

第11章 地下水流入低下工法の検討

11.1 研究の目的及び概要

本研究においては、高レベル放射性廃棄物の地層処分に係る工学技術として、処分場の操業期間中における人工バリアに用いる緩衝材の品質を確証するため、緩衝材の品質評価に影響を与える可能性のある地下水流入量と工学的対策工の効果を評価する技術を確立することを目的とする。

具体的には、高レベル放射性廃棄物地層処分施設において、緩衝材の定置時に処分孔への湧水があると緩衝材定置の妨げになる。また、緩衝材定置後の再冠水期間においては、処分孔への地下水の流入により水みち形成(パイピング)や浸食(エロージョン)が生じる可能性があり、ベントナイトの自己修復作用を妨げ、長期性能に影響を与えることが考えられる。このため処分孔への湧水の流入を低減させる工学的対策としてグラウト等の工法が検討されているが、周辺岩盤の水理特性により効果は影響される。特に割れ目が透水性を支配している岩盤においては、割れ目をモデル化した水理地質構造モデルにより効果を評価する必要がある。

本研究では、割れ目ネットワークモデルによる解析的検討により工学的対策が処分坑道周辺の水理場に与える影響を評価する技術を確立することを目的としている。

本年度は、上記の最終目標を踏まえ、以下の項目を実施する。

- ①平成 26 年度～平成 29 年度の実施計画の作成
- ②割れ目ネットワークモデルの構築
- ③処分孔及び処分坑道への湧水量の算定
- ④止水対策による湧水量低減効果の評価

11.2 平成 26 年度～平成 29 年度の実施計画

平成 26 年度から今後 4 年間の実施計画を策定した。

4 年間の計画としては、大きく分けて埋戻し前と埋戻し後についての検討を行うこととした。埋戻し前においては、坑道や処分孔への湧水が緩衝材定置の妨げになるため、この時の湧水のモデル化と湧水低減対策による湧水量低減効果を解析的に検討する。初年度は割れ目を考慮に入れたモデル化により、上記の検討の有効性を確認する。2 年目においては地質モデルや水理境界条件を現実のものに近づけた解析を行うと共に、感度解析としてのパラメータスタディを行う。3 年目においては処分場レイアウトを想定し、坑道掘削の進展に伴う湧水量変化と止水対策の効果についての解析を行う。各年度の実施項目を以下に示す。

緩衝材設置時の処分孔への地下水流入と工学的対策

平成 26 年度（その 1）

- ①幌延の水理地質データに基づく割れ目ネットワークモデルの構築
- ②処分孔及び処分坑道への湧水量の算定
- ③止水対策による湧水量低減効果の評価

平成 27 年度（その 2）

- ①実測湧水量に合致する水理モデル、境界条件の設定
- ②周辺間隙水圧の違い等による湧水量、止水対策の感度解析

平成 28 年度（その 3）

- ①処分パネルを想定した坑道掘削の進展に伴う湧水量変化の評価
(複数の処分坑道による影響)

4 年目においては埋戻し後の検討を行う。緩衝材定置後の再冠水期間においては、処分坑道内の埋戻し材や処分孔内の緩衝材内へ地下水が流入し、水みち形成(パイピング)や浸食(エロージョン)が生じる可能性がある。この現象はベントナイトの自己修復作用を妨げ、長期性能に影響を与えることが考えられるため、この期間における地下水流入のモデル化と流入量低減対策による流入量低減効果を解析的に検討する。割れ目を介した処分坑道や処分孔への流入量や通過流量を算定することにより、割れ目が支配的な流動場における地下水流入の安全評価へ与える影響や対策の効果についての検討を行う。以下に実施項目を示す。

埋戻し後の処分孔への地下水流入と工学的対策

平成 29 年度（その 4）

- ①埋戻し後の処分坑道、処分孔への通過流量の算定
- ②通過流量低減のための工学的対策の効果の評価

図 11.2-1 イメージ図には各年度の解析イメージを示す。

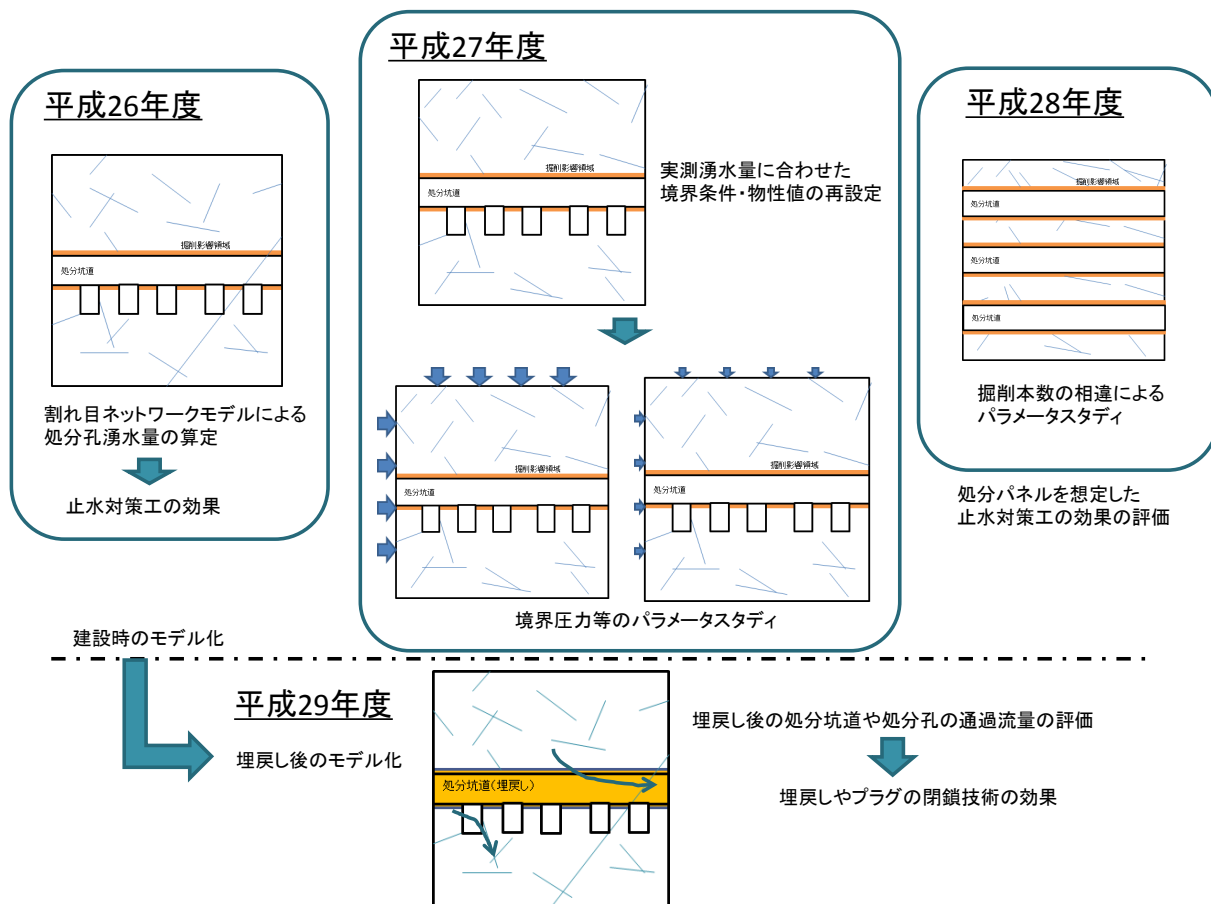


図 11.2-1 イメージ図

本解析の位置付けを図 11.2-2 解析の位置づけに示す。本業務は、100m 四方程度のブロックスケールでの緩衝材定置時、埋戻し後における岩盤内の地下水流動解析である。本解析の境界条件は、より広域の地下水流動解析の結果から求められる圧力分布により決定される。また、岩盤内の解析であるため、埋戻し後に問題となる緩衝材内のパイピングやエロージョンのモデル化までは実施できない。しかし、緩衝材内のパイピングやエロージョン発生境界条件としての流入量や圧力分布が算定できるため、この結果を緩衝材の性能評価へ受け渡すことができる。

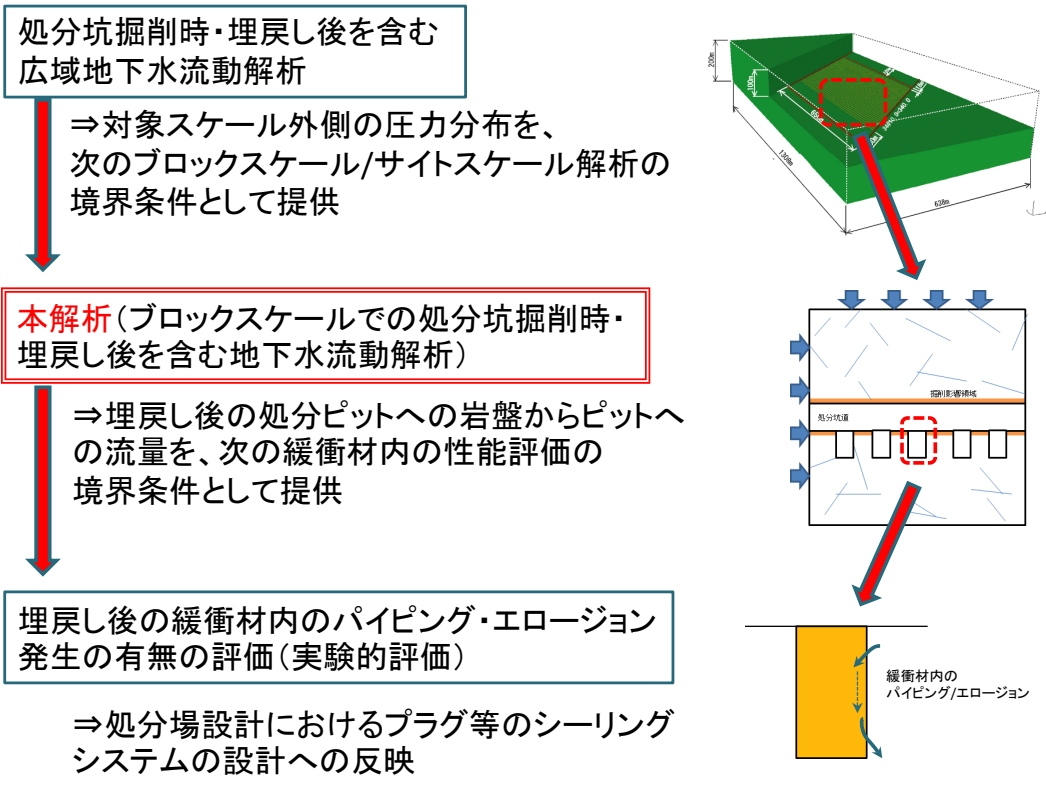


図 11.2-2 解析の位置づけ

11.3 割れ目ネットワークモデルの構築

本節では、独立行政法人日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター（以降、幌延深地層研究センター）に関する公開文献および原環センター殿から貸与される資料を参考とし、割れ目を考慮した水理解析を行うためのチャンネルネットワークモデルによる水理地質構造モデルを作成した。なお、本検討は、既存のデータから割れ目ネットワークを作成及び坑道湧水量を算定する方法論の適用例を示したものあり、そのデータとして幌延超深地層研究センターのデータを活用したものである。実測の湧水量との比較においては、周辺坑道の影響や坑道周辺へのプレグラウト等、より詳細な条件設定を行う必要があり、来年度以降の検討事項としている。

初めに、割れ目の幾何学的パラメータセットを設定した。パラメータセットには、以下を含むものとした。

- ・ 割れ目の方向分布を表現するパラメータ(フィッシャー分布係数など)
- ・ 割れ目の長さ分布を表現するパラメータ(べき乗分布など)
- ・ 割れ目の密度を表現するパラメータ(三次元割れ目密度 $P32(m^2/m^3)$ など)

次に設定した割れ目パラメータセットに基づき、100m 立方のモデル領域に、3次元割れ目ネットワークモデルを10リアライゼーション作成した。この時の割れ目ネットワークモデルの作成方法は、石橋ら（2014）[1]が独立行政法人日本原子力研究開発機構 瑞浪超深地層研究所（以降、瑞浪超深地層研究所）の坑道調査データを元に作成した方法に準じるものとした。

この割れ目ネットワークモデル（10リアライゼーション）の各割れ目に、透水量係数を付与して水理地質構造モデルを構築した。本解析に際しては、割れ目ネットワーク構造を管路網で表現されたパイプネットワークに変換した水理地質構造モデル[2]を用いた。また、本検討においては、割れ目以外の母岩の基質部の透水性を考慮する必要があるため、割れ目だけを考慮したモデル（HL1モデル）に加え、基質部を格子状のパイプネットワークにモデル化し、割れ目によるネットワークと結合させたモデル（HL2モデル）と、より小さな割れ目を発生させ、これを基質部として反映させたモデル（HL12モデル）に関して検討を行った。すなわち計3つのモデルについて検討を行い、最終的に坑道湧水量を算定する水理地質構造モデルを選定した。

割れ目の透水量係数の付与に際しては、各リアライゼーションにおいて水理試験をモデル化し、幌延深地層研究センターの水理試験結果と整合させることで算定した。本手法による水理地質構造のモデル化は、中畠ら（2014）[3]が瑞浪超深地層研究所のデータを元に実施した方法に準じるものとした。

11.4 割れ目の幾何学的パラメータセットの設定

幌延深地層研究所の地質調査結果に基づき、割れ目統計量データの推定を行うために、資料を調べた結果、

- ・幌延深地層研究センターの深度 350m 調査坑道の壁面スケッチで、現在公開されているのは平成 24 年度までで、東立坑と換気立坑の連結構造および周回坑道の一部であること（図 11.4-1 参照）
- ・原環センター殿が原位置試験を実施している深度 350m の試験坑道 5 の地質公開データは無いこと（図 11.4-1 参照）

が判明した。以上のことから、幌延深地層研究所における既存文献に基づき、割れ目統計量データの推定を行うこととした。参考にした文献を以下に示す。

文献 1[4]	Hatanaka,K., Lim, Doo-Hyun and Ishii, E. : Geo-descriptive modeling of water conducting features characterized in sedimentary formations in Horonobe area of Japan, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol.1265, 1265-AA-06-04, 2010.
文献 2[5]	Lim, Doo-Hyun, Hatanaka,K. and Ishii, E. : Site Characterization & Preliminary Performance Assessment Calculation Applied To JAEA-Horonobe URL Site of Japan, Transactions of Korea Nuclear Society Autumn Meeting, 2010.

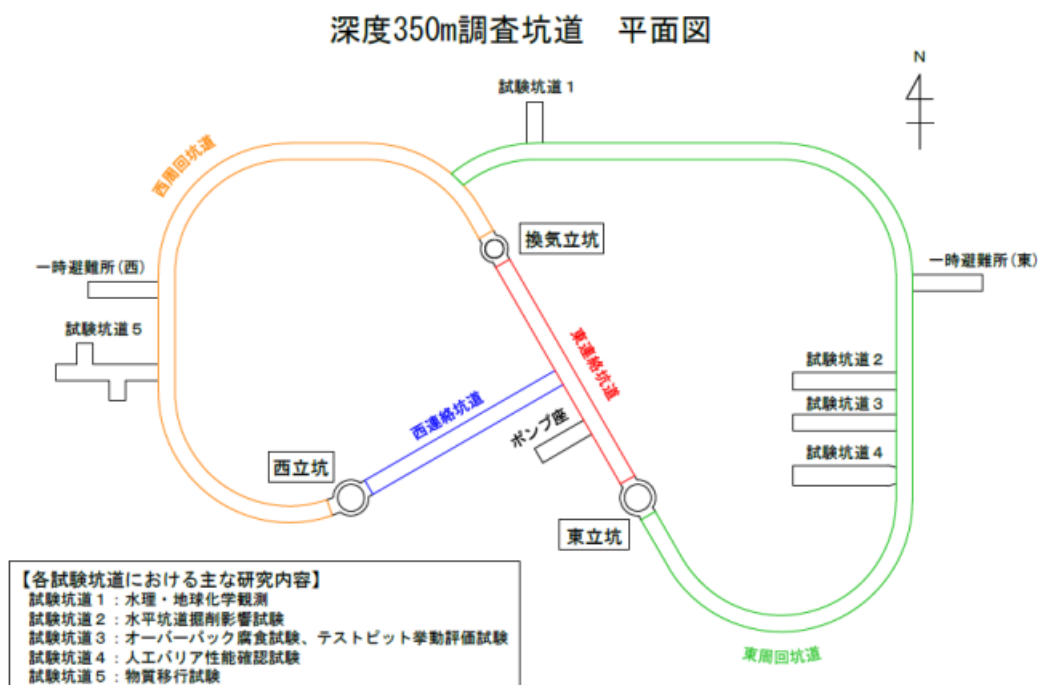


図 11.4-1 深度 350m 調査孔道平面図

割れ目の統計量データとして以下のパラメータの抽出を行った。

- ・割れ目の方向分布を表現するパラメータ(フィッシャー分布係数など)
- ・割れ目の長さ分布を表現するパラメータ(べき乗分布など)
- ・割れ目の密度を表現するパラメータ(三次元割れ目密度 P32(m²/m³)など)

この結果、文献1のボーリング HDB-6、10、11、PB-V01のBHTV観察結果から、方向として2つのパラメータセットを抽出した(図11.4-2)。各Setの割れ目卓越方向及びFisher定数を表11-1に示す。三次元割れ目密度P32は、文献2に示された稚内層のP32「0.25 m²/m³」、および文献1のTable1に示された各々のSetの割合からSet1で「0.16m²/m³」、Set2で「0.09m²/m³」のP32を算出した。長さ分布は、文献1にべき乗数3.5という評価がなされており、これを採用した(図11.4-3)。また、文献1にGL-400m以深の稚内層の最小長さ6m(トレース長)と記載あり、これから最小割れ目半径を半径rの円に対するトレース長Lの期待値から、以下のように算出した(図11.4-4参照)。

$$\pi r^2=2rL$$

ここでL=6とし、r=3.82m

この結果、割れ目の幾何学的パラメータセットは表11-1のようにまとめられる。

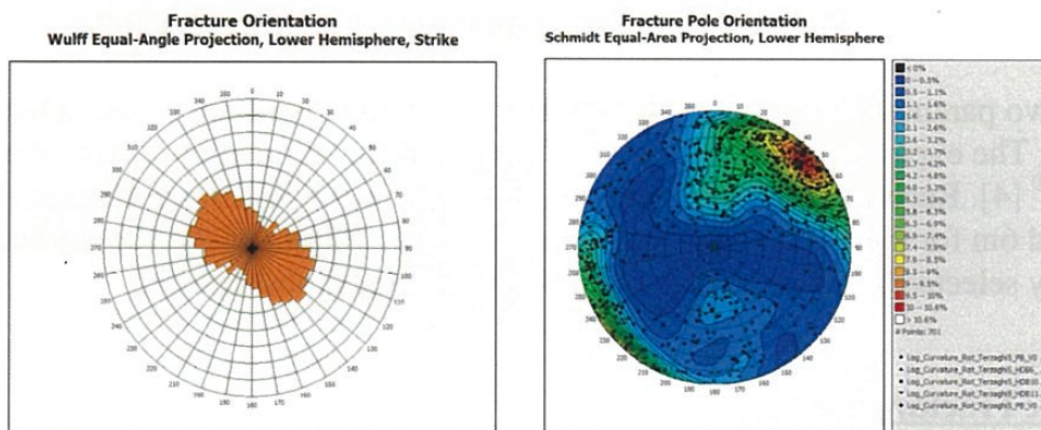


図 11.4-2 幌延深地層研究所のボーリングデータに基づく割れ目卓越方向分布(文献1)

表 11-1 割れ目幾何学的パラメータセット

Set	Fisher 定数	走向	傾斜	P32 (m ² /m ³)	最小割れ目半径 (m)	Power-law distribution
1	3.84	N73.13W	72 SW	0.16	3.82	3.5
2	8.42	N26.43W	83.58 W	0.09		

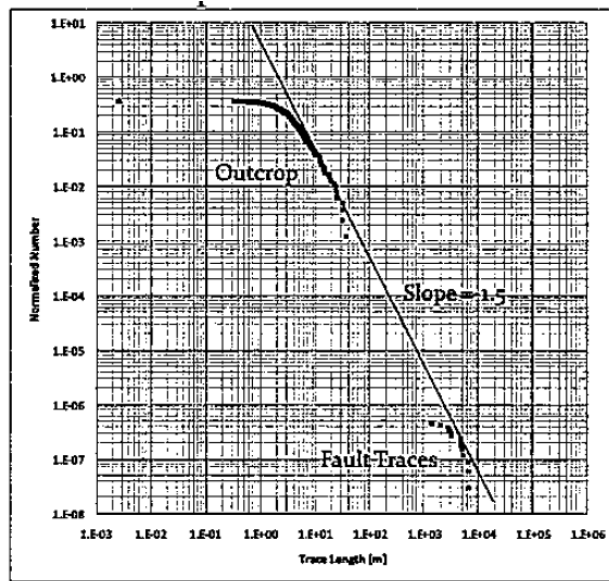
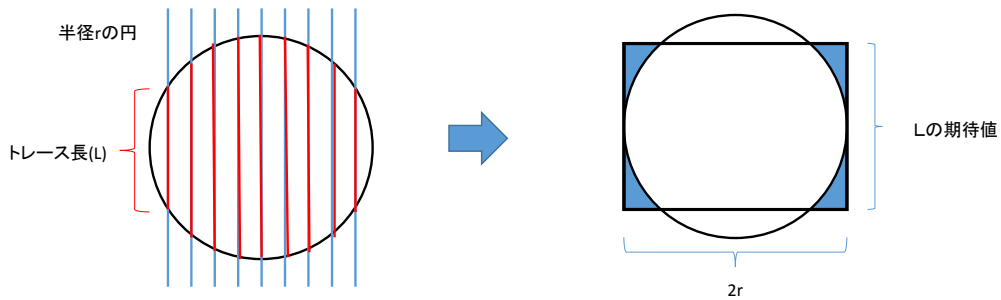


図 11.4-3 幌延深地層研究所の割れ目トレース長の頻度分布（文献1）



半径 r の円(割れ目)に対するトレース長(L)の積分 = 半径 r の円の面積(πr^2)

【 L の期待値】

円を長方形と見立てると長方形の面積は $2rL$ となる。

よって

$$\pi r^2 = 2rL$$

ここで、 L の最小長さは6m(文献値)であるため

$$\pi r^2 = 12r$$

$$r = 12/\pi$$

$$= 3.82 \text{ (最小割れ目半径)}$$

図 11.4-4 円形を仮定した割れ目半径に対するトレース長の期待値の関係

11.5 割れ目ネットワークモデルの作成

11.5.1 割れ目ネットワークモデルの作成方法

100m 立方のモデル領域に 3.1 で設定した幌延深地層研究所の割れ目パラメータセットに基づく割れ目を発生させ、10 リアライゼーションの割れ目ネットワークモデルを作成した。

割れ目ネットワークモデルの作成は、割れ目発生プログラムを使用して実施した。本プログラムは、図 11.5-1 に示す処理フローで、地質調査結果を整理して得られた割れ目統計量に基づき、確率論的手法で割れ目リストを生成することができる。ここでは、割れ目の密度分布、方向分布、半径分布及び空間分布を代表する特性値の独立性を仮定しており、特性値ごとに乱数を発生させてそれぞれの統計分布に見合う割れ目特性パラメータ（中心座標、方位ベクトル、半径）を算定し、それらを組み合わせて単一の割れ目を生成している。所定の三次元割れ目密度（P32）に達するまでこの操作を繰り返し行うことで、すべての統計量に合致する割れ目ネットワークモデルを作成した。

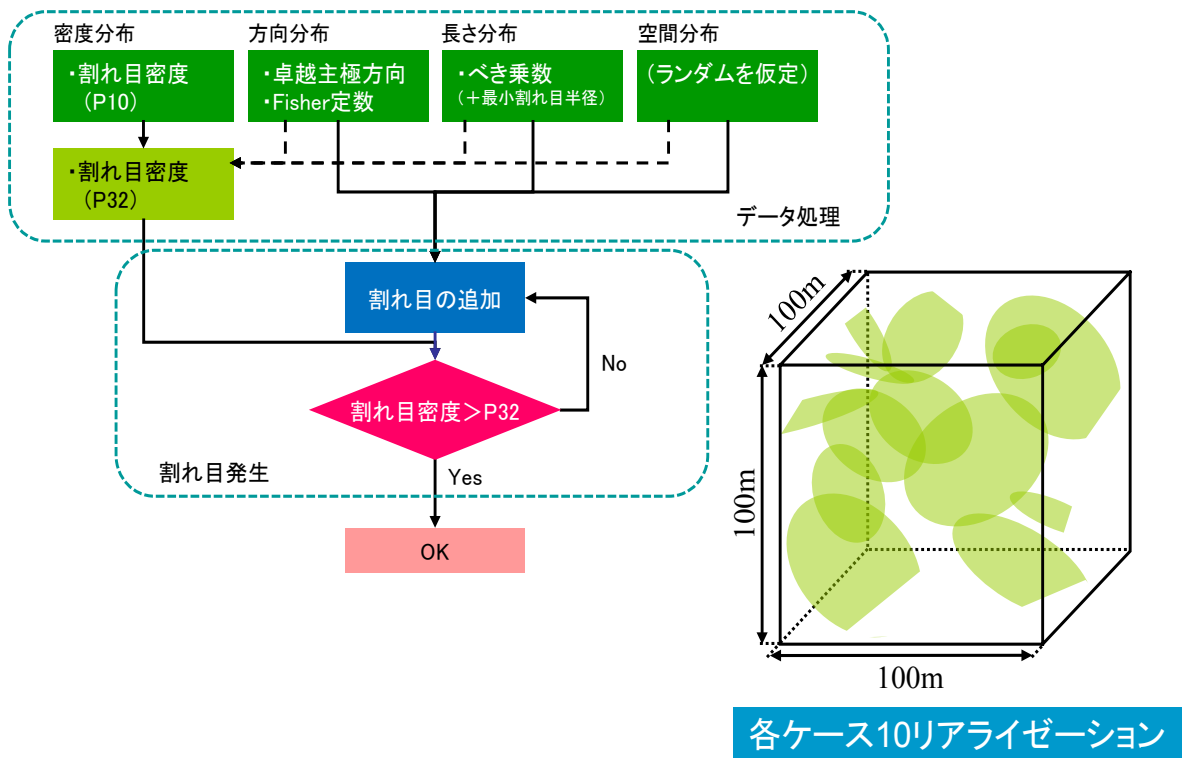


図 11.5-1 割れ目発生プログラム処理フロー

この後で、割れ目ネットワークモデルからチャンネルネットワークモデルを作成し、解析コード LT-Flow による水理解析を行うが、割れ目以外の母岩部を考慮する必要があるため、基質部のモデル化を行っておく必要がある。

本検討では、透水割れ目のみをモデル化したケースと基質部を考慮に入れたケースに関して検

討を行った。透水割れ目のみを考慮したものを HL1 モデルとし、基質部を立体格子でモデル化し、HL1 の割れ目モデルと結合させたものを HL2 モデルとした。一方で、基質部考慮した HL2 モデルでは、坑道を設定した際にチャンネル数が多量になり水理解析において湧水量の計算ができなくなる可能性があった。そのため割れ目の最小半径を、HL1 の 3.82m より小さい 1.25m とし、小さい割れ目を発生させ、これを基質相当として反映させたモデル (HL12) を設定することとした。図 11.5-2 に各モデルのモデル化の概念図を示す。

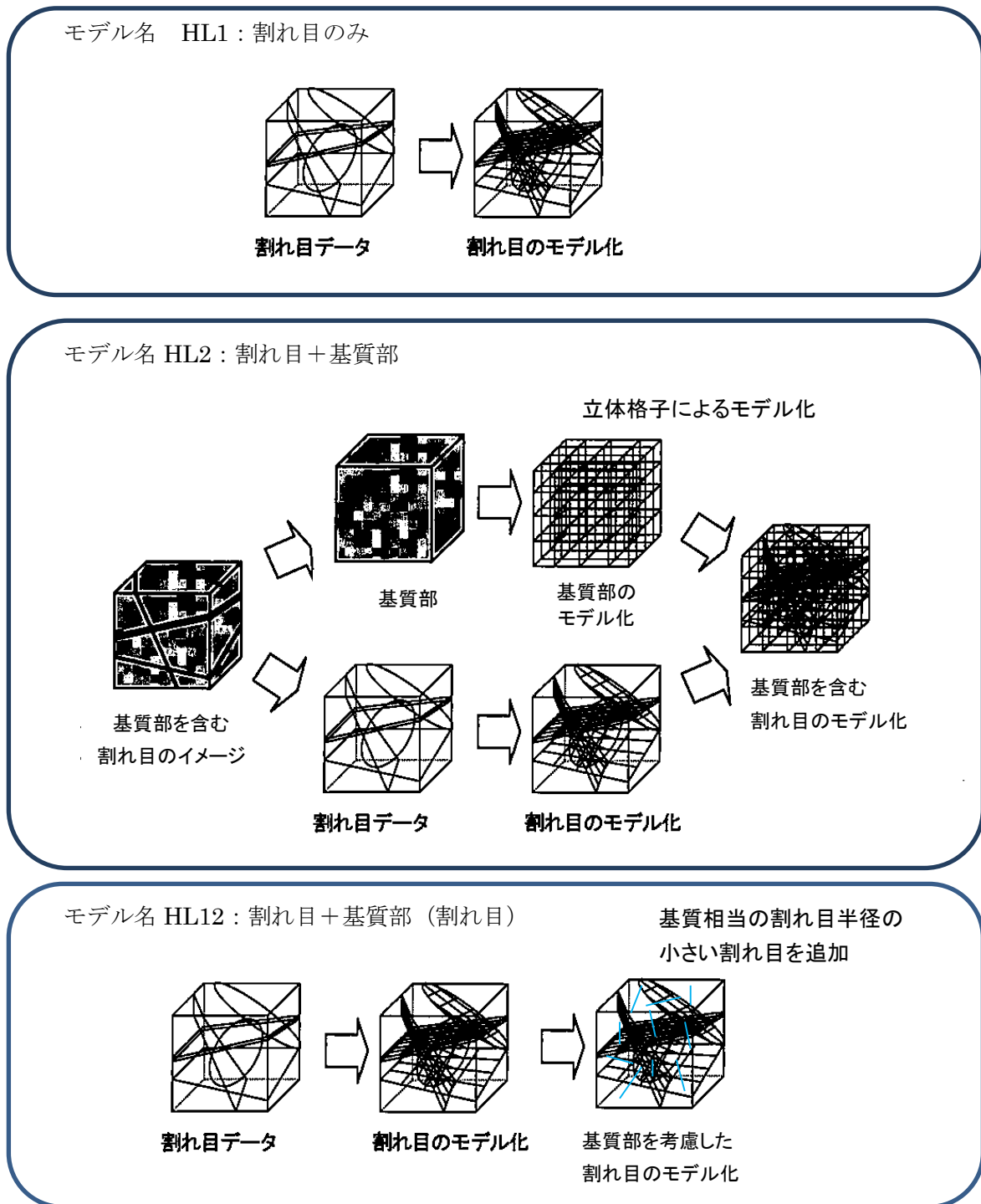


図 11.5-2 チャンネルネットワークによるモデル化概念図

このため、各モデルの割れ目データセットは以下のようになる。

HL1

割れ目データセット

Set	Fisher 定数	走向	傾斜	P32 (m^3/m^2)	割れ目半径 (m)	Power-low distribution
1	3.84	N73.13W	72 SW	0.16	3.82	3.5
2	8.42	N26.43W	83.58 W	0.09		

HL2

HL1 の割れ目データセット + 立体格子モデル (格子間隔は 3m)

HL12

割れ目データセット

Set	Fisher 定数	走向	傾斜	P32 (m^3/m^2)	割れ目半径 (m)	Power-low distribution
1	3.84	N73.13W	72 SW	0.282	1.25	3.5
2	8.42	N26.43W	83.58 W	0.158		

HL2 は HL1 の割れ目分布に、格子間隔 3m の立体格子を追加したモデルとした。

また、HL12 は割れ目半径 3.82m 以上の割れ目分布は HL1 と同じであるが、1.25m から 3.82m の半径を持つ割れ目を、同じべき乗数で追加したモデルとした。そのため各 set の卓越方向分布やべき乗数は同じであるが、最小割れ目半径や割れ目密度 (P32) が異なってくる。すなわち HL1 では P32 の合計値が 0.25 なのに対し、HL12 では 0.44 と追加した割れ目の分を考慮した値とした (この算定方法については参考資料 1 を参照のこと)。

11.5.2 割れ目ネットワークモデルの作成結果

HL1 と HL12 に関して、100m 立方のモデル領域に割れ目のネットワークモデルを作成した結果を示す。HL2 は HL1 に格子上のパイプを追加するため、割れ目モデルとしては HL1 と同じになる。

HL1 と HL12 に関し、割れ目ネットワークモデルを 10 リアライゼーションずつ作成した。図 11.5-3 には、各モデルの割れ目を三次元表示した一例を示す（リアライゼーション 1（RZ1））。各モデルの 10 リアライゼーションの全ての結果は図 11.5-4、図 11.5-5 に示す。割れ目の数が HL1 に比べ HL12 で多く、小さい割れ目が多いことが分かる。

各モデルの比較を次に行う。

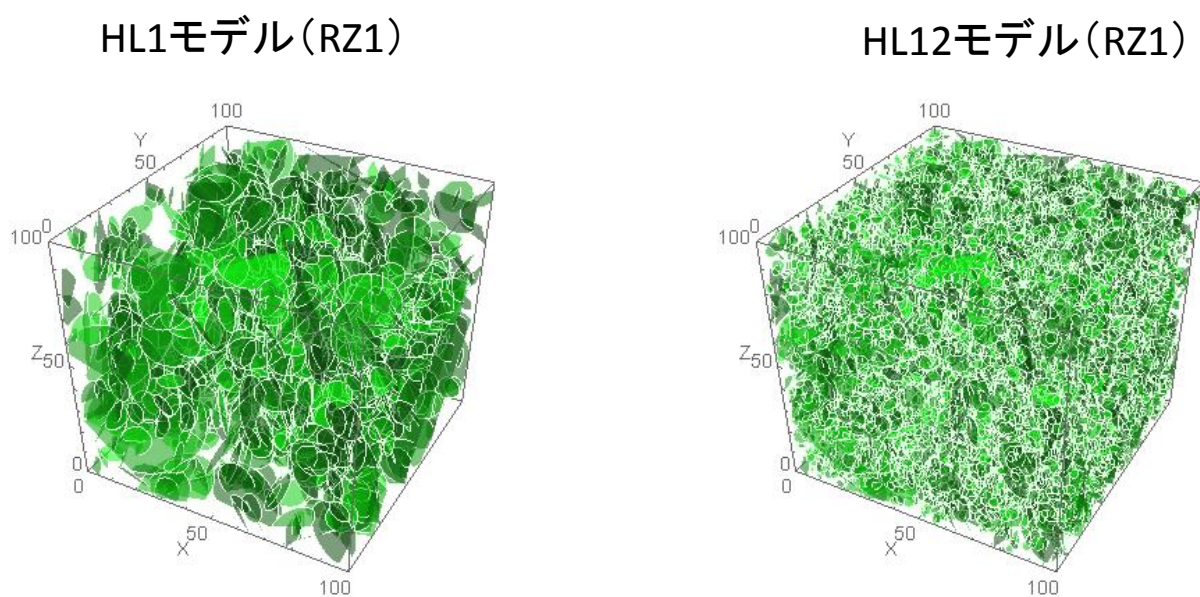


図 11.5-3 割れ目モデルの三次元表示

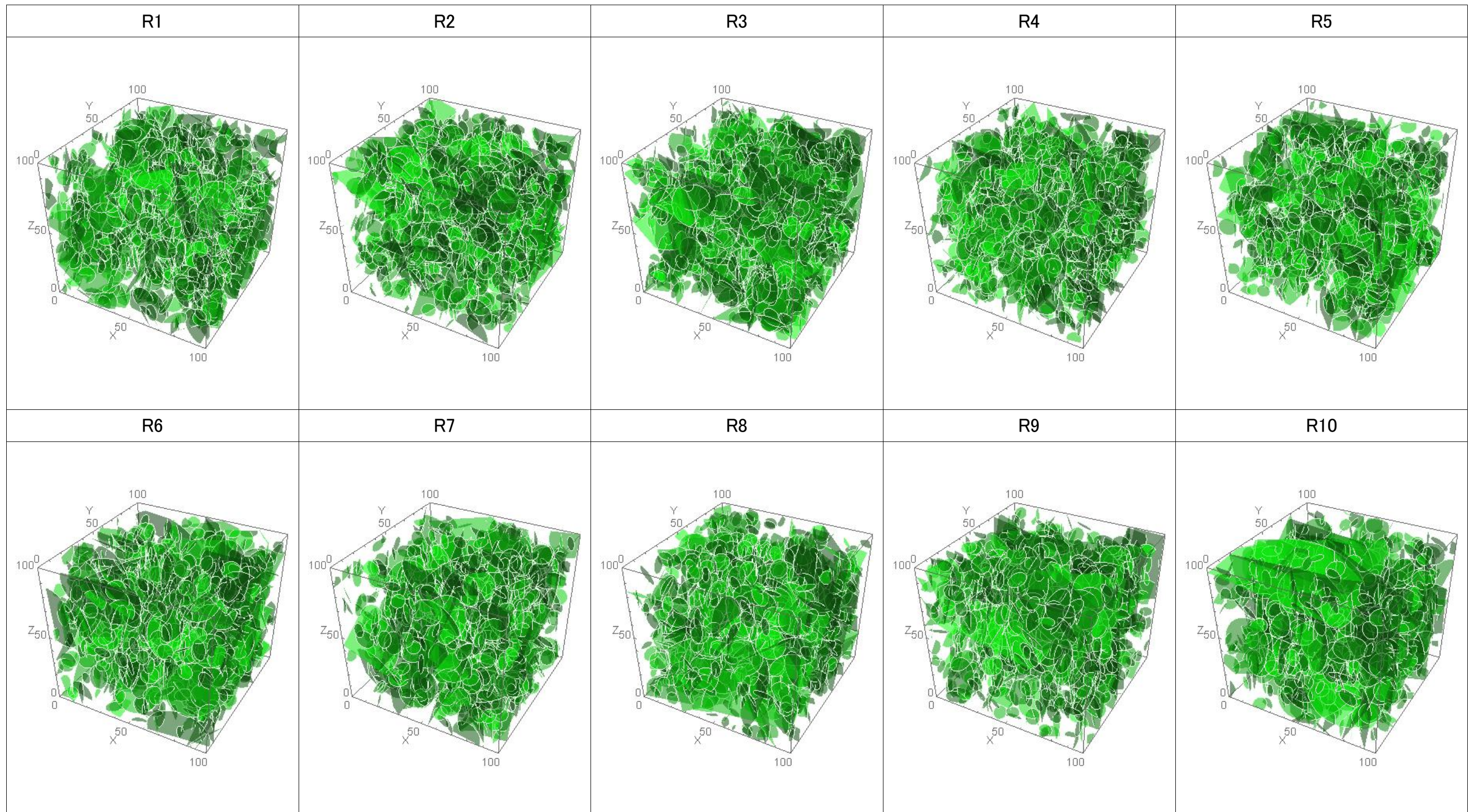


図 11.5-4 HL1 割れ目ネットワークモデル

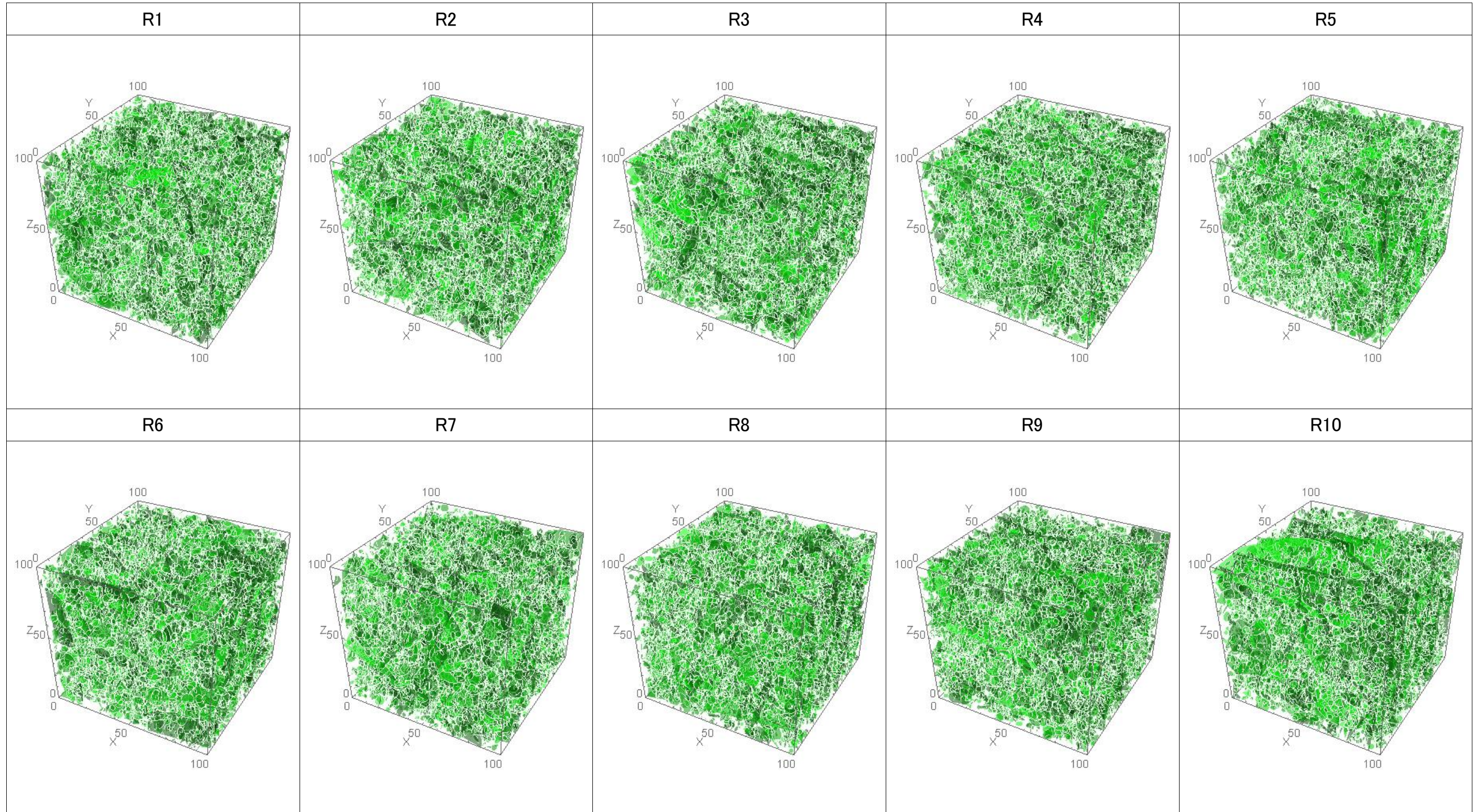


図 11.5-5 HL12 割れ目ネットワークモデル

(1) 割れ目枚数

各モデルの割れ目枚数について整理した比較した結果を図 11.5-6 に示す。HL1 が 10 リアライゼーションの平均で 1,258 枚の割れ目数なのに対し、HL12 では 20,521 枚と 10 倍以上であることが分かる。Set 別では Set 1 が Set 2 より 1.7 倍程度、枚数が多いことが分かる。

三次元割れ目密度 (P32) を計算した結果を表 11-2 に示す。HL1 で 0.224m²/m³、HL12 で 0.440m²/m³ を示す。パラメータセットの設定値は各々 0.25、0.44 であり、HL12 ではほぼ設定通りであったが HL1 ではやや小さくなった。

各モデルの割れ目枚数と三次元割れ目密度 P32 の比較を行った結果を図 11.5-7、図 11.5-8 に示す。

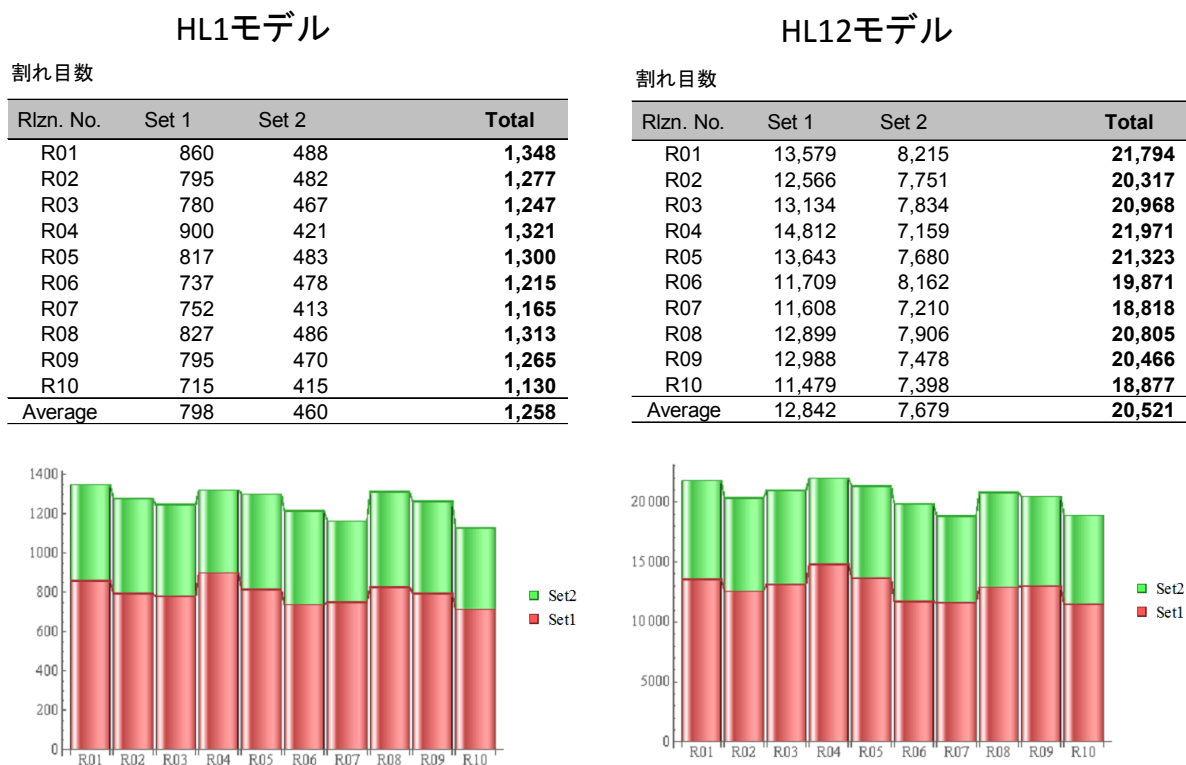


図 11.5-6 各モデルの割れ目枚数

表 11-2 各モデルの三次元割れ目密度

HL1モデル				HL12モデル			
P32				P32			
Rlzn. No. (設定値)	Set 1 (0.16)	Set 2 (0.09)	Total (0.25)	Rlzn. No. (設定値)	Set 1 (0.28)	Set 2 (0.16)	Total (0.44)
R01	0.140	0.072	0.213	R01	0.282	0.158	0.440
R02	0.149	0.077	0.226	R02	0.282	0.158	0.440
R03	0.143	0.077	0.219	R03	0.282	0.158	0.440
R04	0.125	0.081	0.206	R04	0.282	0.158	0.440
R05	0.137	0.078	0.215	R05	0.282	0.158	0.440
R06	0.160	0.071	0.232	R06	0.282	0.158	0.440
R07	0.161	0.081	0.242	R07	0.282	0.158	0.440
R08	0.147	0.074	0.221	R08	0.282	0.158	0.440
R09	0.145	0.079	0.224	R09	0.282	0.158	0.440
R10	0.161	0.080	0.241	R10	0.282	0.158	0.440
10R平均	0.147	0.077	0.224	10R平均	0.282	0.158	0.440

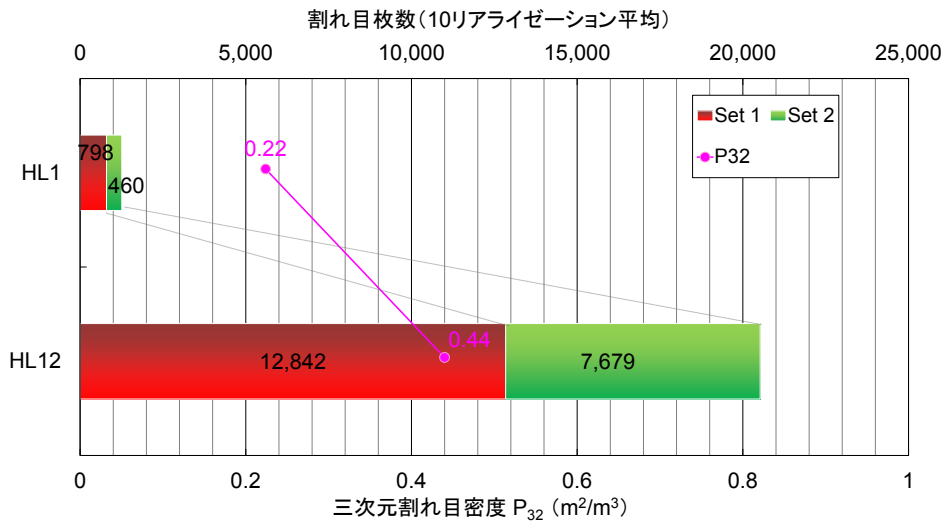


図 11.5-7 割れ目枚数のモデル間の比較

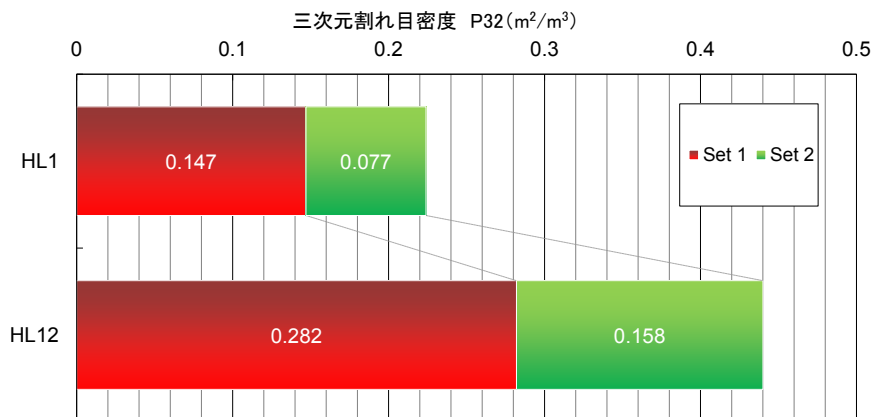
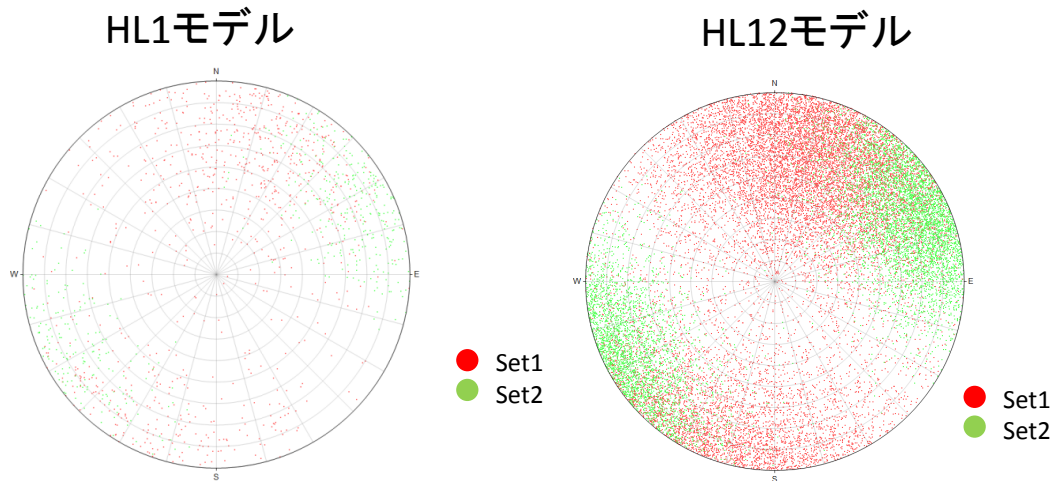


図 11.5-8 三次元割れ目密度のモデル間の比較

(2) 割れ目卓越方向

各モデルの割れ目卓越方向のシュミットネットプロットを図 11.5-9 に示す。表 11-3 には、割れ目方位、割れ目傾斜、フィッシャ定数の結果を示す。各パラメータセットの設定値と 10 リアライゼーションの平均値を比較すると、ほぼ設定値と同じ値であることが分かる。



割れ目法線分布(下半球投影)

図 11.5-9 各モデルの割れ目のシュミットネットプロット

表 11-3 各モデルの卓越方向及びフィッシャ定数

HL1モデル

割れ目方位 θ

Rlzn. No. (設定値)	Set 1 (106.9)	Set 2 (153.6)
R01	108.99	152.52
R02	105.79	153.44
R03	106.84	154.52
R04	108.36	153.93
R05	106.73	153.38
R06	105.80	153.01
R07	105.26	152.58
R08	107.55	155.51
R09	107.97	154.68
R10	105.71	152.88
10R平均	106.90	153.64

割れ目傾斜 ϕ

Rlzn. No. (設定値)	Set 1 (72.0)	Set 2 (83.6)
R01	73.06	85.04
R02	73.94	84.82
R03	71.43	84.45
R04	71.95	84.97
R05	71.98	83.71
R06	72.56	83.19
R07	73.29	83.85
R08	72.82	82.37
R09	71.99	84.26
R10	70.01	82.17
10R平均	72.30	83.88

フィッシャ定数 κ

Rlzn. No. (設定値)	Set 1 (3.84)	Set 2 (8.42)
R01	3.88	8.71
R02	3.84	8.15
R03	3.91	8.22
R04	3.97	8.10
R05	4.07	8.21
R06	4.14	9.23
R07	4.00	8.40
R08	4.21	7.44
R09	4.07	8.29
R10	4.10	8.18
10R平均	4.02	8.29

HL12モデル

割れ目方位 θ

Rlzn. No. (設定値)	Set 1 (106.9)	Set 2 (153.6)
R01	107.26	153.47
R02	106.72	153.82
R03	106.86	153.78
R04	106.95	153.59
R05	107.24	153.82
R06	106.73	153.67
R07	106.77	153.66
R08	107.17	153.59
R09	106.83	153.51
R10	106.90	153.40
10R平均	106.94	153.63

割れ目傾斜 ϕ

Rlzn. No. (設定値)	Set 1 (72.0)	Set 2 (83.6)
R01	72.42	83.53
R02	71.61	83.86
R03	72.26	83.61
R04	71.90	83.55
R05	72.05	83.49
R06	71.49	83.74
R07	72.33	83.36
R08	71.98	83.46
R09	72.05	83.76
R10	71.91	83.60
10R平均	72.00	83.60

フィッシャ定数 κ

Rlzn. No. (設定値)	Set 1 (3.84)	Set 2 (8.42)
R01	4.00	8.48
R02	4.01	8.37
R03	3.98	8.37
R04	3.95	8.38
R05	4.02	8.26
R06	4.03	8.56
R07	3.96	8.40
R08	4.09	8.31
R09	4.06	8.30
R10	3.94	8.37
10R平均	4.00	8.38

(3) 割れ目半径分布

各モデルの割れ目半径に対する超過割れ目枚数を整理した結果を表 11-4 に示す。図 11.5-10 には割れ目半径を横軸にとり、縦軸に超過密度をとった両対数グラフを示す。割れ目半径分布としてべき分布を仮定した場合、両対数グラフ上でのプロットは直線を成し、その傾きは「1-べき乗数」で表される。本検討でのべき乗数の設定値は 3.5 であったため、グラフにおける傾きは-2.5 となるはずである。図 11.5-10 から傾きは-2.5 を示し、モデルは設定値を再現できているといえる。

表 11-4 各モデルの割れ目半径に対する超過割れ目枚数

HL1モデル

割れ目半径超過割れ目枚数

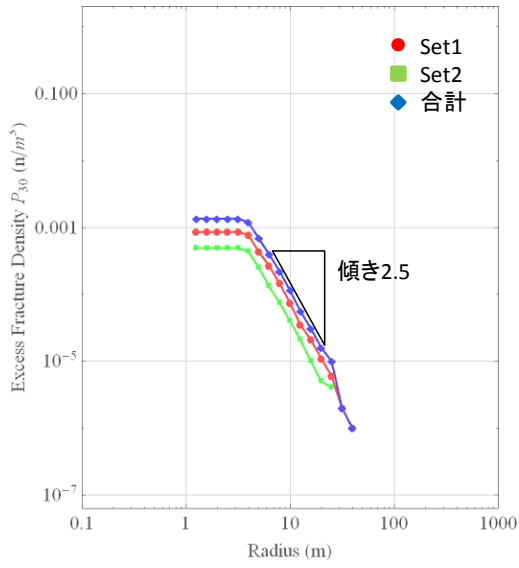
	$r \geq 2$	$r \geq 5$	$r \geq 10$	$r \geq 20$	$r \geq 50$	$r \geq 100$
R01	1348	688	115	16	0	0
R02	1277	649	110	21	1	0
R03	1247	670	119	18	0	0
R04	1321	676	108	13	1	0
R05	1300	663	130	20	0	0
R06	1215	598	129	19	1	0
R07	1165	594	116	29	1	0
R08	1313	693	111	16	1	0
R09	1265	623	100	20	1	0
R10	1130	613	103	29	2	0
AVERAGE	1258.1	646.7	114.1	20.1	0.8	0

HL12モデル

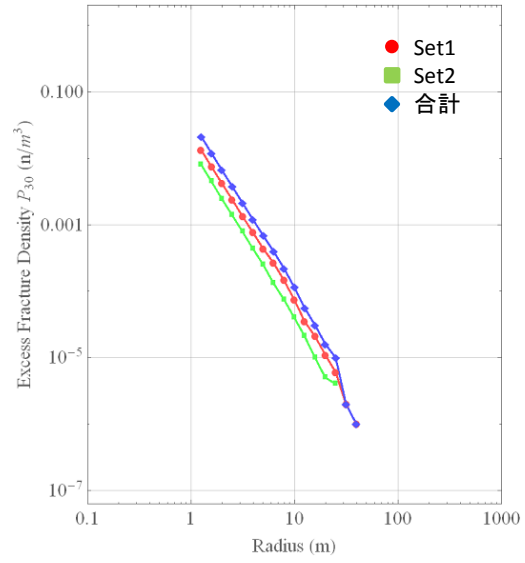
割れ目半径超過割れ目枚数

	$r \geq 1.25$	$r \geq 2$	$r \geq 5$	$r \geq 10$	$r \geq 20$	$r \geq 50$	$r \geq 100$
R01	21794	6623	688	115	16	0	0
R02	20317	6351	649	110	21	1	0
R03	20968	6440	670	119	18	0	0
R04	21971	6926	676	108	13	1	0
R05	21323	6612	663	130	20	0	0
R06	19871	6104	598	129	19	1	0
R07	18818	5912	594	116	29	1	0
R08	20805	6540	693	111	16	1	0
R09	20466	6370	623	100	20	1	0
R10	18877	5826	613	103	29	2	0
AVERAGE	20521	6370.4	646.7	114.1	20.1	0.8	0

HL1モデル



HL12モデル



	$r \geq 1.25\text{m}$	$r \geq 2\text{m}$	$r \geq 5\text{m}$	$r \geq 10\text{m}$	$r \geq 20\text{m}$	$r \geq 50\text{m}$	$r \geq 100\text{m}$
HL1	1,258.1 (100.0%)	1,258.1 (100.0%)	646.7 (51.40%)	114.1 (9.069%)	20.1 (1.5976%)	0.8 (0.0636%)	0.0 (0.0000%)
HL12	20,521.0 (100.0%)	6,370.4 (31.0%)	646.7 (3.15%)	114.1 (0.556%)	20.1 (0.0979%)	0.8 (0.0039%)	0.0 (0.0000%)

図 11.5-10 各モデルの割れ目の半径分布

11.6 水理モデル構築に必要な水理データの設定

水理モデル構築のために必要な水理データを、幌延深地層研究所の既存文献から設定した。深度 350m 調査坑道には稚内層が分布しているため、本検討に必要な水理情報は稚内層に関する水理データである。稚内層に関する、透水性割れ目の割合、水理試験再現解析の透水係数目標値、基質部の透水係数を既存文献に基づき設定した。参考にした文献を以下に示す

文献 1[6]	Ota, K., Abe, H. and Kunimaru, T. : Horonobe Underground Research Laboratory Project Synthesis of phase 1 Investigations 2001-2005, JAEA Research 2010-068, 2010.
文献 2[7]	Aoyagi, K., Tsusaka, K., Nohara, S., Kubota, K., Tokiwa, T., Kondo, K. and Inagaki, D. : Hydrogeomechanical Investigation of an Excavation Damaged Zone in the Horonobe Underground Research Laboratory, 8th Asian Rock Mechanics Symposium, 2014.
文献 3[8]	藪内、國丸、石井他：幌延超深地層研究計画 換気立坑先行ボーリング (PB-V01 孔) 調査報告書-岩盤の水理特性調査-, JAEA-Data/Code 2008-026, 2009.

・透水性割れ目の割合の設定

割れ目ネットワークモデル構築時に最小トレース長 6m と長く連続性のよい割れ目を選択しているため、全ての割れ目を透水性割れ目と設定した。

・水理試験再現解析の透水係数目標値の設定

文献 3 には PB-V01 孔の水理試験データが示されている (表 11-5)。この内、稚内層で割れ目を含む透水試験区間は、流体電気伝導度検層の変化点を含む区間を対象とした No.3,4,8,10,11,14 の 6 区間である。この 6 区間の透水係数の対数平均から目標透水係数を **7.62×10⁻⁷m/sec** とした。1 区間で 2 種類の試験方法が用いられている場合は、より遠方を範囲とした試験結果を採用することとした。水理試験再現解析の試験区間長は、実際の水理試験の平均値 **15m** とした。

・基質部の透水係数の設定

文献 1、2 から深度 250m の声問層の非擾乱部の透水係数 $k=10^{-9} \sim 10^{-10} \text{m/sec}$ であった。一方、文献 3 から稚内層の割れ目のほとんどない箇所での透水試験実施区間は No.12,13 の 2 区間である (表 11-5、区間長 15.05m)。稚内層の基質部の透水係数として、この 2 箇所の透水係数の対数平均 **1.82×10⁻¹¹m/sec** を設定した。

表 11-5 PB-V01 孔 水理試験データ (文献 3)

区間番号	区間上端	区間下端	区間長	地層	区間設定条件	間隙水圧	透水量係数	透水係数	貯留係数	比貯留係数	試験方法	解析方法	範囲
	GL.m	GL.m				MPa	m ² /s	m/s		1/m			
No.1	-249.38	-313.93	64.55	稚内層	全体網羅を目的とする区間	2.843	9.30E-06	1.44E-07			SW2	Hvorslev	試験孔の近傍
No.2	-167.78	-232.33	64.55	声間層	全体網羅を目的とする区間	2.038	4.22E-07	6.54E-09	4.71E-06	7.29E-08	SW	Copper	試験孔の近傍
No.3	-263.36	-277.41	14.05	稚内層	流体電気伝導度検層の変化点を含む区間	2.720	2.32E-06	1.65E-07			SW	Hvorslev	試験孔の近傍
							9.47E-05	6.74E-06			RWS	Agarwal	より遠方
No.4	-233.86	-247.91	14.05	稚内層	流体電気伝導度検層の変化点を含む区間	2.428	1.12E-06	8.00E-08			SW	Hvorslev	試験孔の近傍
							9.28E-06	6.60E-07			RWS	Agarwal	より遠方
No.5	-444.00	-508.55	64.55	稚内層	全体網羅を目的とする区間	4.769	4.90E-07	7.59E-09			SW	Hvorslev	試験孔の近傍
							1.11E-06	1.71E-08			SWS	Agarwal	より遠方
No.6	-379.45	-444.00	64.55	稚内層	全体網羅を目的とする区間	1.194	6.91E-10	1.07E-11	1.43E-03	2.22E-05	PI	Copper	試験孔の近傍
No.7	-314.90	-379.45	64.55	稚内層	全体網羅を目的とする区間	3.489	3.10E-06	4.80E-08			SW	Hvorslev	試験孔の近傍
No.8	-461.00	-476.05	15.05	稚内層	流体電気伝導度検層の変化点を含む区間	4.688	5.52E-07	3.67E-08			SW	Hvorslev	試験孔の近傍
							2.77E-06	1.84E-07			SWS	Agarwal	より遠方
No.9	-394.00	-409.05	15.05	稚内層	流体電気伝導度検層の変化点を含む区間	4.099	6.03E-11	4.01E-12	3.77E-04	2.50E-05	PI	Copper	試験孔の近傍
No.10	-355.80	-370.85	15.05	稚内層	流体電気伝導度検層の変化点を含む区間	3.643	1.29E-06	8.57E-08			SW	Hvorslev	試験孔の近傍
							5.51E-05	3.66E-06			RWS	Agarwal	より遠方
No.11	-318.00	-333.05	15.05	稚内層	流体電気伝導度検層の変化点を含む区間	3.270	4.18E-07	2.78E-08	9.05E-07	6.01E-08	SWS	Agarwal	より遠方
No.12	-486.00	-501.05	15.05	稚内層	割れ目がほとんどない区間	5.002	4.57E-10	1.09E-11			PI	Hvorslev	試験孔の近傍
No.13	-338.00	-353.05	15.05	稚内層	割れ目がほとんどない区間	3.486	4.57E-10	3.04E-11	1.51E-05	1.00E-06	PW2	Copper	試験孔の近傍
No.14	-275.00	-290.05	15.05	稚内層	流体電気伝導度検層の変化点を含む区間	2.848	4.59E-06	3.05E-07			SW	Hvorslev	試験孔の近傍
							3.53E-05	2.35E-06			SWS	Agarwal	より遠方

■: 検討外の区間 (No.2は声間層を対象としており、No11,12は割れ目のない区間を対象としているため)

■: 今回、目標値として採用した区間
 複数の試験方法により実施されている場合は、より遠方を評価している試験方法による結果を採用した

11.7 水理試験再現解析による透水係数量分布の算定

11.7.1 水理試験再現解析による透水係数量分布の算定方法

本検討では、割れ目をパイプでモデル化したチャンネルネットワークによる解析コード **LT-Flow** を用いた水理解析を実施した。本解析手法は、埼玉大学と旧動力炉・核燃料開発事業団が共同で開発した **Don-Chan** モデル（埼玉大学地圏科学研究センター,2002） [2]をベースに改良を加えたものである。本解析では単一の割れ目を格子状に組み込まれたパイプで置き換え、割れ目の特性値（割れ目透水量係数、割れ目幅）から、割れ目を介した地下水の透水量および流速が保存されるようにパイプの透水係数および断面積を決定する。さらに、割れ目間の交線部に新たなパイプを配置してパイプ同士の交差部を節点でつなぐことで割れ目と割れ目の連結をモデル化している（図 11.7-1）。この格子状パイプで構築される解析モデルに所定の境界条件を設定すれば、水理地質構造モデルの特性に準拠した地下水流動解析や物質移動解析を実行できる。

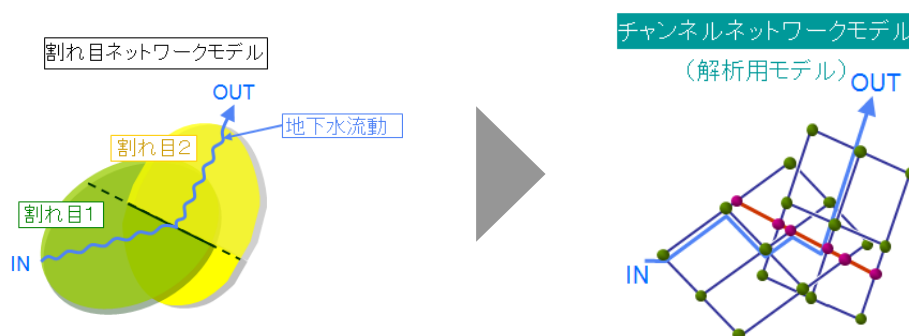


図 11.7-1 格子状パイプによる水理地質構造のモデル化

このモデル化には、割れ目ネットワーク内の各割れ目に透水量係数を設定する必要がある（図 11.7-2）。ここでは同じ水理場の中で実施された水理試験結果を再現できるような透水量係数の統計量を各割れ目に振り分けることで、チャンネルネットワークによる水理地質構造モデルを構築することを行った。このため、水理試験再現解析という手法により割れ目の透水量係数分布を求めることとした。LT-Flow を用いるこの手法は、中嶌ら（2014） [3]が瑞浪超深地層研究所のデータを元に実施した手法に準じたものである。

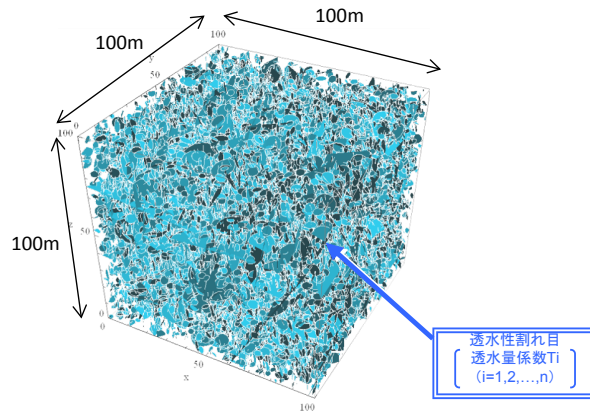


図 11.7-2 水理地質構造モデルの概念図

各モデルにおいて、チャンネルネットワークを以下のように設定した。

HL1 モデル

作成した割れ目（半径 3.81m 以上）を全て透水割れ目として、チャンネルネットワークを作成する。

HL2 モデル

HL1 のチャンネルネットワークに、基質相当の立体格子のチャンネルネットワークを追加する。格子ピッチは 3.0m とする。

HL12 モデル

作成した割れ目（半径 1.25m 以上）を全て透水割れ目として、チャンネルネットワークを作成する。ただし、チャンネルに水理特性を設定する際に、半径 3.81m 以下の割れ目を基質と評価して基質相当の透水性を付与する。

各モデルのチャンネルネットワークの一例を図 11.7-3～図 11.7-5 に示す。

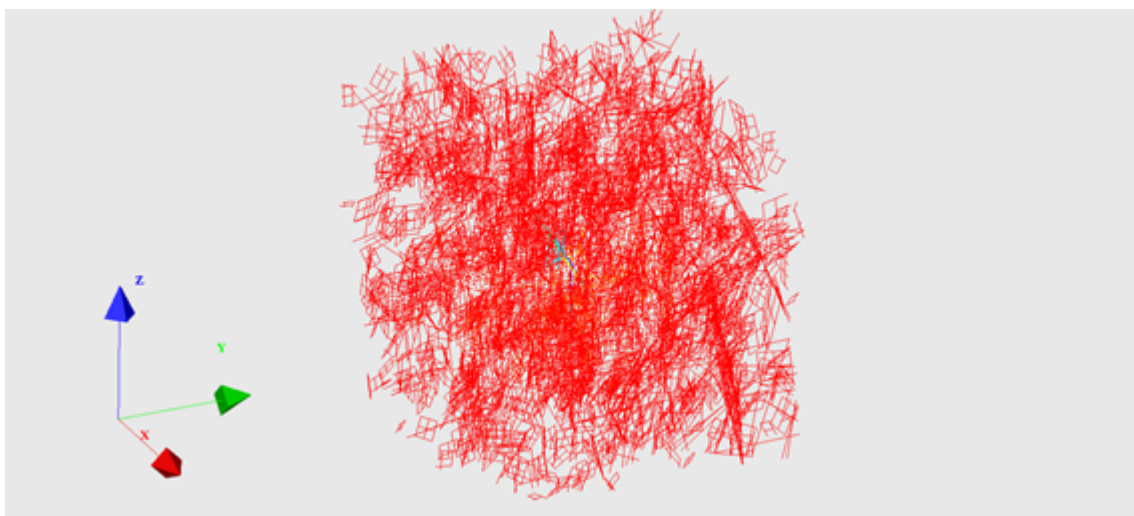


図 11.7-3 HL1 モデルのチャンネルネットワーク (RZ2)

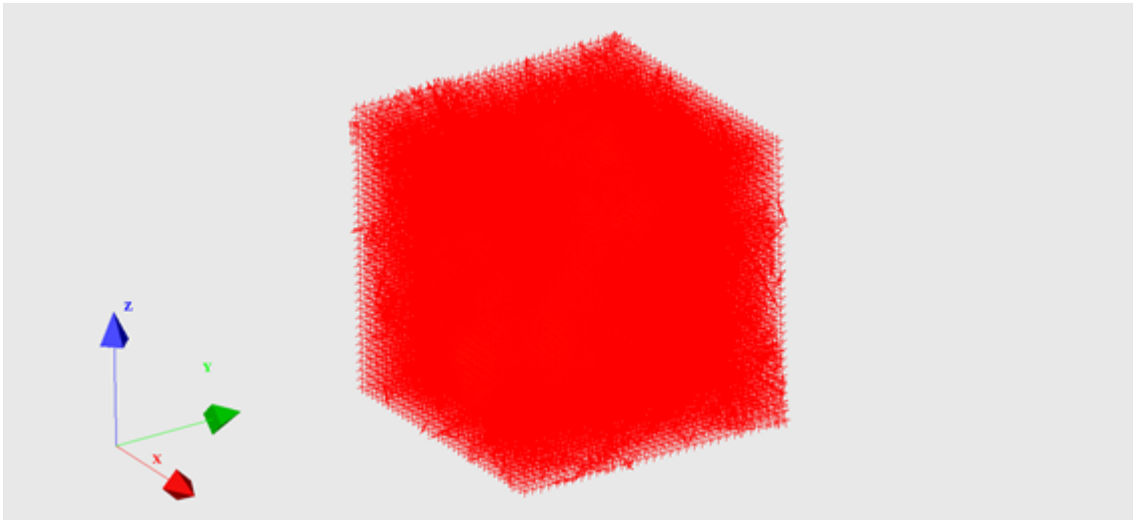


図 11.7-4 HL2 モデルのチャネルネットワーク (RZ2)

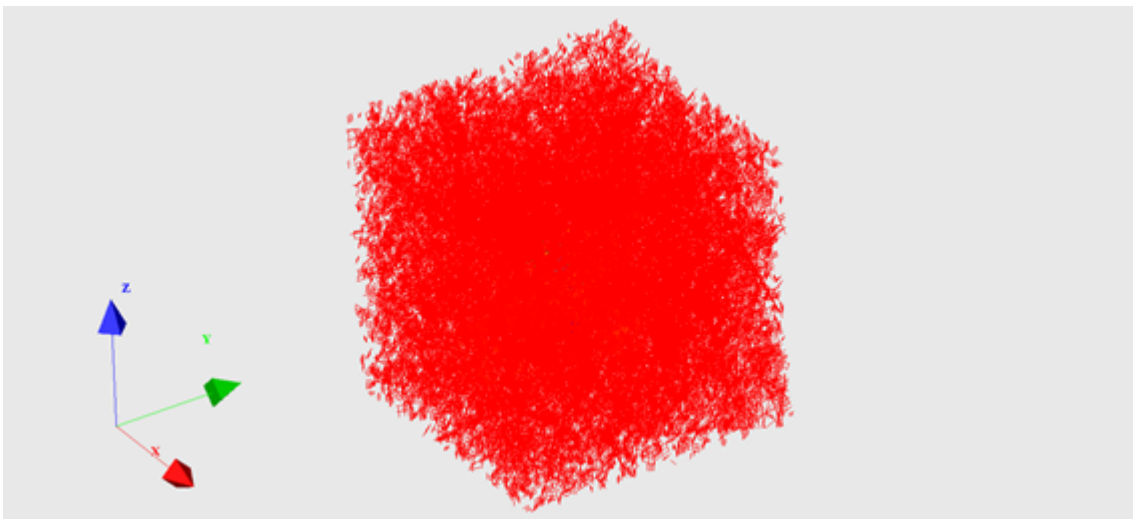


図 11.7-5 HL12 モデルのチャネルネットワーク (RZ2)

次に、水理試験再現解析により、割れ目の透水量係数を求める。図 11.7-6 に水理試験再現解析による割れ目透水量係数の算定フローを示す。全体の流れとしては、モデルごとに、リアライゼーションで得られた 10 個のモデル R_i ($i=1, 2, \dots, 10$) を順番に使用して水理試験再現解析を行い、区間透水係数の実測値を再現する割れ目透水量係数を逆解析で求める。この結果、各モデルで 1 つの割れ目透水量係数が得られ、10 モデル分で同じ操作を繰り返すことによって 10 個の透水量係数 T_i ($i=1, 2, \dots, 10$) が導出される。本検討では、モデル内の割れ目透水量係数は一律に設定する。収束流となる水理試験では、試験区間周辺の動水勾配が大きく個々に分布する割れ目の影響を受けやすい。したがって、リアライゼーションごとの割れ目分布に応じた水理試験区間周辺部の平均的な割れ目透水量係数を求めることになる。

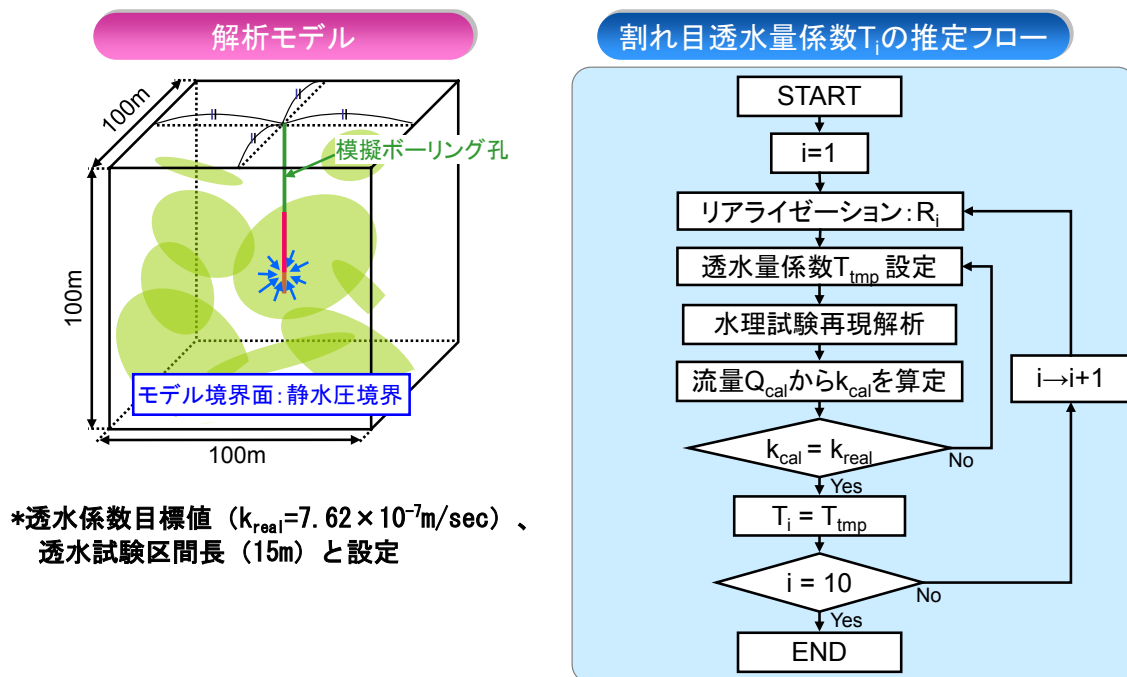


図 11.7-6 水理試験再現解析による割れ目量透水係数の算定フロー

上記の算定フローに基づいて各ケースで割れ目透水量係数を推定するための具体的な手順を、以下の①～⑩に示す。

- ① リアライゼーションで得た解析用モデル ($R_i : i=1,2,\dots,10$) を順に選定する。
- ② ①で選定した解析用モデルに含まれる透水性割れ目のすべてに、適当な割れ目透水量係数 T_{tmp} を仮値として一律に割り当てる。
- ③ ②の解析用モデル中央部に設定された模擬試験区間 (鉛直方向、区間長 $L=15m$) に水理試験の境界条件 ($\Delta s=100m$) を設定する。
- ④ ③の解析用モデルの境界面を静水圧境界 (全水頭 $H=0m$) として設定する。
- ⑤ ④の解析用モデルで定常流解析を行い、模擬試験区間からの揚水量 Q_{cal} を取得する。
- ⑥ ⑤で導出した揚水量 Q_{cal} から、模擬試験区間の区間透水係数 k_{cal} を下式で算出する。

$$k_{cal} = \frac{Q_{cal} \cdot \ln(2L/D)}{2\pi \cdot L \cdot \Delta s} \quad (3-1)$$

ここで、
 L : 試験区間長 (15m)
 D : 試験区間孔径 (125mm)
 Δs : 試験区間の水頭差 (100m)

- ⑦ ⑥で得られる区間透水係数の解析値 k_{cal} が、原位置水理試験で得られた実測値 k_{real} と一致しているかどうかをチェックする。実測値 k_{real} として、3.3 で設定した原位置水理試験の

対数平均値を使用した。

$$k_{real} = 7.62E-7 \text{ (m/s)} \quad (3-2)$$

- ⑧ 区間透水係数の解析値 k_{cal} と実測値 k_{real} が一致するまで、①～⑦の操作を繰り返す。すなわち、 $k_{cal} < k_{real}$ のときは解析用モデルの割れ目透水量係数の仮値 T_{tmp} を大きな値に、 $k_{cal} > k_{real}$ のときは解析用モデルの割れ目透水量係数の仮値 T_{tmp} を小さな値に再設定して水理試験再現解析を繰り返し行い、最終的に区間透水係数の実測値が再現された ($k_{cal} = k_{real}$ となった) ときの割れ目透水量係数を、その解析用モデルにおける割れ目透水量係数 T_i とする。
- ⑨ ①～⑧の操作を 10 個のリアライゼーションで得た全解析モデルについて繰り返し、割れ目透水量係数 T の分布 (T_1, T_2, \dots, T_{10}) を取得する。
- ⑩ ①～⑨の操作を各モデルで実施して、それぞれの割れ目透水量係数分布を取得する。

HL1 においては、割れ目のみを設定しているため、上記の手順で割れ目透水量係数分布を算出した。HL2 においては、基質部の格子部に、実測値に基づく $1.82 \times 10^{-11} \text{ m/sec}$ 相当の透水量係数を与えて、これを固定値として割れ目の透水量係数分布を算出した。HL12 においては、半径 3.82m 以下の割れ目に、実測値に基づく $1.82 \times 10^{-11} \text{ m/sec}$ 相当の透水量係数を与えて、これを固定値として割れ目の透水量係数を算出した。

11.7.2 水理試験再現解析による透水係数量分布の算定結果

各モデルの水理試験再現解析結果を表 11-6～表 11-8 に示す。各モデルで試験が成立した数は 10 リアライゼーションの内、4 リアライゼーションで、この 4 リアライゼーションが試験区間を通過する透水割れ目が存在し、かつモデル内で割れ目が孤立せず境界まで連続していたことになる。

表 11-6 水理試験再現解析結果 (HL1 モデル)

HL1	割れ目透水量係数 (m3/sec)	試験区間流量(m3/sec)		モデル境界面流量(m3/sec)							
		割れ目流量	基質部流量	西面	東面	南面	北面	下面	上面	合計	
R1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R2	9.26E-06	1.31E-03	-	2.26E-04	1.05E-05	2.77E-05	3.16E-05	1.01E-03	8.07E-06	1.31E-03	
R3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
R4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
R5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
R6	3.05E-06	1.32E-03	-	7.51E-05	7.28E-04	1.54E-05	1.45E-04	2.75E-04	7.30E-05	1.31E-03	
R7	2.64E-06	1.31E-03	-	2.09E-04	2.00E-04	1.29E-04	8.04E-05	3.67E-04	3.25E-04	1.31E-03	
R8	3.39E-06	1.32E-03	-	1.89E-04	9.72E-06	5.43E-04	1.02E-04	2.17E-04	2.52E-04	1.31E-03	
R9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
R10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

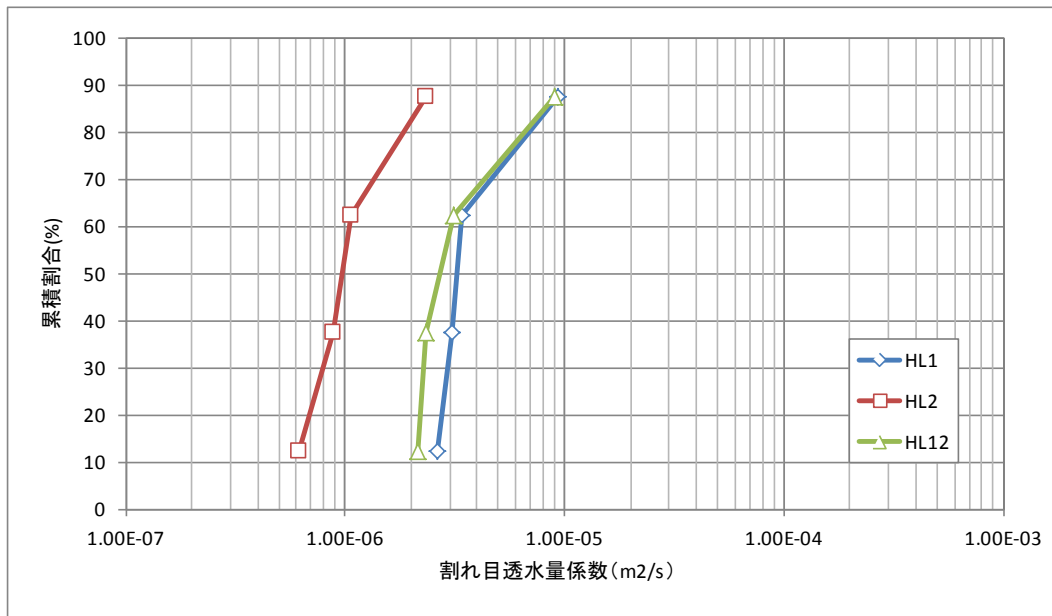
表 11-7 水理試験再現解析結果 (HL2 モデル)

HL2	割れ目透水量係数 (m3/sec)	試験区間流量(m3/sec)		モデル境界面流量(m3/sec)						
		割れ目流量	基質部流量	西面	東面	南面	北面	下面	上面	合計
R1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R2	2.35E-06	1.31E-03	6.94E-08	1.76E-04	5.40E-05	5.80E-05	8.48E-05	7.85E-04	1.54E-04	1.31E-03
R3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R6	6.20E-07	1.31E-03	4.91E-08	1.17E-04	5.92E-04	1.84E-05	1.53E-04	3.21E-04	1.07E-04	1.31E-03
R7	8.77E-07	1.32E-03	8.86E-08	2.50E-04	1.87E-04	2.09E-04	9.24E-05	3.06E-04	2.72E-04	1.32E-03
R8	1.06E-06	1.31E-03	7.85E-08	2.85E-04	4.17E-05	4.72E-04	1.08E-04	2.55E-04	1.48E-04	1.31E-03
R9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

表 11-8 水理試験再現解析結果 (HL12 モデル)

HL12	割れ目透水量係数 (m3/sec)	試験区間流量(m3/sec)		モデル境界面流量(m3/sec)						
		割れ目流量	基質部流量	西面	東面	南面	北面	下面	上面	合計
R1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R2	9.06E-06	1.31E-03	0.00E+00	1.90E-04	8.42E-06	2.77E-05	3.03E-05	1.05E-03	7.12E-06	1.31E-03
R3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R6	2.15E-06	1.31E-03	0.00E+00	5.27E-05	9.47E-04	8.09E-06	6.29E-05	1.62E-04	7.57E-05	1.31E-03
R7	2.34E-06	1.31E-03	0.00E+00	2.34E-04	1.96E-04	1.38E-04	5.34E-05	3.46E-04	3.44E-04	1.31E-03
R8	3.11E-06	1.31E-03	2.81E-09	1.97E-04	2.66E-06	5.38E-04	1.05E-04	2.20E-04	2.46E-04	1.31E-03
R9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

図 11.7-7 に水理試験再現解析により求められた透水量係数分布を示す。割れ目のみの HL1 に比べ、基質部をモデル化している HL2 や HL12 において平均的な透水量係数はやや小さいことが分かる。



モデル名	対数平均	対数標準偏差
HL1	3.99E-06	0.25
HL2	1.08E-06	0.25
HL12	3.45E-06	0.29

図 11.7-7 水理試験再現解析による透水量係数分布

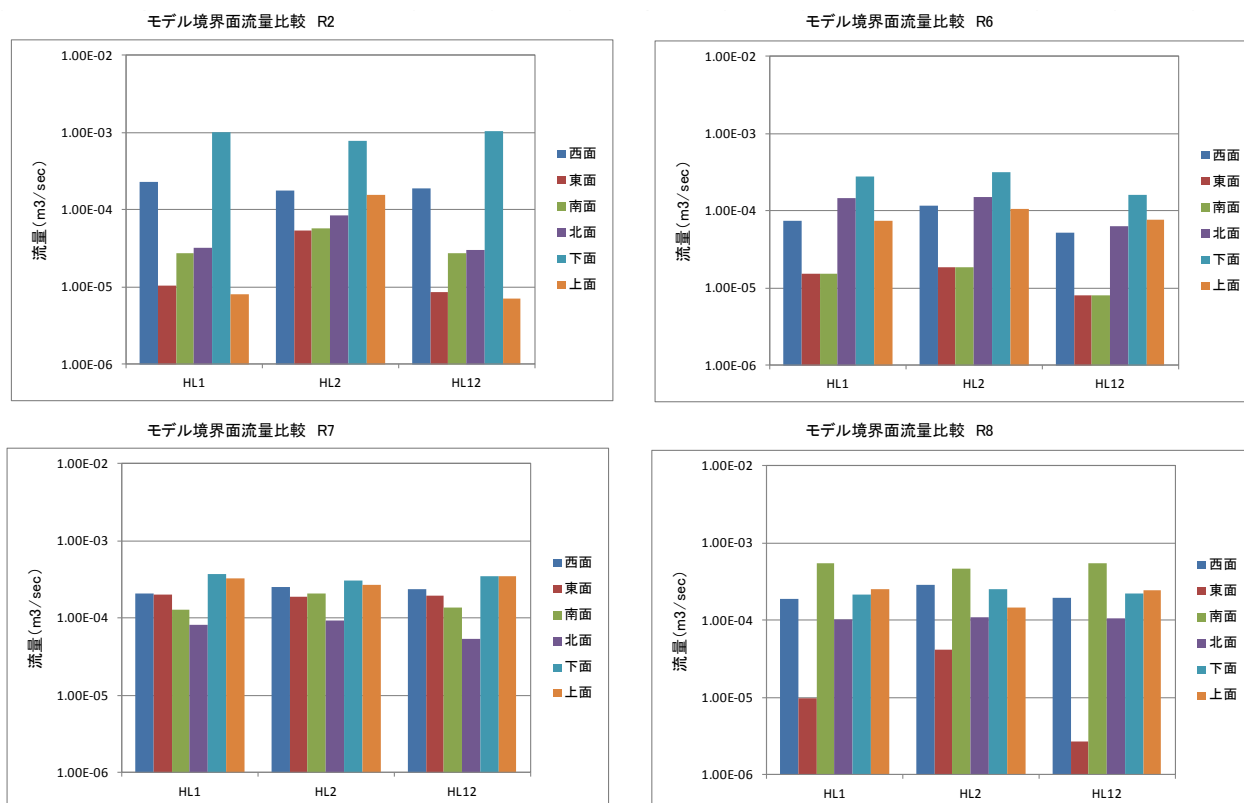


図 11.7-8 各モデルの境界面からの流量

図 11.7-8 には透過したリアライゼーションにおけるモデル境界面からの流量をモデルごとに比較した図を示す。同じリアライゼーションにおいても、モデルにより各境界面への流出量が異なることが分かる。これは基質の有る無しでモデルのネットワークの連続性の違が生じていることを表していると考えられる。方向別の流出量では、HL2 モデルは他のモデルに比べに方向による差が少ない。これは基質の格子状のパイプによりネットワークが均質化していることを反映していると考えられる。

試験区間内の流動状況を詳細に確認するために、試験区間内を割れ目が交差した本数、及び透水割れ目を流れた流量と基質部を流れた流量の割合を計算した。結果を表 11-9 に示す。また、試験区間周辺の割れ目分布の拡大図を図 11.7-9、図 11.7-10 に示す。表 11-9 から、基質を考慮したモデル (HL2、HL12) において、試験区間流量に対する基質部を流れる流量の割合は 0.01%以下となり、割合は非常に小さいことが分かる。このことは、ほとんど基質部を流れず、透水割れ目を流れていることを示している。

本解析の結果から地下水は割れ目をほとんどが流れることが分かった。また、小さな割れ目を基質部と評価した HL12 モデルにおいても基質部の効果を反映した評価が可能であることが示された。このことから、坑道湧水量の算定には HL12 モデルを用いることとした。

表 11-9 各モデルにおける基質部を透過した流量の割合

	HL1				HL2				HL12			
	割れ目流量 (m3/sec)	交差割れ目 本数	基質部流量 (m3/sec)	割合	割れ目流量 (m3/sec)	交差割れ目 本数	基質部流量 (m3/sec)	割合	割れ目流量 (m3/sec)	交差割れ目 本数	基質部流量 (m3/sec)	割合
R1	-	0		-	-	0	-	-	-	1	-	-
R2	1.31E-03	1		0.00%	1.31E-03	1	6.94E-08	0.01%	1.31E-03	1	0.00E+00	0.00%
R3	-	0		-	-	0	-	-	-	1	-	-
R4	-	0		-	-	0	-	-	-	3	-	-
R5	-	0		-	-	0	-	-	-	4	-	-
R6	1.32E-03	3		0.00%	1.31E-03	3	4.91E-08	0.00%	1.31E-03	3	0.00E+00	0.00%
R7	1.31E-03	2		0.00%	1.32E-03	2	8.86E-08	0.01%	1.31E-03	2	0.00E+00	0.00%
R8	1.32E-03	2		0.00%	1.31E-03	2	7.85E-08	0.01%	1.31E-03	3	2.81E-09	0.00%
R9	-	0		-	-	0	-	-	-	1	-	-
R10	-	0		-	-	0	-	-	-	0	-	-

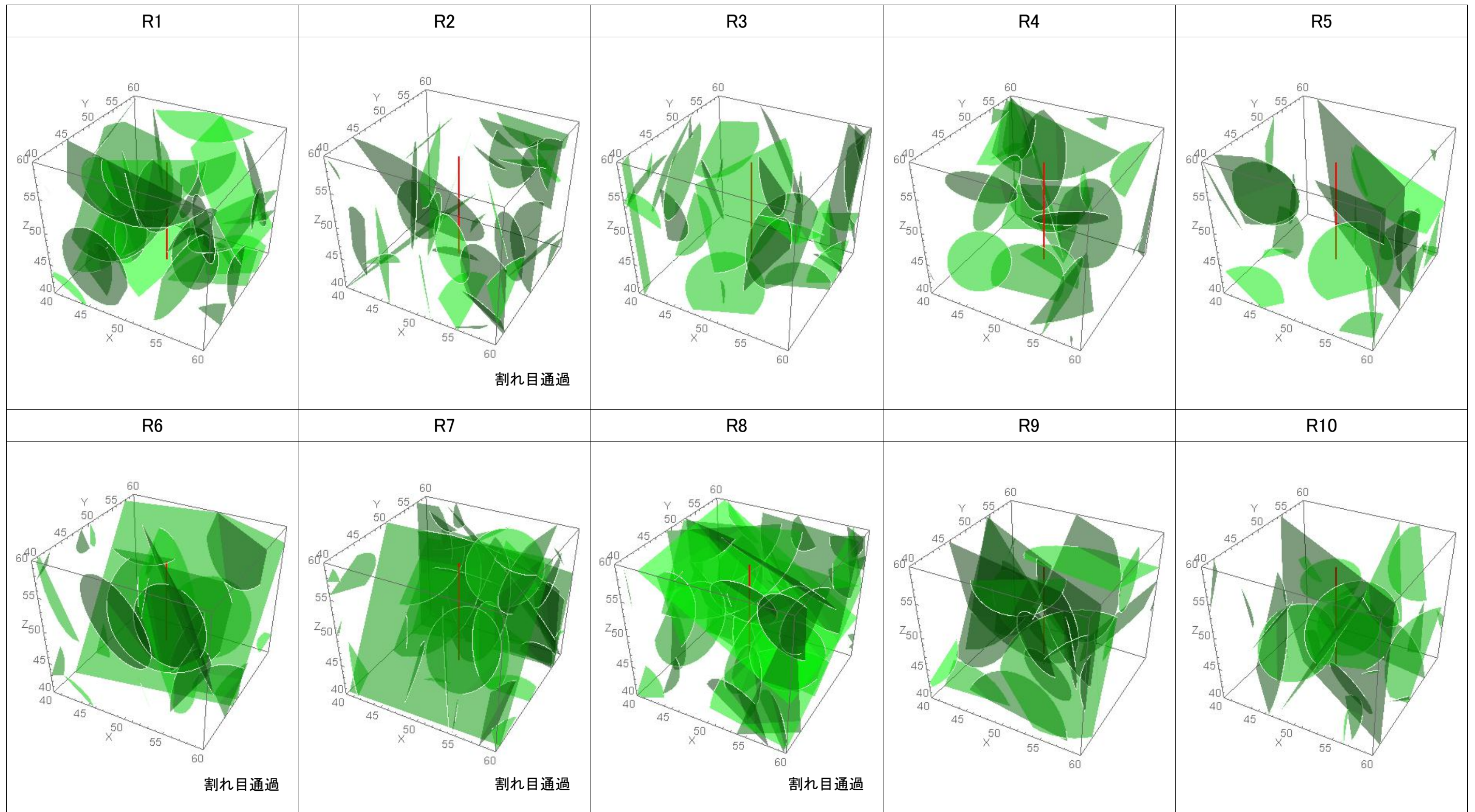


図 11.7-9 HL1 割れ目ネットワークモデル透水試験区間拡大 (20m 四方)

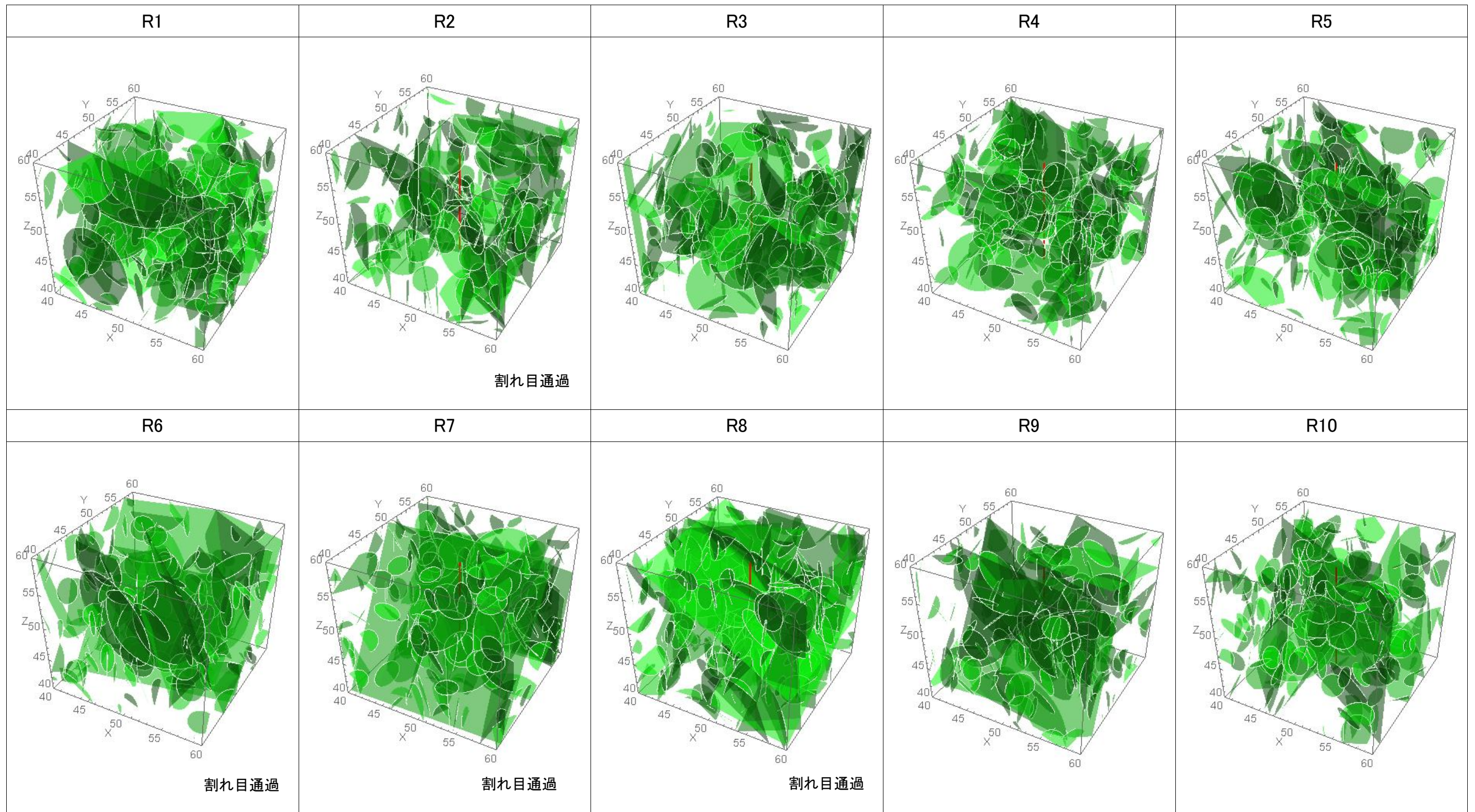


図 11.7-10 HL12 割れ目ネットワークモデル透水試験区間拡大 (20m 四方)

11.8 処分孔及び処分坑道への湧水量の算定

本節では 3 節で構築した水理地質構造モデル（10 リアライゼーション）領域内に、図 11.8-1 に示す掘削影響領域を伴う処分坑道及び処分孔を設定するモデル化を行った。このモデルに対して、境界条件として、(a)処分坑道掘削時、(b)処分孔掘削時（対策前）の 2 段階を設定し、各リアライゼーションで処分坑道への湧水量、10 箇所の処分孔への湧水量を算定した。地下水流動解析には、瑞浪超深地層研究所の研究で実績のあるパイプネットワークを用いた水理解析コード LT-Flow[9]を用いた。

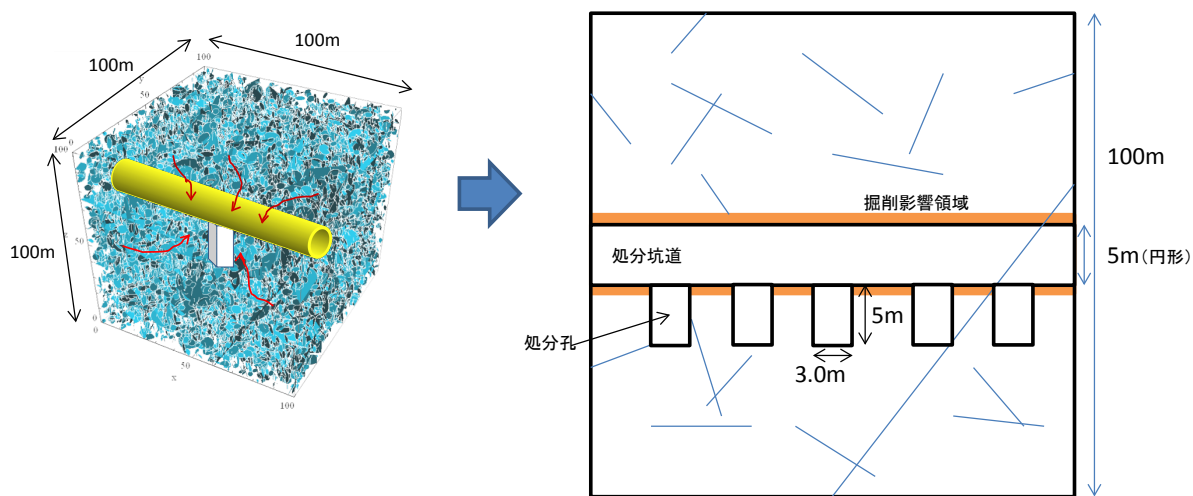


図 11.8-1 割れ目ネットワークモデル内の処分坑道及び処分孔のモデル化

11.8.1 水理試験再現解析による透水係数量分布の算定方法

3節で構築した水理地質構造モデル領域内に処分坑道1本、掘削影響領域及び処分孔10箇所を設定した。処分坑道や処分孔の寸法やレイアウトは、「核燃料サイクル開発機構(1999):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ」[11]におけるIV-209、図4.2.2-2に示す軟岩系岩盤の処分孔断面形状、およびIV-211表4.2.2-1に示す軟岩系岩盤の処分孔の間隔、処分孔縦置き方式の事例に従い、以下のように設定した。

処分坑道は処分坑道レイアウトを参照して、直径5mの円形空洞とする(図11.8-2)。坑道は100m立方の解析領域の中央に、X軸方向(東西方向)に1本設置するとした。坑道周辺の掘削影響領域(EDZ)の幅は既存の幌延深地層研究所の調査結果[4]では、坑道周辺に0.2~1.2mと示されている。これに基づき坑道周辺に1.0mの均一厚さで分布すると設定した(図11.8-2)。

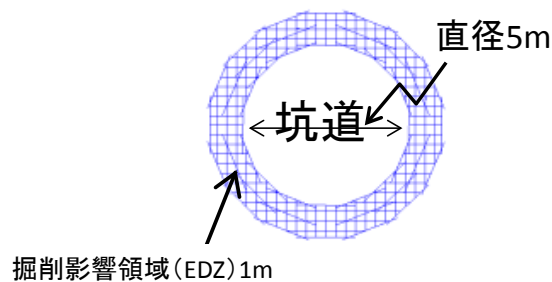
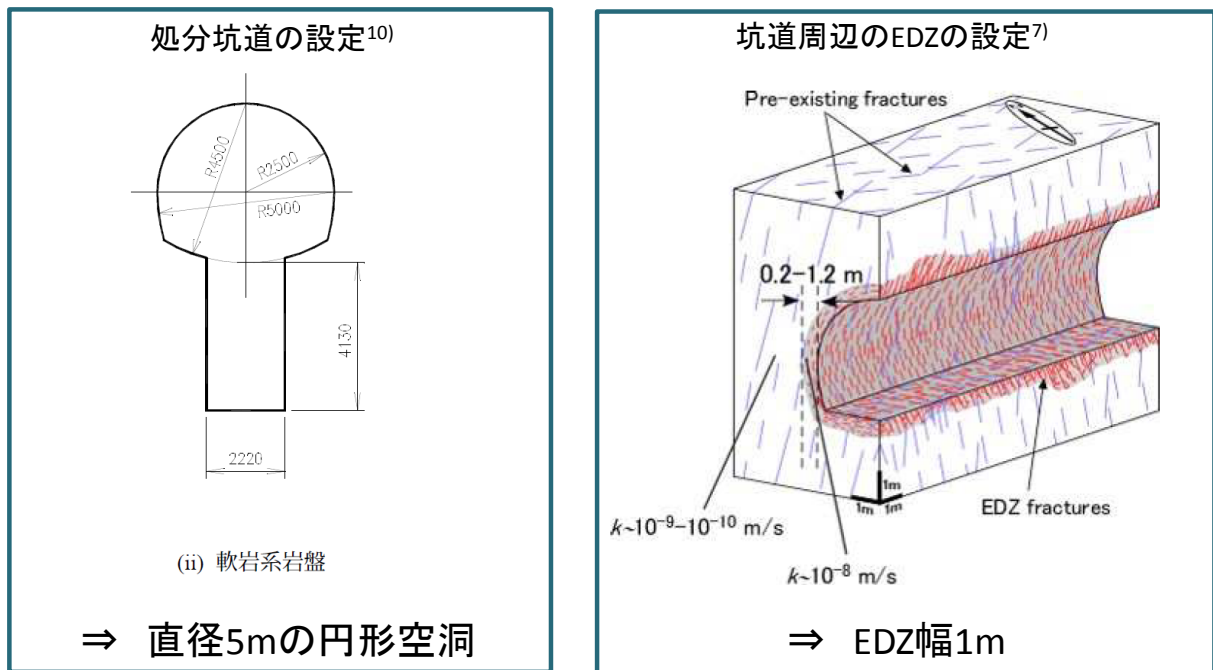


図 11.8-2 処分坑道及び掘削影響領域 (EDZ) の設定

掘削影響領域（EDZ）は、図 11.8-3 に示すように、坑道周囲に放射方向・円周方向・坑道軸方向の格子状チャンネルを追加することでモデル化を行った。このモデル化により軸方向の異方性の設定を容易にすることが可能になる。図 11.8-4 には割れ目のチャンネルネットワーク内に掘削影響領域を含む坑道をモデル化した例を示す。また、掘削影響領域は健岩部より透水性が大きいため、この領域に相当するチャンネルには健岩部とより大きい透水係数の値を設定する。幌延深地層研究センターの調査結果[4]を元に、掘削影響領域の透水係数は $k=10^{-8}\text{m/sec}$ と設定した。表 11-1 に本検討のモデル化において設定した各部位の透水係数の一覧を示す。

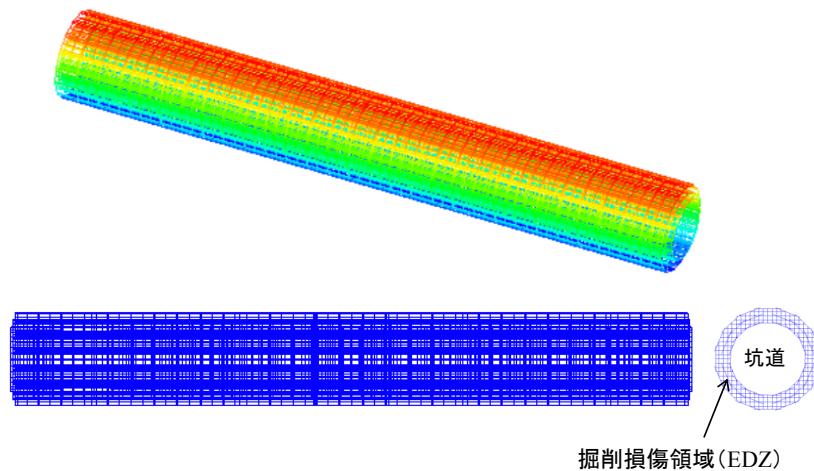


図 11.8-3 掘削影響領域（EDZ）のモデル化

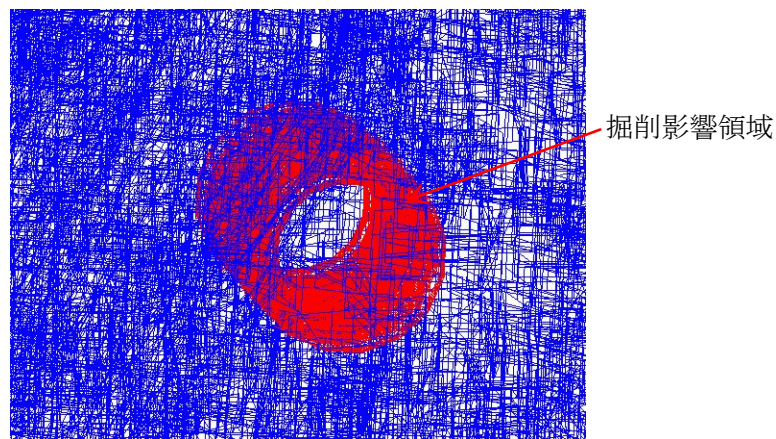


図 11.8-4 チャンネルネットワーク内に掘削影響領域をモデル化した例

表 11-1 本検討における透水係数の設定値

部位	透水係数 (m/sec)
岩盤（基質部）	1.82E-11
割れ目を含む岩盤	7.62E-7
掘削影響領域	1.00E-8

処分孔の形状は、核燃料サイクル開発機構(1999)[11]では直径 2.22m、深さ 4.13m の円柱である。また、処分孔は 6.66m 間隔で設置される。このことから図 11.8-5 に示すように、処分孔周辺の半径 1.5m、底盤から 5.0m 範囲の境界条件を大気圧境界に設定することで処分孔を再現することとした。処分孔間隔は核燃料サイクル開発機構(1999)では 6.66m であることから、6.6m ピッチで処分孔の中心点を設定した。すなわち、100m 立方のモデルでは処分坑道沿いに側方境界から 20.3m の位置に 1 孔目を設置し、その後 6.6m ピッチで 10 箇所設置した。

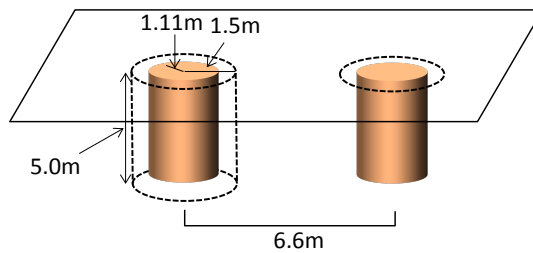
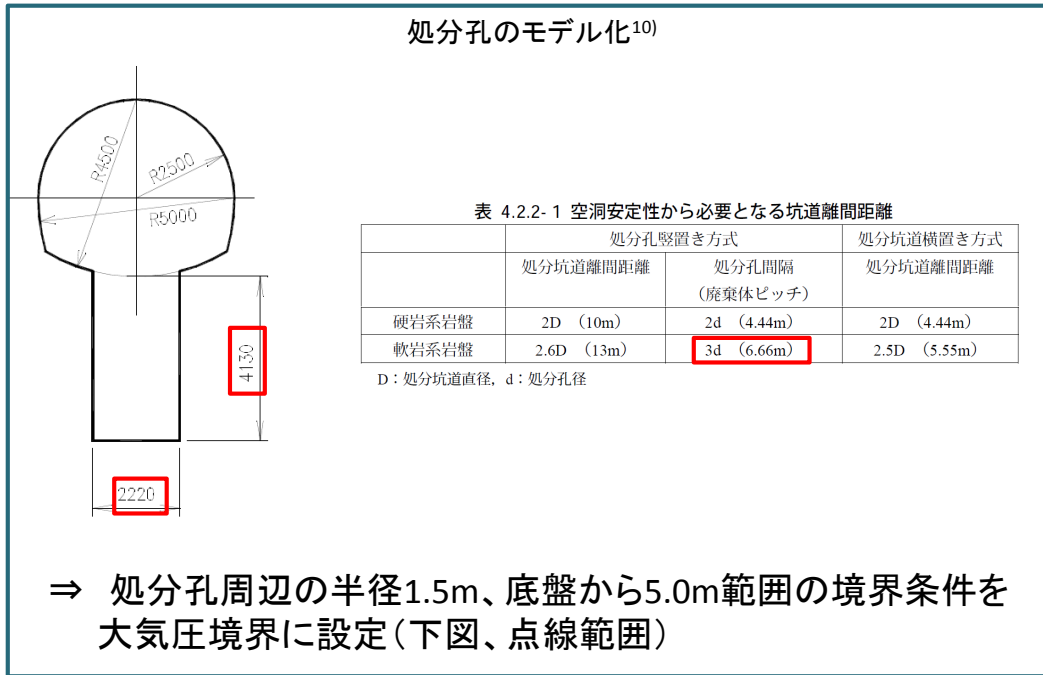


図 11.8-5 処分孔のモデル化

11.8.2 水理試験再現解析による透水係数量分布の算定方法

処分坑道や処分孔への湧水量の解析として、(a)処分坑道掘削時、(b)処分孔掘削時（対策前の初期値）の2段階を想定した。解析時の境界条件は以下のように設定した（図 11.8-6）。

- 共通設定

坑道の向き：X 軸方向（東西方向）

モデルの周辺境界条件：坑道軸面は不透水境界

後の4面は静水圧境界（全水頭 350m）

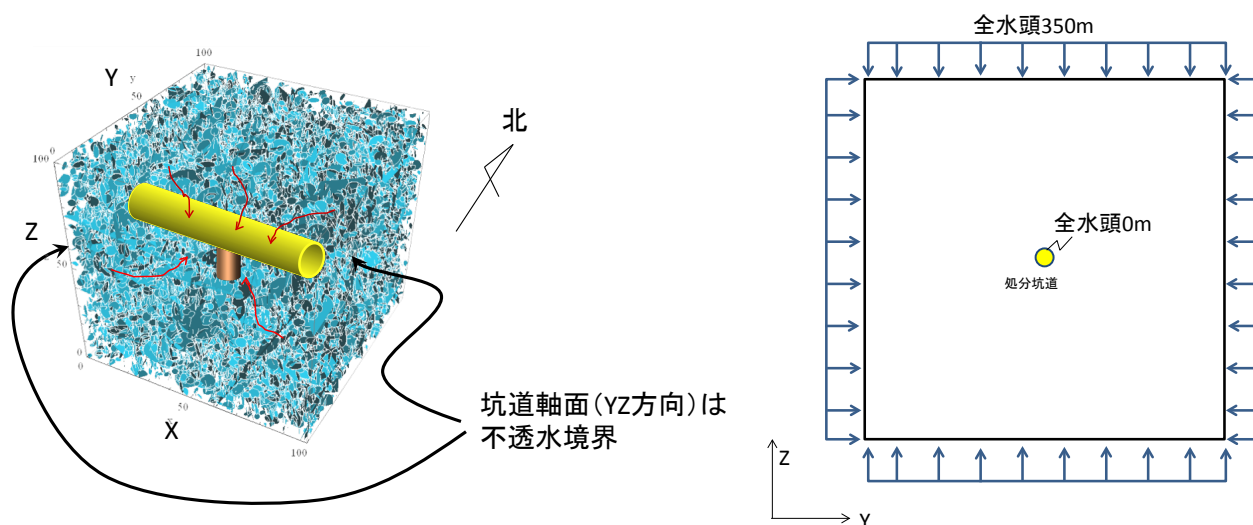


図 11.8-6 境界条件の設定

- (a)処分坑道掘削時における設定

坑道内の境界条件：全水頭 0m

- (b)処分孔掘削時における設定

坑道内の境界条件：全水頭 0m

処分孔の境界条件：全水頭 0m（4.1 で設定した範囲）

各段階における解析モデルのイメージ図を、図 11.8-7、図 11.8-8 に示す。

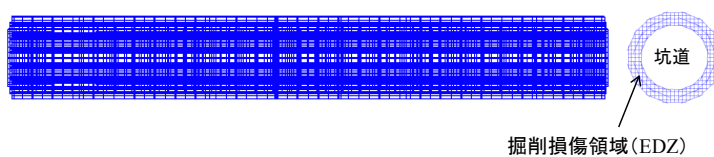
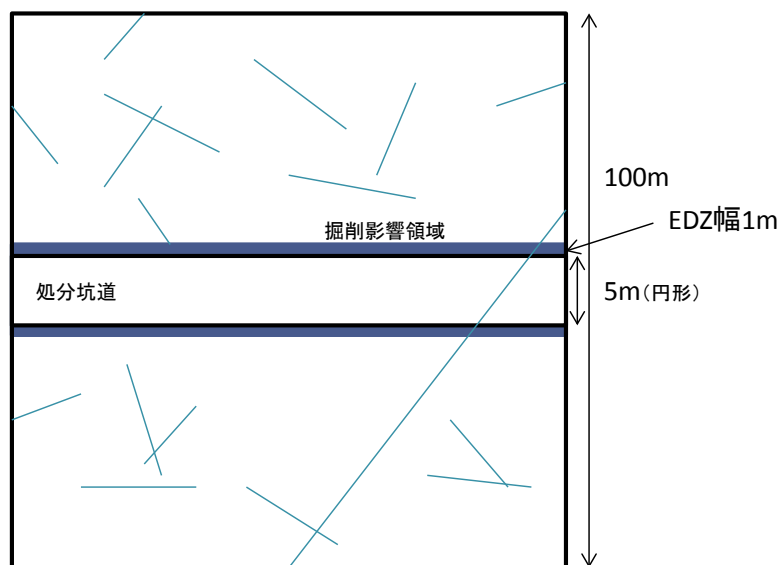


図 11.8-7 処分坑道掘削時のモデル

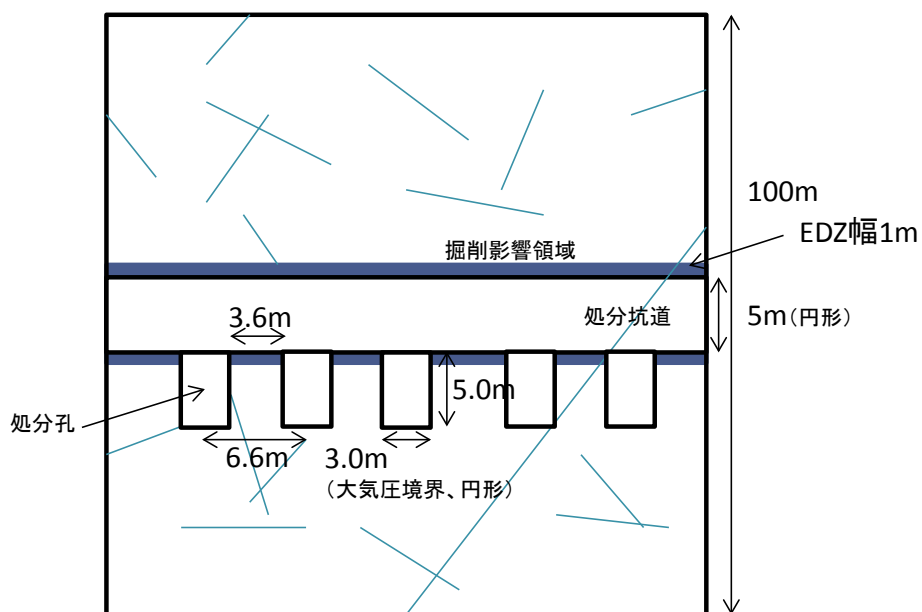


図 11.8-8 処分孔掘削時のモデル

11.8.3 処分坑道掘削時の処分坑道への湧水量の算定結果

処分坑道掘削時における各リアライゼーションの処分坑道への湧水量を算定した。図 11.8-9 には水頭分布の解析結果例を示す。各リアライゼーションについて、坑道への総湧水量、坑道 5m 区間湧水量、坑道へ交差する主要割れ目の流量、坑道壁面の湧水量分布と交差割れ目分布について整理を行った。

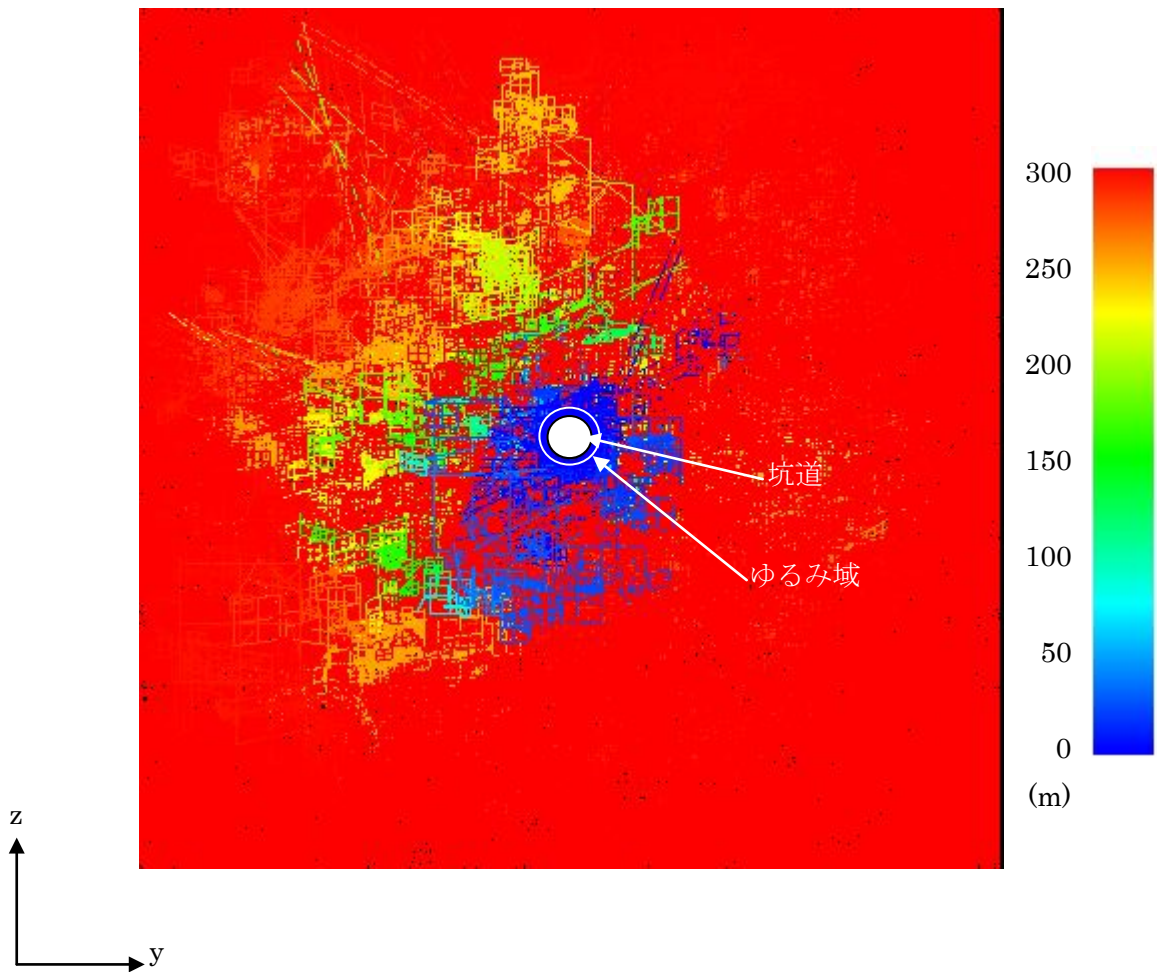


図 11.8-9 解析結果例（全水頭分布、リアライゼーション1）

11.8.4 坑道湧水量

10個のリアライゼーションについて、坑道への総湧水量及び境界面からの流入量の算定結果を表11-2に示す。各リアライゼーションで坑道湧水量と境界面からの流入量とは一致しており、収支が合っていることが分かる。10リアライゼーションの平均は1,489L/minとなり、最小で635L/min、最大で2,176L/minとバラつきがある。これは亀裂の不均一性を反映した結果であるといえる。また、流入が卓越する方向にもバラつきがあり、流入が均質でないことを表している。

表 11-2 坑道湧水量算定結果（処分坑道掘削時）

リアライゼーション	坑道湧水 (L/min)	境界面流入量(L/min)				
		南	北	下	上	合計
1	1,592	-7	-1,220	-320	-45	-1,592
2	946	-50	-282	-472	-143	-946
3	992	-511	-66	-216	-199	-992
4	1,176	-6	-217	-181	-771	-1,176
5	1,408	-56	-196	-1,028	-129	-1,408
6	635	-55	-141	-307	-132	-635
7	3,494	-502	-161	-1,577	-1,255	-3,494
8	895	-236	-206	-155	-297	-895
9	1,572	-27	-116	-655	-774	-1,572
10	2,176	-44	-306	-243	-1,584	-2,176
平均	1,489					
標準偏差	833					

11.8.5 坑道 5m 区間湧水量

各リアライゼーションの坑道沿い 5m ごとに坑道湧水量を集計した結果を図 11.8-10～図 11.8-19 に示す。区間ごとに湧水量の差が大きいことが分かる。

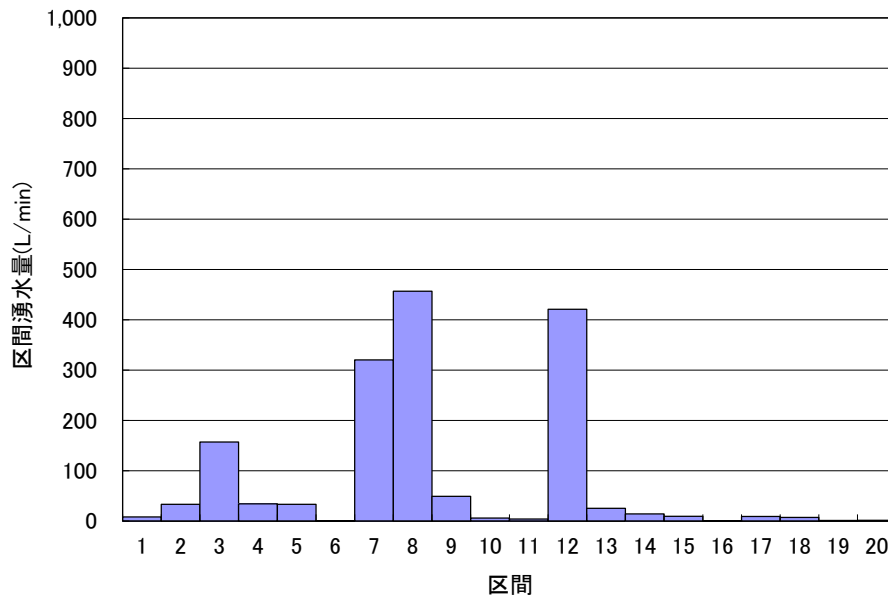


図 11.8-10 区間湧水量集計結果 (HL12_01)

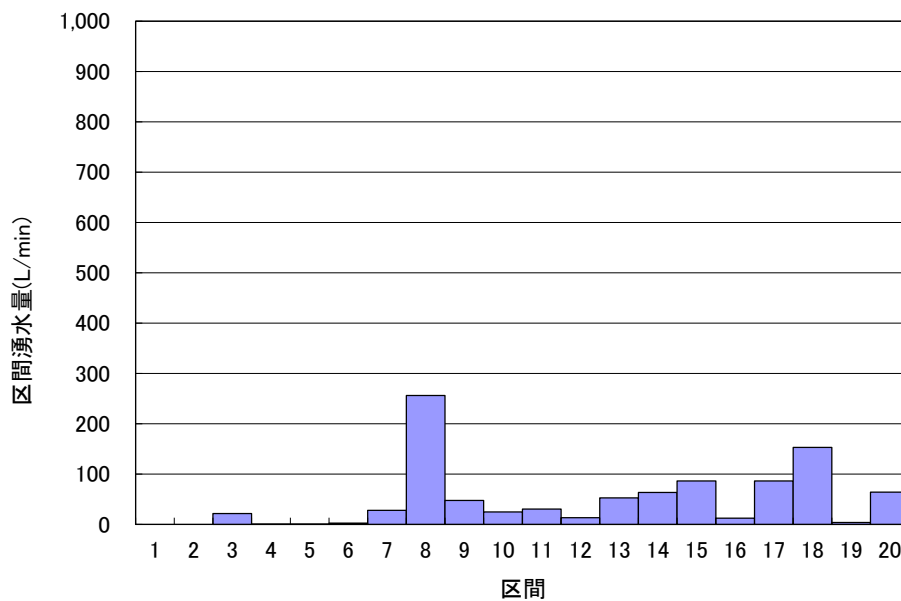


図 11.8-11 区間湧水量集計結果 (HL12_02)

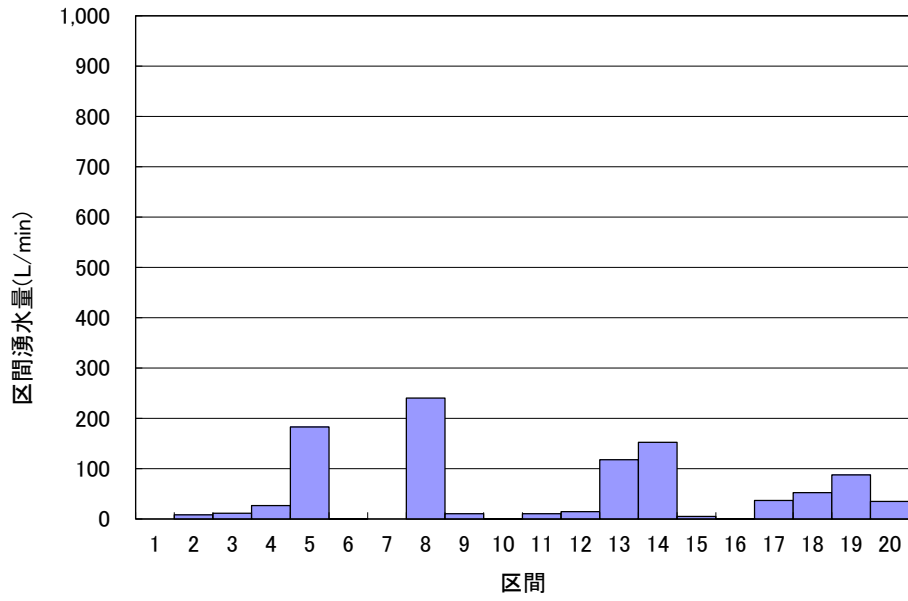


図 11.8-12 区間湧水量集計結果 (HL12_03)

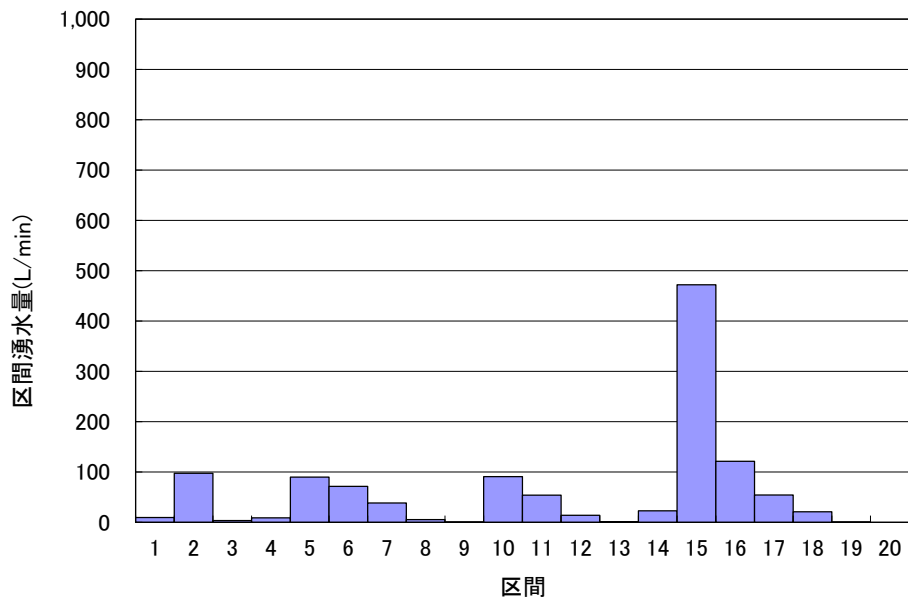


図 11.8-13 区間湧水量集計結果 (HL12_04)

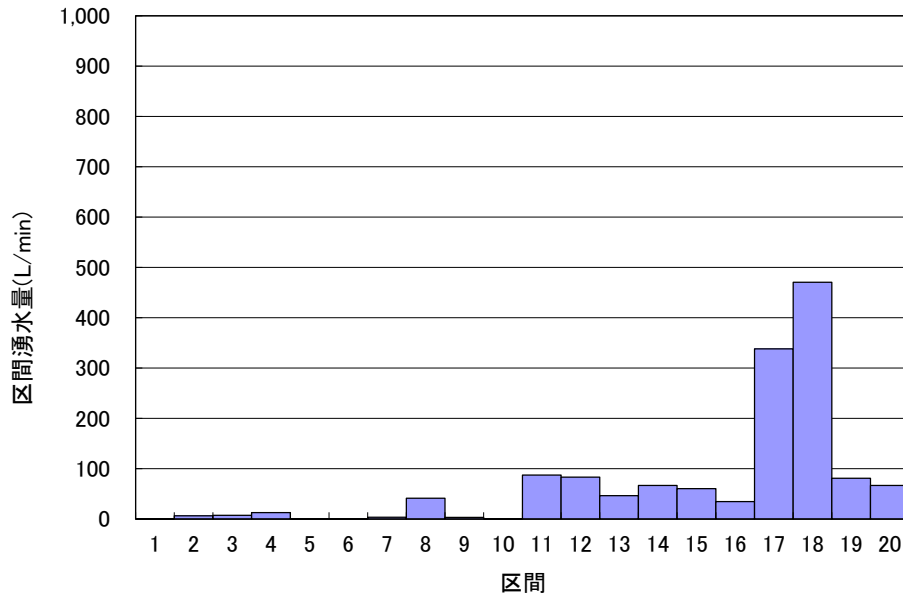


図 11.8-14 区間湧水量集計結果 (HL12_05)

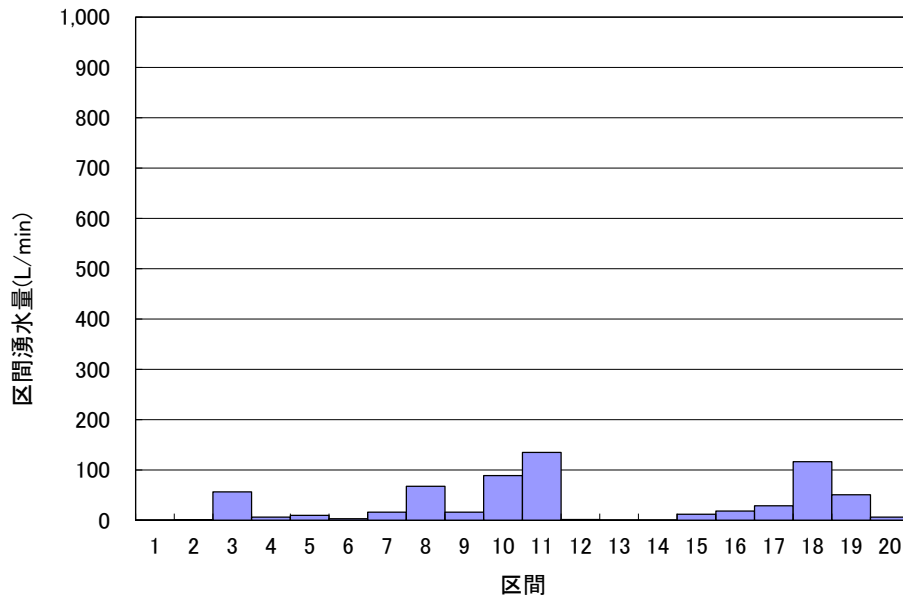


図 11.8-15 区間湧水量集計結果 (HL12_06)

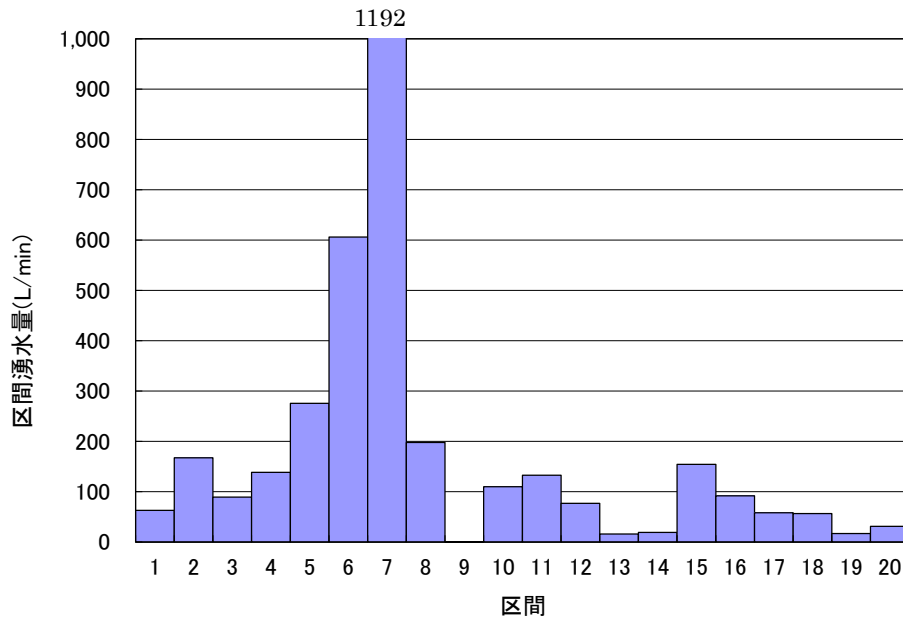


図 11.8-16 区間湧水量集計結果 (HL12_07)

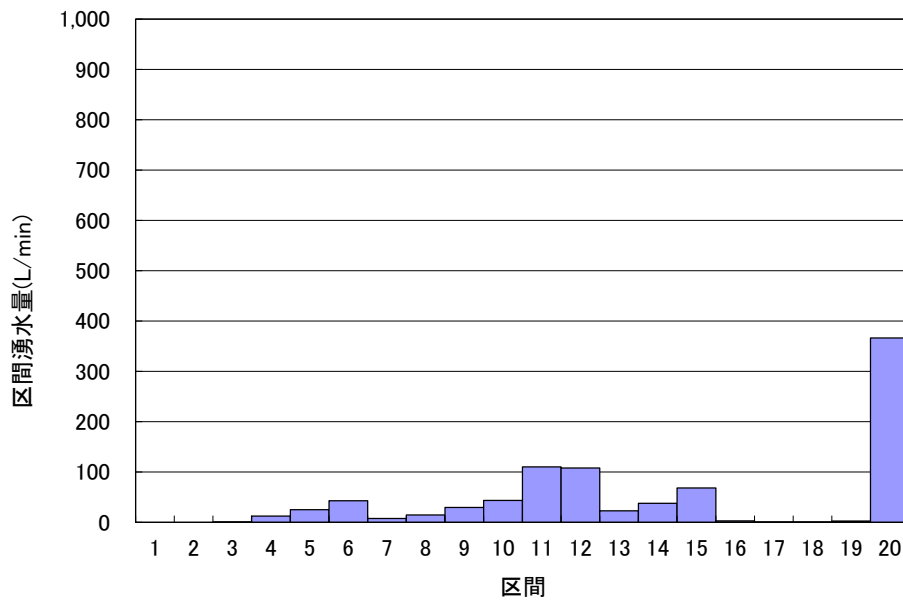


図 11.8-17 区間湧水量集計結果 (HL12_08)

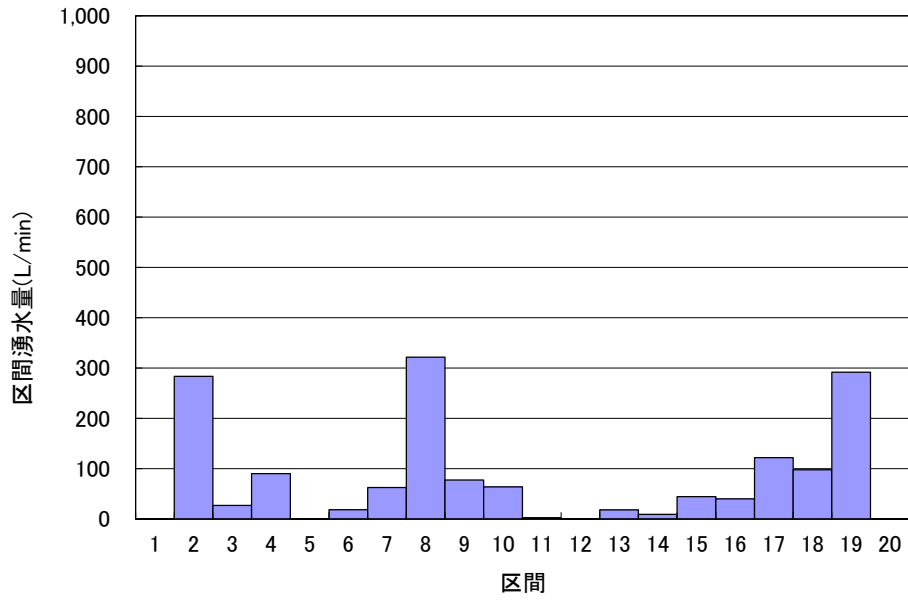


図 11.8-18 区間湧水量集計結果 (HL12_09)

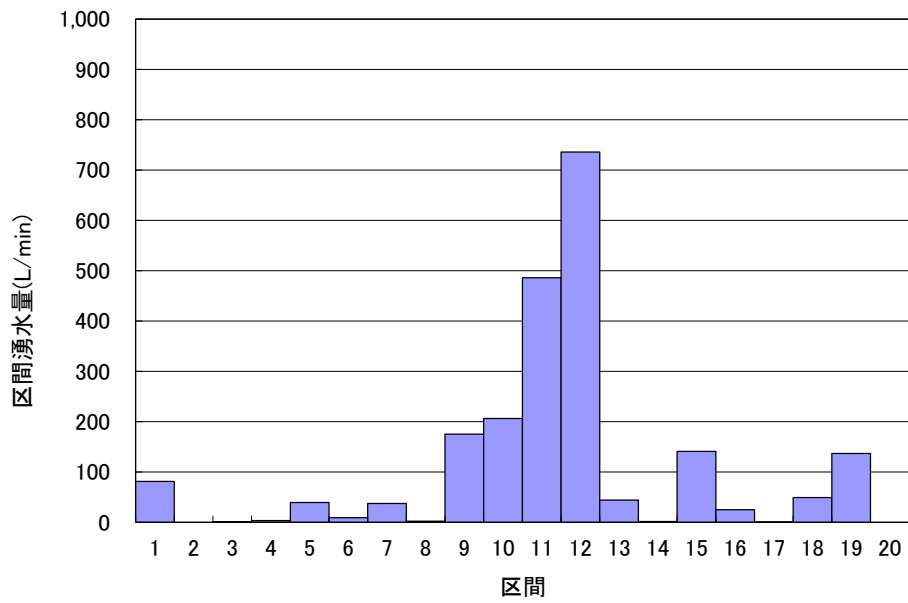


図 11.8-19 区間湧水量集計結果 (HL12_10)

11.8.6 坑道と交差する割れ目の流量

坑道に交差する割れ目の本数は各リアライゼーションで表 11-3 に示すとおりである。この内、6.0L/min 以上の流量をもつ割れ目の流量を表 11-4 に示す。

表 11-3 坑道に交差する割れ目の本数

リアライゼーション	流入量6.0L/min以上の割れ目本数	流入量0.1L/min以上の割れ目本数
1	21	46
2	19	45
3	18	43
4	22	41
5	19	31
6	17	34
7	35	60
8	28	62
9	25	48
10	18	45

表 11-4 坑道に交差する主要割れ目の流量算定結果（処分坑道掘削時）

リアライゼーション1		リアライゼーション2		リアライゼーション3		リアライゼーション4		リアライゼーション5		リアライゼーション6		リアライゼーション7		リアライゼーション8		リアライゼーション9		リアライゼーション10	
HL12_01tunnel		HL12_02tunnel		HL12_03tunnel		HL12_04tunnel		HL12_05tunnel		HL12_06tunnel		HL12_07tunnel		HL12_08tunnel		HL12_09tunnel		HL12_10tunnel	
割れ目 番号	流量(L/min)	割れ目 番号	流量(L/min)	割れ目 番号	流量(L/min)	割れ目 番号	流量(L/min)	割れ目 番号	流量(L/min)	割れ目 番号	流量(L/min)	割れ目 番号	流量(L/min)	割れ目 番号	流量(L/min)	割れ目 番号	流量(L/min)	割れ目 番号	流量(L/min)
6454	648.2	15269	221.4	16651	168.6	17366	437.9	4014	616.7	7268	177.5	3384	954.4	7105	264.6	4438	271.0	4427	855.6
21301	346.4	12526	110.1	9528	165.9	14300	124.6	12033	134.8	10810	101.7	9732	529.7	8591	128.9	20205	259.5	18827	712.0
21036	139.3	10782	104.5	12689	125.5	3824	108.4	4978	102.7	7789	59.9	16968	528.2	5198	61.1	10445	177.1	13989	124.7
3537	56.8	2542	96.0	10976	85.6	16513	95.1	8627	86.3	11829	40.8	17077	196.0	3193	41.5	473	154.1	10137	98.9
1952	47.1	13563	55.4	19751	81.1	12600	55.6	20779	71.7	19340	33.8	15881	137.6	2848	38.5	16942	121.9	18195	81.1
2354	37.3	12656	55.0	16196	65.8	10715	54.8	10626	57.5	12835	31.8	18801	113.1	3247	29.2	3843	91.7	3486	69.4
3125	35.9	20216	52.8	13953	64.0	10206	47.9	17816	56.6	6207	30.8	6917	92.2	5385	25.3	16670	74.6	731	43.8
17495	31.7	4712	40.9	2568	36.5	10337	35.3	16403	47.0	15951	30.1	6097	83.4	8755	24.0	18548	45.3	46	30.2
5345	27.6	12659	23.6	17795	33.0	11590	30.2	14975	40.0	17969	17.8	7573	74.7	12915	17.6	14884	32.8	11775	25.9
1498	27.0	13903	23.2	20211	28.1	17732	18.8	13860	31.8	18349	13.9	12732	68.9	15542	17.4	19672	28.2	4029	19.6
15572	22.8	15847	21.0	14978	22.5	20179	14.7	8724	26.9	18054	13.0	16329	59.4	19316	17.4	13214	26.5	2908	13.8
4026	22.7	15403	15.5	6714	13.7	17180	14.4	13928	19.7	13381	11.9	2706	52.8	3772	17.1	14695	26.0	14332	12.3
7021	20.6	5472	12.2	14377	13.3	1456	13.3	4349	18.7	380	8.8	9289	50.5	19876	16.3	3707	24.3	4509	11.8
16036	14.9	13985	11.3	20116	11.9	3565	12.8	14843	14.6	16858	7.6	11581	45.7	17327	15.8	18836	24.3	10382	11.5
16674	14.1	14167	8.6	16625	10.6	4459	12.4	5843	12.7	10206	7.1	15575	41.4	9091	15.3	800	23.8	5824	9.0
16242	10.9	16277	7.7	17600	8.8	1722	9.0	1560	10.8	9165	6.0	15997	40.1	8090	13.7	2711	20.8	18239	8.3
11923	9.4	18286	7.6	10244	7.0	17841	8.8	18988	9.8	3493	6.0	17787	39.8	16989	11.1	508	20.6	3811	6.5
10688	9.2	11566	6.6	18746	6.0	365	8.2	288	8.8			3969	39.5	20225	10.4	17825	19.8	4710	6.5
13561	7.2	13972	6.3			11949	8.1	10858	7.7			11521	32.3	19161	10.3	13491	14.9		
15443	7.1					8734	7.4					11352	30.4	19499	10.3	2031	12.4		
13006	6.2					16877	7.4					16237	29.3	20291	9.0	20141	12.3		
						8808	7.1					17404	28.4	733	8.6	14157	12.3		
												5690	27.7	20645	8.0	17540	11.8		
												7129	22.0	19574	7.5	19782	11.4		
												15096	19.2	6722	7.2	19907	10.4		
												11609	19.0	19082	6.6				
												17206	15.7	3349	6.5				
												10125	15.4	17832	6.0				
												8893	15.3						
												4440	10.2						
												12288	7.8						
												1478	7.4						
												16072	6.8						
												5019	6.7						
												14011	6.0						

11.8.7 坑道壁面湧水量分布

各リアライゼーションの坑道壁面の湧水量分布と交差割れ目分布を図 11.8-20～図 11.8-29 に示す。

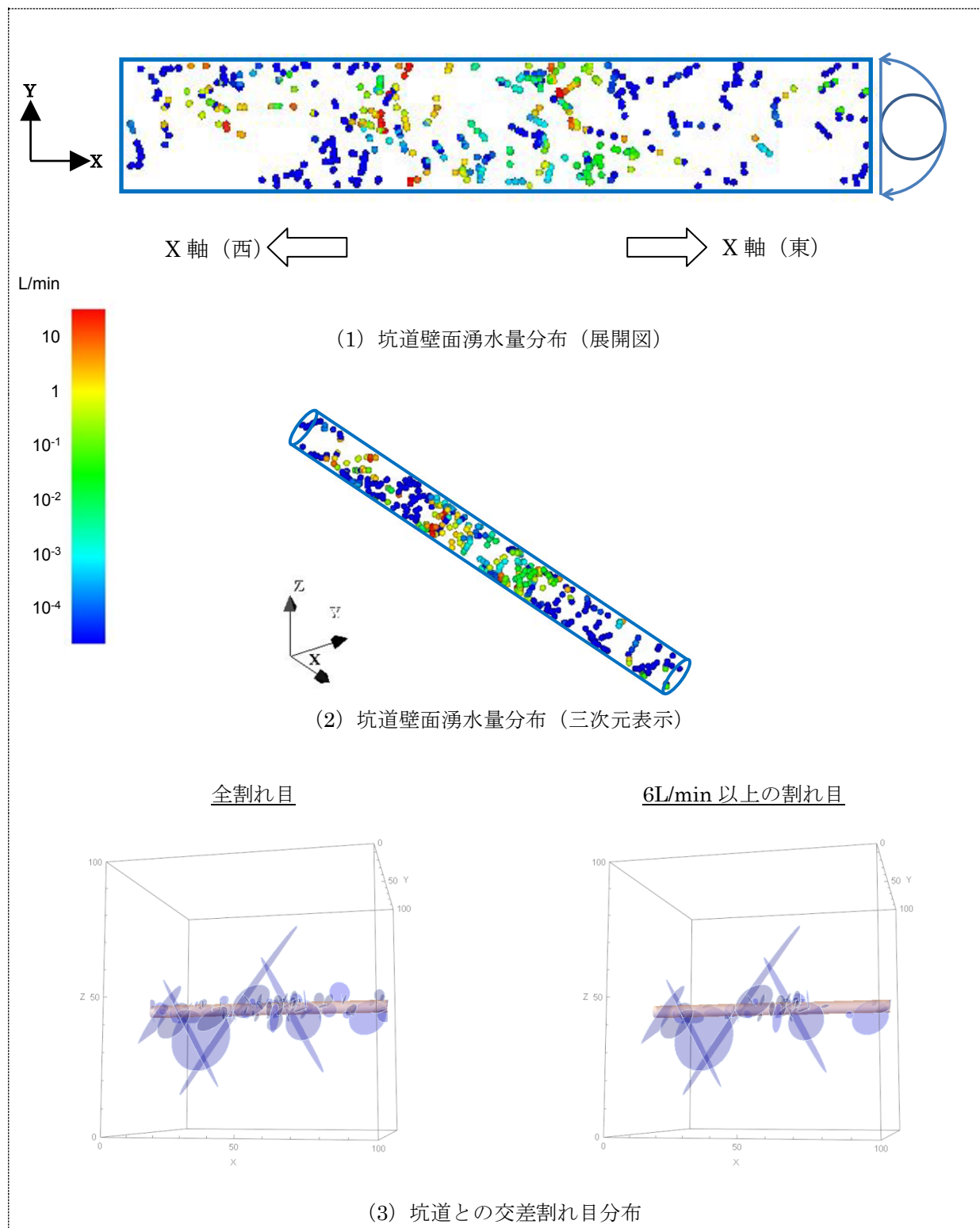


図 11.8-20 坑道壁面の湧水量分布と交差割れ目分布 (HL12_01)

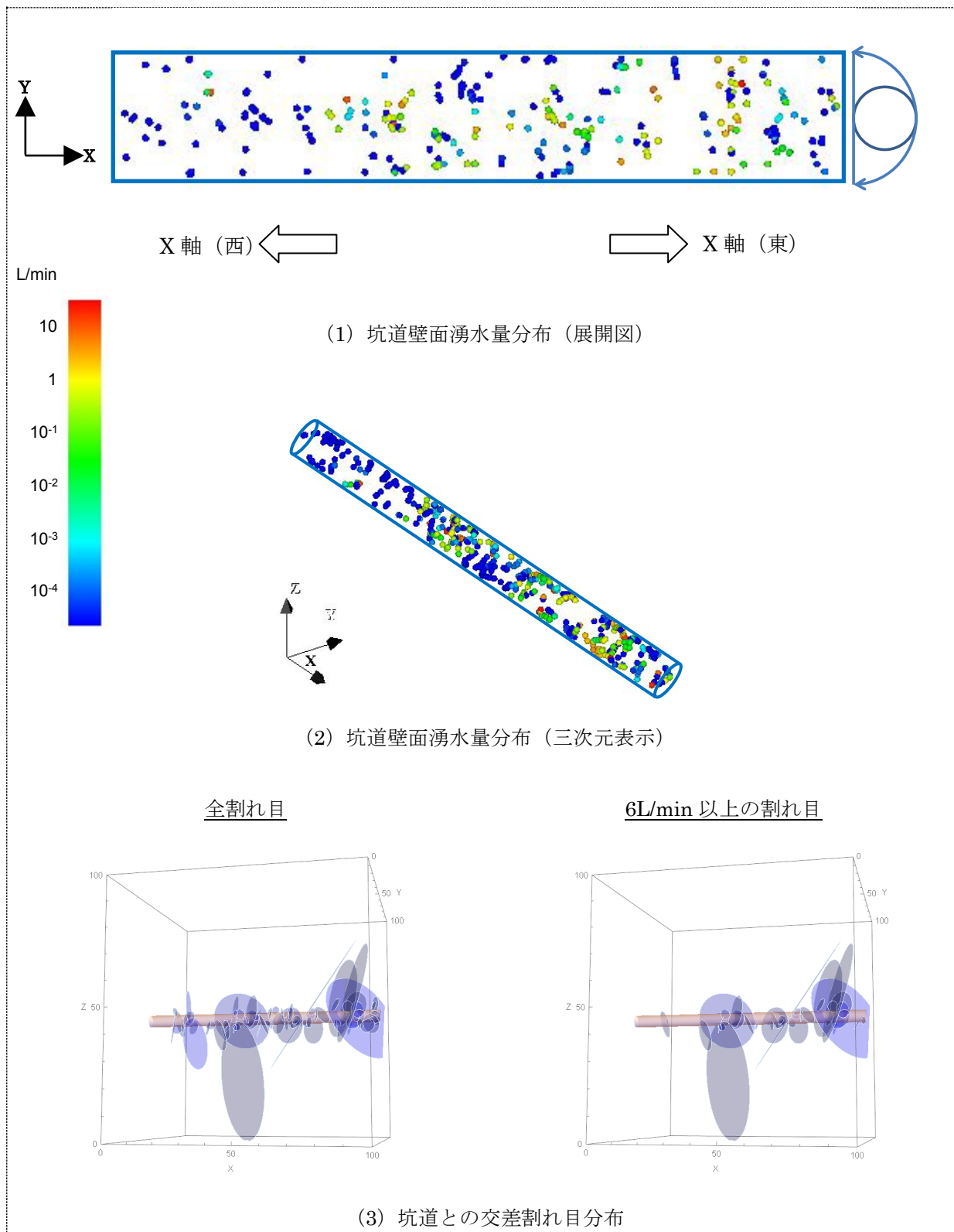


図 11.8-21 坑道壁面の湧水量分布と交差割れ目分布 (HL12_02)

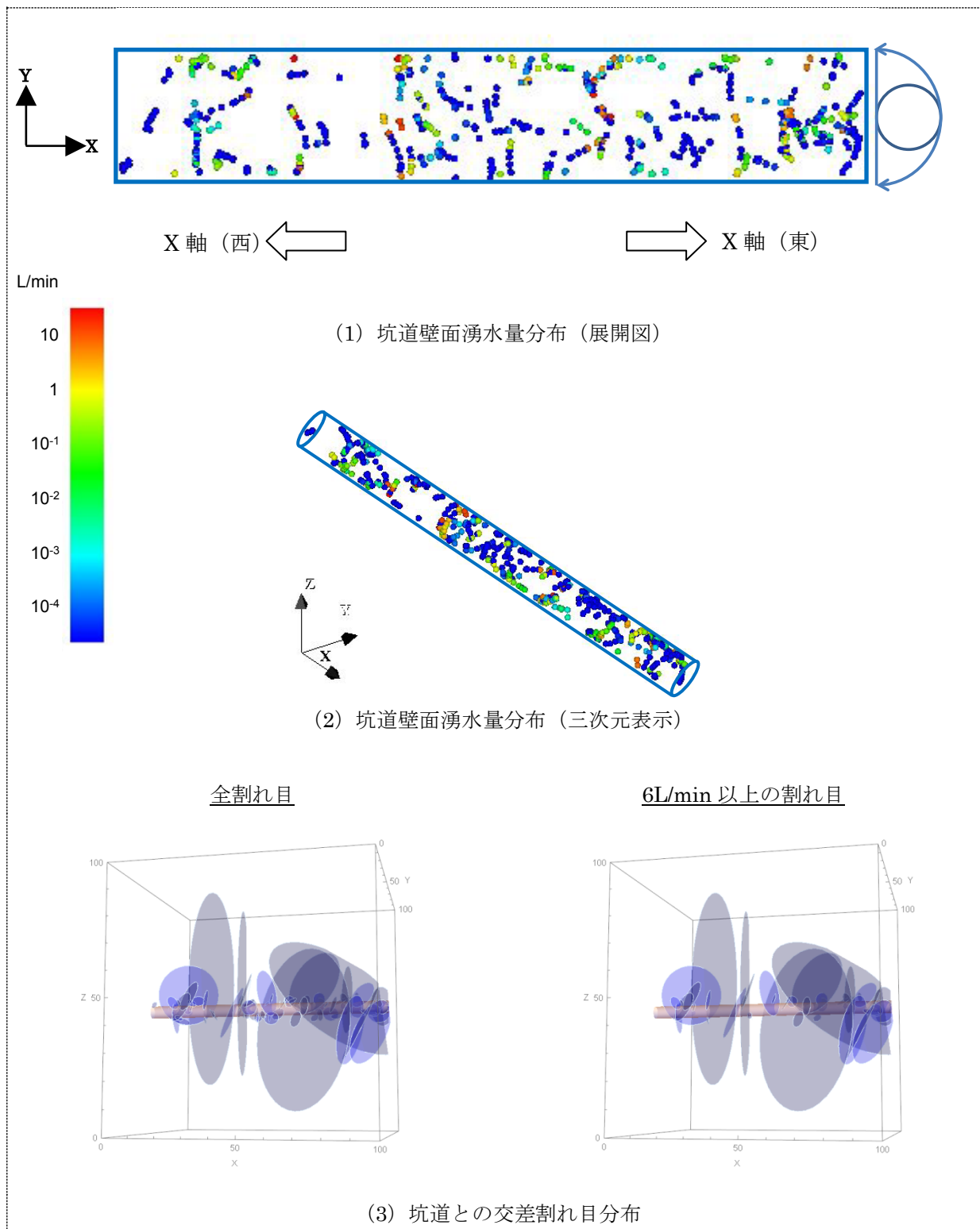


図 11.8-22 坑道壁面の湧水量分布と交差割れ目分布 (HL12_03)

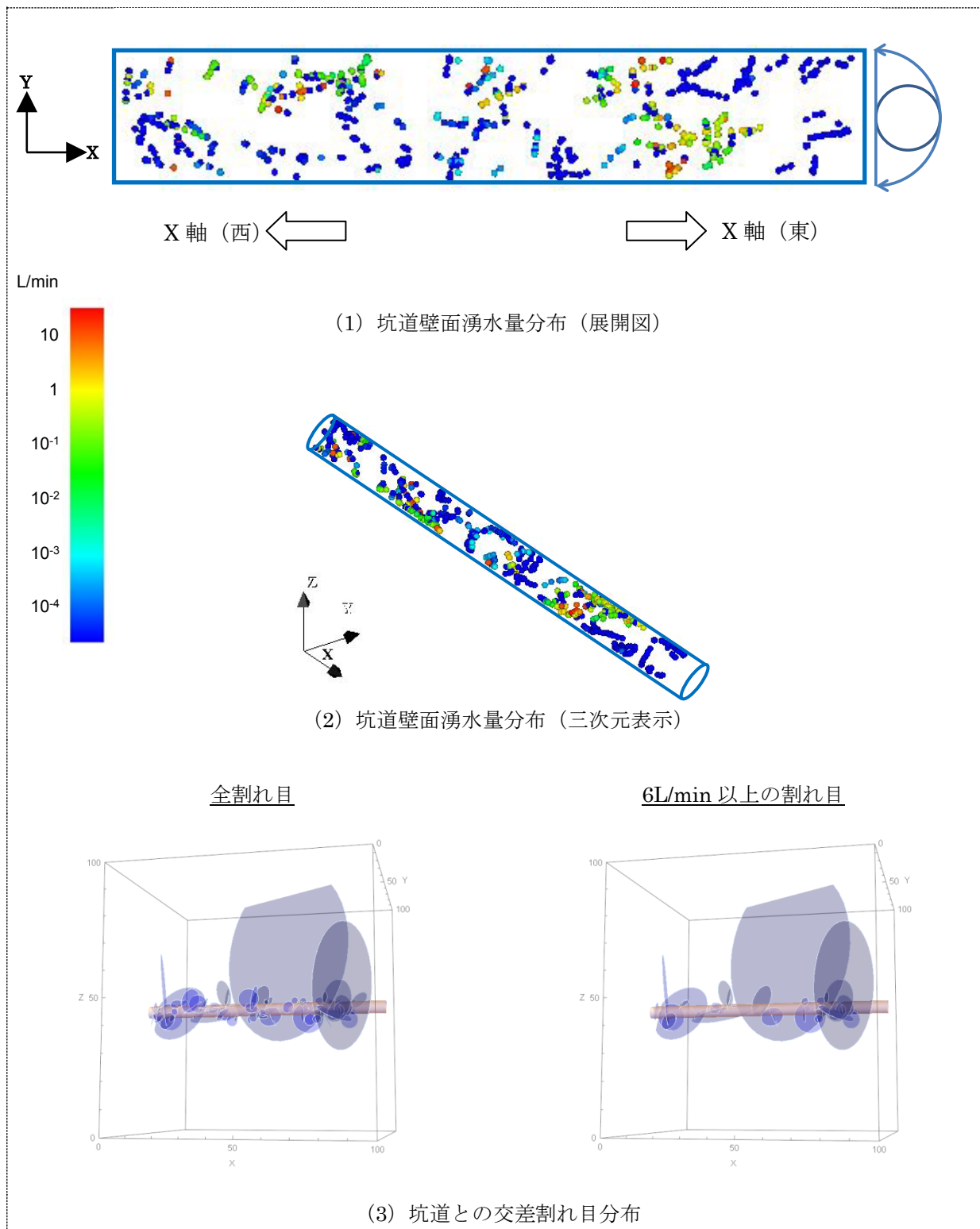


図 11.8-23 坑道壁面の湧水量分布と交差割れ目分布 (HL12_04)

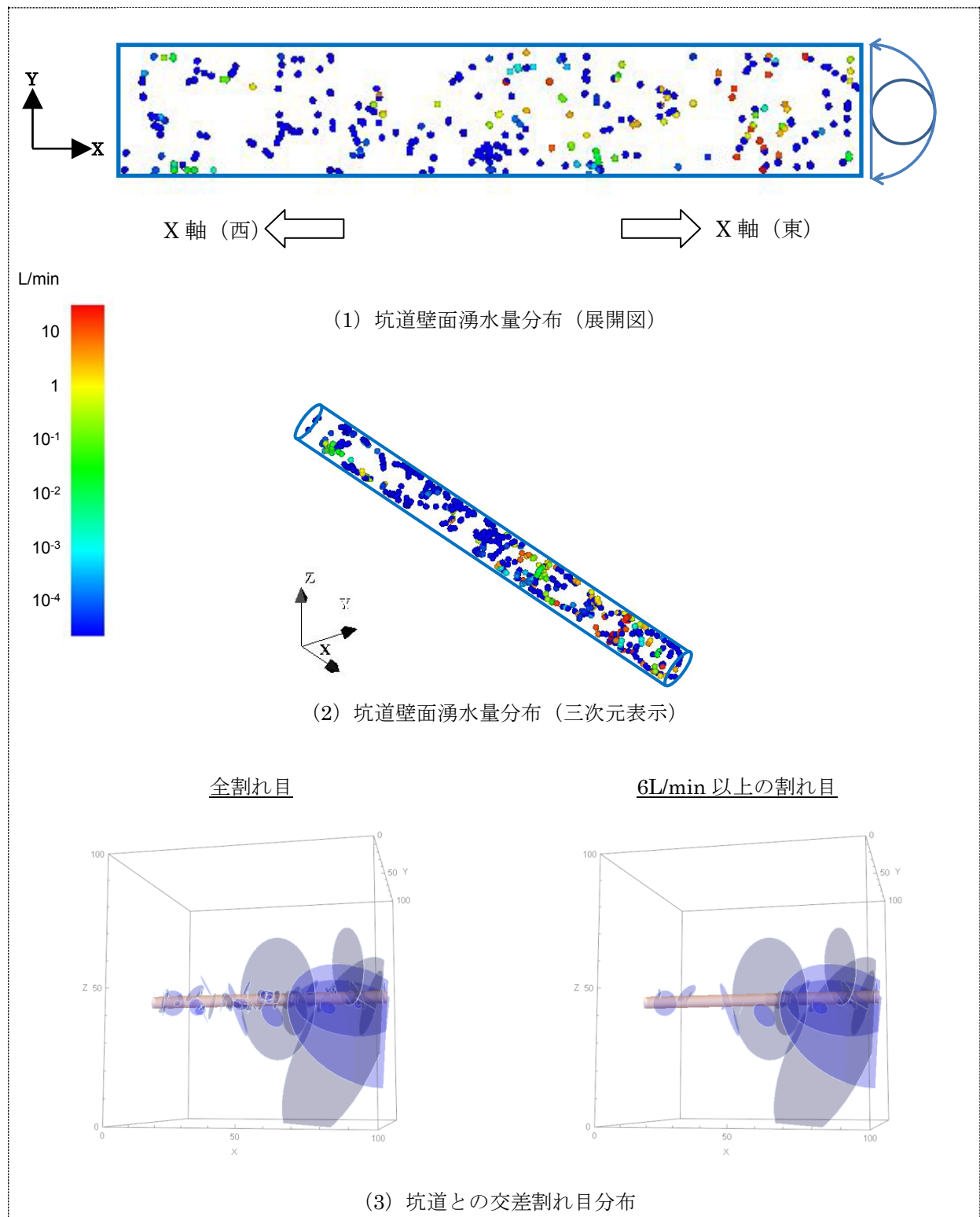


図 11.8-24 坑道壁面の湧水量分布と交差割れ目分布 (HL12_05)

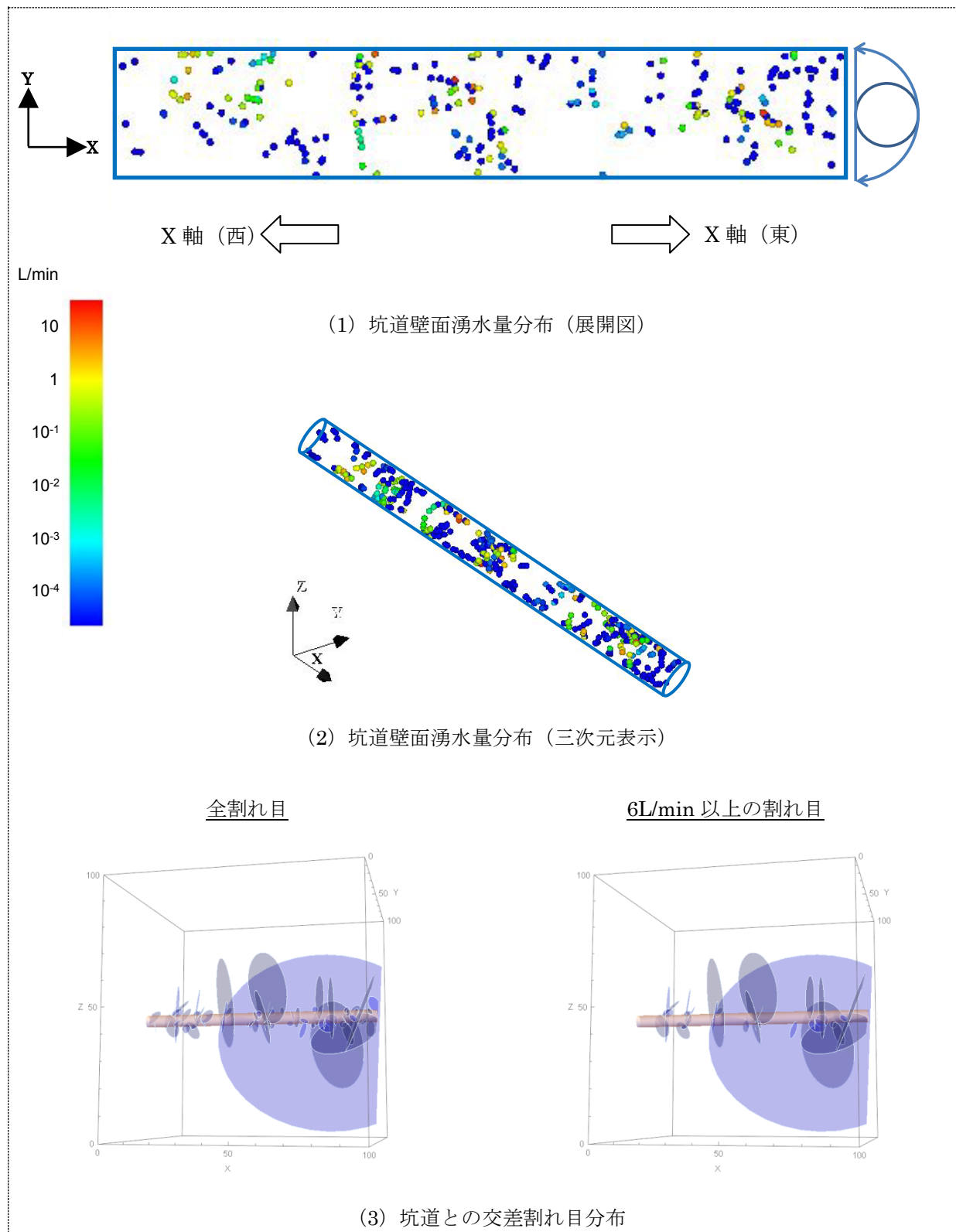


図 11.8-25 坑道壁面の湧水量分布と交差割れ目分布 (HL12_06)

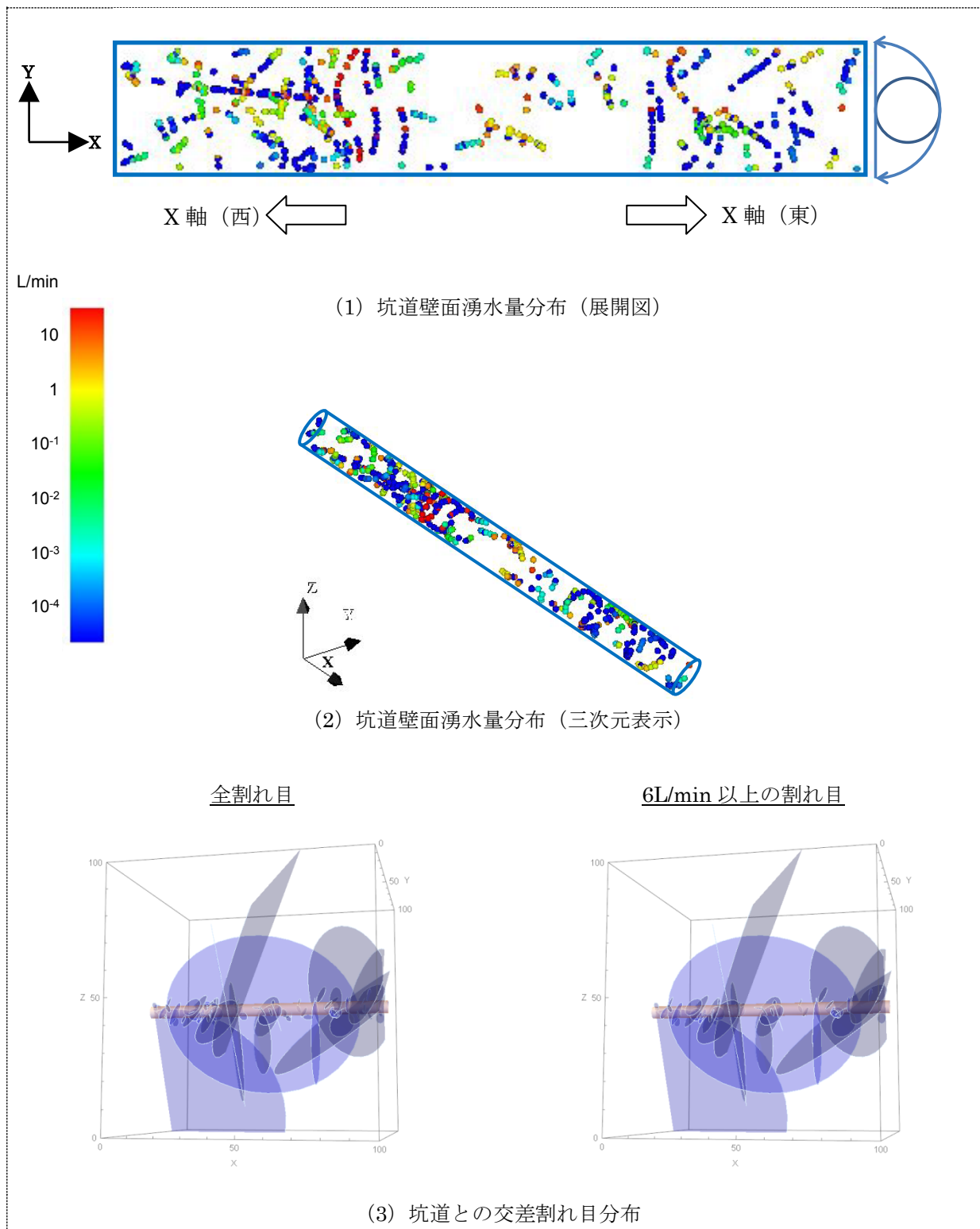


図 11.8-26 坑道壁面の湧水量分布と交差割れ目分布 (HL12_07)

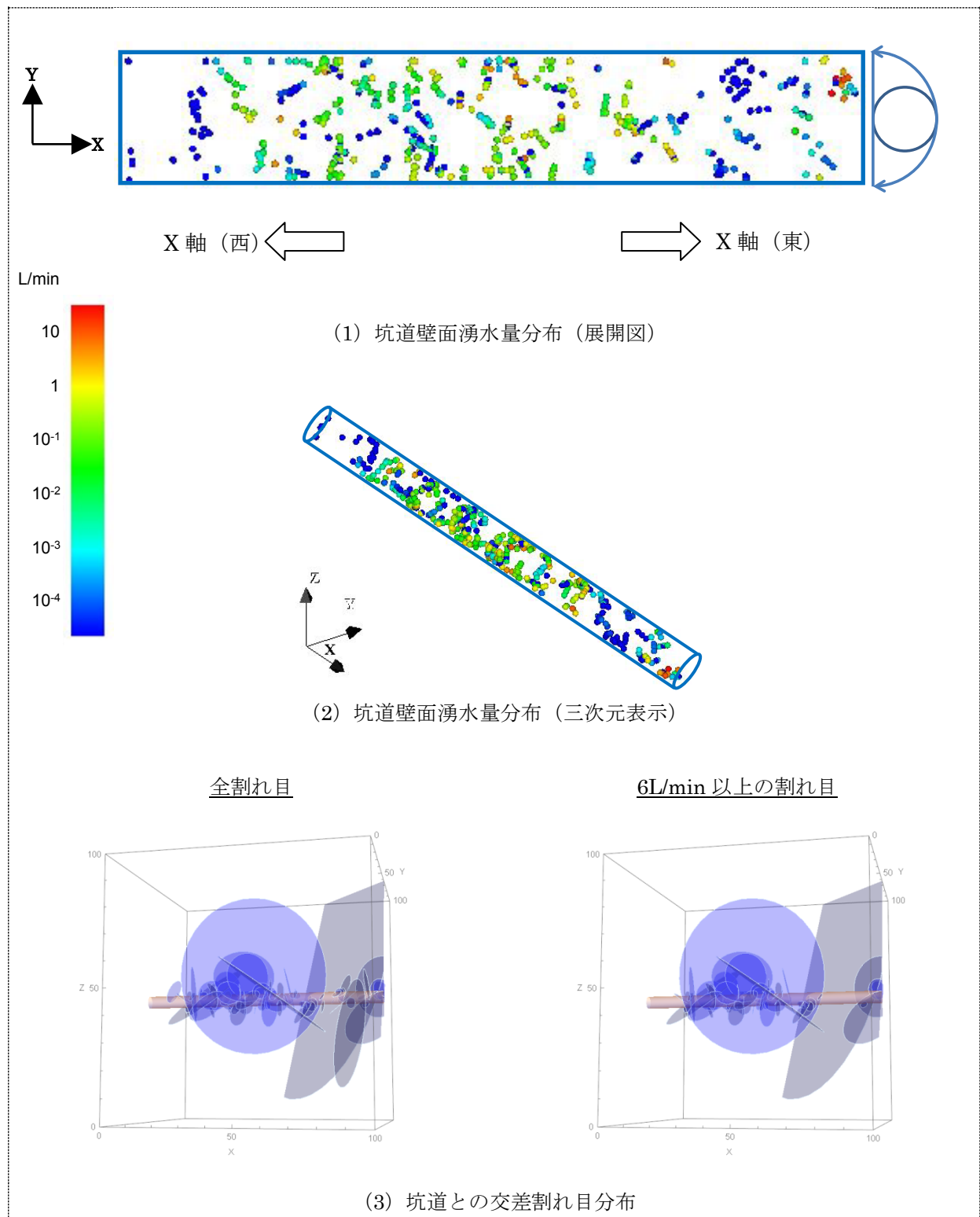


図 11.8-27 坑道壁面の湧水量分布と交差割れ目分布 (HL12_08)

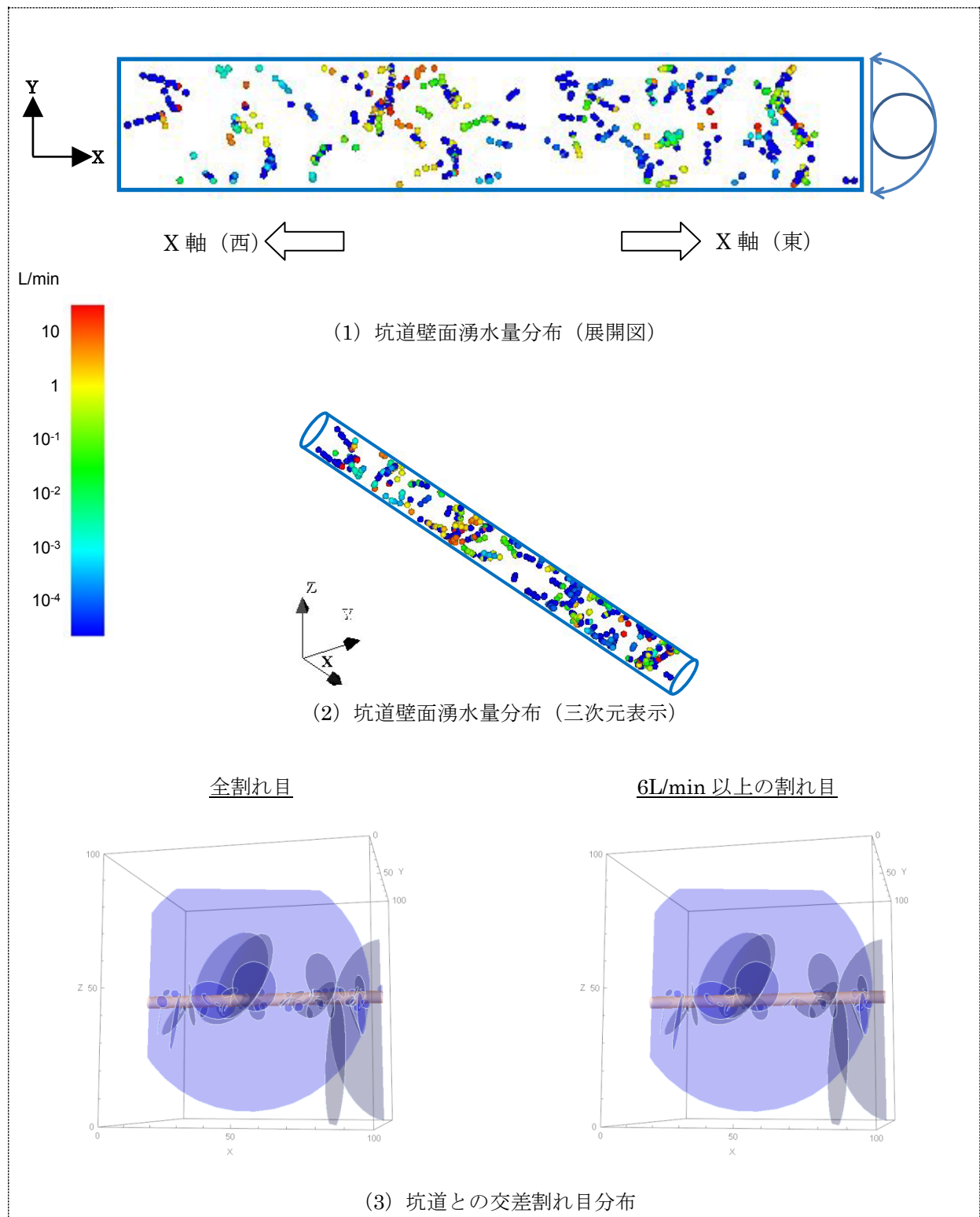


図 11.8-28 坑道壁面の湧水量分布と交差割れ目分布 (HL12_09)

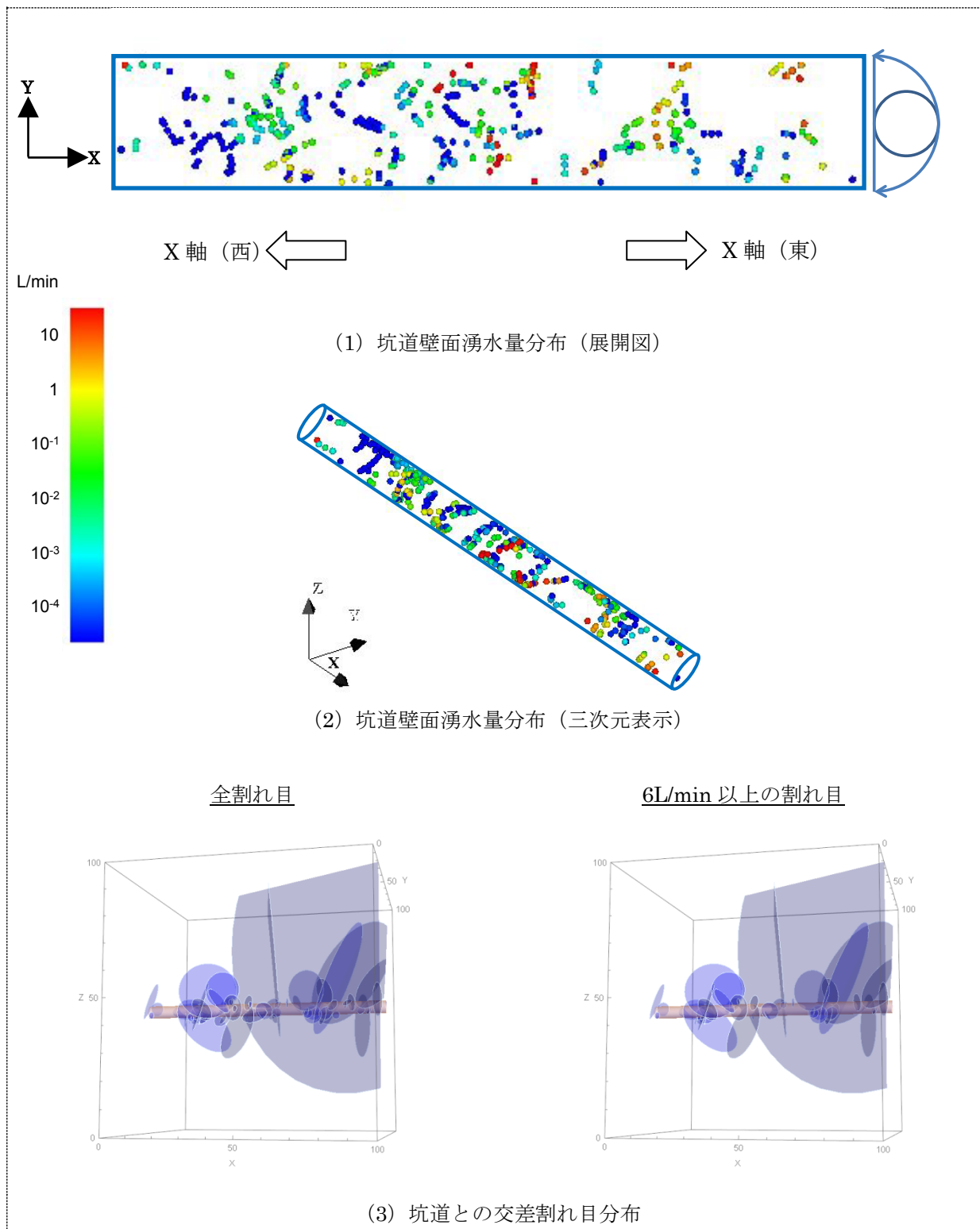


図 11.8-29 坑道壁面の湧水量分布と交差割れ目分布 (HL12_10)

11.9 処分孔掘削時の処分坑道及び処分孔への湧水量の算定結果

処分孔掘削時における各リアライゼーションの処分坑道、処分孔への湧水量を算定した。図 11.9-1 には水頭分布の解析結果例を示す。各リアライゼーションについて、坑道、処分孔への総湧水量、各処分孔への湧水量、坑道、処分孔へ交差する主要割れ目の流量、坑道 5m 区間湧水量、処分孔と交差する主要割れ目の流量、処分孔交差割れ目分布と湧水量分布について整理を行った。

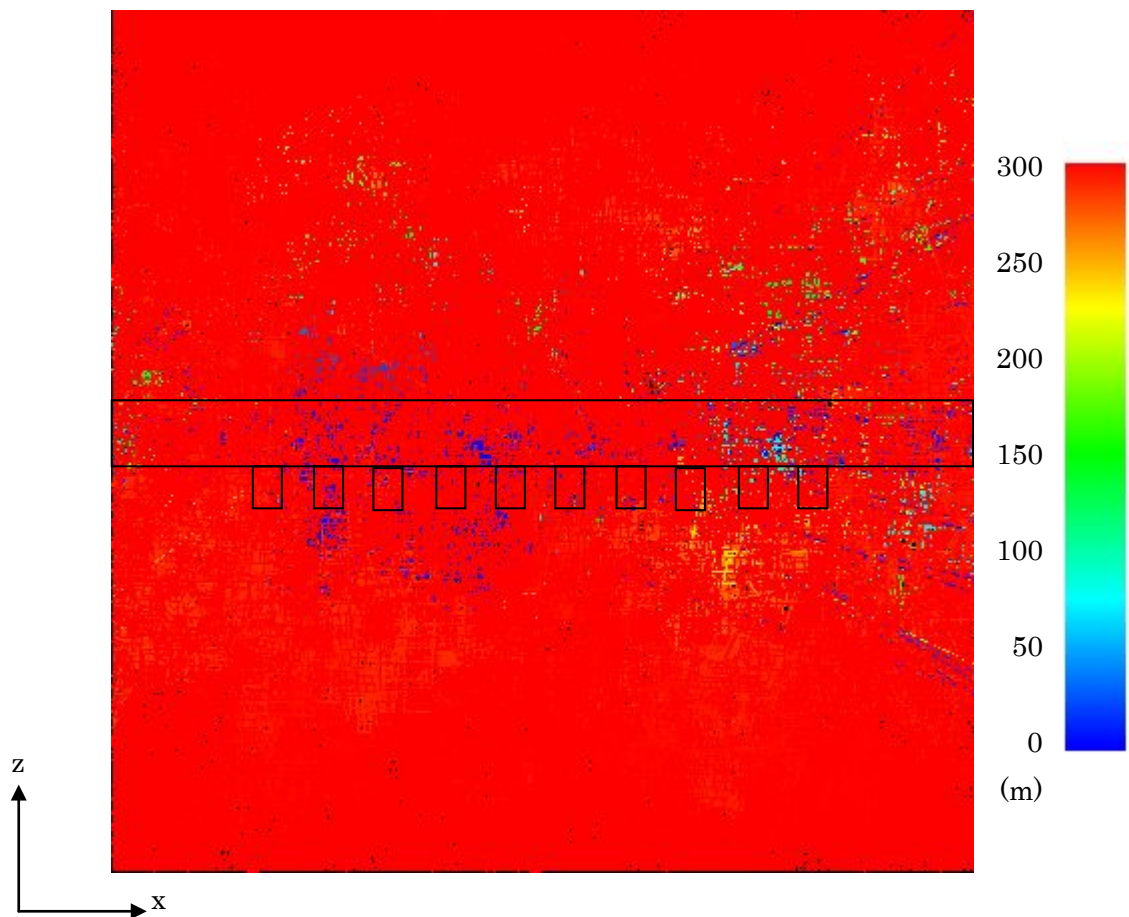


図 11.9-1 解析結果例（水頭分布、リアライゼーション1）

11.9.1 坑道湧水量及び処分孔湧水量

10個のリアライゼーションについて、処分孔掘削後の坑道、処分孔への湧水量及び境界面からの流入量の算定結果を表 11-5 に示す。各リアライゼーションで坑道湧水量と処分孔湧水量の合計値は、境界面からの流入量と一致しており、収支が合っていることが分かる。坑道湧水の 10 リアライゼーションの平均は 1,232L/min であり、坑道掘削時 1,489L/min と比べ小さくなっているが、処分孔湧水が 301L/min あり、これとの合計値は 1,533L/min であり、総湧水量としては坑道掘削時より大きくなっていることが分かる。坑道湧水と同様、処分孔湧水量もバラついており、亀裂の不均一性を反映した結果であるといえる。

表 11-5 坑道湧水量算定結果（処分孔掘削時）

リアライゼーション	坑道湧水(L/min)			境界面流入量(L/min)				
	坑道湧水	処分孔湧水	合計	南	北	下	上	合計
1	1,113	515	1,629	-7	-1,241	-335	-46	-1,629
2	621	464	1,084	-57	-288	-595	-145	-1,084
3	819	203	1,021	-520	-67	-232	-202	-1,021
4	1,065	141	1,207	-7	-223	-201	-776	-1,207
5	1,204	229	1,433	-57	-198	-1,050	-129	-1,433
6	402	253	655	-55	-144	-322	-133	-655
7	2,881	720	3,601	-516	-168	-1,650	-1,267	-3,601
8	726	190	916	-246	-208	-164	-298	-916
9	1,341	271	1,612	-27	-116	-693	-776	-1,612
10	2,147	29	2,176	-44	-306	-243	-1,584	-2,176
平均	1,232	301	1,533					
標準偏差	753	205	846					

各処分孔の湧水量を算定した結果を表 11-6 に示す。湧水量が 0.1L/min 以下を示す処分孔は最小で 1 箇所/10 ピット、最大で 6 箇所/10 ピットであり、今回の計算においては全 100 処分孔の内、38 箇所が 0.1L/min 以下を示す。

表 11-6 処分孔湧水量算定結果

リアライ ゼーション	処分孔 No.(L/min)											湧水 0.1L/min 以下の 処分孔の数
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	合計	
1	16.73	0.00	312.19	18.26	32.11	0.05	122.06	0.01	0.02	13.87	515	4
2	0.00	0.00	0.05	317.74	55.16	0.03	49.74	40.97	0.03	0.01	464	6
3	0.05	34.76	8.22	11.19	0.00	12.69	0.13	107.30	28.42	0.00	203	3
4	67.14	0.01	0.00	0.01	0.03	12.96	0.00	0.50	24.72	35.82	141	5
5	0.00	0.00	2.61	0.00	0.00	32.83	40.93	0.01	38.93	113.68	229	5
6	9.78	7.57	9.13	32.75	45.54	41.61	55.86	0.00	23.30	27.31	253	1
7	136.33	49.90	188.59	0.14	118.60	50.91	0.07	20.92	46.59	107.96	720	1
8	19.43	3.24	0.00	0.04	30.55	35.55	26.00	66.23	8.57	0.01	190	3
9	10.26	0.00	59.66	23.14	5.05	0.00	0.01	0.02	0.01	172.73	271	5
10	2.06	0.16	0.00	0.10	0.16	0.06	0.00	0.06	26.59	0.00	29	5

赤字は 0.1L/min 以上の処分孔

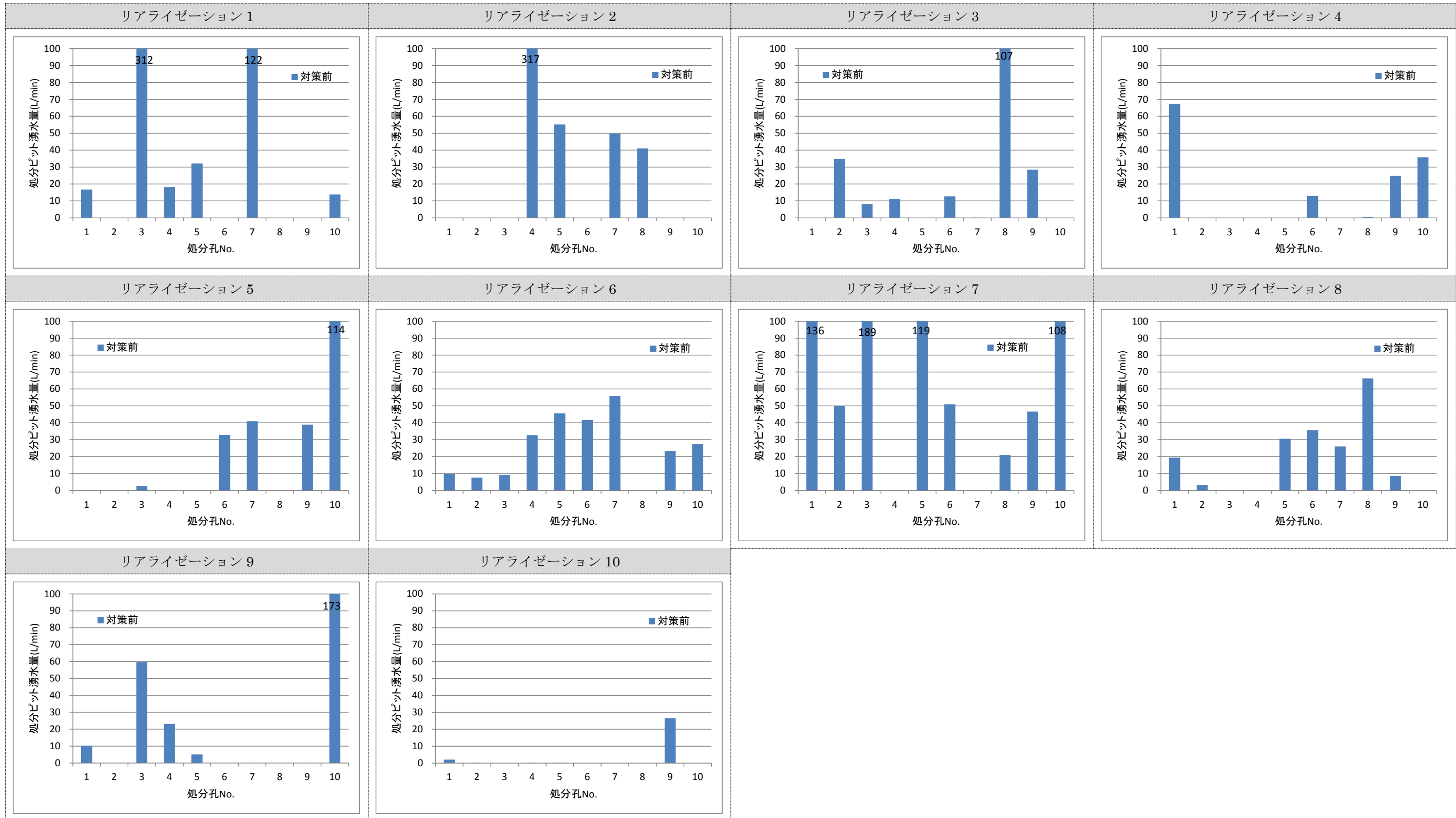


図 11.9-2 処分孔毎の湧水量

11.9.2 坑道 5m 区間湧水量

各リアライゼーションの坑道沿い 5m ごとに坑道湧水量を集計した結果を図 11.9-3～図 11.9-12 に示す。処分孔掘削前に比べやや湧水量が減っていることが分かる。

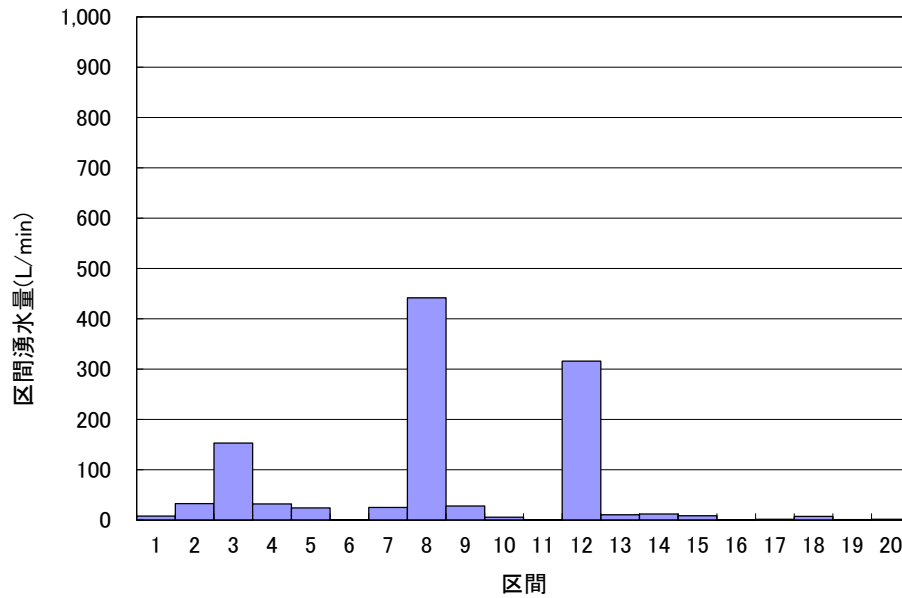


図 11.9-3 区間湧水量集計結果 (HL12_01)

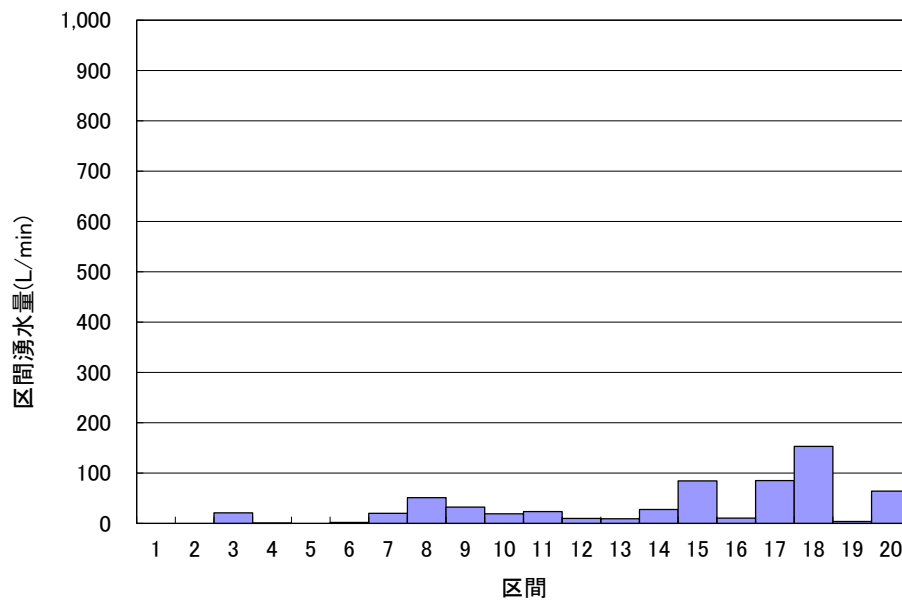


図 11.9-4 区間湧水量集計結果 (HL12_02)

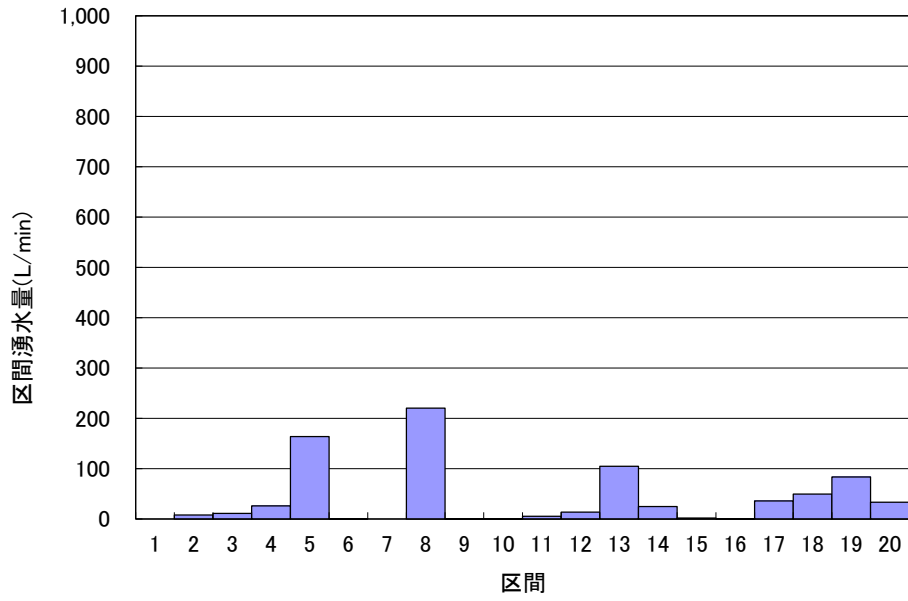


図 11.9-5 区間湧水量集計結果 (HL12_03)

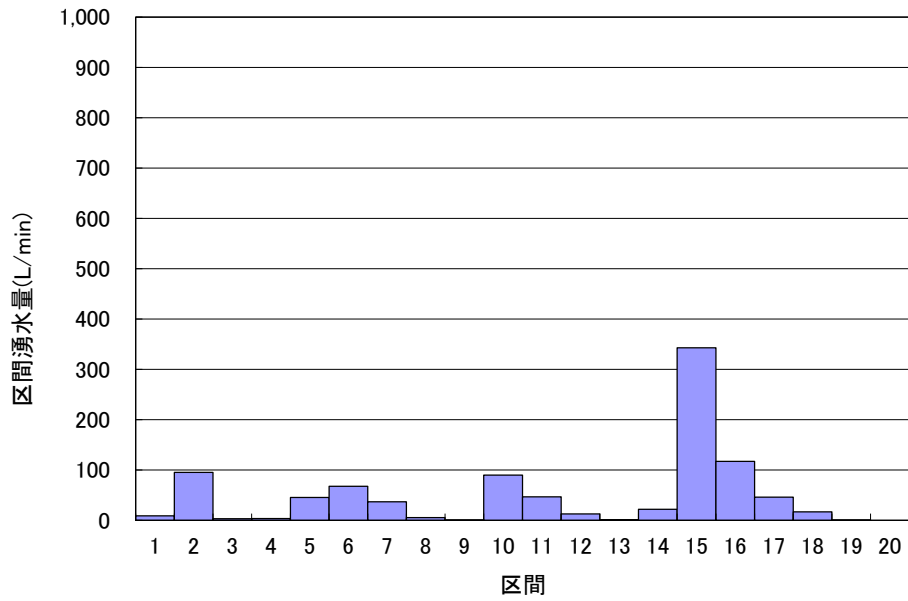


図 11.9-6 区間湧水量集計結果 (HL12_04)

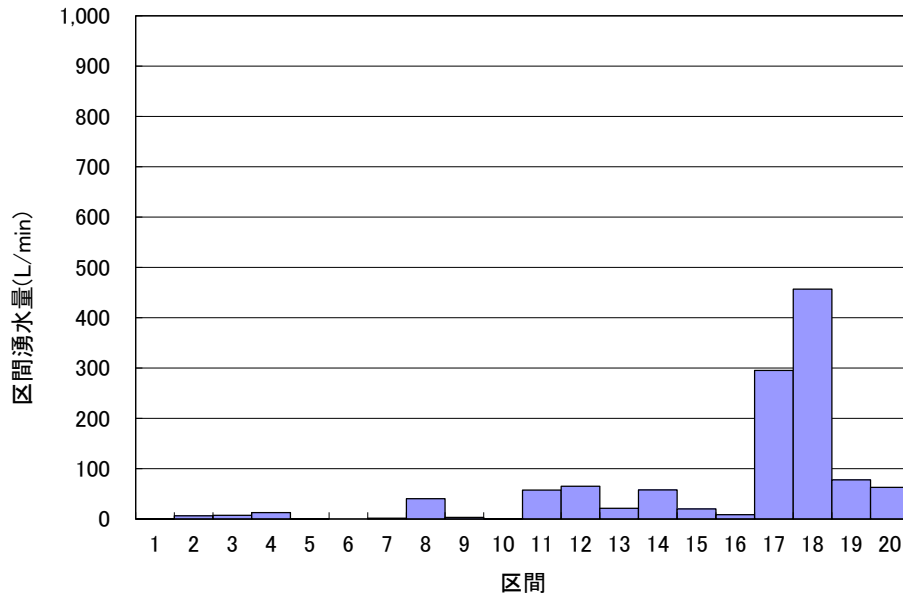


図 11.9-7 区間湧水量集計結果 (HL12_05)

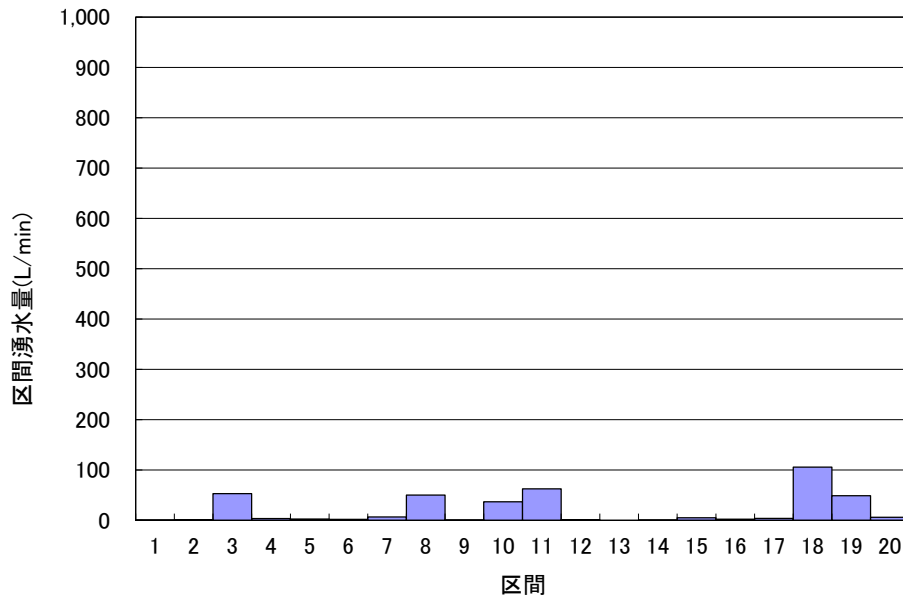


図 11.9-8 区間湧水量集計結果 (HL12_06)

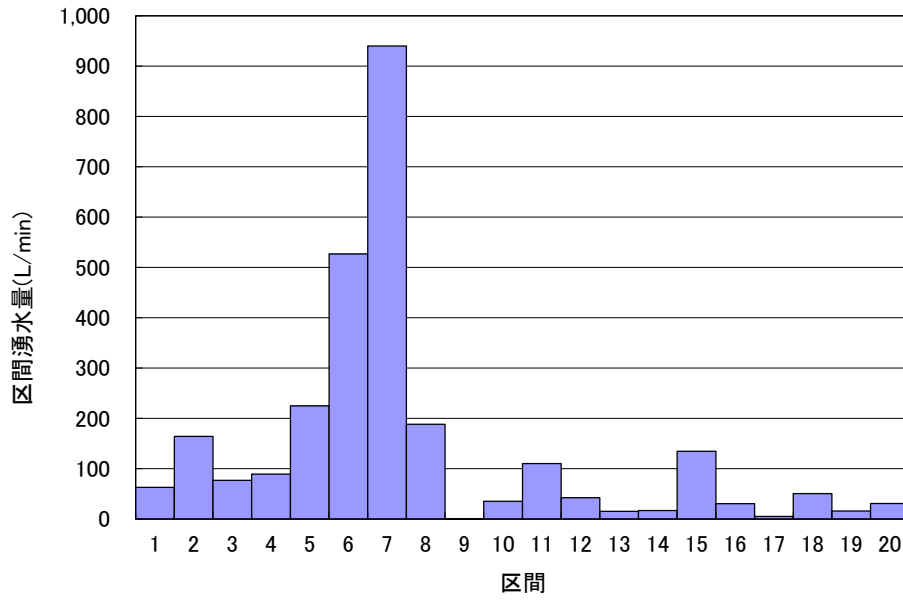


図 11.9-9 区間湧水量集計結果 (HL12_07)

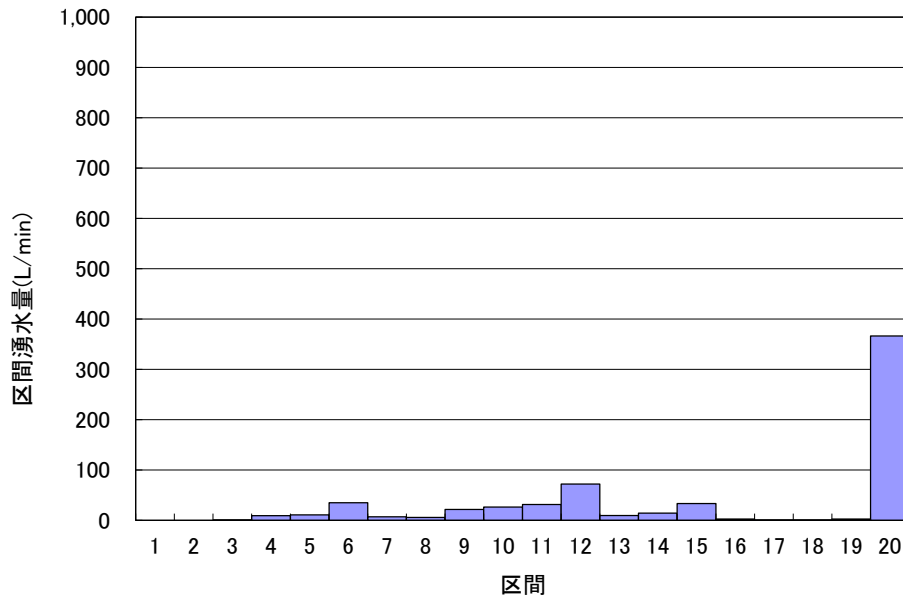


図 11.9-10 区間湧水量集計結果 (HL12_08)

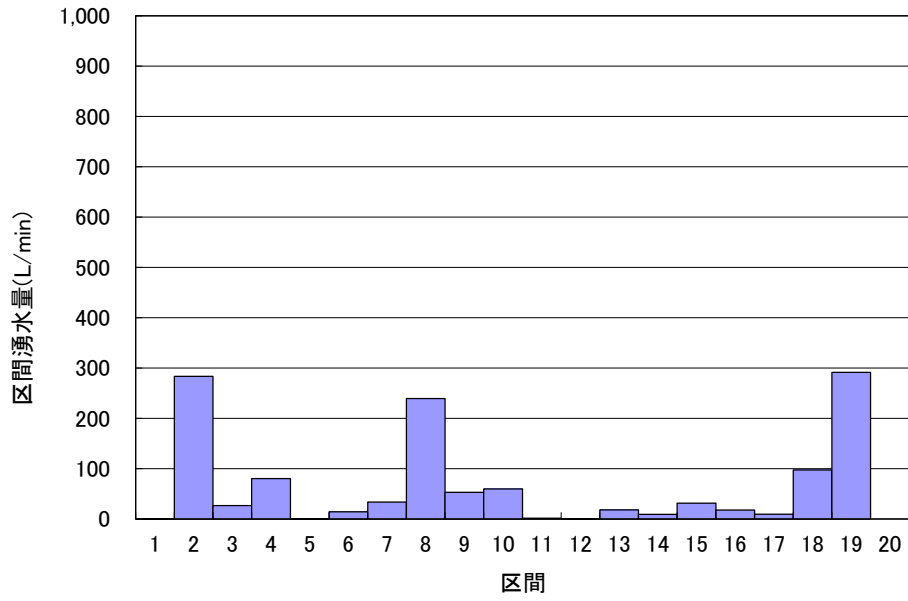


図 11.9-11 区間湧水量集計結果 (HL12_09)

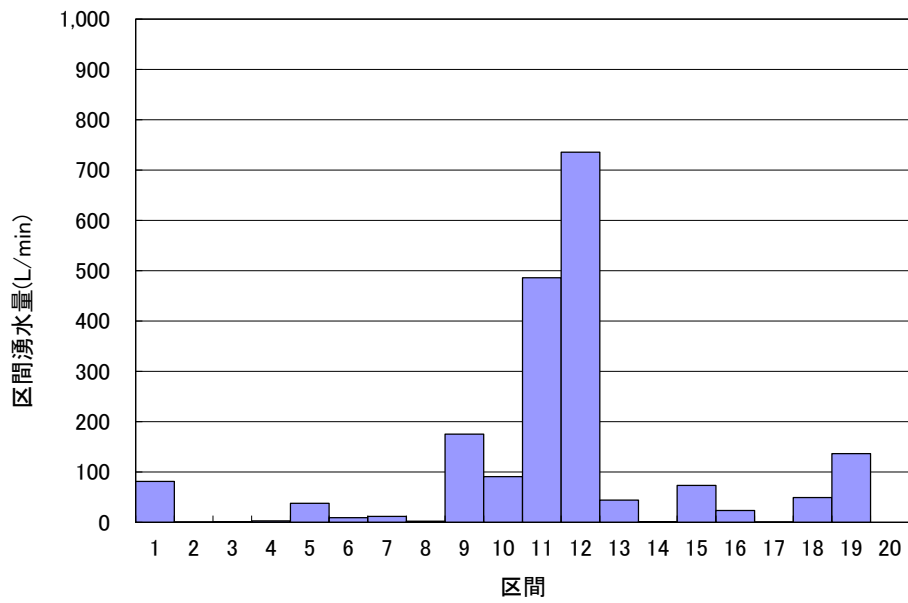


図 11.9-12 区間湧水量集計結果 (HL12_10)

11.9.3 坑道及び処分孔と交差する割れ目の流量

坑道に交差する割れ目の本数は各リアライゼーションで表 11-7 に示すとおりである。この内、6.0L/min 以上の流量をもつ割れ目の流量を表 11-9 に示す。また、各処分孔と交差する割れ目の内、0.1L/min 以上の流量をもつ割れ目の本数を、図 11.8-8 に示す。これらの割れ目の流量を表 11-10 に示す。

表 11-7 坑道に交差する割れ目の本数

リアライゼーション	流入量6.0L/min以上の割れ目本数	流入量0.1L/min以上の割れ目本数
1	16	43
2	17	42
3	16	41
4	21	40
5	16	30
6	11	31
7	31	55
8	20	59
9	24	45
10	18	44

表 11-8 処分孔と交差する割れ目の本数

リアライゼーション	流入量0.1L/min以上の割れ目本数									
	処分孔No.									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2		4	5	2		3			1
2				4	1		3	5		
3		1	1	4		1	1	3	1	
4	2					3		1	3	2
5			1			6	5		4	4
6	3	1	1	2	2	4	1		3	3
7	3	4	2		1	3		2	1	5
8	3	1			3	5	5	3	1	
9	1		6	3	2					1
10	3	1			1				3	

表 11-9 坑道に交差する主要割れ目の流量算定結果（処分孔掘削時）

リアライゼーション1		リアライゼーション2		リアライゼーション3		リアライゼーション4		リアライゼーション5		リアライゼーション6		リアライゼーション7		リアライゼーション8		リアライゼーション9		リアライゼーション10	
HL12_01pit		HL12_02pit		HL12_03pit		HL12_04pit		HL12_05pit		HL12_06pit		HL12_07pit		HL12_08pit		HL12_09pit		HL12_10pit	
割れ目 番号	流量(L/min)	割れ目 番号	流量(L/min)	割れ目 番号	流量(L/min)	割れ目 番号	流量(L/min)	割れ目 番号	流量(L/min)	割れ目 番号	流量(L/min)	割れ目 番号	流量(L/min)	割れ目 番号	流量(L/min)	割れ目 番号	流量(L/min)	割れ目 番号	流量(L/min)
6454	519.5	12526	110.0	16651	150.7	17366	423.5	4014	565.2	10810	93.7	3384	920.5	7105	264.6	4438	270.8	4427	855.4
21301	301.4	10782	70.2	12689	125.2	14300	115.4	12033	107.6	7268	74.8	9732	483.4	8591	94.4	20205	258.9	18827	712.0
21036	135.8	2542	69.4	9528	87.2	3824	107.9	4978	97.3	7789	44.5	16968	397.2	5198	61.1	10445	143.2	13989	106.1
1952	46.8	13563	55.2	19751	73.0	16513	92.9	20779	71.0	12835	30.5	17077	186.4	3193	32.7	473	140.3	10137	98.9
3537	37.7	12656	54.9	16196	62.8	10715	49.9	10626	56.3	15951	29.3	18801	99.9	2848	26.3	3843	79.4	18195	81.1
2354	37.3	20216	52.8	13953	60.2	12600	48.9	8627	56.1	6207	26.7	6917	79.6	5385	25.3	16670	74.4	3486	69.4
3125	31.6	15269	42.4	10976	44.0	10337	31.7	16403	44.2	17969	15.6	15881	75.6	8755	22.2	18548	45.2	731	43.8
17495	31.5	13903	23.1	2568	35.7	11590	28.6	14975	39.1	11829	14.0	6097	53.2	3772	17.1	19672	28.2	46	30.2
5345	27.1	15847	20.4	17795	32.0	17732	18.8	17816	30.8	19340	12.2	11581	42.8	19316	15.2	13214	26.4	11775	24.9
15572	22.7	15403	14.9	20211	27.9	1456	12.7	8724	26.6	18349	11.7	2706	41.9	15542	14.5	14695	24.8	4029	19.5
16674	14.1	13985	11.3	14978	21.3	4459	12.2	13928	18.5	16858	6.9	17787	39.8	8090	13.0	3707	24.2	2908	13.8
1498	13.4	5472	10.7	6714	13.3	3565	10.3	13860	15.6			15997	38.8	17327	12.2	18836	24.0	14332	12.3
16242	10.9	12659	7.7	14377	12.9	20179	9.8	14843	14.2			3969	37.8	19876	11.0	800	23.7	4509	11.8
11923	9.4	18286	7.6	20116	10.9	17180	9.1	5843	12.7			7573	35.2	20291	8.7	2711	20.8	10382	10.2
13561	7.2	16277	6.8	16625	10.2	1722	8.2	1560	10.4			16329	33.6	733	8.1	508	20.5	5824	9.0
15443	7.0	14167	6.3	17600	8.7	365	7.7	288	8.3			9289	33.1	19161	8.1	2031	12.4	18239	8.3
		13972	6.0			17841	7.6					11352	30.4	20225	7.8	13491	12.4	3811	6.5
						8734	7.4					11521	28.8	19499	7.4	20141	12.3	4710	6.5
						8808	6.7					5690	27.4	9091	6.8	14157	12.3		
						11949	6.6					16237	26.5	6722	6.3	17540	11.8		
						16877	6.1					15575	23.5			14884	10.4		
												7129	20.7			16942	9.3		
												15096	19.1			19907	9.0		
												11609	18.0			17825	6.2		
												17206	14.9						
												17404	14.5						
												10125	13.7						
												4440	9.5						
												12288	7.3						
												16072	6.3						
												1478	6.3						

表 11-10 処分孔に交差する主要割れ目の流量算定結果 (処分孔掘削時)

リアライゼーション1			リアライゼーション2			リアライゼーション3			リアライゼーション4			リアライゼーション5			
HL12_01pit	割れ目番号	流量(L/min)	HL12_02pit	割れ目番号	流量(L/min)	HL12_03pit	割れ目番号	流量(L/min)	HL12_04pit	割れ目番号	流量(L/min)	HL12_05pit	割れ目番号	流量(L/min)	
1	10297	10.0	4	1738	10.0	2	18991	34.8	1	5270	13.6	3	4329	2.6	
	11039	6.7		11566	2.9	3	19751	8.2		10206	53.6	6	2237	0.6	
3	665	1.1		15269	302.4	4	189	7.9	6	1986	6.2		10858	13.7	
	3537	8.3		16385	0.8		3105	2.1		3089	2.0		10930	17.5	
	6454	258.1	5	12860	55.2		14194	0.9		17180	4.6		16408	0.2	
4	7021	44.7	7	4712	10.2	6	20425	0.2	8	21748	0.5		7	19633	0.3
	4026	0.8		13639	27.3		6	3909	12.7	9	10715	4.8		20128	0.5
	11216	4.1	19499	12.1	7	13745	0.1	9	17366		18.2	7		6796	1.2
	12066	5.4	3891	0.4	8	1353	1.1		10	20179	1.8			10543	0.4
12887	4.0	8371	12.2	8		9528	67.0	10		350	0.7			11873	4.3
21496	3.9	10284	4.9	9	10976	39.1	10		10683	35.1	17816		31.4		
5	11216	8.1	10782		16.5	9		17873	28.4	9	19588		1.6	4349	1.3
7	12066	24.0	14423	6.9	10									8627	7.7
	1498	1.9	9	13860										21.7	
	14531	8.3		18988										8.3	
21301	111.8	3366		30.5											
10	9069	13.9		4349						1.0					
10														6066	23.0
														8627	59.2

リアライゼーション6			リアライゼーション7			リアライゼーション8			リアライゼーション9			リアライゼーション10		
HL12_06pit	割れ目番号	流量(L/min)	HL12_07pit	割れ目番号	流量(L/min)	HL12_08pit	割れ目番号	流量(L/min)	HL12_09pit	割れ目番号	流量(L/min)	HL12_10pit	割れ目番号	流量(L/min)
1	380	3.7	1	5019	0.3	1	2848	12.3	1	19782	10.2	1	3920	0.4
	9404	5.2		6097	120.6		12645	1.8		1972	14.4		6565	0.2
	18820	0.9		17404	15.4		19499	5.3		3843	5.5		11775	1.5
2	9404	7.6	2	ゆるみ域	0.2	2	17832	3.2	3	5662	6.0	2	2646	0.2
3	18054	9.1		3384	22.1	5	7234	1.5		11175	8.8	5	4427	0.2
4	2493	4.2		3969	18.2		10480	26.7		13062	3.2	9	1824	0.8
	7268	14.8		5806	4.0	16989	2.3	17825	21.9	2065	5.1			
5	7268	41.8	3	18801	5.4	6	1023	0.8	4	643	0.1	9	13989	20.7
	10250	3.8		16968	40.4		3247	6.9		4609	1.1			
6	4996	0.2	18476	148.2	5		3349	9.7	10445	21.9	5		8216	1.3
	11829	24.2	12732	118.6		6593	6.7	13491	3.7					
	14296	5.6	8792	6.4	6	11087	11.4	10	3069	3.1				
14723	11.5	9289	27.8	4943		0.7	11404		1.2					
7	7517	55.9	16329	16.7	7	6593	20.7		10	14884	22.2			
9	1495	6.9	8291	19.5		8	8591	0.9		10	16942	146.2		
	8877	4.9	11609	1.3			9091	0.4						
	17805	11.4	13479	46.5	11087		3.3							
10	6207	7.7	8	7385	0.4	8	11265	0.2	9	12915	63.8			
	6936	1.8		7573	78.6		20645	2.2						
	19340	17.8		8893	17.1		12075	8.6						
				15881	11.4									
			17996	0.4										

11.9.4 坑道壁面湧水量分布及び処分孔湧水量分布

各リアライゼーションの坑道壁面の湧水量分布を図 11.9-13～図 11.9-22 に示す。また、処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布を図 11.9-23～図 11.9-32 に示す。比較的半径の大きな割目と交差している処分孔で湧水も多い傾向にある。

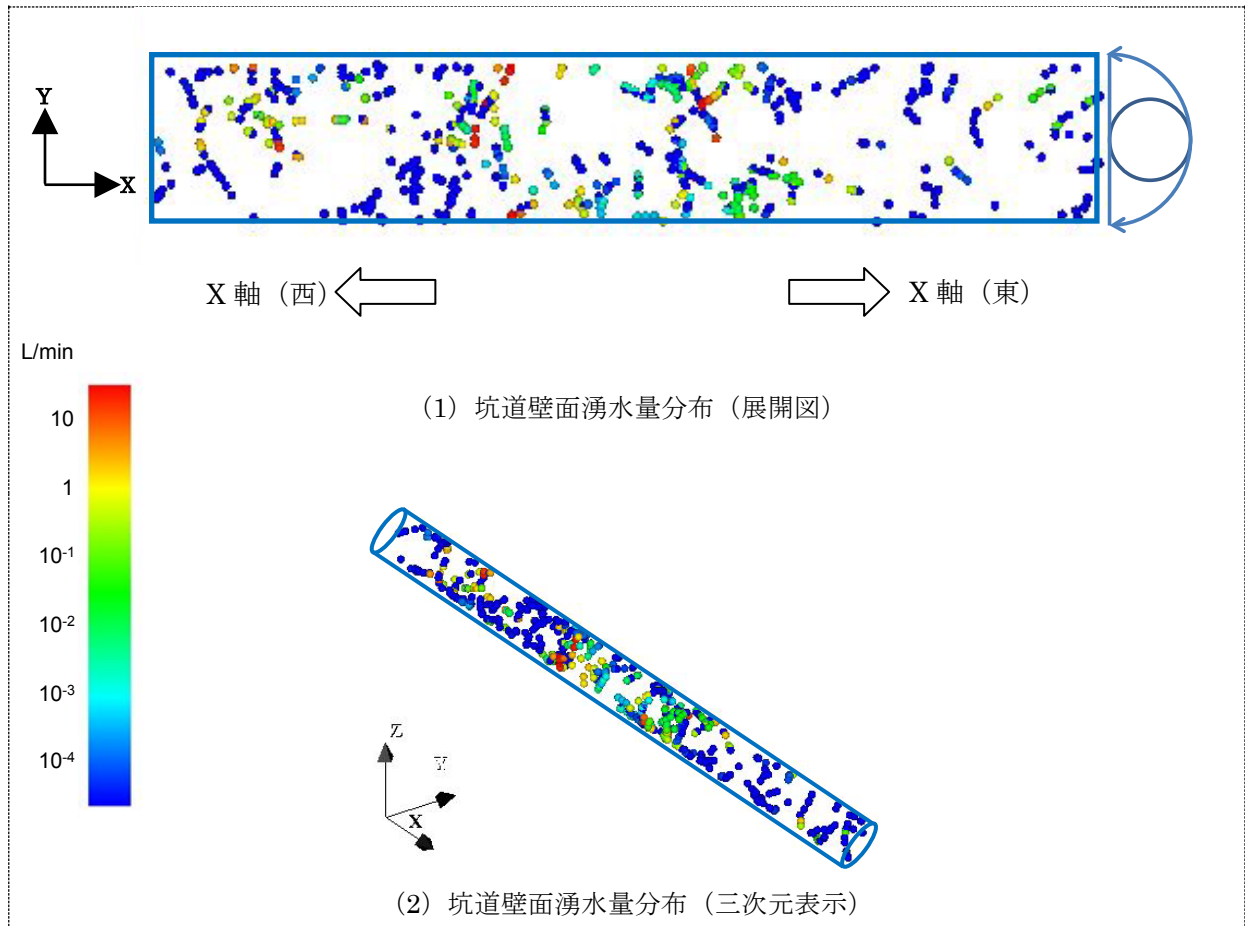


図 11.9-13 坑道壁面の湧水量分布 (HL12_01)

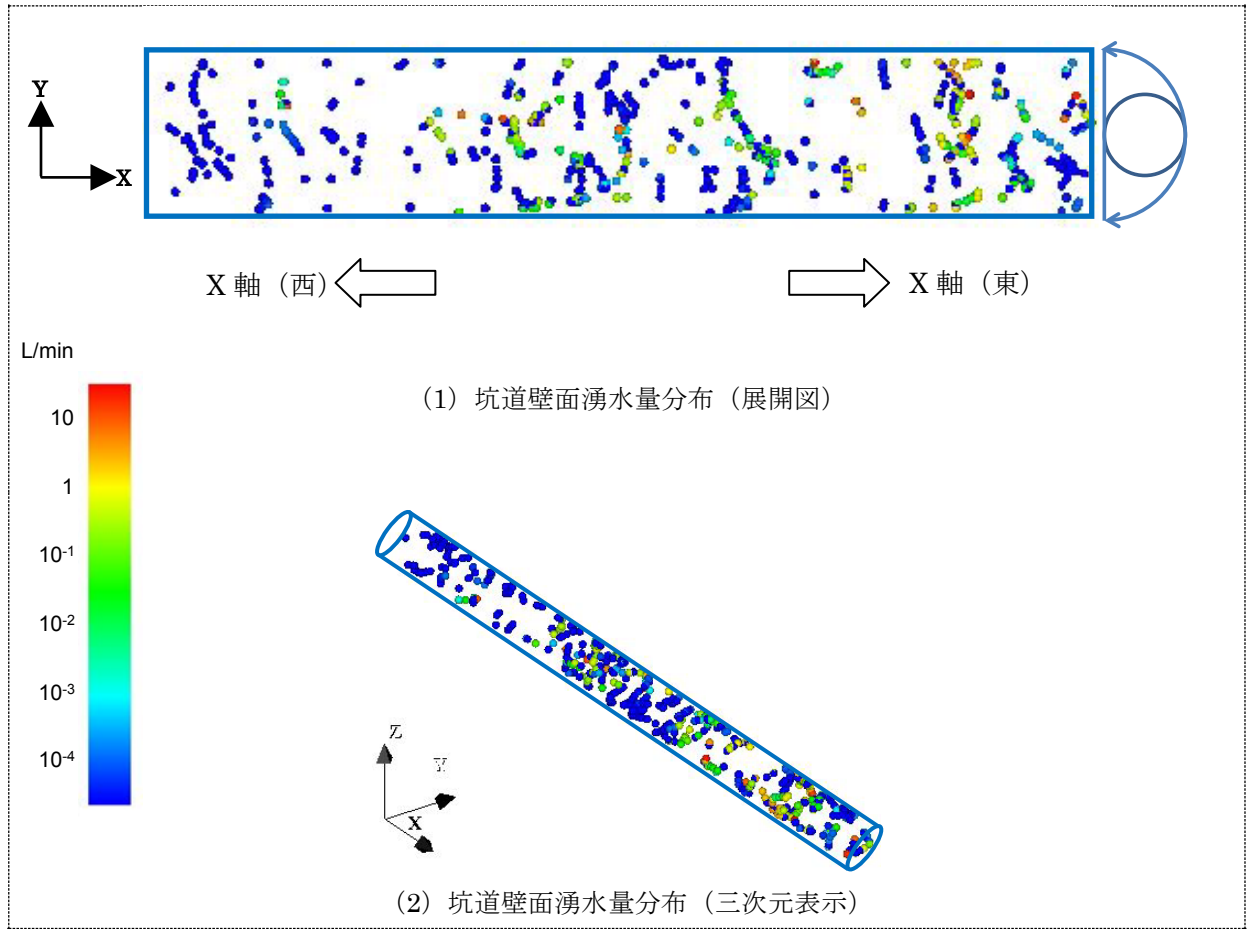


図 11.9-14 坑道壁面の湧水量分布 (HL12_02)

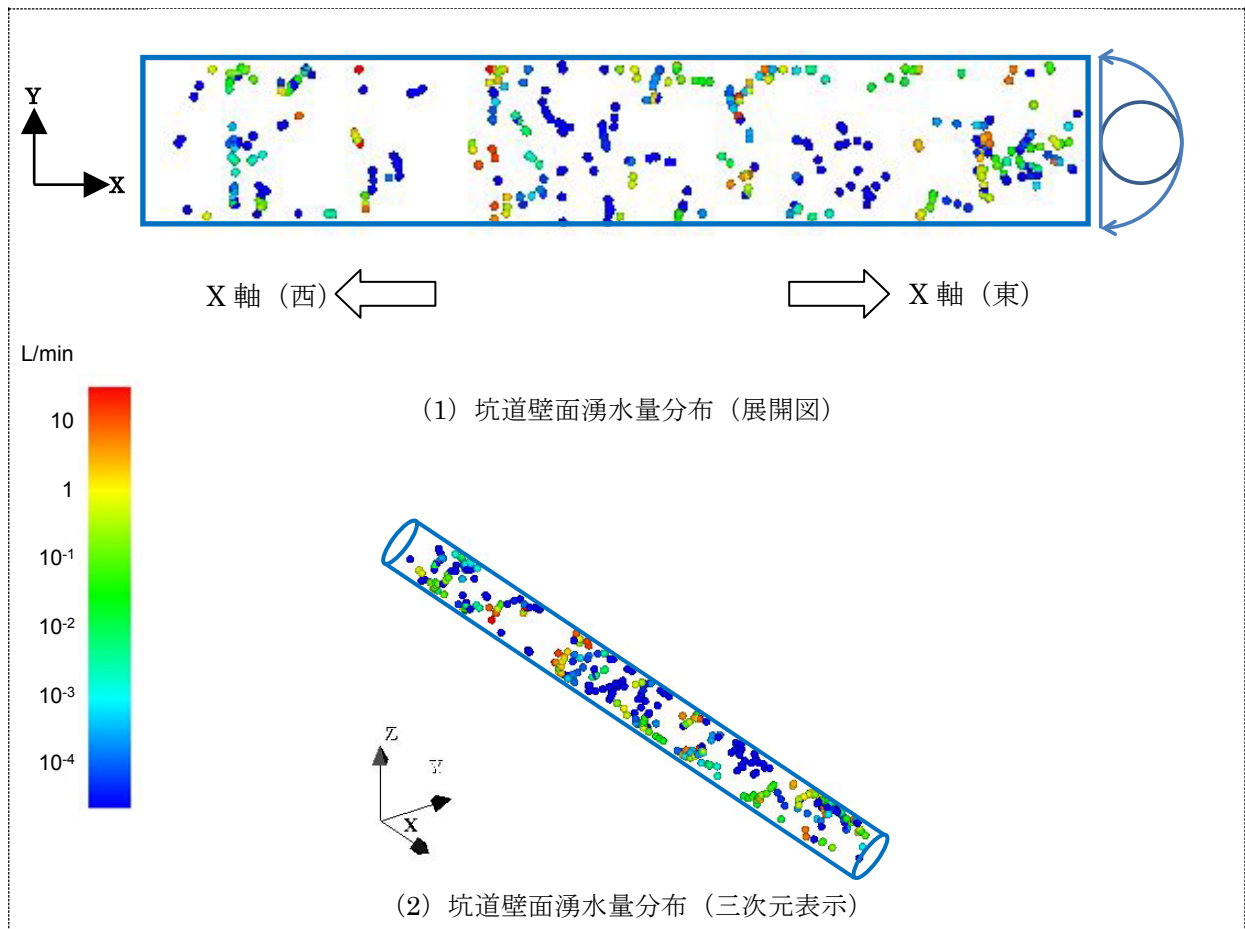


図 11.9-15 坑道壁面の湧水量分布 (HL12_03)

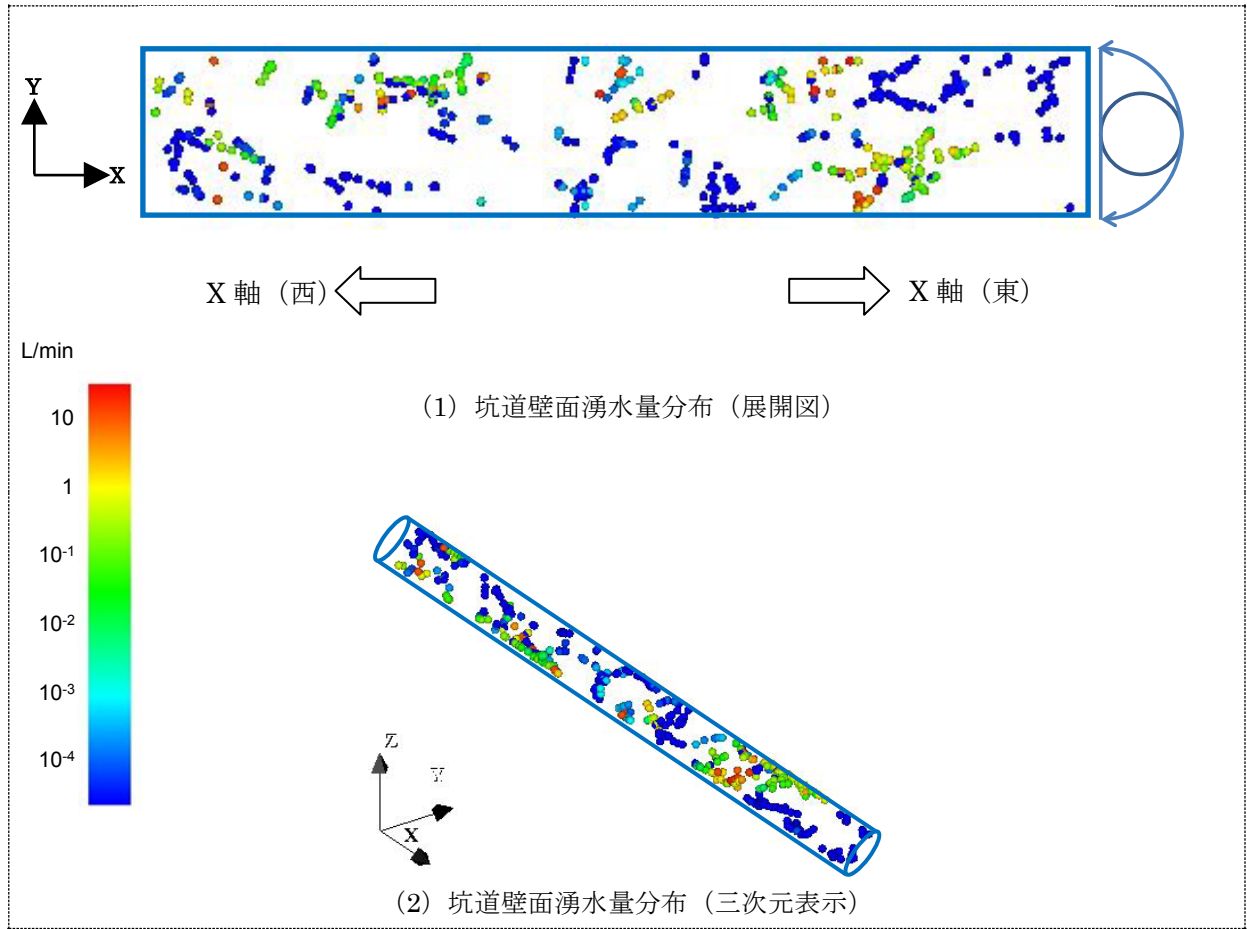


図 11.9-16 坑道壁面の湧水量分布 (HL12_04)

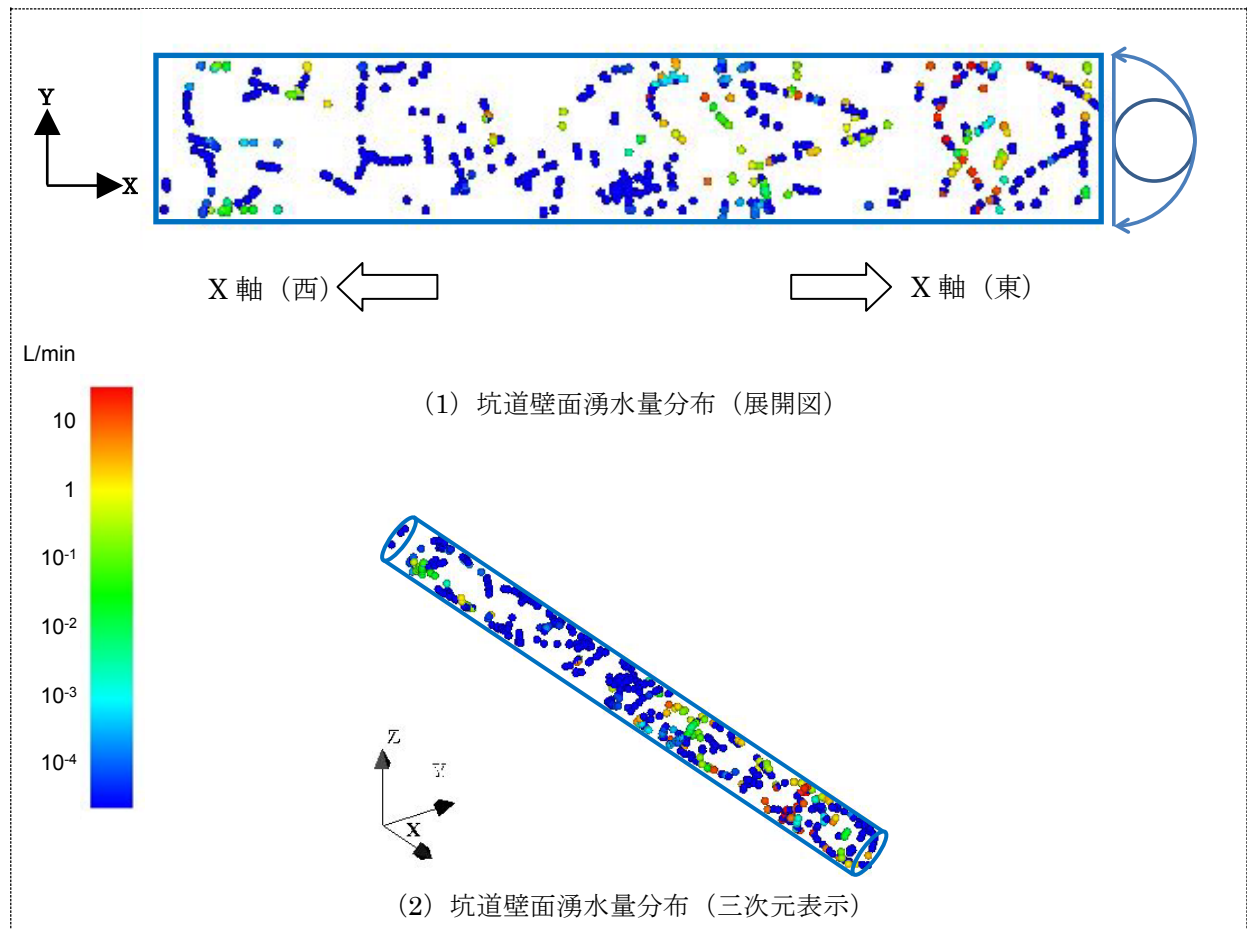


図 11.9-17 坑道壁面の湧水量分布 (HL12_05)

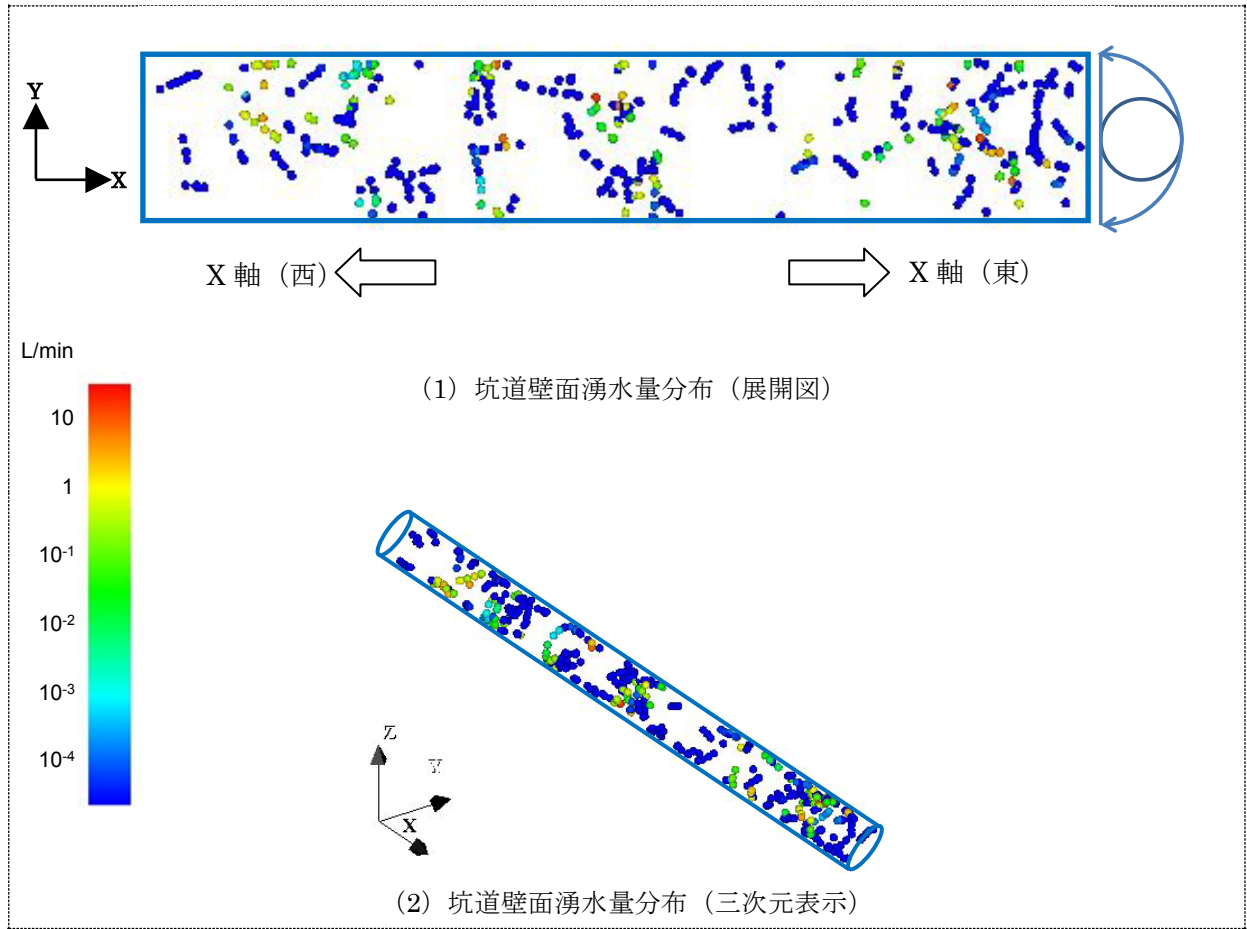


図 11.9-18 坑道壁面の湧水量分布 (HL12_06)

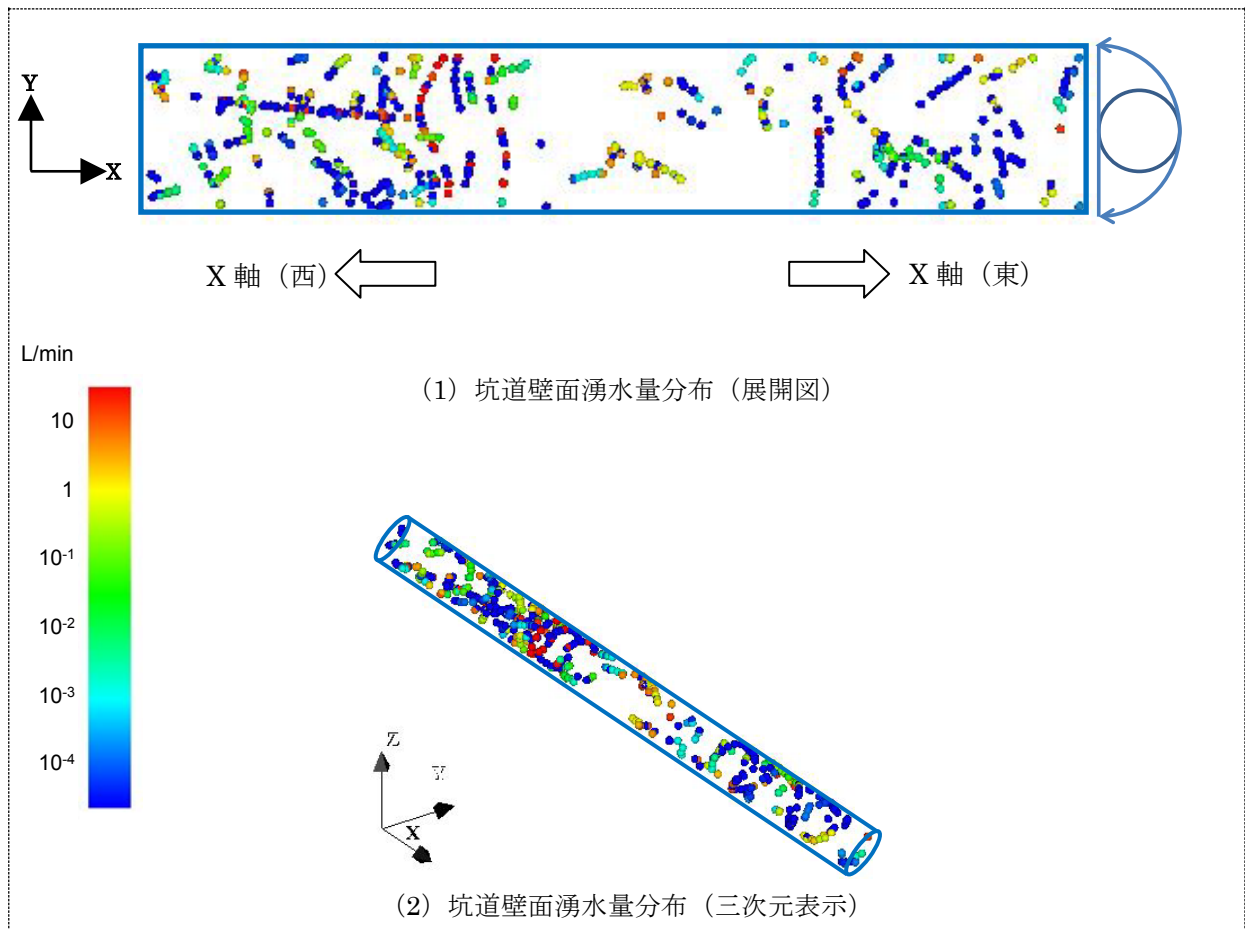


図 11.9-19 坑道壁面の湧水量分布 (HL12_07)

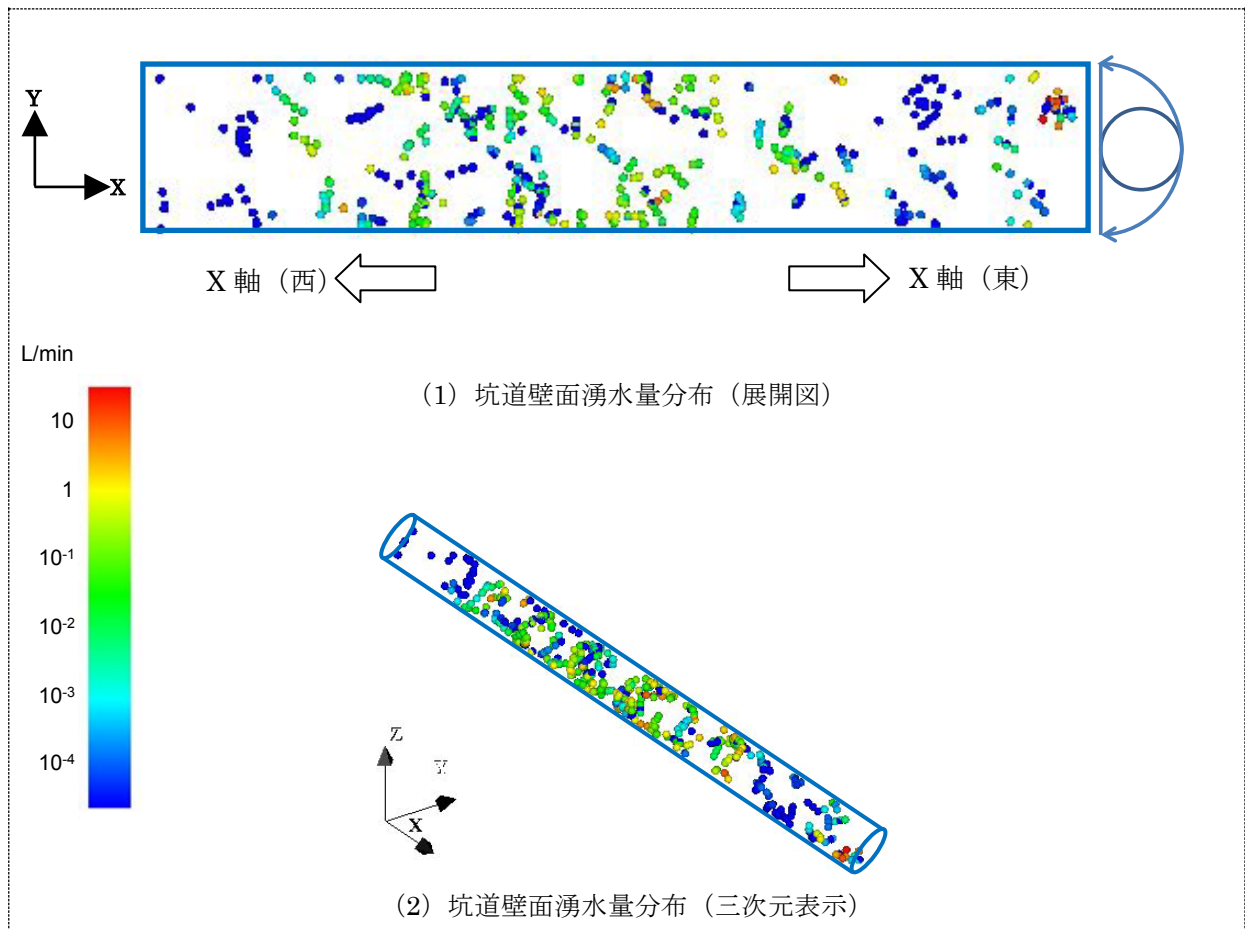


図 11.9-20 坑道壁面の湧水量分布 (HL12_08)

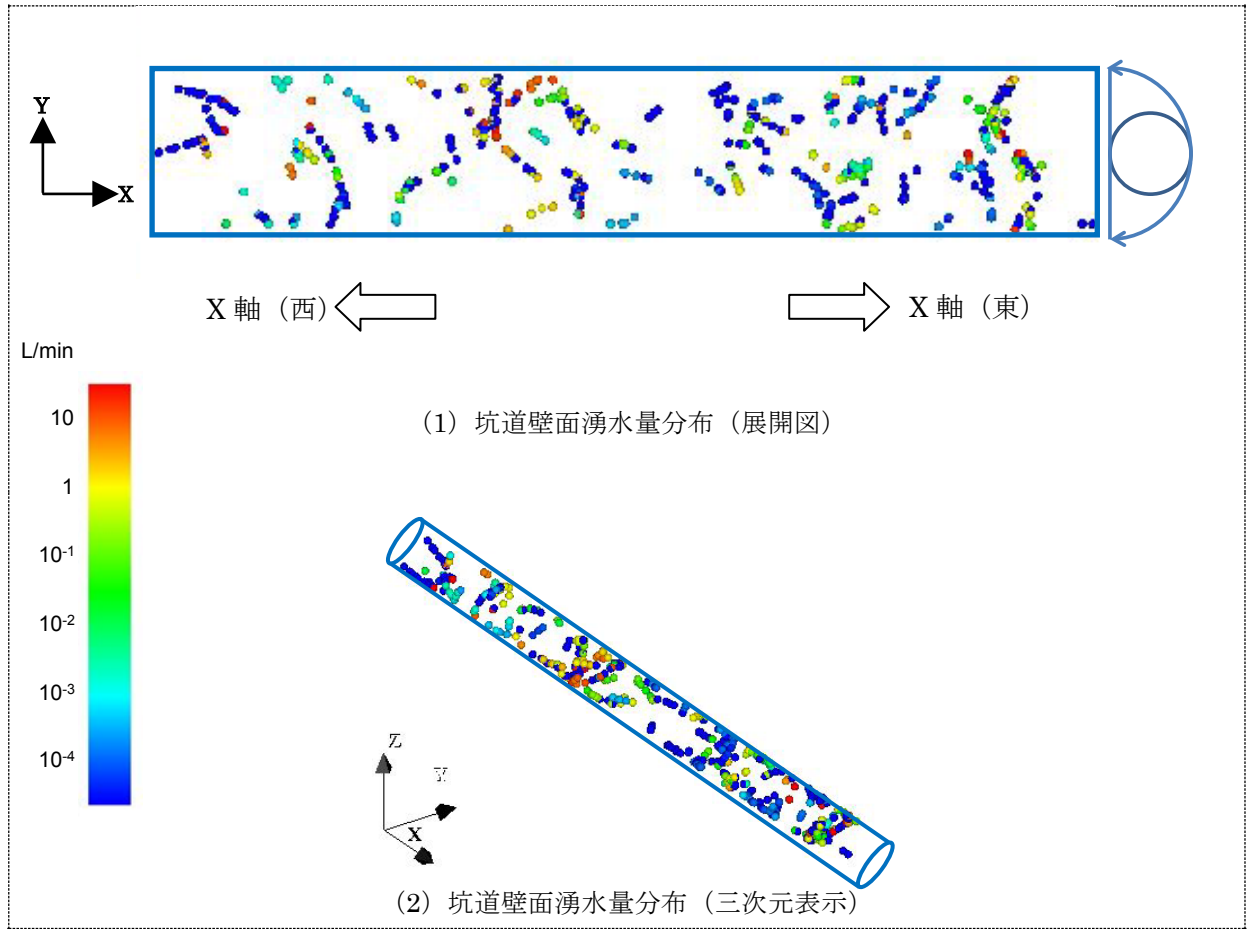


図 11.9-21 坑道壁面の湧水量分布 (HL12_09)

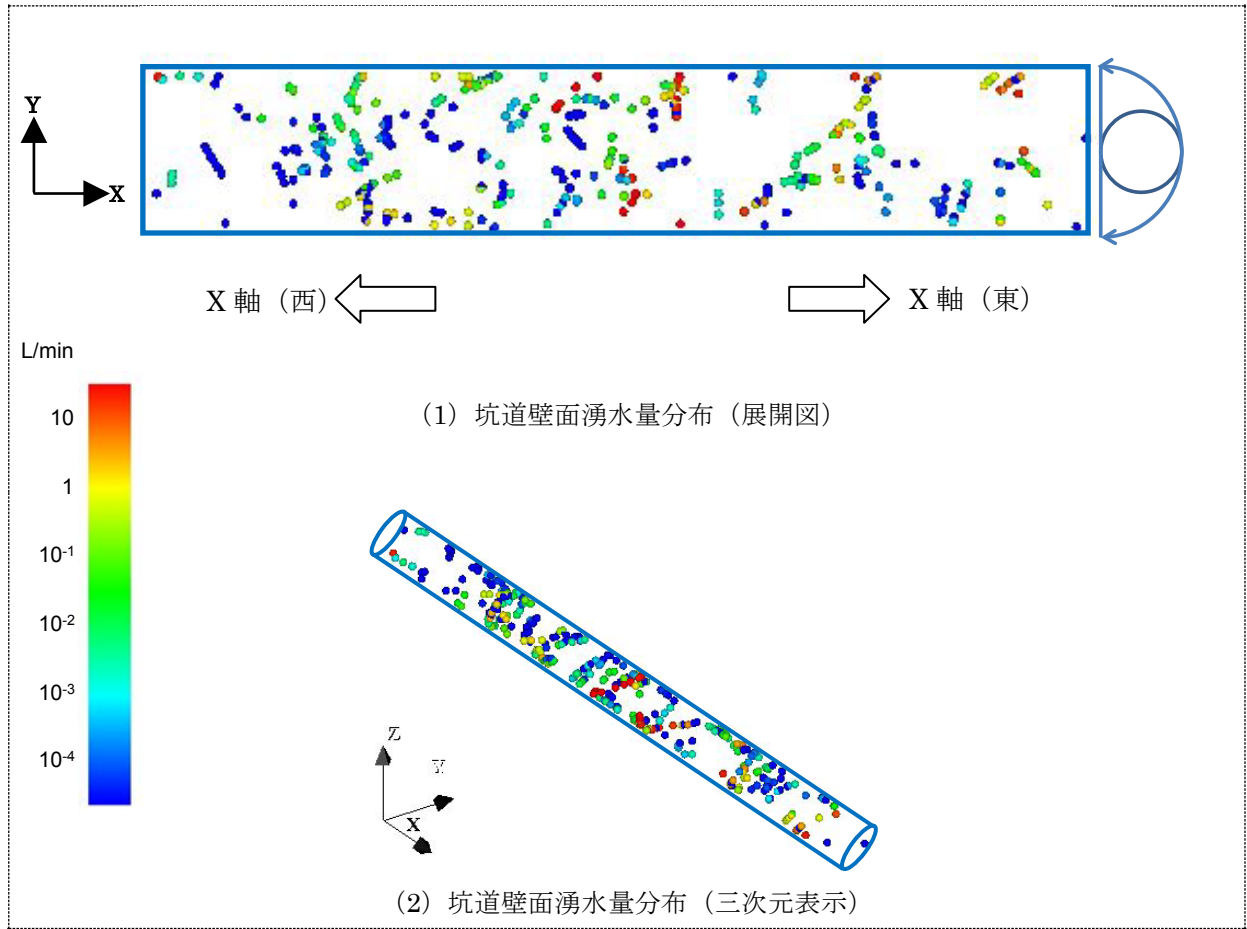


図 11.9-22 坑道壁面の湧水量分布 (HL12_10)

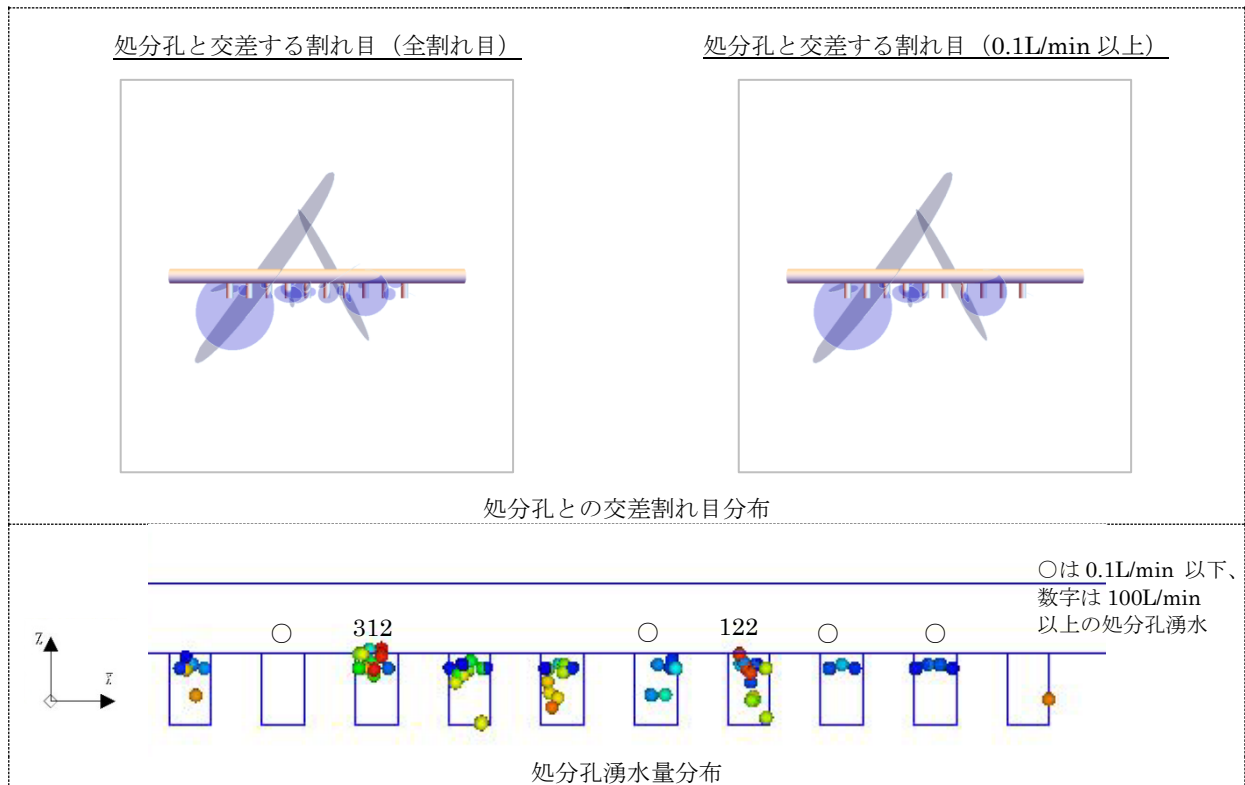


図 11.9-23 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布（HL12_01）

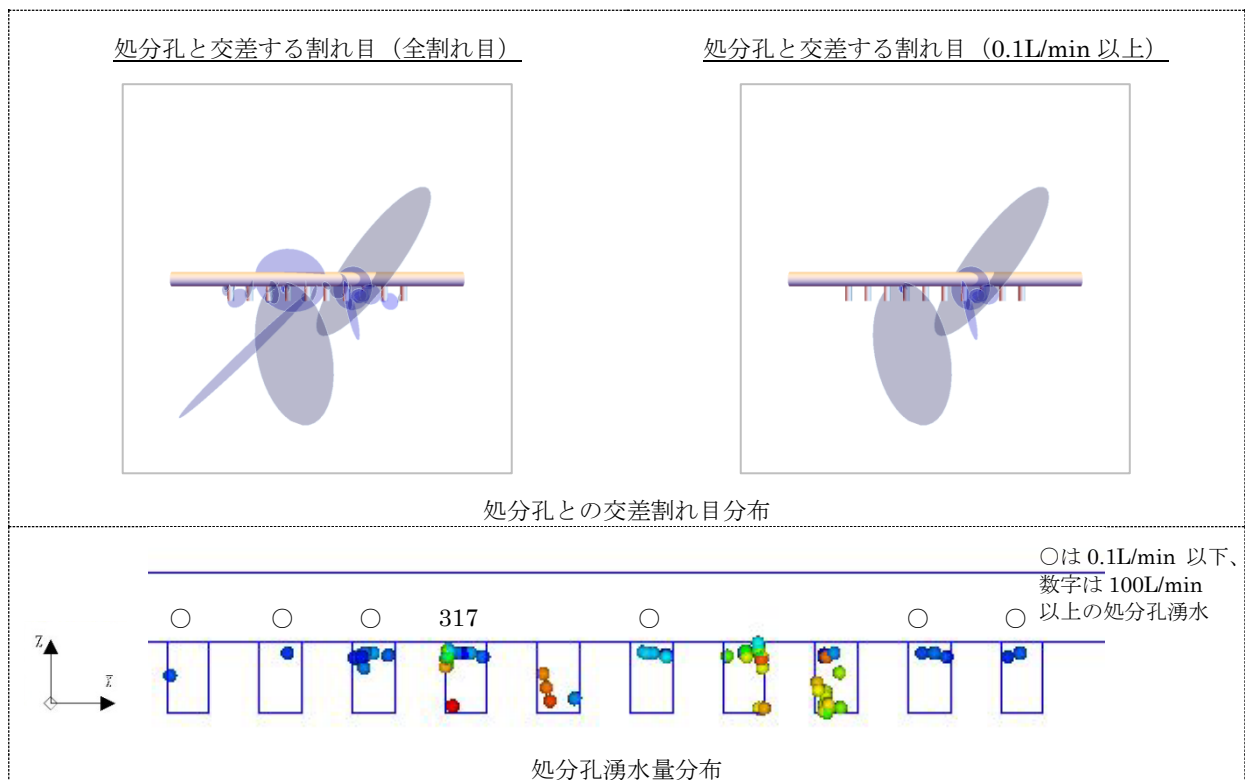


図 11.9-24 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布（HL12_02）

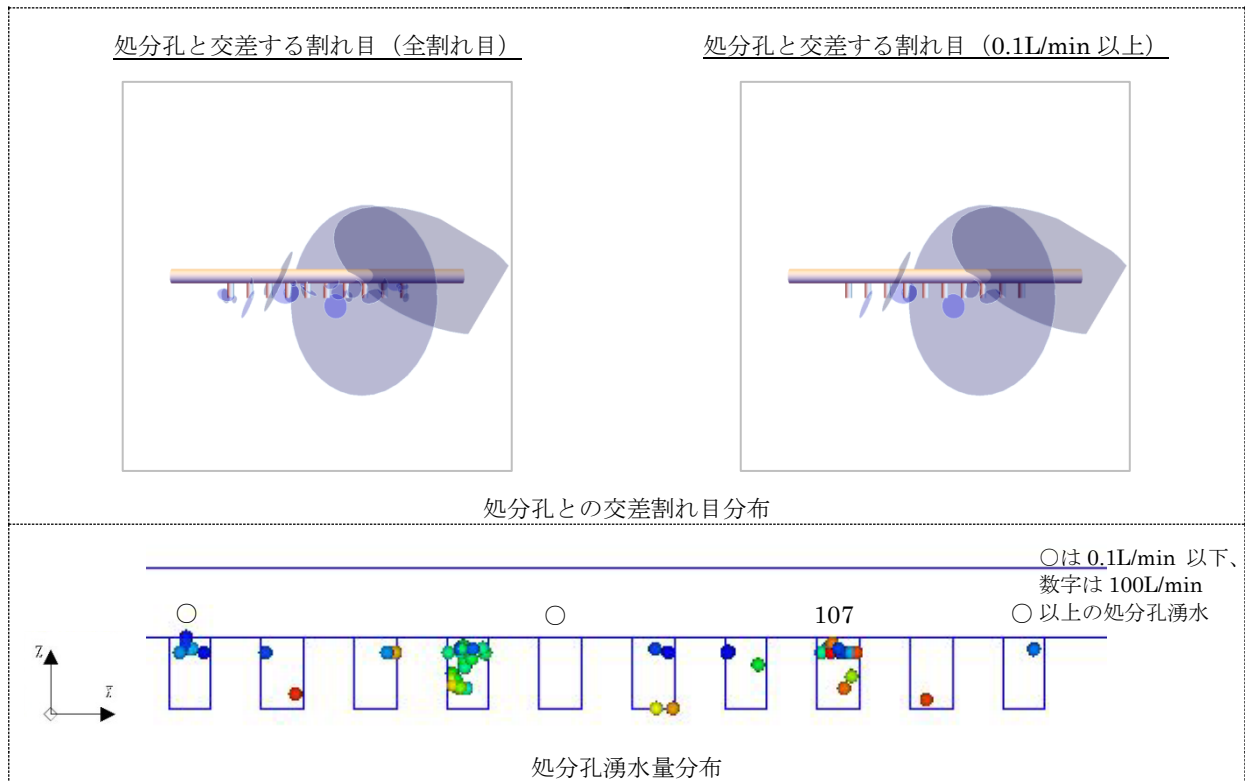


図 11.9-25 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HL12_03)

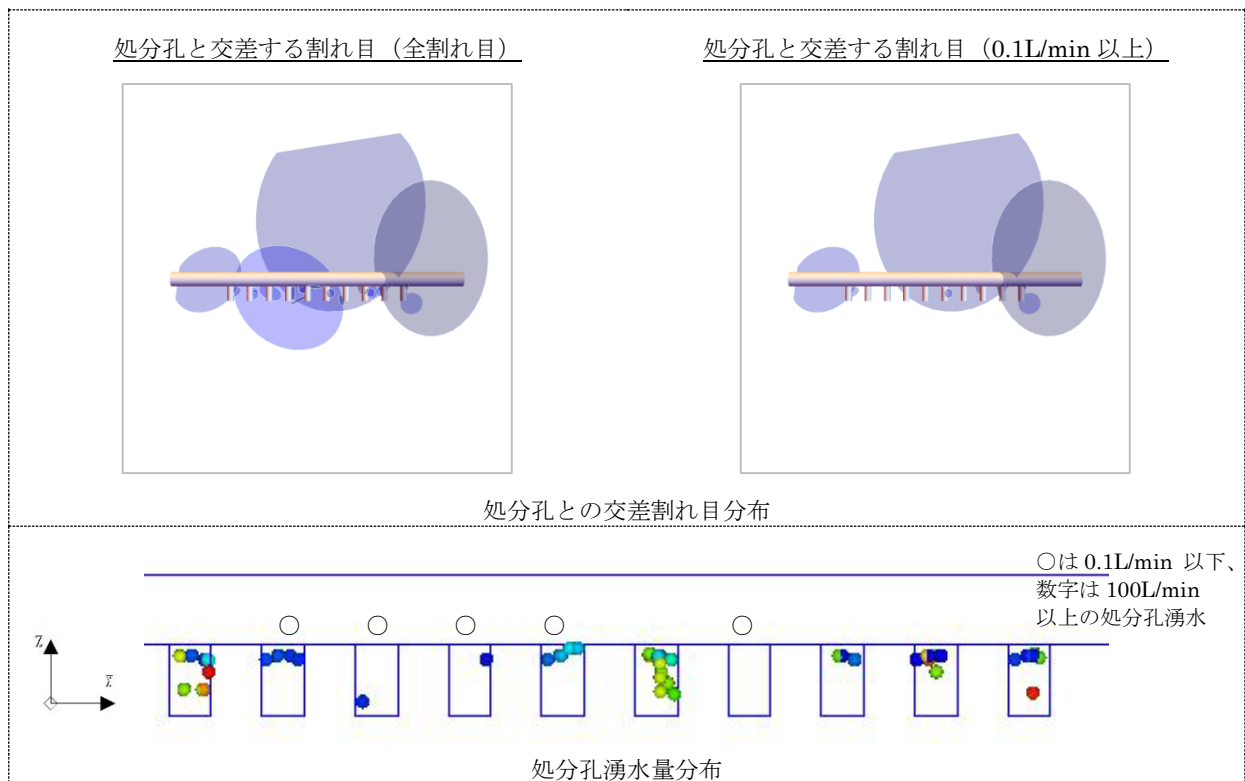


図 11.9-26 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HL12_04)

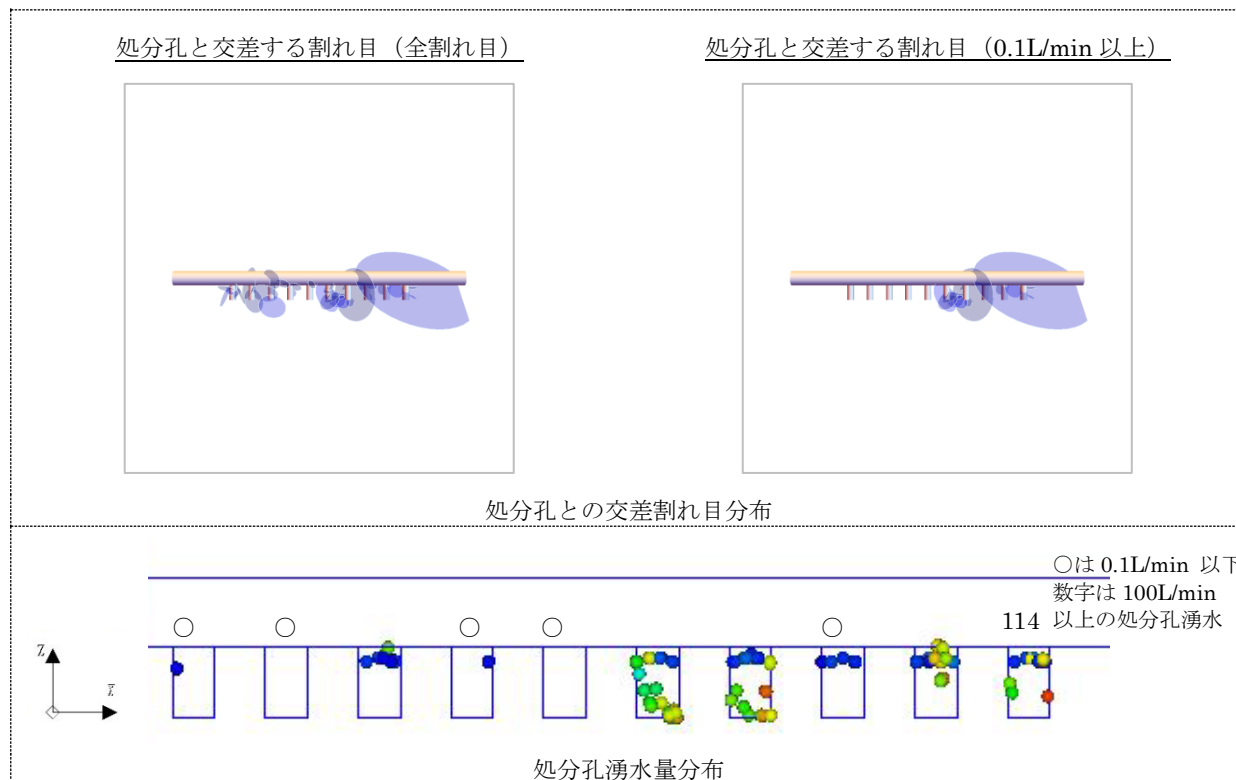


図 11.9-27 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HL12_05)

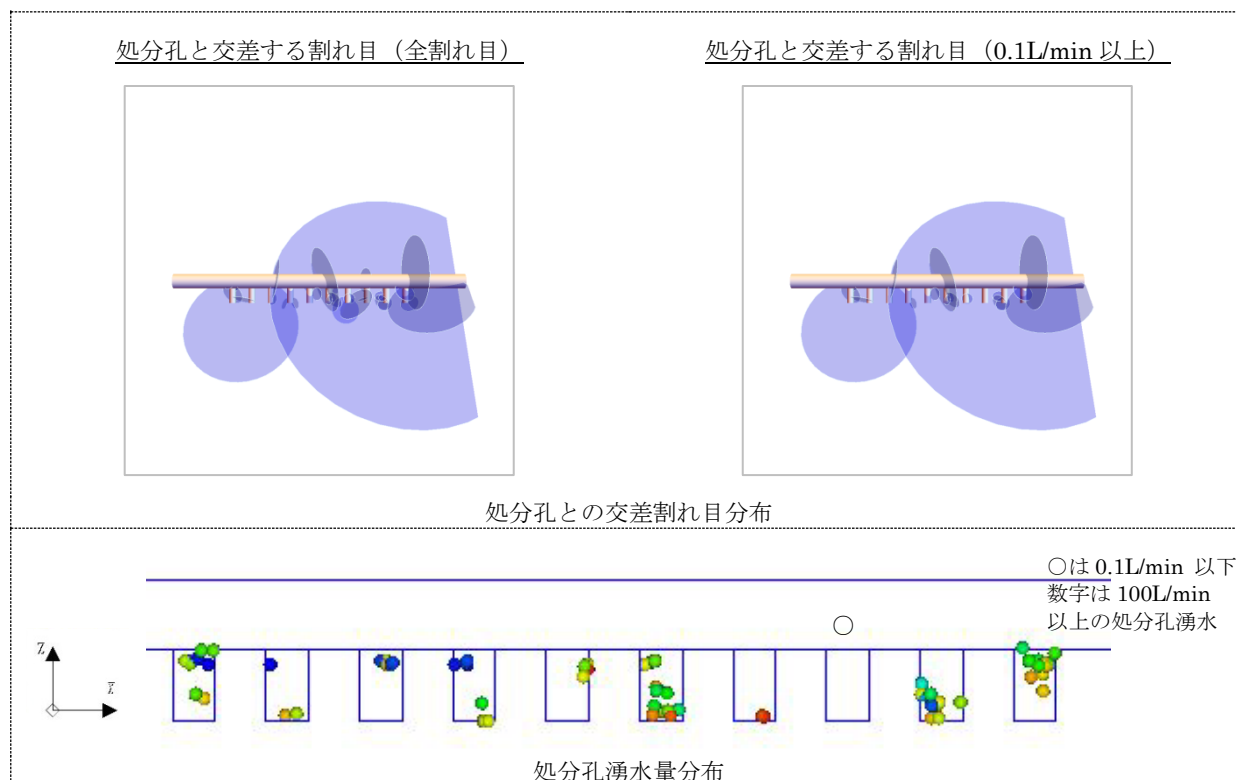


図 11.9-28 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HL12_06)

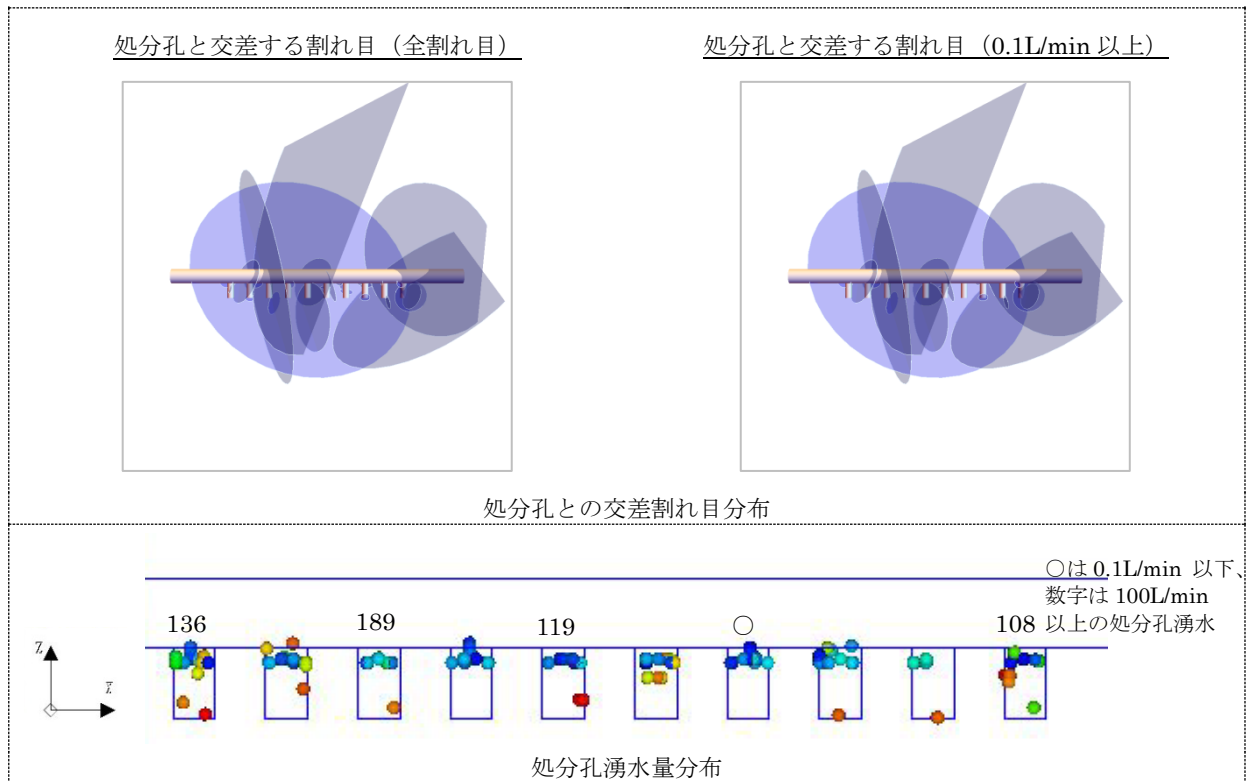


図 11.9-29 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HL12_07)

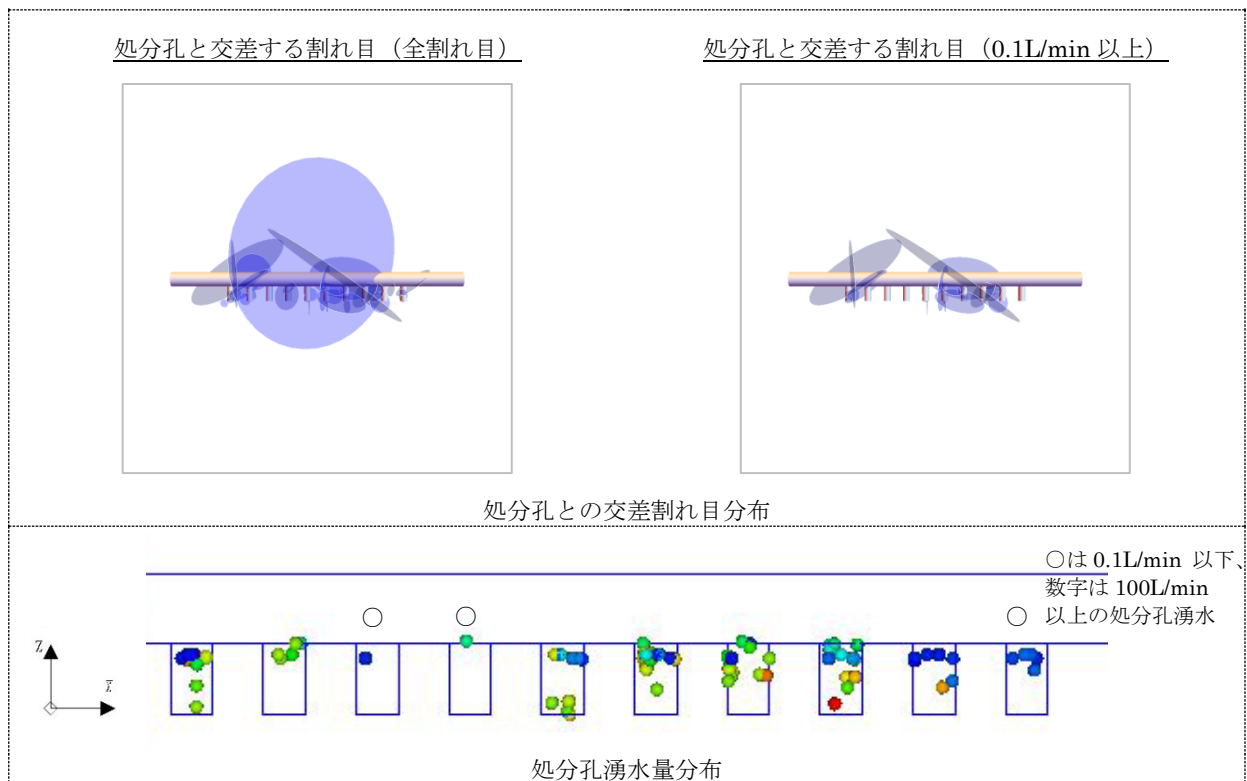


図 11.9-30 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HL12_08)

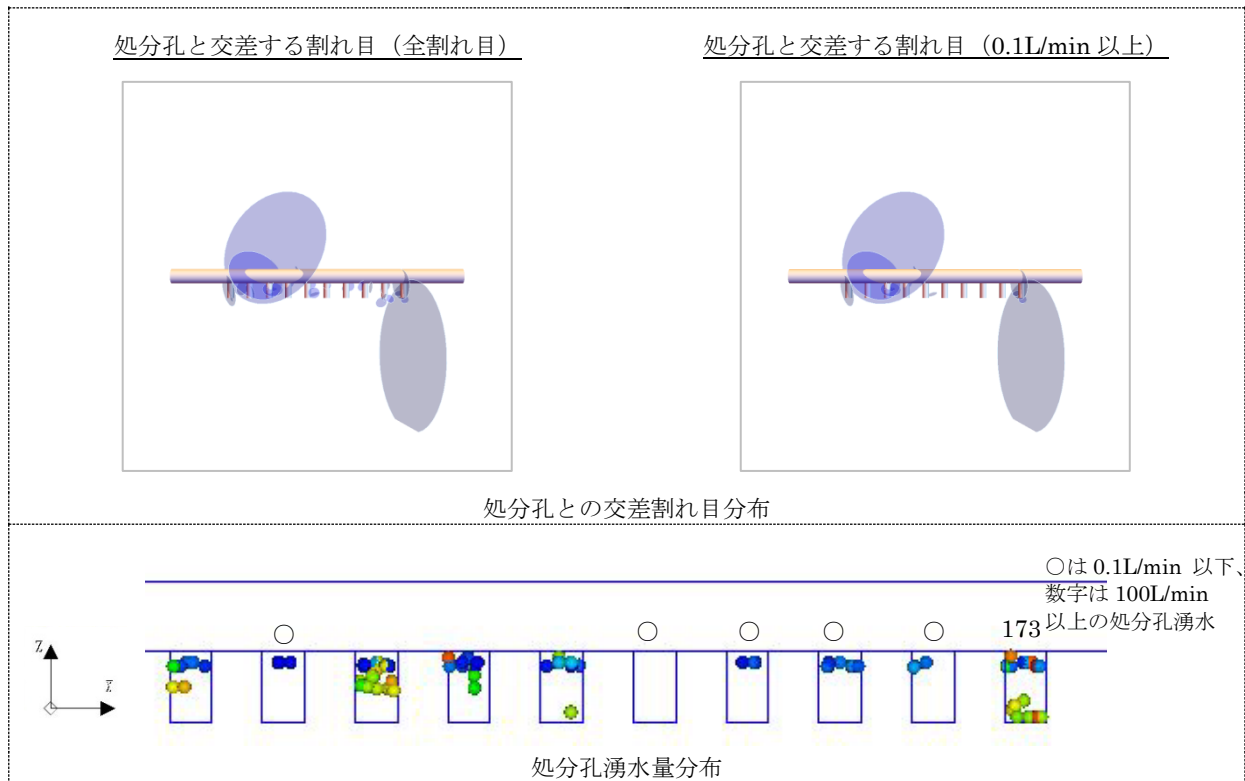


図 11.9-31 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HL12_09)

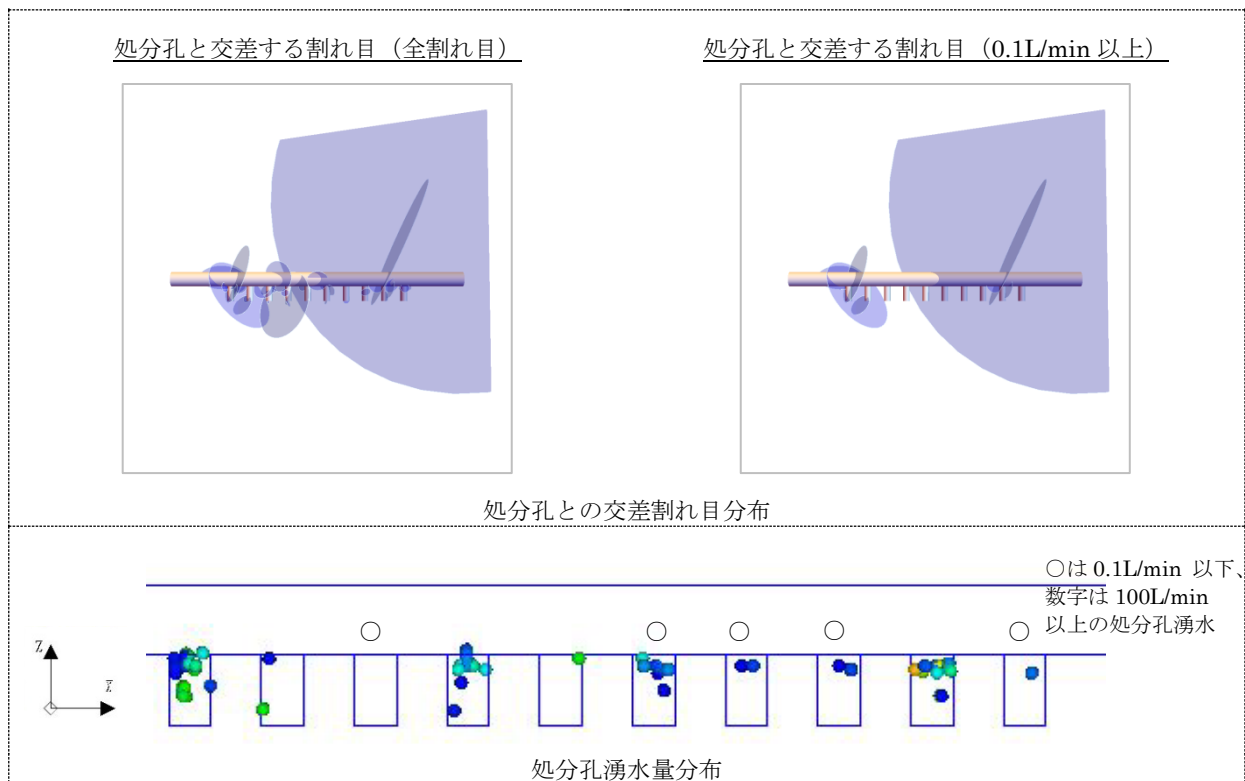


図 11.9-32 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HL12_10)

11.10 止水対策による湧水量低減効果の評価

11.10.1 水抜きボーリングとEDZグラウトのモデル化

4 節で処分坑道や処分孔を設定した水理地質構造モデルにおいて、止水対策として境界条件を変えて、処分孔や処分坑道への湧水量へ与える影響を評価する。境界条件としては、(c)水抜きボーリング設置、(d)EDZ へのポストグラウトの2種類の対策工に対応する設定を行い、各々、処分坑道への湧水量、10 箇所の処分孔への湧水量を算定した。エラー! 参照元が見つかりません。にモデル化のイメージを示す。これに基づき、4 節で計算した処分坑道や処分孔への湧水量（初期値）に対する低減率を評価した。

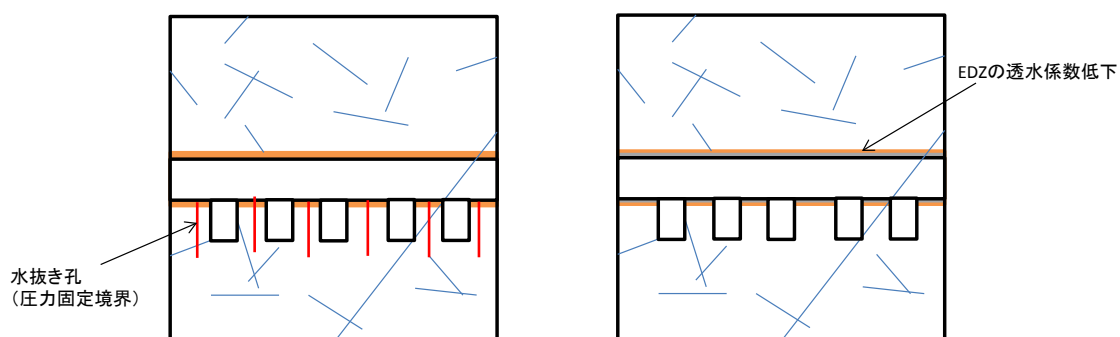


図 11.10-1 止水対策工のモデル化

11.10.2 水抜きボーリングのモデル化

止水対策として水抜きボーリングをモデル化した。水抜きボーリングは処分孔間に設置するものとして、モデル上は圧力固定境界として設定した。図 11.10-2 に水抜きボーリングの境界条件の設定方法を示す。境界条件としては、水抜きボーリングを、処分孔と同様に半径 0.5m、底盤から 8.5m 範囲を圧力固定境界（圧力水頭ゼロ）として設定することで再現する（図 11.10-3）。設置箇所は各処分孔の間に設置するため、最大 11 箇所を設定することとした。ただし、処分孔への湧水量の算定結果から、処分孔への湧水量が 0.1L/min 以下の孔の周辺には設定せず、水抜きボーリングによる効果のある箇所のみ設定することとした。

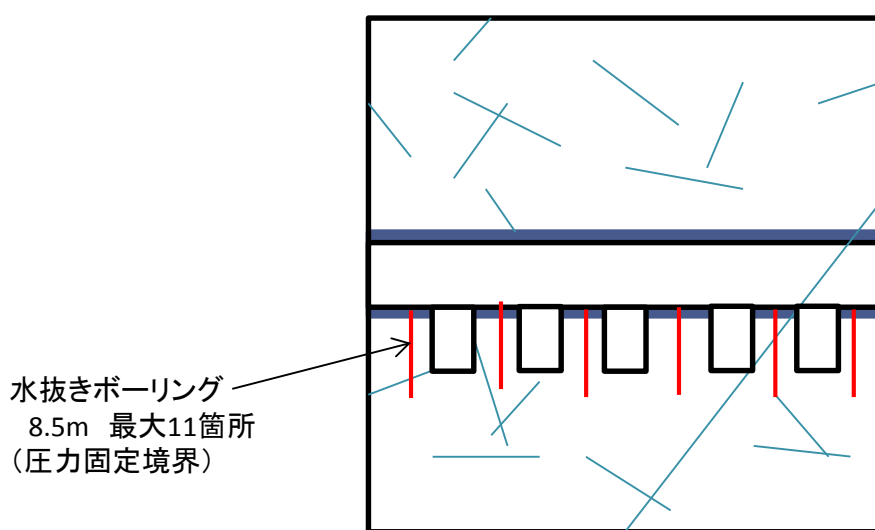


図 11.10-2 水抜きボーリングの境界条件の設定

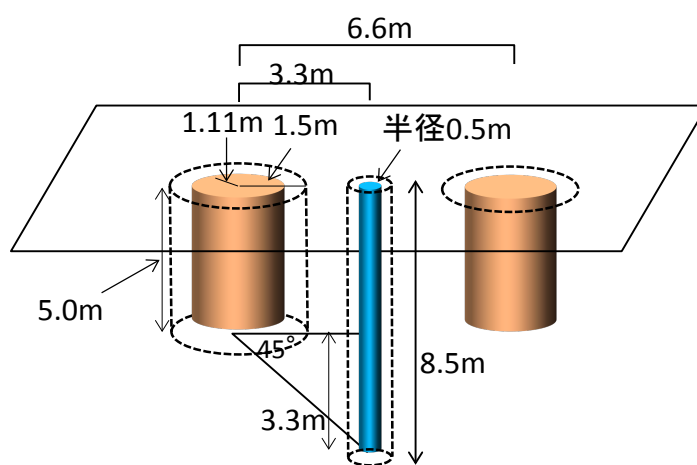


図 11.10-3 水抜きボーリングのモデル化方法

11.10.3 水抜きボーリング設置後の処分坑道及び処分孔への湧水量の算定結果

水抜きボーリング設置後の各リアライゼーションの処分坑道への湧水量、10箇所への処分孔への湧水量を算定した。各リアライゼーションについて、坑道、処分孔への総湧水量、各処分孔への湧水量、坑道、処分孔へ交差する主要割れ目の流量、坑道 5m 区間湧水量、処分孔と交差する主要割れ目の流量、処分孔交差割れ目分布と湧水量分布について整理を行った。

この結果と対策前の処分孔掘削時（初期値）の解析結果との比較を行い、止水対策の効果について検討を行った。

11.10.4 坑道湧水量及び処分孔湧水量

10 個のリアライゼーションについて、処分孔掘削後の坑道、処分孔への湧水量及び境界面からの流入量及び水抜きボーリングからの排水量の算定結果を表 11-1 に示す。各リアライゼーションで坑道湧水量、処分孔湧水量、水抜きボーリング排水量の合計値は、境界面からの流入量と一致しており、収支が合っていることが分かる。坑道湧水の 10 リアライゼーションの平均は 1,173L/min であり、処分孔掘削時 1,232L/min と比べ 5%減少していることがわかる。また、処分孔湧水は 10 孔合計の平均が 237L/min であり、水抜きボーリング設置前 301L/min と比べ 21%減少していることが分かる。共に水抜きボーリングを設置したことによる効果であると判断できる。各リアライゼーションにおける水抜きボーリング設置前後の坑道湧水量の変化を図 11.10-4 に、処分孔 10 孔合計の湧水量の変化を図 11.10-5 に示す。水抜きボーリングによる減少量はリアライゼーション間で 2%から 58%と大きくバラつき、割れ目の分布により大きく変化することが分かる。特にリアライゼーション 4、5、6 では減少量が 40%以上と、水抜きボーリングによる効果が大きかったことが分かる。一方、湧水量の最も多いリアライゼーション 7 では 11%減少、最も少ないリアライゼーション 10 で 2%減少と効果が少なかった。

各処分孔の湧水量を算定した結果を表 11-2 に示す。湧水量が 0.1L/min 以下を示す処分孔は最小で 1 箇所/10 ピット、最大で 6 箇所/10 ピットであり、全 100 処分孔の内、39 箇所が 0.1L/min 以下を示す。これは水抜きボーリング設置前と比べ、1 孔増加したことになる。表 11-3 には各水抜きボーリングにおける排水量算定結果を示す。また、図 11.10-6 には処分毎の水抜きボーリング設置前後における湧水量の変化を示す。各処分孔における水抜きボーリング設置による湧水量の変化に着目すると、リアライゼーション 1 の No.4、No.5 孔は大きく 1/10 程度にまで減少しているものの、No.7 孔はほとんど変化していないといった効果にバラつきが見られる。水抜きボーリングと処分孔が割れ目により連結しているか否かで、効果に大きな差が生じたと考えられる。また、湧水量が大きく減少した処分孔でも 0.1L/min 以下にまでは減少しておらず、そのため 0.1L/min 以下を示す処分孔の孔数はあまり変化しなかったと考えられる。

表 11-1 坑道湧水量算定結果（水抜きボーリング設置後）

リアライ ゼーション	坑道湧水(L/min)				境界面流入量(L/min)				合計
	坑道湧水	処分孔 湧水	水抜き ボーリング	合計	南	北	下	上	
1	1,095	443	107	1,644	-7	-1,247	-344	-46	-1,644
2	613	413	75	1,101	-58	-290	-608	-146	-1,101
3	730	151	185	1,066	-536	-69	-254	-207	-1,066
4	1,032	60	145	1,236	-7	-228	-222	-779	-1,236
5	1,034	129	302	1,465	-57	-200	-1,079	-130	-1,465
6	359	150	162	672	-55	-147	-336	-134	-672
7	2,754	638	259	3,652	-524	-170	-1,685	-1,272	-3,652
8	709	143	70	922	-251	-208	-165	-298	-922
9	1,260	211	450	1,921	-32	-123	-933	-833	-1,921
10	2,142	29	57	2,228	-49	-308	-286	-1,585	-2,228
平均	1,173	237	181	1,591					
標準偏差	736	196	124	864					

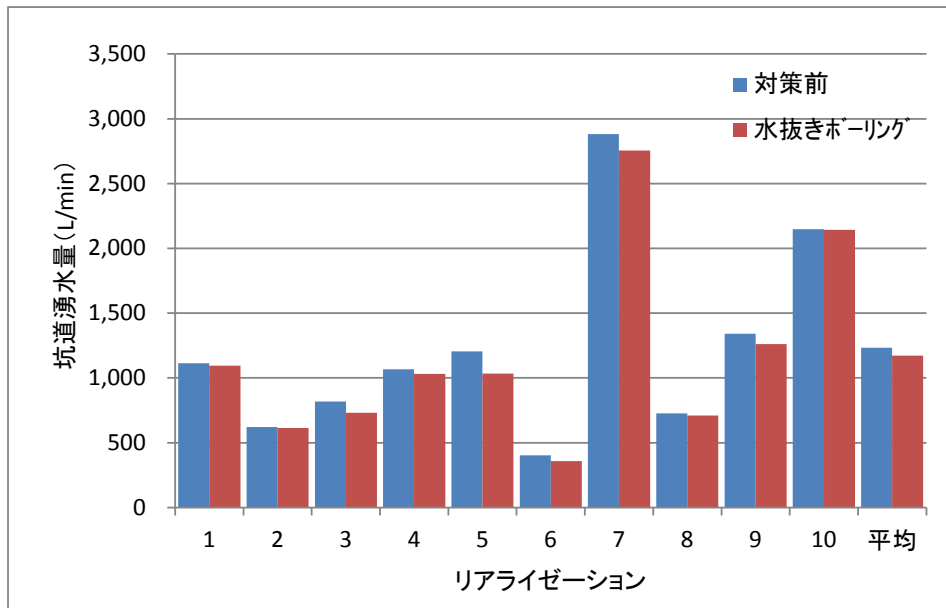


図 11.10-4 水抜きボーリング設置前後の坑道湧水量

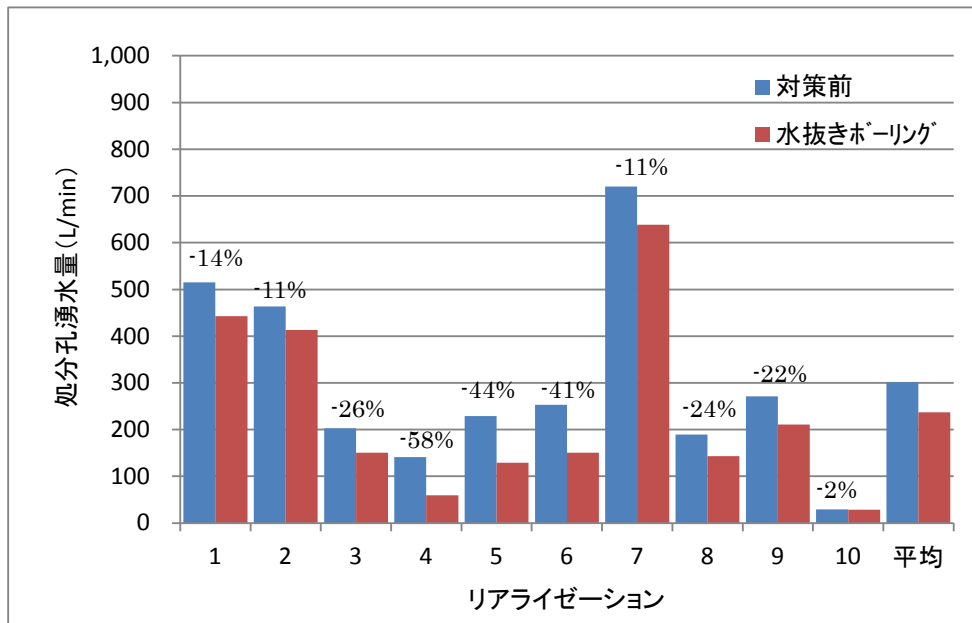


図 11.10-5 水抜きボーリング設置前後の処分孔湧水量

表 11-2 処分孔湧水量算定結果（水抜きボーリング設置後）

リアライゼーション	処分孔 No.(L/min)										合計	湧水量 0.1L/min 以下 の処分孔 の数
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	14.35	0.00	298.69	1.13	3.20	0.04	121.87	0.01	0.01	3.31	443	4
2	0.00	0.00	0.05	301.71	54.70	0.03	37.50	19.44	0.02	0.01	413	6
3	0.04	14.70	8.15	0.26	0.00	3.05	0.13	103.34	21.05	0.00	151	3
4	5.63	0.01	0.00	0.01	0.02	9.48	0.00	0.50	24.47	19.54	60	5
5	0.00	0.00	2.61	0.00	0.00	10.98	31.75	0.00	31.26	52.52	129	5
6	2.26	0.39	4.54	13.86	32.41	32.12	18.36	0.00	20.53	25.89	150	1
7	121.04	46.37	186.50	0.12	116.19	49.54	0.06	19.30	17.03	81.96	638	1
8	18.56	1.88	0.00	0.04	30.39	34.41	24.08	29.30	4.71	0.01	143	3
9	4.71	0.00	29.90	10.30	4.64	0.00	0.01	0.02	0.01	161.25	211	5
10	2.06	0.16	0.00	0.10	0.14	0.04	0.00	0.02	26.19	0.00	29	6

赤字は 0.1L/min 以上の処分孔

湧水量の減衰率（水抜きボーリング設置前を基準、0.1L/min 以上の孔を対象）

リアライゼーション	処分孔No.(%)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	-14.2%	0.0%	-4.3%	-93.8%	-90.0%	0.0%	-0.2%	0.0%	0.0%	-76.2%
2	0.0%	0.0%	0.0%	-5.0%	-0.8%	0.0%	-24.6%	-52.5%	0.0%	0.0%
3	0.0%	-57.7%	-0.8%	-97.7%	0.0%	-75.9%	-3.3%	-3.7%	-25.9%	0.0%
4	-91.6%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	-26.9%	0.0%	-0.5%	-1.0%	-45.4%
5	0.0%	0.0%	-0.2%	0.0%	0.0%	-66.6%	-22.4%	0.0%	-19.7%	-53.8%
6	-76.8%	-94.9%	-50.3%	-57.7%	-28.8%	-22.8%	-67.1%	0.0%	-11.9%	-5.2%
7	-11.2%	-7.1%	-1.1%	-10.0%	-2.0%	-2.7%	0.0%	-7.7%	-63.5%	-24.1%
8	-4.5%	-42.0%	0.0%	0.0%	-0.5%	-3.2%	-7.4%	-55.8%	-45.1%	0.0%
9	-54.1%	0.0%	-49.9%	-55.5%	-8.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	-6.6%
10	0.0%	-0.1%	0.0%	-1.5%	-16.4%	0.0%	0.0%	0.0%	-1.5%	0.0%

赤字は減衰率が-50%以下の処分孔

表 11-3 水抜きボーリング排水量算定結果

リアライ ゼーション	水抜きボーリング No.(L/min)											合計
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	7.92	0.01	23.04	0.04	11.33	51.60	0.00	0.00		0.00	13.13	107
2				0.00	31.81	0.02	0.00	42.78	0.00			75
3		135.91	0.00	18.24	0.00	0.01	12.99	0.00	0.00	17.68		185
4	0.00	78.12				0.06	4.72	0.00	9.82	0.01	51.99	145
5			0.00		0.00	0.02	31.73	28.11	0.00	0.00	242.46	302
6	0.00	37.03	0.34	32.37	0.00	30.77	0.00	0.00	60.68	0.00	1.08	162
7	1.60	44.37	1.51	47.51	9.51	0.01	0.00	0.01	154.67	0.00	0.00	259
8	0.01	2.76	0.04		0.00	0.09	0.00	0.00	66.67	0.00	0.01	70
9	20.75	0.00	354.97	40.77	0.00	0.85				32.46	0.01	450
10	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.86			55.58	0.58		57

灰色は水抜きボーリングを設置していない箇所

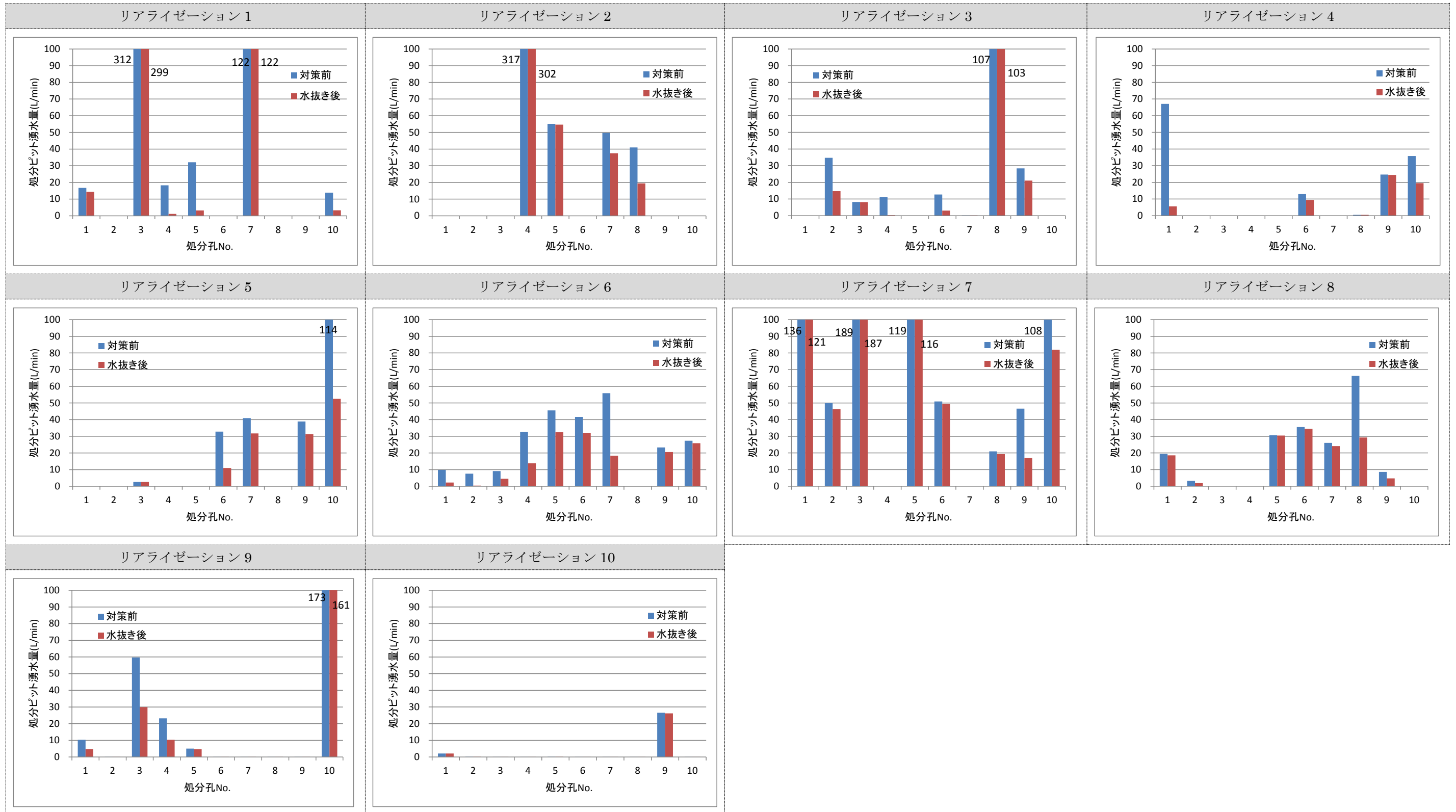


図 11.10-6 処分孔毎の湧水量（水抜きボーリング設置前後）

11.10.5 坑道 5m 区間湧水量

各リアライゼーションの坑道沿い 5m ごとに坑道湧水量を集計した結果を図 11.10-7～図 11.10-16 に示す。水抜きボーリング設置前に比べやや湧水量が減っていることが分かる。

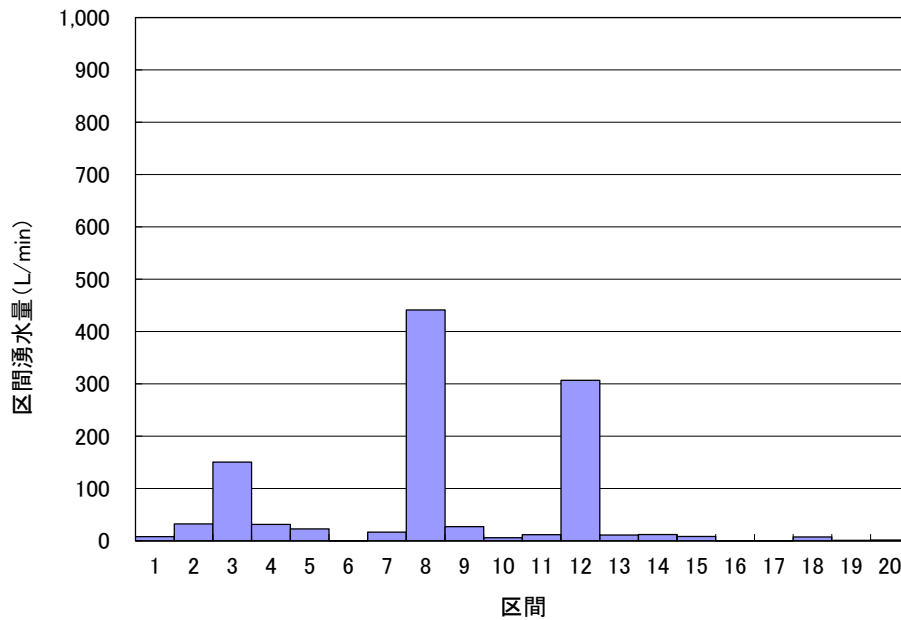


図 11.10-7 区間湧水量集計結果 (HL12_01)

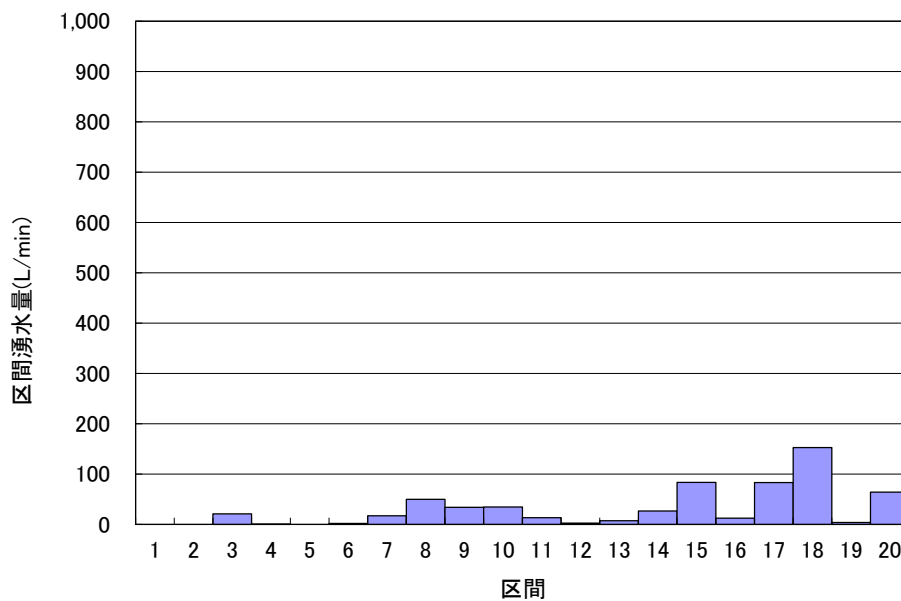


図 11.10-8 区間湧水量集計結果 (HL12_02)

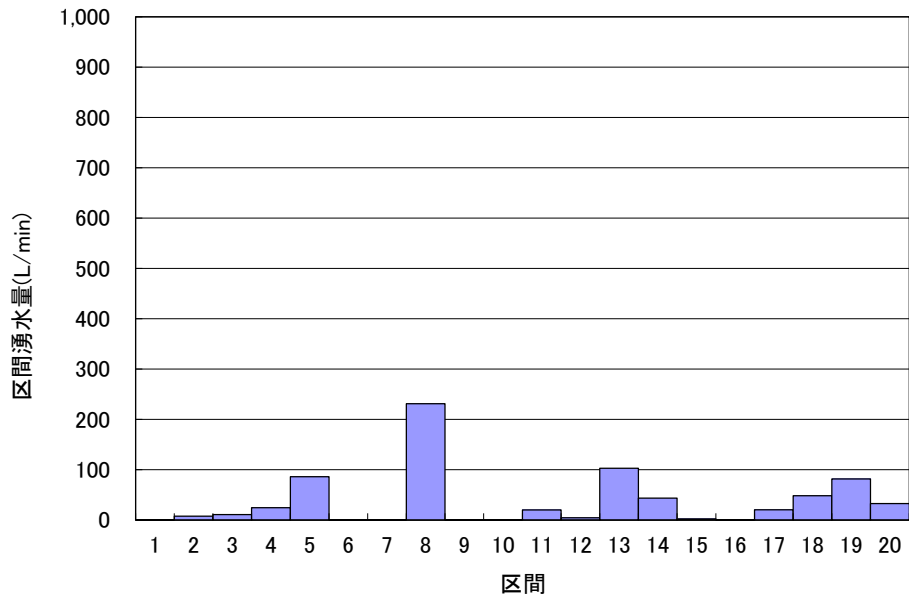


図 11.10-9 区間湧水量集計結果 (HL12_03)

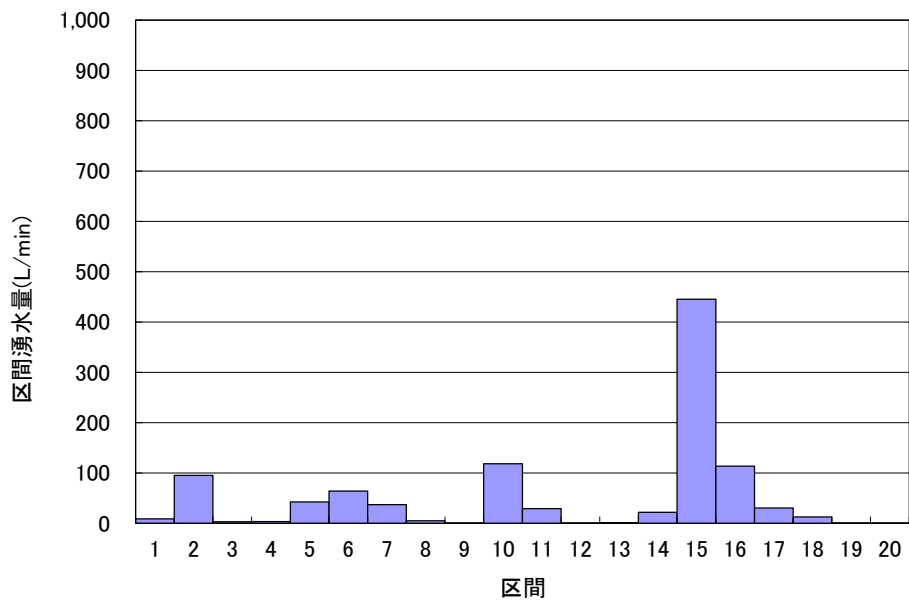


図 11.10-10 区間湧水量集計結果 (HL12_04)

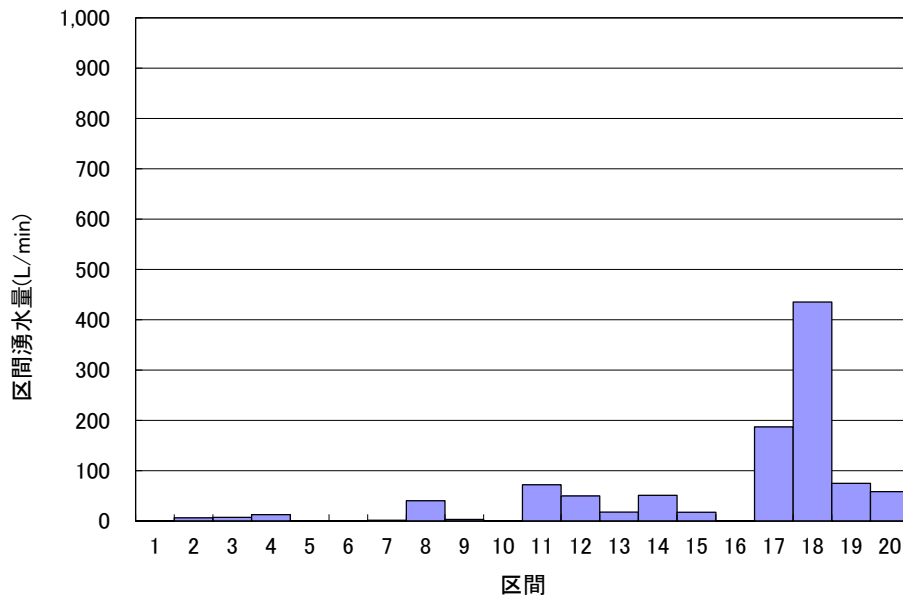


図 11.10-11 区間湧水量集計結果 (HL12_05)

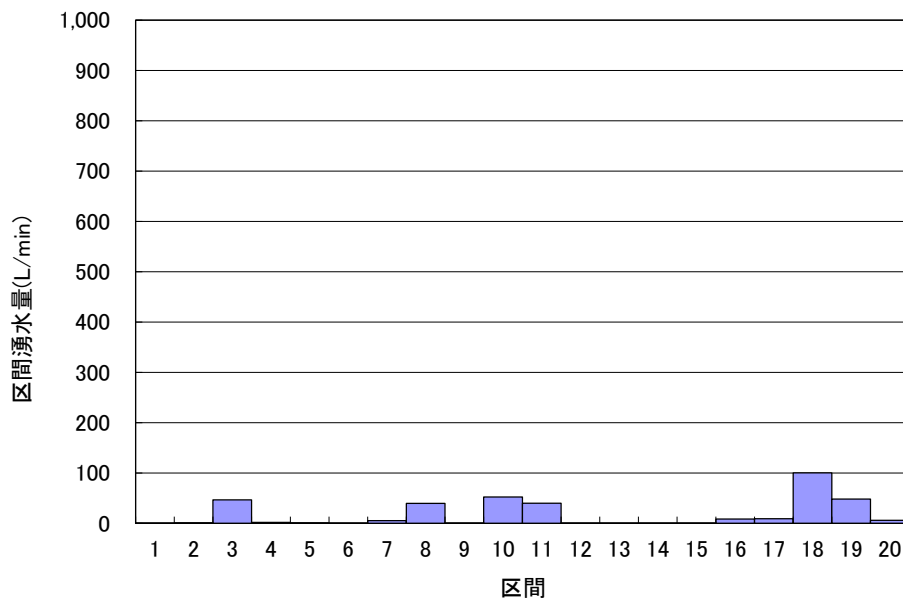


図 11.10-12 区間湧水量集計結果 (HL12_06)

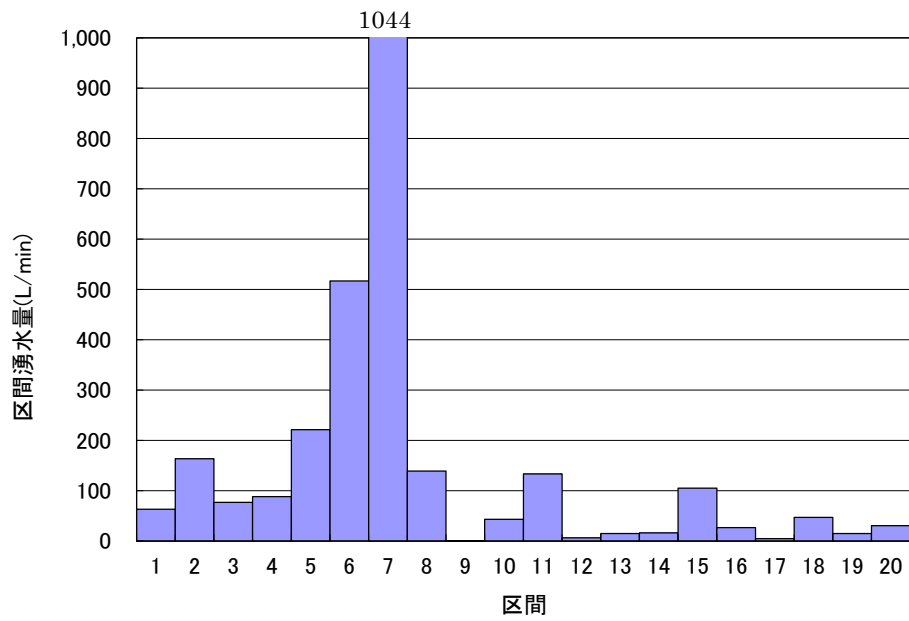


図 11.10-13 区間湧水量集計結果 (HL12_07)

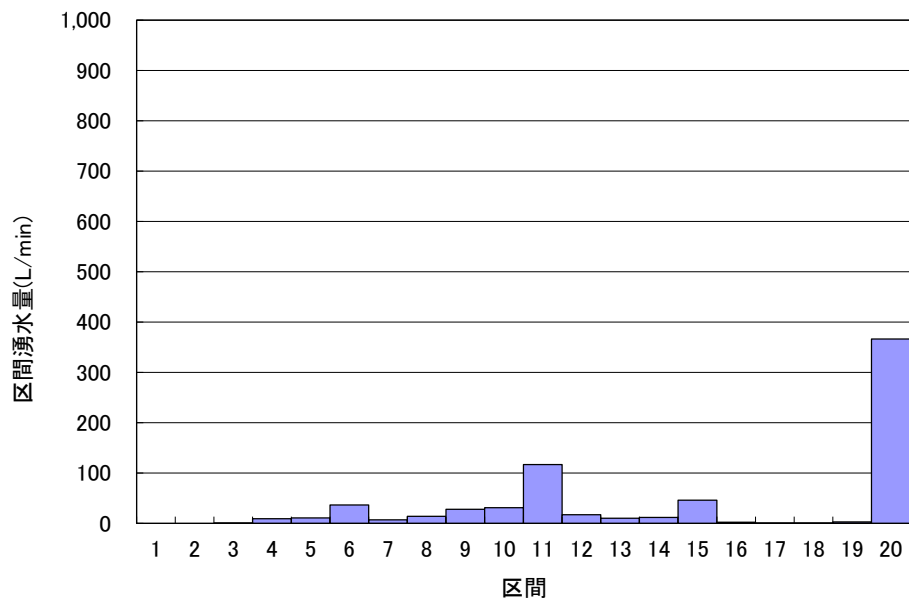


図 11.10-14 区間湧水量集計結果 (HL12_08)

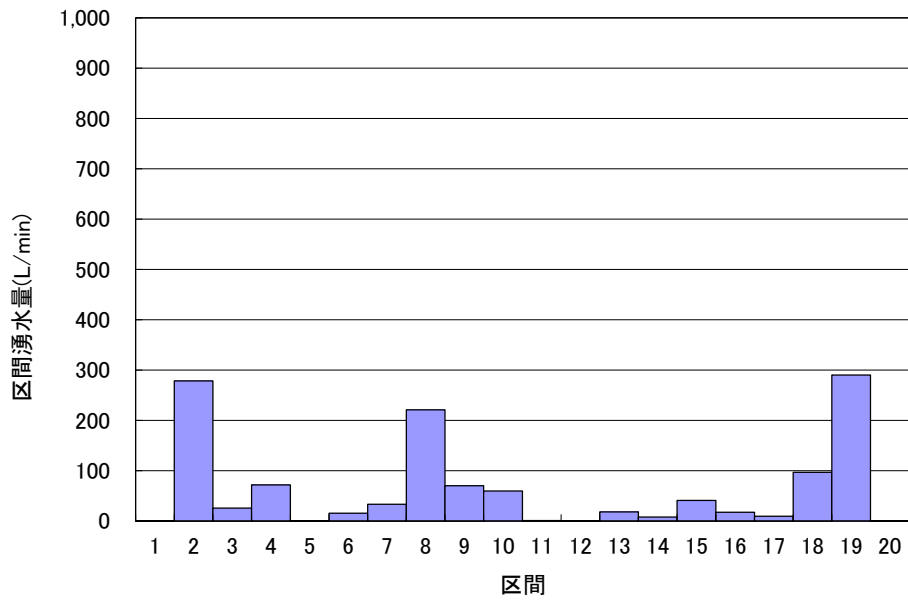


図 11.10-15 区間湧水量集計結果 (HL12_09)

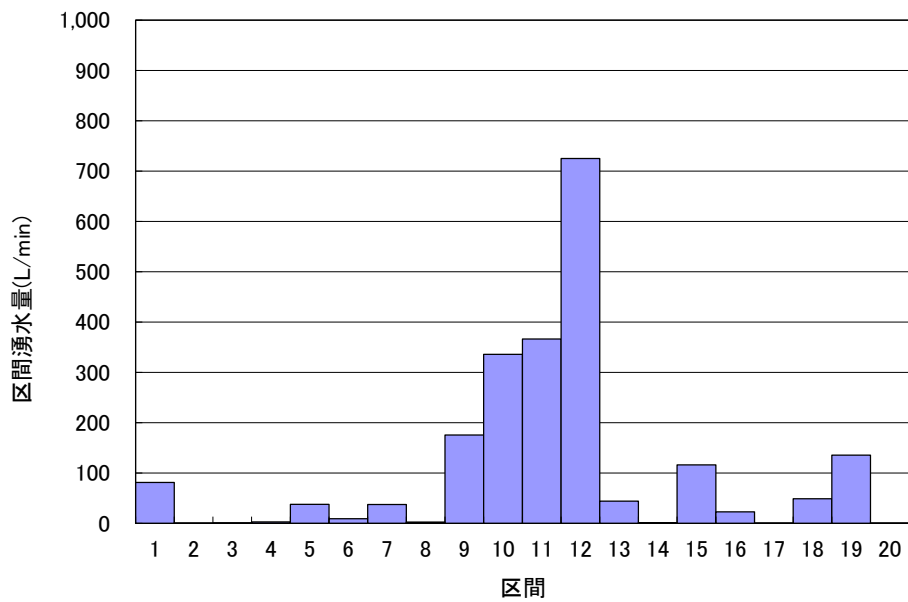


図 11.10-16 区間湧水量集計結果 (HL12_10)

11.10.6 坑道と交差する割れ目の流量

坑道に交差する割れ目の内、**6.0L/min** 以上の流量をもつ割れ目の流量を表 11-4 に示す。また、各処分孔と交差する割れ目の内、**0.1L/min** 以上の流量をもつ割れ目の流量を表 11-5 に示す。

表 11-4 坑道に交差する主要割れ目の流量算定結果（水抜きボーリング掘削後）

リアライゼーション1		リアライゼーション2		リアライゼーション3		リアライゼーション4		リアライゼーション5		リアライゼーション6		リアライゼーション7		リアライゼーション8		リアライゼーション9		リアライゼーション10	
HL12_01tunnel		HL12_02tunnel		HL12_03tunnel		HL12_04tunnel		HL12_05tunnel		HL12_06tunnel		HL12_07tunnel		HL12_08tunnel		HL12_09tunnel		HL12_10tunnel	
割れ目 番号	流量 (L/min)	割れ目 番号	流量 (L/min)	割れ目 番号	流量 (L/min)	割れ目 番号	流量 (L/min)	割れ目 番号	流量 (L/min)	割れ目 番号	流量 (L/min)	割れ目 番号	流量 (L/min)	割れ目 番号	流量 (L/min)	割れ目 番号	流量 (L/min)	割れ目 番号	流量 (L/min)
6454	519.3	12526	109.9	12689	125.0	17366	423.1	4014	440.7	10810	88.4	3384	918.3	7105	264.6	4438	265.7	4427	855.2
21301	300.2	10782	69.5	9528	85.8	14300	110.0	12033	97.6	7268	67.5	9732	471.0	8591	91.2	20205	257.9	18827	711.9
21036	133.5	2542	68.7	16651	79.1	3824	107.5	4978	92.1	7789	34.4	16968	394.8	5198	61.1	10445	128.6	13989	105.4
1952	46.4	13563	55.2	19751	72.7	16513	92.8	20779	70.2	15951	29.0	17077	184.5	3193	29.7	473	113.1	10137	98.0
2354	37.2	12656	54.8	16196	61.5	10715	48.8	10626	55.1	12835	28.2	18801	85.7	2848	26.1	16670	74.0	18195	81.1
17495	31.4	20216	52.8	13953	58.5	12600	42.6	16403	41.1	6207	25.9	15881	70.8	5385	25.3	3843	67.3	3486	68.8
3125	30.0	15269	41.2	10976	43.1	10337	30.9	8627	41.1	11829	13.8	6097	52.5	8755	21.9	18548	43.3	731	43.8
3537	28.2	13903	23.1	2568	33.4	11590	27.0	14975	39.0	19340	12.1	6917	51.6	3772	17.1	19672	28.1	46	30.1
5345	26.7	15847	20.4	17795	31.7	17732	18.8	17816	27.6	18349	11.7	11581	42.5	19316	14.8	13214	24.2	11775	24.9
15572	22.7	15403	14.5	20211	27.6	1456	12.7	8724	26.2	17969	11.5	2706	40.5	8090	12.9	3707	23.9	4029	19.5
16674	14.1	13985	11.3	14978	20.9	4459	12.1	13928	17.0	16858	6.8	17787	39.8	15542	12.3	18836	23.4	2908	13.7
1498	13.2	5472	9.9	6714	13.2	20179	9.8	13860	14.8			15997	38.8	17327	12.0	800	23.0	14332	12.3
16242	10.9	18286	7.6	14377	12.9	17180	8.9	14843	13.9			3969	37.3	19876	9.4	14695	21.7	4509	11.8
11923	9.4	12659	7.5	16625	9.9	3565	7.5	5843	12.7			7573	32.6	20291	8.6	2711	20.6	10382	9.7
13561	7.2	16277	6.3	17600	8.7	1722	7.4	1560	9.5			16329	32.4	733	8.0	508	20.3	5824	9.0
15443	6.9	14167	6.1			8734	7.4	288	8.2			9289	32.3	20225	7.8	13491	12.3	18239	8.3
						365	7.3					11352	30.4	19499	7.4	14157	12.3	4710	6.5
						8808	6.3					11521	28.1	19161	7.0	17540	11.8		
						17841	6.1					5690	27.2	9091	6.6	20141	11.7		
												16237	25.9	6722	6.2	14884	10.3		
												15575	23.1			16942	9.3		
												7129	19.4			19907	8.6		
												15096	19.1			2031	6.6		
												11609	17.4						
												17404	14.5						
												17206	14.4						
												10125	13.2						
												4440	9.3						
												12288	6.9						
												16072	6.1						

表 11-5 処分孔に交差する主要割れ目の流量算定結果（水抜きボーリング掘削後）

リアライゼーション1			リアライゼーション2			リアライゼーション3			リアライゼーション4			リアライゼーション5				
HL12_01pit	割れ目番号	流量(L/min)	HL12_02pit	割れ目番号	流量(L/min)	HL12_03pit	割れ目番号	流量(L/min)	HL12_04pit	割れ目番号	流量(L/min)	HL12_05pit	割れ目番号	流量(L/min)		
1	10297	9.8	4	1738	10.9	2	18991	14.7	1	10206	5.6	3	4329	2.6		
	11039	4.5		11566	2.8	3	19751	8.1		6	1986		3.7	2237	0.1	
3	665	0.9		15269	287.2	4	ゆるみ域	0.1	6		3089	1.2	6	10858	4.5	
	3537	6.7		16385	0.8		189	0.1		17180	4.5	10930		6.2		
	6454	247.3	5	12860	54.7	6	3909	3.1	8	21748	0.5	20128		0.1		
4	7021	43.7	7	4712	6.6	7	13745	0.1	9	10715	4.6	7	6796	0.2		
	4026	0.2		13639	21.9	8	1353	1.1		17366	18.1		11873	3.4		
	11216	0.1		19499	9.0		9528	65.8	20179	1.8	17816		26.5			
	12066	0.6	8	3891	0.2	10976	36.5	10	350	0.6	19588		1.6			
	12887	0.1		8371	5.8	9	17873		21.1	8439	18.9		8627	2.6		
21496	0.1	10284	2.5										9	13860	20.8	
5	11216	0.4	10782	8.0										10	18988	7.9
	12066	2.8	14423	2.9											3366	12.5
7	1498	1.9												6066	6.8	
	14531	8.1												8627	33.2	
	21301	111.8														
10	6825	3.3														

リアライゼーション6			リアライゼーション7			リアライゼーション8			リアライゼーション9			リアライゼーション10		
HL12_06pit	割れ目番号	流量(L/min)	HL12_07pit	割れ目番号	流量(L/min)	HL12_08pit	割れ目番号	流量(L/min)	HL12_09pit	割れ目番号	流量(L/min)	HL12_10pit	割れ目番号	流量(L/min)
1	380	1.6	1	5019	0.1	1	2848	12.3	1	19782	4.7	1	3920	0.3
	9404	0.2		6097	105.6		12645	1.3		1972	5.9		6565	0.2
	18820	0.4		17404	15.3		19499	5.0		3843	3.1		11775	1.5
2	9404	0.4	ゆるみ域	ゆるみ域	0.1	2	17832	1.9	3	5662	3.1	2	14696	0.1
3	18054	4.5		ゆるみ域	0.1	7234	1.5	11175		4.7	2646		0.2	
4	2493	1.0	2	3384	21.9	5	10480	26.6	4	13062	0.2	5	4427	0.1
	2715	3.2		3969	18.0		16989	2.3		17825	12.8		1824	0.8
	7268	9.6		5806	3.9		1023	0.8		4609	0.3		2065	5.0
5	7268	28.8	3	18801	2.4	6	3247	6.7	4	10445	9.9	9	13989	20.4
	10250	3.6		16968	40.3		3349	9.4		8216	0.9			
6	4996	0.2	5	18476	146.2	6	6593	6.5	5	13491	3.7			
	11829	21.0		12732	116.2		11087	11.0		3069	3.1			
	14723	10.9		8792	6.2		4943	0.6		11404	1.2			
7	7517	18.4	6	9289	27.2	7	6593	19.5	10	14884	22.0			
	1495	6.1		16329	16.1		8591	0.7		16942	134.9			
9	8877	4.4	8	8291	18.0	7	9091	0.4						
	17805	10.0		11609	1.3		11087	2.9						
10	6207	7.5	9	13479	17.0	8	11265	0.1						
	6936	1.4		7385	0.4		12915	27.3						
	19340	17.0		7573	60.2		20645	1.8						
				8893	14.1		9	12075	4.7					
			15881	7.2										
			17996	0.2										

11.10.7 坑道壁面湧水量分布及び処分孔湧水量分布

各リアライゼーションの坑道壁面の湧水量分布を図 11.10-17～図 11.10-26 に示す。また、処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布を図 11.10-27～図 11.10-36 に示す。図 11.10-27～図 11.10-36 の右の割れ目の図は水抜きボーリングと交差している割れ目を赤色で着色している。リアライゼーション5や6のように、赤色の割れ目が多いほど、また左の処分孔交差割れ目が赤色に変化した割れ目が多いほど水抜き効果が高くなると考えられ、計算では各々44%、41%の処分孔湧水量の減少が確認された。一方、リアライゼーション7のように、赤色の割れ目が少ないリアライゼーションは、処分孔湧水量の減少率も11%と小さい。また、一つのリアライゼーションの中でも、リアライゼーション1の No.4、No.5 孔は水抜きボーリングと交差している割れ目（赤色割れ目）と交差しており、このため湧水量が 1/10 程度にまで減少しているものの、No.7 孔は交差割れ目がないため、湧水量はほとんど変化していないことが分かる。

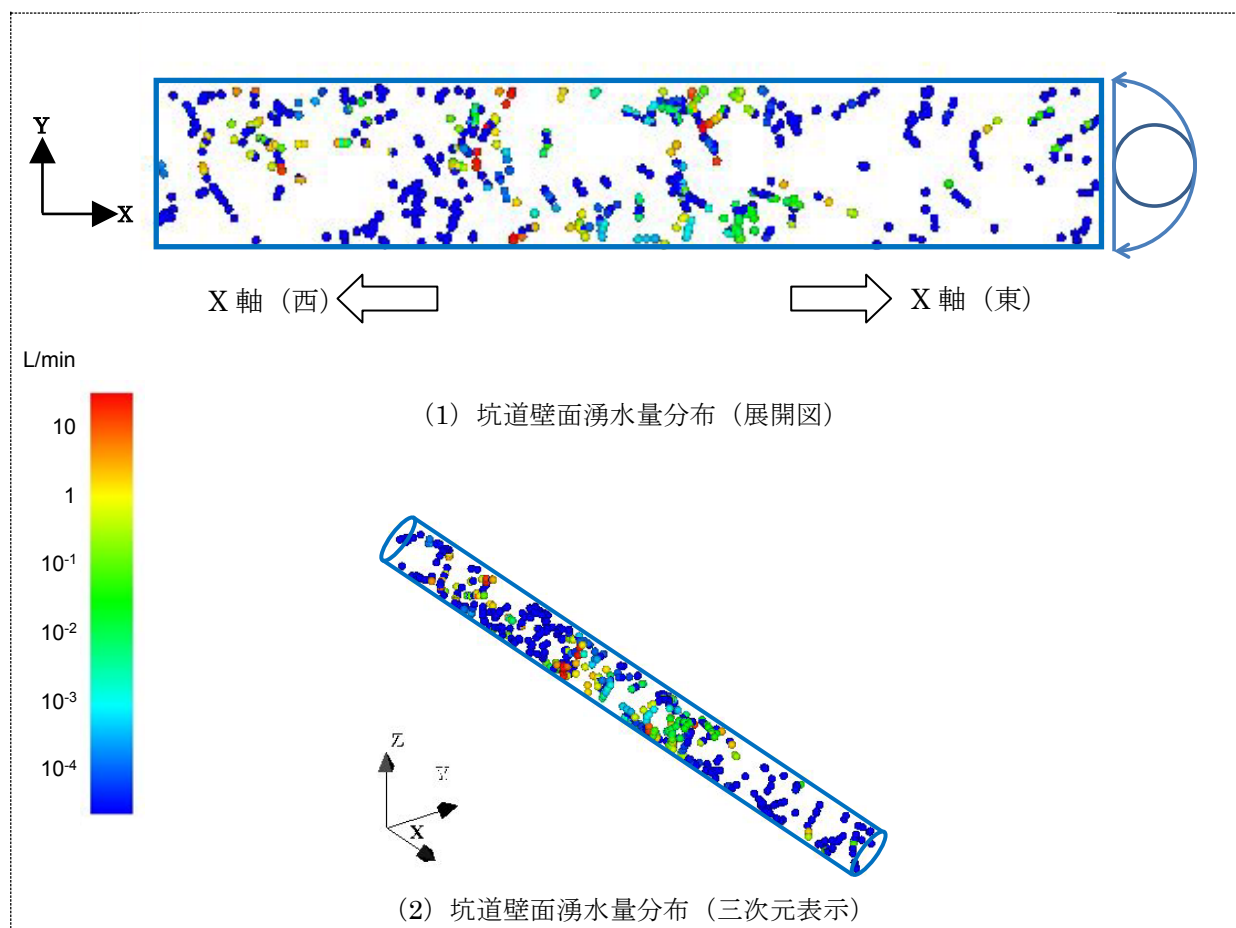


図 11.10-17 坑道壁面の湧水量分布 (HL12_01)

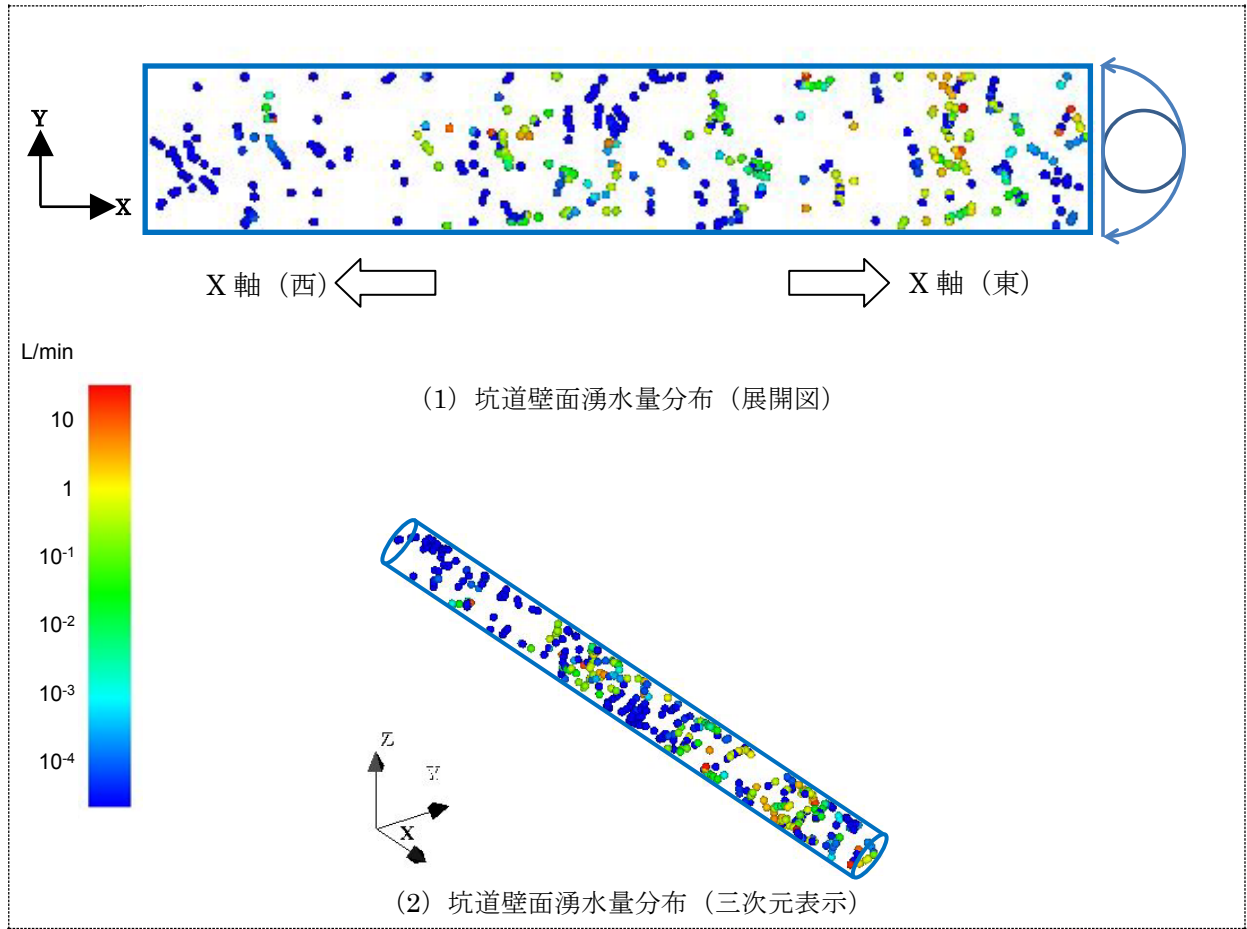


図 11.10-18 坑道壁面の湧水量分布 (HL12_02)

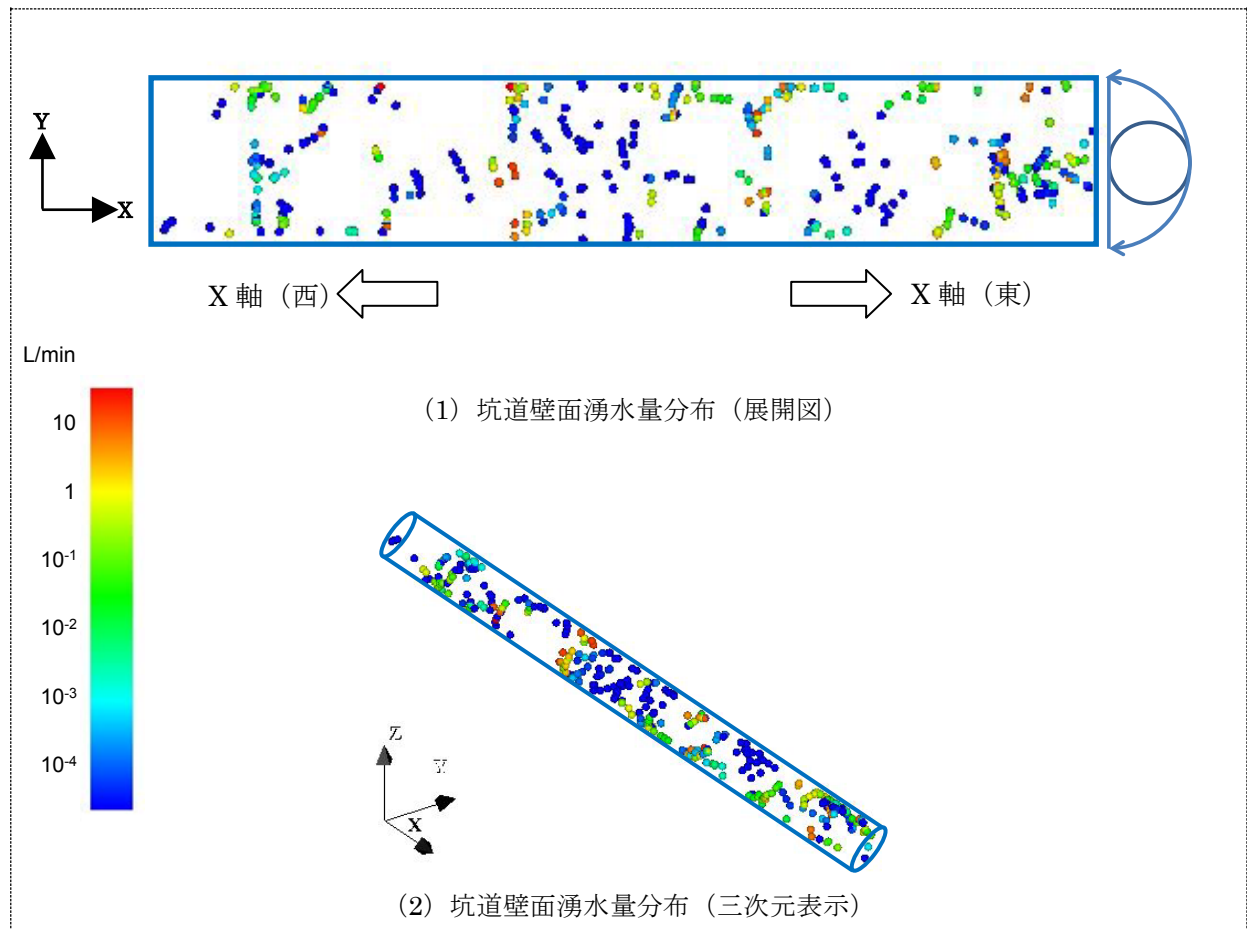


図 11.10-19 坑道壁面の湧水量分布 (HL12_03)

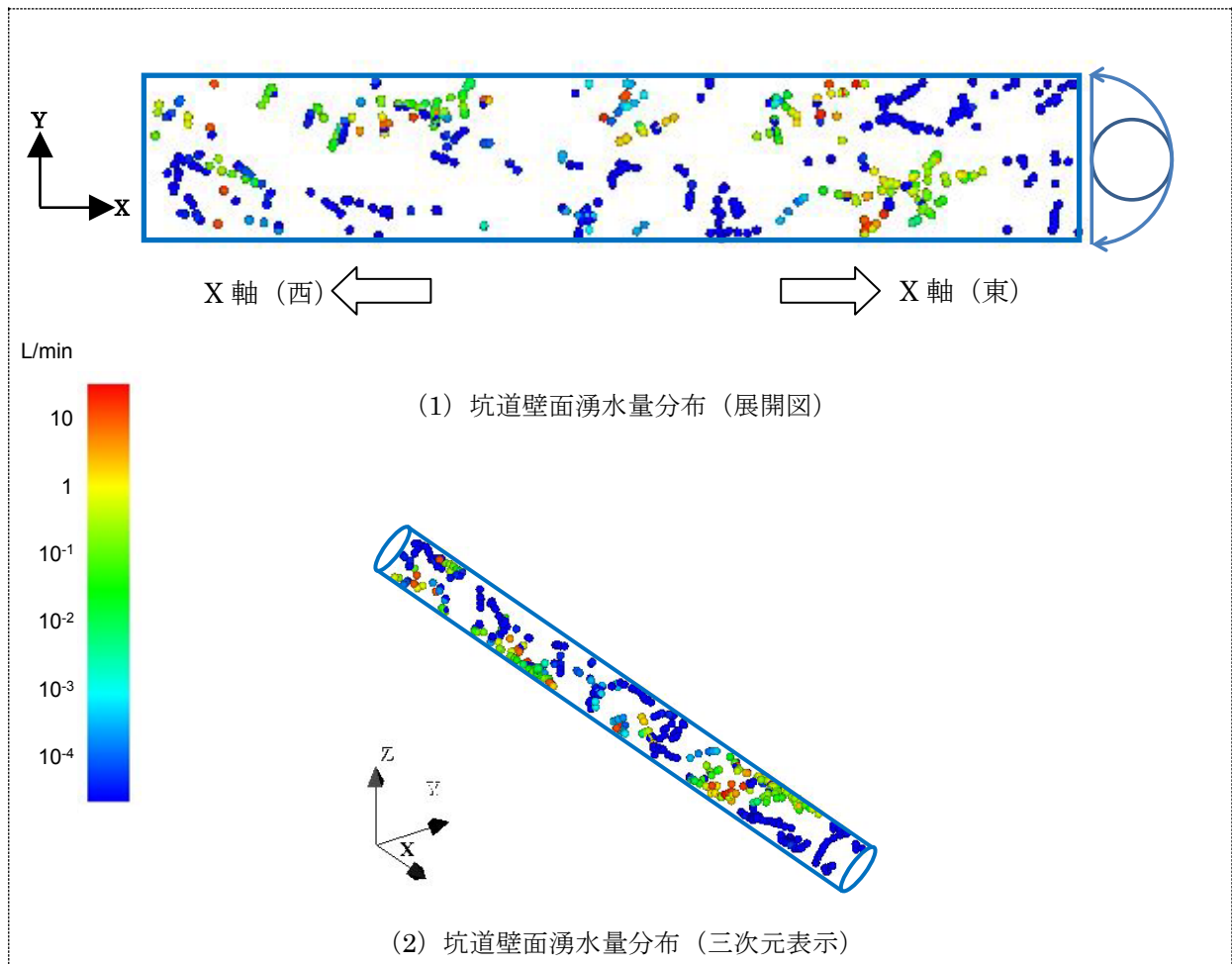


図 11.10-20 坑道壁面の湧水量分布 (HL12_04)

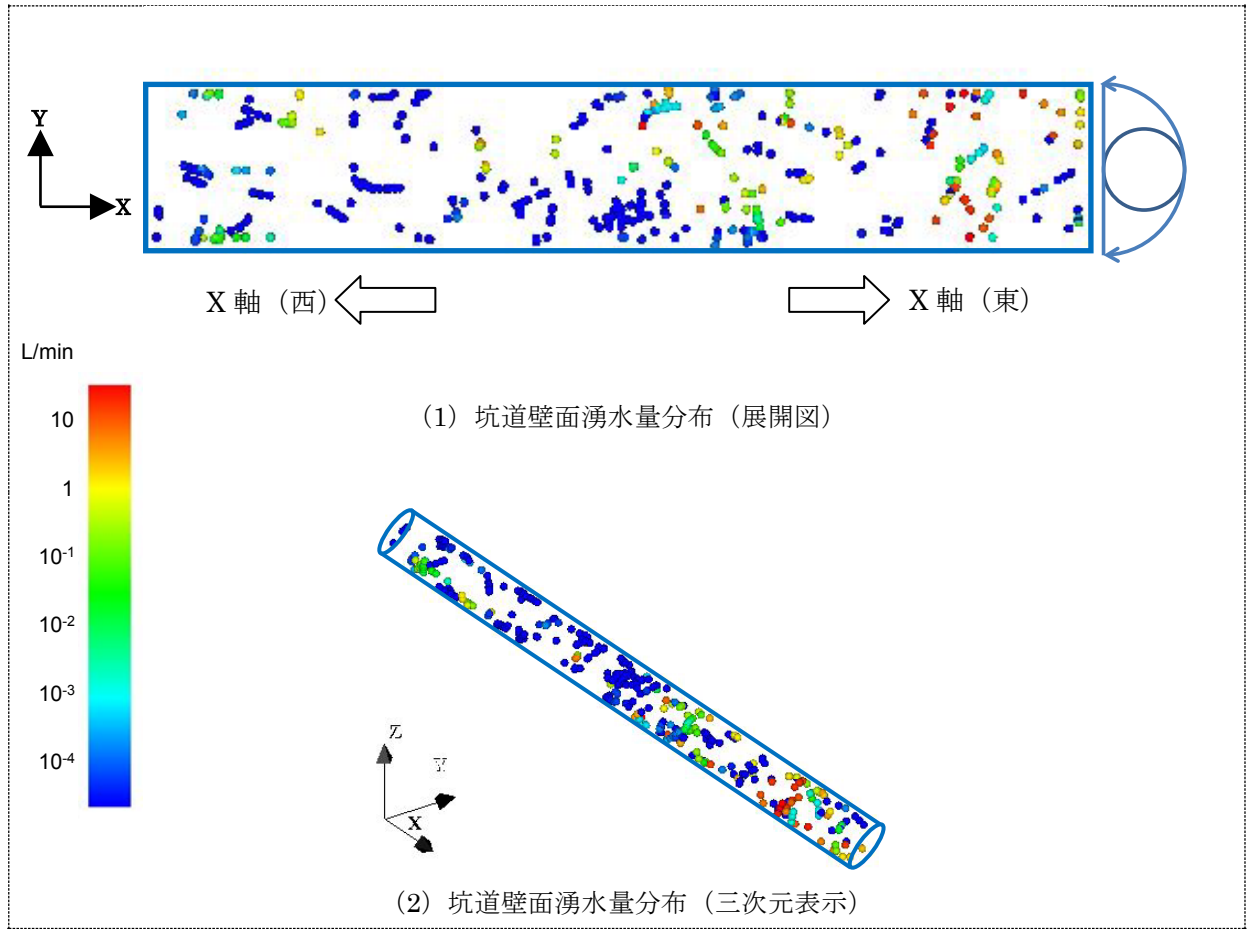


図 11.10-21 坑道壁面の湧水量分布 (HL12_05)

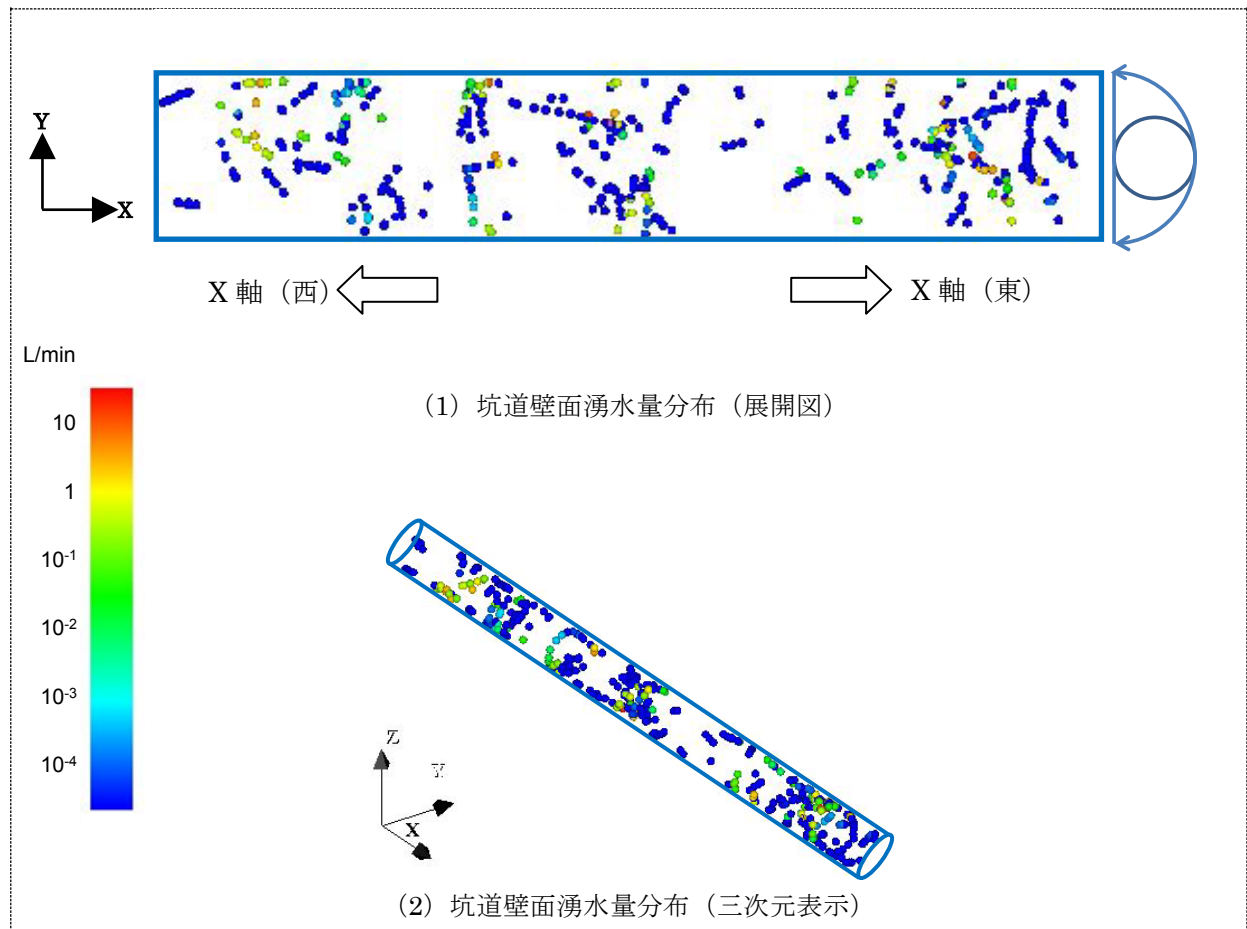


図 11.10-22 坑道壁面の湧水量分布 (HL12_06)

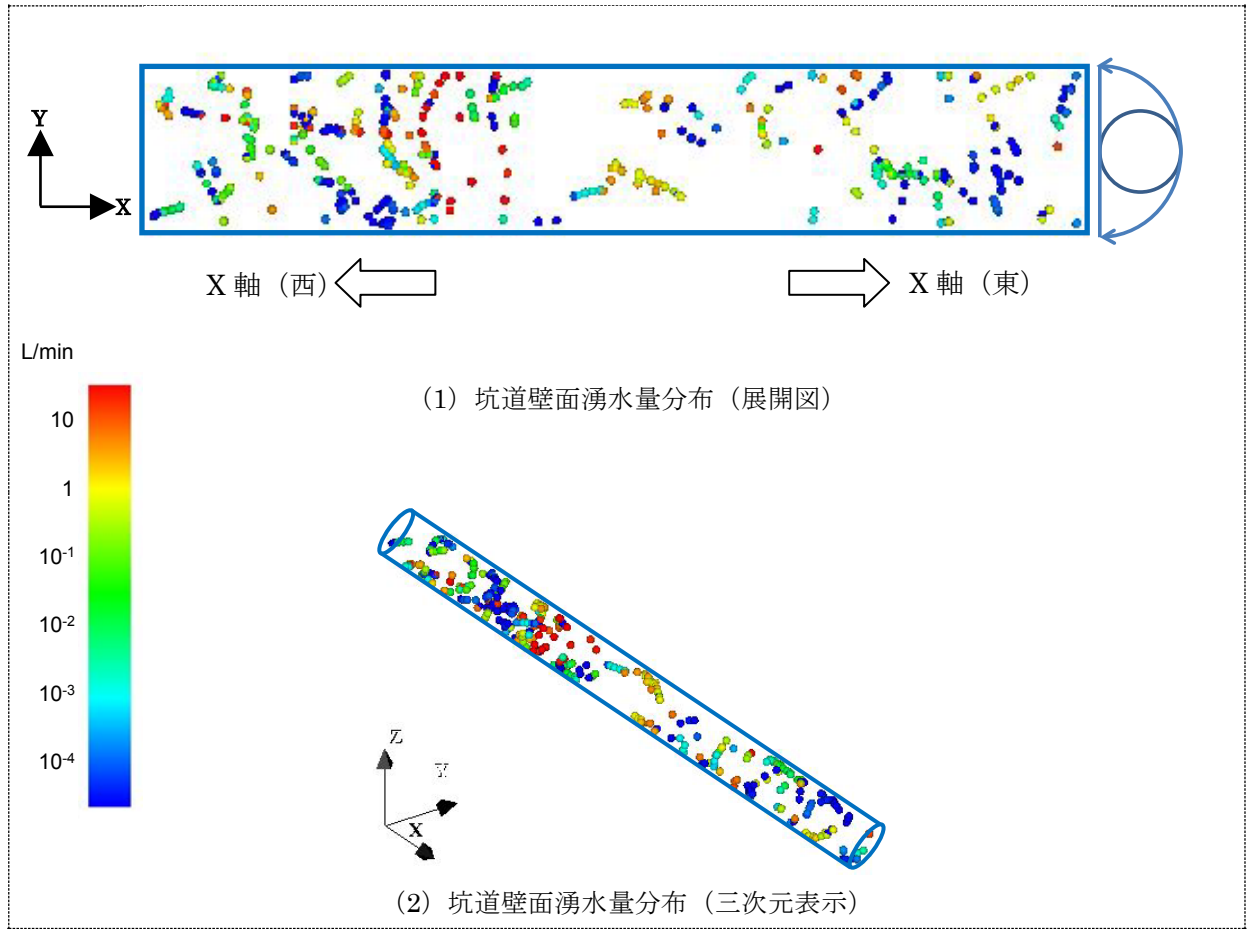


図 11.10-23 坑道壁面の湧水量分布 (HL12_07)

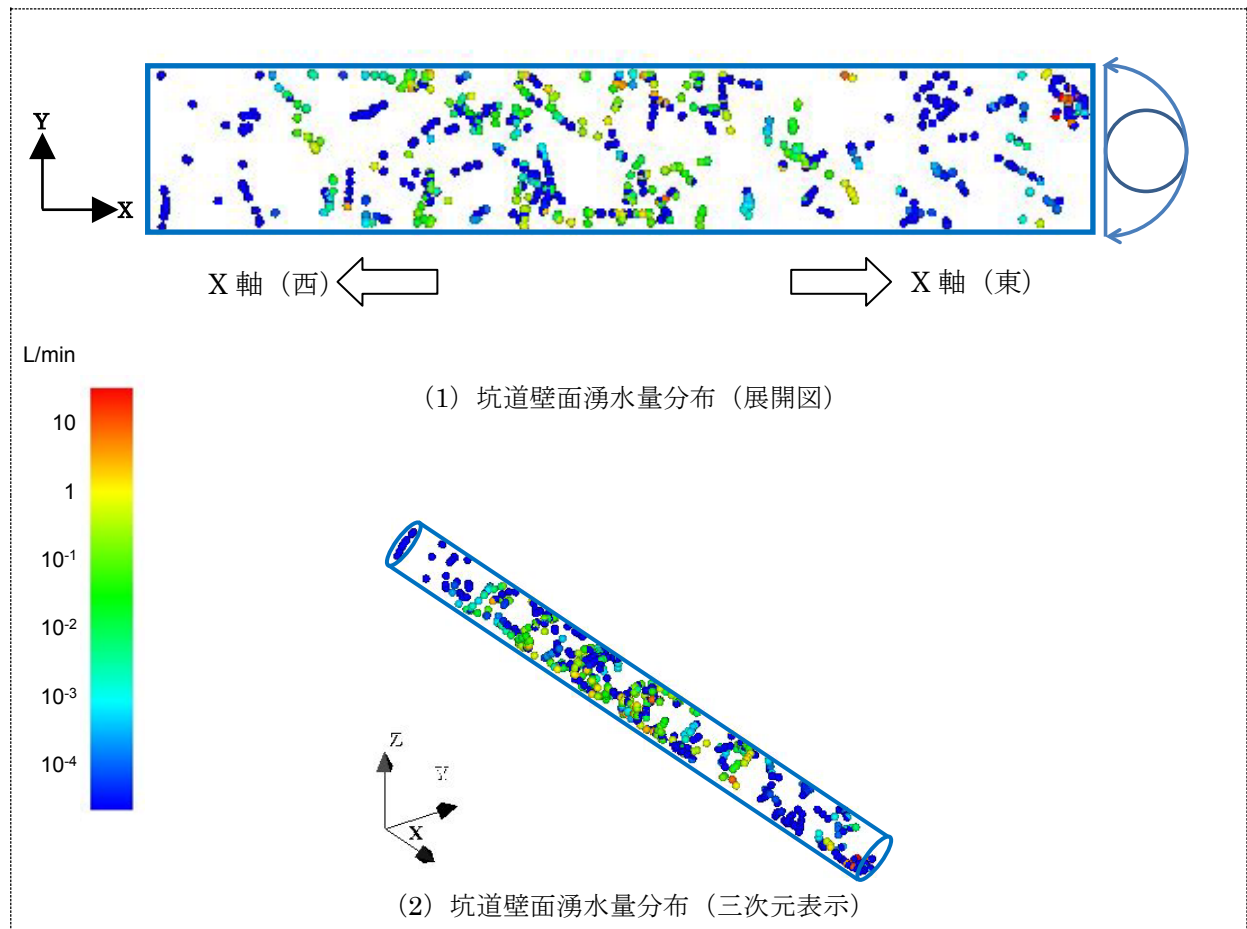


図 11.10-24 坑道壁面の湧水量分布 (HL12_08)

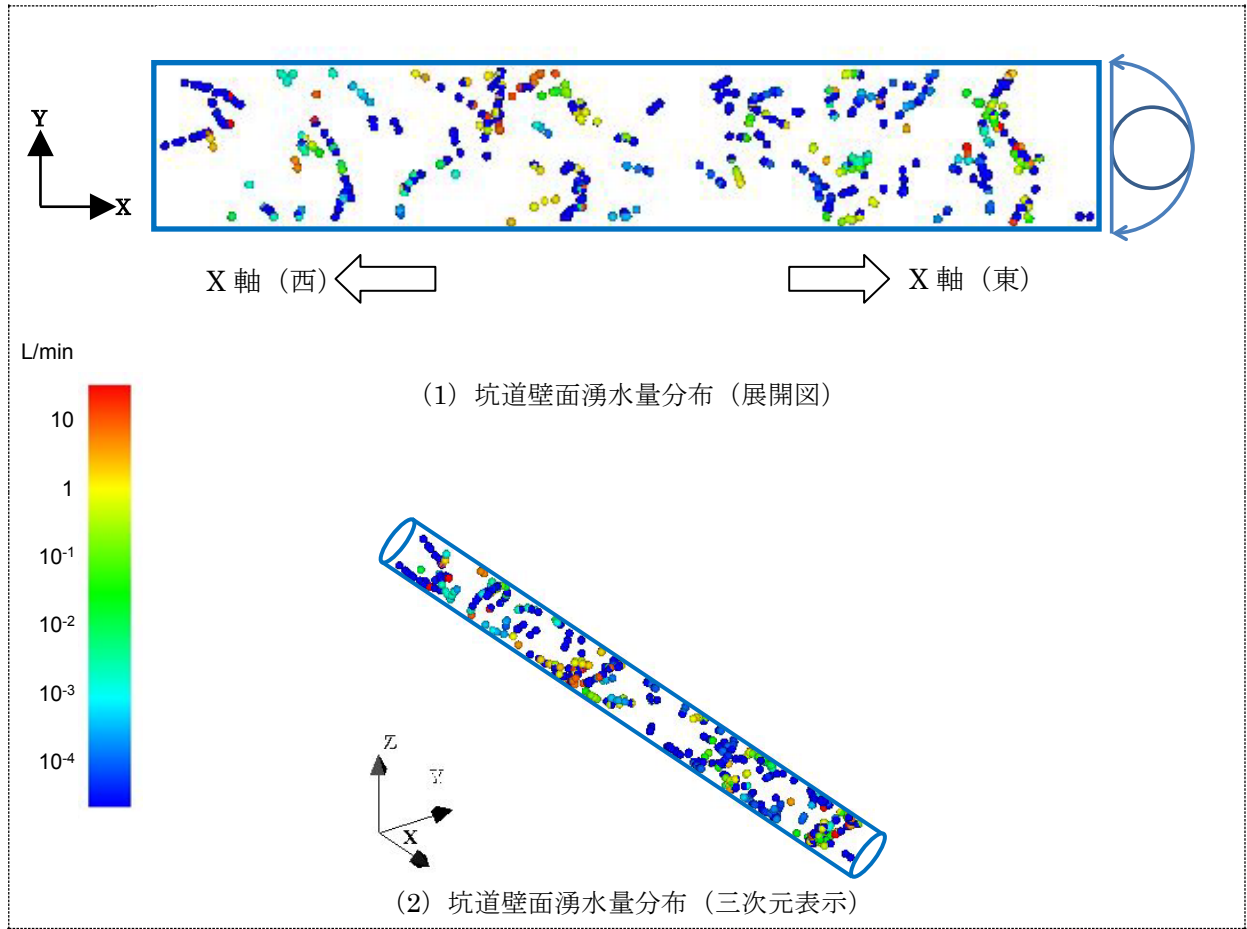


図 11.10-25 坑道壁面の湧水量分布 (HL12_09)

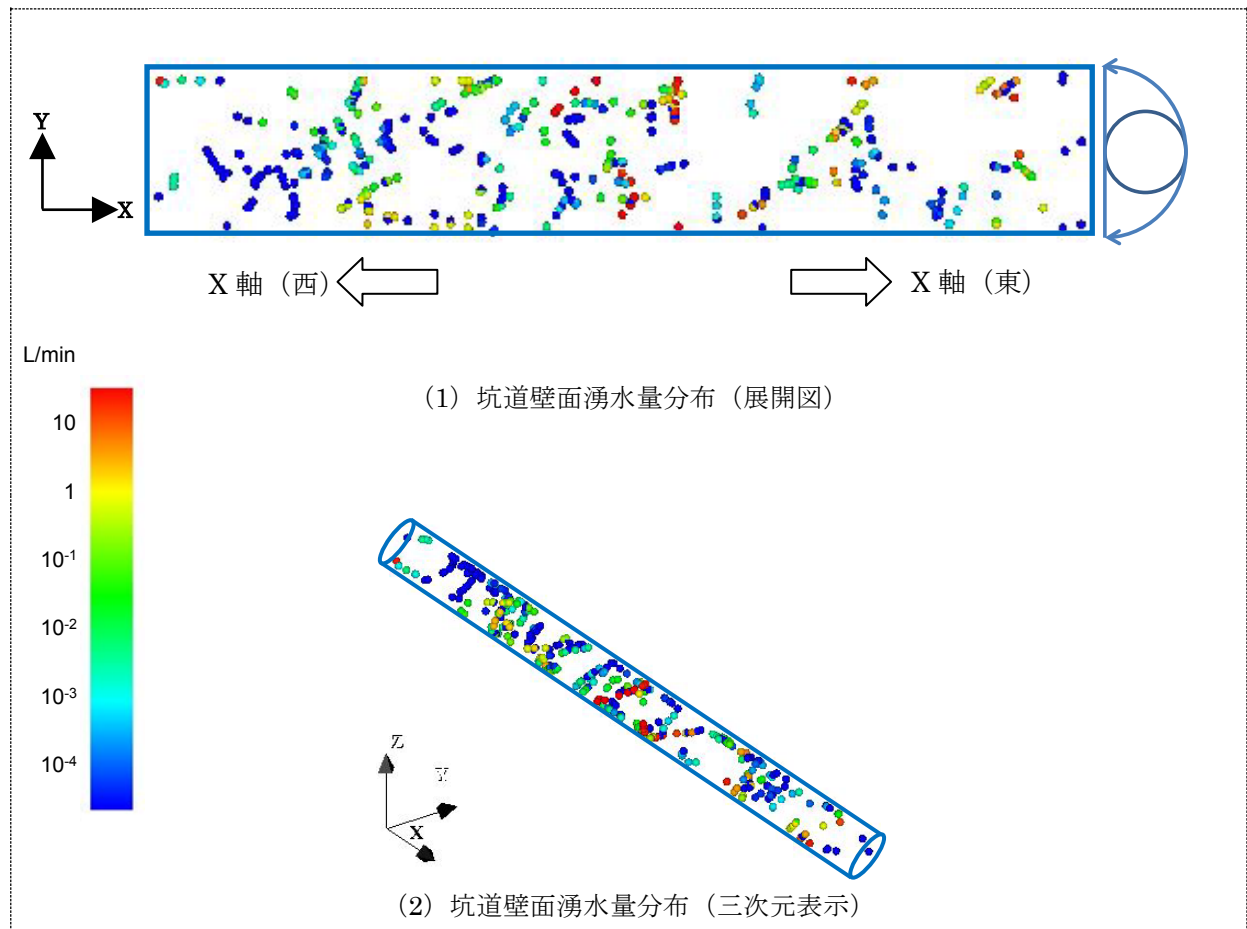


図 11.10-26 坑道壁面の湧水量分布 (HL12_10)

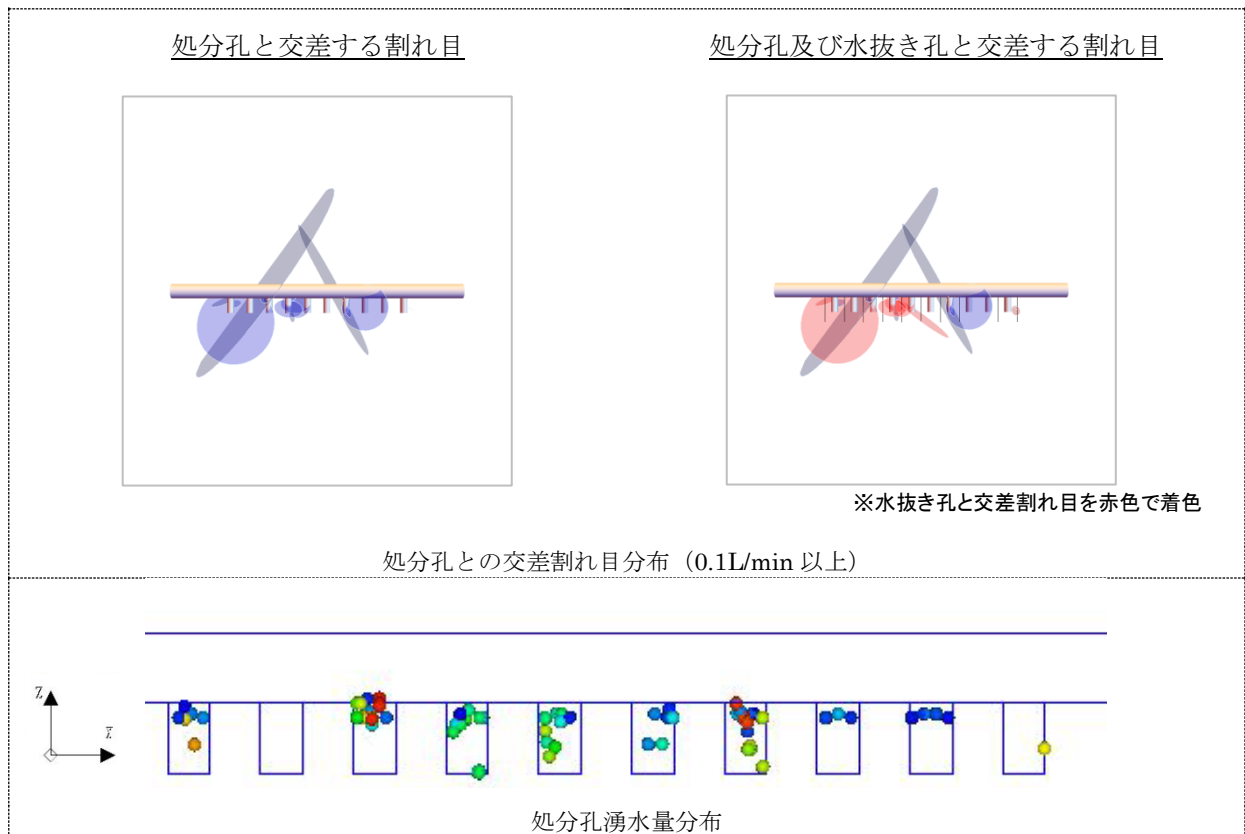


図 11.10-27 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HL12_01)

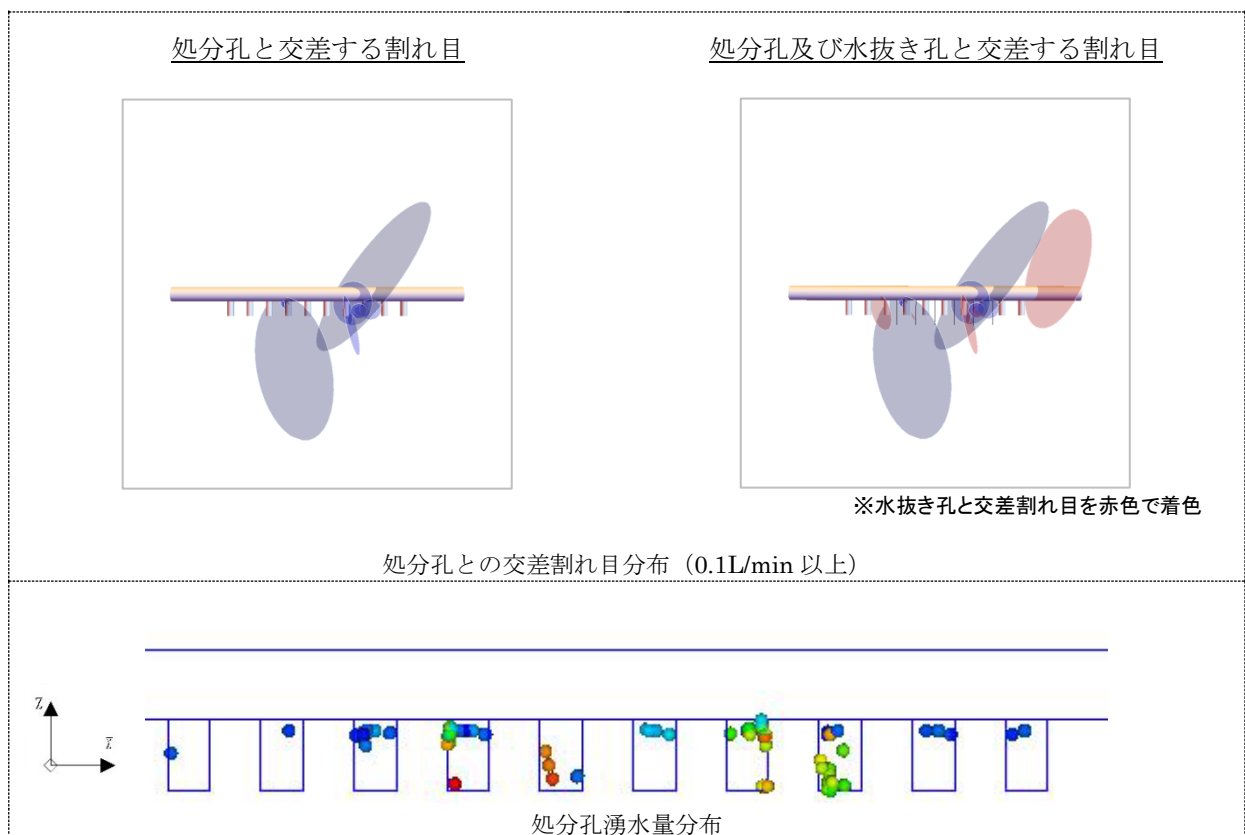


図 11.10-28 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HL12_02)

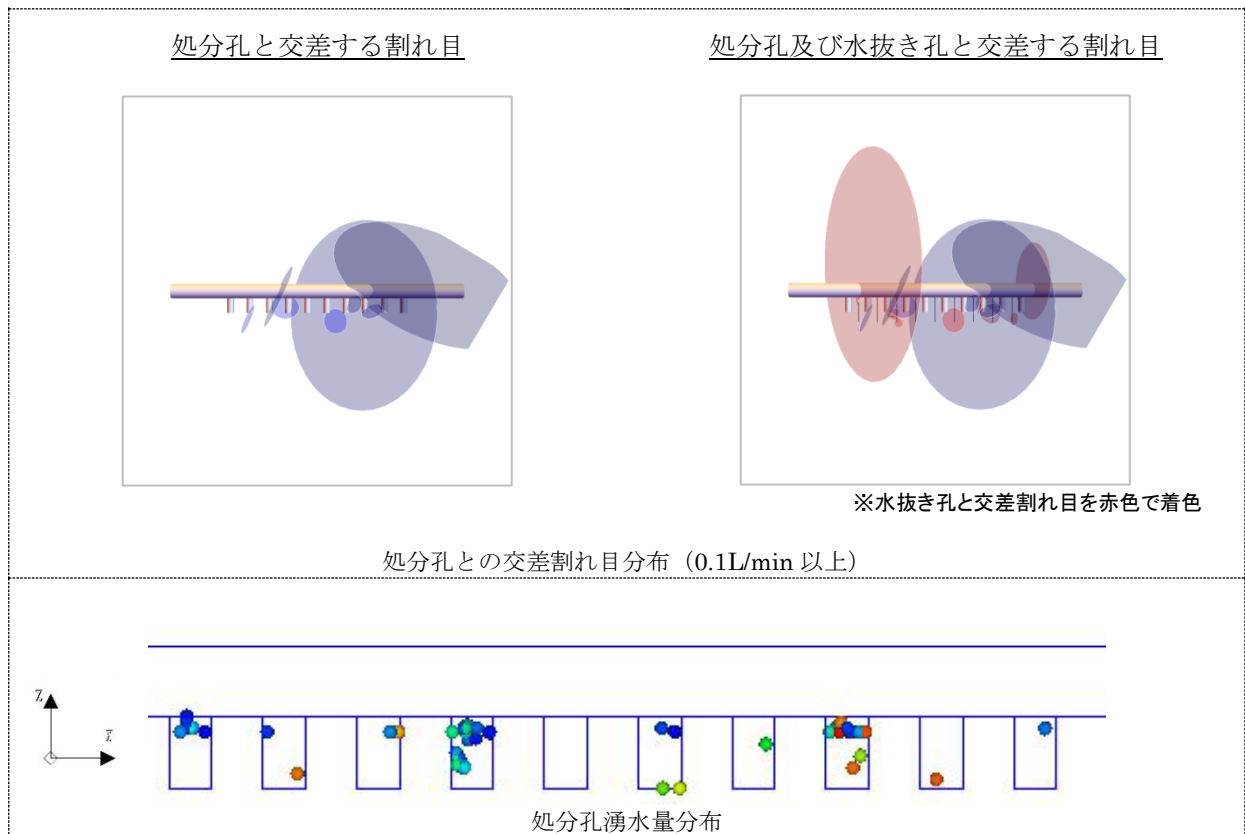


図 11.10-29 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HL12_03)

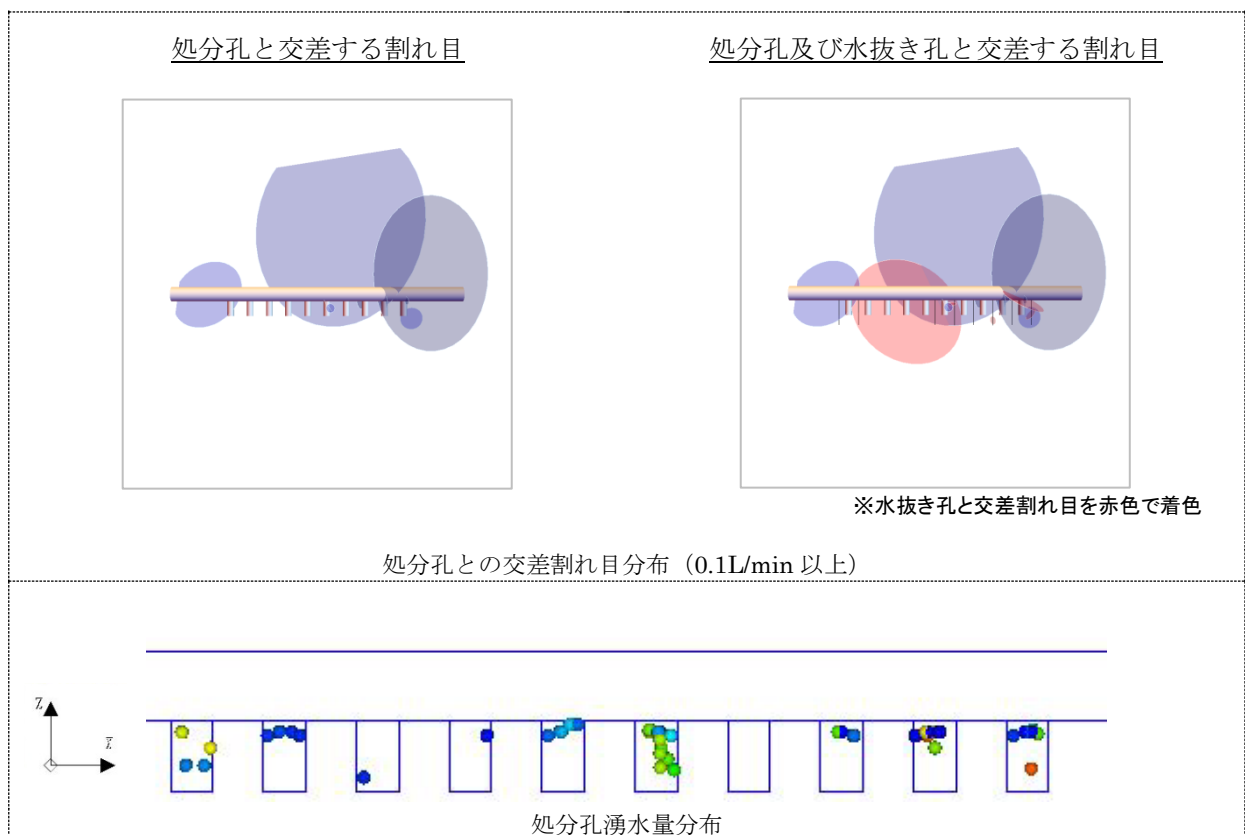
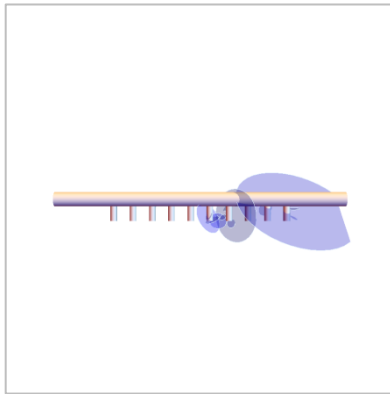
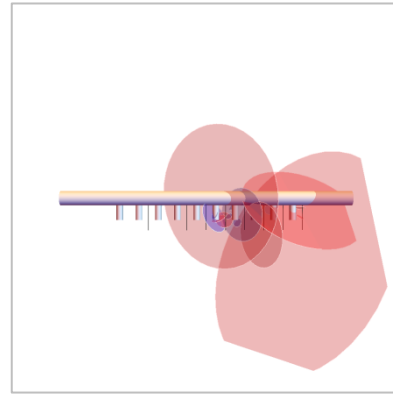


図 11.10-30 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HL12_04)

処分孔と交差する割れ目

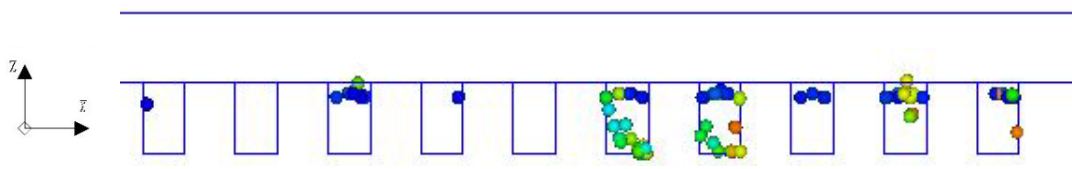


処分孔及び水抜き孔と交差する割れ目



※水抜き孔と交差割れ目を赤色で着色

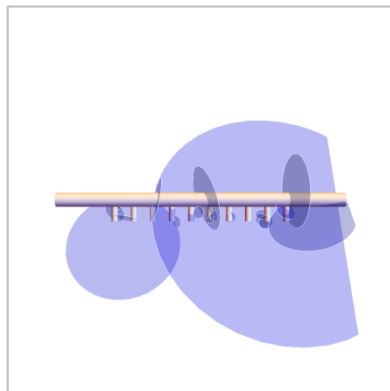
処分孔との交差割れ目分布 (0.1L/min 以上)



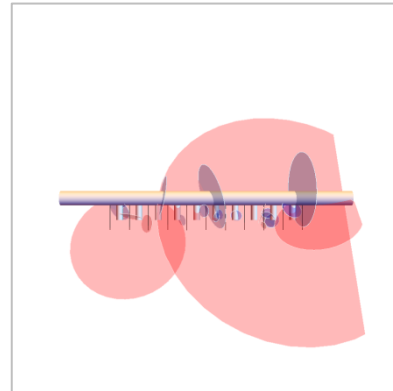
処分孔湧水量分布

図 11.10-31 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HL12_05)

処分孔と交差する割れ目

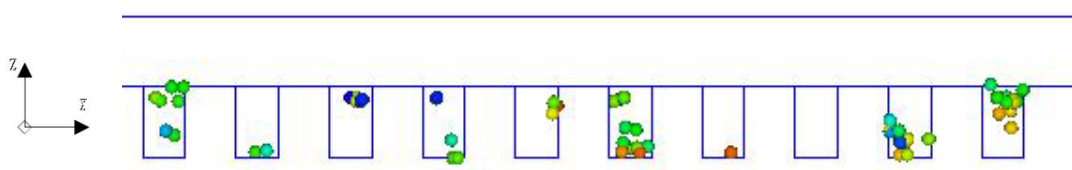


処分孔及び水抜き孔と交差する割れ目



※水抜き孔と交差割れ目を赤色で着色

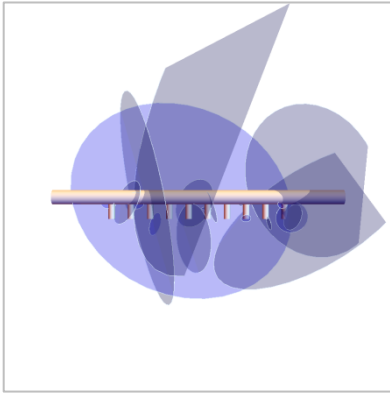
処分孔との交差割れ目分布 (0.1L/min 以上)



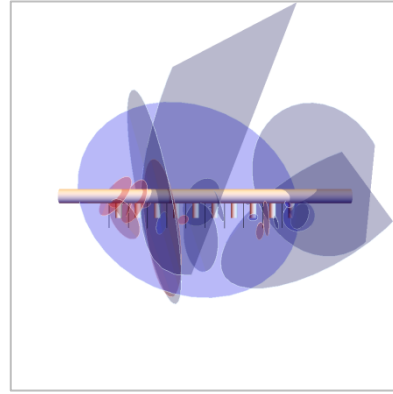
処分孔湧水量分布

図 11.10-32 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HL12_06)

処分孔と交差する割れ目

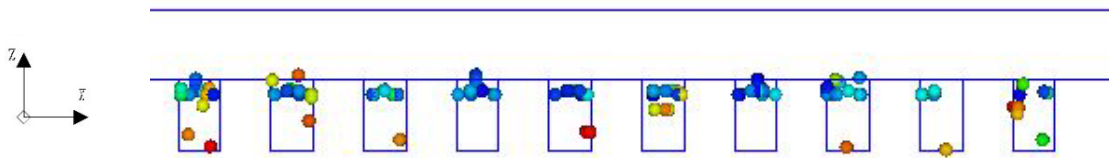


処分孔及び水抜き孔と交差する割れ目



※水抜き孔と交差割れ目を赤色で着色

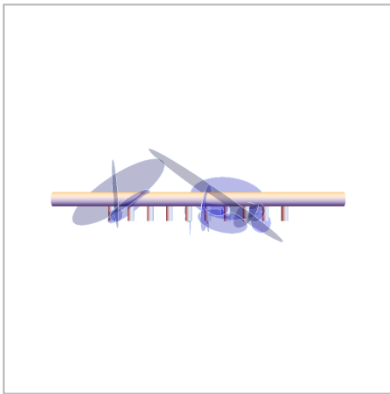
処分孔との交差割れ目分布 (0.1L/min 以上)



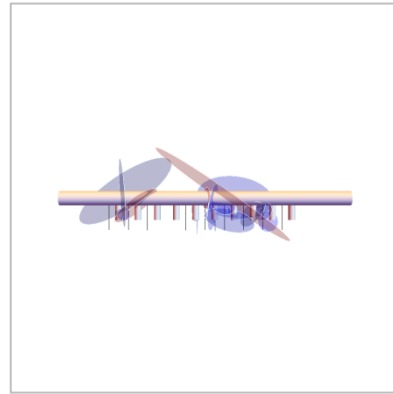
処分孔湧水量分布

図 11.10-33 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HL12_07)

処分孔と交差する割れ目

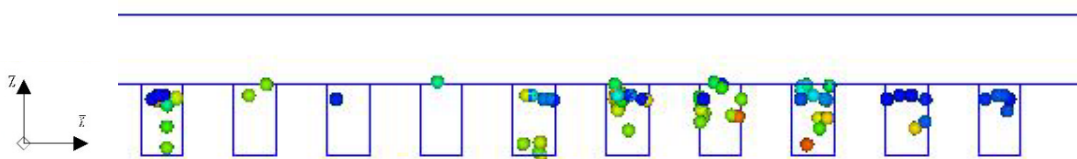


処分孔及び水抜き孔と交差する割れ目



※水抜き孔と交差割れ目を赤色で着色

処分孔との交差割れ目分布 (0.1L/min 以上)



処分孔湧水量分布

図 11.10-34 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HL12_08)

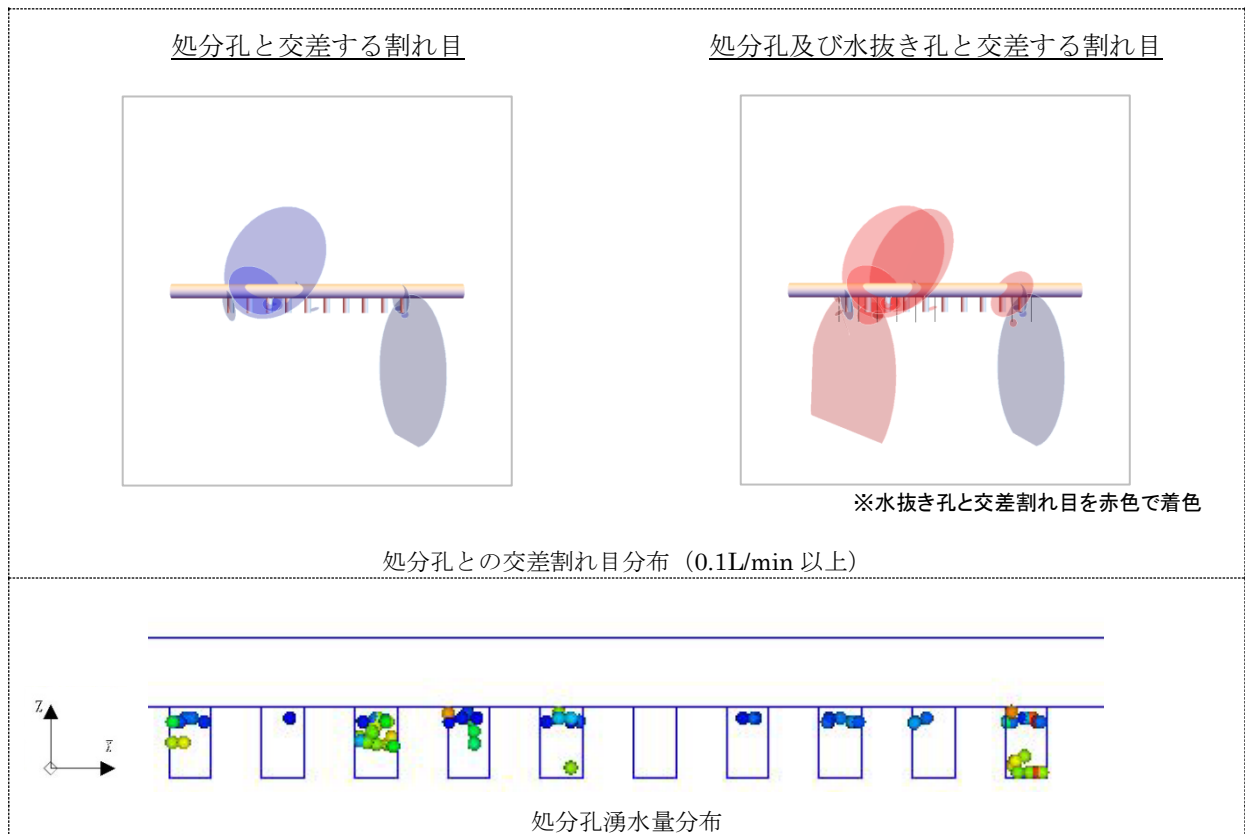


図 11.10-35 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HL12_09)

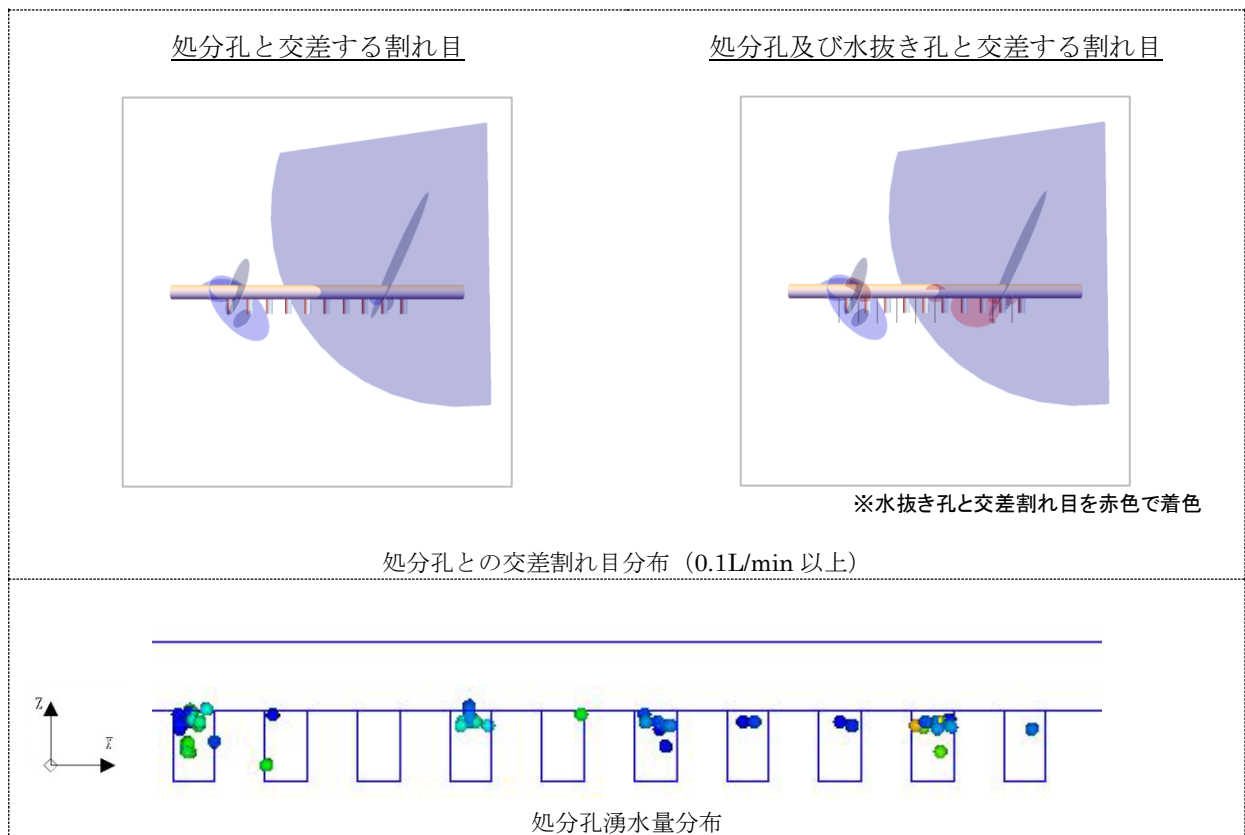


図 11.10-36 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HL12_10)

11.11 掘削影響領域へのグラウト改良のモデル化

止水対策として掘削影響領域 EDZ へのグラウトをモデル化した。グラウト改良は掘削影響領域へ設定する透水係数を低減させて設定した（図 11.11-1）。グラウトによる透水性の変化については、平成 19 年~23 年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連として JAEA が取りまとめた「地下坑道施工技術高度化開発報告書」[11]を参考にして透水係数の低下率を設定した。図 11.11-2 に示すように幌延深地層研究所でのグラウト試験の結果では注入孔②の平均ルジオン値 $1.5Lu$ に対し 50 cm 孔間の離れた確認孔②では $0.5Lu$ へ低下している。このことを参考にして掘削影響領域の透水係数を初期の 30%に低減させて計算を行うこととした。すなわち、 $1.0 \times 10^{-8}m/sec$ から $3.0 \times 10^{-9}m/sec$ に低下させて解析を行った。

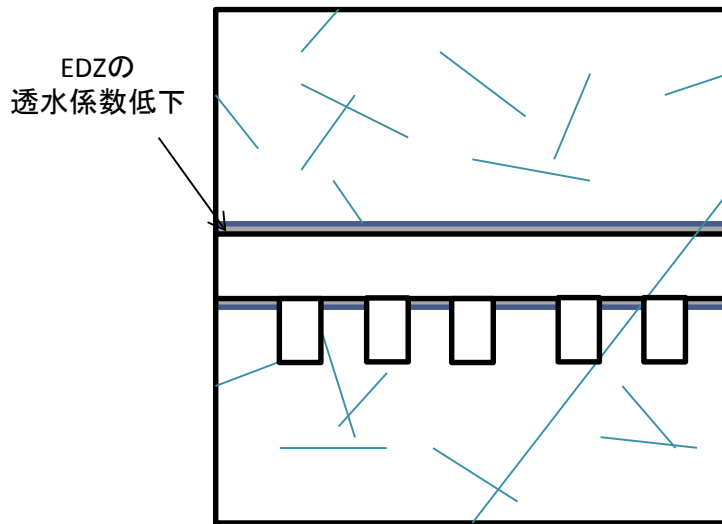


図 11.11-1 掘削影響領域へのグラウト改良の境界条件の設定方法

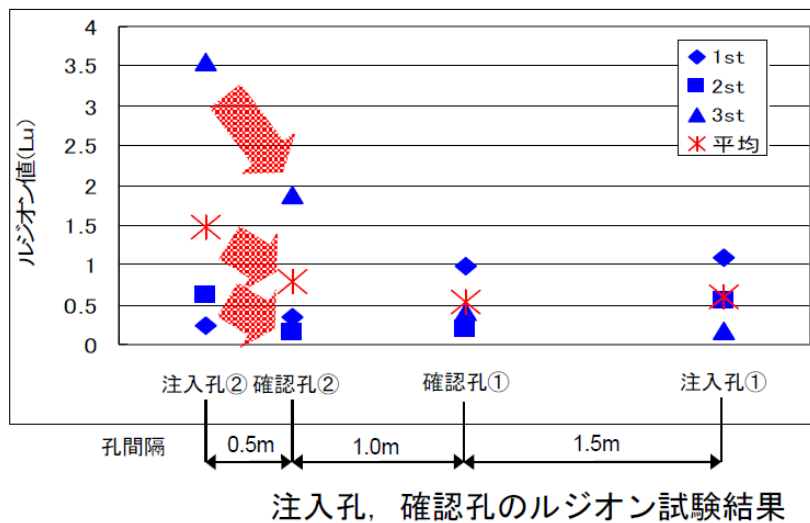


図 11.11-2 幌延 URL でのグラウト実績[11]

※：ルジオン値：岩盤の透水性を評価する指標として、主にダムの基礎岩盤等で用いられている。ボーリング孔内をパッカーで区切った試験区間内に一定圧力で注水した際の注水量として評価するもので、試験区間に 0.98 MPa の有効注水圧力で注水したときの試験区間 1 m 当たりの 1 分間の注水量(1)をルジオン値と呼ぶ。口径 66 mm (r =3.3 cm)、試験区間長 5m (L=500 cm) とすると 1 ルジオンは $1.34 \times 10^{-7} \text{m/sec}$ と換算できる。

11.12 掘削影響領域へのグラウト改良後の処分坑道及び処分孔への湧水量の算定結果

掘削影響領域へのグラウト改良後の各リアライゼーションの処分坑道への湧水量、10箇所への処分孔への湧水量を算定した。この結果と対策前の(b)処分孔掘削時(初期値)の解析結果との比較を行い止水対策の効果について検討を行った。各リアライゼーションについて、坑道、処分孔への総湧水量、各処分孔への湧水量、坑道、処分孔へ交差する主要割れ目の流量、坑道5m区間湧水量、処分孔と交差する主要割れ目の流量、処分孔交差割れ目分布と湧水量分布について整理を行った。

この結果と対策前の処分孔掘削時(初期値)の解析結果との比較を行い、止水対策の効果について検討を行った。

11.12.1 坑道湧水量及び処分孔湧水量

10リアライゼーションについて、処分孔掘削後の坑道、処分孔への湧水量及び境界面からの流入量の排水量の算定結果を表11-6に示す。各リアライゼーションで坑道湧水量、処分孔湧水量の合計値は、境界面からの流入量と一致しており、収支が合っていることが分かる。坑道湧水の10リアライゼーションの平均は1,093L/minであり、処分孔掘削時1,232L/minと比べ11%減少していることがわかる。一方、処分孔湧水は10孔合計の平均が327L/minであり、グラウト前301L/minと比べ9%増加している。EDZのグラウトにより透水係数が減少し、坑道へ流入する水が減少した結果、対策を施していない処分孔へ水が回り、湧水量が増加したものと評価できる。各リアライゼーションにおけるグラウト前後の坑道湧水量の変化を図11.12-1に、処分孔10孔合計の湧水量の変化を図11.12-2に示す。

各処分孔の湧水量を算定した結果を表11-7に示す。また、図11.12-3には処分孔毎のグラウト前後における湧水量の変化を示す。湧水量が0.1L/min以下を示す処分孔は最小で1箇所/10ピット、最大で6箇所/10ピットであり、全100処分孔の内、38箇所で0.1L/min以下を示す。これはEDZへのグラウト前と同じ数量であるが、リアライゼーション1と8で1孔減少、リアライゼーション7と10で1孔増加したことによる。

各処分孔におけるグラウト改良による湧水量の変化に着目すると、リアライゼーション7のNo.4処分孔、リアライゼーション10のNo.4で湧水量が0.1L/min以上であったものが、0.1L/min以下に変化している。詳細に見ると表11-7に示すように処分孔への湧水量が減少している処分孔は33箇所あることになる。これらは、処分孔にEDZを介して湧水していた量が減少したためである。ただしこれらの処分孔への湧水量は元々小さいため、減少量も小さい。それとは別に、リアライゼーション4のNo.9処分孔、リアライゼーション9のNo.4処分孔への湧水量の減少は、割れ目を介しての湧水量の減少である。これはEDZの透水性が変化することで水みちが変化したことによる湧水量の減少と考えられる。

表 11-6 坑道湧水量算定結果（グラウト改良後）

リアライ ゼーション	坑道湧水 (L/min)			境界面流入量 (L/min)				
	坑道湧水	処分孔 湧水	合計	南	北	下	上	合計
1	1,026	530	1,556	-7	-1,183	-324	-42	-1,556
2	557	482	1,039	-56	-264	-580	-140	-1,039
3	752	216	969	-491	-64	-222	-191	-969
4	964	152	1,116	-6	-204	-191	-715	-1,116
5	1,041	286	1,326	-52	-184	-972	-119	-1,326
6	365	274	639	-54	-140	-316	-129	-639
7	2,447	826	3,273	-467	-152	-1,513	-1,140	-3,273
8	640	209	849	-241	-178	-161	-269	-849
9	1,167	297	1,463	-25	-105	-645	-688	-1,463
10	1,975	0	1,975	-40	-271	-219	-1,445	-1,975
平均	1,093	327	1,420					
標準偏差	648	232	756					

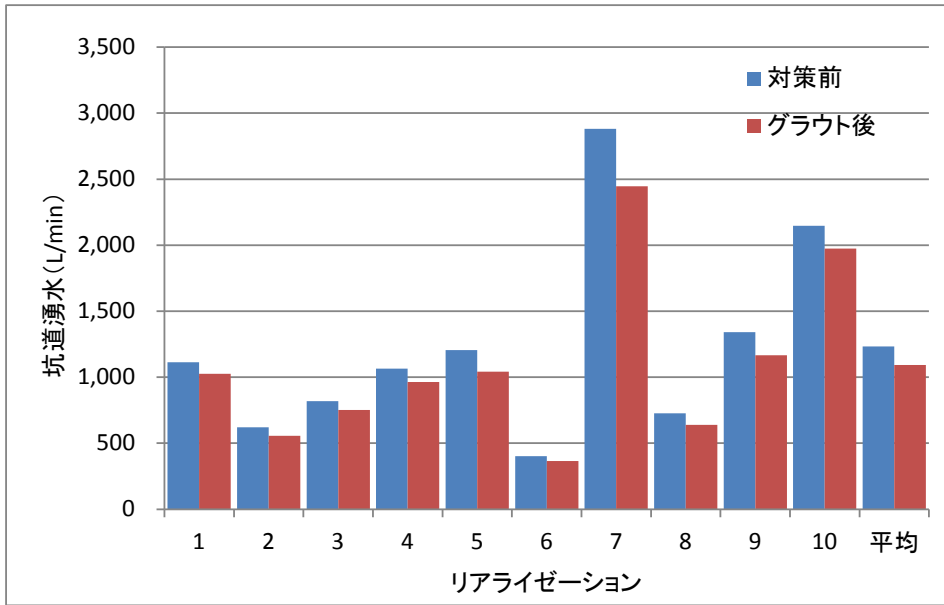


図 11.12-1 グラウト改良前後の坑道湧水量

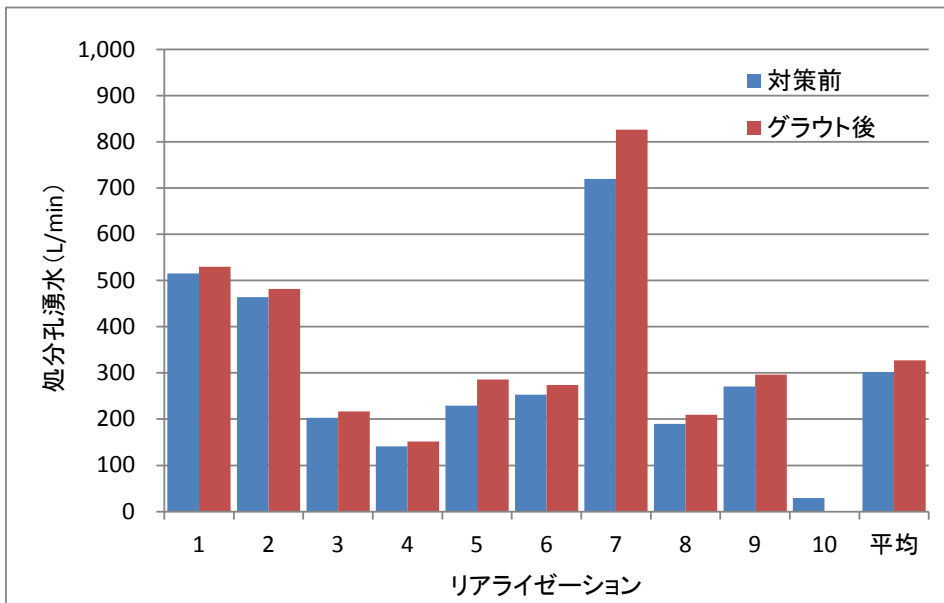


図 11.12-2 グラウト改良前後の処分孔湧水量

表 11-7 処分孔湧水量算定結果（グラウト改良前後）

リアライゼーション	処分孔 No. (L/min)										合計	湧水量 0.1L/min 以下 の処分孔 の数
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	23.63	0.00	315.70	19.33	32.67	0.13	124.21	0.01	0.01	14.26	530	3
2	0.00	0.00	0.04	327.20	57.26	0.02	53.00	44.24	0.02	0.00	482	6
3	0.03	38.45	8.84	11.22	0.00	13.71	0.55	109.85	33.84	0.00	216	3
4	72.77	0.01	0.00	0.01	0.02	15.36	0.00	1.09	23.84	38.45	152	5
5	0.00	0.00	4.28	0.00	0.00	39.09	49.39	0.01	47.07	145.85	286	5
6	12.08	8.59	10.33	35.60	46.82	45.54	59.47	0.00	25.12	30.70	274	1
7	189.73	56.50	190.98	0.05	128.54	60.15	0.03	21.22	53.29	125.67	826	2
8	22.99	3.11	0.00	0.10	31.87	37.51	29.08	75.31	9.36	0.01	209	2
9	11.34	0.00	87.61	18.06	6.00	0.00	0.01	0.01	0.01	173.60	297	5
10	3.64	0.31	0.00	0.03	0.17	0.05	0.00	0.02	27.79	0.00	32	6

赤字は 0.1L/min 以上の処分孔

枠囲みは、処分孔掘削時の湧水より減少した処分孔

湧水量の減衰率（グラウト改良前を基準、0.1L/min 以上の孔を対象）

リアライゼーション	処分孔No.(%)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	41.3%	0.0%	1.1%	5.8%	1.8%	0.0%	1.8%	0.0%	0.0%	2.8%
2	0.0%	0.0%	0.0%	3.0%	3.8%	0.0%	6.6%	8.0%	0.0%	0.0%
3	0.0%	10.6%	7.6%	0.2%	0.0%	8.1%	312.0%	2.4%	19.1%	0.0%
4	8.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	18.5%	0.0%	118.2%	-3.6%	7.4%
5	0.0%	0.0%	63.8%	0.0%	0.0%	19.1%	20.7%	0.0%	20.9%	28.3%
6	23.5%	13.5%	13.1%	8.7%	2.8%	9.4%	6.4%	0.0%	7.8%	12.4%
7	39.2%	13.2%	1.3%	-60.8%	8.4%	18.2%	0.0%	1.4%	14.4%	16.4%
8	18.3%	-4.0%	0.0%	0.0%	4.3%	5.5%	11.9%	13.7%	9.2%	0.0%
9	10.5%	0.0%	46.8%	-21.9%	18.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.5%
10	76.5%	91.7%	0.0%	-68.3%	2.0%	0.0%	0.0%	0.0%	4.5%	0.0%

赤字は湧水量が減衰した処分孔

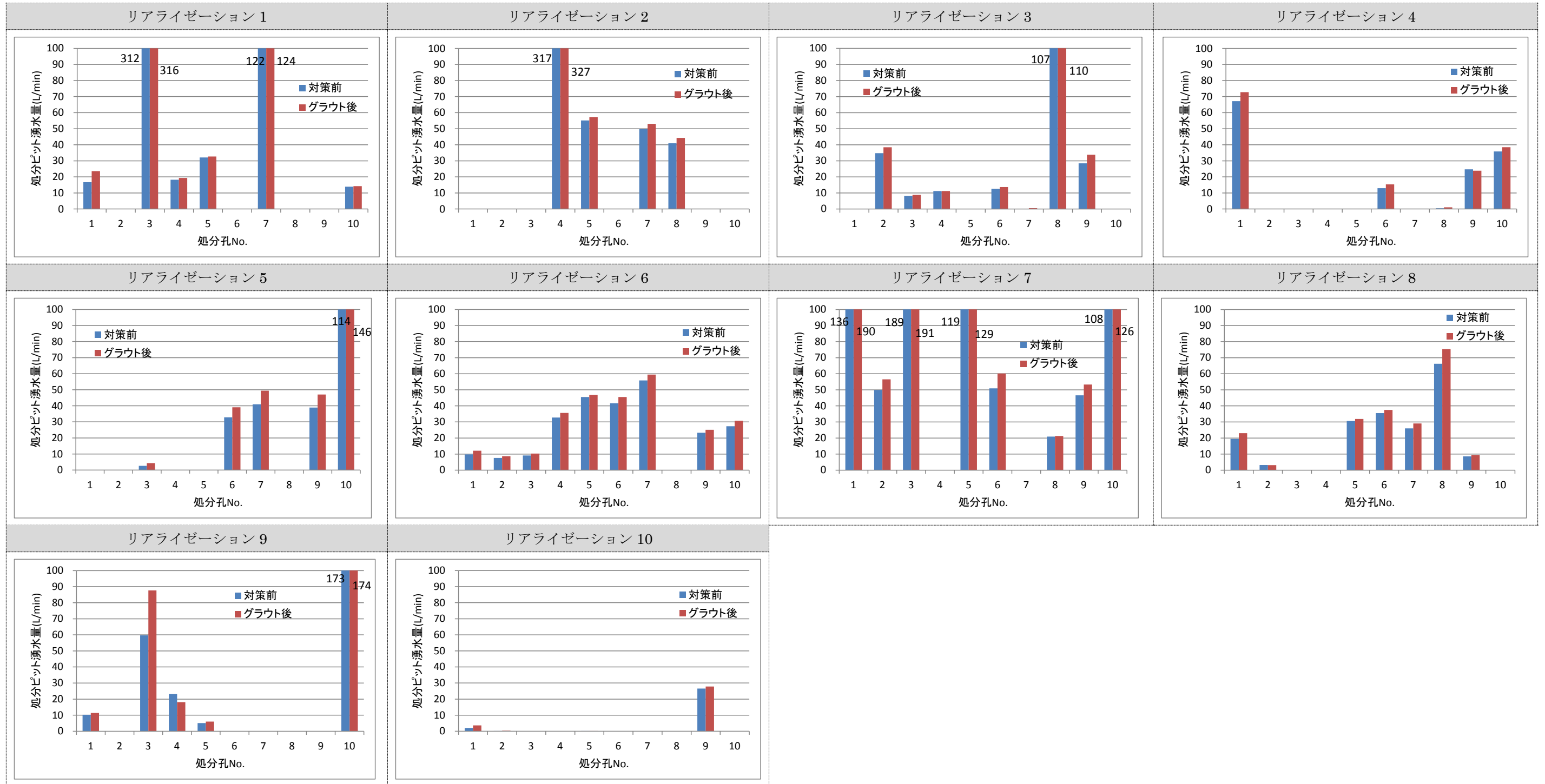


図 11.12-3 処分孔毎の湧水量（グラウト改良前後）

11.12.2 坑道 5m 区間湧水量

各リアライゼーションの坑道沿い 5m ごとに坑道湧水量を集計した結果を図 11.12-4～図 11.12-13 に示す。EDZ へのグラウト前に比べ湧水量が減っていることが分かる。

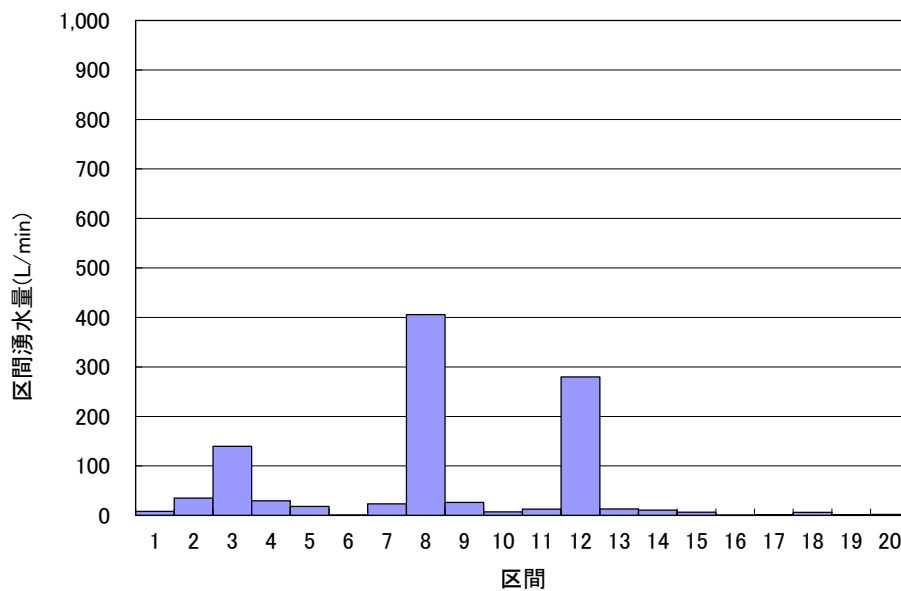


図 11.12-4 区間湧水量集計結果 (HL12_01)

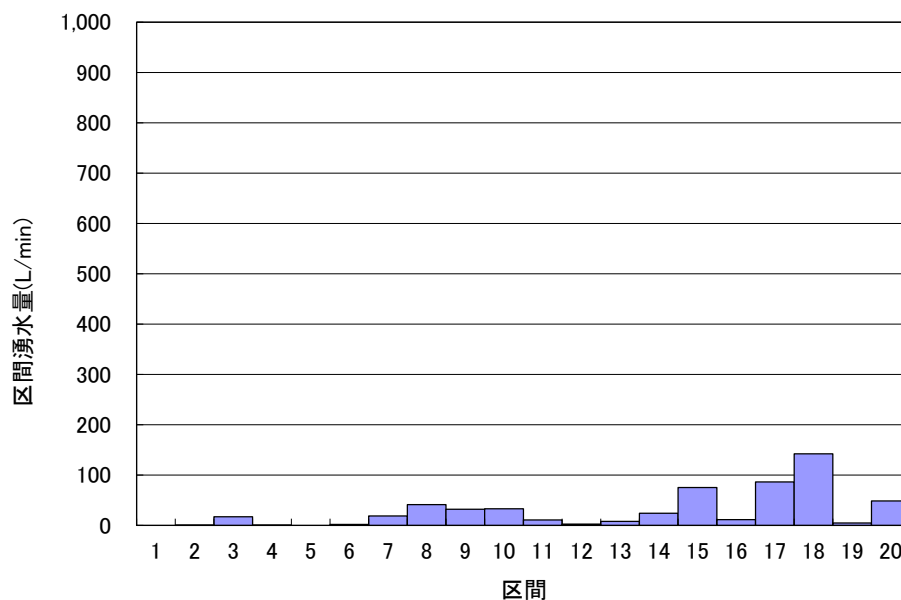


図 11.12-5 区間湧水量集計結果 (HL12_02)

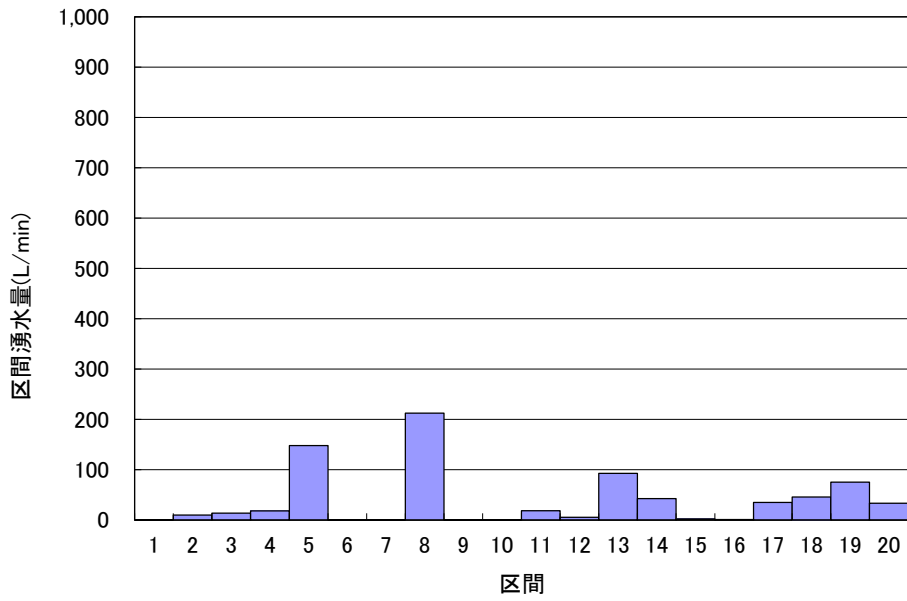


図 11.12-6 区間湧水量集計結果 (HL12_03)

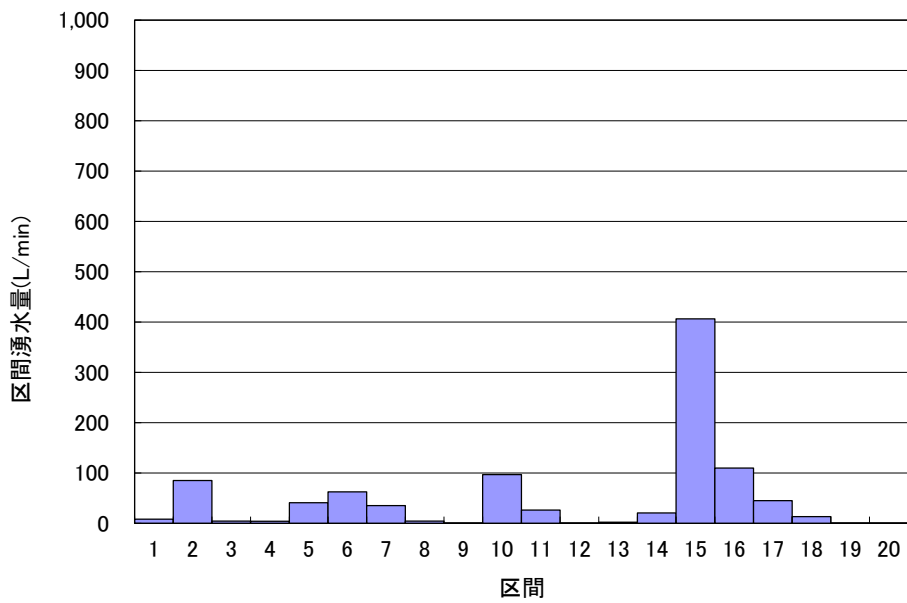


図 11.12-7 区間湧水量集計結果 (HL12_04)

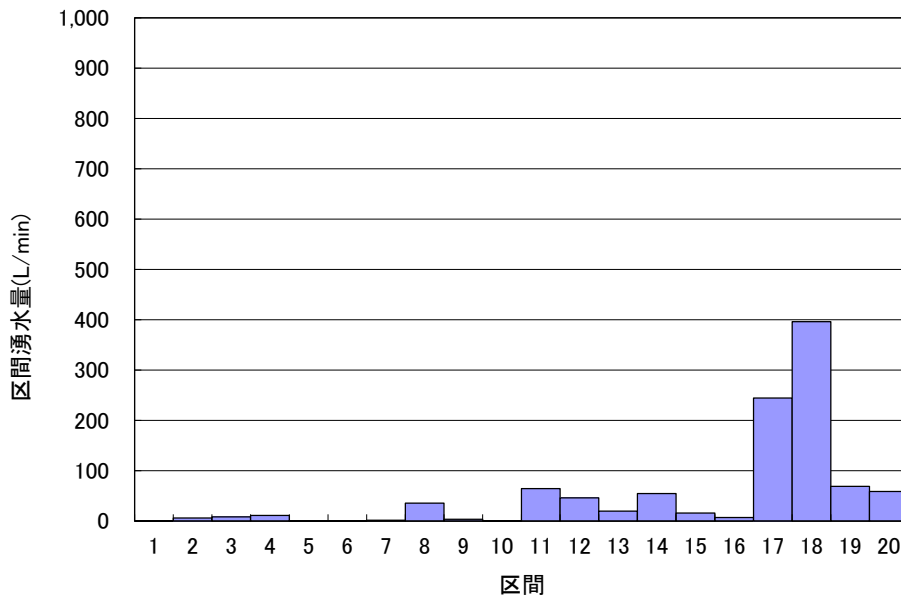


図 11.12-8 区間湧水量集計結果 (HL12_05)

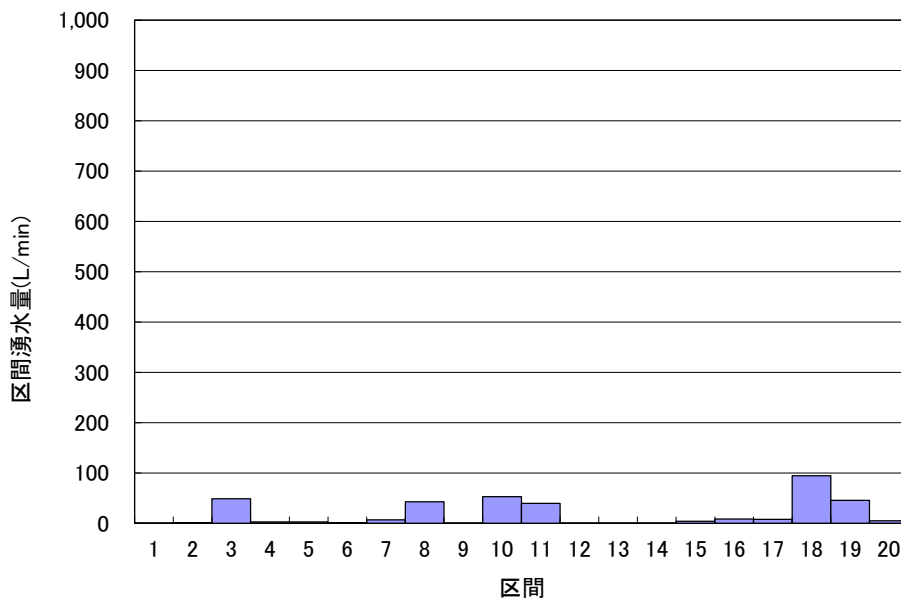


図 11.12-9 区間湧水量集計結果 (HL12_06)

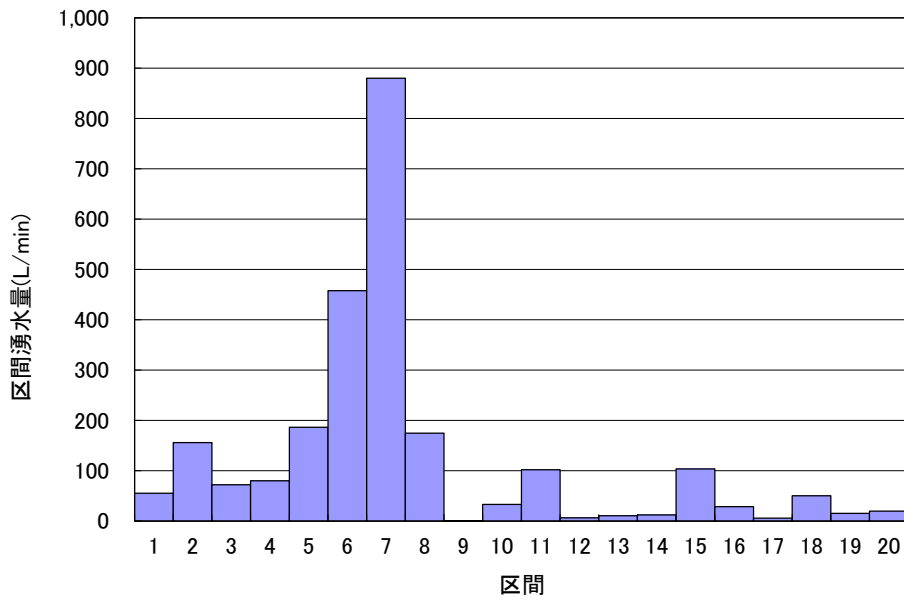


図 11.12-10 区間湧水量集計結果 (HL12_07)

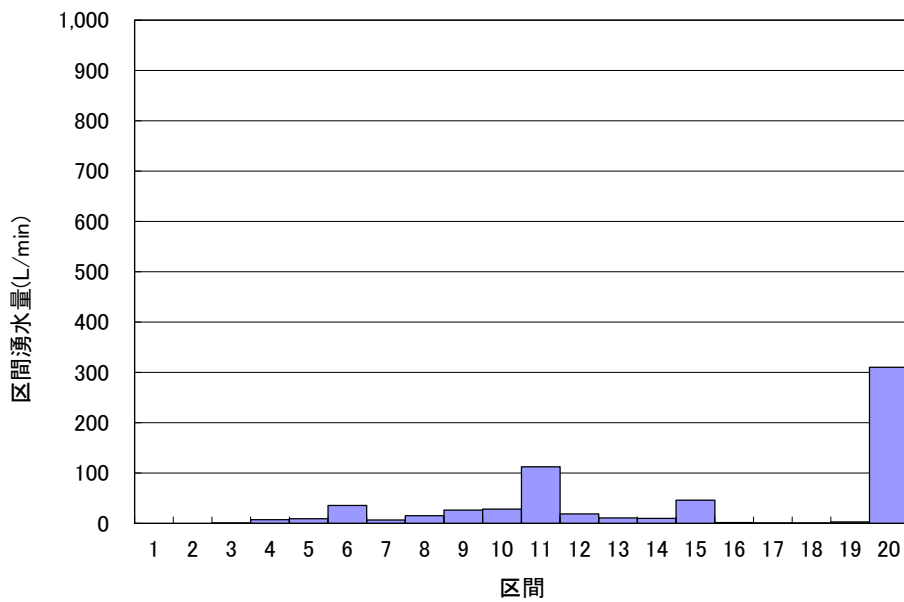


図 11.12-11 区間湧水量集計結果 (HL12_08)

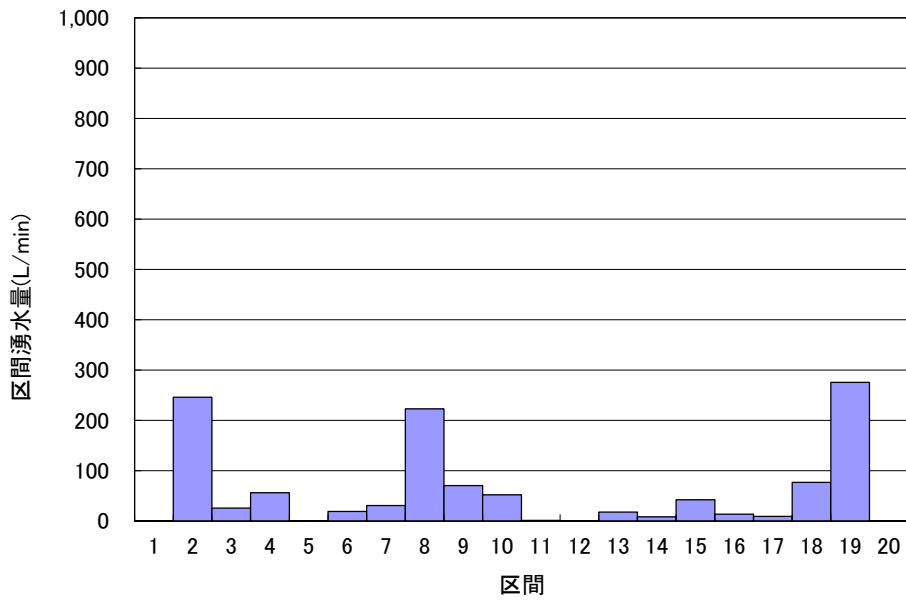


図 11.12-12 区間湧水量集計結果 (HL12_09)

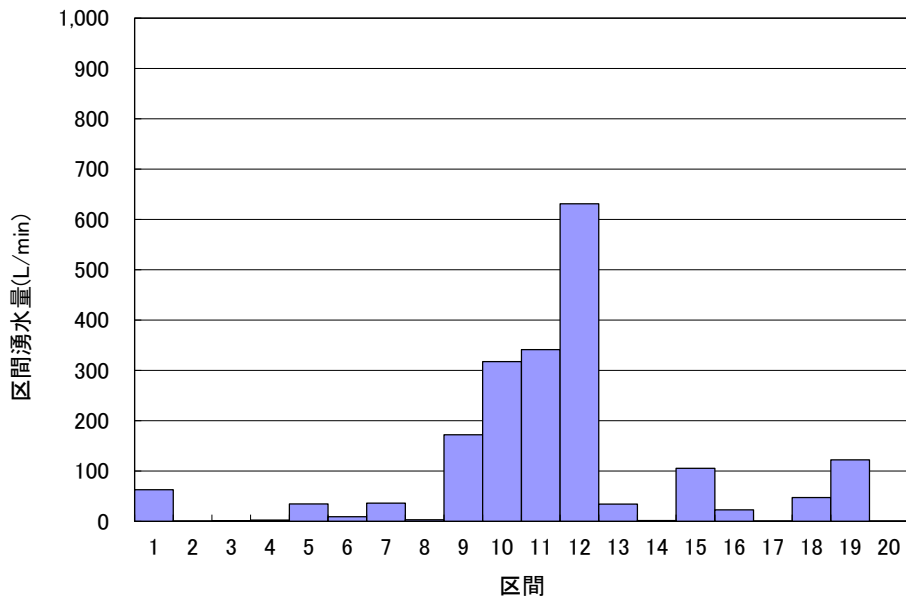


図 11.12-13 区間湧水量集計結果 (HL12_10)

11.12.3 坑道と交差する割れ目の流量

坑道に交差する割れ目の内、6.0L/min以上の流量をもつ割れ目の流量を表 11-8 に示す。また、各処分孔と交差する割れ目の内、0.1L/min以上の流量をもつ割れ目の流量を表 11-9 に示す。

表 11-8 坑道に交差する主要割れ目の流量算定結果 (EDZ グラウト後)

リアライゼーション1		リアライゼーション2		リアライゼーション3		リアライゼーション4		リアライゼーション5		リアライゼーション6		リアライゼーション7		リアライゼーション8		リアライゼーション9		リアライゼーション10	
HL12_01		HL12_02		HL12_03		HL12_04		HL12_05		HL12_06		HL12_07		HL12_08		HL12_09		HL12_10	
割れ目 番号	流量 (L/min)	割れ目 番号	流量 (L/min)	割れ目 番号	流量 (L/min)	割れ目 番号	流量 (L/min)	割れ目 番号	流量 (L/min)	割れ目 番号	流量 (L/min)	割れ目 番号	流量 (L/min)	割れ目 番号	流量 (L/min)	割れ目 番号	流量 (L/min)	割れ目 番号	流量 (L/min)
6454	487.5	12526	98.3	16651	136.8	17366	389.5	4014	484.0	10810	84.2	3384	801.6	7105	217.6	20205	241.8	4427	810.0
21301	277.9	2542	63.4	12689	112.8	14300	102.7	12033	94.5	7268	68.1	9732	410.4	8591	88.4	4438	234.6	18827	619.6
21036	121.1	10782	62.3	9528	76.4	3824	86.2	4978	72.8	7789	37.9	16968	315.8	5198	56.3	10445	122.3	13989	95.5
1952	41.9	13563	55.3	19751	63.9	16513	82.8	20779	67.0	12835	27.9	17077	172.4	3193	31.7	473	121.8	10137	84.7
2354	34.7	12656	54.8	16196	55.9	10715	47.2	8627	50.3	15951	26.2	18801	85.9	2848	24.4	3843	64.5	3486	66.3
17495	32.5	20216	38.5	13953	54.8	12600	44.2	10626	50.2	6207	24.9	15881	70.9	8755	20.7	16670	55.0	18195	62.6
3537	30.6	15269	33.6	10976	39.3	10337	28.4	16403	39.5	17969	14.2	6097	54.8	5385	19.8	18548	32.4	731	34.0
5345	29.4	13903	20.3	17795	30.8	11590	25.9	14975	34.5	11829	13.1	6917	53.0	3772	18.7	19672	28.5	46	29.1
3125	27.4	15847	16.8	2568	29.5	17732	13.9	8724	22.5	18349	12.6	17787	39.8	19316	14.2	13214	25.3	11775	22.9
15572	23.7	15403	12.7	20211	29.3	1456	11.3	17816	20.5	19340	10.3	2706	37.7	8090	12.4	3707	23.0	4029	18.2
16674	13.8	13985	10.1	14978	19.0	4459	10.6	13928	19.1	3493	6.2	7573	35.5	19876	10.0	18836	23.0	2908	14.6
1498	10.2	5472	9.5	6714	15.0	20179	9.9	14843	14.6			11581	35.2	17327	9.7	14695	20.7	14332	10.7
16242	9.9	14167	7.6	16625	11.9	3565	8.4	5843	12.3			15997	31.3	20291	8.8	508	20.7	4509	9.7
11923	8.8	18286	7.1	14377	11.3	1722	8.4	13860	11.0			16329	26.7	15542	8.5	800	20.5	10382	9.7
15443	7.6	12659	6.7	17600	9.3	17180	8.1	1560	9.8			15575	25.8	733	7.8	2711	12.8	18239	8.3
13561	6.2			20116	8.5	17841	7.9	288	6.9			3969	25.5	6722	6.6	17540	12.4	5824	8.2
				8123	6.2	365	7.4					11352	22.9	19499	6.2	14157	11.5	4710	6.2
						10206	6.4					9289	21.2			20141	11.0		
						8734	6.4					7129	20.6			13491	10.9		
						8808	6.3					11521	19.3			2031	9.4		
						16877	6.0					16237	16.9			16942	9.2		
												5690	16.6			19907	8.4		
												15096	14.5			14884	6.3		
												11609	12.9						
												17404	10.4						
												17206	10.2						
												10125	9.9						
												4440	8.6						
												16072	7.2						
												12288	6.9						
												17830	6.3						

表 11-9 処分孔に交差する主要割れ目の流量算定結果 (EDZ グラウト後)

リアライゼーション1			リアライゼーション2			リアライゼーション3			リアライゼーション4			リアライゼーション5		
HL12_01pit	割れ目番号	流量(L/min)	HL12_02pit	割れ目番号	流量(L/min)	HL12_03pit	割れ目番号	流量(L/min)	HL12_04pit	割れ目番号	流量(L/min)	HL12_05pit	割れ目番号	流量(L/min)
1	10297	13.4	4	1738	14.2	2	18991	38.4	1	5270	14.4	3	4329	4.3
	11039	10.2		11566	4.3	3	19751	8.8		10206	58.4		2237	0.8
3	665	1.1		15269	307.9	4	189	8.4	6	1986	6.8	6	10858	15.6
	3537	7.1		16385	0.8		3105	2.2		3089	2.2		10930	21.5
	6454	262.7	12860	57.2	14194		0.4	17180		6.3	16408		0.3	
	7021	44.8	4712	10.9	20425		0.2	8	21748	1.1	19633		0.4	
4	4026	0.5	7	13639	29.1	6	3909	13.7	9	10715	4.3	7	20128	0.6
	11216	4.4		19499	13.0	7	13745	0.6		17366	15.8		6796	1.4
	12066	6.1	8	3891	0.5	8	1353	1.2	20179	3.8	10543		0.4	
	12887	4.2		8371	13.2		9528	73.6	10	350	1.0		11873	4.7
21496	4.0	10284		5.4	10976		35.0	8439	37.5	17816	40.5			
11216	7.4	10782		17.7	9		17873	33.8			19588	2.4		
5	12066	25.3		14423	7.4									
6	20216	0.1										9	4349	2.8
7	1498	2.4											8627	10.3
	14531	10.0											13860	20.6
	21301	111.8										18988	13.3	
10	6825	14.3										10	3366	38.5
													4349	1.9
													6066	29.2
													8627	76.3

リアライゼーション6			リアライゼーション7			リアライゼーション8			リアライゼーション9			リアライゼーション10			
HL12_06pit	割れ目番号	流量(L/min)	HL12_07pit	割れ目番号	流量(L/min)	HL12_08pit	割れ目番号	流量(L/min)	HL12_09pit	割れ目番号	流量(L/min)	HL12_10pit	割れ目番号	流量(L/min)	
1	380	4.8	1	5019	0.3	1	2848	14.9	1	19782	11.3	1	3920	0.6	
	9404	5.9		6097	173.4		12645	2.2		1972	24.4		6565	0.2	
	18820	1.4		17404	15.9		19499	5.9		3843	3.4		11775	2.7	
2	9404	8.6	2	ゆるみ域	0.1	2	17832	3.1	3	5662	10.2	2	14696	0.1	
3	18054	10.3		3384	34.1	4	20728	0.1		11175	14.2		2646	0.3	
4	2493	5.0		3969	12.1	5	7234	1.6		13062	6.4		5	4427	0.2
	2715	16.2		5806	5.0		10480	28.2		17825	29.0		9	1824	0.8
5	7268	14.4	18801	5.0	6	16989	2.1	643	0.1	2065	6.5				
	7268	43.1	16968	30.4		1023	1.1	4	4609	2.1	5987	0.1			
6	10250	3.7	18476	160.6	6	3247	4.9	5	10445	15.9	13989	20.4			
	4996	0.3	12732	128.5		3349	8.6	10	8216	2.3					
	7268	0.1	8792	10.0		6593	7.3		13491	3.7					
	11829	26.7	6	9289		29.6	11087	15.6	3069	3.1					
7	14296	6.8	8	16329	20.6	7	4943	0.7	10	11404	1.7				
	14723	11.7		8291	20.2		6593	22.5		14884	21.3				
	7517	59.5		11609	0.9		8591	1.1		16942	147.5				
9	1495	7.4	9	13479	53.2	8	9091	0.6							
	8877	5.4	10	7385	0.4		11087	4.2							
	17805	12.3		7573	89.9		11265	0.2							
10	6207	8.7		8893	20.9	9	12915	72.0							
	6936	2.2	15881	14.0	20645		3.1								
	19340	19.8	17996	0.5	12075		9.4								

11.12.4 坑道壁面湧水量分布及び処分孔湧水量分布

各リアライゼーションの坑道壁面の湧水量分布を図 11.12-14～図 11.12-23 に示す。また、処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布を図 11.12-24～図 11.12-33 に示す。

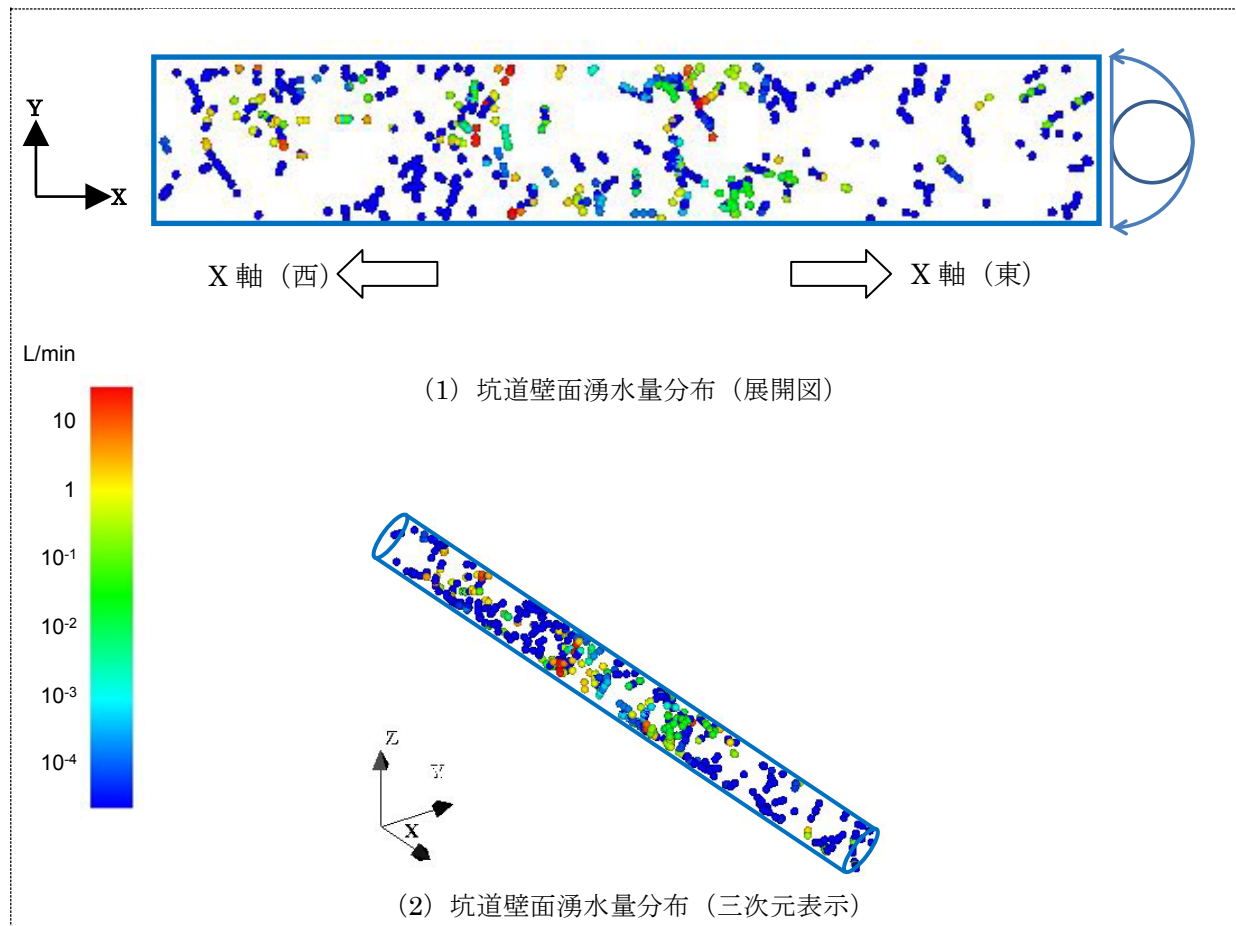


図 11.12-14 坑道壁面割れ目分布 (HL12_01)

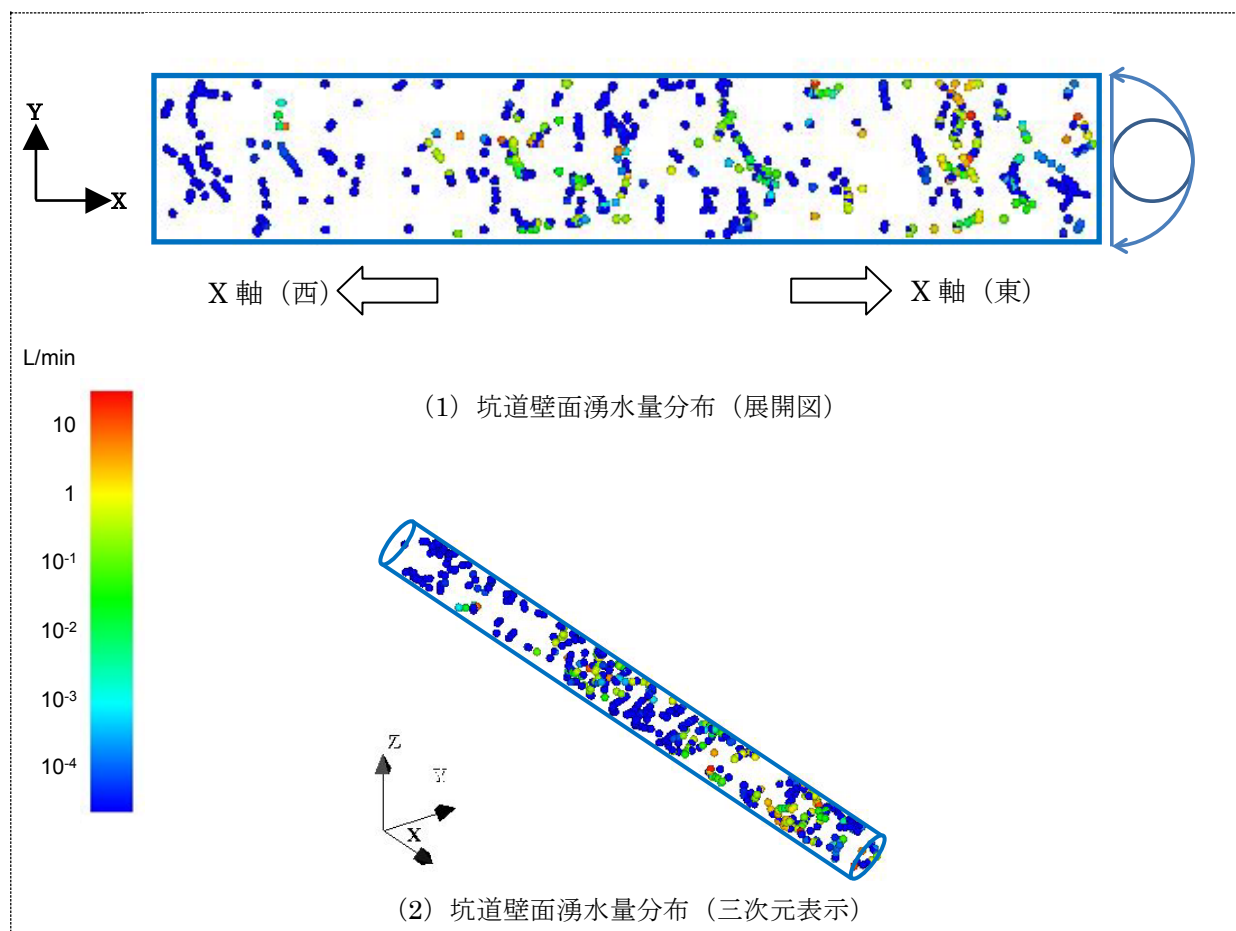


図 11.12-15 坑道壁面割れ目分布 (HL12_02)

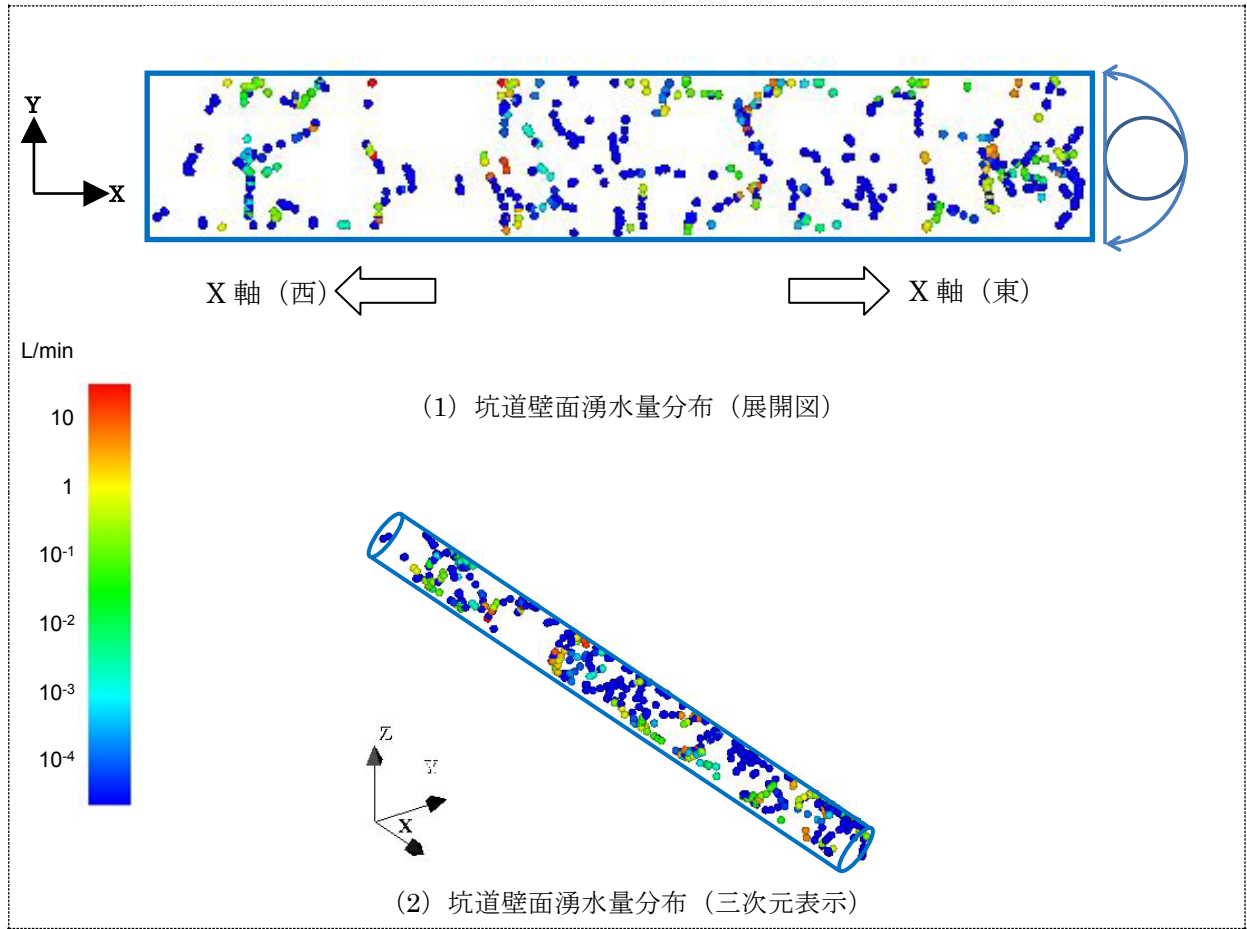


図 11.12-16 坑道壁面割れ目分布 (HL12_03)

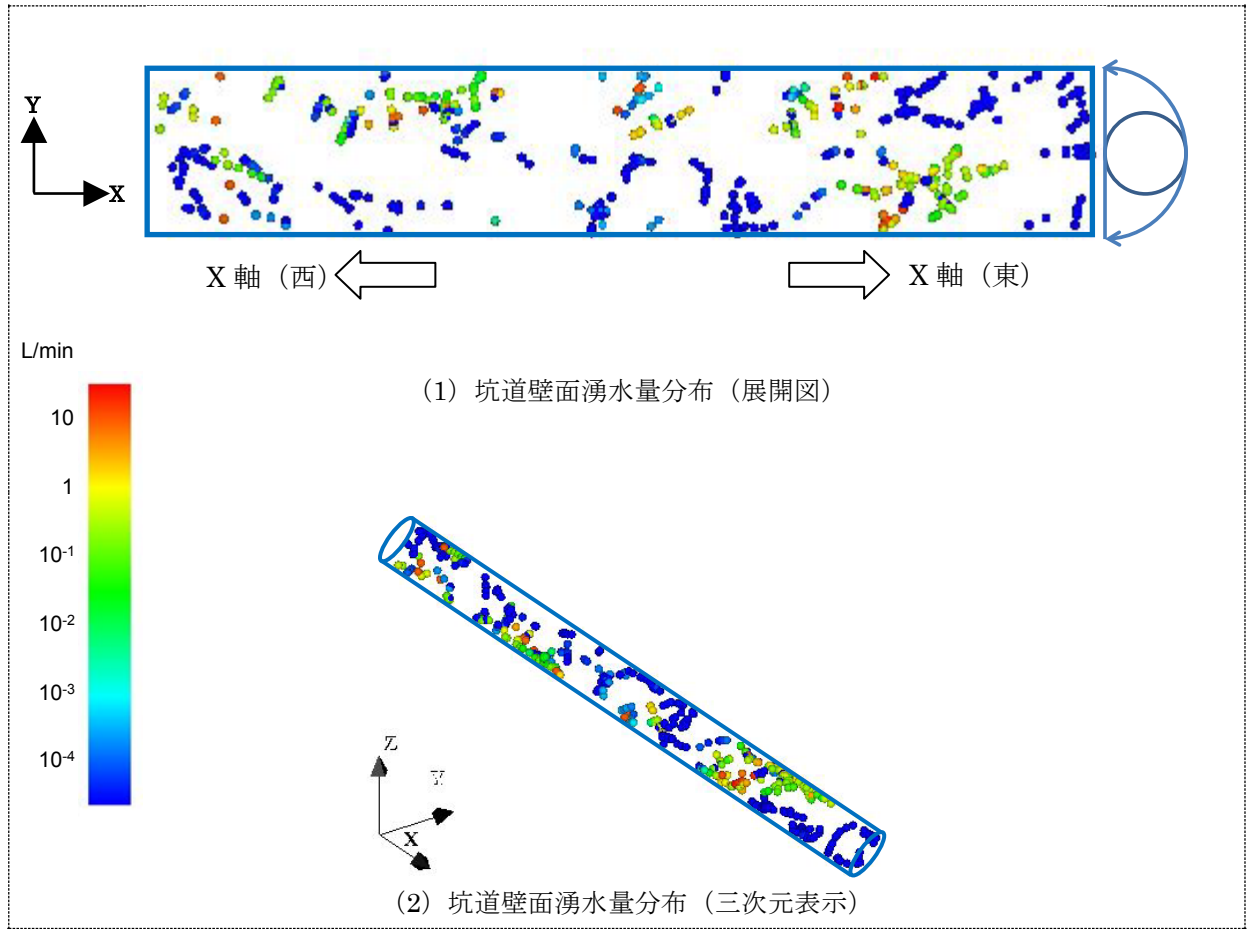


図 11.12-17 坑道壁面割れ目分布 (HL12_04)

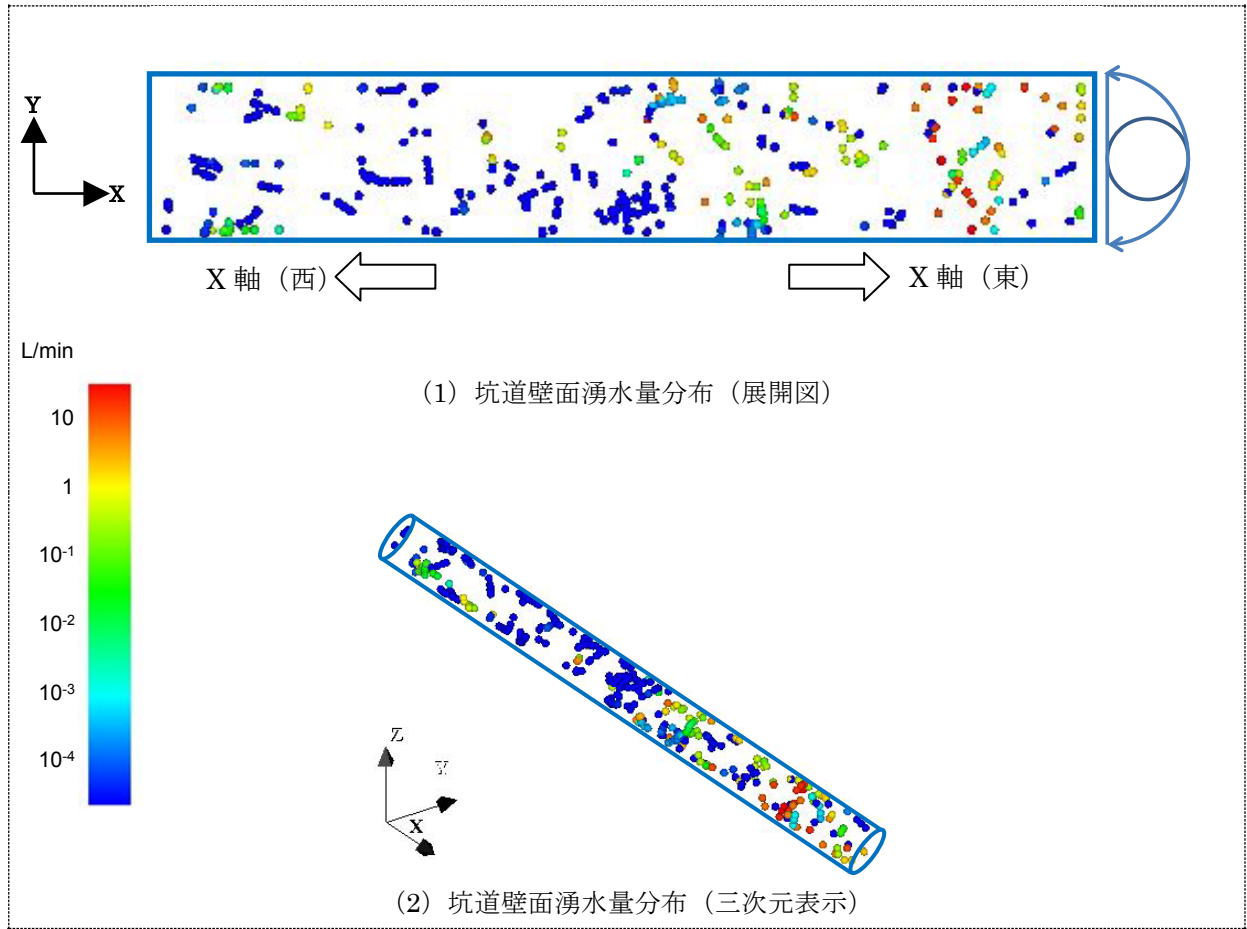


図 11.12-18 坑道壁面割れ目分布 (HL12_05)

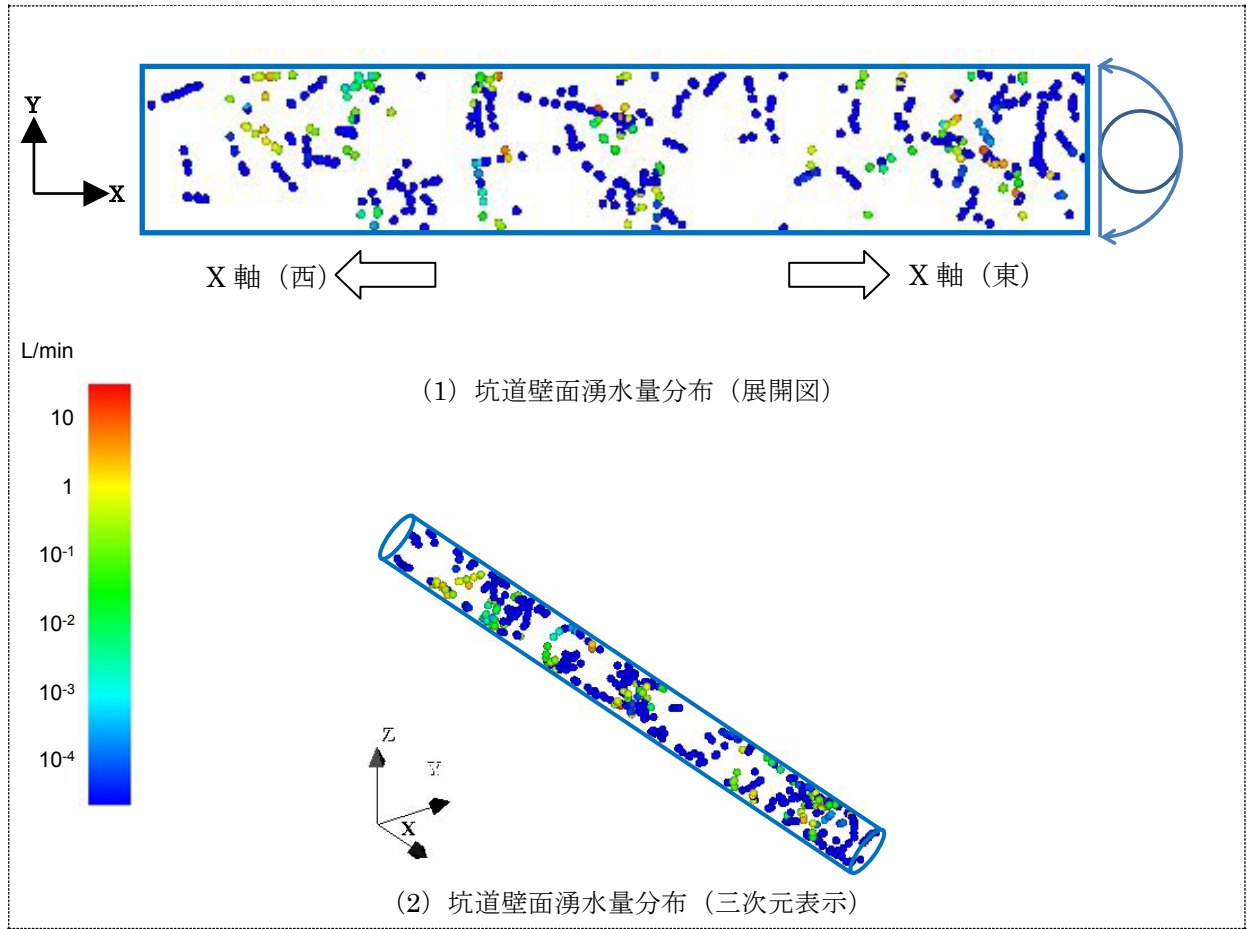


図 11.12-19 坑道壁面割れ目分布 (HL12_06)

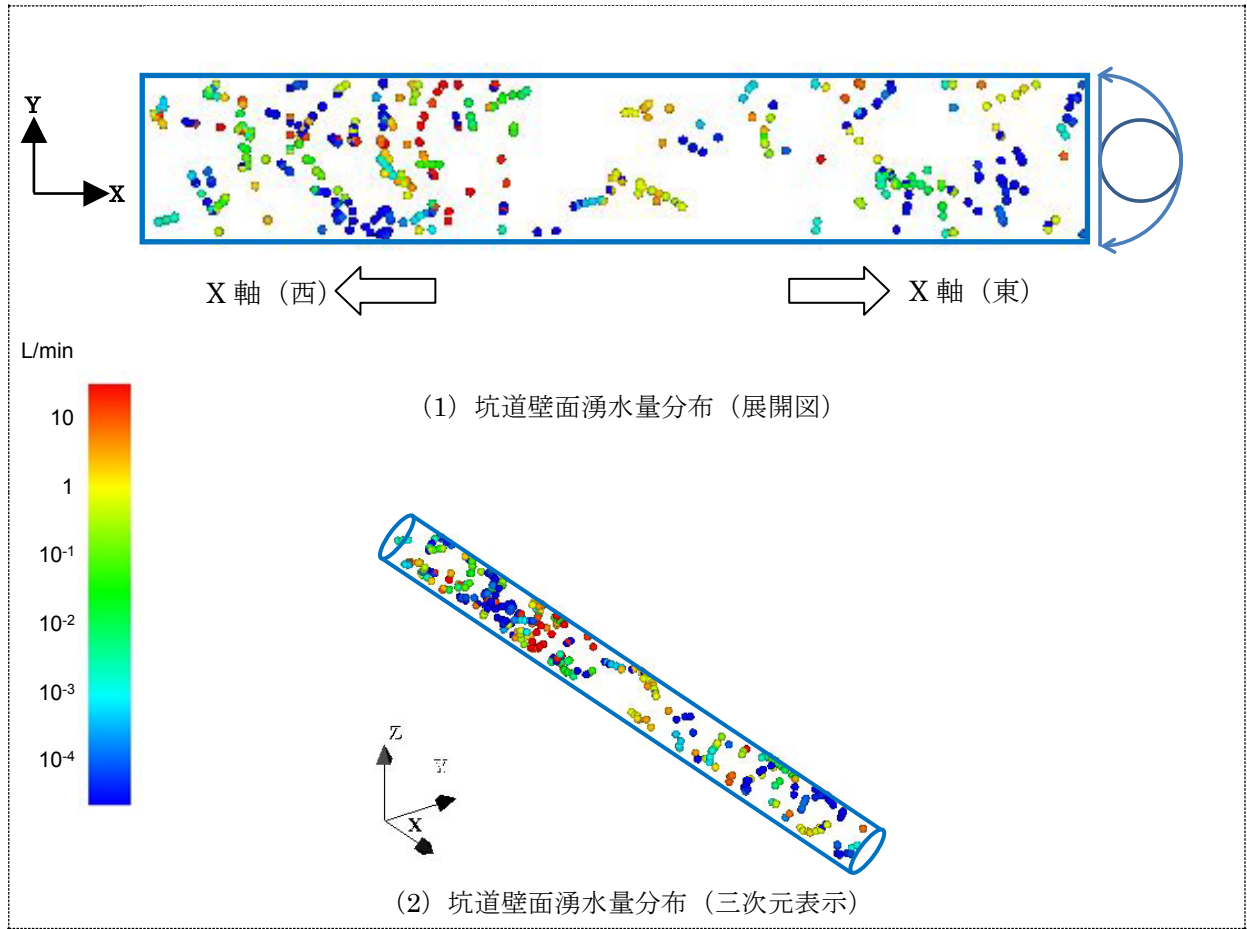


図 11.12-20 坑道壁面割れ目分布 (HL12_07)

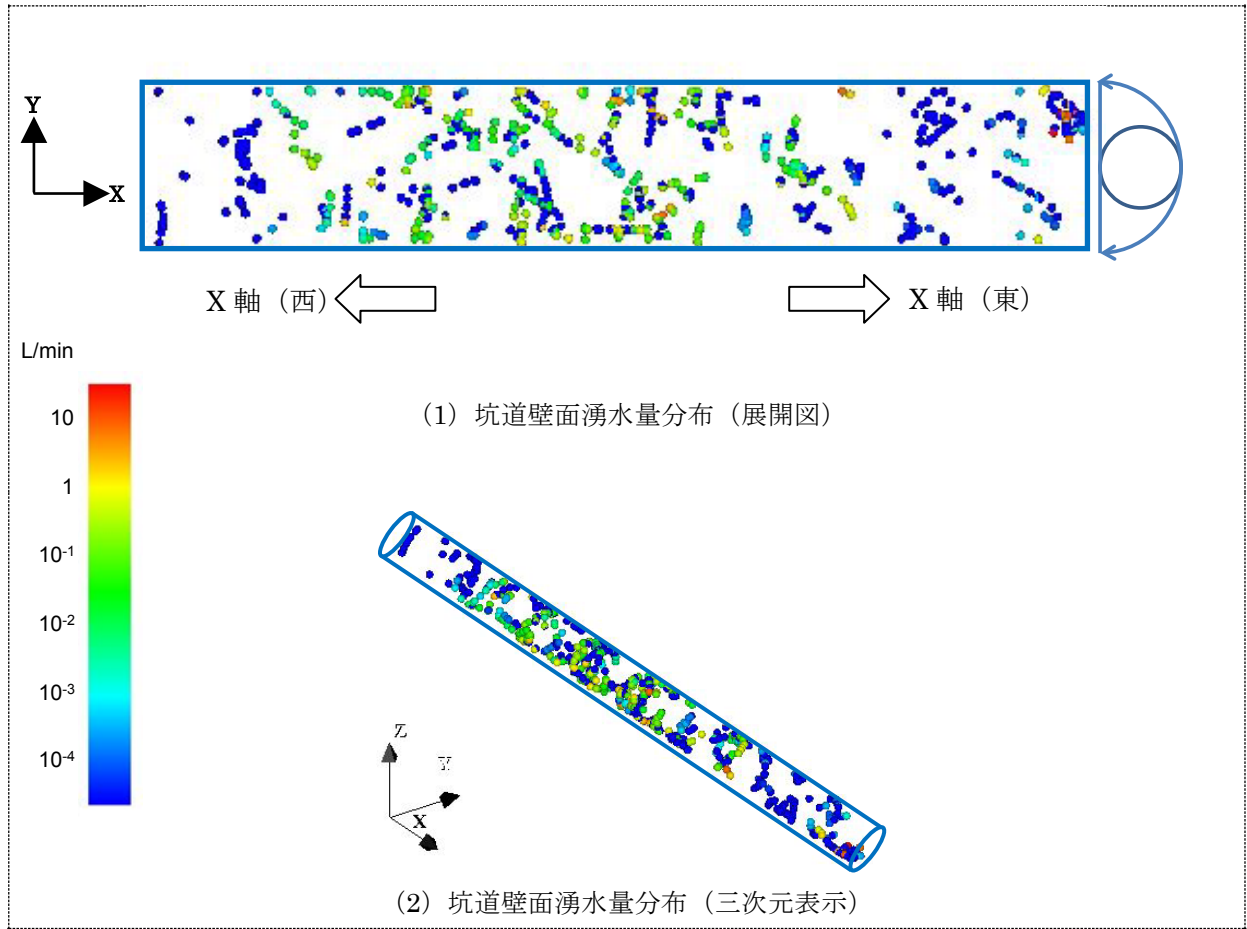


図 11.12-21 坑道壁面割れ目分布 (HL12_08)

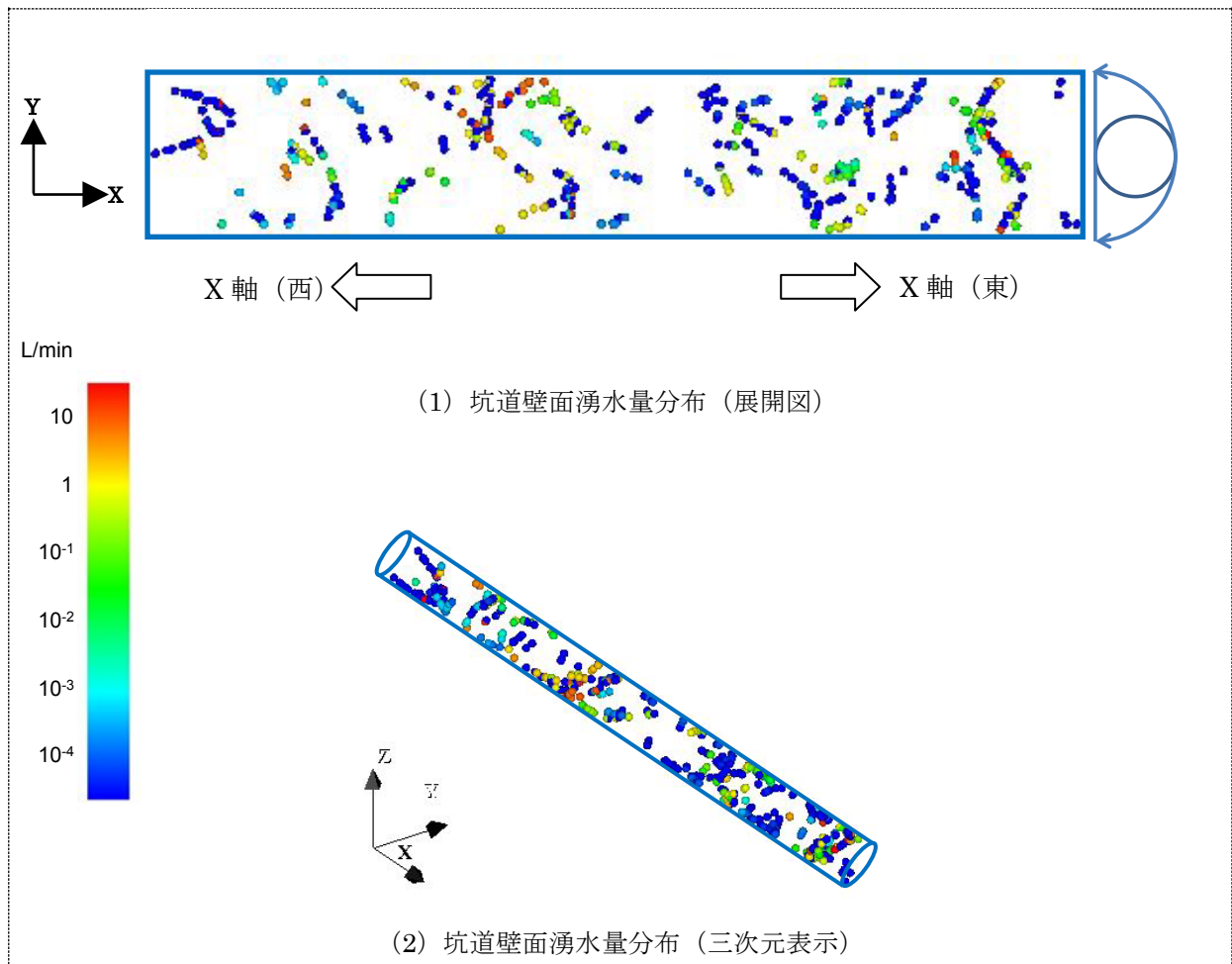


図 11.12-22 坑道壁面割れ目分布 (HL12_09)

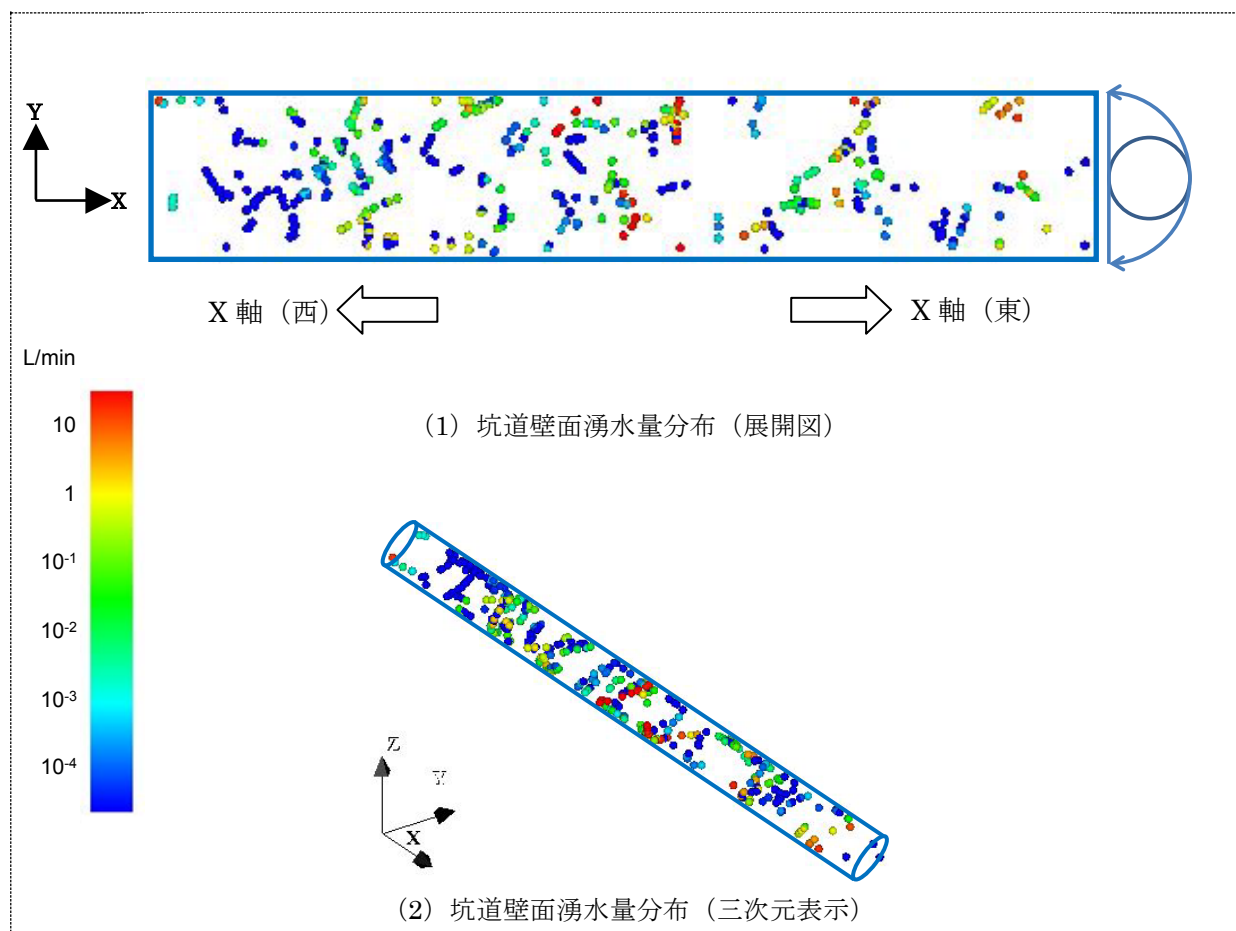
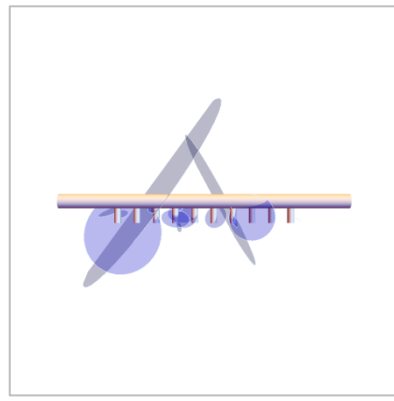
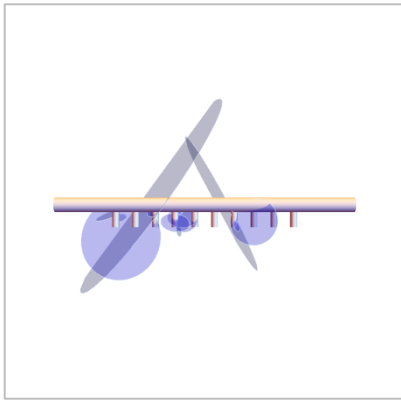


図 11.12-23 坑道壁面割れ目分布 (HL12_10)

処分孔と交差する割れ目（グラウト前）

処分孔と交差する割れ目（グラウト後）



処分孔との交差割れ目分布（0.1L/min 以上）

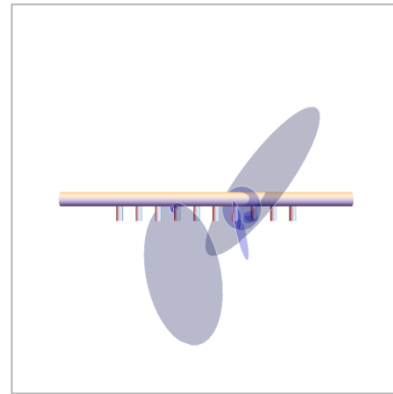
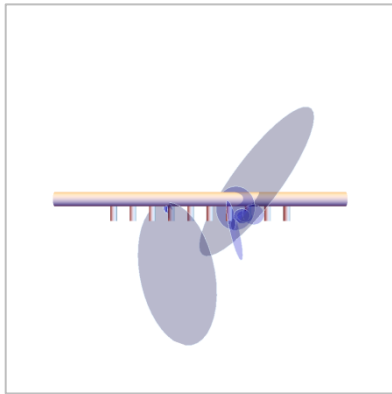


処分孔湧水量分布

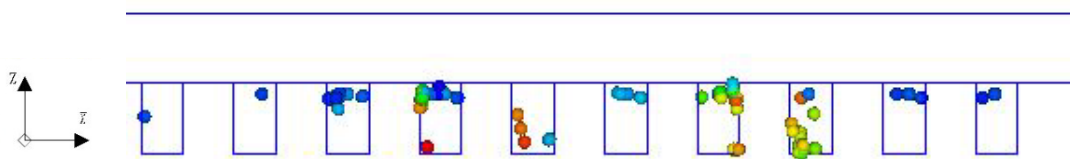
図 11.12-24 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布（HL12_01）

処分孔と交差する割れ目（グラウト前）

処分孔と交差する割れ目（グラウト後）



処分孔との交差割れ目分布（0.1L/min 以上）

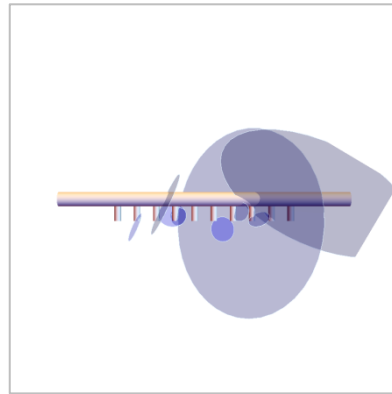
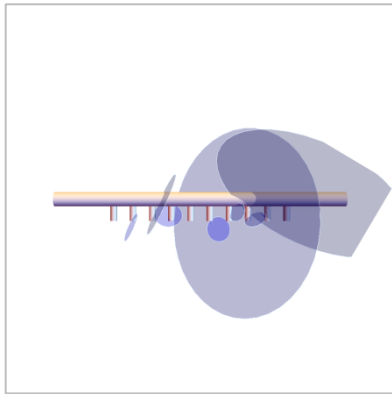


処分孔湧水量分布

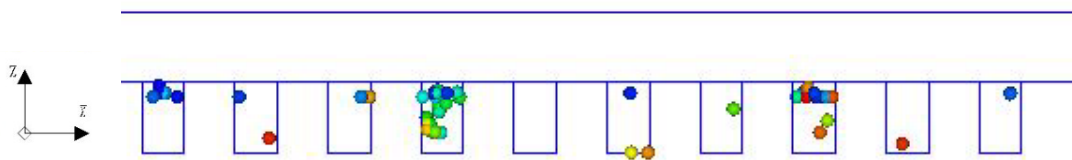
図 11.12-25 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布（HL12_02）

処分孔と交差する割れ目 (グラウト前)

処分孔と交差する割れ目 (グラウト後)



処分孔との交差割れ目分布 (0.1L/min 以上)

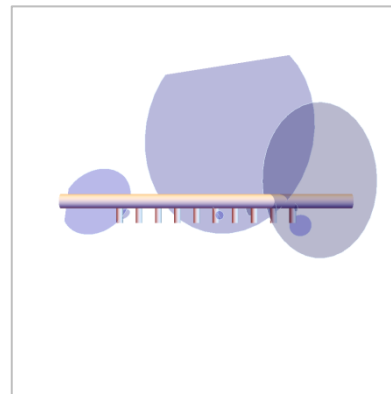
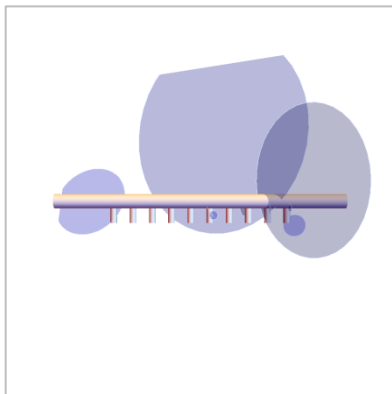


処分孔湧水量分布

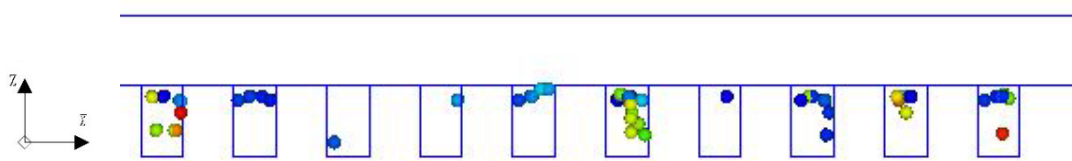
図 11.12-26 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HL12_03)

処分孔と交差する割れ目 (グラウト前)

処分孔と交差する割れ目 (グラウト後)



処分孔との交差割れ目分布 (0.1L/min 以上)



処分孔湧水量分布

図 11.12-27 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HL12_04)

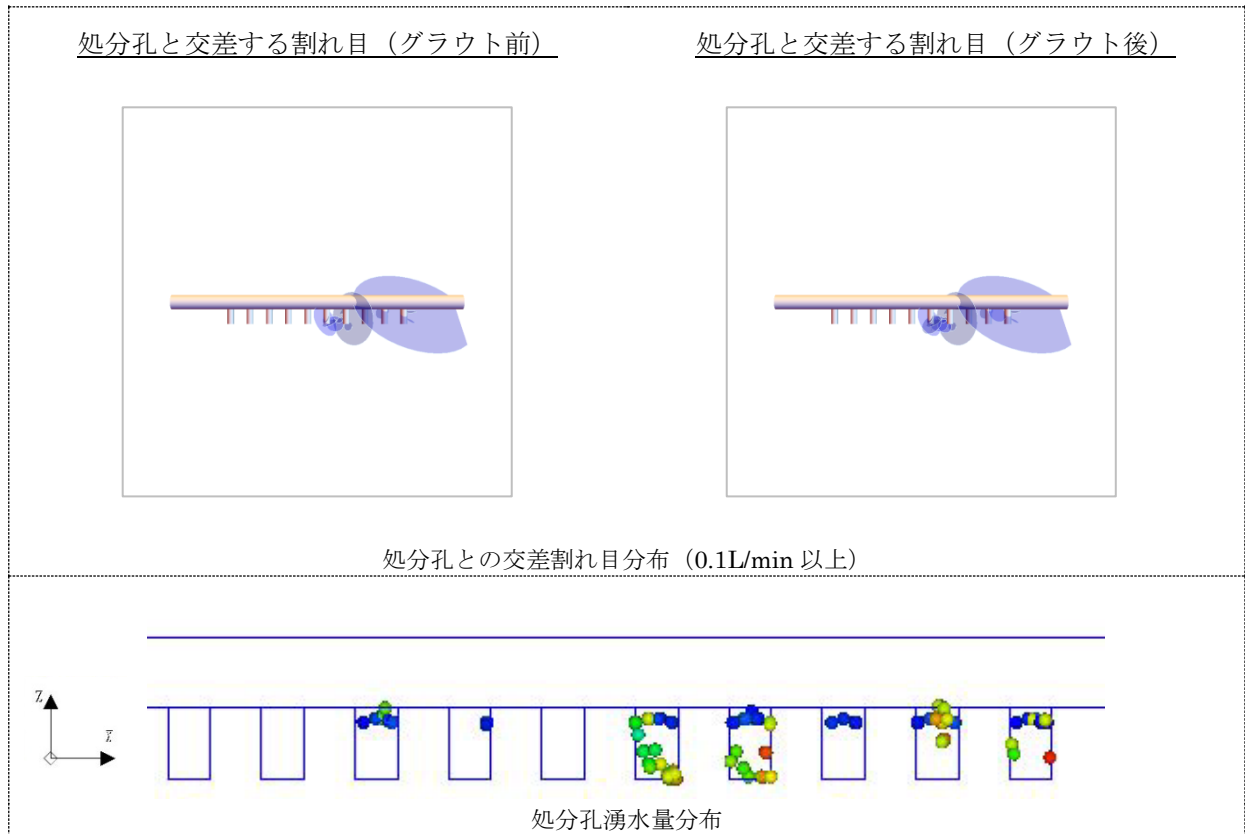


図 11.12-28 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HL12_05)

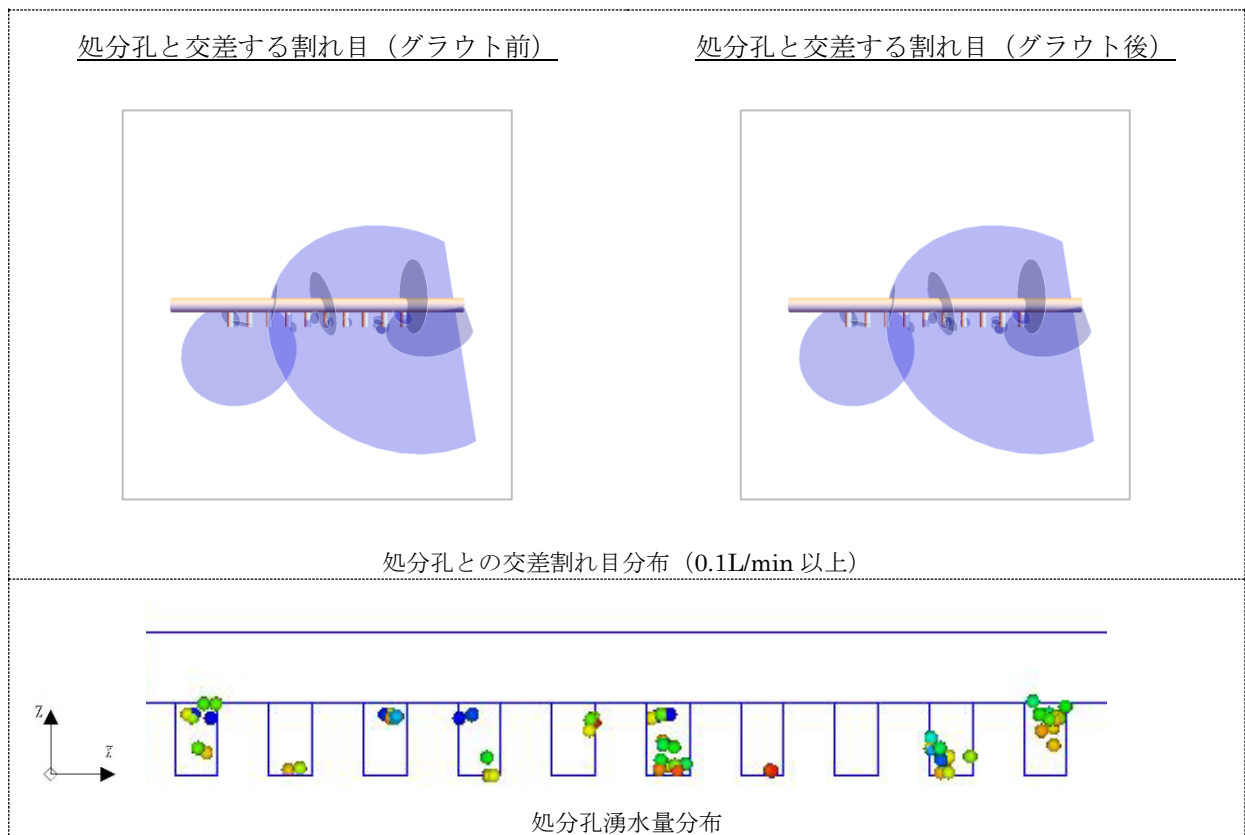
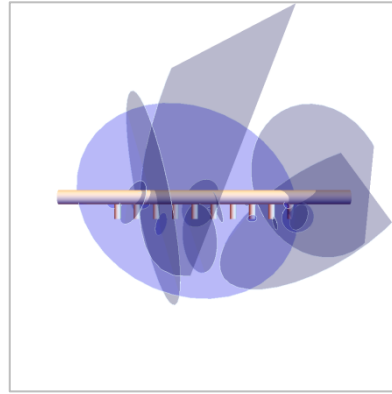
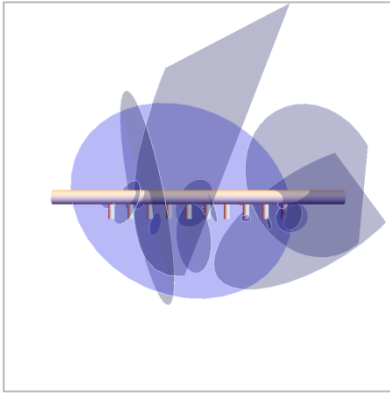


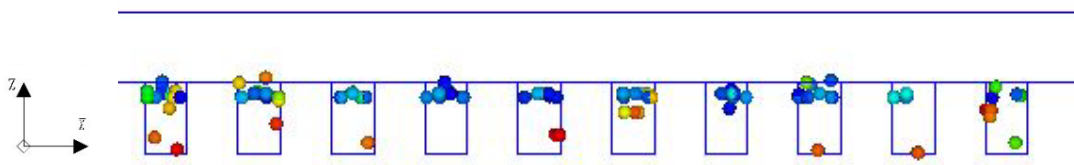
図 11.12-29 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HL12_06)

処分孔と交差する割れ目（グラウト前）

処分孔と交差する割れ目（グラウト後）



処分孔との交差割れ目分布（0.1L/min 以上）

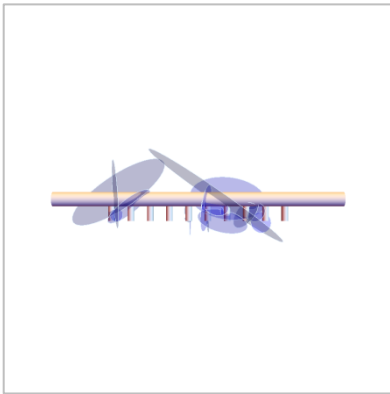


処分孔湧水量分布

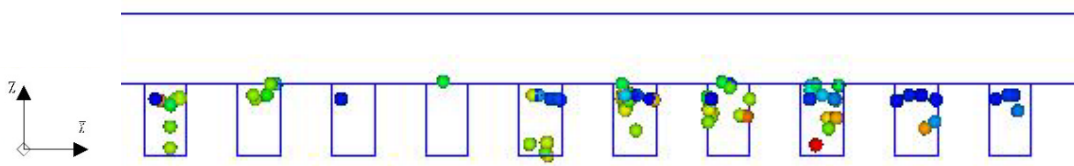
図 11.12-30 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布（HL12_07）

処分孔と交差する割れ目（グラウト前）

処分孔と交差する割れ目（グラウト後）



処分孔との交差割れ目分布（0.1L/min 以上）



処分孔湧水量分布

図 11.12-31 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布（HL12_08）

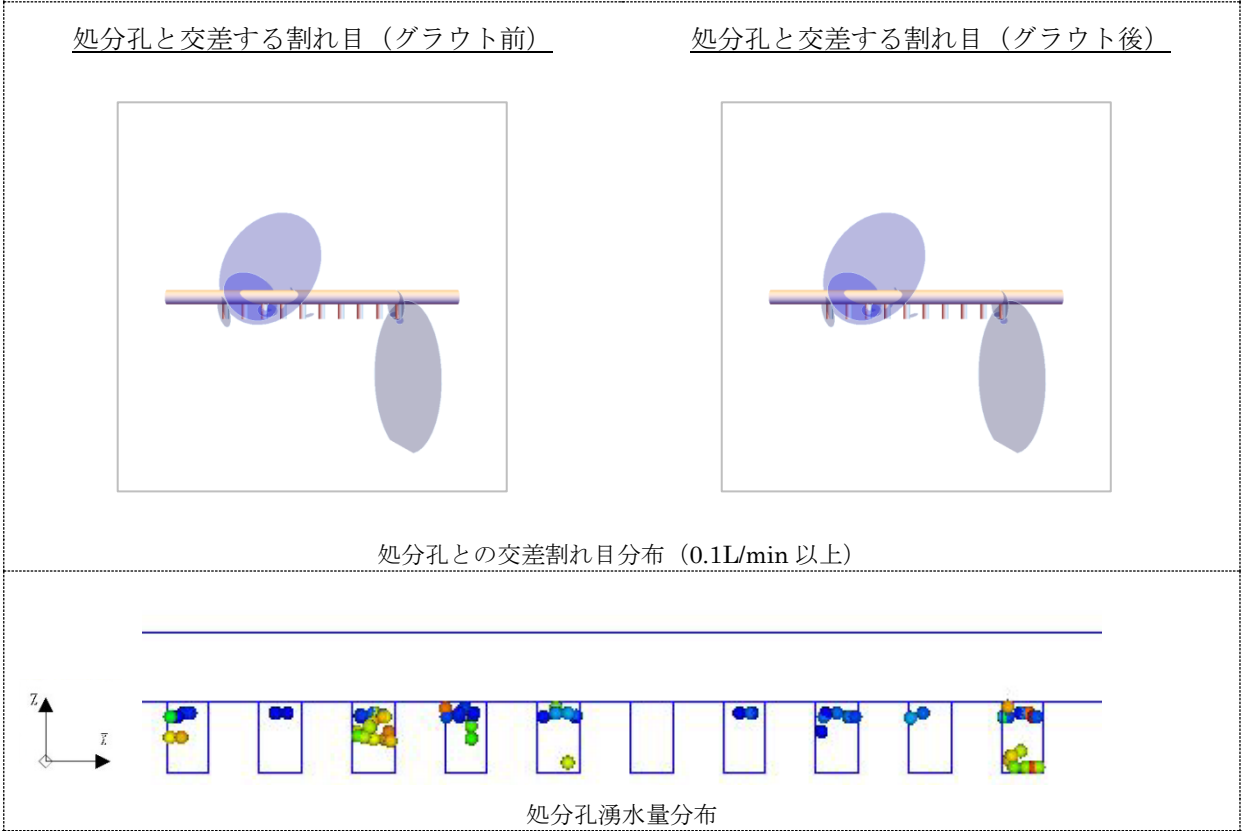


図 11.12-32 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HL12_09)

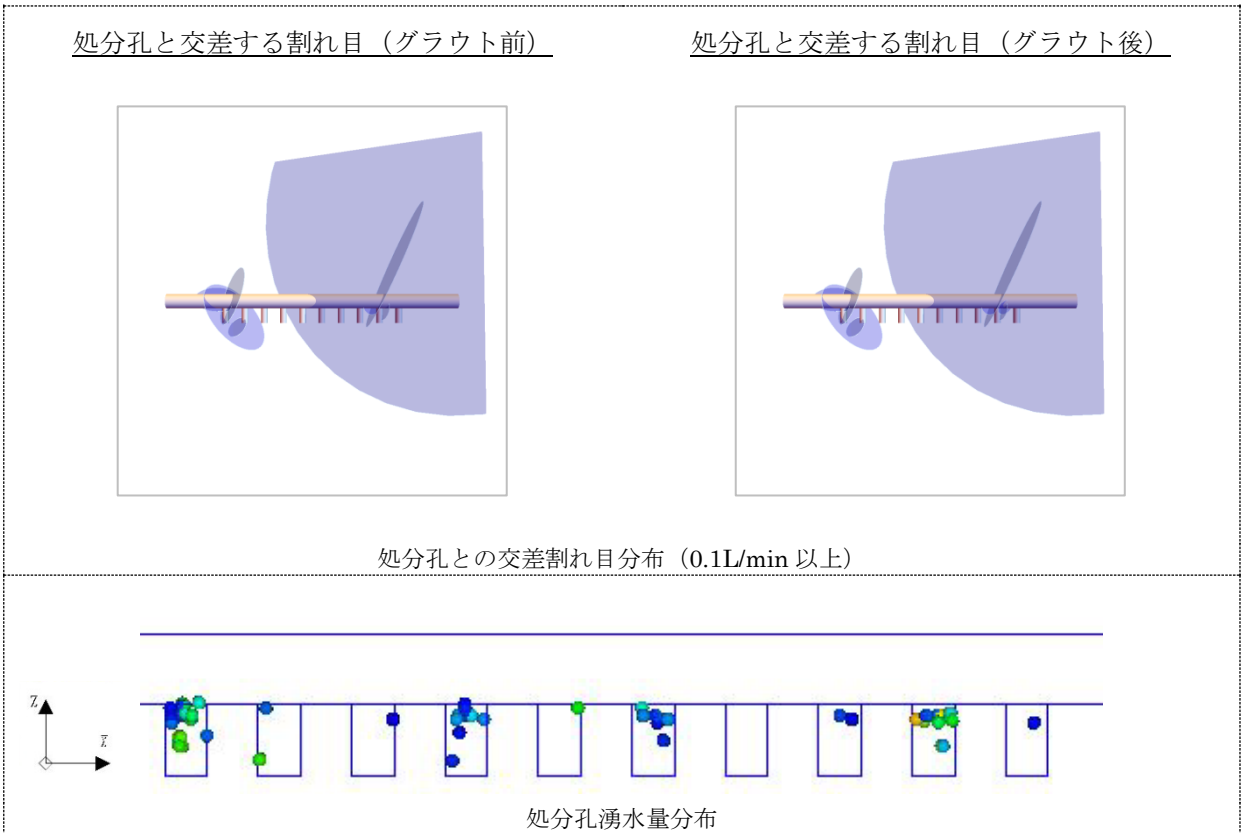


図 11.12-33 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HL12_10)

11.13 掘削影響領域へのグラウト改良のモデル化

処分坑道や処分孔への湧水の流入を低減させる工学的対策としてグラウト等の工法が検討されているが、周辺岩盤の水理特性により効果は影響され、特に割れ目が透水性を支配している岩盤においては、割れ目をモデル化した水理地質構造モデルにより効果を評価する必要がある。そのため本研究では、割れ目をパイプでモデル化したチャンネルネットワークによる解析コード LT-Flow による水理解析を行い、工学的対策が処分坑道周辺の水理場に与える影響を評価することを目的としている。本年度は 4 年計画の 1 年目で、以下の項目を実施した。

- ①平成 26 年度～平成 29 年度の実施計画の作成
- ②幌延の水理地質データを参考とした割れ目ネットワークモデルの構築
- ③処分孔及び処分坑道への湧水量の算定
- ④止水対策による湧水量低減効果の評価

その成果を以下にまとめる。

- (1) 4 年間の計画として、1 年目から 3 年目までは埋戻し前の解析的検討を行い、4 年目に埋戻し後についての検討を行う全体工程を立案した。
- (2) 幌延深地層研究センターの割れ目データ、水理データを参考として LT-Flow で水理解析を行うためのチャンネルネットワークモデルによる水理地質構造モデルを、基質部の影響の反映の有無で 3 モデル作成した。
- (3) 水理試験再現解析の結果、水は割れ目をほとんどが流れること、また、小さな割れ目を基質部と評価したモデル (HL12) においても基質部の効果を反映した評価が可能であることが示された。このことから、坑道湧水量の算定には HL12 モデルを用いることとした。
- (4) LT-Flow により処分坑道及び処分孔への湧水の算定を行った、その結果は以下の通り；
 - ・処分孔掘削前の処分坑道 (100m 延長) 湧水の算定結果は、10 リアライゼーション平均で 1,489L/min であるが、亀裂の不均一性を反映してリアライゼーション間でバラついた結果となった。
 - ・処分孔掘削後の処分坑道 (100m 延長) 湧水の算定結果は、10 リアライゼーション平均で 1,232L/min であった。処分孔 (10 孔合計) 湧水の算定結果は、10 リアライゼーション平均で 301L/min であったが、これも亀裂の不均一性を反映してバラついた結果となった。湧水量が 0.1L/min 以下となる処分孔は全 100 孔の内、38 箇所であった。処分孔への湧水は、掘削影響領域からの湧水よりも、処分孔と交差する割れ目からの湧水の割合が大きいことが分かった。
- (5) 止水対策として、水抜きボーリング設置と EDZ へのグラウトの 2 種類の対策工の設定を行い、処分孔や処分坑道への湧水量へ与える影響を解析的に評価した。この結果は以下の通り；
 - ・水抜きボーリング設置により処分坑道 (100m 延長) 湧水は、10 リアライゼーション平均で 1,173L/min となり、対策前より 5%減少した。処分孔 (10 孔合計) 湧水の算定結果は、10 リアライゼーション平均で 237L/min であり、対策前に比べ 21%減少した。合計湧水量の効果はリアライゼーション間でバラつきがあり、最大で 58%減少、最小で 2%減少となった。
 - ・水抜きボーリング設置後における、湧水量が 0.1L/min 以下となる処分孔は全 100 孔の内、

39箇所、対策前より1孔増加した。各処分孔の湧水量の変化は、最大で90%以上減少しているものからほとんど減少していないものまであり、処分孔と交差する割れ目が水抜きボーリングとも交差しているかどうかで、水抜きボーリングによる効果が大きく異なることが解析で示された。

- EDZへのグラウト改良により処分坑道(100m延長)湧水は、10リアライゼーション平均で1,093L/minとなり、対策前より11%減少した。処分孔(10孔合計)湧水の算定結果は、10リアライゼーション平均で327L/minであり、対策前に比べ9%増加した。これは坑道周辺の透水係数が減少し、坑道へ流入する水が減少した結果、対策を施していない処分孔へ水が回り、湧水量が増加したものと評価できた。
- EDZへのグラウト改良後における、湧水量が0.1L/min以下となる処分孔は全100孔の内、38箇所、対策前と同じであった。各処分孔の湧水量の変化は、湧水量が増加した処分孔が多いが、33孔で湧水量が減少していた。これは処分孔にEDZを介して湧水していた量が減少したためであるが、元々の湧水量は大きくないため減少量も大きくないと評価できた。

本検討の課題として、坑道湧水量の絶対量の評価が挙げられる。本検討は、既存のデータに基づき割れ目ネットワークを作成及び坑道湧水量を算定する方法論の適用例を示したものであり、その元データとして幌延超深地層研究センターのデータを活用したものである。その解析条件においては、今回の解析結果の妥当性はあるものの、実測の湧水量との比較においては、周辺坑道による間隙水圧低下の影響や坑道周辺へのプレグラウト等、より詳細な条件設定を行う必要がある。来年度以降、幌延深地層研究センターで計測されている湧水量を参照し、条件設定において詳細な検討を行う必要がある。

次に、本検討によって得られた湧水対策に対する知見と課題を以下に記す。

(1) 水抜きボーリングの有効性について

今回の解析結果からは、水抜きボーリングを設置することで平均20%程度の湧水量の低下になっている。水抜きボーリングを処分孔の両側に1本ずつ設置しただけのため、効果は限定的であったと考えられる。処分孔と交差する割れ目を水抜き孔が抜いている場合は、90%以上湧水量を低減している計算結果もあるため、湧水割れ目を狙って水抜きボーリングを設置することで低減効果は大きくなると想定できる。具体的には、処分孔を囲むような配置にする、水抜き孔長を長くする、設置位置を処分孔に近くする、といった方策が考えられる。実際の処分では処分孔掘削後に湧水亀裂を同定し、その連続性を評価した後、より効果的な水抜きボーリングの設置レイアウトを検討することが予想されるので、以上のプロセスを模擬した解析を実施することも望まれる。

(2) グラウト改良の有効性について

湧水低減対策として適用した掘削影響領域へのグラウト改良により、処分孔への湧水量が増加するという解析結果が得られた。処分孔掘削後のポストグラウトを想定した解析であったが、EDZを介した湧水量は減少したものの処分孔への湧水量を支配している交差割れ目の改良はなされていないため、処分孔に湧水が集中する結果となった。EDZの透水係数が大きく、処分孔湧水量の大部分がEDZを介して流入する条件においては、今回の対策は有効であった

と考えられる。すなわち、交差割れ目を対象として処分孔周辺へグラウト改良を行えば効果的な低減効果が想定できる。このことから、ポストグラウトの効果的対策として、処分孔周辺へのグラウト改良を解析として検討する必要がある。

処分孔周辺への実際のグラウト注入方法として、SKB ではメガパッカーによる処分孔削孔後のグラウトが考えられているが、処分孔掘削前に実施する処分孔掘削位置への先進ボーリングを用いてグラウトを行う考え方もある。先進ボーリングにより湧水割れ目を同定して、そこからの湧水量を算定し、それに対するグラウトを行うことにより、効率的な湧水量の低減対策が期待できると考える。

参考文献

- [1] 石橋ほか：地下坑道での調査データに基づく坑道周辺領域における水理地質構造モデルの構築（その1），第42回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，pp.101-106，2014.
- [2] 埼玉大学地圏科学研究センター：割れ目系岩盤を対象とした地質構造のモデル化に関する研究，核燃料サイクル開発機構委託研究成果報告書，JNC TJ7400 2002-004，2002.
- [3] 中畠ほか：地下坑道での調査データに基づく坑道周辺領域における水理地質構造モデルの構築（その2），第42回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，pp.107-112，2014.
- [4] Hatanaka,K., Lim, Doo-Hyun and Ishii, E. : Geo-descriptive modeling of water conducting features characterized in sedimentary formations in Horonobe area of Japan, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol.1265, 1265-AA-06-04, 2010.
- [5] Lim, Doo-Hyun, Hatanaka,K. and Ishii, E. : Site Characterization & Preliminary Performance Assessment Calculation Applied To JAEA-Horonobe URL Site of Japan, Transactions of Korea Nuclear Society Autumn Meeting, 2010.
- [6] Ota, K., Abe, H. and Kunimaru, T. : Horonobe Underground Research Laboratory Project Synthesis of phase 1 Investigations 2001-2005, JAEA Research 2010-068, 2010.
- [7] Aoyagi, K., Tsusaka, K., Nohara, S., Kubota, K., Tokiwa, T., Kondo, K. and Inagaki, D. : Hydrogeomechanical Investigation of an Excavation Damaged Zone in the Horonobe Underground Research Laboratory, 8th Asian Rock Mechanics Symposium, 2014.
- [8] 藪内、國丸、石井他：幌延超深地層研究計画 換気立坑先行ボーリング（PB-V01 孔）調査報告書-岩盤の水理特性調査-, JAEA-Data/Code 2008-026, 2009.
- [9] 例えば，山下ほか：割れ目ネットワークモデルを用いた物質移動に関する研究（その1），平成26年度第69回土木学会全国大会年次学術講演会，CS9-045，2014.
- [10] 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性・地層処分研究開発第2次取りまとめ，1999.
- [11] JAEA：平成19年~23年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連「地下坑道施工技術高度化開発報告書」.

参 考 資 料

<参考資料 1 >

数値解析モデルで対象とする亀裂の最小半径を変更した場合の 3次元亀裂密度 P32adj の変換方法について

亀裂半径 3.82m を亀裂半径 1.25m にした場合の P32adj を以下のように算出した。

$$T(x_1, x_2) = \frac{\pi k_r x_r^{k_r}}{-k_r + 2} [x^{-k_r + 2}]_{x_1}^{x_2} \dots \dots \dots \text{式(26)}$$

$$= \frac{\pi k_r x_r^{k_r}}{-k_r + 2} (x_2^{-k_r + 2} - x_1^{-k_r + 2})$$

ここで、T(x1,x2)は半径 x1 から x2 の間にある亀裂面積の総和、Kr はべき乗数、xr は最小半径(3.82)である。

T(3.82,∞)の場合、式(26)は以下のようになる。

$$T(3.82, \infty) = \frac{\pi k_r 3.82^{k_r}}{-k_r + 2} (-x_{3.82}^{-k_r + 2}) \dots \dots \dots \text{①}$$

同様に T(1.25,∞)の場合、式 26 は以下のようになる。

$$T(1.25, \infty) = \frac{\pi k_r 1.25^{k_r}}{-k_r + 2} (-x_{1.25}^{-k_r + 2}) \dots \dots \dots \text{②}$$

亀裂半径 1.25 とした場合の 3次元密度 P32adj は式(28)を基に以下の式で求めた。

$$P_{32adj} = P_{32} \times \frac{T(1.25, \infty)}{T(3.82, \infty)}$$

ここに①②および P32=0.25 を代入すると以下の式となる

$$p_{32adj} = 0.25 \times 3.82^{kr-2} \times 1.25^{-kr+2} \dots \dots \dots \text{③}$$

ここで、 kr にべき乗数を代入するのだが、鈴木ほかの論文のべき乗数の定義が Hatanaka ほかの論文と異なる。

Hatanaka ほかの論文では、FracMan を用い、Figure3 の傾斜・1.5 からべき乗数 3.5 を算出している。

FracMan のマニュアルには power law distribution について次の式が示されている。

$$f_x(x) = \frac{b-1}{x_{min}} \left(\frac{x_{min}}{x} \right)^b, \text{ when } x \geq x_{min}, b > 1$$

ここで、 b はべき乗数である。

一方、鈴木ほかの論文では、亀裂半径の分布について次の式が示されている。

$$f_x(x) = \frac{k_r}{x_r} \left(\frac{x_r}{x} \right)^{k_r+1}, x_r \leq x$$

ここで、 Kr はべき乗数である。

この 2 式を比較すると $kr=b-1$ の関係が分かり、鈴木ほかで使われているべき乗数は、Hatanaka ほかの論文より、1 小さい数値が使われている。

つまり、③の式に代入するべき乗数は 3.5 より 1 小さい 2.5 を代入することで、割れ目半径 1.25 の $P32_{adj}$ を算出することができる。

よって、割れ目半径 1.25 の $P32_{adj}$ は 0.44 となる。

第12章 研究成果の設計施工指針への反映

12.1 再冠水時の緩衝材の挙動に関する研究成果

12.1.1 再冠水時の緩衝材の研究目的と反映先

これまで、緩衝材の検討は、建設作業時の施工性能と閉鎖後の長期性能に関して個別になされてきた。これは、建設作業の後に施設が閉鎖されてから施設周辺の地下水が回復し、施設内も地下水で飽和するまで（再冠水時）までの緩衝材の挙動を定量的に評価する情報が乏しかったためである。そこで、人工バリア品質／健全性評価手法の構築—緩衝材では、建設・作業時の緩衝材の施工品質が再冠水時に発生する現象に及ぼす影響を考慮し、再冠水時の挙動を定量的に評価することによって、建設・作業時から再冠水後（長期性能評価の初期状態）までの緩衝材の性能を連続的に評価できる情報を取得することを目的としている。本検討によって、緩衝材の性能を連続的に評価できるようになれば、長期性能の観点から緩衝材に対する建設時の仕様を提示することも可能となる。さらに、長期性能の観点から緩衝材に要求される仕様を満足する緩衝材を建設できても、再冠水時に発生する事象によってその性能が損なわれる場合には、長期に亘って性能を維持するための工学的対策が必要である。従って、緩衝材の再冠水時の挙動を明らかにすることのみが研究目的ではなく、再冠水時の事象に対する緩衝材の長期的な性能維持のための工学的な対策を提示することも目的の一つである。

本検討の成果は、高レベル放射性廃棄物処分の実施主体である NUMO、規制庁、または学会による設計・施工指針の整備に資する重要な情報となる。本検討を通じて得られた知見は、指標という形で提示され、設計・施工指針の整備のための規準値として活用される。

12.1.2 冠水時の緩衝材の挙動に関するこれまでの研究成果

再冠水時の緩衝材の挙動に関するこれまでの研究成果の概要を 2000 年レポートの成果と比較して表 12.1.2-1 に示す。左側に項目として a. 膨潤挙動(クニゲル V1 70wt%+ケイ砂 30wt%)、b. 岩盤とブロックの隙間、c. 人工給水、d. パイピング/エロージョン、e. エロージョンに対する工学的対策である。それぞれについて以下に述べる。

表 12.1.2-1 原環センターの緩衝材の挙動に関する研究成果

	項目	2000年レポート	センターの成果
a.	膨潤挙動 緩衝材:クニゲルV1 70wt% +ケイ砂30wt%	・実験に使う流入量が25cmのヘッド差(約0.01cc/分)-(IV-106) ・均一に膨潤する ・自己修復作用を期待	・緩衝材ブロックでは、膨潤後も不均一で、液種によって密度差が異なる ・ケイ砂が水みちに沈殿し自己修復を妨げる(1m長尺エロージョン試験)
b.	岩盤と緩衝材ブロックの隙間	・ペレット充填の言及なし	・ペレット充填の効果:緩衝材回りの流速を下げる。緩衝材ブロックの適度な膨潤を促す。
c..	人工給水	・言及なし	・人工給水は、蒸留水を最初に使うと、透水係数を1オーダー低くし、Ca型化を遅らせる効果がある。流入・流出の位置が重要
d.	パイピング/エロージョン	・言及なし	・再冠水時のパイピング/エロージョン現象が考慮すべき現象であることを確認した。地下水組成、流量に応じて工学的対策が必要であることを確認した。
e.	エロージョンに対する工学的対策	・ブロック方式・現場締め固め-(V) ・膨出防止のプラグ(概念図)-(IV-194)	・吹付け工法の効果を確認した。 ・仮設プラグ、人工給水の効果と対策

a. 膨潤挙動について

2000年レポートにおける緩衝材は、クニゲル V1 70wt%+ケイ砂 30wt%をレファレンス設計として定めているが、緩衝材の膨潤挙動を把握する実験の流入量は、0.01cc/分以下であり、その状態において膨潤挙動（膨潤圧、乾燥密度、変形量等）が計測されている。この試験条件は、緩衝材内での地下水の浸透が拡散状態であることに相当する。たとえば、スウェーデンの Forsmark における地下水湧水量として、鉛直処分孔の総数 6,824 箇所のうち 99.9%が 0.01L/分以下であることが報告[3]されており、このような状況であれば、地下水はほぼ拡散状態で緩衝材に浸潤していくといえる。

一方、これから選定される日本の地下環境において、プレグラウトを行うことによって地下水湧水量を低減させる処置を取ったとしても、Forsmark と同程度に少ない地下水湧水量の環境であるとは考えられない。日本の地下湧水量については後章で述べるが、地下湧水量が 0.1L/分～10L/分であると、鉛直処分孔に流入した地下水が継続して処分孔から上の坑道に流れていくような状態であると、緩衝材の流出現象、すなわちエロージョン現象が発生する。このような 0.1L/分～10L/分の流入量がある場合の膨潤挙動、すなわち移流状態における膨潤挙動は 2000 年レポートでは検討されておらず、本検討によって、補完的なデータを取得した。さらに、このような移流場における膨潤挙動においては、モンモリロナイトが選択的に流出し、緩衝材に含まれるケイ砂が水みちに沈殿し、緩衝材の自己修復を妨げることも示した。

また、2000年レポートでは、緩衝材は均一に膨潤すること、さらに水みちも自己修復作用によって自然に閉じることを想定としているが、本検討の成果として、クニゲル V1 70wt%+ケイ砂 30wt%の緩衝材ブロックでは、膨潤後も乾燥密度は不均一の状態であり、液種によっては乾燥密度差も異なることを明らかにした。

b. 岩盤と緩衝材ブロックの間について

2000年レポートでは、緩衝材ブロックと岩盤との隙間にペレットを充填することは言及していない。一方、スウェーデンのSKBやフィンランドのPosivaでは、鉛直処分孔にキャニスターを定置する場合は、すなわちKBS-3Vの場合は、緩衝材ブロックと岩盤との隙間にペレットを充填することを設計レファランスとしている。ペレットを隙間に充填することの効果として、ペレットが緩衝材ブロックよりも先に膨潤することによって、緩衝材ブロックまわりの流速を下げ、緩衝材ブロックが適度に膨潤することを促す効果があると考えている。

本検討では、幌延の試験孔を使ったエロージョン試験でその効果の一部を確認した。350m坑道試験孔2の湧水量は、深さ850mm×直径580mmの試験孔において、底版で7L/分→頂部で0.6L/分の流量変化があり、外径540mmの緩衝材ブロックを6段（1段の高さ100mm）を配置し、ブロックと岩盤との隙間20mm区間には、ペレット（4mm 50wt%+0.3mm 50wt%）を自然落下で投入した。図12.1.2-1に緩衝材ブロック+ペレットを1か月間地下水に浸潤させた後に、試験孔2からブロックC-3とC-4がペレットによって一体化されて取り出された状況を示す。ペレットと緩衝材ブロックの間には隙間はなく、水みちが形成された形跡は発見できなかった。実際の岩盤と緩衝材ブロックの界面のパイピング現象は直接見ることはできないため、水みちを特定することはできなかったが、緩衝材ブロックの上部の水中には、ペレットの微細な粒子が漂っていることがCCDカメラで確認できたことから、パイピング/エロージョン現象は試験孔内で発生しているものと考えられる。



図 12.1.2-1 緩衝材ブロックとペレットが一体化した状況（C-3,C-4ブロックの浸潤後1か月）

c. 人工給水について

2000年レポートでは、緩衝材を定置後、蒸留水を使って人工的に給水すること、すなわち、人工給水については言及していない。一方、スウェーデンのSKBやフィンランドのPosivaでは、KBS-3Hにおいて、すなわち処分坑道にキャニスターを水平に定置する場合は、パイピング/エロージョンの低減対策として、蒸留水による人工給水を設計レファランスとしている。

本検討では、蒸留水による人工給水は、透水係数を1オーダー低くし、Ca型化を遅らせる効果があることを確認しているが、パイピング/エロージョン対策としての効果は、流入と流出の位置に依存することを示した。人工給水のパイピング/エロージョン対策としての効果を高めるためには、人工的な不陸の設置などが有効であることを示した。

d. パイピング/エロージョンについて

2000年レポートでは、パイピング/エロージョン現象については言及していない。本検討では、再冠水時のパイピング/エロージョン現象は、地下水が流入し、緩衝材が十分膨潤していない状態で緩衝材の成分が流出する現象を確認し、地下水組成、流量に応じて工学的対策が必要であることを示した。この試験では、蒸留水、0.5MNaCl、0.1667M CaCl_2 を使い、境界条件として低部から上部に向けて蒸留水が0.1L/分で流れ、常にエロージョン水が上部で排出されるという試験条件を維持したため、実際の処分環境に対しては保守側の検討と考えられる、緩衝材に含まれるケイ砂が水みちに沈殿して自己修復を妨げることなど、実際の処分環境でも発生し得る新たな現象を得た。この現象の工学的対策がb.に示した岩盤と緩衝材ブロックとの隙間にペレットを充填することである。日本の処分施設における1処分孔当たりの許容エロージョン量を検討するために、SKBの算定方法を調査した。SKBは、エロージョン量について

- ① 1処分孔当りに流入する水量は150m³[3]
- ② SKBは処分坑道300m、鉛直処分孔50箇所
- ③ 坑道、処分孔にある空隙体積を算定し、エロージョン量として16kg～164kg[4]
- ④ ③の期間のエロージョン量は16kg～164kg[4]

という結果から、1処分孔当りの許容エロージョン量を100kgとしている。さらにSKBは、図12.1.2-2に示すForsmarkにおける処分坑道、処分孔のレイアウトに対して緩衝材のTHM解析を行い、許容エロージョン量の妥当性を検討している。その解析では、鉛直処分孔内の緩衝材ブロックの流出の状況（位置）をパラメータとしており、流出によって発生した空隙が緩衝材の膨潤によって塞がり、かつ、緩衝材の膨潤圧が1MPa以上となることを確認している。[4]。

同様に、SKBの許容エロージョン算定方法に従って2000年レポートに示す処分施設の配置を対象として許容エロージョン量の算定を試みた。

図12.1.2-3に2,000年レポートに示された硬岩系岩盤における処分坑道、処分孔のレイアウトを示す。算定に当たっては、以下に示す4つの仮定を設けた。この結果、

図12.1.2-3に示す日本の場合に対象とする処分施設は、処分坑道1133m、鉛直処分孔247箇所として、坑道、処分孔

- ① 緩衝材の仕様は乾燥密度1.6Mg/m³以上
- ② 緩衝材の流出によって発生した空隙は膨潤によってシールされる
- ③ 緩衝材の流出は、ベントナイトとケイ砂が7:3の割合で流出する
- ④ ブロックの初期値は1.8Mg/m³

にある空隙体積を算定し、エロージョン量を算出すると36kg～543kgとなった。これに対して、図12.1.2-4に示す1処分孔の中で、緩衝材ブロックと岩盤の間に充填されるペレットの全重量がすべてエロージョンして流出したと仮定すると、1処分孔当たり330kgとなった。

なお、本検討では、エロージョン物質はモンモリロナイト含有率が高く、モンモリロナイトが

選択的に流出し、ケイ砂は水みちに沈殿するという結果を得ている。さらに、緩衝材は均一になるまで膨潤しないという結果も得ている。このことから、SKB の算定方法に即して決定した①～④の仮定は保守側とは言えない。本検討で得られた成果を反映した許容エロージョンの算定方法を確立するためには、エロージョンによってモンモリロナイト含有率が低下した緩衝材の透水係数の取得や、部分的にケイ砂が沈殿した状態の緩衝材のバルクの透水係数の取得、流出した緩衝材の自己シールによる密度分布の取得など、さらなる検討が必要である。

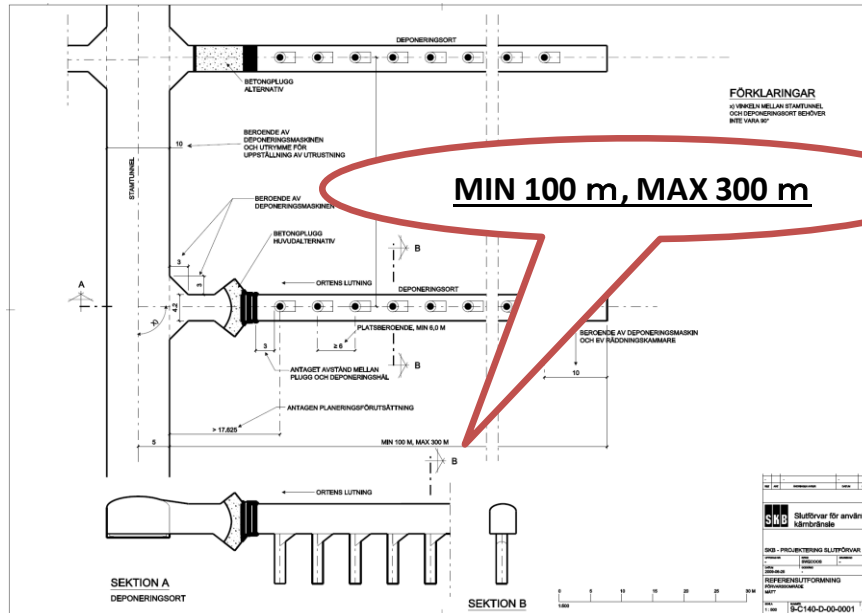


図 12.1.2-2 Forsmark の処分坑道のレイアウト [5]

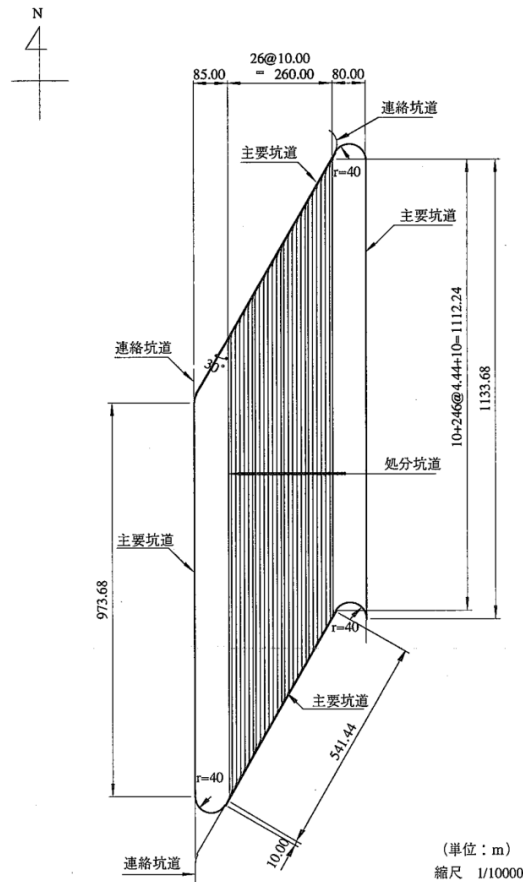
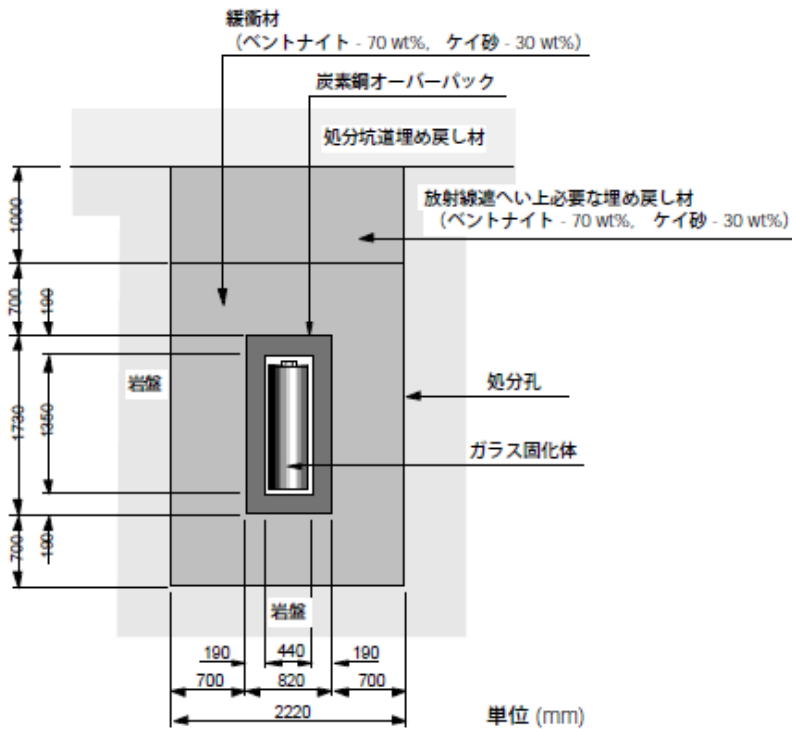


図 12.1.2-3 日本における処分施設の配置[6]

表 12.1.2-2 日本・スウェーデンにおける処分坑道 1 本当たりの処分孔数の比較

項目	日本	スウェーデン
処分孔数	247孔/坑道	50孔/坑道
	6669孔/パネル	6000孔/処分場
処分坑道延長	1133.68m/本	100～300m/本
処分速度	年間約1千本※1	—



処分孔設置き方式の仕様 (硬岩系岩盤/軟岩系岩盤)

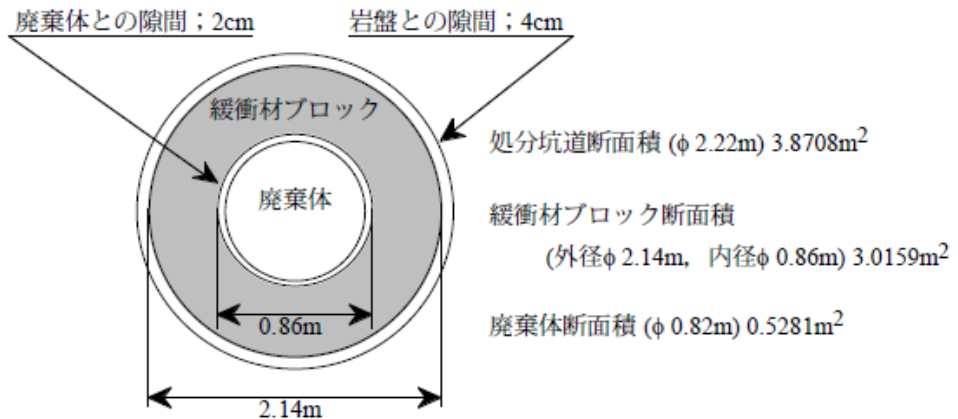


図 12.1.2-4 2000 年レポートにおける鉛直処分孔の形状・寸法[6]

e. エロージョンに対する工学的対策について

2000年レポートでは、エロージョンに対する対策を言及していないが、鉛直処分孔内での緩衝材の膨出対策について、鉛直処分孔の孔口にキャップを設置することが提案されている。キャップに作用する力として0.5MPaの力を想定し、キャップに作用する力Pとして、

$$P = \pi \times 2,0220^2 / 4 \times 0.5 \text{N/mm}^2 = 1935 \text{kN} = 193 \text{ton}$$

すなわち、緩衝材の膨出によって上方向に1935kNのアップリフトが作用するため、この力に対してアンカーを設計しなければならない。例えば、D29アンカー（岡部式）であれば、設計荷重が12ton/本であるので、 $n=193/12=16$ 本となる。

原環センターは、エロージョン対策として、鉛直処分孔の天端に、キャップを設置して、地下水の流れを停止させることを考えている。このキャップは緩衝材のエロージョン対策と同時に膨出対策に対しても有効であることが望ましいので、キャップに作用する膨潤圧を低減すると同時にエロージョンを防止する機能として人工不陸を考案している。図12.1.2-5に人工不陸のイメージを示す。この人工不陸には、2つの機能があり、（下面給水—上面排水）の場合、

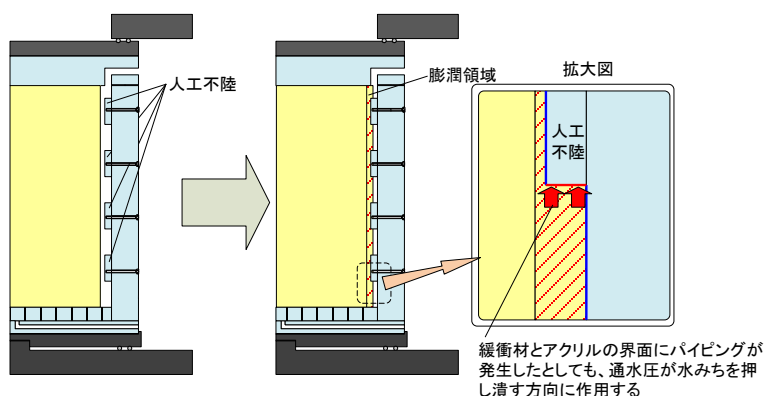


図 12.1.2-5 人工不陸のエロージョン対策と緩衝材の膨出対策

- 1) 給水圧が緩衝材を上押しすることによって、人工不陸に緩衝材が押し付けられ、水みちが塞がると同時にエロージョンを抑制する。
- 2) 人工不陸が緩衝材の上方向への膨出を抑制するため、膨出による上向きの力を低減させ、アンカーの本数を低減する。

この人工不陸の効果については、引き続き、室内工学規模試験、幌延のエロージョン試験で確認していく必要がある。

12.2 再冠水時の緩衝材の研究成果の設計指針・施工指針への反映

12.2.1 再冠水時の緩衝材の研究方針

平成25年度から平成29年度までの研究方針は、ラボ試験、幌延による地下試験、地下水流動に関する解析的検討、および緩衝材の指標を設定するための設計検討の4本を柱として、最終年

度には、緩衝材に要求される判断指標、考え方の構築に資する技術基盤を試設計として提示することである。図 12.2.1-1 に第 3 フェーズの研究方針を示す。

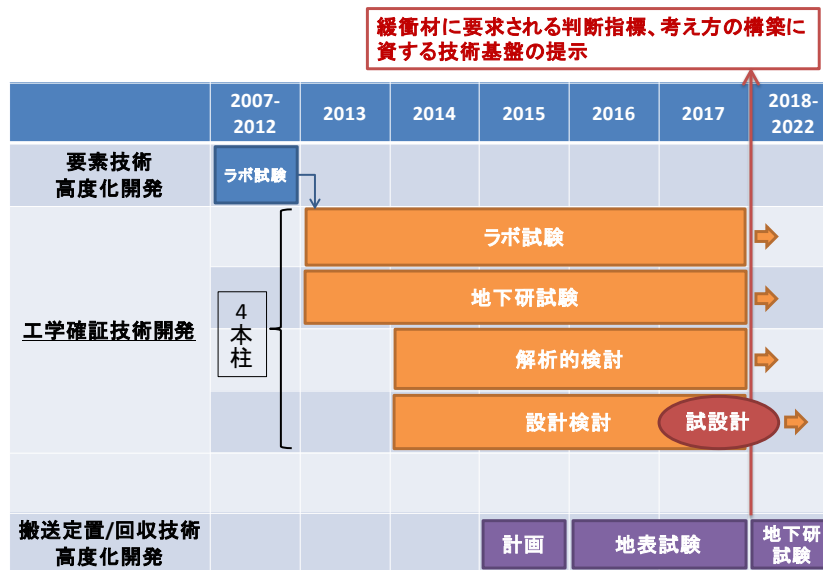


図 12.2.1-1 第 3 フェーズの基本方針

ここで、設計検討フローについて図 12.2.1-2 に示す。緩衝材の要求事項を整理し、緩衝材の材料選定を行うに当たって、緩衝材の厚さ、乾燥密度に影響を与える前提条件を整理し、レファレンス設計となる指標の計算手法を検討し、さらに対策工法を提示する。特に、乾燥密度差、エロージョン現象は、緩衝材の長期健全性に影響を与えるものであるため、地層処分事業の前走者である SKB とワークショップを通じて意見交換を行い、日本における緩衝材の設計・施工の考え方を工学的対策を含めて検討する。

- 設計検討の目的
 - 検討成果を設計検討にまとめ、**指標や基準・考え方の提示に資する**
- 設計検討の方法
 - 緩衝材の**試設計**を行い、レファレンスケースを提示する
- 設計検討の内容
 - 前提条件の検討
 - 計算手法の検討
 - 対策工法の検討
- 今年度の実施事項
 - SKB へのヒアリング
 - 前提条件の設定方法
 - 計算手法の考え方
 - 前提条件検討の準備
 - 湧水量分布の試算
 - エロージョン量の試算

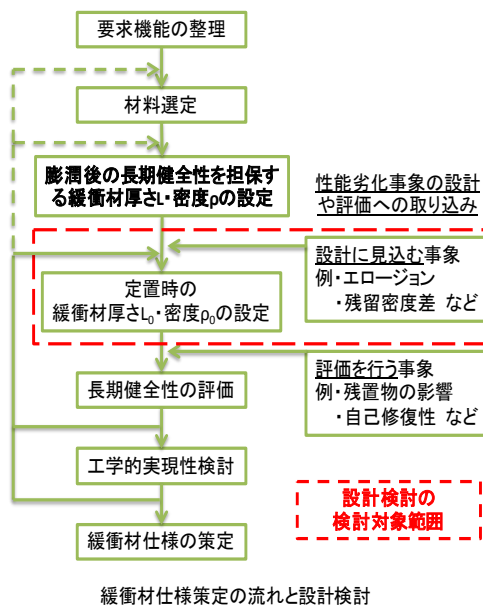


図 12.2.1-2 設計検討のフロー図

12.2.2 再冠水時の緩衝材の密度差

再冠水時の緩衝材の研究成果の設計・施工指針への反映方法について以下に述べる。

まず、再冠水時に処分孔内に定置された緩衝材に密度差が生じる場合とはどのような場合なのかを示す。図 12.2.2-1 に緩衝材ブロックの 1/8 分割のブロックの制作状況をしめす。制作方法は、2000ton (Max 45MPa) のプレスで静的に 1 軸圧縮成形する。緩衝材ブロックのサイズは、縦約 1.1m×横約 1.2m×高さ約 0.8m で型の側板の厚さは 175mm である。緩衝材ブロックは、クニゲル V170wt%+ ケイ砂 30wt%、含水比 9% である。この成形した後の乾燥密度分布をエアー! 参照元が見つかりません。

に示す。緩衝材ブロックは、制作時の乾燥密度を 1.9Mg/m^3 を目標値としているが、隅角部において 1.65Mg/m^3 、 1.7Mg/m^3 のように、 1.9Mg/m^3 を下回る場合がある。密度分布の発生というのは、このような状態である。ここで、緩衝材ブロックの制作方法として、できるだけ密度差が生じないような制作上の工夫が必要であるが、ここでは特にこの解決策については言及しない。



図 12.2.2-1 左 実規模 1/8 分割ブロック成形装置

(ブロック番号：70-CO9-1/8-300-1 B:S=70:30、w=9%)

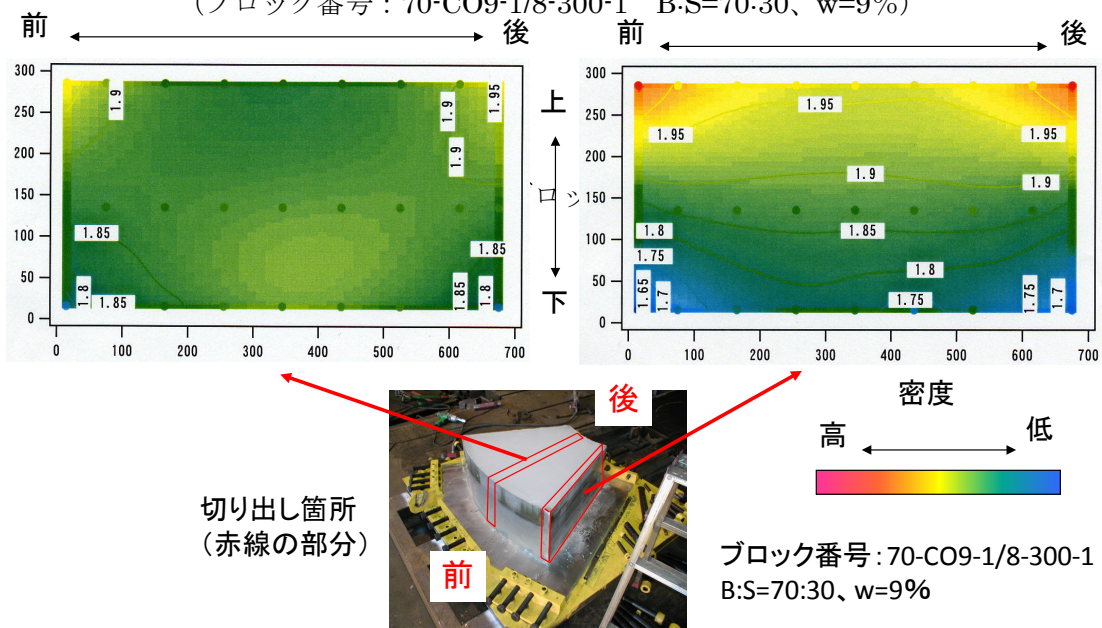
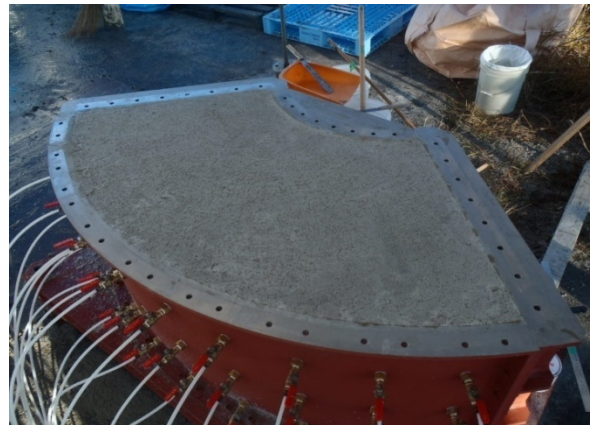


図 12.2.2-2 緩衝材ブロックの 2 断面における乾燥密度分布

これに対して吹付け工法の場合に、吹付け後 1.6 Mg/m^3 の乾燥密度となるよう吹付け施工を行い（図 12.2.2-3 参照）、施工後の実際に測定した乾燥密度分布を図 12.2.2-4 に示す。湧水があった領域でもっとも低い乾燥密度が 1.615 Mg/m^3 であり、それ以外は $1.69 \sim 1.715 \text{ Mg/m}^3$ でほぼ均一の乾燥密度が得られている。



湧水量 0.1L/分の状況で吹付け施工（堆積岩を模擬）

吹付け完了状態

図 12.2.2-3 緩衝材の吹付け施工状況

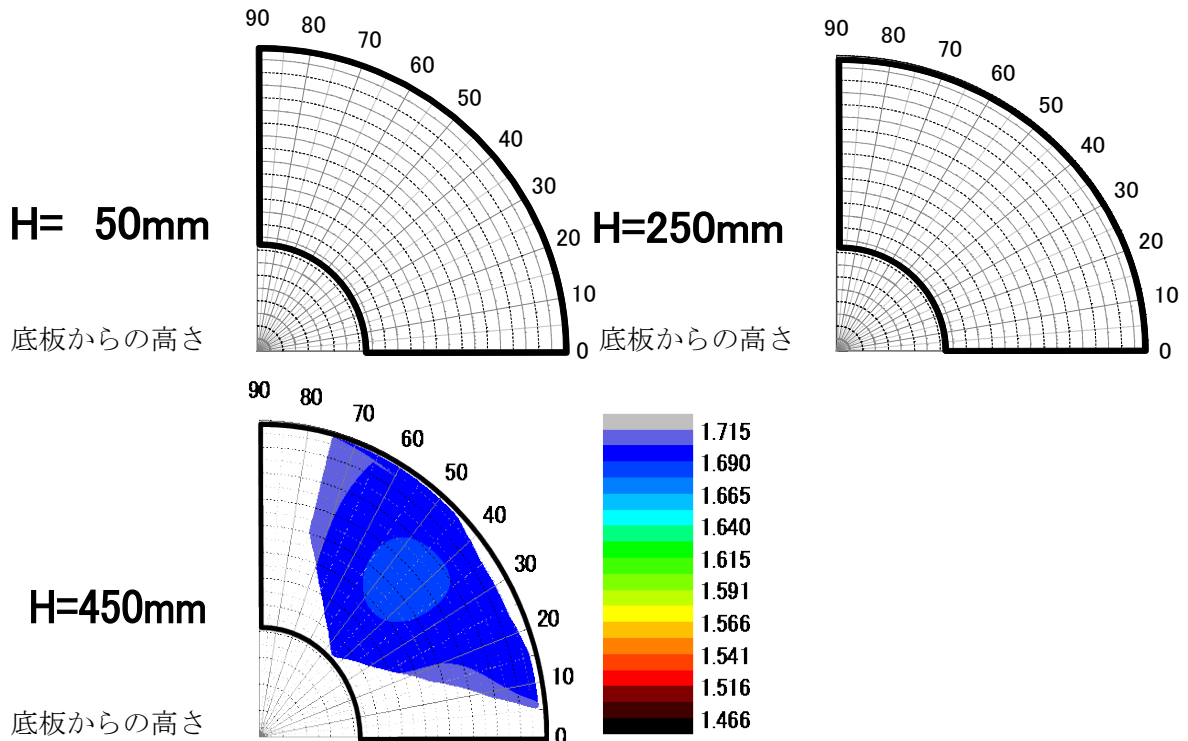


図 12.2.2-4 湧水量 0.1L/分（堆積岩を模擬）の状況で吹付け施工した場合の乾燥密度分布

次に乾燥密度の差は、蒸留水、0.5M NaCl の場合にどのような特徴があるのかを、図 12.2.2-5

に示す。乾燥密度として $1.5/1.7 \text{ Mg/m}^3$ 、 $1.2/2.0 \text{ Mg/m}^3$ 、 $1.4/1.8 \text{ Mg/m}^3$ の組合せで、膨潤試験を行った結果を示す。特に、 $1.2/2.0 \text{ Mg/m}^3$ の場合について、蒸留水と 0.5M NaCl の場合を比較すると、 0.5M NaCl の場合の乾燥密度差 (赤▲△: $1.3/1.85 \text{ Mg/m}^3$) は、蒸留水のケース (赤線分: $1.45/1.7 \text{ Mg/m}^3$) に比較して互いに近寄りにくいことが分かる。また、この時の膨潤圧を図 12.2.2-6 に示す。 0.5M NaCl の場合の膨潤圧 (赤●) は、蒸留水のケース (赤線分) に比較して、低いことが分かる。ここで直列膨潤試験の結果として得られた残留密度分布に Kozeny-Carman 則を適用して得られた結果を図 12.2.2-7 に示す。有効ベントナイト乾燥密度と透水係数の関係で示したものをこの表では、透水係数を 1.0×10^{-11} と 1.0×10^{-12} の間に設定した場合、緩衝材のレファレンス設計として、蒸留水の場合は、エラー! 参照元が見つかりません。で示した乾燥密度分布で問題はないが、 0.5M NaCl の場合は、膨潤後の乾燥密度として 1.6 Mg/m^3 以上でなければならないことが分かる。すなわち、イオン濃度に応じた施工時乾燥密度を取得することによって、地下水の塩分濃度に対応した膨潤後の緩衝材の最大値、最小値が得られることになる。そのイメージを図 12.2.2-7 の右側に示す。この資料によって、サイト選定の場合に、地下水のイオン濃度が分かった場合には、施工時に要求される緩衝材の乾燥密度を設定することが可能になる。これによって、緩衝材ブロックを制作する時には、乾燥密度差が少なくなるような制作方法が要求されることになる。

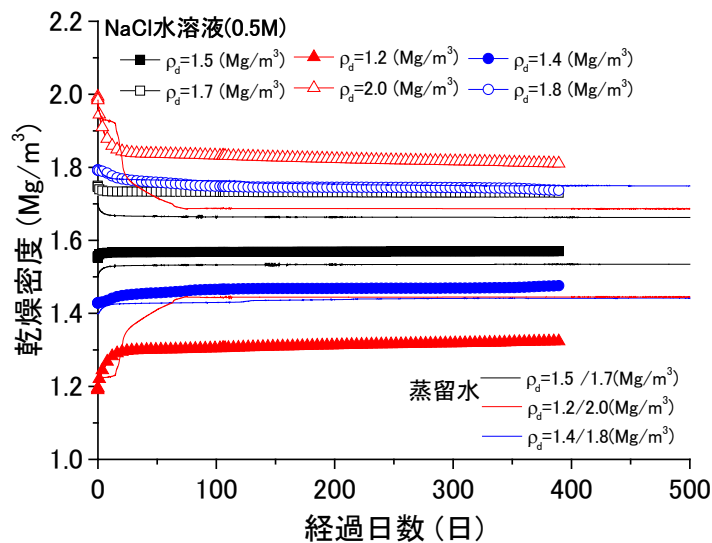


図 12.2.2-5 密度差のある供試体を直列に繋ぎ蒸留水、 0.5M NaCl で膨潤させた場合の乾燥密度

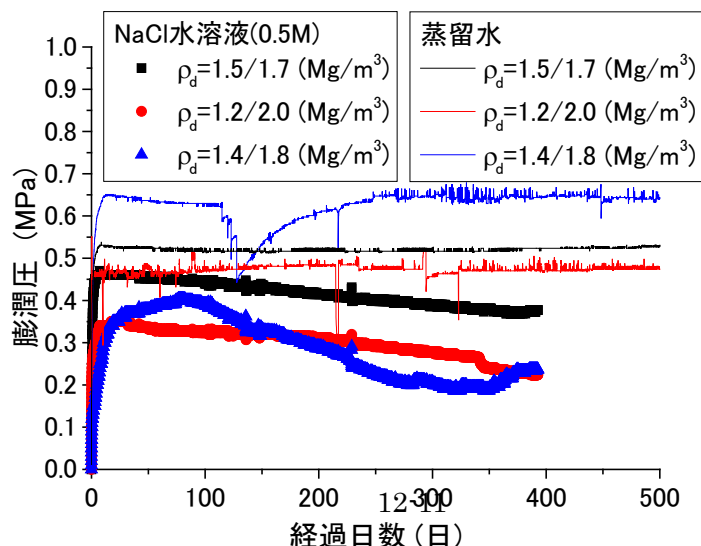
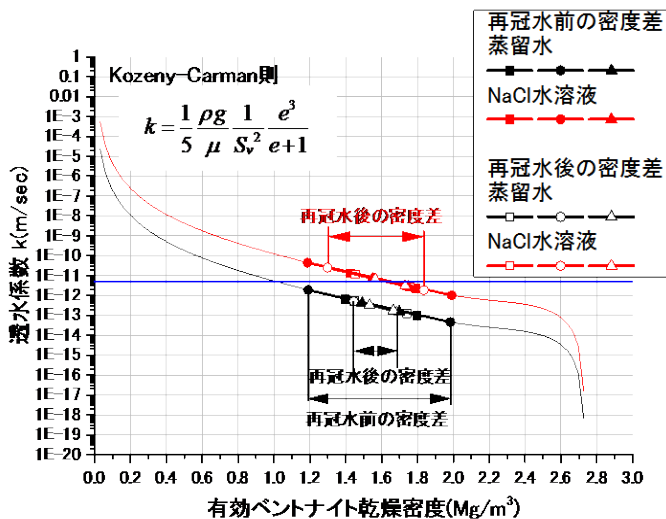


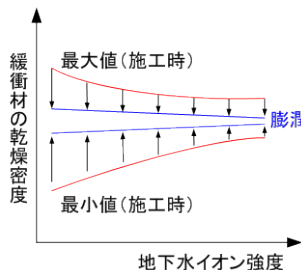
図 12.2.2-6 密度差のある供試体を直列に繋ぎ蒸留水、0.5M NaCl で膨潤させた場合の膨潤圧



列膨潤圧試験の結果として得られた残留密度分布に Kozeny-Carman則を適用して得られる透水係数を示す

設計指針に反映

許容される施工時の密度差を地下水のイオン強度毎に取得する。



地下水のイオン強度に応じた施工時、膨潤後の乾燥密度(イメージ)

図 12.2.2-7 乾燥密度差と透水係数と、膨潤後の乾燥密度を設計指針に反映

ここで緩衝材の試設計を実施するための設計フローを図 12.2.2-8 に示す。この表には原環センターが実施してきた再冠水の緩衝材の膨潤挙動に関する研究成果をまとめて示しており、緩衝材の施工方法の選定に際して、影響の与える項目を示している。処分場の要求機能として、放射性核種の移行を抑制することがあり、①緩衝材としてこれを満足するための透水係数が与えられる。次に②これに対応した緩衝材の膨潤後の乾燥密度が与えられる。ここで地下水が蒸留水であるか塩水であるかによって、すなわち③イオン濃度によってその透水係数が変わってくる。これは Ca 型化速度試験の結果が活かされ、人工注水の場合には蒸留水を使うことのメリットを裏付けて

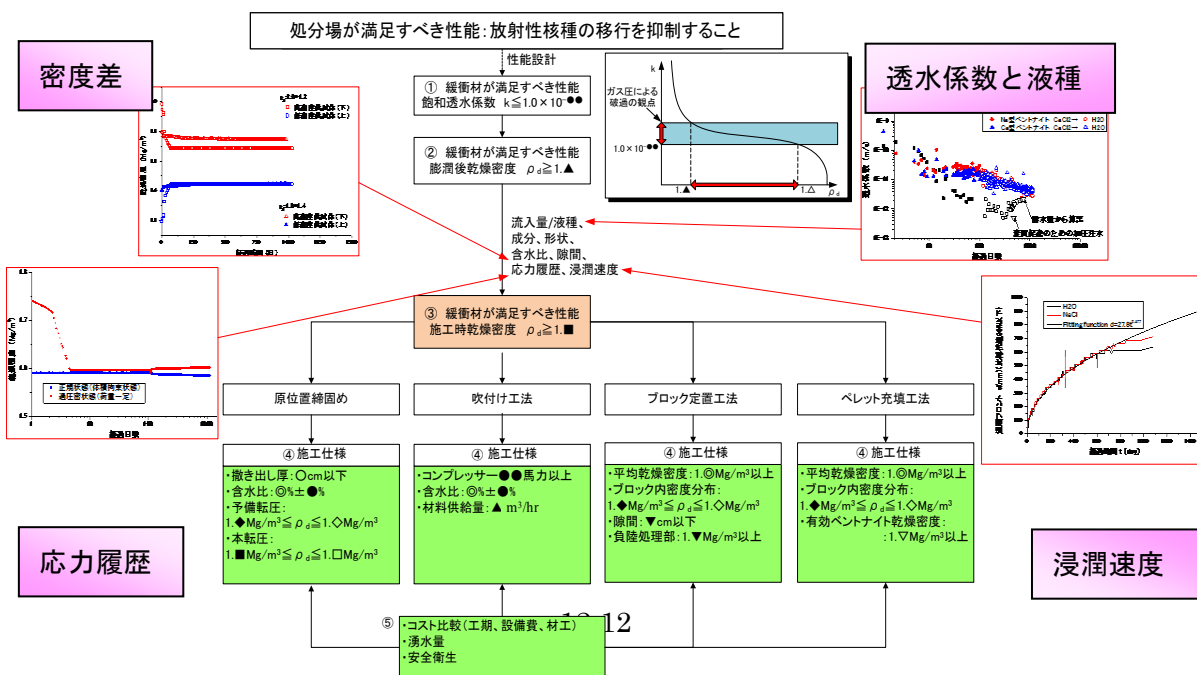


図 12.2.2-8 緩衝材の施工法を選定するための設計フロー

いる。次に緩衝材に蒸留水または、0.5M NaCl を通水した時の浸潤速度を比抵抗を使って求めた。これらの成果は、緩衝材の膨潤挙動を解析する上で重要な情報になる。

12.2.3 緩衝材の Ca 型化速度

Na 型ベントナイトと Ca 型ベントナイトを使って、液種によって透水係数、膨潤圧がどのように変化するかを調べた。図 12.2.3-1 に Na 型ベントナイト、Ca 型ベントナイトに液種として蒸留水、0.5M NaCl を通水した場合の透水係数と経過日数との関係を示す。Na 型ベントナイトは、初めに蒸留水で通水し、110 日後に CaCl₂ を通水すると 300 日で 0.3MPa 低下した。Na 型ベントナイトは、初めに CaCl₂ で通水し、110 日後に蒸留水を通水すると序々の増加し、0.5MPa 弱になった。これは蒸留水によるプレハイドレーションによって Ca 型化に起因する透水係数の増加が遅延される効果を定量評価した。つまり、施工指針に反映することは、プレハイドレーションの効果は、Ca 型化速度を遅延させるということである。

次に、Na 型ベントナイト、Ca 型ベントナイトに液種として蒸留水、0.5M NaCl を通水した場合の膨潤圧と経過日数との関係を図 12.2.3-2 に示す。Na 型ベントナイトは、初めに蒸留水で通水し、110 日後に CaCl₂ を通水すると 300 日で 0.3MPa 低下した。Na 型ベントナイトは、初めに CaCl₂ で通水し、110 日後に蒸留水を通水すると序々の増加し、0.5MPa 弱になった。ここで施工指針に反映することは、Na 型ベントナイトは、蒸留水によるプレハイドレーションによって膨潤圧が最大 (0.6MPa) になったことである。Ca 型イオンを通水すると、膨潤圧は 300 日で 0.3MPa に低下した。つまり、Na 型ベントナイトは、コンクリートから溶出した Ca 型イオンによって透水係数は大きくなり、膨潤圧も小さくなるが、最初に蒸留水で浸潤させると Ca 型化を遅らせ、透水係数を 1 オーダー低く保ち、かつ膨潤圧も 0.6MPa 程度に維持できることが判明した。

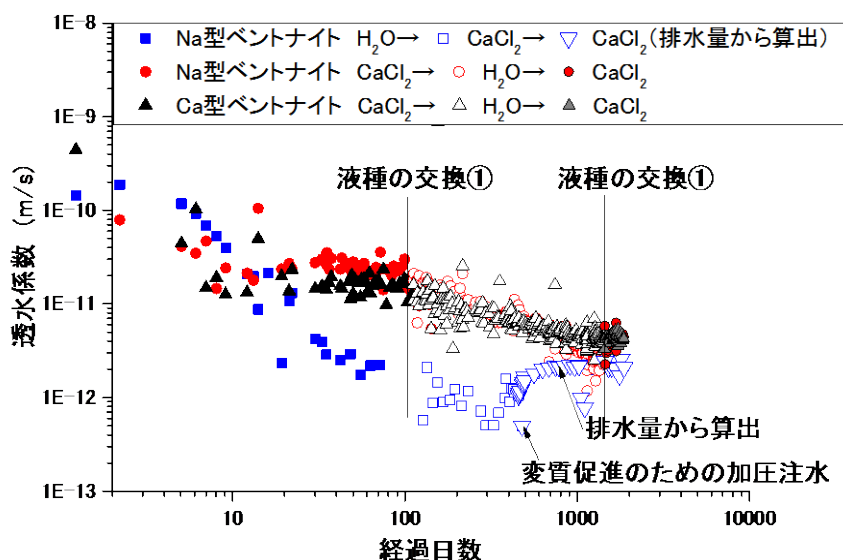


図 12.2.3-1 Ca 型化の透水係数に及ぼす影響

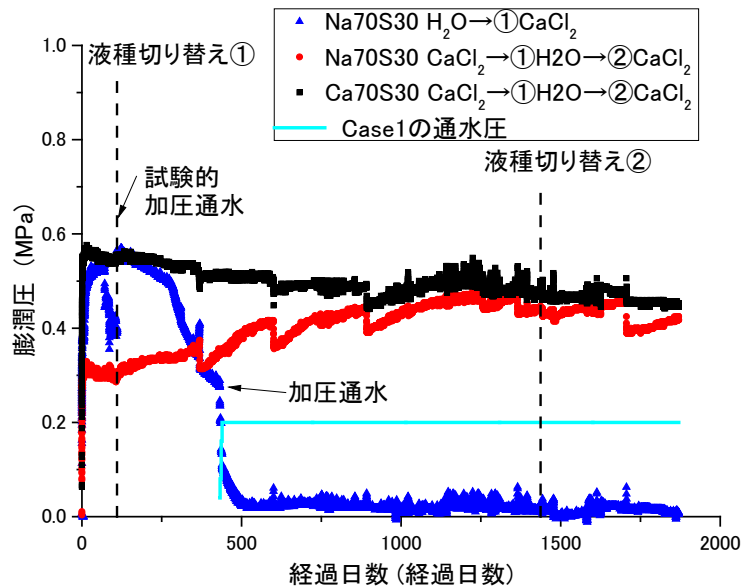


図 12.2.3-2 Ca 型化の膨潤圧に与える影響

12.2.4 緩衝材の浸潤速度と飽和度

不飽和状態の緩衝材に蒸留水、NaCl が浸潤した場合の浸潤速度を比抵抗によって5年半継続して測定している。高さ1 m の試験装置で蒸留水、0.5M NaCl は、拡散状態で浸潤している。これらの成果の妥当性については第5章で述べているが、今後実規模性能確認試験において浸潤速度を推定する場合や、膨潤性鉱物の不飽和一次元浸潤解析が可能な CODE-BRIGHT や DACSAR-UA などの高度化に資する情報となる。また、比抵抗試験において、蒸留水と0.5M NaCl の場合に、緩衝材の乾燥密度を $1.2\text{Mg}/\text{m}^3$ 、 $1.4\text{Mg}/\text{m}^3$ 、 $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$ 、 $1.8\text{Mg}/\text{m}^3$ 、 $2.0\text{Mg}/\text{m}^3$ とした場合の比抵抗と飽和度の関係を取得した。これによって、比抵抗値から飽和度への換算が可能となった。その成果を図 12.2.4-1 と図 12.2.4-2 に示す。

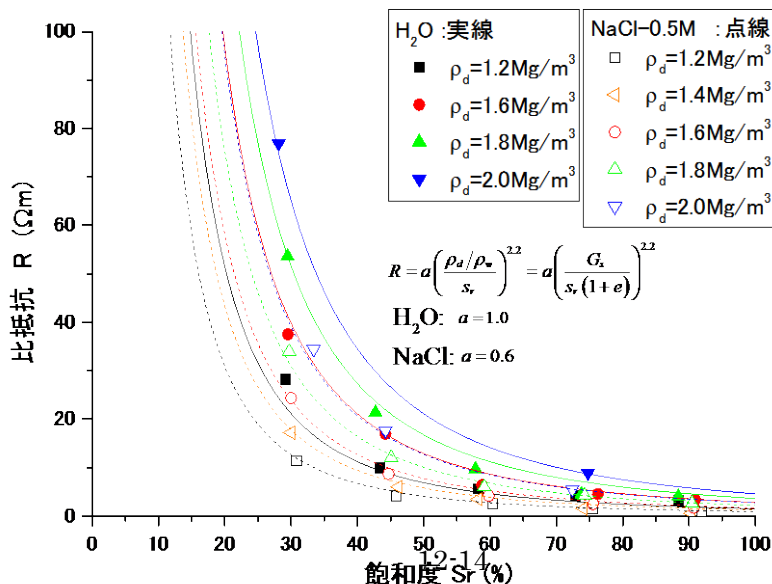


図 12.2.4-1 蒸留水、0.5MNaCl 溶液を使った場合の緩衝材の飽和度と比抵抗の関係

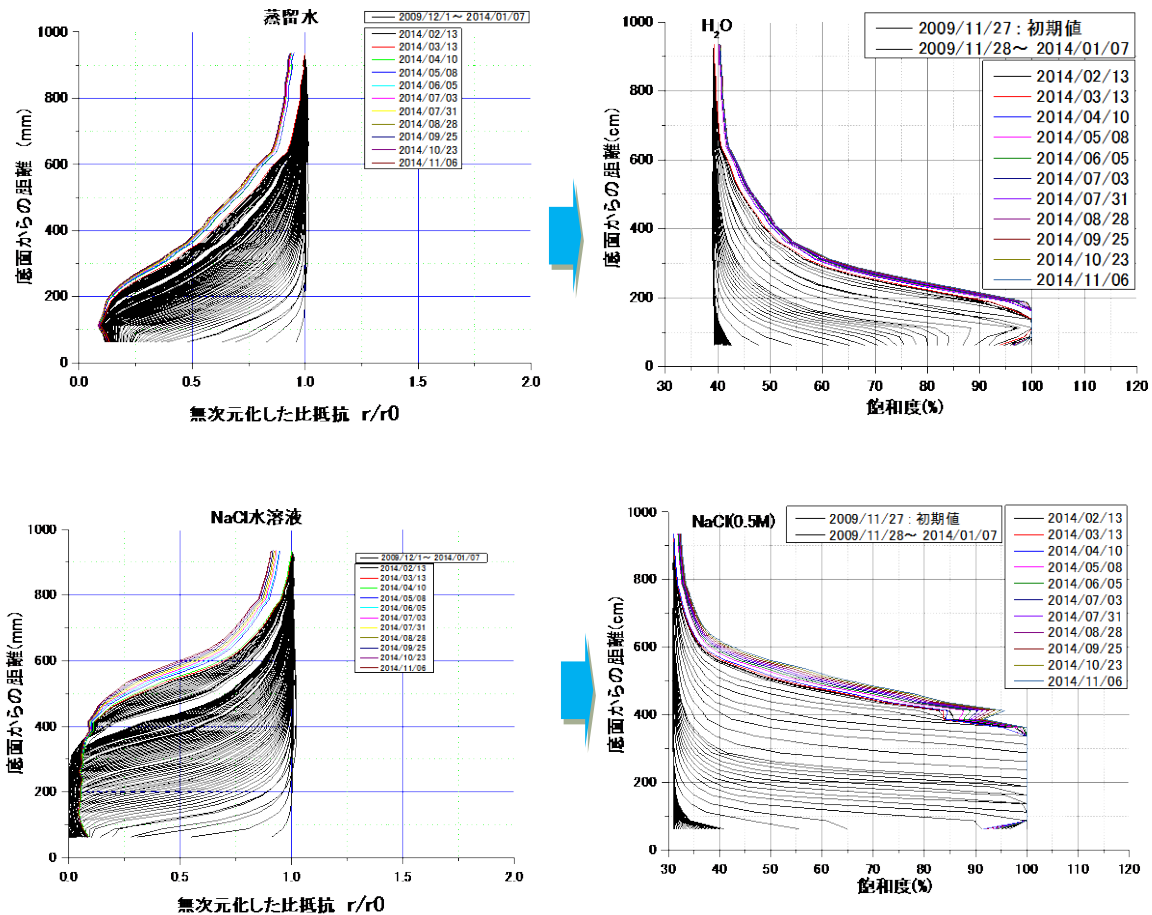


図 12.2.4-2 無次元化した比抵抗 (r/r_0) の飽和度への換算 蒸留水 (上)、0.5M NaCl (下)

緩衝材に地下水が浸潤する時の飽和度が初期値から 1%増加した時点で浸潤フロントが到達したと見なした場合の浸潤フロントの進展状況を図 12.2.4-3 に示す。蒸留水のケースの場合、浸潤フロントの位置 $d(\text{mm})$ は、給水時間 $t(\text{day})$ の指数関数として $d = 60t^{0.35}$ で近似できる。

一方、NaCl 水溶液の場合、浸潤フロントの位置 $d(\text{mm})$ と給水時間 $t(\text{day})$ の関係は $d = 14t^{0.5}$ と近似でき、給水時間 $t(\text{day})$ の平方根に比例するという Washburn 式と整合する結果であるが、浸潤フロントの進展状況は蒸留水の場合よりも遅い。

次に、飽和度が 95%以上となる場所を飽和フロントと定義して、その進展状況をまとめると図 12.2.4-4 のようになる。図から、飽和フロントの進展状況は、蒸留水の場合に比べ NaCl 水溶液の場合の方が速いことが分かる。このことから、蒸留水の場合、ベントナイトに供給された水は、比較的速やかに供試体上部に拡散するため浸潤フロントは移動するが、NaCl 水溶液の場合では供給された NaCl 水溶液はあまり供試体内部に拡散されずに給水側に留まっているものと考えられ

る。これは、NaCl 水溶液の場合、そのイオン強度の影響でモンモリロナイトが凝集し、毛細管現象に寄与する微小な空隙が形成され難いためと考えられる。

なお、飽和フロントが供試体上部(浸潤距離 1000mm)まで到達する時間を近似式から計算すると、蒸留水の場合で約 78 年、NaCl 水溶液の場合で約 21 年となった。

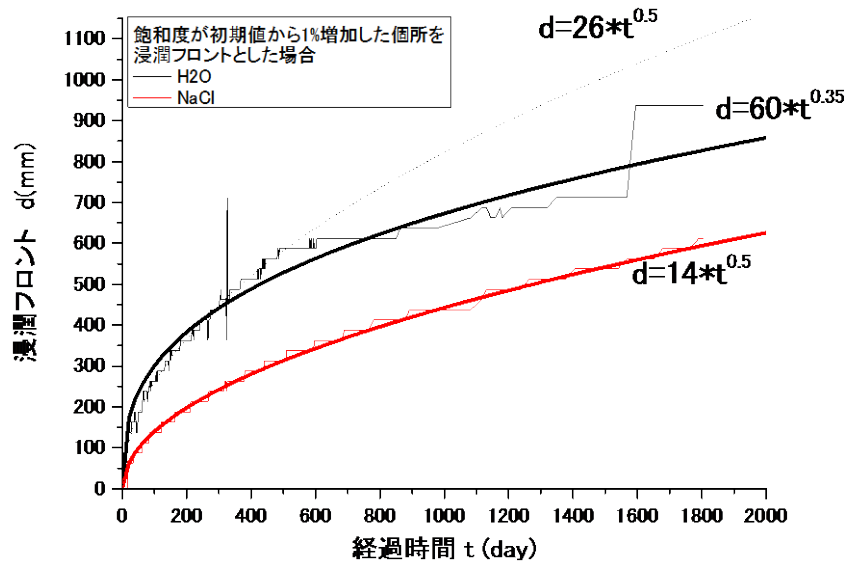


図 12.2.4-3 浸潤フロントの進展状況（初期飽和度からの増分が 1%で定義）

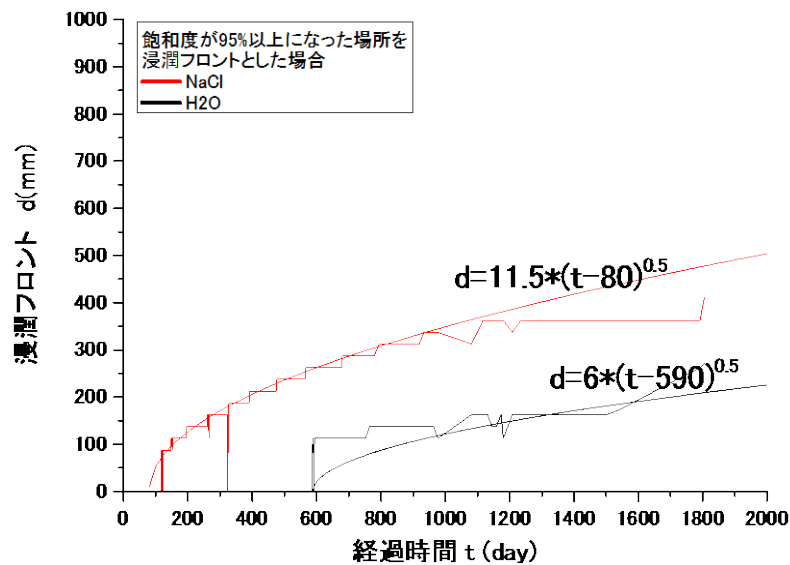


図 12.2.4-4 飽和フロントの進展状況（飽和度 95%以上で定義）

12.3 パイピング/エロージョン現象に対する対策について

12.3.1 緩パイピング/エロージョン現象と流出する物質

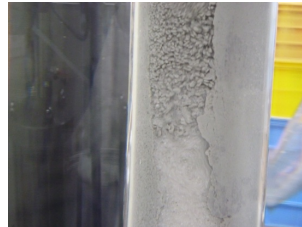
パイピング/エロージョンは、再冠水時の緩衝材と岩盤との界面等に発生する現象であり、境界

条件として対象としている系の中に、流入する場所と流出する場所が存在していることを前提としている。試験では 2000 年レポートで設計レファレンスである緩衝材ブロック（クニゲル V1 70wt%+ケイ砂 30wt%）を使った場合のパイピング/エロージョン現象を調査した。図 12.3.1-1 に 0.5M NaCl を下から上に 0.1L/分で通水させた場合の挙動を示す。ここでは水みちにケイ砂が沈

パイピング試験(0.5M NaClを通水)



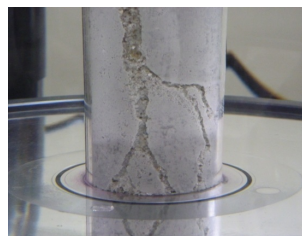
試験全景：
緩衝材ブロック、隙間5mm(片側2.5mm)
NaCl溶液(イオン濃度0.5)
流量0.1L/分



上部
白濁部の上部ではモンモリロナイト成分が凝結し、塊の状態では攪拌されている状況



中部
ケイ砂が分離堆積した位置から通水液が噴出し、白濁部が攪拌されている状況



下部
複数の水みちが1本に収斂

図 12.3.1-1 0.5M NaCl が 0.1L/分で流入した場合のパイピング/エロージョン現象

殿し、パイピングの跡は自己収縮しないことが明らかになった。次に、緩衝材の大小混合ペレットが蒸留水で流出した場合に、試験系の中に残存する鉱物を測定したところ、図 12.3.1-2 に示すようにモンモリロナイトの含有量が 5.22%であったことから、エロージョン物質は、多くがモンモリロナイトであることが推定できる。

1000mm セルによるパイピング試験の総流量とエロージョン質量については総流入量とエロージョンとの関係を蒸留水、0.5M NaCl の場合について調査した。図 12.3.1-3 に、これらのケースの総流量とエロージョン質量の関係をまとめて示す。図には SKB 社が MX80 のペレットを円筒形のセルに充填して取得した総流量とエロージョン質量の関係も併せて示している。さらに、前述の小型セルによるエロージョン試験の結果も併せて示す。青色の直線は蒸留水の場合、赤色の直線は 0.5MNaCl の場合である。

今年度新たに実施したクニゲル V1 と 30wt%ケイ砂が混合されたベントナイト混合土からなるベントナイトブロックに蒸留水を通したケース（下向き青三角▼）やクニゲル V1 単体からなる大小ペレットを充填したケース(上向き青三角△)は、クニゲル V1 を精製したモンモリロナイト 100%のブロックのケース(白抜き丸○)や SKB が取得した MX80 とおぼ同じ勾配で流量が増加するのに従ってエロージョン量も単調に増加している。

一方、NaCl 水溶液を使用したケース（赤線○、□）は、他のケースに比べ明らかに総流量とエ

ローション質量の関係が勾配が急であることが分かる。さらに、通水量が 20L を過ぎた辺りから、総流量とエロージョン質量の関係の勾配が緩くなっている。これは、ブロックとセルの界面に形成された水みちに堆積したケイ砂がエロージョンを抑制しているためだと考えられる。

図 12.3.1-4 に、1000mm セルによるパイピング試験におけるケイ砂の堆積状況と総流量と

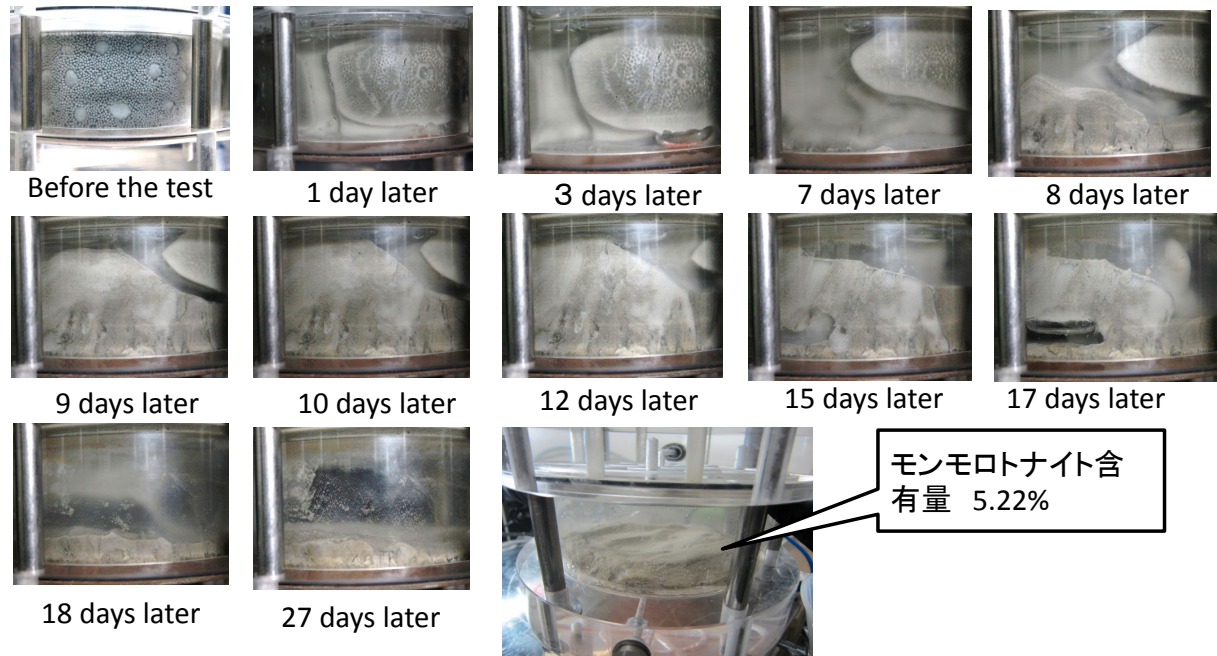


図 12.3.1-2 緩衝材ペレット流出後の鉦物の成分

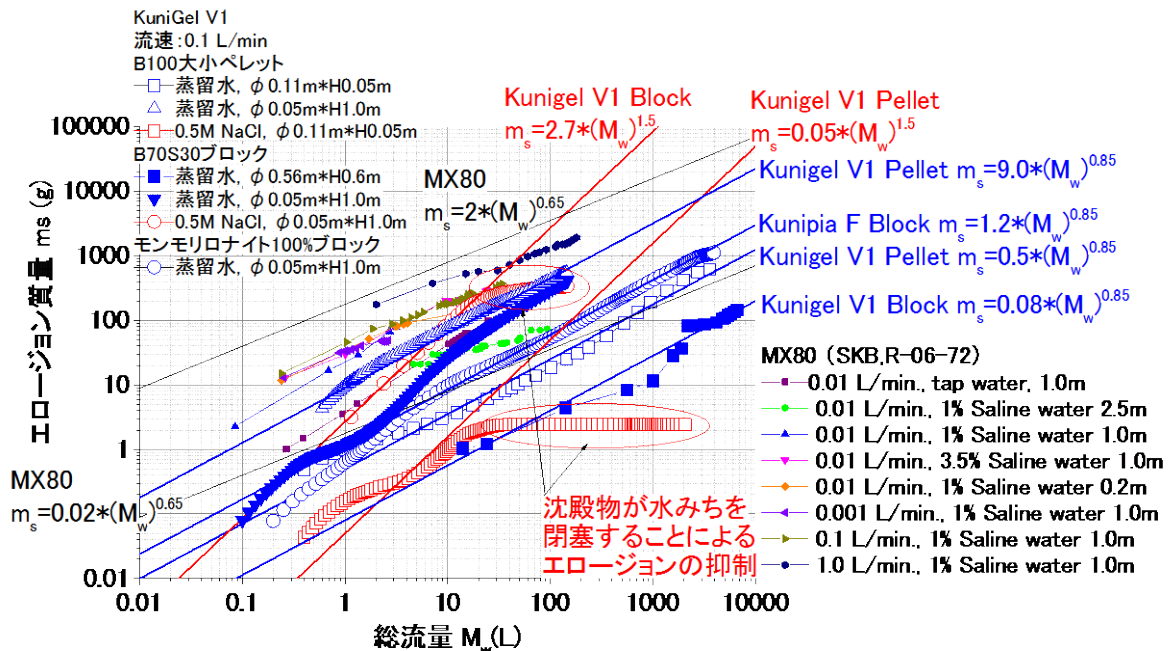


図 12.3.1-3 1000mm セルによるパイピング試験の総流量とエロージョン質量の関係

エロージョン質量の関係を併せて示す。図から、水みちに堆積したケイ砂が 40cm 程度の高さになった頃から、総流量とエロージョン質量の関係の勾配が緩くなっていることが分かった。この傾向は、小型セルにおいても同様であった。このため、海水系地下水におけるエロージョン対策には、このケイ砂が水みちに沈殿することを抑制する必要がある。

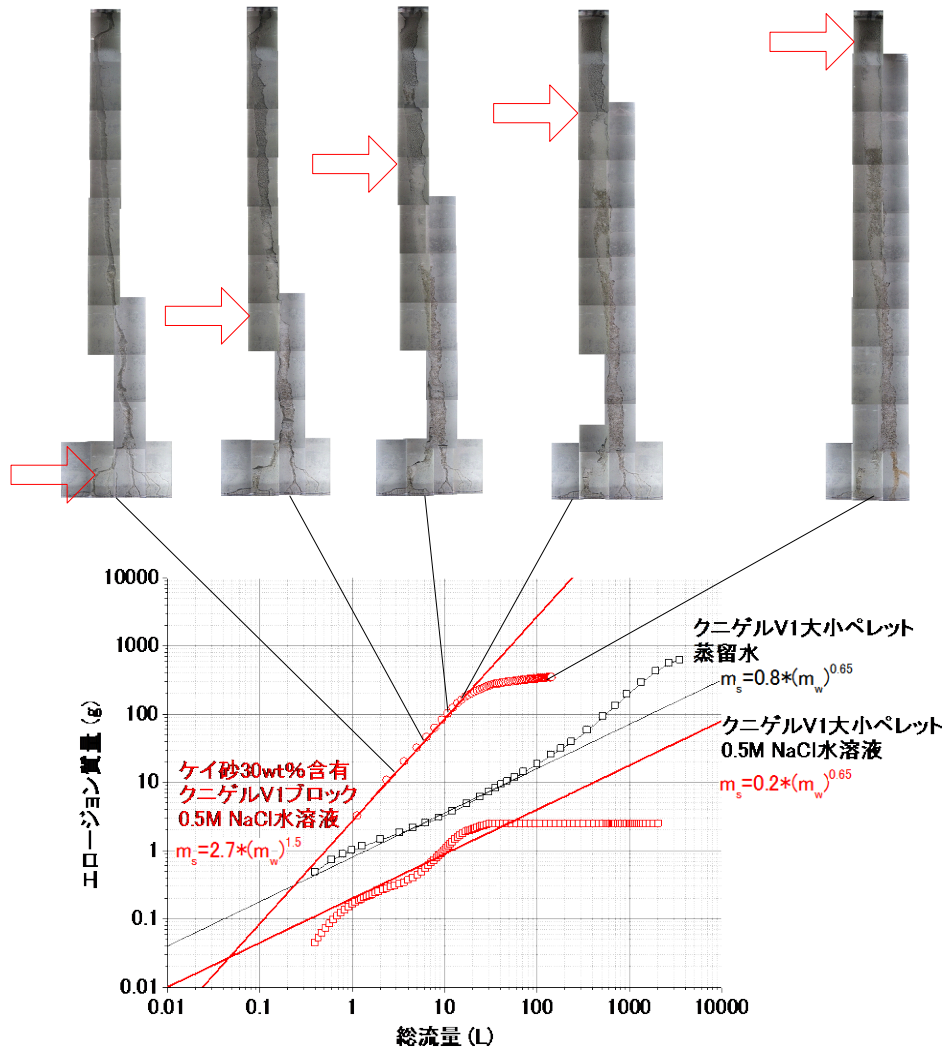


図 12.3.1-4 1000mm セルによるパイピング試験におけるケイ砂の堆積状況とエロージョン質量

12.3.2 緩衝材がエロージョンを起こさない限界流速の検討

流量とエロージョン量の関係をモデルとして汎用的に用いることの妥当性を検証するためには、この関係が、系の大きさに依存しないのか、通水方向や膨潤方向に依存しないのか、材料に対して一意に決まるものなのかなど、確かめなければならないことが多い。仮に、この流量とエロージョン量の関係が材料特性だとすると、材料特性としての限界流量 q_l が存在することになる。この限界流速 q_l の取得を目的として実験を行った。

図 12.3.2-1 に初期乾燥密度 1.6 Mg/m^3 と 1.8 Mg/m^3 の場合の平衡状態の膨潤量と流速の関係を併せて示す。ただし、緩衝材の膨潤が平衡状態であることを確認するための十分な時間を確保することが困難であったため、6 日程度の通水時間における膨潤量を平衡状態と見なして結果を取

りまとめている。

平衡状態の膨潤量と流速の関係は、概ね1本の関数で近似できるように見える。しかしながら、流速が速くなるほど平衡状態の膨潤量が小さくなる傾向を示していることから、流速に対して平衡膨潤量に相当する乾燥密度が存在するものと考えたほうが妥当と考えられる。このため、初期乾燥密度 1.6 Mg/m^3 と 1.8 Mg/m^3 のケース毎に近似関数を取得した。全体的な傾向として、流速が遅いほど、両ケースの膨潤量の差が小さい。これは、流速が遅いほど、十分に膨潤した状態でエロージョンが発生するため、初期乾燥密度が膨潤量に及ぼす影響が小さくなるためである。

この近似関数で外挿すれば、図 12.3.2-2 に示すように初期乾燥密度 1.6 Mg/m^3 の限界流速が 0.22 m/s 、 1.8 Mg/m^3 の場合が 0.40 m/s であった。今年度の試験からは2点しか限界流速が得られないが、今後、様々な乾燥密度に対する限界流速を取得することによって、パイピング・エロージョンに対する対策に資する情報として取りまとめたい。緩衝材の膨潤が平衡状態であることを機械的に決定できる方法に関しても、今後、検討が必要である。

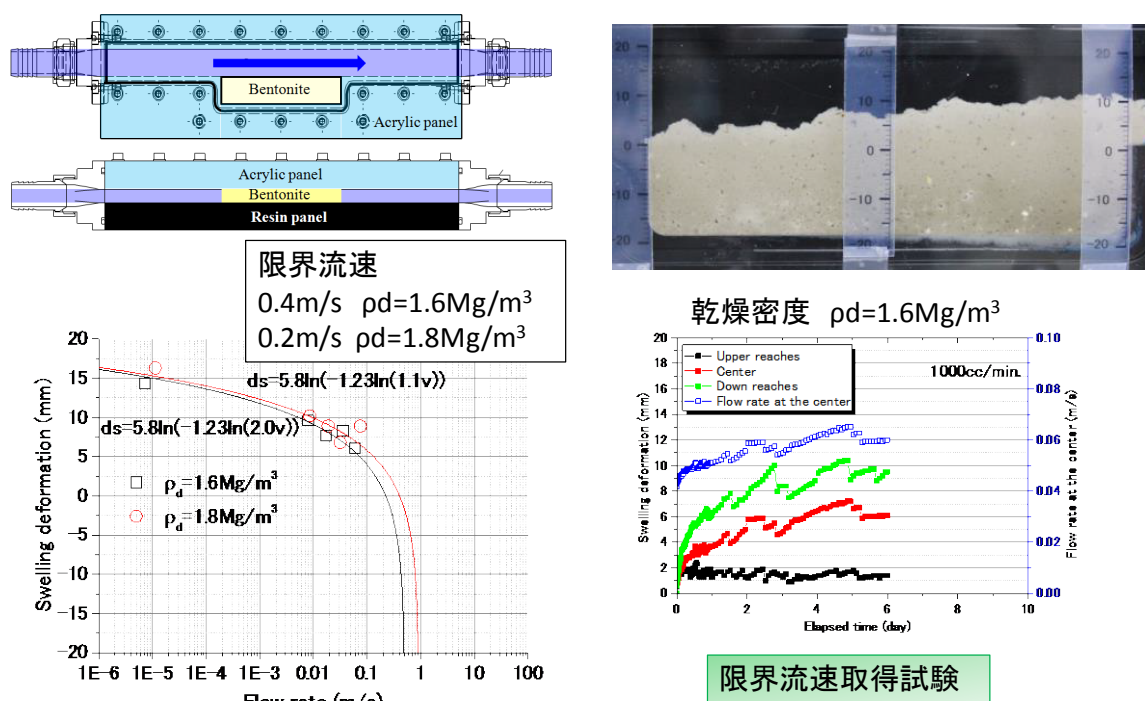


図 12.3.2-1 緩衝材の限界流速取得試験（乾燥密度 1.6 Mg/m^3 と 1.8 Mg/m^3 の場合）

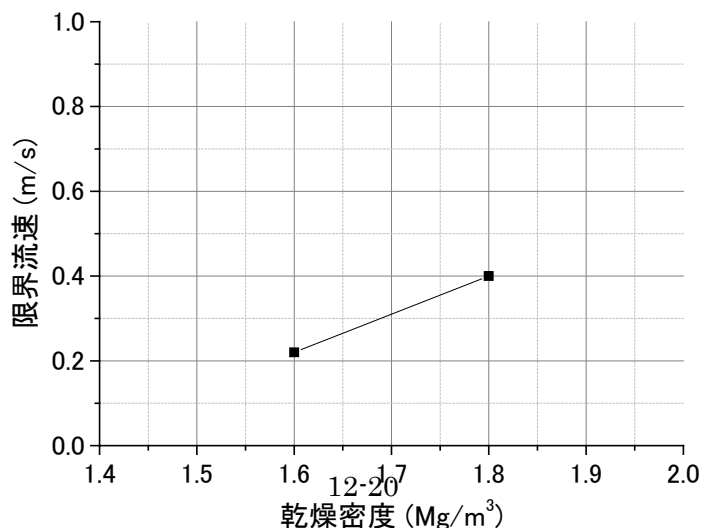


図 12.3.2-2 限界流速と乾燥密度の関係

12.3.3 パイピング/エロージョンに対する対策

パイピング/エロージョンに対する対策として、緩衝材の成分の流出を低減する方法を図 12.3.3-1 に示す。

- ① プラグ施工の時間を短縮する。
- ② プレグラウトや地下水の Water management によって地下水の湧水量を抑える。
- ③ 乾燥密度を高くする。緩衝材の材料を多様化する（クニゲル V1 70wt%+ケイ砂 30wt%）以外の組合せを考える。クニゲル V1 原鉱石、または、MX80 モンモリロナイトのようにモンモリロナイトの含有量を高める。
- ④ 仮設プラグの設置+人工注水: 早期に鉛直処分孔の緩衝材を飽和・膨潤させる。
- ⑤ 人工不陸を鉛直処分孔の壁に設け、緩衝材のエロージョンの低減を図るとともに、緩衝材の膨出の場合の上向きの力を、この人工不陸で一部分を受けるとして、仮設プラグのアンカーの本数を低減する。

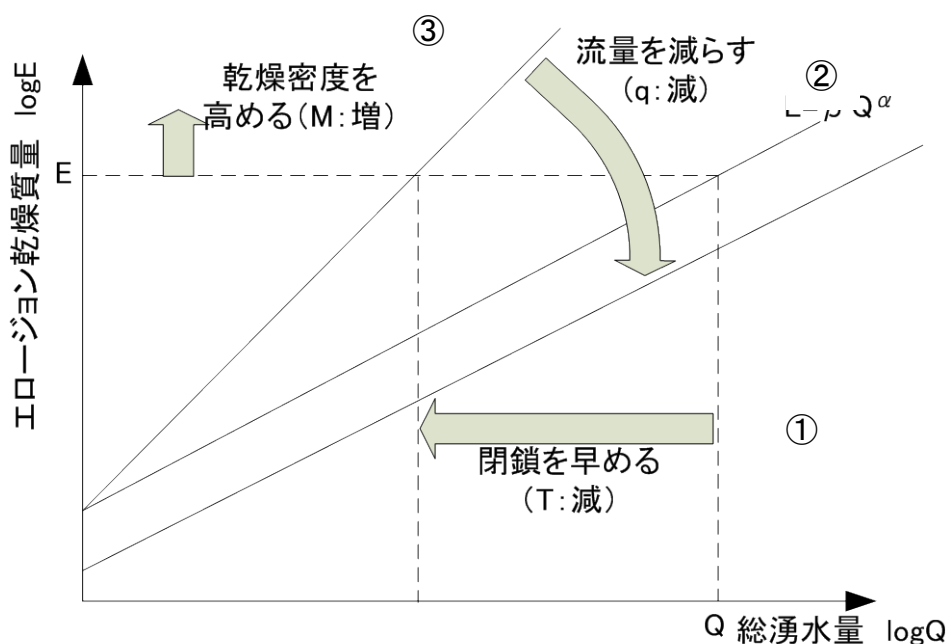


図 12.3.3-1 パイピング/エロージョンに対する対策

ここで、人工注水に関して注意すべき点は、図 12.3.3-2 に示すように地下水の流入場所が下部、排出場所が上部にある場合は、緩衝材が上に押し上げられて、排出孔が塞がれることがあるため、軽減することが可能である。一方、上部の中央から流入して、上部の両側に排出される場合は、緩衝材は常に押し下げられるために、エロージョン現象が止まらないこともあることに注意する

必要がある。対策④、⑤については、その効果を今後室内試験、幌延深地層研究所において確認、
 確証していく必要がある。

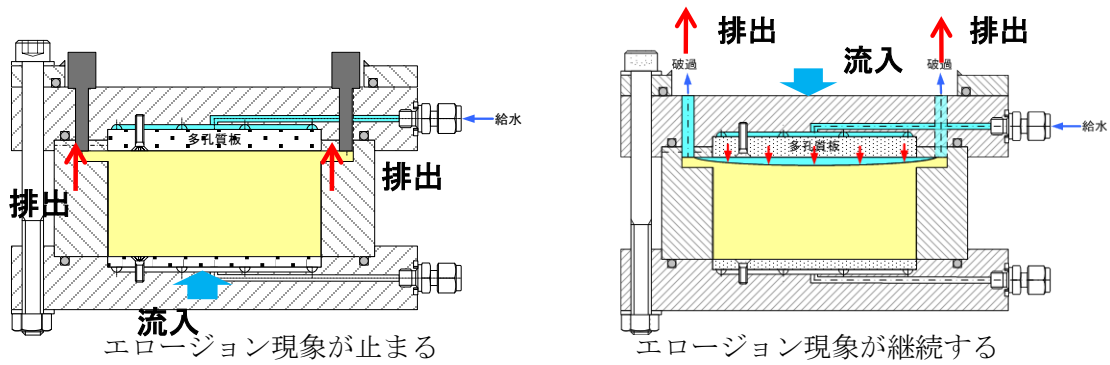


図 12.3.3-2 エロージョン現象の継続と地下水の流入・排出の関係

12.3.4 吹付け施工試験と仮設プラグの効果について

湧水環境における吹付け施工試験を実施した後、仮設プラグを設置して、人工注水の効果を確認した（図 12.3.4-1）。水圧が 1MPa に達した後、同じ圧力で堆積岩では 140 日間、結晶岩では 125 日間給水させた。堆積岩を模擬した給水圧と期間の関係を図 12.3.4-2 に、結晶岩と給水圧との関係を図 12.3.4-3 に示す。

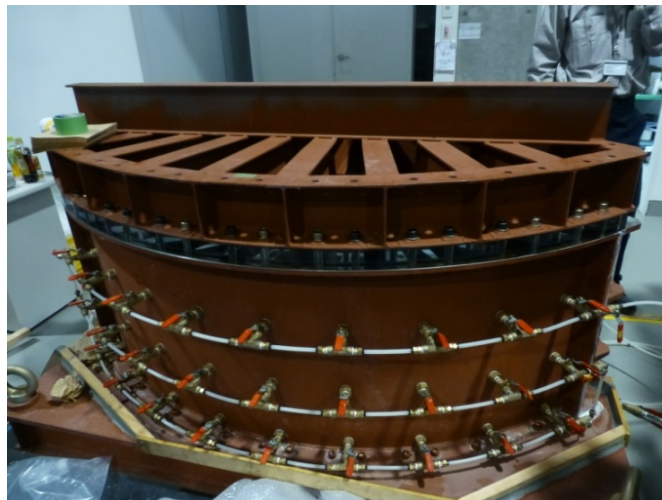


図 12.3.4-1 湧水環境で吹付けを実施した後、仮設プラグを設置した状況（堆積岩）

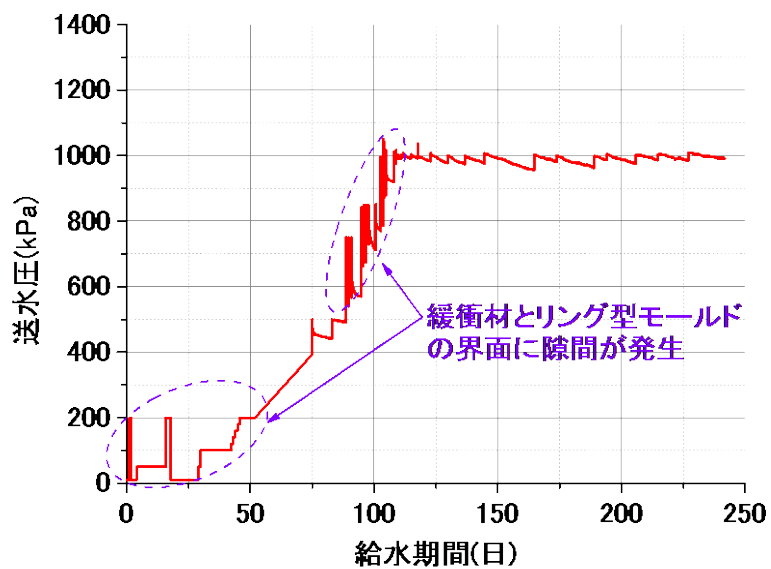


図 12.3.4-2 給水期間と給水圧の関係（堆積岩）

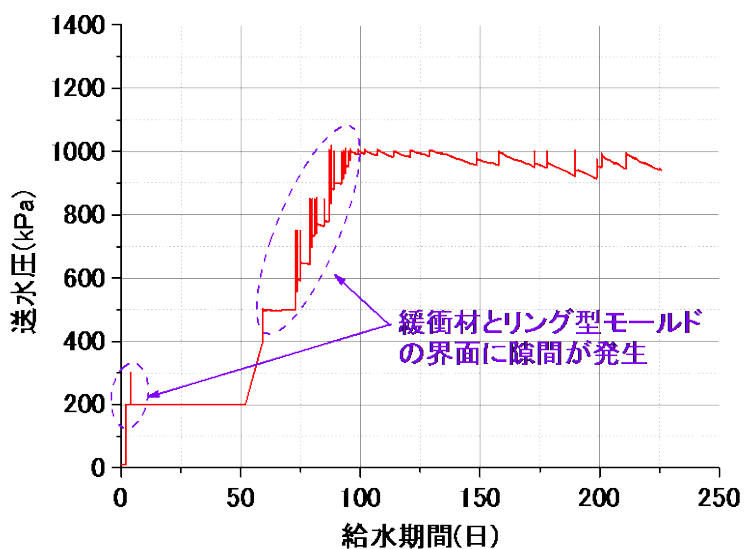


図 12.3.4-3 給水期間と給水圧の関係（結晶質岩）

この仮設プラグの効果は、緩衝材の膨潤圧の約 2 倍の水圧が作用した状態で、破過が生じないこと立証したことで、縦置処分孔への仮設プラグの適用性と人工注水の実現性が確認できたと考える。

12.4 幌延深地層研究所におけるエロージョン試験と工学的対策について

12.4.1 幌延深地層研究所におけるエロージョン試験の評価

エロージョン試験を実施するに先立ち、試験孔3における湧水量の結果を図12.4.1-1に示す。水位が低いところは7L/分の流入量があるが、岩盤面高さになると2L/分程度まで低下するとい特徴があった。この状況で緩衝材ブロックを1段のみ、試験孔3に定置した時の、緩衝材ブロックの膨潤挙動を観察することが第一の目的である。処分孔の外径はΦ580mm、深さは880mmで、

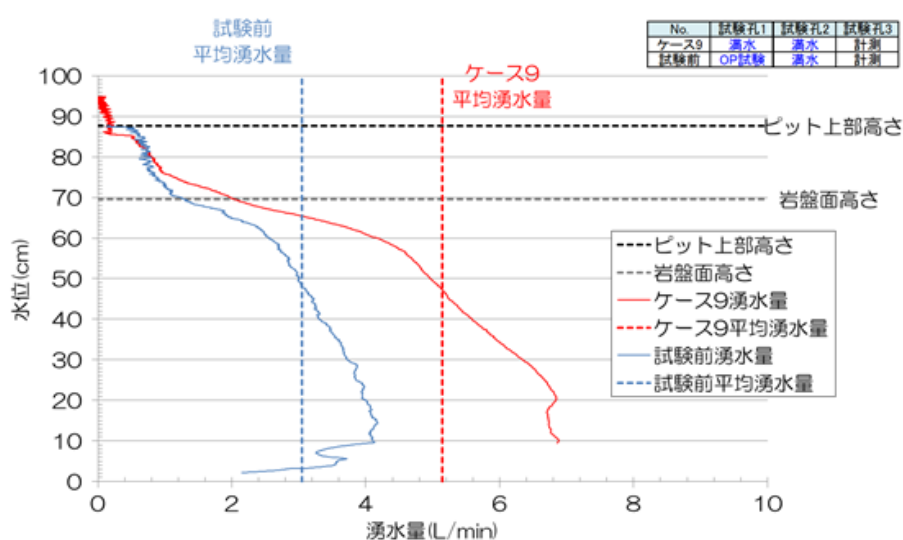


図 12.4.1-1 試験孔3における湧水量

緩衝材ブロックの外径はΦ540mmであるため、岩盤との隙間は20mmである。試験孔3の水分分析の結果、塩分濃度は海水の約1/3である。実験の結果判明したことを以下にまとめる。

- ① 地下水流量7L/分→2L/分の場合に、緩衝材ブロック1段は膨潤し、外側2cmの隙間を埋めることが判明した(図12.4.1-2)。
- ② 緩衝材ブロックの表面にやわらかい物質が約4cmの厚さで堆積していた。
- ③ 緩衝材ブロックと岩盤の隙間は、膨潤によって比較的硬い部分が低面から約10cmの範囲で存在していた(図12.4.1-4)。
- ④ 緩衝材ブロック断面の中心部は、1ヶ月の期間では、膨潤が進んでいないことがわかった(図12.4.1-5)。
- ⑤ 岩盤と緩衝材ブロックの隙間にパイピングが発生したかどうかは、確認できなかった。岩盤面の位置にバキュームの吸い取り口を設置し、地下水を採取したが、吸光度計による測定ではエロージョン量を計測できなかった。

この試験の成果は、1/3 の濃度の地下水において、地下水の流入量が 7L/分→2L/分に変化する環膨で、緩衝材が膨潤し、緩衝材ブロックと岩盤との隙間が埋まったということが確認できた。CCDカメラの映像では、図 12.4.1-3 に示すようにエロージョンを起こした微粒子が水中を漂っ



図 12.4.1-2 緩衝材ブロック 1 段のみ設置し、地下水流入量 (7L/分→2L/分)

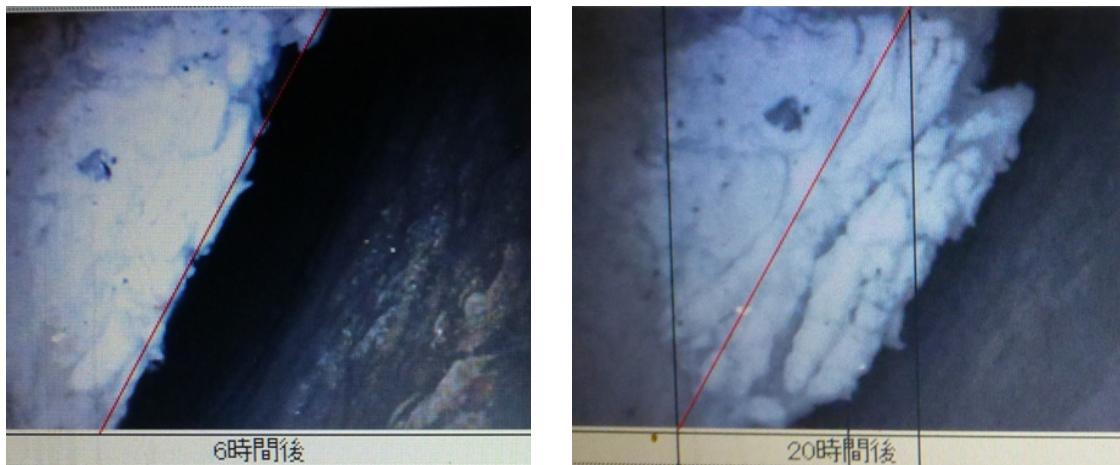


図 12.4.1-3 緩衝材ブロックが膨潤している状況



図 12.4.1-4 試験孔 3 における緩衝材ブロックのみの取り出し状況

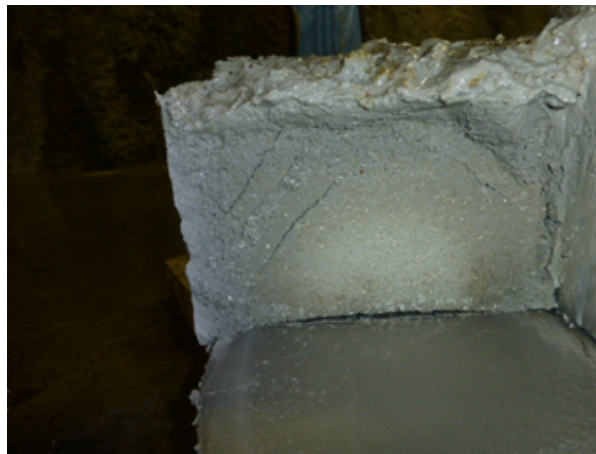


図 12.4.1-5 緩衝材ブロックの断面

ている様子は見られなかった。不確定事項は、緩衝材ブロックの表面ある厚さ 4cm の柔らかい部分は、エロージョンした物質であるか、また、蓋を付けて体積拘束した時に所定の乾燥密度を発現することができるかどうかということである。

試験孔 2 における湧水量の結果を図 12.4.1-6 に示す。水位が低いところは 7L/分の流入量があるが、岩盤面高さになると 2L/分程度まで低下するという特徴があった。この状況で緩衝材ブロック 6 段と岩盤との隙間にペレット (4mm+0.3mm) を自然落下で定置した。この状態をに示す。この試験は緩衝材ブロックとペレットの膨潤挙動を観察することが第一の目的である。処分孔の外径は $\Phi 580\text{mm}$ 、深さは 840mm で、緩衝材ブロックの外径は $\Phi 540\text{mm}$ であるため、岩盤との隙間は 20mm である。

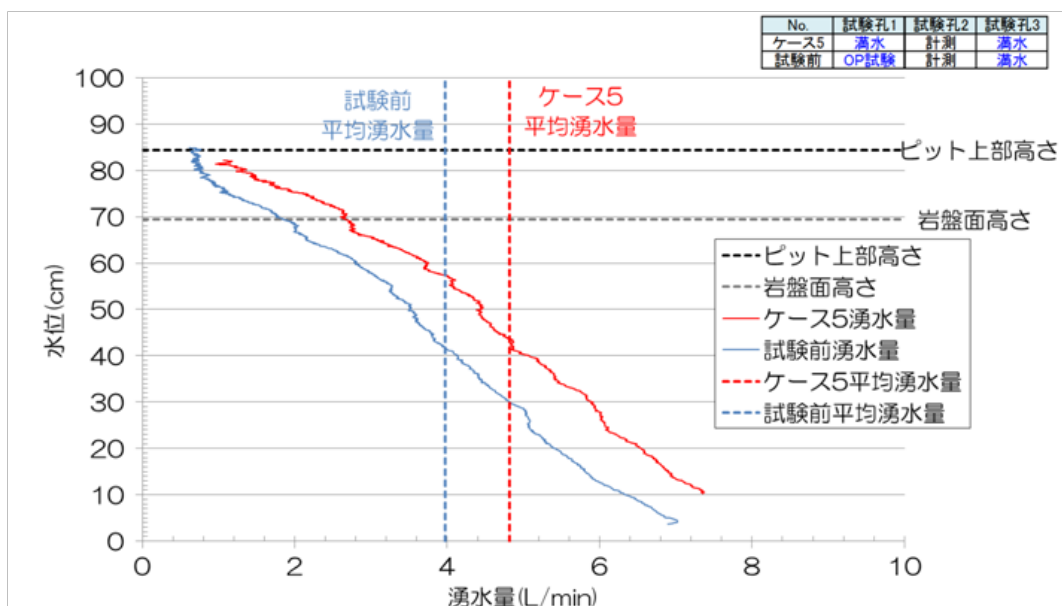


図 12.4.1-6 試験孔 2 における湧水量

- ① 地下水流量 7L/分→2L/分の場合に、ペレット部分が膨潤によって膨れ、緩衝材ブロックの表面には約 40mm の柔らかい沈殿物が堆積していた。CCDカメラで、微粒子が緩衝材ブロックの上を浮遊していることから、ペレットの成分が堆積したものと考えられる (図 12.4.1-7)。
- ② ペレットは、地下水に触れると 1 時間以内で形が崩れて分解し、その後膨潤することが判明した。1 か月後に取出したところ、固いペレット層を構成していることが判明した (図 12.4.1-8、図 12.4.1-9)。
- ③ エロージョン水の採取に当たって、当初バキュームの吸入口を緩衝材ブロックより 20cm 上の岩盤面高さのところに設置していたが、吸光度計では有意なエロージョン量を測定することができなかった。



図 12.4.1-7 緩衝材ブロック 6 段+ペレット (4mm+0.3mm)、地下水流入量 (7L/分→2L/分)

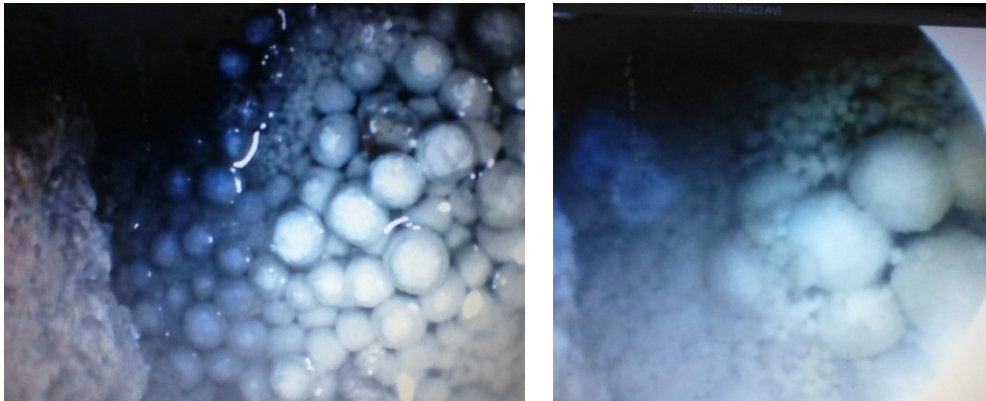


図 12.4.1-8 ペレット (4mm+0.3mm) の膨潤状況

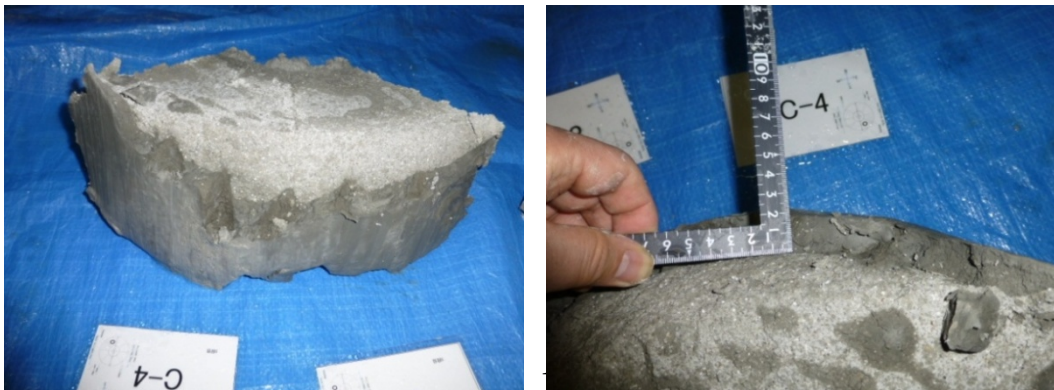


図 12.4.1-9 ペレットの膨潤状況

今回の試験では実際の流水が流入する環境で、緩衝材の挙動を調査すること、吸光度計を使ったエロージョン量の測定を目的としていたが、まず、ペレットの効果として、乾燥密度は緩衝材ブロックよりも低いですが、先に膨潤することによって岩盤と緩衝材ブロックの隙間に硬い緩衝材の層を形成し、緩衝材ブロックの表面にしっかり吸着することによって、緩衝材ブロックのエロージョン低減に貢献する可能性が高いことがわかった。一方、吸光度計によるエロージョン量は有意な量の測定ができなかった。これは、試験孔の中でパイピング/エロージョンが発生しなかったのではなく、バキュームによる吸水口により摂取方法、位置が適切ではなかったことが考えられる。実際には緩衝材の上側への膨潤を拘束するものがないために、緩衝材ブロックが膨潤したことで、試験孔 2 の場合には、ペレットのエロージョン物質が堆積したものが混在しているものと考えられる。

そこで室内試験のエロージョン量測定と同じ条件でエロージョン量を測定することを来年度実施する予定である。試験のイメージを図 12.4.1-10 に示す。すなわち、岩盤面高さの位置に、仮設プラグ(蓋)を設置して、その一部にΦ5mmの孔を設け、そこからエロージョン水を採取する。また、小規模試験において、幌延の試験坑道と同じイオン濃度の地下水を使って、エロージョン試験を行い、単純な系での挙動を調査する必要があると考えている。

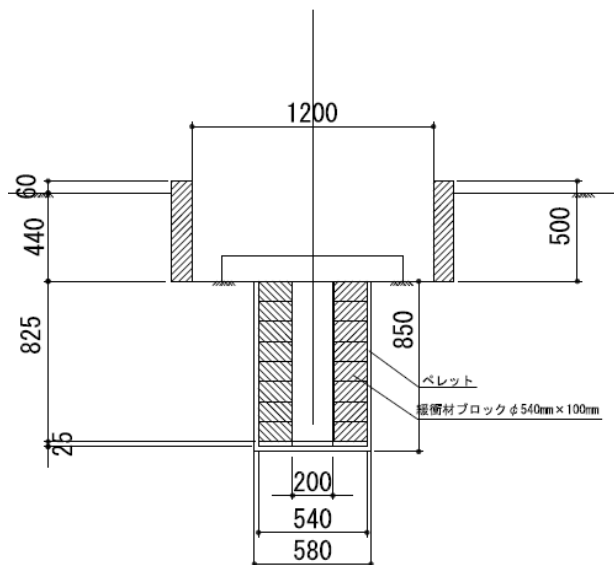


図 12.4.1-10 緩衝材試験に仮設プラグを設置したイメージ

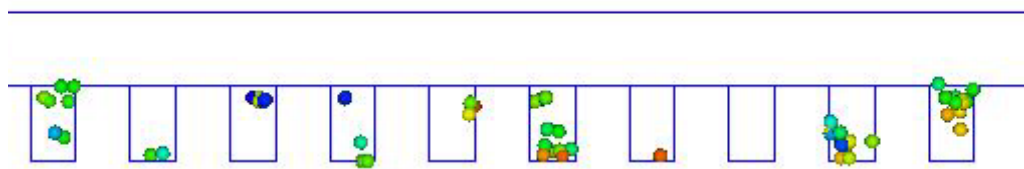
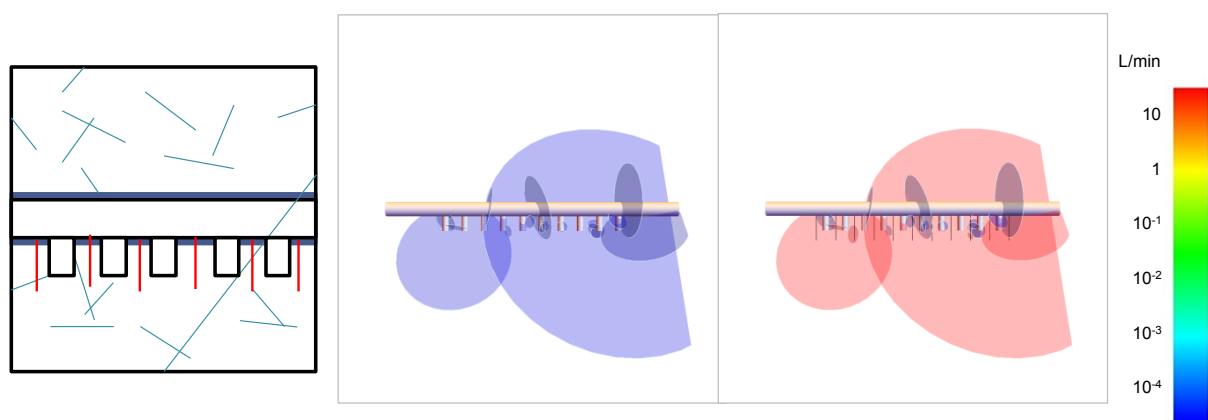
12.4.2 幌地下水位低下工法に関する検討

この検討は、幌延地下 350m の環境を参考として割れ目ネットワークモデルによる解析的検討により工学的対策が処分坑道周辺の水理場に与える影響を評価することを目的としている。

平成 26 年度は、幌延地下 250m の一部のデータが利用可能であったため、これまで公開された

文献を参考として割れ目ネットワークモデルを作成した。この成果として確率的に 100m×100m×100m の中に 10 ケースのネットワークモデルを作成し、坑道掘削時の湧水量、処分孔掘削時の湧水量を算出し、地下水水位低下工法を実施した場合との比較をするための基準値とした。処分坑道の場合は、最大 920 L/分、最小 6 L/分の流入量であり、処分孔は最大 302 L/分、最小 0.2 L/分であった。坑道湧水の 10 ケースの平均は、1,173 L/分であり、処分孔掘削時は、1,232 L/分であった。

水抜きボーリングとその効果について図 12.4.2-1 に示す。水抜きボーリングが処分孔との間の 1 本、床レベルから 8.5m の位置まで削孔し、流量が 0.1 L/分以下は設置しないこととした。処分孔両側への水抜きボーリング設置の効果は、設置前に比べ平均で 20% 減であるが、効果は限定的であった。



処分孔湧水量分布

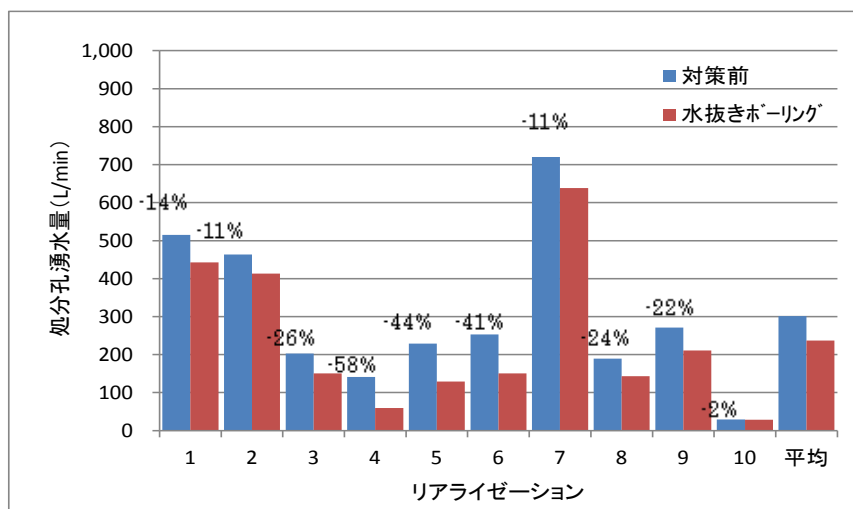


図 12.4.2-1 水抜きボーリングによる地下水水位低下の効果

掘削影響領域（EDZ）へのグラウトの効果について図 12.4.2-2 に示す。EDZ へのグラウト改良により処分坑道（100m 延長）湧水は、10 リアライゼーション平均で 1,093L/min となり、対策前より 11%減少した。処分孔（10 孔合計）湧水の算定結果は、10 リアライゼーション平均で 327L/min であり、対策前に比べ 9%増加した。これは坑道周辺の透水係数が減少し、坑道へ流入する水が減少した結果、対策を施していない処分孔へ水が回り、湧水量が増加したものと評価できた。

水抜きボーリングの有効性は、水抜きボーリングを処分孔の両側に 1 本ずつ設置しただけのため、効果は限定的であったと考えられる。処分孔と交差する割れ目を水抜き孔が抜いている場合は、90%以上湧水量を低減している計算結果もあるため、湧水割れ目を狙って水抜きボーリングを設置することで低減効果は大きくなると想定できる。具体的には、処分孔を囲むような配置に

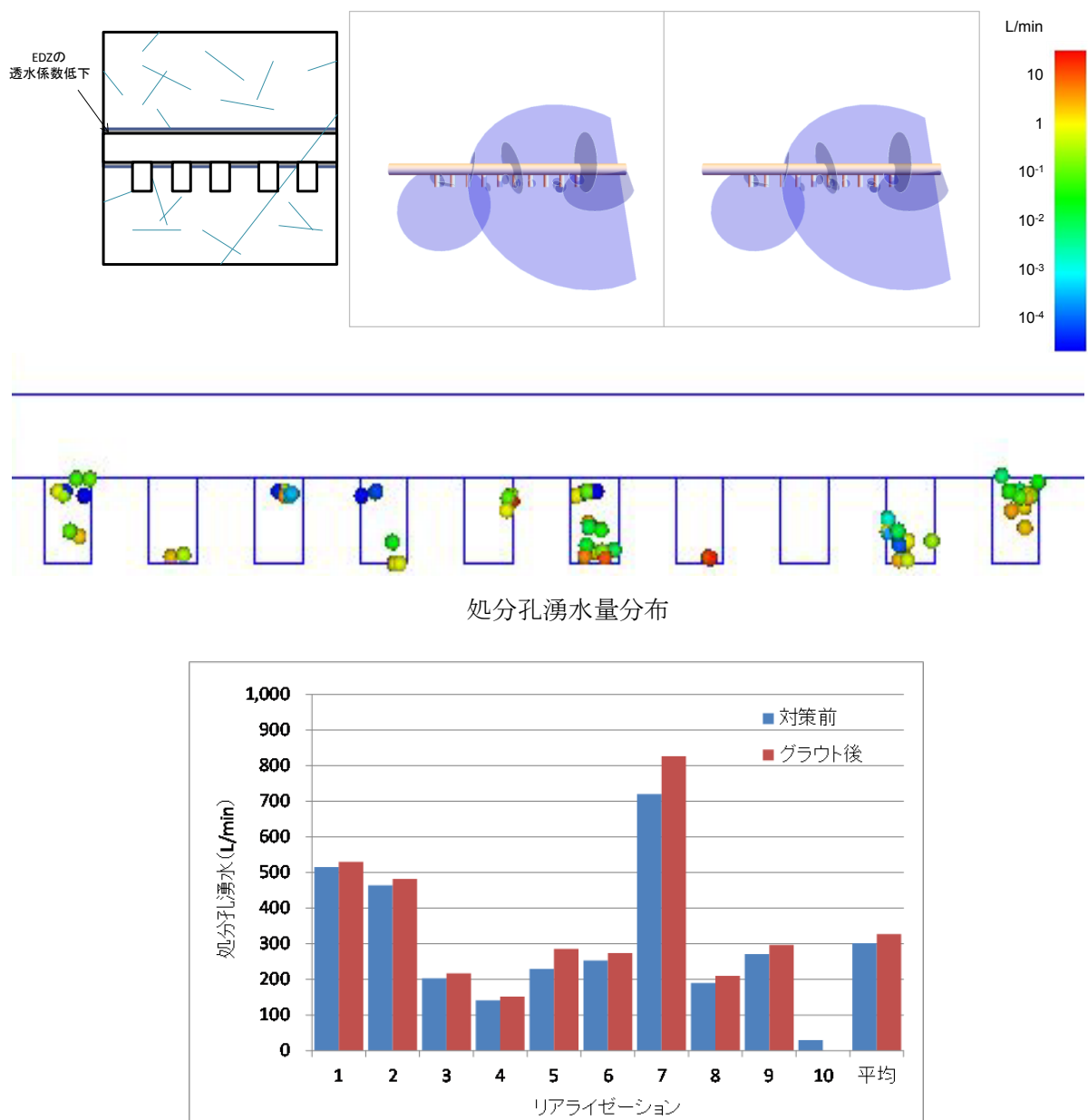


図 12.4.2-2 掘削影響領域（EDZ）へのグラウトの効果

する、水抜き孔長を長くする、設置位置を処分孔に近くする、といった方策が考えられる。実際の処分では処分孔掘削後に湧水亀裂を同定し、その連続性を評価した後、より効果的な水抜きボーリングの設置レイアウトを検討することが予想されるので、以上のプロセスを模擬した解析を実施することも望まれる。

グラウト改良の有効性について、湧水低減対策として適用した掘削影響領域へのグラウト改良により、処分孔への湧水量が増加するという解析結果が得られた。処分孔掘削後のポストグラウトを想定した解析であったが、EDZ を介した湧水量は減少したものの処分孔への湧水量を支配している交差割れ目の改良はなされていないため、処分孔に湧水が集中する結果となった。EDZ の透水係数が大きく、処分孔湧水量の大部分が EDZ を介して流入する条件においては、今回の対策は有効であったと考えられる。すなわち、交差割れ目を対象として処分孔周辺へグラウト改良を行えば効果的な低減効果が想定できる。このことから、ポストグラウトの効果的対策として、処分孔周辺へのグラウト改良を解析として検討する必要がある。

12.5 再埋め戻し材、プラグに関する設計・施工仕様について

埋め戻し材、プラグに関する設計要領とその目的、バリア機能、初期状態における設計指標について SKB-3 について調査した。KBS-3 処分場の建設、所有及び操業に関する SKB 社の許認可申請書の重要な部分の 1 つに『安全報告書』がある。この安全報告書は、KBS-3 処分場施設の操業期間における安全性（SR-Operation プロジェクト）と、KBS-3 処分場の長期安全性（SR-Site プロジェクト）の両方を取り扱うものである。さらに KBS-3 処分場の建設のために、SKB は次に示す 1 組のプロダクション（製造）ラインを定義している。

- 使用済核燃料、
- キャニスタ、
- 緩衝材、
- 埋め戻し材、
- 閉鎖、及び
- 地下開口部。

これらの個別報告書に共通する基礎として『処分場プロダクション報告書』が作成されている。この埋め戻し材、プラグの設計についてはプロダクション報告書[7]を参考にしている。

12.5.1 埋め戻し材のバリア機能と設計要領

埋め戻し材に使用される指標に示す物質は、モンモリロナイトを公称含有率において 50～60wt-% 含み、この含有率の許容変動範囲を 45～90% とするベントナイト粘土とされる。設置状態の埋め戻し材は、ベントナイト・ペレットの圧縮された平坦層の上に圧縮されたブロックが積み上げられたものとなる。これらのブロックと岩盤表面の間の隙間はベントナイト・ペレ

ットで満たされる。物質密度を十分に実現する目的で指定物質を用いて十分な設置密度を実現するために、少なくとも坑道容積の60%にブロックが設置されることになる。

埋め戻し材がバリア機能を備えておくために、埋め戻し材は以下のバリア機能を備えるものとしている。

- 定置坑道における水の流動（移流による移送）を限定すること。
- 緩衝材の上向きの膨潤／膨張を限定すること。
- その他のバリアのバリア機能を有意な水準で損なわないこと。
- 最終処分場において予測される環境のもとで長期間にわたる耐久性を実現するだけでなく、そのバリア機能を維持すること。

埋め戻し材に関するバリア機能、設計されるべき特性及び設計要領を表 12.1.2-1 に示す。

表 12.5.1-1 埋め戻し材に関するバリア機能、設計されるべき特性及び設計要領

バリア機能 又は特性	設計対象となる特性及び 設計パラメータ	『設計要領長期安全性報告書』
埋め戻し材は定置坑道における水の流動（移流による移送）を限定するものとする。	<ul style="list-style-type: none"> ・飽和状態にある埋め戻し材の膨潤圧及び透水係数に影響を及ぼす諸特性。 ・物質組成：モンモリロナイト含有率。 ・設置密度：ブロック、ペレット充填材及び底部層の乾燥密度及び水含有率。ブロック、ペレット充填材及び底部層が設置された定置坑道の割合。 	<p>透水係数は、$< 10^{-10}$ m/s。 膨潤圧は、> 0.1 MPa。</p>
埋め戻し材は、緩衝材の上向きの膨潤／膨張を限定するものとする。	<ul style="list-style-type: none"> ・湿潤化されていない埋め戻し材と飽和状態にある埋め戻し材の圧縮可能性に影響を及ぼす諸特性。 ・物質組成：モンモリロナイト含有率。 ・設置密度：ブロック、ペレット充填材及び底部層の乾燥密度及び水含有率。ブロック又はペレットが充填された定置坑道の割合。 	<p>パッケージングは、また埋め戻し材の密度は、当初の乾燥状態と完全な水飽和状態が成立した後の両方において、提示された条件に従って埋め戻し材の喪失と不確実性の面での余裕を十分にとった上で、最小限の緩衝材飽和密度（すなわち $1,950 \text{ kg/m}^3$）を生じさせる圧縮可能性を確保する上で十分なものでなければならない。</p>
埋め戻し材は、その他のバリアのバリア機能を有意な水準で損なうことがあってはならない。	<ul style="list-style-type: none"> ・緩衝材及びキャニスタの周囲の化学条件に影響を及ぼす諸特性。 物質組成。 	<p style="text-align: center;">—</p>
埋め戻し材は、最終処分場において予想される環境において長期間にわたって耐久性を備え、そのバリア機能を維持するものとする。	<ul style="list-style-type: none"> ・膨潤状態にある埋め戻し材の膨潤圧及び透水係数に影響を及ぼす諸特性と湿潤化されていない埋め戻し材と飽和状態にある埋め戻し材の圧縮可能性。 ・物質組成：モンモリロナイト含有率。 ・設置密度：ブロック、ペレット充填材及び底部層の乾燥密度及び水含有率。ブロック、ペレット充填材及び底部層が設置された定置坑道の割合。 	<p style="text-align: center;">—</p>

12.5.2 埋め戻し材の設計指標

埋め戻し材の設計指標は、設計要領に適合するものとし、また「埋め戻し材の製造」で記述する前処理方法や設置方法を適用することによって製造することが技術的に実行可能であるものとする。

設計指標は、公称値及び受け入れ可能なばらつきが示されている一連の設計パラメータによって記述される。設計指標の検証において、設計パラメータの指定値に従った埋め戻し材が設計要領に適合することが示されるものとする。設計パラメータに関する検査が、製造時に実施されるものとする。その目的は、製造された埋め戻し材がその初期状態において設計指標に適合していることの検証を行うだけでなく、初期状態における埋め戻し材の実際の諸特性の見積りをもたらすことにある。

埋め戻し材として使用することのできる物質は、以下の3つの主要カテゴリに分けることができる。「ベントナイト粘土」、「スメクタイトに富む混合層粘土」、そして「ベントナイトとバラストの混合物」である。SKB-3に示すモンモリロナイト含有量に関する指標を表 12.5.2-1 に示す。この物質組成を備えている市販のベントナイトの例として、IBECO-RWC-BF(ミロス島産)、アシャ(カッチ産)及びMX-80(ワイオミング産)が挙げられる。

埋め戻し材は、有害な緩衝の劣化又はキャニスタの腐食を引き起こす可能性のある物質を含有してはならない。現在のところいかなる物質及び限度も、長期安全性の評価によって設計要領として指定されていない。緩衝材に使用されるベントナイト粘土に存在する物質で、『設計要領長期安全性報告書』で潜在的な有害性を伴うもの物質として指定されているのは、硫化物、硫黄及び有機炭素である。

表 12.5.2-1 モンモリロナイトの含有量

設計パラメータ	設計指標(wt%)	許容誤差(wt%)
モンモリロナイト含有量	50-60	45-90

支配的な陽イオン、CEC、硫化物、硫黄、有機炭素、そして副成分鉱物の含有率には、異なるベントナイトの間で、さらにはある程度までは同一ベントナイト製品の異なった提供時期ごとに、ばらつきが生じるものである。表 12.5.2-2 に、ミロス島産埋め戻し材、アシャ及びMX-80におけるそれぞれの含有率を示す。SKBは製造時にこれらの物質パラメータの測定を行い、文書化することになっている。しかし初期状態を対象として、指定された含有率に適合しているかどうかの検証が行うものとしている。表 12.5.2-3 にペレットの設計指標と許容誤差を示す。

表 12.5.2-2 埋め戻し材に関名する支配的な陽イオン、CEC及び副成分鉱物

Parameter	Nominal content Milos backfill /Olsson and Karnland 2009/	Nominal content Asha (Kutch) /Olsson and Karnland 2009/	Nominal content MX-80 /Karnland et al. 2006/
Cation (%)			
Mg	48	55	72
Ca	41	31	18
CEC (meq/100 g)	73	97	75
Sulphide content (%)	~0.03	~0	limited
Total sulphur content (including the sulphide) (%)	0.06	0.11	limited
Organic carbon (%)	0.38	0.14	limited
Calcite (wt-%)	~8	~2	0-1
+ Siderite (wt-%)	n.d.	n.d.	
Quartz (wt-%)	n.d.	1-2	3
Cristobalite (wt-%)	n.d.	n.d.	2
Pyrite (wt-%)	n.d.	n.d.	0.07
Mica/illite (wt-%)	6-8	n.d.	4
Gypsum (wt-%)	~0.5	~0.9	0.7
Albite (wt-%)	n.d.	n.d.	3
Ca-plagioclase (wt-%)	~1.5	~2	
K-feldspar (wt-%)	5-6	3-4	
Dolomite (wt-%)	~16	n.d.	0
Kaolin (wt-%)	n.d.	~2	
n.d. Not detected			

表 12.5.2-3 ペレットの設計指標

設計パラメータ	設計指標	許容誤差
乾燥密度(kg/m ³)	1,700	±50
寸法	16×16×8	—
ゆるく詰めた場合の乾燥密度(kg/m ³)		
含水比(wt%)	締め固め時のでき方による	締め固め時のでき方による

12.5.3 プラグの定義と設計要領

定置坑道内のプラグは、KBS-3 処分場においていかなるバリア機能も備えていない。定置坑道に設置されるプラグは、定置坑道を操業フェーズの期間にわたり閉鎖する構造物である。このプラグは、主要坑道での充填が終了し、飽和状態となるまで、定置坑道を閉鎖し、その内部の埋め戻し材を所定の位置に保ち、プラグを通じた水の流動を阻止するものとしている。

プラグに関する設計要領は、プラグがコンクリートのプラグ、水密性シール、そしてフィルタによって構成されるという事実に基づくものである。

プラグの機能は、以下の機能を備えているものとする。

- 主要坑道の充填が終了するまでの期間にわたり、処分場深度における静水圧と埋め戻し材からの膨潤圧に耐えること。
- プラグを通過する水の流動を、隣接する主要坑道の充填が終了し、飽和状態が成立するまでの期間にわたって限定すること。
- 主要坑道が閉鎖され、飽和状態となるまでの期間にわたり、処分場施設及び処分場に予想される環境のもとでその耐久性を確保し、機能を維持すること。

最終処分場に関する長期的な観点においてプラグは、処分場が多重バリア原則を維持するために、次のことを実現しなければならない。

- 人工バリア又は岩盤のバリア機能を有意な水準で損なわないこと。

これらの機能及び特性は、プラグ存続期間のさまざまな時期にわたって確保され、維持されるものとする。

最終処分場のバリア・システムは、それらの機能に影響を及ぼす可能性のある破損及び条件、事象及びプロセスに対する耐性を備えるものとする。したがって、埋め戻し材及びプラグの概念の開発において、次に挙げることが検討されるものとする。

- 準備、設置、テスト及び検査のための設計及び方法は、十分に試されているか試験された手法に基づくものとする。

最終処分場のバリアの建設、製作、設置及び非破壊試験は信頼性の高いものでなければならず、次に挙げる事項が検討されるものとする。

- 指定された特性を伴う埋め戻し材及びプラグは、高い信頼性をもって準備し、設置することができるものとする。
- 埋め戻し材及びプラグの諸特性は、指定された受け入れ規準に対して試験し、検査することが可能であるものとする。

信頼性の高い製造は、高い品質及び費用対効果を達成するという SKB の目標との関連においても必要とされる。この費用対効果の面では、次に挙げる事項が検討されるものとする。

- 埋め戻し材及びプラグの設計、さらにはその準備、設置、試験及び検査のための方法は費用対効果の高いものとする。
- 埋め戻し材及びプラグの設置作業は、規定された速度で実行可能なものとする。

12.5.4 プラグの設計指標

プラグの設計指標に示す構造を図に示す。プラグはコンクリート・プラグ、水密シール、フィルタ、コンクリートビームで構成される。

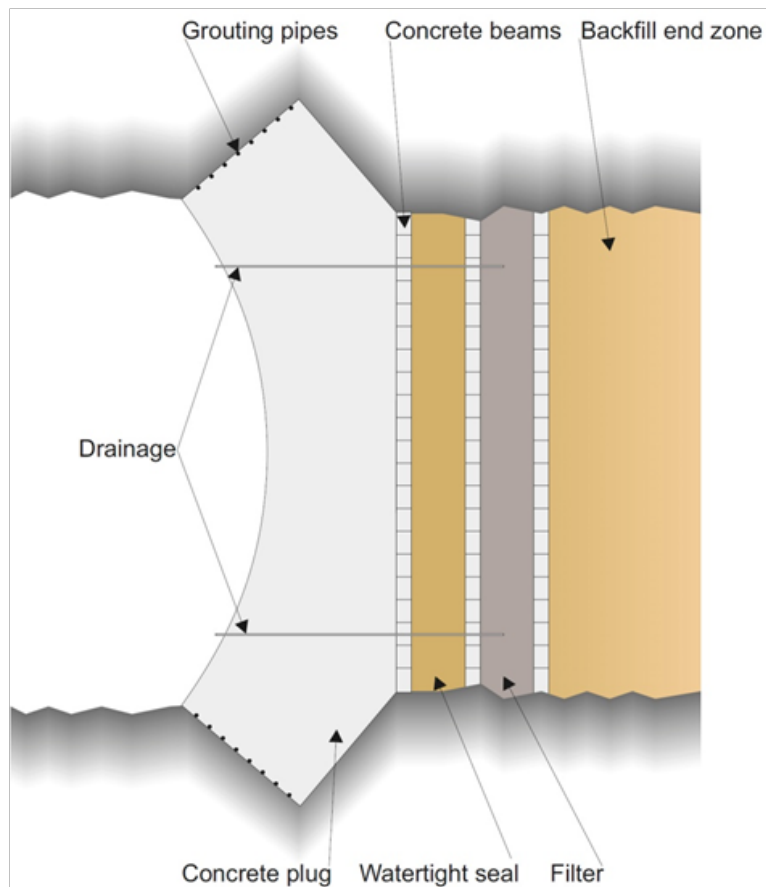


図 12.5.4-1 設計指標に示すプラグ構造

コンクリート・プラグ：

コンクリート・プラグは鉄筋コンクリート製であり、その中には、換気管、冷却・加熱管、エア抜き管、コンクリート設置管及び計器などの補助機器のためのパイプが含まれている。コンクリート・プラグは、変形に抵抗すると共に、水密性シール、フィルタ及び埋め戻し材を所定の位置に維持する役割を果たす。

水密性シール：

水密性シールは、埋め戻し材と同様の配置構成のベントナイト・ブロック及びペレットで構成される。このシールは、コンクリート・プラグ内にある、又はコンクリートと岩盤表面との間にある小さな割れ目を通じた優先的な漏出経路をシーリングする役割を果たすものとする。またこのシールは、岩盤とコンクリートの間の境界面に望ましくない水圧がかからないよう、さらには埋め戻された定置坑道内部の水圧が均等化されるよう、プラグにかかる

圧力勾配を吸収する役割を担うものとする。

フィルタ：

フィルタは砂又は砂利で構成される。このフィルタは、コンクリート・プラグの養生が終了して完全な強度を得る前にコンクリート・プラグに水圧がかからないようにするために、埋め戻し材から漏れ出した水を集め、必要に応じてそれを排水管へと導くものとする。

コンクリート・ビーム：

ビームは鉄筋コンクリート製である。外側（コンクリート・プラグ側）のビームは、コンクリート・プラグ打設時にコンクリートとベントナイトが混合しないようにするために薄いショットクリート層に覆われている。内側（定置坑道側）のビームは、設置時に埋め戻し材を所定の位置に保つ役割を果たす。真ん中のビームは、フィルタを所定の位置に保つ役割を果たすものであり、フィルタ物質の圧縮時に生じる圧力形成に耐えられるよう設計される。外側（コンクリート・プラグ及び主坑道の側）のビームは、水密性シール内のベントナイト・ブロックを所定の位置に保つ役割を果たす。

排水管：

排水管は、シーリング・フェーズ全体を通じて抵抗力を保つ必要があり、鋼鉄製（あるいは必要に応じてチタン製）のものとなる。コンクリート・プラグの養生が終了して完全な強度を得る前にコンクリート・プラグに水圧がかからないようにするために、この排水管により、フィルタに集められた水が引き出され、定置坑道外部に運ばれるものとする。

グラウチング管：

グラウチング管は鋼鉄製であり、グラウトの注入が妨げられないよう、ジオテキスタイルによって隔離される可能性がある。これらはコンクリートが一定レベルの強度に達した時点でグラウチングされるものとする。このグラウトは、コンクリート・プラグと岩盤との接触面を固めるだけでなく、コンクリート・プラグをプレストレスのかかった状態に保つ上で役立つものとする。

プラグに最も近い埋め戻し材（「埋め戻し材終了域」と呼ばれる）について、プラグにかかる荷重を制御するために設置密度の調節を行うことができる。この調節は、埋め戻し材の設計指標に基づくものであり、プラグの設計の一環として実施される。

プラグの設置状態の構成部材に関する設計指標を表 12.5.4-1 に示す。

表 12.5.4-1 プラグの設置状態の構成部材に関する設計指標

設計パラメータ	設計指標	許容誤差
コンクリートプラグ		
コンクリート	低 pH コンクリート B200(200kg セメント量)	標準コンクリート示方書に従う。
鉄筋	K500ST 品質に準拠	示方書に従う。配筋図に従う。
寸法	図 12.5.4-2 に従う	図面に従う。
水密性シール		
厚さ	0.71m	±10mm
材料特性	表 12.5.2-2 に従う	
定置乾燥密度	1,500kg/m ³	
フィルタ		
定置乾燥密度	>1,900kg/m ³	5%
コンクリート・ビーム他		
コンクリート・ビーム	低 pH コンクリート	標準コンクリート示方書に従う。
鉄筋	鉄筋に関する標準示方書に従う	標準に従う。
排水管の材料	チタン	標準に従う。
排水管の寸法		

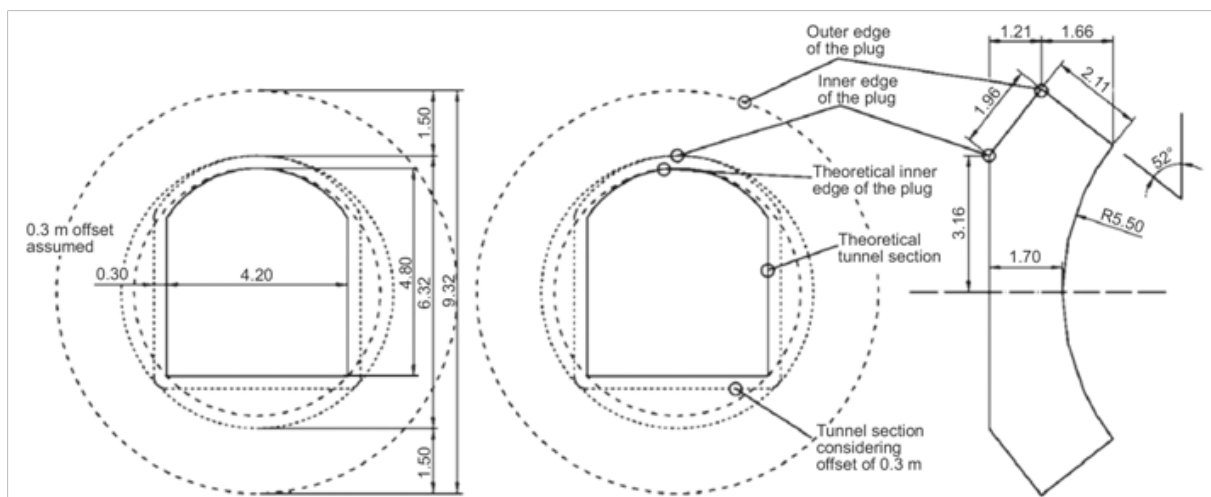


図 12.5.4-2 コンクリートプラグの寸法

12.6 再冠水時の緩衝材に関する今後の方針

12.6.1 検討フロー

再冠水時の緩衝材の今後の方針について、図 12.2.1-1 に示したが、これまでのラボ試験に加えて、地下試験、解析的検討、設計検討を並行して進めることによって、緩衝材を中心とした人工バリアの健全性を確保するために必要な設計施工指およびその考え方を提示していく予定である。図 12.6.1-1 に今後の方針を示す。特に、地下研の利用によって、現実に近い環境における試験が可能となったことで、ラボ試験との比較検討を行い、サイトが選定した場合に、その環境に相応しい設計・施工指針を制定することができるように研究成果を取りまとめていく方針である。さらに、NUMO の高レベル放射性廃棄物処分場に関する技術報告や、回収可能性というステークホルダーの要求に対してもそれを踏まえて検討しかなければならない。地下水流動に関する数値解析についても、地下水を制御するための **Water management** を考え、その効果を評価する上でも、必要不可欠な技術である。

エロージョン現象については、現在、解析的な検討がフィンランドの Posiva によって、行われているが、その妥当性も今後評価されるため、海外の動向については、引き続きフォローしていく必要がある。当センターは、毎年、再冠水時の緩衝材の膨潤挙動について、SKB によるレビューと意見交換を実施しているため、その成果も活用していく方針である。

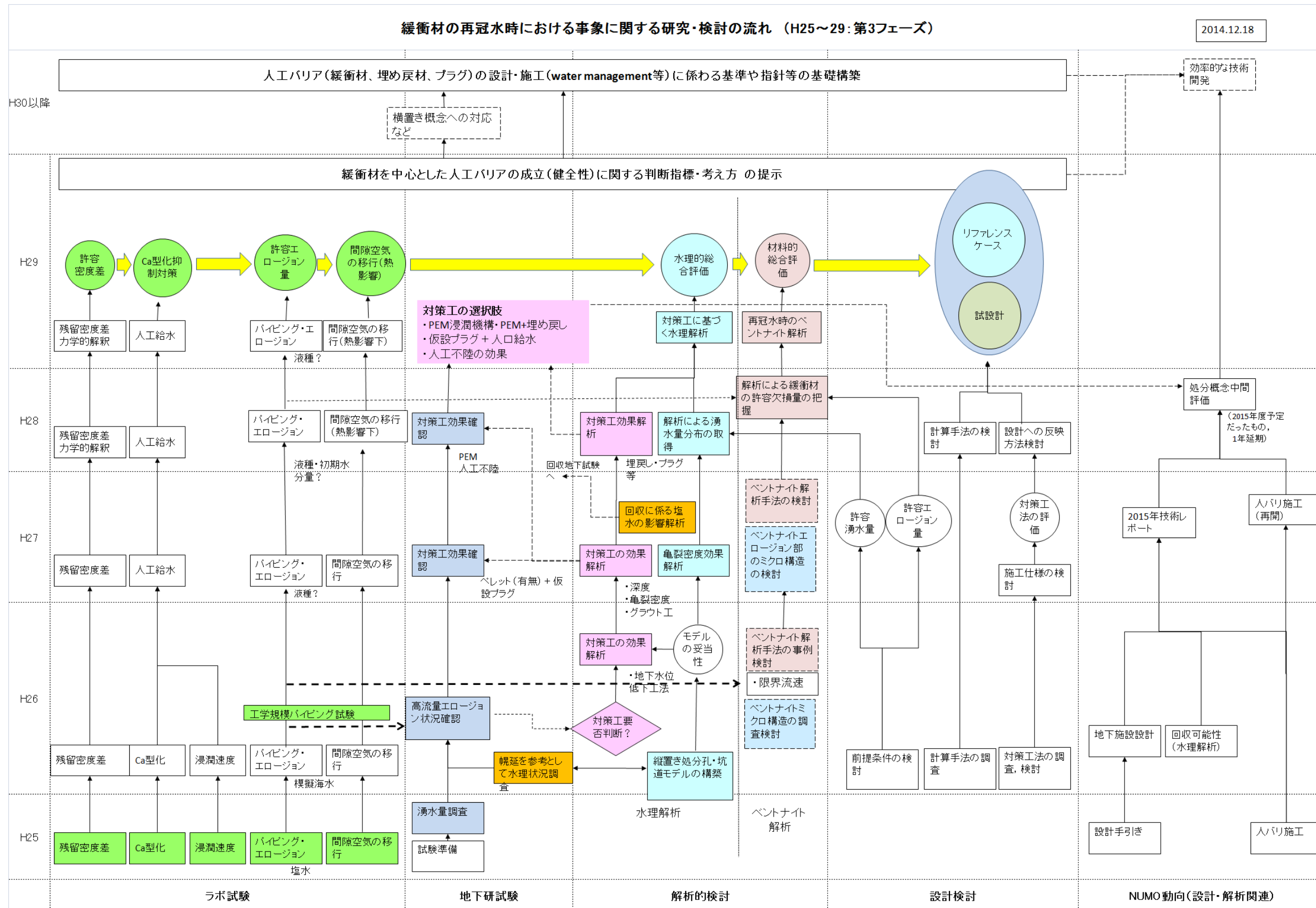


図 12.6.1-1 再冠水時の緩衝材に関する検討方針と（ラボ試験、地下研試験、解析的検討、設計検討）の流れ

第12章 参考文献

[1] Buffer, backfill and closure process report for the safety assessment SR-Site, SKB TR Report TR-10-47(2010)

[2] Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, SKB TR-Report, p253-p257, TR-11-01 (2011)

[3] Urban Svensson, Computer-aided Fluid Engineering AB: The Laxemar and Forsmark repositories An analysis of the water inflow distribution,SKB Report R-06-102 (2006)

[4] Mattias Åkesson, Ola Kristensson, Lennart Börgesson, Ann Dueck: THM modelling of buffer, backfill and other system components, Critical processes and scenarios,SKB Technical Report TR-10-11(2010)

[5] Design premises for KBS-3V Repository based on results from the safety assessment SR-Can and some subsequent analyses, p39 , TR report TR-09-22 (2009)

[6] わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発 2 次取りまとめ－ 分冊 2 地層処分の工学技術、核燃料サイクル機構、JNC TN 1400 99-022(平成 11 年)

[7] Design, production and initial state of the backfill and plug in deposition tunnels, SKB TR-10-16, 2010

第13章 まとめ

13.1 実施内容

本検討では、平成 20 年度に整理した「緩衝材の施工品質が再冠水時に緩衝材に発生する事象に及ぼす影響の定量的評価のための室内試験計画」に基づき以下の事項について、試験を実施した。

- (a): 施工品質（密度分布）の均質化
- (b): Ca 型化
- (c): 施工品質（密度分布）が再冠水に及ぼす影響
- (d): 不飽和浸潤速度
- (e): 緩衝材表面近傍の止水性能評価
- (f): 異種材料界面を有する緩衝材の浸潤状況
- (h): 再冠水時のガスの影響
- (k): 緩衝材の施工技術の高度化による影響度の低減検討

これらの試験結果は、再冠水時に緩衝材に発生する事象に対する影響項目が、緩衝材の品質評価に及ぼす影響の定量評価のための試験という位置付けだけでなく、後続する大きな規模の土槽試験条件を確定させる情報も与えることができ、さらに大きな規模の工学規模試験結果の解釈などに役立つため、他に先んじて実施する必要がある。また、小規模試験は境界条件が比較的明確であることから、解析技術の向上にも資する情報を与えることも考えられる。そのため、この小規模試験結果を解析し、解析ツールを高度化する検討も併せて実施している。これにより、土槽試験や工学規模試験などの試験条件を確定させるための予測解析などに役立てることができる。

平成 23 年度からは、本検討の試験計画の基本概念である、この段階的に試験規模を大きくしていく“スケールアップ”を実践し、試験(a)をスケールアップした土槽規模試験として、(c) 施工品質（密度差）が再冠水時に発生する現象に及ぼす影響の調査のための試験、を新規に開始した。さらに、(e): 緩衝材表面近傍の止水性能評価の中で、小規模から工学規模までのパイピング・エロージョン試験を、段階的に試験規模を拡大しながら実施している。

さらに本検討では、緩衝材の施工方法の品質自体を向上させて、再冠水時に緩衝材に発生する事象に及ぼす影響を低減させる観点から、緩衝材の施工検討も実施している。これにより緩衝材の施工方法を高度化させ、均質な緩衝材を施工できれば、施工品質が再冠水中の緩衝材に発生する事象に及ぼす影響や、再冠水中に緩衝材に発生する事象が長期性能に及ぼす影響を、それぞれ低減させることができる。そのため、工学技術の高度化によって施工品質から長期性能までの連続的な評価を可能にすることができる。

平成 20 年度には検討計画を立案し、平成 21 年度には吹付け施工に適用可能な材料を調べるために、各国のベントナイト系材料を用いて吹付け箱試験を実施した。平成 22 年度では、平成 21 年度に実施した(e) 緩衝材表面近傍の止水性能評価の検討結果を受けて、吹付け工法による緩衝材表面近傍の止水性能向上を意図した施工試験計画を検討した。平成 24 年度からは、高レベル放射

性廃棄物地層処分施設堅置き処分孔と同規模のリング型モールドに対して、湧水を模擬してモールド壁面から水を供給した状態で緩衝材の吹付け施工を行い、施工した 1/4 リング緩衝材について破過試験を実施した。

13.2 平成 26 年度までの成果

平成 26 年度までの検討結果を取りまとめると、以下のようになる。

13.2.1 施工品質（密度差）が再冠水時に発生する現象に及ぼす影響の調査のための試験

(1) 密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響

1) 試験結果（蒸留水のケース）

- 密度分布が均質な供試体と不均質な（密度分布を有する）供試体とでは、全体の密度が同じであっても平衡膨潤圧が異なる結果を示した。このことから、膨潤圧試験のばらつきの要因の一つとして密度分布が考えられる。また、平衡膨潤圧に達した後に解体した供試体には、目視でも判断できる明確な密度分布が残っており、膨潤圧が平衡状態にあることと密度分布が均質化することが同時に成り立つという考え方には一致しない結果となった。これに対して、同供試体の透水係数は大差がないという結果となった。このことから、乾燥密度と膨潤圧の関係は、乾燥密度と透水係数の関係よりも非線形性が強いと考えられる。
- 乾燥密度 1.8Mg/m^3 と乾燥密度 1.4Mg/m^3 の場合(Case1)、供試体は同じ密度にならず密度分布を残した状態で 600 日間以降、非常にゆっくりであるが均一化傾向を継続している。
- 密度の異なる供試体同士を、ピストンを介して直列に繋いだ膨潤量試験(直列膨潤量試験)では、乾燥密度 2.0Mg/m^3 と乾燥密度 1.2Mg/m^3 の場合(Case2)、供試体は同じ密度にならず密度分布を残した状態で 900 日間以上、平衡状態に至っている。このため、試験を終了し解体した結果、上下の供試体内部に密度分布が確認された。この密度分布が膨潤によるものか、供試体作成時に発生したものかを明らかにするために、本試験と同じ手順で再度供試体を作成し、試験前の密度分布を取得する必要がある。
- 膨潤によって密度分布が均一化する範囲を明確にするために、乾燥密度 1.7Mg/m^3 と乾燥密度 1.5Mg/m^3 のケース(Case3)を開始した。試験開始 3 か月弱で既に均一化傾向が鈍化し、400 日以降、ほぼ定常化している。
- 解体した直列膨潤量試験のうち高密度供試体（初期乾燥密度： 2.0Mg/m^3 ）と低密度供試体（初期乾燥密度 1.2Mg/m^3 ）の解体を行い、密度分布を計測した。両供試体共に、有意な密度分布が存在した。この密度分布が、供試体作製の底部側で密度が小さく、さらに、試験中に膨潤するピストン側でも密度が小さいことから、供試体作製の密度分布に試験中の膨潤変形が加わって最終的な密度分布となったものと考えられる。

2) 試験結果 (NaCl 水溶液ケース)

- 試験水として 0.5M の NaCl 水溶液を使用した密度差のある供試体の直列膨潤量試験を開始した。密度差は蒸留水と同等である。すべてのケースで密度差が残った状態で定常状態に達した。膨潤圧とベントナイトの乾燥密度が一意に対応しているのであれば、この膨潤圧の経時変化は両供試体の乾燥密度が 1.6Mg/m^3 になった時点で平衡状態に達するはずである。しかしながら力学的には、物体の変形は釣合いが満足されるまで生じるはずであり、乾燥密度が同じかどうかではなく、膨潤圧が釣合った時点で変形が止まると考えることのほうが自然である。この力学的な解釈が正しければ、高密度供試体と低密度供試体の密度変化は互いに近づくが、密度差はゼロにはならないと考えられる。
- イオン強度が 0.5 の NaCl 水溶液を用いて実施した場合の直列膨潤量試験の膨潤量は、蒸留水のケースに比べ、イオン強度の影響で小さい。このことから、イオン強度が高いほど残留密度差が大きい。また、初期の密度差が大きいものほど、残留密度差が、大きくなる。さらに、イオン強度の影響により、蒸留水のケースに比べ、NaCl 水溶液ケースの方が膨潤圧は小さい傾向にある。
- 直列膨潤量試験では、2 つの供試体のうち、高乾燥密度供試体の乾燥密度の値が大きい程、膨潤量が大きくなる。イオン強度が 0.5 の NaCl 水溶液を用いて実施した場合の試験結果は、この考えに整合している。しかしながら、蒸留水のケースのうち、乾燥密度 1.5Mg/m^3 と 1.7Mg/m^3 の膨潤量よりも乾燥密度 1.4Mg/m^3 と 1.8Mg/m^3 の方が小さくなっている。乾燥密度のばらつき以外の理由で、膨潤量が大きめに発生することは考えにくいため、乾燥密度 1.4Mg/m^3 と 1.8Mg/m^3 のケースの膨潤量が小さいと考えられる。一方、直列膨潤量試験の場合、膨潤圧は、2 つある供試体のうち、低乾燥密度供試体の乾燥密度が大きい程大きくなる。NaCl 水溶液ケースでは、この考え方に整合した結果が得られているのに対して、蒸留水では、乾燥密度 1.5Mg/m^3 と 1.7Mg/m^3 の膨潤圧よりも乾燥密度 1.4Mg/m^3 と 1.8Mg/m^3 の方が大きくなっている。前述の膨潤量試験の結果と併せて考えると、乾燥密度 1.4Mg/m^3 と 1.8Mg/m^3 の場合において、乾燥密度 1.4Mg/m^3 セルにおいて、ピストンの傾き、ピストンとセルの摩擦などの影響で、乾燥密度 1.8Mg/m^3 の供試体の膨潤量が乾燥密度 1.4Mg/m^3 の供試体にきちんと伝播されておらず、その反力として、膨潤圧が大きくなったものと考えられる。また、同様の原因で、乾燥密度 1.4Mg/m^3 と 1.8Mg/m^3 の場合において膨潤量が小さめになっているものと考えられる。
- NaCl 水溶液のケースにおける直列膨潤量試験中の給排水量の経時変化から、直列膨潤量試験の 2 つの供試体のうち、乾燥密度が大きい供試体の方が、給水量が大きいことが分かった。これは、乾燥密度が大きい供試体は吸水膨潤するためである。乾燥密度が 1.2Mg/m^3 と 2.0Mg/m^3 のケースでは、乾燥密度 2.0Mg/m^3 の供試体の膨潤に伴って、乾燥密度 1.2Mg/m^3 の供試体から排水が計測された。
- 直列膨潤圧試験の結果として得られた残留密度分布に Kozeny-Carman 則を適用し、残

量密度差に起因する透水係数分布を取得した。この結果、試験後の透水係数は、蒸留水のケースでは、 10^{-13}m/s オーダーであるが、NaCl 水溶液のケースでは、 10^{-11}m/s から 10^{-12}m/s 程度である。

(2) 応力履歴が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響

- 力学的な解釈の妥当性を検証するために実施した密度が同じであっても応力履歴が異なる供試体同士を、ピストンを解して直列に繋いだ膨潤圧試験では、両供試体が同じ密度であるのにも関わらず、応力状態が釣合っていないため変形(密度分布)が生じ始めている。このことから、ベントナイトは均質化するまで膨潤するのではなく、力が釣合い状態に至るまで膨潤するという解釈の妥当性が分かった。
- 密度差の有無がベントナイトの膨潤圧に及ぼす影響を力学的に評価した。乾燥密度と膨潤圧の関係が非線形関数であると仮定すると、全体の乾燥密度が同じであっても密度分布の有無によって、計測される膨潤圧が異なる可能性があることを示した。
- 応力履歴が膨潤挙動に及ぼす影響評価において、蒸留水を用いた直列膨潤量試験のケース (Case2) の解体を行った。供試体作製時にセルに投入した試料の乾燥質量 90.84g が正規圧密供試体で 2.26g、過圧密供試体で 3.5g 減少していた。この質量の低下は、排水中に含まれる水溶性の塩類によるものと考えられる。さらに、解体時の除荷による体積膨張も乾燥密度の低下の一因であると考えられる。密度分布に着目すると、過圧密供試体の上下端が膨潤して試験開始時に比べ乾燥密度が低下していることが分かる。このことから、過圧密供試体が正規圧密供試体に圧縮された原因に、応力履歴が膨潤圧に及ぼす影響以外にも、直列膨潤試験前の膨潤過程による密度分布の影響も含まれる可能性がある。今後、再現性確認をする場合、過圧密供試体の膨潤過程には十分な時間をかける必要がある。
- イオン強度0.5のNaCl水溶液を用いて応力履歴が膨潤挙動に及ぼす影響評価を実施した。蒸留水を用いた直列膨潤量試験のケース (Case2) の解体の結果、密度分布が生じていることが明らかとなったため、NaCl 水溶液で OC 供試体の作製は、先に飽和させてから膨潤させることとした。

(3) 力学に立脚した残留密度差の理論的解釈

- この事象を弾塑性力学的に解釈すると、高密度領域の応力状態は膨潤線を辿り、低密度領域の応力状態は圧縮線を辿るため、両者は乾燥密度と応力の平面で交わることなく(膨潤圧が平衡状態にあることと密度分布が均質化することが同時に成り立つことがなく)、応力の釣合う点で密度の平均化は止まる(密度分布が残る)ということを説明できた。
- 既往の研究で取得した $e\text{-log}P$ 関係で各ケースを調べると、Case1 では現状ではまだ応力状態が釣り合っておらず、Case2 では応力状態がほぼ釣り合っているという結果が得られ、この弾塑性力学に立脚した解釈の妥当性が確認できた。

- 残留密度差を弾塑性力学に立脚して説明しようとする試みは、残留密度差の推定や緩衝材の許容される密度分布などの施工方法に対する仕様の決定につながる可能性があり、非常に重要である。しかしながら、本検討で実施している乾燥密度 $1.2\sim 2.0\text{Mg/m}^3$ の緩衝材の膨潤挙動を説明できる非常に幅広い応力レベルで実施された圧密試験結果が存在しないため、現状では、比較的幅広い応力レベルで Sasakura ら[1]によって取得されたクニゲル V1 の一次元段階載荷圧密試験から得られる乾燥密度- $\log p$ 関係（応力ひずみ関係）を用いるより他はない。ただし、この結果は 2002 年のクニゲル V1 を用いた試験結果であり材料ロットが異なることや、乾燥密度 1.2Mg/m^3 付近の正規圧密曲線が不足していることなどから、本検討で実施した直列膨潤量試験から得られた残留密度差の結果を理論的に説明するためには、乾燥密度- $\log p$ 関係を新たに取得すべく圧密試験を開始した。
- 施工に起因した密度分布を有する緩衝材の飽和後の残留密度差に関する試験結果の工学技術への反映例を示した。試験から得られる残留密度差は、例えば Kozeny-Carman 則を用いて透水係数範囲として変換可能であり、透水係数の要求性能（透水係数の範囲）から、Kozeny-Carman 則を用いて施工時に許容される密度分布を提示可能である。

13.2.2 Ca 型化と飽和の可逆性検討

(1) 初期～第 1 回液種交換後

- Na 型ベントナイトを蒸留水で飽和した後に CaCl_2 水溶液を通水したケース(Case1)、Na 型ベントナイトに直接 CaCl_2 水溶液を通水したケース(Case2)、Ca 型ベントナイトに CaCl_2 水溶液を通水したケース(Case3)では、それぞれ平衡膨潤圧が異なる傾向を示した。このため、Case2 と Case3 では通水液を蒸留水に切り替えた。
- Case2 と Case1 とでは平衡膨潤圧が異なる結果となっていたが、Case1 の膨潤圧が急激に低下し、両者はほぼ同じ値となった。さらに Ca 型化の促進のために Case1 に 0.2MPa の通水圧を与えたところ、膨潤圧が有効応力として整理した場合にほぼゼロとなった。膨潤圧の解釈を有効応力として取り扱うことは妥当であると考えられるが、通水圧自体が間隙水圧と等価ではないため、正確な膨潤圧を取得するためには間隙水圧の評価が課題となった。
- Case1、Case2 では、注入した CaCl_2 水溶液に含まれる Ca イオンが全て Ca 型化に消費されると仮定して、Na 型ベントナイトの陽イオン交換容量から Ca 型化率を算出した。Case2、Case3 の液種交換時点で Case1 の Ca 型化率は 2.7%であったのに対して、Case2 では 46.1%であった。このことから、事前に蒸留水で緩衝材を飽和させることは Ca 型化させる Ca イオンの供給を遅らせる効果(Pre-Hydration 効果)がある可能性がある。

(2) 第1回液種交換後～第2回液種交換までの変質状況評価

- Case1 の通水圧増加前の Ca 型率が通水期間 300 日で 2.7%であったのに対して、Case2 では 110 日間で 46.1%であった。さらに Case1 で通水圧を増加させた後の Ca 型化率は 127.7%であり、供試体 1 個を十分に Ca 型化させる量の Ca イオンが供給できた。通水圧増加前の Case1 の飽和した緩衝材では Ca イオンが拡散現象で供給されるのに対して、通水圧増加後の Case1 や Case2 では Ca イオンが毛細管現象、もしくは移流によって供給されている。このことから、Pre-Hydration 効果は、緩衝材を拡散場にして変質される陽イオンを移流させない効果であると考えられる。
- Case2 では、通水液を蒸留水に変化させてから、膨潤圧が漸増を続けている。これは間隙水のイオン強度が低下したからであると考えられる。また、Case3 では、Ca 型ベントナイトは液種の違いに拠らず、膨潤圧がほぼ一定値を示している。このことから、Ca 型ベントナイトの膨潤圧は液種の影響を受け難いと考えられる。
- ベントナイトの膨潤圧はドラスティックに変化しているが、その一方で透水係数は Na 型ベントナイトを蒸留水で飽和させた後に CaCl₂ 水溶液を通水した場合の透水係数が一貫して他のケースよりも低い。原因としてはプレハイドレーション効果と呼ばれる現象が挙げられる。これは、一旦、蒸留水による膨潤で土骨格構造が形成されると、その後に CaCl₂ 水溶液を通水しても土骨格構造が完全に崩れないため、Ca 型化の影響が低減されるというものである。このプレハイドレーション効果に関しては実験により定量評価する必要がある。

(3) 第2回液種交換後

- 変質状況評価によって、不飽和状態の Na 型ベントナイトに直接 CaCl₂ 水溶液を通水した後に通水液を蒸留水に切り替えたケース (Case2) は十分に Ca 型化されていない可能性が高いことが分かった。また、Ca 型化ベントナイトに CaCl₂ 水溶液を通水したケース (Case3)も蒸留水を通水しており、十分に Ca 型化されていると考えられる Case1 と Case2、Case3 の全てのケースでベントナイトと通水液の組み合わせが整合していない状態であった。そこで、Case2 も十分に Ca 型化させ、全てのケースで Ca 型化ベントナイトに CaCl₂ 水溶液を通水する試験条件にすべく、再度、全てのケースで CaCl₂ 水溶液を通水した。Case2 と Case3 で CaCl₂ 水溶液に再度切り替えたのは、試験開始から 1437 日目であり、第一回目の通水液の切り替えからは 1327 日目である。第2回液種交換後に透水係数が増加する傾向を示し、最終的に全てのケースで透水係数はほぼ同等となった。このことから、人工給水によって Ca 型化の進行を遅延させる効果があるが、最終的な性能は変化しないことが明らかとなった。
- 現状では、膨潤圧への影響を避けるために通水圧を作用させていないため、CaCl₂ 水溶液は拡散で供試体内を移動している。拡散で変質させるのには時間がかかるため、ある程度の時間、通水液の切り替えによる膨潤圧の変動を観察した後に Case1 と同様に、0.2MPa

程度の通水圧を作用させる計画である。

13.2.3 長尺ベントナイト供試体を用いた一次元浸潤速度取得試験

- 乾燥密度 1.6Mg/m^3 、初期含水比 10%のケイ砂 30wt%含有ベントナイトの供試体($\phi 50\text{mm} \times 1,000\text{mm}$)に対して、蒸留水と NaCl 水溶液による一次元浸潤試験を実施した。その結果、蒸留水の場合の通水圧 60kPa (水位差 $+7.5\text{kPa}$)に対して NaCl 水溶液の方が低い圧力 0kPa (水位差 $+7.5\text{kPa}$)でも同等に浸潤が進むことがわかった。比抵抗値の変化点を浸潤フロントとすると両ケースとも 1500 日程度で 900mm 程度であった。
- このことから、液種の違いによるベントナイトの膨潤の程度の違いがベントナイトの不飽和浸潤挙動に対して大きな影響を与えることが分かった。本試験は今後継続実施し、緩衝材の飽和に掛かる時間評価などに資する情報を取得する予定である。
- 蒸留水のケースの場合、浸潤フロントの位置 $d(\text{mm})$ は、給水時間 $t(\text{day})$ の指数関数として $d = 60t^{0.35}$ で近似できることを示した。この関係式に基づいて浸潤フロントが供試体上部(浸潤距離 1000mm)まで到達する時間を算出すると、約 8.5 年となる。この結果は、浸潤フロント位置 $d(\text{mm})$ が給水時間 $t(\text{day})$ の平方根に比例するという毛細管現象による水の拡散速度の理論式である Washburn 式よりも緩慢である。理論式と実測値を比較すると、浸潤フロントが 650mm 以下では実測値は $d = 26t^{0.5}$ で表され、理論式と良く整合するが、 650mm 以上では、理論式に比べ実測位置が徐々に遅くなる傾向を示している。これは、浸潤に伴うモンモリロナイトの基底間隔の変化によって、間隙構造が徐々に変化したためではないかと考えられる。さらに、初期飽和度から飽和度が 1%増加した時点浸潤フロントと定義したこと、比抵抗値の計測位置が 50mm 間隔であることなども原因として挙げられる。
- NaCl 水溶液の場合、浸潤フロントの位置 $d(\text{mm})$ と給水時間 $t(\text{day})$ の関係は $d = 14t^{0.5}$ と近似でき、給水時間 $t(\text{day})$ の平方根に比例するという Washburn 式と整合する結果であるが、浸潤フロントの進展状況は蒸留水の場合よりも遅いことが明らかとなった。
- 飽和度が 95%以上となる場所を飽和フロントと定義して、その進展状況をまとめると、飽和フロントの進展状況は、蒸留水の場合に比べ NaCl 水溶液の場合の方が速い。このことから、蒸留水の場合、ベントナイトに供給された水は、比較的速やかに供試体上部に拡散するため浸潤フロントは移動するが、NaCl 水溶液の場合では供給された NaCl 水溶液はあまり供試体内部に拡散されずに給水側に留まっているものと考えられる。これは、NaCl 水溶液の場合、そのイオン強度の影響でモンモリロナイトが凝集し、毛細管現象に寄与する微小な空隙が形成され難いためと考えられる。なお、飽和フロントが供試体上部(浸潤距離 1000mm)まで到達する時間を近似式から計算すると、蒸留水の場合で約 78 年、NaCl 水溶液の場合で約 21 年となった。

- 本試験の結果、化学的な変質挙動が施設閉鎖後の何時から始まるのかを推定できる。また、今後の浸潤状況を把握することによって浸潤が一次的に推移するのか、それとも界面を卓越的に浸潤していくのかが分かる。現在の緩衝材の施工方法は、緩衝材と天然バリアの間は隙間、若しくはペレットを充填する方法か、原位置締固めや吹付けのように界面に隙間なく施工出来る方法とが想定されており、施工方法の選択において界面の水理場は施工方法を特徴付けるポイントでもある。
- 本試験結果は、膨潤性鉱物の不飽和一次元浸潤解析のベンチマーク試験という活用の仕方でも可能であり、膨潤性鉱物の不飽和一次元浸潤解析が可能な CODE-BRIGHT[2]や DACSAR-UA[2]などの高度化に資する情報となる。
- Archie 式を援用して求めたベントナイトの飽和度と比抵抗の関係をを用いて、比抵抗値の推移から飽和度の推移を換算した。ベントナイト系人工バリアの場合、その母材が粘土鉱物であるが、その隙間は非常に小さく、その隙間水の伝導性を鉱物表面近傍とその他で区別する必要がないと考えられる。このため、本検討では、比抵抗値と飽和度の関係の近似式として、並列回路モデルではなく、Archie 式の関数形を踏まえて、
$$R = a \left(\frac{\rho_d / \rho_w}{S_r} \right)^{2.2} = a \left(\frac{G_s}{S_r(1+e)} \right)^{2.2}$$
 とすれば試験結果を非常に精度よく表現できることを示した。ただし、 ρ_d は乾燥密度、 ρ_w は間隙液の単位体積質量、 S_r ($\times 100\%$) は飽和度、 e は空隙比、 G_s は土粒子比重である。さらに、 $a(\Omega m)$ は液種の違いによる補正係数であり、試験結果に対するフィッティングから蒸留水の場合は 1.0、0.5M の NaCl 水溶液の場合 0.6 となった。

13.2.4 緩衝材表面近傍の止水性評価

(1) 小型セルによるパイピング・エロージョン・破過試験

- 1) 原位置施工を模擬した小型セルによるブレイクスルー、パイピング、エロージョン試験
 - 平成 22 年度では、鋼製の通水セルを用いて破過圧計試験を行った。試験はベントナイト単体（界面なし）、ベントナイトとベントナイトの界面有り、セメントとベントナイトの界面有り、花崗岩とベントナイトの界面有りの 4 ケースで実施した。また、通水速度も 0.001cc/min パラメータとした。試験後は染料であるローダミンを供試体に通して、水みちの観察を行った。しかしながら、有意なブレイクスルー、パイピング、エロージョン現象は計測されなかった。
- 2) ブロック定置・ペレット充填方式を模擬した小型セルによるパイピング、エロージョン、破過試験
 - 平成 23 年度は、アクリルセルを用いてセルと供試体の間に隙間を設けた場合とペレットを充填した場合でブレイクスルー、パイピング、エロージョン現象を計測した。これは、

ブロック定置工法とペレット充填工法に相当する。このように解釈すれば、平成 22 年度のケースは原位置締固め工法に相当すると考えられる。

- 通水速度は、POSIVA や SKB 社の処分坑の仕様である 0.1L/min.を参考にして、最大流速を 0.1L/min.とした流量制御試験とした。また注入口の位置を下面と上面にした。上面から注水する場合、隙間を有するケースは供試体上面とセルの上蓋の間にあり、通水圧はベントナイトの膨潤を抑制する方向に作用することになる。
- ペレット充填ケースでは、大粒径ペレットと大粒径と小粒径の混合のケースで実施した。大きなペレットのみケースでは乾燥密度 1.1Mg/m³、大粒径と小粒径の混合のケースでは 1.5、1.57Mg/m³ であった。いずれのケースにおいても通水初期に小さな水みちが形成され、時間経過に伴って、大きな 1 つの水みちとなることが分かった。
- ペレット充填ケースにおいて、水みちが形成された後に流量を 0.1cc/min まで低下させた。この結果、水みちの断面積は流速の低減に応じて小さくなる傾向を示した。また、流量 0.1cc/min では、通水圧が増加し始めた。
- ブロックのケースでは、膨潤後の乾燥密度が 1.6Mg/m³ となるように作製した。この場合、通水初期に帯状の水みちが複数形成され、時間経過に伴って、数本の大きな帯状の水みちとなることが分かった。

3) パイピング、エロージョン、破過現象の詳細検討

- 人為的に複数の水みちを供試体に設置したブロック供試体によるパイピング・エロージョン試験を実施した。その結果、水みちは、1 本に収斂すること、その水みちの発生箇所は緩衝材と非膨潤性材料の界面であることが明らかとなった。この傾向は、0.5M の NaCl 水溶液の場合も同様であった。ただし、イオン強度が 0.5 の CaCl₂ 水溶液の場合、水みちが必ずしも 1 本に収斂せず、試験初期発生した複数の水みちがそのまま残る場合も見られた。
- 蒸留水の場合、初期から最後まで流速を一定にしてエロージョンが発生しない流速を計測した結果、本試験条件では、1cc/min であった。イオン強度が 0.5 の NaCl 水溶液や CaCl₂ 水溶液の場合、0.1cc/min であっても破過とシールが繰り返され、完全にシールされることはなかった。
- エロージョンで全てのベントナイトが流出するのに要する時間を調べる目的で、φ 100 mm×H50mm の供試体の周りに 5 mmの隙間を有するセルに（φ 110 mm×H50mm に膨潤後の乾燥密度は 1.6Mg/m³）流速が 0.1L/min で通水を行った。蒸留水の場合では、エロージョンで全てのベントナイトが流出するには 27 日程度を要した。イオン強度が 0.5 の NaCl 水溶液や CaCl₂ 水溶液で通水を行った結果、通水開始から 2~4 時間で大きな水みちが形成された。NaCl 水溶液の場合、16 日目までそのままの形であり、最終的に残

った水みち以外は次第に閉塞された。CaCl₂ 水溶液の場合、時間経過に伴って大きな破砕帯のような水みちが形成された。イオン強度が 0.5 の NaCl 水溶液や CaCl₂ 水溶液の場合、蒸留水の場合と比較して、排水が透明であった。このため、イオン強度が 0.5 の NaCl 水溶液や CaCl₂ 水溶液の場合、長期に亘って給水してもベントナイトはほとんど流出しなかった。これは、イオン強度や Ca 型化の影響でエロージョン物質が凝集して塊状となったこと、水みちが大きく成長して水みちにおける流速が低下したことなどが理由として考えられる。ただし、沈殿物は、給排水の位置関係によっては全て流出する場合もあり得ることに注意が必要である。

- 蒸留水のケースに比べ、イオン強度が 0.5 の NaCl 水溶液や CaCl₂ 水溶液の方が、エロージョン量が少ない。これは、NaCl 水溶液のイオン強度の影響でモンモリロナイトの膨潤が抑制されるため、水みち内の流水に分散せず、沈殿するためであると考えられる。また、水みちが収斂した後では、エロージョン材料は沈殿し、セル外に流出されないため、総流量とエロージョン質量の関係の勾配は水平である。これらの傾向は、底面から上面に向かって通水させているためであり、通水方向と排水箇所の位置関係に依存するものと考えられる。既往の研究から、MX80 の場合、塩水の方が、水道水よりもエロージョンし易いという結果になっているが、境界条件に依存するため、更なるデータの蓄積を行い、同じ条件同士で比較する必要である。
- 流速が速い場合、内部が乾燥状態のまま表面に水みちが形成され、流速が遅い場合内部まで浸潤し、しっかりと膨潤している。水みちの生成に、供試体内部への浸潤速度と流速の大きさのバランスが重要であることが示唆された。
- イオン強度が 0.5 の NaCl 水溶液を 0.001L/min で通水した場合、水みちの形成と破過を繰り返しているため、通水圧は増減を繰り返した。0.001L/min で給水した場合の通水圧は、最大で 0.8MPa 程度であった。0.1cc/min の場合、通水圧が増減を繰り返しているため、破過とシールを繰り返した。この場合の最大通水圧は 0.9MPa 程度であった。
- CaCl₂ 水溶液の場合、イオン強度の影響に加えて Ca 型化の影響により、緩衝材の膨潤性能が大幅に低下して水みちをシールされなかった。さらに、エロージョン物質が凝集して塊状になったこともイオン強度と Ca 型化によるものと考えられる。エロージョン物質が塊状になることによって、水みちに沈殿し易くなり、その沈殿物によって水みちの形状を変化させるために、洗掘される範囲が広がったものと推察された。
- CaCl₂ 水溶液の場合、水みちとなる領域が拡大すると、流速が低下するためエロージョン物質の沈殿が促進され、その沈殿物によって水みちの位置が変化して水みちとなる領域が拡大するという現象が繰り返された。このために、破砕帯のような水みち領域は通水時間の経過に伴って拡大したが、破砕帯のような水みちが形成されて流速が下がってからは、排水は NaCl 水溶液の場合と同様に透明となった。

- 同じイオン強度であれば、NaCl 水溶液にくらべ、CaCl₂ 水溶液の方が、Ca 型化による膨潤性能の低下の分だけ、エロージョンやパイピングに及ぼす影響が大きい。

4) ブレイクスルー、パイピング、エロージョンに対する人工給水効果の評価

- 事前に蒸留水で膨潤させた供試体に流量制御で下面から上面に向かって通水した結果、給水圧が供試体を排水口のある上面に押し付けるように作用するため、全てのケースで通水圧がアクリルセルの上限圧である 3MPa に達した。この境界条件では、人工給水による膨潤によって、パイピングやエロージョンが抑制できることが分かった。イオン強度が 0.5 の NaCl 水溶液の場合、0.5L/min や 0.1L/min のケースで、一時的に送水圧が低下しているため、破過現象が発生したことが分かる。しかしながら、その後、再び送水圧が増加に転じており、パイピングやエロージョンの発生には至っていない。イオン強度が 0.5 の CaCl₂ 水溶液の場合でも、パイピングやエロージョンは発生しなかった。
- 試験中の側面図の観察から、ペレット側の底面では、通水圧が全応力として作用し、供試体を押し上げて圧縮し、隙間が発生した。同様の結果は SKB 社の検討(SKB 社 Report R-06-72[4]) でもみられており、人工給水を行っても、湧水の圧力によって発生する隙間が流出箇所と連通するような場合には破過現象が断続的に生じるものと考えられる。
- 事前に蒸留水で膨潤させた供試体に流量制御で上面から下面に向かって通水した場合、給水圧が供試体を押し下げ、隙間を形成し、上面にある排水口と連通することで破過が断続的に発生し、最終的に水みちが形成されエロージョンが発生した。このことから、給水圧の作用方向と給排水口の位置が人工給水の効果に対して大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。このことは、人工給水に限らず、エロージョンの工学的な対策の検討において、重要な観点であると言える。

(2) 流路長がブレイクスルー、パイピング、エロージョンに及ぼす影響

1) 原位置締め・蒸留水ケース (Case1)

- 供試体はアクリルセル内で仕上がり高さ 5mm を 200 層締め固めて作成したものであり、セルと供試体間には隙間は存在しない。すなわち、前述の小型セルによるブレイクスルー、パイピング、エロージョン試験における施工方法では、原位置締め固め工法や吹付け工法に相当する。試験では実際の処分場の深度である地下 300m 以深に相当する通水圧力として 3.0MPa を与えた。注水圧制御で 0.2、0.5、1.0、2.0、2.5、3.0MPa に段階的に水圧を作用させた。その間、破過現象と思われる微細な水圧の現象は見られるものの、大局的には安定して水圧が保持された。

2) ブロック定置・蒸留水ケース (Case2)

- 供試体は高さ 100mm×直径 45mm の円筒形ブロックを 10 段重ねることで作製した。試験初期には、供試体とセルの間には 2.5mm の隙間が存在している。流速は 0.1L/min. から 0.0001L/min. まで段階的に低下させた。流速が 0.1L/min. から 0.001L/min. までは、

水みちが形成されており注入圧は小さい状態であった。しかしながら、流速を0.0001L/min.まで低下させると注入圧が大きく変動した。注入圧が大きな値を示した直後に、注入圧が非常に小さくなるなど振動した。これば、一時的に水みちがシールされた後に注入圧によってシールが破過した（ブレイクスルー）したものと考えられる。

3) ブロック定置・蒸留水ケース (Case2-2)

- Case2 では、エロージョン量を計測しなかったため、エロージョン量と流量の関係を取得するために Case2 とほぼ同じ試験条件で試験を行った。供試体は高さ 50mm×直径 45mm の円筒形ブロックを 20 段重ねることで作製した。試験開始当初から 6 時間程度は、Case2 に比べ Case2-2 の方が注水圧が、大きめに推移しているが、パイピング現象が発生したと思われる 6 時間以降の注水圧の経時変化は、概ね同様である。その後、流速を 0.001L/min.まで低下させてが、注水圧の傾向は Case2 と概ね同様であった。目視でパイピングとエロージョンの発生を観察できた。

4) ペレット充填・蒸留水ケース (Case3)

- 供試体は大粒径のペレットを充填することで作製した。このため、初期状態では、大きな間隙が存在する。また、乾燥密度も 1.1Mg/m³ 程度であった。流速は 0.1L/min.から 0.0001L/min.まで段階的に低下させた。流速が 0.1L/min.から 0.001L/min.までは、水みちが形成されており注入圧は小さい状態であった。しかしながら、流速を 0.0001L/min.まで低下させると注入圧が大きく変動した。注入圧が大きな値を示した直後に、注入圧が非常に小さくなるなど振動した。これば、一時的に水みちがシールされた後に注入圧によってシールが破過した（ブレイクスルー）したものと考えられる。

5) ペレット充填・蒸留水ケース (Case4)

- Case3 と試験条件はほぼ同じであるが、供試体は大粒径と小粒径のペレットの混合物を充填することで作製した。このため、初期状態では、Case3 よりも比較的小さな間隙が存在する。また、乾燥密度も 1.511Mg/m³ 程度であった。試験開始直後に通水圧が 230kPa 程度まで急上昇したが、その後、流速が 0.1L/min.～0.001L/min.までの間、注入圧は小さい状態であった。目視でパイピングとエロージョンの発生を観察できた。

6) ブロック定置・NaCl 水溶液ケース (Case5)

- Case2 とほぼ同じ条件で試験を行ったが、使用する液種が蒸留水ではなく、0.5M の NaCl 水溶液である。蒸留水のブロック定置工法のケースと同様に大きな水みちがセルとの界面に発生し、水みちには緩衝材から分離して沈殿したケイ砂が沈殿している。NaCl 水溶液であっても、蒸留水の場合と同様に、大きな水みちの底部には 3 号ケイ砂、中部には 5 号ケイ砂、上部には舞いあがったベントナイトが堆積している。舞いあがったベントナイトは徐々にエロージョンによってセル外に流出するものと考えられる。
- 給水量よりも排水量の方が小さいため、まだ供試体は飽和しておらず、パイピングしな

がらずしずつ供試体内部に水が浸潤していることが分かった。給水圧力の経時変化から、水みちが形成されているため、大きな給水圧は発生していない。試験後に供試体に染料であるローダミン B を流して水みちを観察した結果、水みちが 1 本に収斂していることが分かった。

- 総流量とエロージョン質量の関係を取得した。他のケースに比べ明らかに総流量とエロージョン質量の関係の勾配が急であることが分かった。但し、通水量が 20L を過ぎた辺りから、総流量とエロージョン質量の関係の勾配が緩くなっている。これは、ブロックとセルの界面に形成された水みちに堆積したケイ砂がエロージョンを抑制しているためだと考えられる。水みちに堆積したケイ砂が 40cm 程度の高さになった頃から、総流量とエロージョン質量の関係の勾配が緩くなっていることが分かった。

7) モンモリロナイトブロック定置・蒸留水ケース (Case6)

- 供試体は高さ 100mm×直径 45mm のモンモリロナイト 100%の円筒形ブロックを 10 段重ねることで作製した。試験初期には、供試体とセルの間には 2.5mm の隙間が存在している。流速は 0.1L/min.である。試験初期から、複数の水みちが大きな水みち 1 本に収斂し、シールされることなくエロージョンが継続した。総流量とエロージョン質量の関係は、クニゲル V1 と同じ勾配であったことから、クニゲル V1 においても、エロージョン材料の大半はモンモリロナイトであることが示唆された。

8) エロージョン量と流量の関係

- Case2-2、Case4、Case5、Case6 で総流量とエロージョン質量の関係を取得した。NaCl を使用した Case5 以外は、概ね同等の勾配となった。概して、モンモリロナイトブロックを使用した Case6 はずっとエロージョンが継続しており、エロージョンの抑制の観点でモンモリロナイト含有率を増加させることがあまり効果的ではないことが明らかとなった。また、ケイ砂 30wt%混合ベントナイトからなるブロックの定置方式では、水みちにケイ砂が沈殿し、膨潤によるシールを妨げる現象が見られた。この現象は、NaCl 水溶液を使用した場合に顕著であり、ケイ砂の堆積が進行すると、逆にエロージョン物質が排出され難くなり、総流量とエロージョン質量の関係が試験の後半で緩勾配となる。

(3) 緩衝材の限界流速の検討

- 材料特性としての限界流速の存在を確かめるために限界流速計測試験を実施した。ある乾燥密度に締固めた緩衝材を人工的に作った流路の河床部に設置し、様々な流速で通水した。試験結果から、乾燥密度ごとに膨潤量と流速の関係を算出し、さらに乾燥密度と限界流速の関係を求めた。
- 乾燥密度と限界流速の関係を設計へ反映する計算例を示した。計算例では、浸潤深さをパラメータとしたが、実際には、浸潤深さは時間経過に伴って進展するだけでなく、地下水組成や緩衝材の初期飽和度、膨潤に伴って変化する乾燥密度などによっても変化するため、実際に仕様に対しては、個別に浸潤速度を取得する必要がある。なお、浸潤速

度については、前述の浸潤速度試験の手法が参考になる。

(4) 工学規模パイピング・エロージョン試験

- 小規模試験よりスケールアップした工学規模試験において、試験規模の影響評価、実際の処分孔を模擬した境界条件下でのパイピング・エロージョン現象の発生状況観察や発生条件の検討、さらにエロージョンのモデル化を行った。セルとの間に隙間がある条件で蒸留水を下面から上面に向かって一次的に通水させた。この際の流速は、シリンジポンプで 0.1L/min となるように制御した。セルの寸法はφ560 mm×h600 mmであり、供試体はφ500 mm×h600 mmで膨潤後の乾燥密度が 1.6Mg/m³である。試験は、その後、流量を 1cc/min に低減した。試験後、供試体を解体し、乾燥密度分布と飽和度分布を取得した。
- 小規模試験とほぼ同様に、緩衝材とアクリルセルの界面に発生した複数の水みちが 1 本に収斂し、大きな水みちとして残った。水みちにはケイ砂が堆積し、流速を 1cc/min に低減しても、膨潤によって水みちがシールされるのを妨げるように作用した。
- 水みちの形成過程を目視観察することができた。目視観察によると、供試体の据え付け誤差や、密度の不均一などによる膨潤の速度の差異により、緩衝材とセルの接触する場所は全て同一ではない。一部の箇所、セルとの接触が遅れる場所があり、そのような膨潤遅延箇所が水みちとして残ることが分かった。また、このような形成過程により、水みちが階段状に発生することも明らかとなった。
- 給水中、水みちが形成されていても、水みち形成箇所以外の場所では、供試体の乾燥ひび割れが発生していた。このことから、パイピングやエロージョンが非常に局所的な現象であり、流速、浸潤速度、膨潤速度、膨潤速度などの兼ね合いで、エロージョンが発生することが示唆された。
- 解体の結果、供試体下部は 75%程度乾燥密度が低下していることが分かった。また、水みちが形成された箇所に沿って密度の低下領域が形成されていた。また、1 年程度通水したが、供試体中心部では、試験初期と変わらない乾燥密度と飽和度であった。このことから、パイピングやエロージョンが非常に局所的な現象であることが分かった。
- 解体の結果、供試体下部は 75%程度乾燥密度が低下していることが分かった。また、水みちが形成された箇所に沿って密度の低下領域が形成されていた。また、1 年程度通水したが、供試体中心部では、試験初期と変わらない乾燥密度と飽和度であった。このことから、パイピングやエロージョンが非常に局所的な現象であることが分かった。
- プレハイドレーションの検討で得られたように、給水圧がパイピングやエロージョンを抑制する方向に作用すれば、破過や水みち形成が起こらない。そのため、このような境

界条件となるように人工不陸を設けたセルを作製し、工学規模パイピング試験を開始した。この人工不陸は、膨潤の遅延領域を制御するという意味合いもある。試験の結果、人工不陸の縁に沿って周回する水みちが形成されたことから、人工不陸によって膨潤遅延領域を制御できる可能性があることが分かった。また、人工不陸によって給水圧が急激に増加して試験装置の上限圧力まで給水圧が増加して試験を終了した。このことから、パイピング・エロージョンの抑制に効果があることが分かった。

(5) 緩衝材や埋め戻し材等の材料特性としての許容流速の整理

- 総流量とエロージョン質量の関係に基づいて、許容流速と許容エロージョン量の設計概念を示した。この概念に基づいて、許容される流速をなるべく大きくして処分可能な孔を多く確保するためには、止水工法や地下水低下工法などで流速を小さくさせる以外には、閉鎖するまでの時間を短くするか、施工する緩衝材の密度を高める（処分孔当たりの緩衝材の乾燥質量を大きくする）以外に工学技術としての対策はない。また、許容される流速と緩衝材が施工可能な流速の大小関係に関しても検討が必要である。

13.2.5 施工品質による密度分布の均質化検討（2次元土槽試験）

(1) ペレット充填ケース

- 小規模試験による施工品質（密度差）が再冠水時に発生する現象に及ぼす影響の調査のための試験をスケールアップして、供試体寸法が W700 mm×H200 mm×D150mm の土槽を用いた試験を実施した。施工法は供試体に人為的に与えた密度分布、隙間、初期間隙径などによって代表させた。底面に配置された3枚のポーラスメタルから給水を行い、背面には浸潤状況を取得するための比抵抗計測用の電極、上盤には膨潤圧分布を計測するためのロードセルを配置した。給水はマリOTT管を用いて行い、水位が供試体上面になるように水頭差を制御して行った。
- ペレット充填方法では、初期間隙が非常に大きいため、注水開始直後に供試体上面まで水位が達した。その後にペレットに間隙水が吸われるとともに膨潤圧が発生した。ペレットには乾燥した芯が見られるが、徐々に膨潤によって間隙がシールされた。シールされた後もペレット間の界面は識別可能であった。
- 試験開始1日で、吸水面（底面）近傍のペレットは一体化され、止水層を形成した。これに伴い、水の供給が断たれたため、試験開始直後に供給された間隙水を消費して膨潤が進んだ。膨潤に伴って、吸水によって間隙の水が奪われ、一旦、ペレット表面の膨潤によってシールされた間隙であっても再度、空隙になるという現象がみられた。このような空隙は、時間経過に伴って上面から深部に進展した。
- 浸潤状況は、ある程度比抵抗計測によって把握できるが、ペレットと電極が点接触している可能性があり、その変動が激しい。ブロック定置のケースでその適用性について確認し

たい。

- 膨潤圧分布は、上蓋設置時にペレットを圧縮させた際に発生した圧力を初期値として、給水によって圧力は急激に低下した。その分布は、給水前に不均一であったが、給水によって均一化する傾向を示した。また、給水開始 2 カ月後には膨潤圧は増加に転じた。

(2) ブロック定置ケース

- ブロック定置ケースの給水開始 17 時間後の段階で、ブロックとブロックの間への浸潤は進展していないが、ブロックと土槽の界面では、ブロックの上面（ブロックとロードセルの界面）にまで達することが目視観察の結果から分かった。さらに、給水開始から 300 日目には、底部と両端のブロック間の隙間は目視ではほとんど判別できないほど一体化した。このことから、水がブロックと土槽の界面を選択的に浸潤していることが推察できた。底部から側部の界面を浸潤した水は上部のロードセルとの界面まで達しており、上面のブロック間の隙間も判別し難くなっている。このことから、非膨潤性材料に囲まれた緩衝材では、地下水が先行して非膨潤性材料との界面に浸潤するため、緩衝材内部に間隙空気がトラップされる可能性が高い。
- 給水開始から 587 日目（解体直前）では、底部と両端のブロックの一体化が進み、底部から 1 段目と 2 段目のブロックの界面まで一体化が進んだ。その他にも、各段のブロックの上側の隙間も一体化している。このことから、底部から供給された水は、底部からブロック間の隙間だけでなく、土槽との界面に沿って土槽上部まで浸潤するが、土槽上部まで浸潤した水の一部は、ブロックの各段の間の界面に横から浸潤しブロックの上部を膨潤させるものと考えられる。底部からブロック間の隙間を浸潤する水の数よりも、土槽との界面に沿って土槽上部まで浸潤する水が、ブロックの各段の間の界面に横から浸潤する速度の方が速いため、各段のブロックの上側が一体化し、ブロックの下側には隙間が残るものと考えられる。
- 試験開始から 8000 時間(333 日)程度で飽和注水量に達している。飽和注水量に到達した後も給水量が増加し続けている理由としては、土槽の上蓋がロードセルの配線を引き出すために密閉構造となっておらず、隙間から間隙水が蒸発散しているためだと考えられる。
- ブロック定置ケースの膨潤圧は、初期に設置圧として 100～200kPa 程度の値を示しているが、給水すると徐々に増加した。増加傾向は給水開始から 3000 時間(約 125 日)まで続いて、その後ゆっくりと減少傾向を示した。
- 比抵抗による浸潤状況の把握を行った。その結果、水量が土槽の飽和注水量に達する約 8000 時間（333 日）以降では、浸潤状況は、ほぼ定常状態になり、比抵抗値の分布も概ね解消され、ほぼ均一な状態になっているなど、比抵抗値による浸潤状況の計測結果と

吸水量の関係も整合することが分かった。このことから、比抵抗値による浸潤状況の計測は有効であると言える。

- 比抵抗値と飽和度の関係から飽和度分布を取得した。この結果は、解体による乱れなどの影響があるものの、土槽の解体結果とおおむね一致しており、さらに、給水量が土槽の飽和注水量に達する約 8000 時間 (333 日) 以降では、飽和度は、ほぼ 100% で均一になるなど、給水量の計測内容と整合する結果となった。

(3) ブロック定置とペレット充填併用ケース

- 底面から一次的に給水したところ、ペレット側に選択的に水が浸潤し、30 分程度で土槽上部まで到達した。また、ペレットは間隙にある水を吸水して比較的速く膨潤し、一日程度でその間隙をシールした。ペレットの大間隙を満たした水が、ブロックに対して側方からの水の供給源となっている状況も観察された。
- 給水開始から 1 日目以降で、ペレットの底部が一体化し、底面からの水の供給量が低下した。これに伴って、膨潤した密度が小さい領域が再び空隙に戻った。これは、ペレットの中心部分には、まだ乾燥領域が残されており、給水が滞ったために含水比が高く緩い密度の領域からペレットの中心部に間隙水が移動したためだと考えられる。同様の現象はブロックとペレットの間でも発生しており、一旦、ペレットが膨潤してブロックとペレットの界面はほぼ一体化したが、1 日目以降には、底面からの給水が滞ったために、再び界面に隙間が発生している。また、それに伴って、界面近傍のブロックが膨潤してひび割れが発生した。
- ペレットとブロックの間の隙間やペレットの空隙、さらにはブロック間の隙間は、給水時間が経過するに従って次第にシールされ、給水開始から 259 日で底面から 10 cm 程度の位置まで、空隙はほとんどなくなった。
- 比抵抗計測の結果、試験開始直後にペレットが冠水し、その後、給水面である底盤とペレット側からブロックに向かって水がいどうしたという浸潤状況が計測できた。ブロックでは、底盤とペレットから水が浸潤するため、飽和度は右上が最も小さく、左下が最も大きい傾向にある。これらの傾向は、目視観測結果と整合した。しかしながら、比抵抗から推定した飽和度はほとんど 100% に近いのに対して、浸潤状況の目視観察からは土槽に向かって右上付近に乾燥している領域が存在している。比抵抗計測から得られる値は、背面側の供試体表面の値であるため、前面と背面が必ずしも一致しているとは限らない。今後、解体時の飽和度分布と比較して計測結果の妥当性を検討する必要がある。
- 給水開始から 0.8 時間は給水量が急激に増加するが、0.8 時間以降は、流量は急激に小さくなり、給水量は微増傾向となっている。これは、一旦、ペレット部分の大間隙を満たした水がベントナイトの膨潤に消費され、土槽低部のペレットとブロックが隙間をシールしたため、給水量が低下したものと考えられる。さらに時間が経過すると、給水量が

漸増している。飽和度分布の変遷に照らして考えると、上部のブロックの方に水が浸潤して飽和度が増加しており、この給水量の増加は、上部ブロックへの浸透によるものだと考えられる。

- ペレットが充填されている範囲が土槽左端から 175mm であるため、それよりも左側のロードセルに関しては給水後、ロードセルの値が急激に低下している。これは給水に伴うコラプスが発生したためだと考えられる。一方、ブロック側のロードセルは、給水に伴って膨潤圧が増加傾向を示している。さらに給水が進むと、ブロック側の膨潤圧が低下し、逆にペレット側の膨潤圧が増加している。これは、ブロックが相対的に密度の低いペレット側に膨潤し、ペレット部を圧縮したためだと考えられる。
- ペレット領域の膨潤圧は給水開始から 1.5 時間を最大として、それ以降は低下傾向を示している。またその分布はほぼ一定値である。一方、ブロック側の膨潤圧分布は、初期設置圧の影響により、凹凸が激しい。この傾向は給水が進んでも未だに解消されていないが、最も膨潤圧の高い箇所（土槽左端から 375mm、575mm 付近）の圧力が低下傾向にある。このため、今後、給水を続ければ、ブロック定置ケースのように、均等な膨潤圧分布に移行していくものと予想される。

13.2.6 浸潤による間隙空気の移行調査手順

(1) 浸潤による間隙空気の移行調査

- 1000 mmの長尺アクリルセルの中央にポーラスメタルを配置して、その上下を乾燥密度 1.6Mg/m³ のベントナイトで挟み込むようにセットした供試体を用いて、浸潤に伴う間隙空気の移行調査を実施した。給水による破過を防ぐために、試験初期段階は流量制御とし、ある程度の膨潤領域を確認した後に圧力制御に移行した。
- 給水開始から 1 か月程度経過した時点で、供試体上部において比抵抗値の低下が発生し、50 日後には、比抵抗値の低下領域が供試体上端から 250mm 程度まで進展しているのに対して、供試体下部では、比抵抗値の低下が給水開始から 50 日程度まで発生しておらず、53 日経過後にようやく比抵抗値の低下が確認できた。これらの違いは、供試体上部では滴水状に給水されるために浸潤領域が半径方向に狭く深度方向に深くなるのに対して、供試体下部では、一次元的に半径方向に広く深度方向に浅くなるためである。
- 給水に伴う間隙空気圧の変化から、間隙空気圧の変動と大気圧の変動が同期しており、変動要因が大気圧変動であることが分かった。試験の初期段階では、給水による空隙体積の減少に伴う間隙空気圧の増加、間隙水への間隙空気の溶解による間隙空気圧の減少などの現象はほとんど発生していない。また、本試験結果より、浸潤による間隙空気圧の変化量に対して大気圧変動の大きさが有意であると試験結果の傾向を判断する際に差し障る可能性があることが分かった。このため、後述する圧力制御過程では、大気圧変動に影響さ

れない圧力計として絶対圧計を採用した。

- ▶ 膨潤圧は、0.6～0.7MPa 程度の値となった。この値は、既往の研究[1]における同じベン
トナイト系人工バリア材料の同密度での膨潤圧試験結果の平衡膨潤圧と同等である。
- ▶ 給水開始から 50 日目以降では供試体の上下端に比抵抗の低下領域が形成されており、供
給水の浸潤に伴う膨潤領域の存在が確認できた。そこで、通水開始から 53 日目に圧力制
御試験に切り替えた。上部供試体の給水圧が十分に増加していなかったことから、初期の
給水圧を 10kPa として段階的に給水圧を増加させ、550 日目に 876kPa まで増加させた。
この圧力制御過程では、前述のように圧力計として絶対圧計を採用している。この絶対圧
計は、真空状態をゼロとした圧力計であり、一般的な大気圧をゼロとしたゲージ圧計では
約 1MPa に相当する。
- ▶ 背圧適用後の間隙空気圧と大気圧の経時変化から、給水圧が低い段階では、背圧を維持す
ることができずに、背圧が減少傾向を示している。これは、間隙の空気が間隙水に溶存し
たためだと考えられる。しかしながら、給水圧を 876kPa まで増加させると、減少傾向で
あった間隙空気圧が増加に転じていることが分かる。この傾向は、今後も継続するものと
考えられる。
- ▶ 圧力制御に変更した後の浸潤による間隙空気の移行試験における比抵抗分布から、最上下
部の電極付近でも飽和度が 90%程度であった。仮に飽和領域が供試体内に形成されてい
ないとすると、給水を続けても間隙空気が供試体内から排気されてしまうため、通水圧を
増加して明確な飽和領域を形成する必要がある。
- ▶ 試験の終盤で、上下面の比抵抗値が低下する傾向が得られた。その原因としては、供試体
中央部が膨潤することによって供試体の上下端面が圧縮されて乾燥密度が増加すること
などが考えられる。この場合、飽和度が 100%で一定であったとすると、乾燥密度は比抵
抗値と乾燥密度の関係から、 $1.76\sim 1.79\text{Mg/m}^3$ まで増加したことになる。乾燥密度
 1.8Mg/m^3 のクニゲル V1 単体の膨潤圧が、小林ら(2007)[2]に示された完全飽和線から
1.42MPa 程度であり、上下端面に作用している圧力が全応力の膨潤圧として 1.6MPa 程
度であることから、圧密による乾燥密度増加が発生する可能性がある。供試体の解体時に
飽和度や乾燥密度分布を計測することによって、現象の解明を行う必要がある。

13.2.7 吹付け施工技術の適用性

(1) 高度化する緩衝材の施工技術の選択

- ▶ 緩衝材の施工方法を高度化することによって密度分布や隙間がない緩衝材を構築できれ
ば、再冠水に伴う様々な発生事象の影響を低減できる可能性がある。そのため、密度分布

が小さく、隙間が出来ない施工法である吹付け工法による緩衝材の施工試験の前段階としてMX80、Milos Ca bentonite、Friedland Clay の3種類のベントナイトの吹付け箱試験を行った。その結果、モンモリロナイトは吹付けに適さないことが分かった。重曹水などを添加して膨潤を抑制するか、ケイ砂などを混合させてモンモリロナイト含有率を下げることによって、自由水を増やすことができれば、吹付けに適する材料と出来る可能性がある。Friedland Clay は吹付けに適した材料であり、Friedland Clay を用いた埋戻しを吹付け工法で行うことは理にかなっている。

(2) 湧水環境下における吹付け施工実験

1) 湧水影響評価

- 結晶質岩(0.1L/min/27孔)・堆積岩(0.1L/min/3孔、0.01L/min/3孔)での湧水を模擬した環境下で実規模の1/4の大きさの緩衝材を吹付け施工し、緩衝材施工の可能性、施工による止水の可能性について検討した。その結果、湧水環境下において吹付け施工は可能であるが、施工中の止水は困難であることが分かった。
- 湧水環境下で吹付けによって施工した緩衝材の密度分布を計測した結果、均質であることが分かった。

2) 人工給水効果の検証

- 結晶質岩(0.1L/min/27孔)・堆積岩(0.1L/min/3孔)での湧水を模擬した環境下で実規模の1/4の大きさの緩衝材を吹付け施工し、緩衝材施工の可能性、施工による止水の可能性について検討した。その結果、湧水環境下において吹付け施工は可能であるが、施工中の止水は困難であることが分かった。
- 吹付け施工終了後には、緩衝材の上端面を整形し、モールドの上蓋を設置することによって緩衝材の体積を拘束した。その後、送水圧が200kPa程度まで通水圧を増加させ、飽和させた。

13.2.8 地下施設を使った緩衝材の性能確認試験

- 地下施設の試験孔2の形状は、直径580mm、深さ850mm、試験孔3は直径580mm、深さ880mmであり、地下水流入量は地下水位が0の状態から満水になるまで、7L/分～2L/分まで変化しているのが特徴である。また、流入箇所は鉛直壁の壁面から一様に流入しており、室内試験の流量一定条件で底部から流入させ、上部で排出する条件とは異なっている。
- 試験孔2、3のイオン濃度は、海水のイオン濃度の1/3である。
- 試験孔3は、緩衝材ブロック1段のみを地下水の流入量が7L/分→2L/分に変化する環境に設置した。緩衝材は半径方向に膨潤し、緩衝材ブロックと岩盤との隙間が埋まったことを

確認した。また緩衝材の高さ 10cm 部分は半径方向に膨潤し、強度を発現していることが確認できた。緩衝材ブロックの上側表面は、柔らかい微粒子が 40mm ほど堆積してが、これは鉛直方向に膨出した緩衝材ブロックとエロージョン物質の混在したものと考えられる。

- CCDカメラの映像では、エロージョンを起こした微粒子が水中を漂っている様子は見られなかった。不確定事項は、緩衝材ブロックの表面ある厚さ 4cm の柔らかい部分は、蓋を付けて体積拘束した時に所定の乾燥密度を発現することができるかどうか確認する必要がある。
- 試験孔 2 では、緩衝材ブロック 6 段+ペレットを地下水の流入量が 7L/分→2L/分に変化する環境に設置した。ペレット部分が膨潤によって上側に膨れ、緩衝材ブロックの表面には 40mm の柔らかい沈殿物が堆積していた。CCDカメラで、微粒子が緩衝材ブロックの上を浮遊していることから、ペレットの成分が堆積したものと考えられる。
- ペレットは、地下水に触れると 1 時間以内で形が崩れて分解し、その後膨潤することが判明した。1 か月後に取出したところ、固いペレット層を構成していた。ペレットの効果として、乾燥密度は緩衝材ブロックよりも低いが、先に膨潤することによって岩盤と緩衝材ブロックの隙間に硬い緩衝材の層を形成し、緩衝材ブロックの表面にしっかり吸着することによって、緩衝材ブロックのエロージョン低減に貢献する可能性が高いことが判明した。
- 吸光度計によるエロージョン量は有意な量の測定ができなかった。これは、試験孔の中でパイピング/エロージョンが発生しなかったのではなく、バキュームによる吸水口による摂取方法、位置が適切ではなかったことが考えられる。実際には緩衝材の上側への膨潤を拘束するものがないために、緩衝材ブロックが膨潤したこと、試験孔 2 の場合には、ペレットのエロージョン物質が堆積したものが混在しているものと考えられる。

13.3 研究計画の更新

13.3.1 5 年間の全体計画の更新

平成 25 年度に全体 5 ヶ年計画を立案し、各年毎の成果目標に対する進捗状況を確認するとともに、平成 27 年度には、研究項目に関する進捗管理と項目に関する見直し行う。

13.3.2 処分環境（湧水量や水質等）の影響検討

(1) 液種の影響

0.5M NaCl 溶液、人工海水(0.5M NaCl+0.5M/3 CaCl₂)での緩衝材の乾燥密度均質化性能

をそれぞれ平成 25、26 年度と平成 27、28 年度の 2 年間に亘って確認する。

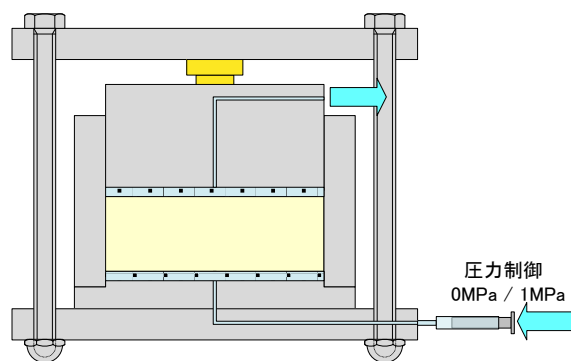
13.3.3 施工品質（密度差）が再冠水時に発生する現象に及ぼす影響の調査のための試験

(1) 継続試験

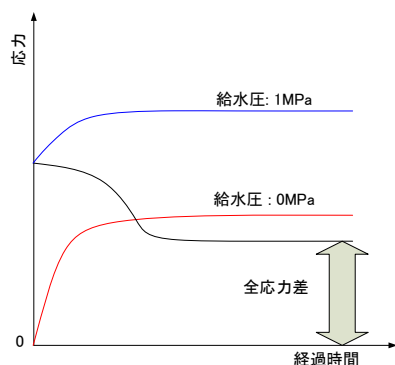
- 現在継続中の試験については試験結果が定常状態になった時点で解体を行い、密度分布を計測する。

(2) 新規試験案

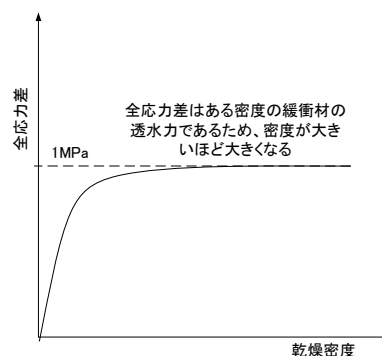
- 継続中の試験が解体された時点で、再冠水中に発生する緩衝材の化学変質が均質化挙動に及ぼす影響の定量評価のために、イオン強度が 0.5 の CaCl_2 水溶液を用いた場合の均質化試験を実施する。
- 従来、膨潤圧は有効応力として取り扱われてきた。そのため、膨潤圧を計測する際には、ロードセルで計測される全応力から通水圧を差し引いた値を膨潤圧としてきた。しかしながら、実際には、給水圧のうち、供試体内部に浸透する水の粘性に起因する水圧と供試体に外力として作用する水圧があり、正味の膨潤圧を算出するためは、両圧力を分離する必要がある。このため、緩衝材の密度や飽和度ごとに給水圧のうち外力として作用する圧力の割合を取得する必要がある。図 13.3.3-1 には、試験の概略図と結果のイメージを示す。圧力制御で緩衝材に給水して膨潤圧を計測する。この場合、膨潤圧として緩衝材の正味の膨潤圧と給水圧の和が計測されるが、給水圧の一部は、供試体内部に浸潤する水によって消費され、給水圧として制御されている圧力よりも小さくなるものと考えられる。そこで、例えば、乾燥密度が同じ（正味の膨潤圧が同じ）緩衝材に 0 と 1MPa の 2 通りの給水圧で膨潤圧試験を行い、両者の全応力の差から給水圧の経時変化を取得することが可能となる。



(a) 試験概略図



(b) 結果のイメージ①



(c) 結果のイメージ②

図 13.3.3-1 緩衝材の透水力の取得イメージ

- 処分坑に緩衝材を施工後から閉鎖されるまでの期間の湧水による緩衝材の膨出が懸念されている。様々な対策が検討されているが、対策の設計に用いる応力は緩衝材の膨潤圧と水圧とすることが保守的な考え方である。しかしながら、実際には、緩衝材の膨潤圧が、処分孔の孔壁との摩擦などによって室内試験の滑らかな金属性のセルを用いて取得したセル圧とは異なる。さらに、孔壁の不陸に緩衝材が膨潤して食い込むと、緩衝材はせん断されながら膨出することになる。よって、従来の設計で考えられている応力は過度に保守的である可能性がある。そこで、図 13.3.3-2 に示したような、滑らかなセルと人工的な不陸を設けたセルの膨潤圧試験を行い、人工不陸による緩衝材のせん断抵抗による膨潤圧の低減割合を定量評価する。この人工不陸は、前述のように、エロージョン対策としても効果が見込めるため、膨出とエロージョンの双方の対策となり得る。さらに、図 13.3.3-3 に示すような試験系で、せん断試験を行えば、緩衝材の膨出に対するせん断抵抗を定量評価可能である。これらの結果を踏まえて、緩衝材の膨出対策の評価を行うために、図 13.3.3-4 に示すような工学規模での膨出試験を行う。

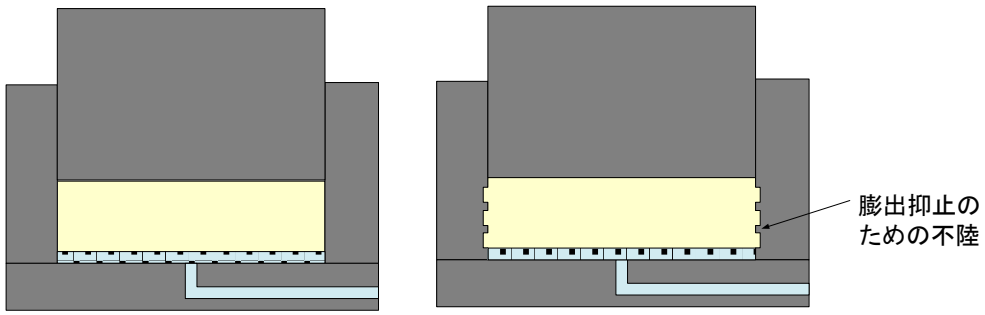


図 13.3.3-2 緩衝材の膨出力の取得イメージ

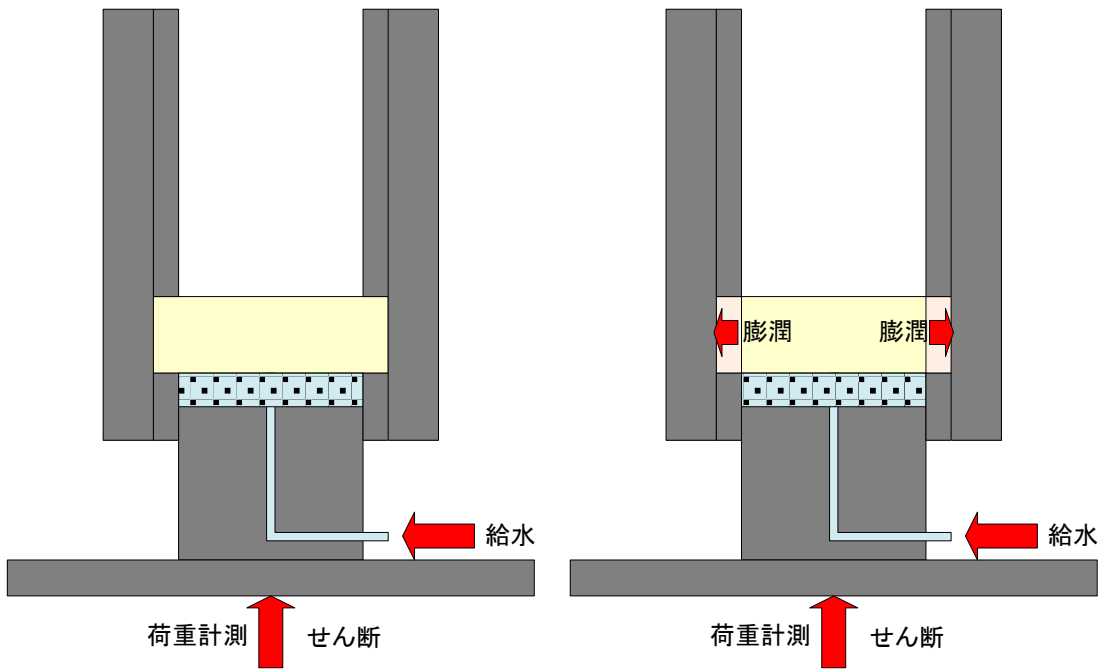


図 13.3.3-3 緩衝材の膨出時のせん断抵抗の取得イメージ

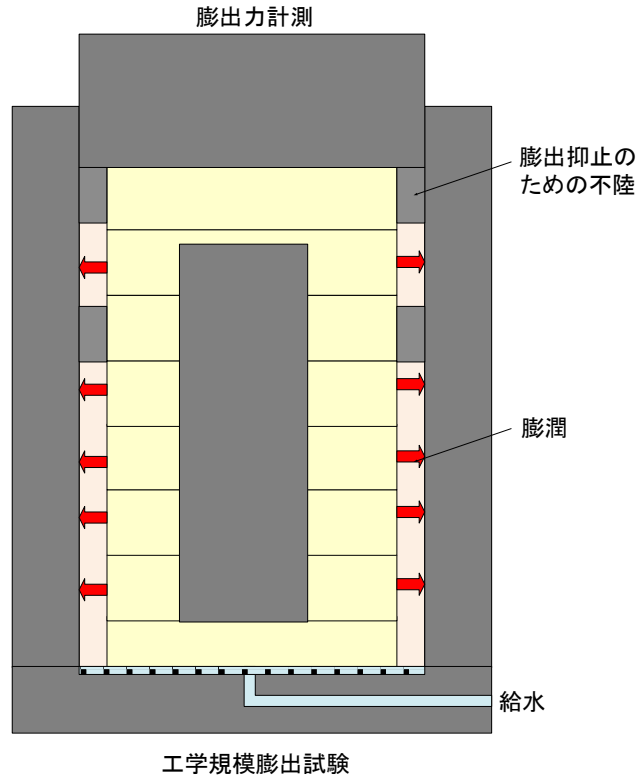


図 13.3.3-4 工学規模緩衝材膨出試験のイメージ

13.3.4 Ca 型化と飽和の可逆性検討

(1) 継続試験

- 現在継続中の試験は、蒸留水で飽和後に CaCl_2 水溶液を供給したケースのみ、Ca 型化を促進させるために通水圧が 0.2MPa 作用しているために膨潤圧の整理が難しい。すでに十分に Ca 型化しているものと考えられるため、全て同じ条件となるように、通水圧を水位差のみに変更し、膨潤圧の経時変化の傾向が取得できるまで試験を継続する。試験後、供試体を精密に解体し、Ca 型化の分布を取得する。

(2) 新規試験案

- これまでの試験で、人為的に蒸留水で飽和させた緩衝材では、Ca イオンが拡散で移動するため、Ca 型化が遅延される効果が期待できることが分かった。この効果を定量的に把握する方法として、飽和した緩衝材の底面にセメント浸出液を模擬した $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 水溶液を循環させ、Ca イオンの減少状況から Ca イオンの拡散状況を観察することが可能である。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 水溶液の循環には、Ca イオンメータを装備した閉鎖型の特殊シリンジポンプを使用する (図 13.3.4-1 参照)。このシリンジは、大気と溶液が接触することがないため、炭酸カルシウムが沈殿して pH が下がるなどの不具合が発生しない。ベントナイトと接触した $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 水溶液で Ca 型化が起きれば、溶液中の Ca イオン濃度が下がる為、Ca イオンの拡散状況が把握できる。また、試験後に解体し、精密な Ca 型化分布を取得することで、整合性の確認も可能である。

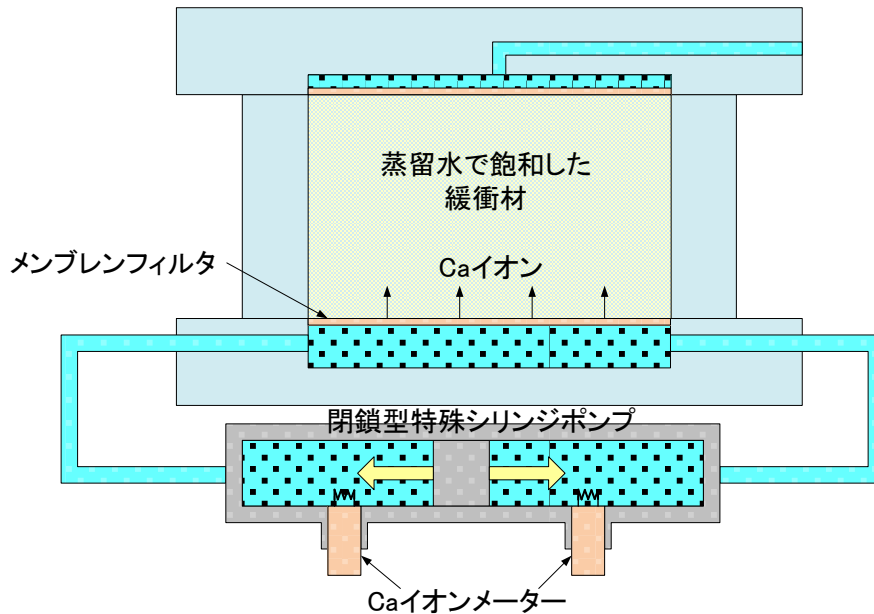


図 13.3.4-1 Ca 型化の拡散速度取得試験のイメージ

13.3.5 長尺ベントナイト供試体を用いた一次元浸潤速度取得試験

(1) 継続試験

- 現在継続中の試験は、供試体上面の飽和度がある程度増加した段階でヒーターを作用させて飽和度分布の変遷を取得する。取得後、解体を行い、乾燥密度と飽和度の分布を計測する。

(2) 新規試験案

- CaCl_2 水溶液を使用した場合の飽和度と比抵抗の関係を取得する。

13.3.6 緩衝材表面近傍の止水性評価

(1) 継続試験

- 工学規模パイピング試験によるパイピングとエロージョン現象に対する工学的な対策として、人工不陸の効果を定量評価する。

(2) 新規試験案

- 工学規模パイピング試験によるパイピングとエロージョン現象に対する工学的な対策として、ペレット充填や人工不陸とペレット充填の併用などの効果を定量評価する。また、これらの施工方法についても検討を行う。
- パイピング・エロージョン現象の対策を検討するためには、給排水の位置関係が重要となる。そのため、横置き処分施設を模擬したエロージョン試験を実施し、これまで実施してきた縦置き処分孔とのエロージョンの発生状況の違いを検討する(図 13.3.6-1 参照)。

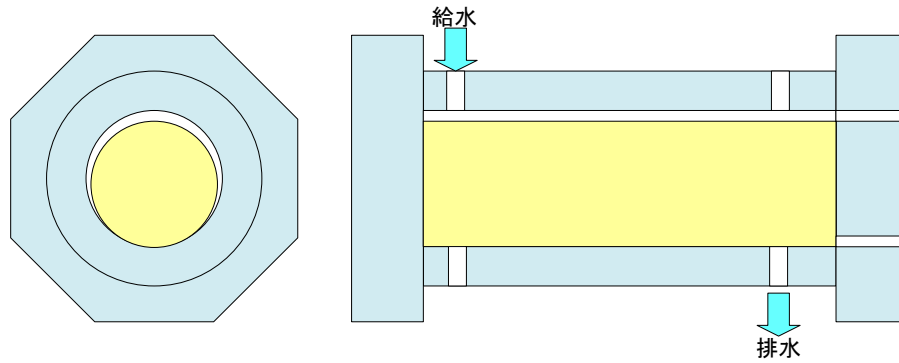


図 13.3.6-1 横置き処分施設を模擬したエロージョン試験のイメージ

- これまでの試験で、パイピング現象は 1 本の水みちに収斂することが明らかとなっている。その一方で、工学規模のパイピング・エロージョン試験では、水みちが形成された場所の周辺以外の場所では、給水中にも拘らず、乾燥ひび割れの発生などが確認された。そこで、互いに独立した給水を複数個所から実施し、それぞれの給水によって発生する水みちが 1 本に収斂するかどうかを確認する（図 13.3.6-3 参照）。

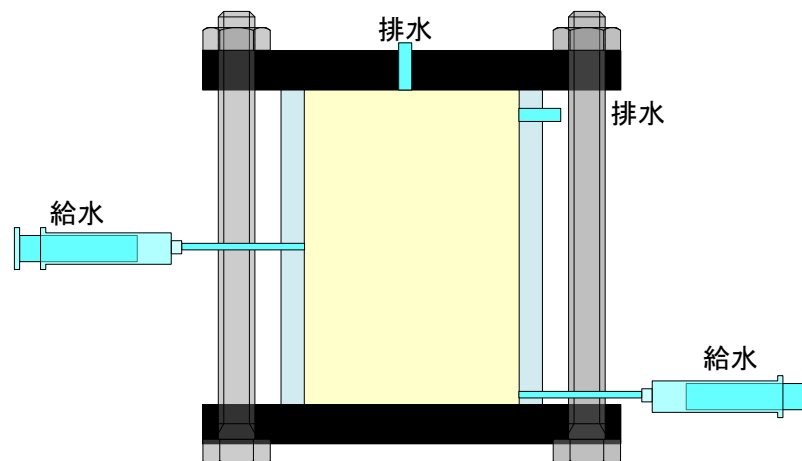


図 13.3.6-2 横置き処分施設を模擬したエロージョン試験のイメージ

- エロージョン現象のメカニズム解明のために、ベントナイトスラリーの濃度（乾燥密度）ごとに粘性とせん断強度を取得する（図 13.3.6-3 参照）。この粘性とせん断強度の関係が得られれば、水の流速と粘性の関係からエロージョンの発生する乾燥密度を水の流速毎に取得できる。

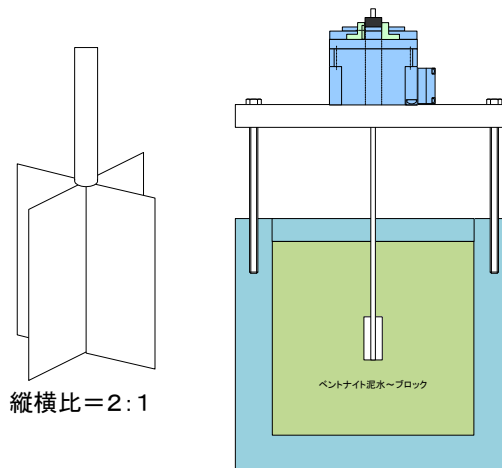


図 13.3.6-3 ベントナイトの粘性とせん断強度の取得試験のイメージ

- 実際の処分場では、緩衝材よりも周辺の岩盤の方が透水係数は大きく、さらに処分孔の削孔時に EDZ が形成されれば、処分孔内よりも天然バリア内を地下水が流れる可能性が高い。この場合、緩衝材と天然バリアの界面では吸出し現象が発生し、緩衝材が天然バリア内に吸い出され、結果として水みちが緩衝材内にも形成される可能性もある。そこで、花崗岩などの多孔質体と界面を有する緩衝材に長期間通水を行い、多孔質エロージョンに対する評価を行う必要がある。試験系としては、前述の花崗岩との界面を有する緩衝材の通水試験や緩衝材と接する多孔質内に一定の流速で水を流した場合の緩衝材の挙動観察などが考えられる（図 13.3.6-4 参照）。

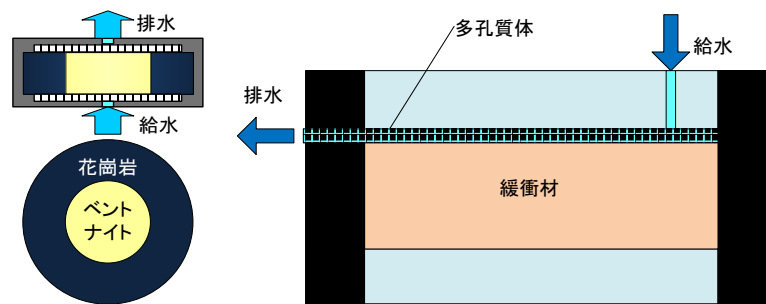


図 13.3.6-4 試験ケース

- SKB 社の横置き処分孔では、緩衝材だけでなく、Distance ブロックや Filling ブロック、さらにはコンパートメントプラグなどにより、エロージョンに対する性能の担保を目指している。この Distance ブロックや Filling ブロックはベントナイト系材料が想定されており、流路長を大きくして耐エロージョン性を高めるものである。そこで、横置き処分方式でのエロージョン試験を実施し、流路長がエロージョンに及ぼす影響を評価する。初期飽和度をパラメータとして試験を実施し、自己シールされる流速に対する初期飽和度の影響に関する知見を取得する（図 13.3.6-5 参照）。

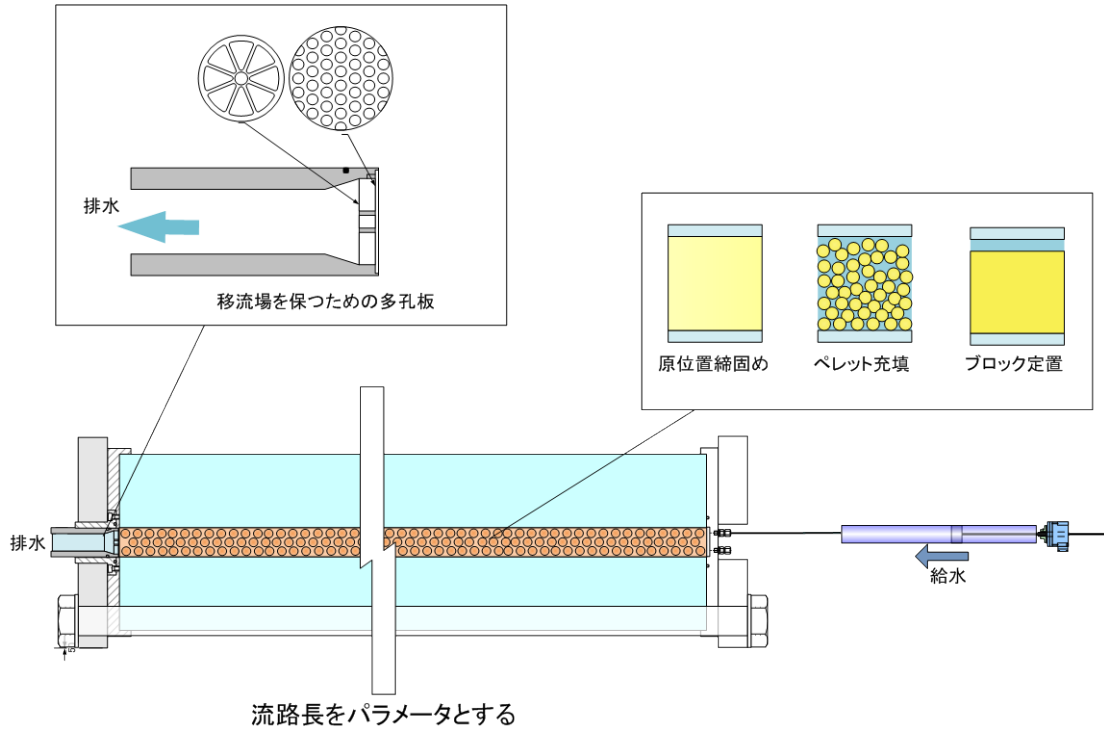


図 13.3.6-5 パイピング生成試験セル（流路長を変化）

- SKB 社の横置き処分孔では、緩衝材だけでなく、Distance ブロックや Filling ブロック、さらにはコンパートメントプラグなどにより、エロージョンに対する性能の担保を目指している。コンパートメントプラグは鋼製であり、ベントナイト系材料を併用することでコンパートメントプラグで区切られた空間を拡散場にすることを実現するものである。SKB-3H では、人工注水するために用いられるが、処分孔を部分的に拡散場にできれば、エロージョンを抑制することにも効果が期待される。このコンパートメントプラグのプラグ形式による止水性効果、及び人工給水の評価を行う（図 13.3.6-6、図 13.3.6-7 参照）。

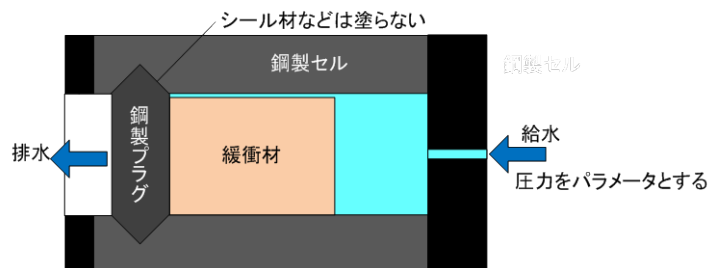


図 13.3.6-6 コンパートメントプラグの止水性効果の検討

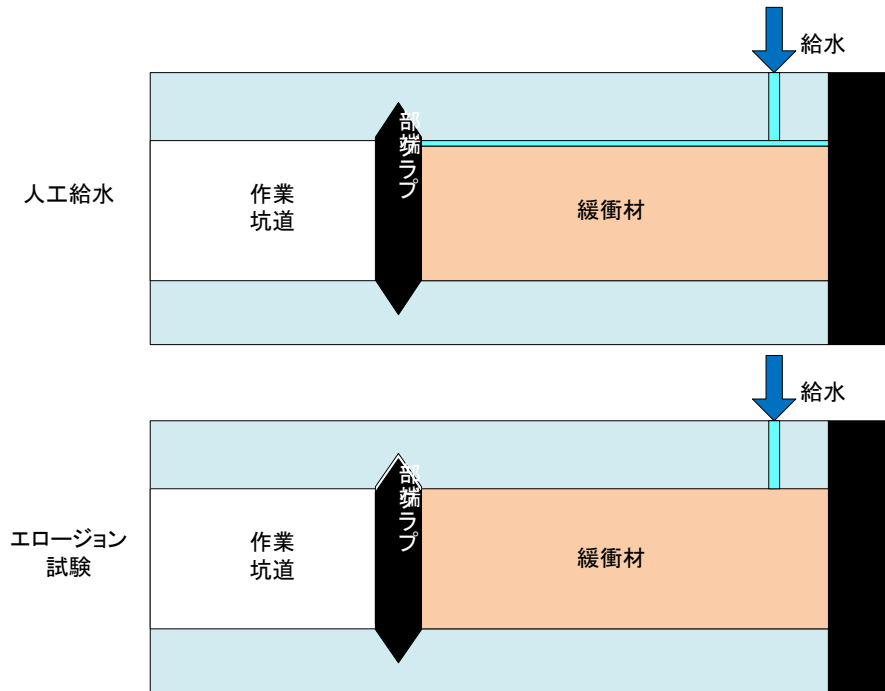


図 13.3.6-7 人工給水効果の検討

- 実際の処分場では、緩衝材よりも周辺の岩盤の方が透水係数は大きく、さらに処分孔の削孔時に EDZ が形成されれば、処分孔内よりも天然バリア内を地下水が流れる可能性が高い。再取出し可能性の観点から、作業トンネルが埋め戻されない場合、地下水は天然バリアからこの作業トンネルに向かって流れることが予想されるが、この際に処分孔の端部プラグ付近の緩衝材を流出させることが懸念される。この対策として作業坑道を早期に埋め戻すことが挙げられるが、再取出し可能性とのトレードオフの関係となる。そこで、作業トンネルを水没させ、周囲の地下水圧と同等の圧力を付与する水封化が折衷案として挙げられる。この水封化については検討されたことがなく、その効果を検証する必要がある（図 13.3.6-8 参照）。

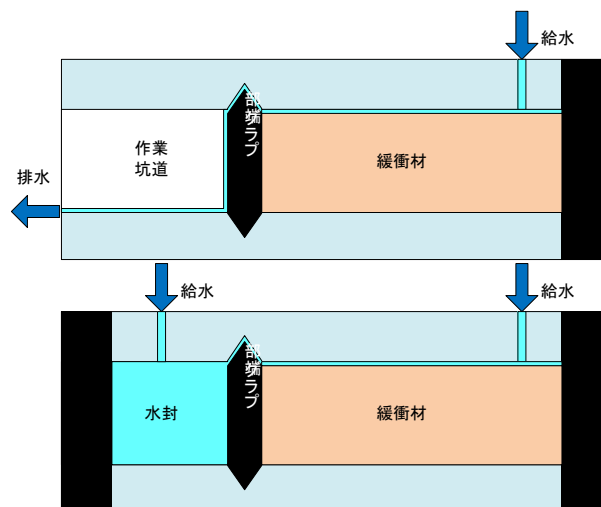


図 13.3.6-8 水封効果の検討

- 再取出し可能性を担保するためには、長期に亘り、作業坑道を埋め戻せない可能性がある。この場合、再取出し可能期間中、ずっと、処分施設を水没させることなく、地下水を処理しなければならないため非常に維持管理にコストがかかる可能性がある。そこで、高度な水密構造を検討し、揚水しなくても坑道内に地下水を流入させない水密構造について検討することは、再取出し可能性、緩衝材の品質確保、コスト低減の観点からも有効である。そこで、一次・二次覆工とベントナイトを併用した水密構造の効果を評価する（図 13.3.6-9 参照）。

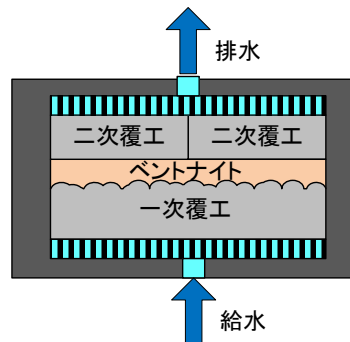


図 13.3.6-9 水密構造評価試験セル

- これまで、縦置き処分方式の緩衝材について、湧水環境下での吹付け工法による緩衝材の施工可能性、および止水性について検討してきた。横置き処分・吹付け方式が湧水環境下で実施可能かどうかについても検討する必要がある。さらに、他の施工方式でも同様の試験を実施する必要がある（図 13.3.6-10 参照）。

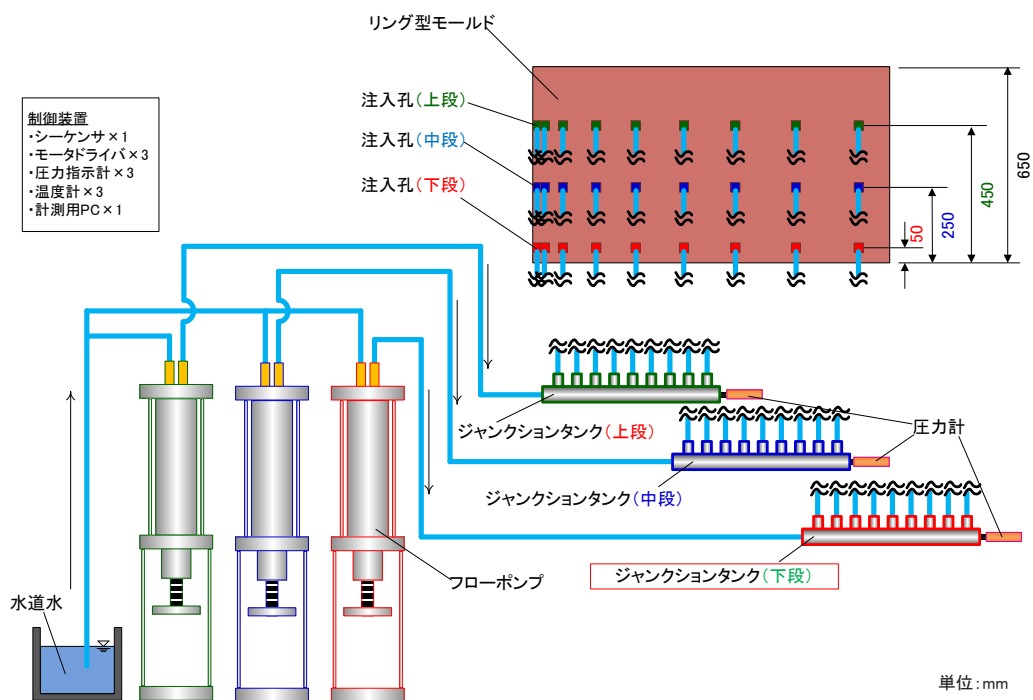


図 13.3.6-10 実験装置系統図

13.3.7 施工品質による密度分布の均質化検討（2次元土槽試験）

(1) 継続試験

- ブロック定置とペレット充填の併用ケースの解体を行い、密度と飽和度の分布を取得する。これにより、飽和後の密度分布を取得する。

(2) 新規試験案

- 模擬オーバーパックと緩衝材を設置して、緩衝材とオーバーパックの隙間、緩衝材と岩盤との隙間のシール状況を把握する。試験後、オーバーパックを発熱させて、熱勾配による飽和度の変化を取得する。

13.3.8 浸潤による間隙空気の移行調査手順

(1) 継続試験

- 給水を継続し、浸潤に伴う間隙空気圧の増加現象を計測する。供試体が十分に飽和したら供試体中央から給気して破過試験を実施する。

(2) 新規試験案

- 処分場を建設するサイトによっては、地下水に溶存ガスが存在する場合も考えられる。現状では、溶存ガスの有無が処分場の成立性に及ぼす影響が定量評価されていないため、溶存ガスを有する地下水場における浸潤挙動に関する試験を実施して、定量評価に資する情報を取得する。

13.3.9 吹付け施工技術の適用性

(1) 継続試験

- 破過試験後の供試体を解体し、乾燥密度や飽和度の分布を取得するとともに、セル近傍の緩衝材の変質状況を定量評価する。さらに、変質部分の緩衝材の膨潤圧を取得して、破過圧と膨潤圧の関係について調べる。

(2) 新規試験案

- 吹付けによって緩衝材を施工して膨潤挙動を取得する。この際に、地中無線を埋め込み土圧や間隙水圧を取得する。地下水として、海水系地下水と降水系地下水を使用する。

13.3.10 地下施設を活用した緩衝材の性能確認

実際の地下施設を活用し、工学規模試験でパイピング／エロージョン挙動を定量的に確認する。幌延地下深層研究所の構内に直径 550mm×深さ 600mm の孔を削孔し、現地の地下水を使ってエロージョン試験を実施した。ケースは実験室における工学規模試験と同様とし、エロー

ジョン量を測定するための蓋を設置する。

13.3.11 人工バリア全体としての設計・施工仕様の策定に資する指標の整備

結晶岩内に処分場を建設する予定のスウェーデン、フィンランドを対象として、以下の3項目について調査を行う。

(1) 人工バリア全体の設計・施工仕様の策定に関する調査・検討

平成26年度は、スウェーデン、フィンランドを対象として基本設計から詳細設計への流れを把握することを目的として、前提条件を整理した。平成27年には、特定のサイトを対象としたD2レポートを分析し、サイト選定後の詳細設計条件を整理する。

(2) 埋め戻し材、プラグの要求品質に関する調査・検討

平成26年度は、スウェーデン、フィンランドを対象として埋め戻し材、プラグの要求品質に関して把握することを目的として、前提条件を整理する。平成27年度から実規模プラグ試験(DOPAS)の測定結果に関する情報を収集し、止水性がどの程度確保されているのか、確認する。

(3) 海外機関との情報の交換と更新

平成26年度は、スウェーデン、フィンランドを対象として処分場の概念であるKBS-3Vと3Hについて最新の情報を取得するとともに、人工注水、グラウトの要求品質に関する調査・検討を行う。

(4) ウォーターマネージメントのための解析的な検討

平成26年度は、幌延深地層研究所の350mの一部の岩盤・水理データを参考に、10ケースのネットワークモデルを作成し、坑道掘削時の湧水量、処分孔掘削時の湧水量を算出し、地下水位低下工法を実施した場合との比較をするための基準値とした。また、ウォーターマネージメントとして処分孔との間に1本地下水位低下用の孔を設置して、地下水位を低下させる工法と掘削影響領域(EDZ)へのグラウトの効果について検討した。

平成27年度は、350m坑道の岩盤水理に関するデータが揃うため、実測湧水量に合わせた境界条件・物性値を再設定する。また、境界条件としての圧力を設定して解析を実施する。これから得られた結果は、処分孔、坑道のパイピング/エロージョン量の算定や、その評価に受け渡すことができる。平成28年度から、処分パネルを想定した止水対策工の効果を評価し、平成29年度には、埋め戻し後のモデルを使って、埋め戻し後の処分坑道や処分孔の通過流量の評価や、埋め戻しプラグの閉鎖技術の効果について評価する。

第13章 参考文献

- [1] Sasakura, T., Kobayashi, I., Sahara, F., Murakami, T., Ohi, T., Mihara, M. and Itoh, H.: Studies on mechanical behavior of bentonite for development of elasto-plastic constitutive model, International Conference on Radioactive Waste Disposal (DisTec 2004), pp.498-507 (2004).
- [2] Olivella S, Gens A, Carrera J and Alonso EE.: Numerical formulation for a simulator (CODEBRIGHT) for the coupled analysis of saline media. Eng Computations 13(7): 87–112 (1996).
- [3] Iizuka, H., Ohta: A Determination Procedure of Input Parameters in Elasto-Viscoplastic Finite Element Analysis, Soils & Foundations, Vol.27, No.3, pp.71-87 (1987).
- [4] Torbjorn Sanden, Lennart Borgesson: Deep repository-engineered barrier system. Piping and erosion in tunnel backfill Laboratory tests to understand processes during early water uptake, SKB Report R-06-72 (2008).