

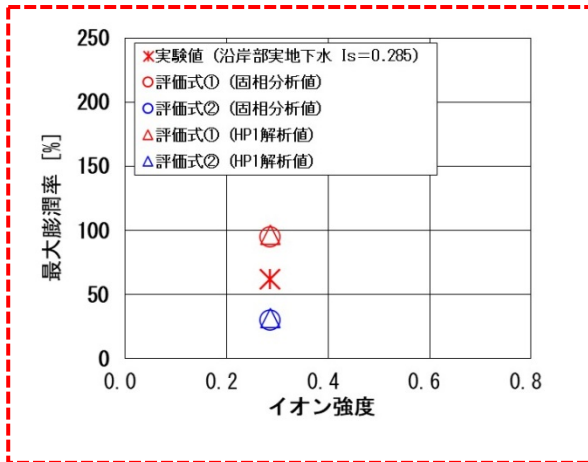
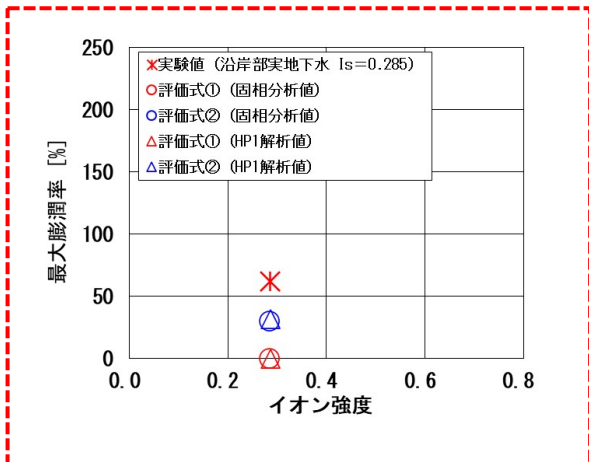
「令和５年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分にに関する技術開発事業（沿岸部処分システム評価確証技術開発）」の報告書の記載内容に誤りがございましたので、下記のとおり訂正いたします。

ページ番号	誤	正
p.303	(ii) イオン交換反応の予測手法を活用した緩衝材の膨潤率の評価手法への適用性の確認 複雑な化学組成の溶液における膨潤率の予測手法として、評価式①及び②の適用性を確認するため、沿岸部地下水（FGB-2 孔_167.70 m～171.78 m、イオン強度 0.285）を通水した膨潤量試験結果の再現計算を評価式①及び②を用いて実施した。評価式①及び②に入力する層間陽イオン量には、SFSA 改良法により求めた固相の吸着陽イオン量を設定した。また、③「イオン交換反応評価のための解析方法の整備」で検討したクニピア F に FGB-2 孔_167.70 m～171.78 m を通水したイオン交換試験の再現解析で得られた吸着陽イオン量を入力値とした計算も合わせて実施した。計算結果と実験値の比較を図に示す。評価式①及び②の詳細な入力パラメータに関しては、AppendixV を参照されたい。 図 4-3-23 から、評価式①の計算結果は実験値の 2 倍程度、評価式②の計算結果は実験値の 2/3 倍程度となり、実験値と概ね整合する結果が得られた。また、評価式①及び②ともに吸着陽イオン量に固相分析値を設定した結果と HP1 での解析値を設定した計算結果は同等の値を示す結果となった。 以上の結果から、評価式①及び②を用いて、沿岸部地下水のような複雑な組成の溶液における膨潤率を予測できる見通しが得られた。また、圧縮ベントナイトにおけるイオン交換反応の予測解析で得られた層間陽イオン量を評価式の入力値として活用することで、ある特定の沿岸部地下水の組成を基に、その地下水での膨潤量を予測する一連の流れを示すことができた。 図 4-3-23 沿岸部地下水を用いた膨潤量試験の最大膨潤率と固相分析値及びイオン交換反応の予測解析結果のそれぞれを入力値とした膨潤特性理論評価式による最大膨潤率	(ii) イオン交換反応の予測手法を活用した緩衝材の膨潤率の評価手法への適用性の確認 緩衝材の膨潤率の評価手法の複雑な化学組成の溶液への適用性を確認するため、(3) ③に記載した沿岸部実地下水（FGB-2 孔_167.70 m～171.78 m、イオン強度 0.285）を用いたイオン交換試験の再現解析で得られた吸着陽イオン量（HP1 解析値）と、膨潤量試験後に SFSA 改良法により取得した固相の吸着陽イオン量（固相分析値）を入力値として、おののに対して評価式①及び②を用いて最大膨潤率を求めた。 図 4-3-23 に HP1 解析値と固相分析値を入力値として評価式①及び②により求めた最大膨潤率と沿岸部実地下水を通水した膨潤量試験により得られた最大膨潤率の結果を示す。 図から吸着陽イオン量に HP1 解析値を入力値した場合の計算結果は、評価式①及び②ともに吸着陽イオン量に固相分析値を入力値した場合のそれと同等の値を示した。 また、評価式①及び②の計算結果は、実験で得られた最大膨潤率と比較して小さいことがわかった。 評価式①の計算では、水の浸透に伴う膨潤が起こらない結果となった。この原因は、Ca²⁺や Mg²⁺が地下水に含まれることによって、図 4-3-20(a)で示したのと同様に、実験値と比較して最大膨潤率が小さく計算されることによるものと考えられた。また、評価式②の計算結果は実験値の 2/3 倍程度となった。 以上の結果から、課題として、陽イオン量やイオン強度の影響等を考慮する必要はあるものの、評価式①及び②を用いて、沿岸部実地下水のような複雑な組成の溶液における最大膨潤率を予測できる見通しが得られた。また、圧縮ベントナイトにおけるイオン交換反応の予測解析で得られた吸着陽イオン量を評価式の入力値として活用することで、ある特定の沿岸部実地下水の組成を基に、その地下水での膨潤量を予測する一連の流れを示すことができた。 図 4-3-23 沿岸部地下水を用いた膨潤量試験の最大膨潤率と固相分析値及びイオン交換反応の予測解析結果のそれぞれを入力値とした膨潤特性理論評価式による最大膨潤率
	303	303

ページ番号	誤	正
p.306	ごとに最大膨潤率の増加の割合が異なることがわかった。一方、イオン強度 0.5 においては、最大膨潤率に対する陽イオン種の影響は見受けられなかった。したがって、上述した高イオン強度の条件で最大膨潤率に対する陽イオン種の影響が見られない傾向は有効粘土密度に依存しないものと推察される。 駿河湾沿岸部の掘削孔から採水したイオン強度の異なる沿岸部地下水を用いて膨潤率を測定した結果、概ね最大膨潤率がイオン強度の平方根に反比例する傾向を示した。塩溶液を使用した室内試験結果は同様な傾向であることから、実際の地下水の傾向と整合することが確認できた。しかし、イオン強度が 0.2 以下の範囲では、概ねイオン強度の平方根に反比例する傾向はあるものの溶液組成の違いに起因すると考えられるバラつきが見られた。一方、イオン強度が 0.7 程度では塩溶液を用いた膨潤量試験と同等の最大膨潤率となり、イオン強度が高くなるほど地下水の組成の影響を受けにくいことも確認できた。 最大膨潤率の予測手法の検討においては、Komine&Ogata（2003）と田中・中村（2005）が提案する緩衝材の膨潤挙動（膨潤率や膨潤圧）の評価式を用いた。これらの評価式に膨潤量試験後の供試体の分析から取得した吸着陽イオン量を設定し、膨潤量試験で得られた最大膨潤率を評価した。その結果、Komine&Ogata（2003）と田中・中村（2005）が提案する評価式をイオン強度に応じて併用することで幅広いイオン強度に対して、陽イオン種ごとのイオン強度と最大膨潤率の関係を概ね予測できることがわかった。さらに、FGB-2 孔_167.70 m～171.78 m の最大膨潤率を、（3）③「イオン交換反応評価のための解析方法の整備」で実施した再現解析により得られたイオン交換後の層間陽イオン組成を膨潤特性理論評価式に入力して算出した結果、実験値に概ね整合する予測値が得られた。このように圧縮ベントナイトのイオン交換反応の予測手法で得られた層間陽イオン組成を上記の膨潤特性理論評価式の入力値として用いることで、沿岸部の様々な組成の地下水において緩衝材の膨潤率を予測できる見通しが得られた。	ごとに最大膨潤率の増大の割合が異なることがわかった。一方、イオン強度 0.5 においては、最大膨潤率に対する陽イオン種の影響は見受けられなかった。したがって、上述した高イオン強度の条件で最大膨潤率に対する陽イオン種の影響が見られない傾向は有効粘土密度に依存しないものと推察される。 駿河湾沿岸部の掘削孔から採水したイオン強度の異なる沿岸部地下水を用いて膨潤率を測定した結果、概ね最大膨潤率がイオン強度の平方根に反比例する傾向を示した。塩溶液を使用した室内試験結果は同様な傾向であることから、実際の地下水の傾向と整合することが確認できた。しかし、イオン強度が 0.2 以下の範囲では、概ねイオン強度の平方根に反比例する傾向はあるものの溶液組成の違いに起因すると考えられるバラつきが見られた。一方、イオン強度が 0.7 程度では塩溶液を用いた膨潤量試験と同等の最大膨潤率となり、イオン強度が高くなるほど地下水の組成の影響を受けにくいことも確認できた。 最大膨潤率の予測手法の検討においては、Komine&Ogata（2003）と田中・中村（2005）が提案する緩衝材の膨潤挙動（膨潤率や膨潤圧）の評価式を用いた。これらの評価式に膨潤量試験後の供試体の分析から取得した吸着陽イオン量を設定し、膨潤量試験で得られた最大膨潤率を評価した。その結果、Komine&Ogata（2003）と田中・中村（2005）が提案する評価式をイオン強度に応じて併用することで幅広いイオン強度に対して、陽イオン種ごとのイオン強度と最大膨潤率の関係を概ね予測できることがわかった。さらに、沿岸部実地下水（FGB-2 孔_167.70 m～171.78 m、イオン強度 0.285）の最大膨潤率を、（3）③に記載した沿岸部地下水を用いたイオン交換試験の再現解析により得られた吸着陽イオン量の HP1 解析値と膨潤量試験により得られた固相分析値を膨潤特性理論評価式のそれぞれを入力値として計算した結果は同等の値を示した。このことから、圧縮ベントナイトのイオン交換反応の予測手法で得られた吸着陽イオン量を上記の膨潤特性理論評価式の入力値として用いることで、沿岸部の様々な組成の地下水において緩衝材の最大膨潤率を予測できる見通しを得ることができた。
	306	306

ページ番号	誤	正
p.635	の文献データを再現できることを確認した。力学的特性の予測手法の検討では、健全なセメントペースト、モルタル、コンクリートの力学的特性の予測手法の妥当性評価や信頼性向上のための検討を行った。これらの検討を基に、様々なセメントを用いたコンクリートや、それらが地下水との接触による化学変質を経た場合の力学的特性を解析するための手法のフローと課題を明確にした。今後、抽出した課題を解決することで、将来的に支保工の設計情報及び環境条件から沿岸部の地下水と接触したコンクリートの時間的・空間的な化学組成及び力学的特性の変化の予測が可能となる。 ② 緩衝材の機能変化に係るデータの拡充 緩衝材の安全機能を確保するための設計要件の一つである自己シール性は、塩水条件を考えた場合に、最も厳しい仕様成立範囲となる。本検討では、この自己シール性に着目し、自己シール性の評価指標である緩衝材の膨潤率を多様な化学組成の溶液条件に応じて予測評価する手法を検討した。 緩衝材の膨潤率は、含有するベントナイトの陽イオン組成に依存するため、ベントナイトと浸潤する溶液との間で起きるイオン交換反応を把握することが重要である。そこで、圧縮したベントナイトにおけるイオン交換反応をシミュレートし、ベントナイトの陽イオン組成を評価できる解析手法として、飽和不飽和浸透流、移流分散、地化学計算を連成した有限要素法解析手法（HP1）の適用性を確認した。また、圧縮したベントナイトに塩溶液を通水するイオン交換反応試験を複数のイオン強度及び乾燥密度の条件で実施し、イオン交換反応の解析の入力値としてイオン交換選択係数を整理した。この圧縮系におけるイオン交換選択係数を上記の解析手法の入力値として設定して、沿岸部地下水を通水したイオン交換反応試験の再現解析を実施した。その結果、ベントナイトの陽イオン組成を概ね再現でき、複雑な化学組成の溶液におけるベントナイトのイオン交換反応を予測する手法として、本解析手法の適用性を確認できた。 緩衝材の膨潤率に関しては、沿岸部の地下水で想定される陽イオンを含む塩溶液を通水した際の膨潤率のデータを複数のイオン強度、乾燥密度の条件で取得し、通水溶液の溶存陽イオン種やイオン強度、乾燥密度の膨潤率に対する影響を把握した。その結果、膨潤率はイオン強度の平方根と反比例の関係があり、特に低イオン強度の範囲（イオン強度が 0.2 以下）で通水溶液の溶存陽イオン種、すなわち、ベントナイトの陽イオン組成の膨潤率に対する影響が大きくなることを把握した。一方、イオン強度が 0.2 より高くなると膨潤率のイオン強度による変化は少なく地下水の組成の影響を受けにくいことも把握した。そこで、緩衝材の膨潤率を予測する手法の検討として、ベントナイトの陽イオン組成を考慮することができる膨潤特性理論評価式（Komine&Ogata2003；Komine&Ogata, 2004；田中・中村, 2005）を用いて、沿岸部地下水の膨潤量試験の再現計算を実施した。この計算では、上記のイオン交換反応の予測解析で得られた沿岸部地下水を通水した際のベントナイトの吸着陽イオン量を入力値とした。再現計算の結果、膨潤量試験で得られた膨潤率を概ね再現するこ	の文献データを再現できることを確認した。力学的特性の予測手法の検討では、健全なセメントペースト、モルタル、コンクリートの力学的特性の予測手法の妥当性評価や信頼性向上のための検討を行った。これらの検討を基に、様々なセメントを用いたコンクリートや、それらが地下水との接触による化学変質を経た場合の力学的特性を解析するための手法のフローと課題を明確にした。今後、抽出した課題を解決することで、将来的に支保工の設計情報及び環境条件から沿岸部の地下水と接触したコンクリートの時間的・空間的な化学組成及び力学的特性の変化の予測が可能となる。 ② 緩衝材の機能変化に係るデータの拡充 緩衝材の安全機能を確保するための設計要件の一つである自己シール性は、塩水条件を考えた場合に、最も厳しい仕様成立範囲となる。本検討では、この自己シール性に着目し、自己シール性の評価指標である緩衝材の膨潤率を多様な化学組成の溶液条件に応じて予測評価する手法を検討した。 緩衝材の膨潤率は、含有するベントナイトの陽イオン組成に依存するため、ベントナイトと浸潤する溶液との間で起きるイオン交換反応を把握することが重要である。そこで、圧縮したベントナイトにおけるイオン交換反応をシミュレートし、ベントナイトの陽イオン組成を評価できる解析手法として、飽和不飽和浸透流、移流分散、地化学計算を連成した有限要素法解析手法（HP1）の適用性を確認した。また、圧縮したベントナイトに塩溶液を通水するイオン交換反応試験を複数のイオン強度及び乾燥密度の条件で実施し、イオン交換反応の解析の入力値としてイオン交換選択係数を整理した。この圧縮系におけるイオン交換選択係数を上記の解析手法の入力値として設定して、沿岸部地下水を通水したイオン交換反応試験の再現解析を実施した。その結果、ベントナイトの陽イオン組成を概ね再現でき、複雑な化学組成の溶液におけるベントナイトのイオン交換反応を予測する手法として、本解析手法の適用性を確認できた。 緩衝材の膨潤率の評価手法の複雑な化学組成の溶液への適用性を確認するため、上記のイオン交換反応の再現解析で得られた沿岸部実地下水（FGB-2 孔_167.70 m～171.78 m、イオン強度 0.285）の吸着陽イオン量（HP1 解析値）と膨潤量試験後に取得した固相の吸着陽イオン量（固相分析値）を入力値として、おのおのに対して膨潤特性理論評価式（Komine&Ogata2003；Komine&Ogata, 2004；田中・中村, 2005）を用いて最大膨潤率を求めた。その結果、吸着陽イオン量に HP1 解析値を入力値した場合の計算結果は、両評価式ともに吸着陽イオン量に固相分析値を入力値した場合のそれと同等の値を示した。このことから、イオン交換反応の予測解析手法と上記の膨潤特性理論評価式を併用することで、任意の化学組成、塩濃度の条件で自己シール性を評価するための緩衝材の膨潤率を予測できる見通しが得られた。
	635	635

ページ番号	誤	正
p.636	とができた。このことから、イオン交換反応の予測解析手法と上記の膨潤特性理論評価式を併用することで、任意の化学組成、塩濃度の条件で自己シール性を評価するための緩衝材の膨潤率を予測できる見通しが得られた。 ③ 緩衝材-オーバーパックの相互作用と緩衝材仕様に関わるデータの拡充 緩衝材-オーバーパックの相互作用と緩衝材仕様に関わるデータの拡充では、沿岸部特有の地下水環境（海水）を考慮し、Na 型ベントナイトに加えて代替オプションとなり得る海水との平衡を考慮したイオン型の異なる材料（Ca 型/Ca 型化ベントナイト等）に着目した検討を行った。すなわち、塩分を含む環境では、①緩衝材中のオーバーパックの変位（移動）挙動、②オーバーパックの変位に伴い緩衝材中に生じるせん断帯の自己修復性等について、特にイオン型の異なるベントナイトではあまり検討されていない。このため、沿岸部特有の地下水環境下であることを考慮した人工バリア性能評価に資するデータの拡充を行うため、要素試験、模型試験、加えて本年度より数値解析を実施した。 要素試験では、令和 5 年度は、令和 4 年まで特定の密度に限定して検討してきた平衡膨潤圧や透水係数に関して、密度依存性を調べるとともに、これまで得られた試験データについて包括的に考察することで、ベントナイト系材料の低透水性発現に関わる現象理解を深めた。その結果、産地が異なるベントナイト間で認められる各性能差に関して、必ずしもイオン型は支配的ではなく、これまでに認識されていたベントナイトの基本的な性状以外の要因が各性能に少なからず影響していることが分かった。また、セメント系材料と反応した海水が緩衝材に浸透することを想定し、ベントナイトの変質反応に伴う透水性や膨潤圧の変化を調べた。その結果、セメント影響が比較的大さい液個比 10：1 の条件では透水性が低下した。一方、セメント影響が比較的小さい液個比 1000：1 の条件では、10：1 の条件と比較して pH は低いものの、海水-セメント反応液により、透水性が変化しない、もしくは、増加することが分かった。 模型試験では、令和 5 年度は、比較的稳定した挙動を示すクニボンドだけでなく、クニゲル V1+砂混合土を用いた試験条件でも安定したデータが取得できるよう、センサーの設置方法や止水方法を改良した上で、オーバーパック変位への緩衝材の材料と廃棄体の熱の影響を確認するための模型試験を行った。その結果、時間経過とともに緩衝材下部から上部に向かって水位および緩衝材応力が上昇していくデータが得られ、より正確な試験が可能になった。その上で、沿岸部の地下水環境を考慮した種々の緩衝材を用いた模型試験によって、オーバーパックの変位(浮上・沈下)にともなう緩衝材の厚み仕様に資する基礎的なデータを拡充することができた。 数値解析では、熱-水理-力学連成解析が可能なコードを用い、緩衝材の材料仕様（海水平衡 Na 型+砂混合土、および/海水平衡 Ca 型）と廃棄体模型の加熱の有無を組み合わせ実施した遠心模型試験を対象に、実規模大の現象の数値解析を実施した。膨潤特性や透水性は要素試験データを有効粘土密度で整理して設定し、基本的な解析条件を統一して全 4	③ 緩衝材-オーバーパックの相互作用と緩衝材仕様に関わるデータの拡充 緩衝材-オーバーパックの相互作用と緩衝材仕様に関わるデータの拡充では、沿岸部特有の地下水環境（海水）を考慮し、Na 型ベントナイトに加えて代替オプションとなり得る海水との平衡を考慮したイオン型の異なる材料（Ca 型/Ca 型化ベントナイト等）に着目した検討を行った。すなわち、塩分を含む環境では、①緩衝材中のオーバーパックの変位（移動）挙動、②オーバーパックの変位に伴い緩衝材中に生じるせん断帯の自己修復性等について、特にイオン型の異なるベントナイトではあまり検討されていない。このため、沿岸部特有の地下水環境下であることを考慮した人工バリア性能評価に資するデータの拡充を行うため、要素試験、模型試験、加えて本年度より数値解析を実施した。 要素試験では、令和 5 年度は、令和 4 年まで特定の密度に限定して検討してきた平衡膨潤圧や透水係数に関して、密度依存性を調べるとともに、これまで得られた試験データについて包括的に考察することで、ベントナイト系材料の低透水性発現に関わる現象理解を深めた。その結果、産地が異なるベントナイト間で認められる各性能差に関して、必ずしもイオン型は支配的ではなく、これまでに認識されていたベントナイトの基本的な性状以外の要因が各性能に少なからず影響していることが分かった。また、セメント系材料と反応した海水が緩衝材に浸透することを想定し、ベントナイトの変質反応に伴う透水性や膨潤圧の変化を調べた。その結果、セメント影響が比較的大さい液個比 10：1 の条件では透水性が低下した。一方、セメント影響が比較的小さい液個比 1000：1 の条件では、10：1 の条件と比較して pH は低いものの、海水-セメント反応液により、透水性が変化しない、もしくは、増加することが分かった。 模型試験では、令和 5 年度は、比較的稳定した挙動を示すクニボンドだけでなく、クニゲル V1+砂混合土を用いた試験条件でも安定したデータが取得できるよう、センサーの設置方法や止水方法を改良した上で、オーバーパック変位への緩衝材の材料と廃棄体の熱の影響を確認するための模型試験を行った。その結果、時間経過とともに緩衝材下部から上部に向かって水位および緩衝材応力が上昇していくデータが得られ、より正確な試験が可能になった。その上で、沿岸部の地下水環境を考慮した種々の緩衝材を用いた模型試験によって、オーバーパックの変位(浮上・沈下)にともなう緩衝材の厚み仕様に資する基礎的なデータを拡充することができた。 数値解析では、熱-水理-力学連成解析が可能なコードを用い、緩衝材の材料仕様（海水平衡 Na 型+砂混合土、および/海水平衡 Ca 型）と廃棄体模型の加熱の有無を組み合わせ実施した遠心模型試験を対象に、実規模大の現象の数値解析を実施した。膨潤特性や透水性は要素試験データを有効粘土密度で整理して設定し、基本的な解析条件を統一して全 4
	636	636

ページ番号	誤	正
p.906	(3)イオン交換反応の予測手法を活用した緩衝材の膨潤率の評価手法への適用性の確認 沿岸部実地下水 (FGB-2 孔 167.70 m～171.78 m から採水した地下水、イオン強度 0.285) を用いた膨潤量試験の試験終了後の供試体の吸着陽イオン量 (図 4-3-2(h)) を評価式①及び②の入力値として計算を実施した。また、クニピア F に沿岸部地下水 (FGB-2 孔 167.70 m～171.78 m) を通水したイオン交換反応試験の再現解析で得られた固相の吸着陽イオン量 (報告書本編 図 4.3-10) を評価式①及び②の入力値として計算した。これらの評価式①および評価式②の計算結果と実験値を比較し、緩衝材の膨潤率 (最大膨潤率) を評価するための手法としての適用性を確認した。 図 4-4-6 に上述の計算結果を実験値と比較して示す。図 4-4-6 から固相分析値と解析値を入力パラメータとして用いて求めた計算結果は評価式①と評価式②のいずれにおいても同等の値を示した。また、実験値と比較した場合、評価式①を用いた計算結果は 2 倍程度、評価式②を用いた場合、2/3 程度の実験値との違いがあるものの、イオン交換反応の予測手法を活用することにより、膨潤量試験を実施せず、また、試験後の供試体の固相分析値を取得することなく、膨潤率を予測できることが可能であることが示された。  図 4-4-6 沿岸部地下水を用いた膨潤量試験の最大膨潤率と固相分析値及びイオン交換反応の予測解析結果のそれぞれを入力値とした膨潤特性理論評価式による最大膨潤率 (初期有効粘土密度 1.37 Mg/m³)	(3)イオン交換反応の予測手法を活用した緩衝材の膨潤率の評価手法への適用性の確認 緩衝材の膨潤率の評価手法の複雑な化学組成の溶液への適用性を確認するため、沿岸部実地下水 (FGB-2 孔 167.70 m～171.78 m、イオン強度 0.285) を用いたイオン交換試験の再現解析で得られた吸着陽イオン量 (HP1 解析値) (報告書本編 図 4.3-10) と、膨潤量試験後に SFSA 改良法により取得した固相の吸着陽イオン量 (固相分析値) (図 4-3-3(d)) を入力値として、おのおのに対して評価式①及び②を用いて最大膨潤率を求めた。 図 4-4-6 に HP1 解析値と固相分析値を入力値として評価式①及び②により求めた最大膨潤率と沿岸部実地下水を通水した膨潤量試験により得られた最大膨潤率の結果を示す。 図から吸着陽イオン量に HP1 解析値を入力値した場合の計算結果は、評価式①及び②ともに吸着陽イオン量に固相分析値を入力値した場合のそれと同等の値を示した。 また、評価式①及び②の計算結果は、実験で得られた最大膨潤率と比較して小さいことがわかった。 評価式①の計算では、水の浸透に伴う膨潤が起こらない結果となった。この原因は、Ca²⁺や Mg²⁺が地下水に含まれることによって、図 4-4-2(c)と(d)で示したのと同様に、実験値と比較して最大膨潤率が小さく計算されることによるものと考えられた。また、評価式②の計算結果は実験値の 2/3 倍程度となった。 以上の結果から、課題として、陽イオン量やイオン強度の影響等を考慮する必要があるものの、評価式①及び②を用いて、圧縮ベントナイトにおけるイオン交換反応の予測解析で得られた吸着陽イオン量を評価式の入力値として活用することで、試験後の供試体の固相分析値を取得することなく、膨潤率を予測できることが可能であることが示された。  図 4-4-6 沿岸部実地下水を用いた膨潤量試験の最大膨潤率と固相分析値及びイオン交換反応の予測解析結果のそれぞれを入力値とした膨潤特性理論評価式による最大膨潤率 (初期有効粘土密度 1.37 Mg/m³)
	906	906