

鋼管矢板継手の内部空間を活用した 遮水浄化促進技術に関する解析的検討

稲積 真哉¹・木村 亮²・角田 敏光³

¹正会員 京都大学助教 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: inazumi.shinya.3c@kyoto-u.ac.jp

²正会員 京都大学教授 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: kimura.makoto.8r@kyoto-u.ac.jp

³正会員 NTT西日本 (〒540-8511 大阪市中央区馬場町3-15)

E-mail: toshi_1986_0320@yahoo.co.jp

本論文では、建設時から将来にわたって廃棄物処分場の環境安全性を持続ならびに保障するため、処分場内の水溶性有害物質の封じ込めに加え、水溶性有害物質の浄化促進をも期待できる鋼管矢板遮水壁を解析的に提案している。具体的には、有害物質の封じ込めおよび浄化促進が求められる海面廃棄物処分場に対して、廃棄物埋立護岸の一つである鋼管矢板遮水壁の継手箇所にて遮水・浄化促進技術を適用し、有害物質の封じ込めおよび浄化促進を図り、更なる環境安全性を追求するものである。本論文の成果として、鋼管矢板遮水壁の継手部材であるH-H継手に遮水・浄化促進技術を適用することで、処分場内の水溶性有害物質の封じ込め、ならびに浄化促進機能を有する鋼管矢板遮水壁の構築が可能であることを明らかにした。

Key Words : containment, H-H joint, landfill, leachate control, steel pipe sheet pile cutoff wall

1. はじめに

(1) 海面廃棄物処分場にて要求される性能

我が国では従来、山間谷地部の水源地帯に比較的小規模な廃棄物処分場（以後、“内陸廃棄物処分場”と称する）を建設することが一般的であった。しかしながら、近年では水源地の保全を図り、処分場からの浸出水による地下水汚染を防ぐため、都市部の港湾域に大規模展開する海面廃棄物処分場が建設される例が増えている¹⁾。

海面廃棄物処分場では、港湾保全との整合を図りつつ廃棄物を埋立処分する空間を確保するため、廃棄物埋立護岸が建設される（図-1 参照）。この廃棄物埋立護岸には地震、波浪、高潮および津波等の海域特有の諸外力から埋立地を護る護岸機能とともに、処分場内からの水溶性有害物質を含有し得る浸出水が海域へ流出することを防ぐ遮水工としての機能（以後、“封じ込め”と称する）が要求される²⁾。近年では、大水深施工が可能な継手を有する鋼管矢板が、その施工性および経済性の観点から廃棄物埋立護岸として海面廃棄物処分場を中心に広く用いられている。以後では、鋼管矢板によって構築される廃棄物埋立護岸（側面遮水工）を“鋼管矢板遮水

壁”と称する。

鋼管矢板が初めて矢板式岸壁に用いられた 1960 年代以来、処分場内に存在する水溶性有害物質の流出に多大な影響を及ぼす継手箇所に関しては様々な取組みがなされ、その結果、継手箇所の遮水性能は著しい進歩を遂げている³⁾。しかしながら、いずれの取組みも継手箇所の透水係数を低下させる議論に終始しており³⁾、長期的にみると、海面廃棄物処分場における鋼管矢板遮水壁の継手箇所からの水溶性有害物質の流出量の低減は図れてい

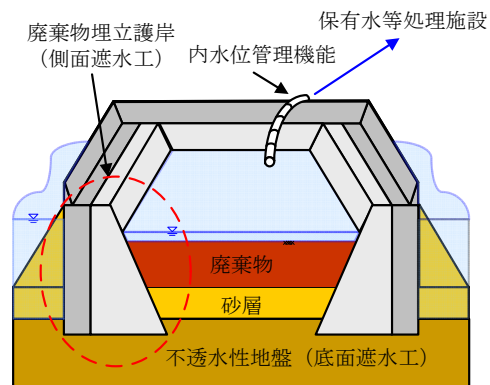


図-1 海面廃棄物処分場における廃棄物埋立護岸

るものの、半永久的な封じ込めには至っていないのが現状である。

海面廃棄物処分場の建設に際しては、上述の側面のみならず底面の遮水工構造に対しても水溶性有害物質の封じ込め機能が求められている。さらに、海面廃棄物処分場では、内陸廃棄物処分場のような浸出水集排水設備(図-2 参照)の設置が義務付けられていない²⁾。そのため、海面廃棄物処分場の多くは、処分場内に存在する水溶性有害物質の浄化を促進する能力を有していない。すなわち、海面廃棄物処分場において埋め立てられた廃棄物中に存在する水溶性の有害物質は、廃棄物処分場の封じ込め概念によって半永久的に管理されることになる。なお、本論文では廃棄物処分場における埋立廃棄物層から水溶性有害物質が除去されることを「浄化」として定義している。一方、廃棄物を埋め立てることによって造成された海面廃棄物処分場は、港湾機能や都市機能などのための用地として利用(以後、「跡地利用」と称する)するという目的も有している⁴⁾。そのため、浸出水集排水設備を有さない処分場において封じ込められた状態で存在する水溶性有害物質は、海面廃棄物処分場の跡地を利用する際に障害をきたすことも十分考えられる。よって、海面廃棄物処分場の建設から跡地利用に至るライフサイクルを考慮した場合、処分場内に存在する水溶性有害物質の封じ込め、ならびに水溶性有害物質の浄化促進技術についても検討する必要があると考えられる。

次節以降では、海面廃棄物処分場にて要求される性能である水溶性有害物質の「封じ込め」および「浄化促進」に関する課題を具体的に説明するとともに、それら課題に対する解決策を提案する。

(2) 有害物質の封じ込め

側面および底面遮水工に求められる遮水性能の基準として、不透水性地盤が存在しない箇所については厚さ50 cm以上、且つ透水係数 1.0×10^{-8} m/s以下の遮水工を設置しなければならない³⁾。しかしながら、高い遮水性能を有する側面・底面遮水工を構築することによって廃棄物浸出水の発生量を低減することは可能であっても、廃棄物浸出水の発生を完全に阻止する側面・底面遮水工を建設することは技術的に困難である。さらに、側面および底面遮水工の遮水性能が透水係数で規定されており、概念的にも水溶性有害物質の封じ込めを達成することは不可能であると考えられる。すなわち、現時点においては廃棄物処分場に起因する周辺環境の汚染を完全に阻止できていない。

海面廃棄物処分場における水溶性有害物質の完全な封じ込めを達成するためには、透水係数で規定されている現在の遮水性能に対して、概念的な部分から転換を図る必要があると考えられる。

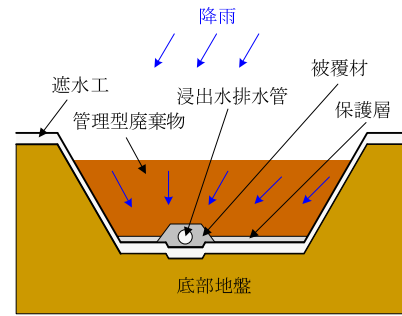


図-2 内陸処分場における集排水設備

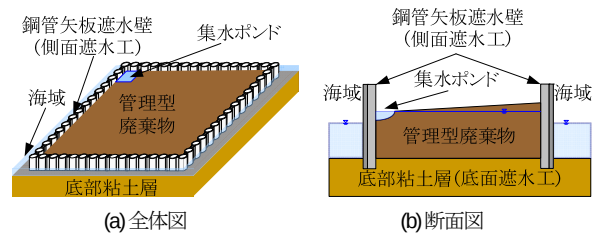


図-3 海面廃棄物処分場における集水ポンド

(3) 有害物質の浄化促進

廃棄物処分場における浸出水集排水設備は、廃棄物内の有害物質の安定化を図る場合に重要な役割を担っている。しかしながら、海面廃棄物処分場においては、底面遮水工として処分場建設以前から原地盤として元来堆積した自然体積粘土層を利用することが一般的であり、浸出水集排水設備の水中施工が困難であることから、浸出水集排水設備の設置が義務付けられていない²⁾。近年では、海面廃棄物処分場における廃棄物浸出水の集排水設備として、処分場内に集水ポンドが設置されることがある(図-3参照)。しかしながら、処分場内に集水ポンドを設置した場合、処分場の埋立容量が低減することになる。近年の処分場の残存容量の逼迫を考慮すると、集水ポンドの設置については議論の余地が残されている。そのような背景の下、現在、多数の海面廃棄物処分場では浸出水を集排水するシステムが確立されていない。すなわち、海面廃棄物処分場の大部分は廃棄物浸出水に含有される有害物質を浄化する能力を有しておらず、処分場内に存在する有害物質は側面・底面遮水工構造の遮水・封じ込め性能に応じて処理・保管されている。よって、海面廃棄物処分場にて保管されている水溶性有害物質の浄化を促進するためには、内陸廃棄物処分場にて実施されているような、廃棄物浸出水を効率的に集排水する設備の導入が必要である。

本論文では、建設時から将来にわたって廃棄物処分場の環境安全性を持続ならびに保障するため、鋼管矢板部材であるH-H継手に「遮水・浄化促進」技術を導入する

ことで、海面廃棄物処分場内における水溶性有害物質の封じ込めに加え、水溶性有害物質の浄化促進をも期待できる鋼管矢板遮水壁の構築を提案している。

2. H-H継手を活用した遮水・浄化促進技術

前章では、海面廃棄物処分場における水溶性有害物質の封じ込めおよび浄化促進について紹介するとともにそれらが抱える課題について述べた。

本章では、海面廃棄物処分場の封じ込めに対して重要な役割を担う側面遮水工の一種である鋼管矢板遮水工を紹介するとともに、鋼管矢板遮水工部材である H-H 継手を有効活用した遮水・浄化促進技術を提案する。

(1) 従来型継手と遮水処理

海面廃棄物処分場では、L-T 継手、P-P 継手および P-T 継手など種々の形状を有する鋼管矢板部材が互いに継手を嵌合しつつ、鋼管矢板遮水工として連続的に打設される(図-4(a), (b), (c)参照)。しかしながら、嵌合した継手内部には通水空間が形成され、継手箇所を廃棄物浸出水が流出する危険性は極めて高い。そこで、鋼管矢板遮水壁の構築では、継手箇所の遮水性能を高める対策(遮水処理)を施さなければならない。

L-T 継手、P-P 継手および P-T 継手に対する遮水処理では、鋼管矢板の打設後に継手空間内へ低透水性の袋詰めモルタルやアスファルトを充填することで継手箇所の透水係数を低下させる工法が一般的である。また、継手の構造に対する遮水処理工法として、P-T 継手内へモルタル充填とともに漏洩防止ゴム板を取り付け、スリット入り鋼管を用いた改良型 P-T 継手(図-4(d)参照)が開発され、袋詰めモルタルを充填した既存 P-T 継手と比較して高い遮水性能を発揮できるとされている⁹⁾。

維持管理・補修について考慮すると、上述の遮水処理では施工不良等によって水みちが生じた場合、継手の深度方向に対してモルタル等が充填されているため、水みちの発生箇所を発見するのは困難である(図-5 参照)。さらに、水みちの発生箇所をセンサー等により特定できたとしても、水みちに対する補修作業に困難が伴うことは想像に難くない。すなわち、50年あるいは100年などの長期にわたる供用を考慮した場合、遮水性能が低下した場合の維持管理・補修が困難な P-P、P-T、L-T および改良型 P-T 継手は、多くの問題を内包していると考えられる。

(2) H-H 継手を施した連結鋼管矢板

前節では P-P、P-T、L-T および改良型 P-T に代表される従来型継手を有する鋼管矢板遮水壁が抱える課題につ

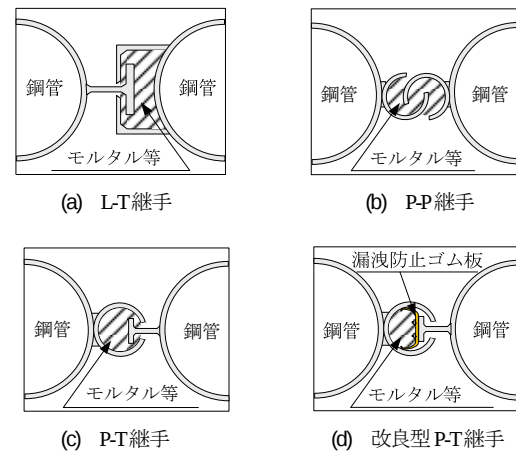


図-4 従来型継手と遮水処理

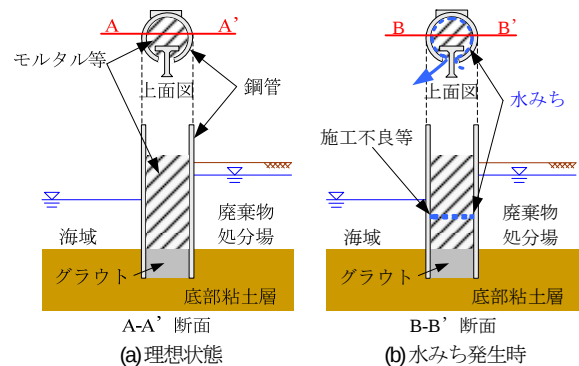


図-5 低透水性材料を充填する遮水処理の課題(例:P-T継手)

いて述べた。このような種々の課題を解決すべく、近年、「H-H 継手」ならびに「連結鋼管矢板」と呼ばれる全く新しい鋼管矢板部材が開発された⁶⁾⁷⁾⁹⁾。

H-H 継手は異なる規格の2つのH鋼を嵌合することで継手箇所を形成するものであり、2つの独立したフランジ部ならびに継手内部の空洞空間で構成される。一方、連結鋼管矢板とは、2本の鋼管をH鋼で剛結した建材であり、施工性に優れているという特徴を有している。

H-H 継手に対する遮水処理は、互いのH鋼フランジ接触面に形成される8~11 mmの隙間を有するフランジ部に膨潤性止水材を接触面に塗布・接着することで遮水機能を担保する(図-6 参照)⁹⁾。さらに、膨潤性止水材により遮水処理が施されたH-H 継手の内部には200×200 mm程度の空洞空間が形成され、H-H 継手フランジ部の遮水特性に応じて空洞空間を有効活用することが可能である。なお、膨潤性止水材が塗布・接着されたH-H 継手内部の土砂洗浄は、確実に実施できることを既往の知見から実証されている⁷⁾。

H-H 継手を施した連結鋼管矢板の遮水性能について、これまでに表-1 に示した種々の条件下で透水試験が実

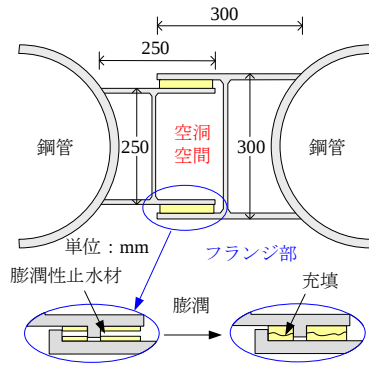


図-6 膨潤性止水材による遮水処理を施した H-H 継手

表-1 H-H 継手の遮水性能に対する既往の対象項目

影響要因	パラメータ	換算透水係数 k_e (作用水圧: 0.05 MPa)
止水材の厚み	厚み	$k_e \leq 1.0 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ (遮水工基準: $k_e \leq 1.0 \times 10^{-8} \text{ m/s}$)
止水材の位置	両面, 片面	
止水材の劣化	膨潤体膜強度	
止水材の欠損	欠損率	
海域の水質	塩水濃度	
土砂等の混入	混入率	
潮汐	乾湿繰返し回数	
地震	繰返しせん断回数	

施されている^{9,70)}。例えば、海面廃棄物処分場において考慮しなければならない作用水圧 0.05 MPa (水頭差 5 m) 以下であれば、H-H 継手を施した連結鋼管矢板は人工海水および淡水を用いた環境において同程度の遮水性能を発揮し、接着する膨潤性止水材の厚さが 1, 2 および 3 mm のいずれにおいても廃棄物処分場の遮水工基準である換算透水係数 $k_e \leq 1.0 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ を満足することが明らかとされている⁹⁾。ここで、継手を介する鋼管矢板の遮水性能は継手箇所および鋼管を一体とみなし、鋼管矢板壁を厚さ 0.5 m の均一な透水層 (遮水層) として換算した換算透水係数 k_e によって評価されることが一般的である⁹⁾。なお、H-H 継手を施した連結鋼管矢板の遮水性能は膨潤性止水材に依存しており、供用の経過とともに膨潤性止水材の劣化が発生し、劣化の進行に伴って遮水性能の低下が発生することは十分考えられる。

(3) H-H 継手の空洞空間を活用した遮水・浄化技術

水溶性有害物質を含んだ廃棄物浸出水が処分場内から鋼管矢板遮水壁を通過して処分場外へ流出する場合、H-H 継手内部の空洞空間を必ず通過しなければならない (図-7(a), (b)参照)。したがって、H-H 継手内部の空洞空間を有効活用することで、遮水・浄化促進機能を有する鋼管矢板遮水工を構築することが可能であると考えら

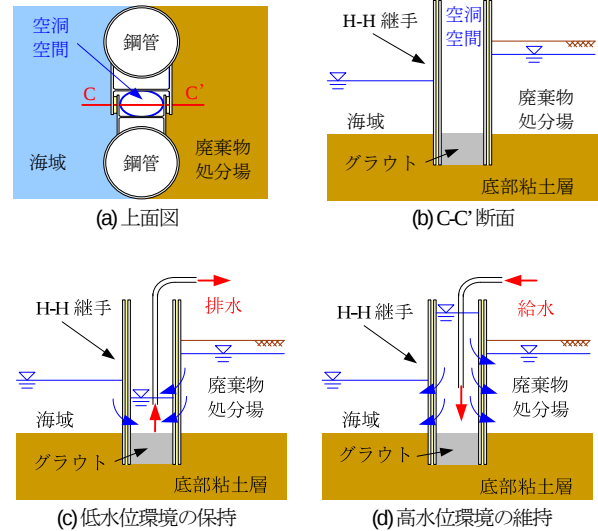


図-7 遮水・浄化促進技術 (H-H 継手)

れる。

H-H 継手内部の空洞空間を有効活用した技術として、(i)モルタル等を充填する、(ii)低水位環境を保持する (図-7(c)参照) および(iii)高水位環境を維持する (図-7(d)参照) の 3 つの技術が考えられる。(i)モルタル等を充填する技術は従来の継手の遮水処理と同様に、H-H 継手内部の空洞空間に低透水性のモルタル等を充填することで水みちの発生を防ぐ工法である。(ii)低水位環境を保持する技術は、H-H 継手内部の空洞空間に低水位環境を形成することで、継手内部の空洞空間へ外部から水が流入する環境となり、流入した水をポンプ等で集排水することで遮水する工法である。また、(ii)低水位環境を保持する技術では、水溶性有害物質を含有し得る廃棄物からの浸出水を揚水装置により排水するため、廃棄物の浄化を図ることも期待できる。(iii)高水位環境維持する技術では、H-H 継手内部の空洞空間の水位を予め周囲より高めておくことで、継手内部の空洞空間から外部へ流出する動水勾配を形成する遮水技術である。

維持補修に関して考慮すると、(i)モルタル等を充填する工法は内部空間をモルタル等の不透水性の材料を充填するため、従来の継手と同様、水みちに対する補修が困難であることが予想される。(ii)低水位環境を保持する工法および(iii)高水位環境を維持する工法では、いずれの方法においても継手内部の空洞空間は簡便に取り除くことが可能な水等が存在しているのみであり、膨潤性止水材の劣化による遮水性能の低下等の長期的な管理、それに伴う補修は比較的容易に実施できる。また、空洞空間に低水位環境を保持あるいは高水位環境を維持する技術では、空洞空間の水位の上昇あるいは下降の程度によって海域側および処分場側 H-H 継手フランジ部の透水

係数をモニタリングすることが可能である．例えば，低水位環境を保持する技術を適用した場合，空洞空間の水位上昇の程度が著しく大きければ，海域側および処分場側 H-H 継手フランジ部両方あるいは片方に遮水性能の低減が生じていると考えられる．すなわち，空洞空間の水位の変化から H-H 継手フランジ部が設計どおりの遮水性能を維持しているか否かを確認することもできる．

海面廃棄物処分場の跡地利用を考慮に入れた場合，海面廃棄物処分場は有害物質の完全な封じ込め機能および優れた浄化機能を有することが望ましい．すなわち，H-H 継手を海面廃棄物処分場の鋼管矢板遮水壁の継手として採用した場合には，遮水・浄化促進機能を有することが望ましい．よって，本論文では H-H 継手の内部空間を活用した諸技術の内，(ii)低水位環境を保持する技術に着目して議論を進める．

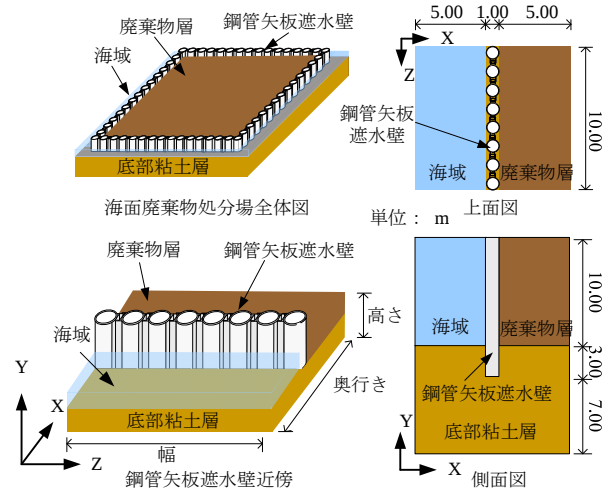


図-8 解析対象断面

3. 遮水・浄化促進機能を有する鋼管矢板遮水壁

本章では，H-H 継手内部の空洞空間に低水位環境を保持した場合の水溶性有害物質の封じ込め性能および浄化促進性能を検討する．具体的には，H-H 継手内部の空洞空間に低水位環境を保持した場合の H-H 継手の浄化促進性能を 3次元浸透・移流分散解析を実施することで議論する．

(1) 解析対象断面および解析条件

本解析では，H-H 継手の封じ込め性能および浄化促進性能を検討するにあたって，飽和・不飽和状態の浸透，および移流分散に基づく地下水での水，溶質の移動を表現する有限要素解析コード「Dtransu-3D・EL」¹⁰⁾を用いている．

図-8 は本解析において設定した基本的な海面廃棄物処分場の概要を示している．設定した海面廃棄物処分場は，海面廃棄物処分場における鋼管矢板遮水壁ならびに遮水壁近傍における構成層（廃棄物層および自然堆積粘土層）の一部分に着目したものである．図-8 に示す処分場では，廃棄物層下端ならびに海域の底部には粘土層が堆積しており，自然堆積粘土層は海面廃棄物処分場における底面遮水工としての役割を果たしている．なお，本解析では，鋼管矢板遮水壁は自然堆積粘土層内に 3 m 根入れされていると仮定している．

海面廃棄物処分場では，基本的に処分場内外の水位差が 2 m を超えないように管理されている²⁾．ここで，本解析では上記管理水位を考慮するため，海域上面部に全水頭 $H=0$ m，廃棄物層上面部には全水頭 $H=2$ m を境界条件として与えている．なお，本解析における処分場の境界端は全て非排水条件である．現在，廃棄物の大部分

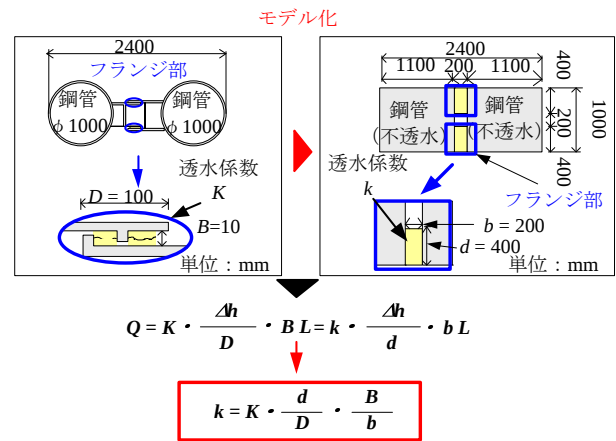


図-9 H-H継手フランジ部のモデル化

は焼却処理された後，焼却残渣として廃棄物処分場に埋め立てられる．したがって，近年建設された廃棄物処分場では，焼却残渣に含有され得る重金属類が主な環境汚染物質となっている．また，重金属類は水溶性であることから，海面廃棄物処分場から漏水が生じた場合，漏水とともに移流分散作用によって処分場外へ重金属類が流出する可能性がある．よって，本解析では廃棄物層を汚染源と仮定し，有害物質（重金属類）濃度 $C=1$ を，廃棄物層以外の領域には有害物質濃度 $C=0$ を初期条件として与えており，時間の経過に伴って濃度は変化する．

本解析では，H-H 継手の封じ込め性能および浄化促進性能を評価することに際し，図-9 に示すとおりモデル化した H-H 継手フランジ部を用いている．解析を実施する際には，H-H 継手フランジ部を通過して内部の空洞空間へ流入する流量が等しくなるように H-H 継手フランジ部の透水係数を設定している（式(1)，(2)参照）．具体的には，現実の H-H 継手フランジ部とモデル化し

た H-H 継手フランジ部を通過する水の体積が同じとなるように透水係数を換算しているため、H-H 継手内部の空洞空間に流入する水の体積は等しくなっており、現実 に即したシミュレーションが可能である。

$$Q = K \cdot \frac{\Delta h}{D} \cdot B L = k \cdot \frac{\Delta h}{d} \cdot b L \quad (1)$$

$$k = K \cdot \frac{d}{D} \cdot \frac{B}{b} \quad (2)$$

ここで、 Q ：流量 (m^3/s)、 K ：透水係数 (m/s)、 B ：H-H 継手フランジ部における透水箇所の幅 (mm)、 L ：H-H 継手の長さ (mm)、 D ：H-H 継手フランジ部の透水長 (mm)、 Δh ：水頭差 (m)、 k ：モデル化後の透水係数 (m/s)、 b ：モデル化後の H-H 継手フランジ部の幅 (mm)、 d ：モデル化後の H-H 継手フランジ部の透水長 (mm) である。

(2) 解析モデル

本解析では、廃棄物層の影響が底部粘土層へ及ばない場合ならびに影響が及ぶ場合の 2 パターンの解析モデルを用いて検討を実施している。具体的には、浄化促進性能の評価では、廃棄物層の影響が底部粘土層へ及ばない「浄化促進モデル I」(図-10 参照)、ならびに影響が及ぶ「浄化促進モデル II」(図-11 参照)を用いることにより検討している。さらに、封じ込め性能の検討でも、廃棄物層の影響が底部粘土層へ及ぶ浄化促進モデル II (図-11 参照)を用いている。なお、浄化促進モデル I および浄化促進モデル II の導出の流れを図-12 に示している。なお、本解析では、H-H 継手一箇所を対象としているため、中央に位置する H-H 継手以外の鋼管ならびに継手箇所は全て不透水且つ不拡散としている。

浄化促進モデル I (図-10 参照)では、継手内部の空洞空間の水位を一定とした条件で H-H 継手の浄化促進性能を評価するため、廃棄物層および処分場側 H-H 継手フランジ部の 2 つから構成される断面を用いている。ここで、浄化促進モデル I (図-10 参照)における H-H 継手内部の空洞空間に保持される水位は、処分場側 H-H 継手フランジ部の空洞空間側端に全水頭を設定することで表現している。一方、浄化促進モデル II (図-11 参照)は、海域、廃棄物層、海域側・処分場側 H-H 継手フランジ部 (以後、両方をまとめて“H-H 継手フランジ部”と称する) および底部粘土層から構成されている。浄化促進モデル II (図-11 参照)においても浄化促進モデル I と同様、H-H 継手内部の空洞空間に保持される水位は海域側・処分場側 H-H 継手フランジ部の空洞空間側端に全水頭を設定することで表現している。また、H-H 継手内部の空洞空間の最深部から 3 m の深度まではグラウト遮水処理が施されているものとしている。さらに、

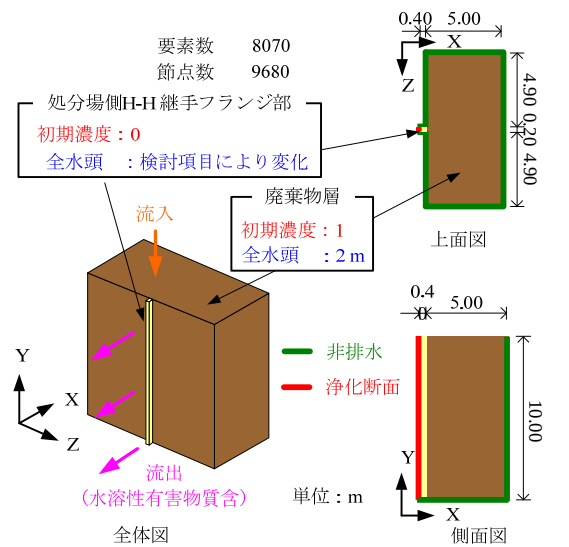


図-10 浄化促進モデル I

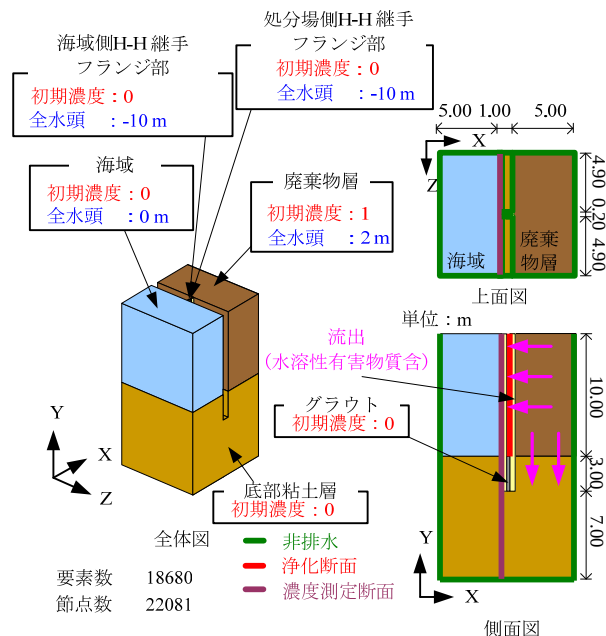


図-11 浄化促進モデル II

各モデルにおいて各構成層に与えた材料特性は、表-2 および表-3 に示すとおりである。ここで、本論文では各構成層の水平および鉛直方向の透水係数が有害物質の封じ込めおよび浄化促進性能に与える影響を検証する。そのため、各構成層の透水係数以外の材料特性は一定としている¹⁰⁾。具体的には、有効間隙率について、粘土層のそれは一般的に 0.4 程度と考えられているが¹⁰⁾、本解析では実流速がより速い状況である危険側を想定し底部粘土層には 0.65 を、H-H 継手フランジ部およびグラウトについては 0.1 を、廃棄物層ならびに海域については 1 を与えた。次に、縦・横分散長に関しては、一般的に適

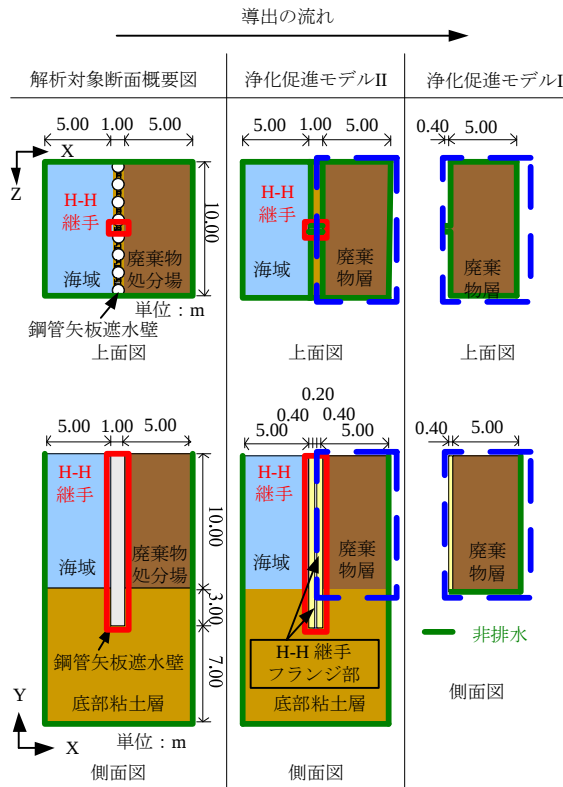


図-12 解析断面導出の流れ

用される値である 0.1 m, 0.01 m に各々設定した。続いて、分子拡散係数に関して、重金属類の分子拡散係数は一意に求まらないため水と同様 $1.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ とした。最後に、吸着係数については、重金属類の吸着能力が高いと考えられる底部粘土層では $R = 2$ 、底部粘土層以外の層では $R = 1$ とした。

(3) 有害物質の封じ込め性能および浄化促進性能

本節では、H-H 継手フランジ部に種々の透水係数を与えた場合の浄化促進性能について検討を実施する。また、海域側および処分場側両方の H-H 継手フランジ部が $k=1.0 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ の遮水性能を有する場合において、種々の条件をパラメトリックに変化させた場合の H-H 継手の浄化促進性能について浄化促進モデル I (図-10 参照) および浄化促進モデル II (図-11 参照) を用いて比較・検討する。さらに、H-H 継手に遮水・浄化促進機能を適用した場合の有害物質の封じ込め性能は浄化促進モデル II を用いることで検証している。

本解析では、処分場側 H-H 継手フランジ部の空洞空間側端 (浄化断面) を通過する有害物質 (重金属類) の質量フラックス (単位面積および単位時間当りに通過する物質質量) によって H-H 継手の浄化促進性能を評価している (図-10 および図-11 参照)。さらに、H-H 継手の浄化促進性能については、浄化促進性能比を用いること

表-2 材料定数 (浄化促進モデル I)

材料	単位	廃棄物層	処分場側 H-H 継手フランジ部
透水係数 (水平方向)	m/s	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-9}
透水係数 (鉛直方向)	m/s	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-9}
有効間隙率	—	1	0.1
縦分散長	m	0.1	0.1
横分散長	m	0.01	0.01
分子拡散係数	m^2/s	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-9}
遅延係数	—	1	1

表-3 材料定数 (浄化促進モデル II)

材料	単位	廃棄物層	海域	底部粘土層	H-H 継手フランジ部	グラウト
透水係数 (水平方向)	m/s	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-10}	1.0×10^{-8} or 1.0×10^{-10} or 1.0×10^{-12}	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-11}
透水係数 (鉛直方向)	m/s	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-10}	1.0×10^{-8} or 1.0×10^{-10} or 1.0×10^{-12}	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-11}
有効間隙率	—	1	1	0.65	0.1	0.1
縦分散長	m	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
横分散長	m	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
分子拡散係数	m^2/s	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-9}
遅延係数	—	1	1	2	1	1

で種々の条件をパラメトリックに変化させた場合の影響の度合いを定量的に求めている。また、有害物質の封じ込め性能については、海域側 H-H 継手フランジ部の海域側端断面 (濃度測定断面) における有害物質の濃度によって評価を実施している (図-11 参照)。なお、H-H 継手の浄化促進性能、浄化促進性能比、ならびに有害物質の封じ込め性能はいずれも定常状態によって評価を行っている。

図-13 は、浄化促進モデル I において、処分場側 H-H 継手フランジ部の透水係数を変化させた場合の有害物質の濃度分布時刻暦を示している。また、図-14 および図-15 は、処分場側 H-H 継手フランジ部の透水係数をパラメトリックに変化させた場合の経過時間に伴う浄化断面を通過する有害物質の質量フラックスならびに処分場側 H-H 継手フランジ部の透水係数が $k=1.0 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ の場合の浄化促進性能を規準とした場合における浄化促進性能比を示している。図-13 によると、H-H 継手内部の空洞空間に低水位環境を形成した場合、処分場側 H-H 継手フランジ部の透水係数に関わらず、H-H 継手近傍から廃棄物層における有害物質の浄化が進行する。また、処分場側 H-H 継手フランジ部の透水係数が高いほうが浄化範囲は広がる。すなわち、処分場側 H-H 継手フランジ部の透水係数が高いほうが広い範囲を浄化することができる。また、処分場側 H-H 継手フランジ部の透水係数が高いほうが H-H 継手の浄化促進性能も優れている (図-14 参照)。具体的には、浄化断面を通過する有害物質の質量フラックスは経過時間に関わらず、処分場側

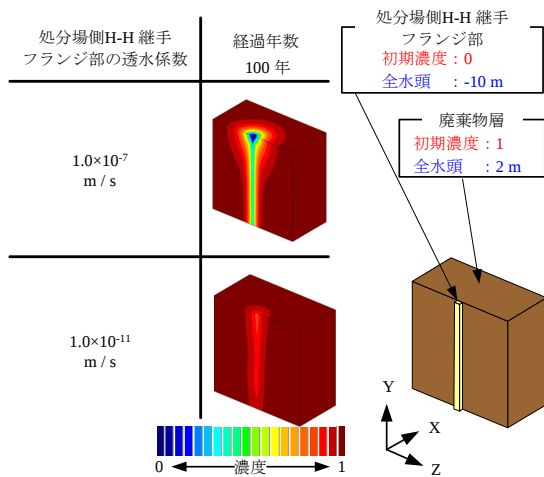
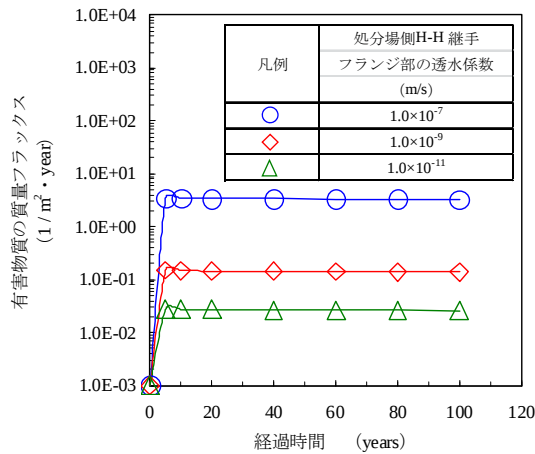
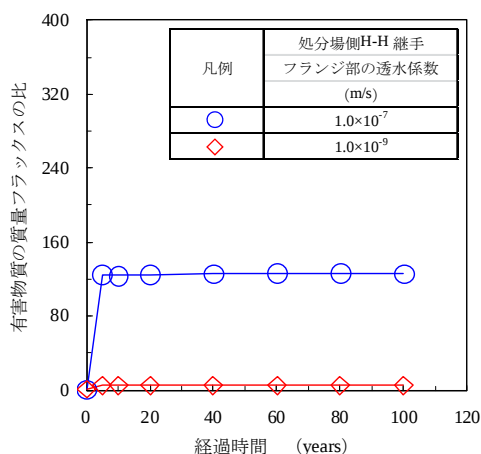


図-13 浄化促進モデルIによる有害物質の濃度分布時刻暦


 図-14 処分場側 H-H 継手フランジ部の透水係数と
浄化断面における物質の質量フラックス

 図-15 処分場側 H-H 継手フランジ部の透水係数と
浄化断面における有害物質の浄化促進性能比

H-H 継手フランジ部の透水係数が $k = 1.0 \times 10^{-7}$ m/s, $k = 1.0 \times 10^{-9}$ m/s および $k = 1.0 \times 10^{-11}$ m/s のとき, 各々約 3.4

$1/\text{m}^2\cdot\text{year}$, 約 $0.15 \text{ } 1/\text{m}^2\cdot\text{year}$, 約 $0.027 \text{ } 1/\text{m}^2\cdot\text{year}$ である. また, $k = 1.0 \times 10^{-11}$ m/s の浄化促進性能を規準とした場合, $k = 1.0 \times 10^{-9}$ m/s では約 5.0 倍, $k = 1.0 \times 10^{-7}$ m/s で約 120 倍の浄化促進性能を有する (図-15 参照). すなわち, 処分場側 H-H 継手フランジ部の透水係数の上昇に伴い H-H 継手の浄化促進性能向上の程度も大きくなる. これは, 透水係数の上昇に伴って移流の影響が卓越し, 結果として, H-H 継手の浄化促進性能が飛躍的に向上することが要因として考えられる. よって, H-H 継手は処分場側 H-H 継手フランジ部の透水係数を高めることで優れた浄化促進性能を発揮する.

図-16 は, 浄化促進モデル I において, 廃棄物層の透水係数をパラメトリックに変化させた場合の経過時間に伴う浄化断面を通過する有害物質の質量フラックスを示している. また, 図-17 は, 廃棄物層の透水係数が $k = 1.0 \times 10^{-5}$ m/s の場合の浄化促進性能を規準とした場合における浄化促進性能比を表している. 図-16 から, 廃棄物層の透水係数が H-H 継手フランジ部より低くなると H-H 継手の浄化促進性能も低減する. 廃棄物層の透水係数が $k = 1.0 \times 10^{-5}$ m/s および $k = 1.0 \times 10^{-8}$ m/s, H-H 継手フランジ部の透水係数が $k = 1.0 \times 10^{-9}$ m/s である場合, 経過時間に関わらず浄化断面を通過する有害物質の質量フラックスは約 $0.15 \text{ } 1/\text{m}^2\cdot\text{year}$ である. 一方, 廃棄物層の透水係数が $k = 1.0 \times 10^{-11}$ m/s まで低下すると, 経過時間に関わらず浄化断面を通過する有害物質の質量フラックスは約 $0.055 \text{ } 1/\text{m}^2\cdot\text{year}$ となる. また, H-H 継手の浄化促進性能に関して, 廃棄物層の透水係数が $k = 1.0 \times 10^{-11}$ m/s の場合, $k = 1.0 \times 10^{-5}$ m/s および $k = 1.0 \times 10^{-8}$ m/s の場合と比較して, 浄化促進性能は約 0.4 倍まで低減する (図-17 参照). この原因は, 処分場から H-H 継手内部の空洞空間への流入量は H-H 継手フランジ部と廃棄物層の透水係数が低い方の影響を受けるためと考えられる. すなわち, 廃棄物層の透水係数が処分場側 H-H 継手フランジ部の透水係数より高い場合, 処分場側 H-H 継手フランジ部を通過して空洞空間へ流入する流量は H-H 継手フランジ部の透水係数によって決まる. 一方, 廃棄物層の透水係数が処分場 H-H 継手フランジ部の透水係数より低い場合, 廃棄物層を流れる水の流速は処分場側 H-H 継手フランジ部を流れる水の流速より緩慢になる. その結果, H-H 継手フランジ部を通過して空洞空間へ流入する流量も減少する. そのため, 移流に伴う有害物質の浄化促進が抑制されるものと考えられる.

図-18 は, 浄化促進モデル I において, H-H 継手内部の空洞空間に保持する水位をパラメトリックに変化させた場合の経過時間に伴う浄化断面を通過する有害物質の質量フラックスを示している. また, 図-19 は, H-H 継手内部の空洞空間に保持する水位が -10 m の場合の浄化促進性能を規準とした場合における浄化促進性能比

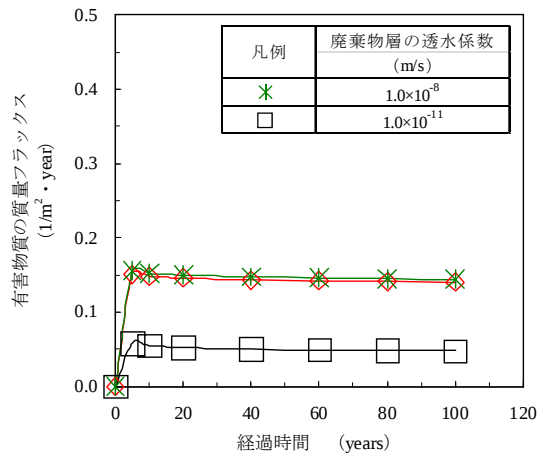


図-16 廃棄物層の透水係数と浄化断面における有害物質の質量フラックス

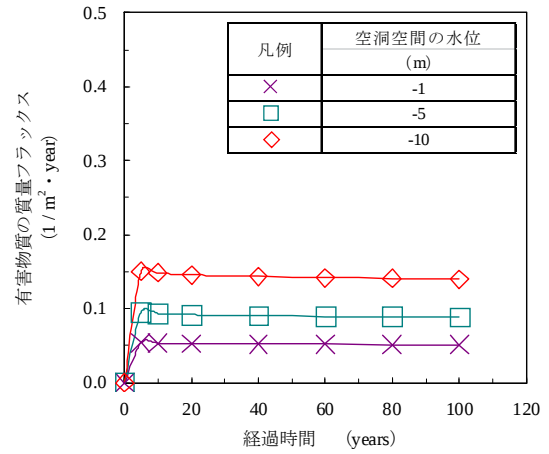


図-18 H-H継手内部の空洞空間に保持される水位と浄化断面における有害物質の質量フラックス

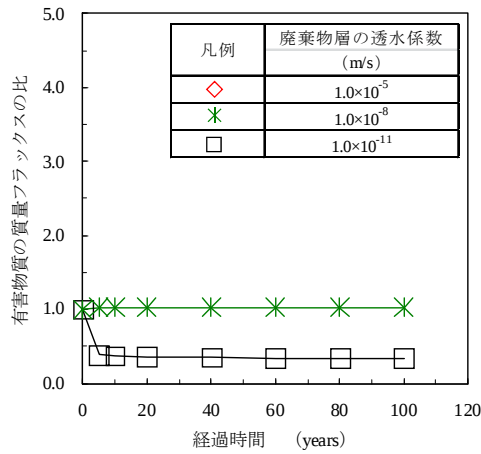


図-17 廃棄物層の透水係数と浄化断面における物質の浄化促進性能比

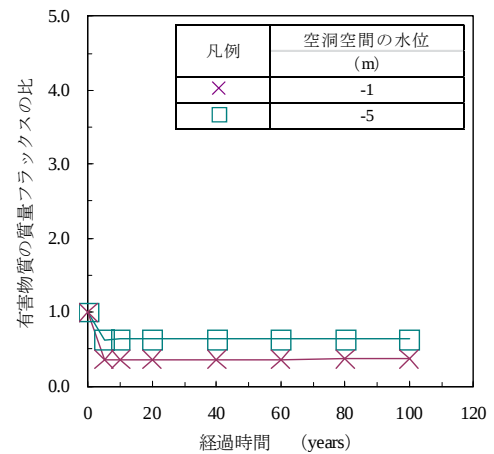


図-19 H-H継手内部の空洞空間に保持される水位と浄化断面における有害物質の浄化促進性能比

を表している。図-18 から、H-H 継手内部の空洞空間の水位を低位置に保持するほうが H-H 継手の浄化促進性能は高くなる。例えば、H-H 継手内部の空洞空間に保持する水位が-10 m の場合、経過時間に関わらず浄化断面を通過する有害物質の質量フラックスは約 $0.15 \text{ 1/m}^2\text{-year}$ である。一方、H-H 継手内部の空洞空間の水位を-5 m あるいは-1 m に保持した場合、浄化断面を通過する有害物質の質量フラックスは各々約 $0.095 \text{ 1/m}^2\text{-year}$ 、約 $0.055 \text{ 1/m}^2\text{-year}$ であり、空洞空間内に保持する水位の上昇に伴い浄化性能は低下する。これは、空洞空間の水位が高くなることによって空洞空間へ流入する廃棄物層からの浸出水量が低減し、結果として、浸出水とともに移流する有害物質も減少するためである。また、空洞空間に-10 m、-5 m、あるいは-1 m の水位を保持した場合の浄化性能について、空洞空間の水位が-10 m の場合を規準とすると、-5 m の場合は0.66倍、-1 m の場合は0.37倍まで低下する（図-19 参照）。すなわち、空洞空間内に保持

する水位の上昇の程度と比較して H-H 継手の浄化性能の低下の度合いは小さい。具体的には、水位を-10 m から10分の1である-1 m に仮定したとしても浄化性能は3分の1程度までしか低下しない。このような結果が得られる要因として、拡散に伴う有害物質の浄化促進が卓越していることが挙げられる。以上より、H-H 継手が浄化促進性能を発揮するには H-H 継手内部の空洞空間において低水位を保持することが重要であり、今回の解析モデルでは水位を-10 m に維持することで、より優れた浄化促進性能を発揮できる。

図-20 は、浄化促進モデル II において、底部粘土層の透水係数を $1.0 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ とした場合における100年経過時点での有害物質の濃度分布時刻暦を示している。また、図-21 および図-22 は、底部粘土層の透水係数をパラメトリックに変化させた場合の経過時間に伴う浄化断面を通過する有害物質の質量フラックスおよび濃度測定断面における有害物質の濃度を各々示している。図-20 によ

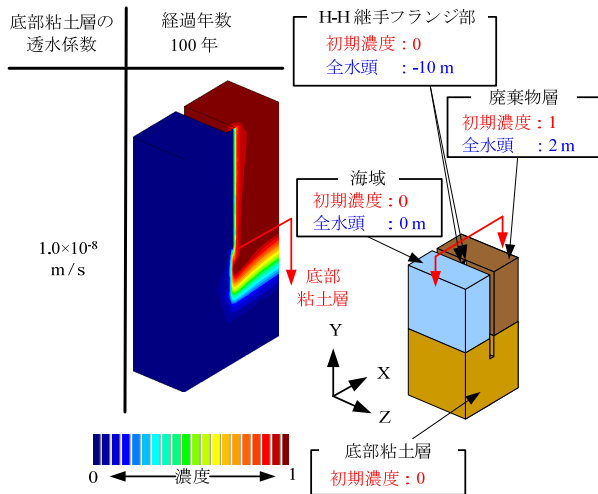


図-20 浄化促進モデルⅡによる有害物質の濃度分布時刻曆

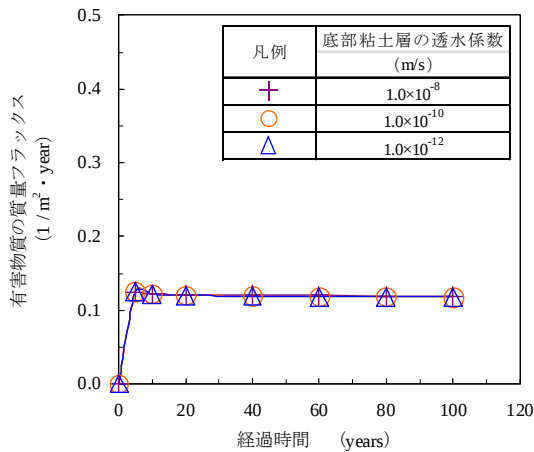


図-21 底部粘土層の透水係数と浄化断面における有害物質の質量フラックス

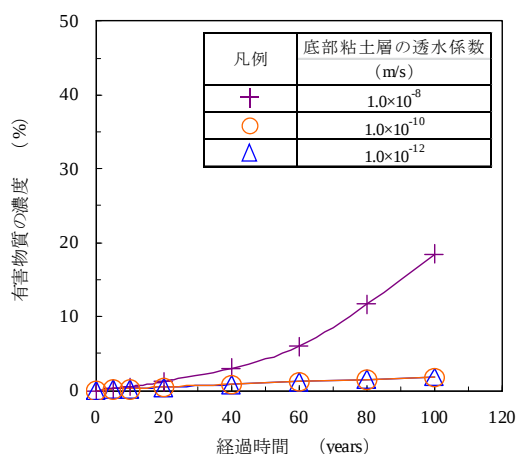


図-22 底部粘土層の透水係数と濃度測定断面における有害物質の濃度

生ずる。一方、図-21 から、底部粘土層の透水係数が変化しても、H-H 継手の浄化促進性能に影響を及ぼさない。例えば、H-H 継手の浄化促進性能について、底部粘土層の透水係数が $k = 1.0 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ の場合の処分場側 H-H 継手フランジ空間側端を通過する有害物質の質量フラックスは約 $0.12 \text{ 1/m}^2 \cdot \text{year}$ 、 $k = 1.0 \times 10^{-12} \text{ m/s}$ の場合も約 $0.12 \text{ 1/m}^2 \cdot \text{year}$ であり、同等の浄化促進性能を示している。これは、底部粘土層の透水係数に関わらず H-H 継手内部の空洞空間に流入する廃棄物層からの浸出水量は同じであるため、浸出水に含有される有害物質量も同じとなっているからである。しかしながら、上述したとおり、廃棄物層の影響が底部粘土層に及ばない場合の浄化促進性能は約 $0.15 \text{ 1/m}^2 \cdot \text{year}$ であることから、底部粘土層を不透水かつ不拡散である場合のほうが浄化促進性能は優れていると考えられる。この要因として、底部粘土層へ廃棄物層の影響が及ばない場合、廃棄物層に存在する有害物質は唯一の流出経路である H-H 継手に集中するので、結果として、H-H 継手の浄化促進性能が高くなることが挙げられる。

有害物質の封じ込めについて考慮すると、H-H 継手に遮水・浄化促進機能を適用することで有害物質の流出量を低減できる。特に、H-H 継手を通過して海域へ流出する有害物質は継手内部の空洞空間において排除されるため、側面からの流出する可能性は限りなく低いと考えられる。また、底部粘土層からの流出に関して考えると、底部粘土層の透水係数は低い方が望ましい（図-22 参照）。底部粘土層の透水係数が $k = 1.0 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ の場合、100 年経過後の濃度測定断面における有害物質の濃度は約 18% である。一方、底部粘土層が $k = 1.0 \times 10^{-12} \text{ m/s}$ の透水係数を有する場合、濃度測定断面における有害物質の濃度は約 1.8% である。これは、底部粘土層の透水係数の上昇に従って移流に伴う有害物質の流出が促進されるためである。さらに、底部粘土層の透水係数が $k = 1.0 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ の場合と $k = 1.0 \times 10^{-12} \text{ m/s}$ の場合を比較すると、100 年経過時点での濃度測定断面における有害物質の濃度はいずれも約 1.8% でほぼ同等である。この理由として、底部粘土層の透水係数が $k = 1.0 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ 以下であれば、移流の影響はほとんど受けず有害物質の拡散によって流出が発生するためである。

H-H 継手の浄化促進機能および処分場の有害物質の封じ込め機能の両方を考慮すると、海面廃棄物処分場の底部には不透水かつ不拡散な遮水工を構築することが望ましい。ただし、実際には底部粘土層を遮水工として用いることになることから、本解析モデルを基に考えると、底部粘土層の透水係数を $k = 1.0 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ 以下にすることで優れた水溶性有害物質の封じ込め機能を発揮できる。

ると、底部粘土層の透水係数がいずれの場合においても、廃棄物層に存在する有害物質の底部粘土層への流出が発

4. おわりに

本論文では、H-H 継手内部の空洞空間に低水位環境を保持した場合について、種々の条件をパラメトリックに変化させたときの H-H 継手の有害物質の封じ込め性能ならびに浄化促進性能について評価を行った。本論文で得られた知見は以下のとおりである。

- (1) H-H 継手内部の空洞空間に低水位環境を保持することで、鋼管矢板遮水壁を通過して海域へ流出する有害物質の発生を防ぐことができる。
- (2) 遮水・浄化促進機能を有する（空洞空間に低水位環境を保持する）H-H 継手の有害物質の浄化促進性能は、処分場からの浸出水量の増大に伴って向上する。
- (3) 処分場内に存在する有害物質の封じ込めを達成するためには、底面遮水工の遮水性能を向上させることも重要である。

上述したとおり、遮水・浄化促進機能を有するH-H継手を鋼管矢板遮水壁として適用した場合、海面廃棄物処分場において求められる水溶性有害物質の封じ込めならびに浄化を効果的に図ることができる。ただし、遮水・浄化促進機能を有するH-H継手を実現場にて用いるにあたっては以下に示すことを考慮すべきであり、各々に対して今後の取り組む必要がある。

- (1) 側面・底面遮水工を総合的に考慮した技術開発が必要であると考えられる。これは、側面遮水工である鋼管矢板遮水壁の遮水性能が向上した場合でも、長期的には廃棄物浸出水が底面遮水工を経由して、側面遮水工下端を回り込む経路で流出するためである。
- (2) H-H継手フランジ部の遮水性能が低下した場合について、遮水性能の低下箇所の探知方法について考慮する必要があると考えられる。H-H継手内部の空洞空間に低水位環境あるいは高水位環境を形成することで、H-H継手フランジ部の遮水性能はモニタリング可能である。しかしながら、効果的に補修を実施するためには遮水性能低下の発生箇所を簡便に探知できる方法が求められる。
- (3) H-H継手フランジ部の遮水性能について、補修技術を確立する必要があると考えられる。(2)とも関連するが、H-H継手フランジ部の遮水性能が低下した場合の補修技術については未だ確立されていない。現在、H-H継手フランジ部の遮水性能が低下した場合、粘性状態の膨潤性止水材を遮水性能の低下箇所に注入することで対処することが考えられている。ただし、上記の技術によるH-H継手フランジ部の遮水性能向上の検討は実施されていない。よって、H-H継

手フランジ部の遮水性能向上に対して膨潤性止水材の注入が効果的か否かを検討する必要がある。

- (4) 水溶性有害物質の浄化を図るにあたって、遮水・浄化促進技術の効果的な適用位置を明らかにする必要があると考えられる。本論文では、継手1箇所当りの浄化促進性能を追究したが、実際の海面廃棄物処分場では継手が数十、あるいは数百箇所存在することになる。すなわち、遮水・浄化促進技術の適用位置について知見を有することで、水溶性有害物質の浄化を効果的に図ることが可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 環境省ホームページ：http://www.env.go.jp（2009.12.10取得）。
- 2) 財団法人港湾空間高度化センター：管理型廃棄物埋立護岸設計、施工、管理マニュアル（改訂版）、港湾、海域環境研究所、2008。
- 3) 木下雅敬，沖 健，岩倉 肇，麻生川学，野路正浩，鳥崎肇一，吉野久能：鋼管矢板継ぎ手の遮水性能評価実験，第36回地盤工学研究発表会発表論文集，地盤工学会，pp.2535-2536，2001。
- 4) 小田勝也：海面処分場跡地利用に当たっての技術開発の現状と課題，廃棄物研究財団だよりNo.67，廃棄物財団，2006。
- 5) 沖 健，鳥崎肇一，喜田 浩，吉田 節，坂口裕司，吉野久能：鋼矢板，鋼管矢板を用いた鉛直遮水壁の遮水性能の評価，第5回環境地盤工学シンポジウム論文集，地盤工学会，pp.53-58，2003。
- 6) 稲積真哉，木村 亮，山村和弘，西山嘉一，嘉門雅史：連結鋼管矢板による鉛直遮水壁の施工技術，材料，日本材料学会，Vol.54，No.11，pp.1105-1110，2005。
- 7) 稲積真哉，木村 亮，三津田祐基，山村和弘，西山嘉一，嘉門雅史：廃棄物埋立護岸におけるH-H継手を施した連結鋼管矢板の開発と適用性評価，土木学会論文集C，Vol.62，No.2，pp.390-403，2006。
- 8) 木村 亮，西山嘉一：鋼管とH鋼をつなげた連結鋼管矢板の開発と適用，未来材料，Vol.5，No.6，エヌ・ティー・エヌ，pp.34-40，2006。
- 9) 嘉門雅史，乾 徹：管理型廃棄物処分場の地盤工学的問題と対策，土木学会論文集，No.701/III-58，pp.1-15，2002。
- 10) 西垣 誠，菱谷智幸，橋本 学，河野伊一郎：飽和・不飽和領域における物質移動を伴う密度依存地下水流の数値解析的手法に関する研究，土木学会論文集，Vol.511/III-30，pp.135-144，1995。

(2010. 5. 21 受付)

LEACHATE CONTROL TECHNOLOGY USING JOINT INTERIOR SPACE OF SPSP CUTOFF WALLS AT LANDFILL SITES

Shinya INAZUMI, Makoto KIMURA and Toshimitsu KAKUDA

This paper proposes leachate control technology using H-H joint interior space as a part of steel pile sheet pipe cutoff walls in coastal landfill site from a long-term perspective. In addition, the containment and remediation performance of the H-H joint in landfill site was evaluated by seepage and advection/dispersion analysis. The H-H joint was able to perform the containment and the remediation functions by keeping the low water-level at H-H joints interior space. Moreover, the leachate control technology using H-H joint interior space demonstrates it's possible to contain water-soluble toxic substances in landfill sites and remediate them.