

海面処分場における鋼管矢板遮水壁の
環境適合性評価とその向上技術に関する研究

平成 19 年 2 月 22 日

京都大学 工学部 地球工学科

大 竹 雄

要 旨

本研究は環境安全性に対する信頼性の向上が急務とされる海面処分場，さらに鋼管矢板遮水壁に着目し，有害物質を含んだ廃棄物浸出水の周辺環境への漏出抑制で代表される環境適合性を，3次元浸透・移流分散解析を用いて検討するものである。

具体的には，鋼管矢板遮水壁における継手箇所からの浸出水の局所的な漏出を表現し得る評価モデルを作成し，鋼管矢板遮水壁に関する換算透水係数を用いた環境適合性の評価に対して，継手箇所の3次元的な配置ならびに透水係数分布を考慮した封じ込め性能を比較検討している。また，種々の継手形状ならびに継手性能を考慮した鋼管矢板遮水壁の環境適合性を，3次元的な継手分布を考慮し得る評価方法を用いて，継手箇所の透水係数，遠配置化および局所漏出が有害物質の封じ込め効果に及ぼす影響も明らかにしている。さらには，廃棄物浸出水の封じ込め環境において経済的かつ効果的に浸出水を集排水することができる集排水機能を有した鋼管矢板遮水壁技術の提案し，有効性を検討している。

目 次

第 1 章 序 論	1
1.1 背 景	1
1.2 目 的	2
1.3 構 成	3
第 2 章 海面処分場の環境信頼性	5
2.1 海面処分場の環境性能	5
2.2 廃棄物の封じ込めと浄化（安定化）	6
2.3 側面・底面遮水工	6
2.4 鋼管矢板遮水壁	8
第 3 章 浸透・移流分散解析	11
3.1 解析概要	11
3.2 解析手法	12
3.3 移流分散物性	13
3.4 適用事例	14
第 4 章 鋼管矢板遮水壁の環境適合性評価	16
4.1 解析対象と評価指標	16

4.2	継手局所漏出を考慮した鋼管・継手モデル	17
4.3	鋼管・継手モデルによる継手性能評価	19
第5章 鋼管矢板遮水壁の環境適合性向上技術		22
5.1	集排水機能を有する鋼管矢板遮水壁	22
5.2	モデル概要	24
5.3	集排水頻度	25
5.4	遮水・浄化性能	26
5.5	環境適合性の向上	27
第6章 結 論		28
6.1	成 果	28
6.2	課題・展望	29
参 考 文 献		a
謝 辞		c

第 1 章 序 論

1.1 背 景

廃棄物処分場（図 1.1 参照）は、ごみとして排出されたものからリサイクル可能な物やエネルギーを回収した後、最終的な残渣物を埋立処分する施設であり、我々の生活空間にごみを残さず街をきれいにするための大切な社会基盤施設である。しかしながら、廃棄物処分場を建設する際、近隣の住民が抱く「浸出水が漏れるのではないか？」等の環境安全性に対する不信感によって建設を反対する例が多く、廃棄物処分場の新規建設が困難になっている。同時に、環境規制の強化等を受け、廃棄物処分場の建設コストも大きく上昇している。そのような社会的背景下、我が国では従来、山間谷地部の水源地帯に廃棄物処分場（内陸処分場）を建設することが多かったものの、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環境への汚染リスクの低減のために、比較的小規模の内陸処分場から都市部の港湾域に大規模展開する海面部の埋立て（海面処分場）へと、処分場の立地条件の多様化が進められている。全国統計¹⁾では、平成 15 年度において全廃棄物処分場のうち海面処分場が全体容量で 23.3%、特に大都市圏では 80% 以上の容量を占めている（図 1.2 参照）。これらは、都市部の港湾域に大規模展開する海面処分場の果たす役割がますます大きくなっていることを示している。しかしながら、上述した周辺住民の環境安全性に対する懸念は未だ残っており、①海面処分場を将来にわたって安定的かつ計画的に確保すること、ならびに、②これまで建設されてきた既往処分場を再整備して延命化措置を講ずることは、大都市圏を中心とする地域の大きな懸案事項である。

海面処分場における埋立護岸（図 1.3 参照）は、廃棄物、建設発生土および浚渫土砂の埋立処分に対応して、港湾保全との整合を図りつつ、埋立処分する空間を確保するためのものである。廃棄物埋立護岸には、地震や波浪、高潮および津波等の海上特有の諸外力から埋立地を護る護岸機能とともに、廃棄物からの浸出水が海域へ流出することを防ぐ側面（鉛直）遮水工としての性能が要求される。

近年では、大水深施工が可能な鋼管矢板が、その施工性および経済性の観点から、図 1.4 に示すような廃棄物埋立護岸として海面処分場を中心に広く用いられている。しかしながら、継手を有する鋼管矢板を用いた廃棄物埋立護岸（以下、鋼管矢板遮水壁と称する）が確保・発揮しなければならない、側面遮水工としての適合性、技術向

上、長期的な維持・管理補修手法は実験的にも解析的にも非常に複雑である。そのため、未だ体系的な見解が示されていないのが現状である。特に、有害物質を含んだ廃棄物浸出水の周辺環境への漏出に対する抑制効果で代表される環境適合性の評価では、継手を有する鋼管矢板（図 1.5 参照）の遮水性能を適切に評価することが非常に重要である。なお、図 1.6 では海面処分場ならびに側面・底面遮水工に関する環境適合性の位置付けを示している。鋼管矢板遮水壁に関する遮水性の評価では、鋼管矢板遮水壁の継手箇所と鋼管を一体とみなし、均一な透水層の透水係数として置換することによって換算透水係数を求めることが一般的に行われている（図 1.7 参照）²⁾。しかしながら、継手箇所と鋼管を一体とみなす換算透水係数を用いた評価手法では、有害物質の継手箇所からの局所的な漏出等を考慮することが困難である。

海面処分場の建設に際しては、側面ならびに底面の遮水工構造に対して半永続的に廃棄物浸出水を周辺環境へ漏出させない、換言すれば、有害物質の封じ込め性能を半永続的に確保しなければならない。すなわち、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有害物質は、廃棄物処分場の封じ込め概念によって永久的に処理・管理されることになる。しかしながら、周辺住民ならびに社会が不安視する「浸出水が何時か漏れるのではないか？」という環境リスク、また、廃棄物の埋立処分が終了した処分場の長期的な環境性能で考えた場合、廃棄物処分場の封じ込め概念は廃棄物浸出水による周辺環境の汚染リスクを半永久的に残すことになる。なお、処分場において封じ込められた状態にて処理・管理されている有害物質は、廃棄物処分場の跡地を利用検討する際に大きな障害を来すことになる。そこで、筆者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、廃棄物処分場の有害物質に対する封じ込め効果を適切に評価・管理するとともに、廃棄物浸出水の封じ込め環境において経済的かつ効果的に浸出水を集排水することができる遮水兼集排水技術の必要性を提案している。

1.2 目 的

本研究では、環境安全性に対する信頼性の向上が急務とされる海面処分場ならびに鋼管矢板遮水壁に着目し、有害物質を含んだ廃棄物浸出水の周辺環境への漏出抑制で代表される環境適合性を、3次元浸透・移流分散解析を用いて検討するものである。さらには、鋼管矢板遮水壁に求められる環境適合性を長期的に持続し、海面処分場の環境安全性を長期的に保障するため、鋼管矢板を遮水兼集排水壁として有効利用するための技術の可能性を検討する。

具体的な目的は以下のとおりである。

- (1) 鋼管矢板遮水壁における継手箇所からの浸出水の局所的な漏出を表現し得る評価方法を検討する。本目的の達成には、鋼管矢板遮水壁に関する換算透水係数を用いた環境適合性（有害物質の封じ込め性能）の評価に対して、継手箇所の3次元的な配置ならびに透水係数分布を考慮した封じ込め性能を比較検討する。
- (2) 種々の継手形状ならびに継手性能を考慮した鋼管矢板遮水壁の環境適合性を検討する。本目的の達成には、3次元的な継手分布を考慮し得る評価方法を用いて、継手箇所の透水係数、遠配置化および局所漏出が有害物質の封じ込め効果に及ぼす影響を検討する。
- (3) 鋼管矢板遮水壁の環境適合性を向上させる一つの技術として、継手箇所内に形成される空間の有効活用を検討する。本目的の達成には、遮水処理が施された継手箇所内に予め集排水空間を設け、その空間を集排水井戸として用いる技術を提案する。集排水機能を鋼管矢板遮水壁に担わせる技術は、自然水頭差に起因する浸出水の鋼管矢板遮水壁への集中、鋼管矢板遮水壁の完全遮水および埋立廃棄物の長期的な浄化（安定化）の促進等が期待される。

1.3 構成

図 1.8 は研究構成を示している。また、図 1.8 に示した研究フローの下、本論文は以下に示す 6 章から構成される。

第 1 章（本章）では、廃棄物処分場に関する社会情勢、海面処分場における鋼管矢板遮水壁に関する環境適合性評価ならびに処分場での封じ込め環境における廃棄物の浄化技術に関する概要を述べ、本研究の目的を明確にしている。

第 2 章では、本研究の実施に対して重要な動機となる海面処分場の環境信頼性を論じている。そこでは、海面処分場における環境性能、廃棄物の封じ込めと浄化（安定化）、側面・底面遮水工ならびに鋼管矢板遮水壁について、法規制を交えて現状、課題および展望等を述べている。

第 3 章では、本研究で用いる浸透・移流分散解析に関する基礎事項、解析手法および移流分散物性を説明している。さらに、廃棄物処分場における環境適合性（有害物質の封じ込め性能）の評価に対して、浸透・移流分散解析が適用された事例を紹介す

るとともに、本研究で実施する3次元浸透・移流分散解析の必要性を述べている。

第4章では、海面処分場における鋼管矢板遮水壁を対象に3次元浸透・移流分散解析を実施することによって、鋼管矢板遮水壁の環境適合性に関する換算透水係数を用いた既往の評価手法に対する、鋼管矢板遮水壁内での継手箇所の3次元的な配置ならびに透水係数分布を考慮した評価手法の適用性を検討している。さらに、種々の継手形状ならびに継手性能を有する鋼管矢板遮水壁の環境適合性の比較評価も行っている。

第5章では、鋼管矢板遮水壁の環境適合性に大きく影響を及ぼす継手構造に着目し、継手構造を有効活用することで、有害物質の封じ込め効果に加え、廃棄物の浄化促進効果まで期待できる、すなわち、環境適合性の更なる向上を実現する画期的な鋼管矢板遮水壁技術（集排水機能を有する鋼管矢板遮水壁）を提案している。そこでは、H-H継手に形成された空洞空間内の水位を処分場内外の水位より低位置に維持するために必要な集排水頻度、ならびに集排水機能を有する鋼管矢板遮水壁の環境適合性と廃棄物の浄化性能を検討している。

第6章では、本研究で得られた成果と今後の課題・展望を述べている。

第 2 章 海面処分場の環境信頼性

2.1 海面処分場の環境性能

海面処分場の建設ならびに維持・管理補修にあたっては、埋め立てられた廃棄物由来の浸出水や飛散物に伴う周辺環境の汚染リスクに対して、暴露経路（図 2.1 参照）を特定するとともに最たる注意を払わなければならない。

一方、近年では廃棄物の処分容量が逼迫している社会的情勢において、ごみの焼却処分による減容化が広く行われるようになってきている。よって、海面処分場にて埋め立てられる廃棄物では焼却残渣の占める割合が大きくなっており、焼却残渣中に含まれる重金属類が主たる環境汚染物質となっている。重金属類は水溶性であるため、何らかの原因で廃棄物（焼却残渣）から処分場外への漏水（浸出水）が生じた場合には重金属類も浸出水とともに漏出する。その結果、廃棄物処分場の周辺環境は廃棄物浸出水由来の重金属類によって汚染される³⁾。そこで、海面処分場では周辺海域の重金属類による汚染リスクを低減するため、構築される側面（鉛直）・底面遮水工（図 2.2 参照）に対して廃棄物浸出水が外域に漏出することを防ぐ十分な遮水性能が求められている。しかしながら、側面・底面遮水工の遮水性能によって、浸出水の漏出を極力抑制することは可能であっても、浸出水の漏出を完全に防止する側面・底面遮水工を建設することは技術的ならびに概念的に不可能である。すなわち、廃棄物処分場由来の環境汚染リスクを側面・底面遮水工によって完全にゼロにすることは現状において不可能であり、リスクをどのようにして軽減・管理するかが重要である。

海面処分場においては廃棄物浸出水に起因する汚染リスクを評価・管理するため、年 1 回以上の頻度にて処分場周辺海域の水質をモニタリングしなければならない⁴⁾。これは、「一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分場に係る技術上の基準を定める命令」（1998 年に改正命令として示された総理府・厚生省令）における維持管理基準として規定されている。また、水質モニタリングの他に、周辺海域の底質等に対してもモニタリングを実施している事例⁵⁾もある。なお、周辺海域の水質ならびに底質に関する環境基準値（管理基準値）としては、「地下水の水質汚濁に係る環境基準」（環境庁告示第 16 号，1999 年）および「土壌の汚染に係る環境基準」（環境庁告示第 46 号，1991 年）（表 2.1 および表 2.2 参照）が一般的に適用されている。これらのモニタリングにより、周辺海域に環境基準値以上の有害物質が検出された等の異常が発

生した場合には、直ちに必要な措置が講じられることになっている⁶⁾。ただし、海面処分場に関する修復技術は未だ開発途上であり、汚染リスクが発生した場合の適切な修復技術の開発が急がれる。

2.2 廃棄物の封じ込めと浄化（安定化）

現状、廃棄物処分場にて埋め立てられた廃棄物に含まれる有害物質は、処分場の“封じ込め概念”に即して永久的に処理・管理されることになる。しかしながら、廃棄物処分場の封じ込めは、廃棄物浸出水による周辺環境の汚染リスクを半永久的に残すことになる。さらに、封じ込め環境にある廃棄物処分場を跡地利用する場合、その用途は非常に制限され、また、跡地利用のための施工管理も困難を伴う。したがって、廃棄物処分場の環境安全性を建設時から将来にわたって持続・保障した上で跡地利用を促進するためには、廃棄物処分場の有害物質に対する封じ込め効果を適切に評価し、さらに、廃棄物浸出水の封じ込め環境において廃棄物を効率的に浄化（安定化）するシステムを構築しなければならないと考える。

廃棄物処分場における廃棄物の浄化設備は、廃棄物処分場を長期間にわたって維持・管理補修していく上で非常に重要である。内陸処分場に設けられる浄化設備（の例）では、埋立廃棄物層の直下に浸出水集排水管を設置することによって、処分場内の降雨水が積極的に循環し、その結果、有害物質を含んだ浸出水は浸出水集排水管を通して浸出水処理施設に送られ、浄化されるシステムである⁷⁾（**図 2.3** 参照）。ただし、目詰りや損傷等、浸出水集排水管の維持・管理補修には大きな課題が残されている。一方、海面処分場では、建設以前から原地盤として元来堆積した自然堆積粘土層を底面遮水工として利用するため、また、浸出水集排水管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⁴⁾。そのため、浸出水を集排水するシステムが確立されていない海面処分場が多数を占めている（**図 2.4** 参照）。よって、海面処分場の大部分は廃棄物浸出水に含まれ得る有害物質を浄化する能力を有しておらず、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。

2.3 側面・底面遮水工

海面処分場において重要な環境保全機能を担う側面・底面遮水工（**図 2.2** 参照）は、

港湾の開発，利用および保全に資するとともに廃棄物処理法上の廃棄物，浚渫土砂等を適切に処分することを目的として，港湾法改正（昭和 47 年）において港湾施設として位置付けられた。つまり，側面・底面遮水工の目的は廃棄物や浚渫土砂等を処分すること，および処分終了後に適切な土地利用を図ることにある。

一方，側面・底面遮水工は，港湾法とともに廃棄物処理法の適用を受ける。図 2.5 に示すように側面・底面遮水工に適用される法令は，建設から廃棄物処分が行われ，廃棄物処分場として閉鎖（廃止）されるまでは港湾法と廃棄物処理法の二重の適用を受ける。さらに，閉鎖（廃止）後の土地利用段階においては港湾法の下で土地利用，施設の維持・管理補修が実施されることになる。また，処分場跡地の形質変更を行う際には廃棄物処理法の関連規定の適用を受ける⁸⁾。

側面・底面遮水工を維持・管理するためには，①処分場内水位以下に存在する廃棄物（焼却残渣）が嫌氣的雰囲気であることから分解が進まず浄化しにくいこと，また，②内陸処分場のように自然流下により雨水等を排水できず，揚水等により外部に排出することが不可欠であることに注意を払う必要がある。例えば，海面処分場として廃止された段階では，保有水等集排水設備からの排水は基準を満たしているが，内部の廃棄物，特に管理水位以深の廃棄物の浄化は期待できない⁸⁾。このため，保有水位が上昇した場合には，覆土層や地表に近い土層が廃棄物保有水に接触する可能性が想定される。また，保有水位が想定より高くなった場合には側面・底面遮水工の安定に影響する可能性もある。

1998 年に改正命令が示された総理府・厚生省令「一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分場に係る技術上の基準を定める命令」では，側面・底面遮水工の構造基準として，不透水性地盤が存在しない箇所について，次のいずれかの要件を満たさなければならない⁴⁾。

- (1) 厚さ 50cm 以上かつ透水係数 $1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 以下の粘土層，または，これと同等以上の層に遮水シートが敷設されていること。
- (2) 厚さ 5cm 以上かつ透水係数 $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 以下のアスファルト・コンクリート層，または，これと同等以上の層に遮水シートが敷設されていること。
- (3) 表面に二重の遮水シートが敷設されていること（二重の遮水シートが同時に損傷することを防止できる不織布等の保護層が設けられているものに限る）。

ただし，処分場底面に不透水地盤が存在する場合には，以下の側面遮水工を設ける。

- (4) 不透水性地盤よりも上に位置する透水性地盤が、ルジオン値が 1 以下になるまで薬液注入等により固化されていること。
- (5) 厚さ 50cm 以上かつ透水係数 $1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 以下の連続壁が不透水性地盤まで設けられていること。
- (6) 鋼（鋼管）矢板が不透水性地盤まで設けられていること。

上記(1)～(3)は、底面やのり面における遮水工を対象としており、重力式（裏込め石がある）や捨石式の廃棄物埋立護岸等に適用されるものと考えられる。一方、(4)～(6)については鋼管矢板遮水壁等の側面遮水工を対象としている。海面処分場では、背後地盤を含めて鋼（鋼管）矢板を厚さ 50cm の均一層として置換した換算透水係数（図 1.7 参照）によって、鋼管矢板遮水壁等の遮水性能が評価される。また、求められた換算透水係数が $1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 以下である鋼（鋼管）矢板壁は、(5)の記述と同等の性能を満たすものと見なされる。しかしながら、換算透水係数を用いた評価では、鋼管矢板遮水壁における浸出水の継手部からの局所漏出のように、局所的に漏水が生じる遮水壁の遮水性能を正しく評価できないという問題点がある。そこで、鋼管矢板のような鋼管部と継手部から構成された遮水壁を評価する場合、漏出経路の遮水性を別途考慮した評価が必要である。

2.4 鋼管矢板遮水壁

「管理型廃棄物埋立護岸設計・施工・管理マニュアル」⁴⁾では、鋼管矢板遮水壁等の廃棄物埋立護岸は、廃棄物、建設発生土および浚渫土砂等の海面埋立処分の要請に対応して、港湾の適正な開発、利用および保全との整合を図りつつ、廃棄物を埋立処分する空間を計画的に確保するために整備するものであるとしている。したがって、廃棄物埋立護岸は、以下の基本方針に基づき、設計されるものとしている。

- (1) 水圧，波圧，廃棄物および埋立土による土圧，地震力，自重，上載荷重，その他の外力に対して安定である。
- (2) 波浪，高潮および津波等に対し，海面埋立処分場の保全および利用に対して支障をきたさない構造である。

(3) 遮水工として十分な遮水機能を発揮し、周辺の公共の水域が汚染されない。

上記より、廃棄物埋立護岸（鋼管矢板遮水壁）は海域による影響に対して十分安定であるとともに、遮水工としての機能を有していなければならない。

海面処分場では、継手箇所を持つ鋼管矢板部材が互いに継手を嵌合しつつ、鋼管矢板遮水壁として連続的に打設される。鋼管矢板（**図 1.5** 参照）とは、連続する土留め壁を構築する目的で鋼管に継手（形状により P-P, P-T, L-T 型に分類できる）を設けた土留め用鋼材である。従来から鋼管矢板は、止水機能を有する壁体として、構造物基礎・土留め壁として広く利用されている⁹⁾。しかしながら、鋼管矢板遮水壁では**図 1.5**に示すように嵌合する P-P, P-T ならびに L-T 継手に大きな通水空間が形成され、継手箇所を廃棄物浸出水が漏水する危険性が多大である。よって、鋼管矢板遮水壁の構築では、継手箇所の遮水性を高める対策を施さなければならない¹⁰⁾。

P-P, P-T ならびに L-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。しかしながら、遮水処理において充填した袋詰めモルタルと継手鋼材の接触界面に沿う水みちの発生や、モルタルの不均一な充填性は顕在化している¹⁰⁾。P-P, P-T ならびに L-T 継手における遮水処理の信頼性が低い原因は、主としてこれら継手を持つ鋼管矢板の打設・嵌合性能に拠るものである。換言すれば、P-P, P-T ならびに L-T 継手を持つ鋼管矢板では、鋼管矢板の打設に伴い、既に継手箇所においてせり合いや押し引き等が発生し、深度方向に対して健全な状態の継手形状を維持していない。よって、不健全な嵌合状態の P-P, P-T ならびに L-T 継手に対して、打設後処理として遮水処理を確実に実施することは困難である。P-P, P-T ならびに L-T 継手に関する遮水処理技術の一例では、**図 2.6**に示すような 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 継手等が開発されており、モルタルを充填したのみの P-T 継手と改良型 P-T 継手の遮水性が比較検討されている¹¹⁾。その報告では、従来型 P-T 継手の透水係数が $1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ オーダーであるのに対し、改良型 P-T 継手は $1 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ オーダー以下の高い遮水性を発揮できるとされている¹¹⁾。しかしながら、実施工において P-T 継手に漏洩防止板ゴムを取り付けた状態での鋼管矢板の高精度な打設はより困難であり、遮水処理に係わるコストのみが増大するものと考えられる。

このような P-P, P-T ならびに L-T 継手を持つ鋼管矢板に内在する種々の問題を解決するため、近年では**図 2.7**に示す「連結鋼管矢板」や「H-H 継手」と呼ばれる全く新しい鋼管矢板部材が開発されている^{10), 12), 13)}。連結鋼管矢板は、“2本の鋼管を H 鋼であらかじめ工場溶接することにより、施工性・経済性の優れた鋼管矢板として利

用する”という単純な発想により開発された建材である。連結鋼管矢板の廃棄物埋立護岸への適用は、施工前に2本の鋼管をH鋼により剛結するため、継手箇所の遮水処理という概念が存在せず、完全遮水が達成できる。さらに、漏水が懸念される連結鋼管矢板両端の継手箇所には、異なるサイズ規格の2つのH鋼を嵌合する「H-H継手」(図2.7参照)を採用することで、連結鋼管矢板の高い遮水性を保持することが可能である^{10), 12)}。なお、H-H継手の遮水処理は、H-H継手内に打設前処理として膨潤止水材を塗布・接着することで実施され、基本的にモルタル注入等の打設後(遮水)処理を施す必要がない。H-H継手を施した連結鋼管矢板の遮水性能は、膨潤止水材を種々の条件で塗布・接着したH-H継手の室内透水試験から定量的に明らかにされており、組み立てられた実験模型ならびに膨潤性シートの特性は文献^{10), 12)}で詳述されている。結果の一例として、表2.3に示す状態で膨潤止水材が接着された条件下におけるH-H継手を施した連結鋼管矢板は、鋼管矢板遮水壁で通常考慮すべき圧力レベル($p_w \leq 0.05\text{MPa}$)において $1 \times 10^{-8}\text{cm/s}$ オーダーの透水係数を発揮できる(図2.8および図2.9参照)¹⁰⁾。さらに、H-H継手を介した連結鋼管矢板は、H-H継手内に塗布・接着された膨潤止水材が打設等に伴い75%欠損した場合を想定しても、鋼管矢板遮水壁に求められる遮水性能($k_e \leq 1 \times 10^{-6}\text{cm/s}$)を発揮できることが明らかにされている¹²⁾。

上記したように、鋼管矢板遮水壁の開発では遮水性を高めた改良継手ならびに新方式の継手構造等、数多くの意欲的な取組みがなされている。しかしながら、海面処分場において、継手を有する鋼管矢板遮水壁の環境適合性を確保する評価手法ならびに長期的な維持・管理補修手法は、未だ体系的な見解が示されていない現状にある。なぜなら、鋼管矢板遮水壁の継手部等からの局所的な有害物質の漏出がどの程度の期間・頻度で生じるかは、原位置の自然条件や施工条件により不確定であり、一意的に評価することはできない¹⁴⁾。そのため、鋼管矢板遮水壁の設計に際しては、このような損傷部からの局所的な有害物質の漏出をリスクとして定量的に評価しなければならない。さらに有害物質の漏出リスクの低減のために、このような鋼管矢板遮水壁の完全遮水性を求めることだけでなく、埋立地盤の地下水位を管理することによって、ソフト的にリスク軽減を図ることも重要である。

鋼管矢板遮水壁が施された海面処分場のリスク管理という観点から再整理すると、鋼管矢板遮水壁に担われるリスク管理とは、廃棄物や浸出水の漏出等による周辺環境への影響を低減すること、および土地利用に当たっての廃棄物・浸出水等の暴露リスクの管理が目的である。これらに対する対応を設計・施工段階、処分場としての供用段階、廃止後の土地利用段階に分けて示すと表2.4のように分類できる。

第3章 浸透・移流分散解析

3.1 解析概要

海面処分場において廃棄物を埋め立てた後、廃棄物浸出水が外域へ流出した場合、その流出箇所の検知手法の開発がなされている。しかしながら、現状の検知手法では耐久性の点で不十分であり、海面処分場における遮水工の修復には莫大な時間と費用を要することになる¹⁵⁾。したがって、側面・底面遮水工の修復技術の確立のみでなく、有害物質の浸出特性に関する2次元・3次元問題としての浸透・移流分散解析の実施と検証を通じて、側面・底面遮水工の性能評価ならびに長期安定性を担保し得る構造を議論する必要がある。

本研究では、海面処分場における鋼管矢板遮水壁の環境適合性（有害物質の封じ込め性能）の評価および遮水兼集水機能を持つ鋼管矢板遮水壁の有効性を数値解析によって議論する。ここで、海面処分場における鋼管矢板遮水壁近傍の浸出水および有害物質（本研究では重金属類）の挙動は、浸透のみでなく、移流と分散の現象を伴う。そのため、数値解析の実施では浸透、移流および分散現象を正確に再現でき、かつ本研究では鋼管矢板の継手部を考慮していることから3次元で現象を解析できるモデルを用いなければいけない。さらに、海面処分場は内陸処分場と異なり、潮汐等の影響も考慮することが望まれている。同時に、廃棄物埋立護岸は海底地盤、捨石、鋼材および化学繊維といった複合的な構造で築造されており、これらも忠実に表現する必要がある。このような複雑な現象を数値計算で再現するために、安定性や収束性の問題を解決し、効率的に計算する方法として、オイリアン・ラグランジュアン有限要素法（Eulerian・Lagrangean Finite Element Method）が知られている。代表的な解析コードとしては、「Dtransu-3D・EL」が挙げられる¹⁶⁾。

本研究においては、以下の環境適合性（有害物質の封じ込め性能）を議論するために3次元浸透・移流分散解析を行う。

- (1) 鋼管矢板遮水壁に関する換算透水係数を用いた環境適合性評価の信頼性の検証
- (2) 鋼管矢板遮水壁における継手箇所の配置ならびに形状が環境適合性に及ぼす効果の検証

- (3) 集排水機能を有した鋼管矢板遮水壁の可能性と埋立廃棄物の浄化に及ぼす効果の検証

3.2 解析手法

本研究における解析には、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である「Dtransu-3D・EL」¹⁶⁾を用いた。本解析コードでは、浸透，および移流分散それぞれにおける圧力水頭，濃度という2変数の取扱いに2段階解析法を用いている（図 3.1 参照）。また離散化方法は、浸透流解析は Galerkin 法であるが，時間項のみ後退差分法によって離散化しており，移流分散問題は Neuman によって提案されたオイリアン-ラグランジアン法 (Eulerian-Lagrangian Numerical Method, EL 法) によって離散化している。EL 法とは，移流による濃度変化をラグランジュ的に，分散による濃度変化をオイラー的に離散化する方法である。

本解析コードで用いている浸透，移流分散方程式の基礎方程式を次式(3-1)に示す。

$$\{\beta S_s + C_s(\theta)\} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K_{ij}^s \{K_r(\theta)\} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} + K_{i3}^s \right] - Q_c \quad (3-1)$$

ここで， β ：飽和領域で 1，不飽和領域で 0 を与える， S_s ：比貯留係数， C_s ：比水分容量， ϕ ：圧力水頭， K_{ij}^s ：飽和透水テンソル， $K_r(\theta)$ ：比透水係数， Q_c ：湧出および吸込項である。

また，移流分散方程式は次式(3-2)で表される。

$$R\theta\rho \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta\rho D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta\rho v_i c) - \theta\rho\lambda R c - Q_c \quad (3-2)$$

ここで， R ：遅延定数， D_{ij} ：分散テンソル， v_i ：実流速， λ ：減衰定数， θ ：体積含水率である。分散テンソル D_{ij} は次式(3-3)で表される。

$$D_{ij} = \alpha_T \|V\| \delta_{ij} + (\alpha_L + \alpha_T) \frac{V_i V_j}{\|V\|} + \alpha_m \tau \delta_{ij} \quad (3-3)$$

ここで、 α_T ：横分散長、 α_L ：縦分散長、 V_i ：実流速ベクトル、 $\|V\|$ ：実流速のノルム、 α_m ：分子拡散係数、 τ ：屈曲率、 δ_{ij} ：クロネッカのデルタである。

3.3 移流分散物性

表 3.1 は、本解析で用いた各構成層における有害物質（重金属類）の移流分散に関する定数をまとめている。以下では、代表的な移流分散物性値に関する説明を行っている。

a) 縦・横分散長

分散長は縦分散長と横分散長に分けられ、縦分散長は流れ方向に水の流速に先行して濃度がぶれる度合い、横分散長は流れに直交する方向への濃度のぶれの度合いを表す（図 3.2 参照）^{17), 18)}。一般的に、分散長は巨視的な地盤の不均質性による流速のばらつきにより、移行距離に依存する。また、横分散長は縦分散長の 1/10 程度である。図 3.3 は縦分散長と横分散長の比を表しており、横分散長は縦分散長に対して 1 桁から 2 桁程度小さい値となっている。本解析では、表 3.1 のように設定した。

b) 分子拡散係数

分子は絶対零度にならない限り絶えず運動しており、この運動により濃度の拡散が起こる。液体の分子拡散係数は、気体の分子拡散係数と比較して 1/10000 程度である。また、液体の分子拡散係数の値は小さく、例えば水の分子拡散係数は $1 \times 10^{-5} \text{cm}^2/\text{s}$ 程度であり、移流速度が代表的な地下水流速の 10cm/day から 1000cm/day の範囲であれば分子拡散による影響はほとんど無視できる^{17), 18)}。本解析では、重金属類の分子拡散係数が一意に求まらないため、水と同様とした。

c) 有効間隙率

地盤中に存在する間隙が地盤全体の体積に対して占める割合が間隙率である。しかし実際には、地盤内部の間隙には空気や水が流通し得ない部分があるため、この間隙の内、水が動ける間隙だけを有効間隙率という^{17), 18)}。有効間隙率は解析上、ダルシ一流速を有効間隙率で除した値を実流速として解析を行うことから、移流分散解析で

も重要な設定パラメータである。有効間隙率は物理－化学的な流路の曲折の比を表し、実際の流路長さ L_e に対する直線流路長さ L の比で定義され、次式で表される。この場合、有効間隙率は 1 以下の値となる^{17), 18)}。

$$\theta = \left(\frac{L}{L_e} \right)^2 \quad (3-4)$$

本解析では、表 3.1 のように設定した。

d) 遅延係数

有害物質が地盤中の間隙を移動する際、地盤に吸着あるいは脱着する現象が起こる。これにより汚染物質の移動が地下水の移動速度に比較して遅れる。これを遅延係数として扱い、次式で表す^{17), 18)}。

$$R = \left(1 + \frac{\rho_d K_d}{\theta} \right) \quad (3-5)$$

ここで、 θ : 体積含水率、 ρ_d : 土の乾燥密度、 K_d : 分配係数である。 R は遅延係数と言われ、固相への吸脱着がなければ $R=1$ となり、吸脱着がある場合は $R>1$ となる。本解析では、重金属類の吸着能力が高いと考えられる粘土層では $R=2$ 、粘土層以外の層では $R=1$ とした。

e) 減衰定数

汚染物質が化学反応や微生物分解等により、地盤に吸収もしくは放射性物質のように減衰する物質の場合、1 次反応と考えると、濃度が時間的に減衰する事象と同等して取り扱う^{17), 18)}。本解析では、減衰は考慮しなかった。

3.4 適用事例

これまで、海面処分場における廃棄物埋立護岸の環境適合性（有害物質の封じ込め性能）では、「Dtransu-2D・EL」を用いた 2 次元問題として評価されている。以下では、「Dtransu-2D・EL」を用いた 2 次元浸透・移流分散解析により、海面処分場における側

面・底面遮水工を評価した事例を示している。

- (1) 嘉門ら^{19), 20)}は、海面処分場の側面・底面遮水工構造の適正化に関する考察を行っており、特に海面処分場の重力式ケーソン護岸の有害物質遮水性能を評価するため、処分場からの有害物質の流出を移流分散問題として定量的に評価した。その結果、遮水シート損傷部やケーソン目地等の局所的な漏出が生じた場合にも、護岸全体として遮水機能を発揮する構造形式ならびに設計条件を提案した。
- (2) 足立²¹⁾は、海面処分場における遮水シートが敷設されたケーソン式埋立護岸の遮水性を、外水位に潮位変動を与えた場合の保有水の浸出状況から評価した。
- (3) 稲積ら²²⁾は、海面処分場における鋼管矢板遮水壁が有害物質の封じ込めに与える効果に着目し、鋼管矢板遮水壁の性能および設置条件と環境適合性との関連性を検討した。そこでは、鋼管矢板遮水壁の性能および設置条件（根入れ長、壁体幅および水位差）と環境適合性とを関連付けた後、開発した H-H 継手を施した連結鋼管矢板（図 2.7 参照）の適用による鋼管矢板遮水壁の施工技術および環境適合性の向上を報告している。また、鋼管矢板遮水壁が発揮する遮水性の維持・管理補修手法についても言及している。

本研究では海面処分場における鋼管矢板遮水壁に着目している。鋼管矢板遮水壁は、互いの鋼管の間に継手箇所が 3 次元的に配置されており、継手箇所からの局所的な有害物質の漏出を的確に再現する必要がある。そこで、既往の研究事例を参考とし、3 次元解析コード「Dtransu-3D・EL」を使用することで、継手箇所をより精密に再現した鋼管矢板遮水壁の環境適合性を評価する。なお、上記(3)で示した稲積ら²²⁾によって実施された解析では、鋼管矢板遮水壁における鋼管ならびに継手箇所を一体として 2 次元的にモデル化しており、鋼管矢板遮水壁全体として機能する環境適合性が評価されている。

第4章 鋼管矢板遮水壁の環境適合性評価

本章は、海面処分場における鋼管矢板遮水壁を対象に3次元浸透・移流分散解析を実施することによって、有害物質を含んだ廃棄物浸出水の周辺環境への漏出抑制で代表される環境適合性を評価する。具体的には、以下に示す2点について議論する。

- (1) 鋼管矢板遮水壁の環境適合性に関する換算透水係数を用いた既往の評価手法（均一層モデル）に対する、鋼管矢板遮水壁内での継手箇所の3次元的な配置ならびに透水係数分布を考慮した評価手法（鋼管・継手モデル）の適用性検討
- (2) 鋼管・継手モデルによる種々の継手形状ならびに継手性能を有する鋼管矢板遮水壁の環境適合性の比較評価

4.1 解析対象と評価指標

図4.1は本解析において設定した基本的な処分場3次元断面を示している。設定した処分場3次元断面は、海面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4.1に示す処分場3次元断面では、廃棄物層下端ならびに海底には粘土層が堆積しており、自然堆積粘土層は海面処分場における底面遮水層としての役割を果たしている。なお、鋼管矢板遮水壁は自然堆積粘土層内に3m根入れされており、鋼管矢板遮水壁の構造条件は検討項目に応じて変化するものである。

図4.1に対して、海面処分場における鋼管矢板遮水壁の施工事例では、鋼管矢板遮水壁の力学的安定性の保持ならびにフェイルセーフの概念により、二重の鋼管矢板遮水壁が用いられることがある（図4.2参照）。また、鋼管矢板遮水壁の力学的安定性を向上させるため、底面遮水工の機能を担う自然堆積粘土層においてはSCP改良等の基盤改良が実施されることもある。しかしながら、本研究の対象は鋼管矢板遮水壁が有する環境適合性（有害物質に対する封じ込め性能）の評価である。そのため、本解析では図4.1に示すように海面処分場を簡略化し、一重の鋼管矢板遮水壁、廃棄物層ならびに自然堆積粘土層で構成される処分場3次元断面を仮定している。また、設定し

た処分場 3次元断面は海面処分場が与える周辺環境への汚染リスクに対して、より厳しい遮水工構造条件である。

海面処分場では、処分場内外の水位差が 2m を超えないように日常的に管理されている⁴⁾。そこで、**図 4.1** に示した処分場 3次元断面では海域上端部に全水頭 $H=0\text{m}$ 、および廃棄物層上端部に全水頭 $H=2\text{m}$ を境界条件として与え、2m で規定される管理水位を再現している。なお、処分場 3次元断面の境界端は全て非排水条件である。本解析において構成各層に材料特性として与えた移流分散物性値は、**表 3.1** に示している。

現在、排出されたごみの大部分は焼却処理された後、焼却残渣として廃棄物処分場にて埋め立てられる。したがって、比較的近年に建設された廃棄物処分場では、従来の有機物主体の廃棄物埋立てから移行し、焼却残渣に含まれ得る重金属類が主たる環境汚染物質となっている。なお、重金属類は水溶性であるため、海面処分場から漏水が生じた場合、漏水流に連動しつつ移流分散作用によって処分場外へ漏出する可能性がある。よって、本研究が対象とする処分場から漏出し得る有害物質は重金属類と仮定している。本解析では、廃棄物層において汚染源と仮定して有害物質（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いる。

海面処分場における環境保全基準として、周辺海域の水質および底質に関する環境基準値（管理基準値）（**表 2.1** および **表 2.2** 参照）は、処分場に廃棄される廃棄物の受入れ基準値（**表 4.1** 参照）の 1/10 であることが読み取れる。そこで、本解析では鋼管矢板遮水壁の環境適合性を評価する一つの指標として、鋼管矢板遮水壁の海域側端（**図 4.1** において破線で囲まれた断面）における有害物質濃度に着目している。すなわち、本解析では鋼管矢板遮水壁の海域側端において有害物質濃度が $C=0.1$ に達する時間を、海面処分場ならびに鋼管矢板遮水壁の環境適合性が損なわれた（**図 1.6** 参照、環境リスクの発生）として捉え、 $C=0.1$ に達するまでの時間を評価指標としている。

4.2 継手局所漏出を考慮した鋼管・継手モデル

海面処分場における鋼管矢板遮水壁に関する環境適合性（有害物質の封じ込め性能）の評価では、鋼管矢板遮水壁の換算透水係数が一般的に用いられている²⁾。ここで、換算透水係数を用いた評価とは、鋼管矢板遮水壁を構成する鋼管部と継手部を一体とみなし、50cm 層厚の均一透水層と等価な透水係数を求めることである（**図 1.7** 参照）。換算透水係数を用いた評価は遮水工基準と直接的に照合可能であるため、鋼管矢板遮水壁の技術開発では頻繁に用いられる。しかしながら、換算透水係数を用いた鋼管矢板遮水壁の評価では、漏水の可能性が高い継手箇所の透水係数と不透水として仮

定される鋼管部を平均化しているため、実現場にて問題となる漏出箇所ならびに時間の特定が容易でない。すなわち、鋼管矢板遮水壁における継手箇所からの局所的な有害物質の漏出による環境影響を評価することが困難である。そこで、本節では鋼管矢板遮水壁における継手箇所からの浸出水の局所的な漏出を表現し得る評価手法を議論する。評価手法の検討では、換算透水係数を用いた評価手法を「均一層モデル」とし、鋼管と浸出水の漏出経路である継手箇所を互いに考慮した評価手法を「鋼管・継手モデル」としている。

図 4.3 および図 4.4 は、均一層モデルおよび鋼管・継手モデルの概略を示している。

図 4.3 に示す均一層モデルでは、鋼管矢板遮水壁全体に換算透水係数として $2.0 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 、 $1.0 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 、 $1.0 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ および $1.0 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ を各々与えた。一方、鋼管・継手モデル（図 4.4 参照）では、鋼管径 1m に対して 0.25m の間隔で継手箇所を設けている。これは、図 1.5 で示したように鋼管矢板の標準的なサイズを再現しているものである。また、鋼管・継手モデルでは、鋼管部と継手部を考慮した全体の透水係数が均一層モデルで与えた鋼管矢板遮水壁全体の透水係数と等しくなるよう、付録として示した換算透水係数からの逆算によって、鋼管部ならびに継手部へ透水係数を各々与える。すなわち、鋼管部は透水係数が無限小であると仮定した上、継手部には透水係数として $2.5 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 、 $1.3 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 、 $1.3 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ および $1.3 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ を与える。表 4.2 は、両モデルの構成各層に与えた材料特性をまとめている。

図 4.5 は、両モデルにおける廃棄物層から処分場外に漏出した有害物質の総物質質量と経過時間の関係を示している。また、均一層モデルでは遮水壁として設定した均一層、鋼管・継手モデルでは鋼管部および継手部における、鋼管矢板遮水壁の海域側端を通過する有害物質の濃度フラックス（単位面積および単位時間あたりに通過する物質質量）の経時変化を図 4.6 に表している。一方、図 4.7 は両モデルにおいて確認された処分場外に漏出する有害物質の最高濃度と経過時間の関係を表している。なお、図 4.8 には、両モデルにおける廃棄物から漏出する有害物質の濃度分布の時刻暦を示している。図 4.8 は有害物質の処分場外への漏出状況に関する両モデルの比較を容易にするため、鋼管矢板遮水壁の海域端から表現したものである。

図 4.5 および図 4.6 では、両モデルにおいて廃棄物層から処分場外へ漏出する有害物質の総物質質量に大きな相違はみられないものの、鋼管・継手モデルでは均一層モデルと比較して、継手箇所において漏出する有害物質の濃度フラックスが集中している。すなわち、鋼管・継手モデルは、鋼管部と比べて透水係数の高い継手箇所に有害物質を含む浸出水の流量集中を定量的に表現することができる。さらに、図 4.8 に示されているように、均一層モデルでは有害物質を含む浸出水が鋼管矢板遮水壁から均等に漏出し、処分場外へ漏出する有害物質濃度が年数経過に従って均一に増加する傾向に

対し、鋼管・継手モデルでは有害物質を含む浸出水が継手箇所において局所的に漏出し、処分場外へ漏出する有害物質濃度が年数経過に従って継手箇所において局所的に増加する。その結果、**図 4.7** に示されるように、鋼管・継手モデルでは処分場外へ漏出する有害物質濃度が均一層モデルと比較して早期に増加する。例えば、評価指標として設定した鋼管矢板遮水壁の海域側端における有害物質濃度 C が 0.1 に達する時間では、均一層モデル（鋼管矢板遮水壁全体の透水係数 $=1.0 \times 10^{-8}$ cm/s）において約 110 年、一方鋼管・継手モデル（鋼管部・継手部を考慮した鋼管矢板遮水壁全体の透水係数 $=1.0 \times 10^{-8}$ cm/s）において約 70 年である（**図 4.7** 参照）。また、鋼管矢板遮水壁全体の透水係数が均一層モデルならびに鋼管・継手モデルにおいて等価である他の解析条件においても、鋼管・継手モデルは浸出水の局所漏出の影響により、均一層モデルと比較して早期に環境有害物質の漏出が確認され（**図 4.9** 参照）、また、その傾向は鋼管矢板遮水壁全体の透水係数の上昇に伴い顕著となる（**図 4.10** 参照）。これは上記した一例と同様の傾向である。

上記したように、鋼管・継手モデルを用いた海面処分場における鋼管矢板遮水壁に関する環境適合性の評価は、鋼管矢板遮水壁の継手部で発生する局所的な浸出水漏出を再現可能であり、また均一層モデルと比較して**図 4.9** で示したように、早期に環境基準値を超過する有害物質が処分場外へ漏出する傾向を示す。換言すれば、従来実施されている換算透水係数を基本とした均一層モデルを用いた評価は漏出する有害物質の総物質量は概略的に評価できるものの、鋼管矢板遮水壁における有害物質の局所漏出を再現できないため、環境適合性を有害物質の漏出時間として安全側に予測している可能性がある。さらに、均一層モデルでは、鋼管矢板遮水壁における有害物質の漏出箇所に対する定量的な特定も困難である。海面処分場において構築された鋼管矢板遮水壁を長期的に維持・補修するためには、鋼管矢板遮水壁の環境適合性が何時そして何れの箇所において損なわれるかを適切に推測することが重要である。本観点からも鋼管・継手モデルを用いた評価によって、鋼管矢板遮水壁の細部にわたる環境適合性を検証することが重要である。

本節では、鋼管本体に比べて高透水性の継手箇所を有する鋼管矢板遮水壁に関する環境適合性の評価では、鋼管・継手モデルで再現したような継手箇所からの浸出水の局所的な漏出を考慮しなければならないことを明らかにした。

4.3 鋼管・継手モデルによる継手性能評価

海面処分場における鋼管矢板遮水壁の継手には、**図 1.5**、**図 2.6** および**図 2.7** で示す

ような種々の形式が採用されている。また、遮水性能が実験的に報告されている継手形式としては、継手空間内に袋詰めモルタルが充填された P-T 継手、モルタルの充填とともに漏洩防止ゴム板が取り付けられた改良型 P-T 継手および膨潤止水材が塗布・接着された H-H 継手（を施した連結鋼管矢板）がある。既往の報告によると、P-T 継手を持つ鋼管矢板、改良型 P-T 継手を鋼管矢板ならびに H-H 継手を施した連結鋼管矢板の換算透水係数は、処分場内外の水位差が 5m 以下の条件 ($p_w \leq 0.05\text{MPa}$) において、それぞれ $1 \times 10^{-6}\text{cm/s}$ オーダー、 $1 \times 10^{-8}\text{cm/s}$ オーダーおよび $1 \times 10^{-9}\text{cm/s}$ オーダーを発揮できることが実証されている^{2), 11), 12)}。しかしながら、これまで報告されている継手を有する鋼管矢板遮水壁の遮水性は、あくまでも換算透水係数を用いた実験的な評価である。

本節では既往報告された鋼管矢板遮水壁の換算透水係数を、鋼管部ならびに継手部の透水係数として逆算（付録参照）し、鋼管・継手モデルに適用することで、種々の継手形式を有した鋼管矢板遮水壁の環境適合性を評価する。なお、表 4.3 には各種継手形状を有する鋼管矢板遮水壁の換算透水係数、鋼管と継手箇所の寸法、さらに継手箇所の透水係数を示している。なお、種々の継手形状・性能を考慮した鋼管矢板遮水壁に関する環境適合性の評価では、以下に示す 4 つの継手形式を有する鋼管矢板遮水壁を鋼管・継手モデルに適用する。

Case I : P-T 継手を有する鋼管矢板遮水壁

Case II : 改良型 P-T 継手を有する鋼管矢板遮水壁

Case III : 改良型 P-T 継手を有する連結鋼管矢板遮水壁

Case IV : H-H 継手を有する連結鋼管矢板遮水壁

図 4.11～図 4.14 は、Case I～Case IV に対する鋼管・継手モデルの概要を示している。なお、各モデルにおける継手箇所の間隔に関して、Case I および Case II では鋼管径 1m に対し継手箇所 0.25m、Case III では連結鋼管径 2.25m に対し継手箇所 0.25m、ならびに Case IV では連結鋼管径 2.25m に対し継手箇所 0.5m である。表 4.4 に各構成層に与えた材料特性としての物性値を示す。ここで、Case I～Case IV において設定した継手箇所の透水係数は付録に示したとおり、Case I では $1.3 \times 10^{-6}\text{cm/s}$ 、Case II および Case III では $1.3 \times 10^{-8}\text{cm/s}$ 、ならびに Case IV では $1.8 \times 10^{-9}\text{cm/s}$ である。

図 4.15 は、Case I～Case IV における廃棄物層から処分場外に漏出した有害物質の総物質質量と経過時間の関係を示している。図 4.16 は、Case I～Case IV において確認された処分場外に漏出する有害物質の最高濃度と経過時間の関係を表している。また、図 4.17 には Case I～Case IV における廃棄物から漏出する有害物質の濃度分布の時刻暦を

示している。なお、図 4.17 は有害物質の処分場外への漏出状況に関する両モデルの比較を容易にするため、鋼管矢板遮水壁の海域端から表現したものである。

図 4.15～図 4.17 より、鋼管矢板遮水壁の海域側端において有害物質濃度 C が 0.1 に達した時間は、Case I で 1 年未満および Case II で約 70 年である（図 4.16 参照）。なお、Case III および Case IV では、140 年に及んでも環境基準値を超過する有害物質の漏出（処分場外にて $C=0.1$ となる挙動）は確認されない。すなわち、継手の配置間隔は同じであるが、継手箇所の透水係数が異なる Case I と Case II からは、鋼管矢板遮水壁における継手箇所の低透水性が有害物質の封じ込めに対して大きく貢献している。さらに、Case III で代表される鋼管矢板遮水壁における継手箇所の遠配置化は、Case II と比べ漏出する総有害物質質量をおよそ半減させる効果を有する（図 4.15 参照）。すなわち、継手箇所の低透水性とともに継手箇所の遠配置化は、処分場外へ漏出する有害物質濃度を低減させることにつながり、有害物質の封じ込め効果を大きく向上させる要因となる。また、Case IV として示された H-H 継手を施した連結鋼管矢板遮水壁は、継手箇所の低透水性ならびに遠配置化を最も効率的に達成した技術であると言える。ここで、Case IV における有害物質の漏出は、鋼管矢板遮水壁を直接浸出する経路よりも、底面遮水工である自然堆積粘土層を経由して鋼管矢板遮水壁下端を回り込む経路が卓越している（図 4.17 参照）。すなわち、H-H 継手を施した連結鋼管矢板遮水壁は、側面遮水工として有害物質の封じ込め効果を十分に担うことができる。

本節では、鋼管矢板遮水壁に関する継手箇所を低透水性化する技術および継手箇所の半減・遠配置化する技術が、海面処分場の環境適合性に対して大きく貢献することを明らかにした。また、現状における鋼管矢板遮水壁の技術開発では、H-H 継手を施した連結鋼管矢板遮水壁の環境適合性の高さを示すことができた。

一方、海面処分場における有害物質の封じ込めの概念では、側面遮水工として鋼管矢板遮水壁の遮水性能（有害物質の封じ込め性能）の向上に伴い、底面遮水工の遮水性能も側面遮水工と同レベルまで向上させる必要があると考える。これは、高度な遮水性能を有する鋼管矢板遮水壁を適用した場合（例えば Case IV に相当する）においても、長期的には廃棄物浸出水が鋼管矢板遮水壁の根入れ以深へ回り込み、底面遮水工を経由して処分場外へ漏出する傾向を示すためである。さらに、底面・側面遮水工に有害物質の漏出を完全に防止する機能（完全遮水機能）が達成された場合を想定しても、遮水工の完全遮水機能は海面処分場内に半永久的に有害物質を残留させることを意味する。海面処分場内における有害物質の長期にわたる封じ込めは、遮水工の長期的な維持・管理をより厳格に実施することを必要とし、さらに処分場の跡地利用の検討に際しても大きな障害となる。そこで、底面・側面遮水工の性能には、完全遮水を目的とした遮水機能とともに廃棄物層の浄化を促進する機能も求められると考える。

第 5 章 鋼管矢板遮水壁の環境適合性向上技術

前章では海面処分場における鋼管矢板遮水壁の環境適合性（有害物質の封じ込め効果）に関する評価手法に着目し、3次元浸透・移流分散解析による継手箇所からの局所的な漏出が環境適合性に及ぼす影響等を議論した。本章では、鋼管矢板遮水壁の環境適合性に大きく影響を及ぼす継手構造に着目し、継手構造を有効活用することで、有害物質の封じ込め効果に加え、廃棄物の浄化促進効果まで期待できる、すなわち、環境適合性の更なる向上を実現する画期的な鋼管矢板遮水壁技術を独自提案する。

5.1 集排水機能を有する鋼管矢板遮水壁

海面処分場において埋め立てられた廃棄物に含まれる有害物質は、処分場封じ込めの概念に即して一般的に処理・保管される。しかしながら、有害物質の封じ込め処理は、半永久的に海面処分場が周辺環境に対する汚染リスクを担保していることになる。さらに、有害物質が封じ込められた条件における海面処分場は、跡地利用のための構造物基礎等の建設に対して大きな支障を来たすことが予想され、処分場跡地の利用用途が制限される。従って、海面処分場にて埋め立てられた廃棄物は、側面・底面遮水工による封じ込め環境下において浄化が図られることが期待され、遮水工には長期的な維持・管理とともに、浄化促進のための技術的工夫が重要であると考えられる。

H-H継手を施した連結鋼管矢板遮水壁では、膨潤止水材が塗布・接着されるH-H継手内に30cm×30cm程度の空洞空間が形成される（図5.1参照）。なお、H-H継手の遮水処理に関する一般的な見解では、接着・塗布される膨潤止水材は仮止水用であり、形成される空洞空間内へモルタル等を充填して本遮水を行うことが考えられている。一方、有害物質を含んだ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に漏出する場合、H-H継手内に形成された空洞空間を必ず通過しなければならない。従って、予め膨潤止水材が接着・塗布されたH-H継手内の空洞空間をモルタル等の充填によって塞ぐことは、水みちの形成を促進することになる。換言すれば、空洞空間内に存在する水を完全排除し、空洞空間をドライな状況に維持することは、H-H継手内における浸出水漏水経路の一つを完全に遮断することができる。具体的には図5.2で示すように、H-H継手内の空洞空間で滞留した廃棄物からの浸出水を揚水ポンプ等で

集排水することで、浸出水の漏水経路はほぼ完全に遮断される（このような機能を有する鋼管矢板を、以後では集排水機能を有する鋼管矢板遮水壁と呼ぶ）。なお、膨潤止水材が塗布・接着された H-H 継手を有する連結鋼管矢板の打設後における H-H 継手の空洞空間の土砂洗浄は、確実に実施できることを既往の知見²³⁾ から実証されている。

海面処分場において、H-H 継手の空洞空間内水位が処分場内外の水位よりも低位置にある状態では、処分場内外から H-H 継手の空洞空間内へ海水もしくは廃棄物浸出水が流入する水頭勾配となる。従って、H-H 継手の空洞空間内の水位を適切に管理すれば、浸出水が処分場内から処分場外へ漏出する危険性は少ない。また、H-H 継手の空洞空間における浸出水の揚水作業は必ずしも定常的に実施する必要がなく、処分場内外の水位よりも H-H 継手の空洞空間内水位が低位置に維持できる頻度で実施すればよいと考えている。そのため、H-H 継手の空洞空間内に滞留した浸出水の揚水作業には大規模な設備を必要とせず、例えば災害救助用等の小型揚水ポンプで対応可能であり、集排水が経済的に実施できると考える。

また、集排水機能を有する鋼管矢板遮水壁では、埋立廃棄物から H-H 継手の空洞空間内に漏出（滞留）した浸出水を揚水作業によって集排水するため、結果的に有害物質を含んだ廃棄物の浄化が促進される効果も期待できる。鋼管矢板遮水壁が廃棄物の浄化促進機能も兼ねることは、封じ込めの概念のみに即して建設される海面処分場（遮水工）の長期的な環境への信頼性に対して大きな利点を添えることになる。

一方、現状において適用頻度が高い鋼管矢板遮水壁では、継手箇所の遮水性を高めるため、継手内空間にモルタルを充填することで遮水処理が行われる。しかしながら、継手空間内へモルタル等の充填による遮水処理は、長期にわたる継手箇所の維持・管理の実施を困難とする。例えば、継手とモルタルの界面において水みち等の発生に起因して浸出水の漏出が認められた際、継手箇所の管理補修は不可能である。一方、集排水機能を有する鋼管矢板遮水壁の場合、H-H 継手の空洞空間へモルタル等の充填を行わず、空洞空間が残存している状態である。そのため、集排水機能を有する鋼管矢板遮水壁に関する長期的な維持・管理補修は、H-H 継手の空洞空間を有効利用することで、比較的容易に実施することができる。例えば、**図 5.3** に概念を示すように、H-H 継手内における処分場側フランジ接触部での通水性を海域側フランジ接触部と比べて増しておくことで、H-H 継手の空洞空間へ廃棄物浸出水の集中ならびに集水を促進することができる。廃棄物の浄化を促進することが可能である。また、H-H 継手の遮水性を高めることで、H-H 継手の空洞空間へ廃棄物浸出水の集中ならびに集水を調整し、H-H 継手の空洞空間における揚水作業の頻度を管理することもできる。このように、海面処分場に求められる環境諸条件に応じて、H-H 継手の透水係数を調節することが可能である（**表 5.1** 参照）。なお、H-H 継手は膨潤止水材を予め塗布・接着することで

遮水処理が実施されるが、塗布・接着する膨潤止水材の膜厚を調整することで、遮水性能を管理できる。

次節からは、提案した集排水機能を有する鋼管矢板遮水壁の適応性を検討するため、集排水機能を有する鋼管矢板遮水壁をモデル化した「継手空洞モデル」を作成し、以下の2点について、3次元浸透・移流分散解析を実施することで議論する。

- (1) H-H 継手に形成された空洞空間内の水位を処分場内外の水位より低位置に維持するために必要な集排水頻度（揚水作業頻度）
- (2) 集排水機能を有する鋼管矢板遮水壁の環境適合性ならびに廃棄物の浄化性能

5.2 モデル概要

本解析では、集排水機能を有する鋼管矢板遮水壁を再現した「継手空洞モデル」、ならびに比較対象として前章で述べた H-H 継手を施した連結鋼管矢板を再現した Case IV を使用する。なお、本章では Case IV として示した H-H 継手を施した連結鋼管矢板の再現を「継手充填モデル」と略称する。

図 5.4 は継手空洞モデルならびに継手充填モデルの概要比較を示している。継手空洞モデルでは継手充填モデルと同様、連結鋼管径 2.25m に対して H-H 継手箇所が 0.5m の間隔で存在している。また、継手空洞モデルにおける H-H 継手には 30cm×50cm の空洞空間を設けており、3cm 厚さの止水材接着領域が空洞空間の両端を囲っている。さらに、H-H 継手内の空洞空間の最深部から 2m 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。一方、継手充填モデルでは、H-H 継手内の空洞空間へモルタル等の充填を想定しているため、H-H 継手箇所は均一層であると仮定している。

継手空洞モデルにおける止水材接着領域には、透水係数として $3.0 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ 、 $3.0 \times 10^{-9} \text{cm/s}$ および $3.0 \times 10^{-10} \text{cm/s}$ を各々変化させて与えている。対して、空洞充填モデルでは H-H 継手を施した連結鋼管矢板の遮水性に関する既往の報告を参考にし、H-H 箇所継手に $1.8 \times 10^{-9} \text{cm/s}$ の透水係数を与えている。なお、設定した継手充填モデルは、止水材接着領域が $3.0 \times 10^{-10} \text{cm/s}$ の透水係数を保持する空洞空間モデルと同等の換算透水係数を有することになる。両モデルにおいて各構成層に与えた材料特性は、表 5.2 に示すとおりである。

5.3 集排水頻度

集排水機能を有する鋼管矢板遮水壁が担う環境機能の発揮，ならびに有害物質を含んだ浸出水の処分場外への漏出防止のためには，H-H継手の空洞空間内の水位を処分場内外水位より低位置に維持することが重要である。そこで，H-H継手の空洞空間内の水位を，処分場内外水位より低位置に維持するために必要な集排水頻度（揚水作業頻度）を検討する。解析では，H-H継手の空洞空間において揚水作業を行った直後のドライな空洞空間の状態を初期状態として想定し，空洞空間内に初期水位-11mを与え，空洞空間内の水位が海水面と同じ水位0mに達するまでの時間を検討した。

図 5.5 は，止水材接着領域の透水係数が異なる場合における H-H 継手の空洞空間内水位の経時変化を示している。これによると，室内透水試験の結果（図 2.7 参照）として既に報告されている止水材接着領域の透水係数が $1 \times 10^{-9} \text{cm/s}$ オーダー（継手空洞モデルでは止水材接着領域の透水係数が $3.0 \times 10^{-10} \text{cm/s}$ に相当）では，空洞空間内水位が海水面と同等の水位に達するまで 2 年程度を要する。すなわち，隔年 1 度の揚水作業を実施することで H-H 継手の空洞空間内の水位は外海面より低位置に維持できる。また，隔年 1 度の揚水処理は処分場を維持管理していく上で，経済的にも大きな負担とはならないと考えられる。

止水材接着領域の透水係数が膨潤止水材の欠損や劣化等が原因で上昇した場合を考える。H-H 継手では，膨潤止水材の塗布・接着により遮水処理が行われる（図 2.7 参照）。しかしながら，膨潤止水材は浸出水との化学的反応や海域からの波力等により欠損し，H-H 継手の遮水性能が低下することも想定される。ただし，稲積らは膨潤止水材が初期の状態から 75% 程度欠損した場合を想定しても，H-H 継手は $1 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ オーダーの透水係数を発揮できることを報告している¹²⁾（図 2.8，図 2.9 および表 2.3 参照）。そこで，H-H 継手に関する膨潤止水材の欠損と透水係数の関連を図 5.4 と照合すると，止水材接着領域において膨潤止水材が 75% 欠損した状態でも，H-H 継手の空洞空間では 3 ヶ月に 1 度の間隔で揚水作業を実施すればよいことがわかる。

集排水機能を有する鋼管矢板遮水壁では，H-H 継手内にモルタル等の充填物を施していないため，H-H 継手の空洞空間を有効利用することが可能であり，膨潤止水材によって発揮される遮水性能に対する管理補修も比較的容易である。例えば，H-H 継手の空洞空間における水位上昇が予測を反して著しい場合には，空洞空間を利用して膨潤止水材を再塗布することで H-H 継手の遮水性を修復することができ，かつ，水位上昇を抑制することが可能である。

本節では，集排水機能を有する鋼管矢板遮水壁における揚水作業が，実務的に可能な頻度で実施できることを明らかにした。また，H-H 継手の空洞空間を有効に活用す

ることで、H-H継手の遮水性能に関する長期的な維持・管理補修も可能であることを言及した。

5.4 遮水・浄化性能

集排水機能を有する鋼管矢板遮水壁は、廃棄物浸出水を揚水作業により集排水するため、鋼管矢板遮水壁から浸出水の漏出を完全に遮断するとともに廃棄物層の浄化も促進する効果が期待できる。そこで、集排水機能を有する鋼管矢板遮水壁が発揮し得る環境適合性（有害物質の封じ込め性能）および廃棄物の浄化促進効果を、継手空洞モデルおよび継手充填モデルの比較によって議論する。

継手空洞モデルでは、H-H継手の空洞空間内水位-11mを固定条件として与えている。また、H-H継手の空洞空間内では長期間にわたって揚水作業が継続されると仮定し、空洞空間内に有害物質濃度を固定条件で $C=0$ を与え、さらに、止水材接着領域では、膨潤止水材が塗布されたH-H継手が発揮できる透水係数 $3.0 \times 10^{-10} \text{cm/s}$ を与えた。

図 5.6 は、継手空洞モデルおよび継手充填モデルにおける鋼管矢板遮水壁を通過して処分場外に漏出した有害物質の総物質量と経過時間の関係を表している。図 5.7 は、両モデルにおける処分場外へ漏出した有害物質の最高濃度の経時変化を表している。図 5.8 は、両モデルにおいて得られた経過時間に対する処分場内に残存している有害物質量の初期条件に対する比率を示している。さらに、図 5.9 には、両モデルの経過時間に伴う有害物質の濃度分布時刻暦を示している。

図 5.6 および図 5.7 によると、継手空洞モデルでは約 50 年が経過するまで、有害物質の処分場外への漏出は認められず、50 年以後わずかな漏出が確認される。この傾向に関して、継手空洞モデルにおいて鋼管矢板遮水壁の継手箇所を経由する浸出水は、H-H継手の空洞空間内の揚水作業により処分場外へ漏出する以前に揚水作業により集排水される。一方、底面遮水工である自然堆積粘土層から鋼管矢板遮水壁下端を回り込む経路で漏出した浸出水は、50 年以後の時点において若干であるが処分場外へ漏出する。しかしながら、継手空洞モデルは処分場外に漏出した有害物質の総物質量および最高濃度において継手充填モデルと比べて低値である。ここで、集排水機能を有する鋼管矢板遮水壁で特筆すべき効果は、継手空洞モデルにおいて廃棄物層内の有害物質が鋼管矢板遮水壁の近傍から徐々に浄化されており、約 100 年で廃棄物層内の有害物質をおよそ 4 割も浄化していることである（図 5.8 および図 5.9 参照）。すなわち、鋼管矢板遮水壁に集排水機能を担わせる技術は、鋼管矢板遮水壁からの浸出水漏出の防止（遮水効果）とともに廃棄物層の浄化促進の観点からも有効である。

本節では、集排水機能を有する鋼管矢板遮水壁が有害物質の封じ込め効果、さらに埋立廃棄物の浄化促進効果を併せ持つため、H-H継手の空洞空間内にモルタル等が充填されたH-H継手を有する連結鋼管矢板遮水壁と比較して、より高い環境適合性を発揮することを示した。

5.5 環境適合性の向上

集排水機能を有する鋼管矢板遮水壁は有害物質の封じ込めにおいて、第4章で検討した種々の継手形状および性能を有する鋼管矢板遮水壁と比べ、高い性能を有することが示された。さらに、集排水機能を有する鋼管矢板遮水壁は有害物質の封じ込め効果に留まらず、廃棄物浸出水の揚水作業による集排水により廃棄物の浄化促進効果も併せ持つ。集排水機能を有する鋼管矢板遮水壁が発揮する両効果は、従来の海面処分場において大きな課題の一つとして認識されており、海面処分場における環境リスク低減の観点から意義深い技術であると考えられる。さらに、H-H継手の空洞空間における揚水作業は止水材接着領域が健全な状態で隔年1度の低頻度で実施することが可能であり、揚水作業に莫大な費用を要することはない。また、H-H継手の空洞空間は揚水作業と同時に多機能空間として有効活用することが可能であり、止水材接着領域に欠損が生じた場合も確認・修復が比較的容易に実施できる。表5.3は、本章で提案した集排水機能を有する鋼管矢板遮水壁技術で明らかにされた特徴をまとめている。

本節では集排水機能を有する鋼管矢板遮水壁技術の有効性を論じたが、本技術概念は鋼管矢板遮水壁に限定されるものでない。例えば、海面処分場における廃棄物層内へ集排水機能を有する鋼管矢板を打設することで、集排水機能を有する鋼管矢板は処分場浸出水集排水設備として機能するとともに、処分場跡地利用における構造物の基礎工としての機能も兼ねることができる。筆者が独自に提案した集排水機能を有する鋼管矢板遮水壁技術は、処分場に求められる様々な環境適合性に対して幅広く応用の可能性を秘めた技術である。

第 6 章 結 論

本研究では、環境安全性に対する信頼性の向上が急務とされる海面処分場ならびに鋼管矢板遮水壁に着目し、有害物質を含んだ廃棄物浸出水の周辺環境への漏出抑制で代表される環境適合性を、3次元浸透・移流分散解析を用いて評価した。さらには、鋼管矢板遮水壁に求められる環境適合性を向上させる、鋼管矢板を遮水兼集水排水壁として有効利用するための技術の可能性を検討した。

6.1 成 果

得られた成果は以下のとおりである。

- (1) 鋼管本体に比べて高透水性の継手箇所を有する鋼管矢板遮水壁に関する環境適合性の評価では、鋼管・継手モデルで再現したような継手箇所からの浸出水の局所的な漏出を考慮しなければならないことを明らかにした。海面処分場の外域では継手箇所からの有害物質の局所漏出によって、現行評価手法と比べて早期に環境基準値を上回る有害物質の汚染が確認された。
- (2) 鋼管矢板遮水壁に関する継手箇所を低透水化する技術および継手箇所の半減・遠配置化する技術は、海面処分場の環境適合性に対して大きく貢献することを明らかにした。また、現状における鋼管矢板遮水壁の技術開発では、H-H継手を施した連結鋼管矢板遮水壁の環境適合性の高さを示した。
- (3) 鋼管矢板遮水壁に関する長期的な環境適合性では、既往の有害物質の封じ込め概念に留まらず、封じ込め環境下における浄化促進効果を積極的に検討しなければならないことを提案した。鋼管矢板遮水壁における継手形式の一つであるH-H継手は、継手形状ならびに遮水メカニズムより、集排水機能を有する鋼管矢板遮水壁として効率的に利用することができる。
- (4) 集排水機能を有する鋼管矢板遮水壁における揚水作業は、実務的に可能な頻度で

実施できることを明らかにした。また、H-H継手の空洞空間を有効に活用することで、H-H継手の遮水性能に関する長期的な維持・管理補修も可能であることを提言した。

- (5) 集排水機能を有する鋼管矢板遮水壁は、有害物質の封じ込め効果、さらに埋立廃棄物の浄化促進効果を併せ持つため、H-H継手の空洞空間内にモルタル等が充填されたH-H継手を有する連結鋼管矢板遮水壁と比較して、より高い環境適合性を発揮することを示した。
- (6) 集排水機能を有する鋼管矢板は処分場浸出水集排水設備として機能するとともに、処分場跡地利用における構造物の基礎工としての機能も兼ねることができる。集排水機能を有する鋼管矢板遮水壁技術は、処分場に求められる様々な環境適合性に対して幅広く応用の可能性を秘めた技術である。

6.2 課題・展望

本研究の実施によって考えられた今後の展望は以下のとおりである。

- (1) 鋼管・継手モデルを鋼管矢板遮水壁の隅角部へも適用し、評価する必要があると考えている。遮水壁隅角部では浸出水の集中が生じると考えられ、本研究における辺部と比較して廃棄物浸出水の漏出がより早期に生じる可能性がある。
- (2) 廃棄物の封じ込めに対する、鋼管矢板遮水壁、特に継手箇所の開発は種々実施されている。しかしながら、側面・底面遮水工を総合的に考慮した技術開発ならびに評価が必要であると考ええる。すなわち、鋼管矢板遮水壁の遮水性能が向上した場合、長期的に廃棄物浸出水は底面遮水工を経由して、遮水壁下端を回り込む経路で漏出する可能性がある。
- (3) 鋼管矢板遮水壁に関する技術開発の今後は、継手箇所の遮水性能を長期的に保障するための技術・評価提案へ展開しなければならない。これは(2)とも関連しているが、既往の技術では継手箇所の遮水性能が低下した場合、その確認ならびに管理補修に莫大な費用を要するためである。

- (4) 現状では、海面処分場に求められる有害物質の封じ込め効果と廃棄物の浄化作用とは矛盾した概念である。そのため、両者の概念を効率的に達成できる遮水工技術の開発が急務の課題である。

- (5) 集排水機能を有する鋼管矢板遮水壁技術の提案は、(4)を達成するための一つの技術提案に過ぎない。今後は、本技術に関する更なる詳細評価・検討が必要であると考えらる。

参 考 文 献

- 1) 環境省ホームページ：<http://www.env.go.jp/>
- 2) 渡部要一：海面処分場の設計，処分場建設の調査・設計から施工」講習会資料，地盤工学会，pp.45-63，2003.
- 3) 吉田喜久雄：化学物質の暴露・リスク評価における数理モデルの役割と課題，資源と環境，資源環境技術総合研究所，Vol.9，No.4，2000.
- 4) 運輸省港湾局：管理型廃棄物埋立護岸設計・施工・管理マニュアル，財団法人 港湾空間高度化センター，2000.
- 5) 半谷高久：新版・環境とリサイクル：⑩うめたて処分場，小峰出版，2003.
- 6) 石井一郎：廃棄物処理－環境保全とリサイクル－，森北出版，1998.
- 7) 田中信壽：環境安全な廃棄物埋立処分場の建設と管理，技報堂出版，2000.
- 8) 小田勝也：海面廃棄物処分場の信頼性向上，ベース設計資料，建設工業調査会，No.126（土木編），pp.36-41，2005.
- 9) 岡原美知夫：鋼管矢板基礎技術の変遷と今後，基礎工，総合土木研究所，Vol.31，No.8，pp.2-5，2003.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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，土木学会，Vol.62，No.2，pp.390-403，2006.
- 13) 木村 亮：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・エス，pp.34-40，2005.
- 14) 嘉門雅史：管理型海面最終処分場の地盤工学的問題と新技術，基礎工，総合土木研究所，Vol.34，No.4，pp.10-14，2006.
- 15) 樋口壯太郎：廃棄物処理実務シリーズ・施設建設編(1)：最終処分場の計画と建設－構想から許可取得まで－，日報，1999.
- 16) 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.

- 17) 西垣 誠・小松 満：移流分散解析入門（5. 物質移動解析に必要な物性），土と基礎，地盤工学会，Vol.50，No.12，pp.80-85，2002.
- 18) 勝見 武：地盤環境汚染の基礎と解析の考え方，WEB セミナー，CRC ソリューションズ，2005
- 19) 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.
- 20) 嘉門雅史・勝見 武・遠藤和人・伊藤圭二郎・土居 亮：矢板式遮水構造を有する海面埋立処分場の性能評価，第4回環境地盤工学シンポジウム論文集，地盤工学会，pp.279-284，2001.
- 21) 足立一美：廃棄物海面処分場埋立護岸の遮水性能の評価，国総研アニュアルレポート 2003，国土交通省国土技術政策総合研究所，pp.76-77，2003.
- 22) 稲積真哉・木村 亮・嘉門雅史・西山嘉一：海面埋立処分場における鋼管矢板遮水壁に対する環境適合性の評価ならびに向上技術の一提案，建設マネジメント研究論文集，土木学会，Vol.13，pp.1-10，2006.
- 23) 田村博邦・西山嘉一・稲積真哉・木村 亮：連結鋼管矢板の開発と橋脚井筒基礎への適用事例，地盤工学ジャーナル，地盤工学会，Vol.1，No.3，pp.113-122，2006.

謝 辞

本論文を締めくくるにあたって、本研究にご協力していただいた方々、またお世話になった方々に感謝の言葉を述べたいと思います。

主査を務めてくださいました京都大学大学院工学研究科・教授・大津宏康 先生には研究室に配属された時から、多分に目をかけていただき、大変ありがとうございました。平素から、楽しいお話を聞かせていただいただけでなく、研究においても的確なアドバイスをしていただいたことに深く感謝の意を表します。先生から学んだことを大切に、これからの社会人としての生活を一步一步歩んでいきたいと思えます。

京都大学大学院工学研究科・助教授・西山 哲 先生には副査を務めていただきありがとうございました。

京都大学大学院工学研究科・助手・稲積真哉 先生には、研究者としての生活態度から論文作成まで全面的なご指導をしていただき、大変ありがとうございました。また先生には、研究以外についても無事卒業できるよう、平素より力を貸していただき非常に心強く感じました。ここで深く感謝の意を心より申し上げます。

研究生活にて生じた様々な問題の解決に多方面からサポートしてくださった京都大学大学院 工学研究科 都市社会工学専攻 社会基盤マネジメント工学講座 土木施工システム分野（大津研究室）の学生の皆様に深く感謝を申し上げます。特に、日常生活から論文作成まで色々な面で多分に目をかけていただいた磯辺公一先輩，福林良典先輩，柳 民峰先輩，酒井 悠先輩には深くお礼を申し上げます。

最後になりましたが、私の学生生活を経済面や精神面など様々な面で支えてくれた家族，また私の学生生活を豊かなものにしてくれた同級生の皆様に感謝いたします。ありがとうございました。

付 録

換算透水係数からの逆算

本研究では、均一層モデルの換算透水係数から換算透水係数の概念を逆算することによって、鋼管・継手モデルの鋼管部および継手部に各々異なる透水係数を与えている。以下にその計算方法を示す。

鋼管・継手モデルと均一層モデルの各々の鋼管矢板遮水壁からの単位幅当たり流量が等しいと仮定する。さらに、鋼管・継手モデルの鋼管部が不透水（無限小の透水係数を与える）なので、継手部からの流量と均一層からの流量が等しく、次式が成立する。

$$Q = k_e \cdot \frac{\Delta h}{T} \cdot B = k \cdot \frac{\Delta h}{t} \cdot b \quad (\text{付-1})$$

この式を変形して、

$$k = k_e \cdot \frac{t}{T} \cdot \frac{B}{b} \quad (\text{付-2})$$

(付-2)より継手部の透水係数を求めることができる。

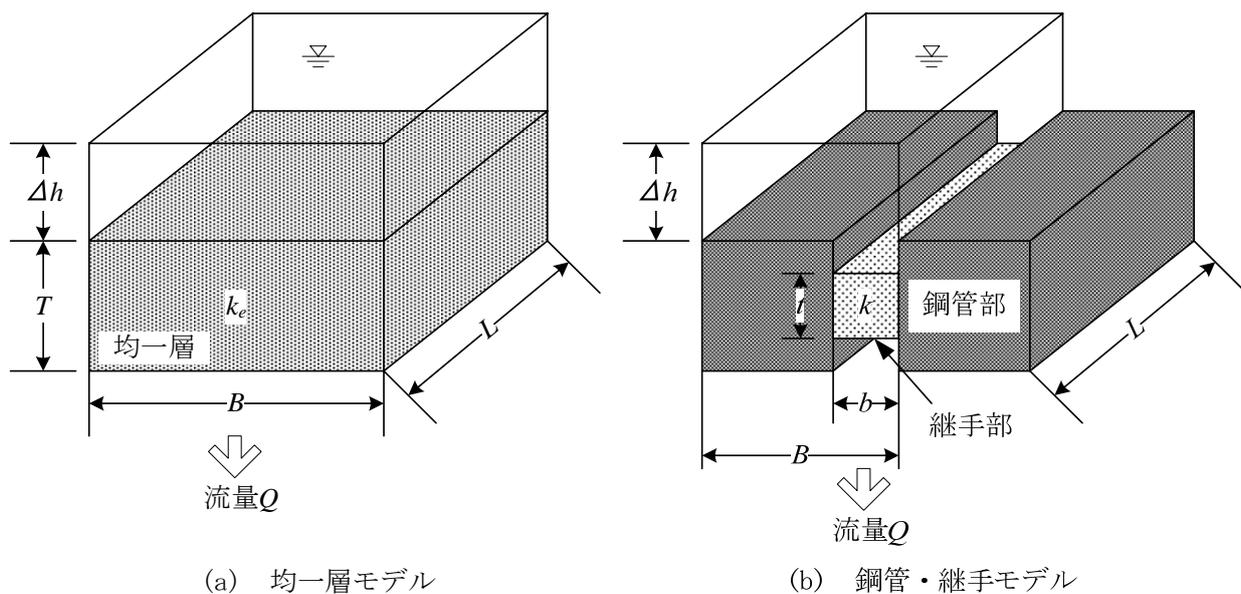


図-付 1 モデル比較図

表-付1 各Caseの換算透水係数と継手部の透水係数

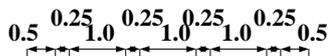
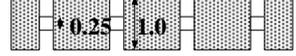
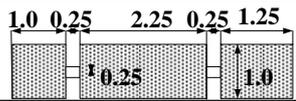
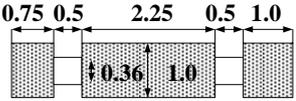
	鋼管矢板部分の上面図 	換算透水係数 k_e (cm/sec)	継手部の透水係数 (cm/sec)
Case I		1×10^{-6}	1.3×10^{-6}
Case II		1×10^{-8}	1.3×10^{-8}
Case III		5×10^{-9}	1.3×10^{-8}
Case IV		1×10^{-9}	1.8×10^{-9}

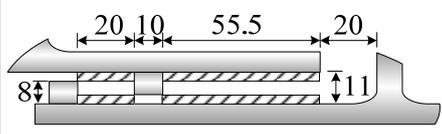
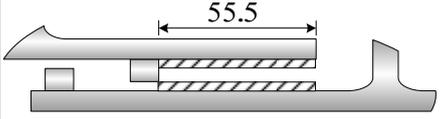
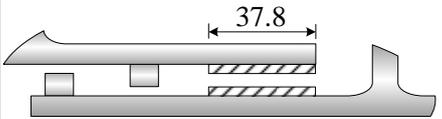
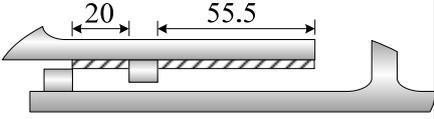
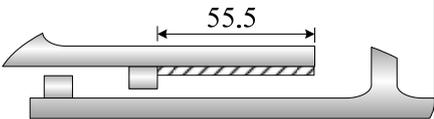
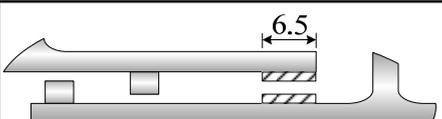
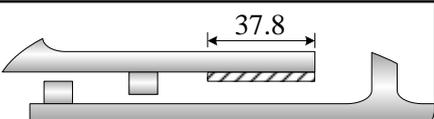
表2.1 地下水の水質汚濁に係る環境基準（重金属類）

項目	基準値
カドミウム	0.01mg/L以下
鉛	0.01mg/L以下
六価クロム	0.05mg/L以下
総水銀	0.0005mg/L以下

表2.2 土壌の汚染に係る環境基準（重金属類）

項目	基準値（溶出量）
カドミウム	0.01mg/L以下
鉛	0.01mg/L以下
六価クロム	0.05mg/L以下
総水銀	0.0005mg/L以下

表2.3 欠損を考慮した膨潤止水材の塗布・接着条件

Case	欠損率* [%]	(a) 両面接着 (単位 mm)	(b) 片面接着 (単位 mm)
1	0		
2	26.5		
3	50		
4	63.25		
5	75		

* 膨潤止水材厚 : 2 mm

表2.4 海面処分場のリスク管理

廃棄物・保有水等の流出・浸出のリスクの管理	処分場の設計・施工	○遮水工自体の信頼性の向上
		○地震，波浪，高潮・津波等の影響を考慮した信頼性設計法の導入
土地利用に当たっての廃棄物・保有水等の暴露リスクの管理	処分場の運用	○遮水機能健全性評価手法の開発 ・モニタリング手法 ・補修工法
		○積極的な保有水水位（内水位）管理
土地利用に当たっての廃棄物・保有水等の暴露リスクの管理	処分場の跡地利用	○積極的な保有水水位（内水位）管理
		○廃棄物の早期安定化

表3.1 本解析で用いた各構成層における重金属類に対する物性値

材料	海域	粘土層	廃棄物層	グラウト処理	空洞	鋼管部
透水係数 (水平方向) $k_H(\text{cm/s})$	1.0×10^{-0}	7.0×10^{-7}	1.0×10^{-0}	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-0}	無限小
透水係数 (鉛直方向) $k_V(\text{cm/s})$	1.0×10^{-0}	5.0×10^{-7}	1.0×10^{-0}	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-0}	無限小
有効間隙率 θ	1	0.65	1	1	1	0.1
縦分散長 $\alpha_L(\text{cm})$	10	10	10	10	無限小	無限小
横分散長 $\alpha_T(\text{cm})$	1	1	1	1	無限小	無限小
分子拡散係数 $D_m(\text{cm}^2/\text{s})$	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	無限小	無限小
遅延係数 R_d	1	2	1	1	1	1

表4.1 埋立場所等に排出しようとする金属等を含む廃棄物に係る判定基準（重金属類）

項目	許容限度（溶出量）
カドミウム又はその化合物	0.1mg/L以下
鉛又はその化合物	0.1mg/L以下
六価クロム又はその化合物	0.5mg/L以下
水銀又はその化合物	0.005mg/L以下

表4.2 均一層モデルと鋼管・継手モデルの各構成層における重金属類に対する物性値

材料	海域	粘土層	廃棄物層	均一層	継手箇所	鋼管部
透水係数 (水平方向) $k_H(\text{cm/s})$	1.0×10^{-0}	7.0×10^{-7}	1.0×10^{-0}	2.0×10^{-6} , 1.0×10^{-6} , 1.0×10^{-7} , 1.0×10^{-8}	2.5×10^{-6} , 1.3×10^{-6} , 1.3×10^{-7} , 1.3×10^{-8}	無限小
透水係数 (鉛直方向) $k_V(\text{cm/s})$	1.0×10^{-0}	5.0×10^{-7}	1.0×10^{-0}	2.0×10^{-6} , 1.0×10^{-6} , 1.0×10^{-7} , 1.0×10^{-8}	2.5×10^{-6} , 1.3×10^{-6} , 1.3×10^{-7} , 1.3×10^{-8}	無限小
有効間隙率 θ	1	0.65	1	0.1	0.1	0.1
縦分散長 $a_L(\text{cm})$	10	10	10	10	10	無限小
横分散長 $a_T(\text{cm})$	1	1	1	0.1	0.1	無限小
分子拡散係数 $D_m(\text{cm}^2/\text{s})$	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	無限小
遅延係数 R_d	1	2	1	1	1	1

表4.3 各種継手形状を有する鋼管矢板遮水壁の鋼管と継手箇所寸法の換算透水係数，継手箇所の透水係数

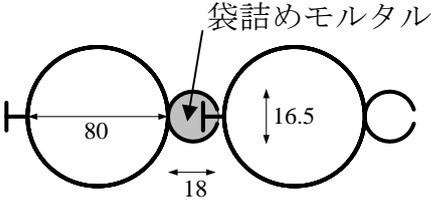
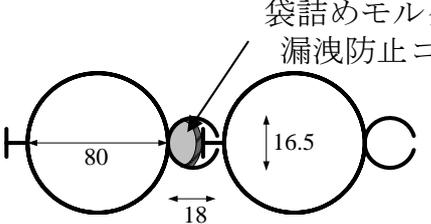
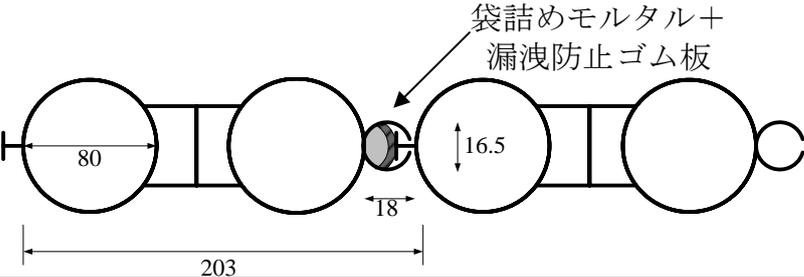
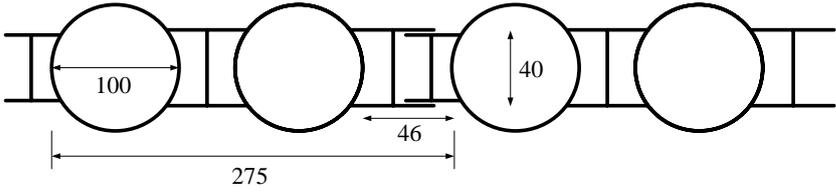
単位 cm	換算透水係数 (cm/s)	継手箇所透水係数 (cm/s)
<p>袋詰めモルタルが充填されたP-T継手</p> 	1×10^{-6}	1.8×10^{-6}
<p>モルタルの充填とともに漏洩防止ゴム板が取り付けられた改良型P-T継手</p> 	1×10^{-8}	1.8×10^{-8}
<p>改良型P-T継手を有する連結鋼管矢板遮水壁</p> 	4.9×10^{-9}	1.8×10^{-8}
<p>H-H継手を有する連結鋼管矢板遮水壁</p> 	1×10^{-9}	4.8×10^{-9}

表4.4 各Caseの各構成層における重金属類に対する物性値

材料	海域	粘土層	廃棄物層	継手箇所 (Case I)	継手箇所 (Case II, Case III)	継手箇所 (Case IV)	鋼管部
透水係数 (水平方向) $k_H(\text{cm/s})$	1.0×10^{-0}	7.0×10^{-7}	1.0×10^{-0}	1.3×10^{-6}	1.3×10^{-8}	1.8×10^{-9}	無限小
透水係数 (鉛直方向) $k_V(\text{cm/s})$	1.0×10^{-0}	5.0×10^{-7}	1.0×10^{-0}	1.3×10^{-6}	1.3×10^{-8}	1.8×10^{-9}	無限小
有効間隙率 θ	1	0.65	1	0.1	0.1	0.1	0.1
縦分散長 $a_L(\text{cm})$	10	10	10	10	10	10	無限小
横分散長 $a_T(\text{cm})$	1	1	1	0.1	0.1	0.1	無限小
分子拡散係数 $D_m(\text{cm}^2/\text{s})$	1×10^{-5}	1×10^{-5}	無限小				
遅延係数 R_d	1	2	1	1	1	1	1

表5.1 継手箇所の透水係数と種々の性能との関係

	高い	← k →	低い
遮水性	◎		◎
必要揚水量 (必要揚水頻度)	高頻度		低頻度
浄化作用	◎		○

表5.2 継手充填モデルと継手空洞モデルの各構成層における重金属類に対する物性値

材料	海域	粘土層	廃棄物層	継手箇所 (継手充填 モデル)	継手部 (継手空洞 モデル)	グラウト 処理	空洞	鋼管部
透水係数 (水平方向) $k_H(\text{cm/s})$	1.0×10^{-0}	7.0×10^{-7}	1.0×10^{-0}	1.8×10^{-9}	3.0×10^{-8} , 3.0×10^{-9} , 3.0×10^{-10}	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-0}	無限小
透水係数 (鉛直方向) $k_V(\text{cm/s})$	1.0×10^{-0}	5.0×10^{-7}	1.0×10^{-0}	1.8×10^{-9}	3.0×10^{-8} , 3.0×10^{-9} , 3.0×10^{-10}	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-0}	無限小
有効間隙率 θ	1	0.65	1	0.1	0.1	1	1	0.1
縦分散長 $\alpha_L(\text{cm})$	10	10	10	10	10	10	無限小	無限小
横分散長 $\alpha_T(\text{cm})$	1	1	1	0.1	0.1	1	無限小	無限小
分子拡散係数 $D_m(\text{cm}^2/\text{s})$	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	無限小	無限小
遅延係数 R_d	1	2	1	1	1	1	1	1

表5.3 集排水機能を有する鋼管矢板遮水壁と継手内を低透水性材料で充填した鋼管矢板遮水壁の相違点

集排水機能を有する 鋼管矢板遮水壁		継手内を低透水性材料で 充填した鋼管矢板遮水壁
空洞空間内での揚水による 浸出水漏出経路の遮断	 有害物質の 封じ込め 	空洞空間内へのモルタル等 充填に依存
空洞空間内水位を低位置に 維持することによる浸出水 漏出の危険性低減		考慮不可能
空洞空間での浸出水集排水 による浄化促進	 廃棄物の浄化 	考慮不可能
空洞空間に有効活用により 可能	 維持・管理補修 	考慮不可能
低頻度の揚水作業	 経済性 	必要なし
空洞空間によって遮水性に 関する維持・管理・補修が 容易		考慮不可能

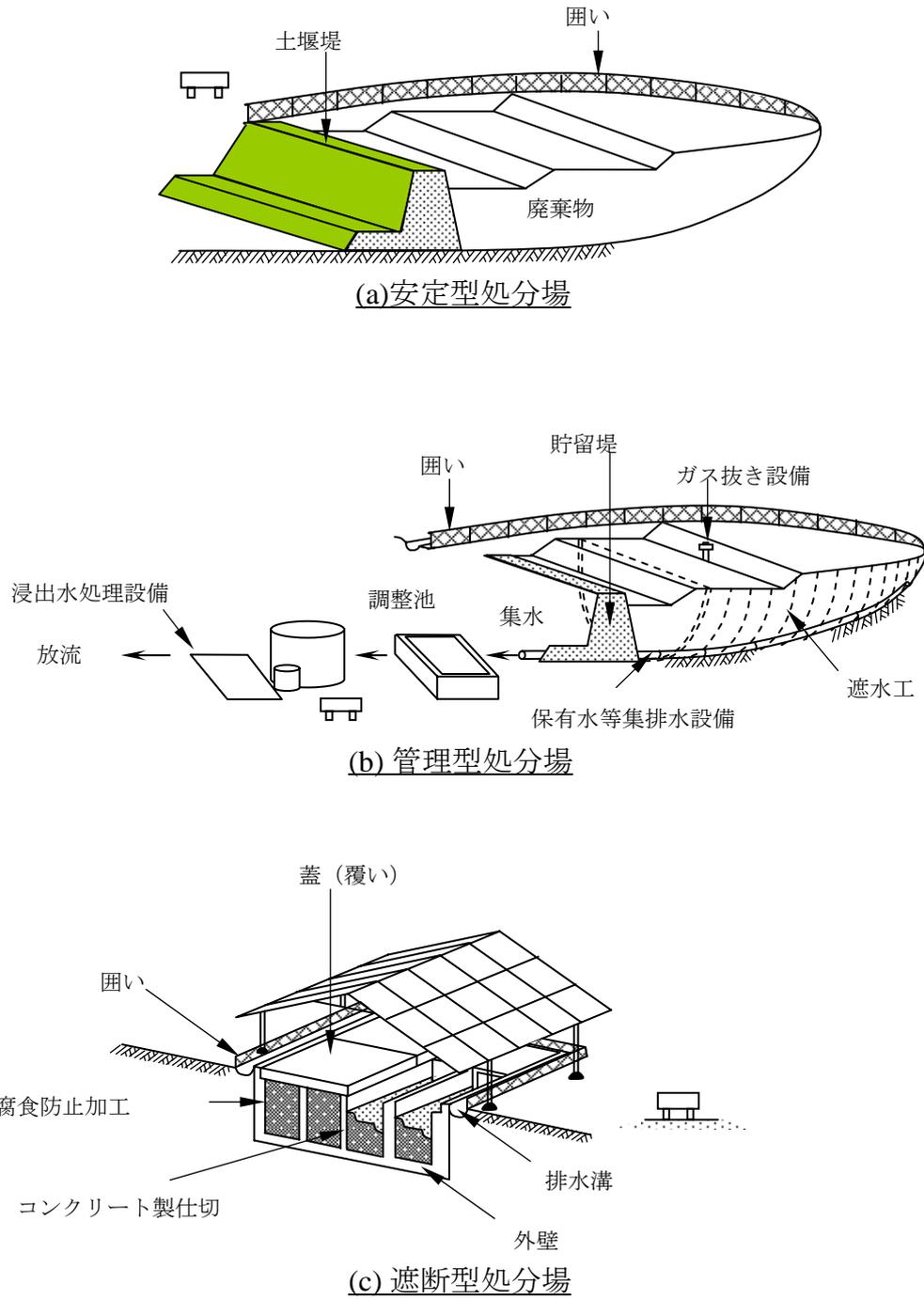


図1.1 廃棄物処分場の構造

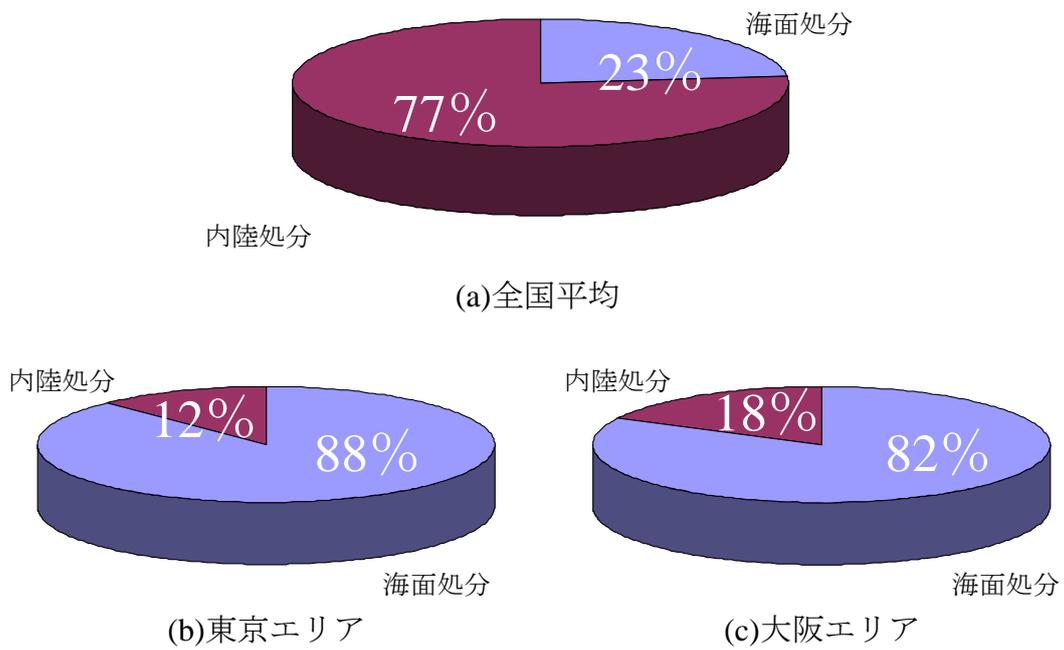


図1.2 廃棄物処分場における全体容量での海面処分場のシェア(H15)

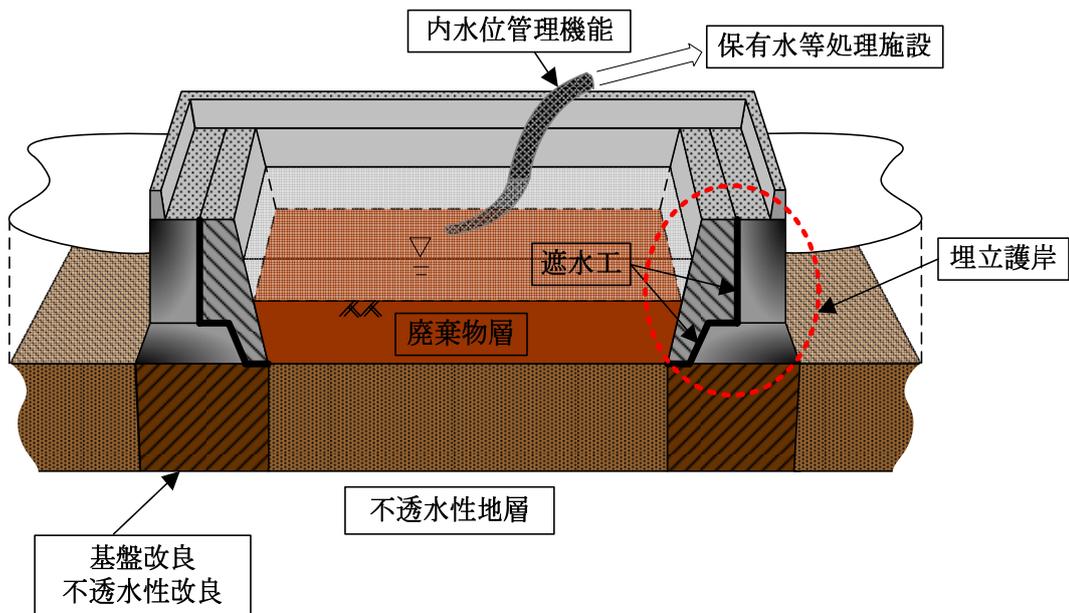


図1.3 海面処分場における埋立護岸

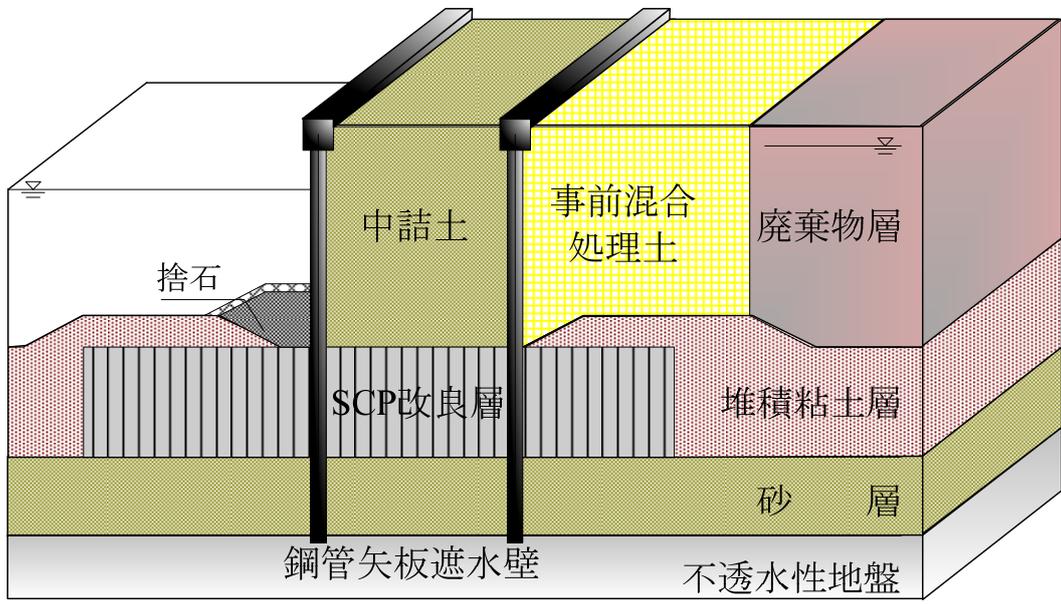


図1.4 海面処分場における鋼管矢板遮水壁

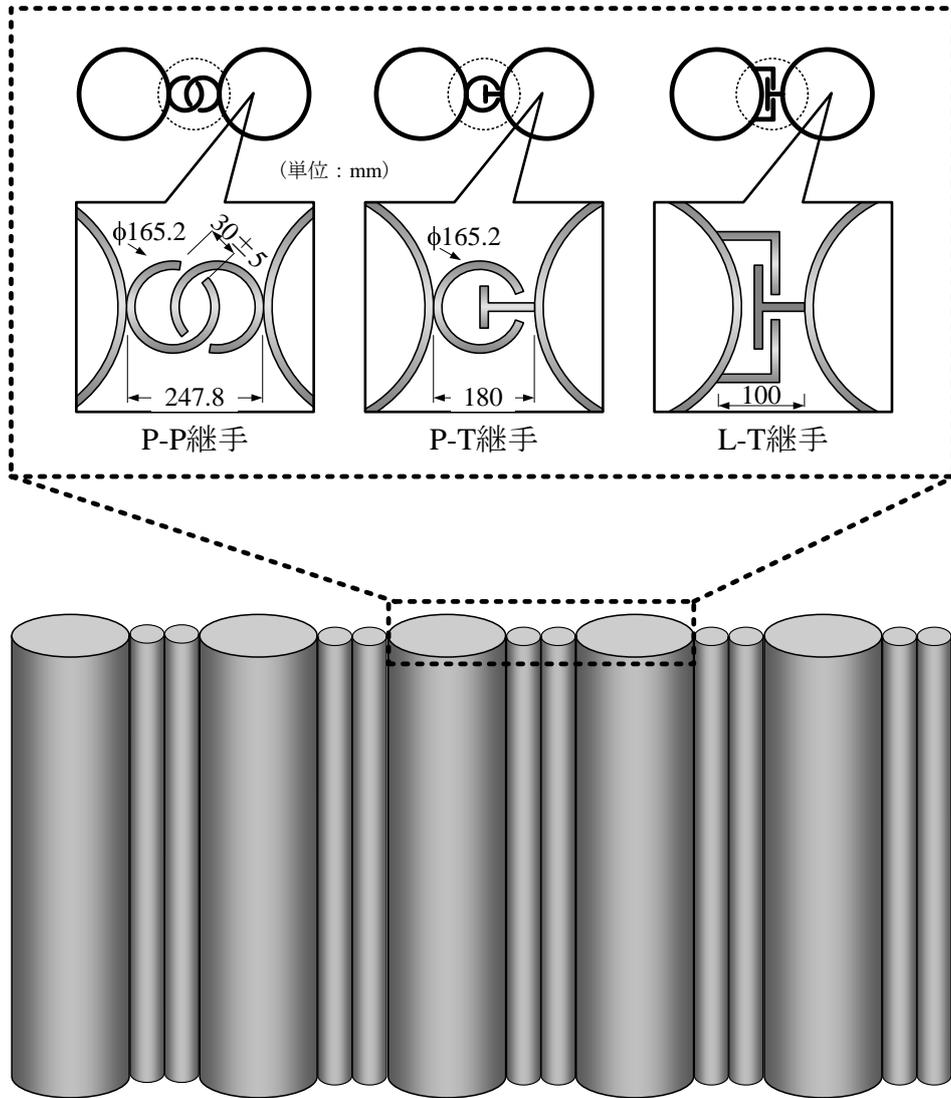


図1.5 継手を有する鋼管矢板

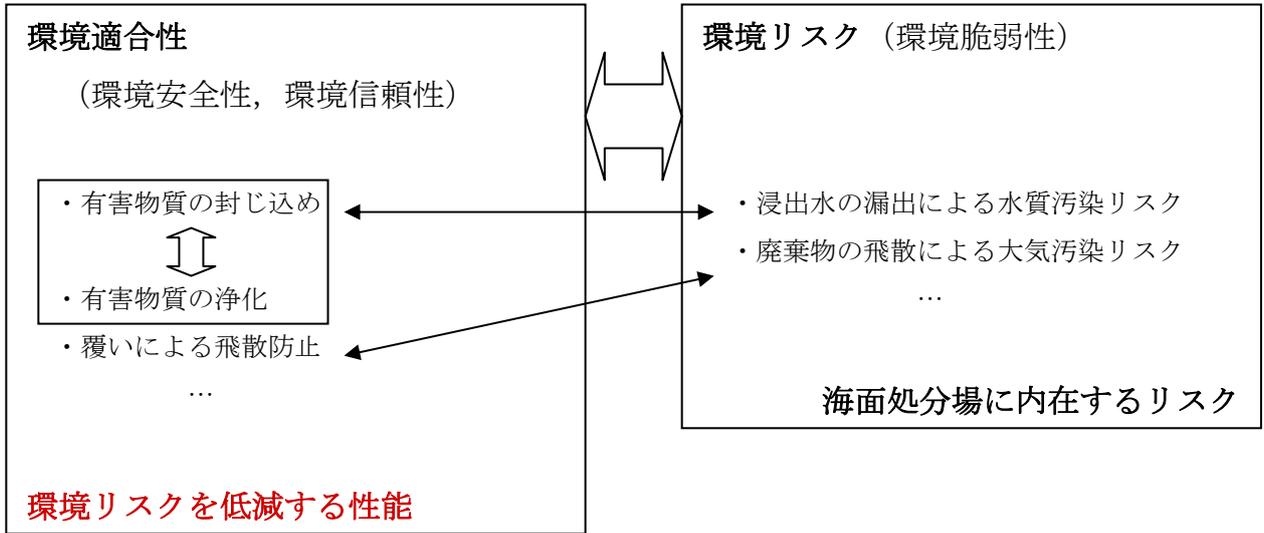


図1.6 環境適合性の位置付け

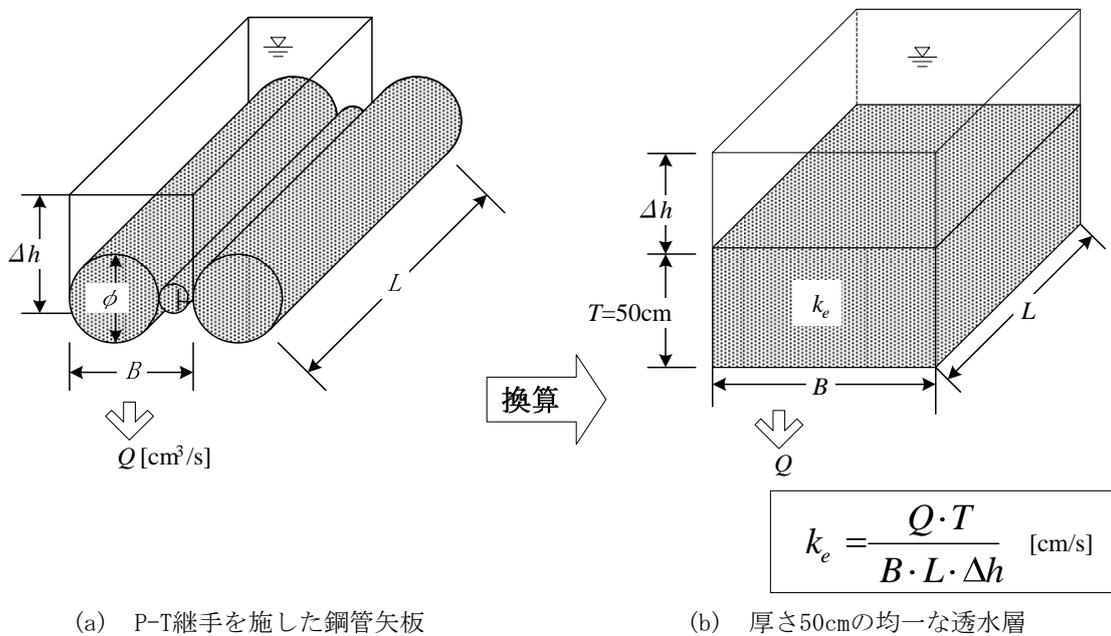


図1.7 換算透水係数

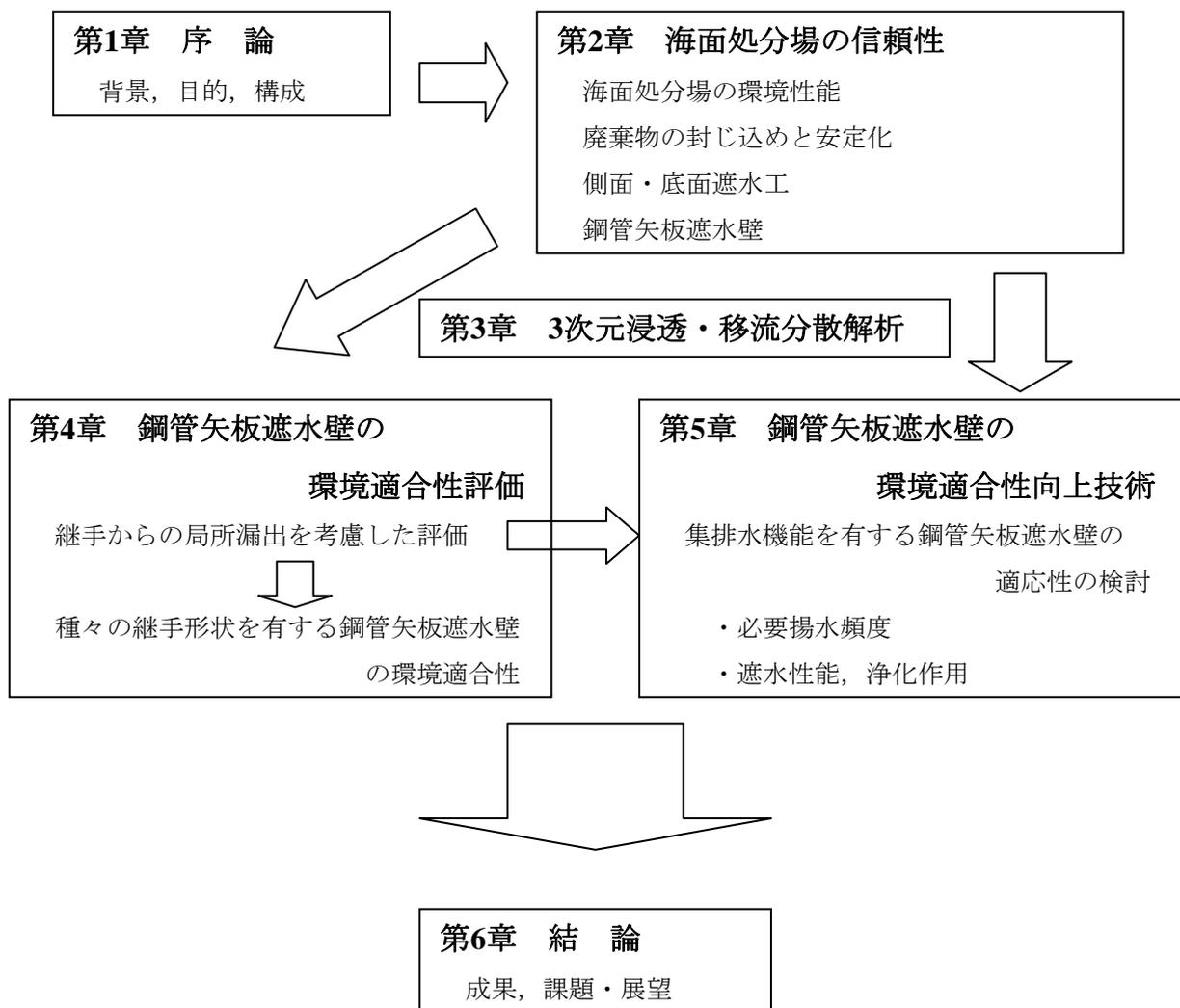


図1.8 研究構成

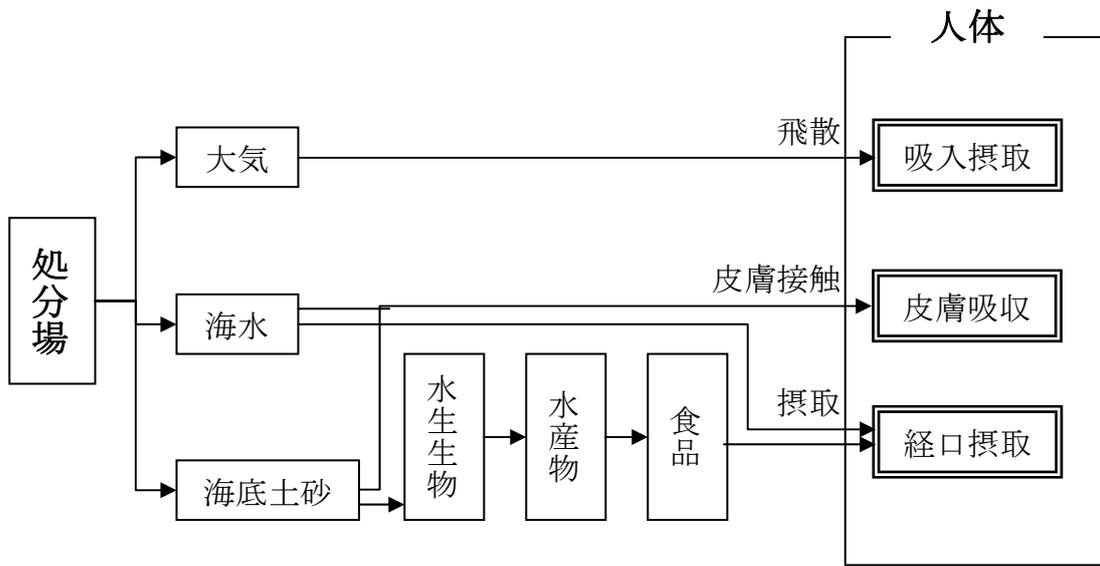


図2.1 海面処分場に存在する有害物質の暴露経路

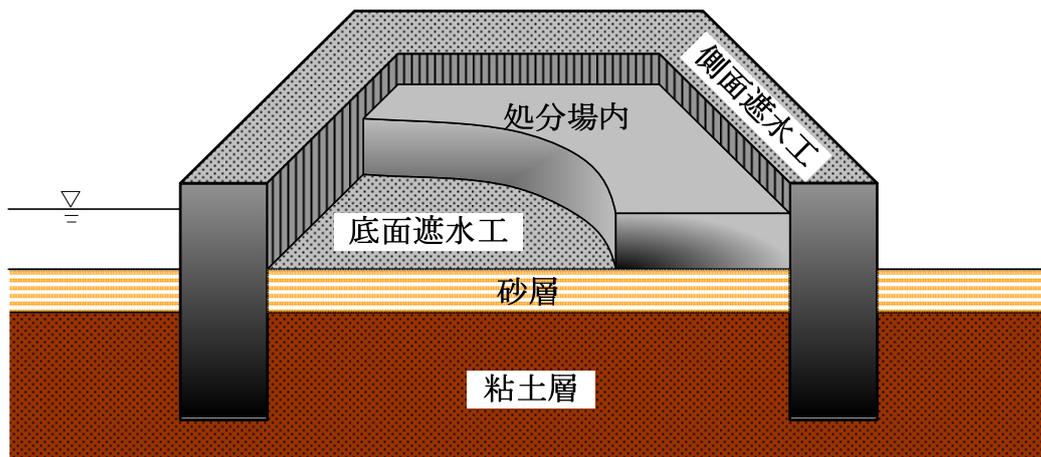


図2.2 海面処分場における側面（鉛直）・底面遮水工

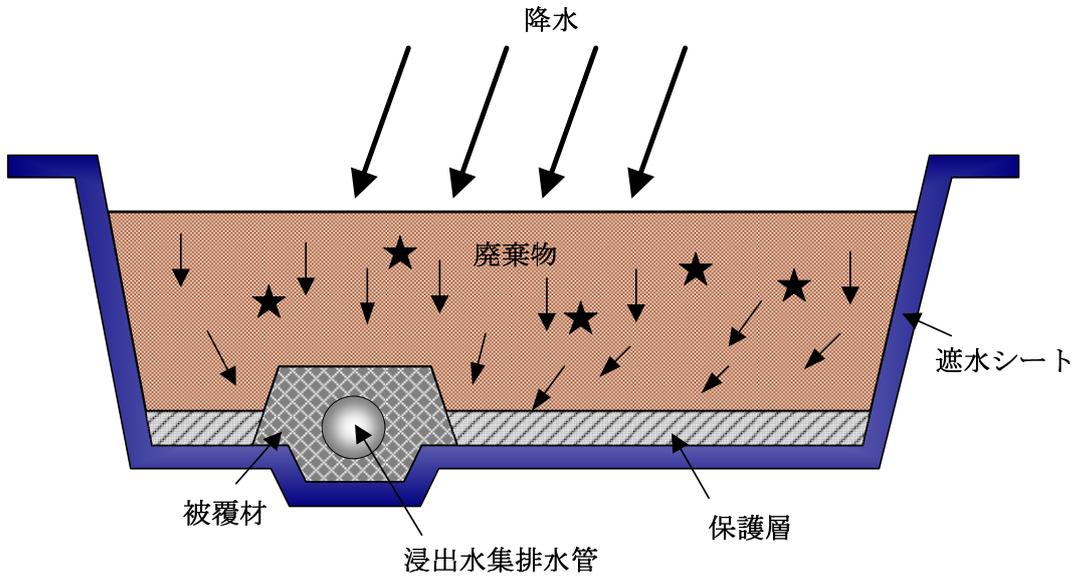


図2.3 内陸処分場における浸出水浄化システム

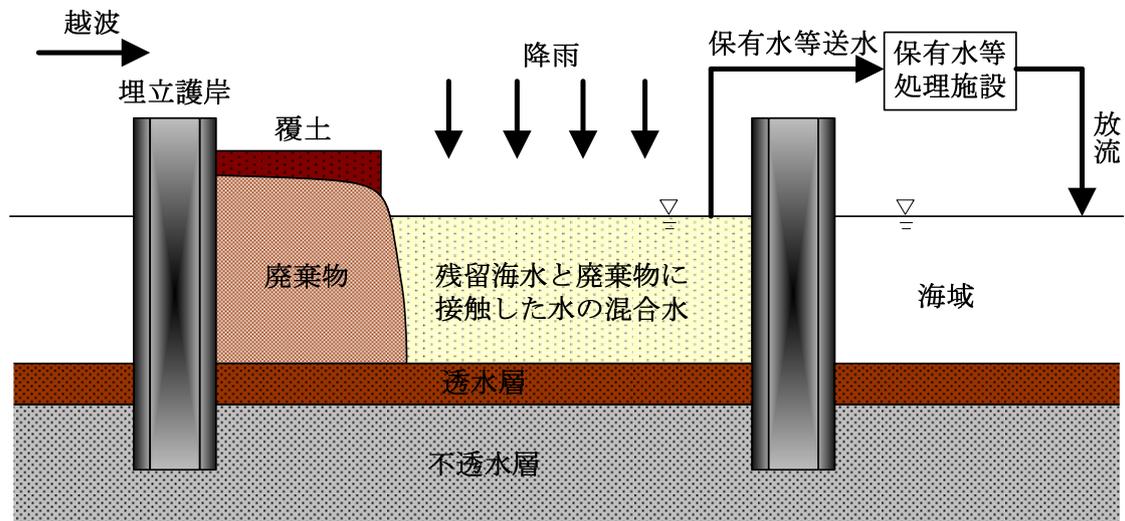


図2.4 浸出水の集排水システムが確立されていない海面処分場

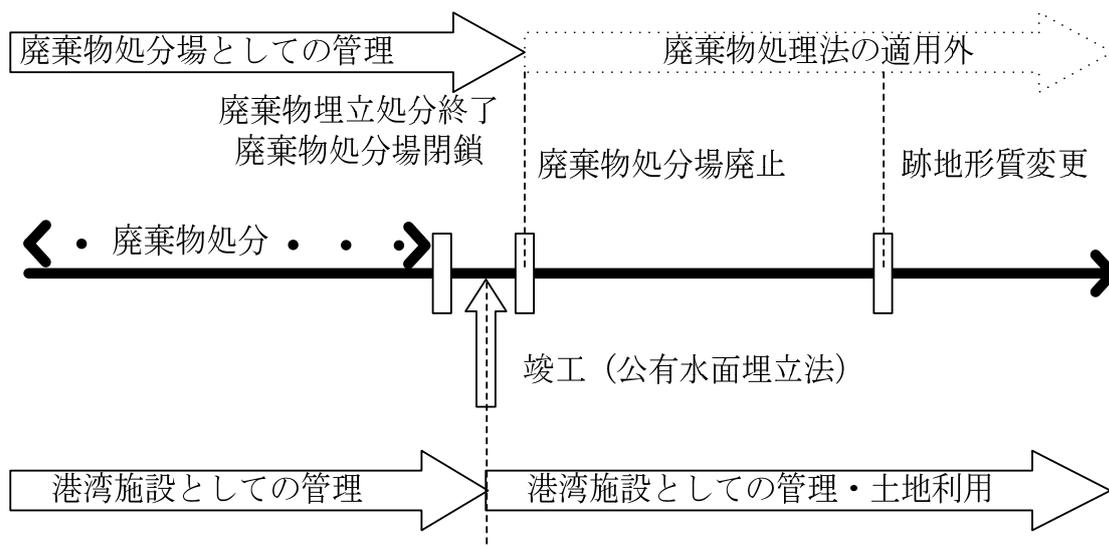
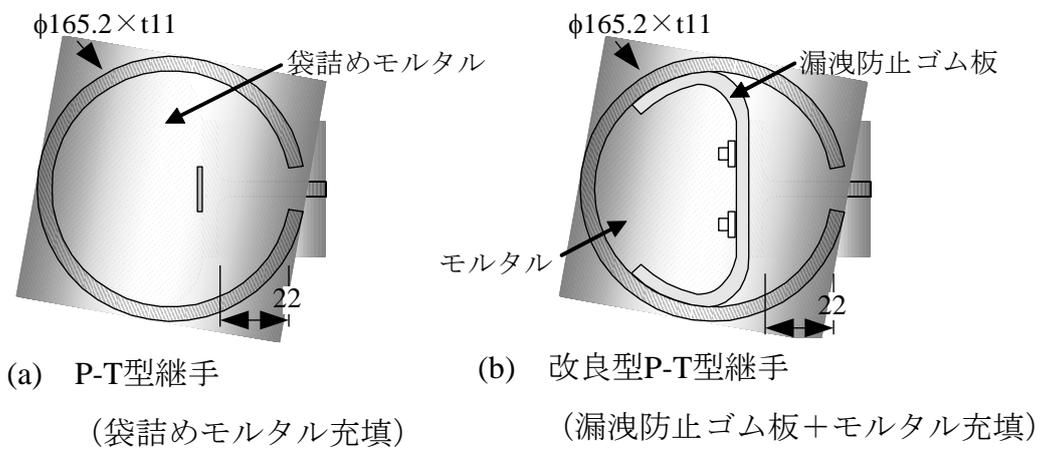


図2.5 海面処分場の計画・維持管理・跡地利用等に関連する制度



(単位 mm)

図2.6 P-T継手に対する遮水処理

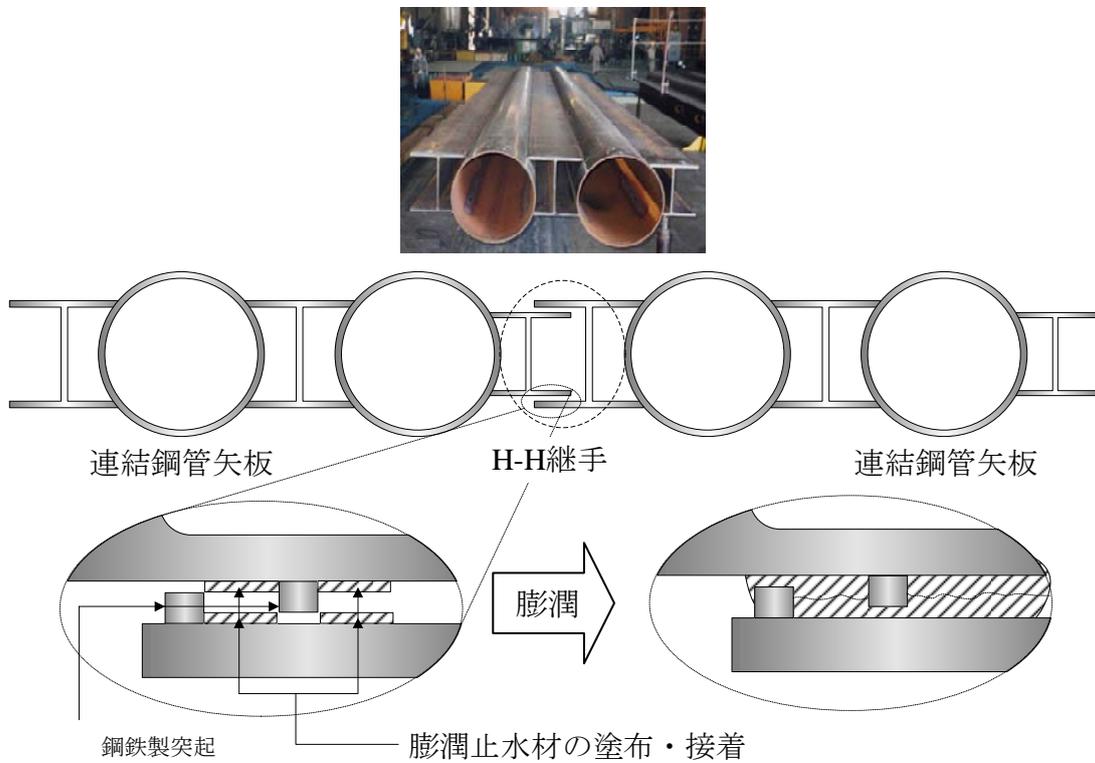


図2.7 H-H継手を施した連結鋼管矢板

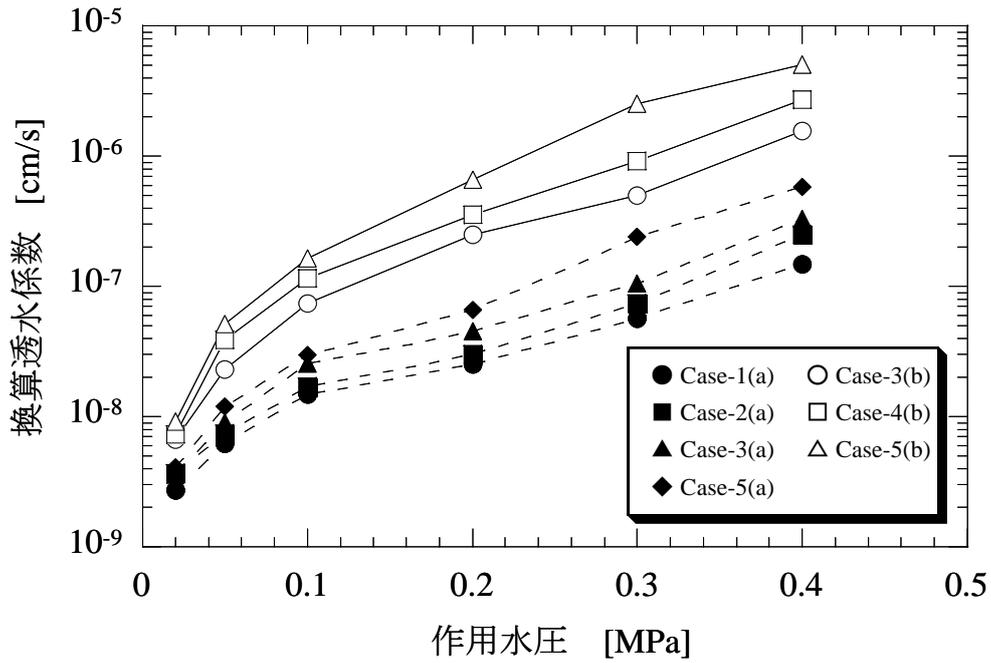


図2.8 膨潤性シートの欠損条件下におけるH-H継手を施した連結鋼管矢板の作用水圧と換算透水係数

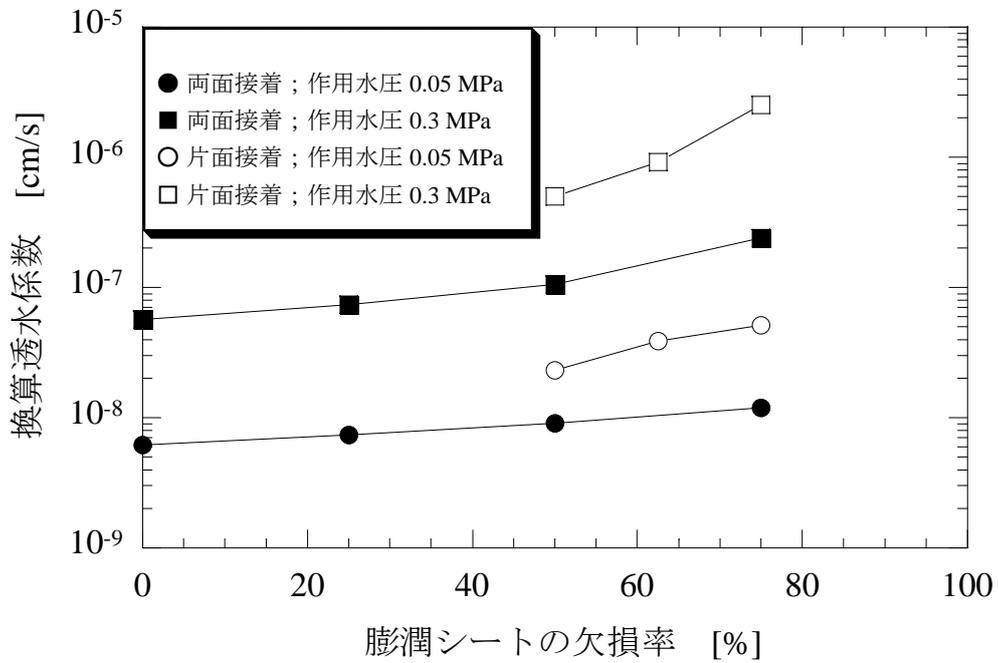


図2.9 膨潤性シートの欠損率とH-H継手を施した連結鋼管矢板の作用水圧と換算透水係数

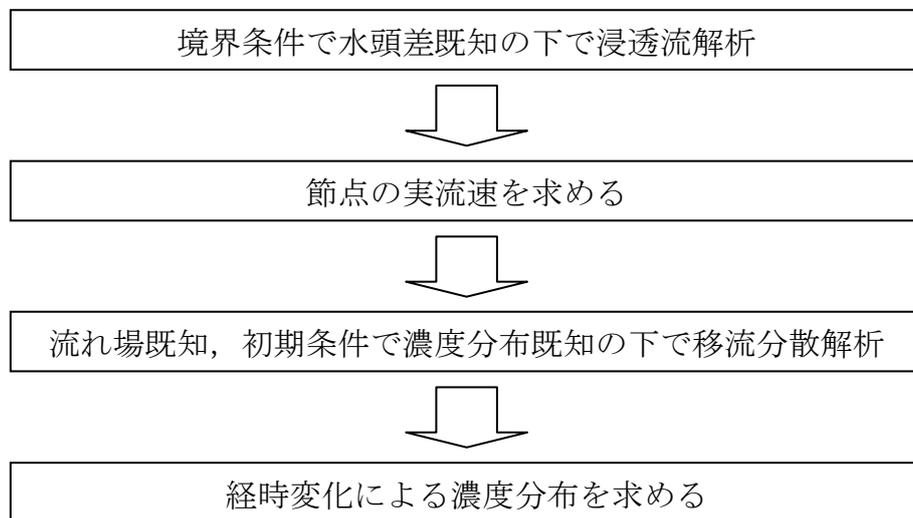


図3.1 解析フロー図

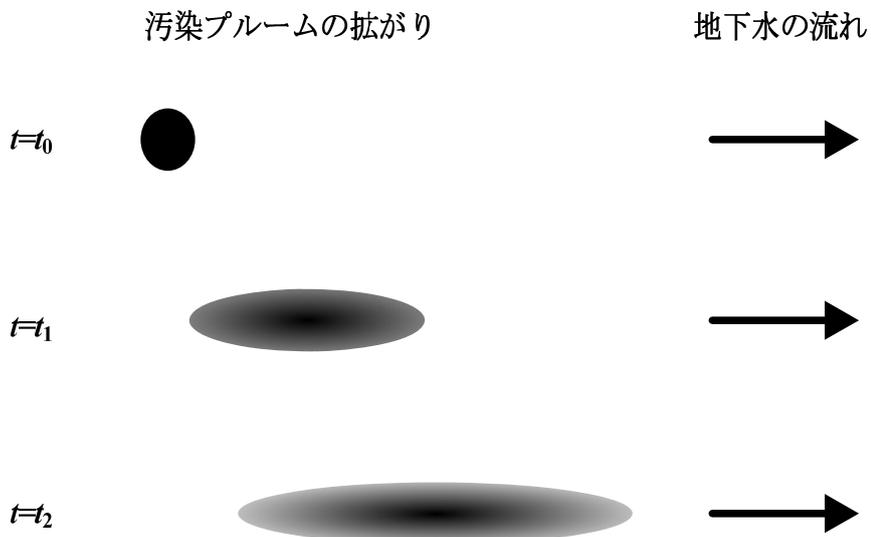


図3.2 縦分散と横分散を模式的に表した図

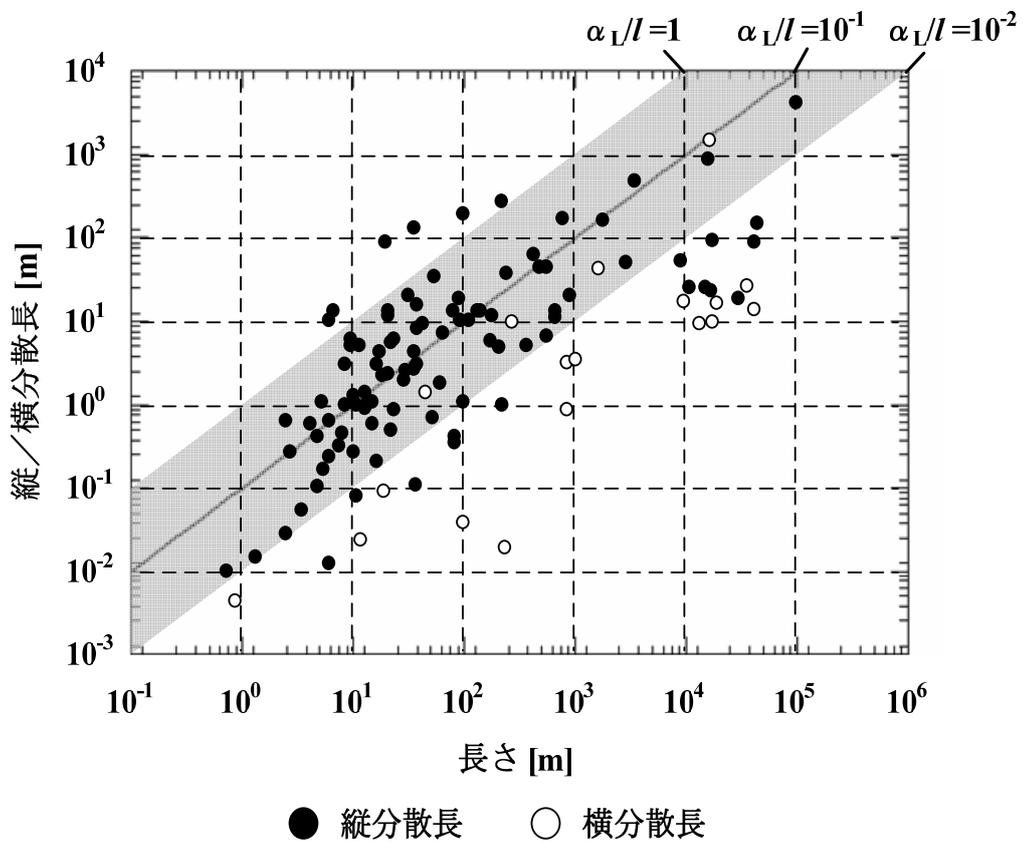


図3.3 分散長設定の例

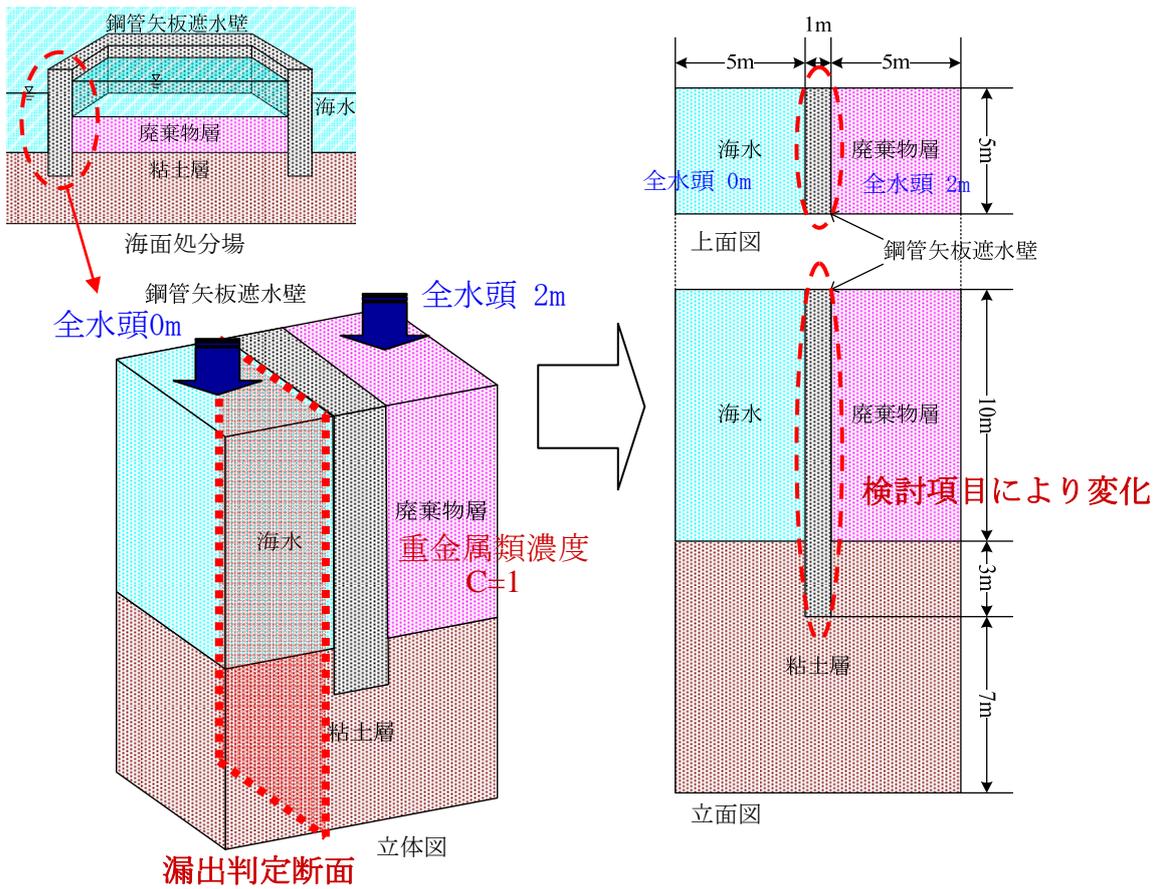


図4.1 解析で使した処分場3次元断面

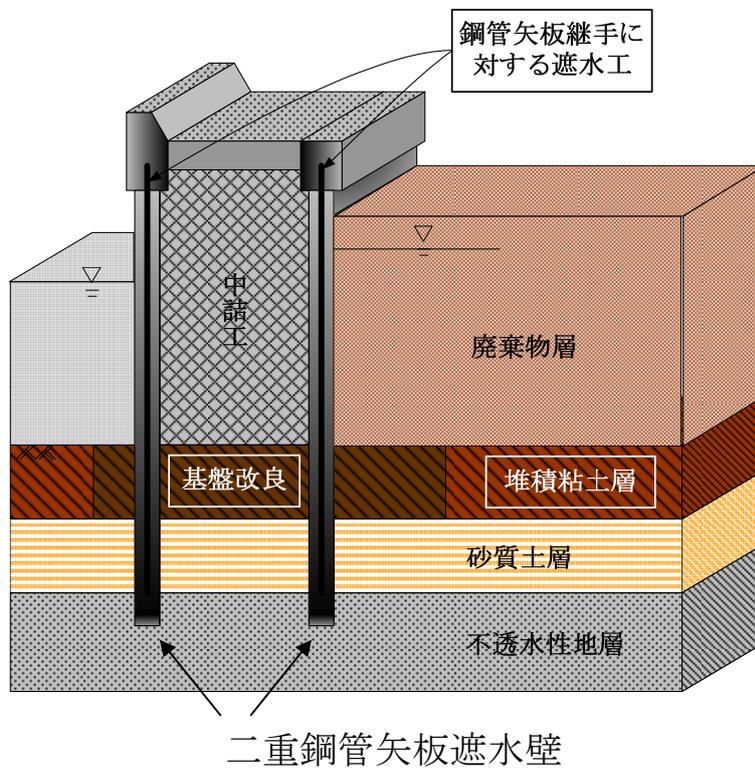


図4.2 二重鋼管矢板遮水壁の例

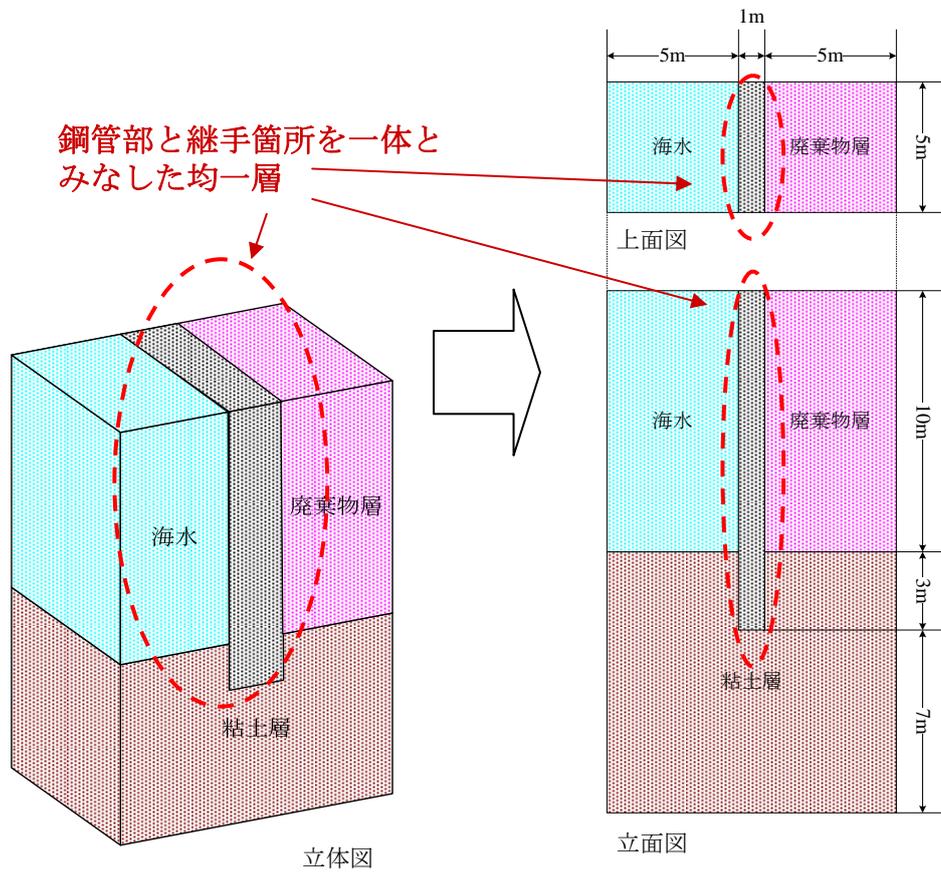


図4.3 均一層モデル

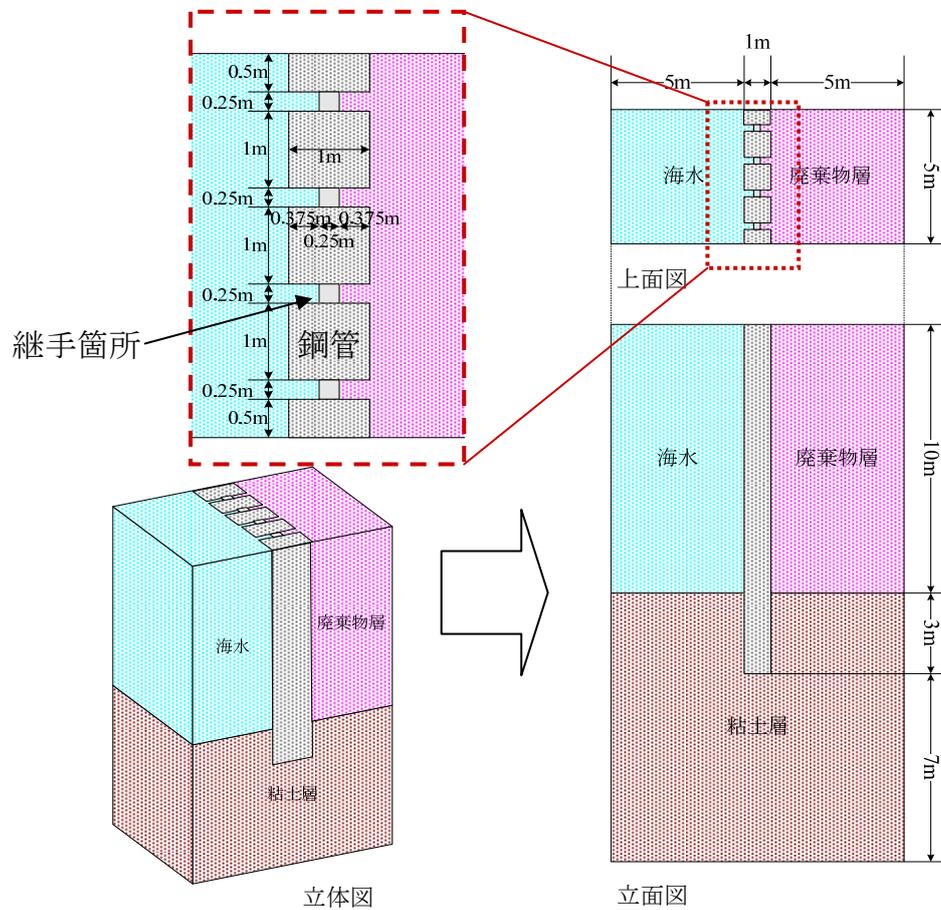


図4.4 鋼管・継手モデル

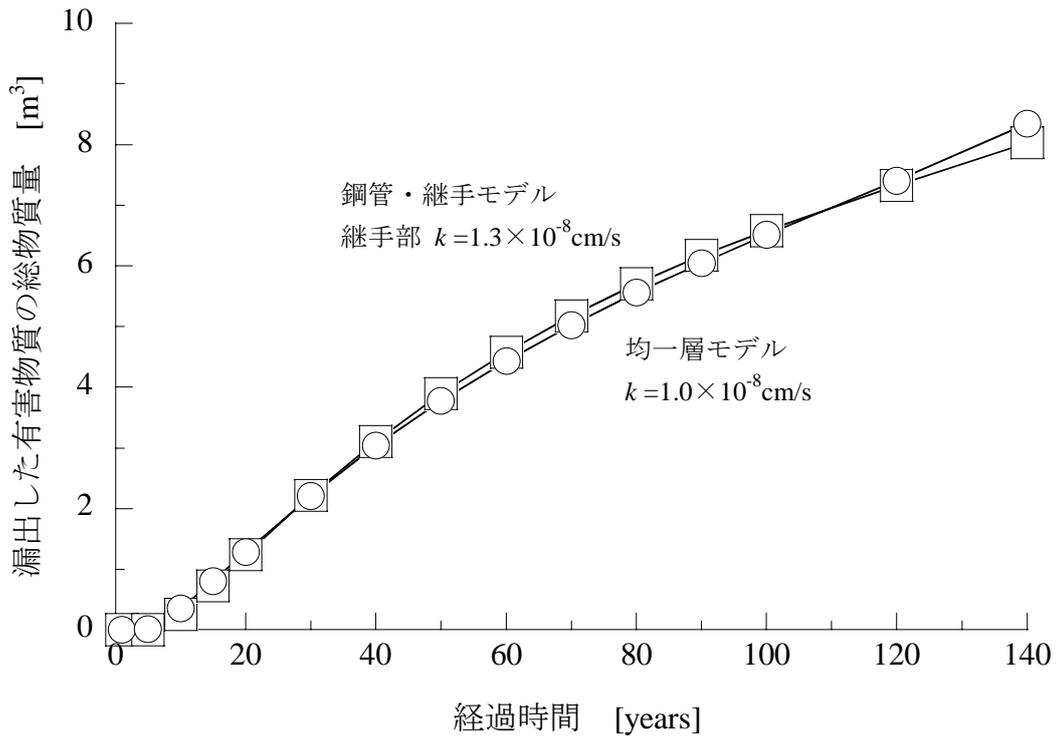


図4.5 均一層モデルと鋼管・継手モデルにおける漏出した有害物質の総漏出量と経過時間の関係

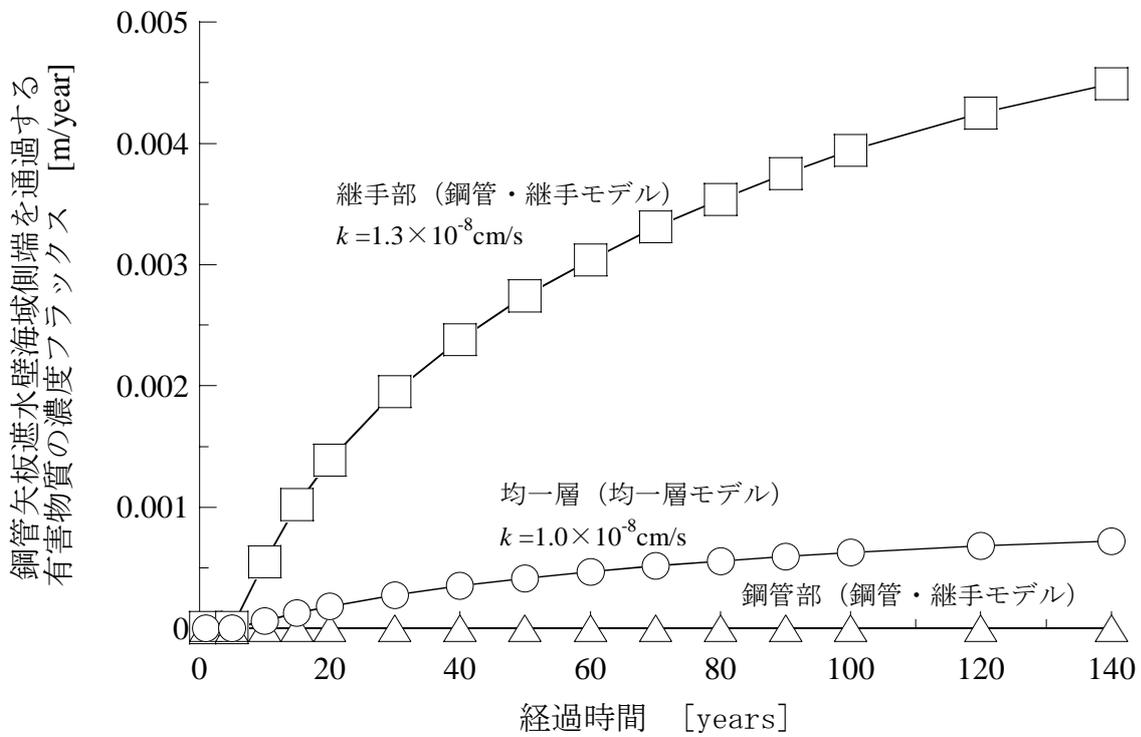


図4.6 均一層モデルと鋼管・継手モデルにおける鋼管矢板遮水壁の海域側端を通過する有害物質の濃度フラックスと経過時間の関係

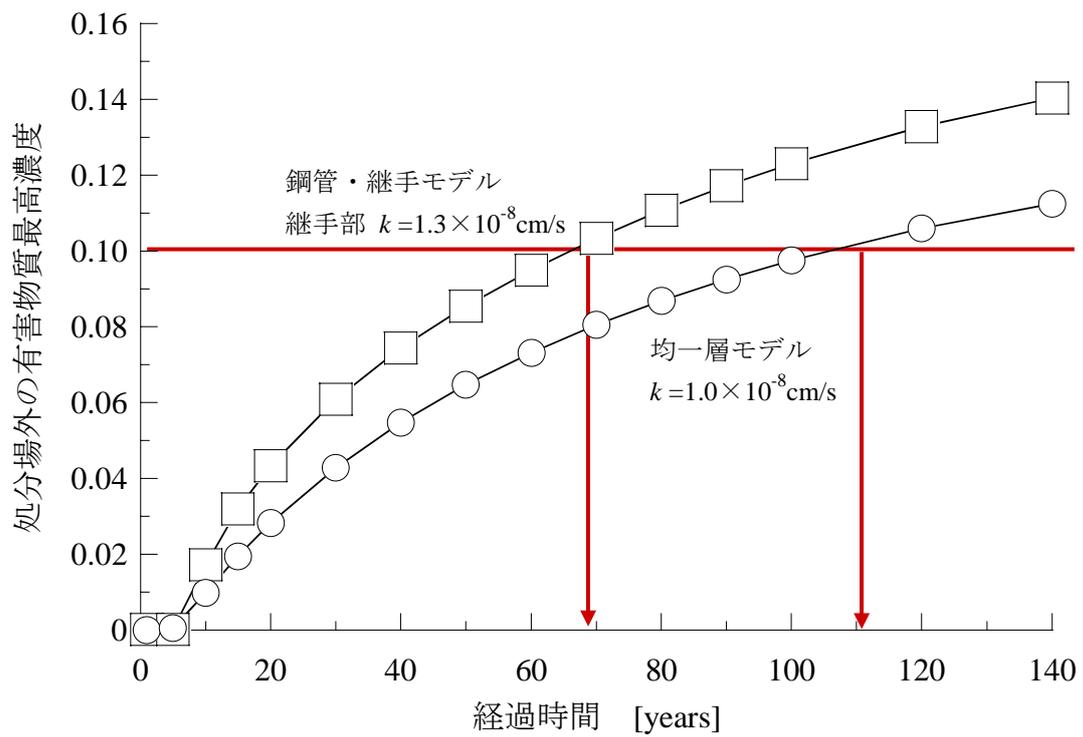


図4.7 均一層モデルと鋼管・継手モデルにおける処分場外の有害物質の最高濃度と経過時間の関係

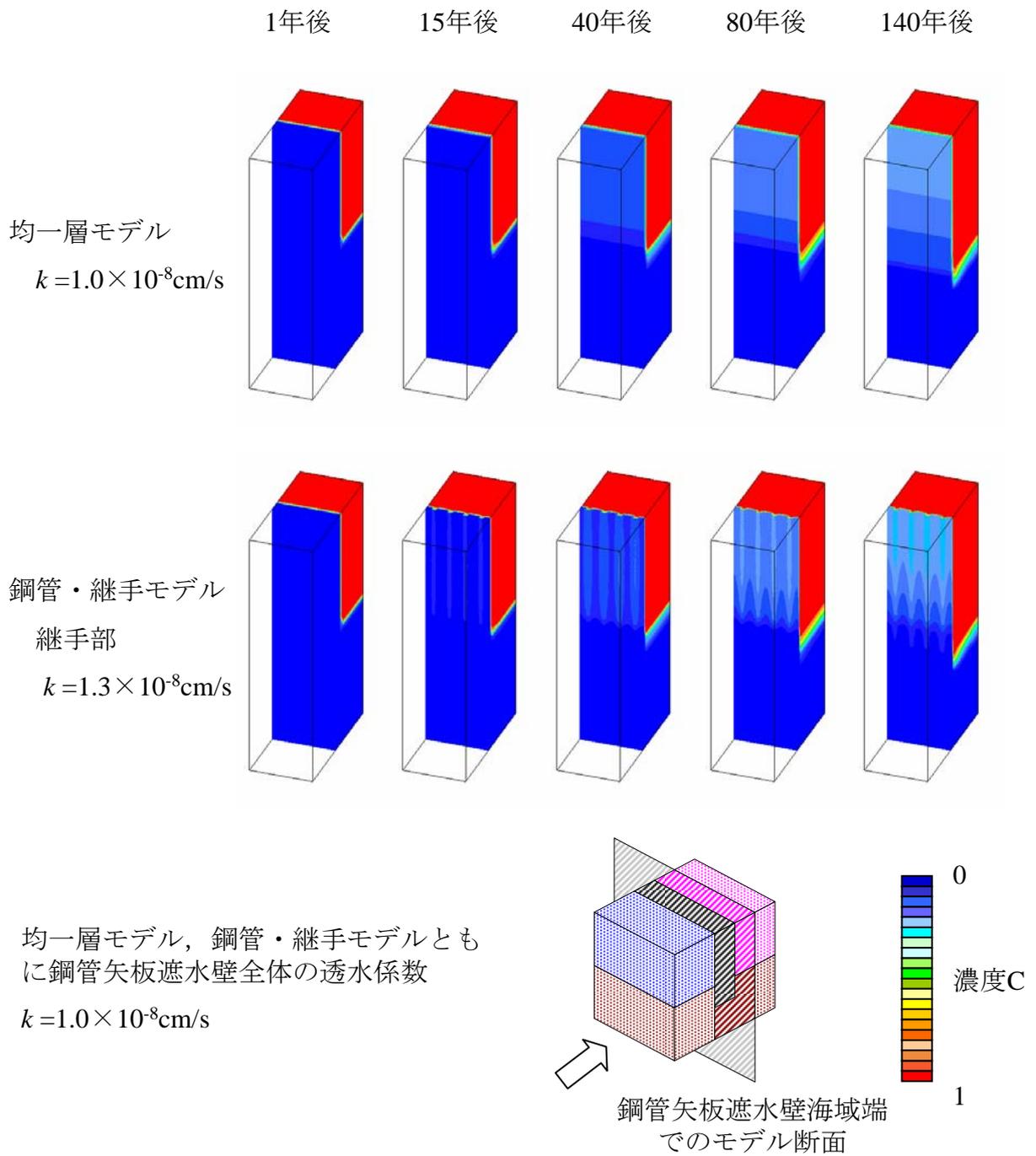


図4.8 均一層モデルと鋼管・継手モデルにおける漏出した有害物質の濃度分布の時刻暦

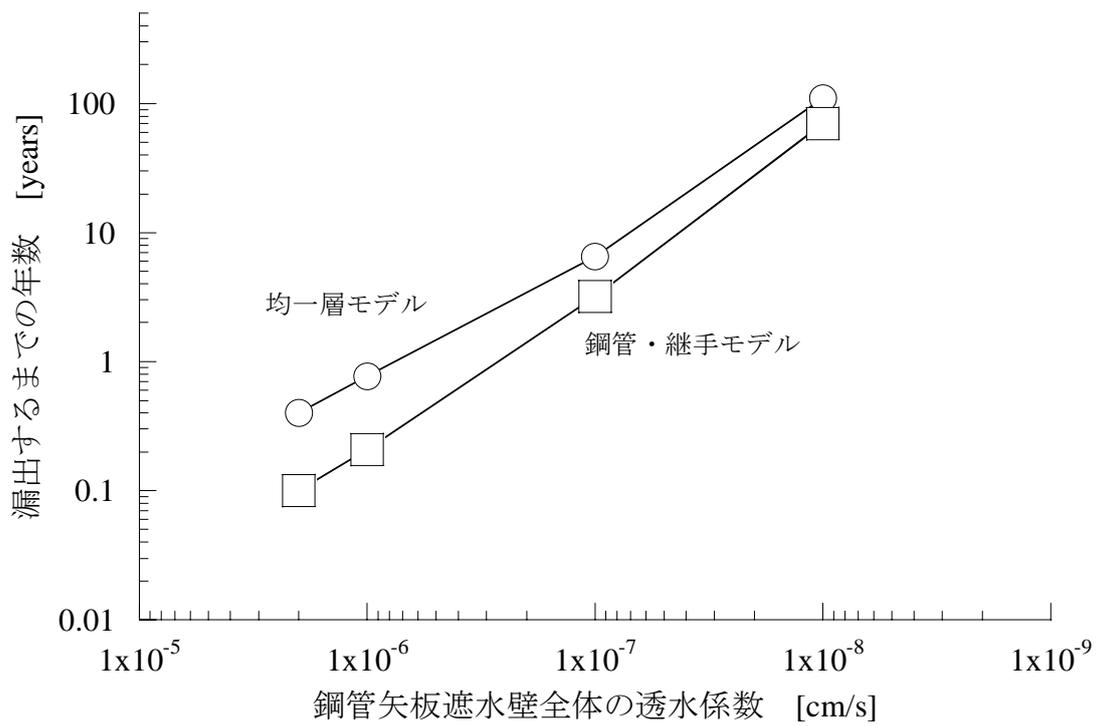


図4.9 均一層モデルと鋼管・継手モデルにおける換算透水係数と漏出するまでの年数の関係

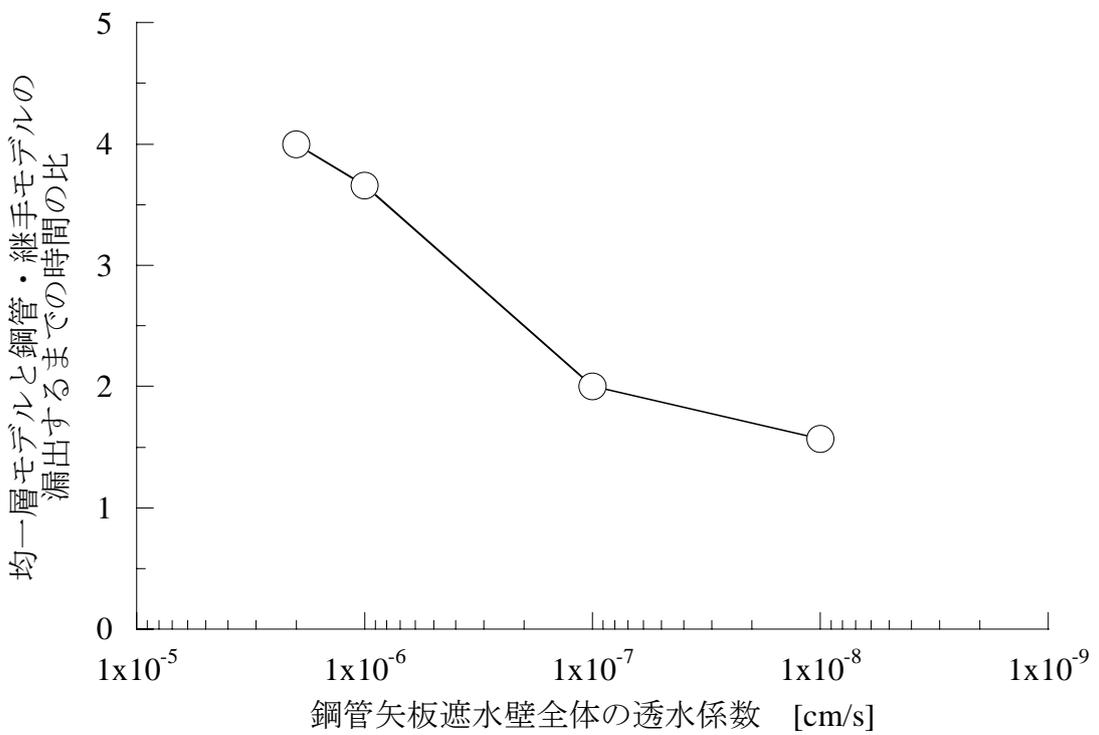


図4.10 均一層モデルと鋼管・継手モデルにおける換算透水係数と漏出するまでの年数の比の関係

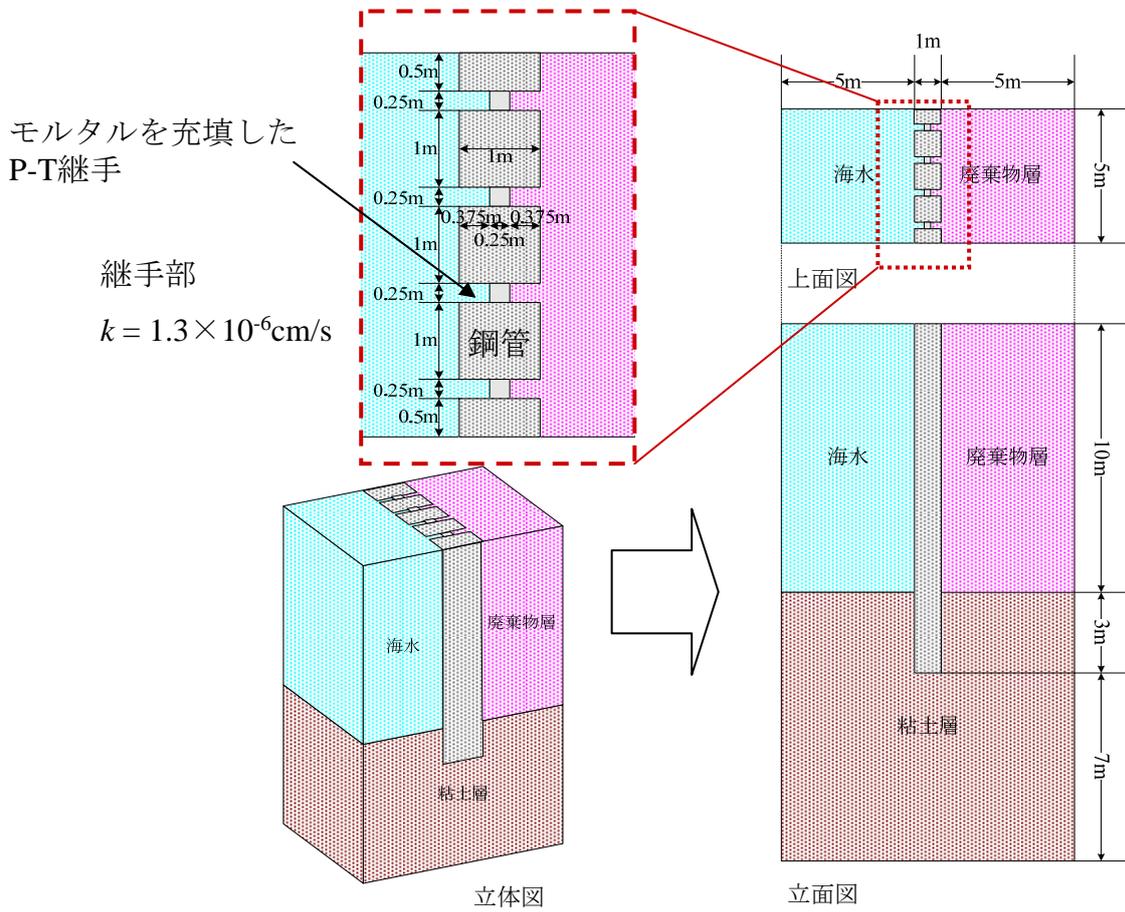


図4.11 Case I モデル (P-T継手を有する鋼管矢板遮水壁)

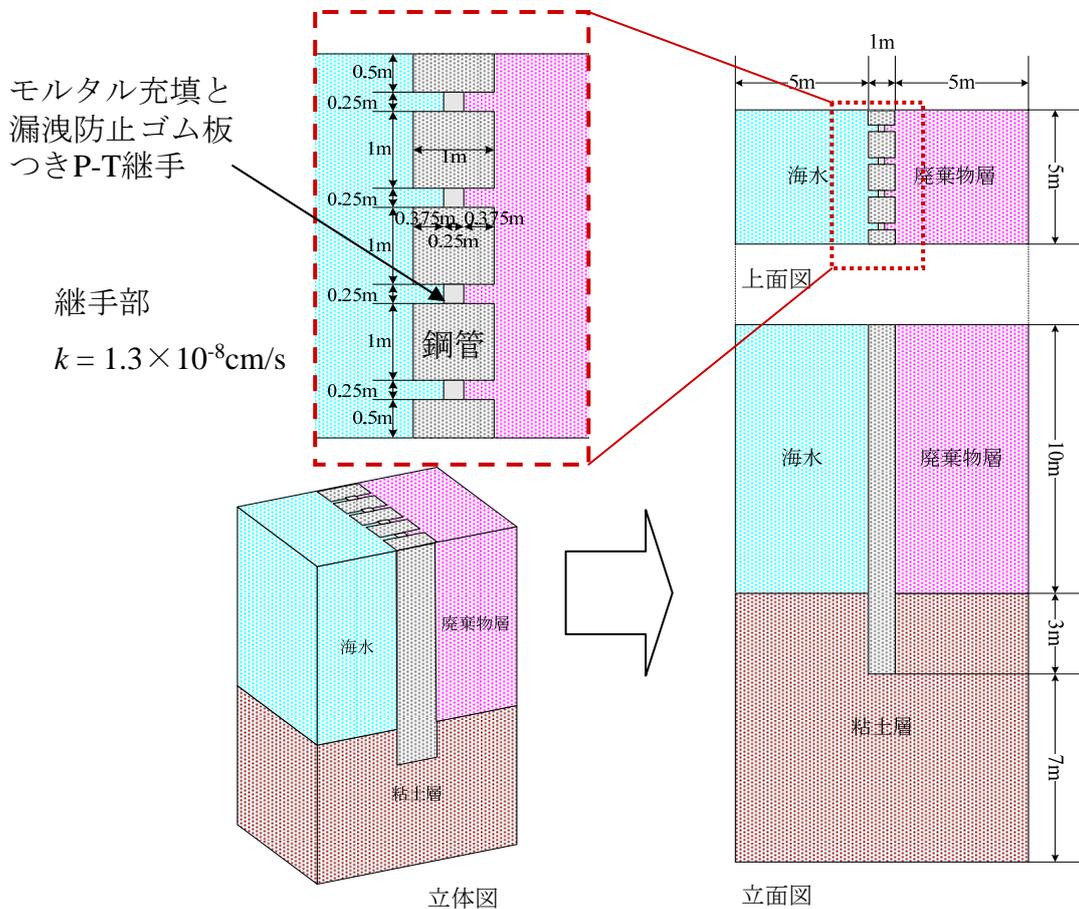


図4.12 Case II モデル (改良型P-T継手を有する鋼管矢板遮水壁)

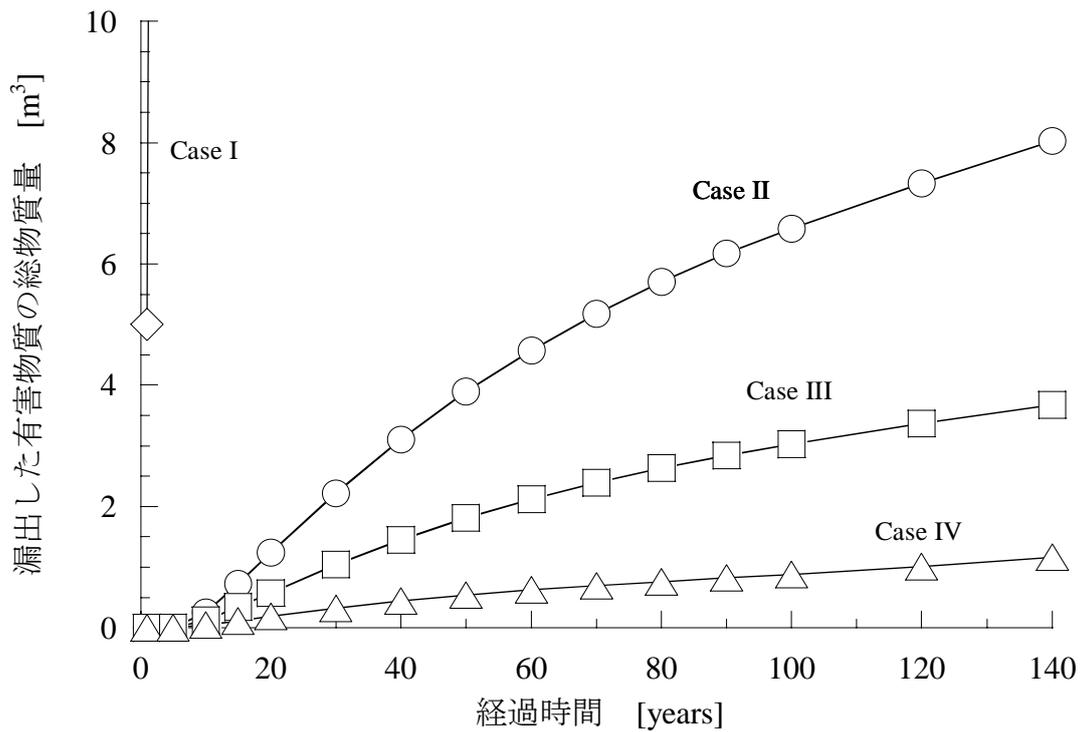


図4.15 各Caseにおける漏出した有害物質の総漏出量と経過時間の関係

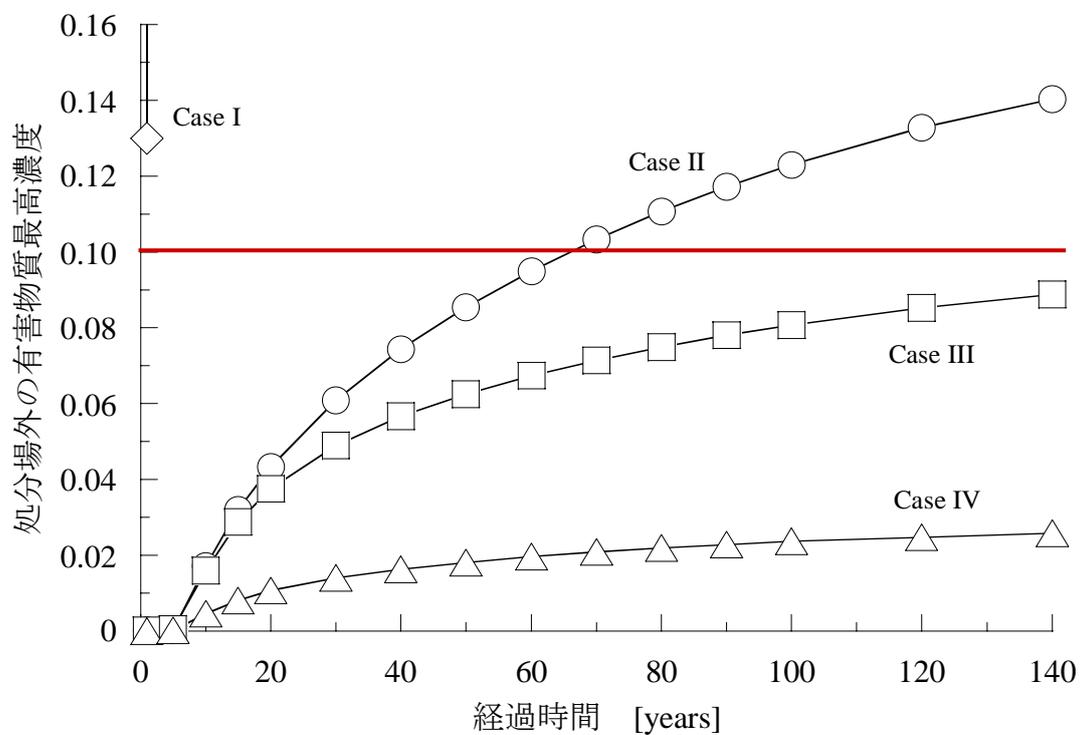


図4.16 各Caseにおける処分場外の有害物質の最高濃度と経過時間の関係

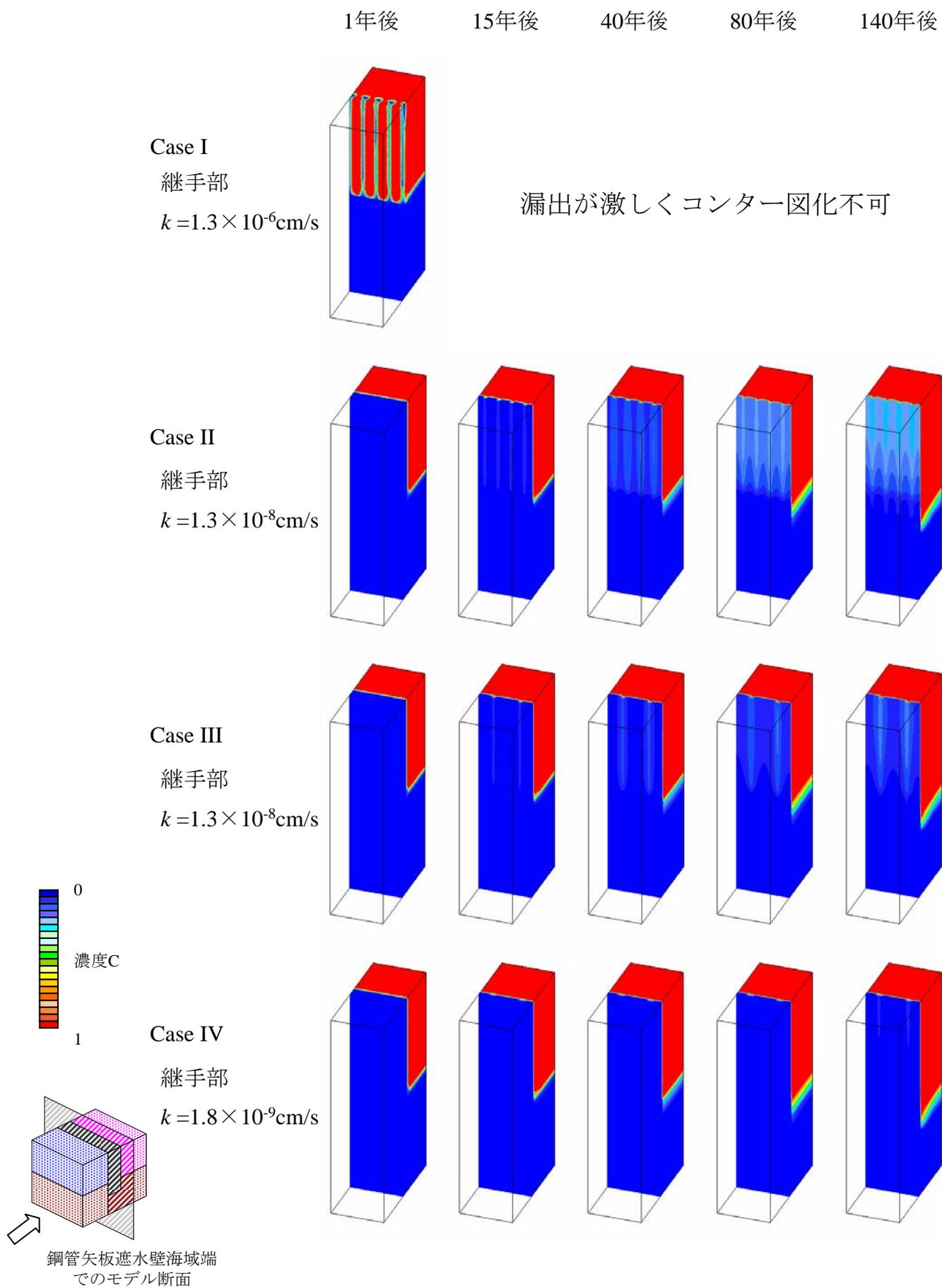


図4.17 各モデルにおける漏出した有害物質の濃度分布の時刻暦

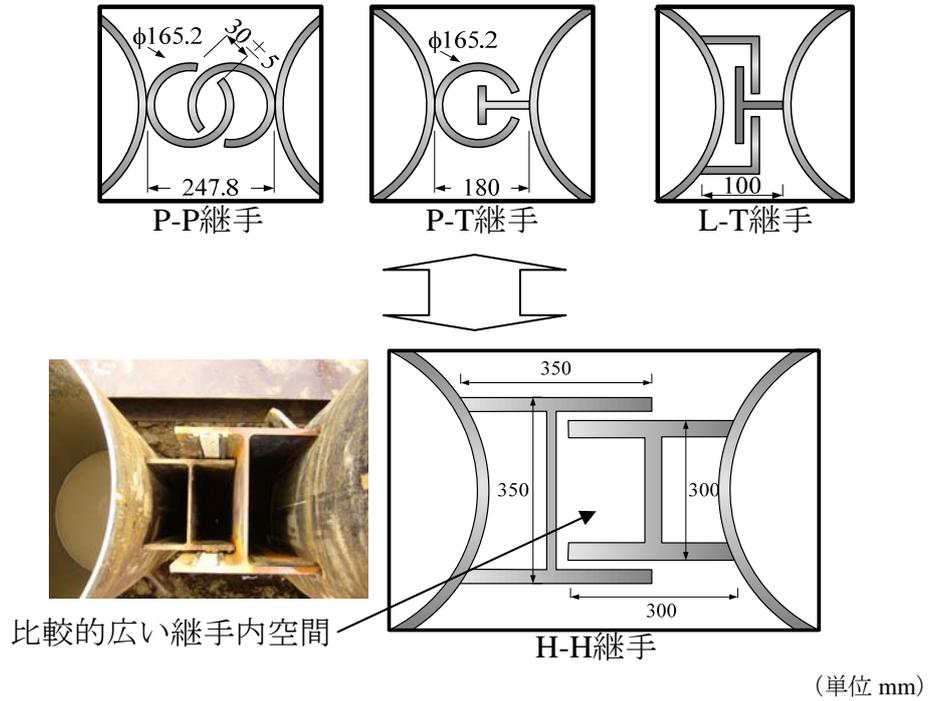


図5.1 H-H継手の有する継手内空間

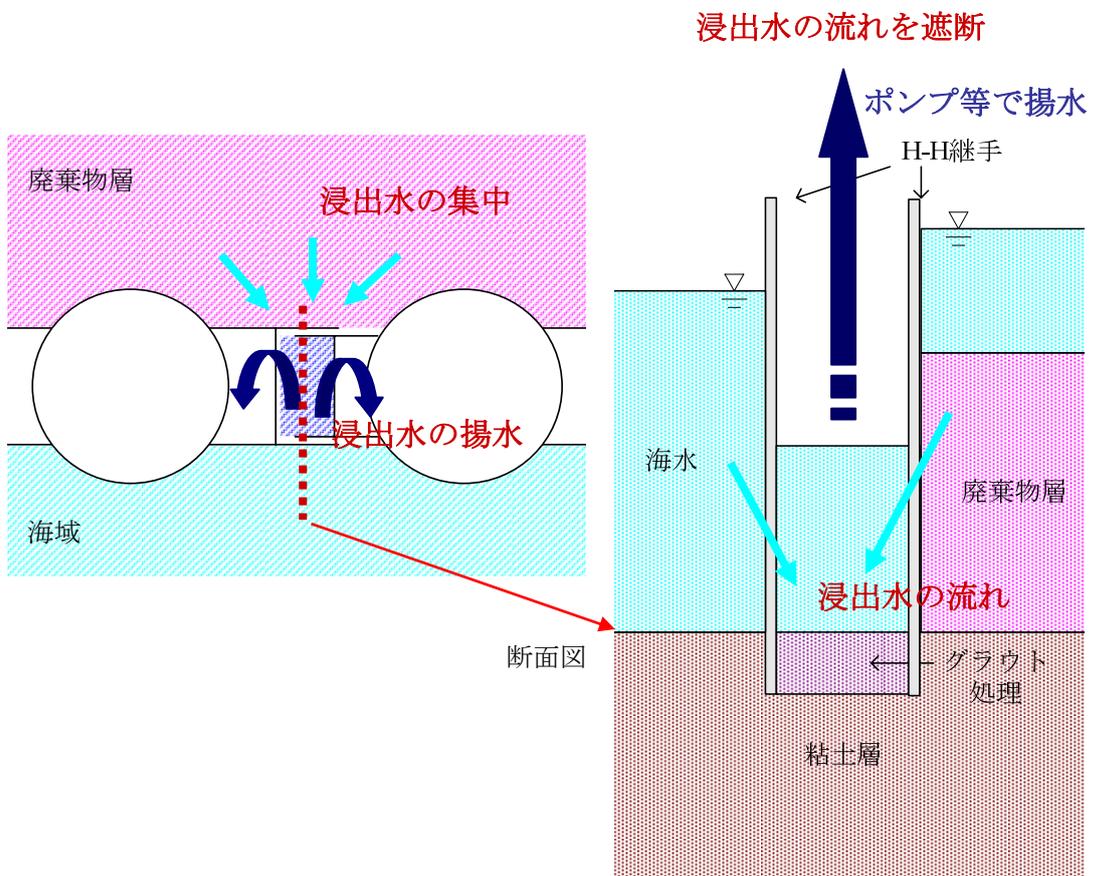


図5.2 集排水機能を有する鋼管矢板遮水壁の概念

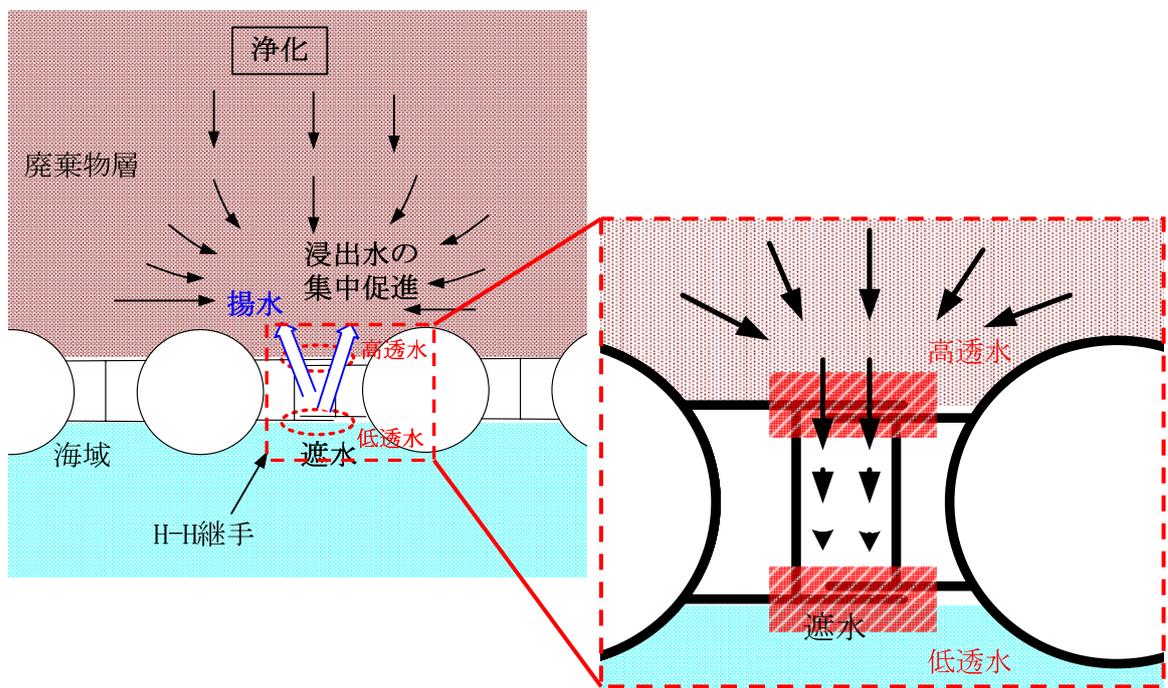


図5.3 浸出水の集水を促進させるシステム

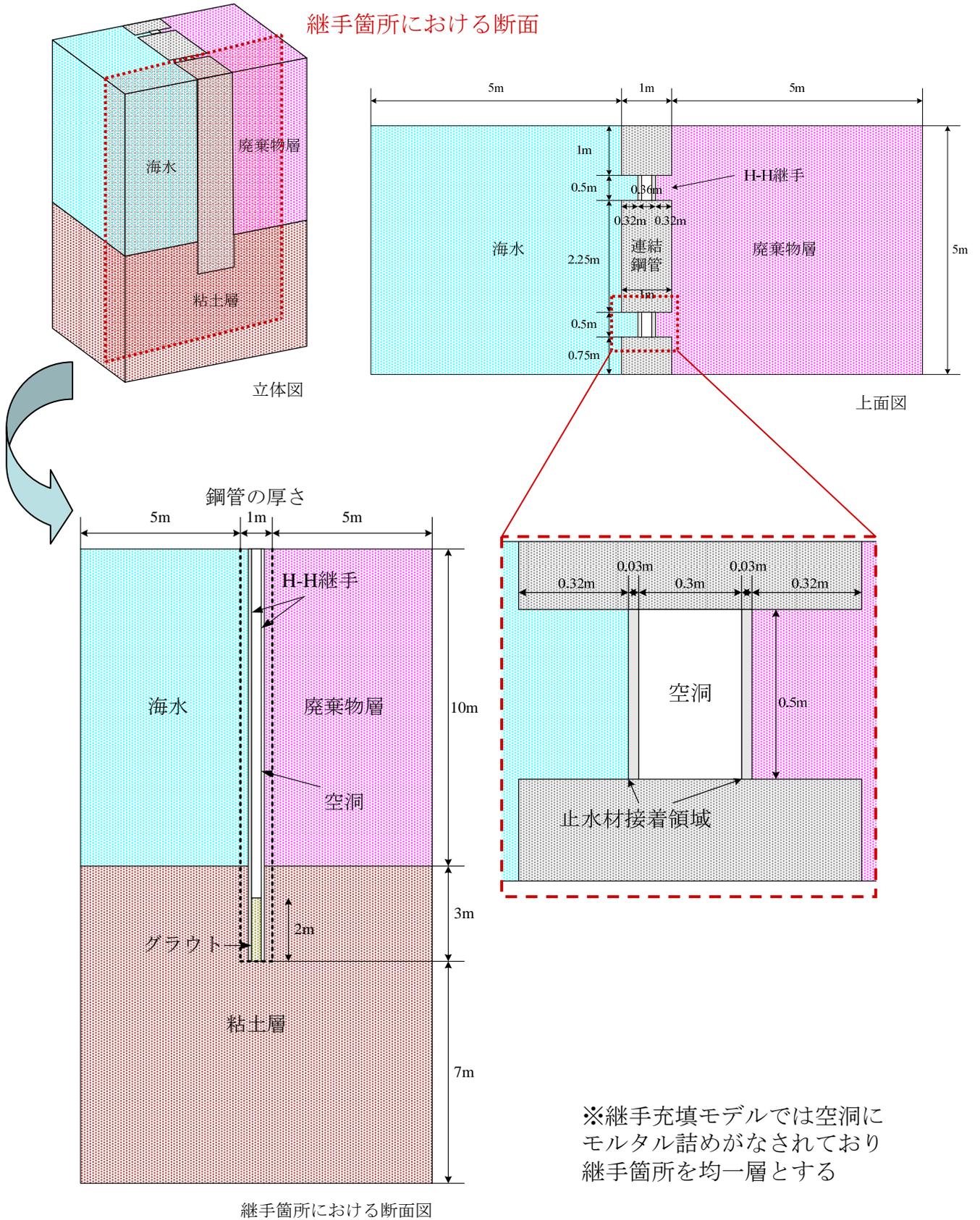


図5.4 継手空洞モデル

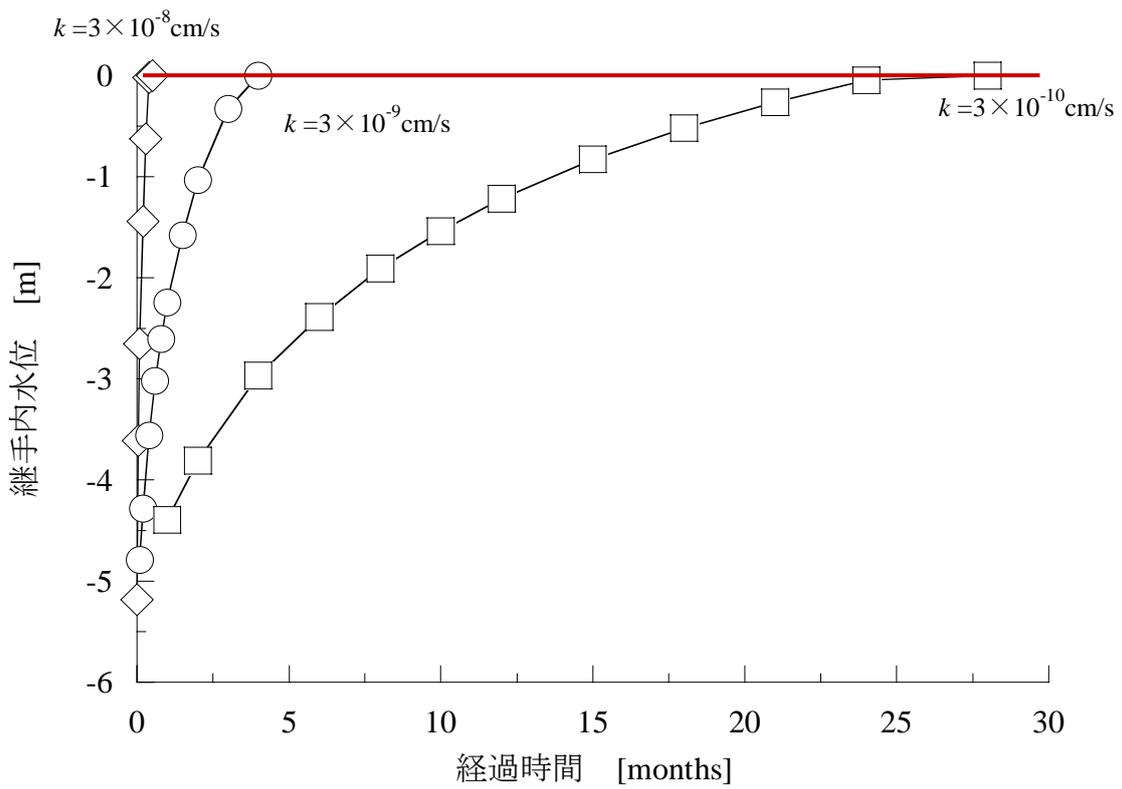


図5.5 止水材接着領域の透水係数による継手内水位と経過時間の関係

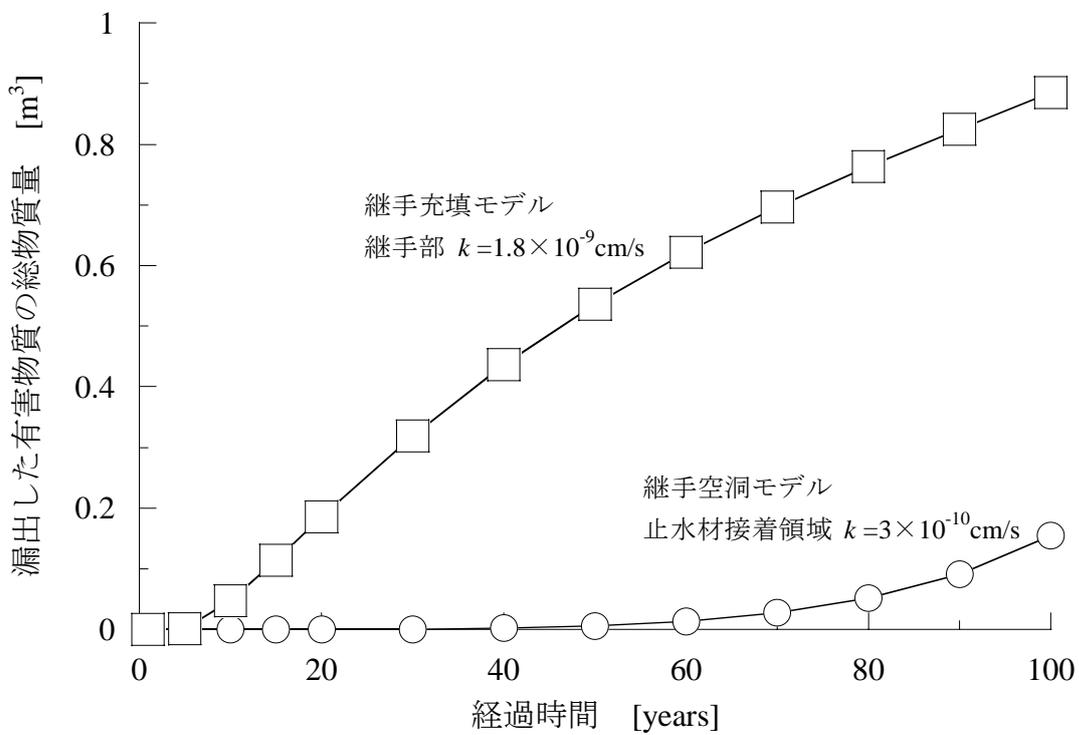


図5.6 継手充填モデルと継手空洞モデルにおける漏出した有害物質の総漏出量と経過時間の関係

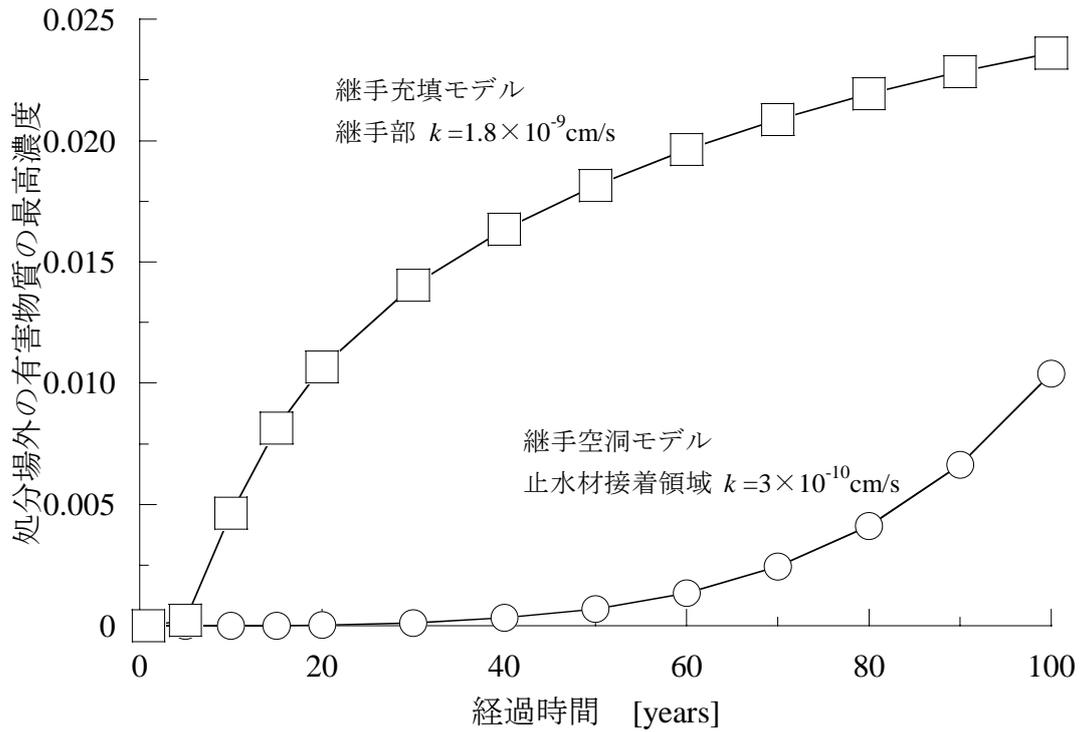


図5.7 継手充填モデルと継手空洞モデルにおける処分場外の有害物質の最高濃度と経過時間の関係

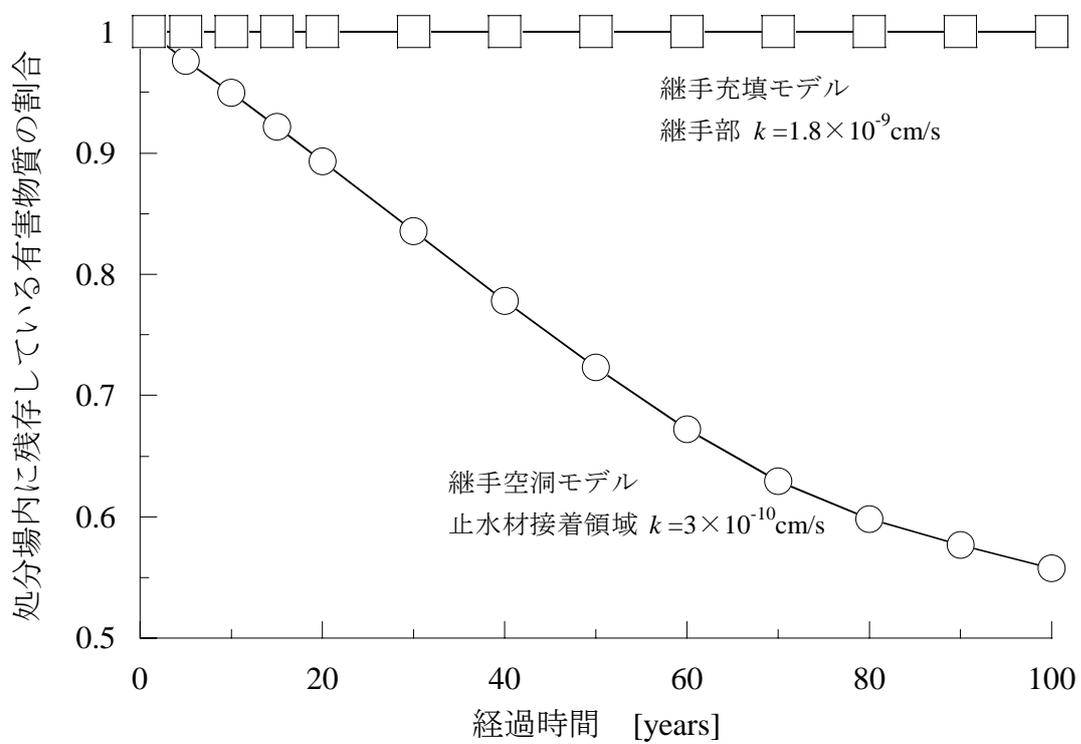


図5.8 継手充填モデルと継手空洞モデルにおける処分場内に残存している有害物質の割合と経過時間の関係

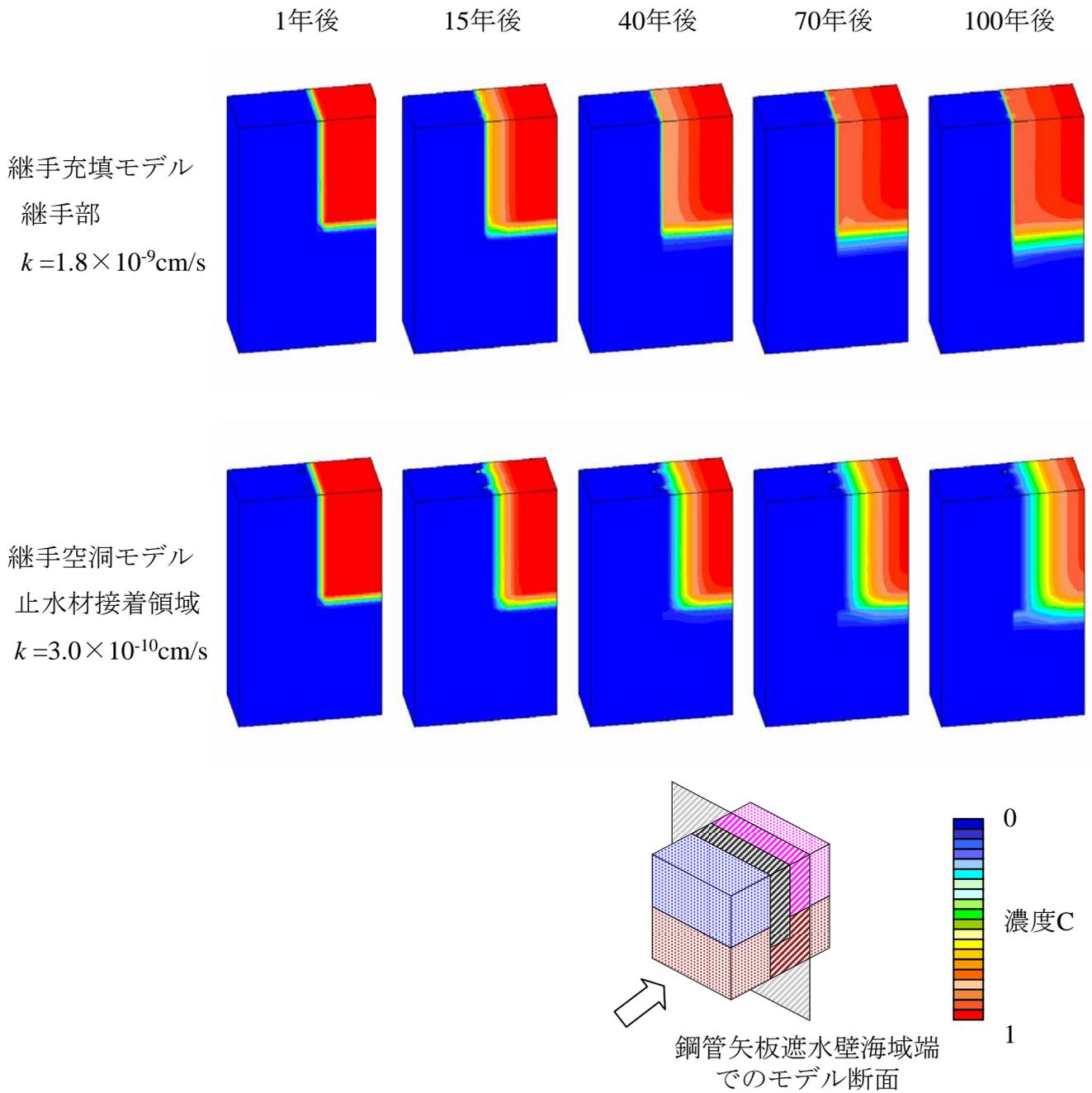


図5.9 継手充填モデルと継手空洞モデルにおける処分場内に残存した有害物質の濃度分布の時刻暦