

地下水流動保全技術に関する研究委員会

報 告 書

2005年6月

地下水地盤環境に関する研究協議会

地下水流動保全技術に関する研究委員会

目次

- i -

6. 非開削トンネル工法の地下水流動保全工法	
6. 1 本章の位置付け	6-1
6. 2 トンネルの地下水流動阻害	6-1
6. 3 考えられる非開削トンネル工法の地下水流動保全対策工	6-5
6. 4 地下水流動阻害と対策工案	6-6
6. 5 対策事例	6-11
6. 6 新工法（非開削トンネルでの地下水保全工法）	
における留意点	6-17
参考文献	6-18
7. 供用時のメンテナンス・モニタリング	
7. 1 地下水流動保全工法におけるメンテナンスの位置付け	7-1
7. 2 通水・集水涵養設備の機能低下要因	7-3
7. 3 メンテナンス工法	7-10
7. 4 供用時におけるモニタリング	7-16
参考文献	7-30
8. おわりに	8-1

1. はじめに

本委員会の前身である地下水流動保全工法に関する研究委員会では、地中を対象とした建設工事による地下水の流動阻害をどのように防止するかを主たる課題として、2001年2月にその委員会での活動の集大成として「地下水流動保全工法」を世に発表した。その成果を2001年2月に大阪、2001年9月に東京、2002年6月に名古屋の3ヶ所で講習会を開催し、多くの技術者に地下水流動を保全する意義、そのための調査法、設計のための解析法、そして過去の多くの施工事例とその問題点を啓蒙した。

2002年8月に表1.1の新しい委員によって、再度、委員会を設立し、残された課題に対して委員会で検討することになった。その目的で再び、委員会の中に5つのワーキンググループ(WG)を作り、委員はそれぞれのWGの中で密に活動をしていただく組織にした。すなわち、WG1：開削工法、WG2：トンネル工法、WG3：予測技術、WG4：メンテナンス・モニタリング、WG5：事例収集・調査の5つのWGである。

本報告書は、これらのワーキンググループの委員の方々の努力の賜物である。以下に本報告書の特長を説明する。

本報告書の構成は、第2章に従来の研究すなわち事例集を整理し、第3章の調査では、地下水の流動保全では地下水の“水みち”を求める事が最も大変であるとの観点より、現時点で開発されている“水みち”の調査法の整理を行った。また、地下水流動保全施設の機能低下で問題となる目詰まりに関する限界流速の求め方と、粒径を求めることについても触れている。

第4章の予測技術では、地下水流動保全施設を検討しなければどのような現象が生じるかを予測し、それに対して、保全施設を設けることにより得られる効果を予測する方法について論じている。さらに実際に準三次元浸透流解析において、流動保全施設をモデルに組み込む方法の例を示している。

第5章の開削工法では、止水壁をどのように除去するかについて、凍結工法や薬液工法の経時的な劣化を設計の中に入れる方法を提案している。さらに柱列式ソイルセメント壁等の止水壁を静的破碎工法によって壁体にひび割れを入れる事による通水性も検討している。さらに、現実的な多層地盤ではそれぞれの帯水層で水位が異なるために、それに対して地下水流動保全をどのように実施するかについても触れている。

この開削工法の研究報告での独創的な点は、多層地盤での地下水流動保全で既存の帯水層をどのように通水施設として利用するかについて検討しているところである。我国の地盤では、この方法はきわめて有効に適用できる可能性がある。

第6章の開削工法以外の地下水流動保全工法は、あくまでシールドトンネル工法とNATMを対象にしている。大断面のシールドトンネルが帯水層中の地下水の浸透を遮断することは、今後、日本の中で色々な所で生じてくる。このような流動阻害に対しての流動保全工法の実施例は我国ではまだない。ドイツの例を一つ示しているが、地下空間をマル

チで利用するようになってくると、なんらかの対策を検討する必要がある。地下水の流動保全だけでなく、シールドの周囲に対して上流側と下流側に作用する水圧が異なってくることがあるため、構造上の検討も必要である。シールドの周囲に通水性の裏込めを注入する工法も提案されている。このような新しい工法の実績が積まれることを期待する。

第7章のメンテナンス・モニタリングは、従来の地下水流動保全ではあまり深く検討されていない。人工の流動保全施設の機能が低下した時点でどのようなメンテナンスをするかを、井戸のメンテナンス技術のエキスパートに検討をしていただいた。この章も、本委員会の独特な報告書である。

流動保全施設の機能が低下しているかどうかのモニタリングもきわめて大変である。また、地下水位の計測データから機能がどの程度低下しているかどうかを判断するのもきわめて困難である。本報告書は、そのような課題の一端を解決しようとしたものである。

地下水流動保全技術に関する研究委員会

委員長 西 垣 誠

(岡山大学環境理工学部 教授)

表1.1 地下水流動保全技術に関する研究委員会 委員名簿

平成17年3月31日現在

会 務	ワーキング	氏 名	所 属
委員長	—	西垣 誠	岡山大学 環境理工学部
副委員長	トンネル	橋本 正	(財)地域 地盤 環境 研究所
幹事長	予測	進士 喜英	大成基礎設計(株)
委員	—	青木 一男	大阪工業大学
委員	メンテ・モニタ	有本 弘孝	NTTインフラネット(株)
委員	—	安藤 勲	国土交通省近畿地方整備局
委員	トンネル	石井 憲一	日本道路公団
委員	事例・調査	伊藤 学	阪神高速道路公団
委員	予測	今井 紀和	(有)アイジオル
幹事	—	植田 康宏	(株)阪神コンサルタンツ
委員	事例・調査	大栗 究	パシフィックコンサルタンツ(株)
委員	開削	大西 耕司	清水建設(株)
委員	開削	尾崎 大輔	大成建設(株)
委員	事例・調査	尾関 良純	阪神高速道路公団
委員	—	川上 伸行	福岡市交通局
委員	メンテ・モニタ	河野 良彰	(株)森川鑿泉工業所
委員	開削	小池 昇	五洋建設(株)
委員・WG長	事例・調査	小里 隆孝	(株)環境総合テクノス
委員・WG長	メンテ・モニタ	小林 延房	飛島建設(株)
委員	トンネル	坂山 安男	大日コンサルタント(株)
委員	事例・調査	櫻井 皆生	(株)オキコ コーポレーション
委員	トンネル	佐々木 彰	西松建設(株)
委員・WG長	開削	佐藤 常雄	(株)銭高組
委員	事例・調査	杉本 隆男	(株)日建設シビル
委員	トンネル	杉山 和久	(株)大林組
委員	メンテ・モニタ	住田 賢二	応用地質(株)
委員	予測	大東 憲二	大同工業大学 工学部
委員	メンテ・モニタ	谷口 知彰	計測テクノ(株)
委員	トンネル	辻子 雅則	飛島建設(株)
委員	メンテ・モニタ	鳥越 寿彦	NTTインフラネット(株)
委員・WG長	事例・調査	中山 健二	川崎地質(株)
委員	トンネル	長屋 淳一	(財)地域 地盤 環境 研究所
委員・WG長	予測	西田 憲司	(株)大林組
委員・WG長	トンネル	濱手 慎也	パシフィックコンサルタンツ(株)
委員	トンネル	松田 義則	八千代エンジニアリング(株)
委員	予測	水口 和彦	神戸市水道局
委員	モニタ・メンテ	宮辺 啓輔	(株)鴻池組
委員	開削	吉川 直志	首都高速道路公団
委員	開削	渡辺 幹広	鹿島建設(株)
顧問	—	丹原 光隆	(株)阪神コンサルタンツ
旧 委 員			
委員		眞柄 鎮	日本道路公団
委員		山本 俊幸	神戸市水道局
委員		米谷 作記子	阪神高速道路公団

2. 地下水流動保全工法の対策事例

2. 1 はじめに

事例収集WGでは、委員会が発足してすぐに地下水流動保全工法に関する文献資料の収集を開始し、間接的な資料も含めて現時点でおよそ 350 件が収集できた。そして、それらの資料を整理し種々の切り口から資料分析を行い、地下水流動保全工法を考える場合の基礎資料のひとつにする。

今回は、地下水流動保全工法と関連技術に関する文献資料の収集状況とその対策事例についての概要報告ということで、整理中の 232 件についての整理結果を報告するものとした。

2. 2 収集対象と方法

地下道路、地下鉄などの長大構造物の地下水流動阻害に対して地下水流動保全工法が採用され出したのは、1980 年頃からと思われるので事例収集も主としてこの頃からとし、まず J I C S T を利用していくつかのキーワードによる概要検索リストを得た。そして、これらのアブストラクトの内容を吟味し、有効になると思われる文献資料について、そのコピーを関係機関や学会などから収集した。今回の収集対象となった雑誌名や学会発表資料名と件数とを表 2.2.1 に示す。収集件数の多いのは、雑誌「基礎工」が 68 件で多く、ついで「土木学会年次学術講演会講演集」、・・・となっている。

なお、海外の文献資料については、数例の収集であるが、今後さらに収集する予定である。

また、「土木学会年次学術講演会講演集」などの文献資料は紙面が少ないため、概要報告のものが多く。そのため、別の雑誌などで詳細に報告している事例もあって重複しているがそのまま収録した。民間や官公庁の技報は主に技術研究所の年報資料である。

表 2.2.1 収集対象と件数

雑誌名・学会発表名	件数
「基礎工」	68
土木学会年次学術講演会講演集	36
地盤(土質)工学研究発表講演集	25
民間会社などの技報	19
「トンネルと地下」	15
官庁・財団などの技報	12
「土と基礎」	7
「地下水技術」	6
「土木施工」	6
「日経コンストラクション」	6
「土木技術」	5
その他学会発表	5
土木学会論文集	2
「月刊下水道」	1
「建築技術」	1
「電力土木」	1
「土木学会誌」	1
その他	16
合計	232

2. 3 文献資料の内容分類

文献資料の内容は、概要版から詳細版、あるいは施工中報告や、技術論評といったように様々な内容である。したがって、一定の分類できちんと仕分けることは難しいが、大まかに分類すると表 2.3.1 のようになった。

表 2.3.1 文献資料の内容分類

分類	内容分類	件数
1	技術論評・施工計画概要・環境保全	51
2	大規模掘削工事・大型建築基礎工事	39
3	計測技術・実験報告	28
4	地下水解析・設計理論	26
5	地下水流動保全工法の対策事例	25
6	関連技術・新工法開発	25
7	ディープウェル・リチャージウェル	20
8	トンネル・シールド工事	13
9	情報化施工	5
	合 計	232

各分類の内容はおおむね次のようである。

- (1) 分類 1 : ある特定の工事や施工計画について報告するのではなく、事例を紹介しながらの技術論評や、地下水環境保全に関する評論などが主な内容となっているもの。
- (2) 分類 2 : 地下鉄の駅構築とか大型ビルの基礎工事などの施工報告が主なもので、工事中の地下水対策は行われているが、いわゆる恒久的に地下水流動保全工事をしていない事例内容。
- (3) 分類 3 : 地下水の観測方法や測定器の精度問題、あるいは地下水流動保全工法についてのモデル実験報告など。
- (4) 分類 4 : 地下水流動保全工法についての予測解析や対策工事の設計手法に関する内容。
- (5) 分類 5 : 実際に施工された対策工事に関する施工報告で、地下鉄工事や地下道路工事が主なものの。
- (6) 分類 6 : 地下水流動保全工法に付随する技術（目詰まり防止や土留め工法など）の報告例。
- (7) 分類 7 : 主としてウェルポイント技術や施工実績に関する内容。分類 2 に関連するものが多い。
- (8) 分類 8 : 地下水対策を伴うトンネル工事の事例。
- (9) 分類 9 : 施工中の地下水観測や、ウェルポイント工事の計測管理施工についてのもので分類 2 や分類 7 に関するものがほとんどである。

2. 4 地下水流動保全工法の分類

地下水流動保全工法としては、いくつかの方法が考えられているが、地下水流動保全工法の分類²⁾を図 2.4.1～2.4.3 に示す。ただし、文献資料によっては「注水方式」とか「揚排水方式」というような表現も見られるが、工法断面図を見ればどれと類似しているかはすぐに理解できる。

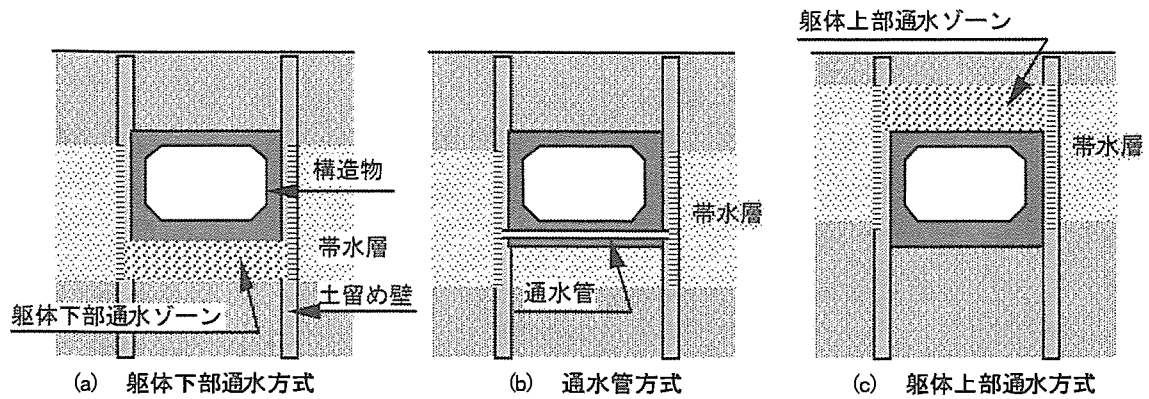


図 2.4.1 通水方式

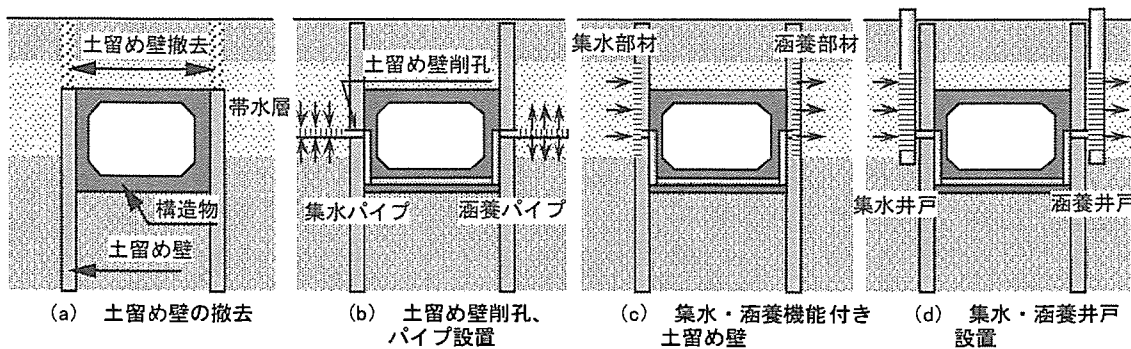


図 2.4.2 集水・涵養方式

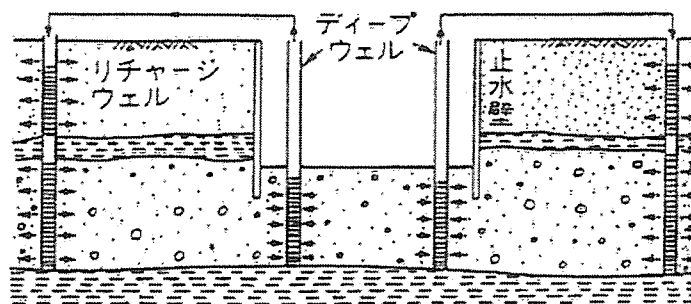


図 2.4.3 復水方式

2. 5 地下水流動保全工法の対策事例

ここに紹介する 16 の実施例は、地下水流動阻害が恒久的に生じると予測されて、その対策工法が実施された事例である。構造物の形状も線状で長いものが多い。表 2.5.1 に年代順に並べ、また、主な事項について比較してみた。保全対策工法の欄の（ ）内の管と層とは、上流側の水を流下さすときに通水管を採用、もしくは砕石層などを採用した、の分類を意味する。

採用されている工法としては 通水方式が多い。この方式はメンテナンスが不要というメリットがあるので採用されることが多いと言われている。集排水方式は、施設の維持管理や井戸壁の目詰まり問題があるとされるが種々の工夫が試みられている。

土留工としては SMW が多い。また最近、通水 SMW 工法も採用され出している。事前調査では、在来の井戸とか観測井を設けて地下水位の平面コンターを把握してから予測解析する事例が多い。

予測解析手法としては、FEM による準三次元解析が多い。これは対象地盤が沖積地盤で、地下水流を水平流としても差し支えないという判断が入っているものと思われる。

施工後の地下水観測については継続的に行われている事例もあるが、回復したということで中止している事例もある。山岳トンネルの場合、今までは無対策での施工が多かったが、最近になって防水型トンネルの採用事例が増える傾向にある。これは環境保全の強化という背景があるものと思われる。また、工事中に地下水低下が起こり井戸補償をした事例もあるが、施工後に地下水低下問題はとくにないという報告が多く、対策工の効果が発揮されているということである。

なお、表 2.5.1 の事例における保全対策工法の実施図を 2.7 節に示しておいた。同じ方式でも現場の事情や構造物の違いによって部分的に工夫の凝らしていることが分かる。

表 2.5.1 地下水流動保全工法の対策事例の比較

NO.	実施図	施工時期	工事名	保全対策工法	開削・土留	事前調査	予測解析	地下水影響	文献NO.
1	A	1979	地下鉄山手線三宮駅工事	通水方式(管)	開削・泥水固化壁	井戸・地下水動態	平面二次元浸透流	特になし	3)
2	B	1979	Duisburg市地下鉄工事	通水方式(管)	シールドトンネル	地下水コンター	-	特になし	4)
3	C	1982	福岡市高速鉄道2号線建設工事	通水方式(層)	開削・止水矢板	井戸・地下水コンター	-	井戸枯渇・補償	5)
4		1982	武庫川流域下水道事業(今北流入渠)	復水工法(注水)	シールドトンネル	注水試験	鏡像法水位低下解析	特になし	6)
5	D	1990	阪神電鉄西宮高架化地下部工事	通水方式(管)	地中梁・鋼矢板	地下水・宮水水質	-	特になし	7)
6	E	1991	阪和自動車道堺地区工事	集排水方式(管)	掘削・SMW	井戸・地下水動態	平面二次元	特になし	8)
7	F	1991	鹿屋分水路上流側開水路工事	底面遮水壁	開削・SMW	観測井	二次元浸透流	特になし	2)、9)
8		1992	東名阪自動車道(小幡～上社IC間)	通水方式(管)	掘削・止水矢板	地下水コンター	FEM三次元	低下・回復	10)
9		1993	名古屋高速1号線吹上～四谷	通水方式(層)	SMW・連壁	地下水コンター	FEM準三次元	低下・回復	11)
10		1994	京都市地下鉄烏丸線(北山～松ヶ崎駅間)	通水方式(管)	掘削・SMW	地下水コンター	FEM準三次元	低下・回復	12)
11		1995	JR仙石線地下化工事	通水方式(層)	開削・SMW	地下水コンター	FEM準三次元	特になし	13)
12	G	1996	地下鉄烏丸線延伸工事(北山～国際会館)	防水型トンネル	NATM	丈ヶ谷・宝ヶ池水位	-	特になし	14)
13		1997	国道200号直方バイパス工事	集排水方式(管)	掘削・SMW	井戸分布調査	FEM準三次元	特になし	15)
14		1998	小河川工事(関東近郊)	通水方式(層)	開削・鋼矢板	井戸・地下水動態	FEM準三次元	特になし	16)
15	H	1998	環8井萩地区立体化工事	通水方式(管)	開削・SMW連壁	地下水コンター	-	低下・回復	17)
16		1998	首都高速中央環状線新宿線SJ12工区	集排水方式(管)	RC地中連壁	観測井	FEM準三次元	観測中	18)

注 1) 施工時期の年数は、施工開始年もしくは事例の発表年である。

注 2) 「事前調査」の欄は、表 2.6.1 の「モニタリング・メンテ」の欄を参照されたし。

注 3) 「地下水影響」の欄は、表 2.6.1 の「対策の効果・課題」の欄を参照されたし。

2. 6 対策事例で見られる問題点や対策効果と課題について

前章で紹介した16の対策事例の報告を読むと、工事がスムーズに終えたものもあれば、いくつかの問題点を克服しながら完成したというようなものも見受けられる。対策事例で報告された問題点や課題点について表2.6.1にとりまとめた。

表 2.6.1 対策事例に見られる問題点や対策効果と課題

工 事 名	問 題 点	モニタリング・メンテナンス	対策の効果・課題
1. 地下鉄山手線 三宮駅工事	<ul style="list-style-type: none"> 旧河川の存在で地下水が豊富 地形が一方に傾斜 透水性地盤が優勢 	<ul style="list-style-type: none"> 上下流に観測孔4本設置 通水管で流量観測 	<ul style="list-style-type: none"> 対策後15年現在でも異常なし
2. Duisburg市 地下鉄工事	<ul style="list-style-type: none"> 地下水流に直角の構造物 シールドめがねトンネルの保全対策 	<ul style="list-style-type: none"> 不明 	<ul style="list-style-type: none"> 施工後の情報が不明
3. 福岡市高速鉄道 2号線建設工事 (東公園工区)	<ul style="list-style-type: none"> 東公園地区沿線の地下水は古来名水として市民に親しまれているため保全する 	<ul style="list-style-type: none"> 周辺井戸水位観測 	<ul style="list-style-type: none"> 地下水の流れは復水された
4. 武庫川流域 下水道事業 (今北流入渠)	<ul style="list-style-type: none"> 周辺に井戸多く、枯渇の場合、農作物補償問題になる恐れ。 復水方式の效果に疑問ありで注水試験後施工に入る 	<ul style="list-style-type: none"> 注水管理・逆洗 水質観測 復水効果確認試験 周辺井戸水位観測 	<ul style="list-style-type: none"> 濾過装置により目詰まりを少なくする 配管材の防錆問題 空気の巻き込み防止
5. 阪神電鉄 西宮高架化 地下部工事	<ul style="list-style-type: none"> 宮水地帯のため慎重な施工計画。 水位だけでなく水質問題が大 	<ul style="list-style-type: none"> 水位観測孔67本設置 H6年4月～H9年7月において観測 揚水試験による通水量確認 	<ul style="list-style-type: none"> 保全効果が確認されとくに問題なし
6. 阪和自動車道 堺地区工事	<ul style="list-style-type: none"> 地下水浸透が一様でない 涵養施設での目詰まり問題 復水工法の効果の確認 	<ul style="list-style-type: none"> 水位観測孔20本設置 トレーサー追跡調査 効果確認の試験施工 観測は約1ヶ月 	<ul style="list-style-type: none"> 施設の恒久的維持管理問題 目詰まり、逆洗問題への対応
7. 鹿屋分水路 上流側開水路工事	<ul style="list-style-type: none"> 河床付近が降下軽石層（ぼら層）を切るため底版の施工問題 未経験のしらすでのトンネル工事 	<ul style="list-style-type: none"> 地下水位観測・揚水量 地下水流向・流速 水質分析 トンネル・地中の変位測定 	<ul style="list-style-type: none"> しらすの内部浸食は土木工学でも遅れている分野であるが貴重な資料や知見を得た
8. 東名阪自動車道 (小幡～社IC間)	<ul style="list-style-type: none"> 掘削道路建設区間での周辺への地下水問題 豊富な地下水の砂礫層があり地下水利用が多く保全の要あり 	<ul style="list-style-type: none"> 上下流に観測孔5本設置 約2ヵ年観測 	<ul style="list-style-type: none"> H4年8月末から水位が回復し、H5年9月末にほぼ回復する FEM3次元解析結果より連通パイプの適切な設計が可能
9. 名古屋高速1号線 (吹上～四谷間)	<ul style="list-style-type: none"> 掘削道路建設区間での周辺への地下水問題 非常に透水性の高い砂礫層がある 	<ul style="list-style-type: none"> 観測孔32本設置 観測は約3ヵ年強 トレーサー追跡調査 	<ul style="list-style-type: none"> 水替え期間終了後1ヶ年で建設前水位にほぼ回復する トレーサー試験結果で対策効果を確認できた
10. 京都市地下鉄 烏丸線延伸工事 (北山～松ヶ崎間)	<ul style="list-style-type: none"> 沖積砂礫層が遮断されることになる 開削工法のため地下水流動阻害の恐れあり 	<ul style="list-style-type: none"> 観測孔36本設置 H6年1月～H8年末 	<ul style="list-style-type: none"> H7年3月頃で通水効果が確認される
11. JR仙石線 地下化工事	<ul style="list-style-type: none"> 線状構造物のため地下水流を遮断する恐れがある 段丘の砂礫層が非常に湧水が多いと判断される 	<ul style="list-style-type: none"> 観測孔8本設置 継続的に観測 	<ul style="list-style-type: none"> 対策効果があるとの判断はまだ不明 地山からの細粒分の混入で目詰まりを起こす恐れがある

工 事 名	問 題 点	モニタリング・メンテナンス	対策の効果・課題
12. 京都市地下鉄 烏丸線延伸工事 (松ヶ崎～国際会館)	<ul style="list-style-type: none"> 透水性の高い扇状地堆積層を通過することから地下水流動保全が問題 	<ul style="list-style-type: none"> 周辺での水文調査 環境保全から宝ヶ池と丈ヶ谷水位の観測 H5 年 8 月～H8 年末まで観測 	<ul style="list-style-type: none"> トンネル覆工完了後（H8 年 11 月）にほぼ回復する
13. 国道 200 号 直方バイパス工事	<ul style="list-style-type: none"> 地下水利用の井戸が多く（271 件）道路構築により地下水流動阻害の恐れ有り 浅井戸が圧倒的に多い 	<ul style="list-style-type: none"> H9 年 4 月～H11 年 5 月において対策工施工中に観測するが、継続予定 	<ul style="list-style-type: none"> 観測期間中は対策効果は十分発揮されているが、今後もモニタリングは続行
14. 小河川工事 (関東近郊)	<ul style="list-style-type: none"> 周辺に民家が密集していて地盤への影響が考えられる 砂礫層から河床への湧水を防ぐ 	<ul style="list-style-type: none"> 継続的な地下水位観測 詳細は不明 	<ul style="list-style-type: none"> 右岸側の地下水位低下は工事だけでなく自然的な条件との複合とされる
15. 環状 8 号線 井荻立体化工事	<ul style="list-style-type: none"> 浅層地下水を賦存する武蔵野砂礫層を通過する はじめ止水性の土留め壁で施工するが、井戸水濁りや井戸枯渇を生じる 	<ul style="list-style-type: none"> 周辺井戸の水位観測 	<ul style="list-style-type: none"> 地下水回復は多少認められたが広域的な地下水位の回復は十分ではない 通水効率の改善要あり 集排水管の目詰まり
16. 首都高速 中央環状線 (新宿線 SJ12 工区)	<ul style="list-style-type: none"> 西から東に流れる地下水を南北に横断するため流動阻害の恐れがある 	<ul style="list-style-type: none"> 通水井の洗浄工 逆洗浄による仕上げ 通水性の確認を現場透水試験で確認 	<ul style="list-style-type: none"> スクリーンの状態写真観察から洗浄の効果を確認 今後施工中施工後の地下水位を観測して効果を検証

2. 7 まとめ

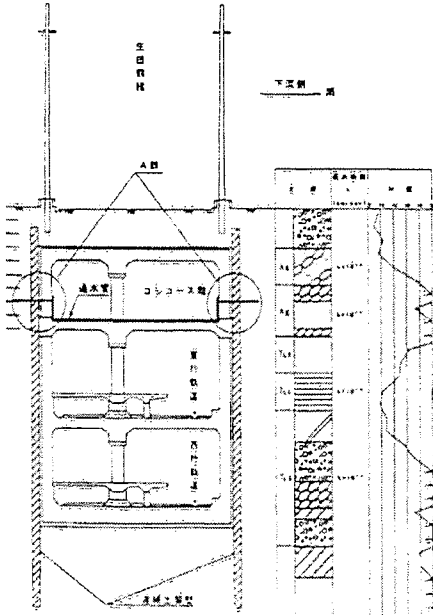
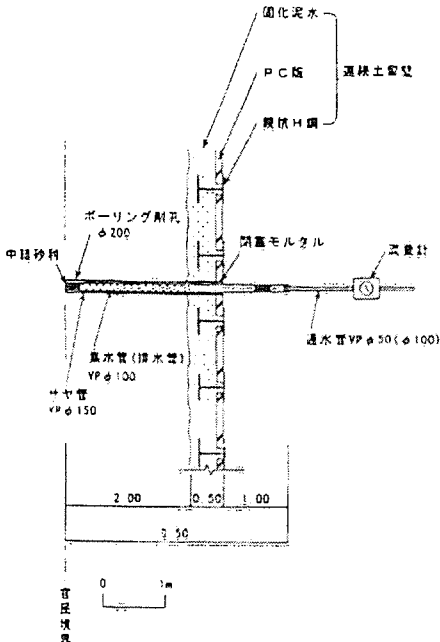
今回は、地下水流動保全工法に関する事例収集の整理と分析ということでまとめたが、関連する文献資料は非常に多くまだ全てを分析できていない。したがって、まとめた内容は、地下水流動保全工法の対策事例の概要を紹介する程度にとどまった。

紹介した対策事例の多くは、その地域や現場での事情に対応して様々な工夫のなされた工法を採用しているようである。また、対策工法としてはやはり通水方式が圧倒的に多いが、やはり施工後のメンテナンスが楽なことも一因にあると思われる。

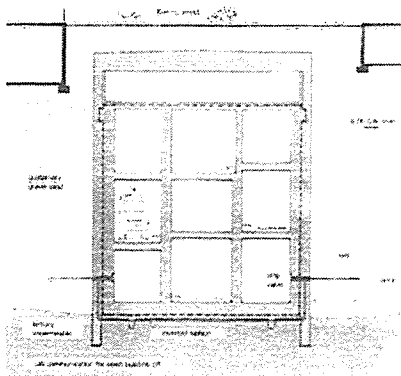
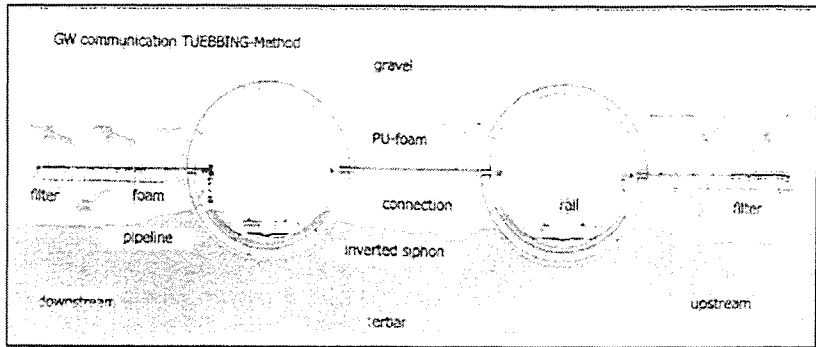
なお、モニタリングやメンテナンスに関する検討事例は少なく、施工後もモニタリングを継続して様子を見ながら問題が出れば対応するという内容のものがいくつか見受けられた。

今後、地下水流動保全工法の採用される現場は、都市近郊の沖積地盤よりも山間地での工事計画が増えると予想されるが、反面、都市内における大深度での工事計画もそれなりにはあると思われる。したがって、これまでの施工実績と経験に加えて、さらに新しい工法技術の要求される場面に直面すると考えられる。

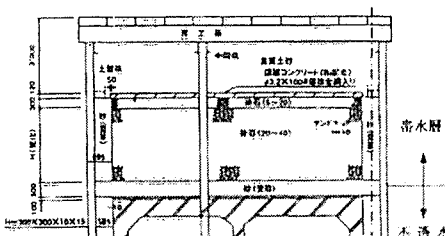
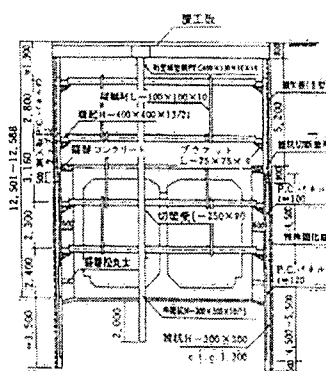
参考資料 地下水流動保全工法の対策事例図集

NO.1	調査事例名	地下鉄山手線三ノ宮駅工事		施工(調査)時期	1979
調査・試験	地質関連	ボーリング調査 13本・古地図調査			
	地下水関連	地下水位観測孔 上下流に4孔設置			
地下水影響予測及び対策工法の検討手法	2次元浸透流解析・通水管の効果確認試験				
掘削土留工法	開削・泥水固化壁工法				
補助工法					
地下水流動保全対策	通水工法 (通水管Φ150を7本)				
対策工法の効果	対策後15年経過でもとくに影響はなし				
施工完了後の対応	地下水モニター	通水管流量観測	メンテナンス	—	
地質と構造物の断面図など	<div><div></div><div></div></div> <p>A部詳細断面図</p>				

引用文献：3)

NO.2	調査事例名	Duisburg市地下鉄工事		施工(調査)時期	1979
調査・試験	地質関連	不明			
	地下水関連	地下水流動速度			
地下水影響予測及び対策工法の検討手法	大規模土質水理実験				
掘削土留工法	めがねシールド工法				
補助工法					
地下水流動保全対策	通水工法（サイフォン式）・バイパス管などによりウェル洗浄可能				
対策工法の効果	とくに地下水変動は発生させていないが、20年前の資料につき現状は不明				
施工完了後の対応	地下水モニター	下流水位差・配管内流量観測	メンテナンス	—	
地質と構造物の断面図など	<div></div> <div></div>				

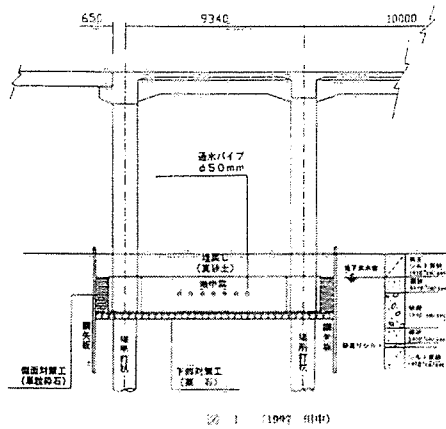
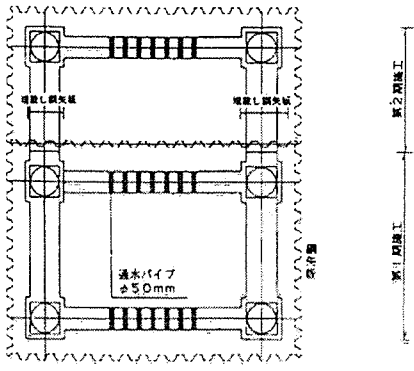
引用文献：4)

NO.3	調査事例名	福岡市高速鉄道2号線建設工事		施工(調査)時期	1982
調査・試験	地質関連	ボーリング調査			
	地下水関連	井戸水位観測			
地下水影響予測及び対策工法の検討手法	井戸水位観測による地下水コンターの調査				
掘削土留工法	開削・止水矢板				
補助工法					
地下水流動保全対策	通水方式（砕石による上部通水層方式）				
対策工法の効果	地下水の流れは復水された模様				
施工完了後の対応	地下水モニター	—	メンテナンス	—	
地質と構造物の断面図など	<div><p>平土質柱状図を参考に帯水層、不透水層位置を示した。</p><p>図-1 止水構造 (1996 福岡市交通局)</p></div> <div><p>図-2 特殊連続地中壁標準断面図 (1983 日揮、他)</p></div>				

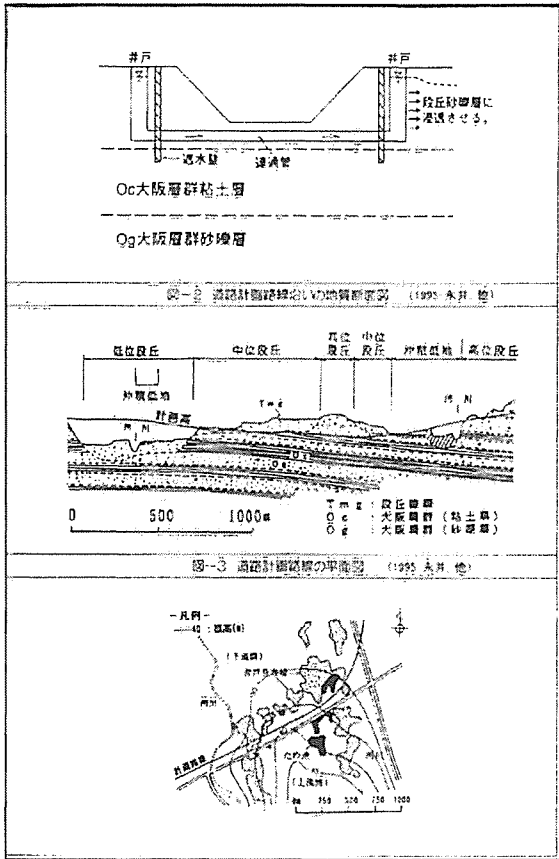
引用文献：5)

NO.4	調査事例名	武庫川流域下水道事業(今北流入渠)		施工(調査)時期	1982
調査・試験	地質関連	ボーリング調査			
	地下水関連	農業用井戸の水位観測・復水工の水質分析			
地下水影響予測及び対策工法の検討手法	注水実験・鏡像法による地下水位低下の予測解析				
掘削土留工法	シールドトンネル				
補助工法					
地下水流動保全対策	リチャージウェルによる復水工法				
対策工法の効果	井戸枯れ及び農作物補償問題が生じるもその後は復水された				
施工完了後の対応	地下水モニター	—	メンテナンス	—	
地質と構造物の断面図など					

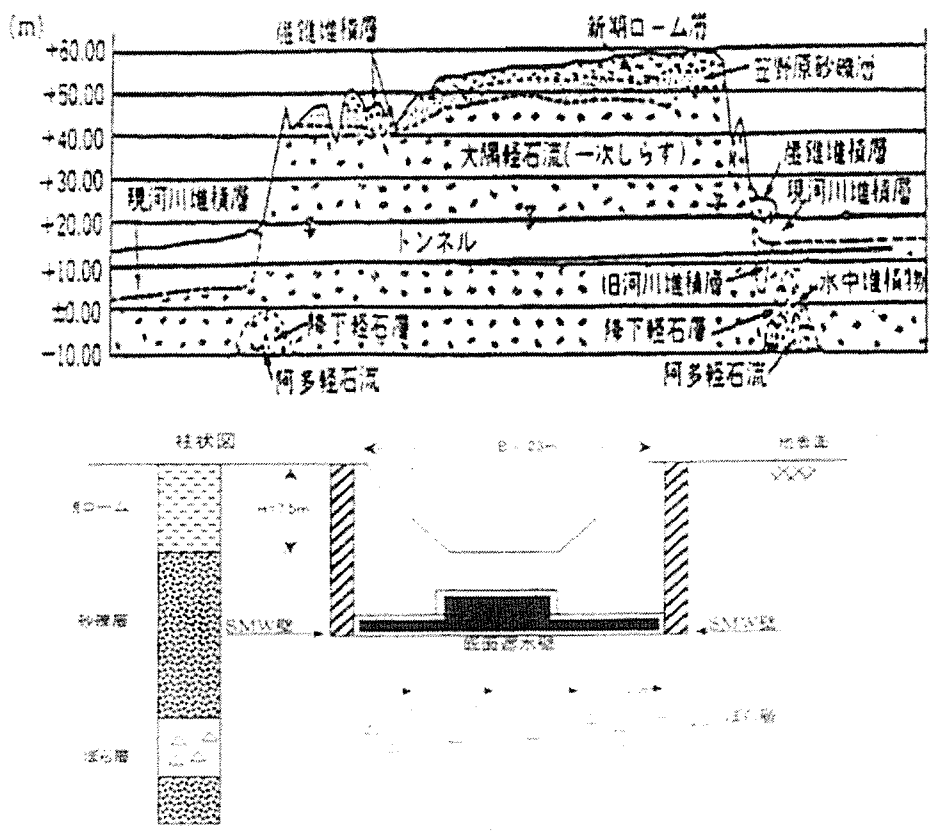
引用文献：6)

NO.5	調査事例名	阪神電鉄西宮高架化地下部工事			施工(調査)時期	1990
調査・試験	地質関連	ボーリング調査				
	地下水関連	宮水の水位・水質調査及び地下水位観測孔67本設置				
地下水影響予測及び対策工法の検討手法	工事中の地下水位観測を継続・監視での施工					
掘削土留工法	地中梁・鋼矢板					
補助工法						
地下水流動保全対策	通水方式（地中梁内に管設置など）					
対策工法の効果	降雨による水位変動はあるものの工事の影響はほとんどなし					
施工完了後の対応	地下水モニター	—	メンテナンス	—		
地質と構造物の断面図など	<div></div> <div></div>					

引用文献：7)

NO.6	調査事例名	阪和自動車道堺地区工事		施工(調査)時期	1991
調査・試験	地質関連	ボーリング調査			
	地下水関連	地下水位観測孔20本設置・トレーサー追跡調査			
地下水影響予測及び対策工法の検討手法	対策工法の効果確認試験・平面2次元浸透流解析				
掘削土留工法	掘削・SMW				
補助工法					
地下水流動保全対策	集排水工法(管)				
対策工法の効果	とくに問題はなし				
施工完了後の対応	地下水モニター	—	メンテナンス	—	
地質と構造物の断面図など	<div></div>				

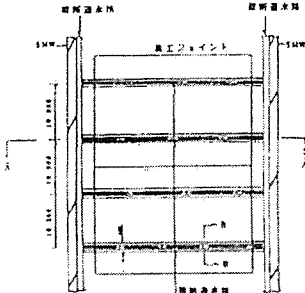
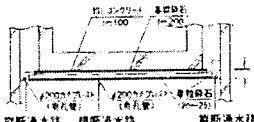


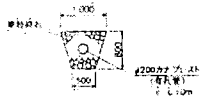
引用文献：8)

NO.7	調査事例名	鹿屋分水路上流側開水路工事			施工(調査)時期	1991
調査・試験	地質関連	ボーリング調査				
	地下水関連	地下水流向・流速観測・揚水試験・水質分析				
地下水影響予測及び対策工法の検討手法	2次元浸透流解析					
掘削土留工法	開削・SMW					
補助工法						
地下水流動保全対策	水路底面遮水壁					
対策工法の効果	地下水流動への影響はとくになし					
施工完了後の対応	地下水モニター	—	メンテナンス	—		
地質と構造物の断面図など	<div></div>					

引用文献：2),9)

NO.8	調査事例名	東名阪自動車道(小幡～上社IC間)		施工(調査)時期	1992
調査・試験	地質関連	ボーリング調査			
	地下水関連	上下流に観測孔5本設置・トレーサー追跡調査			
地下水影響予測及び対策工法の検討手法	F E M 3次元浸透流解析・トレーサー追跡調査で対策の効果確認				
掘削土留工法	掘削・止水矢板				
補助工法					
地下水流動保全対策	通水方式(管)				
対策工法の効果	工事中に水位低下を生じるがほぼ回復する				
施工完了後の対応	地下水モニター	—	メンテナンス	—	
地質と構造物の断面図など	<div></div> <div>(a) 止水入換引き抜き法</div> <div>(b) 地下水通過パイプ設置法</div> <div><div><div></div> : 透水層</div><div><div></div> : 不透水層</div><div><div></div> : 止水壁</div><div><div></div> : 地下水の流れる方向</div></div>				

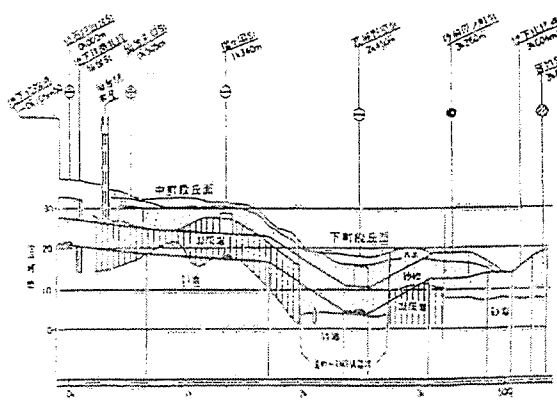
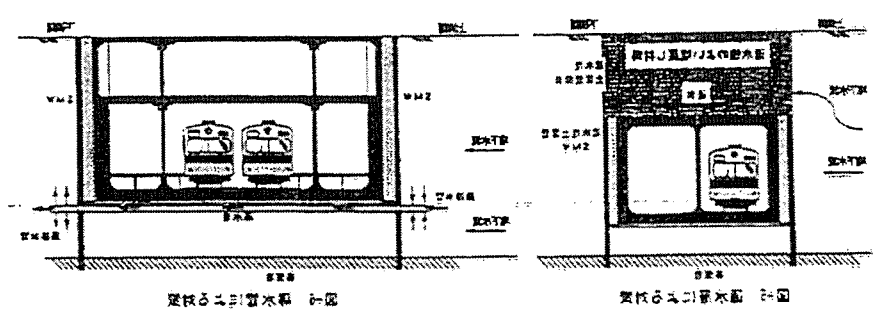
引用文献：10)

NO.9	調査事例名	名古屋高速1号線(吹上～四谷間)		施工(調査)時期	1993
調査・試験	地質関連	ボーリング調査			
	地下水関連	地下水位観測孔32本設置・トレーサー追跡調査			
地下水影響予測及び対策工法の検討手法	FEM準3次元浸透流解析・トレーサー追跡調査で効果の確認				
掘削土留工法	連壁・SMW				
補助工法					
地下水流動保全対策	通水方式(砕石層)				
対策工法の効果	工事中に低下するも建設前水にほぼ回復				
施工完了後の対応	地下水モニター	—	メンテナンス	—	
地質と構造物の断面図など	<div><div><p>透水工法平面図</p><p>SMWは、透水性確保に於いては10mのロックオーダーにて10mピッチで設置。</p></div><div><p>SMWおよび透水工法断面図 (深田、他)</p><p>A-A 透水部横断面図</p><p>B-B 横断透水部断面図</p><p>透水地中壁および透水工法断面図 (深田、他)</p><p>A-A 透水壁断面図</p><p>B-B 横断透水部断面図</p><p>透水地中壁および透水工法断面図 (深田、他)</p></div></div>				

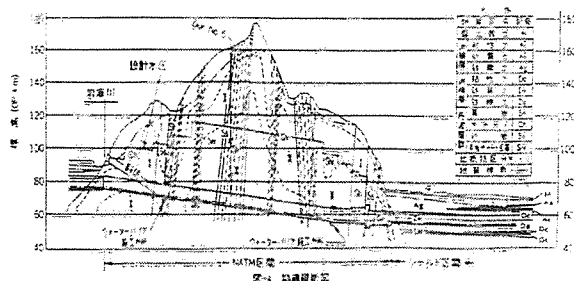
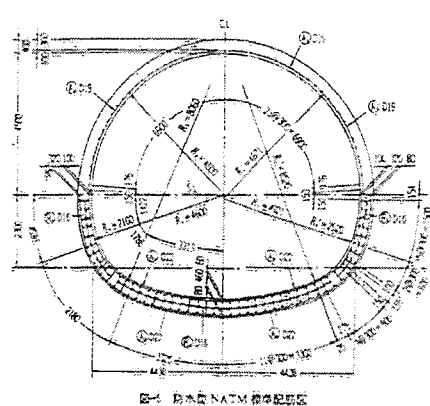
引用文献：11)

NO.10	調査事例名	京都市地下鉄烏丸線(北山～松ヶ崎間)		施工(調査)時期	1994
調査・試験	地質関連	ボーリング調査			
	地下水関連	地下水位観測孔36本設置			
地下水影響予測及び対策工法の検討手法	FEM準3次元浸透流解析・地下水位の継続観測により監視施工				
掘削土留工法	掘削・SMW				
補助工法					
地下水流動保全対策	通水方式(管)				
対策工法の効果	通水効果を確認・とくに問題なし				
施工完了後の対応	地下水モニター	—	メンテナンス	—	
地質と構造物の断面図など	<div><div><p>地質と構造物の断面図など</p></div><div><p>②北山通工区のパイプワーク</p></div><div><p>③北山通工区の最南部 漏水状況の断面図</p></div></div>				

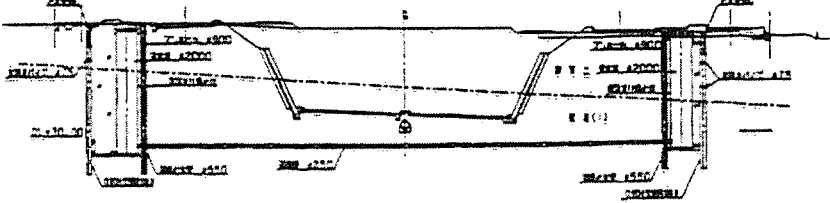
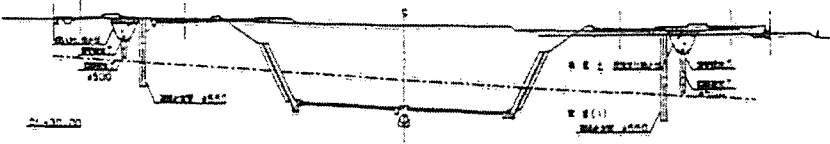
引用文献：12)

NO.11	調査事例名	JR仙石線地下化工事		施工(調査)時期	1995
調査・試験	地質関連	ボーリング調査			
	地下水関連	地下水位観測孔 8 本設置			
地下水影響予測及び対策工法の検討手法	F E M 準 3 次元浸透流解析・地下水位の継続観測による施工				
掘削土留工法	開削・SMW				
補助工法					
地下水流動保全対策	通水方式(層)				
対策工法の効果	とくに地下水位変動の影響は認められないが、対策効果の判断はまだ不明				
施工完了後の対応	地下水モニター	—	メンテナンス	—	
地質と構造物の断面図など	<div><p>図-4 地質図</p><div><p>図-5 断面図</p></div></div>				

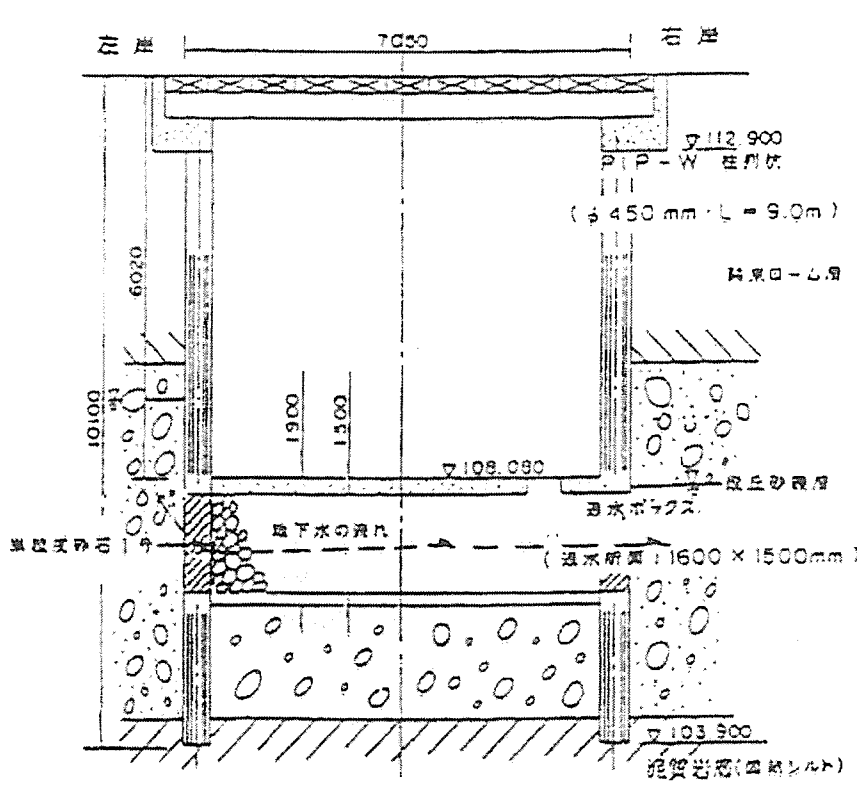
引用文献：13)

NO.12	調査事例名	地下鉄烏丸線延伸工事(北山～国際会館)			施工(調査)時期	1996
調査・試験	地質関連	ボーリング調査				
	地下水関連	水文観測・沢、池の水位観測				
地下水影響予測及び対策工法の検討手法	宝ヶ池・丈が谷の水位を観測しながら施工					
掘削土留工法	N A T M					
補助工法						
地下水流動保全対策	防水型トンネル					
対策工法の効果	宝ヶ池や丈が谷の水位は少し低下するも回復する					
施工完了後の対応	地下水モニター	—	メンテナンス	—		
地質と構造物の断面図など	<div></div> <div></div>					

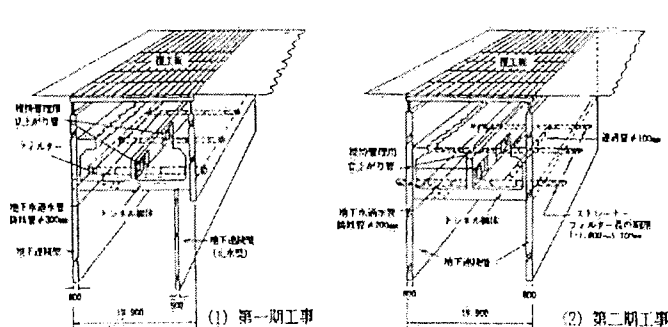
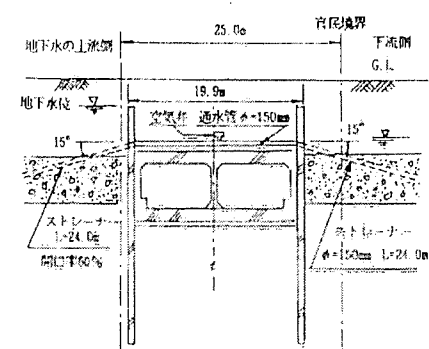
引用文献：14)

NO.13	調査事例名	国道200号直方バイパス工事		施工(調査)時期	1997
調査・試験	地質関連	ボーリング調査			
	地下水関連	周辺井戸の水位観測			
地下水影響予測及び対策工法の検討手法	F E M準3次元浸透流解析・井戸水観測による監視施工				
掘削土留工法	掘割・SMW				
補助工法					
地下水流動保全対策	集排水方式(管)				
対策工法の効果	通水効果の確認、今のところとくに問題はないが観測は継続				
施工完了後の対応	地下水モニター	継続観測	メンテナンス	—	
地質と構造物の断面図など	<div><p>通水管の断面図</p><p>止水壁の断面図</p></div> <p>図一13 逆サイフォン方式による復水工法の標準断面図</p>				

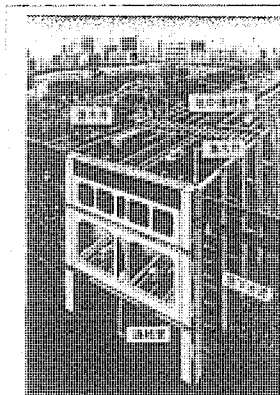
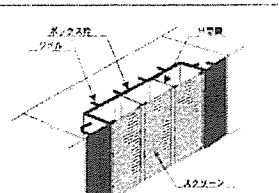

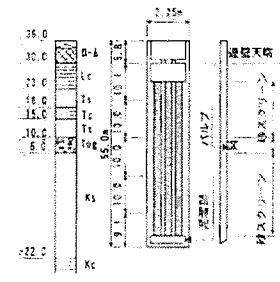
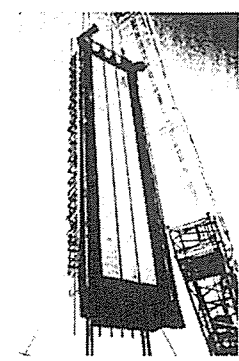
引用文献：15)

NO.14	調査事例名	小河川工事(関東近郊)		施工(調査)時期	1998
調査・試験	地質関連	ボーリング調査			
	地下水関連	継続的地下水観測・直接的地下水流動観測			
地下水影響予測及び対策工法の検討手法	F E M準3次元浸透流解析・地下水位の継続観測による監視施工				
掘削土留工法	開削・鋼矢板				
補助工法					
地下水流動保全対策	通水方式(層)				
対策工法の効果	地下水の低下は認められたが自然的な条件が関係する複合と判断する				
施工完了後の対応	地下水モニター	—	メンテナンス	—	
地質と構造物の断面図など					

引用文献：16)

NO.15	調査事例名	環8井荻地区立体化工事		施工(調査)時期	1998
調査・試験	地質関連	ボーリング調査			
	地下水関連	周辺井戸の水位観測			
地下水影響予測及び対策工法の検討手法	地下水位の継続観測による監視施工				
掘削土留工法	開削・SMW連壁				
補助工法					
地下水流動保全対策	通水方式(管)				
対策工法の効果	地下水位の回復は多少認められるも広域的な回復は充分ではない				
施工完了後の対応	地下水モニター	—	メンテナンス	—	
地質と構造物の断面図など	<div><p>図-4 躯体底板中の通水管配置イメージ図</p></div>				

引用文献：17)

NO.16	調査事例名	首都高速中央環状線(新宿線SJ12工区)			施工(調査)時期	1998
調査・試験	地質関連	ボーリング調査				
	地下水関連	現場透水試験・洗浄試験				
地下水影響予測及び対策工法の検討手法	F E M準3次元浸透流解析・洗浄の効果確認試験					
掘削土留工法	R C地中連壁					
補助工法						
地下水流動保全対策	集排水方式(管)					
対策工法の効果	試験では効果を確認するが今後施工中・後において地下水位の観測をする予定					
施工完了後の対応	地下水モニター	継続観測	メンテナンス	—		
地質と構造物の断面図など	<div><div><p>図-1 透水性R C地中連壁の概念図 (1997・鎌高城「透水連壁工法開発誌」)</p></div><div><p>図-2 透水ボックスの概念図</p><p>図-3 透水ボックス付き鉄筋かご断面模式図 (1999・土橋・他)</p></div><div><p>図-4 地質と透水井の設置箇所 (1999・土橋・他)</p></div><div><p>写真-1 透水ボックス付き鉄筋かごの施工状況 (1999・土橋・他)</p></div></div>					

引用文献：18)

参考文献

- 1)財団法人 先端建設技術センター：「地下構造物建設に伴う地下水保全工法事例調査検討業務」報告書、平成3年2月
- 2)地下水流動保全工法に関する研究委員会：「地下水流動保全工法」、2002年6月版
- 3)杉村孝雄、山内英治、橋本 正、有本弘孝：「神戸市営地下鉄山手線の三宮駅建設に伴う地下水流動保全対策」、地下水地盤環境に関するシンポジウム'99 発表論文集、pp. 115～154、1999.
- 4)Stadtbahn Duisburg, Fahren auf neuen Wegen, Verlagsgesellschaft FLAMM DRUCK, pp. 92～95, 2000.
- 5)深津保文、他1名：「報文・地下鉄根切工事における山留め工と排水の事例-福岡市高速鉄道2号線地下鉄東工区-」、基礎工 pp. 85～88, 1995.
- 6)山口征弘：「下水道工事における地下水位低下防止のための復水工」、土木学会誌、pp. 59～66, 1983.
- 7)阪神西宮工事事務所：「本設地下部工事における地下水対策」、1997.
- 8)永井 宏、西垣 誠、宇野尚雄、柳田三徳：「道路建設の切土区間における地下水環境保全のための復水工法の検討」、土木学会論文集 N0. 516/VI-27、pp. 15～25, 1995.
- 9)亀江幸二：「鹿屋分水路トンネル建設工事-地下水位下のしらす層にトンネルを掘る-」、土木技術 Vol. 46, No. 5、1991.
- 10)大東憲二、植下 協、高木利則、安江勝夫：「掘割道路建設における地下水状態への影響評価に関する研究」、土と基礎 Vol. 43, No. 9、pp. 27～29, 1995
- 11)名古屋高速道路公社：「市道高速1号（吹上～四谷）地下水影響検討（その1）～（その3）業務委託」報告書、平成4年～平成8年
- 12)出口博一、福田雅友、椋浦正人、田中信幸、橋本 正、有本弘孝：「京都市地下鉄烏丸線における通水工法を用いた地下水位変動低減対策」、地盤工学研究発表会発表講演集、pp. 2013～2014, 1997
- 13)大野賢二、松本岸雄、鈴木孝之、縄田晃樹：「仙石線地下化工事における地下水保全策」、土質工学会東北支部研究討論会講演集、pp. 25～31, 1994.
- 14)梅田雅弘、井戸澄夫、出口博一、若林良二：「環境保全対策を充分考慮した大規模都市型トンネル施工」、トンネルと地下 第28巻2号、pp. 25～30, 1997.
- 15)佐藤敏行、塚元伸一、井出 修：「直方バイパス掘割区間の地下水対策工」、九州技法第25号（財団法人 建設工法研究所福岡支部）、pp. 45～50, 1999.
- 16)平山光信：「建設工事に伴う地下水環境影響評価」、地下水技術 第40巻第3号、1998.
- 17)村尾公一、地主勝己、松村治比湖：「環ハの大渋滞を救う-井荻地区立体化工事-」、トンネルと地下 第27巻4号、pp. 15～25, 1996.
- 18)土橋 浩、並川賢治、多田浩治、松田義則、坂本佳一：「通水性 RC 地中連続壁の設計・施工」、基礎工 第27巻12号、1999.

3. 地下水流動保全の調査

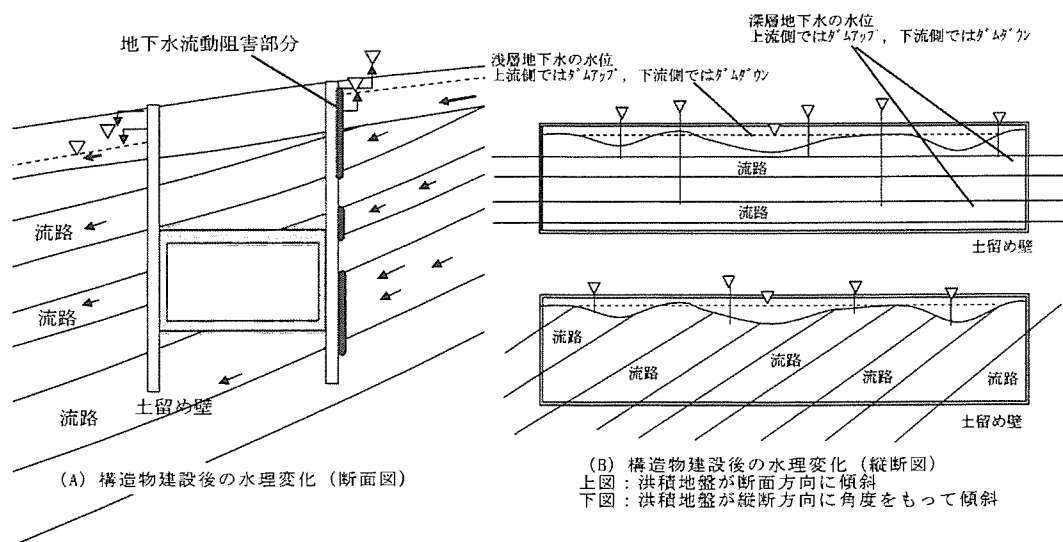
3. 1 本章の位置付け

地下水の流れのある地盤中に線状構造物を設けた場合、地下水流動阻害が発生し、上流側では地下水のダムアップ、下流側ではダムダウン現象が発生する等、周辺地下水環境が変化してさまざまな問題が発生する。地下水流動保全工法¹⁾では沖積平野をモデルとして問題点を整理し、これに基づいた各種の調査・解析・対策方法が紹介された。一方、対象地盤が丘陵・山地の場合、地盤は断層をはじめとした地質構造の影響を受けるようになり、地盤構成や地下水水理も非常に複雑になる。

特に、丘陵地の地盤は傾斜しているのが一般的であるが、以下に示すような地盤モデルを想定しても、広範囲で多層にわたる地下水環境が変化する。今回はこのようなモデルも含めて水みちの存在状況と構造物建設後の水理変化を考察し、地下水流動保全工法のための調査方法についてとりまとめた。

ここで、丘陵地の傾斜した地盤に線状構造物を設けた場合の地下水環境の変化の一般的な地盤モデルを次の条件とする。

- ①土留め壁や構造物に関わる地盤は多層で傾斜する。
- ②地下水の動水勾配は沖積平野より大きい。



(a) 構造部横断方向

(b) 構造物縦断方向

図 3.1.1 丘陵地で線状構造物を設けた場合の地下水水理

3. 2 地下水流路や地下水流動について

一般に地下水は丘陵地から沖積平野にかけては砂質土・礫質土で構成される粗粒土の間に、丘陵地から山地にかけては崩積土や土砂化した強風化帯、岩盤の割れ目や断層破碎帯などの裂か構造に存在し、これらの領域が地下水の流路となる。また、流路の内部には透水性が高く、地下水流動の卓越した領域があり、一般的にはこれを水みちと呼んでいる。流路・水みちを区分すると以下ようになるが、本文では流路も広義の水みちと位置づける。

(1) 流路と水みち

a) 流路

地盤中に自由面地下水あるいは被圧地下水が存在し、これが流動する領域

① 山地から丘陵地

強風化し土砂化した領域、岩盤の割れ目、断層破碎帯などの裂か構造帯（亀裂性の流路）

② 丘陵部から平野部

沖積層・洪積層を構成する土層の内、主に礫質土・砂質土

③ 山地から河口部

谷筋堆積物、扇状地性堆積物、沖積河道堆積物などの新規堆積物

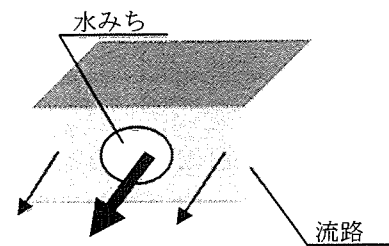


図 3.2.1 流路と水みち

b) 水みち

①～③において、流路の内部で周辺地盤より透水係数が 1～2 桁高く（水みち内部の粒度構成が異なる）地下水流動の卓越する領域

次に、丘陵山地の水理的な特徴を示す。

(2) 丘陵・山地における水理的な特徴

- ① 谷筋・扇状地の新規堆積物中や崩積土の浅層地下水は斜面の傾斜方向に流動する
- ② 洪積地盤の地下水流動は地層の走向傾斜や岩盤の割れ目や裂か構造に支配される
- ③ 断層を介した特異な水理（断層自体が遮水壁、流動層）を有する
- ④ 丘陵・山地地下水は降雨による挙動が大きい

参考として、図 3.2.2 に大阪市内の東西方向の断面図を示す。御堂筋より西側では沖積地盤が厚く分布するが、地盤構成は概ね水平構造を示し、地下水水理も比較的単純である。一方、東側の上町台地周辺部では何条かの断層の存在や、これに伴い地盤が急変するため、地下水水理は非常に複雑なものになる。

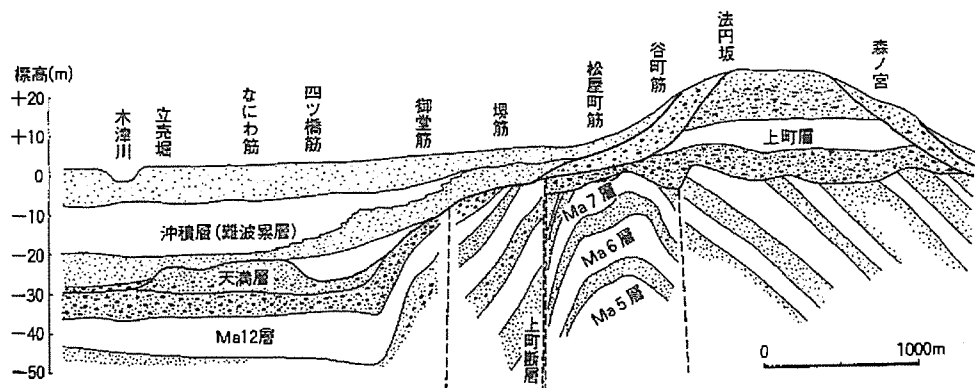


図 3.2.2 大阪市内上町台地北部東西断面²⁾

以下に、丘陵・山地の代表的な水理機構について紹介する。

3.2.1 浅層の地下水流動について³⁾

浅層の地下水流動については崩積土とその直下の沖積層もしくは洪積層で構成される 2 層の地盤を想定し、水位・水頭がそれぞれ異なる場合の地下水流動状況を図 3.2.3 に示した。透水係数が A 層の方が B 層よりも高い場合、(a) では A 層の一部が B 層へ浸透、(b) では A 層の地下水が全水頭の低い B 層へ、(c) では全水頭の高い B 層から A 層へ浸透する。なお、空中写真で判読できるような新規堆積物や河道沿いの沖積低地ではこれらの上位にもしくはこれらを削り込んで透水性の高い地盤が堆積して流路を形成し、図 (b)、(c) のように周辺地盤の水位・水頭の関係で周辺に浸出するもの、あるいは周辺から浸入するような流動状況となる。

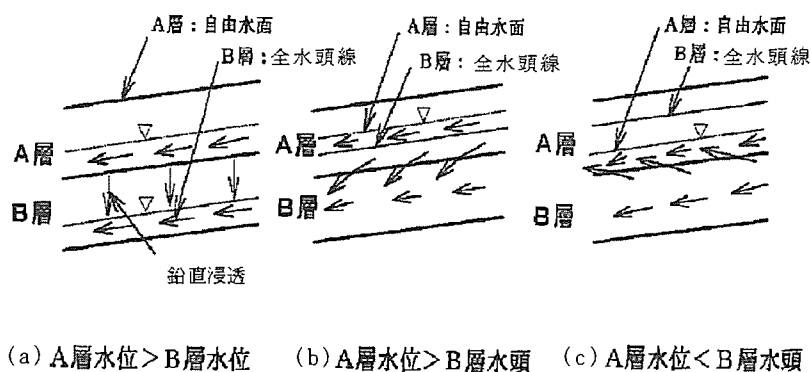


図 3.2.3 2 層地盤の地下水流線の変化例

一方、扇状地や低地を流れる河川沿いの地下水流動の平面分布は以上の関係より図 3.2.4 のようになる。

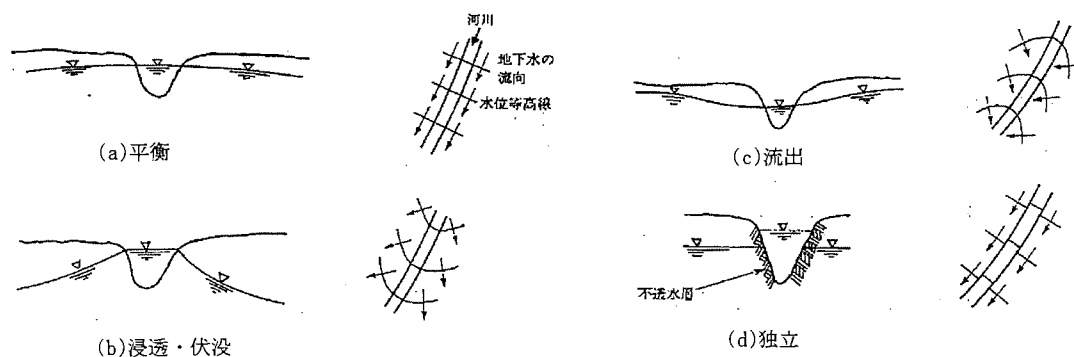


図 3.2.4 表流水と地下水の関係(文献 4)を一部修正)

3.2.2 丘陵地の地下水流動

丘陵地では図 3.2.5 のように浅層より洪積地盤が分布するが、崩積土と洪積砂層の水位・水頭関係から層境界部分では図 3.2.3 に示すような地下水の浸入や浸出が生じている。すなわち、洪積地盤の地下水の水頭が崩積土の自由面地下水位より高ければ層境付近で崩積土中に浸入するが、これが低ければこの部分から崩積土層内の地下水が浸入する。

一方、地下水の流動方向は洪積地盤の場合、地層の走向傾斜方向に規制されて水位・水頭の低い方へ流動する。このように、沖積平野の地下水は沖積層も洪積層も大局的には沿岸部への流動方向を示すが、丘陵地の洪積地盤中の地下水は必ずしも同一方向とは限らない。

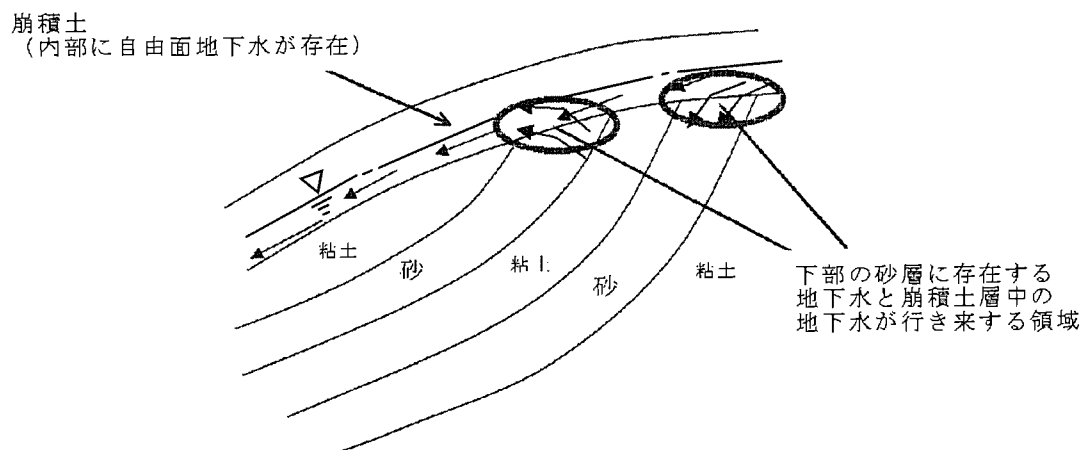


図 3.2.5 地質構造の影響を受けた丘陵地の地盤と地下水の挙動

3.2.3 断層破碎帯が存在する場合の地下水水理

丘陵・山地で断層破碎帯が存在し、この裂か構造が発達あるいは遮水壁となる場合、線状構造物建設で問題となるような地下水諸現象が発生している。

図 3.2.6 に断層を介する地下水水理について示す。断層が遮水壁（地下水流動阻害）となるような（a）の場合、断層背面地盤の地下水はダムアップし、B層の地下水はA層に浸入し、A層の地下水はこの部分では高くなる。一方、断層前面のB層では地下水の供給が絶たれる関係でこの地下水がダムダウンする。（b）の場合は、断層自体が地下水の流路となり、ここに存在する地下水が高い圧力を有する場合、A層と断層が接するところではA層の地下水位はこれの供給を受けて高くなる。丘陵・山地における土砂災害はこのような部分で豪雨時に水位・水頭が極端に高くなって発生する。（c）の場合は、断層自体が地下水の流路となり、水位・水頭が周辺地盤に比べて低ければ、周辺地盤の地下水はこれに向かう流線となる。また、山体地下水は普段では図（c）のようであっても豪雨時には（b）のような機構も考えられる。

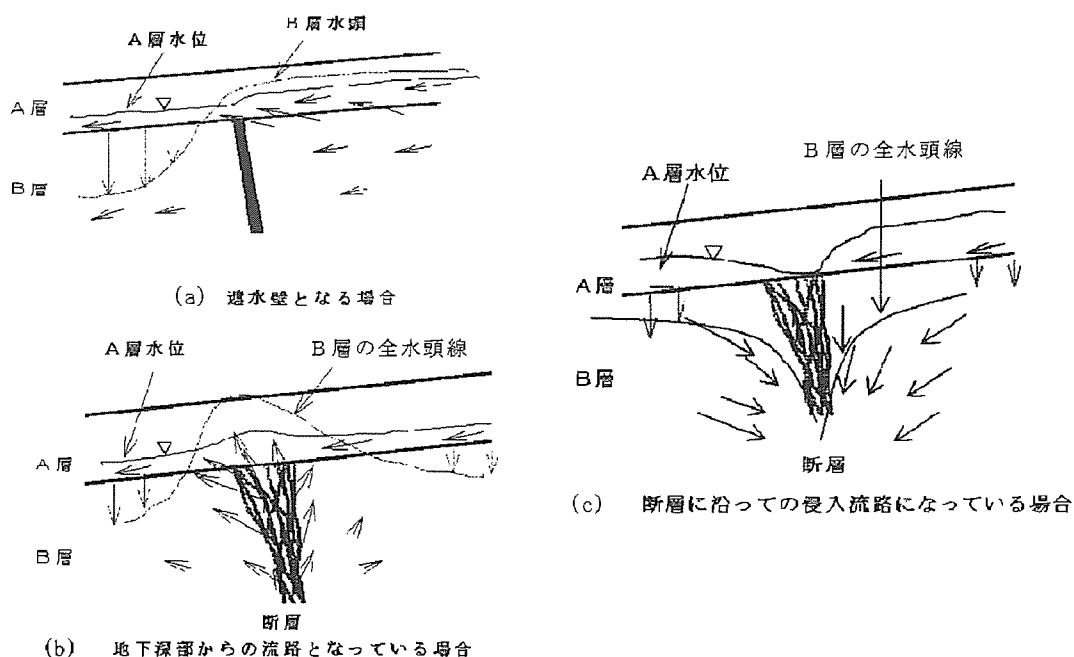


図 3.2.6 断層を介する場合の地下水水理

以上、断層を介する周辺地盤の地下水水理は非常に複雑であり、線状構造物の建設による地下水水理の変化はまさにこれと類似し、横断方向では（a）のような遮水壁、縦断方向では（c）のように構造物自体が流路となる。

3.2.4 地下水流路の中に存在する水みちの地下水水理

一般に、地下水は地盤内を均一に流れているように思われているが、流路の内部には相対的に透水性の高い水みちと呼ばれる部分が存在し、ここでは周辺地盤より透水係数が1～2桁高く、地下水流動が卓越している。この水みちの水位・水頭は図 3.2.7 に示すように普段は小さいが、豪雨時の流動状況は活発なものになり、周辺地盤に大きな影響を与えることもある。

一般に、地下水観測孔で降雨時の水位変化が大きいものは観測孔のストレーナ区間が水みちに当たっていることが多い。

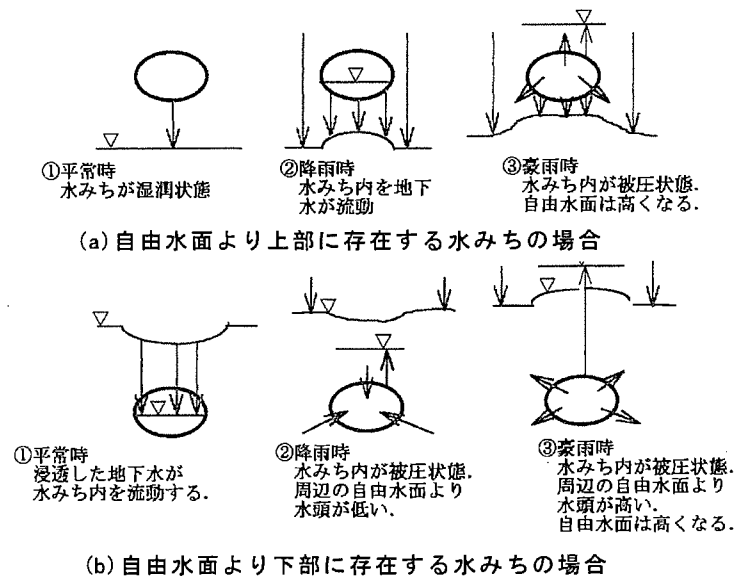


図 3.2.7 水みちの地下水水理(文献 5)を一部修正)

3. 3 地下水流動保全のための調査

3.3.1 段階的な水みちの調査手順

地中構造物による地下水流動阻害の影響は水理地質的に様々なパターンが考えられるが、地下水流動保全工法の設計・施工においてはこれらを想定した段階毎の水みち調査が必要である。水みち調査を予備調査、概略調査、詳細調査、施工中の調査・監視、維持管理の5項目に大別して表3.3.1に提案する。

表 3.3.1 地下水流動保全のための段階毎の水みち

段階	調査レベル	調査内容と調査目的	調査手法
計画	予備調査	計画路線に沿った一定範囲（200～500m）における地形、表層地質、水文に関するデータ収集（計画ルートにおける水みち存在範囲の抽出）	現況地形・古地図調査 空中写真判読 水文・地表調査、井戸調査 既往ボーリングデータ収集
調査設計	一次調査	計画ルートにおける一定間隔の概略地質調査・地下水調査 予備調査で入手した情報に関する確認調査。 （水みち範囲の地盤や地下水情報の解明）	ボーリング、現場透水試験 湧水圧試験、土質試験 水質試験
	二次調査 （水みち詳細調査）	計画ルートにおける水みち領域の詳細調査 地下水流動層の平面分布、鉛直方向の規模や深度の把握。 施工前の地下水観測データ入手 （地下水流動保全の解析・対策検討）	ボーリング 各種原位置試験 検層や物理探査による水みち調査 地下水追跡（トレーサ試験） 土質試験、水質試験 層別地下水観測
施工	確認調査 監視	開削地盤の地質確認（対策工の位置や深度） 施工中の地下水監視 （対策区間・非対策区間の地下水監視）	開削地盤観察 土質試験、水質試験 層別地下水観測
維持管理	モニタリング メンテナンス	解析・対策区間における施工中の地下水監視 （対策区間・非対策区間の地下水監視）	水質試験 層別地下水観測

段階的な水みち調査の手順を図 3.3.1 の概念図に示す。計画ルートに沿う一定範囲の水みち情報については、図の上部に示す予備調査として地形図や空中写真判読、水文、井戸調査等で入手する。次に、地盤の概要や予備調査の確認は図の下部左に示すような概略調査としてボーリングや原位置試験等で入手する。そして、詳細調査は地下水流動保全工法の対象区間の設定や対策検討に必要な情報となり、図の下部右に示すような水みちの平面分布や鉛直方向の規模や深度を把握するための物理探査や検層が主体となる。さらに、施工中、施工後に開削地盤の確認調査やモニタリング調査が続く。

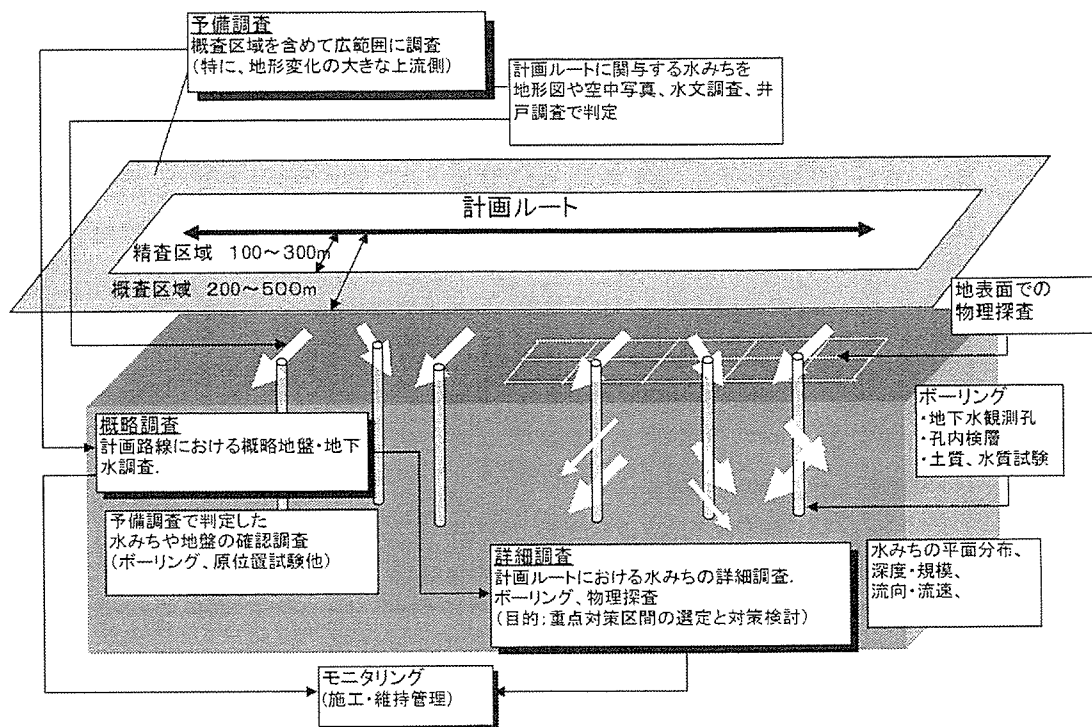


図 3.3.1 地下水流動保全のための地下水調査

3.3.2 予備調査

予備調査は現況地形、古地図調査、空中写真判読、水文・地表調査、井戸調査、既往ボーリングデータ収集が主体となる。概要は以下のとおりである。

(1) 調査範囲

首都圏や関西圏での施工事例から調査範囲としては概ね 200m～500m 程度が多く、また、断層破碎帯を含む地盤では 1～2km にも及ぶ。

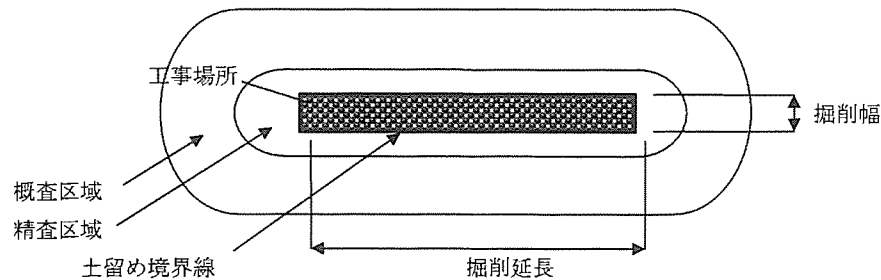


図 3.3.2 調査区域の取り方(東京建設局,1997 に加筆)⁶⁾

(2) 現況地形、古地図

地形図は古いものでは参謀本部陸軍部測量局による明治時代の古地図をから、現在に至るまで概ね一定の年数ごとに作成されている。これらを時系列に解析すると地形改変や水文地形情報が把握できるため予備調査には必須の調査となる。

(3) 空中写真

空中写真は地質構造や微地形判読が可能であり、地形の全体像や広がり、連続性を把握できると同時に、旧河道河床などの流路の解明が可能になる。

(4) 地質図

対象地域の地盤情報の把握には地質図の活用が必要である。国土技術院地質調査所や(財)国土開発センターなどで発行されている。

(5) 地盤図・地盤情報データベース

地盤図は大都市の第四紀層を対象に既存のボーリングデータを多数収集したもので、ボーリングデータだけでなく、地下水位や物理・力学試験、各種原位置試験結果まで含めてデータベース化されつつある。地盤情報を入手するにはこれらの活用が有効である。

(6) 地下水利用状況

地下水の利用状況に関する資料は井戸台帳などがあるが、主に深井戸に関するものが多く、工事による影響が大きな浅井戸に関しては情報が乏しい。浅井戸はアンケートによる井戸調査が必要である。

(7) 地表踏査

地表踏査は事前調査により各種の文献・資料や空中写真を基に概要を把握した後で実施する。現地では地形、地表地質、水文調査、土地利用や井戸利用状況など行い、ルートマップ作成や調査計画作成のための基礎資料とする。

3.3.3 一次・二次調査

(1) 一次調査

一次調査は計画ルートにおける予備調査の結果より、一定間隔の概略地質調査や水みちとして推定できた範囲における地盤・地下水概略調査を実施する。調査手法はボーリング及びボーリング孔を利用した調査が主体となり、予備調査の問題事項の把握や検証も行う。また、各種原位置試験や土質試験も盛り込みこれらの概要も把握して、二次調査計画に反映させる。

なお、ボーリング孔を利用して地下水観測孔を施工し、孔内検層や地下水位・水質のモニタリング孔としての活用する場合が一般的である。

表 3.3.2 ボーリング孔を利用した調査⁷⁾

分類	調査・試験名		試験基準	得られる項目
原位置 試 験	標準貫入試験		JIS A 1219	帯水層の分布,N 値,乱した試料
	現場透水試験		JGS 1314	平衡水位と透水係数
	揚水試験		JGS 1315	透水量係数,貯留係数,影響半径,帯水層の連続性
	湧水圧試験		JGS 1321	岩盤の平衡水位と透水係数
	ルジオン試験		JGS 1323	岩盤の透水性,ルジオン値
	地下水位測定		JGS 1311	自由水と被圧水の水頭位置と変動状況
	流向流速測定		—	地下水の流向流速
検層	地下水検層		—	帯水層の分布、水みち
	電気検層		JGS 1121	帯水層の分布
	温度検層		—	地温、水温
採取	サンドサンプリング		JGS 1223	砂の不攪乱試料→室内透水試験
	地下水の採水		—	帯水層の試料
室内 試験	土質	土粒子の密度	JIS A 1202	特殊土の判定、粒度試験の整理
		含水比	JIS A 1203	含水量、細粒分含有量、粒度試験の整理
		粒度	JIS A 1204	細粒分含有量、透水係数の推定
		透水試験	JIS A 1218	粗粒土の透水係数
	水質	水質試験	—	環境基準項目
観測	地下水位観測		JGS 1312	長期的な地下水位変動

JIS: 日本工業規格 JGS: 地盤工学会基準
水質試験は 7 章参照

(2) 二次調査

二次調査は計画ルートにおける水みち通過範囲の詳細調査として位置づけ、主に地下水流動層の平面分布や鉛直方向の規模や深度の把握、土質・水質試験や、層別地下水観測を行う。特に、水みちをはじめとした地下水流動層については物理探査を活用することで精度よく判定することができる。なお、丘陵・山地ではほとんどの探査が可能であるが、市街地における測線展開を必要とするような探査は種々の制約や支障があるため適用できない場合が多く、このようなところではボーリング孔を利用した物理検層が主体となる。ボーリング孔を利用した調査は表 3.3.2 に、地下水調査に利用される物理探査は表 3.3.3 に示す。なお、種々の物理探査は後述の 3.4 にまとめた。

表 3.3.3 調査目的別物理探査⁸⁾

調査目的		調査範囲	物理探査・検層・観測
器・流路となる 地質構造	水みちの 面的分布	計画路線を中心に上 下流側、対策工は構 造物と接する部分で 検討。	弾性波探査・比抵抗法二次元探査・EM 探査
流路			1 m 深地温探査・自然電位法
流動層	水みちの 深度・規模・特徴	水みちの平面分布と 構造物と接する部分 の深度方向で検討。	多点温度検層・電気検層・地下水検層
流向流速			流向流速計・地下水追跡・流動電位法
挙動	水みちの水位水頭	水みち内部・外部	層別地下水観測・領域別地下水観測

(一部、加筆)

次に、上表を参考として集水・涵養土留めや通水管などの対策施設検討段階での詳細調査方法を表 3.3.4 に示す。調査は構造物を挟んで上流側・下流側も含めた範囲でボーリング並びこれを利用した観測孔で行うことになるが、得られた情報をもとにした集排水管の配置検討が必要である。すなわち、上下流側に設ける集水管、排水管ではそれぞれ水みちを目指し、どちらか一方がこれから外れないような配慮が必要となる。

表 3.3.4 対策施設検討部分での詳細調査方法

調査目的	調査方法	入手データ	利用
対策範囲の設定	ボーリング 弾性波探査 高密度電気探査 1m 深地温探査	構造物を含めた上下流側における地下水流動層の分布範囲、平面分布、地盤情報	対策範囲や重点対策範囲の特定
対策施設の深度や方向	地下水検層 多点温度検層 電気検層	構造物背面の上流側、下流側における地下水流動層の深度や規模、帯水層の厚さ	計画ルートの上流側・下流側の水みちの連続性を把握し、適切な集水、涵養計画を行う。
	連続的な物理試験	深度方向の粒度特性 (水みちとなる粗粒土の深度分布)	計画ルートの上流側・下流側の水みちの鉛直深度や規模を把握して対策施設の深度設定計画に活用する。
	流向流速測定	地下水の流動方向や速度	集排水管打設方向の検討
モニタリング	観測施設の設置	地下水位・水圧 水質	対策施設の検証

3.3.4 施工時の確認調査

地下水流動保全とは水みちを流動する地下水を集水し、同様の水みちへ涵養する施設を設け、構造物建設前後の地下水環境の変化を最小限とすることが本来の目的である。しかし、既設の地下水流動保全対策工の集水量に着目すると、その量は必ずしも均一ではなく、施設により異なるのが普通である。これは、構造物の上流側あるいは下流側に設けられた集排水ボーリングが確実に水みちを捉えたものかによるものと考えられる。この問題に関しては、下に示す施工時の確認調査で事前設計の修正が可能となる。

以下に施工時の確認調査の項目例を示す。

- ① 開削工事の場合、予め掘削面の観察ポイントを一定の間隔で設け、工事の進捗に応じて地盤状況を明らかにし、事前調査結果の検証を行う。
- ② 特に、不透水層となる粘土層の分布状況は詳細に連続性を確認する。
- ③ 地下水流動層の流路となる砂層についても詳細に分布状況や連続性を把握すると同時に、細粒・粗粒部分の区分を行う。すなわち、粗粒部分が水みちとなり、この部分を狙った集水、涵養対策が必要になる。
- ④ 対策工の対象領域となる粗粒部分の試料を採取し、粒度試験を実施する。
- ⑤ 岩盤内部の地下水は境界部分や風化部分、割れ目の内部を複雑に流動する。このため、開削地盤が岩盤の場合は、上限深度や風化・破碎状況を詳細に観察する。
- ⑥ 地質構造に起因するような不連続面の有無を調査する。
- ⑦ 地下水流動保全工法は上流側と下流側に設けられる。したがって、①～⑥の観察調査を掘削底面だけでなく集水側と涵養側の両側で行う。
- ⑧ 土留め壁の上下流側に設置してある観測孔を利用して多点温度検層や地下水検層を事前に行っている場合、施工時の確認調査でこれの深度や規模を検証する。

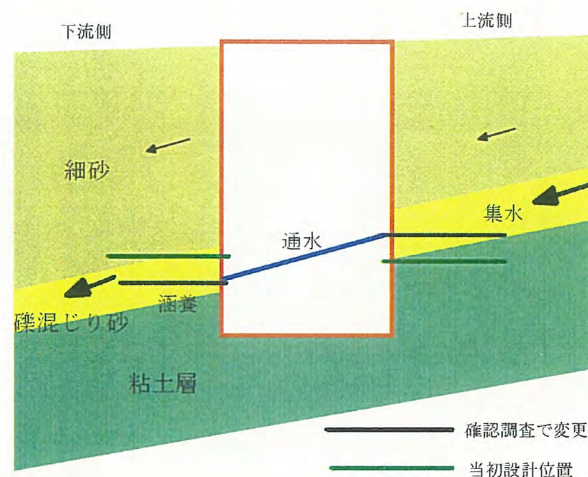
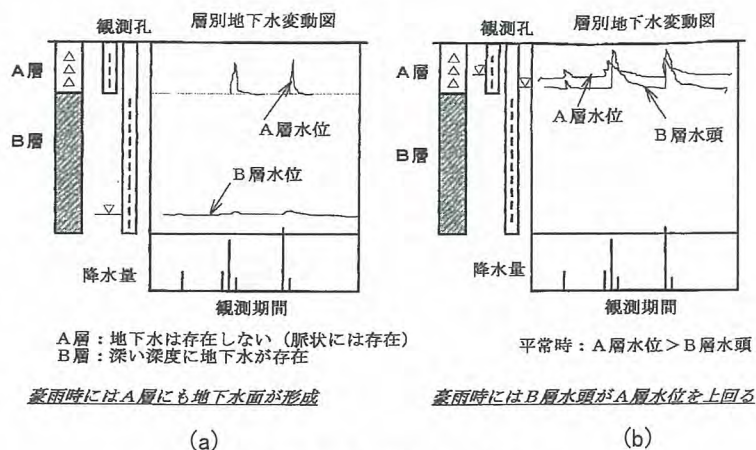


図 3.3.3 施工時の確認調査による対策工の修正例

3.3.5 地下水観測孔施工に対する留意点

(1) 層別地下水観測

地下水流動障害が対象となる地層は単一層ではなく複数層にまたがる場合が普通である。したがって、設計施工に必要な水位・水頭・降雨による挙動のデータは層別に観測する必要がある。なお、調査ボーリング孔を利用した全孔ストレーナ観測孔は、見かけの孔内水位を示しているに過ぎず、誤った地下水情報を提供していることになる。このため、地下水流動保全対策のための観測孔は必ず層別に設けるか、あるいは単孔で深度毎に水位計を設置する単孔多段式水位計設置とする必要がある。後者の場合、設置する水位計の間に遮水層が存在することと確実なパッカー施工が必要である。図 3.3.4 に層別地下水観測孔の測定事例を示す。



(2) 観測孔仕上げに関する留意点

地下水観測孔は地下水流動保全工法を検討のための水位・水頭観測の他、各種検層や地下水追跡のモニタリング孔として利用できる。しかし、ボーリング掘削中の情報を基に決定する観測孔のストレーナ設置区間の設定ミスや止水パッカーの設置ミス、孔内洗浄が不十分である場合では、観測データや試験結果の信頼性が低くなる。このような問題に対しては、ボーリング掘削中における日々の水位変化やコア観察結果を基に、観測すべき対象層を正確に捉えた確実な観測孔の施工が必要となる。同時に、観測孔施工時の孔内洗浄の徹底も重要である。

図 3.3.5 は孔内洗浄が十分な場合と不十分な場合の多点温度検層結果を示したものであるが、流動層の検出結果は洗浄程度によって全く異なるものとなる。

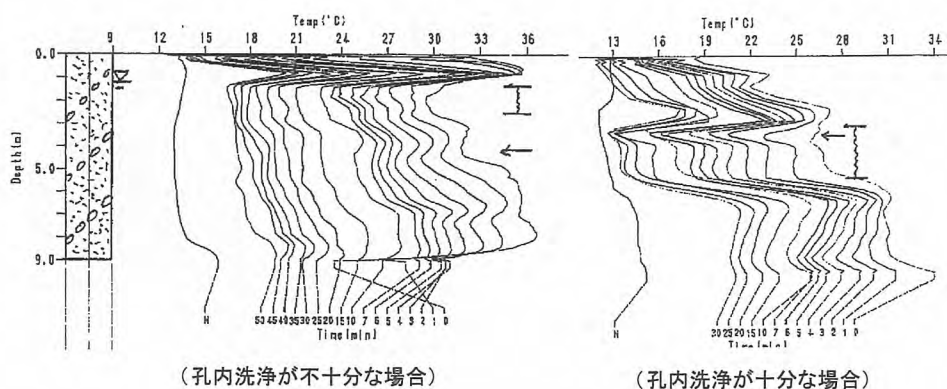


図 3.3.5 孔内洗浄に伴う多点温度検層結果¹⁰⁾

3. 4 水みちの調査方法

3.4.1 水みちの調査方法の区分

一般的に地下水調査法はボーリング調査と、ボーリング孔を利用した各種検層、地下水観測、水質分析、一方では最新のハイテク技術を活用した物理探査に区分されるが、当然のことながら調査フィールドによって調査の適用に限界がある。特に、沖積平野の発達する市街地では測線展開を必要とするような大掛かりな物理探査は不可能な場合が多く、主にボーリングを中心とした調査手法になる。しかし、丘陵・山地では市街地のような制約も少なくなるため、ボーリング調査に加え各種物理探査の併用が可能となる。そして、どのように調査手法を組み合わせていくかは対象地盤や計画構造物によって異なるが、地下水水理の基本を理解した調査計画が必要である。

丘陵・山地の複雑な地盤中に存在する地下水流動状況を把握するためには、地下水の器・流路となる地質構造や地下水の分布を3次元的に捉える必要があるが、物理探査とその他の調査法を組み合わせることによって、非常に有効かつ精度の高い調査が可能となる。

そして、各種物理探査・検層には多種多様なものが有り、それぞれの得失や適用範囲を理解し、調査目的に応じた調査法を選択する必要がある。ここでは、調査目的を①地下水の器・流路となる地質構造の解明、②地下水の流路の解明、③地下水流動層の規模や深度の把握、④地下水の流向や流速の把握、⑤地下水の挙動の把握、に区分し、これらの目的に応じた各種物理探査・検層の例を表 3.4.1 に示す。

表3.4.1(a) 地下水調査に用いる物理探査・検層(その1)

目的	探査・検層名	探査深度	直接得られる物理量・結果	解析・解釈から得られる成果	適用範囲・留意点	備考
① 地下水の器・流路となる地質構造の解明	屈折法地震探査	測線長・起振方法による 爆薬起振で100～200m	地盤の速度構造	地質構造 岩盤の硬軟や割れ目の程度 風化帯、変質帯、断層破砕帯の分布状況	火山岩地帯や傾上断層などで下位に速い速度層がある場合は解析が困難 破砕帯などの高角度の低速度帯の傾斜方向は判定できない 非爆薬起振では探査深度が数～30m程度となる	
	反射法地震探査	測線長・起振方法による 土木分野では数十～数百m程度が多い	反射断面図	地質構造 断層の分布位置、規模、傾斜方向	弾性波速度のコントラストが乏しい地盤や地形が急峻な地域では適用が困難 極端に薄い地層の検出が困難	
	高密度電気探査	測線長・電極間隔による おおよそ100m以下	比抵抗分布図	地質構造 風化、変質の程度 風化帯、変質帯の分布状況 岩盤の硬軟 断層破砕帯の位置、規模、傾斜方向 地下水の分布	比抵抗は様々な要因で変化するため、結果の解釈は他の調査結果と総合的に行う必要がある 測線の両端で精度が落ちる 比抵抗分布図に偽像が表れることがある 鉄道、鉄製構造物、鉄筋コンクリート構造物等の近傍では適用困難	1 m 深地温探査と併用することにより地下水流動の立体的な分布位置を把握することも可能
	電磁探査	1000m程度まで	比抵抗分布図	高密度電気探査と同様であるが、さらに深い深度の探査が可能	比抵抗は様々な要因で変化するため、結果の解釈は他の調査結果と総合的に行う必要がある 電磁波ノイズの影響を強く受けるため市街地や変電所、送電線の近傍では適用が困難	
	弾性波トモグラフィ	ボーリング孔等の深度による	速度分布図	地質構造 風化帯、変質帯、断層破砕帯の分布状況 空洞の位置	起振・受振点の設置できない部分付近では探査精度が落ち、偽像が発生しやすい	
	音響トモグラフィ	ボーリング孔等の深度による	速度分布図 間隔率分布図 透水係数分布図	弾性波トモグラフィと同様であるがさらに高精度 支持層や基盤の起伏 不連続な地層の分布状況 断層の分布位置 帯水層の分布状況	高精度にも関わらず比較的広範囲の探査が可能 人工的な震動の影響を受けない高周波数の音波を使用するため、市街地や建設現場でも探査可能	
	比抵抗トモグラフィ	ボーリング孔等の深度による	比抵抗分布図	高密度電気探査と同様であるが、さらに高精度 空洞の位置	必ず電気検層を併用する 探査実施時にはボーリング孔周辺の良導体（ボーリングマシン、ケーシングパイプ、足場材等）を撤去する必要がある 水平成層構造地盤では適用不可	
	マイクロ重力探査（高精度重力探査）	数十m	重力異常分布図	浅部の基盤深度 沖積層と洪積層の境界深度 断層や空洞の位置 地盤の緩み領域の分布	広範囲の調査に適するが、地下構造の分解能は他の物理探査に比べてやや劣る 大きな構造物の近傍や地形が急峻に変化する地点では測定値に影響を受けるが、測線底面を開く必要とせず、電磁気ノイズの影響も受けないので市街地でも探査可能	

《参考文献》

物理探査学会物理探査要領作成委員会編(2000)：物理探査適用の手引き（とくに土水分野への適用）；①
 関東地質調査業協会技術委員会編(1995)：ボーリング孔を利用する原位置試験についての技術マニュアル；③、④
 伊藤芳朗、横見晴重、竹内寛雄 編(1998)：斜面調査のための物理探査―地すべり・地下水・岩盤詳細―；①、②、③、④
 竹内寛雄 著(1996)：温度測定による流動地下水調査法、古今書院；②、③、④
 竹内寛雄、中山健二、渡辺知恵子 著(2001)：温度を測って地下水を診断する、古今書院；②、③、④

表3.4.1(b) 地下水調査に用いる物理探査・検層(その2)

目的	探査・検層名	探査深度	直接得られる物理量・結果	解析・解釈から得られる成果	適用範囲・留意点	備考
② 地下水の流路の解明	1 m 深地温探査	探査深度は平常 1 m 深地温と流動地下水温の差や地下水流動層の規模によって左右される 理論上は 10～17 m 程度	1 m 深地温分布図	地下水流路の平面的な分布状況	平常 1 m 深地温と流動地下水温の差が小さくなく 6 月と 12 月を中心とした時期は適用が困難 地下水流路の存在深度を正確に把握することが困難	高密度電気探査や多点温度検層と併用することにより地下水流動層の立体的な分布位置を把握することも可能
	自然電位法電気探査	—	自然電位ベクトル合成図	地下水流路の平面的な分布状況	人工的な電気(迷走電流等)の影響を強く受けるために市街地では適用が困難	
	多点温度検層	100 m 程度まで	温度-深度曲線 温度復元率-深度曲線 温度復元率-時間曲線	地下水流動層の分布深度、厚さ 地下水の流速	エアリーフト法などによって孔内洗浄を十分に行う必要がある 孔内水位以浅の流動層の検出も可能	
	塩分希釈による地下水検層	50 m 程度	孔内水の比抵抗値の変化曲線	地下水流動層の分布深度、厚さ	エアリーフト法などによって孔内洗浄を十分に行う必要がある 孔内水位以浅の流動層の検出が困難 地下水の比抵抗値が小さい場合は電解物質を投入しても十分に比抵抗値が下がらないため、測定が困難	
③ 地下水流動層の規模や深度の把握	電気検層	ボーリング孔等の深度による	見掛け比抵抗曲線 自然電位曲線	帯水層の分布深度、厚さ 粗粒土と細粒土の判定 風化の度合い	帯水層の定性的な評価・解釈にとどまるのが一般的 地層の空隙率・飽和度等の定量的解析には地下水や岩石の質の比抵抗を求める必要がある	
	単孔式流向流速測定	ボーリング孔等の深度による	電位差・温度などの各種物理因子や CCD カメラを用いる方式などがあり多種多様	単・孔内における地下水の流向流速	エアリーフト法などによって孔内洗浄を十分に行う必要がある 深度方向に局所的な地下水流速を測定できる 測定される流速はストレーナの開口率によって左右される	
	流動電位法	—	電解物質を投入したボーリング孔の周囲に放射状に配置した電極から得られる自然電位の経時的変化	地下水の流向流速	深部の地下水流速の測定が困難 電解物質(食塩等)による地下水汚染を考慮する必要がある。 人工的な電気(迷走電流等)の影響を受ける	高密度電気探査を併用することにより深部の地下水の流向流速の把握が可能
	トレーサーによる多孔式流向流速測定	—	各種トレーサー濃度の経時的変化	地下水の流向流速	多数のボーリング孔(トレーサー投入孔+複数の観測孔、採水孔)が必要 単孔式よりも精度は高い トレーサーによる地下水汚染を考慮する必要がある	
《参考文献》 物理探査学会物理探査要領作成委員会編(2000)：物理探査適用の手引き(とくに土水分野への適用)；① 関東地質調査業協会技術委員会編(1995)：ボーリング孔を利用する原位置試験についての技術マニュアル；③、④ 伊藤芳朗・横見晴重・竹内寛雄 編(1998)：鉛直調査のための物理探査-地すべり・地下水・岩盤評価-、古井書店；①、②、③、④ 竹内寛雄 著(1996)：温度測定による流動地下水調査法、古今書院；②、③、④ 竹内寛雄、中山健二、渡辺知恵子 著(2001)：温度を測って地下水を診断する、古今書院；②、③、④						

3.4.2 地下水の器や流路を平面・断面的に把握できる物理探査

地下水の器や流路を把握するための探査は、弾性波探査や比抵抗法二次元探査（高密度電気探査）が一般的であり、断面二次元における低速度帯や低比抵抗帯が流路や水みちを示唆することになる。一方、浅層に存在する水みちの平面分布を把握するための探査では、地すべり調査で実績がある1m深地温探査が有効である。ただし、同探査は流動地下水の温度と1m深地温の温度差の異常部分から水みちを検出する探査である。図3.4.1、3.4.2に比抵抗法二次元探査と1m深地温探査の解析結果事例を示す。



図 3.4.1 比抵抗二次元探査測定例¹¹⁾

(1) 弾性波探査

弾性波探査は地表付近で発破等の人工震源から弾性波を発振させて、地下の地層境界で屈折あるいは反射して戻ってきた波の到達時間を解析し、地盤の速度層構造や断層等の地質構造を把握しようとするものである。

弾性波探査には屈折法と反射法があるが、地盤の速度層構造を把握するためには屈折法が適している。一方、断層等の詳細な位置・分布方向の把握や地層の分布状態を詳細に対比するには反射法が優れている。

(2) 高密度電気探査

電気探査（比抵抗法）は地表に設置した電極から電流を流して地盤中の電位変化を測定し、そのデータから地盤の比抵抗分布を解明するものである。

電気探査には探査法や電極配置に多くのバリエーションがあるが、近年では高密度電気探査が多く用いられている。高密度電気探査は測線に多数の

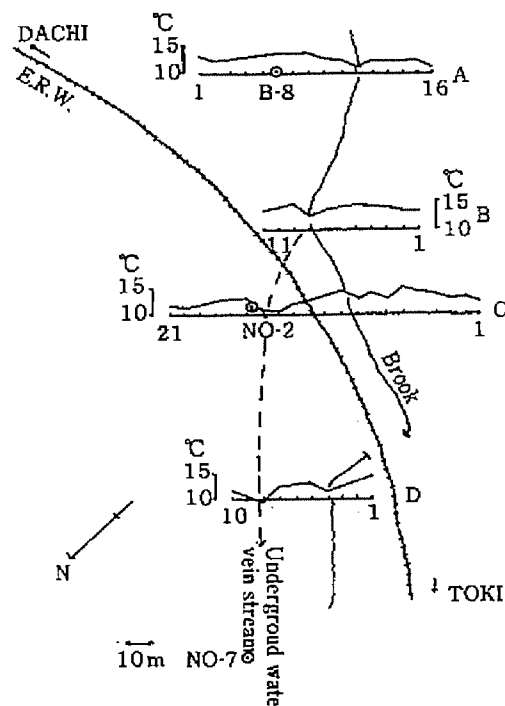


図 3.4.2 1m深地温探査による旧河道検出事例¹²⁾

電極を等間隔に設置して多チャンネルの比抵抗測定器を用いて高密度な比抵抗データを測定し、コンピュータ解析によって高精度な比抵抗断面図を得る方法である。

しかし、地盤の比抵抗は風化の程度・硬軟・地下水の有無などの様々な要因で変化することが知られている。したがって、地盤の比抵抗分布だけでは正しい解釈を行うことが困難であるため、他の調査結果との総合的な判断が必要である。

(3) スリングラムEM探査

EM探査は電磁誘導現象を利用して地下の電気構造を精度良く迅速に計測することが可能である。従来の電気探査に比べ粘性土などの不透水層の識別能力に優れ、地表と比接触で計測できることから作業性が向上していることが特徴である。図 3.4.3 に探査原理と探査装置を示す。

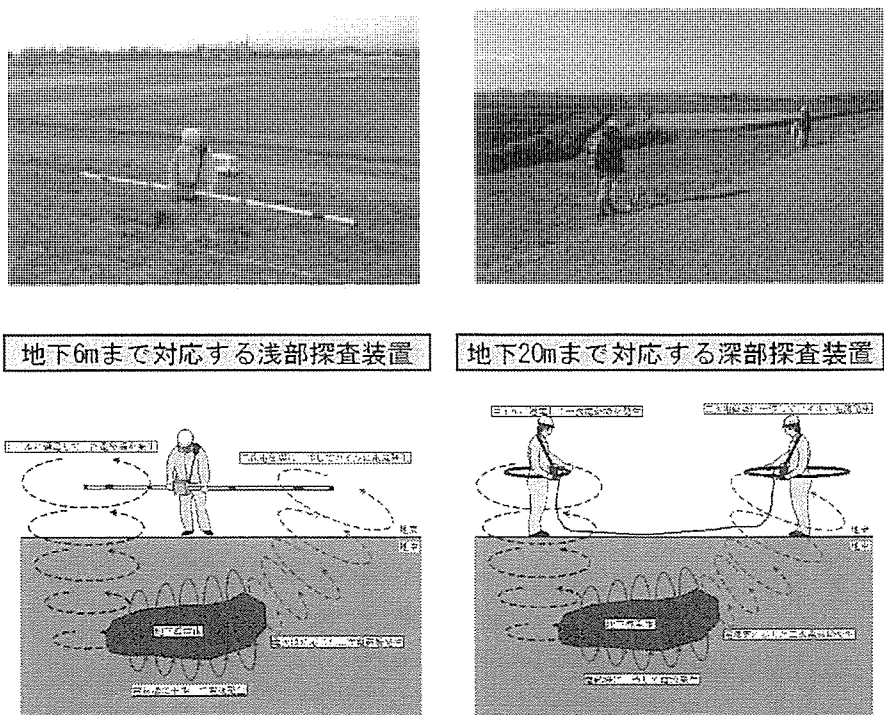


図 3.4.3 EM探査の探査原理と探査装置 ¹³⁾

(4) FDEM探査

基本原理のレイアウトは概ね上図と同じであり、測定された生データは受信機内にあるA/Dコンバーターによりデジタル変換され、光ファイバーケーブルを介してパソコンに伝送され、ただちに見かけ比抵抗が計算され、測定点ごとに記録される。

- ①送信コイルに交流電流を流すことにより1次磁場が発生する。
- ②1次磁場の変化(交流)による電磁誘導現象で地中に渦電流が誘起される。
- ③渦電流により発生する2次磁場強度を測定する。

- ④ 1次磁場強度と2次磁場強度の比より比抵抗を求める。
- ⑤送信の周波数を変え、深度方向の比抵抗の変化を測定する。

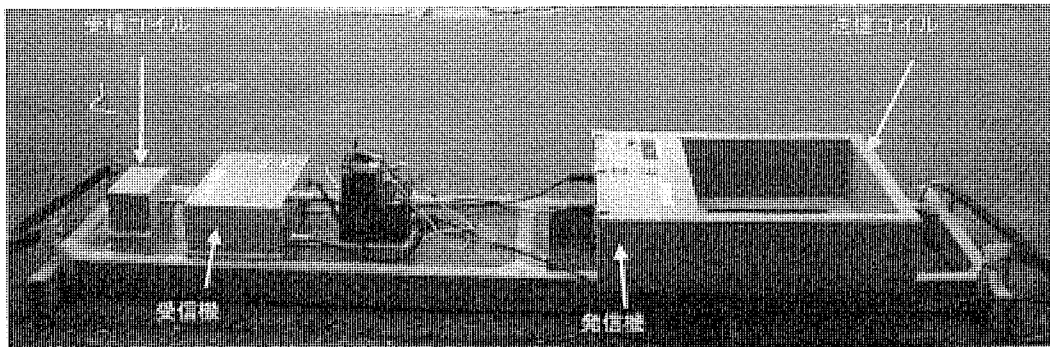
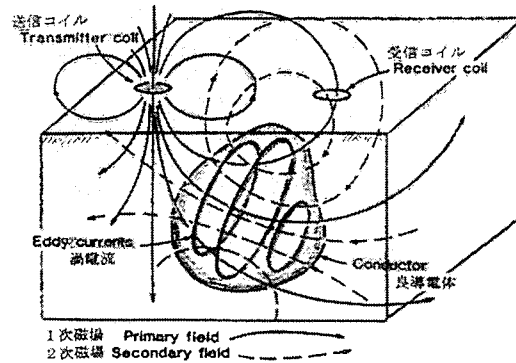


図 3.4.4 FDEM探査原理と探査機¹⁴⁾

(5) 1 m 深地温探査

1 m 深地温探査はメッシュ状に切った測線上を通常数 m ピッチで、深度 1 m の地温を精密な温度センサーで測定し、1 m 深地温が流動地下水によって高温側もしくは低温側に乱されている領域を地下水の流路として解明するものである (図 3.4.5)。

探査には地下水と平常 1 m 深地温の温度差を用いるが、1 m 深地温は季節変動するため、地下水温との差が大きくなる夏季と冬季が探査適用期間となる。

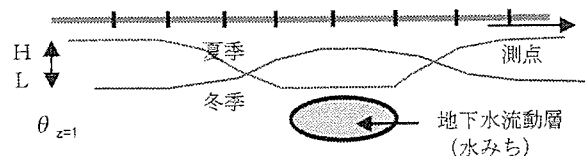


図 3.4.5 1m 深地温探査の探査原理

(6) 自然電位法電気探査

自然電位法電気探査は地表面に電位電極を設置して、地下水流によって自然発生している電位を測定し、地下水流路の分布位置を把握するものである。自然電位は人為的に発生する電気ノイズの影響を大きく受けるため、市街地での適用は困難である。

3.4.3 水みちの鉛直方向の深度や規模を把握するための物理探査

地下水流動保全工法は集水・涵養機能つき土留め壁や地下水連通パイプが実用化されている。これらの対策施設を効果的に設けるためには水みちの深度や規模の把握が必要である。

地下水流動層検出調査は塩分希釈法の地下水検層の他、温水で孔内温度を強制的に高めた後で孔内温度の復元状況より流動層を把握できる多点温度検層があるが、後者は、測定時間が短く、孔内水位より上部の地下水情報が得られるという特徴がある。図 3.4.6 に多点温度検層の測定パターンを示すが、復元状況より流路の水位・水頭の関係も把握できる。

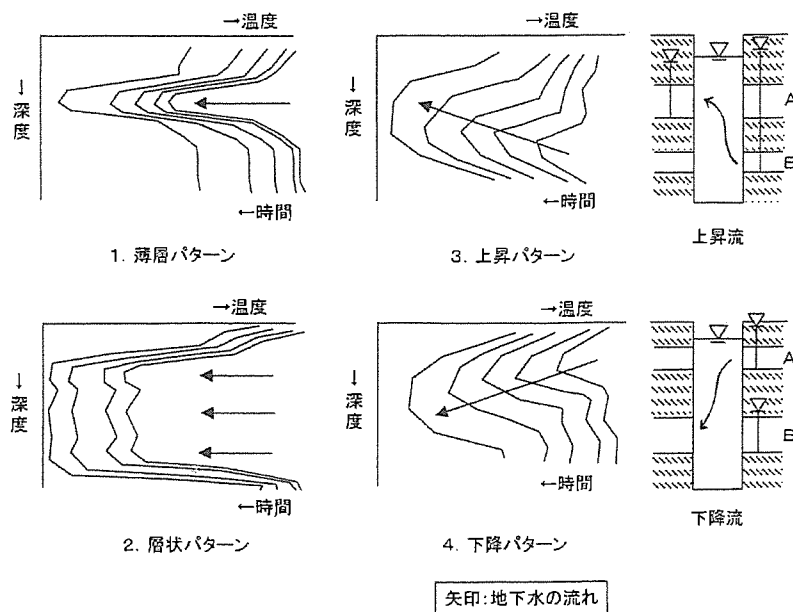


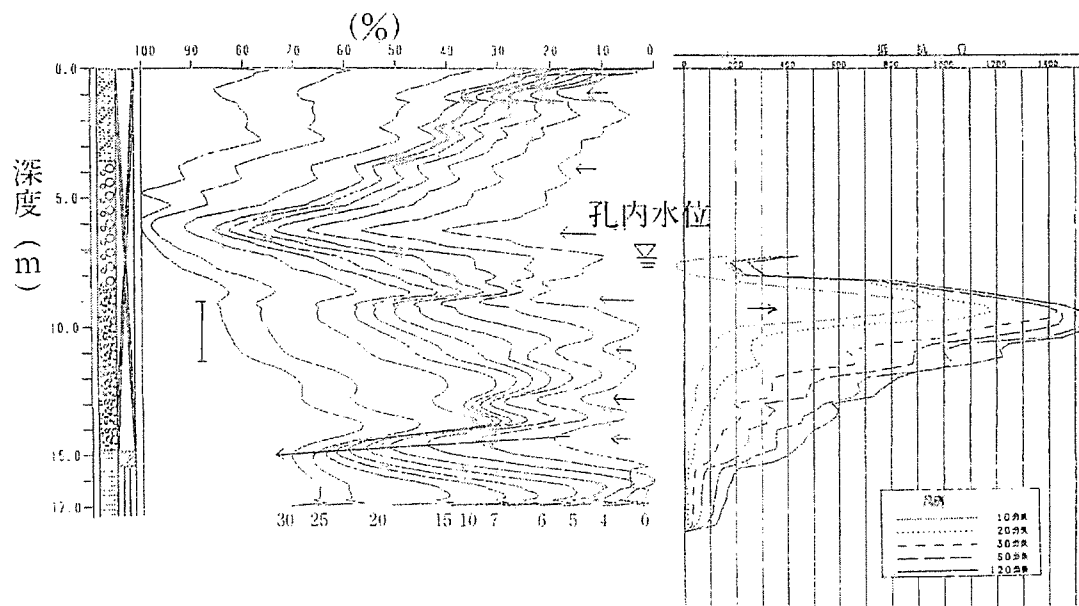
図 3.4.6 多点温度検層による測定パターン¹⁵⁾

(1) 多点温度検層

多点温度検層は孔内にお湯を注入して、孔内温度を強制的に上昇させ、温度の回復状況から地下水流動層の深度・厚さを把握するものである。また、多点温度検層では孔内全体の温度を上昇させるため、豪雨時以外は地下水がほとんど流れない地下水位以浅の流動層の把握が可能である。ただし、孔内洗浄が不十分であると、実際の地下水挙動とは大きく異なる調査結果が得られる場合があるので注意する必要がある。

(2) 地下水検層

地下水検層はボーリング孔内の孔内水の電気抵抗を塩などで低下させておき、地盤から流入する地下水により、置換希釈させ、抵抗値の変動により地下水流動層の深度や規模を把握するものである。したがって、検層可能区間は孔内水位より下となる。図 3.4.7 に地下水検層と多点温度検層の対比図を示す。



(a) 多点温度检层结果

(b) 地下水检层结果

图 3.4.7 地下水检层与多点温度检层¹⁶⁾

3.4.4 水みちの流向や流速を把握するための測定器や測定方法

水みちの流向流速は地下水面の平面分布と動水勾配や透水係数が把握できれば推定できる。一方、単孔の地下水観測孔でこれら情報を得たい場合はあらかじめ所定の流向流速測定器に応じた観測孔の仕上げと目的深度を明確にする必要がある。測定原理にはいくつかの種類があるが、固体粒子追跡型（テレビ、レーザ、超音波）と溶液濃度追跡型（熱中性子、電位差、熱量）に大きく区分される。表 3.4.2 はこれら機器の比較表であるが、測定原理や測定器によって流速測定範囲が異なるため、機器の選定には十分な検討が必要である。参考として、図 3.4.8 に単孔式加熱型流向流速計の測定原理を示すが、流向は測定器中心部の加熱ヒータ周辺に設けられた温度計の時系列変化、流速は室内実験式より推定できる。

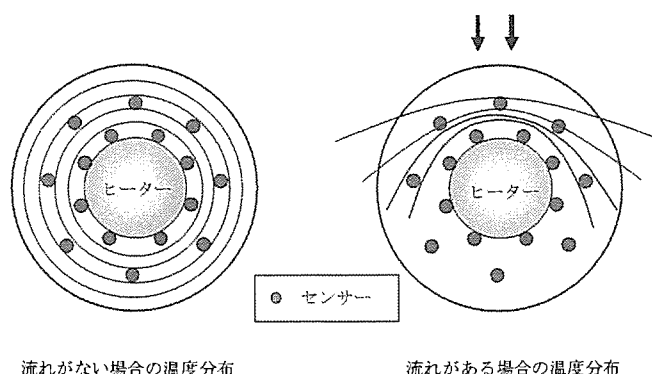


図 3.4.8 単孔式加熱型流向流速計測定原理¹⁷⁾

(1) 流向流速測定

流向流速測定には様々な物理因子を用いた測定法が開発されている。しかし、流速が遅い場合には測定精度が低下する、ストレナーの開孔率によって測定される流速が変化するなどの欠点が指摘されている。

一方、トレーサーによる流向流速測定（多孔式流向流速測定）は採水孔や観測孔を多数施工しなければならず、コストがかかるが、単孔式よりも信頼性が高いデータが得られ、しかも広範囲の地下水流系を評価できる。

単孔式の測定器による測定結果は、一時的な地下水の流れや局所的な流れを捉えているに過ぎないため、周辺地形地質や地下水位等高線を参考に総合的な判断が必要である。

表 3.4.2 単孔式流向流速計一覧表¹⁸⁾

開発機関	測定方法 トレーサー	適用孔径 mm	測定範囲 (流速) cm/sec	備考
鹿島建設（株）	中性子計数方式 ホウ素	B.H: 150 P.P: 80	$3 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-1}$	建設技術評価 第83401号
(株) 建設技術研究所	定温度加熱熱拡散方式 熱	B.H: 66 P.P: 45	$1 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-1}$	建設技術評価 第83402号
大成基礎設計（株）	電位差方式 蒸留水	B.H: 116 P.P: 82	$3 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-2}$	建設技術評価 第83403号
(株) 建設技術研究所	ボアホールカメラ方式 微粒子	B.H: 66 P.P: 48	$1 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-1}$	
日本国土開発（株）	定温度加熱熱拡散方式 熱	B.H: 86 P.P: 41	—	
清水建設（株）	レーザートップ ラー方式 微粒子	B.H: 66	—	
東北工業技術研究所	定温度加熱熱拡散方式 熱	—	$6 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-1}$	
京都大学 川崎地質（株）	加熱方式 熱	B.H: 66 P.P: 40	$1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-1}$	流動方向の精度 $\pm 45^\circ$ VP-50に挿入可能
飛島建設（株）	CCDカメラとプリズム の3次元解析方式	B.H: 86 P.P: 59	$1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-1}$	特許第3374351号

B.H: ボーリング孔径, P.P: プローブ外径

「温度測定による流動地下水調査法, 竹内」に加筆

(2) トレーサー試験

トレーサー試験はボーリング孔を多数施工しなければならず、コストがかかるが、単孔式よりも信頼性が高いデータが得られ、しかも広範囲の地下水流系を評価できる。トレーサー材には環境に無害な食塩などの電解物質や有機色素等が用いられるが、周辺井戸等への影響を考慮する必要がある。

また、トレーサーを用いた流向流速測定には流動電位法や多層多孔電気伝導度計測システム等があり、このうち多層多孔電気伝導度計測システムは同時に複数の観測孔において、多層(点)で電気伝導度と温度を計測することができる高分解能の探査である(図 3.4.9)。

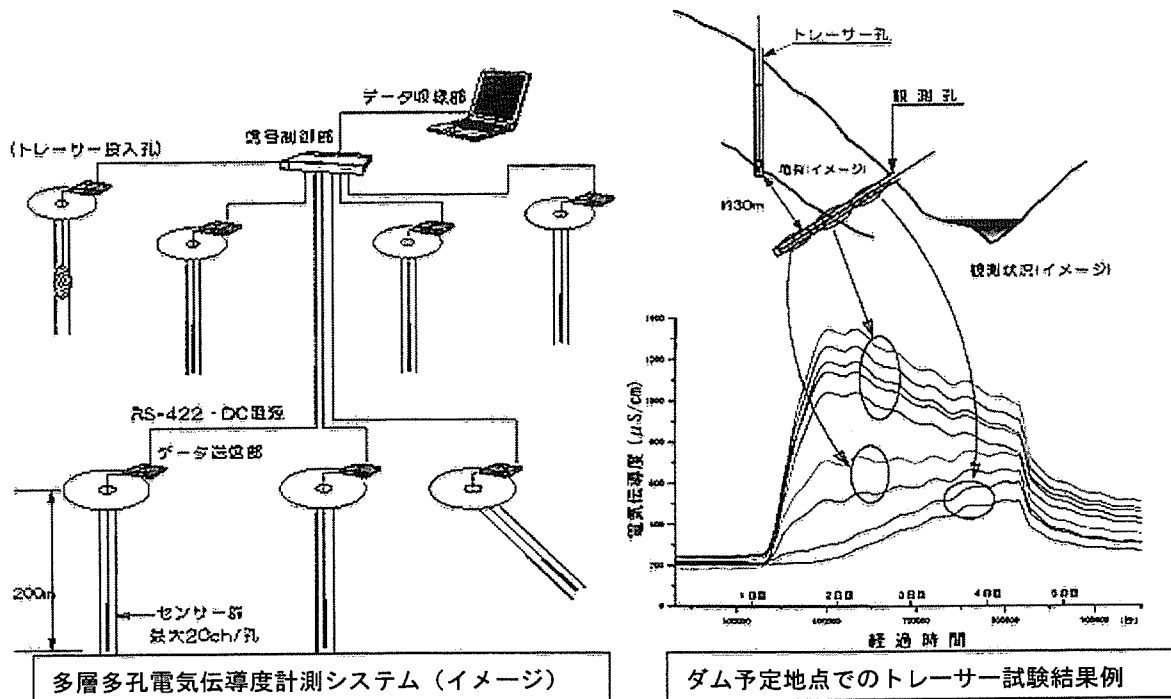


図 3.4.9 多層多孔電気伝導度計測システムの原理と調査事例¹⁹⁾

3.4.5 その他関連調査

(1) 地中レーダ探査

地中レーダ探査は、地層境界による電磁波の反射現象を利用し、地層の分布状況や岩盤の割れ目、断層、緩みや空洞、埋設管等、地盤内部の情報をビジュアルに表現できる点できわめて有効な探査手法である。探査機は瞬間的に電磁波を放出する方式のパルス波地中レーダと一定の振幅の電磁波を、周波数を変えながら長時間発信して波形全体のエネルギーを増大させる方式の連続波レーダの2タイプに区分される。いずれも送信アンテナから地中に向けて電磁波を送り出し、地中における電氣的な特性の異なる境界で反射して再び地表に戻る信号を受信アンテナで受け、測線下の電磁波による反射断面を取得する。前者の探査深度は2～3m、後者は20～30mと地下水流動保全のための利用としては後者が適し、主に流動層の下限深度や帯水層構造の推定への活用となる。

表 3.4.3 地中レーダの適用分野

適 用 分 野	探 査 目 的	探 査 対 象 物
地盤調査 (連続波レーダ)	断層位置確認探査	地層構造 (連続、不連続)
	地盤性状探査	地層構造 (連続、不連続、空洞など異常域)
トンネル探査	健全性調査	コンクリート覆工厚調査、覆工厚裏面空洞調査
		鋼製支保工調査
河川堤防探査 (高分可能レーダ装置)	変状探査	樋管・樋門下空洞調査、堤体構造調査
	空洞探査	水みち調査
その他	河川調査	河床面探査、洗掘調査
	シールド前方探査	基礎杭、不発弾探査
	土質調査	シルト、粘土、砂など分類
	雪中埋設物探査	雪下ガードレール調査
	その他	地下壕、防空壕調査、不発弾探査

(2) ボアホールカメラ

ボーリング孔内にカメラやビデオカメラを挿入することにより、地盤の走向傾斜、亀裂の方向や傾斜・厚さ、地質構造有無、地下水の微粒子の動きなどの情報が入手できる。特に、割れ目と微粒子の動きは密接な関係があるためこれらを解析することにより、水みちの方向や厚さを直接的に判定することができる。丘陵・山地の事前調査では地山の判定、構造の有無、地下水関係の調査に有効である。図 3.4.10 にボアホールカメラで撮影した孔壁展開図の一例を示す。

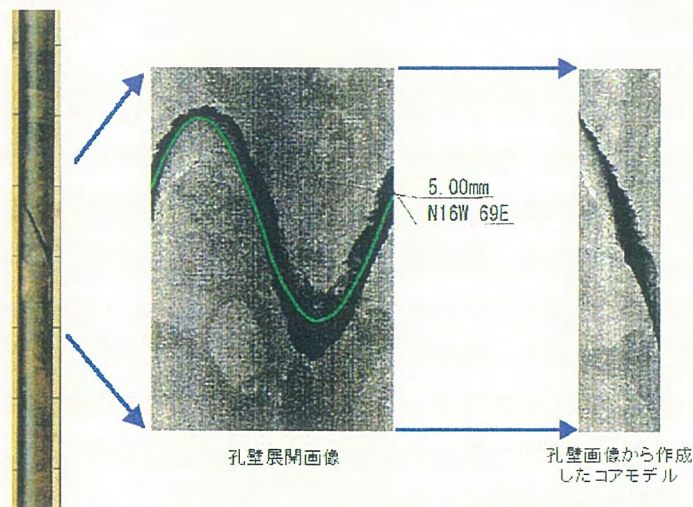


図 3.4.10 ボアホールカメラ孔壁展開図の一例²⁰⁾

(3) 微化石・火山灰分析

断層等に近接した複雑な地質構造を示す地域では地層の連続性を検証するために微化石・火山灰分析は有効な手段となる場合がある。図 3.4.11 に微化石・火山灰分析による地層対比の例を示す。

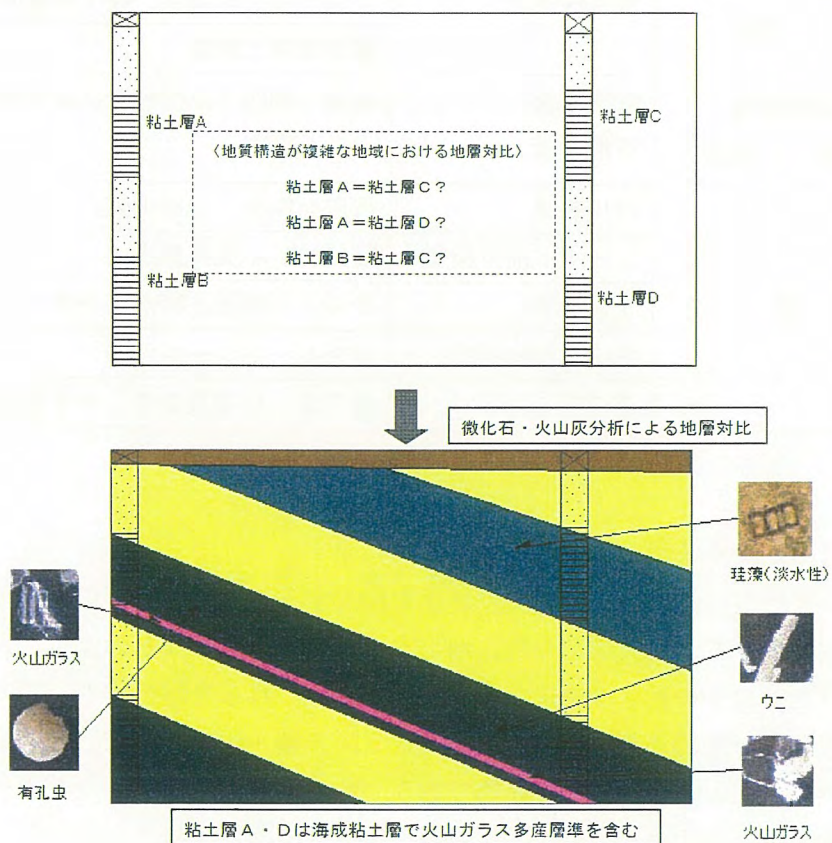


図 3.4.11 微化石・火山灰分析による地層対比の例²¹⁾

3. 5 調査事例

本節では、調査事例として、主として線状構造物に対する水みちの（事前）調査事例を3例紹介する。

第2章に紹介した施工事例からも、地下水流動保全に関する事前調査事例としては、ボーリング、地下水位観測を主体とした一般的な手法がほとんどであることがわかる。この理由は、地下水流動保全が、主として地下水水理が比較的単純な沖積平野において実施されていることによると思われる。

ここで紹介する事例は、丘陵地（事例3は河口部）を主体とした事例であり、地下水の流動が水みちのような局所的な流れに依存するケースにおける調査事例である。

表 3.5.1 水みち調査事例一覧表

	事例の表題	調査内容
事例1	開削道路に対する水みち調査事例	◇一次調査 ボーリング、現場透水試験、地下水位観測 ◇二次調査 高密度電気探査、1m 深地温探査、多点温度検層、流向流速測定、水質試験（主成分イオン・酸素水素同位対比・トリチウム濃度）
事例2	開削道路付近のため池保全調査の事例（水みち調査）	◇一次調査 ボーリング、現場透水試験、水位観測 ◇二次調査 1m 深地温探査、地下水検層、水位流量観測 溜池 H-V 測定
事例3	感潮河川から堤内地への塩水浸透経路調査事例（水みち調査）	◇一次調査 ボーリング、現場透水試験、水位観測 ◇二次調査 比抵抗トモグラフィ、音響トモグラフィ

(事例1) 地下水保全に関する 施工 ・ (調査) 事例

	調査事例名	開削道路に対する水みち調査事例		施工(調査)時期	2001～2002
調査・試験	地質関連	丹波層群からなる西山山地の全面に形成された丘陵地。崖錐堆積物および段丘堆積物からなり、厚さ20～30m程度の粘土質砂礫からなる。下位は、大阪層群の粘性土を主体とした地層。			
	地下水関連	(一次) ボーリング、現場透水試験、地下水位観測 (二次) 高密度電気探査、1m深地温探査、多点温度検層、流向流速測定、水質試験 (主成分イオン・酸素水素同位対比・トリチウム濃度)			
地下水影響予測及び対策工法の検討手法	掘削道路建設予定地において、下流側に分布する池や井戸（農業用水、観光資源、信仰対象）に対する影響が懸念されたため、地下水流動保全工法が検討された。難透水性地盤中における地下水流動層（水みち）の分布を把握し、三次元浸透流解析により各種保全工法を比較検討。				
地下水流動保全対策	集水・涵養機能付き土留め壁（計画）				
地下水影響の結果又は調査による予測	■ 調査による予測 調査結果から、粘土質砂礫層を流動する地下水のうち局所的な流動層（水みち）が寄与する量的割合は比較的大きく、このような「水みち」区間・深度に保全対策を実施することが重要であることが示された。				
施工完了後の対応	地下水モニター	—	メンテナンス	—	
地質と構造物の断面図など	<p>(道路計画縦断面図)</p>				

表 地下水保全に関する施工・調査事例

想定地質断面図			
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;"> <p>高密度電気探査結果 (L=450m、深度50m)</p> <p>旧谷地形 (扇状地堆積物下面の凹部)</p> </div> <div> <p>1.高密度電気探査結果</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 20px;"> <div style="text-align: center;"> <p>2.水みち分布断面図(多点温度検層)</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>3.水みち分布平面図(1m深地温探査)</p> </div> </div>			
保全工法概要図			
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;"> <p>保全工法概要</p> <p>(c) 集水・涵養機能付き土留め壁</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>予測解析結果(地下水位変化量)</p> </div> <div style="text-align: center;"> </div> </div>			
施工・計画・概略工程図			
整理番号		文献・資料名	

(事例2) 地下水保全に関する 施工 ・ (調査) 事例

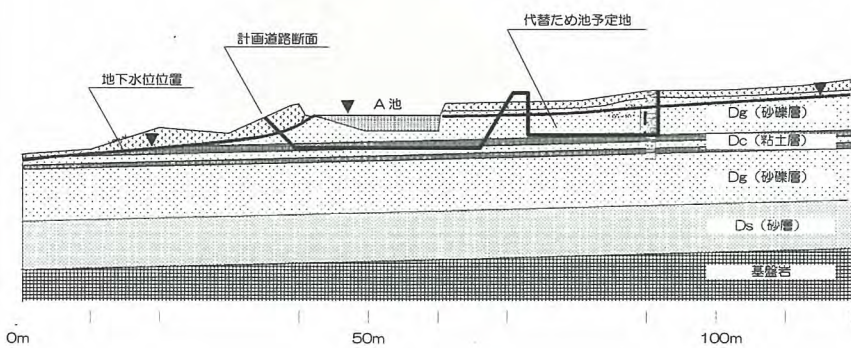
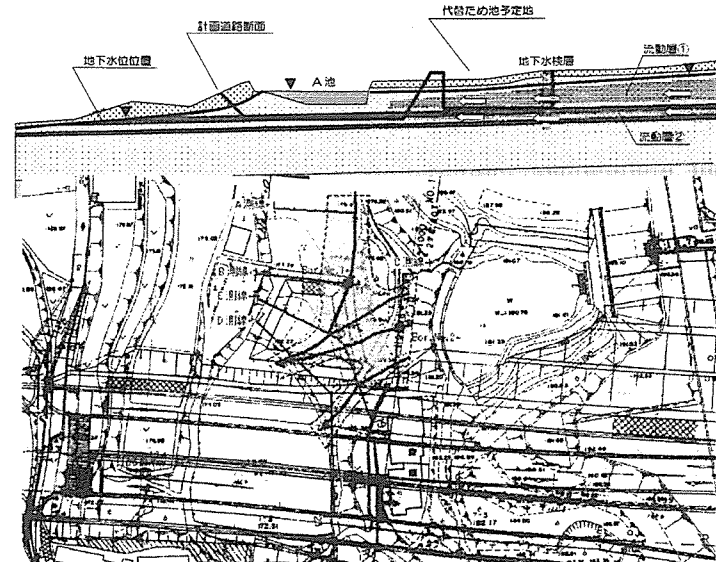
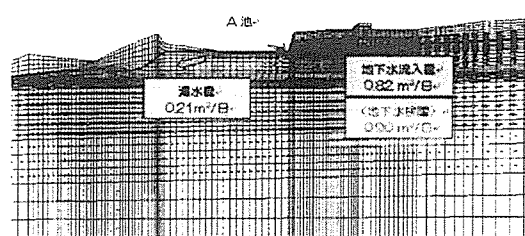
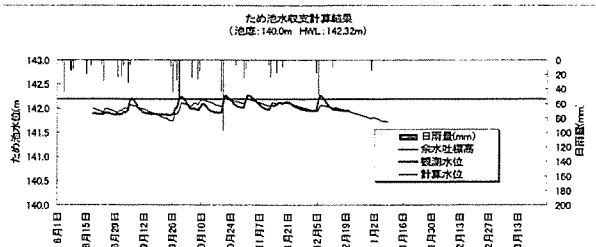
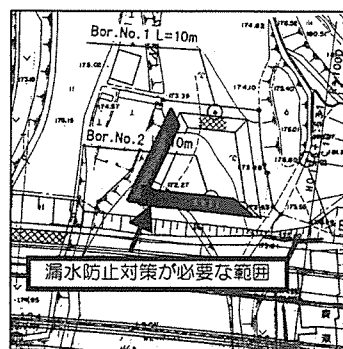
	調査事例名	開削道路付近のため池保全調査の事例 (水みち調査)		施工(調査) 時期	2002
調査・試験	地質関連	基盤岩上に、菖蒲谷層と呼ばれる砂礫層～砂層が数10mの厚さで堆積する丘陵地。粘土混じり砂礫 (Dg) 層中に不透水性のDc層が挟在している。			
	地下水関連	(一次) ボーリング、現場透水試験、水位観測 (二次) 1m深地温探査、地下水検層、水位流量観測、溜池H-V測定			
地下水影響予測及び対策工法の検討手法	掘削道路建設予定地において、計画道路が農業用ため池を分断する計画となっており、代替ため池予定地における貯水の可能性を調査。難透水性地盤中における地下水流動層（水みち）の分布を把握し、二次元浸透流解析・ため池水収支計算により保全工法を検討。				
地下水流動保全対策	ため池に遮水シート等の漏水防止対策（予定）				
地下水影響の結果 又は調査による予測	■調査による予測 ため池は地下水流入が比較的多く、局所的な流動層（水みち）を介した流入が主体である。このため、二次元浸透流解析により地下水流入成分の減少、対策効果による影響の低減を評価し、ため池水収支計算により代替池の貯水可能性を検討した。				
施工完了後の対応	地下水モニター	—	メンテナンス	—	
地質と構造物の断面図など	<p>(計画道路縦断面図)</p> 				

表 地下水保全に関する施工・調査事例

想定地質断面図			
<p>地下水流動層(水みち)断面図 (地下水検層による)</p> <p>地下水流動層(水みち)平面図 (1m深地温探査による)</p>			
保全工法概要図			
<p>地下水収支解析(二次元浸透流解析)</p> 		<p>ため池水収支計算による現況水収支の解析</p> 	
<p>漏水防止対策範囲図</p> 			
整理番号		文献・資料名	

(事例3) 地下水保全に関する 施工 ・ 調査 事例

	調査事例名	感潮河川から堤内地への 塩水浸透経路調査事例(水みち調査)	施工(調査) 時期	2003
調査・試験	地質関連	20m程度の厚い沖積砂層 (As) ・ 粘土層が (Ac) が基盤岩を覆う。		
	地下水関連	(一次) ボーリング、現場透水試験、水位観測 (二次) 比抵抗トモグラフィ、音響トモグラフィ		
地下水影響予測及び対策工法の検討手法	海岸付近の河川堤防改修予定箇所において、満潮時に堤内地(湿地)に塩水が浸透・流出しており、汽水状況に適応した貴重生物が生息している。塩水浸透を確保した河川改修計画を策定するために塩水浸透経路の解明のための調査を実施。			
地下水流動保全対策	塩水浸透を確保した河川堤防補強(予定)			
地下水影響の結果 又は調査による予測	<p>■ 調査による予測</p> <p>堤防下部の沖積砂層 (As) に、局所的な塩水分布域(比抵抗トモグラフィによる低比抵抗ゾーン) および、高透水性ゾーン(音響トモグラフィによる) がほぼ一致した箇所に存在し、この高透水性ゾーンが塩水を浸透させる主要経路であると推定された。このことから、矢板等による塩水浸透経路の遮断は望ましくなく、浸透経路を保存した堤防補強が必要との知見が得られた。</p>			
施工完了後の対応	地下水モニター	—	メンテナンス	—
地質と構造物の 断面図など				

表 地下水保全に関する施工・調査事例

想定地質断面図			
<p>高密度電気探査結果</p>		<p>音響トモグラフィ探査結果</p>	
保全工法概要図			
施工・計画・概略工程図			
整理番号		文献・資料名	

参考文献

- 1)地下水流動保全工法に関する研究委員会：地下水流動保全工法，地下水地盤環境に関する研究協議会,2002.
- 2)市原実：大阪層群,創元社,pp70,1993.
- 3)田中茂：領域別地下水の水理,神戸市土木局第28回宅地防災月間講習会テキスト,pp.1～14.
- 4)建設省河川局監修：地下水調査及び観測指針（案）、pp.204,1984.
- 5)竹内篤雄,中山健二,渡辺知恵子：温度を測って地下水を診断する,古今書院,p.177,2001.
- 6)地下水流動保全工法に関する研究委員会：地下水流動保全工法，地下水地盤環境に関する研究協議会,pp.2～10,2002.
- 7)地下水流動保全工法に関する研究委員会：地下水流動保全工法，地下水地盤環境に関する研究協議会,pp.2～37,2002.
- 8)竹内篤雄,中山健二,渡辺知恵子：温度を測って地下水を診断する,古今書院,pp.50,2001.
- 9)竹内篤雄,中山健二,渡辺知恵子：温度を測って地下水を診断する,古今書院,pp.174,2001.
- 10)竹内篤雄：温度測定による流動地下水調査法,古今書院,pp.305,1996.
- 11)川崎地質(株)；<http://www.kge.co.jp/Gijyutsu/resistor/resistor.htm>
- 12)竹内篤雄：温度測定による流動地下水調査法,古今書院,pp.427,1996.
- 13)川崎地質(株)；技術資料より
- 14)㈱環境総合テクノス；技術資料より
- 15)竹内篤雄,中山健二,渡辺知恵子：温度を測って地下水を診断する,古今書院,pp.158,2001.
- 16)竹内篤雄,中山健二,渡辺知恵子：温度を測って地下水を診断する,古今書院,pp.108,2001.
- 17)竹内篤雄：温度測定による流動地下水調査法,古今書院,pp.350,1996.
- 18)竹内篤雄：温度測定による流動地下水調査法,古今書院,pp.349,1996.
- 19)川崎地質(株)；<http://www.kge.co.jp/Gijyutsu/Imct/Imct.htm>
- 20)日本物理探査(株)；<http://www.n-buturi.co.jp/business/geology/bips/index.htm>
- 21)㈱オキココーポレーション；技術資料より

4. 流動保全の予測技術

4. 1 予測技術によって得られる指標と技術課題の取りまとめ

近年、数値解析は高度化され、流動保全に関係する種々の指標を計算結果として与えることも可能となってきた。ただし、これにはまだ研究レベルのものもあり、実用化という点では制限のあるものである。これまでも述べられてきたように¹⁾、流動保全に関係する指標は、地下水位や流動流量の他に、地盤の安定や植生、塩水化など多岐にわたる。このため、これら全てを考慮し、さらに広域の地下水系を扱うことのできる解析手法は現段階では実用化されておらず、また新たに開発するのも現実的ではない。

したがって、流動阻害によって生じる主たる項目（本書では現象項目）と、これによって副次的に生じる項目（影響項目）に分けて考えることを推奨する。

すなわち、地下水の予測解析に期待する指標は、以下の項目に留めている。

- a) 地下水位および間隙水圧
- b) 流動量および井戸などでの湧水あるいは注水流量
- c) 地下水流速

これに対して、以下の項目については上記 a)～c) の予測結果に基づいて別途評価する。

- d) 地盤の安定性
- e) 塩水化や既存汚染地下水汚染源の挙動
- f) 植生や凍上現象に関わる含水分布

この考え方は、現象項目が影響項目に対して独立した挙動を示すという前提に立っているが、必ずしもそうではない場合がある。例えば、圧密予測では、圧密の進行に伴い粘性土の透水系数が小さくなる傾向があると言われており、この現象は単に圧密だけではなく、粘性土層からの排水挙動に、そしてさらには帯水層の地下水挙動に影響を与えるものとなる場合がある。他に、塩水侵入によって生じる密度流が地下水挙動に影響を与えるなど、地下水挙動を正確に予測するためには因果関係のある挙動を連成（カップリング、同時に互いの影響を考慮する取り扱い方）させなければならない。

また、広域地下水流動を扱うため、解析範囲が数 km から数十 km 四方に及ぶこと、さらに地下構造物と地層の位置的關係から構造物周辺では三次元的な地下水流動が観測されるため、深さ方向への解析領域拡大も考慮しなければならない。このため、先述の議論のように地下水挙動を圧密などの問題と連成し、かつ三次元場で解析するとなれば、極めて大規模な作業となってしまう。

このため、種々の連成解析技術の開発と相まって現状で適用可能な予測技術を駆使するべく対象とする問題の簡素化・近似化の考え方の整理も重要となっている。

4. 2 解析モデル

近年、電子計算機の小型化・大容量化・高速化に劇的な改善が見られ、数値解析技術の実問題への適用が飛躍的に高まってきた感がある。特に三次元場での解析は、大容量マトリックスの縮減と高速解法の課題が間接解法の導入により飛躍的に改良され、これに伴い一般の商業ベースでの実施も増えつつあり、より一層その活用に期待が高まってきたところである。これに対して、二次元場（断面・平面・準三次元など）での解析は、机上のパーソナルコンピュータベースでの適用も可能となり、ここでも細メッシュの適用や微小時間々隔の導入が可能となり、低次元場ではあるものの、従来と比較すると、より詳細な予測が可能となり、さらに大規模かつ複雑な現象を扱おうとする傾向があり、研究・技術開発の対象としては解析モデルの開発は現在も営々と継続されている。

このような状況の中で、地下水流動保全の問題を扱う場合には、以下の特徴を把握しておく必要がある。

- a) 浸透特性や地層構造など地盤情報がいくつかの調査段階を経て入手されるので、解析モデルの組み直しがある。
- b) 対策工の設計段階でみられる試行が数多くあり、これを数値解析に頼る部分が少なくない。

このため、現状の計算やモデル作成の限界もあり（往々にして近い将来あっさりと解決する問題であると見込まれるが）、より快適に少ない労力で解析を行う必要があり、適用にあたっては考慮しておくべきポイントを以下の項で説明する。

まず、4.2.1では、1)低次元場への近似化、2)井戸などの施設の近似モデル化、の観点で地下水流動阻害と地下水流動保全対策検討における簡易近似モデルをまとめる。

4.2.2では、これまでの建設工事では着目されることが少なかった広域地下水モデルの作成についてその要点をまとめる。

4.2.3では、構造物や対策工のモデル化についてまとめる。

4.2.1 近似モデルの一般的な作り方と留意点

多くの地下水流動は三次元的挙動であることはいうまでもない。しかし、いくつかの仮定の下で挙動を簡素化、特に低次元場に近似できる。例えば、井戸に集中する流れを軸対称化するものは代表的な近似化と言える。ここでは近似モデルの提案およびその適用に際して留意すべき点をまとめる。

例えば、長方形掘削地に集まる地下水流量の計算では、掘削地を大口径井戸に近似する場合がある。このとき、井戸半径には、等価周辺長円半径と等価面積円半径が用いられることが多いが、その適用範囲は明確にはされず、長方形に近いなら等価周辺長円、正方形に近いなら等価面積円といった表現であり²⁾、大きな誤りはないのであろうが、“提案”のレベルを脱しえない近似モデルであることは否めない。従来であれば、これらの適用範囲を明確にするには、実験や工事経験によって妥当性や定量的な適用範囲を示す他なかったが、費用と時間の点で問題があった。しかし、現在では高次元場やより実際に近い現象の詳細予測解析も可能となっている。例えば、大口径井戸モデルについては三次元や準三次元解析との比較から、円形モデルの選定について整理されている^{3,4)}。

地下水流動保全工法の検討では、遮水壁を部分的に取り除く対策工があり、この検討では解析モデルは、取り除く部分を地山相当の透水性としその幅と対策する間隔から、対策によって遮水壁を平均的な透水性を有すると考える方法がある。大局的に地下水系を見た場合には、通水流量などの予測精度は高いが、遮水壁近傍の水位は実際よりもその変動は小さく見込まれる可能性が高く、水位変動に対する基準が厳しい場合には、この方法の適用は注意しなければならない。また、壁からどの程度離れた地点であれば、水位予測の精度が満たされるかの検討も今後の課題である。

このように、これからの近似モデルの提案および適用にあたっては、単に“提案”に終わることなく、また“昔から使っている”といった考えではなく、適用性と適用範囲を理論的・実験的（物理実験、数値実験など）に裏づけをとることが重要である。

さらに、数値解析は解析領域全体に対して何らかの数値を提供することから、近似モデル適用時には、あらかじめ設定された適用範囲の中で評価することに注意する。

また、近似モデル導入の最大の利点は、より高次・複雑な解析よりも解析が省力化されるというものである。つまり、近似化に拘泥するあまりかえって過大な労力を費やすことは好ましいとはいえず、このような場合には三次元など高次・複雑な解析に最初から取り組むべきである。いわゆる、研究のための研究とならないように気をつけるべきである。

4.2.2 広域地下水のモデル化

広域地下水系を数値解析で扱う場合、以下の点で注意が必要である。

①水理境界と水収支の関係

最も重要視すべきは水収支を明確にすることである。

一般的な建設工事での地下水解析を鑑みると、解析領域は数百 m 四方か大きくても 1km 四方程度であろう。しかし、広域と称される場合には、数 km から数十 km 四方の領域を扱わねばならなくなってくる。当然、明確な（物理的な）境界が存在すればこれに従って領域を決めればよいが、影響圏範囲のように、揚水などの水理インパクトから十分に離れたことで、その影響を受けないと“みなす”境界には特に注意が必要である。

例えば、西垣⁵⁾や進士^{6,7)}がまとめたように、影響圏半径は井戸問題では降雨による涵養補給と排水の収支バランスから評価され、降雨補給や隣接粘性土層からの漏水を地盤水平方向からの補給に置き換えたものと考えることが望ましい。その他には、帯水層内の貯留水の排出に伴う影響半径の定義が提案されている。いずれも、揚水など地盤からの排出量と地盤への供給・貯留量の水収支を考えるべきものである。しかし、一度影響圏半径と定義されてしまうと、水収支を省みない場合が少なくない。

地下水流動保全で実施される予測解析を考えてみたとき、地下水流動に影響を与える構造物が数 km 四方にあるため、これに準じて解析領域も数十 km 四方となり、揚水試験などから得られる影響圏範囲と比較するとずいぶん大きな領域を扱うことになり、影響圏範囲がすなわち解析領域に設定されてしまう。この取り扱い、広域地下水を扱う場合にはしばしば遭遇するものである。図 4.2.1 は降雨供給のある場合に得られた揚水試験時の地下水位分布と影響圏半径の関係であり、図 4.2.2 は降雨を考慮せずに地下水位分布を評価したものである。影響圏半径 R より遠方の地盤をモデル化せずここで境界を設定する場合には問題ないが、図 4.2.2 のようにより遠方まで領域をモデル化する場合、降雨などの供給を無視すると実際よりも過大な水位低下を評価することになる。

このように、地形状況や地層構成の複雑な地盤を忠実に再現する数値解析では、旧来の影響圏半径設定の物理的な意味を再考し、降雨や漏水はそのまま補給源としてとり扱うことが適切である場合があることを認識されたい。

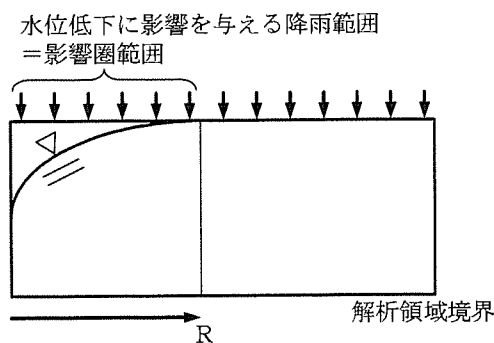


図4.2.1 揚水試験時の影響圏範囲

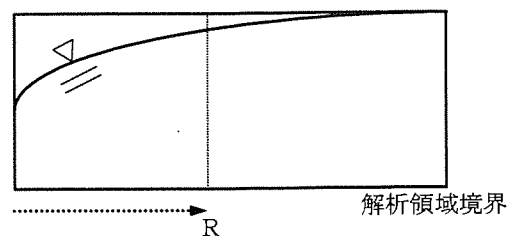


図4.2.2 降雨を無視した解析境界

これを踏まえ、広域地下水解析を行う場合、最初に検討するのが現況での地下水位と湧水や揚水などの測定可能な水理インパクトの収支を合わせる作業である。この中で、降雨浸透も涵養源として評価される。気をつけなければならないのは、地下水位分布や測定可能な水理インパクトと異なり、降雨涵養は当該地域の降雨履歴がそのまま地下水涵養とは言えない点である。単純には、降雨量の 1/3 ずつが、蒸発・表面流出・地下水涵養、と近似化される傾向があるが、地表面の傾斜や裸地や舗装の有無など広域地下水系を扱う程に降雨による地下水涵養の把握は複雑である。特に、降雨状況は現地観測やデータベースなどから比較的容易に得られても、実際に涵養源として地下に浸透する降雨量はわからないのが実情である。このような場合の対策として、揚水試験などで得られる影響圏半径と降雨供給の関係（例えば、文献 5 や 7）を用いて、揚水試験結果から得られた影響圏半径から降雨供給量を逆算する方法も考えられる。

②河川・湖沼のモデル化

広域地下水系問題に限らないが、河川や湖沼があるところの線上や地点や既知水位境界を設定することがあり、三次元や断面二次元モデルで、地表面高さや川や池の底高さでこの条件が用いられる場合には問題はない。しかし、平面二次元や準三次元では、既知水位境界は川床の深さ位置のみならず、地層深さ全体にわたって河川水位と同じ水位境界をもつことになってしまう。この結果、平面二次元や準三次元では、領域内に河川を含むような領域モデルを用いた場合には、河川より遠方は河川の既知水位境界の影響を強く受けてしまうことから、適用には注意が必要である。特に、図 4.2.3 および図 4.2.4 の比較に示すように、湖沼底や河床には透水性の低い粘性土が堆積し難透水性層を形成している場合が少なくなく、河川水位と近傍の地下水位が必ずしも一致しないことがある。このような場合には、前述で示した現況解析時に、湖沼や河川境界を水位境界とするだけでなく、河川や湖沼から地下水への涵養流量を同定することで、次段階の解析では河川や湖沼には流量条件を導入することも勘案すべきである。

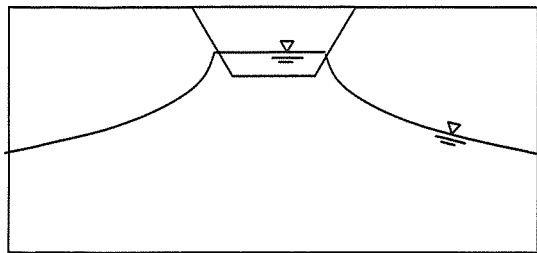


図 4.2.3 河川水位と地下水位の連続性

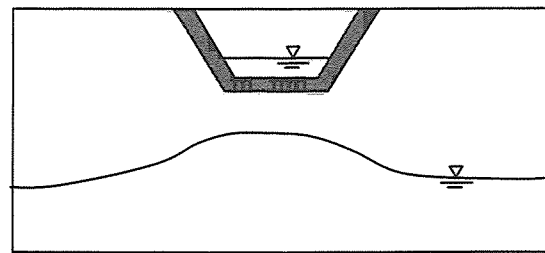


図 4.2.4 河川水位と地下水位の不連続性

4.2.3 構造物・対策工のモデル化

広域地下水解析によく用いられる準三次元解析では、鉛直方向の流れを無視した Dupuit の仮定を取り入れているために、鉛直方向の流れが生じるような不完全または部分ストレーナー井戸揚水（注水）、さらに完全に帯水層を遮断しない遮水壁を取り扱う場合などで問題となる。また、遮水壁に通水管などを設置する対策の場合においても、通水管の表現方法などが問題となる。そこで、数値解析コードを用いるときの構造物・対策工モデル化における留意点を述べ、通水管の取り扱いに関する提案を行う。

①不完全・部分ストレーナー状態の等価透水係数モデル¹⁾

遮水性構造物が帯水層を深さ方向に完全遮断し、その影響評価を準三次元解析（二次元流動場）で行う場合に、対策工としての集水・涵養井戸が帯水層厚さ方向に部分的にしかストレーナーがない状態であったと仮定する。このとき、井戸周辺の地下水流には鉛直方向成分が見られるために、通常では鉛直方向の流れを無視した準三次元解析などでは検討できないと考えられる。そこで図 4.2.5 に示すように、井戸周辺地盤の透水係数について鉛直流成分を考慮したものに修正する方法があげられる。具体的には、鉛直流成分を考慮した本来の流れ状態を別の手法で計算し、そのときの揚水流量と井戸内水位および井戸周辺水位分布が等価となるように修正透水係数ゾーンの透水係数を逆算すればよい。なお、本来の流れ状態の計算は、対策施工施設 1 基の受け持つ領域をモデル化した小規模なモデルでよい。こうした取り扱いにより、三次元解析を行わなくとも準三次元解析で評価できる。

透水係数の逆算の例を示す。図 4.2.6 に示すように鉛直流を考慮できる断面二次元軸対称解析で本来の流れ状態を求め、準三次元解析で不完全・部分ストレーナー周辺部分の透水係数をいくつか設定し等価透水係数を求めた。準三次元解析で透水係数を変化させた計算結果と断面二次元軸対称解析の結果の差の二乗和を最小にする設定透水係数を等価透水係数とした。図 4.2.7 に透水係数比（等価透水係数／地盤の透水係数）と結果の差の二乗和を取った計算例を示す。同図から等価透水係数は、地盤の透水係数を 0.15 倍した値となる。

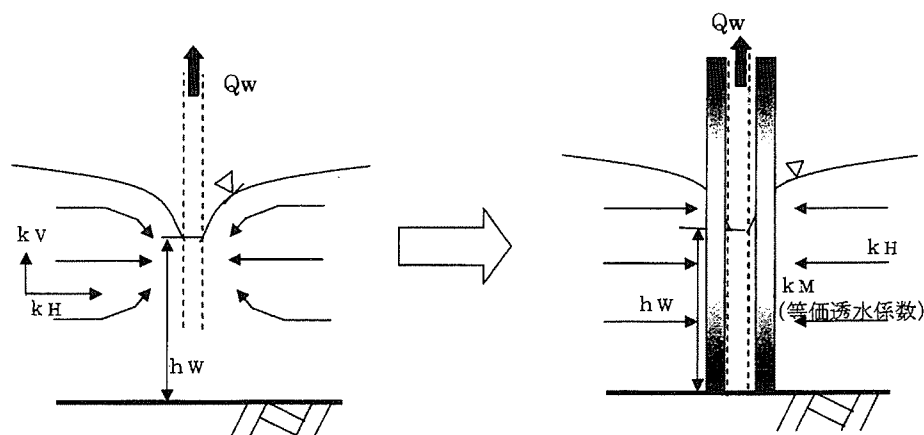


図4.2.5 部分ストレーナー井戸の完全貫入井戸モデル化¹⁾

②遮水壁のモデル化¹⁾

遮水壁や構造物が帯水層を深さ方向に完全に遮断している場合は、準三次元解析で現象

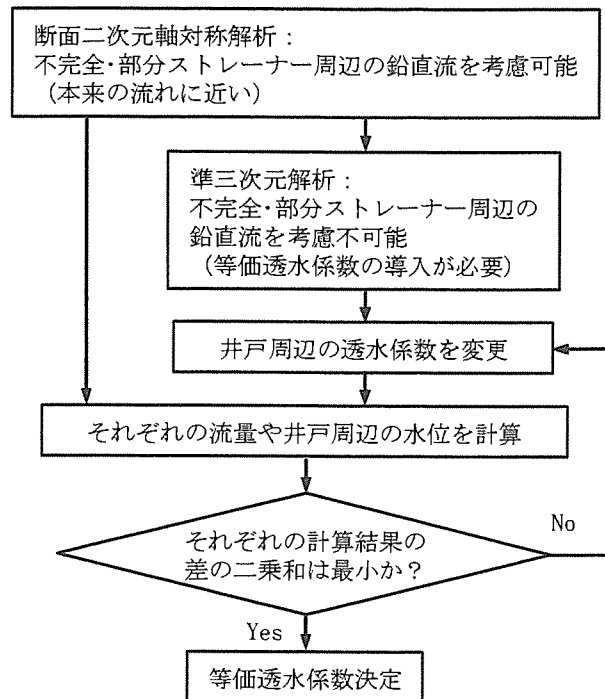


図4. 2. 6 等価透水係数の推定手順

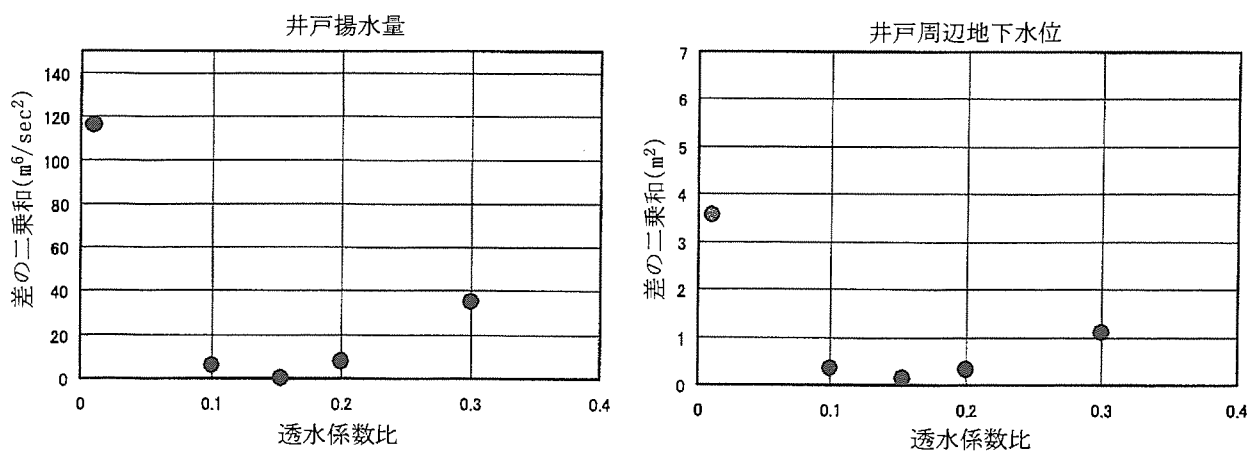


図4. 2. 7 透水係数比(等価透水係数/地盤透水係数)と準三次元・軸対象解析結果の差の関係(算定例)

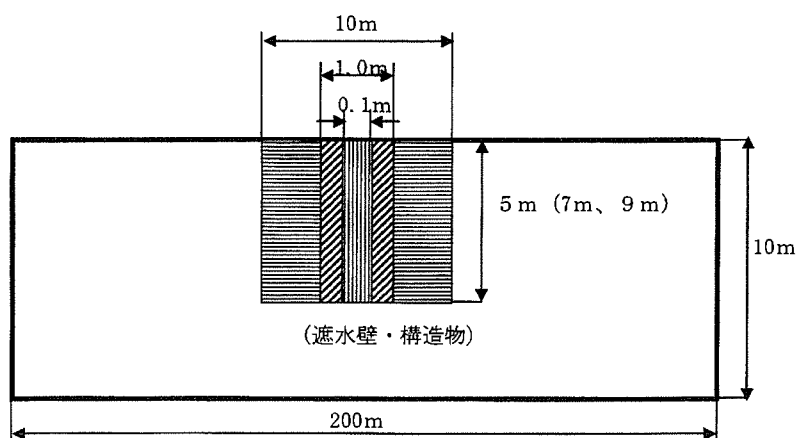


図4. 2. 8 断面二次元モデルの例

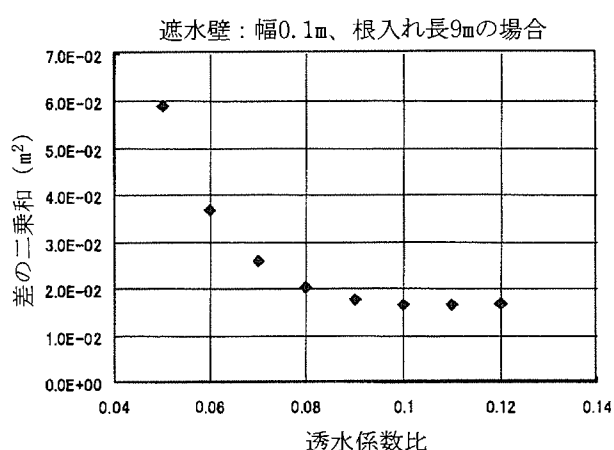


図4. 2. 9 透水係数比(等価透水係数/帯水層透水係数)と断面二次元・準三次元解析結果の差の関係 (算定例)

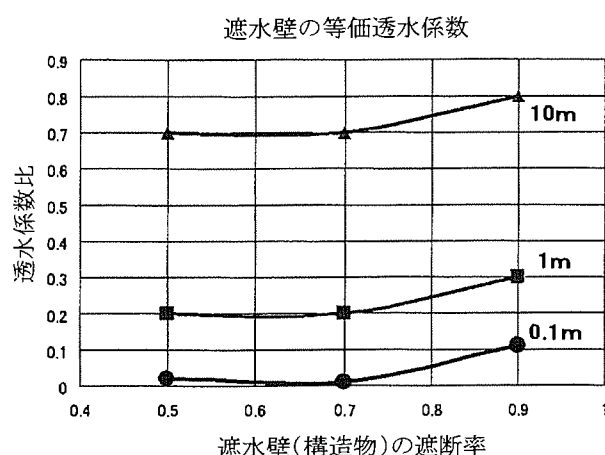


図4. 2. 10 遮水壁(構造物)の遮断率と透水係数比(等価透水係数/帯水層透水係数)の関係 (算定例)

を表現できる。しかし、遮水壁や構造物が完全に帯水層を遮断していない場合は、遮水壁や構造物の周辺で回りこみによる流れの鉛直方向成分が発生するため、三次元解析が必要となる。しかし、三次元解析はモデル化などに多大な時間や費用がかかるために何らかの工夫により準三次元解析を適用したい要望は多い。そこで、構造物下側の透水係数について鉛直流を考慮した等価透水係数に置き換えることで準三次元解析での検討を可能にするモデル化があげられる。等価透水係数の決定方法として、断面二次元解析と準三次元解析による単純なモデルによる比較を行った。断面二次元モデルを図 4. 2. 8 に示す。帯水層厚 10m のモデル中心に幅 0.1m、1m、10m の遮水壁(構造物)を根入れ長 5m、7m、9m として解析した。遮水壁(構造物)からそれぞれ上流側、下流側に 0.5m、1m、2m、5m 離れた位置における水位と、同様な条件で準三次元解析した結果の同じ位置における水位を比較した。準三次元解析の遮水壁(構造物)下側の透水係数をいくつか設定し、断面二次元解析の結果に最も近い結果(両解析の水位差の二乗和が最小となった結果)が得られた透水係数を

その条件での等価透水係数とした。

図 4.2.9 に、遮水壁（構造物）の幅が 0.1m、根入れ長が 9m の場合の透水係数比（等価透水係数／帯水層透水係数）および、断面二次元と準三次元の計算水位差の二乗和の関係を示す。図 4.2.10 には、各遮水壁（構造物）の幅毎の構造物の遮断率（根入れ長／帯水層厚）と透水係数比を示した。

③通水部を地盤としてモデル化

遮水壁による地下水遮断の対策工として、施工後に遮水壁の一部を取り除いて通水部を設ける対策を行う場合、その設計対応解析としては、

a) 対策工を正確に表現できるように要素分割を再分割する方法

b) 要素を変更せずに遮水壁と通水部を平均化した透水係数を遮水壁部分に与える方法があげられる。

a) の手法は、遮水壁を取り除いた通水部の要素の透水係数を変更することで問題なく対応可能である。しかし、要素を再分割することにより通水部近傍の流れを正確に把握できるが、地下水保全に必要な通水部分の範囲を決定するためには、何度も要素分割を変更する必要がある非常に時間と手間が掛かる。さらに、通水管のような対策工を適用する場合には要素分割が非常に細かくなり現実的ではなくなる。

一方、b) の方法は通水部近傍での水の流れは正しく表現できないが、地下水保全に必要な通水部分の範囲を決定する際、透水係数を変更するだけで多くの条件を検討できるために非常に有利である。ただし、通水管のような対策工適用の場合、通水管の透水係数をマンニング公式から求めて適用することも可能であるものの、その平均透水係数の設定は難しくなる。また、通水管は解析モデル全体の大きさから見て小さい（細い）ために通水部近傍の水の流れの違いが大きくなる懸念がある。遮水壁と通水部を平均した透水係数は、図 4.2.11 を参照し成層地盤の流れが成層面に平行な場合の計算式から、

$$k_a = \frac{(k_1(L-L_2) + k_2L_2)}{L} \quad (4.2.1)$$

と表される。ここで、 k_a ：平均透水係数、 L ：要素の幅、 L_2 ：通水部の幅、 k_1 ：遮水壁透水係数、 k_2 ：通水部透水係数である。

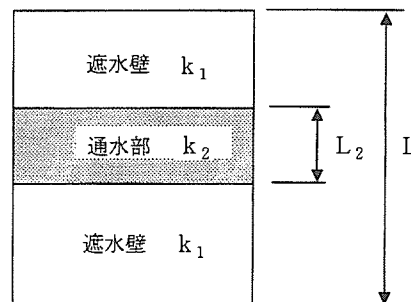


図4.2.11 遮水壁と通水部の平均透水係数算出

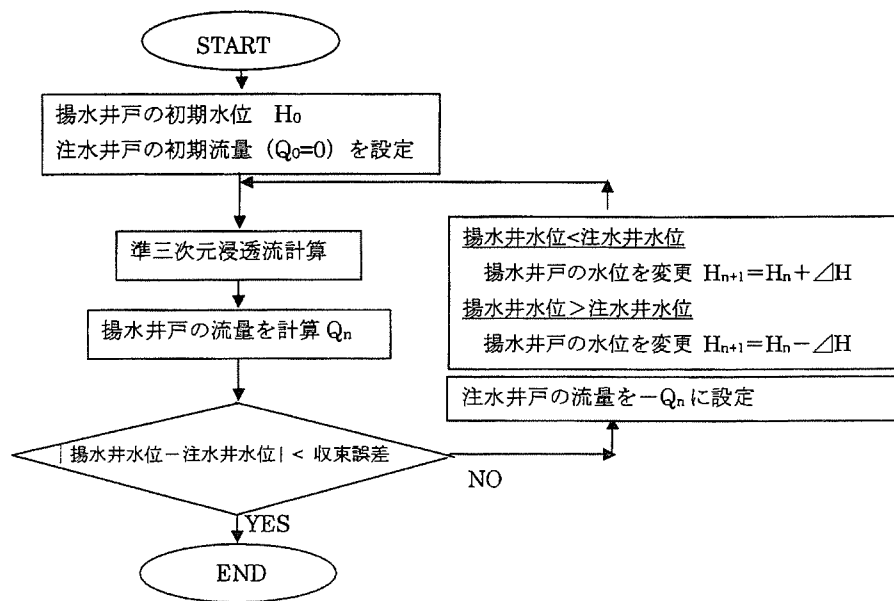


図4. 2. 12 流量の収支バランスによるモデル化の処理フロー図

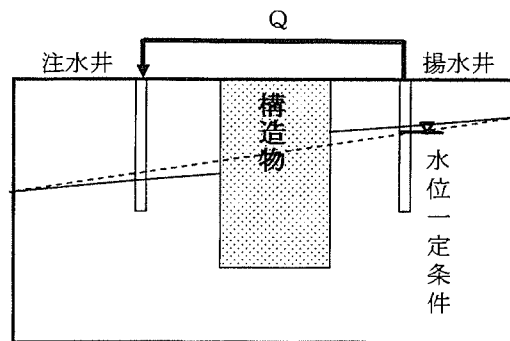


図4. 2. 13 流量の収支バランスによるモデル化

④流量の収支バランスによるモデル化

地下水保全対策工としての通水管と揚水・注水井をモデル化する場合、揚水・注水井戸の揚水・注水量が既知であれば通水管をモデル化する必要はない。この条件を用いたものが、流量の収支バランスによるモデル化である。この方法は流量の処理だけであり簡単であるが、一般的な汎用解析コードには組み込まれていないためプログラムの修正が必要である。考え方を図4. 2. 12, 4. 2. 13に示した。まず遮水壁・構造物の揚水井戸の位置に水位一定条件を与え準三次元解析等で計算をすると、その位置での流量が得られる。その値を注水井戸の位置に固定条件として与えれば、注水井戸位置での地下水位が計算される。ここで、揚水井戸と注水井戸の水位は、通水管によりほぼ同じ水位に保たれていると仮定する。通常、揚水井戸の水位を適切に設定していない限り、揚水井戸と注水井戸の水位は同じにならない。そこで、揚水井と注水井の水位がほぼ同じになるように揚水井の水位を変更しながら、揚水井と注水井の水位差がある誤差範囲に収まるように収束計算を行う。求めたい水位は、揚水井戸の水位と注水井戸の水位の間に必ず存在しているため、両井戸の水位を比較して、注水井戸の水位が高ければ、揚水井戸の水位を上げ、注水井戸の水位が

低ければ、揚水井戸の水位を下げるような水位設定を行えばよい。最終的に得られた水位が、対策工を施工した場合の結果であり、揚水井からの流量が通水管を流れる水の量である。

⑤一次元線要素によるモデル化⁸⁾

本モデル化は、遮水壁や構造物等の両側を結ぶ通水管による対策工をモデル化する場合、要素の再分割などを避けて簡便にするため、一次元の線要素を既存の解析モデルに追加する手法である。モデル化にあたっては、一次元要素の両端の節点を三次元（二次元）要素構成節点に繋ぐ。したがって、モデルの修正は非常に簡単である。しかし、一次元の線要素は一般的な解析コードには組み込まれていないため、プログラムの修正が必要である。例えば、有限要素法などの浸透解析コードに本手法を導入するためには、一次元の浸透支配方程式を二次元・三次元支配方程式の全体剛性マトリックスに組み込む必要があり、プログラムの修正も非常に難しくなる。以下に一次元の線要素の取り扱いについて説明する。まず、通水管の透水係数 k_p は、マンニング公式から次式のようになる。

$$k_p = \frac{\gamma_w D^2}{32 \eta} \quad (4.2.2)$$

ここに、 k_p ：通水管の透水係数、 γ_w ：水の単位体積重量、 D ：パイプの直径、 η ：水の粘性係数。また、そのときの平均流速 V_{ap} は次式で表される。

$$V_{ap} = -k_p \frac{\partial h}{\partial x} \quad (4.2.3)$$

ここに、 V_{ap} ：通水管内の平均流速、 h ：全水頭値、 x ：距離。

式 (4.2.3) と質量保存則

$$\frac{\partial V_{ap}}{\partial x} = 0 \quad (4.2.4)$$

により、次式が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_p \frac{\partial h}{\partial x} \right) = 0 \quad (4.2.5)$$

式 (4.2.5) を一次元有限要素法に離散化することにより求められる。

⑥2重節点（要素）によるモデル化⁹⁾

⑤で述べたように、遮水壁や構造物等の両側を結ぶ通水管などの対策工をモデル化した一次元線要素を使う場合には、解析コードのプログラム修正等が必要である。一方、解析コードを変更せずに簡単な要素分割の修正だけでモデル化手法がある。その手法が、遮水壁や構造物を表した要素に通水管を表した要素を重ねる 2 重節点（要素）によるモデル化である。問題点として、節点を新たに追加した場合に、有限要素法の解法に Gauss の消去法を用いている解析コードでは、節点番号のバラツキによりマトリックスのバンド幅が非常に大きくなる可能性がある。こうした場合には、計算速度が遅くなり、また計算機の制限で解析できなくなることも考えられる。しかし、最近は節点番号の並びには関係しない PCG 法などの解法が用いられているコードも多く、その場合には特に問題は発生しない。

以下に 2 重節点（要素）での地下水保全の解析例を示す。図 4.2.14 は、2 重節点を用いて通常の要素分割に通水管を表す要素を重ね合わせた図である。図 4.2.15 は遮水壁による流動阻害時の水位コンター図と流速ベクトル図である。

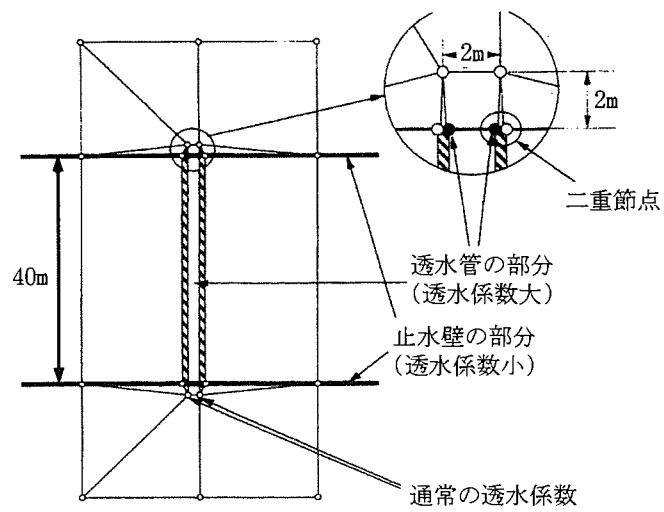


図4.2.14 二重節点 (要素)⁹⁾

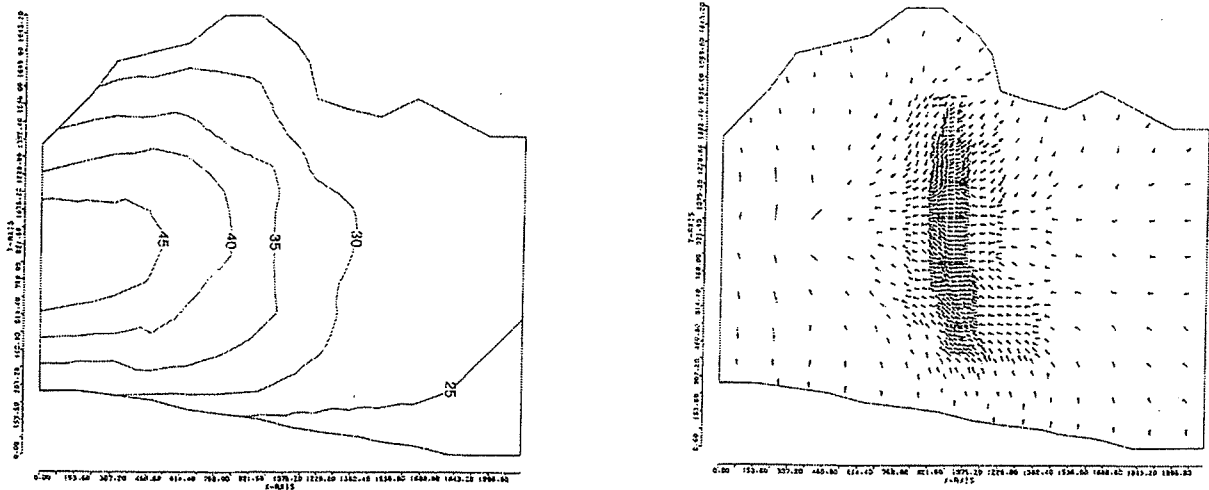


図4.2.15 水位コンター図と流速ベクトル図 (遮水壁のみ)⁹⁾

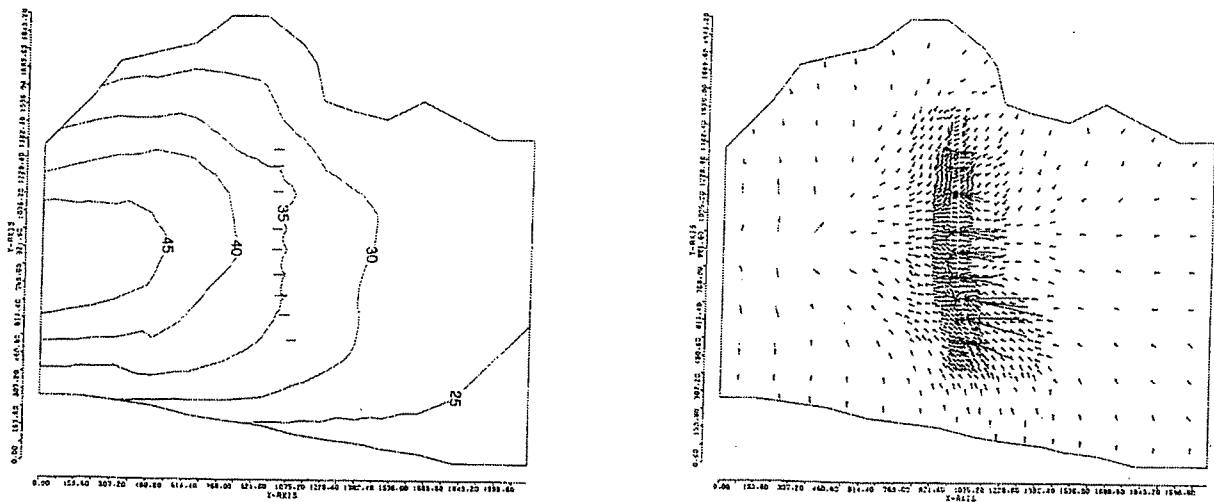


図4.2.16 水位コンター図と流速ベクトル図 (二重節点 (要素) による対策工)⁹⁾

図 4.2.16 は、2 重節点（要素）により通水管を設定した対策工を実施した場合の水位コンター図と流速ベクトル図である。三次元モデルでの 2 重節点（要素）を設定した例として、図 4.2.17 に通水管を考慮した 2 重節点（要素）を通常の要素に組み込んだ状態を上から見た図で示す。図中の●印で示した節点を共有することで、通水管を水が流れるように取り扱っている。図 4.2.18 は、通水管を重ねる前の従来の要素分割を取り出したものであり、遮水壁等の要素に相当する。図 4.2.19 は、通水管と従来要素との連結部分を表した要素分割を取り出した図である。図 4.2.20 は従来要素と通水管等の要素を重ねた図である。

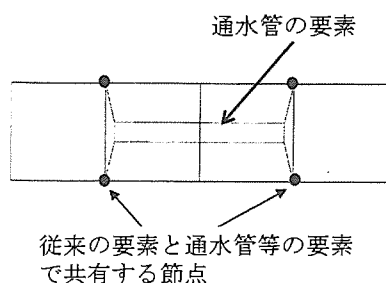


図4.2.17 三次元モデルの2重節点（要素）

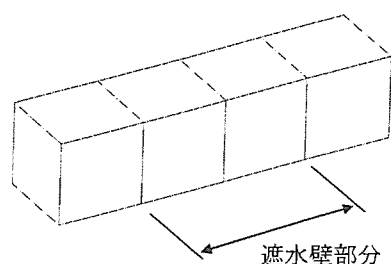


図4.2.18 従来の要素分割

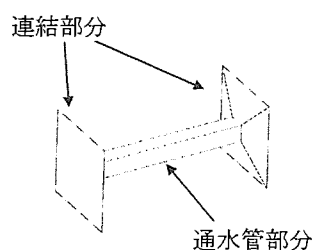


図4.2.19 通水管と従来要素の連結部分要素

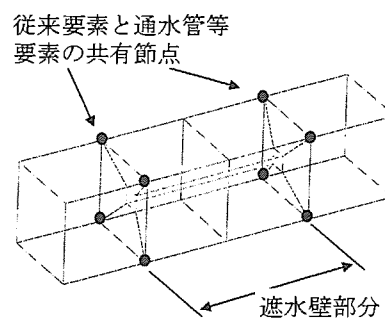


図4.2.20 従来要素と通水管要素を重ねた図

4. 3 関連する物性

地下水解析に用いる物性を整理しておく。

表 4.3.1 は Creager 法による透水係数を示したもので、ボーリング調査から採取された資料による推定値であることから、地山の透水係数としては参考値程度にしか用いられない。流動保全工法の場合、対策工でフィルター層を人工的に構築する場合があります、このような場合には Creager 法など粒度から透水係数を評価する手法は有効である。他に粒径から透水係数を評価する方法は、文献 11) に整理されている。粒径から透水係数を求める方法では、表 4.3.1 の欄外のコメントのように現場の締固め密度で値が変わることに注意する。他に、土質分類に対して透水係数の代表値や文献値をまとめたものがある。文献 12,13) がこれにあたる。

間隙率は土質試験から得られるが、地下水挙動を考える場合には、実際に水が可動する間隙（有効間隙率）が必要であり、表 4.3.2 に示すように、土質試験から得られる間隙率と比較すると有効間隙率は小さな値を示す。他に文献 15,16) にも有効間隙率が紹介されている。

比貯留係数は、多孔式現場透水試験（揚水試験）の結果として得られるものであるが、一般には室内での供試体の圧縮試験から得られる特性を用いて算定された表 4.3.3 の値が知られている。

表 4.3.1 Creager 法による透水係数¹⁰⁾

D ₂₀ (mm)	k(cm/s)	土質分類
0.005	3.00×10^{-6}	粗粒粘土
0.01	1.05×10^{-5}	細粒シルト
0.02 0.03 0.04 0.05	4.00×10^{-5} 8.50×10^{-5} 1.75×10^{-4} 2.80×10^{-4}	粗砂シルト
0.06 0.07 0.08 0.09 0.10	4.60×10^{-4} 6.50×10^{-4} 9.00×10^{-4} 1.40×10^{-3} 1.75×10^{-3}	極微粒砂
0.12 0.14 0.16 0.18 0.20 0.25	2.6×10^{-3} 3.8×10^{-3} 5.1×10^{-3} 6.85×10^{-3} 8.90×10^{-3} 1.40×10^{-2}	微粒砂
0.30 0.35 0.40 0.45 0.50	2.20×10^{-2} 3.20×10^{-2} 4.50×10^{-2} 5.80×10^{-2} 7.50×10^{-2}	中粒砂
0.6 0.7 0.8 0.9 1.0	1.10×10^{-1} 1.60×10^{-1} 2.15×10^{-1} 2.80×10^{-1} 3.60×10^{-1}	粗粒砂
2.0	1.80	細礫

※これらの値は現場の密度で変わること注意到。

影響圏半径については、文献 18,19)に推定式が示されている。これらの多くは揚水試験結果から得られた影響圏半径値の整理や非定常井戸理論からの推定であり、水収支を考慮したものではない。しかし、前述の文献 5,6,7)には水収支に基づいた影響圏半径の与え方が示されている。

表 4.3.2 間隙率と有効間隙率の代表値
(文献 14) から抜粋)

地層	間隙率 (%)	有効間隙 率(%)
沖積礫層	35	15
〃 細砂	35	15
〃 砂丘砂層	30~35	20
〃 泥粘土質層	45~50	15~20
洪積砂礫層	30	15~20
〃 砂層	35~40	30
〃 ロ～ム層	50~70	20
〃 泥層粘土層	50~70	5~10

表 4.3.3 比貯留係数の代表値¹⁷⁾など

土質分類	比貯留係数 $S_s(1/m)$
塑性粘土	$(2.6 \sim 20) \times 10^{-3}$
締まった粘土	$(1.3 \sim 2.6) \times 10^{-3}$
やや硬い粘土	$(6.8 \sim 13) \times 10^{-4}$
ルーズな砂	$(5.1 \sim 9.8) \times 10^{-4}$
密な砂	$(1.3 \sim 2.0) \times 10^{-4}$
密な砂礫	$(5.1 \sim 9.8) \times 10^{-5}$
割れ目のある岩石	$(3.2 \sim 6.8) \times 10^{-6}$
固結した岩石	$\sim 3.2 \times 10^{-6}$

※Domenico、Mifflin による。

参考文献

- 1)地下水流動保全工法に関する研究委員会：地下水流動保全工法，地下水地盤環境に関する研究協議会，2002.
- 2)土質工学会編：根切り工事と地下水，pp.182，1991.
- 3)進士喜英，小野紘一，西垣誠：地盤掘削における排水流量の算定法に関する一考察，土木学会第43回年次講演会，第Ⅲ部門，pp.892～893，1988.
- 4)西垣誠，進士喜英，小野紘一：土留め壁内での排水流量の算定法，第26回土質工学研究発表会，pp.1763～1764，1991.
- 5)土質工学会編：根切り工事と地下水，pp.101～103，1991.
- 6)進士喜英，西垣誠，古田直：漏水性帯水層モデルによる影響件半径に関する一考察，地下水学会1996年秋季講演会，pp.22～27，1996.
- 7)進士喜英，平山光信，大丸修二：降雨供給を考慮した影響件半径の推定式に関する一考察，土木学会第49回年次講演会，第Ⅲ部門，pp.324～325，2004.
- 8)大東憲二，植下協，市川悦男：掘削構造物周辺の地下水流動状態保全に関する研究，土木学会論文集，No.535，第Ⅲ部門，pp.13～21，1996.
- 9)三木一：地下水環境の保全に関する研究，岡山大学大学院工学研究科修士論文，1993.
- 10)Creager, W.P., Justin, J.D. and Hinds, J.: Engineering for Dams, Vol. III, Earth, Rock Fill, Steel and Timber Dams, John Wiley & Sons, pp.649, 1994(土質工学会：掘削のポイント，第一回改訂版，pp.303，1975).
- 11)山本莊毅：新版地下水調査法，古今書院，pp.192～195，1983.
- 12)地盤工学会：土質試験の方法と解説，第一回改訂版，pp.335，2000.
- 13)Spitz, K. & J. Moreno: A practical guide to groundwater and solute transport modeling, 1996(岡山地下水研究会訳：実務者のための地下水環境モデリング，技報堂出版，pp.296～302，2003).
- 14)土木学会：水理公式集 昭和46年版，pp.365，1971.
- 15)土質工学会編：根切り工事と地下水，pp.100，1991.
- 16)Spitz, K. & J. Moreno: A practical guide to groundwater and solute transport modeling, 1996(岡山地下水研究会訳：実務者のための地下水環境モデリング，技報堂出版，pp.295，2003).
- 17)Spitz, K. & J. Moreno: A practical guide to groundwater and solute transport modeling, 1996(岡山地下水研究会訳：実務者のための地下水環境モデリング，技報堂出版，pp.302，2003).
- 18)土質工学会編：根切り工事と地下水，pp.102～103，1991.
- 19)山本莊毅：新版地下水調査法，古今書院，pp.254，1983.

5. 開削工法における地下水流動保全工法の検討

5. 1 はじめに

大規模な地下水流動阻害に対する地下水流動保全に関する技術は「地下水流動保全工法に関する委員会」の成果として「地下水流動保全工法¹⁾」にまとめられている。開削工法 WG ではこの中に盛り込むことのできなかった地下水流動保全に関する課題や既往の技術の流動保全工法としての適用性に関する検討を加えた。

5. 2 簡易計算モデルによる水位変動予測式としての適用性に関する検討

「地下水流動保全工法」には大規模地下構造物の地下水流動遮断による影響判定方法として根入れ回り込みモデルによる計算方法が紹介されている。

ここでは、この計算方法を小～中規模構造物での地下水流動阻害に関する判定法に利用できないかを検討する。小～中規模地下構造物に想定して、構造物条件、地下水条件、帯水層条件ごとの影響検討をし、準三次元解析結果と比較した。

(1) 簡易計算モデル¹⁾と計算結果

1) 被圧帯水層モデル

$$h = H_L + 2\Delta H \times \left(1 - \frac{x^*}{2L_w + 2R}\right) \quad \text{----- (5.1)}$$

$$2\Delta H = H_U - H_L \quad \text{----- (5.2)}$$

$$h_o = \frac{i_o}{\frac{1}{L_w} + \frac{1}{R}} \quad \text{----- (5.3)}$$

ここに、 x^* : 上流境界端部 A 点から下流境界端部 B 点へ向かう破線区間上の経路長 (m)
構造物の幅 $2W$ も、この x^* に含めて解析することが可能である。

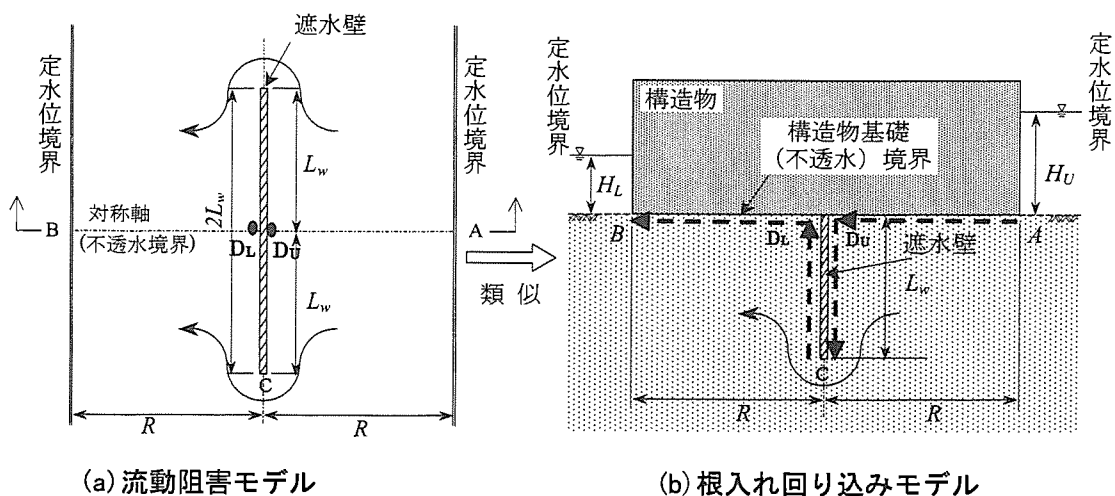


図 5.1.1 根入れ回り込みモデルによる影響検討モデル¹⁾

h_o : 構造物の中心での上
 下流に生じる水位
 変動 (m)。中心軸
 線の上下流での水位
 差は $2 \times h_o$ となる。
 L_w : 構造物の長さの半
 分長 (m)
 R : 影響圏半径 (m)
 H_L : 下流側水頭 (m)
 H_U : 上流側水頭 (m)

2) 計算結果

計算結果を図 5.1.2 に示す。

- ・動水勾配、影響圏半径、
 障害構造物の大きさが
 大きいほど、影響を受け
 る。
- ・ $i_o=1/250$ では影響は小
 さい。
- ・構造物長が 50m 程度
 では影響は小さい。

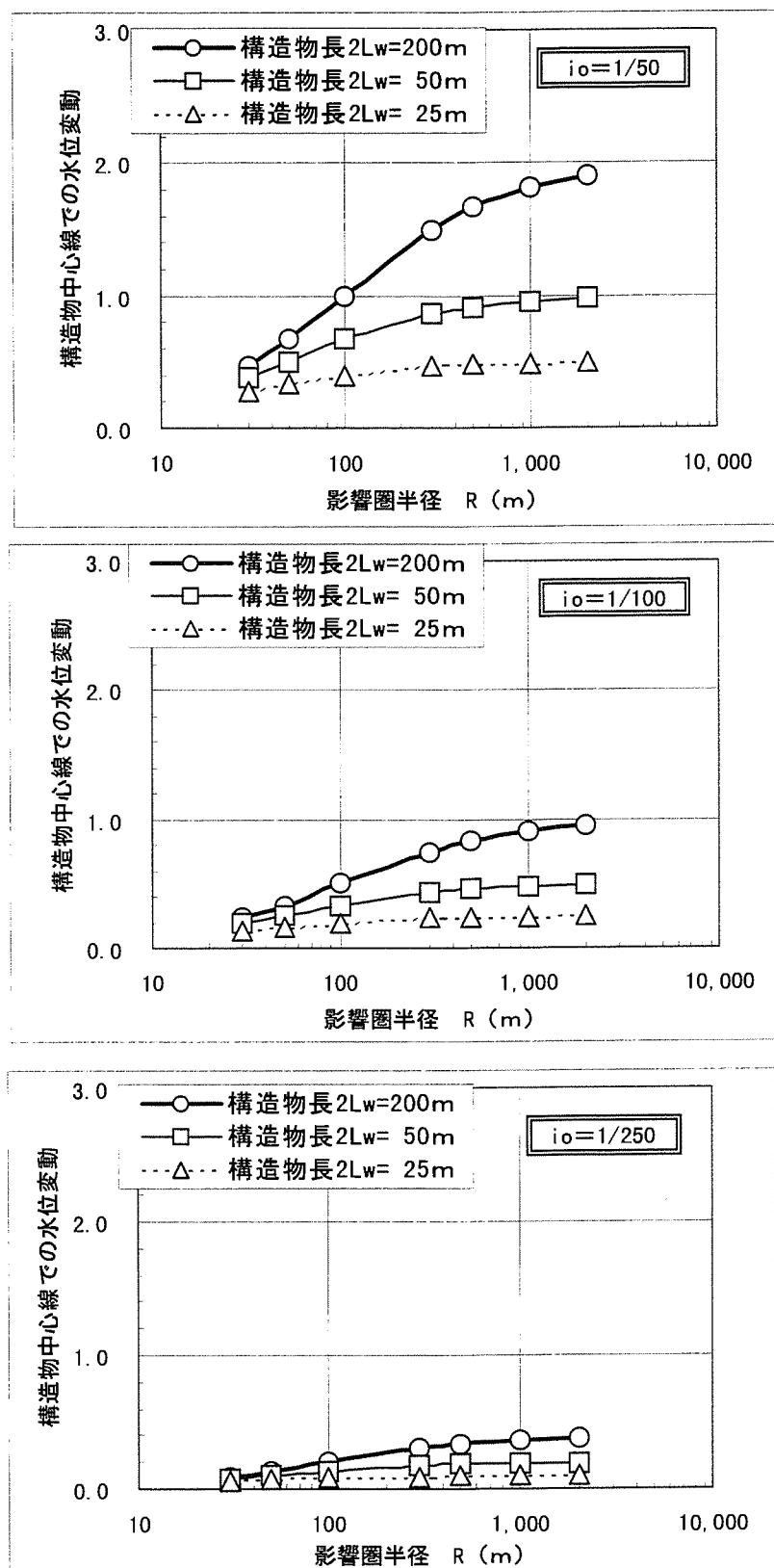


図 5.1.2 影響圏半径 R と動水勾配 i_o の違いと水位低下の影響量の関係

(2) 準三次元解析モデルでの計算例

ここでは古本・三木の研究報告 (2002)²⁾ に示された準三次元解析結果を紹介する。

1) 解析モデル

解析方法は準三次元解析で解析モデルは 1500 m×1500 m の矩形、帯水層厚を 27.5m としている。

地下水流の方向 θ を構造物に対して 30° 、 60° 、 90° と変えている。構造物の幅 $2W$ (m) を 50m で一定とし、構造物長さ L を 100m、200m、300m、600m と変える。動水勾配 i は 0.01、0.005、0.0033、0.002 の 4 種類に変化させる。

以上のパラメータを変化させた解析結果を以下に示す。

(a) 構造物の長さ L の影響

動水勾配 $i=1/100$ の場合で、 $L=100\text{m}$ 程度ではほとんど影響ない (-0.7m)。 $L=600\text{m}$ と大きくなると、構造物直近で -3.3m の変化、500m 離れで -1m の水位差となっている。

(b) 動水勾配の影響

$L=300\text{m}$ の場合の比較で $i=1/200$ 程度で影響はかなり小さくなり (-1.0m)、 $1/500$ でほとんど生じない (-0.3m)。 $i=1/100$ では -1.7m の水位差が発生となっている。

2) 地下水流の方向の影響として、 $L=600\text{m}$ の場合の比較では、 $\theta=60^\circ$ では、 $\theta=90^\circ$ とあまり差がない結果となっている。 $\theta=30^\circ$ の場合、発生水位差は -1.6m 程度と $\theta=90^\circ$ の場合の半分以下の影響となり、かなり緩和されることが分かる。

3) 解析結果と簡易計算法の比較

上記の結果を簡易判定手法と比較してみる。

簡易計算式による発生地下水位差 Δh は以下の式で求まる。

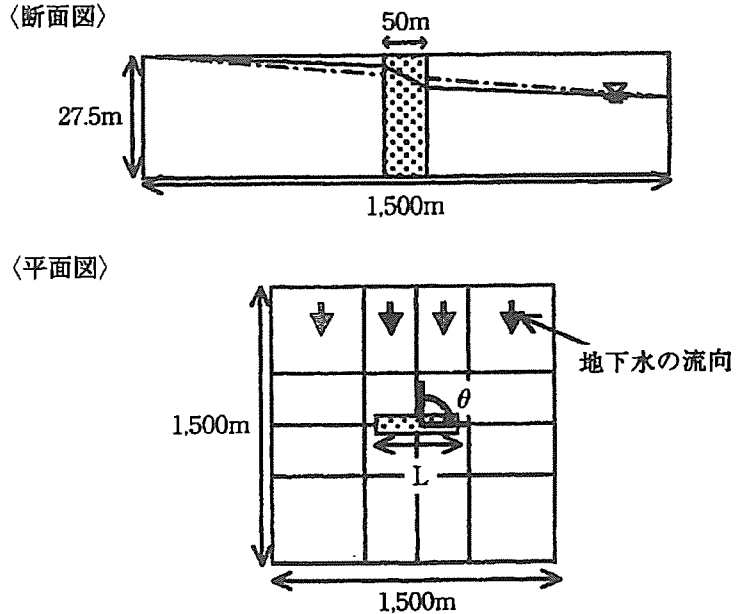


図 5.1.3 準三次元解析モデル²⁾

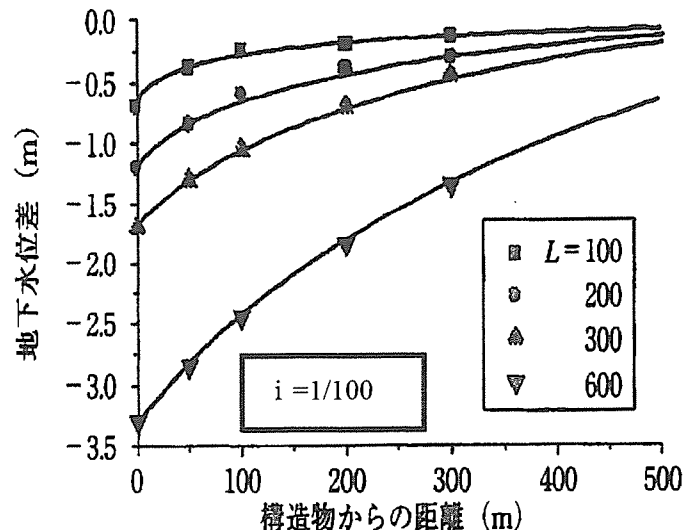


図 5.1.4 構造物の規模による影響²⁾

$$\Delta h = \frac{i_o}{\frac{1}{R} + \frac{1}{L_B}} = \frac{i_o}{\frac{1}{R} + \frac{1}{L_w + W}}$$

----- (5.4)

影響圏半径は解析領域の
1/2 とする。R=750m。

構造物の幅 2W=50m、
W=25m。

準三次元解析結果との比較
結果を表 5.1.1 に示す。

(a)L が長くなると、簡易計算
式の Δh は準三次元の計算値
よりも小さく計算される。

・準三次元解析モデルは、
構造物幅の変化に対しても
解析幅一定で実施している
ため、構造物の幅の変化に
対しては敏感なモデルにな
っていると言える。

・ちなみに L=600m の場合、
流路の閉塞率（流路幅/解析
幅）は 0.4 となっている。

このため、流動阻害効
果が高くなっていると言
える。

(b)同一 L に対して、動
水勾配 i が変化した場合
の計算値は i が大きいほ
ど小さく計算される。

・動水勾配が大きい程、
発生する水位差も大き
く計算されることは簡
易計算法でも準三次元
解析でも同じ傾向であ
る。

側方への回り込みが制限されるために、準三次元解析の方が水位差が大きく求まっているものと言える。

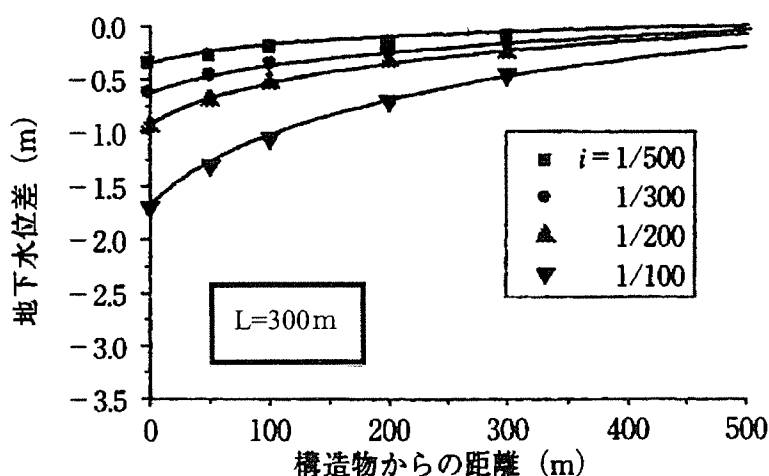


図 5.1.5 動水勾配の影響²⁾

表 5.1.1 簡易計算式と準三次元解析結果との比較

構造物長 (m)		地下水位差 Δh (m)			
L (全長)	L_w	動水勾配 i			
		1/100	1/200	1/300	1/500
100	50	0.7	0.3	0.2	0.1
200	100	1.1 (1.2)	0.5	0.4	0.2
300	150	1.4 (1.7)	0.7 (1.0)	0.5 (0.6)	0.3 (0.3)
600	300	2.3 (3.3)	1.1	0.7	0.5

() 内は参考文献の準三次元解析結果数値

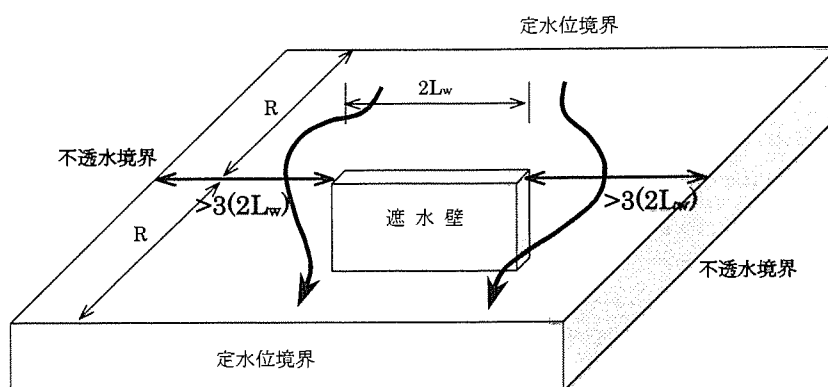


図 5.1.6 解析領域の設定例¹⁾

3) 地下水の流向の影響の評価

解析結果では地下水流の方向の影響として、 $L=600\text{m}$ の場合の比較では $\theta=90^\circ$ で-3.3m、 $\theta=60^\circ$ で-2.8m とあまり差がない。 $\theta=30^\circ$ の場合、-1.6m 程度と半分以下になっている。

構造物長 600m の投影長を求めると表 5.1.2 の様になる。この投影長における水位変動を簡易計算法で求めた結果も同表に示した。準三次元の解析モデルに対して、簡易計算法の値が小さくなっているものの、流向に対する影響はほぼ同じと言え、投影長を考慮することで簡易計算法でも対応できることがわかる。

準三次元解析の影響が大きく出ているのは、構造物幅が変化しても解析幅一定で解析しているため、遮断効果が高くでている

ものと思われる。

表 5.1.2 地下水の流向と水位変動に対する影響

流向 θ	投影長 $2L_w'(\text{m})$	計算水位変動 $\Delta h(\text{m})$	
		準三次元解析	簡易計算法
90°	600	3.3	2.3
60°	520	2.8	2.1
30°	300	1.6	1.4

(3) 簡易計算方法の適用性

1) 簡易計算方法は大規模な地下水流動の遮断モデル以外でも適用できることが判明した。

2) 構造物の長さ $2L_w$ 、幅 $2W$ 、水位変動量 Δh 、動水勾配 i_o 、影響半径 R とすると水位変動は次式で推定できる。

$$\Delta h = \frac{i_o}{\frac{1}{R} + \frac{1}{L_B}} = \frac{i_o}{\frac{1}{R} + \frac{1}{L_w + W}} \quad \text{-----前出 (5.4)}$$

3) 構造物の長さ方向と地下水の流動方向とが異なる場合は、流動方向に対する構造物の投影長 $2L_w'$ を上記評価式に反映させることで影響を考慮できる。

5. 3 既存技術の流動阻害対策として活用に関する検討

既存の技術を利用した地下水流動保全対策工法の適用可能性を検討した。実際の地下水流動保全対策としての適用には今後の詳細な検討が必要ではあるが、簡易な対策としての利用や本格的な対策が必要ではないが何らかの対策を施した方がいいケース、あるいは影響はないと思われるが地下水の変動は避けられないケースなどの地下水位変動の軽減策としての適用は可能と思われる技術について以下に紹介する。

5.3.1 土留め壁にひび割れを発生させて通水させる技術の検討

RC 地中連続壁や柱列式ソイルセメント壁等に対し、ひび割れを計画的に発生させ透水性の回復を図る技術の検討を行った。

ひび割れを発生させる技術として、以下のような方法が考えられる。

- ① 静的破碎剤の利用
- ② 油圧クサビによる方法
- ③ 鋼材の電気腐食現象の利用
- ④ プラズマの活用

⑤アルカリ骨材反応の利用

⑥その他（強度低下を期待したアルミナセメントの併用など）

本例では、比較的任意の位置や時期に強制的にひび割れ発生させることが可能と考えられる静的破碎剤を用いた方法について紹介する。

1) ひび割れからの透水流量

ひび割れからの透水流量³⁾

$$Q_{cjd} = \frac{\gamma_w}{12a\mu_w} bw^3 \frac{h}{L} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad \text{-----} \quad (5.5)$$

ここに、

w : ひび割れ幅の設計値 (m)

b : 対象部分のひび割れ長(m)

γ_w : 水の単位重量 (=9790N/m³)

μ_w : 水の粘性係数 (1.002×10^{-3} Ns/m²)

a : ひび割れの部材内部での曲がりやひび割れの
表面粗さの影響を考慮する係数
($a=25$ のとき、上限の透水量となる)

L : 構造物の設計断面厚さ (=0.60m)

h : 構造物内面と外面の水頭差

2) 削孔配置とひび割れ量

厚さ 600mm の RC 地中連続壁に静的破碎剤で貫通ひび割れを発生させるイメージ図を図 5.3.1 に示す。5ヶ所の静的破碎剤の充填

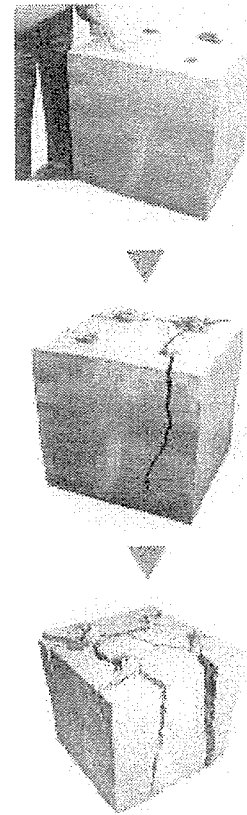


図 5.3.1 静的破碎剤によるひび割れ形成

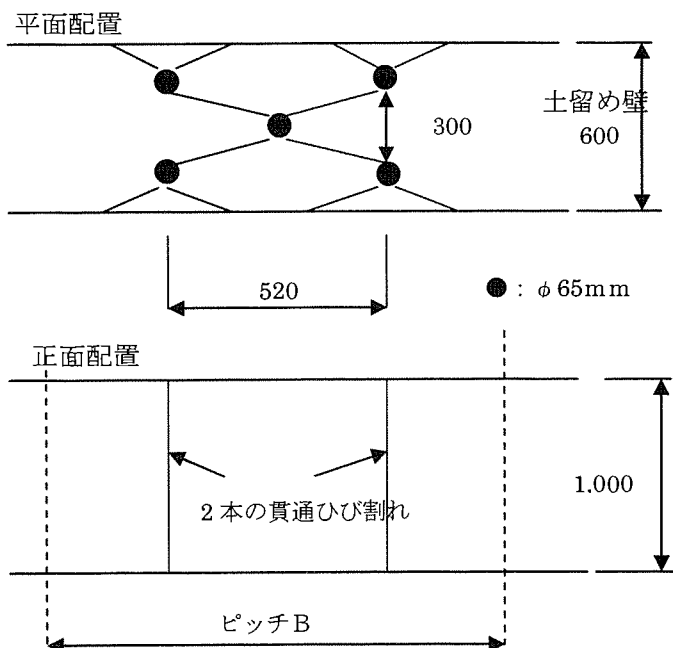


図 5.3.2 静的破碎剤による
連続ひび割れの形成イメージ

孔の設置で2本の貫通ひび割れを発生させる。これを1セットとして、以下でピッチ等を検討する。

3) ピッチ B の算定

ひび割れ中の透水量に関して安全率 F_s を考慮、 $F_s=3$ として、構造物内面と外面の水頭差 h とひび割れ幅 w を考慮した設置幅 B は、表 5.3.1 の値となる。設置間隔 B が大きくなると、ひび割れ設置間での水位差が大きくなること、復水側での流速が大きくなることなどの課題が出てくる。

表 5.3.1 ひび割れの通過透水量から求まる
ひび割れ幅 w とピッチ B の関係

ひび割れ幅 w (mm)	水位差 h (m)		
	0.5	1.0	1.5
0.3	5	10	15
0.5	23	45	68
1.0	181	362	543

4) 限界流速、限界動水勾配より決定される設置間隔 a_c

“集水・涵養装置の設置間隔 l ” の考え方（限界流速、限界動水勾配）を考慮して、目詰まりについて以下に検討する。

限界動水勾配より決定される設置間隔

$$a_c \leq A_w \cdot i_c / (D \cdot i) \quad \text{----- (5.6)}$$

ここに、

A_w : 集水・涵養装置の流入・流出部の面積

$= w$ (クラック幅) $\times 4$ 本 $\times 1\text{m}$

$= 4w \text{ m}^2$ (単位厚さ当たり)

i_c : 限界動水勾配 $= 7$

(文献1) 図 3.7.2、透水係数 $k=1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ の時)

D : 帯水層の厚さ

$= 1\text{m}$ (単位厚さ当たり)

i : 自然状態における地下水の動水勾配

$= 1/100 = 0.01$

以上の条件より、

$a_c \leq 2,800w$ (m) となり、

土留め壁のひび割れ幅 w に対して、

$w=1.0\text{mm}$ の時のピッチ $a_c \leq 2.8\text{m}$

$w=2.0\text{mm}$ の時のピッチ $a_c \leq 5.6\text{m}$

となる。

この結果と表 5.3.1 との比較から、ひび割れを入れるピッチ B は限界流速で決まるケースが多く、有効なひび割れ、特に大きな幅のひび割れを入れる必要があることが分かる。

5) 適用に当たっての課題

静的破碎剤を用いる方法について検討例を示したが、土留め壁に対する地盤の拘束により適用深度は 10m 程度までと考えられている。深い位置にひび割れを発生させるには工夫が必要である。

- ・効率的なひび割れの導入方法

ひび割れ導入方法とピッチ幅の算定方法案を示したが、ひび割れを任意の位置に制御した形で導入する信頼性の高い方法は現在の所、見あたらない。また、ひび割れの導入時期やひび割れを導入する土留め壁の強度によって有効な方法が異なるなどの課題が多い。

- ・発生させたひび割れを水が流れている間にエフロッセンスで閉塞する可能性がある。

多くの、できるだけ幅の広いひび割れを形成させる必要がある。ひび割れ誘発目地のような考え方も参考になる。

- ・ひび割れ発生によって、鉄筋や鋼材の錆発生を引起こすことのないよう配慮する必要がある。出てくる場合もある。

5.3.2 薬液注入工法の薬液の配合と経年変化を利用して通水させる技術の検討

1) 薬液注入工法と経時変化

近年、仮設期間の長期化に対応するための薬液開発および経時変化に関する知見が室内試験によって得られつつある。従来の薬液に関する開発目的は経年的には積極的に劣化させることを目的としていないが、経年変化データからは劣化を積極的に利用できるものも見受けられる。配合ごとの止水効果の持続時間あるいは止水性能の変化が計測、確認ができれば、復水時期と薬液との適切な組み合わせが可能となる。薬液のモル比により注入後 1000 日前後で未注入の地山の透水係数程度までに回復した配合試験例⁴⁾を図 5.3.3 に示す。アルカリ生成物量が多くなると、劣化が大きい。同じく図 5.3.4 に透水係数を長期的に実験室レベルで計測した事例⁵⁾を示す。これは、特殊水ガラス主剤 HM の働きにより、ゲルの収縮、 SiO_2 の溶脱を低減した耐久性に優れる薬液で、かつ緩結型で浸透性もよいため都市部での近接大規模止水壁工事の補助工法として選定されることの多い材料の例である。この例でも約 3 年間は一定の止水性を維持しているが、3 年経過後に著しく劣化が進行していることが分かる。

地盤との相関については、長期加圧透水下では、動水勾配が大きいほど、砂の粒径が粗くなるほど、相対密度がゆるいほど、長期止水性は低下する傾向があることが定性的傾向として報告⁶⁾されている。

2) 適用性

一般的な開削都市土木工事では、土留め壁による止水から埋戻し完了までが 3 年程度の場合

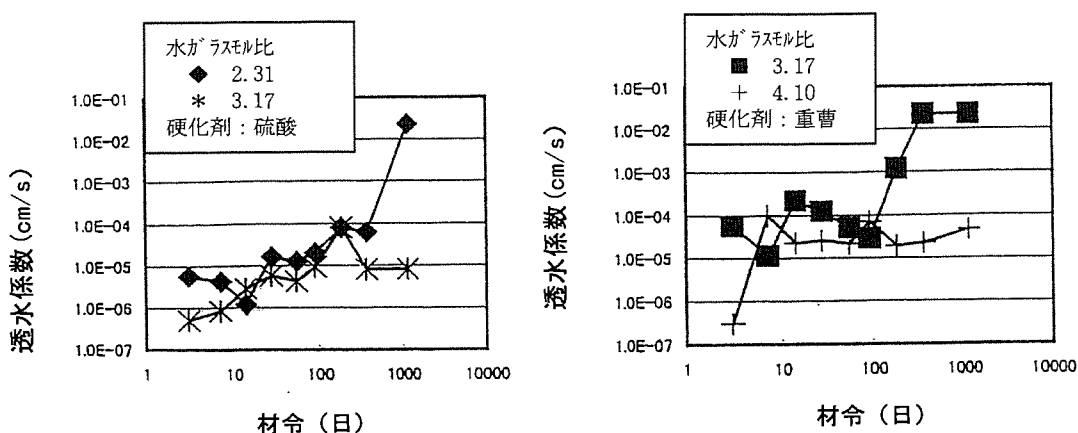


図 5.3.3 水ガラスのモル比が止水性に及ぼす影響確認例⁴⁾に加筆

合が多く、適当な材料を選定することにより、止水性と復水効果を両立させることが期待できる。有効期間の設定が可能な薬液の開発が望まれる。

3) 留意点

具体的に適用する場合の留意点として以下のような項目が考えられる。

- ・元々透水性のある地盤が対象なので、地下水流速を考慮してゲルタイムの短い薬液を選定して希釈に対応する。
- ・早期劣化が見られたときに追加注入可能なように、2重管ダブルパッカー工法の採用が望ましいが、ゲルタイムの短い材料に対応できないことも考えられ、2重管複相注入も有用である。
- ・土留め壁欠損幅に応じて、応力上必要であれば両サイドの芯材をサイズアップしておく。
- ・欠損幅が大きいと薬液注入改良体のみでは土圧や水圧に抵抗できないため、横矢板等の補助工法が必要と思われる。
- ・薬液注入はセメント系ジェットグラウトよりも強度が劣るので、施工中は欠損部に対する補強として鉄板を貼るなどして不慮の出水を回避する。埋戻し時にはこれらの鉄板を切断撤去する。
- ・劣化した薬液が地下水流によって拡散することを考慮し、できるだけ無機系の材料を選定する。
- ・基本的にある一定期間経過後に性能が低下することを期待するものなので、事前の材料選定段階で十分試験、検討を行い、本施工に支障のないことを大前提とする。

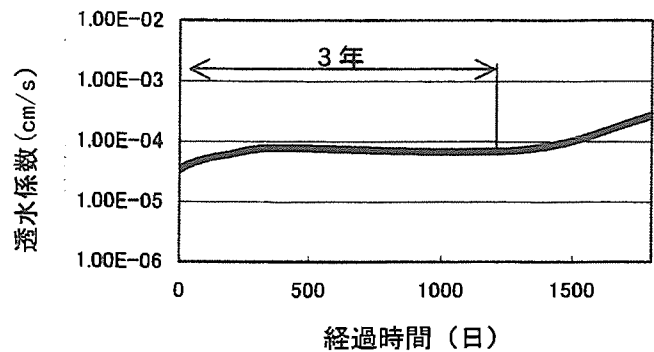


図 5.3.4 透水係数の経年変化の測定例⁵⁾

5.3.3 部分的に凍結させた土留め壁を利用して通水させる技術の検討

1) 既往の事例

地下水流動保全工法として、凍結工法を利用したドイツの地下鉄工事の例⁶⁾がある。土留め壁は RC 地中連続壁で、1.5m の歯抜け部を残して施工し、掘削開始前に、この歯抜け部に凍結工で凍土を造成し、掘削中の土水圧に抵抗させる。構造物下部および側部に透水性材料で通水層を作り、構造物完成後に凍土を解凍することで上流側から下流側へ通水させている。

2) 凍結工法を採用した場合の特徴

- ・土留め壁周辺の地盤を乱さない
土留め壁を施工しないため、安定液の浸透や泥膜の影響、打設コンクリートの浸透などの影響が小さい。
- ・広い浸透面積の確保が容易
- ・浸透幅の変化などへの対応は容易なため、目詰まりしにくい通水施設となる。
- ・通水流量の確認が困難で、維持管理対策が困難。
- ・費用が高い
- ・凍土造成のプラント設備が必要で、配管長が長くなることは好ましくない。
- ・工事期間中の凍土厚・凍土温度の維持管理が必要。

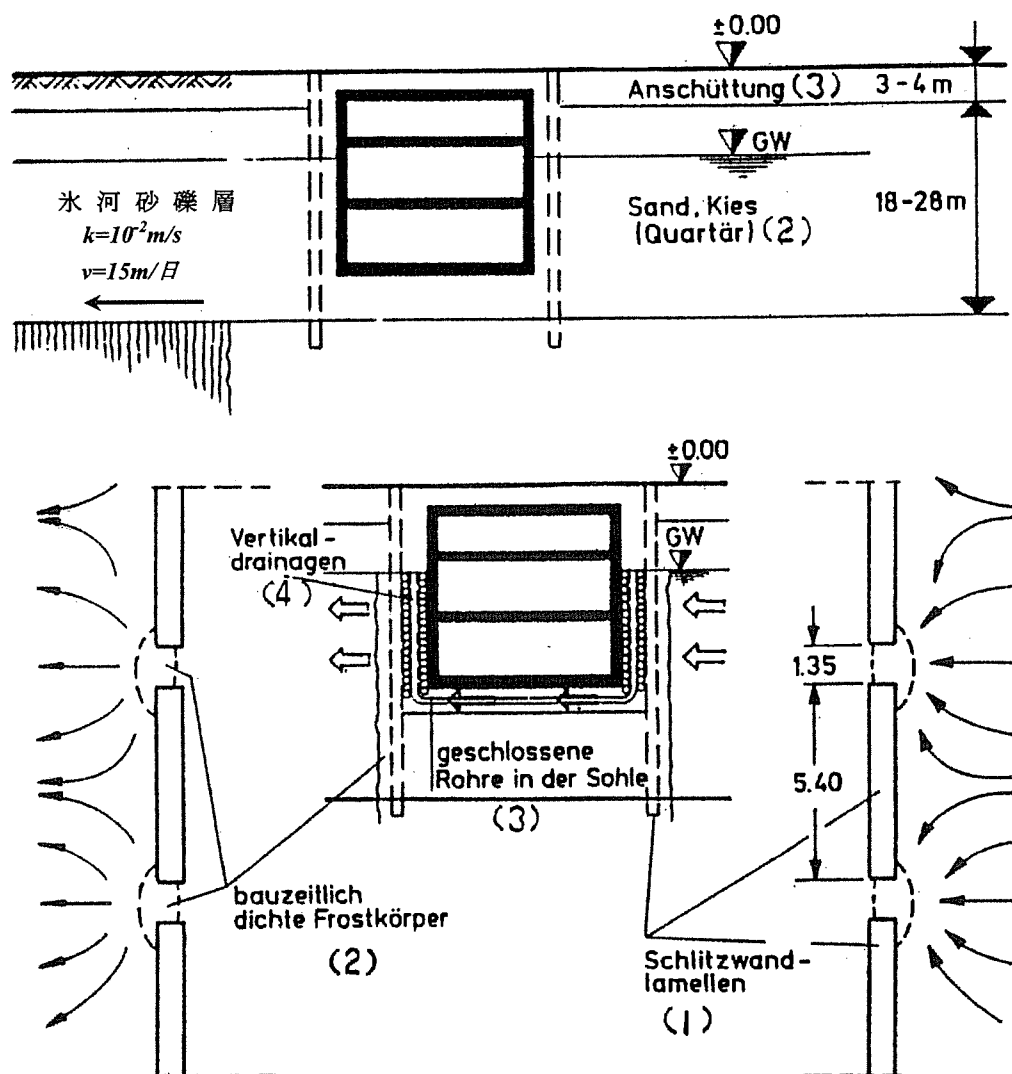


図 5.3.5 ドイツの凍結工法を適用した地下水流動保全例 ⁷⁾に加筆

3) 凍結工法を適用したケーススタディ

(a) 検討条件

想定した構造物と土留め壁深度、帯水層の位置関係を図 5.3.6 に示す。土留め壁の施工方法は柱列式連続壁としている。遮断される帯水層が深く、構造物がこの地層よりある程度浅い位置に計画されているために土留め壁の撤去やサイフォン構造による迂回浸透工法の適用は困難である。

(b) 凍結工による開口部設置

通水のための開口部はソイルセメント壁を造成せずに、芯材だけを設置する。

凍結範囲は通水開口部に対して上下左右+2.0m の限定範囲とする。

4) コスト試算例

凍結工はコストが高いと認識されている。以下に、本条件でのコスト試算例を示す。

(a) コスト試算条件

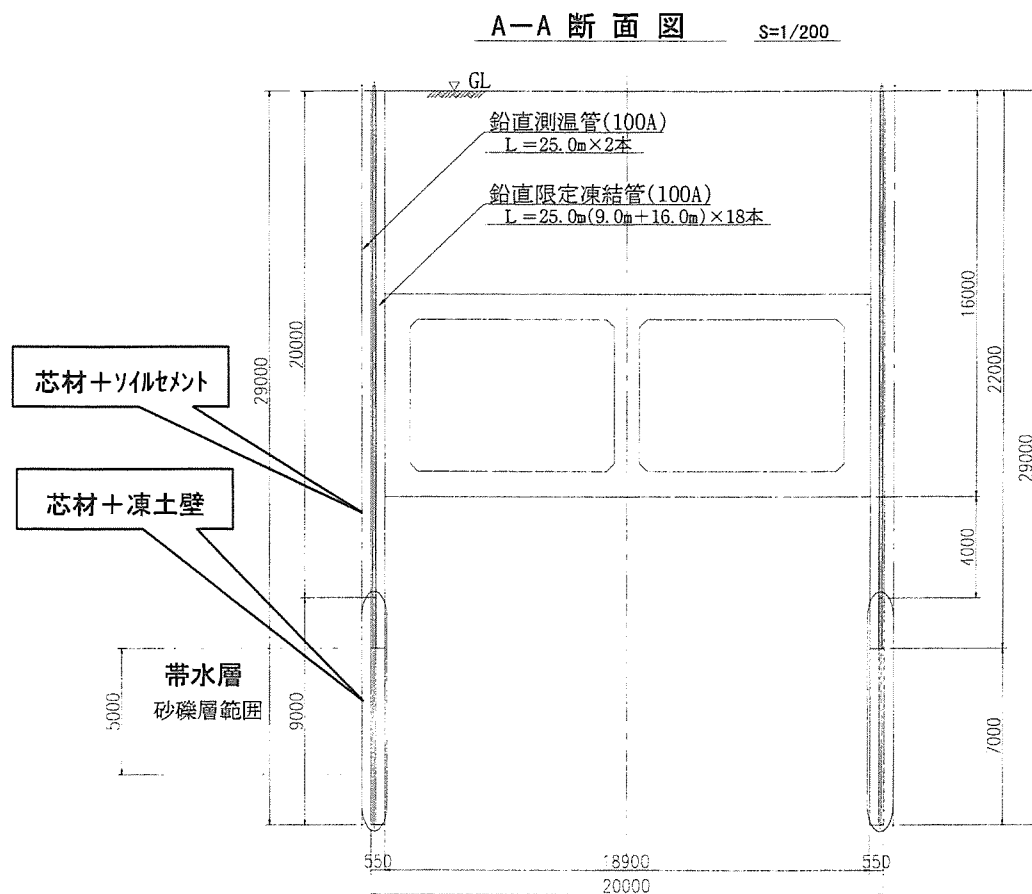


図 5.3.6 土留め壁と帯水層、構造物との関係

①凍土造成ヶ所数

凍土造成のためのブライン液の冷却・循環プラント設備を設置する。1 プラント施設で何ヶ所の凍土造成を担当するかでプラント費用が異なってくる。

②凍土維持期間 3 年

通常、凍土の平均温

度は-10℃程度に設定されるが、この温度を工事期間中維持することになる。この工事期間中の凍土壁の維持費用もコストに大きく影響する。当然ながら、地中温度や地下水条件により、凍土からの熱の放熱条件が異なればプラントの稼働動力費用やプラントのメンテナンス費用も異なってくる。自動運転導入などによる管理費用の削減も検討する必要がある。止水効果のみを期待する場合には凍結及び管理温度の設定値の見直しも必要である。

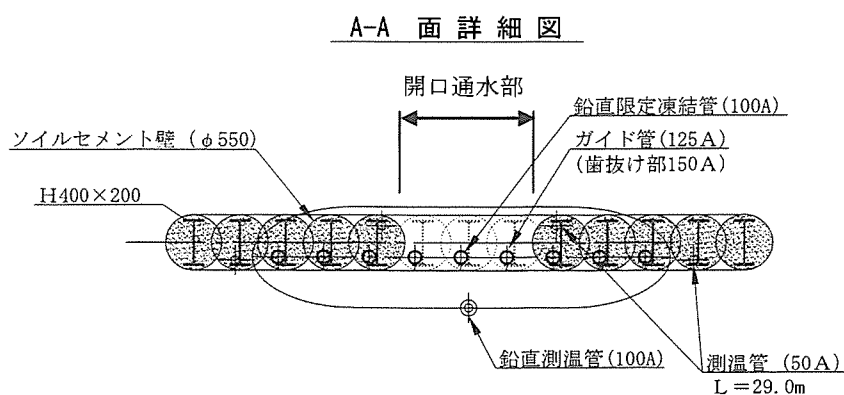


図 5.3.7 柱列式土留め壁断面、凍結管配置

(b) 試算結果

試算結果を図 5.3.8 に示す。試算結果は上記の条件を考慮して、凍土壁の設置ヶ所数（通水施設の設置ヶ所数）を変化させ、また自動化による可能なコスト削減等を配慮し、費用の上限および下限相当の費用を算定したものである。

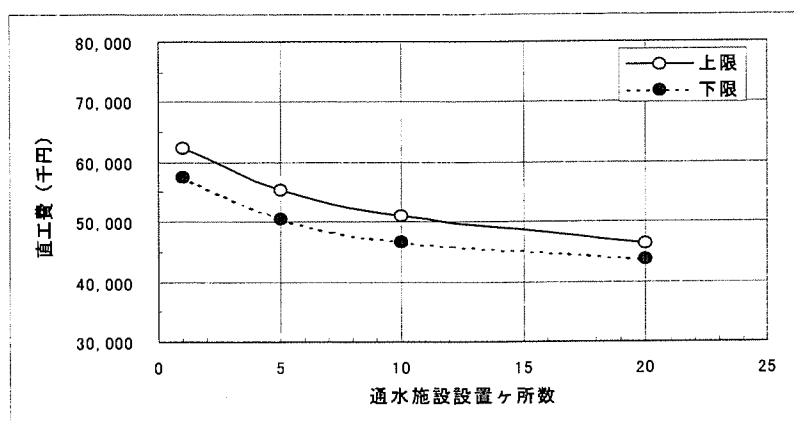


図 5.3.8 通水施設の設置ヶ所数と推定費用

横軸は通水施設数とし、縦軸は通水施設 1 ヲ所当たりの凍結工の費用で整理している。

なお、凍土壁造成面積（当例では 5.5m×9.0m）の多少の増減はコストにあまり敏感ではない結果となっている。

5) 凍結工法を採用に当たっての留意点

以下に凍結工法を採用するに当たっての留意点を示す。

・ 事前準備

土留め壁の芯材 H 鋼杭建込み時に、凍結管挿入用のガイド管（開口部：150A、その他 125A）を芯材に沿わせて設置する。また、温度測定のための测温場所には测温素子挿入用の 50A 程度の管を同様に設置する。

・ 維持期間中の凍土成長

所定の凍土壁造成完了後の維持期間（掘削—構造物築造—埋め戻しの期間、当例では約 3 年）にも、凍土壁は成長を続ける。帯水層の砂礫層上下部の粘性土地盤は凍結膨張による凍上等の問題が発生することが懸念される。このために、冷凍機の間欠運転、凍結管の間引き運転等により凍土成長を制御する必要がある。

この際、柱列壁としての止水性を確保するため、凍結の状態を地中温度により確認しながらの制御となる。解凍が発生すると地下水の浸透により、パイピングや盤ぶくれが発生することになるので注意が必要である。

・ 凍土の解凍

埋め戻し完了後、凍結を停止しても凍土はすぐには解凍しない。このため、工事終了後直ちに通水を開始する必要がある場合は、凍結管に温水を循環することにより解凍を促進する。なお、自然解凍で完全に解凍が完了するのは一年以上かかると考えられる。

・ 地盤の塩分含有量

地盤に塩分が含有されている場合には、若干凍土造成日数が延びる。

・ 砂礫層の自然地下水流

土留め壁造成に伴い、ダムアップにより土留め壁開口部（ソイルセメント壁の未施工部分）の地下水流が一時的に早くなる。この対策として、土留め壁の未施工部分を残しておいて凍土造成を行なうか、地下水流を低減させる処置が必要な場合も出てくるものと思われる。

5.3.4 井戸の利用

(1) マルチレイヤーウェル（仮称）の考え方

地下水の水位差を調整する方法として、井戸の利用は古くから用いられている。このような井戸の原理は現在の工事においても利用されている。例えば、ディープウェルで汲み出した水をリチャージウェルによって戻す方法がその一つである。この応用として、異なる帯水層の地下水を他の帯水層に戻す事により、地下水の水位を調整できれば、地下水流動保全工法としての可能性が期待できる。

ここでは、自然水位を利用した井戸の復水工法の考え方を紹介する。

簡単な例で考えると以下ようになる。

異なる帯水層の井戸の水を抵抗のない管で連結したと仮定する。各帯水層には異なる水位が存在しているが、各々の井戸を管で連結すれば、高い水位の地下水は、低い水位の井戸へ流れ、水位（水頭差）が同じになったところで釣り合うことになる。

(2) マルチレイヤーウェル（仮称）のイメージ

1) 深い帯水層の被圧水を利用した地下水の低下した帯水層のダムダウン対策案

構造物を設置する場合、深い帯水層を遮断することは少なく、深層地下水の流れ（方向、流量）を把握できれば、深層帯水層と浅い帯水層の被圧水頭差を利用することにより、下層の地下水が上層へ流れ込み、異なる帯水層の水位調整は可能となる。

上層が被圧帯水層であれば、各層の水頭差が無くなった位置でつりあ

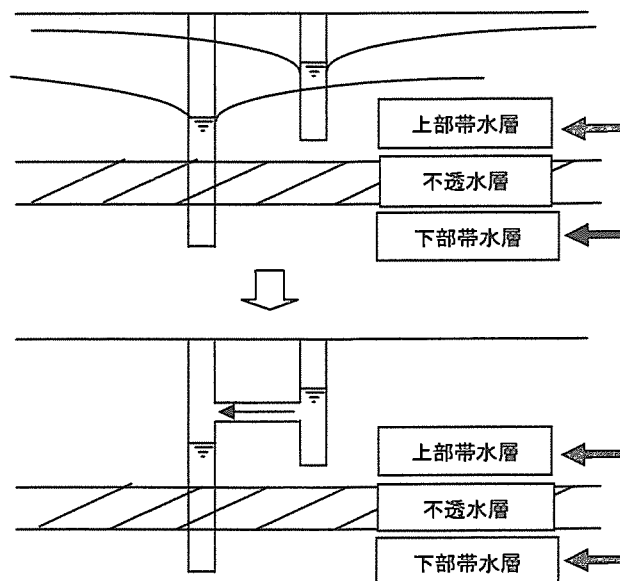


図 5.3.9 マルチレイヤーウェルのイメージ図

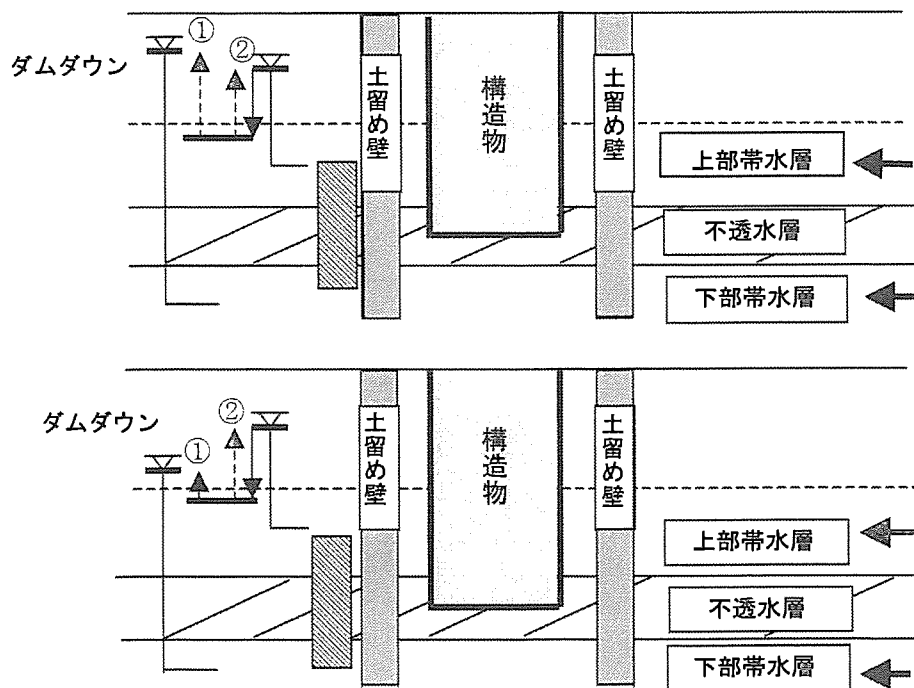


図 5.3.10 ダムダウン側での考え方

うと考えられる（図 5.3.10 の上段図、①と②の間）。上層が不圧帯水層であれば、第二帯水層の被圧水頭までは復水すると考えられる（図 5.3.10 の上段図、①）。

上層が被圧帯水層であれば、下層の水頭位置が第一帯水層の水頭位置より低い場合は、第二帯水層の被圧水頭までは復水すると考えられる（図 5.3.10 の下段図①とダムダウン時の水頭の間）。

2) 浅い帯水層を深層へ涵養することでの上流側でのダムアップ対策案

上層帯水層の自由水位（被圧水頭）が下層の被圧水頭より高ければ、上層の水は下層へ流れようとし、異なる帯水層の水位調整が可能となる。

上層が被圧帯水層の場合、各層の水頭差が無くなった位置で釣り合うと考えられる（図 5.3.11、③と④の間）。上層が不圧帯水層であれば、下層の被圧水頭まで水位は低下すると考えられる（図 5.3.11、④）。

上層が被圧帯水層で、下層の水頭位置が第一帯水層より水頭位置より高い場合は、第二帯水層の被圧水頭まで復水すると考えられる（図 5.3.11 下段図、ダムアップ時の水位と③の間）。

以上のように、上層帯水層の自由水位（あるいは被圧水頭）が下層の被圧水頭より高い場合、水位調整が可能と考えられる。

3) フィルター層の設置について

井戸内の流れによっては、帯水層内の細粒土分や砂分が流出し、帯水層内の透水係数が変わってしまうことも考えられる。したがって、帯水層間にフィルター層の設置が望ましい。フィルターの材料については、自然流下であることを考慮すれば、帯水層間の流れを阻害しないように透水係数が良いこと。フィルター層の目詰まりが起らないような粒径、粒土分布が必要である。

4) 透水係数について

透水係数は、一般の文献等⁸⁾を参考にして決定するが、透水試験等を実施し、決定することが望ましい。

(3) 適用不可能なケース

適用できないケースを図 5.3.12 に示す。次の3ケースがある。被圧帯水層の地下水位の影響範囲は、不圧帯水層より広いため、周囲への影響（井戸枯れ、沈下など）が大きい。被圧帯水層の状況を適切に把握しておく必要がある。

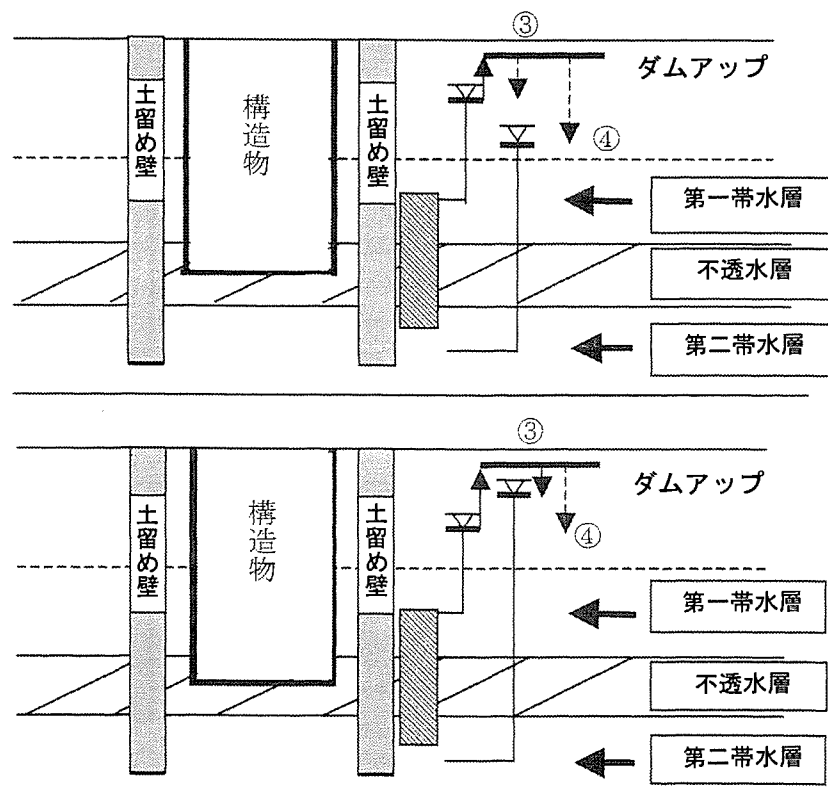


図 5.3.11 ダムアップ側での考え方

①第一帯水層のダムダウン時の水位より第二帯水層の被圧水頭が低い場合。

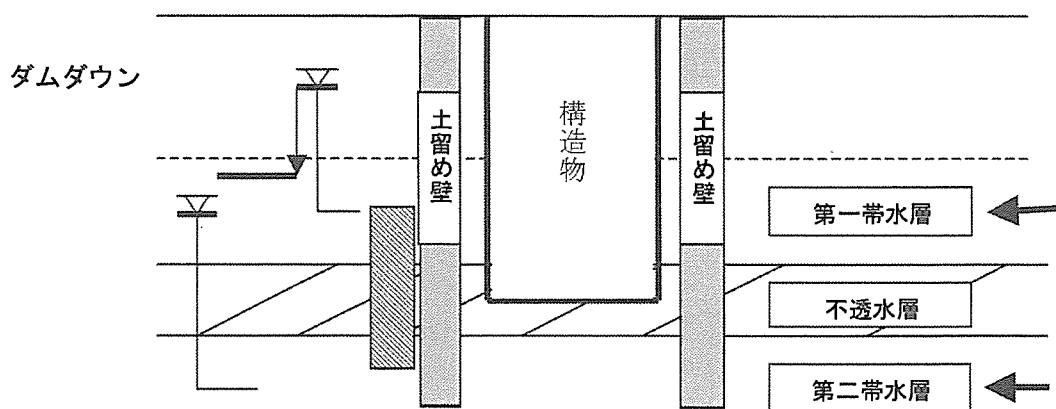
第一帯水層の地下水は第二帯水層へ流れようとするため、逆に第一帯水層の地下水低下を招くので、適用は不適である。

②第一帯水層のダムアップ時の水位より第二帯水層の被圧水頭が高い場合。

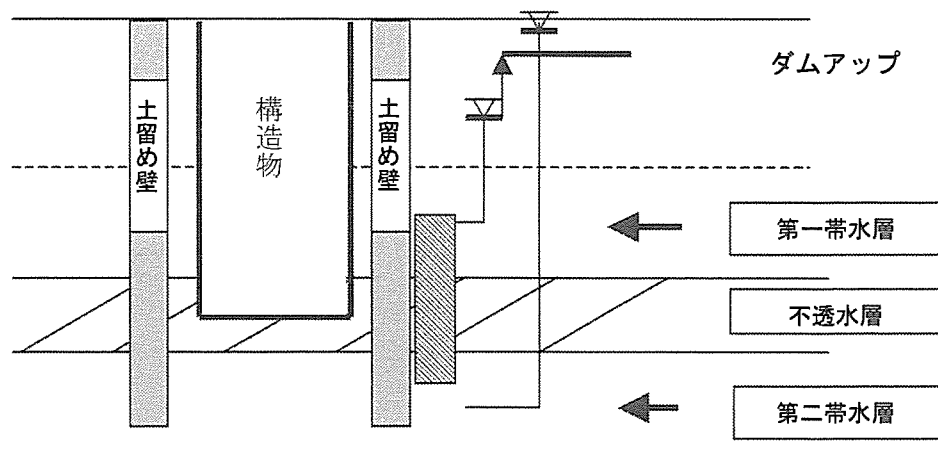
下層の被圧水頭がダムアップ時の水位より高い場合は、地下水は下層へ流れようとはしない。このような箇所への適用は不適である

③帯水層の水質が汚染されている場合や汚染が予測される場合。

帯水層間を連結することは恒久的な対策としては適用不可である。短期間の場合は連結管内に適切な汚染除去フィルターを設置することも考えられる。



a) ダムダウン時の水位より第二帯水層の被圧水頭が低い場合



b) ダムアップ時の水位より第二帯水層の被圧水頭が高い場合。

図 5.3.12 適用できないケース

(4) 計算例

井戸公式を応用して、マルチレイヤーウエルの効果を推定してみる。

今、第一帯水層、第二帯水層を被圧層と考えた場合、各層の井戸の中に流れる流量 Q は以下のように求められる。なお、水位の釣り合い位置を H とする (図 5.3.13)。

第一帯水層の流量は

$$Q_1 = 2\pi r_1 D_1 v_1$$

$$= \frac{2\pi k_1 D_1 (h_1 - H)}{\ln(R_1 / r_1)} \quad \text{----- (5.7)}$$

同じく、第二帯水層の流量は

$$Q_2 = 2\pi r_2 D_2 v_2$$

$$= \frac{2\pi k_2 D_2 (H - h_2)}{\ln(R_2 / r_2)} \quad \text{----- (5.8)}$$

ここに、

Q : 流量

k_1 : 第一帯水層の透水係数

k_2 : 第二帯水層の透水係数

D_1 : 第一帯水層の層厚

D_2 : 第二帯水層の層厚

R_1 : 第一帯水層の影響範囲

R_2 : 第二帯水層の影響範囲

各帯水層の井戸の半径、流入、流出量も同じと考え、 $r_1 = r_2 = r_0$ 、 $Q_1 = Q_2$ とする。

今、簡略化のために各帯水層の影響範囲 R を同じと考え、 $R_1 = R_2 = R_0$ とすると、

式 (5.7)、(5.8) より、

$$\frac{2\pi k_1 D_1 (h_1 - H)}{\ln(R_0 / r_0)} = \frac{2\pi k_2 D_2 (H - h_2)}{\ln(R_0 / r_0)}$$

$$k_1 D_1 (h_1 - H) = k_2 D_2 (H - h_2) \quad \text{----- (5.9)}$$

となる。これより、

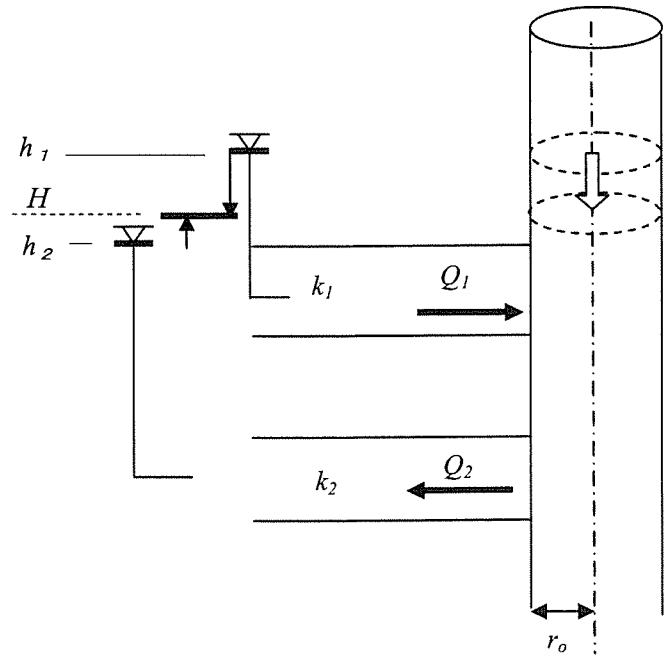


図 5.3.13 マルチレイヤーウエルのモデル化

$$H(k_1D_1 + k_2D_2) = k_1D_1h_1 + k_2D_2h_2$$

$$H = \frac{k_1D_1h_1 + k_2D_2h_2}{k_1D_1 + k_2D_2} \quad \text{-----}(5.10)$$

一般的なケースでは、式(5.10)から平衡水位 H が求まり、マルチレイヤーウェルによる井戸周辺のダムアップ側における水位低下効果 (h_1-H)、ダムダウン側における水位上昇効果 ($H-h_2$) が推定できることになる。

ただし、不透水層への漏水や、同一層内での水平方向の流れは無視している。

仮に、帯水層の条件がほぼ等しいとして

$$k_1D_1 = k_2D_2 = k_oD_o \quad \text{-----}(5.11)$$

とすると、

$$H = \frac{h_1 + h_2}{2} \quad \text{-----}(5.12)$$

となり、ダムアップ（あるいはダムダウン）水位と第二帯水層の水位との中間で釣り合うことがわかる。

(5) 実用化に当たっての問題点

これまでに述べてきたマルチレイヤーウェル（仮称）に関しては、あくまでもイメージの域であり、実用化に当たっては更なる検討の上、解決しなければならない問題点がある。

- ・ 不圧帯水層が降雨の影響を敏感に受けるのに対し、被圧帯水層は季節的な変動が大きく、両者の水頭バランスは常時変化するため、時期によっては十分な通水効果が得られない。ダムダウン側では、さらに地下水位が下がることもあり得る。
- ・ 被圧帯水層の地下水位の影響範囲は、不圧帯水層より広いため、周囲への影響（井戸枯れ、沈下など）の予測が難しい。
- ・ 詳細検討する場合は三次元浸透流解析等で行なうことになるが、境界条件や初期条件設定が難しい。
- ・ 解析を行なう際には、不圧帯水層と被圧帯水層を結ぶ通水層を適切にモデル化する必要がある。
- ・ 異なる帯水層を連結した場合の水質変化および水質汚染等が発生することも考えられるため慎重な配慮が必要である。

5. 4 おわりに

既存の技術を活用した地下水流動保全工法の可能性について検討した成果について報告した。すぐに採用できる工法まで検討レベルは高まっていないが、本格的な対策工としてよりも、小規模であるが可能性のあるケース等での地下水流動保全の対策工の検討資料となれば幸いである。

以下に、開削WGで検討したものの成果の取りまとめまで到らなかった開削工法に関する今後の課題を示す。

1) 構造物群による地下水流動阻害に関する検討

大都市では連続ではないが、大規模な構造物が隣接して構築されるケースが多い。主要駅に沿う構造物群や幹線道路沿いの構造物などがあげられる。これらの構造物は多くの場合は敷地面積一杯の地下階を持ち、また地下街や地下通路と接続しているケースも多い。

個々の構造物としては地下水流動に与える影響は少ないが地区全体としては地下水の流路を遮断する事になる。このような場合の対策工については、今後の課題といえる。

2) 地下水環境の変化による影響に関する検討

浅い帯水層の大雨等による短期的な水位上昇による影響や深い帯水層の長期的な水位回復により地下構造物が大きな影響を受けることがある。一般的には地下構造物に働く揚圧力に関する安定問題として地下水位の変動が取り扱われるが、地下水流を遮断することで地下水位の変動が大きくなり、安定問題にも大きな影響を与えていることも考えられる。

このような広域的な地下水位の変動による影響についても今後の検討課題といえる。

3) 地下構造物による新たな地下水流動の発生に関する検討

地下水流動保全工法を検討する多くのケースは、構造物による地下水流動の遮断による影響についてであり、主に、構造物を挟んだ上流側と下流側という概念で分類された影響検討である。ところが、地下水流の遮断による影響の他に、構造物の築造によるその他の影響についても懸念されている。その一つに、構造物や土留め壁に沿う新しい地下水流動が発生するケースが考えられる。新しい地下水流動が発生すると、採用した地下水流動保全工法の効果が損なわれることになる。また、構造物に沿う流れにより、水圧の増減による構造物の安定が損なわれることも考えられる。

遮断した地下水の構造物に沿う流れの発生の上に、構造物の路線方向のレベル変化により、新たな帯水層間のみずみちが構造物に沿って形成されることも考えられる。

このような構造物に沿う地下水流動の発生原因として、構造物周辺の良質土による埋め戻しの影響や土留め壁周辺や掘削以深の地盤の乱れによる透水係数の変化、広域的な地層や地下水条件と構造物の相互関係に対する配慮不足などが考えられるが、今後の大きな課題と言える。

参考文献

- 1) 地下水流動保全工法に関する研究委員会：地下水流動保全工法、2002年6月。
- 2) 古本一司・三木博史、地下構造物の地下水流動阻害要因について、基礎工、2002. 04、p34-p37
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書〔施工編〕、2002年版、p32。
- 4) 古城誠：水ガラス系薬液の耐久性に関する考察（第5報）、第36回地盤工学研究発表会、p809-p810、2001年6月。
- 5) トクヤマエムテック：ジオキープ緩結#130の耐久性に関する技術資料、2001. 10。
- 6) 米倉亮三・島田俊介：薬液注入における長期耐久性の研究、土と基礎、vol. 40、No. 12、p17-p22、1992. 12。
- 7) Albert Weiler・Jöchen Vagt: The Duisburg Method of Metro-Construction, a Successful Application of the Gap-Freezing-Method, The 2nd International Symposium on Ground Freezing(The Norwegian Institute of Technology)、p916-p927、June 24-26、1980。
- 8) 例えば、地盤工学会：根切り工事と地下水、現場技術者のための土と基礎シリーズ

6. 非開削トンネル工法の地下水流動保全工法

6. 1 本章の位置付け

従来より開削トンネルの地下水流動保全についての研究を行ってきた。本章は、新たに NATM やシールド等の非開削トンネルについてもその影響、考えられる対策工等について知見を取りまとめた。

6. 2 トンネルの地下水流動阻害

6.2.1 現在までの背景

NATM やシールド等の非開削トンネル工法は、直接地盤を掘削するために地下水流動の保全方法が難しく、今までは環境条件や地山条件に地下水流動保全の問題が少なかったことなどから、具体的な対策を施さないで施工するのが一般的であった。また、地下水の処理対策は、事後において地下水被害が生じたときに初めて施されるのがほとんどである。これは、NATM（山岳工法）が、切羽の安定を確保するため、排水工法により地盤の地下水を流下させ、あるいは水位が高い場合や被圧水がある場合には水位を下げながら施工を進めるためである。また、二次覆工施工後も地盤の水位が上がらないようにトンネル縦断方向へ流下させることを前提にトンネルが建設されたためである。

山岳トンネルの事後対策の例では、流下した水をポンプアップで渇水した水田や畑または水路に返すか、代替え井戸等による補償方式の例が多い。これらは、ポンプの維持管理や、運転費など将来にわたり補償しなければならず、設備的にも大変な工費がかさむこととなる。

一方、都市部での NATM の施工や、被りの薄い透水地盤や水田の下を通過する場合などでは、しばしば地盤の帯水層や水みちを遮断したりトンネルの横断により地下水の流下が妨げられ、地盤沈下や周辺地下水利用、植生への影響など地下水変動に起因する被害が生じ、永久的な地下水保全対策が求められるケースが増えてきた。山岳トンネルにおいても湧水や地下水利用への影響を考慮した地下水流動保全対策が求められるケースが増えてきている。

また最近の都市 NATM の施工にあってはシールド工法よりも経済的な理由から二次覆工を防水、耐圧型として設計し、地下水位を復元させて地下水保全対策を前提とする設計の必要性や要求が強い。

6.2.2 影響評価項目と評価方法

(1) 環境影響評価

環境影響評価では、トンネルの施工・設置に伴う影響項目（地盤沈下など）が、どの程度の影響範囲、影響程度を受け、環境問題が発生する可能性があるかを検討する。また、環境影響が生じる場合は、必要に応じて環境保全措置を考慮した環境影響評価を実施する。

まず、トンネルの施工・設置に伴う直接的な現象項目（地下水位の変動など）への影響を定量的に評価し、現象項目と影響項目の関連性から影響項目への影響程度を評価する。

① 現象項目

地下水環境に影響を及ぼす発生原因（誘因）と現象項目との関連を表 6.2.1 に示す。

表 6.2.1 地下水環境に及ぼす発生原因（誘因）と現象項目¹⁾に加筆

	地下水対策	施工法	工法例	発生原因(誘因)	現象項目
施設の 施工時	排水を主体とする工法	開削	ディーブウェル	・ 地下水の揚水	・ 地下水位の低下
		非開削	都市部山岳工法	・ 坑道への出水	・ 地下水位の低下
	止水を主体とする工法	開削	止水壁、薬注	・ 止水壁の構築による地下水の流動阻害	・ 地下水位の低下 ・ 地下水位の上昇
				・ 薬液、濁水の拡散	・ 施設周辺の水質汚濁
		非開削	シールド、止水壁併用都市部山岳工法	・ 補助工法として地下水位を低下させる	・ 地下水位の低下
				・ トンネル周辺の水みち発生による異なる帯水層間の連続化	・ 地下水位の低下 ・ 地下水位の上昇 ・ 水質悪化(土壌汚染源の拡散)
				・ 圧気による酸素の供給	・ 化学反応(酸化)
				・ 薬液・濁水の逸散	・ 施設周辺の水質汚濁
施設の存在及び供用			・ 地下水の流動阻害	・ 地下水位の低下 ・ 地下水位の上昇	
			・ 施設内への漏水	・ 地下水の低下	
			・ 地下地盤(帯水層)の現象による地下水貯留域の減	・ 地下水位の上昇	
			・ 熱源の供給	・ 地下水温の変化	

② 影響項目

現象項目と自然環境や生活環境に不利益となる影響項目との関連を表 6.2.2 に示す。

表 6.2.2 現象項目から生じる影響項目（自然環境や生活環境に不利益となる事象）¹⁾に加筆

現象項目		影響項目 (環境や住民生活の不利益として具現化する事象)
地下水位の変動 地下水の流動阻害	地下水位の低下	・ 有効応力の増加による地盤沈下 ・ 井戸(浅・深井戸)、湧水の枯渇 ・ 植生をはじめとする生態系の変化 ・ 温泉源への影響 ・ 下記(地下水質の変化)における(化学反応(酸化))および(塩水化)に対する事象
	地下水位の上昇	・ 既設の施設の浮き上がり ・ 既設の施設への漏水・浸水 ・ 液状化抵抗の減少 ・ 植生をはじめとする生態系の変化
地下水質の変化	周辺施設の水質汚濁	・ 水質悪化による生態系への影響や地域住民の健康被害
	化学反応(酸化)	・ 強酸性地下水の発生(海成粘土層)による埋設構造物の腐食 ・ 有毒ガスの発生 ・ 酸欠事故の発生 ・ 地下水利用への弊害
	塩水化	・ 地下水利用への弊害
	水質悪化	・ 生態系への影響や地域住民の健康被害
その他		・ 地下水温の変化 ・ 生態系への影響 ・ 天然ガス(特に沿岸部)の発生による環境被害

(2) 環境影響評価手順

影響評価の概略手順は、図6.2.1に示すとおりである。

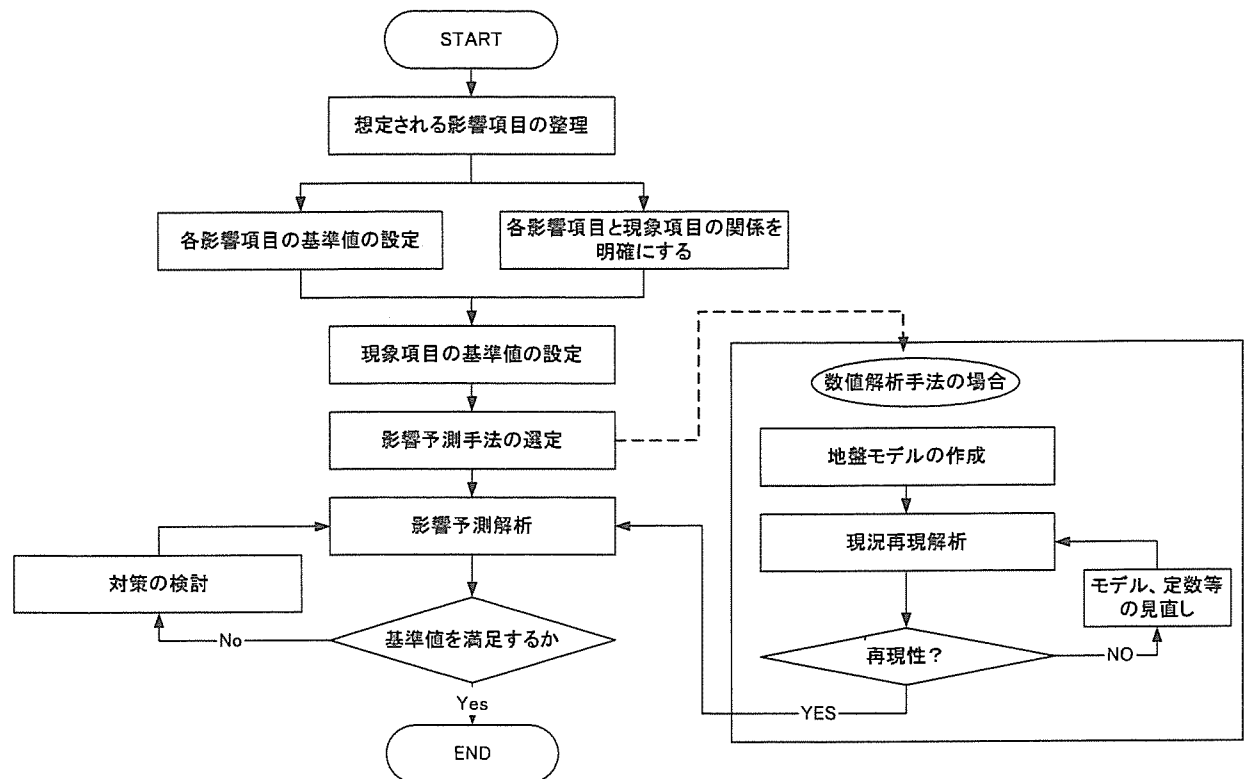


図6.2.1 影響評価の概略手順¹⁾に加筆

以下に想定される影響項目について述べる。

① 想定される影響項目の整理

影響項目は、全ての地盤に対して問題となることはなく、環境条件、地盤条件、地下水・土地利用などの観点から、検討すべき項目を選定する。影響項目は、前項で整理した内容を活用することができる。

現象項目の例としては以下のものがある。

(a) 排水や漏水に伴う地下水位の低下の例

トンネル施設の排水や漏水によって、地下水位の低下を招く恐れがある。NATMにおいては施工技術の発展により都市部での採用が多くなっている。都市部では沖積、洪積層等の未固結地山を対象とする場合が多く、まれに軟弱地盤の下をNATMで施工する場合も見受けられる(図6.2.2参照)。これらの場合、トンネル掘削により透水層の水位が低下し、上方の軟弱地盤が圧密沈下することが考えられる。この圧密現象は盛土等による過剰間隙水圧の消散による圧密ではなく、軟弱層自身の水圧低下による圧密と負圧による圧密現象が考えられ、通常の圧密理論とは異なるものといえる。

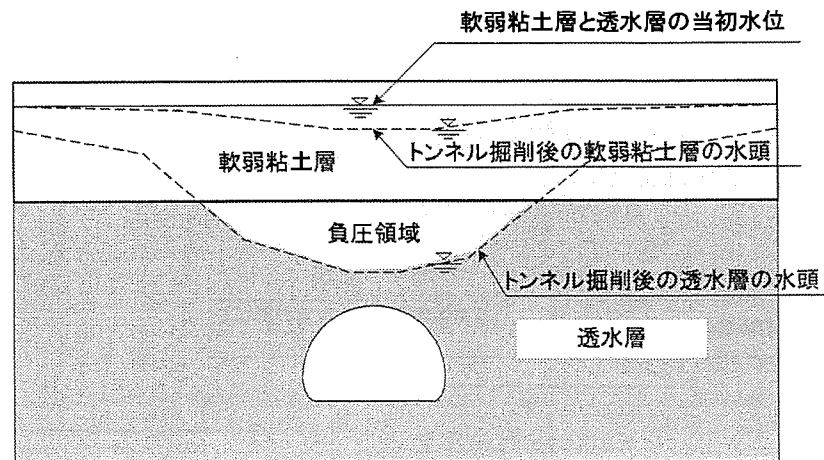


図 6. 2. 2 排水や漏水に伴う地下水位の低下の例

(b) 非開削トンネルの施工・設置による地下水流動阻害の例

トンネルの施工・設置により、地下水流動が阻害され、その周辺は図 6. 2. 3 のようにトンネルの上流側水位の上昇、下流側の低下が考えられる。この他、亀裂性岩盤中の水みち、断層破碎帯を直接遮断すること等も考えられる。地下水流動阻害により発生する恐れのある影響項目を以下に示す。

- ・ 地下水利用への影響：井戸枯れ、湧水枯渇など
- ・ 地下水質への影響：滞留による水質悪化、供給量低下による水質悪化、塩水化など
- ・ 地盤環境への影響：地盤の湿潤化、液状化抵抗の減少、地盤沈下など
- ・ 構造物への影響：地下構造物の浮力または漏水の増大、杭のネガティブフリクションなど
- ・ 生態系への影響：植生、地中生物への影響、水生生物への影響、水辺の減少など

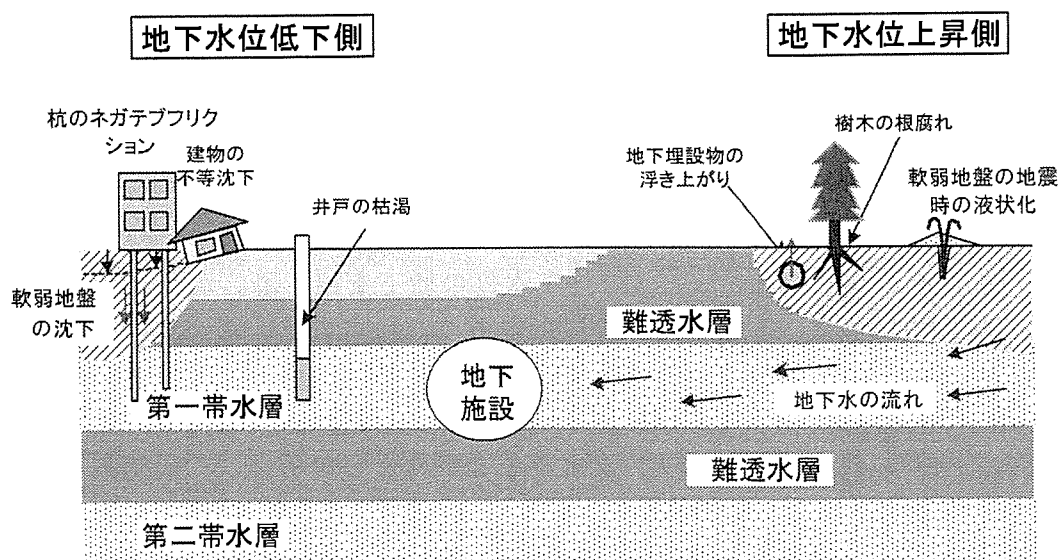


図 6. 2. 3 地下施設の施工・設置による地下水流動阻害の例

(c) トンネル軸方向流れによる地下水位の上昇・低下

トンネルを施工すると、掘削に伴うトンネル周辺地盤のゆるみの発生や覆工と地山との隙間が原因で、トンネル周辺に沿って新たな水みちを形成するおそれがある。この新たな水みちによって、従来の地下水流動が変化し、地下水障害が発生することが考えられる。また、図 6.2.4 に示すように、異なる帯水層の連続化によって一部の帯水層では、地下水位の上昇・低下のおそれがある。

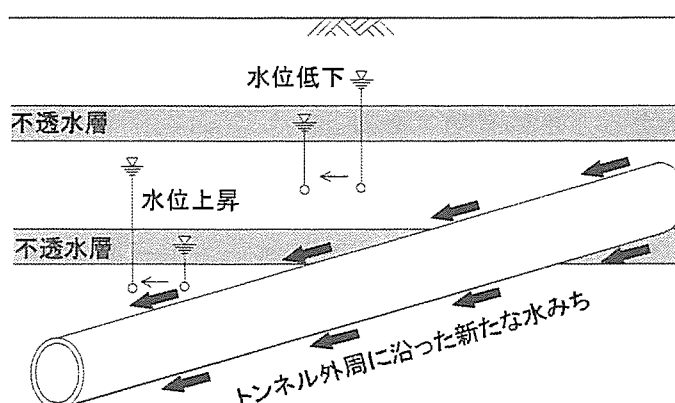


図 6.2.4 帯水層の連続化による地下水位の上昇・低下の例

6. 3 考えられる非開削トンネル工法の地下水流動保全対策工

NATM、シールド等の非開削トンネル工法の地下水流動保全に必要な対策工はトンネルに沿う軸方向流れの防止工法と横断方向流れの保全工法の 2 種類である。

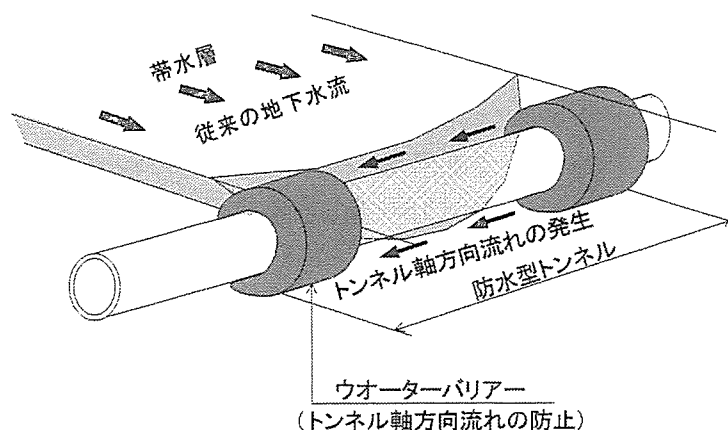
6.3.1 非開削トンネル工法のトンネルに沿う軸方向流れの地下水流動保全対策工

非開削トンネル工法に共通する軸方向流れの原因は、トンネル覆工と地山の間に、施工上どうしても生じる地山のゆるみやこれに伴う地山の透水係数の拡大、一次覆工（吹付けコンクリート）の透水性、一次覆工と二次覆工との隙間や天端部における空洞、シールドトンネルの場合のテールボイド等があげられる。この周辺地山との隙間に沿う軸方向流れは物理的に防ぎようが無く、水理的にはトンネル覆工と地山との間にできる隙間が動水勾配を大きくするため、トンネルの縦断勾配によっては下り側の坑口に流下させてしまうことになる。

非開削トンネルの地下水流動保全の最大の特徴としては第一義的に、この軸方向流れをいかに止めるかが最大の対策工になる。

軸方向流れの有効な防止対策としては以下の方法があげられる。

- ① トンネルを横断交差する帯水層の両側にウオーターバリアー（止水隔壁、バルクヘ



- ッド、キャッピング等)を設置して元の滞水層の流れ方向に水を流す。
- ② 止水裏込め注入による止水。
 - ③ トンネル軸方向流れを生じさせないような凹型のトンネル縦断計画の採用。

6.3.2 非開削トンネル工法のトンネルを横断する流れの地下水流動保全対策工

(1) NATM の場合

① 通水ボーリング工法

覆工コンクリートから通水ボーリングを施し、通水パイプをトンネル内部に施工し、上流側の水を下流側に導水する。比較的、水みちや水脈が明確な場合で大量な導水を必要とするときに有効である。

② 透水シート工法

覆工防水シートの裏面に設置した不織布などの透水シートにより上流側の水を下流側に透水シートを通じて導水する。水量によっては透水シートやマットの厚さを予め調整して通水に支障の無いようにする必要性がある。

③ 排水、透水マット工法

透水シートでは導水しきれないような水脈がある場合などには水量に見合った導水断面を確保すべく厚さの厚いマットを予め地山に設置し導水する。

④ 排水パイプ工法

水みちが点的であるような場合で水圧を持ち、水量が比較的多い場合にはフレキシブルな導水パイプを予め地山あるいは1次覆工に設置し導水する。

⑤ 透水性1次覆工(透水性吹き付けコンクリート)工法

地山からの湧水が全面的で比較的少ない場合には1次覆工の吹き付けコンクリートを透水性のよいポーラスな構造にして防水シートによって面的に導水する。

(2) シールドの場合

① 通水ボーリング工法

覆工セグメントから通水ボーリングを施すか注入孔等を利用して、通水パイプを施工しポイント的に上流側の水を下流側に導水する。比較的水みちや水脈が明確な場合で大量な導水を必要とする時に有効である。

② 透水性裏込め工法

覆工セグメント背面のテールボイドに注入する注入材を硬化後透水性となる注入材で予め施工しセグメント背面の面的な導水を目的に施工するものである。

③ 透水性セグメント工法

セグメントの背面側構造を予め透水性のコンクリート材料で作る内面側は防水、耐圧型の2重構造にしたものである。全面的な導水を必要とする場合に用いる。ただし断面厚が予め大きくなり不経済となるため経済性のチェックを要する。

6.4 地下水流動阻害と対策工案

上述した地下水流動阻害とその対策工案については、未だ確立されたものではないが、参考として、その概念を次に示す。

表6.4.1 帯水層より大きな径のシールド

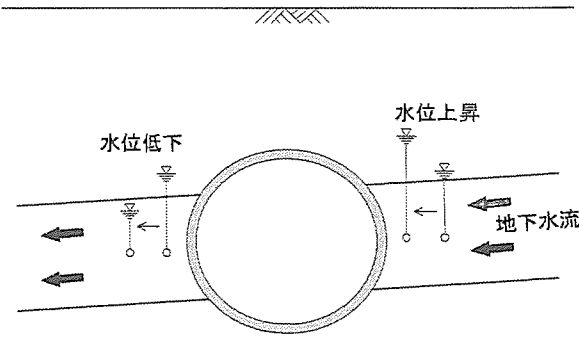
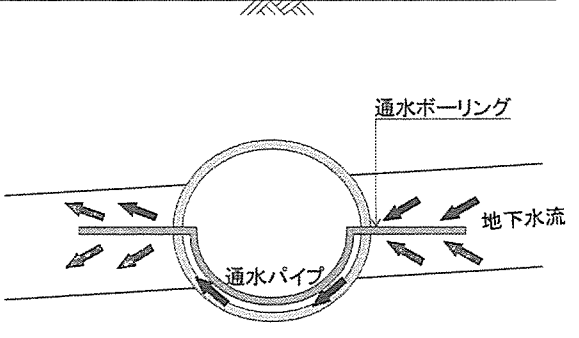
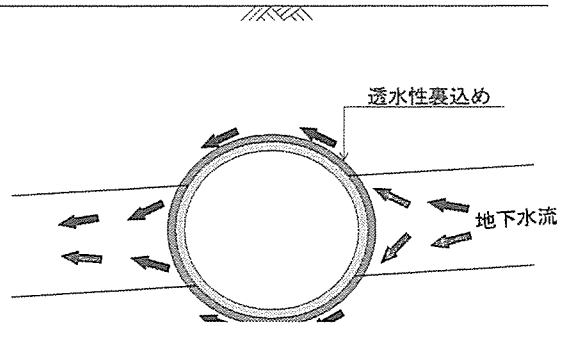
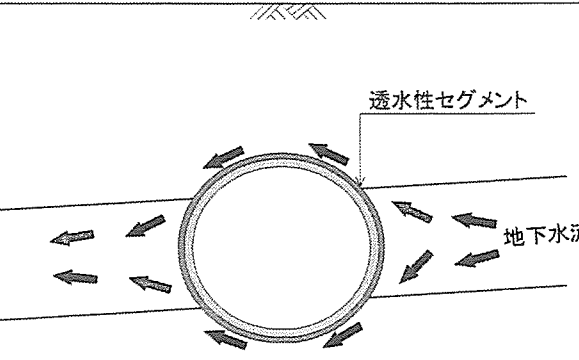
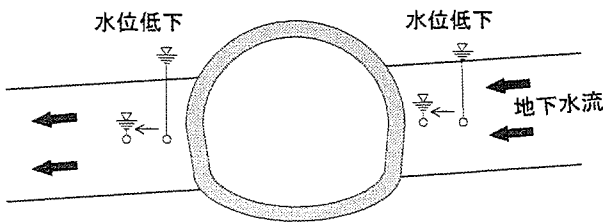
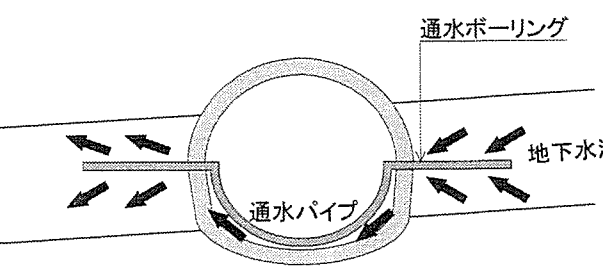
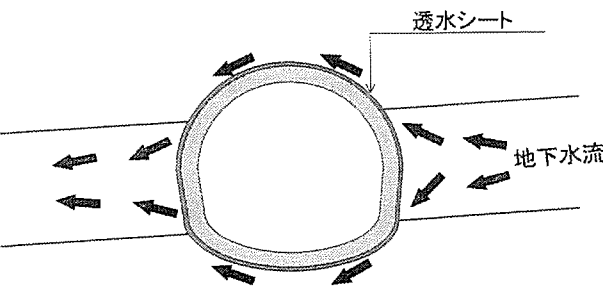
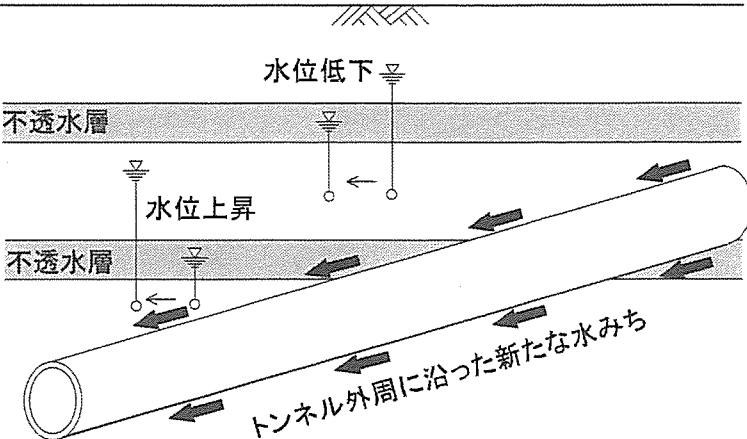
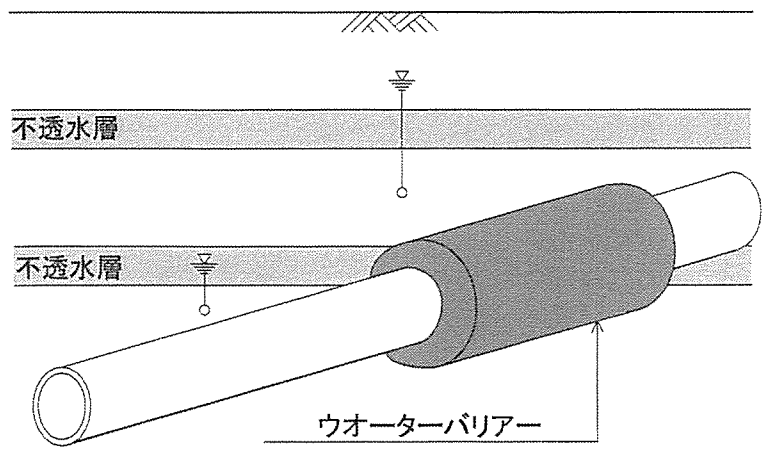
項目	概要図	
<div data-bbox="284 450 316 577">流動阻害</div>		
	<div data-bbox="320 824 352 1032">通水ボーリング</div>	
	<div data-bbox="240 1272 272 1400">対策工案</div> <div data-bbox="320 1249 352 1435">透水性裹込め</div>	
	<div data-bbox="320 1630 352 1861">透水性セグメント</div>	

表6.4.2 帯水層中のNATM

項目		概 要 図	
流動阻害			
対策工案	通水ボーリング		
	透水シート		

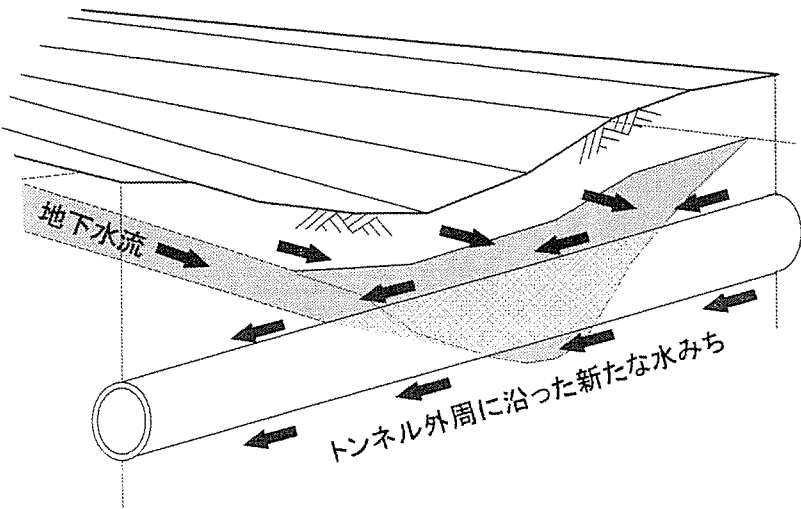
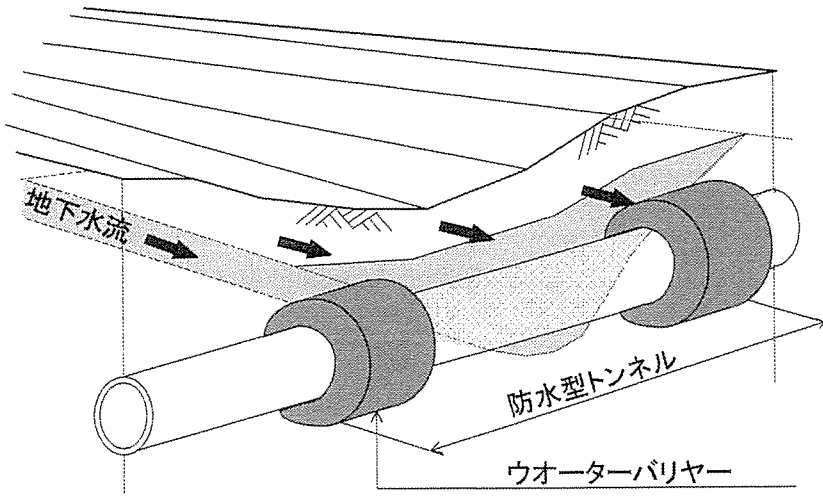
- ・ NATMは防水型トンネル。
- ・ 施工時の対策については、その必要性を含めて検討する必要がある。
(施工時の一時的影響、地下水環境保全の重要度、コスト等)

表6.4.3 複数の帯水層を貫く場合（シールド・NATM）

項目	概要図
流動障害	
対策工案	

- ・シールドの場合、基本的に影響は非常に小さいと考えられる。
- ・NATMは防水型トンネル
- ・NATM施工時の対策については、その必要性を含めて検討する必要がある。
（施工時の一時的影響、地下水環境保全の重要度、コスト等）

表6.4.4 水脈を阻害する場合（シールド・NATM）

項目	概要図
流動阻害	 <p>地下水流</p> <p>トンネル外周に沿った新たな水みち</p>
<div data-bbox="212 1294 248 1429">対策工案</div> <div data-bbox="292 1227 328 1496">ウォーターバリアー</div>	 <p>地下水流</p> <p>防水型トンネル</p> <p>ウォーターバリアー</p>

- ・シールドの場合、基本的に影響は非常に小さいと考えられる。
- ・NATM施工時の対策については、その必要性を含めて検討する必要がある。
（施工時の一時的影響、地下水環境保全の重要度、コスト等）

6. 5 対策事例

現在のところ、少ないながらも対策事例があることから、以下に示す。

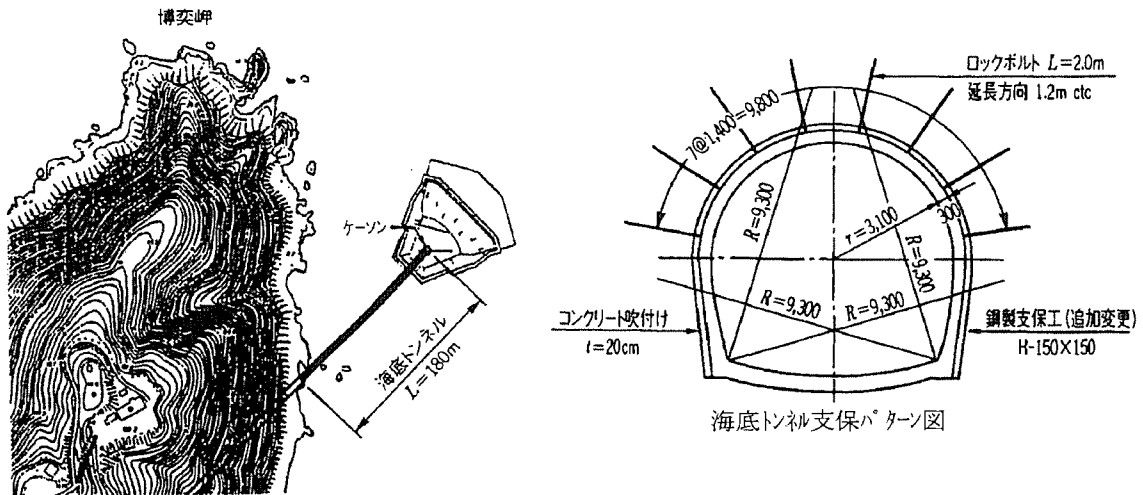
表6.5.1 対策例-1

page1

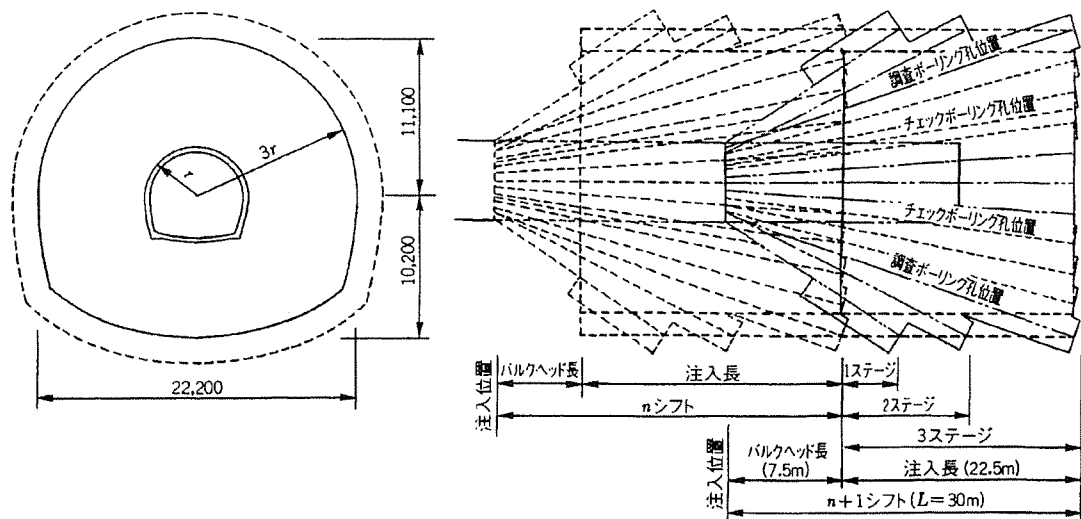
工 事 概 要	工事件名：(仮称)八王子城跡トンネル工事	施工時	完成後
	施工場所：東京都八王子市	止水対策	○ ○
工 期	平成11年10月掘進開始 ～ (施工中)		
	(山岳トンネル区間) 工法：NATM工法		
(内止水対策区間)	延長：上下線 各延長約2.4km		
	工法：前方地山止水注入+NATM(機械掘削)		
	先進導坑(シールド掘削)+NATM(機械掘削)		
	延長：上り線1.0km+124m 下り線1.0km+175m		
地下水流動保全の目的	<p>・多摩地域をはじめとする自然豊かな地域を通過するため水環境保全に配慮する。 (国指定の史跡である八王子城跡の下を通過し、築城当時に掘削された坎井と呼ばれる井戸や城主の住居であった御主殿の遺跡近傍に御主殿の滝がある。)</p> <p>・これらの井戸や滝は八王子城跡を構成する重要な遺跡であり水文環境の保全が必要。</p>		
対策工の概要とその結果	<p>御主殿の滝上流部の城山川集水域を通過する区間についてトンネル内に水を引きこまない止水構造とする。</p> <p>対策：・山岳トンネルの構造を防水型トンネル(覆工コンクリート・防水シート)とする。</p> <p>・止水注入による地山止水構造</p> <p>・端部には止水壁を形成する</p> <p>・止水構造部は先行止水注入後掘進する</p> <p>結果：平成14年1月ごろ約1km程度掘進が進んだ段階で、止水構造予定箇所手前で観測孔の水位低下が見られたことから、応急注入施工後、本注入を実施。その後水位上昇。今後一時的な水位低下はあるものの将来的には上昇し安定する予想</p>		
参 考 文 献	<p>記者発表資料平成15年6月及び平成14年10月「(仮称)八王子城跡トンネルの施工方法について」 国土交通省関東地方整備局相武国道事務所より抜粋</p>		

表6.5.2 対策例-2

工 事 概 要	対象構造物：関西電力・舞鶴火力発電所放水路トンネル 放水口が海上沖合いに位置する関係上、トンネル総延長約2,500mのうち約180mが海底トンネル区間 掘削方法：ミベント法発破工法
地下水流動保全の目的	本事例は、地下水流動保全を目的とした事例ではなく、トンネル内に海水を引き込むことに対する防止対策として実施されたものであるが、トンネル周辺に止水ゾーンを構築する方法として、地下水流動保全対策工の一つの事例になるものと考え紹介する。
対策工の概要とその結果	対策：湧水止水対策としてトンネル切羽からセメントミルクによる止水注入工を実施することにより、 μ 値=0～9.9を示す周辺地山を、 μ 値=3以下かつチェックボーリング孔の時間湧水量=0.5%/分/m以下に改良する。 結果：上記の改良目標値まで周辺地山を改良することにより、異常出水などのトラブルもなく、無事掘削を終えることができた。 トンネル掘削時の湧水量は、トンネル1mあたり最大3.5%/分、累計湧水量は146%/分(平均0.9%/分)であり、十分な止水効果があつたものと判断している。



海底トンネル位置図



止水注入工断面図および注入シフト図

参 考 文 献	トンネルと地下2001年1月(P41～48)「海底下の急傾斜地層を貫く放水路トンネル」
---------	---

表 6.5.3 対策例-3

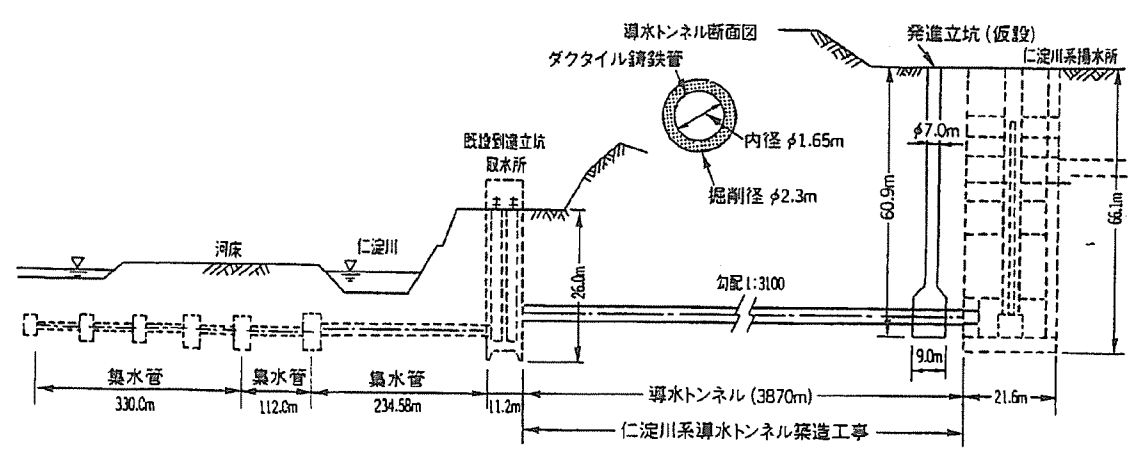
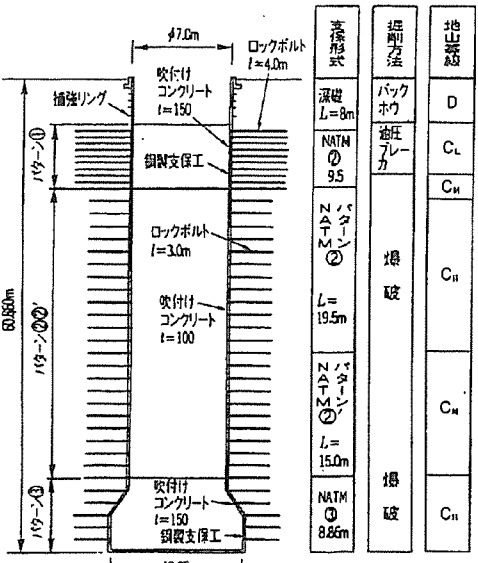
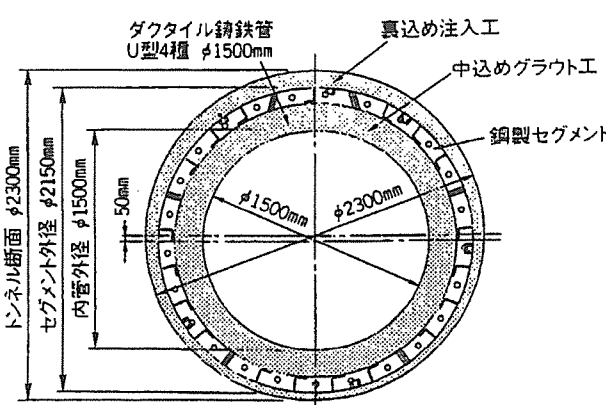
工 事 概 要	<p>工事件名：仁淀川系導水トンネル築造工事</p> <p>施工場所：高知市朝倉針木寺ヶ谷～吾川郡伊野町大字音竹</p> <p>工 期：1993年(平成5年)9月20日～1997年(平成9年)3月20日</p> <p>1) 発進立坑 $\phi 7.0 \sim 9.0\text{m}$ $H=60.9\text{m}$ $GL \sim -13.5\text{m}$: 開削工法 $-13.5 \sim -60.9\text{m}$: NATM工法</p> <p>2) 導水トンネル 発破工法区間 仕上がり断面 4.4m^2 $L=44.0\text{m}$, 仕上がり断面 10.9m^2 $L=12.0\text{m}$</p> <p>TBM工法区間 掘削径 $\phi 2,300\text{mm}$ $L=3,805.7\text{m}$ 圧砕式流体輸送方式</p>
地下水流動保全の目的	<p>当該ルート地域周辺は、高品質の果実を生産する果樹園を有するなど、地表水の低下や流出は耕作物や井戸などの周辺環境や水質への影響が大きい。このため、トンネルは将来の維持管理、周辺環境を考慮し完全防水が可能となるような覆工対応が求められた。</p>
対策工の概要とその結果	<p>対策：・止水性の高い鋼製セグメントによる一次覆工の採用</p> <p>・早期裏込め注入の実施</p> <p>・ダクタイル鑄鉄管を用いた内管方式による水密構造の採用</p> <p>・止水性、充填性に優れた中込め注入材の採用</p> <p>結果：TBM掘進時は、地下水への影響が現れ井戸の枯渇が生じた。しかし、ブロックごとに中込め注入を繰り返し実施する二次覆工施工後では、比較的短期間に地下水の回復傾向が確認された。</p>
<div style="display: flex; justify-content: space-around;">  </div> <p style="text-align: center;">施設系統図</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div> <p style="text-align: center;">多量湧水区間標準断面図</p> <p style="text-align: center;">発進立坑施工区分</p>	
参 考 文 献	<p>トンネルと地下1996年10月(P35～45)「NATM立坑と小口径TBMで湧水激しい層部に挑戦」</p> <p>トンネルと地下1997年6月(P47～56)「完全止水を目指す導水路二次覆工」</p>

表6.5.4 対策例-4

<p>工 事 概 要</p>	<p>工事件名：高速鉄道烏丸線（国際会館・北山間）建設工事（宝ヶ池工区） 施工場所：京都市左京区岩倉大鷲町地内～京都市左京区松ヶ崎町田町地先 工 期：1993年7月8日～1997年3月7日（44ヶ月） （山岳トンネル区間） 工法：NATM工法 機械掘削 上半先進ショットベントリタ付工法 延長：複線部775.7m ロート部95.8m 拡幅部14.2m 単線部77.8m （シールドトンネル区間） 工法：気泡シールド工法（泥土圧） 延長：南行線316.8m 北行線288.9m</p>																												
<p>地下水流動保全の目的</p>	<p>・山岳トンネル区間近傍に位置する池や湿地帯の水環境保全に配慮する。 （学術的見地から貴重とされる八丁トンボの生息地であり、湿生植物が群生する湿地帯や池をひかえている。） ・都市部における環境保全の立場からも、地下水流動保全対策が必要な地域である。</p>																												
<p>対策工の概要と その結果</p>	<p>周辺環境への事前予測より、宝ヶ池等周辺の地下水位低下の影響が明らかとなった。 対策：・山岳トンネルの構造を防水型トンネルとする。 ・トンネル延長方向の新たな水脈による水文環境への影響防止より、ウォーターバリア（止水ゾーン：幅3m、深度3m）を構築する。 ・リチャージ可能な観測孔を設置し、地下水位観測を行う。 結果：工事中は地下水位への影響が認められたが、リチャージを必要とすることはなかった。 また、覆工完了後には地下水位の復水が確認されている。</p>																												
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="236 904 810 1361"> <p>防水型NATM標準配筋図</p> </div> <div data-bbox="874 904 1417 1361"> <p>ウォーターバリア(止水ゾーン)</p> </div> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 10px;"> <p>路線縦断面図</p> <table border="1" style="float: right; margin-top: 10px;"> <thead> <tr> <th>凡 例</th> <th>地質区分記号</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>盛土・表土</td> <td>M</td> </tr> <tr> <td>沖積層</td> <td>Ac</td> </tr> <tr> <td>砂質土</td> <td>As</td> </tr> <tr> <td>砂礫土</td> <td>Ag</td> </tr> <tr> <td>粘性土</td> <td>Dc</td> </tr> <tr> <td>洪積層</td> <td>Da</td> </tr> <tr> <td>砂礫土</td> <td>Dg</td> </tr> <tr> <td>丹波層</td> <td>Sh</td> </tr> <tr> <td>チャート</td> <td>Ch</td> </tr> <tr> <td>砂岩</td> <td>Ss</td> </tr> <tr> <td>頁岩チャート互層</td> <td>Slr</td> </tr> <tr> <td>比抵抗区分</td> <td>.....</td> </tr> <tr> <td>地質境界</td> <td>——</td> </tr> </tbody> </table> </div>		凡 例	地質区分記号	盛土・表土	M	沖積層	Ac	砂質土	As	砂礫土	Ag	粘性土	Dc	洪積層	Da	砂礫土	Dg	丹波層	Sh	チャート	Ch	砂岩	Ss	頁岩チャート互層	Slr	比抵抗区分	地質境界	——
凡 例	地質区分記号																												
盛土・表土	M																												
沖積層	Ac																												
砂質土	As																												
砂礫土	Ag																												
粘性土	Dc																												
洪積層	Da																												
砂礫土	Dg																												
丹波層	Sh																												
チャート	Ch																												
砂岩	Ss																												
頁岩チャート互層	Slr																												
比抵抗区分																												
地質境界	——																												
<p>参 考 文 献</p>	<p>トンネルと地下1997年2月(P25～33)「環境保全対策を充分考慮した大規模都市型トンネルの施工」 大林・飛島・銭高・大日本・吉村・日新特定建設工事共同企業体施工関連資料</p>																												

表 6. 5. 5 対策例-5

<p>工事概要</p>	<p>対象構造物：日本鉄道建設公団 鉄道（北陸新幹線）トンネル 歌トンネルL=1,743m 新潟県西頸城郡青梅町歌 工事概要：トンネル延長 1,743m 掘削断面 約 90m²</p>
<p>地下水流動保全の目的</p>	<p>断層破砕帯内のトンネル直上40mの位置に周辺住民が水源としている『水上谷川』がある。 施工箇所付近の土質は時代不詳の蛇紋岩で構成されており、はんれい岩、結晶片岩、超塩基性岩などをブロックとして取り込み、地質としての連続性が失われている。その中に割れ目が多く、透水性の良好な断層破砕帯が存在し、多量の湧水、断層に沿った河川水の流入、及びトンネルの崩落が想定された。 又、この付近一帯は地すべり地帯でもあり、先行緩みを抑える必要もあった。</p>
<p>対策工の概要と、その結果</p>	<p>対策：・先行ゆるみ、トンネル崩落、湧水、河川水の流入、これら全てに有効と考えられるAFG工法（長尺鋼管先受け工法）を採用した。 ・施工区間は断層破砕帯を含む延長90m区間とし、インバートより上部のトンネル周辺に鋼管径114.3mmを45cm間隔で合計47本の施工を行った。 ・薬液注入範囲は2.0mとし、注入率はスリーブ注入5%浸透注入35%を設定した。 ・又、ロックボルトも水を引込む可能性があるため、この区間の打設はひかえた。 結果：・止水ゾーンを形成することにより、施工途中の河川水の引込み、湧水も無く、『水上谷川』への影響は無かった。 ・トンネル崩落等、地山の安定に関しても、大きな崩落も無く、懸念された地すべりも観測されなかった。</p>

図-1 AGF工法施工断面図

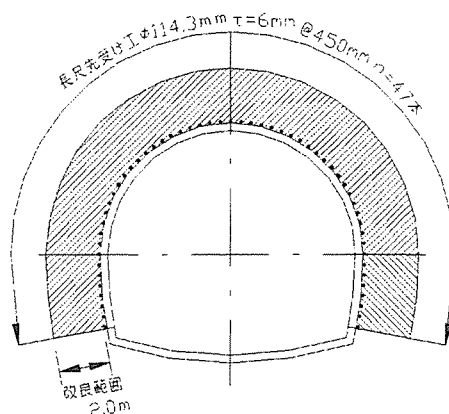
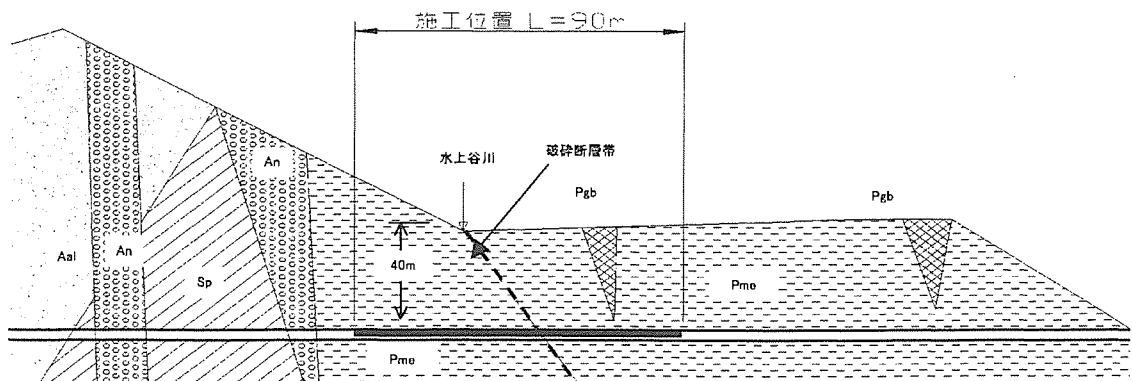


図-2 水上谷川付近土質縦断概略図と地質凡例

地質順所の凡例				
地質時代		地層名	記号	岩相・層相
新世代	古第三紀	赤壳山砂岩層	Aal	凝灰角礫岩砂岩泥岩互層
			Ams	赤色凝灰質泥岩
古生代	二疊紀 ～ 石炭紀	蛇紋岩 メランジュ	Sp	蛇紋岩
			Pme	変玄武岩
			Psch	泥質片岩
			Pgb	片麻状はんれい岩
貫入岩(時代不詳)			An	安山岩



参 考 文 献 トンネルと地下2001年12月 (P 7～13) 「河川直下の断層破砕帯の掘削」

表 6. 5. 6 対策例-6

<p>工事概要</p>	<p>対象構造物:シールドトンネル構造物 デュイスバーク市 (duisburg) 地下鉄工事 デュイスバーク市 (duisburg)ドイツ連邦共和国 工事概要 :上下線2本並列 ※トンネル外径、施工延長等不明</p>
<p>地下水流動保全の目的</p>	<p>施工場所はライン川の伏流水が15m/日程度の流速で流れる砂、砂礫層であり、地下鉄の建設工事は、この伏流水の自然な流れを阻害し、上下流に水位差を発生させることが明らかであった。 このため、地下水の流動保全、及びドイツの条例をクリアするためにも、地下鉄工事完了後も地下水の流動を確保する必要があった。</p>
<p>対策工の概要と、その結果</p>	<p>対策: 図-2に示すように、シールドトンネルで遮断された滞水層を、ウェルとシールド内に配置した管路とでつなぎ、地下水の流れの確保を行った。 対策の概要を以下に述べる。 ・覆工の完了したトンネル内から伏流水の取り込み、排出のためのウェルとして、フィルターパイプを水平に挿入し、その周辺を直径約1.5mの範囲でフィルター層を形成させる。 ・トンネル内はインバート部分にサイフォン形式で通水用パイプを配管し、2本のトンネル間は水平にパイプをつないで通水可能な形状としている。 ・詳細は不明であるが、バイパス管等により、ウェルの洗浄が可能な構造とすると共に、圧力計他計測機器により、上下流の水位差、配管内流量、流速が、計測可能なシステムとしている。 ※資料によれば、事前に地下水のトンネル軸にそって流動速度を測定し、本工法の妥当性を確認するため、大規模な土質水理実験を行った、とある。 結果: 地下鉄工事完了後もこのシステムは安定して稼動し、地下水の変動を発生させていない。<文献は20年以上前のものであり、現在のシステムの状況は不明。></p>
<p>ウェル概念図 システム概念図</p>	
<p>参 考 文 献</p>	<p>Ecology and City Railway construction ; groundwater balance through horizontal filter wells Duisburg City Railway/Germany Inversed Siphon 関連文献 1)Gap freezing solves groundwater problem for Duisburg metro (Tunnele Tunneling Vol.13 1981,12) 2)The Duisburg method of metro construction (Des Parameters Geotech Eng Vol 3 1979)</p>

6. 6 新工法（非開削トンネルでの地下水保全工法）における留意点

非開削トンネルである NATM やシールドでの地下水流動阻害の事象は前述したとおりであるが、大きな共通的特徴はトンネル施工による地山のゆるみや、覆工と地山の間の隙間に沿うトンネル軸方向への地下水の流下を生じさせてしまう点である。したがって非開削トンネルの地下水流動保全は、

- ① トンネル施工で生じたトンネル軸方向の流動の防止を図る
- ② 本来の地山に流れていたトンネルを横切る滞水層や水みちをトンネル構築による影響がない状態に復元する

という 2 つの対策主旨があると考え、これらに対するトンネル覆工構造の留意点を以下に整理する。

(1) NATM の覆工構造

NATM において掘削時には切羽前方の地山湧水を排水しながら、あるいは地山の地下水位を予めボーリングや強制排水によって低下させる地下水低下工法を採用するのが一般的である。これは NATM にとって切羽の安定上、最も問題となる水の影響を少なくすることが施工上必要であることにほかならない。即ち、NATM は地山の持つ地盤自身の支持力を最大限に発揮させるため水を抜くことが前提であり、水が多くて地山が崩壊するような場合や、吹き付けコンクリートが施工できない場合には NATM は基本的には成立しないこととなる。このため、NATM における覆工構造の考え方は基本的に、地下水の復元による水圧を考慮しないのが一般的であった。

しかし、NATM に地下水保全工法を採用する場合は、最終的に地下水圧を考慮する必要がある、二次覆工の設計にあたっては水圧を考慮したウォータータイト構造として設計するなどの必要がある。

(2) シールドの覆工構造

シールド工法は、掘削対象とする地盤が都市部の沖積層や洪積層の未固結地山であり一般的に地下水位が高い地層を掘削することが前提となる。工法は、泥水加圧式や泥土圧方式の密閉式工法が主体であり、掘削及びセグメント覆工構造も予め地下水圧を考慮したウォータータイトとして設計するのが一般的で、この点がシールドセグメント設計の大きな特徴である。

参考文献

- 1) 国土交通省都市・地域整備局大都市圏整備課大深度地下利用企画室：大深度地下利用における環境に関する検討調査，2004.3
- 2) 国土交通省関東地方整備局相武国道事務所：(仮称)八王子城跡トンネルの施工について，記者発表資料，2002.10及び2003.6
- 3) 海底下の急傾斜地層を貫く放水路トンネル，トンネルと地下，pp41～48，2001.1
- 4) NATM立坑と小口径TBMで湧水著しい層部に挑戦，トンネルと地下，pp35～45，1996.10
- 5) 完全止水を目指す導水路二次覆工，トンネルと地下，pp47～56，1997.6
- 6) 環境保全対策を充分考慮した大規模都市型トンネルの施工，トンネルと地下，pp 25～33，1997.2
- 7) 河川直下の断層破碎帯の掘削，トンネルと地下，pp7～13，2001.12
- 8) Ecology and city railway construction：groundwater balance through horizontal filter wells Duisburg city/Germany inversed siphon.

7. 供用時のメンテナンス・モニタリング

7. 1 地下水流動保全工法におけるメンテナンスの位置付け

7.1.1 供用時のメンテナンスフロー

供用時における地下水流動保全施設のメンテナンスは、図 7.1.1 の地下水流動保全工法全体フロー図の調査・設計時から始まる検討の最終段階として位置付けられ、その詳細フローは図 7.1.2 に示す通りである。

通常、通水設備の機能低下が生じる場合、主なモニタリング項目である地下水位変動と地下水流動量は、水位差の拡大や通水量の低下として計測される。これら計測値が管理値を越えた場合、原因調査・性能回復の為の検討や対策を行い効果の確認を行った後、再度、供用に戻ることとなる。また、メンテナンス時の初期及び長期性能試験のフロー図他は参考文献¹⁾ P4-10 に詳述しているので参照されたい。

7.1.2 供用時の一般的なモニタリング項目

メンテナンスの時期は、図 7.1.1、7.1.2 にあるように評価基準 ε_2 （管理値）をもとに判断されるが、供用時のモニタリング（計測）は長期的になることから、モニタリング項目は地下水位変動量と地下水流動量変化の計測が一般的である。地下水流動保全工法の種類によって違いは異なるが表 7.1.1 のような内容で行われることが多い。

しかし、水質も機能低下の大きな要因となるため、本報告書では水質に関する計測（案）を表 7.2.4 に後述する。

表 7.1.1 供用時の一般的なモニタリング（計測）項目

モニタリング（計測）項目	計測位置	
	地盤	上流側地盤内水位 下流側地盤内水位
地下水位変動量	涵養・集水施設	涵養施設内水位 集水施設内水位
		配管内流量
地下水流動量	涵養・集水施設	配管内流量

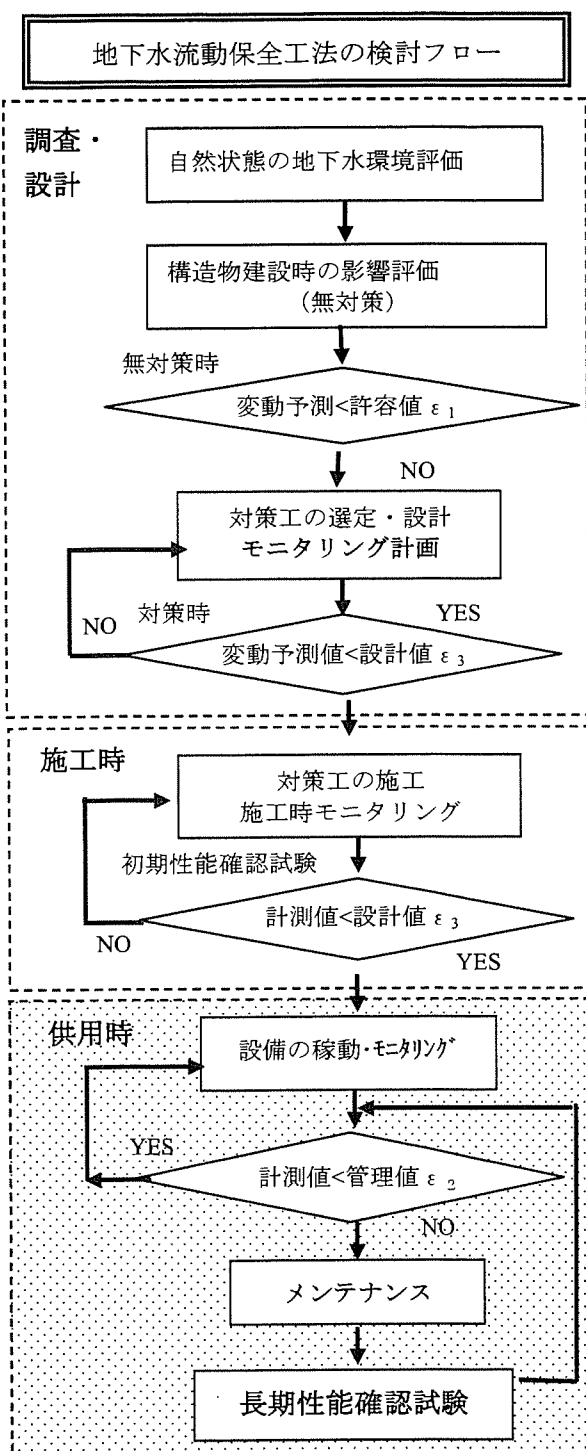


図 7.1.1 「地下水流動保全工法¹⁾」 3-3 参照

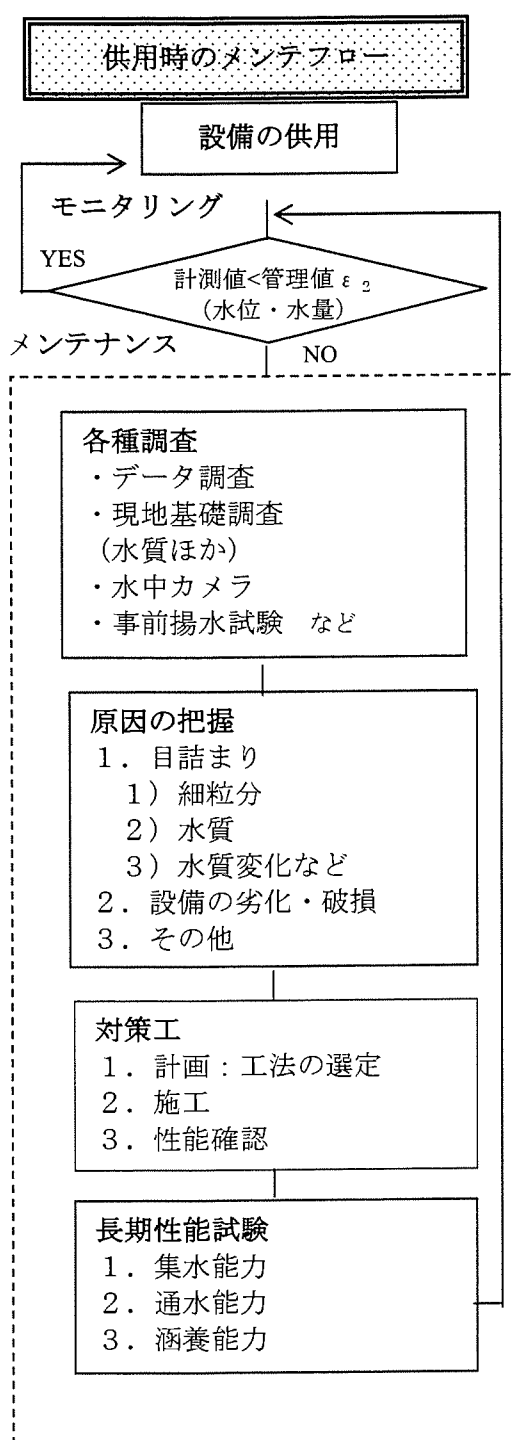


図 7.1.2

評価基準 ε_1 (許容値) : 地盤沈下や井戸枯れなど環境影響に対応する現象項目
(地下水位変動量、地下水流動量変化) の許容値

評価基準 ε_3 (設計値) : 現象項目 (地下水位変動量、地下水流動量変化) に対し、
対策工の初期性能として期待する設計値

評価基準 ε_2 (管理値) : 現象項目 (地下水位変動量、地下水流動量変化) に対し、
対策工の長期性能として期待する管理値

7. 2 通水・集水涵養設備の機能低下要因

地下水流動保全では対策工法の特徴を把握すると共に、その設備の機能低下原因を把握し、適切なメンテナンス方法を選定する必要がある。

7.2.1 対策工法の特徴

各工法共に多少バリエーションは異なるが、基本的な方式は表 7.2.1、図 7.2.1～2 のとおりである。どの工法も集水・涵養部、通水部の目詰まり要因を少なくすることがメンテナンス時期を遅らせることになる。特に通水工法のうち、A 躯体上部・C 躯体下部通水工法は地盤を通水部とするためメンテナンスが難しく、フィルター材の選定、開口部の大きさなど目詰まり防止のため設計や管理が重要である。但し、目詰まり要因を取り除くことが出来ればメンテナンスフリーともなる。

表 7.2.1 現状施工法における集水・涵養方式と通水方式（参考文献¹⁾ 資料-1 に加筆）

集水・涵養 方式 通水方式		土留め壁				4. 集水・ 涵養井戸
		1. 土留め壁撤去 ・部分的破壊	2. 土留め壁削孔 集水・涵養パイプ	3. 集水・涵養機能 付き土留め壁		
A. 躯体下部通水		②、⑦、⑨		③		
B. 通水管				①、④、⑤	⑥、⑧	
C. 躯体上部通水						
各 設備	フィルター材	有り	有り	有り	有り	有り
	スクリーン他	なし	なし	有り	なし	有り
開発された 最近の工法例		①S.N.F 工法、②クボタ復水工法、③両面型内井戸による地下水流動保全工法 ④通水 SMW 工法、⑤通水 RC 連壁工法（EDW）、⑥バイオ通水連壁工法 ⑦スルーパス工法、⑧地下水流動阻害対策工法、⑨遮水性土留め壁透水化工法				

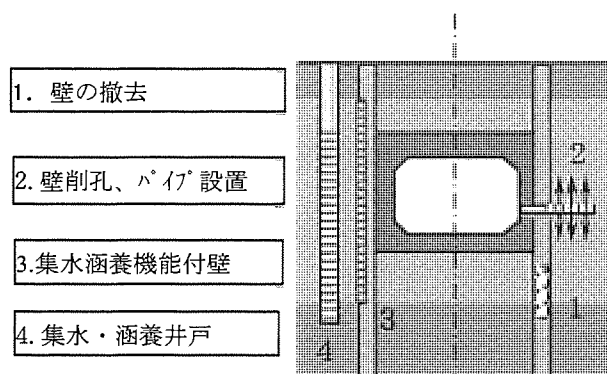


図 7.2.1 集水・涵養方式の模式図

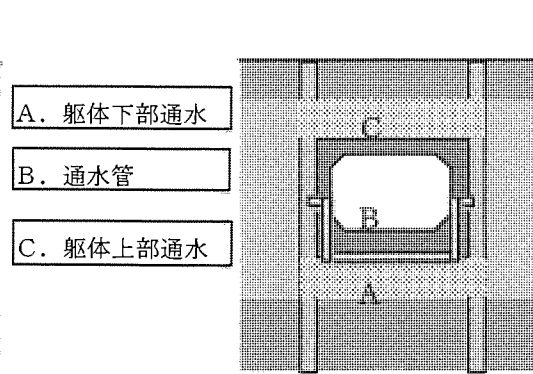


図 7.2.2 通水方式の模式図

7.2.2 通水、集水・涵養設備の機能低下の主な要因

通水、集水・涵養設備の機能低下の主な要因は、設備供用の初期段階では施工時の掘削や設備の洗浄などの施工状況が原因の性能低下が主となり、長期的な供用時では集水・涵養または通水装置の目詰まりや設備の劣化・破損などが主となると考えられる。

供用時における計測データの変化と通水設備の機能低下の主な要因を表 7.2.2 に示す。

表 7.2.2 計測データの変化と通水設備の機能低下の主な要因

計測データの変化		・水位差の拡大・通水量の低下
通水設備機能低下の主な要因	目詰まり (周辺地盤、 設備本体)	1) 細粒分に起因： スクリーン、充填砂利、周辺帯水層等の目詰まり
		2) 水質に起因 ①溶存塩類の化学反応によるスケールの生成・付着 ②微生物によるスライムの生成・付着 ③スクリーン材の電気化学的腐食や微生物腐食 ④その他：水質の変化 ・生活排水や工場排水他の流入 ・帯水層（異なる水質）の混合による化学的变化
	設備の劣化	・スクリーンの磨耗、パイプ接続部などの破損
	その他	・地震や地盤沈下による帯水層の変化、 ・地下水の変化（自然水位の変化）

7.2.3 メンテナンス時の調査事項

通水設備の機能低下の原因を把握し適切な対策工を選定するため、以下のような調査・検討を行う。

(1) データ調査

竣工年度、経過年数、口径、深度、スクリーンタイプと材質、位置・揚水試験データ、水質試験データ、地質構成、電気検層図、設備配置図など。

(2) 現地基礎調査

現地水質試験（PH、アルカリ度、鉄、マンガン、バクテリアの有無、電気伝導率など）、排砂量、配管などの腐蝕またはスケールの付着状況など。

(3) 水中テレビカメラ調査

目詰まりの状況や施設の腐蝕などによる老朽化の程度により、選定する洗浄方法が異なるものとなる。選定する洗浄法によっては施設の構造に不利となるケースがあり、井戸など目視が可能な施設の場合、この調査は最も有効な事前調査法である。

(4) 事前揚水試験

改修工事の確認となる揚水試験と同条件として計画することが重要である。また、設備が稼動中であることから短期間の実施となるが、効果確認の基準数値となる静水位の確認など十分注意して行う必要がある。

7.2.4 細粒分に起因する目詰まり

目詰まり要因は表 7.2.2 のように土粒子と水質に起因するものに大別出来るが、土粒子に起因して起こる目詰りは、集水設備周辺では地下水は細粒分と共に井戸方向に移動し、周辺地盤とスクリーン外周の充填砂利に目詰まりが発生する。また涵養設備周辺では、細粒分が地下水流に押し出され、孔壁からある程度の距離に透水性の低いゾーンを形成し目詰まりを発生させる。

以上のように集水・涵養施設の計画では、長期間目詰まりが起こらない充填砂利（フィ

ルター材)の選定、及び周辺の細粒分が移動しない地下水流速になるように設計する必要がある。また目詰まり評価の為の調査や設計に関しては、参考文献¹⁾「地下水流動保全工法 2002.6」の P2-50、3-19 に記載されているので参照されたい。

7.2.5 水質に起因する目詰まりと水質分析項目

集水・涵養装置内では、水質に起因にするスクリーン部の目詰まりが生じる。しかし、地下水流動保全工法の施設にてこのような事例データはまだ取得されていないため、地下水取水井戸におけるスクリーン部の目詰まりの調査事例から引用する。

(1)水質に起因する目詰まり

井戸スクリーン部の目詰まりの原因として、表 7.2.2 を詳述すると以下の通りである。

① 溶存塩類の化学反応によるスケール*の生成・付着

② 微生物によるスライム*の生成・付着

スケールの付着はスケール内部と外部で、スライムの付着は付着部分と未付着部分で、溶存酸素が不均一となって酸素濃淡電池を形成し、スクリーン材の腐食へと進行する可能性がある。また、スライムは水中の浮遊物質 SS*を固着し、微生物、無機物からなるスライムをも形成する。

③ クリーン材の電気化学的腐食や微生物(起因)腐食などによる腐食*

材質自体を亜鉛メッキ炭素鋼からステンレス鋼や FRP(Fiber Reinforced Plastics)へ変更することにより改善されつつある。ただし、ステンレス鋼でも pH が中性域で塩化物イオン濃度が数 10mg/L の水でも接合部やすき間部で腐食を起こす可能性があり、また近年、微生物腐食との関連性も指摘・研究されつつある⁴⁾。

(注) *印：後述する(4)「補足説明」を参照されたい

(2)腐食井戸の水質変化の実例

実際に腐食した深井戸の水質経年変化を表 7.2.3 示す。この事例では、昭和 62 年から平成 4 年までの水質変化が示されている。なお、井戸管およびスクリーンは鋼材と思われる。表によると、井戸設置時(S62.7)の水質と比較して腐食が進行すれば、鉄、マンガン、硬度、蒸発残留物、pH、臭気、色度、濁度、電気伝導率、ランゲリア指数が変化しているのが分かる。

この井戸の腐食の原因は、鉄バクテリアの繁殖と、そのスライム内部で増殖した硫酸塩還元バクテリアによる硫化水素の激しい腐食促進と判断された²⁾。

表 7.2.3 実際に腐食した井戸の水質経年変化²⁾

	S 62.7	S 63.7	H 1.7	H 2.9	H 3.5	H 4.5
水温 (°C)	17.5	17.3	7.5	17.2	18.9	16.7
NO ₂ +NO ₃ (mg/l)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
塩素イオン(mg/l)	10.6	13.5	14.2	17.9	26.0	21.2
KMnO ₄ (mg/l)	0.7	0.9	0.9	1.3	7.1	2.8
一般細菌数	1	0	0	0	0	0
大腸菌群	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
鉄	0.02	0.50	0.97	1.23	12.10	4.70
マンガン(mg/l)	0.02	0.24	0.12	0.20	0.84	0.48
亜鉛	0.00	0.01	0.00	—	0.05	0.00
フッ素	0.0	0.0	0.1	—	0.0	0.0
硬度	62.0	74.0	78.0	88.0	144.0	106.0
蒸発残留物	125	142	152	—	232	217
pH	8.25	7.43	7.33	7.07	6.65	6.76
臭気	異常なし	異常なし	異常なし	硫化臭	硫化臭	硫化臭
色度	0.0	4.0	8.5	20.0	50.0	1.5
濁度	0.0	1.0	3.5	7.0	20.0	0.7
伝導率	164	191	197	236	324	295
総硬度	68.0	66.0	70.0	60.0	62.0	64.0
硫酸塩ナトリウム	—	—	—	(+)	(+)	(+)
硫酸イオン	—	—	—	47.0	72.5	55.0
ランゲリッ指数	-0.35	-0.07	-0.07	-1.33	-1.55	-1.54

(3)水質分析項目(案)

地盤工学会の調査法では、地下水の分析は図 7.2.3 のように溶解している化学物質を分析して解析する方法と、地下水の水分子を構成している酸素と水素および溶解している化学物質の同位体を分析する二つの方法が行われている。

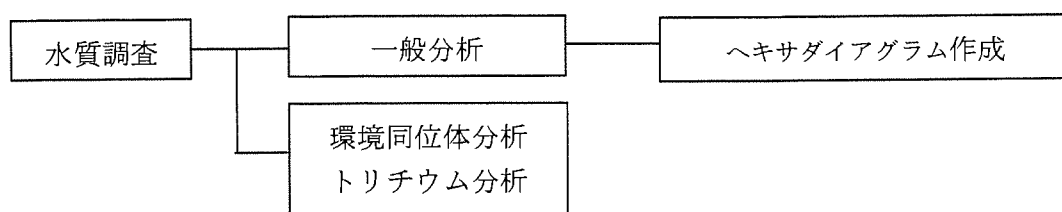


図 7.2.3 水質調査

ここで、表 7.2.2 に示したように通水施設の機能低下には、水質に起因にする目詰まりも大きく関係するが、地下水流動保全対策施設にての事例データはまだ取得されていない。よって地下水取水井戸における目詰まり調査事例を参考に、通水設備の目詰まり原因を検討する水質分析の提案例として表 7.2.4 を作成した。

水質分析(提案)では、上下流側の帯水層地下水では水質分析項目①、通水設備内(集水・涵養装置・通水装置)の地下水では①+②の水質分析項目とした。

①一般分析(ヘキサダイアグラム分析)を基本とした水質分析項目

②装置の腐食性を検討するために補足する水質分析項目

表 7.2.4 帯水層地下水および通水設備内の水質分析（提案例）

<p>(1) 基本項目</p> <p>：観測地点、採水日時、採水深度、水位、水温、気温</p>
<p>(2) 一般分析（ヘキサダイアグラム分析）を基本とした水質分析項目</p> <p>・ pH：通常の地下水の pH は 5～9 であるが、異常な pH となった場合は、別種の + イオン（例えば、pH4 であれば Al^{3+}）を取り上げる必要がある。また一般に、pH 7 より低い時は装置の腐食性が増し、pH 7 より高い時にはスケールが生成し易くなる。</p> <p>・ 電気伝導率 EC ($\mu\text{S/m}$)：EC は溶存イオン量にほぼ比例して変化し、イオンの当量バランスのチェックに使用する。また、EC が高いと施設の腐食性傾向を示す。</p> <p>・ 溶存酸素量 DO (mg/L)：</p> <p>DO が高いと、$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ と溶解性鉄があまり含まれない傾向になる。</p> <p>また、DO にほぼ比例して施設の腐食性が増す。</p> <p>・ ヘキサダイアグラムを構成するイオン：</p> <p>通常の地下水は、以下の +、- イオンでバランスしている。</p> <p>各イオンは濃度表示で利用されるが、分析結果に間違いがないかイオン個々に当量換算し $\Sigma(+\text{イオン}) = \Sigma(-\text{イオン})$ のバランスのチェックを義務付ける。</p> <p>+ イオン：Na^+、K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、$\text{NH}_4^+ - \text{N}$、溶解性鉄、溶解性マンガン</p> <p>- イオン：Cl^-、HCO_3^-、SO_4^{2-}、$\text{NO}_3^- - \text{N}$</p>
<p>(3) 装置の腐食性を検討するために補足する水質分析項目</p> <p>・ 色度</p> <p>・ 濁度</p> <p>・ 蒸発残留物量 (mg/L)：</p> <p>いずれも数値が大きくなれば装置の腐食性が増している可能性が大きい。</p> <p>・ ランゲリア指数 LI：</p> <p>炭酸カルシウム被膜（スケールの初期）の形成され易さと、水の腐食性の目安となる。</p> <p>LI が正の値で絶対値が大きいほど炭酸カルシウムの析出が起こり易く非腐食性であり、ゼロであれば平衡状態、負の値では炭酸カルシウム被膜は形成されにくく腐食傾向が強くなる。</p> <p>・ 硬度または Ca 硬度 (mg/L)：硬度が低い水（軟水）は装置に対する腐食性が大きい。</p> <p>・ 酸化還元電位 (mV)：</p> <p>電位が大きければ、他物質を酸化させる力（酸化性）が強く、小さければ還元させる力（還元性）が強い。電位は pH とともに水の状態（酸化性-酸性、酸化性-アルカリ性、還元性-酸性、還元性-アルカリ性）を特徴づける。</p> <p>・ バクテリアの種類と数：バクテリアの存在は装置の腐食の可能性が大きい。</p>
<p>(4) 実施時期</p> <p>①通水設備の設置前と設置後。</p> <p>②年 2 回（地下水位の高い時期と低い時期）を基本。</p> <p>…通水流量や水質組成の経年変化に異常が発生した場合には、分析頻度をより密にする。</p> <p>なお、採水は空気に触れない状態で行う。</p>

(4)補足説明

(a)腐食(湿食の中の自然腐食)

その発生機構から分類すると、電気化学的腐食、微生物腐食、異種金属接触腐食、応力腐食(引張応力に起因)に大別される。微生物腐食は、以下のバクテリアが金属に直接的または間接的に関与して、腐食が著しく促進される現象である。

鋼系材料の腐食に関与するバクテリアとその活動⁴⁾

	硫酸塩還元細菌 (SRB)	メタン生成細菌 (MPB)	鉄酸化細菌 (IOB)	硫黄酸化細菌 (SOB)	鉄細菌 (IB)
分類	嫌気性細菌		好気性細菌		
生息環境	嫌気性の粘土、埋立地、ヘドロ、さびこぶの中で繁殖しやすい。		好気性の硫酸酸性の環境で繁殖しやすい。	好気性の土壌、油田、硫黄鉱床、汚水などの中で繁殖しやすい。	Fe、Mnなどを多く含んだ井水、湧水などの地下水で繁殖しやすい。
至適pH	6.5～7.5	中性域	2.0～2.5	2.0～3.5	6～8
栄養物	SO ₄ ²⁻ 、乳酸など	酢酸など	Fe ²⁺	S、FeS	Fe ²⁺ 、Mn ²⁺ 、HCO ₃ ⁻ 、CO ₃ ²⁻ など
生物活動	SO ₄ ²⁻ をS ²⁻ に還元する。	メタンを生成する。	Fe ²⁺ をFe ³⁺ に酸化する。このとき生成するFe ₂ (SO ₄) ₃ は、加水分解され硫酸を生成する。	元素硫黄あるいは硫化物を硫酸にする。	Fe ²⁺ をFe ³⁺ に酸化する。
生成物	FeS、H ₂ S	CH ₄	FeSO ₄ 、Fe ₂ (SO ₄) ₃ 、Fe(OH) ₃ 、H ₂ SO ₄	H ₂ SO ₄	Fe ₂ O ₃ 、FeOOH

(b)スケール

酸化などによって水中の溶存塩類が析出して不溶固形物化したものである。最もよく見られるものは炭酸カルシウム(CaCO₃)で、その他には、炭酸マグネシウム(MgCO₃)、珪酸カルシウム(CaSiO₃、Ca₂SiO₄)などがある。いずれも析出初期には軟泥状であるが、結晶水を失い白色の石状に変化する。

(c)スライム

粘性のある微生物の集合体や、その分泌物(多糖類の粘着物質)が固体壁に付着したものである。主な微生物には、緑藻・藍藻・珪藻などの藻類、鉄バクテリア・ゾーグレア・硫黄還元バクテリアなどのバクテリアならびに真菌類である。粘着物質はバクテリアの付着を助ける。

(d)浮遊物質 SS (Suspended Solids の略称)

水中に浮遊または懸濁している直径 2mm 以下の粒子状物質のことで、微細土粒子、動植物プランクトンやその死骸、下水、工場排水などに由来する有機物や金属の沈殿物が含まれる。

(e)ランゲリア指数

水の実際の pH 値と理論的 pH 値(pH_s: 水中の炭酸カルシウムが溶解も析出もしない平衡状態にある時の pH 値)との差のことである。ランゲリア指数は、水の pH、カルシウムイオン濃度、総アルカリ度および溶解性物質（補正值計算に使う）から、次の式によって求められる。ランゲリア指数は多くの実例から、-1.0 程度より小さくすれば水の非腐食性が期待できるようである。

$$\text{ランゲリア指数(LI)} = \text{pH} - \text{pH}_s$$

$$= \text{pH} - 8.313 + \log [\text{Ca}^{++}] + \log [\text{A}] - \text{S}$$

ここに、	pH	: 水の実際の pH 値
	pH _s	: 平衡状態にあるときの pH 値
	log [Ca ⁺⁺]	: カルシウムイオン濃度の対数
	log [A]	: 総アルカリ度の対数
	S	補正值

(f)硬度

水中の Ca²⁺および Mg²⁺量を、これに対応する CaCO₃ の mg/L に換算してあらわすものをいう。総硬度とは、水中の Ca²⁺および Mg²⁺の総量によって示される硬度をいう。カルシウム硬度とは水中の Ca²⁺の総量によって示される硬度をいう。

(g)総アルカリ度(JIS 規格 酸消費量)

水中に含まれる炭酸水素塩、炭酸塩または水酸化物等のアルカリ分の量をこれに対応する炭酸カルシウム(CaCO₃)の濃度で表したもので、水が酸を中和する能力の指標となる。アルカリ度は2種に区別され、pH8.3 まで中和した場合の酸消費量をフェノールフタレインアルカリ度 (P アルカリ度) , pH4.8 までの酸消費量を総アルカリ度(T アルカリ度または M アルカリ度)と呼ぶ。

7. 3 メンテナンス工法

地下水流動保全工法には、集水・涵養方式として集水・涵養井戸や集水涵養機能付き土留め壁、通水方式として地盤通水や通水管の各種組合せが開発されている。よって、それぞれの工法の特徴に合わせた各種調査の結果により異常原因を把握し適切な対策を選定することとなるが、通常、原因は表 7.2.2 の目詰まりであることが多いため、ここでは集水・涵養井戸の目詰まり除去方法について記載する。

7.3.1 集水・涵養井戸のメンテナンス

(1) 目詰まり除去（洗浄）

1) 機械的洗浄方法

機械的洗浄による目詰まり除去には幾つかの工法があるが、井戸の状態（事前調査）やスクリーンの構造を考慮し、最適な工法を選定する必要がある。表 7.3.1 に機械的洗浄方法を示すが幾つかを組合せて実施する場合もある。

表 7.3.1 機械的洗浄方法⁷⁾

	洗浄方法の特徴	井戸状態	洗浄範囲
①ベアーリング洗浄 図 7.3.1	ケーシング内径に近いベラー（注）を上下運動させ、水の衝撃にて目詰まり除去を行う。	腐蝕が大 …衝撃：小	スクリーン部
②ブラッシング洗浄 図 7.3.2	ケーシング内径+2～3mmのブラシを上下運動させ、付着物と目詰まり除去を行う。	腐蝕が大 …衝撃：小	スクリーン部
③ジェットイング洗浄 図 7.3.3	高圧水を噴出させ水の衝撃にて目詰まり除去を行う。	腐蝕が軽度 …衝撃：中	スクリーン部と 充填砂利
④揚水・注水洗浄 （バックウォッシング） 図 7.3.4	水中ポンプで揚水し、自然流下またはポンプで急激にケーシング内に流入（逆洗）させる事を繰り返して、目詰まり除去を行う。	腐蝕が軽度 …衝撃：中	スクリーン部と 充填砂利
⑤スラッピング洗浄 （サージング） 図 7.3.5	スラップ玉をケーシング内で上下運動させ、水の衝撃とブラシにて目詰まり除去を行う。スクリーンが劣化している場合、過度の洗浄は設備の破損につながるため注意が必要。	腐蝕ナシ、①～④効果少。 …衝撃：大	スクリーン部
⑥大容量断続揚水 （オーバーポンピング）	容量の大きな水中ポンプの断続運転にて、揚水水位を大きく上下させ周辺地盤の目詰まり除去を行う。		周辺地盤 まで

注）ベラー：井戸掘削時に用いられる鋼管を加工した屑排除用具。

下端の弁が降下時に開き、巻上げ時に閉じる。

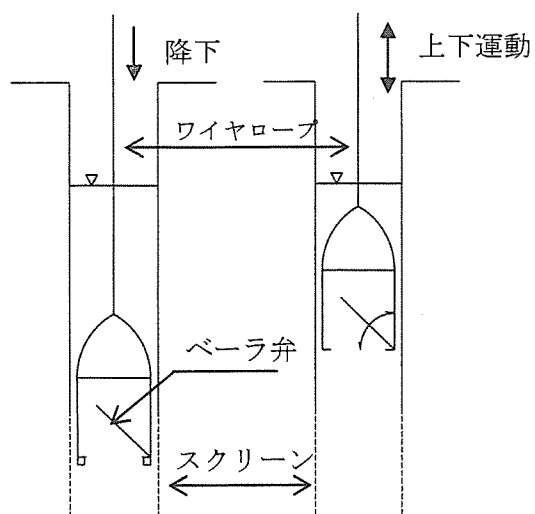


図 7.3.1 ベーリング洗浄

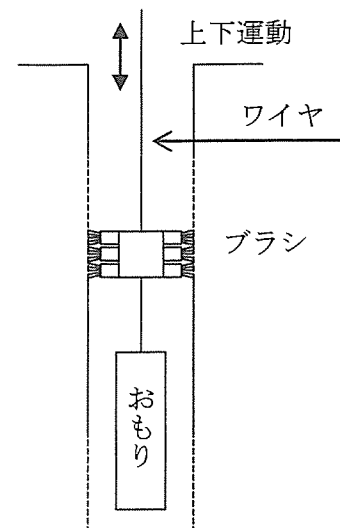


図 7.3.2 ブラッシング洗浄

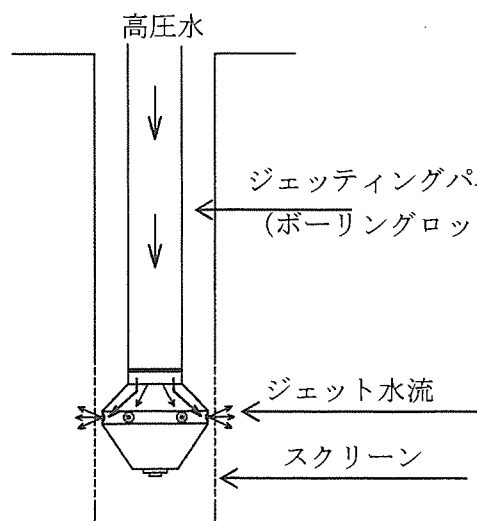


図 7.3.3 ジェット洗浄

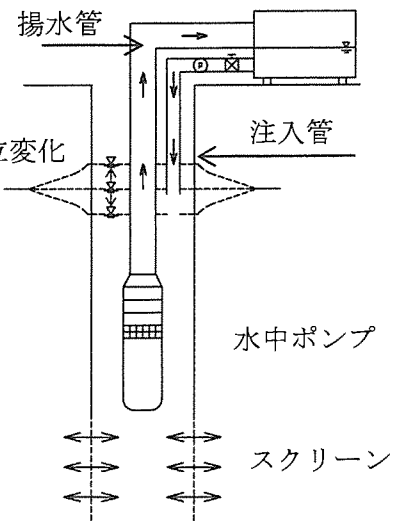


図 7.3.4 揚水・注入洗浄

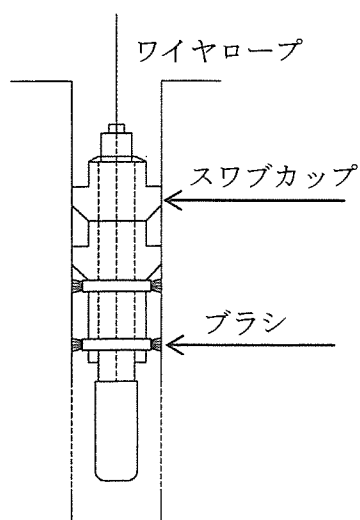


図 7.3.5 スワッピング洗浄

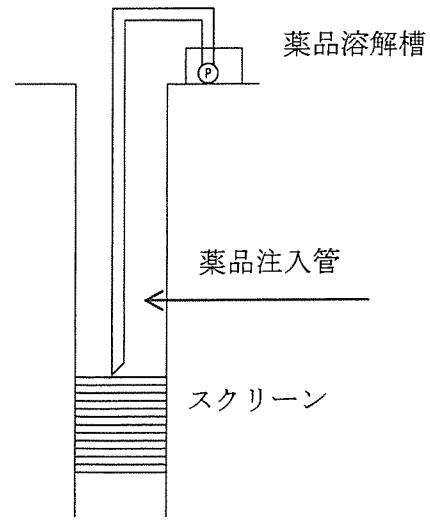


図 7.3.6 薬品洗浄の模式図

2)薬品洗浄方法

機械的な洗浄だけでは処理出来ない場合や、機械的洗浄をより効果的に行うため薬品による洗浄が併用される。図 7.3.6 参照。薬品洗浄が行われる主な目詰まり原因は表 7.3.2 のとおりである。

表 7.3.2 薬品洗浄が併用される主な目詰まり原因

目詰まり原因	
①高アルカリの地下水	カルシウムやマグネシウム炭酸塩などの沈殿物がスクリーンを閉塞
②バクテリアの存在	鉄バクテリアや硫酸塩還元バクテリアが作り出す鉄酸化物がスクリーンを閉塞
	バクテリアによるマンガソ炭酸塩やマンガソ水酸化物の堆積と閉塞

使用される一般的な薬品を表 7.3.3 に記載するが、高重合リン酸塩・無水リン酸・有機酸・無機酸・過酸化物・界面活性剤・さらし粉・防錆剤などを数種組合せたものである。

ここで、目詰まり原因に適した化学薬品の選定を行うため、7.2.4 に記載した現地水質試験による事前調査が重要となる。特に溶解鉄分の含有量が 5~10mg/l 程度あると鉄スケールの付着は多く鉄バクテリアが存在していることが多いといわれている。

また化学薬品を使用する場合、スクリーンの材質に悪影響を与えないか事前に検討することが重要である。

表 7.3.3 一般に販売されている井戸洗浄剤の例

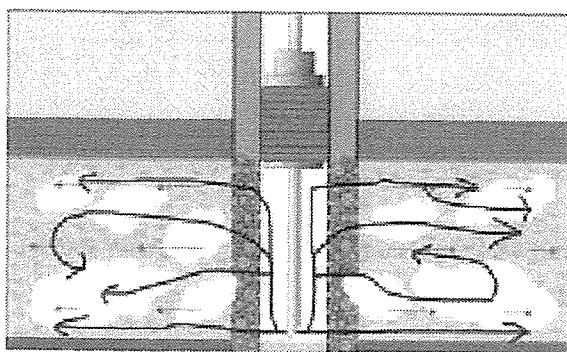
		効果	その他
液体	A	鉄バクテリアの殺菌、鉄・炭酸塩スケールの溶解	PH2.4 (原液)
	B	金属酸化物の分散溶解、炭酸塩沈殿物の除去	PH1.5 (70%溶液)
	C	鉄バクテリアの殺菌、有機質スライムの除去、配管の洗浄	PH7.0 (中性)
粉末	D	鉄バクテリアの殺菌、鉄・炭酸塩スケールの溶解	PH10 程度 (7%溶液)
	E	泥壁除去、スケール除去	PH9 程度 (4%溶液)

3)ガス注入による方法

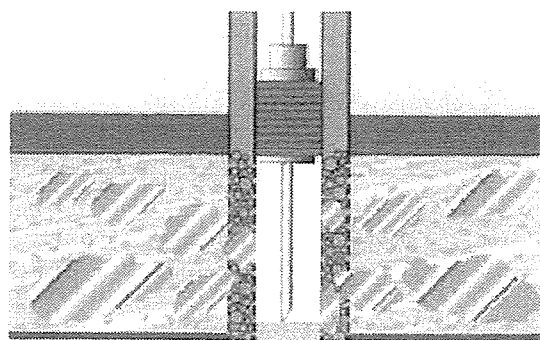
液化・気化炭酸ガスを井戸に注入することにより発生する、炭酸ガス状態変化(液体・固体・気体)の破碎エネルギーによる物理的洗浄と共に、炭酸水形成による化学的洗浄効果と冷却・凍結効果も期待でき、腐食の著しい井戸の以外で適用が可能である。アクアフリード工法(AF工法)と呼ばれ、米国 Subsurface Technologies,Inc. が工法特許を有している。

主な特徴としては、①炭酸ガスを利用するので浸透力が高い、②凍結により間隙の体積膨張、粒子間揺動が生じる、③炭酸水の形成により炭酸塩等の溶解が生じる、④冷却、弱酸性化によりバクテリアが死滅することが上げられる。

なお、AF工法の適用に際して、ガス注入後に PH が 2 程度低下するため、周辺井戸への影響をモニタリングする必要がある(10m 以内の井戸、人家)。



液化・気化炭酸ガスの交互注入
破砕エネルギーの発生、充填砂利、帯水層への浸透



充填砂利・帯水層の凍結
スケールの剥離、間隙の膨張、炭酸塩の溶解、バクテリアの死滅

図 7.3.7 AF 工法のイメージ

(2)井戸底に溜まった沈殿物除去

井戸底に溜まった土砂ほかの沈殿物はサンドポンプやエアリフトにより除去を行う。

除去方法	適用沈殿物
ベアラ浚渫 図 7.3.8	比較的柔らかい堆積物の回収に適す。
エアリフト浚渫 図 7.3.9	比較的締まった砂や砂利などの回収に適す。

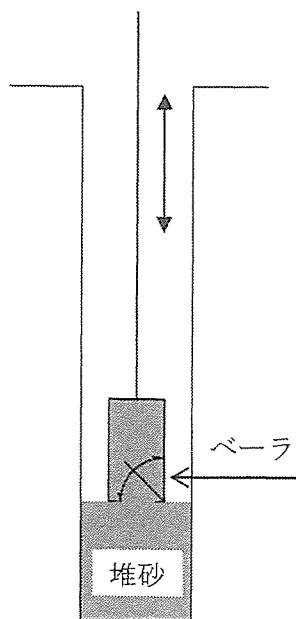


図 7.3.8 ベアラ浚渫

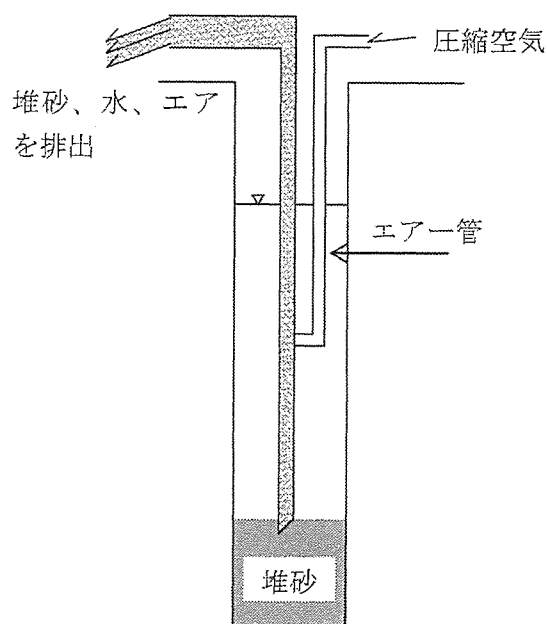


図 7.3.9 エアリフト浚渫

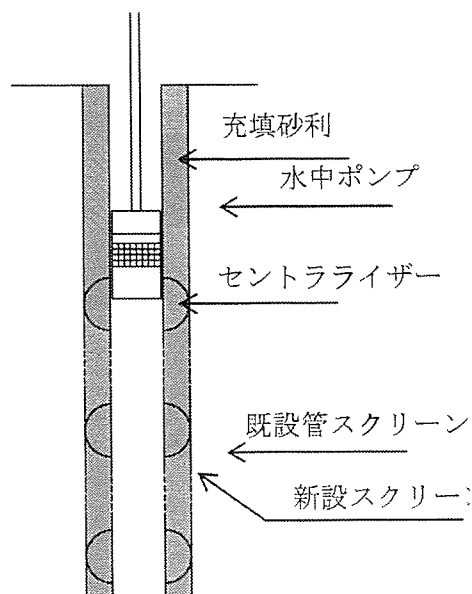
(3)井戸設備の破損補修

地盤の変位や部材の腐蝕などによりケーシングやスクリーンが破損した場合の補修方法は一般的に下記のような工法で補修される。

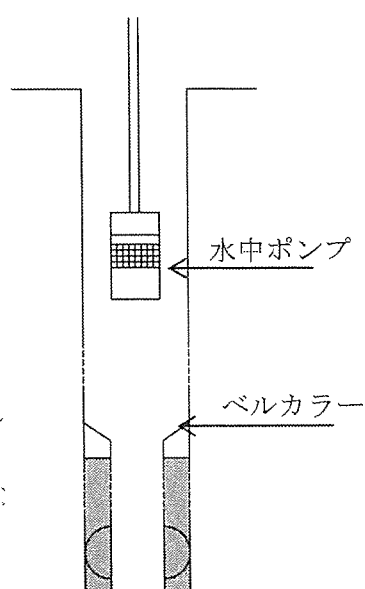
	補修概要	備考
ダブルケーシング 図 7.3.10①②③ 注)	内挿管の挿入	破損状況により材質選択が重要
ケーシングライナー装着工法	成形ライナー管の拡張圧着	破損個所が小さい場合
ケーシングパッチ工法	樹脂管をパッカーにて圧着	

注) ・内挿用のスクリーンは既存スクリーンより孔径が小さくなるため、スクリーン長を既存より長くして対処する場合が多い。また、内挿管と既設管の間の砂利充填は必ずしも実施する必要はないが、破損部より土砂が流入する場合には充填する。

①全長、二重構造とする場合



②部分的に下部を二重構造とする場合



③部分的に上部を二重構造とする場合

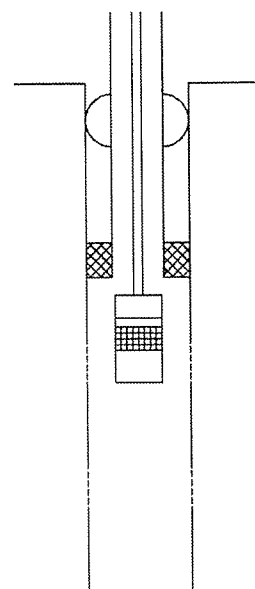


図 7.3.10 ダブルケーシング

7.3.2 効果の確認

メンテナンスを実施した後、通水施設の能力（集水能力、通水能力、涵養能力）が回復していることを確認する。

これは、対策工として設置した通水設備が十分な能力を有し、施設の長期連続稼動が可能であることを確認するための性能試験であり、対策工設置直後に行う初期性能確認試験とメンテナンス時の長期性能確認試験がある。基本的な確認試験の内容は初期もメンテナンス時も同様であり、これは「地下水流動保全工法¹⁾（p3-3、P4-10）」版にて詳細に記載しているのでこれを参照されたい。

図 7.3.11 に能力確認試験のフロー図のみ記載する。

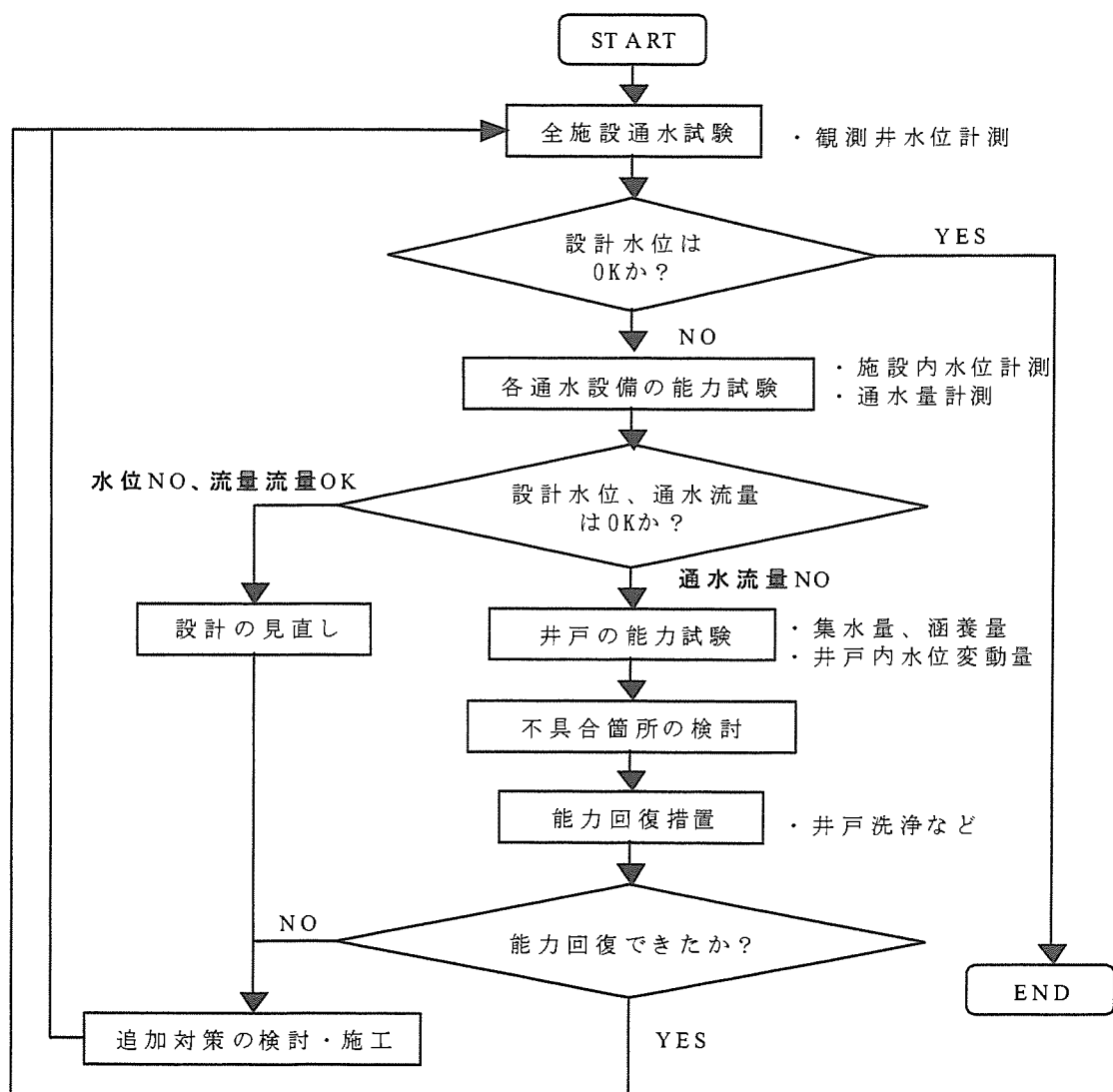


図 7.3.11 性能確認試験フロー

7. 4 供用時におけるモニタリング

モニタリングは各調査・設計・施工・維持管理の各段階にて実施されるが、ここでは施工段階から流動保全設備の継続的な維持管理段階までにおける、計測項目や方法、使用される計測機器等について記述する。

施工段階から維持管理におけるモニタリングの主な目的は下記のとおりである。

- 1) 施工前（計画・設計段階）における基礎データの収集。
影響の有無や地下水流動保全工法の検討・設計を行う上での基礎データの収集、また、施工前の基礎データはモニタリング時の管理値を設定する際の基準となる。
- 2) 施工や流動保全設備設置にともなう地下水流動状況の変化の把握
対策効果や影響の有無を把握し、補足調査や補助工法等の必要性の検討資料とする。
- 3) 施設供用時の維持管理（メンテナンス）
対策効果の継続性や機能低下の有無の把握。目詰まり等の原因把握による集水施設等の保守
- 4) その他、周辺環境への影響把握

7.4.1 モニタリング項目の分類

地下水流動のモニタリングは、計測する対象と計測値の利用目的により次の様に大別できる。よってモニタリングの目的を明確にした上で計測機器の選定等を行うことが重要である。

- ①地下水流動の状況の計測
地下水流動保全工法の効果の確認
- ②地下水流動阻害要因の計測
メンテナンスの実施時期と目詰まり等の原因把握
- ③周辺環境変化の計測

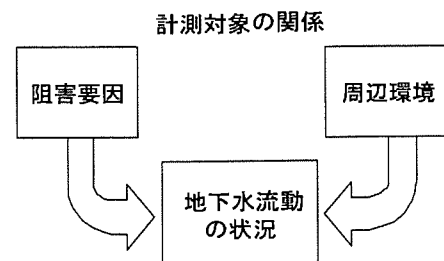


図7.4.1

(1) 地下水流動状況の計測

計測項目：水位、流量、流向流速

水位のみを長期に観測する場合にはフロート式の自記水位計を用いることもあるが、それ以外の項目も合わせて比較的高い頻度でモニタリングする場合は電気式水位計を用いる場合がほとんどである。

通水管の流量や湧水流量は、電磁流量計や三角堰を用いて計測できるが、地盤内の透水流量は計測が困難であるため、複数の孔内水位を計測し増水時等の変動からダルシー則に基づき推定する。流向流速についても同様にして比較的広い範囲の状況を推定できる。

また、単孔にて孔内流向流速を計測する方法もいくつか提案されており、揚水井の孔壁付近の局所的な水みち分布や比較的広い範囲の水みちの目安、目詰まり状況の把握に用いることができる。

詳細は第4章を参照。

(2) 地下水流動阻害要因の計測

計測項目：pH、DO、塩化物イオン、電気伝導度、濁度、ポンプ電流、ポンプ流量

地下水流動阻害要因には①細粒分の移動による目詰まり、②水質に起因した目詰まり、③通水設備の劣化（表7.2.2参照）がある。ここで、①③は間接的に水位や流量の変化で想定されるものの直接的なモニタリングは難しく、メンテナンス実施時期に孔内のカメラ観察等での確認となり、モニタリングの対象としては②の水質が実施される。

ほとんど沈降しない細粒分や微生物によるスライム、塩化物の生成、腐食等の水質の変化や通水設備の能力の劣化による地下水流動阻害を把握するものである。

集水・涵養施設の水質に起因した目詰まりは、現場によって種々の原因が考えられるが、近年、水質用のセンサーを装備した水位計が開発、利用されている。メンテナンスを想定した水質分析項目としては、表7.2.4に水質分析の提案例を示しているが、これらのうち、水位と同時に水質用のセンサーで濁度、水温、pH、電気伝導度、DOについては計測可能である。その他の項目に関しては、別途詳細に検討を行う必要があるものの、目詰まりが問題となる集水・涵養施設では、水位と合わせてこれら項目をモニタリングすることも有用であると考えられる。

(3) 周辺環境の変化の計測

計測項目：降水量、温度（気温、水温）、水位（用水井水位、河川水位、潮位）、流量、日射量、降雪量、周辺工事の影響

影響区域内では農業用水・工業用水の取水や排水状況、降雨や融雪、蒸発発散等の気象・水文など、施工以外の環境変化が地下水流動に及ぼす影響を把握しておくことが望ましい⁹⁾。これにより地域住民とのトラブルを回避することも可能である。また周辺工事、地震や水害、揚水、かんがい等によって環境が著しく変わることがあるので自然や人為的な要件を記録しておく必要がある。

(4) その他の計測

表7.4.1に示すように水位の変動量に関連づけられる地盤への影響が予測される場合、該当する項目について、併せてモニタリングを行うことが望ましい。特に地盤の変位に係わる項目は比較的計測が容易であり、かつ建設工事の施工に関連して周辺地域からの苦情等が多い項目である。よって、定期的かつ直接的な計測を実施することが望ましい。これらのモニタリング結果を分析して、地下水流動阻害の主要因を明確にすることで、効率のよい通水設備のメンテナンスを行い、地下水流動阻害が環境に及ぼす影響を知るための継続的な調査資料を得ることができる。表7.4.2に主なモニタリング項目の概要と計測原理を記載する。

表7.4.1 地下水流動阻害による地盤環境への影響⁸⁾

	(a)上流側		(b)下流側	
(1)地下水利用面への影響	利用水量が増える		水量変化	井戸枯れ 水田減水深の増加
	水質変化	滞留による	水質変化	塩水化
		汚染物質の拡散		酸化
(2)地盤・構造物への影響	地盤	液状化危険度増大	地盤	圧密沈下
		地盤の湿潤化		地表陥没(圧密以外)
		凍上・融解		地表の乾燥化
		水浸沈下(コラプス)		
		こね返しによる強度低下		
	構造物	構造物の浮上り 構造物への漏水増大	構造物	ネガティブフリクション 杭の腐食 地中埋蔵文化財への影響
(3)自然環境、動植物・生態系への影響	自然環境	泉や池の氾濫	自然環境	湧水枯渇
		地表の気象変化		河川・湖沼の減水 地表の気象変化
	動植物生態系	根腐れ	動植物生態系	植物の枯死
				水生生物、水生植物

7.4.2 モニタリングの範囲（配置）・頻度・期間

モニタリングを実施する範囲（配置）と頻度については、個々の現場の状況に応じて設定する必要があり、さらにモニタリングを進める中で結果をみながら適宜見直せば良い。

(1) モニタリングの範囲、配置

基本的なモニタリングの範囲、配置は以下のように考えられる。

- ①集水・涵養施設（構造物直近）はメンテナンスの必要性を判断するためにも必要であるため、構造物の縦断方向に上・下流両側に極力密に観測点を配置する。観測点は、集水・涵養施設が井戸構造であれば、施設内でのモニタリングとする。
- ②事前の影響予測において影響が発生する恐れがあるとされた範囲をカバーできるように観測点を構造物横断方向の上・下流両側に配置する。過去の施工事例や機関別の調査要領等によれば、一般的な地質条件下での調査範囲が概ね構造物より500m程度（地下水流動保全工法¹⁾ 表2.2.2～2.2.4）とされており、この範囲で事前に水位観測孔が設置されていれば、それを引続き利用することができる。なお、測線数は施工前の地下水位コンターの形状や土質構成の違い、地下水利用状況、重要構造物の有無等を考慮して設定する。
- ③影響範囲外の地点でもモニタリングを実施する。影響範囲外の計測地点は、対象地の自然条件下での地下水位を示すものであるから、集水・涵養施設等で計測された水位変動状況と、影響範囲外の水位変動状況を比較することで、施工による影響なのか自然条件下での水位変動なのかが、把握しやすくなる。
- ④地盤変位を計測する場合には、絶対値として大きな変位を生じる恐れのある範囲、相対変位が大きくなる恐れがある範囲があり、それぞれ計測地点が異なるため、沈下対象となる粘土層の層厚分布や水位変化量の場所的な変化量の違い、対象構造物の分布範囲などから適切に計測が行えるポイントを選定する。

表7.4.2 主なモニタリング項目の概要と計測原理

項目	目的	概要	計測原理
水位	水位低下による井戸枯れ、地盤沈下、水位上昇による植物の根腐れ等の監視	流動保全工法の効果を確認する以外に、周辺の用水井戸や表面水の変化を把握する	フロート式、水圧式、超音波式、電極式
流量	目詰まりの発生や周辺環境の変化の監視	集水・涵養施設の目詰まりが生じれば、流量の低下として現れる。その他周辺の用水井戸や表面水流量の変化を把握する	電磁式、超音波式、回転羽式、三角堰
流向流速(単孔)	周辺地盤の流向流速傾向の推定	孔内の流向流速を把握することで、周辺地盤内の地下水の流動状況を推定する	加熱測温式、電位差式、ボアホールカメラ
DO(溶存酸素量)	微生物によるスライムの生成・付着、酸素濃淡電池形成によるスクリーン材の腐食	溶解度は、水温が高くなると小さくなる他、塩分、気圧等によっても影響される。	隔膜型ガルバニ電池式
塩化物イオン	溶存塩類の化学反応による塩化物の生成・付着状況の把握	水中溶存塩化物。沿岸海域では、海水の影響を受け、濃度が高いことがある。また、塩素イオンは、生活排水、工場排水等の混入により増加する事がある	伝導度換算式
電気伝導度	酸素濃淡電池形成によるスクリーン材の腐食状況の把握	電気伝導率ともいう。電気の流れやすさを示す数値で、水中に含まれる陽イオン、陰イオンの合計量の目安となる。	4端子式
pH	微生物・塩化物等の生成および腐食の発生状況把握	酸性・アルカリ性の度合いを示す指標。水素濃度の逆数の常用対数をpH単位として示したもので、中性を7として、数値が大きいとアルカリ性、小さいと酸性である。	ガラス電極式
濁度	微生物・塩化物等の発生状況把握	水の濁りの度合いを示す指標。粘土鉱物であるカオリン1mg/Lが含まれた水を1度という。主要因は粘土性物質、プランクトン微生物、有機物質など。粒子の粒径は0.1～数百μmのものがほとんどである。	散乱光・透過光測定方式
降水量	降雨による地下水流動の変化を把握		転倒ます式
温度	蒸発発散や融雪による地下水流動の変化を把握		熱伝対、電気抵抗変化式、白金センサ式

(2) モニタリングの頻度

モニタリングの頻度については以下のように考えられる。

- ①可能な限り自記記録タイプの水位計を利用し、連続的な観測データを収集する。地下水位は、降雨等によって変動するので、その程度を把握するためには連続観測が望ましい。
- ②計測頻度は地下水の利用実態や地域の特性に応じて設定する。一般に地下水位の変動速度は速くないと考えられるので、1回/日程度の計測で十分であると思われるが、地下水の利用が盛んな地域では、人為的な水位変動が観測されることがある。その程度や変動パターン等を把握するためには、水位の変動要因に応じて計測頻度を多くするなどの工夫が必要である(図7.4.2、7.4.3参照)。また、沿岸地域で地下水位が潮の干満の影響を受けて変動する地域でも同様のことがいえる。

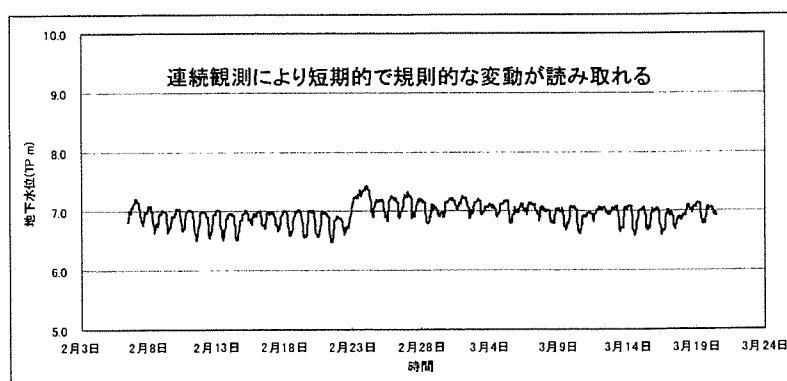


図7.4.2 人為的要因で変動する地下水位：連続観測（1回/日）した場合の水位データ

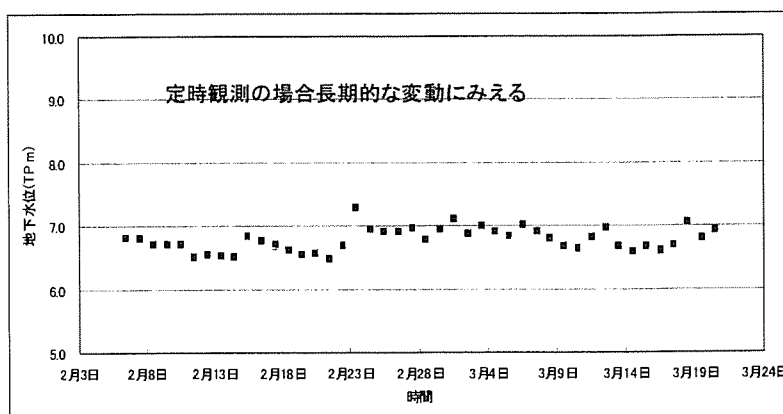


図7.4.3 人為的要因で変動する地下水位：定時観測（1回/日）した水位データ

(3) モニタリングの期間

モニタリングの実施期間は、地下水位が施工時のダムアップや低下状態から施工前の状態まで復水したことが確認されるまでが一つの目安となる。ここで、施工時の影響がなくなり、定常的な変動をするようになるまで継続することが基本となるが、季節変動などを考慮すると少なくとも数年モニタリングを行うことが望ましい。また、メンテナンスが必要な集水・涵養施設がある場合には、機能維持を確認するためのモニタリングを継続して実施する必要がある。

7.4.3 モニタリングにおける管理値

管理値は、地下水位、通水量、地盤変位等があり、地盤の透水性、帯水層の分布などにより設定される。また、地下水流動の変化により影響を受けると考えられる構造物の機能維持の観点から設定される管理値もある（建物や鉄道の軌道等）。このように管理値の設定は様々であるが、モニタリングの際に設定する管理値の考え方は、「地下水流動保全工法¹⁾」に詳しく記載されているので参考にされたい。ここでは地下水位にする管理値を主に記載する。地下水流動保全工法の検討時および稼働時のメンテナンス計画における管理値や各種評価基準値については図7.1.1、図7.1.2を参照。

(1) 地下水位の管理値

管理値 (ε_2) は図7.4.4（参考資料¹⁾）の図3-4.1に加筆）に示すように限界値 (ε_0)、許容値 (ε_1)、設計値 (ε_3) をもとに設定される。それぞれの値について概要を記す。

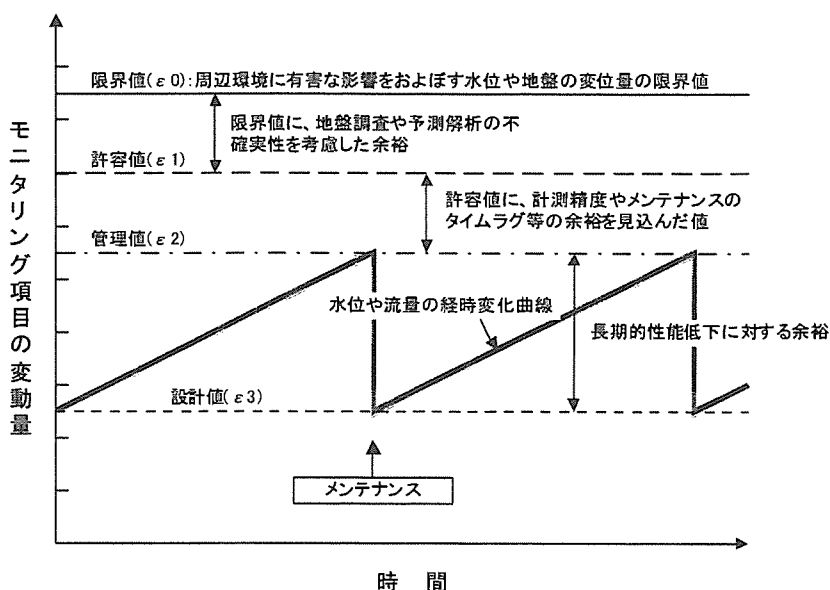


図 7.4.4 地下水流動保全工法における管理値の概要

①限界値 (ε_0)

限界値 (ε_0) は、構造物の施工にともなう地下水の流動阻害により生じる水位変動により、井戸枯れや有害な圧密沈下が生じるときの水位低下量や通水管流量の値で、施工前の水位や施工前水位を維持できる通水管流量を基準として、両者の水位差で表される。

ここで、施工前の基準となる水位は、年間の水位変動特性と地下水の利用実態を考慮して設定する必要がある。多くの地域では、地下水位は降水量の多い夏期に高く冬期に低くなると考えられ、自然状態での変動幅のうち、下限値を示す冬期の水位を施工前水位の基準とすることができる。ただし、地下水の利用実態として、夏期に多くの地下水を利用する地域では、水位低下量による影響を受けやすいのは水位の高い夏期である可能性もあるため、基準値となる地下水位の設定には配慮が必要となる（図7.4.5参照）。

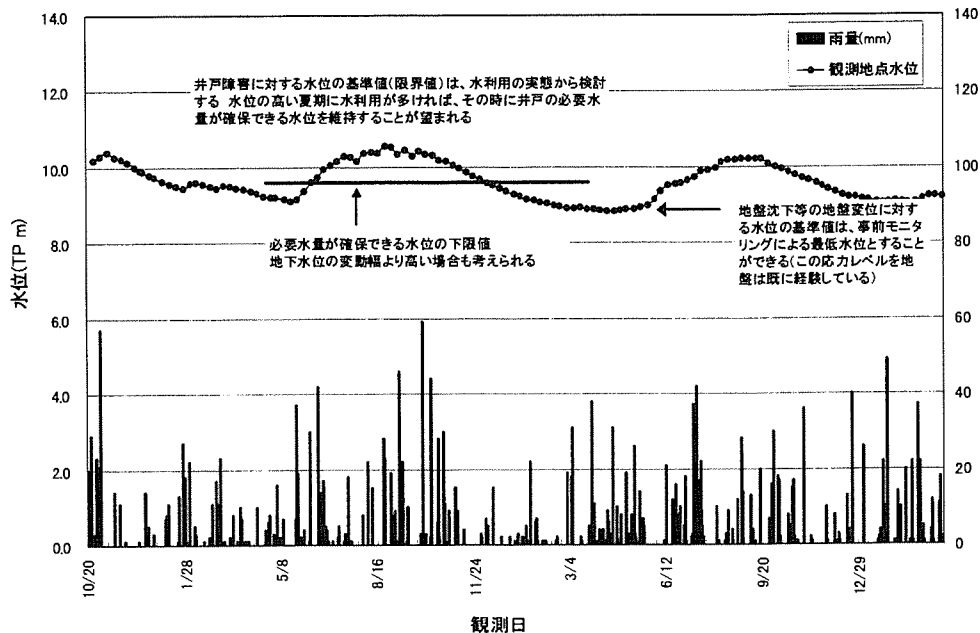


図 7.4.5 水位の管理値（限界値 ε_0 ）設定のイメージ

②許容値（ ε_1 ）

地盤調査や予測解析の精度の不確かさを考慮して、限界値（ ε_0 ）に一定の余裕を見込んで設定される基準値を許容値（ ε_1 ）とよぶ。この余裕の取り方は決まった方法はないが、地盤調査の不確かさを考慮する程度は、たとえば斜面や盛土の安定計算などで採用される安全率（この安全率にも地盤や試験結果の不確かさが考慮されていると考えられる）を目安にできる。一般に、対象にもよるがこのような安全率は1.2程度の値をとる。よって、限界値から2割程度の余裕を考慮して限界値の80%程度を許容値とするといったことも考えられる。ただし、限界値が小さい場合には、余裕代の絶対値が小さくなるため、危険な設定となる場合には、別途許容値を検討する。

③管理値（ ε_2 ）

地下水流動保全工法では目詰まり等による性能低下を考慮し、許容値を超える前にメンテナンスを実施する必要があるが、そのメンテナンスを実施する時期を決めるための基準値が管理値（ ε_2 ）である。管理値の設定では、許容値に対してモニタリングの精度やメンテナンス実施までのタイムラグを考慮して、一定の余裕を考慮する。ここで、モニタリングの精度そのものは、観測頻度がある程度密であれば非常に小さい値であると考えられるため、現実的にはメンテナンスの実施に際して必要となる時間（準備工とメンテナンス期間）を設定した上で、その間に発生する水位変動量の大きさを、それまでの観測データから推定し、設定することとなる。

図7.4.6にメンテナンスの時期の設定模式図を示すが、この図では、メンテナンス開始前に観測された水位等の変化量と時間の関係から、メンテナンス期間中に進行する水位等の変化を予測し、水位等の変化量がメンテナンス終了時に許容値を超えないようにメンテナンスの開始時期を決めている。

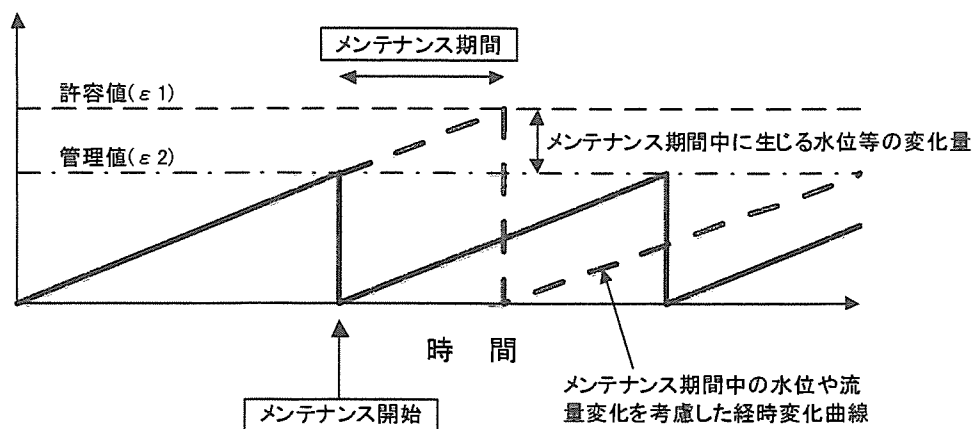


図 7.4.6 メンテナンス時期の設定模式図

④設計値 (ε_3)

流動保全工法の初期性能、つまり設計上許容しうる水位変動量を設計値 (ε_3) とよぶ。設計値には、長期的目詰まりによる性能低下が予想される場合には、管理値に性能低下分を見込んで設定する。長期的目詰まりの影響が小さいと評価できれば、設計値＝管理値となる。

(2) その他の管理値

地下水の計測値以外にて設定される管理値としては、地盤変位に対する構造物の許容値より設定される場合があり、各機関別または構造物別の値が示されている。

「地下水流動保全工法¹⁾ p2-96～2-104」に整理されているので参照されたい。

7.4.4 モニタリングシステム

モニタリングシステムは、観測情報の連続性やリアルタイム性、通信方法や電源の確保、およびそのコストといった諸条件の中で、いくつかの技術開発の変遷を経て現在に至り、さらに次の世代に移行中であるといえる。それらは大きく次の5つの世代に分類できる。

表7.4.3 モニタリングシステムの世代分類

世代	観測方式	内容	特徴
第一世代	手動方式	標尺や計器を持ち運び、電池式の携帯型測定器で人力にて観測	<ul style="list-style-type: none"> ・1日1回～1週間に1回程度の断続的な観測 ・悪天候、冬季などでは観測に行くことが困難
第二世代		機械式の計器を用いてゼンマイ式や電池式のアナログメータ（自記式記録計）で記録	<ul style="list-style-type: none"> ・連続的な観測が行える ・一定期間ごとに用紙交換やインク、電池の交換が必要 ・冬季などでは器械的に観測が困難 ・監視用には不向き（ただし警報出力型も有）
第三世代	半自動方式	電気式計器を用いてデジタルレコーダに記録	<ul style="list-style-type: none"> ・電源として商用電源やバッテリーを用いる ・複数の測定項目について観測できる ・断続的だが測定頻度を密にできる ・記録紙等の交換は不要だがデータの回収が必要 ・冬季観測可能 ・監視用には不向き（ただし警報出力型も有）
第四世代	全自動方式	有線テレメータ方式（商用電源及び通信線や電話回線を用いて電気式計器で測定しデータ転送する）	<ul style="list-style-type: none"> ・商用電源を使用 ・多項目データを高頻度で観測可能 ・メンテナンスを除き現地に立ち入る必要がない ・定期的にデータを記録媒体に移すことで半永久的な記録が可能 ・年間を通じ24時間の観測が可能 ・リアルタイムで挙動を把握できる ・監視に適する
第五世代		無線テレメータ方式（商用電源と電話回線を用いて電気式計器で測定しデータ転送する）	<ul style="list-style-type: none"> ・無線（あるいは衛星通信）によるデータ転送 ・太陽光または風力発電でバッテリー充電 ・山岳地域など電源や有線通信の困難に適応

施工におけるモニタリングでは、第四世代が主流であり一部で第五世代も登場している。地下水観測では、既存の井戸の利用や径の小さい孔を用いる場合も多く、比較的厳しい条件下で複数の必要な項目について観測する必要がある。

また、施工完了後も長期に観測を行うことから、観測にともなうコストをできる限り抑えた体制を構築することが重要である。そのため、計測機器の保護やメンテナンス、交換性および観測人員の引継ぎ等の負担軽減などを考慮してシステム化を図る必要がある。

表7.4.4に、モニタリングシステム構築に関して、各方式のメリットやコストなどの特徴についての比較表を示す。

表7.4.4 各方式の特徴の比較

	手動方式	半自動方式	全自動方式
データの集約度	【間欠データ】 観測員派遣時に 収集したデータのみ	【連続データ】 蓄えたデータを 一定期間ごとに収集	【連続データ+即時性】 多項目のデータを 即時に収集できる
省力度	【小】 観測員の現地での 労力が大きい	【中】 観測員の現地での 労力が若干必要	【大】 メンテナンス以外は 全くの省力化
機器コスト	【小】 各計器とも安価	【小】 記録装置に費用がかかる。	【大】 初期のコストが高い。
データ単価	【大】 労力の割りに、測定点数や 観測頻度を大きく取れない	【中】	【小】 大量・高密度で安価
データ活用の リアルタイム性	【小】 観測からの図表化や 解析着手までに時間を要す	【小】 データ収集や数値化に 時間を要し即時性に欠ける	【大】 即時的な図表化や警報監視 迅速な解析作業が可能
長期コストの傾向	主に人件費が占め、 やがてメンテナンス費が増大	主に人件費(消耗品費)が占め、 やがてメンテナンス費が増大	主に通信費と電気代が占め、 やがてメンテナンス費が増大
適用範囲	比較的小規模な地下水位観測や 詳細調査計画立案に先立つ概査に適用されている。	データの頻度は全自動方式と大きく変わらないが、 比較的緩慢な動きを示す地下水の挙動の 解明や対策効果の判定に適用	大規模な観測や保全対象の重要度が高い区域など、 観測点数が多く、観測頻度が高い場合などに非常に有効

このように全自動式では、観測が長期で大規模になるほどコストパフォーマンスは高まる。施工後の観測間隔を大きく取る場合には、不使用の期間について電源を切断し通信を停止することで手動方式並みにランニングコストを下げることができる。しかし、長期化するにともない機材の修理交換のコストが増大する。

また、近年はインターネット技術の導入が盛んであり、VPN（バーチャル・プライベート・ネットワーク；インターネットを用いて専用回線を構築する技術）等を用いることで従来の専用回線を用いるより低コストで大量の情報を高速に送ることができる。

既存のネットワークを活用してこのような技術で観測に掛かる通信費を固定のネットワーク料金内に納めてしまうことで、実質的な観測通信ランニングコストをゼロに抑えることが可能となる。

7.4.5 自動モニタリングシステム

モニタリングにおいては、施工や気象、水文等の様々な環境変化の影響を受けるが、自動モニタリングシステムでは使用している計器はすべて電気・電子機器であるため、経年劣化や落雷等による破損が生じる。

一方、モニタリングの重要度が認識されるにつれて、測定頻度は増加し期間も長期化する傾向にあり、長期自動モニタリングについて対応が迫られている。その対策としては、次のようなものが挙げられる。

(1) 長期自動モニタリングの注意点

1) 計器の集積化

計器を単純化・小型化して複数の計器をまとめることで、既存孔や小さい径の観測孔でも多くの情報を得ることができる。計器本体の素材や構造を熱や振動に対し強化し測定・演算・記録用部分のIC化を図るなど、故障やノイズの影響を受けにくくすることで、長期使用に耐えうるシステムにする。

また、水質センサ部についても計測方式や構造を工夫することで、観測ごとの水の攪拌やセンサ表面の清掃を不要にすることでメンテナンスフリー性を高めることができる。

2) 交換が容易なシステムや設置方法の開発

計器設置においては治具を工夫し、計器本体を撤去及び再設置が可能なものにする。計器は、その選定にあたり長期間、使用計器あるいはその相当品が入手可能であるかを考慮する。配線は計器設置部付近で集約化して極力シンプルな配線にする。

3) ユーザフレンドリーな自動観測システムインターフェースの開発

計測の長期化に伴い担当官の年次交代も増えるため、操作未経験者にも操作が容易なように自動観測システムの操作インターフェースを直感的でユーザフレンドリーなものにしてゆく必要がある。

4) 長期的な視野に立ったフレキシブルなシステム構成

計器やコンピュータ、OS等の将来的な世代交代やアップデートにも支障なく対応するために、機能の切り分けを行い、移植性も考慮した柔軟性の高いシステム構成を考えておく必要がある。

(2) 参考事例

1) 自動モニタリングシステム

図7.4.7に自動モニタリングシステムの構成例を示す。

監視局

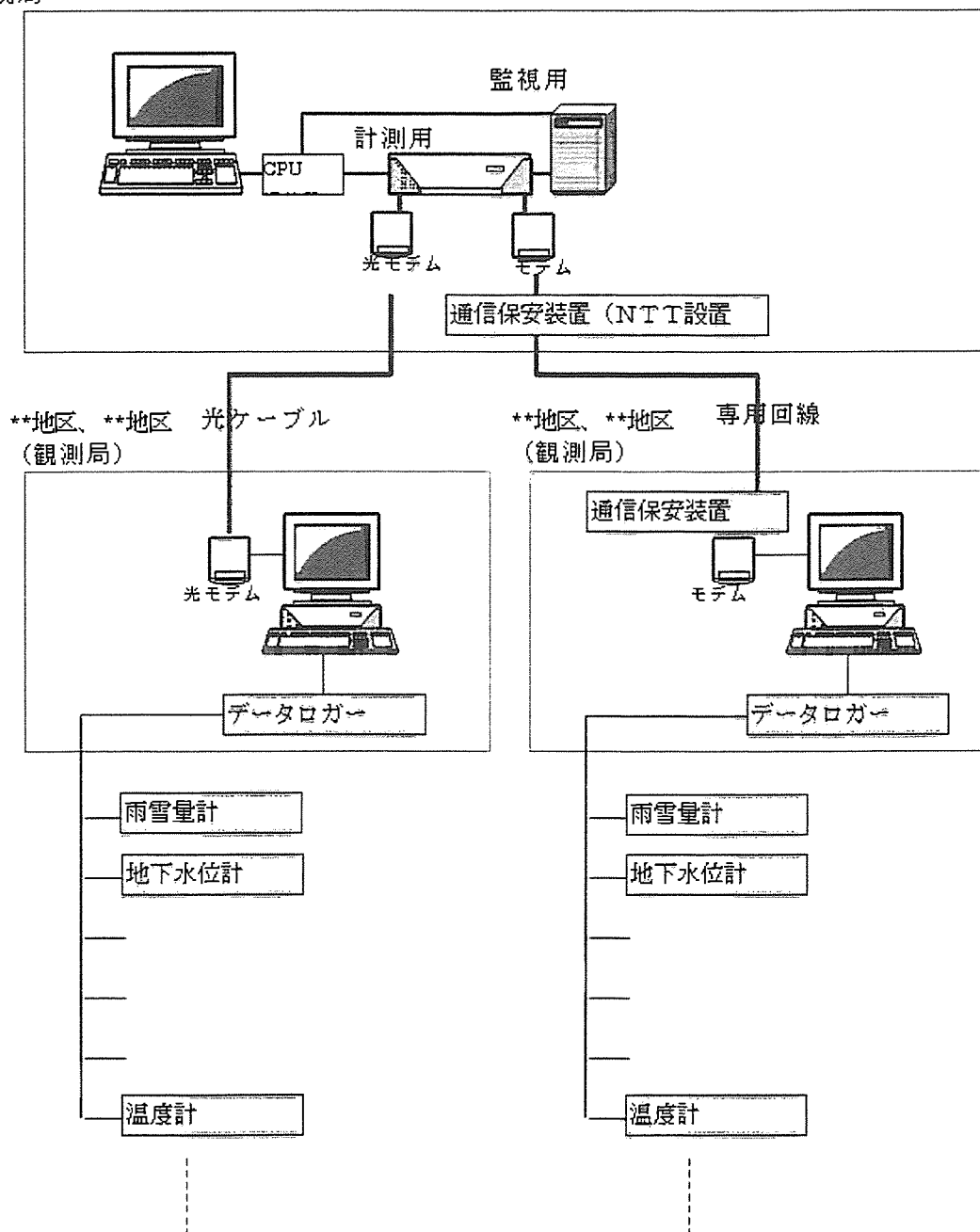


図7.4.7 自動モニタリングシステム構成例

2) 計測機器

①水位・水質モニタリングプローブ例

外 見	概 要
<p>S&DL水位計(応用地質株式会社)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ・水位・pH・温度 ・プローブ径：25/35mm ・データログ内蔵（512k B）センサーとデータログを1つのプローブに集約 ・プローブ内でのデジタルによって温度変化やノイズの影響を受けにくい構造 ・データ回収や電池交換・メンテナンスが容易 ・水深35mまで観測可能
<p>Multi-Parameter TROLL 9000 (In-Situ Inc.)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ・センサー：濁度、DO、電導度、pH、ORP、温度、レベル、大気圧、硝酸性窒素、アンモニウム性窒素および塩素イオンから5つを選択 ・プローブ径：45mm ・データログ内蔵 4MBメモリ内蔵 ・ネットワークおよびテレメトリー機能で長期間モニタリング可能
<p>水質自動監視装置 KW-2 (株式会社 鶴見精機)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ・センサー：濁度、水温、pH、DO、電気伝導度、投げ込み式でダムなどの水深を測定可能。 ・回転式洗浄装置（ワイパ）を装備

図7.4.8 水位・水質モニタリングプローブ例

②データロガー内蔵タイプの水位計

地下水流動保全の計測管理においては現地でデータを回収する半自動観測が一般的であるが、近年は立ち上がりパイプの内部にデータロガーが内蔵された構造の水位計が多用されている。図 7.4.9 にデータロガー内蔵タイプ水位計の構造図を示す。

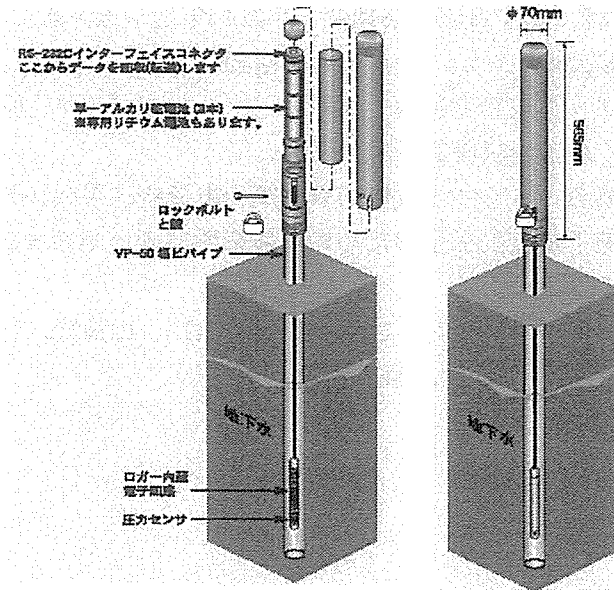


図 7.4.9 データロガー内蔵タイプ水位計の構造図¹⁰⁾

③観測データをEメールで配信するシステム例

計測システムに関しては計測機器の数により決定すべきものであるが、IC カードレコーダー、無線式、ネットワーク型センサー、データロガーを利用したシステムがある。

図 7.4.10 に DoPa 網による遠隔データ配信機種を示す。…DoPa 網（NTT ドコモグループによる携帯電話網）による遠隔データ配信。I-SENSOR データ通信ユニットを付加することにより、DoPa 網を利用して複数のメールアドレスに同時に配信できる。

	高性能型 MODEL-4640A	普及型 MODEL-4677	15φ 型 MODEL-4647	水位・導電率計 MODEL-4631A	水位・pH 計 MODEL-4665
外観・構造	RS-232C 乾電池 データ通信ユニット	RS-232C 乾電池 データ通信ユニット	RS-232C 乾電池 データ通信ユニット	RS-232C 乾電池 データ通信ユニット	RS-232C 乾電池 データ通信ユニット
特長・用途	●総チタン製 ●優れた耐食性 （海水など） ●優れた長期安定性 ●揚水試験用の測定パターンに切替可能	●安価 ●一般（陸水）用	●超小型 ●一般（陸水）用	●水位・導電率を同時測定 ●電磁誘導法の採用で抜群の長期安定性 ●導電率の自動温度補正	●水位・pH を同時測定 ●KG1 無極性方式 ●保守が容易
圧力センサの材質	チタン	SUS-316	SUS-316	チタン	チタン

図 7.4.10 DoPa 網による遠隔データ 配信機種¹⁰⁾

参考文献

- 1) 地下水流動保全工法に関する研究委員会：地下水流動保全工法2002年6月
- 2) (社)日本水道協会：井戸等の管理技術マニュアル，pp147-149，1999.
- 3) 地下水地盤環境に関する研究協議会：平成12年度 地下水情報に関する報告書
- 4)(社)腐食防食協会編：エンジニアのための微生物腐食入門，丸善(株)，p. 16、50-57，2004.
- 5)地下水ハンドブック編集委員会：改定地下水ハンドブック、(株)建設産業調査会、1998.
- 6)日本水道協会：水道施設設計指針、2000.
- 7)(社)全国鑿井協会：さく井・改修工事標準歩掛資料、平成15年度
- 8)地盤工学会：地下水流動保全のための環境影響評価と対策－調査・設計・施工から管理まで－，丸善，2004.
- 9)建設省河川局：地下水調査および観測指針（案），山海堂，1993.
- 10)応用地質(株)：製品カタログ2004.

8. おわりに

地下水地盤環境に関する研究協議会の特別委員会として発足した地下水流動保全技術に関する研究委員会（委員長 西垣 誠）は、約4年間の研究活動を経て、平成16年度末に報告書をまとめることができた。地下水地盤環境に関する研究協議会からの研究活動への御支援ならびに当研究委員各位の委員会活動への積極的な取組みに対し厚くお礼申し上げます。

当委員会に先立ち、地下水流動保全工法に関する研究委員会（委員長 丹原 光隆）が、平成9年から13年3月までの約4年間を活動し、その結果をまとめた地下水流動保全工法テキスト（2001年12月）およびその改訂版である地下水流動保全工法（2002年6月）を出版するに至っている。

従って、平成9年から始まった地下水流動保全に関する研究は、8年間におよび、研究成果の発表や講習会を通じての啓蒙化によって、地下水流動保全の重要性が社会的にも認知されるようになってきたと考えられる。

それとともに、地下水流動保全を検討・実施する事業が増加し、新しい技術開発も活発化している。

この様な中で、当委員会は、開削工法以外をも対象にして前委員会でまとめきれなかった事例や新しい事例の研究、特に水みちを中心に考えた地下水調査、地下水位変化の予測技術、新しい発想による地下水流動保全技術（開削、トンネル切土を含む）、地下水流動保全工法のメンテナンス、モニタリングの具体的内容等を取りまとめるに至った。

今回の報告書が前委員会の「地下水流動保全工法」（2002年6月）を補強する形をとったため、一貫性に欠けてはいるが、柔軟な考え方のもとで、将来的に地下水流動保全技術が如何にあるべきかを論じる事に力点を置いている。地下水地盤環境に関する研究協議会会員だけでなく、広く関係者に向けてこれらの新しい考え方が何らかの参考になれば幸いである。

地下水流動保全技術に関する研究委員会
副委員長 橋本 正