

地下水流動保全対策技術

高坂 信章¹・西村 晋一¹・江頭 正州²・小出 太朗¹・
東海林 達弘¹・平林 岳樹³・山野 泰弘⁴・新坂 隆志⁵

¹正会員 工修 清水建設株式会社 土木技術本部（〒105-8007 東京都港区芝浦一丁目2-3）

²正会員 工修 清水建設株式会社 土木事業本部営業統括（〒105-8007 東京都港区芝浦一丁目2-3）

³正会員 工修 清水建設株式会社 土木東京支店（〒105-8007 東京都港区芝浦一丁目2-3）

⁴正会員 小田急電鉄株式会社 複々線建設部（〒160-8007 東京都新宿区西新宿一丁目8-3）

⁵正会員 工博 三信建設工業株式会社 技術開発本部（〒111-0052 東京都台東区柳橋二丁目19-6）

地下鉄道や地下高速道路など線状地下構造物の建設により地下水の流れが遮断され、上流側の水位上昇、下流側の水位低下が発生する地下水流動阻害の問題が顕在化する事例が増加してきている。

この対策としてアブレス・ウォールカット工法およびウェルインウォールの開発を行ってきた。アブレス・ウォールカットは研磨材入りウォータージェットにより土留め壁を切削し、スリット状の開口部を設けるものである。一方、ウェルインウォールは井戸機能を有する装置を土留め壁内に設置し、地下水流動保全対策とするものである。これらの工法の概要・特徴・実施例を示す。

地下水流動保全対策の現場適用を鑑み等価透水係数を用いた設計計算例を示し、その妥当性を検証する。

キーワード：地下水、流動阻害、土留め壁、ウォータージェット、設置間隔

1. はじめに

近年、騒音・振動・日照などの公害問題や景観上の理由から、道路・鉄道などの土木構造物が地下に建設されるケースが増加してきている。このような線状地下構造物の建設により地下水の流れが遮断され地下水位が変動し、様々な地下水・地盤環境影響が発生する事例が報告されてきている^{（例えば1）、2）}。地下水流動阻害により発生する環境影響の例を図-1に示す。

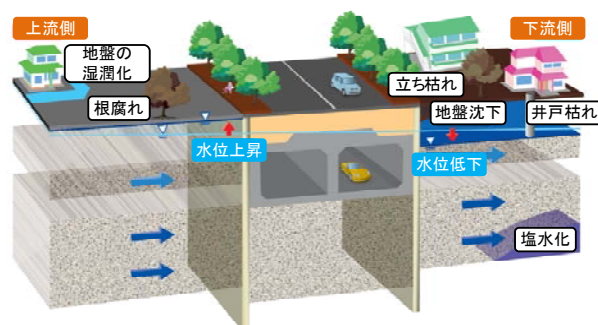
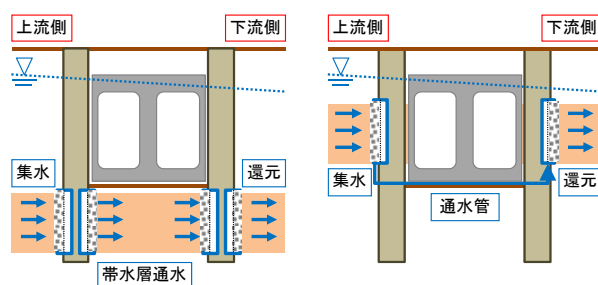


図-1 地下水流動阻害による環境影響の例

このような背景より、構造物建設後においても地下水の流れを維持するための様々な地下水流動保全対策の開発が行われてきている^{3）}。対策の基本的考え方は図-2に示すように、上流側土留め壁部に地下水を帯水層から集水する構造、下流側土留め壁部に地下水を帯水層に還元する構造を設け、両者をパイプ（通水管）や帯水層でつなぐことにより地下水の流れを維持するものである。

本報では、開発を行ってきたアブレス・ウォールカット工法およびウェルインウォールという2つの地下水流動保全対策について概要、特長、実施例を紹介する。また、2つの対策工法についてその特徴を比較し、工法使い分けの指針を示す。

地下水流動保全対策を現地で適用するに際しては、その設置間隔を事前に定め適切な間隔で設置する必要がある。所定の間隔で設置した流動保全対策を等



(a) 土留め壁根入れが遮断 (b) 本体構造が遮断

図-2 地下水流動保全対策の基本的考え方

価な透水性を有する均質材料に置き換える等価透水係数を用いた設計法について紹介し、その妥当性を検証する。

2. 研磨材入りウォータージェットによる土留め壁切削工法（アブレシブ・ウォールカット工法）

(1) 工法概要

本工法は、躯体構築、埋戻しが完了し、土留め壁の止水機能が不要になった段階で、研磨材入りウォータージェット（アブレシブジェット）により土留め壁を切削し、開口部を設け地下水の通水を可能にする工法である。アブレシブ・ウォールカット工法（以下AWC工法）と呼ぶ。工法のイメージを図-3に示す。

a) 施工手順

AWC工法の施工手順を図-4および以下に示す。

- ① 通水箇所が事前に決まっている場合は、土留め壁施工時に切削箇所の直上までガイド管をセットしておく。ガイド管はφ100mm程度の塩ビ管を使用し、芯材とともに建て込む。
- ② ボーリングマシンによりガイド管の中にロッドを挿入し、アブレシブジェット切削深度の下端まで鉛直削孔を行う。ガイド管が予めセットされていない場合は、地上から所定の深さまで鉛直削孔を行う。
- ③ ロッドを引き上げながらアブレシブジェットを噴射ノズルから水平方向に高圧噴射し、スリットの切削を行う。切削されたズリはガイド管内を上昇し地上へ排出される。
- ④ 地上からフィルター材を投入し、切削したスリット部およびガイド管内を充填する。

b) 工法の特長

AWC工法の主な特長は以下である。

- ① 地上から施工するオールケーシング工法などの土留め壁破碎・撤去工法に比べて安価である。
- ② 既存の土留め壁に対して事後対策として施工できる。この場合は、地上からスリット切削深度下端まで鉛直削孔を行う必要がある。

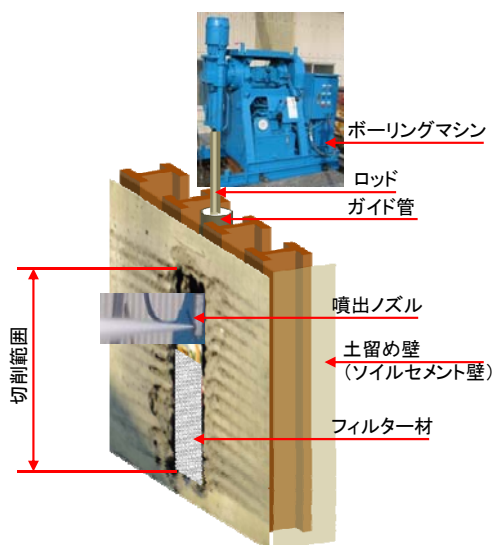


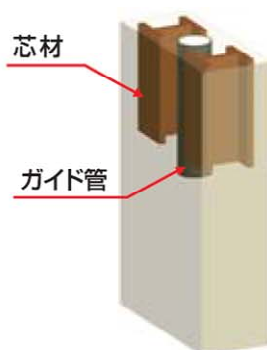
図-3 アブレシブ・ウォールカット工法イメージ図

- ③ 施工機械は小型であり、敷地的な余裕のない場所での施工が可能である。
- ④ 低騒音・低振動の工法である。
- ⑤ 洗浄用のスクリーンパイプを設置することにより、通水性能を維持するためのメンテナンスが可能になる。

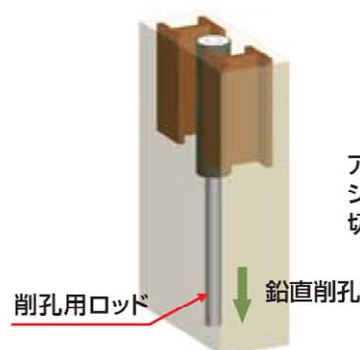
(2) 切削能力確認試験

アブレシブジェットによる土留め壁材料（主にソイルセメント）の切削能力を把握するために、ソイルセメント壁を模擬した試験体を用いた切削能力確認試験を実施した。試験体は地面を深さ1m、長さ4m、幅1m掘削し、ここに流動化処理土を打設して地中に造成した。試験にあたっては、ソイルセメントの強度、ジェットの研磨材混入量、噴射水量、噴射水圧、噴射時間など様々な条件を変化させ、どのような範囲の切削が可能かを確認した。試験結果の一例を図-5に示す。この図は試験体の強度と切削距離の関係を示している。噴射水量が50 L/minの場合、

①ガイド管設置



②鉛直削孔



③スリット切削



④フィルター充填

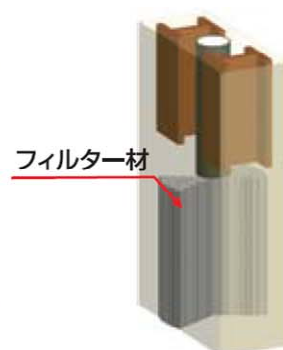


図-4 アブレシブ・ウォールカット工法施工手順

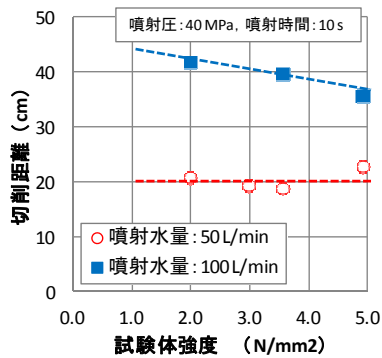


図-5 ソイルセメント強度と切削距離の関係

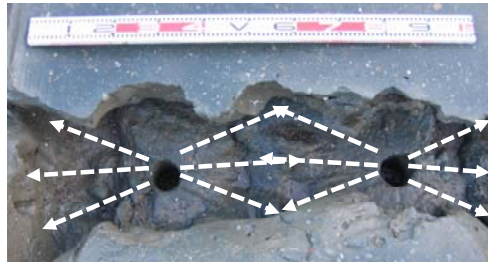


写真-1 切削能力確認試験での貫通状況

切削距離は試験体強度によらず約20cmとなっている。噴射水量を100 L/minとすると、試験体強度の増加にともない切削距離が減少する傾向がみられるが、50 L/minのときの約2倍の距離の切削が可能である。1m厚さの土留め壁を2本の噴射孔から切削するための目標切削距離35cmを確保するためには100 L/minの噴射水量が必要といえる。

写真-1は幅1mの供試体の貫通状況である。噴射孔を2か所設置し、合計4方向の噴射を行うことにより、土留め壁の貫通が可能になる。

(3) 試験工事

小田急世田谷代田地下化工事において実施したAWC工法試験工事⁴⁾の概要を以下に示す。AWC工法は本来、躯体構築、埋戻しが完了した後に、土留め壁根入れ部を切削し通水を確保する工法である。しかし、本現場においては、図-6に示すように主帯水層がGL-13 ～-14m付近に位置する東京礫層である。この層は躯体本体により遮断されるため、上流側と下流側を通水管により接続し通水する必要がある。また、本現場におけるAWC工法の適用性を確認するため、地下掘削の途中段階で試験工事を実施した。

このような特殊条件下での施工となるため、アプレシブジェット切削部の掘削側に鋼製箱で製作した集水装置(写真-2)を取り付け、掘削途中段階での切削および通水管による接続が可能な構造とした。

通水管は図-6に示すように第1段階は帯水層付近の深度で連結、第2段階は躯体上部レベルで連結(現況地下水位+6m)、第3段階は躯体下部で連結(現況地下水位-12m)という3段階で切替え通水

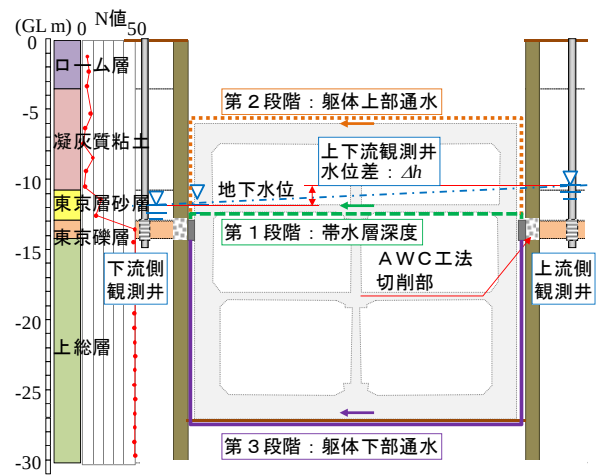


図-6 アプレシブ・ウォールカット工法試験工事
(小田急世田谷代田地下化工事)



写真-2 土留め壁に設置した集水装置

試験を行った。図-7に試験結果として得られた上流側観測井と下流側観測井の水位差 Δh と通水量 Q の関係を示す。現場周辺は工事にもなう種々の要因により地下水位が変動しているため、上流側と下流側の地下水位が逆転($\Delta h < 0$)する期間もあるが、その場合は下流側から上流側への通水($Q < 0$)が認められた。約6mのサイフン(注)を効かせた躯体上部通水では配管内に地下水中のエア分が溜りサイフンが切れて通水不能になる事象が発生した。この結果を踏まえ本施工では躯体下部で通水管を連結する計画とした。

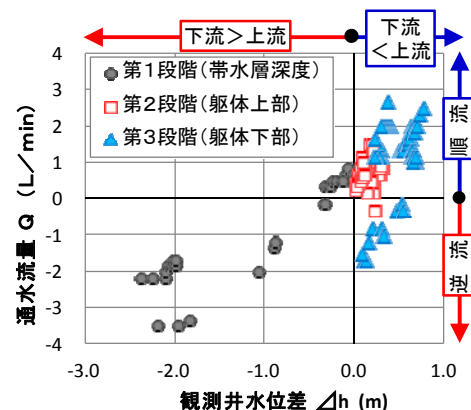


図-7 上下流観測井水位差と通水量の関係

3. 土留め壁設置型井戸による地下水流動保全対策（ウェルインウォール）

(1) 工法概要

ウェルインウォール（WIW）は、井戸機能を有する装置を土留め壁施工時に土留め壁内に設置する地下水対策である。WIWによる地下水流動保全対策のイメージを図-8に示す。

a) 装置の構造

両面型WIWの装置構造概要を図-9に示す。地下水の集水面を土留め壁の両側（掘削側と背面側）に装備している。これらをバルブ付連通管でつなぐ。施工期間中は、このバルブを閉じ土留め壁としての止水性を確保する。施工完了後、このバルブを開いて土留め壁部の通水を可能にする。この装置を対象帯水層の深さに設置する。集水部の背面に装備されたジャッキにより、集水面を地山に押し付けることが可能な構造となっている。

設置が完了したWIWは、地山側からフィルター材、スクリーンで構成され、この内側にポンプがセットされる通常の井戸と同様の構造となる。

b) 施工手順

WIWの施工手順概要を図-10および以下に示す。

- ① 土留め壁施工機械によりWIW設置個所の土留め壁施工を行う。
- ② 土留め壁の芯材（H型鋼）を建て込んだ後、芯材と同様にWIW装置を建て込む。
- ③ 装置を所定の深度まで沈設した後、ジャッキを拡張して集水面を地山に押し付ける。

ここまですを1日目の作業として行う。装置の設置に要する時間は約1時間である。この後、ソイルセメントが固化するまでの期間として約1日間の養生期間をおく。

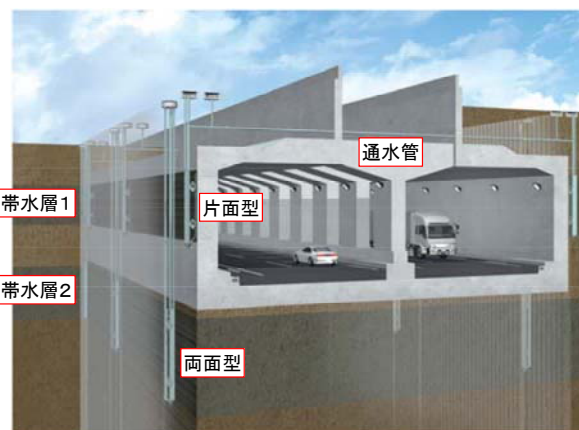


図-8 ウェルインウォール イメージ図

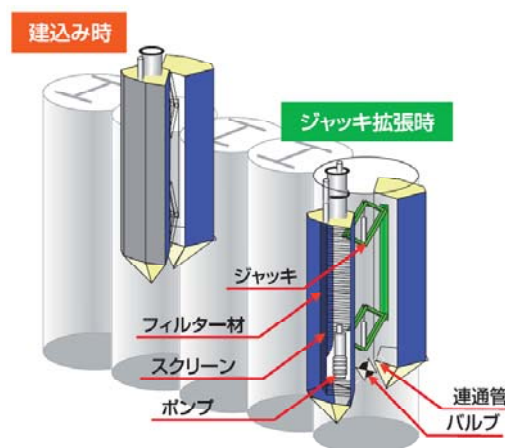


図-9 両面型ウェルインウォール装置構造概要

- ④ ソイルセメントが固化した後、集水部の洗浄を行う。装置設置時には集水部に低強度固化体を充填しておき、ソイルセメントが装置内に浸入することを防止する。この予め充填した低強度固化体と集水面の前面に残っているソイルセメント膜を高圧ジェット水により切削除去する。ジェット洗浄作業と同時に切削泥水をポンプ等で排出する。
- ⑤ 洗浄パイプよりフィルター材を投入、充填する。

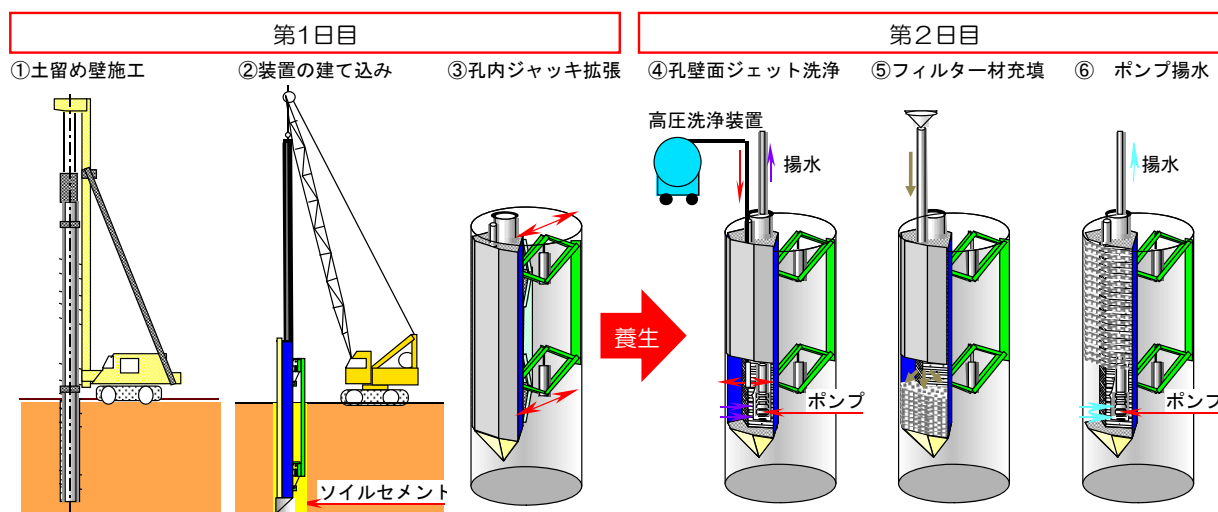


図-10 ウェルインウォール施工手順

⑥ 全層のジェット洗浄，フィルター材充填が完了した段階で，ポンプ揚水により残留泥水を排除して仕上げ洗浄を行う。

c) 工法の特長

WIWの主な特長は以下である。

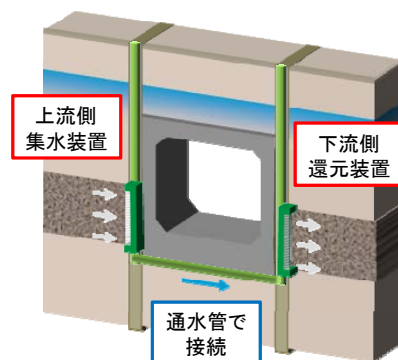
- ① 土留め壁の構築時に装置を設置するため，特別な重機を必要とせず，工期，コスト的なメリットが大きい。
- ② 土留め壁内に設置されるため，敷地的な余裕がない現場でも採用可能である。
- ③ 高圧ジェット水を用いてソイルセメント膜の除去を行うため，高い通水性能が確保できる。
- ④ 地下水流動保全対策だけでなく施工中の地下水対策（ディープウェル，リチャージウェル代替工法）としても利用できる。

(2) 装置のタイプ

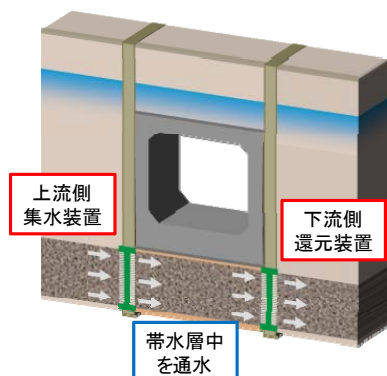
装置の種類として集水部を1面だけ有する片面型WIWと，掘削側・背面側の両側に集水部を有する両面型WIWがある。流動保全対策におけるこれらの適用状況を図-11に示す。

構造物本体が帯水層を遮断する場合は，片面型WIWの集水部を背面側に向けて設置し，上流側集水装置と下流側還元装置を通水管で連結する。土留め壁の根入れ部が帯水層を遮断する場合は，両面型WIWを用い，地上から操作可能なバルブの開閉により通水状態と止水状態を切り替える。

これまでに種々の土留め壁種に対応したWIW装置を開発した。写真-3にその例を示す。SMW, TRD, 泥土固化壁などへの対応が可能である。



(a) 片面型 WIW による地下水流動保全対策



(b) 両面型 WIW による地下水流動保全対策

図-11 ウェルインウォールによる地下水流動保全対策

(3) 適用事例

a) ディープウェル・リチャージウェル代替工法

両面型WIWを施工中の地下水対策として適用した事例を図-12に示す。深さ15mの掘削工事で掘削内地下水位を12.5m低下させる必要があった。地下水位低下が必要な帯水層を対象に両面型WIWを設置し，掘削側はディープウェル代替，背面側はリチャージ



(a) 片面型
SMW用



(b) 片面型
泥土固化壁用



(c) 両面型
SMW用



(d) 両面型
TRD用



(e) 両面型
大口径SMW用

写真-3 ウェルインウォール装置のバリエーション

ウェル代替として利用した。WIW設置状況を写真-4に示す。この写真に示されるように、ディープウェルおよびリチャージウェルが土留め壁内に設置されるため、施工の邪魔にならない、リチャージウェル設置用地が不要となるなどのメリットがある。

施工期間中、100 L/min程度の揚水・注水を継続し、無事工事を完了した。

b) 地下水流動保全対策試験工事

環状第8号線南田中トンネル築造工事においてWIWを用いた地下水流動保全対策試験工事を実施した⁵⁾。試験実施状況の概要を図-13に示す。上流側は土留め壁の外側に従来型の井戸を設置し集水井戸とした。下流側は土留め壁内に両面型WIWを設置し還元井戸とした。両者をφ50mmの通水管で連結した。

通水試験は2004年9月から2006年1月の約17カ月間にわたり行った。試験期間中の地下水位、通水量の経時変化を図-14に示す。通水開始前は上流側観測井と下流側観測井に約4mの水位差があったが、通水開始後、上流側と下流側の水位差が約3.5mに減少した。通水開始当初の通水量は約90 L/minであったが、試験開始直後に来襲した台風により地下水位が大きく上昇し、その後、通水量が65 L/min程度に減少した。台風来襲時に濁水が井戸内に浸入し目詰まりが発生したことが原因と考えられる。その後、8カ月程度は65 L/min程度の通水が維持されたが、2005年6月ごろから通水量が漸減した。特に、大雨により水位が上昇した後に通水量が減少する傾向が認められる。2005年11月には通水量が30 L/min程度まで減少したため、バキューム併用揚水による逆洗メンテナンスを行った。この結果、通水量が50 L/min程度まで回復した。

流動保全対策の計画にあたっては、井戸内への濁水流入防止対策が不可欠である。

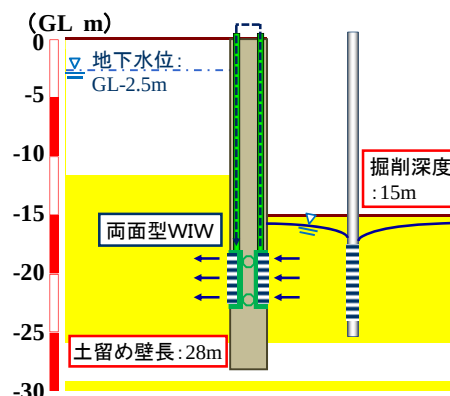


図-12 ウェルインウォールによる施工中の地下水対策

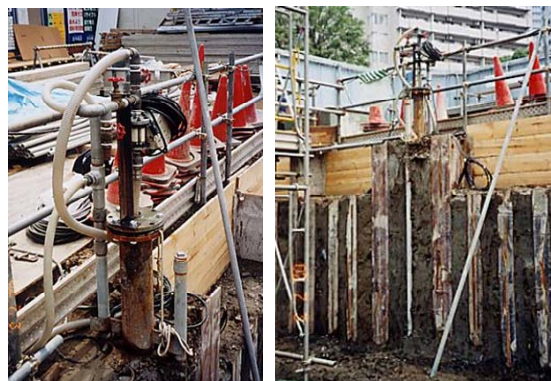


写真-4 掘削工事におけるWIW設置状況

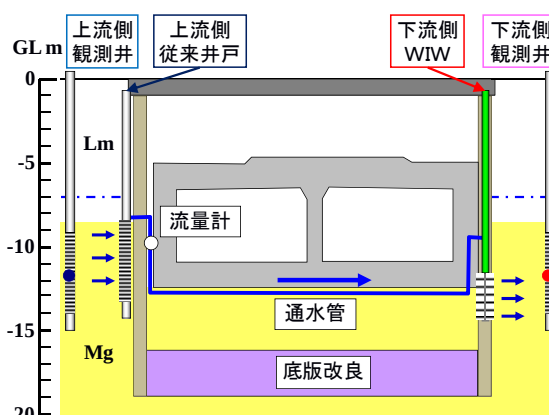


図-13 WIWによる地下水流動保全対策試験工事概要

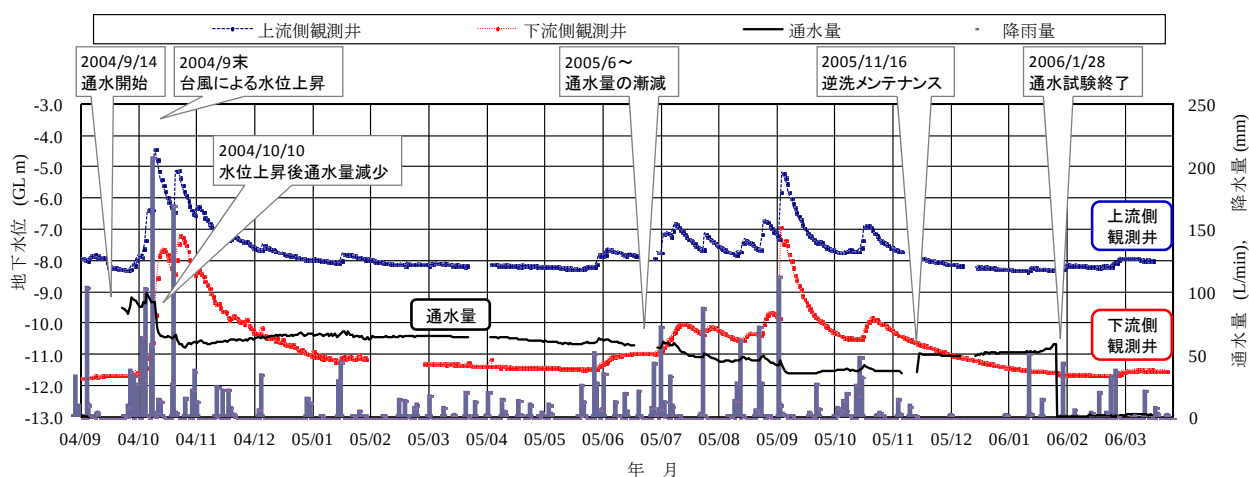


図-14 WIWによる地下水流動保全対策試験工事結果

表-1 地下水流動保全対策の特徴比較表

		アプレシブ・ウォールカット工法	ウェルインウォール
概 要		・土留め壁を研磨材入りウォータージェットで切削し、スリット状の開口を設ける。	・土留め壁に井戸機能を有する装置を設置する。
施工時期		躯体構築・埋戻し完了後 (集水装置の併用により施工時も可能)	土留め壁施工時
帯水層深度 による対応	構造物本体が帯水層 を遮断する場合	△ (集水装置、通水管併用)	○ (片面型ウェルインウォール)
	土留め壁根入れ部が 帯水層を遮断する場合	◎	○ (両面型ウェルインウォール)
特 徴		・構造物完成後に環境影響が発生した場合の事後対策として適用可能 ・対策効果を確認しながら設置間隔を調整することが可能	・施工期間中の流動保全対策としても利用可能 ・施工時の地下水対策(ディープウェルやリチャージウェルの代替工法)として利用可能
メンテナンス		・ガイド管を用いてエアリフトやジェットによる洗浄が可能	・装置内に設置した逆洗ポンプを用いて、揚水によるメンテナンスが可能

4. 工法の特徴と使い分け

上記2つの地下水流動保全対策の特徴を表-1にまとめる。最大の違いは、施工時期である。

AWC工法は基本的には躯体構築・埋戻しが完了した後に土留め壁を切削し、開口部を設ける工法である(集水装置の併用により施工時の対応も可能)。このため、構造物完成後に環境影響が発生した場合の事後対策として適用することが可能であるし、対策効果を確認しながら開口部の設置間隔を増減することも可能である。

WIWは土留め壁施工時に装置を建て込む工法である。土留め壁の施工直後に使用可能な状態になるため、施工中の地下水対策として利用できる。WIW内に仮設のポンプを設置し、上流側から揚水した水を下流側に還元することにより、施工中の地下水流動保全対策として利用できる。また、前述のように施工時のディープウェル、リチャージウェル代替工法として利用することも可能である。その一方で、土留め壁施工段階で事前に設計を行い設置間隔を設定する必要がある。

基本的に、AWC工法は土留め壁根入れ部が帯水層を遮断する場合の対策、あるいは環境影響が発生してから事後対策としての利用に適している。WIWは事前に環境影響が予測される場合、また施工が長期にわたり施工期間中も地下水流動保全対策が必要となる場合などに採用すべき工法といえる。

5. 地下水流動保全対策の設計

AWC工法やWIWを地下水流動保全対策として適切に計画し運用するためには、現場周辺で許容地下水位変動量が満足されるように設計する必要がある。設計の要素としては、AWC工法やWIWの開口幅、開口長さといった施設の構造・仕様に関するものと、

施設の設置間隔に関するものがある。施設の構造や仕様は、適用する工法や地盤条件により概略決定されるため、設置間隔が主たる設計項目となる。

地下水流動保全対策の設計は、有限要素法などの数値解析手法を用いて行うことが一般的である。しかし、数キロメートルという広い解析領域の中で、数十センチメートルの小さい対策施設をモデル化することは容易でない。そこで対策施設の仕様や設置間隔を反映した等価透水係数を用いて設計する方法を提案した⁶⁾。等価透水係数の概念を図-15に示す。実配置モデルにおいては地下水流動保全対策の設置ピッチに合わせて細かくメッシュ分割する必要があるが、等価透水係数モデルではこれを等価な均質材料に置き換えてモデル化するため、要素分割作業が大幅に省力化できる。

AWC工法の適用を計画している小田急世田谷代田地下化工事における設計計算を等価透水係数を用いて実施した例⁷⁾を示す。この現場においては現場

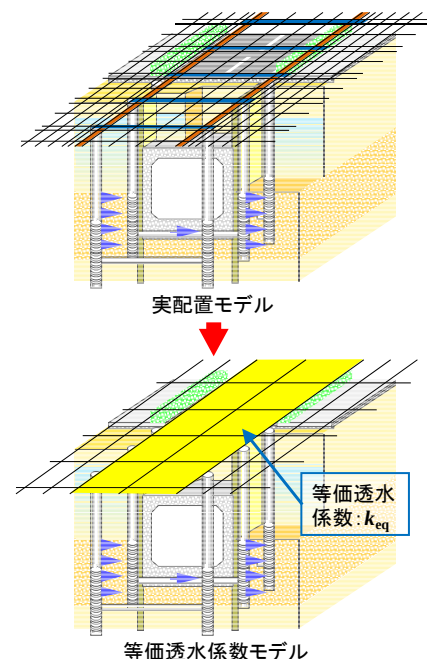


図-15 流動保全対策設計における等価透水係数の概念

表-2 地下水流動保全対策の設計検討ケース一覧⁷⁾

	設置 セット数	平均設置 間隔 a (m)	実配置モデル 通水管位置	等価透水係数	
				均一モデル	不均一モデル
				CASE b	CASE c
CASE 1	5	33.3	CASE 1a	CASE 1b	CASE 1c
				$k_{eq} = 2.3 \times 10^{-5} \text{ m/s}$	
CASE 2	6	28.6	CASE 2a	CASE 2b	CASE 2c
				$k_{eq} = 2.8 \times 10^{-5} \text{ m/s}$	
CASE 3	10	18.2	CASE 3a	CASE 3b	CASE 3c
				$k_{eq} = 4.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$	

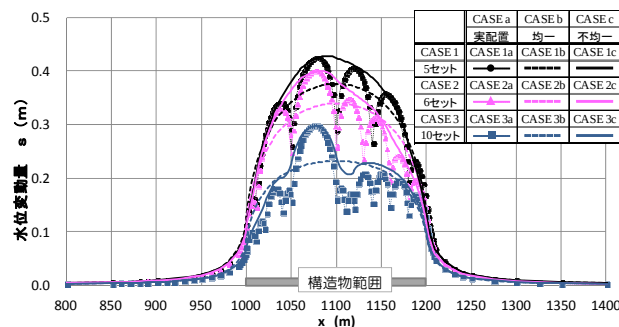
周辺の敷地条件などから対策施設を均一間隔で配置することが難しく、部分的に設置間隔を50m程度離さざるを得ない箇所がある。解析ケースの一覧を表-2に示す。対策施設配置条件としてCASE1～3の3ケースを設定した。いずれも現場の施工条件から最大設置間隔が50mとなるが、周辺の設置間隔が異なる。各々について、対策施設の実配置を考慮した「実配置モデル」(CASE a)、対策施設の平均設置間隔から等価透水係数を算出し入力した「均一モデル」(CASE b)、設置間隔の不均一性を考慮した等価透水係数を入力した「不均一モデル」(CASE c)の3パターンの解析を行った。

解析結果として構造物上流側縦断方向の水位上昇量分布を図-16に示す。等価透水係数を用いた解析結果は「均一モデル」でも「実配置モデル」の水位変動状況を概略表現できているが、「不均一モデル」を用いることにより、より正確に水位の変動状況が再現できる。また、いずれのケースも最大設置間隔は50mで一定であり、この部分で最大の水位変動が発生しているが、CASE 3のように周辺の設置間隔を短くすることにより、最大水位変動量が低減できることがわかった。

6. おわりに

地下水流動保全対策として開発を行ってきたアプレシブ・ウォールカット工法およびウェルインウォールの技術概要および実施例を紹介した。効果的な地下水流動保全対策を実現するためには、設計・施工を適切に行うことが不可欠である。特に、地盤と対策施設との接触部において十分な透水性が確保できるような確実な施工がキー技術となる。

いずれの工法も地下水流動保全対策としての本格適用は今後となるが、計測データを蓄積し、長期的な性能を確認したうえで展開を図っていきたい。

図-16 等価透水係数を用いた設計計算結果⁷⁾

参考文献

- 1) 杉本隆男, 三木健, 上之原一有, 中沢明, 林喜久英, 田村真一, 張替徹: 環 8・井荻トンネル工事での地下水対策工, 平成7年東京都土木技術研究所報告, Vol.71, pp.211-218, 1995.
- 2) 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, No.516, VI-27, pp.15-25, 1995.
- 3) 日経コンストラクション: 地下水トラブル予防法, 日経コンストラクション, 2001年11月9日号, pp.64-78, 2001.
- 4) 平林岳樹, 小出太朗, 東海林達弘, 高坂信章, 山野泰弘: AWC工法を適用した地下水流動保全計画(その2: 現場における試験施工計画), 土木学会第66回年次学術講演会, VI-275, 2011.
- 5) 高坂信章, 萩生良紀, 島田剛, 中村理絵: 壁内井戸による地下水流動保全工法試験工事, 土木学会第60回年次学術講演会, III-303, pp.605-606, 2005.
- 6) 高坂信章, 江頭正州: 等価透水係数を用いた地下水流動保全工法の設計, 第46回地盤工学研究発表会, No.481, pp.967-968, 2011.
- 7) 高坂信章, 江頭正州, 平林岳樹, 山野泰弘: 等価透水係数を用いた地下水流動保全工法設計の現場適用, 土木学会第66回年次学術講演会, III-212, 2011.