

報告 既設地下構造物の外防水膜形成工法の開発

小西 一寛*1・桜井 邦昭*2・吉田 了三*3・篠塚 祐輔*4

要旨：既設地下構造物の漏水対策として、地下壁内側から地下壁と外周地盤間との境界に低圧で無機系注入材を注入しゲル化させることにより、後施工で地下壁背面に広く防水膜を形成する工法を開発した。その効果は、高さ 4.0m×幅 3.2m×奥行き 1.7m のコンクリート製大型土槽内に、開削構造物の埋戻しを模擬した水締め砂地盤を作製して、地下 10m の土水圧環境を模擬した大型注入実験を行い、注入体が壁の背面に広がりその止水性により確認した。これにより、外防水膜形成工法は、既設地下構造物の漏水対策として有効であることを示した。

キーワード：漏水対策, 注入工法, 無機系材料, ゲル, 界面注入, 外防水

1. はじめに

これまで地下構造物は漏水することが多く、排水費用を増大させるとともに、構造物の劣化を促進させてきたが、低成長時代の今日、メンテナンス費用の低減や構造物の耐久性維持のために、地下漏水を減少することは、社会的なニーズとなっている。

そこで、ひび割れ等の止水欠陥が存在する地下壁の内側から背面地盤との境界に、無機系材料を低圧注入後にゲル化させることにより、地下壁背面に外防水膜を形成する工法を考案した。工法の有効性を確認するために、内部に山砂を水締め充填したコンクリート製大型土槽を用い、注入材を側壁背面に注入後にゲル化させることにより、側壁背面に注入体(以下、界面注入体)が広がり、止水性も高いことが確認された。

ここでは、本工法開発について報告する。

2. 技術開発目標の設定

2.1 従来技術の課題

既設地下構造物の漏水のうち 99%以上は、ひび割れ等の止水欠陥から発生しており、止水欠陥からの漏水を止水する方法の概要を、図-1 に示す。

このうち、②のひび割れに直接注入する止水方法が一般的であるが、以下のような課題があった。

- ・補修前、漏水箇所の特定が必要
- ・補修時、狭いひび割れに高圧注入しひび割れ幅が拡大
- ・補修後、水圧が上昇し周辺の潜在ひび割れから漏水
- ・経年後、膨潤性のウレタン系注入材料が劣化し再漏水

また、図-1 に示す止水方法のうち①の表面噴射は予備試験を実施したが、今回の試験条件では特に効果は得られなかった。そこで、③の背面地盤注入により外防水層を形成する技術を開発することにした。

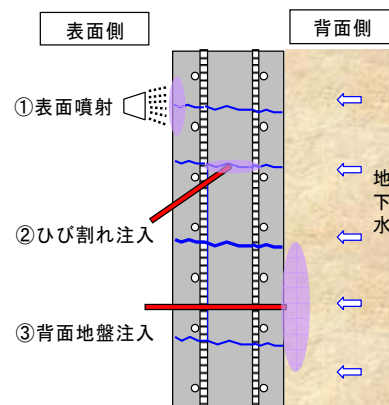


図-1 各種止水方法の概念

外防水型の背面地盤注入方法を検討するために、鋼製の中型土槽を用いた予備注入試験を実施した。注入材は、地盤に浸透注入させるために超微粒子セメントミルクを用い、注入速度 2L/分で 10 分間注入した。側壁と背面の砂地盤の境界に注入すると、図-2 に示すように半球状の浸透注入体が形成され、浸透深さが凸凹で注入範囲が狭く、湧水量もそれほど減少しなかった。^{1),2),3)}

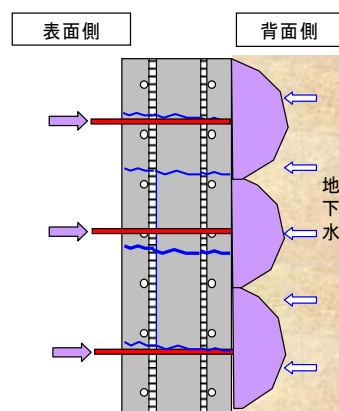


図-2 半球状の浸透注入体の概念

*1 (株)大林組 技術本部技術研究所 生産技術研究部 博士(工学) (正会員)

*2 (株)大林組 技術本部技術研究所 生産技術研究部 修士(正会員)

*3 太平洋マテリアル(株) 開発研究所 主任研究員

*4 (株)大阪防水建設社 東京支店技術部課長

2.2 新技術の考案

そこで注入材を注入後にゲル化させると、図-3に示すように背面砂地盤に浸透せず、壁に沿って広がることわかった。この界面注入体を漏水部分の外面に形成できれば、以下の特徴を持つ外防水膜になると考えられた。

- ・壁と地盤の境界に無機系材料を低圧で注入
- ・地下壁外面に密着して薄く広い注入体を形成
- ・壁内側から止水欠陥を特定せず壁外側に防水膜を被覆

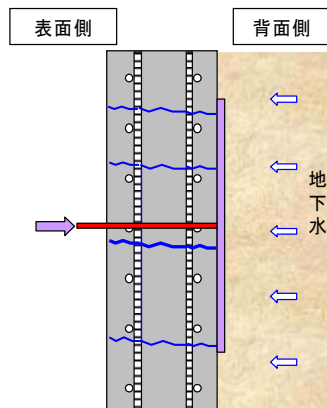


図-3 壁背面の界面注入体の概念

3. 界面注入現象の確認試験

3.1 中型土槽を用いた注入試験条件

中型土槽は、高さ 1.0m×幅 2.0m×奥行き 0.6m であり、0.5m ピッチの格子点に湧水量測定孔を設置した。

実施した中型注入試験の試験条件一覧を表-1に示す。

中型注入試験の注入材の配合は、試験ケースにより若干変更しているが、基本的な配合は表-2に示す。

表-1 中型注入試験の条件一覧

ケース	壁体条件	土水圧条件	地盤条件	注入条件
1	アクリル板	無視	振動締め	1回(2次)
2	コンクリート壁	無視	振動締め	1回(2次)
3	コンクリート壁	考慮	振動締め	1回(2次)
4	コンクリート壁	考慮	投入水締め	1回(2次)
5	コンクリート壁	考慮	投入水締め	1次+2次

表-2 中型注入試験の注入材の配合

		1次注入	2次注入
A液 (0.5m ³)	超微粒子セメント	11kg	225kg
	セメント分散剤	0.34kg	6.75kg
	水	496kg	419kg
B液 (0.5m ³)	液体急硬材	285kg	285kg
	ゲルタイム調整剤	—	4.5kg
	水	250kg	248kg

3.2 鋼製土槽を用いた界面注入性能確認試験(ケース1)

界面注入現象を目視により確認するため、注入面は透明なアクリル板とする中型鋼製土槽を用いて注入試験を実施した。内部土層は、7号硅砂を厚さ 5cm 毎に敷均し振動締め後に、底部から浸水し作製した。注入前後にアクリル板に設けた観測孔の湧水量を測定した。

アクリル板の中央孔から、注入材を混合後に粘性が急激に増加するまでの時間(以下、ゲルタイム)を 10 秒、注入速度 2L/分で注入すると、写真-1,2に示すように、注入 1 分後には界面に広がり、10L 注入された 5 分後には約 1m²まで広がった。注入は、アクリル板背面全てに行き渡った 32 分後に終了した。

内部土砂を掘削後の背面注入状況を、写真-3に示す。これにより、界面注入体は 2m×1m のアクリル板背面と地盤間全体に広く形成され、湧水量も減少したことから、注入材のゲル化による界面注入現象が確かめられた。



写真-1 注入開始後 1 分が経過した注入試験(ケース1)



写真-2 注入開始後 5 分が経過した注入試験(ケース1)



写真-3 注入終了後の背面注入状況(ケース1)

3.3 コンクリート製土槽を用いた再現性確認試験

(1) 試験目的

次に中型土槽を用いた注入試験より、現実に近い試験環境において背面注入現象の再現性を確認することを目的として、注入試験を実施した。

(2) 試験条件と試験結果

①壁体条件（ケース 2）

鋼製土槽を用いた中型注入試験は、注入面がアクリル板のため壁面抵抗が少なく界面注入され易い懸念があるために、鋼製土槽と同一内空寸法（高さ 1.0m×幅 2.0m×奥行き 0.6m）のコンクリート製土槽を作製し注入試験を実施した。13L を注入した結果、写真-4 に示すように、注入壁背面に界面注入体が薄く広がるのが確認された。また、1m 離れた左右の 2 孔から注入したが、界面注入体の中央の重なり具合も良好なことがわかった。

②土水圧条件（ケース 3）

これまでの注入試験は、土被りが少なく界面注入され易い懸念があるために、土槽上部の蓋のボルトの締付力を利用して深さ 10m 程度の土被り圧を導入した。12L を注入した結果、写真-5 に示すように注入壁背面に界面注入体の広がり確認された。なお、写真-5 の左（白破線内）には、土槽作製時に、壁内に鉛直に厚さ 0.2mm×高さ 150mm×深さ 100mm の鋼板を 3 枚重ねて埋設し、コンクリート打込後に引き抜いて設けた模擬ひび割れの背面に存在した円筒状の砂の流失跡にも注入されているのが観察された。

③地盤条件（ケース 4）

これまでの注入試験は、7 号硅砂を振動により十分に締め固めた地盤であり、1 回の注入により界面注入できたが、地盤の間隙が少なく（間隙率 38%程度）界面に注入され易い懸念があるために、開削埋戻し地盤を模擬した緩い水締め砂層（間隙率 50%程度）に変更し、注入試験を実施した。12L を注入した結果、写真-6 に示すように、界面注入はされたが壁に垂直な地盤を割裂し脈状に注入（以下、割裂注入）も観察され、緩い地盤に対して 1 回の注入では、注入ロスが多くなることがわかった。

④注入条件（ケース 5）

そこで、“緩い地盤”を“締め固めた地盤”に改良するために、まず、1 次注入としてゲルタイムの比較的長い注入材を浸透注入して、間隙の少ない地盤にすることにした。その後、2 次注入としてゲルタイムの短い注入材を注入直後にゲル化させることにより、地盤には割裂注入ではなく界面注入させることにした。

試験では、ゲルタイム約 2 分の配合の 1 次注入材を 20L 先行注入後、翌日にゲルタイム約 10 秒の配合の 2 次注入材を同量注入した結果、写真-7 に示すように、振動締め固めた地盤と同様に 2 次注入体が壁背面に広く注入されて

いるのが確認された。

(3) まとめ

以上のように、より実際に近い試験条件にして注入試験を行っても、界面注入現象は再現され湧水量も 1/100 オーダで減少したことから、界面注入は地下漏水対策として有効である可能性を確認した。



写真-4 コンクリート製土槽を用いた注入試験(ケース2)



写真-5 土水圧を考慮した注入試験(ケース3)



写真-6 埋戻し地盤を考慮した注入試験(ケース4)



写真-7 1次+2次注入した注入試験(ケース5)

4. 外防水膜形成の実証実験

4.1 実験概要

大型構造物において界面注入体の範囲の広がりおよびその止水性を確認するために、大型土槽を構築して界面注入の実証実験を行った。実験対象は、砂質土を水締めにより埋め戻した開削構造物とした。

大型注入実験の手順を、図-4に示す。

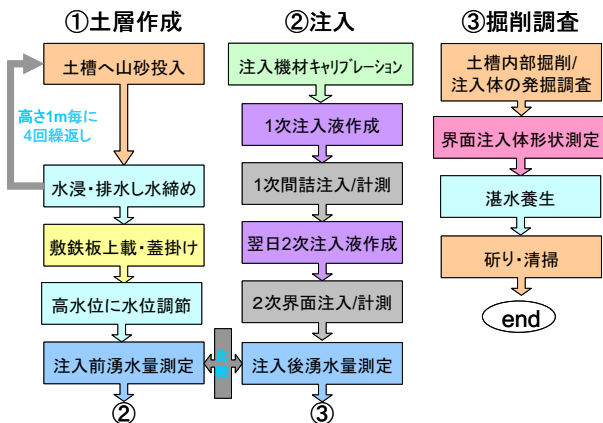


図-4 大型注入実験の手順

4.2 実験方法

(1) 土槽の構築

大型土槽の内空形状は、図-5に示すように、高さ4.0m×幅3.2m×奥行き1.7mで、壁厚は0.3mとした。側壁には0.5m間隔の格子点に、注入および湧水量観測孔として壁を貫通するφ25mmの鋼管を埋設し、外面に開閉弁を設置した。

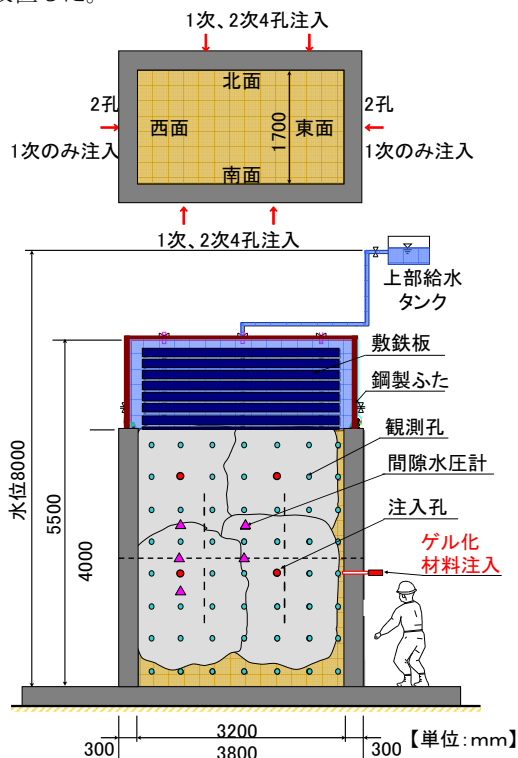


図-5 大型注入土槽の構造概要

(2) 土層の作製

大型土槽底版には給排水管を埋設し、土層底版上には給排水用の整流板と砕石を敷設した。内部への土砂充填は、高さ4mの土槽内に山砂を1m毎投入し、土層下部から土層天端まで給水後、排水し水締めした。これを4回繰り返し高さ4mの土層を作製した。

土槽下部において、地下10mの土水圧環境を模擬するため、図-5に示すように、土層上には残り6mの土被り重量に相当する敷鉄板を上載した。また、地表面下2mに地下水位が存在すると仮定して、敷鉄板を収容できる蓋を被せて内部に湛水し、内部水位を土層上から4m上に保持する給水タンクを設置した。

(3) 充填した砂の特性

充填した土砂は、砂分を94%含む山砂であり、水締めにより充填した砂の間隙率は43%（乾燥密度は1.56g/cm³）で、透水係数は1.54×10⁻³cm/sとなった。

(4) 注入前湧水量

止水性の確認は、壁面に設けた0.5m間隔の格子点の観測孔56箇所において、注入前後の湧水量を測定する。観測孔は、上から下へ1~8段、内面の右から左へ南北面がA~Gの7列、東西面がA~Cの3列とした。所定の水位の注入前湧水量は、1孔あたり1L/分前後であった。

(5) 注入材料

1次、2次注入は、表-3に示す2液を注入直前に等量混合した。A,B液の粘性は2~5MPa・s程度だった。

表-3 大型注入実験の注入材の配合

		1次注入	2次注入
A液 (0.5m ³)	超微粒子セメント	15kg	225kg
	セメント分散剤	0.45kg	3.38kg
	水	495kg	422kg
B液 (0.5m ³)	液体急硬材	285kg	285kg
	ゲルタイム調整剤	—	5kg
	水	250kg	248kg

(6) 注入システム

界面注入の注入システムを、図-6に示す。

注入材のゲルタイムは短いので、2ショット方式（A,B液を注入管先端部で合流混合させる注入方式）とした。

(7) 注入条件

注入条件は表-4に示す。1次注入は側壁の東西南北面に行ったが、2次注入は掘削後に注入範囲を明確にするため、南北面のみとし東西面へは注入しなかった。

南北面の注入は図-5に示すように1.5m間隔の4孔（上下位置は、側壁上端から0.75m,2.25mの2,5段目）とし、側壁外面の左上から時計回りの順番で注入した。1孔当たりの注入量は1次が250L、2次は南面の50Lに

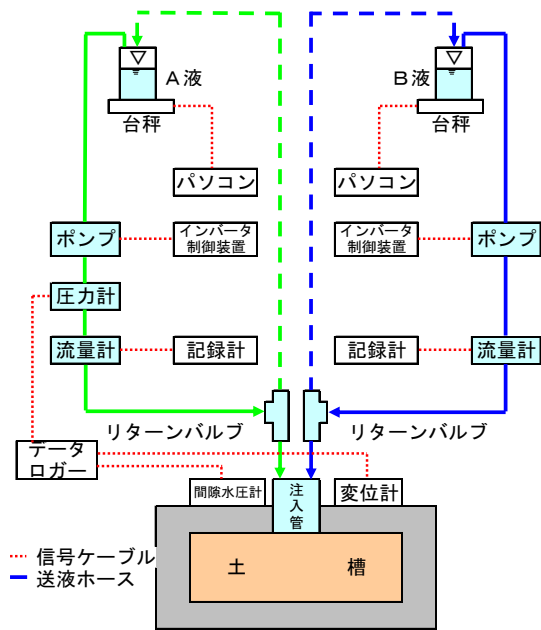


図-6 注入システム

表-4 注入の標準条件

	1次注入	2次注入
概要	緩い地盤に間詰注入するため、ゲルタイムの長い注入材を浸透注入	壁と地盤間に界面注入させるため、ゲルタイムの短い注入材を割裂注入
注入範囲	地下壁背面地盤	壁と地盤の境界面
ゲルタイム	2~3分	10±2秒
注入量	250L/孔	50L/孔
注入速度	6L/分	2L/分
注入時間	42分	25分

対し北面では70Lに増量したが、注入範囲は変わらなかったことから、砂地盤に対し1.5m間隔に注入する注入量は50L程度が適量であると考えられる。

4.3 実験結果

(1) 注入データ

大型注入実験の2次注入データの例を、図-7に示す。埋戻砂地盤において注入速度は、1次が6L/分、2次が2L/分に対して、注入圧力は0.2~0.25MPaで安定した。また、側壁中段の背面に生じた間隙水圧の上昇は0.1MPa以下、側壁中段の変位量も0.15mm以下であり、界面注入による地下構造物への影響は小さいことが確かめられた。

なお、別途実施した大型注入実験では、注入前に側壁中段の7観測孔から50cc/分漏水させながら、0.5m下の注入孔から注入した。その結果、注入孔近傍の観測孔から漏水量が順次減少し始め、注入終了時には7観測孔全ての漏水がほぼ止水されたのが観察された。

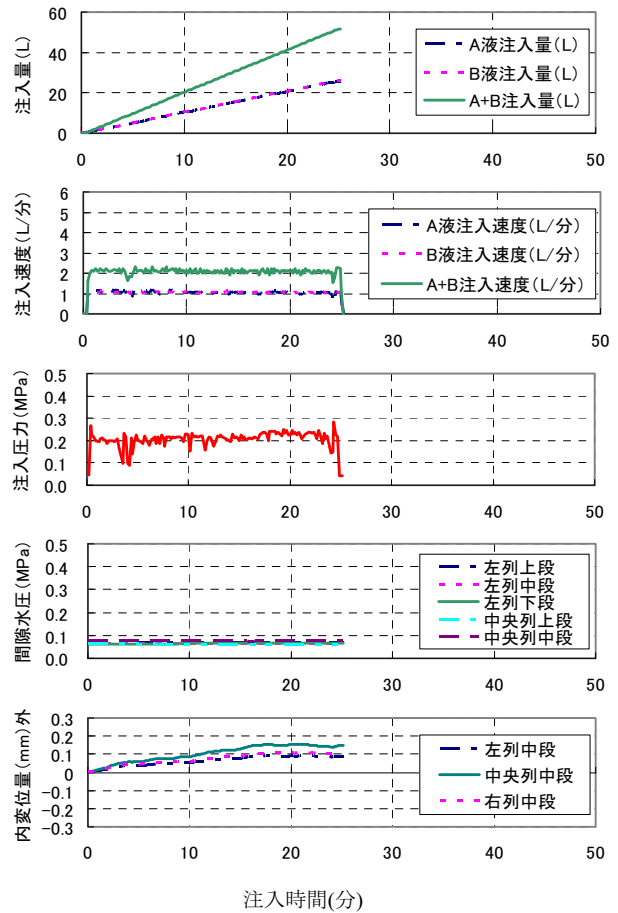


図-7 大型注入実験の2次注入データの例

(2) 注入後湧水量

注入後の湧水量測定結果を、図-8に示す。

注入孔近傍の観測孔の湧水量は、注入前の1L/分前後から、注入後には1/100以下に減少した。なお、南北面の湧水量に対し東西面はそれ程減少しなかった理由は、南北面には1次+2次注入したが、東西面には1次のみ注入したためと考えられる。

(3) 掘削状況

土槽内の土砂を掘削すると、写真-8に示すように、土槽近傍には1次注入材が、0.3~0.5mの厚さに浸透注入され、注入体をスコップで削ると、ほぼ鉛直に掘削痕が残る固さで削れ、間隙の少ない地盤が形成されていた。さらに、壁面近傍まで掘削しても浸透注入体が露頭し、界面注入体は薄く平坦であることが示唆された。

界面注入体を露頭させると、写真-9に示すように壁面に密着し、隣接注入体との重なり具合も良好だった。また、1.5m間隔の注入範囲には未注入域が見られなかった。注入範囲を色別するために色粉を混ぜて4注入孔から注入した界面注入範囲を測定すると、注入面積は平均3.5m²であり、円形に換算すると半径は平均1.03m、正方形に換算すると1辺の長さは平均1.83mとなった。

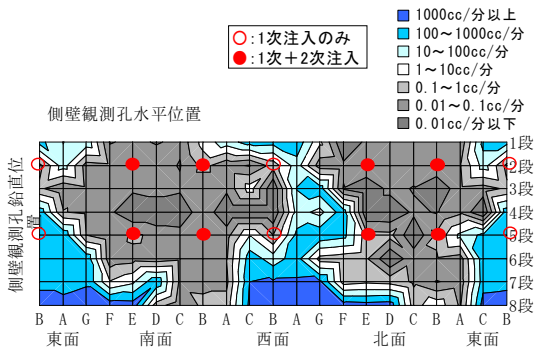


図-8 注入後湧水量の側壁分布展開

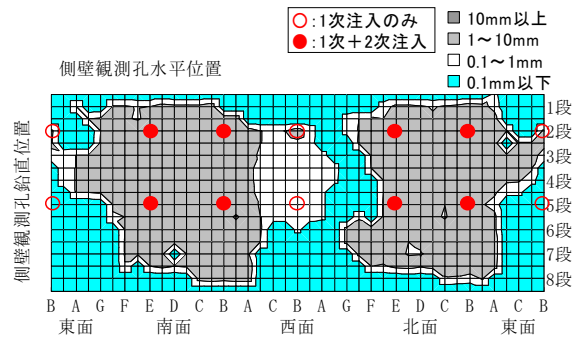


図-9 界面注入体厚さの側壁分布展開



写真-8 1次注入体の露頭状況



写真-9 界面注入体の露頭状況

(4) 注入厚さ

露頭した界面注入体の厚さは、側壁面の0.25m間隔の格子点において膜厚計で測定した。

その結果、図-9に示すように界面注入体は厚さ1~10mmで平坦に注入されていた。50Lの2次注入材が3.5m²に広がると平均厚さは14mmになるが、その差は注入ロス、脱水、一部逸走等が考えられる。また、図-8に示す注入後の湧水量分布と比較すると、湧水量が減少した範囲と界面注入された範囲がほぼ重なり、相関性が確認された。以上のことから、界面注入体の厚さが1mm程度あれば、ほぼ止水されると判断される。

(5) まとめ

大型土槽に砂を水締めして行った界面注入の大型実証実験により、以下のことが明らかになった。

- ① 注入中、壁背面の間隙水圧は0.1MPa、壁変位量は0.15mm以下であり、構造物への影響は小さい。
- ② 壁から50cc/分の漏水中に界面注入しても止水され、僅かな流水下において注入は可能である。
- ③ 界面注入体は壁に密着し、隣接注入体との重合も良好であり、重合部の止水性も期待される。
- ④ 1孔あたりの界面注入範囲は、正方形に換算すると1辺の長さは平均1.83mまで広がり、1.5m間隔に注入すれば壁全面を被覆可能である。
- ⑤ 界面注入厚さは平均数mmで平坦であり、注入範囲の湧水量は注入前の1/100以下に減少した。

5. おわりに

地下構造物の漏水対策として、外防水膜形成工法の実証実験を行い、以下に示すことが明らかになった。

- (1) 地下10mの地下壁と背面に水締めされた埋戻砂地盤の境界に、強度発現性とゲルタイムを調整した注入材を2回に分けて低圧で注入し、既設地下壁の背面に、止水性の高い界面注入体を広範囲に形成できることを確認した。
- (2) 以上のことから、外防水膜形成工法は、後注入で開削構造物の地下壁内側から、壁背面に外防水膜を形成でき、地下漏水対策として有効であるといえる。

参考文献

- 1) 土質工学会編：現場技術者のための土と基礎シリーズ9 薬液注入工法の調査・設計から施工まで、土質工学会、1985
- 2) 柴崎光弘、下田一雄：最新・薬液注入工法の設計と施工、山海堂、1985
- 3) 日本グラウト協会編：新訂正しい薬液注入工法、相模書房、2007