

φ4,300 下水道シールドの吊受防護工

綿谷茂則¹・山口博章²・中谷孝司³・福田宏之⁴・山下清広⁴・梅本正樹⁵

¹正会員 工修 大阪市交通局 建設技術本部 (〒550-0025 大阪市西区九条南1-12-52)

²工修 大阪市交通局 建設技術本部 (〒550-0025 大阪市西区九条南1-12-52)

³正会員 大阪市交通局 建設技術本部 (〒550-0025 大阪市西区九条南1-12-52)

⁴正会員 大成建設株式会社 関西支店 地下鉄8号線緑橋作業所 (〒537-0021 大阪市東成区東中本1-13-9)

⁵工修 大成建設株式会社 関西支店 地下鉄8号線緑橋作業所 (〒537-0021 大阪市東成区東中本 1-13-9)

本稿は、大阪市地下鉄第8号線緑橋停留場建設工事（駅名は仮称）で実施した掘削構内における幹線下水道シールド（外径 $\phi 4,300$ ）の防護工について報告するものである。土中のシールドは、土水圧による円周方向軸圧縮力が卓越した応力状態となっている。一方、開削工事により周辺の土砂を掘削し、吊防護を行った段階では、内水圧による軸引張力が卓越した状態となる。この場合、応力上及び使用上の問題が発生するため補強用鋼製セグメントを外部から設置するものとした。

設計・施工に際しては満水時 **250kN/m** となるシールド自重に起因する掘削時の沈下抑制対策に配慮し、ワイヤーロープと PC 鋼棒を組み合わせた仮吊り方法を考案し、PC 鋼棒に **200kN/本** のプレテンションを導入することで沈下抑制対策を行った。また、シールド下半部に分布する鋭敏粘性土に対しても高圧噴射改良工法を特殊な方法で使用し改良した。

キーワード：下水道シールド，吊防護，受防護，外巻鋼製セグメント，鋭敏粘土，ステップ改良

1. はじめに

大阪市地下鉄第8号線は、大阪市東部の東淀川区井高野から東成区今里を結ぶ路線で、延長12 km、11駅を整備するものである。本稿は、これらのうち、緑橋停留場建設工事（駅名は仮称）で実施した掘削構内における田島中浜幹線下水道シールド（外径4,300）の防護工について報告するものである。

この工事は、大阪市東成区の「緑橋交差点」北側に延長115m、幅約15mの3層3径間の停留場を大阪市東部地域を南北に走る都市計画道路森小路大和川線（通称「今里筋」）の地下部に開削工法により建設するものである。今里筋はこの地域の主要幹線道路であり、その地下部分には大小さまざまなインフラ施設が埋設されている。図-1に示したように当工区開削範囲内にも多くの地下埋設物が配置されており、開削部投影面積の約50%を地下埋設物が占めている。これらの地下埋設物を安全に防護しつつ、掘削工事を進めることが施工管理上大きなポイントとなるが、その中でも開削内を縦断に走る下水田島中浜幹線（内径φ3,500、外径φ4,300の下水道シールド）の防護

工は、その規模、方法とも前例を見ないものであった。

一方、土質構成について見ると図-1 に示した様に、地表から GL-12m までは沖積層が、それ以下では大阪層群の砂礫層 (O_{10} 層)、粘性土層 (O_9 層)、砂層 (O_8 層) が床付付近まで堆積している。沖積層で特徴的なのは GL-6m～

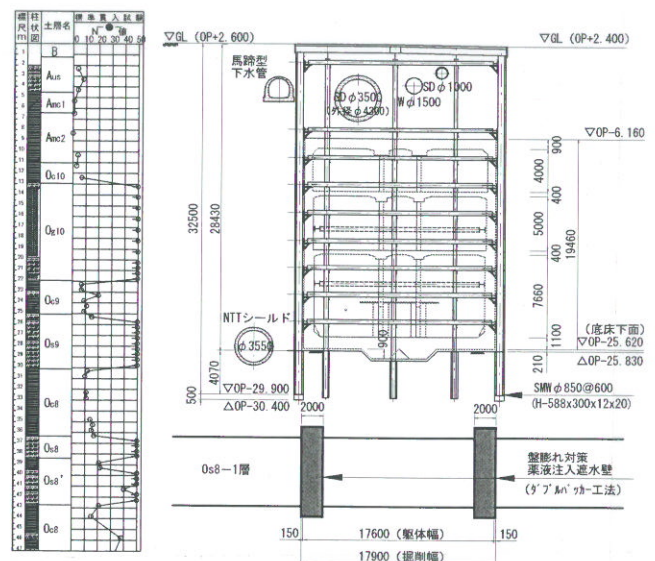


図-1 緑橋停留場断面図（南立坑部）

GL-12m に分布する鋭敏粘性土である。この粘性土層は東大阪鋭敏粘土とも呼ばれる N 値=0~2 の軟弱粘土であり、液性指数が 1.0 前後で鋭敏性が非常に高い。この粘土は下水シールドの下半部以深に 6m 分布しており、トラフィカビリティ確保のためにどのような地盤改良を行うのがかシールド防護工を施工する上で大きなポイントとなった。

2. 鋼製セグメントによる下水道シールド補強

(1) 既設下水道シールドの補強の必要性について

既設下水道シールドは、昭和 40 年に圧気工法併用の開放型シールド工法により築造されたもので、一次覆工には山型鋼（アングル）とコルゲートプレート（スキンプレート）を組み合わせた鋼製セグメントを使用しており、その内側に厚さ 250mm の RC 二次覆工を施工している。

地下埋設物（特に下水道管）の防護工は、管種変更を行う場合もあるが、一般的には既設管をそのまま吊り防護あるいは受け防護する。

今回の場合、防護対象となる下水道シールドが大きく、管種変更は用地の関係上不可能であったため、既設管を直接防護する必要があった。

a) 横断方向の検討

下水道シールドの横断方向の施工前の応力状態は、外圧（土水圧）による円周方向軸圧縮力が卓越した応力状態となっている。その場合、空液の荷重ケースが応力的に厳しくなる。

一方、開削工事により周辺の土砂を掘削し、吊受防護を行った段階では、自重および内水圧のみが作用し、内水圧による軸引張力が卓越した状態となる。この場合、以下のような問題が発生するため、既設管の補強が必要となった。

- ・流水集中時には下水道シールド管底で最大約 8.0m の水頭が作用するため、大きな軸引張力が発生し、既設部

材（一次覆工のみを有効部材とした）が許容応力度を超える。

- ・常時の荷重状態でも、軸引張力が作用するため、既設 RC 二次覆工に引張域が生じ使用限界上問題が生じる。流水集中時にさらに大きな内水圧が作用すると、RC 二次覆工が剥離・剥落し、構造上の問題が生じるとともに、下水流下能力が減少する。

b) 縦断方向の検討

掘削および吊受け防護完了時点での縦断方向の施工前の状態では、地震時を除き下水道シールドは縦断方向にはほぼ無応力状態となっている。一方、吊受防護完了時点では、吊り支点及び受け支点が存在するために、縦断方向に断面力が発生する。そのため横断方向の場合と同様に、応力上の問題と使用上の問題が生じる。

(2) 補強方法の選定

既設シールドの補強方法としては、内部からの補強と外部からの補強が考えられたが、流量が豊富な下水道管であることから、外部からの補強を検討した。

補強方法として、鋼製覆工による補強とコンクリート覆工による補強およびその折衷案を比較検討し、経済性・施工性に優れた鋼製覆工による補強を選定した。

今回の補強対象となる下水道シールドは外径 4,300mm であり、鋼製覆工を現地で加工することは困難であったため、図-2 に示すような補強用鋼製セグメントを工場で製作し、現地で組み立てる方法を採用した。一般的なシールド工事で用いる鋼製セグメントと異なり、既設シールドの外側からの取付けとなるため、スキンプレートの外側に覆工主桁およびリブプレートを取付け、外側からのボルト締結が可能な構造とした。

補強用鋼製セグメントを設計・計画する上で最も問題になったのは、補強用鋼製セグメント設置後に施工する仮吊

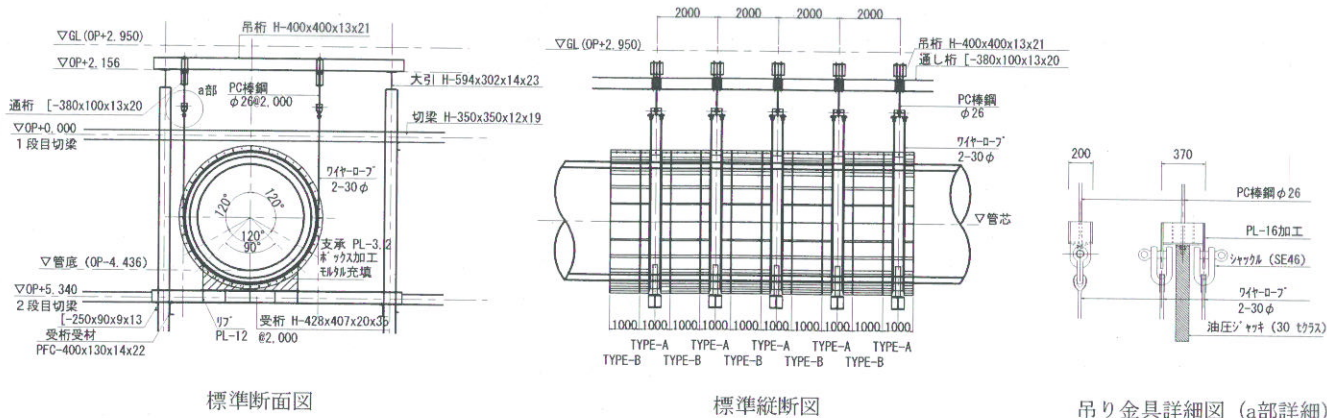


図-2 吊受防護標準図

り防護用部材と受け防護用部材をどのように取り付けるかである。先にも述べた通り、スキンプレートの外側に覆工主桁および補強リブプレートを取付けているため、吊材や受支承を補強用鋼製セグメントにそのまま取り付けることが出来ない。そのため、吊受け防護のピッチを 2.0m とし、吊受け支承を取り付ける部分の補強用鋼製セグメント (TYPE- A) と支承のない部分の補強用鋼製セグメント (TYPE- B) の 2 種類を製作するものとした。TYPE- A セグメントにはリング中央にリブプレートを設置しない部分を設けるとともに、ピース間継ぎ手板に窓空き部を設け、吊防護用ワイヤーロープや受支承が設置可能な構造とした。

既設シールドは昭和 40 年に築造されたもので、現在のシールドよりも大きな蛇行量を持っていることが想定されたため、TYPE- B セグメントの約 30%をテーパリング (50mm 両テーパ) とし、既設シールドの蛇行に追従できるように計画した。

既設シールドと補強用鋼製セグメントの間には 50mm のクリアランスを設け、その隙間に無収縮グラウト材を充填し、既設シールドと補強用鋼製セグメントの一体化を図る

ものとした。

3. 補強用鋼製セグメントの設計

(1) 施工フロー

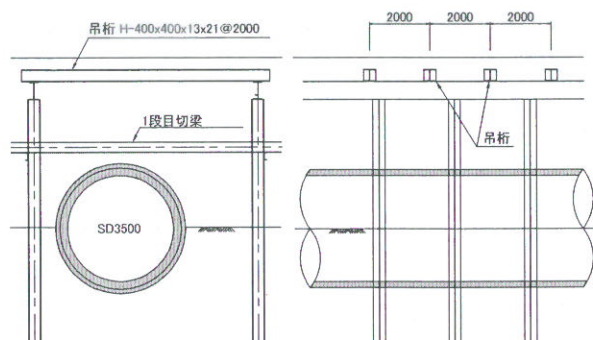
補強セグメントの設計方法を説明する前に、下水道シールド防護工の施工ステップを図- 3 に示す。それぞれの施工ステップで既設シールドの支持条件や荷重条件が異なることから、次章の様なモデルで設計を行った。

(2) 検討モデル

既設管の上半部掘削時、下半部掘削時、仮吊り時、本受け時、埋戻し時の 5 つの施工状態をモデル化して設計を行った。実際に発生する断面力は剛性比率に応じて既設一次覆工 (鋼製セグメント)、既設二次覆工 (RC, $t=250\text{mm}$)、新設補強用鋼製セグメントに分配されるが、ここでは安全側に表- 1 の様な考え方に基づき有効部材を定めた。

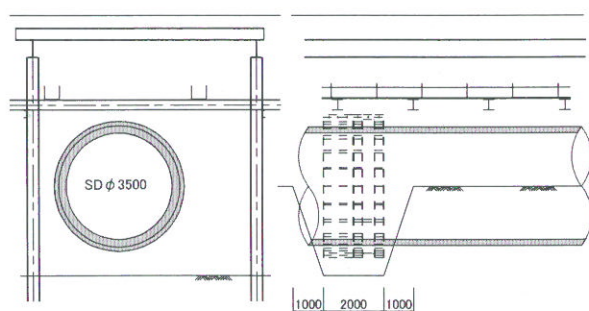
横断方向の検討モデルは円形のフレームモデルとした。また、縦断方向については掘削地盤を支点とした弾性床上の梁とし、縦断方向の剛性は継ぎ手部とセグメントの等価

STEP1 上半部掘削



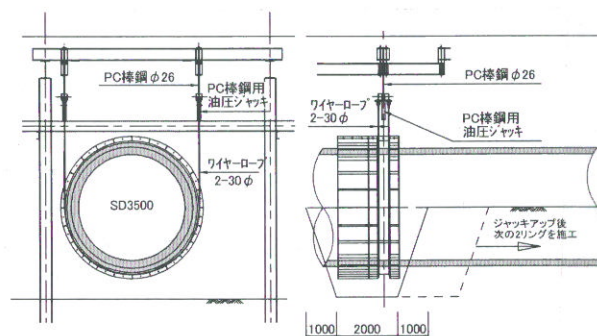
1. シールド上半部が露出するまで掘削を行う。
2. シールド表面をクレン清掃する。

STEP2 下半部掘削



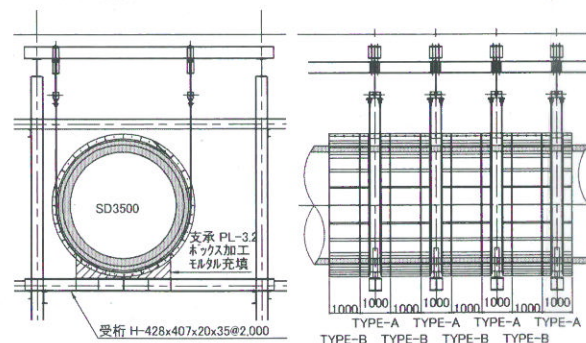
1. 補強セグメント2リング分の下半部掘削を行う。
2. クレーン、チェーンブロック、レバーブロックを使用し、セグメントを取り付ける。

STEP3 仮吊り防護工



1. ワイヤーロープを取付け、仮吊り防護を行う。
2. 油圧ジャッキによりPC棒鋼及びワイヤーロープにプレテンションを作用させ、吊り材のあそびや埋設荷重によるのびを防止し、シールドの変形を防止する。
3. 2リングを1セットとして、順次吊り防護を行う。

STEP4 受け防護工



1. 吊り防護が約20m終了した時点で、受け防護を行う。
2. 受桁、桁受け、支承金物を設置する。
3. 支承金物内にモルタルを充填し、支承と下水管を密着させる。

図-3 施工ステップ図

表-1 下水シールド防護工検討条件

	設計上の考え方	
	考慮した荷重	部材の有効断面
上半部掘削時 下半部掘削時 (鋼製セグメント設置時)	・ 雨水期を考慮し、内水圧作用時の以下の荷重を考慮した。 ①既設管渠の重量 ②覆工重量 ③水の重量(満水) ④内水圧 (GL+0.3mとした。横断方向の検討のみ考慮)	・ 部材の有効断面は、既設管渠一次覆工部分とする。 管渠一次覆工中詰コンクリート及び二次覆工については、安全側に無視した。 短期として取り扱い、許容応力度の割り増しは1.5
仮吊り防護時	・ 荷重に対する構造計算の他に、掘削によるリバウンドに対する検討も行う。	・ 部材の有効断面は、既設管渠一次覆工及び鋼製セグメント部分とする。 ここで、既設管渠二次覆工は、安全側に無視した。 許容応力度の割り増しは1.5
受け防護時		・ 受け防護期間は約2年間に及ぶため、部材の有効断面は、鋼製覆工部分とする。 許容応力度の割り増しは1.3
埋戻し時	・ 上記の荷重の他に、土水圧を考慮する。 ・ 埋戻し時に管渠下半部は無収縮モルタルで受け替えを行うので、構造計算においてはその影響も考慮する。	・ 埋戻後についても、既設管渠部材は無視し、鋼製覆工のみで荷重に抵抗する。 本設構造物として取扱うため、許容応力度の割り増しは、1.0

剛性を評価し検討を行った。

(3) 検討結果

既設一次覆工の強度に期待せざるをえない下半部掘削時および仮吊り時の縦断方向応力が厳しくなったため、1サイクル当たりの施工量を2リング(2m)とし、仮吊り防護が完了した時点で次の施工サイクルに移るよう施工上の制約を設けた。

4. 下水道シールド防護工の施工

(1) 施工上の問題点

一般的に小さな地下埋設物を吊り防護する場合、吊りボルトにターンバックルを取り付け、吊材のあそびや弾性変形を吸収する。今回の場合、地下埋設物の規模が大きく適用可能なターンバックルが無かったことから、仮吊り部材の弾性変形やあそびに起因する沈下抑制対策が必要であった。

また、シールド下半部の地盤は前章でも述べたようにN値=0~2の軟弱鋭敏粘土であることからワーカビリティの確保と施工中の沈下抑制のために何らかの改良が必要であった。

(2) プレテンションの導入による沈下抑制対策

下水道シールド防護工の最終形状は、管渠の大きさ(外径4,300)、重量(満水時250kN/m)および防護期間(約2年)を考慮し、受け防護工としたが、施工上は一旦仮吊りする必要があった。一般的な吊り防護は地下埋設物下半部に平鋼板製のバンドを巻き、バンドに吊りボルトを取り付ける構造をとるが、今回は吊り1箇所当たりの荷重が大きく局部的な座屈やねじれを考慮すると一般的な方法を採用

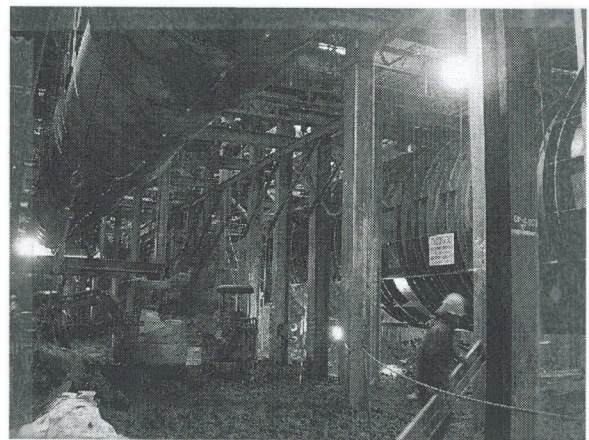


写真-1 φ4,300 下水道シールド吊防護状況

用できなかった。そこで、仮吊り構造としては図-2に示すように下水道シールドをワイヤーロープおよびPC鋼棒で吊る構造を採用した。

ワイヤーロープは、狭い施工空間でも取り扱い易く施工上大きなメリットがある反面、弾性変形や部材のあそびに伴う管の沈下が発生する。今回の施工では、シールドの死荷重は、内水が半分程度の場合でも約200kN/mであり、弾性変形や部材のあそび分も含めると吊り防護完了後に10cm程度の沈下が生じることが予測できた。

この沈下抑制対策として、仮吊り防護工においてプレテンションの導入を行うこととした。プレテンション量は、吊りピッチが2.0mであるため、 $200\text{kN/m} \times 2.0\text{m}/2$ 箇所=200kN/箇所とし、導入方法としては、図-2に示したように吊り金具を介してワイヤーロープとPC鋼棒を連結させ、PC鋼棒に中空ジャッキで200kN/箇所のプレテンションが導入可能な構造とした。施工に当っては10kN~50kNの8段階載荷を行い、上向き変位が生じた時点で載荷を終了した。

(3) 高圧噴射工法を用いた軟弱地盤の改良

当工区に分布する沖積粘性土の未攪乱状態での一軸圧縮強度は $q_u=62\sim99$ (kN/m²) であり、比較的高い強度を有するが、少しの攪乱や水の供給により強度が大幅に低下する性状を示す。標準貫入試験ではロッド貫入時の攪乱で強度が急激に低下し、 N 値=0~2 の値を示した。これは自然含水比が非常に高いためで、供試体によっては自然含水比が液性限界を越えているものもあった。(すなわち液性指数が 1.0 を越えている。)

このような沖積粘性土は過去に行った地下鉄建設工事

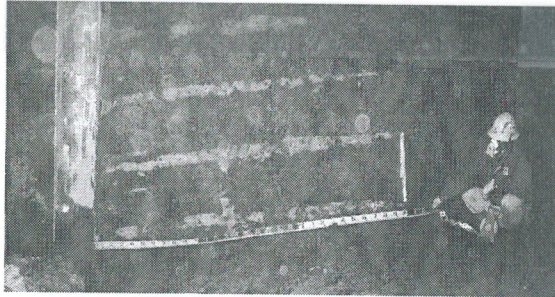


写真-2 ステップ改良による地盤改良状況

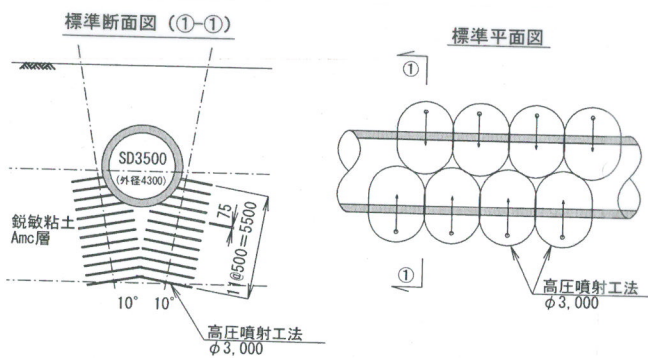


図-4 ステップ改良標準図

記号	計測項目	使用機器	数量		備考
			主計測断面	副計測断面	
●	補強セグメントひずみ計測	ひずみゲージ	6箇所 × 2 = 12点	6箇所 × 2 = 12点	2箇所/ベース
○	SD3500沈下計測	変位計	1箇所 × 1 = 1点	1箇所 × 1 = 1点	
◆	PC鋼棒軸力計測	ひずみゲージ	2箇所 × 2 = 4点	2箇所 × 2 = 4点	
◇	吊り桁軸力計測	ひずみゲージ	1箇所 × 2 = 2点	—	
☆	受桁吊材軸力計測	ひずみゲージ	1箇所 × 2 = 2点	—	
△	受桁応力計測	ひずみゲージ	2箇所 × 2 = 4点	—	
▼	ベース間ボルト張力	ボルト張力計	2箇所 × 3 = 6点	—	
★	リング間ボルト張力	ボルト張力計	8箇所 × 1 = 8点	8箇所 × 1 = 8点	

※その他、管渠内水位をポータブル水位計で定期的に計測する。

でもたびたび出現しており、セメント混合工法や生石灰杭工法、DJM 工法に代表される機械攪拌工法により改良を行ってきた。しかし、今回は外径 $\phi 4,300$ の下水道シールド直下の改良を掘削に先行して行う必要があり、それらの工法は適用できなかった。このため、地下鉄4号線深江橋駅の改良工事で小規模であるが同様の軟弱粘性土に対して良好な改良結果が得られていた高圧噴射工法(二重管、 $\phi 1,600$)を用いたステップ改良の適用性を検討した。この工法は、トラフィカビリティの改善ならびに施工時の法面の自立性を目的としたもので、一般的な高圧噴射工法のように円柱状の改良体を造成するのではなく、厚さ 75mm の円盤状の改良体を 500mm ピッチに造成していくものである。改良は接円配置とし、地中に層状のセメント改良体を造成することで土のせん断抵抗を増加させトラフィカビリティを向上させるとともに、セメント改良体にはさまれた部分の粘土を施工時の攪乱から防護し鋭敏化を防ぐものである。

緑橋停留場工事では、図-4に示すように下水道シールド直下を改良できるように造成径を $\phi 3000$ とし、管渠への影響を少なくするために、三重管工法を用いるものとした。採用に際しては、造成時に地盤の沈下が発生し下水道シールドに悪影響を及ぼすことが懸念されたため、事前に試験施工を行い、下水道シールドへの影響を評価し問題がないことを確認した上で採用に踏み切った。

今回の工事でも良好な改良効果が得られ、現地での試料観察では、改良体に挟まれた粘土が鋭敏化していなかった。(写真-2参照) この工法は、円盤状の改良体を 500mm ピッチに造成するため、改良率が 10%程度と小さく従来の円柱状の改良と比べて効率がよく、軟弱鋭敏粘土を対象とし

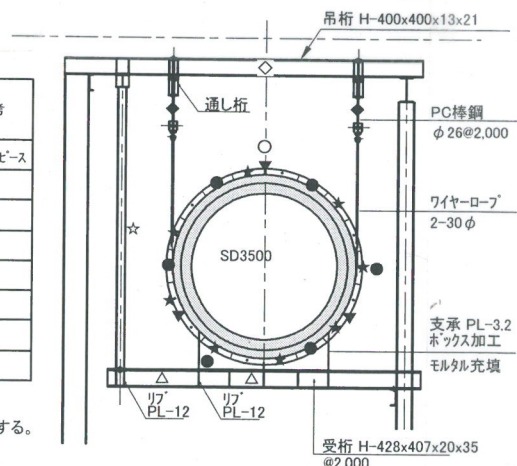


図-5 SD3500計測システム

たトラフィカビリティ向上や土留め壁の受動抵抗増強などの用途に適用するに当たり貴重な実績を残せた。

(4) 情報化施工による安全性の確認

今回施工した下水道シールド防護工は、その大きさ、重さ、防護方法という点で過去に事例がなかったため、図-5に示すような計測計器を設置し、施工進捗に伴う下水管の挙動を計測し、安全性の確認を行った。

図-6に計測結果を示す。PC鋼棒軸力計測結果を見ると、次サイクルのプレテンションの影響で200kNの初期導入量が150kN程度まで減少し、その後の掘削に伴うリバウンドの影響で100kN程度まで軸力が減少している。

この傾向は、変位計測結果でも確認されており、次サイクルのプレテンションの影響で1mm程度隆起した後、その後の掘削に伴うリバウンドの影響で隆起が2mm程度まで増加しているが、それ以降大きな変動は無い。

一方4月下旬に受防護工を施工した後、受桁の曲げ応力度は増加し続け、6月には75N/mm²程度まで応力が増加している。これは下部掘削によるリバウンドの影響で受桁の支点となっている中間杭が隆起したためと考えられる。ただし、下水道シールドの剛性が非常に大きいため、変位やPC鋼棒の軸力にはこの傾向は現れていない。

次に、セグメントの応力について考察すると、応力度は10N/mm²程度しか発生しておらず、設計値の数%のオーダーにとどまっている。この原因としては、これまでの計測では満水となるような大雨が無く、満水位の1/3程度の水位であったことと、安全側に設計上無視した既設シールドのRC二次覆工が荷重を分担していることが考えられる。

何れにせよ、過度な沈下や応力は発生していない。

5. おわりに

平成15年4月末現在、補強セグメント取り付けおよび吊り防護、受け防護を停留場延長115mに渡って施工完了した。油圧ジャッキによるプレテンションの導入や軟弱粘性土のステップ改良の効果により、安全に防護工を行うことができた。計測システムも順調に稼働しており、流水集中時の挙動も含めて、今後も下水道シールドの安全性を確認していく予定である。最後に、今回の下水道シールド防護工についての報告が、今後の同種工事の施工計画立案の際に参考になれば幸いである。

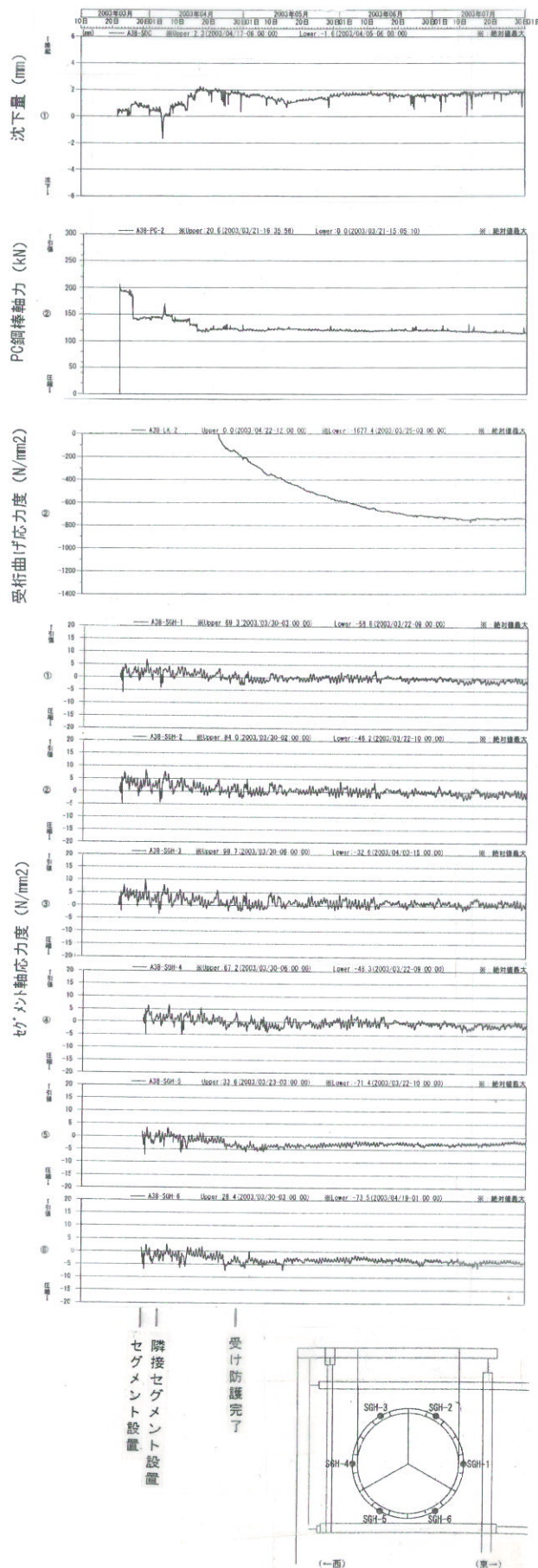


図-6 計測結果

セグメント計測ポイント