

重要埋設物と離隔 1m の近接施工となる圧入ケーソンの施工事例

(株) 大林組 正会員 ○宮田 健治朗 正会員 久保寺 家光
(株) 大林組 正会員 西川 祐輔 正会員 高野 金幸
東日本高速道路 (株) 正会員 本間 英貴
ヤマハ加工建設 (株) 松浦 崇二

1. 概要

東京外環自動車道三郷ジャンクション G ランプ橋 (下部工) 工事は、既設 G ランプ (外環道外回りから常磐道水戸方面へのランプ) の慢性的な渋滞を解消するために、G ランプに並走する新設 G ランプを構築する下部工工事である。46 橋脚のうちの 1 橋脚のみ、上空には供用中の G ランプ、地中には電力用トンネル (以下、トンネル) に挟まれた施工上困難な立地条件にあり、コンパクトな基礎形状とするため「圧入オープンケーソン基礎」が採用されている (図-1 参照)。

本報文では、重要な埋設物の圧入ケーソン施工時の引込沈下対策、軟弱地盤条件下での初期沈設時の不等沈下対策および硬質地盤条件下での最終沈設時の補助工法の計画から施工結果について報告する。

表-1 工事概要

項目	内容
工事名称	東京外環自動車道 三郷ジャンクション G ランプ (下部工) 工事
発注者	東日本高速道路株式会社 関東支社
施工者	株式会社大林組 東京本店
工事内容	既設高速道路ランプの拡幅工事 (46橋脚)
施工場所	埼玉県三郷市
圧入ケーソン数量	グラウト・アンカー：削孔径 $\phi 135$ 、 $L=73.5\text{m}$ 、 $N=4$ 本 荷重沈下設備：1式 (油圧ジャッキ $3,000\text{kN} \times 4$ 基) 掘削工 $V=1,770\text{m}^3$ 、圧入長 $L=47.3\text{m}$

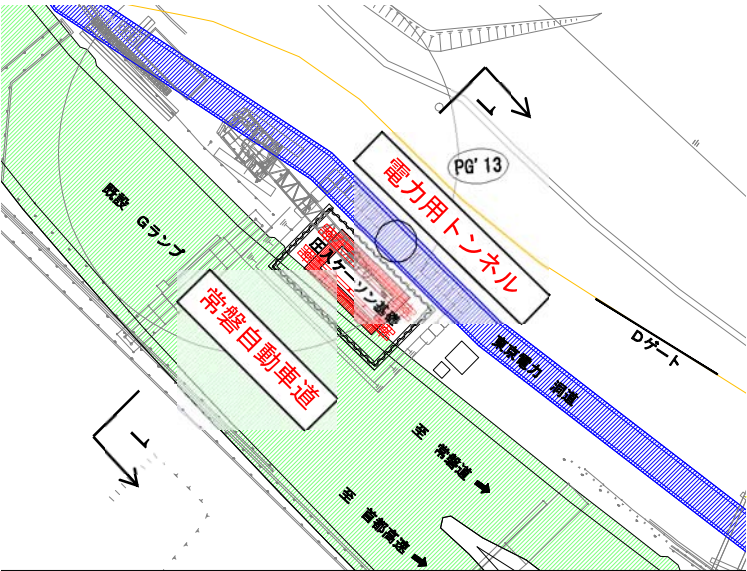


図-1 平面図

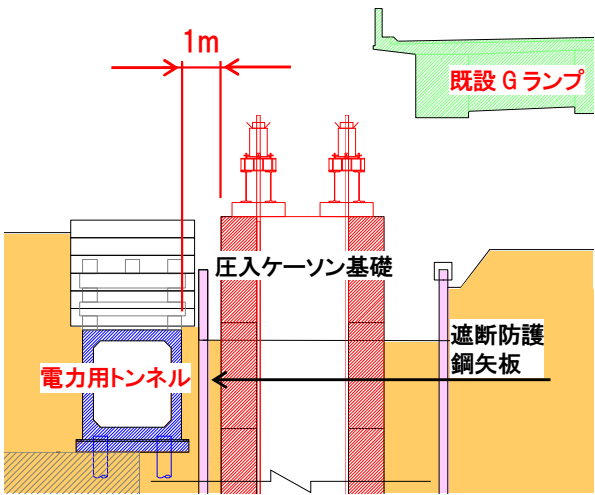


図-2 断面図 (1-1 断面)

キーワード 圧入オープンケーソン, 近接施工, 引込沈下対策, 圧入困難時の補助工法, 不等沈下対策
連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 品川インターシティ B 棟 (株) 大林組本社設計第四部 TEL 03-5769-1308

2. 本工事の地盤条件と技術的課題

(1) 地盤条件

施工箇所は、地表面から約 33m の深度までは N 値が 0 の非常に軟弱な沖積層の粘性土が厚く堆積し、その下には洪積層の N 値が 5～30 程度の砂質土と粘性土が互層にあり、支持層としては地表面から約 46m 深度以深に N 値 50 以上の洪積層の砂質土が堆積している。土質柱状図を図-3 に、設計土質定数を表-2 に示す。

表-2 設計土質定数まとめ

土層名	N 値	γ (kN/m ³)	C (kN/m ²)	ϕ (°)
Yus	7	18.2	0	32
Yuc	2	15.5	27.7	0
Ylc1	1	16.5	30.4	0
Ylc2	1	15.8	52.8	0
Ylc4	2	17.2	70.1	0
Nac	7	16.7	70.0	0
Nas	30	18.8	0	35
Tos	75	20.0	0	35
Tog	82	21.0	0	40

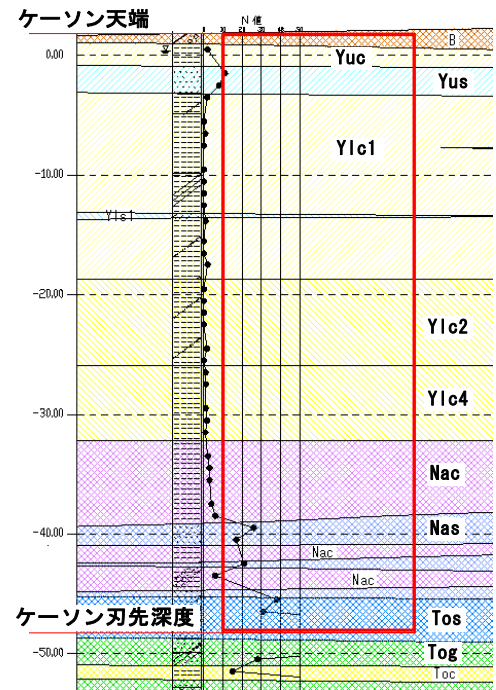


図-3 土質柱状図

(2) 技術的課題

本工事における技術的課題としては下記の 3 項目が挙げられる。

- ① 重要埋設物であるトンネルとの離隔 1m の近接施工
- ② 軟弱地盤条件下での初期沈設時の不等沈下の可能性
- ③ 硬質支持層での最終沈設時の圧入困難

それぞれの技術的課題について、詳細を以下に記載する。

① トンネルとの離隔 1m の近接施工

重要埋設物であるトンネルとの離隔は、図-2 に示す通り 1m と非常に近接している。ケーソン施工時の引込沈下による影響解析を実施した結果、トンネルの沈下量は 29.8mm に達し、トンネル縦断方向の発生応力度は許容応力度を超過することが分かり、トンネルの健全性を確保する沈下抑制対策が必要とされていた。影響解析ステップ図を図-4 に示す。トンネルの横断方向および縦断方向の 2 方向で検討し、ケーソン施工時は引込沈下力とフリクションカット分の水平変位量(20.0mm)によるトンネルの変状を解析で再現した。

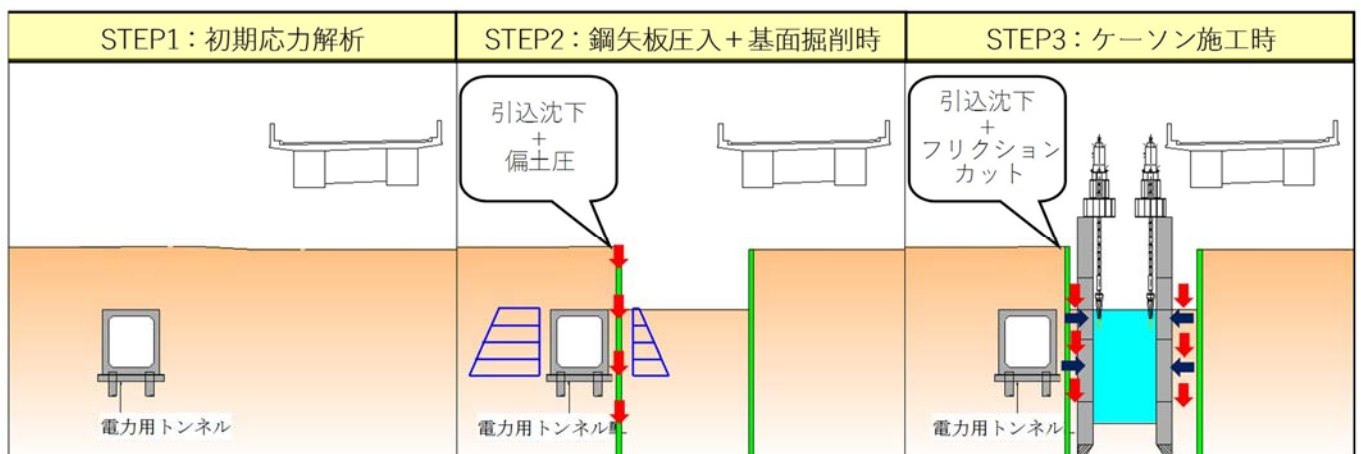


図-4 影響解析ステップ図

② 軟弱地盤条件下での初期沈設時の不等沈下

初期沈設時において、刃先下のマウンドが所定の支持力を有していない場合、不等沈下により傾斜が発生することが懸念された。図-5 に示す通り、刃先下のマウンドは緩い砂層である Yus 層上面に位置するが、1 ロット目構築完了時点で、皿板に作用する分散荷重 (57.8 kN/m^2) に対して、道路橋示方書・同解説 (IV 下部構造編) の直接基礎の設計に基づき算出した Yus 層の支持力 (29.4 kN/m^2) が不足しており、不等沈下対策が必要とされていた。

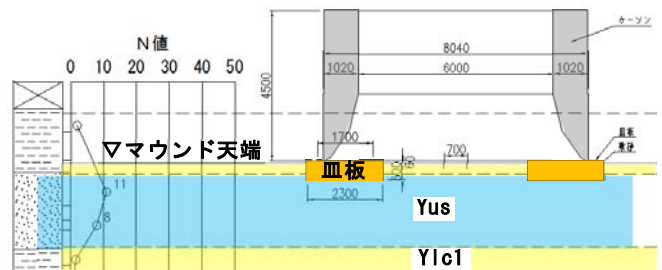


図-5 刃先下マウンド断面図

③ 硬質支持層での最終沈設時の圧入困難

圧入ケーソンの沈設は、圧入力としてケーソンの躯体重量とグラウンドアンカーを反力とする油圧ジャッキ圧入力 (ジャッキ荷重 $3,000 \text{ kN/台} \times 4 \text{ 台}$) があり、それに対して抵抗力としてはケーソン外周の地山との周面摩擦と刃先下の先端抵抗および揚圧力がある。

軟弱な N 値 0 程度の沖積層粘性土地盤を圧入してきた 10 ロット目圧入完了時点で、周面摩擦の縁切りの際に必要なとされた最大圧入力は、既に圧入能力の約 90% にまで達していた。図-6 に 10 ロット目圧入時点での地質縦断図と刃先の位置関係を示す。11 ロット目以深は洪積層となるため、より抵抗力が大きくなり、最終沈設時は支持層である Tos 層 (洪積層砂質土) に貫入させるため、更に圧入困難な状況が発生することが予想され、補助工法の採用が必要とされていた。

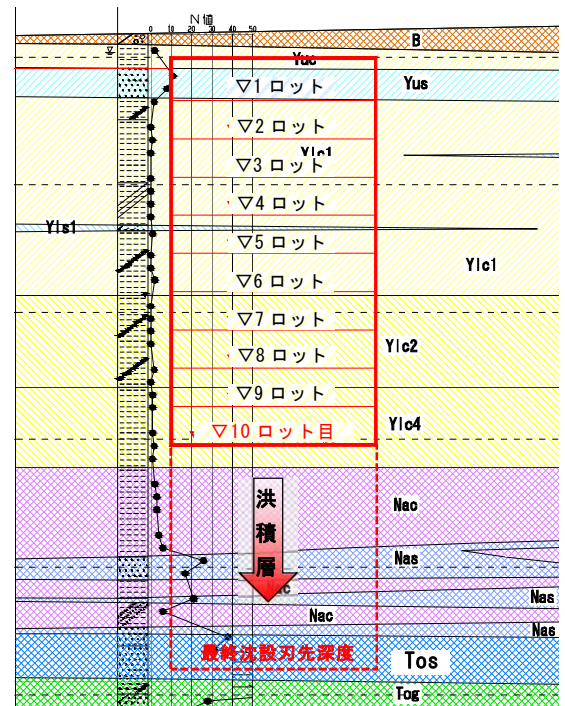


図-6 刃先位置 (10 ロット目)

3. 課題に対する解決策

(1) トンネルの引込沈下対策

ケーソン施工時の引込沈下対策として、表-3 および図-7 に示す A~C の 3 つの対策を検討した上で、トンネルの変状を最も小さくできる「B. 地盤改良工によるトンネルの直接支持案」を採用した。地盤改良工 (以下 SJ50, 改良径 5.0m) の配置を検討するに当たり、図-8・9 に示す通り、改良範囲を変更した数値解析によるケー

表-3 沈下対策工 比較検討結果まとめ

沈下対策工	仕様	トンネルへの影響	判定
A. 遮断防護	鋼矢板Ⅲ型 L=13.5m(当初)	沈下量 $\delta = 40.8 \text{ mm}$ $\sigma_s = 363 \text{ N/mm}^2 > \sigma_a = 180 \text{ N/mm}^2$	×
	鋼矢板Ⅴ型 L=40m	沈下量 $\delta = 51.8 \text{ mm}$ $\sigma_s = 468 \text{ N/mm}^2 > \sigma_a = 180 \text{ N/mm}^2$	×
B. 仮受け	地盤改良工による直接支持	沈下量 $\delta = 19.8 \text{ mm}$ $\sigma_s = 148 \text{ N/mm}^2 < \sigma_a = 180 \text{ N/mm}^2$	○
C. トンネルの補強	トンネルを補強 (沈下は許容する)	沈下量 $\delta = 40.8 \text{ mm}$ (応力度は許容応力度以下)	△

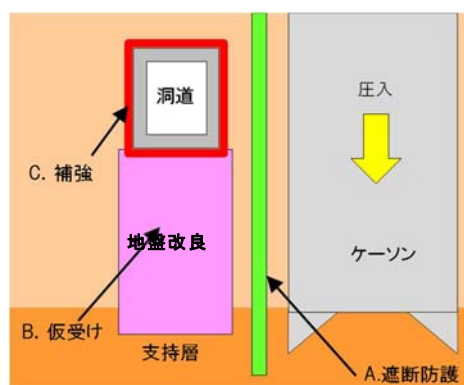


図-7 沈下対策工 概念図

スタディにより考案した「摺り付け構造（緩衝区間）」を設けることで、トンネルに生じる変形を緩やかにし、結果の発生断面力を抑制することができると考えた。さらに、図-10 に示す3段階施工（セメントベントナイト（CB）充填によるトンネル直下の固化⇒上部改良⇒下部改良）および図-8 に示す隣り合う改良体を造成しない施工順序とすることで、SJ50 施工時の予期せぬトンネルの沈下を最小限に抑制できると考えた。

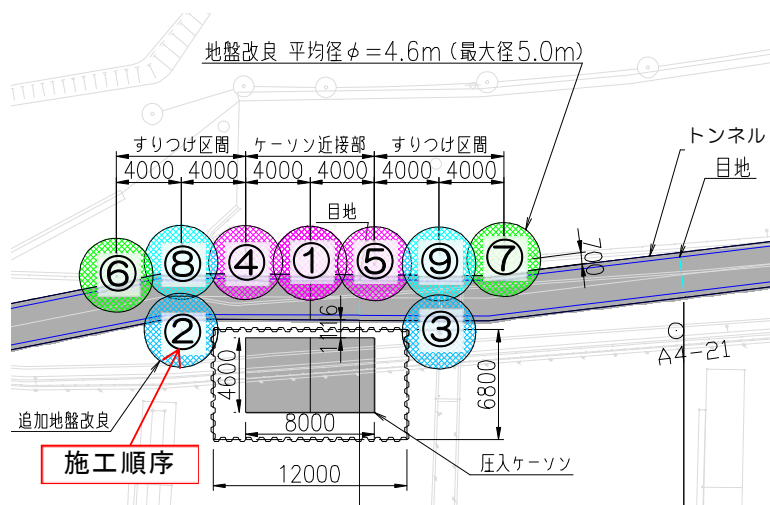


図-8 地盤改良工 平面図（施工順序図）

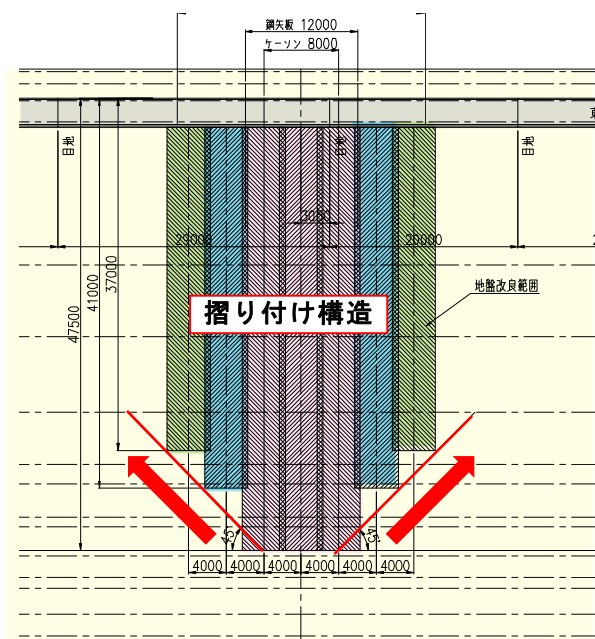


図-9 地盤改良工 縦断図（摺り付け構造）

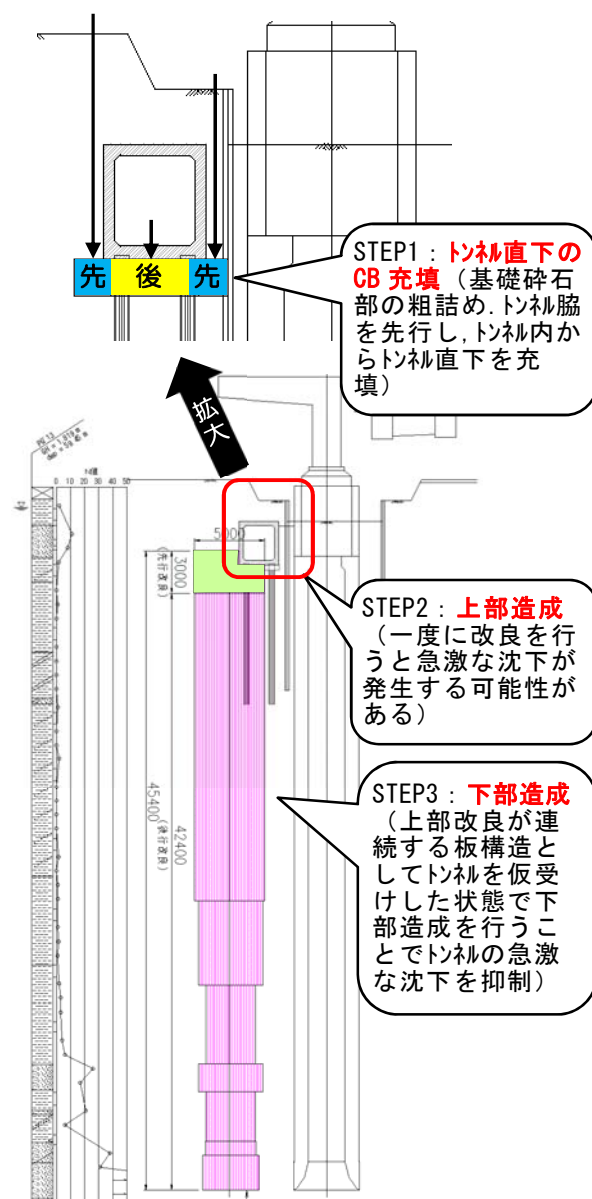


図-10 地盤改良工 3段階施工説明図

（２）初期沈設時の不等沈下対策

初期沈設時の不等沈下対策として、刃先下マウンドの地盤改良工により Yus 層の支持力を増強することとした。施工方法については、「セメント固化」を採用すると刃先下の地盤が固化され圧入作業が困難になるため、「密度の増大」の中から工法選定を行うこととした。施工条件としては、改良範囲がトンネル脇にあることから、砂を流動化させた流動化砂をポンプによって、地盤に圧入することで地盤の締固めを行う「SAVE-SP 工法（砂圧入式静的締固め工法）」を採用した。施工機械は、常磐道桁下での作業となるため、低空頭仕様機（ロータリーパーカッションドリル）により施工を行うこととした。

（３）最終沈設圧入困難時の補助工法

最終沈設時の補助工法として、周面摩擦および先端抵抗の低減を図る目的で、表-4 に示す補助工法を検討した。軟弱地盤においては、ケーソン周面摩擦の低減を図ることができれば対応可能な場合が多い。しかしながら硬質地盤の場合、先端抵抗の低減まで必要となる場合もあることから、補助工法の実施順序として、表-4 に示す順序の通り、周面摩擦力の低減を最初に図り、それ以上の対策が必要とされる圧入困難な場合は先端抵抗の低減を行うこととした。

表-4 ケーソン補助工法と採用順序

順序	補助工法	工法概要および効果
1	滑材注入	フリクションカット充填用のケーソン躯体内各ロットに埋設してあるコンタクトグラウト配管から滑材を注入し、周面摩擦力の低減を図る
2	エアジェット	コンタクトグラウト配管から圧縮空気を送り、ケーソン外周の境界面の地山との接触を一時的に切ることによって周面摩擦の低減を図る
3	突き矢による土平落し	ケーソン内面および刃先下に付着した土平を突き矢によりそぎ落とし、先端抵抗の低減を図る
4	ウォータージェット	刃先下の地山をウォータージェットにより切削し、先端抵抗の低減を図る

4. 結果

（１）トンネルの引込沈下対策

トンネルの引込沈下対策工である CB 充填は、吐出量を毎分 8 ㍓に低減した低压浸透注入工法を採用し、トンネル内に設置した水盛式沈下計（自動計測）を確認しながら慎重に施工を進めた。SJ50 は改良対象土が粘性土主体であるため、プレジェット併用による造成を行い、固化材は粘性土用の SJ-2 号を使用した。トンネル直下の上部造成は、造成時のブリーディングに伴う沈下を最小化するため造成長を 3m とし、トンネルに 1m ラップさせるこ

とで、トンネル直下の改良体との隙間が発生しないように工夫した。施工完了後にトンネル内からチェックボーリングを行い、トンネル直下に確実に充填されていることを確認し、トンネル脇からは改良体下端が確実に支持層へ根入れされていることを確認した。

トンネルの沈下対策効果として、沈下対策工（CB 充填時～SJ 工）からケーソン施工時および圧入後のトンネルの自動計測結果を図-11 に示す。施工方針としては、トンネルの隆起量管理値付近までトンネルを CB 充填により弱冠量隆起させた。次工程の SJ50 において沈下は発生したが、完了時のトンネルの鉛直変位量としては、0mm 付近の状態に納めることができた。その後の慎重な施工によりケーソン施工時の最大沈下量として、事前解析値（測点③8.5mm）の約 50%、一次管理値（測点③5.1mm＝事前解析値×60%）の約 90%の 4.5mm に抑制することができた。地盤改良体で支持した箇所のケーソン施工時の沈下量は 2mm 以内に抑制できた。

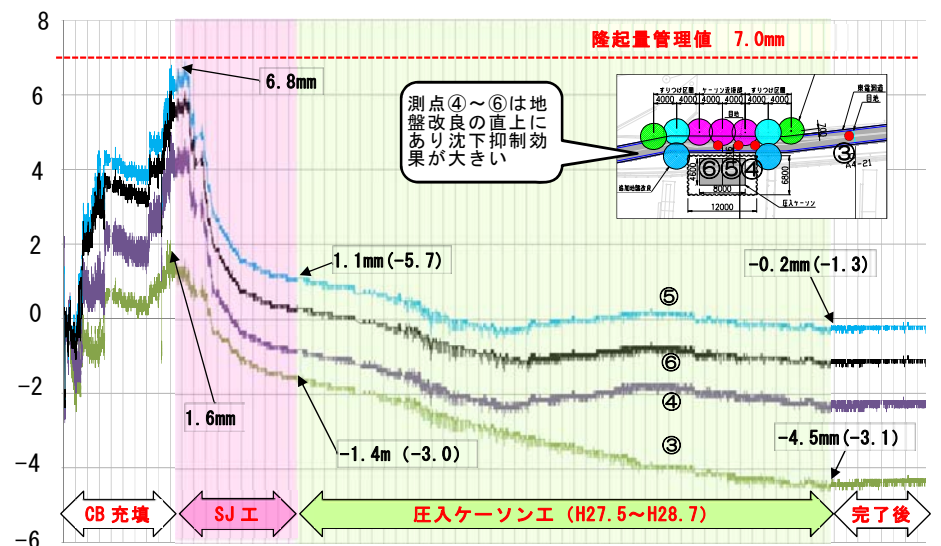


図-11 トンネルの自動計測結果（沈下対策工～圧完了後 4 ヶ月間）

(2) 初期沈設時の不等沈下対策

初期沈設時の不等沈下対策工としての刃先マウンド下の地盤改良施工状況写真を写真-1 に示す。施工順序は、トンネルへの影響を最小限とするため最初にトンネル側を施工した。砂杭径は $\phi 700\text{mm}$ とし、注入速度は 100L/min で当初設定したが、トンネルの水平変位を抑制するため、最終杭列は段階的に $1/3$ にまで低減した。施工後に平板載荷試験を実施し、当初の 29.4kN/m^2 (計算値) から $P_u=113.2\text{kN/m}^2$ まで地耐力が向上し、施工時荷重以上の耐力を確保することができた。その結果、コンクリート打設時および初期沈設時に不等沈下を発生させることなく沈設作業を進めることができた。



写真-1 SAVE-SP工 施工状況

(3) 最終沈設時の補助工法

1 ロット目～15 ロット目は 3m 沈設するのに、施工実績として 3 日間 (1 日目：周面摩擦力の縁切り、2～3 日目：掘削・圧入) で圧入が完了したが、最終ロットは 16 日間もの日数が必要とされ、表-4 の補助工法をすべて実施した。最終沈設時の補助工法に関する写真-2～4 に示す。実施した補助工法の中で、最も効果があったのは、15 ロット目までは「突き矢による土平落し (写真-2 参照)」であったが、最終沈設時は「ウォータージェット (以下、WJ) による刃先下の地山の切削 (写真-3 参照)」であった。



写真-2 突き矢

WJ による刃先下地盤の切削は 2 段階に分けて作業を行った。最初に、刃先の 4 つのコーナー部の切削を行った。コーナー部は刃先下の土が集まる箇所、今までの施工実績からこのコーナー部の切削を行えば、通常沈設は進めることができるが、本工事においてはコーナー部の切削だけでは圧入が進まなかったため、第 2 段階として、直線部の刃先下の切削を実施した。写真-4 は、WJ により刃先下に付着した粘性土の土塊が剥がれ落ち、その土塊を WJ 直後に掘削した状況である。その刃先下に付着した土塊を無くした後、圧入作業はスムーズに進んだ。なお、WJ は、切削した砂を刃先下から離れた位置へ吹き飛ばす必要があったため、より強力な二重管システム (高圧水+圧縮空気) を採用した。



写真-3 WJ 噴出状況

これらの補助工法を駆使しながら、ケーソンの予期せぬ沈下が発生しないように、常時監視しながら施工を進めることで所定の設計深度まで圧入が完了できた。

底版コンクリートを打設するまでは刃先下の地盤を切削することでケーソンの刃先抵抗が一時的に期待できない状態になり、予期せぬ沈下が発生する可能性があることから、沈設完了後は直ちにコンタクトグラウトを行い周面摩擦を確保した。次に、刃先下の清掃とスライム処理を慎重に行い、刃先下の切削した地盤を確実に底版コンクリート (水中不分離性コンクリートを採用) で置き換えることで、基礎として必要な支持力を確保した。



写真-4 刃先下に付着していた粘土土塊

5. まとめ

重要な埋設物と離隔 1m という施工条件下での大深度圧入ケーソン工事において、埋設物の安全性を確保しつつ、無事に所定の深度までケーソンの沈設を施工した 5 つのポイントを以下に示す。

- ① 沈下対策として効果的な埋設物下部の地盤改良による直接支持を選択した
- ② 改良深さを変化させた摺り付け区間を設けることにより埋設物に与える影響を緩和した
- ③ 埋設物の施工中の鉛直変位量を対策工施工中も含めて自動計測により厳密に管理した
- ④ 地盤改良施工時の埋設物の鉛直変位量を抑制するため、平面方向・鉛直方向共に段階的な施工ステップを採用した
- ⑤ 軟弱な表層部や硬質な支持層といった地盤条件にも事前に入念な調査と計画を行い、その対策として各種補助工法を準備した

本報文が、圧入ケーソン工事における重要埋設物との近接施工時の沈下対策と硬質地盤での圧入困難時の補助工法の選定時の参考となれば幸いである。