

揚水による掘削底面のリバウンド対策技術

新保貴光¹・山口秀樹²・柳 英実³・高坂信章⁴・安藤 陽³

¹京浜急行電鉄株式会社 鉄道本部 蒲田連立・空港線担当（〒144-0031 東京都大田区東蒲田二丁目30-17）

²正会員 清水建設株式会社 土木東京支店 土木第一部（〒144-0041 東京都大田区羽田空港2-8）

³正会員 清水建設株式会社 土木技術本部 都市基盤統括部（〒105-8007 東京都港区芝浦一丁目2-3）

⁴正会員 清水建設株式会社 技術研究所 インキュベーションセンター
（〒135-0044 東京都江東区越中島三丁目4-17）

京浜急行電鉄発注の「国際ターミナル駅（仮称）建設工事 土木工事」においては、砂質土層（As2）からの揚水を行うことによって掘削底面のリバウンドを抑える工法を採用した。同工法は、営業線を抱えながら軟弱地盤を広範囲に掘削する際のリバウンド対策として、土質条件・工程・工費など種々の条件を総合的に勘案して立案したものである。これにより、鉄道の特性である大量性・速達性・定時性等を損なうことなく安全・安定輸送の確保が可能となった。

本論では、同工法を採用するにあたっての事前解析や試験等について述べるとともに、実施工時（掘削～躯体構築）のリバウンド・沈下の測定結果、今後の課題と展望について述べる。

キーワード：リバウンド，軟弱地盤，開削工法，応力解放

1. はじめに

羽田空港の再拡張事業の1つであるD滑走路が完成すると、発着能力が現在の30.3万回/年から40.7万回/年に増強される。この整備により将来の国内航空需要に対する発着枠を確保しつつ、国際線定期便の受入れが可能となる。

京浜急行電鉄（株）では、平成22年度に予定されている国際線定期便就航および国際線ターミナルビルの新設に合わせ、乗客の利便性向上を目指し、ターミナルビルに直結する新駅を建設することとした。この新駅は、空港線ボックスカルバートを拡張するように軌道階（地下2階）にホームを、地下1階に機械室を設置するものであり、京浜急行としては1998年に開業した羽田空港駅以来11年ぶり、73番目の新駅設置となる（図-1、図-2）。

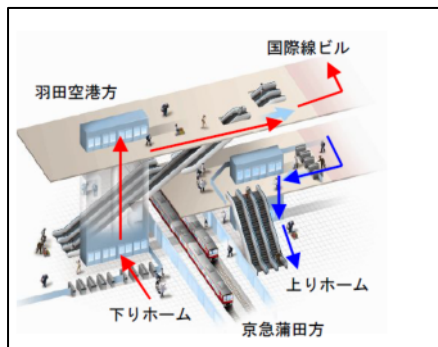


図-1 新駅概要

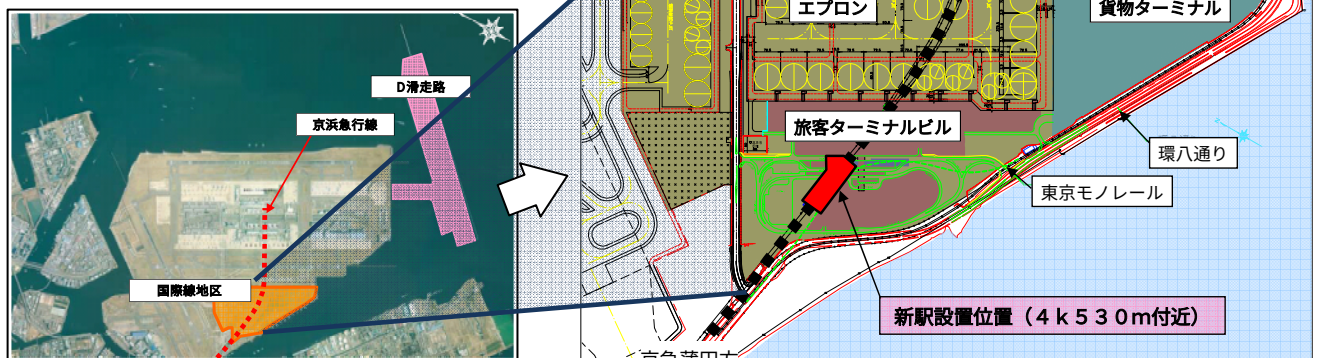


図-2 全体概要図

2. 工事概要

(1) 工事概要

工事名称	国際線ターミナル駅（仮称） 建設工事 土木工事
工事場所	東京都大田区羽田空港 2 丁目 （京急蒲田起点4K530m付近）
発注者	京浜急行電鉄株式会社
設計・監理者	パシフィックコンサルタンツ
施工者	清水・大成・鹿島・五洋・京急 共同企業体
工期	H18.4.1～H20.12.28

(2) 地質概要

a) 沖積層（完新世）

- ・埋土層（F）
地表面から2m～3mに分布し、ガレキ・シルト混じり砂から成り、非常に緩い状態にある。
- ・有楽町層上部（As1）
AP-10m付近まで分布する、細砂・シルト混じり砂から成る砂層である。貝殻片が微量に混入し、緩い状態にある。
- ・有楽町層下部（Ac2, As2）
Ac2はAP-20m付近、As2はAP-30m付近に分布する。Ac2はシルトから成り均質で非常に軟らかく、As2はシルト混じり砂・粗砂・礫混じり砂から成り、緩い状態にある。なお双方とも貝殻片が微量に混入している。

b) 洪積層（更新世）

- ・七号地層（Dc1, Ds1）
Dc1はAP-45m付近、Ds1はAP-50m付近に分布する。Dc1は粘性中位の粘性土であり、中位の硬さの状態にある。またDs1は粘土が多量に混入し、腐食物が微量に混入しており、砂質土としては緩い状態にある。
- ・東京層（Ds2）
Ds1下に出現する砂質土層であり、N値50以上で非常に密である。
地質縦断図を図-5に示す。

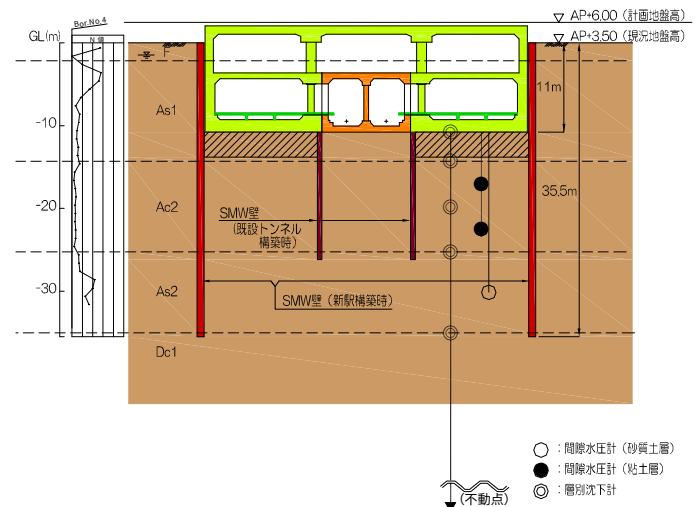


図-3 横断図

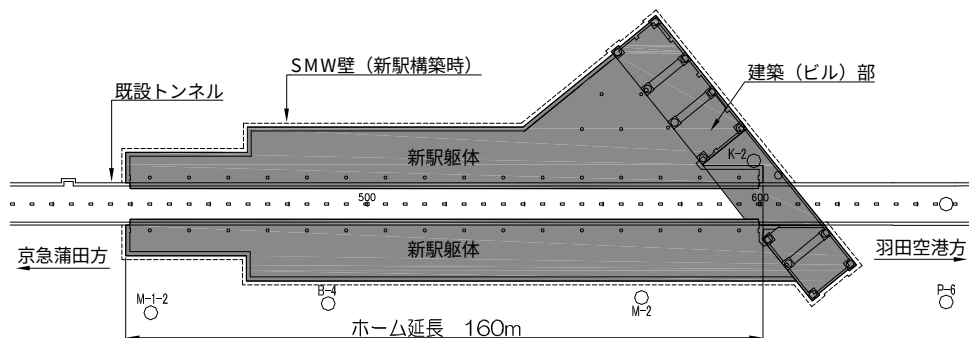


図-4 平面図

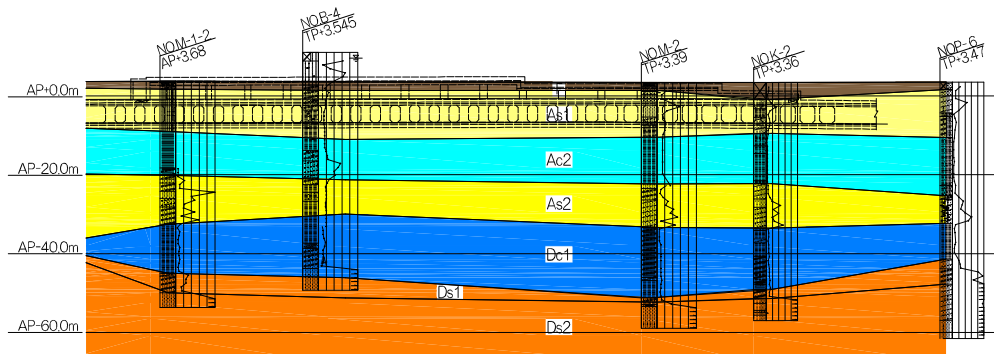


図-5 地質縦断図

3. 山留め掘削概要

本工事は営業中の京急空港線のボックスカルバート（以下、既設トンネル）の両脇を深さ 11m ほど掘削し、地下 2 階のホーム階（軌道階）および地下 1 階の機械室階を築造したのち、埋め戻すものである。

平面図を図-4 に、横断図を図-3 に示す。

先述のとおり当該地は軟弱な土層が AP-30m 程度まで存在し、掘削に伴う応力解放によって掘削底面のリバウンドが発生するとともに、それによって既設トンネルの軌道および躯体へ重大な影響を及ぼすことが当初より懸念されていた。

そこでまず横断面において 2 次元の有限要素法（FEM）による事前予測解析を行った。その際用いた土質物性値（変形係数）は、土質試験結果より得られたものである。予測解析の結果、軌道位置（躯体）で 84mm・掘削底面で 140mm のリバウンドが発生する結果となった（図-6）。

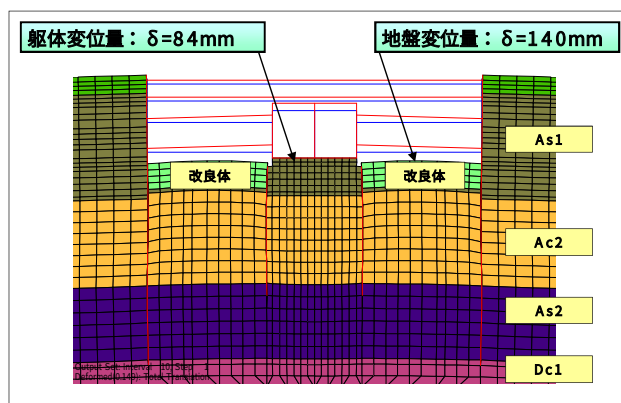


図-6 FEM 解析

軌道が最大で 84mm 浮き上がった場合でも、

①軌道の相対変位量

②躯体の縦断方向における応力度

に問題ないとの検討結果が得られていたが、既設トンネルと新設トンネルとの接合部や中間杭等の山留め支保工に対しての構造的な影響、さらには杭基礎である駅ビル（建築部）との接合部に設置する可撓継手の許容変位を上回るズレが生じる事も懸念されることから、掘削時のリバウンドを抑制させる手法の立案を行うこととなった。

4. 揚水によるリバウンド対策

(1)概要

掘削底面のリバウンドを抑制する手法として、

①狭い範囲で掘削～構築を行い、それを繰り返す方法（分割施工）

②軟弱地盤を全面的に改良する方法

③支持層までアンカーを打設する方法

④躯体に重りを載せる方法

等の検討を行ったが、いずれもコスト面・工程面、また技術的に問題があり、採用には至らなかった。

そこでコスト・工程に寄与できる方法として、ディープウェル工法を用いて砂質土層（As2）から揚水することにより、間隙水圧の低下および有効応力を増加させ、その結果 As2 層には弾性沈下を、上部の粘性土層（Ac2）には圧密沈下を発生させてリバウンドを抑制する手法を考案した。概念図を図-7 に示す。

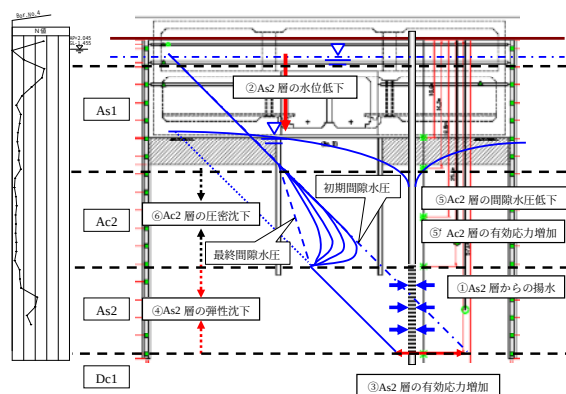


図-7 概念図

原理の上では可能な工法であるが、揚水によってリバウンドを抑制した事例は過去にない、また既往の文献等もなかった。したがって実施工に入る前に、揚水による地下水位の低下状況および揚水の効果や予測解析に必要な物性値（変形係数）の詳細な算出などについて、図-8 の手順により検討を行った。

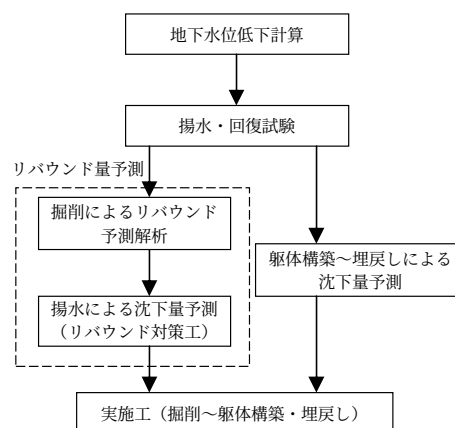


図-8 検討手順

(2)地下水位低下計算

揚水対象層である As2 層から排水することで沈下を発生させることから、地下水位が適切に低下することが必要条件となる。本工事の場合、山留め壁（SMW 工法）が As2 層下の Dc1 層まで貫入されているものの、一部山留めが閉合できない箇所（既設トンネル下）もあるため、浸透流解析により地下水位の低下状況を把握した。

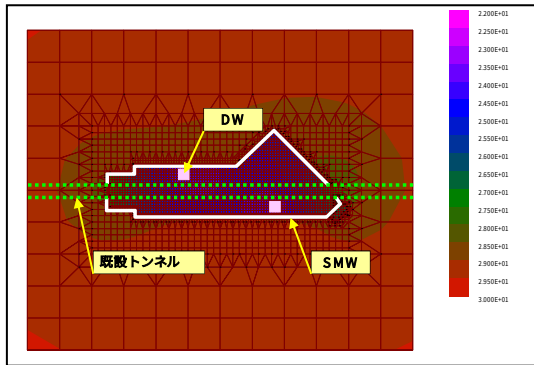


図-9 地下水位低下計算

(3)揚水・回復試験

現地にて揚水・回復試験を行い、各土層の水圧変動（有効応力の変動）と地盤変位状況を確認するとともに、その挙動から土層がマクロ的に有している物性値（変形係数）を算出した。

なお各土層境界位置に層別沈下計、Ac2 層には上部・下部に間隙水圧計、As2 層に水位計を設置し、それぞれの値を計測した（図-3）。

なお、2 週間の揚水試験によって 10mm ほど沈下が発生し、その後の 2 週間の回復試験では 4mm の膨張（回復）という結果であった。

(4)掘削によるリバウンド予測解析

揚水・回復試験結果（応力－ひずみの関係）から算出した地盤の物性値（変形係数）を用いて、再度 2 次元 FEM によるリバウンド予測解析を行ったところ、最終掘削時における軌道位置での変位量は 42mm という結果となった（図-10）。

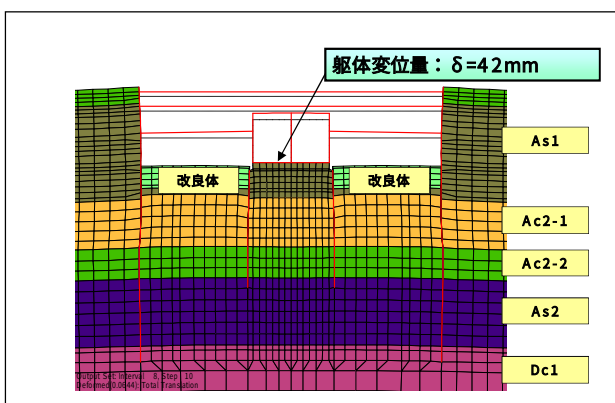


図-10 FEM 解析

沈下～回復という実際の土の挙動から求めた変形係数（図-11）を使うことにより、サンプリングした土の変形係数を使った場合の予測値 84mm の約半分となった。

なお揚水・回復試験にて得られた有効応力とひずみの関係（As2 層）を以下の図に示す。

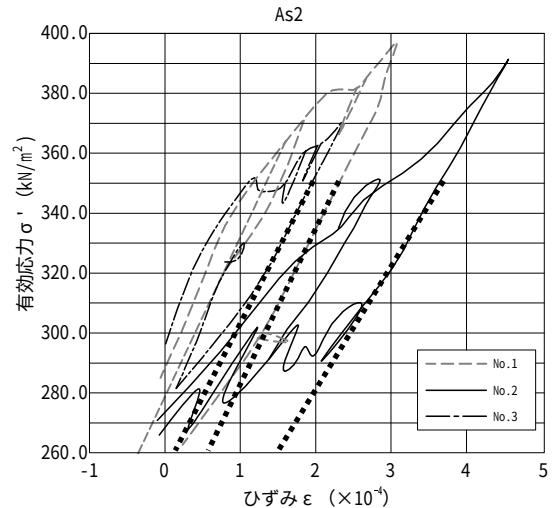


図-11 変形係数の算出

$$E_1 = \frac{280 - 390}{\{-1 - (-3)\} \times 10^{-4}} = 550,000 \text{ kN/m}^2$$

$$E_2 = \frac{277 - 365}{\{-2 - (-4)\} \times 10^{-4}} = 440,000 \text{ kN/m}^2$$

$$E_3 = \frac{297 - 350}{\{-1 - (-2)\} \times 10^{-4}} = 530,000 \text{ kN/m}^2$$

$$\therefore E' = 507,000 \text{ kN/m}^2$$

上記より、土質試験結果を基に設定した変形係数（ $E=150,000 \text{ kN/m}^2$ ）と比較すると、3 倍程度の値となることが分かった。

(5)揚水による沈下量予測

続いて揚水による沈下の度合い、すなわち下部砂層（As2）からの揚水による粘性土層（Ac2）の圧密過程の経時変化を求めることとし、粘弾塑性法を用いた連成解析を行なった。Ac2 層の間隙水圧は図-12 のように徐々に低下し、150 日後の圧密沈下量は約 20mm となった（図-13）。

従って、掘削によるリバウンド 42mm と足し合わせることで、トータル 22mm のリバウンドが発生するという予測結果が得られた。

揚水による水位・水圧の低下により、有効なリバウンド対策としての効果が期待できることが判明したため、揚水・計測を行いながら、掘削を行うこととした。

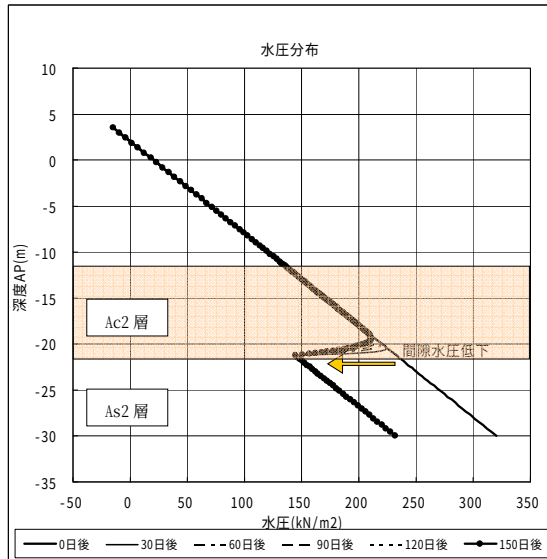


図-12 水圧分布

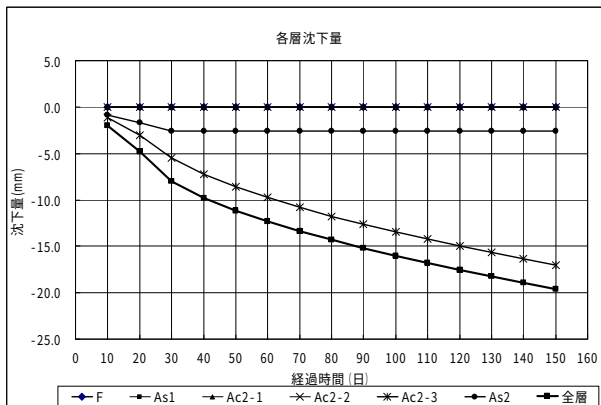


図-13 沈下図

(6) 躯体構築～埋め戻しによる沈下量予測

掘削完了後は躯体構築・埋め戻しとなるため、リバウンドから一転して沈下傾向となる。

掘削底面を基準に考えると、掘削前に作用していた土砂荷重よりも、躯体および埋め戻し土重量の方が軽量となるため、埋め戻し完了後も過圧密状態であると考えられる。

したがって沈下量の殆どは弾性沈下であり、躯体構築時の沈下性状を基に算出した最終沈下量は20mm程度であるという予測結果を得た。

5. 実測結果

(1) 計測工

掘削段階における躯体・軌道変位の管理値、管理手法を表-1のように設定し、管理を行った。

表-1 管理手法

	管理値	管理手法
軌道	絶対値 3mm	水盛式沈下計による24時間体制管理
既設躯体	相対値 1.4mm/10m	定期的にクラック調査

以下に、水盛式沈下計設置のイメージ図を示す。

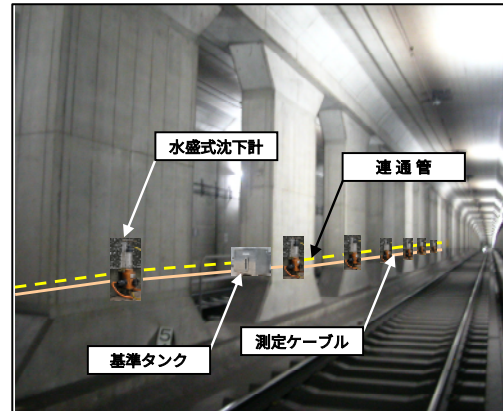


図-14 沈下計イメージ

(2) 実測結果 (リバウンド)

2次元の FEM 解析結果 42mm を梁バネモデルに荷重として与えて、縦断方向のリバウンド量分布を算出した結果を図-15 に示す。なお湯水による沈下量については、時間効果を伴うため、重ね合わせは行わないこととした。

湯水による効果もあり、掘削完了時における軌道位置での変位量は約 18mm であり、FEM 解析による予測値の半分以下であった。また定量的評価は難しいが、切梁・中間杭などの支保工の拘束効果も、寄与したものと考えられる。

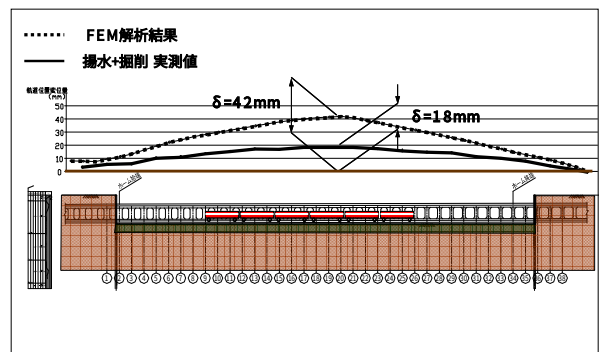


図-15 縦断方向変位 (リバウンド)

(3) 実測結果 (躯体構築による沈下)

5月現在の躯体構築状況および沈下状況のグラフを図-16 に示す。5月時点では一部の躯体(上床版)構築と、埋め戻しを残すのみとなっている。

グラフから分かるように、掘削完了時点を基準(0mm)と考えた場合、最大 6.7mm ほどの沈下が発生している。

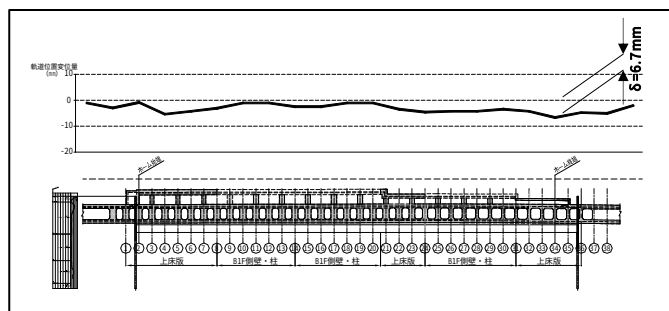


図-16 縦断方向変位（躯体構築による沈下）

なお、測点No.2における掘削底面位置での挙動を示したグラフを図-17に示す。

6. 考察

揚水によりリバウンドを抑えるという他に類をみない工法ではあったが、手順を追ってその効果を予測・検討することで、実施工においても既設トンネルへの影響を抑えることができた。

また簡便的に掘削（応力解放）によるリバウンド量、揚水による沈下量（揚水の効果）をそれぞれ算出し、足し合わせる手法により、下式のように最終的な総リバウンド量の予測が可能となった。

$$\text{トータルのリバウンド量} = \text{①掘削によるリバウンド量} + \text{②揚水の効果}$$

将来的には、①と②の解析を同時に行なうプログラムの開発が有効であると考えられる。また山留め壁が閉合されていない場合や、不透水層まで根入れのない場合、すなわち地下水の流入がある場合においても、流入量と排出（揚水）量をコントロールしながら、揚水によるリバウンドの制御が可能なシステムを構築することも必要と考える。

掘削完了後の躯体構築・埋戻し等の荷重による沈下については、今回は過圧密状態であるため弾性沈下（即時沈下）となったが、さらに大きな荷重が作用し正規圧密となる場合には、弾性沈下量に加え、より正確な圧密沈下量の算定手法を検討する必要があると考えられる。

さらには、掘削で応力解放されることによるリバウンド量算定（揚水の効果を含む）と、躯体・埋戻しによる沈下を総合的に捉えた上で、既設構造物への影響を検討する手法の構築が期待される。

7. 終わりに

本論では、軟弱地盤中において、鉄道営業トンネルの周囲を大規模掘削する際の、リバウンド対策工について述べた。

近年における都市土木工事の多くは、近接した重要構造物を抱えており、掘削底面のリバウンドを抑えることは工事中の品質・安全確保のために重要である。

今後関係者各位のご指導を賜りながら、揚水によるリバウンド抑制技術を更に改良・発展させていく所存である。

最後に、本報が今後の都市土木工事のリバウンド対策方法の検討に一助となれば幸いである。



写真-1 掘削時全景

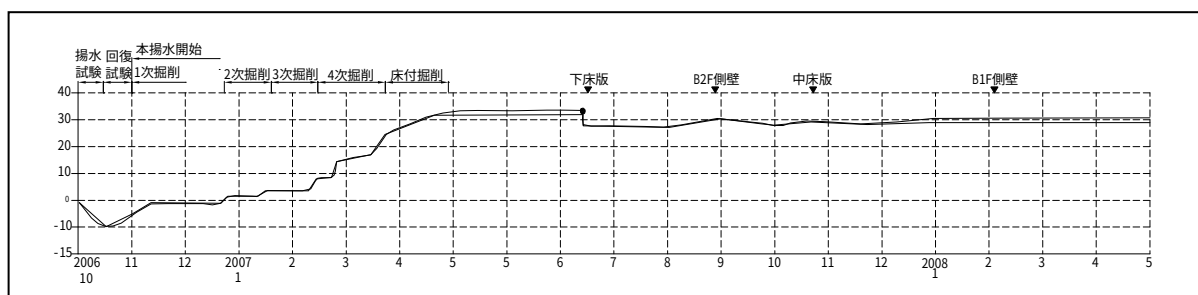


図-17 掘削底面位置の挙動