

# 大規模・大深度掘削工事における 上総層群土丹層のリバウンド挙動

中沢 楓太<sup>1\*</sup>・沼上 清<sup>2</sup>・高倉 望<sup>3</sup>・谷 和夫<sup>4</sup>

<sup>1</sup>東急建設株式会社 建築技術部（〒150-8340 東京都渋谷区渋谷1-16-14）

<sup>2</sup>東急建設株式会社 技術研究所（〒252-0244 神奈川県相模原市中央区田名3062-1）

<sup>3</sup>東急建設株式会社 土木技術部（〒150-8340 東京都渋谷区渋谷1-16-14）

<sup>4</sup>横浜国立大学 大学院（〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5）

\*E-mail: nakazawa.fuuta@tokyu-cnst.co.jp

本報では、上総層群土丹層を大規模・大深度に掘削する建築工事において、掘削底以深の地盤のリバウンドを計測し、地下施工方法がリバウンド挙動や地盤剛性に与える影響について考察した。

掘削底以深の地盤のリバウンドは、順打ち工法の場合には地中深くから生じるが、逆打ち工法の場合には構真柱杭の先端以深ではほとんど生じておらず、逆打ち工法のリバウンド抑制効果を確認することができた。よって、逆打ち工法の場合、最終床付け面から構真柱杭先端までの領域でのみ地盤剛性のひずみ依存性を考慮すればよいことが確認された。さらに、逆打ち工法の現場では、地盤中のひずみを計測する埋設型のコアセンサーを適用し、リバウンドの計測手法として有効であることを確認した。

**Key Words** : excavation, silty-hard clay, rebound, field measurement, Young's modulus

## 1. はじめに

都市部の建築工事において、大規模・大深度に地盤を掘削する場合、山留め壁の変形による地盤変形に加えて、掘削底以深の地盤のリバウンド現象が近接構造物に与える影響も考慮しなければならない。これまで掘削工事に伴うリバウンドの計測の事例は報告されている<sup>1)~3)</sup>が、地盤種別や近接構造物の構造型式が多様なため、その評価手法が確立されているとはいえず、地盤の掘削や躯体の構築に伴う掘削底以深地盤の剛性の変化を経験的に判断し、リバウンド量や沈下量を評価している。

建築の地下施工方法には、地盤を掘削した後に深部から地下躯体を構築する順打ち工法と地盤の掘削と並行して地下躯体を構築する逆打ち工法があるが、市街地では、工期短縮と共に近接構造物への影響を抑えるために、逆打ち工法を採用する場合がある。

本報では、上総層群土丹層を大規模・大深度に掘削する工事において、掘削底以深の地盤のリバウンドを計測し、地下施工方法がリバウンド挙動に及ぼす影響を考察すると共に、実測値に基づいた逆解析により土丹層の掘削工事に伴う地盤剛性のひずみ依存性について考察する。また、逆打ち工法の現場では、筆者らが開発した原位置における地盤ひずみの新たな計測方法<sup>4)</sup>であるコアセン

サーによる計測を実施し、その妥当性を検証した。

## 2. 工事概要

表-1に、リバウンドを計測した現場の工事概要および地盤概要を示す。Site-A<sup>7)</sup>は順打ち工法を、Site-B<sup>8)</sup>は逆打ち工法を採用している。各Siteの工事平面および断面を図-1に、地層構成、せん断波速度 $V_s$ および計測器の設置深度は図-2に示す。いずれも上総層群土丹層（固結シルト、 $V_s=480\sim 560\text{m/s}$ ）を大規模・大深度に掘削する工事である。

なお、本報では最終床付け面をEL±0.0mと定義する。

表-1 工事概要

		Site-A	Site-B
地下施工方法	順打ち工法	順打ち工法	逆打ち工法
	平面	約115m×140m	約200m×55m
	最大掘削深度	約22.5m	約40m
規模	建物階数	地上16階・地下2階	地上34階・地下4階
用途		複合施設	
計設地	多摩川流域の沖積低地	山の手台地	
支持地盤	土質	上総層群土丹層 (Kac)	
	N値	50以上	
	せん断波速度	560~660m/s	530~550m/s
リバウンド計測手法	層別沈下計	層別沈下計	コアセンサー

### 3. リバウンドの計測方法

各Siteとも、リバウンドの計測には層別沈下計を用いた。層別沈下計は、図-2の断面図に示すように、水圧式アンカーおよび区間変位計をロッドで連結した構造となっており、各水圧式アンカー間に区間変位計を設置して、各区間の伸縮量を計測した。計器設置にあたっては、ボーリング孔内（φ116mm）に硬化遅延剤を混入したセメントベントナイトを充填した後、層別沈下計を建込み、不動点となる最深部の水圧式アンカーを定着させ、区間変位計の出力値を確認しながら、深部から順に水圧式アンカーを定着した。

また、逆打ち工事のSite-Bでは、地盤ひずみの新たな計測方法であるコアセンサー<sup>6)</sup>、<sup>8)</sup>を利用した。コアセンサー（φ100mm）とは、良質なコアが採取可能な地盤を対象としたひずみ計測の手法であり、地盤中から採取したボーリングコアにひずみゲージを貼付したものである。コアセンサーを台座付きのワイヤーで懸垂して、方位を制御しながらボーリング孔（φ150mm）に戻し、隙間には周辺地盤と同程度の剛性のグラウト材を最深部より充填した。なお、コアセンサーには、3方向（水平、45°および鉛直方向）にひずみゲージを貼付したが、本報では鉛直方向のみ考察する。

これらは掘削地盤上に置いた測定器に接続し、掘削の進捗に合わせて下げていき、定期的かつ継続的に自動計測した。

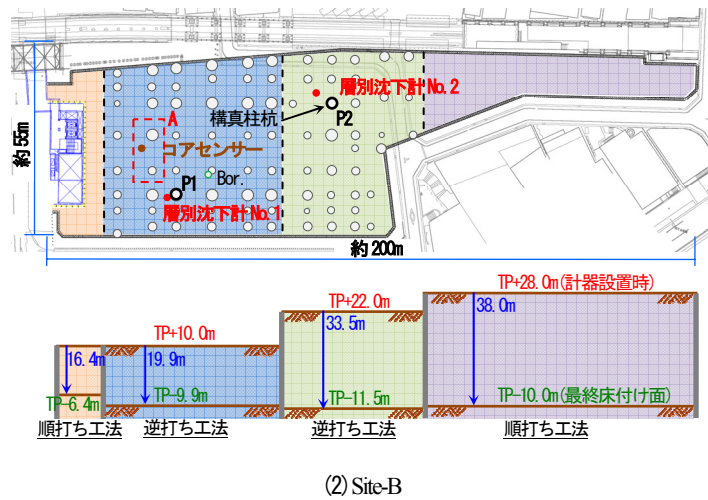
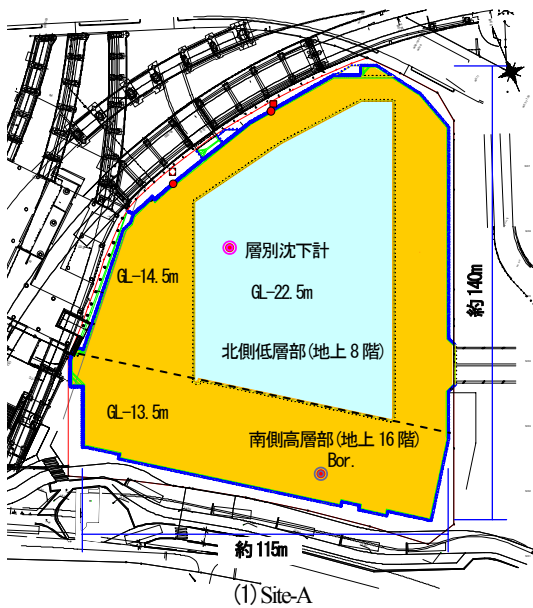


図-1 工事平面および断面

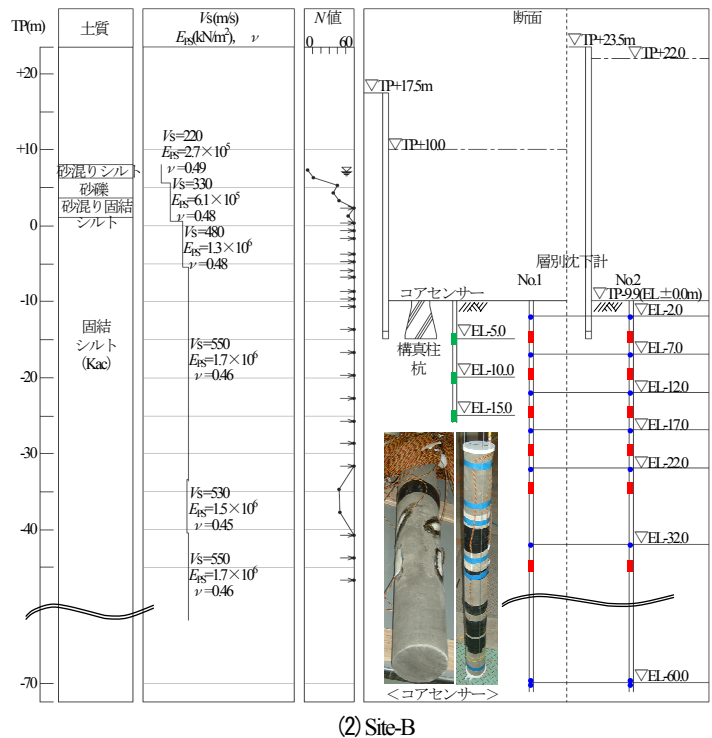
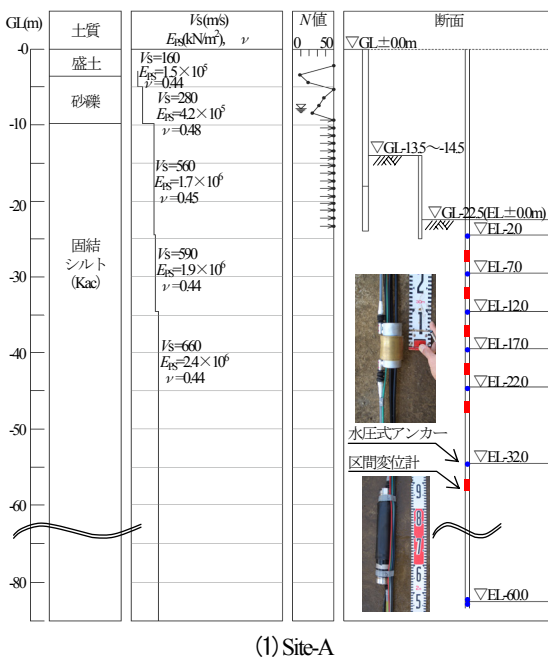


図-2 地盤概要および計測器の設置深度

#### 4. リバウンド計測結果

##### (1) Site-A (順打ち工法)

図-3は、層別沈下計の経時変化（初期値：掘削開始時）であり、工事工程（STEP1～6：掘削時、STEP7：概ね躯体工事および外装工事完了時）と共に示す。なお、2009年5月下旬に最深区間（EL-32.0m～-60.0m）が計測不能となったが、それ以降、その上部EL-22.0m～-32.0m間のひずみに変化がないことから、計測不能期間における最深区間のひずみはそれ以降変化しないと仮定して、図-3(2)を描いた。図-3(3)の区間ひずみは層別沈下計による区間伸縮量を区間長で除して算出した。

掘削過程（STEP6以前）において、掘削底以深の地盤は耐圧版（基礎：厚さ1.3m）の打設（2008年末～2009年初頭）により0.8mm沈下している。その後、地下躯体の構築期間（2009年以降）にEL-2.0m～-12.0m間で僅かに沈下している。

過程において、掘削底以深の地盤は耐圧版（基礎：厚さ1.3m）の打設（2008年末～2009年初頭）により0.8mm沈下している。その後、地下躯体の構築期間（2009年以降）にEL-2.0m～-12.0m間で僅かに沈下している。

##### (2) Site-B (逆打ち工法)

図-4は、層別沈下計No.1およびコアセンサー（鉛直ひずみ）の経時変化（初期値：掘削開始時）であり、層別沈下計No.1位置の工事工程および図-1(2)中の構真柱杭P1およびP2の設計軸力と共に示す。

層別沈下計の結果によると、地盤掘削に伴い、最浅区間（EL-2.0m～-7.0m）のみ引張りひずみが増大している。掘削完了時（STEP4）において、EL-2.0mのリバウンド量は約0.6mmであり、最浅区間（EL-2.0m～-7.0m）の引張りひずみは約150 $\mu$ （ $\mu=1.0\times 10^6$ ）と小さい。これに対して、構真柱杭の先端以深のひずみ（EL-7.0m以深）は、約-15～-10 $\mu$ と極めて小さい。つまり、躯体の構築が支

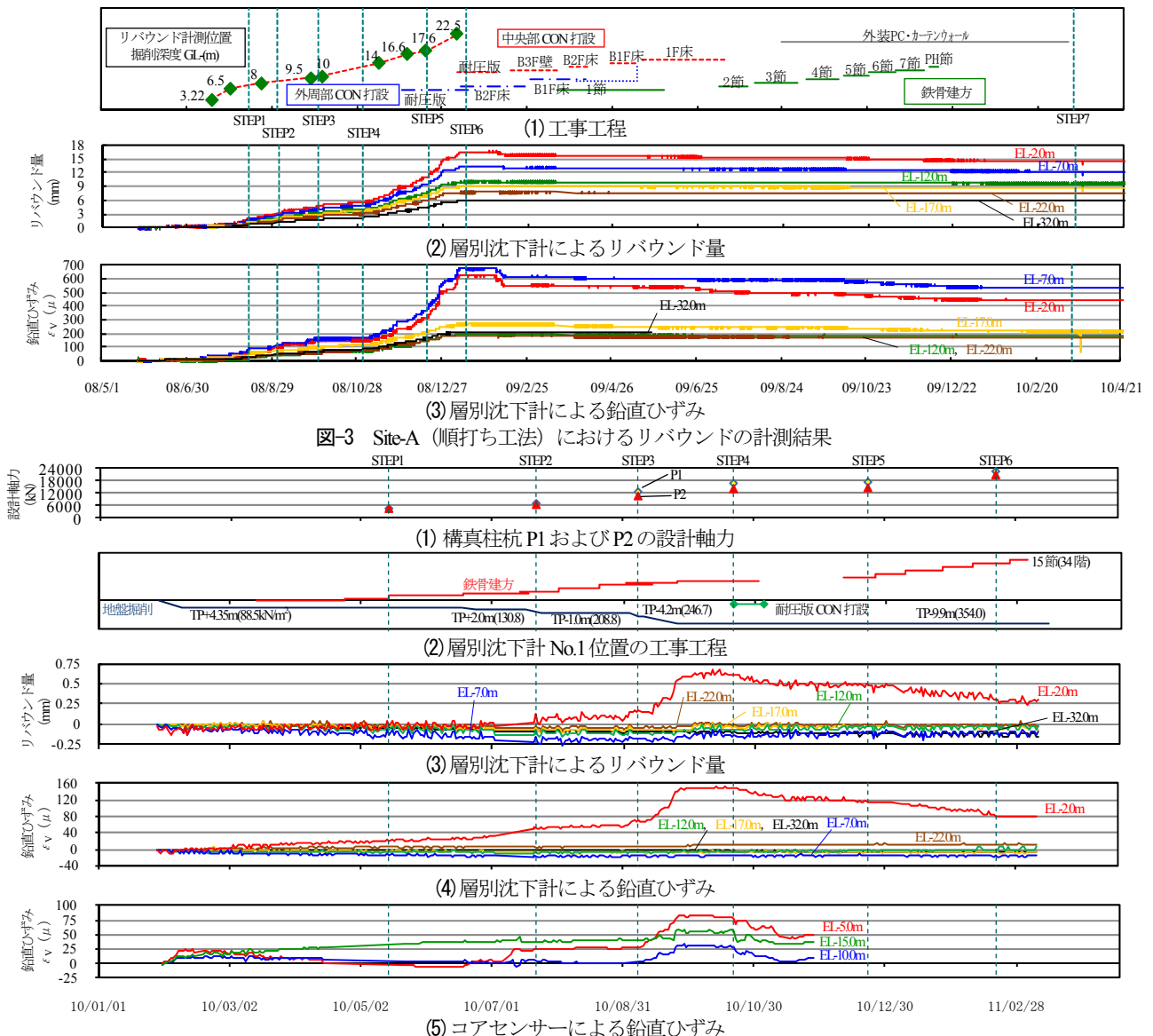


図-3 Site-A (順打ち工法) におけるリバウンドの計測結果

図-4 Site-B (逆打ち工法) におけるリバウンドの計測結果

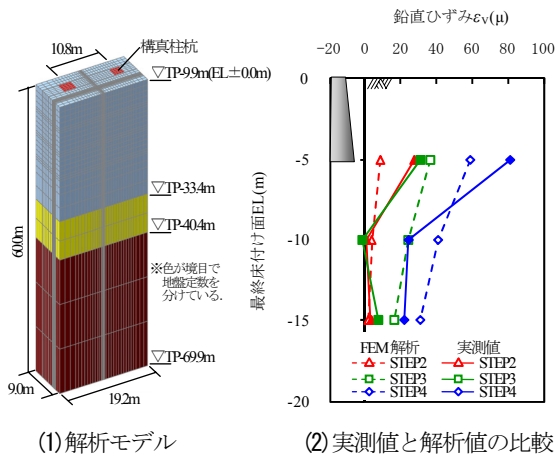


図-5 コアセンサーによる計測値の検証

持地盤へ与える影響は、地盤掘削に伴いリバウンド変位が生じた床付け面に近い深度に限定されている。

コアセンサーによる鉛直ひずみ(図-4(5))は、地盤掘削を開始すると全深度で引張ひずみが増大し、その後の地下躯体の構築に伴い、EL-5.0mおよびEL-10.0mの引張ひずみは減少している。その後、再び地盤掘削を開始すると引張ひずみが増大している。コアセンサーによるEL-15.0mの引張ひずみがやや大きいことを除けば、地盤掘削時や躯体構築時の計測ひずみは、層別沈下計の計測結果と調和している。

図-5に、コアセンサーによるひずみ計測の検証に用いたFEM解析モデルおよび比較結果を示す。解析モデルは、図-1(2)中のA範囲の地盤および構真柱杭をソリッド要素でモデル化したものであり、コアセンサーの設置深度のひずみは微小であることから、地盤剛性には弾性剛性を用い、ひずみ依存性は考慮していない。なお、図-5(2)はSTEP1からの増分ひずみで示している。深度毎の増分ひずみは、実測値と解析値でやや差があるが、その深度分布の傾向はほぼ対応していることから、計測結果は概ね妥当と判断できる。<sup>8)</sup>

## 5. 地下施工方法の違いがリバウンド挙動に与える影響

表-2に、Site-A(順打ち工法)およびSite-B(逆打ち工法)の層別沈下計によるリバウンド計測結果を示す。Site-Aは20m掘削時点について、Site-Bは各計測位置の最終床付け時点についてまとめた。Site-Bの躯体重量はそれぞれ構真柱杭P1およびP2の設計軸力を負担面積で除したものである。

掘削深さが等しく地下施工方法が異なるSite-AとSite-B(No.1)を比較すると、EL-2.0mのリバウンド変位はSite-Bの方が約1/10と小さく、Site-BのEL-2.0m~7.0m間のひずみはSite-Aの約30%である。逆打ち工法で掘削深度が異

表-2 リバウンド計測結果一覧

現場名 (計測位置)	Site-A	Site-B (No.1)	Site-B (No.2)
地下施工法	順打ち工法	逆打ち工法	
掘削深さ	20m	32m	
排土重量 (kN/m <sup>2</sup> )	370	350	580
躯体重量 (kN/m <sup>2</sup> )	-	310 (P1)	390 (P2)
排土重量/躯体重量	-	1.1	1.5
リバウンド量 (mm)	14.3	0.6	1.8
EL-2.0m			
鉛直ひずみ (μ)	495	150	175
EL-2.0m~-7.0m			

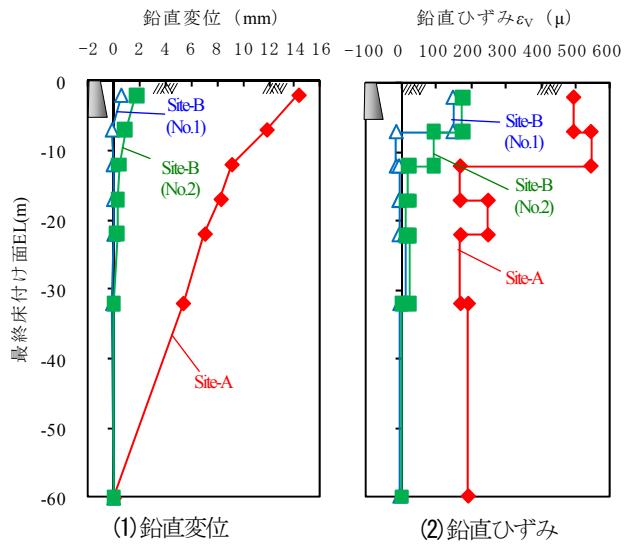


図-6 リバウンド深度分布

なるSite-BのNo.1とNo.2比較すると、EL-2.0mのリバウンド変位は、躯体重量に対する排土重量の比が大きいNo.2の方が大きい。

図-6に、それぞれ表-2にまとめた時点における鉛直変位および鉛直ひずみの深度分布を示す。

図-6(1)によると、Site-Aは深い深度からリバウンドが生じているが、Site-Bは構真柱杭の先端(EL-5.0m)以深で、ほとんどリバウンドが生じていない。

図-6(2)によると、Site-Aは全区間(EL-60.0m以浅)で150μ以上の引張ひずみが生じている。Site-Bは掘削底面近傍ではSite-Aの1/3程度と小さく、No.1ではEL-2.0m~5.0m間に、No.2ではEL-2.0m~12.0m間にのみ集中して引張ひずみが生じている。

## 6. 掘削地盤のヤング率

図-7は、Site-AおよびSite-Bにおいて、層別沈下計の実測リバウンド量に基づいて地盤の剛性を逆解析(3次元有限要素法、以下、フィッティング解析と定義)した際に用いた解析モデルであり、地盤および構真柱杭をソリッド要素でモデル化した。解析モデルの側方境界は掘削平面の幅以上離れた位置とし、鉛直方向に移動可能なロ



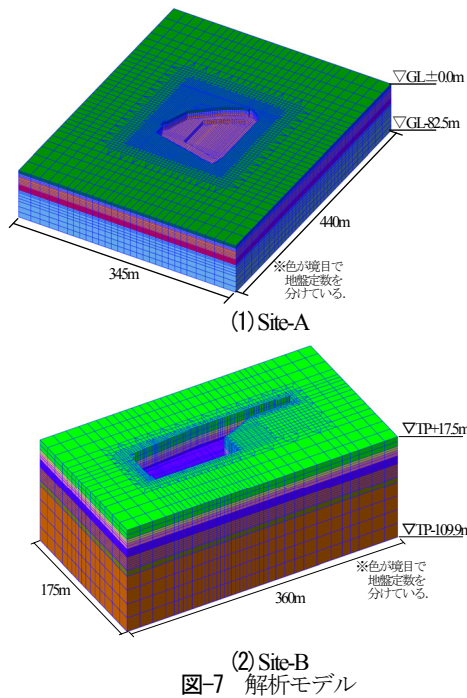


図-7 解析モデル

一層境界とした。また、底面境界は層別沈下計の最深部アンカー深度 (EL-60.0m) とし、水平方向に移動可能なローラー境界とした。

荷重は各STEPにおいて、両Site共に実際の掘削地盤を再現するように排土荷重を上向きに作用させ、Site-Aは最終床付け面に躯体荷重を下向きに、Site-Bは構真柱杭の先端面に設計構真柱軸力を下向きに作用させた。各STEPにおけるリバウンド計測位置近傍の荷重条件は表-3に、地盤掘削前のボーリング調査によるPS検層より求めた地盤パラメータ (初期ヤング率 $E_{PS}$ 、ポアソン比 $\nu$ ) は図-2中にそれぞれ示している。

Site-Aでは、介在する細砂層などによる土丹層の局部的な不均質性の影響を排除する目的で、EL-2.0m~12.0m、EL-12.0m~22.0mおよび EL-22.0m~60.0mの3区間を検討対象とした。なお、STEP7はEL-2.0m~12.0mのみ検討対象とした。Site-Bでは、No.1について、EL-7.0m以深のひずみは $1.2 \times 10^5$ 以下と小さかったので、STEP2~6の最浅区間 (EL-2.0m~7.0m) のみを検討対象とした。

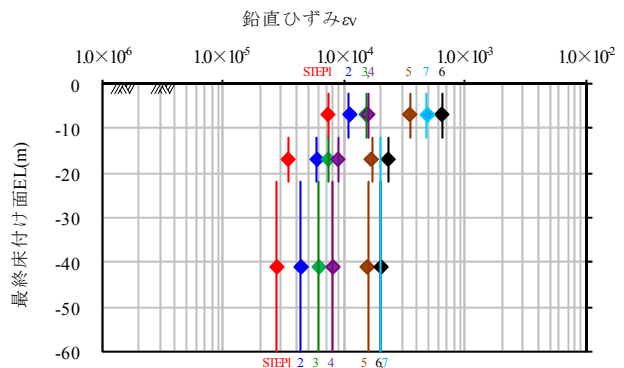
フィッティング解析では、初期ヤング率 ( $E_{PS}$ ) を基準に各区間のヤング率を仮設定し、解析で得られる層別沈下計によるリバウンド計測位置における各区間の平均鉛直ひずみが実測鉛直ひずみ  $\varepsilon_v$  にそれぞれ一致するように繰り返し計算を行い、全区間の  $\varepsilon_v$  が一致したときの各区間のヤング率 $E$ を求めた。なお、検討対象外である区間の地盤のヤング率 $E$ および全地層のポアソン比  $\nu$  は初期状態から一定と仮定した。

図-8は各Siteの各STEPにおける鉛直ひずみの深度分布であり、実線はフィッティング解析の目標とした層別沈下計による実測値を示し、プロット (◇) はフィッティング解析の結果を示す。解析値は実測値と良く一致して

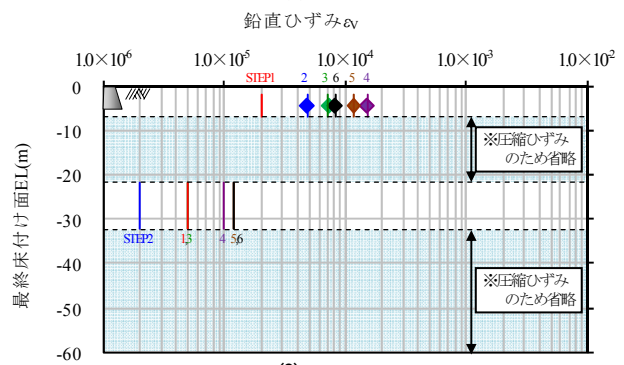
表-3 荷重条件

(1) Site-A							
	STEP1	STEP2	STEP3	STEP4	STEP5	STEP6	STEP7
掘削地盤深度GL(m)	-6.5	-7.5	-9.5	-10.0	-16.6	-22.5	-22.5
排土重量(kN/m <sup>2</sup> )	125	142	177	186	309	419	419
平均躯体重量(kN/m <sup>2</sup> )	掘削工事のため無し						137

(2) Site-B						
	STEP1	STEP2	STEP3	STEP4	STEP5	STEP6
掘削地盤深度TP(m)	+4.35	+0.5	-4.2	-9.9	-9.9	-9.9
排土重量(kN/m <sup>2</sup> )	89	165	247	354	354	354
躯体荷重 (P1)(kN/m <sup>2</sup> )	79	125	230	308	320	415



(1) Site-A



(2) Site-B

図-8 フィッティング解析結果

いることがわかる。

図-9は初期ヤング率 $E_{PS}$ に対する解析より求めたヤング率 $E$ の低下割合 (ヤング率比)  $E/E_{PS}$  と鉛直ひずみ  $\varepsilon_v$  の関係であり、横軸は対数表示としている。なお、同図中には、同じく土丹層を大規模に掘削する逆打ち工事である文献9)において、3次元有限要素法で実施したヤング率のフィッティング解析の結果もプロットした。

$\varepsilon_v$  が  $3.4 \times 10^5$  以下の場合には  $E/E_{PS} = 1.0$  であるが、地盤の掘削に伴い  $\varepsilon_v$  が増大し、 $E/E_{PS}$  が減少している。Site-Bでフィッティング解析の対象外としたEL-7.0m以深のひずみは微小ひずみの弾性範囲にあり、土丹層のヤング率の低下を考慮する必要はないといえる。また、工事地点や地下施工方法による差異は見られない。Site-AのEL-2.0m~12.0mおよびSite-BのEL-2.0m~7.0mに着目すると、排土荷重が同程度であるにもかかわらず、最終床付け時において逆打ち工法のSite-Bの方が  $\varepsilon_v$  は小さく、

$E/E_{ps}$ は大きい。EL-12.0m以深（構真柱杭の先端以深）に着目すると、順打ち工法のSite-Aは約50%までヤング率が低下しているが、逆打ち工法のSite-Bは弾性変形領域である。

これらより、工事計画や基礎設計を行う際に、順打ち工法の場合には、深部からリバウンド変形が生じるので、深部までヤング率の低下を考慮しなければならない。これに対して、逆打ち工法の場合には、地盤の掘削と躯体の構築が同時に進行することによるリバウンド抑制効果により、構真柱杭の先端以深のリバウンド量が非常に小さく抑えられるため、最終床付け面から構真柱杭の先端までの限定された領域でのみヤング率の低下を考慮すればよい。

## 7. まとめ

本報では、大規模・大深度に地盤を掘削する順打ち工事および逆打ち工事において、掘削地盤のリバウンドを計測し、以下の知見を得た。

- ①順打ち工事の場合、地中深くからリバウンドが生じる。
- ②逆打ち工事の場合、リバウンドは最終床付け面から構真柱杭の先端の間で集中して生じ、構真柱杭の先端以深ではほとんど生じない。
- ③深度が浅いほどリバウンドによるひずみが大きく、ヤング率比 $E/E_{ps}$ は小さい。
- ④工事計画や基礎設計を行う際に、地盤剛性の低下は、順打ち工法の場合には深部まで考慮しなければならないが、逆打ち工法の場合には最終床付け面から構真柱杭の先端までの限定された領域でのみ考慮すればよい。
- ⑤コアセンサーはリバウンドによる地盤中のひずみの計測手法として有効である。

今後は、同様の計測データを蓄積すると共に、層別沈下計よりも簡易なコアセンサーを平面的に配置することで、平面的にリバウンド挙動を捉えられるようにし、近接構造物の変位も適切に評価できるようにしたい。

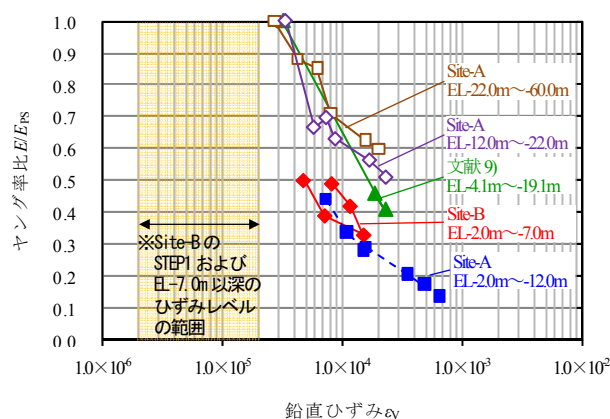


図-9 ヤング率比  $E/E_{ps}$  と鉛直ひずみ  $\epsilon_v$  の関係

## 参考文献

- 1) 秋野矩之：地盤の剛性評価と建物の沈下予測 建築物の即時沈下予測方法（その1），日本建築学会構造系論文報告集，No.412，pp.109-119，1990。
- 2) 秋野矩之：建設工事の地盤変状解析ーリバウンドと沈下ー，基礎工，Vol.25, No.4，pp.23-30，1997。
- 3) 常木康弘，鳥井信吾，青木雅路，河野貴徳，長尾俊昌：東京ミッドタウンと基礎，基礎工，Vol.35, No.1，pp.90-94，1997。
- 4) 奥地正敏，伊勢本昇昭，保井美敏：鉄道に近接した大深度掘削に伴うリバウンドに関する報告，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.737-738，2004。
- 5) 岩田暁洋，石井善一：近接施工における対象物の構造種別によるリバウンド挙動の差異について，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.465-466，2009。
- 6) 谷和夫，田中悠一，岡田哲実，平野公平，高倉望，池野谷尚史：埋設型センサーで計測されるひずみの補正に関する室内要素試験，第40回岩盤力学に関するシンポジウム，pp.115-120，2007。
- 7) 柴崎浩一郎，沼上清，中沢楓太，蒔苗齊，高倉望：大規模掘削工事のリバウンドによる近接鉄道高架橋への影響，第46回地盤工学研究発表会，pp.819-820，2011。
- 8) 中沢楓太，沼上清，柴崎浩一郎，高倉望，谷和夫：コアセンサーによる大深度掘削工事のリバウンド挙動計測，第46回地盤工学研究発表会，pp.821-822，2011。
- 9) 沼上清，三浦正悟，板橋靖：逆打ち工事における上総層群土丹・細砂互層のリバウンド特性，第43回地盤工学研究発表会，pp.883-884，2008。
- 10) 高倉望，中沢楓太，沼上清，池野谷尚史，田中悠一，谷和夫：大深度地下空洞の埋戻しに伴う周辺岩盤のひずみ計測，第41回岩盤力学に関するシンポジウム，2011。（投稿中）

## REBOUND BEHAVIOR OF SILTY-HARD CLAY IN KAZUSA GROUP OBSERVED IN LARGE-SCALE DEEP EXCAVATION WORKS

Futa NAKAZAWA, Kiyoshi NUMAKAMI, Nozomu TAKAKURA and Kazuo TANI

This paper reports on the rebound behavior of foundation ground observed during two large-scale deep excavation works in silty-hard clay in kazusa group. In the case of reverse concreting excavation method, rebound displacements can hardly be seen in deep ground below the pile tip. Thus, the degradation of the Young's modulus of the ground should be taken into account for limited shallow depths above the pile tip. Moreover, the new instrumentation technique of core sensors which measures the strain distribution in the ground was found appropriate for rebound measurement.