

U.D.C 691.328.4

逆打ち工事のリバウンド計測に基づく 土丹層ヤング率の評価

中沢 楓太* 沼上 清** 矢島 淳二*
古垣内 靖* 三浦 正悟* 板橋 靖***

要約： 本報では、上総層群の土丹・細砂互層を直接基礎の支持層として設計された建物の新築工事において、逆打ち工法によって地盤を掘削する際、地中中間変位計を土丹層中に設置して計測したリバウンドについて報告し、同層のフィッティング解析から土丹層のヤング率を評価する。また、リバウンド量の新たな計算手法として Steinbrenner の近似解と Mindlin の第 1 解を組み合わせた簡易な弾性計算法を提案し、その計算方法が 3 次元 FEM 解析よりも簡易であり、精度もそれと同程度であることを示す。計測より、地盤の掘削に伴いリバウンドが進行すると、地表面から概ね掘削平面短辺長さの 1/2 の範囲のリバウンドが支配的となり、その鉛直ひずみは 10^{-4} ~ 10^{-3} レベルとなることを確認した。また、支持地盤は地盤の掘削に伴い剛性低下を生じながらリバウンドするが、構真杭に作用する軸力が増加すると、剛性低下の割合が小さくなることを確認した。

キーワード： 逆打ち工事, リバウンド, 土丹層, 現場計測, ヤング率, 簡易計算法

- 目次：**
- | | |
|------------------------|----------------------------|
| 1. はじめに | 5. 支持地盤のヤング率の評価方法 |
| 2. 地盤および工事概要 | 6. Mindlin 解を利用した地盤変位簡易計算法 |
| 3. リバウンド量および構真柱軸力の計測概要 | 7. フィッティング解析結果および考察 |
| 4. リバウンド量および構真柱軸力の計測結果 | 8. まとめ |

1. はじめに

地盤を掘削しながら上部躯体を構築する逆打ち工事においては、作業床や上部の構築躯体を支える構真柱の支持地盤に掘削によるリバウンドや構築躯体の増加荷重による沈下が生じる。逆打ち工事の計画では、支持地盤のリバウンド量を事前に予測して構真柱の設計に反映させ、かつ、実際の工事では、この予測計算量に対する計測管理を行い、工事計画の妥当性や安全性を検証することが必要となる。

地盤のリバウンド量を事前に予測する際には、有限要素法などを用いる。近年、コンピューターの性能が飛躍的に向上したこともあり、大容量を必要とする解析も比較的簡単に行うことが可能となったが、この際、地盤のモデル化が課題となる。秋野ら¹⁾や玉置ら²⁾は地盤掘削に伴い、地盤剛性が低下することを指摘しており、地盤剛性を正しく評価することが必要である。

本報では、上総層群の土丹・細砂互層を直接基礎の支持層として設計された建物の新築工事において、逆打ち工法によって地盤を掘削する際、地中中間変位計を土丹層中に設置して計測したリバウンドについて報告する。また、種々のリバウンド量の評価手法について、その違いや問題点を述べた後に、構真柱軸力を含む地盤のリバウンド量を簡易に評価する弾性計算法を提案する。さら

に、支持地盤ヤング率のフィッティング解析から土丹層のヤング率を評価すると共に、提案手法の妥当性を示す。

2. 地盤および工事概要

図 1 は、工事概要を示す敷地平面図であり、山留め壁、逆打ち・順打ち工区や計器設置位置などを示している。また、図 2 は、地層構成、根切り断面、せん断波速度 V_s 値および計器設置深度などである。表 1 には、軸力計測を行った構真杭の仕様を示す。

工事は、地上 7 階 (S 造)・地下 2 階 (RC 造) の学校施設新築工事であり、長辺約 128m、短辺約 61.5m の形状である。建設地は、洪積台地に位置しており、その地層構成は地表面から埋土、関東ローム、洪積粘性土、洪積砂質土、上総層群土丹 (Ka-c)・細砂 (Ka-s) 互層である。建物基礎 (べた基礎) は、GL-15.6m の上総層群土丹・細砂互層 (換算 N 値 67~150) を支持層とし、設計地耐力度 $1,000\text{kN/m}^2$ に対して最大接地圧 202kN/m^2 にて設計されている。Ka-c 層 (GL-14.5m) の一軸圧縮強さおよび変形係数は、 $q_u=3,530\text{kN/m}^2$ および $E_{50}=1,035\text{MN/m}^2$ であり、 $E_{50}=293q_u$ の関係にある。地下の常水位は透水性の良い GL-6.5m 付近の洪積砂質土中にあり、根切り底以深の細砂層 (Ka-s : GL-18.0m) は約 61kN/m^2 の被圧を受けている。

* 建築本部 建築技術部 ** 基盤技術開発部 *** 設計本部 構造設計部

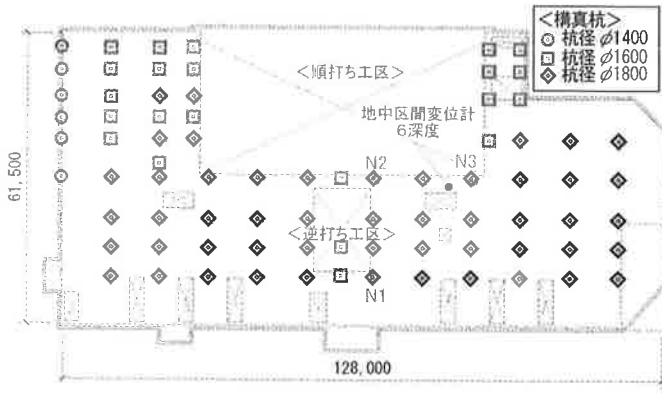


図1 建物平面・計測位置

表1 構真柱および構真杭の仕様

計測点	構真柱		構真杭	
	鉄骨断面	コンクリート断面	杭径 (mm)	杭長 (m)
N1	H-588×300×12×20(X方向) 2CT-294×300×12×20(Y方向)	□-1100×1100	1800	4.0
N2	H-600×200×11×17(X方向) 2CT-294×300×12×20(Y方向)	□-1100×1100	1800	4.0
N3	H-600×200×11×17(X方向) 2CT-294×300×12×20(Y方向)	□-1100×1100	1800	4.0

根切り工事は、まず準備工事として GL-2.9m までを鋤取りし、この施工レベルにて、ソイルセメント柱列山留め壁を施工した後、GL-4.5m まで掘削した。そして、リバウンド計測用の地中区间変位計を設置した後に、逆打ち工区では、STEP1 : 1 階床を構築して GL-9.0m まで掘削、STEP2 : 地下 1 階躯体を構築して GL-15.6m まで掘削、STEP3 : 床付け (GL-15.6m) 完了後に、地下 2 階躯体および基礎耐圧版を構築した。上部躯体は、STEP2 において 5 階床まで、STEP3 において屋上階を含む全ての床コンクリートを打設している。順打ち工区は、逆打ち工区に先立って掘削を行っており、STEP2 の途中で床付け (GL-15.6m) を完了したため、STEP2 終了時には全ての地盤掘削を完了した状態となっている。

3. リバウンド量および構真柱軸力の計測方法

支持地盤のリバウンド量を計測するために、建物のほぼ中央において、約 GL-75m までボーリング孔 (φ116mm) を掘削し、孔内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、地中区间変位計を建て込んだ。地中区间変位計 (写真 1, 定格容量 50mm, 定格出力 2000 μ) は、図 2 に示す各深度に水圧式アンカーおよび区间変位計が連結した構造となっており、各水圧式アンカー間にそれぞれ区间変位計を設置して、それぞれの区间変位量を計測する。これらは不動点とみなす最深部の水圧式アンカーを GL-73.7m に定着した後、区间変位計の出力値を確認しながら、深い深度から順に水圧

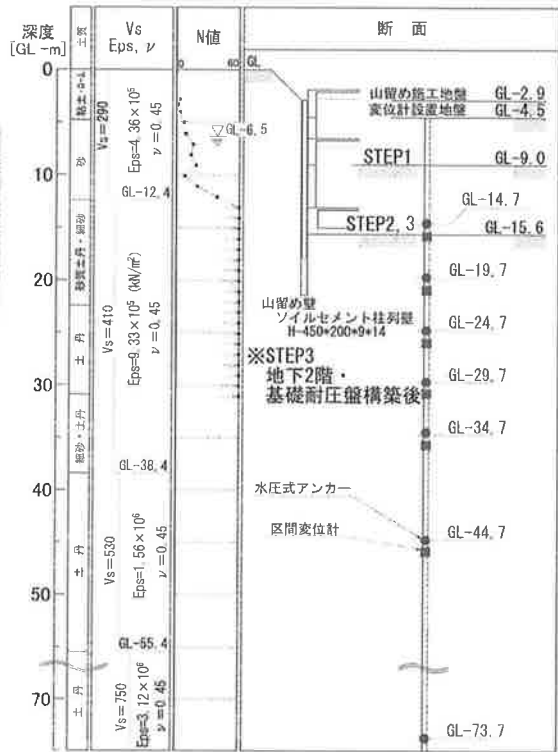


図2 地盤概要・計測深度

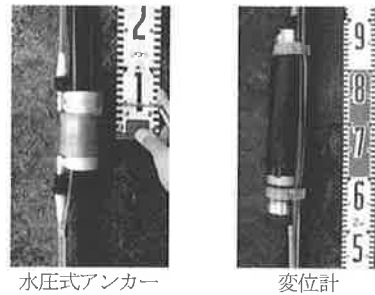


写真1 地中区间変位計

式アンカーを定着した。地盤掘削に伴うリバウンド量の測定は GL-4.5m から GL-15.6m までの約 11m の掘削深度において行い、STEP3 完了後も継続的に計測した。

4. リバウンド量および構真柱軸力の計測結果

図 3 は、工事に伴う支持地盤のリバウンド量の推移であり、同時に計測した構真柱軸力および工事工程と共に示している。掘削過程における支持地盤のリバウンド量は、根切りの進行とともに大きくなり、STEP1 完了時には 1.2mm、STEP2 途中の最上段アンカー (GL-14.7m) の撤去直前には、GL-14.7m ~ GL-73.7m 間で最大約 5.1mm となった。STEP2 における掘削過程では、特に GL-34.7m 以浅の支持層のリバウンドが増大しており、全計測深度におけるリバウンド量の約 7 割を占めている。なお、GL-14.7m ~ 19.7m および GL-19.7m ~ 24.7m の区间変位計は、STEP2 の施工途中、最上段アンカーの撤去

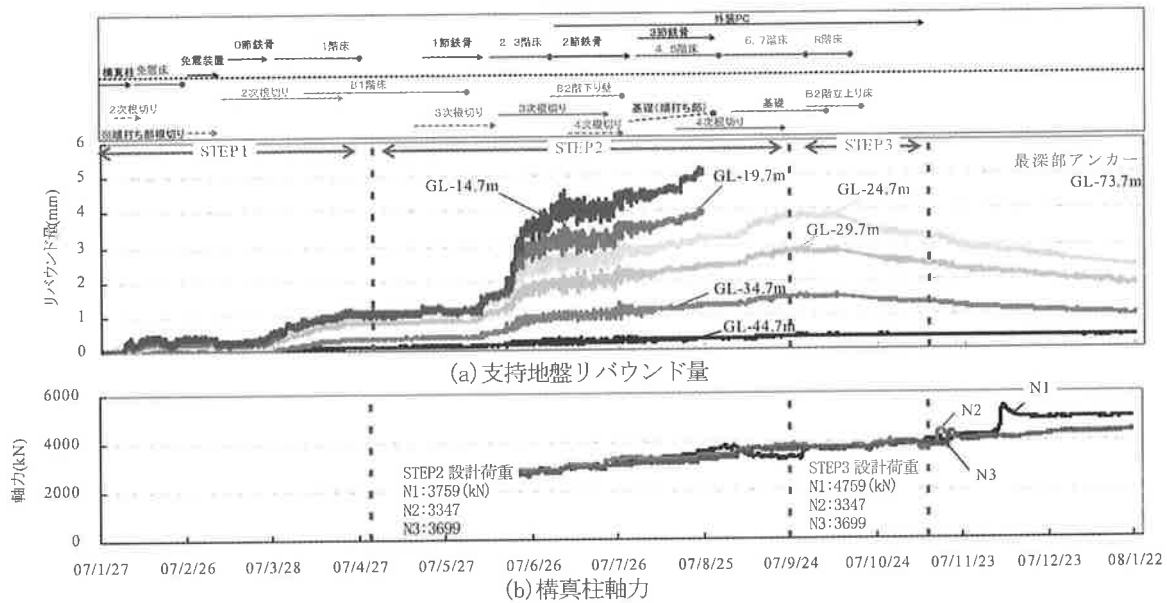


図3 支持地盤リバウンド量・構真柱軸力計測結果

と共に計測不能となった。

構真柱軸力は、STEP2の鉄骨建て方途中から計測を開始した。これは、上部躯体の施工に伴う柱脚荷重に相当するものであり、STEP2の施工過程においては支持地盤のリバウンドを抑制し、STEP3以降においては支持地盤を沈下させる荷重となっている。計測された構真柱軸力は、各STEPで想定した設計荷重とほぼ等しく、構真柱周辺の上部躯体で鉄骨建て方やスラブコンクリート打設を行った際には一時的に急増し、その後、時間経過とともに一定値に収束する傾向が見られる。

図4は、リバウンド計測に基づく各STEP完了時の鉛直ひずみの深度分布である。鉛直ひずみは、各深度の区間変位を区間長で除して算出した。GL-34.7m以深の鉛直ひずみは、STEP3完了時においても概ね 10^{-5} レベルであるのに対して、それ以浅では、地盤掘削が進んだSTEP2およびSTEP3完了時において、 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ レベルとなっている。これより、本工事においては、GL-34.7m以浅地盤のリバウンド量が支配的であり、この範囲は掘削平面短辺(61.5m)に対して、地表面から約1/2、床付け面から約1/3に相当する深度であった。

5. 支持地盤のヤング率の評価方法

逆打ち工事においては、表2に示すような3種類の施工荷重(排土・基礎・構真柱)が支持地盤に作用する。これらの荷重条件を考慮し、地盤のリバウンド量を事前に予測・評価する手法として、図5~図7に示す各計算モデルがある。

手法①: 各構真柱に生じる軸力を平均荷重度として作用させたSteinbrennerの近似解による評価(図5)

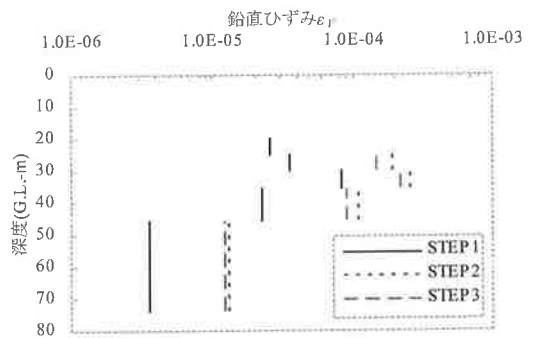


図4 リバウンドひずみ分布

手法②: 一般的な(計測位置近傍)1スパンを抽出した有限要素法による評価(弾性FEM解析)(図6)

手法③: 敷地全てを含む広域をモデル化した有限要素法による評価(弾性3次元FEM解析)(図7)

手法①は、分布荷重を組み合わせることで計算するものである。構真柱軸力は個々に評価せずに、平均化した平均荷重度(全構真柱軸力/逆打ち工区の敷地面積)として評価する。計算時間が短く、概算的に評価する上では有効である。ただし、敷地形状が複雑な場合にはそのモデル化が難しくなり、また、それぞれの構真柱で異なる軸力が生じることを評価できないため、局所的な地盤変位を評価できない。

手法②は、敷地内の一部を取り出して計算するものである。地盤に加えて、構真杭および山留め壁をソリッド要素でモデル化して、排土荷重、構真杭に作用する軸力および山留め壁に作用する荷重を作用させる。敷地内の一部のみをモデル化するので、モデルの作成および計算時間はそれほど長くはならないという利点がある。しか

し、モデル化したスパンに隣接する構真杭に作用する軸力がモデル化したものと大きく異なる場合には、この方法は適さない。さらに、敷地全体の傾向を把握したい場合には、1スパンのみの評価では不十分である。

手法③は、手法②を拡張して、敷地全てをモデル化するものである。手法①では評価できなかった各構真柱毎に異なる軸力を評価でき、かつ、敷地全体の傾向を把握することもできる。しかし、解析モデルの作成に膨大な時間を要する上に、計算時間も長くなり、大容量計算が可能なコンピューターも必要となる。工事の事前検討では、杭径や杭長が変更になる場合や施工手順により構真柱に生じる軸力が変更になることもあり、その対応が煩雑となる。

そこで、手法④として、排土によるリバウンド量をSteinbrennerの近似解で評価して、構真柱軸力による構真杭の沈下量をそれぞれMindlinの第1解（以下、Mindlin解）で評価する弾性計算法を提案する。この方法は、敷地全てをモデル化するものであり、構真杭をモ

表2 荷重条件

	Step1	Step2	Step3
排土荷重度(kN/m ²)	73.66	192.46	
基礎重量(kN/m ²)	0.00		34.90
構真柱軸力			
分散荷重度(kN/m ²)	17.70	40.99	45.34

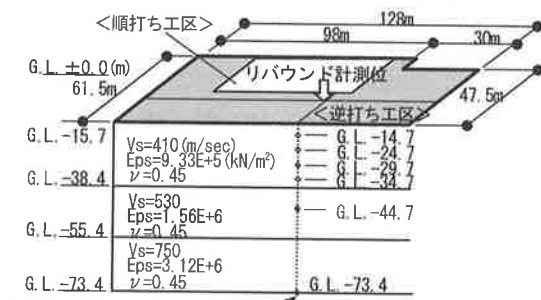


図5 手法①(Steinbrenner)モデル

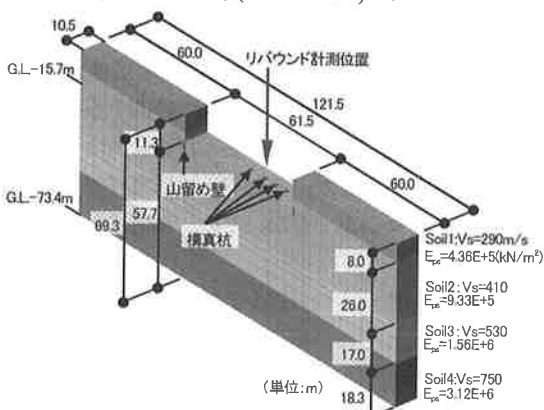


図6 手法②(1スパンFEM)モデル

デル化せずに、地盤定数と作用荷重から地盤の変位量を計算する。それぞれの構真柱で異なる軸力が生じることを個々に評価し、局所的な地盤の変形も評価できる。さらに、敷地全体をモデル化した手法③に比べて、容易にモデルを作成することができる上に、逆マトリックスを解かないので計算時間も短い。また、杭径等のモデルの変更もFEM解析と比べて容易である。

6. Mindlin 解を利用した地盤変位簡易計算法

Mindlin 解は図8のように、半無限地盤において、集中荷重作用点から離れた任意点の変位を算出するものであり、式(1)のように表す³⁾。ただし、Mindlin 解は荷重作用点の変位を算出できないため、この場合には、Mindlin 解を構真杭断面積について積分した式(2)を利用する。成層補正はSteinbrennerの近似解と同様に行う。

$$S_p = \frac{P}{16\pi(1-\nu)G} \left[\frac{3-4\nu}{r_1} + \frac{8(1-\nu)^2 - (3-4\nu)}{r_2} + \frac{(z-z_0)^2}{r_1^3} + \frac{(3-4\nu)(z+z_0)^2 - 2zz_0}{r_2^3} + \frac{6zz_0(z+z_0)^2}{r_2^5} \right] \quad \dots \text{式(1)}$$

$$S_q = \frac{q}{8(1-\nu)G} \left[(3-4\nu)R_1 + (5-12\nu+8\nu^2)R_2 - \frac{(z-z_0)^2}{R_1} + \frac{2zz_0 - (3-4\nu)(z+z_0)^2}{R_2} - \frac{2zz_0(z+z_0)^2}{R_2^3} + 2(2\nu-1)\{z-z_0\} - (2\nu-1)\{z+z_0\} \right]$$

$$R_1 = \sqrt{(z-z_0)^2 + d^2/4}, \quad R_2 = \sqrt{(z+z_0)^2 + d^2/4}$$

d : 杭径, $q=P/A$ (A : 杭断面積), $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$...式(2)

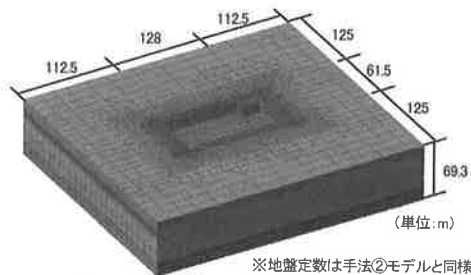


図7 手法③(3次元FEM)モデル

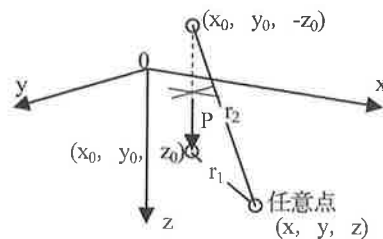


図8 Mindlin 解の概念図

それぞれの構真柱軸力について、これを解き、重ね合わせることで全ての構真柱軸力による任意点の鉛直変位を算出することが可能となる。

図9は図6のFEM解析の構真柱軸力による地盤および構真杭変位(杭をモデル化)とMindlin解を利用した場合の地盤変位(杭のモデル化なし)を比較したものである。Mindlin解による地盤変位は、深度が深くなるとFEM解析と幾分異なるものの、全体的にFEM解析と同様な傾向を示している。構真杭(同図中の荷重作用位置)の鉛直変位は、地表面ではMindlin解において杭をモデル化しない影響で全く一致していないが、深度-2.0mおよび-4.0mでは概ね一致している。

以上より、地盤掘削に伴う排土荷重や敷地全体に均一に作用する荷重による地盤変位を簡易に算出できるSteinbrennerの近似解と杭軸力のような局所的な荷重による地盤変位を簡易に算出できるMindlin解を併用することで、逆打ち工事のような複雑な荷重条件における地盤の鉛直変位を簡易に算出し、実現象を再現できる。また、構真杭の軸方向弾性変形量を無視すると、その鉛直変位は、杭先端や杭長の1/2の深度で評価できると考えられる。

7. フィッティング解析結果および考察

図10は手法③および④によるフィッティング解析結果

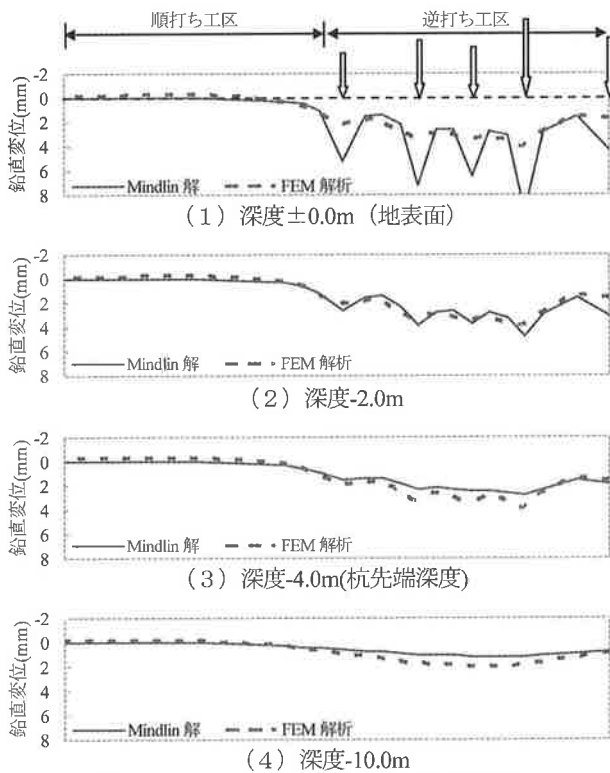


図9 Mindlin解とFEM解析比較 (STEP2)

果のリバウンド深度分布である。なお、フィッティング解析は支持層 (GL-38.4m 以浅) の実測鉛直ひずみ ϵ_V をフィッティング目標とし、同支持層のヤング率 E を求める方法とし、GL-38.4m 以深地盤のヤング率 E は初期ヤング率 E_{PS} (PS 検層より算出したヤング率) のまま一定とした。

手法③のリバウンド量は手法④のそれよりもやや大きい傾向がある。これは、水平方向の境界条件の位置が関係していると考えられる。FEM解析によってリバウンド量を推測する場合には、この点に注意する必要がある。また、両者のリバウンド量は異なるものの、同様の傾向を示しており、手法④の妥当性がうかがえる。

表3は手法①~④による解析から得られたGL-38.4m以浅の土丹層ヤング率およびPS検層より算出したヤング率 E_{PS} との比である。また、図11は手法①~④による支持層の鉛直ひずみ ϵ_V とヤング率比 E/E_{PS} の関係を示したものであり、文献1)および文献2)の提案式を併記した。

フィッティング解析から得られた支持層のヤング率は、手法③および手法④は概ね同様であり、その他の解析方法によるそれよりも大きい。これらのSTEP2~3の過程において、支持地盤は掘削の進行に伴い剛性低下を生じながらリバウンドするが、構真杭に伝達する鉛直荷重が増加すると剛性低下の割合は小さくなる。ただし、手法①および②では異なる傾向を示す。これは、リバウンド計測位置において、全構真柱軸力を平均分散荷重としたSteinbrennerの近似解(手法①)は、構真柱軸力を過小評価となること、および建物1スパンを取り出した弾性FEM解析(手法②)は、敷地内全ての構真柱軸力を適切に評価できていないことが理由と考えられる。

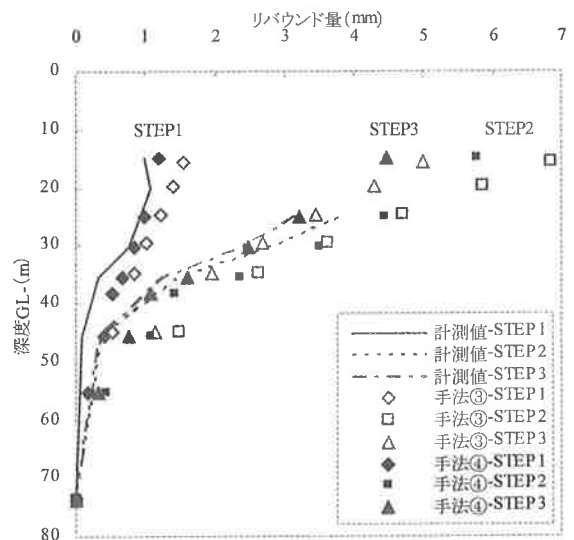


図10 フィッティング解析結果

また、手法③および手法④によるヤング率比は文献1)と比較的近い値であり、同様の傾向を示している。

8. まとめ

本報では、土丹層のリバウンドに関して報告し、さらに、支持地盤ヤング率のフィッティング解析から土丹層のヤング率を評価した。また、リバウンド量の新たな簡易弾性計算法を提案した。得られた知見を以下に示す。

- ①. 本工事においては、土丹層においてリバウンドが進行すると、地表面から掘削平面短辺長さの約 1/2 の範囲のリバウンドが支配的であり、全体の約 7 割を占める。その範囲の地盤鉛直ひずみは $10^{-4} \sim 10^{-3}$ レベルとなった。
- ②. 支持地盤は、地盤の掘削の進行に伴い剛性低下を生じながらリバウンドするが、構真杭に伝達する軸力が増加すると、剛性低下の割合が小さくなる。
- ③. 本敷地における土丹層のヤング率比 E/E_{PS} は文献1)の提案式と同様の傾向を示した。
- ④. 本報で提案した Mindlin 解を利用した計算手法は、3次元の FEM 解析と同様の傾向を示し、簡易的に実現現象を再現できる。

今後は、リバウンドに関する実測値を蓄積すると共に、各計測区間でフィッティング解析を行い、支持地盤のヤ

参考文献

- 1) 秋野矩之, 福井茂和, 山辺雅英: 大深度掘削・逆打ち工法の建設工事における沈下・変状解析と実測結果—その3 リバウンド・沈下予測解析—, 第34回地盤工学研究発表会, pp.1387-1388, 1999年7月
- 2) 玉置克之, 桂豊, 岸田了: 掘削および構築時の支持地盤のヤング係数の変化, 日本建築学会構造系論文報告集, 第446号, pp.73-80, 1993年4月
- 3) 土屋勉: 併用(パイルド・ラフト)基礎における相互作用, 基礎工, pp.21-25, vol.37, No.10, 2009年10月
- 4) 三浦正悟, 沼上清, 他3名: 逆打ち・順打ち工法を併用した地下工事におけるリバウンド特性(その1~3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2009年8月

ESTIMATION OF YOUNG' MODULUS OF SILTY-HARD CLAY BASED ON REBOUND MEASUREMENT OF TOP DOWN CONSTRUCTION

F.Nakazawa, K.Numakami, J.Yajima
Y.Furugaichi, S.Miura, and Y.Itabashi

This paper reports on the rebound behavior measured by multi layered anchored settlement gauge, and the young's modulus of silty-hard clay evaluated from fitting analysis of bearing silty-hard clay, when building is constructed in silty-hard clay and fine sand using top down construction. Moreover, it proposes a new simple elasticity calculation method of the amount of the rebound that combines approximate solution calculated by Steinbrenner's method with Mindlin's solution.

When the rebound behavior increased in excavation of ground, the rebound within the range of half of short side length of excavation area form ground level occupies the majority of rebound, and vertical strain became $10^{-4} \sim 10^{-3}$ level. Moreover, Mindlin's solution is suitable for calculating a complex ground displacement in top down construction.

表3 支持地盤のヤング率およびヤング率比 ($\times 10^5 \text{ kN/m}^2$)

	STEP1	STEP2	STEP3
E_{PS} (PS検層)	9.33 (1.00)		
手法①(Steinbrenner)	6.75(0.72)	2.57(0.28)	2.33(0.25)
手法②(1スパンFEM)	8.16(0.88)	2.80(0.30)	2.75(0.29)
手法③(3次元FEM)	9.33(1.00)	2.83(0.41)	4.29(0.46)
手法④(Steinbrenner+Mindlin)	9.33(1.00)	3.73(0.40)	4.01(0.43)

※ () 内: ヤング率比 E/E_{PS}

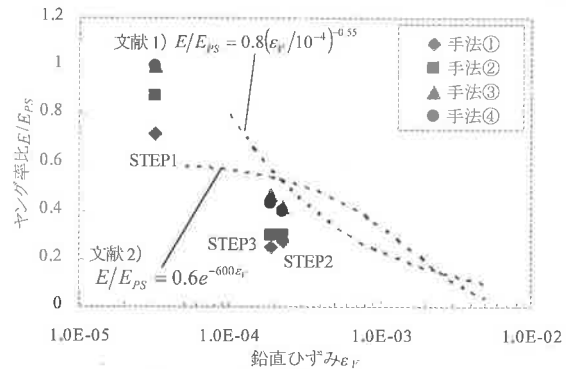


図11 支持地盤の $\epsilon_v \sim E/E_{PS}$

ング率について検討する必要があると考える。また、工事計画上重要となる構真杭の鉛直変位に関して、事前の予測精度を向上させるための検証が今後必要と考える。