

# 建物荷重が作用した場合の地下鉄シールドトンネルの挙動予測

石井善一\*<sup>1</sup>・藤井 衛\*<sup>2</sup>

## Forecast Technique on the Behavior of Subway Shield Tunnel on Which Building Load Acts

by

Yoshikazu ISHII\*<sup>1</sup> and Mamoru FUJII\*<sup>2</sup>

(Received on September 27, 2008 & accepted on November 26, 2008)

### Abstract

We propose a method to forecast the behavior of a shield tunnel on which building load acts after the last excavation, when a new building is constructed above the shield tunnel. We verified the forecast technique by the measurement result. The following findings were obtained. 1) The behavior of the shield tunnel on which the building load acts can be analyzed by the rebound behavior analysis model. The behavior of the shield can be evaluated by the building load acting on the bottom of excavation without evaluating the rigidity of the building. 2) When the axis line is the direction of the longer side of the building, it is necessary to consider the three-dimensional effect concerning the plan of excavation, for the examination of the rebound behavior. 3) When the building load is lighter than the removing soil load, the rigidity of the Ground is the same as that adopted when the rebound behavior is examined. At the other side, when the building load is heavier than the removed soil load, it is necessary to decrease the rigidity of the Ground according to the difference between the building load and removed soil load.

**Keywords:** Construction, deformation, subway shield tunnel

## 1. はじめに

地下鉄シールドトンネル（以下、シールドと呼ぶ）などの既設地下構造物は道路の下に構築されていることが多いため、その直上に建物を建設する事例は少なかった。しかし、近年の再開発工事や大規模な建替え工事の活発化などにより、このような事例が増加する傾向にある<sup>1)~3)</sup>。一般的に既設構造物の近傍で建物を建設する場合には、建物の設計および施工方法を事前に既設構造物の管理者と協議し、施工時の影響および新築建物完成後の地震時の挙動などが既設構造物に有害な影響を及ぼさないことを証明しなければならない。施工に関する影響評価は、掘削が完了した時点および建物荷重全体が作用した時点での挙動予測が必要となる。

筆者らは、これまで、既存構造物のうちシールドに着目し、シールドが新築建物の直下に位置する場合の掘削に伴うシールドの隆起（以下、リバウンドと呼ぶ）について実用的な予測方法を提案している<sup>4)~6)</sup>。本論文では、掘削後に一連の流れで始まる新築建物建設時において建物荷重が作用した場合のシールドの挙動について実用的な予測方法を提案するとともに、実測結果と比較検証した結果について述べる。

## 2. シールドの挙動予測手法

### 2.1 リバウンド検討時の予測手法

筆者らは、リバウンド時の実用的な予測手法として以下の提案をしている<sup>4)~6)</sup>。

- 1) シールドのリバウンド量は、シールドに沿った方向（以下、軸線方向と呼ぶ）でモデル化し、掘削に伴う地盤剛性の低下を考慮した二次元弾性有限要素法解析（以下、2D-FEMと呼ぶ）におけるシールド下端深度の地盤の変形量で評価が可能である。
- 2) 解析領域の下端深度は、掘削中心の地中応力が $\sigma_z=0.1p$ （ここで、 $\sigma_z$ :鉛直応力、 $p$ :単位面積あたりの荷重）程度とする必要がある。
- 3) 軸線方向が長辺となる場合は、掘削の平面形状に関する三次元効果を考慮することで実際の挙動に近い解析結果を得ることができる。この三次元効果は、掘削中心の軸線方向の解析結果と直交方向の解析結果の比 $\alpha$ を軸線方向の変位分布に乗ずることで評価できる。
- 4) 地盤剛性の低減については、初期剛性を弾性波速度検層（以下、PS検層と呼ぶ）で得られた剛性とし、低減後の剛性はひずみ依存性と拘束圧依存性を考慮して設定する。
- 5) 地盤剛性の低減範囲は、 $\sigma_z=0.1p$ の圧力球根の形状を模擬した範囲とする。

### 2.2 新築建物建設時の挙動予測手法の概要

本論文で提案する新築建物の荷重が直下に位置するシールドに作用した場合のシールドの挙動に関する予測手法の概要を以

\*1 理工学研究科総合理工学専攻

\*2 工学部建築学科主任教授 工博

下に示す。次節以降に考え方の詳細を述べるとともに、次章以降で実測結果に基づき提案内容の検証を行う。

- 1)解析手法はリバウンド時の予測手法と同様に弾性 2D-FEM とし、同一の解析モデルとする。また、長辺方向は軸線方向となる場合にはリバウンド時の検討と同じ手法で掘削平面形状に関する三次元効果を考慮する。
- 2)建物の剛性は考慮せず、建物は荷重のみで評価する。
- 3)地盤剛性は、掘削した土の重さ（以下、排土荷重と呼ぶ）と建物の重さ（以下、建物荷重と呼ぶ）の関係を考慮して設定する。

### 2.3 解析モデル

工事期間中に層別式沈下計で地盤の鉛直方向変位を実測した結果から、リバウンドは深い部分の地盤まで影響が及ぶが、新設建物建設に伴う沈下は基礎底面に近い部分の地盤に限られるとの報告がある<sup>7),8)</sup>。しかし、掘削から新築建物の建設は一連の流れであり、解析モデルを変更すると応力履歴が不連続となってしまう。よって、本手法の解析モデルはリバウンド検討時と同一のモデルとする。また、掘削の平面形状に関する三次元効果は荷重の方向による差はないと考えられるので、建物荷重が作用する場合でも考慮する。

### 2.4 新築建物の評価方法

新築建物の挙動を検討する場合には建物全体の剛性を考慮する必要があるが、本論文の対象は新築建物ではなく、地盤を介したその下部にあるシールドの挙動であるため、新築建物の剛性は考慮せず、掘削底面に建物荷重を作用させることで新築建物进行评估する。このときの建物荷重は、シールド上部周辺の平均的な荷重とする。

### 2.5 地盤剛性の評価方法

新築建物設計時の建物の沈下量を検討する場合の地盤剛性の設定は、逆打ち工法を採用した場合やその他の特殊な条件の場合を除き掘削の影響を考慮せず、PS 検層などで得られた初期剛性から建物荷重のみを考慮して設定される場合が多い。建物の設計は建設した構造体の安全性が問題となるので、荷重の方向および荷重と変形の履歴は問題とならないが、本論文の対象ではこれらが重要な要素となる。掘削前の初期状態からの荷重と変形は Fig.1 に示すような履歴となるため、地盤剛性は荷重の方向と荷重の大きさを考慮して設定すべきである。Fig.1 の①は排土荷重<建物荷重、②は排土荷重=建物荷重、③は排土荷重>建物荷重の荷重-変形関係を示したものである。

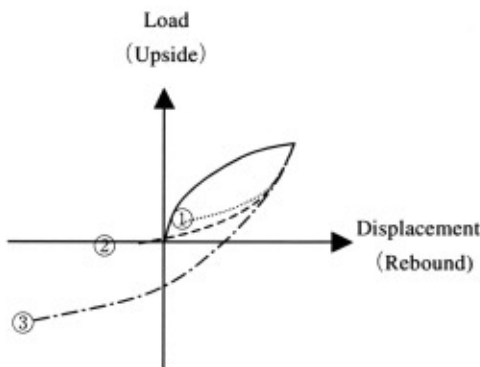


Fig.1 Load-Displacement Loop

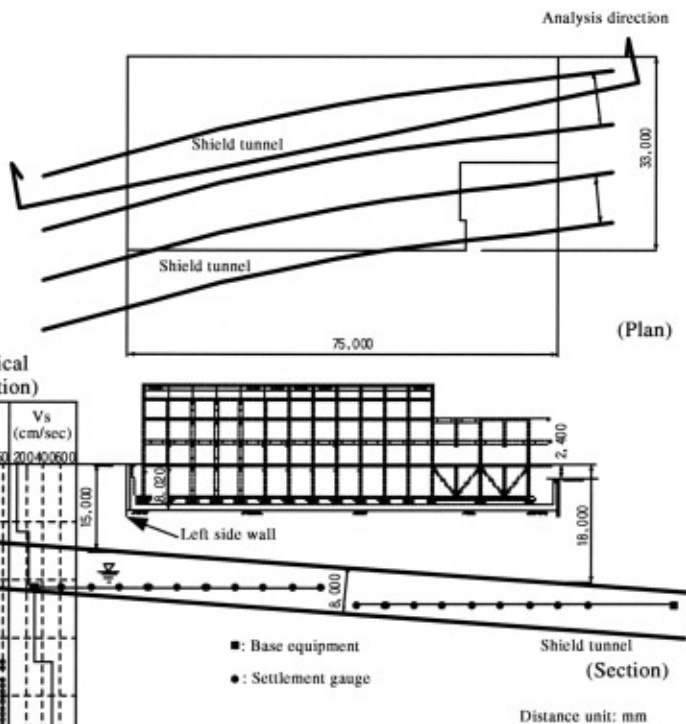
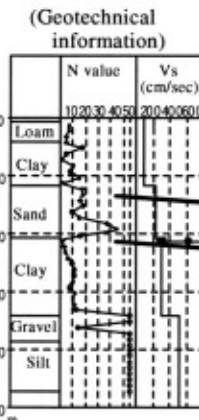


Fig.2 Summary of construction and ground<sup>3)</sup>

地盤剛性の設定方法に関しては以下に示す方法が考えられる。設定方法の可否については、次章以降で実測結果と比較検討することにより判断する。

- 1)リバウンド検討時に使用した地盤剛性を使用する（以下、リバウンド検討剛性と呼ぶ）。
- 2)リバウンド検討時に使用した地盤剛性を初期剛性とし、排土荷重と建物荷重の差が作用する荷重として地盤剛性を低減する（以下、差分評価剛性と呼ぶ）。
- 3)PS 検層などで得られた剛性を初期剛性とし、建物荷重のみが作用する荷重として地盤剛性を低減する（以下、建物荷重剛性と呼ぶ）。

## 3. 建物荷重が排土荷重よりも小さい場合の検証

本章では実測結果により 2.2 節で示した手法および建物荷重が排土荷重よりも小さい場合の地盤剛性評価手法の検証を行う。

### 3.1 工事および地盤状況

本建物は、地上 3 階、地下 1 階の鉄骨造で、建物全体が基礎の深度で免震構造となっている。基礎形式は、GL-9m の N 値 5~10 の粘性土層を支持層とする直接基礎である。地盤・新設建物・シールドの関係を Fig.2 に示す。建物の平均接地圧は 60kN/m<sup>2</sup>、排土荷重は 112kN/m<sup>2</sup>で建物荷重が排土荷重よりも小さい。

シールドは直径 8m で、一般的な上載荷重を想定して設計され、掘削領域に 2 列構築されている。シールドの天端の深度は根切り底から 7m~10m である。シールドの鉛直方向の変形は、内部に設置した 2 系統の連通管式沈下計で計測した (Fig.2 参照)。計測の基準点は、山留め壁から約 30m 離れた位置に設置し、沈下計は 5m 間隔に配置した。

3.2 解析モデル

解析モデルを Fig.3 に示す。掘削部分はシールドに沿った長さでモデル化し、境界条件は、モデル下端をピン支持、外周部をローラー支持、山留め壁の変形がシールドの鉛直方向変位に与える影響は小さいと考え、掘削部分は外周部と同様に鉛直ローラー支持とした。

解析は、自重解析、掘削、建物荷重の载荷の順で行った。建物の荷重は平均接地圧 (60kN/m<sup>2</sup>) を掘削底面に载荷した。検討に用いた地盤剛性は、建物荷重が排土重量よりも小さいことを考慮し、リバウンド検討剛性の1種類とした。使用した地盤定数を Table1 に示す。なお、本建物は軸線方向が長辺となるため、リバウンド時と同様に三次元効果に関する補正を導入し、その補正係数  $\alpha$  は 0.9 とした<sup>3)</sup>。

3.3 実測結果と解析結果の比較

シールドの変形量として評価するシールド下端深度の鉛直方向変位の解析結果を Fig.4 に示す。同図には、掘削完了時のリバウンドの実測値および三次元効果に関する補正を考慮しない場合の解析結果も参考に示した。

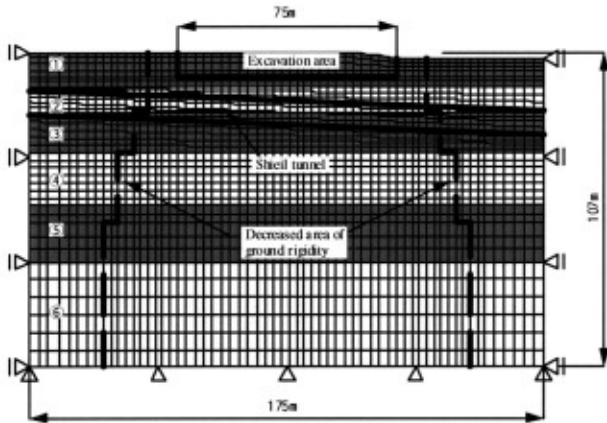


Fig.3 Analysis Model<sup>3)</sup>

Table1 Ground constant<sup>3)</sup>

Bottom level (GL-m)	Soil name	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\nu$	Initial deformation modual E <sub>0</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	Decreased deformation modual E (kN/m <sup>2</sup> )	Decreased ratio
① 11.6	Clay	14	0.4	122,000	117,100	4%
② 20.4	Sand	18	0.35	270,000	130,700	52%
③ 33.9	Silt	17	0.35	505,000	438,900	13%
④ 51.8	Gravel	20	0.35	1,260,000	1,145,600	9%
⑤ 71.1	Silt	20	0.35	1,260,000	1,150,500	9%
⑥ 107.0	Silt	20	0.3	2,560,000	2,305,200	10%

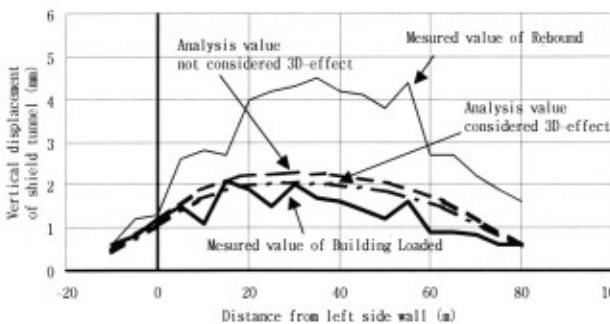


Fig.4 Vertical displacement of shield tunnel

三次元効果に関する補正をした解析結果は、実測値を再現できたと考えられる。この結果より、建物荷重が作用した場合のシールドの挙動は 2.2 節で示した方法で評価でき、かつ建物荷重が排土荷重以下となる場合の地盤剛性はリバウンド検討剛性で評価できることが判明した。

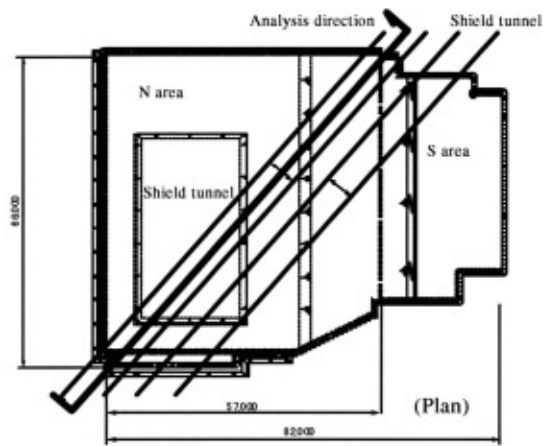
4. 建物荷重が排土荷重よりも大きい場合の検証

本章では建物荷重が排土荷重よりも大きい場合の地盤剛性評価手法の検証を行う。

4.1 工事および地盤状況

本建物は、2棟の地上部分を一体の基礎で支える構造形式で、基礎形式はGL-15mのN値50程度の砂質土層を支持層とする直接基礎である。地盤・新設建物・シールドの関係を Fig.5 に示す。建物が高層部分と低層部分に分けられるが、高層部分の接地圧は 500~650kN/m<sup>2</sup>、排土重量は 228kN/m<sup>2</sup> で建物荷重が排土荷重よりも大きい。

シールドの直径は 6.5m で、大きな上載荷重が作用することを想定して設計された高耐力シールドで、掘削領域に2列構築されている。シールドの天端の深度は根切り底から 10.1m~16.2m である。シールドのリバウンド量は、内部に設置した2系統の連通管式沈下計によって計測した (Fig.5 参照)。計測の基準点は、山留め壁から約 30m 離れた位置に設置し、沈下計は 10m 間隔に配置した。



(Geotechnical information)

Soil Name	N value	Vs (cm/sec)
Loam Clay	10/20/40/50	200/400/600
Sand		
Clay		
Sand		
Gravel		
Sand		

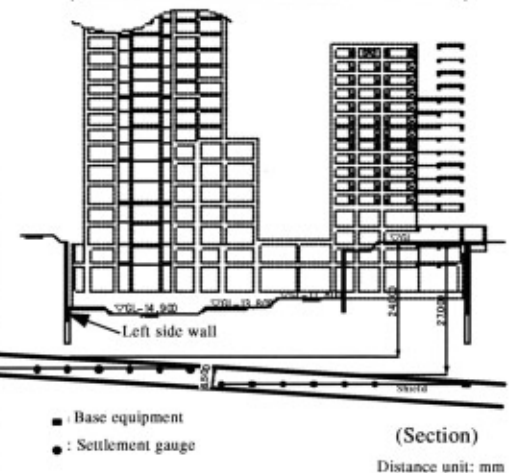


Fig.5 Summary of construction and ground<sup>2)</sup>

4.2 解析モデル

解析モデルを Fig.6 に示す。掘削部分はシールドに沿った長さでモデル化し、境界条件は、モデル下端をピン支持、外周部をローラー支持、山留め壁の変形がシールドの鉛直方向変位に与える影響は小さいと考え、掘削部分は外周部と同様に鉛直ローラー支持とした。

解析は、自重解析、掘削、建物荷重の載荷の順で行った。建物の荷重は高層部分と低層部分で大きく異なるので、荷重条件は Fig.7 に示す分布とした。検討に使用した地盤定数は建物荷重が排土重量よりも大きい場合、2.5 節に示した3種類の地盤定数とし、差分評価剛性および建物荷重剛性の算定にあたっては建物の最深部かつ建物の最大接地圧の条件で設定した。使用した地盤定数を Table2 に示す。Table2 中の E1 はリバウンド検討剛性、E2 は差分評価剛性、E3 は建物荷重剛性の値を示す。なお、本建物は掘削形状が正方形に近い場合三次元効果に関する補正係数  $\alpha$  は 1.0 とした。

4.3 実測結果と解析結果の比較

シールドの変形量として評価するシールド下端深度の鉛直方向変位の解析結果を Fig.8 に示す。同図には、掘削完了時のリバウンドの実測値も参考に示した。

建物荷重剛性の解析結果は荷重の方向および荷重と変形の履歴を考慮しないで設定されているので、地盤剛性の低下が大きく、実測結果よりも大きな結果となった。建物の設計にあたっては、基礎の不同沈下、変形角、傾斜角などが問題となるためこの方法で地盤定数を設定した場合には安全側の設計となることがあるが、実測値と解析値に大きな差があり、本手法で対象としているシールドの挙動の評価には適用できないと考えられる。

リバウンド検討剛性の解析結果は最大値、相対変形量ともに実測値を下回っており、危険側な結果となった。差分評価剛性の解析結果は相対変形量が一部で実測値を下回った。しかし、最大値および分布形状は近似しており、実測値を再現できたと考えられる。以上の結果より、建物荷重が排土荷重よりも大きい場合の地盤剛性は差分評価剛性により設定することによりシールドの挙動を評価できることが判明した。

5. まとめ

シールドの直上に新築建物を建設する場合で、掘削後に建物荷重が作用した場合のシールドの挙動に関する実用的な予測手法を提案し、実測結果により検証した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 建物の荷重が作用した場合のシールド挙動は、リバウンド検討時と同一の解析モデルを使用し解析することができる。この時、建物の剛性は評価する必要はなく、掘削底に建物の荷重を載荷することによりシールドの挙動を評価することができる。
- 2) 長辺方向が軸線方向となる場合には、リバウンド時の検討と同様に掘削平面形状に関する三次元効果を考慮することで実際の挙動に近い解析結果を得ることができる。
- 3) 建物荷重が排土荷重よりも小さい場合の地盤剛性はリバウンド検討時に使用した地盤剛性とする。一方、建物荷重が

排土荷重よりも大きい場合には、リバウンド検討時に使用した地盤剛性を初期剛性とし、排土荷重と建物荷重の差が作用する荷重として地盤剛性を低減する必要がある。

本論文および筆者らの既往の研究により、シールド直上に建物を建設した場合の実用的なシールドの挙動予測が掘削開始から建物完成時までの一連の流れで可能になったといえる。しかし、検証が限られた条件であるので、今後は、種々の条件による実測結果に基づき検証を行いより汎用性を高める予定である。

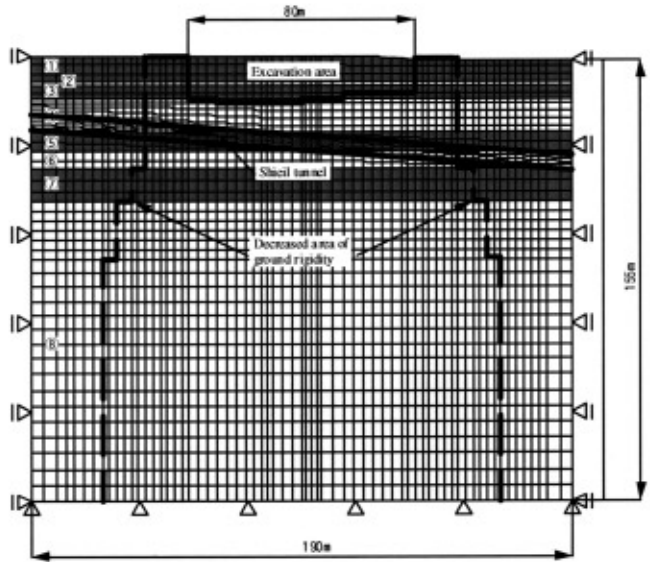


Fig.6 Analysis Model

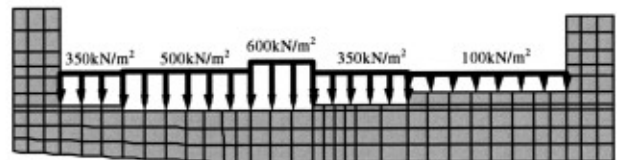


Fig.7 Building Load  
Table2 Ground constant

Bottom level (GL-m)	Soil name	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\nu$	Initial deformation modual Eo (kN/m <sup>2</sup> )	Decreased deformation modual (kN/m <sup>2</sup> )		
					E1	E2	E3
① 7.8	Loam	14	0.35	80,200	40,100	40,100	40,100
② 9.4	Clay	15	0.35	145,000	72,500	72,500	72,500
③ 13.8	Sand	17	0.35	441,500	229,600	158,463	22,163
④ 25.7	Sand	18	0.3	1,100,000	702,000	596,281	352,790
⑤ 32.3	Sand	19	0.3	1,621,000	1,145,800	1,028,640	758,472
⑥ 38.4	Sand	19	0.3	826,200	465,300	351,478	101,770
⑦ 50.0	Sand	20	0.3	1,189,000	1,132,900	1,115,897	1,076,677
⑧ 155.0	Sand	20	0.3	2,530,000	2,224,700	2,217,215	2,200,041

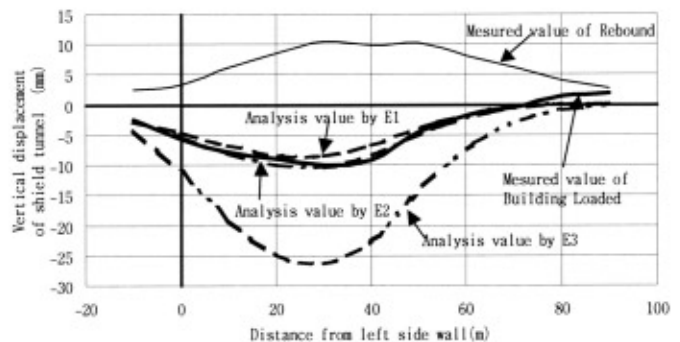


Fig.8 Vertical displacement of shield tunnel

参考文献

- 1)川村東雄, 真島正人: JR セントラルタワーズ, 基礎工 pp.26  
～30,200.8
- 2)堀田洋之,中西啓二,桂豊,浅香美治,西川裕,加藤博巳:山王パーク  
タワー建設工事におけるリバウンド・沈下現象,清水建設研  
究報告,第72号,pp.9～20,2000.12.
- 3)奥地正敏,伊勢本昇昭,保井美敏:地下鉄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  
集,pp737～738,2004
- 4)石井善一,岩田暁洋,藤井 衛,小林治男,妹尾博明:地下鉄シー  
ルド直上を掘削する場合のリバウンド検討方法の提案 その  
1 基本事項と地盤剛性低減領域の影響,日本建築学会大会  
学術講演梗概集,pp.467～468,2007.9.
- 5)小林治男,石井善一,藤井 衛,岩田暁洋,妹尾博明:地下鉄シー  
ルド直上を掘削する場合のリバウンド検討方法の提案 その  
2 掘削以深が砂質土の場合の実測値と計算結果の比較,日  
本建築学会大会学術講演梗概集,pp.469～470,2007.9.
- 6)岩田暁洋,石井善一,藤井 衛,小林治男,妹尾博明:地下鉄シー  
ルド直上を掘削する場合のリバウンド検討方法の提案 その  
3 掘削以深が粘性土の場合の実測値と計算結果の比較,日  
本建築学会大会学術講演梗概集,pp.471～472,2007.9.
- 7)岡田純治,山本嘉一郎,中堀和英:根切りに伴う地盤のリバ  
ウンドについて,第17回土質工学研究発表会講演集,pp.925～  
928,1982.
- 8)石崎長俊,大西靖和,丸 隆宏:掘削および建物構築に伴う  
地盤の鉛直変位について(その1)リバウンド量および沈下  
量の実測結果,日本建築学会大会学術講演梗概集,pp.597～  
598,1997.9.