

大型建物基礎杭の施工が シールドトンネルに与える影響に関する一考察

水上 博之¹・宇波 邦宣²・大石 敬司³・岩波 基⁴

¹正会員 メトロ開発株式会社 技術部（〒103-0001 東京都中央区日本橋小伝馬町11-9）
E-mail: minakami@metro-dev.co.jp

²正会員 メトロ開発株式会社 技術部（〒103-0001 東京都中央区日本橋小伝馬町11-9）
E-mail: unami@metro-dev.co.jp

³正会員 東京地下鉄株式会社 鉄道本部（〒110-8614 東京都台東区東上野3-19-6）
E-mail: k.oishi@tokyometro.jp

⁴正会員 長岡高等専門学校（〒940-8532新潟県長岡市西片貝町888番地）
E-mail: miwanami@nagaoka-ct.ac.jp

トンネルに近接して大規模建築物の杭が施工される場合において，特に軟弱地盤の場合にはその影響が大きくなる傾向にある．また基礎部分の掘削で周辺地盤がリバウンドによりトンネルが隆起することもあるそのような場合には，近接協議にて影響の予測値およびその対策を検討することとなるが，その影響解析の手法が十分に確立されているとはいえない．そこで，報告文は基礎杭を有する建物が，トンネルに近接して施工される場合の，影響解析手法を提案するとともに，施工時のトンネル挙動の計測値を解析結果と比較してその妥当性を述べるものである．

Key Words : Adjacent Construction, Influence of pile construction, FEM Analysis, Tunnel

1. はじめに

トンネルに近接して建造物が施工される場合，その施工時の影響を予測するために簡易的にトンネル横断方向の弾性二次元FEMが多く用いられている．しかし，近接する建造物がトンネル奥行きに対して短い杭などを対象とする場合には，トンネル横断方向の弾性二次元FEM解析に，その考慮を行わないと予測が不正確となる．従来からこのような課題があったものの，その予測手法が十分に確立されていない．そこで，平面FEM解析と横断FEM解析を段階的に行う(以下，疑似三次元解析という)予測手法について事例をもとに，その妥当性を検証する．

2. 二次元解析の問題点

一般に近接問題に関してトンネルへの影響解析を実施する場合トンネル横断方向断面における地盤を対象とした二次元FEM解析を用いることがほとんどである．図-1に杭の平面的な挙動を示すが，地盤応力を解放するとその周辺にアーチング効果があらわれる．しかしトンネル横断方向の二次元FEM解析にその考慮をしなければ，図-2に示すように，杭の要素が溝掘り状態を表現することと

なり，現実的な挙動と異なる結果となる．

そこで，近接構造物が杭基礎のように奥行きが短い場合が，解析における課題となる．この課題の解決策は，三次元FEM解析を行うことが考えられる．しかし，三次元FEM解析には，次のような欠点がある．

- 1) 多くの手間がかかり費用が高くなる．
- 2) 三次元解析結果と実測値を比較した例が少ない．

従来，多くの地盤を対象とした二次元FEM解析が実施され，現場との実証がなされてきた．その結果として，解析に与える変形係数やポアソン比を適切に条件を与えることで，おおむね実際の挙動が表現できると言われている．例えば，地盤を掘削する場合のリバウンド量を推定するためには，掘削より以深の変形係数を3倍～4倍とすれば，現場の実態に近づけることができるなどである．一方，地盤を対象とする三次元FEM解析は実施例がまだ少なく，解析に inputs する地盤の物性値などの検証が十分なされているとはいえない．そこで，杭施工時の地盤応力を解放する解析にあたっては，実績のある二次元FEM解析を基本とした．

一方，軟弱粘性土地盤の場合，建造物の地下部分の掘削や杭施工による地中内応力の変化により，圧密沈下が生じることがある．このような地盤の乱れによる圧密沈下量も必要に応じて考慮する．

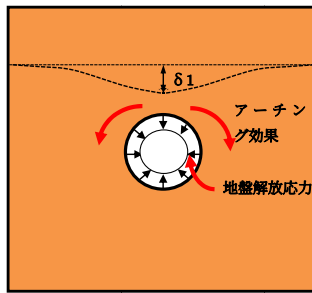


図-1 杭の平面挙動

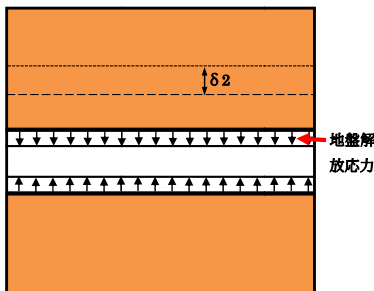


図-2 奥行きを考慮しない場合の平面的な挙動

3. 課題解決の方策

二次元FEM解析を行うにあたり、トンネル横断FEMのこれらの課題の解決としては、次の2方策が考えられる。

(a)方法：杭施工箇所の変形係数を低減する方法

(b)方法：横断方向および水平方向の二次元FEM解析を行い、疑似三次元を表現する方法

(a)方法は、杭施工時に与える架空要素の変形係数を式-(1)および式-(2)で与えることで表現が可能となる。

$$E_1 = (C - \Phi) \cdot E_0 \quad (1)$$

$$E_2 = \{\Phi \cdot E_c + (C - \Phi)\} \cdot E_0 \quad (2)$$

ここに

E_0 ：杭施工時に解放する地盤の変形係数(kN/m^2)

E_c ：杭のヤング係数(kN/m^2)

E_1 ：杭掘削時に与える架空要素の変形係数 (kN/m^2)

E_2 ：杭を埋設した後の架空要素の変形係数(kN/m^2)

Φ ：杭径(m)

C ：杭間隔(m)

である。

すなわち、杭に相当する解放された空間と奥行きに存在する地盤の変形係数を平均化させた要素をFEM解析に与えるということである。この方法は、杭施工時の評価として変形係数を平均的に減じているので、一見適切に見えるが、先に述べたとおり、杭は奥行きが限定されているにもかかわらず、解析上でトンネル横断二次元に与える形状は溝掘りとなるため、平面的な掘削で発現するアーチング効果が反映されないため、実際の挙動を忠実に表現しているとは言い難い。

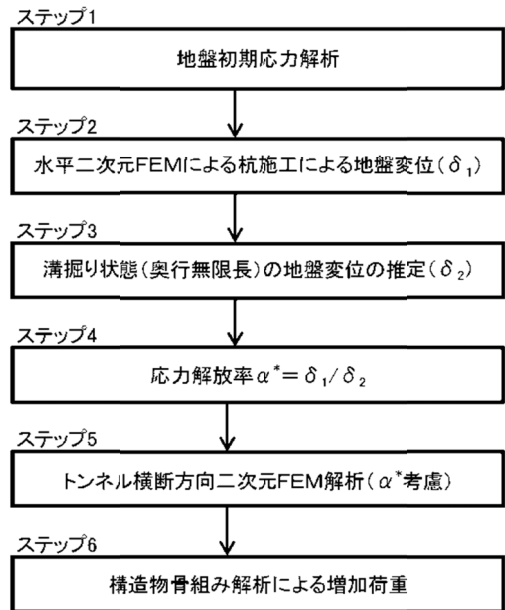


図-3 解析フロー

そこで、平面的な杭のアーチング効果を反映できるような疑似三次元解析を行う方法を、本稿で提案するとともにその検証を行う。疑似三次元解析のフローを図-3に示す。なお、FEM解析は、局部的には塑性域に達する地盤要素もあるが、トンネルの周辺やそのほとんどは微小ひずみであることから弾性FEM解析を基本とする。

ステップ1：初期地盤応力解析を行い、要素内に初期応力を与えて、計算上算出される自重による変位をキャンセル化する。

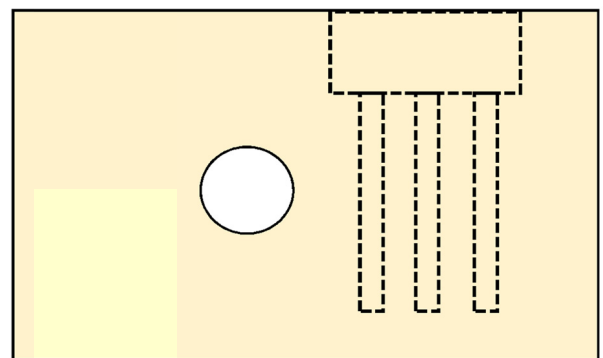


図-4 解析断面模式図 (1)

ステップ2：水平二次元FEMで、杭部分に相当する要素を取り除き地盤の応力を解放させ、孔壁の地盤変位量(δ_1)をえる。なお、この場合、孔壁防護の影響を考慮した地盤応力の解放力を与えることで、杭の施工法に応じた配慮を行うことができる。例えば、泥水掘削の場合は、深さに応じた泥水圧を円周地盤方向に与えればよい。

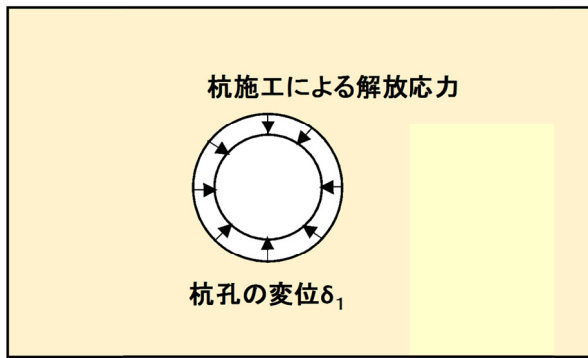


図-5 解析断面模式図 (2)

ステップ3: トンネル横断二次元FEM解析で、杭に相当する要素を解放して溝掘り状態を表現して、孔壁の地盤変位量(δ_1)をえる。

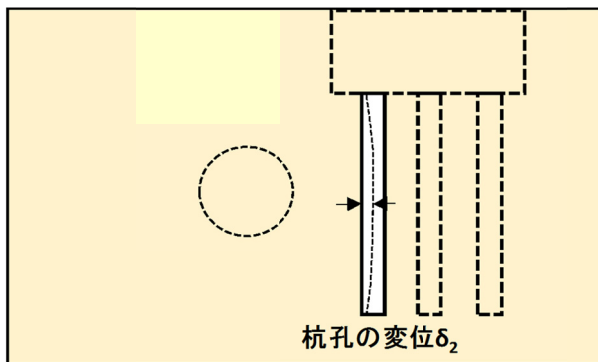


図-6 解析断面模式図 (3)

ステップ4: 応力解放率 (α^*) を式-(3)により算定する。

$$\alpha^* = \delta_1 / \delta_2 \quad (3)$$

ここに、

α^* : 杭の応力解放率

δ_1 : 水平二次元FEM解析による杭孔の変位

δ_2 : 横断二次元FEM解析による杭孔の変位

である。

ステップ5: トンネル横断二次元FEM解析で、杭部分の要素を取り除くとともに、式-(4)に示す応力解放率を考慮した地盤応力を解放する。その後、必要に応じて杭の剛性を挿入した後、基礎掘削や耐圧版(マットスラブ)構築など一連の施工順序に従い解析を行う。

$$Q_r = \alpha^* \cdot Q_p \quad (4)$$

ここに、

α^* : 杭の応力解放率

Q_r : トンネル奥行を考慮した解放応力(kN/m^2)

Q_p : 杭の深さに応じた初期地盤応力(kN/m^2)

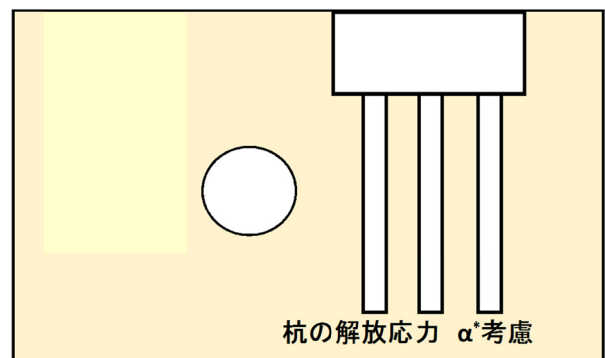


図-7 解析断面模式図 (4)

これらのステップを踏まえて、トンネル位置における鉛直および水平の変位量を求めることができる。なお、トンネルの増加応力を求める場合には、覆工を梁としてモデル化した骨組みモデルに、FEM解析で得られた地盤の変位量を、ばね先変位として与えればよい。

また、地中内応力の変化や地盤の乱れに起因する圧密沈下量は、必要に応じて、森・赤木が提唱している式-(5)で算定することで、その値をえることができる³⁾。

$$\alpha = \frac{Cc'}{1+e_0} \cdot \log(k \cdot \gamma + 1) \quad (5)$$

$$Cc' = 0.3Cc \quad (6)$$

$$k = 0.33I_p^{-0.37} \cdot \log St \quad (7)$$

ここに、

α : 地盤要素の収縮率

γ : 地盤内せん断ひずみ

Cc : 圧縮指数

I_p : 塑性指数

St : 鋭敏比

である。

4. 施工結果との検証

(1) 現場状況

a) A現場

既設トンネルに近接する建築物は、鉄筋コンクリート造の地上19階である。基礎杭は、最大杭径が2.3m、杭長約65mの場所打ち拡底杭（アースドリル工法）で、拡底杭の径は、3.4mである。施工本数は21本で、直近での既設トンネル（φ6900mm×2、土被り約23m）との離れは約1.6mである。図-8、図-9に示すようにビルの計画位置は、既設トンネルの直上に位置し、これを跨ぐように建物を支持する場所打ち杭が既設トンネルの両側に施工される。

地盤は、図-9に示すようにN値=0~2のシルト層がGL-40mまで堆積し、既設トンネルはこの軟弱な層に構築されている。その下部は、N値が10程度の厚さ24mの粘性

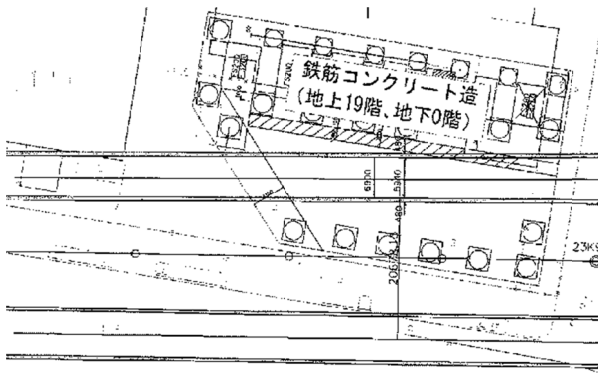


図-8 A現場平面図

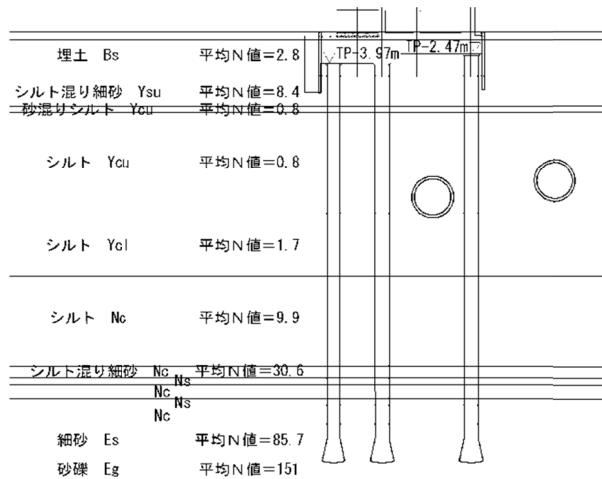


図-9 A現場横断面

土層、N値が30程度の砂層の互層、GL-65mから5.5mのN値が50以上の砂層また、GL-70m以深はN値が50以上の礫層である。なお、トンネルは、厚さ450mmの特殊中子形鉄筋コンクリート製セグメントで、外径6900mmの単線シールドトンネルである。

b) B現場

既設トンネルに近接する建築物は、鉄筋コンクリート造の地上5階、地下2階建ての住宅棟であり、建築面積は1800 m^2 である。基礎杭は、最大杭径26m、杭長約54mの場所打ち拡底杭（アースドリル工法）で拡底杭の径は、4.1mである。施工本数は63本、直近での既設トンネル（ $\phi 6900\text{mm} \times 2$ 、土被り約26m）との離れは約2mである。また、基礎の掘削は、掘削深さ約15m、掘削土量約25000 m^3 と大規模である。図-10、図-11に既設トンネルと建築物の位置関係を示す。

地盤は、図-11に示すようにN値0～2のシルト層がGL-40mまで堆積し、既設トンネルはこの軟弱な層に構築されている。その下は、N値が30程度で厚さ5mの砂層、N値が10程度で厚さ10m、さらに、GL-55mからはN値が50以上の砂層となっている。なお、トンネルは、厚さ450mmの特殊中子形鉄筋コンクリート製セグメントで、外径6900mmの単線シールドトンネルである。

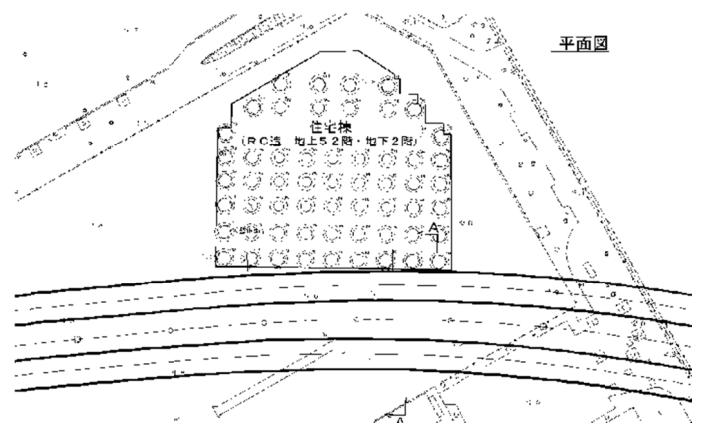


図-10 B現場平面図

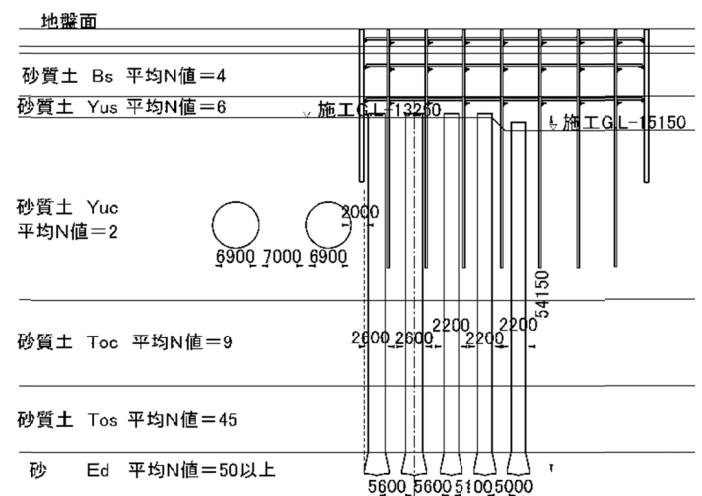


図-11 B現場横断面

(2) 計測と解析結果の比較

a) A現場

A現場では、図-12に示すように、建築物が地上7階まで構築された段階で、沈下が予想以上に進行していたため、解析にて最終沈下量の予測が求められた。最終沈下量を精度よく予測するためには、建築物荷重による地中内の増加応力を十分に把握しなければならない。

まず、杭の施工による沈下が8mm程度発生し、その後、基礎部分の掘削によるリバウンドで2mm程度隆起し、その後、地上部の立ち上がりとともに沈下が継続し、地上7階まで構築された段階で約15mm程度の沈下量が計測された。一般にマットスラブを有する完全支持杭の設計では、マットスラブは剛体としてその底盤反力は無視、杭と地盤の周面摩擦も同様に考慮しないが、建物基礎部分の掘削した後の沈下の原因は、上記のマットスラブ下の反力や杭の周面摩擦の影響であると推察した。そこで、A現場では、トンネル横断方向のFEM解析に入力すべき地中内増加応力を把握するために、地盤をばねとして評価した建築物の骨組解析を行った。

骨組解析の結果、全建物荷重のうち、約8%はマットスラブ下部の地盤反力、約35%は杭の周面摩擦による反力が地中内への増加応力となった。

3 課題解決の方策で述べたステップに応じて、 α^* を求めたところ、 α^* は約10%となった。そこで、ステップ5では、 α^* を考慮した杭施工時の地盤応力解放を行ったのち、建物基礎の掘削、建物骨組解析による地中内増加応力の入力を行い解析を行った。

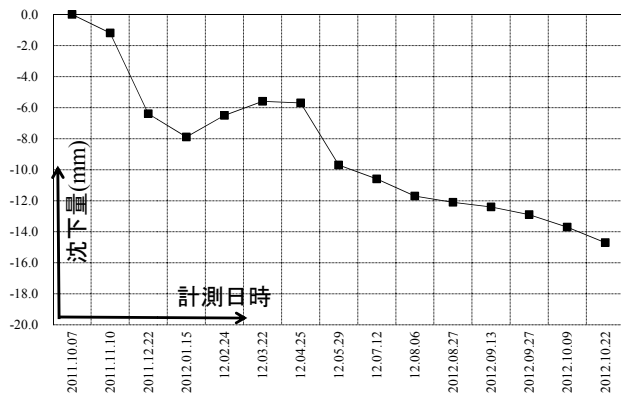


図-12 トンネルの沈下量（建物地上7階構築時）

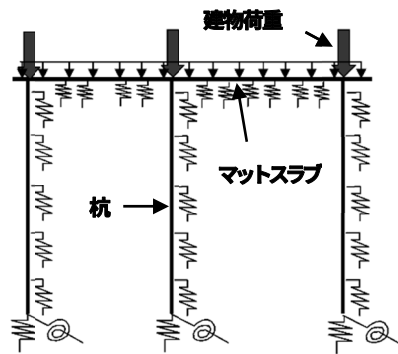


図-13 建築物の骨組解析

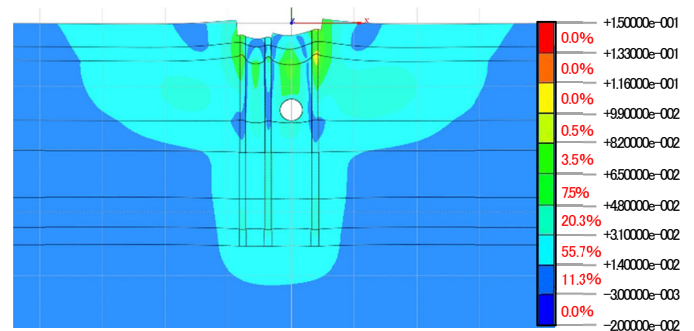


図-14 FEM解析コンター図(A現場)

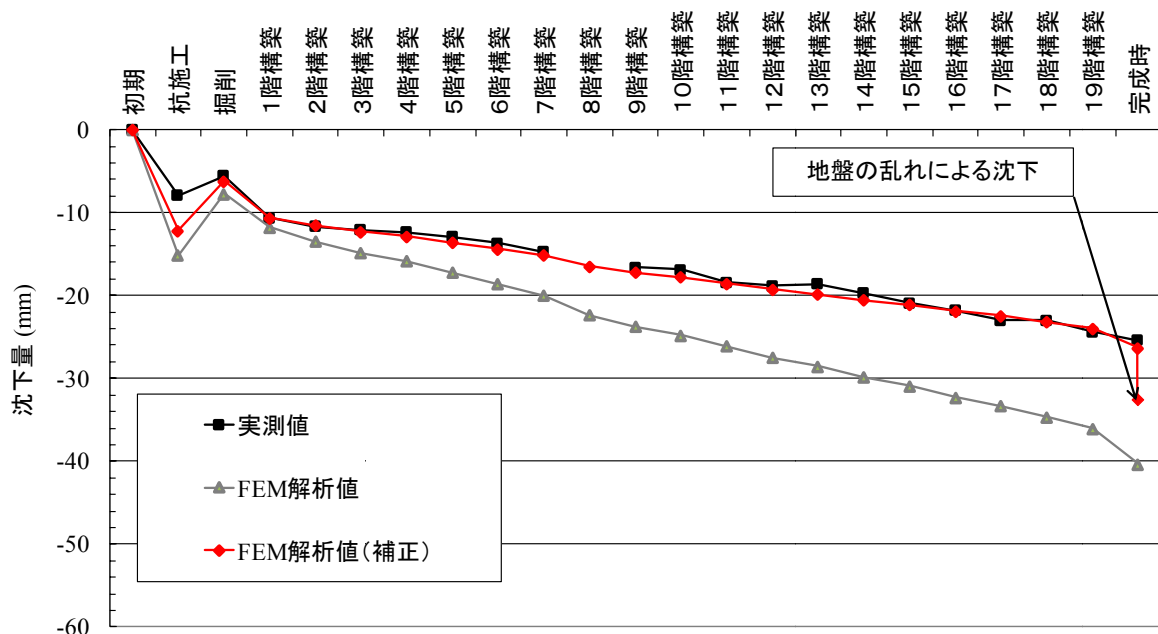


図-15 沈下量の予測値(A現場)

解析結果と計測結果の比較を図-15に示す。解析値と計測値を比較すると、杭施工時の沈下量およびリバウンド量は解析値が大きく、また、その後の沈下量も大きく算定されているが、沈下傾向は類似している。地盤FEM解析では、変形係数のばらつきなど不確定要素が大きく、その設定で大きく異なる。一方で、解析時点において7階まで構築した時点のトンネル沈下実測値が計測されている。そこで、実測値の沈下勾配と解析値のそれを合わせ最終沈下量の予測値とした。なお、地盤の乱れによる圧密沈下量の6.5mmは最終沈下量として、建物完成時の値に加えることとした。建物が完成した直後の沈下量は、24.0mmの値が計測された。そこで、予測値が26mmであり、ほぼ同様の値となった。なお、その後、3か月経過すると計測値が25.4mmと増加したが、軌道方向の高低狂いは、整備基準以内であった。

b) B現場

B現場では、建物の基礎杭の施工が行われて時点で沈下勾配が大きくなったため、解析を行った。解析ステップは、3 課題解決の方策で示したとおりであるが、ステップ5においては、杭施工時の応力解放、建物基礎部の掘削までの解析としており、A現場のように、建物荷重による地中内増加応力までは、考慮していない。B現場における解析結果からは、 α^* は、約6%と計算された。その結果、建物に最も近接している箇所の沈下量が、約14mmと予測された。そこで、▽隣り合う杭の連続施工の禁止▽分割掘削など、施工上の対策をとることにした。

図-17に建物の工事着手からマットスラブ施工までの経時沈下図を示す。杭の施工とともに沈下が生じ、最大で約9mmの値が計測されている。計測値が予測値よりも小さくなった要因は、施工上の対策が効果を発揮したものと考えられる。その後、建物基礎部の掘削とともに約7mmのリバウンドが生じている。解析のリバウンド結果も約7mmであり、おおむね計測値と一致している。なお、B現場においては、地盤の乱れに起因する圧密は考慮していない。

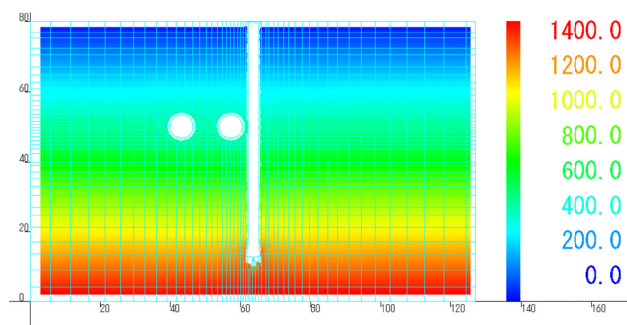


図-16 FEM解析コンター図(B現場)

5. 検証結果と今後の展望

A現場およびB現場の解析結果と計測値の比較を行ったが、A現場においては、施工途中の計測結果から解析値を修正させて、計測値と予測値がほぼ一致した。一方、B現場では、解析結果を踏まえて施工上の対策を実施したことから、計測値が予測値を下まわった。この対策を実施しなかったとすれば、実際の変位はもっと大きくなったと考えられることから、おおむね疑似三次元解析の妥当性が検証されたと言える。地盤を対象とするFEM解析においては、地盤定数の設定、特に変形係数とポアソン比の値が重要であり、この値によって大きくその結果が変化する。変形係数は、土質によっては、歪依存性があり、その歪量によりその値が変化する。また、FEM解析は等方性地盤の理想形としてモデル化を行うことに対して、現地盤では異方性の性状も示すことから、解析値と計測値が一致しないこともある。その場合には、変形係数を定数と扱うのではなく、歪レベルや現場の状況に応じて、その値を変化させることも考えなければならない。今後も多くの現場で解析値と計測値の対比を行い、検証を加えることで、予測値の精度をさらに向上させることができると考えている。

参考文献

- 1) 藤木育雄, 宇波邦宣, 三原正哉：日中シールド交流会, 軟弱地盤における近接建築物の基礎施工に伴うシールドトンネルの変形挙動, 2011
- 2) I.Fujiki, H.Minakami, M.Iwanami：Safety of subway structures in Proximity of New Construction of a High-Rise Building 2014
- 3) 森隣, 赤木寛一：非排水せん断変形で生じた乱れに基づく正規圧密粘性土の圧密現象, 土木学会論文報告集, 第 335号, pp.117-125, 1983

(2014.9.15 受付)

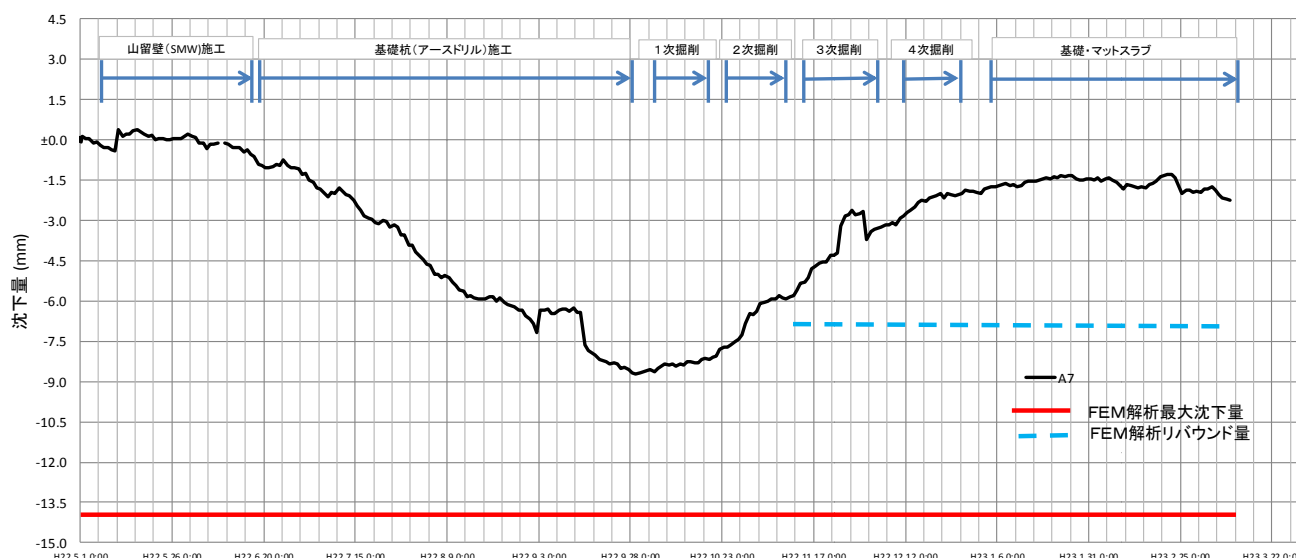


図-17 沈下量の予測値(B現場)

CONSIDERATION OF INFLUENCE AGAINST SHIELD TUNNEL UNDER PILE CONSTRUCTION OF HIGH RISE BUILDING

Hiroyuki MINAKAMI, Kunitaka UNAMI, Keiji OISHI and Motoi IWANAMI

In case that the piles of high rise building are constructed in contiguity with the tunnel particularly at the soft ground area, the tunnel tends to have a significant influence. In addition, the upheaval of tunnel by the rebound of the surrounding ground is occurred by the underground excavation. In the case at the soft ground condition, the conferring meeting among the parties concerned will be held and considered the predicted value and taken measures. But it is difficult to say that the method of effective analysis hasn't been established. This report is proposed the method of effective analysis in the case that the building with piles will be constructed in contiguity with the tunnel and expressed the validity for the method by compared with the result of the analysis and the measurement.