

開削工法による近接施工に伴う既設トンネルの簡易影響評価に関する研究

片山 智裕¹・山口 哲司²・岩波 基³

¹ 学生会員 早稲田大学理工学術院 建設工学専攻 (〒169-8555 東京都新宿区大久保三丁目 4-1)
E-mail: tfdt-1746@toki.waseda.jp

² 正会員 株式会社熊谷組 土木設計部 (〒162-0004 東京都新宿区津久戸町 2)
E-mail: tyamagu@ku.kumagaigumi.co.jp

³ 正会員 早稲田大学理工学術院 社会環境工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保三丁目 4-1)
E-mail: miwanami@waseda.jp.

わが国では、大都市部の人口集中に伴い多くの超高層ビルが建設されている。一方で、数次にわたる全国総合開発計画に沿って進められた社会基盤整備の結果、大都市部の地下空間には既設のインフラトンネルが輻輳している。超高層ビルでは基礎の構築における掘削深度が深く、これらインフラトンネルに近接した施工となることが多い。この掘削工事が既設トンネルの健全供用に影響を与えないよう配慮が必要であり、既設トンネルとの離隔や相対深度により「近接施工」に適合する場合には、管理者との協議が必要となる。その際、トンネルの過大な変位による障害を防ぐため、工事の施工計画段階で影響評価を行う必要がある。本報告は、近接施工に伴う既設トンネルの変形について予測影響解析を行い、検討項目ごとにその適用性を検討したものである。

Key Words: Earth Retaining Wall, Tunnel

1. はじめに

わが国では、大都市部の過密化による人口集中に伴い超高層複合ビルが多く建設され、計画されている。一方で、数次にわたる全国総合開発計画に沿って進められた社会基盤整備の結果、大都市部の道路下を中心とした地下空間には地下鉄や通信、ガスなどの既設のインフラトンネルが輻輳している。また、幹線道路に面して建設されている超高層ビルでは基礎や地下室の構築における掘削深度が深い。そのため、これらインフラトンネルに近接した施工となることが多い。

この掘削工事が既設トンネルの健全供用に大きな影響を与えないよう細かい配慮が必要であり、施工計画を立てる際にインフラトンネルとの離隔や相対深度により「近接施工」に適合する工事である場合には、インフラトンネル管理者との協議が必要となる。その際、掘削工事に伴うトンネルの過大な変位による障害を防ぐため、工事の施工計画段階で影響評価を行う必要がある。また、地下鉄道の近接施工の実測値から、影響評価のうちリバウンドにおける鉛直方向変位が解析値より大きいケースがいくつか生じている。

本報告ではこのような開削工法による近接施工に伴う

既設トンネルの変形について、2次元FEM解析と弾塑性法を用いた予測影響解析を行い、検討条件に対する水平方向変位と鉛直方向変位の妥当性と推定値の実測値の関係における傾向を整理したものである。

2. 解析方法

本報告では、近接施工に伴う既設トンネルの簡易影響評価手法として、2次元弾性FEM解析と土留め背面変位を考慮した影響評価を検討する。すなわち、本解析では土留め壁周辺地盤の特性と土留め変位の関係を評価できる弾塑性法により求めた土留め壁の水平方向変位を、2次元FEMモデルの土留め壁部に強制変位として作用させる。

3. 解析概要

解析対象は、図1および図2に示すどちらも地下鉄道トンネルに近接する掘削工事であり、シールド工法により構築されたトンネル周辺に高層ビルディングの基礎を構築するための近接開削工事である。各解析対象の周辺地盤の諸元を表1および表2に示す。なお、地盤の諸元

に関して、土質とN値から弾性係数やポアソン比などおおよそ決めているのが現状である。実際に、トンネル変位に関してどちらも設計時の事前解析および掘削工事後の実測が行われていたが、鉛直方向変位の解析値が実測

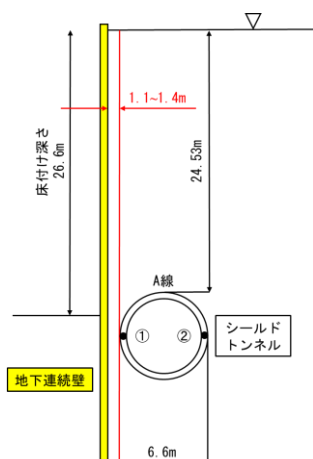


図1 解析対象 I

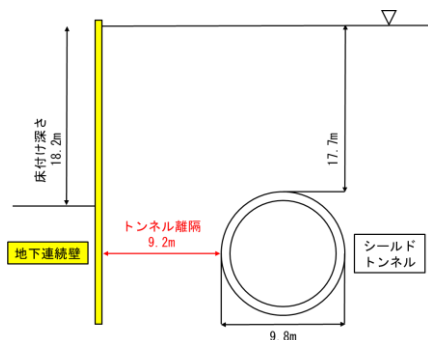


図2 解析対象 II

表1 地盤の諸元 (解析対象 I)

地盤	層厚 (m)	N 値	E (kN/m ²)	γ (kN/m ³)
粘性土	0 ~ 6.1	5	14000	17
砂質土	6.1 ~ 12.2	18	50400	20
砂質土	12.2 ~ 16.3	40	112000	20
粘性土	16.3 ~ 9.0	19	53200	17
砂質土	19.0 ~ 24.6	60	168000	21
砂質土	24.6 ~ 26.6	60	168000	20
粘性土	26.6 ~ 30.0	60	168000	17
砂質土	30.0 ~	60	168000	21

E : 弾性係数, γ : 単位体積重量

表2 地盤の諸元 (解析対象 II)

地盤	層厚 (m)	N 値	E (kN/m ²)	γ (kN/m ³)
埋め土	0 ~ 2.8	3	8400	19
砂質土	2.8 ~ 6.3	23	64400	18
シルト	6.3 ~ 16.8	7	19600	16
砂礫	16.8 ~ 25.5	60	168000	20
土丹	25.5 ~	60up	168000	18

値を大きく上回るなど、予測解析の精度としては不十分であった。そこで、本報告では 2 次元 FEM 解析におけるトンネルの変形要因として掘削以深の解析領域と土留め背面の解析領域に着目し、その傾向を整理する。解析領域はそれぞれ掘削深さの 2~4 倍とし、検討ケースを表 3 にまとめた。また、東京の洪積地盤の除荷時弾性係数が圧縮時の 2~3 倍程度であることから、通常解析モデルに加えて掘削以深地盤の弾性係数を 2 倍および 3 倍にした場合の解析も行った。本研究に用いる 2 次元 FEM 解析モデルは図 3 および図 4 に示すとおりである。解析では全土被りを考慮し、境界条件は左右端で水平方向固定、鉛直方向自由として、下端では水平方向および

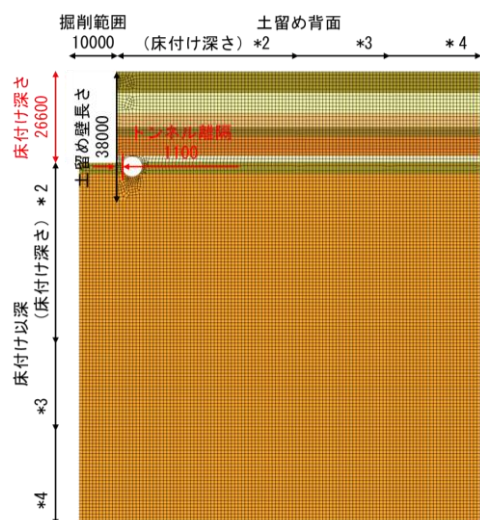


図3 2次元 FEM 解析モデル (解析対象 I)

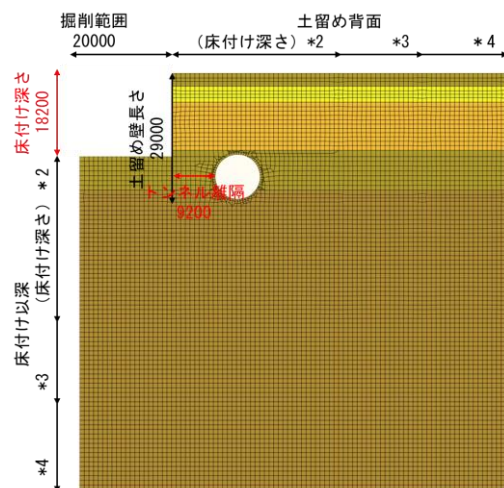


図4 2次元 FEM 解析モデル (解析対象 II)

表3 各解析対象における検討ケース

(掘削深さの ~ 倍)		土留め背面の解析領域		
		2 倍	3 倍	4 倍
掘削以深の 解析領域	2 倍	Case 1	Case 2	Case 3
	3 倍	Case 4	Case 5	Case 6
	4 倍	Case 7	Case 8	Case 9

鉛直方向固定とした。地盤は平面ひずみ要素、セグメントおよび土留め壁ははり要素でモデル化している。

4. FEM解析におけるトンネル変形要因の検討

解析対象Ⅰおよび解析対象Ⅱの弾塑性法による土留め壁部の水平方向変位を図5および図6に示す。求めた水平方向変位を、2次元FEMモデルの土留め壁部に強制変位として作用させた。

解析対象Ⅰおよび解析対象Ⅱに関して、土留め壁側トンネル側端部の変位の解析結果と実測値を表4および表5に示す。この結果をもとに2次元FEM解析におけるトンネル変形要因について考察する。

(1) 土留め背面の解析領域による影響

土留め背面の解析領域がトンネル変位に与える影響を評価する。まず、掘削以深地盤の弾性係数が1倍の場合に着目して傾向を整理する。解析対象Ⅰについて、表4のCase 1, Case 2およびCase 3を比較すると、水平方向変位と鉛直方向変位ともに解析値はほぼ同値となった。Case 4～6, Case 7～9を比較しても同じ傾向が確認できた。さらに、このことは掘削以深地盤の弾性係数を2倍、3倍にした場合でも同様であった。

次に、解析対象Ⅱについて、表5のCase 1～3を比較すると、土留め背面の解析領域を大きくすることで水平方向変位と鉛直方向変位ともにやや大きくなるが、実

測値に対して非常に小さな変動であることがわかる。このことはCase 4～6, Case 7～9, さらには掘削以深地盤の弾性係数を2倍、3倍にした場合でもおおむね同様

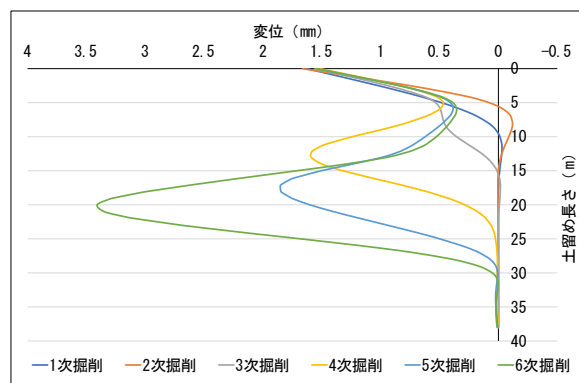


図5 弾塑性法結果（解析対象Ⅰ）

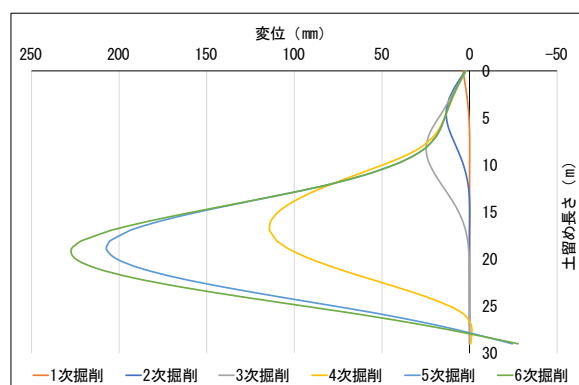


図6 弾塑性法結果（解析対象Ⅱ）

表4 トンネル変位の解析結果（解析対象Ⅰ）

Case		1	2	3	4	5	6	7	8	9	実測値
弾性係数1倍	水平方向変位 (mm)	7.2	7.2	7.3	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	0
	鉛直方向変位 (mm)	36.0	37.5	37.8	46.9	48.3	49.3	56.9	56.4	57.4	17.8
弾性係数2倍	水平方向変位 (mm)	6.9	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	—
	鉛直方向変位 (mm)	19.2	20.2	20.5	24.3	25.2	25.8	29.3	29.0	29.5	—
弾性係数3倍	水平方向変位 (mm)	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9	7.0	6.9	6.9	7.0	—
	鉛直方向変位 (mm)	12.9	13.8	14.0	16.0	16.6	17.1	19.2	18.9	19.2	—

表5 トンネル変位の解析結果（解析対象Ⅱ）

Case		1	2	3	4	5	6	7	8	9	実測値
弾性係数1倍	水平方向変位 (mm)	37.0	41.9	44.0	37.2	41.8	43.9	37.4	41.8	43.7	0
	鉛直方向変位 (mm)	7.2	9.8	11.0	13.7	15.1	17.0	19.7	19.5	21.4	2.3
弾性係数2倍	水平方向変位 (mm)	36.8	41.2	43.0	37.4	41.4	43.2	37.8	41.9	43.5	—
	鉛直方向変位 (mm)	6.3	8.6	9.8	11.3	11.7	13.3	14.8	13.7	14.9	—
弾性係数3倍	水平方向変位 (mm)	36.8	40.9	42.7	37.5	41.4	43.0	38.0	42.0	43.6	—
	鉛直方向変位 (mm)	6.1	8.2	9.4	10.5	10.7	12.1	13.2	11.9	12.7	—

のことがいえる。

以上より、土留め背面の解析領域が2次元 FEM 解析におけるトンネル変形に与える影響は極めて小さいと考えられる。

(2) 掘削以深の解析領域による影響

次に、掘削以深の解析領域がトンネル変位に与える影響を評価する。(1)で土留め背面の解析領域が2次元 FEM 解析に及ぼす影響は小さいと考えられた。そこで、掘削以深地盤の弾性係数ごとに Case 1 ~ 9 の解析結果を用いて、掘削以深の解析領域がトンネル変位に及ぼす影響を考察する。まず、解析対象 I に関して、掘削以深の解析領域と水平方向変位および鉛直方向変位の関係を図 7 および図 8 に示す。図 7 をみると、掘削以深の弾性係数が同じ場合、掘削以深の解析領域を拡張しても水平方向変位はほぼ同じ値となった。一方で、鉛直方向変位に関しては、図 8 より掘削以深の解析領域が大きくなると鉛直方向変位も大きくなることが確認できた。その倍率は、掘削以深地盤の弾性係数 1 倍のとき、掘削以深の解析領域 2 倍で鉛直方向変位およそ 1.5~1.6 倍、弾性係数 2 倍のときで 1.4~1.5 倍、弾性係数 3 倍のときで 1.35~1.4 倍であった。

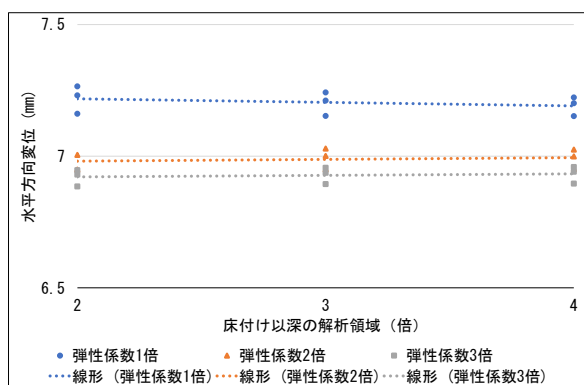


図 7 掘削以深の解析領域と水平方向変位の関係 (解析対象 I)

解析対象 II に関しても、同様に掘削以深の解析領域と水平方向変位および鉛直方向変位の関係を図 9 および図 10 に示す。図 9、図 10 より、水平方向変位と鉛直方向変位ともに解析対象 I と同様の傾向が確認できた。なお、掘削以深の解析領域と鉛直方向変位の関係倍率は、掘削以深地盤の弾性係数 1 倍のとき、掘削以深の解析領域 2 倍で鉛直方向変位およそ 1.9~2.7 倍、弾性係数 2 倍のときで 1.5~2.3 倍、弾性係数 3 倍のときで 1.3~2.1 倍となった。

以上より、掘削以深の解析領域の増加は水平方向変位には解析結果に影響を及ぼさないが、鉛直方向変位を増加させると考えられる。

(3) 掘削以深地盤の弾性係数による影響

掘削以深地盤の弾性係数がトンネル変位に与える影響を評価する。まず、解析対象 I について、弾性係数ごとに水平方向変位および鉛直方向変位の分布を示したものを図 11 および図 12 とした。図 11 をみると、掘削以深地盤の弾性係数が 2 倍、3 倍になっても水平方向変位の分布はあまり変動しなかったことがわかる。一方で、図 12 より掘削以深地盤の弾性係数を 2 倍、3 倍にすると鉛直方向変位は著しく減少し、実測値に大きく近づく値と

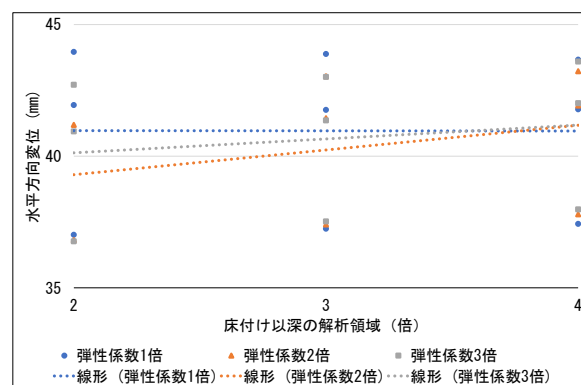


図 9 掘削以深の解析領域と水平方向変位の関係 (解析対象 II)

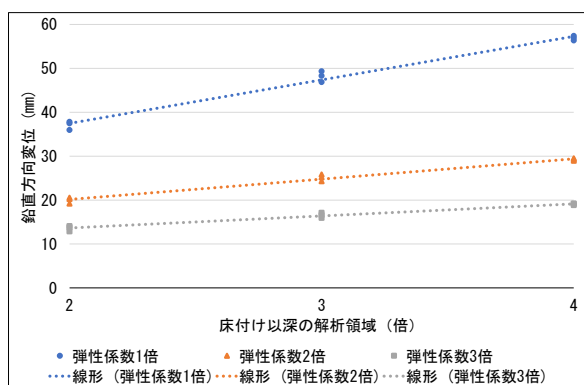


図 8 掘削以深の解析領域と鉛直方向変位の関係 (解析対象 I)

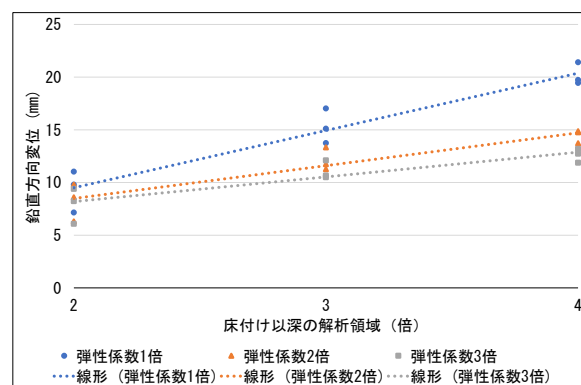


図 10 掘削以深の解析領域と鉛直方向変位の関係 (解析対象 II)

なった．その変動は弾性係数 2 倍で鉛直方向変位およそ 0.5 倍，弾性係数 3 倍で 0.35 倍であった．

解析対象Ⅱに関しても，同様にして掘削以深地盤の弾性係数ごとに水平方向変位および鉛直方向変位の分布を示したものを図 13 および図 14 とした．図 13 から，掘削以深地盤の弾性係数が変動しても水平方向の分布は変わらないことが確認できる．鉛直方向変位に関して，図 14 より掘削以深地盤の弾性係数を 2 倍，3 倍にすることで鉛直方向変位が実測値に近づくことが確認できる．その変動は，掘削以深の解析領域により異なるが，弾性係数 2 倍でおよそ鉛直方向変位 0.7～0.9 倍，3 倍で 0.6～0.85 倍であった．

以上より，掘削以深地盤の弾性係数の設定は水平方向変位には影響を及ぼさないが，鉛直方向変位を著しく減少させ，実測値に近い値に改善する可能性があると考えられる．

(4) 解析値と実測値の比較

最後に解析値と実測値の比較を行い，その妥当性について検討する．まず，解析対象Ⅰの実測値は水平方向変位 0mm，鉛直方向変位 17.8mm であった．表 4 より解析値と比較すると，まず水平方向変位はすべてのケースで

7mm 前後であるのに対して，鉛直方向変位は掘削以深地盤の弾性係数を 2 倍で評価することで解析値に近い値かつ安全側の評価ができる傾向が得られた．また，掘削以深地盤の弾性係数を 3 倍で評価すると，掘削以深の解析領域によっては危険側評価となるケースもある．このように，掘削以深の解析領域は解析結果にある程度影響を及ぼすが，それ以上に掘削以深の地盤特性の設定はリバウンドを評価する際に特に重要な検討項目であると考えられる．

次に，解析対象Ⅱに関して，実測値は水平方向変位が 0mm，鉛直方向変位が 2.3mm であった．解析値と比較すると，まず，水平方向変位はおよそ 35mm～45mm と非常に大きな値となっている．この要因として考えられるのは地盤特性の評価方法である．表 2 より，解析対象Ⅱでは掘削以深地盤の N 値は 60up であり，この地盤の弾性係数の評価が実際よりも小さい可能性が考えられる．鉛直方向変位に関しては，掘削以深地盤の弾性係数を 2 倍，3 倍にすることで解析値に近い値かつ安全側の評価ができる傾向が得られた．

以上より，掘削以深地盤の地盤特性の評価は予測影響解析において非常に重要な検討項目であると考えられる．

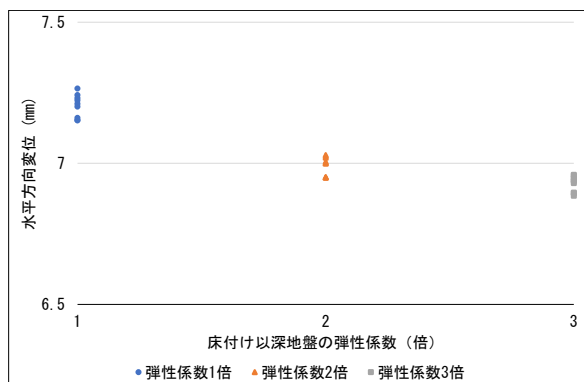


図 11 掘削以深地盤の弾性係数と水平方向変位の関係（解析対象Ⅰ）

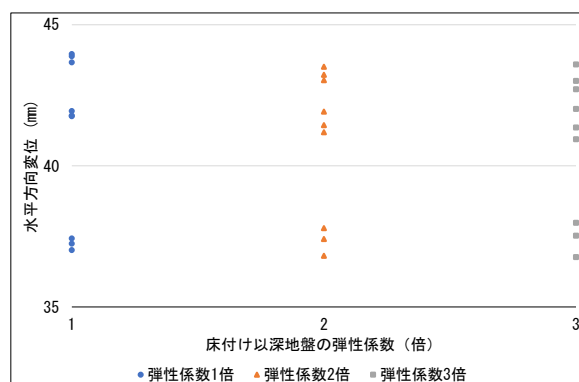


図 13 掘削以深地盤の弾性係数と水平方向変位の関係（解析対象Ⅱ）

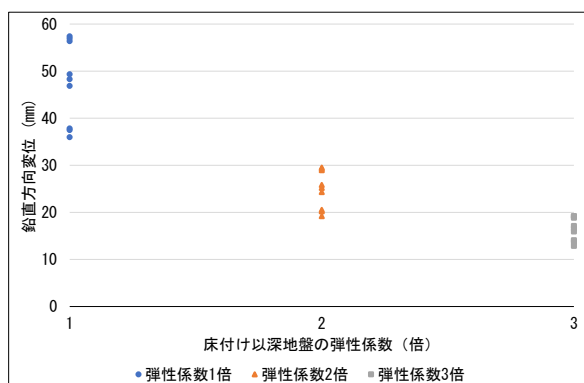


図 12 掘削以深地盤の弾性係数と鉛直方向変位の関係（解析対象Ⅰ）

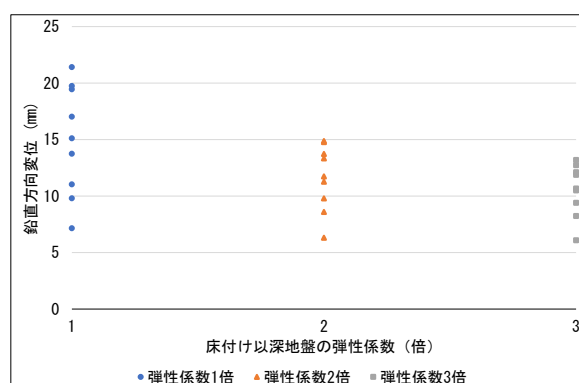


図 14 掘削以深地盤の弾性係数と鉛直方向変位の関係（解析対象Ⅱ）

5. まとめ

本研究では、比較的大深度の開削工法による近接施工に伴う洪積地盤層内に設置された既設トンネルの変形について(1)土留め背面の解析領域、(2)掘削以深の解析領域、(3)掘削以深地盤の弾性係数が予測解析に及ぼす影響について、2次元FEMモデルを用いて比較検討を行った。これら比較検討により得られた知見を以下に述べる。

- ・土留め背面の解析領域が解析結果に及ぼす影響は小さいと考えられる。
- ・掘削以深の解析領域を適切に設定することで、鉛直方向変位の精度をある程度高める可能性がある。
- ・掘削以深地盤の弾性係数を適切に評価することが特に重要であり、解析精度の向上に大きく寄与すると考え

られる。

しかしながら、工事の施工計画段階で地盤条件は把握されているものの、室内土質試験によって得られる粘着力や内部摩擦角、一軸・三軸圧縮強度などの地盤特性まで調査されている例は稀である。そのため、確実に得られる情報は地盤構成やN値、単位体積重量程度である。N値からこれら土質定数を適切に評価するためには、論文調査など行う必要がある。

参考文献

- 1) 土質工学会：近接施工,土質基礎工学ライブラリ-34,1989.9

(2020. 8. 7 受付)

Analytical Study on Simple Impact Assessment of Excavation Work on Existing Tunnel

Tomohiro KATAYAMA, Tetsuji YAMAGUCHI and Motoi IWANAMI

In accordance with over-population in a big city, a lot of high-rise buildings have been planned and built in our country. On the other hand, as a result of the public infrastructure development accordance to Comprehensive National Development Plan, underground space is crowded with infrastructural tunnels such as a subway, data communications, gas and water. In addition, the excavating bottom of high-rise buildings facing the arterial roads is deep. Therefore, it is frequently to excavate in contiguity with these infrastructural tunnels. In case of proximity construction, detailed considerations for in-service operation of existing tunnel need to be taken. So, when complying with proximity construction, consultation is required. At the time, impact assessment of excavation work on existing tunnel should be conducted to prevent excessive displacement of existing tunnel. Furthermore, from the measure value of the proximity construction of the subway, there are few cases that vertical displacement by rebound is bigger than analytical one. Therefore, this report suggests high-precision and simple analysis of the existing tunnels accompanied with the proximity construction.