

孔壁防護薬液注入における改良厚の影響検討

東日本旅客鉄道（株） 東京工事事務所 正会員 ○長井 優樹
正会員 高橋 保裕
正会員 金田 淳

1. 目的

軌道に近接して新たに杭基礎等を施工する場合、新設構造物の施工が既設構造物に影響を与える範囲を工学的に判定する。「変位や変形の影響がまれにある」あるいは「有害な影響が及ぶと考えられる」とき、軌道等の既設構造物に与える変状の予測や計測、既設構造物の防護を行う。例えば、列車運行時間帯に軌道に近接して場所打ち杭（リバース工法、TBH 工法）を施工する場合、孔壁防護工として薬液注入による地盤改良を実施する。これは、施工時の孔壁崩壊によって軌道に変位等が生じ、列車事故が発生することを未然に防ぐためである。

一般に、薬液注入による地盤改良範囲は、注入孔を複列配置し改良範囲を連結させ、最小改良厚 1.5m 以上を確保する。最小改良厚は地盤の不均質性と施工の不確実性を考慮しており、安全性の担保のために地盤改良範囲をやや過大に設定している現状がある。

本報では経済的な薬液注入の実施に向けて、地盤改良厚が孔壁の安定に及ぼす影響を定量的に評価することを目的とし、FEM（Finite Element Model）解析を用いて地盤改良厚の違いによる孔壁安定性の比較検討を行った。

2. 解析手法

本検討では、「せん断強度低減法を適用した三次元弾塑性 FEM」（以下、SSR-FEM）を用いて孔壁の安定と崩壊挙動を解析するソフトウェア「杭孔壁@FE」¹⁾を用いた。地盤材料の破壊規準は Mohr-Coulomb 式、塑性ポテンシャルは Drucker-Prager 式である。

SSR-FEM では、式 1 に示す通り、低減係数 F を用いて地盤の強度定数 c , ϕ を低減させる。

$$\tau_f = \frac{c}{F} + \sigma \frac{\tan \phi}{F} \text{ (式 1)}$$

低減係数を段階的に増加させ、せん断強度を仮想的に低減させていくと、ある段階で孔壁から地表面

までの降伏域が繋がるすべり面が形成される。このすべり面が形成される直前の低減係数 F を系全体の安全率 F_s と考えた。当社基準では $F_s \geq 1.35$ が安全側として定義されている。この値は、孔壁崩壊等のトラブルがなく線路近接施工を完了したリバース工法および TBH 工法の実績を用いて SSR-FEM による解析を行い、算定された安全率である。

3. 解析モデルおよびパラメータ

本検討で用いた解析モデルを図-1 に示す。孔壁形状や施工条件は実際の施工条件を参考とした。図 1 中の B1, B2 層の様な透水性の高い埋土層は孔壁崩壊の危険性が高い土質であり、孔壁のすべり崩壊や逸水を防止するために孔壁防護が行われる。特に、地表面から深さ 10m の範囲で孔壁崩壊が発生した場合に軌道への影響が大きいため、解析モデルではこの範

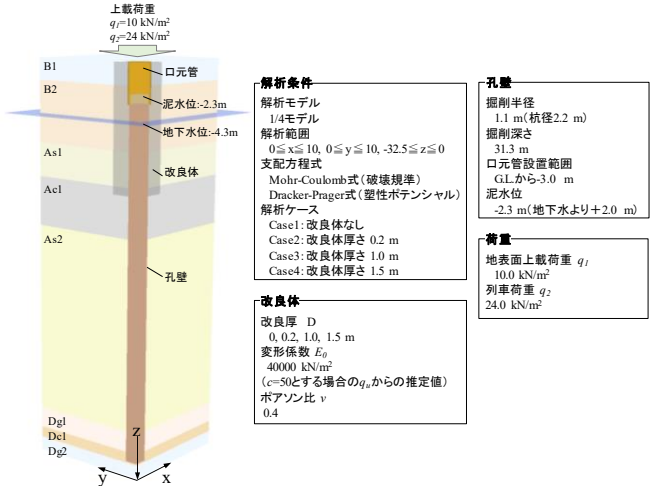


図 1 解析モデル（SSR-FEM）

表 1 解析に用いた各土層の地盤物性値

土層	上端深度 (m)	層厚 (m)	γ_i (kN/m³)	E (kN/m²)	ν (kN/m²)	c (kN/m²)	ϕ (°)	ψ (°)
B1	0	1.7	18	8080	0.495	20	0	0
B2	-1.7	4.92	18	8080	0.495	20	0	0
As1	-6.62	2.73	18	13880	0.333	0	34	34
Ac1	-9.35	3.97	14.5	3368	0.495	45	0	0
As2	-13.32	15.5	18.5	16000	0.333	0	32	32
Dg1	-28.82	1.7	20	103000	0.333	0	35	35
Dc1	-30.52	0.9	19	91000	0.495	300	0	0
Dg2	-31.42	1.1	20	103000	0.333	0	34	34

キーワード FEM, せん断強度低減法, 薬液注入, 孔壁安定

囲を対象に改良体を再現した。また、孔内泥水と地下水位との水位差は2.0mとした。

表1に地盤物性値を示す。入力パラメータは実際の施工地盤を対象とした地質調査および室内試験結果を基に各土層を代表する物性値(γ, c, ϕ, E)を設定した。一般に、薬液注入による地盤強度の増加は粘着力が付加されることで発現する。本検討では改良体の粘着力 $c=50\text{kN/m}^2$ として改良体の変形係数 E_0 を推定した。鉄道構造物設計標準・同解説²⁾では、一軸試験結果から求まる割線剛性 E_{50} と地盤変形係数の設計用値の関係を $E_0=4\times E_{50}$ としている。また、改良体の割線剛性 E_{50} と一軸圧縮強度 $q_u (=2\times c)$ には $E_{50}=50\sim 200\times q_u \div 100q_u$ の関係が得られることが知られている。以上より、薬液注入による改良体の物性値は変形係数 $E_0=4\times 10^4\text{kN/m}^2$ とし、ポアソン比 ν は0.4を用いた。なお、その後の試験施工から改良体の粘着力は想定と同程度となることが確認された。

4. 解析条件

本検討では、薬液注入による地盤改良範囲の改良厚 D をそれぞれ0, 0.2, 1.0, 1.5mとした4ケースについて孔壁掘削直後の地盤の安定性照査を行った。薬液注入による改良体とその厚さは注入孔の配置により決定され、一般に単列配置と複列配置に区別される(図2)。本解析における改良厚は、単列配置における改良体の最小厚と最大厚を想定して0.2, 1.0m、複列配置における改良体の最大厚を想定して1.5mと設定した。

5. 解析結果

図3に系全体の安全率のコンター図(x-z平面)を示す。系全体の安全率 F_s に着目すると、薬液注入を行わない場合は $F_s<1.35$ となり、設計上危険側と判定される。一方で、薬液注入により改良体を造成したケースについては、いずれの場合も $F_s\geq 1.35$ を満たした。

6. 考察

系全体の地盤の安全率は、改良体の有無によって基準値以上か否かが分かれる一方、改良厚の影響はほとんどみられない。また、改良厚が非常に小さい場合(例えば0.2m程度)であっても薬液注入による孔壁の安全性向上効果がみられる。よって、本検討の対象地盤は、これまで孔壁防護のために複列配置1.5mとしていた薬液注入による改良体の配置やその厚さ

を、単列配置かつ1.5m未満に縮小可能である。本検討のような数値解析を用いた孔壁安定性の判定により、より経済的な薬液注入の検討が可能となった。

なお、実際の改良体は解析モデルで再現した均一な厚みを持つ壁体ではなく不定形となる場合が多い。また、地盤条件により改良効果も異なる。よって改良範囲縮小の検討は、数値解析のみならず試験施工や実績の精査などの総合的な判断が必要である。

7. 結論

本報では、薬液注入による地盤の改良厚が孔壁の安定に与える影響を把握するため、異なる改良厚を持つ地盤に対してSSR-FEMを用いた安定性評価を行った。解析結果より、孔壁周辺に単列配置を模擬したような厚さの改良体を再現した場合、その厚さに依らず薬液注入による孔壁防護効果が確認された。本結果は、対象地盤において改良範囲を縮小した経済的な薬液注入が実施可能であると示している。



図2 注入孔の配置と解析で想定した改良厚

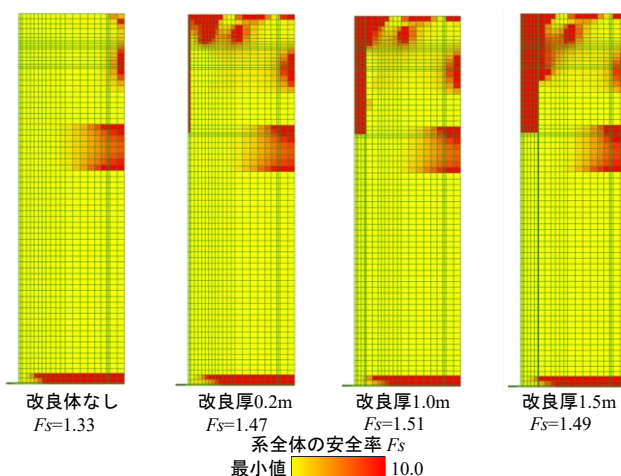


図3 孔壁掘削直後の系全体安全率
(改良厚 $D=0, 0.2, 1.0, 1.5\text{m}$)

参考文献

- 1) 太田正彦, 渡邊康夫, 清水満:「せん断強度低減法」を用いた場所打ち杭の孔壁挙動解析手法の開発, JR EAST Technical Review, No.37, pp43-48, 2011.
- 2) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説(基礎構造物), 2012.
- 3) (社)地盤工学会: 薬液注入工法の理論・設計・施工, 2009.