

都市トンネル掘削に伴う地盤改良の設計

On Designing the Soil Improvement for Urban Tunneling

有泉 毅*・富所達哉**・松永 浩**・見郷浩二*

Takeru ARIIZUMI, Tatsuya TOMIDOKORO, Hiroshi MATSUNAGA, Kouji KENKYO

Jet grouting was applied in the diluvial sandy deposit with high artesian head, as an improving measure on constructing the electric transmission line tunnel in a manner of New Austrian Tunneling Method. The authors have made an analysis based on 2-dimension finite element method for zoning the improvement. The paper mainly refers to the results that the analysis clarifies the plastic zone and the targeted zone to be improved as well. The set-up of larger diameter in an improved soil column than ever has enabled us to expect a shorter period and the cost-effectiveness of the construction accordingly.

Keywords : Jet Grouting, diluvial sandy deposit, 2-dimentional finite element method, plastic area, set-up of larger diameter

1.はじめに

都市域における地下掘削工事は近年ますます深層化する傾向にあり、深部洪積層を地盤改良して掘削する工事が増えつつある。密に締まった洪積砂層は薬液による浸透注入が極めて困難であるため、均質な改良ゾーンを造成する工法として、高圧噴射注入工法の有用性が高い。

本工法の設計は、簡易式の適用、または地盤物性値や施工深度などにより定められた経験値を用いる方法が一般的である。簡易式あるいは経験値については一定条件のもとでの成立を仮定しているが、本工事においては洞道の断面形状や地盤条件などの主要因がこれらの条件を満足していないため、従来式の設計法の適用には問題がある。本報告では地盤改良範囲と改良有効径の2点に着目し、従来設計を一部変更して設計、施工した事例を紹介する。

2.工事概要

本工事は、横浜市港北区内の洪積地盤に山岳工法による洞道を施工するものである。施工にあたり、洞道

* 正会員 東京電力(株) 地中線建設所 横浜工事事務所

** 正会員 東京電力(株) 送変電建設本部

掘削時の地山の安定確保、高水圧に対する止水確保のため、洞道周囲に高圧噴射注入工法（三重管式）による地盤改良を行うこととした。なお、本洞道の設計諸元、施工対象地盤は次のとおりである。平面図および断面図を図-1、2に示す。

- ・設計諸元：平均土被り約19m、延長約62m、掘削断面（馬蹄形）B:5.5m×H:5.6m
- ・対象地盤：第四紀更新世の王禅寺層（上総層群）

洞道上半部は薄い砂層を介する泥岩層、下半部は粒径の小さい均質な砂層

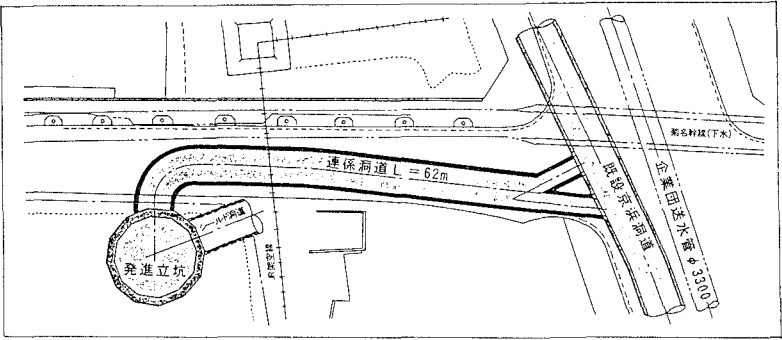


図-1 平面図

3.設計時の問題点

高圧噴射注入工法の設計は、前述のとおり簡易式の適用、または経験値を用いる方法が一般的である。しかしながら、本工事においてこのような従来式の設計法を適用した場合、次の2つの問題が生じる。

(1)改良範囲の設定：改良断面の設計においては、掘削により生じる地山の塑性領域を改良体で置換することが基本となるため、的確な塑性領域の把握が必要となる。従来設計で用いられている塑性領域を求める簡易式は、一様地盤中の円形断面掘削モデル（厚肉円筒理論）により導かれているため、本工事における洞道の断面形状（馬蹄形）および複雑な地層構成を模擬したモデルとは見なし難く、従来設計では塑性領域を的確に把握できない。特に、既設シールド洞道との連係部は構造が複雑で従来方法によるモデル化は難しい。

(2)改良有効径の設定：改良有効径は施工対象地盤の地質、N値、および施工深度によって設定される。本工事のように改良対象地盤がN値50以上の密に締まった洪積砂層の場合、改良有効径は1.2mと著しく小さく設定されるため、施工本数が増加し、工期、経済性の面で極めて不利となる。また、洞道上半部においては泥岩層に介在した薄い砂層が改良対象となるため、十分な改良ができるかが懸念される。

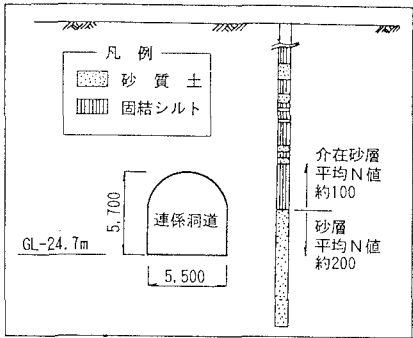


図-2 断面図

4.改良範囲の設定

4-1 解析方法

解析には洞道の掘削断面形状、地層構成を比較的忠実にモデル化できる2次元FEMを用い、洞道の一般部、および既設洞道連係部について、改良厚さを変えたケーススタディを行った。洞道の一般部については断面方向で解析を行い、また、連係部については平面および断面方向について解析を行った。改良厚さは無改良を含め、1.0m、2.5m、4.0mの4ケースを設定した。各ケースにおいて初期応力解析を行った後、

解放率100%で応力解放を行った。塑性領域の判定は、各要素においてMohr-Coulombの破壊基準より算定される局所安全率 F_s を指標とし、 $F_s \geq 2$ かつ最小主応力 $\sigma_3 > \sigma_t$ を満たせば、掘削による地山の緩みがなく所定の改良効果が得られたものと評価した。

4-2 解析結果

一般部の解析モデルを図-3に示す。解析結果の安全率コンターより求めた安全率 $F_s = 2$ 以下の面積と改良厚さの関係を図-4に示す。この結果より面積の範囲が改良厚さ $t = 2.5\text{m}$ ではば一定値に収束し、 $t = 4.0\text{m}$ にしても大きな差が認められないことがわかる。一方、改良厚さ $t = 1.0\text{m}$ では、 $F_s = 2$ 以下の要素が地山に多く現れるため、改良範囲が不十分であると考えられる。以上より、一般部における改良厚さを $t = 2.5\text{m}$ とした。

連係部についても一般部と同様の解析を行い、改良範囲を求めた。解析結果を図-5、6に示す。これらより次のことがわかる。

- ・平面2次元FEM解析結果より、改良幅は4.0m、改良長さは2.5m必要である。
- ・断面2次元FEM解析結果より、改良幅は2.5m、改良長さは2.5m必要である。

以上の解析結果より、連係部における改良幅を4.0m、長さを2.5m、高さを2.5mと設定した。

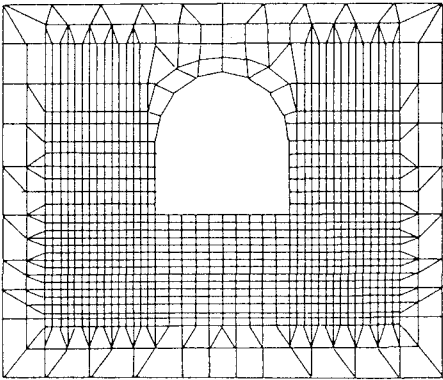


図-3 一般部解析モデル

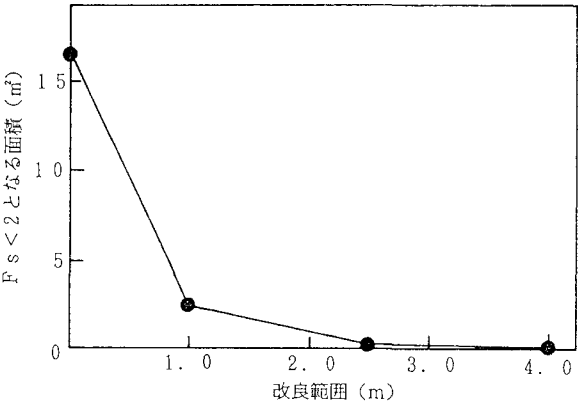


図-4 一般部解析結果

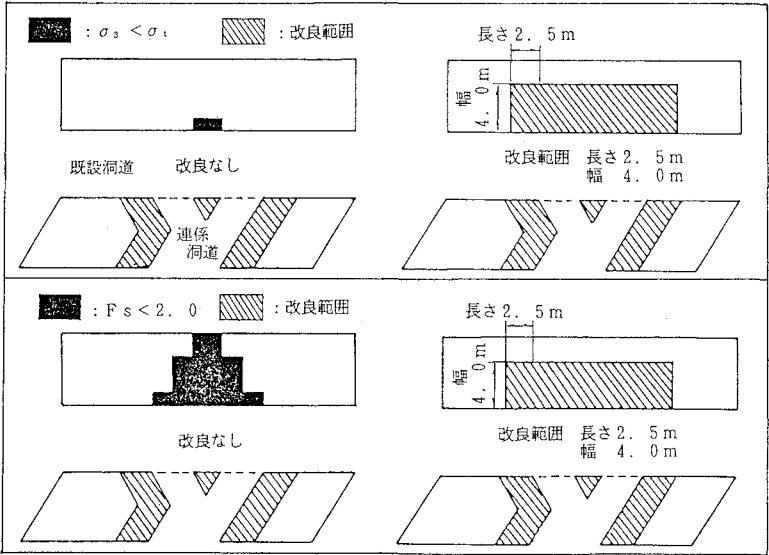


図-5 連結部解析結果（平面）

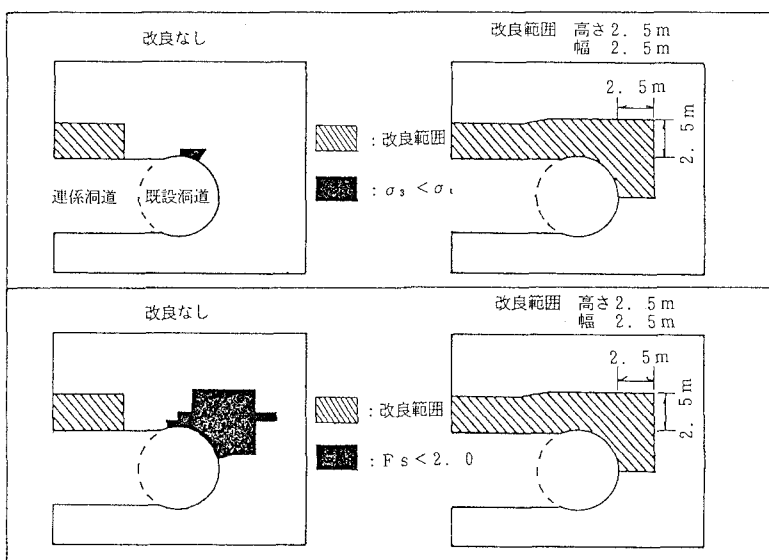


図-6 連結部解析結果(断面)

5.改良有効径の設定

5-1 設定

高圧噴射注入工法の改良有効径は施工対象地盤の地質、N値、および施工深度によって設定されており、本工事では1.2mと設定される。この場合、施工本数が多くなり工期に支障が生じる。全体工程に支障を及ぼさないために、所定の工期を満たしうる目標改良有効径を工期と有効径の関係(図-7)から2mに設定した。改良有効径を拡大するためには、超高圧水の噴射エネルギーを高めること、および切削時間を長くすることが有効と考えられることから、標準的な施工仕様に対し(a)切削回数、(b)超高圧水吐出流量、(c)ロッドの引き上げ時間の3仕様を変更し、それらの組み合わせにより表-1に示す3タイプの変更仕様を設定した。これらの仕様について本工事の原位置で試験施工を実施し、コア採取により改良有効径の端部およびラップ部で出来形を確認した。

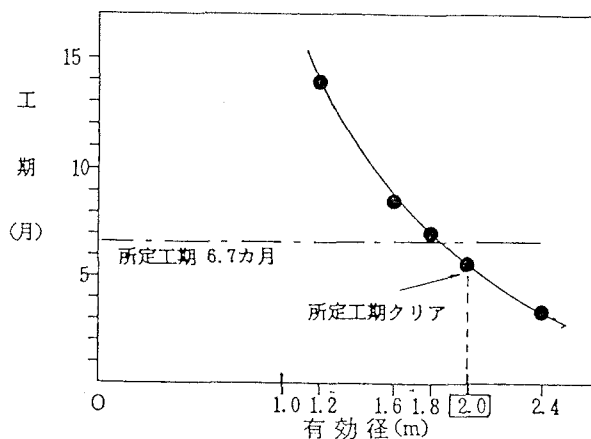


図-7 工期と有効径の関係

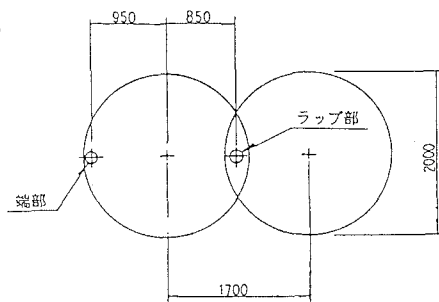
表-1 地盤改良施工仕様

改善案	A	B	C	標準設計
超高圧水				
圧力(kgf/cm ²)	400	400	400	400
流量(ℓ/分)	140	140	140	70
硬化材				
圧力(kgf/cm ²)	5~10	20~50	20~50	20~50
流量(ℓ/分)	泥水 50	硬化材 180	180	140
引き上げ速度(分/m)	20	25	32	25
目標改良径(m)	2,000程度	2,000程度	2,000程度	1,200~1,600

5-2 仕様の選定

試験施工結果を表－2に示す。改良有効径確保の判定基準は、次のとおり定義した改良体採取率を指標とし、ラップ部で100％、端部で80％以上とした。コア採取位置を図－8に示す。

$$\text{改良体採取率} = \frac{\text{改良コア長}}{(\text{コア採取長} - \text{泥岩層厚})} \times 100\%$$



図－8 コア採取位置図（試験）

試験施工により、介在砂層部については仕様改善案C、砂層部については仕様改善案BまたはCで目標改良径2mが確保できることが判明した。実施工では、工期、経済性を考慮して、介在砂層部をC仕様、砂層部をB仕様で施工することとした。

表－2 試験施工結果

改良地質	仕様	離れ (mm)	コア 採取長 (m)	コア採取長内訳 (m)			改良体採取率 (%)
				固結部層厚	改良長	未改良部	
介在砂層	A	924 端部	11.40	10.70	0.31	0.39	44
	B	954 端部	7.00	4.07	1.93	1.00	66
		853 ラップ部	7.48	3.96	3.30	0.22	94
	C	942 端部	7.13	4.27	2.54	0.32	89
細砂層	A	856 ラップ部	7.90	4.18	3.72	0	100
	B	914 端部	2.00	1.31	0.20	0.49	29
		904 端部	2.70	1.22	1.48	0	100
		896 ラップ部	3.00	1.68	1.32	0	100
	C	963 端部	3.00	1.30	1.70	0	100
		849 ラップ部	2.42	1.24	1.76	0	100

6. 実施工.

地盤改良工の施工は平成4年7月13日から平成4年12月22日まで行われた。実施工においても改良有効径の端部相当箇所において、試験施工と同様の効果確認を行った。確認箇所を図-9、調査結果を表-3に示す。これによると、ほぼ100%に近い改良体採取率が得られている。また、改良体の28日養生後の一軸圧縮強度も平均値で55.3kgf/cm²であり、さらに現場透水試験による透水係数の平均値も 4.2×10^{-5} cm/secであった。これらの結果から、改良有効径の端部でも十分な地盤改良効果が得られていると判断できる。

また掘削中は、地盤改良部において切羽の観察を行ったが、泥岩層と砂層との間に若干のエア溜まりが見られたり、レンズ状の砂層が未改良が残っているものの地山の崩壊はもちろん、過大な変位や応力の発生はなく、所定の地盤改良効果が得られた。

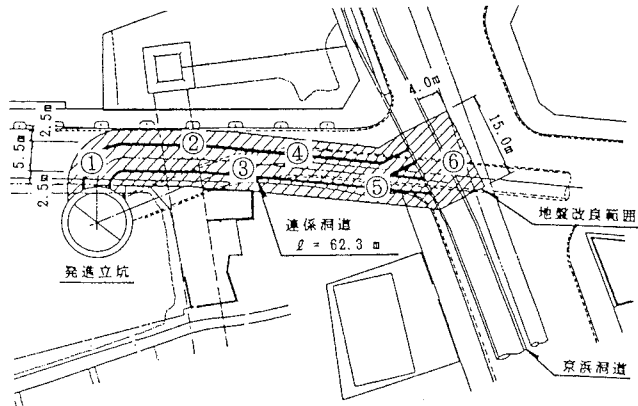


図-9 地盤改良確認工位置図

表-3 実施工調査結果

	①	②	③	④	⑤	⑥
コア採取長 (m)	10.70	10.70	10.70	10.70	6.35	6.35
改良コア長 (m)	7.33	9.32	2.88	1.46	1.96	2.35
泥岩層厚 (m)	2.95	1.22	7.63	8.35	3.71	3.72
改良体採取率 (%)	95.42	98.50	98.04	91.68	89.29	95.59

7. おわりに

以上より、本工事における洪積地盤では、従来設計を現場条件に合わせて変更し、合理的な設計、施工を行うことができた。しかしながら、同様の地盤改良工事に水平展開するにあたっては、各地盤によつ土質および土質物性値の相違、地下水の状況、工期、経済性などを総合的に判断する必要性があろう。

参考文献；富所，松永，「洪積地盤における地盤改良有効径の拡大について」，土木学会第48会年次学術講演会（第Ⅵ部門），平成5年9月