

# 推進工法で施工する軌道下BOXの液状化対策

全日本コンサルタント(株) 奥平 敬  
○小谷 真史  
神尾 正  
田邊 隆

## 論文要旨

推進工法で施工する軌道下BOXが、地震時液状化により浮上りの安全率が確保できない場合、突起などの対策を設けることが難しいため、これまでは、対策工法はアンカー工によるなどの方法が一般的であった。しかし、近年、恒久グラウトが開発され、比較的安価な薬液注入工法により液状化防止対策が出来るようになった。薬液注入工法は、BOX施工形態とは関係なく施工できるため、推進工法にも適用可能であるばかりでなく、既に施工済みの構造物に対しても対策工として採用できる。現時点で軌道下BOXに対する液状化対策として恒久グラウトを用いる場合の設計基準は、明確なものがないが、各種基準類を参考にし、軌道下BOXに適用した例を報告する。

キーワード：軌道下BOX、液状化判定、液状化対策、恒久グラウト

## まえがき

名古屋市は「ささしまライブ24土地区画整理事業」の一環として、名古屋市笹島地区と名古屋駅西口を結ぶ都市計画道路椿町線の整備工事を既に実施している。この事業の完成により、大規模な鉄道施設で長年分断されていた中村区太閤地区とささしまライブ24地区の地域分断が解消され、名古屋駅からのアクセス改善が見込まれることになる。



写真-1 ささしまライブ24開発計画概要写真

本工事の工区分割は、以下の通りである。

### ①鉄道会社受託工事

鉄道直下の工事となるため、鉄道運行の安全を考慮し、近鉄名古屋線直下を近畿日本鉄道株式会社（以下、近鉄と称す）、JR 関西本線とあおなみ線直下を東海旅客鉄道株式会社がそれぞれ、名古屋市から受託して工事を実施する。

### ②名古屋市工事

鉄道以外の掘割部については、名古屋市にて開削工法により工事を実施する。

アンダーパス部に接続する掘割部と併せて平成29年度

の本線部分完成を目指して工事が進められている。

本稿は、鉄道会社受託工事部のうち、近鉄施工区間で採用した軌道下BOX液状化対策について述べる。

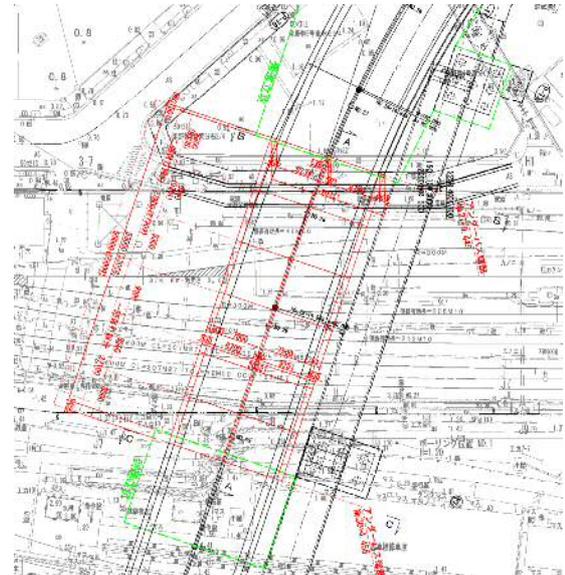


図-1 近鉄施工区間計画平面図

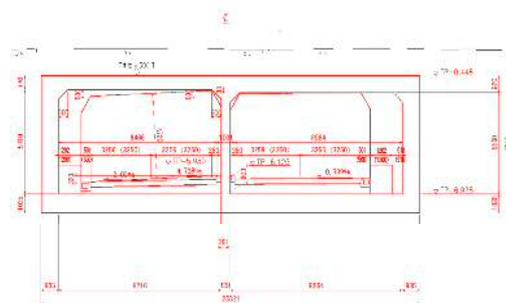


図-2 近鉄施工区間計画断面図

## 1. 地盤条件

### (1) 既往調査

既往調査による地層想定図を図-3 に示す。これによると、地層は砂・泥互層で概ね水平成層に堆積されており、沖積層は最大でG L-5mまでの表層部を構成し、それ以下は洪積層となっている。地層は濃尾平野の地盤図にまとめられている層序区分に沿って、沖積層（南陽層：A）、洪積層では熱田層上部（D3u）、熱田層下部（D3L）、海部・弥富層（Dm）に区分される。

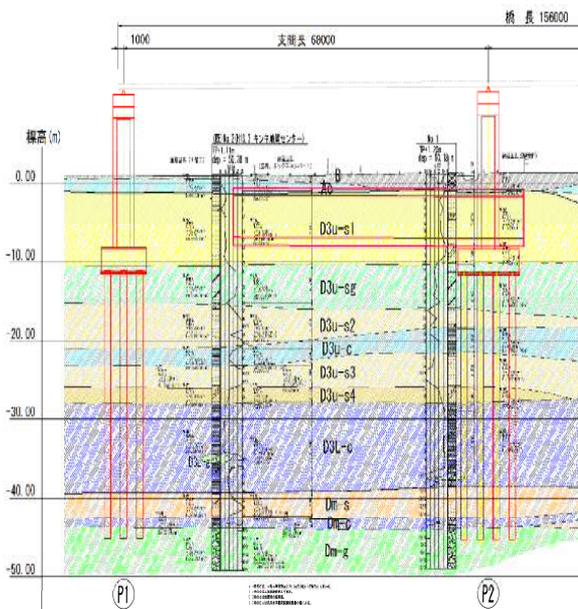


図-3 地質想定図

### (2) 追加調査

液状化の影響を考慮した構造物の耐震性能評価を実施する場合、液状化の可能性およびその程度を精度よく予測することは重要である。BOX周辺で液状化が発生すると揚圧力が作用し、摩擦抵抗が減少することで浮上る可能性がある。

一方、兵庫県南部地震をはじめとした過去の地震においては、大きな地震力が作用した場合でも洪積砂地盤においては液状化の発生が確認されていない。しかし、鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計H11.10（以下、耐震標準と称す）では、洪積層は一般にN値が高く、液状化に対する抵抗が高いため液状化の可能性は低いと考えるが、N値が極端に低いような洪積砂質層については乱さない試料を用いた室内試験等を実施して液状化判定を行うことが望ましいと示されている。

そこで、液状化判定法の精度を向上するため、洪積砂質層（本工事中ではD3u-s1、平均N値13）の液状化に対する地盤の抵抗程度を判断するため、「ゲルプッシュサンプラー（以下、GPサンプラーと称す）」による高品質

試験試料を4本（供試体①～④）採取し、液状化強度比（R）の評価を行うことにした。

GPサンプラーは、サンプラー内の高濃度ポリマー溶液「Gel」がコアをコーティングし保護しながらコアによってビットから押出「Push」される非循環式ロータリーサンプラーである。

GPサンプラーの主な特徴を以下に示す。

①従来の常温サンプリングでは、高品質資料が困難であった「未固結砂礫」「砂混じり砂」等のサンプリングが可能となる。

②サンプリング時の乱れによる影響が少なく「液状化強度試験や動的変形試験など」に適した高品質資料の採取が可能となる。

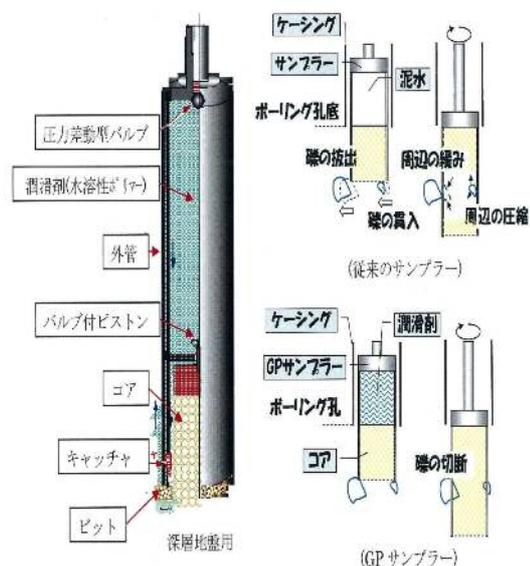


図-4 GPサンプラー概念図

## 2. 液状化判定

### (1) 対象土層

液状化の判定は、耐震標準によると次のすべてに該当する飽和砂質土層について実施するように示されている。

- ① 地下水位面が現地盤面から10m以内にある土層
- ② 現地盤面から20m以内の範囲にある土層
- ③ 平均粒径D50が10mm以下で、かつ10%粒径D10が1mm以下の土層
- ④ 細粒分含有率FCが35%以下の地盤、またはFCが35%を越えても粘土分含有率PCが15%以下の土層

当該地盤は、D3u-s1、D3u-sg、D3u-s2の各層について、①～④のすべてに該当するため、液状化判定を実施する必要がある。

液状化検討のための地盤モデルは、表-1に示す。

表-1 液状化検討のための地盤モデル

地層名	下限標高 (TP+m)	下限深度 (GL-m)	平均N値	単位γ (kN/m <sup>3</sup> )	平均粒径 D50	細粒分 含有率Fc	粘土分 含有率Pc	液状化 判定対象	
地表面	1.20	0							
B 粘性土～砂質土			4.0	17.0	-	-	-	地下水位以上×	
D3u-s1 細砂～シルト質細砂		-3.80	5.00	12.3	0.573	10.6	2.2	○	
		-7.90	9.00	14.5	18.0	0.369	19.0		3.8
		-10.1	11.30	4.0	0.153	38.2	11.5		
D3u-sg 砂礫～礫混り砂		-15.80	17.00	26.8	20.0	1.770	5.9	○	
D3u-s2 シルト		-18.20	19.40	37.7	19.0	(D3u-sgと同様の物性であるとして)		○	
D3u-c シルト		-21.40	22.60	17.0	18.3	0.078	49.6	15.4	GL-20m以上×

(2) 液状化判定方法

液状化判定は、耐震標準によるものとし、液状化強度比 (R) とせん断応力比 (L) から液状化抵抗率 (FL) を求め、FL値が1.0以下の土層については液状化が発生するものと判定する。

$$FL = R/L$$

ここに、R：液状化強度比、

L：地震時最大せん断応力比

今回、L2地震の検討に用いる液状化強度比 (R) は、GPサンプラーで得られた資料を用いた繰返し三軸試験結果から軸ひずみ両振幅 10～15% の場合の強度と繰返し回数の関係より「繰返し回数-強度曲線」を設定し、せん断応力比 (L) は、地盤の応答解析結果から得られる加速度波形を用い、累積損傷度理論を適用してFLを算定する。

L2地震における検討 (FL法) は図-5に示す。

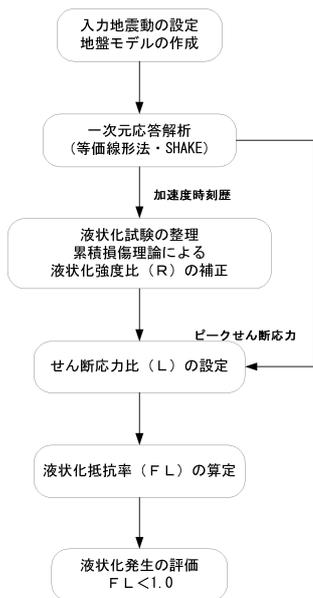


図-5 L2地震動における検討 (FL法)

鉄道構造物設計標準 (耐震設計5.5より)

また解析は、鉄道総合研究所版 J R 用解析ソフト「LIQUEUR-JR (リキュールジェイアール)」を用いる。

(3) 液状化強度特性と液状化判定結果

①液状化強度特性

液状化判定に用いる液状化試験結果データは、原則として DA=10% に対して得られた4点のデータをそのままインプットした。ただし、GP-1, 2資料による液状化試験においては、供試体①②と③④で資料状態が大きく異なり、結果として液状化強度曲線が図-6に示す通り、2系統に分かれてしまう結果となった。そこで、液状化判定においては、既往のPS検層値を参考に、より原位置データに近い供試体①②のデータを用い、2点のデータより回帰式を求め、不足する Nc=10, 20 のデータを補完した液状化判定のインプットデータを作成した。

GP-1, 2試験データの設定図は図-6に示す。

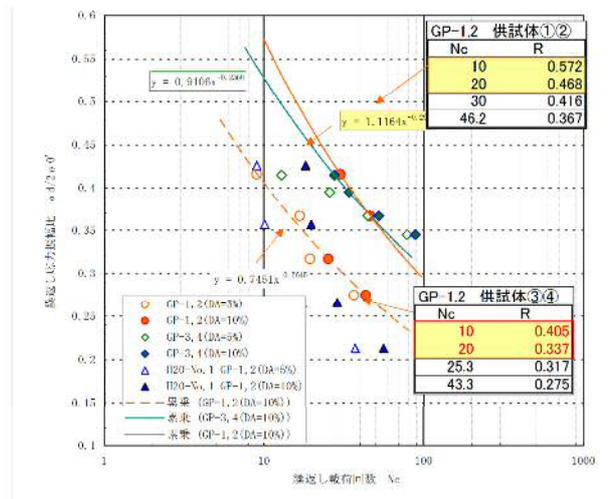


図-6 GP-1, 2試験データの設定図

②液状化抵抗率 (FL)

液状化判定は、砂～礫質土層は概ね全層で FL < 1.0 となり、地震時に液状化する可能性が極めて高いと判断される。L2地震の液状化判定結果は表-2に示す。

表-2 L2地震液状化判定結果

層番号	地層深度 (m)	層厚 (m)	液状化を繰り返す深さ (m)	R	L	FL	判定	深さ方向 w	1-FL	ΔPl
1	1.50	1.50	0.75	-	-	-	-	-	-	-
2	2.81	1.31	2.16	-	-	-	-	-	-	-
3	3.80	0.99	3.30	0.52	0.71	0.73	×	8.348	0.27	2.24
4	4.50	0.70	4.15	0.51	0.80	0.65	×	7.925	0.35	1.98
5	5.25	0.75	4.88	0.52	0.86	0.60	×	7.563	0.40	2.25
6	8.18	2.93	6.71	0.52	0.97	0.51	×	6.613	0.16	8.92
7	11.60	3.42	9.89	0.54	1.08	0.50	×	5.035	0.50	8.61
8	13.55	1.95	12.57	0.81	1.13	0.71	×	3.713	0.29	2.08
9	16.50	2.95	15.03	0.52	1.16	0.45	×	2.487	0.55	4.04
10	17.50	1.00	17.00	1.58	1.17	1.35	○	1.500	0.00	0.00
11	18.80	1.30	18.15	5.31	1.17	4.53	○	0.925	0.00	0.00
12	20.00	1.20	19.40	0.41	1.18	0.37	×	0.300	0.63	0.23
13	20.45	0.45	20.23	-	-	-	-	-	-	-

(4) 液状化によって生じる現象

液状化によって生じる地下構造物の影響は、以下のものがある。

①地下構造物の浮上り

周辺地盤の飽和密度より見掛けの比重が小さい地下構造物は、液状化になった周辺地盤の浮力によって浮上る。

②地盤の支持力低下

有効応力が低下すると、地盤の支持力が低下する。

③地盤の水平方向の永久変位

地盤の液状化に伴い有効応力が失われ、地盤は液体と同じように挙動するため、地下構造物に液圧が作用する。

このうち浮上りについては、マンホール等の地盤より軽い地中構造物が浮上る事例が多く報告されている。このため、大規模な地中構造物である軌道下BOXにおいても周辺地盤の液状化に伴い浮上りが生じ、軌道位置で過大な変形を引き起こす可能性がある。

3. 液状化による浮上り照査

(1) 照査手法

液状化が発生すれば函体底面に作用する揚圧力が増加することになる。耐震標準では、鉛直方向のつり合いから算出した浮上り安全率による照査(式-1)を行っている。この手法は、鉄道以外の地中構造物や共同溝設計指針等の実務設計において広く用いられている手法である。(図-8 浮上り概念図参照)

$$\gamma_i \cdot \frac{US + UD}{WS + WB + 2QS + 2QB} \leq 1.0 \quad \dots \text{式-1}$$

$$WB = f_{uw} \cdot wB$$

$$WS = f_{uw} \cdot p_v \cdot B$$

$$QS = f_{us} \cdot H' \cdot (cs + K_o \cdot \sigma'_{vs} \cdot \tan \cdot s)$$

$$QB = f_{us} \cdot H' \cdot (cb + K_o \cdot \sigma'_{vb} \cdot \tan \cdot b)$$

$$US = \gamma_f \cdot us \cdot B$$

$$UD = Lu \cdot \sigma'_{v'} \cdot B$$

ここに、

WB: 開削トンネルの自重(kN/m)

WS: 鉛直荷重(水の影響を含む)(kN/m)

QS: 上載土のせん断抵抗(kN/m)でFL<1の土層は

$$QS=0$$

QB: 開削トンネル側面の摩擦抵抗(kN/m)FL<1の土層はQB=0とする。

US: 開削トンネル底面の静水圧による揚圧力(kN/m)

UD: 開削トンネル底面の過剰間隙水圧による揚圧力

Lu: 過剰間隙水圧比で、図-9による

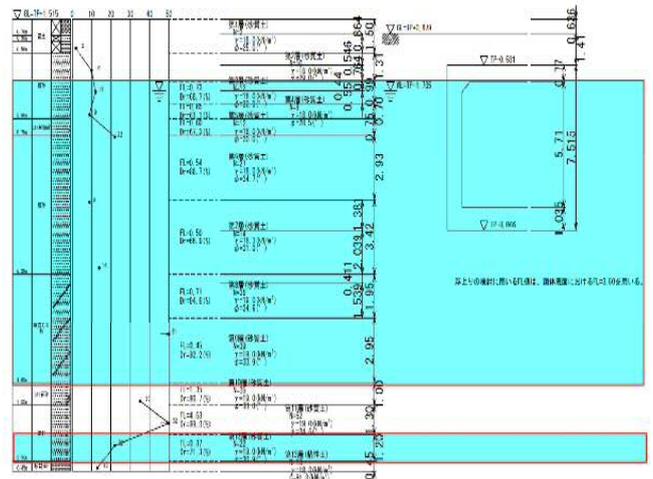


図-7 液状化層と土質定数

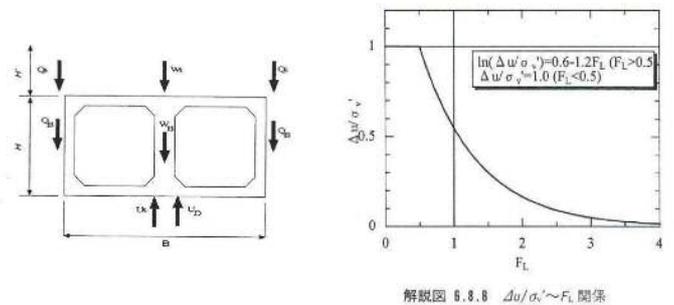


図-8 浮上り概念図

図-9 過剰間隙水圧比

(2) 照査結果

$$\gamma_i \cdot \frac{US + UD}{WS + WB + 2QS + 2QB}$$

$$= 1.0 \times \frac{1282.46 + 1990.44}{641.94 + 1549.36 + 2 \times 8.59 + 2 \times 9.96}$$

$$= 1.469 > 1.00 \quad \underline{\text{OUT}}$$

照査の結果、安全率は1.0を超えているため、地震発生時に液状化した場合、函体は浮上ると予想される。

よって、液状化対策を講じる必要がある。

4. 液状化対策工

(1) 対策方法の検討

液状化対策方法は、土の性質改良による方法と応力・変形に関する条件や間隙水圧に関する境界条件を改良させる方法に大別される。

液状化の発生を抑制する原理と方法は、図-10に示す。

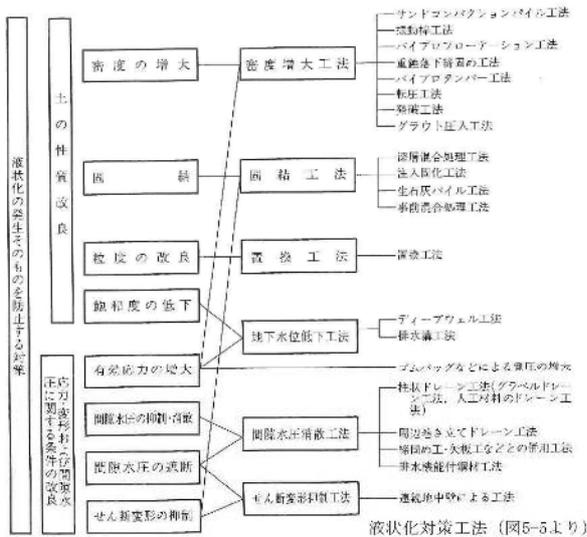


図-10 液状化の発生を抑制する原理と方法

本工事の液状化によるBOX浮上り対策は、土の性質改良として「固結工法」、応力・変形に関する条件や間隙水圧に関する境界条件を改良として「せん断変形抑制工法」がある。また、液状化は許容し浮上りを防止する方法には「アンカー工」による対策が考えられる。

①固結工法

固結工法は、改良体の造成方法によりいくつかの工法に分類できるが、改良材と土を攪拌混合する工法と薬液注入工法により地盤を固結させ、せん断強度を増加させる工法等がある。

②せん断変形抑制工法

BOX両側面に鋼矢板を打設し、液状化地盤と遮断することにより、液状化によるBOXの浮上りを防止する。

③アンカー工法

グラウンドアンカー等によりBOXと支持地盤を結合させ、液状化によるBOXの浮上りを防止する。

BOXは、軌道7線(本線2線、車庫線5線)の直下に敷設するため、推進工法を採用することになっている。対策工法は、推進工法で敷設するBOXに対し対策可能な部位、軌道近接施工等を考慮した選定を行う必要があった。

②せん断変形抑制工法は、軌道7線に支障するため、不採用となった。

③アンカー工法は、軌道下推進工法にて敷設したBOX底版にアンカー用の開口を設け、支持地盤までアンカー一定着させる必要があり、その分工事は大掛かりのものとなる。また、アンカー設置後の止水処理、BOX側面の液状化対策が未対策であるため、液状化による側圧が作用することになる。これらのことから、③アンカー工法は不採用となった。

①固結工法は各種あるが、今回は、推進工法の補助工法である止水目的の薬液注入工法を兼ねることができる「薬液注入工法」を採用することになった。ただし、使用する薬材は、従来の仮設目的のものでなく、近年、開発された恒久グラウトを使用するものとした。

同工法に用いられるグラウトは、水ガラスのアルカリを除去して得られた活性シリカコロイドを使用しているため、シリカの溶脱や体積変化が極めて少なく、長期的に強度を保持し、高い耐久性を発揮する。構成成分は全て無機物であるため、安全性・環境保全性にも優れている。用途に応じ、溶液型の「パーマロック・ASF-II シリーズ」と、懸濁型の「ハイブリットシリカシリーズ」の2種類のグラウトがあるが、本工事では軌道直下での施工性を考慮し、溶液型の「パーマロック・ASF-II シリーズ」を採用した。

(2) 改良範囲

BOX側面の地盤改良範囲は、図-11 に示すように「埋立地の液状化対策ハンドブック:平成9年 運輸省港湾局監修」に準拠することとした。これは、対象とする構造物下端より主働崩壊線を液状化層の上面まで延長した箇所から、液状化によって安定性の低下を考慮する範囲(液状化層下端から30°で影響線を考えた範囲)を加えた範囲を地盤改良の範囲に設定するである。この考え方では、液状化による側圧増加を躯体設計に考慮する必要はない。

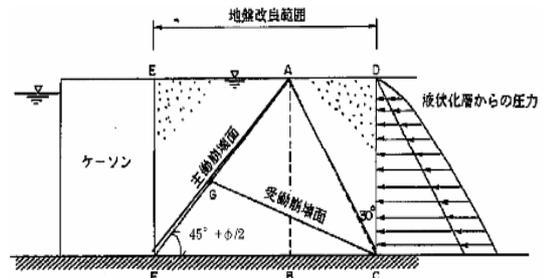


図-11 液状化対策改良範囲

(3) 液状化対策後の浮上り照査

$$\gamma i \cdot \frac{US + UD}{WS + WB + 2QS}$$

$$= 1.0 \times \frac{3163.43 + 3285.09}{1408.91 + 4998.74 + 2 \times 24.37}$$

$$= 0.999 \leq 1.00 \quad \underline{\text{OK}}$$

判定の結果、安全率は1.0以下となり、液状化による浮上りの影響を受けないものと判断する。

改良強度は、必要とする地盤せん断強度を求め、現場/室内強度比0.4を考慮し、以下のように設定した。

①地盤改良土の強度

$$\tau = \sigma \cdot \tan \phi + C = qu/2 \text{ より、 } \tau = 100 \text{ kN/m}^2$$

## ②函体側面・底面

室内強度 =  $q_u' = 100 / 0.4 = 250 \text{ kN/m}^2$

パーマロックASF-II (300kN/m<sup>2</sup> : D<sub>r</sub> = 60%時)

## (4) 施工計画

地盤改良範囲は図-12、本工事の使用工法、注入間隔、注入材は以下に示す。

- ・工法：二重管ストレーナー（複相）  
一次注入：瞬結（ゲルタイム 20秒以内）  
二次注入：緩結（ゲルタイム 約1時間）
- ・注入間隔：1m
- ・注入材料：パーマロックASF-II（溶液型）

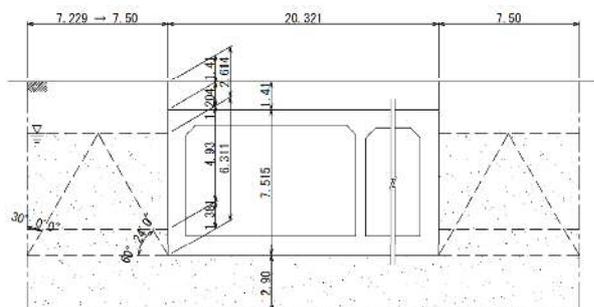


図-12 地盤改良範囲

地盤改良工の施工範囲は、図-13に示すように幅約35m、長さ約53mという非常に広範囲におよび、軌道7線（本線2線、車庫線5線）、道路部、水路部といった様々な条件下での施工となるほか、軌道内は線路閉鎖時間内での施工となることから、効率良く施工を行う必要があった。

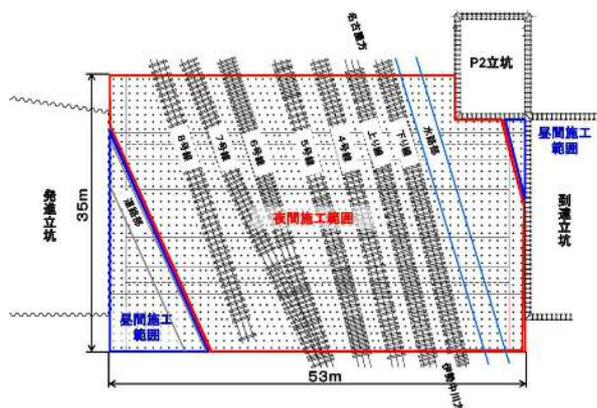


図-13 施工範囲平面図

そこで、薬液注入工はボーリングマシンを12セット使用して施工することとし、ボーリングマシンの設置撤去に要する時間を短縮し注入時間を確保するため、ボーリングマシンをキャリアダンプに積載する方法を採用した。これによりボーリングマシンの格納場所から注入位置までのスムーズな移動を可能とし、線路閉鎖の限られた時間内での工事を可能とした。

## 5. あとがき

「さしまライブ24土地区画整理事業」は、平成11年より着手し、近鉄軌道下アンダーパス部の工事は平成28年3月に完成した。現在、平成30年3月開通に向けて明り区間の工事が進行中である。

今回、洪積砂礫地盤においてもG Pサンプラーの試験値を用いた液状化判定では、砂～礫質土層は全層でFL < 1.0となり、PL値は20以上であることから、「液状化の危険性が極めて高い」と判定され、恒久グラウトによる液状化対策を実施した。また、改良範囲については明確な基準がなく埋立地の液状化対策ハンドブックを用い、液状化による側圧増加の影響を受けない範囲まで改良を行った。

液状化対策としての地盤改良範囲の設計は、学術的な観点から今後さらに研究すべき課題であると考えている。しかし、来たるべき大地震に備えて液状化対策を施すことは急務であり、本稿が設計実務の対策として参考になれば幸いである。

最後に、本稿の執筆ならびに本工事の計画、設計にあたりご指導、ご協力いただいた関係各位に深く感謝の意を表し、本稿の結びとする。

## 参考文献（または引用文献）

- 1) 近畿日本鉄道株式会社: 技術基準（鉄道土木施設）、平成16年9月
- 2) (財) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計基準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物、平成12年6月
- 3) (財) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計基準・同解説 耐震設計、平成11年10月
- 4) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I～IV、平成14年3月
- 5) 地盤工学会: 液状化対策工法、平成16年7月
- 6) 理工図書: 恒久グラウト・本設注入工法、平成20年6月