

2.2.3 大規模地震時等の地盤液状化対策の検討

(1) 地盤液状化対策の検討

東北地方太平洋沖地震では、東北地方だけでなく首都圏においても地盤液状化が多発し、住宅・家屋のみならず、道路を始めとした社会インフラにも被害が発生した。一方、沖縄県では、沖縄本島南部断層系の地震等が想定され、下図のとおり、液状化危険度が高い地域が沖縄本島東西の海岸沿いに見られる。

一般的に、地盤液状化は、締まりの緩い砂質層と地下水位が高い場所で生じると言われており、主に海岸埋立地や緩扇状地などの砂質層で構成された地下水位の高い地盤条件で発生する。

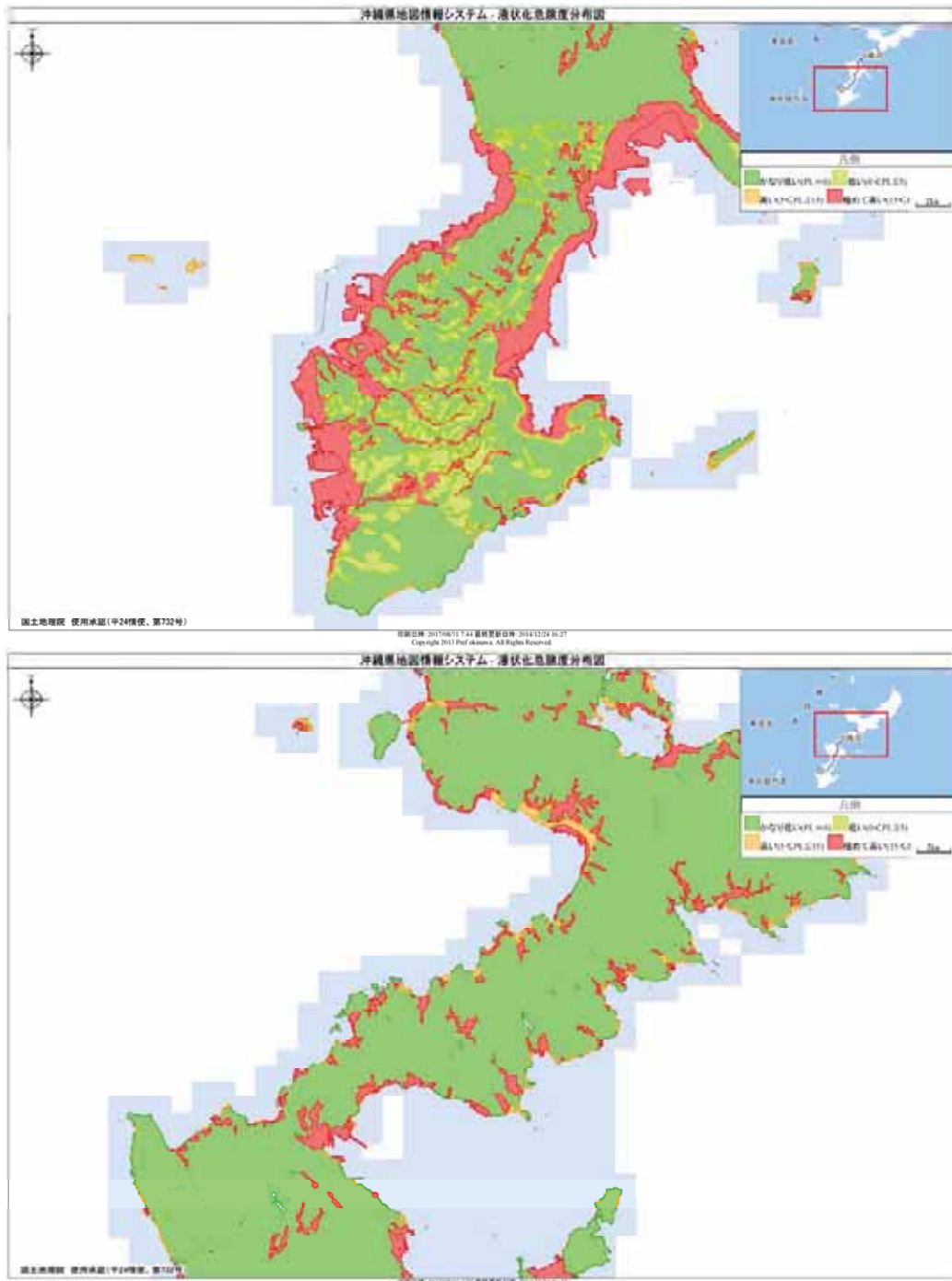


図 沖縄本島南部断層系の地震による液状化危険度（ P_L 値）分布

出典：沖縄県地図情報システム
<<http://gis.pref.okinawa.jp/pref-okinawa/top/select.asp?dtp=94>>

1) 地盤液状化の判定手法

地盤液状化とは、「土中の水(間隙水)の圧力が上昇して砂粒子同士の接触点力(有効応力)が減少する結果、砂質土が強度を失うこと」と一般的に言われている。

間隙水の圧力が上昇する原因には、地震による水平方向の力が繰り返し作用することのほか、地下水位の変動や波浪等によることがある。(次頁イメージ図参照)

一般に、鉄道構造物等で考慮する地盤液状化は、地震によるものを指し、鉄道構造物等の設計に当たっては、下表に示す地盤液状化の判定手法を用いて、その設計に反映を行う。

表 地盤液状化の判定手法

指針・基準名	鉄道構造物等設計標準・同解説 ー耐震設計ー 鉄道総合技術研究所 2012										
液状化判定の対象とすべき土層	<ul style="list-style-type: none"> 液状化の判定は次のすべてに該当する飽和砂質土層とする。 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 D_{50} が 10 mm 以下で、かつ 10% 粒径 D_{10} が 1 mm 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 										
液状化の判定方法	<p>【液状化抵抗率による場合】</p> <ul style="list-style-type: none"> 液状化抵抗率 F_L を求め、この値が 1.0 以下の土層については液状化するものとする。 $F_L = \frac{R}{L}$ <p>ここに、R：液状化強度比、L：地震時最大せん断応力比</p> <ul style="list-style-type: none"> 液状化の範囲、程度は次式の液状化指数 (P_L) を目安として総合的に判断する。P_L が 5 以上となるれば液状化する可能性が高い。 $P_L = \int_0^H (1 - F_L) w dz$ <p>ここに、P_L：液状化指数、w：液状化抵抗率の深さ方向の重み関数 ($=10-0.5z$) z：地表面からの深さ(m)、H：液状化判定を行う表層地盤の厚さ ($H \leq 20m$)</p> <ul style="list-style-type: none"> F_L 値は次の 2 つの地震動レベルで計算を行う。 ① L1 地震動 ② L2 地震動 <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th colspan="2">液状化判定基準</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$15 < P_L$</td> <td>液状化の危険度が極めて高い</td> </tr> <tr> <td>$5 < P_L \leq 15$</td> <td>液状化の危険度が高い</td> </tr> <tr> <td>$0 < P_L \leq 5$</td> <td>液状化の危険度は低い</td> </tr> <tr> <td>$P_L = 0$</td> <td>液状化の危険度はかなり低い</td> </tr> </tbody> </table> <p>【地盤の地震応答解析による場合】</p> <ul style="list-style-type: none"> 「液状化の可能性のある地盤の動的解析法」において時刻歴有効応力解析を実施した結果より、液状化発生の有無を判定してもよい。この場合、過剰間隙水圧比が 0.95 以上であれば完全液状化状態とみなしてよい。 	液状化判定基準		$15 < P_L$	液状化の危険度が極めて高い	$5 < P_L \leq 15$	液状化の危険度が高い	$0 < P_L \leq 5$	液状化の危険度は低い	$P_L = 0$	液状化の危険度はかなり低い
液状化判定基準											
$15 < P_L$	液状化の危険度が極めて高い										
$5 < P_L \leq 15$	液状化の危険度が高い										
$0 < P_L \leq 5$	液状化の危険度は低い										
$P_L = 0$	液状化の危険度はかなり低い										

構造物への影響の
評価

【土質定数の低減】

- ・ 液状化すると判定された土層は、液状化抵抗率に応じて土質定数を低減させるものとする。この場合の土質定数とは、地盤の変形係数、地盤反力係数、地盤反力度の上限値および杭の周面支持力度である。
- ・ 低減係数は下図のとおりである。ただし、液状化指数 $P_L < 5$ の地盤では、液状化抵抗率 F_L が 1 以下となる土層が存在しても土質定数の低減は不要である。

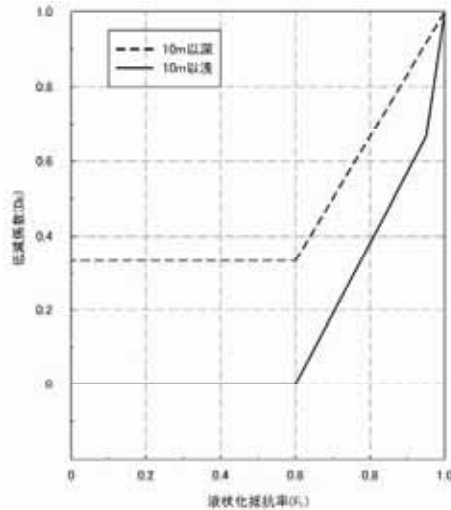


図 液状化による土質定数の低減

【液状化の可能性ある地盤における応答値の算定】

- ① 橋梁・高架橋・抗土圧構造物
 - ・ 液状化の可能性のある地盤における橋梁、高架橋および抗土圧構造物の応答値は、地盤の剛性低下および側方流動の影響を考慮して算定する。
- ② 盛土
 - ・ 液状化の可能性のある地盤における盛土の応答値は、盛土の剛性および地盤の液状化程度を考慮して算定するものとする。
- ③ 開削トンネル
 - ・ 液状化の可能性のある地盤における開削トンネルの応答値は、過剰間隙水圧の発生（揚圧力）、側方土圧の増加、液状化後の地盤沈下、側方流動を考慮して算定する。

注) 基礎地盤コンサルタンツ株式会社 液状化判定手法ダウンロード (鉄道構造物等設計標・同解説—耐震設計)
<<https://www.kiso.co.jp/activities/liquefaction/>>より作成

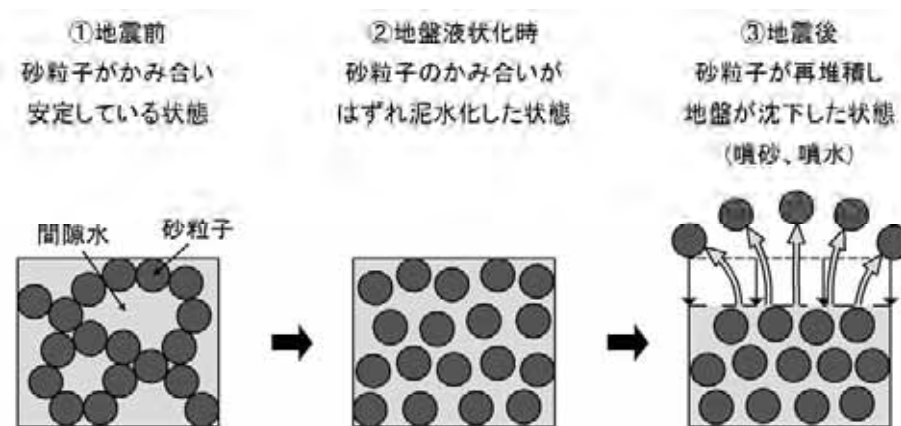


図 地盤液状化現象のメカニズム

2) 液状化被害と液状化指数

液状化被害と液状化指数 (P_L 値) の関係について、『鉄道沿線における液状化の発生と構造物被害に関する考察 (土木学会論文集)』では、下記の通り報告されている。

過去の地震における事例から、 P_L 値が高いほど地盤液状化が発生する可能性が高く、 P_L 値が低いほど地盤液状化が発生する可能性が低くなる点が実際のデータからも確認されている一方で、 P_L 値が高い値であっても、地盤液状化が発生していない箇所が存在していることや、地形・地質的特徴によっても液状化の発生頻度や被害規模は異なることも確認されている。

さらに、実際に地盤液状化が発生していても、構造物に被害が生じていないという事象も見られ、特に、杭やケーソン基礎等を有する構造物は、地盤液状化の発生が直ちに構造物の被害につながらない事例も多い。

例えば、千葉県浦安市では、東北地方太平洋沖地震において大規模な地盤液状化が発生したが、液状化の影響を考慮せずに設計した高架橋 (JR京葉線) が比較的軽い被害 (列車運行に支障なし) で済んだという事例が確認されている。(次頁写真参照)

各種指針や基準等に規定される液状化発生の有無やその程度を予測する手法は、過去の地震被害事例からも安全側の評価であることが確認されている。

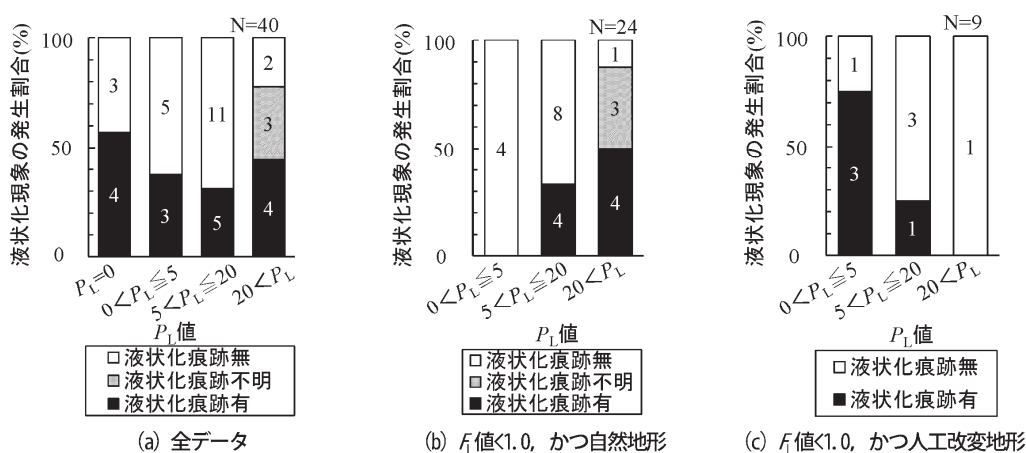


図 P_L 値と液状化発生状況

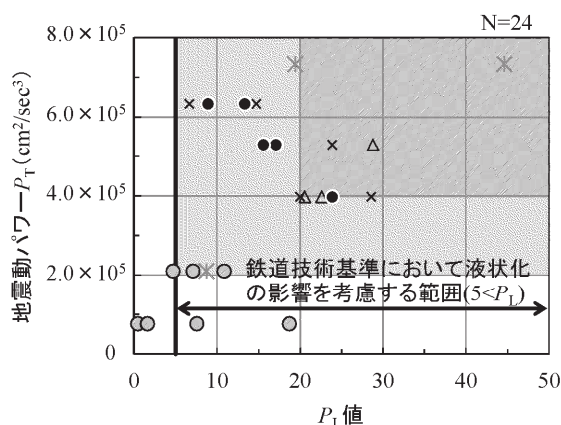


図 P_L 値と地震動パワー

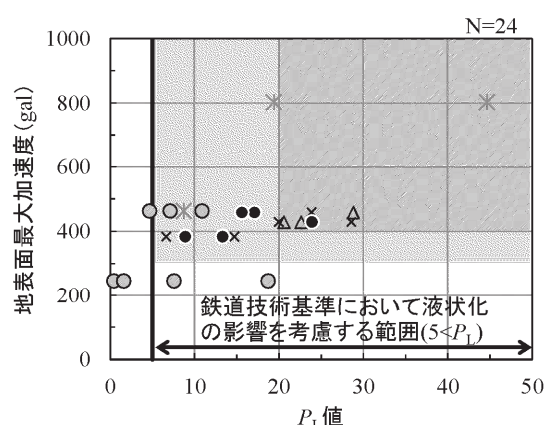


図 P_L 値と地表面最大加速度

- × 液状化痕跡有 (新潟県中越地震)
- 液状化痕跡無 (新潟県中越地震)
- × 液状化痕跡有 (東北地方太平洋沖地震)
- △ 液状化痕跡不明 (東北地方太平洋沖地震)
- 液状化痕跡無 (東北地方太平洋沖地震)

出典：鉄道沿線における液状化の発生と構造物被害に関する考察 (土木学会論文集)



写真 JR京葉線の橋脚の基礎部分（フーチング）約20cm 抜け上がりの状況（千葉県浦安市）

出典：千葉県資料（浦安地区の液状化－流動化被害の詳細調査結果）
<<https://www.pref.chiba.lg.jp/wit/chishitsu/ekijoukahoukoku/documents/4d.pdf>>



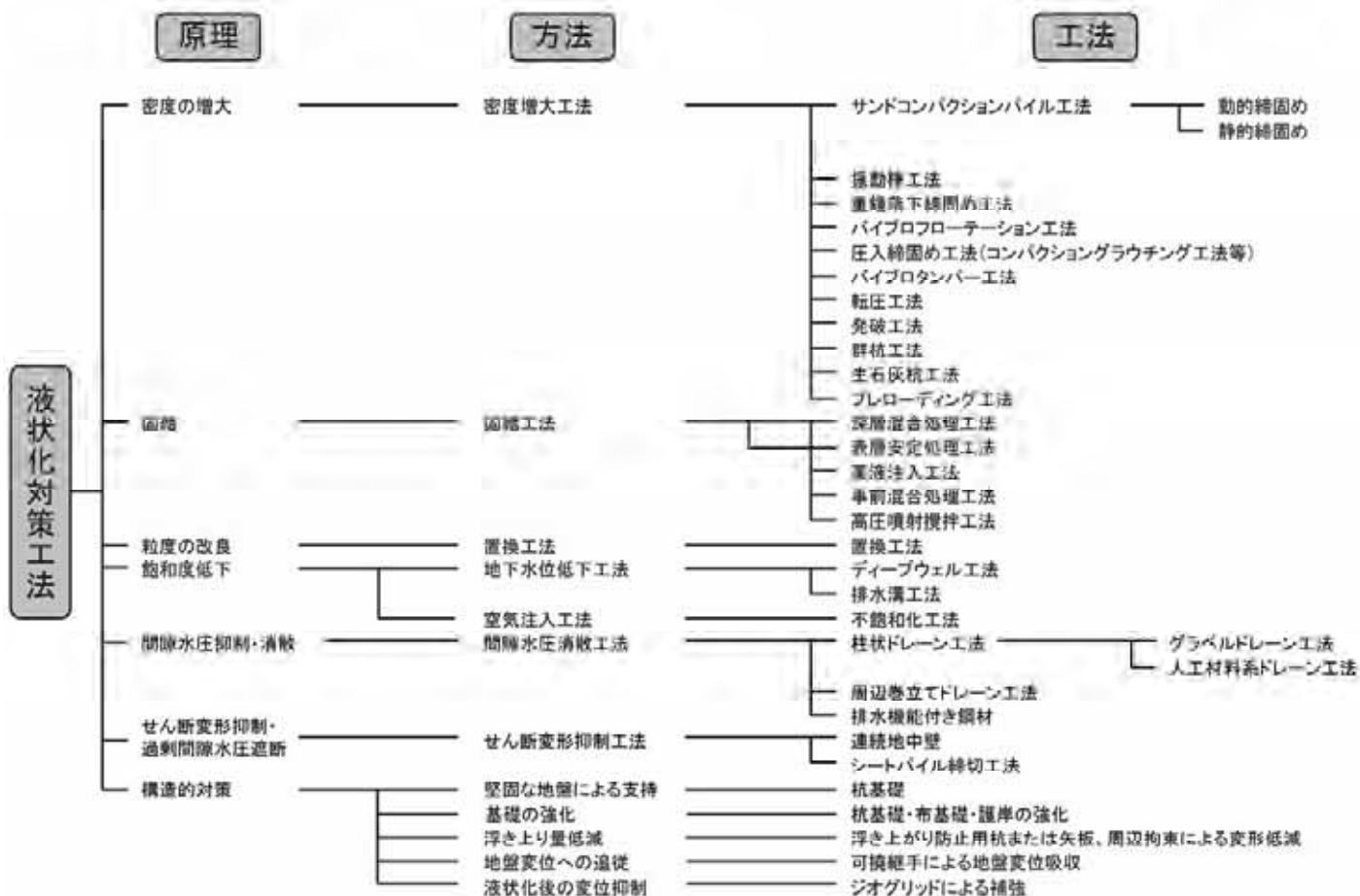
写真 仙台市地下鉄南北線・長町1丁目付近上部の路面沈下の状況

出典：東北地方太平洋沖地震災害調査報告会（2011.4.11）「宮城県中央部の被害」
<<https://www.jiban.or.jp/file/file/4-11kiku.pdf>>

3) 地盤液状化対策工法

地盤液状化対策工法について、原理・方法、工法より体系的に整理すると下図のとおりである。

原理としては、密度の増大や固結、粒度の改良、飽和度低下、間隙水圧抑制・消散、せん断変形抑制・過剰間隙水圧遮断、構造的対策に分類できる。



注) 平成 23 年度 浦安市液状化対策技術検討調査 平成 24 年 3 月 (浦安市液状化対策技術検討調査委員会)

< http://www.city.urayasu.lg.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/002/934/lasthoukoku02-03.pdf > より作成

図 地盤液状化対策工法の体系的分類

表 地盤液状化対策工法の概説

工 法	概 説
サンドコンパクションパイル工法 (動的締固め)	地中に締固められた砂杭を形成、粘性土地盤にも適用可
サンドコンパクションパイル工法 (静的締固め)	振動・騒音を大幅に低減し、市街地での砂杭造成が可能
振動棒工法	ロッドの振動圧入による直接的な締固め、良質な補給土不要
重錘落下締固め工法	重錘の自由落下による衝撃力で締固め、浅層改良向き
バイプロフローテーション工法	先端にバグリータを内蔵した鋼管で締固め、振動・騒音比較的小
圧入締固め工法 (コンパクショングラウチング工法等)	球根状の固結体を連続的に造成し、周辺地盤を圧縮強化する
バイプロタンパー工法	強力な振動タンパによる締固め、表層改良向き
転圧工法	20～30cmのまき出し層ごとに転圧、盛土地盤向き
発破工法	ダイナイト等を爆発、その衝撃力で密度増。振動・騒音非常に大
群杭工法	杭打設による締固め効果とせん断変形抑制効果、沈下抑制も
生石灰杭工法	生石灰の吸水脱水+硬化+膨張による、粉塵と発熱に注意
プレローディング工法	盛土等により上載圧を作用させ、地盤を過圧密状態にして強化
深層混合処理工法	固化材と原地盤を攪拌混合、改良部は堅固だが施工費は高い
表層安定処理工法	固化材と表層地盤を攪拌混合、囲込・キャッピング効果を創出
薬液注入工法	ボーリング孔を利用しグラウト等を注入、既設近傍での機動性高い
事前混合処理工法	埋立土に固化材を事前添加して運搬・搬入、新規埋立てのみ可
高圧噴射攪拌工法	ウォータージェットで地盤切削と固化材の混合攪拌を行い固結体造成
置換工法	液状化しにくい材料(砕石等)で置換、もしくは固化造粒等の改質
ディープウェル工法	止水壁で囲み、ディープウェル等で地下水位低下、沈下に留意
排水溝工法	トレンチ暗渠による地下水の自然流下、補助工法の必要性大
不飽和化工法	マイクロバブル等の消泡しにくいエアを地盤に注入して不飽和化
柱状ドレーン工法 (グラベルドレーン工法)	砕石パイルを造成して水圧の上昇抑制、他工法との併用多い
柱状ドレーン工法 (人工材料系ドレーン工法)	人工ドレーン材による排水、ドレーンの目詰り防止がカギ
周辺巻立てドレーン工法	地中構造物の周辺埋戻しに礫・砕石を利用、浮き上がり防止策
排水機能付き鋼材	杭・矢板側面に排水部材を設けて水圧上昇を抑制、変形抑制も
連続地中壁	剛性の高い連続壁を構築してせん断変形を抑制、确实だが高い
シートパイル締切工法	地盤の流動を抑制して変状を防止。既設物周辺の改良に適用
杭基礎	液状化しても構造物が安定するよう杭の本数や断面を増強
杭基礎・布基礎・護岸の強化	液状化を前提とした杭・護岸・布基礎等の設計と補強工の実施
浮き上がり防止用杭または矢板、周辺拘束による変形低減	堅固な地盤に支持された杭・矢板等で引き上げ抵抗力を付与
可撓継手による地盤変位吸収	液状化による地盤変位に追従させる埋設管の保護方法
ジオグリッドによる補強	ジオグリッドの層状敷設等による変位抑制

注)平成23年度 浦安市液状化対策技術検討調査 平成24年3月(浦安市液状化対策技術検討調査委員会)

<http://www.city.urayasu.lg.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/002/934/lasthoukoku02-03.pdf>より作成

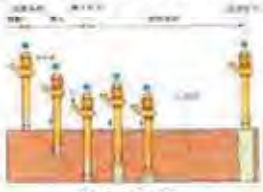

・ 主な地盤液状化対策工法

A. サンドコンパクションパイル工法

軟弱地盤中に振動または衝撃により砂を圧入し、直径が大きく圧縮された砂杭を造成して地盤の安定を図る工法である。

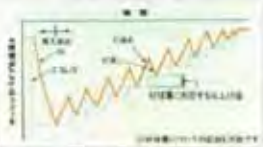
○施工機械
通常は、低周波バイプロハンマ(V-75、V-120)、クローラクレーン(35～45トン吊り)をベースに施工を行うが、長尺用または岩砕地盤のような貫入抵抗が大きい場合には、大型バイプロハンマ(V-180)、ウォータージェットおよびジェットカッターなどの各種貫入補助装置の搭載も可能である。

○施工フロー
ケーシングの貫入、引き抜き、打ち戻しを繰り返す「打ち戻し施工」が特徴である。

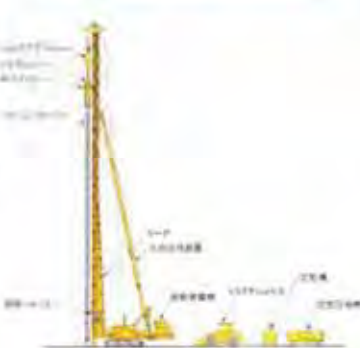


施工順序

- ①ケーシングを所定の位置に据える
- ②バイプロハンマを起動しケーシングパイプを地中に貫入する
- ③所定深度に達すると、ケーシングパイプ内に一定量の砂を投入する
- ④ケーシングパイプを規定の高さに引き上げながら、ケーシングパイプ内の砂を圧縮空気を発生しながら、排出する
- ⑤ケーシングパイプを打ち戻し、排出した砂柱を締める
- ⑥④～⑤を繰り返し、所定の深さまで砂杭を造成する



施工記録例



出典：平成 23 年度 浦安市液状化対策技術検討調査 平成 24 年 3 月（浦安市液状化対策技術検討調査委員会）
<http://www.city.urayasu.lg.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/002/934/lasthoukoku02-03.pdf>

B. 生石灰杭工法

生石灰を主成分とする粉粒状の改良材を軟弱地盤中に円柱状に圧入造成し、生石灰の吸水・膨張作用を利用して地盤の含水比低下・圧密（密度増大）効果を期待するとともに、水硬性の生石灰と圧密強化された中間地盤（原地盤）とで複合地盤を形成し、地盤全体を改良する工法である。なお、一般には軟弱粘性土地盤に対する圧密・排水工法の中の化学的脱水工法として分類されることが多い。

C. 深層混合処理工法

地表面下深い層まで存在する軟弱地盤を原位置で直接固化材と混合する工法であり、改良深度が概ね 10m を超える工法を対象とされる。

D. 薬液注入工法

薬液を地盤に注入して止水性または強度を増大させることを目的とする工法で、多重管注入工法と浸透固化工法がある。

最新の地盤液状化対策工法

鉄道構造物の中で液状化の影響を受けやすい構造は盛土構造や地平構造であり、路盤下の地盤が液状化した場合には、路盤構造自体が変形するため、線路（軌道）への影響が懸念される。

従来採用されている地盤液状化対策工法は、液状化地盤を完全に改良する高改良率を前提とした高コストの工法（改良率30～40%、改良域1m²当たり4～5万円）であるため、広範囲の領域を対象として液状化対策を実施することが困難であるのが現状である。また、大型機械を必要とする工法であるため、大都市圏の狭隘な箇所への適用には不向きであった。

このため、小型の施工機械を用いて効率的かつ安価に液状化対策を実施出来る工法を開発し、早急に大都市圏の広範囲の液状化対策を実施することが望まれた。

平成24年度から鉄道総合技術研究所が中心となり、小型の施工機械を用いて動的に薬液注入を行うことで地盤内に脈状の改良体を作成し、周辺地盤を密実化させることにより、低改良率（10%程度）で液状化被害の軽減が可能な脈状地盤改良工法について基礎的な検討が行われてきた。

検討の結果、砂質土を中心とする液状化地盤に脈状改良体を作成し、密実化が可能であること、未改良地盤と比べて液状化抵抗が十分に増加することを確認し、従来工法の2割程度のコスト（改良率10%で改良域1m²当たり1万円弱）で液状化対策の実施が可能となった。

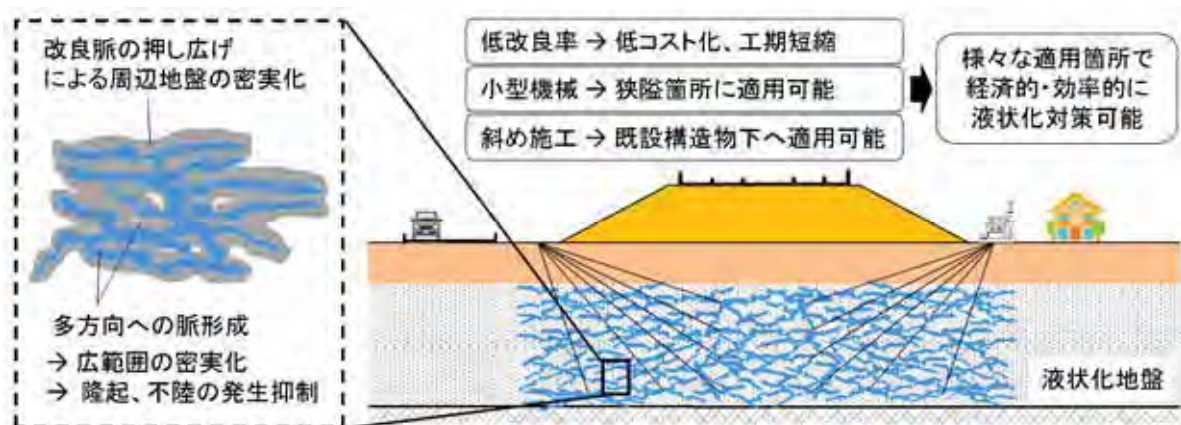
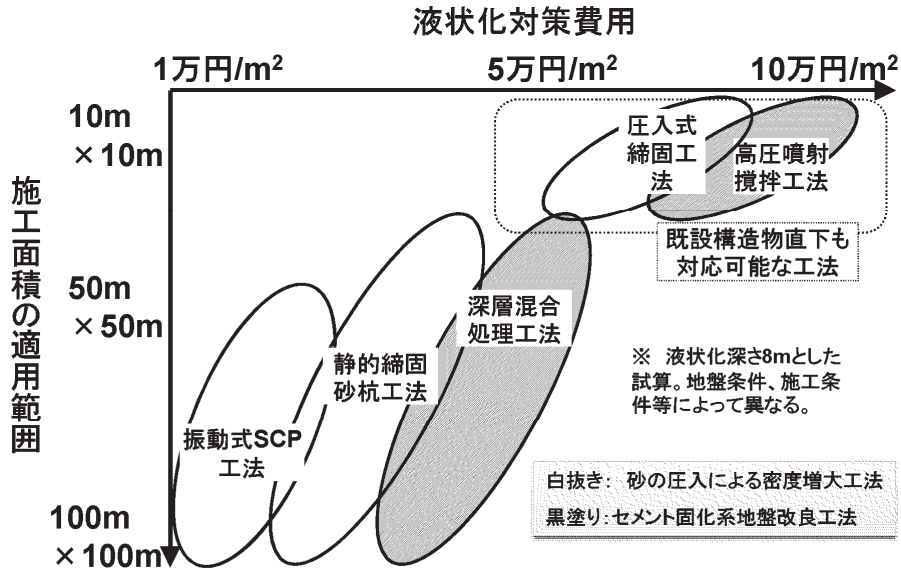


図 狭隘な既設鉄道構造物下の脈状地盤改良のイメージ

出典：鉄道施設の液状化被害の軽減に向けた地盤改良工法の開発および実用化 平成29年3月 鉄道総合技術研究所
<<http://www.mlit.go.jp/common/001194139.pdf>>

・ 地盤液状化対策費用

地盤液状化対策工法において、対策費用が施工面積によって変わってくるため、代表的な工法に対して、液状化対策費用と施工面積の適用範囲を整理したところ、下図に示すように、各工法ともに施工面積が広くなるに従い、対策費用が安価になることが分かった。



出典：JGS関東支部・「造成宅地の耐震対策検討委員会資料」を加筆・修正

図 地盤液状化対策費用と施工面積の適用範囲

出典：平成 23 年度 浦安市液状化対策技術検討調査 平成 24 年 3 月（浦安市液状化対策技術検討調査委員会）
 <http://www.city.urayasu.lg.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/002/934/lasthoukoku02-03.pdf>

(2) 地盤液状化対策工の検討

1) 地盤液状化の影響を受ける範囲

沖縄本島南東沖地震3連動液状化の場合を想定し、鉄道及びトラムトレインの検討ルートを重ね合わせ、その影響範囲について整理を行う。次頁以降にその重ね合わせ図を示す。

地盤液状化の可能性がある区間は、鉄道、トラムトレインともに全体の3割程度となる。

表 地盤液状化 P_L 値区分ごとの路線延長

沖縄本島南東沖地震3連動 液状化 P_L 値	沖縄本島南東沖地震3連動 液状化 分類	鉄道		トラムトレイン	
		距離 (km)	割合	距離 (km)	割合
P_L is NULL	NULL	0.05	0.1%	0.00	0.0%
$P_L=0$	かなり低い($P_L=0$)	55.32	69.5%	57.06	71.1%
$0 < P_L \leq 5$	低い($0 < P_L \leq 5$)	3.29	4.1%	1.53	1.9%
$5 < P_L \leq 15$	高い($5 < P_L \leq 15$)	1.16	1.5%	1.16	1.4%
$15 < P_L$	極めて高い($15 < P_L$)	19.75	24.8%	20.52	25.6%
	合計	79.58	100.0%	80.27	100.0%
	可能性がある ($0 < P_L$)	24.21	30.4%	23.21	28.9%

注) 鉄道・ケース2 (うるま・国道330号・西海岸ルート) + 空港接続線

トラムトレイン・ケース7 (うるま・国道58号・西海岸ルート) + 空港接続線

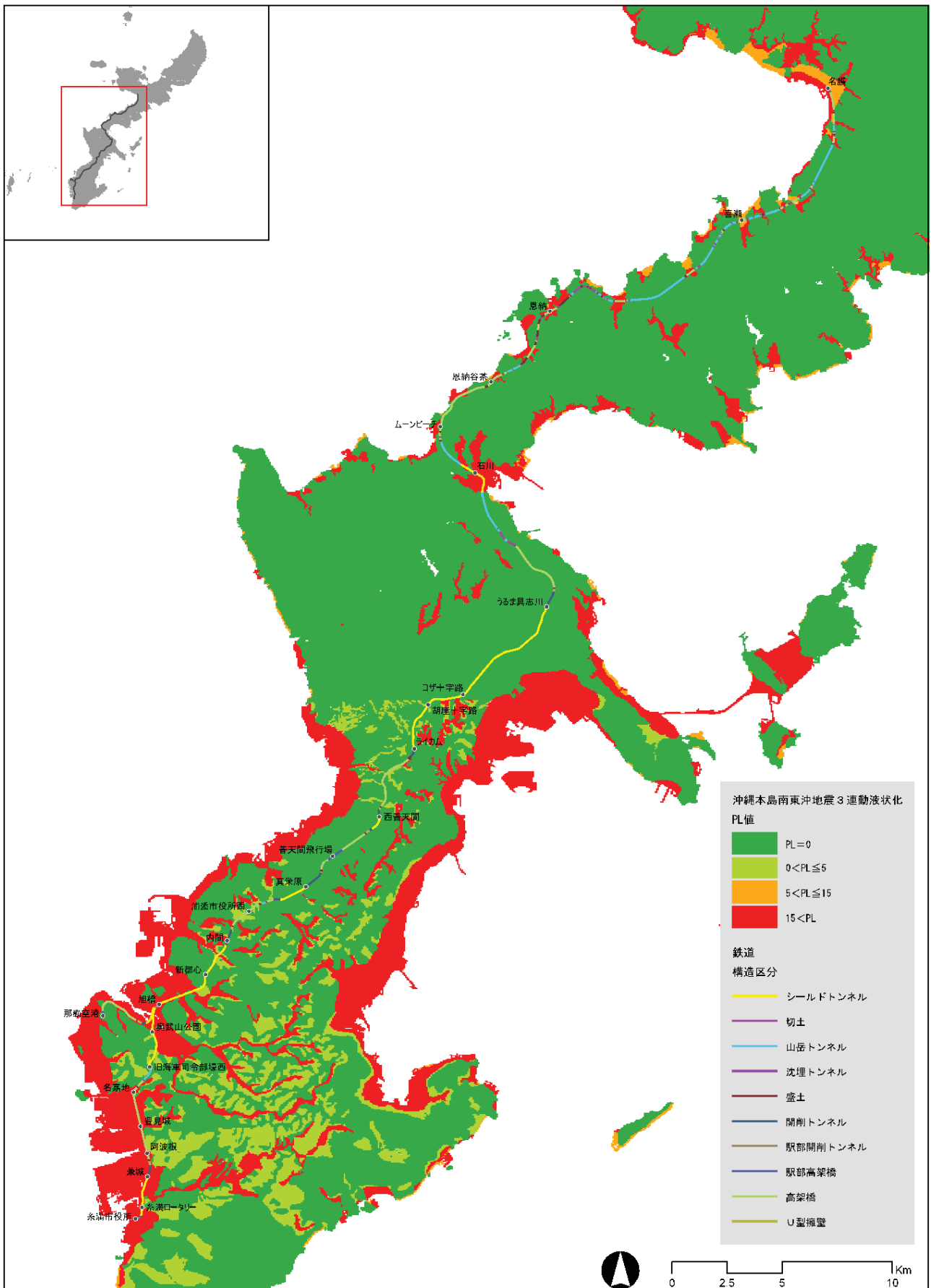


図 検討ルート重ね合わせ図（鉄道）

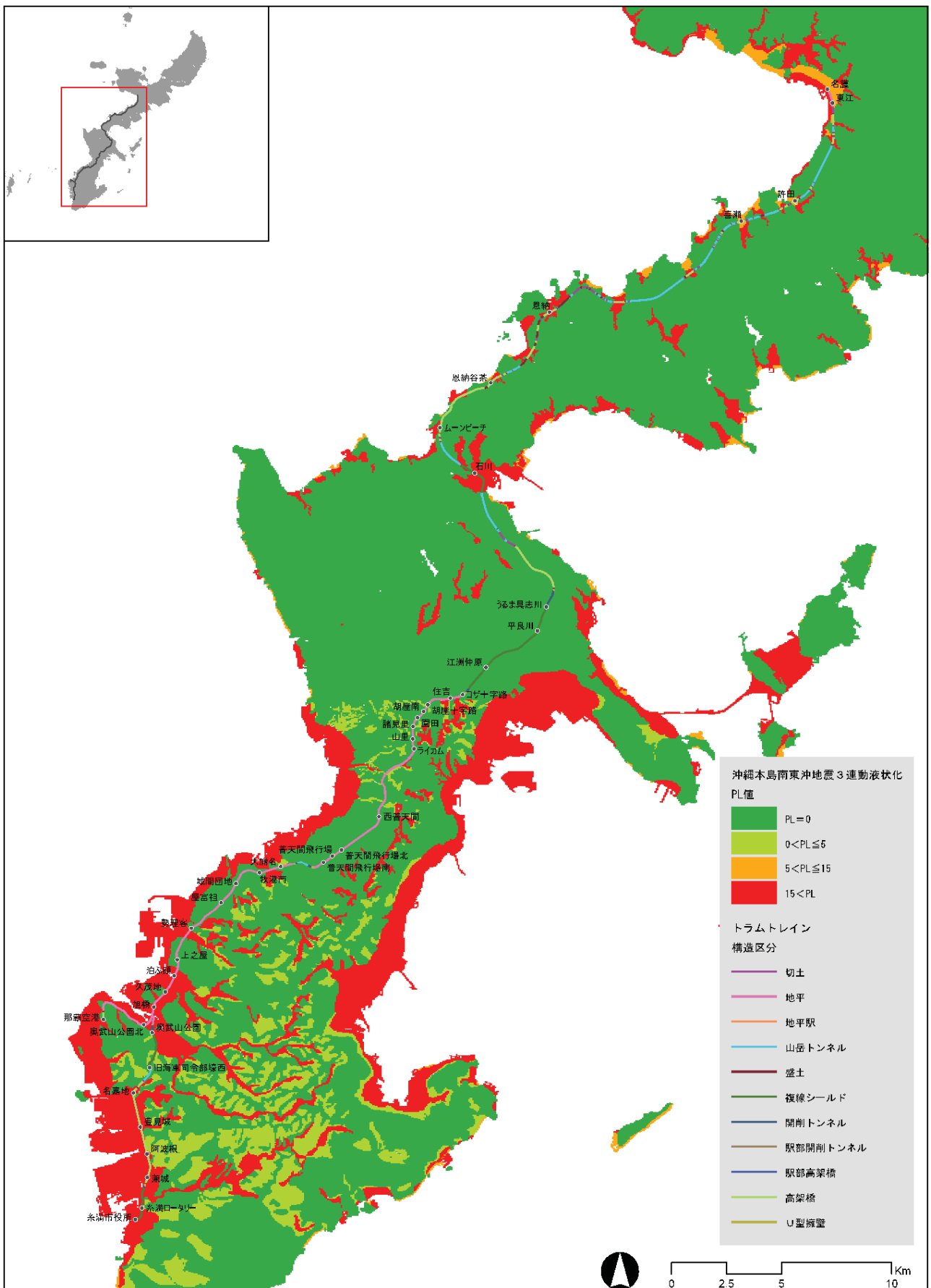


図 検討ルート重ね合わせ図(トラム・トレイン)

地下区間

下図のように構造物が液状化層に構築される場合、地盤液状化対策が必要である。

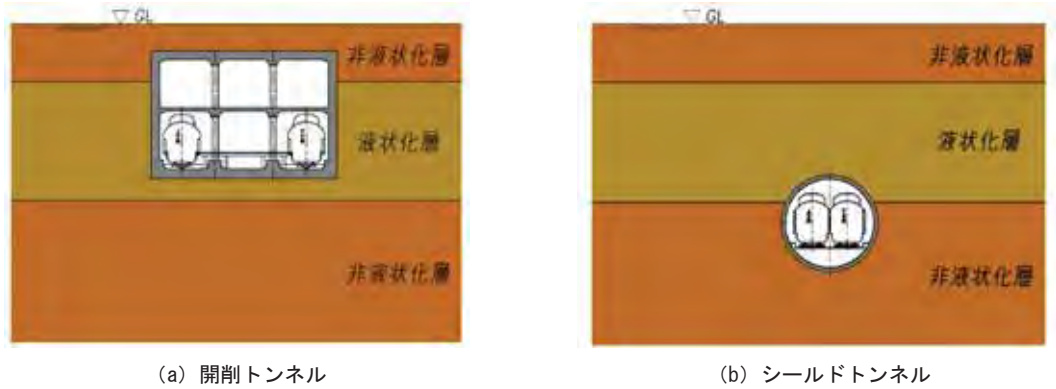


図 地下構造物と液状化層との関係

地盤液状化対策は、以下の考え方に大別される。

- ① 地盤液状化を発生させないようにする。
- ② 鉄軌道の運行を妨げる損傷や変状が発生しないよう、構造物にて対応する。

地盤液状化は地震による地盤のせん断変形にて土中の過剰間隙水圧が上昇することにより発生する。液状化の発生を防ぐためには、「間隙水圧の上昇を防ぐ」若しくは「地盤の改良」が必要である。

下表に地盤液状化を発生させない対策案の例を示す。開削トンネルでは、地中壁による締め切りや薬液注入等による地盤改良が考えられる。また、シールドトンネルの場合、薬液注入による対策が考えられる。

表 地盤液状化を発生させないための対策例


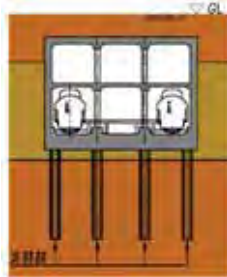
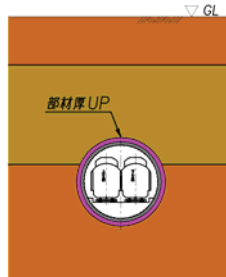
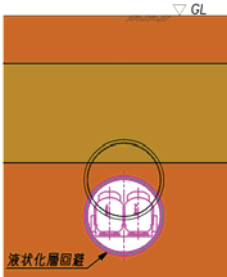
	開削トンネル		シールドトンネル
	地中壁設置	薬液注入	薬液注入
概要図			
対策内容	地中壁による土のせん断変形抑制	薬液注入による液状化層の地盤改良	薬液注入による液状化層の地盤改良



凡例： 液状化層 非液状化層

地盤液状化が発生する場合、揚圧力による浮き上がり、泥水圧および動水圧の作用、地盤沈下等が懸念される。

開削トンネルの場合、部材厚アップや支持杭設置対策が主な対策として考えられる。また、シールドトンネルの場合、部材厚アップや縦断線形変更が主な対策として考えられる。

表 地盤液状化が発生する場合の対策例

	開削トンネル		シールドトンネル	
	部材厚 UP	支持杭設置	部材厚 UP	縦断線形変更
概要図				
液状化の影響	浮き上がり、液状化地盤からの土水圧	浮き上がり、沈下	液状化地盤からの土水圧	浮き上がり、沈下
対策内容	揚圧力に抵抗するための自重増加、泥水圧および動水圧に対する安全性確保	揚圧力に抵抗するための杭設置	泥水圧および動水圧に対する安全性確保	液状化地盤を避ける

凡例：  液状化層  非液状化層

・ 盛土区間

軌道が液状化層を有する地盤上に敷設される場合、地盤液状化対策を検討する必要がある。

盛土区間においては、全面的な対策が必要となるためコストが膨大となる。一方、盛土構造は他の構造物と比較し地震発生後の復旧が容易である。このため、有道床軌道とし地盤液状化対策を実施せずに地盤液状化の発生による沈下を許容する事も選択肢の一つとなる。

盛土構造の地盤液状化対策は以下の考え方に大別される。

- ① 地盤液状化の発生を許容し、推定沈下量を制限内に抑える（無対策）。
- ② 地盤液状化を発生させないようにする。
- ③ 地盤液状化の発生を許容し、鉄軌道の運行を妨げる損傷が発生しないよう、構造物にて対応する。

盛土構造に対する地盤液状化対策としては、一般的に上記②の地盤液状化を発生させない対策が基本となり、下記の対策が用いられている。

表 地盤液状化を発生させないための対策例

液状化対策	固結工法		表層安定工法	
	深層混合処理工法	薬液注入工法	置換工法	表層混合処理工法
概要	改良材と土を地盤中で攪拌混合する工法。改良体に土圧や動水圧が作用した場合の改良体全体の外的安定も確保した改良範囲の設定が必要である。液状化が問題となる地盤であれば、ほとんどの地盤に対して適用可能で、最も適用範囲の広い工法である。	薬液を低圧で浸透注入させ、砂地盤の間隙水を薬液に置換して粘着力とせん断強度の増加を図る工法。薬液の注入管を地盤中に挿入するだけで施工できるので、狭隘な場所や斜め施工により既設構造物の直下の施工も可能である。但し、薬液の浸透範囲の確認方法や周辺環境に及ぼす影響の予測、改良効果の定量的評価方法の確立、耐久性の確認について留意する必要がある。	液状化対策が必要な地盤を、液状化が発生しない材料に置き換える工法。比較的簡単に施工が可能であるが、良質の置換材料が改良体積と同程度必要なため、液状化対象域が比較的浅く、局部的な場合に用いられる。置換した材料には転圧が必要な場合があり、地下水位が高い場合には施工する際に止水が必要である。	液状化の可能性のある地盤をセメント系の材料を用いて安定処理を行う工法。軟弱層が浅い場合（粉体系：2m以下、スラリー系：3.5m以下）にのみ適用可能。現地発生土を有効利用できる。但し、地下水位以深での混合は困難となる。
メリット	振動・騒音が少ない実績も多く、一般的	狭隘な場所での施工が可能	施工が確実	施工機械が小規模発生土が少ない
デメリット	施工機械が大規模	薬液浸透範囲の確認が困難 安定剤による水質の汚濁・汚染	置換により発生した土の処理 地盤の変位に留意する必要有り	液状化層が深い場合は適用困難 地盤の変位に留意する必要有り

液状化層の深度や液状化危険度、施工条件に応じて上記の工法から最適な工法を選定する。

構造的な対応例としては、杭基礎の設置、シートパイル締切り工法、ジオテキスタイルによる補強などが考えられるが、盛土構造に対する対策としてはコストや実績の面で劣る。

・高架区間

高架区間の場合は、基礎形式（支持層の深さ）によって一般的に用いられている対策が異なる。地盤液状化対策は以下の考え方に大別される。

- ① 支持層が浅い位置にある構造物（直接基礎）では、盛土構造と同様に地盤液状化を発生させない対策が基本となる。
- ② 支持層が深い位置にある構造物（杭基礎）では、地盤液状化の発生を許容し、地盤液状化時における慣性力および地盤変位に耐えうる構造とすることが基本となる。

下表に地盤液状化時における杭基礎の検討モデルを示す。地盤液状化時における検討を実施する事により、杭径や杭長などが1ランク～2ランク程度大きくなる可能性がある。

表 地盤液状化時における杭基礎の設計モデル

液状化対策	液状化Ⅰ	液状化Ⅱ
	$5 \leq P_L \leq 20$ の場合	$20 < P_L$ の場合
概要図		
地盤ばね・地盤強度	液状化の程度に応じて低減する	液状化の程度に応じて低減する
地盤変位	地盤の変位による影響を考慮	地盤の変位による影響を考慮しない
付加重量	見込まない	杭が囲む領域の地盤重量を付加重量として考慮

高架区間における地盤液状化対策は、構造物に変状を起こさないことを目的とするため、基礎が設置される範囲に対してのみ実施する。そのため、構造物の安全性や列車の走行性には影響が無いが、基礎が無い範囲（桁の区間や地中梁で囲まれた範囲）においては地盤の対策を実施しないため、周辺地盤は地盤液状化時に沈下する可能性がある。

2) 検討断面

地盤液状化対策費を算出するため、駅及び駅間について下図の断面を代表断面として設定する。

地下区間

駅間部はシールドトンネルで外径 10.0m (複線) とし、駅部は開削トンネルで島式ホームの幅は 9.0m とする。

本検討では、駅間部 1 断面、駅部 1 断面を対象に地盤液状化対策の検討を行い、各断面形状における概算対策費を算出する。

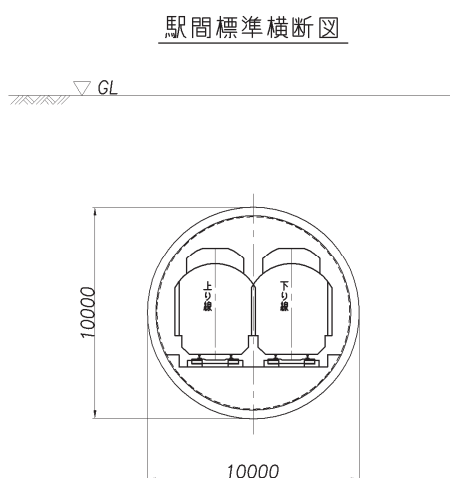
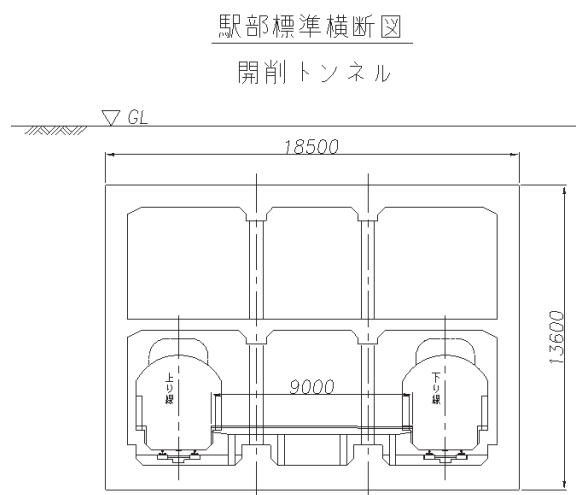


図 標準断面図 (地下区間)

表 駅構造一覧表 (地下区間)

駅名	構造
1 糸満市役所駅	開削トンネル
2 糸満ロータリー駅	〃
3 兼城駅	〃
4 奥武山公園駅	〃
5 旭橋駅	〃
6 石川駅	〃

・ 盛土区間

駅間部は補強盛土構造で施工基面幅 9.5m（複線）、構造物高 6.0m とする。

本検討では、駅間部 1 断面を対象に地盤液状化対策の検討を行い、概算対策費を算出する。

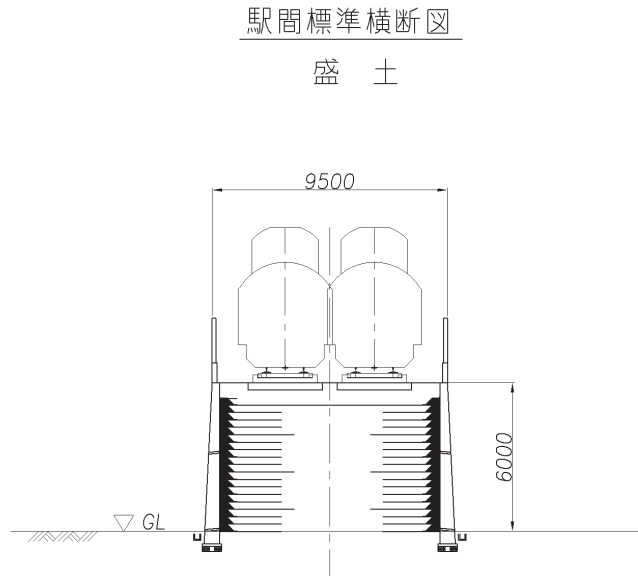


図 標準断面図（盛土区間）

・ 高架区間

駅間部はラーメン高架橋で施工基面幅 9.5m（複線）、構造物高 8.0m とし、基礎形式については杭基礎（杭長 20m）及び直接基礎の 2 タイプを想定する。

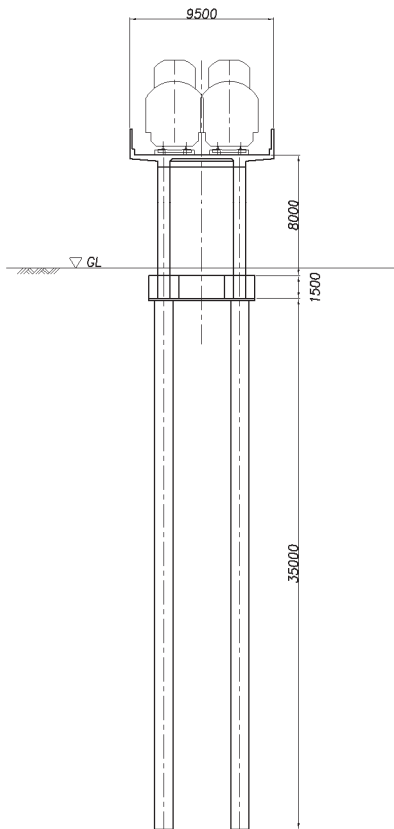
高架駅はラーメン高架橋で総幅員は 21.2m、構造物高 8.0m とし、基礎形式については駅間部と同様に杭基礎（杭長 20m）及び直接基礎の 2 タイプを想定する。

本検討では、駅間部 1 断面、駅部 1 断面を対象に地盤液状化対策の検討を行い、各断面形状における概算対策費を算出する。

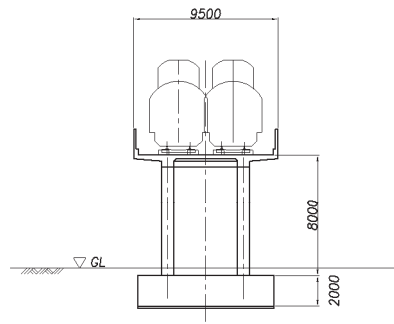
表 駅構造一覧表（高架区間）

	駅 名	構 造	駅配線形式
1	阿波根駅	ラーメン高架橋	相対式 2 面 2 線
2	豊見城駅	〃	〃
3	名嘉地駅	〃	〃
4	ムーンビーチ駅	〃	〃
5	恩納駅	〃	〃
6	喜瀬駅	〃	〃
7	名護駅	〃	島式 1 面 2 線

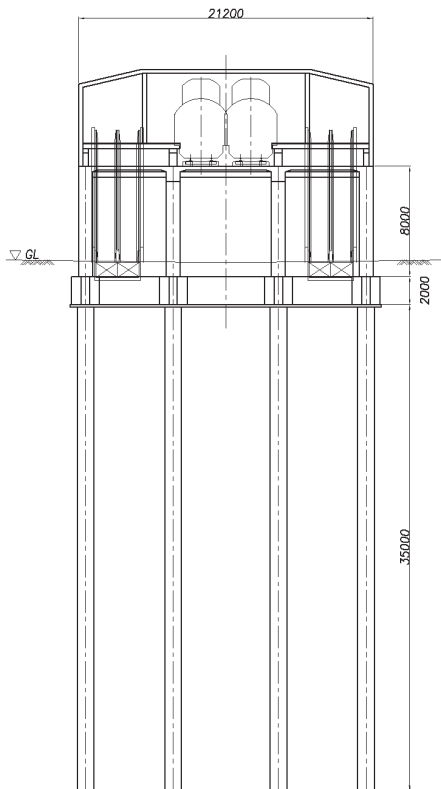
駅周標準横断面図
高架橋（杭基礎）



駅周標準横断面図
高架橋（直接基礎）



駅部標準横断面図
高架橋（杭基礎）



駅部標準横断面図
高架橋（直接基礎）

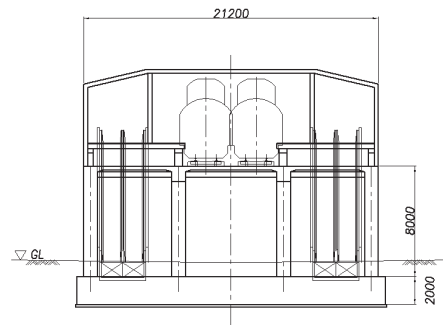


図 標準断面図（高架区間）

3) 地盤条件の設定

地盤条件は、「国土地盤情報検索サイト KuniJiban」（管理：国立研究開発法人土木研究所）より設定する。

・ 地下区間

KuniJibanを閲覧すると、沖縄本島でのボーリングデータが少なく、地盤液状化の影響があると想定される範囲の検討ルート近傍のボーリングデータはより少ない。このため、若干、検討ルートから離れるが、糸満市役所駅付近のボーリングデータで地盤条件を設定する。

採用したボーリング位置及びボーリングデータを下図に示す。



図 ボーリング位置図

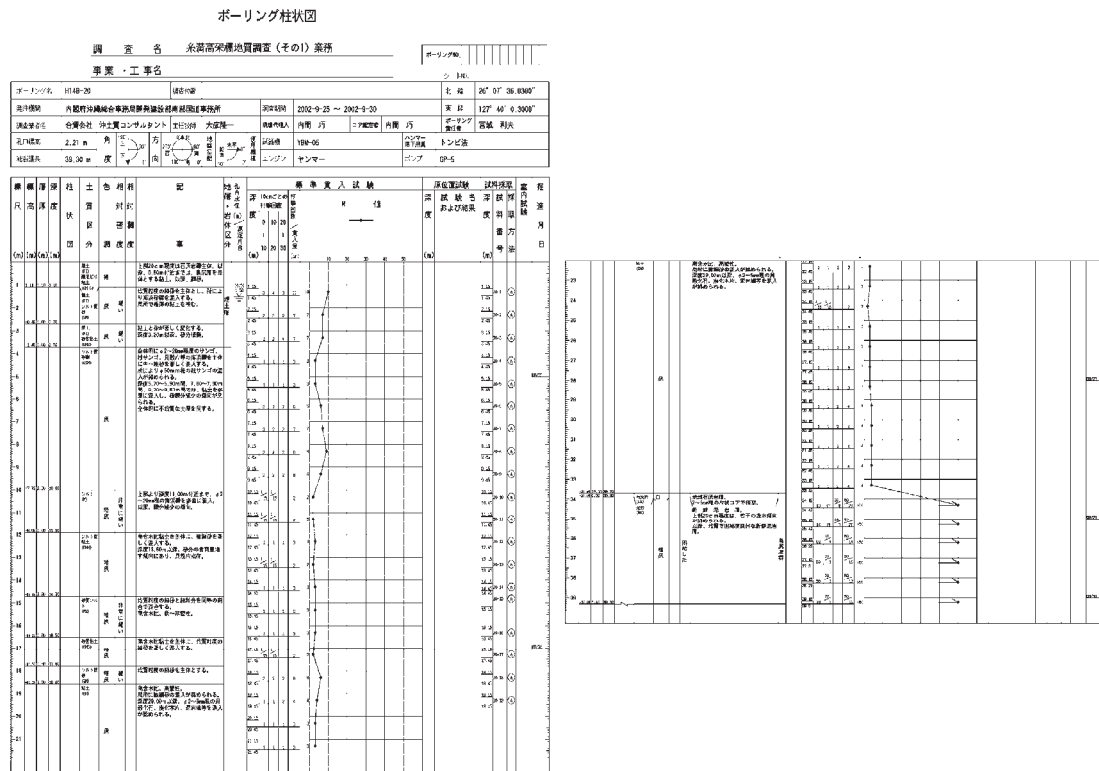


図 採用ボーリング

出典：国土地盤情報検索サイト KuniJiban ホームページ
 <<http://www.kunijiban.pwri.go.jp/jp/GSImap/GSImap.html>>

駅部の検討断面は、採用したボーリングに近い「糸満市役所駅」とし、駅間部のシールドトンネルの検討断面は「糸満市役所駅と糸満ロータリー駅の間」とする。
 下図に駅躯体及びシールドトンネルと想定液状化層との深さ関係を示す。

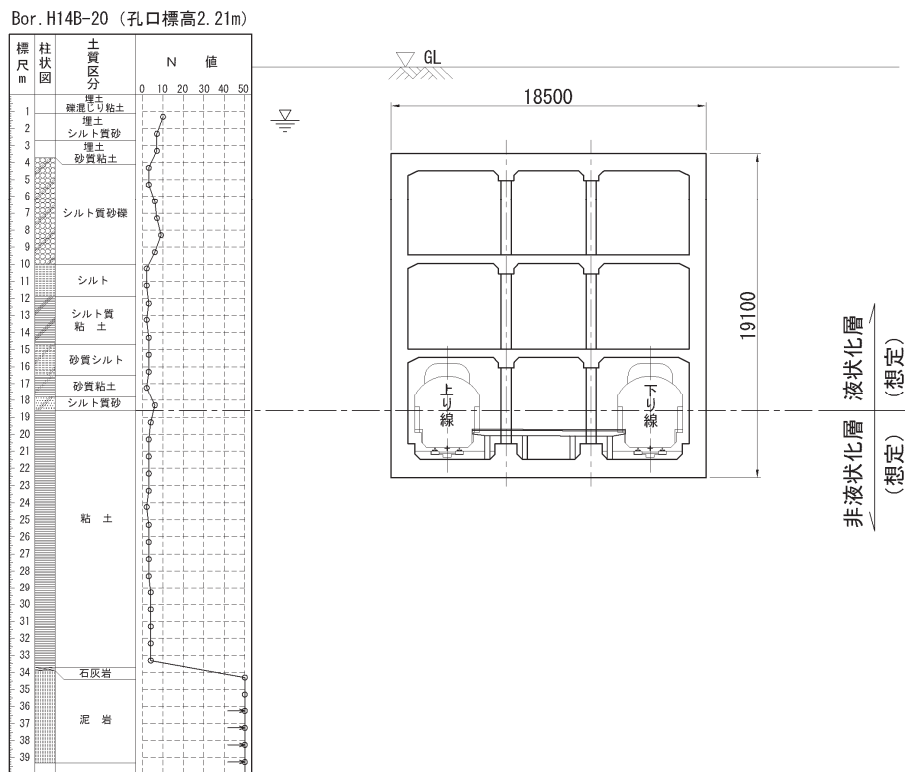


図 駅部検討断面図 (糸満市役所駅)

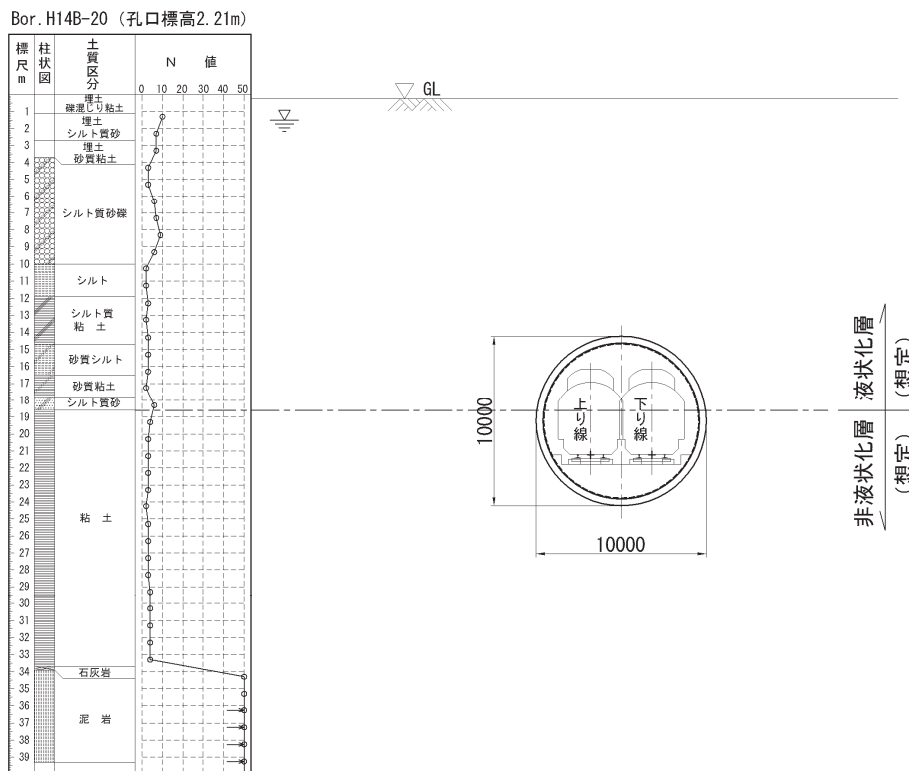


図 駅間シールド検討断面図 (糸満市役所駅～糸満ロータリー駅)

盛土区間

盛土区間の検討断面は、「喜瀬駅と名護駅の間」とする。
採用したボーリング位置及びボーリングデータを下図に示す。



図 ボーリング位置図

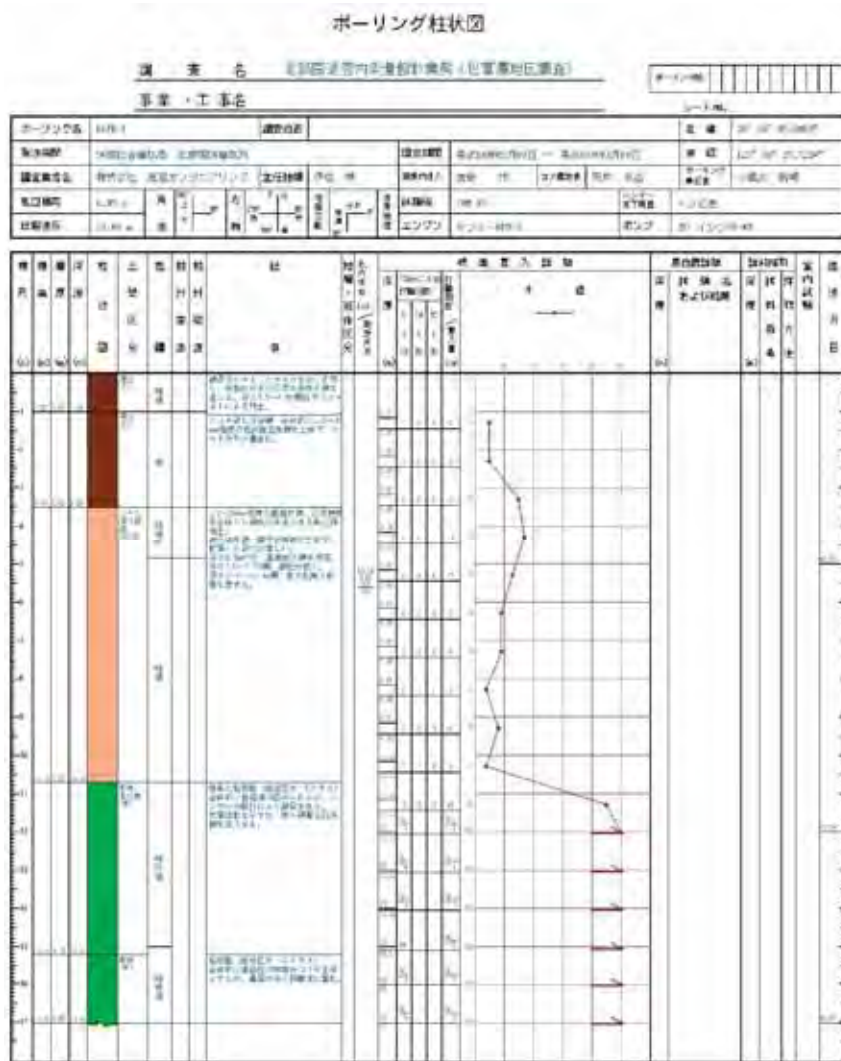


図 採用ボーリング

出典：国土情報検索サイト KuniJiban ホームページ
<<http://www.kunijiban.pwri.go.jp/jp/GSImap/GSImap.html>>

下図に盛土区間における構造物と想定液状化層との深さ関係を示す。

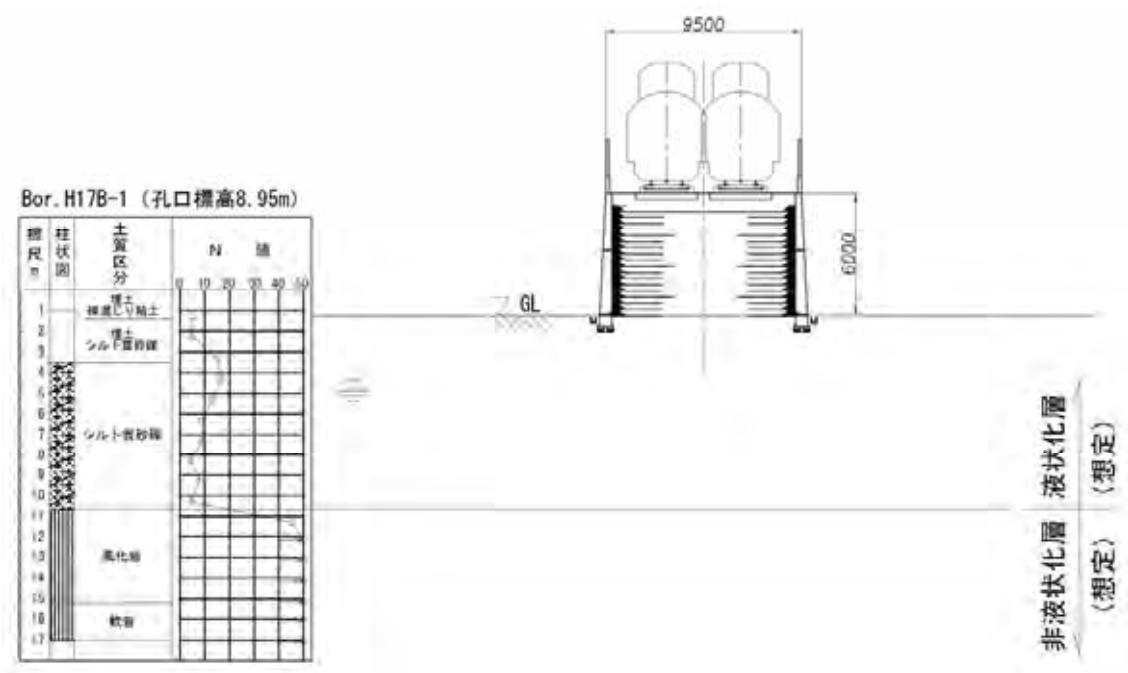


図 駅間盛土検討断面図 (喜瀬駅 ~ 名護駅)

・ 高架区間

高架駅の検討断面は、杭基礎形式の検討断面として「豊見城駅」、直接基礎形式の検討断面として「恩納駅」とする。

駅間の検討断面は、杭基礎形式の検討断面として「阿波根駅と豊見城駅の間」、直接基礎形式の検討断面として「恩納駅と喜瀬駅の間」とする。

採用したボーリング位置及びボーリングデータを下図に示す。

【ラーメン高架橋（杭基礎）】



図 ボーリング位置図

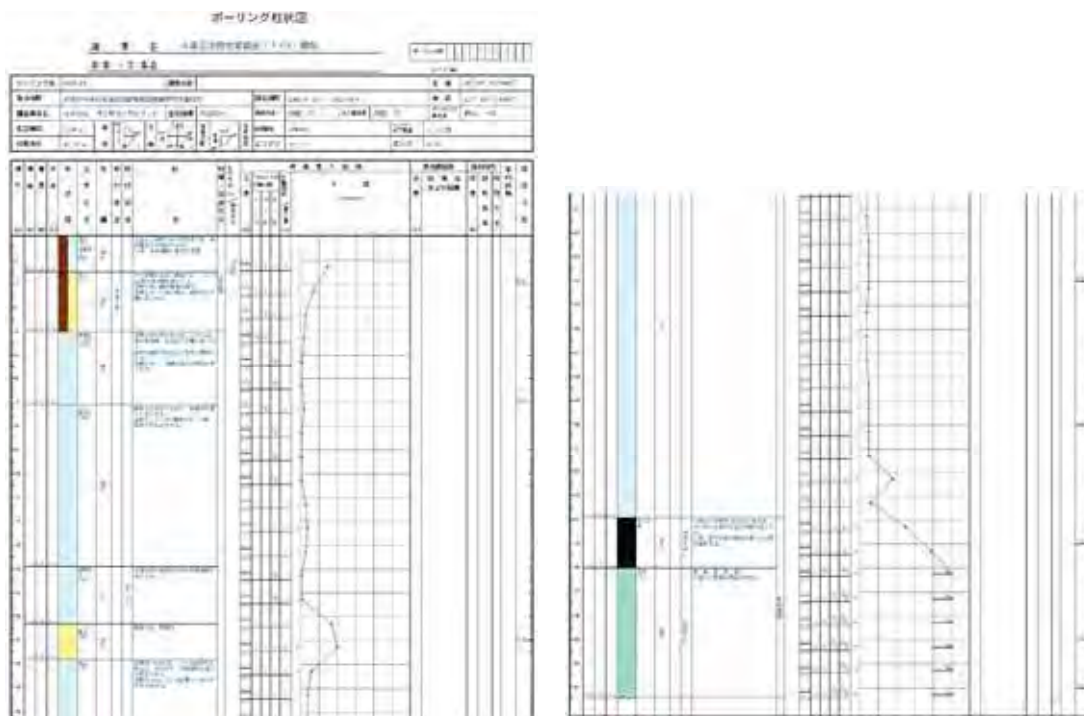


図 採用ボーリング

出典：国土盤情報検索サイト KuniJiban ホームページ
 <<http://www.kunijiban.pwri.go.jp/jp/GSImap/GSImap.html>>

【ラーメン高架橋（直接基礎）】



図 ボーリング位置図

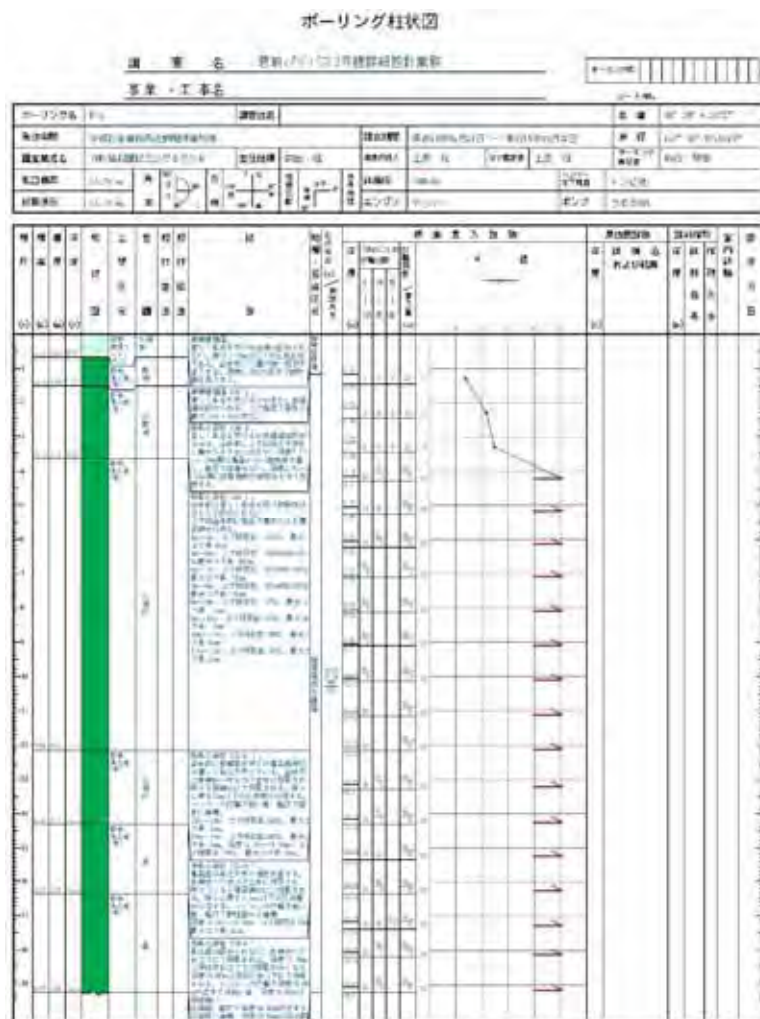


図 採用ボーリング

出典：国土院情報検索サイト KuniJiban ホームページ
 <<http://www.kunijiban.pwri.go.jp/jp/GSImap/GSImap.html>>

下図に高架区間における駅部及び駅間部の構造物と想定液状化層との深さ関係を示す。

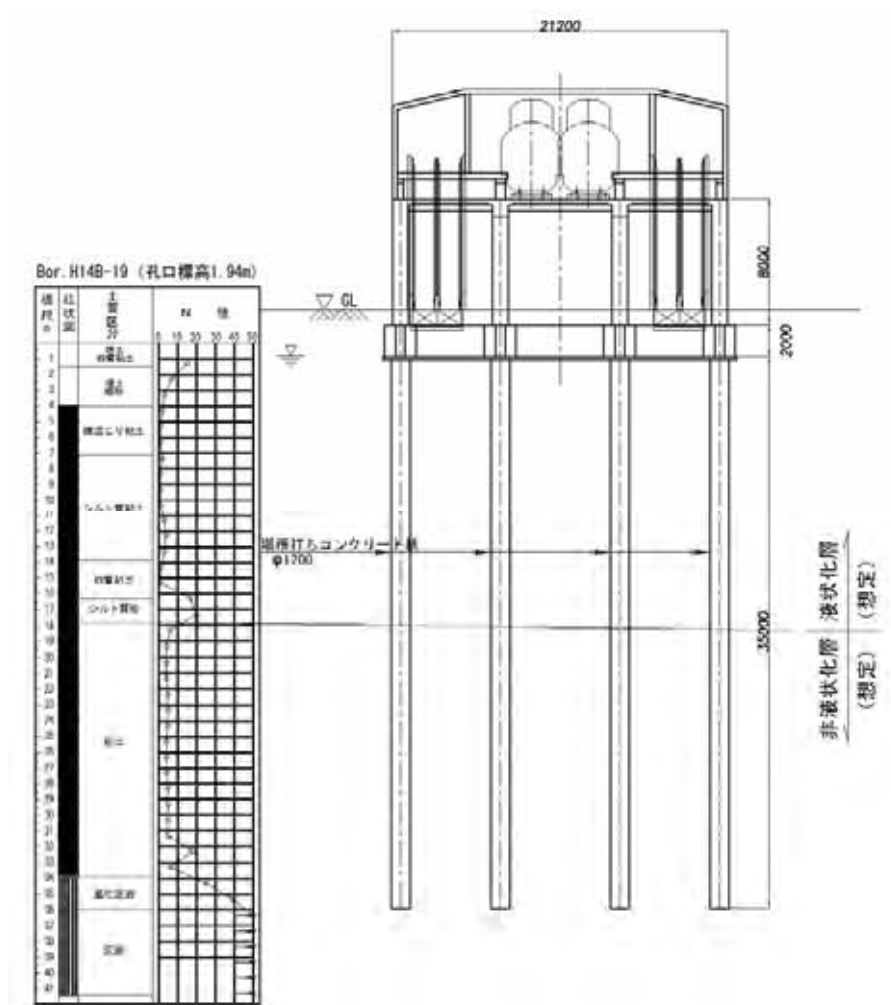


図 駅部高架橋（杭基礎）検討断面図（豊見城駅）

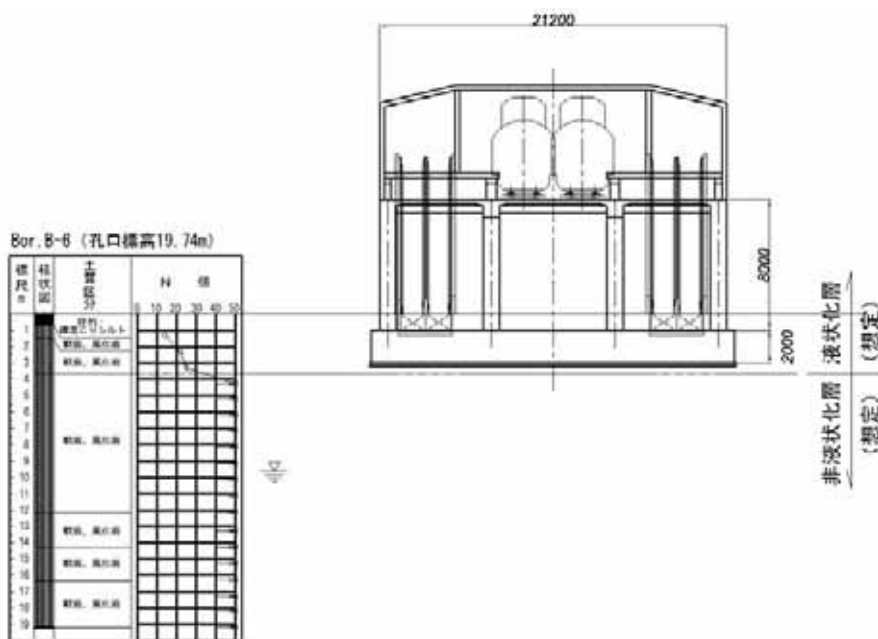


図 駅部高架橋（直接基礎）検討断面図（恩納駅）

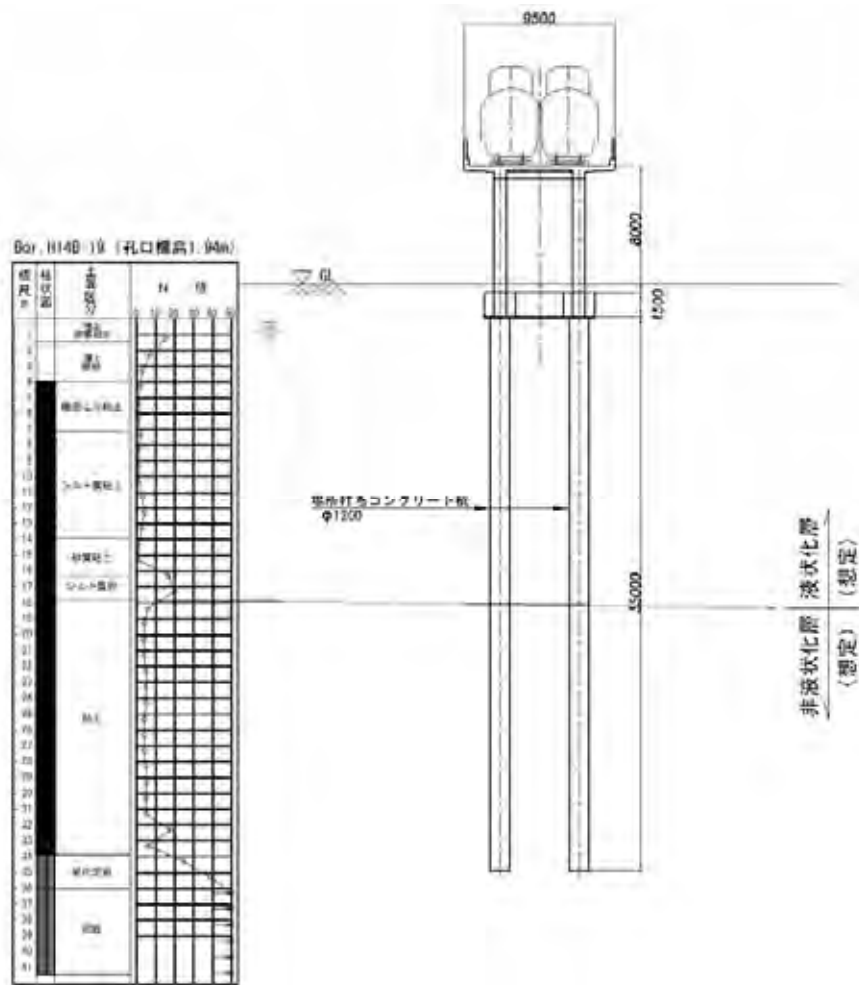


図 駅間部高架橋（杭基礎）検討断面図（阿波根駅～豊見城駅）

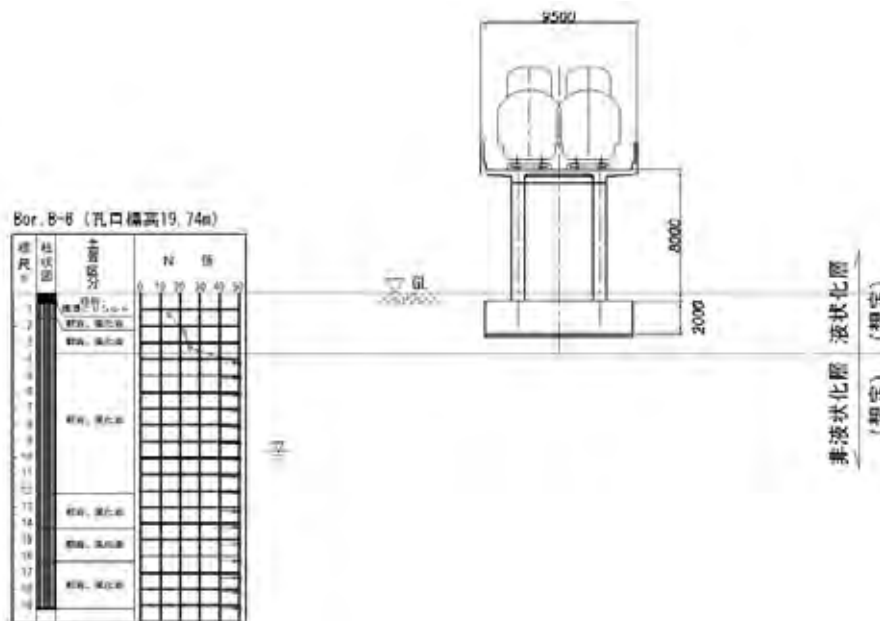


図 駅間部高架橋（直接基礎）検討断面図（恩納駅～喜瀬駅）

4) 地盤液状化対策工の検討

・ 地下区間

A. 開削トンネル

開削トンネルは、深度 19m 程度まで堆積している軟弱な砂層、砂礫層、シルト層が液状化すると想定する。

開削トンネルの地盤液状化対策は、掘削施工時に構築する剛性の高い仮土留壁を残置することが主な対策である。しかし、仮土留壁を撤去する場合や仮土留壁を本体利用する等の仮土留壁が残置されない場合は、対策工が必要となる。

仮土留壁が残置されない場合、当該地盤では開削トンネルに液状化層の泥水圧及び動水圧が作用することが考えられ、それらに抵抗するように上床版や側壁等の部材厚の増加が必要になることがある。

以上より、液状化対策は仮土留壁の残置、もしくは液状化層の泥水圧及び動水圧に対する安全性確保のための部材厚の増加が考えられる。液状化対策範囲及び対策案を下図に示す。

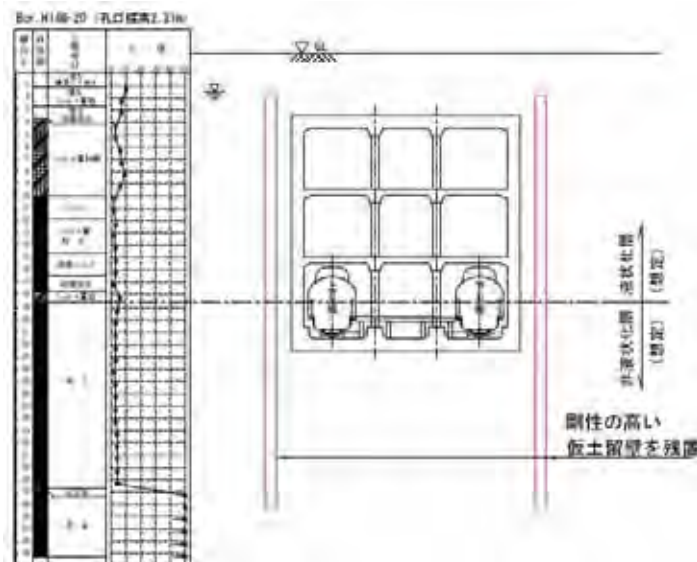


図 開削トンネル部液状化対策案（仮土留壁を残置した場合）

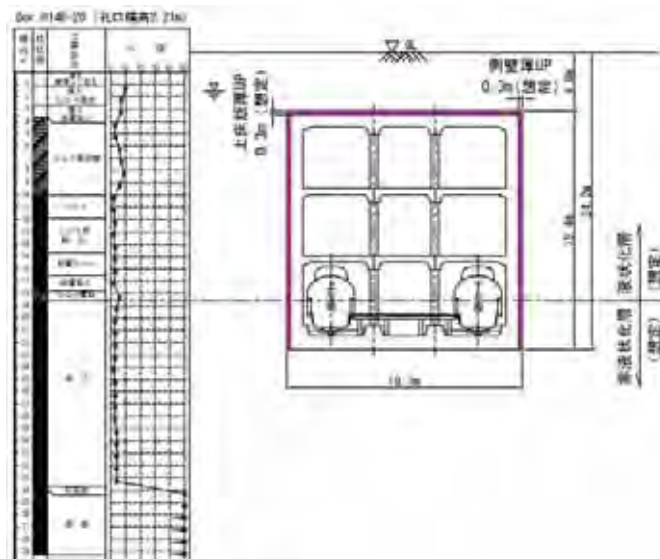


図 開削トンネル部液状化対策案（仮土留壁を撤去した場合）

B. シールドトンネル工法

シールドトンネル区間は、深度 19m 程度まで堆積している軟弱な砂層、砂礫層、シルト層が液状化すると想定する。

当該地盤に対するシールドトンネル区間の地盤液状化対策は、浮き上がり対策として薬液注入工法が考えられる。液状化対策範囲及び対策案を下図に示す。

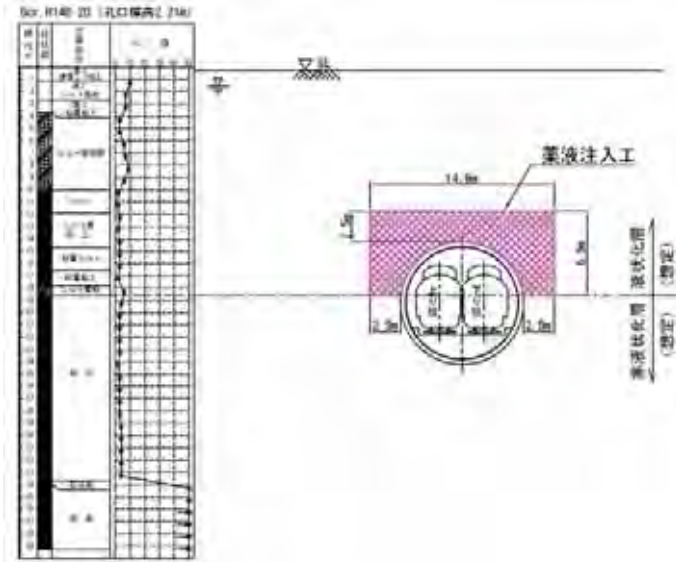


図 シールドトンネル部液状化対策案（仮土留壁を撤去した場合）

・ 明かり区間

A. 盛土区間

盛土区間は、深度 10m 程度まで堆積している軟弱な砂礫層が液状化すると想定する。

盛土区間の地盤液状化対策は、地盤改良が主な対策となり、想定している地盤は礫質土で、礫径・礫率が大きい事が予想される。

また、比較的地盤の傾斜が緩やかな箇所であるため、大がかりな機械の使用は問題ないと考えられる。

以上より、地盤液状化対策としては、深層混合処理工法（機械攪拌）を用いる。地盤液状化対策範囲及び対策案を下図に示す。

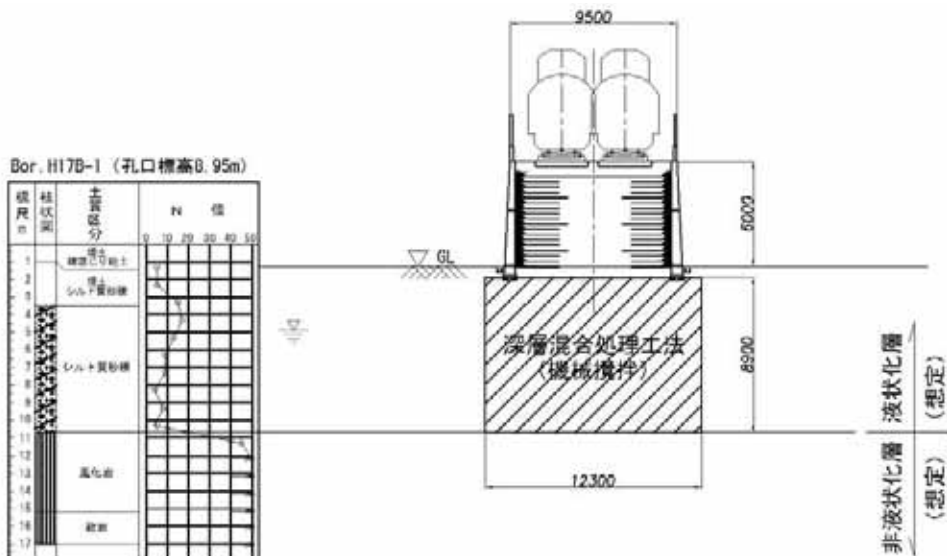


図 駅間盛土部液状化対策案

B. 高架区間

a. 杭基礎

高架区間の杭基礎で想定している地盤は、支持層が深度 40m 程度の深い位置にあり、また、深度 18m の位置に堆積している軟弱なシルト質砂層が液状化すると想定する。

杭基礎の地盤液状化対策は、構造物で地盤液状化に耐える構造とする事が基本となる。

一般的に地盤液状化の検討を行うと、杭の断面力及び変位が大きくなるため、杭径が大きくなる。本検討では、杭径を $\phi 1200$ から $\phi 1500$ に上げる事で液状化に耐えうる構造とする事を想定する。液状化対策範囲及び対策案を下図に示す。

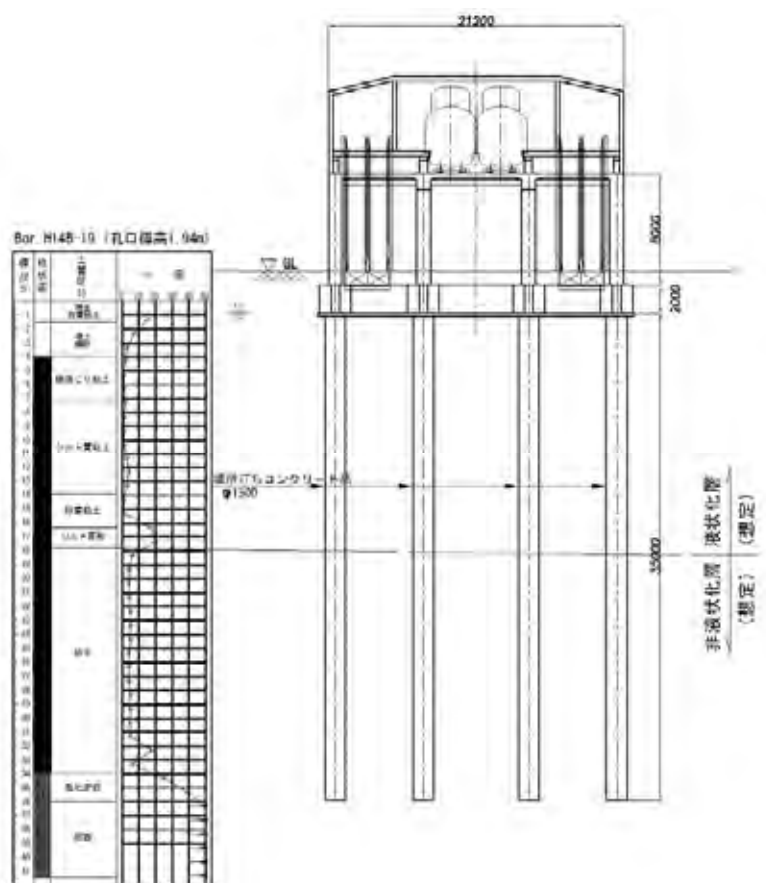


図 駅部高架橋（杭基礎）液状化対策案

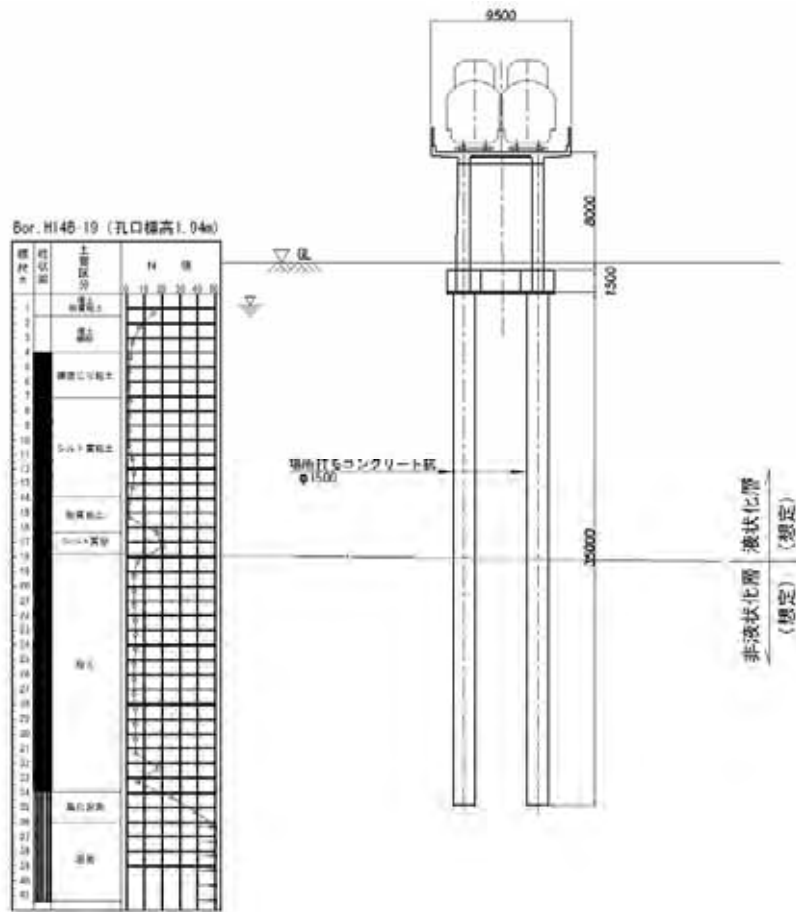


図 駅間高架橋（杭基礎）液化化対策案

b. 直接基礎

高架橋（直接基礎）区間は、深度4m程度まで堆積している軟弱な風化岩層が液状化すると想定する（一般的に風化岩は液状化しないが、既存資料による P_L 値の結果より、本層が砂質土の性状を示し、また水位が孔内水位よりも高い位置にあると仮定する）。

直接基礎区間の地盤液状化対策は、盛土区間と同様、地盤改良が主な対策となる。

想定している地盤は起伏が激しい箇所であるため、大がかりな機械の使用は困難であると想定する。

以上より、地盤液状化対策としては、深層混合処理工法（高圧噴射）を用いる。液状化対策範囲及び対策案を下図に示す。

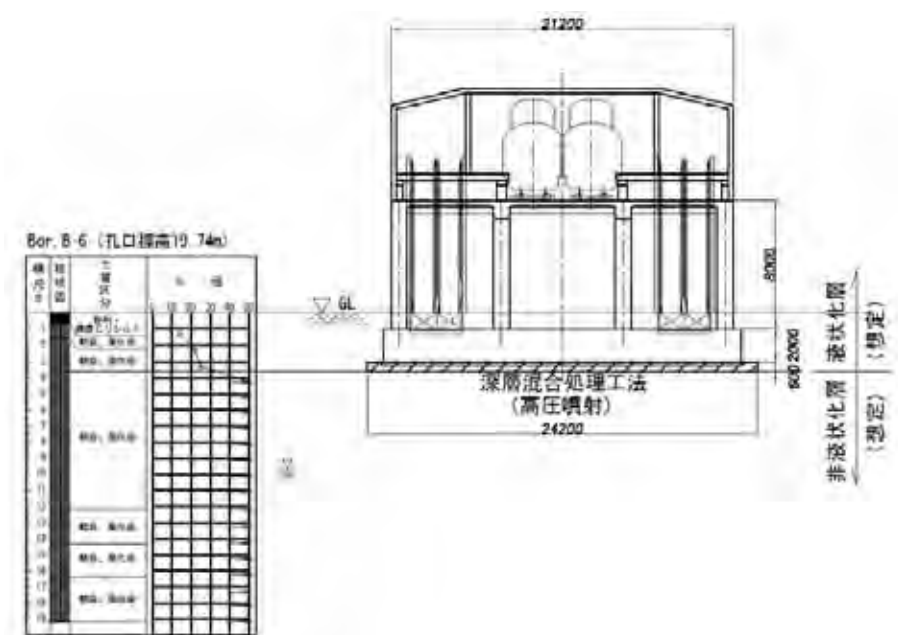


図 駅部高架橋（直接基礎）液状化対策案

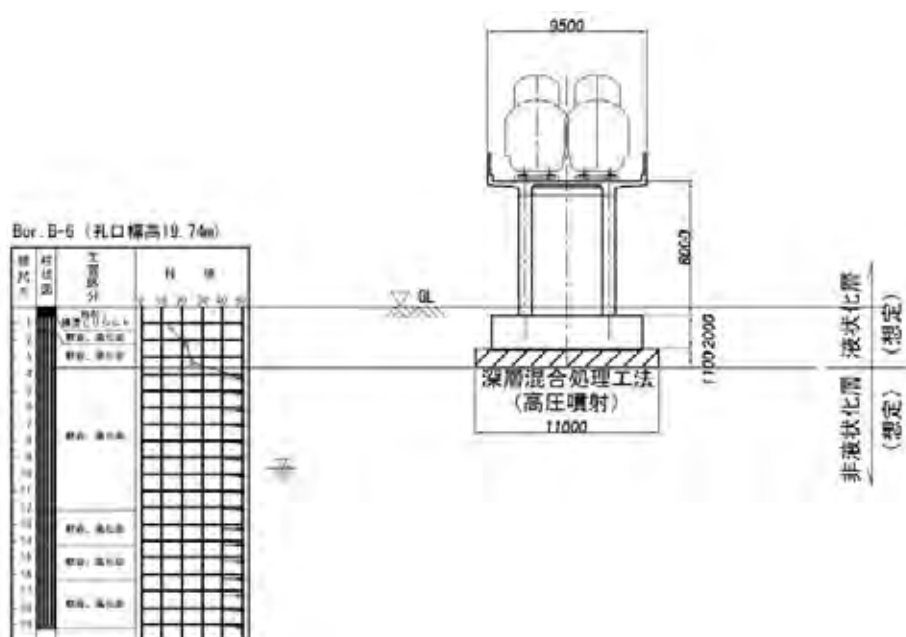


図 駅間高架橋（直接基礎）液状化対策案

(3) 地盤液状化の対策費の試算

選定した地盤液状化対策工法にかかる概算費用について試算を行う。

これまでの鉄軌道整備においては、高架橋の杭基礎や施工過程で必要な土留壁等が地盤液状化対策としての役割を部分的に担ってきたこと、現時点で地盤条件等が明確でないこと、過大な対策費を計上する可能性があることなどから、概算事業費への反映は実施しないものとする。

1) 地下区間

・ 開削トンネル

仮土留壁を残置する場合は、対策費は0円となる。

仮土留壁を撤去する場合は、上床版及び側壁の部材厚増加量を0.3mと想定すると、増加するコンクリート体積は、 $0.3\text{m} \times (19.1\text{m} + 19.4\text{m} \times 2) = 17.37\text{m}^3/\text{m}$ となる。

側壁の部材厚0.3m増加に伴い、増加する掘削土量は、 $0.3\text{m} \times 24.2\text{m} \times 2 = 14.52\text{m}^3/\text{m}$ となる。

事例より、コンクリート単価は110,000円/ m^3 とし、掘削工単価を2,000円/ m^3 とする。

よって、仮土留壁を撤去する場合の1.0m当たりの概算対策費は、約1,950千円/mとなる。

・ シールドトンネル

薬液注入工の対策費は、事例より40,000円/ m^3 とする。

対策対象の土量は、 $69.5\text{m}^3/\text{m}$ となる。

よって、1.0m当たりの概算対策費は、約2,800千円/mとなる。

2) 明かり区間

・ 盛土区間

深層混合処理工法（機械攪拌）の対策費は、事例より25,000円/ m^3 とする。

対策対象の土量は、 $8.9\text{m} \times 12.3\text{m} = 109.47\text{m}^3/\text{m}$ となる。

よって、1.0m当たりの概算対策費は、約2,750千円/mとなる。

・ 高架区間

A. 杭基礎

杭基礎の施工単価は、事例より $\phi 1200$ ：75,000円/m、 $\phi 1500$ ：98,000円/mとする。

対策対象の杭長及び本数は、駅部：35m、4本（12mスパンを想定）、駅間部：35m、2本（10mスパンを想定）となる。

よって、1.0m当たりの概算対策費は、駅部で $(98,000 - 75,000) \times 35 \times 4 \div 12 =$ 約270千円/m、駅間部で $(98,000 - 75,000) \times 35 \times 2 \div 10 =$ 約170千円/mとなる。

B. 直接基礎

深層混合処理工法（高圧噴射）の対策費は、事例より50,000円/ m^3 とする。

対策対象の土量は、駅部で $0.6\text{m} \times 24.2\text{m} = 14.52\text{m}^3/\text{m}$ 、駅間部で $1.1\text{m} \times 11.0\text{m} = 12.1\text{m}^3/\text{m}$ となる。

よって、1.0m当たりの概算対策費は、駅部：約730千円/m、駅間部：約610千円/mとなる。