

松山駅高架化事業における脈状地盤改良工法の適用 その1（事前検討）

四国旅客鉄道（株） 正会員 糸川和樹
 中央復建コンサルタンツ（株） 正会員 山脇奨平
 ライト工業（株） 正会員 大西高明
 （公財）鉄道総合技術研究所 正会員 ○山本昌徳 井澤 淳

1. 目的

現在、予讃線松山駅付近の高架化事業が進められており、高架区間と現在線の取り付け区間は土工区間として計画されている。この区間の直下地盤は液状化の可能性がある地盤と判定されており、対策が必要となっている。本箇所では施工上の制約などから土工区間の液状化対策として一般的に適用されている鋼矢板締切による対策の実施が困難なため、近年開発されている脈状地盤改良工法¹⁾の適用性を検討したので報告する。

2. 適用箇所および検討概要

図1に当該区間の概要を示すが、松山駅終点側に位置する約110mの土工区間を脈状地盤改良工法の適用対象としている。同区間では2001年（平成13年）に標準貫入試験（以降、SPT H13-No.4）が実施されており、この結果に基づいて脈状地盤改良工法の適用性を検討した。図2(a)にSPT H13-No.4から得られた地層構成とN値分布を示すが、地下水位以深の砂質土層（2.9~5.8m）、砂礫層（11.2~15.7m）、砂質土層（15.7~20.0m）が液状化判定を行う層に該当する。液状化判定に用いる地表面地震動は、鉄道構造物等設計標準 耐震設計（以降、耐震標準）²⁾で推奨されているGHE-Sモデル³⁾を用いた逐次非線形動的解析により算出した。ただし、SPT H13-No.4ではせん断波速度構造など動的解析に必要な諸数値が不足しているため、2021年（令和3年）に新たに標準貫入試験（以降、SPT R03-No.1）とPS検層を実施した。図2(b)にその結果を示すが、SPT H13-No.4の地層構成と概ね一致しているため、SPT R03-No.1位置で実施した動的解析の地表面地震動を用いてSPT H13-No.4位置における液状化判定を実施した。なお、GHE-Sモデルのパラメータについては、5~8m間の砂質土層はサンプリング試料を用いた繰り返し三軸試験を実施して得られたG- γ 、h- γ 関係を元に設定し、その他の層については標準パラメータを用いた。なお、予讃線松山駅付近の高架化事業において設定しているL2地震動は、断層直下型地震として耐震標準に示されているスペクトルII地震動、および海溝型地震として南海トラフ地震を対象に強震動予測手法で設定したサイト波である。本稿ではスペクトルII地震動に対する検討結果のみを示すが、南海トラフ地震に対しても同様の結果が得られている。

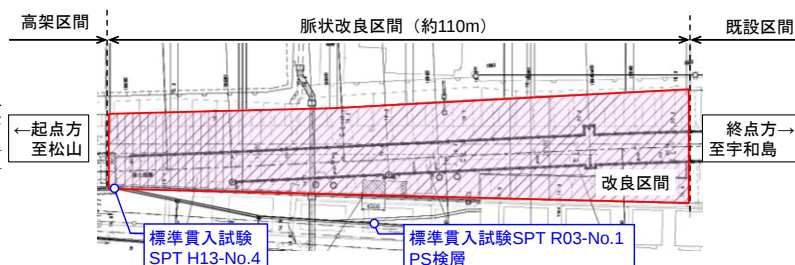


図1 脈状改良区間周辺および地盤調査地点の位置関係

3. 改良前の液状化判定

表1(a)に動的解析から得られた地表面加速度を用いた改良前の液状化判定結果を示す。第5、6層（深度3.8~5.8m）の砂質土層で F_L が1を下回っており、 P_L 値も6.8となっていることから、液状化設計が必要な地盤と判定された。ただし、第5、6層以外では F_L は1.0以上であることから、第5、6層の層厚2.0mを脈状地盤改良工法改良対象域として検討を行った。

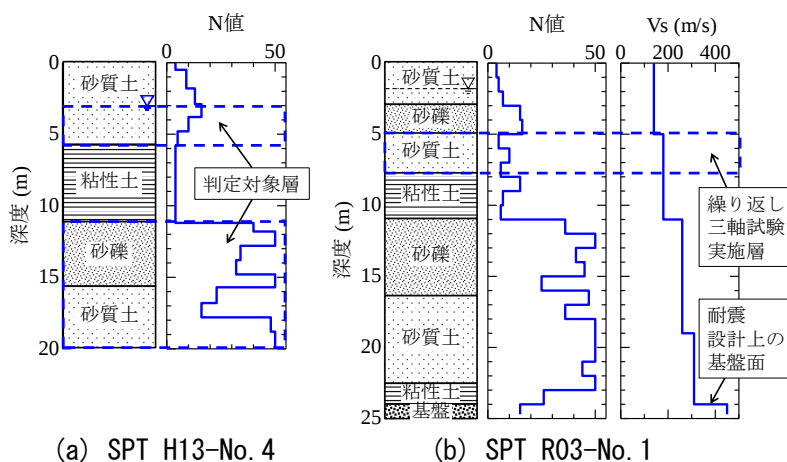


図2 地盤調査結果

4. 改良後を想定した液状化判定

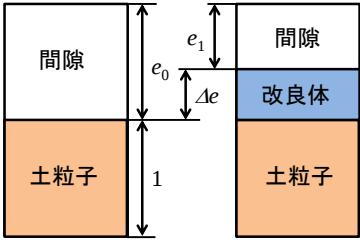
脈状地盤改良工法の計画段階では、図3に示すような改良前後の地盤内の間隙状況を想定し、式(2)から求まる改良後のN値(N₁)を用いた液状化判定により改良効果を検討する。標準的に実施する注入率(以降、実施注入率)は10%としているが、過去の適用箇所における改良前後のN値の計測結果から、実施注入率10%に対して5%程度が有効に効く傾向があることが分かっている¹⁾。そこで、有効に作用する注入率(以降、有効注入率)を5%として改良後のN値を推定した。表2にその結果を示すが、N値10,5であった層を22.2, 14.9まで改良できる結果となった。ただし、過去の施工実績を踏まえた安全側の配慮として、改良後のN値の上限値N_{max}=25および増分上限値ΔN_{max}=5の制約条件を設定し、N値15および10として改良後の液状化判定を実施した。なお、この時の有効注入率は平均的に2.6%である。表1(b)にL2スペクトルII地震動に対する改良後の液状化判定結果を示すが、第6層でF_Lが1を下回っているもののP_Lは5以下であり、液状化の影響を無視できるレベルまで改良できる可能性があると判断した。

4. まとめ

予讃線松山駅付近の高架化事業における土工区間において脈状地盤改良工法の適用性について、既存の地盤調査結果を用いた検討を実施した。その結果、有効注入率2.6%程度まで改良できれば、液状化の影響を無視できるレベルまで改良できる可能性があることを確認した。本検討で想定した改良効果が得られることを試験施工により確認し、本施工に進む方針とした。

参考文献

1) 井澤ら：脈状割裂注入による効率的な液状化対策工法の開発，土木学会論文集C, Vol. 75, No.4, 2019. 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 2012. 3) 野上ら：S字型履歴曲線を有する土の非線形モデルとその標準パラメータの設定，第30回土木学会地震工学研究発表会論文集, 2009.



間隙比: 改良前 e_0 改良後 e_1

注入率: $A_s = \frac{e_0 - e_1}{1 + e_0}$ (1)

改良後N値: $N_1 = \frac{69 + \sigma'}{98} \left\{ \frac{e_{min} - e_1}{0.21(e_{max} - e_{min})} \right\}^2$ (2)

図3 改良効果の算定模式図

表1 改良前後の液状化判定結果 (SPT H13-No. 4、判定対象層のみ抜粋)

					(a) 改良前						(b) 改良後推定値					
地層番号	土質分類	深度(m)	F _c (%)		N値	R	L	F _L	ΔP _L	P _L	N値	R	L	F _L	ΔP _L	P _L
4		2.9 ~ 3.8	5.0		16.0	0.671	0.474	1.42	0.000		16.0	0.671	0.474	1.42	0.000	
5	砂質土	3.8 ~ 4.8	5.0		10.0	0.358	0.491	0.73	2.126		15.0	0.552	0.491	1.12	0.000	
6		4.8 ~ 5.8	5.0		5.0	0.185	0.506	0.37	4.663		10.0	0.338	0.506	0.67	2.440	
7	粘性土	5.8 ~ 11.2	0.0		4.0	—	—	—	0.000		4.0	—	—	—	0.000	
8		11.2 ~ 11.8	8.8		40.0	7.721	0.560	13.79	0.000		40.0	7.721	0.560	13.79	0.000	
9		11.8 ~ 12.8	8.8		50.0	24.302	0.561	43.32	0.000		50.0	24.302	0.561	43.32	0.000	
10	砂礫	12.8 ~ 13.8	8.8		34.0	2.131	0.562	3.79	0.000	6.8	34.0	2.131	0.562	3.79	0.000	2.4
11		13.8 ~ 14.8	8.8		32.0	1.428	0.562	2.54	0.000		32.0	1.428	0.562	2.54	0.000	
12		14.8 ~ 15.7	8.8		50.0	11.934	0.560	21.31	0.000		50.0	11.934	0.560	21.31	0.000	
13		15.7 ~ 16.8	36.3		23.0	0.907	0.558	1.63	0.000		23.0	0.907	0.558	1.63	0.000	
14	砂質土	16.8 ~ 17.8	36.3		16.0	0.647	0.555	1.17	0.000		16.0	0.647	0.555	1.17	0.000	
15		17.8 ~ 18.8	14.9		48.0	5.188	0.551	9.42	0.000		48.0	5.188	0.551	9.42	0.000	
16		18.8 ~ 20.0	14.9		50.0	5.481	0.546	10.04	0.000		50.0	5.481	0.546	10.04	0.000	

改良対象層

表2 改良後の推定N値および有効注入率

層番号	土質分類	深度(m)	土質データ				改良前		改良後		土質別平均
			F _c (%)	σ' _v (kPa)	e _{max}	e _{min}	N ₀	e ₀	N ₁	e ₁	
4		2.90 ~ 3.80	5.0	164	1.100	0.640	16	0.849	16.0	0.849	-
5	砂質土	3.80 ~ 4.80	5.0	171	1.100	0.640	10	0.905	22.2	0.809	2.3
6		4.80 ~ 5.80	5.0	179	1.100	0.640	5	0.964	14.9	0.866	2.9