

令和6年度
交通運輸技術開発推進制度
研究成果報告書
ダイジェスト版

鉄道施設の液状化被害軽減のための
脈状地盤改良工法の経年変化評価

令和7年3月
公益財団法人 鉄道総合技術研究所
ライト工業株式会社
東日本旅客鉄道株式会社

目次

和文要約	1
英文要約	2
研究開発の目的及び実施体制	3
研究開発の成果	5
1. 序論	5
2. 改良地盤の経年変化の把握	5
2.1 実施概要	5
2.2.調査項目	6
3. 改良地盤の経年変化を考慮した液状化強度の把握	11
3.1 実施概要	11
3.2 試験結果	12
4. 改良地盤の経年変化評価法の検討	16
5. まとめ	17
6. 知的財産権取得状況	17
7. 研究成果発表実績	17
8. 参考文献	17

和文要約

研究成果報告要約

作成年月	令和 7 年 3 月
研究テーマ名	安全・安心かつ効率的な交通運輸の実現に向けた技術研究開発
研究課題名	鉄道施設の液状化被害軽減のための脈状地盤改良工法の経年変化評価
研究代表者名	井澤 淳
研究期間	令和 6 年 1 0 月 1 5 日～令和 7 年 3 月 3 1 日
研究の目的	研究代表者らは、2014～2016 年度の本制度により、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で、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を開発した。本工法は従来よりも 1/3 程度のコスト、1/5 程度の施工期間で改良可能であり、開発終了後の 5 年間で 4 つの鉄道事業者で採用され、良好な結果を得ている。その一方で、改良品質の経年変化が懸念されている。脈状地盤改良工法に限らず、地盤改良工法の経年変化に関する懸念は従来から根強いものの、施工後の経年変化を追跡した事例は数例しかない。特に本工法と同様の密実化工法の経年変化については数年程度の調査事例しか公表されていない。本研究では、脈状地盤改良工法の信頼性向上による更なる社会実装を目指し、2015 年度に本制度により実施した試験施工箇所を再調査することで、施工から約 10 年後の改良品質を確認し、安全・安心な交通運輸を実現することを目的とする。
研究成果の要旨	① 改良地盤の経年変化の把握 施工後約 10 年の改良地盤に対して各種地盤調査を実施し、施工直後と同等の改良効果が持続されていることを確認した。 ② 改良地盤の経年変化を考慮した液状化強度比の把握 各種地盤調査結果を踏まえて施工後約 10 年を想定した地盤条件下での液状化強度試験を実施し、拘束圧が減少した場合でも十分な液状化強度比を有していることを確認した。 ③ 改良地盤の経年変化評価法の検討 上記の成果より、計画・設計時に想定する改良地盤の液状化強度比が経年的に保たれていることを想定し設計してよいと考えられる。
知的財産権 取得状況	特許出願 0 件 特許出願（予定）0 件 著作権登録 0 件
研究成果発表実績	論文発表：国内 1 件（投稿中）、海外 0 件 口頭発表：国内 3 件、海外 0 件 そ の 他：0 件

英文要約

Summary of Research Report

Program for Promoting Technological Development of Transportation

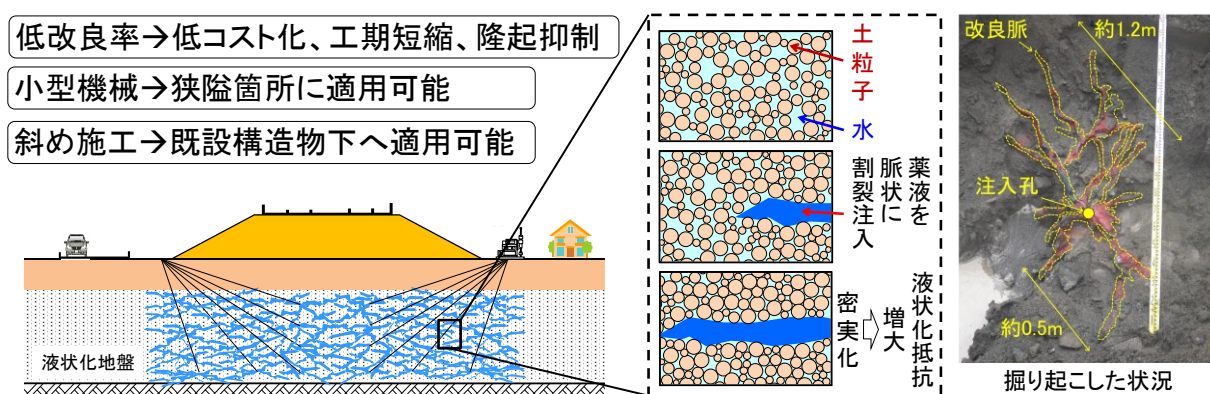
Date of preparation	March, 2025
Title of subject	Technological Research and Development for Safe, Secure, and Efficient Transportation
Title of project (Project number)	Evaluation of Aging Effects on Vein-Type Ground Improvement Method for Mitigating Liquefaction Damage to Railway Facilities
Name of research coordinator	Jun Izawa (Railway Technical Research Institute)
Duration of project	October 15, 2024 - March 31, 2025
Purpose of project	This study aims to enhance reliability and promote the societal implementation of the vein-like ground improvement method. To achieve this, we will re-investigate test construction sites established in 2015 to evaluate the quality of the improvements approximately ten years after construction, thereby contributing to the realization of safe and secure transportation infrastructure.
Summary of results	(1) Long-Term Changes in Improved Ground Various ground investigations were conducted on the improved ground approximately ten years after construction. The results confirmed that the improvement effects are sustained at levels equivalent to those measured immediately after construction. (2) Liquefaction Strength Considering Long-Term Changes Based on the findings from the ground investigations, liquefaction strength tests were performed under ground conditions simulating the state approximately ten years after construction. These tests confirmed that the ground retains sufficient liquefaction strength, even accounting for a decrease in confining pressure. (3) Evaluation Method for Long-Term Changes in Improved Ground Based on the above results, we conclude that the liquefaction strength of the improved ground assumed during the planning and design phases can be considered to remain consistent over time. Therefore, this assumption can be safely used in the design process.
Patents, etc	0
Publication, etc	Paper Publications: Domestic 1 (under review), Overseas 0 Oral Presentations: Domestic 3, Overseas 0 Others: Domestic 0, Overseas 0

研究開発の目的及び実施体制

研究開発の目的

鉄道をはじめとする交通システムが集中する日本の都市圏の多くは河川の堆積地盤や埋め立て地盤で占められており、地震時に液状化に至る可能性のある地盤が広範囲に存在している。地盤が液状化に至ると、交通システムは安全性を損なうだけでなく、復旧にも時間を要するため、都市機能が広範囲にマヒする可能性がある。したがって、液状化による被害の軽減に向けた対策を可能な限り広い領域に対して早急に実施する必要がある。従来採用されている液状化対策工法は液状化の発生を完全に防止することを前提とした高改良率で高コストの工法であるため、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など、都市部の狭隘な箇所へ適用には不向きであった。研究代表者らは、2014～2016 年度の本制度により、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で、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を開発している¹。本工法は従来よりも 1/3 程度のコスト、1/5 程度の施工期間で改良可能であり、開発終了後の 5 年間で 4 つの鉄道事業者で採用され、良好な結果を得ている。

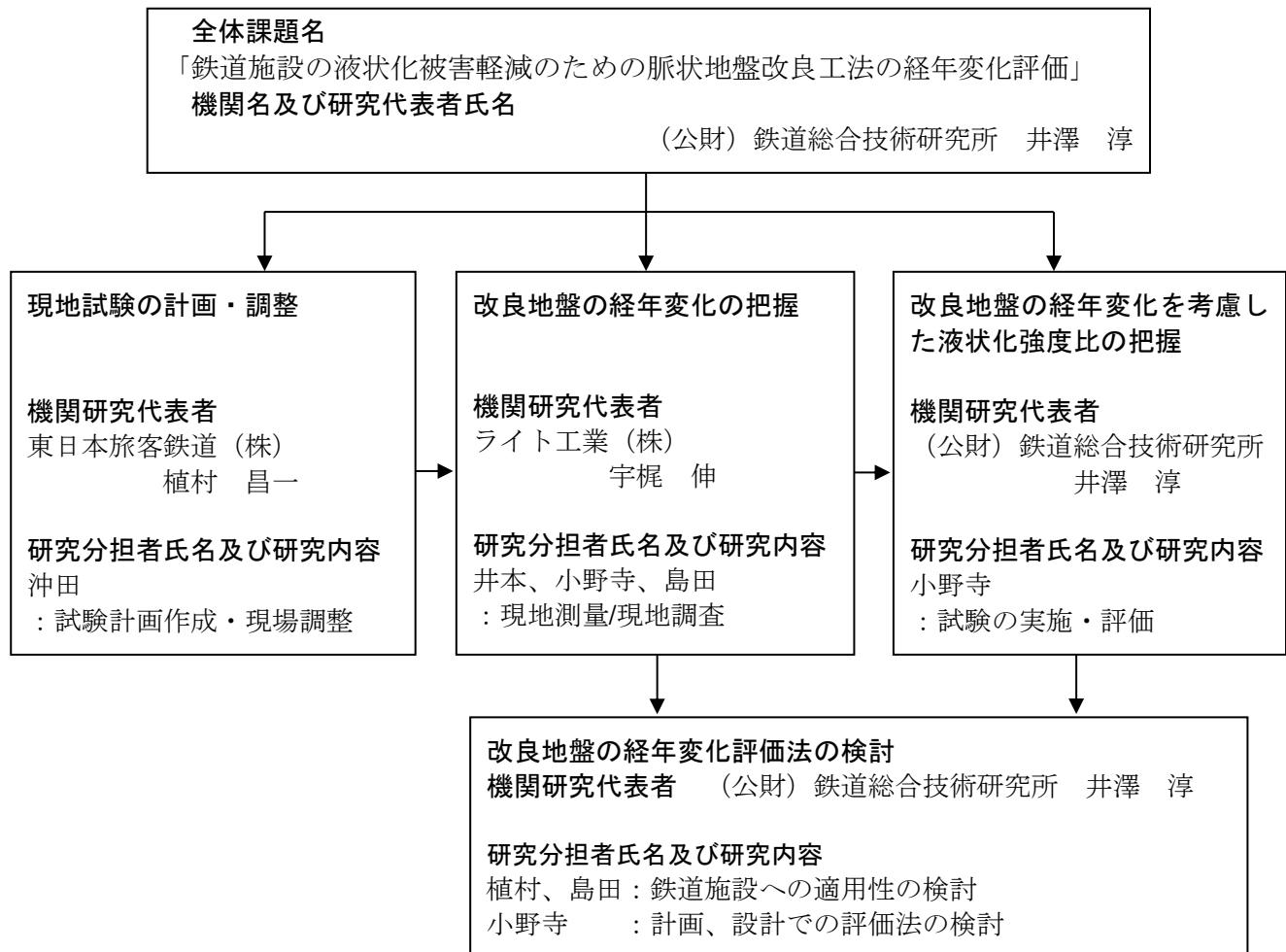
その一方で、改良品質の経年変化が懸念されている。脈状地盤改良工法に限らず、地盤改良工法の経年変化に関する懸念は従来から根強いものの、施工後の経年変化を追跡した事例は 1～2 年後の調査を実施した数例しかない^{例えば 2)}。特に本工法と同様の密実化工法の経年変化については数年程度の調査事例しか公表されていない。本研究では、脈状地盤改良工法の信頼性向上による更なる社会実装を目指し、2014～2016 年度に本制度により実施した試験施工箇所を再調査することで、施工から約 10 年後の改良品質を確認し、安全・安心な交通運輸を実現することを目的とする。



脈状地盤改良工法の概念図

研究実施体制

本研究は、(公財) 鉄道総合技術研究所を総括研究機関とし、ライト工業 (株)、東日本旅客鉄道 (株) と共同して実施した。担当機関の研究実施の流れを示すチャートは以下の通りである。



研究開発の成果

1. 序論

本研究では、「研究開発の目的」に示した目的のため、以下の3つを目標とした検討を行う。

① 改良地盤の経年変化の把握（2章）

施工後約10年の改良地盤に対して各種地盤調査を実施し、改良品質の経年変化を把握する。

② 改良地盤の経年変化を考慮した液状化強度の把握（3章）

各種地盤調査結果を踏まえて施工後約10年を想定した地盤条件下での液状化強度を把握する。

③ 改良地盤の経年変化評価法の検討（4章）

上記の結果を踏まえて、計画・設計時における改良地盤の経年変化の考え方を整理する。

上記目標の達成に向けて、それぞれ以下の通り研究を実施した。

2. 改良地盤の経年変化の把握

2.1 調査概要

2015年度に本制度において実施した脈状地盤改良工法の試験施工箇所の概念図を図1に示す。2015年は、線路から離れた列（図1の図面で上側）で地盤調査を行っており、今回は線路側の箇所で調査を実施した。図1には、事前に実施した標準貫入試験から推定される地質縦断図も示した。A, Bブロックの改良域はすべて液状化層であるAs層であるが、CDブロックは改良域の上部1m程度が埋土層となっている。なお、2015年と地表面位置が変わっているため、以降は標高を合わせて結果を整理、比較する。

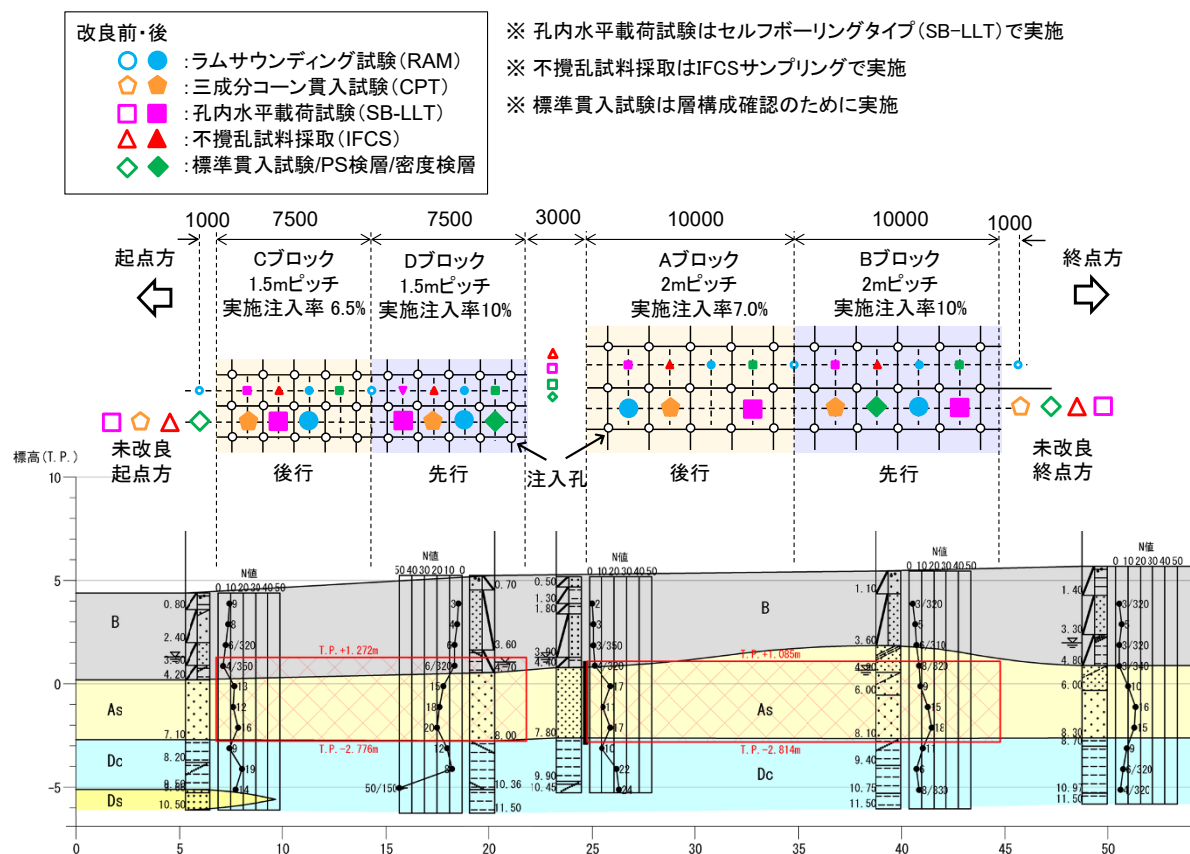


図1 再調査地点

調査項目としては、ラムサウンディング試験（RAM 試験）による N_d 値評価を基本とした。なお、2015 年はピエゾドライブコーン試験（PDC 試験）を行い、 N_d 値と細粒分含有率 F_c を計測していたが、 F_c を用いた品質確認が難しかったことから、今回は三成分コーン貫入試験（CPT）により換算 N 値（先端抵抗）、間隙水圧、周面摩擦の変化を確認することとした。また、2015 年に孔内水平載荷試験（LLT）を実施して静止土圧係数 K_0 の変化を確認した。この手法はボーリング孔を削孔した後、ゾンデと呼ばれる計測部を挿入して孔壁を押すことで、その抵抗から側方土圧を計測する方法である。そのため、削孔時に孔壁が乱れて正確な値が得られない場合があることが課題とされている。今回は削孔機構を付属させたゾンデを用いて、ゾンデ自体で削孔できるセルフボーリングタイプの孔内水平載荷試験（SB-LLT）を適用した。これにより、孔壁の乱れを極力軽減し、より精緻に計測が可能である。なお、事前に地質構成を確認するため標準貫入試験を数カ所で実施すると共に、同じ孔を用いて密度検層と PS 検層も実施した。これらの調査とは別に、3 章で示すように調査結果から推定される現在の応力状態を勘案した液状化強度試験を実施するための不攪乱試料のサンプリングも行った。サンプリングには試料の乱れを極力除去可能な IFCS サンプリングを適用した。

2.2 調査結果

2.2.1 換算 N 値(N_d 値)

図 2 に 2015 年に PDC 試験で求めた改良前後の N_d 値と、2024 年にラムサウンディング試験および三成分コーン貫入試験で求めた N_d 値の深度分布を示す。なお、下段には 1m で平均化した値も示している。

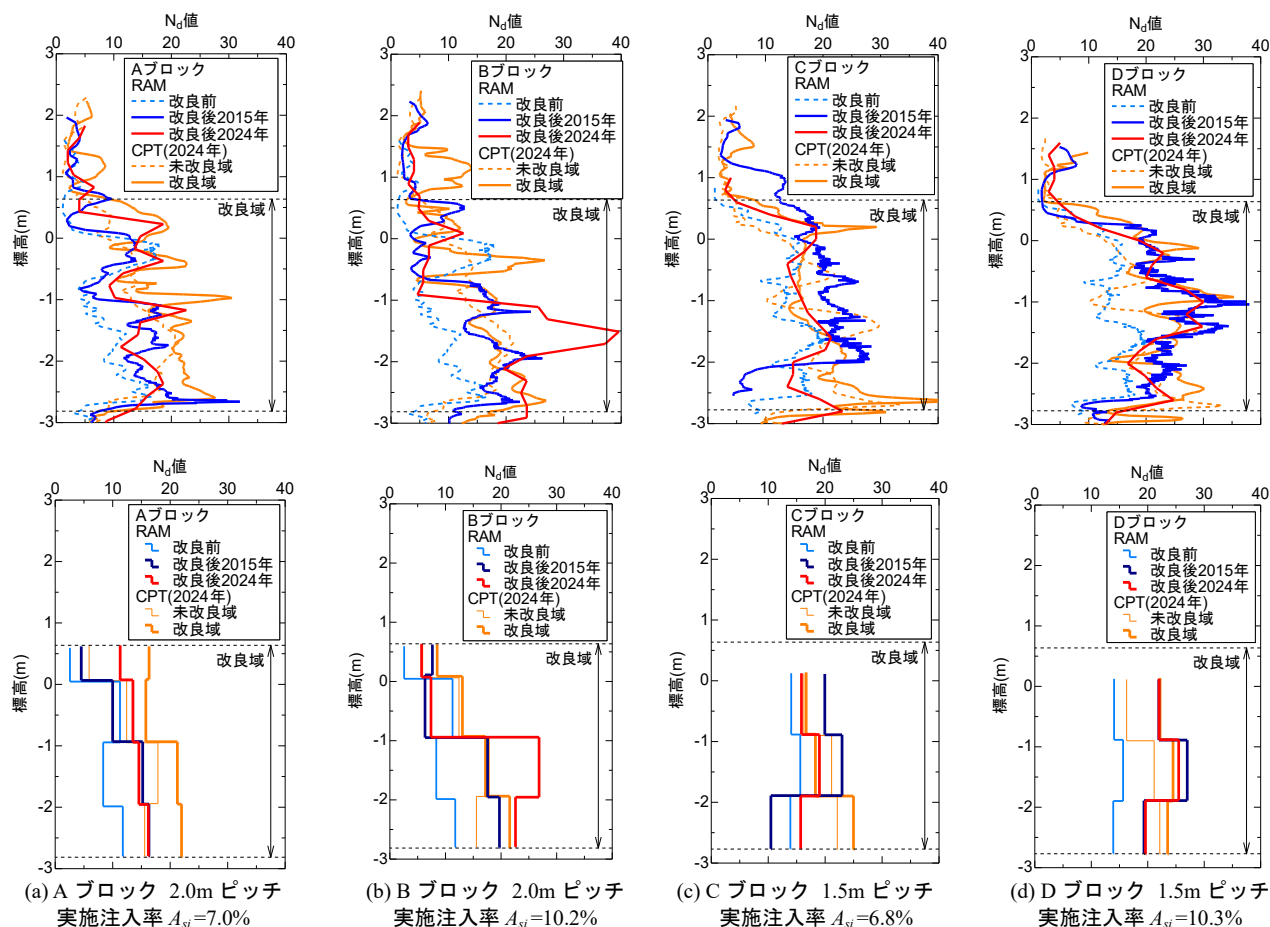


図 2 N_d 値の経年変化

表 1 N_d 値を用いた有効注入率

(a) A ブロック										2015 年					2024 年 (RAM)					2024 年 (CPT)				
下端標高 (m)		土質データ				改良前(AB-2)		改良後(2015)		有効注入率 (%)		改良後(RAM1)		有効注入率 (%)		改良後(S-1)		有効注入率 (%)						
		F_c (%)	σ'_v (kPa)	$e_{\max}$	$e_{\min}$	N_d	e_0	N_d	e_1	各層	平均	N_d	e_1	各層	平均	N_d	e_1	各層	平均					
0.636	～	0.073	2.9	80.57	1.058	0.623	2.6	0.939	4.5	0.901	2.0	11.3	0.810	6.7	3.4	16.3	0.759	9.3	5.8					
0.073	～	-0.941	2.9	87.86	1.058	0.623	11.3	0.816	10.0	0.830	-0.8	13.5	0.793	1.3		15.8	0.771	2.4						
-0.941	～	-1.955	2.9	95.15	1.058	0.623	8.4	0.854	15.2	0.783	3.8	14.6	0.789	3.5		21.3	0.733	6.5						
-1.955	～	-2.793	2.9	102.44	1.058	0.623	11.8	0.821	16.3	0.779	2.3	16.2	0.780	2.3		22.0	0.727	4.9						
(b) B ブロック										2015 年					2024 年 (RAM)					2024 年 (CPT)				
下端標高 (m)		土質データ				改良前(AB-2)		改良後(2015)		有効注入率 (%)		改良後(RAM2)		有効注入率 (%)		改良後(S-2)		有効注入率 (%)						
		F_c (%)	σ'_v (kPa)	$e_{\max}$	$e_{\min}$	N_d	e_0	N_d	e_1	各層	平均	N_d	e_1	各層	平均	N_d	e_1	各層	平均					
0.636	～	0.073	2.9	80.57	1.058	0.623	2.6	0.939	7.6	0.854	4.4	5.7	0.882	3.0	3.5	8.5	0.842	5.0	3.9					
0.073	～	-0.941	2.9	87.86	1.058	0.623	11.3	0.816	6.3	0.877	-3.4	7.4	0.862	-2.5		13.1	0.797	1.0						
-0.941	～	-1.955	2.9	95.15	1.058	0.623	8.4	0.854	17.6	0.762	5.0	26.8	0.692	8.7		17.2	0.765	4.8						
-1.955	～	-2.793	2.9	102.44	1.058	0.623	11.8	0.821	19.7	0.752	3.8	22.6	0.730	5.0		21.6	0.730	4.7						
(c) C ブロック										2015 年					2024 年 (RAM)					2024 年 (CPT)				
下端標高 (m)		土質データ				改良前(CD-1)		改良後		有効注入率 (%)		改良後(RAM3)		有効注入率 (%)		改良後(S-3)		有効注入率 (%)						
		F_c (%)	σ'_v (kPa)	$e_{\max}$	$e_{\min}$	N_d	e_0	N_d	e_1	各層	平均	N_d	e_1	各層	平均	N_d	e_1	各層	平均					
0.073	～	-0.941	2.9	87.86	1.058	0.623	14.0	0.788	19.9	0.736	2.9	15.8	0.771	0.9	1.4	16.7	0.763	1.4	2.5					
-0.941	～	-1.955	2.9	95.15	1.058	0.623	15.6	0.779	23.0	0.720	3.3	19.0	0.750	1.6		18.3	0.756	1.3						
-1.955	～	-2.793	2.9	102.44	1.058	0.623	13.9	0.801	10.5	0.835	1.9	17.2	0.771	1.6		25.0	0.713	4.9						
(d) D ブロック										2015 年					2024 年 (RAM)					2024 年 (CPT)				
下端標高 (m)		土質データ				改良前(CD-1)		改良後		有効注入率 (%)		改良後(RAM4)		有効注入率 (%)		改良後(S-4)		有効注入率 (%)						
		F_c (%)	σ'_v (kPa)	$e_{\max}$	$e_{\min}$	N_d	e_0	N_d	e_1	各層	平均	N_d	e_1	各層	平均	N_d	e_1	各層	平均					
0.073	～	-0.941	2.9	87.86	1.058	0.623	14.0	0.788	22.0	0.720	3.8	22.0	0.719	3.8	3.6	22.2	0.718	3.9	4.0					
-0.941	～	-1.955	2.9	95.15	1.058	0.623	15.6	0.779	27.0	0.691	4.9	25.5	0.702	4.3		24.5	0.709	3.9						
-1.955	～	-2.793	2.9	102.44	1.058	0.623	13.9	0.801	19.3	0.755	2.6	19.6	0.752	2.7		23.5	0.723	4.3						

※ 有効注入率が同等以上であった箇所を青字、低下した箇所を赤字で表示

標準仕様（実施注入率 10%、注入孔ピッチ 1.5m）で施工できた D ブロックを見ると、ラムサウンディング試験結果、三成分コーン貫入試験結果ともに改良直後とほぼ同等の N_d 値分布が得られていることが分かる。なお、改良域上部では 2015 年、2024 年共に改良前後で N_d 値の増加が見られないが、図 1 に示すように粘性土系の埋土箇所になっており、締め固め効果が得られなかったためであると考えられる。C ブロックについては、標高 0~-2m 領域で全体的に低下する傾向があるが、-2m 以深は逆に増加傾向にある。A, B ブロックについては計測地点ごとにバラツキはあるものの、改良前からの N_d 値の増加は 2024 年にも概ね確認できている。

2.2.2 有効注入率 A_{se}

2.2.1 に示したように約 10 年間、 N_d 値の増加が概ね維持されていることが確認できたが、定量的に判断できないため、図 2 下段に示すように 1m 毎で N_d 値を平均し、有効注入率 A_{se} を求めて比較した。表 1 に 2024 年に実施したラムサウンディング試験および三成分コーン貫入試験から得られた N_d 値を用いた有効注入率 A_{se} を、2015 年の結果と共に示す。なお、有効注入率 A_{se} は改良前の N_d 値によっても変わってくるため、改良前の N_d 値については 2015 年の改良前に計測した N_d 値を用いて算定し、C, D ブロックの上部は粘性土層であるため、有効注入率算定の対象外としている。また、細粒分含有率 F_c および平均粒径 D_{50} については、3 章で示す液状化強度試験に伴って実施した不攪乱試料の物理試験結果を用いた。

まず、注入ピッチ 1.5m、注入量 10% の標準仕様で実施した D ブロックでは、改良直後の 2015 年の段階で有効注入率 $A_{se}=3.8\%$ と他のブロックと比較して高い値が得られており、2024 年もラムサウンディング試験で 3.6%、三成分コーン貫入試験で 4.0% とほぼ同等の有効注入率が維持されていたことが確認できる。一方、同じ注入ピッチで実施した C ブロックは、注入量が 6.5% と低かったせいか、他のブロックと比べて低い有効注入率しか得られていないことが分かる。しかしながら、2015 年の 1.5% に比べて、

2024 年は 1.2%、2.5%と同等かそれ以上の値が得られたことから、改良品質自体は維持できていると判断できる。注入ピッチ 2.0m で実施した A, B ブロックでは 2015 年に 2%程度の有効注入率であったのに対して 2024 年には 2.8~5.1%と増加しているものの、調査地点毎にバラツキが大きい結果となっている。これは注入ピッチを広くしたことで、1.5m ピッチと比較して相対的に不均質な改良となっていたことが一因と考えられる。いずれにしても、各ブロックで 2015 年の改良直後と同等以上の有効注入率が得られており、約 10 年間は改良品質を維持できていると判断できる。

2.2.3 静止土圧係数 K_0

2015 年と 2024 年に実施した孔内水平載荷試験から得られた静止土圧係数 K_0 を表 2 および図 3 に示す。 K_0 の影響も含まれていると考えられる N_d 値に変化がなかったことから K_0 も維持されていると考えられるが、2015 年では $K_0=1$ を超えるような増加が見られているのに対して、2024 年では 0.48~0.64 となっており、 K_0 が低下している可能性が示された。

K_0 が低下する要因としては、注入時に増加した拘束圧がクリープにより徐々に低下することが考えられるが、今回の結果については適切に計測できていなかった可能性も考えられる。2015 年の結果を見ると極端に大きな K_0 が計測されている箇所が散見される。孔内水平載荷試験から得られた圧力～孔壁変位関係を図 4 に示す。この切片を初期土圧 P_0 として、上載圧で除すことで K_0 を求めるが、極端に高い値を示した箇所では、载荷初期に圧力が上がらず、抵抗を得るまでに大きな変

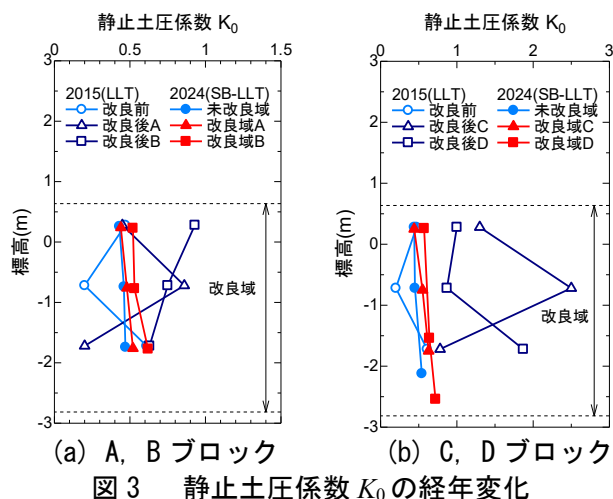
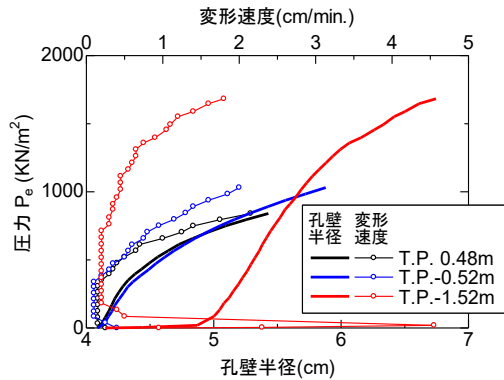


表 2 静止土圧係数 K_0

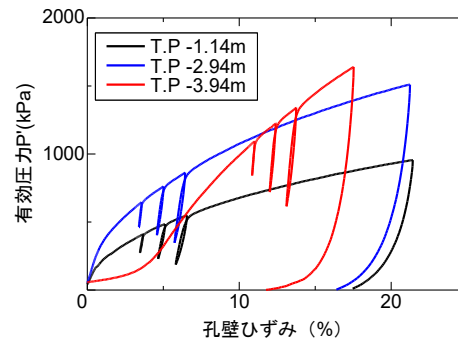
(a) 2015 年計測結果 (LLT)						
	中心 標高 (m)	初期 土圧 P_0 (kPa)	間隙 水圧 u (kPa)	鉛直 有効応力 σ'_v (kPa)	水平 有効応力 σ'_h (kPa)	静止土圧 係数 $K_0 (= \sigma'_h / \sigma'_v)$
改良前	0.28	43.2	9.8	70.6	33.4	0.47
	-0.72	35.4	19.6	77.9	15.8	0.20
	-1.72	81.4	29.4	85.2	52.0	0.61
改良後 A	0.08	42.8	9.8	73.9	33.0	0.45
	-0.92	89.3	19.6	81.2	69.7	0.86
	-1.92	47.1	29.4	88.5	17.7	0.20
改良後 B	-0.12	81.7	9.8	77.2	71.9	0.93
	-1.12	83.1	19.6	84.5	63.5	0.75
	-2.12	87.4	29.4	91.8	58.0	0.63
改良後 C	0.68	92.8	9.8	64.0	83.0	1.30
	-0.32	198.2	19.6	71.3	178.6	2.50
	-1.32	90.7	29.4	78.6	61.3	0.78
改良後 D	0.48	77.2	9.8	67.3	67.4	1.00
	-0.52	84.4	19.6	74.6	64.8	0.87
	-1.52	182.7	29.4	81.9	153.3	1.87

※ 黄色ハッチング箇所は孔壁の乱れが生じたと考えられる箇所

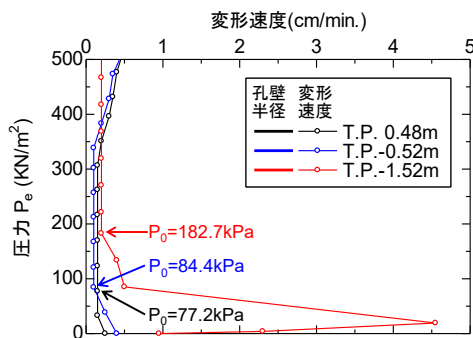
(b) 2024 年計測結果 (SB-LLT)						
	中心 標高 (m)	初期 有効土圧 P_0 (kPa)	鉛直 有効応力 σ'_v (kPa)	水平 有効応力 σ'_h (kPa)	静止土圧 係数 $K_0 (= \sigma'_h / \sigma'_v)$	平均 K_0
未改良域 終点方	0.26	31.0	72.5	31.0	0.43	0.45
	-0.74	36.0	78.4	36.0	0.46	
	-1.74	40.0	84.3	40.0	0.47	
未改良域 起点方	0.28	25.0	56.4	25.0	0.44	0.48
	-0.72	28.0	62.5	28.0	0.45	
	-2.12	38.0	70.8	38.0	0.54	
改良後 A	0.24	30.0	80.3	35.0	0.44	0.48
	-0.76	37.0	86.2	41.0	0.48	
	-1.76	41.0	92.1	48.0	0.52	
改良後 B	0.23	43.0	82.1	43.0	0.52	0.56
	-0.77	47.0	88.0	47.0	0.53	
	-1.77	58.0	93.9	58.0	0.62	
改良後 C	0.25	31.0	69.9	31.0	0.44	0.54
	-0.75	40.0	76.1	42.0	0.55	
	-1.75	50.0	82.0	52.0	0.63	
改良後 D	-1.14	42.0	73.7	42.0	0.57	0.64
	-2.94	54.0	84.3	54.0	0.64	
	-3.94	58.0	90.2	65.0	0.72	



(a) 圧力～孔壁半径，変形速度関係



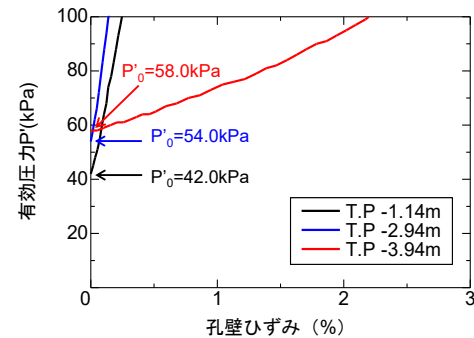
(a) 有効圧力～孔壁ひずみ関係



(b) 圧力～変形速度関係（拡大）

図4 LLT 試験結果

(2015年Dブロック改良後)



(b) 有効圧力～孔壁ひずみ（拡大）

図5 SB-LLT の計測結果

(2024年Dブロック改良後)

位を必要としていることが分かる。これは孔壁が乱れたことが要因と考えられ、通常のLLTでは適切な計測ができておらず、極端に大きな K_0 を算定してしまった可能性が否めない。

一方で2024年は孔壁の乱れを極力軽減でき、より精緻に計測が可能なセルフボーリングタイプの孔内水平載荷試験を適用した。元データの一例を図5に示すが、セルフボーリングタイプであっても孔壁の乱れが発生している可能性もあり、孔内水平載荷試験で求めた K_0 値の信頼性に疑問が残る。また、図6に以前に同じ箇所を実施した通常のLLTとセルフボーリングタイプのLLT試験を実施した例⁷⁾を示すが、全体的にセルフボーリングタイプでは K_0 を小さく評価する傾向にあることが分かる。 K_0 を用いた改良品質の確認方法については、今後の更なる検討が必要である。

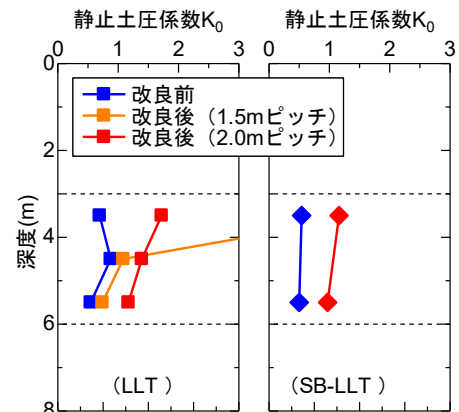


図6 過去の試験施工における調査方法の違いによる K_0 測定結果の比較⁷⁾

2.2.4 三成分コーン貫入試験

三成分コーン貫入試験では、図7に示すような先端抵抗、間隙水圧、周面摩擦が求まり、この結果をもとに土質分類、換算 N 値、細粒分含有率、単位体積重量、非排水せん断強さ、圧密降伏応力、せん断抵抗

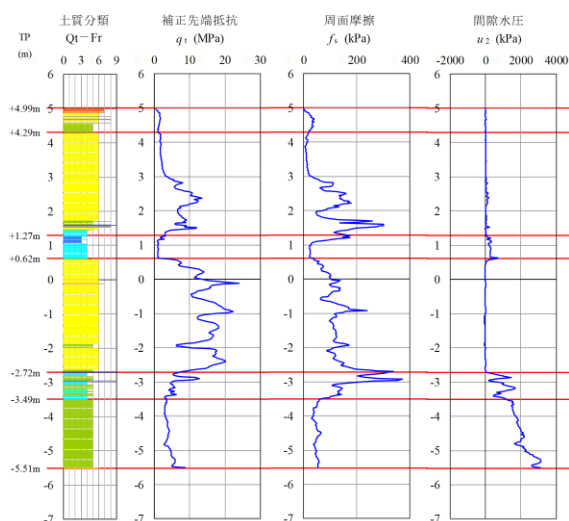


図7 三成分コーン貫入試験の調査結果の例 (Dブロック)

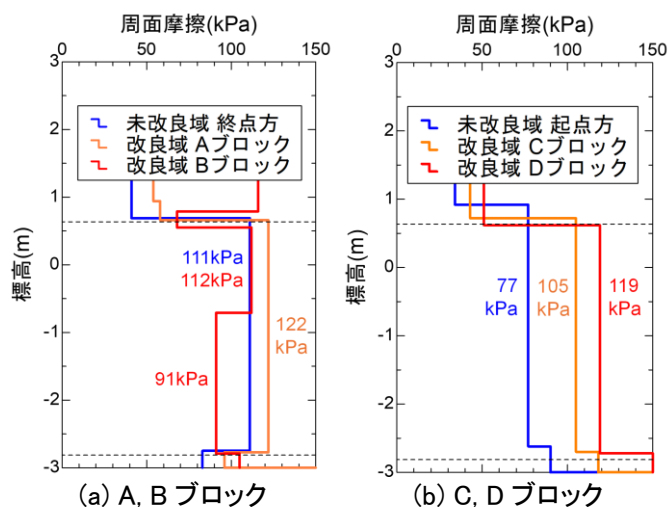


図8 三成分コーン貫入試験から得られた
周面摩擦の比較

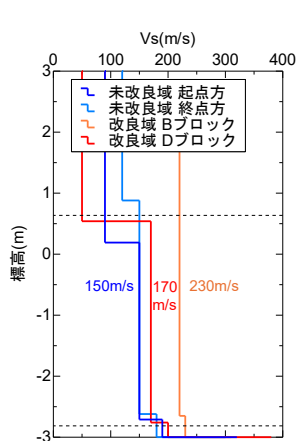


図9 PS 検層結果

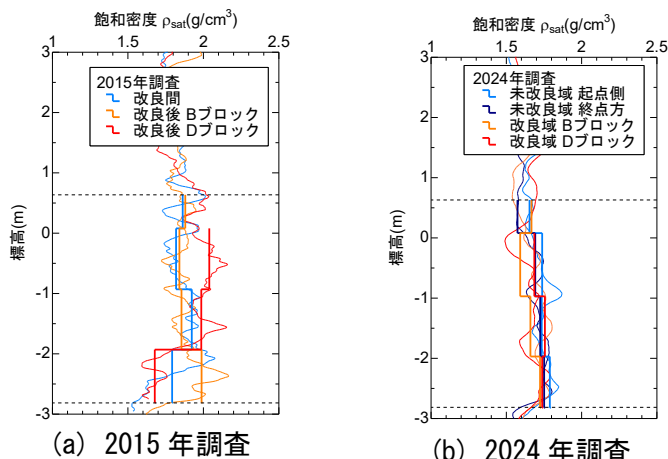


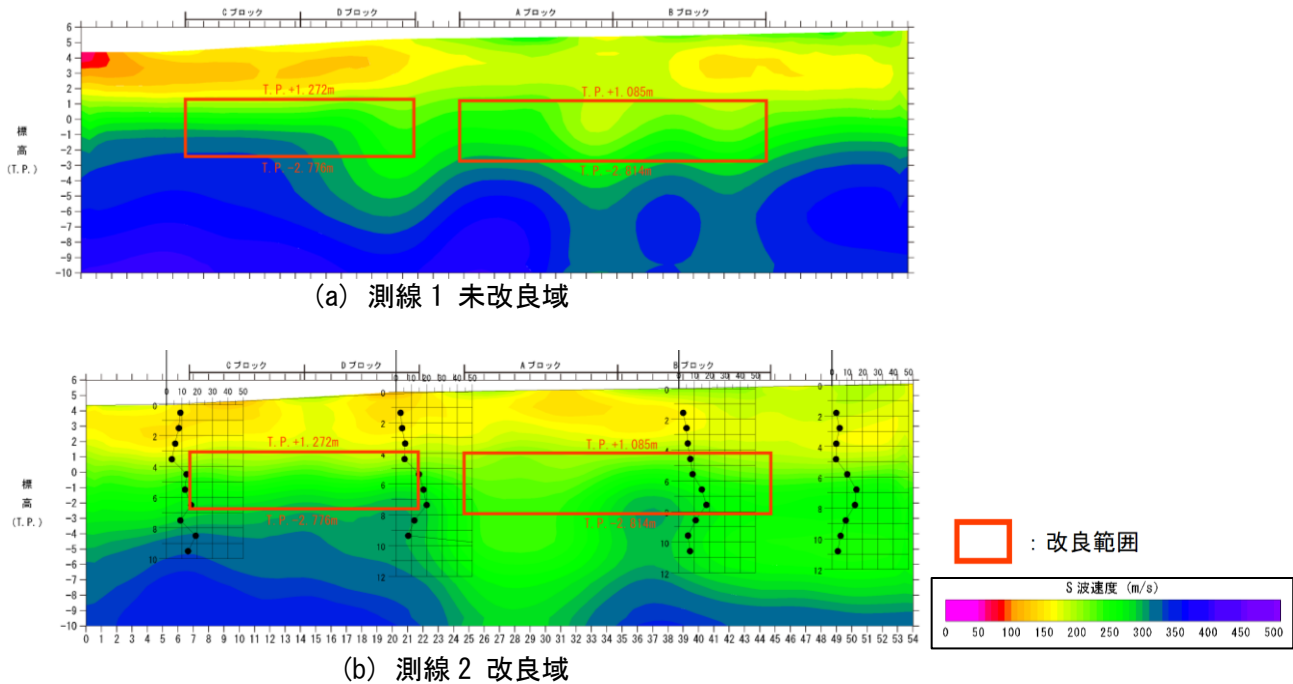
図10 密度検層結果

角、相対密度、せん断弾性波速度などが推定できる。これらの結果を用いて総合的に改良効果を評価できる可能性があるが、ここでは周面摩擦について示す。

K_0 の検討でも言及したとおり、改良体を割裂注入するため、拘束圧が増加することが確認されている。三成分コーンと地盤との摩擦係数が変化しないと仮定すれば、拘束圧の増加は周面摩擦の増加として評価できる。図8にC, Dブロックとそれに近い起点方の未改良域における三成分コーン貫入試験から得られた周面摩擦の深度分布を地層毎に平均化して示す。未改良域で77kPa程度の周面摩擦が、Cブロックで105kPa、Dブロックで119kPaとそれぞれ1.3~1.5倍程度増えており、拘束圧が増加していると推測できる。この倍率は表2に示したSB-LLTで計測した K_0 の倍率と概ね一致しており、三成分コーン貫入試験により K_0 の増加も推測できる可能性がある。今後、三成分コーン貫入試験による評価実績を増やししながら、周面摩擦による評価も進めていきたい。

2.2.5 その他の調査結果

地盤構成等の確認のために実施した標準貫入試験のボーリング孔を使用し、PS検層によるせん断弾性波速度の計測と密度検層による密度測定を行った。その結果を図9、10にそれぞれ示す。未改良域で計測



した標高 0m 以深のせん断弾性波速度は 150m/s であったのに対して、B ブロックにおいて 230m/s までの増加が見られたものの、D ブロックでは 170m/s と大きな増加は見られなかった。また、密度については減少傾向が見られた。せん断弾性波速度の分布が得られる表面波探査試験も改良域と未改良域の 2 測線で実施しており、その結果を図 11 に示すが、これについても改良前後で大きな差は見られなかった。これらの計測は地盤内の弾性波の伝播や γ 線の透過からせん断弾性波速度や飽和密度を求める手法であり、改良体の存在が計測結果に影響している可能性がある。また、脈状地盤改良工法のような低注入率の改良では、これらの値に差が見られるような剛性や密度の増加を期待できないことも考えられる。

3. 改良地盤の経年変化を考慮した液状化強度比の把握

3.1 試験概要

脈状地盤改良工法は密実化工法に分類され、改良脈の割裂注入により間隙が減少し、拘束圧が増加する。2015 年に実施した調査でもこの効果を確認されたが、2024 年に実施したセルフボーリングタイプの孔内水平載荷試験の結果、標準的な仕様で改良した D ブロックであっても K_0 が 1 程度から 0.65 程度まで低下している可能性があることが分かった。

この状況を間隙比と平均有効拘束圧の関係を用いて図 12 に模式的に示す。改良前の①の状態から、改良後は②に示すように間隙が減少、すなわち密度が増加するとともに拘束圧も増加する。その後、応力緩和等により改良直後よりも拘束圧が低下する可能性があるが、ある程度間隙の減少は維持された過圧密

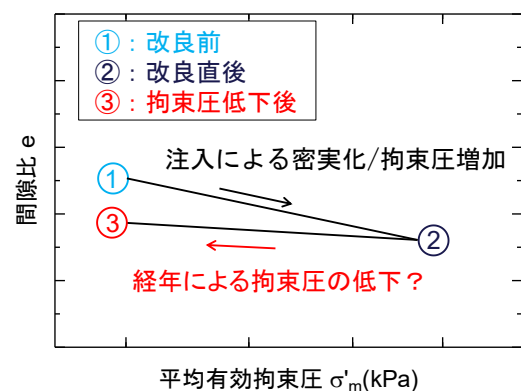


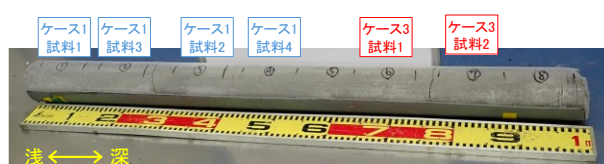
図 12 改良地盤の経年変化のイメージ

状態を維持する可能性があるが、ある程度間隙の減少は維持された過圧密

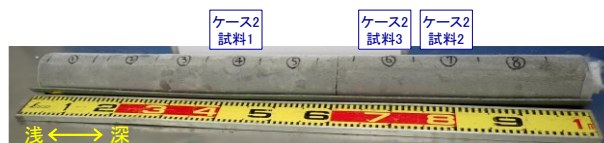
の状態にあると考えられる。液状化地盤が過圧密の状態にある場合、土が弾性的な挙動を示すことで過剰間隙水圧が上がりにくくなり、高い液状化強度比を発揮することが知られている。したがって、密実化された地盤では、拘束圧が低下しても、液状化強度比の増加は大きく損なわれない可能性がある。

そこで、改良域直近の未改良域からサンプリングした不攪乱試料を用いて、改良前を想定した $K_0=0.5$ の状態（以降、ケース 1）、改良直後を想定して $K_0=1.0$ まで圧密した状態（以降、ケース 2）、改良直後の $K_0=1.0$ の状態から経年変化により $K_0=0.65$ まで低下した状態（以降、ケース 3）の 3 パターンの応力状態を中空ねじりせん断試験装置内で再現し、非排水繰返しせん断試験（以降、液状化強度試験）を実施することで各パターンでの液状化強度比を把握した。なお、すべてのケースで鉛直有効応力 σ'_a は 80kPa とした。サンプリングは IFCS サンプリング手法を用いて実施し、極力乱れを排除した試料を採取した。採取した試料と試験に使用した箇所の大凡の位置を図 13 に示す。試料の均質性を考慮して、起点方で採取した T. P. = -0.20 ~ -2.20 m 間の試料を使用した。比較的均質な細砂試料が採取できていたが、礫が混入している箇所やクラックの入った箇所などを除外し、ケース 1 は 4 試料、ケース 2 は 3 試料、ケース 3 は 2 試料を確保した。なお、試験中は各圧密過程終了時に圧電素子を用いて供試体のせん断弾性波速度 V_s を計測し、各試料の状態を確認した。

試験施工箇所から採取した不攪乱試料を用いて中空ねじりせん断試験装置を用い、剛性把握のための V_s 、 V_p 計測と液状化強度試験を実施した。供試体作成状況を図 14 に示す。



(a) T. P. = -0.20 ~ -1.20m



(b) T. P. = -1.20 ~ -2.20m

図 13 試験に使用したサンプリング試料（起点方で採取）



(a) 供試体の穿孔 (b) 外径の整形 (c) 端面の整形 (d) 内径整形準備 (e) 内径の整形 (f) 作製完了
図 14 中空円筒供試体の作成状況

3.2 試験結果

図 15(a) ~ (d) に液状化試験直前に計測した間隙比や密度、せん断剛性等と平均有効拘束圧 σ'_m との関係を、図 16(a) (b) に液状化強度試験から得られた繰返しせん断応力比 $\tau_d/2\sigma'_a$ と繰返し回数 N_c の関係を示す。なお、耐震標準では L1 地震動および L2 地震動に対する液状化判定に用いる液状化強度比 R_{20} は、三軸せん断試験装置を用いた非排水繰返しせん断試験から求まる軸ひずみ両振幅 DA が 5% または 10 ~ 15% における繰返しせん断応力比 ~ 繰返し回数の関係をそれぞれ用いて良いこととされている。中空ねじり試験装置を用いた場合は、せん断ひずみ両振幅 DA で 7.5% または 15 ~ 22.5% に相当する。そのため、図 16(a) (b) には DA=7.5% と 15% の結果をそれぞれ示している。表 4 には図 15、16 で確認できる諸数値を取りまとめる。

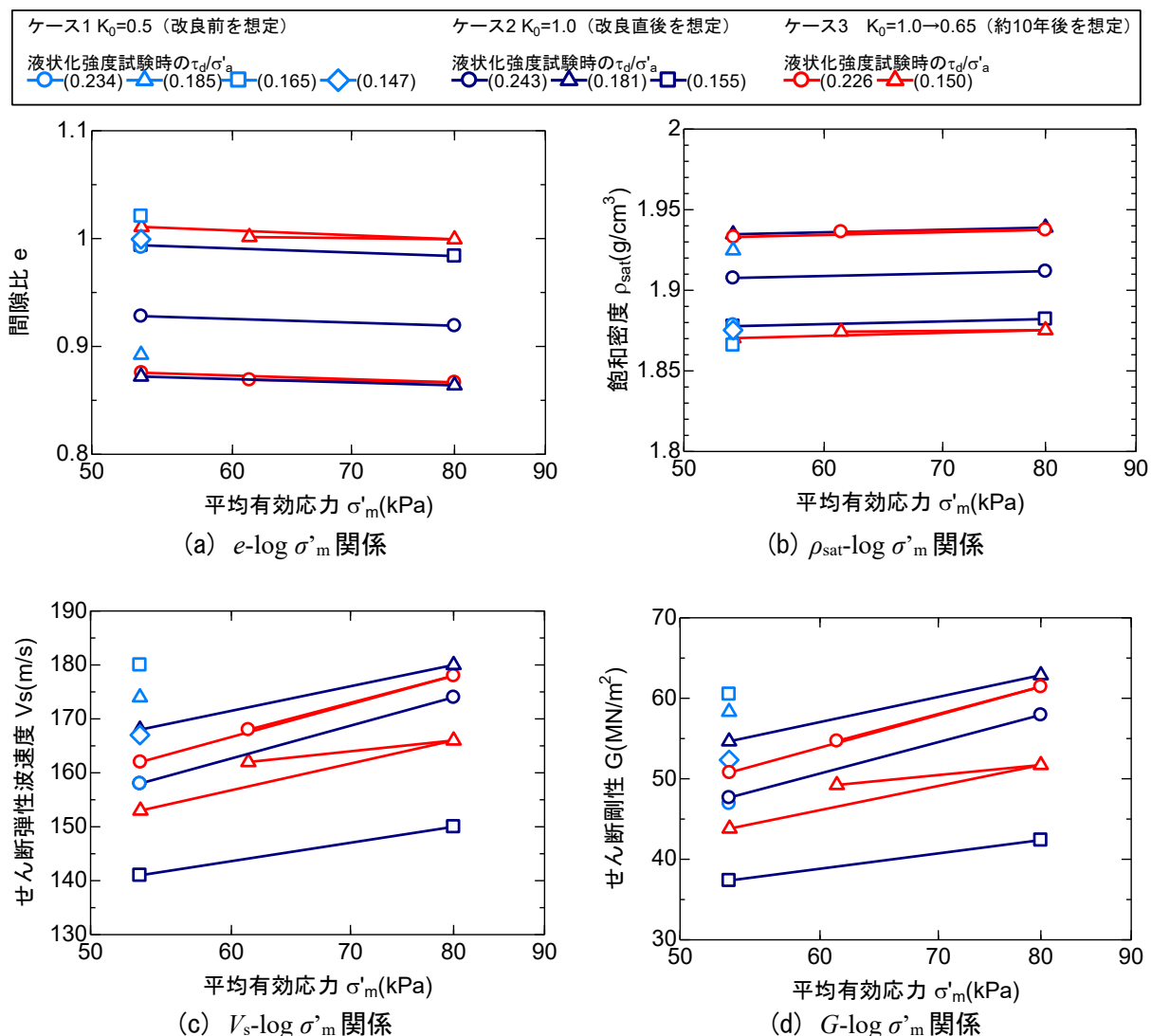


図 15 試験中の供試体の間隙比，飽和密度，せん断弾性波速度，せん断剛性と平均有効応力の関係

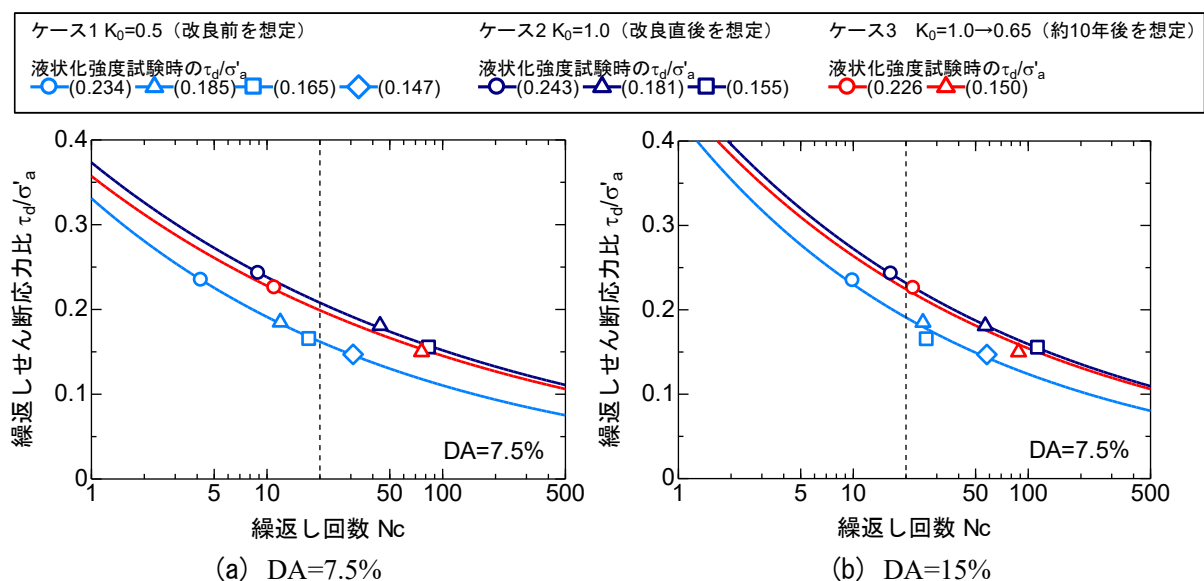


図 16 液状化強度試験結果

表 4 液状化強度試験等から得られた各種地盤諸数値

(a) ケース 1 $K_0=0.5$ (改良前を想定)

		K_0	有効応力状態			間隙比		飽和密度		せん断弾性 波速度 V_s (m/sec)	せん断 剛性 G (MN/m ³)	液状化強度試験結果		
			鉛直 σ'_a (kPa)	水平 σ'_r (kPa)	平均 σ'_m (kPa)	e	Δe	ρ_{sat} (g/cm ³)	$\Delta \rho_{sat}$ (g/cm ³)			せん断 応力比 τ_d/σ'_a	繰返し回数 N_c DA7.5% DA15%	
試料 1	段階 1	0.5	80	40	53.3	0.992	-	1.790	-	158	44.68	0.235	4.2	9.9
試料 2	段階 1	0.5	80	40	53.3	0.892	-	1.831	-	174	55.44	0.185	11.9	25.0
試料 3	段階 1	0.5	80	40	53.3	1.021	-	1.778	-	180	57.62	0.165	17.4	26.3
試料 4	段階 1	0.5	80	40	53.3	0.999	-	1.787	-	167	49.83	0.147	30.9	58.0
												R_{20}	0.162	0.191

(b) ケース 2 $K_0=1.0$ (改良直後を想定)

		K_0	有効応力状態			間隙比		飽和密度		せん断弾性 波速度 V_s (m/sec)	せん断 剛性 G (MN/m ³)	液状化強度試験結果		
			鉛直 σ'_a (kPa)	水平 σ'_r (kPa)	平均 σ'_m (kPa)	e	Δe	ρ_{sat} (g/cm ³)	$\Delta \rho_{sat}$ (g/cm ³)			せん断 応力比 τ_d/σ'_a	繰返し回数 N_c DA7.5% DA15%	
試料 1	段階 1	0.5	80	40	53.3	0.928	-	1.816	-	158	45.33	-	-	-
	段階 2	1	80	80	80.0	0.919	-0.009	1.820	0.004	174	55.09	0.243	8.9	16.4
試料 2	段階 1	0.5	80	40	53.3	0.872	-	1.840	-	168	51.94	-	-	-
	段階 2	1	80	80	80.0	0.864	-0.008	1.844	0.004	180	59.74	0.181	44.0	56.8
試料 3	段階 1	0.5	80	40	53.3	0.994	-	1.789	-	141	35.57	-	-	-
	段階 2	1	80	80	80.0	0.984	-0.010	1.793	0.004	150	40.34	0.155	83.7	113.7
												R_{20}	0.208	0.232

(c) ケース 3 $K_0=1.0 \rightarrow 0.65$ (改良から約 10 年後を想定)

		K_0	有効応力状態			間隙比		飽和密度		せん断弾性 波速度 V_s (m/sec)	せん断 剛性 G (MN/m ³)	液状化強度試験結果		
			鉛直 σ'_a (kPa)	水平 σ'_r (kPa)	平均 σ'_m (kPa)	e	Δe	ρ_{sat} (g/cm ³)	$\Delta \rho_{sat}$ (g/cm ³)			せん断 応力比 τ_d/σ'_a	繰返し回数 N_c DA7.5% DA15%	
試料 1	段階 1	0.5	80	40	53.3	0.876	-	1.839	-	162	48.25	-	-	-
	段階 2	1	80	80	80.0	0.867	-0.009	1.843	0.004	178	58.38	-	-	-
	段階 3	0.65	80	52	61.3	0.869	0.002	1.842	-0.001	168	51.98	0.226	11.0	22.0
試料 2	段階 1	0.5	80	40	53.3	1.011	-	1.782	-	153	41.72	-	-	-
	段階 2	1	80	80	80.0	0.999	-0.011	1.787	0.004	166	49.24	-	-	-
	段階 3	0.65	80	52	61.3	1.001	0.002	1.786	-0.001	162	46.87	0.150	75.8	88.0
												R_{20}	0.199	0.224

※ Δe および $\Delta \rho_{sat}$ は前段階との差分 ※ R_{20} : 20 回繰返し時の液状化強度比

3.2.1 V_s , V_p 計測による剛性把握

図 15(a) (b)を見ると、改良前を想定したケース 1 の状態、すなわち $K_0=0.5$ 、平均有効応力 $\sigma'_m=53\text{kPa}$ の状態にける各試料の間隙比 e および飽和密度 ρ_{sat} はそれぞれが 0.892~1.021 程度、1.778~1.831g/cm³ 程度となっており、供試体毎に個体差が見られた。ケース 2, 3 においても、圧密前の $K_0=0.5$ の状態で、このような個体差が同様にみられた。図 13 に示すように、綺麗なサンプリング試料が得られていたことから、自然地盤においてはこの程度の不均質性があったものと考えられる。

改良直後を想定したケース 2 では、圧密前の $K_0=0.5$ の状態で $\rho_{sat}=1.789\sim 1.844\text{g/cm}^3$ 程度であったが、 $K_0=1.0$ 、 $\sigma'_m=80\text{kPa}$ まで圧密すると、各供試体とも間隙比が 0.008~0.011 程度減少し、飽和密度はすべて 0.004g/cm³ 増加した。改良から 10 年後想定したケース 3 でも、 $K_0=1.0$ 、 $\sigma'_m=80\text{kPa}$ までの圧密で飽和密度はすべて 0.004g/cm³ 増加した。更に $K_0=0.65$ 、 $\sigma'_m=61\text{kPa}$ まで拘束圧を低下させた場合は、飽和密度の低下は 0.001g/cm³ にとどまっていた。つまり、 $K_0=1$ まで圧密した状態から 8 割程度の密度増加が維持されており、有効応力、すなわち地盤内の拘束圧は低下するものの、完全に密実化を喪失するわけではないことが分かる。

図 15(c) (d)には、せん断弾性波速度 V_s と V_s に概ね比例するせん断剛性 $G (= \rho_{sat} V_s^2)$ を示す。改良前を想定したケース 1 の 4 試料が、ほかのケースに比べて全体的に高いせん断弾性波速度、せん断剛性を示していることが分かる。間隙比や飽和密度ではそのような傾向は見られなかったが、これらの試料は他のケースよりも浅部に位置する試料を使っていたため、何かしらの要因があった可能性がある。具体的な状況については現状不明であるが、せん断弾性波速度が大きいほど高い液状化強度比を示すことが知られており、ケース 1 は他のケースよりも液状化強度比が高く算定される可能性がある。ただし、いずれも 150~180m/s 程度であり、図 8 に示す PS 検層結果と概ね一致する。このことから、IFCS サンプルングにより乱れの少ない不攪乱試料が採取できていたと考えられる。

ケース 2, 3 では、 $K_0=1.0$ の状態まで圧密することでせん断弾性波速度、せん断剛性ともに増加した。ケース 3 において $K_0=0.65$ まで低下させた場合、試料 1 (図中の赤○ケース) においてせん断弾性波速度で 10m/s (5.6%)、せん断剛性で 6.41MN/m² (11%)、試料 2 (図中の赤△ケース) においてそれぞれ 4m/s (2.4%)、2.37MN/m² (4.8%) の低下が見られた。特に試料 1 では図 15(c) (d)に見られるように $K_0=0.5$ から 1.0 に増加させた時の線上にほぼ位置していることから、有効応力の低下によりせん断剛性は元に戻ってしまう可能性があると言える。なお、せん断剛性は有効応力の 0.5 乗に概ね比例することが知られている。ケース 2, 3 の段階 1 と段階 2 における平均有効応力はそれぞれ 53.3kPa、80.0kPa であり増加率の 0.5 乗は 1.22 となり、ケース 3 の段階 2 と段階 3 ではそれぞれ 80.0kPa、61.3kPa であり増加率 (低下率) の 0.5 乗は 0.88 である。これに対してケース 2, 3 の段階 1 と段階 2 における剛性比は 1.13~1.22、ケース 3 の段階 2 と段階 3 のせん断剛性の剛性比は 0.89~0.95 となっており、ほぼ同等の値を示した。密度増加は 8 割程度残存していたことから、せん断剛性の低下は有効応力の低下によるものと考えられる。したがって、脈状地盤改良工法等の密実化工法で改良された地盤において、経年的に拘束圧の低下が見られた場合、密度増加は概ね残存しているものの、剛性は低下する可能性があると言える。ただし、拘束圧を低下させたケースは 2 ケースしか検討できなかったため、今後の検討が必要である。

3.2.2 液状化試験結果

液状化強度試験から得られたせん断応力比と繰返し回数の関係を図 16(a) (b)に示している。また、表 4 にはこれらの試験結果と共に、20 回繰返し時の液状化強度比 R_{20} を示す。なお、図中に示す液状化強度曲線は最小 2 乗法によりべき乗関数でフィッティングしている。ケース 3 については 2 点しか結果が得られていないため、ケース 2 の傾きを使用してフィッティングした。

改良前のケース 1 では $R_{20}=0.162$ および $R_{20}=0.191$ であるのに対して、ケース 2 の $K_0=1.0$ の状態ではそれぞれ $R_{20}=0.208$ と $R_{20}=0.232$ と 1.2~1.3 倍程度の強度増加がみられた。一般的には平均有効応力の増加率である 1.5 倍程度の増加が期待されるが、今回はそれを下回る結果となった。この要因の一つとして、上述の通りケース 1 ではせん断弾性波速度の高い試料を使用していたことから、改良前を想定した液状化強度比を相対的に高く算出していた可能性がある点が挙げられる。一方、ケース 3 では $R_{20}=0.199$ および $R_{20}=0.224$ まで若干強度比が低下しているが、これは 4.2%および 3.2%程度の低下であり、有効応力が低下するものの、増加した液状化強度比を 95%以上維持できていると考えられる。

図 17(a) (b)に、ケース 1~3 において同程度の繰返しせん断応力比 τ_d/σ'_a で実施した液状化強度試験のせん断応力と平均有効応力の関係 (有効応力パス) を示す。 $\tau_d/\sigma'_a=0.226\sim0.243$ で実施したケースを示した図 17(a)を見ると、ケース 1, 2 では初期繰返し載荷時の有効応力の低下量がそれぞれ 27.2kPa および

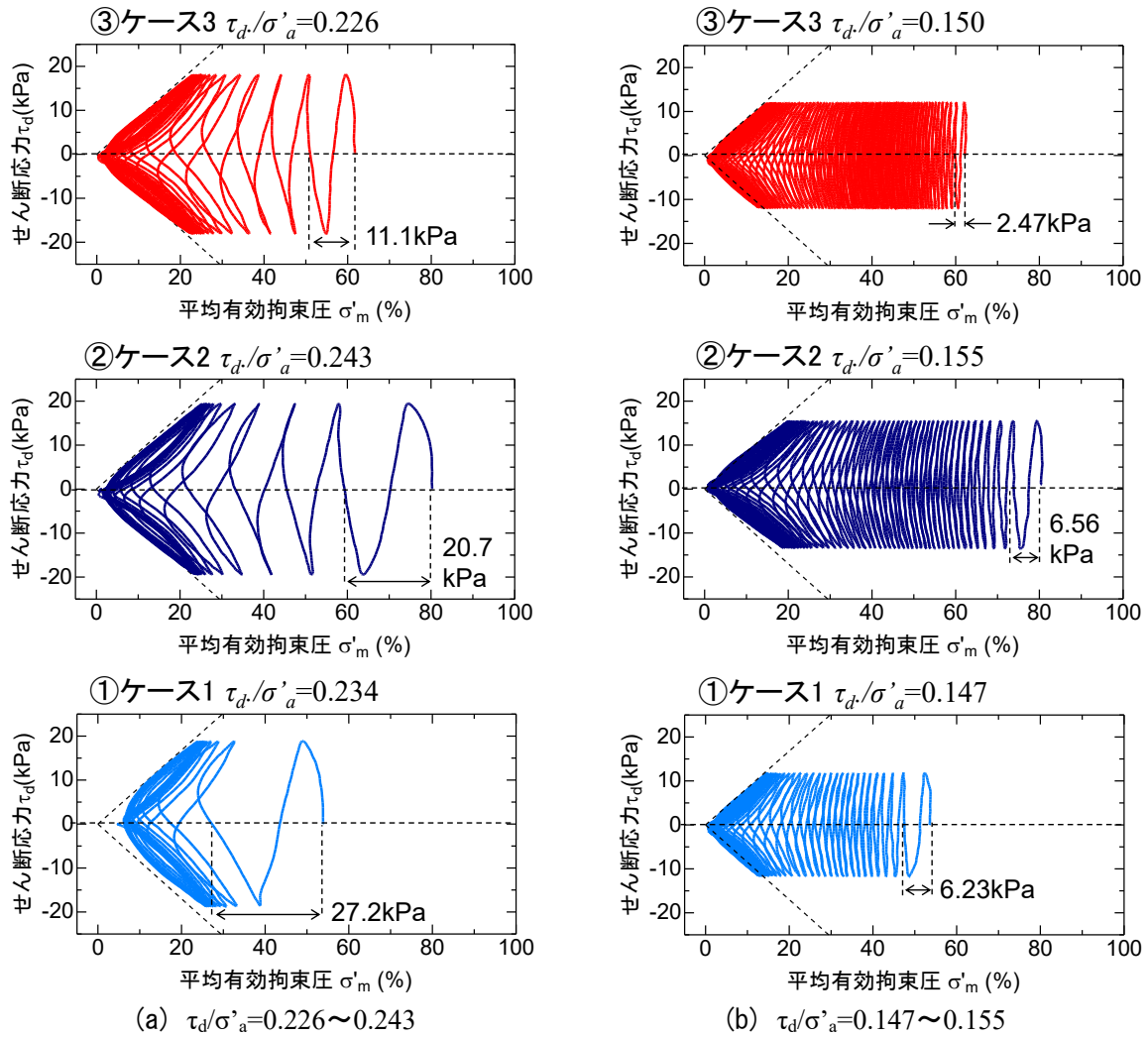


図 17 液状化強度試験における有効応力パスの比較

20.7kPa であるのに対して、ケース 3 では 11.1kPa と非常に小さくなっていることが分かる。図 17 (b) に示す $\tau_d/\sigma'_a=0.147\sim0.155$ で実施したケースでも、ケース 1, 2 の初期载荷における有効応力低下量がそれぞれ 6.23kPa および 6.56kPa であるのに対して、ケース 3 では 2.47kPa となっている。このように有効応力の低下量が小さくなる現象は過圧密砂の典型的な挙動である。

以上より、脈状地盤改良工法により改良直後に密度や拘束圧が増加した今回の地盤においては経年変化により改良直後よりも拘束圧が低下している可能性があるが、改良直後に想定される飽和密度の 8 割程度は維持できており、過圧密効果により 95%以上の液状化強度比が維持できていると考えられる。

4. 改良地盤の経年変化評価法の検討

上記の調査、試験結果を踏まえると、脈状地盤改良工法を適用した地盤においては、施工後に確認した改良効果が恒久的に維持されると判断できる。したがって、今後の計画・設計時に想定する改良地盤の液状化強度が経年的に保たれていることを想定し設計してよいと考えられる。

5. まとめ

2015 年に脈状地盤改良工法を適用した箇所では地盤調査を実施し、改良効果の経年変化を確認した。以下に得られた知見を示す。

- (1) ミニラムサウンディング試験や三成分コーン貫入試験の結果、調査地点や深度によってバラツキは見られるものの、約 10 年経過した現在においても同等の換算 N 値 (N_d 値) が得られていた。 N_d 値から算定される有効注入率 A_{se} で 0.3%程度低下する箇所はあるものの、概ね同等かそれ以上であったことから、改良効果が維持されていることを確認した。
- (2) 孔内水平載荷試験から得られる静止土圧係数 K_0 については、改良直後に 1.0 程度あったものの、約 10 年経過後には 0.65 程度まで低下している可能性があることが分かった。一方、三成分コーン貫入試験から得られる周面摩擦は未改良域と比較して改良域で倍程度発揮されていることから、改良前の $K_0=0.5$ から $K_0=1.0$ まで増加していると推測される。液状化検討に用いる K_0 の改良品質確認については、調査方法を検討する必要がある。
- (3) 試験施工箇所の未改良域から採取した不攪乱試料を用いて、孔内水平載荷試験をもとに推定した現在の地盤状態を中空ねじりせん断試験装置内で再現し、液状化強度試験を実施した。その結果、クリープ等により拘束圧が低下した場合でも、80%以上の密実化効果は維持されており、過圧密履歴の影響により、改良直後の 95%の液状化強度比が維持されることを確認した。

以上より、脈状地盤改良工法の対策効果は約 10 年間維持されていると考えられる。ただし、拘束圧の増加に期待した設計を行った場合、拘束圧の経年的な低下による 5%程度の液状化強度比の低下が見られた。この点については、今後、液状化検討に用いる K_0 の調査法の改善や、異方状態・過圧密状態での液状化強度試験の実績を増やしながら検討を続けていく予定である。なお、今後も同様に対策効果が維持されると考えられるが、継続的に同様の調査を行いながら、恒久性を確認していきたい。

6. 知的財産権取得状況

特許出願 0 件 ※ 本成果に関する特許出願の予定なし

7. 研究成果発表実績

- 1) 論文発表 国内 1 件 (投稿中)、海外 0 件
- 2) 口頭発表 国内 3 件、海外 0 件
- 3) その他 (研究内容報告書、機関誌発表、プレス発表等) 0 件

8. 参考文献

- 1) 井澤 淳, 小島謙一, 荒木 豪, 大西高明, 林田 晃, 藤原寅士良, 上田恭平, 舘山 勝: 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 (地圏工学), Vol. 75, No. 4, pp. 454-468, 2019

- 2) 荒木 豪, 大西高明, 蓮見 亮, 滝沢 聡, 井澤 淳, 舘山 勝: 脈状注入工法による液状化対策(鉄道盛土直下での適用), 基礎工, Vol. 45, No.12, pp. 72-74, 2017.
- 3) 井上康太, 水越貴大: 脈状地盤改良工法による液状化対策の施工〜東武スカイツリーライン北千住駅〜, 日本鉄道施設協会誌, 2019 年 6 月号, pp. 431-432
- 4) 井澤 淳, 吉本 叶, 速見直紀, 前田友章: 浮き上がり対策としての脈状地盤改良工法の適用と品質確認, 日本鉄道施設協会誌, 2023 年 8 月号.
- 5) 糸川和樹, 宇野匡和, 山脇奨平, 大西高明, 山本昌徳, 井澤 淳: 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 3 (本施工結果), 土木学会第 78 回年次学術講演会, 2023.
- 6) 原田健二・山本実・大林淳: 静的締固め砂打設地盤の K_0 増加に関する一考察, 第 53 回土木学会年次学術講演会, III B, pp. 540-541, 1998
- 7) 井澤 淳, 小島 謙一, 荒木 豪, 大西高明, 林田 晃, 藤原 寅士良, 細井 学, 水野 弘二, 舘山 勝, 脈状地盤改良工法の自然地盤への適用性と改良効果の持続性に関する検討, 土木学会論文集, Vol. 80, No. 1, 論文 ID: 23-0013, 2024
- 8) (財) 沿岸技術研究センター: 液状化対策としての静的圧入締固め工法技術マニュアル-コンパクショングラウチング工法, 2007.
- 9) 平間邦興: 相対密度の適応に関する 2・3 の私見, 砂の相対密度と工学的性質に関するシンポジウム発表論文集, pp. 53-56, 1979.
- 10) Meyerhof, G. G.: Discussion of Session 1, Proc. of 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 3, pp. 110, 1957.
- 11) (公財) 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
- 12) 水野恭男, 末松直幹, 奥山一典: 細粒分を含む砂質地盤におけるサンドコンパクションパイル工法の設計法, 土と基礎, Vol. 35, No. 5, pp. 21-26, 1987.
- 13) 井澤 淳, 小島謙一, 速見直紀, 半井恵介, 前田友章, 中谷紘也, 山田孝弘: 各種地盤調査結果を用いた脈状地盤改良工法の改良効果評価, 地盤材料のボーリング・サンプリングと採取試料の品質評価法に関するシンポジウム, 2021.
- 14) 兵頭 順一, 一井 康二: 締固め砂杭工法による密度増加と K_0 増加のそれぞれによる改良効果の評価とモデル化, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol. 75, No.4, pp. 443-453, 2019
- 15) 細井 学, 藤原寅士良, 井澤 淳, 荒木 豪, 大西高明, 林田 晃: 脈状注入による液状化対策工法の試験施工結果, 第 51 回地盤工学研究発表会, 2016
- 16) 井澤 淳, 荒木 豪, 小島謙一, 舘山 勝, 大西高明, 藤原寅士良: 効率的な液状化対策が可能な脈状地盤改良工法の開発, 鉄道総研報告, 第 30 巻, 第 5 号, pp. 23-28, 2016