

堤防の液状化対策に関する模型振動実験と動的解析

Shaking Table tests and FEM Simulation of Permeable Grouting Method as Measure against Liquefaction of River Embankment

兵頭武志*・喜多信代**

HYODO Takeshi and KITA Nobuyo

* (財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

** 大阪市港湾局 計画整備部 設計課

The permeable grouting method is a measure against liquefaction by replacing pore water with chemical grout, which is to be applied to soil improvement of existing right bank of Shirinashi river. This method must be basically used in 100% replacement ratio. Therefore, we examined the effect of reduction to 70% replacement ratio by shaking table tests and FEM simulation. As a result, we confirmed that it is effective to prevent the displacement of sheet-pile-wall due to liquefaction.

Key Words : liquefaction , permeable grouting method , shaking table test , FEM

1. はじめに

浸透固化処理工法は、水ガラスを主成分とする溶液型薬液を地盤中の間隙水と置き換え、土粒子間に粘着力を付加して地盤を固結させる工法で、既設構造物に影響を与えずに液状化対策が行えるという特長を有する。ただし、浸透固化処理工法技術マニュアル¹⁾によると、本工法の改良率は100%が原則で、改良率を減じる場合は模型振動実験等で構造物に有害な変形が生じないことを確認しなければならない。そこで本研究では、大阪市港区尻無川右岸（水門上流）堤防の液状化対策として採用を検討していた本工法について、図-1に示す流れで検討を進め、改良率70%に低減した場合の妥当性を検証した。

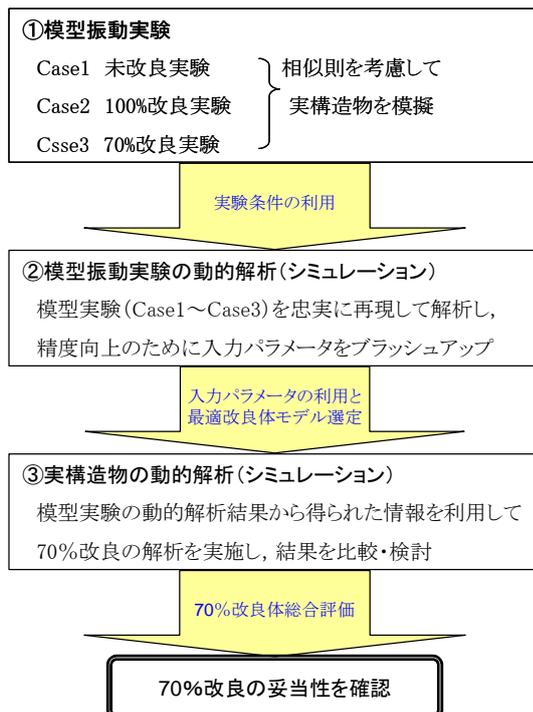


図-1 検討の流れ

2. 模型振動実験

2.1 試料土と薬液濃度

まず、現地の尻無川右岸より試料土を採取し、模型地盤の締め固め管理や改良地盤の薬液濃度の決定に必要な情報を得るために物理試験を実施した。

次に、工事で使用する薬液の濃度を定めるため、薬液濃度と改良強度との関係性を調べる配合試験を実施した。そして、その結果をもとに、模型振動実験の薬液濃度を定める配合試験を実施して、薬液の濃度を5%に設定した。

2.2 実験内容

(1) 実験装置と実験ケース

振動実験に用いた実験土槽を図-2に示す。

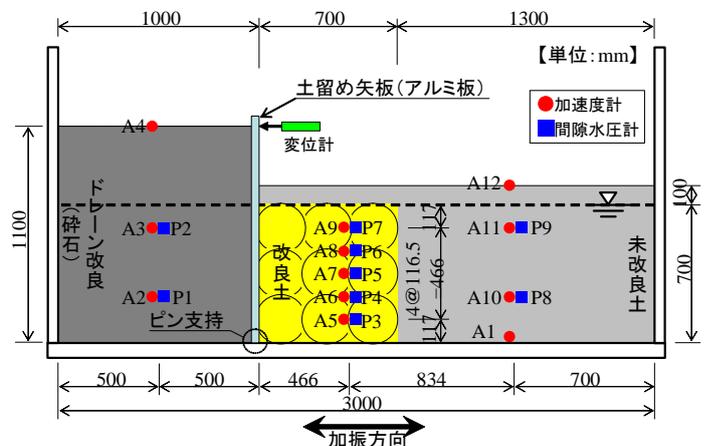


図-2 実験土槽断面 (Case3)

振動実験は、未改良 (Case1), 100%改良 (Case2), 70%改良 (Case3) の3ケースを行った。未改良および100%改良ケースは70%改良ケースに対する比較対象として実施した。それぞれのケースで、図-2に示すような位置に計測機器を設置し、矢板の最大変位量や間隙水圧、加速度などの動的挙動を計測した。

(2) 入力地震波と相似則

当該地の工学的基盤における設計用入力地震動 (4-35EW) は上町断層系の想定地震によるものである。この地震動に対し、模型地盤底面に相当する深さでの地震動を応答解析で求め、それを相似則に従って調整した波形を入力地震動とした。波形を図-3に示す。

模型振動実験には、井合が提案する重力場 (1G場) における相似則⁹⁾を適用し、長さについて実物の1/10の模型を作製した。表-1に各パラメータの縮尺を整理する。

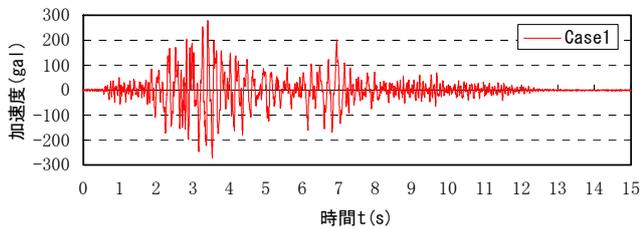


図-3 入力波形 (Case1)

表-1 相似則と模型の縮尺

パラメータ	実物/模型	縮尺
長さ	λ	10
密度	1	1
時間	$\lambda^{0.75}$	5.62
応力	λ	10
間隙水圧	λ	10
変位	$\lambda^{1.5}$	31.6
加速度	1	1
ひずみ	$\lambda^{0.5}$	3.16

2.3 実験結果と考察

模型振動実験では全ケースについて未改良部で噴砂が観察され、液状化の発生が確認された。計測結果一覧を表-2に示す。実験で計測した項目 (矢板残留変位、過剰間隙水圧比、応答加速度) について以下に整理する。

①矢板残留変位

Case1 での矢板残留変位 759mm (実寸換算) に比べ、Case2 で16mm, Case3 で82mm と、改良したケースで変位が大幅に低減した。

②過剰間隙水圧比

間隙水圧計 (P3~P9) に着目すると、Case1 では過剰間隙水圧比がほぼ1.0に達して液状化しているが、Case2 では改良部のため0.3以下で、Case3 では、改良部 (P3・P5・P7) が0.4以下、改良部に囲まれた未改良部 (P4・

P6) が0.7以上であり、改良部と未改良部では差がある。

③加速度

改良部に設置した加速度計 (A1・A5~A9) に着目すると、Case1 では液状化発生に伴い、下層から上層に向かって最大加速度が低減しているが、Case2 とCase3 では、液状化していないため増幅している。

④沈下量

改良部の沈下を見ると、Case1 での実物換算の沈下量は949mmと大きい。Case2 とCase3 では、それぞれ158mm および32mm と大幅に低減している。

矢板残留変位と改良率の関係を図-4に示す。横軸が改良率で、縦軸が矢板残留変位を実物換算したものである。未改良に比べ、100%改良及び70%改良の矢板残留変位が大幅に小さくなっており、70%改良でも液状化対策として十分有効であることが実験的に確認された。

表-2 計測結果のまとめ

ケース	矢板残留水平変位(mm)		過剰間隙水圧比		最大加速度 (Gal)		地表面沈下量(mm)			
	模型	実寸換算					位置	模型	実寸換算	
Case1 (未改良)	24.0	759	碎石部	P1	0.00	A1	278	碎石部	20	632
				P2	0.10	A4	618			
				P3	0.91	A5	262			
			未改良部	P4	0.97	A6	150	未改良部	30	949
				P5	0.87	A7	147			
				P6	0.92	A8	125	未改良部	20	632
				P7	0.93	A9	125			
				P8	1.00	A11	127			
				P9	0.93	A12	131			
Case2 (100%改良)	0.5	16	碎石部	P1	0.03	A1	295	碎石部	4	126
				P2	0.07	A4	738			
				P3	0.01	A5	317			
			改良部	P4	0.01	A6	353	改良部	5	158
				P5	0.08	A7	396			
				P6	0.28	A8	468			
			未改良部	P7	0.06	A9	480	未改良部	22	696
				P8	1.00	A11	184			
				P9	0.90	A12	154			
Case3 (70%改良)	2.6	82	碎石部	P1	0.09	A1	292	碎石部	4	126
				P2	0.09	A4	614			
				P3	0.09	A5	326			
			改良部	P4	0.76	A6	349	改良部	1	32
				P5	0.28	A7	340			
				P6	0.90	A8	356			
			未改良部	P7	0.34	A9	516	未改良部	23	727
				P8	1.00	A11	168			
				P9	1.00	A12	306			

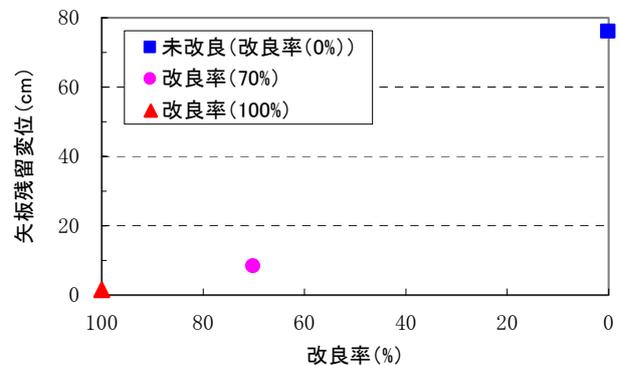


図-4 矢板残留変位 (実物換算) と改良率の関係

3. 動的解析

3.1 解析概要

(1) 解析プログラム

動的解析にはFLIP³⁾を用いた。FLIPは有効応力法に基づく2次元地震応答解析プログラムであり、液状化のような地盤破壊現象を予測するプログラムとして、主に港湾施設を対象に多くの実績がある。

解析は模型振動実験と実構造物を対象に2種類を実施した。まず、模型振動実験を動的解析でシミュレーションし、実験結果と比較することで解析パラメータの精度を高めるとともに70%改良地盤の最適なモデルを選定した。次に、それらの成果を実構造物解析に反映させることで、改良率を70%に低減した場合の効果を推定した。

(2) 対象断面と解析条件

模型実験の断面は上述のとおりである。実構造物の対象断面を図-5に示す。

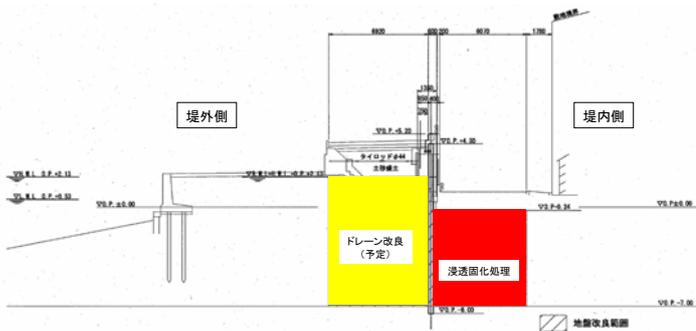


図-5 実構造物の断面

模型実験解析では、土槽を剛体とみなして底面を固定境界、側面を鉛直ローラー境界とした。一方、実構造物解析では、底面境界は工学的基盤を現地Ds層に設定して粘性境界とし、側方境界については無限地盤を模擬するために、自由地盤を設けて粘性境界とした。各材料については、液状化地盤と浸透固化改良地盤をマルチスプリング要素とし、ドレーン改良を模擬した碎石地盤は液状化しないマルチスプリング要素とした。また、矢板を非線形はり要素でモデル化した。

模型実験解析では、振動台土槽底板での実測波形を用いた。実構造物解析については、工学的基盤より上層をモデル化するので、応答解析で求めた工学的基盤での地震動をそのまま入力した。

(3) 70%改良地盤のモデル化

70%改良の改良地盤について、以下の2つのモデルで解析し、得られた結果を比較して、模型実験をより精度良く再現できるモデルを選定することにした。モデル化の概念図を図-6に示す。

①区分地盤モデル：Case3-A

70%改良の場合、改良地盤内部に未改良の部分が残るので、この部分について液状化を考慮したマルチスプリング要素で忠実にモデル化する。

②一様地盤モデル：Case3-B

改良率に応じて材料物性を低減し、均一な地盤としてモデル化する。

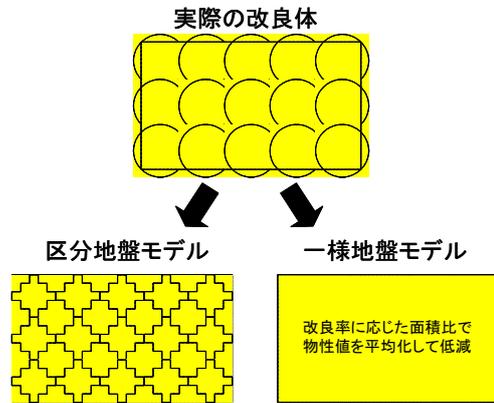


図-6 改良地盤の解析モデル化概念

3.2 解析結果

(1) 模型実験解析結果と考察

地盤変形状況と過剰間隙水圧比の分布を図-7にあわせて示す。同図より、未改良部は液状化(赤色)に達しており、模型振動実験結果とほぼ整合した。なお、改良部は解析条件として非液状化層に設定しているため、過剰間隙水圧は発生しない。Case1を見ると、模型矢板受働側の地盤変形が顕著で、この影響により、矢板が堤内側へ変位している様子がわかる。

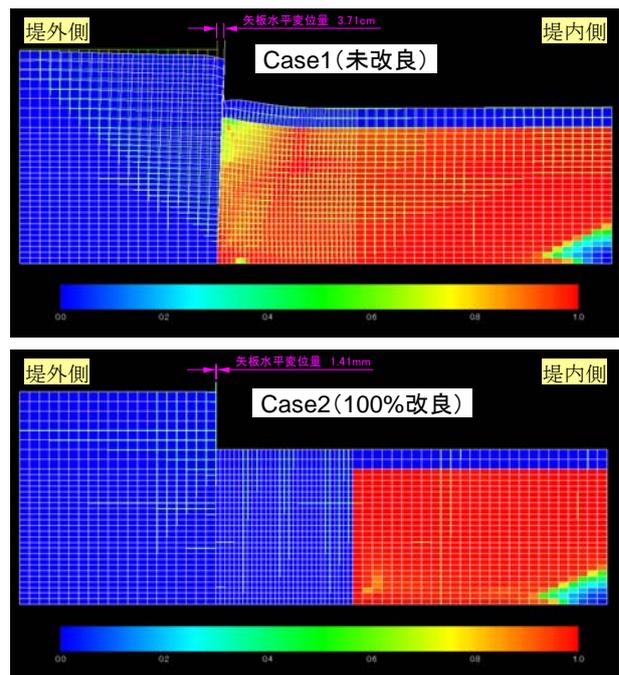


図-7 地盤の変形と過剰間隙水圧比の分布 (その1)

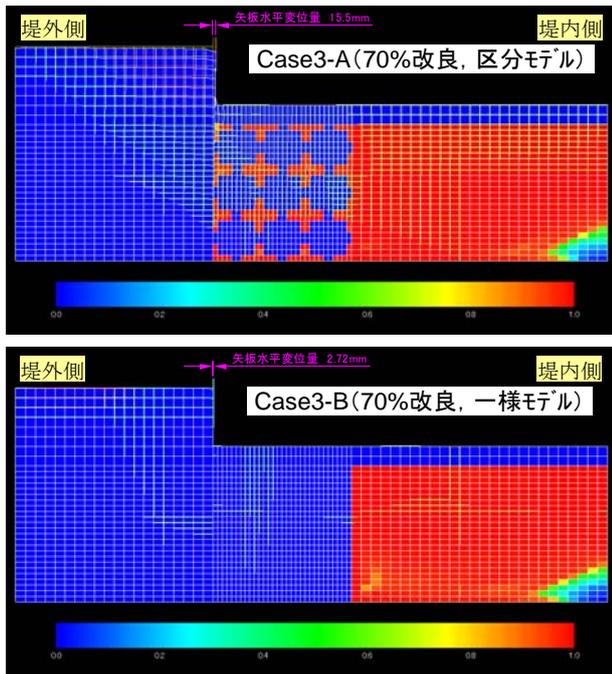


図-7 地盤の変形と過剰間隙水圧比の分布 (その2)

模型矢板残留水平変位について、実験結果と解析結果を表-3に比較して示す。全ケースで解析結果は実験結果よりも水平変位量が大きいですが、これは、解析では、地盤を均質なものとモデル化していることと、間隙水の排水が考慮できない点が主因と考えられる。

表-3 模型矢板の残留水平変位

ケース	模型実験	模型解析
Case1 ; 未改良	23.5mm	37.1mm
Case2 ; 100%改良	0.5mm	1.4mm
Case3-A ; 70%改良 (区分地盤)	2.6mm	15.5mm
Case3-B ; 70%改良 (一様地盤)	2.6mm	2.7mm

70%改良の2ケース (Case3-A, 3-B) に着目すると、改良範囲を一様地盤とした Case3-B に対して、改良範囲に未改良部がある Case3-A の方が5~6倍大きく、実験結果との差が大きい。Case3-A は、改良範囲内に未改良部があり、模型矢板と改良土との接触範囲、あるいは改良土同士の接触範囲が小さいことから、改良土周辺の未改良部の液状化によって、改良範囲を一体とした場合の剛性や強度が小さくなったためと考えられる。したがって、今回の解析では、実験と比較的対応した Case3-B の一様地盤モデルを採用して、実構造物を解析することにした。

(2) 実構造物解析結果と考察

改良部を一様地盤モデルに設定した結果 (変形図と残留過剰間隙水圧比分布) を図-8に示す。同図では左側が堤外側となるが、護岸周辺部は液状化によって堤外側の変位と沈下が著しいことが見て取れる。一方、海側道路の中央部下層はドレーン改良であるため、過剰間隙水圧

の上昇は抑制されており、変位量は大きいものの、一体的に変位している。また、浸透固化改良範囲の周辺は液状化に達しているものの、改良範囲が液状化していないため、その影響で防潮堤や陸側道路部は変位・変形が抑制されている。

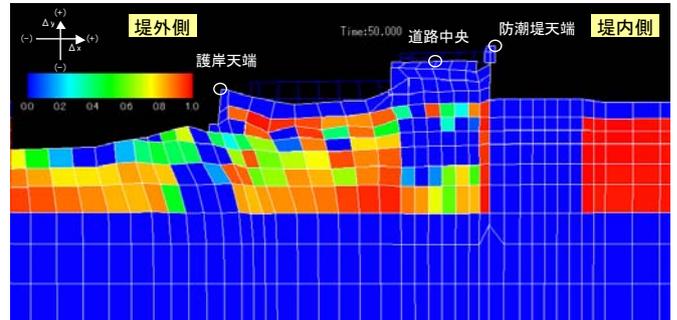


図-8 変形図と残留過剰間隙水圧比の分布

代表的な箇所 (護岸天端, 道路中央, 防潮堤天端) の変位量を表-4にまとめる。同図より、防潮堤天端 (矢板天端) の変位量は、水平方向陸側に 9.3cmで、鉛直方向に 5.5cmの沈下となり、70%改良でも変位抑止に有効であることが確認できた。

表-4 代表点の変位量のまとめ (+ : 堤内側)

護岸天端		道路中央		防潮堤天端	
Δx(cm)	Δy(cm)	Δx(cm)	Δy(cm)	Δx(cm)	Δy(cm)
-228.7	-51.9	-60.7	-70.7	9.3	-5.5

4. おわりに

本論文は、平成17年度に大阪市港湾局より受託した調査業務を取りまとめたもので、計画整備部設計課の担当職員各位には本論文の草稿に際してご協力をいただきました。また、(独)港湾空港技術研究所 地盤・構造部 動土質研究室の山崎室長には、実験や解析結果の考察・評価に際して貴重なアドバイスをいただきました。これらの方々に感謝の意を表して結びとします。

参考文献

- (財) 沿岸開発技術研究センター：沿岸開発技術ライブラリー No.18, 浸透固化処理技術マニュアル, 2003.5.
- S.Iai : Similitude for Shaking Table Tests on Soil-Structure Model in 1G Gravitational Field, Report of the Port and Harbour Res. Inst., Vol.27, No.3, pp.3-24, 1988.
- Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T. : Strain space plasticity model for cyclic mobility, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol.29, No.4, pp.27-56, 1990.