

木杭基礎を用いた液状化対策工の解析的研究

栗原 柊介¹・森 春香²・松田 涼輔³・沼田 淳紀⁴・酒井 久和⁵

¹学生会員 法政大学デザイン工学研究科 (〒162-0843 東京都新宿区市ヶ谷田町 2-15)

E-mail: shusuke.kurihara.9j@stu.hosei.ac.jp

²非会員 LEGOLAND Japan (〒455-8605 愛知県名古屋港区金城ふ頭 2)

E-mail: info@LEGOLAND.jp

³非会員 松戸市役所 (〒271-8588 千葉県松戸市根本 387-5)

E-mail: info@city.matsudo.chiba.jp

⁴正会員 飛鳥建設株式会社 技術研究所 (〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬 5472)

E-mail: atsunori_numata@tobishima.co.jp

⁵正会員 法政大学 (〒162-0843 東京都新宿区市ヶ谷田町 2-33)

E-mail: hisakai@hosei.ac.jp

LP-LiC 工法の液状化対策効果を確認するために実施された大型模型振動実験に対して、有効応力解析コード FLIP ROSE を用いて無対策地盤、丸太打設(5D 間隔, 4D 間隔)地盤、密度増大地盤の 4 ケースにおける数値シミュレーションを行った。結果、実験における過剰間隙水圧時刻歴と整合するような液状化パラメータをパラメトリックスタディにより同定することで、液状化の程度や錘の沈下量について整合した結果が得られ、さらに、室内試験による液状化抵抗曲線にフィッティングした液状化パラメータを使用することで、整合度のより高い結果が得られた。

Key Words: *liquefaction, LP-LiC method of construction, multi-spring, joint element*

1. はじめに

近年わが国では、大地震のたびに甚大な液状化被害が発生している。1964 年新潟地震では、液状化現象による新設の橋桁の落下や県営住宅の横倒し被害などにより、液状化現象が広く知られることとなった¹⁾。2011 年東北地方太平洋沖地震では、津波による甚大な被害に並び、東北地方から関東地方の太平洋沿岸を中心に広範囲にわたって各地で液状化被害が発生した。特に、液状化被害の大きかった江戸川区や浦安市の一部では、大量の砂の噴出、大きな地盤沈下、それに伴うマンホールの浮上や建物の沈下・傾斜といった液状化被害が顕著に表れた²⁾。また今後も首都圏直下地震や南海トラフ地震等の大規模な地震の発生が予測されている。そこで発生する地震に対し、液状化現象による被害を軽減・防止するために安全性が高く、かつ経済的な液状化対策工法が望まれており、各研究機関において開発が進められている。一方、建設事業においても、経済性や合理性だけでなく、持続可能性や温室効果ガス削減を積極的に考える必要がある。温室効果ガスのひとつである二酸化炭素を削減する方法

の一つとして、木材利用が提案されている。植物は太陽からの光エネルギーを利用し、大気中の二酸化炭素を有機物として固定する働きがあり、特に樹木は幹や枝などの形で大量の二酸化炭素を吸収固定している。伐採した木材を長期間保存すれば、炭素貯蔵(カーボンストック)となり、大気中の二酸化炭素削減に寄与できる。植林と伐採・保存を繰り返すことは、木材利用の拡大と二酸化炭素の大量貯蔵を行うことにつながる。施工に使用するセメントや鉄を自然素材を丸太に代替することにより、製造時エネルギーを少なくし、二酸化炭素排出量を削減することが可能である。

以上の背景から、飛鳥建設により丸太打設液状化対策 & カーボンストック工法(Log Piling Method for Liquefaction Mitigation and Carbon Stock)、通称 LP-LiC 工法が開発された。LP-LiC 工法は、丸太を砂地盤に打設することで地盤を密に改良し液状化対策を行うと共に、丸太を地下水位以深に打設して炭素貯蔵を行う液状化対策工法である。丸太は地下水位以深では腐朽せず半永久的に健全な状態を保ち続け、二酸化炭素の貯蔵と液状化対策効果を長期に渡って発揮することができる³⁾。

飛島建設では、LP-LiC 工法の液状化対策効果を確認するため、大型模型を用いた振動実験が行われた。本研究では、大型模型振動実験に対して数値シミュレーションを行い、液状化対策効果を評価できる解析手法の確立を目的とする。

2. 実験概要

飛島建設による振動実験⁵⁾では無対策地盤(D_r=48%)、丸太打設地盤 4D 間隔(D_r=70%)・5D 間隔(D_r=65%)(Dは丸太の直径)、密度増大地盤(D_r=91%)の4ケースについて実験が行われた。土槽1では、土槽を2つに仕切り、無対策地盤と丸太打設 5D 間隔地盤が作製され同時に加振された。同様に土槽2では、丸太打設 4D 間隔地盤と密度増大地盤が作製された。実験ケースについて表1に、大型振動実験の写真を図1に示す。

模型地盤とセンサー設置位置を図2-1、2-2に示す。模型地盤の寸法は、内寸横 5.7m×奥行き 3.6m×高さ 1.8m、

2つに区切り、それぞれ地盤を設置している。作成方法は水中落下法である。GL-0.1m面に水位を設定したため、地盤上部 0.1mは非液状化層である。地盤に、液状化の程度を確認するために横 1m×奥行き 1m×高さ 0.5mで質量 1.1tのコンクリート製の錘が載荷されている。

使用したセンサーは、変位計(D1~D8)、加速度計(A00x, A00y, A00z, A01x~A04x, A05x, A05y, A05z, A06x~A09x, A10x, A10y, A10z)、間隙水圧計(P01~P12)であり、加速度計 A06x~A09x と水圧計 P07, P08, P11, P12 は、それぞれ丸太にセンサーを埋め込んでいる。

使用された丸太はスギで、末口径 D_rが 8cm、長さ Lは 1mで、皮を剥ぎ先端を三角錐状に尖らせただけの自然木が用いられた。使用された丸太は、用意された 200本の内末口径が 8cmに近いもの 77本から選ばれたもので、元口は末口より平均で 0.65cm太い。

表1 実験ケース

実験ケース	対策	相対密度(%)
NIP	無対策	48
P5D	丸太打設(5D間隔)(D:丸太直径)	64
DNS	密度増大	91
P4D	丸太打設(4D間隔)(D:丸太直径)	70

入力地震動は、50gal~400galまでの8秒間の正弦波

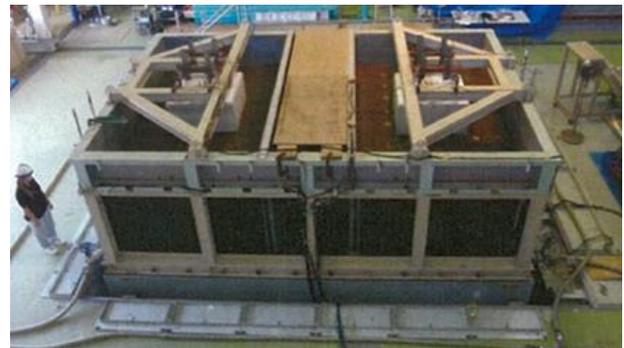


図1 大型振動実験の様子

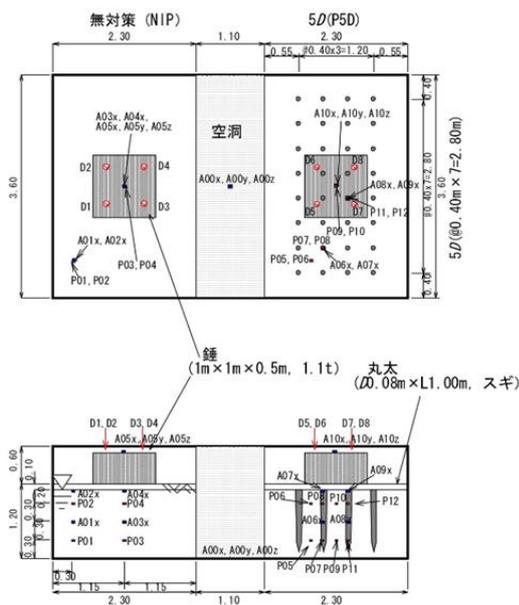


図2-1 実験大型模型とセンサーの設置位置 (NIP, P5D)

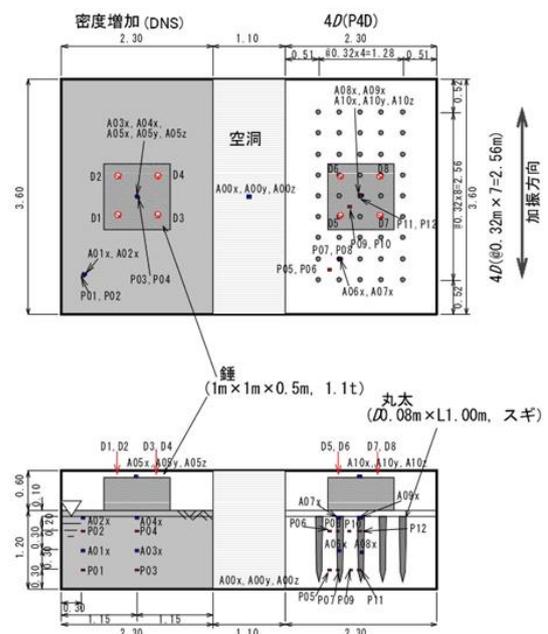


図2-2 実験大型模型とセンサーの設置位置 (DNS, P4D)

使用した砂の粒度組成と物理的性質を図3に示す。使用した砂は霞ヶ浦砂であり、相対密度は、最小法によって求めた最小間隙比から求めた。最小法によって求めた相対密度は液状化抵抗との相関関係が高いことから本実験で用いている。

大地震を再現するために入力された振動の加振波形を図4に示す。加振は、約50Galずつ増やすステップ加振として、主要部の振幅を50Galから400Galまで8回の加振が行われた。この加振波の主要部は、4Hzで波が20回の正弦波であり、この波の初めに5回の0Galから主要部まで振幅が直線的に増加する波と、最後に5回の減少する波がある。1回の加振が終わった後、次の加振に進む前に地下水位が所定の高さに落ち着き、加振によって上昇した過剰間隙水圧を十分に消散させて前の振動の影響を少なくさせている。

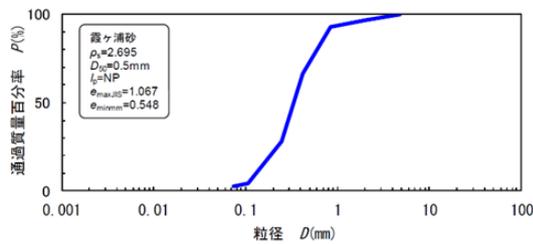


図3 使用した砂の粒度組成と物理的性質

表2 液状化パラメータ (解析ケース1)

ケース	液状化特性						
	変相角 ϕ_p (°)	液状化パラメータ					Sus 値
		s1	w1	p1	p2	c1	Sus
NIP	28	0.005	5.6	0.6	1.0	2.5	4.5
P5D	28	0.005	7.7	0.6	1.0	3.0	5.5
DNS	28	0.005	6.0	0.5	0.8	2.3	設定なし
P4D	28	0.005	8.0	0.6	0.8	5.0	設定なし

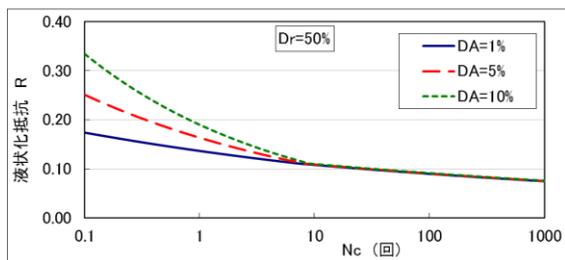


図4-1 相対密度50%の液状化抵抗曲線 (NIP)

3. 解析条件

大型模型実験に対する数値シミュレーションは2次元動的有効応力解析プログラム FLIP ROSE ver.7.4.0 を用いた。

(1) 地盤パラメータ

液状化パラメータの異なる2ケースで解析を行った。解析ケース1は、地震応答解析において錘の振動の影響の小さな表層地点の過剰間隙水圧の時刻歴に着目して、同定した液状化パラメータ(表2)を使用して解析を行った。解析ケース2は、液状化抵抗曲線にフィッティングするよう求めた液状化パラメータ(表3)を使用して地盤と杭の相互作用にないNIPとDNSのケースについて解析を行った。ただし、パラメータ同定のターゲットとなる図5-1~5-4に示す液状化抵抗曲線は、実験ケース(NIP, P4D, P5D, DNS)に相当する相対密度の液状化抵抗曲線で、飛島建設が別途、拘束圧98kPaでの非排水

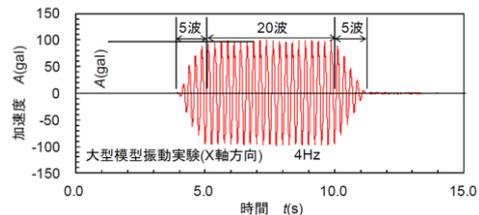


図4 入力された振動の加振波形

表3 液状化パラメータ (解析ケース2)

ケース	液状化特性						
	変相角 ϕ_p (°)	s1	w1	p1	p2	c1	Sus 値
NIP	28	0.005	7.0	0.5	1.0	1.23	1.8
DNS	28	0.005	35	8.0	1.2	2.43	0.5

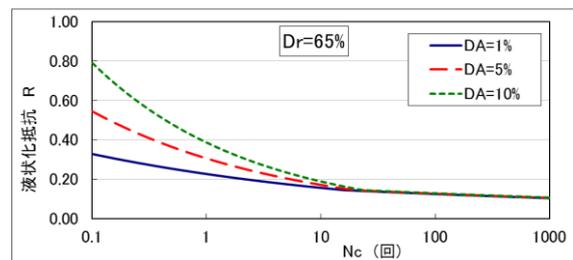


図4-2 相対密度65%の液状化抵抗曲線 (P5D)

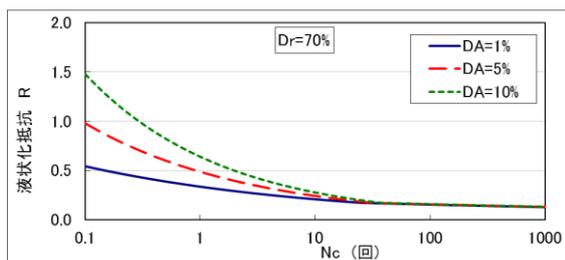


図4-3 相対密度70%の液状化抵抗曲線 (P4D)

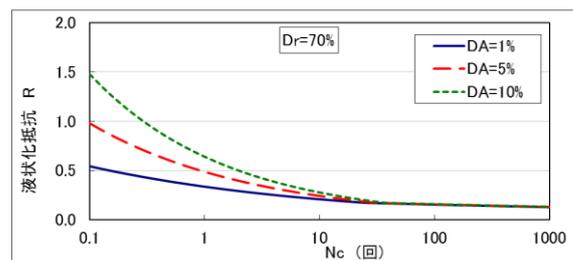


図4-4 相対密度80%の液状化抵抗曲線 (DNS)

三軸圧縮試験から求めたものである。また、表 4-1, 4-2 に示す地盤パラメータは飛鳥建設が室内試験に基づいて求めた大型模型振動実験のデータである。

(2) 解析モデル

解析モデルは、振動実験に用いられた大型模型に基づいて作成し、その詳細を図 5-1, 5-2 に示す。鍾コンクリートと乾燥地盤の接触面に剥離現象と滑動現象を表現できるジョイント要素を設けた。解析ケース 1 では、乾燥地盤と鍾コンクリートの接触面にジョイント要素を設定した場合の効果を確認するために、乾燥地盤と鍾コンクリートの接触面を多点拘束した場合との比較を行った。入力地震動は、50gal~400gal までの 8 秒間の正弦波である。

対策ケース		NIP	P5D	DNS	P4D
質量密度	$\rho(t/m^3)$	1.551	1.594	1.809	1.607
間隙率	n	0.420	0.403	0.373	0.397
初期せん断剛性	$G_{ma}(kN/m^2)$	94840	101700	113400	104100
体積弾性係数	$K_{ma}(kN/m^2)$	247300	265200	295800	271500
平均有効拘束圧	$\sigma'_{ma}(kN/m^2)$	98	98	98	98
ポアソン比	ν	0.33	0.33	0.33	0.33
拘束依存係数	m_G, m_a	0.5	0.5	0.5	0.5
内部摩擦角	$\phi_p(^{\circ})$	37.0	39.3	42.9	39.9
粘着力	C(kN/m ²)	0	0	0	0
履歴減衰上限値	h_{max}	0.24	0.24	0.24	0.24

表 4-1 乾燥地盤のパラメータ

対策ケース		NIP	P5D	DNS	P4D
質量密度	$\rho(t/m^3)$	1.937	1.965	2.051	2.020
間隙率	n	0.420	0.403	0.373	0.397
初期せん断剛性	$G_{ma}(kN/m^2)$	94840	101700	113400	104100
体積弾性係数	$K_{ma}(kN/m^2)$	247300	265200	295800	271500
平均有効拘束圧	$\sigma'_{ma}(kN/m^2)$	98	98	98	98
ポアソン比	ν	0.33	0.33	0.33	0.33
拘束依存係数	m_G, m_a	0.5	0.5	0.5	0.5
内部摩擦角	$\phi_p(^{\circ})$	37.0	39.3	42.9	39.9
粘着力	C(kN/m ²)	0	0	0	0
履歴減衰上限値	h_{max}	0.24	0.24	0.24	0.24

表 4-2 飽和地盤のパラメータ

4. 解析結果

(1) 解析ケース 1

a) ジョイント要素と多点拘束

乾燥地盤と鍾コンクリートの間にジョイント要素を設定した場合の効果を確認するために、多点拘束した場合と比較した結果、鍾直下 A 点でのせん断応力-せん断ひずみ関係 (図 6-1, 6-2) は、ジョイント要素を設定した場合、繰り返しせん断に伴う残留ひずみが多点拘束に比べて約 3分の 1 となっている。多点拘束を設定した場合は鍾の振動に伴って強制的に地盤に変位が生じたが、ジョイント要素を設定することで接触面が滑動し、地盤に作用するせん断力が低減されていることが分かる。

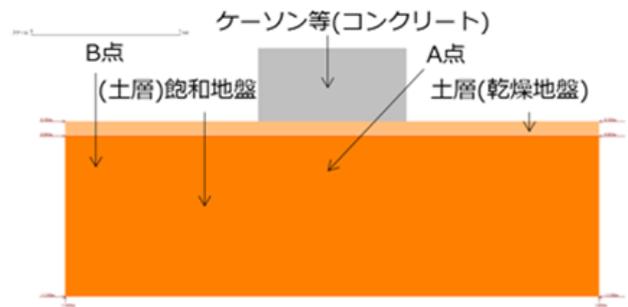


図 5-1 解析モデル (NIP,DNS)

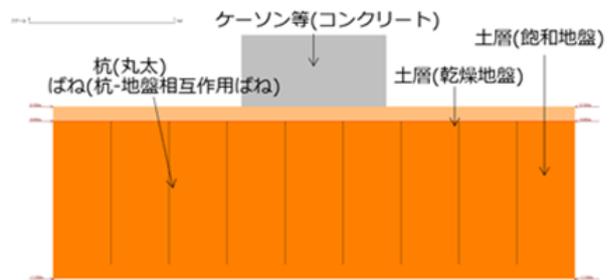


図 5-2 解析モデル (P4D,P5D)

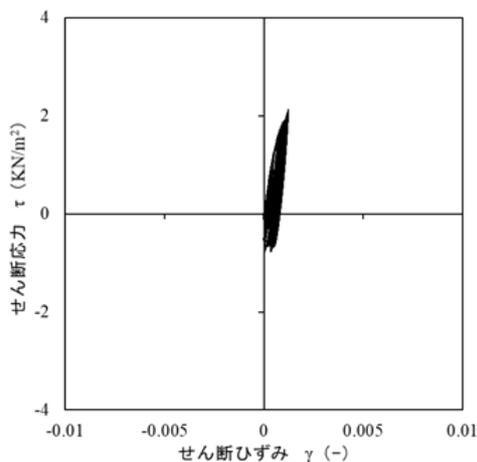


図 6-1 せん断応力-せん断ひずみ関係 (ジョイント要素)

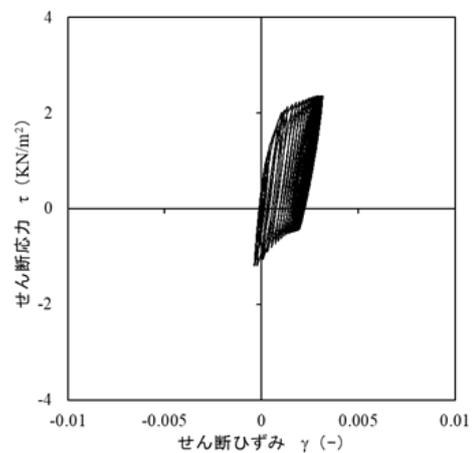


図 6-2 せん断応力-せん断ひずみ関係 (多点拘束)

b) 入力加速度と累積沈下量

各4ケースの入力加速度と累積沈下量の関係の実験結果と解析結果をそれぞれ図7-1, 7-2に示す。

解析では, NIP, P5D で入力加速度 150gal の沈下量がそれぞれ 44%, 4%, DNS, P4D で入力加速度 300gal の沈下量を 83%, 59%過小評価している。

実験の P4D, DNS では入力加速度 200gal を超えると沈下量が急激に増加するのに対し, 解析では緩やかな増加で, 実験を再現できていない。

ただし, 実験の P5D では錘が沈下することで丸太が下端に接し, 沈下が抑制されているが, 解析では丸太の位置を固定しているためその効果は再現されていない。

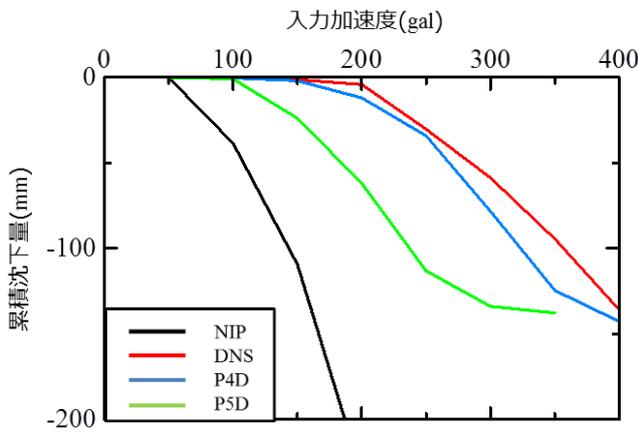


図7-1 入力加速度と累積沈下量 (実験結果)

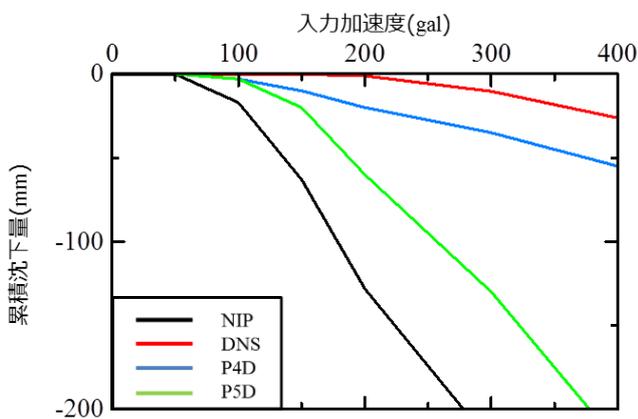


図7-2 入力加速度と累積沈下量 (解析結果)

(2) 解析ケース2

入力加速度と累積沈下量の関係の実験結果と解析結果をそれぞれ図8に示す。NIPのケースでは, 解析の沈下量が実験の沈下量とほぼ一致するほど, 整合した結果が得られた。-DNSにおいても入力加速度 150gal, 200gal の沈下量は, 実験と約 1mm, 3mm の差異であった。入力加速度 300gal では, 解析ケース1のDNSで沈下量を83%過小評価したが, 解析ケース2では沈下量を30%の過大評価に抑えられている。

参考のため, DNSに入力加速度 150ga, 200gal を与えたときの8秒の加振終了後の過剰間隙水圧の分布図を図9-1, 9-2に示す。入力加速度 200gal の場合, 錘直下過剰間隙水圧の上昇が見られた。特に, 拘束圧の低い自由地盤で液状化が進行していることが分かる。

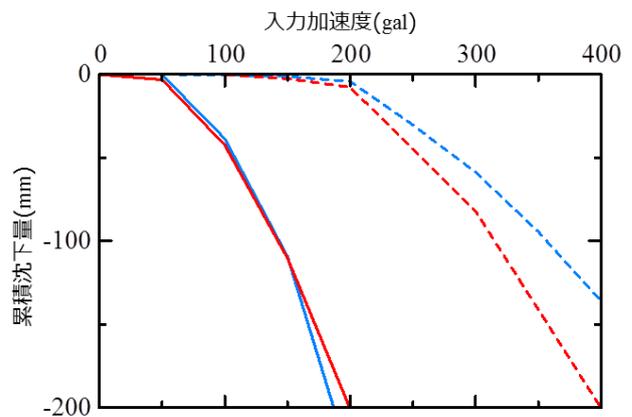


図8 入力加速度と累積沈下量 (NIP, DNS)

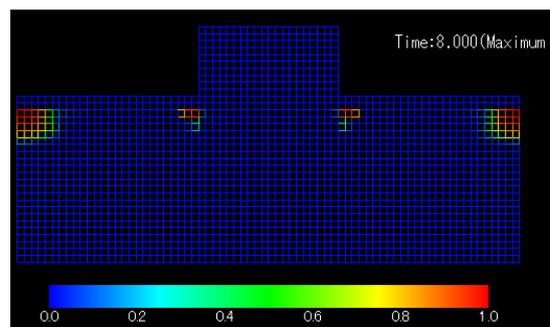


図9-1 過剰間隙水圧の分布図 (DNS, 入力加速度 150gal)

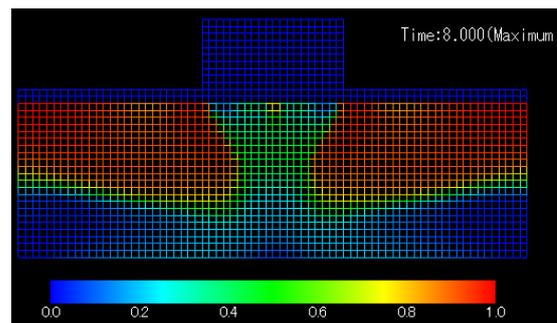


図9-2 過剰間隙水圧の分布図 (DNS, 入力加速度 200gal)

7. 結論

本研究では、飛島建設が実施した数ケースの大型振動台実験（無対策（NIP）、木杭間隔 4D（P4D）、5D（P5D）、密度増大（DNS））に対して数値シミュレーションを行った。

乾燥地盤と錘コンクリートの間にジョイント要素を設定した場合、繰り返しせん断に伴う残留ひずみが多点拘束に比べて約3分の1となった。

地震応答解析において錘の振動の影響の小さな表層地点の過剰間隙水圧の時刻歴に着目して、同定した液状化パラメータを使用して解析を行った。結果、解析では、NIP、P5D で入力加速度 150gal の沈下量をそれぞれ 44%、4%、DNS、P4D で入力加速度 300gal の沈下量を 83%、59%過小評価した。

それに対し、液状化抵抗曲線にフィッティングし求めた液状化パラメータを使用した解析では、NIP については非常に高精度に沈下量が再現され、DNS のケースでは、入力加速度 150gal、200gal で約 1mm、3mm、300gal で 30%の過大評価と沈下量の改善が見られた。

謝辞： 関西大学の飛田哲男准教授、株式会社フォレストエンジニアリングの林健二氏、応用地質株式会社の藤井紀之氏には、解析に対して御協力いただいた。ここに

記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 国立研究開発法人防災科学技術研究所：1964 年新潟地震オープンデータ特設サイト，新潟地震の概要，<http://ecom-plat.jp/19640616-niigata-eq/index.php?gid=10020>。(2016.12.閲覧)
- 2) 三輪滋，筒井雅行，本山寛，池田隆明，沼田 淳紀：2011 年東北地方太平洋沖地震における関東地方の液状化被害調査，第 31 回土木学会地震工学研究発表会講演論文集，CD6-191，2011.11.
- 3) 先端建設技術センター(ACTEC)：先端建設技術・技術審査証明事業概要書 丸太打設液状化対策&カーボンストック工法-(LP-LiC)-，2015.3.
- 4) 沼田淳紀，筒井雅行，村田拓海，山口澄靖，佐藤和夫，鶴見哲也，榎園庄一郎，加藤賢二：丸太打設液状化対策&カーボンストック(LP-LiC)工法の開発，とびしま技報，No.63，2014.
- 5) 沼田淳紀，三輪滋，三村佳織，水谷羊介，村田拓海，吉田雅穂，堀俊和，池田浩明，RIAZ Saima，原忠，坂部晃子：丸太打設液状化対策の大型模型振動実験の概要，第 48 回地盤工学会研究発表会，pp.1785-1786，2013.7.

(2018. 9. 7 受付)

NUMERICAL SIMULATION OF LARGE SHAKING TABLE TESTS FOR COUNTERMEASURE EFFECT OF LOG PILING METHOD FOR MITIGATING LIQUEFACTION

Shusuke KURIHARA, Haruka MORI, Ryosuke MATSUDA, Atsunori NUMATA and
Hisakazu SAKAI

Tobishima corporation had conducted some large shaking table tests of the log piling method for liquefaction mitigation & carbon stock (LP-LiC method). We conducted the two dimensional analyses for the tests to evaluate the mitigating effect of the countermeasure method. The analytical case (Case.1) were performed for four shaking test types; non-improvement ground type (NIP), the log piling of 5 and 4 diameter interval types (P5D and P4D) and density increased ground (DNS), based on the ground parameters identified from time histories of the excess pore-water pressure ratio. Another case (Case.2) were for two test types of NIP and DNS based on the parameters identified from liquefaction strength curves.

As the results, in the case 1, the settlements of the weight could be calculated qualitatively for all types in spite of including a large amount of error. In the case 2, we could simulate the settlements of the two types with high accuracy.