

既設宅地を対象とした格子状改良による液状化対策工法の開発

合理的な改良形状の格子状改良で大幅なコスト縮減を実現した既設宅地対象の液状化対策工法

山内 崇寛*1・手塚 広明*2・清水 英樹*3・平田 昌史*4・岡田 直仁*1

Development of a Liquefaction Countermeasure Method for Residential Land by Lattice-Shape Ground Improvement

Takahiro YAMAUCHI, Hiroaki TEZUKA, Hideki SHIMIZU, Masafumi HIRATA, Naohito OKADA



写真-1 超小型施工マシン

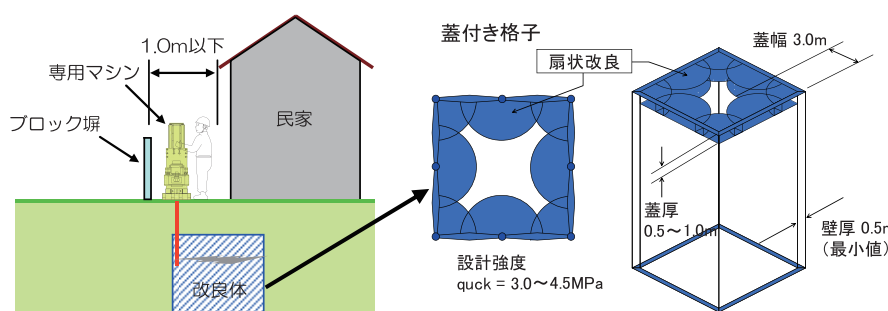


図-1 超小型施工マシンを用いた施工概略図（蓋付き格子改良）

研究の目的

3.11 東日本大震災では、千葉県浦安市など多くの住宅地で液状化被害が発生した。これを受けて国土交通省では、公共施設と既設戸建て住宅を一体として液状化対策を推進する「市街地液状化対策事業」を策定した。しかしながら、宅地部の対策費用は所有者へ負担を強いることになり、事業を推進するためには、従来の液状化対策工法の大幅なコスト縮減が強く求められる。

本研究は、社会基盤施設・産業施設等に隣接する既設戸建て住宅を対象に、経済的かつ効果的な液状化対策工法およびその設計法、更にその工法を迅速に普及させるための簡易設計図表を提案することを目的とする。なお、本研究は平成 23 年度補正予算建設技術研究助成制度（国土交通省）の助成を受け行った。また、実証実験は平成 24 年度浦安市実証実験事業（浦安市）の一環として、実験ヤードの提供を受け行ったものである。

技術の説明

本技術は、既設宅地の液状化対策・耐震補強として、自由形状改良体を造成できる「マルチジェット工法」の特徴を生かし、合理的かつ経済的な改良形状とその簡易設計図表の提案するものである。また、狭隘地でも施工可能な超小型施工マシン（写真-1）も開発し、宅地所有者の負担額を 100 万円台に押さえた液状化対策を可能とした。

主な結論

本研究の主な成果は以下の通りである。

(1) 合理的な改良形状の提案

遠心載荷実験および 3 次元動的有効応力解析から、格子状改良の上端部付近に部分的な蓋をかける「蓋付き格子」が、液状化の抑制に最も効果的な改良形状であることを確認した。

(2) 合理的な改良形状の簡易設計手法の提案

改良体の剛性を低減することで、3 次元動的挙動を再現できる 2 次元有効応力解析モデルを確立した。このモデルを用いたパラメトリックスタディにより、浦安地盤モデルにおいて、目標性能に応じて、液状化層厚が決まれば、格子間隔(単純格子、蓋付き格子)が概略算定可能な簡易設計図表を策定した。

(3) 合理的な改良形状の試験施工による施工性確認

浦安市運動公園内での実証実験により、超小型施工マシンの施工性および施工品質を確認した。また、動圧密工法による人工地震動を作用させた挙動観測により、「蓋付き格子」の液状化抑制効果を確認した。

*1 本店 土木設計・技術部

*2 本店 土木設計・技術部 第2グループ

*3 本店 土木設計・技術部 技術開発グループ

*4 本店 技術研究所 基盤技術研究グループ

既設宅地を対象とした格子状改良による液状化対策工法の開発

山 内 崇 寛^{*1} 手 塚 広 明^{*2}
 清 水 英 樹^{*3} 平 田 昌 史^{*4}
 岡 田 直 仁^{*1}

要 旨

東日本大震災により1都8県80市区町村にも及ぶ極めて広い範囲で液状化現象が発生し、特に、東京湾沿岸部の市街地や利根川下流域の埋立地等では住宅、道路、護岸等の様々な構造物に甚大な被害をもたらす結果となった。このような著しい液状化被害を受けた地域において、再度災害の発生を抑制するための市街地液状化対策推進事業が創設されたことを受け、関係自治体では事業計画の策定と検討委員会の設立が行われ、道路等の公共施設と隣接宅地の一体的な液状化対策の推進に向けた議論が活発化している。現在、実現可能性のある工法として、地下水位低下工法や格子状地盤改良等が挙げられているが、いずれも既設宅地に対する定量的効果の検証や周辺地盤への影響対策、コスト低減策などの課題も多く残されている。

そこで、自由形状・大口径高圧噴射攪拌工法である「マルチジェット工法」に着目し、経済的で効果的な液状化対策工法の研究開発を実施した。

キーワード 既設宅地／市街地液状化対策／格子状改良／マルチジェット工法／FLIP

目 次

- | | |
|-----------------------|-----------------------|
| 1. はじめに | 5. 3次元の挙動を考慮した2次元有効応力 |
| 2. マルチジェット工法超小型マシンの開発 | 解析モデル |
| 3. 模型実験による合理的な改良形状の検討 | 6. 簡易設計図表の策定 |
| 4. 3次元有効応力解析による合理的な改良 | 7. 浦安実証実験 |
| 形状の検討 | 8. おわりに |

Development of a Liquefaction Countermeasure Method for Residential Land by Lattice-Shape Ground Improvement

Takahiro YAMAUCHI Hiroaki TEZUKA
Hideki SHIMIZU Masafumi HIRATA
Naohito OKADA

Synopsis:

The Great East Japan Earthquake on 11th March, 2011 has caused serious land disasters in large area due to liquefaction. Therefore the action plan against liquefaction was established and the discussion of the countermeasures is in progress.

Lowering of ground water and lattice-shape ground improvement are the feasible methods, however there are still several problems to be solved such as the verification of the effect, noise control, cost improvement, etc.

Therefore authors have developed an economical and effective countermeasure method against liquefaction for residential land by using "Multi-Jet Ground Improvement Method" which is able to improve the ground in free form.

* 1 本店 土木設計・技術部

* 2 本店 土木設計・技術部 設計第2グループ

* 3 本店 土木設計・技術部 技術開発グループ

* 4 本店 技術研究所 基盤技術研究グループ

1. はじめに

東日本大震災により 1 都 8 県 80 市区町村にも及ぶ極めて広い範囲で液状化現象が発生し、特に、東京湾沿岸部の市街地や利根川下流域の埋立地等では住宅、道路、護岸等の様々な構造物に甚大な被害をもたらす結果となった。このような著しい液状化被害を受けた地域において、再度災害の発生を抑制するための市街地液状化対策推進事業¹⁾が創設されたことを受け、関係自治体では事業計画の策定と検討委員会の設立が行われ、道路等の公共施設と隣接宅地の一体的な液状化対策の推進に向けた議論が活発化している。現在、実現可能性のある工法として、地下水位低下工法や格子状地盤改良等が挙げられている²⁾が、いずれも既設宅地に対する定量的効果の検証や周辺地盤への影響対策、コスト低減策などの課題も多く残されている。

そこで、自由形状・大口径高圧噴射攪拌工法である「マルチジェット工法」³⁾に着目し、経済的で効果的な液状化対策工法の研究開発を実施した。なお、本研究開発は国土交通省の平成 23 年度補正予算建設技術研究開発助成制度による「震災対応型技術開発公募（液状化対策）」を受け行なった。また本研究で実施した実証実験は千葉県浦安市公募の「浦安市が管理する施設を利用した液状化対策工法の実証実験」として実施したものである。

1.1 研究開発の目的

本研究は、狭隘地における既設戸建て住宅、社会基盤施設、産業施設等に対して目標性能を設定し、経済的かつ効果的な液状化対策工法およびその設計法、更にその工法を迅速に普及させるために対象エリアの簡易土質条件があれば平易に概略設計が可能となる設計図表を提案することを目的とする。

1.2 研究開発項目と全体フロー

本研究の開発項目は以下の 3 項目である。

- ① 合理的な改良形状の提案
- ② 合理的な改良形状の簡易設計手法の提案
- ③ 合理的な改良形状の試験施工による施工性確認

上記項目に対して、図-1 に示す 5 段階の開発フェーズで研究開発を実施した。

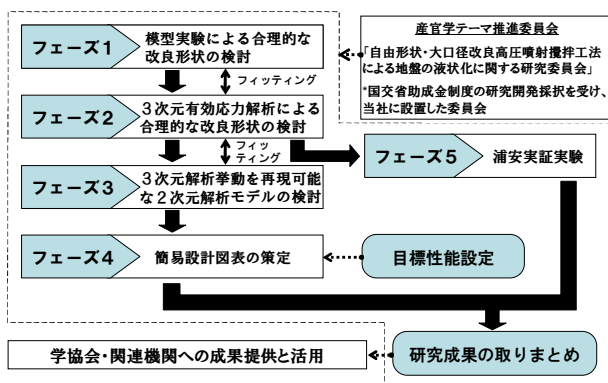


図-1 研究開発項目と開発フェーズ

2. マルチジェット工法超小型マシンの開発

2.1 マルチジェット工法の概要

自由形状・大口径高圧噴射攪拌工法「マルチジェット工法」では地中挿入ロッドを揺動させることで、図-2 に示すような扇形、壁状および格子状等の改良体を造成することが可能であるため、円柱状の改良体を並べた従来の格子状地盤改良と比較して、より合理的な改良が可能のため経済的である。さらに、扇形や壁状の改良体を組み合わせることで、特殊な改良形状も造成することが可能であり、狭隘な施工条件下での効果的な改良が求められる宅地の液状化対策において順応性の高い様々な提案が期待できる工法である。

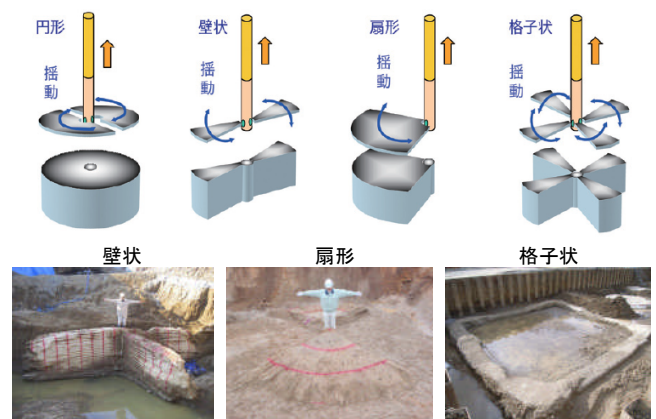


図-2 自由形状改良

2.2 新たに開発した超小型マシンの特徴

既設宅地などの狭隘地に対して施工幅 1.0m と空頭 2.0m 程度のスペースがあれば人力で施工できることを目的に、既設宅地向け超小型マシンを開発した。既設宅地を対象とするため、①住民が生活しながら建物への有意な変形を発生させない、②振動・騒音が特定建設作業の規制基準以下、③建物への汚れを発生させないことを開発目標とした。超小型マシンの概要図を図-3 に示し、特徴を以下に示す。

- ① 従来のマルチジェット工法標準機と同等の改良性能
- ② 幅 60cm×長さ 75cm×高さ 163cm, 総重量 400kg
- ③ 施工機は自走以外にも人力移動が可能、さらに分解して人力搬入も可能
- ④ 施工時に相番のクレーンなしで施工可能

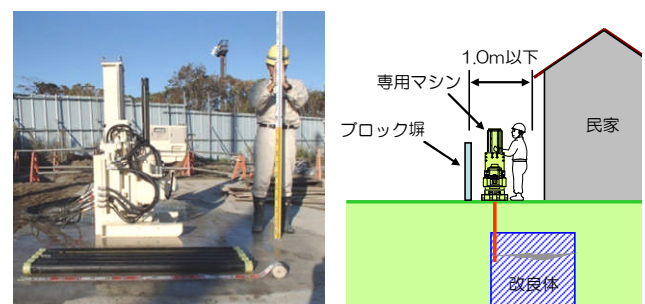


図-3 超小型マシン概要図

3. 模型実験による合理的な改良形状の検討 (研究開発項目①, フェーズ 1)

3.1 目的

合理的な改良形状を検討するための模型実験で、予備実験として 1G 場における振動台実験、および本実験として遠心模型実験を実施した。1G 場における振動台実験は、改良形状の選定を目的として改良形状に対する改良効果を相対的に比較する。遠心模型実験は実規模スケールを 80G 場で再現し振動台実験で選定した改良形状に対して、改良効果の検討を実施する。

3.2 1G 場における振動台実験

(1) 実験概要

振動台実験では、図-4 に示すせん断土槽（幅 1.2m、高さ 1.0m、奥行き 0.8m）を用い、豊浦標準砂を投入し、高さ 450mm（実物の 1/50 スケール）、相対密度 50%になるように模型地盤を作製した。また、地下水位は地表面と同一としている。

改良形状ケースは、マルチジェット工法で造成可能な改良形状で改良効果が見込める形状を選定し、表-1 に示す 9 ケースを実施した。入力地震波は周期 2Hz、加速度 80gal の正弦波とし、加振時間を振動台の始動・停止を含め 10 秒(有効加振時間 7 秒程度、およそ 14 波)とした。

(2) 実験結果および考察

地盤内に設置した間隙水圧の計測結果より、過剰間隙水圧比を求め、各計測位置における比較を行った。図-5 は過剰間隙水圧比が 0.8 に到達する時間 $T_{0.8}$ とし各ケースを比較したものである。若干のばらつきはあるが、着底型改良ケース（Case-02～Case-05）の地盤中央（改良体内部）の値が他のケースに比べ大きく、過剰間隙水圧比の上昇がゆるやかであることを確認した。図-6 は 12 波目の過剰間隙水圧比を最大値の比率で低減率として無次元化して比較したものである。地表面に近い GL-150mm～350mm の範囲で、蓋付き格子着底型の改良ケース（Case-03, Case05）の値が他のケースに比べ小さく、地表面付近の過剰間隙水圧比の発生を抑制していることを確認した。

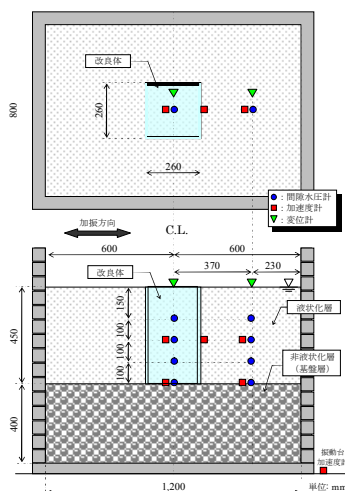


図-4 模型地盤と計測器位置の概略図

表-1 実験ケースおよび改良体形状の一覧

ケースNo.	改良体形状
Case-01	無対策
Case-02	ハットレス格子着底型
Case-03	蓋付きハットレス格子着底型
Case-04	単純格子着底型
Case-05	蓋付き格子着底型
Case-06	ハットレス格子浮き型
Case-07	蓋付きハットレス格子浮き型
Case-08	単純格子浮き型
Case-09	蓋付き格子浮き型

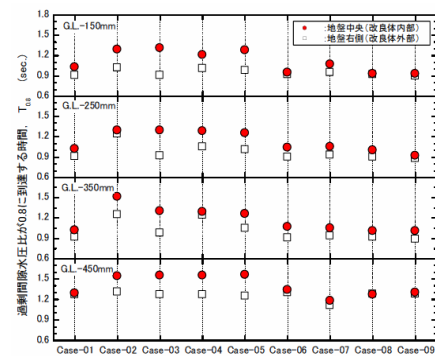


図-5 過剰間隙水圧比が 0.8 に達する時間の比較

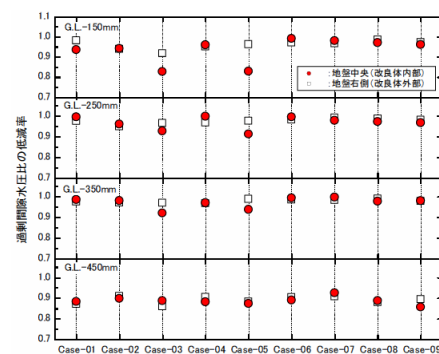


図-6 過剰間隙水圧比の低減率の比較

3.3 遠心载荷装置を用いた模型実験

(1) 実験概要

改良体の格子間隔や地盤内の有効土被り圧の影響を実スケール相当で発現できる遠心力場（80G）での模型実験を実施した。図-7 に、遠心模型実験で使用した模型地盤の概略図を示す。実験では、剛性容器内に、乾燥させた豊浦標準砂を高さ200mm（＝実スケール換算層厚 16m）、相対密度が約 40%になるようにゆっくりと投入し、その後容器の下からセルロース系の粘性流体を透水・飽和させることで液状化層を作製した。改良体模型はアクリルで制作し、家屋の沈下や傾斜を評価するため、表層に 20mm の不飽和層（地下水位 GL-20mm）設け、その上に 80G 場での接地圧が 15kPa となるよう住宅模型を設置した。

実験ケースは、振動台実験の結果を受けて、表-2 に示す 5 ケースとした。表中の「一部着底型」とは、隣接する道路等公共施設部分を基盤層まで改良する「着底型」とし、宅地部分を液状化層の途中まで改良する「浮き型」とすることを想定したケースであり、改良体模型の前面・背面の 2 面を基盤層までの「着底型」としている。

入力地震波は、各実験ケースの再現性を重視し、内陸直下型地震相当の規則波（正弦波, 1Hz, 150gal, 15 波）を採用した。なお、80G 場でこの入力地震波を再現する場合、相似則より 80Hz, 12800gal（約 13G）となる。

(2) 実験結果とまとめ

遠心模型実験では、地盤内に設置した間隙水圧計、加速度計、沈下計の計測結果より、液状化や沈下に対する抑制効果が確認された。写真 1 は、高速度カメラで撮影した加振前と加振後（経過時間約 6.0 秒（実スケール換算約 480 秒後））の住宅模型の様子を比較したものである。地盤改良を考慮したすべてのケース（Case-02～Case-05）で、その中でも特に、蓋付き形状ケース（Case-04, Case-05）は表層付近の液状化抑制に高い効果を発揮すると共に、住宅基礎の沈下に対して非常に高い抑制効果がある。また、一部着底型の蓋付き形状ケース（Case-05）は、着底型の蓋付き形状ケース（Case-04）とほぼ同程度の抑制効果を確認した。

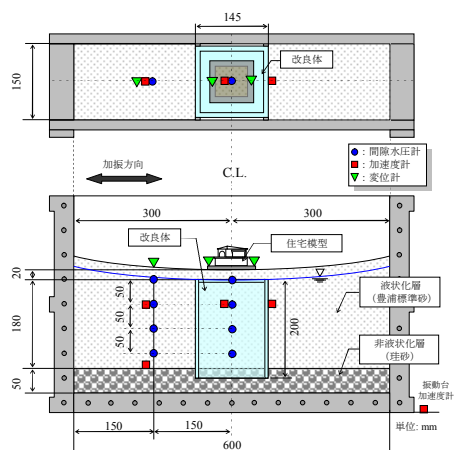
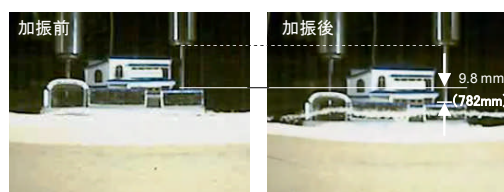


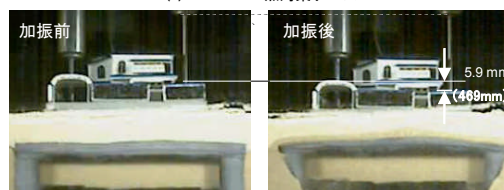
図-7 遠心模型地盤と計測器位置の概略図

表-2 実験ケースおよび改良体形状の一覧

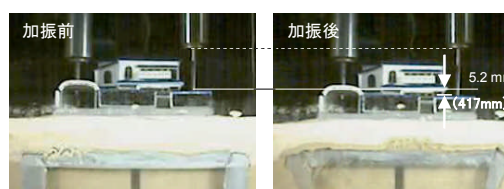
ケースNo.	改良体形状	
Case-01	無対策	—
Case-02	単純格子着底型	
Case-03	バットレス格子着底型	
Case-04	蓋付き格子着底型	
Case-05	蓋付き格子一部着底型	



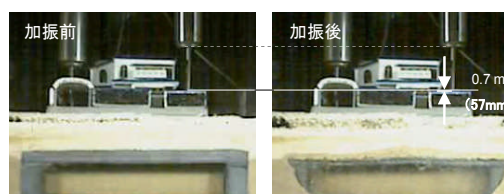
(a) Case-01: 無対策ケース



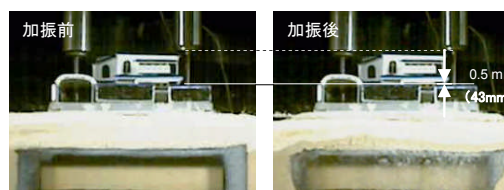
(b) Case-02: 単純格子改良ケース(着底)



(c) Case-03: バットレス格子改良ケース(着底)



(d) Case-04: 蓋付き格子改良ケース(着底)



(e) Case-05: 蓋付き格子改良ケース(一部着底)

() 内は実スケール換算値

写真-1 加振前後における住宅模型の沈下比較

4. 3次元有効応力解析による合理的な改良形状の検討(研究開発項目①, フェーズ2)

4.1 目的

本章は、模型実験による合理的な改良形状の効果について再現解析を行い評価することを目的とする。解析的に検討を行うには、3次元の挙動を再現する必要がある。本研究では一般的な2次元有効応力解析として普及しているコード「FLIP」の3次元有効応力解析が可能な「FLIP3D⁴⁾」を用いる。しかし、このコードはまだ使用実績は少ないことからその再現性および境界条件等のモデル設定の妥当性も含めて検証する必要がある。そこでフェーズ1で実施した遠心載荷実験モデルを再現した3次元有効応力解析を実施して3次元解析モデルの妥当性を検証した。

4.2 解析条件

図-8に解析に用いたメッシュ図を示す。奥行き方向は対称性を考慮して1/2モデルとしている。境界条件は遠心模型実験が剛性土槽を用いていることから、底面と側面を剛基盤として入力地震波を与え、前面と背面をローラー固定とした。解析に用いた地盤の材料パラメータ(表3)は、未改良ケースに対する逆解析により同定した。なお、改良体の材料パラメータについては、遠心模型実験で格子状改良を模擬したアクリル材の剛性を用いている。

入力地震動は、遠心振動台において計測された加速度応答波形を使用した。なお、遠心模型実験は80G場における実験であることから、実験で使用した地盤を80倍に拡大したモデルを用いる。

住宅部分は10×10mのべた基礎、高さ5mとし、接地圧が15kPaとなるように単位体積重量を設定した。解析ケースは、遠心模型実験で実施した同じ5ケースについて検討した。

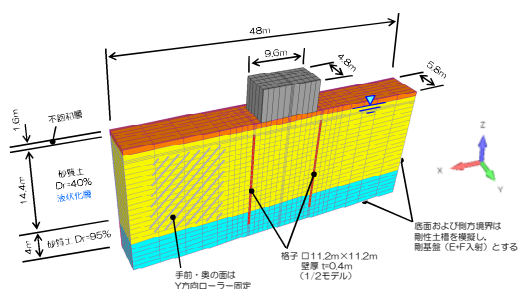


図-8 解析に用いたメッシュ図

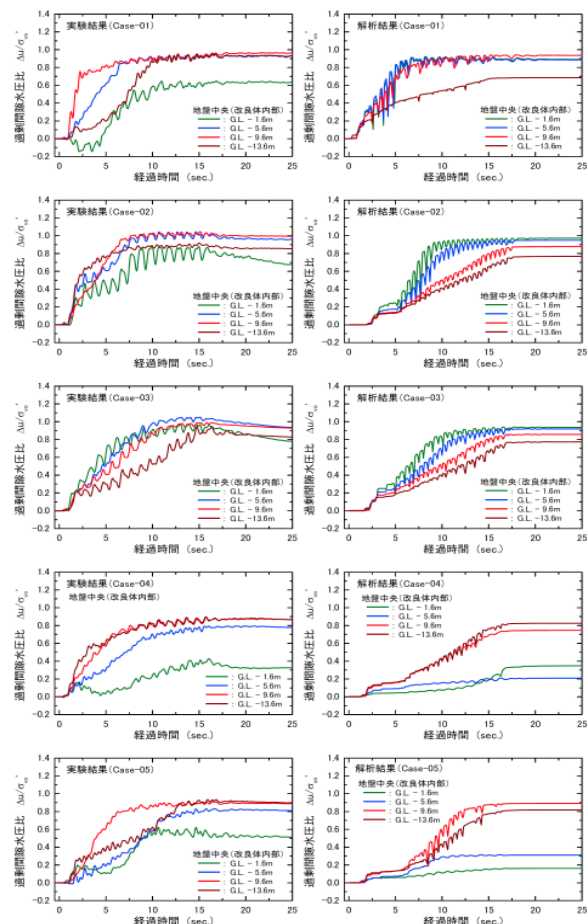
表-3 解析に用いた各層の材料パラメータ

		不飽和層	液化化層	基礎層
湿潤密度	ρ_t t/m ³	1.91	1.91	1.91
基準せん断弾性係数	G_{ms} MPa	52.29	52.29	126.22
ポアソン比	ν	0.33	0.33	0.33
粘着力	c kPa	0.0	0.0	0.0
内部摩擦角	ϕ deg	38.30	38.30	41.20
細粒分含有率	F_c %	10.0	10.0	10.0
履歴減衰の上限値	h_{max}	0.24	0.24	0.24
変相角	ϕ_p deg	—	28.0	—
液化化特性全体の規定パラメータ	$H'1$	—	6.057	—
液化化特性前半の規定パラメータ	$P1$	—	0.500	—
液化化特性後半の規定パラメータ	$P2$	—	1.025	—
液化化発生下限値規定パラメータ	$C1$	—	1.600	—
液化化終局状態の規定パラメータ	$S1$	—	0.005	—

4.3 解析結果とまとめ

(1) 過剰間隙水圧比

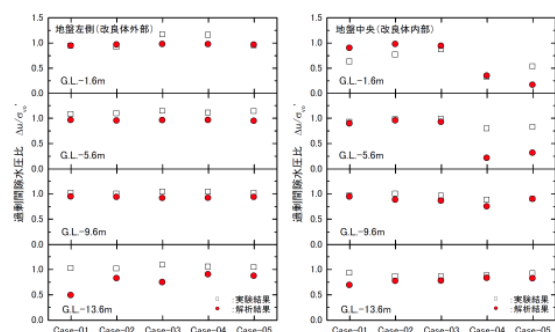
図-9に、格子改良内地盤の中央部における過剰間隙水圧比の時刻歴の実験結果(経過時間は実スケールに換算)と解析結果の比較を、図-10に、加振直後における過剰間隙水圧比の比較を示す。FLIP3Dによる解析が非排水条件であるため地盤表層(GL-1.6m)での水圧上昇傾向に差異が表れるものの、その他の深度においては、実験結果で見られる過剰間隙水圧の増加傾向を概ね再現できている。また、実験結果と同様、蓋付き格子改良が表層部において高い液化抑制効果を発揮することが確認できる。



(a) 実験結果

(b) 解析結果

図-9 改良内部における過剰間隙水圧比の比較



(a) 格子改良外部

(b) 格子改良内部

図-10 加振直後の過剰間隙水圧比の比較

(2) 住宅基礎沈下量

FLIP3D では過剰間隙水圧消散に伴う沈下を直接計算することができないため、住宅基礎の沈下量は、Ishihara and Yoshimine⁵⁾ による手法を用いて、各要素の最大せん断ひずみから過剰間隙水圧消散後の体積ひずみを別途算出し、FLIP3D による加振終了後の変形に足し合わせることで評価した。

図-11 は、加振直後の過剰間隙水圧比と、消散後の体積ひずみの分布図である。過剰間隙水圧比の分布を見ると、格子改良により内部地盤の液状化が抑制され、特に蓋付き格子改良ケースでは、表層付近の過剰間隙水圧が大幅に抑制されており、解析結果からも蓋付き格子の高い対策効果が確認できる。また、過剰間隙水圧消散に伴う体積ひずみ分布を見ると、未改良ケースでは体積ひずみが大きく発生し、住宅基礎が地盤にめり込むように沈下している。これに対し、格子改良を実施したケース、特に蓋付き格子改良ケースでは、格子改良周辺地盤が大きく沈下しているのに対して住宅基礎の沈下は抑制されており、遠心模型実験の傾向ともよく一致した結果が得られている。

表-4 は住宅基礎沈下量の比較であるが、解析結果の沈下量は実験結果に比べかなり小さい値となった。これは、遠心模型実験において、加振中に不飽和層へ間隙水が浸透することで生じる大きな沈下を、非排水条件を仮定した FLIP3D では考慮できないためと考えられる。そこで、遠心模型実験における加振直後の地下水位の上昇量から不飽和層に浸透した間隙水量を算定し、この値を用いて解析結果の補正を行った。図-12 は、補正後の住宅基礎沈下量を比較したグラフであるが、解析結果は実験結果とほぼ一致しており、今回用いた沈下量評価手法が十分に適用可能であることがわかる。

(3) まとめ

遠心模型実験結果に対して、3次元動的有効応力解析（FLIP3D）による再現解析を行い、過剰間隙水圧の上昇傾向や住宅基礎沈下量の比較から、解析モデルの妥当性を確認することができた。また、格子状改良を実施した地盤の沈下量を定量的に評価するには、最大せん断ひずみから過剰間隙水圧消散に伴う沈下を評価する手法が有効であることを確認した。格子状改良の形状については、遠心模型実験同様、蓋付き格子の対策効果が高く、一部浮き型の改良とした場合にも、蓋付きであれば表層地盤に対する液状化対策効果を十分に発揮することを解析的に確認した。

5. 3次元動的挙動を考慮した2次元有効応力解析モデルの検討 (研究開発項目②, フェーズ3)

5.1 目的

既設宅地に格子状改良を適用する場合には10m以上の大きな格子スパンが必要となるため、地震時には加振方向と直交する壁のたわみ変形が卓越する。従来、格子状改良の液状化対策効果の評価は、2重要素モデル⁹⁾を用いた2次元有効応力解析による疑似3次元動的な検討が行われてきたが、それらは比較的

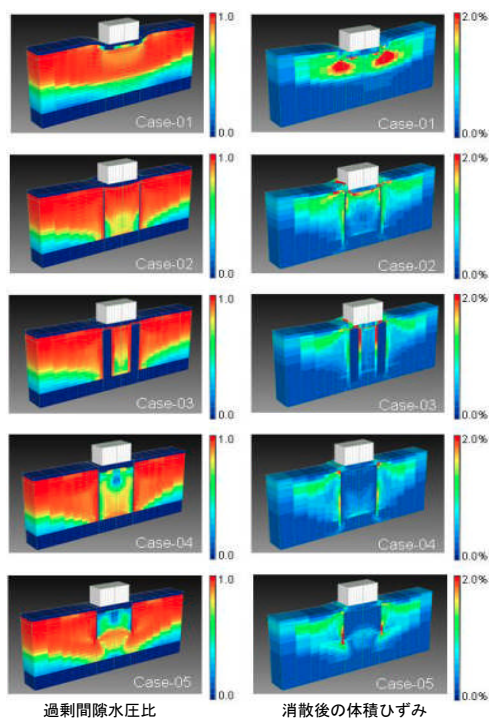


図-11 格子改良内部における比較

表-4 住宅基礎沈下量

	住宅基礎沈下量 (mm)				
	実験結果 (平均値)		解析結果 (基礎中央)		
	加振直後	水圧消散後	加振直後		水圧消散後
			補正前	補正後	
Case-01	514	782	113	489 [376]	757
Case-02	300	469	42	230 [188]	472
Case-03	299	417	25	213 [188]	394
Case-04	46	57	4	4 [-]	98
Case-05	26	43	5	5 [-]	111

※ [-] 内は補正前

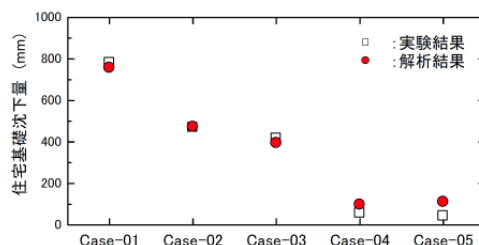


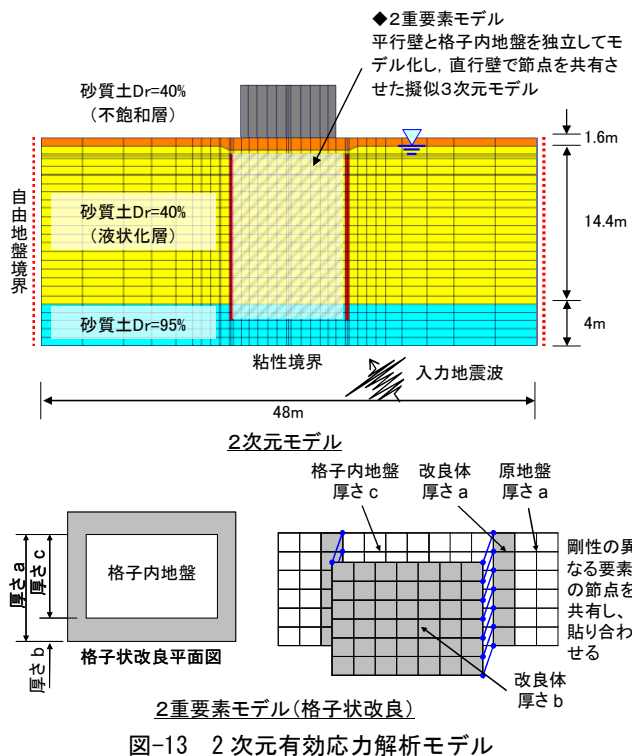
図-12 住宅基礎沈下量の比較（解析結果補正後）

小スパンの格子形状を対象としており、加振直交壁のたわみ変形は考慮できないことから、既設宅地における大スパンの格子改良に対しては危険側の解析結果を与える可能性がある。そのため10mを超えるような大スパンの格子改良の液状化対策効果を評価するにあたっては、3次元有効応力解析を用いる必要がある。しかし、3次元有効応力解析による解析は非常に時間とコストがかかるため、概略検討段階において液状化対策の仕様を迅速に設定するには、2次元有効応力解析による解析が必要とされる。

そこで、遠心載荷実験で妥当性を検証した3次元有効応力解析モデルについて、2次元有効応力解析モデルとの比較検討を行い、実際の3次元動的挙動を再現可能な2次元解析モデルのモデル化手法を検討した。

5.2 解析条件

解析コードは「FLIP2D」を用いた。2次元モデルを図-13に示す。地盤・改良体の材料パラメータおよび入力地震動は、前章の3次元有効応力解析モデルと同様とした。格子状改良のモデル化は、擬似的に3次元化するため2重要素モデル⁹⁾を用いた。解析ケースは、前章の3次元有効応力解析の検討ケースのうち、単純格子（CASE-02）および蓋付き格子（CASE-04）で検討した。

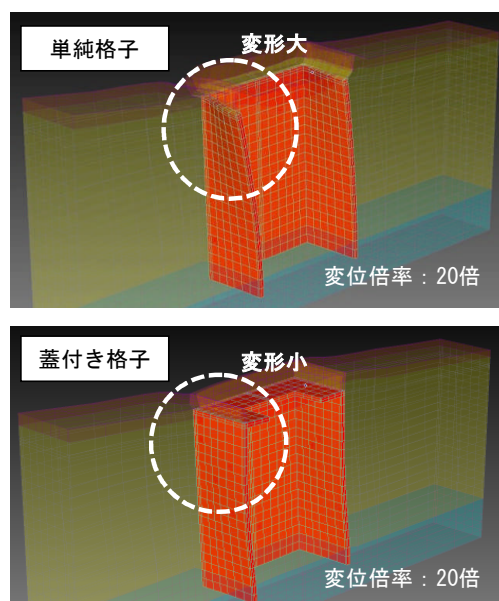
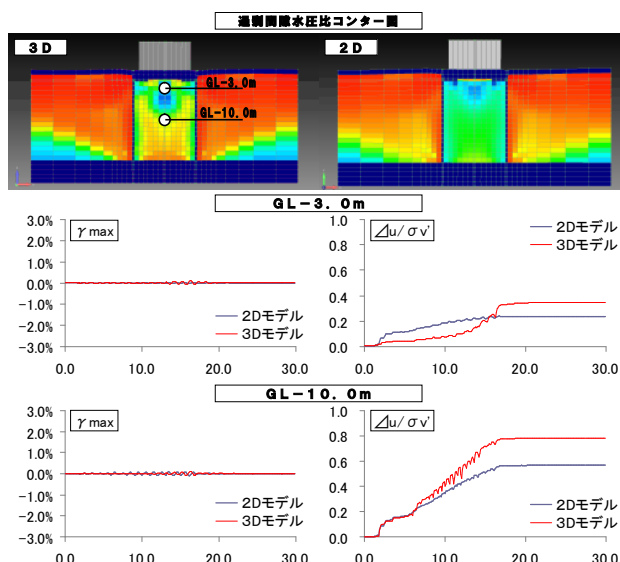
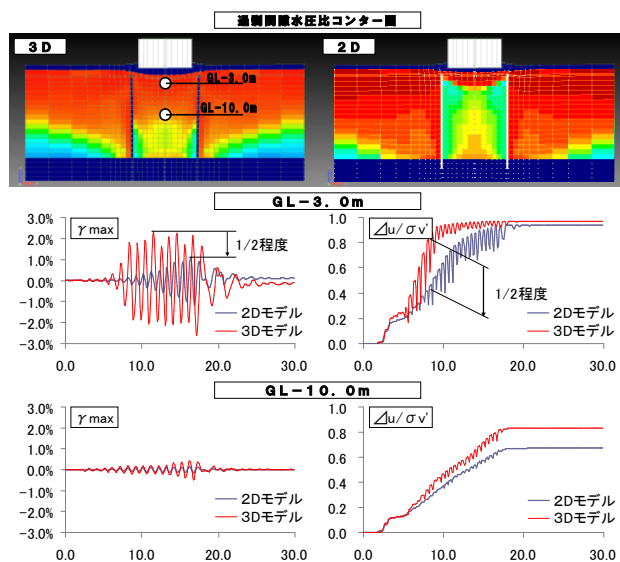


5.3 解析結果とまとめ

単純格子の過剰間隙水圧比コンター図、格子内地盤中央部（GL-3.0m, GL-10.0m）の時刻歴のせん断ひずみと過剰間隙水圧比の解析結果を図-14に、蓋付き格子を図-15に示す。

単純格子では、GL-3.0mの表層付近のせん断ひずみは、3次元モデルでは、初期の段階から大きな値が発生しているのに対し、2次元モデルでは緩やかに増加し、最大値では1/2倍程度と危険側の解析結果となった。過剰間隙水圧比も同様の結果である。これは、図-16に示すように、スパンの大きな格子状改良では、上層付近の変形が大きく発生し、従来の2重要素モデルを用いた2次元モデルでは3次元挙動を適切に再現できない可能性があることを示しており、モデルの適正化が必要であると考えられる。GL-10mでのせん断ひずみと過剰間隙水圧比の進行度と最大値は、過剰間隙水圧比が2次元モデルでやや小さな値となるが、概ね再現できている結果となった。

一方、蓋付き格子では、2次元モデルのせん断ひずみと過剰間隙水圧比の解析結果は、全体的にやや小さな値となるが、表層付近の蓋部が改良体上部の変形を拘束する効果であると考えられるが、従来の2重要素モデルによる2次元モデルにおいても全体的に概ね再現できている結果となった。



5.4 改良体剛性の適正評価による再検討

単純格子を2次元モデルで評価すると危険側の評価となるため、改良体剛性を補正（低減）することで適正に評価できるモデルを検討した。解析コード「TDAP-III」を用いて3次元と2次元で改良体と格子内地盤のみをモデル化し、慣性力を作用させ格子内地盤中央のせん断ひずみが同程度となるよう改良体剛性を補正した。検討結果より、格子内地盤中央のせん断ひずみが同程度となる改良体剛性は上部を10%、下端を70%（中間部を直線比例）まで低減するが必要となった。

補正後の改良体剛性を用いてFLIP2Dで再解析を実施した。図-17に補正後の単純格子の格子内地盤中央部GL-3.0mの時刻歴のせん断ひずみと過剰間隙水圧比の解析結果を示す。図-14と比較すると、GL-10mでは2次元モデルがやや安全側な評価となるものの、概ね整合する結果となった。図-18に格子内地盤中央部の最大せん断ひずみの深度分布で改良体剛性の補正前後の比較を示す。補正前では2次元モデルが危険側に評価しているものが、補正後で適正に評価できていることを確認した。つまり、2次元モデルで3次元の挙動を考慮するには、改良体剛性を補正する今回の手法が有効であると考えられる。

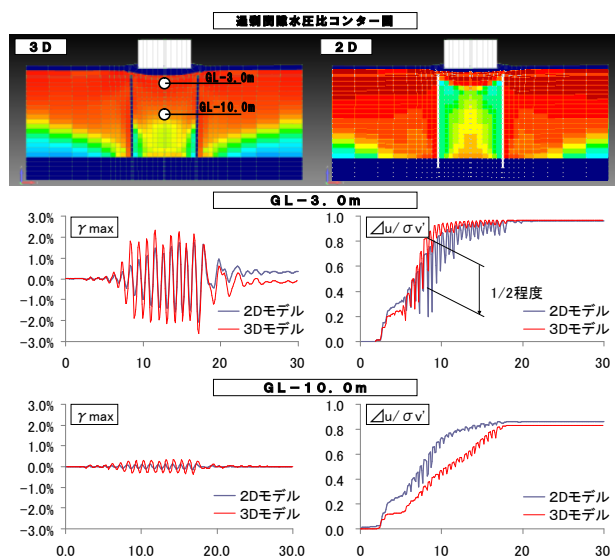


図-17 改良体剛性補正後の
3次元と2次元モデルの対比－単純格子

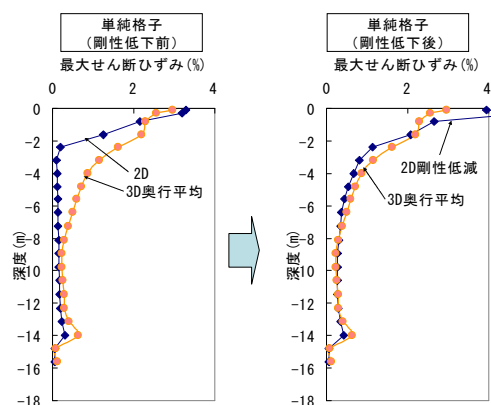


図-18 改良体剛性補正後の格子内地盤中央の
最大せん断ひずみ深度分布比較－単純格子

6. 簡易設計図表の策定 (研究開発項目②, フェーズ 4)

6.1 目的

合理的な改良形状による液状化対策を速やかに普及させるために、対象エリアの簡易土質条件等があれば目標性能に応じて平易に概略設計が可能となる簡易設計図表を策定することを目的とする。

今回の簡易設計図表を策定するに当たり、解析コード「FLIP2D」を用いて、前章で検討した3次元の挙動を再現できる2次元有効応力解析モデル（改良体剛性を補正）を用いてパラメトリックスタディにより策定した。

6.2 適用条件

各機関^{7), 8), 9)}の動向を踏まえ、本研究の簡易設計図表で設定した適用条件と目標性能の指標を以下に示す。

(1) 適用条件

- 対象エリア : 浦安市臨海地域
- 設計強度 : $q_{uck}=4.5\text{MPa}$ (高強度タイプ)
- 設計壁厚 : 50cm
- 格子ピッチ : 10~30m
- 地下水位 : GL-1.0m
- 地震レベル : 中地震動 (200gal, M9)
大地震動 (350gal, M7.3)
中地震動 東北地方太平洋沖地震夢の島観測波
大地震動 東京湾北部地震 (首都圏直下型)

(2) 目標性能の指標

【地表面沈下量 D_{cy} 】

多くの機関で目標性能の指標として取り上げられ、構造物への影響も非常に大きいと考えられることから地表沈下量 D_{cy} を評価指標の一つとした。

「FLIP2D」では過剰間隙水圧消散に伴う沈下を直接計算することができないため、沈下量 D_{cy} の算定は、Ishihara and Yoshimine⁹⁾による手法を用いて、各要素の最大せん断ひずみから過剰間隙水圧消散後の体積ひずみを別途算出 ($Dr60\%$ と設定) し、加振終了時の変形に足し合わせることで評価した。

【地表面付近3mの過剰間隙水圧比 $\Delta U/\sigma_v'$ 】

木造家屋などの軽量小規模構造物を対象とした場合、液状化による地盤被害が発生する条件は既往事例の調査により図-19のように示されている¹⁰⁾。例えば中規模地震動(200gal, M9.0)の場合は概ね表層の非液状化層厚が3mあれば液状化による地盤被害が発生しないことが読み取れる。よって本研究では簡易設計図表の評価指標の一つとして、地表面付近の非液状化層厚3mの範囲の過剰間隙水圧比の平均値と最大値をとることとした。

【改良体の最大せん断ひずみ】

改良体の健全性を確認するため、改良体平行壁の最大せん断ひずみを評価指標とした。北詰¹¹⁾によるセメント改良地盤の

一軸圧縮強さと破壊ひずみの関係を図-20 に示す。同図中にマルチジェット工法の室内配合供試体と現場コア試料の関係も示す。既往の報告にマルチジェット工法の実績も踏まえて、破壊ひずみを 0.5%と設定した。許容せん断ひずみは、中地震動に対しては破壊ひずみに安全率 1.5 を考慮した 0.33%とし、大地震動では破壊ひずみである 0.5%とした。

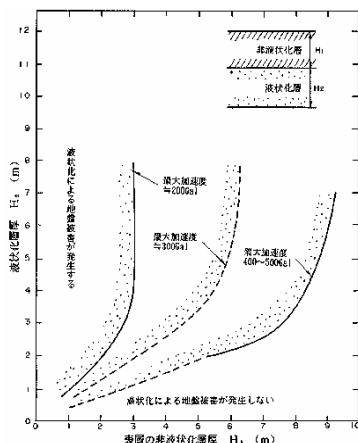


図-19 液状化により被害が発生する条件¹⁰⁾

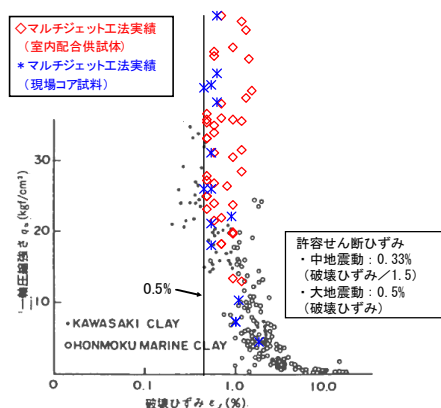


図-20 セメント改良地盤の一軸圧縮強さと破壊ひずみ¹¹⁾

6.3 簡易設計図表（浦安臨海地域）

解析結果を基に中地震動と大地震動それぞれについて、格子間隔 L /液状化層厚 H を縦軸にとり、横軸に沈下量、地表面 3m 以浅の過剰間隙水圧比の平均値、最大値、及び改良体平行壁のせん断ひずみを取り各ケースの解析結果をプロットし簡易設計図表を策定した。図-21 に中地震動に対する簡易設計図表を示す。これらの簡易設計図表を用いることにより、液状化層厚と目標性能を設定すれば単純格子、蓋付き格子の格子間隔を決定することができる。

なお、本研究で策定した簡易設計図表は浦安市をモデル地盤としたものであり、現段階での適用範囲は浦安市に限定される。今後は各地をモデル地盤として簡易設計図表を策定し、地盤の固有周期、 N 値等のパラメータで整理することにより、全国どのようなエリアに対しても適用可能な簡易設計図表を策定していくことを今後の展望としている。

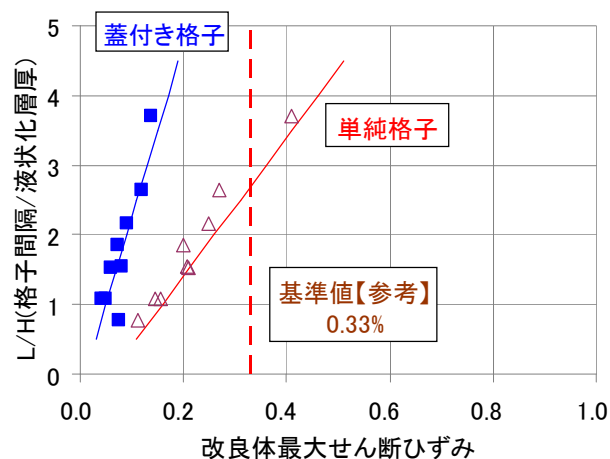
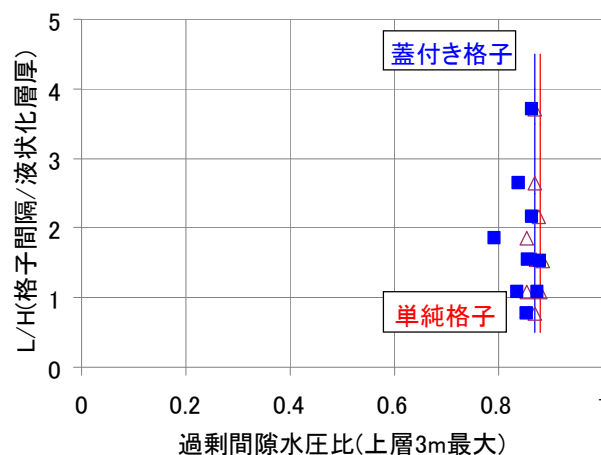
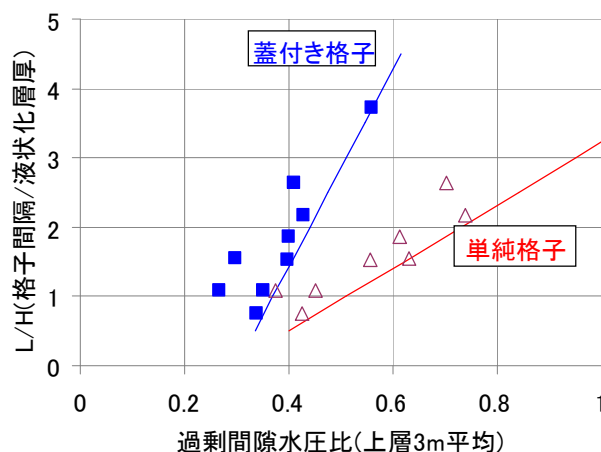
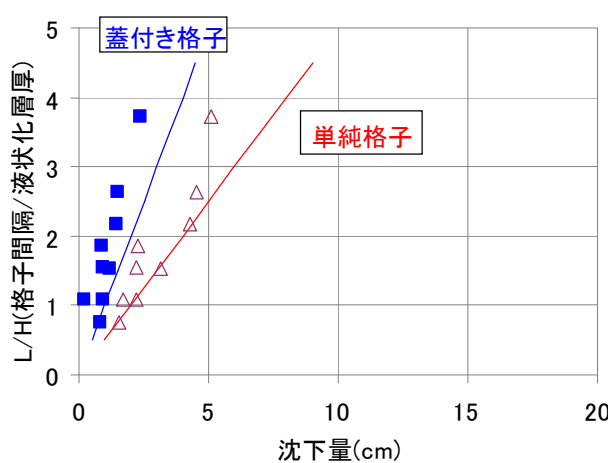


図-21 簡易設計図表（中地震動 浦安臨海地域）

7. 浦安実証実験（研究開発項目③、フェーズ5）

7.1 目的

自由形状・大口径高圧噴射攪拌工法（マルチジェット工法）における既設宅地の液状化対策として、効果的な薄壁改良形状で、これまでの研究成果より単純格子および蓋付き格子に対して実証実験を行なった。実証実験では、既設宅地を想定した狭隘地でも適用可能とするために開発した超小型マシンを用いて（一部標準機を併用）、単純格子と蓋付き格子の改良体を作成し、施工性・品質・周辺への影響・改良効果について確認することで既設宅地を対象とした効果的な液状化対策の確立を目的とする。表-5 に実験目標および確認方法一覧を示す。

なお本実証実験は、平成 24 年度浦安市実証実験事業に採択され、浦安市より実証実験ヤードの提供を受け実施した。

表5 実験目標および確認方法一覧

項目	実験目的	確認方法
①施工性の確認	狭隘地でも施工可能	・狭隘条件での施工性確認 ・施工サイクルの確認
②周辺への影響確認	既設宅地へ影響を与えない	・施工前後の振動・騒音計測 ・施工前後のレベル計測
③品質確認	計画の出来形・強度を確保	・掘起しによる出来形確認 ・サンプリングによる強度確認
④改良効果の確認	想定地震動に対し格子内地盤が液状化しない	・人工地震による効果検証 ・長期モニタリング（地震発生時に検証）

7.2 実証実験概要

図-22 に実証実験位置図および柱状図を示す。地盤は、地下水位が GL-1.4m であり、GL-2.8～4.2m にシルト層が介在するが、GL-9.5m まで N 値 5 程度の細砂主体の埋土、GL-11.8m まで N 値 15 程度の細砂主体の沖積層、GL-11.8m 以深は沖積シルト層で構成される。なお、実証実験ヤードは東日本大震災において実際に液状化現象が発生した。

図-23 に実証実験配置図を示す。CASE1（蓋付き格子）、CASE2（単純格子）の 2 ケースとし、単独の改良体を非液状化層に着底させて造成する。既設宅地の影響を確認するため、写真-2 に示すように、地表面にはべた基礎を模擬した RC スラブ（□10m×10m、厚さ 20cm）を設置した。

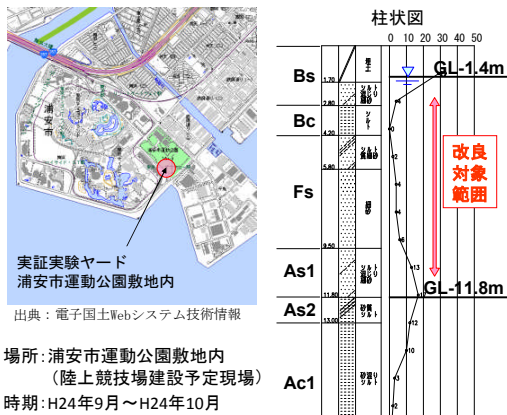


図-22 浦安実証実験位置図および柱状図

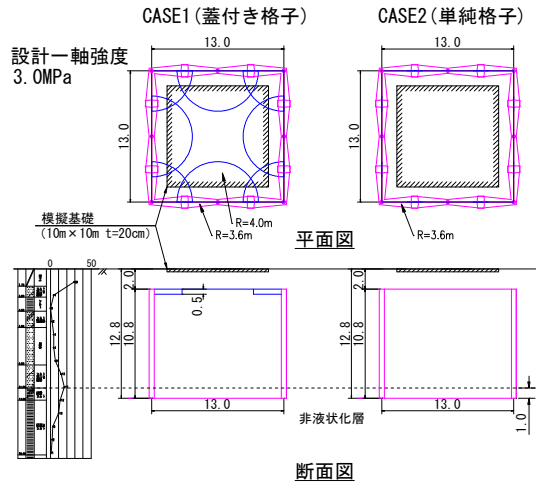


図-23 実証実験配置図



写真-2 既設宅地を模擬したべた基礎

7.3 実証実験結果

(1) 施工性の確認

造成中の施工状況を写真-3 に示す。仮設ハウスと外構を模擬した建枠を離隔 1m で設置し、狭隘条件の下で施工を実施した。その際の蓋付き格子の 1 孔当たりの標準的な造成（2 方向壁状改良＋蓋部 180 度）の施工サイクルを表-6 に示す。標準的な施工サイクルは改良体造成を 1 日 1 本で施工が可能であり、効率的な施工が可能であることを確認した。

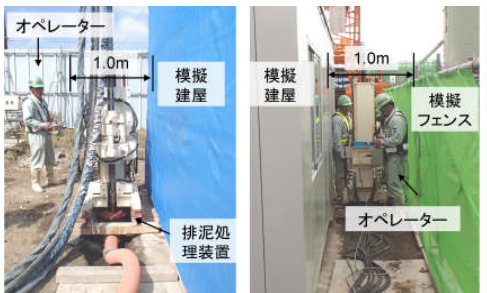


写真-3 超小型マシンによる施工状況

表-6 標準的な施工サイクル（CASE1 蓋付き格子）

内容	サイクル	時間
マシン移動・設置	30分/箇所	30分
削孔工	12分/m（ロッド接続時間含む）	144分
造成工	17分/m（ロッド切断時間含む）	170分
撤去・片付け	60分	60分

合計 404分
(6.7時間)

(2) 周辺への影響確認

施工中に模擬基礎の中央部（施工地点より約 5m 地点）において、振動・騒音の計測をおこなった。図-24 に振動・騒音結果を示す。振動は 60～70dB 程度（暗振動 35dB 程度）、騒音は 70～80dB 程度（暗騒音 60dB 程度）であった。振動は造成中の超高圧ジェットの噴射に起因するものであり、騒音は造成位置に設置した排泥処理装置より発生するバキューム車の吸気音であった。いずれも造成中（約 3 時間弱）での振動・騒音であり、造成前後ではほとんど振動・騒音は発生しなかった。造成中の振動・騒音については特定建設基準値を満足している。なお、騒音の原因であるバキューム車による吸気音については、排泥処理装置の改善で対応可能である。

施工による沈下の影響についてはレベル計測を行った。最終的に 3mm 程度以下の沈下傾向を示したが、沈下量自体は小さく既設宅地への影響は小さいと考えられる。

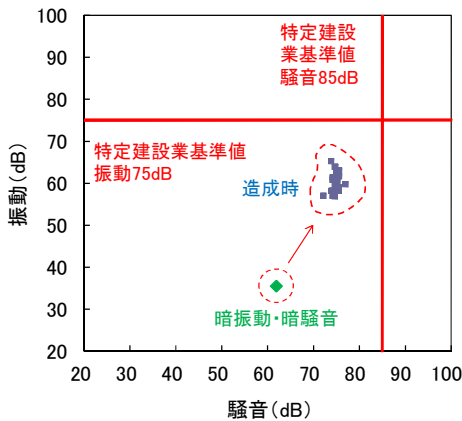


図-24 振動・騒音計測結果

(3) 品質確認

造成した改良体の一部を掘起し、出来形確認を行った。図-25 に結果を示す。CASE1（蓋付き格子）の蓋部については、改良半径 4m の計画に対し 4.2m を確保していた。なお、噴射距離を明確にするため、改良体を外側へ 30 度追加して造成を行っている。CASE2（単純格子）では、最小壁厚は 65cm であり計画値の 50cm を満足している結果となった。

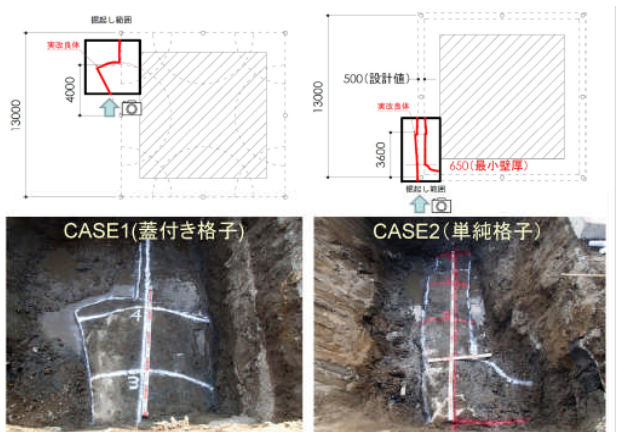


図-25 掘起しによる出来形確認結果

改良体の強度を、掘起した改良体の一部をブロックサンプリングし、一軸圧縮強度試験と圧裂引張試験を実施した。サンプリング位置を写真-4 に試験結果を表-7 に示す。一軸圧縮強度および引張強度について設計値をすべて満足する結果となった。

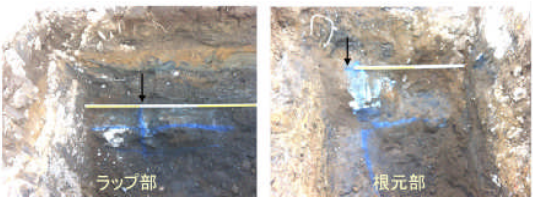


写真-4 ブロックサンプリング位置

表-7 一軸圧縮試験および圧裂引張試験結果

試験		一軸圧縮試 (MPa) JIS A 1218	圧裂引張試 (MPa) JGS 2551
設計値		3.0MPa	0.33MPa
ラップ部	①	6.33	0.52
	②	5.97	0.81
	③	7.21	0.76
	平均	6.50	0.70
根元部	①	7.78	0.71
	②	6.76	0.92
	③	6.39	0.65
	平均	6.98	0.76

(4) 改良効果の確認

無対策地盤と改良地盤（蓋付き格子・単純格子）の対策効果を確認することを目的として、原地盤（無対策）、CASE1（蓋付き格子）、CASE2（単純格子）の 3 ケースに対して、人工地震による動的載荷試験により地盤の応答値（加速度・間隙水圧）と改良体ひずみの計測を行った。人工地震は動圧密工法¹²⁾を用いて起振した。動圧密工法とは、クレーンで吊り上げた重錘を地盤へ落下させることで地盤を直接締め固める工法であり、地盤の液状化対策などに用いられている（写真-5）。

表-8 に人工地震仕様を、図-26 に動的載荷試験概要図を示す。



写真-5 動的載荷試験状況

表-8 人工地震仕様

項目	仕様①	仕様②
重錘重量	10t	
落下高さと載荷回数	落下高15m×10回	落下高20m×11回
載荷サイクル	インターバル90秒間隔	
セット数	2セット	1セット

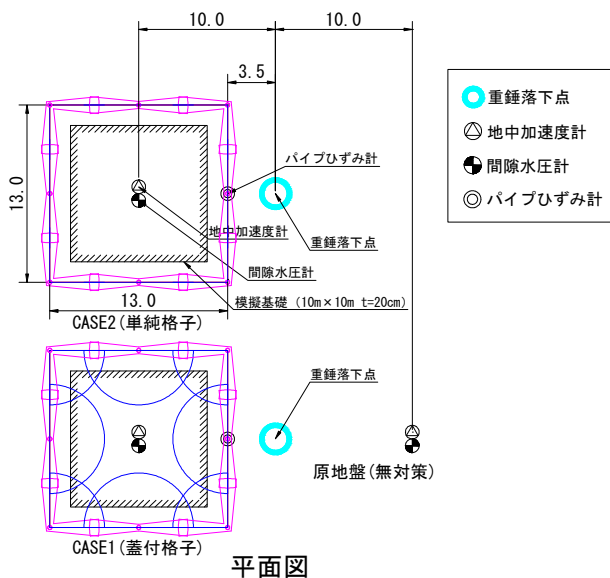


図-26 動的荷重試験概要図

人工地震仕様②において、原地盤（無対策）の GL-7m 深度の応答加速度と過剰間隙水圧比の計測結果を図-27 に示す。人工地震仕様②で計測された原地盤（無対策）の応答加速度は、1 载荷当たり平均 150gal 程度であった。過剰間隙水圧比では、1 载荷当たり 0.20～0.23 程度の上昇を計測したが、载荷後のインターバルで消散し地盤の液状化までは至らなかった。

人工地震仕様①および②において、原地盤（無対策）、CASE1（蓋付き格子）、CASE2（単純格子）の 3 ケースに対して、GL-7m 地点の 1 载荷当たりの応答加速度と間隙水圧比で整理した結果を図-28 に示す。1 载荷当たりの地盤の応答加速度と過剰間隙水圧比の関係に高い相関性が確認された。応答加速度は、人工地震仕様②で比較した場合、原地盤（無対策）がもっとも小さく、CASE1（蓋付き格子）と CASE2（単純格子）が 230gal 程度と同程度であり、原地盤（無対策）に対して 1.5 倍程度大きい結果となった。これは、格子内地盤の全体剛性が増大することで、地盤のせん断変形による応答加速度の減衰が小さくなっているものと考えられる。

過剰間隙水圧比は、人工地震仕様②で比較した場合、原地盤（無対策）の過剰間隙水圧比の上昇量をもっとも大きく 1 载荷で 0.20～0.23 程度上昇しているのに対して、CASE1（蓋付き格子）では 0.05～0.09 程度、CASE2（単純格子）では 0.10～0.14 程度に抑制していることを確認した。

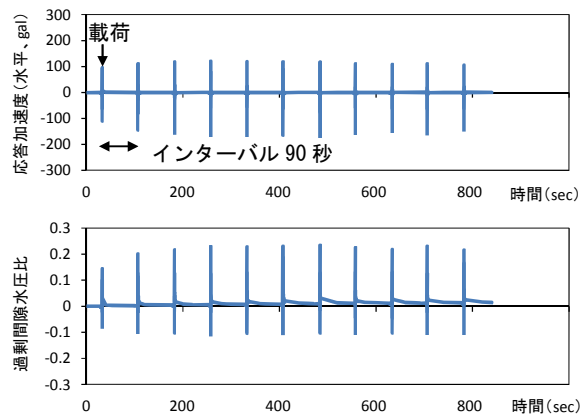


図-27 応答加速度と過剰間隙水圧比の計測結果
（人工地震仕様②，原地盤（無対策）GL-7m）

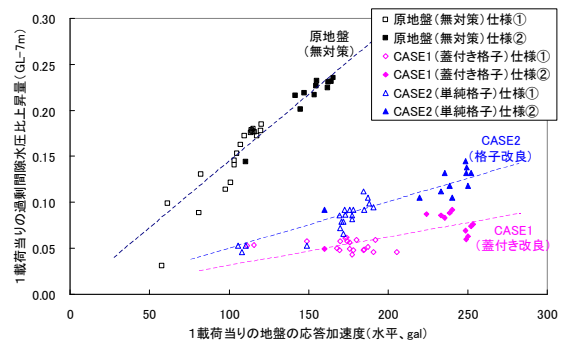


図-28 過剰間隙水圧比と応答加速度の関係
（GL-7m，1 载荷当たり）

人工地震仕様②における深度 GL-3.5m，7.0m の改良体ひずみの計測結果を図-29 に示す。地表面からの载荷のため、GL-3.5m では地表面付近でひずみが累積する傾向があるが GL-7.0m では累積する傾向が確認されなかった。なお、载荷した直後の値がもっとも大きく、GL-3.5m，GL-7.0m とともに最大 0.02%程度の改良体ひずみを計測した。

今回の実験結果は周辺地盤が液状化していないこと、1 载荷当たりの応答加速度自体は想定地震動レベルにあるが連続载荷でないことから、一概に実際の地震動レベルでの改良体の健全性評価とならないが、北詰²⁾の報告を参考にセメント改良地盤の破壊ひずみ 0.2～0.5%とした場合の 1/20～1/10 程度と非常に小さい値である。

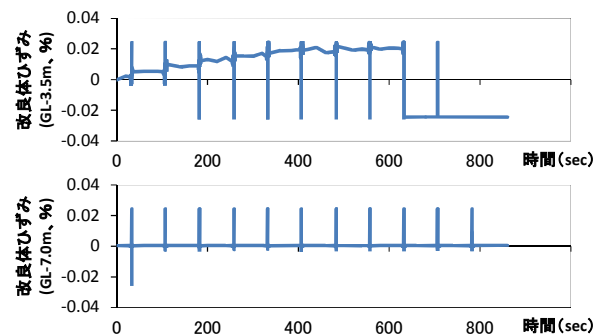


図-29 改良体ひずみ計測結果
（蓋付き格子，仕様②）

7.4 まとめ

浦安市実証実験の施工性・周辺への影響・品質に関する検証結果より、既設宅地への適用は十分可能であることを検証することができた。平成 25 年度でも品質に関わるデータ蓄積を目的に実証実験を計画しており、更なる信頼性確保を目指す所存である。

改良効果の検証結果では、相対的な比較となるが、原地盤（無対策）に対して、過剰間隙水圧比の上昇を蓋付き格子では 1/3 程度、単純格子では 1/2 程度まで抑制できることを確認した。動的載荷試験後の沈下量は 2～3mm の計測誤差範囲であった。実際の地震動に対する効果検証を目的とした長期モニタリングについては、現在継続中である。以降 2～3 年程度の期間を目処に計測を継続する予定である。

8. おわりに

本研究は、千葉県浦安市において、道路や下水道などの公共施設と民間の宅地とを一体化した「市街地液状化対策事業」を想定し、経済的かつ効果的な改良形状の開発とその簡易設計図表の研究を行なった。その結果、蓋付き格子状改良を提案・検証することができた。成果の実用化の見通しと今後の課題について以下にまとめる。

8.1 成果の実用化の見通し

従来の格子状改良では、改良率が 50%程度であるのに対し、本成果を活用すれば改良率を 7～10%程度の改良率まで削減でき、従来工法に対して大幅にコストを削減できる。所有者 1 軒当たりの概略負担額は中地震動では 100～200 万円程度、大地震動では 400～500 万円程度と試算される。経済性に優れた本成果の活用で、市街地液状化対策事業の大きな課題でもある所有者合意形成の促進を期待できる。さらに、合理的な改良形状の簡易設計図表では、市街地液状化対策事業の改良仕様を平易に算定できることから、これらの設計手法により「市街地液状化対策事業」の普及までの迅速化が期待できる。

また、開発した狭隘地向け超小型マシンを用いて、既設戸建て住宅を想定した実証実験による検証結果から、本成果の実用化については十分可能である。なお、本成果を用いれば、浦安市以外の市街地液状化対策事業は当然のことながら、その他狭隘地における社会基盤施設、産業施設等に対しての液状化対策にも十分活用ができる。

8.2 今後の課題

(1) 改良体の引張応力に関して

本研究は現段階において、従来の格子状改良と同様に改良体はせん断応力の照査のみで、引張応力の照査は実施していない。そこで、3 次元解析により格子状改良体の引張応力を算定すると解析上、局部的、部分的に許容値（引張強度等）を超える箇所が発生することは避けられない。引張応力に関する、このような部分的な領域を一切許容しない設計は合理性に欠けると考

えられるため、適切な判断基準（例えば、部材断面方向に部分的な引張破壊は許容するが、貫通クラックは発生させない等）を設定して上で、引張応力の健全性も評価することが望ましい。

(2) 施工データ蓄積による品質の信頼性向上

新たに開発した超小型マシンは、基本的に従来機と同等の性能を満足する施工仕様を確保できるように設計しているため問題はないと考えられるが、今後も超小型マシンの試験施工を実施していき総合的な品質の信頼性向上を図ることが望ましい。

謝辞：本研究は、平成 23 年度補正予算建設技術研究助成制度（国土交通省）の支援を受け行われた。また、実証実験では平成 24 年度浦安市実証実験事業（浦安市）より実験ヤード提供の協力を受け行われた。なお末筆ながら、今回の研究開発で設置した産官学テーマ推進委員会の塚本良道委員長（東京理科大学 理工学部 土木工学科・教授）をはじめ、各関係者の多大なご協力を得たことをここに記し深謝いたします。

参考文献

- 1) 国土交通省：液状化対策推進事業について（国土交通省、都市局市街地整備課、報道発表資料）、2011.11.29
- 2) 浦安市：市街地液状化対策実現可能性検討調査結果の概要（浦安市市街地開発課、報道発表資料）、2013.01.13
- 3) （社）日本建設機械化協会：「マルチジェット工法」建設技術審査証明書、2009.06
- 4) Iai, S.: Three dimensional formulation and objectivity of a strain space multiple mechanism model for sand, Soils and Foundations, Vol.33, No.1, pp.192-199, 1993.
- 5) Ishihara, K. and Yoshimine, M. : Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes, Soils and Foundations, Vol.32, No.1, pp.173-188, 1992
- 6) 港湾空港技術研究所報告 Vol.51：（独）港湾空港技術研究所, pp28-39, 2012.9
- 7) 液状化被災市街地における地下水位低下工法の検討・調査について（ガイダンス（案））：国土技術政策総合研究所, p12, 2013.1
- 8) 浅層盤状改良による宅地の液状化対策の合理的な設計方法の研究：（社）地盤工学会, pp192-193, 2012.9
- 9) 格子状改良工法 WG (WG2) 検討報告：浦安市液状化対策実現可能性技術検討委員会, pp1-76, 2012.11
- 10) 石原研而：Stability of Natural Deposits during Earthquakes, 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.1, pp.321-376, 1985
- 11) 北詰昌樹：深層混合処理工法における改良地盤の安定性に関する研究、港湾技研資料 No.774, p7, 1994
- 12) 実用 軟弱地盤対策技術総覧、（株）産業技術サービスセンター, pp733-744, 1993.11