

東日本大震災における SIMAR 工法・マルチジェット工法の液状化対策効果の検証

山内 崇寛^{*1}・手塚 広明^{*2}・清水 英樹^{*3}

Report of the Countermeasure Effects by “SIMAR method” and “Multi-Jet method” against Liquefaction in the Great East Japan Earthquake

Takahiro YAMAUCHI, Hiroaki TEZUKA, Hideki SHIMIZU



図-1 SIMAR 工法の改良効果

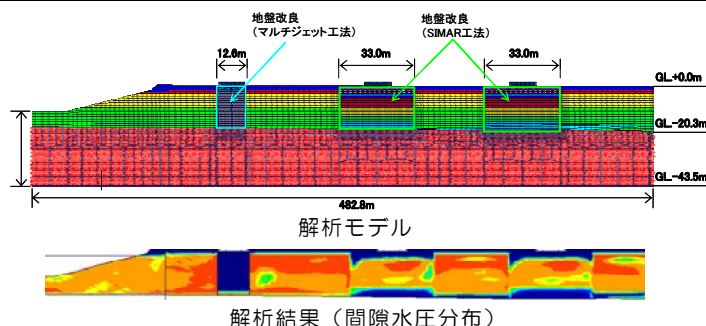


図-2 2次元動的有効応力解析による検証

研究の目的

東日本大震災により、茨城県常陸那珂火力発電所では大規模な液状化被害が発生する中、当社が貯炭場基礎の液状化対策として SIMAR 工法およびマルチジェット工法で地盤改良を実施した範囲においては、施設機能上支障となる変形が発生せず、隣接する未改良箇所との差異によって地盤改良効果を確認することができた。

そこで、SIMAR 工法およびマルチジェット工法の液状化対策としての改良効果を検証するため、地震後の実際に被災を受けた液状化対策地盤に対して各種地盤調査を行った。また、調査結果と実際の観測地震波を基に 2 次元動的有効応力解析による再現解析を実施し評価を行なった。

技術の説明

SIMAR 工法：液状化対策工法の密度増大工法に分類される対策工法。従来のロッドコンパクション工法に吸水機能を付加することで飛躍的に改良効果を高めた工法であり、現在主流とされているサンドコンパクションパイル工法（SCP 工法）に対してコストダウンできる工法である。

マルチジェット工法：自由形状で大口径改良が可能な新しい高圧噴射攪拌工法であり、液状化対策工法の固結工法に分類される対策工法。とくに液状化対策としての格子状改良を行う場合、従来工法に対して大幅にコストダウンした合理的な対策を行うことができる。

主な結論

SIMAR 工法

- ・地震前後で改良地盤の N 値は低下していない。
- ・現状の設計で考慮される改良境界部の軟化範囲においても、地震前後で N 値は低下していない。
- ・現状の設計では DA=5% で液状化強度が設定されているが過小評価である。（再現解析では DA=10% の方が実際に近い、DA=10% 評価ができれば設計の合理化が可能）

マルチジェット工法

- ・格子内地盤の液状化は発生しておらず、改良体は連続的に健全である。
- ・格子状改良の動的解析モデル化において一般的に用いられている 2 重要素モデルにおいて、地盤と改良体にジョイント要素を入れたほうが実際の再現性が高い。（格子内地盤が液状化しにくくなり、設計の合理化が可能）
- ・格子状改良の表層部に 100% 改良で蓋をするような形状で表層改良することで、液状化改良効果を高めることができる。表層改良に排泥を自ら利用することで併せてコストダウンも可能。

*1 本店 土木事業本部 土木設計・技術部

*3 本店 土木事業本部 土木設計・技術部 設計第 2 グループ

*2 本店 土木事業本部 土木設計・技術部 技術開発グループ

東日本大震災における SIMAR工法・マルチジェット工法の液状化対策効果の検証

山内 崇寛*¹ 手塚 広明*²
清水 英樹*³

要 旨

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、広範囲な地域で埋立地を中心に液状化現象が発生し、住宅・道路・港湾施設・ライフライン・産業施設等に多大な被害をもたらした。茨城県常陸那珂火力発電所では震度6弱の地震動により、大規模な液状化現象が発生した。その中で、当社が貯炭場基礎の液状化対策として実施したSIMAR工法およびマルチジェット工法で地盤改良を実施した範囲においては、地盤の液状化現象が発生せず、隣接する未改良箇所との差異によって地盤改良効果を確認することができた。そこで、両工法の改良効果を検証するため、地震後の実際に被災を受けた液状化対策地盤に対して各種地盤調査を行ない、調査結果と実際の観測地震波を基に2次元動的有効応力解析（FLIP）による再現解析を実施した。

本報告は、両工法の改良効果の検証結果、およびその成果を踏まえた設計の合理化によるコストダウンの検討結果について報告する。

キーワード 東北地方太平洋沖地震／地盤の液状化／SIMAR工法／マルチジェット工法／FLIP

目 次

- | | |
|--------------------|-----------------------|
| 1. はじめに | 4. 動的解析による再現解析の検証 |
| 2. 工事概要 | 5. 設計の合理化によるコストダウンの検討 |
| 3. 原位置試験による改良効果の検証 | 6. まとめ |

REPORT OF THE COUNTERMEASURE EFFECTS BY “SIMAR METHOD” AND MALTI-JET METHOD” AGAINST LIQUEFACTION IN THE GREAT EAST JAPAN EARTHQUAKE

Takahiro YAMAUCHI Hiroaki TEZUKA
Hideki SHIMIZU

Synopsis:

The Great East Japan Earthquake on March 11, 2011 caused various types of land disasters in East Japan. Hitachinaka thermal power station in Ibaraki Prefecture was suffered from large-scale liquefaction in the whole area except countermeasure had been executed.

“SIMAR method” and “Multi-Jet method” which had developed as liquefaction countermeasure had been executed in the thermal power station before the Great East Japan Earthquake. And the great effect had come out clearly.

This is the report that the effect verifications by ground survey and dynamic analysis with the aim of cost reduction for the countermeasure.

* 1 本店 土木設計・技術部 * 3 本店 土木設計・技術部 技術開発グループ
* 2 本店 土木設計・技術部 設計第2グループ

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震（以下、3.11 地震と記す）では、広範囲な地域で埋立地を中心に液状化現象が発生し、住宅、道路、港湾施設、ライフライン、産業施設等に多大な被害をもたらした。

茨城県茨城港常陸那珂港区北ふ頭工業用地に敷地面積 141ha を有する東京電力常陸那珂火力発電所（図-1、平成 15 年 1 号機運転開始、平成 25 年 2 号機運転開始予定）でも震度 6 弱の地震動により、大規模な液状化現象が発生した。当発電所は、平成 9 年から平成 11 年の間に埋め立てられた箇所であり、約 20m の埋土層は、細粒分含有率 20%程度以下、N値=5～20 の緩い砂地盤を主体としている。今回の地震で液状化対策を実施していない埋土層が液状化し、タイヤが埋まるほどの噴砂が発生し、構内道路は部分的に沈下・蛇行し、通行が困難となった（写真-1）。

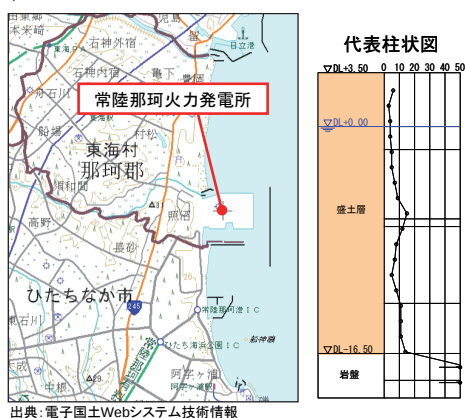


図-1 常陸那珂位置図



写真-1 当現場の液状化による被害状況

3.11 地震当日は、2 号機（100 万 kW）増設工事に伴い新たな貯炭場を整備する工事のうち大型機械を設置するための道床基礎の液状化対策工事が完了し、道床整備工事が施工中であった。当工事での液状化対策工法は、当社保有の液状化対策工法である吸水型振動棒締固め工法¹⁾（以下、SIMAR 工法と記す）および自由形状・大口径高圧噴射攪拌工法²⁾（以下、マルチジェット工法と記す）による格子状改良が採用された。無対策の部分で大規模な液状化を発生させた 3.11 地震において、SIMAR 工法を実施した箇所は液状化現象が認められなかった。また、マルチジェット工法は後述のように格子状改良を行っていたが、格子内部の地盤は液状化していないことが確認できた。写真-2 は当現場で液状化現象が発生し始めたときの写真であり、SIMAR 工法施工箇所と無対策箇所の液状化の発生状況の差が明らかであることがわかる。

本報告は、両工法の改良効果の検証結果、およびその成果を踏まえた設計の合理化によるコストダウンの検討結果について報告する。



写真-2 SIMAR 工法の液状化対策効果の状況

2. 工事概要

本工事は図-2 に示す No.4、No.5、No.6 の 3 つの道床を新たに整備するものである。施工箇所周辺は、東側には 1 号機用貯炭場、西側には SMW 遮水壁で囲われた灰捨場、また北側には石炭運搬用の密閉型ベルトコンベアなど、運用中の発電所諸設備に囲まれており、施工ではこれらの既存設備の運用に影響を与えないようにする必要があった。

このような施工条件下において、地盤改良工法として No.4、No.5 道床では SIMAR 工法（DL.+0m～岩盤）を適用し、土被りが小さい表層部については浅層改良工法（DL.+2.5m～DL.+0m）を併用した。No.6 道床では地盤改良工法による SMW 遮水壁への影響を抑制するため、マルチジェット工法による格子状改良工法（DL.+0.9m～岩盤）を適用し、表層部については No.4、No.5 道床と同様の浅層改良工法（DL.+2.5m～DL.+0.9m）を採用している。

表層改良工法はマルチジェット工法で発生する排泥を浅層改良の固化材として有効利用することで、環境負荷の低減を図った。地盤改良の設計は施設運用に対する要求性能で規定されている。

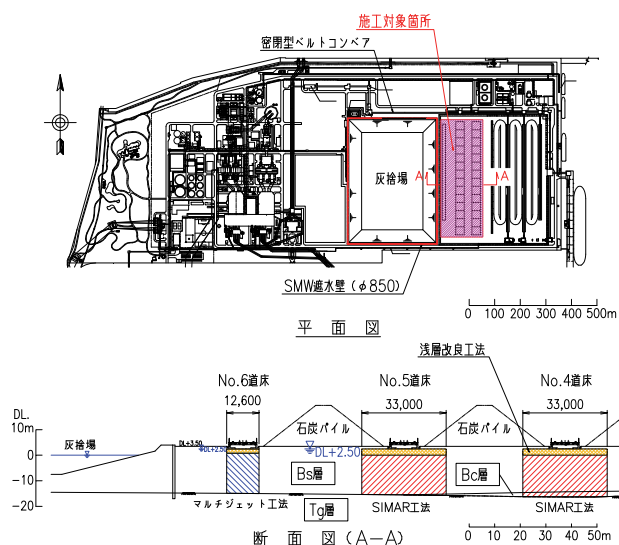


図-2 施工位置図

3. 原位置調査による改良効果の検証

当現場では 3.11 地震により、液状化対策を実施していない箇所は大規模な液状化現象が発生したが、SIMAR 工法の施工範囲、およびマルチジェット工法格子状改良の格子内地盤は液状化現象の発生は認められなかった。この効果を定量的に確認するため、地震後の改良地盤と未改良地盤において、各種地盤調査を行った。図-3 に調査位置全体平面図を、図-4 に調査位置図を示す。図-4 の SIMAR 工法の改良範囲に示す「軟化範囲」とは、液状化した未改良地盤からの過剰間隙水圧の伝播により改良地盤が軟化すると考えられる影響範囲である。この様に、一般的な密度増大工法の設計では、基礎直下だけではなく軟化範囲も含めて改良範囲としている³⁾。

なお、調査位置 B の③孔において、SIMAR 工法改良地盤について、GP サンプル⁴⁾による不攪乱試料を採取し、繰返し三軸試験（液状化特性、変形特性）を実施している。これは、後述する 4 章の動的解析による再現解析で SIMAR 工法改良体の動的力学特性の物性値を評価するためである。（本章での結果説明は省略する）

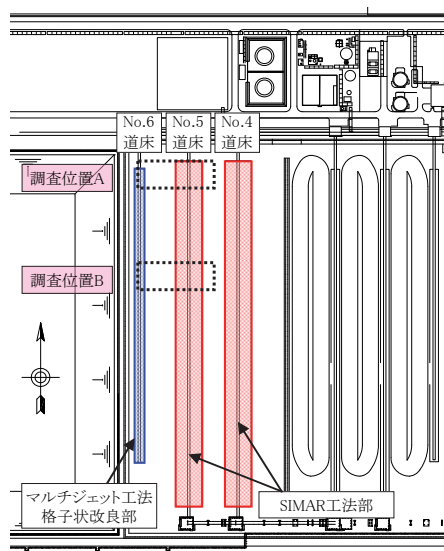


図-3 調査位置全体平面図

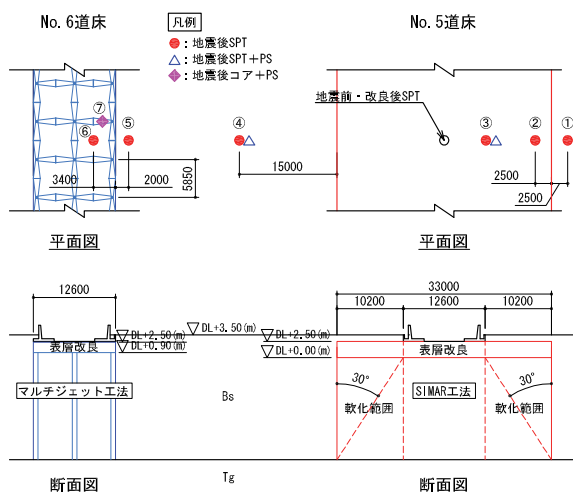


図-4 調査位置図

3.1 SIMAR 工法部の調査結果

調査位置 A および B の地震前後の未改良部に対する N 値の比較を図-5 に、地震前後の改良部に対する N 値の比較を図-6 に示す。

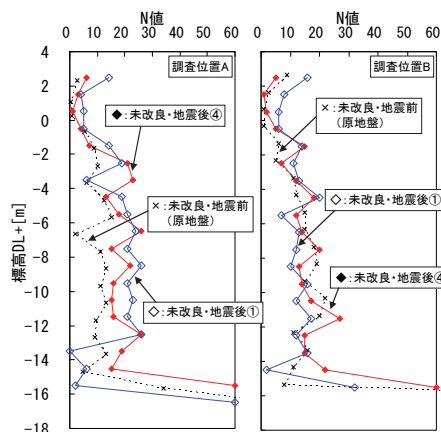


図-5 地震前後の未改良部に対する N 値比較

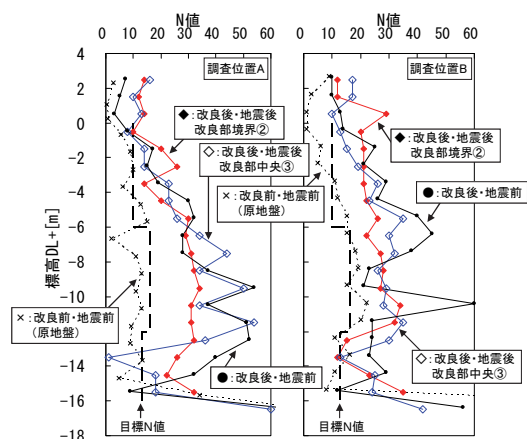


図-6 地震前後の改良部に対する N 値比較

(1) 未改良部の地震前後の N 値比較（液状化前後）

図-5 に「未改良・地震前（原地盤）」、「未改良・地震後①」、「未改良・地震後④」の N 値の比較を示す。調査位置 A では、DL-6m 以深において液状化後に若干の N 値が増加する傾向も見受けられるが、調査位置 B では、N 値の変化が小さいことが確認できた。

(2) 基礎直下改良部の地震前後の N 値比較

図-6 に「改良後・地震前」、「改良後・地震後改良部中央③」の N 値の比較を示す。調査位置 A および B のいずれにおいても、地震前後で N 値が低下していないことが確認できた。

(3) 改良部軟化範囲の地震後の N 値比較

図-6 に「改良後・地震後改良部境界②」、「改良後・地震後改良部中央③」の N 値の比較を示す。調査位置 A および B のいずれにおいても、過剰間隙水圧の伝播による軟化範囲として設定されている範囲において N 値が低下していない（「改良後・地震後改良部境界②」）。つまり、SIMAR 工法により施工を行った箇所では、一般的に軟化範囲とされている範囲でも N 値は低下していないことが確認できた。

3.2 マルチジェット工法部の調査結果

(1) 格子状改良の連続的な健全性確認

格子状改良の連続的な健全性を確認するため、チェックボーリングを1箇所（調査位置 B, ⑦）実施し、同一孔で原位置 PS 検層（サスペンション方式）を行った。コアボーリングのコア採取率はほぼ 100%であり、全層にわたって良好な改良体を目視確認できた。また、図-7 に弾性波速度 V_s の深度分布図を示す。原位置 PS 検層（未改良）の弾性波速度 V_s を併用して評価すると、改良体の弾性波速度 V_s が全層で 0.6 km/sec 以上を確保しており、原地盤の弾性波速度（平均値 0.2 km/sec）を大きく上回っている結果から、連続的に健全であると評価できる。

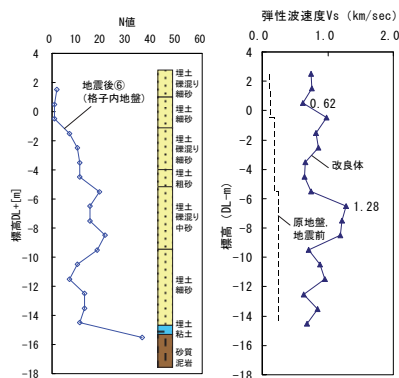


図-7 原位置 PS 検層結果

さらに、改良体が面的に健全であったことを確認するため多点式インテグリティ (IT) 試験 (図-8) を行った。多点式 IT 試験とは、杭やコラムの頭部に弾性波を発生させ、反射波を測定・解析することで健全性を評価する通常の IT 試験（破損位置や杭下端で反射波がもどってくることで健全性を評価）を応用した試験方法である。通常の IT 試験では 1 つの受信センサーの評価に対し、2 個以上の受振センサーを用いて位相差で計測・解析をおこなうことで、改良体の面的な健全性の評価が可能となる。

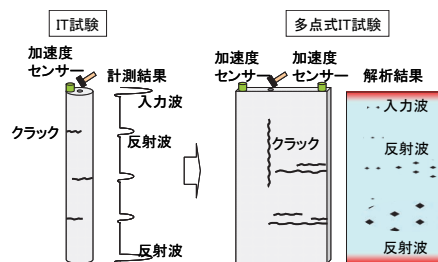


図-8 多点式 IT 試験イメージ図

多点式 IT 試験による改良体の計測結果を図-9 (a, b のみの結果を掲載) に示す。上・下端の濃い部分は、入力波と反射波を意味しており、下端位置は実施工での改良下端とほぼ同一深度である。改良体上・下端以外の中央部では、強い反射波がないことから改良体が面的に連続性を確保していることが確認できた。

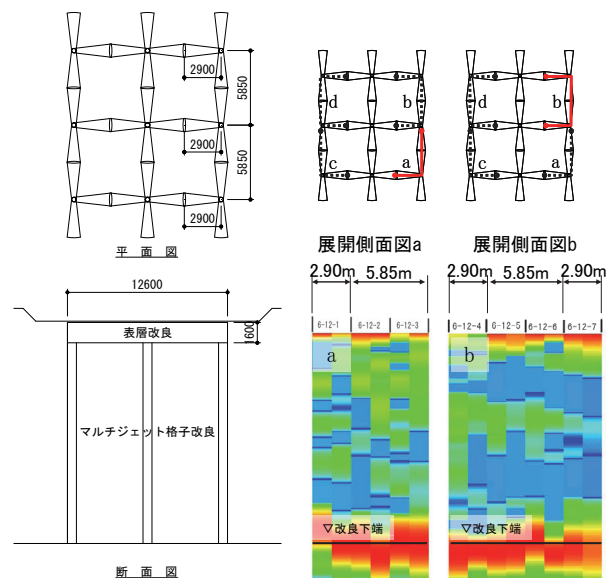


図-9 多点式 IT 試験結果（調査位置 B）

(2) 格子内未改良地盤の液状化有無の確認

格子改良範囲外の未改良地盤は液状化により最大 70cm 程度沈下が発生した。したがって、格子内未改良地盤が液状化した場合、図-10 に示すように浅層改良部と格子内未改良部で空洞が発生することが想定される。そこで、浅層改良と格子内地盤の境界をボアホールカメラで空洞の有無を確認した。図-11 に結果を示すが、表層改良と格子内地盤の境界部に空洞がないことから、格子内未改良地盤の液状化は発生していないことが確認できた。

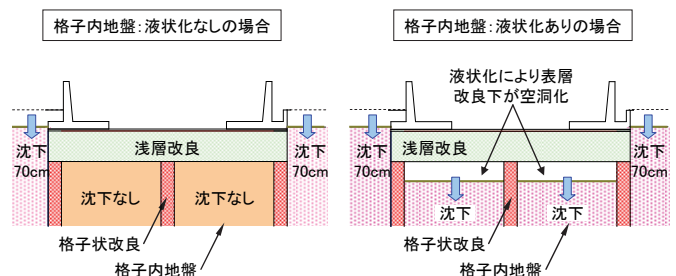


図-10 格子内地盤の液状化について

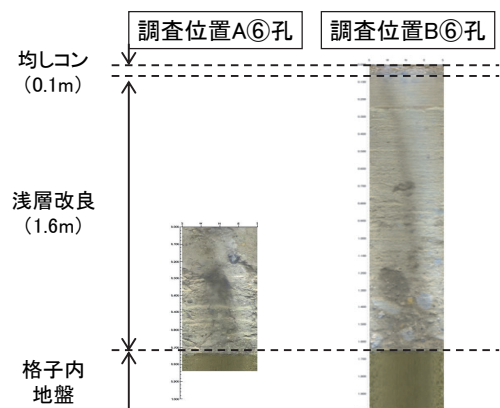


図-11 ボアホールカメラによる空洞調査結果

4. 動的解析による再現解析の検証

4.1 再現解析概要

3.11 地震における再現解析では、実際の観測された地表面地震波から一次元等価線形解析(解析コード:SHAKE)で引き下げて、基盤面の入力地震動を設定した。地盤モデル・改良体モデルのパラメータは、地震動地震後の原位置調査結果からを設定し、2次元動的有効応力解析(解析コード:FLIP⁹⁾)を行い検証した。FLIP では、土の応力ひずみ関係に双曲線モデルを組み合わせたマルチスプリングモデル⁹⁾を採用しており、有効応力法によって非排水条件下での地盤の液状化を考慮した解析が可能⁴⁾である。

4.2 入力地震動の設定

入力地震動は、3.11 地震の観測記録を用いた一次元地震応答解析を行い、観測点の地表面地震波を基盤面へ引き戻すことで設定した。観測点は K-NET⁷⁾ 那珂湊(IBR007)を用い、解析コードはSHAKEを用いた。

なお、3.11 地震では、非常に長い本震の継続時間に加え約30分後に襲った大きな余震によって液状化の被害が拡大したという報告⁸⁾もあるため、約30分後の最大余震まで考慮した入力地震動とした。図12に基盤面の入力地震動を示す。なお、解析時間の短縮化を行うため、解析上の余震発生は本震後500秒後とした。

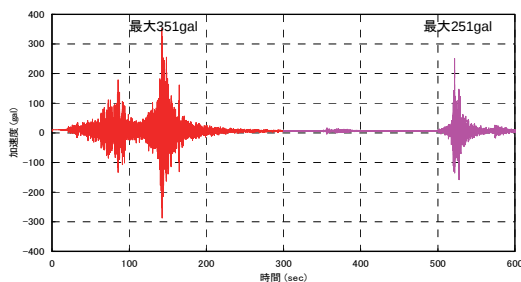


図-12 基盤面の入力地震動

4.3 解析モデルの設定

解析モデルを図-13に示す。原地盤については、当初設計で実施された地盤調査結果を基に設定しているが、SIMAR 工法では地震後に実施した地盤調査結果より土層区分を細分化している。

マルチジェット工法の格子状改良においては、3次元形状を2次元に置き換える必要がある。そこで、図-14に示すように2重要素モデルによって要素化した。すなわち、格子状改良となっている面内方向(加振方向に平行)および面外方向(加振方向に垂直)に改良壁が存在するため、この部分を改良体と地盤の2重の要素を持たせ、2次元断面に垂直方向、および平行方向の改良領域を表現したモデルである。

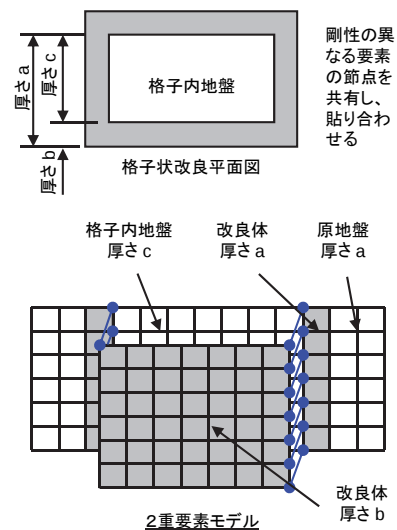


図-14 基盤面の入力地震動

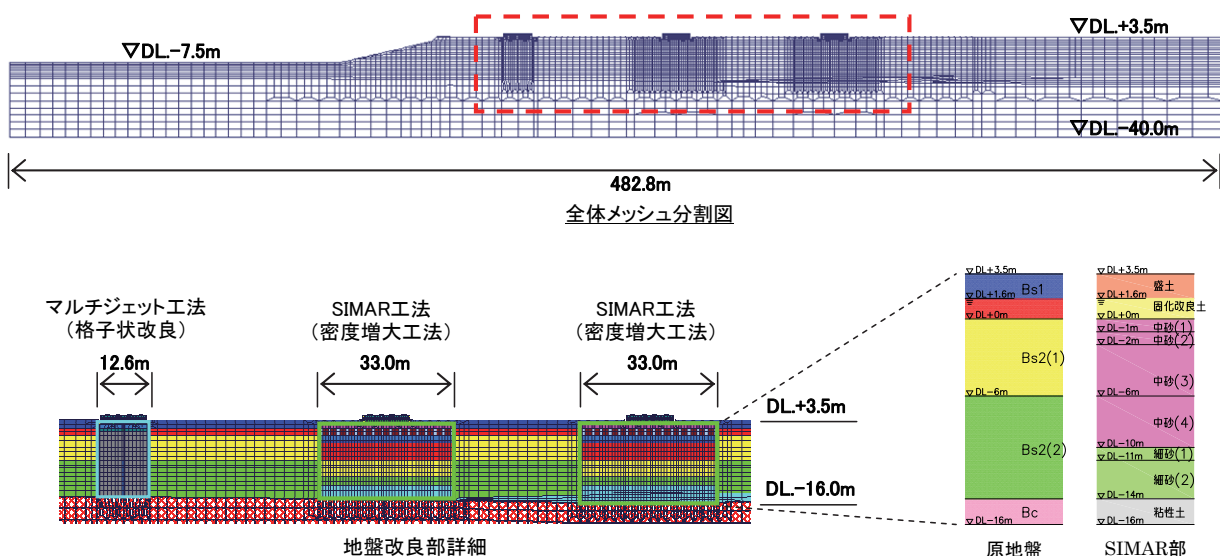


図-13 解析モデル

4.4 調査結果に基づく解析パラメータの設定

再現解析で用いる原地盤モデルおよびマルチジェット工法による改良地盤モデルについては、原設計で実施している地盤調査・室内試験結果を基本に設定を行った。SIMAR 工法の改良地盤モデルについては、地震後に実施した原位置調査・室内試験結果を基本に設定を行った。各種解析パラメータの設定方法の一覧を表-1 に示す。

表-1 解析パラメーター一覧

解 析 パ ラ メ ー タ		原地盤	SIMAR工法 改良地盤	マルチジェット 工法 改良地盤	
湿 潤 密 度 (kN/m ³)		ρ_t 室内試験より (原設計調査)	室内試験より (地震後調査)	原地盤と同等	
間 隙 率		n 室内試験より (原設計調査)	室内試験より (地震後調査)	原地盤と同等	
変形特性	初期せん断剛性 (k P a)	G_{ma} PS検層 (原設計調査)	PS検層 (地震後調査)	E=700qu G=E/2(1+ν)	
	基準化拘束圧 (k P a)	σ_{ma}' K ₀ =0.5 として算定	K ₀ =0.5 として算定	K ₀ =0.5 として算定	
	拘束圧依存係数	m 標準値 ³⁾	標準値 ³⁾	考慮しない	
	内 部 摩 擦 角 (度)	ϕ_f 室内試験より (原設計調査)	原地盤と同等	0.0	
	粘 着 力 (kPa)	c 室内試験より (原設計調査)	原地盤と同等	c=qu/2	
	履歴減衰上限値	h_{max} 室内試験 (原設計調査)	室内試験 (地震後調査)	粘性土の 標準値 ³⁾⁴⁾⁵⁾	
液 状 化 特 性	変 相 角 (度)	ϕ_p	室内試験結果 をフィッティング (原設計調査)	室内試験結果 をフィッティング (地震後調査)	考慮しない
	液状化の全体の 挙 動 を 規 定	$w1$			
	液状化の前半の 挙 動 を 規 定	$p1$			
	液状化の後半の 挙 動 を 規 定	$p2$			
	せん断応力比の 下 限 値 を 規 定	$c1$			
	液状化の終局強 度 を 規 定	Sl			
		繰返し三軸試験 液状化特性 DA5%基準	繰返し三軸試験 液状化特性 DA5%基準		

4.5 解析結果

全時間を通して最大となる過剰間隙水圧比分布図を図-15 に、残留変形図を図-16 に示し、以下に解析結果を整理する。

(1) 最大過剰間隙水圧分布

SIMAR 工法部では大部分の範囲で最大過剰間隙水圧比が 0.8 以上となり、再現解析上では液化化現象の発生する可能性が高い結果となった。

マルチジェット工法部格子内地盤の過剰間隙水圧比は大部分が 0.7~0.9 であり、SIMAR 工法の改良地盤と同様に、再現解析上では液化化現象の発生する可能性が高い結果となった。

(2) 残留変位

残留変位については、水平・鉛直ともに実際の計測結果よりも再現解析結果が過大に評価する結果となっている。なお、FLIP は非排水状態を仮定しているため、地震後の最終的な沈下量（残留鉛直変位）は、解析でえられる鉛直変位に、別途、過剰間隙水圧の詳細に伴う体積収縮による沈下量を加算している。

(3) 総評

実際の原位置調査結果と対比すると、動的解析による再現解析結果は過大に評価している結果となった。これは、設計方法が過大評価であり、設計を合理化することで液化化対策のコストダウンの可能性があることを示している。設計の合理化によるコストダウンの検討については次章で報告する。

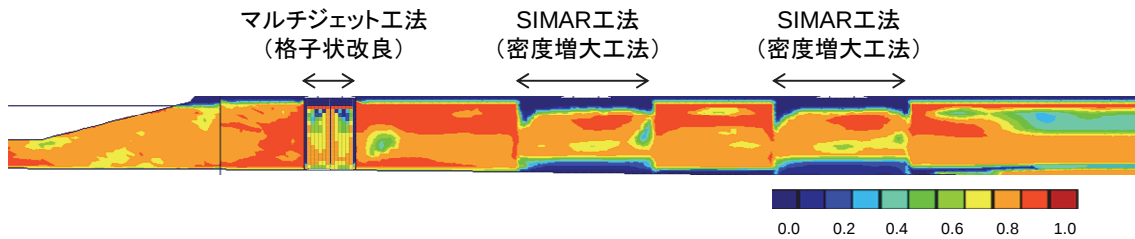


図-15 最大過剰間隙水圧比分布（全時間を通して最大）

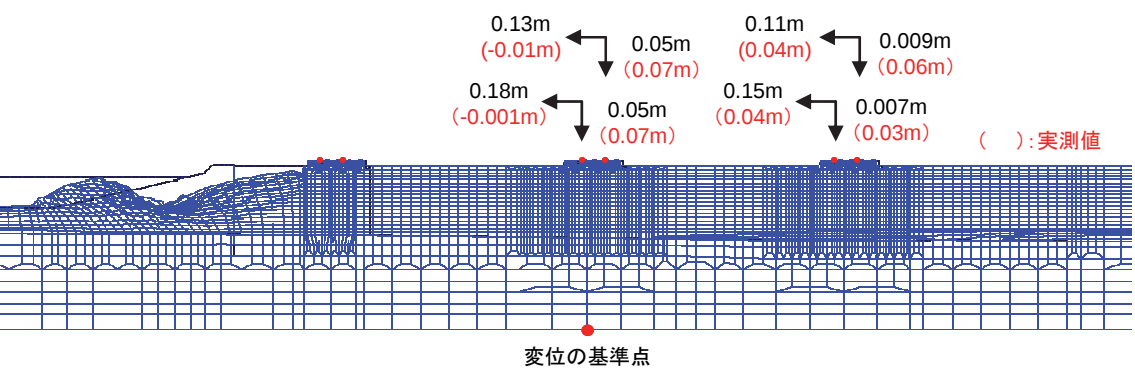


図-16 残留変形図

5. 設計の合理化によるコストダウンの検討

5.1 SIMAR工法

(1) 液状化強度特性の評価方法による合理化

(a) SIMAR 工法改良地盤の動的特性

SIMAR 工法改良地盤の動的特性を確認するため、調査孔③で GP サンプリング⁴⁾による不攪乱試料を採取し、繰返し三軸試験（液状化強度特性 JGS0541-2009）を実施した。図-17 に試料採取深度、写真 3 に不攪乱試料、図-18 に繰返し三軸試験結果、図-19 に繰返し三軸試験波形データ（中砂 1,2 DL-9.3～9.9m）を示す。

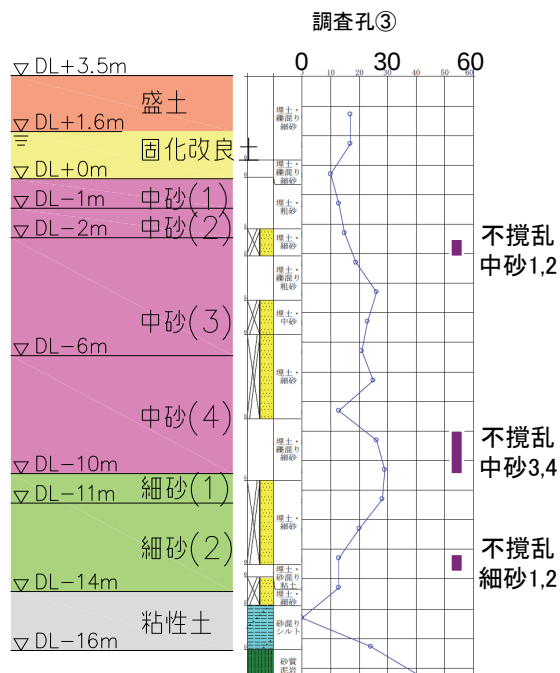
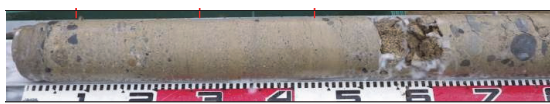


図-17 不攪乱試料採取深度 (No.5 道床調査孔③)

不攪乱 中砂1,2



不攪乱 中砂3,4



不攪乱 細砂1,2



写真-3 不攪乱試料 (GP サンプリング⁴⁾)

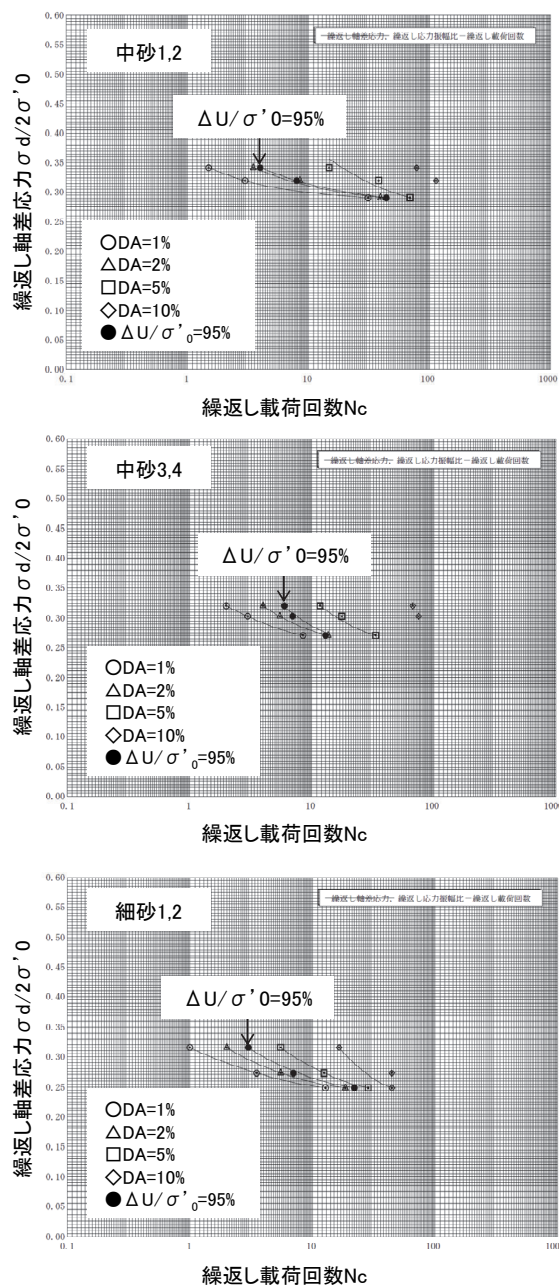


図-18 不攪乱試料による繰返し三軸試験結果

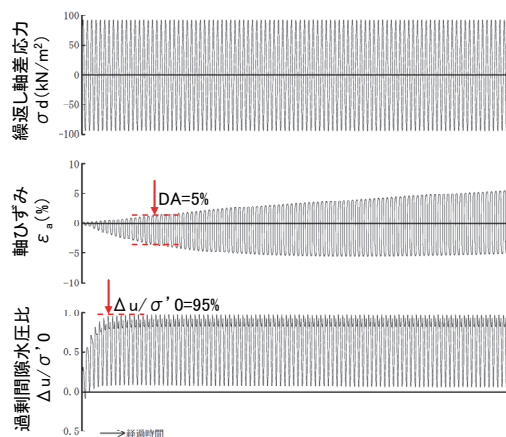


図-19 不攪乱試料の繰返し三軸試験波形データ (中砂 1,2 DL-9.3～9.9m $\sigma_d/2\sigma'_0=0.303$)

図-18 より、一般的な緩い砂質土では、 $\Delta u/\sigma'_{v0}=95\%$ の強度曲線が $DA=5\%$ の上に引かれる場合が多いのに対し、SIMAR 工法改良地盤は $DA=2\sim 5\%$ の強度曲線の間にある。図-19 より、緩い砂質土では、過剰間隙水圧が有効拘束圧に等しくなる（ $\Delta u/\sigma'_{v0}=95\%$ ）とひずみが急速に増加するのに対し、SIMAR 工法改良地盤では $\Delta u/\sigma'_{v0}$ が 95% を超えても、せん断ひずみが急激に増加せずに緩やかに進行していることがわかる。これは、過剰間隙水圧が有効拘束圧に等しくなっても、正のダイレイタンスにより、有効応力が回復し、その結果ある程度のせん断剛性が保持され、ひずみの急激な進行を抑制するサイクリックモビリティの作用であると考えられる。

そこで、調査孔③で実施した原位置 PS 検層の結果より、式 (1) により静止土圧係数 K_0 の確認を行った。図-20 に K_0 の深度分布図を示す。

$$\nu = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2((V_p/V_s)^2 - 1)}$$

$$K_0 = \frac{\nu}{1 - \nu} \quad \dots (1)$$

ここに、 ν : ポアソン比
 V_p : P 波速度 (m/sec)
 V_s : S 波速度 (m/sec)
 K_0 : 静止土圧係数

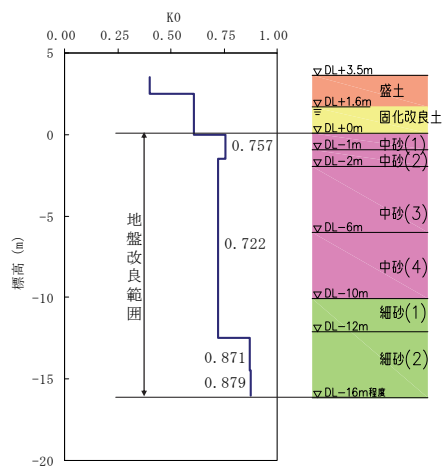


図-20 原位置 PS 検層より求まる K_0

図-20 より、 K_0 は SIMAR 工法改良範囲において $0.722\sim 0.879$ と大幅に増加していることが確認できた。

つまり SIMAR 工法改良部は、締め固め効果により静止土圧係数 K_0 が増加しており、通常より高い拘束圧が保持されるとともに、過圧密状態（正のダイレイタンス）にあり、その結果過剰間隙水圧比が 1 となっても液状化には至らずせん断剛性のある程度保持できることを示している。またこの K_0 増加効果は、3.11 地震のような大きな地震動を受けた後でも保持されていることが確認できた。

(b) K_0 増加の効果を考慮した液状化強度特性の評価

繰返し三軸試験は拘束条件が等方圧であるため、原位置の拘束条件を再現するため、式 (2) で補正が行われる。

$$C = (1 + 2K_0)/3 \quad \dots (2)$$

ここに、 C : 原位置の拘束条件に関する補正係数

$K_0=0.5$ では $C_{0.5}=0.667$ であり、前述した SIMAR 工法改良地盤の K_0 の下限値相当の 0.7 とした場合 $C_{0.7}=0.800$ となり、 $C_{0.7}/C_{0.5}=1.2$ となる。つまり、液状化強度特性を拘束条件で補正した場合、SIMAR 工法改良地盤の強度曲線は 1.2 倍程度大きくなるといえる。

そこで、不攪乱試料より求めた液状化特性で $DA=5\%$ の強度曲線、 $DA=5\%$ を $C_{0.7}/C_{0.5}$ で補正した強度曲線、および $DA=10\%$ の強度曲線で整理した（図-21）。

その結果、 $DA=5\%$ を $C_{0.7}/C_{0.5}$ で補正した強度曲線は $DA=10\%$ とほぼ同等であることが確認できた。

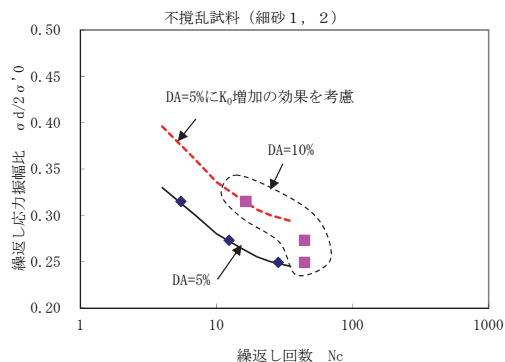
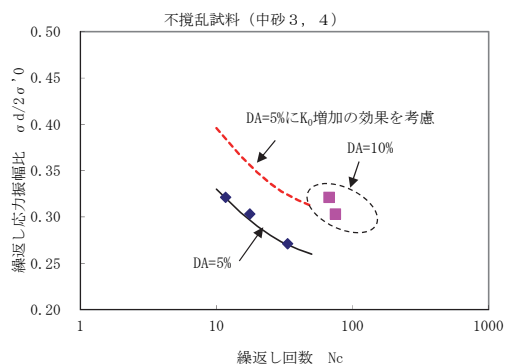
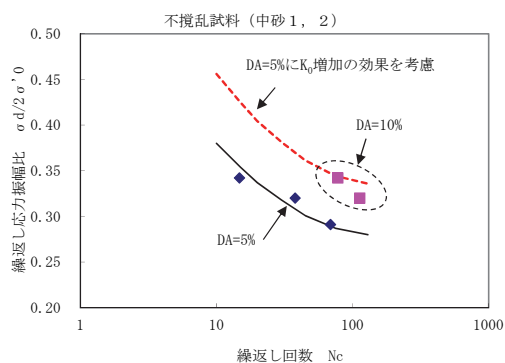


図-21 不攪乱試料による液状化強度特性

(c) 再現解析による確認

前述した液状化強度特性で $DA=10\%$ でフィッティングしたパラメータを用いて FLIP 解析で再検討を実施した。 $DA=5\%$ と $DA=10\%$ の最大過剰間隙水圧比分布の対比図を図-22 に、変位図の対比図を図-23 に示す。

再検討結果によると $DA=10\%$ とした場合、最大過剰間隙水圧分布も相対的に小さく、実際に液状化していない改良地盤に対して、比較的再現性の高い解析結果となった。また、残留変位についても $DA=5\%$ よりも $DA=10\%$ とした場合の方が、水平・鉛直ともに実測値に近く再現性の高い解析結果となった。

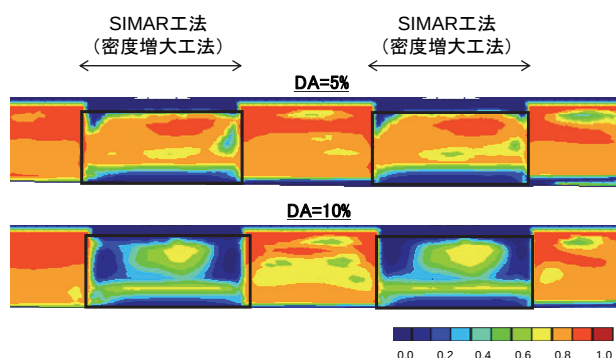


図-22 最大過剰間隙水圧比分布の対比

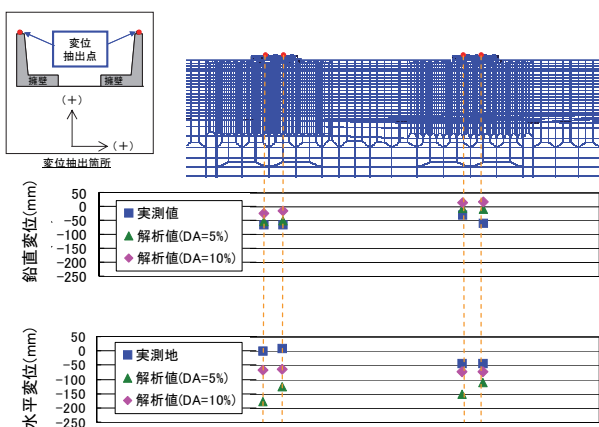


図-23 残留変位図

(d) まとめ

SIMAR 工法改良地盤は K_0 の増加を評価することで設計の合理化が可能である。具体的には本施工開始前に試験施工を行い原位置 PS 検層で K_0 の増加量を確認し、設計にフィードバックすることでコストダウンできる。

なお、今回の検討では、 K_0 の下限値が 0.7 であり、 K_0 で補正した液状化強度曲線が $DA=10\%$ とほぼ同等であったが、これらの相関性を定量的に評価する必要がある。今後、設計段階で評価を行なうには、今後データの蓄積が必要となる。

(2) 軟化範囲の評価方法による合理化

SIMAR 工法を含む密度増大工法は、過剰間隙水圧の伝播による軟化範囲を考慮して、必要改良範囲に追加して余改良範囲を設けることが一般的である。図-24 に軟化範囲の設定方法を示す。余改良範囲は、改良深度が深い場合には相当量必要となり、当現場においては、余改良範囲が必要改良範囲の 1.6 倍程度となっている。

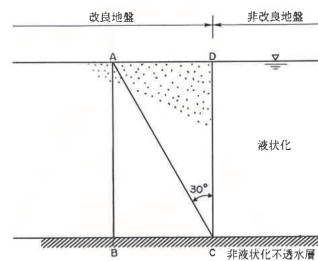


図-24 軟化範囲の設定方法⁹⁾

SIMAR 工法部の改良範囲の軟化範囲では、4 章で報告したとおり過剰間隙水圧の伝播による強度低下が発生していない。写真-4 に示すように、地震中に SIMAR 工法改良部の軟化範囲に緩みが発生していないのは明確である。



写真-4 軟化範囲の被害状況

そこで、5 章で実施した動的解析による再現解析において、軟化範囲における最大過剰間隙水圧分布の確認を行った。図-25 に軟化範囲における最大過剰間隙水圧分布を示す。

解析結果によると、軟化範囲の過剰間隙水圧は小さく強度低下が発生していないことがわかる。FLIP は非排水状態を仮定しているため、過剰間隙水圧の伝播の影響を直接評価することができないが、少なくとも未改良地盤の液状化によるせん断変形の軟化範囲はごく僅かであることが確認できた。

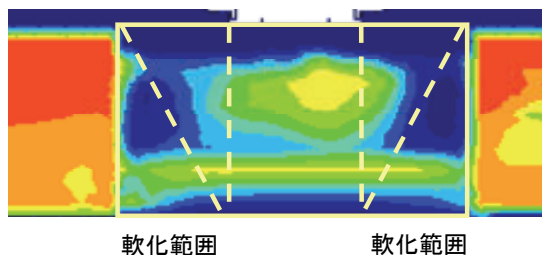


図-25 軟化範囲における最大過剰間隙水圧比分布図 ($DA=10\%$, No.5 道床)

5.2 マルチジェット工法

(1) 格子状改良ジョイント要素モデルによる合理化

5章で報告した動的解析による再現解析では、図-26に示すように、実際には液状化が発生していない格子内地盤において、解析では格子内地盤の過剰間隙水圧比で0.8を超えるものが全体の42.7%を占める結果となった。

また、改良体のせん断ひずみは、図-27に示すように中央部下端付近で0.5%を超えるせん断ひずみが発生する結果となっている。改良体の破壊ひずみは図-28に示すように0.2%程度であることから、実際には破壊していない改良体が解析では破壊する可能性が高い結果となった。

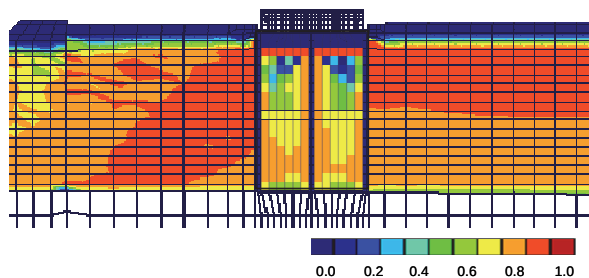


図-26 格子内地盤の最大過剰間隙水圧比分布図

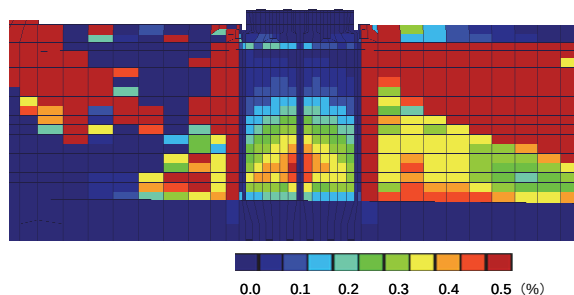


図-27 改良体の最大せん断ひずみ比分布図

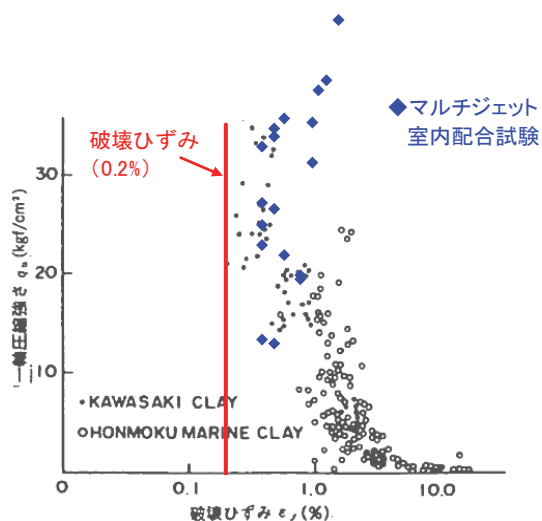


図-28 セメント改良地盤の破壊ひずみ
(既往資料¹⁰⁾ 及び配合試験実績)

このような現象が発生した原因としては、改良体が周辺地盤の変位に拘束され、改良体に過剰のせん断変形が発生し、格子内地盤の過剰間隙水圧と改良体のせん断ひずみが過大に発生したものと考えられる。

そこで、周辺地盤と改良体の境界に図-29に示すようにジョイント要素を設定し再検討を実施した。ジョイント要素設定後の格子内地盤の最大過剰間隙水圧分布図を図-30に、改良体の最大せん断ひずみ分布図を図-31に示す。

ジョイント要素を設定したモデルでは、過剰間隙水圧比の0.8を超える範囲が全体の20.1%と半減し、格子内地盤の過剰間隙水圧比は全体的に小さくなる結果となった。

改良体のせん断ひずみでは、最大せん断ひずみが破壊ひずみの0.2%よりも小さくなり、ジョイント要素モデルで行う解析の方が再現性の高い合理的なモデル化が可能であることが確認できた。

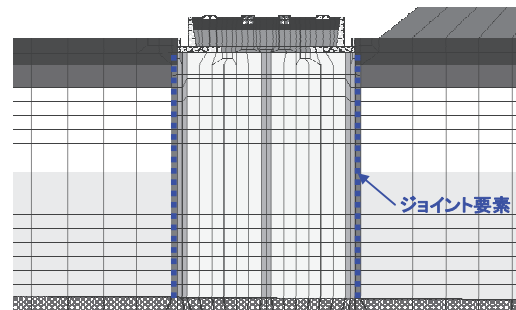


図-29 格子状改良体のジョイント要素モデル

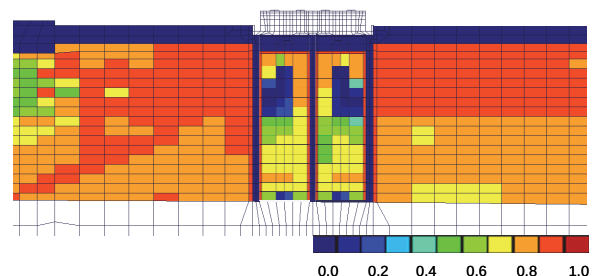


図-30 ジョイント要素設定後の
格子内地盤の最大過剰間隙水圧比分布図

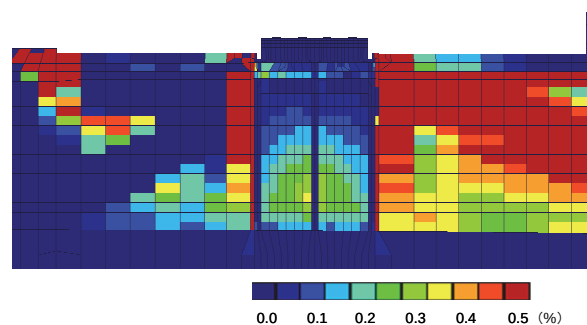


図-31 ジョイント要素設定後の
格子改良の最大せん断ひずみ比分布図

(2) 表層改良の併用による合理化

本案件の格子状改良は、格子状改良上部に発生排泥を自ら利用した全面表層改良を実施している。表層改良の有無が格子内地盤の過剰間隙水圧に及ぼす影響を確認するため、表層改良無しモデルで再検討をおこなった。図-32 に表層改良の有無による格子内地盤の最大過剰間隙水圧比分布の対比を示す。

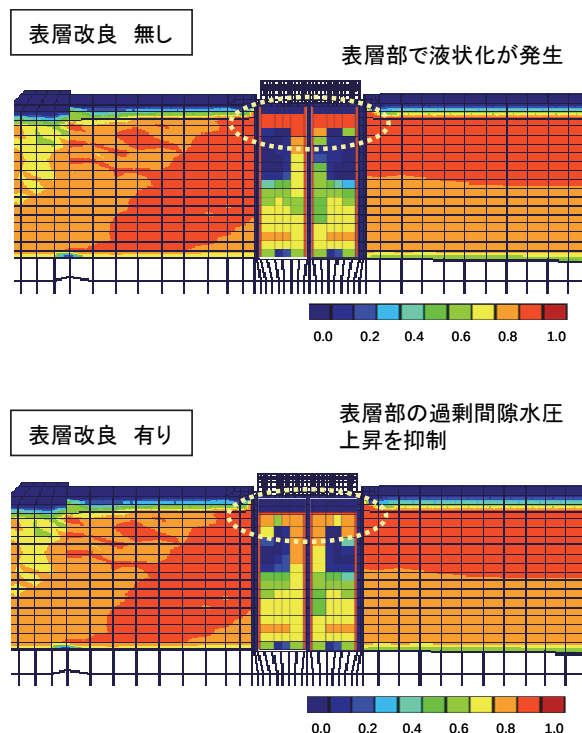


図-32 格子内地盤の最大過剰間隙水圧比分布
(表層改良の無し、ジョイント要素モデル)

表層改良が無い場合には、格子内地盤の表層部の最大過剰間隙水圧比が 1.0 となっている。一方で表層改良がある場合には、格子内地盤の表層部に発生する過剰間隙水圧を抑制できることが確認できた。これは、格子状改良の上層部を全面表層改良することで、格子状改良の剛性が飛躍的に向上し、格子内のせん断変形を効果的に抑制していると考えられる。

表層改良併用による格子状改良は、剛性向上により格子間隔を拡大することでコストダウンが可能であり、さらに表層改良は格子状改良を施工する際の排泥を自ら利用することで産業廃棄物の場外処分費を削減することが可能であると考えられる。

6. まとめ

設計の合理化による液状化対策のコストダウンを目的として実施した、地震後の原位置調査および動的解析による再現解析の検証結果を以下に整理する。

6.1 SIMAR 工法

- ① SIMAR 工法改良地盤は K_0 が大幅に増加する。 K_0 の効果を液状化強度特性で評価した場合、より再現性の高い解析が可能であった。また K_0 補正した液状化強度特性は $DA=10\%$ と同等であった。
- ② SIMAR 工法改良地盤の軟化範囲は、原位置調査結果から強度低下せず、動的解析による再現解析においても周辺地盤の液状化に伴う SIMAR 工法改良地盤の軟化範囲は、ごく僅かであることが確認できた。

6.2 マルチジェット工法

- ① 2次元動的有効応力解析では、2重要要素モデルに加え、格子内地盤と改良体にジョイント要素を設定することでより合理的な評価が可能である。
- ② 格子状改良に全面表層改良を併用した改良方法は、全体剛性の飛躍的な向上により、せん断変形抑制の効果が高くなるため、格子間隔を拡大することでコストダウンが可能である。また、表層改良は改良体造成時に発生する排泥を自ら利用することで、産業廃棄物の場外処分費も削減可能である。

謝辞：本稿で紹介した各液状化対策工法の現場適用および地震後の効果検証において、東京電力（株）、中央大学研究開発機構石原研而教授、東京理科大学理工学部龍岡文夫教授、東京電機大学理工学部安田進教授に多大な協力を得た。関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 前田建設工業(株)：技術紹介に関するページ
<http://www.maeda.co.jp/tech/all/td0031.html>
- 2) 前田建設工業(株)：技術紹介に関するページ
<http://www.maeda.co.jp/tech/all/td0048.html>
- 3) 埋立地の液状化対策ハンドブック（改訂版），
（財）沿岸開発技術研究センター，pp230-238，平成9年
- 4) 基礎地盤コンサルタンツ(株)：技術紹介に関するページ
http://www.kiso.co.jp/services/ch_shokai/index/GP-sampling-hyosho.html
- 5) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, report of the port and harbour research institute, No. 29, Vol. 4, pp27-56, 1990.
- 6) Towhata, I. and Ishihara, K. : Modeling soil behavior under principal stress axes rotation, Proc. of 5th International Conference on Numerical Method in Geomechanics, Nagoya, pp523-530, 1985.
- 7) 防災科学研究所：強震観測網に関するページ，
<http://www.kyohin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 8) 安田進，原田健二：東京湾岸における液状化被害，地盤工学会誌，Vol. 59, No. 7, pp. 38-411, 2011
- 9) 埋立地の液状化対策ハンドブック（改訂版），
（財）沿岸開発技術研究センター，p231，平成9年
- 10) 北詰昌樹：深層混合処理工法によ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