

首都直下地震に対する基礎・地盤の解析

1. 目的

東日本大震災では、石油タンクの周辺において地盤が変形したことが確認されているが、震度 6 を超える地震動であったにもかかわらず、大規模な貯蔵物の流出につながる屋外タンク貯蔵所の損傷は無かった。このことは、1977 年（昭和 52 年）以降に設置された屋外タンク貯蔵所が、堅固な地盤の上に設置することが求められていること、1977 年（昭和 52 年）以前に設置されていた既存の屋外タンク貯蔵所が、1994 年（平成 6 年）の危険物の規制に関する法令改正により、耐震対策として地盤の液状化に対する強度の確保が求められており、それらの成果の表れであると考えられる。また、本検討会において平成 26 年度に南海トラフ地震が発生した場合の特防区域の屋外貯蔵タンク本体の直下の地盤改良効果とその周辺地盤が屋外貯蔵タンク本体に与える影響を確認した。

しかしながら、将来発生が危惧される首都直下地震が発生した場合の東京湾周辺の特防地区の安全性については、確認されていない。

よって、本検討では、首都直下地震が発生した場合に、屋外貯蔵タンク本体の直下の地盤改良効果とその周辺地盤が屋外貯蔵タンク本体に与える影響を確認することを目的するとともに、従来設計レベルを超えるような大きな地震外力に対しての安全性を検討するうえ、地盤改良効果を解析に組み込むことの効果と重要性を示すことを目指すものとする。

解析の流れを図 1. 1 - 1 に示す。

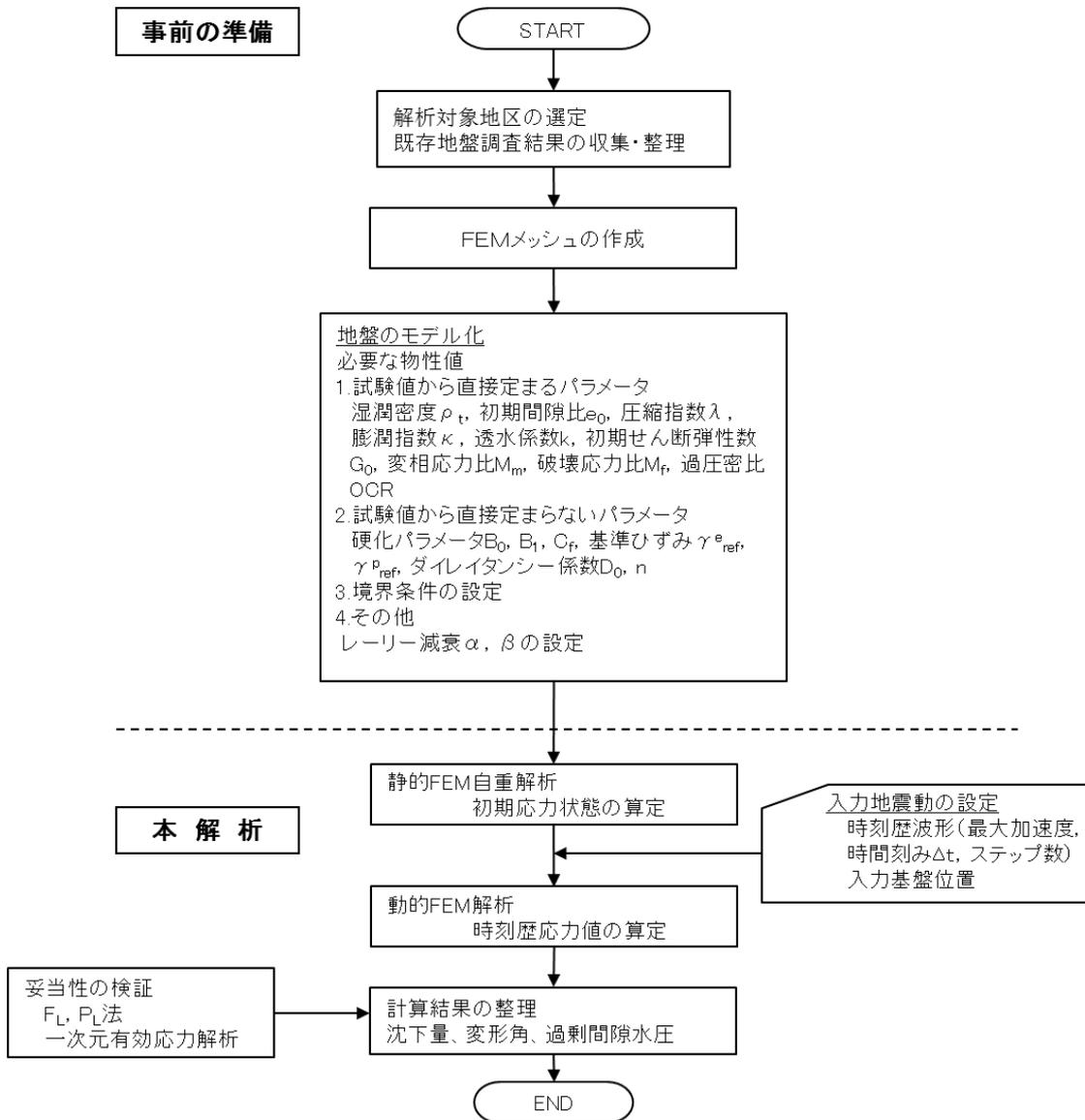


図 1.1-1 解析の流れ

2. 解析対象地区の選定

2. 1 解析対象地区の選定

解析対象地区は、検討目的である「屋外貯蔵タンク本体直下の地盤改良効果とその周辺地盤の影響を確認する」ために適した地区を選定する。

東京湾沿岸の特防区域のうち想定震度が震度6強となる主な特防区域として一次元応答解析において対象とした、3地区（A地区、B地区、C地区）のうち2地区を選定した。

なお、2地区の選定においては以下の5項目を考慮しながら総合的に判断した。

- 砂層の有無：地盤変形の可能性が高いか
- 解析精度：既存資料により解析精度が担保できるか
- 液状化対策効果：地盤改良の実施状況を確認できるか
- 特徴：東京湾沿岸の地盤条件として特徴的であるか
- 解析上異なる特徴をもつ解析対象地区であるか

上記により総合的に判断した結果、3地区のうち一次元応答解析結果から顕著な非線形挙動を示すA地区と、非線形挙動はしないものの地震動の短周期成分が卓越し大きな地表面加速度が予想されるB地区を解析対象地区とした。

候補となった3地区の項目の比較を表2. 1-1に示す。

なお、石油タンクの地盤については、液状化対策が講じられた地盤とすることを求めており、貯蔵量ベースで98%を占める大規模なタンクについては平成25年12月31日までに全て基準に適合しており、小規模な石油タンクについても平成28年度末までに耐震基準に適合させるよう耐震化を進めている。

表2. 1-1 特防区域の震度・地盤状況等の比較

	A 地区	B 地区	C 地区
想定震度階	6 強	6 強	6 強
液状化可能性 (N 値 ≤ 15 程度の 砂・砂礫層で高い)	高い N 値 5~10 程度の沖積砂質土層が続く	中くらい N 値 5 以下の沖積砂質土層が若干ある	高い N 値 5~16 程度の沖積砂質土層が挟在
解析精度 (既存資料)	非常に良い	非常に良い	非常に良い
地盤改良 (既存資料)	サンドコンパクションパイル他	サンドパイル他	サンドコンパクションパイル他
一次元応答 解析結果	非線形挙動顕著であり、長周期化	非線形挙動を示さず短周期が卓越	ほか 2 地区の中間的応答
二次元動的変形解析の対象とする地区	対象	対象	—

2. 2 解析対象地区の地層構成概要

選定した解析対象地区の地層について概要を示す。

2. 2. 1 A地区

地質層序表を表2. 2. 1-1に示す。表層に埋土層が分布しており、その下位は完新世の粘性土層と砂質土層が分布している。完新世の粘性土は比較的軟らかく、砂質土層は緩い～中位の締め具合である。これらの地層の下位は、更新世の砂質土層と粘性土層が互層に分布、その下位に工学的基盤と考える礫質土層が分布する。このような堆積状況において、地盤の変形が懸念される層は、埋土層・第一砂質土層・第一粘性土層・第二粘性土層である。

表2. 2. 1-1 A地区における地質層序表

地質時代			地層名	構成	N 値	
現 世			埋土層	砂質土	5	
新 生 代	第 四 紀	完 新 世	沖 積 層	第一砂質土層	砂	12
				第一粘性土層	シルト	3
				第二粘性土層	粘土	5
		更 新 世	洪 積 層	第二砂質土層	シルト質砂	30
				第三粘性土層	粘土	14
				第三砂質土層	シルト質砂	30
				第四粘性土層	シルト	14
				礫質土層	礫	50

2. 2. 2 B地区

地質層序表を表2. 2. 1-2に示す。表層に埋土層が薄く分布しており、その下位は完新世の砂質土層と薄い粘性土層が分布している。完新世の砂質土層は緩い締まり具合、粘性土は軟らかい。これらの地層の下位は、上総層群であり工学的基盤と考える砂質泥岩が分布する。このような堆積状況において、地盤の変形が懸念される層は、埋土層・第一砂質土層・第二粘性土層である。

表2. 2. 1-2 B地区における地質層序表

地質時代			地層名	構成	N 値
現 世			埋土層	砂質土	9
新 生 代	第 四 紀	完 新 世	沖 積 層	第一砂質土層	3
				第一粘性土層	1
	第 三 紀	鮮 新 世		岩盤層 (上総層群)	砂質泥岩

3. 屋外貯蔵タンク本体の選定

3. 1 屋外貯蔵タンク本体の選定

解析に用いる屋外貯蔵タンク本体については、その大きさや高さによって地盤に対する影響や地盤の変状に伴う屋外貯蔵タンク本体の変状にも影響を及ぼすため、慎重に設定を行う必要がある。

質点系モデルによる首都直下地震における屋外貯蔵タンク本体の浮き上がり変位解析において、代表的なタンクモデルとして表3. 1-1に示す計11基を設定している。

解析断面に載荷させる屋外貯蔵タンク本体の選定においては以下の2項目を考慮しながら総合的に判断した。

- 重量が重く地盤変形が生じた場合の影響が大きいと考えられること
- 万が一事故が発生した場合の影響が大きいと考えられること

上記により判断した結果、A地区では（公称容量：7.5万KL）を、B地区では（公称容量：10万KL）のタンクを選定した。

屋外貯蔵タンク本体の詳細な諸元を表3. 1-2、表3. 1-3に示す。

表3. 1-1 浮き上がり変位解析で設定したタンクの諸元一覧

【A地区】

タンク 番号	内容物	許可容量 (KL)	貯蔵内径 (m)
1	ヘキサン	1000	11.60
2	軽油	5000	23.24
3	ナフサ	10000	32.93
4	原油	30000	53.60
5	原油	50000	61.00
6	軽油	75000	70.00

【B地区】

タンク 番号	内容物	許可容量 (KL)	貯蔵内径 (m)
1	潤滑油	1000	11.63
2	重油	6000	29.07
3	重油材	10000	32.94
4	重油	30000	52.33
5	原油	50000	69.77
6	原油	77000	77.27
7	原油	100000	81.48

表3. 1-2 A地区選定屋外貯蔵タンク本体の諸元一覧 (SI単位)

A 地区 T801 タンク (SI単位)
 質点系モデルによる側板下端の浮き上がり変位計算用諸元 (赤字:入力値)

[諸元]			
公称容量	VOL (kl)	75000	(kl)
貯槽内径	D	70000	(mm)
側板高さ	Hmax	21958	(mm)
最下段側板厚	t _s	30	(mm)
1/3の最高液高さにおける側板厚	t _{1/3}	23.89	(mm)
アニュラ板厚	t _b	18	(mm)
鋼材のヤング率 (SPV490Q)	E	2.06E+05	(N/mm ²)
鋼材のポアソン比	ν	0.3	(-)
降伏応力	σ _y	490	(N/mm ²)
最高液高さ	H	19618	(mm)
液密度	γ	8.80E-07	(kg/mm ³)
直径/液高さ比	D/H	3.57	(-)
液高さ/直径比	H/D	0.28	(-)
消防法/有効液重量率 f _{w0} $f_{w0} = -0.1408(\frac{H}{D})^4 + 0.8427(\frac{H}{D})^3 - 1.916(\frac{H}{D})^2 + 2.0933(\frac{H}{D}) - 0.1172$		0.34	(-)
消防法/有効液重量率 f _{w1} $f_{w1} = -0.1429(\frac{H}{D})^4 + 0.9653(\frac{H}{D})^3 - 2.2807(\frac{H}{D})^2 + 2.3017(\frac{H}{D}) - 0.1634$		0.32	(-)
消防法/有効液の重心高さ係数 f _{h0} $f_{h0} = 0.0384(\frac{H}{D})^4 - 0.1493(\frac{H}{D})^3 + 0.204(\frac{H}{D})^2 - 0.0807(\frac{H}{D}) + 0.4096$		0.40	(-)
消防法/有効液の重心高さ係数 f _{h1} $f_{h1} = 0.0256(\frac{H}{D})^4 - 0.1387(\frac{H}{D})^3 + 0.216(\frac{H}{D})^2 + 0.0207(\frac{H}{D}) + 0.3644$		0.38	(-)
底板に作用する最大静液圧 P ₀ =gγH		0.17	(N/mm ²)

タンク本体重量 (赤字:入力値)

側板重量	Ws0	7.68E+03	(KN)
側板付属品重量	Ws1	0.00E+00	(KN)
浮き屋根重量	Wr0	0.00E+00	(KN)
浮き屋根付属品重量	Wr1	2.45E+03	(KN)
固定屋根重量	Wcr0	0.00E+00	(KN)
固定屋根骨重量	Wcr1	0.00E+00	(KN)
固定屋根付属品重量	Wcr2	0.00E+00	(KN)
タンク本体重量 合計	Wsr	7.68E+06	(N)

表3. 1-3 B地区選定屋外貯蔵タンク本体の諸元一覧 (SI単位)

B 地区 NO.111 タンク (SI単位)

質点系モデルによる側板下端の浮き上がり変位計算用諸元 (赤字:入力値)

[諸元]			
公称容量	VOL (kl)	100000	(kl)
貯槽内径	D	81480	(mm)
側板高さ	Hmax	22570	(mm)
最下段側板厚	t _s	36	(mm)
1/3の最高液高さにおける側板厚	t _{1/3}	28	(mm)
アニュラ板厚	t _b	12	(mm)
鋼材のヤング率 (HT60)	E	205939.65	(N/mm ²)
鋼材のポアソン比	ν	0.3	(-)
降伏応力	σ _y	450	(N/mm ²)
最高液高さ	H	19063	(mm)
液密度	γ	1.00E-06	(kg/mm ³)
直径/液高さ比	D/H	4.27	(-)
液高さ/直径比	H/D	0.23	(-)
消防法/有効液重量率 f _{w0} $f_{w0} = -0.1408(\frac{H}{D})^4 + 0.8427(\frac{H}{D})^3 - 1.916(\frac{H}{D})^2 + 2.0933(\frac{H}{D}) - 0.1172$		0.28	(-)
消防法/有効液重量率 f _{w1} $f_{w1} = -0.1429(\frac{H}{D})^4 + 0.9653(\frac{H}{D})^3 - 2.2807(\frac{H}{D})^2 + 2.3017(\frac{H}{D}) - 0.1634$		0.26	(-)
消防法/有効液の重心高さ係数 f _{h0} $f_{h0} = 0.0384(\frac{H}{D})^4 - 0.1493(\frac{H}{D})^3 + 0.204(\frac{H}{D})^2 - 0.0807(\frac{H}{D}) + 0.4096$		0.40	(-)
消防法/有効液の重心高さ係数 f _{h1} $f_{h1} = 0.0256(\frac{H}{D})^4 - 0.1387(\frac{H}{D})^3 + 0.216(\frac{H}{D})^2 + 0.0207(\frac{H}{D}) + 0.3644$		0.38	(-)
底板に作用する最大静液圧 P ₀ =g γ H		0.19	(N/mm ²)

タンク本体重量(赤字:入力値)

側板重量	Ws0	1.05E+04	(KN)
側板付属品重量	Ws1	0.00E+00	(KN)
浮き屋根重量	Wr0	0.00E+00	(KN)
浮き屋根付属品重量	Wr1	3.68E+03	(KN)
固定屋根重量	Wcr0	0.00E+00	(KN)
固定屋根骨重量	Wcr1	0.00E+00	(KN)
固定屋根付属品重量	Wcr2	0.00E+00	(KN)
タンク本体重量 合計	Wsr	1.05E+07	(N)

3. 2 屋外タンク貯蔵所の基礎の選定、及び地盤改良工法

屋外タンク貯蔵所の基礎の施工実績では、盛土基礎が最も多く、リング基礎を検討に加えることにより、ほとんどの屋外タンク貯蔵所の基礎を網羅できると考えられる。今回の解析においてはA地区についてリング基礎、B地区においては盛土基礎を設定する。

また、本調査で収集したA地区、B地区の資料のうち、地盤改良について得られた結果を表3. 2-1に示す。どの地区においても締固め砂杭による地盤改良が主であることがわかる。

図3. 2-1にA地区における地盤改良事例、図3. 2-2～図3. 2-5に地盤改良後の地盤調査結果例を示す。図3. 2-6にB地区における地盤改良事例、図3. 2-7に地盤改良後の地盤調査結果例を示す。

収集した資料からは地盤改良後の調査が、杭芯、杭間のどちらで実施されているかまでは判明しなかったが、この地域では設計段階の改良目標 N 値が概ね 15 程度と設定されており、地盤調査の結果からも確認された。

上記により設定した解析断面図を図3. 2-8、図3. 2-9に示す。

本調査ではタンク周辺の地質断面図を収集しており、タンク直下に限れば概ね水平成層であることを確認しているため解析断面においても理想的な水平成層として設定している。しかし、自然地盤の多くでは、少なからず地層構成に傾きや工学的基盤の起伏が生じる。その場合、不等沈下などの問題の恐れがあるので、モデルの設定には面的な地盤調査の結果を十分に反映させることが必要である。

表3. 2-1 収取した地盤改良工法実績

地区	改良工法	収集できた資料数
A 地区	サンドコンパクションパイル	7
	バイプロフローテーション	4
	バックドレイン	1
	サンドドレイン	1
	深層混合	1
	改良なし	2
B 地区	サンドコンパクションパイル	4

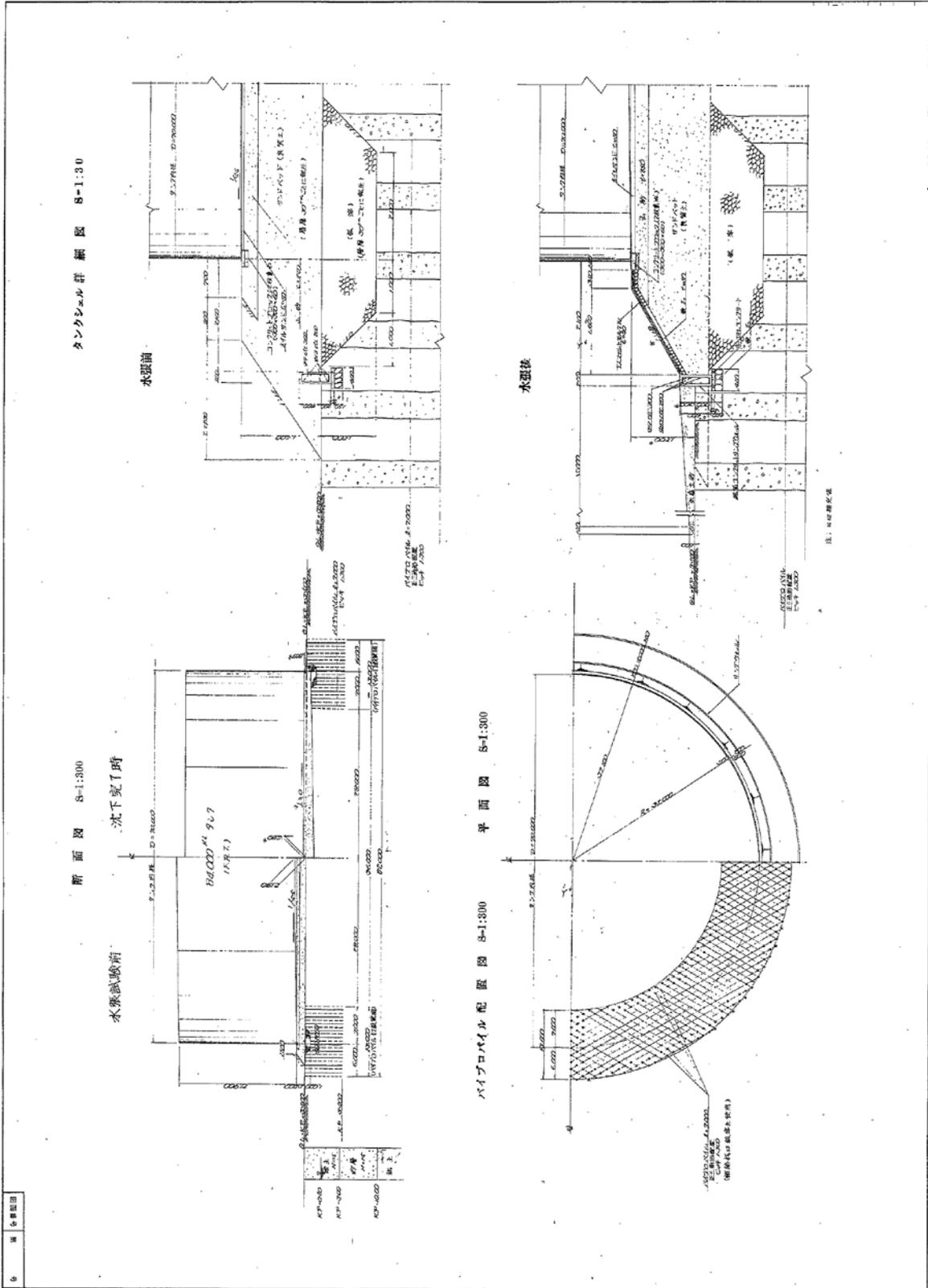


図3. 2-1 A地区での地盤改良事例

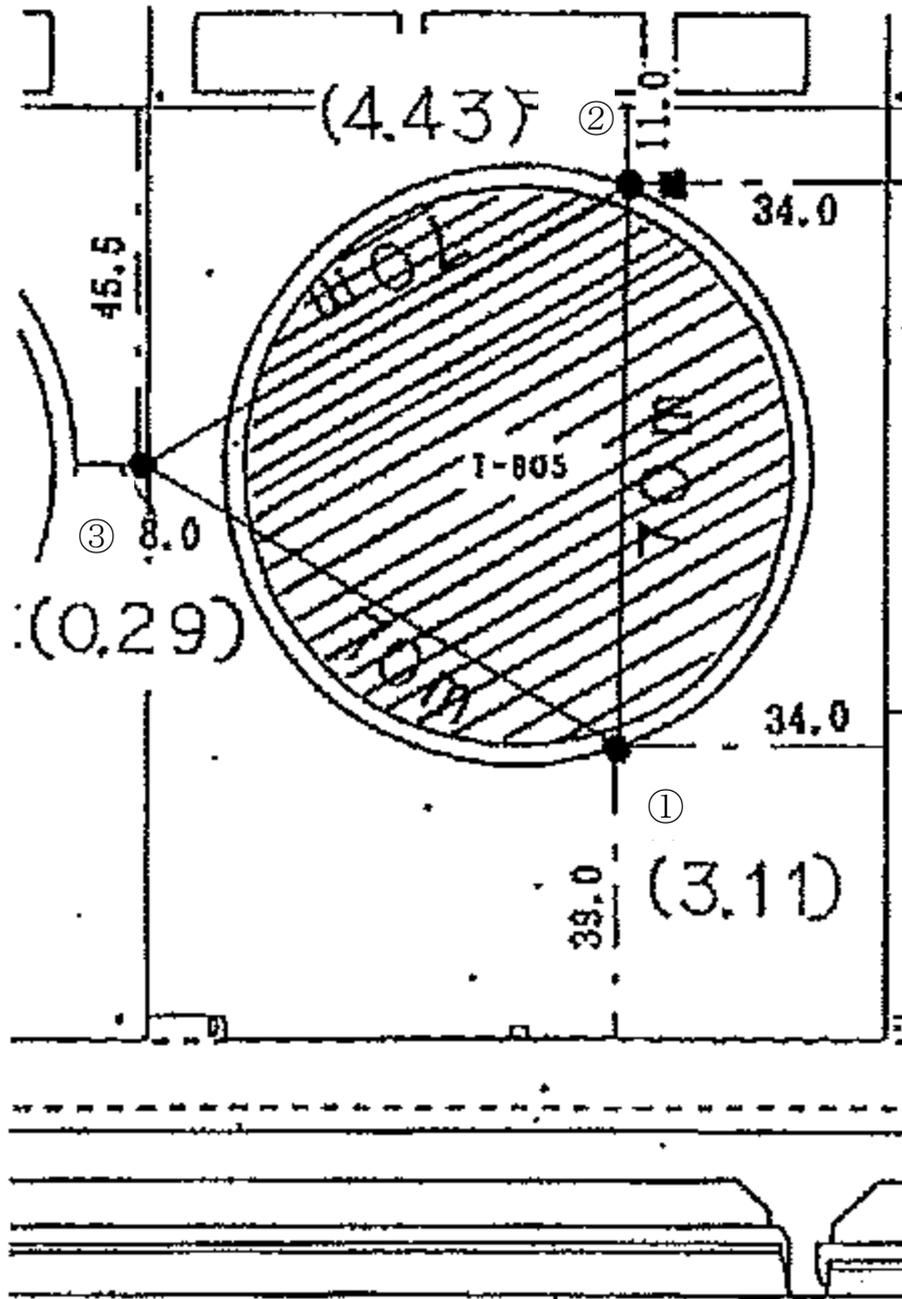


図 3. 2-2 A 地区での改良後の地盤調査位置

調査名

ボーリングNo.

事業・工事名

ボーリング名	調査位置		北緯	
発注機関	調査期間		東経	
調査業者名	主任技師	現場代理人	コア鑑定者	ボーリング責任者
孔口標高 RP +2.89m	角 180° 上 0° 下 0°	方 北 0° 西 270° 南 180°	地盤勾配 水平0°	使用機種 試錐機 YSO-1H エンジン 三菱 X F - N E
総掘進長 20.4m	ハンマー 落下用具 トンビ	Y B M S P - 4 0		

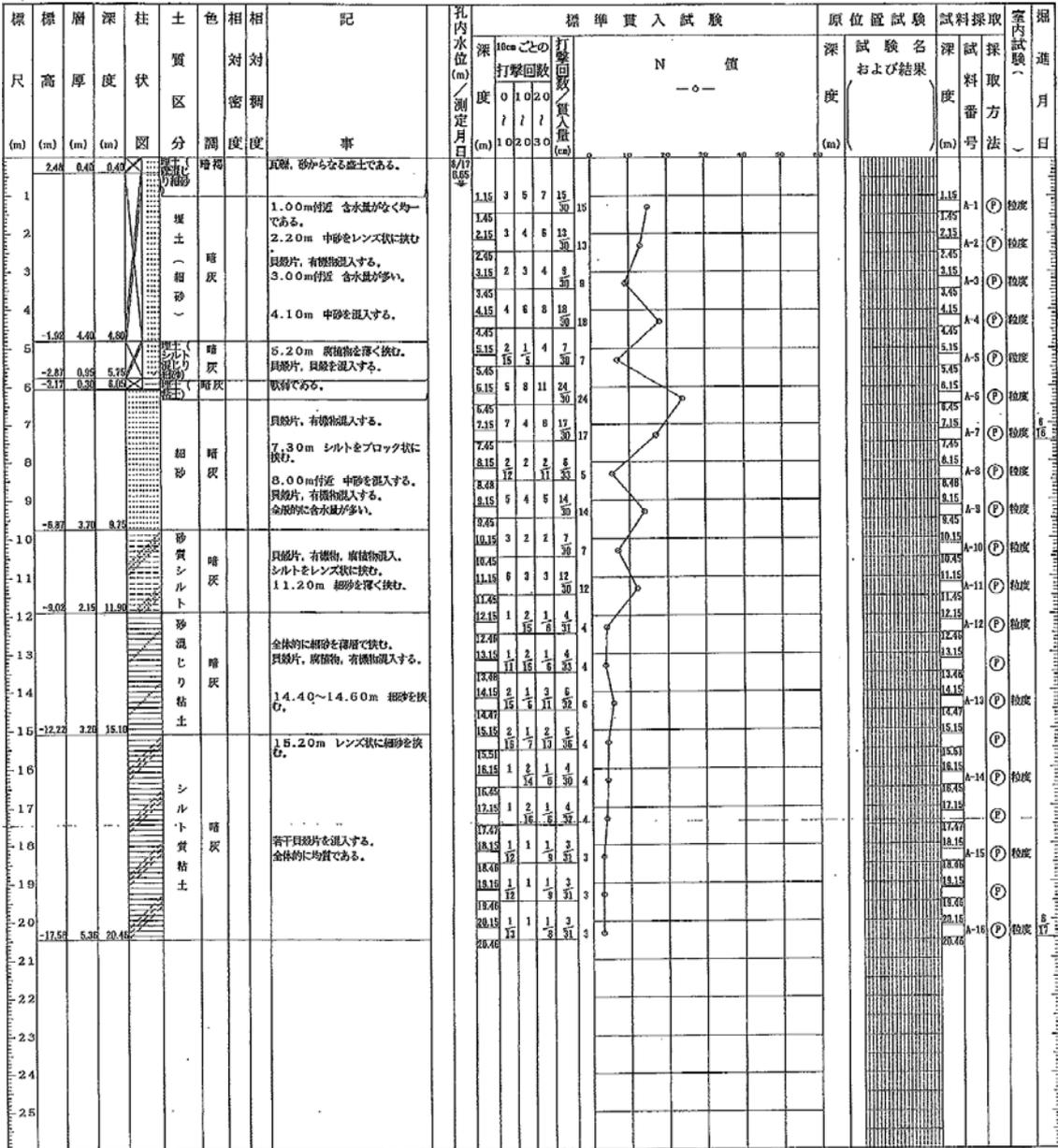


図3. 2-3 A地区での改良後の地盤結果例①

調査名

ボーリングNo.	
----------	--

事業・工事名

シートNo.

ボーリング名	調査位置			北緯	
発注機関	調査期間			東経	
調査業者名	主任技師	現代理人	コア鑑定者	ボーリング責任者	
孔口標高	方位	地盤勾配	使用機種	YSO-1H	ハンマー落下用具
総掘進長	20.40m	90°	エンジン	三菱 X P - N E	ポンプ Y B M S P - 4 0

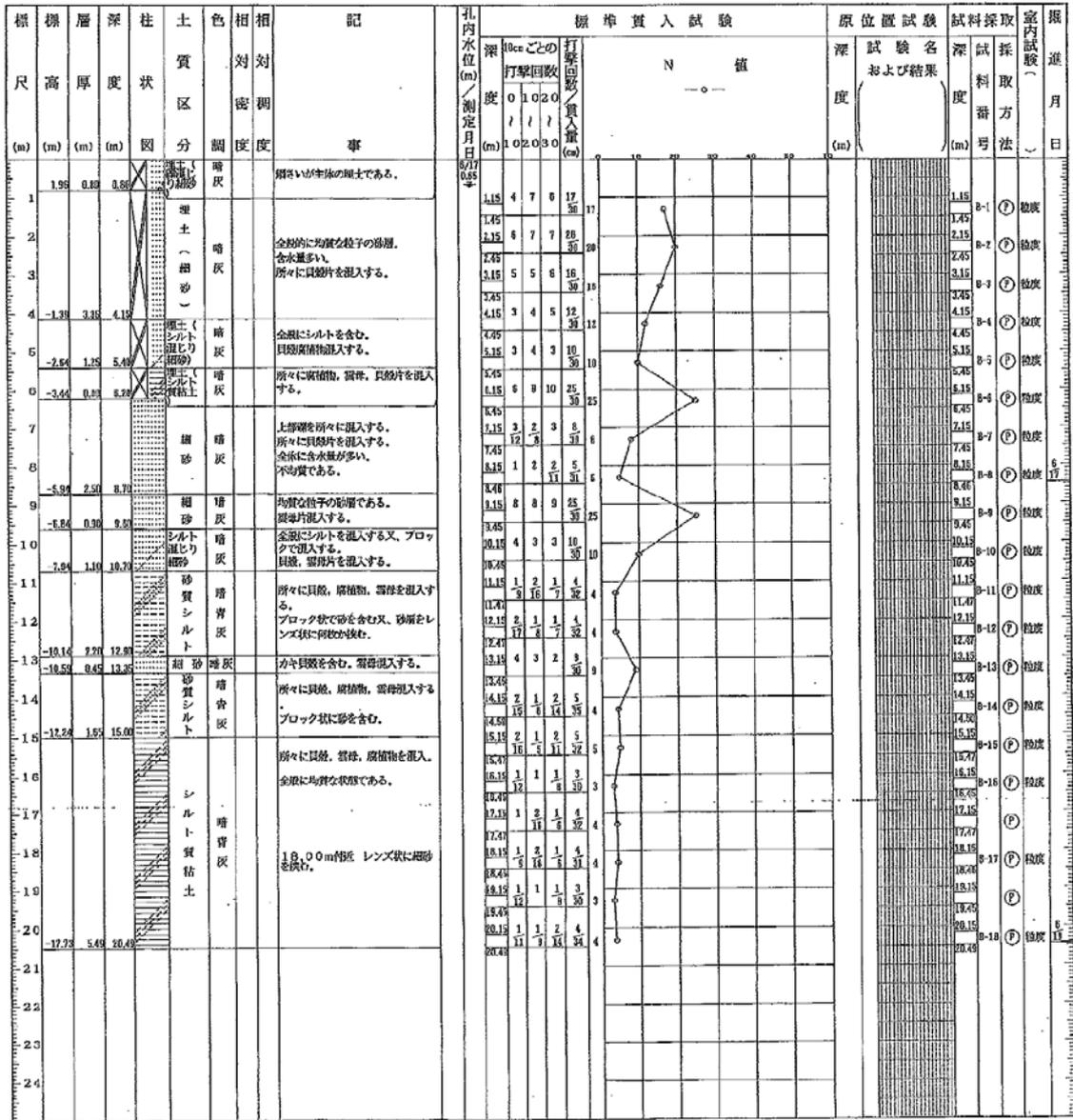


図 3. 2-4 A地区での改良後の地盤結果例②

調査名

ボーリングNo.

事業・工事名

ボーリング名	調査位置	北緯
発注機関	調査期間	東経
調査業者名	主任技師	現場代理人
孔口標高	角	コア鑑定者
総掘進長	度	ボーリング責任者
	方	ハンマー
	向	落下用具
	地盤勾配	トンビ
	使用機種	エンジン
	試錐機	Y S O - 1 H
	エンジン	三菱 X F - N E
		ポンプ
		Y B M S P - 4 0

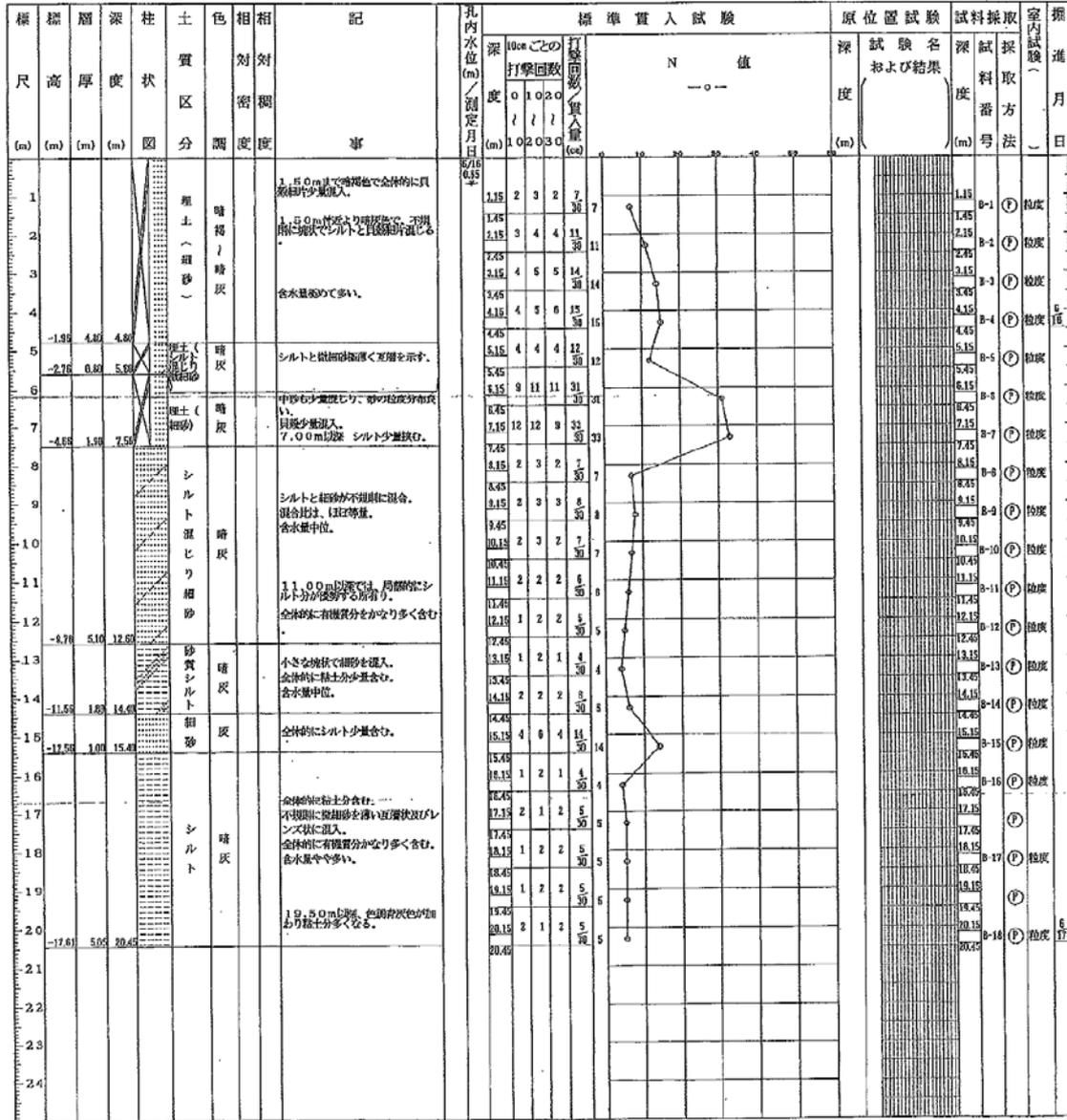


図 3. 2-5 A地区での改良後の地盤結果例③

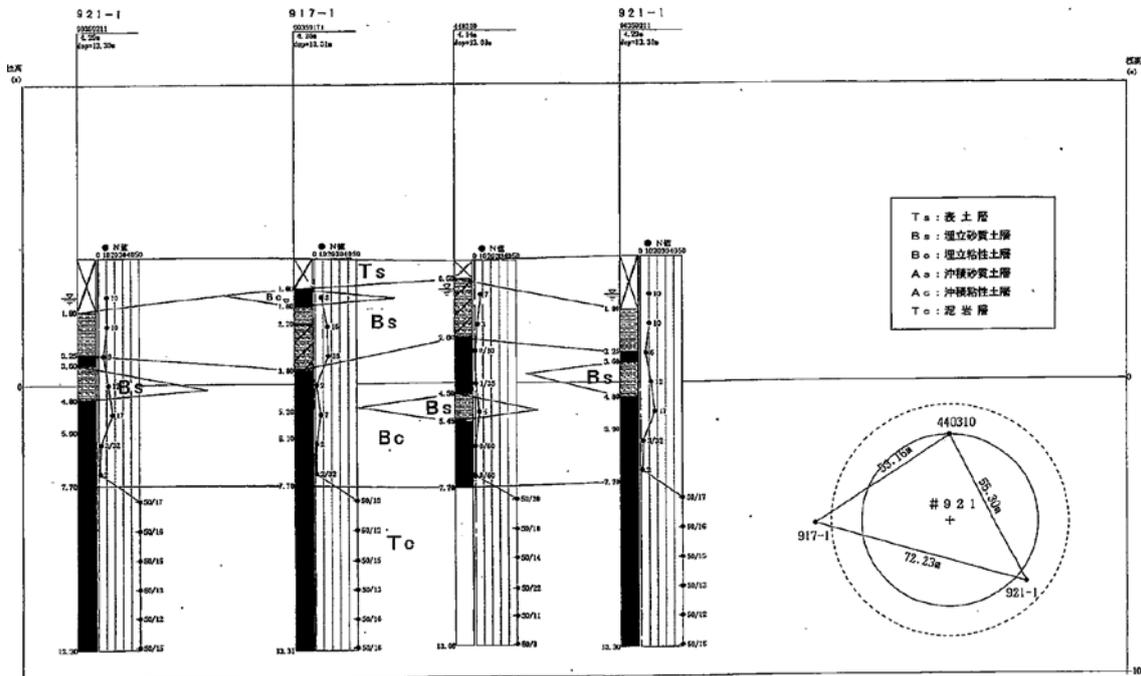


図 3. 2 - 7 B地区での改良後の地盤調査・断面例

〈地質断面図 A地区

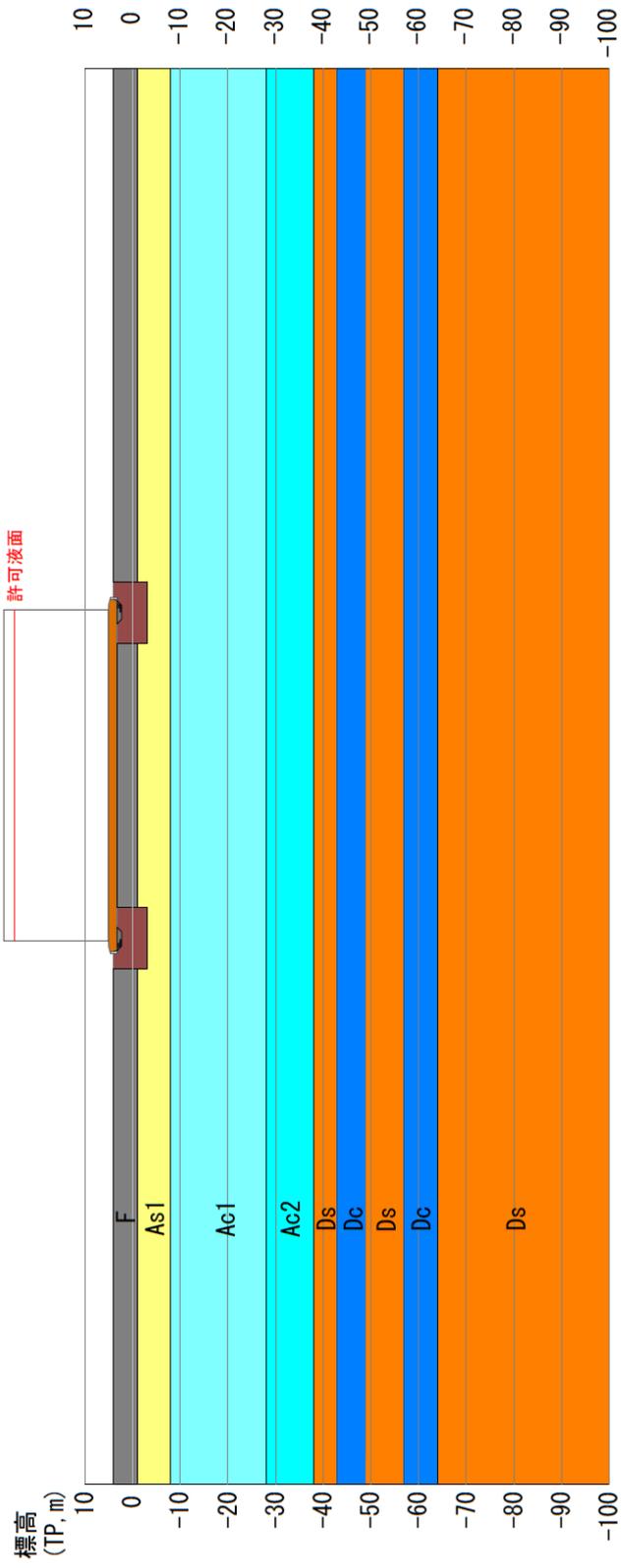


図3. 2-8 A地区の二次元動的変形解析用断面

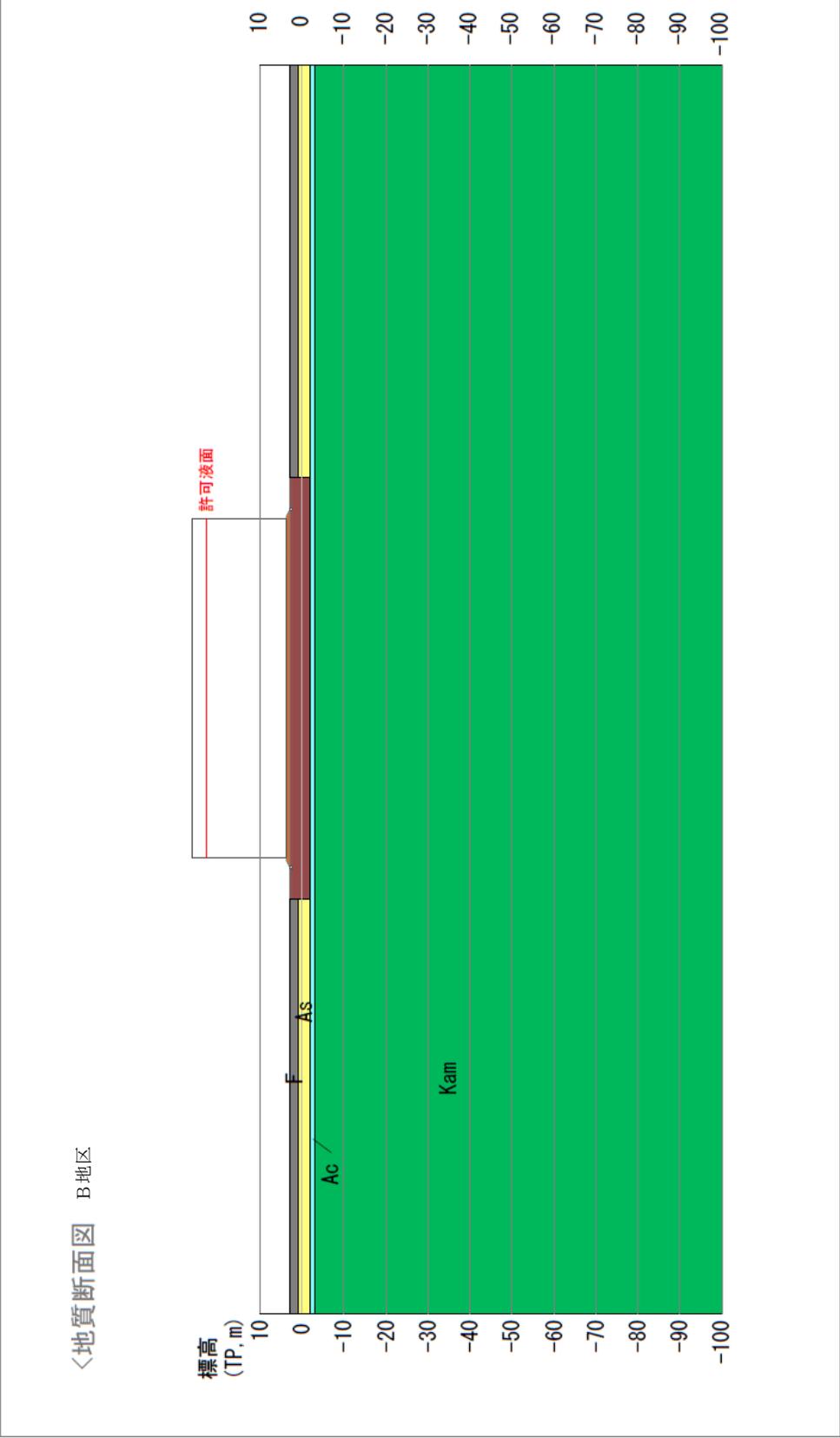


図3. 2-9 B地区の二次元動的変形解析用断面

4. 解析条件の設定

平成26年度調査と同様に以下のような流れで、地盤及び構造物（基礎及び屋外貯蔵タンク本体）の解析を行う。

解析で入力する地震動は、首都直下地震の想定地震とする。

動的変形解析は、3次元非線形有効応力解析を実施することが望ましいが、現状では3次元非線形有効応力解析の実績はまだ少ないため、より使用実績の多い断面2次元非線形有効応力解析で実施するものとする。また、断面の設定にもよるが、一般的に3次元解析よりも2次元解析の方が厳しい条件となることから、二次元解析による評価は安全側の検討になることが言われている¹⁾。

断面2次元非線形有効応力解析によって、地盤の変形の評価を行うとともに、変形の発生が想定される場合は、屋外貯蔵タンク本体の沈下量や変形角及び過剰間隙水圧比の経時変化の評価を行う。

上記の評価を行うために、加振後（動的解析後）の排水解析（過剰間隙水圧の消散に伴う圧密解析）が可能なプログラムが必要であり、これらの条件を満足するプログラムである、『Computer Program for Liquefaction Analysis（以下「LIQCA」という。）』を使用して解析を行う。断面2次元非線形有効応力解析の流れを図4. 1-1に示す。

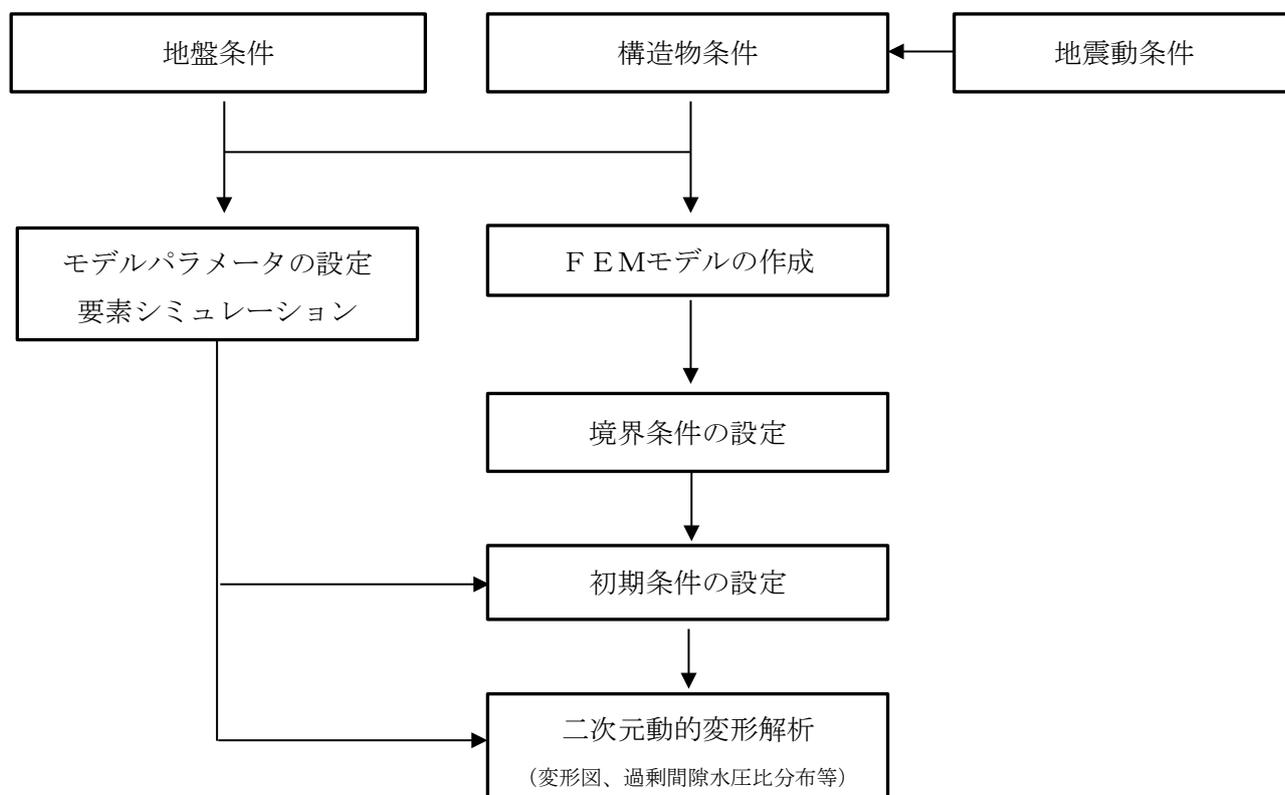


図4. 1-1 断面2次元解析の流れ

¹⁾ 国土交通省：大規模盛土造成地の変動予測調査ガイドラインの解説、平成20年2月

以下に『LIQCA』の概要について説明する。

『LIQCA』は、固体力学に基づく土の骨格と間隙水圧の連成問題の支配方程式を解く数値解析コードである。この連成問題は、固相と液層の二相からなる飽和多孔質体を扱ったBiotの理論より導かれる。Biotの式は、未知数の取り方や近似の方法により、様々な定式化がなされているが、『LIQCA』では、固相の変位 u 、液相の間隙水圧 p を未知数とした u - p 定式化を用いている。支配方程式の離散化は、力のつりあい式の空間的な離散化には有限要素法、連続式の間隙水圧の項の空間的な離散化には直交格子に対する有限差分を拡張した有限体積法を用いている。また、時間離散化には陰解法であるNewmarkの β 法を用い、減衰にはRayleigh減衰が用いられている。

定式化には以下のことが仮定されている。

- 1) ひずみは微小ひずみ
- 2) 間隙率、液相(間隙水)の密度、透水係数の空間に対する勾配は十分小さい
- 3) 液相の固相に対する相対加速度は、固相の加速度に比べて十分に小さい
- 4) 土粒子は非圧縮性である
- 5) 温度変化は無視する

なお、『LIQCA』では動的解析後の排水解析が可能であり、過剰間隙水圧の消散に伴う圧密解析を行うことができる。

以下に、『LIQCA』中で使用する構成式および各条件について概要を示す。

(1) 動的解析に用いられる土の構成式

- 1) Okaら(1999)の砂の繰返し弾塑性モデル
- 2) 修正Ramberg-Osgood (RO) モデル
- 3) 弾性モデル
- 4) 繰返し弾粘塑性モデル (2011年度版より配布開始、2次元のみ適用)

(2) 要素

取り扱っている要素は、平面要素、ジョイント要素、ビーム要素(タイロッドは曲げ剛性を非常に小さくすることで表現)、付加質量

(3) 境界条件

変位境界、等変位境界、粘性境界、排水境界

(底面境界は剛基盤 (E+F) および弾性基盤 (2E) の設定が可能)

(4) 入力動条件

sin波、地震波(水平、鉛直の同時入力が可能)、表面力

(5) 計算条件

計算条件の設定について、表 4. 1 - 1 に示す。

表 4. 1 - 1 計算条件の設定

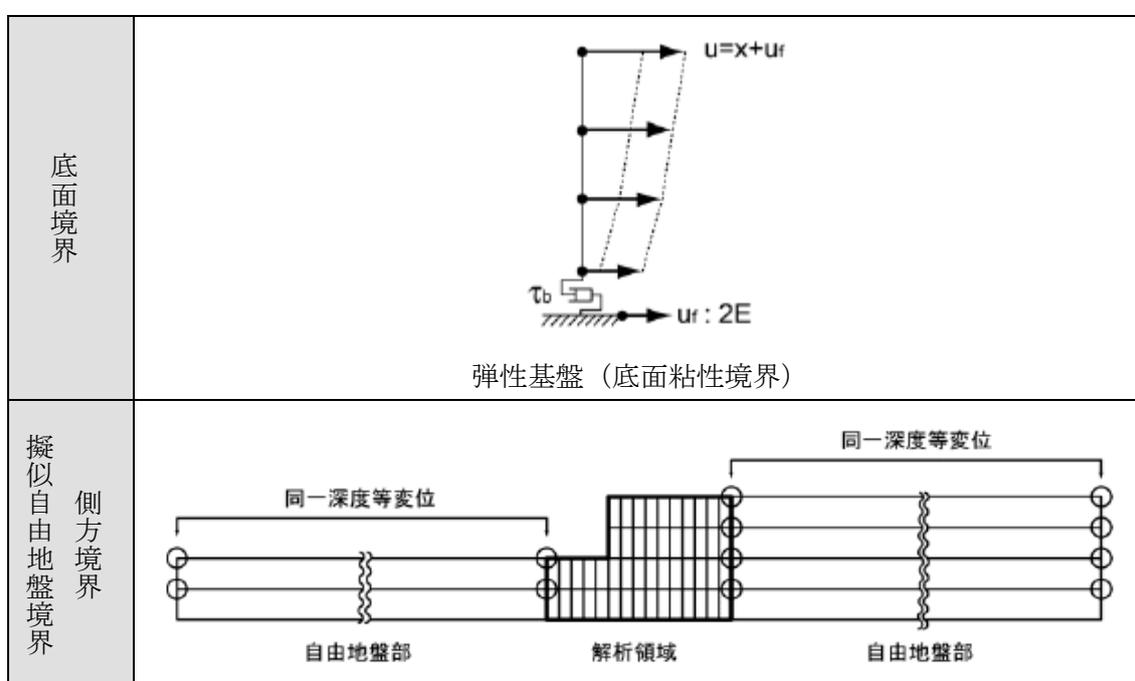
条件項目	条件内容
バージョン	LIQCA2D16(2016 公開版)
地盤モデル	液状化層:砂の繰返し弾塑性モデル 非液状化層:修正 R-O モデル
解析領域	150m の領域
境界条件	底面:粘性境界($\rho V_s, V_p$) 側方:疑似自由地盤(1500m)の同一深度等変位境界とする
レーレー減衰	1次元線形地盤の第1次固有振動モードに対して、小さな減衰定数(1.0%)を与えるように設定 $\alpha_0=0.0, \alpha_1=0.002$
Newmark の β 法	$\beta=0.3025, \gamma=0.6$
解析時間間隔	$\Delta T=0.002$ (入力地震波の時間間隔 0.02 秒の 1/10)
解析ステップ	初期応力:地盤の自重による初期応力解析 動的解析:地震応答解析 圧密排水解析:加振終了後に圧密解析

(6) 境界条件

解析モデルの底面及び左右側面に用いる境界条件は、初期自重解析及び地震応答解析に対してそれぞれ、表4. 1-2に示す通り設定する。

表4. 1-2 境界条件の設定

位置	初期自重解析	地震時応答解析
底面境界	XY 固定境界	粘性境界
左右側方境界	鉛直ローラー	疑似自由地盤境界



LIQCA2D マニュアル資料より抜粋

4. 1 解析対象地区における物性値の設定

A地区、B地区ともに、物性値については、関係団体から提供された屋外タンク貯蔵所に係る地盤調査資料等のデータにおいて地区における既往の室内土質試験結果が存在する場合はその結果を用いるとともに、既往調査資料や各種文献などのデータも参考にしながら設定した。主な設定項目を以下に示す。

- ① 地下水位
- ② 地盤改良
- ③ 基礎部分
- ④ 屋外貯蔵タンク本体部分
- ⑤ 繰返し応力振幅比
- ⑥ 解析地盤メッシュ

なお、本検討では平成26年度の検討手法を基本に検討した。さらに、動液圧が地盤の液化程度に与える影響を加味するために、新たにタンク本体と内容液を個別に考慮することで、タンク本体と内容液の固有周期の違いなどを反映させるモデルの検討を別途行った。参考として巻末に解析結果を示す。

また、本検討で採用しているような断面2次元非線形有効応力解析は、地震動による影響について時刻歴を追って詳細を把握することができる反面、設定する定数なども多く、高度な技術・専門性が要求される。よって、二次元解析の導入として、より実務的な手法である「飽和土の非排水せん断強度の非排水繰返し载荷による低下を考慮した残留変形解析」のタンクへの適用性を検討することとした。具体的には龍岡らが提唱、ため池などの安全性検討に採用されている手法を参考とした。参考として巻末に解析のイメージを示す。

4. 1. 1 A地区

A地区において設定した物性値を表4. 1. 1-1に示す。

【地下水位】

地下水位は、季節や時間によって変動するものであるが、解析においてはその設定が重要となってくる。A地区では、ボーリング調査結果の孔内水位よりGL-1.5mに設定した。

【地盤改良】

A地区の地盤は、地表から埋土層～沖積砂層、粘性土層、その下部に洪積層となっており、地下水位より深い埋土層と第一砂質土層が液状化対象層と考えられる。当該地に関しては、液状化対策の地盤改良としてリング基礎直下のサンドコンパクションパイル工法が施工されている。(図3. 2-1参照)。

地盤改良後の地盤情報としては、地盤改良後の地盤調査結果のデータが存在しており、サンドコンパクションパイル打設前後のN値を比較することができる。

地盤改良前後のN値から推定されるS波速度(推定S波)は、砂質土層で1.2～1.4倍程度となった。

【基礎部分】

屋外タンク貯蔵所の基礎部分の鉦滓の物性値についてはコンクリート並みの強度を与えた。

【屋外貯蔵タンク本体部分】

基礎・地盤の解析において、屋外貯蔵タンク本体部分の物性値については上載圧として、表3. 1-2からタンク本体重量と底板に作用する最大静液圧から単位面積当たりの重量を算出し、液面高を考慮したうえで、各メッシュに重量を割り当て、地盤に対して十分に大きな剛性を与えて設定した。よって、本来ならば円形を三次元で表現するところを二次元断面にて設定することなど、別途検討している屋外貯蔵タンク本体部分の解析を主目的にしていなため、簡易的な設定となっていることに注意する必要がある。

【繰返し応力振幅比】

図4. 1. 1-1に地盤改良前後の繰返し応力振幅比を示す。縦軸の $\sigma_d/2\sigma_0'$ は室内土質試験結果における繰返し応力振幅比(R)を表わしており、せん断応力(τ)を有効拘束圧(σ_0')で除した(正規化)もの($R=\tau/\sigma_0'$)をいう。ここで、せん断応力(τ)と、繰返し軸差応力の片振幅(σ_d)の関係は、 $\tau=\sigma_d/2$ であるため、 $R=\sigma$

$d/2\sigma_0'$ となる。この図では、N値より道路橋示方書(2012)に従って算出したものを参考に、解析モデルとしてフィッティングさせた関係が黒線である。繰返し応力振幅比についても、地盤改良後のN値を用いて地盤改良効果を見込んだ設定を行う。

【解析地盤メッシュ】

図3. 2-8に示した断面図から、解析を実施するのに必要となるメッシュ図を作成した。解析地盤メッシュを図4. 1. 1-2に示す。

以上のように、解析モデルを設定した。解析モデルの設定に際し、地盤改良の効果を表わす各パラメータについては、表4. 1. 1-2に示すとおりである。

表4. 1. 1-1 A地区の物性値一覧表（地盤改良後の値を含む）

地層名		平均 N値 改良前⇒後	湿潤 密度 $\rho(\text{g/cm}^3)$	間隙比 e	細粒分 含有率 Fc	内部 摩擦角 $\phi'(^{\circ})$	S波速度 Vs(m/s) 改良前⇒後
	埋土層	5⇒13	1.90	0.95	40	36	110⇒150
沖積層	第一砂質土層	12⇒21	1.85	0.80	30	36	160⇒190
	第一粘性土層	3	1.65	1.65	80	-	130
	第二粘性土層	5	1.65	1.15	85	40	150
洪積層	第二砂質土層	30	1.80	0.85	-	-	250
	第三粘性土層	14	1.75	1.15	-	40	250
	第三砂質土層	30	1.80	0.85	-	-	250
	第四粘性土層	14	1.75	1.15	-	-	250
	礫質土層	50	2.00	-	-	-	450

表4. 1. 1-2 地盤改良の効果を表す各パラメータ

①	$\sigma_d / 2\sigma'_0$	繰返し応力振幅比	N値より改良による効果分を設定 ΔU (間隙水圧) より効果分を把握
②	G_0	剛性	S波速度より改良による効果分を設定
③	ϕ	内部摩擦角	変更なし
④	-	鉦滓	コンクリート並みの強度を与えた

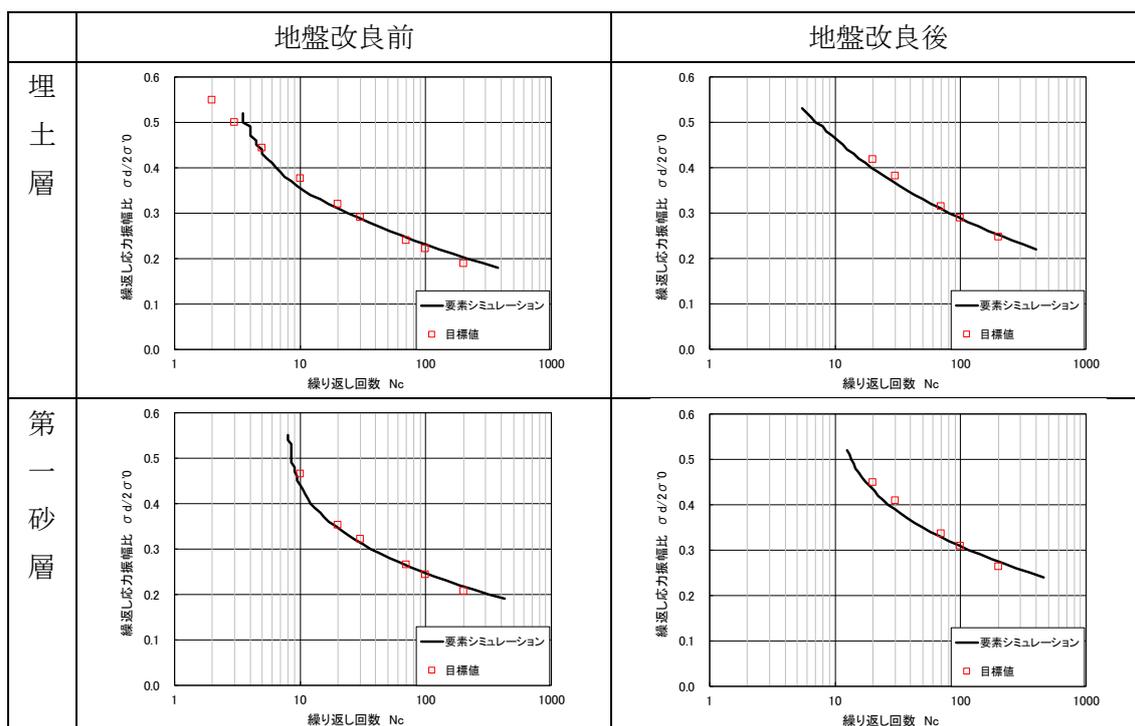


図4. 1. 1-1 A地区の地盤改良前後の繰返し応力振幅比

※ここでの繰返し応力振幅比は、ひずみ5%でのものを示している。ひずみレベルが変わることにより曲線は変化することになる。

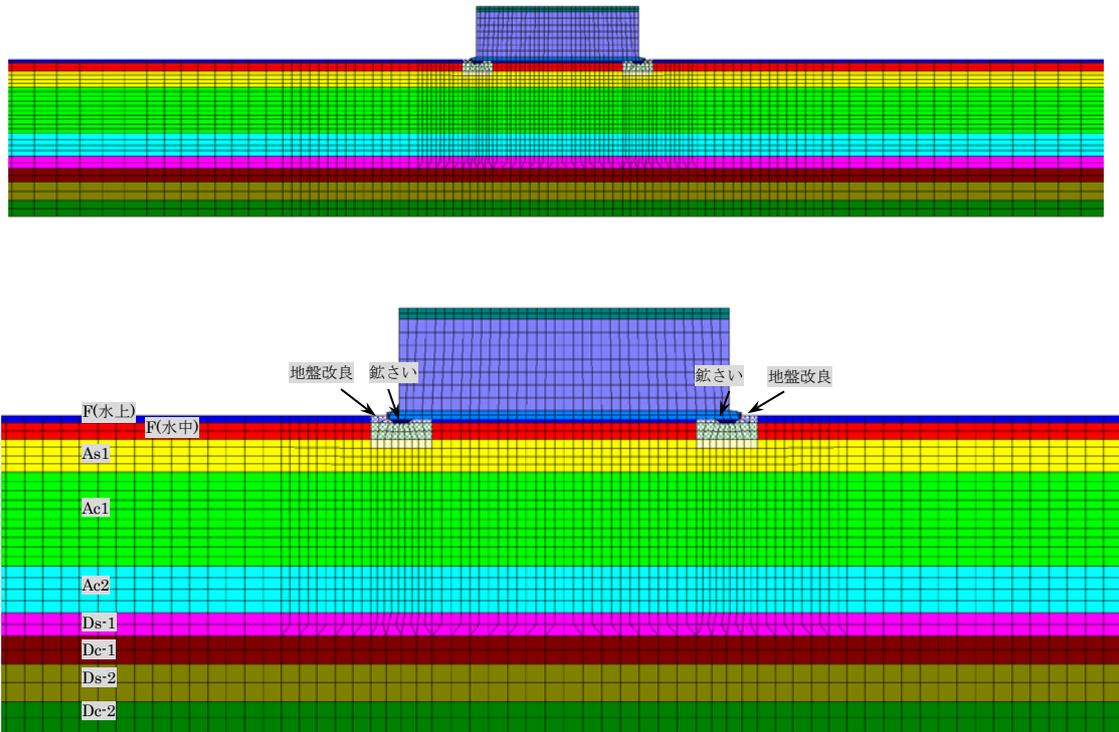


図4. 1. 1-2 A地区解析地盤メッシュ

4. 1. 2 B地区

B地区において設定した物性値を表4. 1. 2-1に示す。

【地下水位】

地下水位は、季節や時間によって変動するものであるが、解析においてはその設定が重要となってくる。B地区では、ボーリング調査結果の孔内水位よりGL-1.5mに設定した。

【地盤改良】

B地区の地盤は、地表から埋土層～沖積砂層、粘性土層、その下部に岩盤層となっており、地下水位より深い埋土層と第一砂質土層が液状化対象層と考えられる。当該地に関しては、液状化対策の地盤改良として岩盤層までサンドコンパクションパイル工法が施工されている。(図3. 2-6参照)。

改良後の情報としては、地盤改良後のボーリング調査結果のデータが存在しており、サンドコンパクションパイル打設前後のN値を比較することができる。地盤改良前後のN値から推定されるS波速度(推定S波)は、粘性土層で1.4倍程度、砂質土層で1.1～1.5倍程度となった。

【基礎部分】

解析において土構造物として設定する盛土基礎部分については、十分に締固められて施工されていると考えられることから、施工管理の条件などを確認の上、基礎部分を設定した。

【屋外貯蔵タンク本体部分】

基礎・地盤の解析において、屋外貯蔵タンク本体部分の物性値については上載圧として、表3. 1-3からタンク本体重量と底板に作用する最大静液圧から単位面積当たりの重量を算出し、液面高を考慮したうえで、各メッシュに重量を割り当て、地盤に対して十分に大きな剛性を与えて設定した。よって、本来ならば円形を三次元で表現するところを二次元断面にて設定することなど、別途検討している屋外貯蔵タンク本体部分の解析を主目的にしていなかったため、簡易的な設定となっていることに注意する必要がある。

【繰返し応力振幅比】

図4. 1. 2-1に地盤改良前後の繰返し応力振幅比を示す。縦軸の $\sigma_d/2\sigma_0'$ は室内土質試験結果における繰返し応力振幅比(R)を表わしており、せん断応力(τ)を有効拘束圧(σ_0')で除した(正規化)もの($R=\tau/\sigma_0'$)をいう。ここで、せん断応

力（ τ ）と、繰返し軸差応力の片振幅（ σ_d ）の関係は、 $\tau = \sigma_d/2$ であるため、 $R = \sigma_d/2\sigma_0'$ となる。この図では、N値より道路橋示方書(2012)に従って算出したものを参考に、解析モデルとしてフィッティングさせた関係が黒線である。繰返し応力振幅比についても、地盤改良後のN値を用いて地盤改良効果を見込んだ設定を行う。

【解析地盤メッシュ】

図3. 2-9に示した断面図から、解析を実施するのに必要となるメッシュ図を作成した。解析地盤メッシュを図4. 1. 2-2に示す。

以上のように、解析モデルを設定した。解析モデルの設定に際し、地盤改良の効果を表わす各パラメータについては、表4. 1. 2-2に示すとおりである。

表4. 1. 2-1 B地区の物性値一覧表（地盤改良後の値を含む）

地層名		平均 N 値 改良前⇒後	湿潤 密度 $\rho(g/cm^3)$	間隙比 e	細粒分 含有率 F _c	内部 摩擦角 $\phi' (^{\circ})$	S波速度 Vs(m/s) 改良前⇒後
	埋土層	9⇒10	1.60	1.15	50.7	40	150⇒160
沖積層	第一砂質土層	3⇒11	1.70	1.20	24.1	37	150⇒230
	第一粘性土層	1⇒3	1.60	1.70	85.5	-	150⇒220
	岩盤層	50	1.80	-	-	-	470

表4. 1. 2-2 地盤改良の効果を表す各パラメータ

①	$\sigma_d / 2\sigma_0'$	繰返し応力振幅比	N値より改良による効果分を設定 ΔU (間隙水圧) より効果分を把握
②	G_0	剛性	S波速度より改良による効果分を設定
③	ϕ	内部摩擦角	変更なし

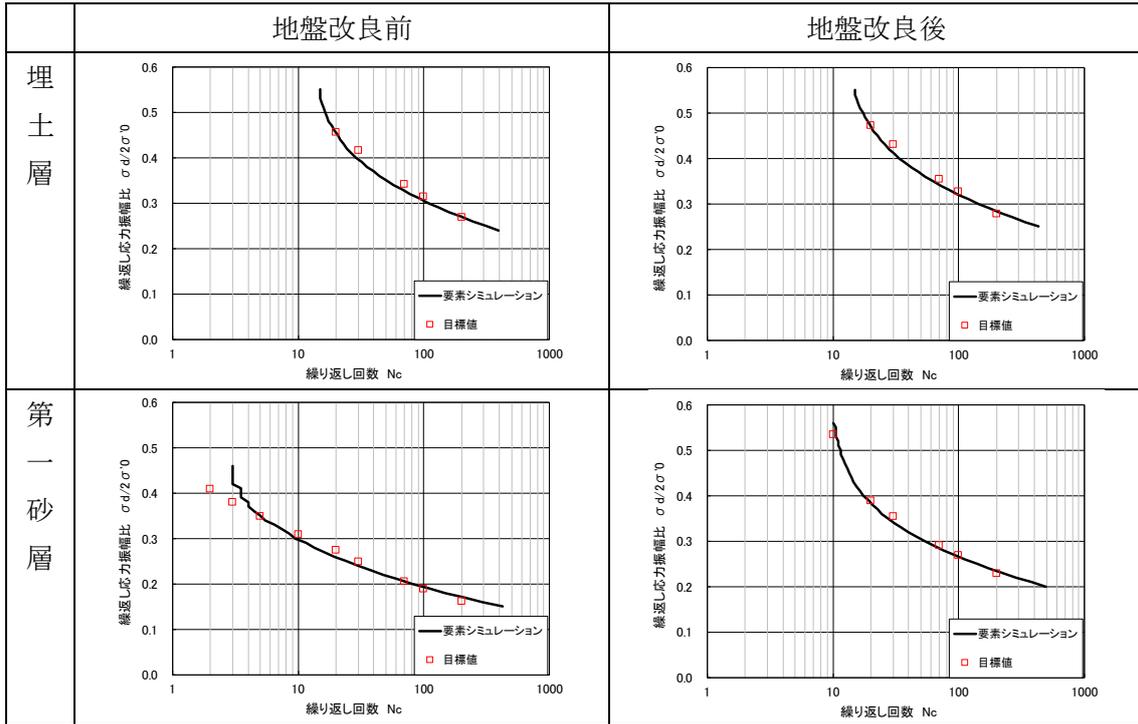


図4. 1-2-1 B地区の地盤改良前後の繰返し応力振幅比

※ここでの繰返し応力振幅比は、ひずみ5%でのものを示している。ひずみレベルが変わることにより曲線は変化することになる。

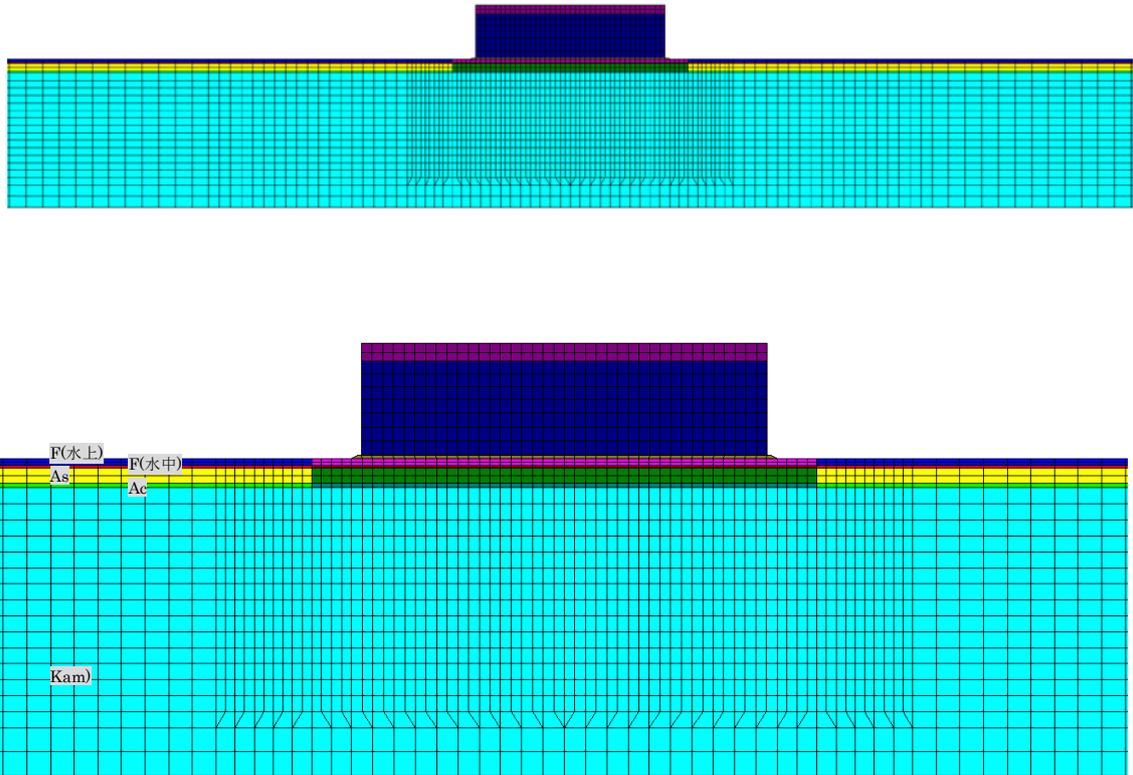


図4. 1. 2-2 B地区解析地盤メッシュ

4. 2 工学的基盤面の加速度波形

解析対象地区で採用する工学的基盤面における加速度波形を図4. 2-1に示す。本検討では、各地点共に最大加速度が大きいEW成分を入力地震動とした。

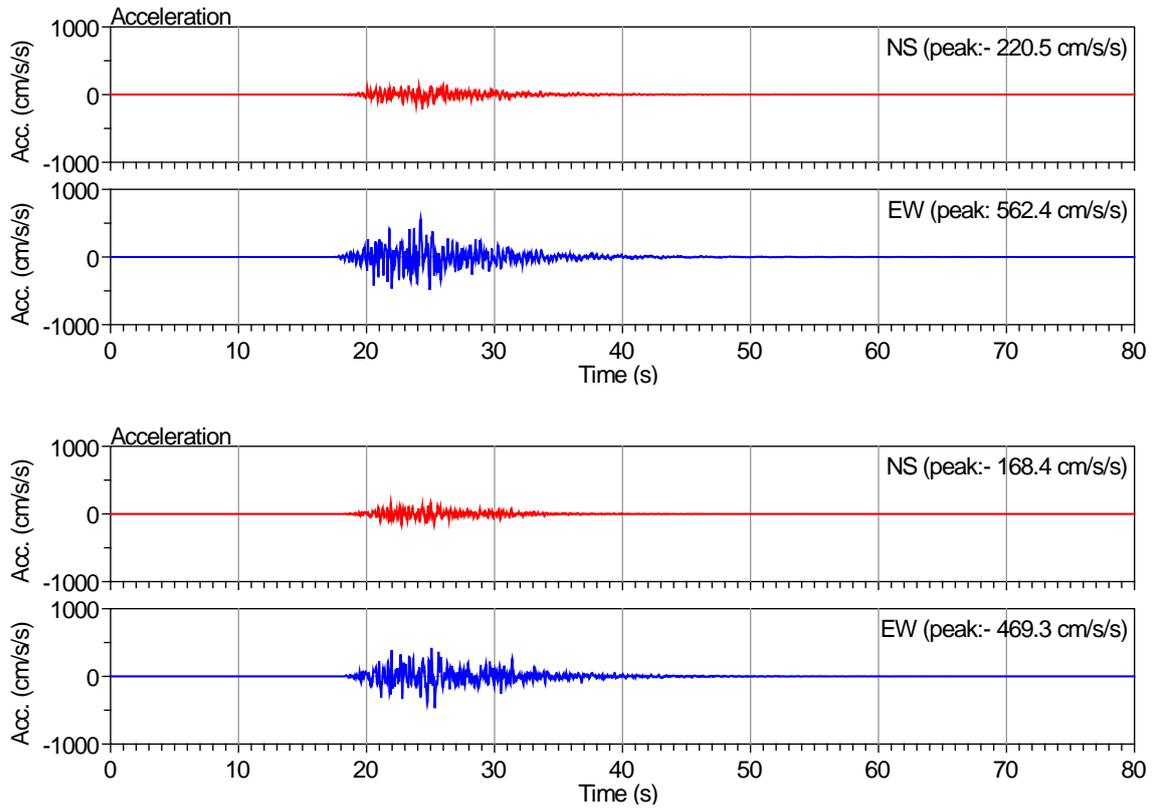


図4. 2-1 工学的基盤面における加速度波形(上:A地区、下:B地区)

5. 解析結果

5. 1 静的自重解析

前述の解析条件における初期応力状態の解析結果を図5. 1-1、図5. 1-2に示す。

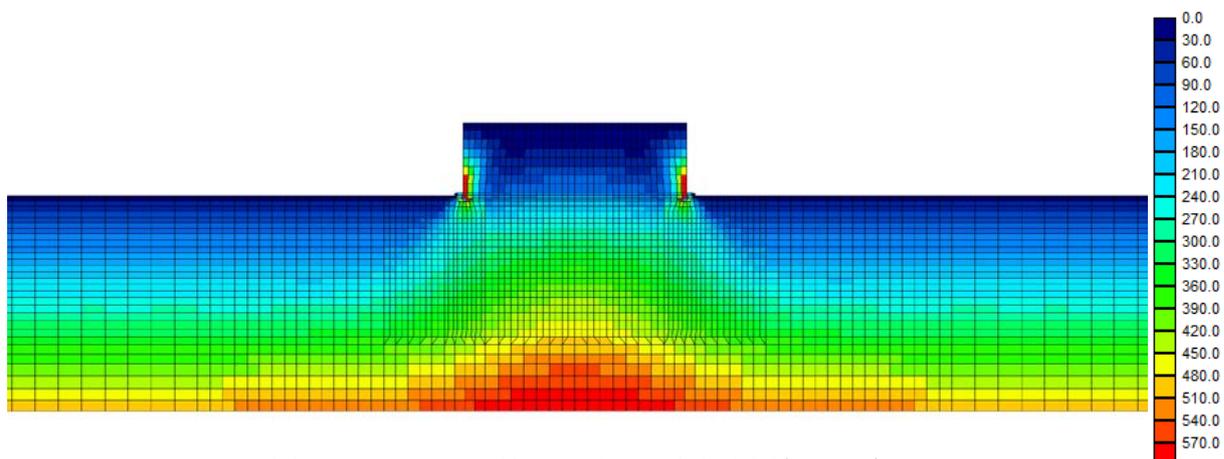


図5. 1-1 A地区の鉛直応力分布図(kN/m²)

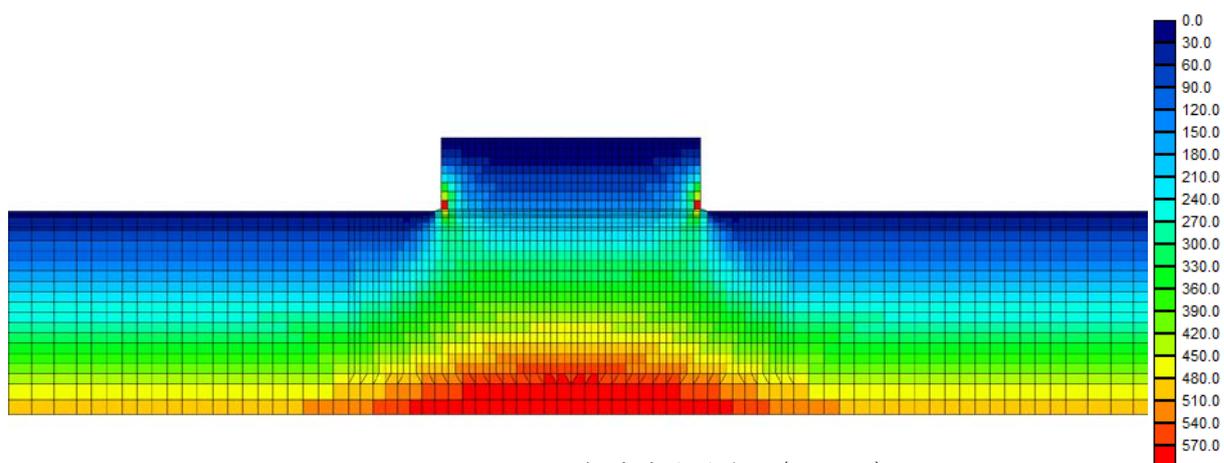


図5. 1-2 B地区の鉛直応力分布図(kN/m²)

5. 2 動的変形解析

前述の解析条件における動的解析による解析結果を図5. 2-1～図5. 2-8に示す。

A地区では、最終的に屋外貯蔵タンク本体の直下で**32cm** 沈下し、その周辺の未改良地盤では**10cm**程度沈下することが予測された。首都直下地震の想定地震動が大きく、沖積層も厚いため、屋外貯蔵タンク本体の直下の沈下はやや大きい結果となっている。なお、過剰間隙水圧は、埋土層、砂層で上昇が激しい結果となっているが、リング基礎直下の地盤改良効果が表れていることから不等沈下などの傾きが起こるようなことはなく、屋外貯蔵タンク本体に大きな影響を与えるほどの変形とはなっていない。

そのうえ、本解析は2次元で表現しているため、特にリング基礎直下の3次元的な地盤改良効果を評価できていない。安全側の検討ではあるが、実際の改良効果はもっと期待できるものと考えられるため、さらに厳しい条件の場合などには3次元解析によって表現することが考えられる。

B地区では、最終的に屋外貯蔵タンク本体の直下で**4mm** 沈下し、その周辺の未改良地盤では、**7cm** 程度沈下することが予測された。工学的基盤層まで地盤改良がおこなわれているため、屋外貯蔵タンク本体や基礎に影響を与えるような変形はないことが分かる。

また、FL法、PL法及び1次元の有効応力解析を実施した結果、A地区及びB地区における地盤改良前後の間隙水圧の上昇具合や変位を比較する限り、液状化対策の効果は2地区ともに確認できた。

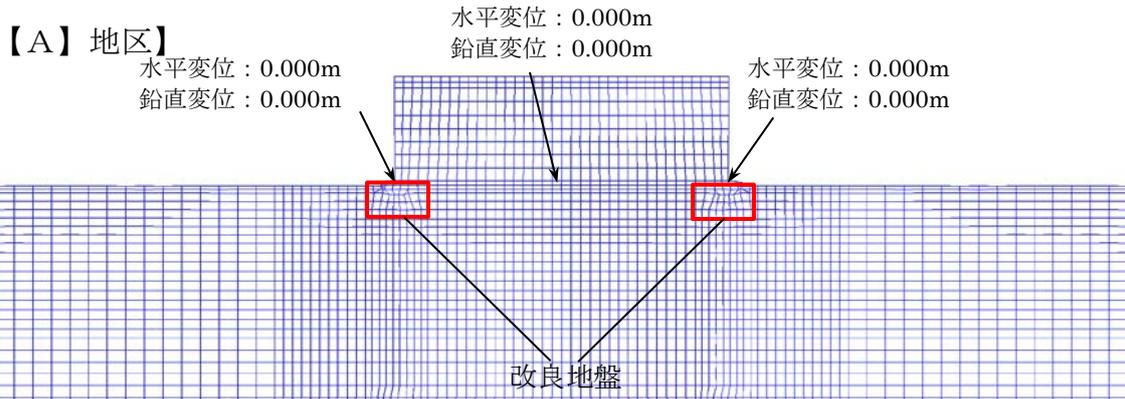


図5. 2-1 加振前 (0秒後) の変形図 (実スケールの10倍表示)

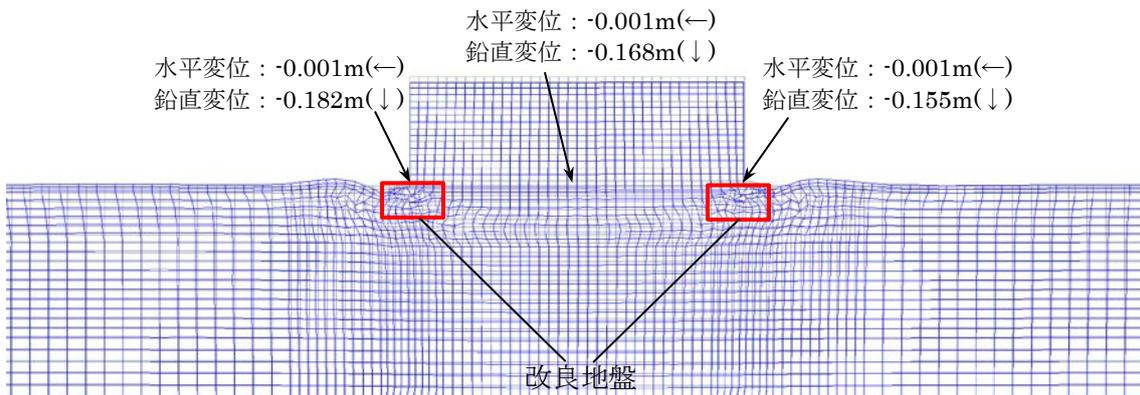


図5. 2-2 加振終了後 (約80秒後) の変形図 (実スケールの10倍表示)

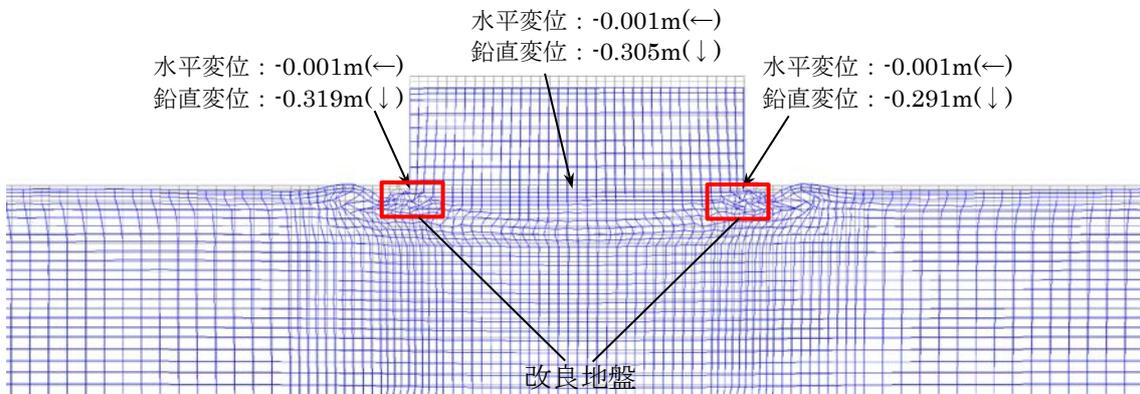


図5. 2-3 過剰間隙水圧消散後 (約3時間後) の変形図 (実スケールの10倍表示)

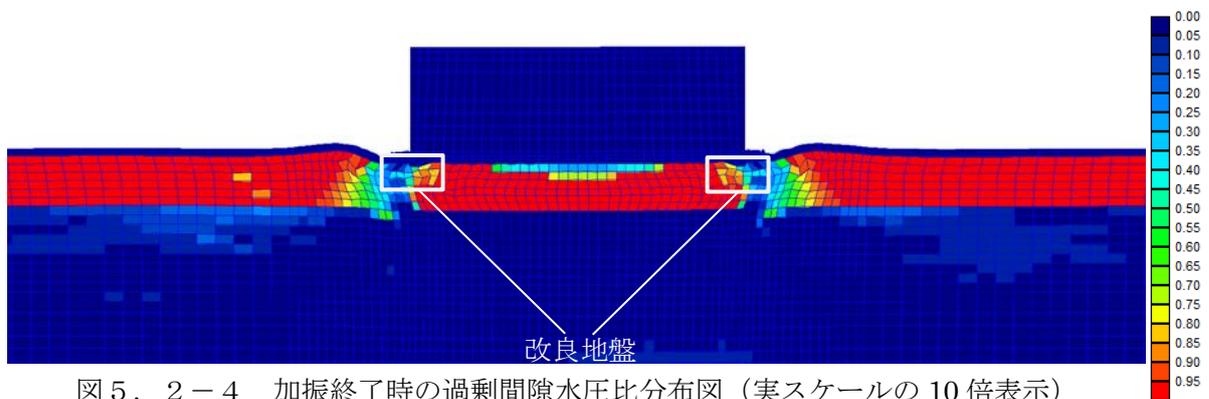


図5. 2-4 加振終了時の過剰間隙水圧比分布図 (実スケールの10倍表示)

【B】地区

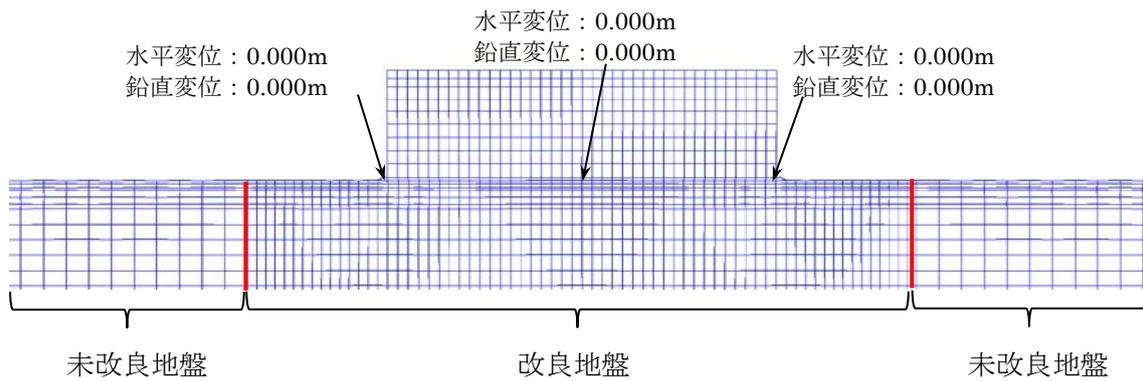


図5. 2-5 加振前（0秒後）の変形図（実スケールの10倍表示）

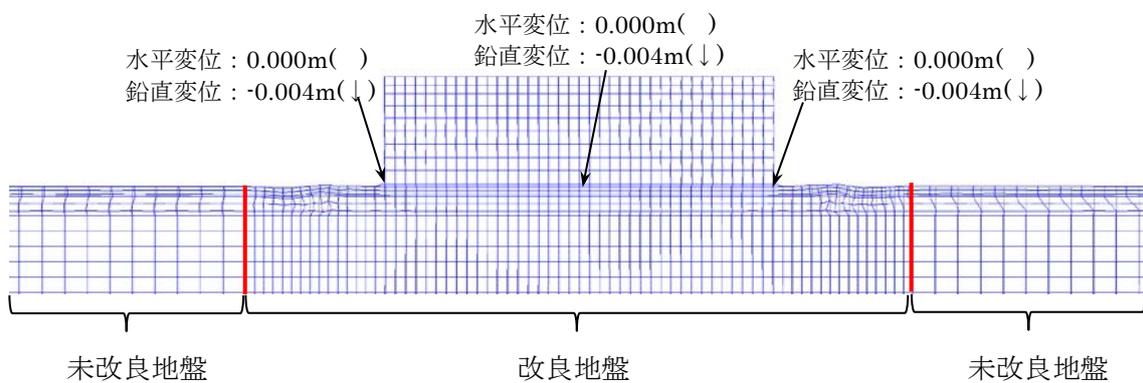


図5. 2-6 加振終了後（約80秒後）の変形図（実スケールの10倍表示）

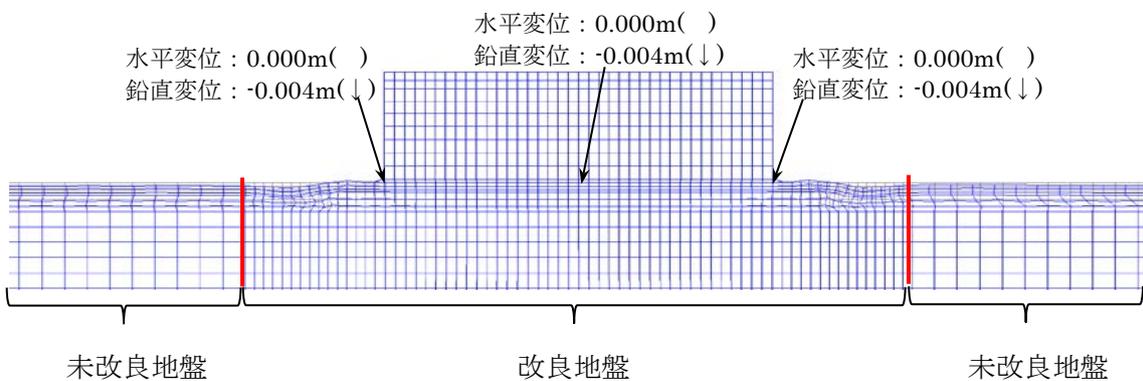


図5. 2-7 過剰間隙水圧消散後（約3時間後）の変形図（実スケールの10倍表示）

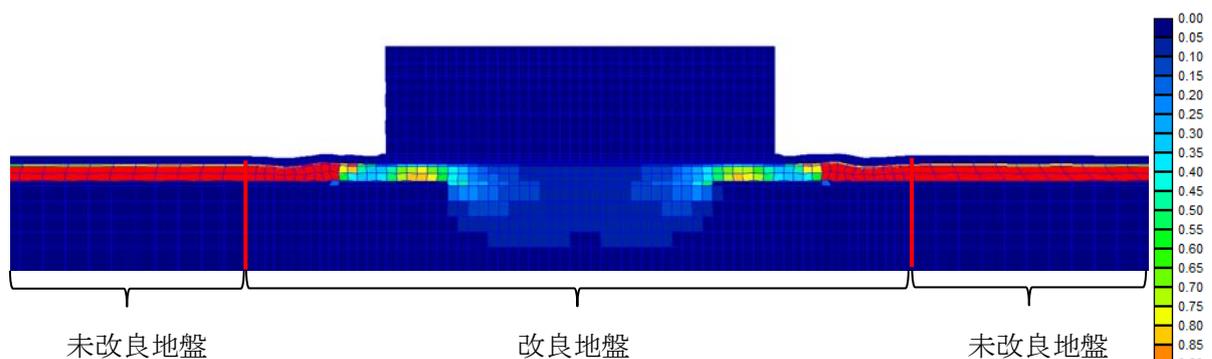


図5. 2-8 加振終了時の過剰間隙水圧比分布図（実スケールの10倍表示）

6. まとめ

6. 1 解析手法等

今年度は、首都直下地震が発生した場合における、屋外貯蔵タンク本体の直下の液状化対策による地盤改良効果、仮に液状化が生じた場合における屋外貯蔵タンク本体の周辺地盤が屋外貯蔵タンク本体に与える影響を確認することを目的とし、断面2次元非線形有効応力解析を実施した。本調査では行っていないが、液状化改良における効果を具体的に把握するためにも、未改良であった場合を想定して解析を行うことも有効な手段である。

本解析により、屋外タンク貯蔵所の地盤の変形の評価を行うとともに、屋外貯蔵タンク本体の沈下量や変形角、過剰間隙水圧比の経時変化の評価を行った。

評価には、加振後（動的解析後）の排水解析や過剰間隙水圧の消散に伴う圧密解析が可能なプログラムが必要であり、これらの条件を満足するプログラムとして『LIQCA』を採用した。

6. 2 解析結果

解析対象としたA地区の過剰間隙水圧消散後の変形を図6. 2-1に、B地区の過剰間隙水圧消散後の変形を図6. 2-2に示す。

A地区では、液状化対策のため地盤改良された屋外貯蔵タンクのリング基礎直下の地盤で32cmの沈下が予測されたが、一様沈下であり、屋外貯蔵タンク本体に大きな応力がかかるような不等沈下は確認されなかった。屋外貯蔵タンク本体直下から外れた未改良地盤については、10cmの沈下となっている。未改良地盤の沈下量と屋外貯蔵タンク本体直下の改良地盤の沈下量との差は20cm程度であり、屋外貯蔵タンク本体や基礎への影響がみられるような変形は確認されなかった。

B地区では、液状化対策のため地盤改良された屋外貯蔵タンク本体の直下の地盤で4mmの沈下が予測されたが、屋外貯蔵タンク本体に大きな応力がかかるような沈下は確認されなかった。また、屋外貯蔵タンク本体から外れた未改良地盤については、7cmの沈下となっている。未改良地盤の沈下量と屋外貯蔵タンク本体直下の改良地盤の沈下量との差は小さく、B地区と同様に屋外貯蔵タンク本体や基礎への影響がみられるような変形は確認されなかった。

なお、A地区とB地区における過剰間隙水圧消散後の地表面での鉛直変位量分布を参考として図6. 2-3、図6. 2-3に示す。

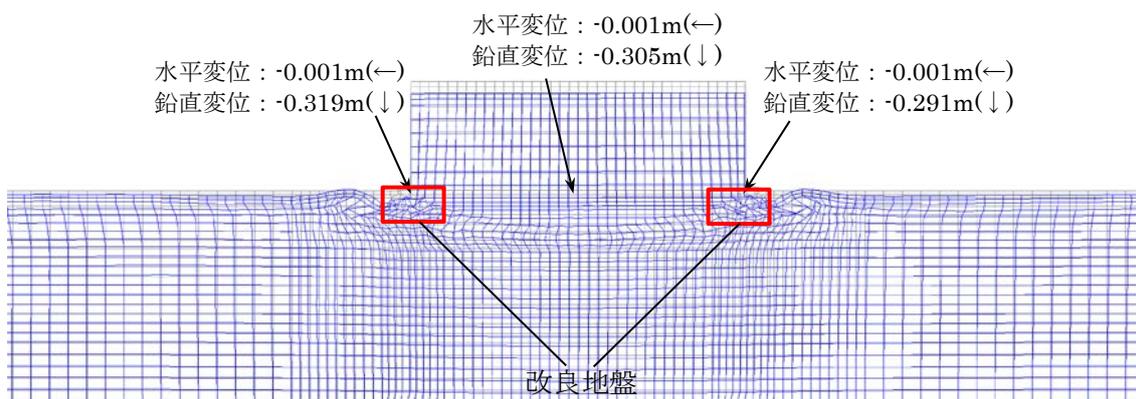


図6. 2 - 1 A地区の過剰間隙水圧消散後（約3時間秒後）の変形図（縦横比10倍表示）

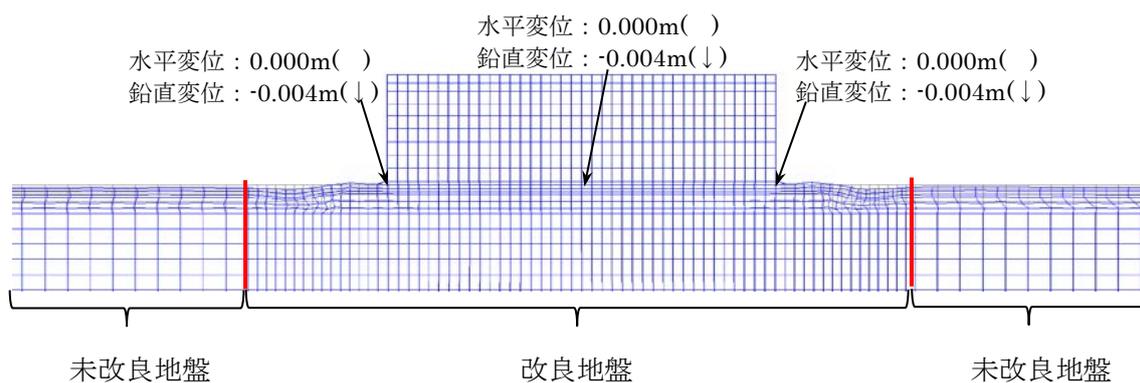


図6. 2 - 2 B地区の過剰間隙水圧消散後（約3時間秒後）の変形図（縦横比10倍表示）

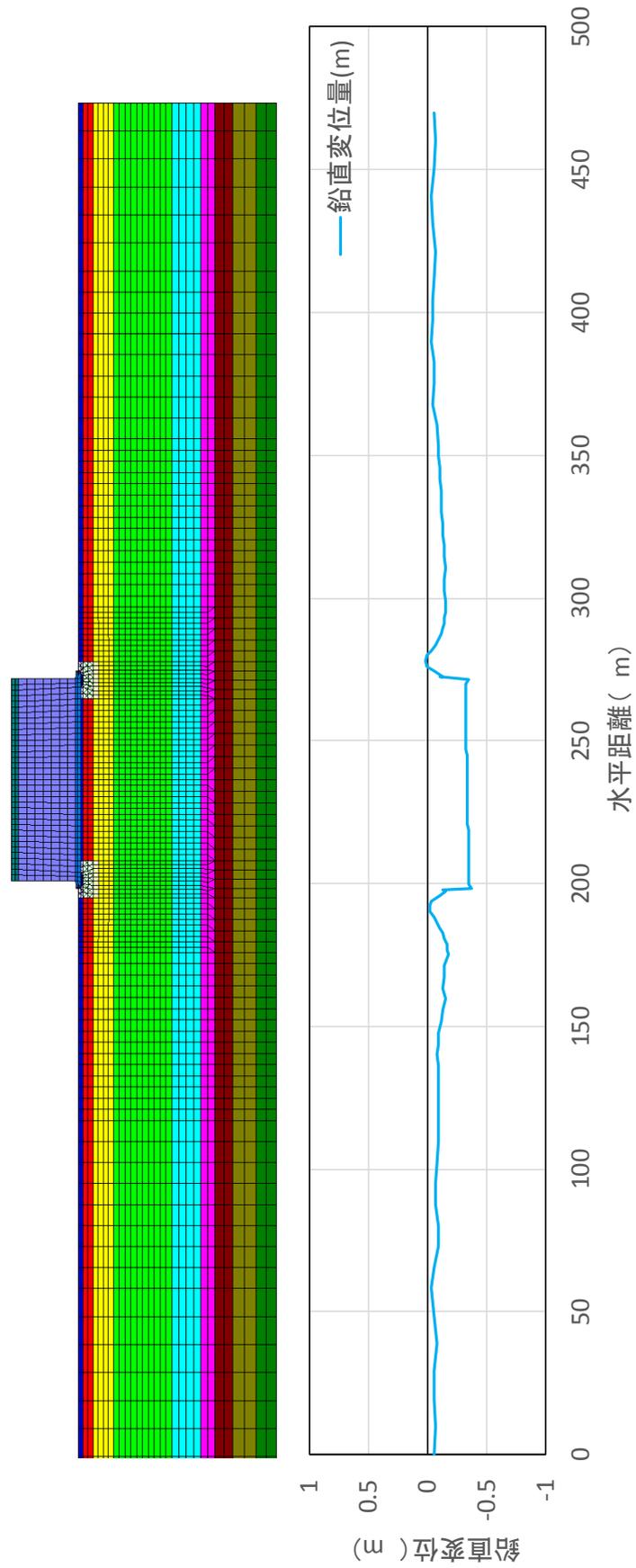


図6. 2 - 3 A地区における過剰間隙水圧消散後の地表面の鉛直変位量分布

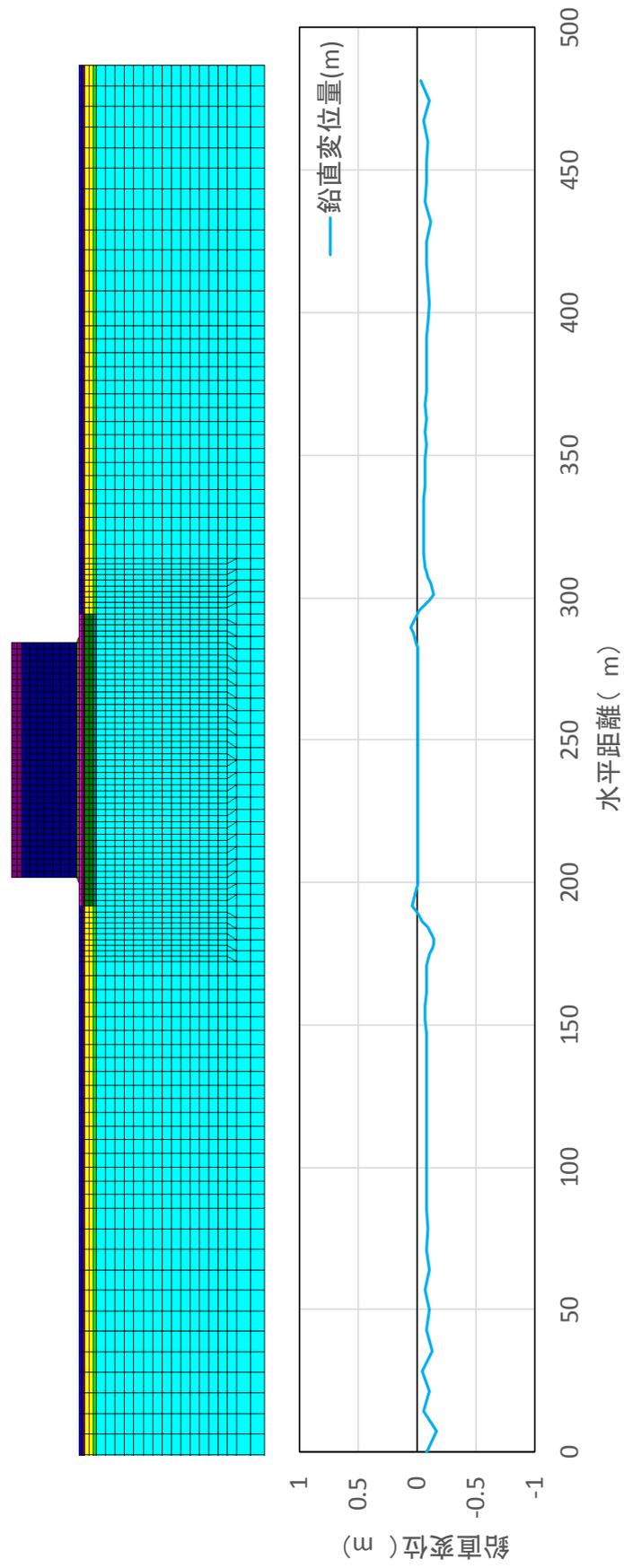


図6. 2 - 4 B地区における過剰間隙水圧消散後の地表面の鉛直変位量分布

6. 3 まとめ

首都直下地震に対して、屋外貯蔵タンク直下の液状化対策による地盤改良効果と周辺の未改良地盤が屋外貯蔵タンク本体に与える影響を確認するために解析を実施した。解析の対象とした地区は、想定地震動が大きく、また、当該地区の中では液状化が発生する可能性の高いA地区と地震動が大きく慣性力が大きく働くB地区を選定したが、想定地震動が大きいかかわりなく、構造物に影響を与えるような地盤の変形は確認されないという解析結果が得られた。また、液状化対策による地盤改良についてもその効果を考慮していくことの必要性が確認された。

首都直下地震のように繰り返し大きなせん断力が生じる場合、簡易的な手法であるFL法・PL法では、「液状化しない」と判定される「見逃し」はなかった。」(国土交通省、2011²)にもあるように、液状化危険度を過大評価することが指摘されている。また、過剰間隙水圧の最大値だけに着目する一次元の有効応力解析などでは、締固めの効果を著しく過小評価することが指摘されている(龍岡ら、2014³)。よって、本調査では基礎・地盤の安全性について、平成26年度調査の詳細を踏襲しながら、新たな知見として、より実務的な手法である「飽和土の非排水せん断強度の非排水繰返し载荷による低下を考慮した残留変形解析」のタンクへの適用性を参考資料に示した。

また、動液圧が地盤の液状化程度に与える影響を加味するために、新たにタンク本体と内容液を個別に考慮することで、タンク本体と内容液の固有周期の違いなどを反映させるモデルの検討を別途行い参考資料に示した。その結果、条件によってはタンクと内容液を個別に評価することで、位相などの違いが表現され、地盤に働く地震力が相殺されて液状化及び変形に対する影響が小さくなる可能性を解析において確認した。その反面、動液圧を表現するモデル化に際して、基礎形式によってはタンク重量を上載圧として地盤に適切に伝えられていない課題も挙げられた。その解決方法の一つとして、上載圧を加味したうえで液状化強度を設定することなどが考えられる。

以上の検討より、東京湾沿岸に屋外タンクを保有する各事業者が、従来の設計レベルを超えるような大きな地震外力に対しての安全性を検討する際には、検討対象地の既往地盤調査資料を可能な限り収集し、これまで実施してきた地盤改良効果を見込むことの重要性を示した。

今後は、本検討結果を参考に、地盤状況の把握したうえで地震動を適切に評価し、簡易的手法から、二次元解析、高度な三次元解析まで、各解析レベルの特徴を把握したうえで、その結果を適正な安全確認、対策につなげていくことが必要である。

² 「液状化対策技術検討会議」検討成果：国土交通省液状化対策技術検討会議、2011.3

³ 龍岡ほか：非排水繰返し载荷による強度低下とひずみ軟化を考慮したニューマーク法による地震時斜面残留変位推定、地盤工学シンポジウム、2014.5