

地盤・構造物の解析結果について

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年以前に設置されていた既存の屋外タンク貯蔵所が、1994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。

しかしながら、将来発生が危惧される南海トラフ巨大地震（中央防災会議（2012））が発生した場合、東北地方太平洋沖地震を上回る揺れとなる、震度7が想定されている特防区域があり、これら地域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、南海トラフ巨大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とする。

解析の流れを図1-1に示す。

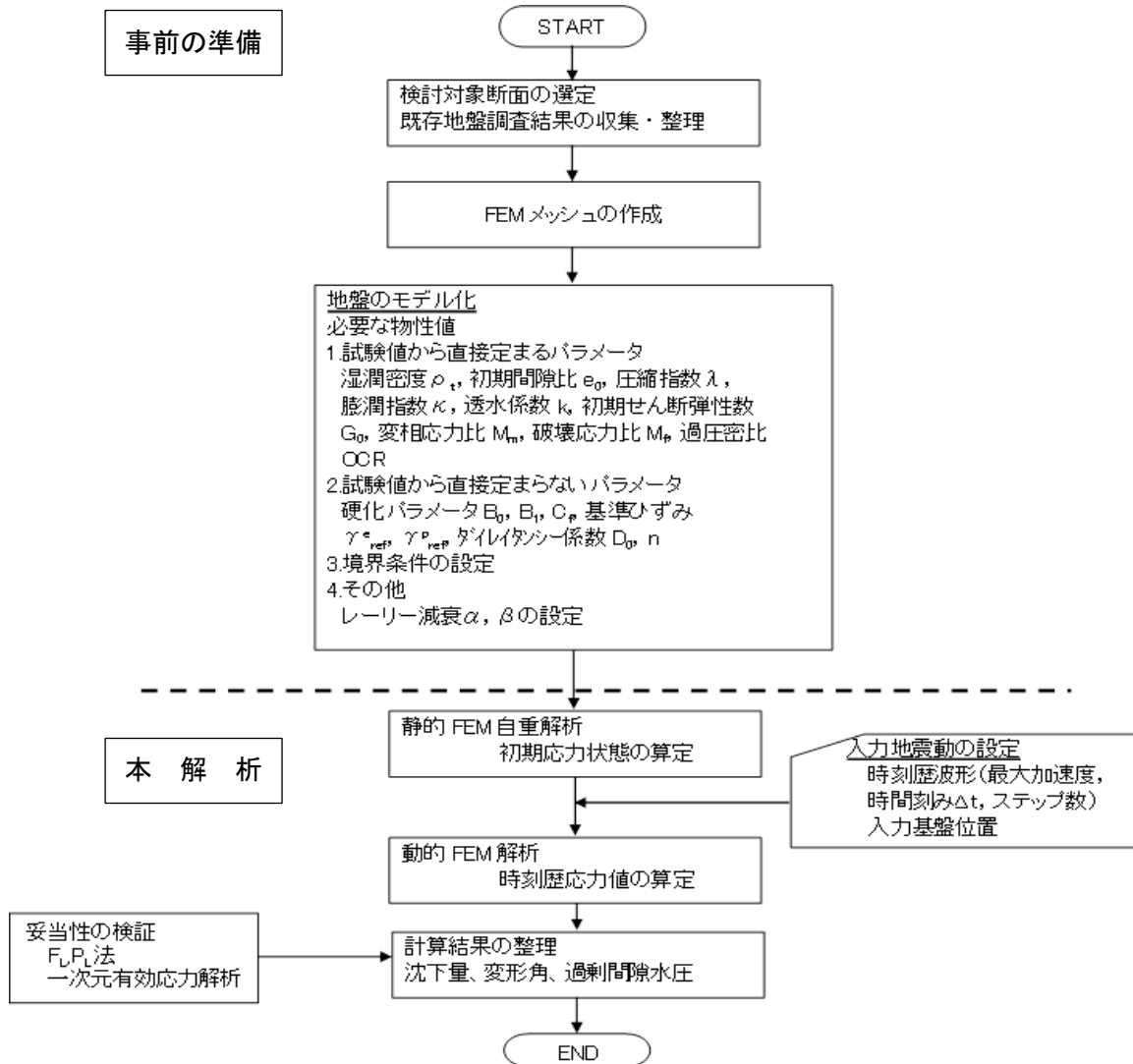


図 1 - 1 解析の流れ

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。地区の選定の条件としては、南海トラフ巨大地震（M9クラス）によって、大きな揺れ（計測震度6.4以上）が想定されている地区であることとする。そのうち、西日本の代表的な特防区域5地区を候補に挙げたうえ、対象とする2地区を選定した。

なお、2地区の選定においては以下の3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

上記により総合的に判断した結果、地盤変形の可能性が高い3地区（B、C、E地区）のうち、計測震度6.8、サンドコンパクションパイル（SCP）工法及び浸透固化処理工法を実施しているB地区と、計測震度6.4、動圧密工法を実施しているE地区を解析対象地区とした。

候補となった5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 特防区域の計測震度・地盤状況等の比較

	A地区	B地区	C地区	D地区	E地区
想定震度階 (計測震度)	7 (6.8)	7 (6.8)	7 (6.5)	6強 (6.4)	6強 (6.4)
液状化可能性 (N値≤15程度の砂・砂礫層で高い)	低い N値>20の砂礫層が続く	高い N値<10の砂と粘土の互層	高い N値4~20の砂礫層(含む埋土)	中くらい N値0~30のシルト層に砂層挟在	高い N値3~30の砂・砂礫層
解析精度 (既存資料)	非常に良い	良い	良い	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 注入固化 改良後N値	サンドコンパクション 一部調査中 改良後N値	ハイブ0 コンポーサー 改良後N値	動圧密 改良後N値
二次元動的解析の 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 B地区

B地区における地質層序表を表2. 2. 1-1に示す。B地区は、表層に埋土層が薄く分布しており、その下位は完新世の粘性土層と砂質土層が互層状に分布している。完新世の粘性土は比較的軟らかく、砂質土層は緩い～中位の締まり具合である。これらの地層の下位は、岩盤が風化した礫質土が堆積し、その下位に工学的基盤と考える泥岩・砂岩が分布する。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・第二砂質土層及び第三砂質土層である。

表2. 2. 1-1 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	玉石混り砂礫・砂礫	7～17	
新生代	第四紀	完新世	沖積層	第一粘性土層	砂質シルト	3～5
				第一砂質土層	シルト質砂	3～7
				第二粘性土層	砂質シルト	1～6
				第二砂質土層	シルト質砂・細砂・中砂	6～13
				第三粘性土層	砂質シルト	2～4
				第三砂質土層	シルト質砂	4～7
				第四粘性土層	粘土質シルト・シルト質粘土	2～5
		更新世	洪積層	礫質土層	砂礫	38～50以上
第三紀	中新世		岩盤層	泥岩・砂岩	50以上	

2. 2. 1-2 E地区

E地区における地質層序表を表2. 2. 1-2に示す。E地区は、表層に盛土層が分布しており、その下位は完新世の砂質土層と礫質土層が互層状に分布している。完新世の砂質土層は比較的緩い締まり具合であり、礫質土層においても締まり具合が中位程度である。これらの地層の下位は、更新世の締まった礫質土層が堆積し、その下位に工学的基盤と考えうる泥岩・砂岩・頁岩が分布する。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、盛土層・第一砂質土層および第二砂質土層である。

表2. 2. 1-2 E地区における地質層序表

地質時代			地層名	構成	N値	
現世			盛土層	玉石混り砂礫・礫混り中砂 シルト混り細砂	3~6	
新生代	第四紀	完新世	沖積層	第一砂質土層	細砂	12~14
				礫質土層	砂礫	21~31
				第二砂質土層	シルト質細砂・粗砂	7~20
	第三紀	更新世	洪積層	礫質土層	砂礫・玉石混り砂礫・玉石	50以上
		中新世	尾鷲層群	基盤層	泥岩・泥質砂岩・頁岩	50以上

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南海トラフ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5基を設定している。

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

タンク番号	内容物	貯蔵内径 (m)	容量 (KL)
旧法No.1	重油/原油 相当 比重:0.95	15.5	2500
旧法No.2		29.0	7500
旧法No.3		45.1	30000
旧法No.4		69.8	75000
旧法No.5		83.1	100000

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、旧法 No. 5（公称容量：10万KL）を選定した。

旧法 No. 5の屋外貯蔵タンク本体の詳細な諸元を表3. 1-2に示す。

表3. 1-2 旧法 No. 5の屋外貯蔵タンク本体の諸元一覧 (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	83100	(mm)
側板高さ	Hmax	19985	(mm)
最下段側板厚	t_s	33	(mm)
1/3の最高液高さにおける側板厚	$t_{1/3}$	25	(mm)
アニュラ板厚	t_b	12	(mm)
鋼材のヤング率 (SPV450Q)	E	205939.7	(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	18447	(mm)
液密度	γ	9.50E-07	(kg/mm ³)
直径/液高さ比	D/H	4.50	(-)
液高さ/直径比	H/D	0.22	(-)
消防法/有効液重量率 f_{w0} $f_{w0} = -0.1408(\frac{H}{D})^4 + 0.8427(\frac{H}{D})^3 - 1.916(\frac{H}{D})^2 + 2.0933(\frac{H}{D}) - 0.1172$		0.26	(-)
消防法/有効液重量率 f_{w1} $f_{w1} = -0.1429(\frac{H}{D})^4 + 0.9653(\frac{H}{D})^3 - 2.2807(\frac{H}{D})^2 + 2.3017(\frac{H}{D}) - 0.1634$		0.25	(-)
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 $P_0 = g \gamma H$		0.17	(N/mm ²)

タンク本体重量 (赤字:入力値)

側板重量	Ws0	7.79E+03	(KN)
側板付属品重量	Ws1	1.18E+03	(KN)
浮き屋根重量	Wr0	2.65E+03	(KN)
浮き屋根付属品重量	Wr1	6.58E+02	(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	1.23E+07	(N)

3. 2 屋外タンク貯蔵所の基礎の選定

屋外タンク貯蔵所の基礎の施工実績では、盛り土基礎が最も多く、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B地区についてリング基礎を、E地区の解析においては盛り土基礎を設定する。一般的な盛り土基礎及びリング基礎の概要を図3. 2-1に示す。

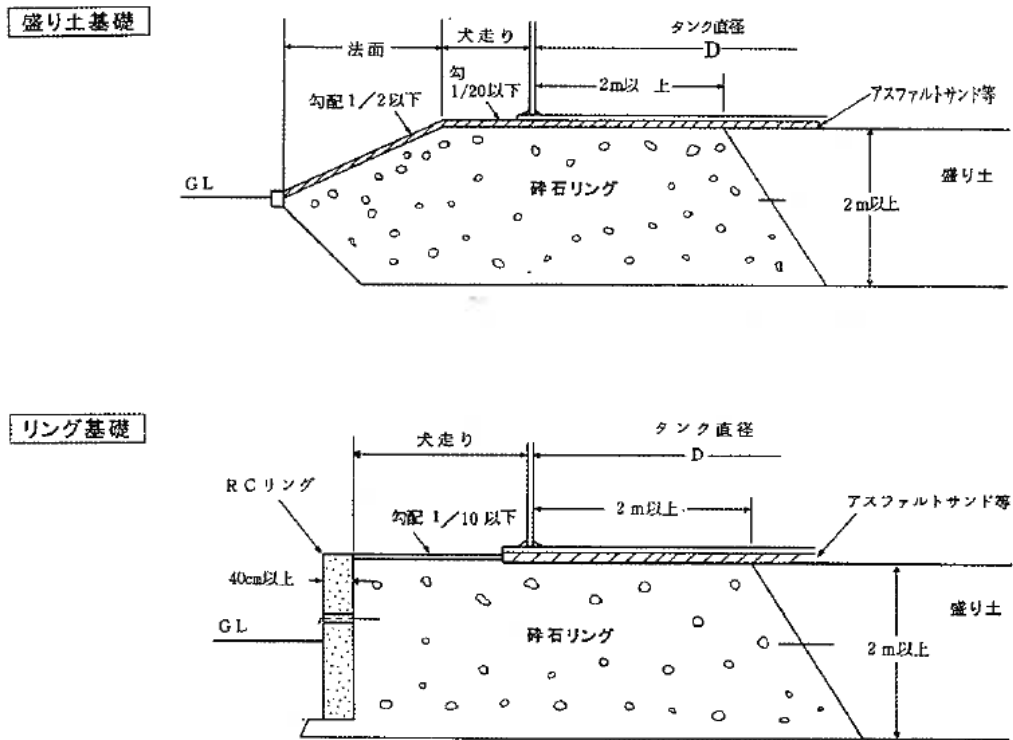


図3. 2-1 屋外タンク貯蔵所の基礎の概要

上記により設定した解析断面図を図3. 2-2～5に示す。

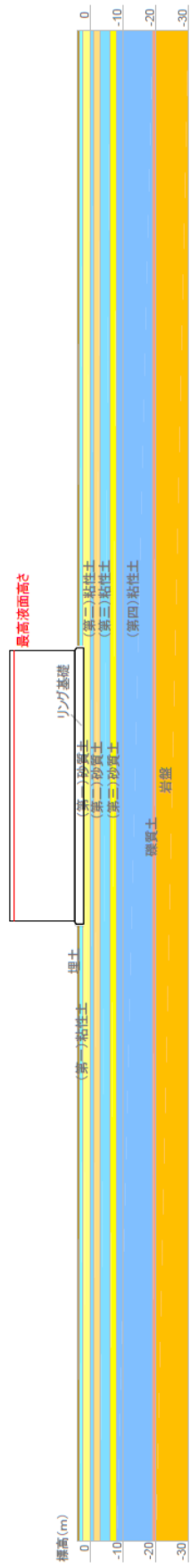


図3. 2-2 B地区の解析用断面図

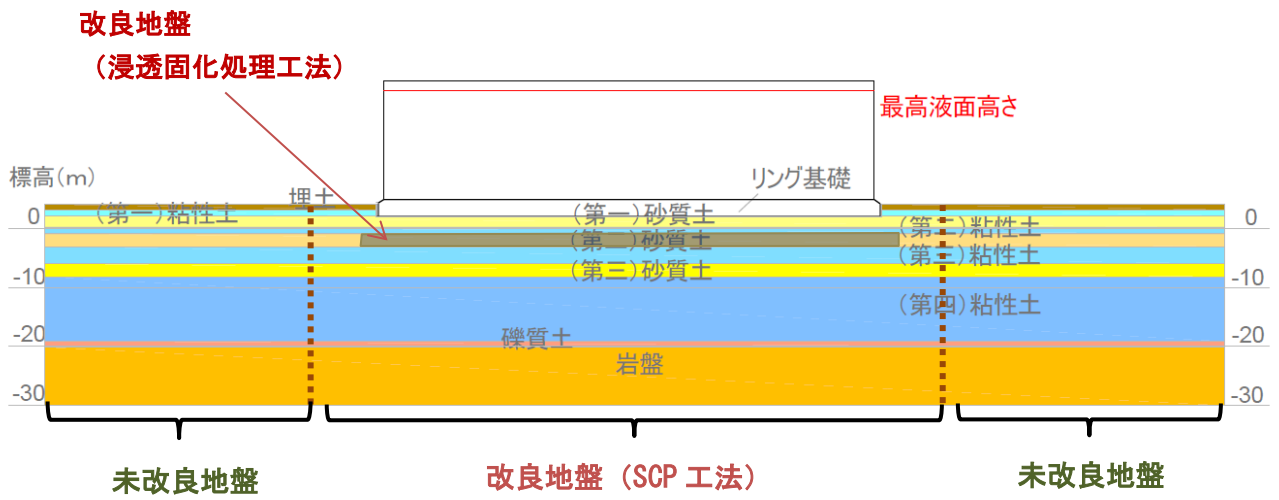


図3. 2-3 B地区の解析用断面図 (地盤改良範囲の拡大図)

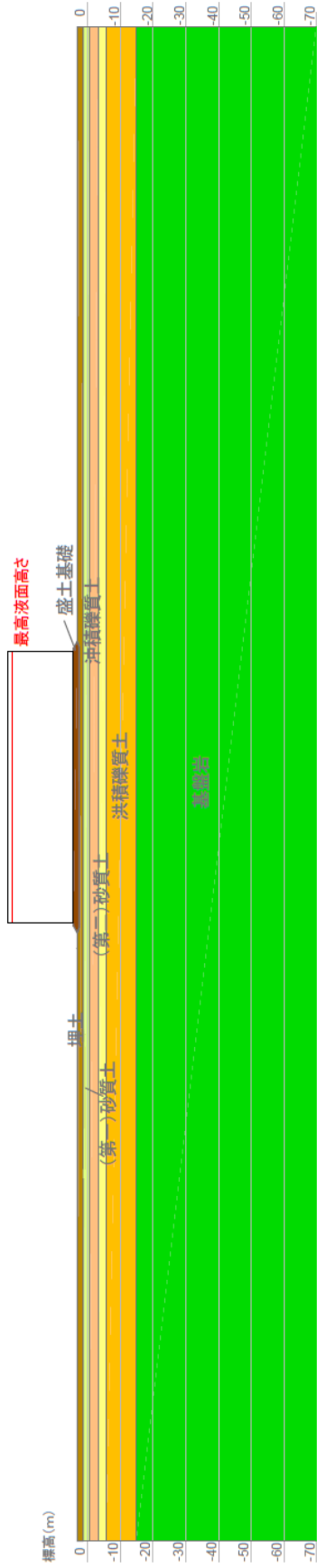


図3. 2-4 E地区の解析用断面図

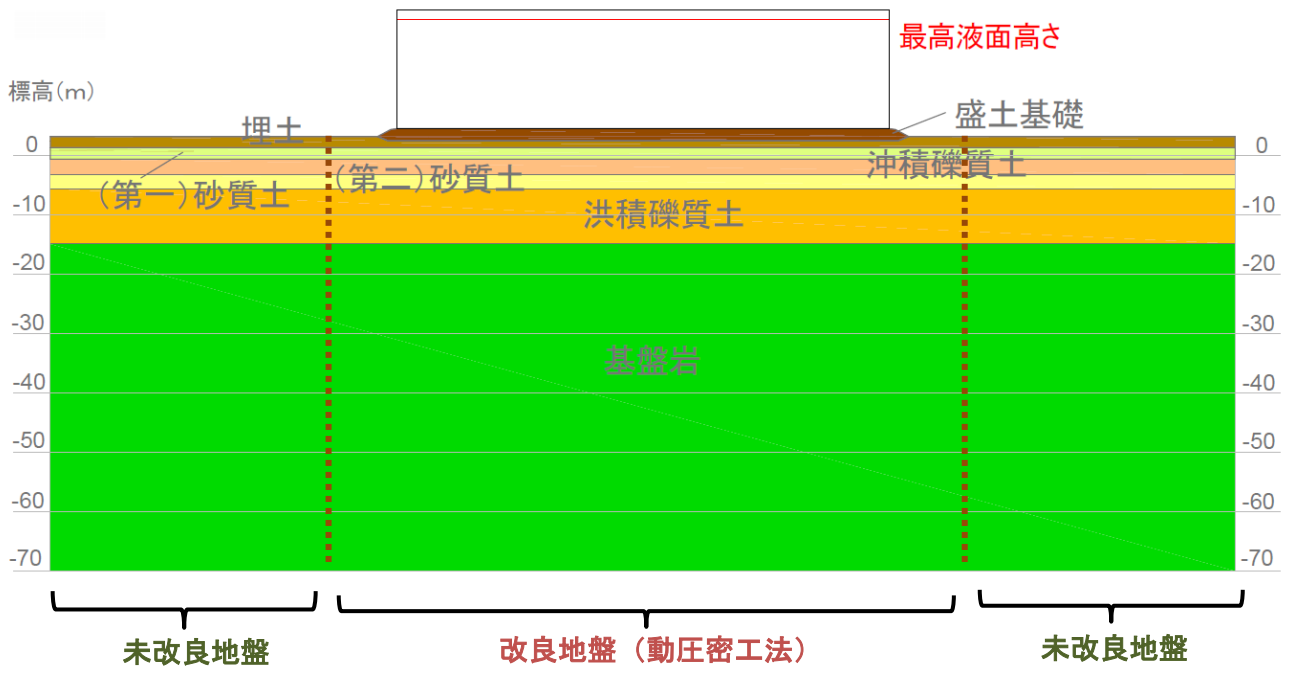


図3. 2-5 E地区の解析用断面図 (地盤改良範囲の拡大図)

4. 解析条件の設定

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、南海トラフの想定地震とする。

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。

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）の排水解析が可能であり、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に示す。

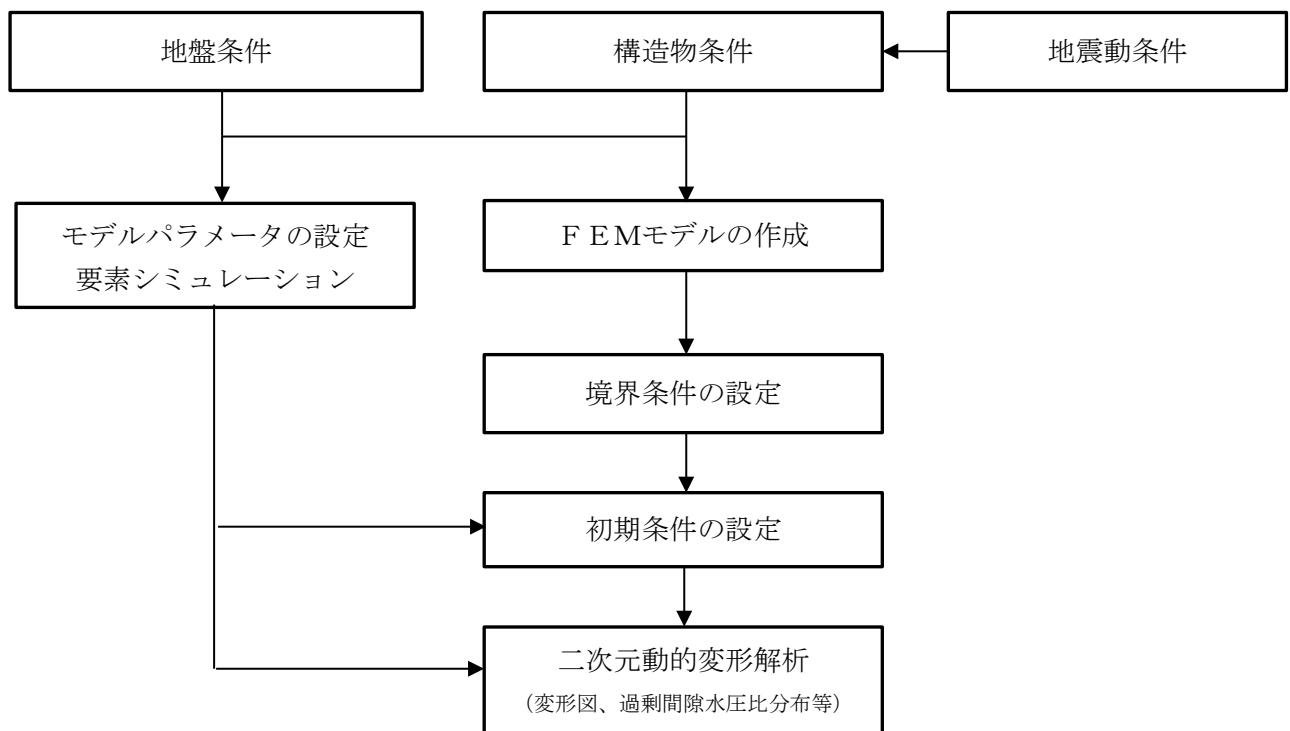


図4-1 断面2次元解析の流れ

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の式には、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』では動解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 に示す。

表 4-1 計算条件の設定

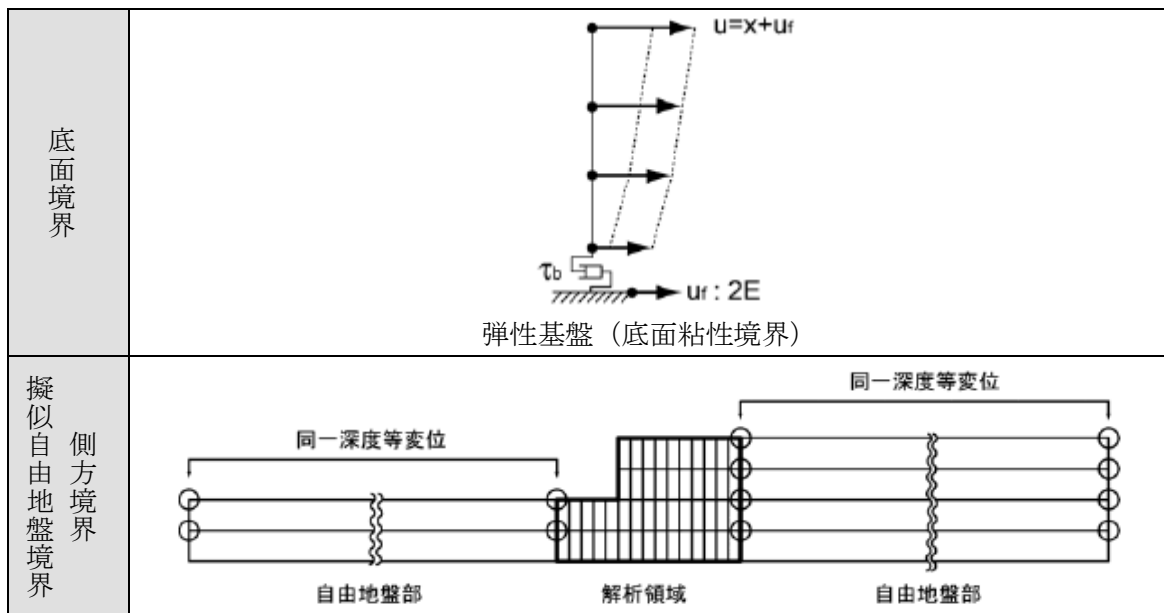
条件項目	条件内容
バージョン	LIQCA2D12 (2012 公開版)
地盤モデル	液状化層: 砂の弾塑性繰返しモデル 非液状化層: 修正 R-O モデル
解析領域	150m の領域
境界条件	底面: 粘性境界(ρ , V_s , V_p) 側方: 疑似自由地盤(1500m)の同一深度等変位境界とする
レーレー減衰	1次元線形地盤の第1次固有振動モードに対して、小さな減衰定数(1.0%)を与えるように設定 $\alpha_0=0.0$, $\alpha_1=0.002$
Newmark の β 法	$\beta=0.3025$, $\gamma=0.6$
解析時間間隔	$\Delta T=0.002$ (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4-2に示す通り設定する。

表4-2 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

4. 1. 1 B地区

B地区において設定した物性値を表4. 1. 1-3に示す。

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B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。

【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-2mに設定した。よって、 F_L 法などの簡易法においては、表層の埋土層は解析対象外となり、その下位の砂質土層から解析対象となる。

【地盤改良】

B地区の地盤は、地表から粘性土層と砂層が互層状になっており、埋土層と第一砂質土～第三砂質土層が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サンドコンパクションパイル（SCP）工法が施工されている。加えて、第二砂質土層を対象として浸透固化処理工法による地盤改良も施工されている（図4. 1. 1-1参照）。

地盤改良後の地盤情報としては、チェックボーリング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。地盤改良前後の実測N値及びN値から推定したS波速度を比較して表4. 1. 1-5に示す。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1.0～1.1倍程度、砂質土層で1.1～1.4倍程度となった。

また、第二砂質土層の浸透固化処理工法による地盤改良の効果については、土木学会論文などの報告を考慮して、S波速度で+20m/s程度の増加を見込み、200m/sとした。

さらに、サンドコンパクションパイル（SCP）工法による一般的な地盤改良率は、およそ8%～15%程度であるが、その部分だけの物性値が変わるというわけではない。よって、本解析のモデル化においては、屋外貯蔵タンク本体の直下及びその周辺10mの範囲において、改良地盤は一様に平均化した物性値を設定した。サンドコンパクションパイル（SCP）工法による地盤改良については、「地盤改良効果の予測と実際」（地盤工学会）より表4. 1. 1-1の提案式が示されている。

チェックボーリングから設定した剛性（ G_0 ）と、表4. 1. 1-6に示す条件の砂杭を設定し、表4. 1. 1. 1-1に示す①式により平均化して剛性（ G_0 ）と比較することで妥当性を検証した。

検証結果を図4. 1. 1-2に示す。設定したS波速度から求めた値と、地盤の改良率を設定して求めた値が、ほぼ一致した値であることから、一様に設定した剛性は妥当と考えられる。

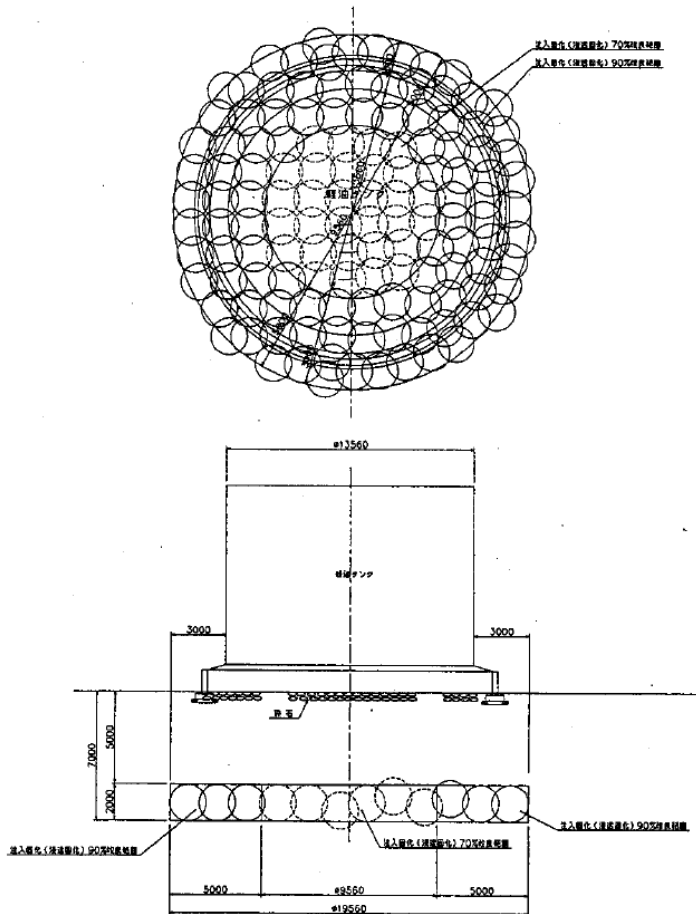


図 3 液状化対策工事の概念図

図 4. 1. 1-1 B地区の地盤改良工事の概念図

表 4. 1. 1-1 SCP 工法による改良地盤の k_h (横方向地盤反力係数)

①	$k_h = a_s \cdot k_s + (1 - a_s) \cdot k_c$	(3.12)
②	$k_h = k_{ho} \cdot D^{-1/4} \cdot y^{-1/2}$	(3.13)
③	$k_h = 0.15 N$ (置換率 70% 程度の高置換率の場合, ($\times 9.8 \text{ MN/m}^2$)) ...	(3.14)

ここに、 k_h : 改良地盤の横方向地盤反力係数 (MN/m^2)

k_s, k_c : 砂杭および杭間粘性土の横方向地盤反力係数 (MN/m^2)

a_s : 置換率

D : 杭径 (cm)

y : 変位 (cm), 一般に常時で 1 cm, 地震時で 1.5 cm

k_{ho} : 比 k 値 (径 1 cm の杭が, 1 cm 変位したときの値) ($\times 9.8 \text{ MN/m}^2$)

$$k_{ho} = 6.6 a_s + 5.1 (1 - a_s) \cdot q_u \text{ (3.15)}$$

q_u : 杭間粘性土の一軸圧縮強度 ($\times 9.8 \text{ MN/m}^2$)

N : 改良地盤の N 値で, 例えば以下のように求める。

$$N = (\phi_{\pi} - 20)^2 / 12$$

$$\phi_{\pi} = \tan^{-1} (\mu_s \cdot a_s \cdot \tan \phi_s)$$

μ_s : 応力集中係数

$$\mu_s = \pi / (1 + (\pi - 1) \cdot a_s)$$

π : 応力分担比

である。

【基礎部分】

屋外タンク貯蔵所の基礎部分の砕石及び浸透固化処理範囲（第二砂質土）の物性値については、表4. 1. 1-4に示す。

【屋外貯蔵タンク本体部分】

屋外貯蔵タンク本体部分の物性値については、表3. 1-2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。

【繰返し応力振幅比】

図4. 1. 1-3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(2002)に従って算出したものを青塗、赤の白抜きは周辺の繰返し非排水三軸試験(DA=5%)の値を示す。この二つの値を参考に、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. -2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。解析地盤メッシュ図を図4. 1. 1-4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. 1-2 地盤改良の効果を表す各パラメータ

①	$\frac{\sigma_d}{2\sigma_0'}$	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	C	粘着力	第二砂質土の浸透固化処理に対して、 50kN/m^2 を改良による効果分として設定

表4. 1. 1-3 B地区の物性値一覧表（地盤改良後の値を含む）

赤字: 既往資料等により設定した物性値



深度 (m)	土層	平均 N値 改良前⇒後	湿潤密度 $\rho_t(\text{g/cm}^3)$	間隙比 e	細粒分 含有率 Fc	内部 摩擦角 $\phi'(^{\circ})$	S波速度 $V_s(\text{m/sec})$ 改良前⇒後
0.8	埋土	10⇒10	1.65	1.53	96	40	190⇒190
2.0	(第一)粘性土	7⇒7	1.65	1.53	96	30	190⇒190
4.0	(第一)砂質土	5⇒11	1.80	0.9	22	35	130⇒180
5.0	(第二)粘性土	4⇒5	1.74	1.56	97	30	160⇒170
7.0	(第二)砂質土 【浸透固化処理】	6⇒11	1.80	0.9	34	35	150⇒200 (180+20)
10.0	(第三)粘性土	3⇒4	1.73	1.27	94	30	150⇒160
12.0	(第三)砂質土	6⇒8	1.80	0.9	34	35	150⇒160
22.7	(第四)粘性土	3	1.73	1.27	94	30	140
24.2	礫質土	38	1.90	0.6	6	40	340
-	岩盤	50以上	2.00	—設定した工学的基盤面			350

表4. 1. 1-4 碎石及び浸透固化処理改良後の物性値

	湿潤密度 $\rho_t(\text{g/cm}^3)$	粘着力 c (kN/m ²)	せん断抵抗角 $\phi(^{\circ})$	S波速度 $V_s(\text{m/s})$
碎石	2.0	20	35	300
第二砂質土 (浸透固化処理 部分)	1.8	50	35	200

表4. 1. 1-5 B地区における地盤改良前後のN値とS波速度の比較

土層	実測 N 値		N 値から求めた S 波速度 (m/s)		S 波速度の比 地盤改良後/地盤改良前
	改良前	改良後	改良前	改良後	
第一粘性土	7	7	191	191	1.0
第一砂層	5	11	132	179	1.4
第二粘性土	4	5	162	167	1.0
第二砂層	6	11	149	178	1.2
第三粘性土	3	4	145	162	1.1
第三砂層	6	8	149	160	1.1
第四粘性土	3	3	140	140	1.0

表 4. 1. 1-6 砂杭本体の土質定数

ϕ	30°
c	0
目標 N 値	15

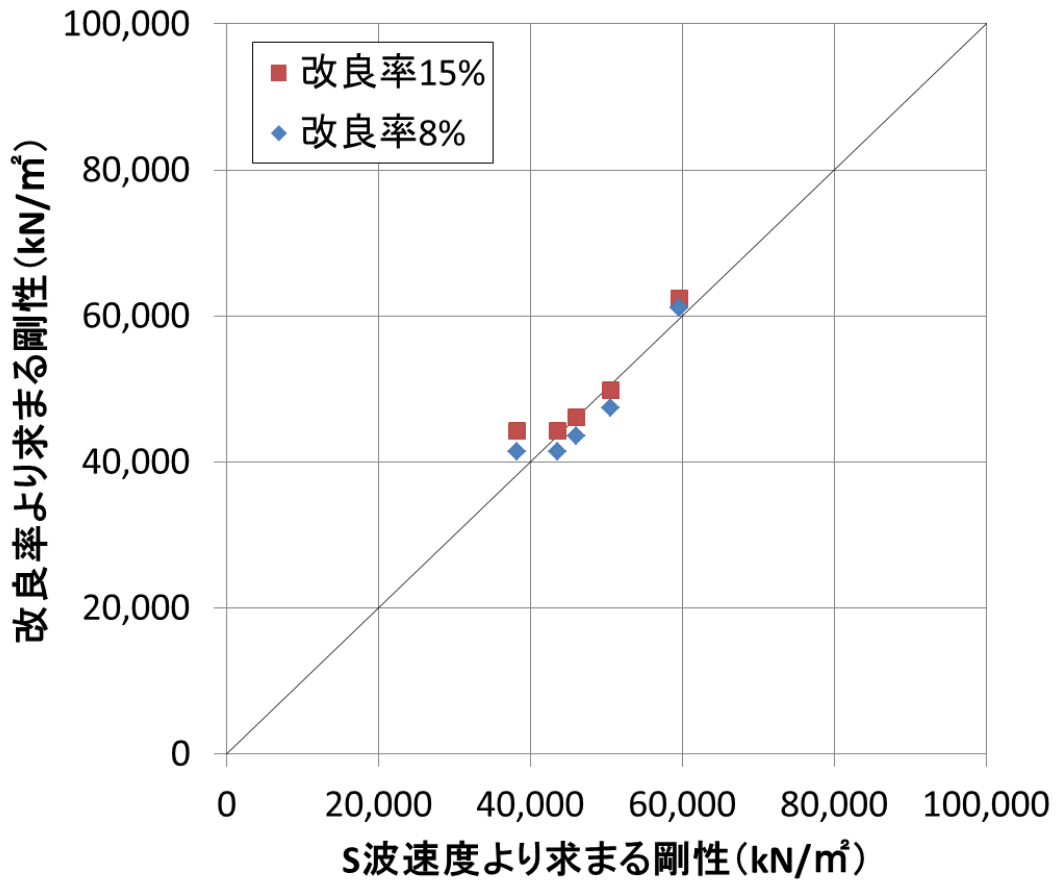


図 4. 1. 1-2 B地区の複合地盤（地盤改良後粘性土）の剛性比較

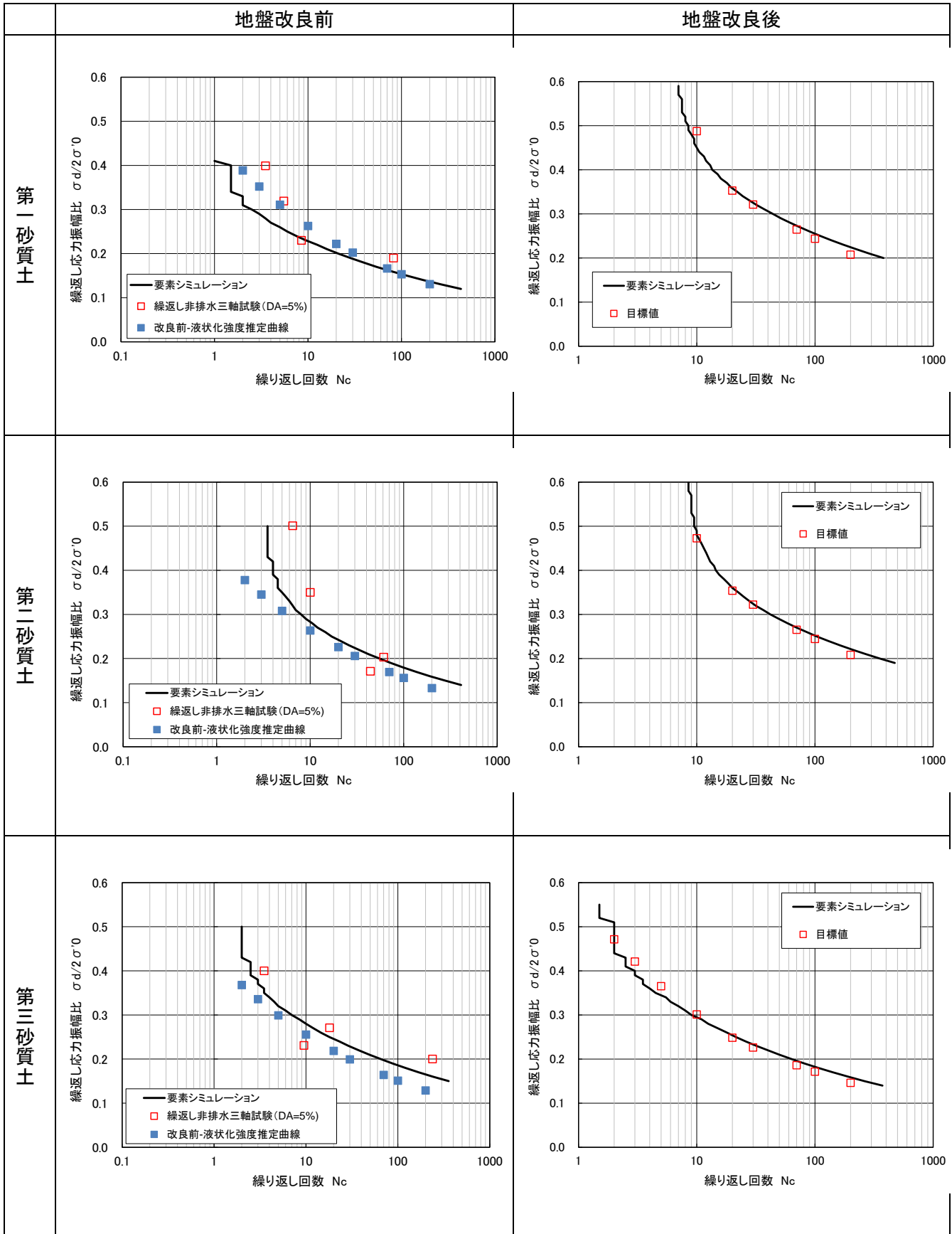


図4. 1. 1-3 要素シミュレーション結果

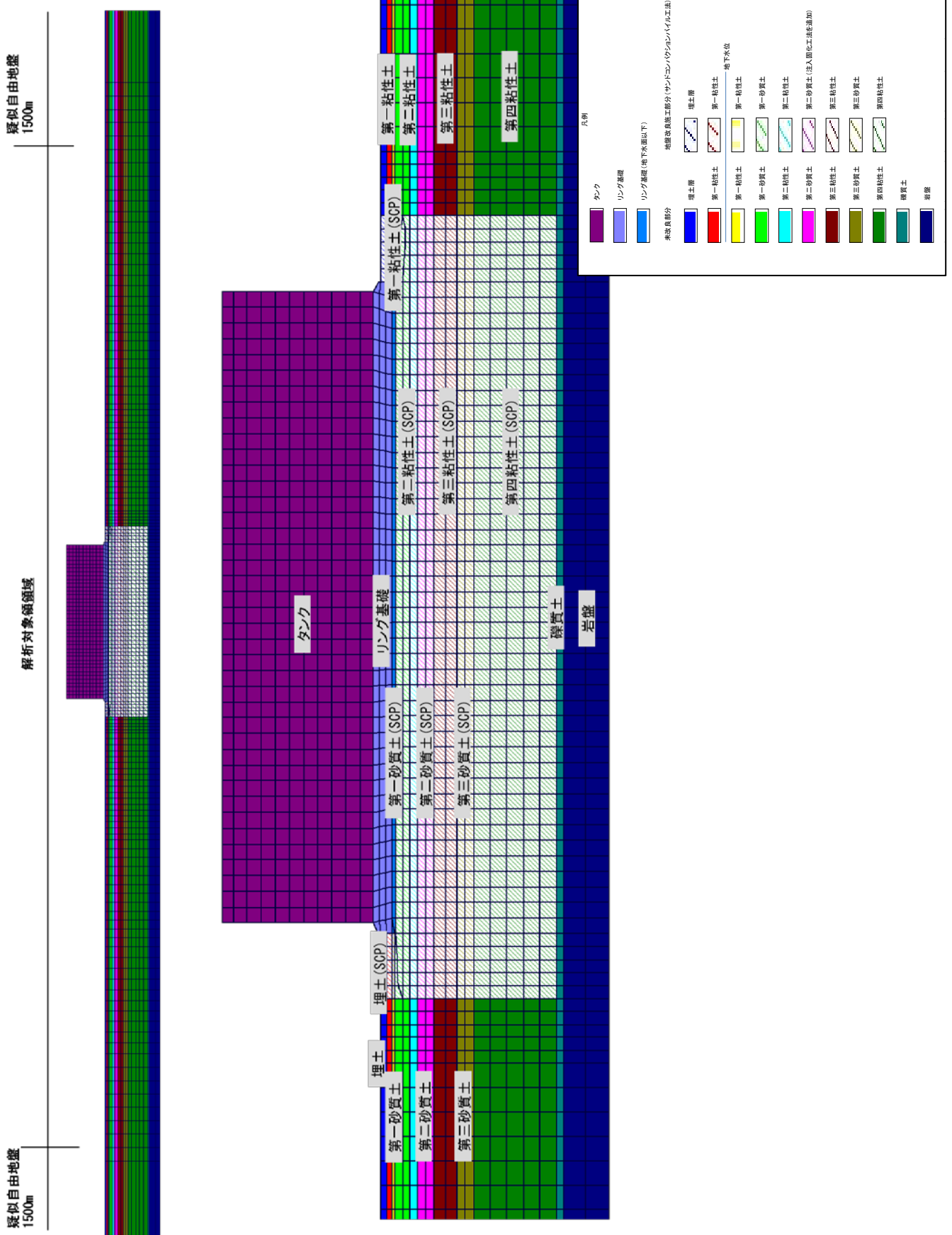


図4. 1. 1-4 解析メッシュ図 (B地区)

4. 1. 2 E地区

E地区において設定した地盤モデルについて表4. 1. 2-2に示す。

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E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。

【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。

E地区では、ボーリング調査結果の孔内水位よりGL-3mに設定した。よって、地下水位以下の基盤となる礫質土までが解析対象となる。

なお、E地区の地盤は、地表から砂層と礫層が互層状になっており、盛土層と第一砂質土・第二砂質土層が解析対象層と考えられる。

【地盤改良】

E地区の地盤は、液状化対策の地盤改良として動圧密工法が施工されている。B地区と同様に地盤改良前後の実測N値を比較して表4. 1. 2-3に示す。地盤改良前後のN値から推定したS波速度（推定S波）の倍率を土質区分毎に求めたところ、1.2~1.4倍程度となった。

ここで、B地区と同様の手法により推定S波から解析定数を設定することも可能であるが、E地区ではPS検層が実施されており、地盤改良前のS波速度が把握（検層S波）されている。この推定S波と検層S波は、概ね一致しているが、図4. 1. 2-1に示したように推定S波は一定のバラツキのある値であり、一般的には検層S波は精度が良いとされている。本検討では、地盤改良効果を把握できるのはN値のみであったため、推定S波よりS波速度の変化を把握したうえで、より精度の高い検層S波に乗ずることで地盤改良後の定数を設定した。

なお、E地区については、粘性土層が存在しないため複合地盤の考え方からは除外される。また、液状化対策として動圧密工法を採用しているため、均質に施工されている想定のもとN値から推定したS波速度より剛性 (G_0) を屋外貯蔵タンク本体の直下及びその周辺10mの範囲に設定した。

【基礎部分】

解析において土構造物として設定する盛り土基礎部分については、十分に締め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、基礎部分の設定を行う。

【屋外貯蔵タンク本体部分】

屋外貯蔵タンク本体部分の物性値については、表3. 1-2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。

【繰返し応力振幅比】

図4. 1. 2-2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(2002)に従って算出したものを青塗、赤の白抜きは周辺の繰返し非排水三軸試験(DA=5%)の値を示す。この二つの値を参考に、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. 2-4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。解析地盤メッシュ図を図4. 1. 2-3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. 2-1に示すとおりである。

表4. 1. 2-1 地盤改良の効果を表す各パラメータ

①	$\frac{\sigma_d}{2\sigma_0'}$	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	C	粘着力	変更なし

表4. 1. 2-2 E地区の物性値一覧表（地盤改良後の値を含む）

赤字：既往資料等により設定した物性値

深度 (m)	土層	平均 N値 改良前⇒後	湿潤密度 $\rho_t(\text{g/cm}^3)$	間隙比 e	細粒分 含有率 Fc	内部 摩擦角 $\phi'(^{\circ})$	S波速度 $V_s(\text{m/sec})$ 改良前⇒後
3.5	盛土 (礫・砂) B	10⇒29	1.90	0.6	11	40	180⇒260
4.7	砂質土 As1	12⇒21	1.88	0.9	16	34	220⇒260
10.0	礫質土 Ag	20⇒33	2.10	0.6	8	40	220⇒260
14.5	砂質土 As2	12⇒21	1.80	0.9	30	35	190⇒230
18.4	砂質土 As2下部	12⇒21	1.94	1.27	20	36	190⇒230
	礫質土	50	2.00	—	—	—	380

設定した工学的基盤面

表4. 1. 2-3 E地区における地盤改良前後のN値とS波速度の比較

土層	実測N値の平均		N値から求めた S波速度 (m/s)		S波速度の比 地盤改良後/地盤改良前	PS 検層による S波速度 (m/s)	
	改良前	改良後	改良前	改良後	k	改良前	改良後※
盛土	10	29	170	246	1.4	180	260
礫質土	20	33	218	257	1.2	220	260
砂質土	12	21	182	219	1.2	190	230
粘性土	5	8	171	203	1.2	190	230

※改良前S波速度×k

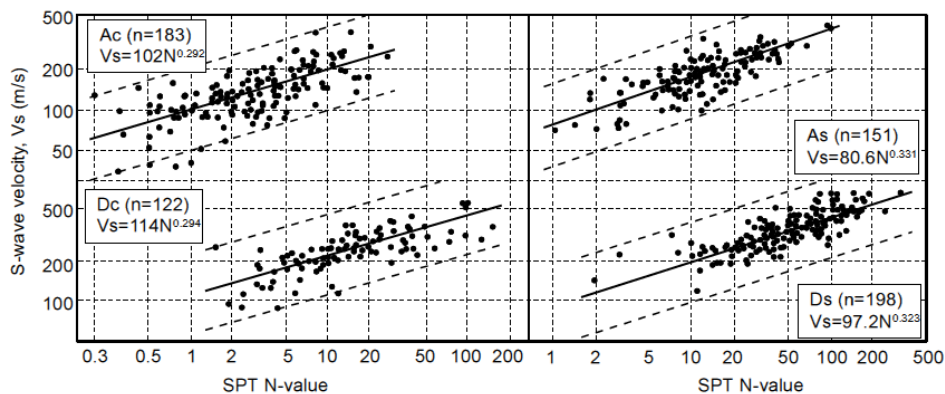


図4. 1. 2-1 Vs-N値関係（計測値と経験式）の例

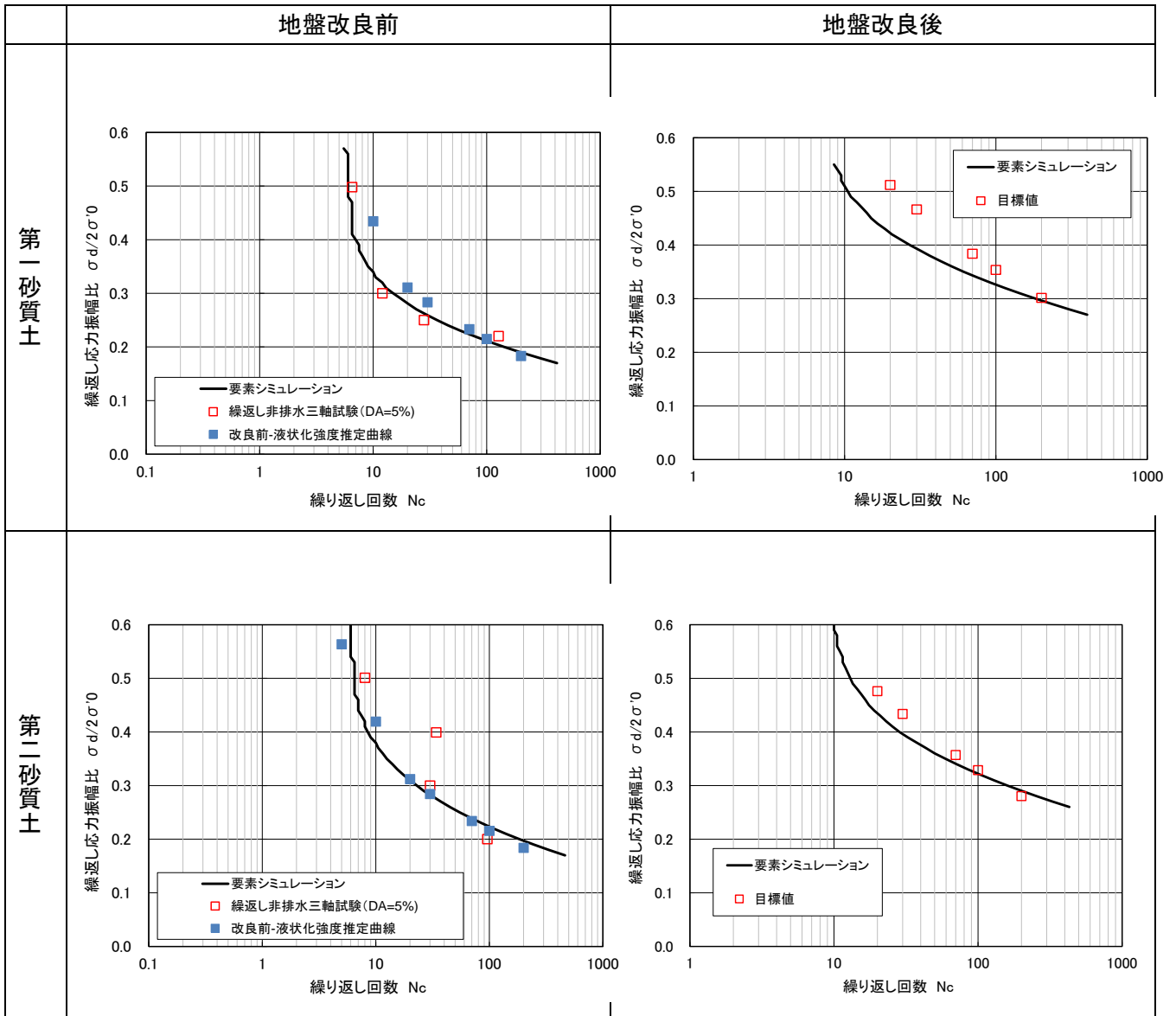


図4. 1. 2-2 要素シミュレーション結果

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。

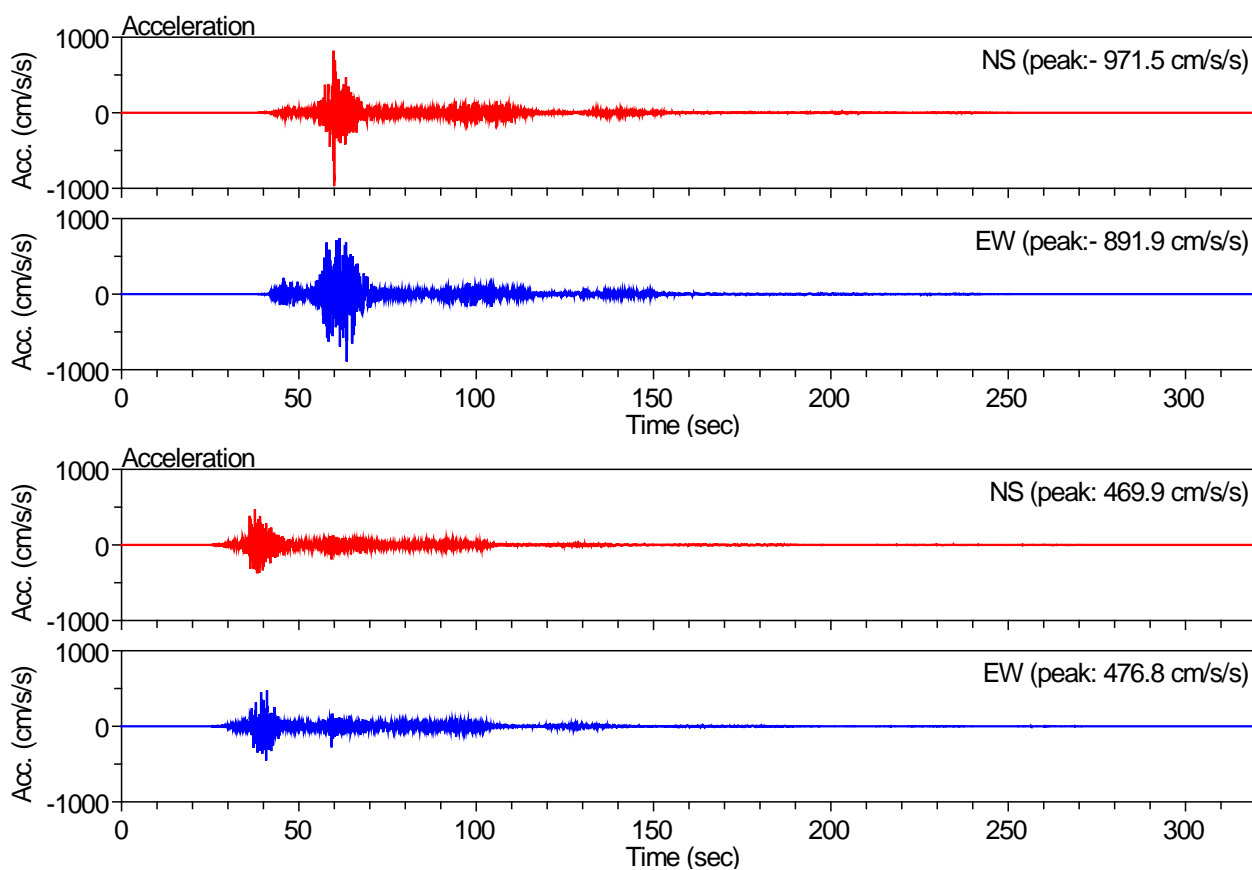


図4. 2-1 工学的基盤面における加速度波形（上：B地区、下：E地区）

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. 1-1～2に示す。

(1) B地区

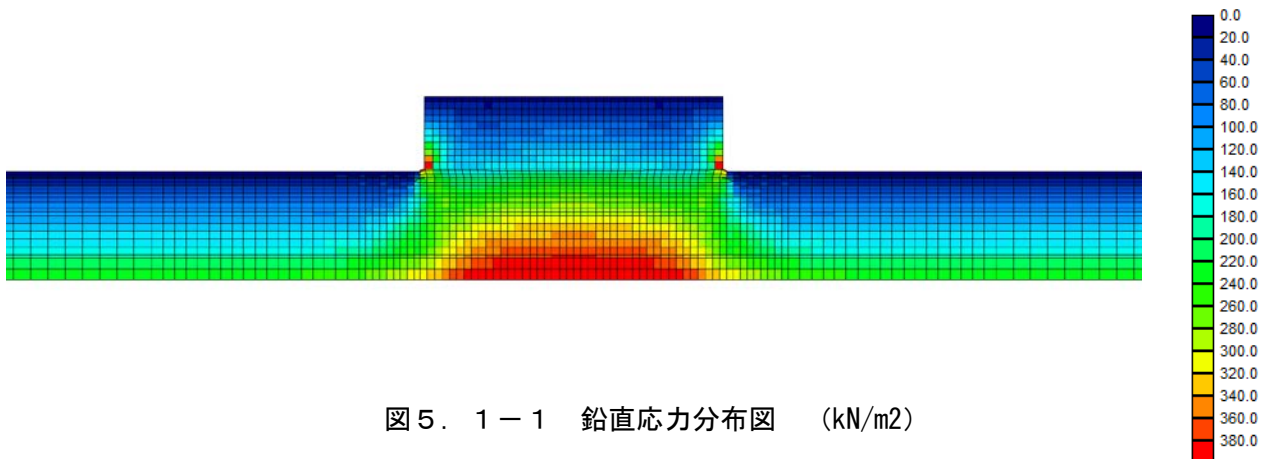


図5. 1-1 鉛直応力分布図 (kN/m²)

(2) E地区

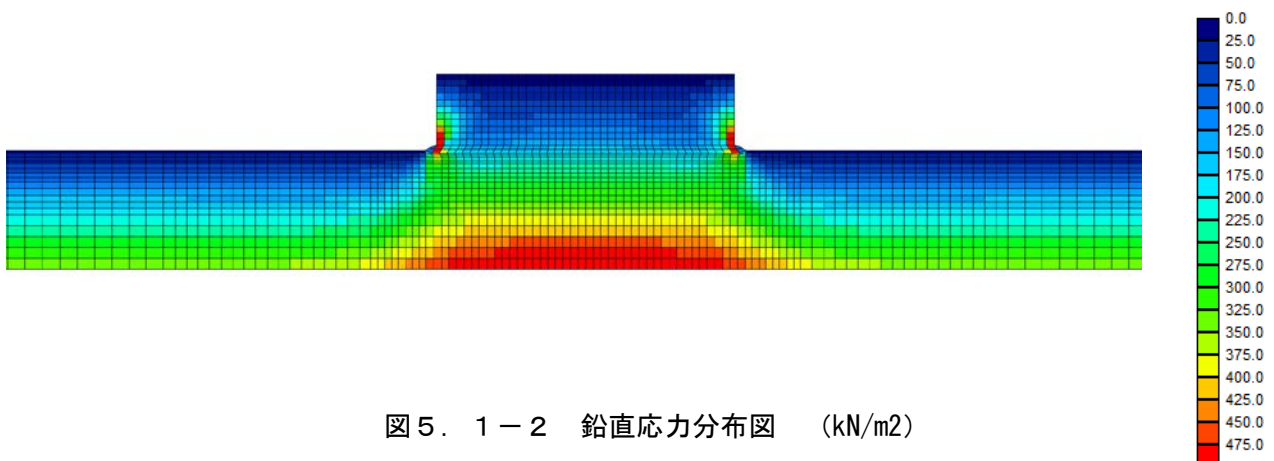


図5. 1-2 鉛直応力分布図 (kN/m²)

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. 2-1～8に示す。

B地区では、最終的に屋外貯蔵タンク本体の直下で27.7cm沈下し、その周辺の未改良地盤では12.7cm沈下することが予測された。南海トラフの想定地震動が大きいため、屋外貯蔵タンク本体の直下の地盤の変形がやや大きい結果となっている。なお、過剰間隙水圧は、各砂層で上昇が激しい結果となっているが、粘性土層に挟まれていること、各層の層厚が厚くないことから、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。

一方、E地区では、最終的に屋外貯蔵タンク本体の直下で8.9cm沈下し、その周辺の未改良地盤では、13cm程度沈下することが予測された。その差は5cm程度あるが、未改良地盤の変形に引きずられる格好で、改良地盤も変形しているが、タンク周辺10mの改良地帯が緩衝帯として働くことで、地盤が若干外側には変形するが、改良地盤が一定の沈下となり、屋外貯蔵タンク本体や基礎に影響を与えるような変形とはなっていないことが分かる。

また、 F_L 法、 P_L 法及び1次元の有効応力解析を実施した結果、B地区及びE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。

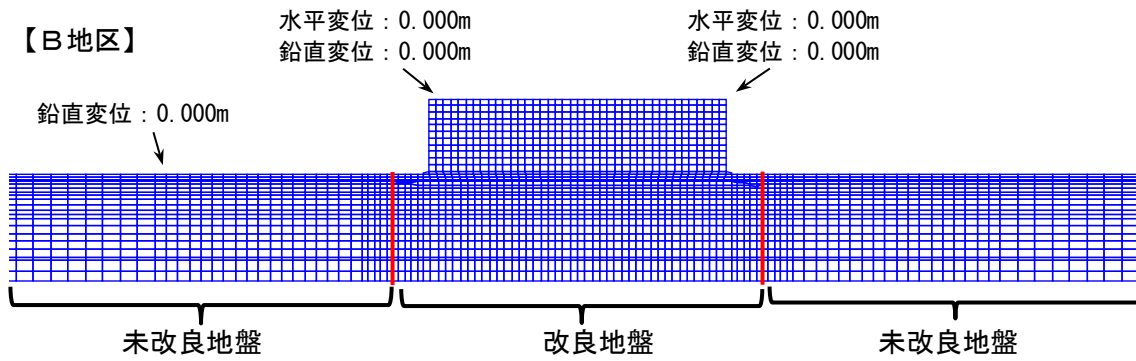


図5. 2-1 加振前(0秒後)の変形図(縦横比等倍)

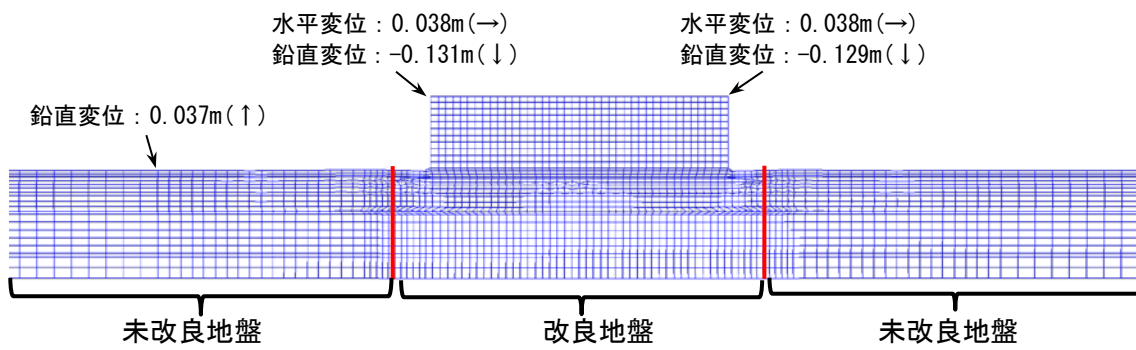


図5. 2-2 加振終了時(約170秒後)の変形図(縦横比等倍)

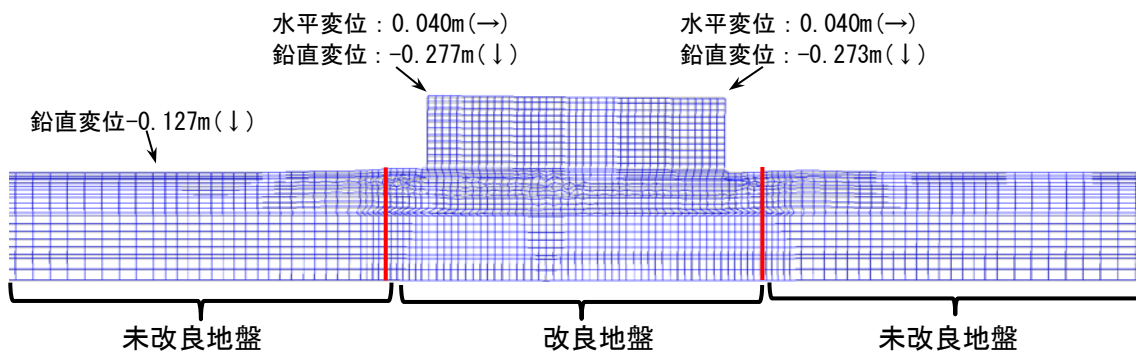


図5. 2-3 過剰間隙水圧消散後(約45日後)の変形図(縦横比等倍)

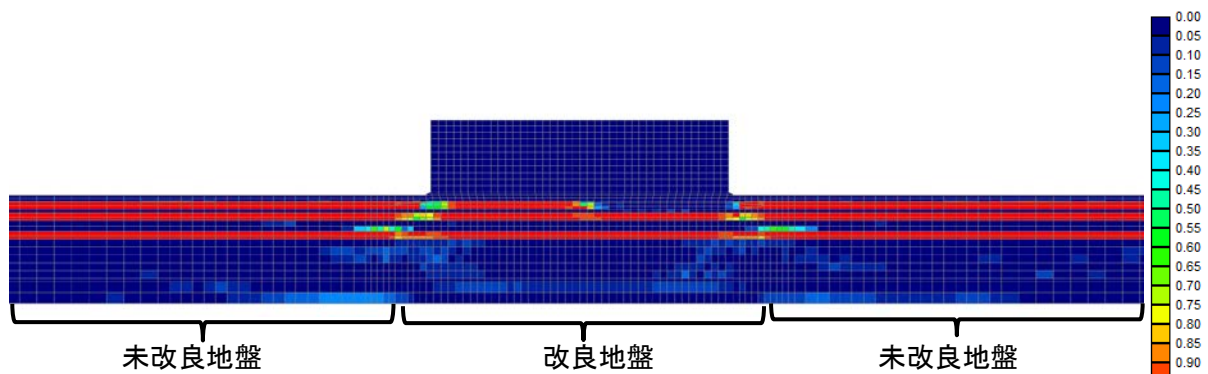


図5. 2-4 加振終了時(約170秒後)の過剰間隙水圧比分布図

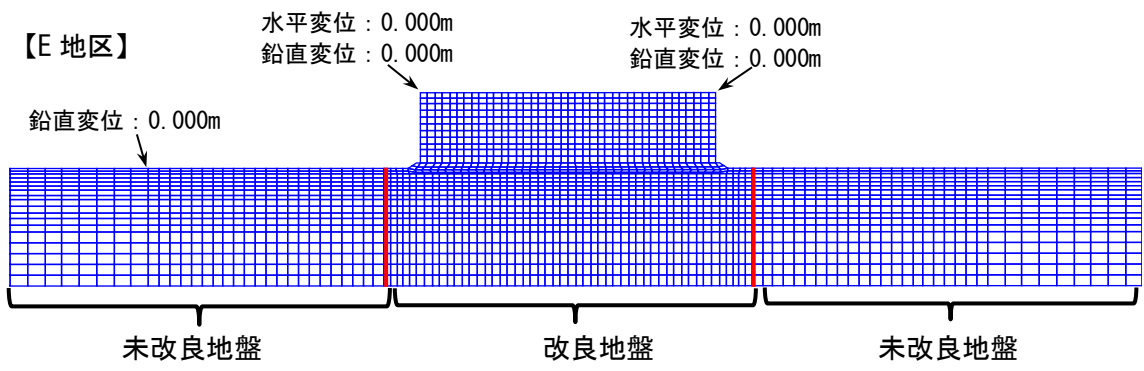


図 5. 2 - 5 加振前 (0 秒後) の変形図 (縦横比等倍)

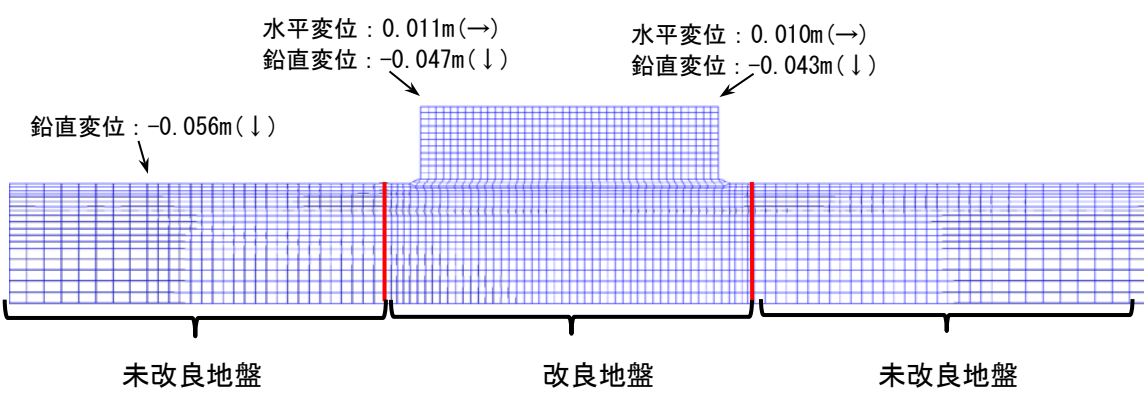


図 5. 2 - 6 加振終了時 (約 150 秒後) の変形図 (縦横比等倍)

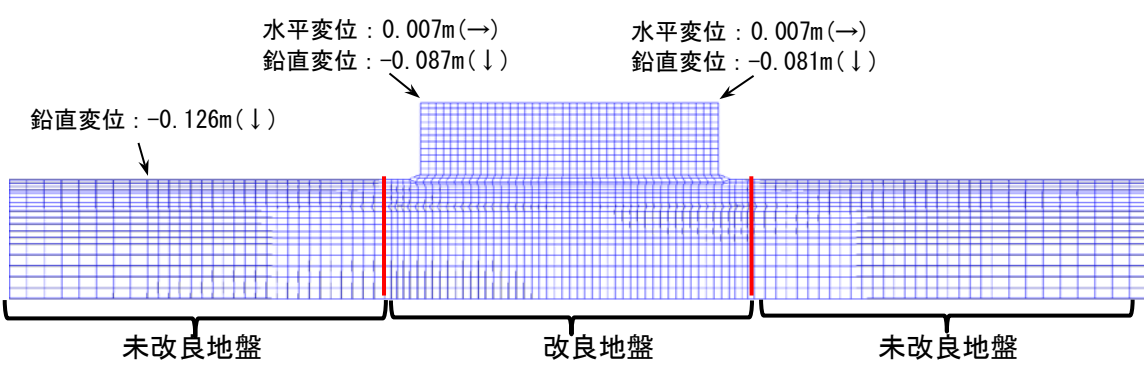


図 5. 2 - 7 過剰間隙水圧消散後 (約 2.5 時間後) の変形図 (縦横比等倍)

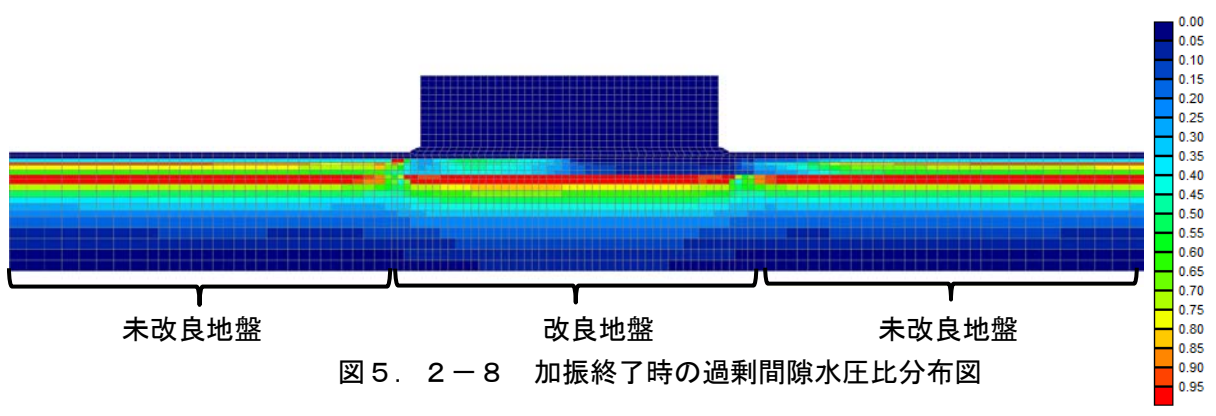


図 5. 2 - 8 加振終了時の過剰間隙水圧比分布図

6. まとめ

6. 1 解析手法等

今年度は、南海トラフ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B地区の過剰間隙水圧消散後の変形を図6. 2-1に、E地区の過剰間隙水圧消散後の変形を図6. 2-2に示す。

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27.7cm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。また、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、12.7cm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25cm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。

E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8.7cmの沈下が予測されたが、B地区と同様に一様沈下であり、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。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、12.6cm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5cm程度であり、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、B地区とE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巻末に示す。

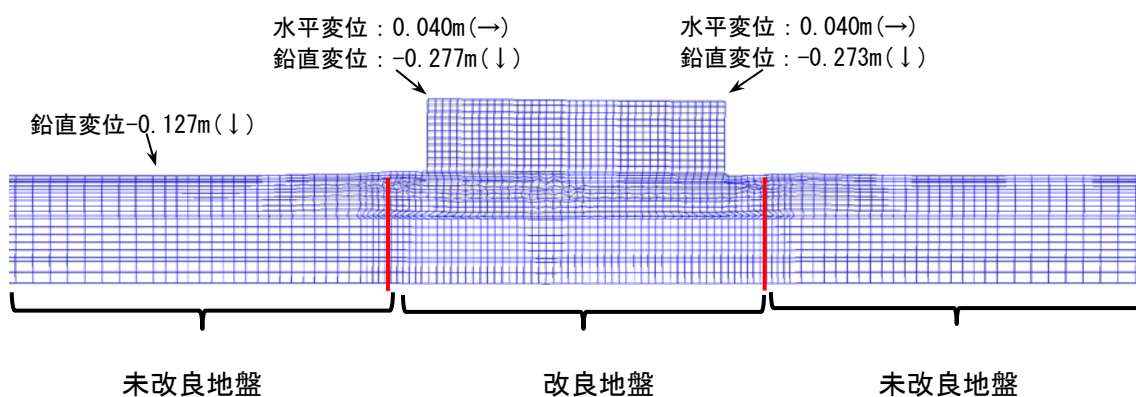


図6. 2-1 B地区の過剰間隙水圧消散後（約45日後）の変形図（縦横比等倍）

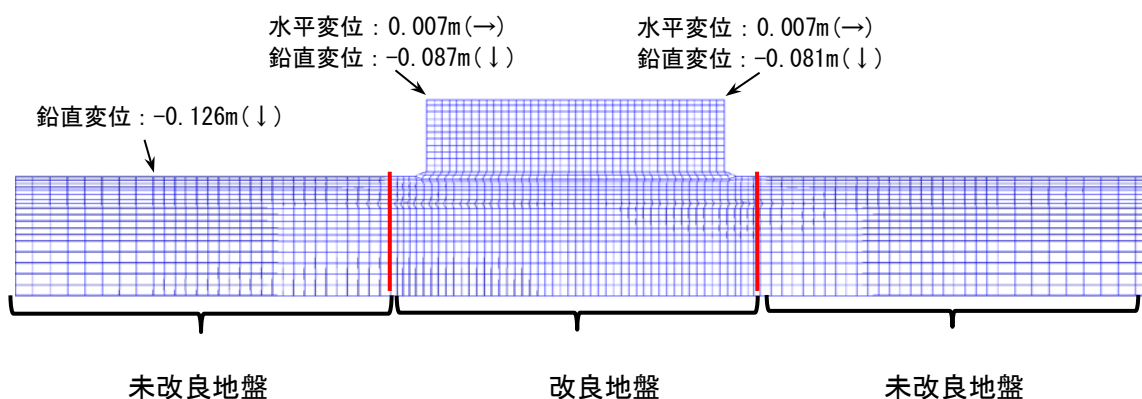


図 6. 2 - 2 E 地区の過剰間隙水圧消散後（約 2.5 時間後）の変形図（縦横比等倍）

6. 3 まとめ

南海トラフ地震に対して、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地区を選定したが、想定地震動が大きいにもかかわらず、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。

南海トラフ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 F_L 法・ P_L 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、2011¹）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、2014²）。

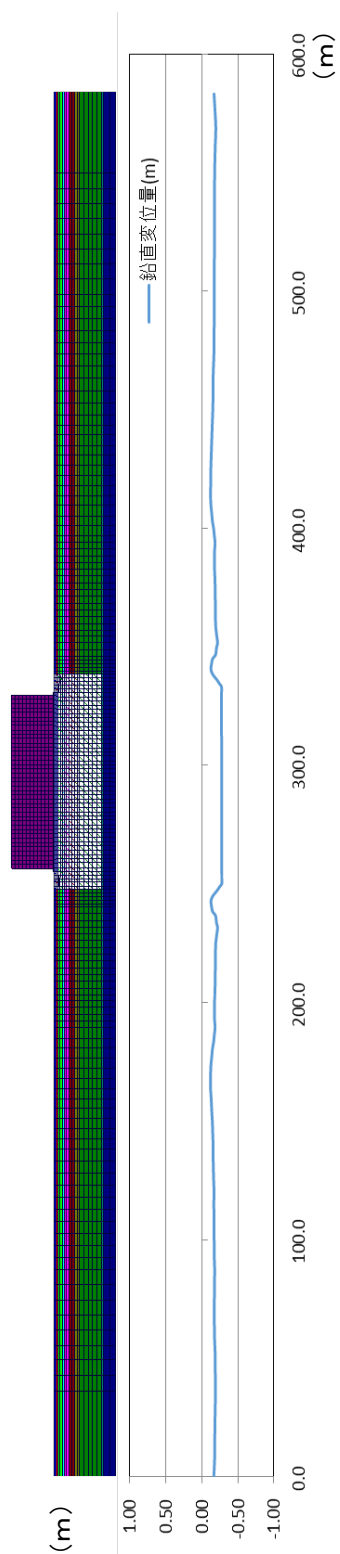
今回解析の対象としたような改良された地盤では、その締固め効果などが発揮され、実際、非排水繰り返し荷重による強度低下は、考えられているよりはるかに小さいという報告がされており、これらを適切に評価していくという課題があるが、現在研究が行われている段階である。

1 「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

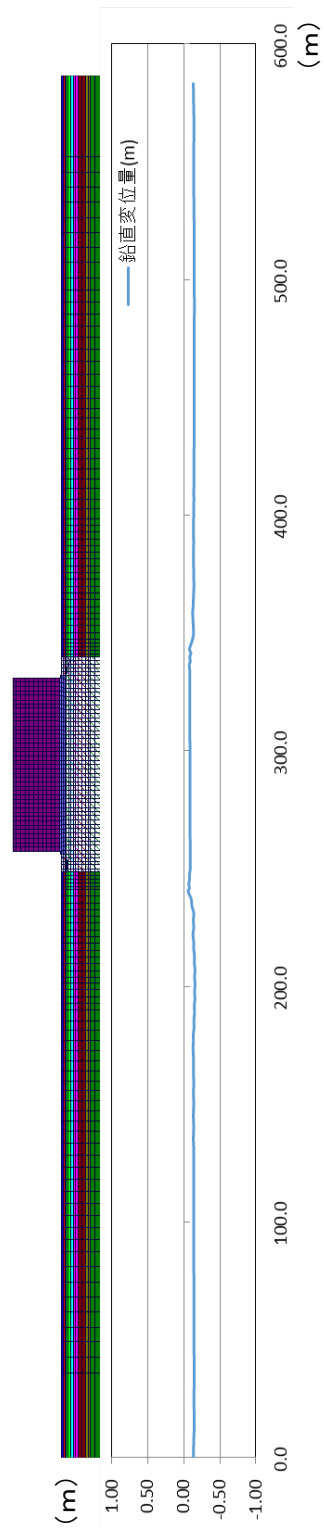
2 龍岡ほか：非排水繰り返し荷重による強度低下とひずみ軟化を考慮したニューマーク法による地震時斜面残留変位推定、地盤工学シンポジウム、2014.5

【参考資料】

B地区及びE地区について、南海トラフの想定地震を入力した地盤解析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の詳細を参考図1及び参考図2に示す。ここでは、屋外貯蔵タンク本体の中心から水平方向に300mの範囲における鉛直変位量を水色線で示す。



参考図1 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（垂直方向を30倍に強調）



参考図2 E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（垂直方向を30倍に強調）