

首都直下地震に対する基礎・地盤の解析（中間報告）

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。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。

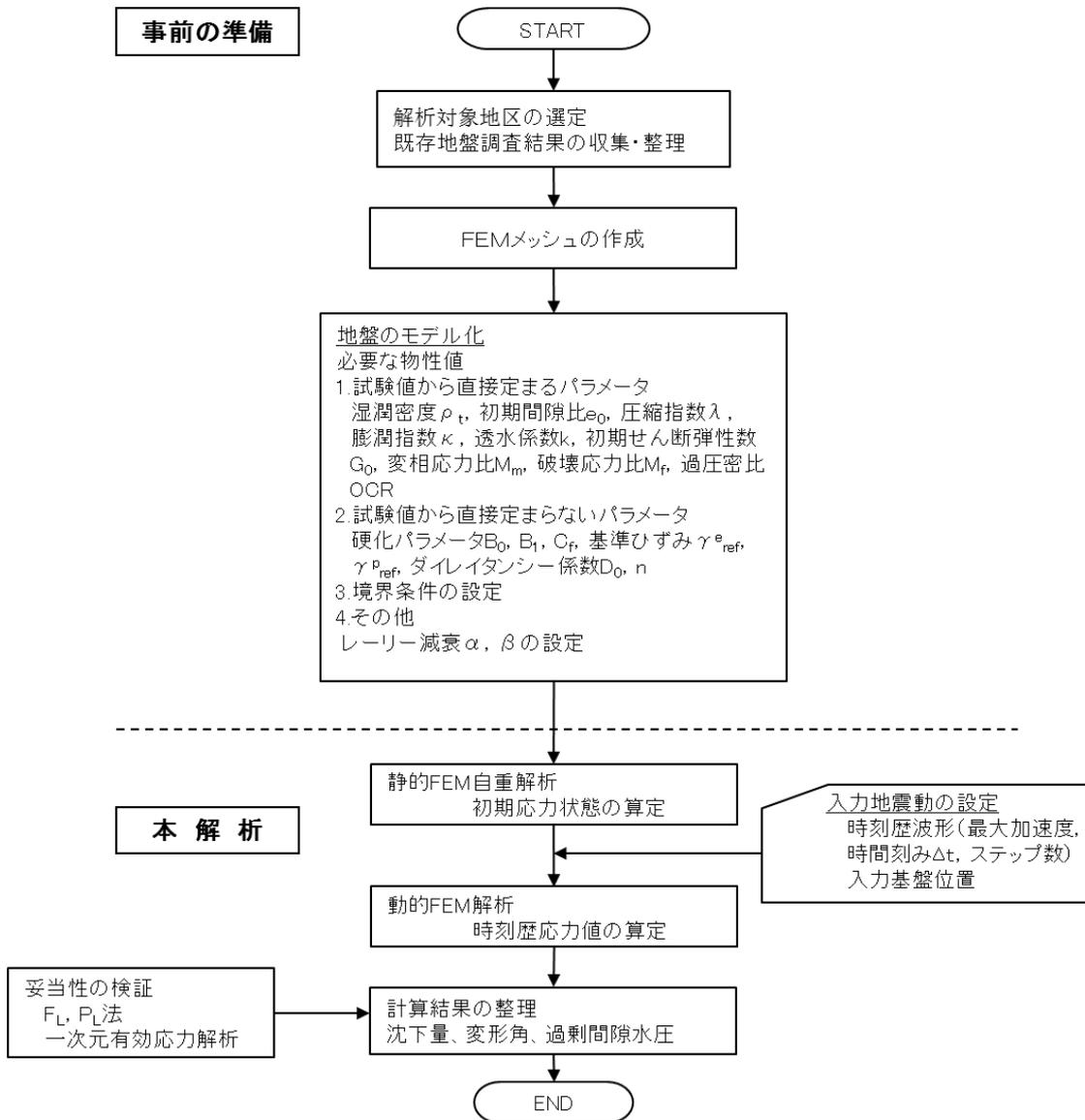


図 1.1-1 解析の流れ

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を選定する

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 \leq 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)	バイブロパイル他	サンドパイル他	バイブロパイル他
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	厚生	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	厚生	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	砂	3
			第一粘性土層	シルト	1
	第 三 紀	鮮 新 世	岩盤層	砂質泥岩	50

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A地区についてリング基礎、B地区においては盛り土基礎を設定する。

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
A 地区	深層混合
	バイブロパイル
	バックドレイン
	バイブロフローテーション
	バイブロフローテーション
	バイブロフローテーション
	バイブロフローテーション
	サンドドレイン
	バイブロパイル
	バイブロパイル
	サンドコンパクションパイル
	バンブロコンポーザパイル
	改良なし
	改良なし
	サンドコンパクションパイル
サンドコンパクションパイル	
B 地区	サンドパイル
	サンドパイル
	バンブロコンポーザパイル
	サンドパイル

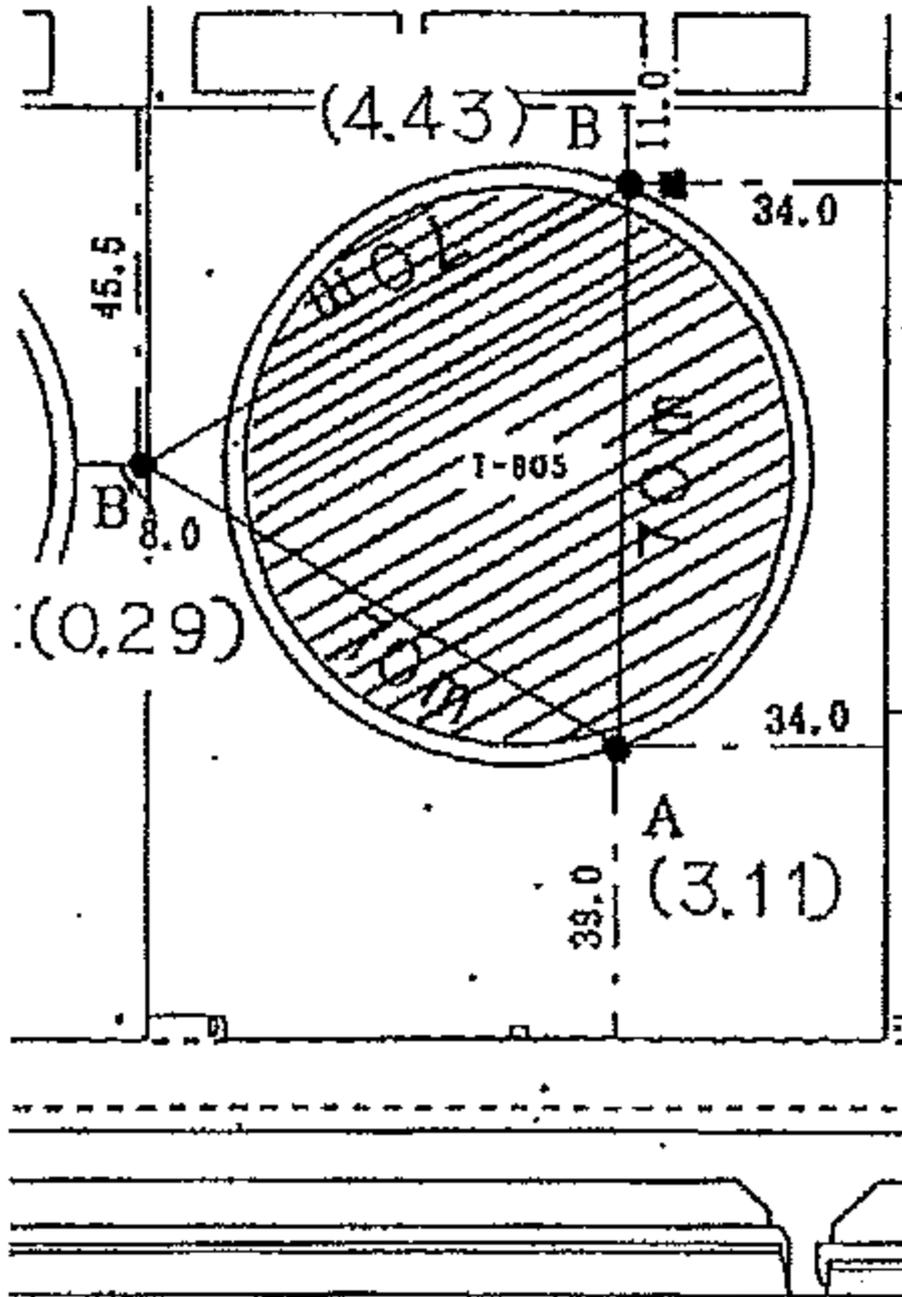


図3. 2-2 B地区での改良後の地盤調査位置

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	コア鑑定者
現場代理人	試験機	ボーリング責任者
孔口標高 RP +2.89m	角 180° 上 90° 下 0°	方 北 0° 西 270° 南 180°
地盤勾配 水平0°	使用機種	エンジン
総掘進長 20.4m	Y S O - 1 H	ハンマー 落下用具 トンビ
	三菱 X F - N E	Y B M S P - 4 0

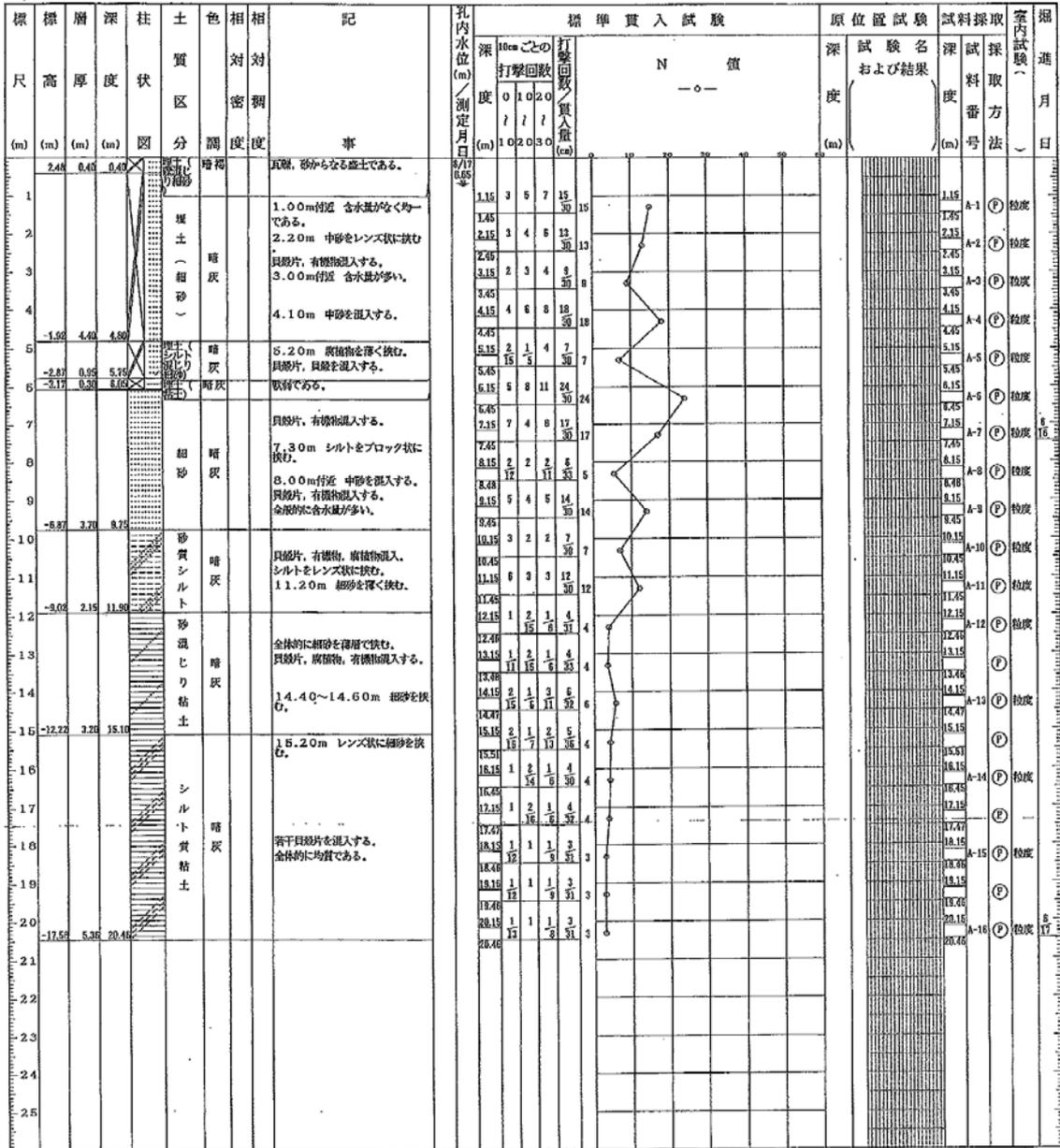


図3. 2-5 A地区での改良後の地盤結果例③

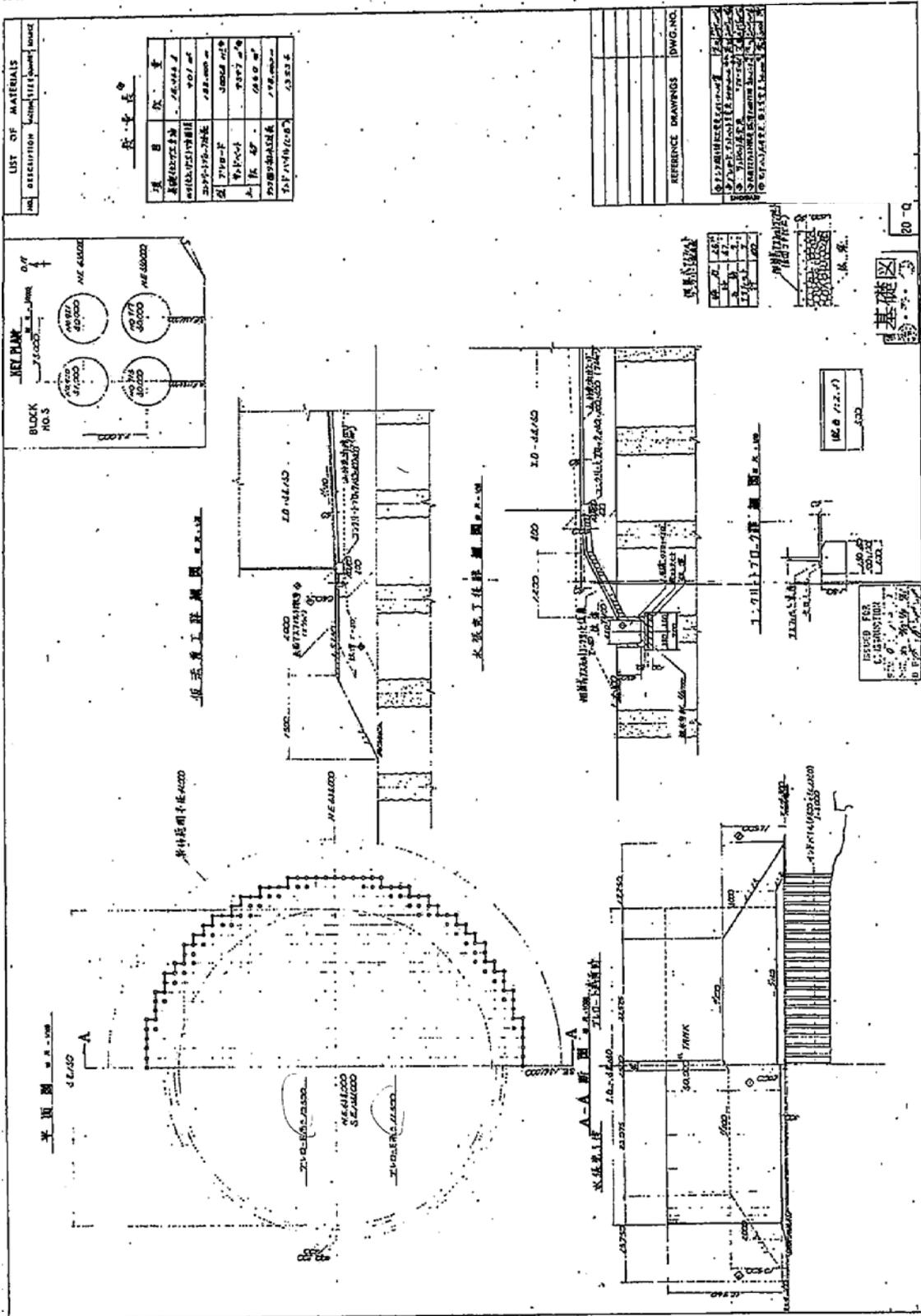


図3. 2-6 B地区での地盤改良事例

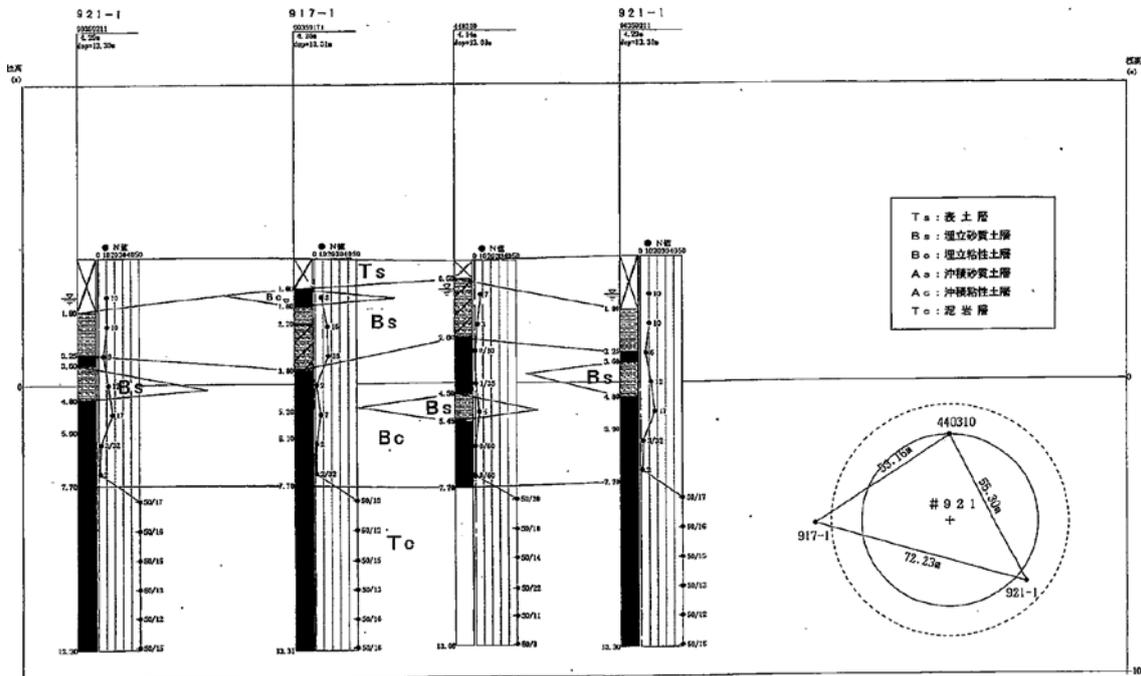


図 3. 2-7 B地区での改良後の地盤調査・断面例

〈地質断面図 A地区

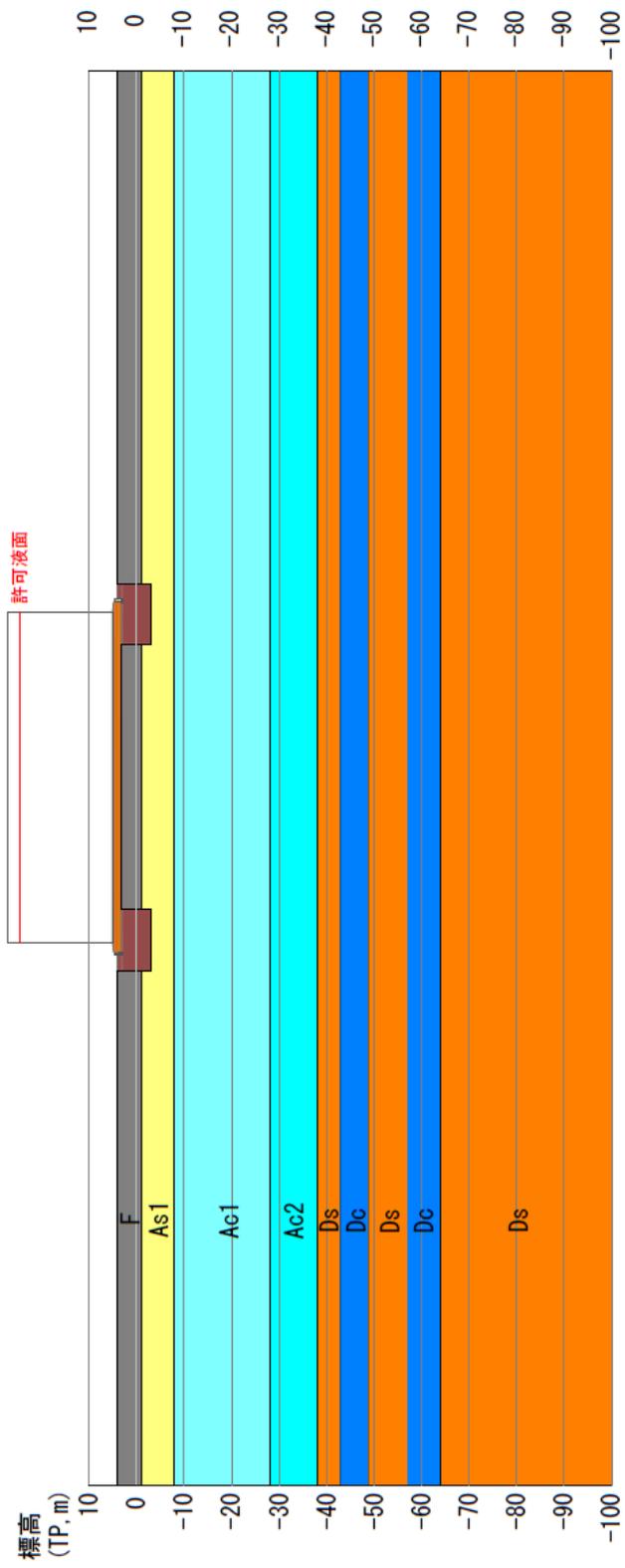


図3. 2-8 A地区の二次元動的変形解析用断面

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、断面の切り方にもよるが、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、2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に示す。

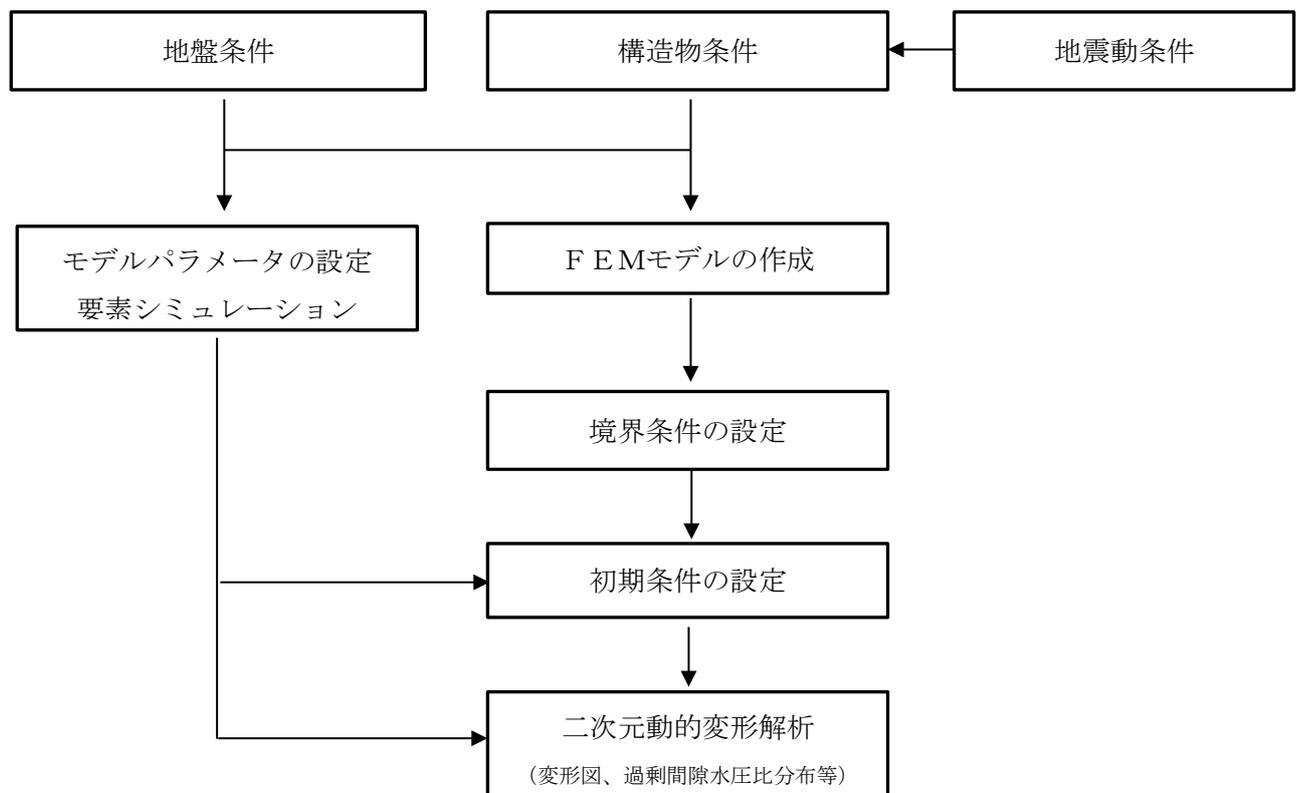


図4-1 断面2次元解析の流れ

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

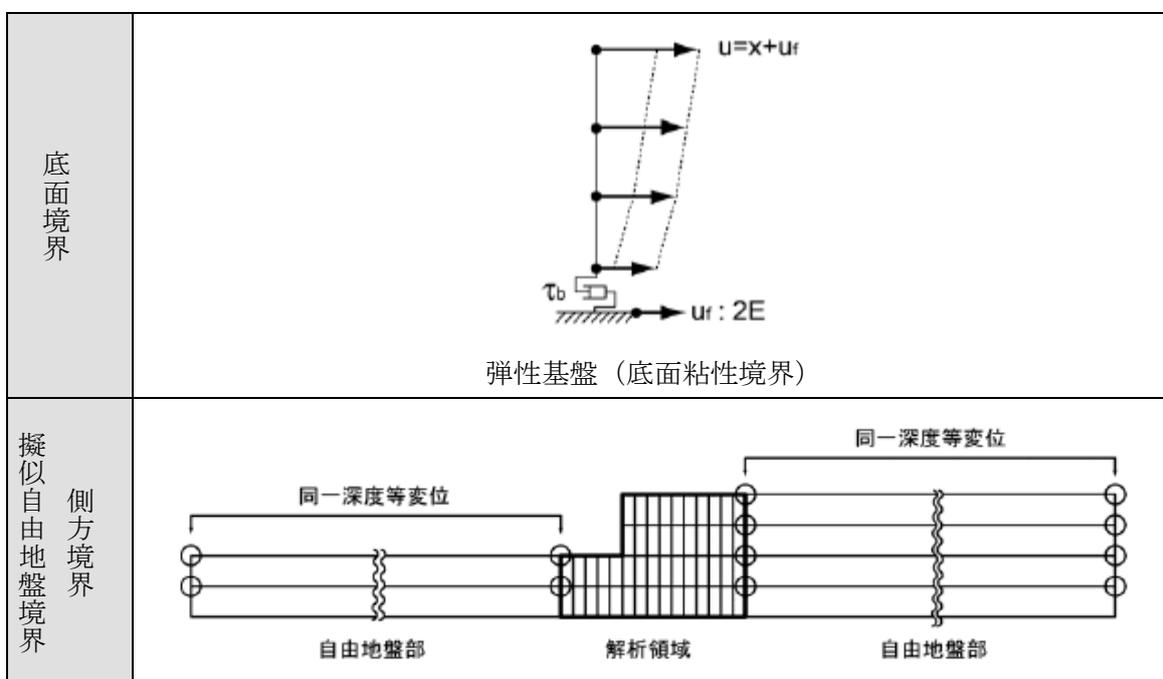
条件項目	条件内容
バージョン	LIQCA2D16(2016 公開版)
地盤モデル	液状化層:砂の繰返し弾塑性モデル 非液状化層:修正 R-O モデル
解析領域	150m の領域
境界条件	底面:粘性境界(ρ Vs, Vp) 側方:疑似自由地盤(1500m)の同一深度等変位境界とする
レーレー減衰	1次元線形地盤の第1次固有振動モードに対して、小さな減衰定数(1.0%)を与えるように設定 $\alpha_6=0.0$, $\alpha_4=0.002$
Newmark の β 法	$\beta=0.3025$, $\gamma=0.6$
解析時間間隔	$\Delta T=0.002$ (入力地震波の時間間隔 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

京浜臨海地区、根岸臨海地区ともに、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する。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：（図4-1.1、4-1.2）

なお、本検討では平成26年度の検討手法を基本に、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化を行った。

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、地震動による影響を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。

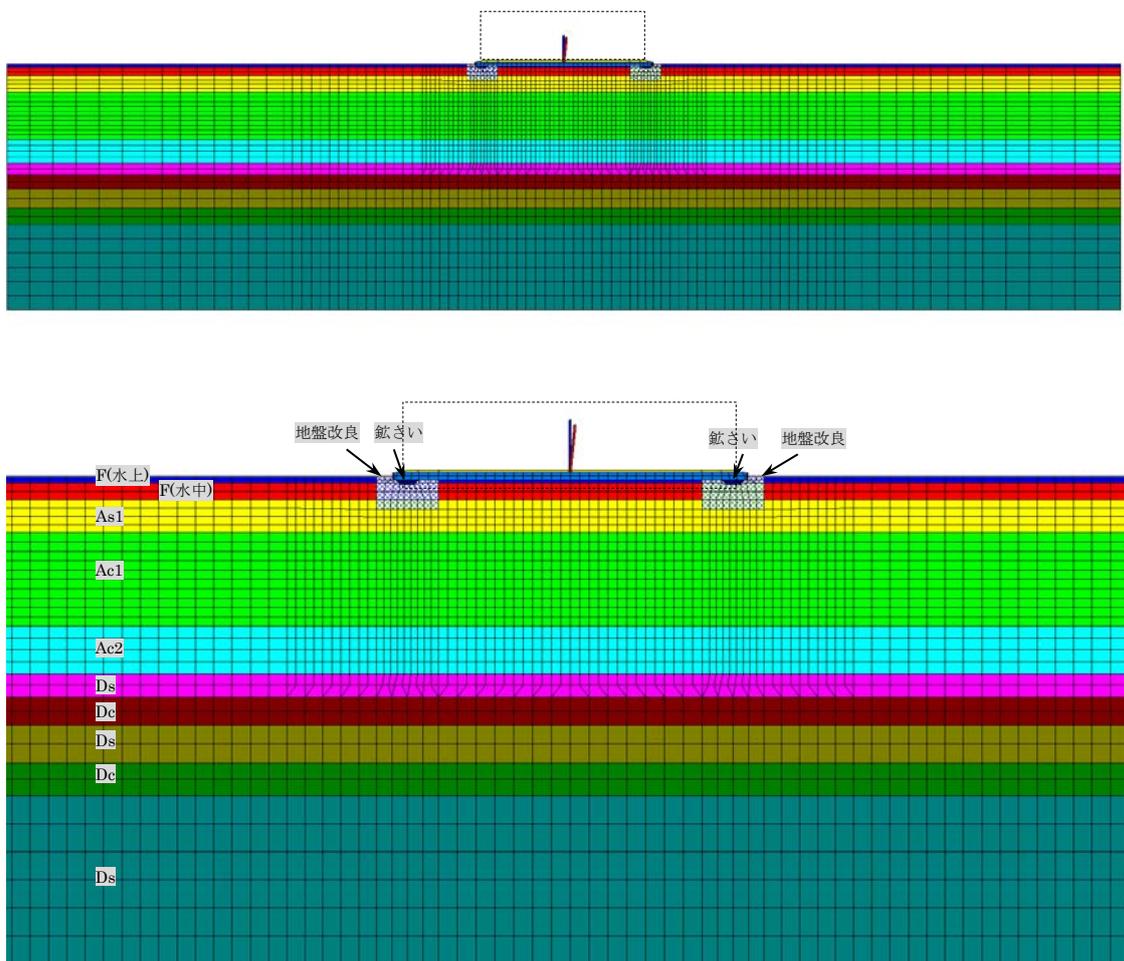


図4-1.1 A地区解析地盤メッシュ

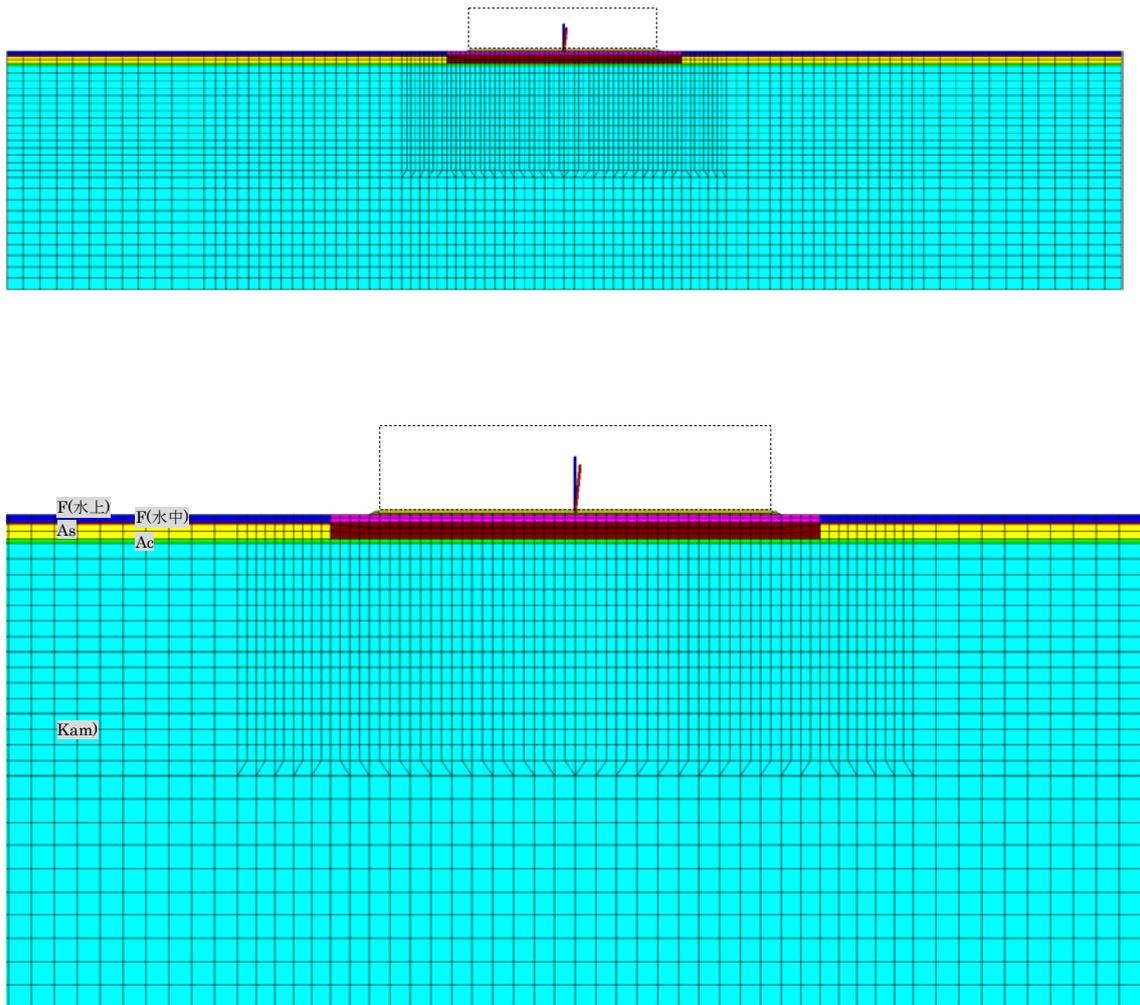


図4-1.2 B地区解析地盤メッシュ

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概説

本検討で用いる「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²（以下、本手法と称する）」は龍岡らにより提唱され、ため池などの安全性検討に使用されている手法である。本手法は、地震時の液状化による変形を土の剛性劣化・強度劣化を考慮した応力ひずみ関係で簡易的に模擬する手法であり、有効応力動的 FEM 解析と比較すると以下の点があげられる。

- ・本手法は、全応力解析である。
- ・有効応力動的 FEM 解析は、時刻歴を追って解析を実施するため、より詳細に現象を把握できる反面、高度な専門知識がないと実施が難しく、構成則の違いや解析者の技術的な力量によって結果が左右される可能性がある。一方で、本手法には構成則がなく、実際の土質試験結果を直接、解析に反映させることができるため、解析者による結果の違いが小さい。

①地震応答解析

等価線形化法による断面 2 次元地震応答解析（全応力解析）を実施し、応答加速度、応答応力の時刻歴を求める。

②液状化による構造劣化・強度低下の算出 1（室内土質試験）

非排水繰返し試験を実施した直後に、非排水単調载荷試験を実施、強度低下と両振幅せん断ひずみの関係（図 1）、液状化による構造劣化を考慮した応力ひずみ関係（図 2）を求める。

③液状化による構造劣化程度の算出 2（断面 2 次元解析）

液状化による構造劣化程度は、累積損傷度の枠組みで評価する。すなわち、①で算出した応答応力の時刻歴を用い、FEM の各要素における損傷度 D およびひずみ振幅 DA の時刻歴を求め、ひずみ振幅 DA に応じて②で求めた強度低下、応力ひずみ関係を設定する。

④変形解析

③で求めた強度低下、応力ひずみ関係を用いて準静的な力の釣り合いより変形量（図 3）を求める。

² DUTTINE, Antonie, 新保, 龍岡, 矢崎: 非排水繰返し载荷による土の剛性・強度の劣化を考慮した Newmark 法と準静的 FEM による盛土の残留変形解析, 第 51 回地盤工学研究発表会 (岡山), pp.1039-1040, 2016 年 6 月.

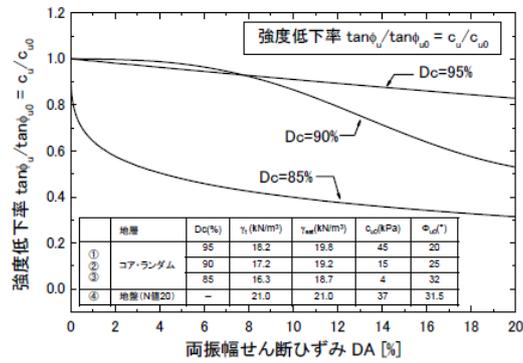


図1 強度低下率と DA の関係の例¹

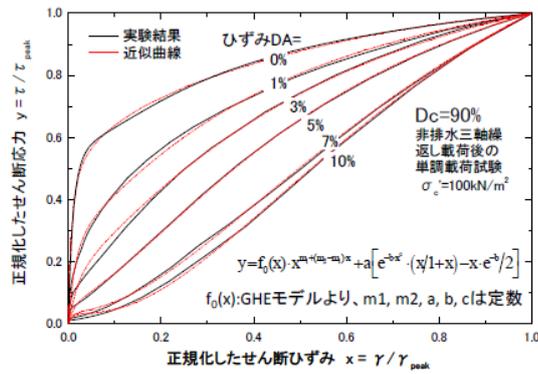


図2 構造劣化を考慮した応力ひずみ関係の例¹

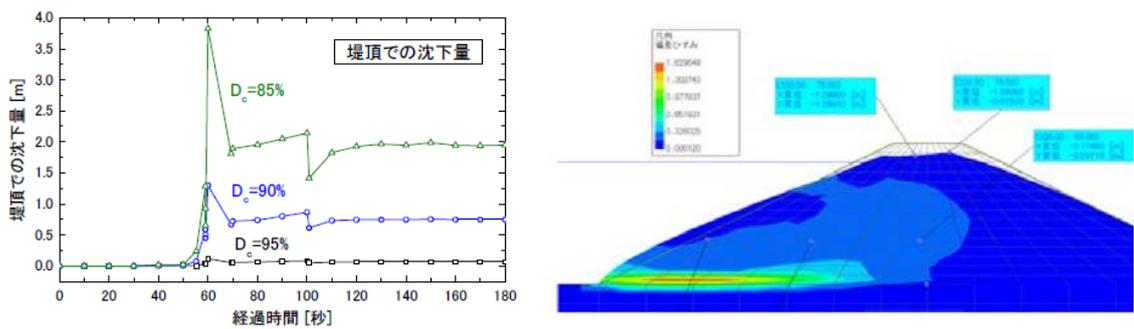


図3 計算結果例¹