

荷重を受けた基礎地盤の変位測定及び数値解析について

1 目的と概要

旧法タンクの基礎地盤の堅固さの定量的な評価方法の検討のため、水張試験時に底板および外周部の沈下計測を行うこととする。さらに沈下計測した旧法タンクに対し有限要素法を用いて沈下シミュレーションを行うこととする。

2 計測及び解析の対象とする旧法タンクと地盤条件

(1) 計測対象タンク

計測及び解析の対象とした、コスモ石油株式会社堺製油所 # 2 2 4 タンクの概要を表 2.1 に示す。

表 2.1 対象とした屋外貯蔵タンクの諸元

住 所		大阪府堺市
対象タンク		浮き屋根式タンク(シングルデッキ)
計測期間		平成 24 年 12 月～平成 25 年 1 月 (予定)
基本 寸法等	内径 (mm)	29,060
	側高さ(mm)	16,455
	最高液高(mm)	13,426
	底部勾配	1/80
	許可容量 (kl)	8,830
底部 板厚	底板 (mm)	9
	アニュラ板(mm)	12

(2) 地盤条件

当該タンクを所有するコスモ石油株式会社堺製油所は、図 2.1 に示す大阪府堺港の臨港工業地帯で堺港の西泊地に面した埋立地に位置しており、1968 年操業開始である。図 2.2 に示すように、当該タンクは、西泊地の南東角より南 150m、東 300m のところにある。

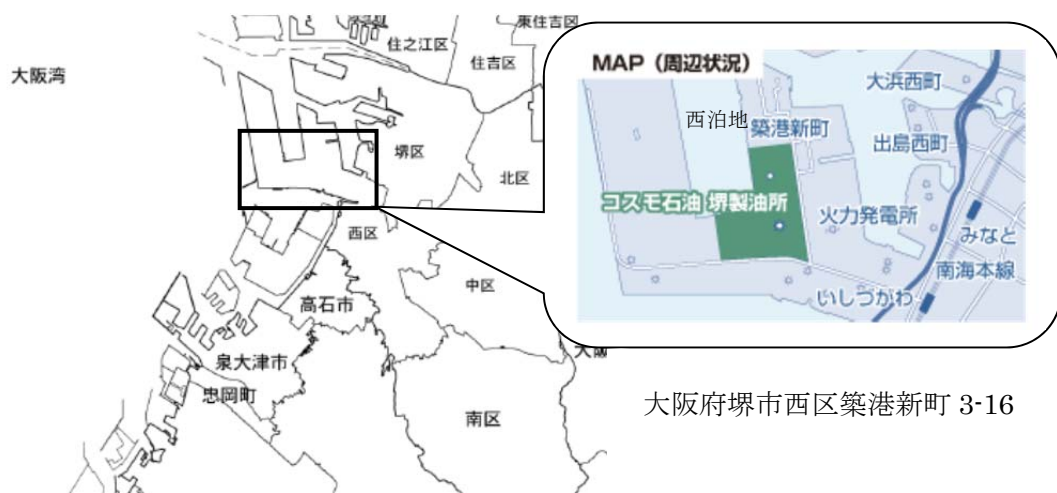


図 2.1 堺製油所の位置

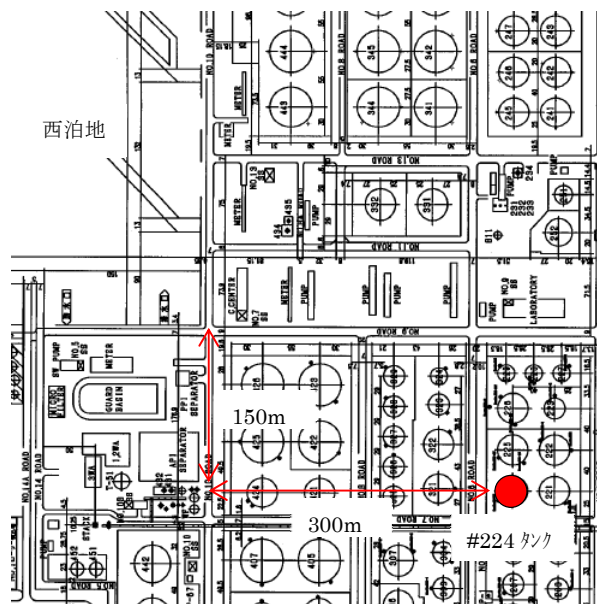


図 2.2 #224 タンク

堺製油所のタンク敷地の来歴に関しては、文献「関西石油(株)堺製油所における油タンク基礎の地盤改良 土と基礎 1971 年 11 月号」に概要が示されている。

文献によると、埋立ての時期が昭和 38 年末であり、敷地の地盤構成は、地表 OP+4.5m から-5~6m が粘土、砂の混合体の埋立層、その下 OP-12m までは粘土、砂の不規則な互層の沖積層、その下に砂礫の洪積層が存在している。これらの層は非常に軟弱なため、サンドドレーン・ウエルポイント工法を施し、載荷盛土を行い圧密を促進させた。サンドドレーンは、杭径 500mm、深さ 12m、#224 タンク基礎に対して 417 本、載荷盛土量は 3900m³ (=載荷高さ 3.5m) であった (図 2.3 参照)。タンク建設後水張り試験を実施し、さらに圧密を促進させている。平成 21 年、タンク安全性評価工事において#224 タンク近傍でボーリング調査が行われた (図 2.4~2.7 参照)。

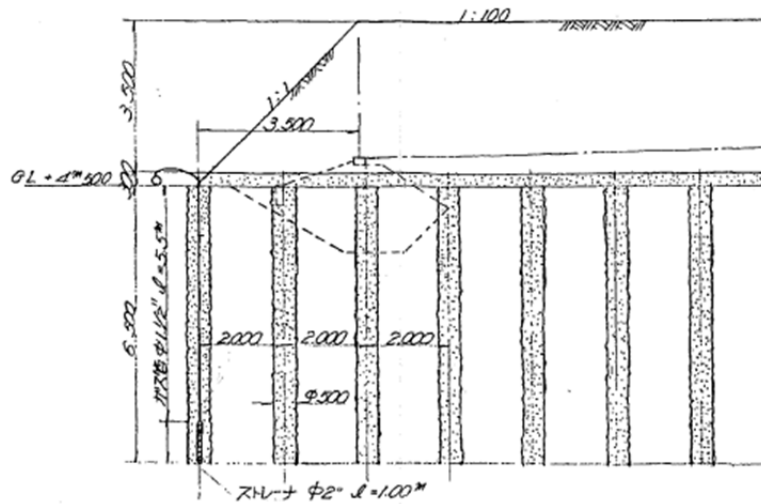
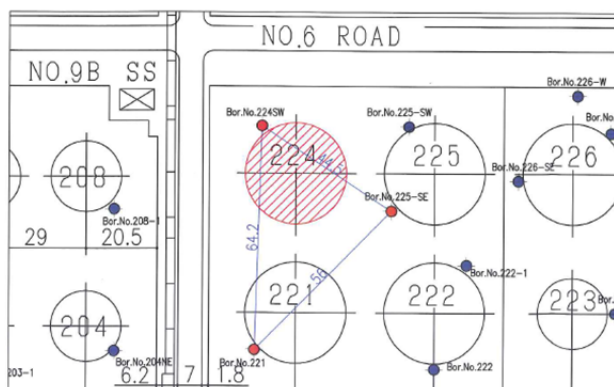
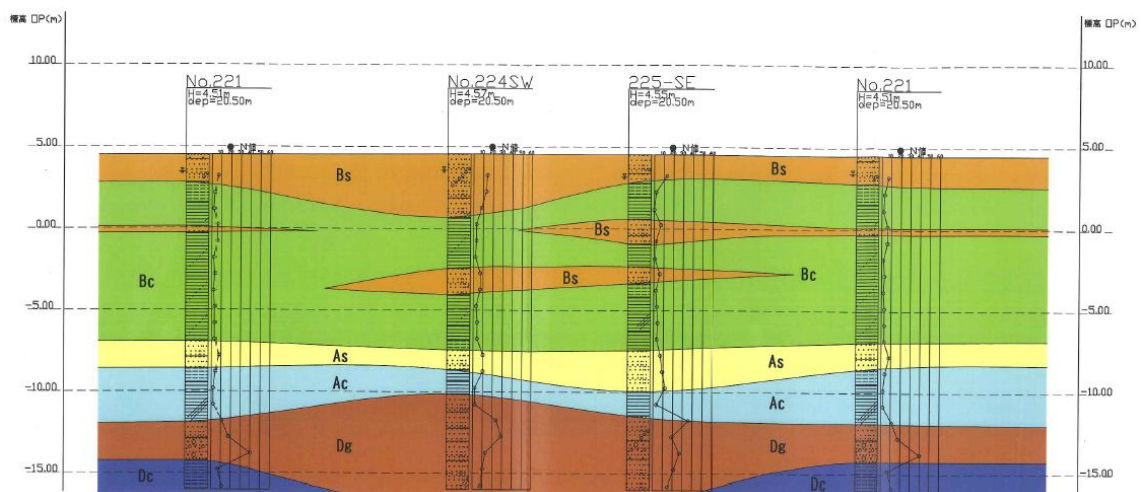


図 2.3 タンク建設時の地盤改良概要



: 対象タンク
 : 調査ボーリング地点

地層構成		
地質時代	地層名	地層記号
現世	埋立砂質土層	Bs
	埋立粘性土層	Bc
新第四紀	沖積砂質土層	As
	沖積粘性土層	Ac
	洪積礫質土層	Dg
	洪積粘性土層	Dc

図 2.4 地層想定断面図等

ボーリング柱状図

調査名

事業・工事名

ボーリングNo. 224SW

シートNo. 224SW

ボーリング名	No. 224SW		調査位置	大阪府堺市西区築港新町3-16 コスモ石油（株）堺製油所構内				北緯	
発注機関					調査期間	平成21年8月18日～21年8月19日		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	OP +4.57m	角 度	180° 上 90° 下 0°	方 向	北 0° 270° 西 180° 南 東	地盤勾配 鉛直 水平 0° 90°	使用機種	試錐機 OK-II	ハンマー 落下用具 ポンプ
総掘進長	20.50m						エンジン NFD9-K		自動落下装置 SP-8

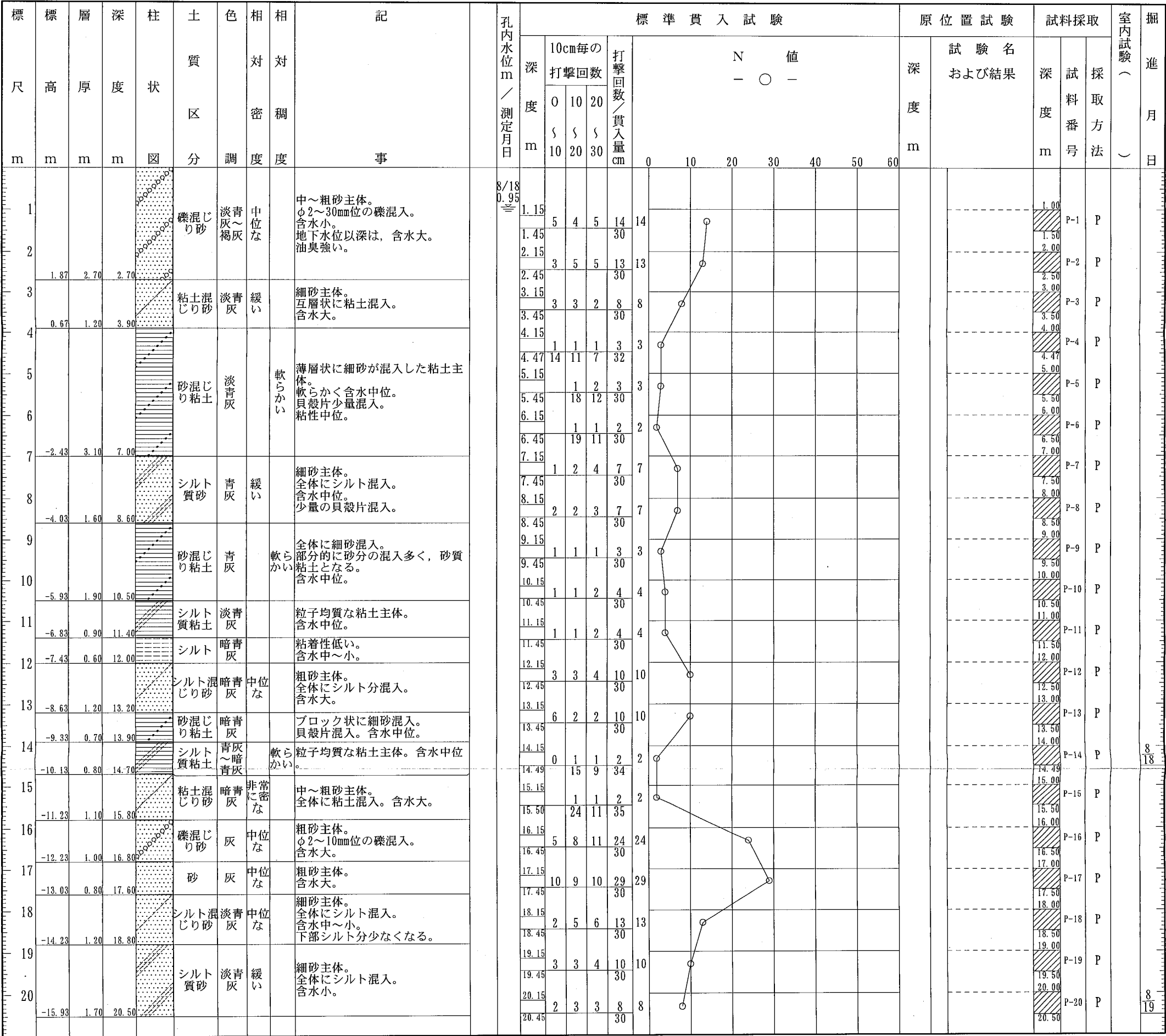


図2.5 ボーリング柱状図 (No. 224SW)

ボーリング柱状図

調査名

ボーリングNo. 221

事業・工事名

シートNo. 19002221

ボーリング名	No. 221	調査位置	大阪府堺市西区築港新町3丁コスモ石油株式会社堺製油所構内				北緯	34° 34' 10.9"
発注機関		調査期間	平成19年5月28日～19年5月29日				東経	135° 26' 0.5"
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	OP +4.51m	角	180°上 90° 0°下	方	北 0° 270°西 90°東 180°南	地盤勾配	水平 0° 鉛直 90°	使用機種
総掘進長	20.50m	度		向				試験機
								エンジン
								KR-SH
								ハンマー落下用具
								自動落下装置
								NFAD-7L
								ポンプ
								V5-P

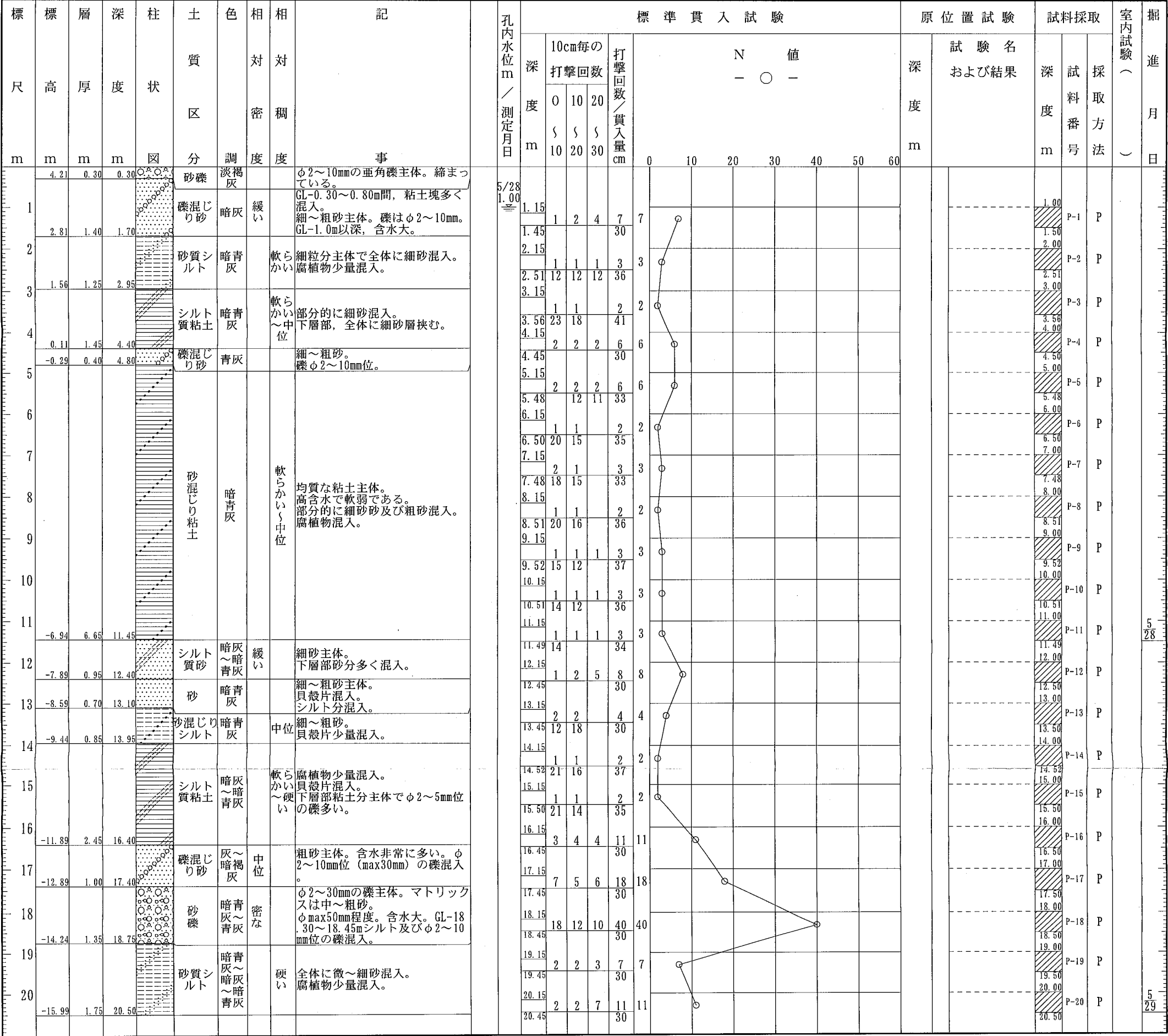


図2.6 ボーリング柱状図 (No. 221)

ボーリング柱状図

調査名

事業・工事名

ボーリングNo. 225-SE

シートNo. 18046

シートNo. 18046

ボーリング名	225-SE			調査位置	大阪府堺市西区築港新町3-16コスモ石油堺事業所構内						北緯		
発注機関							調査期間	平成18年7月11日～18年7月12日				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	OP +4.55m	角	180° 上 90° 下 0°	方	北 0° 270° 西 180° 南 90° 東	地盤勾配	水平 0° 鉛直 90°	使用機種	試錐機	D0-D		ハンマー 落下用具	自動落下装置
総掘進長	20.50m	度		向				エンジン	NFAD7-K		ポンプ	V6-B	

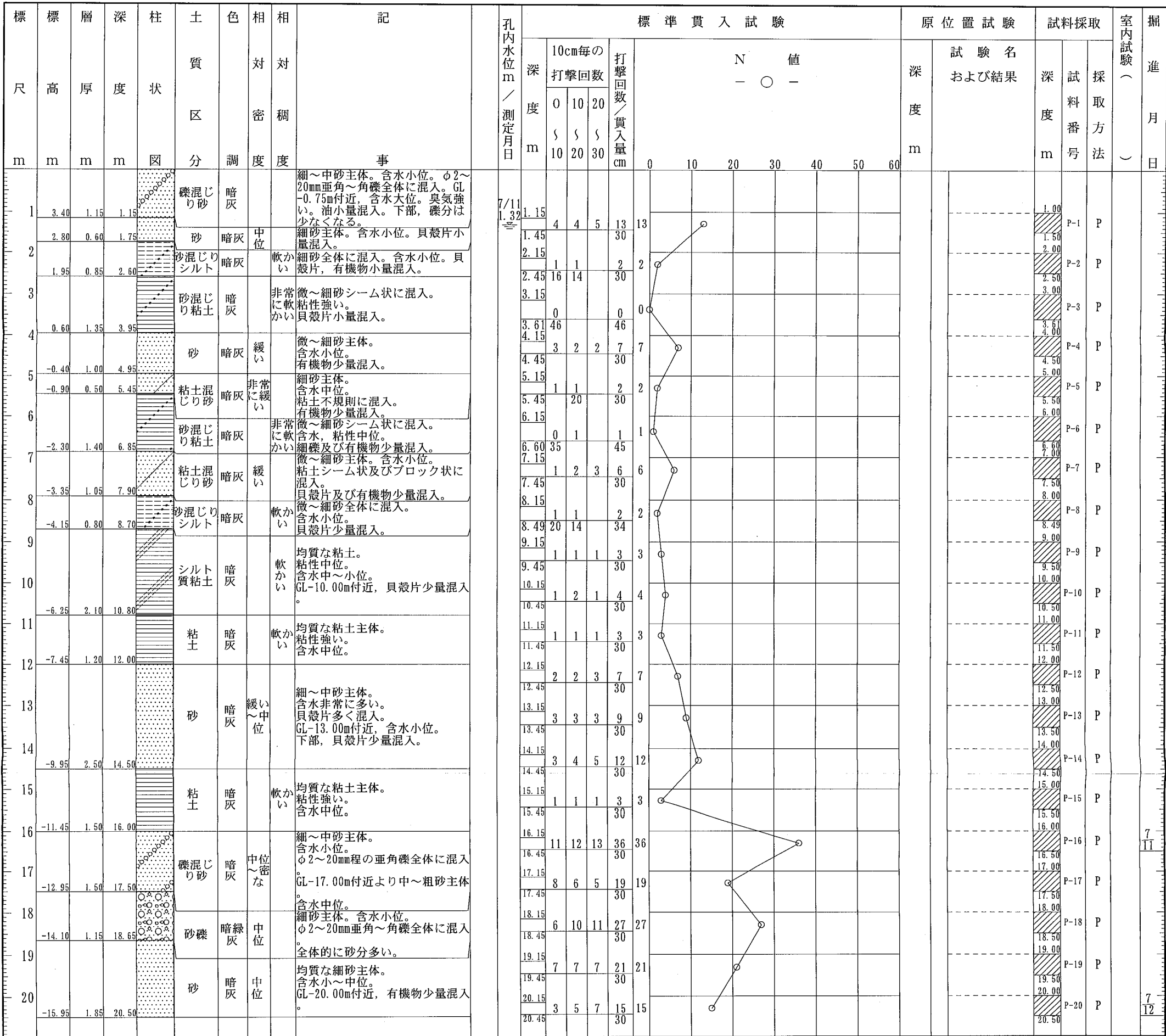


図2.7 ボーリング柱状図 (No.225-SE)

3 水張試験時における基礎地盤の沈下量計測について

水張試験時の側板外周部およびタンク内底板の沈下量計測について以下の要領で実施する。

(1) 側板外周部の沈下量計測概要

側板外周部の沈下量測定は、危険物の規制に関する規則第 20 条の 10 第 1 項第 1 号の側板最下段の水平度の測定と同様に、屋外タンク側板最下段に設置済みの沈下測定ピースを用いた水準測量により沈下量測定を行う。

(2) タンク内底部の沈下量計測概要

タンク内に水張りを行った影響により発生するタンク内底板の変形(沈下)量を計測するため、浮き屋根上に存在する孔を利用した計測を実施する。

測定は、レベル測量によりタンク内壁に設置した、仮ベンチマークの標高を基準として、底板から浮き屋根までの鉛直距離を計測する。この鉛直距離は、予めタンク内底板に設置した鋼製巻き尺を浮き屋根上に引き上げ、水準測量とレーザーレベル装置による測定から標高を求め、水張り前との標高差を沈下量とする。

測定数は、浮き屋根上に存在するデッキ貫通マンホール、排水口、リムベントを利用し、合計 7 点とした。なお、ルーフサポート孔に関しては、底板部に SUS 板が溶接されており、マグネットによる吸着力が低いことや、ルーフサポートを抜く事による構造上の安全性を考慮して利用しない計画とした。

図 3.1 に対象タンクの底板沈下量計測位置（7 箇所）と側板外周部の沈下測量位置（16 箇所）を示す。

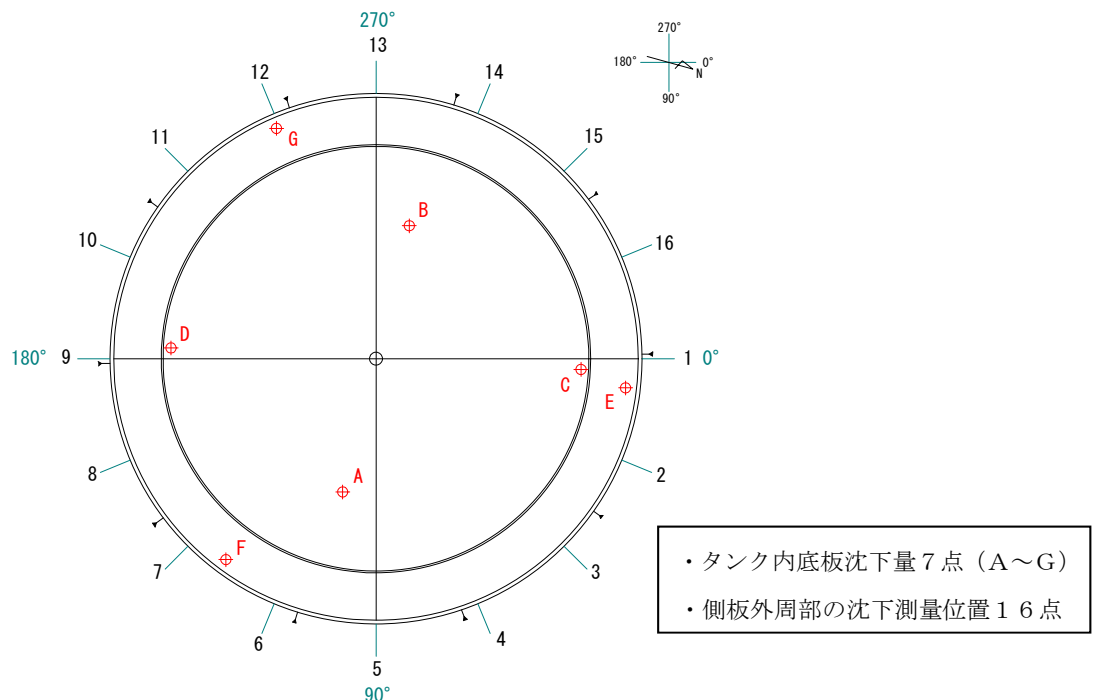


図 3.1 タンクの側板外周部及びタンク内底板の沈下量計測位置

(3) 沈下量計測方法

対象タンク内への水張り水位と沈下量計測の関係を図 3.2 に示す。

試験時の沈下量計測は、水位を増加させる条件(①～④)と水位を減少させる条件(④～⑦)の計 7 CASE を計画し、注水時と排水時に計測する水位は同レベルとする。

図 3.3 に水張り試験時の沈下量計測概念図と各距離記号について示す。

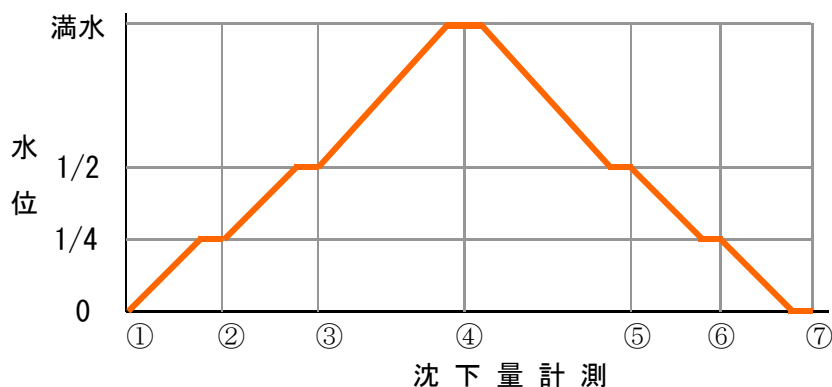
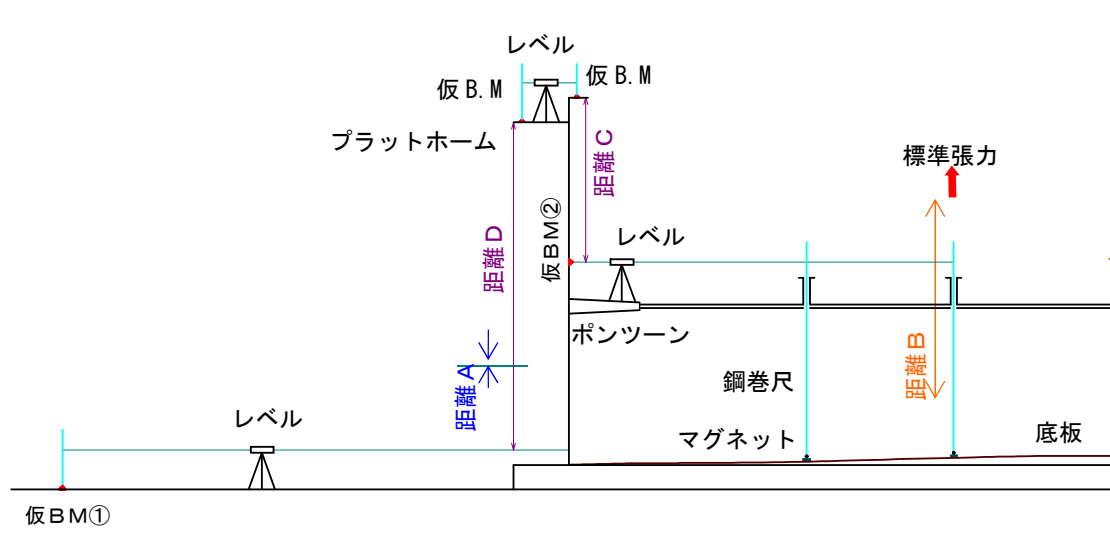


図 3.2 水張り試験水位と沈下量計測の関係



- 距離A：側板円周部の沈下量（水張り前を初期値とした標高の変化量）
- 距離B：浮き屋根上の計測位置から底板までの距離（水準測量とレーザー）
- 距離C：天端部から浮き屋根上の計測位置までの距離（直接測定）
- 距離D：天端部から仮BMまでの距離（直接測定 or トータルステーション）

仮BM①よりタンク内壁の仮BM②の標高を測量
 底板の標高＝仮BM②の標高－距離B（水張り前との標高差が底板の沈下量）

図 3.3 沈下量計測概念図と各距離記号

a) 【距離A】側板円周部の沈下量（水張り前を初期値とした標高の変化量）

距離Aは仮ベンチマーク①を利用し、水準測量からタンク側板円周部の沈下量（鉛直距離A）を計測する。

計測値（距離A）が側板外周部の標高値であり、初期値からの変化量を沈下量とする。

b) 【距離B】浮き屋根上の計測位置から底板までの距離

距離Bは JIS1 級の鋼製巻尺を用いて測定を行う。計測方法は、浮き屋根上の孔位置に設定した計測位置の直下にあたる底板部に吸着能力の高いマグネットホルダ台を取り付け、その上部に鋼製巻尺を固定する。この鋼製巻尺を浮き屋根の計測用孔へ垂直に引き上げ、浮き屋根上部にて水準測量とレーザーレベル装置を用い距離を直読する。

鋼製巻尺の目盛りを浮き屋根上で測定する方法は、鋼製巻尺へ標準張力を与え、タンク内壁の仮BM②を基準とした水準測量を実施する。また、精度と誤測定確認のため、レーザーレベル装置を用いて、レーザー光線と受光装置により距離を測定する。レーザーレベル装置を用いた計測概念図を図 3.4 に示す。

なお、JIS1 級の鋼製巻尺の温度補正が必要な場合に備え、タンク内の水温を熱電対により計測する。

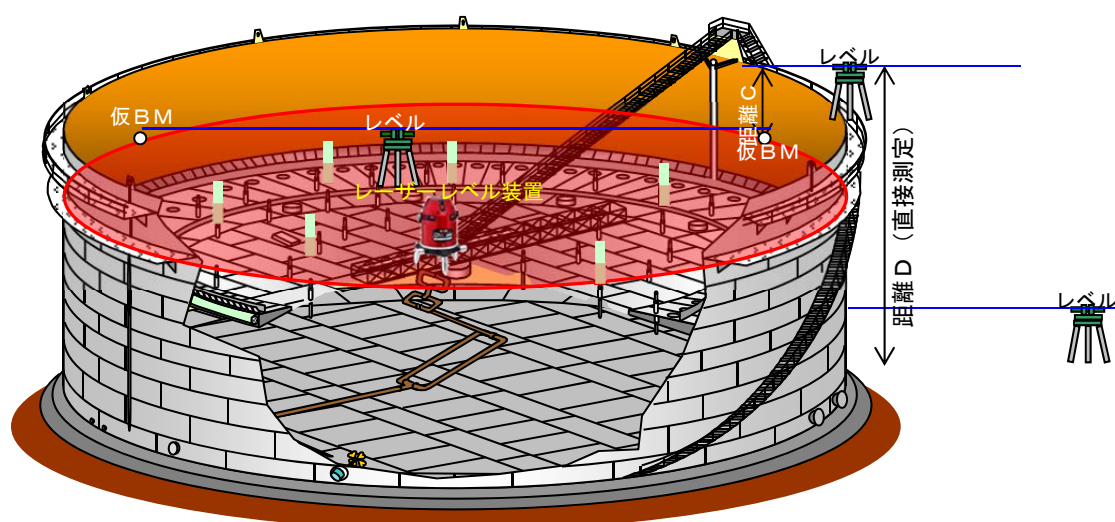


図 3.4 レーザーレベルを用いたタンク内底部の沈下量計測概念図

c) 【距離C, D】天端部から浮き屋根計測位置、天端部から仮BMまでの鉛直距離

距離C、Dは、対象タンク外壁の基礎等に仮ベンチマークを設定し、鋼製巻き尺による直接測定を行う。

d) 【底板の標高】 底板の沈下量

水張り前のタンク底板標高値と水張り試験時におけるタンク底板の標高値の差を測定ポイントの底板沈下量として下記の計算式により算出する。

$$\text{底板の標高} = \text{仮BM②の標高} - \text{距離B}$$

(4) 計測誤差に関する対策

底板の標高は、水準測量とレーザーレベル装置による2通りの結果が得られるが、お互いの値がかけ離れた場合、再測定を実施する。再測定は、市販のタンクスケールによる計測を併用した結果により決めるものとする。また、タンクスケールによる計測は、計測不能となった計測点の測定値とする。



タンクスケール

(5) 沈下量計測項目

沈下量計測の計測項目を表 3.1 に示す。

表 3.1 計測項目と計測方法

計 測 項 目	計測方法、計測機材等
① 側板外周部の沈下量計測	水準測量
② 測量を主としたタンク内底部の沈下量計測	水準測量＋鋼製巻尺
③ レーザーを用いたタンク内底部の沈下量計測	レーザーレベル装置＋鋼製巻尺
⑤ タンクスケールを用いた内底部の沈下量計測	タンクスケール
⑥ タンク内水温	熱電対
⑦ タンク内水位	水位計(対象タンクに設置済み)

4 有限要素法を利用した水張試験時における基礎地盤の沈下量解析について

(1) 使用する解析コード

使用する解析コードは、弾塑性が表現できさらに離間が表現できる汎用プログラム ABAQUS を利用し、解析 STEP を細かく刻み、前 STEP の結果により地盤剛性等を変化させその STEP の解析を実施する。

(2) 構造モデルの概要

構造モデルのイメージを図 4.1 に示す。解析範囲は石油タンクの径を d とすると、平面方向には $6d$ 、深さ方向には $3d$ をとる。地盤の境界条件は、底面および外周面はピンローラーとし、底板と地盤の境界は接触要素で表現する。

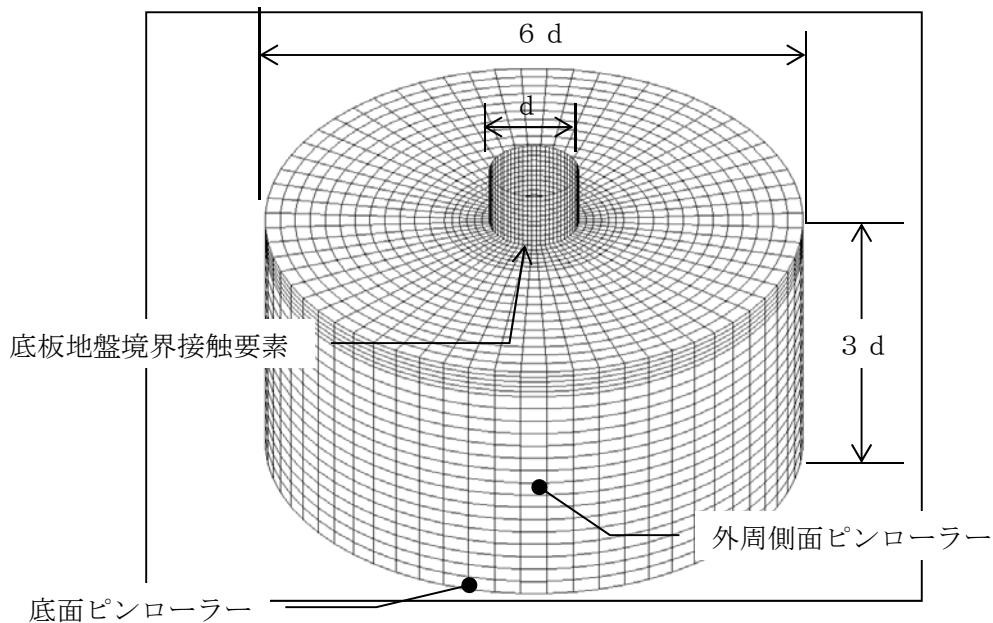
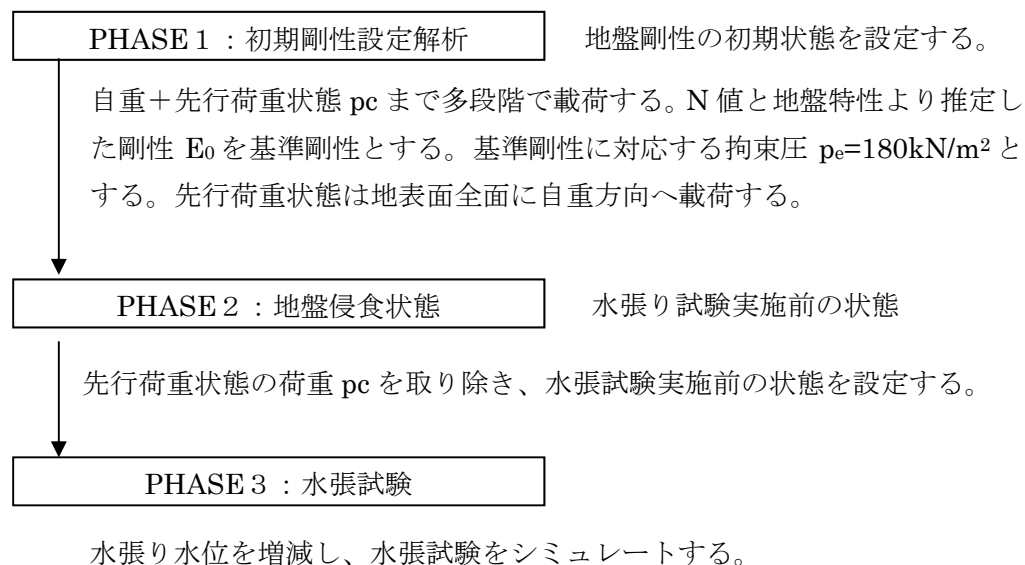


図 4.1 構造モデルのイメージ

(3) FEM 解析のフロー

FEM 解析は 3 つの PHASE で実施する。その流れを図 4.2 に示す。



【水張り水位】（沈下モードや応力分布を求める水張り水位）

0m → 3.3m → 6.6m → 13.4m → 6.6m → 3.3m → 0m

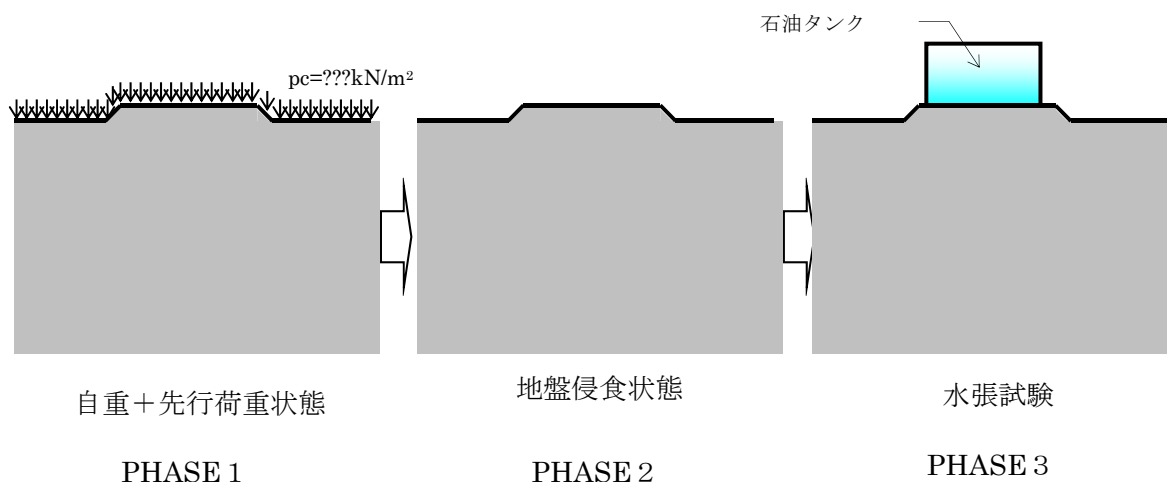


図 4.2 FEM 解析の流れ

(4) 地盤要素特性の評価方法

ア 破壊基準

地盤の破壊曲面は Mohr-Coulomb で規定する。Mohr-Coulomb のパラメータである土の粘着力 C 、土の内部摩擦角 ϕ は、当該地盤からサンプルされた試料に対する三軸試験から得られるものを用いるのが望ましいが。当該地盤の三軸試験結果がない場合ため、N 値等から推定する。

・破壊規準：モールクーロン

C：土の粘着力 ϕ ：土の内部摩擦角

破壊規準に載った場合は一次剛性の α_{py} 倍に剛性低下

$$C=10N \quad (\text{kN/m}^2)$$

$$\phi=\sqrt{15N}+15 \quad \text{とする.}$$

α_{py} ：砂質土 $\alpha_{py}=1/30$ 粘性土 $\alpha_{py}=1/100$

・ポアソン比 ν

$$\nu=\frac{1-\sin \phi}{2+\sin \phi} \quad \phi:\text{土の内部摩擦角}$$

ただし $\phi=0$ の場合、破壊規準に達した時 $\nu=0.495$

イ 地盤の基準剛性

地盤の基準剛性の定め方のフローを図 4.3 に示す。基準剛性とそれに対応する拘束圧は、当該地盤のサンプル試料に対する要素試験から得られるものを使用するのが望ましいが、当該地盤には要素試験結果がないのでN値と V_s の関係より推定した剛性 E_0 を基準剛性とし、N値と V_s の関係より推定した基準剛性に対応する拘束圧 $p_e=180\text{kN/m}^2$ とすることとした。基準剛性に対応する拘束圧は設定根拠はないので、今後の検討により、適切な拘束圧を定めることが必要と思われる。

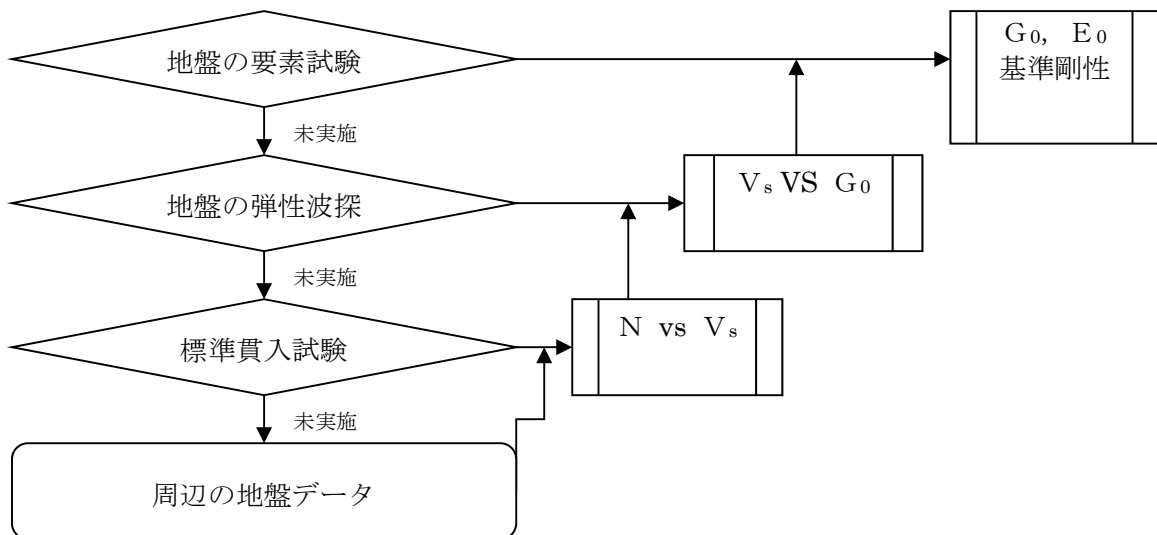


図 4.3 地盤の基準剛性の定め方

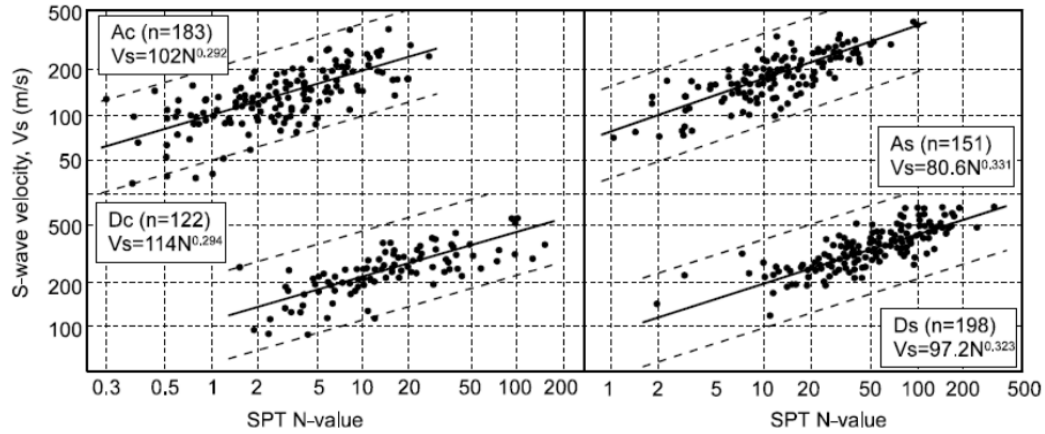
弾性波探査から地盤の基準剛性は下式で求める。

$$\text{せん断弾性係数 } G_0 = \rho V_s^2$$

ρ : 質量密度

V_s : 地盤のせん断弾性波速度

標準貫入試験のN値より地盤の基準剛性推定する場合は図 4.4 で求める。



$$\text{沖積砂質土 (As)} \quad V_s = 80.6 N^{0.311} \quad \text{沖積粘性土 (Ac)} \quad V_s = 102 N^{0.292}$$

$$\text{洪積砂質土 (Ds)} \quad V_s = 97.2 N^{0.323} \quad \text{洪積粘性土 (Dc)} \quad V_s = 114 N^{0.292}$$

$$\text{基準拘束圧 } p_e = 180 \text{ kN/m}^2$$

図 4.4 標準貫入試験の N 値と V_s

ウ 地盤剛性の初期状態の設定

地盤の剛性はそれまで受けてきた荷重履歴を反映している。このため、基準剛性とそれに対応する拘束圧を元に、荷重履歴による拘束圧の変化に起因する剛性変化を評価して地盤剛性の初期状態を設定する (図 4.5)。

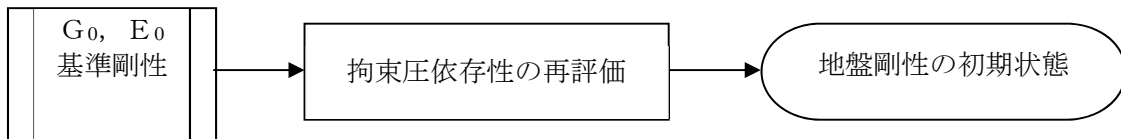


図 4.5 地盤剛性の初期状態の設定

剛性変化の程度は、(履歴最大主応力／基準拘束圧) の 0.5 乗に比例するとした。またせん断応力により剛性も変化するが、処女せん断応力状態時の塑性ひずみ成分変化による剛性変化はダンカンチャン式で評価することとした。PHASE1,2 の除荷時には剛性変化はしないものとした。

- ・地盤の一次剛性 E_{i+1} 基準剛性 E_0

$i+1$ -step 時の剛性 E_{i+1} を i -step までの最大主応力 $\sigma_{1,1\sim i}$ より下式で修正する.

$$E_{i+1} = E_0 \times (\sigma_{1,L} / p_e)^{0.5} \quad \text{ここで } p_e : \text{基準拘束圧}$$

$$\sigma_{1,L} = \max(\sigma_{1,1\sim i-1})$$

- ・降伏規準内剛性

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_j \geq \max[(\sigma_1 - \sigma_3)_{0\sim j-1}]$$

$$\text{接線剛性 } E_t : E_t = (1 - \frac{R_f(1 - \sin \phi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2 \cdot c \cdot \cos \phi + 2 \cdot \sigma_3 \cdot \sin \phi})^2 E_j$$

R_f : 破壊比

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_j \leq \max[(\sigma_1 - \sigma_3)_{0\sim j-1}] \quad \text{地盤一次剛性 } E_{i+1}$$

PHASE 1 では、先行荷重状態 pc 相当の荷重履歴を反映させ、自重+先行荷重状態 pc まで地表面に自重方向へ多 STEP で載荷することとした。簡単のため、自重に加え先行荷重状態 pc 相当の荷重を地表面に載荷することにより、それまで受けてきた荷重履歴を評価することとした。自重+先行荷重状態 pc まで地表面に自重方向へ多 STEP で載荷することにより、STEP 毎の剛性変化が評価できる。PHASE2 では、水張り試験実施前の状態を設定する。先行荷重 pc を取り除き、自重のみの水張り試験実施前の地盤の応力状態を求める。

エ 水張り試験時の地盤剛性変化

PHASE3 では、水張り水位を増減し、水張り試験をシミュレートする。この際には弾性成分の剛性の拘束圧依存性およびひずみ依存性を考慮することとした。PHASE1,2 で得られた剛性を初期剛性とし、STEP- $i+1$ の剛性変化の拘束圧依存性は、(STEP- i の最大主応力/自重時の最大主応力) の 0.5 乗に比例することとした。剛性変化のひずみ依存性は、除荷、再載荷の開始時からの最大主ひずみの増分に依存することとした。剛性変化のひずみ依存性の程度は、当該地盤のサンプル試料に対する三軸試験から得られるものを使用するのが望ましいが、当該地盤には三軸試験結果がないため、既往の研究資料（木幡行宏、村田修 せん断剛性比のひずみレベル依存性に関する定式化 土木学会第 55 回年次学術講演会）を参考に定めることとした。

- ・地盤の一次剛性 E_{i+1} 初期地盤剛性 E_0 PHASE2 終了時（水張り試験直前）の剛性

$i+1$ -step 時の各要素の剛性 E_{i+1} を i -step の最大主応力 $\sigma_{1,i}$ より下式で修正する。

$$E_{i+1} = E_0 \times (\sigma_{1,i} / \sigma_{1,0})^{0.5} \quad \text{ただし } E_{i+1} \geq E_0$$

ここで $\sigma_{1,0}$ は PHASE2 終了時（水張り試験直前）の最大主応力

- ・降伏規準内剛性 $j+1$ -step

$$\text{接線剛性 } E_{t,j+1} : E_{t,j+1} = E_j \times K$$

ここで $K = \exp(-\Delta \varepsilon \times \alpha_K)$ ただし $K \geq K_{\min}$

$\Delta \varepsilon$: 除荷時 除荷開始点の ε_1 と j-step の ε_1 との差の絶対値

再載荷時 再載荷開始点の ε_1 と j-step の ε_1 との差の絶対値

ここで ε_1 は最大主ひずみ

$\alpha_K, K_{\min}$: 剛性のひずみ依存性の程度を評価するパラメータ

土要素のひずみ依存性は、割線せん断剛性 G とせん断ひずみ γ の関係として下式にまとめられている。

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \alpha \cdot \gamma^\beta}$$

ここで、 α 、 β は表 4.1 に示す。

表 4.1 ひずみ依存性の α 、 β

地盤材料	α	β
沖積粘性土	135.997	0.804
洪積粘性土	270.033	0.824
沖積砂質土	603.053	0.854
洪積砂質土	603.902	0.942

木幡行宏, 村田修 せん断剛性比のひずみレベル依存性に関する定式化 土木学会第 55 回年次学術講演会

これを割線剛性 E と軸ひずみ ε_a の関係に直すと

$$\frac{E}{E_0} = \frac{1}{1 + \alpha \cdot [(1 + \nu) \varepsilon_a]^\beta}$$

ν : ポアソン比

これより応力ひずみ関係は

$$\begin{aligned} \sigma &= E \cdot \varepsilon_a \\ &= \frac{\varepsilon_a}{1 + \alpha \cdot [(1 + \nu) \varepsilon_a]^\beta} E_0 \end{aligned}$$

接線剛性は、 $\frac{d\sigma}{d\varepsilon_a}$ なので、ひずみ依存性の影響度を K であらわすと

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon_a} = K E_0$$

$$K = d \left(\frac{\varepsilon_a}{1 + \alpha \cdot [(1 + \nu) \varepsilon_a]^\beta} \right) / d\varepsilon_a$$

となる。ここでは、簡単のため

$$K = \exp(-\Delta \varepsilon \times \alpha_K)$$

とし、ひずみ適用範囲により α_K を定めることとした。

(5) 構造モデルと要素特性

- ・軸対称モデル
- ・タンクの構造：側板のみモデル化、各側板の板厚、高さは表 4.2 のとおりとする。
- ・材質はスチールで弾性で弾性係数は $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ とする。

表 4.2 タンク構造諸元等

タンク内径(mm)	タンク高さ(mm)	基礎高さ
29060	16445	700mm

アニュラー板			底板	
範囲	材質	板厚(mm)	材質	板厚(mm)
側から 1m	SM400C	12.0	SS400	9.0

	板幅(mm)	実板厚	材質
9 段目	1820	8.10	SS41
8 段目	1820	7.90	SS41
7 段目	1820	7.60	SS41
6 段目	1820	9.70	SS41
5 段目	1820	11.60	SS41
4 段目	1820	13.60	SS41
3 段目	1820	15.70	SS41
2 段目	1820	16.60	SS41
最下段	1820	19.10	SS41

- ・ 底板と地盤

地表面付近の構造モデルのイメージは図 4.6、地層区分と基準剛性を図 4.7 に示す。

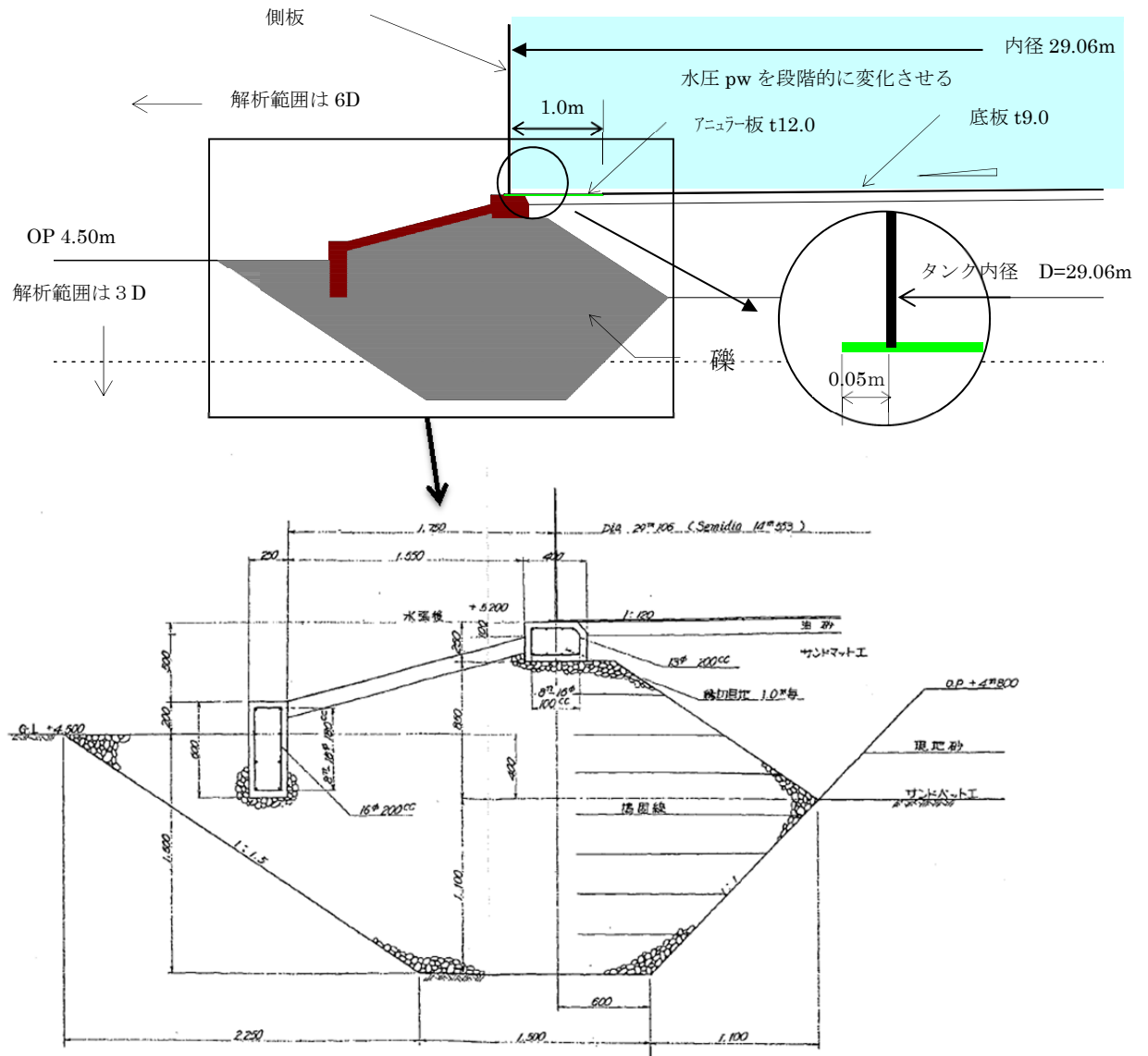
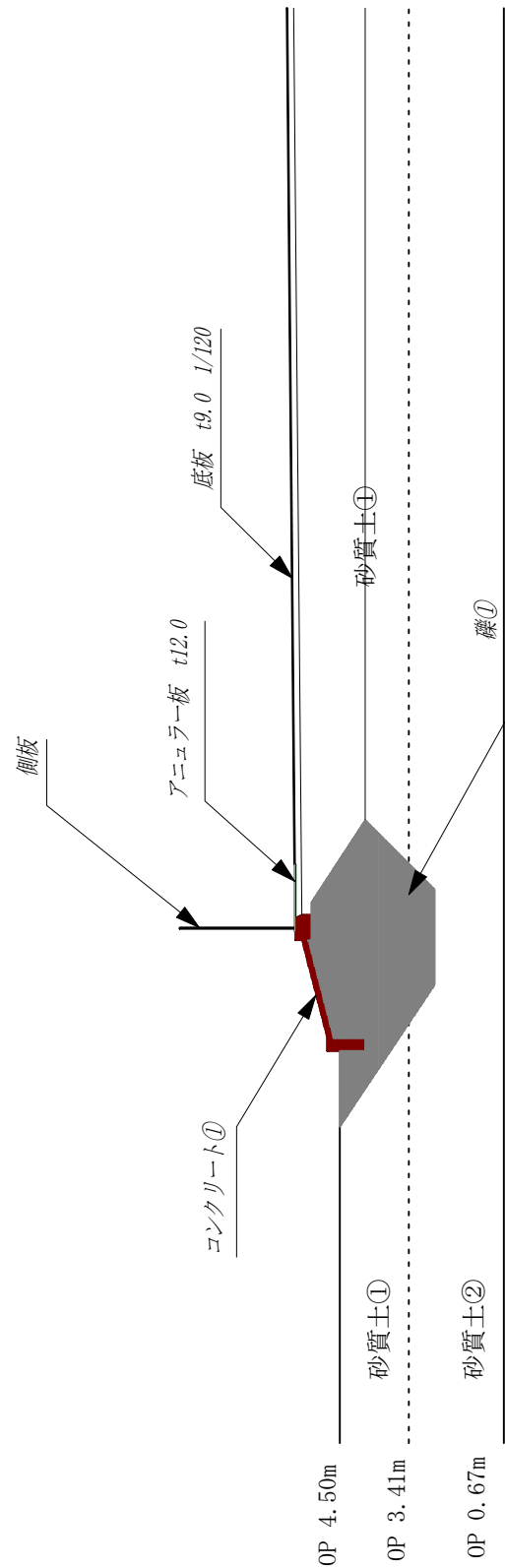


図 4.6 地表面付近の解析モデルのイメージ



	地盤種	OP(m)		層厚(m)	平均N値	ϕ (°)	C (kN/m ²)	ν	γ (kN/m ³)	ρ (kg/m ³)	Vs (m/s)	G0 (kN/m ²)	E0 (kN/m ²)
		上	下										
粘性土①	コンクリート①					0.0	784.0	0.2	23.5	2398			
砂質土③	礫①				60	45.0	19.6	0.23	19.6	2000	288	165848	406839
	砂質土①	4.5	3.41	1.09	11.7	35.0	4.9	0.30	17.1	1745	173	52249	135738
粘性土②	砂質土②	3.41	0.67	2.74	11.7	35.0	4.9	0.30	19.1	1949	173	58360	151614
	粘性土①	0.67	-2.43	3.1	2.7	21.3	26.7	0.39	15.7	1600	136	29518	81994
砂質土④	砂質土③	-2.43	-4.03	1.6	7.0	25.2	70.0	0.36	17.6	1800	148	39228	107050
	粘性土②	-4.03	-7.43	3.4	3.7	22.4	36.7	0.38	15.7	1600	149	35551	98278
粘性土③	砂質土④	-7.43	-8.63	1.2	10.0	27.2	100.0	0.35	17.6	1800	165	48971	132376
	粘性土③	-8.63	-11.23	2.6	2.0	20.5	20.0	0.39	15.7	1600	125	24953	69569
砂質土⑤	砂質土⑤	-11.23	-15.93	4.7	16.8	30.9	168.0	0.33	17.6	1800	224	90622	240590
	粘性土④	-15.93	-87.18	71.25	8.0	26.0	80.0	0.36	17.6	1800	209	78793	214306
砂質土⑤													
粘性土④													

図 4.7 地層区分と基準剛性