

砂杭で改良された粘性土地盤の変形予測法

Prediction Method of Deformation of Partially Improved Soft Ground  
with Sand Compaction Piles

住 岡 宣 博\* (Nobuhiro Sumioka)  
森 脇 武 夫\*\* (Takeo Moriwaki)  
山 本 康 治\*\*\* (Kouji Yamamoto)  
吉 国 洋\*\*\*\* (Hiroshi Yoshikuni)

キーワード：地盤改良／締め固め砂杭／軟弱地盤／変形／有限要素法／予測 (IGC:E2)

1. まえがき

軟弱地盤上に盛土などを施工する場合には、支持力の改善や沈下の促進等の目的で、サンドドレーン（以下SDと略す）やサンドコンパクションパイル（以下SCPと略す）等を用いて地盤改良を行う場合が多い。このような場合の沈下予測は、一般にその簡便さのために準一次元化した計算法（応力分散を考慮しBarron解を用いた一次元沈下、以下慣用計算法と称する）を用いることが多い<sup>1)</sup>。しかし、この慣用計算法で用いるBarron解は載荷域及び改良域が共に広範囲な場合に対するものであり、実際の現場がそうであるように、載荷域及び改良域が部分的な場合には計算値と実際とが大きく異なることがある<sup>2) 3)</sup>。また、沈下量を推定する際は地盤の側方変形を考慮せず、SDで改良した場合は砂柱の剛性を無視し、SCPの場合は砂柱部と粘土部が分担する応力の比率（応力分担比）を仮定している。このため、より現場の条件に即した沈下・変形予測を行う場合には多次元の変形解析が可能な有限要素法が用いられる。この場合には、用いる土の構成式モデルによって予測結果は異なったものとなる。そのため、モデルによる予測特性の違いを明らかにすることは、沈下予測を行う上で重要なことである。

そこで本論文では実際の工事を例にとり、SD及びSCPで部分的に改良された粘性土地盤の圧密沈下挙動を、慣用計算法、弾性及び弾塑性有限要素法で予測し、実測値と比較することによって各種予測手法の特性や予測精度を明らかにするとともに、適用上の留意点を明らかにすることを試みた。特に有限要素法で用いられるSCPの応力 $\sim$ ひずみ関係は、取扱の簡便さから線形弾性、或いはバイリニアな弾性が用いられることが多く、その際のSCPの変形特性の評価の仕方は予測結果に大きな影響を及ぼす重要な問題である。本論文ではこの点にも言及し、適切なSCPの評価法を明らかにする。さらにSCPで改良された砂杭と粘土からなる複合地盤を、これと等価な変形特性を持つような均質な材料（以後、複合体と呼ぶ）に置き換えて解析する方法を提案する。

2. 地盤及び施工概要

ここで取り上げた工事例は、山口県柳井市で施工された埋め立て護岸工事である。護岸建設地点の地盤は上層に沖積粘性土が層厚18~20mにわたって堆積し、以下砂質土層、レキ質土層、風化軟岩層で構成されている。上層の沖積粘性土層の土性は、図-1に示すように、自然含水比 $w_n = 80\sim 100\%$ 、間隙比 $e = 2.0\sim 2.5$ 、標準圧密試験から求めた圧縮指数 $C_c = 0.8\sim 1.2$ と高圧縮性を示す軟弱粘性土である。

護岸の施工は、最初にサンドマットが施工された後、築堤盛土荷重に対する安定を確保する目的で、置換率40%のSCPと、SDによる地盤改良が行われ、続いて基礎捨石工、腹付工が行われている。図-2に護

\* 中電技術コンサルタント 技術主査, \*\* 広島大学工学部第四類建設構造 助手, \*\*\* 中国電力 土木部  
\*\*\*\* 広島大学工学部第四類建設構造 教授

岸の施工断面を示す。図中に示した安定管理のための各種計測器は地盤改良の施工直後に設置されたもので、地盤改良時を除いて、築堤工の初期状態からの地盤変形を捉えている。築堤工の施工ステップは、図中で分割されたブロックの番号で示すとおりである。施工中は地盤の沈下と側方変移を計測し、現施工段階での安定の確認と次期施工段階での安定の予測をして施工を進める、いわゆる情報化施工が実施されている。

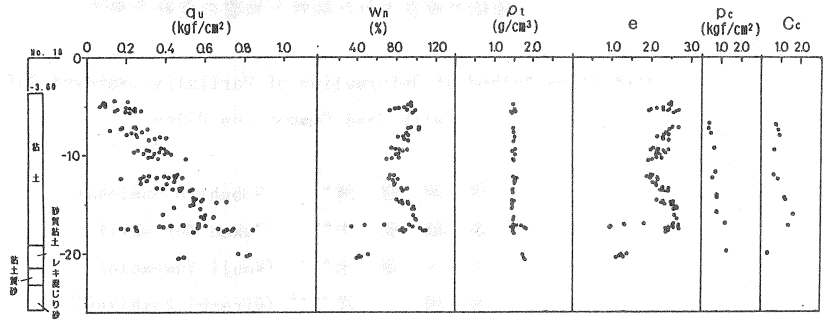


図-1 土性図

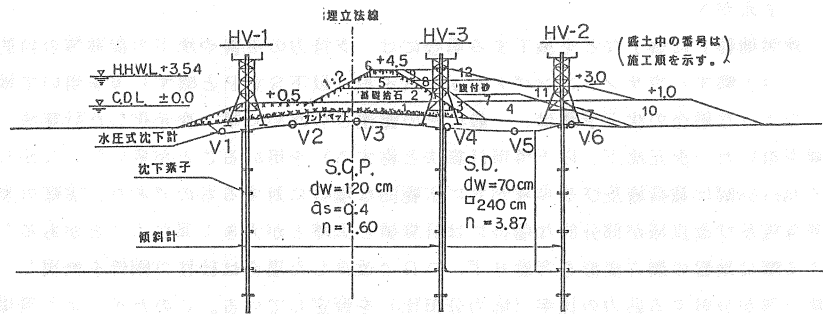


図-2 護岸断面図

### 3. 解析方法

#### 3-1. 慣用計算法

沈下量の算定は以下の方法によった。すな

わち、圧密各層について、地中応力分散を考慮し盛土荷重による鉛直応力増分  $\Delta \sigma_z$  を Boussinesq 解によって求め各層毎に実施した標準圧密試験から求めた体積圧縮係数  $m_v$  を用いて、沈下量  $S$  を

$$S = \beta \cdot m_v \cdot \Delta \sigma_z \cdot H \quad \text{----- (1)}$$

として求め、これを全層にわたって重ね合わせた。ここに、 $\beta$  は沈下低減係数で、SD 改良部については  $\beta = 1$ 、SCP 改良部については次式で表される。

$$\beta = 1 / (1 + (m - 1) A_s) \quad \text{----- (2)}$$

$A_s$  は SCP の置換率で、本解析では  $A_s = 0.4$  である。 $m$  は応力分担比で、通常  $m = 3 \sim 5$  とされているが<sup>2)</sup>、本解析では  $m = 5$  を仮定した。

圧密速度に関しては次のようである。すなわち、SD 及び SCP 改良域では Barron 解による予測をおこなった。なお、ここで用いた Barron 解は地表面沈下に関する圧密度の近似解である。

#### 3-2. 有限要素法による解析方法・その1 (砂・粘土地盤モデル)

##### 1) 解析モデル

このモデルは、改良域の砂杭と粘土地盤とを分けて考え、それぞれの材料特性を表せるように有限要素に分割する方法であり、ここでは砂・粘土地盤モデルと呼ぶ。解析に用いた要素分割と境界条件は、図-3 に示すとおりであり、節点数 909、要素数 820 である。要素は一次要素であり、間隙水圧は要素内で一定としている。

SD 及び SCP による圧密は軸対称の放射流れによる圧密であるが、解析では平面ひずみ条件となっているため、等価な圧密速度を持つ水平一次元流れによる圧密に置き換えている。すなわち、杭状の SD 及び SCP の代わりに壁状のそれを設け、圧密度 50% 時点での経過時間が等しくなるように水平方向の透水係数を

換算した。また、SD及びSCPの透水性は良好であるとし、ウェルレジスタンスは考慮していない。

なお、SCP要素の分割は、実施工のSCPの置換率と同じになるようにその大きさを決めている。

載荷は、図-2に

示したような実際の

盛土過程を図-4に

示すような4つの盛

土ステップに簡略化

して行った。その際、

新たに盛土される部

分(図中の着色部)

の自重は直下の節点

力として載荷したが、

増分計算を行っている

ため、節点には盛

土荷重を10分割して加えている。

2) 土の応力～ひずみモデル

解析で用いた原地盤粘性土の応力～ひずみ関係はHooke 則を用いた線形弾性と、修正Cam-clay理論に基づく弾塑性モデルである。以後、前者による解析を弾性解析、後者による解析を弾塑性解析と呼ぶ。

SCPの応力～ひずみ関係には、応力状態によらず一定のヤング係数を用いる線形弾性と、応力状態によって破壊を判定し、破壊以前と以後でヤング係数を変えるバイリニアな弾性を用いた。その際、破壊はMohr-Coulombの破壊基準によって判定し、破壊以後はヤング係数をそれまでの値の1/10に低減した。またSDの剛性は無視した。

3) 土質パラメータ

・弾性解析の土質パラメータ

弾性解析における原地盤粘性土の土質パラメータは、次に示す2つの方法で求めた。そのひとつは、標準圧密試験より得られる体積圧縮係数 $m_v$ よりヤング係数 $E'$ を

$$E' = ((1 + \nu') \cdot (1 - 2\nu') / (1 - \nu')) / m_v \quad (3)$$

として求める方法である。もうひとつは、一軸圧縮試験から得られる非排水せん断強度 $C_u (=q_u / 2)$ より、

$$E_u = 210 \cdot C_u \quad (4)$$

$$E' = (1 + \nu') / (1 + \nu_u) \cdot E_u \quad (5)$$

として求める方法である。ここで、 $E_u$ と $\nu_u$ は非排水状態での全応力に関する弾性定数であり、 $\nu_u = 0.5$ である。 $E'$ と $\nu'$ は有効応力に関する弾性定数であり、ポアソン比は静止土圧係数 $K_0 = 0.5$ となるように $\nu' = 1/3$ とした。また、透水係数は、標準圧密試験から得られた値をそのまま採用した。ただし、SD及びSCPによる改良域では解析モデルの項で示したように、水平方向の透水係数を換算している。以上のようにして得

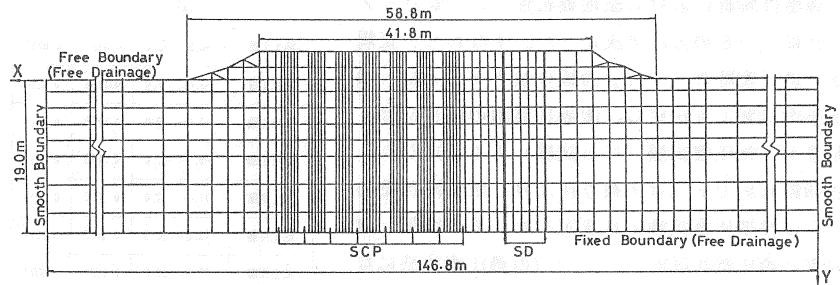
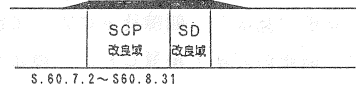
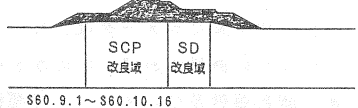


図-3 要素分割図(砂・粘土地盤モデル)

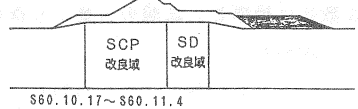
Step-1 (t=0~61日)



Step-2 (t=62~106日)



Step-3 (t=107~125日)



Step-4 (t=126~227日)

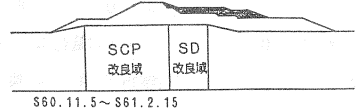


図-4 盛土ステップ

表-1 粘性土の土質パラメータ(弾性解析)

土質名	深度(m)	$m_v$ (cal/kgf)	$C_v$ (cal/min)	$q_u$ (tf/ml)	$E'(m_v)$ (tf/ml)	$E'(q_u)$ (tf/ml)	$k_v$ (m/day)
粘土I層	-3.5~-5.0	0.310	0.120	0.54	21.51	50.40	5.4E-04
粘土II層	-5.0~-9.0	0.240	0.135	1.36	27.78	126.93	4.7E-04
粘土III層	-9.0~-13.0	0.071	0.250	2.56	93.90	283.93	2.6E-04
粘土IV層	-13.0~-20.0	0.078	0.200	4.20	85.47	392.00	2.2E-04
粘土V層	-20.0~-22.5	0.028	0.290	5.58	238.90	520.80	1.2E-04

られた弾性解析における原地盤粘性土の土質パラメータを、表-1に示す。

・弾塑性解析の土質パラメータ

弾塑性解析における原地盤粘性土の土質パラメータは、つぎの方法で決定した。すなわち、正規及び過圧密時の  $e \sim \ln p$  曲線の傾き  $\lambda$  と  $\kappa$  は、標準圧密試験より決定し、限界状態線の傾き  $M$  は、非排水三軸圧縮試験 (CU試験) より決定した。初期鉛直応力  $\sigma_{v0}$  は土被り圧より、圧密降伏応力  $\sigma_{vc}$  は標準圧密試験より決定した。その結果、原地盤は過圧密比  $OCR=1.1 \sim 3.7$  の過圧密状態になっていると判断された。正規圧密時の静止土圧係数とポアソン比は文献5に示す方法で決定し、過圧密状態である現状の静止土圧係数は  $A_{lpn}$  の示す方法<sup>9)</sup>で決定した。また透水係数は、標準圧密試験より得られた間隙比  $e$  と透水係数  $k$  の  $e \sim \ln k$  関係を直線と見なし、間隙比  $e$  によって決定した。なお、SD及びSCPによる改良域での水平方向の透水係数は、前述の方法で換算した。このようにして決定された、弾塑性解析における原地盤粘性土の土質パラメータを、表-2に示す。

・SCPの土質パラメータ

SCPの土質パラメータは、SCPの変形特性をどのように評価すればよいかを明らかにするため、線形弾性及びバイリニアな弾性について、それぞれ数種類の値を用いた。すなわち、ヤング係数  $E$  は標準貫入試験の  $N$  値より次の関係を仮定して求めた。

$$E = a \cdot N \quad (a = 1, 4, 7) \quad \text{-----} \quad (6)$$

ここで  $a$  の値は宇都の例<sup>7)</sup>を参考にして定めた。またポアソン比は  $\nu$  は、次の3種の値を用いた。すなわち  $\nu = 0.3, 0.4, 0.5$  ----- (7)

である。但し、 $\nu = 0.5$  の場合はこの値では計算できないため、解析においては  $\nu = 0.495$  を用いている。

更に、バイリニアな弾性を用いる場合は、SCPの破壊を規定する内部摩擦角  $\phi_r'$  を、

$$\phi_r' = 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ \quad \text{-----} \quad (8)$$

と変化させた。表-3は、このようにして求めたSCPの土質パラメータである。

3-3. 有限要素法による解析方法・その2 (複合体地盤モデル)

1) 解析モデル

このモデルは、砂杭と粘性土地盤からなる複合地盤を、等価な変形特性を持つ均質な材料 (以下、複合体と呼ぶ) に置き換えて解析しようとするものであり、ここでは複合体地盤モデルと呼ぶ。解析に用いた要素分割と境界条件は、図-5に示すとおりであり、節点数 821、要素数 740である。要素は一次要素であり、間隙水圧は要素内で一定としている。

SD及SCPによる圧密は、前節で示したものと同様に軸対称の放射流れによる圧密を、等価な圧密速度を持つ水平一次元流れによる圧密に置き換えている。また、SD及びSCPの透水性も前節で示したのと同様に考え、ウェルレジスタンスは考慮していない。

載荷も前節で示したものと同様に、実際の盛土過程を図-4に示すような4つの盛土ステップに簡略化して行った。載荷重の節点力としての与え方も、前節で示したものと同様である。

表-2 粘性土の土質パラメータ (弾塑性解析)

土質名	深 度 (m)	$\lambda$	$\kappa$	M	$\nu$	$e_0$	kv (m/day)
粘土I層	-3.5~-5.0	0.3127	0.0211	1.72	0.327	2.175	1.5E-03
粘土II層	-5.0~-7.0	0.5229	0.0274	1.72	0.327	2.600	6.3E-04
粘土II層	-7.0~-9.0	0.5229	0.0274	1.72	0.327	2.430	4.2E-04
粘土III層	-9.0~-11.0	0.3036	0.0215	1.89	0.302	2.118	4.6E-04
粘土III層	-11.0~-13.0	0.3036	0.0215	1.89	0.302	2.075	4.2E-04
粘土IV層	-13.0~-16.5	0.5320	0.0321	1.61	0.343	2.330	3.5E-04
粘土IV層	-16.5~-20.0	0.5320	0.0321	1.61	0.343	2.288	3.1E-04
粘土V層	-20.0~-22.5	0.1138	0.0230	1.45	0.348	0.840	1.7E-04

表-3 SCPの土質パラメータ

土質名	深 度 (m)	N値	E (kgf/cm <sup>2</sup> )			$\nu$	$\phi_r$ (°)	K <sub>0</sub>
			7N	4N	1N			
SCPI層	-3.5~-5.0	10	70	40	10	0.3	30	0.5
SCPII層	-5.0~-9.0	12	84	48	12	0.4	35	
SCPIII層	-9.0~-13.0	16	112	64	16	0.5	40	
SCPIV層	-13.0~-20.0	18	126	72	18			

2) 土の応力～ひずみモデル

原地盤粘性土とS

CPから成る複合体の変形特性は、置換率が50%以下の場合には原地盤粘性土によって支配されると考え、複合体の応力～ひずみ関係は原地盤粘性土と同様に修正Cam-clay理論に従うものとした。従

って、SCP独自の応力～ひずみ関係は必要でない。また、SDの剛性は、前節の解析方法と同様に無視できるものと考えた。

3) 土質パラメータ

・複合体と原地盤粘性土

複合体は前述のように、修正Cam-clayモデルに従う材料とし、そのパラメータを決定した。パラメータの決定方法は、以下のとおりである。すなわち、複合体のパラメータは砂と粘土の中間的な土質特性を持つものと仮定し、両者のパラメータをSCPの置換率に応じて比例配分する方法で、これを定めるものとした。つまり、図-6に示すように置換率 $A_s = 0$ の時、複合体のパラメータ $X_{fg}$ は粘土の値 $X_c$ であり、置換率 $A_s = 100\%$ の時、 $X_{fg}$ は砂の値 $X_s$ を持つもので、 $X_{fg}$ は置換率に応じて $X_c$ から $X_s$ の間で直線的に変化すると仮定し

$$X_{fg} = X_s \cdot A_s + X_c \cdot (1 - A_s) \quad \text{--- (9)}$$

を用いて計算してみた。なお、サフィックス $fg, s, c$ はそれぞれ複合体、砂、粘土を示す。その結果、式(9)では沈下量を過大に評価することが判明し、何らかの補正が必要であることが分かった。そこで式(9)に定数補正係数 $\alpha$ を導入し、式(9)を式(10)のように書き改めた。

$$X_{fg} = X_s \cdot \alpha A_s + X_c \cdot (1 - \alpha A_s) \quad \text{--- (10)}$$

定数補正係数の決定方法は不明であるが、ここでは、複合体モデルの可能性をみることを主眼にし、とりあえず正規圧密状態について砂・粘土地盤モデルと複合体モデルの沈下量が等しくなるように $\alpha$ を定めた。すなわち、図-7に示すような係数の決定用モデルを考え、同一荷重を与えて一次元的沈下をさせ、両者の沈下量が等しくなる $\alpha$ を定めた。解析ではSCPの $A_s$ を数種類変え、任意の置換率について $\alpha$ を求めた。砂のパラメータは、利根川産の砂を参考<sup>9)</sup>にした。粘土について

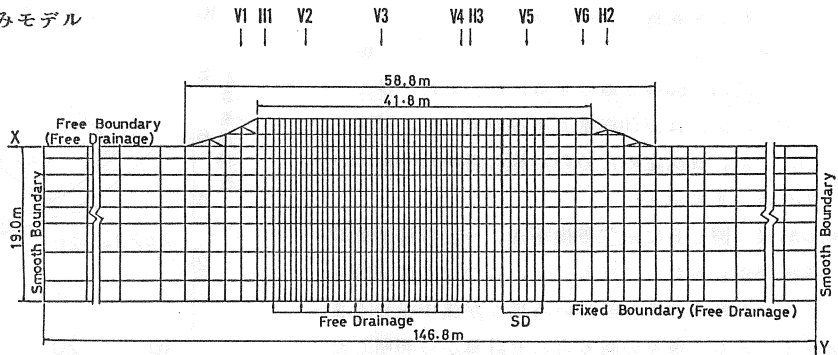


図-5 要素分割図 (複合体地盤モデル)

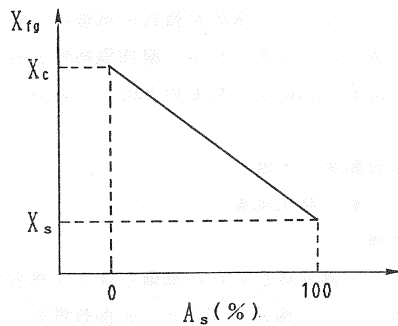


図-6 複合体のパラメータ

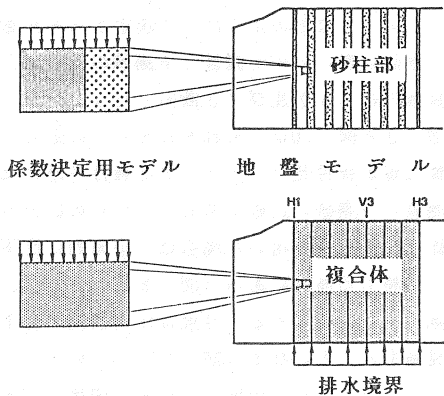


図-7 複合体のモデル概念図

表-4 定数決定用モデルの土質パラメータ

	$\lambda$	$\kappa$	M	$\nu'$	$e_0$	$K_0$
粘土	$a \cdot \lambda_s$	$0.1 a \cdot \lambda_s$	1.720	0.327	2.20	0.50
砂	0.0100	0.0038	1.549	0.333	0.64	0.50

は、任意の粘土を表現できるように、

$$\lambda_c = a \cdot \lambda_s \quad \text{--- (11)}$$

とし、 $a = 20, 40, 60$ の3通りを考えた。また、多くの粘土の $\kappa_c / \lambda_c$ は1/10程度であるので、 $\kappa_c$ は $\lambda_c$ の1/10とした。 $\alpha$ 決定のための計算に用いた土質パラメータを表-4に示す。

その結果、図-8に示す置換率 $A_s$ ～定数補正係数 $\alpha$ の関係が得られた。なお、 $e_0$ については式(10)を用いるよりも粘土のそれを用いるほうが沈下量をうまく表せることが、種々の組み合わせ計算から判明した。ポアソン比 $\nu$ についても、粘土のそれを用い、 $M$ については、 $\alpha = 1$ の場合が最適であった。

以上のようにして求めた複合体地盤の土質パラメータを、表-5に示す。なお、原地盤粘性土の土質パラメータは表-2に示したものと同じである。

#### 4. 解析結果と考察

##### 4-1. 砂・粘土地盤モデルにおけるSCPの変形特性の評価

SCPで部分改良された地盤の沈下予測を有限要素法を用いて行う場合、SCPの変形特性をどのように評価するかは、予測結果に大きな影響を及ぼす重要な問題である。そこで、まずSCPの応力～ひずみ関係にどのようなモデルを用いれば適当か、また、その時のパラメータはどのようにして決定すべきかを検討する。検討に際しての実測値と予測値の比較は、SCP改良域であるV2及びV3断面で行う。

図-9と図-10は、それぞれSCPの応力～ひずみ関係に線形弾性及びバイリニアな弾性を用いた場合の実測値と予測値の比較である。SCPの応力～ひずみ関係に線形弾性を用いた場合は、全体的に沈下量を小さく見積もる傾向にある(図-9)。そこで、SCPの剛性を小さくすると、今度は圧密初期の沈下を過大に見積もることになる(図-9、(a)の $E = 1N$ の場合)。一方、SCPの応力～ひずみ関係にバイリニアな弾性を用いると、全体的に実測値の傾向をよく表している。例えば、図-10のb)で見られるように、 $t = 20 \sim 30$ 日でSCPの破壊によって生じると思われる沈下量の急増を、予測値はよく表現している。これらの図より、SCPの応力～ひずみ関係にはバイリニアな弾性を用い、 $E = 4N$ と評価した場合が、実際の挙動を最も良く説明していると判断される。

図-11は、SCPのポアソン比を $\nu = 0.3, 0.4$ ,

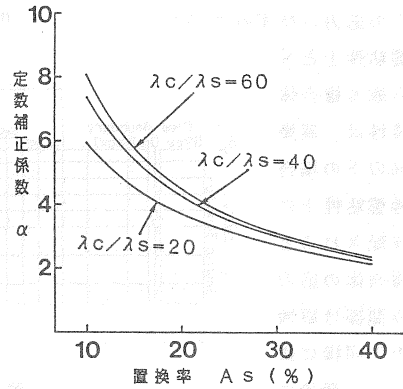
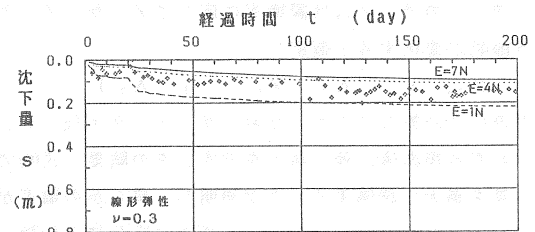


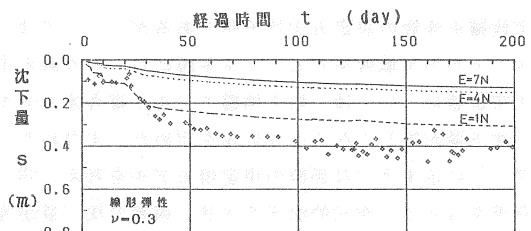
図-8 定数補正係数と置換率

表-5 複合体地盤モデルの土質パラメータ

土質名	深度 (m)	$\lambda_{r0}$	$\kappa_{r0}$	$M_{r0}$	$e_0$	$k_v$ (m/day)
粘土I層	-3.5～-5.0	0.0345	0.0052	1.652	2.175	2.2E-02
粘土II層	-5.0～-7.0	0.0395	0.0052	1.652	2.600	9.2E-03
粘土II層	-7.0～-9.0	0.0395	0.0052	1.652	2.430	6.1E-03
粘土III層	-9.0～-11.0	0.0342	0.0053	1.742	2.118	6.7E-03
粘土III層	-11.0～-13.0	0.0342	0.0053	1.742	2.075	6.1E-03
粘土IV層	-13.0～-16.5	0.0397	0.0054	1.586	2.330	5.0E-03
粘土IV層	-16.5～-20.0	0.0397	0.0054	1.586	2.288	4.5E-03

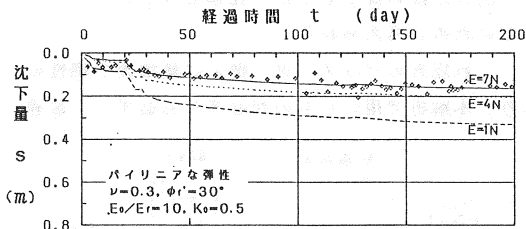


a) V2断面

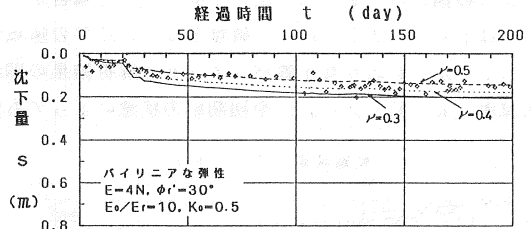


b) V3断面

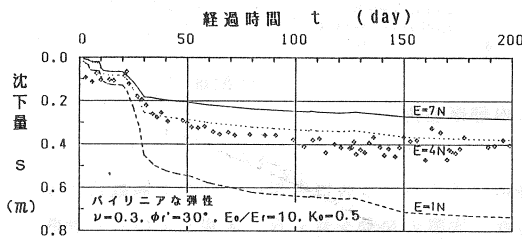
図-9 SCPの剛性(線形弾性)



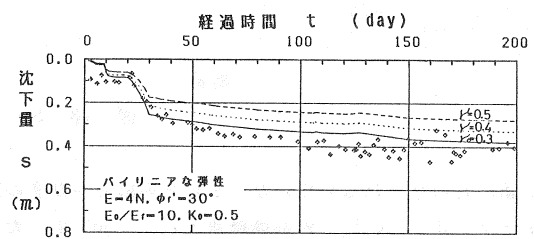
a) V2断面



a) V2断面



b) V3断面



b) V3断面

図-10 SCPの剛性 (バイリニアな弾性)

図-11 SCPのポアソン比

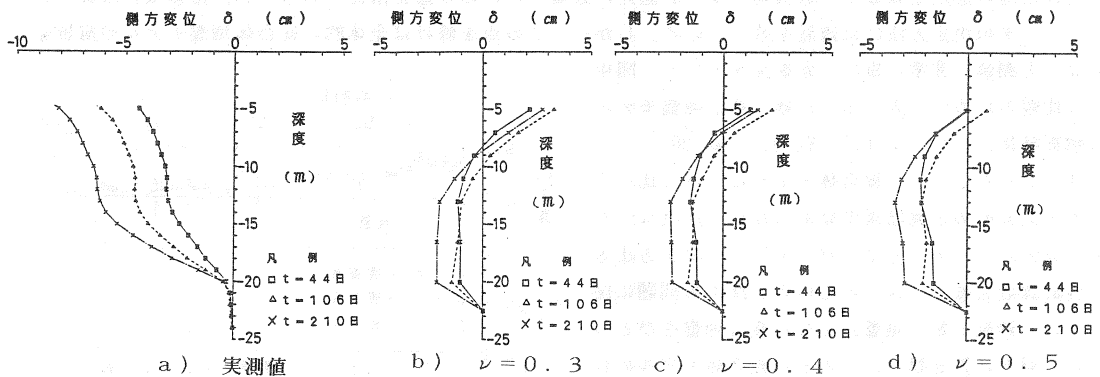


図-12 SCPのポアソン比と側方変形

0.5 と変化させた時の時間～沈下関係であり、図-12その時のH1断面での側方変位である。側方変位の形状及び発生状況は、実測値と予測値ではかなり異なっている。この原因として、SCPの応力～ひずみ関係に弾性を用いているため、ダイレイタンスーなど土固有の特性を表現できなかったことや、SCPの剛性を大きく見積もり過ぎたことが上げられる。すなわち、載荷後、地盤は圧密の進行に伴って体積ひずみが生じるが、その際、SCP改良域での杭間粘性土はSCPの剛性が大きいので、鉛直方向よりも水平方向に圧縮されやすいと考えられるため、SCP改良域での側方変形が外側に向かってはらみだす傾向を、表現できなかったと思われる。このように側方変形は、定量的にも定性的にも実測値と予測値が異なるが、今回の解析では、SCPのポアソン比を $\nu=0.5$ とした場合が、他の場合に比べてより実際の挙動に近いと思われる。

図-13は、破壊を判定する内部摩擦角を $\phi_r' = 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$ とした場合の時間～沈下関係である。

これらの図より、 $\phi_r' = 35^\circ$  と  $40^\circ$  とした場合は  $t = 20 \sim 30$  日以後の沈下を小さく見積もりすぎている。これは  $\phi_r'$  が大きいほど、破壊となる SCP の領域が少ないためと考えられる。

以上で示したような土質パラメータと解析結果の関係は、これ以外のパラメータ、例えば破壊後の剛性の低減率 ( $n = E_r / E_0$ ) や初期応力状態によっても変わり、本解析で用いたものが必ずしも必ずしも最適

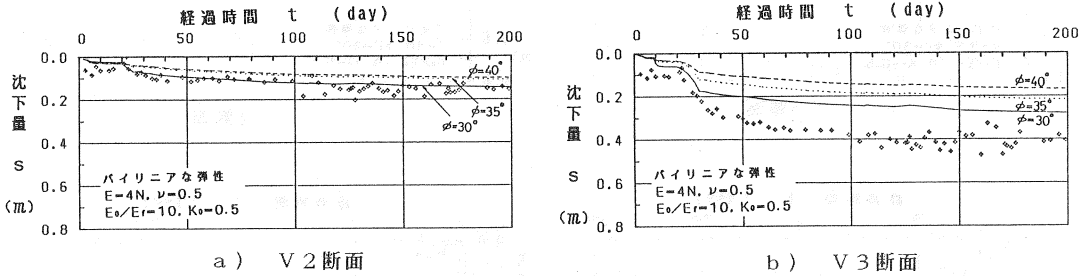


図-13 SCPの内部摩擦角

な組み合わせとはならないが、SCPの応力 $\sim$ ひずみ関係にバイリニアな弾性を用い、ヤング係数  $E = 4 \text{ N}$ 、ポアソン比  $\nu = 0.5$ 、内部摩擦角  $\phi_r' = 30^\circ$  とした場合が、実際の挙動を最も良く表現していると判断される。

4-2. 複合体地盤モデルの解析結果とその考察

先に示した複合体地盤モデルでの解析による、V2、V3、V4断面の時間 $\sim$ 沈下関係を図-14に示す。ただし、この結果は表-5で示した値のうち、 $\kappa_{r9}$ の値を $\lambda_{r9}$ の約1/20に修正したものである。これは、 $t = 30$ 日以前の過圧密領域での荷重時の沈下を過大に評価したための修正措置であり、過圧密領域の解析時のパラメータの決定方法には課題を残している。しかし、この点を除けば全体的に複合体地盤モデルの解析結果は、実測値と非常に良い一致を見せている。図中には比較のために、先に示した砂・粘土地盤モデルの解析結果 ( $E=4\text{N}$ ,  $\nu=0.5$ ,  $K_0=0.5$ ,  $\phi=30^\circ$ , バイリニア) も示した。複合体モデルはこれと比べるとやや大きめの予測結果ではあるが全く遜色ないものと言える。このことは、パラメータの決定方法等に検討課題を残してはいるものの、沈下の問題に関しては、砂杭と粘土地盤からなる複合体地盤をひとつの均一材料に置き換えようとする複合体モデルの有用性を示すものと言えよう。

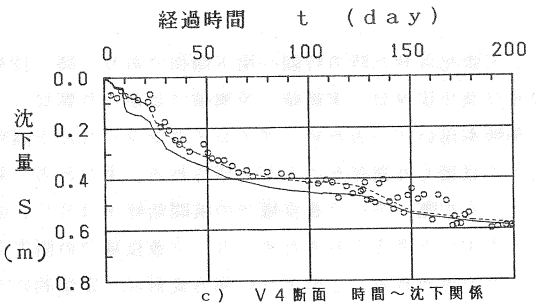
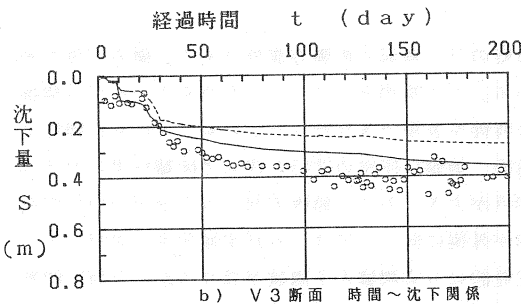
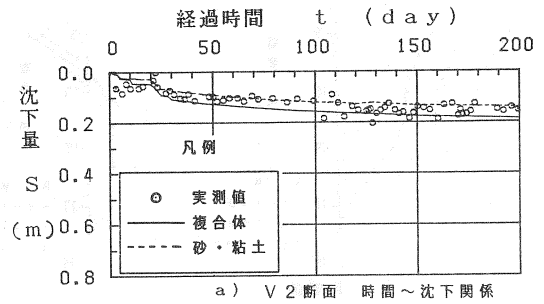


図-14 複合体地盤モデルの時間 $\sim$ 沈下関係



図-15は、 $t=33、106、210$ 日におけるH1、H3断面での側方変位である。図中には、先の砂・粘土地盤モデルの解析結果も示している。H1断面では両モデルとも浅い位置ではSCP改良域側に引き込まれる傾向を示し、実測値と傾向が異なる。これは、H1断面では、解析対象期間中に新たな載荷が無かったため、解析では地盤は過圧密領域のままであり、挙動が弾性的なものとなったことや、要素分割の際、捨て石マウンド部を大きなヤング係数を持つ線形弾性材料としたことのためであると思われる。しかし、深い位置では複合体地盤モデルは比較的一致する傾向にある。

H3断面では複合体地盤モデルは、定性的にも定量的にも実測値と非常に良い一致を示しており、砂・粘土地盤モデルと比較して、はるかに予測能力の高いことが分かる。

以上に示した複合体地盤モデルは、正規圧密状態で決定した複合体のパラメータを用いているため、過圧密領域の解析を対象とする場合に支配的な $\kappa_{rs}$ や、地盤の変形から破壊の問題が主な解析の対象となる場合に重要な $M_{rs}$ 等の決定法には今後の課題を残しているが、今回示した範囲内においては十分に有用なモデルであると考えられる。

#### 4-3. 各種予測法の適用性

図-16は慣用計算法、弾性解析及び弾塑性解析により予測した時間～沈下関係と実測値の比較である。なお、砂・粘土地盤モデルにおける弾性解析では、原地盤粘性土のヤング係数を体積圧縮係数 $m_v$ を用いて決定した場合と、一軸圧縮強度 $q_u$ を用いて決定した場合の2つのケースが行われている。また、SCPの変形特性は4-1項で決定したモデル及び土質パラメータが用いられている。

慣用計算法を用いた場合の最終沈下量は、実測値と比較的一致している。これは、本解析において用いた応力分担比 $m=5$ が適切な値であったことを示している。一方、沈下速度は、実測値とかなり異なったものとなる。特に、非改良域に近い改良域(V5断面)での解析値は、実測値に比べ大幅に速い沈下速度を示している。これは、改良域と非改良域との相互作用による改良域側で沈下遅れ現象<sup>2) 3)</sup>を予測できないためである。

砂・粘土地盤モデルによる弾性解析では、用いた粘性土の弾性定数によって予測結果が大きく左右される。一軸圧縮強度 $q_u$ を用いて弾性定数を決定した場合は、載荷直後で地盤が非排水状態と見なせる範囲では実測値と良く一致しているが、その後の沈下量を過少評価している。一方、体積圧縮係数 $m_v$ を用いて弾性定数を決定した場合は、最終的な沈下量は比較的良く一致するが、圧密初期の沈下量を大きく見積もり過ぎている。これは、一軸圧縮強度 $q_u$ が非排水状態におけるものであり、体積圧縮係数 $m_v$ が圧密の最終状態から求まるものであることに起因していると考えられる。

砂・粘土地盤モデルによる弾塑性解析での予測値は、SCP改良域(V2、V3、断面)、SD改良域や

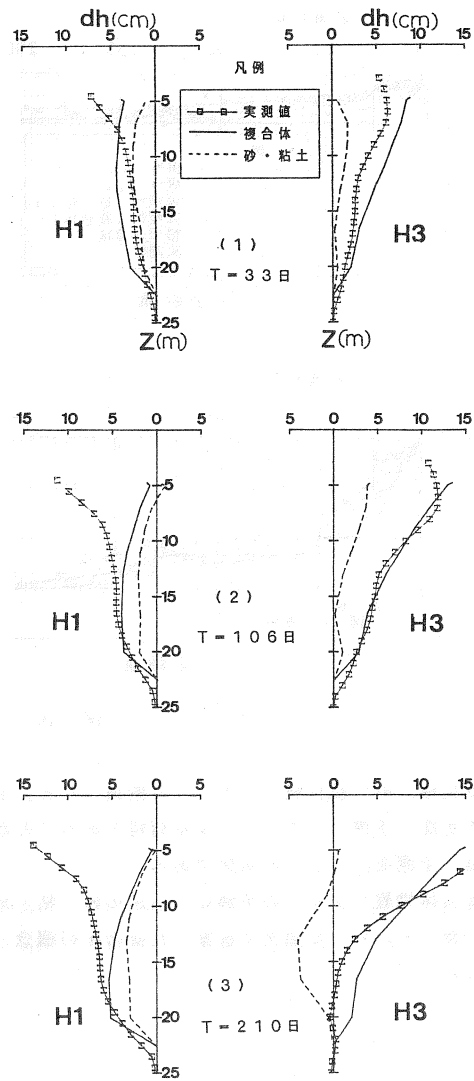


図-15 複合体地盤モデルの側方変形

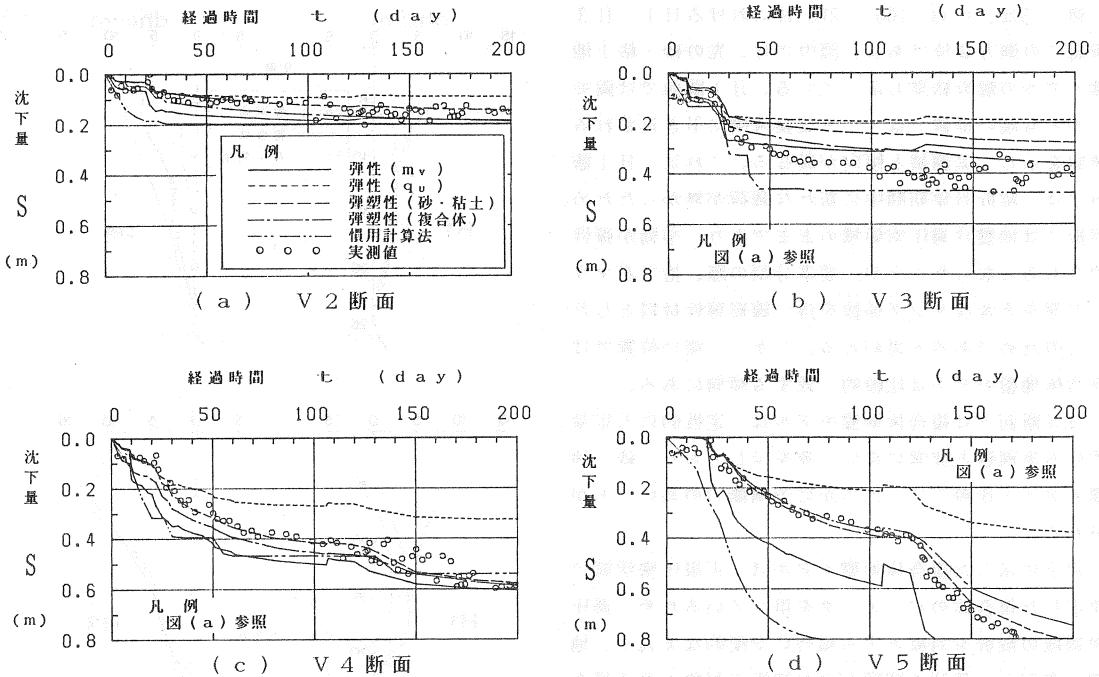


図-16 各種予測法の比較

非改良域に近い改良域 (V4, V5断面) など、すべての実測値と良く一致しており、部分改良された地盤の圧密沈下予測に、このモデルが有用であることが分かる。しかし、この場合も適切な土質定数の選択が精度良い予測を行う上で不可欠である。

複合体地盤モデルでの予測は、前述の砂・粘土地盤モデルによる弾塑性解析と同様に全体的に実測値と良く一致しており、本論文で提案した複合体の概念と、そのパラメータ決定法の妥当性を示唆していると考えられる。

### 5. 結論

- (1) 慣用計算法を用いて予測を行う場合、応力分担比を適切に評価すれば最終沈下量は比較的精度良く予測できるが、圧密速度は非改良域の影響を考慮できないため、改良域で実際と比べて過大となる。
- (2) 有限要素法でSCPを弾性体として取り扱う場合は、その応力～ひずみ関係に破壊を考慮できるバイリニアな弾性を用い、ヤング係数  $E = 4 \text{ N}$ 、内部摩擦角  $\phi_r' = 30^\circ$ 、 $\nu = 0.5$  (ただし、沈下のみに限定すれば、 $\nu = 0.3$ ) とした場合が実際の挙動を説明するうえで最も適切である。
- (3) 弾性有限要素解析では、弾性定数をどの土質パラメータから決定するかによって、予測結果は大きく異なるため、実際の条件に適合した土質試験より弾性定数を定める必要がある。
- (4) 砂・粘土地盤モデルを用いた弾塑性有限要素解析による予測は、全体的に実測値と良く一致しており、この予測法は砂杭で改良された軟弱粘性土地盤の沈下予測を行う際に適切な方法である。
- (5) 本論文で提案した砂杭と粘性土から成る複合地盤をこれと等価な変形特性を持つ複合体に置き換えて行った弾塑性有限要素解析の予測値は、実測値と非常に良く一致した。パラメータの決定方法を今後更に検討する必要があるが、この方法は砂杭で改良された複合地盤の変形予測に非常に有用であると考えられる。

<参 考 文 献>

- 1) 吉国 洋・楠本千賀志・原 久夫・住岡宣博・石田高夫(1983) : 我国における慣用的圧密解析の実体, 土質工学会中国支部論文報告集「地盤と建設」, Vol.1 No.1 pp.29~40
- 2) 原 久夫・吉国 洋・住岡宣博(1983) : 局部的にサンドドレーンを打設した地盤の圧密変形解析, 土質工学会中国支部論文報告集「地盤と建設」, Vol.1 No.1 pp.41~50
- 3) 住岡宣博・吉国 洋・森脇武夫・中ノ堂裕文(1985) : パーチカルドレーンによる部分改良地盤の圧密沈下予測, 第20土質工学研究発表会講演集 pp.965~966
- 4) 一本英三郎(1981) : サンドコンパクションパイル工法の実用設計と実施結果, 第36回年次学術講演会研究討論会資料 土木学会 pp.51 ~56
- 5) 森脇武夫・網干寿夫・中ノ堂裕文・藤井秀憲(1986), 粘性土におけるひずみ増分比~応力比関係の時間依存性, 第21土質工学研究発表会講演集 pp.459~460
- 6) Alpan, I. (1967) : THE EMPIRICAL EVALUATION OF THE COEFFICIENT  $K_0$  AND  $K_{0r}$ , Soils and Foundations Vol.7 No.1 pp.31~40
- 7) 土質工学ライブラリー 4 「土質試験結果の解釈と適用例」第2章
- 8) 西 好一・江刺靖行(1977) : 弾塑性論に基づく砂の応力~ひずみ関係式, 電力中央研究所報告, NO.376014
- 9) 熊本直樹・住岡宣博・吉国 洋(1986) : 部分改良地盤の余改良域の決定法について, 第31回土質工学シンポジウム, -軟弱粘性土地盤における沈下予測と対策- pp.141 ~146