

# 未貫通SCPで改良された粘土地盤の圧密挙動

鄭 鍾範<sup>1</sup>・森脇 武夫<sup>2</sup>・住岡 宣博<sup>3</sup>・日下部 治<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 工修 広島大学大学院 工学研究科構造工学専攻 (〒739-8527 広島市鏡山 1-4-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 広島大学助教授 工学部第四類 (〒739-8527 広島市鏡山 1-4-1)

<sup>3</sup>正会員 工博 中電技術コンサルタント(株) 臨海・都市計画部 (〒734-0001 広島市南区出汐 2-3-30)

<sup>4</sup>正会員 Ph.D 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

サンドコンパクションパイル(以下SCP)工法を軟弱粘土地盤に適用する際に、施工機械の能力不足、経済的制約などの理由からSCPを支持層である下部砂礫層まで打設せず、SCPの下部に粘土層を残す場合がある。このような場合は未貫通SCPと呼ばれているが、現在用いられているSCP工法の慣用設計法では、SCPは下部支持層まで完全に貫通している場合を想定しており、SCPが軟弱地盤の途中で打ち止められている場合の取り扱いについては明らかにされていない。そこで本研究では、未貫通SCP打設地盤の基本的な圧密メカニズムを解明することを目的として室内模型地盤を行った。その結果、SCP打設地盤の応力分担比は時間的(圧密の進行)および場所的(深度方向)にも変化し、その程度はSCPの打設深度、置換率および相対密度に影響されることが明らかとなった。

*Key Words* : model test, partly penetrated SCP, stress concentration ratio, consolidation behavior

## 1. まえがき

地盤改良工法の一つであるサンドコンパクションパイル(以下SCP)工法は、軟弱地盤中に振動または衝撃荷重を用いて砂を圧入して良く締まった砂杭を造成し、軟弱地盤の強化を図るものである<sup>1)~4)</sup>。このSCP工法では、強度の大きい砂杭と軟弱な粘性土地盤から成る複合地盤を形成することにより、せん断強度の増加、圧密の促進、沈下の低減などの効果が得られる<sup>5)~11)</sup>。このように性質の異なる材料から構成される複合地盤はその性状が複雑になり、その力学挙動については解明されていない点も多い。そのため、慣用設計法がいくつか提案されているが<sup>14), 16)~18)</sup>、設計法では時間的および深度方向にも変化する応力分担比を一定値としている<sup>18)</sup>など、必ずしも複合地盤の力学挙動を忠実に反映したものとはなっていない。また、SCP工法を軟弱地盤に適用する際、以下の理由からSCPの下部に粘土層を残し未貫通とする場合がある。

①一般的に用いられるSCP施工機械の打設深度は陸上用で地表面から35m、海上用で海上面から50~60m程度であり、改良すべき粘土層がそれより深い場合は施工機械

の施工能力不足で未貫通となる。②改良地盤のすべり破壊に対する安全性が確保でき、許容沈下量が所定の値以内に納まると、経済的制約から未貫通にする。③下部砂礫層の地下水が被圧されている場合やSCP工法と水位低下工法を併用する場合にはSCPに下部砂礫層から地下水の流入を防止するために未貫通とする。④埋立材料として廃棄物を用いる場合や改良地盤上を廃棄物処分地として利用する場合には汚染水がSCPを通して周辺の地下水汚染を引き起こさないように未貫通とする<sup>13), 20), 21)</sup>。

表-1はSCPの打設深度を地盤工学研究発表会の過去20年間にわたる報告から整理したものであり、この表から未貫通SCPはかなりの割合<sup>15), 23), 25)</sup>で用いられていることがわかる。

現在用いられているSCP工法のいくつかの慣用設計法は、置換率、砂杭の内部摩擦角、周辺粘土地盤の初期せん断強度と強度増加率、応力分担比などの違いが考慮できるようになっているが、SCPは下部支持層まで貫通しているものとして考えられており、SCPが軟弱地盤層の途中で打ち止められている場合の取り扱いについては考慮されていない<sup>14), 25)</sup>。

表-1 過去20年間のSCP打設範囲

年 (論文数)	貫通率 (%)	100-80 (%)	80-60 (%)	60 (%)
1976-1980 (13)	30.8 (4)	30.8 (4)	7.7 (1)	30.8 (4)
1981-1985 (6)	50.0 (3)	50.0 (3)	-	-
1986-1990 (7)	71.4 (5)	14.3 (1)	14.3 (1)	-
1991-1995 (15)	-	20.0 (3)	53.3 (8)	26.7 (4)

すなわち、一般にSCP打設地盤の安定計算は応力分担比を仮定して円弧すべり法を用いて行われているが、その応力分担比はSCPが下部支持層まで貫通しているか否かに関わらず貫通させた場合の値を使っている。SCPの下端が下部支持地盤で支えられているか否かによってSCPへの応力集中は異なると考えられるが、これを考慮する方法は提案されていない<sup>17), 24)</sup>。また、これらの慣用設計法での未貫通地盤の圧密計算では、上部を貫通SCPに対する方法で計算し、下部は未貫通サンドドレーンによる圧密と同じになると考えて、均一弾性地盤に対する応力分散解より算出した応力増分を用いて沈下量を計算するとともに、SCP下端深度の水平面を完全な排水層とみなして圧密時間を計算することが多い。しかし、実際には、SCP打設域の下部に応力集中が生じ、慣用設計法で予測する値より大きな応力増分が生じるとともに、断面積の限られているSCP断面は完全な排水面として機能しないことが多い<sup>24), 27)</sup>。そのため、慣用設計法では未貫通地盤の圧縮量を小さく、圧密時間を早く見積もる傾向にあることが木山ら<sup>14)</sup>、網干ら<sup>10), 11)</sup>、住岡ら<sup>23), 24)</sup>、常陸ら<sup>25)</sup>によって報告されており、未貫通SCP改良地盤の圧密挙動を明らかにすることが求められている。そこで本研究では、未貫通SCP改良地盤の基本的な圧密メカニズムを解明することを目的として、鉛直等ひずみ状態でSCPの置換率、打設深度および相対密度を変えた室内模型実験を行い、応力分担比の深度分布および経時変化を中心に、未貫通SCP改良地盤の圧密挙動を検討した。なお、本論文では応力分担比を全応力によって定義している。

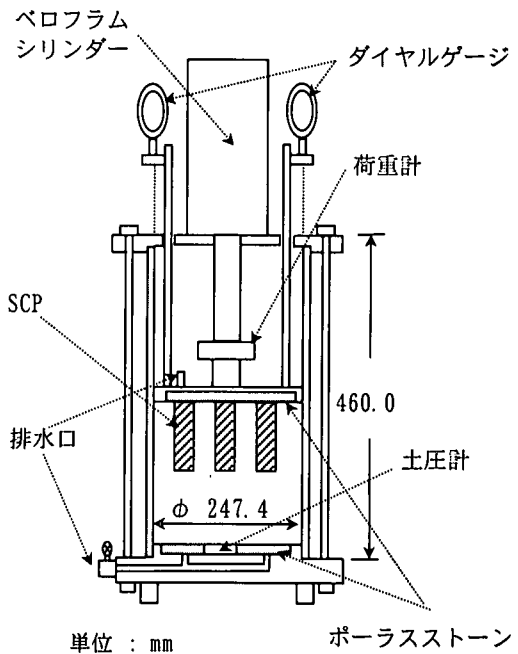


図-1 模型地盤の実験装置

表-2 広島粘土と豊浦砂の土質工学的性質

(a) 広島粘土

土粒子密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	液性限界 $w_L$ (%)	塑性限界 $w_P$ (%)	塑性指数 $I_P$
2.657	110.0	43.2	66.8

(b) 豊浦砂

土粒子密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	最大間隙比 $e_{max}$	最小間隙比 $e_{min}$
2.640	0.996	0.601

(c) 広島粘土の力学特性

強度増加率 $c_u/p$	圧密係数 $c_v$ (cm <sup>2</sup> /day)	圧縮指数 $C_c$	膨潤指数 $C_s$
0.357	55.2	0.758	0.105

## 2. 実験装置および試料

本実験は直径247.4mm、高さ460mmのステンレススチール円筒容器内に作製したSCP模型地盤を復動式ベロフラムシリンダーを用いて一次元的に載荷することにより行った。その実験装置の概略を図-1に示す。

表-3 実験パターン

地盤	SCP 直径 (cm)	置換率 $a_s$ (%)	相対密度 $D_r$ (%)	貫通率 $H_d / H$ (%)	初期層厚 $H$ (cm)
無改良	-	-	-	-	17.20
改良	3.6	28.8	80±1.0	50	16.85
				75	17.10
				100	17.57
	3.6	28.8	70±1.0	50	16.90
				75	17.25
				100	17.85
	4.6	40.0	80±1.0	50	17.01
				75	17.34
				100	17.95

実験に用いた試料は、広島湾五日市沖より採取した沖積粘土（通称広島粘土）であり、粘土をスラリー状にし、425 $\mu$ mのふるいを通して粗粒分を除去し、含水比を液性限界の約2倍（約190%）に調整後、室内で練り返し再圧密したものを使用した。また、SCPには豊浦砂を使用した。それらの物理的性質を表-2(a), (b)に、広島粘土の力学特性を表-2(c)に示す。

### 3. 実験方法

模型地盤に対する荷重は、鉛直等ひずみ条件とし、ペロフラムシリンダーの荷重を剛な載荷板を介して加えた。試料作製時の圧密時間は土質試験に示されている3 $\epsilon$ 法<sup>2)</sup>によって定め、排水条件は両面排水とした。まず、模型地盤を49kPaの圧密荷重で一次的に圧密した後、いったん圧密容器から載荷装置を取り外した。その後、予め決められたSCP打設位置に孔が垂直になるようにガイドパイプを使って、試料に $\phi = 36$ mmまたは46mmの孔を木工用ドリルで慎重に削孔した。そして、豊浦砂を相対密度 $D_r = 80\%$ と70%に調整して、-40℃で凍結させて砂柱を作製し、その上下端面に土圧計（三計エンジニアリング、P310-5）を埋設した後、孔に挿入した。一方、粘土部の土圧計（前述）と間隙水圧計（Druck, PDCR81）は、砂杭埋設用の孔および計器埋設位置より約10mm程度横に前述と同様な方法で削孔された直径12mmの孔から粘土中の所定の位置に横方向に押し込んで設置した。その後、砂杭埋設用の孔には前述の方法で凍結した砂杭を挿入し、非改良部分の孔には比較的含水比の小さな粘土スラリーを充填した。SCPおよび各計測センサーを埋設し、SCPが

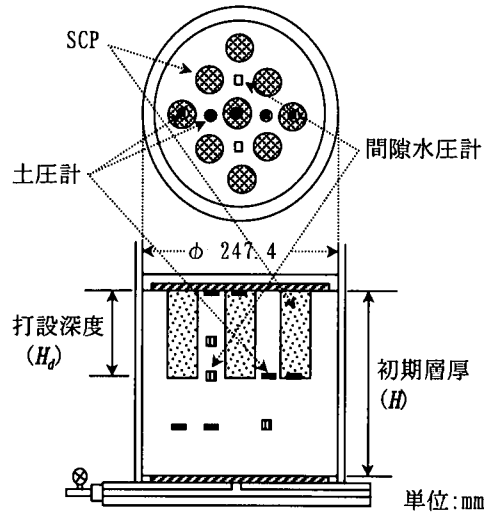


図-2 模型地盤と計測概略図(貫通率 50%の例)

解凍した後、載荷板に沈下計3つを設置し、49kPaの圧密荷重で4日間再圧密してSCPと粘土の応力状態を安定させた。土圧計のキャリブレーションは、同じ実験装置を用い、実施した実験条件と同じ状態になるように砂または粘土を単体で詰め、その中に土圧計を埋設し、ペロフラムシリンダーを介して載荷された鉛直応力と土圧計で測定された読み値の関係をを用いて行った。なお、粘土部の土圧と間隙水圧には各計測センサーを埋設するために掘削した孔の影響があると考えられるが、掘削した孔は粘土スラリーが充填され除荷前の荷重まで再圧密されていること、掘削した孔の断面積は粘土部全体の面積に比べて十分小さいこと、計測センサーは掘削していない粘土部に押し込まれていること、などの理由から掘削した孔が粘土部の土圧および間隙水圧に及ぼす影響は考慮していない。

このようにして作製した模型地盤を98kPaの荷重（増加荷重 $\Delta\sigma = 49$ kPa）で、鉛直等ひずみ条件で圧密した。載荷は瞬時載荷とし、排水は上面排水、下面は非排水とした。圧密放置時間は3 $\epsilon$ 法によって決定した。実験パターンは、改良地盤についてはSCPの相対密度と打設深度を変化させて、それに未改良地盤を加えて計10種類である。実験パターンを表-3に示す。表中に示した貫通率( $H_d / H$ )は初期層厚( $H$ )に対するSCP打設深度( $H_d$ )を表す。本研究で用いた砂杭の直径は置換率が $a_s = 28.8\%$ の場合に3.6cm、 $a_s = 40.0\%$ の場合に4.6cmで、地盤層厚（約17cm）に対して約1/4.7~1/3.7程度の値である。

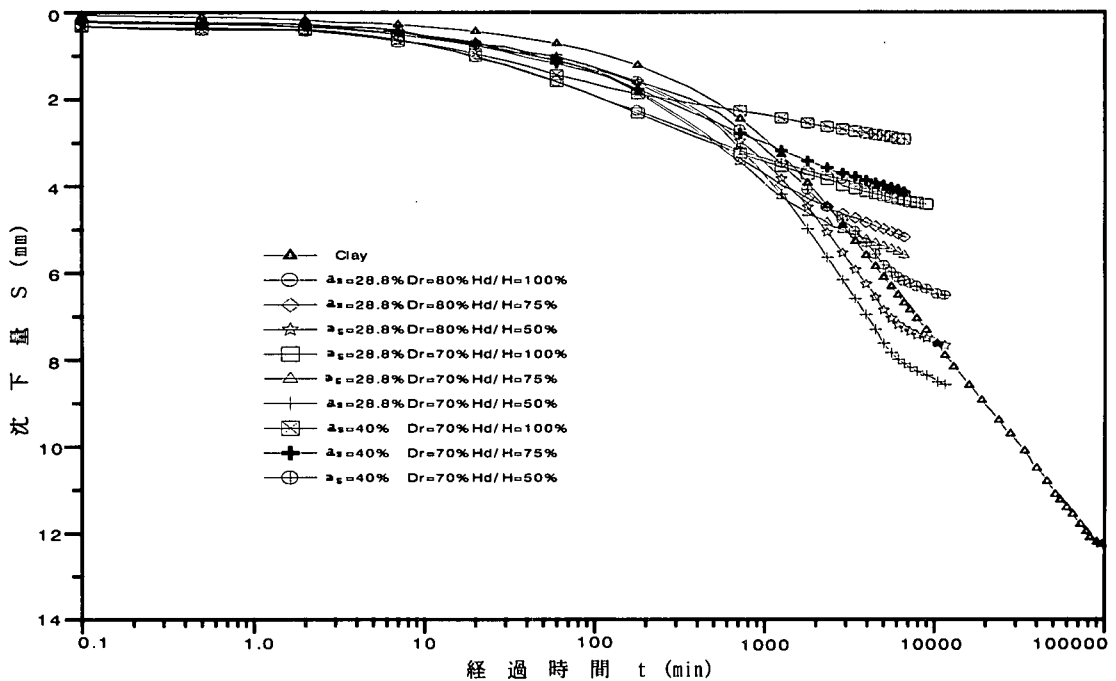


図3 圧密沈下量と経過時間の関係

一方、現場で施工されることの多い直径1~2mの砂杭の直径は、10~20mの地盤層厚に対して1/20~1/5程度の値となり、実験に用いた値はこの値よりかなり大きい。現行設計法では置換率が同じであればSCPの直径の違いは圧密速度に影響を及ぼすが、応力分担比には影響を及ぼさないとされている。実際にSCPの直径が応力分担比をはじめとする複合地盤の圧密挙動にどのような影響を及ぼすかについては今後明らかにしていく必要があるが、本研究ではSCP間粘土の中に土圧計や間隙水圧計を埋設するスペースを確保するために前述の直径を用いた。また、図-2には代表的な貫通率50%の実験ケースのSCP、土圧計及び間隙水圧計の配置を示す。

#### 4. 実験結果及び考察

##### (1) 沈下-時間関係

改良地盤および無改良地盤の表面沈下と時間関係を図-3に示す。当然予想されることではあるが、無改良地盤の沈下は改良地盤より大きく、改良地盤の中では貫通率の小さなものほど沈下が大きいことが分かる。表-4は、圧密を3法で打ち切ったときの最終沈下量とそれをもとに次式<sup>20)</sup>を用いて逆算した応力分担比を示したものである。

$$S_f = \{1 - (1 - \beta) \cdot H_d / H\} \cdot S_{f_0} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{1}{1 + (m - 1)a_s} \quad (2)$$

ここに、 $S_f$ は貫通率が $H_d / H$ の改良地盤の最終沈下量で、 $S_{f_0}$ は無改良地盤の最終沈下量で、表-2に示した圧縮指数 $C_c = 0.758$ を用いて各ケースの初期層厚を考慮して求めたものである。なお、このようにして求められた無処理地盤の最終沈下量は $S_{f_0} = 12.1\text{mm}$ で、実測値 $12.3\text{mm}$ とよく一致している。また、 $\beta$ は沈下低減率、 $m$ は応力分担比および $a_s$ は置換率である。この表からSCPが完全に貫通している $H_d / H = 100\%$ の場合、応力分担比は $m = 7 \sim 9$ で、通常の慣用設計法で用いられている値( $m = 3 \sim 5$ )よりかなり大きいことが分かる。また、SCPの相対密度が大きいほど、置換率が大きいほど応力分担比は大きくなっている。未貫通の場合は、貫通率の減少とともに応力分担比も小さくなり、 $H_d / H = 75\%$ のときに $m = 5 \sim 6$ 、 $H_d / H = 50\%$ のときに $m = 2 \sim 4$ となっており、貫通の場合よりそれぞれ約1/1.5、1/3の値となっている。また、未貫通の場合も貫通の場合と同様に、SCPの相対密度が大きいほど、置換率が大きいほど応力分担比も大きくなっている。図-4は以上で述べた応力分担比と貫通率の関係を描いたものであるが、本実験の範

表-4 最終沈下量から逆算した応力分担比

置換率 $a_s$ (%)	相対密度 $D_r$ (%)	貫通率 $H_d/H$ (%)	$\alpha$ による 最終沈下量 $S_f$ (cm)	逆算した 応力分担比 $m$
28.8	80	100	0.421	7.67
		75	0.521	5.73
		50	0.769	3.08
28.8	70	100	0.444	7.14
		75	0.563	5.11
		50	0.864	2.47
40.0	70	100	0.294	8.96
		75	0.417	5.87
		50	0.653	3.20

囲内では各実験条件ごとに応力分担比は貫通率の低下とともにほぼ直線的に減少している。

図-5と図-6は、置換率 $a_s=28.8\%$ 、相対密度 $D_r=70\%$ の改良地盤と無改良地盤に対して圧密度 $U=100\%$ に相当する点（圧密終了点と呼ぶ）を $\log t$ 法と $\alpha$ 法によって定めた場合の圧密度( $U$ )と時間( $t$ )の関係である。これらの図から改良地盤はSCPの排水効果によって貫通 $H_d/H=100\%$ 、未貫通 $H_d/H=75\%$ 、 $50\%$ の順に圧密が早く終了し、無改良地盤は遅れることが分かる。

また、表-5は $\log t$ 法と $\alpha$ 法によって求めた圧密終了点の時間( $t_f$ )と沈下量( $S_f$ )を比較したものである。この表によれば圧密終了点の時間は無改良地盤で $\log t$ 法と $\alpha$ 法の違いはあまりないが、改良地盤では $\alpha$ 法が $\log t$ 法よりかなり大きくなっている。このように、無改良地盤の場合、圧密度～時間関係は圧密終了点の決定方法が $\log t$ 法か $\alpha$ 法かの違いにあまり影響されないが、改良地盤の圧密度～時間関係は圧密終了点の決定方法に影響されている。そこでまず、どのような方法によって圧密終了点を評価したら良いかを検討する。

図-7は、間隙水圧と時間の関係を示したものであり、これを見ると $\log t$ 法によって定めた圧密終了点では間隙水圧が消散せずに残っているが、 $\alpha$ 法で定めた圧密終了点では完全に消散していることが分かる。なお、以後の図中に示される $y/H$ は初期層厚( $H$ )に対する計測深度( $y$ )を表しており、間隙水圧の測定位置は隣接するSCP間の中間である。この結果から改良地盤における圧密終了の判断は $\log t$ 法より $\alpha$ 法の方が適していると思われる。

また、表-5には図-3の沈下～時間関係から直接求めた二次圧密速度( $C_\alpha = d\varepsilon/d \log t$ )と次式によって未貫通

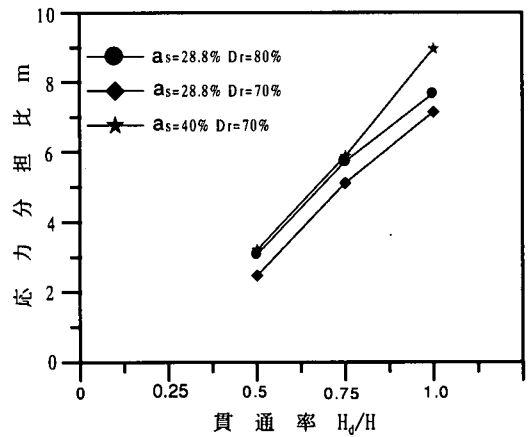


図-4 逆算した応力分担比と貫通率関係

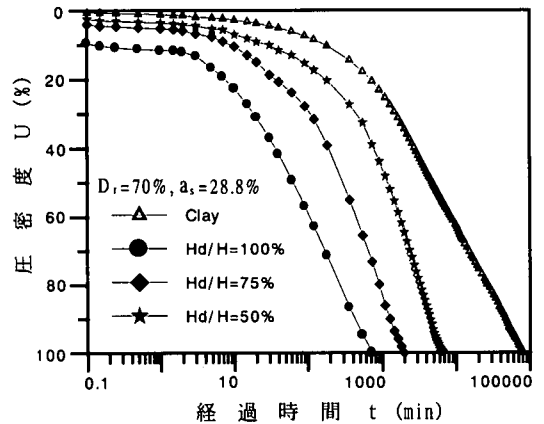


図-5  $\log t$ 法で計算した圧密度と時間の関係

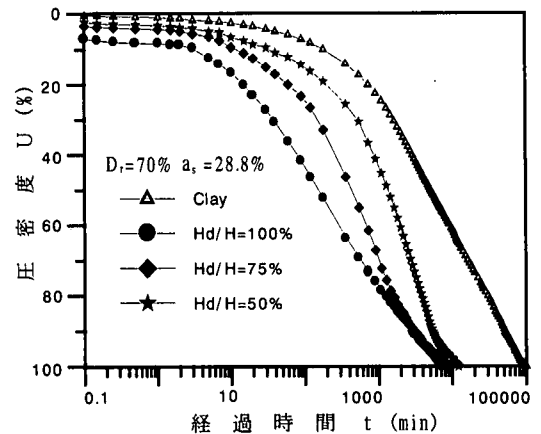


図-6  $\alpha$ 法で計算した圧密度と時間の関係

の場合の二次圧密速度を無改良と完全貫通の場合の二次圧密速度を用いて予測したものと示している。

表-5 logt 法と 3 $\alpha$  法による圧密終了時間の関係

		無改良地盤	改良地盤		
相対密度 $D_r$ (%)		-	70		
置換率 $a_s$ (%)		-	28.8		
貫通率 $H_d/H$ (%)		-	100	75	50
logt	時間 $t_f$ (分)	80,000	720	1,980	6,660
	沈下 $S_f$ (cm)	1,202	0.326	0.473	0.811
3 $\alpha$	時間 $t_f$ (分)	100,000	7,000	9,000	11,880
	沈下 $S_f$ (cm)	1,230	0.444	0.563	0.864
二次圧密速度 ( $C_\alpha$ )		1.86E-2	4.46E-3	8.87E-3	1.28E-2
式(3)で予測される $C_\alpha$		"	"	7.99E-3	1.15E-2

$$C_\alpha = C_{\alpha 0} \cdot (1 - H_d/H) + C_{\alpha 100} \cdot (H_d/H) \quad (3)$$

ここに、 $C_{\alpha 0}$  と  $C_{\alpha 100}$  は、それぞれ無改良と完全貫通の場合の二次圧密速度である。この表より、二次圧密速度は貫通率の増加とともに減少し、未貫通の場合には式(3)で予測される値より実測値の方が大きくなっていることがわかる。これは、未貫通の場合の二次圧密速度を無改良と完全貫通の場合の二次圧密速度を用いて単純に予測できないことを物語っている。

## (2) 間隙水圧の消散

図-8 は SCP の相対密度の違いが、置換率  $a_s = 28.8\%$  の改良地盤において深度  $y/H = 50\%$  での間隙水圧の消散過程に及ぼす影響を検討したものである。なお、この図で示されている間隙水圧は、表-4 の応力分担比  $m$  を用いて次式によって算出した粘土に加わる応力  $\Delta\sigma_c$  を用いて正規化してある。

$$\Delta\sigma_c = \frac{\Delta\sigma}{1 + (m-1)a_s} \quad (4)$$

ここに、 $\Delta\sigma$  は増加荷重で、 $\Delta\sigma = 49\text{kPa}$  である。また、この計算に用いる応力分担比としては、後述する地盤内応力の実測値から求めた値を用いる方法もあるが、ここでは最終沈下量から逆算した応力分担比が実際の地盤内の応力状態をどの程度表しているか検討するために表-4 の値を用いた。この図から、間隙水圧の消散に及ぼす相対密度の影響は少ないが、貫通率が同じ場合は相対密度  $D_r = 80\%$  の方が  $70\%$  よりわずかに早く間隙水圧が消散し

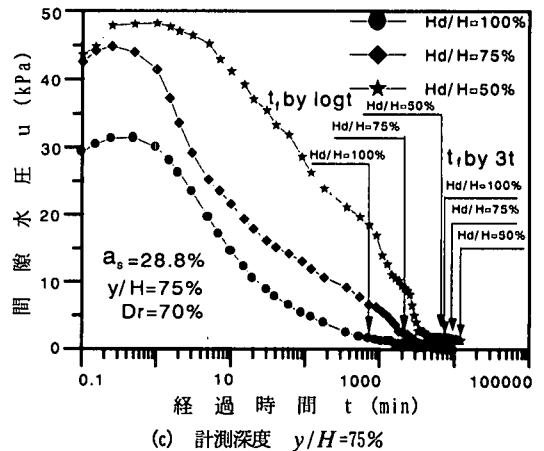
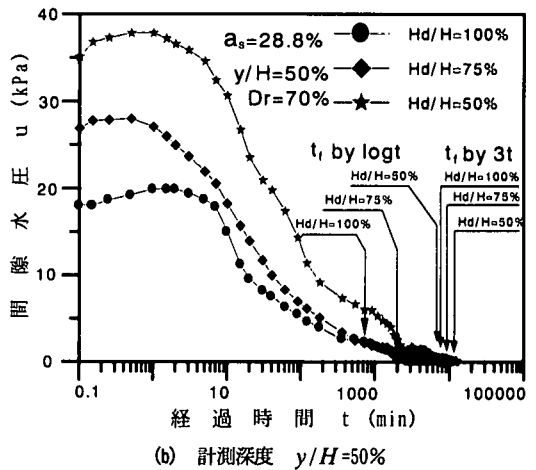
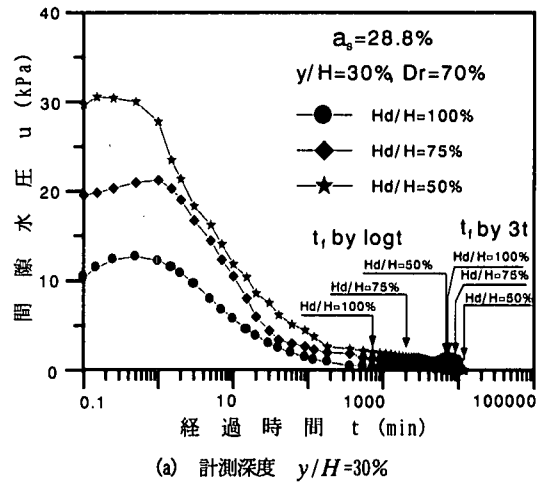


図-7 間隙水圧と時間の関係 (置換率 28.8%, 相対密度 70%)

ていることがわかる。そして、全てのケースで間隙水圧が測定された深度まで SCP が打設されているにもかかわらず

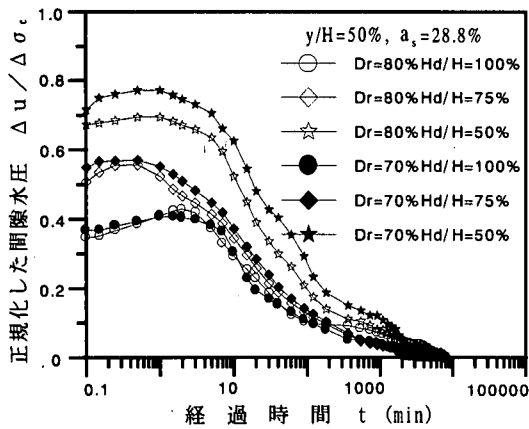


図-8 正規化した間隙水圧と時間の関係 (置換率 28.8%)

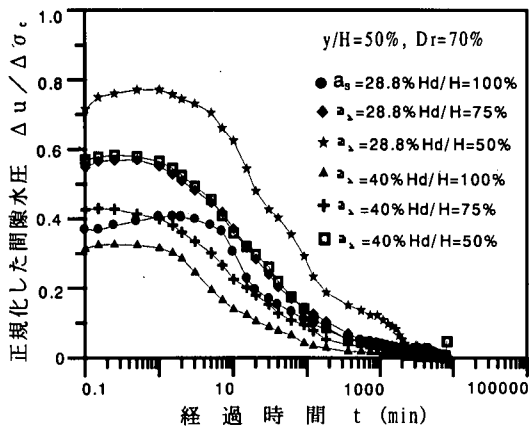
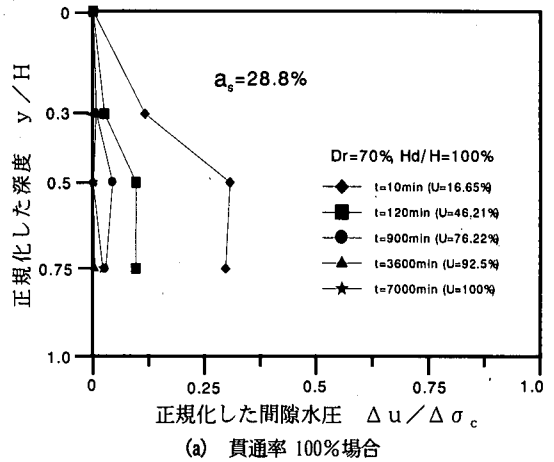


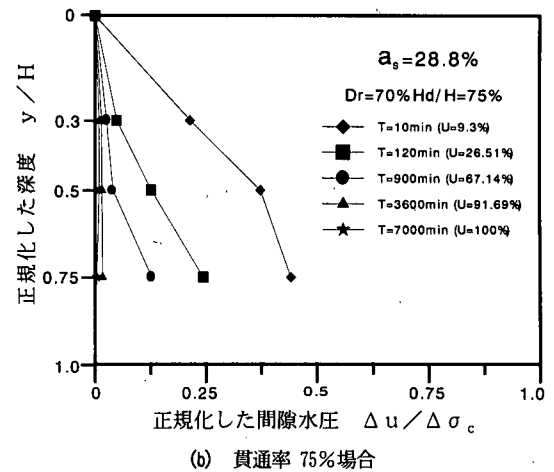
図-9 正規化した間隙水圧と時間の関係 (相対密度 70%)

らず  $H_d/H = 100\%$  で  $D_r = 80\%$  の圧密後半部を除いて間隙水圧の消散は、 $H_d/H = 100\%$  の貫通の場合が最も早く、次で貫通率が  $H_d/H = 50\%$  の順になっている。

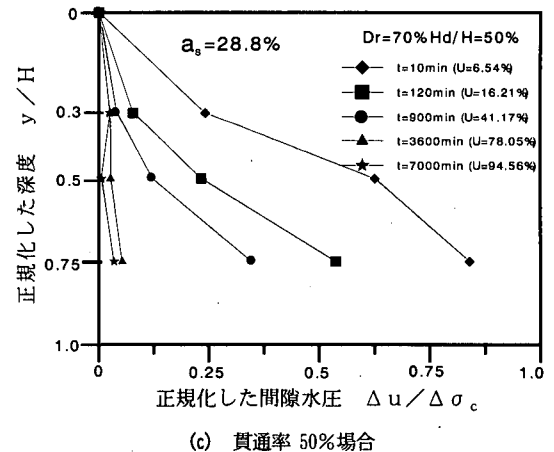
図-9は、SCPの相対密度が  $D_r = 70\%$  の改良地盤において深度  $y/H = 50\%$  での間隙水圧消散に及ぼす置換率の影響を検討したものである。この図でも、間隙水圧は前述したように表-4に示した最終沈下量から逆算した応力分担比を用いて算出される粘土部の増加応力  $\Delta\sigma_c$  によって正規化されている。この図において、置換率が  $a_s = 40\%$  の場合、圧密初期に  $\Delta u/\Delta\sigma_c = 1.0$  であるため、最終沈下量から逆算した応力分担比を用いて予測される粘土部の増加応力とほぼ等しい間隙水圧が発生しているのに対して、 $a_s = 28.8\%$  の場合は、逆算した応力分担比を用いて予測される粘土部の増加応力より1.2~1.4倍程度大きな



(a) 貫通率 100% 場合



(b) 貫通率 75% 場合



(c) 貫通率 50% 場合

図-10 正規化した深度と間隙水圧関係 (置換率 28.8%, 相対密度 70%)

間隙水圧が発生していることが分かる。このことは、置換率が大きい場合のSCPと粘土の応力分担は、最終沈下量から逆算した応力分担状態となっているが、置換率が

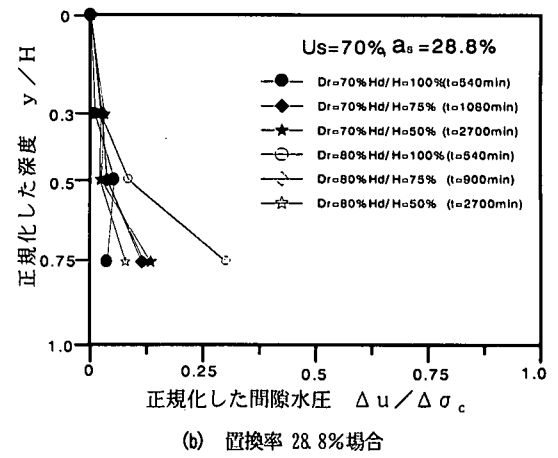
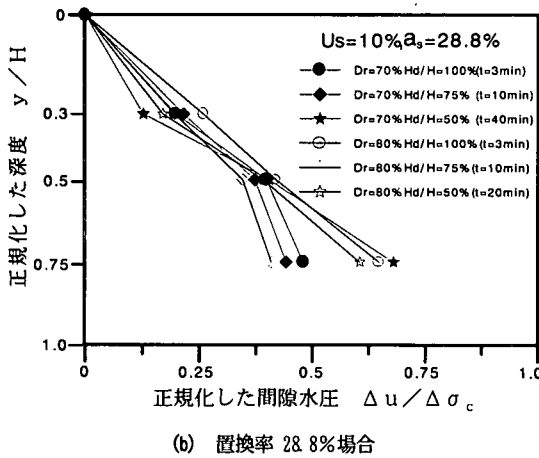
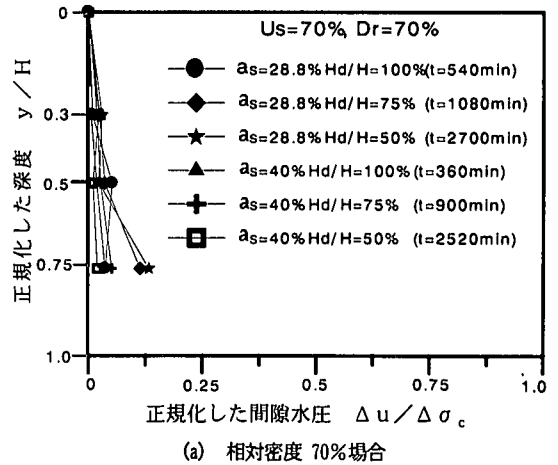
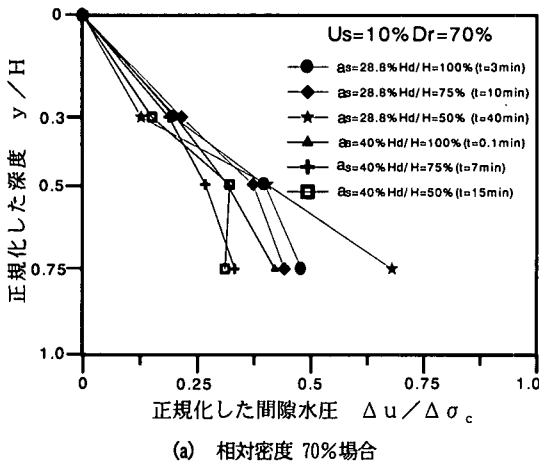


図-11 正規化した深度と間隙水圧の分布 (圧密度  $U_s=10\%$ )

図-12 正規化した深度と間隙水圧の分布 (圧密度  $U_s=70\%$ )

小さい場合は、最終沈下量より逆算した状態より粘土部により大きな応力が作用していることを示唆している。このような現象が生じた原因のひとつとして、圧密の進行に伴うSCPから粘土への応力の再分配がSCPの置換率、相対密度および貫通率などに影響されることがあげられるが、後述するように応力再分配のメカニズムは複雑であり、本実験の結果だけからこのような現象を合理的に説明することは困難であった。

図-10は、置換率が $a_s=28.8\%$ 、相対密度が $D_r=70\%$ の改良地盤における間隙水圧のアイソクロンを貫通率ごとに描いたものである。本実験ではSCPと上端面から排水を行っているため、全てのケースで最も上部( $y/H=30\%$ )の間隙水圧は、他の深度より小さくなっており、 $y/H=30\%$ の位置では上端の排水面の影響を受けていると考えられる。SCPが貫通している図-10(a)の $y/H=50\%$ と $75\%$ の間隙水圧の値を見ると、ほぼ一様に消散して

おり、少なくとも $y/H=50\%$ 以深ではSCPへ向かう水平放射流れによって圧密が進んでいると考えることができる。一方、SCPが未貫通である図-10(b)と(c)を見ると、SCP打設部の間隙水圧(図-10(b)の $y/H=50\%$ の値)は $H_d/H=100\%$ の貫通の場合とほぼ等しいが、SCP下端部の間隙水圧(図-10(b)の $y/H=75\%$ と図-10(c)の $y/H=50\%$ の値)は未貫通部分の影響を受け、SCP打設部より消散が遅れていることが明らかであり、その傾向は圧密が進むとより顕著になっている。

図-11は、間隙水圧のアイソクロンに及ぼす置換率と相対密度の影響を調べたものである。この図は沈下量から求めた圧密度が $U_s=S/S_f=10\%$ の時点のアイソクロンを描いたものであるが、図における間隙水圧の消散程度からみた平均圧密度 $U_u=1-\int_0^1(\Delta u/\Delta\sigma_c)\cdot d(y/H)$ はおおよそ $U_u=50\sim70\%$ と推定でき、沈下量による圧密度より間隙水圧による圧密度が大きくなっている。これは、



3 $\epsilon$ 法で決定した最終沈下量（100%圧密沈下量）には二次圧密沈下やSCPに集中していた応力が粘土部へ再分配されることによって生じる沈下が含まれるためと考えられる。また、貫通率が小さくなるほど間隙水圧の消散はSCP打設部で速く、未貫通部で遅れる傾向が読み取れる。

一方、置換率と相対密度が間隙水圧のアイソクローンに及ぼす影響については明確な傾向が読み取れない。特に、沈下量から求めた圧密度が $U_s=70\%$ である図-12(a)と(b)では、置換率や相対密度の違いにかかわらず間隙水圧はほぼ消散している。なお、図-12(b)において、 $D_r=80\%$ で $H_d/H=100\%$ の貫通の場合の間隙水圧が他のケースより大きくなっているが、これが真の挙動か測定上の誤差なのかは本実験では明らかにできなかった。

### (3) 応力分担比

図-13は置換率 $a_s=28.8\%$ の改良地盤で、深度 $y/H=50\%$ の位置での応力分担比の経時変化を示したものである。これを見ると、応力分担比は圧密の進行とともにいったん増加し、ピークを示した後、減少していることが分かる。このような現象は、圧密途中でSCPに集中した応力が時間の経過とともに粘土に再分配されるために起こるものと考えられる。同様の現象は、住岡ら<sup>24)</sup>や運輸省<sup>27)</sup>の実験によっても確認されている。また、 $H_d/H=75\%$ と50%の未貫通の場合には、貫通率が同じものを比較するとSCPの相対密度の大きい方が応力分担比もわずかに大きくなっているが、相対密度による差はほとんどなく、圧密終了時には $H_d/H=75\%$ の場合に $m \approx 2.0$ 、 $H_d/H=50\%$ の場合に $m \approx 1.5$ に落ち着いている。一方、 $H_d/H=100\%$ の場合は、圧密前半では相対密度の大きい方で応力分担比が大きくなっているが、途中で逆転し、圧密終了時には $D_r=70\%$ の場合に $m \approx 3.0$ 、 $D_r=80\%$ の場合に $m \approx 2.0$ となり、SCPの相対密度の大きい方が、SCPから粘土への応力の再分配が大きいことが分かる。

図-14は、SCPの相対密度が $D_r=70\%$ の改良地盤において深度 $y/H=50\%$ での応力分担比に及ぼす置換率の影響を検討したものである。貫通率が $H_d/H=50\%$ と小さい場合は、応力分担比に置換率の影響はほとんど表われず、 $m \approx 1.2 \sim 1.5$ の間を推移している。貫通率が大きい場合、すなわち $H_d/H=75\%$ と貫通 $H_d/H=100\%$ の場合は置換率が小さい方で応力分担比が大きくなっている。SCPと粘土を弾性体とした場合、応力分担比は主としてSCPと粘土の剛性およびポアソン比に依存し、置換率には無関

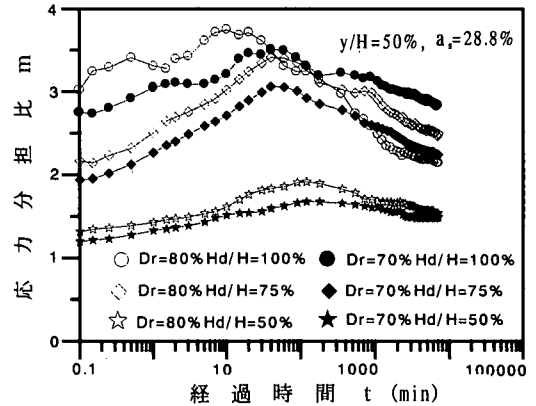


図-13 応力分担比と時間の関係（置換率 28.8%）

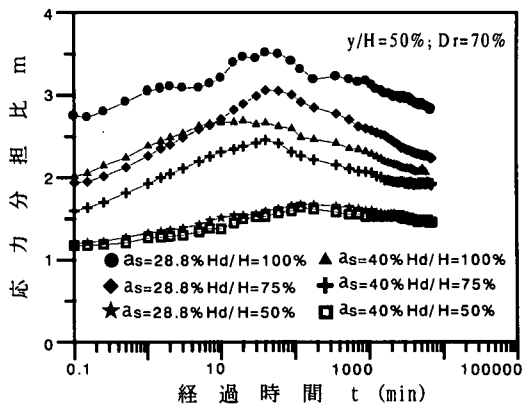


図-14 応力分担比と時間の関係（相対密度 70%）

係であるが、実際には置換率も影響していることがこの図から窺える。

次に、応力分担比の深度方向分布について検討する。図-15はSCPの置換率が $a_s=28.8\%$ 、相対密度が $D_r=70\%$ の場合で、貫通率が $H_d/H=100\%$ 、75%および50%のときの応力分担比の深度方向分布を経過時間ごとに示したものである。なお、図中の深度は粘土層厚で正規化したものであり、圧密度は3 $\epsilon$ 法で決定した $U=100\%$ 圧密沈下量を用いて求めたものである。SCPが貫通している図-15(a)を見ると、圧密初期には地盤上部（地盤表面）で $m \approx 3.0$ 、地盤下部（計測深度 $y/H=75\%$ ）で $m \approx 2.5$ と応力分担比はそれほど大きな深度方向分布を示していないが、圧密の進行とともに地盤上部の応力分担比は $m \approx 4.5$ まで増加するのに対して地盤下部の応力分担比は圧密途中で一旦増加するものの最終的には圧密初期の $m \approx 2.5$ を若干下回る値となり応力分担比の深度方向分布が大きくなっていることがわかる。

また、SCPが未貫通である図-15(b)と(c)を見ると、地

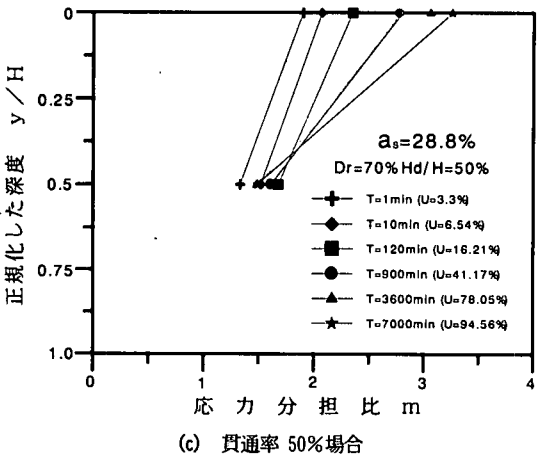
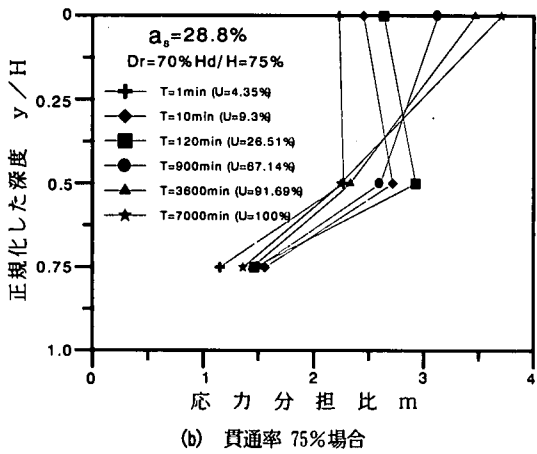
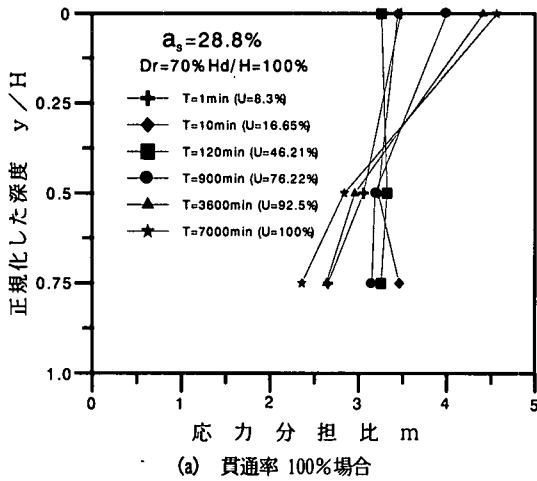


図-15 応力分担比と時間の関係  
(置換率 28.8%, 相対密度 70%)

盤表面の応力分担比は貫通の場合と同様に圧密の進行とともに  $m \approx 3.5$  程度まで増加しているが、SCP 下端部では  $m = 1.0 \sim 1.5$  であまり変化しない。このことは、盛土な

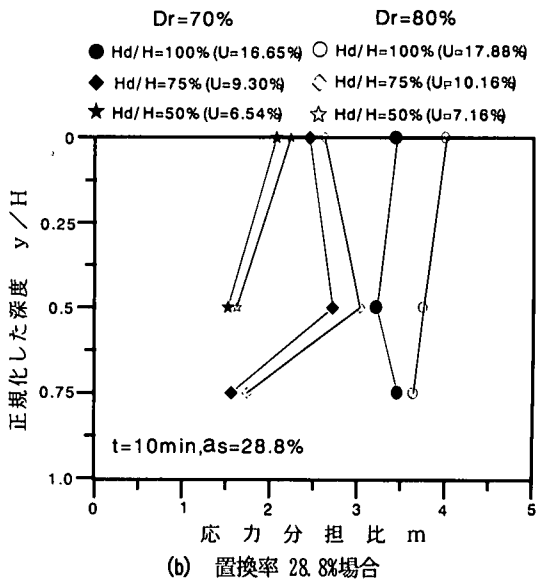
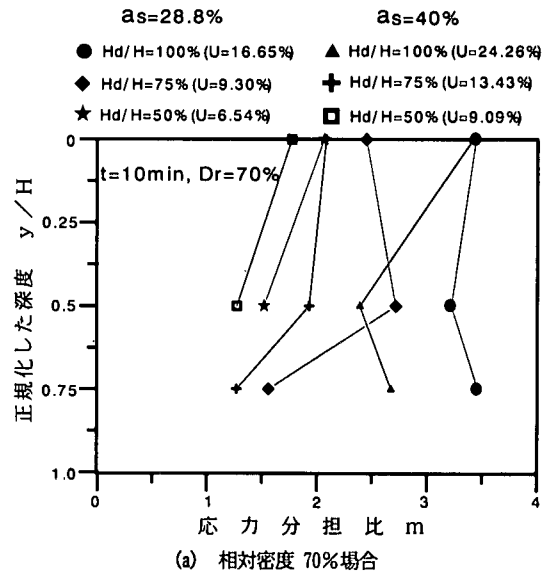


図-16 正規化した深度と応力分担比分布 (経過時間 10分)

どの荷重が段階的に作用する場合の 2 段階以降の荷重に対する安定検討時には応力分担比の設定に注意しなければならないことを示している。

図-16 と図-17 は、経過時間が 10 分と 900 分のときの応力分担比の深度方向分布に及ぼす置換率と相対密度の影響を調べたものである。なお、ここで選んだ経過時間 10 分と 900 分は、それぞれ応力分担比が最大となる時と間隙水圧がほぼ消散する時である。

経過時間が  $t = 10$  分のときの図-16 によれば、応力分担比は置換率および相対密度の違いにかかわらず貫通率が

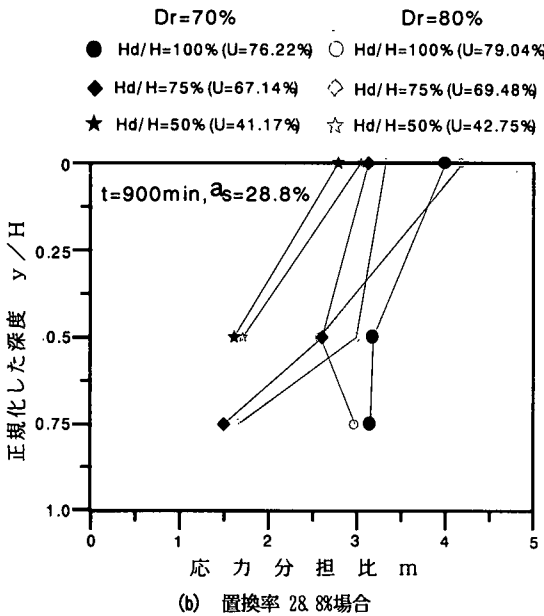
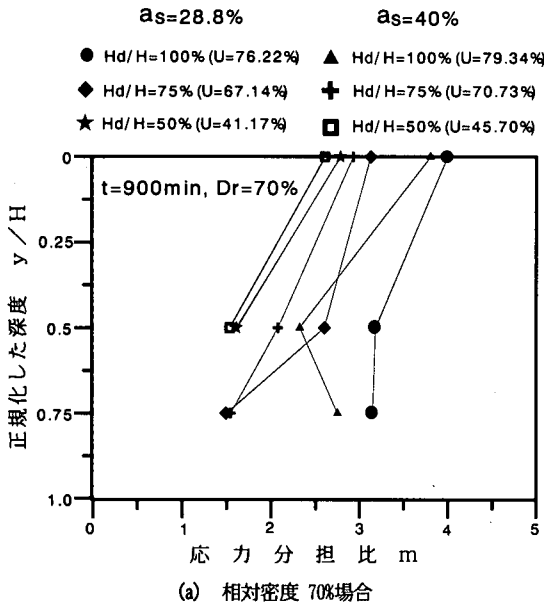


図-17 正規化した深度と応力分担比分布 (経過時間 900分)

同じ場合にはほぼ同じ形の深度方向分布を示し、その量は置換率が小さいほど、また相対密度が大きいほど、大きくなっている。また、経過時間が  $t=900$  分のときの図-17においても  $t=10$  分のときとほぼ同じ傾向を示しているが、貫通の場合の地盤内部の応力分担比は  $t=10$  分のときと逆転して相対密度の小さい方が小さくなっている。これは前述したようにSCP改良地盤ではSCPに集中していた応力が圧密の進行に伴って粘土に再配分されるが、SCP

の下端が下部支持層で支持され、かつ相対密度が大きい場合にはSCPへの応力集中が大きくなりSCPが降伏しやすくなるため、それに伴う粘土への応力再配分が大きくなり、結果として応力分担比が小さくなったと考えられる。しかし、貫通の場合でも地盤表面の応力分担比は相対密度が大きい方で大きくなっており、前述の考え方で全ての挙動が説明できる訳ではない。今後、SCPの拘束圧も測定できる詳細な実験や有限要素法解析などを行って、SCPから粘土への応力再配分のメカニズムを明らかにする必要がある。

## 5. 結論

本研究では、SCPを下部支持層まで貫通させた場合と未貫通にした場合の圧密模型実験を行い、次の結論が得られた。

- 1) 改良地盤はSCPの排水効果によって、貫通  $H_d/H = 100\%$ 、未貫通  $H_d/H = 75\%$ 、 $50\%$ の順に圧密が早く終了し、無改良地盤は遅れる。
- 2) 未貫通地盤の二次圧密速度は、貫通率の低下とともに大きくなる。また、その値は貫通率に応じて無改良地盤と完全貫通地盤の二次圧密速度を比例配分して求めた値より大きくなる。
- 3)  $\log t$  法によって定めた圧密終了点では間隙水圧が消散せずに残っているが、 $\alpha$  法で定めた圧密終了点では完全に消散している。このことから改良地盤における圧密終了の判断は  $\log t$  法より  $\alpha$  法の方が適していると判断できる。
- 4) 測定した地盤内応力から算出した応力分担比は、圧密の進行とともに変化する。すなわち、SCP上部(地表面)の応力分担比は圧密の進行とともに増加し、圧密終了時は  $H_d/H = 100\%$  の場合に  $m = 4.5$ 、 $H_d/H = 75\%$  の場合に  $m = 3.5$ 、 $H_d/H = 50\%$  の場合に  $m = 3.0$  に達する。一方、SCP下部の応力分担比はいったん増加し、ピークを示した後に減少し、圧密終了には  $H_d/H = 100\%$  の場合に  $m = 2.5$ 、 $H_d/H = 75\%$  の場合に  $m = 2.0$ 、 $H_d/H = 50\%$  の場合に  $m = 1.5$  に落ち着く。
- 5) 測定した地盤内応力から算出した応力分担比は、深度方向に変化し、SCP上部で大きく、SCP下部で小さくなる。また、この傾向は貫通率の低下およ

び圧密の進行とともに大きくなる。

- 6) SCPが未貫通の場合、SCPの相対密度が応力分担比に及ぼす影響は比較的小さいが、SCPの相対密度が大きい方で応力分担比が大きくなる。一方、SCPが完全貫通の場合は、圧密前半では同様な傾向があるが、圧密の進行とともに逆転し、SCPの相対密度が大きい方で応力分担比が小さくなる傾向がある。このことは、SCPの相対密度の大きい方が圧密の進行に伴うSCPから粘土への応力の再分配が大きいことを示している。
- 7) SCPの置換率が応力分担比に及ぼす影響は、貫通率が大きな場合 ( $H_d/H = 75\%$ 以上) に表れ、置換率が小さいほど応力分担比が大きくなる。
- 8) 最終沈下量から逆算した応力分担比は、 $H_d/H = 100\%$ の場合に  $m = 7 \sim 9$ 、 $H_d/H = 75\%$ の場合に  $m = 5 \sim 6$ 、 $H_d/H = 50\%$ の場合に  $m = 2 \sim 4$  となり、地盤内応力から算出した応力分担比より大きな値となる。このことは、最終沈下量から逆算した応力分担比を用いて、地盤内の応力状態を評価できないことを示している。
- 9) SCPが未貫通の場合、SCP下端深度での粘土の間隙水圧はSCP未貫通部分の影響を受けて消散が遅れ、この傾向は貫通率が小さい場合に大きくなる。また、未貫通部分の影響はSCP下端深度より浅い部分にも影響し、SCP貫通部分での粘土の間隙水圧の消散を遅らせる。なお、SCPの相対密度と置換率が間隙水圧の消散過程に及ぼす影響はほとんど認められない。
- 10)  $\alpha$  法によって決定した最終沈下量をもとに沈下量から求めた圧密度より間隙水圧から求めた圧密度の方が大きくなる。これは、 $\alpha$  法で決定した最終沈下量には二次圧密沈下やSCPに集中していた応力が粘土に再分配されることによって生じる沈下が含まれているためと考えられる。

以上で示したように、未貫通SCP改良地盤の応力分担比は、時間的（圧密の進行）及び場所的（深度方向）にも変化するとともに、SCPの相対密度、置換率および貫通率にも影響されることが明らかとなった。本研究では行った実験条件も限られているため、具体的な設計方法は提案できなかったが、未貫通SCP改良地盤の合理的な設計を行うためにはこれらの影響を考慮する必要がある。

謝辞：本論文の作成におきまして、終始多大なご助力をいただきました広島大学土木教室文部技官の山本博氏に深く感謝いたします。また、中電技術コンサルタント(株)の福原和顕氏、三宅健一氏、広島大学卒業生の佐藤芳男氏と今井崇満氏、同大学院博士課程前期M2年加藤典彦氏に対しても深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 建設省：コンポーザー工法の試作研究，建設工業技術研究補助，1957。
- 2) 村山朔郎：Sand Compaction Pileによる軟弱地盤の改良（コンポーザー工法），大阪建設業協会講演会資料，pp. 1-17，1957。
- 3) 村山朔郎，庄野勝：振動する中空管を用いる砂杭の造成法，特公昭35-1631号，1960。
- 4) 小川充郎，一本英三郎：粘性土に対するパイロコンポーザー工法の適用について（粘性土の力学的特性に与える影響について），土と基礎，Vol. 11，No. 3，pp. 3-8，1963。
- 5) 茨木龍雄：複合土の直接せん断試験による実験的研究（第一報），土と基礎，Vol. 13，No. 7，pp. 33-39，1965。
- 6) 運輸省：軟弱地盤の新置換法の研究，応用科学技術研究補助，1966。
- 7) 松尾稔，久我昂，前川行正：砂柱を含む粘土の力学的性質に関する研究，土木学会論文集，第141号，pp. 42-55，1967。
- 8) 松尾稔，稲田直治，寺村昌忠：複合地盤の支持力に関する研究（その1），土と基礎，Vol. 16，No. 12，pp. 11-19，1968。
- 9) 松尾稔，寺村昌忠，稲田直治，広瀬富哉：複合地盤の支持力に関する研究（その2），土と基礎，Vol. 17，No. 1，pp. 3-9，1969。
- 10) 網千寿雄，吉國洋，原田邦夫：複合地盤の圧密に関する研究，土木学会第25回年次学術講演会第Ⅲ部門，pp. 377-379，1970。
- 11) 網千寿夫，吉國洋，一本英三郎，原田邦夫：複合地盤の沈下特性について，第15回土質工学シンポジウム，pp. 73-80，1971。
- 12) 吉國洋：多次元圧密理論とその軸対称問題への適用，東京工業大学学位論文，1973。
- 13) Hughes, J. M. O., Withers, N. J. and Greenwood, D. A.: A field trial of the reinforcing effect of a stone column in

- soil. *Geotechnique* Vol. 25, No. 1, pp. 31-44, 1975.
- 14) 木山正明, 池森珪祐, 山本嘉一郎, 中堀和英: 未貫通サンドドレーンによる圧密の数値計算例, 第13回土質工学研究発表会発表概要集, pp. 241-244, 1978
  - 15) 木山正明, 池森珪祐, 山本嘉一郎, 中堀和英: 未貫通サンドドレーンによる圧密の理論解と実測値の比較, 第14回土質工学研究発表会発表概要集, pp. 293-296, 1979.
  - 16) 吉國洋: パーチカルドレーン工法の設計と施工管理, 技報堂出版, pp. 108-114, 1965.
  - 17) 一本英三郎: 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回土木学会年次学術講演会研究討論会資料, pp. 51-55, 1981.
  - 18) 曾我部隆久: サンドコンパクションパイル工法の設計・施工の技術的課題, 第36回土木学会年次学術講演会研究討論会資料, pp. 39-50, 1981.
  - 19) Mitchell, J. K. and Katti, R. K. : Soil improvement, *Proc. 10th ICSMFE State of the Art Report (Preliminary)*, pp. 295-299, 1981.
  - 20) 奥村樹郎: 軟弱地盤対策, 土木学会論文集, No. 358/III-3, pp. 1-10, 1985.
  - 21) 網干寿夫, 小場善助, 二木正則, 村瀬博一: サンドドレーン未貫通部の圧密沈下挙動について, 第20回土質工学研究発表会発表概要集, pp. 1663-1664, 1985.
  - 22) 土質試験法(第3回改訂版) 編集委員会編: 土質試験の方法と解説, 土質工学会, pp. 304-305, 1990.
  - 23) 住岡宣博: パーチカルドレーン改良下部無処理粘土地盤の間隙水圧挙動, 土木学会第46回年次学術講演会講演概要集第三部門, pp. 414-415, 1991.
  - 24) 住岡宣博, 吉國洋: パーチカルドレーンによる粘土の圧密変形メカニズムに関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 463/III-22, pp. 125-132, 1993.
  - 25) 常陸壮介, 山本浩, 池田直太, 及川研, 中ノ堂裕文: 未貫通パーチカルドレーンによる圧密, 第29回土質工学研究発表会発表概要集, pp. 2107-2110, 1994.
  - 26) 鄭鍾範, 森脇武夫, 日下部治, 住岡宣博: 未貫通のSCP模型地盤の圧密挙動, 第30回地盤工学会研究発表会発表概要集, Vol. 1, pp. 631-632, 1995.
  - 27) 運輸省港湾技術研究所: 空港建設における不貫通ドレーンの適用性に関する研究, 第30回空港土木工事報告会資料, pp. 14-15, 1995.

(1998. 1. 16 受付)

## THE CONSOLIDATION BEHAVIOR OF CLAY GROUND IMPROVED BY PARTLY PENETRATED SCP

Jong-bum JUNG, Takeo MORIWAKI, Nobuhiro SUMIOKA and Osamu KUSAKABE

The sand compaction pile (SCP) method is the most commonly used soil improvement techniques. In present design of the SCPs method, the SCPs are assumed to be fully penetrated up to the bottom of the clay deposit. However, there are many cases where the SCPs are partly penetrated to the bottom of the clay deposit because of the construction cost, the capacity of construction equipments and other factors. In this research, a series of model tests was carried out in order to clarify the consolidation behavior of the clay ground improved by the partly and fully penetrated SCPs. As the results, it was found that the stress concentration ratio of model ground improved by partly penetrated SCPs varied with time and depth and this ratio was dependent on the penetration depth of SCPs.