

# プラスチックボードドレーンの排水性能に関する基礎的研究

三浦哲彦\*・朴 永穆\*\*・M.R. MADHAV\*\*\*

軟弱粘土の圧密改良に利用するためのプラスチックボードドレーン (PD) が種々開発されている。これらの排水性能を比較検討し、また等値直径を評価するために数種類の PD およびサンドドレーンについて大型圧密装置による実験を行った。また、PD 周辺における間隙水の流れ特性と粘土の圧密の方向性の検討、PD 周辺における細粒子の移動現象、ウェルレジスタンスに関する影響要因、スミアゾーンの領域、等の基礎的事項について考察した。さらに、二層スミアゾーンに対する圧密解析モデルを提案し、解析例を示した。

**Key Words :** plastic-board drain, consolidation, well resistance, smear zone

## 1. まえがき

バーチカルドレーン工法による軟弱地盤改良においては、サンドドレーンに代わり得るものとしてプラスチックボードドレーン (以下 PD という) の利用が広まってきている。その有用性が注目されるようになったのは 1960 年頃<sup>1)</sup>からであり、これまでに数多くの PD が開発されてきたが、それらの排水性能に関する評価は必ずしも定まっていない。PD の排水性能は、基本的にはバーチカルドレーンに関する吉国<sup>2)</sup>の考察によって評価できようが、PD に特有な検討事項も多い。これまでの研究としては、PD の変形や側圧による縦方向の通水能力の低下を明らかにした研究<sup>3)~8)</sup>、板状の PD の等値直径<sup>9)~12)</sup>、PD のフィルター材の透水係数<sup>1)</sup>、細粒土の移動現象<sup>13), 14)</sup>、ウェルレジスタンスに関する近似解<sup>2), 10)</sup>および厳密解<sup>15)</sup>、またスミアゾーン<sup>10), 16), 17)</sup>、等に関する研究が注目される。

これらの諸研究の成果を踏まえた上で、本研究では次の基礎的事項について考察した。1) PD の等値直径に関する大型圧密装置による検証、2) PD 周辺における間隙水の流れ特性と粘土圧密の方向性の検討、3) PD 周辺における細粒土の移動現象、4) ウェルレジスタンスに関する影響要因、5) スミアゾーンが圧密過程に及ぼす影響。

## 2. 大型圧密装置を用いた実験

### (1) 実験材料および方法

粘土の圧密量が 20% を越える大ひずみに達した場合

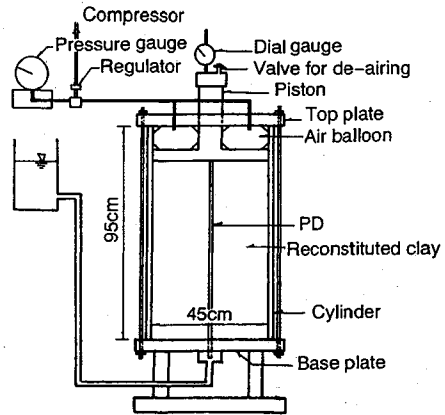


Fig.1 Schematic diagram of large-scale consolidation apparatus

の PD の排水性能を調べるために、Fig.1 に示す大型圧密装置を用いて実験を行った。PD として、市販されている 5 種類 (GL, CS<sub>2</sub>, MB, TS, TF) をそれぞれ幅を 5 cm に作り直して用いた。Table 1 に各 PD の物理的性質を示す。PD の等値直径を比較評価するための袋詰めサンドドレーン (SD) 実験には、幅 5 cm の TS のフィルター (ポリプロピレン不織布) の中に Terzaghi のフィルター基準を満たす砂を詰めて用意した。

大型圧密装置の中心に PD または SD を芯状にセットし、その周辺に十分に練り返した佐賀市兵庫町の有明粘土 (自然含水比  $w_n=140\%$ 、液性限界  $w_L=128\%$ 、塑性指数  $I_p=80\%$ 、土粒子比重  $G_s=2.62$ 、圧縮指数  $C_c=1.88$ 、圧密圧力  $p=49\text{ kPa}$  における圧密係数  $c_v=210\text{ cm}^2/\text{day}$ ) を 85 cm の厚さまで入れ、Fig.1 に示すようにエアバルーンに空気圧を送り剛性円盤を介して鉛直圧力 (49 kPa) を加えて圧密を行った。排水は、Fig.1 に示すように PD の下端部から行った。一連の実験は 2 台の装置を用いて 3 回にわたって実施したが、圧密で脱

\* 正会員 工博 佐賀大学教授 理工学部建設工学科 (〒840 佐賀市本庄町1)

\*\* 学生会員 佐賀大学大学院博士後期課程 工学系研究科 システム生産科学専攻 (韓国 農漁村振興公社)

\*\*\* 正会員 工博 佐賀大学教授 低平地防災研究センター (インド工科大学 カンパール校)

Table 1 Physical properties of PD tested

		GL	MW, MB	CS, CS <sub>2</sub>	TS	TF
Size (mm)	Thickness	3.4 ± 0.5	3.0 ± 0.5	2.6 ± 0.5	4.6 ± 0.3	7.5 ± 1.0
	Width	95.8 ± 2.0	100 ± 20	94 ± 2	100 ± 3	100 ± 5
Unit weight (g/m)		100	75	90	100	80
Structural type		Free	Free	Fixed	Free	One body
Material	Filter	Synthetic fiber of cellulose and polyester	Non woven fabric made from polypropylene	Spun bonded of polyester	Non woven fabric made from polypropylene	Spun bonded non woven fabric made from polyethylene
	Core	Polyolefin	Polypropylene	Polyethylene	Polyethylene	
Section diagram						

MB and CS<sub>2</sub> are improved ones of MW and CS respectively.

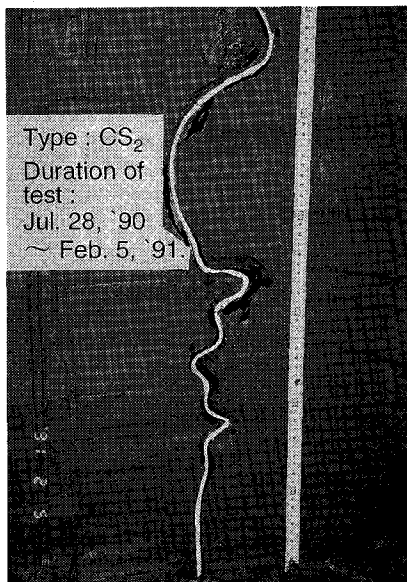


Photo.1 Deformed shape of PD (CS<sub>2</sub>) after consolidation,  $\epsilon_1 = 22\%$

水した塩分を含んだ水は保存しておき、これを元に戻し含水比調整して第2, 3回目の粘土試料とした。

(2) 実験結果及び考察

Photo.1 は圧密量が 22% に達した時の CS<sub>2</sub> の変形状態を示す。また、Fig.2 は 5 種類の PD および SD の実験後のスケッチである。PD によって、緩やかに曲がったものと局部的に折れ曲がりを生じたものに分けられる。一方、SD については砂の充填密度が低く、横方向の変形は小さかった。新倉ら<sup>19)</sup>は折れ曲がった所で PD が破損したケースがあると報告しているが、本実験に用いた PD についてはそのような状況は観察されなかった。PD の屈曲は流路断面の減少および損失水頭の増加をもたらす、ウェルレジスタンス増大の原因となる。

Fig.3 に PD(TS) と SD の沈下曲線を比較して示す。

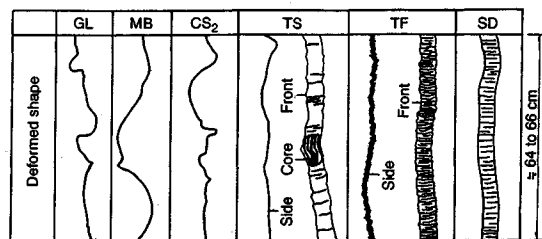


Fig.2 Deformed shape of PD and SD after consolidation,  $\epsilon_1 > 20\%$

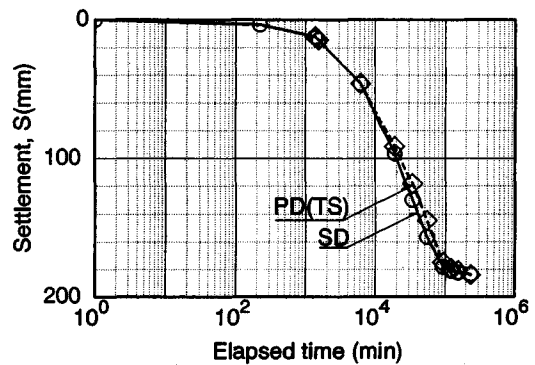


Fig.3 Comparison of settlement curves with PD and SD

SD の沈下速度はわずかに早く進行しているが、最終沈下量はほぼ同じであった。他の 4 種類の PD を用いた行った実験結果もほぼ同様な沈下曲線を現した。また、排水量の経時変化の比較においても、ほぼ同じ傾向を認めている<sup>20)</sup>。

PD の等値直径 ( $d_w$ ) の評価の方法としては、PD の幅 (=a) および厚さ (=b) を用いた Hansbo<sup>10)</sup> の式  $2(a+b)/\pi$ 、Rixner ら<sup>11)</sup> の式  $(a+b)/2$ 、等が提案されている。本実験の結果は、等値直径は  $2(a+b)/\pi \geq d_w > (a+b)/2$  の関係にあることを示唆するものであった。現在、代表的な PD (幅 100 mm, 厚さ 3 mm) の等値直

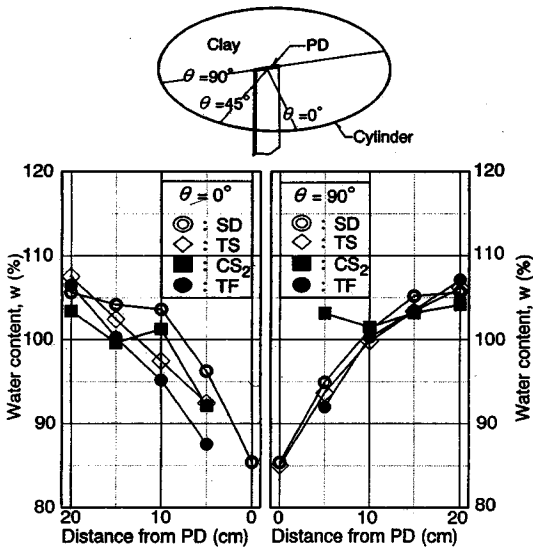


Fig.4 Water content distribution of clay after consolidation

径として 50 mm を採用することが多いが、その妥当性について実験的検証を求める声が少ない。及川ら<sup>21)</sup>は、現場試験において PD の等値直径を  $60 \text{ mm}$  ( $2(a+b)/\pi$  の 94%) とした場合に予測に近い挙動を示すことを報告している。また、今回の大型圧密装置による実験結果に照らしても、等値直径評価に関する現行の慣用法は  $2(a+b)/\pi$  に対して安全係数 1.3 を考えていることになり妥当であるとの確信を得た。

ドレーンへの間隙水の流入特性を明らかにするために、一次圧密後の SD および PD 周辺粘土の含水比分布を試料の上部、中部、および下部の 3 箇所において、3 方向 ( $\theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ ) について調べた<sup>20)</sup>。Fig.4 は、試料中部についての結果であるが、上部と下部についてもほぼ同じ含水比分布特性が認められた。PD 周辺部と側壁付近とで含水比に差を生じたのは、等ひずみ条件のもとで圧密を行ったために PD から周辺部に向かって圧密度が低下したこと、また粘土と装置側面の間の摩擦による間隙水圧の残留の影響があらわれたこと、が原因していると考えられる。この実験結果より、SD では水の流れは放射状となること、端部 ( $\theta=90^\circ$ ) から水が流入できない CS タイプの場合には方向性があることが認められた。

### 3. PD 周辺部における細粒土の移動

#### (1) 実験材料および実験方法

PD 周辺に形成されるといわれるフィルターゾーン<sup>13)</sup> (粘土中に細粒土が集まる領域)を確認するために、2. で述べた大型圧密試験後に、PD(CS<sub>2</sub>) 表面から 1 cm ずつ半径方向 ( $\theta=0^\circ$ ) に粘土を切り出し、粒度試験を行った。また、PD(TS) 表面から 2 cm 毎にポケットコー

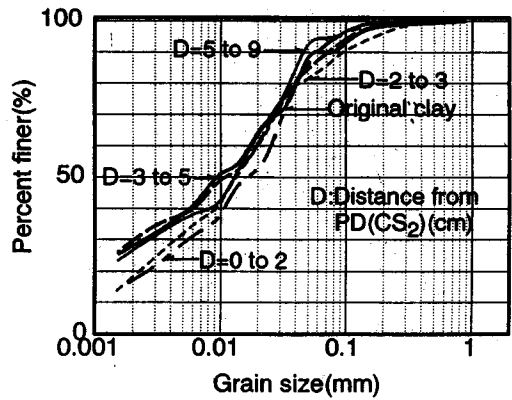


Fig.5 Grain size distribution of clay around PD after consolidation

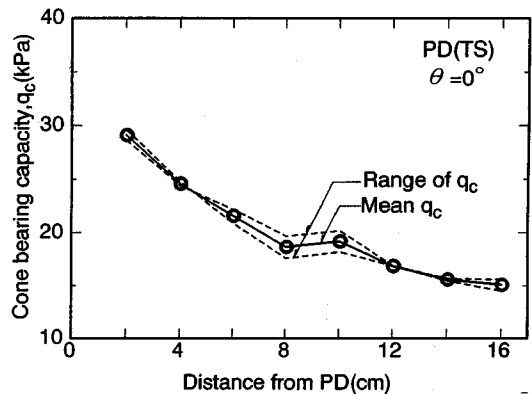


Fig.6 Strength distribution of clay around PD after consolidation

ンペネトロメータ (PCP, コーン断面積  $0.385 \text{ cm}^2$ , 先端角  $30^\circ$ ) を用いて強度分布を測定した。クロッキング<sup>14)</sup> (細粒土による不織布の目詰まり)量は、空気乾燥した不織布の重量の水洗い前後の差を測って求めた。パッシング (不織布を通過した細粒土)量は、実験後の SD のコアに付着している細粒分を水洗い分離し、重量測定して計測した。

#### (2) 実験結果及び考察

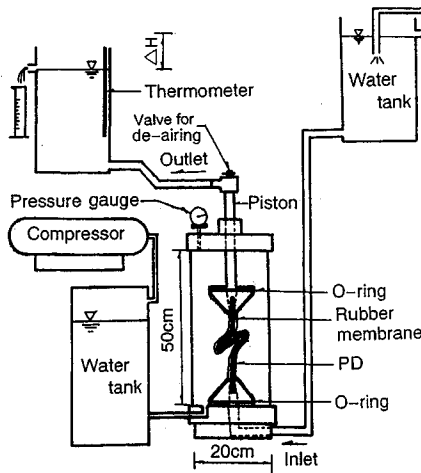
Fig.5 に示すように粒径  $0.01 \text{ mm}$  以下の粒子含有量は PD 付近と離れたところでは約 10% の差を生じており、PD 周辺粘土の粒度は半径方向に変化していることがわかった。また PCP による強度分布は、Fig.6 に示すように PD(TS) 表面から 8 cm 離れた付近を境にして、明確に変わることが認められた。これらのことと PD 周辺の含水比の変化 (Fig.4) を考え合わせると、フィルターゾーンが、PD 表面から 3~8 cm の位置に生じたことが推察される。フィルターゾーンは、後述するスミアゾーンと共に圧密遅れの一因になる。

フィルターゾーンと PD 表面との間には細粒土の流出によって形成されるブリッジングゾーンが生じるとい

**Table 2** Amounts of clogging and passing of fine particles after consolidation

Amount of clogging (filter sleeve of 855cm <sup>2</sup> )			Passing of fine particles (H=85cm)	
Grain size (mm)	Weight (g)	%	Sample location	Weight (g)
≥ 0.074mm	2.48	11	Upper	2.97
< 0.074mm	20.01	89	Middle	2.12
Total	22.49	100	Lower	2.71
			Total	7.80

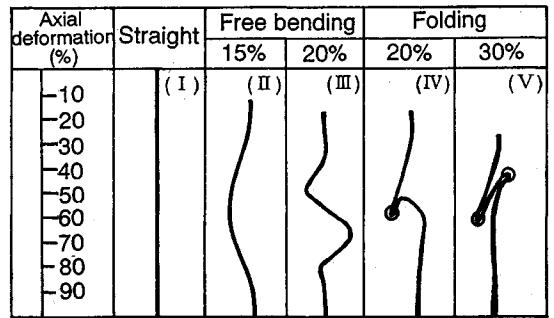
H(=85cm):Length of PD



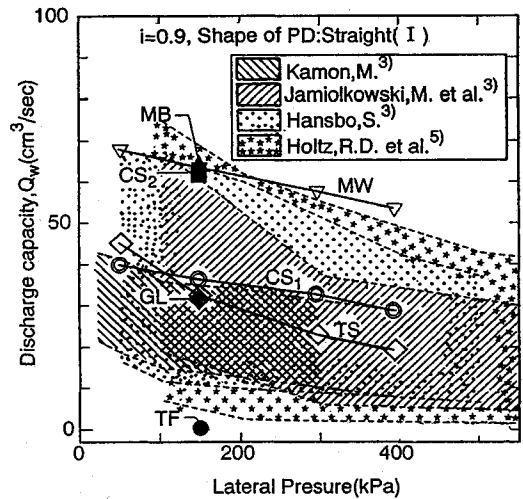
**Fig.7** Test apparatus for longitudinal permeability of PD

われている<sup>13)</sup>。これを検証するために測定したクロッキング量及びパッシング量は **Table 2** に示すとおりであった。これら2つの量を合わせると約 30 g となるが、これは PD 表面から 4 cm までの粘土から流出した細粒土の量 (約 24 g) に近い。このように、PD 周辺の粘土は細粒土含有率が少なく、含水比が低く、かつ強度が高い、等の測定結果は、そこにブリッジングゾーンが形成されたことを示唆している。上記の結果に基づいてブリッジングゾーンは、PD 表面から 3~4 cm の範囲で生じるものと推察される。PD 付近の細粒土の移動現象とブリッジングゾーンの形成については、不織布の上に置いたシルト質粘土に対する透水実験においても確かめている<sup>22)</sup>。上述の結果は、PD 周辺に形成されたフィルターゾーンおよびブリッジングゾーンを直接測定する確定的方法が見当たらないので一つの試みとして行ったものであるが、得られた結果によりフィルター層の形成を推測することができると思われる。

嘉門<sup>1)</sup>は PD のフィルターが厚い場合には粘土粒子の侵入によって透水係数が低下する可能性があること、しか



**Fig.8** Deformed shape of PD for the longitudinal permeability test



**Fig.9** Variation of discharge capacity,  $Q_w$  with lateral pressure

しフィルターの厚さが薄い場合には粘土の圧密促進に障害をもたらさないことを報告している。本実験においても、圧密実験前後に不織布 (フィルター、厚さ  $t=0.25$  mm) に対する定水位透水試験を行い、クロッキングが影響を及ぼしていないことを確認した。

#### 4. PD の縦方向通水能力に関する検討

##### (1) 実験方法

PD の縦方向通水能力は、 $Q_w$ =(単位通水量  $Q$ /動水勾配  $i$ ) によって評価できる<sup>6)</sup>。この  $Q_w$  および透水係数  $k_w$  が側圧の大きさや縦方向の大変形によってどのような影響を受けるのかを調べるために、**Table 1** に示した 7 種類の PD を対象に以下の実験を行った。**Fig.7** に示すアクリル円筒管 (直径 20 cm, 高さ 50 cm) 内にゴムスリーブ (厚さ 0.8 mm) で覆った PD (幅 10 cm, 長さ 40 cm) をセットし、三軸試験と同様の方法で側圧  $\sigma_3$  をかけ、PD の下部から上部に向けて水道水を通した。実験は、4 つの側圧条件 ( $\sigma_3=49, 147, 294$  および 392 kPa)、4 つの動水勾配条件 ( $i=0.1, 0.2, 0.5$  および 0.9)、

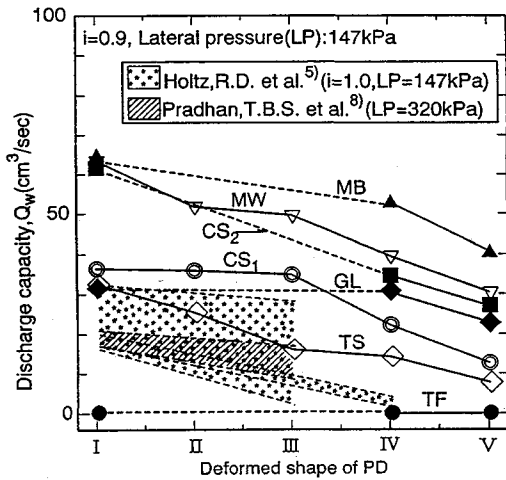


Fig.10 Variation of discharge capacity,  $Q_w$  with deformed shape of PD

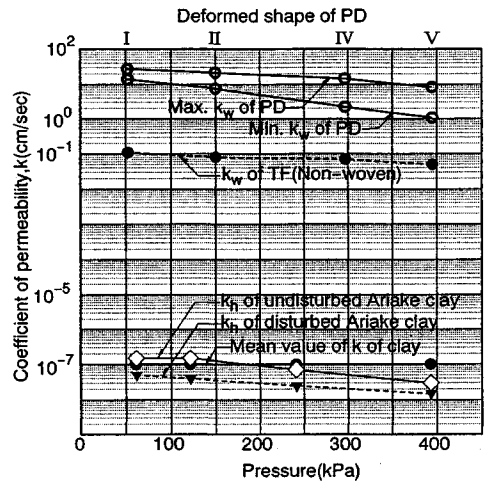


Fig.11 Coefficients of permeability of clay and PD

Table 3 Calculation of coefficient of well resistance

Length of PD $H$ (m)	$k_w$ (cm/sec)			$k_c$ (cm/sec)	$d_w$ (cm)	Coefficient of well resistance, $L_{cwr}$			Remark
	Max.	Min.	TF			Min.	Max.	TF	
5	27.6	1.1	0.08	$1 \times 10^{-7}$	5	0.0001	0.0030	0.0405	Usual length of PD, $H=10 \sim 20m$ in Japan
10	27.6	1.1	0.08	$1 \times 10^{-7}$	5	0.0005	0.0118	0.1621	
20	27.6	1.1	0.08	$1 \times 10^{-7}$	5	0.0019	0.0471	0.6483	
30	27.6	1.1	0.08	$1 \times 10^{-7}$	5	0.0042	0.1061	1.4590	
50	27.6	1.1	0.08	$1 \times 10^{-7}$	5	0.0118	0.2948	4.0529	

および Fig.8 に示す 5 つの変形条件 (変形なし, 15% 自由変形, 20% 自由変形, 1 箇所強制変形, および 2 箇所強制変形), のもとで実施した。強制変形は, PD を 2 つ折りにした状態で 4 個の強力クリップを用いて幅全体にわたって強制的に折り曲げた。

実験に先立って装置内の空気を十分に除去し, 安定のために 20 分間通水した後, 6 回ずつ所定時間の通水量を測定した。装置の損失水頭は, 水頭差が 36 cm ( $i=0.9$ ) の時に 0.6 cm (1.7%) と小さかったので無視した。以下の実験結果は, すべて温度 20℃ の場合に換算している。

(2) 実験結果および考察

Fig.9 は,  $i=0.9$  の場合の  $\sigma_3 \sim Q_w$  の関係を他の研究結果<sup>3),5)</sup>と併せて示したものである。  $\sigma_3$  の増加に伴って  $Q_w$  が低下するのは PD 内部にフィルターが入り込み流路断面が減少するためである。一定  $\sigma_3$  の下で長時間経過する場合は, フィルターおよびコア (芯体) のクリープ変形が進行し流路断面は一層小さくなると考えられ

る。これらの現象は, コアおよびフィルターの材質と形状によって変わってくる。  $i$  を 0.1, 0.2, 0.5 と変えた場合についても同様な結果を得た。

次に PD の縦方向変形による  $Q_w$  の変化を調べて Fig.10 の結果を得た。この図には, 自由変形 20% までの他の研究結果<sup>5),8)</sup>を一緒に示している。自由変形から 2 箇所強制変形にわたる 5 つの条件に対して,  $Q_w$  は次第に低下していき, 最も影響の大きい場合には  $Q_w$  は変形なしの場合 26% にまで低下した。  $Q_w$  の低下は, PD の種類によって自由変形状態から始まるものと強制変形状態から始まるものがある。

5. ウェルレジスタンスに関する考察

PD を用いて粘土地盤を圧密改良する場合, 粘土の圧密速度に影響を及ぼす要因としては, PD の打設間隔, ウェルレジスタンスおよびスミアゾーンが挙げられる<sup>10)</sup>。ここでは, これらの要因の内 PD のウェルレジスタンスが粘土の圧密速度にどのように影響を及ぼすかを

Table 4 Factors affecting well resistance

Factors		Mechanism	Effect on well resistance
External factors	Normal pressure, $\sigma_n$	Reduction of cross-section of flow, $A_f$ caused by $\sigma_n$ in short term.	$\sigma_n: 50\text{kPa} \rightarrow 400\text{kPa};$ $Q_w \rightarrow (0.3\sim 0.85)Q_w$
	Folding of PD	Reduction of $A_f$ due to folding of PD as clay is large deformations.	Straight PD $\rightarrow$ Double folded; $Q_w \rightarrow (0.25\sim 0.6)Q_w$
	Temperature $T$	Change of viscosity of water.	$T: 20^\circ\text{C} \rightarrow 15^\circ\text{C};$ $Q_w \rightarrow (0.9)Q_w$
	Intrusion of fine particles	Clogging in filter and passing of fine particles into PD core.	Effect is small.
	Entrapped air	Entrapped air results from lowering of hydrostatic pressure in ground water.	Significant effect in laboratory permeability test <sup>23)</sup> .
	Hydraulic gradient <sup>25)</sup> $i$	Water flow in the PD changes from laminar to turbulent.	$i: 0.2 \rightarrow 0.9;$ $Q_w \rightarrow (0.6\sim 0.85)Q_w$
Internal factors	Material <sup>26)</sup>	Creep deformation of core and filter sleeve in long term.	Initial value $\rightarrow$ After 2~60days; $Q_w \rightarrow (0.55\sim 0.7)Q_w$
	Cross-section of flow $A_f$	Decrease of pore of PD for water flow.	$A_f \rightarrow (0.35\sim 0.75)A_f;$ $L_{CWR} \rightarrow (1.5\sim 2.5)L_{CWR}$
	Length of PD $H$	Increase of head loss, $h_1$ $h_1 = f(H/d)(v^2/2g)$ , where $f = 124.5m^2/d^{1/3}$ .	$H: 5\text{m} \rightarrow 50\text{m};$ $L_{CWR} \rightarrow (95)L_{CWR}$ (Ref. Table 2)

$A_f$ : Total cross-sectional area of PD,  $L_{CWR}$ : Coefficient of well resistance

考察する。

吉国<sup>2)</sup>は、Barronの式に基づいてバーチカルドレーンのウェルレジスタンスを考慮に入れた圧密度  $U(T_h)$  の近似解を次式で与えた。

$$U(T_h) = 1 - \exp\left(-\frac{8}{F(n) + 0.8L_{CWR}} T_h\right) \dots\dots\dots (1)$$

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln n - \frac{3n^2}{4n^2} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $T_h = c_h \cdot t / d_e^2$ 、 $d_e$  = 有効径、 $n = d_e / d_w$ 、 $d_w = 2(a + b) / \pi$ 、ドレーンの換算直径。また、 $k_c$  = 不攪乱粘土の水平透水係数、 $k_w$  = ドレーンの縦方向透水係数、 $H$  = ドレーンの長さ、としてウェルレジスタンス係数  $L_{CWR}$  は次式で与えた。

$$L_{CWR} = \frac{32}{\pi^2} \frac{k_c}{k_w} \left(\frac{H}{d_w}\right)^2 \dots\dots\dots (3)$$

Fig.11は、有明粘土の水平透水係数～圧力関係、一般粘土の平均透水係数、およびPDの縦方向透水係数 ( $k_w$ )～側圧～変形条件を比較して示したものである。これでわかるように、側圧および変形の影響を共に考慮した場合であっても、PDの  $k_w$  は粘土の透水係数の  $10^6 \sim 10^8$  倍であるので、式(3)を用いてウェルレジスタンス係数  $L_{CWR}$  を求めると Table 3 に示すように小さいものとなる。ここで  $k_w$  の値は Fig.11 に示した試験結果に基づいて算出したものである。通水能力が最も小さいTFの場合でも、打設深度20mでは  $L_{CWR}$  は0.65程度であった。 $H=50\text{m}$  に対するPDの最大の  $L_{CWR}$  の値を式(1)の圧密度の計算に用いると、PD打設間隔が  $n = 10 \sim 30$  の場合の  $F(n)$  計算値<sup>11)</sup>の  $1/6 \sim 1/9$  となり、

実用上は無視してよい大きさである。

PDのウェルレジスタンスに及ぼす影響要因としては、以上に検討したものの他に、地下水水温、間隙水中に含まれる空気が気泡化することによって生じるPD流路断面の閉塞<sup>23)</sup>、PD切口の中で実際に水を通し得る有効流路断面  $A_f$ 、等が挙げられよう。これらの中で気泡の影響については、特に室内実験によるPDの通水能力の評価試験結果に大きな影響を及ぼす<sup>23)</sup>。これらについては稿を改めて報告する予定である。

Table 4は、PDのウェルレジスタンスに影響を及ぼす要因を、外的要因およびPDそのものに関する内的要因に分けて示したものである。表中の値は Fig.9, 10 および既報の室内試験結果<sup>20), 23), 24)</sup>に基づいて求めた結果である。各要因の中で、側圧、PDの変形、温度、および材料特性については、これらの全要因が関与して  $Q_w$  を最も小さくした時に、 $0.3 \times 0.25 \times 0.9 \times 0.55 = 0.04 Q_w$ 、つまり元の値の4%にまで低下する。この場合であっても  $H=50\text{m}$  に対応する  $L_{CWR}$  値は約0.5である。このことより、 $H=50\text{m}$  まではウェルレジスタンスは圧密促進に大きな影響を及ぼすことはない。Kodaら<sup>25)</sup>は、有機質の粘土地盤中にペーパードレーンとPDをそれぞれ打設し、250日から1000日経過した後掘り出し縦方向の透水試験を行った。そしてPDの場合には  $Q_w$  は側圧によって50~70%低下したが、側圧250kPaで350m<sup>3</sup>/year以上の値を保っていたと報告している。

以上の考察からすれば、ウェルレジスタンスに関してはPDには問題は少ないとの結論が導かれる。もちろん

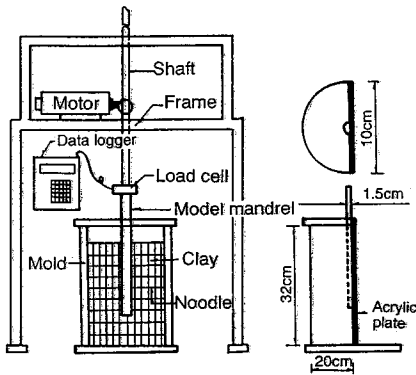


Fig.12 Model test for estimating smear zone

ん、透水係数が高いシルト地盤等を対象にする場合は、ウェルレジスタンスによる圧密遅れに及ぼす影響は、PDの打設間隔およびスミアゾーンによる影響に比べて相対的に大きくなっていく。また、PDを打設して一次圧密を終了した後、第2次、第3次盛土を施工するような場合には、既設PDの排水性能を評価するに当たってウェルレジスタンスの影響を十分に考慮する必要が生じてこよう。

### 6. スミアゾーンに関する検討

PD打設にあたってはマンドレルの貫入・引き抜き作業を伴うが、この時に生じるスミアゾーンがパーチカルドレーンによる圧密速度にどの程度の影響を及ぼすのかは、また十分に検討されていない。この問題を考察するのに先立って、スミアゾーン領域を調べるために、再圧密試料および不攪乱有明粘土を用いて実験を行った。再圧密試料は、兵庫町の有明粘土（前出）をコンクリート土槽に厚さ80cmまで入れ鉛直圧力（10kPa）を加えて上下面排水により280日間再圧密した。不攪乱試料は、川副町の有明粘土であり、その性質は $w_n=136\%$ 、 $w_L=90\%$ 、 $I_p=43\%$ 、 $G_s=2.62$ であった。

Fig.12に示す二つ割り鋼鉄モールド（直径20cm、高さ32cm）の中に、再圧密試料および不攪乱有明粘土を挿入し、ワイヤーソーで二つ割りにした後、試料の側面に素麺をグリッド状に付着させ、その上から摩擦を低減させたアクリル板を取り付けた。アクリル板の内面に沿って半円形断面のプラスチック模型マンドレル（直径 $d_m=3\text{cm}$ ）を1mm/secの速さで貫入した。これにより発生した塑性領域をスミアゾーンと考え、その範囲を直接観察した。その結果、塑性領域から推定したスミアゾーン（直径 $d_s$ ）は、再圧密試料では $d_s=2.0\sim 2.5d_m$ 、不攪乱有明粘土では $d_s=2.5\sim 3.0d_m$ であった<sup>20), 23)</sup>。

実験後、マンドレルを引き抜き、その空間が無くなるまで圧縮して、Fig.13に示す箇所のでポケットコーンペネトロメータ（PCP、前出）を用いて強度を測定した。

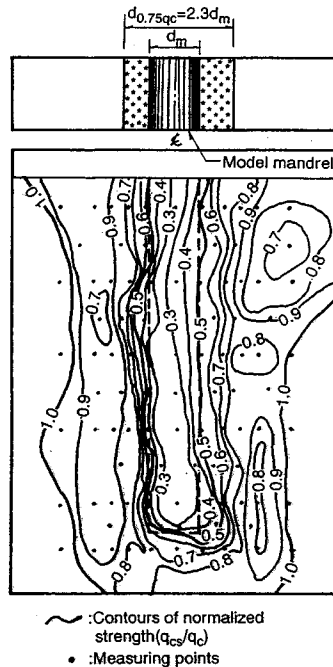


Fig.13 Contour lines of clay strength around PD

そして、塑性領域の粘土の強度 $q_{cs}$ の不攪乱粘土 $q_c$ に対する比は、Fig.13に示すように $q_{cs}/q_c \leq 75\%$ という結果を得た。同様な結果は3次元的な実験においても確かめている<sup>26)</sup>。上述のように、本実験に基づいて推定した $d_s$ の範囲は、Holtzら<sup>27)</sup>が報告している値よりやや大きい値が得られた。

### 7. スミアゾーンに関する解析的考察

スミアゾーンが圧密に及ぼす影響を検討するのに、Hansboの近似解<sup>10)</sup>がよく用いられる。この式は、PDおよびスミアゾーンを等値直径に換算し、またスミアゾーンの透水係数として一つの値を用いて導出したものである。実際にはPDは板状であるし、スミアゾーンはマンドレルの形状に応じて方形に近い状態で発生することであろう。さらに、マンドレルに近い粘土ほど強く乱されると考えられるので、水平方向の透水係数はマンドレルからの距離によって変わることが考えられる。本研究では、これらのことを考慮に入れたFig.14に示す二層スミアゾーンモデルについて考察する。PDは同図(a)に示すような横 $L_x$ 縦 $L_y$ のピッチの長方形配置とし、マンドレルは図(b)の形状を仮定した。

解析は全領域の1/4の部分（図(c), ABCD)を対象とし、次のゾーニングを行う：内部スミアゾーン（Iゾーン）；外部スミアゾーン（Oゾーン）；および不攪乱ゾーン（Uゾーン）。 $k_h$ の変化はFig.14(d)のようであると考える。ゾーン毎の代表値をIゾーンでは $k_{sI}$ 、Oゾーンでは $k_{sO}$ 、およびUゾーンでは $k_e$ とおいた。圧

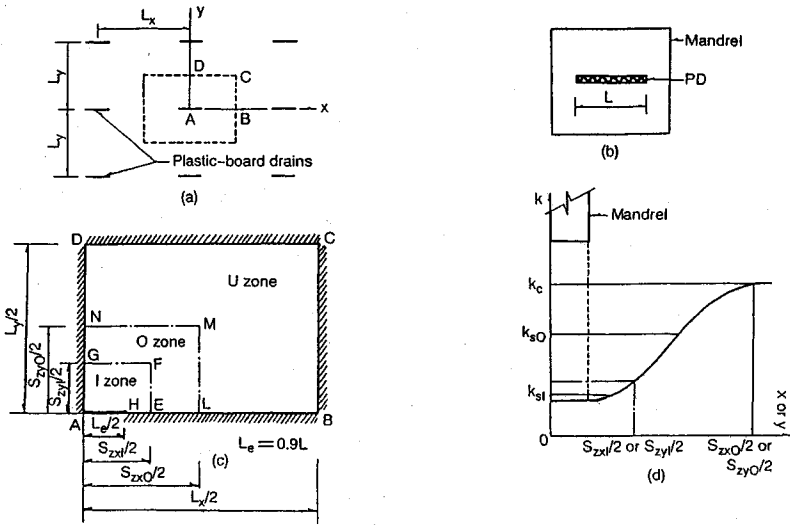


Fig.14 Modelling of smear zone for numerical analysis

密解析は、Terzaghi-Rendulic の理論<sup>29)</sup>を用い、スミアゾーンの影響を透水性の変化として取り扱うことにした。また、PDのウェルレジスタンスは考慮しなかった。支配方程式は次のとおりである。

a) 内部スミアゾーン

$x \leq S_{zx1}/2$  および  $y \leq S_{zy1}/2$  において

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_{h1} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \dots\dots\dots (4)$$

b) 外部スミアゾーン

$S_{zx1}/2 < x \leq S_{zx0}/2$  および  $S_{zy1}/2 < y \leq S_{zy0}/2$  において

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_{h0} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \dots\dots\dots (5)$$

c) 不攪乱ゾーン

$S_{zx0}/2 < x \leq L_x/2$  および  $S_{zy0}/2 < y \leq L_y/2$  において

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_{hv} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $u$  : 過剰間隙水圧、 $t$  : 時間、 $x, y$  : 間隔変数、 $c_{h1}, c_{h0}$  および  $c_{hv}$  : 内部、外部スミアゾーンおよび不攪乱ゾーンの水平圧密係数、 $S_{zx1}/2, S_{zy1}/2, S_{zx0}/2, S_{zy0}/2, L_x/2$  および  $L_y/2$  は各ゾーンの境界座標である。

境界条件は次のとおりである。

(a) PD, 境界 AH ( $0 < x \leq L_e/2, y = 0$ ) においては  $u = 0 \dots\dots\dots (7)$

ここに、 $L_e = \lambda L$  は PD の有効幅であり、本解析では  $\lambda = 0.9$  とする。

(b) 境界 AD ( $x = 0$ ) および境界 BC ( $x = L_x/2$ ) においては  $\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \dots\dots\dots (8)$

(c) 境界 BH ( $L_e/2 < x \leq L_x/2, y = 0$ ) および境界 CD ( $y = L_y/2$ ) においては

$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (9)$$

IゾーンとOゾーンとの境界(EF, FG)およびOゾーンとUゾーンとの境界(LM, MN)における流れの連続条件より、

$$k_1 \frac{\partial u_1}{\partial x \text{ (or } \partial y)} = k_2 \frac{\partial u_2}{\partial x \text{ (or } \partial y)} \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 $k_1, k_2$  は両層の透水係数、 $u_1, u_2$  は両層の間隙水圧である。上式で理解されるように、本解析は多層地盤の圧密解析手法を二層スミアゾーンモデルに適用したものである。

Fig.15に、PDの打設間隔( $L_x, L_y$ )をPDの有効幅 $L_e$ の10倍とし、正方配置した場合の解析結果の一例を示す。図中の破線は、No smear zoneに対する比較のために Barron の式<sup>29)</sup>による解析結果を示したものである。No smear zoneに関する2つの曲線の比較では、等値円形に換算した場合の圧密が初期段階にはやや遅く、圧密度が30%を越えると速くなる。しかし、両曲線の偏差は2%程度でありずれば小さい。また、 $L_x = L_y = 10 L_e$  の正方形配列における圧密度~圧密時間係数の曲線は、等値円形での  $n (= d_e/d_w) = 17.7$  に相当し、 $T_h$  は正方形の1/1.27倍に相当することが知れる。ここで上記の等値円形での  $n$  は次のように求めた。

$$L_x \cdot L_y = \pi d_e^2 / 4, \text{ より } d_e = 1.129 \sqrt{L_x \cdot L_y} \dots\dots\dots (11)$$

また、 $2(L_e + b) = \pi d_w$ , より  $d_w = 0.637 L_e$ , を得る。ここで、 $L_x = L_y = 10 L_e$ , PDの厚さ  $b$  を無視すると、

$$n = d_e/d_w = (1.129 \sqrt{L_x \cdot L_y}) / 0.637 L_e = 17.7 \dots\dots\dots (12)$$

次に、2次元および放射状での圧密時間係数を  $T_h, T_{hr}$  とすると、

$$T_{hr} = C_{hr} \cdot t / d_e^2 \dots\dots\dots (13)$$



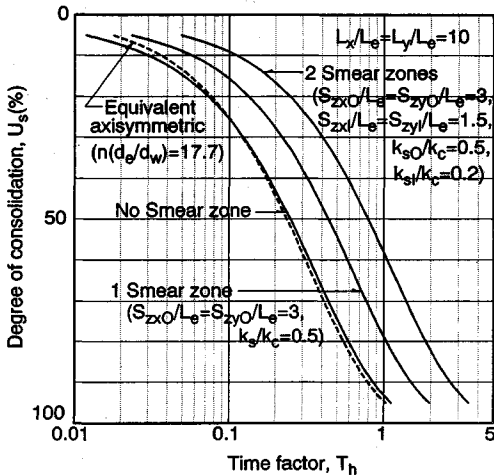


Fig.15 Degree of consolidation,  $U_s$  versus time factor,  $T_h$

$$T_h = c_{hx(y)} \cdot t / L_x \cdot L_y = c_{hx(y)} \cdot t / (\pi d_e^2 / 4) = 1.27 c_{hx(y)} \cdot t / d_e^2 \dots \dots \dots (14)$$

Fig.15の1 smear zone 曲線は、単層のスミアゾーンがPD有効幅  $L_e$  の3倍の範囲に生じ、この領域での透水係数  $k_s$  は不攪乱ゾーンの  $k_c$  の50%であるとした場合であるが、No smear zoneの曲線と比較して明らかに圧密遅れが生じることを示している。また、二層スミアゾーン (2 smear zones) の場合の曲線は不攪乱ゾーンの  $k_c$  に比べて外部スミアゾーンの  $k_{s0}$  は50%、内部スミアゾーンの  $k_{s1}$  は20%であるとした場合である。このケースでは圧密の遅れは一層顕著となり、50%圧密度に相当する  $T_h$  はスミアゾーンが生じない場合の3.3倍に達する。以上の解析例で示されたように、スミアゾーンの透水係数が不攪乱ゾーンの数分の1に低下するだけでかなりの圧密遅れをもたらすことになる。

8. 結 論

プラスチックボードドレーン (PD) の排水性能ならびに影響要因について、実験的および解析的考察を行い次のような知見を得た。

(1) 周長を等しくしたSDおよびPD (等値直径  $d_w = 2(a+b)/\pi$ ) の比較実験を大型圧密装置を用いて行い、両者の沈下曲線はほぼ重なることを確かめた。これより、現行の等値直径の評価 ( $d_w = (a+b)/2$ ) は安全係数1.3を考慮していることになり合理的であることが確信された。

(2) PD周辺における細粒土の移動について幾つかの方法を用いて直接測定を試み、フィルターゾーンの形成を明らかにした。また、細粒土の流入によるPDの排水性能への影響は比較的小さいとの結論を得た。

(3) PDの縦方向通水能力  $Q_w$  は側圧、縦方向変形および動水勾配の影響を受ける。2箇所強制変形 (圧縮

ひずみ30%) した場合の  $Q_w$  は変形しない場合の26%にまで低下することが認められた。

(4) しかし、側圧の作用、PDの強制変形、その他の要因によるウェルレジスタンスがPDの長さ  $H=50$  mまでは圧密速度に及ぼす影響は比較的小さく、本実験の範囲ではパーチカルドレーンによる粘土の圧密促進に明かな影響を及ぼす程ではないとの結果を得た。

(5) PDのウェルレジスタンスに及ぼす諸要因について、今回の試験結果に基づいて総合的に考察し、Table 4の形にまとめて提示した。

(6) スミアゾーン  $d_s$  を推定するために、模型マンドレルの貫入によって生じる塑性領域を測定した。その結果、 $d_s$  はマンドレル直径の2~3倍であること、この領域の粘土の強度は元の強度の75%以下であることを知った。

(7) PDが方形に配置され、スミアゾーンが二層に生じる場合の圧密解析モデルを提案した。解析例により、スミアゾーンが生じない場合はBarron解析法による結果とほぼ一致することを確認した。

(8) 二層スミアゾーンに対する解析を行い、スミアゾーンがPDの有効幅  $L_e$  の3倍、外部スミアゾーンの透水係数が不攪乱粘土の50%、内部スミアゾーンのそれが20%である場合には、50%圧密度に相当する  $T_h$  はスミアゾーンが生じない時の3.3倍に達することを示した。

謝辞：本実験の一部は、本学卒業生福原茂君 (現、建設省)、上原清貴君 (現、(株)熊谷組) によって行われたものである。また、錦城護模 (株)、五洋建設 (株)、大部工業 (株)、太陽工業 (株) および三井石化産資 (株) の各社からは、実験装置および実験試料を提供して頂き、また研究上の便宜を図って頂いた。お世話になった上記の関係者の方々に厚く御礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 嘉門雅史：プラスチックボードドレーン材料の性質とその特性，基礎工，pp.11~16, 1985.8.
- 2) 吉国 洋：パーチカルドレーンの設計と施工管理，技報堂出版，1979.
- 3) Hansbo, S. : Preconsolidation of soft compressible soils by the use of prefabricated vertical drains, Ann. des Travaux Publ. de Belgique, No.6, 1986.
- 4) Kramer, R.H.J., Oostveen, J.P., van Weele, A.F., De Jager, W.F.J. and Meyvogel, I.J. : The quality of vertical drainage, Proc. 8th Eur. Conf. Soil Mech. Found. Eng., (2), pp.721~726, 1983.
- 5) Holtz, R.D., Jamiolkowsky, M., Lancellotta, R. and Pedroni, S. : Behavior of bent prefabricated vertical drains, Proc. 12th ISSMFE, Rio De Janerio, pp.1657~1660, 1989.

- 6) Oostveen, J.P. : Comparison of drains, Research report, Delft University of Technology, 1990.
- 7) Ali, F.H. : The flow behavior of deformed prefabricated vertical drains, *Geotextiles and Geomembranes* (10), pp.235~248, 1991.
- 8) Pradhan, T.B.S., Kamon, M. and Suwa, S. : Design method for the evaluation of discharge capacity of prefabricated band-shaped drains, 9th ARC, Bangkok, 1991.
- 9) Kamon, M., Pradhan, T.B.S. and Suwa, S. : Evaluation of design factors of prefabricated band-shaped drains, ICGECD, GEO-COAST '91, pp.329~334, 1991.
- 10) Hansbo, S. : Consolidation of clay by band-shaped prefabricated drains, *Ground Engineering*, Vol.12, No.5, pp.21~25, 1979.
- 11) Rixner, J.J., Kraemer, S.R. and Smith, A.D. : Prefabricated vertical drains, FWHA/RD-86/168, Federal Highway Administration, 1986.
- 12) Tanaka, H. : Settlement of ground improved by band drains at the development of the Tokyo International Airport, 10th S.E. Asian Geotech. Conf., pp.133~138, Taipei, 1990.
- 13) Rankilior, P. R. : *Membranes in Ground Engineering*, A Willey-Interscience Publication, 1981.
- 14) Dierickx, W. : Model research on geotextile blocking and clogging in hydraulic engineering, 3rd International Conference on Geotextiles, Vol.3, Vienna, Austria, pp.775~778, 1986.
- 15) Onoue, A. : Consolidation of multilayered anisotropic soils by vertical drains with well resistance, *Soils and Found.*, Vol.28, No.3, pp.75~90, 1988.
- 16) 尾上篤生 : ドレーンのウェル・レジスタンスに関する基礎的研究, 清水建設研究報告, 第32号, 1991.
- 17) Bergado, D.T., Asakami, H., Alfaro, M.C. and Balasubramaniam, A. S. : Smear effect of vertical drains on soft Bangkok clay, *J. Soil Mech. Found. Engrg., ASCE*, Vol.117, No.10, pp.1509~1529, 1991.
- 18) 三浦哲彦・朴 永穆・松村謙三・橋詰文伯 : 有明粘土の圧密特性とプラスチックドレーンによる圧密改良に関する実験, 佐賀大学理工学部集報, 第19巻, 第1号, 1990.
- 19) 新舎 博・林 健太郎・渡 義治 : プラスチックドレーン材の折れ曲がりと改良効果, 第22回土質工学研究発表会, pp.1791~1792, 1987.
- 20) 朴 永穆・三浦哲彦・上原清貴 : 高圧縮性粘土の圧密改良に用いるPD材の排水機能について, 土木学会第47回年次学術講演会, pp.1074~1075, 1992.
- 21) 及川 研, 中岡清貴, 神保信雄, 河田庄司 : 関西国際空港建設におけるプラスチックボードドレーン工法による地盤改良, 第24回土質工学研究発表会, 1989.
- 22) 朴 永穆 : 堤塘の Geotextile Filter に関する実験的研究, 修士論文, 韓国嶺南大学校, 1985, (韓国語).
- 23) 三浦哲彦・朴 永穆・福原 茂 : プラスチックドレーン材の排水特性に関する実験, 第26回土質工学研究発表会, pp.2009~2010, 1991.
- 24) 上原清貴・三浦哲彦・朴 永穆 : 高圧縮性粘土の圧密改良に関するドレーン材実験, 土木学会西部支部研究発表会, pp.514~515, 1992.
- 25) Koda, E., Szymanski, A. and Wolski, W. : Behavior of geodrains in organic subsoils, Proc. 12th ISSMFE, Rio De Janeiro, pp.1377~1380, 1989.
- 26) 三浦哲彦・呉 文経・朴 永穆・濱野洋繁 : 粘土中杭の周面抵抗に関する模型実験, 佐賀大学理工学部集報, 第20巻, 第1号, pp.97~105, 1991.
- 27) Holtz, R.D. and Holm, G. : Excavation and sampling around some sand drains at Ska-Edeby, Sweden, Proc. Nordic Geot. Meeting, Trondheim 1972, Norw. Geot. Inst., Oslo, 1973.
- 28) Das, B.M. : *Advanced Soil Mechanics*, Hemisphere Publishing Corporation, 1983.

(1992. 8. 7 受付)

## FUNDAMENTAL STUDY ON DRAINAGE PERFORMANCE OF PLASTIC-BOARD DRAINS

Norihiko MIURA, Yeongmog PARK and Madhira R. MADHAV

Many types of plastic-board drains have been developed. For understanding the drainage performance of these drains, large-scale consolidation tests were carried out with plastic-board drains and sand drain. Factors influencing the drainage performance of these drains were investigated focussing on : flow characteristics of pore water ; consolidation of clay in the close vicinity of the drain ; deformed shape of drain ; migration of fine particles ; well resistance ; formation of smear zone and its effect on consolidation.

A two-layer smear zone model is proposed for estimating the influence of smear zone on consolidation of clay in vertical drain system.