

高分子材料を使用したドレーン材の圧密促進効果について

齋藤二郎
平間邦興

概 要

軟弱地盤改良工法のなかで、ペーパー・ドレーン工法は、わが国の軟弱地盤の諸条件に適合した多くの利点を有する工法として普及してきたが、打設するドレーン材が紙製であるため、湿潤状態における強度の不足、膨潤および腐食などの問題については、改良にも必然的に限界があり不満足な点も多い。

筆者らは、かねてより、上記の問題の解決を意図して高分子材料を使用するドレーン材の開発を行なってきたが、今般試作品を完成し、圧密効果測定試験においてもすぐれた結果を示した。

本報文は、開発したドレーン材の性状紹介および試験結果の報告を行なうものである。

1. まえがき

スウェーデンで開発されたペーパー・ドレーン工法¹⁾が導入されて以来、わが国の軟弱地盤の諸条件に適合した数多くの利点を有する工法として、すでに多くの地盤改良工事に採用されてきた。

ペーパー・ドレーン工法の原理は、サンド・ドレーン工法と全く同じであって、砂グイのかわりにドレーン・ペーパーを挿入して圧密の促進をはかるのであるから、ペーパー・ドレーン工法の特徴とするところは挿入するペーパーの特性に依存する部分が非常に大きいといえることができる。したがって、このドレーン・ペーパーが具備しなければならない条件を列挙すれば、

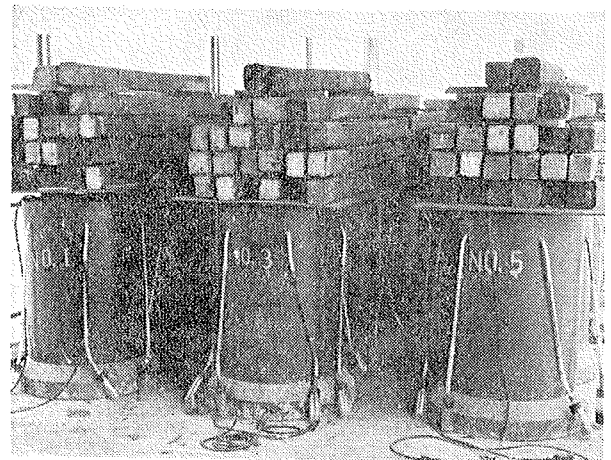
- (1) 十分な強度、特に湿潤時においても、地盤の流動に伴って破断しないために必要な強度を有していること。
- (2) 長時間地中にあっても、地下水および土壌中のバクテリアなどによって腐朽しないこと。
- (3) 透水性がよく、しかも湿潤状態にあって経時変化の生じないこと。
- (4) ドレーン断面が深度に関係なく一定であり、側方土圧によって、おしつぶされたりしないこと。
- (5) 地中において、吸水による膨潤の少ないこと。

などが、その基本であって、そのために形状、材質および加工などの面で、これまで種々の改良を重ねてきてはいるが²⁾、材質が紙であるかぎり改良には必然的に限界があり、現在、数多く市販され、また使用に供せられているドレーン・ペーパーについても、いまだ不満足な点が多い。

本研究は、上記の問題の解決することを意図して、かねてよりドレーン材の開発を行なってきたが^{3) 4)}、

今般、高分子材料を使用する2種のドレーン材を試作し、試験結果も良好であった。これらは、従来のドレーン・ペーパーに比べて経済的であり、材質はもちろんドレーン内の排水溝構造も全く異なるものである。

本報文では、これら試作ドレーン材の性状紹介と、圧密促進効果を測定した試験結果を、とりまとめて報告する。



図一 試験状況

2. 試作ドレーン材の性状

2.1. ドレーン材の基本的性質

開発したドレーン材の概要は次のとおりである。

Sample. A 発泡ポリプロピレン製

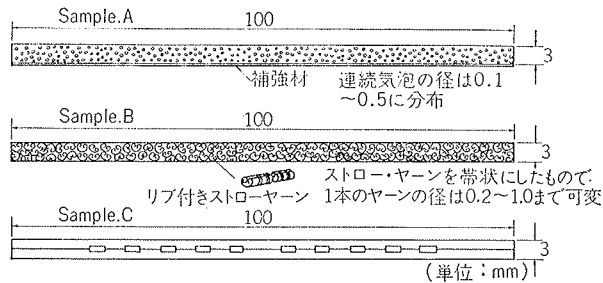
ポリプロピレンを40倍発泡にて加熱生成した連続発泡体で補強材を付してある。

Sample. B ポリプロピレン・フィルム製

両端巻込型ストロー・ヤーン・フィルムを延伸加工、外周に一定間隔でリブを付してある。

ドレーン材	項目	巾寸法 (mm)	厚さ (mm)	標準重量 (g/m)	引張り強さ(kg/15mm)		透水係数 (cm/sec)
					乾燥時	湿潤10日時	
Sample.A		100.1	3.4	52.3	53.1	57.5	1.32×10^{-3}
Sample.B		100.2	3.1	69.8	86.0	83.6	3.32×10^{-1}
Sample.C		99.8	3.2	168.4	112.7	19.1	1.94×10^{-1}

表一 表一 ドレーン材の基本的性質



図一 図二 ドレーン材の断面形

また圧密効果をほかのドレーン材と比較するために、試験に当たっては、次の供試体を準備した。

Sample. C 一般に市販されている某社のドレーン・ペーパー

Sample. D サンド・ドレーン

川砂を薄布袋に詰めて直径 5cmにしたもの。

Sample. E ドレーン材打設なし。

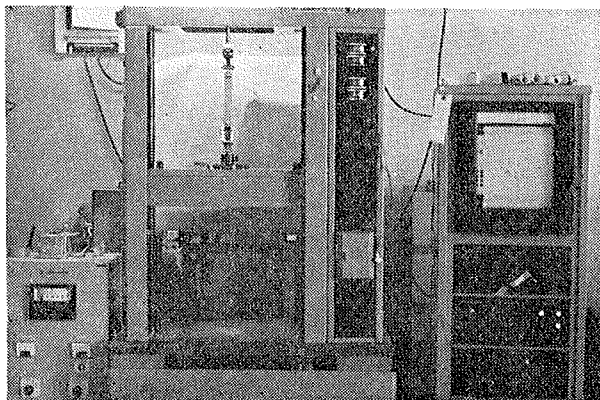
各ドレーン材の断面形を図一 図二 に示す。

2.2. 引張り強さ

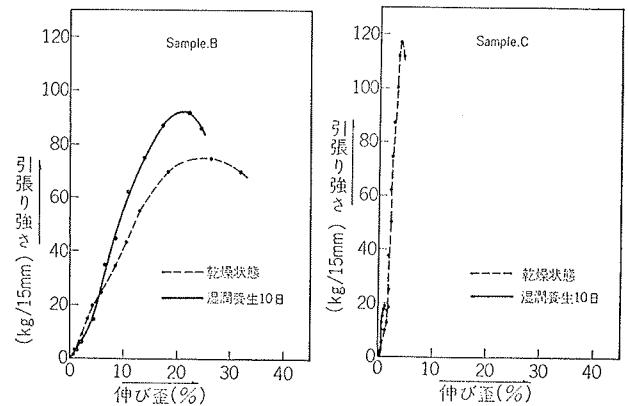
ドレーン材の性質のうちで、最も重要なものの一つに引張り強さがある。たとえば、気乾状態における引張り強さが小さければ打設中のドレーン材切損の問題に結びつき、湿潤状態における引張り強さが小さければ、地中におけるドレーン材破断の問題となる。

使用した引張り強さ試験装置を図一 図三 に示す。

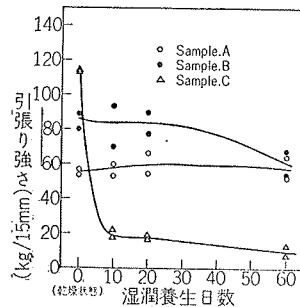
Sample. B, C を例にとって、気乾状態と湿潤状態における応力一ひずみの関係を示したのが図一 図四 であり、



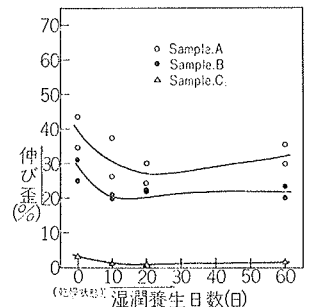
図一 図三 引張り強さ試験装置



図一 図四 引張り強さ一ひずみ



図一 図五 引張り強さの経時変化



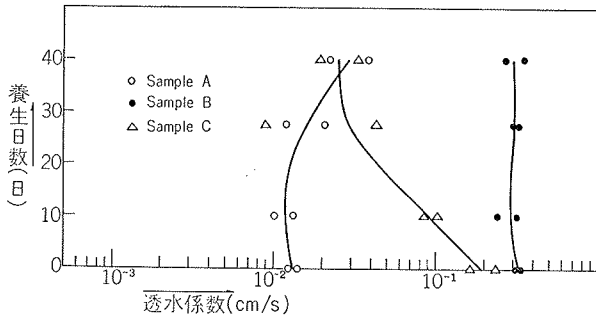
図一 図六 破壊時伸びひずみの経時変化

同図のピーク点の応力を引張り強さとした場合、その経時変化を示したのが図一 図五 である。傾向に明確な相違が認められる。材質が紙である Sample. C は乾燥時引張り強さではきわめて大きな値を示すが、湿潤によって、その値は約 1/6 に減少している。これは当然の結果であり、これまで数多く報告されている試験結果に一致する⁵⁾。今般、試作した Sample. C について湿潤時の引張り強さは、乾燥時のそれと比較してほとんど同じであり、バラツキについても有意の差はない。

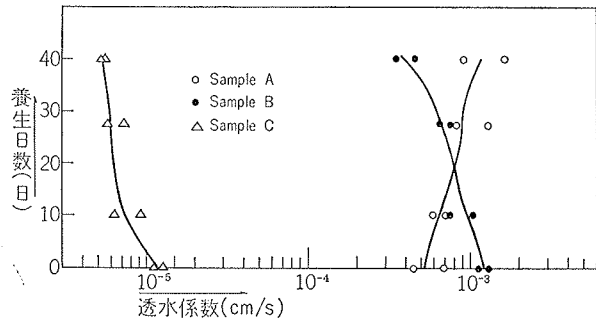
引張り強さに対応するひずみの経時変化を示したのが図一 図六 である。したがって、この値が大ききことは、地中にあるドレーン材が、地盤の変形によって破断されにくいことを意味するから、上述の引張り強さ特性とかねあわせて Sample. A, B がドレーン材としてすぐれた性質を有していると理解できよう。

2.3. 透水性

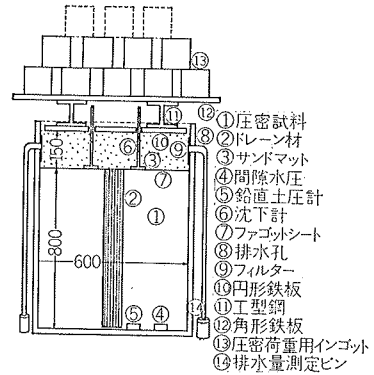
ドレーン材の表面から内部に浸透した間ゲキ水は、その通水溝を通して地上に排水される。また設計に当たっては、地中に打設されたドレーン材の通水溝では過剰間ゲキ水圧が零であると仮定して行なうことからドレーン材の透水性は重要な性状の一つであり、特



図一七 縦方向透水係数の経日変化



図一八 横方向透水係数の経日変化



図一九 圧密効果測定装置

土の組成			三角座標分類	含水比	土粒子の比重	湿潤密度	間隙比	
砂	シルト	粘土						
7 (%)	57 (%)	36 (%)	シルト質粘土	78.6 (%)	2.644	1.54 (kg/cm ³)	2.066	
飽和度		ペーン・セン断強さ	コンシステンシー		圧縮指数	圧密係数	透水係数	
			液性限界	塑性限界				塑性指数
100 (%)		0.018 (kg/cm ²)	65.7 (%)	22.0 (%)	43.7 (%)	0.481	9.280×10^{-7} (cm ² /sec)	6.665×10^{-7} (cm ² /sec)

表一 土試料の物理的性質 (試験前)

にドレーン材が長くなると水頭損失に及ぼす影響は大きくなる。

各ドレーン材の自然水頭による縦方向および横方向透水係数の経時変化を示したのが図一七、八であり、湿潤初期の状態では Sample. B, C, が大きな透水性を示している。また変化の傾向については Sample. A, B の透水係数が養生日数とともに、さらに増加を示しているのに対して、Sample. C では逆の傾向である。この現象は材質の性状によるものであって、開発したドレーン材のごとき比表面積の大きなポリプロピレンでは、乾燥時には潑水性を示すが、一度水になじむと、水との親和性が時間とともに増加するという性質によるものであろう。Sample. C の傾向は、当然予測されることである。

横方向 (材料) の透水係数については、前述のごとく、開発したドレーン材の排水機構が、従来のものと全く異なるので参考値として示すにとどめる。

3. 圧密効果測定試験

3.1. 試験方法と土試料の調整

3.1.1. 試験方法 開発したドレーン材の圧密促進効果を測定するために、図一八に示す大型圧密装置を使用して沈下量、排水量、土中間ゲキ水圧、土圧の経日変化を測定した。圧密荷重の付加は、1本180kgのインゴットを使用して、ほぼ9日(ドレーン材打設試料

で圧密度90%) ごとに0.12 kg/cm² ずつ増加させ最終圧密荷重は供試体中点で 0.88 kg/cm² である。圧密終了後、除荷しシンウォール・サンプラーを使用して、1つの装置につき半径方向に3本ずつの試料採取を行ない、さらに各サンプラーについて、深さ方向に3個ずつの試料を採った。したがって1つの装置から9個ずつの試料を採取することになり、これらについて含水比および強度分布の測定を行なった。各ドレーン材について、2個の実験装置を用意した。したがって以後の論述に使用する諸測定値は、これらの平均である。

3.1.2. 土試料の調整 試験に供した土試料は、名古屋港埋立地より採取したもので、試験開始前における物理的性質を表一に示す。これを、まず容量0.5m³の大型ミキサーで十分に練り返して均質にする。圧密装置に打設する際には、空隙を残すことなく、突き棒でよく突きながら投入し、ミキサー1練りについて各装置に均等量ずつ分配した。さらに均質化をはかって、載荷前に15日間の養生を行なった。

3.2. 試験結果とその検討

3.2.1. 沈下量と排水量 圧密荷重段階に対応する各供試体の沈下量と排水量の経時変化を示すのが図一10, 11である。図中0~16日間は試料養生のため、ドレーン材打設後の放置期間を意味する。

Sample. A, Bの沈下は、いずれも Sample. D と同様の沈下傾向を示しているが Sample. C の沈下については、予期していたよりも、かなり下回った値であっ

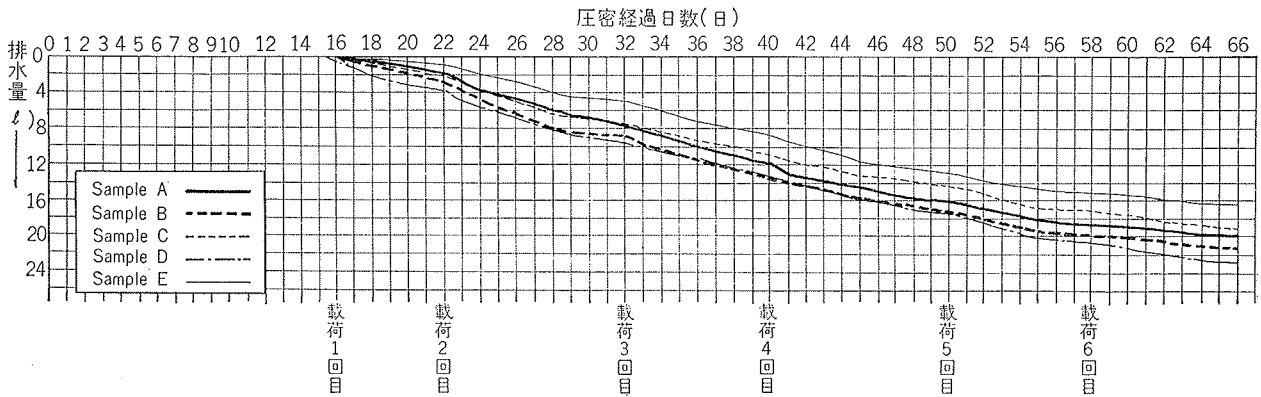


図-10 沈下量の変化

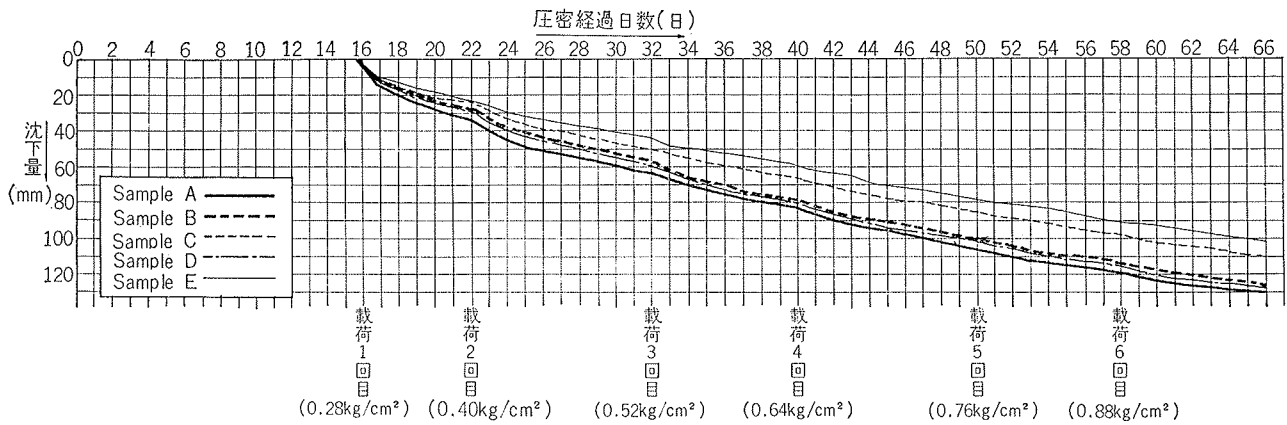


図-11 排水量の変化

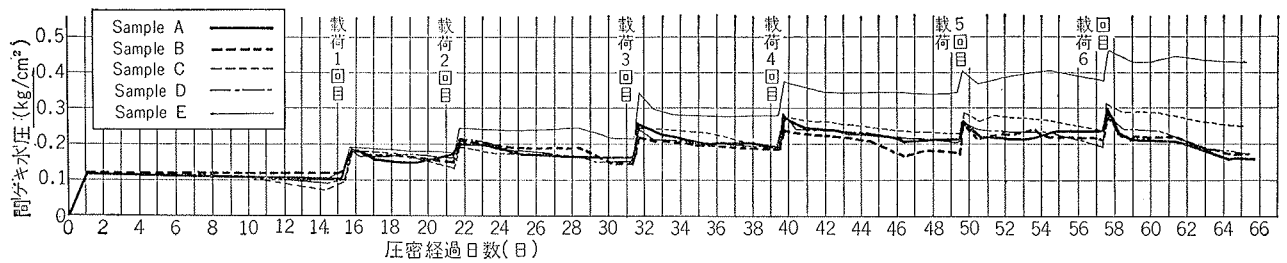


図-12 土中間ゲキ水圧の変化

載荷回数	第1回載荷	第2回載荷	第3回載荷	第4回載荷	第5回載荷	第6回載荷
Sample.A	1.853×10^{-3}	8.145×10^{-4}	8.423×10^{-4}	8.520×10^{-4}	7.352×10^{-4}	8.760×10^{-4}
Sample.B	3.283×10^{-3}	9.390×10^{-4}	1.111×10^{-3}	5.747×10^{-4}	4.550×10^{-4}	8.490×10^{-4}
Sample.C	3.085×10^{-3}	9.510×10^{-4}	8.482×10^{-4}	6.233×10^{-4}	5.615×10^{-4}	5.527×10^{-4}
Sample.D	2.148×10^{-3}	1.020×10^{-3}	1.107×10^{-3}	8.472×10^{-4}	7.223×10^{-4}	7.110×10^{-4}
Sample.E	9.852×10^{-4}	5.310×10^{-4}	7.790×10^{-4}	7.440×10^{-4}	6.863×10^{-4}	6.268×10^{-4}

(単位 cm^2/sec)

表-3 圧密係数の変化

た。ドレーン材を打設していない Sample. E の沈下量が小さいのは、最大排水距離の違いによって所定圧密度に達していない間に次の載荷が行なわれることになり、この累積が差となって現われたためである。

圧密検討において沈下量とともに重要なことは、その沈下過程である。各荷重段階ごとに概算した圧密係数 C_v を表-3 に示す。通常の圧密解析で得られる傾向がそうであるように、本実験結果からも初期の C_v は表-2 のそれよりも大きな値を示しているが、全体としては各ドレーン材の特性を表わしているといえるようである。

図-11は排水量の経時変化を示したものであるが、その傾向は沈下量と同様であった。

いずれにしても、試作したドレーン材は、一般にいわれているように、直径 5cm のサンド・ドレーンに匹

試料	位置	中心	中間	外周
Sample. A		0.99	0.81	0.81
Sample. B		0.85	0.88	0.86
Sample. C		0.74	0.63	0.75
Sample. D		0.65	0.80	0.84
Sample. E		0.63	0.65	0.63

(単位・kg/cm²)

表-4

試料	項目	セン断強さ
Sample. A		0.87
Sample. B		0.86
Sample. C		0.71
Sample. D		0.76
Sample. E		0.63

(単位・kg/cm²)

表-6

敵する良好な圧密促進効果を有していると判断するのが自然である。

3.2.2. 間ゲキ水圧 沈下量および排水量の変化に対応させて、土中間ゲキ水圧の経緯を示したのが図-11であり、ほぼ同じ傾向を示していることがわかる。

荷重载荷によって上昇した初期間ゲキ水圧に差はほとんどないが、その後の変化には興味ある特性が認められる。たとえば、ドレーン材を使用した試料は6回目の载荷にいたるまで排水能を保っていることを表わしており、無処理試料についてはすでに1回目の载荷からドレーン材打設試料とに差が生じている。しかも、この差は载荷回数が増すにつれて、ますます大きくなり、逸散を妨げられた過剰間ゲキ水圧は、圧密荷重の増加とともに累積されていく。

また Sample. C をみると、打設後40日間は他のドレーン材と同程度の間ゲキ水圧逸散能力を示してはいるが、それ以後では機能の低下が認められる。その理由が吸水による膨潤の影響か、または当該試料特有のきわめて大きな圧密沈下によってドレーン材にひだが生じ、通水溝がふさがれたためかは、さだかでない。

3.3. 圧密後の強度および含水比の分布

3.3.1. 強度の分布 圧密終了後の深度方向と半径方向の強度分布を調べるために、3.1. で述べた要領で試料を採取しベーン・セン断試験を行なった。回転モーメントよりカールソンの式⁹⁾ を使用してセン断強さを求め、その分布を示したのが表-4, 5である。

半径方向の分布については明確な傾向を見いだすことができなかったが、深さ方向の分布については、い

試料	項目	位置	セン断強さ
Sample A	A	上部	1.04
		中部	0.86
		下部	0.72
Sample B	B	上部	1.03
		中部	0.86
		下部	0.70
Sample C	C	上部	0.81
		中部	0.67
		下部	0.63
Sample D	D	上部	0.94
		中部	0.73
		下部	0.62
Sample E	E	上部	0.65
		中部	0.63
		下部	0.63

(単位・kg/cm²)

表-5

試料	位置	中心	中間	外周
Sample. A		53.5	55.2	57.0
Sample. B		56.8	56.4	57.7
Sample. C		55.5	61.6	58.4
Sample. D		57.1	55.8	55.7
Sample. E		67.1	57.7	58.7

(単位・%)

表-7

試料	含水比
Sample. A	55.2
Sample. B	57.0
Sample. C	58.5
Sample. D	56.2
Sample. E	61.2

(単位・%)

表-9

ずれも上部のセン断強さが最も大きく、下方に向かうに従って小さくなっていることがわかる。

各ドレーン材について、セン断強さを総平均で示したのが表-6である。圧密前のかく乱状態におけるセン断強さは0.018kg/cm²であった。増加強度のかなり

の部分はシキントロピー現象によるものと想定されるが、ドレーン材によっても、その効果にかなりの差が認められる。たとえば、最も顕著な効果が認められた Sample. A と Sample. C との差は 0.16kg/cm²であった。

3.3.2. 含水比の分布 圧密促進効果を調べるために、圧密終了後、深度方向の含水比分布を示したのが表-7, 8である。

半径方向の分布については、おおむねドレーン材に近いほど含水比が小さい。しかしドレーン材を打設していない Sample. E で、その傾向が認められないのは当然のことである。深さ方向の分布については、前項のセン断強さと同じ効果が認められ、いずれも上部の含水比が小さく、下方に向かうに従って小さくなっている。この傾向は、土試料表面に敷いたサンド・マットの影響によるところが大きい。

各ドレーン材について、含水比を総平均で示したのが表-9である。圧密前における試料含水比は78.6%であったから効果は大きいといえるが、ドレーン材の種類による効果には有意の差が認められなかった。

4. まとめ

現在ペーパー・ドレーン工法に使用されているペー

パーには、湿潤状態における強度の不足、膨潤および腐朽などの問題について、いまだ不満足な点が多い。

本研究は上記の問題の解決することを意図して、かねてより新しいドレーン材の開発を行なってきたが、今般、2種のドレーン材を試作し、その性状を測定するため種々の試験を行なってきたが良好な結果を得た。本報文は、これらを取りまとめて報告するものである。

ドレーン材の基本的性質としては、

(1) 開発した2種のドレーン材は、高分子材料を使用するもので非常に軽く、また従来のドレーン・ペーパーとは、ドレーン内の排水溝機構が全く異なるものである。

(2) 湿潤時の引張り強さは、乾燥時のそれと比較してほとんど同じであり、また対応する引張りひずみも大きい。このことは、ドレーン材が地盤の変形によって破断されにくいことを意味する。

(3) 湿潤状態における透水性は、従来のドレーン・ペーパーとは逆に、むしろ湿潤時間とともに増加の傾向を示しており、これは材質の性状によるものである。

また、圧密促進効果を測定するために行なった大型圧密試験結果からは、

(4) 沈下量、排水量の測定から、開発したドレーン材は、一般にいわれているように直径5cmのサンド・ドレーンと同程度ないしは若干上回る効果を示した。

(5) 間ゲキ水圧の経日変化から、十分な間ゲキ水圧逸散能力を有していることが明らかになった。また従来から使用されているドレーン・ペーパーには、途中で機能の低下が認められる。

(6) 圧密後の強度および含水比分布の測定から、強度分布については、開発したドレーン材に最も顕著な効果が認められた。しかし、含水比の分布については、ドレーン材の種類による効果に有意の差は認められなかった。

以上の検討から、開発した2種のドレーン材は、これまで使用されてきたドレーン・ペーパーに比べてすぐれたものであると判断される。

しかしながら、本報告で行なった試験は、ドレーン材の長さも約1mであって、これをそのまま実際の施工に結びつけるのは早計である。たとえば、打設するドレーン材が長い場合の効果、水平土圧によるドレーン材

材圧縮の透水性に及ぼす影響、また現在使用されている打設機械を使用する場合の改良など、いまだ問題点も多い⁷⁾。また基礎的研究についても、微細な土粒子および間ゲキ水の性質とドレーン材の関係、さらに、それが粘着力増加のメカニズムにどのような影響を与えるかなど、ドレーン材による圧密機構のミクロ的な解明も、いまだ判然としていない。

これらについては、今後の研究課題となろう。

謝辞

本研究を行なうに当たって、ドレーン材の開発については、積水化学工業(株)の鶴岡利朗、湊俊、(株)クラレの鈴木秀男、渡辺優、諸氏の尽力に負うところが多い。また実験、解析については、中央大学学生、清水清氏に協力を受けた。

ここに記して、深甚なる謝意を表します。

参考文献

- (1) W. Kjellman. "Consolidation of Fine-grained Soil by Drain Wells". Proc. of Am. Soc. of Civil Eng. May. 1948.
- (2) 島崎城司, "ドレーン・ペーパーの特性について" コンストラクション, 1966, 10月
- (3) 齋藤二郎, 平間邦興, "圧密促進工法に関する研究, (新しいドレーン材の開発)" 大林組技術研究所報告, 1970
- (4) 齋藤二郎, 平間邦興, "圧密促進工法に関する研究, (新しいドレーン材の開発)その2" 大林組技術研究所報告, 1971
- (5) 摂津板紙(株), 東洋パルプ(株)のペーパー・ドレーンに関するカタログ
- (6) Karlson, "Suggested Improvements in the Liquid Limit Test with Reference to Flow Properties of Remoulded Clays." Proc. 5th. Int. Conf. SMFE, 1961, Vol. 1.
- (7) 米倉亮三, "ペーパー・ドレーン工法とサンド・ドレーン工法" 土と基礎, 1967, 12月
- (8) 齋藤二郎, "地盤改良機械" 建設の機械化, 1968, 6月