

# 大型圧力容器によるベントナイト系遮水マットの 遮水性能に関する基礎的実験

— ベントナイト系遮水マットの貯水池への適用に関する研究 (I) —

長東 勇\* 毛利栄征\* 浅野 勇\*  
大和真一\*\* 三浦信隆\*\* 福元信一\*\*

The Fundamental Experiments on the Water-Proof Properties of Geosynthetic Clay Liner  
using a Ultra High Pressure Mold

— Practical studies on GCL for a sealing material of ponds (I) —

Isamu NATSUKA\*, Yoshiyuki MOHRI\*, Isamu ASANO\*, Shinichi YAMATO\*\*, Nobutaka MIURA\*\*,  
and Shinichi FUKUMOTO\*\*

\* National Research Institute of Agricultural Engineering, MAFF

\*\* Construction Materials Development Laboratory, Asahi Chemical Industry Co., Ltd

**Abstract** Thin sheets of flexible polymeric geomembranes, which works as the impermeable barrier have been used widely in Japan as a typical material for agricultural farm ponds. But, the polymeric geomembranes are not completely impermeable to liquid, and it is not always the best material in the sense of construction (installation), durability and maintenance. Thus, we newly developed a geosynthetic clay liner (GCL) for a sealing material of the farm pond. GCL is a thin flexible mat of the bentonite-synthetic composites, and consists of the granulated sodium bentonite sandwiched between two geotextiles. An organic adhesive is used to bond the bentonite to the geotextiles.

This paper describes the fundamental experiments performed to clarify the water-proof properties of GCL and the practical usage of GCL for the farm pond. A bench mark test were conducted by using a permeability test apparatus with a ultra high pressure mold, which is 1.5 m wide, 3.0 m long and 1.0 m high. The specimen is a 6 mm-thick flexible mat.

Through the experiments, we investigated the characteristics of swelling and permeability of GCL under the high water pressure, noticing its self-sealing and self-healing properties. The following conclusions are obtained:

- (1) Under the water pressure of 5 kPa, GCL was swelled and the thickness of GCL was increased to 12 mm by a day then bentonite-gel was formed.
- (2) The hydraulic conductivity of GCL was less than  $1 \times 10^{-7}$  cm/s under the water pressure of 20 kPa up to 700 kPa.
- (3) We proposed the design and construction method for the practical use of GCL as a water-proof material of a farm pond.

## I. はじめに

近年、立地条件や周辺の環境条件・工期の制約から自

然土質材料を用いた遮水工法が採用できない貯水池、調整池、老朽溜池等に対して、不透水性土質材料の代替として高分子材料等の人工材料を用いた遮水工法が採用されるようになってきている。これら高分子材料の代表的なものである合成ゴムシートについては、数多くの施工例が報告されており、各種現場条件での利用技術が確立

\* 農業工学研究所造構部

\*\* 旭化成工業(株)建材開発研究所

キーワード：ベントナイト、ジオテキスタイル、遮水材、透水係数、膨潤、圧縮、圧密

されつつある<sup>1)</sup>。確かに、完全表面遮水材としての合成ゴムシートは、軽量で、扱いやすく、柔軟性・追従性・接着性に優れていることから、利用価値の高い材料である。しかし、安全性や貯水効率の面から、多少の漏水が許容される構造物、たとえば農業用貯水槽を対象に、施工性・経済性・耐久性・維持管理面でより優れた遮水材の開発が現場から要請されている。こうした中で筆者らは、欧米を主体として開発されてきたベントナイト系遮水マット（以下、遮水マットという。）に注目した。遮水マットは、一般に粘土・繊維複合体からなる柔軟なマット状の遮水材である。天然でしかも化学的活性を持つ粘土の一種であるベントナイトを、ある拘束条件下で水和膨潤させると、組織の緻密化によって不透水性層を形成する特性を応用したものである。この遮水マットは、合成ゴムシート等の高分子材料と異なり、遮水材そのものは無機系の粘土であることから、基本的には材料劣化はなく、小さな穴やクラックは自己閉塞するといった特性の発揮を期待できる材料である。このことから、この種の材料の表面遮水材としての設計施工法が確立されれば、極めて有望な遮水材として、広範に利用し得るものと考えられる。

そこで、遮水マットを水深が数m程度の貯水槽の底盤遮水材に利用することを対象として、大型圧力容器を用いた実際の施工規模のモデル試験を行い、遮水マットの遮水性能を明らかにした。本論では、遮水マット施工初期における遮水性能に焦点を当てて実施した、遮水マットそのものの遮水性能試験やマット相互およびコンク

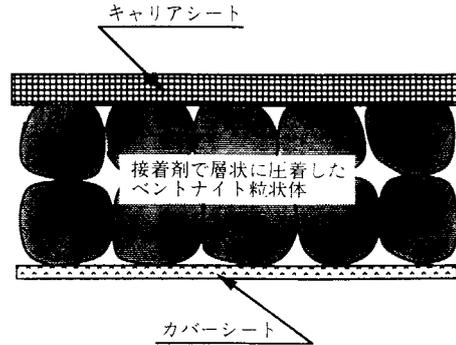


Fig. 1 ベントナイト系遮水マットの構成図

リート構造物との接合部の遮水性能試験の結果から得られた知見を報告するものである。

## II. 試験に用いたベントナイト系遮水マット

試験に用いた遮水マットの構成を Fig. 1 に示すが、ベントナイト層の上下をジオテキスタイルでサンドイッチ状に挟んだものである。ここで使用されているベントナイトは、層状構造を示すスメクタイト系粘土鉱物に属するナトリウムベントナイトで、層間の  $\text{Na}^+$  の強い水和力により、水中で著しく膨潤して安定なゲルを生成するナトリウムモンモリロナイトを主成分鉱物とする粘土である<sup>2)</sup>。なお、ベントナイト層は、材料の不均一性を極力抑える観点から、ベントナイトを一次加工して粒状体としたものが無溶剤系の高分子系接着剤を用いて層状に定着されて形成されている。また、ジオテキスタイルは、ベントナイト層の保護、可搬性を高めるために使用され

Table 1 使用材料一覧表

原 材 料	項 目	試 験 方 法	遮水マットの試験値
ベントナイト	Na モンモリロナイト分	XRD, DTA	>90 (%)
	膨潤力	JBAS, ACC 法	23 (ml/2 gf)
	水分 (含水比)	強制乾燥 (150)	6~8 (%)
	真比重	ベックマン法	2.38
	嵩比重	JIS-K-6721	0.92
接着剤	軟化温度	JIS-K-2207	80 (°C)
	粘着力 (ボールタック)	JIS-Z-0237	>20
上層材*	材 質	JIS-L-1096	高密度ポリエチレン
	厚 さ		0.5 (mm)
	重 さ		100 (gf/m <sup>2</sup> )
	引っ張り強さ		95 (kgf/5 cm)
	伸 度		15 (%)
下層材*	材 質	JIS-L-1096	ポリエステル
	厚 さ		0.30 (mm)
	重 さ		50 (gf/m <sup>2</sup> )
	引っ張り強さ		19 (kgf/5 cm)
	伸 度		20 (%)

\*透水係数 =  $1 \sim 3 \times 10^{-3}$  cm/s (JIS A 1218 に準拠)

ているが、素材は上面が高密度ポリエチレン織布、下面がポリエステル不織布である。Table 1 に使用材料の一覧を示す。

### III. 貯水槽への適用について

#### 1. 小型モールド試験

施工規模のモデル試験を行う前に、遮水性能の前提となる(1) 遮水マットの耐水圧性、(2) 遮水材に使用されている接着剤の膨潤・透水性に与える影響度合い、および、(3) 基盤材料を変化させたときの耐水圧性、に関して、Fig. 2 に示す小型モールド(内径 200 mm) を用いた基礎実験を行った。

(1) 圧着された遮水マットの耐水圧性 遮水マットは、ベントナイト粒状体が感圧性接着剤を用いて圧着されていることから、その耐水圧性状に対する圧着効果の有無を調べるため、ベントナイト粒状体 1~4 層の遮水マットと、次のようにして作製した試料との比較耐水圧試験を行った。比較試料は、ジオテキスタイル上に、ベントナイト粒状体を 1 m<sup>2</sup> 当り 3~13 kgf の範囲で所定の量だけ単に散布し、接着剤を含まない粒状体のみで構成された層を形成させ、さらに、その上にジオテキスタイルをかぶせたものである。

試験は、以下の手順で行った。まず、モールドに基盤材(山砂)を詰め、突固めた。突固めた基盤上に遮水マット、もしくは比較試料をセットし、7 cm 厚の山砂で覆土を行った後、注水した。Fig. 3 に示すように 3 日間膨潤させた後、15 分間隔で 50 kPa ずつ昇圧を行った。ここでは、漏水量の著しい増大が始まった時の水圧を、膨潤後の昇圧に対する遮水マットの耐水圧限界と判定することとした。

Fig. 4 に結果を示す。比較試料であるベントナイト粒状体単独の積層物は、積層量が増え、その厚さが大きくなるにつれて耐水圧が徐々に増大しているが、耐水圧 1 MPa 以上になるには、積層量が 1 m<sup>2</sup> 当り 8 kgf 以上が必要である。それに比べ、接着剤でベントナイト粒状体を圧着した遮水マットの方は、ベントナイト粒状体の

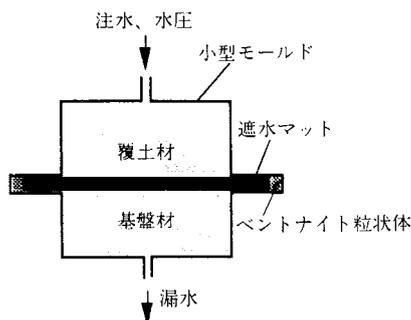


Fig. 2 小型モールド試験模式図

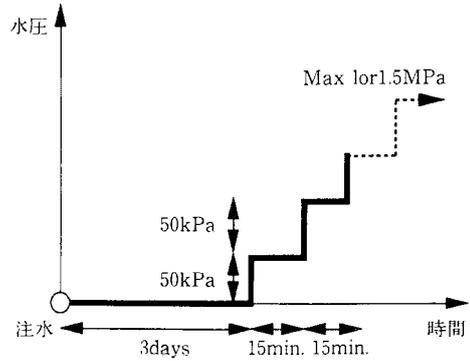


Fig. 3 小型モールド試験の昇圧パターン図

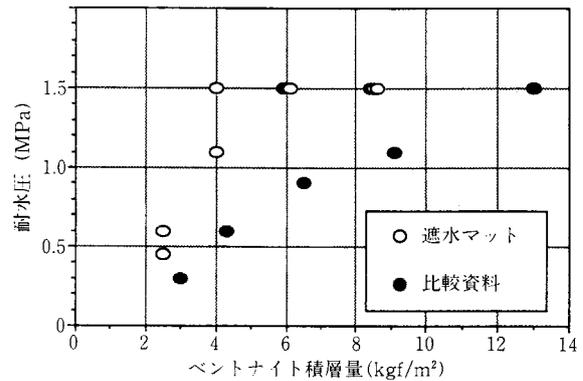


Fig. 4 遮水材料の耐水圧性

積層量が 1 m<sup>2</sup> 当り 4 kgf 以上で耐水圧 1 MPa 以上の値を示し、安定した耐水圧性を示すことが分かった。圧着により積層物の均質化、間隙充填効果等が図られているものと考えられるが、圧着による初期密度の変化が膨潤時や水圧負荷下における遮水層の形成に与える影響度合いについては、さらに検討が必要である。

そこで、以降の実験においては、供試体遮水マットに含まれるベントナイト粒状体の重量を 1 m<sup>2</sup> 当り 4.3 kgf(ベントナイト粒状体 2 層撒き、厚さ 6 mm)とした。

(2) 接着剤が膨潤・透水性に与える影響 供試体遮水マットは、前述したようにベントナイト粒状体をシート間に定着するために接着剤を用いている。この接着剤がベントナイトの膨潤・透水性に大きな影響を与えるか否かを確認するため、接着剤を含む供試体(遮水マット)と含まない供試体(比較試料)に対して膨潤・透水性に関する試験を実施した。

Table 2 に、おのおの 3 供試体ずつ実施した平均値結果を示す。膨潤厚さおよび含水比は膨潤期間 2 週間(覆土は山砂 7 cm)後の値であり、透水係数は水圧 50~600 kPa 載荷時の値である。接着剤を含む供試体と含まない供試体に関しては、膨潤・遮水性に若干の差はあるものの、接着剤を使用することによる特性の大きな変化は認められなかった。ただし、含水比において差が認められ

るように、遮水マットに用いる接着剤の量を増やすと、局所的にベントナイト粒状体の膨潤に必要な水の供給が妨げられ、ベントナイトによる遮水層の形成に時間がかかることが懸念されることから、接着剤は極力使用量を減ずる方が好ましいと思われる。

(3) 基盤材料による遮水マットの耐水圧性

基盤に凸凹があると、膨潤時あるいは圧縮、圧密時に遮水マットが部分的に薄くなったり破断を起こす可能性が高い。そこで、遮水マットがどの程度の粒径の基盤材料であれば、膨潤後の圧縮、圧密時に基盤の不陸にも追従して、ベントナイト層の破断を起こさず、耐水圧性を保持できるかを確認するため、基盤材が山砂の場合と、碎石(粒径 5~10 mm)の場合とで比較試験を実施した。試験方法は、(1)と同様であり、漏水量の著しい増大がなければ耐水圧性有りと判定した。Table 3 に試験結果を示す。基盤材が山砂である場合は、全ての供試体で 1 MPa 以上の耐水圧性を保持し、碎石の場合は、500 kPa 程度であった。この結果から、膨潤後の遮水マットは粒径 10 mm までの砂利基盤によって生じる程度の基盤の不陸に対して 500 kPa 程度までは追従性があると考えられ、水深数mの貯水槽に適用する場合、実用上の耐水圧性を有するものと思われる。

2. 施工規模モデル試験

(1) 試験方法 実際の施工に近似しうるモデル規模で遮水性試験を行うため、Fig. 5 に示す大型压力容器を用いて試験を実施した。現在までに実施した試験

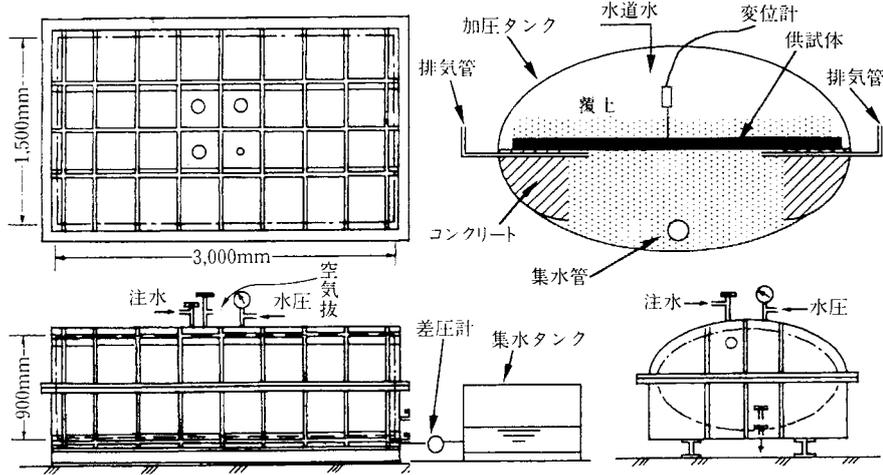


Fig. 5 大型压力容器

内容の概略を Table 4 に示すが、膨潤期間の設定、基盤面からの揚圧力の抑制、ベントナイト膨潤量の経時変化、および使用水の水温変化による透水係数への影響等、試験条件や試験方法自体、試行錯誤の連続であり、若干各ケースごとに違いはあるものの、できる限り実際の施工方法を評価できるよう考慮しつつ実施した。

Fig. 5 に示すように、モールド内側周縁部にコンクリートを打設し、中央に山砂を詰め、振動コンパクタを用いて、十分に締固めて基盤とした。この上に遮水マットの供試体を敷設し(具体的な敷設方法は後述)、覆土をした。モールドの蓋をセットしてボルト締めした後、注水し、遮水マットが膨潤する期間をおいて、試験を行った。

すべての試験において、モールド内の水圧値、供試体上面の変位、漏水量を測定した。モールド内の水圧値はモールドに取付けた水圧計により、供試体上面の変位は供試体上面 3カ所に取付けた変位計により、漏水量は漏水集水タンクに取付けた差圧計によりおのおの読取った。ここで、供試体変位測定用の変位計は覆土が被らないようにするため、供試体上に塩ビパイプを立て、その中空部に位置するように取付けを行った。

Test 1~8 については、試験中の供試体厚さ  $d$  は次式により求めた。

$$d = d_0 + \Delta d \dots\dots\dots (1)$$

$d_0$  : 試験前の供試体の厚さ

$\Delta d$  : 試験中の供試体上面の変位

しかし、上式では試験中に基盤が沈下した場合、供試体の厚みを過小に評価してしまうため、Test 9 については供試体の下部にも変位計を取付け、供試体の上下両面の変位から厚さを求めた。

試験中の供試体の透水係数  $k$  は、ダルシー則が成立すると仮定して、次式により求めた。

Table 2 接着剤の影響

	接着剤なし	接着剤あり
初期厚さ	0.54 cm	0.61 cm
膨潤厚さ	1.90 cm	1.95 cm
含水比	558.7%	403.5%
透水係数	$5 \sim 1 \times 10^{-9}$ cm/s	$7 \sim 1 \times 10^{-9}$ cm/s

Table 3 基盤材料による耐水圧試験結果

基盤	耐水圧 (MPa)
山砂	全供試体 (9 供試体) とも 1.0 以上
碎石 (5~10 mm 径)	全供試体 (5 供試体) のうち 0.45 (3/5), 0.5 (1/5), 0.8 (1/5)

Table 4 試験項目一覧表

test No.	膨潤期間 (日数)	モデル内容				遮水マツト上載材料
		基盤材料	敷設遮水マツト	構造物との取合い		
				接合部	水平部	
test 1	7	山砂	無	取合幅 300 mm TYPE-A	無	山砂 ・締固め無し ・厚さ 70 mm
test 2	7	山砂	無			
test 3	7	山砂	有 幅 200 mm TYPE-B	取合幅 300 mm  TYPE-B	無	山砂 ・締固め無し ・厚さ 70 mm
test 4	10	山砂	有 幅 100 mm TYPE-B			
test 5	7	山砂	無			
test 6	9	山砂	無	無	有	コンクリート版 (中心部) 100 mm
test 7	7	山砂	無			砕石(C-40)/山砂 (70 mm/30 mm)
test 8	7	山砂	無	無	有	砕石(C-40)/山砂 (100mm/100mm)
test 9	18	山砂	無	無	有	両者とも締固め

TYPE-A：マツト端部のシートを一部はがし、ベントナイト粒状体を露出させ接合したもの。

TYPE-B：重ね部または取合い部にベントナイト粒状体を散布したもの。

$$k = \frac{Q \cdot d}{A \cdot t \cdot p} \dots\dots\dots (2)$$

Q：漏水量      d：供試体厚さ      A：供試体面積  
t：時間          p：水圧値 (水頭差)

(2) 遮水マツトの膨潤      今回報告するテストケースは、すべて Table 4 に示す膨潤期間(水深 50 cm のもとで膨潤) を設けた。

Fig. 6 は、山砂による覆土厚 7 cm のもとで膨潤させたときの遮水マツトの厚さと時間の関係を示す。各ケースごとに若干の相違はあるが、遮水マツトは、吸水開始後急激に膨潤して 24 時間で厚さ約 12 mm (初期値に対する体積比 200%) に達し、その後膨潤速度は緩やかになり 72 時間で約 14 mm (同 230%) に達した。

(3) 遮水マツトと水平構造物との接合部の遮水性能      現場施工においては、構造物との接合は避けられない。遮水マツトと水平構造物を接合する場合には、接合面のジオテキスタイル (透水性シート) を剥がすか、接合面にベントナイトを散布する方法が考えられる。前者は Test 1, 2 で、後者は Test 3, 4 でおのおの試験した。なお、散布したベントナイトは、遮水マツトを構成している粒状体と同一である。

Fig. 7 は、Test 2 のセット図を示す。Test 2 はコン

クリート構造物と砂基盤との境界にベントナイト粒状体を散布し、供試体の遮水マツト下面の透水性シートを幅 20 cm 剥がして切断し、コンクリート構造物との接合部幅を 30 cm 設けてセットした。その後、山砂による覆土厚 7 cm のもとで約 160 時間膨潤させ、試験を行った。

Fig. 8 に、Test 2 の試験結果を示す。図に示すように水圧 100~700 kPa を段階的に負荷した結果、水圧が上がるにつれて厚みが小さくなっており、遮水マツトは水圧を負荷することにより、粘性土の圧縮、圧密における構造変化<sup>3)</sup>と同様の現象が生じているものと推論される。透水係数については  $1 \times 10^{-8}$  cm/s 近くを維持して

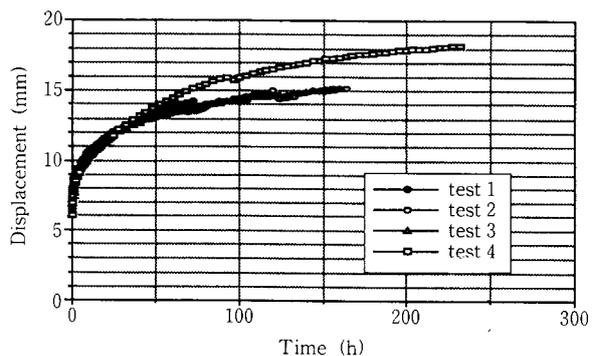


Fig. 6 膨潤試験結果

おり、水平構造物との接合部も本体マット部に近い遮水性を有すると判断される。

(4) 遮水マット相互接合部の遮水性 現場に遮水マットを搬入する必要上、遮水マットは長さ・幅共に一定の制約があるため、遮水マット相互の接合の必要を生ずる。その方法は種々考えられるが、本論における試験では、遮水マットの端部を重ね合わせ、重ね合わせ面にベントナイト粒状体を散布する方法で行った。接合幅は 20 cm (Tsst 3) と 10 cm (Test 4) の 2 種類、ベントナイト粒状体散布量は  $1\text{ m}^2$  当り  $2.5\text{ kg f}$  で行った。Fig. 9 は、Test 3 のセット図を示す。Test 3 は幅 20 cm で接合し、山砂による覆土厚 7 cm のもとで約

160 時間膨潤させた後、試験を行った。

Fig. 10 に、Test 3 の試験結果を示す。Fig. 10(a) に水圧～時間の関係を示すように、水圧 100~700 kPa を段階的に载荷した。Fig. 10(b) は、そのときの遮水マット厚さ～時間の関係であり、○印は遮水マット本体部の、●印は接合部の厚さをおのおの示す。Fig. 10(c) は透水係数～時間の関係を示す。水圧が変化しても透水係数は  $10^{-8}\text{ cm/s}$  オーダを維持している。

Fig. 11 は、接合部がない場合 (○印)、接合幅 20 cm の場合 (▲印)、接合幅 10 cm の場合 (■印) の水圧と透水係数の関係を示す。接合の有無、接合幅の違いによる差は明確ではないが、いずれのケースも透水係数は  $10^{-8}\text{ cm/s}$  オーダである。遮水マットに要求される遮水性が

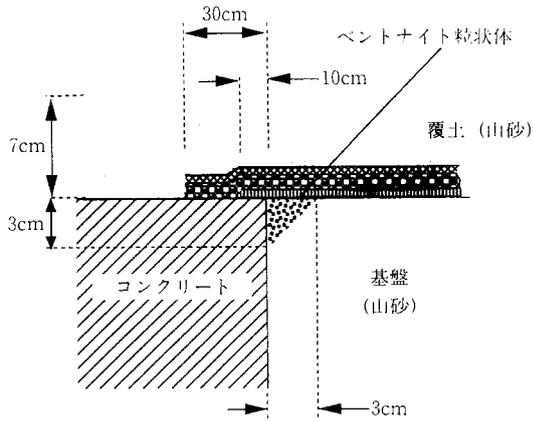


Fig. 7 水平構造物との接合部の供試体セット方法

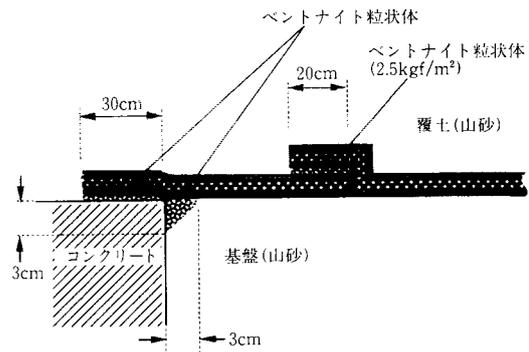


Fig. 9 遮水マット相互接合部の供試体セット方法

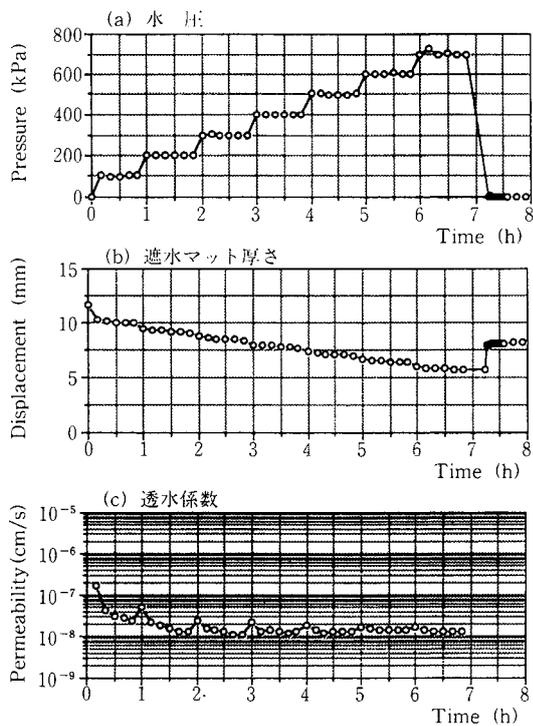


Fig. 8 水平構造物との接合部の遮水性試験結果

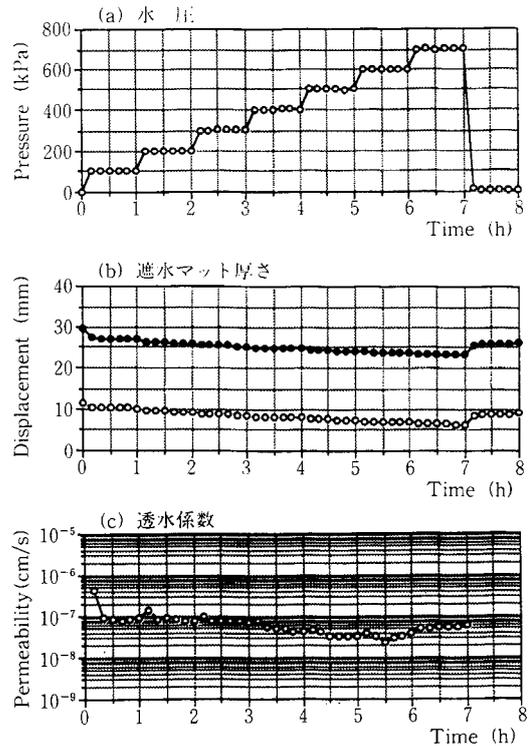


Fig. 10 遮水マット相互接合部の遮水性試験結果

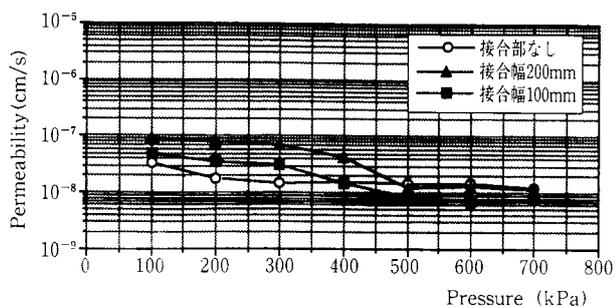


Fig. 11 遮水マット相互接合部の遮水性

透水係数として  $10^{-8}$  cm/s オーダであれば、接合幅は 10 cm 程度を目安としてよいと思われるが、さらに、より施工性の高い接合方法の工夫を含めた検討が必要である。

(5) 遮水マットと垂直構造物との接合部の遮水性  
現場施工においては、垂直構造物との接合を生ずる場合も考えられ、その方法として、ベントナイト付きシート（透水性シートの片面にベントナイト粒状体が付着したシート、供試体遮水マットを上下 2 枚に剥がして作製）を用いる方法が考えられる。Fig. 12 は、Test 8 のセット図を示す。Test 8 は、遮水マットと垂直構造物との接合部において、ベントナイト付きシートを遮水マットの上下からはさみ、垂直構造物と接触させることにより接合したケースである。覆土は山砂 10 cm 厚、碎石 10 cm 厚で行い、振動コンパクタにより締固めた。

Fig. 13 に、Test 8 の試験結果を示す。図に示すように、水圧 20~320 kPa を段階的に载荷した結果、透水係数は  $1 \times 10^{-7}$  cm/s 近くを維持している。垂直構造物との接合方法についても、施工性も考慮しながらさらに工夫を要すると思われるが、実用上の遮水性は確保できているものと考えられる。

(6) 遮水マットの自閉性  
垂直構造物接合部の遮水性試験を目的として Test 8, 9 を行ったが、Test 9 は試験途中で漏水量が多くなったことから、遮水マットに水みちが発生したのと考え、その後は発生し

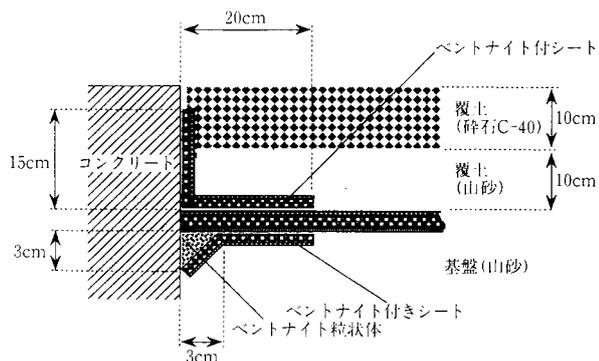


Fig. 12 垂直構造物との接合部の供試体セット方法

た水みちが自己閉塞するか否かを確認することにした。

Fig. 14 は、Test 9 の試験結果を示す。図に示すように、水圧 20~160 kPa を段階的に载荷した結果、20~80 kPa までは透水係数は  $2 \times 10^{-7}$  cm/s 程度であったが、160 kPa では  $10^{-6}$  cm/s オーダにまで大きくなったため、このとき何らかの原因によって水みちが発生したと

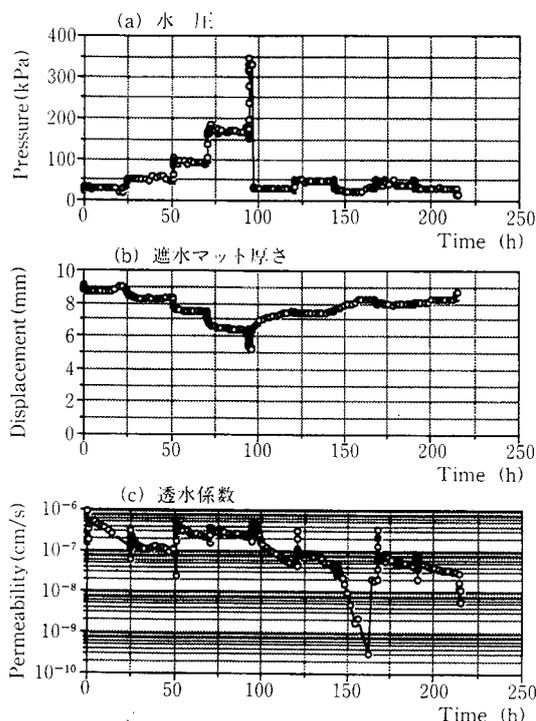


Fig. 13 垂直構造物との接合部の遮水性試験結果

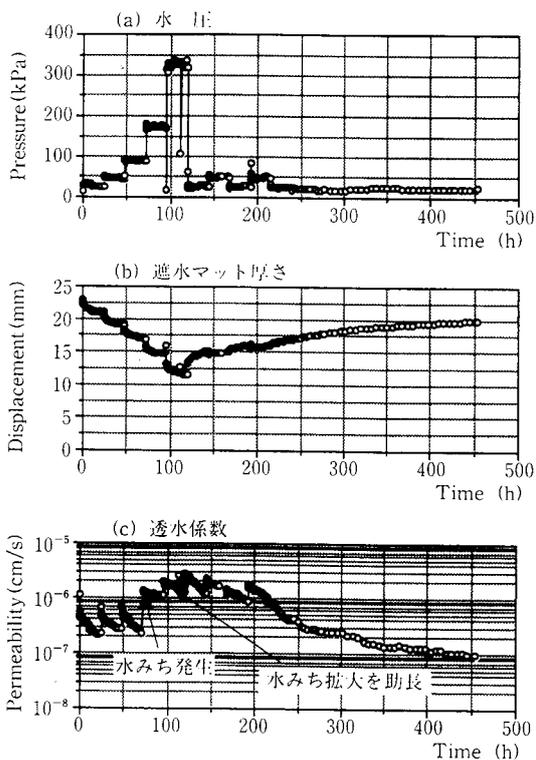


Fig. 14 遮水マットの自閉性

思われる。そこで、さらに水圧を 320 kPa にまで上昇させたり、20~40 kPa の繰返し载荷を行うことによって、意図的に水みちの拡大を助長させた後、20 kPa で養生を行い、透水係数の変化を観察した。その結果、透水係数は初期の値 ( $2 \times 10^{-7}$  cm/s) 程度まで回復した。この現象は、ベントナイトの膠着性に起因して、低圧養生中に下面のジオテキスタイルにベントナイトの被膜が再形成されたこと、あるいは、使用しているベントナイトが 100 kPa 程度の膨潤圧を有することから、膨潤圧以上に拘束された状態から 20 kPa まで降圧することにより、徐々に再膨潤を起こすという膨潤圧の働きに起因するものと考えられる。すなわち、遮水マット自体が持つ自己閉塞機能が発揮されたことにより、水みちが閉塞され、ほぼ元の状態にまで遮水性能が回復したものと説明するのが妥当と思われる。

#### IV. おわりに

遮水マットは、小さいといえども透水係数を有した材料であることから、完全遮水は不可能であるが、ある程度の漏水を許容できる場合には、遮水材として用いることができる有用な材料であることが確認できた。今後はさらに実験を続け、(1)遮水マットの透水係数に及ぼす遮水層の初期密度、膨潤条件の影響、(2)遮水ゾーン形成

のメカニズム、(3)水圧負荷に伴うベントナイトのマイクロ構造の変化が透水係数に及ぼす影響、(4)乾燥ひびわれを含む自己閉塞性、および(5)遮水性の長期安定性、などに関して明らかにしていくとともに、試験施工を通じて設計施工法を確立していく予定である。

最後に本研究を進めるに当たり、福井県立大学助教授菊沢正裕博士、東北農政局母畑開拓建設事業所片倉慎介所長はじめ所員の方々より貴重な助言を賜った。また、実験に当っては、農業工学研究所造構部の諸兄に多大なご協力をいただいた。ここに記して、謝意を表します。

#### 引用文献

- 1) 長束 勇・中島賢二郎・鶴丸雄二郎：合成ゴムシートの遮水性能—農業用貯水池への適用を目的として—, 防水ジャーナル, 228, pp.56~67 (1990)
- 2) H.von Olphen : An Introduction to Colloid Chemistry, A Wiley Interscience Publication; New York, London, Sydney, Toronto, Second Ed., p.37(1985)
- 3) 土壤物理研究会編：土の物理学—土質工学の基礎—, 森北出版, pp.84~88(1979)

[1993.1.5.受稿]

[この研究論文に対する公開の質疑あるいは討議 (4,000 字以内, 農業土木学会論文集編集委員会あて)は, 1994 年 4 月 24 日まで受け付けます。]