

# ジオメンブレン降雨浸透防止工法に関する基礎的研究

——ジオメンブレン摩擦特性の把握と降雨浸透実験シミュレーション解析——

山本 彰 鳥井原 誠  
平間 邦興

## Method for Preventing Permeation of Rainwater into Ground using Geomembranes

——Evaluation of Friction Characteristics of Geomembranes and Numerical Simulation of Rainwater Test on Model Slope——

Akira Yamamoto Makoto Toriihara  
Kunioki Hiramama

### Abstract

In devising a method for preventing permeation of rainwater into ground using geomembranes, it is very important to determine the friction between the soil and the geomembrane, and the permeability of rainwater into the slope covered by the geomembrane. This paper first describes friction tests on soils and geomembranes, and resulting friction characteristics. Next, it discusses the permeation prevention effect of geomembranes on a slope, based on rainwater tests and unsaturated groundwater analysis of a slope for various geomembrane positions and lengths.

The results showed the following: ① The simple friction test method is useful in measuring the friction between soils and geomembranes. ② The friction angle is 15-30 degree independently of the soil type. ③ Geomembranes are useful for stabilizing slopes by the preventive effects of reducing suction and rising groundwater table in the ground when it rains.

### 概要

本報告は、ジオメンブレン降雨浸透防止工法における土とジオメンブレンの摩擦抵抗、ジオメンブレンを敷設した斜面の雨水の浸透特性について検討したものである。報告ではまず、土とジオメンブレンの摩擦試験を実施し、その摩擦試験手法および摩擦抵抗特性について検討している。次に、ジオメンブレンを敷設した模型斜面の降雨実験とその不飽和浸透流解析を実施し、ジオメンブレンの敷設範囲や敷設位置が斜面の雨水浸透性状に与える影響について検討している。その結果、以下の点が明らかとなった。① 簡易型摩擦試験は土とジオメンブレンの摩擦抵抗の測定に有効である。② 土とジオメンブレンの摩擦角は土の種類によらず、おおむね15～30°程度である。③ 斜面に敷設したジオメンブレンは、地山内への雨水の浸透を遅らせることによって、自重増加、サクシジョンの低下や地下水位の上昇を抑制し、斜面を安定化させる効果がある。

## 1. はじめに

我が国は、気象、地形、地質的要因から、梅雨、台風、あるいは融雪に伴って毎年のように地すべりなど多くの土砂災害が発生し、社会的に大きな被害を及ぼしている。これら土砂災害の主な原因は、雨水の地山への浸透に伴う自重増加、間隙水圧の増加、サクシジョンの低下、地盤の強度低下などであると考えられている。

地すべり対策としてのジオメンブレン降雨浸透防止工法とは、図-1に示しているように、地すべり地域において地表面にジオメンブレンなどの不透水性材料を敷設して降雨による雨水の地山内への浸透を抑制し、主として地下水の上昇を防止することによって斜面や地すべり地の安定化を図る工法である。また、この工法では景観、

自然環境の保全への配慮から地表面にジオメンブレンを敷設した後、1～2 m程度覆土するのが基本であり、これが本工法の特徴の1つとなっている。

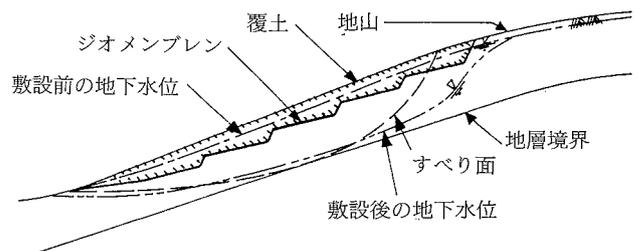


図-1 ジオメンブレン降雨浸透防止工法の模式図

そこで、本報告ではまず、ジオメンブレン上の覆土の安定性を評価するための土とジオメンブレンの摩擦試験手法、およびその摩擦抵抗特性について検討する。次に、ジオメンブレンを敷設した模型斜面の降雨浸透実験とその不飽和浸透流解析を実施し、ジオメンブレンの敷設が斜面の雨水浸透性状に与える影響について検討する。

## 2. ジオメンブレンと土の摩擦試験

### 2.1 試験方法

摩擦試験は、簡便な試験である簡易型摩擦試験とより実際の条件に近いと考えられる斜面降水実験の2つの試験方法によって行った<sup>2),3)</sup>。表-1は試験に用いたジオメンブレン材料の一覧を示しており、土試料としては2.0mmのふるいで調整した鬼怒川砂(内部摩擦角 $\phi=38.3^\circ$ )と0.425mmのふるいで調整した関東ローム( $\phi=21.1^\circ$ )を用いた。

**2.1.1 簡易型摩擦試験** 図-2に簡易型摩擦試験の概要を示す。この装置はジオメンブレンを固定した台座上に土試料を詰めた塩ビモール(内径 $\phi 84$ mm)を設置し、モールを水平方向に移動させることによってジオメンブレンと土の摩擦抵抗を測定する構造となっている。実験ではモール内に土試料を所定の密度(鬼怒川砂： $\gamma_d=15.8$  kN/m<sup>3</sup>, 関東ローム： $\gamma_d=7.9$  kN/m<sup>3</sup>)で詰め、ジオメンブレンと土試料を深さ1cm程度浸水させ、垂直荷重を保ったまま5分間放置した後、せん断速度1.0mm/minで強制変位を与えた。

**2.1.2 斜面降水実験** 図-3に斜面降水実験の概要を示す。降雨装置は圧力水と圧縮空気を混合し、霧状の雨(粒子径 $8\sim 300\mu$ )を降らせることのできるノズルが8個取り付けられており、毎時 $10\sim 200$ mmの降雨を与えることが可能である。実験ではまず、ジオメンブレンを3種類の角度の異なる斜面角( $\theta=\alpha$ ,  $\theta=\alpha+2.5^\circ$ ,  $\theta=\alpha+5.0^\circ$ )を有する台座上に張り付け、土試料を詰めた高さ20cm、直径30cmの塩ビパイプを設置する。その後、供試体上方から時間雨量100mmの降雨を継続的に加え(最大1時間)、塩ビパイプが滑動する台座の傾斜角を求めた。

### 2.2 試験結果

図-4は簡易型摩擦試験で求めた材料Dの鬼怒川砂を用いた場合のせん断応力とせん断変位の関係を示している。この図から、せん断応力は垂直応力の大きさにかかわらず、いずれもせん断変位とともに増加し、ピークに達した後、減少し、残留状態に至る。

図-5, 6は斜面降水実験で得られた摩擦角と簡易型摩擦試験で得られたピーク時および大変位時(せん断変位量7mm)の摩擦角の関係を示している。この図から、いずれも簡易型摩擦試験の方がやや大き目の値を示しているものの、両者はほぼ対応しており、簡易型摩擦試験は土とジオメンブレンの摩擦抵抗の測定に十分に適用できるものと判断される。ただし、簡易型摩擦試験で求めた摩擦角を設計に用いる場合にはある程度(0~20%程

表-1 材料一覧

材 料	材 質	厚さ(mm)
A	塩ビ系(軟質)	1.0
B	塩ビ系(基布入)	1.0
C	HDPE系	1.0
D	ゴム系	1.0
E	再生塩ビ系	0.4
F	LDPE	0.4
G	EVA	0.4

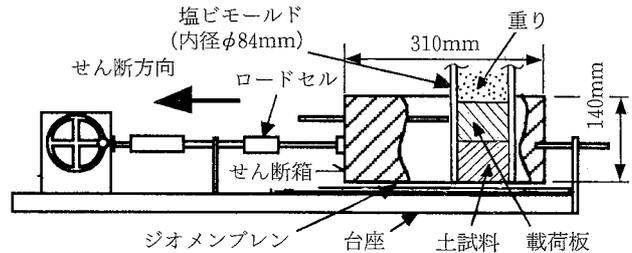


図-2 簡易型摩擦試験概要

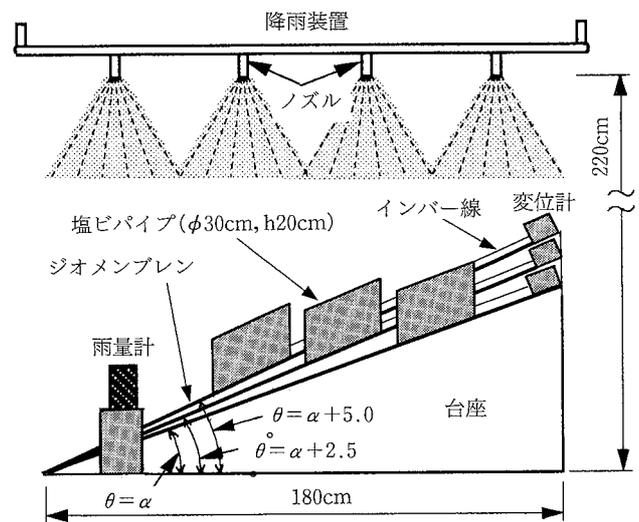


図-3 斜面降水実験概要

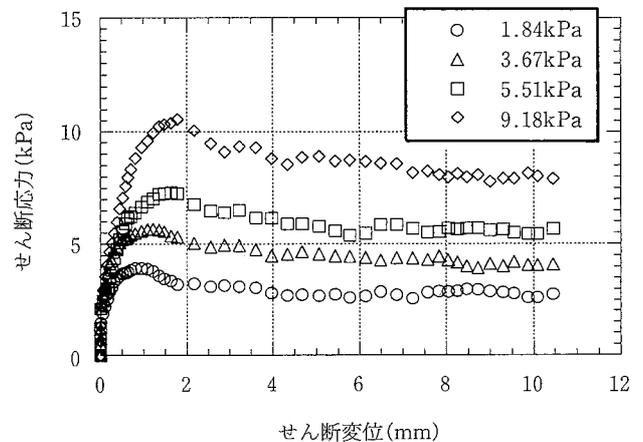


図-4 せん断応力とせん断変位の関係  
(材料D, 鬼怒川砂)

度) 低減した値を用いる必要があるといえる。

また、これらの摩擦試験結果から、ジオメンブレンと鬼怒川砂、関東ロームとの摩擦角はいずれも15~30°程度となっており、ジオメンブレンの敷設勾配を1:4(≒14°)以下にすれば覆土のジオメンブレン上での安定性はおおむね確保されるものと考えられる。ただし、関東ロームのように比較的摩擦角の小さい土を覆土に用いる場合には、覆土内部の安定性について別途検討する必要がある。

さらに、これらの試験結果から土とジオメンブレンの摩擦角は、同一の土試料であってもジオメンブレンの種類によって異なる傾向を示しており、ジオメンブレン表面の粗さ(凹凸の大きさ)や硬さなどその材質によって大きな影響を受けることが分かる。

### 3. 斜面降雨実験

#### 3.1 実験方法

図-7に斜面降雨実験の概要を示す。実験土槽の寸法は2m(長さ)×1m(高さ)×0.3m(幅)であり、降雨装置は摩擦試験で用いたものと同様である。模型斜面は図に示すように傾斜角25°の台座上に層厚20cmの斜面を相対密度が80%( $\gamma_d=15.8\text{ kN/m}^3$ )になるように空中落下法によって作成した。実験に用いた土試料は2.0mmのふるいで調整した鬼怒川砂であり、ジオメンブレンとしては表-1の材料Dを用いた。実験に当たってはジオメンブレンを敷設しない状態で3時間降雨を与えた後、斜面下端から20時間排水した状態を初期条件とした。実験は地表面部にジオメンブレンを敷設し、排水口を閉じた後、上方から時間雨量60mmの降雨を3時間与えた。なお、実験中のジオメンブレン上の雨水は斜面に浸透しないよう排除している。実験ケースはジオメンブレンを敷設しない場合(Case1)と図-8に示しているようにジオメンブレンの敷設位置と範囲を変化させた場合の5ケースである。実験ではテンシオメータ、間隙水圧計、電圧センサー、荷重計を配置し、経時的に計測を行っている。

#### 3.2 実験結果

3.2.1 経時変化 図-9は各ケースにおける斜面底面A点のテンシオメータ、間隙水圧計、電圧センサー、および斜面下端部の荷重計の計測結果を示している。これらの図から、圧力水頭は降雨開始直後から徐々に増加し、ある点で急激に増加した後、一定値に漸近している。この圧力水頭が急激に増加し始める点は雨水に伴う浸潤前線がA点に到達したことを示しているものと考えられ、Case1, 2, 3では約15分後、Case4, 5では約60分後に浸潤前線が到達したことがわかる。

一方、間隙水圧は降雨開始後しばらくして、急激に増加し、一定値に漸近している。この間隙水圧が急激に増加する点は地下水面がA点に到達したことを示しており、Case1, 2が最も早く、Case3>Case4>Case5の順で遅くなっている。Case5では間隙水圧の発生にCase1の2倍程度の時間を要する結果となっている。また、最終的な

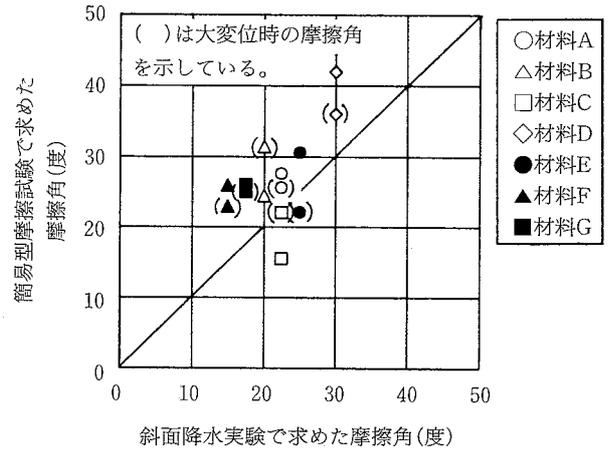


図-5 各種試験から求めた摩擦角の比較(鬼怒川砂)

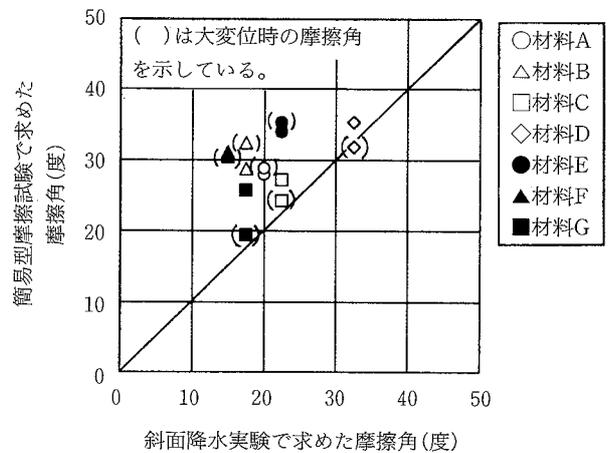


図-6 各種試験から求めた摩擦角(関東ローム)

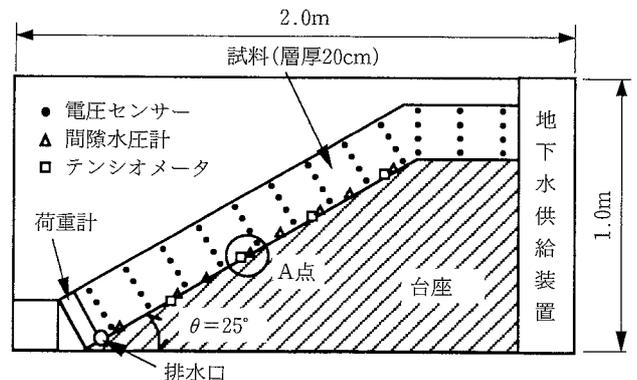


図-7 斜面降雨実験概要

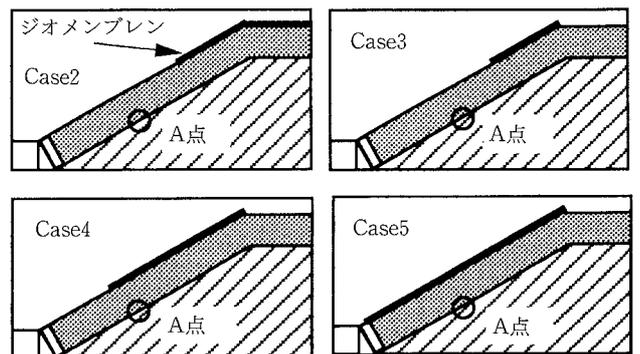


図-8 実験ケース

間隙水圧はCase1が最も大きく、Case3>Case2>Case4>Case5の順で小さくなっており、Case3ではCase1の4/5程度、Case2では3/5程度、Case4では1/2程度、Case5では1/3程度となっている。これらのことから、斜面上に敷設したジオメンブレンは、負の圧力水頭(サクション)の低下や間隙水圧の発生を遅らせるとともに、間隙水圧の発生を抑制する効果のあることがわかる。

次に、斜面下端部での荷重は降雨開始直後から徐々に増加し、ある程度時間が経過した後、急激に増加する傾向が見られる。Case1, 3, 4ではこの荷重増加点と間隙水圧の急激に増加する点とはほぼ対応しており、すべり荷重は地下水面上昇とともに、急激に増加することが分かる。また、最終的な荷重増加はCase1が最も大きく、Case2, 3はCase1の3/4程度、Case4は1/2程度、Case5は1/4程度となっており、Case1, 3, 4, 5を比較するとジオメンブレンの斜面上の敷設長さと荷重増分は反比例の関係にあることがわかる。なお、Case2, 3から、天端のジオメンブレンの有無による荷重増加への影響はあまり見られない。

電圧は降雨後徐々に減少した後、大きく減少し、最終的に一定値に漸近している。この電圧の変化は圧力水頭と同様な挙動を示しており、急激に小さくなる点は圧力水頭の急激に大きくなる点とほぼ対応している。このことから、電圧が急激に低下した段階は、浸潤前線が到達した時点に対応するものと考えることができる。

3.2.2 間隙水圧、浸潤前線の分布 図-10は降雨開始180分後の間隙水圧分布を示している。この図から、Case1の間隙水圧が最も大きく、Case3>Case2>Case4>Case5の順となっており、間隙水圧はジオメンブレンの敷設長さが大きくなるほど小さくなっている。

次に、図-11は電圧センサーの計測結果から求めた浸潤前線の到達時間分布を示している。この図から、Case1では浸潤前線は時間の経過とともにほぼ斜面形状に平行に分布しているのに対し、Case2~5のジオメンブレンを敷設した部分では斜面に垂直に浸潤前線が分布しており、雨水の浸透形態が大きく異なることが分かる。また、上流側にジオメンブレンを敷設していないCase3~5ではジオメンブレンを敷設していない部分全体に雨水が浸透した後、敷設した部分に徐々に浸透している。さらに、Case2~4では毛管現象によって下流側からジオメンブレンを敷設した部分に浸透している様子がよく分かる。このような浸透性状の変化によって、Case1では20分程度で雨水が斜面全体に浸透しているのに対し、Case3では30分程度、Case4では60分程度、Case5では90分程度の時間を要する結果となっている。

#### 4. シミュレーション解析

##### 4.1 解析方法

解析は不飽和浸透流解析によって行った。不飽和浸透流解析に用いる圧力水頭 $\psi$ と体積含水率 $\theta$ の関係はpF試験(土柱法)によって求めた。また、比透水係数K

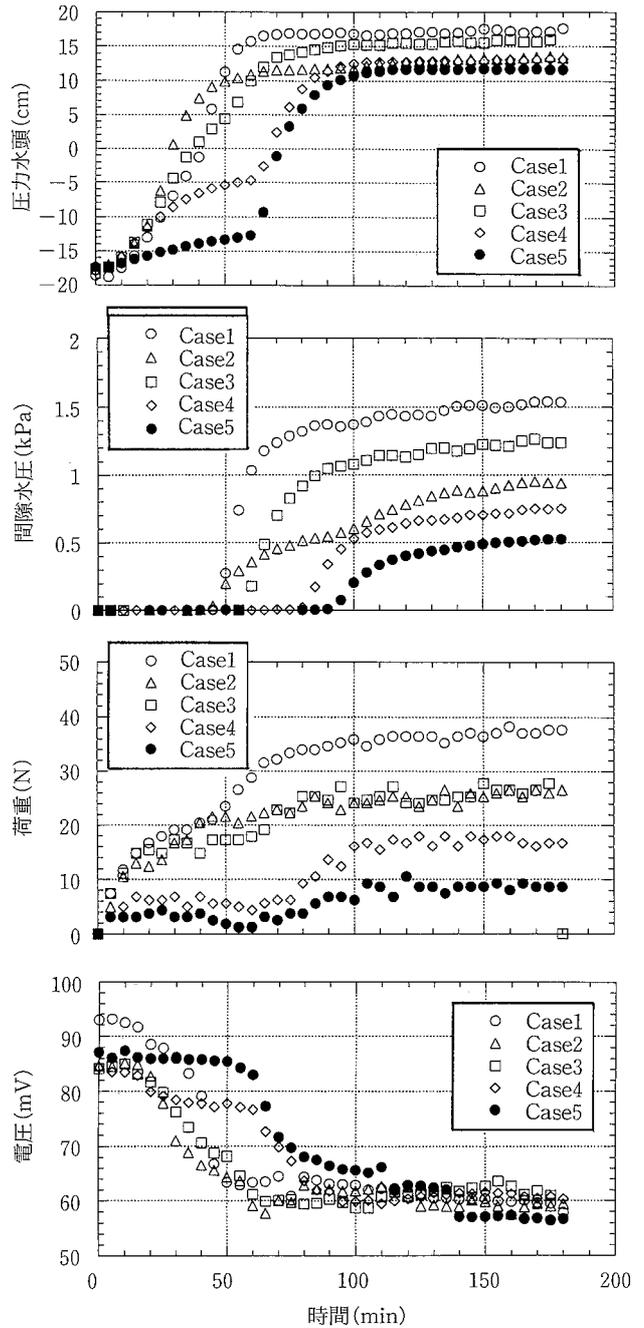


図-9 各種計測結果

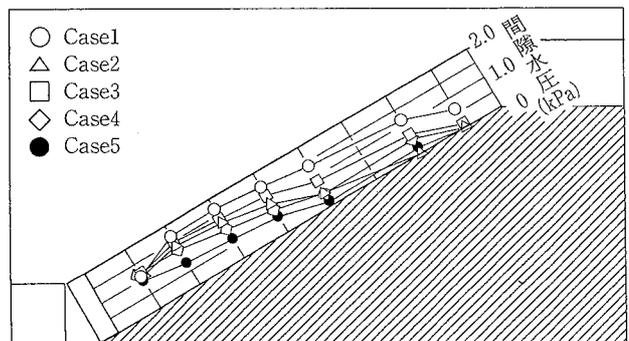


図-10 間隙水圧分布 (180分経過後)

と体積含水率の関係は飽和透水試験と Irmay<sup>4)</sup>の式を用いて求めた。

$$\text{Irmayの式: } K = \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\alpha \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 $\theta_r$ : 最小含水量,  $\theta_s$ : 飽和体積含水率,  $\alpha$ : 定数である。なお、 $\alpha$  の値は砂質土の場合  $\alpha=2.5\sim 4.0$  となることが理論的・実験的に求められており<sup>5)</sup>、今回の解析では  $\alpha=3.0$  とした。表-2、図-12は解析に用いた定数、圧力水頭、比透水係数と体積含水率の関係を示している。また、解析ではジオメンブレン上に降った雨は地盤に浸透しないものと仮定し、ジオメンブレン上の降雨は考慮しないこととした。

4.2 解析結果

図-11には実験結果と併せて解析で得られた浸潤前線を示している。なお、解析での浸潤前線の到達時間は圧力水頭の変化し始めた点から求めた。これらの図から、解析で求めた浸潤前線の浸透は実験結果に比べ、時間の経過とともに遅くなる傾向が見られるものの、斜面天端での浸透性状、浸潤前線がジオメンブレンの敷設部分に回り込む様子などジオメンブレンを敷設した斜面への雨水の浸透性状をよく表わしているといえる。

図-13は Case1, 4 の降雨開始180分後における流速ベクトルを示している。この図から、Case4 に比べ Case1 の方が斜面内の浸透速度が大きくなっている。また、Case1 では地盤に浸透した雨水はほぼ斜面に平行に浸透しているのに対し、Case4 ではジオメンブレンを敷設した部分に上流側、下流側から雨水が回り込むように浸透している様子がよく分かる。

図-14は降雨開始180分後における圧力水頭分布を示しており、Case1 では Case4 に比べ、雨水の浸透によ

表-2 解析定数

Irmay の式の定数	最小含水量 $\theta_r$	0.05
	飽和体積含水率 $\theta_s$	0.32
	定数 $\alpha$	3.0
飽和透水係数 $k$ (cm/sec)		0.0225

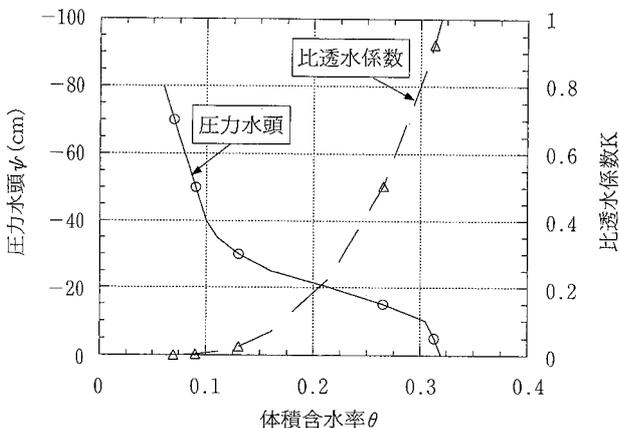


図-12 圧力水頭、比透水係数と体積含水率の関係

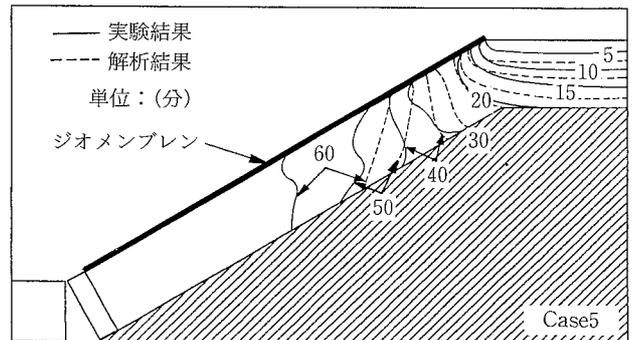
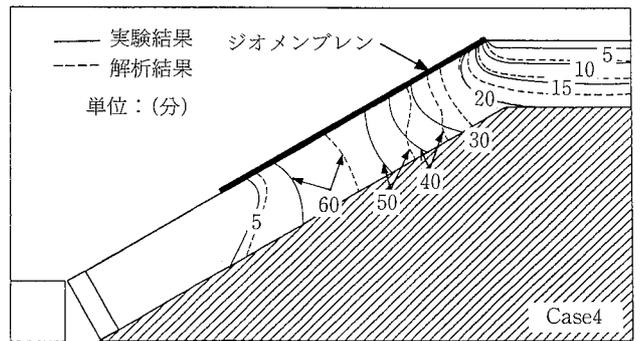
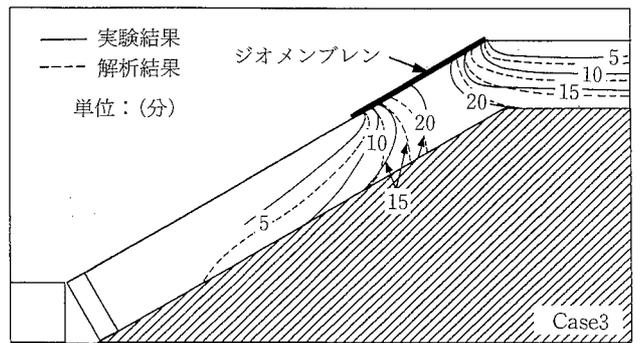
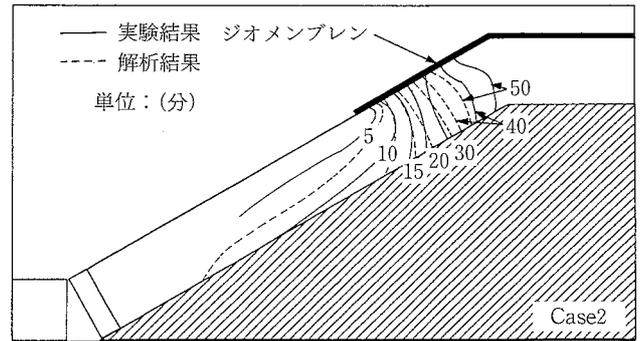
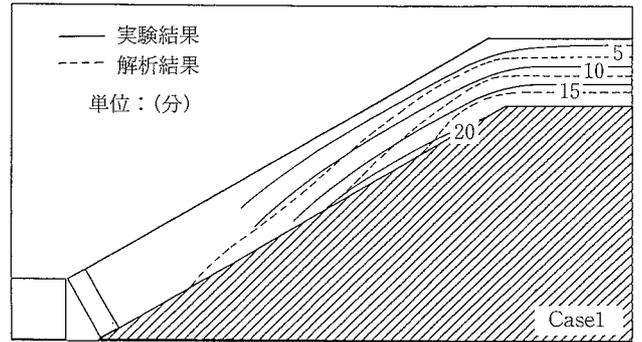


図-11 浸潤線分布図

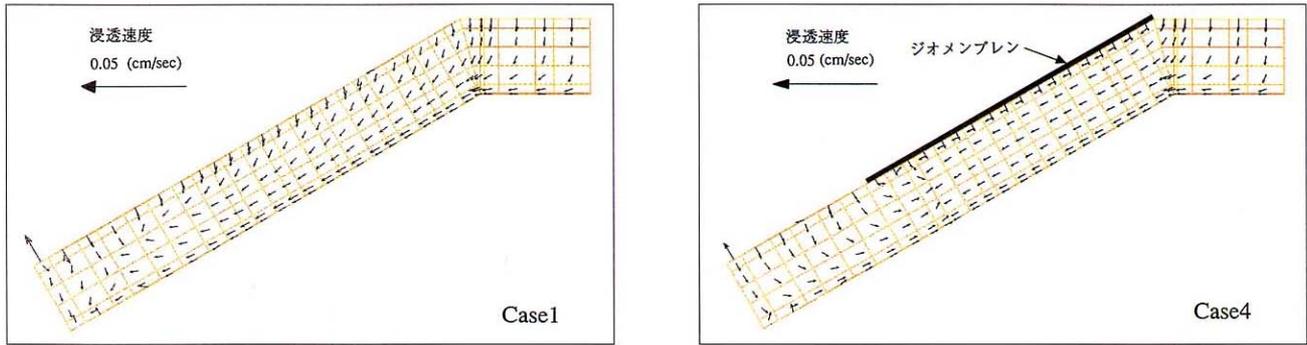


図-13 流速ベクトル図 (降雨開始180分後)

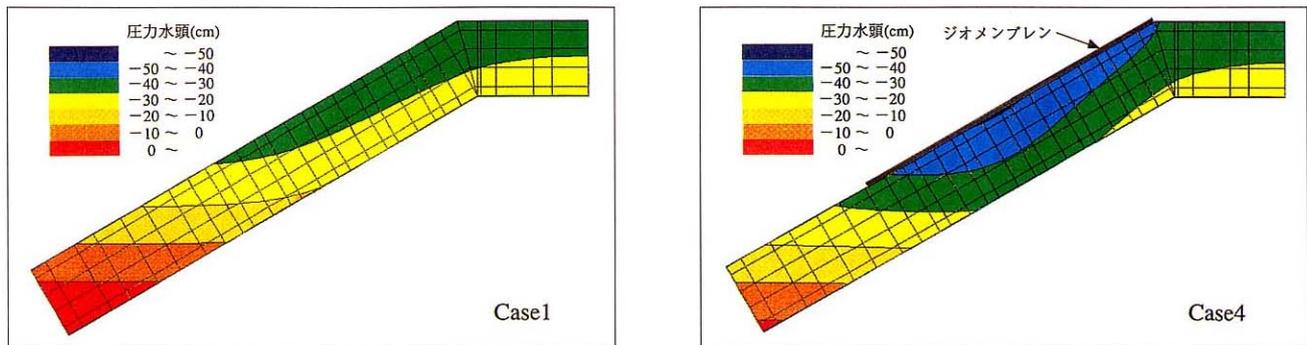


図-14 圧力水頭分布図 (降雨開始180分後)

て負の圧力水頭（サクシオン）がかなり低下していることが分かる。特に、Case4 のジオメンブレンを敷設した部分でのサクシオン分布は Case1 のそれと大きく異なっている。

以上の結果から、ジオメンブレンの斜面への敷設効果は地山内への雨水の浸透を遅らせることによって、自重増加、サクシオンの低下や地下水位の上昇を抑制し、結果として斜面を安定化させるところにあり、これがジオメンブレン降雨浸透防止工法による斜面や地すべり地の安定化のメカニズムであるといえる。

### 5. おわりに

この報告ではジオメンブレン上の覆土の安定性、ジオメンブレンを敷設した斜面の降雨浸透特性について検討した。その結果、以下の結論を得た。

- ① ジオメンブレンと土の摩擦角は簡易型摩擦試験によって求めることができる。
- ② ジオメンブレンと土の摩擦角は土の種類によらず、おおむね15～30°程度であり、覆土勾配はこの摩擦角以下にする必要がある。
- ③ 斜面に敷設したジオメンブレンは、地山内への雨水の浸透を遅らせることによって、自重増加、サクシ

ンの低下や地下水位の上昇を抑制し、斜面を安定化させる効果がある。

なお、この報告は土木研究センターと民間21社で実施している共同研究成果の一部を含んでいる。

### 参考文献

- 1) 八木, 矢田部, 山本: 雨水浸透による斜面崩壊, 土木学会論文報告集, No. 330, p. 107~114, (1983)
- 2) 三木, 鳥井原, 山本, 井上: 地すべり対策としてのジオメンブレン降雨浸透防止工法に関する研究—ジオメンブレンと砂の摩擦抵抗特性について—, 第30回土質工学研究発表会, p. 1773~1774, (1995)
- 3) 三木, 鳥井原, 山本, 井上: 地すべり対策としてのジオメンブレン降雨浸透防止工法に関する研究—ジオメンブレンの摩擦抵抗試験について—, 第50回土木学会年次学術講演会講演概要集, p. 822~823, (1995)
- 4) Irmay, S.: On the hydraulic conductivity of unsaturated soil, Trans Amer. Geophys. Union, Vol.35, No.3, p. 463~467, (1954)
- 5) 西垣: 飽和・不飽和領域内の土中水の浸透特性に関する2, 3の考察, 土質工学論文報告集, Vol. 23, No. 3, p. 165~177, (1983)