

## しらす補強盛土の降雨時の挙動

Behavior of Steep Reinforced Embankments of Shirasu during Rainfall

調 修 二 (しらべ しゅうじ)  
基礎地盤コンサルタンツ㈱福岡支社 主任新 英 司 (あらた えいじ)  
建設省九州技術事務所 所長

## 1. まえがき

ジオテキスタイル工法は地盤工学の分野において近年注目され始めており、試験段階ではあるが施工事例<sup>1)</sup>もかなり多くなっている。また、設計法<sup>2),3)</sup>も数多く開発されつつあるが統一された段階には至っていないのが現状であると考えられる。

ジオテキスタイル工法を盛土に対して用いる場合には、急勾配のり面を造成することが用途目的として多い。九州南部地方に広く分布するしらすは、自然状態では相当なせん断強度を発揮し、しかも、容易に締め固めできることから盛土材料として多用されている。ところが、しらすは土粒子の比重が極めて小さく、独特な粒子形状を有していることから、水に対して著しく弱く、しらす盛土では梅雨期や台風期に災害が発生することも多い。この原因は、雨水の盛土への浸透によって盛土材の自重が増加すること・サクションが低下することから見掛けの粘着力が減少することおよび浸透力の作用等によって盛土のり面付近のしらすが破壊することから盛土の安定性が損なわれるためと考えられる。そこで、しらすに対してジオテキスタイル工法の適用に期待が注がれているが、経験的にも未解明な部分が多く、将来設計法を確立するためにも、しらす補強機構を把握しておく必要がある。

本文では、ジオテキスタイルとしてポリマーグリッド (SR-55) を敷設した高さ 2 m の実物大のしらす盛土に対して実施した降雨浸透試験結果におけるポリマーグリッド (以下グリッドと略す) に発生するひずみ・のり面変位・盛土内の土圧分布・飽和度分布から、しらす盛土におけるジオテキスタイル工法の適用性について考察する。

## 2. 試料および実験方法

## 2.1 実験に使用した試料

実験に使用したしらすは、鹿児島県川内市の土取り場から採取した中硬質しらす<sup>4)</sup>であり、その基本的物性を表-1に示す。このしらすは、砂分とシルト分を合わせた構成比が全体の90%内外であり、平均的な中硬質しらす<sup>5)</sup>よりも礫分が10%程度少なく、貧配合な粒度特性にある。透水係数は、室内透水試験より  $k=2.9 \times 10^{-3}$  cm/s が得られており、粒度分布を反映して平均的なしらすの試験結果<sup>6)</sup>より大きい。また、図-1に締め固め曲線を示すが、最適含水比よりも乾燥側では含水比の変化に対して乾燥密度はほぼ一定で最大乾燥密度が明りょうに現れず、し

表-1 しらすの物理特性値

粒 度 特 性	礫	分 (%)	2~6
	砂	分 (%)	67~69
	シルト	分 (%)	21~25
	粘土	分 (%)	4~6
	不均等	係数	17~30
	曲率	係数	1.2~1.8
	日本統一土質分類		SV
	土粒子の比重		2.40
	自然含水比		16.7~21.1

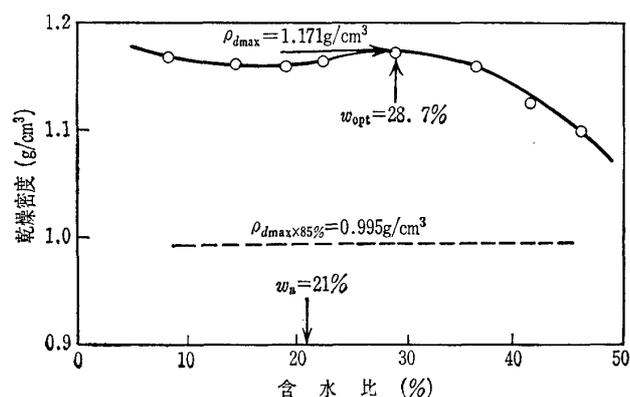


図-1 締め固め曲線

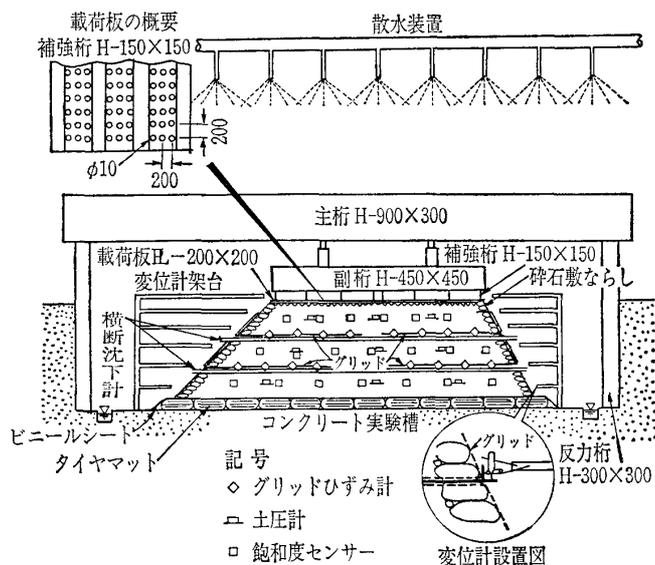


図-2 盛土形状と計器配置

らす特有の締め固めやすい性質が良く現れている。

2.2 盛土形状と実験方法

実験は、図-2のように高さ2m、広さ10m×10mのコンクリート製実験槽を用いて行った。実験槽内に築造した盛土は、高さ2m、天端幅4m、長さ10m、のり面勾配1:1.0と1:0.5の形状を有しており、盛土中央には敷幅2mでグリッドを2段敷設している。盛土の築造は、締め固め度85%を目標として人力により1層30cmの仕上げ厚さを目途に80kgfランマーを用いて転圧した。盛土のり面には降雨による土砂流出防止とのり面保護を兼ねて土のうを積み上げており、盛土下端には盛土に自由な変形を生じさせることを目的に古タイヤを利用したタイヤマットを敷設し、盛土との境界にはビニールシートを敷いて土砂流出を防止している。

実験は、この盛土天端に0.5tf/m<sup>2</sup>ごとの一定荷重を保持時間30分で5.0tf/m<sup>2</sup>までの荷重を作用させる荷重載荷試験と5.0tf/m<sup>2</sup>の荷重を保持した状態で降雨強度25mm/hの人工降雨を24時間連続して与える降雨浸透試験によっている。ただし、本文では降雨浸透試験を中心に述べる。実験中には下記に示す項目について計測している。

- 1) ひずみゲージによるグリッドのひずみ変化、2) 変位計によるのり面変位の変化、3) 土圧計による盛土内の鉛直土圧の変化、4) 電気抵抗式水分計による降雨時の盛土内の飽和度の変化、5) 三角ノッチによる地表面流出量の変化

3. グリッドとしらすとの引抜き特性

グリッドによる盛土補強効果の大小は、グリッドとしらすとの引抜き特性によって左右される。そこで、グリッドとしらすとの引抜き特性が拘束荷重あるいは飽和度の増大によってどのように変化するかを調べるために図-3に示す装置によって引抜き試験を実施した。供試体は盛土実験と同一の乾燥密度0.995g/cm<sup>3</sup>となるように締め固めて作成しており、試験条件は供試体の飽和度を17%、40%、58%（含水比で8.5%、20%、29%）に設定して、上載荷重を盛土実験の応力状態に合わせて0.3~1.0kgf/cm<sup>2</sup>に設定した。試験結果の整理は、まずグリッドに加えた引抜き力と供試体外側で測定されたひずみによりグリッド自体の応力~ひずみ関係を求める。次に、供試体内側で測定されたひずみと引抜き力の関係より、供試体内側に発生している応力を求め、供試体内側での変位量との関係より図-4に示す整理方法によって、グリッドとしらすとの間に働くせん断ばね係数として、引抜き抵抗の大小を評価した。

図-5にせん断ばね係数と上載荷重との関係を示す。これより、せん断ばね係数は上載荷重に比例して増加する傾向を示す。また、上載荷重が0.5kgf/cm<sup>2</sup>以上では自然含水比付近の飽和度であるS<sub>r</sub>=40%のときにせん断ばね係数が最大値を示す。このこ

- |               |                  |                  |
|---------------|------------------|------------------|
| ① 変速ギア        | ⑥ ロードセル          | ⑪ 土中変位計測用ダイヤルゲージ |
| ② モーター        | ⑦ チャック           | ⑫ ピアノ線           |
| ③ スクリュージャッキ   | ⑧ リード線           | ⑬ ひずみゲージ         |
| ④ ダイヤルゲージ     | ⑨ デジタルひずみ測定器     | ⑭ 空気圧供給ホース       |
| ⑤ ユニバーサルジョイント | ⑩ 土槽(100cm×30cm) | ⑮ ポリマーグリッド       |

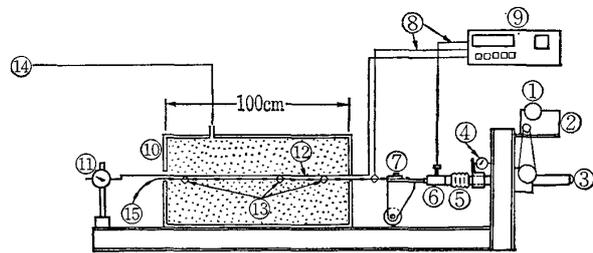


図-3 引抜き試験装置

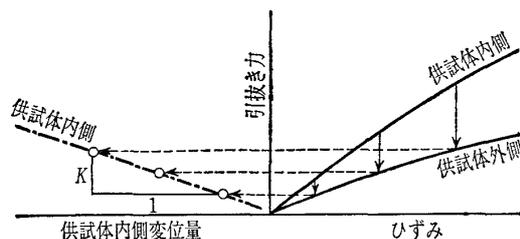


図-4 引抜き試験の整理方法

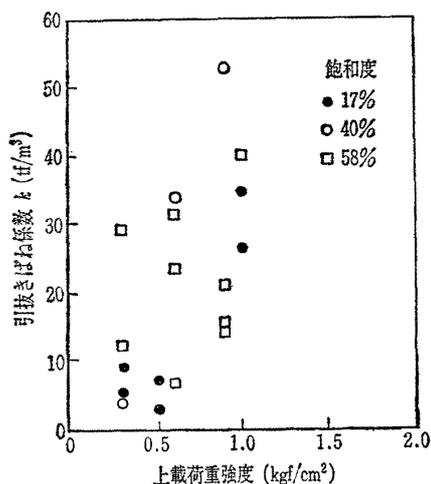


図-5 引抜きばね係数と上載荷重強度との関係

とから、しらすとグリッドとのかみ合い効果を示す指標であるせん断ばね係数は上載荷重に大きく影響を受け、しかも、自然含水比状態に近い飽和度のときにかみ合い効果が最も発揮されることとなり、それより高い飽和度領域では土中水分の増加によるサクシジョンの低下により、また、それより低い飽和度領域では、土中水分の減少により土の塑性的な性質が顕著になって粒子間結合力が弱くなることからしらすとグリッドとのかみ合い効果が低下すると解釈される。また、福田ら<sup>7)</sup>による実験結果に対して2倍程度のかみ合い効果が得られており、しらすは一般的な砂よりかみ合い効果が大きいことが明らかとなった。

#### 4. 降雨浸透試験結果

##### 4.1 盛土内の飽和度の変化

雨水浸透による盛土内の飽和度の変化は、伊勢田ら<sup>8)</sup>によって開発された電気抵抗式水分計によって計測している。雨水の浸透による土中の水分変化を迅速かつ的確に捉えるためには水分量の変化を何らかの物理量に変換して測定する必要があり、我が国では、テンシオメーター法<sup>9)</sup>、中性子水分法<sup>10)</sup>、電気抵抗法<sup>11)</sup>などが用いられている。この中で、今回用いた電気抵抗法は、図-6のようにセンサー部が一对の電極のみで安価に作成できること、測定場を乱さないで測定できること、急速な水分変化に対して時間遅れなく連続測定が可能なことなどの利点を有していることから採用しており、較正試験結果は図-7のように今回の試験範囲内の飽和度領域では

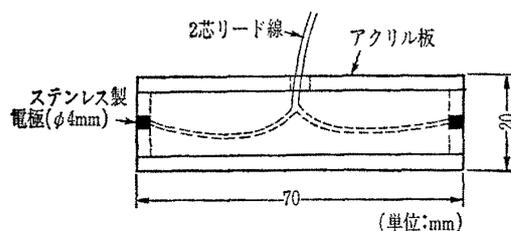


図-6 飽和度センサーの構造

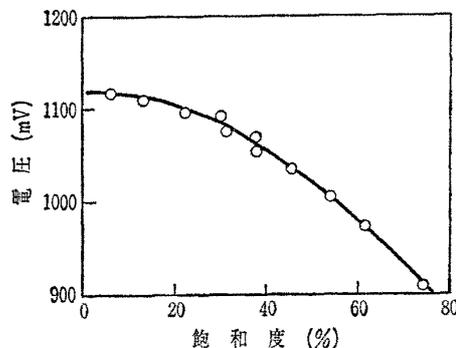


図-7 較正曲線

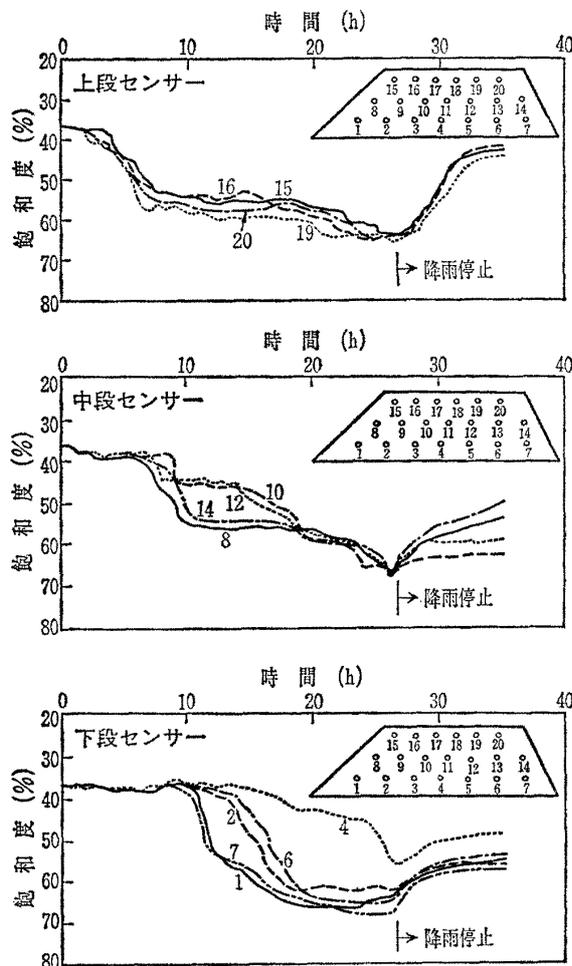


図-8 時間と飽和度の関係

十分な精度を有していることが示される。

図-8は代表箇所における飽和度の経時変化である。雨水浸透の特徴は、盛土表面の飽和度が上昇し、次第に内部へと進行していき盛土下部の中心付近で

## 報告—2046

最も雨水の浸透が遅いことおよび雨水浸透後の飽和度は60~70%であり、湿潤前線はそれより上部の土を完全飽和させながら進むのではなく一定の間隙空気を残存した状態で進行していくことが挙げられ、これは久楽<sup>12)</sup>が実施した実験および伊勢田ら<sup>13)</sup>の実験とも符合するものである。また、降雨停止後の浸透水の挙動としては、盛土表面では降雨停止とともに急速に飽和度が低下し、約8時間で降雨前の自然状態まで回復するのに対して、盛土下部では飽和度の回復がほとんど認められないことが特徴として挙げられる。

## 4.2 グリッドのひずみ変化

図-9は、グリッドのストランド部に貼付したひずみゲージによって計測したグリッドの軸方向ひずみ分布を降雨時間3, 6, 12, 18, 24時間に対して図示している。降雨開始以前の5.0 tf/m<sup>2</sup> 荷重時のひずみは引張りひずみが優勢であるが、発生ひずみの最大値は0.14%と小さく、引張り力に換算して180 kgf/mとなる。この値は、グリッドの設計強度の8%に相当し、降雨24時間後では設計強度の19%に相当するひずみしか発生しておらず、当初の設計強度に対してかなり安全側のものであったと考えられる。次に、降雨時の挙動としては、雨水浸透による盛土の変位、特に沈下量の増大によって上段のグリッドのひずみは増大傾向を示すのに対して、下段のものは変位量が相対的に小さいことから降雨時間18時間までほとんど変化を示しておらず、雨水浸透による盛土の不安定傾向が盛土上部より進行するこ

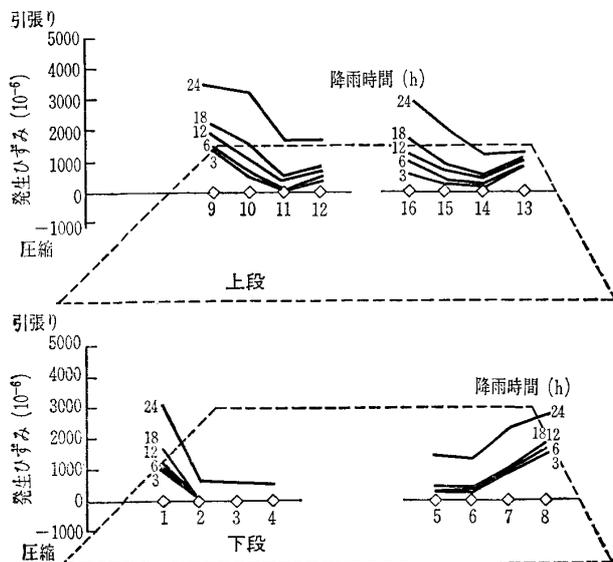


図-9 ポリマーグリッドのひずみ分布

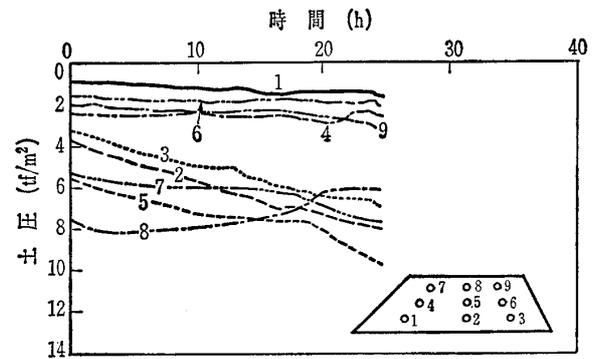


図-10 土圧の経時変化

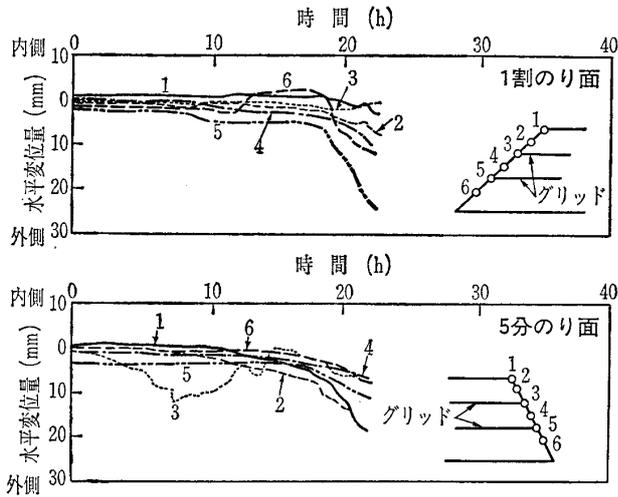
とを示唆している。また、降雨時間18時間以降に急激なひずみ増加が生じており、これは盛土全体が飽和度60~70%でほぼ一樣になったときと一致しており、この時点より盛土の不安定化が盛土全体に及んでいる結果であると考えられる。

## 4.3 盛土内の鉛直土圧の変化

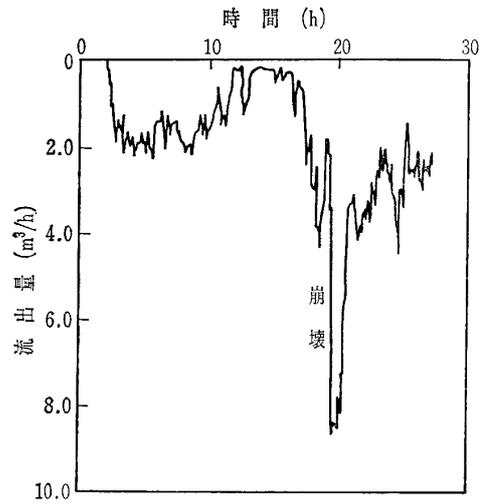
図-10は、盛土築造後を初期値としたときの盛土内の鉛直土圧の経時変化を図示したものである。雨水浸透による盛土内の鉛直土圧の変化は、盛土中央で著しく、のり面付近ではほとんど変化していない。ただし、5分のり面側の下段のものは盛土中央のものと同じく経時的な増加傾向を示す。これは、浸透した雨水によって盛土内の飽和度が上昇して盛土自重の増大を招き、圧縮変形を促進させることおよび、5.0 tf/m<sup>2</sup>の荷重によって生じていた盛土上段中央部の集中応力が徐々に下方へ分散される結果であると言える。一方、1割のり面付近では、5分のり面付近に比べて鉛直土圧が相対的に小さいことから雨水浸透による変形係数の低下率が大きく、盛土自重の増加による鉛直土圧の増大を相殺する結果であると考えられる。

## 4.4 のり面変位の変化

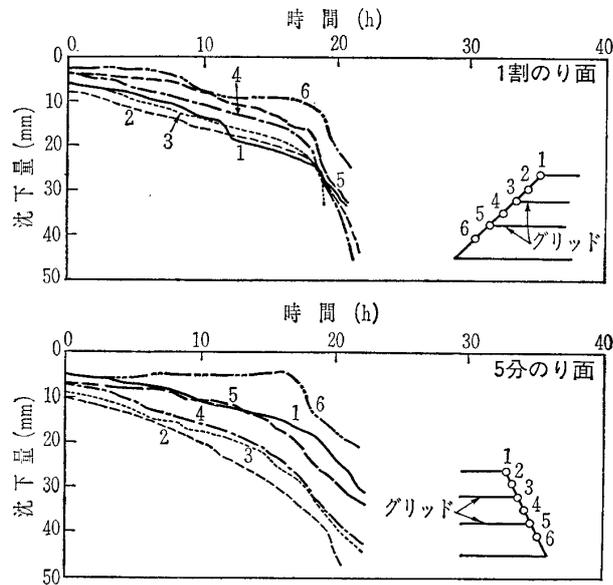
図-11は、降雨継続時間と水平変位の関係を示しており、図-12は、降雨継続時間と沈下量の関係を図示したものである。降雨前の5.0 tf/m<sup>2</sup> 荷重時の変位挙動のなかで特徴的な事項としては、沈下量に比べて水平変位量は1/6~1/7を示してしらすのポアソン比が小さいことが挙げられ、このことがグリッドに発生するひずみが極めて小さいことと大きく関係している。降雨後の挙動も降雨前と同様であり、雨水の浸透による水平変位の変化はわずか数mm内外であるのに対して、沈下量は雨水の浸透に伴って



図—11 時間と水平変位量の関係



図—13 流出量と時間の関係

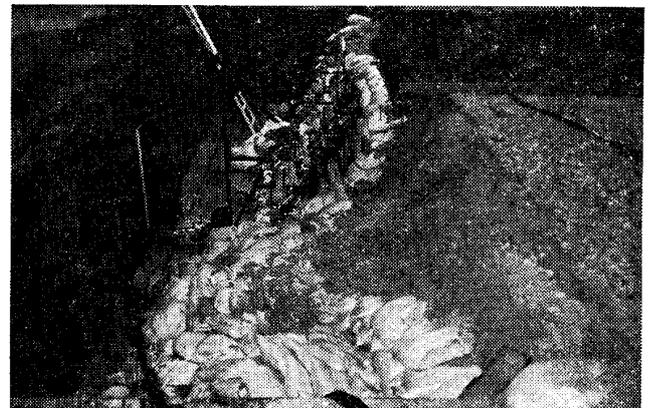


図—12 時間と沈下量の関係

徐々に増加しており、降雨開始から18時間後の鉛直変位の増加量は 12~13 mm を示しており、この値は降雨前の  $5.0 \text{ tf/m}^2$  載荷時の変位量の 2 倍に相当する大きなものである。なお、降雨浸透による盛土自重の増加に相当する増加荷重は盛土底面で  $0.8 \text{ tf/m}^2$  程度である。このことから、雨水浸透による盛土の変位挙動は、雨水浸透による盛土自重の増加よりも飽和度の上昇による変形係数の低下およびサクシオンの低下によるせん断抵抗力の減少に支配的であると考えられる。

### 5. 雨水浸透とのり面崩壊

ここでは、4. で示した実験事実と土のせん断強度・変形特性の関係から雨水浸透によるのり面崩壊とグリッドの働きについて考察する。



写真—1 5分のり面崩壊状況



写真—2 5分のり面崩壊時の補強部の状況

降雨浸透試験では、降雨開始18時間後よりのり面の変位量が急増し、合わせてグリッドのひずみが増大した。また、降雨流出量は図—13に示すようにこの時点より急激に増加し、流出水は土砂を含んで濁水となった。さらに、盛土天端ののり面付近では人間が立つことができないうらいに支持力が低下しており、盛土表面の土は水の中に浮いた状態であることが確認されている。その後、写真—1および写真—2に示すように無補強部分のしらすと土のうの間

## 報告--2046

でのり面崩壊を生じた。ところが、グリッドで補強した部分は崩壊した部分からのもたれによる若干の変形を生じたのみで安定を保った。この現象は次のように説明される。雨水の浸透によって盛土内の飽和度は徐々に増加し、やがて盛土内は飽和度60~70%の疑似飽和領域で満たされる。このとき、サクシヨンの減少によってしらすの見掛けの粘着力・引張り強さが低下することから、盛土表面は不安定化を増し、のり面変位の増大を招く。また、のり面変位が増大すれば、それに伴って土の間隙が大きくなるとともに透水性が良くなり雨水が浸透しやすくなると考えられる。このことは、のり面崩壊が生じる以前に降雨流出量が激減していることから説明できる。この状態のもとに降雨が継続すると、のり面付近に宙水が生じ、土粒子は宙水の中に浮いた状態となり、細粒分が流出して土のうとしらすとの付着力をなくしてのり面崩壊を生じると考えることができる。一方、グリッドで補強された部分は、土のうをグリッドで巻き込むことによって盛土表面の緩みをグリッドが引き留めるためにのり面崩壊を抑制でき、のり面の維持が可能になると考えることができ、無補強部分ののり面崩壊が生じる以前にグリッドのひずみが全体に増大していることから説明できる。しかし、グリッド自体はしらす粒子の流出防止に対する効果は少なく、土のうとグリッドとの併用はのり面維持上も重要である。なお、今回の実験では補強部分でのしらす粒子の流出は無補強部分より少なく、グリッドが浸透水の水道になる可能性は少ないと判断される。

## 6. ま と め

しらす盛土へのジオテキスタイル工法の適用に際してその補強効果を明らかにするため、実物大の盛土を築造して荷重載荷試験と降雨浸透試験を実施した。これより、しらす盛土は、自然状態では大きなせん断強度を有することからグリッドに明りょうな引張りひずみが生じるのは一部分であり、盛土全体としては無補強でも相当な安定性を有していることが明らかとなった。ところが、降雨時には飽和度の上昇によってせん断強度、特に粘着力と引張り強さが低下するため、のり面付近で不安定化が増大し、無補強部分でのり面崩壊を生じる結果となった。こ

れに対して、グリッドで補強した部分では、しらすとグリッドとのかみ合い効果が一般の砂よりも2倍程度大きいことも関係して何ら変状は生じなかった。このように、自然状態では良好な盛土材料であるしらすに対しても降雨履歴によるのり面の不安定化を防止するためにはジオテキスタイル工法が有用であると考えられる。

## 謝辞

本実験を実施するに際して御指導・御助言いただいた九州産業大学山内豊聰教授に深甚の謝意を表します。また、引抜き試験を実施していただいた三井石油化学工業(株)西村淳一氏ならびに本実験を実施するに際して終始ご協力いただいた建設省九州技術事務所の関係者に謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 山内豊聰・尾曲伝吉・福田直三・池上政宏：ポリマーグリッドを応用した急勾配補強盛土の設計と実際，第30回土質工学シンポジウム，pp.13~18，1985.
- 2) Jewell, R.A., Paine, N. and Woods, R.I.: Design methods for steep reinforced embankments, Symp. Polymer Grid Reinforcement in Civil Engineering, pp.1~12, 1984.
- 3) D. Leshchinsky, E.B. Perry: A design procedure for geotextile-reinforced walls, Geotechnical Fabrics Report, pp.21~27, 1987.
- 4) 建設省九州地方建設局：しらす地帯の河川・道路土工指針(案)，pp.2~3，1985.
- 5) 土質学会編：土質試験法，pp.700~701，1979.
- 6) 調 修二・松雪清人・江崎三男・山根史郎：地山しらすの透水性について，第5回応用地質学会九州支部研究発表会，pp.13~18，1988.
- 7) 福田直三・三浦哲彦・山内豊聰：延伸プラスチックグリッドによる擁壁土圧の軽減効果，土と基礎，Vol.32, No.6, pp.21~26，1984.
- 8) 伊勢田哲也：地中浸透水検出装置について，先端技術研究成果報告書，pp.39~43，1984.
- 9) Ralph, A.L., Philip, F.L.: A self-adjusting null-point tensiometer, Soil Sci. Soc. Amer., Vol.26, pp.123~125，1962.
- 10) 安間正虎・小田桂三郎・岐部利幸：電気抵抗法による土壌水分測定の研究(第1報)，関東東山農試研報9, pp.83~96，1956.
- 11) 山田芳雄・長 智男：中性子による土壌水分測定法，畑かん研究集録，pp.343~346，1963.
- 12) 久楽勝行：盛土構造物の崩壊と対策に関する研究，九州大学学位論文，pp.40~42，1983.
- 13) 伊勢田哲也・調 修二：不飽和土の浸透特性に関する実験的考察，第23回土質工学研究発表会講演集，pp.1831~1832，1988.

(原稿受理 1989.11.17)