

連続長繊維を用いた補強土壁を有する 実物大盛土の降雨実験と安定解析

BEHAVIOR OF PROTOTYPE STEEP SLOPE EMBANKMENT HAVING SOIL-WALLS REINFORCED BY CONTINUOUS FIBERS

久楽勝行*・三木博史**・中山覚博***・藤木広一****

By Katsuyuki KUTARA, Hiroshi MIKI, Kakuhiro NAKAYAMA and Hirokazu FUJIKI

Large-scale model tests were carried out under artificial heavy rain conditions to study the behavior of 5 m high steep slope embankments having soil-walls reinforced by continuous fibers. The erodability of the soil-walls and the stability of the embankments were examined. According to the test results, it was concluded that the soil-walls reinforced by continuous fibers are highly resistant to erosion due to rain and that the stability of embankments having soil-walls can be analyzed basing on circular slip method and conventional design method for concrete retaining walls if soil-walls are thick enough.

Keywords: geotextile, continuous fiber, full scale model test, stability analysis

1. はじめに

ジオテキスタイルに関する技術開発が進むなかで、連続長繊維を砂質土のなかに混入した補強土を用いて、盛土や切土ののり面に補強土擁壁やのり面保護のための補強土層を築造し（以下これらを統括して補強土壁とよぶ）、盛土や切土の安定と緑化をはかる工法がフランスで開発され、施工例も増えてきている^{1)~3)}。本工法を日本のように雨の多い地域に適用するにあたっては、設計に用いる安定解析手法の妥当性を確認し、安全率の設定方法について検討する必要がある。また本工法は砂の中に繊維を混入して補強土を作製するため、降雨による補強土壁表面の浸食量の程度や、盛土内への降雨の浸透に対して補強土壁は排水効果を有するのかなどについても把握しておく必要がある。

そこで今回の実験では、実物大の模型盛土を使った人工降雨実験を行って、盛土の挙動を測定するとともに盛

土の安定解析を実施し、これらの結果を比較することによって連続長繊維を用いた補強土壁を有する盛土の安定性の評価方法について検討を加えた。さらに人工降雨による補強土壁表面の浸食の状況を観測し、盛土内への降雨の浸透に対する補強土壁の排水効果についても検討を加えたので、ここに報告する。

2. 連続長繊維を用いた補強土壁工法の概要

(1) 工法の概要

連続長繊維を用いた補強土壁工法は、図-1に示すよ

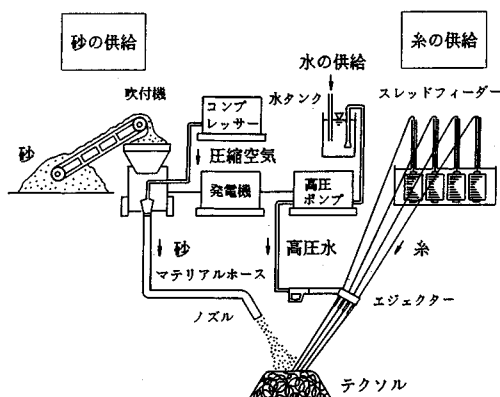


図-1 補強土の施工システム

* 正会員 工博 建設省土木研究所土質研究室室長
(〒305 つくば市大字旭1番地)

** 正会員 工修 建設省土木研究所土質研究室主任研究員
(同上)

*** 正会員 (株)熊谷組土木本部企画管理部部長
(〒162 新宿区津久戸町2-1)

**** 正会員 工修 (株)熊谷組土木本部土木技術部(同上)

うに、のり面吹付け用の吹付け機を用いて空気圧送された砂と、別系統で高圧水を利用して送り出された連続長繊維を現位置において直接混合して締め固め、盛土や切土ののり面に補強土擁壁やのり面保護のための補強土層を築造して、盛土や切土の安定化をはかる工法である。完成した補強土壁の表面に植生を施すことにより、壁面の緑化が行えるのも同工法の大きな特徴の1つである。なお最近では、現地における効率的な施工法が可能な移動式の大型機械も開発され、実用に供されている（写真一1）。

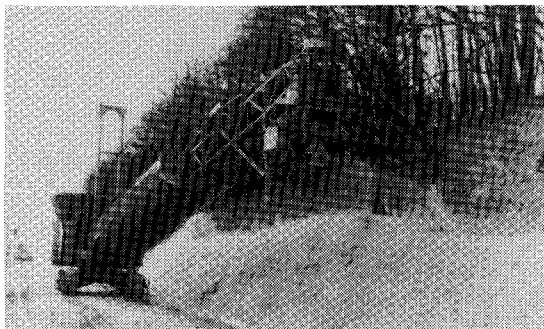
(2) 設計の考え方

連続長繊維を用いた補強土壁の設計では、以下に示すような補強土壁の内的安定と外的安定に対する検討を行う。

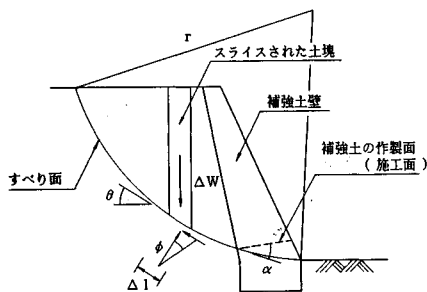
a) 内的安定に対する検討 補強土壁の内的安定の検討は、補強土壁の内部を通るすべり破壊に対して、以下に示すような2通りの方法で行う。

① 円弧すべり法による方法 補強土壁と盛土を一体とみなして、補強土壁内を通る円弧すべりに対する安定の検討を行う（図一2）。ただし強度の異方性を有する補強土の見掛けの粘着力 c' は、補強土の一面せん断試験結果⁴⁾より求め、補強土の作製面（施工面）とすべり面のなす角度 α が15度における値を用いる。

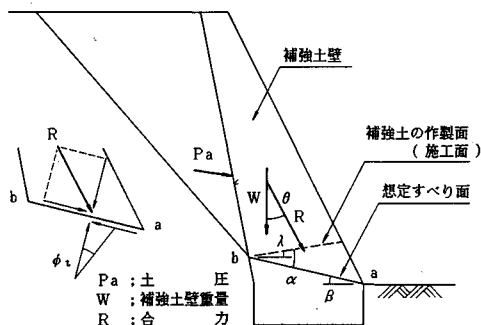
② 補強土壁の内部を通る直線すべり面について安定を調べる方法 図一3に示すように補強土壁背後からの土圧を考慮し、補強土壁の内部を通る任意の直線すべり



写真一1 大型機械による施工



図一2 内的安定の検討 (円弧すべり法による検討)



図一3 内的安定の検討 (補強土壁の内部を通る直線すべり面に沿ったすべり破壊の検討)

り面について、補強土壁のすべり破壊に対する安定の検討を行う。ただし補強土のせん断抵抗力については、円弧すべり法の場合と同様に、見掛けの粘着力 c' は、補強土の一面せん断試験結果を用いる。

b) 外的安定に対する検討 補強土壁重量と補強土壁背後からの土圧による補強土壁ののり先まわりの転倒に対する検討を、一般のコンクリート製もたれ擁壁の場合と同様の方法で行う（図一4）。

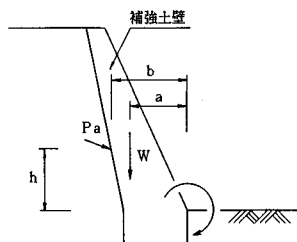
3. 本研究の目的

本研究の目的は、わが国のように雨の多い条件のもとで本工法を適用するにあたって、前章で提案した設計計算法の妥当性、設計安全率の設定方法を実験によって確かめることとした。すなわち、厚さの異なる補強土壁を有する2種類の大型模型盛土を用いて人工降雨による降雨実験を行い、連続長繊維を用いた補強盛土の安定性の評価方法と補強土壁に作用する土圧について検討した。また降雨による補強土壁表面の浸食の程度を調べるとともに、盛土内への降雨の浸透に対する補強土壁の抑制効果についても検討を加えた。

4. 実験方法

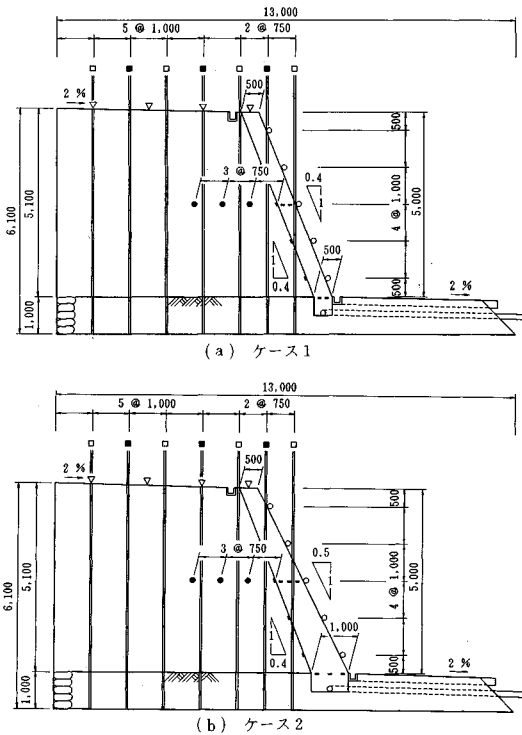
(1) 実験条件

実験盛土は図一5に示すように、高さ5m、のり勾配1:0.4とし、そののり面に連続長繊維を混入した厚さの異なる2種類の補強土壁を構築した。ケース1では、



図一4 外的安定の検討 (補強土壁の転倒に対する検討)

記号	計測項目	記号	計測項目
○	補強土壁の位置	—	補強土壁内の土圧
▽	盛土天端の枕下層	—	補強土壁背面の土圧
□	盛土内の水位	—	補強土壁表面のエロージョン
●	盛土内の飽和度	—	降雨量
●	盛土内のサクション	—	盛土および補強土壁の変位観察
●	補強土壁内排水管からの排水量		



図—5 実験ケースおよび計測計器の配置図

設計の考え方の項で示した盛土の安全率の最小値が降雨の途中で1.0より小さくなって補強土壁が崩壊することを想定して、補強土壁の天端幅および根入れ部の幅とともに0.5mとした。またケース2では、安全率の最小値が多量の人工降雨を与えたときにも1.0程度となるように、天端幅はケース1と同様に0.5mとしたが、根入れ部の幅を1.0mとケース1に比べて厚くした。盛土の幅は両ケースともに10mとして、両盛土間は合板で縁切りをした。さらに、実施工で行われているように、盛土天端に降った降雨のうちの表面水が直接に補強土壁の表面を流下することのないように、盛土ののり肩部に幅100mmのU字形の側溝を設けた。また、補強土壁の根入れ部には、内径100mmの有孔塩化ビニール管を設置して、補強土壁内の浸透水を排除するようにした。なお、盛土の下部には補強土壁の根入れ部を設けるために、厚さ1mの基礎地盤を築造した。

降雨強度は、30mm/hを目安として、累計降雨量が1000mmに達するまでの降雨実験を行った。また、盛土への苛酷な条件として地山からの浸透水の影響を想定

して、累計降雨量が460mmに達した時点で、盛土背面の水槽の水位を段階的に上げて、背面水位を4.1mまで上昇させた。

(2) 実験材料

盛土材料は茨城県稲敷郡江戸崎地内に分布する山砂を用いた。補強土壁を構成する砂は千葉県君津市箕輪地内に分布する山砂を、また連続長繊維はポリエステル100%のマルチフィラメント糸をそれぞれ使用した。これらの材料の諸特性および補強土の力学的特性を表—1と表—2に示した。なお基礎地盤材料は、建設省土木研究所敷地内に分布している関東ロームに生石灰系固化材を加えて安定処理したもの(添加量80kgf/m³)を用いた。

(3) 実験盛土の築造方法

実験盛土は、土木研究所の盛土実験棟の大型土槽(縦20m、横20m、深さ6m)の中に築造した。基礎地盤は関東ロームと生石灰系固化材をバックホウによって均一に混合し、振動ローラーを用いて締め固めて造成した。盛土はバックホウおよび人力により、1層の仕上がり厚さが25cm程度になるように撤出し、プレートランマーで2回転圧して築造した。補強土壁は図—1に示した小規模の補強土施工システムを用いて、現位置で砂と繊維を混合した後、厚さ約25cmごとにプレートランマーで2回転圧して構築した。なお、補強土壁は背面の盛土を数層先行させながら並行して行うものとし、その施工面は、水平に対して約15度傾斜させて構築した。

盛土および補強土壁の築造時には、各層ごとに現場の含水比ならびに単位体積重量を測定した。それらの結果によると、盛土では平均の含水比は30% (各層ごとの平均値の変動範囲は29~31%、以下同様)、締め固め度

表—1 盛土材の物理特性

土粒子比重 Gs		2.707
粒 度	礫 分	2 (%)
	砂 分	68 (%)
	シルト分	28 (%)
	粘土分	2 (%)
特 性	最大粒径 Dmax	4.76 (mm)
	均等係数 Uc	15.8
	曲率係数 Uc'	1.0
締固め 特 性	最適含水比 wopt	24.2 (%)
	最大乾燥密度 ρdmax	1.520 (t/m ³)
透水係数 *1 k		1.54×10 ⁻⁵ (cm/sec)
強 度	乾燥密度 ρd	1.216 (t/m ³)
	湿潤密度 ρt	1.581 (t/m ³)
	粘着力 c'	1.3 (t/m ²)
	せん断抵抗角 φ'	21.2 (度)
	特 性	乾燥密度 ρd
	湿潤密度 ρt	1.767 (t/m ³)
	粘着力 c'	0.2 (t/m ²)
	せん断抵抗角 φ'	18.8 (度)

*1 ρd = 1.216 t/m³のときの値

表一2 補強土の物理特性

(a) 砂の物理特性

土粒子比重 G_s		2.709
粒 度	礫 分	1 (%)
	砂 分	98 (%)
	シルト分	1 (%)
	粘土分	1 (%)
	最大粒径	D_{max} 4.76 (mm)
特 性	均等係数	U_c 2.1
	曲率係数	U_c' 1.0
	締固め特性	最適含水比 w_{opt} 20.1 (%) 最大乾燥密度 ρ_{dmax} 1.511 (t/m^3)

(b) 繊維の物理特性

繊維の太さ	146.6 (D)
引張り強度	4.44 (gf/D)
伸び率	36.4 (%)
フィラメント数	30 (本)
組 成	ポリエステル 100%

(注) 日本化学繊維協会測定値 (JISL1013)
(注) D (デニール) : 繊維の太さを表す単位、
繊維長 9000 mあたりの繊維の質量 (グラム数)

(c) 補強土の物理特性

透水係数 k^*		2.14×10^{-2} (cm/sec)
強 度	みかけの粘着力 c'	2.5 ~ 5.3 (t/m^2)
	せん断抵抗角 ϕ'	35 (度)

*1 繊維混入率 0.19%、 $\rho_d = 1.383 t/m^3$ のときの値
*2 一面せん断試験結果 繊維混入率 0.20%、
 $\rho_d = 1.431 \sim 1.444 t/m^3$ 、 $w = 19.1 \sim 20.4\%$ 、
補強土の製作面とせん断面の交差角が、 $0^\circ \sim 30^\circ$ のときの値 (強度に関する異質性が存在する)
*3 三軸圧縮試験結果 繊維混入率 0.19%、
 $\rho_d = 1.429 t/m^3$ 、 $\rho_t = 1.902 t/m^3$ のときの値

79% (75~82%)、飽和度は66% (61~70%)であった。また、補強土壁については、平均の含水比、締固め度および飽和度はそれぞれ18% (17~19%)、95% (94~97%)、55% (51~58%)で、比較的均質な値のものが得られた。補強土壁に混入した連続長繊維は、砂の乾燥単位体積重量に対してほぼ0.2%であった。なお、基礎地盤の一軸圧縮強さは、7日強度で2.0 kgf/cm² (196 kPa) 以上のものが得られた。

(4) 計測項目

降雨条件下で実施する計測項目と諸計測機器の配置図を図一5に示す。補強土壁の水平・垂直方向の変位量の測定はワイヤと変位計を用いて行い、また盛土天端の沈下量はレベルとスタッフによる測定とした。盛土内の水位は、盛土築造時にあらかじめ設置した計測井の天端より電極を降ろして盛土内の自由水面までの距離を求め、水位に換算した。盛土内の飽和度は、盛土内に設置した鋼管にRI (ラジオアイソトープ) 水分計を挿入して計測した。盛土内のサクシオン圧の測定はテンションメータを用いて行い、また補強土壁内および補強土壁背面の土圧は土圧計による測定とした。補強土壁表面のエロー

ジョンは、補強土壁ののり先に設けた測定溝に流出する砂量の測定結果および断面測定機 (光波による測距装置を備えた構造物の断面形状を測定する特殊機械) の測定結果から算出した。また降雨量は降雨装置の送水量と降雨量についての検定の結果に基づいて降雨装置の送水量から換算した。

なお盛土の築造過程においては、盛土および補強土壁の密度と含水比の測定のほかに、補強土壁内および補強土壁背面に作用する土圧の測定を定期的に行った。

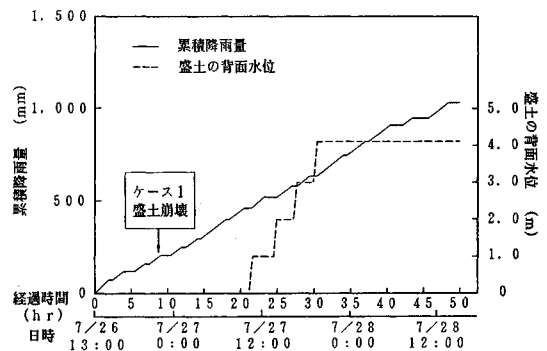
5. 実験結果

(1) 実験経過の概要

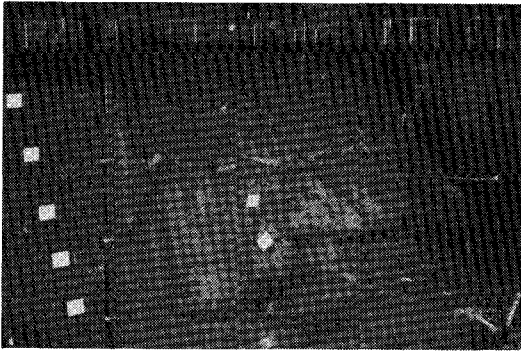
図一6に降雨開始後の経過時間と累積雨量および盛土の背面水位の関係を示す。降雨は計測に必要な時間を除いてほぼ連続して与えた。累積雨量が198 mmに達した時点でケース1の盛土が崩壊した。さらに降雨を加えた後、盛土の下部を除いたほぼ全領域が高い飽和度に至ったとみなされる累積雨量が460 mmに達した時点から盛土背面の湛水を開始し、盛土内の自由水面の位置を確認しながら、徐々に盛土の背面水位を約10時間かけて段階的に基礎地盤上4.1 mまで上昇させた。最終的に累積雨量が1029 mmに達した時点においてもケース2の盛土は崩壊には至らなかった。なお、降雨装置の送水量から換算した実験中の平均降雨強度は30.5 mm/hであった。実験終了時の盛土の変状を写真一2に示す。

(2) 盛土内の飽和度、サクシオン圧および補強土壁内の排水管からの排水量

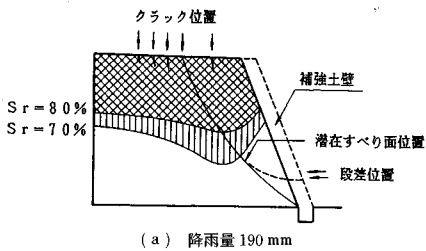
ケース1における盛土内の飽和度分布と補強土壁の崩壊の状況を図一7に示す。またケース2における盛土内の飽和度分布の推移および自由水面の位置を図一8に示す。盛土内の飽和度分布に着目してこれらの図をみると、通常の盛土では、降雨時には一般にのり先から盛土内部に向かって飽和度の高い領域が拡大していくのに対して、連続長繊維を用いた補強土壁を有する盛土では、補



図一6 降雨実験開始後の経過時間と累積降雨量および盛土の背面水位の関係

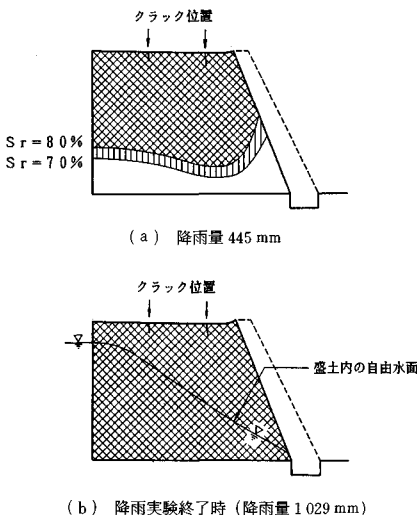


写真一2 実験終了後の盛土の状況 (向こうが崩壊したケース1の模型盛土, 手前がケース2の模型盛土)



(a) 降雨量 190 mm
(b) 補強土壁の崩壊状況 (降雨量 198 mm)

図一7 盛土内の飽和度の分布と補強土壁の崩壊状況 (ケース1の場合)



図一8 盛土内の飽和度の変化状況 (ケース2の場合)

強土壁背面の領域の飽和度の上がり方が遅いことがわかる。これは、補強土壁の表層近くを流下する浸透水の割合が多く、盛土本体まで到達する浸透水の割合が低下することによるものと考えられる。したがって、盛土内への降雨の浸透に対する補強土壁の緩衝帯としての効果を示すものといえる。

また、補強土壁内に埋設した排水管からの排水量も累積降雨量が120 mmを越える頃から検出され始め、降雨量の増大とともに徐々に増加した。累積降雨量が400 mmに達した時点では、補強土壁表面に降る降雨の全体量の約30%にあたる0.3 m³/h (ケース2の場合)が検出され、補強土壁内の排水が効率良く行われることが観測された。

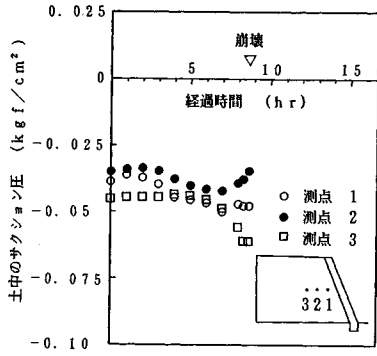
したがって、盛土内への降雨の浸透に対する補強土壁の緩衝帯としての効果および補強土壁内に埋設された排水管による排水促進の結果、図一7や図一8に示したように補強土壁背後の盛土の飽和度の上がり方が遅れたと考えられる。

なお、テンショメータによる盛土内のサクシオン圧の経時変化を図一9に示す。ケース1では、盛土の中段の高さにおいて補強土壁の背面より1.5 m位置におけるサクシオン圧が上昇の気配を示した直後に盛土が崩壊した。またケース2では、補強土壁の背面より1.5 m位置におけるサクシオン圧が、降雨開始から約14時間経過後に急激に小さくなり、さらに約4時間遅れて0.75 m位置、2.25 m位置におけるサクシオン圧もほぼ零になった。いずれのケースにおいても、サクシオン圧が減少する位置の順番および時刻は、盛土内の飽和度の測定結果とおおよそ符合する。

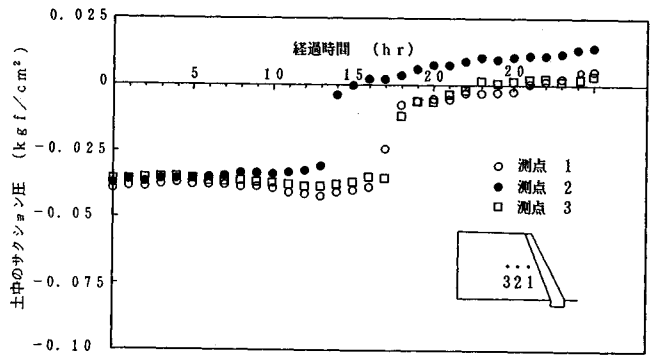
(3) 盛土および補強土壁の変形と変状

補強土壁の水平・鉛直方向の変位量および盛土天端の沈下量の経時変化を図一10に示す。この図が示すように、ケース1では、盛土の築造完了時に、補強土壁には基礎地盤上1.0~1.2 mの高さにおいてすでに最大約9 cmのはらみが生じていて、降雨開始後、補強土壁はさらにはらみ出すと同時に、ほぼこの高さで段差が発生し、これがだいに大きくなって崩壊に至った。また盛土天端では、のり肩より1 mの位置における盛土の天端沈下が進行し、のり肩より2~3 mの位置に、のり肩に平行にクラックが発生した。これらの測定結果より、ケース1では、基本的には、図一7に示すように盛土天端のクラック位置と盛土ののり先を通過するような円弧に沿って安全率が最小となるすべり面が存在したと推定される。

一方ケース2では、盛土の築造完了時に、補強土壁には最大約5 cmのはらみが生じ、降雨開始後もさらに変形して、盛土天端には数本のクラックが発生しているの

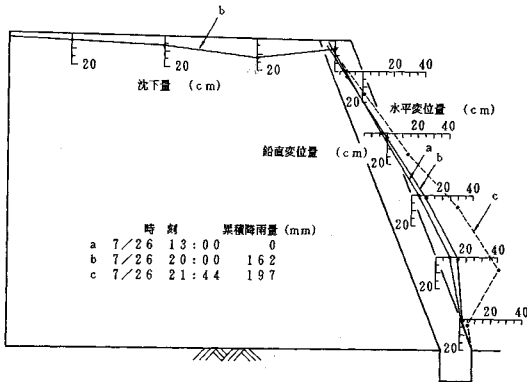


(a) ケース1



(b) ケース2

図-9 盛土内のサクシヨン圧の経時変化図



(a) ケース1

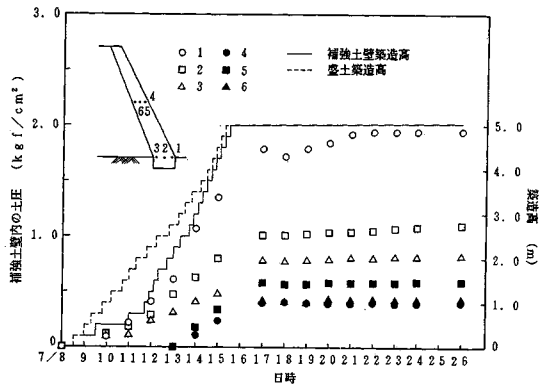
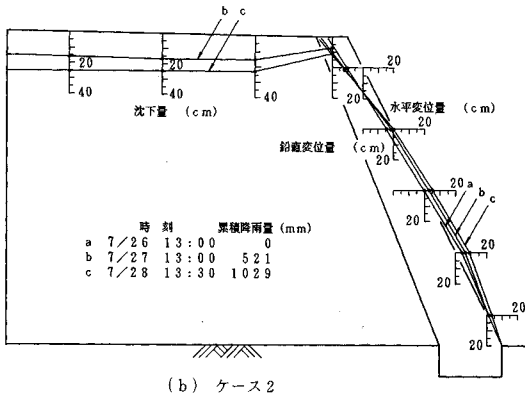


図-11 補強土壁内の土圧 (鉛直方向) の経時変化図 (ケース2の場合)



(b) ケース2

図-10 補強土壁の水平・鉛直方向変位量および盛土天端の沈下量の変化図

が認められたものの、盛土は崩壊には至らなかった。また盛土天端の沈下はほぼ一様であり、実験終了時における盛土天端の沈下量は、ほぼ 25 cm に達した。

(4) 補強土壁内および補強土壁背面の土圧

盛土築造過程における補強土壁内の鉛直方向土圧と盛土築造高の関係を、ケース2を例にとって図-11に示す。また実験終了時までの補強土壁内の鉛直方向土圧の

分布を図-12に示した。図-11から、補強土壁内に作用する土圧は盛土の築造とともに増加することが読み取れる。また図-12から、盛土の築造とともに補強土壁の下部では、のり側面に作用する土圧は背面側に作用する土圧よりも大きくなり、降雨開始後はさらにその傾向が強まることが認められた。さらに、この挙動はケース2において特に顕著であることも図-12から読み取れる。ただし補強土壁の中段では、逆に背面側に作用する土圧がのり側面に作用する土圧よりも大きくなる傾向が認められたが、これは背面の盛土の沈下が大きいために盛土から補強土壁に対して下方向へ引き込む力が作用するためと考えられる。これらの測定結果は、盛土の築造や降雨による荷重増加とともに補強土壁が転倒に対する抵抗を強めたことを示すものといえる。

補強土壁背面における背面に垂直な方向の土圧から、換算した水平方向土圧と盛土天端からの深さの関係を図-13に示す。図中の一点鎖線と二点鎖線は、それぞれ盛土築造完了時におけるクーロン土圧と盛土材の粘着力を考慮した場合の土圧を示したものである。補強土壁の厚みが厚いケース2では、測定された土圧の大きさはほ

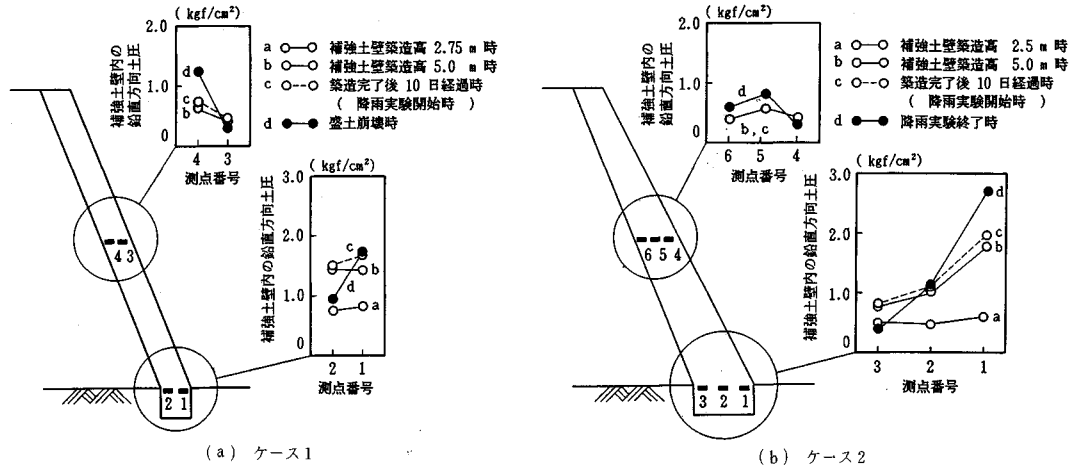


図-12 補強土壁内の土圧（鉛直方向）の分布図

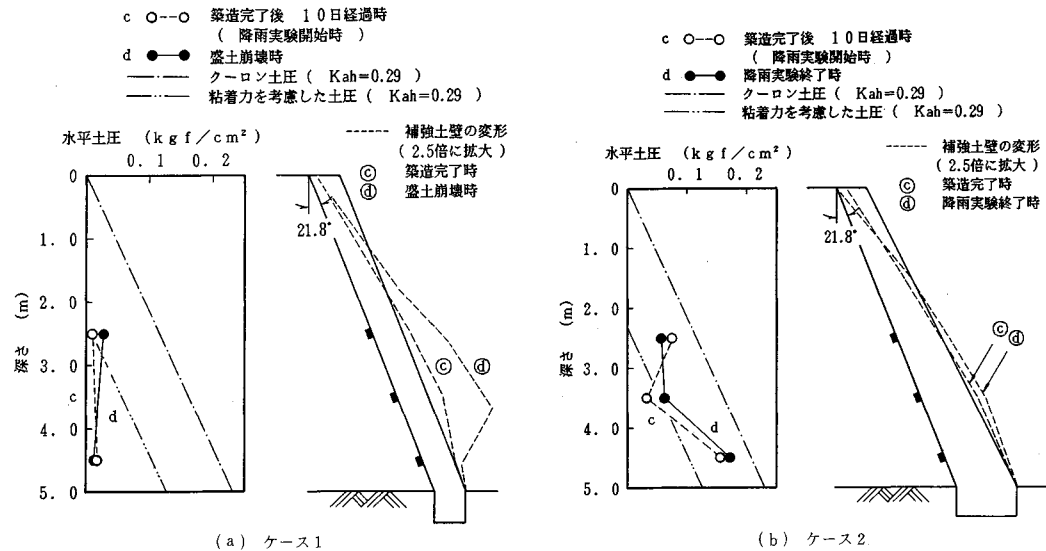


図-13 補強土壁背面の土圧（水平方向）の分布図

ばこれらの中間を示すのに対し、厚みが薄いケース1では、ケース2と比較して測定された土圧は非常に小さい。これは補強土壁の変形がケース2に比べて大きいことによるものと考えられる。

したがって、補強土壁内および補強土壁背面に作用する土圧についてのこれらの測定結果より、補強土壁の厚みが厚い場合は、補強土壁は擁壁とみなした挙動を示すが、厚みが薄い場合はそのようにみることができないといえる。ただし、どの程度の壁厚があれば擁壁としての一体的な挙動を示すかという点については、今後さらに検討を加えていく必要がある。

(5) 補強土壁表面のエロージョン

補強土壁ののり先に設けた測定溝に流出する砂量の測

定結果より、壁面の砂の平均流出厚さを算出した結果を図-14に示す。この図から、補強土壁表面のエロージョンは降雨開始直後には早い速度で進行するが、時間の経過とともにその速度は著しく低下することが明らかになった。しかし累積降雨量が600mmの時点では、エロージョンは完全に停止するには至らず、わずかながらも進行した。

なお、断面測定機を用いて補強土壁表面のエロージョンの分布を測定した例を示した図-15から、エロージョンは補強土壁の高さ方向に対してほぼ一様に進行するが、局部的に他の部分より大きくなる箇所があることが認められた。なお、のり肩では他の部分と比べて大きくなっているが、これは補強土壁の隅角部が降雨によって

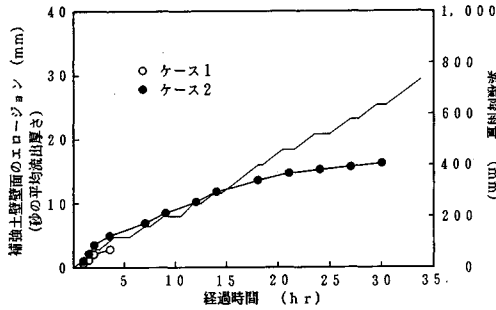


図-14 補強土壁壁面のエロージョンの変化図

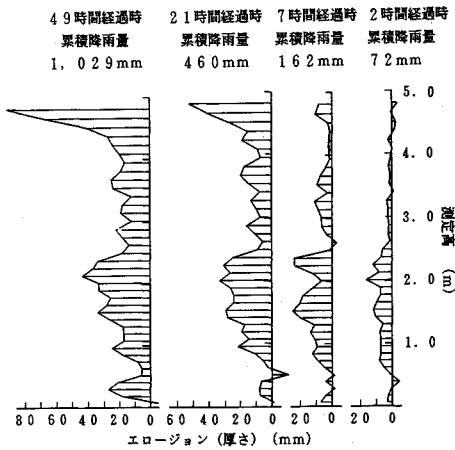


図-15 補強土壁壁面のエロージョン分布の変化図 (ケース2の断面の一例)

少し丸みを帯びたことによるものである。

補強土壁表面のエロージョンについての以上の測定結果から、補強土壁は、植生を施さない場合でも降雨による浸食に対してかなりの抵抗性を有しているといえるが、エロージョンが完全には止まらない点やエロージョンが部分的に進行する箇所がある点を考慮すると、現場施工においてはすでに実施されているように、施工後の補強土壁表面に植生を行うなどの対策を施すことが望ましい。

6. 安定解析

連続長繊維を用いた補強土壁を有する盛土の安定性を評価するために、2. で述べたように、補強土壁の内部を通るすべり破壊に対して、円弧すべり法による方法と、補強土壁の内部を通る直線すべりについて安定を調べる方法の2方法によって内的安定の検討を行った。また外的安定については、補強土壁を一般のコンクリート製もたれ擁壁とみなした場合の転倒に対する検討を行った。これらの安定計算においては、降雨による盛土の飽和度の上昇に伴い、盛土材と補強土壁材料の単位体積重量が増加し、また盛土材の強度が低下するものとした。そしてこれらの要因によって盛土全体の安全率が低下すると考えた。また土中のサクシオン圧の測定結果によると、サクシオン圧は飽和度が80%を上回る頃から急激に小さくなることから、盛土材の強度は、表-1に示した土質試験結果をもとに、せん断抵抗角 ϕ' は一定値として粘着力 c' のみが低下するものとした⁵⁾。なお、補強土の強度定数 c' 、 ϕ' については、飽和度の上昇による影響は無視できるほど小さいことから、降雨中一定とした。安定計算に用いた盛土材および補強土壁材料の物性値の一覧表と盛土内の飽和度分布の測定結果をもとに算出した盛土の安定計算結果の一覧表をそれぞれ表-3と表-4に示す。

補強土壁の内的安定の計算結果をみると、まず最初にケース1では、表-4から盛土崩壊時における安全率は、円弧すべり法によると0.99となつて1.0に近い値となり、実際の現象とよく一致した。一方、補強土壁内部の直線すべりについて安定を調べる方法では安全率は1.35となり、かなり大きめの安全率を与えることがわかった。しかし計測結果によると、ケース1では補強土壁に大きな変形が生じて、補強土壁背面には通常の土圧理論に基づく土圧よりも小さい土圧しか作用しないため、これを仮定した直線すべりによる補強土壁の内的安定の評価方法は、この場合適切でないと考えられる。

次にケース2では、実験終了時における補強土壁の内

表-3 盛土の安定計算に用いた物性値

	築造完了時 Sr=66% (平均)	降雨開始後			
		66% < Sr < 80%	80% ≤ Sr < 100%	Sr=100% (地下水位以下)	
盛土材料	ρ_d (t/m ³)	1.22	1.22	1.22 [1.27]	1.22 [1.27]
	ρ_t (t/m ³)	1.58	1.60	1.68 [1.72]	1.77 [1.80]
	c' (t/m ²)	1.3	0.9	0.3 [0.3]	0.2 [0.3]
	ϕ' (度)	20	20	20 [23]	20 [23]
補強土壁材料	ρ_d (t/m ³)	1.44			1.44
	ρ_t (t/m ³)	1.69			1.81
	c' (t/m ²)	2.5~5.3 *1			2.5~5.3 *1
	ϕ' (度)	35			35

*1 補強土の製作面とせん断面との交差角が0°~30°のときのみかけの粘着力(試験値)
[] 内の数値は降雨開始後の盛土材料の密度上昇を考慮したときの値

表—4 盛土の安定計算結果

(a) 内的安定に対する安全率

補強土壁の内部を通る円弧すべりに対する安全率

	築造完了時	ケース1 盛土崩壊時	実験終了時	盛土内の全領域の飽和度が80%以上のとき *1
ケース1	1.40 (1.62)	0.99 (1.17)	—	0.79
ケース2	1.61 (1.85)	1.21 (1.45)	0.99 (1.22) [1.06]	1.02

補強土壁の内部を通る直線すべり面に沿ったすべり破壊に対する安全率

	築造完了時	ケース1 盛土崩壊時	実験終了時	盛土内の全領域の飽和度が80%以上のとき *1
ケース1	2.14	1.35	—	0.93
ケース2	2.69	2.28	1.63	1.63

(b) 外的安定に対する安全率 (補強土壁の転倒に対する安全率)

	築造完了時	ケース1 盛土崩壊時	実験終了時	盛土内の全領域の飽和度が80%以上のとき *1
ケース1	3.66	1.10	—	0.74
ケース2	6.60	1.98	1.34	1.34

*1 参考値 (設計安全率)。但し地下水位は考慮せず。

() 内の数値は補強土壁内に作用する土圧を考慮したときの安全率

[] 内の数値は補強土壁背面の盛土の密度上昇に伴う強度増加を考慮したときの安全率

的安定についての安全率は、円弧すべり法によると0.99となった。一方、補強土壁内部の直線すべりについて安定を調べる方法では安全率は1.63となり、ケース1の場合と同様に円弧すべり法による安全率よりかなり大きめの安全率を与えることがわかった。

上記の安定解析の結果から、円弧すべり法による安全率は1.0よりも小さくなったが、実際には盛土は崩壊せず比較的安定していた。これは次のような要因によるものと考えられる。すなわち、計測結果によると、まず最初に、補強土壁の下部には大きな鉛直方向の土圧が作用していたことから、補強土壁部のせん断抵抗が、円弧すべり法による評価よりも大きいことが考えられる。また、実験終了時には補強土壁背面の盛土天端の沈下量が約25 cmにも達していたことから、盛土材料の密度の上昇に伴い、盛土の強度も若干増加したと考えられる。そこで、おのおのの要因を考慮した場合の円弧すべり法による安全率を試算すると、それぞれ1.22、1.06となった。

以上の補強土の内的安定についての検討結果から、円弧すべり法が、補強盛土が崩壊したときの安全率が1.0に近く実際の現象ともよく合っており、補強土壁内部の直線すべりについて安定を調べる方法は、円弧すべり法よりかなり大きめの安全率を与えることがわかった。したがって、補強土壁の内的安定の検討方法としては、補強土壁の強度異方性を見掛けの粘着力の中に考慮した円弧すべり法が適しているといえる。

次に、補強土壁の外的安定としての補強土壁の転倒に

対する安全率は、ケース1では1.10であった。しかし計測結果によれば、ケース1のように補強土壁の厚みが薄い場合は補強土壁を擁壁とみなした取扱いができないので、補強土壁の転倒についての検討はあまり意味をもたないと考えられる。一方、ケース2では、補強土壁の転倒に対する安全率は1.34であった。今回、この値は前記の円弧すべり法による安全率よりも大きく、最小の安全率にはなっていない。しかし、ケース2のように補強土壁の厚みが厚く、しかも内的に十分安定な場合は、擁壁とみなした挙動を示すことが判明したので、上述の内的安定の検討に加えて、外的安定としての補強土壁の転倒の検討を、通常のコンクリート製もたれ擁壁と同様に行っておくのが望ましいと考えられる。

7. ま と め

連続長繊維を用いた補強土壁を有する盛土の安定性を、実物大の模型を使った人工降雨実験によって調べた。その結果を要約して、以下に述べる。

(1) 今回得られた実験結果と各種の安定解析の結果を比較した結果、連続長繊維を用いた補強土壁を有する盛土の安定性の評価手法に関して、次のような知見が得られた。

a) 補強土壁内部を通るすべり破壊について、円弧すべり法による方法と、補強土壁背後からの土圧を考慮して補強土壁の内部を通る任意の直線すべり面に対する安定を調べる方法の2通りの方法によって、補強土壁の内

的安定の検討を行った結果、前者の円弧すべり法が、補強盛土が崩壊したときの安全率が1.0に近く、実際の現象とよく合っていることが明らかになった。これに対して後者の方法は、円弧すべり法よりかなり大きめの安全率を与えることがわかった。したがって、補強土壁の内的安定の検討方法としては、補強土壁の強度異方性を見掛けの粘着力の中に考慮した円弧すべり法が適しているといえる。

b) 補強土壁の厚みが薄い場合は、補強土壁のはらみ出しが大きく、擁壁とみなした取扱いはあまり適さないと考えられるが、補強土壁の厚みが厚くしかも内的に十分安定な場合は、擁壁とみなした挙動を示すことがわかったので、a) で述べた内的安定の検討に加えて、外的安定の検討(特に、転倒の検討)を、通常のコクリート製もたれ擁壁の場合と同様に行っておくのが望ましい。ただし、どの程度の壁厚があれば擁壁としての一体的な挙動を示すかという点については、今後さらに検討を加えていく必要がある。

(2) 補強土壁表面の浸食状況の測定結果から、補強土壁は植生を施さない場合でも降雨による浸食に対してかなり高い抵抗性を有しているといえるが、実際の施工においては、施工後の補強土壁表面に植生を行うなどの

対策を施すことが望ましい。また、補強土壁背後の盛土内への降雨の浸透が補強土壁の近くで遅れることが観測され、補強土壁は盛土内へ達する浸透水の量を低下させる緩衝帯としての効果を有することが明らかになった。

今後、補強土壁の背面に直接に間隙水圧が作用する場合についても検討を加え、さらに現場実験結果等をも合わせて検討したうえで、連続長繊維を用いた補強土壁を有する盛土の合理的な設計法を提案していく予定である。

参 考 文 献

- 1) Leflaive, E. and Liausu, Ph. : TEXSOL, Geotechnical Fabrics Report, Vol. 4, No. 2, 1986. 3/4.
- 2) CETE Normandie Centre, LCPC, SETRA/DCT : Procédé TEXSOL, Note d' Information, Chaussees Terrassements 24, 1986. 9.
- 3) 堀家茂一：テクソル工法の導入と専用施工機の開発、建設の機械化, 1988年4月.
- 4) 中山覚博・藤木広一・久楽勝行・三木博史：連続長繊維を用いた補強土の力学的特性に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No. 427, pp. 213~221, 1991年.
- 5) 久楽勝行・石塚廣史：雨水の浸透と盛土の安定性, 土と基礎, Vol. 30, No. 9, pp. 37~43, 1982年.

(1990.11.20・受付)