

# 降雨浸透時におけるアンカー式補強土壁の遠心力実験

豊田工業高等専門学校 正会員 小林 睦  
豊橋技術科学大学 国際会員 三浦均也

## 1. はじめに

道路事業や造成工事等において、地形や用地の制約条件を低コストで対処することができる強土構造物<sup>1)</sup>は、変形することによって補強効果が発揮されて安定性を保持するために、ある程度の変形は許容されることから、耐震性は比較的高いことが知られている<sup>2), 3)</sup>。特に、多数アンカー式補強土壁工法<sup>4)</sup>は、盛土材料に建設発生土を利用できることや直壁構造のために更なる土地の有効利用が可能なることから、建設事業費の縮減に大きく貢献する工法として着目され、補強メカニズムの解明<sup>5)</sup>および適用地盤の検証<sup>6)</sup>がなされ、近年の施工実績は着実に増加している。

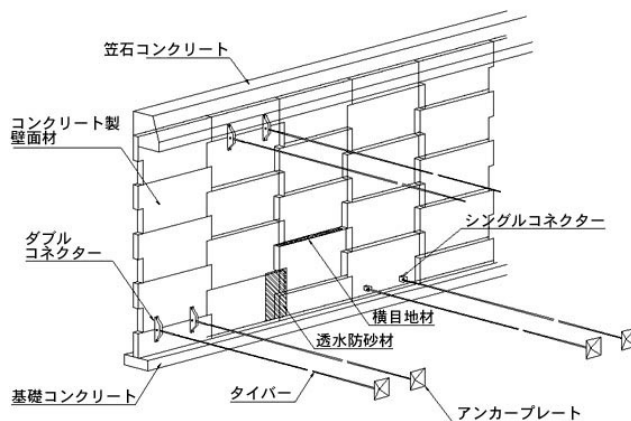


図-1 アンカー式補強土壁の構造<sup>2)</sup>

多数アンカー式補強土工法は、図-1に示すように、壁面材とアンカープレートをタイバーと呼ばれる剛性の高いロッドで緊結し、壁面材に作用する土圧に対して、アンカープレートに作用する引抜き抵抗力により保持する構造である。壁面材同士の継ぎ目には、透水防砂材が設置され、盛土内に浸透した雨水はこれを介して外部に排出されることになっている。ところが、近年の地震における災害調査では、盛土内に浸透した雨水が排水されずに貯留したことに起因して、補強土構造物の安定性が低下することが報告されており、降雨時の変形・崩壊挙動の発展過程を詳細に検討することが望まれている。

ところで、土構造物の挙動は自重応力に大きく依存するために、これらの構造物の性能を検証するためには、小型模型構造物に遠心加速度を付与する遠心力場模型実験が有効な手法の一つであると言われている<sup>7)</sup>。筆者らは、浸透流を受ける盛土斜面において、法面勾配および締固め度が崩壊機構に及ぼす影響を調べるための一連の遠心模型実験を実施してきており、降雨浸透時の斜面崩壊メカニズムを検証してきた<sup>8)</sup>。また、排水材としてジオテキスタイルを敷設した盛土の降雨時変形挙動を調べたところ、補強材の補強効果だけでなく、盛土下部のような浸透水が集中する箇所に不織布を敷設することで排水性能の向上による盛土の安定性増加を確認することができた<sup>9)</sup>。

そこで本研究においては、降雨時の多数アンカー式補強土壁の変形挙動を調べることを目的として、盛土部および基礎部の締固め度を種々変化させて、浸透流を受ける補強土壁の崩壊挙動に関する遠心力載荷実験を実施した。また、盛土内の地下水位を効率的に排出する排水工を検証するために、排水材に不織布を採用した一連の遠心模型実験を実施した。

## 2. 実験方法

### (1) 盛土材料について

本研究における模型盛土材料には、豊田市内で採取したまさ土(2mmふるい通過分)を用いた。粒径加積曲線を図2に示す。これより、地盤工学的に分類すると細粒分まじり砂(S-F)に分類されることが分る。

また、締固め度80%における透水係数は、 $5.0 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ であり、細粒分は多くないものの透水性が良好でない材料である。一方、締固め度70%における透水係数は、 $1.0 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ であり、透水性が良い材料に分類される。

表-1 実験条件

実験シリーズ	実験コード	基盤部締固め度 (%)	盛土部締固め度 (%)	排水工
100 模型縮尺：1/100	B75E70	75	70	-
	B75E75	75	75	-
	B80E75	80	75	-
50 模型縮尺：1/50	E70	75	70	-
	E70D	75	70	壁面材裏に不織布
	E70D-F	75	70	壁面材裏に不織布 + 下部2層に不織布

(2) 実験条件

表-1 に実験条件を示す。100 シリーズでは、縮尺 1/100 の小型模型に 100G の遠心加速度を付与し、盛土部および基盤部の締固め度を種々変化させている。基盤部の乾燥密度は  $\rho_d=1.50, 1.60\text{g/cm}^3$  の 2 種類（締固め度はそれぞれ 75, 80%）、盛土部の乾燥密度は  $\rho_d=1.40, 1.50\text{g/cm}^3$  の 2 種類（締固め度はそれぞれ 70, 75%）である。また、50 シリーズにおいては、50G の遠心加速度を付与し、壁面材裏面に排水材として不織布を添付したものと、これに加えて下部 2 段のタイバー設置層に不織布を水平に敷設したケースについて、排水機能が補強盛土の安定性に及ぼす影響を検証した。基盤部および盛土部の締固め度は、それぞれ 75, 70% としている。

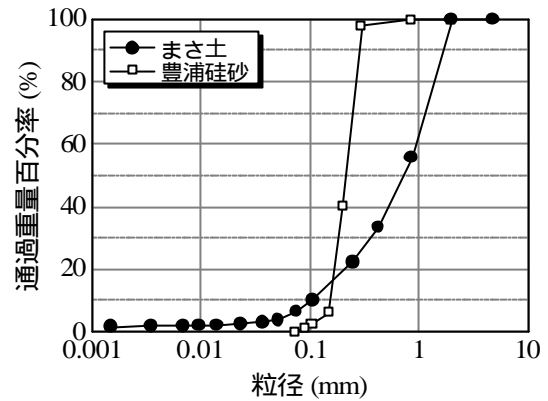


図-2 粒径加積曲線

(3) 補強部材

図-3 に補強材のモデルを示す。50 シリーズにおける壁面材は、コンクリート製の H1000mm × W1000mm × t100mm をモデル化し、遠心力場における曲げ剛性に関する相似率が満足されるように、アクリルの寸法を H20mm × W20mm × t2mm に決定した。100 シリーズにおける壁面材モデルは H1000mm × W1500mm × t100mm である。壁面材中央部にタイバーを固定する孔を空け、ユニバーサルジョイントを採用した。また、アンカープレートは、H400mm × W400mm の鋼製プレートを想定し、模型にも鉄板を採用している。

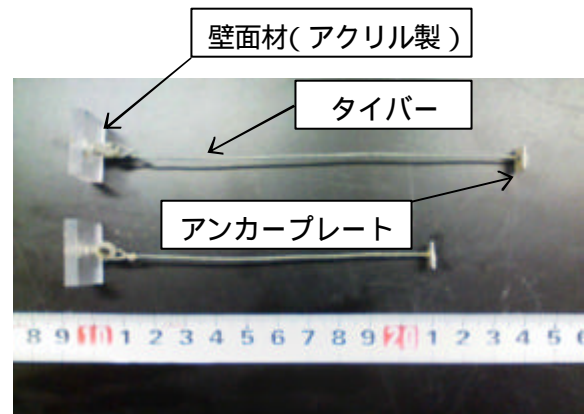


図-3 補強部材

(4) 遠心模型実験

図-4 に 100 シリーズにおける模型地盤の概要を示す。

模型土槽寸法は、H210 × W250 × D60 (mm) であり、模型地盤の背後には給水タンクを設け、外部から水を供給し、地盤内に浸透流を発生させる。浸透実験中の下流側水位を規定するために、模型土槽前面に基盤部に合わせた高さの排水孔を設けている。

模型地盤の作製にあたって、タイバー敷設位置毎に、含水比 10% に調節した所定量の試料を土槽内に投入し、それぞれ定めた乾燥密度になるように締め固める。100 シリーズでは、H10 × W15 (mm) のアクリル板を壁面材として、模型盛土高が 100mm (実規模換算値：10m) になるように配置した。アクリル板の盛土側にはセロファンフィルムを貼付し、壁面材同士の継ぎ目から漏水することを防ぐとともに、下流側の水位を規定した。

また、図-5 に 50 シリーズの模型地盤概要を示す。このシリーズにおいては、H20 × W20 (mm) のアクリル板を、模型盛土高 160mm (実規模換算値：8m) になるように配置した。さらに、基盤部を含めたすべり円弧に沿った変形を防止するために、基盤上に不織布を敷設している。排水工を施す場合は、壁面材の裏側には不織布を

貼付し、下部2段のタイバー設置層に不織布を敷設し、水平排水材とした。遠心力载荷中の模型盛土の変形挙動の観察を容易にするために、模型地盤前面にはカオリンパウダーを格子状に塗布した。

作製した模型地盤を遠心力载荷装置に搭載し、模型縮尺に対応した所定の遠心加速度を付与する。次に、基盤部を飽和させるために、外部から水を供給する。基盤飽和確認後、模型地盤背後の給水タンク内水位を 1cm/min の速度で上昇させて、模型盛土内に浸透流を発生させていく。遠心力载荷中の模型地盤の挙動は、CCDカメラにより撮影してTV送信し、遠心力载荷装置外部にて受信した映像を記録・観察する。映像のスナップショットの模型地盤の形状および格子点の座標を読み取ることで、浸透実験中の模型地盤の挙動を図化した。

### 3. 実験結果および考察

#### (1) 盛土部および基盤部の締固め度の影響

浸透実験の結果、全てのケースにおいて給水タンク内の水位が上限（盛土高）に達したにも関わらず、アンカープレートが引抜けて壁面材が崩壊するような全体的な崩壊に至ることは観察されなかった。

図-6~8 に浸透実験後の模型地盤の状況を示す。これらより、基盤部の締固め度が同様の B75E70, B75E75 を比較すると、盛土の締固め度が小さな B75E70 においては、盛土天端の沈下変状が大きくて壁面材下部がはらみ出していることから、すべりにより回転するような変形を認めることができる。これより、この部分のアンカープレートが引き抜けていると推定できる。これは、地下水の上昇による飽和度の上昇によってすべり土塊の自重が増加したことに加えて、引抜き抵抗力が依存している有効応力とせん断抵抗力が低下したことが原因と考えられる。しかしながら、滑動量が盛土高比較して大きいにも関わらず、アンカープレートの引き抜き抵抗力は引抜き過程で完全に失われることは無く、盛土が崩壊するまでには至らなかったことは特筆できる。これに対して、盛土部の締固め度が大きなケースにおいては、変形の程度は B75E70 に対して大きくないものの、カオリンパウダー格子の不連続部分が確認され、盛土部が基盤部を含むようにすべり破壊を起こしたことが認められた。このように、変形状態に差が見られたのは締固め度が異なるために、

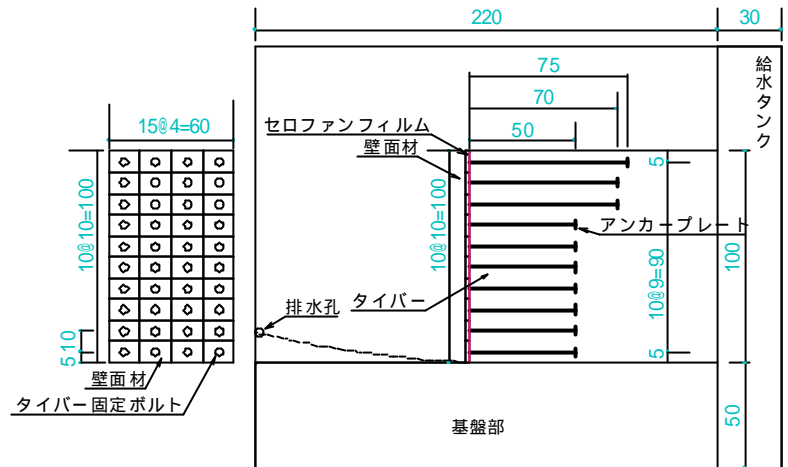


図-4 模型地盤概要 (100シリーズ)

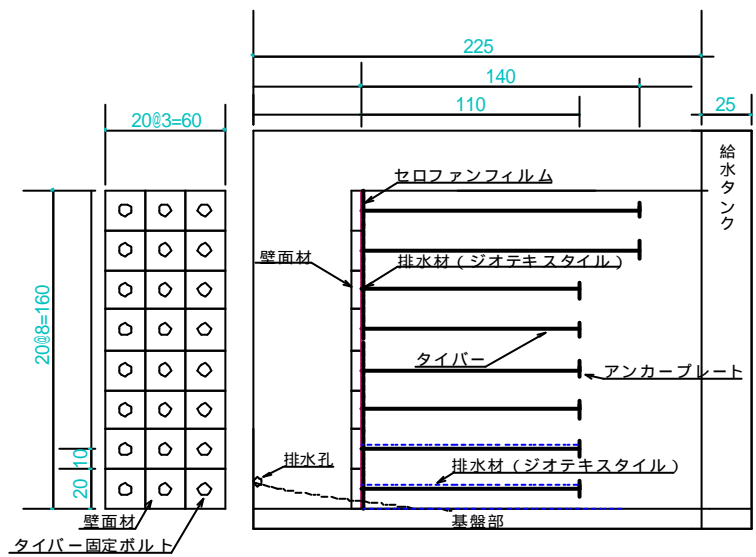


図-5 模型地盤概要 (50シリーズ)

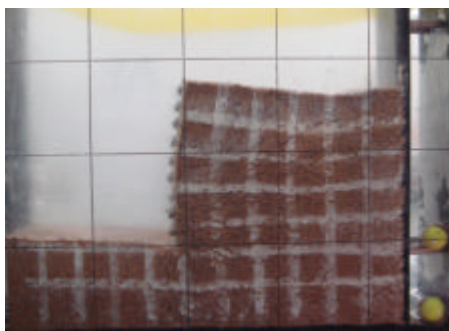


図-6 浸透実験後の模型地盤 (B75E70)

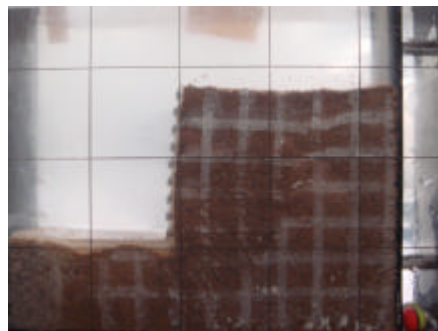


図-7 浸透実験後の模型地盤 (B75E75)

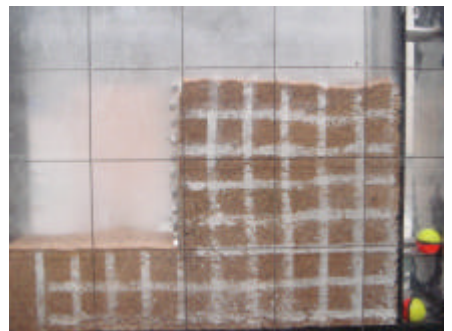


図-8 浸透実験後の模型地盤 (B80E75)

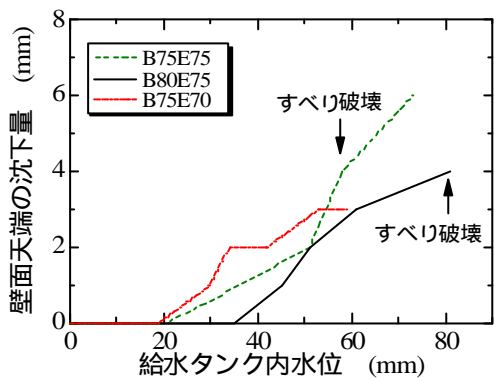


図-9 壁面天端沈下量～給水タンク内水位の関係

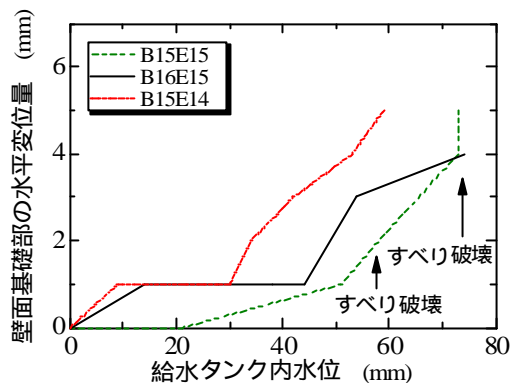


図-10 壁面材基礎部の水平変位～  
給水タンク内水位の関係

浸潤による体積圧縮の程度が異なってきたことに起因するものと考えられる。すなわち、密度が小さな盛土においては、地下水上昇に伴う自重の増加による体積圧縮変形により、盛土は沈下するものの形状は安定化していったことに対して、密度が大きくなると盛土形状が大きく変わることないが、飽和度の上昇により有効応力と強度の低下の影響を大きく受け、剛塑性的な変形を起こしたのであろう。このように、盛土体の締固め密度が低い場合には、降雨浸透時における変形が大きいものの、その変形は急激ではなく段階的に進行する。このような土構造物の特徴を考えると、何らかの方法によって崩壊に至る過程での構造物の変状を早く認識できると対策措置を講じることも可能になるため、モニタリングが防災上重要であることを示唆している。

また、異なる締固め度の基盤上に同一の締固め度で盛土を造成した場合について比較すると、基盤部が密なケース（B80E75）においても、盛土部がすべり面に沿って滑動しているのが見られた。しかしながら、CCDカメラによる記録映像より、このケースですべり面が形成されたことが確認されたのは、給水タンク内水位が上限に達する直前であったことが確認されている。一方、B75E75においては、給水タンク内水位が模型盛土高の7割を越えたあたりより、明確なすべり面に沿って土塊が活動したことが観察された。これらのことより、地下水上昇に伴う盛土部の土塊重量の増加により滑動力が増大することに対して、基盤部で発揮されるせん断抵抗力が大きいために、比較的高い地下水位まで補強盛土が構造物として供用できるための性能を維持したことを示唆するものであろう。

図-9に浸透実験中に撮影した映像より読み取った壁面天端の沈下量と給水タンク内水位の関係を示す。図中の水位は、基盤飽和時点をゼロとしている。これより、基盤部の締固め度が小さいほど地下水位が低い時点で大きな沈下を生じていることが指摘できる。

また、図-10に示すような壁面材基礎部の水平方向変位と給水タンク内水位の関係より、盛土部の締固め度が小さなE70B75においては、他の2ケースと比較して上流側水位が低い時点で前方に変位していることが読み取れる。このように、E70B75においては、壁面上部の沈下量は小さいものの、水平変位が比較的大きなことから、盛土部はすべりにより回転を伴って変形したことが確認できる。

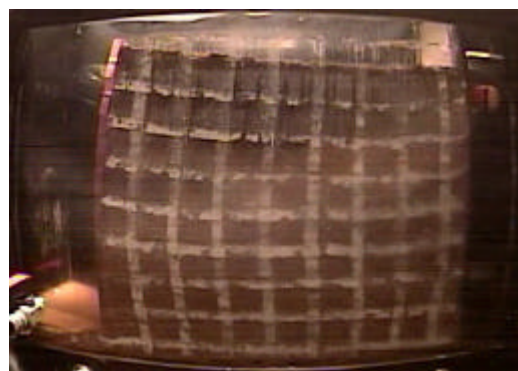


図-11 浸透実験終了直前の模型地盤の状況  
(E70)



図-12 浸透実験終了直前の模型地盤の状況  
(E70D)

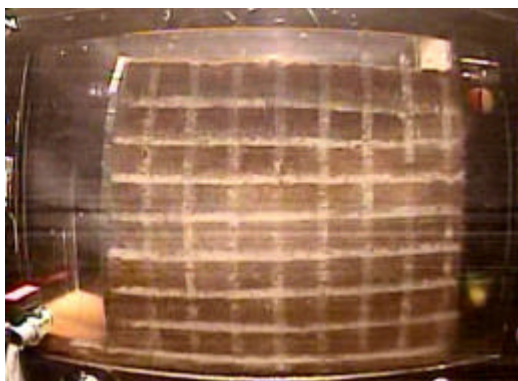


図-13 浸透実験終了直前の模型地盤の状況  
(E70D-F)

このように、比較的小さな締固め度で施工した多数アンカー式補強土においても、降雨により飽和度の高い領域が盛土部の大部分を占めたにも関わらず、構造物が原形をとどめないような壊滅的な崩壊には至らなかった。このことは、多数アンカー式補強盛土の降雨時安定性が高いことを示唆するものであり、適切に裏込め材料の選定および締固め施工管理を行うことで、建設発生土・産業副産物の再利用の可能性は十分にあるといえよう。

## (2)排水工の効果

浸透流を受けるアンカー式補強土壁において、排水工が変形挙動に及ぼす影響を調べた結果として、図-11～13に浸透実験終了時の模型地盤の状況を示す。これらは遠心力载荷中の画像であるために、広角レンズにより歪んでいる。E70においては、B75E70(100シリーズ)と同様に、地下水上昇に伴う土塊重量の増加のために、盛土が体積圧縮を起こして沈下していることと、盛土部が回転するように変形していることが指摘できる。浸透実験終了後に模型地盤を解体する際に、最上部のアンカープレート後方に空隙が確認されたことから、変形に抵抗できずに引き抜きを起こしたことが考えられる。しかしながら、補強材全体の補強効果は盛土の変形の程度を低くとどめ、構造物を修復して再供用できる可能性は残したといえる。また、これらの図より、排水工を多く施し、排水機能を向上させていくにしたがって盛土の変形が抑制できることも実験結果から理解できる。アンカープレートの引抜きメカニズムが、土塊重量の増加と飽和度の上昇に伴うせん断抵抗力の低下に起因していることから、盛土内に排水工を施し、地下水位の上昇を抑制することで、変形を抑制できるといえる。特に、E70D-Fにおいては、下部2段のタイバー設置層に敷設した不織布が、排水材としての機能に加えて、ジオテキスタイル補強工のような補強効果を発揮したことが考えられ、これによって、変形がさらに抑制できたものと考えられる。このように、多くの場合、排水材としての面的材料は、地盤材料との摩擦抵抗力あるいは自身の引張り抵抗力が補強効果として発揮されるために、土構造物の変形に対して十分な抑制効果を期待することができる。

盛土内水位上昇の様子を比較するために、スナップショットより読み取った浸透実験終了直前の給水タンク内水位に対する盛土内水位を図-14に示す。これらより、E75Dの水面形状において、排水工を無施工のケースと大きな差が見られないが、E75においては、地下水上昇に伴って盛土全体が沈下しているために、相対的な盛土内水位は異なってくる。また、E75D-Fについても同様に、特に図-14において盛土上流側の水位が他の2ケースと同程度であることが分かるが、このケースにおいては、地下水上昇に伴う盛土全体の体積圧縮が著しく小さいために、相対的な盛土内水位は低いことを付け加えておく。これより、このケースは上流側の水位に対して下流側の水位が低い理由を説明でき、排水工が十分に機能していることが確認できた。一方、このケースにおける水位上昇を抑制した領域は、壁面裏部でありアンカープレートの引抜き強度の低下を軽減したことよりも、壁面材に作用する土圧の増加を軽減し、盛土全体の変形量を小さくとどめたものであろう。

図-15に浸透実験中の盛土天端(最上部アンカープレート設置部)の沈下量と給水タンク内水位の関係を示す。これより、排水工を施すことによって盛土天端の沈下量が小さくなっていることが指摘できる。これは、排水機能の向上により、地下水上昇が抑制されたために、土塊重量の増加とせん断強度の低下が抑えられ、盛土の変形量が軽減されたものと考えられる。

これらのことから、壁面材結合部からの土砂流出を防ぐ目的で設置される透水防砂材を排水工として考えて設置面積を拡大させることで、降雨時のアンカー式補強盛土の安定性を増加させることが期待でき、実際には礫材等による壁面材裏側の排水層が機能すれば降雨時の安定性はある程度確保できると考えられる。一方で、この排水機能が適切に機能しないケースにおいては、降雨浸透時の安定性の低下の度合いが大きくなることに留意する必要がある。

さらに、排水機能を有するジオテキスタイルを併用すると、地下水の上昇に起因する変形を抑制するだけでな

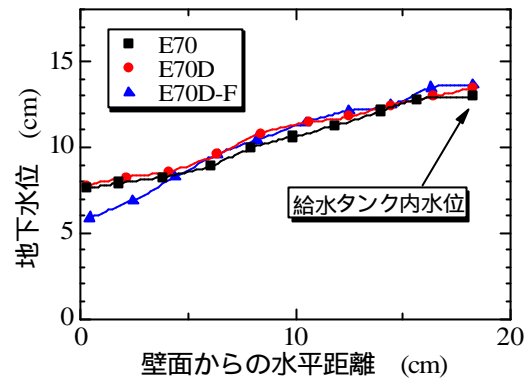


図-14 盛土内水位の比較(給水タンク内水位上限)

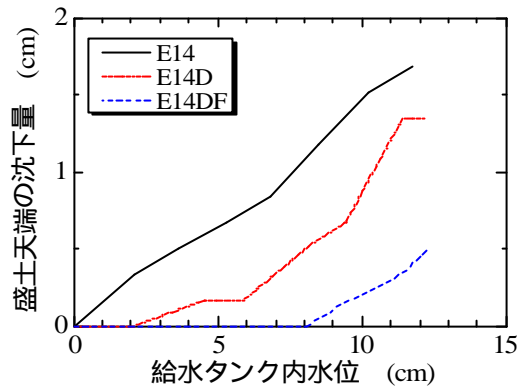


図-15 盛土天端の沈下量～給水タンク内水位の関係

く、補強効果による安定性の向上も見込めるため、飽和度の上昇に伴ってせん断強度が著しく低下する材料においても裏込め材に適用できる可能性は十分にあるといえる。

#### 4. まとめ

本研究においては、降雨時の多数アンカー式補強土壁の変形挙動を調べるために、盛土部および基盤部の締固め度ならびに排水工を種々変化させた一連の遠心力場浸透実験を実施した。その結果、以下のことが明らかになった。

- ・降雨時の多数アンカー式補強土壁の安定性が低下する要因は、地下水上昇に伴う土塊重量の増加により、壁面に作用する土圧が増加することと、これに抵抗しているアンカープレートの引抜き抵抗力が、飽和度の上昇による盛土材のせん断抵抗力の低下によって軽減されるためである。
- ・盛土部の締固め度が適切に管理されて施工されると、雨水の浸透に伴って自重応力は増加するもののアンカープレートの引抜き抵抗力が十分に発揮されるために、ある程度の地下水位までの変形量は大きくない。しかしながら、土塊のすべり破壊に対する均衡が崩れると瞬時に剛塑性的な変形を起こすために、予兆の乏しい急激な破壊形態になる可能性があることが分かった。
- ・アンカー式補強土壁において、壁面材裏部に不織布を排水工として設置したところ、構造物の降雨時安定性は向上することが確認された。このことから、従来から施工されている透水防砂材と礫層による排水工としての機能を維持することは、補強土壁の降雨時安定性を向上させることに繋がるといえる。
- ・排水材として不織布を水平に敷設することによって、地下水上昇を抑制するだけでなく、不織布と地盤の摩擦抵抗力あるいは不織布自体の引張り抵抗力によって、盛土の安定性は著しく向上することが確認された。したがって、透水性が良くない材料に対しては、ジオテキスタイルを併用することで利用可能な裏込め材の範囲をさらに広げる可能性があることが分かった。

#### 6. 謝辞

本研究は、科研費（課題番号：19760332）の助成を受けて行ったものである。ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 土木研究センター：ジオテキスタイルを用いた補強盛土の設計・施工マニュアル，2000
- 2) 館山勝，龍岡文夫，古関潤一：阪神・淡路大震災における土構造物の挙動，土と基礎，Vol.44，No.2，pp.10-13，1996
- 3) 吉田浩一，久保哲也，南和弘：中越地震による補強土壁の被災調査と復旧事例，ジオシンセティックス論文集，第20巻，pp.301-304，2005
- 4) 土木研究センター：多数アンカー式補強土壁工法 設計・施工マニュアル，2002
- 5) 三浦均也，佐野将義，前田健一，土橋聖賢，三澤清志：多数アンカー擁壁の内的安定性および外的安定性，第30回土質工学研究発表会，pp.2401-2404，1995
- 6) H. Hashimoto, N. Aoyama, H. Miyatake & M. Hirasawa: Stability test of the multi-anchored reinforced soil wall constructed on soft ground, Landmarks in Earth Reinforcement, Blkema, pp.359-362, 2001
- 7) 岡村未対，竹村次朗，上野勝利：講座 遠心模型実験 - 実験技術と実務への適用 - 2. 遠心模型の相似則，実験技術 - 利点と限界，土と基礎，vol.52，No.10，pp.37-44，2004
- 8) Centrifugal modeling of slope failures due to seepage flow：A. Hiro-oka, M. Kobayashi, H. Nagase & K. Shimizu, Recent Development of Theory and Practice in Geotechnology, pp.150-157, 1999
- 9) 小林睦，廣岡明彦，永瀬英生，清水恵助，片山亮，織掛晴弘：法先排水工ならびにジオテキスタイルによる補強工を施した盛土の降雨時安定性に関する遠心模型実験，土木・構造論文集，第17号，pp.97-104，2001