

◆ 報 文 ◆

浸透に対する河川堤防強化工法

古本一司* 齋藤由紀子** 森 啓年*** 小橋秀俊****

1. はじめに

河川堤防は、古くから逐次強化を重ねてきた長い治水の歴史の産物であり、堤防延長や堤防断面については相当の整備がなされている。

しかし、近年の異常気象を踏まえると、想定を超える豪雨の長期化も考えられること、過去に築造された堤防には、必ずしも十分な管理ができず、必要な強度を有さないものもあることから、堤防の質的な安全性の検討が開始されている。こうした中、浸透に対する堤防の安全性点検が実施されており、国土交通省の発表（平成19年3月）によると、平成18年12月現在で、直轄堤防点検対象区間10,118kmのうち64%にあたる区間で終了している。このような点検により確認された弱点箇所に対する早急な強化工法の確立が求められている。

堤防強化工法としては、ドレーン工法や矢板工法などがあるが、各工法の長期的効果や、堤体および基礎地盤条件に対する各工法の適用性は必ずしも明らかでない。

そこで、本報では、ドレーン工法など堤防強化工法の効果、および堤体・基礎地盤条件に対する適用性について実施した実験的検討の結果について報告する。

2. 堤防強化工法の効果

2.1 ドレーン工法

2.1.1 目的

浸透に対する堤防強化工法の1つとして用いられつつあるドレーン工法は、れきや碎石により作製したドレーン工を堤体裏のり尻に配置し、堤体内の浸透水を速やかに排水し、かつ、のり尻部のせん断強さを増すことにより洪水時の堤体の安定を図るものである。

しかし、ドレーン工の排水機能により、堤体内の水位勾配（動水勾配）が急になり、パイピングが生じたり、れきや碎石をつつむフィ

ルター材が土粒子により目詰まりを起こすなどの問題が指摘されている。ドレーン工の幅に関しては、既往の研究¹⁾でパイピングを生じる可能性が小さいと言われている平均動水勾配0.3程度以下とすることが確認されている。ここでは、未だ設計法が確立されていないドレーン工の形状と、目詰まりの課題を検討する目的で、模型実験を実施した。

2.1.2 実験方法

図-1に示すような大型堤防模型（高さ3.0m、天端幅3.0m、のり面勾配1:2の半断面堤防）を用いて、実験を行った。ドレーン工の形状は、幅を一定とし、図-2のとおり、基本パターン（ケース1）、新設堤防への設置を想定したパターン（ケース2）、既設堤防への設置を想定した掘削土量の少ないパターン（ケース3）とした。

ドレーン材には粒径30～40mmの碎石を、フィルター材にはジオテキスタイルを用いた。堤体は、細粒分が13%程度の山砂を用いて締固め度80%程度の緩詰めとした。また、堤体内の所定の位置に、マノメータを設置し浸透水の水位を観測した。

外力として、河川水位を想定した外水位を1時間かけて計画高水位相当の2.3mまで上昇させ、続いて1時間あたり15mmの降雨を同時に与えて48時間維持し、その後数日間排水を行うという作業を5回繰り返した。降雨強度は、のり面に降った雨が表面流出せずにはほぼ堤体内に浸透する条件としている。実験後、目詰まりの有無を調査するため、実験模型からフィルター材を採取して透水性

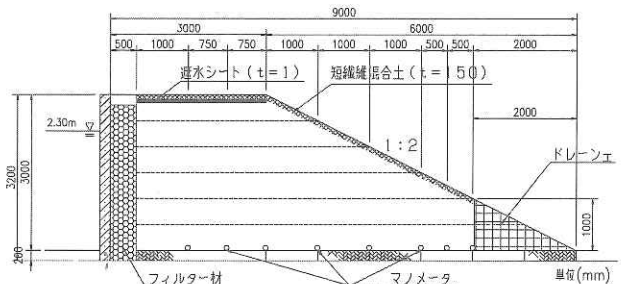


図-1 ドレーン工法に関する模型実験

能試験²⁾を行った。

2.1.3 実験結果

模型実験の結果から、以下の点が明らかになった。

- (1) 図-2より、いずれのケースも水位がほぼ同じ（たとえば、のり尻から3mの位置で1m）であることから、ドレーン工の底面幅が一定の場合、前面（堤体内部側）の角度によらずほぼ同じ排水効果があることが確認された。このため、ドレーン工の形状は、一定の幅を確保した上で現場の状況（施工性）に応じて設定することが可能である。
- (2) いずれのケースも繰り返しの負荷（外水位と降雨、5回）に対して、堤体内水位（図-3）と裏のり尻の排水量（図-4）に変化は見られ

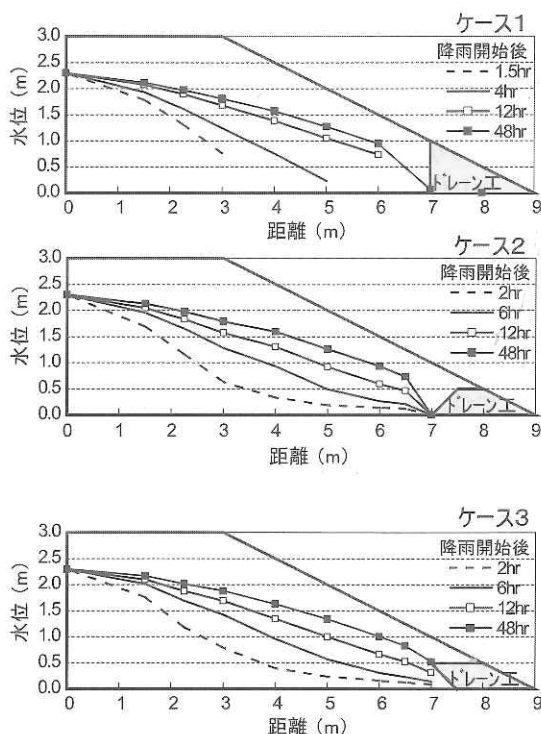


図-2 ドレーン形状の堤体内水位への影響

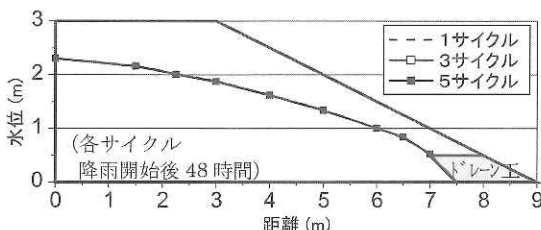


図-3 堤体内水位に対する繰り返し負荷の影響(ケース3)

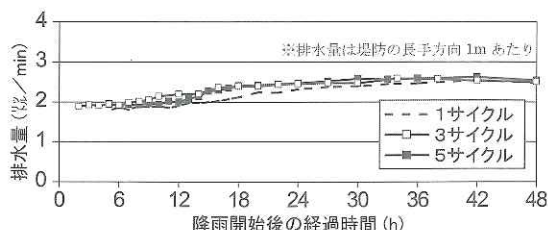


図-4 排水量に対する繰り返し負荷の影響(ケース3)

なかった。このことは、ドレーン工の排水効果が、その形状に関わらず繰り返しの負荷に対して維持されていることを示している。

- (3) フィルター材の実験後の透水性能は、 $1.7 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ 程度で、実験前と比べてほとんど機能低下がみられなかった。よって、今回検討した堤体土質等の条件では、フィルター材の目詰まりは生じなかったといえる。

今回の検討では、繰り返しの外力に対して、パイピングや目詰まりなどの機能低下は見られなかったが、ケース1や2のドレーン工形状ではドレーン工近傍で水位勾配が急になる傾向が見られた。したがって、実務で使用する際には堤体内水位をモニタリング³⁾し、ドレーン工の排水機能を監視することが必要と考えられる。

2.2 短繊維混合被覆土工法

2.2.1 目的

短繊維混合補強土（写真-1）は、ハイグレードソイル⁴⁾として研究開発が進められたもので、耐洗掘性に加え、耐パイピング性が高いといった特徴があり、有効な浸透対策工法の一つになりうると考えられる。そこで、短繊維混合被覆土工法の浸透破壊に対する対策効果を検証する目的で、模型実験を実施した。



写真-1 短繊維混合補強土

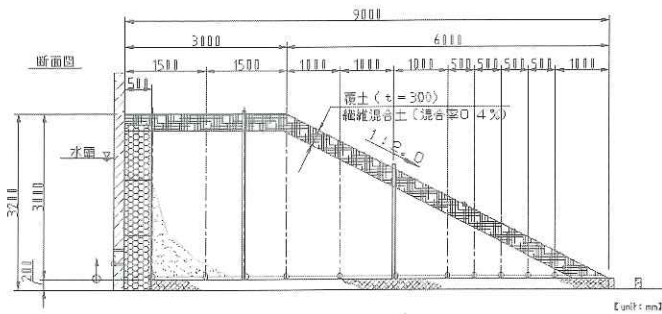


図-5 短繊維混合被覆土工法に関する模型実験



写真-2 短繊維混合被覆土工法の実験状況

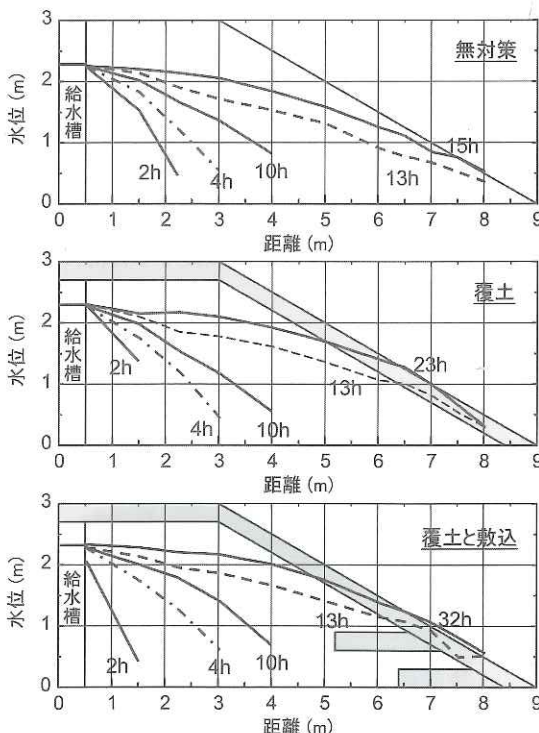


図-6 堤体内水位の経時変化

2.2.2 実験方法

図-5に示すような大型堤防模型を用いて実験を行った。

本実験では、短繊維混合補強土を覆土（覆土厚30cm）として用いたケース、および覆土と堤体内への敷き込みを行ったケースについて、無対策の場合と比較した。

短繊維混合補強土は、川砂に長さ64mm太さ45 μ mの繊維を乾燥重量比で0.4%の割合で、水平ドラムミキサーを用いて攪拌して作製した。堤体は、川砂を用いて締固め度90%以上となるように締固めを行った。短繊維混合補強土による覆土部分についても、同様の締固めを行った。模型の大きさ、与えた外力は、2.1で示した条件と同様である（ただし、外水位、降雨は1回のみ）。

2.2.3 実験結果

模型実験の結果から、以下の点が明らかとなった。

(1) 無対策のケースは、実験開始から4時間程度でのり尻が緩みはじめた。その後、経時的にのり尻から崩壊が進み、15時間後にはのり面全体が崩壊に至った（写真-2）。一方、短繊維混合補強土を用いたケースでは、のり面は降雨の影響をほとんど受けていないことが認められた。

(2) 図-6に示すとおり、実験開始から13時間までは、各ケースとも堤体内水位には顕著な差異が認められず、無対策のケースが崩壊し始めた時点（4h）では、堤体内水位は十分には発達していないことから、のり面崩壊は降雨による影響が大きく、副次的に堤体内水位の影響を受けたものと考えられる。一方、短繊維混合土を用いたケースでは、外力としての水位と降雨により発生した浸透流により変形したが、せん断強度およびねばり強さが増したため、大きな崩壊には至らなかった。

今回の検討から、短繊維混合補強土を用いた堤防強化工法は靱性が高く、降雨や洪水に対して有効な対策であるといえる。

3. 堤防強化工法選定

「河川堤防の構造検討の手引き（以下、「手引き」という）⁵⁾」で示されているように、浸透破壊に対する堤防強化工法にはいくつか種類があるが、堤防内部の土質構造に応じて適用性の高い工

法は異なると考えられる。そこで、堤体と基礎地盤の透水性に着目し、①堤体の透水性が基礎地盤より高い場合、②堤体の透水性が基礎地盤より低い場合、それぞれについて堤防強化工法の適用性を検討した。

3.1 堤体の透水性が基礎地盤より高い場合

3.1.1 目的

堤体の透水係数 k_1 が基礎地盤の透水係数 k_2 より高い($k_1 > k_2$)場合、水が相対的に浸透しやすい堤体を対象とした強化工法の適用性が高いと考えられる。そこで、手引きに示されている断面拡大工法、ドレーン工法、表のり面被覆工法について、堤防強化工法としての適用性を検討する目的で、模型実験を行った。断面拡大工法は、堤体ののり面に土質材料で腹付けをして断面幅を拡大することにより、のり面勾配および堤体内水位の平均的な勾配(平均動水勾配)を緩やかにし、浸透に対する安全性を増加させる効果がある。ドレーン工法の効果は、2.1で記述したとおりである。表のり面被覆工法は、堤体の表のり面を難透水性材料で覆うことにより、河川水の表のりからの浸透を抑制する効果がある。

3.1.2 検討方法

図-7のような堤防模型を用いて、実験を行った。堤体の透水係数 k_1 は $4 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 、基礎地盤の透水係数 k_2 は $2 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ である。

断面拡大工法は、無対策の断面幅5mに対し、7mに拡大する条件とした。のり面勾配は、表のり、裏のりをいずれも1:3にする場合と、表のり1:2、裏のり1:4にする場合の2ケースとした。

ドレーン工法で使用した材料は、2.1と同様の碎石とジオテキスタイルとした。

表のり面被覆工法では、被覆材に塩化ビニールシートと不織布を貼り合わせた遮水シート(厚さ11mm)を使用しており、堤防長手方向に1カ所継ぎ目を設けた。継ぎ目における遮水シートの重ね合わせ幅は0.2mで、接着等の処理は行っていない。

実験では、河川水位を想定した外水位を30分かけて計画高水位相当の0.8mまで上昇させて維持し、続いて1時間あたり15mmの降雨を同時に16時間与えた。

3.1.3 検討結果

実験ケースと、実験および浸透流解析から得られた堤体内水位を表-1に示す。実験および解析の結果、以下の点が明らかとなった。

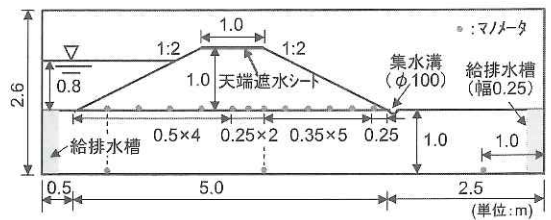
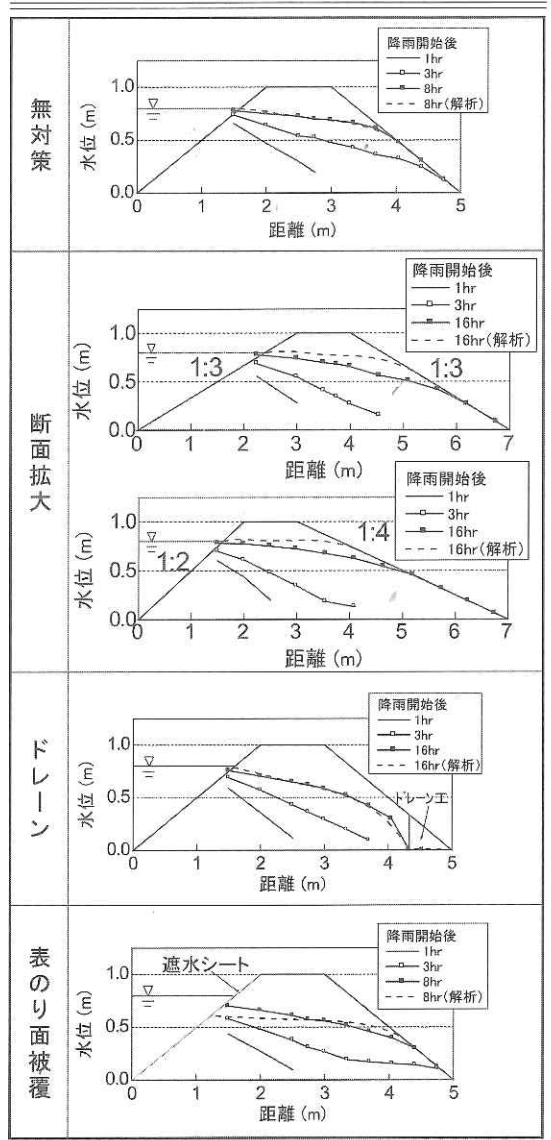


図-7 実験模型断面(無対策)

表-1 実験および解析による堤体内水位
(堤体の透水係数 k_1 > 基礎地盤の透水係数 k_2)



- (1) 堤体の断面を大きくすることにより、無対策の場合と比較して、堤体内水位が裏のり面に達するまでの時間を遅らせる効果があること

がわかった（断面拡大工法）。無対策の場合は降雨開始後3.3時間で、裏のり面の勾配が1:3の場合は8.5時間で裏のり面にすべりが生じ始めた。一方、裏のり面の勾配が1:4の場合は、実験終了時（降雨16時間）までのり面に変状は見られなかった。堤体幅が同じ場合、河積が十分確保できるのであれば、裏のり面の勾配を緩くする方が浸透によるのり面すべりに対してより安全であるといえる。

- (2) 無対策と裏のり面にドレーン工を設置した場合を比較すると、ドレーン工の排水性により、堤体内水位を低下させる効果があることがわかった（ドレーン工法）。実験終了時（降雨16時間）までのり面の変状も見られなかったが、他のケースと比べて裏のり面で計測した排水量が多かったことから、現場においては排水の処理に配慮が必要であるといえる。
- (3) 遮水シートで表のり面を被覆することで、無対策と比較して堤体内水位の上昇速度が減少するとともに、水位を低下させる効果があることが分かった（表のり面被覆工法）。しかしながら、遮水シートのケースでは4.7時間で裏のり面に変状が生じ始めた。表のり面を遮水した場合でも、今回のように透水係数が大きい場合などは、基礎地盤からの回り込みや降雨による堤体内水位の上昇に留意が必要である。
- (4) 浸透流解析から得られた堤体内水位は、実験結果とほぼ一致するか、やや高めに評価（安全側）する傾向にあった。したがって、今回検討した土質条件等では、断面拡大工法、ドレーン工法、表のり面被覆工法に関して、浸透流解析を利用して適用性を比較検討することが可能であるといえる。

3.2 堤体の透水性が基礎地盤より低い場合

3.2.1 目的

堤体の透水係数 k_1 が基礎地盤の透水係数 k_2 より低い（ $k_1 < k_2$ ）場合、水が相対的に浸透しやすい基礎地盤を対象とした強化工法の適用性が高いと考えられる。そこで、川表遮水工法と、川表遮水工法と表のり面被覆工法の組み合わせについて、堤防強化工法としての適用性を検討する目的で、模型実験を行った。川表遮水工法は、表のり面に遮水壁を設置することにより、基礎地盤への浸透水量を低減する効果がある。

3.2.2 検討方法

図-8のような堤防模型を用いて、実験を行った。堤体の透水係数 k_1 は $2 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 、基礎地盤の透水係数 k_2 は $4 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ である。

今回は、遮水壁として止水矢板を使用した。矢板は木製合板（厚さ2.3mm、透水係数 $6 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ 程度）を利用し、基礎地盤の下に敷いた厚さ0.1mのローム層に0.05m貫入させた。与えた外力は、3.1の条件と同じである。

3.2.3 検討結果

実験ケースと、実験および浸透流解析により得られた堤体内水位を表-2に示す。実験および解析の結果、以下の点が明らかとなった。

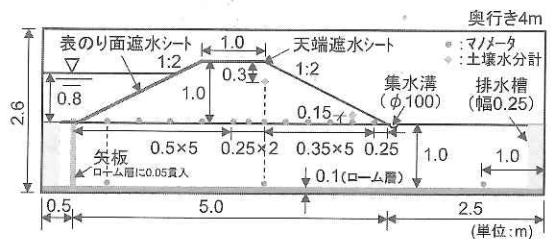
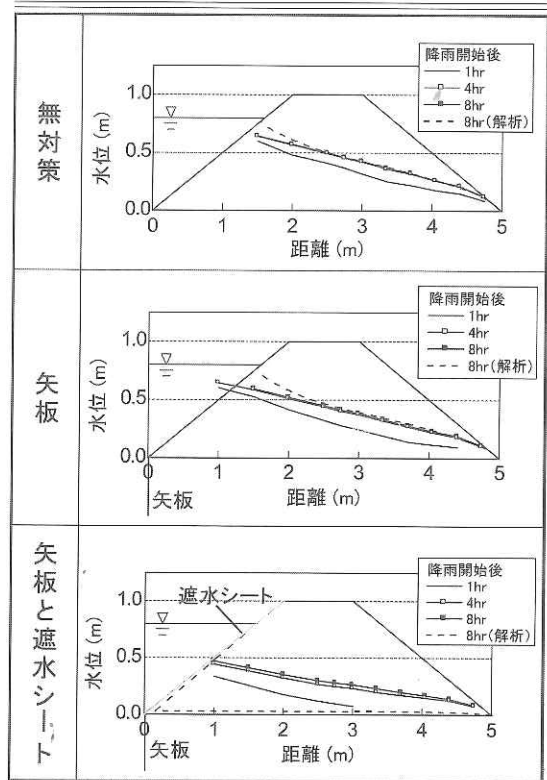


図-8 実験模型断面（矢板と遮水シート）

表-2 実験および解析による堤体内水位
（堤体の透水係数 $k_1 <$ 基礎地盤の透水係数 k_2 ）



- (1) 表-1、2より、無対策の場合、堤体と比べて基礎地盤の透水性が高い方が、低い場合より堤体内水位が下がる傾向にあることがわかった。前者は、基礎地盤からの排水量が多かったことから、河川水や降雨による浸透水が透水性の高い基礎地盤へ流入し、その結果堤体内水位が上がりにくい状態になったと考えられる。
- (2) 基礎地盤内の浸透水の動きを遮断する目的で矢板を設置したところ、無対策と比較して水位を下げる効果は小さく、裏のり尻からの排水量も減らなかった(川表遮水工法)。
- (3) 矢板と表のり面被覆工法を組み合わせたケースでは、堤体内水位が低下した。基礎地盤の透水性が高く、堤体の透水性もある程度以上に高い場合は、基礎地盤と堤体の対策工を組み合わせることにより、堤体内水位を下げる効果が発揮できることがわかった。
- (4) 浸透流解析で得られた堤体内水位は、矢板のみの場合は実験結果とほぼ一致したが、矢板と表のり遮水シートを使用した場合は、実験結果よりかなり低かった。工法を組み合わせる場合の堤体内水位の評価には、今後も検討が必要である。

4. まとめ

河川堤防の浸透破壊に対する強化工法ならびに工法選定に関する実験的検討を行った結果、以下の点が明らかとなった。

①効果的かつ経済的な対策の検討

- ・ドレーン工法は、ドレーン工の形状の影響は受けず、底面幅を確保した上で、現場の状況に応じて形状を設定することが可能である。また、

繰り返しの負荷に対する効果も維持される。

- ・短繊維混合補強土を用いた覆土工法は、堤防強化工法として適用できる可能性がある。

②堤防強化工法選定に関する検討

- ・基礎地盤と比べて堤体の透水性が高い場合、堤体内水位が上昇しやすい傾向にあり、断面拡大工法やドレーン工法などが有効である。
- ・堤体と比べて基礎地盤の透水性が高い場合、河川水や降雨による浸透水が基礎地盤に流入し易い傾向にある。堤体の透水性もある程度以上に高い場合は、基礎地盤のみの対策では、堤体内水位低下に関して有意な効果は得られない。基礎地盤と堤体の対策工を組み合わせることにより、効果が発揮される。

実際の堤防は基礎地盤を含め、内部構造が複雑であり、今後は、これらを考慮した検討を引き続き行う予定としている。

参考文献

- 1) 三木博史、山田哲也、藤井厚企、野口典孝：堤防基礎地盤のパイピング破壊規準に関する考察，土木技術資料，第37巻，第12号，(財)土木研究センター，pp.40-45，1995。
- 2) 木暮敬二、軽部大蔵：新規制定の学会基準案「ジオテキスタイルの垂直方向透水性性能試験方法」および「ジオテキスタイルの面内方向通水性性能試験方法」について，土と基礎，第42巻，第2号，(社)地盤工学会，pp.83-88，1994。
- 3) 国土交通省河川局治水課：河川堤防モニタリング技術ガイドライン(案)，2004。
- 4) 森 啓年、古本一司、大野真希、小橋秀俊：建設発生土リサイクル技術の適用用途拡大と技術向上の取り組み，土木技術資料，第46巻，第1号，(財)土木研究センター，pp.26-31，2004。
- 5) (財)国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き，2002。

古本一司*



国土交通省国土交通政策研究所主任研究官(前 独立行政法人土木研究所材料地盤研究グループ土質チーム主任研究員)
Kazushi FURUMOTO

齋藤由紀子**



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所材料地盤研究グループ土質チーム研究員
Yukiko SAITO

森 啓年***



国土交通省国土技術政策総合研究所企画部国際研究推進室研究官(前 独立行政法人土木研究所つくば中央研究所材料地盤研究グループ土質チーム研究員)
Hiroto MORI

小橋秀俊****



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所材料地盤研究グループ土質チーム上席研究員，工博
Dr. Hidetoshi KOHASHI