

ベントナイト混合土充填マットによる 堤防の質的強化技術(リバーベント工法)の紹介

野地朋和¹・浜井邦彦¹・山田宏¹・鍋嶋靖浩²
・稲元裕二³・溝渕健一郎³・水野正之⁴

¹正会員 株式会社大林組 本社生産技術本部土工技術部 (〒108-8502 東京都港区港南二丁目15-2)

²正会員 旭化成ジオテック株式会社 環境資材事業部 (〒103-0014 東京都中央区蛸殻町一丁目39-5)

³アキュテック株式会社 (〒577-0843 大阪府東大阪市荒川三丁目11-18)

⁴ホーゲン株式会社 (〒476-0001 愛知県東海市南柴田町口ノ割95-6)

国土交通省の直轄河川において浸透に対する堤防の安全性調査が行われ、そのうちの約4割で安全性が不足していると報告されている(平成18年12月現在)。近年、大規模な水害が増加傾向にあり、治水安全度が低い堤防の強化は喫緊の課題である。筆者らは、ベントナイトで充填されたマットを用いて河川堤防の川表側のり面を被覆することで、堤防の浸透破壊を防止できるリバーベント工法を開発した。本文では、工法の概要や性能検証結果、試験施工結果について報告する。

キーワード: 河川堤防, 浸透対策, 多自然型護岸, 洪水, 質的強化, ベントナイト

1. はじめに

近年、地球温暖化に伴う気候変動の影響により各地で過去に例を見ない局地的豪雨が多数記録されている。また、河川堤防近傍での高度な土地利用など我が国特有の国土条件から、ひとたび堤防が決壊すると被害は深刻なものとなる。特に、平成16年の円山川、同21年の佐用川の堤防決壊に代表されるように、人的・物的被害を伴う大規模な水害がここ数年増加傾向にある。今後も同様の水害発生が危惧されており、効果的な治水対策が求められている。

これらを背景に、筆者らは、ベントナイトで充填されたマットを用いて河川堤防の川表側のり面を被覆することで、河川水位上昇に伴う堤防の浸透破壊を防止する技術(リバーベント工法)を開発した。本文は、リバーベント工法の概要、性能検証結果、試験施工結果について報告するものである。

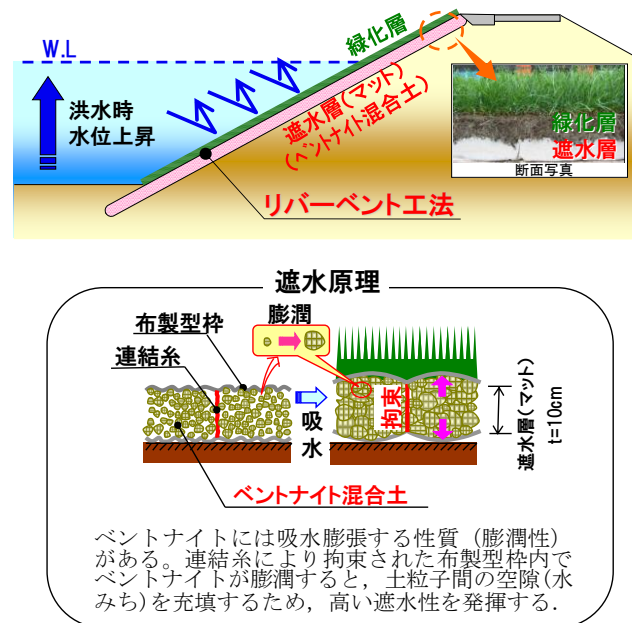


図-1 リバーベント工法の標準断面および遮水原理

2. リバーベント工法の概要

図-1 に、リバーベント工法の標準断面および遮水原理を示す。本工法は、遮水層(マット)と緑化層の2層からなり、遮水層は布製型枠内に充填されたベントナイト混合土にて形成する。これはベントナイトの吸水膨潤作用を利用したものであり、布製

型枠の上面と下面が連結系により結束されているため、ベントナイト混合土自体の体積膨張が抑えられ、ベントナイトが粒子間の空隙(水みち)を閉塞することにより遮水性能を発揮するものである。

本工法の主な特徴を以下に示す。

- 遮水シートと同等の遮水性能を有し、堤体への河川水の浸透を抑制できる。
- 緑化層は、布製型枠に緊結した緑化補助材（植生ネット）を介して遮水層に連結されているため、従来の緑化系護岸に比べて耐流速性能を向上できる。また、万が一洪水により緑化層が流出した場合でも容易に再緑化が可能である。
- 遮水層は土質材料にて形成されているため、堤体の沈下などの変形に対する追従性を有している。また、万が一漂流木などの衝撃により遮水層に水みちが発生しても、ベントナイトの再膨潤作用により自己修復が期待できるため、メンテナンスフリーで長期にわたり遮水性能を維持できる。
- 敷設した布製型枠内に気乾状態のベントナイト混合土を空気圧送充填し、吹付により緑化するだけなので、従来工法（遮水シート＋連節ブロック＋覆土＋植生）に比べて大幅な工期短縮が可能である。

3. 性能検証

(1) 遮水性能の検証

リバーベント工法は、従来の堤防強化工法に用いられる遮水シート（ $t=1\text{mm}$ ）と同等の遮水性能（透水係数 $k=1\times 10^{-8}\text{cm/sec}$ ）を有することを目標としている。目標とする透水係数 k を、本工法の遮水層の厚さ 10cm に換算すると、 $k=1\times 10^{-6}\text{cm/sec}$ と算定できる¹⁾。また、本工法の遮水層に用いる充填材料のコストダウンを目的として、ベントナイトに砂質土を加えた混合材料とすることを標準とした。この混合材料の配合比率を決定するため、配合比率をパラメータとした室内透水試験を実施した。なお、材料のバラツキを考慮し、本工法における透水係数の目標値は、上記より1オーダー厳しい $k=1\times 10^{-7}\text{cm/sec}$ と設定した。

① 試験条件

表-1 に室内透水試験の試験条件を示す。

表-1 試験条件

項目		条件
試験法		変水位法 (JIS A 1218)
材料	ベントナイト	粒状ベントナイト ($D\approx 1\text{mm}$)
	砂	単粒砂 ($D\leq 2\text{mm}$)
ベントナイト配合量		30, 50, 70, 100%
供試体作成密度		最小密度相当 (緩詰め)

② 試験結果

ベントナイト配合量と透水係数の関係を図-2 に、透水試験状況を図-3 に示す。ベントナイト配合量が 30%以上あれば、所定の遮水性能を満足できると考え、本工法の標準配合量を 30%とした。

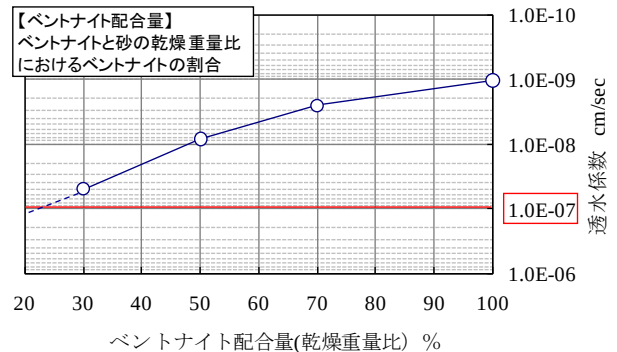


図-2 ベントナイト配合量と透水係数の関係



図-3 透水試験状況

(2) 耐流速性能の検証

a) 安定検討

一般的な護岸の安定検討手法²⁾に基づいて、遮水層（マット）の滑動に対する安定検討を実施した。

① 検討条件

表-2に護岸の構造モデル一覧を示す。のり勾配が 1:1.5より緩いため、流体力による滑動に対する照査を行う。また、遮水層（マット）同士は面ファスナーによって接合されているため、群体として取り扱う「滑動－群体」モデルとして検討する。

表-2 護岸の構造モデル

No.	破壊要因	破壊形態	設置状態	構造モデル
①	流体力	滑動	単体	「滑動－単体」モデル
②	流体力	滑動	群体	「滑動－群体」モデル
③	流体力	めくれ	単体	「めくれ」モデル
④	流体力	掃流	一体性弱い	「掃流－一体性が弱い」モデル
⑤	流体力	掃流	一体性強い	「掃流－一体性が強い」モデル
⑥	流体力	掃流	籠詰め	「掃流－籠詰め」モデル
⑦	土圧・水圧	滑動、転倒	—	「積み」モデル
⑧	土圧・水圧	滑動、転倒	—	「擁壁」モデル
⑨	土圧・水圧	水平変位	—	「矢板」モデル

安定検討式を式-(a)に示す。遮水層に作用する揚力 L および抗力 D による滑動力（左辺）と摩擦抵抗

力（右辺）が、式(a)を満足すれば、遮水層は滑動に対し安全である（図-4）。

$$\sqrt{D^2 + (W_w \cdot \sin \theta)^2} \leq \mu(W_w \cdot \cos \theta - L) \quad (a)$$

μ : 摩擦係数

W_w : 遮水層の水中重量

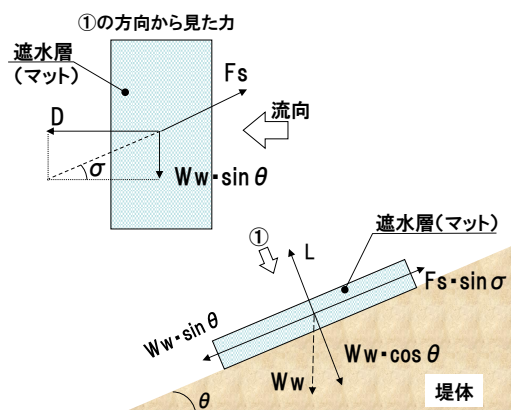


図-4 力のつり合いモデル

上記の手法に基づく安定検討において、表-3のとおり検討条件を設定した。

表-3 検討条件

項目	諸元	備考
検討モデル	「滑動-群体」	表-2に示す構造モデル。
設計水深	10m	利根川の中～下流域（セグメント2）をモデルとした。
代表流速	5m/sec	従来工法（連節ブロック）の設計流速に準拠 ³⁾ した。

② 検討結果

設計水深10m、のり勾配1:1.0～1:5.0の場合における、代表流速1～6m/secでの安全率を図-5に示す。

「河川堤防設計指針」⁴⁾で規定されているのり勾配である1:3.0より緩い勾配において、理論上、連節ブロックと同等の耐流速性能があることが分かる。

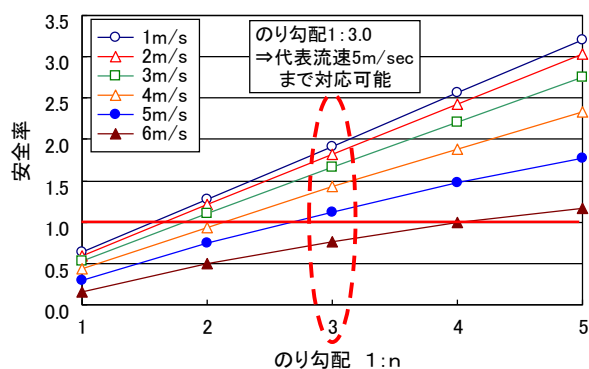


図-5 のり勾配と安全率の関係

b) 水理実験

前述の性能検証結果を実証するため、下記の要領にて水理実験を実施した。

① 実験方法および条件

水理実験の状況を図-6に示す。水槽（水路長9.0m、幅0.3m）の中に、リバーベント工法の標準的な断面構造（遮水層の厚さ10cm、緑化層の厚さ5cm）の供試体（長さ1.0m、幅0.3m）を3体並べ、流速を増加させながら流水し、遮水層の安定性および侵食状況を観察した。

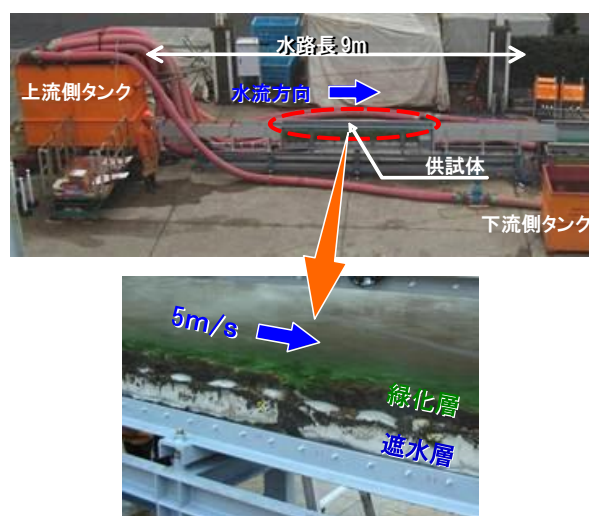


図-6 実物大マットを用いた水理実験状況

実験ケースを表-4に示す。

表-4 実験ケース

ケース	ベントナイト配合量(%)	緑化層
Case1	50	張芝 (根が良好に活着した状態を模擬)
Case2	50	植生基材 (根が活着する前の初期の状態を模擬)

充填材料のベントナイト配合量は、所定の遮水性能を確保できる50%とした。遮水層の重量は、ベントナイト配合量が大きくなるにつれて軽くなるので、標準配合としている30%の場合に比べて、安全側の実験条件となっている。

また、緑化層は、張芝と植生基材の2ケースを設定した。これは、施工後長期間経過し根が遮水層に良好に活着した状態と、施工直後の根が活着していない状態をそれぞれ模擬するためである。種子入りの植生基材は、ある程度生育した状態の張芝に比べて根を絡ませるまでに時間を要するため、後者を模

擬することを目的として採用した。両ケースとも約1ヶ月間生育させ、芝丈が約15cmとなったものを使用した。張芝の根の活着状況を図-7に示す。根が遮水層と連結した植生ネットに良好に活着している。



図-7 根の活着状況 (Case1張芝, 実験後)

② 実験結果

図-8にCase2の水深10cmの流速と時間の関係を示す。各々の流速で30分間維持し、最大約5.2m/secまで上昇させた。図-9に各時間における流速の深度分布を示す。芝の抵抗により緑化面に近づくほど流速が低下している。

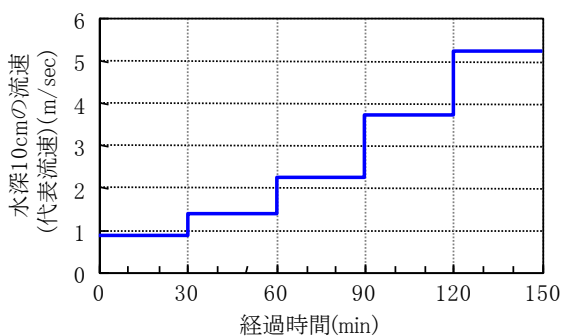


図-8 流速の経時変化 (Case2植生基材)

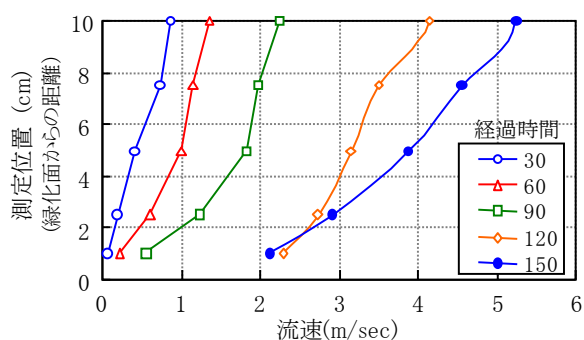


図-9 流速の深度分布 (Case2植生基材)

観察結果より、Case1では、流速4m/secで連続して3時間流したが、図-10に示すように緑化層・遮水層ともに変化が見られず安定した状態であった。

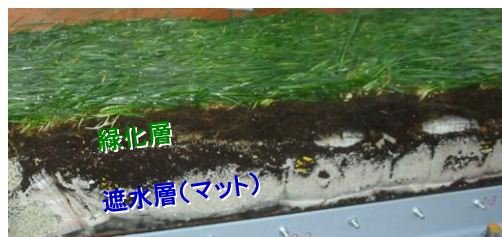


図-10 実験後のマットの状況 (Case1張芝)

最大流速5.2m/secまで上昇させたCase2では、流速4m/secまで緑化層は健全であったが、流速4m/secを上回ると緑化層の土（基材）が流出した。一方、遮水層は流速5m/secを約1時間与えても変化は見られず安定した状態であった。

以上より、緑化層は、根が遮水層に活着していない施工直後においては、流速4m/secを上回る水流に対して、不安定になる可能性がある。しかしながら、遮水層自体は、流速5m/secの水流に対しても安定を保持しており、本実験にて理論上の遮水層の耐流速性能（対応流速5m/sec）を実証できたと考える。

4. 試験施工

本工法の実用化に際し、施工性や品質（遮水性能）、植生の永続性の確認を目的として、実物大の斜面を用いた試験施工を実施した。

(1) 試験条件

a) 勾配

「河川堤防設計指針」より、「堤防のり面は表のり、裏のりともに、原則としてのり勾配が3割より緩い勾配とし、一枚のりの台形断面として設定することから、当該のり勾配を1:3.0とした。

b) 主要資機材

① 布製型枠

本工法の遮水層に使用する布製型枠は、ファブリフォームマット工法⁵⁾（流動性コンクリートまたはモルタルを注入するコンクリート体成形法）に使用されるものと同様品（図-11, NF100型）を標準としている。素材はポリエステルおよびポリアラミド高強度合繊維である（表-5）。

●ノーフィルター(NF)マット



上下二層の繊維をドロップステッチ状に織り、一層の部分がなくした遮水型マットです。
NF50: 上下層は緻密に結ばれ、モルタル圧入後は量表状の平滑な盤面を形成します。
NF100・NF150: ドロップステッチの個所を部分的にまとめ仕上り後の盤面は起伏のある格子模様を形成します。

図-11 布製型枠のイメージ

表-5 素材特性

項目	単位	特性	測定法
引張強さ	N/3cm	1470×1470以上	JIS L 1096
伸び率	%	25×25以下	

試験施工に使用した布製型枠の仕様は図-12のとおりである。

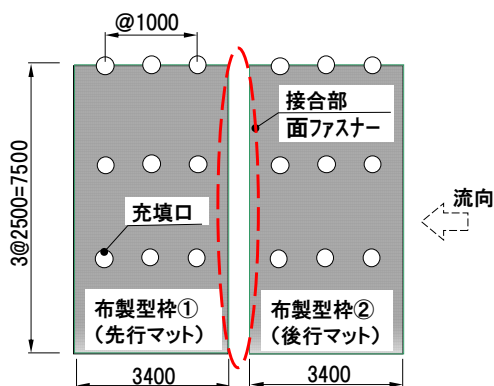


図-12 布製型枠 (マット) 模式図

ベントナイト膨潤後の平均層厚は約10cmとなる。布製型枠の端部にはそれぞれ面ファスナーが施されており、全長にわたり接合する。材料充填口のピッチは、事前の施工性確認試験の結果から縦2.5m, 横1.0mとした。

② 充填材料

試験施工に使用した充填材料の基本物性は表-6のとおりである。ベントナイト混合土の配合比率は、所定の透水係数を満足できるベントナイト配合量である30%とした。これは、水理実験で適用した50%の場合に比べ、遮水層の重量が増すので安定上有利となる。

表-6 充填材料の基本物性

項目	ベントナイト	砂
単体	使用材料	粒状ベントナイト
	最大粒径(mm)	3.5
	自然含水比(%)	5.0
	膨潤力(ml/2g)	13.0
混合	ベントナイト配合量(%)	30
	最小乾燥密度(g/cm³)	1.112

③ 充填装置

図-13に充填装置の概要を示す。ホッパーに投入された材料を送風機から送られる空気によって、充填地点まで搬送する。

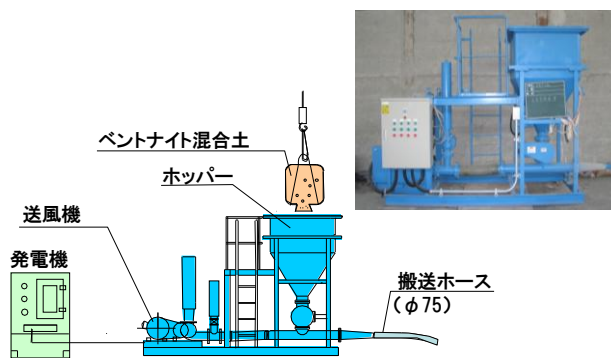


図-13 充填装置模式図, 写真

c) 施工手順

以下に示す手順にて、試験施工を実施した。

①ベントナイト混合土製造工

所定の量のベントナイトと砂をアジテータ車に投入し、高速攪拌後、フレコンバックに排出する。

②布製型枠敷設工 (図-14)

布製型枠を広げ、上端部を引張り支持する。

③圧送充填工 (図-14)

下部より充填口の高さごとに充填する。

④植生工

充填完了後、植生基材吹付 (t=3cm) を実施する。

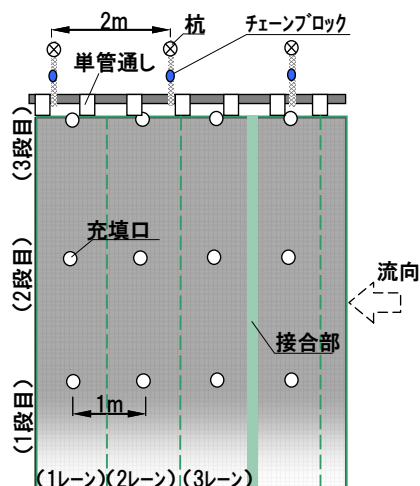


図-14 布製型枠 (マット) 正面図

(2) 試験結果

a) 施工性

施工フロー写真を図-15に示す。試験施工を通じて、施工性に問題の無いことを確認できた。

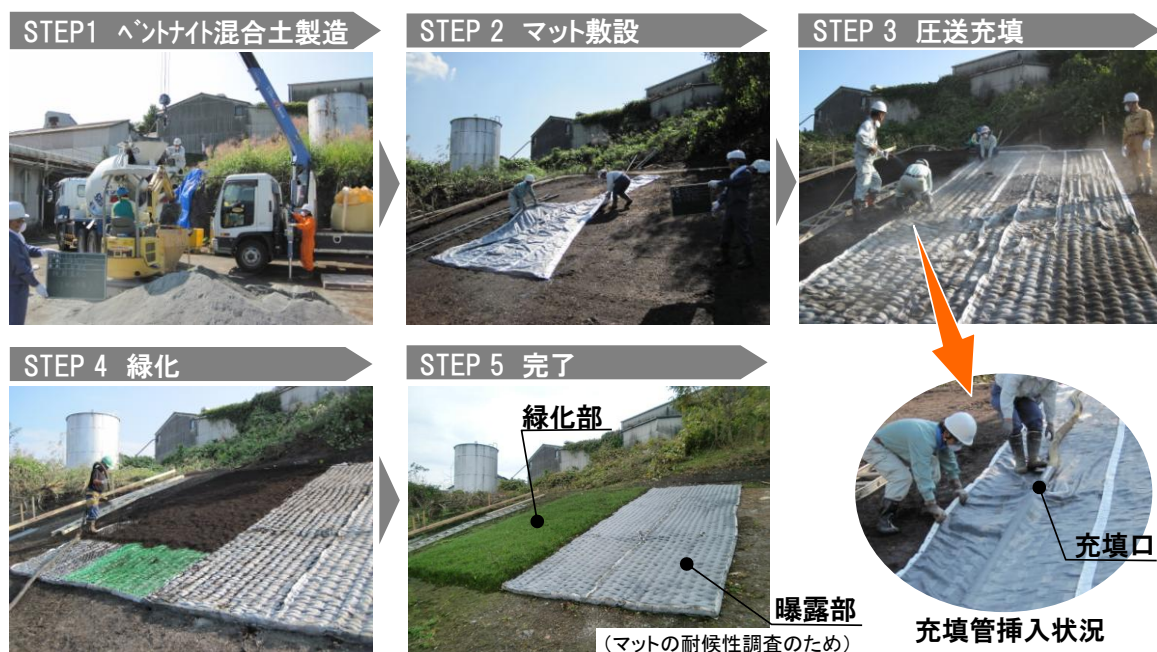


図-15 施工フロー

b) 遮水性

実施工における本工法の遮水性能を確認するため、遮水層よりブロックサンプリングを行い、現場透水試験を実施した。

なお、サンプリングの実施時期は、試験施工マットと同条件で作成し、同様の降雨作用を受けたミニチュアマットを用いた膨張量の測定結果から（図-16）、膨張が概ね収束した時点（施工後約2か月）とした（図-17）。



図-16 ミニチュアマットによる膨張量確認状況



図-17 サンプリング状況

サンプリング試料から、布製型枠の連結糸を含ま

ない供試体と含んだ供試体をそれぞれ採取した。遮水層を貫く連結糸が、水みちとなることが懸念されたが、表-7に示すとおり、連結糸の有無に関わらず、目標の透水係数を満足する結果となった。

表-7 透水試験結果

Case	供試体	目標透水係数 (cm/s)	試験値 (cm/s)
1	一般部(連結糸無し)	1.0×10^{-6}	1.8×10^{-8}
2	連結糸を含む部分	以下	1.1×10^{-8}

c) 植生の永続性

試験施工後、目視による植生の生育状況の経過観察を実施し、永続性を確認した。図-15の完了写真（STEP5）は、施工後約半年が経過した時点の状況である。散水等の維持管理はしていないが、植生が良好に生育している。

5. 環境配慮型技術としての評価

近年の社会的情勢より、環境に配慮したローコストな技術が求められ、開発が盛んに行われている。本工法において考えられる利点を以下に述べる。

- 構造系護岸の従来工法（連節ブロック等）に比べて、クレーン等の大型機械が不要であり、コンクリート使用量も低減できることから CO₂ 排出量を大幅に削減できる。
- 従来の浸透破壊防止工法（遮水シート＋連節ブ

- ロック＋覆土＋植生）に比べて、コストを約 10%削減できる。また、工期を約 30%短縮できるため、工事中の環境への負荷を低減できる。
- 吹付により容易に緑化できるため、多自然型護岸の整備が可能となる。また、生育基盤材のみを吹付け自生種の侵入を待つ、もしくは、現地すき取り土を生育基盤材として有効利用する吹付工法の併用による緑化も可能であり、その土地本来の河川環境を保全できる。

6. おわりに

堤防の浸透に対する要対策延長は全国の国土交通省直轄河川の約 4 割 (2,396km) に及び⁶⁾ (平成 18 年 12 月現在)、安全度が特に低くかつ被災履歴のある区間を中心に、平成 19 年度より緊急的に対策が実施⁷⁾ されている。利根川水系では首都圏氾濫区域堤防強化対策事業として、主に断面拡大工法による対策が講じられている。表のり面被覆工法である本工法は、堤防の改変を最小限に抑えながら質的強

化が可能となるため、用地上の制約を受ける箇所への適用が期待できる。

今後、本工法の実河川への適用に向けて、フィールド提供型技術募集への応募などを通じて河川管理者へのピーアールに努めていきたい。

参考文献

- 1) 財団法人国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き，p. 59，2002. 7
- 2) 財団法人国土技術研究センター：改定 護岸の力学設計法，pp. 61-81，2007. 11
- 3) 建設省河川局：美しい山河を守る災害復旧基本方針，p. 36，2006. 6
- 4) 国土交通省河川局：河川堤防設計指針，p. 4，2007. 3
- 5) 旭化成ジオテック株式会社：ファブリフォーム技術資料，2010. 9
- 6) 国土交通省河川局：河川堤防の点検状況及び点検を受けた堤防強化について(報道発表資料)，2007. 3
- 7) 国土交通省河川局：河川堤防の浸透に対する安全性確保のために今後 3 ヶ年で対策を実施する予定箇所について(報道発表資料)，2007. 7