

連続繊維補強土の風波による耐侵食特性について
THE EROSION-PROOF CHARACTERISTIC OF THE CONTINUATION FIBER
REINFORCED SOIL BY WIND WAVE

堀江直樹¹・関谷 明²
Naoki HORIE and Akira SEKIYA

¹ 正会員 日特建設株式会社 技術本部 (〒104-0044 東京都中央区明石町 13-18)
² 正会員 建設技術研究所 水理室 (〒300-2651 茨城県つくば市鬼ヶ窪 1047-27)

There is a method of construction that protects revetment by using the continuation fiber reinforced soil. This method of construction is easy to build up compared with the conventional concrete structure. Moreover, it excels in environment or the scene. For this reason, application of this type of method to revetment of a dam reservoir or a river is expected. The external force by wind wave acts on revetment in a dam reservoir. In order to use this method of construction for revetment of a dam reservoir or a lake, it is necessary to grasp the erosion-proof characteristic by wind wave. In this research, we investigated the characteristics of the erosion-proof ability to the wind wave acting on the continuation fiber reinforcement ground. And, we showed the issues to develop this method of construction.

The part at which erosion occurs notably in revetment effective was clarified by a result of the examination. It became clear that erosion seriously affects the state of the surface of revetment. Where natural ground is reinforced by only the fiber, it turned out that the control effect of erosion is not acquired.

Key Words : Wind wave, continuation fiber reinforced soil, erosion-proof characteristic

1. はじめに

砂質土とポリエステル繊維の混合土からなる連続繊維補強土を用いた法面保護工は、盛土・切土部の景観保全工法として、道路法面やトンネル坑口をはじめ多岐に利用されている。現在、この工法は、従来コンクリート構造物を多く用いていた工法に代わり、施工が容易であること、植生環境づくりや景観に優れているためダムの湛水面や河川護岸への適用が期待されている。

しかし、ダム湖等で用いる場合、陸域の場合と違い、風による波浪が堤体や護岸に外力として作用する。

従って、連続繊維補強土を用いた法面保護工法をダム湖法面に適用する場合、この風波に対する耐侵食特性を把握しておく必要がある。

本研究では、連続繊維補強土の風波に対する耐侵食

性を調査し、施工後の形状予測資料とすること、また設計に際しての問題点と課題を把握することを目的とした。

2. 試験概要

(1) 試験内容

本研究では、連続繊維補強土を造成した供試体を造波水路の終端に設置し、そこに波浪を与え、侵食の状況を調査した。

対象とした供試体は、表-2.1 に示す①連続繊維補強土のみの場合、②連続繊維補強土表面にネットを敷設した場合、③連続繊維補強土表面に牧草を繁茂させた場合、④連続繊維補強土表面にネットを敷設し、かつ牧草を繁茂させた場合の4ケースとした。

水理条件は、湛水深 0.6m、最大波高 0.12m、周期

表-2.1 試験検討ケース

実験ケース	供試体の条件			外力として与えた風波の条件		
	連続繊維補強土	基盤材を押えるネット	植生	波浪の形状	最大波高	周期
1	○	×	×	修正Bretschneider・光易型スペクトラム	0.12m	1秒
2	○	○	×			
3	○	×	○			
4	○	○	○			

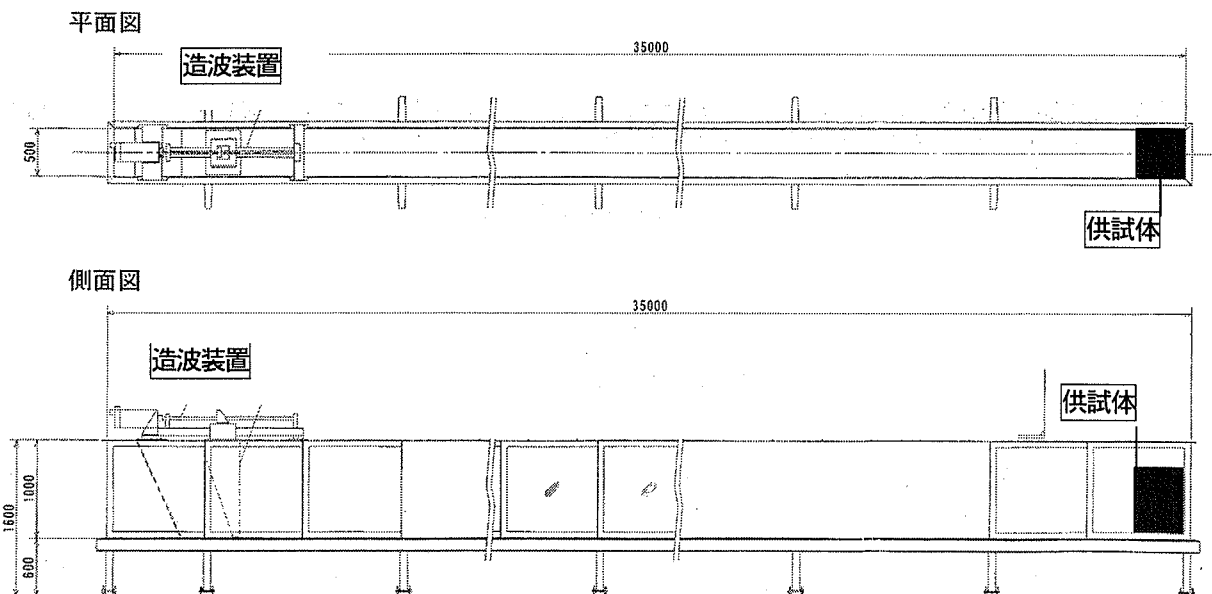


図-2.1 試験装置

1 秒とし、波形は、Bretschneider・光易型スペクトラムの不規則波とした。

(2) 試験装置

試験装置は、図-2.1 に示すように幅 0.5m、長さ 35 m の二次元水路の上流端に最大波高 25 cm (周期 3sec)、発生周期 0.5～6.0sec の造波装置が敷設してあるものである。

また、造波装置は、港湾で標準となる修正 Bretschneider・光易型スペクトラムの不規則波を発生させられる装置である。

3. 連続繊維補強土の特性と供試体

連続繊維補強土とは、砂質土とポリエステル連続繊維の混合土で 1m³ 当りに 3.3kg の連続した繊維を均質に方向性を持たせて混合したものである。砂質土の規格と連続繊維の規格を表-4.1、4.2 に示す。

連続繊維補強土の特徴は、繊維により砂質土の相対移動を防止できること、繊維補強土が外力を受けた場合、砂質土と繊維との摩擦により繊維が引張補強材として寄与すること、つまり擬似粘着力を持った強い土構造物化することがあげられる。

一般的な施工では、吹付工法により法面に厚さ 20cm 以上で築造することとしている。また、表面に植生工を施すものとしている。

以上より、本試験では、上記条件の繊維補強土を図-3.1 に示すボックスに 20cm 以上で敷設したものを供試体の基本形状とした。また、比較ケースとして表層にネット、植生を施したものを供試体とした。

表-3.1 砂質土の規格

項 目	規 格	備 考
最大粒径	20mm以下	φ45以下の吹付施工では5mm以下が望ましい
50%粒径 (D ₅₀)	0.2～1.0mm	
均等係数 (D ₆₀ /D ₁₀)	2以上	
75 μ m 以下含有率	20%以下	φ45以下の吹付施工では7～13%が望ましい

表-3.2 連続繊維の規格

項 目	規 格	備 考
材 質	ポリエステル (マルチフィラメント)	回収ペットボトルの再生品
繊維の太さ	167±6T	T: デシテックス
引張強度	35.3mN/T以上	
伸び率	40%以下	

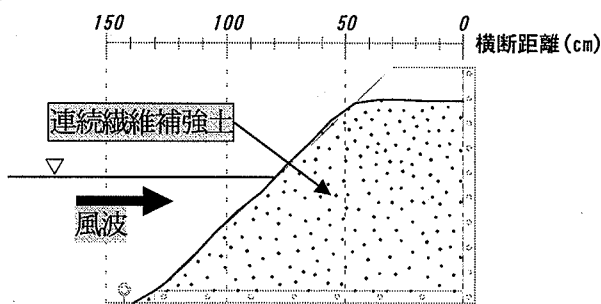


図-3.1 供試体の縦断形状

4. 入力する風波条件の設定

風による波浪の高さと周期は、(式 4.1)、(式 4.2) に示す S. M. B 法の改良式とした Wilson IV型^{1), 2)}により求められる。

$$gH/U^2 = 0.30 \left\{ 1 - \left\{ 1 + 0.004 \left(gF/U^2 \right)^{1/2} \right\}^{-2} \right\} \quad (4.1)$$

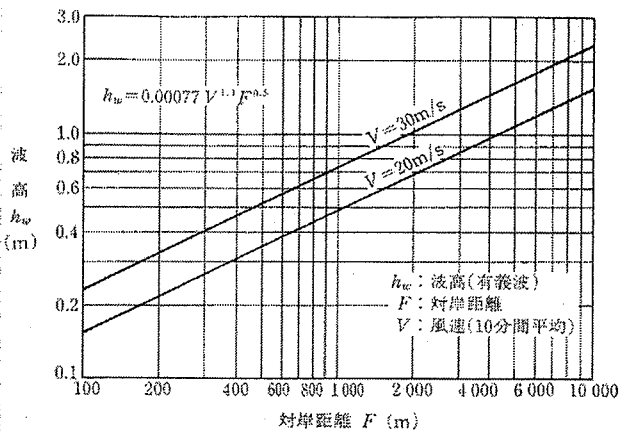


図-4.1 ダム湖における波高と対岸距離の関係²⁾

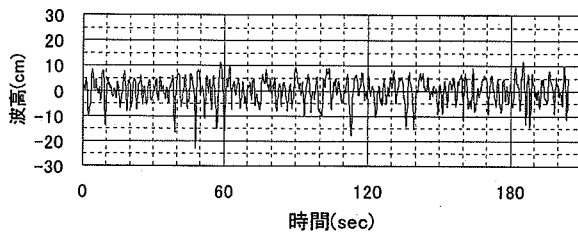


図-4.2 入力波形

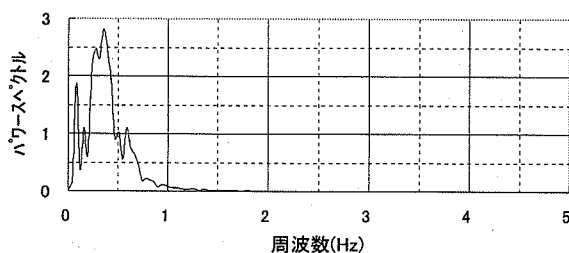


図-4.3 入力波形のスペクトル

$$gT/2\pi U = 1.37 \left\{ 1 - \left\{ 1 + 0.008 \left(gF/U^2 \right)^{1/3} \right\}^{-5} \right\} \quad (4.2)$$

H : 波高 (m) ; T : 周期 (sec)

F : フェッチの長さ (m) ; U : 風速 (m/s)

一般にダム堤体の非越流部高を設計する際は、より安全性を考え、風波の高さは(式4.1)、(式4.2)を簡略化した(式4.3)を用い、風速は、20, 30m/sを用いる³⁾ 場合が多い。(図-4.1³⁾ 参照)

$$h_w = 0.00077V \cdot F^{0.5} \quad (4.3)$$

h_w : 波高 (m) ; V : 10分間平均風速

F : 対岸までの距離 (m)

本試験は、平常時の法面維持状況の調査を目的とするため、国内での平均的な風速を対象とした。

日本の年間を通した平均風速は、ほぼ平地部で風速 5m/s 以下 (2.3m/s 程度)、山間部では、6~10m/s 程度を示す⁴⁾。

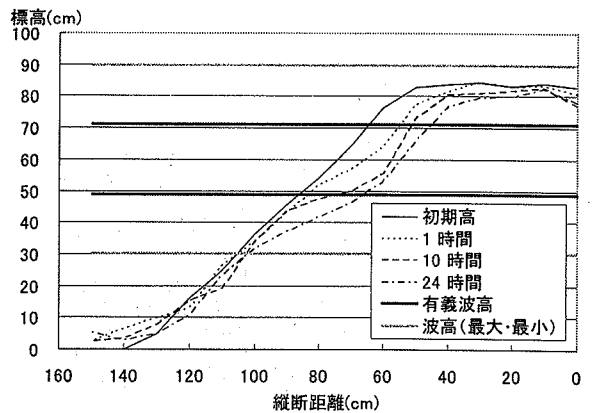
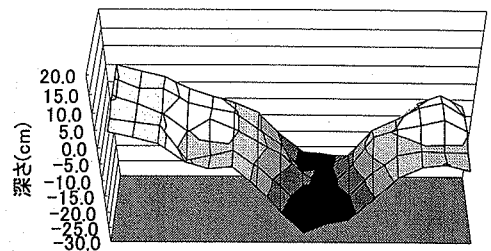


図-5.1 法面の時間変化図

ケース1 (24時間)



ケース1 (24時間)

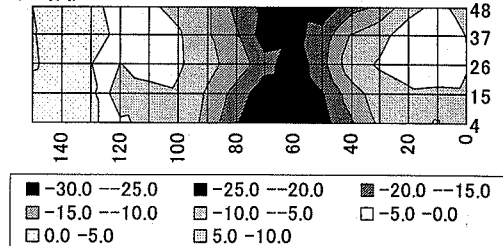


図-5.2 24時間通水後の法面コンター
(初期河床高を 0.0m とした場合)

対象となるダム湖により若干の差異はあるが、ダム設置場所程度であれば 6~8m/s 程度を示すエリアが多い。

国内の大ダムを堰高順にみると黒部ダム (堤高 186 m, 堤頂長 492m) を筆頭に信濃川の高瀬ダム (堤高 176m, 堤頂長 362m)、徳山ダム、奈良俣ダム、奥只見ダムと順位が付けられる⁵⁾。ここで、上位 100 位までのダムにおける堤頂長の平均を計算すると約 370m となる。

上記より、風速 8m/s、フェッチの長さ 370m として (式 4.3) より算出した最大波高 0.12m, 周期 1 秒を試験条件の波高, 周期とした。

一般に一定の風速の風が吹き続けるとき、波浪スペクトラムの形状は安定した構造を示す⁶⁾とされている。

その形状は、観測結果から推論した標準型の(式 4.4)、修正 Bretschneider・光易型スペクトラム⁷⁾で算出される。

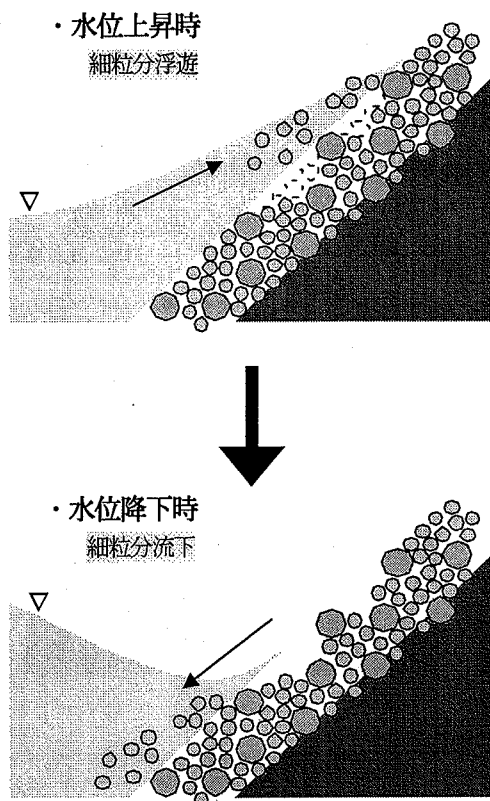


図-5.3 表層侵食状況

$$S(f) = 0.432 \left(H / g T^2 \right)^2 g^2 f^{-5} \exp \left(-0.675 T^{-4} f^{-4} \right) \quad (4.4)$$

S : 波スペクトラム ($\text{m}^2 \text{s}$) ; f : 周波数 (Hz)

これより、試験で与える風波の形状は、この修正 Bretschneider・光型型スペクトラムの不規則波を与えるものとした。

実際に与えた波形の値は、図-4.2, 4.3 に示すとおりである。

5. 試験結果

(1) 連続繊維補強土のみの場合 (ケース1)

試験結果として図-5.1に供試体表面の時間変化図、通水前と通水 24 時間後の河床コンター図を図-5.2 に示す。

これより、風波発生開始と同時に湛水位置 0.6m 地点を中心に表層の基盤材が浮遊、流出する様子が観察され、その後、基盤材下の細粒分の流出が発生した。侵食箇所は、湛水深 0.6m より上方で顕著となることが確認できた。

具体的には、通水 5 分後に 0.6m 地点で約 5cm 程度侵食され、1 時間で約 10cm, 6 時間で約 15cm, 24

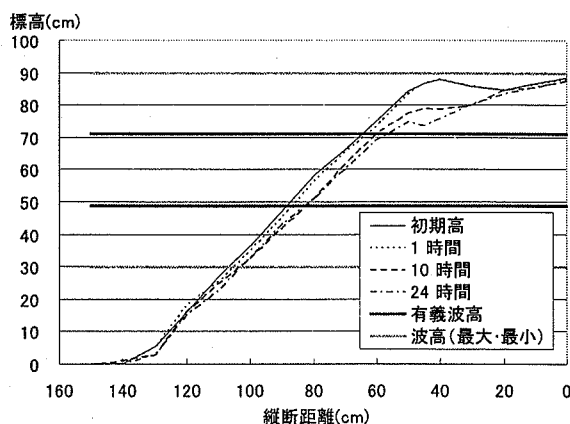
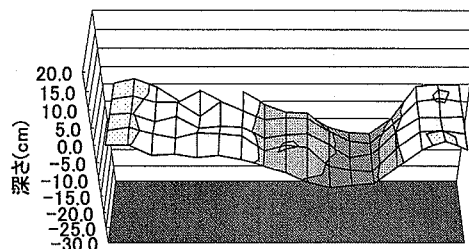


図-5.4 法面の時間変化図

ケース2 (24時間)



ケース2 (24時間)

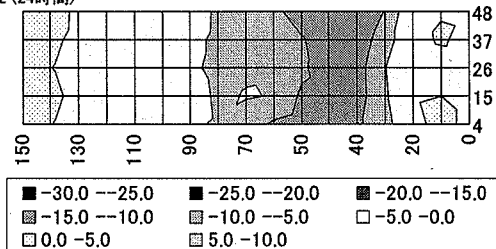


図-5.5 24時間通水後の法面コンター
(初期河床高を 0.0m とした場合)

時間で約 20cm の侵食が、全体でみると 0.4m 地点より上方では通水後 24 時間で約 20cm の侵食が確認できた。この際、浪の振動に追随し、露出した繊維が水中で漂う様子も観察された。

侵食は、図-5.3 に示すように波が上昇する際に、供試体表面の細粒分が吸出され、浮遊し、波が降下する際、浮遊した細粒分が流下、最後に残留した粗粒分が、自重にて転がり落ち安定するといった順で進行する。

以上より、連続繊維補強度のみでは、表層基盤が早い時間に破壊され、時間とともに侵食は進行することが解かった。

また、侵食は湛水面位置を中心に特に波高の到達する上方で顕著となることが確認できた。

従って、波浪に対する侵食防止は、法面表層部の強化が必要不可欠となると考えられた。また、強化する範囲は、湛水面を中心に上方をより強化する必要があると考えられた。

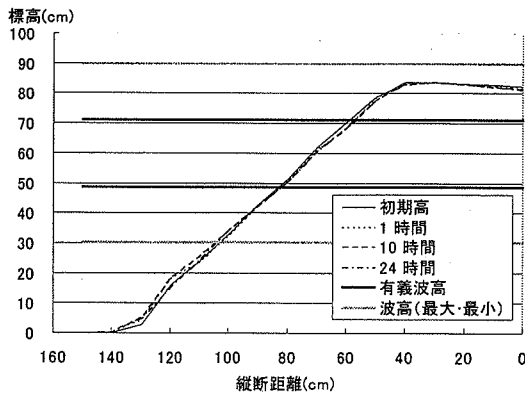


図-5. 6 法面の時間変化図

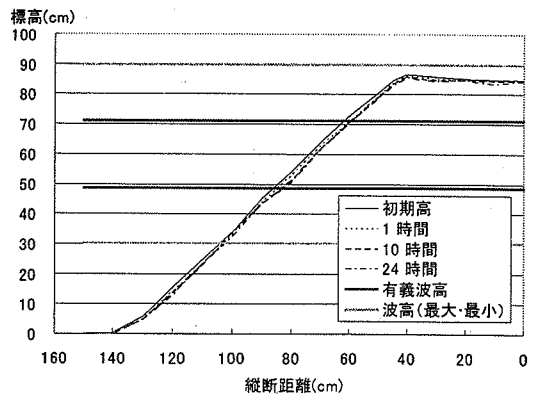
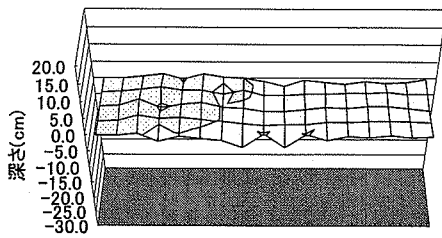


図-5. 8 法面の時間変化図

ケース3 (24時間)



ケース3 (24時間)

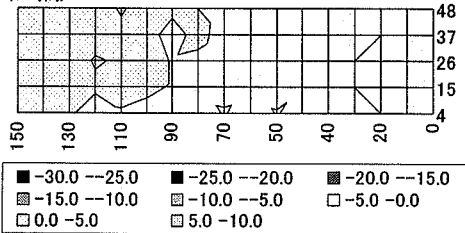
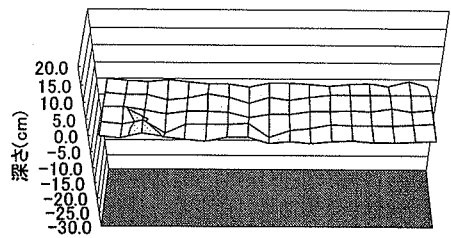


図-5. 7 24時間通水後の法面コンター
(初期河床高を 0. 0mとした場合)

ケース4 (24時間)



ケース4 (24時間)

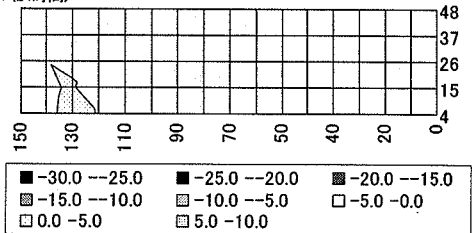


図-5. 9 24時間通水後の法面コンター
(初期河床高を 0. 0mとした場合)

(2) 連続繊維補強土表面にネットを敷設した場合 (ケース2)

試験結果として図-5. 4に供試体表面の時間変化図, 通水前と通水 24 時間後の河床コンター図を図-5. 5に示す。

これより, このケース2は, ケース1同様, 風波発生開始と同時に表層基盤材が浮遊, 流出する様子がみられ, 2 時間で約 5cm の侵食が進行したが, その後, 進行が止まり, 24 時間後においても 6~7cm 程度となることが確認できた。

つまり, 基盤材は流出するが, その下の連続繊維補強土はネットにより防止できたと考えられる。

侵食範囲は, ケース1同様, 湛水位置より上方が顕著となる傾向を示す。ケース1に比べ, 湛水深より深い地点 (0. 6m以下) での侵食範囲は縮小され, 特に 0. 5mより深い地点では初期河床を維持できていた。

以上より, 表層にネット等を敷設したことによる侵食の進行抑制効果はあるものと考えられた。

しかし, ネットのみでは, 湛水深位置より上方の基盤材を維持するには至っていないものと考えられ

た。

(3) 連続繊維補強土表面に牧草を繁茂させた場合 (ケース3)

試験結果として図-5. 6に供試体表面の時間変化図, 通水前と通水 24 時間後の河床コンター図を図-5. 7に示す。

これより, このケース3では, 風波発生開始と同時に植生が倒伏し, 供試体表層を覆い, 表層基盤材の流出, 細粒分の吸出し現象は発生しないことが確認できた。侵食深も 24 時間後で 1~2cm 程度であった。

つまり, 植生が倒伏し, 表層土層が覆われるため, 流水の浸透, 流出はあるが, 土砂の吸出しが抑制されるためと考えられる。

(4) 連続繊維補強土表面にネットを敷設し, かつ牧草を繁茂させた場合 (ケース4)

試験結果として図-5. 6に供試体表面の時間変化図, 通水前と通水 24 時間後の河床コンター図を図-5. 7に示す。

これより, このケース4では, ケース3同様, 風波発生開始と同時に供試体表面を植生が覆うかたち

となり、表層基盤材の流出、細粒分の吸出し現象は発生しないことが確認された。

侵食深も 24 時間後で 1～2 cm 程度であることが確認できた。

つまり、植生の倒伏とネットにより基盤材の流失抑制効果により土砂の吸出しが防止されるためと考えられた。

以上より、連続繊維補強度をダム湖法面等に敷設した場合、植生さえ完全に繁茂すれば波浪の影響は受けづらく、法面が維持されるものと考えられた。

6. 実施事例

実際にダム湖に適用した事例として写真-6.1 に施工約 1 ヶ月後の状況、写真-6.2 に施工完了後 2 年 4 ヶ月経過した状況の写真を示す。

これより、試験結果同様、連続繊維補強土による法面の保護と植生が繁茂することで風波による侵食がみられないことが確認された。

また、草本植物が表面を覆い、木本植物が立体的な植生景観をつくりあげ、ダム湖岸の自然な植生景観に近づきつつあることも確認できた。

7. おわりに

本研究により明らかになった結果を整理すると次のとおりである。

- ①法面侵食箇所は、湛水深位置を中心に波高の到達する上方で顕著となることが確認できた。
- ②連続繊維補強度のみ敷設した場合、通水後数分で表層の土砂が流出し、時間とともに侵食は進行する傾向がみられた。また、表層にネットを敷設することで表層の土砂流出が防止でき、侵食の進行抑制効果は高まることが確認できた。
- ③これに対し、表層に牧草を繁茂させた場合は、通水と同時に植生が倒伏し、表層土層を覆うため、流水の浸透、流出はあるが、土砂の吸出しが防止され、法面保護効果が極めて高いことが確認できた。
- ④従って、波浪に対する侵食を防止するには i) 法面表層部の強化が必要不可欠となること、ii) 強化する範囲は、湛水深位置を中心に上方をより強化する必要があること、iii) 植生による波浪防止効果は高いことが確認できた。
- ⑤現地の施工事例からも植生が繁茂した場合、風波により侵食防止効果がみられることが明らかになった。



写真-6.1 1ヶ月目の植生状況



写真-6.2 2年4ヶ月目の植生状況

以上より、ダム湖等の法面保護に連続繊維補強土を用いる場合、そのみでは、風波による侵食を防止できないが、植生が表層に繁茂することで防止効果が高まることが明確になった。

課題として、以下の3点について検討を行うことで、より安全性が高く、かつ自然環境に配慮した工法の構築ができるものと考えられる。

- ①植生による侵食防止を期待する場合、施工後、表層に植生が繁茂するまでの期間の法面保護方法の検討が必要となる。
- ②また、水面変動により、水中に没した植生自身の維持方法の検討が必要となる。
- ③植生に依存しない、表層保護方法の検討も必要となる。

参考文献

- 1) 首藤信夫:“海の波の水理”, 技報堂出版, pp. 111-119, 1981.
- 2) バーナード・ル・メオーテ/堀川清司訳:“応用流体力学入門”, 東京大学出版会, pp. 239-255, 1979.
- 3) (社)日本河川協会編:“改訂新版建設省河川砂防技術基準(案)同解説・設計編Ⅰ”, 山海堂, pp. 148-149, 1997.
- 4) m. Yoshida:“JAPAN WIND TURBINE MAP 風強調査平成6年3月版”, インターネット.
- 5) (財)日本ダム協会:“ダム年鑑”, 鹿島出版会, pp. 682-687, 1981.
- 6) 運輸省港湾技術研究所報告:“ブロックの安定数算定ための試験方法について”, 海岸ブロック講習会資料, 2000.
- 7) 佐藤昭二, 合田良實:“海岸・港湾”, コロナ社, pp. 90-92, 1980.

(2005. 4. 7 受付)