

排水機能を持つ堤防裏法尻保護工 に関する実験的検討

Experimental Examinations on the Toe Protection Works of Back Slope
against Overflow from Levee

奥田浩司¹・高橋迪夫²・山崎 僚³・小澤徳雄⁴・三浦 剛⁵

Hiroshi OKUTA, Michio TAKAHASHI, Ryo YAMAZAKI, Tokuo OZAWA and Takeshi MIURA

¹学生会員 日本大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原 1 番地)

²フェロー会員 博士(工学) 日本大学教授 工学部土木工学科 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原 1 番地)

³正会員 福島県いわき市役所 (〒970-8686 福島県いわき市平字梅本 21 番地)

⁴小澤工業株式会社 (〒960-1241 福島県福島市松川町字町端 54 番地)

⁵社団法人 東北建設協会 福島支所 (〒960-8153 福島県福島市黒岩字八郎内 5-2)

It is important to reinforce the toe of levee back slope against failure by the overtopping flow due to a flood exceeding the designed level. In order to control the running water from the back slope and to remove the inflowing water without delay, we proposed the toe protection works consisting of several units of drain ditch.

In this study, the flow pattern and the flow velocity have been investigated on the proposed toe protection works by using two model levees. As a result, it was considered that the behavior of flow on the toe protection works depends on the width of an unit of drain ditch. In the case of the drain ditch unit with the relative width of 2.15 and with holes, the flow velocity was markedly decreased. Such the effect was attributed to the dispersion of the flow. Furthermore, it was recognized that there was a difference in the flow pattern between two types of the drain ditches with a projection and without it.

Key Words : Model test, Toe protection of back slope, Energy dissipater, Overflow from levee

1. はじめに

近年の都市化の急速な進展に伴い、氾濫源においても土地が高度に利用され、その結果、大都市だけでなく地方中核都市においても計画規模を上回る出水による氾濫時のダメージポテンシャルはますます増大している。また、都市域においては堤防の間際まで宅地化が進んでおり、堤防用地の制約から、これ以上の河道拡幅や堤防天端のかさ上げ、堤防断面の拡大が困難になってきている。一方で、過去に甚大な被害を与えてきた集中豪雨は今後も十分起こり得る状況にあり、近年の気象変化により、その発生頻度が増加することが危惧されている。こうした背景から堤防強化を図る場合、超過洪水対策に基づき、本来越水を考慮していない堤防に対する暫定措置として、若干の耐越流性を持たせ、できる限り既設堤防の用地内で補強することが必要になってくると考えられる。

堤防を越流した流れは裏法面を崩壊させ、堤体自身の力学的安定を失わせるため破堤の直接的な原因となる。また、裏法の崩壊は 1) 裏法面の浸食によるもの、2) 裏法尻の洗掘によるものの 2 種類の形態が考えられる^{1) - 4)}。1) の裏法面の浸食を防止・軽減するための方策として、表面に設置する裏法保護工^{5)・6)}があるが、この裏法保護工が耐越水機能を十分に発揮するためには、越流水に対して法尻が十分な強度を保つことが重要となる。この問題に対しては、従来から堤内側にあまりスペースをとらず、かつ法尻及び堤内地の洗掘の影響が裏法面に及ばないような法尻保護工に関する検討がなされてきた^{5)・7)・8)}。しかしながら、裏法尻の保護と併せて堤内地まで流れ込んだ越流水の処理方法について検討した事例は見受けられない。都市化、宅地化の進んだ堤内地側への影響を考慮した場合、裏法尻保護工には越流水を堤内地側に氾濫させることなく、堤防法線に沿って排水できる排水路としての機能が求められるであろう。

著者らは、堤防裏法尻保護工として、1)裏法保護工の末端を押さえることで越流水による洗掘を防止すると共に、堤内地側の土地利用の制約から、できるだけ短い流下距離で越流水の流速を抑えるような減勢工としての機能を持つ、2)越流水を速やかに排水するために法尻保護工自体が堤防法線に沿った堤内排水路としての役目を持つ、3)経済的にも安価である、の3つの機能に着目して、法尻保護工全体が数個の減勢工のユニットからなる構造を提案した^{9), 10)}。本報では、これらの機能を持った法尻保護工の最適形状に関して、法面の被覆状況、減勢工の形状・寸法、減勢工壁面透過孔の有無、減勢工下流側壁面上部突起の有無等を系統的に変化させて実験的に検討する。

2. 実験の概要

実験は、水路幅0.5m、水路長3.5m、水路高1.0mの長方形断面開水路の下流部に、堤高0.6m、裏法勾配2割の堤体模型を設置して行った。本報では裏法尻保護工に注目した実験を行うためにアクリル製堤体を用い、保護工への侵入速度の相違による流速減衰効果の変化を検討するために、堤体の表面には、まき土の吹き付け(以下、裸地堤という)、及び人工芝による植生(以下、植生堤という)を施した。実験装置の概要を図-1に示す。法尻保護工は、減勢工ユニットの高さ k を10.0cmの一定として、図-2に示すようにユニットの幅 λ を変化させた。透過壁は図-3に示すように減勢工壁面に透過孔を千鳥状に設けたものを1枚から4枚まで変化させて比較した。また、下流側壁面上部の突起の形状は図-4に示すように、一辺が0.5cmと1.0cmの2種類の直角二等辺三角柱状のものを用いた。これらの法尻保護工を用いて表-1に示す実験条件により、流速の減衰効果及び排水性の面から法尻保護工の最適形状について、流況観察、水面形、流速データをもとに検討した。流速の測定にはプロペラ(ϕ 3mm)流速計を用いた。

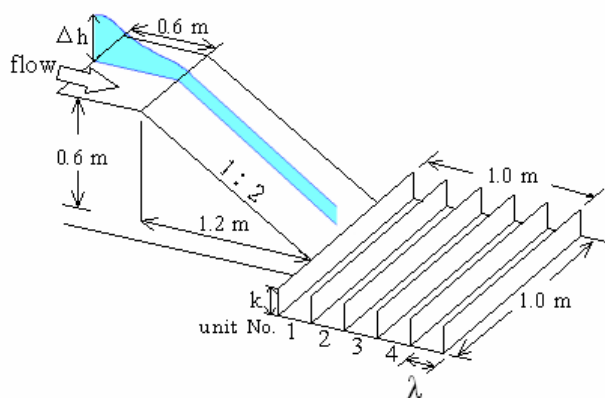


図-1 堤体及び法尻保護工

なお、本報における流れは、とくに流入部でかなりの空気連行が認められるが、本プロペラ流速計は発光部と受光部の間隔1mmを赤外線を当てることによってプロペラの回転数をカウントする構造であるので空気連行による誤差は小さいものと考えられる。また、 Δh は天端上流端の越流水深、Froude数 $Fr=U/\sqrt{gh}$ は図-2に示すように裏法面の法尻から上流10cmの位置における値である。ここに、 h 及び U はその位置における水深、及び断面平均流速である。

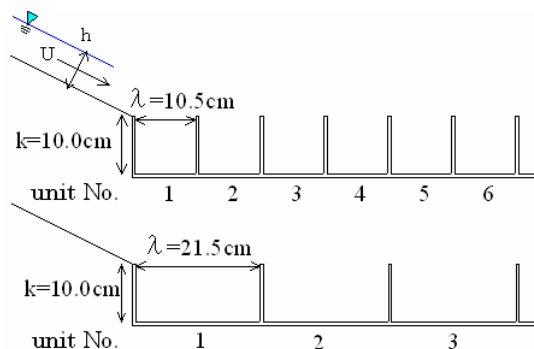


図-2 法尻保護工の側面図

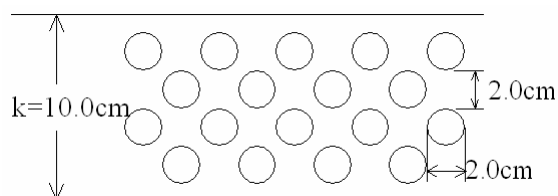


図-3 透過壁の形状

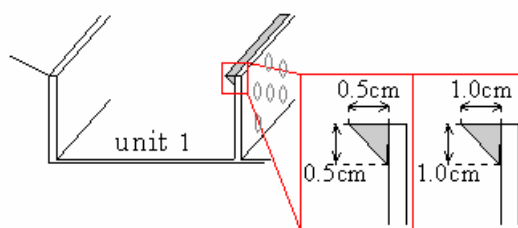


図-4 突起の形状

表-1 実験条件

法面の被覆状況	法尻保護工形状			越流水深 Δh (cm)	限界水深 h_c (cm)	越流量 Q (l/s)	Froude数 $u/\sqrt{gh}$
	λ (cm)	壁面形式	突起 有/無				
裸地堤	10.5	不透過	○ ○	3.00	1.99	4.40	4.8
			○ ○	6.00	4.33	14.12	5.4
			○ ○	8.00	5.74	21.53	6.3
		透過	○ ○	3.00	1.99	4.40	4.8
			○ ○	6.00	4.33	14.12	5.4
			○ ○	8.00	5.74	21.53	6.3
	21.5	不透過	○ ○	3.00	1.99	4.40	4.8
			○ ○	6.00	4.33	14.12	5.4
			○ ○	8.00	5.74	21.53	6.3
		透過	○ ○	3.00	1.99	4.40	4.8
			○ ○	6.00	4.33	14.12	5.4
			○ ○	8.00	5.74	21.53	6.3
植生堤	10.5	不透過	○ ○	3.00	1.39	2.56	1.3
			○ ○	6.00	3.55	10.47	2.8
			○ ○	8.00	5.04	17.73	3.7
		透過	○ ○	3.00	1.39	2.56	1.3
			○ ○	6.00	3.55	10.47	2.8
			○ ○	8.00	5.04	17.73	3.7
	21.5	不透過	○ ○	3.00	1.39	2.56	1.3
			○ ○	6.00	3.55	10.47	2.8
			○ ○	8.00	5.04	17.73	3.7
		透過	○ ○	3.00	1.39	2.56	1.3
			○ ○	6.00	3.55	10.47	2.8
			○ ○	8.00	5.04	17.73	3.7

3. 実験結果及び考察

(1) 越流水深及び減勢工ユニット幅の相違による流況の変化と流速減衰状況

a) 流況の変化

写真-1 は、裸地堤における越流水深 Δh 及び減勢工ユニット幅 λ の相違による流況の変化を示す。相対ユニット幅 $\lambda/k=1.05$ の場合、 $\Delta h=3.00\text{cm}$ ではある程度減勢工として機能するが、 $\Delta h=6.00\text{cm}$ ではユニット1の壁面上端を滑るように水が跳ねており、また、流れの飛散がひどく、減勢工としての機能がかなり低下しているものと思われる。 $\Delta h=8.00\text{cm}$ では流れの飛散がさらに激しくなり、また排水性も著しく低下していることがわかる。一方、 $\lambda/k=2.15$ においては、 $\Delta h=3.00, 6.00, 8.00\text{cm}$ のいずれの流れ対してもユニット1の下流側壁面上での水流の跳ねが抑えられており、 $\lambda/k=1.05$ に比べて減勢工としてより効果的に機能していることがうかがわれる。

b) 最大流速の流下に伴う減衰状況

図-5 は、裸地堤の $\lambda/k=1.05$ と $\lambda/k=2.15$ の減勢工における最大流速 $U_{\max}$ の流下方向減衰状況を示す。ただし、 V_0 は法尻保護工始端($l/k=0.10$)における最大流速、 l は減勢工ユニット1の上流側壁面を基準とした流下距離である。この図より、 $\lambda/k=1.05$ に比べて $\lambda/k=2.15$ の減勢工の方が最大流速の流下に伴う減衰は速やかであり、この点からも $\lambda/k=2.15$ の方が、減勢工としてより効果的に機能していることが分かる。

(2) 透過壁による減勢効果

次に、減勢機能をより高めるために、減勢工壁面に透過孔を設け、この透過壁の枚数を変化させて透過壁による流速減勢効果を最大流速と水深方向流速分布をもとに検討する。

a) 最大流速の流下に伴う減衰状況

図-6,7 は、裸地堤と植生堤の $\lambda/k=1.05$ における最大流速 $U_{\max}$ の流下方向減衰状況を示す。これらの図より、裸地堤、植生堤いずれにおいても、相対流下距離 l/k が1以下、すなわちユニット1内では、孔のない不透壁と孔のある透過壁はほぼ同様な減衰傾向を示すが、それより下流側においては透過孔の効果が明瞭に現れ、 l/k が2では、不透壁で $U_{\max}/V_0=0.6$ 程度の減衰に対して透過壁では $U_{\max}/V_0=0.2\sim0.4$ 程度まで減衰しており、不透壁に比べて透過壁の方が最大流速の流下に伴う減衰がより速やかに進行することが分かる。これは、b)で述べる透過孔による水流の分散、整流効果と減勢効果によるものと考えられる。また、透過壁の枚数による減衰効果の違いをみると、1枚に比べて2枚の方が若干減衰効果が大きいように思われるが、2枚以上においては、枚数の効果に明瞭な差異は認めにくい。

$\Delta h=3.00\text{cm}$



$\lambda/k=1.05$



$\lambda/k=2.15$

$\Delta h=6.00\text{cm}$



$\lambda/k=1.05$



$\lambda/k=2.15$

$\Delta h=8.00\text{cm}$



$\lambda/k=1.05$



$\lambda/k=2.15$

写真-1 越流水深及び減勢工ユニット幅の相違による流況の変化(不透壁、突起無し)

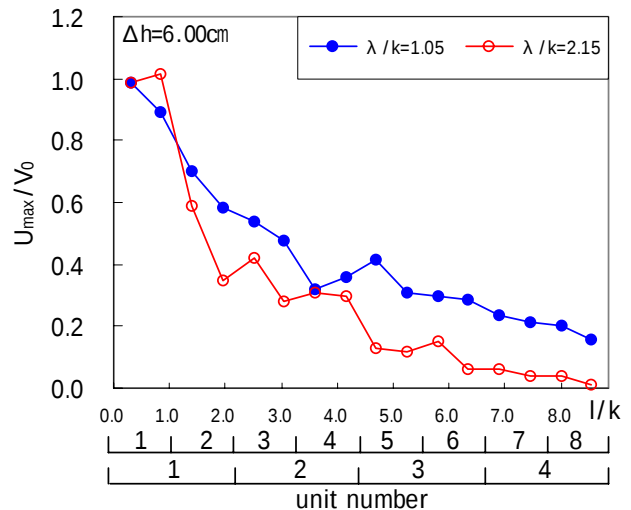


図-5 ユニット幅の相違による最大流速減衰状況の変化(不透壁)

b) 水深方向流速分布の流下に伴う減衰状況

図-8,9 は、裸地堤の $\lambda/k=1.05$ と $\lambda/k=2.15$ における水深方向流速分布の流下に伴う減衰状況を示す。ただし、 v は減勢工上端を基準とした水深方向 y (上向きを正)における流速である。

これらの図より、透過壁を通過した後の、 $\lambda/k=1.05$ では $l/k=1.40$ より下流側、 $\lambda/k=2.15$ では $l/k=2.50$ より

下流側の結果においては、水流の分散、整流効果と減勢効果によって不透過壁に比べて透過壁の流速のピークの値が減衰し、また、ピークの発生位置も減勢工内にあることが分かる。

なお、 $\lambda/k=2.15$ の $l/k=1.40$ では、むしろ不透過壁よりも透過壁の最大流速がやや大きな値をとることが認められるが、これは、 $\lambda/k=2.15$ では、この地点は1枚目の透過壁上流側に位置していることと、透過孔を通過する流れが発生していることによって壁面による流速の減衰効果が若干小さくなることによるものと考えられる。

一方、 $\lambda/k=1.05$ と $\lambda/k=2.15$ を比較すると、 $l/k=2.50$ においては、2枚の透過壁通過後の $\lambda/k=1.05$ に比べて1枚の透過壁通過後の $\lambda/k=2.15$ の方が流速の減衰がやや劣っていることがみられる。しかしながら、法尻保護工の最適形状の決定に際しては、図-10の減勢工ユニット幅の相違による水面形の変化にみられるように、 $\lambda/k=2.15$ に比べて $\lambda/k=1.05$ の最高水位が大幅に高くなること、また、これに伴って壁面にかかる水圧がかなり大きくなることが予測されること、さらに、本研究の減勢工の主要な機能である排水性においては $\lambda/k=2.15$ の方がかなり優れていること等を総合的に勘案する必要がある。

以上の検討より、とくに堤内用地に制約がある場合には、本報で対象とした流れ及び減勢工の寸法の範囲においては、減勢工壁面に透過孔を設けることによって、 $\lambda/k=1.05$ であればユニット4で、 $\lambda/k=2.15$ であればユニット2で減勢工の設置を打ち切ったとしても流速は十分に減衰しており、減勢工を溢水した水流は、かなり無害化されているものと考えられる。

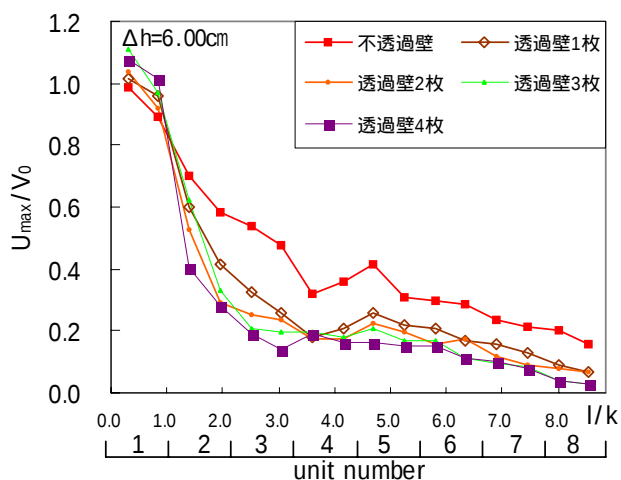


図-6 裸地堤における最大流速減衰状況

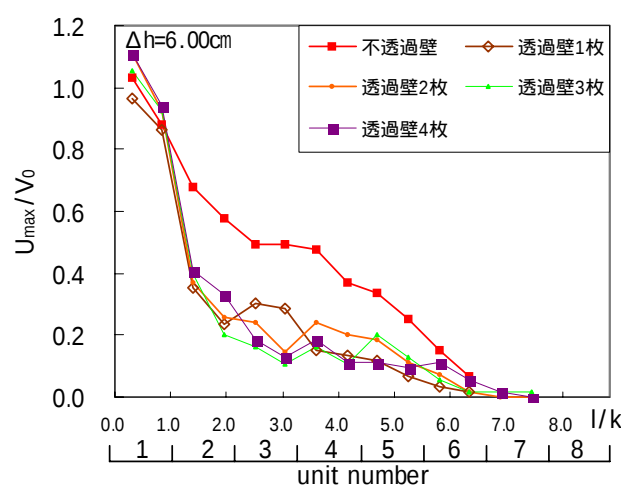


図-7 植生堤における最大流速減衰状況

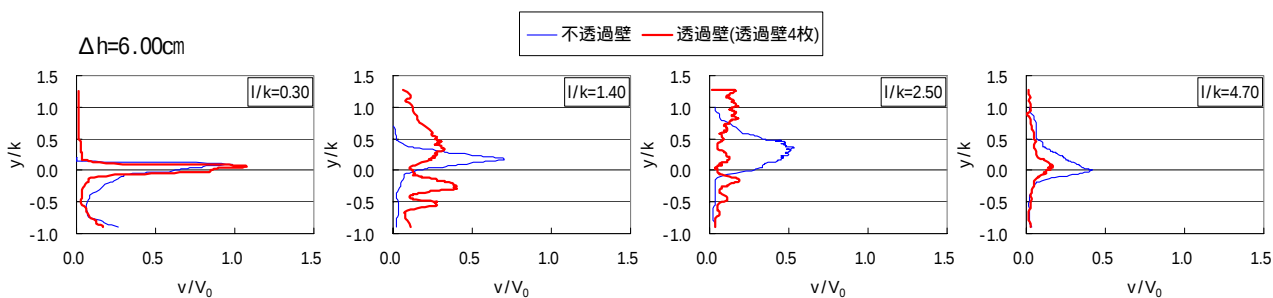


図-8 $\lambda/k=1.05$ における水深方向流速分布の流下に伴う減衰状況(裸地堤)

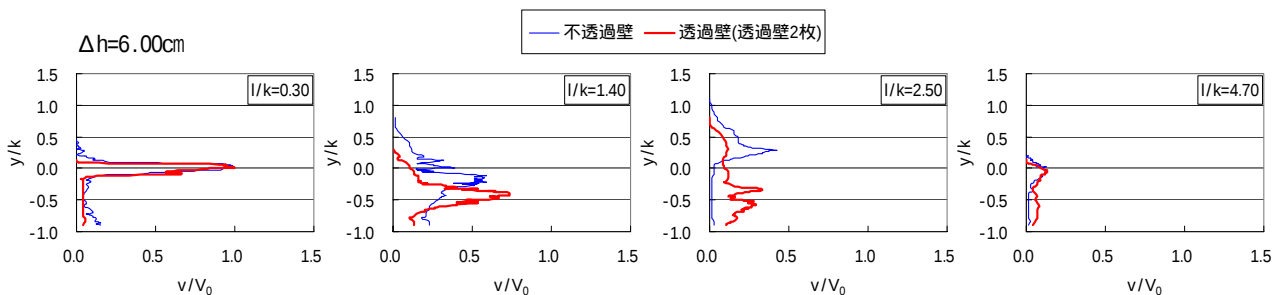


図-9 $\lambda/k=2.15$ における水深方向流速分布の流下に伴う減衰状況(裸地堤)

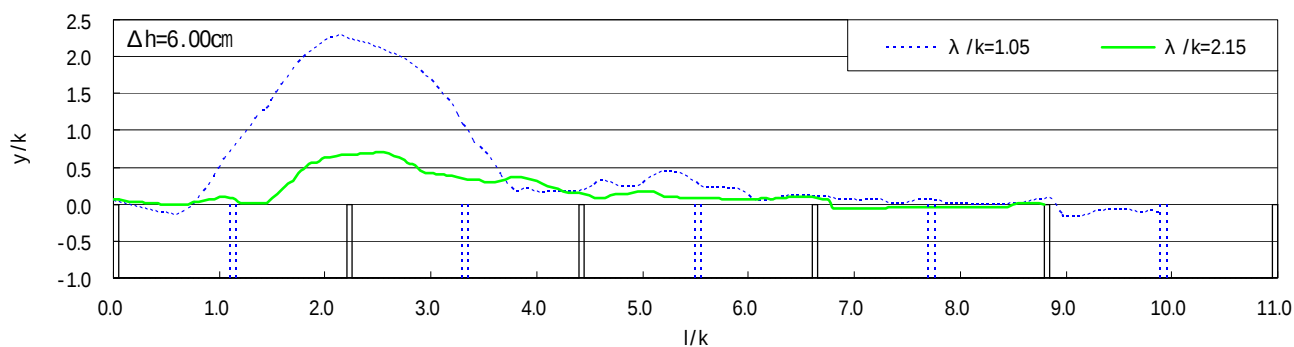


図-10 減勢工ユニット幅の相違による水面形の変化

(3) 減勢工下流側壁面上部突起の効果

減勢効果をさらに高めることを目的として、減勢工ユニット 1 の下流側壁面上部に設けた突起による流速減衰効果を検討する。

図-11 は、裸地堤の $\lambda/k=2.15$ において 1.0cm の突起を設けた場合の水深方向流速分布の流下に伴う減衰状況を示したものである。この図より、 $l/k=0.30$ では、突起の有無に関わらずほぼ類似の流速分布だったものが、流下に伴って突起がない場合に比べて突起を設けた方が流速のピークの値が減少すると共に、ピークの位置がより減勢工下方にシフトしていることが分かる。これは、突起を設けることによって減勢工内で強制的に循環流れ(図-12)を発生させると共に、後の図-13,14 に示すように減勢工ユニット 1 の水位を上昇させてユニット 1 内での水クッションの効果をより高めたことによるも

ると、突起無しに比べて突起を設けた方が、突起の設置による減勢工内での強制的な循環流れの発生によって水位の最高値が上流側のユニット 1 内に移動し、水クッションの形成に寄与していることが分かる。

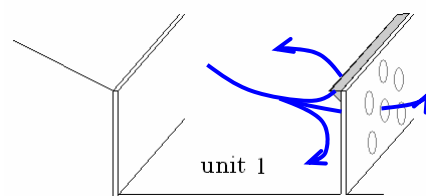


図-12 突起による循環流れの発生

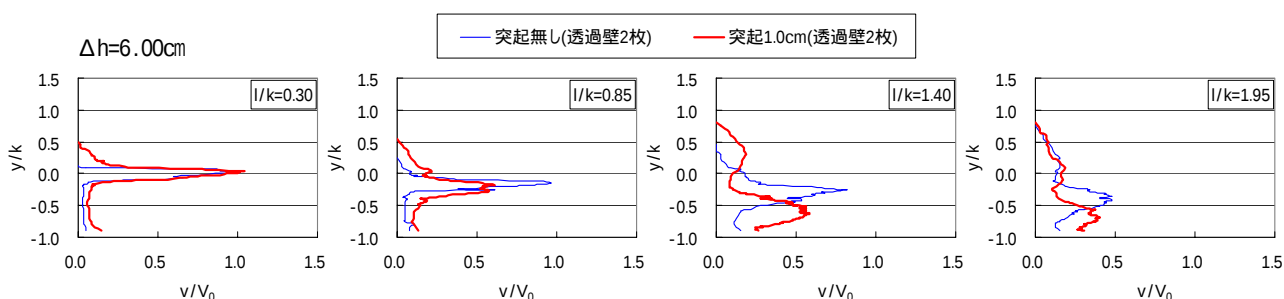


図-11 $\lambda/k=2.15$ における水深方向流速分布の流下に伴う減衰状況 (裸地堤)

のと考えられる。なお、0.5cm の突起を用いた実験も実施し、突起の大きさによる減勢効果の相違を検討したが、明瞭な差異は認められていない。

以上の検討より、透過壁の上部に突起を設けることによって流速の一層の減衰を図れることが期待できる。

(4) 減勢工壁面の相違による水面形の変化

図-13,14 は、裸地堤と植生堤における減勢工壁面の形状・形式の相違による水面形の変化を示す。これらの図より、裸地堤、植生堤いずれにおいても、不透過壁と透過壁を比べると、透過孔による水流の分散、整流効果によって透過壁の方が水位の最高値が低下していることが分かる。次に、透過壁における突起の効果についてみ

4. まとめ

堤防裏法尻の洗掘を防止し、越流水を減勢させる減勢工としての機能に加え、越流水を堤防法線に沿って排水する排水路としての機能を持つ裏法尻保護工の最適形状に関して実験的に検討したが、要約すると以下のようである。

- 1) 相対ユニット幅 $\lambda/k=1.05$ と 2.15 における流況特性と流速減衰状況の比較検討により、 $\lambda/k=2.15$ の方が大流量に対しても減勢工として機能することが分かった。

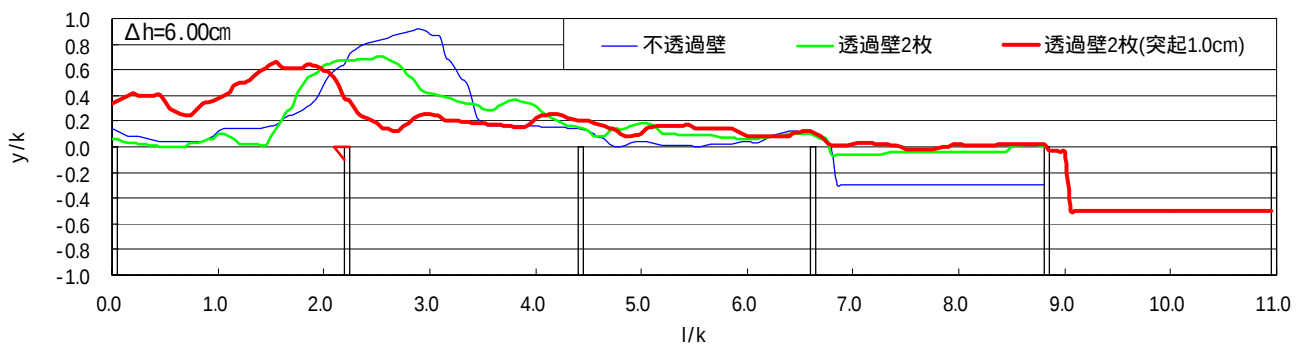


図-13 減勢工壁面の相違による水面形の変化($\lambda/k=2.15$, 裸地堤)

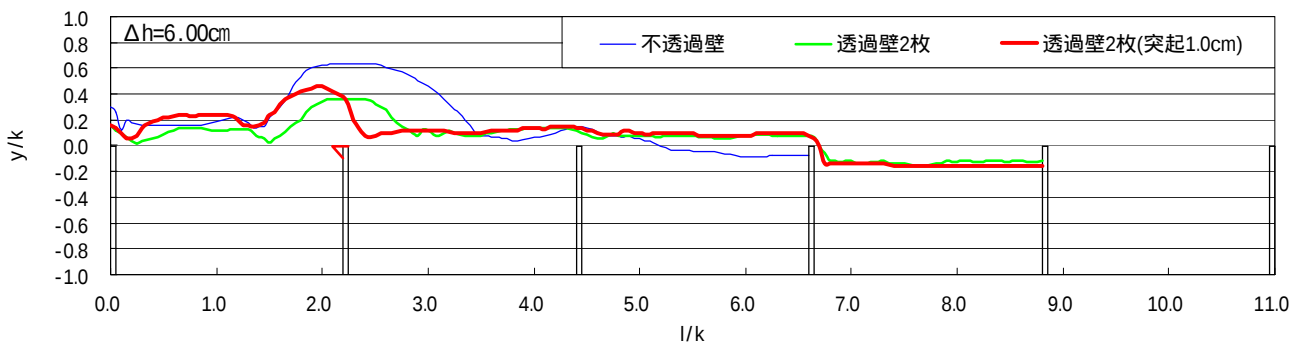


図-14 減勢工壁面の相違による水面形の変化($\lambda/k=2.15$, 植生堤)

- 2) 透過壁による流速減衰効果を最大流速と水深方向流速分布をもとに検討した結果、不透過壁に比べて透過壁の流速のピークが減衰し、ピークの発生位置も減勢工内にシフトすることが分かった。
- 3) $\lambda/k=1.05$ と 2.15 の透過壁の比較では、一部流域で $\lambda/k=2.15$ の方が流速の減衰がやや劣っていることがみられたが、一方、水位の最高値、壁面にかかる水圧、排水性等に関しては優れており、法尻保護工の最適形状の決定に際しては、これらを総合的に勘案する必要があることが指摘された。
- 4) 透過壁の上部に突起を設けたことによる流速減衰効果を検討した結果、突起の設置により、流速の減衰が一層進行し、流速のピークの位置が減勢工下方にシフトすることが分かった。
- 5) 減勢工壁面の相違による水面形の変化の検討より、不透過壁に比べて透過壁の方が水位の最高値が低下することが分かった。また、突起の設置によって水位の最高値が上流側のユニット1内に移動し、水クッションの形成に寄与することが分かった。

謝辞：本研究は、日本大学総合研究「水域開発と環境保全に資する工法の総合研究」の助成を受けて実施されたものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 山本祐二・吉野文雄：越流水による堤防法面の浸食特性，第33回土木学会年次学術講演会，pp.529-530，1978
- 2) 吉野文雄・土屋昭彦・須賀堯三：越流水による堤防法面の破壊特性，第24回水理講演会論文集，pp.351-356，1980
- 3) 葛西敏彦・須賀堯三・吉野文雄：越流水による堤防の破壊特性(その2)，第35回土木学会年次学術講演会，pp.462-463，1980
- 4) 藤田光一・橋本宏・加藤善明：越流水による堤防の破壊特性(その4)，第39回土木学会年次学術講演会，pp.523-524，1984
- 5) 福岡捷二・藤田光一・加賀谷均：アーマレビーの設計，その1，土木技術資料，Vol.30，No.3，pp.27-38，1988
- 6) 小川和彦・坂野章・二村貴幸：破堤しにくい堤防構造に関する一考察，第59回土木学会年次学術講演会，pp.241-242，2004
- 7) 加藤善明・橋本宏・藤田光一：堤防の耐越水化対策に関する実験的研究，第29回水理講演会論文集，pp.627-632，1985
- 8) 福岡捷二・藤田光一・加賀谷均：アーマレビー法尻工の水理設計，第31回水理講演会論文集，pp.365-370，1987
- 9) 山崎僚・高橋迪夫：堤防裏法尻の耐越水化対策に関する実験的検討，第59回土木学会年次学術講演会，pp.263-264，2004
- 10) 奥田浩司・高橋迪夫・河村徹：越水に強い堤防裏法尻保護工に関する二、三の検討，第61回土木学会年次学術講演会，pp.605-606，2006

(2006.9.30 受付)