

# 豪雨洪水時におけるため池堤体および河川堤防の耐越水強化技術の開発

株式会社 水倉組 取締役建設本部長 小林 秀一

## 1. 越水保護工による豪雨耐性の強化

頻発する豪雨洪水により多くのため池堤体や河川堤防が越水損傷の危険にさらされている。際限なく増える降雨量を前に、越水は許容するとして堤体自身に越水に耐えられる能力を強化するのが現実的な対応策であり、その実装化により、破堤・出水に伴う水土インフラの損失ならびに流域被災の緩和・軽減を図ることが可能となる。堤体をガビオンマットレスによる越水保護工で被覆し、越水流れによる侵食と洗掘を確実に防ぐことができれば、堤体の安全性を確保しながら洪水流を流下させることが可能になる<sup>1)</sup>。ガビオンマットレスは、直方体状の鉄線かご枠に大粒径の石材粒子を詰めた構造体で、これを連結して、堤頂から下流斜面にかけて平張り状に被覆敷設する。これまで、実規模越水量を再現した水路実験等に基づく設計検討<sup>2), 3), 4)</sup>および稼働中の小規模ため池における試験施工<sup>5), 6)</sup>を通して技術開発を進めてきた。おおむね実装可能なレベルになったと判断し、ここに設計手法を提示する。

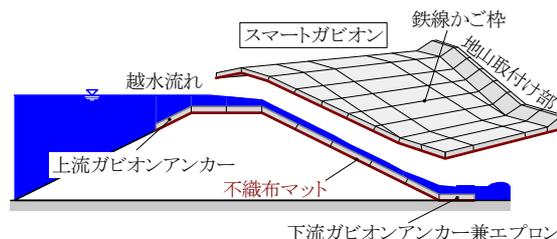


図-1 ガビオンマットレスを用いたため池越水保護工の施設概要



図-2 ガビオンマットレスとその底面に敷いた不織布マット（水食防止マット）の施工状況

## 2. ガビオン越水保護工の構造設計

### 2.1 ガビオン越水保護工の施設概要

図-1 に施設概要を示す。鉄線かご枠に粒径 100～200 mm の玉石を詰めた厚さ 0.3m 程度のガビオンマットレスを被覆敷設し、法尻には、越水時の滑動を抑えるアンカー機能と越水流れの減勢機能を持たせた水平状のガビオンマットレスを設置する。ガビオンマットレスの底面には、図-2 に示すように、河川護岸工などで吸出し防止材として用いられる不織布マット（以下、「水食防止マット」という）を敷設し、これにより、越水時に堤体土に接する流速を低減させ土の侵食を防止する<sup>3)</sup>。

### 2.2 越水流れの水理

越水時にガビオンマットレスの上を流れるオーバーフロー（流れに沿って流量が増減する不等流）とガビオンマットレスの内を流れるスルーフ

ロー（非ダルシー浸透流）は、流量を交換しながら流下していく。前者に対して数値積分法、後者に有限要素法を用いた連結水理解析<sup>7)</sup>によると、図-3 に示すように、この流量の複雑な出し入れは、堤頂下流域から斜面頂部近傍に限られ、堤頂部では常流の漸変不等流のオーバーフローと動水勾配 0.01 程度の被圧浸透流のスルーフローが、また下流斜面に沿っては射流不等流のオーバーフローと斜面傾斜角  $\theta$  の正弦を動水勾配とする被圧浸透流のスルーフローといったように、シンプルな水理挙動で記述できる。

### 2.3 滑動に対する安全性を担保するための構造設計

図-4 に、ガビオン越水保護工に作用する力を模式的に示す。これらの力が釣り合って滑動に対す

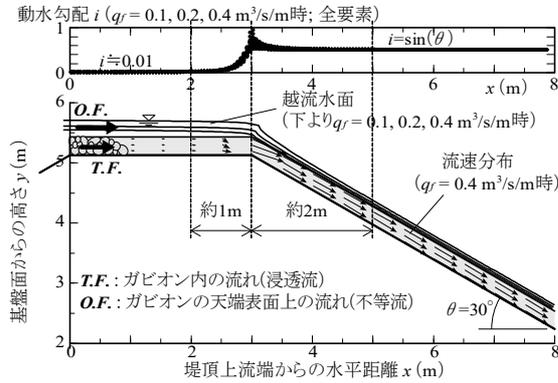


図-3 越水流れの水理 (堤頂幅 3m, 斜面傾斜 30°, ガビオン厚さ 0.3m, 越水量  $q_f=0.1\sim 0.4\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$  の数値計算例)

る安全性を確保できるようにすれば、構造断面と寸法を決定できる。ガビオンマットレスは堤頂から斜面にかけ全面に敷設するため、構造設計時は、ガビオン越水保護工が滑動に対する安全性を確保できるよう、法尻のガビオンアンカー工の長さ  $l_A$  を決定する必要がある。

滑動に対する安全率  $F_{slide}$  は、平常時では、

$$\frac{R_C \cos\theta + R_S + R_A \cos\theta}{S_S} \geq F_{slide} \quad (1)$$

により評価できる。ここで  $R_C$ ,  $R_S$  および  $R_A$  はそれぞれ堤頂部 (添え字の C), 斜面部 (S) およびアンカー工部 (A) のガビオンマットレスと堤体土との間に生じる摩擦抵抗力,  $S_S$  は斜面部のガビオンマットレスによる滑動力である。このうち  $R_C$  は斜面部の滑動に対するカウンターバランスとして機能する。法尻のアンカー工は、用地等の制約により可能な限り短いほうが有利なため、アンカー工の厚さをガビオンマットレスの厚さ  $t$  の 2 倍にして、自重の寄与によるアンカー機能を確保する。

越水が起きた場合には、ガビオンマットレスに対して、スルーフローによる浸透力  $J$ , その上を流れるオーバーフローによる表面掃流力  $T$ , ならびにガビオンマットレス全体が越水に覆われるため浮力  $B$  が発生し、図-4(b)のベクトル矢ようになる。このうち  $R_C'$ ,  $R_S'$ ,  $R_A'$  および  $S_S'$  は、 $B$  の作用を受けるため、ガビオンマットレスの嵩単位体積重量  $\gamma_t$  ではなく水中単位体積重量  $\gamma_{sub}$  を用いて算定される摩擦抵抗力および滑動力である。堤頂部下流側の 1m 程度の区間とそれより下流側へ水平距離で 2m 程度の区間ではガビオンマットレス内の動水勾配が急変するため、それによって生じる浸透力を水平成分  $J_{Cx}$ ,  $J_{Sx}$  と鉛直下方成分  $J_{Cy}$ ,

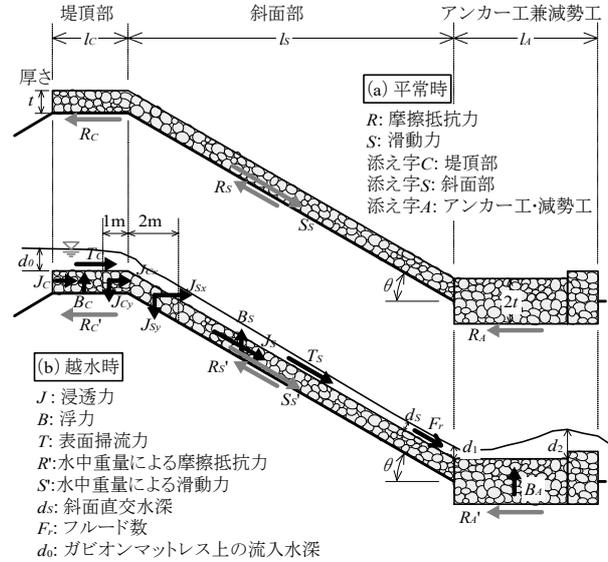


図-4 ガビオン越水保護工に作用する力、およびアンカー工兼減勢工の配置

$J_{Sy}$  で表示している。これらはいずれも滑動を起こすように働くため、力の作用方向を考慮して式(1)左辺の分母に加えれば、越水時の滑動に対する  $F_{slide}$  を評価でき、斜面安定計算の安全率に準じて  $F_{slide}=1.2$  に設定すれば、これより  $l_A$  を算定できる。

このアンカー工は減勢工の役割も兼ねる。連結水理解析により、斜面部のガビオンマットレス表面上を下る流れのフルード数  $F_r$  と水深  $d_s$  (および流入水深  $d_1=d_s/\cos\theta$ ) を求めれば、跳水型減勢工 (副ダム型) の設計指針<sup>8)</sup>にしたがって共役水深  $d_2$  と減勢工の長さ  $6d_2$  (以上) を算定できる。これを上記のアンカー工として必要な長さと比較し、大きい方をもってアンカー工兼減勢工の構造寸法とする。

## 2.4 ガビオン越水保護工の構造設計計算

ガビオン越水保護工の構造設計に必要な情報は、①越水の規模を表す  $q_f$ , ②堤体の規模・形状を与える  $h$ ,  $l_c$  および  $\theta$ , ③材料条件の  $D$  となる。表-1の重回帰式より、これらの情報/条件を説明変数として図-4の諸量を求めれば、 $F_{slide}=1.2$  として  $l_A$  を決定できる。図-5に、 $h=3, 5, 7\text{m}$ ,  $l_c=3\text{m}$  および  $\theta=20, 30^\circ$  の堤体において、 $q_f$  が 0.1, 0.2 または  $0.4\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$  と想定される場合に必要となるガビオン越水保護工の構造断面・規模を示す。ガビオンマットレスの自重の算定に必要な  $\gamma_t$  と  $\gamma_{sub}$  はそれぞれ 16 と  $10\text{kN}/\text{m}^3$ , 滑動抵抗力の算定

表-1 数値実験による越水時の力と水量の変数選択重回帰式

(注)重回帰式の設定例： $J_{sy}=(-0.0866)\times\theta+(-2.5740)\times t+(1.6916)$

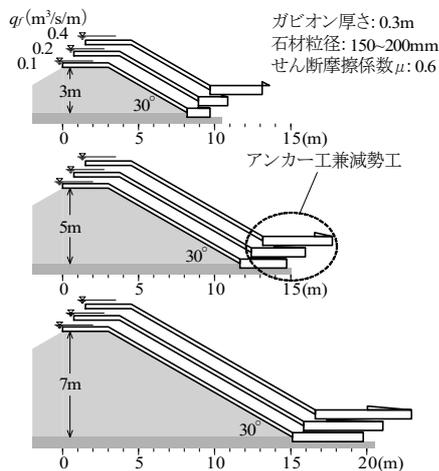
越水時の力と水量 =	$\times l_c$ [m]	$\times \theta$ [°]	$\times t$ [m]	$\times D$ [m]	$\times q_f$ [m <sup>3</sup> /s/m]	+ 定数項
$J_c$ [kN] =	動水勾配 0.01 で水平方向に作用					
$J_{cx}$ [kN] =	-	0.0160	1.4744	0.3126	0.1403	-0.6124
$J_{cy}$ [kN] =	-	-0.0085	-0.6811	0.1108	-0.1419	0.3011
$J_{sx}$ [kN] =	-	0.1036	6.3678	-	0.7809	-2.2102
$J_{sy}$ [kN] =	-	-0.0866	-2.5740	-	-	1.6916
$J_s$ [kN] =	動水勾配 (=sin $\theta$ ) で斜面方向に作用					
$\tau_c$ [kN/m <sup>2</sup> ] =	-0.0011	-	0.0023	0.0573	0.0326	0.0084
$\tau_s$ [kN/m <sup>2</sup> ] =	-	0.0083	-0.1012	-	0.5753	-0.0835
$d_s$ [m] =	-	-0.0017	-0.0328	-	0.2158	0.0589
$F_r$ [1] =	-	0.0886	-0.3277	-5.1158	1.9166	2.0344
$d_0$ [m] =	0.0084	-0.0001	-0.0213	0.01155	0.4905	0.0623

に必要なガビオンマットレスと土との間のせん断摩擦係数は0.6に設定した<sup>7)</sup>。

図-5より、 $q_f$ が大きいほど、また $h$ と $\theta$ が大きくなるほど、ガビオンマットレスを滑らそうとする力が大きくなるため、それに応じて、アンカー工兼減勢工の規模延長も大きくなる。また、想定される越水流量の範囲<sup>2)</sup>では、堤頂上流端での流入水深 $d_0$ (図-4参照)は0.1~0.35mほどとなるため、ガビオンマットレスの地山取付け部において新たに地山土の侵食が起きないように、図-1に示すように、この $d_0$ に相当する高さの側壁を設ける必要がある。

### 3. 耐久性と強度を考慮したかご枠鉄線の選定

ガビオンマットレスのかご枠となるかご枠は、河川護岸や治山工に用いられる角形じゃかご(ふとんかご)で標準に用いられる亜鉛めっき鉄線とし、線径 $\phi$ は網線4mmないし5mm、枠線6mm



(a) ガビオン越水保護工の構造設計試算

図-5 大小規模のため池堤体を対象に試算したガビオン越水保護工の構造断面・寸法と越水時の流入水深

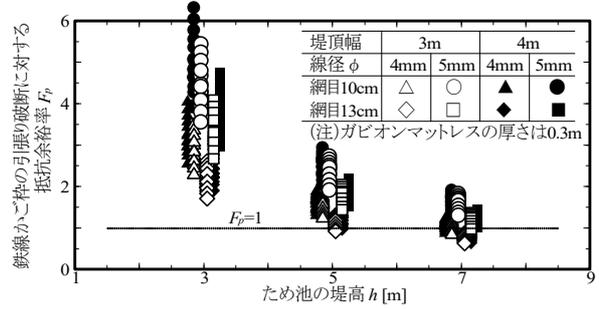
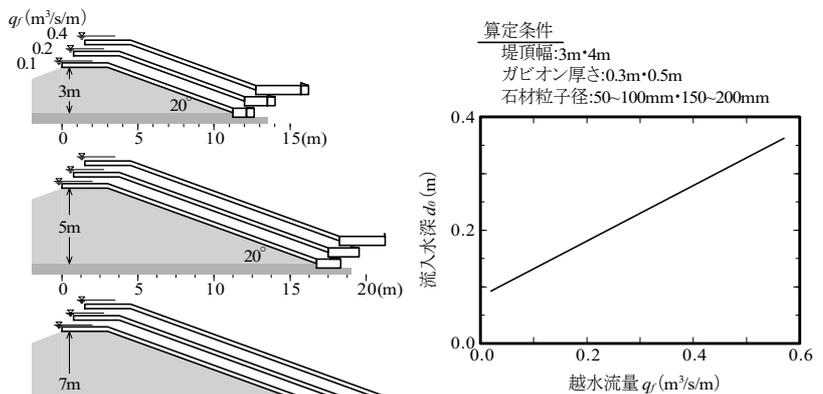


図-6 引張り破断に対する鉄線かご枠の抵抗余裕率 $F_p$

とする。めっき鉄線の耐久性(年数)は、めっき部分と鉄線部分の耐久性を合わせたもので、前者はめっき付着量とめっき腐食速度との関係から、後者は、鉄線腐食速度により鉄線の断面積が1/2に減じるまでの期間として算定できる<sup>9),10)</sup>。大気中環境におけるめっき腐食速度と鉄線腐食速度をそれぞれ5~20g/m<sup>2</sup>/年と0.01~0.02mm/年とすると、亜鉛めっきの付着量によるグレードに応じて、35~50年以上の耐久性が期待できる。

鉄線かご枠は、単に石詰め材を固定するだけでなく、不測の事由により斜面土に大きな侵食が生じ、斜面に沿った滑動抵抗力と下流アンカー機能が消失するような状況に際して、堤頂部から斜面部へとつながるガビオンマットレスに構造破断が起きないように十分な引張り強さを有するものとする。ガビオンマットレスは1,000~5,000kN/m<sup>2</sup>ほどの軟らかな弾性係数を持つことから、鉄線かご枠が引張り破断しない限り、侵食・洗掘形状に追随して水食防止マットを圧着し続ける粘り強さが発揮されると期待できる。

図-4(b)に示す $R_s'$ と $R_A'$ が消失したとして、堤頂



(b) 越水時の流入水深

部の下流端位置で鉄線かご枠に掛かる斜面方向の引張り力  $P$  を算定し、鉄線かご枠の引張り強さ  $P_t$  と比較する。これを引張り破断に対する抵抗余裕率  $F_p=P_t/P$  としてまとめると、図-5 が得られる。粒径 200 mm 以上の石材粒子を用いざるを得ない場合以外、通常、適度に石詰めできる厚さ 0.3 m が標準となるため、この厚さを算定条件としている。 $P_t$  には金網の網目と線径が、また  $P$  には  $h$  と  $\theta$  のほかにカウンターバランスとして機能する  $l_c$  が関係することから、 $l_c=3\text{m}$  と  $4\text{m}$ 、 $\phi=4\text{mm}$  と  $5\text{mm}$ 、網目=10cm と 13 cm の組合せとしている。横軸は堤高で、縦方向に分布幅をもつ打点は  $\theta=10, 20, 30^\circ$  の 3 ケースと  $q_f=0.1\sim 0.5\text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  の 5 ケースを組み合わせた 15 個の算定値である。

図-6 は、不測の状況を想定したものであるが、そのような過酷な状況下でも、鉄線かご枠の引張り強さに支えられてガビオン越水保護工に構造破断が起きないことが分かる。

#### 4. まとめ

越水流れの水理挙動に基づき、ガビオン越水保護工の構造設計を行うことが可能となり、実際的な越水量、堤体規模および石材粒径の条件のもとで、ガビオン越水保護工の構造断面・寸法を試算し具体像を提示することが可能となった。

何らかの理由により下流アンカー機能と斜面上のすべり抵抗機能が消失する危機的状況に置かれた場合においても、ガビオン越水保護工が構造破断を起こさず越水保護工としての機能を果たしていくとの視点から、鉄線かご枠の引張り強度を担保する線径と網目サイズを規定することが可能となった。越水保護工として、ガビオンマトレスを採用した理由、根拠がこの点にある。ため池堤体および河川堤防を守る供用期間を設定することは難しいものの、適用する亜鉛めっき鉄線の腐食速度からは最低 40~50 年の耐久性が保証されることも明らかにできた。本研究成果により、ガビオン保護工の技術設計はほぼ実装レベルで確立できたと考える。

気候変動に伴い、今後も豪雨洪水がさらに頻発化・激甚化することが考えられ、堤体からの越水に対し、被害を軽減することが求められている。施設の能力を超える洪水に対し、避難のための時間を確保するなど、被害をできるだけ軽減するため、越水した場合でも決壊しにくく、決壊するまでの時間を少しでも長くするなどの減災効果が

求められている。今後、経費が低廉で工期が短い本技術を効果的な保全技術として普及させることを当面の課題として引き続き検討していく予定である。

謝辞 技術開発にあたり、(一社)北陸地域づくり協会所管の第 30 回「北陸地域の活性化」に関する研究助成事業より多大なご支援をいただいた。ここに記して関係各位に深謝申し上げるしだいである。

#### 引用文献

- 1) 森井俊廣・岡島賢治・小林秀一：ため池堤体への越水保護工の導入と補助洪水吐機能の創出，*水土の知* 92(2)，pp. 7~10 (2024)
- 2) 小林秀一・小林龍平・高橋直哉・森井俊廣：スマートガビオンを用いたため池堤体の越水保護工の開発，*水土の知* 92(11)，pp. 25~28 (2024)
- 3) 小林龍平・小林秀一・板垣知也・高橋直哉・青木勇武・小林千佳子・森井俊廣：越水破壊のメカニクスを考慮したため池堤体の越水保護工，第 73 回農業農村工学会大会講演会講演要旨集，pp. 73~74 (2024)
- 4) 小林龍平・小林秀一・板垣知也・高橋直哉・小林千佳子・青木勇武・森井俊廣：スマートガビオンを用いたため池堤体の越水保護工の構造安定性，第 73 回農業農村工学会大会講演会講演要旨集，pp. 75~76 (2024)
- 5) 小林龍平・小林秀一・高橋直哉・森井俊廣：ため池堤の越水保護工の試験施工と安定性モニタリング，*水土の知* 91(11)，pp. 48~49 (2023)
- 6) 小林秀一・小林龍平・板垣知也・高橋直哉・森井俊廣：スマートガビオンを用いたため池堤体の耐越水補強工の開発，*ARIC 情報誌* No. 156，pp. 14~21 (2025)
- 7) 森井俊廣・小林龍平・小林秀一：ため池堤体斜面に被覆敷設した鉄線かご枠石詰め層に生じる越水流れの水理解析，*農業農村工学会論文集* 318(92-1)，pp. I\_13~I\_20 (2024)
- 8) 農林水産省農村振興局整備部：土地改良事業設計指針「ため池整備」，*農業農村工学会*，pp. 65~90 (2015)
- 9) 日本じゃかご協会：じゃかご工法の手引きと解説，*日本じゃかご協会*，pp. 70~80 (2008)
- 10) 国土交通省河川局治水課：鉄線籠型護岸の設計・施工技術基準(案)，pp. 19~25 (2009) .