

# もたれ式護岸の被災形態に関する研究

平野 誠治<sup>1</sup>・有川 太郎<sup>1</sup>

<sup>1</sup> (独) 港湾空港技術研究所 海洋研究領域耐波研究チーム (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

海岸の護岸は、我が国の沿岸を高波や高潮から防護する役割を担っているが、高波浪の作用により被災を受けることがある。もたれ式は、護岸の代表的な構造の一つである。もたれ式護岸の被災形態は、護岸堤体下部の沖側への滑動と、堤体打継部の破断に大別される。一方で、これらの破壊形態に至る各要因は明らかにされていない。そこで、本研究では、もたれ式護岸の堤体の挙動に主眼を置き、水理模型実験により被災メカニズムを検証した。検証の結果、堤体前面に接する被覆ブロック等の構造物の有無により、堤体下部の沖側へ滑動変位に差異があること、及び、堤体下部の変位が抑制されれば、堤体に衝撃波圧が作用し、堤体打継部が破断する可能性があることが明らかとなった。

キーワード もたれ式護岸、被災形態、被覆ブロック、裏込石、堤体、滑動

## 1. 背景及び既往の研究

平成16年の台風16号及び18号による高潮高波浪にて、瀬戸内海の護岸が多数被災した。中国地方整備局広島港湾空港技術調査事務所<sup>1)</sup>によると、被災護岸の構造は13施設中10施設がもたれ式であった。もたれ式護岸の被災形態は、もたれ壁堤体（以下、堤体という）の沖方向への滑動と堤体打継部の破断の2形態に大別される。また、同一施設でも、堤体の被災程度が平面的に様ではない場合がある。もたれ式の構造は、全国の海岸の護岸にて多く用いられており、今後の高潮及び高波による被災への対策において、堤体の被災要因の解明が重要である。

もたれ式護岸の堤体打継部の破断に関しては、有川・鷺崎<sup>2)</sup>が、堤体下部を固定した条件において実証実験を行っている。

一方で、もたれ式護岸が各被災形態に至る要因に関しては、既往の研究で明らかにされていない。そこで、本研究では、もたれ式護岸堤体の挙動に主眼を置き、水理模型実験を用いて被災形態とその要因を検証した。

## 2. 断面実験

### (1) 実験条件

#### a) 実験断面

堤体に作用する波力及び滑動量を計測することを目的として、広島港観音地区マリーナ護岸をモデルに、縮尺1/10の実験を行った。実験水路は、延長105 m、幅0.8 m、深さ2.5 mである。

実験断面を図-1に示す。基礎捨石の上に堤体及び被覆ブロックを設置した。なお、ケースによっては、堤体前

面部の被覆ブロックを取り外して実験を実施した。また、堤体背後の裏込石上にモルタル製の水叩きを設置した。今回の実験は、波力の計測及び裏込石の挙動に着目した堤体の変位の計測を主目的としていることから、裏込石の背後には砂の層及び防砂シートを設けていない。基礎捨石の法尻から沖側には、延長20 mの1/40勾配を設け、その沖側は水平床とした。

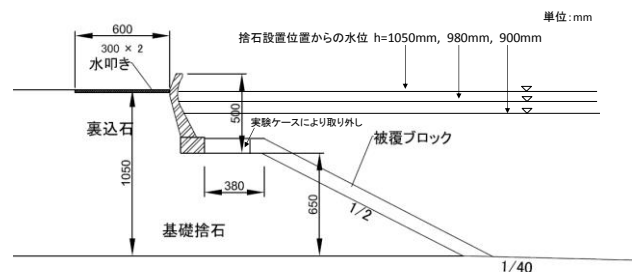


図-1 実験模型断面図

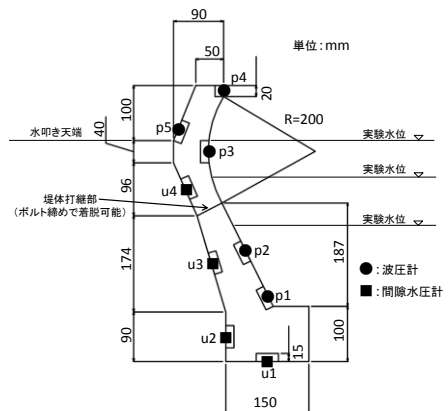


図-2 波圧計及び間隙水圧計設置位置

## b) 堤体模型の構造

堤体模型の構造は、後述の平面実験におけるものと同じである。現地構造物の堤体打継部に相当する箇所は、ボルト締めにより着脱可能な構造となっている。堤体には、作用する波力を計測するため、図-2のとおり波圧計及び間隙水圧計を設置した。

## c) 波浪諸元

本実験は、ブレットシュナイダー・光易型スペクトルの不規則波を造波し、合計131ケースの計測を行った。捨石設置位置の水深  $h$  及び入射波の有義波周期  $T_{1/3}$  で分類した各ケースの条件を表-1に示す。表-1では、各分類における実験ケース数、有義波周期  $T_{1/3}$  のばらつき及び最大の有義波高  $H_{1/3}$  を記載している。堤体から造波板中立位置までの距離は70.5 mである。入射波は、堤体から2.0 m及び3.0 mの位置に設置した2本の容量式波高計にて入反射分離を行い、有義波高  $H_{1/3}$ 、有義波周期  $T_{1/3}$ 、最大波高  $H_{max}$  を求めた。

## (2) 堤体下部に接する構造物による変位抑止効果

堤体下部に接する被覆ブロック等の構造物が存在する場合、堤体変位の増大の抑止効果があると考え、被覆ブロックなし及びありの場合で堤体の滑動実験を行った。 $h=1.05$  m、 $T_{1/3}$  の分類がCのケースにおいて、堤体は、被覆ブロックなしの場合には倒壊し、被覆ブロックありの場合には倒壊に至らない変位が生じた。このことから、以下の検討は、 $h=1.05$  m、 $T_{1/3}$  の分類がCのケースにて行った(3)図-7のみ $h=0.90$  m、 $T_{1/3}$  の分類がD)。なお、堤体の滑動時には、引き波時に堤体下部が沖側方向に変位することから、波圧及び変位は沖側を正とした(図-3)。

### a) 被覆ブロックなしの場合

図-4に、造波時間300秒の不規則波群 ( $H_{1/3}$  が0.14 mから0.16 m) を3回作用させた際における、堤体背面最下部

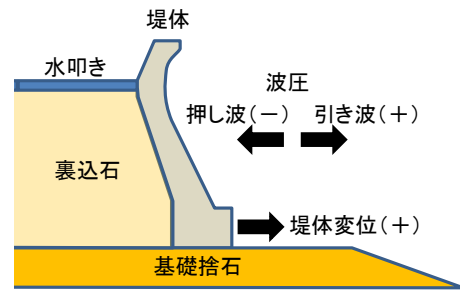


図-3 波圧の作用と堤体変位の方向の定義

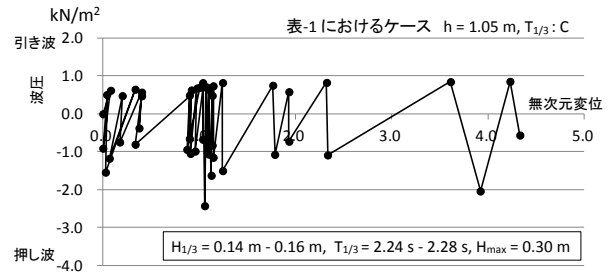


図-4 堤体変位と波圧の関係 (被覆ブロックなし)



写真-1 変位拡大の引き金となる裏込石落下

表-1 実験ケース

T <sub>1/3</sub> (s)による分類		A	B	C		D
被覆ブロックの有無		有	有	無	有	有
h (m)	T <sub>1/3</sub> (s)のばらつき					
	最大のケース	1.52	1.90	2.30	2.30	2.68
	最小のケース	1.46	1.83	2.18	2.11	2.50
0.90	ケース数	—	6	—	6	6
	最大の H <sub>1/3</sub> (m)		0.14		0.21	0.30
	もたれ壁変位		0		0	0
0.98	ケース数	8	8	19	24	9
	最大の H <sub>1/3</sub> (m)	0.09	0.14	0.19	0.20	0.27
	もたれ壁変位		0	0	0	0
1.05	ケース数	—	6	10	23	6
	最大の H <sub>1/3</sub> (m)		0.13	0.20	0.20	0.25
	もたれ壁変位 (mm) (沖側が正)		0	倒壊	+75	倒壊

h:捨石設置位置の水深, T<sub>1/3</sub>:有義波周期, H<sub>1/3</sub>:有義波高

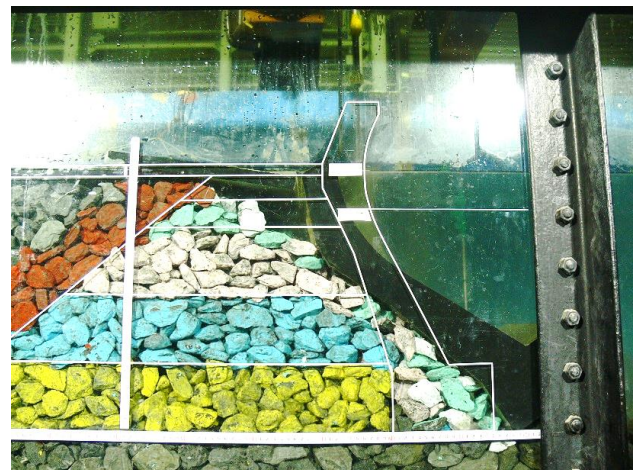


写真-2 滑動による堤体倒壊後の状況

の変位と波圧の関係を示す。横軸は、堤体の残留変位量 (mm)を裏込石の直径(30 mm)で除して無次元化した変位 (以下、無次元変位という) である。

変位は、波浪の作用状況の記録映像から読み取った値を、各波群作用後に実測した変位で補正して求めた。波浪の諸元は図中に示す。ここでの波圧は、計測した波圧及び間隙水圧を作用面積で積分した波力を、単位面積 (幅1 mあたりの堤体前面投影面積) で除した値とした。

図-4では、堤体が滑動をはじめた時刻の引き波の波圧は、 $0.62 \text{ kN/m}^2$  (裏込石のせん断抵抗角 $\phi = 40^\circ$ , 堤体背面の壁面摩擦角 $\delta = 15^\circ$ , 堤体底面と基礎捨石の摩擦係数 $\mu = 0.6$ として計算した堤体の滑動安全率は0.86。以下、堤体滑動安全率は同様の条件で算出) である。その後、引き波により微量滑動し、押し波により変位が戻される挙動を繰り返した。無次元変位が概ね1.0を超えると、写真-1のように裏込石が堤体との隙間に落下し、その後、変位が急速に拡大した。写真-2は、滑動変位拡大による堤体倒壊後の状況である。

### b) 被覆ブロックありの場合

堤体下部の前面に接するように、質量2.5 kgのモルタル製被覆ブロックを設置し、被覆ブロックに隙間がない条件及び隙間がある条件でそれぞれ実験を行った。

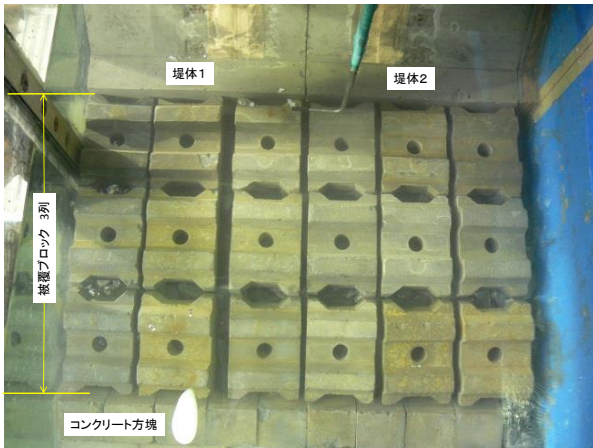


写真-3 被覆ブロック設置状況 (ブロックの隙間なし)

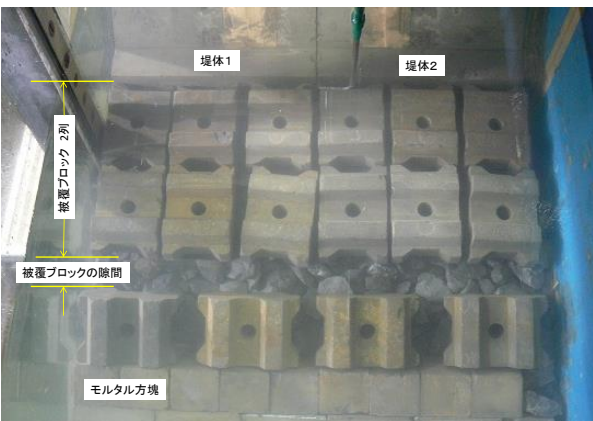


写真-4 被覆ブロック設置状況 (ブロックの隙間あり)

### ① 被覆ブロックの隙間なし

水路幅0.8 mあたり6個の被覆ブロックを3列で設置した (写真-3)。被覆ブロックは、法線直角方向には隙間がなく、相互に拘束されている。本条件では、図-4の実験と同等の波群を作用させたが、堤体の変位は生じなかった。これは、被覆ブロックが堤体の滑動を抑制していたことが要因と考えられる。また、押し波時には最大で $4.9 \text{ kN/m}^2$ の衝撃波圧 (絶対値) が計測された。これは、堤体下部が被覆ブロックから圧縮の反力を受け、堤体上部に波圧が作用する際に堤体下部が沖側に滑動しようとする運動が抑制されたためと考えられる。被覆ブロックに作用する圧縮力に関しては、今後の検証が必要である。

### ② 被覆ブロックの隙間あり

写真-4のとおり、3列目の被覆ブロックを横向きに置き、2列目と3列目のブロック間に隙間を設け、ブロック相互の拘束を解放した。この状態で、造波時間300秒の不規則波の波群 ( $H_{1/3}$ が0.17 mから0.19 m) を4回作用させた。図-5に、被覆ブロックありの各条件 (ブロックの隙

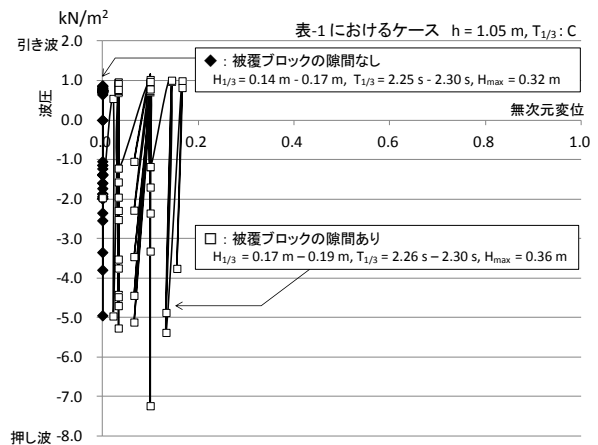


図-5 堤体変位と波圧の関係 (被覆ブロックあり)

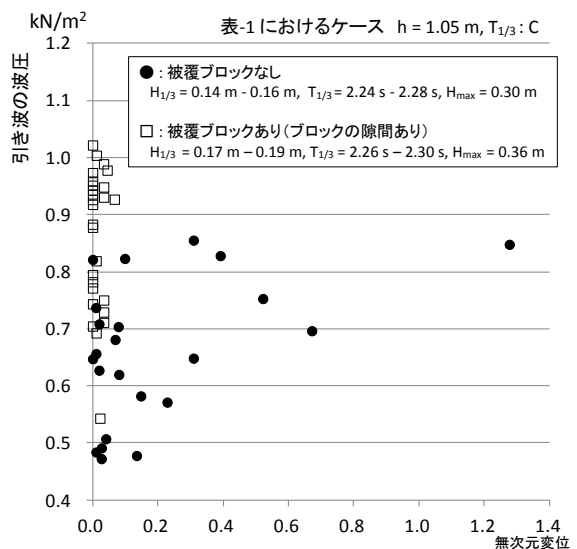


図-6 一波の作用で生じた堤体変位



間なし及びあり)における堤体変位と波圧の関係を示す。図-5に示すように、被覆ブロックに隙間があると、堤体の変位は微小ながら徐々に増大している。また、被覆ブロックに隙間がない条件と同様に、押し波による衝撃波圧(最大 $7.2\text{ kN/m}^2$ )が計測されている。

### c) 一波の作用で生じる堤体変位の比較

ここで、引き波に対する被覆ブロックの抑止効果を定量的に比較するため、一波作用毎の堤体変位を検証した。その結果を図-6に示す。一波による変位が生じない最大の波圧は、被覆ブロックなしの場合は $0.82\text{ kN/m}^2$ (堤体滑動安全率 $0.63$ )であるのに対し、被覆ブロックありの場合では、 $1.02\text{ kN/m}^2$ (堤体滑動安全率 $0.48$ )であった。

一方、前述の最大の波圧よりも小さい波圧でも堤体の

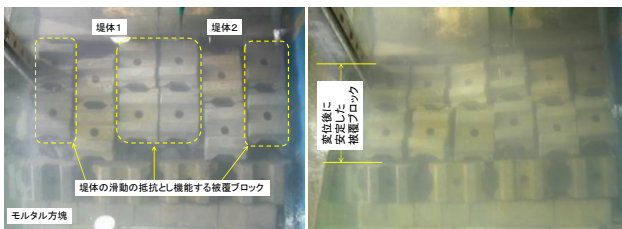


写真-5 被覆ブロックの状況：(a)滑動抵抗調整,(b)滑動後

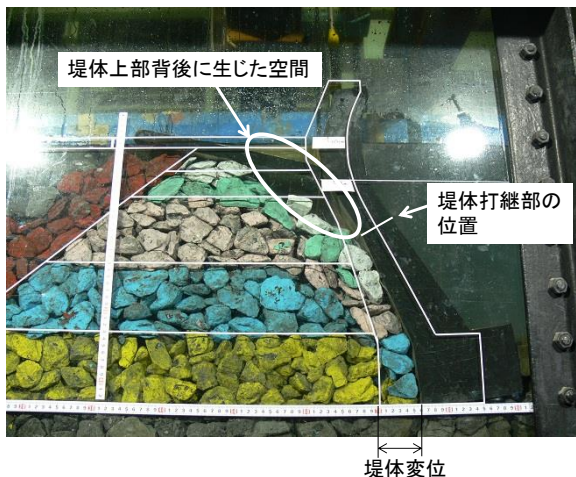


写真-6 堤体上部背後に生じた空間

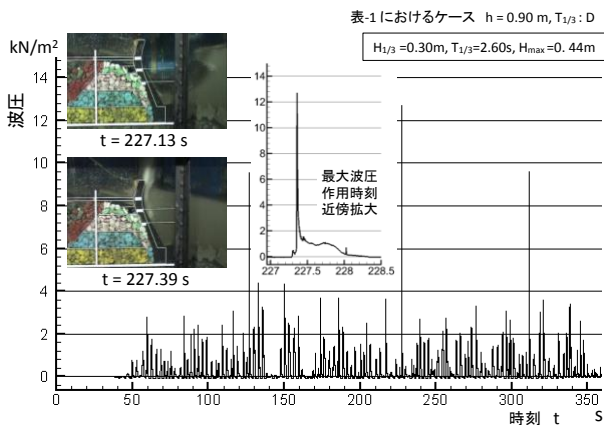


図-7 堤体の打継部より上部に作用する波圧の時系列

変位が生じている。これは、それぞれの波圧の作用時間が異なること、堤体底面と基礎捨石の摩擦係数にばらつきがあること、それぞれの波圧の作用時刻における裏込石の噛み合わせの違いにより土圧のばらつきがあること、という要因が考えられる。特に、堤体滑動時に作用する裏込石の土圧については、護岸の安定性を評価する上で重要と考えられ、今後の検証が必要である。

### (3) 打継部を破断する衝撃波圧の検討

有川ら<sup>2)</sup>は、堤体下部を固定した条件にて、堤体打継部破断の実証実験を行っている。同実証実験の結果から、鉄筋が破断する静的荷重の2倍程度の衝撃波圧が作用すると打継部が破断する可能性があると考えられる。

本実験では、被災前の初期状態から波浪を繰り返し受けることにより、打継部が破断する条件が形成され得るかを検証した。写真-5(a)のように、堤体に接する被覆ブロックのうち2個×2列を堤体から離し、滑動抵抗力となるブロック重量を低減させた。そこで、造波時間300秒の不規則波の波群( $H_{1/3}$ が $0.19\text{ m}$ から $0.20\text{ m}$ )を4回作用させたところ、写真-5(b)の状態にて堤体の滑動が止まり、安定した。写真-6は、堤体の滑動が止まり安定した状態における堤体及び裏込石の状況である。上部の裏込石が堤体との隙間に落下して空間が生じ、打継部より上部の堤体背後が裏込石に支持されない状態が形成されている。

図-7に、堤体上部背後が裏込石に支持されていない状態において打継部より上に作用した波圧を、時系列で示す。入射波の諸元は図中に示す。特に大きい衝撃波圧は、造波時間300秒間において、 $9\text{ kN/m}^2$ を超え $12\text{ kN/m}^2$ 未満のものが2回、 $12\text{ kN/m}^2$ を超えるものが1回発生している。以上より、堤体の滑動によって堤体上部の背後に空間が生じていても、堤体下部が固定された状態になれば、衝撃波圧が発生することが確認された。また、この状況は、被災前の初期状態から、堤体が波浪を繰り返し受けることにより形成され得ることも確認された。

## 3. 平面実験

### (1) 実験条件

堤体の変位の平面的な分布を計測することを目的として、断面実験と同様の縮尺 $1/10$ にて実施した。

実験水槽は延長 $50\text{ m}$ 、幅 $10\text{ m}$ である。水路の両側にベニヤ板製の仕切り壁を設け、水路中央部に幅 $5\text{ m}$ の模型を設置した。図-8に模型の断面図及び平面図を示す。

水深は水路床から $h=0.98\text{ m}$ とし、修正プレットシュナイダー・光型周波数スペクトルの不規則波にて一方方向の造波を行った。実験ケースを表-2に示す。堤体から $2.0\text{ m}$ 及び $3.0\text{ m}$ の位置に設置した2本の容量式波高計にて入射波の分離を行い、入射波の有義波高 $H_{1/3}$ 、有義波周期 $T_{1/3}$ 、最大波高 $H_{\text{max}}$ を求めた。堤体は7個設置し、図-8に示すアクリル板側よりNo.1からNo.7まで番号を付け、各

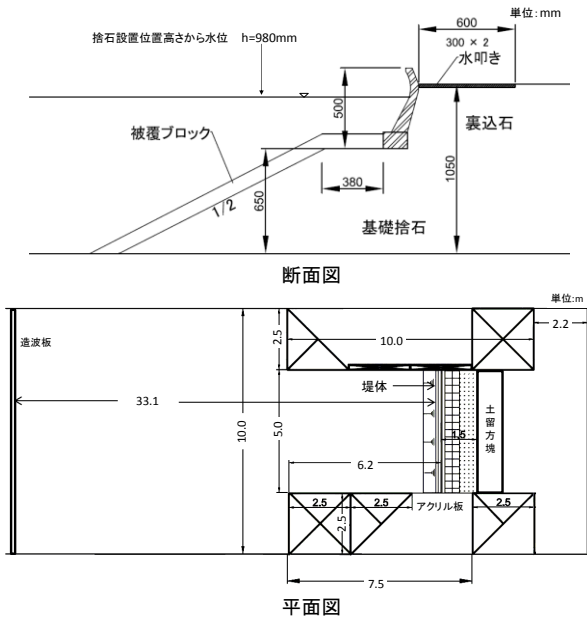


図-8 実験模型の断面図及び平面図

表-2 実験ケース

捨石設置位置からの水深 h(m)	有義波周期 $T_{1/3}$ (s)	有義波高 $H_{1/3}$ (m)	造波時間 (s)
0.98	1.7	0.10, 0.13, 0.14, 0.15, 0.16, 0.17, 0.20, 0.21	300, 600

堤体を定義した。被覆ブロックは、堤体下部に接する第1列目は質量2.5 kgのものを5個/mの間隔で、2列目以降は質量1.7 kgのものを法線方向は隙間なく、法線直角方向は20 mm程度隙間を空けて配置した。

## (2) 平面的な堤体の変位

図-9に、600秒の波群を18回作用させた際における各堤体下部の滑動量の時系列変化を示す。壁の近傍に位置する堤体 No.1及び No.7と比較すると、水槽中央部付近の堤体の滑動量が大きい。これは、仕切り壁が水槽内の波浪に与えた影響も大きいと考えられる。

一方で、水槽中央部付近の堤体 No.3, No.4, No.5 の滑動量も同一ではなく、かつ、水槽中央を軸として対称とはなっていない。このことから、同じ入射波の条件においても、平面的な滑動量には、ばらつきが発生するものと考えられる。これらの定量的な検証は今後の課題である。

## (3) 堤体打継部が一部被災した場合の被災拡大

図-9における累積時間7,200秒(120分)にて、堤体 No.5のみ打継部より上部を撤去し、打継部破断後の状況を再現した。その結果、堤体No.5の変位は打継部撤去後の600秒で17.5 mm増大したが、隣接する堤体No.4及びNo.6の変

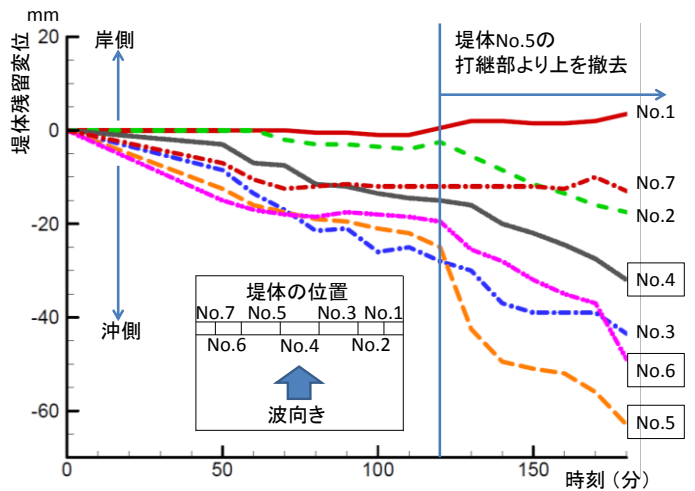


図-9 各堤体の滑動残留変位の時系列



写真-7 堤体No.4及びNo.6の変位

位の増加傾向は、その後もほぼ同様であった。

写真-7は、堤体No.4及びNo.5の変位の結果である。本実験では、堤体の一部分の撤去により露出した裏込石の流出が見られず、被災の平面的拡大に関し、顕著な傾向は確認されなかった。しかしながら、被災の拡大には、個々の裏込石の粒径や、被災箇所近傍の流速も深く関与していると考えられ、今後、これらの検証が必要である。

## 4. 被災のメカニズム

### (1) 現地における被災状況

写真-8は平成16年の台風18号による高潮高波浪にて被災した広島港観音地区の護岸(もたれ式構造)の状況である。中国地方整備局広島港湾空港技術調査事務所<sup>1)</sup>によると、延長165.1 mのうち堤体100 mが被災し、被災時は、潮位CDL+4.79 m, 有義波高 $H_{1/3}$ =2.1 m, 有義波周期 $T_{1/3}$ =5.8 s, 最大波高 $H_{max}$ =3.8 mと推算されている。

主な被災形態は、堤体下部の沖側への滑動である。堤体前面には質量2,000 kgの被覆ブロックが設置されていた。今回の実験で使用した被覆ブロックは、縮尺1/10で質量が2.5 kgであることから、フルードの相似則を適用すると現地のブロック質量の25%増しである。現地の被



写真-8 現地護岸の被災状況

覆ブロックの被災形態には不明な点も多いが、実験結果と比較すると、波浪が繰り返し作用し、堤体の滑動により、徐々に沖側へ押し出されたものと考えられる。

また、写真より、少なくとも1つの堤体にて打継部の破断が確認できる。打継部の破断時に堤体上部に作用した圧力は、設計断面から、静的載荷の条件で40 kN/m<sup>2</sup>と算出される。有川ら<sup>2)</sup>が行った実証実験から、鉄筋が破断する静的荷重の2倍程度の衝撃波圧が作用すると打継部が破断する可能性があると考えられる。このことから、被災時には、80 kN/m<sup>2</sup>程度の衝撃波圧が打継部より上部に作用したと考えられる。

## (2) 堤体が各被災形態に至るフロー

もたれ式護岸堤体の被災形態は、沖方向への堤体の滑動と堤体打継部破断の2形態に大別される。有川ら<sup>2)</sup>の研究及び本研究の結果から、堤体が各被災形態に至るフローを整理すると図-10のようになると考えられる。

## 5. まとめ

もたれ式護岸の被災形態検証のため、断面及び平面にて水理模型実験を行った。主な結論は以下の通りである。

- (1) 堤体下部に接するブロック等の構造物は、堤体の急激な変位の増加を抑制する効果がある。なお、ブロックは、設置状況によっては、波浪の繰り返し作用にて、堤体によって徐々に沖側に押し出される場合がある。
- (2) 堤体上部背後に空間が生じた状態でも、堤体下部の変位が抑制されていれば、衝撃波圧が発生し、堤体打継部が破断する可能性がある。また、この状況は、堤体が波浪を繰り返し受けることにより形成され得る。
- (3) 堤体の滑動時には、裏込石の噛み合わせが変化し、裏込石から堤体への作用力に影響する可能性がある。そのため、堤体に作用する土圧を動的に検証する必要がある。

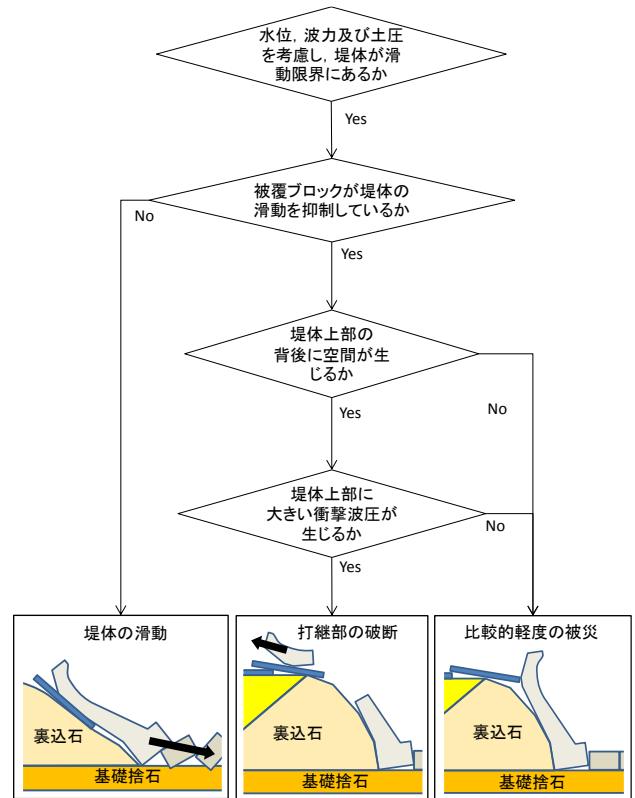


図-10 もたれ式護岸堤体の被災に至るフロー

- (4) 一部の堤体のみ打継部破断後の状況を再現したところ、今回の実験条件下では、露出した裏込石の流出は見られなかった。今後、被災箇所裏込石が流出する現象と裏込石粒径の関係について検証する必要がある。
- (5) 高波による護岸構造物の変形と背後地浸水に関する数値シミュレーションシステムの開発により、設計外力を超えた現象が生じた場合における被害の定量的評価手法の提案を目指す。

謝辞：本研究を行うにあたり、国土交通省中国地方整備局広島港湾空港技術調査事務所よりご支援を頂きました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 有川太郎・鷺崎 誠 (2012) : 衝撃砕波力によるもたれ式護岸の打継ぎ部の破壊に関する実験的研究 : 土木学会論文集B2 (海岸工学) ,Vol.68, No.2, pp.1\_796-1\_800.
- 2) 国土交通省中国地方整備局広島港湾空港技術調査事務所 (2005) : 瀬戸内海における高潮・高波浪防災検討調査報告書 (1/2) p.4\_12, p.5\_24.