土木学会論文集, Vol. 81, No. 18, 25-18119, 2025.

施工過程のブロック積護岸の被災再現実験

水野　辰哉[1]・出口　博之[2]・西畑　剛[2]・羽田　奎介[3]・
柴田　和也[3]・大月　一真[4]

[1] 正会員　五洋建設（株）技術研究所（〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1）
E-mail: tatsuya.mizuno@mail.penta-ocean.co.jp (Corresponding Author)
[2] 正会員　五洋建設（株）技術研究所（〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1）
[3] 東京大学大学院工学研究科システム創成学専攻（〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1）
[4] 正会員　五洋建設（株）大阪支店（〒530-0014 大阪市北区鶴野町 1-9）

2023 年 8 月に大阪湾を通過した 2023 年台風第 7 号により，兵庫県淡路市で施工途中であったブロック積護岸では堤体を構成するコンクリートブロックが転落する被害を受けた．被災時の波浪条件は施工時想定波浪と同等であり，高い潮位の影響による被災と推察された．本研究では，施工途中の低天端高の護岸を対象に被災再現実験を実施し，潮位が被災メカニズムに与える影響を考察した．実験の結果，施工時想定潮位において波の打ち込みに伴う衝撃波圧による被災が生じること，潮位がさらに高くなることで護岸前背面の水位差に伴う静水圧による被災が新たに被災メカニズムに加わることを明らかにした．

Key Words : *overtopping, block seawall, high tide, under construction, hydraulic experiment*

1.　はじめに

2023年8月15日に大阪湾を通過した2023年台風第7号（以降，台風7号とする）により，兵庫県淡路市岩屋地区（**図-1**）で施工途中であったブロック積護岸では堤体を構成するコンクリートブロックの転落や背後の裏込石が洗堀される被害を受けた（**図-2**）．被災地点近傍のNOWPHAS神戸港では日最大有義波高$H_{1/3}$=1.2mが，神戸検潮所では日最大潮位T.P.+1.14mが観測された. 施工中の護岸の安定性照査には1年確率波高H_{max}=2.2m，H.W.L.=T.P.+0.5 mが想定されていた. 発災時，波高は想定と同程度，潮位は想定より0.64 m高い条件であり，潮位の影響により被災に至ったものと考えられる.

気候変動の影響は平均的な海水面の上昇のみならず潮位偏差にもおよぶ．森ら [1)]は東京湾，大阪湾および伊勢湾の三大湾を対象とした高潮の最大潮位偏差推定に関する論文のレビューを行い，地球温暖化が進行した21世紀末では現状の海岸保全施設設計の最大潮位偏差を上回る高潮が生じる可能性が平均的に予測されていることを示した．施工過程の海岸・港湾構造物は一般に完成時より天端高が低く潮位の影響を受けやすい．今回被災したブロック積護岸も完成断面に対して1.0 m護岸の天端高が低く，護岸背面への越波が生じやすい状況であった．完成断面に対する海面上昇の影響については検討が進んでおり，例えば国土交通省 [2)]では防波堤や岸壁，護岸を対



図-1　被災地点位置図と台風 7 号の経路



図-2　施工中のブロック積護岸の被災状況

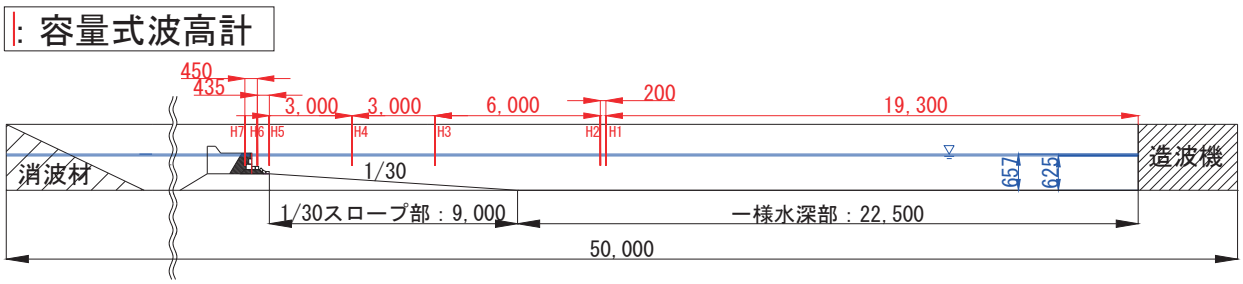


図-3　実験断面図（縦横比 2:1，単位:mm）

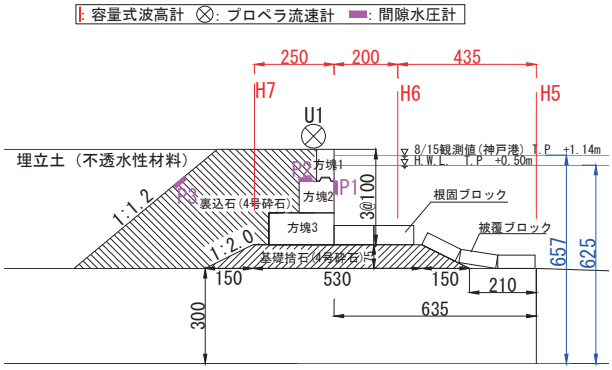


図-4 護岸模型断面図（縦横比 1:1，単位:mm）

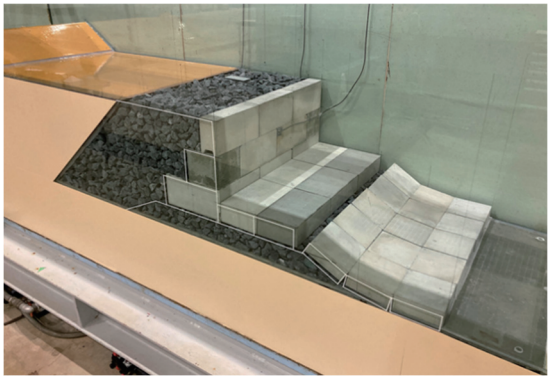


図-5　護岸模型写真

象に気候変動の影響を考慮した設計事例を公開している他，村上ら[3]や村上ら[4]は深い円弧状の断面を有するフレア型護岸の防波性能・越波阻止性能に対する海面上昇の影響を評価している．一方で，施工断面を想定した議論は十分になされていない．そこで，本研究では施工過程のブロック積護岸の被災再現実験により，潮位の変化が施工中の低天端構造物の被災メカニズムに及ぼす影響を考察する．

2.　水理模型実験

(1)　実験方法

実験には**図-3** に示す延長 50 m，幅 0.6 m，高さ 1.2 m の二次元造波水槽を用いた．実験縮尺はフルードの相似則に基づく 1/20 とした．造波板前面から 22.5 m の位置に延長 9 m，勾配 1/30 の斜面を設け，その先を水平床とした．**図-4** に示すように水平床上に捨石マウンド，ブロック積護岸，根固ブロックおよび被覆ブロックを設置し，ブロック積護岸の背面に裏込石を充填した．製作したブロックの諸元を**表-1** に示す．ブロックはいずれもモルタル製とし，比重を無筋コンクリートの 2.3 に合わせて製作した．隣り合う方塊ブロックは互いに接しないように 1～2 mm の隙間をあけ設置し，ブロックの隙間を水が通過できるような構造とした．また，方塊 1 と方塊 2 の接触面には凹凸があり，滑動を抑制する構造となっている．捨石マウンドおよび裏込石には 4 号砕石（d_{50}=22 mm）を用い，裏込部より陸側は不透水性材料（木枠）とした．**図-3**，**図-4** に示す位置に容量式波高計，間隙水圧計およびプロペラ流速計を設置し，水位，水圧および水平流速を計測した．衝撃的波圧の作用を考慮しサンプリング周波数は 1000Hz とした．

表-1　製作ブロック諸元

	質量(kg)	体積(cm³)	代表寸法(cm)
方塊1	2.33	1,012.3	19.8×5.5×10.0
方塊2	5.04	2,192.2	19.8×11.0×10.0
方塊3	9.56	4,059.0	19.8×20.5×10.0
根固ブロック	3.42	1,485.0	19.8×12.5×6.0
被覆ブロック	1.32	574.9	11.7×11.7×4.2

表-2　実験条件

	波の種類	水位(m)	波高(m)	周期(s)	方塊の転落
Case1	規則波	0.625 H.W.L.	0.06	1.16	無し
Case2			0.11	1.16	無し
Case3-1	不規則波		0.06	1.16	1回目で転落
Case3-2					無し
Case3-3					無し
Case4	規則波	0.657 観測潮位	0.06	1.16	無し
Case5			0.11	1.16	1回目で転落
Case6-1	不規則波		0.06	1.16	2回目で転落
Case6-2					1回目で転落
Case6-3					無し

表-2 に実験ケースの一覧を示す．造波条件は被災時観測波浪を元とした不規則波，有義波高相当の規則波および最高波高相当の規則波とした．不規則波は造波信号作成時の初期乱数を変え 3 波群造波した．水位は施工時想

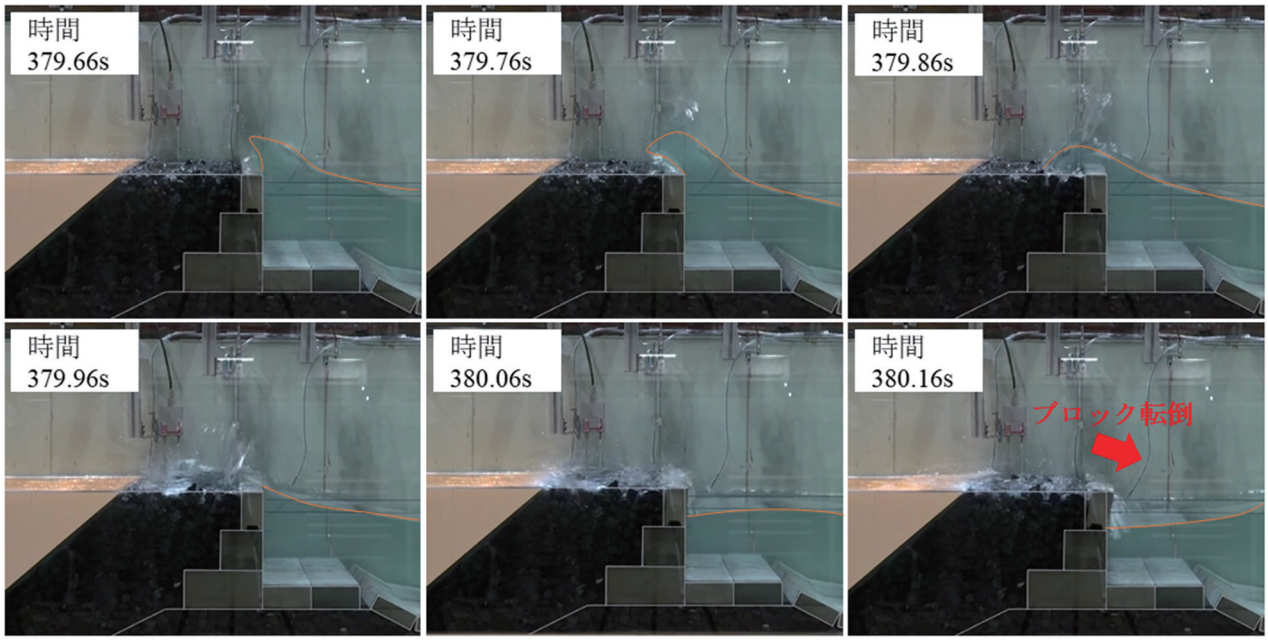


図-6　波の打ち込みによる方塊の転倒(Case3-1)　※水表面を橙線で加筆明示

定潮位 H.W.L.=T.P.+0.50 m と被災時観測潮位 T.P.+1.14 m に相当する 2 ケースとした.

実験は規則波では約 100 波，不規則では約 1000 波を 1 組として造波した．波を 1 組作用させる度に水槽内の水位を下げ, 裏込部の地形を計測した. 地形の計測にはレーザースキャナを用いた．ブロックの転倒が生じないケースは地形変化量が定常となるまで造波と地形計測を繰り返した．造波中にブロックの転倒が生じた場合は既定の波数に達する前でも造波を停止し，地形変化量を計測した．その後，転落が生じないケースと同様に地形変化量が定常となるまで造波と地形計測を繰り返した.

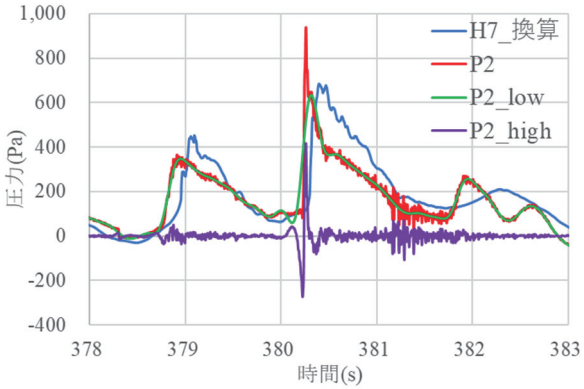


図-7　波の打ち込み時の作用波圧(Case3-1)

(2)　実験結果

a)　方塊ブロック転落

表-2 の実験ケースのうち，方塊ブロックの転落が生じたのは Case3-1, Case5, Case6-1, Case6-2 の 4 ケースであった．Case6-1 のみ 2 回目の造波で方塊ブロックが転落し，他の 3 ケースでは 1 回目の造波で転落が生じた.

図-6 に Case3-1 で方塊ブロックが転落する際の波の作用状況を示す．ブロック積護岸に衝突した波が上方に打ちあがり空気を巻き込みながら裏込部に打ち込む様子が確認できる．その後，護岸前面の水位が大きく低下する瞬間にブロックが転倒を開始する様子が確認できる．図-7 に方塊ブロック背面に設置した間隙水圧計 P2 で取得された圧力(赤線)と裏込部に埋め込んだ容量式波高計 H7 で取得された水位から換算した静水圧（青線）を示す．P2 では波の打ち込みが生じた 380 s 過ぎに鋭く尖ったピークが確認でき, H7 よりも大きな最大値を示している．このとき P2 では静水圧に加えて衝撃的な波圧が作用し

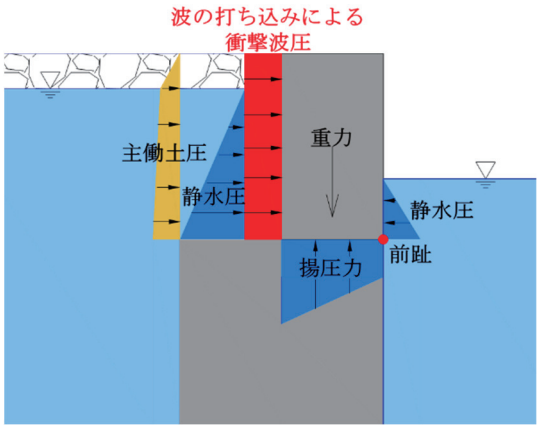


図-8　圧力の鉛直分布の仮定

ているものと考えられる．計測された水位や圧力から方塊ブロックに作用する転倒モーメントを評価し，ブロック積護岸の被災要因を分析するうえでは，静水圧と衝撃波圧を分け，それぞれの鉛直分布を仮定し，評価することが望ましい．そこで，周波数フィルタを用いて静水圧

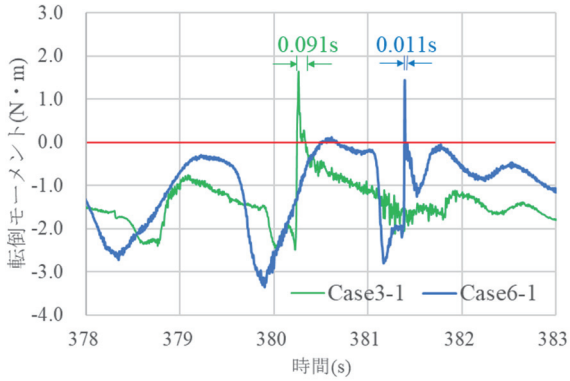


図-9　波の打ち込み時の転倒モーメント
(Case3-1　1 回目および Case6-1　1 回目)

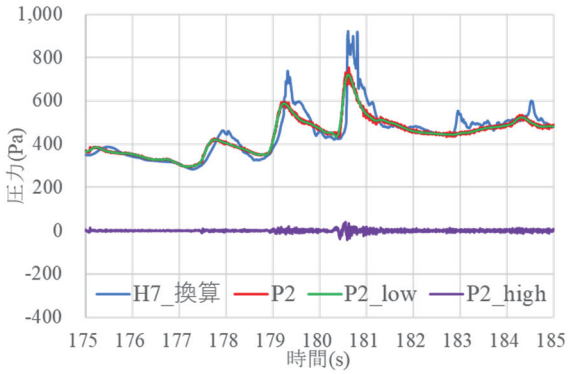


図-10　方塊ブロックが不安定となる際の作用波圧
(Case6-1　2 回目)

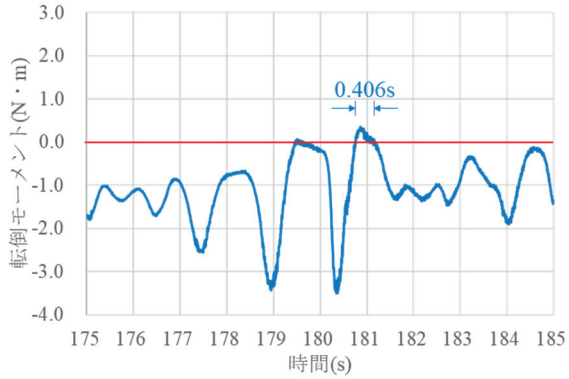


図-11　方塊ブロックが不安定となる際の転倒モーメント
(Case6-1　2 回目)

表-3　護岸背面における平均水位上昇量

(a)　初期水位 0.625 m

	水位上昇量(m)
Case1	0.008
Case2	0.046
Case3-1	0.005
Case3-2	0.005
Case3-3	0.005

(b)　初期水位 0.657 m

	水位上昇量(m)
Case4	0.019
Case5	-
Case6-1	0.011
Case6-2	0.011
Case6-3	0.013

と衝撃波圧を分離することを試みた．**図-7** 中の緑線と紫線は 5 Hz を閾値として低周波数成分（静水圧）と高周波数成分（衝撃波圧）に分離した結果である．低周波数成分では分離前に見られた鋭いピークが取り除かれ，H7 と同程度の最大値を示している．高周波数成分では最大 417 Pa のピークが見られる．静水圧を三角形分布，裏込部への波の打ち込みによる衝撃波圧を鉛直一様分布，その他裏込石から作用する主働土圧やブロックの前背面水位差によって生じる揚圧力や浮力の分布を**図-8** のように仮定する．Case3-1 および Case6-1（それぞれ 1 回目）において計測した水位・圧力から方塊ブロック前趾回りの転倒モーメント時刻歴を算定した結果を**図-9** に示す．転倒モーメントは海側に転倒する方向を正とし，転倒モーメントが正の値をとっている間は，転倒に対する抵抗モーメントより転倒モーメントが大きくなっていることを表す．Case3-1 では衝撃波圧が作用する 380 s 以降で瞬間的に転倒モーメントが大きくなっており，衝撃波圧の作用によって方塊ブロックの転倒が生じたものと考えられる．Case6-1 においても衝撃波圧により海側への転倒モーメントが発生しているがこの時転倒は生じていない．Case6-1 では衝撃波圧による海側の転倒モーメントの作用時間が 0.011s と Case3-1 の 0.091s と比較して短かったため，転倒が生じなかったと考えられる．Case6-1 では 1 回目の造波では方塊ブロックの転倒は生じず，2 回目の造波において 180 s 頃に護岸位置に到達する H_{max} 相当の波によって方塊ブロックが海側に傾斜し不安定となり，後続の波で転倒した．**図-10**，**図-11** に方塊ブロックが不安定となる時刻帯の作用波圧と転倒モーメントを示す．**図-7** に見られるような鋭いピークは見られず，高周波成分も小さいことから衝撃波圧の作用はほとんどなかったものと考えられる．転倒モーメントは圧力 P2 のピークから少し遅れて最大となる．**図-9** と比較すると小さいが海側への転倒モーメントが生じ，ブロックは不安定となった．転倒モーメントの作用時間は 0.406s と衝撃波圧と比較して長い．このような静水圧的な作用による海側への転倒モーメントは Case6-1 の 1 回目の造波の際も生じていたが，その際方塊ブロックは不安定になっていない．初期地形と 1 回目の造波の後の地形計測値を比較すると造波後の方塊ブロックは 1.2° 海側に傾斜していた．**図-9** に示すような波の打ち込みによる波圧が繰り返し作用することでブロックが前傾しより転倒しやすい状態となり，そこに静水圧的な作用による海側への転倒モーメントが生じたことで不安定化したと考えらえる．

Case4～6 では初期水位が 32 mm 高いことに加え，越波・越流量が大きくなることで護岸背面の平均水位上昇量が大きくなる．**表-3** に H7 で取得された水位の時間平均から算定した，護岸背面における水位上昇量を示す．初期水位の差は含んでいない．方塊ブロックの転倒が生じるケースでは転倒前までの時刻の水位を使用している．

Case5 は十分な水位上昇が生じる前に転倒が生じたため除外した．同一の波浪条件で比較するといずれも初期水位の高いケースで水位上昇量が大きくなっている．Case4～6 は護岸の前背面で水位差が生じやすい条件となっており，水位差による静水圧的な作用により，沖側への転倒モーメントが生じやすいと考えられる．

Case6-2 では**図-9** と同じく波の打ち込みによる衝撃波圧の作用によりブロックが転落した．同じ波群で H.W.L. 時の Case3-2 でも波の打ち込みは発生していたが，波圧が小さくブロックの転倒は生じず，同一の波群であっても潮位条件の違いにより被災の有無に差が生じることが確認された．

Case3-3 と Case6-3 ではいずれもブロックの転倒は生じなかった．Case3-3 では他のケースと同様に衝撃波圧が発生していたが，波圧が小さく転倒は生じなかった．Case6-3 で被災しなかった要因として波の打ち込みによる衝撃波圧の大きさとその出現頻度が考えられる．Case6-3 において地形計測値から方塊ブロックの傾きを算定すると 1 回造波後で 0.5°，2 回造波後で 0.8° であり，Case6-1 と比較して小さい．方塊ブロック背面の P2 で観測された衝撃波圧の上位 2%平均値を比較すると Case6-1 が 180 Pa であるのに対し，Case6-3 では 133～163 Pa と小さいために方塊ブロックが前傾せず，静水圧の作用による転倒モーメントによって不安定化しなかったものと考えられる．このことから，静水圧の作用によって方塊ブロックの転倒が生じる場合でも，それまでに繰り返し作用する衝撃波圧の影響が大きいと考えられる．

H_{max} 相当の規則波を作用させた Case2 と Case5 では初期水位の高い Case5 でのみ転倒が生じた．Case2 では造波直後の数波で打ち込みによる衝撃波圧が生じるが転倒モーメントは 0 未満であり，ブロックの転倒は生じなかった．その後，重複波浪場が形成されると静水圧的な波圧が支配的となり，転倒モーメントはさらに小さくなった．Case5 では Case2 と同様に造波直後に衝撃波圧が生じるが波圧は Case2 と比較して大きく，海側への転倒モーメントが繰り返し作用することで，重複波浪場が形成される前に方塊ブロックが転倒した．

b)　裏込石の洗堀

図-12 は方塊ブロックの転落が生じない Case6-3 において裏込部の 1000 波毎の縦断地形変化を示したものである．縦軸は裏込部の地形変化量 Δz を中央粒径 d_{50} で無次元化したもの，横軸は方塊ブロック前面からの距離 x をブロック幅 B で無次元化したものを表す．裏込部の洗堀は初めの 1000 波で大きく進行し，その後は変化量が小さくなっている．この傾向は他のケースでも同様であった．Case6-1 を除けばブロックの転倒が生じたのは 1 回目の造波である．Case6-1 の転倒が前述の水位差による静水圧によることを考慮すると裏込石の洗堀に伴いブロック背面に作用する衝撃波圧が増加し，転倒に至るような被災形態は今回の実験では確認されなかった．

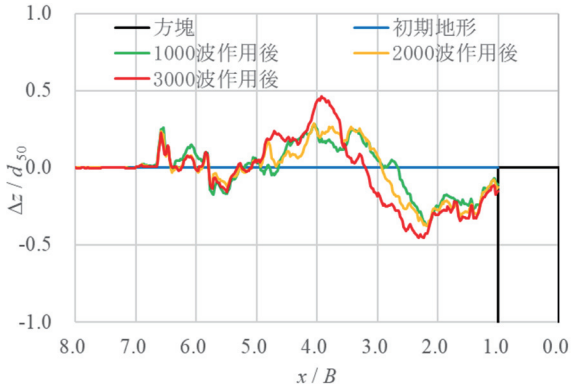


図-12　裏込部の縦断地形変化 (Case6-3)

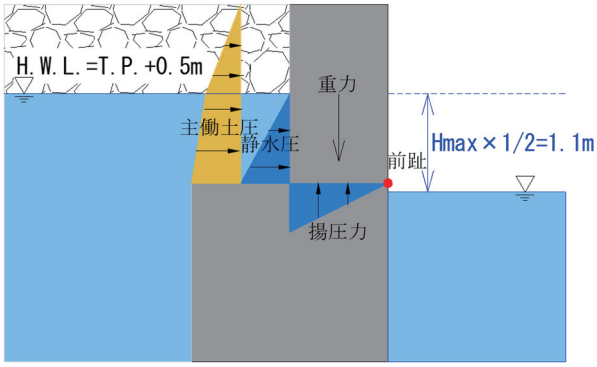


図-13　施工時に想定した外力条件

3.　考察

施工時想定条件と被災時条件を比較し被災に至った要因と対策について考察する．

(1)　施工時想定条件との差異

施工時には前述の通り，波高に 1 年確率波高 H_{max}=2.2 m，潮位に H.W.L.= T.P.+0.5 m を想定し，**図-13** に示すように波の谷が作用する際の静的な力のつり合いから安定性を評価している．この条件ではブロック前趾回りの転倒モーメントに対して安定となるが，実験では越波による背面水位の上昇と衝撃波圧の作用によって転倒が発生している．今回対象としたような越波・越流による陸側からの波圧が問題となるような構造物では静的な力のつり合いのみでなく，越波水の運動を考慮する必要があり，特に波の打ち込みの発生を予測することが重要である．

(2)　越波水の運動

高橋ら [5] は越波現象を「打ち込み時」と「越流時」の 2 つに分けて考え，それぞれの水位分布をモデル化してい

る．図-14 に Case3-3 と Case6-3 の H_{max} を対象にモデル化した越波水の水位分布を示す．図中の点線が打ち込み時の水位分布，一点鎖線が越流時の水位分布，実線が 3000 波作用後の裏込部の地形である．越流時の水位は潮位の高い Case6-3 で全体的に高い結果を示している．高橋らは越流時の流速が水位の 1/2 乗に比例することを示しており，越流時水位の違いが地形変化量の差につながっているものと考えられる．

打ち込み時の水位分布は両者で大きく変わらないが，どちらも方塊ブロックより陸側の裏込部に波が打ち込む結果となっており，衝撃波圧の発生が予想される．波の打ち込み位置を把握することで，裏込部への打ち込みを避けるようなブロックの配置・構造の立案が可能となる．

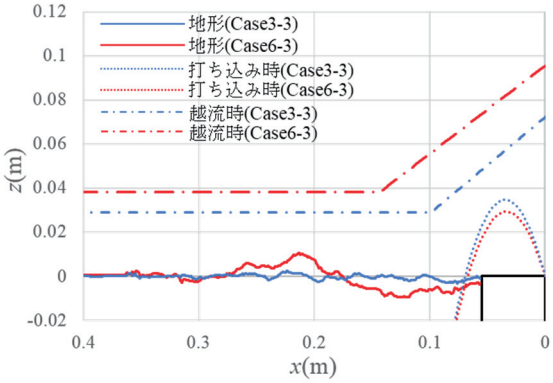


図-14　越波水の運動と地形変化

4.　結論

施工過程の低天端構造のブロック積護岸を対象に初期水位を変えた被災再現実験を行い，以下の主要な結論を得た．

施工時に想定し安定照査を実施していた H.W.L.=T.P.+0.5m の潮位条件においても，実験では波の打ち込みに伴う衝撃的な波圧の作用による方塊ブロックの転倒が生じた．安定照査では護岸前面に波の谷が作用する際の静的な力のつり合いから安定性を評価しているが，越波・越流による陸側からの波圧が問題となるような構造物では静的な力のつり合いのみでなく，越波水の運動を考慮する必要がある．

ブロックの被災メカニズムとして①一度の衝撃波圧の作用により，ブロックの転倒が生じるもの，②ブロックが転倒しなくとも衝撃波圧が繰り返し作用することでブロックが徐々に前傾し，その後静水圧的な作用による転倒モーメントによってブロックが不安定化するものの 2 つが確認された．①は初期水位によらず確認されたが，②は護岸の前背面の水位差が大きくなる高潮位の条件でのみ確認された．被災を防ぐためには，いずれのメカニズムに対しても波の打ち込みの発生を予測し衝撃波圧を低減する対策が重要である．波の打ち込みは高橋らの手法に基づき打ち込み時の水位分布を評価することで出現位置を予測することが可能であり，効果的な対策の立案に寄与するものと考えられる．

今回の実験では被災の再現を主目的としたため，被災時に想定された外力条件を中心とした実験ケースの実施に留まった．ブロックが転落するという実験の特性上，計測機器の配置に制約があり，衝撃波圧の鉛直分布等に仮定が残っている．より詳細に現象を分析するために，数値シミュレーション等も活用しながらケース数を増やし，汎用性の高い施工検討手法を構築していくことが今後の課題である．

REFERENCES

1) 森信人，福井信気，志村智也：気候変動を考慮した我が国の三大湾の高潮最大潮位偏差についての研究レビュー，土木学会論文集 B2(海岸工学)，76 巻 1 号，pp. 1-12，2020. [Nobuhito, M., Nobuki, F. and Tomoya, S.: A review of maximum storm surge heights in Japanese three major bays considering climate change, *Japanese J. Jpn Soc. Civil Eng., Ser.B2(Coastal Eng.),* Vol 76, Issue 1, pp.1-12, 2020]

2) 国土交通省 港湾局：気候変動に対応した港湾の施設の設計事例集，2025. [MILT Ports and Harbours Bureau, Collection of case studies on port facility design to adapt to climate change, 2025]

3) 村上啓介，若村太郎，真木大介，上久保祐志：海面上昇に対するフレア型護岸の防波特性の変化について，海洋開発論文集, 第 23 巻, pp. 1117-1122, 2007. [Keisuke, M., Taro, W., Daisuke, M. and Yuji, K.: Changes of hydraulic characters on flaring shaped seawall against sea level rise, *Proceedings of Civil Engineering in The Ocean*, Vol 23, pp.1117-1122, 2007]

4) 村上啓介，新田純也，真木大介，上久保祐志，片岡保人：海水面上昇に対するフレア型護岸の越波阻止性能の保全に関する研究，海岸工学論文集，第 55 巻，pp. 821-825，2008. [Keisuke, M., Junya, N., Daisuke, M., Yushi, K. and Yasuto, K.: Study on maintenance of non-wave Overtopping performance of flaring shaped seawall, *Proceeding of Coastal Engineering, JSCE*, Vol.55, pp.821-825]

5) 高橋重雄，遠藤仁彦，室善一郎：1.混成防波堤上の越波水の運動と波力に関する実験的研究~親水性港湾構造物に関する水工的研究（第 1 報）~，港湾技術研究所報告，Vol.31,No.1,pp.3-50,1992[Shigeo, T., Kimihiko, E. and Zen-ichirou, M.: Experimental study on motions and forces of overtopping waves on compsite breakwaters, *Report of the Port and Harbour Research Institute*, Vol.31, No.1, 1992]

(Received February 4, 2025)
(Accepted May 15, 2025)

土木学会論文集, Vol. 81, No. 18, 25-18119, 2025.

EXPERIMENTS TO REPRODUCE DAMAGE ON THE BLOCK SEAWALL UNDER CONSTRUCTION

Tatsuya MIZUNO, Hiroshi DEGUCHI, Takeshi NISHIHATA, Keisuke HANEDA, Kazuya SHIBATA and Kazuma OOTSUKI

Typhoon No.7 of 2023, which passed through Osaka Bay in August 2023, caused damage to the block seawalls which was under construction in Awaji City, Hyogo Prefecture, as concrete blocks which made up the seawall fell off. The wave height was the equivalent one as expected. The damage was thought to have been caused by high tide. In this study, experiments to reproduce damage on the low crown seawall under construction were carried out and the influence of the disagreement of tide level on the mechanism of damage was considered. As a result, damage induced by impact wave pressure occurred even under the conditions of the design tide level. In addition, it was found that high tides could cause damage due to hydrostatic pressure difference between front and back of seawalls.