

既設防波堤ケーソンの予防保全的補強方法の開発

松林 卓^{*1}・安井 利彰^{*2}・岩波 光保^{*3}・川端 雄一郎^{*3}・水谷 征治^{*4}・森田 浩史^{*5}

Development of Preventive Reinforcement Method for Existing Breakwater Caissons

Taku MATSUBAYASHI, Toshiaki YASUI, Mitsuyasu IWANAMI, Yuichiro KAWABATA, Seiji MIZUTANI, Kouji MORITA

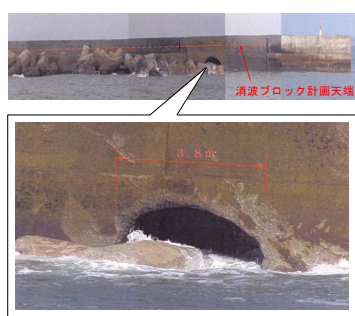


写真-1 防波堤ケーソンの
穴あき被災例

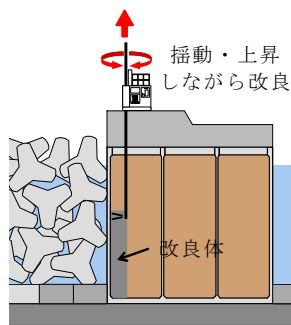


図-1 補強方法イメージ
(中詰材の固結)



改良なし 改良厚200mm 改良厚300mm
写真-2 衝撃実験結果の例
(同じ衝突回数における衝突面の破壊状況の例)

研究の目的

消波ブロックで被覆されたケーソン式防波堤では、台風などの荒天時に消波ブロックが移動し、ケーソンの壁に繰り返し衝突して穴が開く被災が生じる場合がある。しかし、予防保全的な対策はなされず、事後的な補修を繰り返しているのが現状である。特に、既設の防波堤ケーソンにおいては、消波ブロックや上部コンクリートの存在が施工上の支障となり、合理的に補強する方法が確立されていない。本研究の目的は、既設防波堤ケーソンを予防保全的に補強する方法を提供することにより、ストックされた社会基盤の安全性の向上に資することである。

技術の説明

既設防波堤ケーソンを予防保全的に補強するにあたり、設置された消波ブロックや上部コンクリートの撤去を伴うことは、施工中のケーソンの安定性を損なうことから好ましくなく、施工費用も膨大となるため現実的ではない。そこで、地盤改良技術に着目し、ケーソンの上方から中詰材を部分的に固結させることにより、既設防波堤の状態を極力乱すことなくケーソン壁の耐衝撃性を向上させる補強方法を考案した。考案した補強方法は、防波堤ケーソンにおける施工の実現性に関する検討および実際に被災経験のあるケーソンをモデルとしたコスト試算を行った。さらに、防波堤ケーソンを部分的にモデル化した試験体に対する補強の有無等をパラメータとした静的載荷試験および繰り返し衝撃載荷試験を実施し、補強効果の検証を行った。

主な結論

- ・ 既設の防波堤ケーソンに対して補強方法を適用する場合を想定した施工性の検討を行い、耐衝撃性向上のための補強工法として施工が可能である見込みを得た。
- ・ 予防保全的な補強方法と事後保全的な補修方法のコストをそれぞれ試算した結果、被災の発生確率が高い防波堤ではコストメリットがあることを確認した。
- ・ ケーソンを部分的にモデル化した試験体に対する静的載荷試験を実施した結果、本補強方法によりケーソン壁の静的耐力を向上させる効果があることを確認した。
- ・ ケーソンを部分的にモデル化した試験体に対する繰り返し衝撃載荷試験を実施した結果、本補強方法によりケーソン壁の耐衝撃性を向上させる効果があることを確認した。

*1 本店 技術研究所 企画・知財グループ

*2 本店 技術研究所 基盤技術研究グループ

*3 独立行政法人 港湾空港技術研究所 構造研究チーム

*4 東洋建設株式会社 土木事業本部 土木技術部

*5 東洋建設株式会社 美浦研究所

既設防波堤ケーソンの予防保全的補強方法の開発

松 林 卓^{*1} 安 井 利 彰^{*2}
 岩 波 光 保^{*3} 川 端 雄一郎^{*3}
 水 谷 征 治^{*4} 森 田 浩 史^{*5}

要 旨

消波ブロックで被覆されたケーソン式防波堤では、ケーソンの壁に消波ブロックが繰り返し衝突して穴が開く場合がある。しかし、そのような被災に対して予防保全的な対策はなされず、事後的な補修を繰り返しているのが現状である。既設の防波堤ケーソンでは、消波ブロックや上部コンクリートの存在が施工上の支障となり、合理的に補強する方法が確立されていない。そこで、地盤改良技術の一つである高圧噴射攪拌工法に着目し、既設防波堤ケーソンを対象とした予防保全的補強工法を考案した。考案した補強工法に対して、施工性およびコストに関する検討を行い、既設防波堤に対して施工が可能である見込みを得るとともに、被災の発生確率が高い防波堤ではコストメリットがあることを確認した。また、防波堤ケーソンを部分的にモデル化した試験体を製作し、補強の有無等をパラメータとした静的載荷試験および繰返し衝撃載荷試験の実施により補強効果の検証を行った。その結果、本工法の実施により、ケーソン壁の静的耐力および耐衝撃性を向上させる効果があることがわかった。

キーワード 防波堤／ケーソン／被災／予防保全／衝撃／補強／高圧噴射攪拌工法

目 次

- | | |
|------------------|-------------|
| 1. はじめに | 5. 施工コストの検討 |
| 2. 穴あき被災対策の現状と課題 | 6. 補強効果の検証 |
| 3. 耐衝撃補強工法の提案 | 7. まとめ |
| 4. 施工性の検討 | |

DEVELOPMENT OF PREVENTIVE REINFORCEMENT METHOD FOR EXISTING BREAKWATER CAISSONS

Taku MATSUBAYASHI	Toshiaki YASUI
Mitsuyasu IWANAMI	Yuichiro KAWABATA
Seiji MIZUTANI	Kouji MORITA

Synopsis:

In breakwater caissons covered with concrete blocks, repeated impact loads induced by collision of concrete blocks may cause localized failure of the wall. Generally, damaged walls are repaired after the localized failure is observed. On the other hand, a preventive reinforcement method for localized failure of caisson walls has not been established. In this study, an efficient and effective method of preventive reinforcement for caisson walls against repeated impact loads by using jet-grouting was proposed. From the result of examination of constructivity and cost of construction, it was confirmed that the reinforcement method is really possible to be conducted in actual construction works. The effect of reinforcement was evaluated by static loading tests and impact loading tests on models of caisson walls. The laboratory test results showed that the proposed reinforcing method is promising to enhance the resistance of caisson walls against static loads and repeated impact loads.

* 1 本店 技術研究所 企画・知財グループ
 * 2 本店 技術研究所 基盤技術研究グループ
 * 3 独立行政法人港湾空港技術研究所 構造研究チーム

* 4 東洋建設株式会社 土木事業本部 土木技術部
 * 5 東洋建設株式会社 美浦研究所

1. はじめに

港湾構造物では、衝撃砕波力や、消波ブロック、船舶、漂流物の衝突のような衝撃力が発生し、これらによって損傷する場合がある¹⁾。例えば、消波ブロックで被覆されたケーソン式防波堤では、台風などの荒天時に消波ブロックが移動し、ケーソンの壁に繰り返し衝突することにより穴が開く局部破壊（以下、穴あき被災と呼ぶ）が生じる場合がある。写真-1 に穴あき被災の例を示す。穴あき被災は中詰材の流出を招き、ケーソン本体の重量を減少させるため、防波堤の滑動に対する安定性を低下させる原因となる。穴あき被災は地域により多発する場合もあるが、これまで、本現象に対して事前に対策が施されることはほとんどなく、事後的な補修が繰り返されてきた。

一方、我が国では、台風が大型化する傾向にあり²⁾、穴あき被災のリスクは今後増加するものと予測される。また、社会資本の高齢化が今後急速に進行することを踏まえ、既に整備した社会資本に対し、損傷等が発生した後に対処する「事後的管理」から、致命的欠陥が発現する前に速やかに措置する「予防保全的管理」への転換が求められている³⁾。

以上の背景を踏まえ、本研究では、防波堤ケーソン壁の穴あき被災対策の現状と課題を整理し、既設の防波堤ケーソンの穴あき被災に対して予防保全的に補強する工法を提案した。また、本工法の施工性およびコストに関する検討を行うとともに、防波堤ケーソンを部分的にモデル化した試験体に対する静的载荷試験および繰返し衝撃载荷試験の実施により補強効果を検証した。

2. 穴あき被災対策の現状と課題

防波堤ケーソン壁の穴あき被災対策は、実施時期および構造物の状態によって図-1 のように区分することができる。現在のところ実施されている対策の大半は、既設ケーソンに対する事後的補修である。

事後的補修の方法は、中詰材の流出により発生したケーソン内の空洞を、水中コンクリートで充填することにより行われるのが一般的である。その具体的な施工方法の例を図-2 に示す。本方法は、ケーソンの沖側に設置された消波ブロックを一時的に撤去し、その後ケーソン壁に開いた穴を型枠で塞ぎ、上部コンクリートに削孔した穴から水中コンクリートを打ち込むものである。他の方法としては、上部コンクリートを部分的に撤去して空洞化したケーソン内に作業員が入り、被災により生じた穴をケーソンの内側から塞いだ後、水中コンクリートを打ち込む方法もある。これらの方法は、消波ブロックや上部コンクリートの撤去および復旧、隔室内での作業等において危険作業が発生するだけでなく、補修を行った隔壁以外のケーソンの条件は改善されないため、周囲のケーソン壁が被災を繰り返す場合がある。

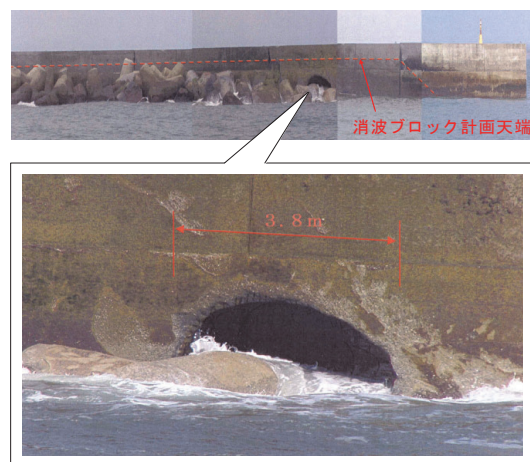


写真-1 防波堤ケーソンの穴あき被災例

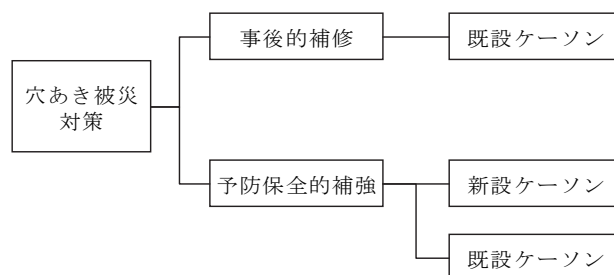


図-1 防波堤ケーソンの穴あき被災対策の分類

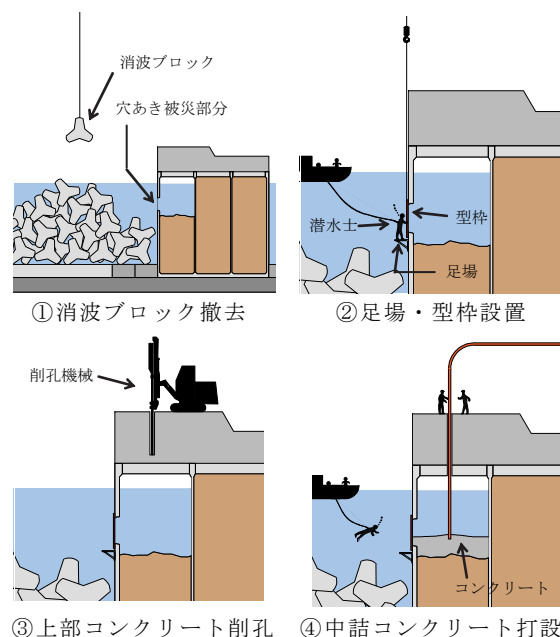


図-2 穴あき被災の事後的補修方法の例（外型枠工法）

一方、予防的補強の方法は、新設ケーソンを対象とした場合と既設ケーソンを対象とした場合の2つに分けられる。新設ケーソンについては、現行設計において穴あき被災を想定した安全性の照査は行われていないが、最

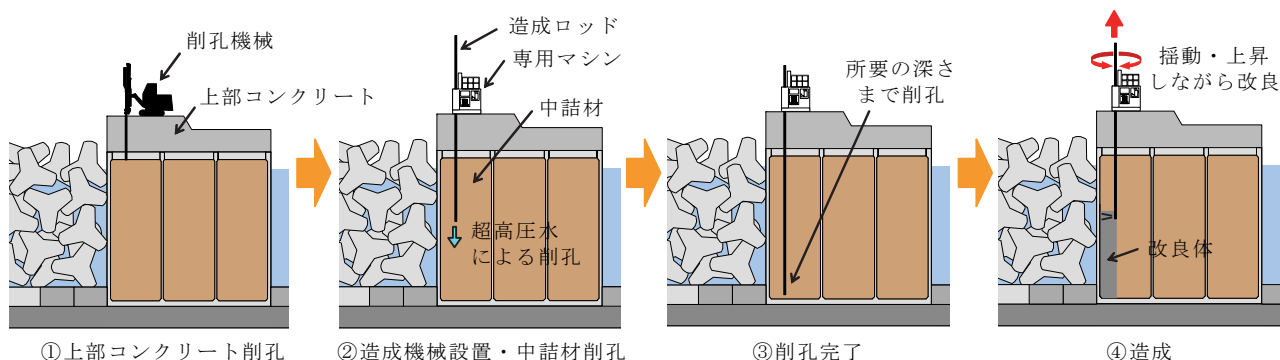


図-3 高圧噴射攪拌工法を用いた耐衝撃補強工法の施工手順

近の研究では、壁厚や鉄筋比がケーソン壁の耐衝撃性に及ぼす影響を評価する手法が提案されており⁴⁾、耐衝撃性を考慮したケーソン壁の設計が可能になると思われる。既設ケーソンについては、前壁の増厚あるいは前壁への緩衝材の設置、中詰材のコンクリート置換などが補強方法として考えられる。しかし、ケーソン前壁に増厚や緩衝材設置を施す場合、消波ブロックの一時撤去、仮置きおよび再据付けといった付帯的作業が必要となるため施工コストが莫大となるだけでなく、施工中における防波堤の安定性も低下するという課題がある。中詰材をコンクリートに置換する場合についても、上部コンクリートの部分撤去および復旧、置換部の中詰材撤去の必要が生じるため、同様の課題が生じる。また、中詰材からコンクリートへの置換によってケーソン重量が部分的に増加することがケーソンの安定性に与える影響を検討する必要がある。なお、ケーソン自体は補強せず、消波ブロックをより大きなものに置き換える、あるいはブロック同士を連結させる等によりブロックを動きにくくするといった対策も考えられる。しかし、ブロックの置き換えは経済面および施工中の防波堤の安定面から現実的でなく、ブロックの連結についても消波機能を保持しながら実施する適切な方法がないのが現状である。

既設の防波堤ケーソンを予防保全的に補強するためには上記の課題が挙げられ、これらを解決する施工方法の確立が望まれる。

3. 耐衝撃補強工法の提案

前述の課題を踏まえ、既設ケーソン壁の予防保全的な補強に着目した工法を提案する。既設ケーソン壁の耐衝撃性向上には、緩衝材設置のように壁に作用する衝撃力を低減させる処置、あるいは壁の増厚や中詰材のコンクリート置換のように衝撃を受ける側の抵抗を向上させる処置が必要である。そして、前述の課題を解決するためには、既設防波堤の状態を極力乱すことなく施工することが必要である。そこで著者らは、地盤改良技術に着目し、ケーソンの上方から中詰材を固結させることによりケーソン壁の耐衝撃性を向上させることを考えた。近

表-1 高圧噴射攪拌工法の適用地盤

対象地盤	N値の目安
砂質土	$N \leq 150$
粘性土	$N \leq 9$
砂礫	$N \leq 150$

年の地盤改良技術は施工の確実性や品質が向上しており、本設構造物にも利用されている⁵⁾。また、最近では、比較的自由な形状を改良する技術も開発されており⁶⁾、改良範囲の無駄が少ない経済的な施工が可能となっている。

また、固結による地盤改良工法の種類は、比較的高強度な改良体（一軸圧縮強度： 3N/mm^2 程度以上）を造成することができ、かつ浸透注入などに比べて改良の確実性が高い方法である高圧噴射攪拌工法を選択した。高圧噴射攪拌工法を用いた耐衝撃補強工法の施工手順を図-3に、適用地盤の目安を表-1に示す。防波堤ケーソンの中詰材としては砂が一般的であり、高圧噴射攪拌工法の適用地盤である可能性が高いと考えられる。本方法によれば、上部コンクリートに削孔した穴を介して上部コンクリートの上方から施工することが可能であるため、消波ブロックの撤去・仮置き・再据付けや上部コンクリートの大規模な撤去・復旧が必要ない。したがって施工中の防波堤の安定性を確保できるとともに、施工コストも低く抑えることができると考えられる。また、改良体の単位体積重量は砂の場合で 1.7t/m^3 程度であり、一般的な砂と概ね同等である。したがって、隔壁内をコンクリート（単位体積重量 2.3t/m^3 程度）で充填する場合のようなケーソン重量の大幅な増加はないと考えられる。

以上より、提案した補強工法（以下、提案工法と呼ぶ）は、既設の防波堤ケーソンの予防保全的な補強において想定される、付帯的作業によるコスト増大やケーソンの安定性低下といった課題を解決できると考えられる。

4. 施工性の検討

提案工法の施工性について検討した。提案工法では、削孔機械および高圧噴射攪拌工法の専用マシンを防波堤上に運搬する必要がある。また、地盤改良時には、固化

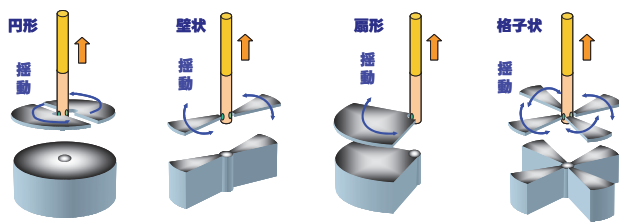


図-4 高圧噴射攪拌工法による改良形状の例



a) 扇形 b) 格子状 c) 壁状
写真-2 高圧噴射攪拌工法による改良体の例

材や水を供給するとともに、発生する排泥を処理・運搬する必要があり、特に沖に位置する防波堤の場合には運搬方法に留意する必要がある。これについては、クレーン付台船上に資機材を積載し、防波堤の港内側に接舷させることで防波堤上へ安全に運搬できる。また、排泥については、後述する排泥機構により排出された排泥を密閉式の土運船に貯留し、運搬することで周辺海域へ流出させることなく施工可能と考えられる。

提案工法では中詰材の改良範囲を必要最小限とするために適した改良形状を選定する必要がある。高圧噴射攪拌工法による改良形状の例を図-4 および写真-2 に示す。提案工法では、ケーソン壁背面を一定の厚さで改良する必要があるため、図-4 のうち、壁状あるいは扇形の改良形状を採用すればよいものと考えられる。

高圧噴射攪拌工法は、高い圧力を与えて噴射した流体によって地盤を切削破壊しながら地中内で固化材と土を攪拌混合して地盤改良を行う工法である。そのため、ケーソンの隔室のように閉鎖された環境下では、圧力によるケーソン隔壁の損傷や、排泥上昇時の閉塞が懸念される。同様な閉塞環境で高圧噴射攪拌工法の施工を行う場合、造成ロッドに圧力測定センサーを取り付け、圧力の上昇に合わせて造成ロッドを上下させる等により圧力を下げる処置を行っている例がある。防波堤ケーソンにおいても本技術を利用することにより、圧力管理が可能と考えられる。排泥の閉塞については、造成ロッドの周囲の排泥を促すために、排泥する方向に空気を送り出す機構が既に開発されており、これを利用することで閉塞のリスクを低減できると考えられる。ケーソン隔室内の圧力上昇および排泥閉塞対策の概要を図-5 に示す。

提案工法では、上部コンクリートに開けた穴から排泥することになるため、これを適切に処理することが海洋

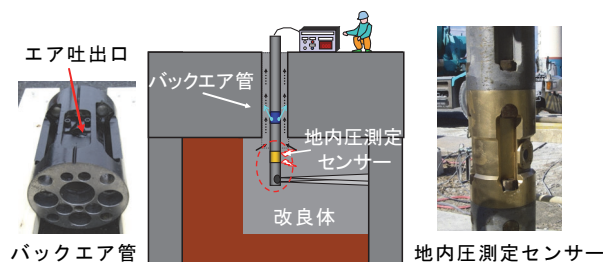


図-5 ケーソン隔室内の圧力上昇および排泥閉塞対策

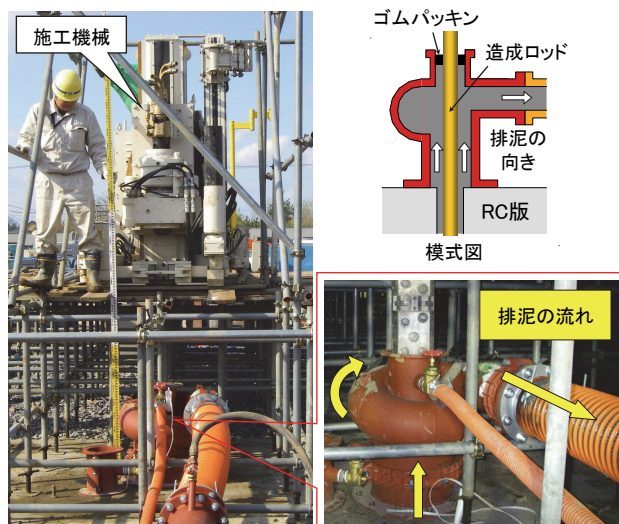


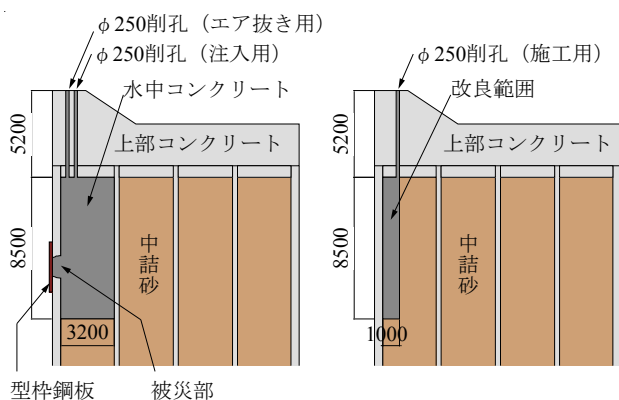
写真-3 排泥の誘導方法の例

環境を守る上で重要である。高圧噴射攪拌工法により既設 RC 床版下の地盤を改良するような場合には、写真-3 に示すように上昇する排泥を横向きに導く管が用いられている。提案工法においても、これを用いることで排泥を土運船の貯留槽まで海洋へ流出させることなく導くことが可能と考えられる。

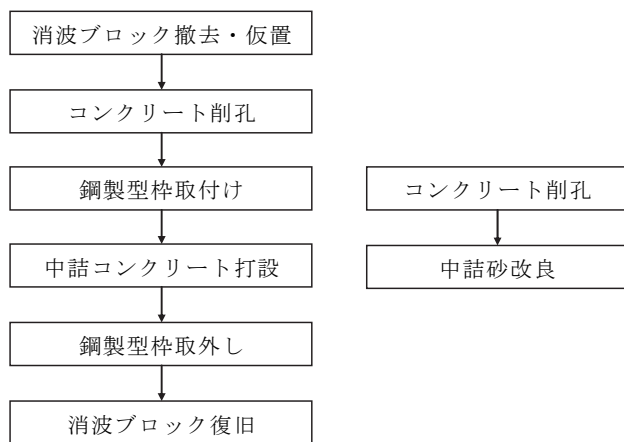
以上のような対策をとることにより、提案工法を既設防波堤の耐衝撃補強として施工することは可能と考える。

5. 施工コストの検討

提案工法のコストメリットを検討するため、被災経験のある防波堤ケーソンの隔室 1 室をモデルとして、現在一般的に行われている事後保全的補修と提案した補強方法による予防保全的補強のコストをそれぞれ試算した。想定した補修・補強の形状寸法を図-6、施工フローを図-7、主要船舶機械および施工数量を表-2 および表-3、事後保全的補修のコストを基準としたコスト比を表-4 にそれぞれ示す。同一施工範囲で比較した場合、事後保全的補修のコストに対して予防保全的補強のコストは 3 割程度となることを確認した。現状では、防波堤の穴あき被災箇所を事前に予測することは困難であるため、予防保全的補強は比較的広範囲について行うことになる。本コス



a) 事後的補修 b) 提案した補強工法
図-6 想定した補修・補強の形状寸法



a) 事後的補修 b) 提案した補強工法
図-7 想定した施工フロー

ト試算の結果だけで考えれば、ケーソン全体のうち 3 割程度以上が被災するような防波堤においては全延長を予防保全的に補強してもコストメリットがあることになる。

防波堤ケーソンの穴あき事例の調査結果例を表-5 に示す。これによると、被災経験のある防波堤ケーソンでは被災を繰返す傾向があり、全体の 9 割以上のケーソンが被災した例もある。一方、被災件数の少ない防波堤ケーソンでは極端に数が少ない。また、同じ防波堤ケーソンであっても隅角部など防波堤の線形に変化がある部分において被災が生じやすい傾向がある。したがって、予防保全的補強のコストメリットの有無を検討する際には、被災経験の有無や防波堤の線形などを考慮する必要がある。また、事後的補修においては、被災が発見された際に実施される臨時点検、被災箇所の詳細調査、補修方法の検討など、直接的な補修工事以外の費用が発生することも考慮すべきである。

本コスト試算においては、想定した改良範囲の形状が長方形であるのに対し、図-8 に示すような半円形の改良範囲で施工数量を計上している。図-4 に示したように、高圧噴射攪拌工法の中には壁状に改良できるものがある

表-2 主要船舶機械および施工数量（事後的補修）

a) 主要船舶機械

使用船舶機械	規格・寸法	用途
非航旋回起重機船	鋼D250t	消波ブロック撤去据付（水中用）
自航旋回起重機船	鋼D415t	消波ブロック撤去据付（気中用）
クレーン付台船	35～40t	上部工削孔用
引船	鋼D1000ps	起重機船用
引船	鋼D300ps	クレーン付台船用
潜水土船	180ps	水中玉掛・型枠取付け・取外し
クローラークレーン	150t吊り	陸上仮置きブロック転置
削孔機	グーテンホルン	φ250

b) 施工数量

工種	単位	数量	備考
80t消波ブロック撤去（気中）	基	3	鋼D415t
80t消波ブロック撤去（水中）	基	19	鋼D250t
80t消波ブロック陸上横持ち	基	22	陸上クローラークレーン
80t消波ブロック据付（水中）	基	19	鋼D250t
80t消波ブロック据付（気中）	基	3	鋼D415t
コンクリート削孔	m	10.4	クレーン付台船
鋼製型枠製作	式	1	
鋼製型枠取付け	箇所	1	
中詰コンクリート打設	m ³	123.2	

表-3 主要船舶機械および施工数量（提案した予防保全的補強工法）

a) 主要船舶機械

使用船舶機械	規格・寸法	用途
クレーン付台船	35～40t	上部工削孔用
クレーン付台船	35～40t	高圧噴射攪拌工法施工用
引船	鋼D300ps	上部工削孔台船用
引船	鋼D300ps	高圧噴射攪拌工法施工用
密閉土運船	鋼100m ³ 積	排泥運搬用（2隻）
削孔機	グーテンホルン	φ250

b) 施工数量

工種	単位	数量	備考
コンクリート削孔	m	5.2	クレーン付台船
高圧噴射攪拌工	m	8.5	有効半径2.5m, 改良角度180°
排泥運搬	t	73.2	比重1.4, 陸上運搬
排泥処分	t	73.2	比重1.4

表-4 コスト比

事後保全的補修 （外型枠工法）	提案した補強工法 （予防保全的補強）
1.0	0.33

表-5 防波堤ケーソンの穴あき事例の調査結果の例

港	防波堤	穴あき損傷の発生状況
A 港	a 防波堤	整備 15 函で、14 函損傷
B 港	b 防波堤	整備 35 函で、21 函損傷
C 港	c 防波堤	36 箇所（12 函）の調査で、6 箇所損傷（隅角部）
D 港	d 防波堤	60 箇所（20 函）の調査で、1 箇所損傷（隅角部）
E 港	e 防波堤	266 箇所の調査で、0 箇所損傷

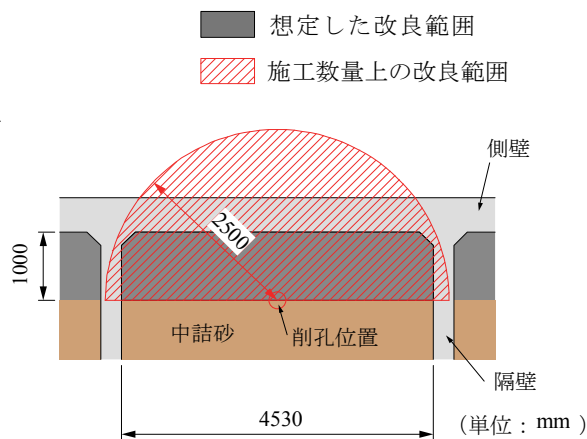


図-8 改良範囲

ため、これを用いた方が改良範囲のロスが少ないと考えられる。しかし、今回の試算ケースでは、壁状の改良形状で施工するには改良厚を確保するために削孔数を増やす必要があり、削孔数の増加がコストアップの要因となることが想定されたため、削孔箇所を1箇所とした改良範囲を設定した。一般的な高圧噴射攪拌工法の改良形状は円形断面であるため、それに比べればここで想定した高圧噴射攪拌工法の改良範囲の無駄は少ないが、まだ減少させるべき施工ロスが残っているのが現状である。より無駄の少ない地盤改良が可能となれば、提案工法のコストメリットは高まると考えられる。

6. 補強効果の検証

提案工法による防波堤ケーソンの補強効果を検証するため、防波堤ケーソンの隔室1室を模擬したコンクリート試験体を製作し、静的載荷試験および繰返し衝撃載荷試験の実施により補強効果を検証した。

6.1 静的載荷試験

(1) 実験の概要

試験体の形状、寸法および配筋を図-9に示す。試験面の壁厚は120mm、支間長は800mmである。壁厚および支間長は実構造物の1/5程度であり、鉄筋比は実構造物と同等となるように配筋した。鉄筋の材質はSD345である。

実験ケースを表-6に示す。実験パラメータは改良体の有無とし、改良体のあるものについては改良厚を200mm（実構造物で1m相当）とした。中詰材には表乾密度2.66～2.68の粗目砂を使用し、実施工を踏まえて締固めを行わずに隔室内に投入した。改良された中詰材は、圧縮強度が高圧噴射攪拌工法で想定される強度程度に調整したモルタルを想定した改良範囲に打設することにより模擬した。中詰材投入後の試験体の状況を写真-4に示す。また、試験日におけるコンクリートおよび改良体の物性値を表-6に示す。

載荷装置を図-10に示す。載荷には油圧ジャッキを用い、

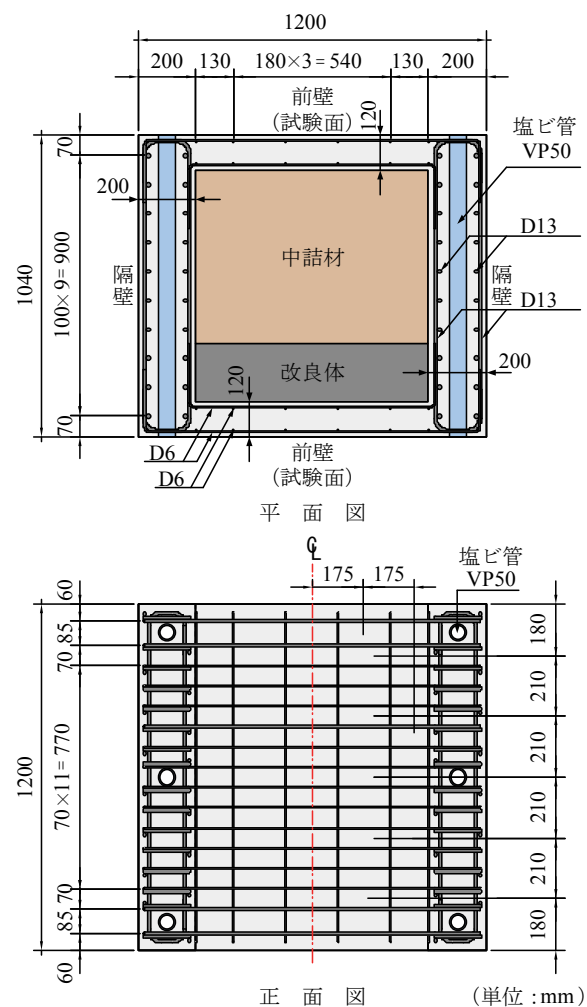


図-9 試験体の形状、寸法および配筋

表-6 実験ケースおよび材料物性値

実験 No.	改良体 の厚さ (mm)	物性値		
		種類	圧縮強度 N/mm ²	弾性係数 kN/mm ²
Sta-1	0	コンクリート	40.0	22.7
Sta-2	200	コンクリート	37.5	23.1
		改良体	5.8	11.0

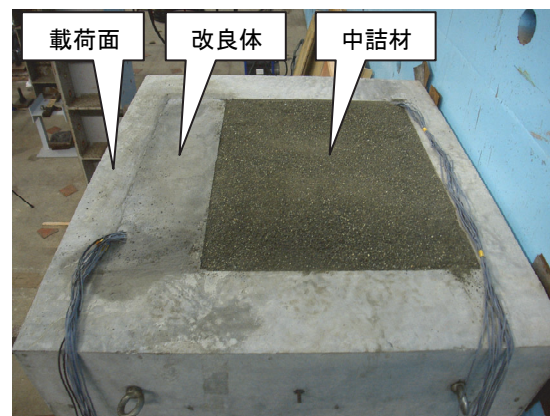


写真-4 中詰材投入後の試験体の状況

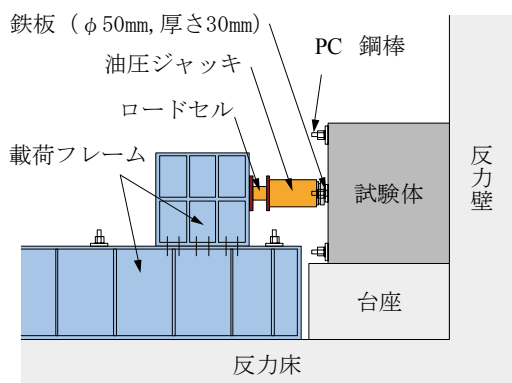


図-10 荷重装置（静的荷重試験）

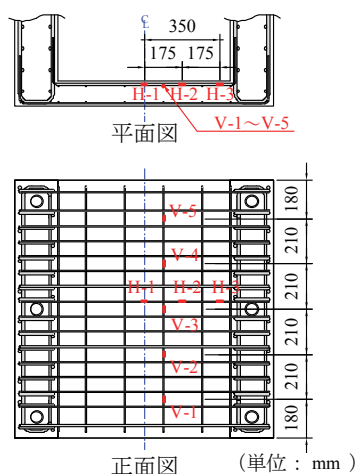


図-11 鉄筋のひずみ計測位置（静的荷重試験，繰返し衝撃荷重試験共通）

反力壁に固定した試験体の壁中央に、直径 50mm、厚さ 30mm の鉄板を介して静的荷重を作用させた。試験体は高さ調整のためコンクリート製の台座の上に設置し、試験体の隔壁部に設けた貫通孔に PC 鋼棒を通して反力壁に固定した。なお、PC 鋼棒は 1 本あたり 150kN の力で締め付けた。また、試験体と台座の間はビニールシートを敷いて縁を切った。

計測項目は、荷重、変位（油圧ジャッキのストローク）、図-11 に示す鉄筋のひずみ、図-12 に示す改良体内に設置した鉄板のひずみ（以下、鉄板ひずみと呼ぶ）および改良体に埋め込んだ鉄筋と壁の相対変位（以下、改良体天端変位と呼ぶ）とした。なお、鉄板ひずみの鉛直方向位置は荷重点と同じ高さとした。

(2) 中詰材固化による耐荷性の向上効果

図-13 に荷重－変位関係を示す。これによれば、中詰材を固化しない場合（Sta-1）に比べて中詰材を部分的に固化した場合（Sta-2）の方が、耐力が 1.5 倍以上となっており、明確な補強効果があることが確認された。

また、同一荷重における変位は Sta-1 よりも Sta-2 の方

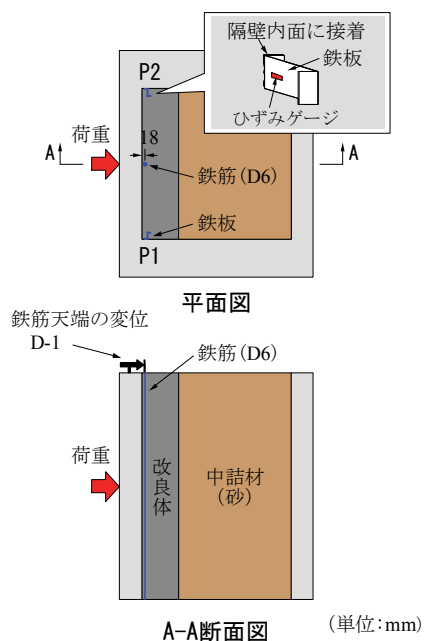


図-12 改良体周辺の計測

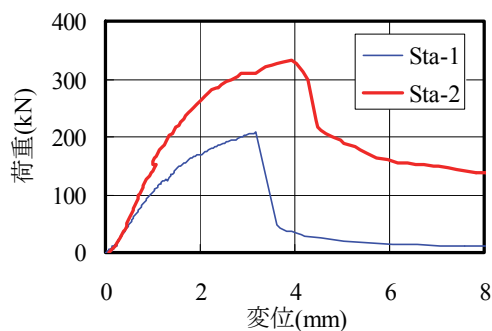


図-13 荷重－変位関係

が小さくなっており、改良体により変形が抑制されることが確認できた。

(3) 試験体の破壊状況

図-14 に、荷重点背面および荷重点位置における鉛直方向断面のひび割れ状況を示す。壁背面のひび割れは、中詰材および改良体を撤去した後にスケッチしたものである。Sta-1 では、ケーソン壁に明瞭なコーン状の破壊面が形成されており、押抜きせん断破壊により終局状態に至ったことがわかる。一方、Sta-2 では、ケーソン壁背面には明瞭な押抜きせん断破壊面は確認されなかったが、ケーソン壁から進展したひび割れが改良体内部に進展していた。特に、荷重点から下側に進展したひび割れでその傾向が顕著であり、上側に進展したひび割れは上方には進展せず、水平方向に進展した。

荷重と鉄板ひずみの関係を図-15 に、荷重と改良体天端変位の関係を図-16 に示す。図-15 によれば、片側（P1）において、荷重が約 100kN でひずみが急増しており、こ

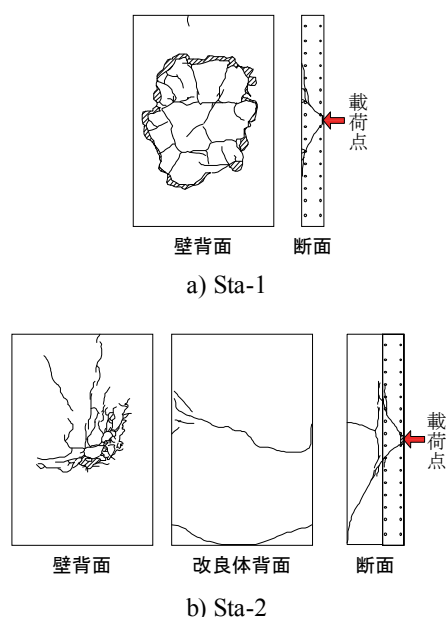


図-14 背面および断面のひび割れ状況

の時点でケーソン壁と改良体が剥離し始めたものと推察される。続いて約 200kN の時点で反対側 (P2) のひずみも急増した。これと同時に、改良体天端変位も増加し始めており、改良体天端に剥離が発生し始めたことが確認できる。荷重は約 330kN まで増加した後に減少し、それとともに改良体天端変位も減少した。この時点で、改良体も破壊したものと考えられる。

以上より、ケーソン壁と中詰材が剥離し始めてからも、ケーソン壁の押抜きせん断破壊を抑制する効果があることがわかった。これは、ケーソン壁と改良体が剥離していない部分が一体的に荷重に対して抵抗するためと考えられる。本実験では、載荷点よりも下側に生じた押抜きせん断ひび割れが改良体まで貫通していたことから、主に載荷点よりも下側の改良体がケーソン壁と一体的に挙動したものと推察される。

(4) 補強効果の評価に関する考察

試験体の破壊状況を踏まえ、改良体の下半分がケーソン壁と同様に押抜きせん断耐力に寄与すると仮定し、土木学会コンクリート標準示方書⁷⁾の設計押抜きせん断耐力の算定式を参考とした式〔1〕により、改良体の見かけの押抜きせん断耐力を試算した。

$$V'_{pcd} = f''_{pcd} \times u'_p \times t \quad [1]$$

ここに、

$$f''_{pcd} = 0.2 \times (f''_{cd})^{0.5} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

u'_p : 改良体の照査断面の周長

t : 改良体の厚さ (mm)

f''_{cd} : 改良体の圧縮強度 (N/mm²)

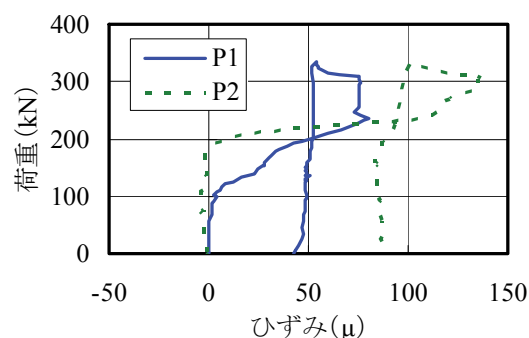


図-15 荷重－鉄板ひずみの関係

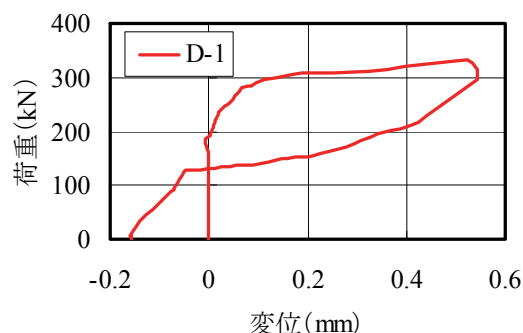


図-16 荷重－改良体天端変位の関係

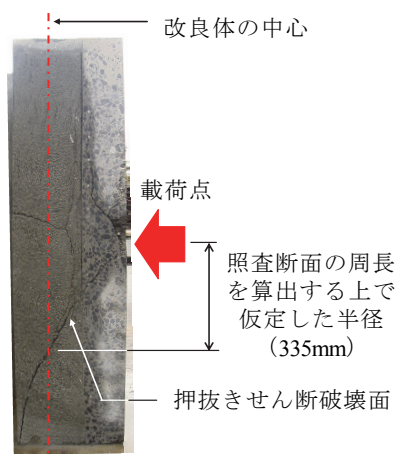


写真-5 ケーソン壁および改良体の破壊断面

ここで、照査断面の周長は、写真-5 に示すように試験体の破壊断面を実測し、下方半円部のみ有効として算定した。なお、一般的に押抜きせん断耐力の算定式は無筋コンクリートを対象としていないが、本実験では載荷点から下側の改良体には明瞭な押抜きせん断破壊面が形成されていたため、上記の式を適用できるものと考えた。式〔1〕によれば、改良体下方の見かけの押抜きせん断耐力は、約 100kN となり、図-13 で示した改良体の有無による耐力の差と同程度となった。

以上より、改良体の耐力の一部をケーソン壁の耐力に加えることにより、背面に改良体が存在するケーソン壁の耐力を評価できる可能性があることがわかった。ただ

し、設計上見込むことができる改良体耐力の割合の設定方法については今後の課題である。

6.2 繰返し衝撃載荷試験

(1) 実験の概要

試験体の形状、寸法および配筋は、静的載荷試験と同じとした。また、改良体や中詰材についても静的載荷試験と同様な方法で製作した。

実験ケースを表-7 に示す。同表には、各ケースの実験実施日におけるコンクリートおよび改良体の物性値を併せて示す。実験パラメータは改良体の有無、衝突速度および改良厚とした。衝突速度は、既往の研究において定式化が提案されている消波ブロックの移動速度⁸⁾を参考に設定した。

載荷に使用した試験装置を図-17 に示す。本装置の原理は、鋼製のフレームに 2 本のワイヤで吊り下げられた鋼製の重錘を所定の高さまで引き上げた後に解放し、重錘に振り子運動を生じさせるものである。重錘による衝撃荷重は前壁の中央部に作用させた。重錘は直径 500mm の球状であり、質量は 514kg である。衝突速度の調整は、位置エネルギーと運動エネルギーの釣り合い式から目標とする衝突速度が発生する高さを計算し、これに重錘の中心の高さを合わせるにより行った。試験体の固定方法は静的載荷試験と同様とした。

計測項目は、重錘の加速度、載荷点表面の残留変位および図-11 に示した鉄筋のひずみとした。加速度およびひずみの計測機器には、デジタル動ひずみ計を使用し、計測間隔 50 μ s でデータ収録した。載荷表面の残留変位の計測は、載荷点と同じ高さに水系を張り、水系から載荷点までの距離を鋼尺により測定した。また、繰返し衝撃載荷中、適宜試験体の載荷表面に発生したひび割れ状況を観察し、スケッチした。

実験は、目視による試験体の破壊状況と後述する残留変位の進展状況から、十分に押抜きせん断破壊面が形成されるまで、衝突を繰り返した。ただし、Imp-6 については、300 回まで衝突を繰り返したが押抜きせん断破壊する兆候が見られなかったため、この時点で実験を終了した。

(2) 試験体の破壊状況

Imp-1～5 の衝突面の破壊状況は、直径 50mm 程度の円形状のくぼみが発生し、繰返し衝突とともにその範囲が広がる破壊形態となった。同一衝突速度で概ね同じ回数衝突させた後における衝突面の破壊状況の例を写真-6 に示す。改良体が存在し、改良厚が大きい場合の方が破壊の進展は緩やかであり、改良体の存在により壁表面の損傷が軽減されることが外観上確認された。Imp-6 については、実験終了時においても衝突点があわずかに削れた程度であり、破壊範囲の広がりには認められなかった。

Imp-1～Imp-5 における実験終了後の壁背面の破壊状況

表-7 実験ケースおよび試験体の物性値

実験ケース	実験パラメータ		試験体物性値		
	衝突速度 (m/s)	改良厚 (mm)	種類	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
Imp-1	2.0	0	コンクリート	35.4	24.2
Imp-2		200	コンクリート	36.3	23.8
			改良体	3.9	6.6
Imp-3	1.5	0	コンクリート	35.0	24.9
Imp-4		200	コンクリート	34.2	25.0
			改良体	5.9	9.3
Imp-5		300	コンクリート	37.7	22.7
			改良体	3.1	8.6
Imp-6	1.0	0	コンクリート	37.0	23.2

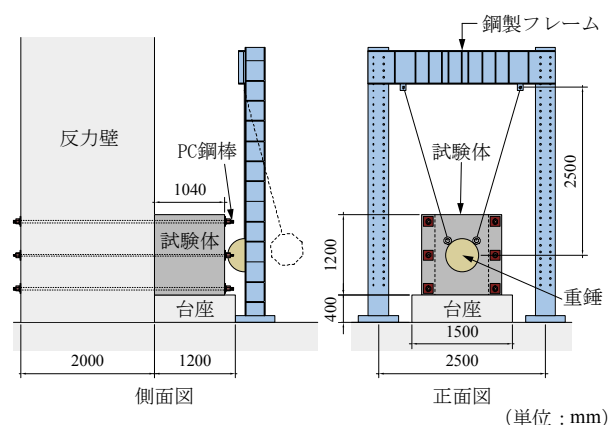
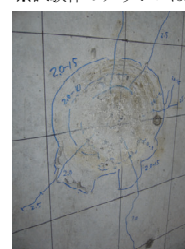


図-17 衝撃載荷試験装置

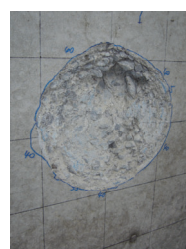
※試験体のメッシュは100mmピッチ



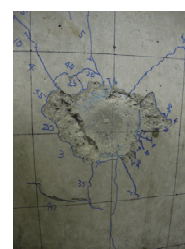
Imp-1 (改良なし)
V=2.0m/s, 15回目



Imp-2 (改良厚200mm)
V=2.0m/s, 16回目



Imp-3 (改良なし)
V=1.5m/s, 40回目



Imp-4 (改良厚200mm)
V=1.5m/s, 40回目



Imp-5 (改良厚300mm)
V=1.5m/s, 40回目

写真-6 衝突面の破壊状況の例

※斜線はかぶりコンクリートの剥落部を示す。

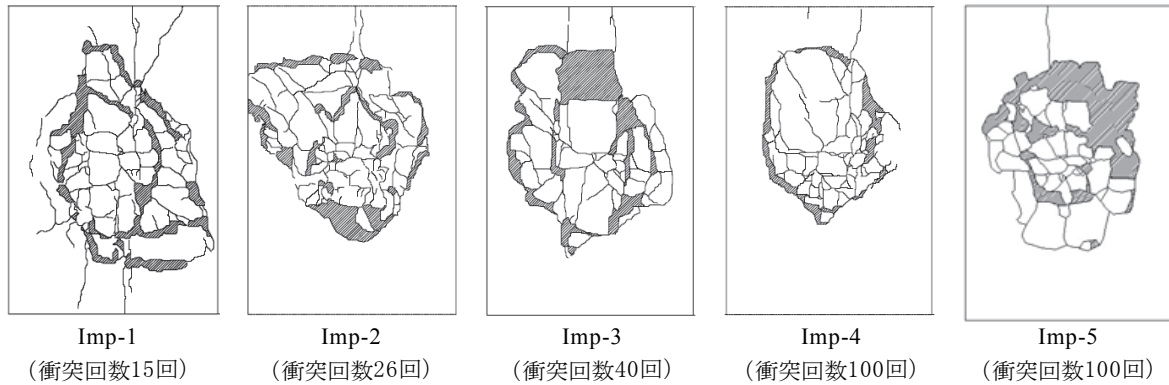


図-18 衝撃载荷試験終了後の壁背面の破壊状況

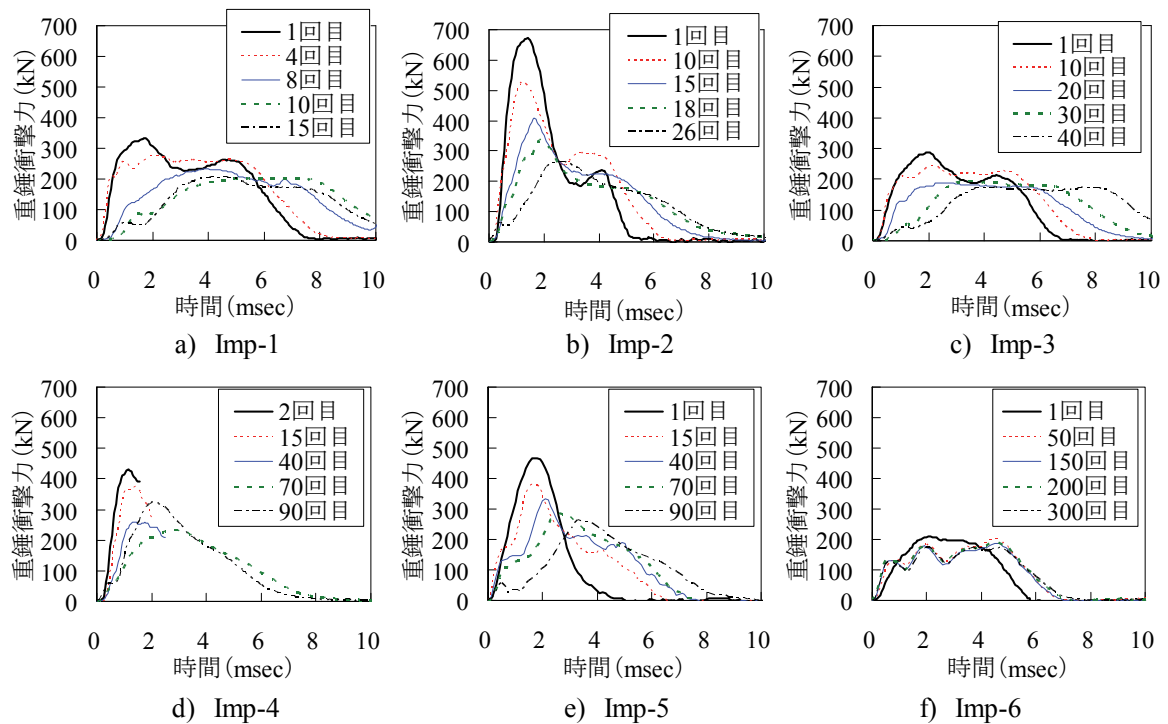


図-19 重錘衝撃力の時刻歴応答

を図-18 に示す。なお、改良体を設けたケースについては、改良体を撤去した後に破壊状況を観察したものである。図-18 の状態に至る衝突回数は各ケースで異なるが、最終的な破壊形態としては、いずれも押抜きせん断破壊であった。Imp-6 は、後述する残留変位の進展状況等から押抜きせん断破壊は生じなかったものと推測される。

(3) 重錘衝撃力

各実験ケースの代表的な衝突回数における重錘衝撃力の時刻歴応答を図-19 に示す。ここで重錘衝撃力とは、重錘の加速度に重錘質量を乗じたものであり、簡便に衝撃力を表す方法として広く用いられている⁹⁾。なお、Imp-4 において波形が一部表示されていないが、これは波形にノイズが生じた部分を消去したことによる。同一速度で比較した場合、背面に改良体を設けた Imp-2、Imp-4 およ

び Imp-5 では、改良体が無い場合である Imp-1 および Imp-3 と比べて最大重錘衝撃力が大きくなる傾向が見られた。これは、壁背面の改良体の存在によって壁の曲げ変形が拘束され、見かけ上壁の曲げ剛性が高くなったことによるものと推察される。また、改良体の有無に関わらず、繰返し衝突回数の増加に伴い衝突直後に励起する重錘衝撃力波形の最大値が小さくなるとともに、作用時間が長くなる傾向が見られた。これは、重錘の繰返し衝突による壁の損傷によって壁の剛性が低下し、壁と重錘の接触時間が長くなったことによるものと推測される。

(4) 残留変位

衝突点における残留変位と衝突回数の関係を図-20 に示す。試験体によって程度の差はあるものの、Imp-1～5 については図中に矢印で示すように、繰返し载荷の途中か

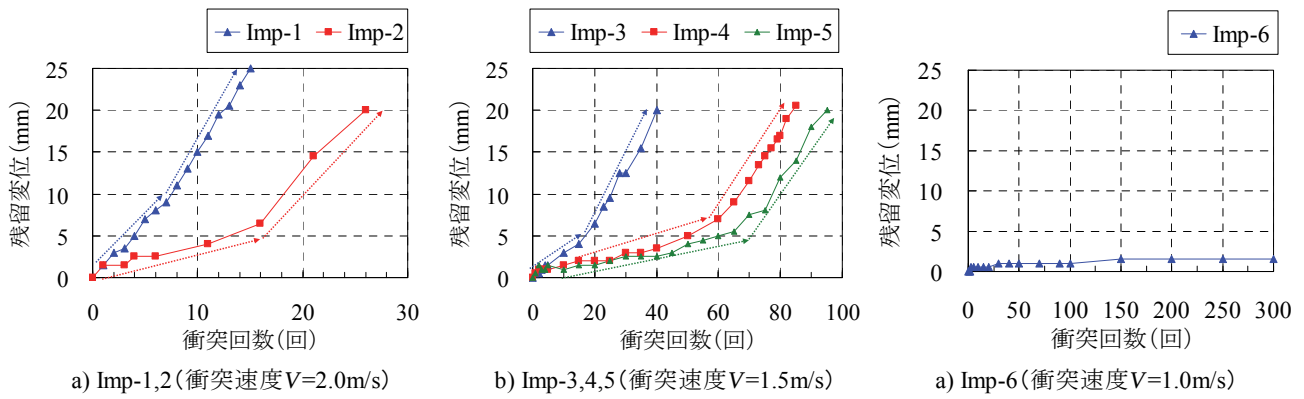


図-20 残留変位と衝突回数の関係

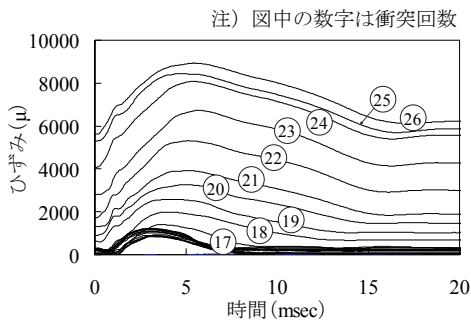


図-21 ひずみの時刻歴応答の例 (Imp-2, H-2)

ら残留変位の進展が早まる傾向が見られた。既往の研究によれば、押抜きせん断破壊が発生すると、繰返し衝撃荷重によって発生する残留変位が急速に進展することがわかっており¹⁰⁾、本実験においても押抜きせん断破壊面の形成により残留変位の進展が早まったものと考えられる。Imp-6については、実験を終了するまで残留変位の明確な進展は見られなかった。

(5) 鉄筋のひずみ

鉄筋のひずみの時刻歴応答の例 (Imp-2 の H-2) を図-21 に示す。これによると、17 回目程度までの波形に大きな差異は見られないが、それ以降は 1 回ごとにひずみの最大値が大きくなり、残留ひずみも明らかに増加している。このようなひずみの変化点においては、コンクリートにひび割れが発生し、鉄筋の応力状態に変化が生じていると考えられる。各ケースにおける鉄筋の最大ひずみと衝突回数の関係を図-22 に示す。同図には、図-20 において残留変位の進展に変化が見られた衝突回数を併せて実線で示した。これによれば、残留変位の進展に変化が見られた衝突回数付近において、最大鉄筋ひずみの値が変化しているもの多く見られた。鉄筋のひずみは曲げひび割れの発生などによっても変化するため、ひずみの変化が必ずしも押抜きせん断破壊の発生に対応しているわけでないが、残留変位の進展に変化が見られた時に押抜きせん断破壊により試験体に変化が生じたことが、鉄筋ひずみの値からも推察される。

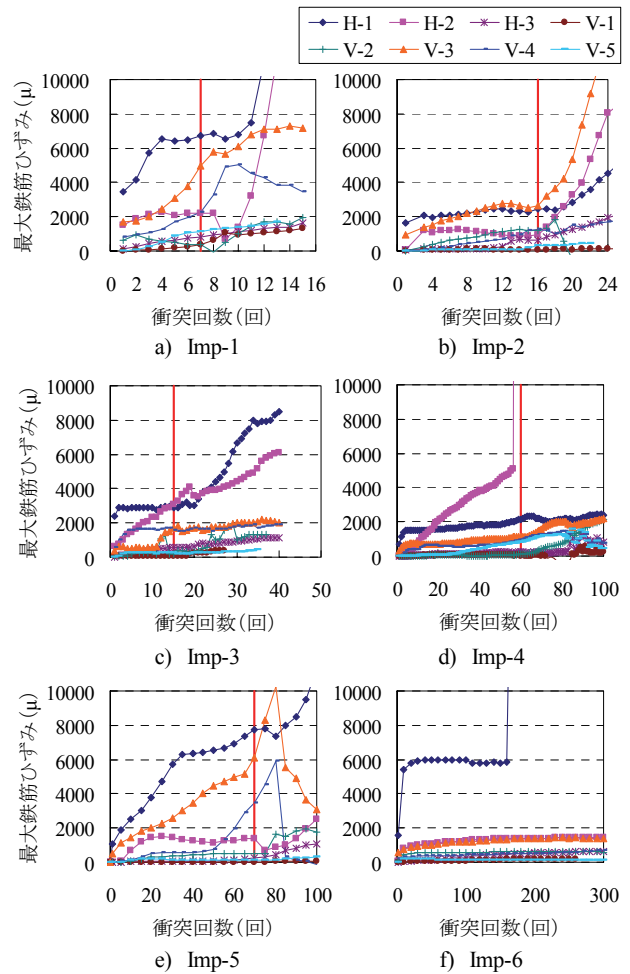


図-22 最大ひずみと衝突回数の関係

(6) 補強効果の評価に関する考察

著者らは既往の研究において、繰返し衝撃荷重が作用する RC 版を対象とした押抜きせん断抵抗性能を評価する方法を提案している¹¹⁾。具体的には、押抜きせん断破壊面を想定し、その破壊面におけるコンクリートの破壊エネルギーと衝突エネルギーの比が押抜きせん断破壊に至るまでの衝突回数と関係している点に着目し、式〔2〕の形で押抜きせん断破壊に至るまでの衝突回数を評価することを提案している。

$$N = \frac{1}{(\alpha \cdot R)^\beta} \quad [2]$$

ここに、

N : 押抜きせん断破壊に至るまでの衝突回数
(限界衝突回数) (回)

R : エネルギー比

$$R = E_i / E_1 \quad [3]$$

E_i : 衝突エネルギー

$$E_i = \frac{1}{2} M V^2 \quad [4]$$

M : 衝突体の質量 (kg)

V : 衝突体の衝突速度 (m/s)

E_1 : 押抜きせん断破壊面におけるコンクリートの破壊エネルギー

$$E_1 = A_p \cdot G_F \quad [5]$$

A_p : 押抜きせん断破壊面の面積 (m²)

G_F : コンクリートの破壊エネルギー

$$G_F = 10(d_{\max})^{1/3} \cdot f'_{ck}{}^{1/3} \quad (\text{N/m}) \quad [6]$$

$d_{\max}$: 粗骨材の最大寸法 (mm)

f'_{ck} : 圧縮強度の特性値 (N/mm²)

α : 鉄筋の影響を表す係数

β : 支持条件および拘束条件の影響を表す係数

そこで、上式を用いて本研究における衝撃载荷実験結果の評価を試みた。想定される押抜きせん断破壊面は、写真-7 に示す試験体断面の破壊状況から、載荷面を直径 100mm の円形、押抜きせん断破壊面の角度を 30° とした。また、試験体の配筋が同一であることから係数 α を一定と考えた。また、押抜きせん断破壊に至るまでの衝突回数（限界衝突回数）の実験値として、実験で残留変位に変化が見られた衝突回数として表-8 に示す回数をを用い、実験値に式〔2〕を近似させた。なお、実験において衝突速度を 1.0m/s とした Imp-6 では衝突回数 300 回において破壊を確認できていないが、破壊までの衝突回数を少なく評価することにより安全側に評価できると考え、300 回で破壊したと仮定した。改良厚を 300mm とした場合は取得したデータが Imp-5 のデータのみであるので、評価の対象から外した。

以上の仮定により求めた限界衝突回数とエネルギー比の関係を図-23 に示す。図-23 に示す関係を精度良く表すことができれば、想定される衝突条件から改良体の有無による限界衝突回数をそれぞれ算出し、その回数の比によって補強の効果を表すことができると考えられる。ただし、現状では実験データが少なく、評価の精度は高いとはいえない。評価精度の向上は今後の課題である。

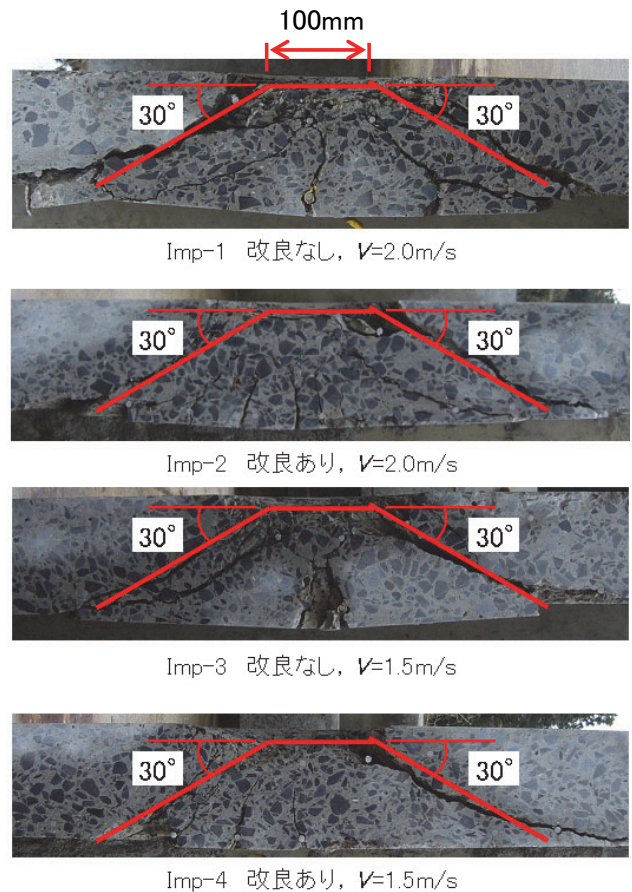


写真-7 試験体断面の破壊状況

表-8 仮定した限界衝突回数の実験値

改良の有無	衝突速度 (m/s)	限界衝突回数 (回)	根拠とした実験ケース
なし	2.0	7	Imp-1
	1.5	15	Imp-3
	1.0	300*	Imp-6
あり	2.0	16	Imp-2
	1.5	60	Imp-4

※安全側に評価するため、破壊したと仮定

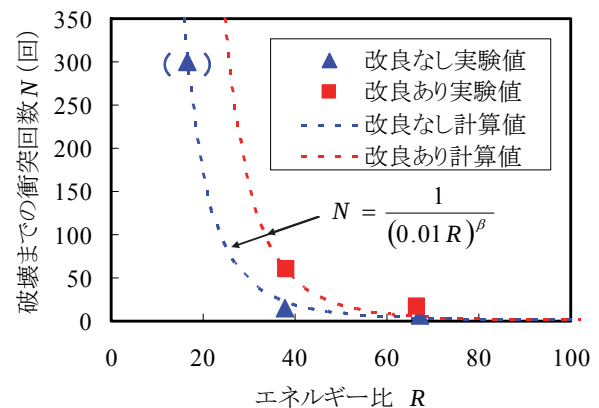


図-23 押抜きせん断破壊に至る衝突回数とエネルギー比の関係

7. まとめ

本研究では、既設防波堤ケーソンの穴あき被災に対して、消波ブロックや上部コンクリートを撤去することなく予防保全的に耐衝撃補強する工法を提案した。また、提案工法を既設防波堤に対して適用することを想定した施工性に関する検討および施工コストの検討を行い、既設防波堤の耐衝撃性向上のための補強工法として施工が可能である見込みを得るとともに、被災の発生確率が高い防波堤ではコストメリットがあることを確認した。さらに、ケーソンを部分的に模擬した試験体に対する静的載荷試験および繰返し衝撃載荷試験を実施し、提案工法によりケーソン壁の静的な耐力および繰返し衝撃荷重に対する耐衝撃性を向上させることが可能であることを確認した。

今後は、補強設計を可能とするための補強効果の定量評価に向けた検討および試験施工による施工性の検証が課題と考えている。

参考文献

- 1) 平山克也, 南靖彦, 奥野光洋, 峯村浩治, 河合弘泰, 平石哲也: 2004 年に来襲した台風による波浪災害事例, 港湾空港技術研究所資料, No.1101, 2005.6
- 2) 国際連合: 気候変動に関する政府間パネル (IPCC), 第 4 次評価報告書, 2007.11
- 3) 国土交通省: 平成 22 年度国土交通白書
- 4) 川端雄一郎, 岩波光保, 松林卓: 繰返し衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリート版の残存押抜きせん断耐荷性能, 港湾空港技術研究所報告, Vol.50, No.3, pp.43-64, 2011.9
- 5) 吉田宏: 高圧噴射攪拌工法の技術的課題と展望, 基礎工, Vol.37, No.5, pp.8-13, 2009.5
- 6) 安井利彰, 手塚広明, 竹岡正二: 自由形状・大口径高圧噴射攪拌工法—マルチジェット工法—, 建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集, pp.45-50, 2010.11
- 7) 土木学会: 2007 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 2007
- 8) 有川太郎, 池辺将光, 大崎菜々子, 黒田豊和, 織田朋哉, 下迫健一郎: 消波ブロックによるケーソン壁面押し抜きせん断破壊に関する研究, 港湾空港技術研究所報告, Vol.44, No.1, pp.43-83, 2005.3
- 9) 別府万寿博, 小暮幹太, 酒巻勝, 大野友則: RC はり部材の衝撃実験における衝撃荷重の計測と波形処理法, 土木学会論文集, No.724, I-62, pp.141-156, 2003.1
- 10) 松林卓, 岩波光保, 横田弘, 山田岳史, 竹鼻直人: 繰返し衝撃荷重を受ける二辺支持鉄筋コンクリート版の破壊性状に関する実験的研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 67, No.1, pp.149-164, 2011.3
- 11) 松林卓, 岩波光保, 川端雄一郎, 横田弘: 繰返し衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリート版の押抜きせん断抵抗性能評価に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.58A, pp.967-980, 2012.3