論文 既設防波堤ケーソンの耐衝撃補強方法に関する実験的研究

松林 卓^{*1}·森田 浩史^{*2}·岩波 光保^{*3}

要旨:消波ブロックの衝突による繰返し衝撃荷重を受ける既設の防波堤ケーソンを対象として、ケーソンの 中詰材を地盤改良技術の一つである高圧噴射攪拌工法により部分的に固化させることで耐衝撃性を向上させ る補強方法を考案した。この補強効果を検証するために、防波堤ケーソンの壁と中詰材をモデル化した試験 体に対する繰返し衝撃載荷実験を実施し、中詰材の部分的な固化の有無による破壊性状の比較を行った。そ の結果、鉄筋コンクリート壁の背面の砂が固化されることにより、鉄筋コンクリート壁の局部的な変形が抑 制されるとともに、壁が押抜きせん断破壊に至るまでの繰返し衝突回数が増加することが明らかとなった。 キーワード:防波堤ケーソン、予防保全、耐衝撃補強、高圧噴射攪拌工法

1. はじめに

港湾構造物では、設計荷重以上の波力や、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 らによって損傷に至る場合がある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壁に穴あき損傷が生じる場合がある。 ケーソン壁の穴あき損傷は中詰材の流出を招き、ケーソ ンの重量を減少させるため、防波堤の滑動に対する安定 性を低下させる恐れがある。しかし,防波堤ケーソンの 設計では、穴あき損傷のような壁の局部破壊については 考慮されていないのが現状である²⁾。筆者らは、既往の 研究において、消波ブロックの衝突による繰返し衝撃荷 重を受ける防波堤ケーソン壁を対象とした鉄筋コンクリ ート版部材の繰返し衝撃載荷実験を行い、その破壊挙動 を把握するとともに³⁾, 耐衝撃性能の評価に関する検討 を行ってきた⁴⁾。

耐衝撃性能の評価が可能となった場合,新設のケーソ ンに対して耐衝撃性を考慮した設計が可能となる一方で, 既設のケーソンにおいては性能不足と評価されるものが 生じると推測される。しかし,既設防波堤ケーソンの補 強は施工上の制約が多く,適切な補強方法が存在しない のが現状である。

そこで、本研究では、消波ブロックの衝突による繰返 し衝撃荷重を受ける既設防波堤ケーソンを対象とした耐 衝撃補強方法を提案するとともに、補強構造をモデル化 した試験体に対して繰返し衝撃載荷実験を行い、補強効 果の検証を行った。

2. 耐衝撃補強方法の提案

消波ブロックで被覆された一般的なケーソン式防波堤

*1 前田建設工業(株) 技術研究所 (正会員)
*2 東洋建設(株)美浦研究所
*3 (独)港湾空港技術研究所 構造研究チーム 工博 (正会員)



の形状および寸法の例を図-1 に示す。穴あき損傷が生 じるケーソンの前壁は,前面に消波ブロックが配置され, 背面には中詰材として一般的に砂が投入されている。ま た上面には厚さ数 m の上部コンクリートが打設されて いる。壁の前面に増厚などによる補強を施す場合,消波 ブロックの撤去および再据付作業が発生することにより, それまでの波浪による沈下やブロック同士のかみ合いに よって形成された比較的安定な状態を初期の不安定な状 態に戻してしまうという問題が生じる。また,ケーソン 内の中詰材を抜き出してコンクリートに置き換える方法 が考えられるが,これを実施するためには上部コンクリ ートや中詰材の撤去作業が発生することにより施工中の ケーソンの安定性が損なわれるという問題が生じる。

そこで筆者らは、高圧噴射攪拌工法による地盤改良技 術に着目し、これによりケーソン壁背面の中詰材を部分 的に改良することで耐衝撃性を向上させる補強方法を考 案した。従来、薬液注入をはじめとした地盤改良技術は、 その品質の不確実性から仮設としての利用が一般的であ ったが、高圧噴射攪拌工法は高圧水によって地盤を切削 することにより品質が大幅に向上し、最近では本設構造 物にも利用されるようになっている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⁾、



図-2 高圧噴射攪拌工法による施エイメージ

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。本方法によれば、上部コンクリートに削孔し、その 穴から施工することが可能であるため、消波ブロック、 上部コンクリートおよび中詰材を撤去する必要がない。 また、仮に想定を超える衝撃荷重が作用して壁に穴が開 いたとしても、中詰材が固化されていることにより、中 詰材の流出を大幅に抑制できると考えられる。高圧噴射 攪拌工法による施工イメージを図-2に示す。

3. 実験概要

3.1 試験体および実験ケース

試験体の形状, 寸法および配筋を図-3 に示す。試験 体は防波堤ケーソンのうち, 前壁を含む隔室1室を模擬 しており, 前壁の壁厚は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。試験体は 左右対称にしており, 1 体の試験体で載荷面を2 面とし た。また, 実構造物においては消波ブロックに面した前 壁に対して隔壁厚が小さいのが一般的であるが, 実験で は載荷面よりも先に隔壁が破壊することを避けるため, 隔壁厚を大きくしている。なお, 隔壁内には水平方向に 6 箇所の穴を設けているが, これは試験体に PC 鋼棒を通 して反力壁に固定するために設けたものである。

実験ケースを表-1 に示す。実験パラメータは改良体 の有無および重錘の衝突速度とした。載荷方法は同一速 度による繰返し載荷とした。なお、消波ブロックの移動 速度については、既往の研究において波速の関数として 定式化が提案されており⁷⁾、これを参考に設定した。ま た、case1 については繰返し載荷を行う前に衝突速度 V=0.5、1.0、1.5m/s にて予備的な載荷を行ったが、損傷 が軽微であったので、これによる影響は無視した。

各実験ケースの試験日におけるコンクリートの力学 特性および載荷面となる前壁の押抜きせん断耐力を表-2に、使用した鉄筋の力学特性を表-3に示す。ここで、 押抜きせん断耐力の計算は、後述する試験体の破壊状況 を踏まえて載荷面の形状を直径 50mmの円形とし、コン クリート標準示方書⁸⁾に基づき導出した。なお、コンク



図-3 試験体の形状, 寸法および配筋

表-1 実験ケース

ケース	改良体の厚さ	重錘の衝突速度	
No.	(mm)	(m/s)	
case1	200	2.0	
case2	0	2.0	
case3	200	1.5	
case4	0	1.5	

表-2 コンクリートの力学特性および押抜きせん断

ケース No.	圧縮強度 (N/mm ²)	弹性係数 (kN/mm ²)	押抜き せん断耐力 (kN)
case1	36.3	23.8	98.6
case2	35.4	24.2	97.8
case3	34.2	25.0	96.1
case4	35.0	24.9	97.2

表-3 鉄筋の力学特性

呼び名	降伏点 (N/mm ²)	使用部位
D6	447	側壁

注) 隔壁に用いた D13 は SD345 を使用

リート強度は材料試験より得られた特性値を用い,部材 係数 $\gamma_b = 1.0$ とした。

3.2 中詰材およびその改良体

中詰材には、表乾密度 2.66g/cm³、粗粒率 3.48 の砂を 使用した。中詰材は、実施工において締固めを行わずに 投入されることを踏まえ、締固めは行わなかった。中詰 材の改良については、試験体の寸法の制約上、実際の改 良に用いる機械は使用できないため、中詰材に使用した 砂を用いて改良体を模擬した低強度のモルタルを混練し、 所定の改良範囲(改良厚 200mm、実構造物で 1m 相当) に打設した。載荷試験前における改良体と中詰材の状況 を写真-1 に示す。また、改良体の配合を表-4 に、試 験日における力学特性を表-5 に示す。

3.3 載荷装置

本実験に使用した衝撃試験装置を図-4 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 られた重錘を所定の高さまでチェーンブロックで引き上 げ、重錘とチェーンブロックをつなぐ鋼線を切断するこ とにより重錘に振り子運動を生じさせるものである。重 錘は直径 500mm の球状であり、質量は 514kg である。 重錘による衝撃荷重は試験体の前壁中央部に作用させた。 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。

3.4 計測

本実験では衝撃載荷実験に先立ち衝突速度の計測を 行った。衝突速度は,重錘進行方向に対して直角方向か ら高速度カメラで撮影を行い,得られた画像を解析する ことにより求めた。

衝撃載荷時の計測項目は、重錘の加速度,載荷点表面 の残留変位および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、A/D 変換器を内蔵したデジタル動 ひずみ計を使用し、専用ソフトを用いて計測・記録用パ ソコンでデータ収録した。計測間隔は 50µs とし、計測デ ータのフィルタ処理は施さなかった。載荷表面の残留変 位の計測は、載荷点と同じ高さに水糸を張り、水糸から 載荷点までの距離を鋼尺により測定した。図-5 に鉄筋 のひずみの計測位置を示す。ひずみゲージは衝撃荷重に より曲げ変形した際の引張側、すなわち中詰材に近い方 の鉄筋に貼り付けた。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。



写真-1 改良体と中詰材の状況

表-4 改良体の配合

単位量(kg/m ³)		
水	セメント	細骨材
W	С	S
251	251	1200

表-5 改良体の力学特性

ケース	圧縮強度	弾性係数
No.	(N/mm ²)	(kN/mm ²)
case1	3.9	6.6
case3	5.9	9.3



図-4 載荷装置





図-5 鉄筋のひずみ計測位置

4. 実験結果

4.1 衝突速度

実験におけ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、これに重錘の高さを合わせることにより行った。高速度カメラによる画像解析結果から得られた速度を実速度と考え、目標速度に対する実速度の 比と衝突速度の関係を図-6 に示す。これによれば、目標速度に対して実速度が小さくなる傾向があり、速度が小さいほどその傾向が強い結果となった。鋼製フレームと重錘をつなぐワイヤやフック、アイボルトの接続部に 生じる摩擦が、実速度が小さくなった要因の一つと推測される。

4.2 試験体の破壊状況

各ケースの衝突回数1回目における載荷面表面のひび 割れ発生状況を図-7 に、代表的な衝突回数における重 錘衝突点の破壊状況を写真-2 に示す。改良体を設けな かった case2 と case4 は、それぞれ case1 と case3 と比べ て、載荷面が隔壁と接合する部分(図中に点線で記入) に発生する鉛直方向のひび割れが顕著であった。これよ り、改良体の存在によって壁の曲げ変形が抑制されたも のと推測される。一方、衝突点の破壊状況としては、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。同じ衝突速 度のほぼ同じ衝突回数における重錘衝突点の破壊状況を 比較すると、改良体を設けないケースの方が重錘衝突点 の破壊の範囲が広かった。また、改良体を設けた場合は そうでない場合と比べて衝突点を中心とした放射状のひ び割れが顕著であった。

各ケースの載荷終了後における壁背面の破壊状況を 図-8 に示す。なお、改良体を設置したケースについて は、改良体を撤去した後の壁面を観察したものである。 これによれば、改良体の有無によらず、壁背面には押抜 きせん断破壊と見られる破壊面が発生した。なお、破壊 面の形状には改良体の有無による明確な差異は認められ なかった。また、case1 および case3 において、改良体を 撤去する前の改良体の破壊状況を写真-3 に示す。これ によれば、改良体には明確な押抜きせん断破壊面は発生 しておらず、ひび割れ本数も少なかった。これより、改 良体は壁と一体となって破壊していないと考えられる。

4.3 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-9 に 示す。試験体によって差はあるものの,図中に矢印で示 すように繰返し載荷の途中か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



図-6 目標速度に対する実速度の比と衝突速度の関係





case1 写真-3 改良体の破壊状況

壊が発生すると,繰返し衝撃荷重によって発生する残留 変位が急激に大きくなることがわかっており³⁾,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。

case3

4.4 重錘衝撃力

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-10に示す。ここで重錘衝撃力とは、重錘に取り付 けた加速度計から得られた加速度に重錘質量を乗じたも のである。なお, case3 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。図によれば、背面に改良体を設けた casel お よび case3 では、改良体が無い場合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測される。 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。





10

4.5 鉄筋のひずみ

重錘衝擊力(kN)

鉄筋のひずみの時刻歴応答の例(case1のH-2)を図-11 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 ていると予想される。ひずみの値に顕著な変化が見られ たものについて、各載荷における鉄筋の最大ひずみと衝 突回数の関係を各ケースについて求めたものを図-12 に示す。なお、4.3 において、ある衝突回数を境に残留 変位の進展が早まる傾向が見られる原因は、押抜きせん 断破壊面の形成によるものであることを述べた。そこで、 図-12には、各ケースにおいて残留変位の進展に変化が 見られた衝突回数を実線で示した。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と、最大鉄筋ひず みの値に変化が見られる衝突回数は概ね対応していると 考えられる。すなわち、鉄筋のひずみの変化要因の一つ として、押抜きせん断破壊によるひび割れの形成が考え られる。なお、case3については、最大鉄筋ひずみの値に 変化は見られたが、他のケースほど急激な値の変化は見 られなかった。これは、壁背面の改良体が、押抜きせん 断ひび割れ形成後にひび割れの幅の増大を抑制したこと が要因の一つと推測される。

4.6 補強効果の検証

試験体の破壊状況から壁の破壊モードは押抜きせん 断破壊と考えられ,破壊に至った衝突回数が残留変位お よび鉄筋ひずみの計測結果から推測された。この衝突回 数に着目して改良体の有無を比較すると,衝突速度 2.0m/sの場合は7回(改良体無し)と16回(改良体有り), 1.5m/sの場合は15回(改良体無し)と60回(改良体有 り)であり,いずれも改良体が有る場合の方が破壊に至 るまでの衝突回数が多かった。したがって,本研究で提 案した補強の実施により,ケーソン壁が押抜きせん断破 壊に至るまでの繰返し衝突回数を増加させる効果が期待 できるといえる。

5. まとめ

本研究では,高圧噴射攪拌工法によって防波堤ケーソ ン壁の背面に位置する中詰材を固化することにより,壁 の耐衝撃性能を向上させる補強方法を提案した。また, 補強構造を模擬した試験体の繰返し衝撃載荷実験を行っ た結果,補強の実施により,ケーソン壁が押抜きせん断 破壊に至るまでの繰返し衝突回数を増加させる効果が期 待できることがわかった。補強効果の程度については, 改良体の強度や改良範囲による影響が考えられ,それら の影響を考慮した補強効果の定量評価方法については今 後の課題である。

参考文献

- 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
- 国土交通省港湾局監修:港湾の施設の技術上の基準・同解説,日本港湾協会,2007.7
- 3) 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



図-12 鉄筋の最大ひずみと衝突回数の関係

集 A1 (構造・地震工学), Vol. 67, No.1, pp.149-164, 2011.3

- 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, 2009.5
- 6) 安井利彰,手塚広明,竹岡正二:自由形状・大口径 高圧噴射攪拌工法ーマルチジェット工法ー,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) 有川太郎,池辺将光,大嵜菜々子,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
- 2007年制定コンクリート標準示方書[設計編],2007