

論文 高耐久性埋設型枠を設置した鉄筋コンクリート版の繰返し衝撃荷重に対する破壊挙動

松林 卓^{*1}・田畑 稔^{*2}

要旨：局所的な繰返し衝撃荷重を受けて押抜きせん断破壊する鉄筋コンクリート壁を対象として、その一部を高耐久性埋設型枠に置き換えた場合の破壊挙動を明らかにするために、同構造を模擬した版部材に対する繰返し衝撃載荷実験を実施した。その結果、繰返し衝撃荷重が作用する面を高耐久性埋設型枠に置き換えた場合には押抜きせん断破壊を抑制する効果は期待できないが、衝撃荷重が作用する背面側を高耐久性埋設型枠に置き換えた場合は、押抜きせん断破壊を抑制する効果が期待できることがわかった。また、埋設型枠とコンクリートの間に有害な剥離は認められなかった。

キーワード：埋設型枠、衝撃、鉄筋コンクリート版、押抜きせん断破壊

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防波堤ケーソンでは、波力により移動した消波ブロックがケーソンの側壁に繰返し衝突することにより側壁に穴が開く場合がある。穴あき被災の例を写真-1に示す。これに対し、ケーソンの壁に短繊維補強コンクリートを適用することにより耐衝撃性能を向上させる効果が得られることが既往の研究から明らかとなっている²⁾。

防波堤ケーソンの側壁のうち穴あき被災が懸念されるのは、消波ブロックが設置される港外側の壁である。したがって、耐衝撃性能を向上させる必要があるのも港外側の壁のみであるが、短繊維補強コンクリートを港外側のケーソン壁のみに適用することは施工上困難であり、全断面に短繊維補強コンクリートを適用すると不経済となる難点がある。

一方、短繊維補強モルタルで製作された高耐久性埋設型枠（以下、単に埋設型枠と呼ぶ）が開発され、実用化されている。埋設型枠は、型枠支保工および脱型作業が不要となることによる工期短縮効果や密実なモルタルが構造物表面に配置されることによる耐久性の向上効果が期待できる材料である。本埋設型枠における短繊維は、主に施工中に作用するフレッシュコンクリートの側圧に抵抗するために用いられているが、施工後の構造物に対しても短繊維補強効果が期待できる。これを防波堤ケーソンに適用した場合、港外側の側壁にのみ設置することが可能であるため、全断面を短繊維補強コンクリートで打設するよりも経済的に短繊維補強効果を側壁に付与できると期待される。図-1に適用のイメージを示す。し

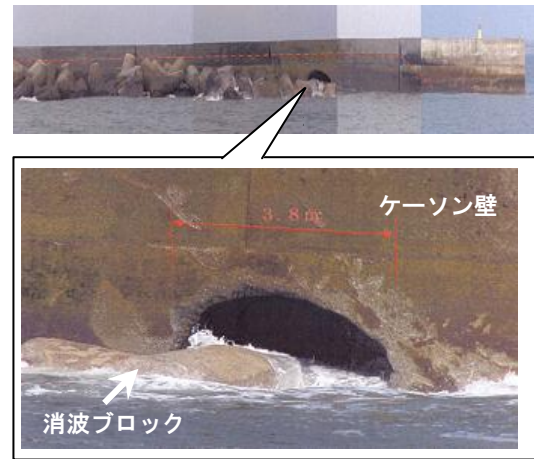
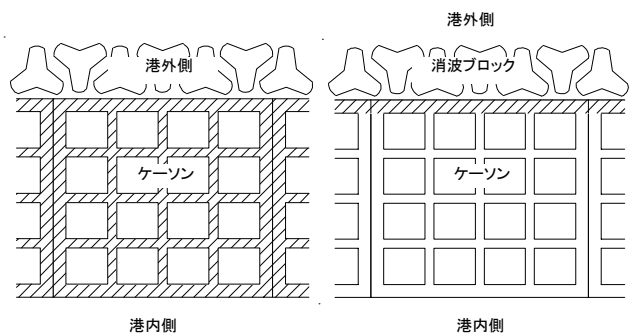


写真-1 防波堤ケーソンの穴あき被災の例



a) 短繊維補強コンクリート b) 高耐久性埋設型枠

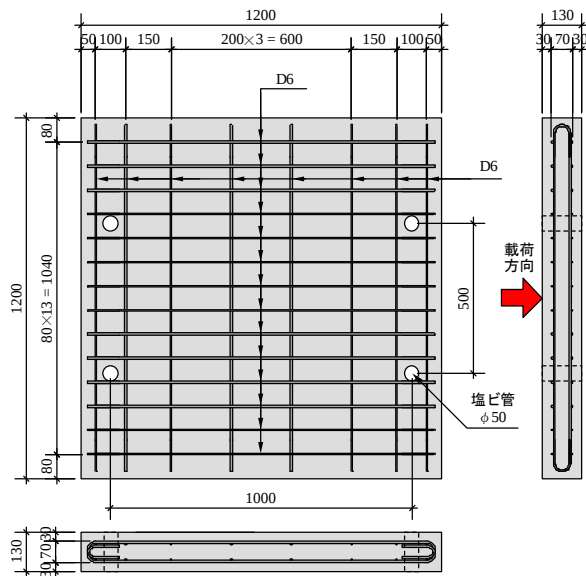
図-1 施工範囲（斜線部）のイメージ

かし、本埋設型枠を設置した RC 版部材の耐衝撃性能は明らかとなっていない。

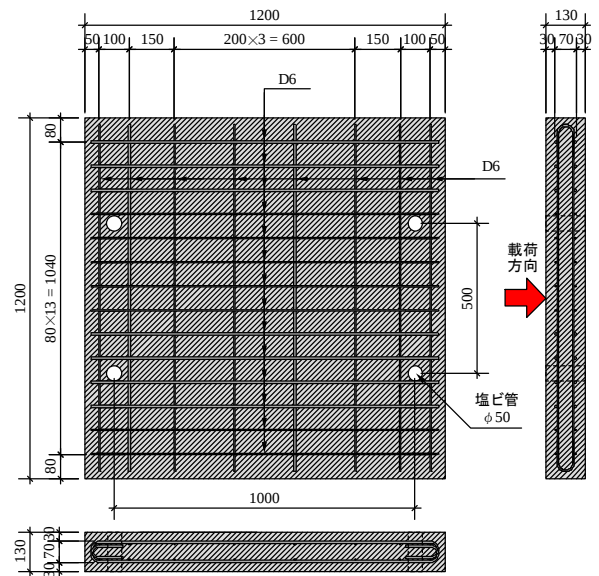
そこで、埋設型枠を設置した RC 版部材の繰返し衝撃実験を実施し、その耐衝撃性能について検討を行った。

*1 前田建設工業株式会社 技術研究所 基盤技術研究グループ 博(工) (正会員)

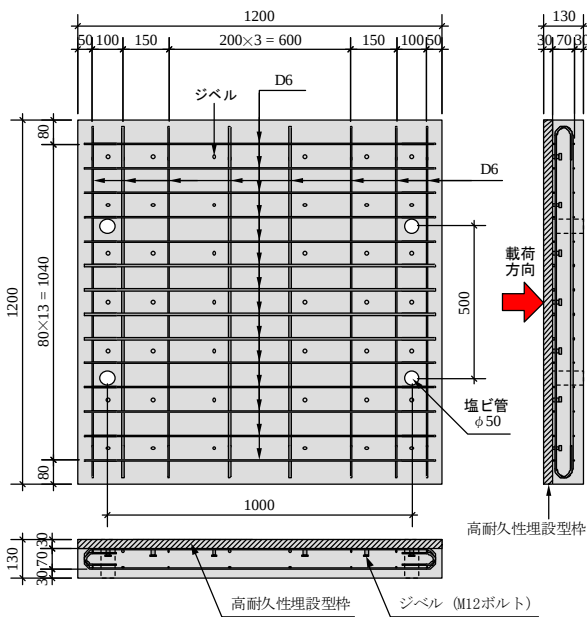
*2 日本 SEED フォーム技術研究会



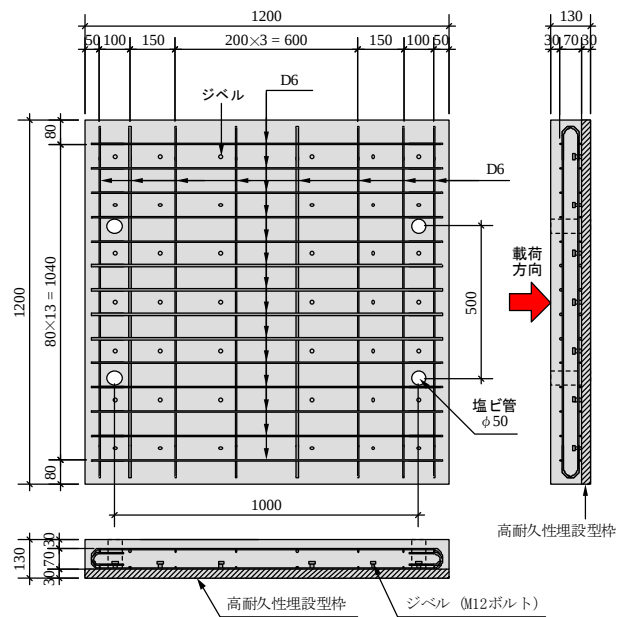
No.1 試験体（補強なし）



No.2 試験体（全断面短繊維補強）



No.3 試験体（衝突面に埋設型枠設置）



No.4 試験体（衝突背面に埋設型枠設置）

図-2 試験体の形状および寸法

2. 実験概要

2.1 試験体および荷荷条件

図-2 に試験体形状および寸法を示す。ケーソンの壁は、既往の研究²⁾を参考として二辺支持鉄筋コンクリート版にモデル化し、試験体の種類は短繊維補強の有無および埋設型枠の設置位置の相違により 4 種類とした。No.1 試験体は一般的なケーソン壁、No.2 試験体は全断面に短繊維補強コンクリートを適用した壁をそれぞれモデル化したものである。No.3 および No.4 試験体は、一般的なケーソン壁断面の一部を埋設型枠に置き換えた場合であり、衝突面および衝突背面にそれぞれ置き換えた場

の効果を確認する目的で埋設型枠を設置した。なお、埋設型枠には、後から打設するコンクリートとの剥離を抑制するためにジベルを設置した。試験体寸法は実構造物の 1/5 程度であり、鉄筋比は一般的な防波堤ケーソンの側壁と同程度とした。試験体に使用したコンクリートおよび埋設型枠に使用したモルタルの配合を表-1 に、実験実施日における圧縮強度を表-2 に示す。使用した鉄筋の材質は SD345 である。また、No.2~4 試験体で使用した短繊維は全て同種の PVA 短繊維であり、その力学的特性は表-3 のとおりである。

荷荷は、上記の試験体それぞれに対して同一質量の鉄

表－1 コンクリートおよびモルタルの配合

種 別	W/C (%)	短繊維混入率 (%)	単位量 (kg/m ³)						適用試験体
			W	C	混和材※1	S	G	Ad	
普通コンクリート	55	—	170	309	—	932	920	0.96※2	No.1,3,4
短繊維補強コンクリート	55	1			—			0.90※2	No.2
埋設型枠用モルタル	30	2	179	597	149	1407	—	2.30※3	No.3,4

※1 無機系鉱物質微粉末

※2 高性能AE減水剤

※3 粉体高性能減水剤

表－2 衝撃試験実施日における圧縮強度

試験体 No.	種 別	圧縮強度 N/mm ²	弾性係数 kN/mm ²
No.1	普通	34.7	28.3
No.2	短繊維補強	25.9	23.8
No.3	普通	32.9	28.5
	埋設型枠	87.5	32.3
No.4	普通	34.5	26.6
	埋設型枠	86.4	32.6

表－3 PVA 短繊維の物性値

直径 (mm)	標準長 (mm)	アスペクト比	比重	引張強度 (N/mm ²)	引張伸度 (%)	ヤング率 (kN/mm ²)
0.66	30	45.5	1.3	900	9	23

球を同一速度で繰返し衝突させた。鉄球の直径は 500mm、質量は 514kg であり、実構造物としては 64t 程度に相当する。なお、既往の研究によれば 50t 型以上の消波ブロックの場合に被災が多いとされている³⁾。実験における衝突速度は 1.7m/s であり、防波堤ケーソンの衝撃問題を対象とした既往の研究²⁾を参考に衝突速度を設定した。

2.2 試験装置および計測

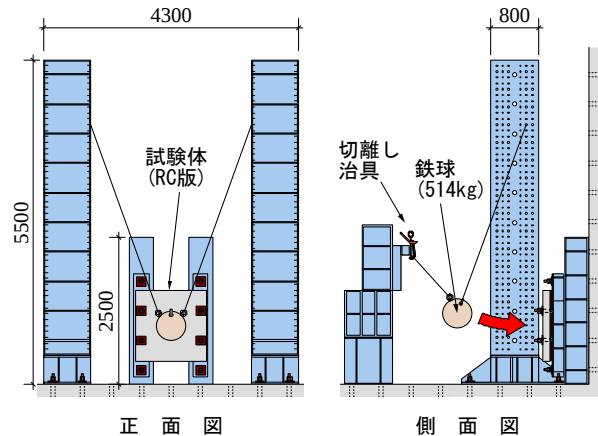
図－3 に衝撃載荷試験装置を、写真－2 に実験状況を示す。載荷は、2 本のワイヤで吊り下げた直径 500mm の鉄球に振り子運動を生じさせ、試験体の中央部に衝突させることにより行った。実験は RC 版背面に押抜きせん断破壊面が明確に形成されるまで繰返し行った。計測は、RC 版背面中央部における水平変位をレーザ変位計にて計測した。また、試験体の破壊状況を逐次観察した。

3. 実験結果

3.1 各試験体の破壊状況

(1) No.1 試験体

実験開始から数回の衝突により、RC 版の背面には、曲げひび割れおよび衝突点を中心とした放射状のひび割



図－3 衝撃載荷試験装置



写真－2 実験状況

れが発生したが、その後は衝突を繰り返してもひび割れ本数の増加はわずかとなり、ひび割れ幅が増加した。さらに衝突を繰返すと、RC 版の背面に押抜きせん断破壊によるコーン状のひび割れが発生し、間もなくかぶりコンクリートの剥離・剥落が生じて終局状態に至った。すなわち、曲げ降伏後に押抜きせん断破壊に移行する破壊モードであり、これは、既往の研究²⁾で確認されている破壊モードと同様である。実験終了後における No.1 試験体の衝突面および衝突背面の破壊状況を図－4 に示す。

No.1 試験体における衝突背面の残留変位と衝突回数との関係を図－5 に示す。これによれば、衝突回数が 52 回目程度を境に残留変位が急速に進展していることがわかる。このような勾配の変化は、押抜きせん断破壊の形成

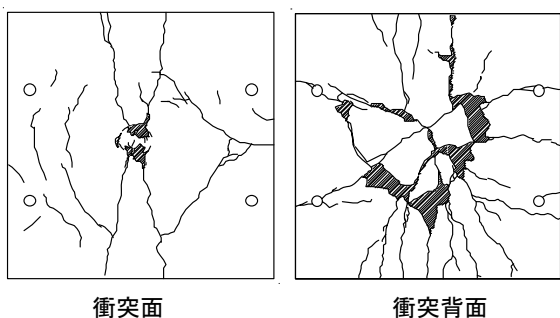


図-4 実験終了時の RC 版の破壊状況 (No.1 試験体)

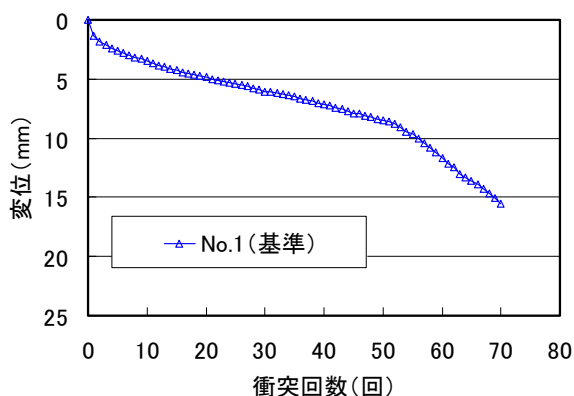


図-5 残留変位と衝突回数の関係 (No. 1 試験体)

によるものであることが既往の研究で確認されており²⁾、No.1 試験体ではこの時点で押抜きせん断破壊が発生したと考えられる。

(2) No.2 試験体

短繊維補強コンクリートを全断面に使用した RC 版である No.2 試験体の破壊モードは、基本的には No.1 試験体と同じであった。ただし、ひび割れが分散して本数が多くなっていることや押抜きせん断破壊に伴うかぶりコンクリートの剥落が明確でないことが特徴的である。実験終了後における No.2 試験体の衝突面および衝突背面の破壊状況を図-6 に示す。

No.2 試験体における衝突背面の残留変位と衝突回数との関係を図-7 に示す。同図には比較のため、基準とした No.1 試験体のデータも併せて示した。これによれば、35 回目程度以降、No.2 の方が No.1 よりも残留変位が小さくなっていることがわかる。また、No.1 において見られたような残留変位の進展の変化が明確に現れていないことがわかる。これは、短繊維の架橋効果により、押抜きせん断ひび割れの開口が抑制されたためと考えられる。残留変位の進展状況および目視による破壊状況から、押抜きせん断破壊に移行した衝突回数は少なくとも 100 回以上と推察される。

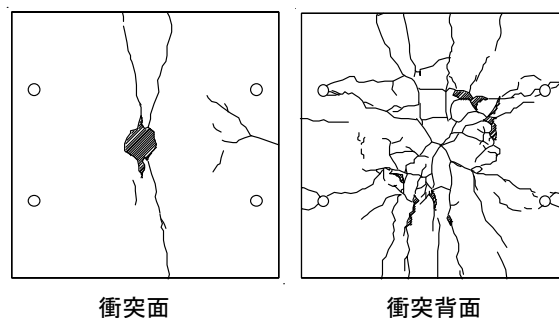


図-6 実験終了時の RC 版の破壊状況 (No.2 試験体)

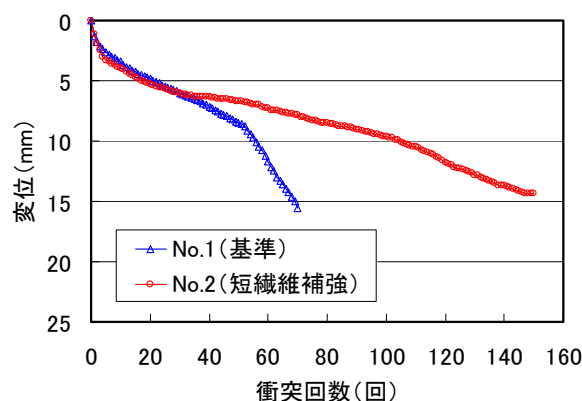


図-7 残留変位と衝突回数の関係 (No.2 試験体)

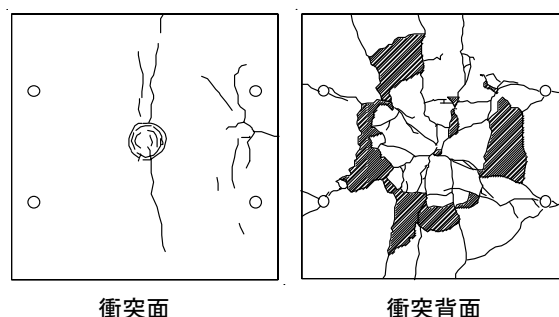


図-8 実験終了時の RC 版の破壊状況 (No.3 試験体)

(3) No.3 試験体

衝突面側に埋設型枠を設置した RC 版である No.3 試験体の破壊モードは、基本的には No.1 試験体と同じであった。実験終了後における No.3 試験体の衝突面および衝突背面の破壊状況を図-8 に示す。衝突背面側には短繊維は存在していないため、衝突背面側のかぶりコンクリートの剥落は生じているが、衝突面側においては衝突部近傍のコンクリートの剥落がほとんど生じていないことが特徴的である。No.1～3 の試験体について、それぞれ同じ衝突回数における衝突部近傍の破壊状況を写真-3 に示す。なお、写真の下には残留変位を併せて示した。これによれば、No.3 は衝突した鉄球の貫入跡が生じたが、No.1 および No.2 と比べてコンクリートの剥落が少ない。



No.1 変位：7.87mm No.2 変位：6.54mm No.3 変位：10.99mm
写真-3 衝突部近傍の破壊状況（衝突回数 45 回）

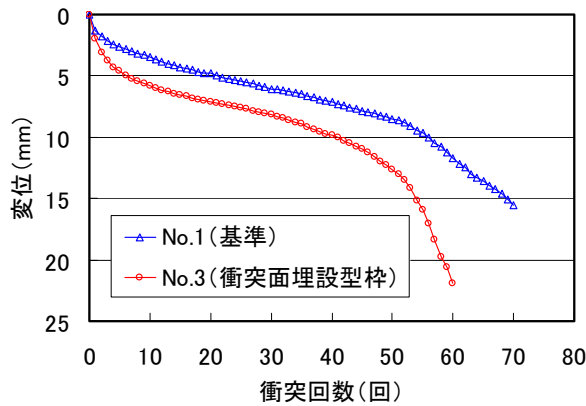


図-9 残留変位と衝突回数の関係（No.3 試験体）

この剥落の原因の一つとして、曲げ変形に伴うコンクリートの圧壊が考えられる。一方、同じ衝突回数においては No.3 試験体が最も残留変位が大きかった。すなわち、No.3 試験体が最も圧壊しやすい状態であったにもかかわらず、コンクリートの剥離が最も少なかった。これは、圧縮側に配置された埋設型枠の圧縮強度が高くかつ短繊維混入率も高いため、圧壊および圧壊後の剥離に対する抵抗性が高まったためと考えられる。

No.3 試験体における衝突背面の残留変位と衝突回数の関係を、No.1 試験体のデータと併せて図-9 に示す。これによれば、残留変位の進展が急速となる衝突回数は基準試験体と概ね同等であった。また、はじめの数回の衝突時における残留変位が、No.3 試験体の方が大きくなる傾向が見られた。ここで、No.1 および No.3 の残留変位に差が見られた衝突回数である 3 回目における変位の時刻歴応答を図-10 に示す。これによれば、最大変位については No.1 と No.3 でほぼ同じであるのに対し、その後 RC 版が振動する過程において、No.3 の自由振動状態が乱れており、結果として残留変位が大きくなっている。これは、埋設型枠の局部変形により、背面の RC 版が塑性化したものと推察される。

以上より、衝突面側への埋設型枠の設置は、繰返し衝撃荷重に対して衝突面側のコンクリートの剥離を抑制する効果は高いが、押抜きせん断破壊を抑制する効果は期

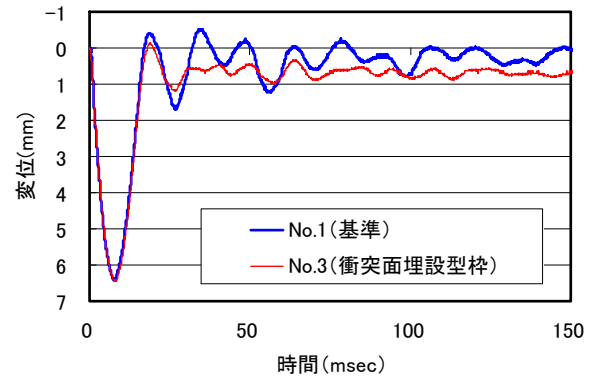


図-10 変位の時刻歴応答（No.3 試験体，3 回目）

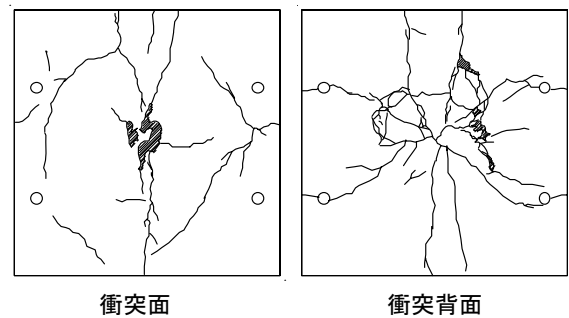


図-11 実験終了時の RC 版の破壊状況（No.4 試験体）

待できないといえる。

(4) No.4 試験体

衝突背面側に埋設型枠を設置した RC 版である No.3 試験体の破壊モードは、基本的には No.1 試験体と同じであった。ただし、短繊維補強コンクリートを用いた No.2 試験体と同様、押抜きせん断破壊に伴うかぶりコンクリートの剥落が抑制されることが確認された。実験終了後における No.4 試験体の衝突面および衝突背面の破壊状況を図-11 に示す。

No.4 試験体における衝突背面の残留変位と衝突回数の関係を、No.1 試験体のデータと併せて図-12 に示す。これによれば、衝突回数 40 回目程度以降、No.4 の方が No.1 よりも残留変位が小さくなっている。また、衝突回数が 70 回目程度において変位の進展に変化が見られており、No.1 で同様の傾向が見られた時の衝突回数よりも多くなっている。本実験ケースでは、衝突背面に埋設型枠を設置したことにより、押抜きせん断破壊が生じるまでの衝突回数が 35%程度（70 回/52 回=1.35）増加したと考えられる。

以上より、衝突背面側への埋設型枠の設置は、繰返し衝撃荷重に対して、押抜きせん断破壊を抑制する効果が期待できるといえる。

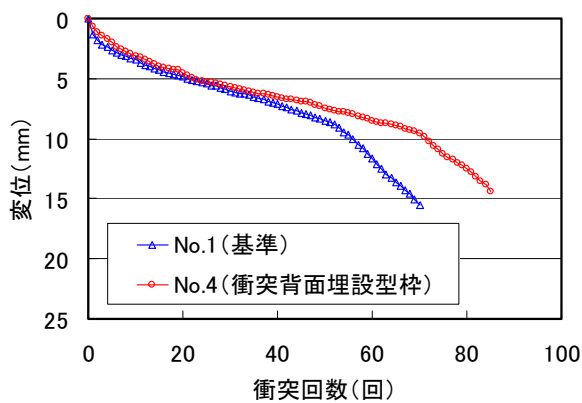


図-12 残留変位と衝突回数の関係 (No.4 試験体)

3.2 埋設型枠の剥離状況

実験を終了した各試験体を載荷点位置で2つに切断し、断面を観察した。図-13に各試験体の切断面の状況を示す。これによれば、埋設型枠とコンクリートの間に明確な剥離は認められなかった。本実験で設定した消波ブロックの移動速度程度の衝突速度では、埋設型枠とコンクリートの間が剥離することにより破壊する可能性は低いと考えられる。

4. まとめ

本検討で得られた知見を以下に示す。

- (1)埋設型枠を衝突面側または衝突背面側に設置した二辺支持 RC 版に対し、防波堤ケーソンで想定される程度の繰返し衝撃荷重を与えた場合、その破壊モードは曲げ降伏後の押抜きせん断破壊となる。
- (2)衝突面側への埋設型枠の設置は、繰返し衝撃荷重に対して衝突面側のコンクリートの剥落を抑制する効果は高いが、押抜きせん断破壊を抑制する効果は期待できない。
- (3)衝突背面側への埋設型枠の設置は、繰返し衝撃荷重に対して、押抜きせん断破壊を抑制する効果が期待できる。

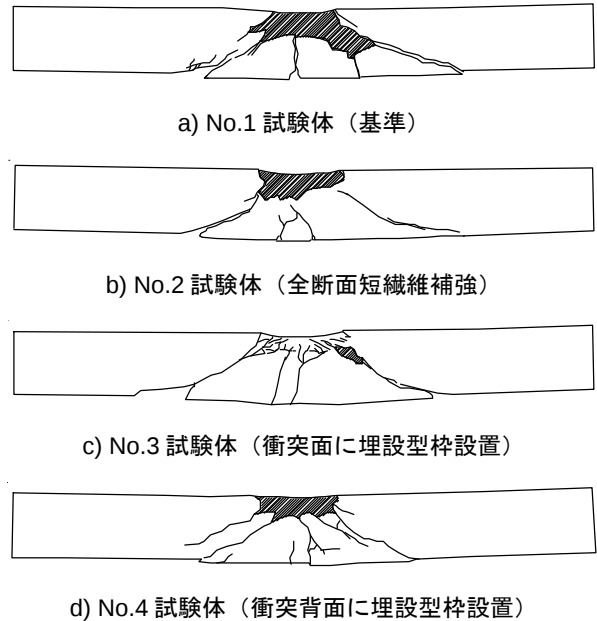


図-13 RC 版断面の破壊状況

- (4)埋設型枠を衝突面側あるいは衝突背面側に設置した二辺支持 RC 版に対し、防波堤ケーソンで想定される程度の繰返し衝撃荷重が作用しても、埋設型枠とコンクリートの間が剥離することにより破壊する可能性は低い。

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)岩波光保, 松林 卓, 川端雄一郎: 繰返し衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリート版の破壊性状, 港湾空港技術研究所資料, No.1216, 2010.6
- 3)有川太郎, 池辺将光, 大寄菜々子, 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