

独立行政法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

Vol.50 No.3 September 2011

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 50 卷 第 3 号 (Vol. 50, No. 3), 2011 年 9 月 (September 2011)

目 次 (CONTENTS)

1. 超音波式四次元水中映像及び測量取得システム (4-DWISS) の開発
..... 松本さゆり, 吉住夏輝, 片倉景義 3
(Development of Four-dimensional Wide-angle Imaging and Surveying SONAR
..... Sayuri MATSUMOTO, Natsuki YOSHIZUMI, Kageyoshi KATAKURA)

2. 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
..... 川端雄一郎, 岩波光保, 松林卓 43
(Residual Punching Shear Capacity of RC Slab Damaged by Repeated Impact Loads
..... Yuichiro KAWABATA, Mitsuyasu IWANAMI, Taku MATSUBAYASHI)

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

川端 雄一郎*・岩波 光保**・松林 卓***

要 旨

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作用する場合があります。これらによって損傷に至る事例がある。このうち、消波ブロック被覆堤では、消波ブロックがケーソン前壁に繰返し衝突し、穴あきに至る局部破壊が発生するケースもある。しかしながら、現行の港湾の施設の技術上の基準・同解説では、ケーソン前壁の局部破壊については考慮されておらず、耐衝撃設計方法の確立が必要不可欠となっている。

本研究は、繰返し衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリート版（RC版）の残存押抜きせん断耐荷性能を評価することを目的とし、繰返し衝撃荷重を作用させた四辺支持 RC版の静的載荷試験を行った。また、四辺支持 RC版の試験結果から得られた知見を二辺支持 RC版の押抜きせん断耐荷性能の評価に適用した。その結果、衝撃荷重を受けた RC版の残存押抜きせん断耐力は、押抜きせん断破壊面が明確に形成される前においては健全な場合の8割程度以上であり、押抜きせん断破壊面の形成とともに急激に低下すること、また健全な RC版の押抜きせん断耐力に対する損傷を受けた RC版の残存耐力比を用いることで、繰返し衝撃荷重を受ける RC版の残存性能評価ができる可能性があることが分かった。これらの知見を基に、繰返し衝撃荷重を受ける RC版の性能照査手法を提案し、試験設計により照査の流れを示した。

キーワード：港湾構造物、鉄筋コンクリート、繰返し衝撃荷重、押抜きせん断耐荷性能、照査

* 構造研究領域 構造研究チーム 研究官

** 構造研究領域 構造研究チームリーダー

*** 客員研究員（前田建設工業株式会社）

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1

電話：046-844-5059

Fax：046-844-0255

独立行政法人 港湾空港技術研究所

E-mail：kawabata-y@pari.go.jp

Residual Punching Shear Capacity of RC Slab Damaged by Repeated Impact Loads

Yuichiro KAWABATA*
Mitsuyasu IWANAMI**
Taku MATSUBAYASHI***

Synopsis

Reinforced concrete (RC) structures would be subjected to accidental huge loads infrequently. In port facilities, accidental huge loads such as earthquake and collision of ships attack incidentally to RC structures, causing collapse of structural members. It is reported that due to repeated impact loads, large hole was generated in the caisson wall by repeated collision of concrete blocks. Therefore the design method of RC structure against such accidental impact loads is necessary to be developed while it has not been established so far.

This paper reports the residual punching shear capacity of RC slab damaged by repeated impact loads. In the experiment, residual structural capacity of 2-way RC slabs against punching shear failure was examined by conducting static loading tests after falling-weight impact loading. Based on the results obtained from the tests, the proposed method to evaluate residual punching shear capacity of damaged RC slab was applied to 1-way slab. As the results, it was found that punching shear capacity of RC slabs damaged by repeated impact loads slightly decreases compared with non-damaged slabs just before the occurrence of punching shear crack, when no major damage is observed in the slabs. And, it was found that punching shear capacity rapidly declines after clear formation of cracks due to punching shear at the bottom surface of the slab. Consequently, the verification method for punching shear failure of RC slab subjected to repeated collision of concrete blocks was proposed. Furthermore, the practical procedure of the verification was described in this paper.

Key Words: Port structure, reinforced concrete, repeated impact loads, punching shear capacity, verification

* Researcher, Structural Mechanics Group, Structural Engineering Division

** Head of Structural Mechanics Group, Structural Engineering Division

*** Visiting Researcher (Maeda Corporation)

3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan Port and Airport Research Institute
Phone : +81-46-844-5059 Fax : +81-46-844-0255 E-mail : kawabata-y@pari.go.jp

目 次

要 旨	43
1. まえがき	47
2. 繰返し衝撃荷重を受ける四辺支持RC版の残存押抜きせん断耐荷性能	48
2.1 実験概要	48
2.2 実験結果および考察	49
3. 繰返し衝撃荷重を受ける二辺支持RC版の押抜きせん断耐荷性能の評価	52
3.1 実験概要	52
3.2 実験結果および考察	54
4. 消波ブロックの繰返し衝突によるケーソン前壁の局部破壊に対する照査方法の提案	59
4.1 性能照査全体におけるケーソン前壁の耐衝撃性能照査の位置づけ	59
4.2 耐衝撃設計断面の範囲	60
4.3 ケーソン前壁のモデル化	61
4.4 消波ブロックのモデル化	62
4.5 試設計	63
5. 結論	63
謝辞	63
参考文献	63

1. まえがき

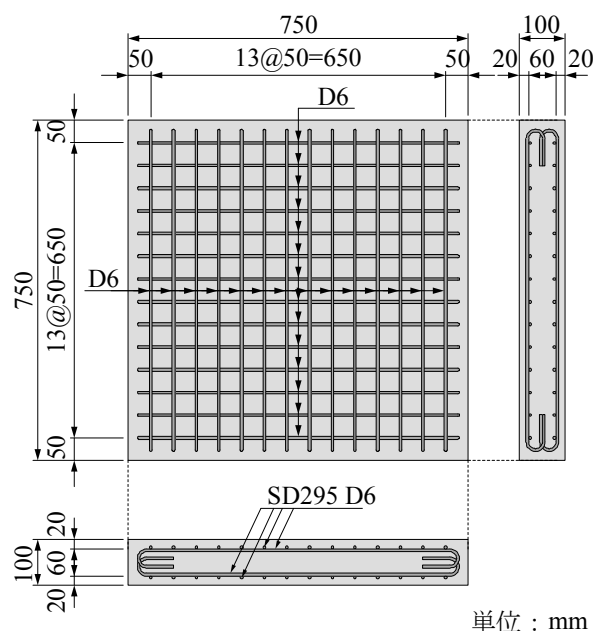
港湾構造物では、設計荷重以上の波力や、消波ブロック、船舶、漂流物の衝突のような衝撃力が作用する場合があります。これらによって損傷に至る事例がある¹⁾。このうち、消波ブロック被覆堤では、消波ブロックがケーソン前壁に繰返し衝突し、穴あきに至る局部破壊が発生する場合があります。ケーソン壁の穴あき損傷は中詰材の流出を招き、ケーソン本体の重量を減少させるため、滑動に対する安定性も低下し、防波堤の機能低下に至るケースもある。

現行の港湾の施設の技術上の基準・同解説²⁾では、ケーソン前壁の局部破壊については考慮されておらず、耐衝撃設計・照査方法の確立が必要不可欠となっている。一方、衝撃力を受ける鉄筋コンクリート(RC)部材の挙動については多くの研究成果がある³⁾。しかし、その多くは落石の衝突力や爆発力などの単発的な衝撃力を対象にしており、港湾構造物で見られるような繰返し作用する衝撃力を対象としたものは少ない⁴⁾。

筆者らは、既往の研究の中で、基本的な部材である鉄筋コンクリートはりや二辺支持された鉄筋コンクリート版の曲げ耐荷性能について、重錘落下による繰返し衝撃載荷実験を実施し、その破壊挙動を把握するとともに、主に変位応答や荷重応答を算出する方法について検討を行ってきた^{5),6),7),8)}。しかし、実際に損傷を生じた事例においてケーソン前壁が押抜きせん断破壊のような局部破壊を生じることを考えると、曲げ耐荷性能だけでなく押抜きせん断耐荷性能を評価することが必要である。

既往の研究において、繰返し衝撃荷重を受けるRC版の押抜きせん断耐荷性能に関する検討は少ない⁹⁾。特に、繰返し衝撃荷重を受ける場合のRC版の残存耐力などについては十分に明らかにされていない。よって、繰返し衝撃荷重を受けるRC版の押抜きせん断耐荷性能を評価することは、消波ブロックの繰返し衝突によるケーソン前壁の局部破壊に対する性能照査方法の提案に寄与すると考えられる。

本論は、繰返し衝撃荷重を受けるRC版の残存押抜きせん断耐荷性能を評価することを目的とした。まず、曲げの影響を極力排除するため、四辺支持RC版に対して繰返し衝撃荷重を作用させて損傷を与えた後に静的載荷試験を行い、残存押抜きせん断耐荷性能を評価し、それらの結果を基に局部破壊に対する性能照査を行う上での限界値の設定および照査方法の提案を行った。次に、提案方法をケーソン前壁の2/5モデルとした二辺支持RC版に適用し、その妥当性について評価した。さらに、繰返し衝



単位：mm

図-2.1 試験体の形状および配筋

表-2.1 実験ケース

試験体	載荷方法	重錘質量 (kg)	衝突速度 (m/s)	衝突エネルギー (J)	衝突回数 (回)
1	静的載荷	-	-	-	-
2	単一衝撃 載荷後に 静的載荷	400	2.0	800	1
3			2.5	1250	
4			3.0	1800	
5	繰返し衝撃 載荷後に 静的載荷	400	1.5	450	100
6					300
7			1.7	578	140
8					203
9					270
10			1.8	648	12
11					29
12					40
13					60
14			1.9	722	244
15	14				
16	2.0	800	19		
17			4		
18	200	2.69	724	27	

撃荷重を受けるRC版の押抜きせん断破壊に対する性能照査方法を提案し、試設計例を示した。

2. 繰返し衝撃荷重を受ける四辺支持RC版の残存押抜きせん断耐荷性能

2.1 実験概要

(1) 試験体および実験ケース

試験体の形状および配筋を図-2.1に示す。試験体寸法は、750mm×750mm×100mmであり、支間長 600mmで四辺支持した。試験体数は全 18 体である。表-2.1に実験ケースを示す。荷重方法は静的荷重、衝撃荷重を1回作用させた後の静的荷重および繰返し衝撃荷重を作用させた後の静的荷重の3種類とした。

表-2.2に使用材料の物性値を示す。使用したコンクリートは普通コンクリートとした。

(2) 試験装置

衝撃荷重に用いた試験装置の原理は、重錘を所定の高さまでチェーンブロックで引き上げ、ロープを用いてフックを解除することにより重錘を自由落下させるものである。実験で用いた重錘の質量は 400kg を基本とし、1ケースのみ 200kg とした。重錘による衝撃荷重は、直径 50mm の荷重板（厚さ 30mm）を介して試験体上面中央部に作用させた。これは、試験体の支間内に押抜きせん断破壊面が形成されるよう考慮したものである。また、荷重板と試験体の間には、衝撃荷重が荷重面に一様に作用するように、硬度 65 度のゴムシート（寸法 150mm×150mm×10mm）を1枚敷いた。試験体は、浮き上がりや設置位置のずれを防止するため、寸法 150mm×150mm×20mm の鉄板を試験体上面に8箇所設置し、ナットで締め付けた。本実験に使用した試験体設置部の詳細を図-2.2に示す。静的荷重については、試験体の支持条件および使用する荷重板は衝撃荷重と同じとし、ゴムシートは用いずに荷重板を RC 版上面に設置して油圧ジャッキを用いて静的に荷重を作用させた。なお、荷重板は、試験体へ一様に荷重が作用するように、石膏を介して試験体に設置した。写真-2.1に静的荷重試験の状況を示す。

(3) 計測方法

衝撃荷重時の計測項目は、重錘部に作用する反力（以下、重錘反力と呼ぶ）および衝突点直下における試験体下面の鉛直変位（以下、衝突点変位と呼ぶ）とした。重錘反力の計測には重錘部に組み込まれた容量 2MN のひずみゲージ式ロードセルを使用し、衝突点変位の計測には非接触型レーザ変位計（最大計測レンジ 750mm、サンプリング周期 20~1000μs）を使用した。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

表-2.2 使用材料の物理的性質

コンクリート		鉄筋
圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	降伏点 (N/mm ²)
46.1	31.3	366

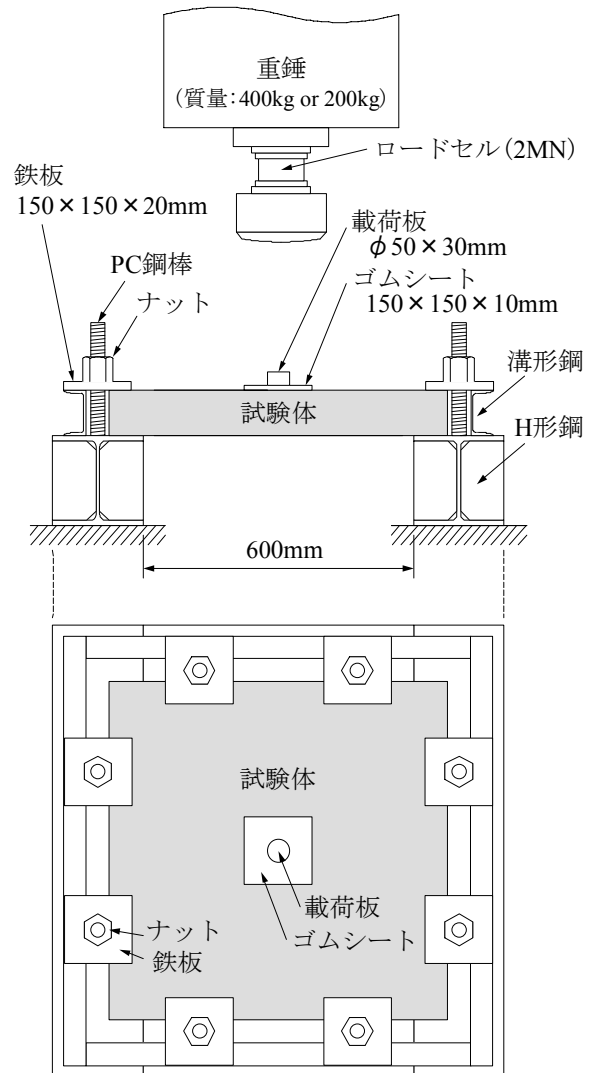


図-2.2 試験体設置部の詳細

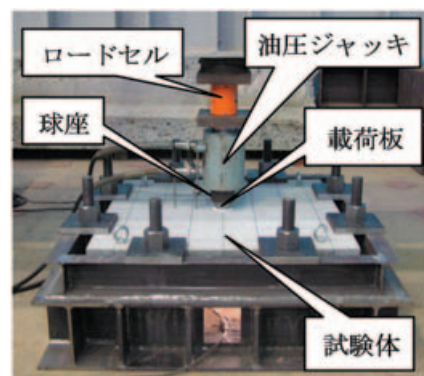


写真-2.1 静的荷重試験状況

た. 計測間隔は 50 μ s とし, 計測データのフィルタ処理は施さなかった. また, 衝撃载荷の終了後, 静的载荷試験を行う前に RC 版に発生したひび割れ状況を観察し, スケッチした.

静的载荷時の計測項目は, 荷重および载荷点直下における試験体下面の鉛直変位 (以下, 载荷点変位と呼ぶ) とした. 荷重の計測には容量300kNのひずみゲージ式ロードセルを使用し, 载荷点変位の計測には容量25mmの変位計を使用した.

2.2 実験結果および考察

(1) 単一衝撃载荷による破壊状況および残存耐力

単一衝撃载荷を行った試験体 (No.2, 3, 4) の衝撃载荷後における衝突面の破壊状況を写真-2.2に, 試験体下面のひび割れ発生状況を図-2.3に示す. 衝突速度 $V=2.0\text{m/s}$ の場合, 衝突点における試験体表面のひび割れは認められず, 試験体下面には衝突点を中心とする放射状のひび割れが確認された. $V=2.5\text{m/s}$ の場合は, 衝突点に载荷板とほぼ同じ大きさの円形状のひび割れが発生し, $V=2.0\text{m/s}$ の場合と比べて試験体下面のひび割れ本数も多かったが, 押抜きせん断破壊面の形成は確認されなかった. $V=3.0\text{m/s}$ の場合には, 衝突点の陥没が顕著となり, 試験体下面に明確な押抜きせん断破壊面が確認された. 図-2.4に衝突点変位の時刻歴応答を示す. 载荷速度の増加に伴い残留変位が大きくなり, 特に $V=3.0\text{m/s}$ における残留変位が急激に大きくなっている. これは試験体下面のひび割れ発生状況と対応している.

衝撃荷重により損傷を与えた試験体に対して静的载荷試験を行い, 残存耐力を求めた. 図-2.5に静的载荷試験における荷重-変位関係を示す. 無損傷のNo.1では, 最大荷重148.9kNにて押抜きせん断破壊面の形成によって荷重が急激に低下し, その後は荷重40kN程度で一定となった. $V=2.0\text{m/s}$ (No.2) および $V=2.5\text{m/s}$ (No.3) では, 最大荷重はそれぞれ137.1kN, 114.1kNとなり, 無損傷の試験体よりも小さくなった. 一方, $V=3.0\text{m/s}$ (No.4) では, 約40kNまで増加した後に頭打ちとなっており, 鉄筋のダボ効果で荷重が約40kNまで達したものと思われた.

図-2.6に衝突速度と残存耐力比の関係を示す. なお, 残存耐力比とは, 各試験体の最大荷重を無損傷の試験体の最大荷重で除した値である. 図-2.3にて明確な押抜きせん断破壊面が認められなかった $V=2.0\text{m/s}$ (No.2) および $V=2.5\text{m/s}$ (No.3) では, 残存耐力比が約0.8以上となっており, $V=3.0\text{m/s}$ (No.4) のような押抜きせん断破壊面の形成後には急激に残存耐力が低下した.

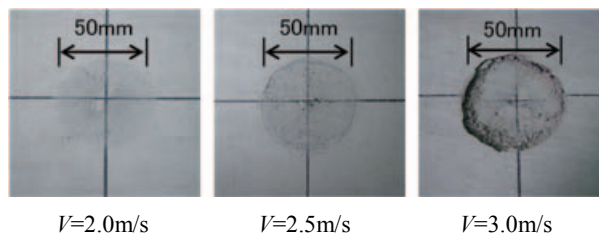


写真-2.2 衝突部の破壊状況

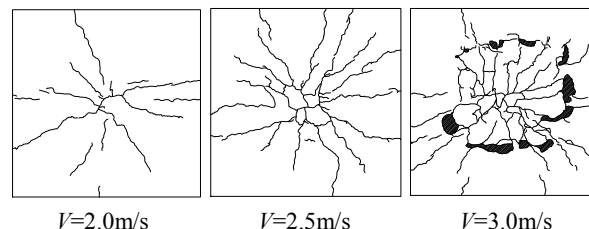


図-2.3 試験体下面の破壊状況 (単一衝撃)

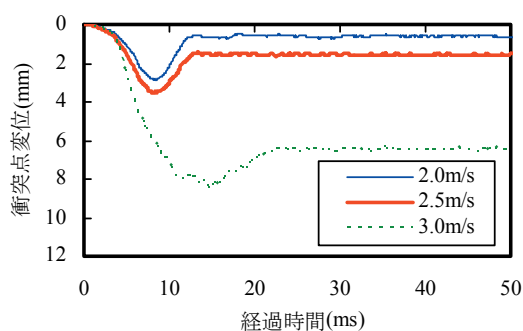


図-2.4 衝突点変位の時刻歴応答

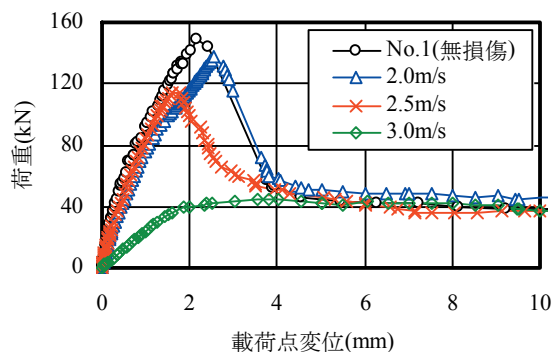


図-2.5 荷重-载荷点変位関係 (静的载荷)

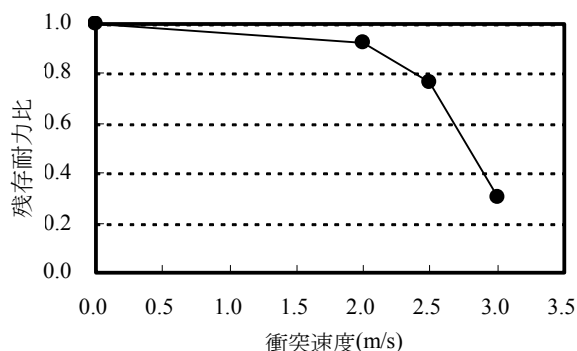


図-2.6 衝突速度と残存耐力比の関係

(2) 繰返し衝撃载荷による破壊状況および残存耐力

図-2.7 に繰返し衝撃载荷を行った試験体のうち代表的なものの試験体下面のひび割れ発生状況を示す。また、図-2.8 に衝突回数と衝撃载荷後に除荷した際の試験体の衝突点変位（以下、残留変位）の関係を示す。No.6 ($V=1.5\text{m/s}$, 300 回) では、衝撃载荷終了後においても明確な押抜きせん断破壊面は形成されず、最終的な残留変位も 0.1mm 程度であった。No.8 ($V=1.7\text{m/s}$, 203 回) では、残留変位が衝突回数約 100 回から徐々に大きくなった。その後、衝突回数約 200 回で残留変位が約 1.0mm となり、それ以上の衝突回数では残留変位が急激に大きくなった。No.16, No.17 も同様に残留変位 1.0mm 程度となる衝突回数をしきい値として、それ以上では急激に残留変位が大きくなった。今回の実験の範囲では、残留変位が 1.0mm 程度で試験体下面に明確な押抜きせん断破壊面が形成されたことが分かる。

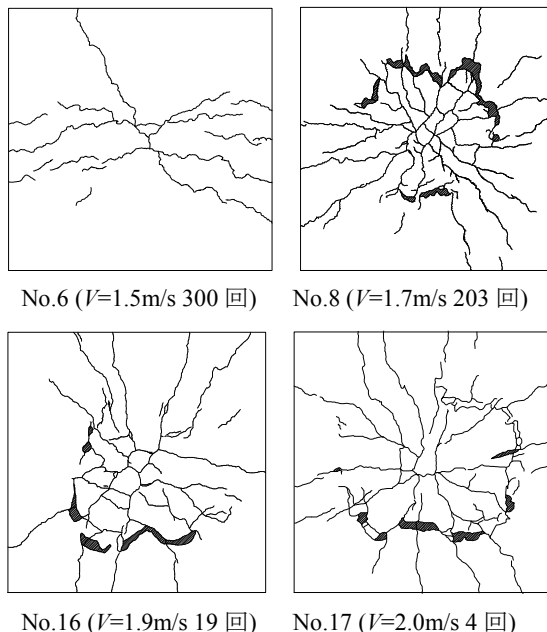


図-2.7 試験体下面のひび割れ発生状況
(繰返し衝撃)

図-2.9 に、表-2.1 に示した試験体の繰返し衝撃载荷後の残留変位と残存耐力比の関係を示す。残留変位が 3.5mm 程度までは残留変位と残存耐力比には負の相関が認められ、それ以上の残留変位では残存耐力比がほぼ一定値に収束した。ここで、図-2.8 において示した明確な押抜きせん断破壊面が形成される残留変位が約 1.0mm の時点では残存耐力比は 0.8 程度を示していることが分かる。残留変位が 1.0mm 以上となると押抜きせん断破壊面の形成が急激に進行し、急激に押抜きせん断耐荷性能が低下するといえる。

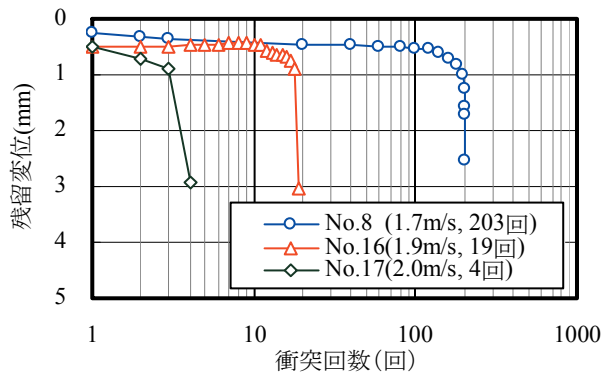


図-2.8 衝突回数と残留変位の関係

図-2.10 に衝突回数と残存耐力比の関係を示す。残留変位と同様、残存耐力比 0.8 程度となる衝突回数をしきい値として、それ以上では急激に耐力が低下することが分かる。また、衝突速度 1.70m/s では残存耐力比 0.8 となるために衝突回数が 150 回程度必要であるのに対して、衝突速度 1.90m/s では 15 回程度で残存耐力比が 0.8 以下となっている。本実験条件では衝突速度 1.80m/s 程度をしきい値として、残存耐力比が急激に低下するまでの衝突回数が大きく変化していることがわかる。

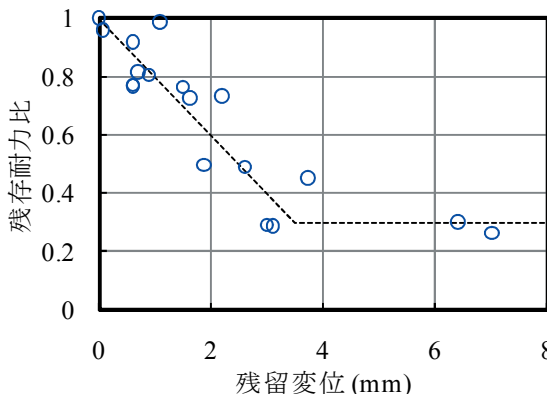


図-2.9 残留変位と残存耐力比の関係

また、No.18 ($M=200\text{kg}$, $V=2.69\text{m/s}$) に着目すると、衝突エネルギーが同じであるNo.16 ($M=400\text{kg}$, $V=1.9\text{m/s}$) の場合と概ね同等な衝突回数で押抜きせん断破壊が生じ、残存耐力比が急激に低下した。よって、重錘質量が異なっても衝突エネルギーが一定であれば、押抜きせん断破壊面が明確に形成されるまでの衝突回数は概ね同等と考えられる。

(3) 繰返し衝撃荷重を受けるRC版の局部破壊に対する
限界状態および性能照査方法に関する考察
ケーソン前壁に押抜きせん断破壊面が形成されると、

隔壁内の中詰砂が流出することによりケーソン本体の重量が減少するため、滑動に対する安定性も低下し、防波堤の機能低下に至る。よって、ケーソン前壁の局部破壊

に対しては、中詰砂が流出しない程度の押抜きせん断破壊面の開口幅もしくはそれに対応した部材の変位を限界値とすることが理想と考えられる。しかしながら、計算によるひび割れ幅や変位の算出は容易ではない。ここで、最大荷重後においても押抜きせん断破壊面が明確に形成されなければ中詰砂の流出は抑制できると考えられる。そこで本研究では押抜きせん断破壊面が明確に形成されていない残存耐力比0.8を限界値に設定し、外力作用として衝撃エネルギーを考えることで、残存耐力比0.8を担保するための限界衝突回数を定めることができると考えた。

図-2.10 にプロットした各点のうち、押抜きせん断破壊面が明確に形成されていない点として、残存耐力比が0.7以上の点のみを図-2.11 に示す。また、それぞれの衝突速度について、縦軸の切片を1.0（衝突回数0回の時の残存耐力比が1.0）とした場合の近似直線をあわせて示している。これは、押抜きせん断破壊面が明確に形成されるまでは残存耐力比と衝突回数に間に線形関係が成り立つと仮定したものである。ここで、残存耐力比の限界値を仮に0.8に設定すると、これに至るまでの衝突回数、すなわち限界衝突回数がそれぞれの近似直線より求まる。

一方、実験の結果、衝突エネルギーを一定とした場合、押抜きせん断破壊面が明確に形成されるまでの繰返し衝突回数は概ね同等であったことから、RC版の限界衝突回数の評価に衝突エネルギーを用いることができると考えた。具体的には衝突エネルギーが、押抜きせん断破壊面が形成されるための破壊エネルギーに変換されると考え、破壊エネルギーに対する衝突エネルギーの比（エネルギー比）を用いることとした。

ここで、破壊エネルギー G_F は、図-2.12に示すように載荷面から45°の破壊面を仮定し、コンクリート上面から2方向の平均の有効高さ d の範囲におけるコーン破壊面の面積を算出し、式(1)の土木学会コンクリート標準示方書¹⁰⁾に示された単位面積あたりのコンクリートの破壊エネルギーを乗じることにより求めた。

$$G_F = 10(d_{\max})^{1/3} \cdot f_{ck}^{1/3} \quad (\text{N/m}) \quad (1)$$

ここに、 d_{\max} : 粗骨材の最大寸法 (mm)
 f_{ck} : 圧縮強度の特性値 (N/mm²)

図-2.13にエネルギー比と限界衝突回数の関係を示す。これによれば、エネルギー比と限界衝突回数には高い相関が認められる。ここで、エネルギー比は100~200程度となっている。これは、ゴムシートや試験治具等によるエネルギー吸収のほか、鉄筋によるダウエル抵抗やひび割れ面によるせん断伝達等の影響が考えられる。本方法

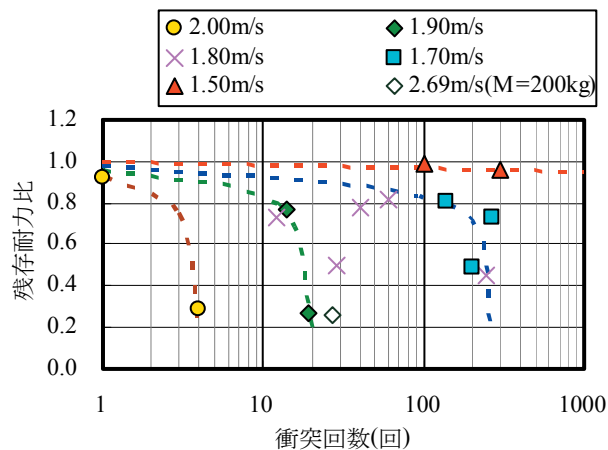


図-2.10 衝突回数と残存耐力比の関係

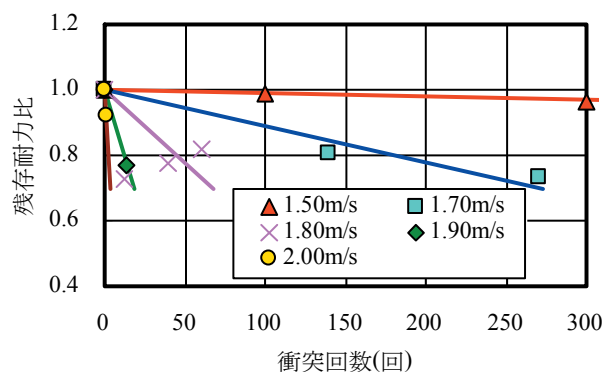


図-2.11 衝突回数と残存耐力比の関係
(残存耐力比0.7以上)

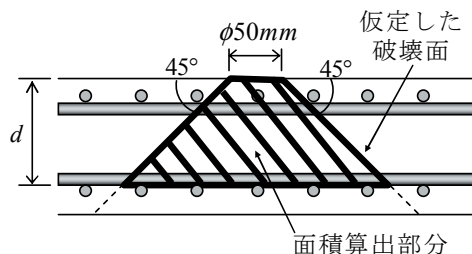


図-2.12 仮定した押抜きせん断破壊面

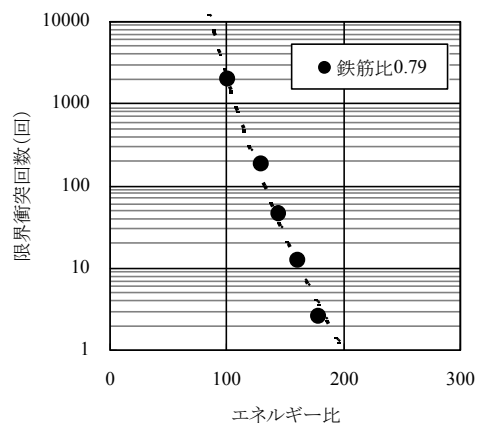


図-2.13 エネルギー比と限界衝突回数の関係

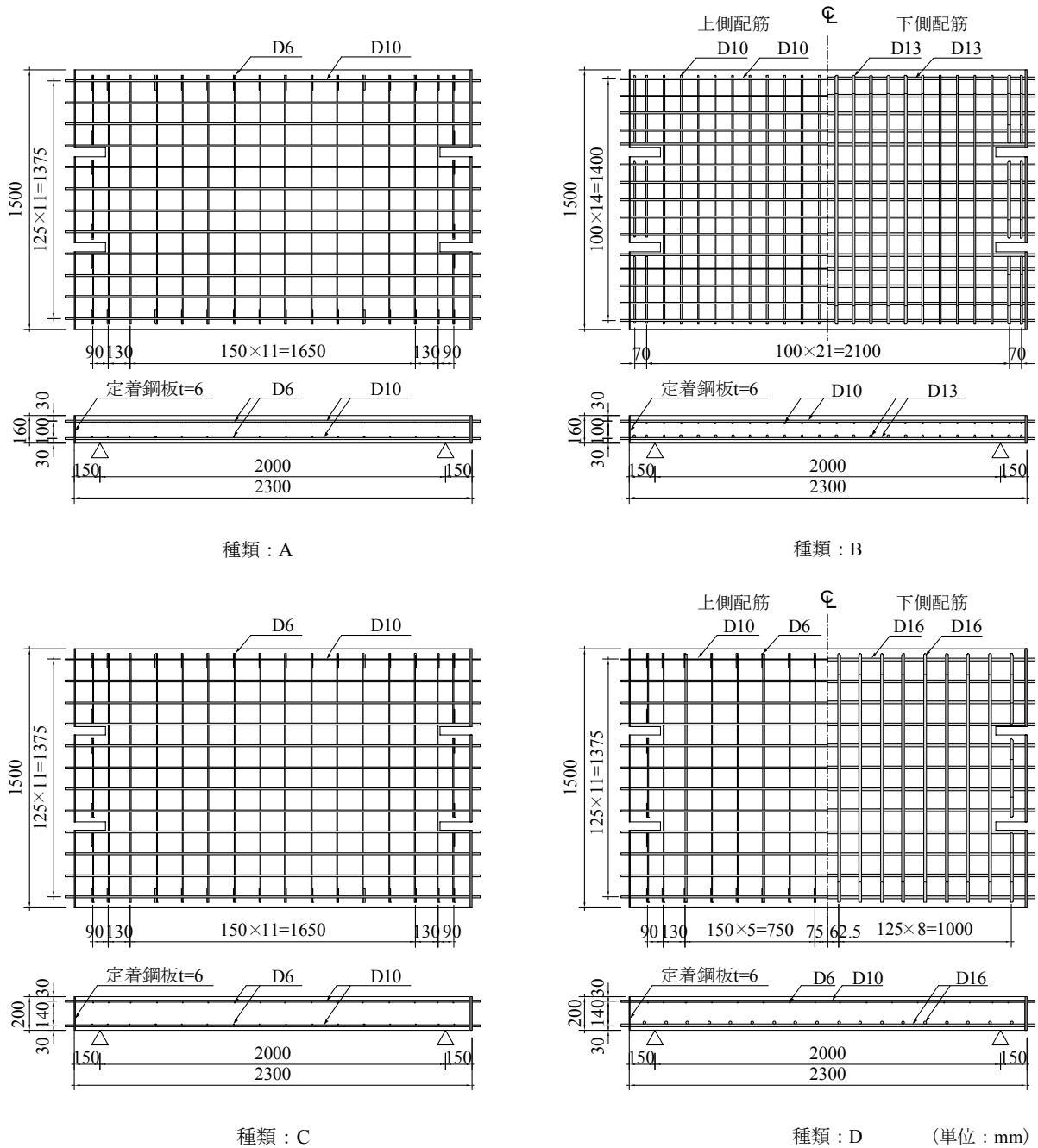


図-3.1 試験体の形状および寸法

により、エネルギー比から限界衝突回数を算出することができると考えられ、消波ブロックの繰返し衝突によるケーソン前壁の局部破壊に対する性能照査方法として活用が可能であると考えられる。

3. 繰返し衝撃荷重を受ける二辺支持RC版の押抜きせん断耐荷性能の評価

本章では、2. で考案した方法を、一般的なケーソンを

2/5にモデル化して鉄筋比や版厚を変化させた二辺支持RC版に適用し、これらの影響について明らかにするとともに定式化し、繰返し衝撃荷重を受ける二辺支持RC版の押抜きせん断耐荷性能に関する評価方法を提案した。

3.1 実験概要

(1) 試験体および実験ケース

図-3.1に試験体の形状および寸法を示す。本研究では4種類の試験体を作製した。Aは一般的なケーソンの前壁を

表-3.1 実験ケースおよびコンクリートの物性

試験体種類	試験体名	衝突速度 (m/s)	鉄筋比 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	備考
A	A-1	3	0.31	44.3	30.4	基準
	A-2	4		32.9	28.4	
	A-3	7		44.3	30.4	
B	B-1	3	1.03	44.3	30.4	鉄筋比大
	B-2	7		44.3	30.4	
C	C-1	3	0.24	35.0	28.1	版厚大
	C-2	4		39.6	29.8	
D	D-1	4	0.98	37.1	29.7	版厚大・鉄筋比大

2/5でモデル化した試験体である。モデル化は既報と同様の計算により行った⁹⁾。その他の試験体については、BはAよりも鉄筋比を大きくしたもの、CはAと同一鉄筋量として試験体の版厚のみを大きくしたもの、DはAよりも鉄筋比、版厚ともに大きくしたもの、である。

表-3.1、表-3.2に使用したコンクリートの力学特性、鉄筋の力学特性を示す。また、表-3.3に上記の材料物性から求められる曲げ耐力および押抜きせん断耐力を示す。これらの耐力は、土木学会コンクリート標準示方書¹⁰⁾に基づき、材料係数および部材係数を1.0、曲げ耐力算出時の有効幅は考慮せずに算出した。なお、押抜きせん断耐力算出時の載荷面は直径150mmの円形とした。

試験体の支間長は2000mmとし、衝突速度を3, 4, 7m/sとして400kgの重錘を衝突させる繰返し衝撃荷重を行った。

(2) 試験装置

本実験では、2.1(2)にて示した衝撃試験装置を使用した。二辺支持RC版の支点部には、試験体の浮き上がりや脱落を防止するため、跳ね上がり防止治具を備えている。この治具は、支点片側あたり4本のPC鋼棒を介して試験体の上側からナットで締め付ける構造となっている。なお、試験体の支点近傍に切欠きを設けているが、これはPC鋼棒を通すためのものである。ナットにより締め付ける力は支点片側あたり約120kNとなるように調整した。なお、支点部における試験体の回転は自由としている。また、重錘落下点には、四辺支持RC版の場合と同じ材質のゴムシート(寸法300mm×300mm×10mm)を敷いて実験を行った。

(3) 計測方法

本実験における計測項目は重錘反力、支点反力、支間中央部におけるRC版下面の載荷点変位、鉄筋のひずみである。重錘反力および変位の計測に用いた機器は2.1(3)で示したものと同一である。また、本論文において支点

表-3.2 鉄筋の物性

呼び名	降伏点 (N/mm ²)	使用試験体名
D6	365	A-1, A-3
	348	A-2, C-1, C-2
	359	D-1
D10	384	A-1, A-3, B-1, B-2
	393	A-2, C-1, C-2
	409	D-1
D13	380	B-1, B-2
D16	389	D-1

表-3.3 曲げ耐力および押抜きせん断耐力の計算値

試験体種類	試験体名	曲げ耐力 (kN)	押抜きせん断耐力 (kN)
A	A-1	96.5	200.8
	A-2	93.5	191.9
	A-3	96.5	200.8
B	B-1	184.6	291.1
	B-2	184.6	291.1
C	C-1	121.3	286.1
	C-2	123.3	290.1
D	D-1	298.3	448.3

反力は、支点部に組み込まれたひずみゲージ式ロードセル(容量200kN, 片側6点ずつ)による計測値の合計を指すこととする。図-3.2に支点反力およびRC版下面の変位の計測位置を示す。また、RC版に発生したひび割れ状況を適宜観察し、スケッチした。

3.2 実験結果および考察

(1) 試験体の破壊過程

図-3.3 に、A-1 試験体および B-1 試験体の、試験体下面におけるひび割れ発生状況を示す。また、図-3.4 に、A-1 試験体および B-1 試験体の荷重点変位，最大重錘反力および最大支点反力と衝突回数との関係を示す。

A-1 試験体は、衝突回数 1 回目から曲げひび割れおよび荷重点を中心とした放射状のひび割れが発生し、衝突回数の増加とともにひび割れ本数も増加した。曲げひび割れおよび放射状のひび割れの発生は衝突回数 10 回程度で概ね収束し、その後は既に発生したひび割れ幅が版の曲げ変形とともに大きくなった。衝突回数 25 回目には、荷重点直下付近のかぶりコンクリートが剥落し始め、35

回目には完全に押抜きせん断破壊した。荷重点変位は、衝突回数 10 回目程度以降（図-3.4 中の b），増加の勾配が一旦緩やかとなり、25 回目程度以降（同図中の c），再び急になった。最大重錘反力は、衝突回数 10 回程度まで（同図中の a）の低下が顕著であり、その後は一旦横ばいとなり（同図中の b），25 回目程度以降（同図中の c）

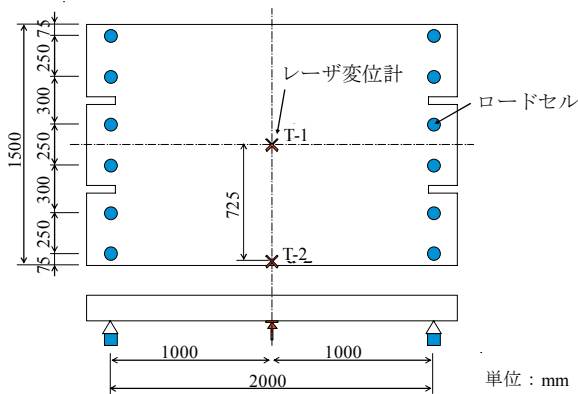


図-3.2 計測位置

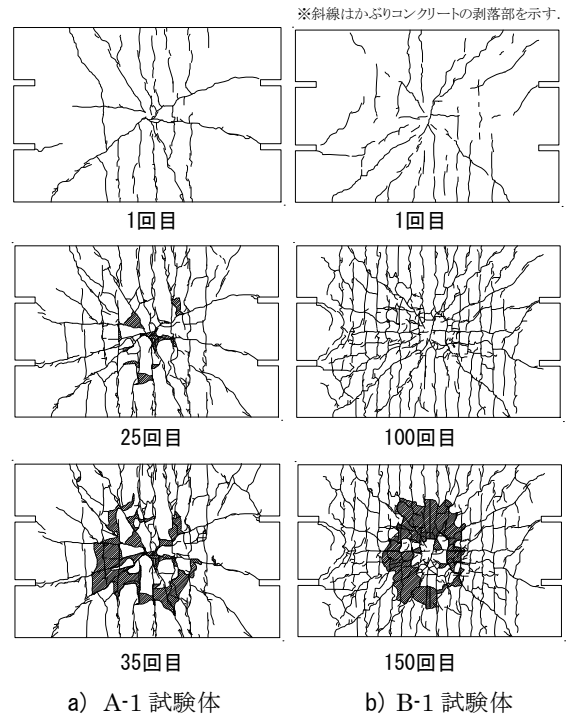


図-3.3 試験体下面の破壊状況

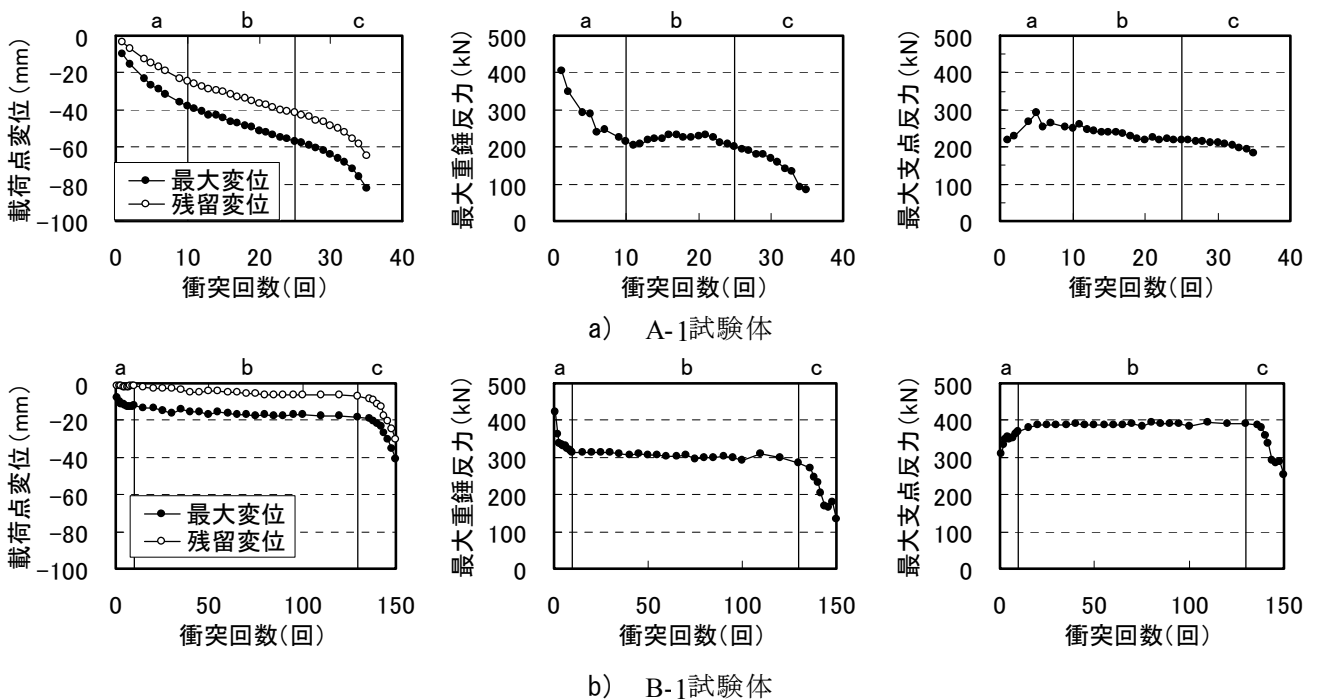


図-3.4 衝突回数と荷重点変位，最大重錘反力，最大支点反力の関係

再び大きく低下した。最大支点反力は、衝突回数の少ない段階（同図中の a）で一旦増加し、その後横ばいとなり（同図中の b）、25 回目程度以降（同図中の c）若干低下する傾向が見られた。載荷点変位、最大重錘反力および最大支点反力ともに、衝突回数 10 回程度と 25 回程度で、計測値の発生傾向が変化している。ひび割れ発生状況の観察結果と比較すると、前者は新たなひび割れの発生が収まる時期と一致しており（同図中の a と b の境界）、新たなひび割れの発生に伴い試験体の剛性が徐々に低下したことで最大重錘反力と最大支点反力の発生傾向が変化したものと推測される。また、後者（同図中の b と c の境界）は押抜きせん断破壊面の形成時期と一致していることから、これが影響要因の 1 つと考えられる。

B-1 試験体は、A-1 試験体と比較して全般的にひび割れの本数が多く、また、衝突回数130回程度から押抜きせん断破壊に移行していることがわかる。押抜きせん断破壊に移行した衝突回数は、A-2 試験体より4倍程度多く、そのときの曲げ変形量は1/3程度であった。しかし、新たなひび割れ発生の収束（同図中の a と b の境界）および押抜きせん断破壊面の形成（同図中の b と c の境界）とともに、載荷点変位、最大重錘反力および最大支点反力が変化する傾向は A-2 試験体と同様であった。

他の試験体についても、鉄筋比や版厚によらず、上述したような載荷点変位、最大重錘反力および最大支点反力が変化する傾向を示し、程度の差はあるものの、破壊過程は同様の傾向を示した。

(2) 限界状態の設定

各試験体の押抜きせん断破壊に対する抵抗性を定量的に比較するため、押抜きせん断破壊が明確に形成されるまでの繰返し衝突回数を用いることとした。ここで、押抜きせん断破壊が明確に形成されたことを判断するための指標について説明する。2. では、残留変位が1.0mm、

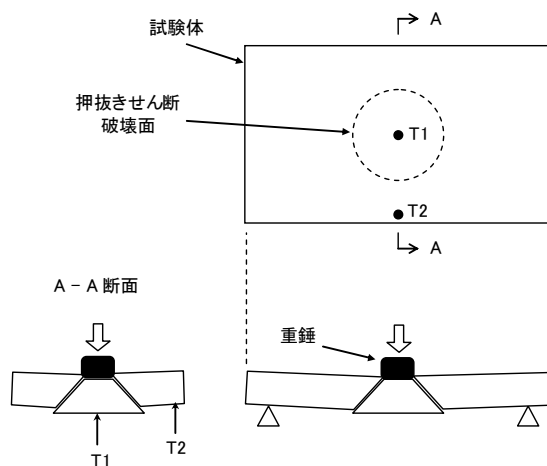


図-3.5 押抜きせん断破壊した RC 版の模式図

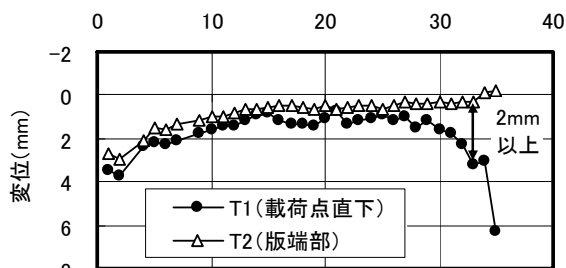


図-3.6 衝突回数と残留変位の関係(A-1)

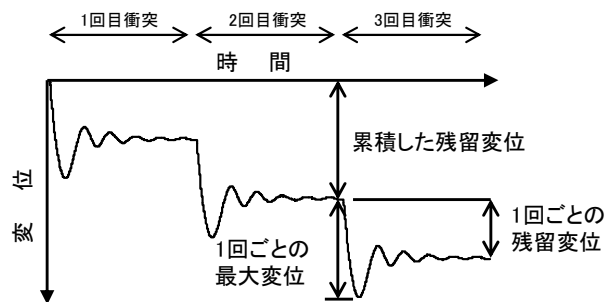
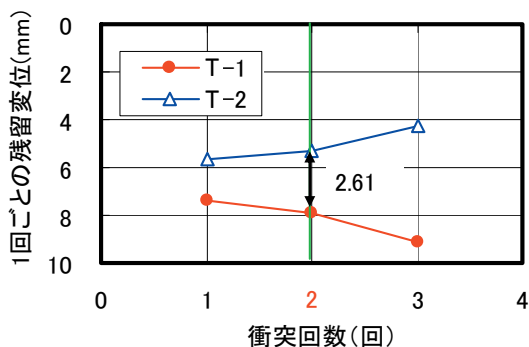
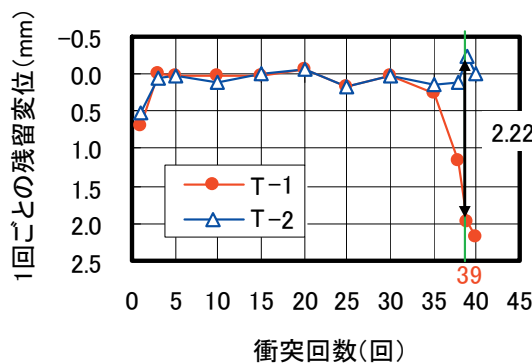


図-3.7 変位の時刻歴応答の模式図



a) A-2 試験体



b) D-1 試験体

図-3.8 衝突回数と 1 回ごとの残留変位の関係

残存耐力比が0.8となった時点で押抜きせん断破壊面が明確に形成されたと判断した。しかしながら、残留変位に基づく基準は試験体寸法や支持条件等の影響を受けるため、ケーソン前壁の2/5モデルとした二辺支持RC版には直接的には適用できない。そこで、ここでは押抜きせん断破壊面の内外における残留変位差を用いて押抜きせん断破壊面の形成状況を判断した。

図-3.5に、押抜きせん断破壊したRC版を模式的に示す。押抜きせん断破壊が明確に形成されると、押抜きせん断破壊面内外の縁が切れるため、T1とT2の箇所では計測している残留変位の差が大きくなると考えられる。図-3.6に、衝突回数と1回ごとの残留変位の関係の一例(A-1試験体)を示す。ここで、1回ごとの残留変位とは、図-3.7に示すように、着目した衝突回数における残留変位からそれまでに累積した残留変位を除いた値を意味する。図-3.6には、載荷点直下における残留変位(図-3.5におけるT1)および版端部における残留変位(同図中のT2)の値を示している。これによると、図-3.4で示したように、押抜きせん断破壊面の形成が観察された衝突回数25回目以降に、T1とT2の計測値の差が急激に増加している。各試験体の破壊状況の目視観察によれば、T1とT2の計測値の差が2mm程度以上になると、版の底面において押抜きせん断破壊面の形成が明確に確認できた。そこで、T1とT2の計測値の差が2mmを超えた時の衝突回数を、押抜きせん断破壊面が明確に形成されるまでの衝突回数、すなわち限界衝突回数 N_u と設定した。

(3) 提案方法の適用

上述した方法により、各試験体の限界衝突回数 N_u を求めた。図-3.8にA-2試験体、D-1試験体の衝突回数と1回ごとの残留変位の関係を示す。A-2試験体、D-1試験体に対する重錘の衝突速度は4 m/sである。図より、A-2

試験体の場合、衝突回数2回でT1とT2の計測値の差が2mmとなった。一方、鉄筋比および版厚を大きくしたD-1は衝突回数35回まで一体的に挙動し、その後急激に押抜きせん断破壊面の形成が進行し、衝突回数39回でT1とT2の計測値の差が2mmとなった。表-3.4にそれぞれの試験体における限界衝突回数 N_u を示す。同一衝突速度で比較すると、鉄筋比を増加させたBシリーズはAシリーズよりも限界衝突回数が大幅に多くなっている。一方、版厚を大きくしたCシリーズの限界衝突回数はAシリーズとほぼ同等であった。これは、版厚を増加させたものの、鉄筋量をAシリーズと同等にしているためと考えられる。鉄筋比、版厚ともに大きくしたDシリーズでは限界衝突回数が最も多かった。

2.2(3)にて提案した考え方に基づいて、二辺支持RC版の実験データを式(2)で近似した。また、エネルギー比 R の算出にあたっては、試験体の実際の破壊状況を踏まえ、衝突面の半径は50mm、押抜きせん断破壊面がRC版となす角度は45°とした。鉄筋比および版厚の異なる4

表-3.4 各試験体の限界衝突回数 N_u

試験体種類	試験体名	限界衝突回数 (回)
A	A-1	33
	A-2	2
	A-3	1
B	B-1	143
	B-2	1
C	C-1	24
	C-2	4
D	D-1	39

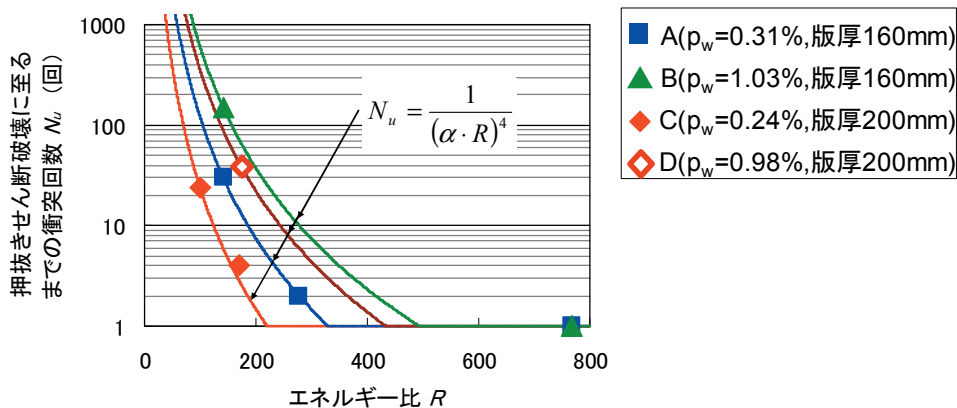


図-3.9 押抜きせん断破壊に至るまでの衝突回数 N_u とエネルギー比 R の関係

種類の二辺支持 RC 版について、押抜きせん断破壊に至るまでの衝突回数 N_u とエネルギー比 R の関係を図-3.9 に示す。

$$N_u = \frac{1}{(\alpha R)^\beta} \quad (2)$$

係数 β を一定とし、 α を変数として 4 種類の試験体について繰返し計算を行うと、 $\beta=4$ 程度で一定とした場合に、鉄筋比および版厚の違いによらず実験値と曲線が概ね一致した。これより、係数 β は、RC 版の諸元には依存せず、RC 版の支持条件や拘束条件に依存するものと推測される。この推測が成り立てば、係数 α は、RC 版の諸元に依存するものと考えられる。RC 版の諸元のうち、版厚およびコンクリート強度については、エネルギー比 R を算出する際に考慮されているため、係数 α は鉄筋比に依存すると考える。図-3.9 によれば、鉄筋比が大きくなるほど、同一エネルギー比に対する押抜きせん断破壊に至るまでの衝突回数が増える傾向、すなわち曲線が右側に移動する一定の傾向が見られる。よって、係数 α および β にかかる上記推測は概ね妥当と考えられる。

本研究で衝撃実験を行った二辺支持RC版は、検討対象構造物をモデル化したものであるため、検討対象構造物について検討する際には $\beta=4$ として考えてよいものとし、 $\beta=4$ のもので、鉄筋比の異なる各試験体の実験値に、それぞれ計算による曲線が一致するような係数 α を繰返し計算により求めた。鉄筋比と α の関係を図-3.10に示す。なお、ここで用いている鉄筋比は、二方向の引張鉄筋比の平均値である。これによれば、鉄筋比が小さいほど、 α は大きくなる傾向にあることがわかる。ここで、無筋コンクリートの場合を考えると、エネルギー比 $R=1.0$ の時に押抜きせん断破壊に至るまでの衝突回数 N_u が1回となるためには、 α は1.0でなければならない。したがって、鉄筋比 $p_w=0$ の時には、理論上 $\alpha=1.0$ となると考えられる。

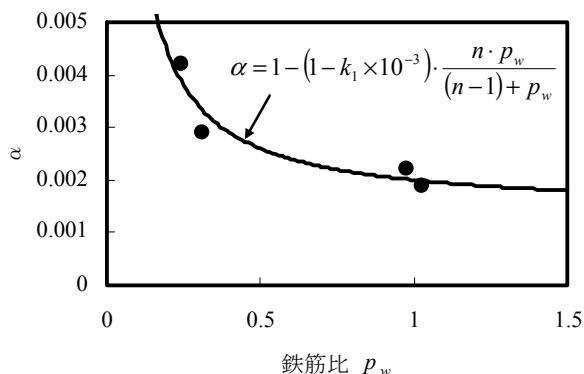


図-3.10 α と鉄筋比 p_w の関係

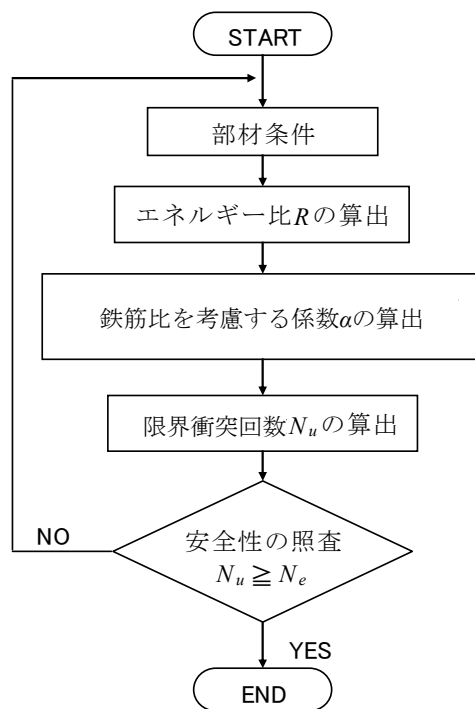


図-3.11 押抜きせん断破壊に対する性能照査フロー

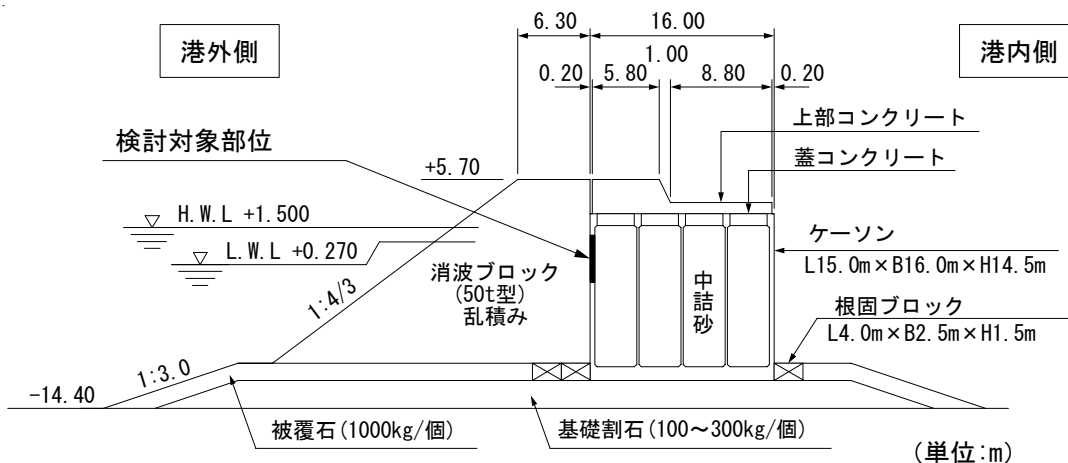


図-3.12 検討対象とした構造物の概要

これを考慮し、係数 α と鉄筋比 p_w の関係を式(3)、(4)のように定式化した。

$$\alpha = 1 - (1 - k_1 \times 10^{-3}) \cdot \frac{n \cdot p_w}{(n-1) + p_w} \quad (3)$$

$$n = k_2 \times 10^{-4} \cdot (1 + k_1 \times 10^{-3}) + 1 \quad (4)$$

ここに、

p_w : 二方向の引張鉄筋比の平均値 (%)

k_1, k_2 : 実験定数 ($k_1=2, k_2=6$)

以上より、係数 α と鉄筋比 p_w の関係を求めることによって任意の鉄筋比に応じた係数 α を設定することができ、想定される衝突エネルギーと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の比を用いることで任意の衝突エネルギーおよび版厚に対する限界衝突回数 N_u を設定することができる。この限界衝突回数 N_u とブロックの衝突回数の設計値 N_e を比較することで、図-3.11に示す消波ブロックの繰返し衝突によるケーソン前壁の局部破壊に対する性能照査が可能になるものと考えられる。

この限界衝突回数 N_u に対して、作用として消波ブロックの衝突回数を設定する必要がある。しかしながら、実構造物において損傷が生じた衝突回数などは不明である。そこで図-3.12に示す過去に消波ブロックの衝突により損傷を受けたことがある防波堤ケーソンを対象として、提案した方法により押抜きせん断破壊に至る衝突回数を算出すると10回となった。よって、対象とした穴あき現象は数回で発生するレベルにあったと推測される。

また、2.の実験では、実験データが非常にばらついた衝突速度1.8m/s付近を境に、これよりも衝突速度を0.1m/s前後させるだけで、数回で破壊する場合と100回程度以上で破壊する場合に明確に分かれた。上述したように現状として消波ブロックの衝突回数 N_e の設定が困難であることから、ブロック衝突回数 N_e は、ケーソン壁が押抜きせん断破壊に耐えうる衝突回数のレベルを、数回のレベルから数百回程度のレベルに引き上げることが、経済的な耐衝撃設計を行う上で重要であると考えられる。これより、本研究では暫定的にブロック衝突回数 N_e の設計値を100回と設定することとする。

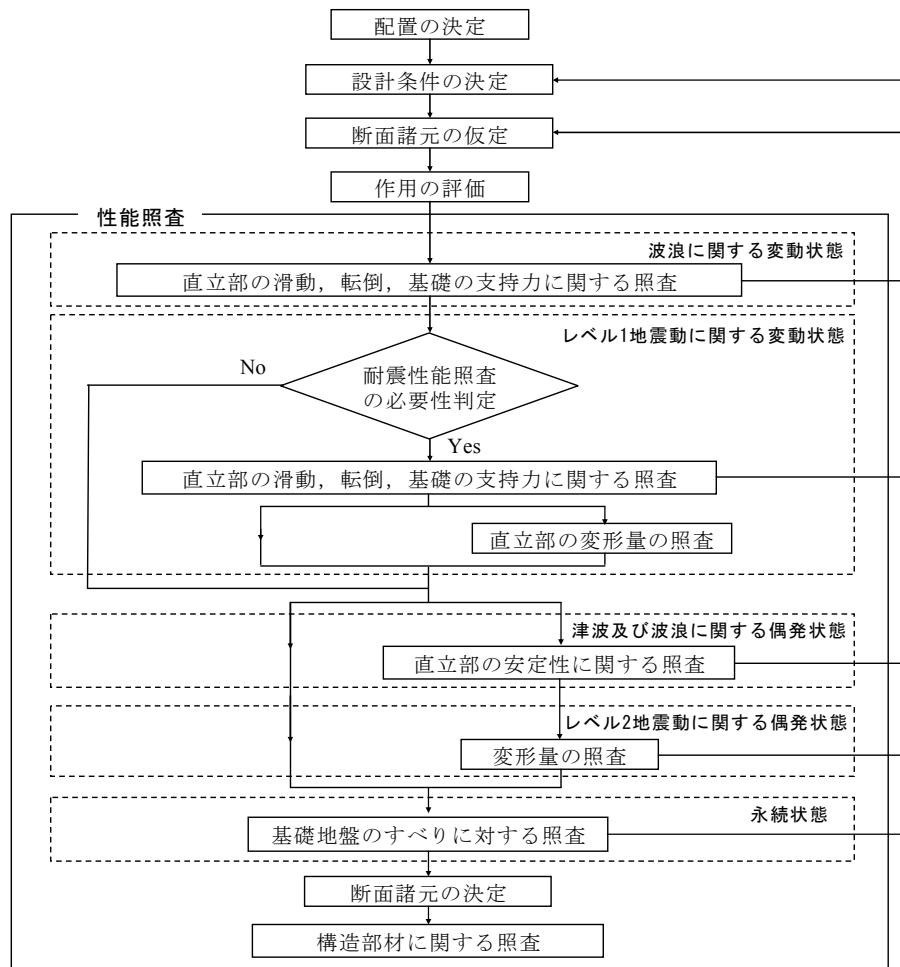


図-4.1 混成堤の性能照査順序の例

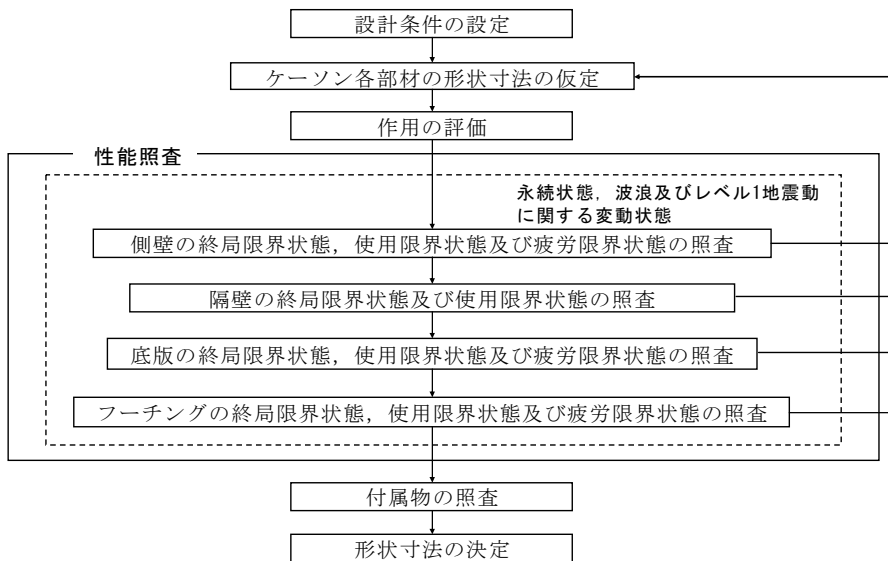


図-4.2 ケーソンの性能照査の順序の例

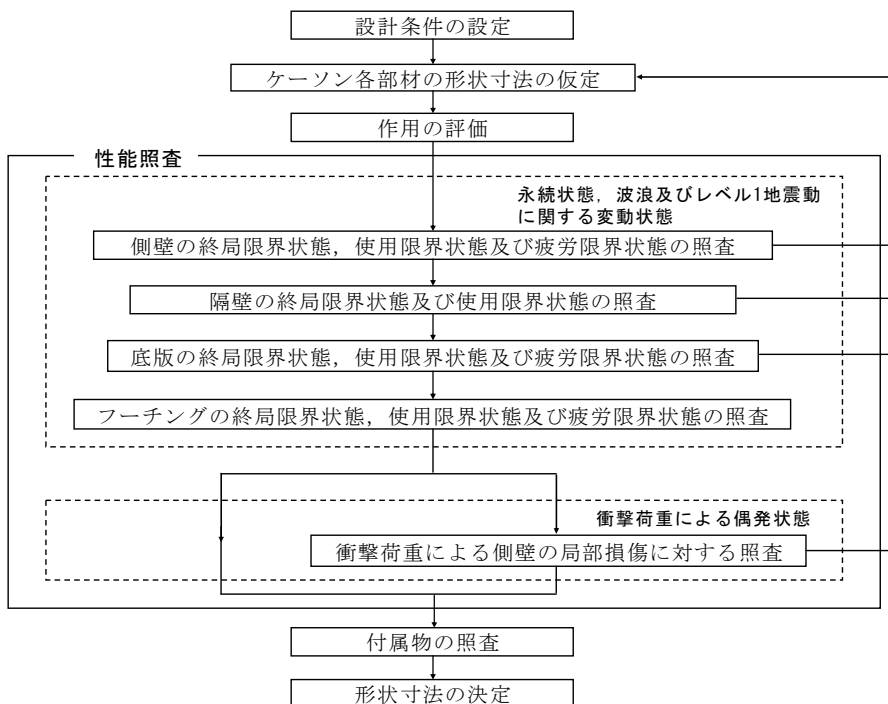


図-4.3 衝撃力に対する照査を含めたケーソンの性能照査の順序

案する。

4. 消波ブロックの繰返し衝突によるケーソン前壁の局部破壊に対する照査方法の提案

3. では、消波ブロックの繰返し衝突によるケーソン前壁の局部破壊に対する照査方法を提案した。ここでは、より実務的な点に着目して、消波ブロックの繰返し衝突によるケーソン前壁の押抜きせん断破壊に対する性能評価方法を用い、実務における性能照査方法の考え方を提

4.1 性能照査全体におけるケーソン前壁の耐衝撃性能照査の位置づけ

耐衝撃設計を行うにあたっては、現行の防波堤ケーソンの照査方法の中における耐衝撃設計の位置づけを明確にしなければならない。ケーソン式混成堤の一般的な性能照査の順序は図-4.1に示す通りである²⁾。この中における「構造部材に関する照査」は、一般的に図-4.2に示す

順序で行われる。本研究における衝撃力に対する性能照査の位置づけは、現行の性能照査によって決定された部材断面に対して行う、すなわち、図-4.3に示す順序によって行うものと考えている。そして、この照査手順を守るためには、現行の性能照査において決定された部材寸法は変更しないことを標準と考えた。これは、耐衝撃設計を行う段階において部材の形状寸法が変更されると、ケーソン全体の安定性に対する基本設計段階に戻らなければならない可能性があり、このような設計上の手戻りが発生すると実務に適さなくなるおそれがあるためである。

したがって、ケーソン前壁の耐衝撃設計は、現行の設計において行われる構造部材の性能照査において、永続状態、波浪およびレベル1地震動に関する変動状態に対して性能を満足したものに対して追加的に行うこととし、かつ部材寸法を変更しないことを標準とした。

4.2 耐衝撃設計断面の範囲

耐衝撃設計を行うにあたっては、対象構造物全体の中における耐衝撃設計の対象範囲を定めなければならない。対象構造物全体の中における耐衝撃性が必要とされる範囲は、消波ブロックの衝突による損傷が予想される範囲を適切に考慮した上で設定することが、経済的な設計を行う上で望ましい。過去の穴あき損傷事例によれば、損傷が生じる高さは海面付近が多く、海中における損傷事例は比較的少ない。これは、通常、上部コンクリートの天端まで被覆された消波ブロックが繰り返す波の影響で沈下し、上層部に積まれた最も動揺しやすい消波ブロックが海面付近に位置することになるためであると考えられる。例えば、東北地方整備局仙台港湾空港技術調査事務所の既往の成果¹¹⁾による予防工法設計例によれば、上記のような消波ブロックの衝突現象を考慮し、耐衝撃性が必要とされる範囲を、ケーソン天端から下方に静水面（L.W.L）以下消波ブロック1個分の高さまでと設定しており、耐衝撃性が必要とされる範囲を設定する際の参考になる（図-4.4）。ただし、図-4.5に示すように、消波ブロックによる被覆を行う区間から行わない区間に変化する区間が存在する場合には、転落やロッキングなどにより消波ブロックの衝突が発生することが懸念される。したがって、このような区間については、耐衝撃性が必要とされる範囲をケーソン前壁全面とするなどの適切な範囲の設定が必要である。また、対象となる防波堤や近傍の防波堤において、過去にケーソンの穴あき損傷の記録がある場合には、その結果も考慮して耐衝撃性が必要とされる範囲を設定することが望ましい。

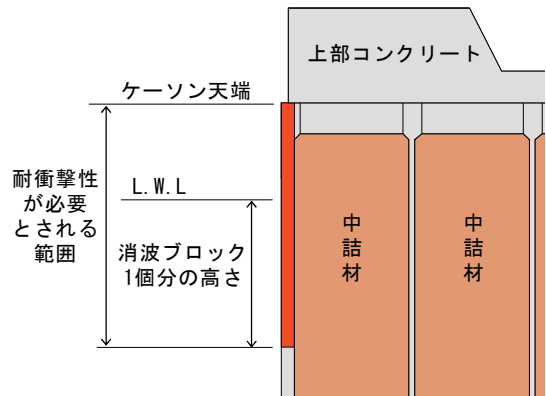


図-4.4 耐衝撃設計が必要とされる範囲の一例

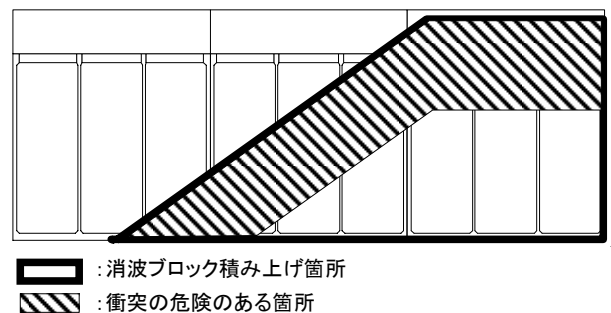


図-4.5 消波ブロックの被覆区間のイメージ

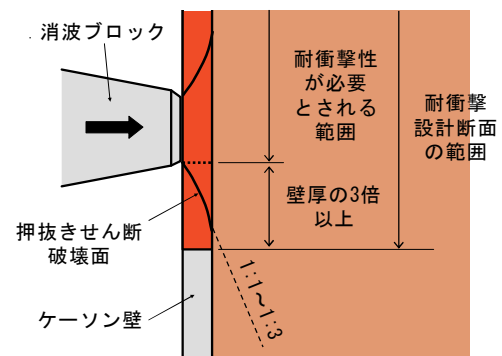


図-4.6 耐衝撃設計断面の範囲の一例

以上より、耐衝撃性が必要とされる範囲の設定は、消波ブロックの衝突が想定される範囲を考慮して適切に設定することとした。

また、耐衝撃性が必要とされる範囲の最下部に消波ブロックが衝突した場合、押抜きせん断による破壊面が、耐衝撃性が必要とされる範囲の外側におよぶ可能性がある。したがって、このような破壊面をカバーする範囲を耐衝撃設計断面として設定する必要がある。既往の衝撃実験におけるRC版の押抜きせん断破壊状況によれば、押抜きせん断破壊面がRC版となす勾配は、1:1~1:3程度となっている。そこで、例えば図-4.6に示すように、耐衝撃性が必要とされる範囲の下側に壁厚の3倍以上を加え

表-4.1 消波ブロックの衝突パターンおよび衝突速度

衝突パターン		衝突速度	
		有川らによる提案値 ¹³⁾	山口らによる提案値 ¹⁴⁾
ロッキング	砕波時	0.04C	—
	非砕波時	$4H/\sqrt{6}T$	—
転落		(0.1C+自由落下速度)/4	—
水平移動		0.15C	(1/20~1/13)C

表-4.2 設計条件

自然条件	砕波時の波速 C	12.5 m/s
ケーソン前壁の構造	支間長 l	5.00 m
	壁厚 h	0.40 m
	かぶり	外側 80 mm, 内側 60 mm
	コンクリートの設計基準強度 f_{ck}	24 N/mm ²
	コンクリートの静弾性係数 E_c	25 kN/mm ²
	粗骨材の最大寸法 d_{max}	20 mm
	鉄筋の引張降伏強度の特性値 f_{yk}	345 N/mm ²
	鉄筋のヤング係数 E_s	200 kN/mm ²
	ヤング係数比 n	8.0
	消波ブロック (50t 型)	消波ブロック質量 M
脚の先端半径 r		0.455 m
消波ブロック高さ H		4.155 m

た範囲 (図-4.7) を耐衝撃設計断面の範囲として設定する必要がある。これらを踏まえ、耐衝撃設計断面の範囲の設定は、耐衝撃性が必要とされる範囲の外側に、適切な余裕を持った範囲を設定することとした。

4.3 ケーソン前壁のモデル化

耐衝撃設計を行うにあたっては、対象とする防波堤ケーソンの前壁を適切にモデル化する必要がある。そこで、これまでの研究における衝撃実験によって性能を確認した実績を踏まえ、支間長と側壁の高さの比が 4:3 の二辺支持された RC 版にモデル化することとした。一般的な防波堤ケーソンの前壁は、隣接する側壁、隔壁や底版によって三辺支持された部材であるが、辺長比が大きいため底版による拘束の影響は小さいものと考え、本研究では図-3.1 に示したように二辺単純支持された RC 版としてモデル化を行った。また、一般的な防波堤ケーソンの前壁の配筋では、ハンチ部や底版部の鉄筋が側壁部に定着されるが、これらの鉄筋の影響は無視し、最も配筋が粗な部分の部材断面を用いて試験体の設計を行った。したがって、ケーソン前壁をモデル化するには、前壁の

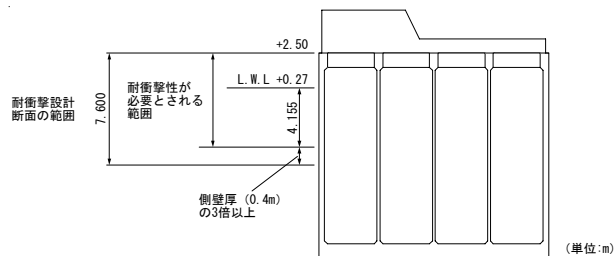


図-4.7 耐衝撃設計断面の範囲

断面のうち最も配筋が粗な部分を考えることとした。

また、防波堤ケーソンの前壁の背面には中詰材が存在しており、これが耐衝撃性に影響を与えと考えられる。既報によると、中詰材が存在している場合、これが存在しない場合と比べて曲げ変形量が小さくなるとともに押抜きせん断破壊に至るまでの繰返し衝突回数が多くなる¹²⁾。しかし、同実験データは限られた衝突条件でのみ行われたものであり、中詰材の影響を定量評価することは現状では困難である。そこで、安全側の設計とするため、中詰材の影響を無視することとした。

表-4.3 ケーソン壁の諸元

	Case 1	Case 2
支間長 l	5.00 m	
RC 版の幅 b	5.00×3/4 = 3.75 m	
RC 版の質量 m	5.00×3.75×0.4×2.4×1000 = 18,000 kg	
主鉄筋本数 (圧縮側)	3.75/0.2 = 18.75 本 (200mm ピッチ)	
主鉄筋本数 (引張側)	3.75/0.2 = 18.75 本 (200mm ピッチ)	3.75/0.15 = 25.00 本 (150mm ピッチ)
圧縮側主鉄筋量 A'_s	286.5 mm ² ×18.75 本 = 5371.9 mm ² (D19)	
引張側主鉄筋量 A_s	286.5 mm ² ×18.75 本 = 5371.9 mm ² (D19)	794.2 mm ² ×25.00 本 = 19855.0 mm ² (D32)
RC 版の圧縮縁から 圧縮側主鉄筋までの距離 d'	80 mm	
RC 版の圧縮縁から 引張側主鉄筋までの距離 d	340 mm	
配力筋 (圧縮側)	D13 400mm ピッチで配筋	
配力筋 (引張側)	D13 400mm ピッチで配筋	D19 400mm ピッチで配筋
コンクリートの種類	普通コンクリート	

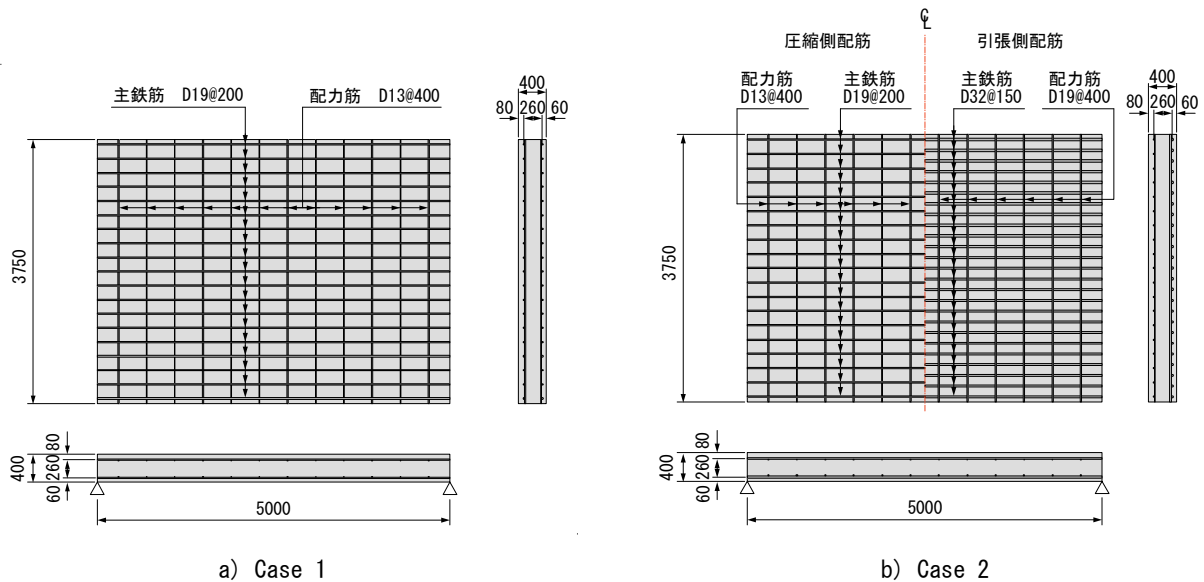


図-4.8 試設計 RC 版断面 (単位: mm)

4.4 消波ブロックのモデル化

耐衝撃設計を行うにあたっては、対象とする消波ブロックの運動形態、衝突速度および衝突面の形状を適切に設定する必要がある。本研究においては、消波ブロックの運動形態および移動速度について、既往の研究成果を参考に設定した。有川らは、消波ブロックの衝突パターンを水平移動、ロッキング、転落の3種類に分類し、大型水路を用いた消波ブロックの衝突実験結果から、それぞれの衝突パターンによる衝突速度を定式化している¹³⁾。また、山口らは、衝撃砕波力が作用した消波ブロック被覆堤を模擬した水理模型実験を行い、消波ブロックは波の流体力によって一脚だけが少し浮いたような状態で滑

るように衝突する機会が多いこと、その時の衝突速度は波速の1/20~1/13であることを確認している¹⁴⁾。表-4.1に有川らおよび山口らにより提案された衝突速度の提案値を示す。本研究では、消波ブロックによる穴あき損傷事例が比較的少ないことを考慮し、山口らの研究により得られた知見のうち衝突速度の上限である、波速の0.08倍の衝突速度で水平衝突すると考え、これをもとに衝突速度を設定している。この考え方を踏まえ、消波ブロックの運動形態は水平移動とし、その衝突速度は砕波時の波速の0.08倍と仮定することとした。

4.5 試設計

図-3.12を対象構造物として、試設計を行った。表-4.2に試設計の条件を示す。なお、限界値や性能照査の手法はケーソン前壁の2/5モデルとした二辺支持RC版で得られた結果を準用できるものと考えた。

試設計では、表-4.3および図-4.8に示す2つの断面に対して照査を行った。Case 1は一般的なケーソン壁の諸元とし、Case 2は鉄筋比を大きくした断面としている。ここでは、Case 1における計算例を示す。

衝突エネルギーは式(5)から算定される。

$$E_i = \frac{1}{2} MV^2 = 23,000 \text{ kg} \cdot (\text{m/s})^2 \quad (5)$$

また、押抜きせん断破壊面における破壊エネルギー E_p は式(6)により求められる破壊面の面積 A_p と式(1)から求められる単位面積当たりの破壊エネルギー G_F ($=84.3 \text{ N/m}$)の積(式(7))で算出できる。

$$A_p = \pi \left(\frac{r}{\cos \theta} + \frac{\bar{d}}{\sin \theta} \right) \left(r + \frac{\bar{d}}{\tan \theta} \right) - \pi \frac{r^2}{\cos \theta} \quad (6)$$

$$E_p = A_p \times G_F = 141.6 \text{ N} \cdot \text{m} = 141.6 \text{ kg} \cdot (\text{m/s})^2 \quad (7)$$

以上より、エネルギー比 R は162.4と算出される。

次に、平均引張鉄筋比を算出する。支間方向断面の鉄筋比は $286.5 / (200 \times 340) = 0.0042 = 0.42\%$ 、支間直角方向断面の鉄筋比は $126.7 / (400 \times 324) = 0.0010 = 0.10\%$ となり、平均引張鉄筋比は $(0.42 + 0.10) / 2 = 0.26\%$ となる。式(3)、(4)に代入すると、 $\alpha = 0.00371$ となり、これを式(8)に代入することで限界衝突回数 N_u が求められる。

$$N_u = \frac{1}{(\alpha \cdot R)^4} \quad (8)$$

試設計の結果、Case 1では、限界衝突回数 $N_u = 10$ 回となり $N_e = 100$ 回を満足できない。一方、Case 2では限界衝突回数 $N_u = 102$ 回とCase 1の10倍程度となり、 $N_e = 100$ 回を満足することができた。

上述した通り、新設構造物において消波ブロックの繰返し衝突によるケーソン前壁の局部破壊を照査することが可能となった。これにより、消波ブロックの繰返し衝突によるケーソン前壁の局部破壊が想定される箇所では、耐衝撃性能の改善効果を定量的に評価することが可能となり、合理的な断面決定等に寄与することができる。今後の課題として、既報にて耐衝撃性能向上効果が認められているPVA短繊維¹⁴⁾の効果の定量評価法や作用となる消波ブロック衝突回数の設定法等を確立する必要がある。

5. 結論

本論は繰返し衝撃荷重を受けるRC版の残存押抜きせん断耐荷性能について明らかにし、限界状態の設定や性能照査方法について提案した。また、提案方法を用いて試設計を行い、消波ブロックの繰返し衝突によるケーソン前壁の局部破壊に対する照査方法を示した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 衝撃荷重を受けるRC版の残存押抜きせん断耐力は、押抜きせん断破壊面が明確に形成される前においては健全な場合の8割程度以上であり、押抜きせん断破壊面の形成とともに急激に低下することが分かった。
- (2) 健全なRC版の押抜きせん断耐力に対する損傷を受けるRC版の残存耐力比を用いることで、繰返し衝撃荷重を受けるRC版の残存性能を評価できる可能性があることが分かった。
- (3) 入力される衝撃エネルギーに対するRC版の吸収可能なエネルギーの比を用いることで、RC版が押抜きせん断破壊に至るまでの繰返し衝突回数を推測することができた。
- (4) 消波ブロックの繰返し衝突によるケーソン前壁の局部破壊に対して、エネルギー比から限界衝突回数を求め、作用側の消波ブロックの衝突回数設計値と比較することで性能照査を行う方法を提案した。
- (5) 提案方法を用いた試設計の結果、一般的なケーソン前壁の引張側鉄筋を2倍とすることで、約10倍の限界衝突回数となった。また、本方法により、消波ブロックの繰返し衝突によるケーソン前壁の局部破壊に対する耐衝撃設計が可能になることが示された。

(2011年4月27日受付)

謝辞

本研究の実施にあたっては、国土交通省東北地方整備局仙台港湾空港技術調査事務所に多大なるご支援、ご助言をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 平山克也, 南靖彦, 奥野光洋, 峰村浩治, 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年
- 2) 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年

- 3) 例えば, 岸徳光, 三上浩, 栗橋祐介: 低速度衝撃を受ける四辺支持RC版の耐衝撃設計法に関する一提案, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.1327-1338, 2009年
- 4) 例えば, 山口貴之, 別府万寿博, 大野友則: 消波ブロックの繰返し衝突により防波堤ケーソン壁に生じる局部破壊と防護対策に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.759/I-67, pp.381-396, 2004年
- 5) 山田岳史, 岩波光保, 白根勇二, 竹鼻直人: 曲げ破壊型RCはりの耐衝撃設計法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.799-804, 2007年
- 6) 松林卓, 岩波光保, 横田弘, 山田岳史: RCはりの耐衝撃性に影響を及ぼす要因の実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.841-846, 2008年
- 7) 岩波光保, 松林卓, 横田弘, 小野寺美昭: 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挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.799-804, 2009年
- 8) 松林卓, 岩波光保, 山田岳史, 竹鼻直人: 二辺支持鉄筋コンクリート版の耐衝撃性評価に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.805-810, 2009年
- 9) 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年
- 10) 土木学会: コンクリート標準示方書設計編, 2007年
- 11) 国土交通省東北地方整備局仙台港湾空港技術調査事務所: 防波堤ケーソンの損傷対策に関する技術マニュアル(案) -消波ブロック衝突による側壁損傷対策-, 2007年
- 12) 松林卓, 岩波光保, 川端雄一郎: 背面に砂層が存在する二辺支持鉄筋コンクリート版の繰返し衝撃実験, 土木学会第65回年次学術講演会講演概要集, pp.535-536, 2010年
- 13) 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, 2005年
- 14) 山口貴之, 別府万寿博, 大野友則: 衝撃砕波を受ける消波ブロックの直立壁への衝突現象に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.711-715, 2003年

港湾空港技術研究所報告 第50巻第3号

2011.9

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2011) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

CONTENTS

1. Development of Four-dimensional Wide-angle Imaging and Surveying SONAR
..... Sayuri MATSUMOTO, Natsuki YOSHIKUMI, Kageyoshi KATAKURA 3

2. Residual Punching Shear Capacity of RC Slab Damaged by Repeated Impact Loads
..... Yuichiro KAWABATA, Mitsuyasu IWANAMI, Taku MATSUBAYASHI 43