

衝撃波力を受けるケーソン壁の設計法

DESIGN PROCEDURES FOR A CAISSON WALL AGAINST IMPULSIVE WAVE FORCES

津田宗男¹・高山知司²

Muneo TSUDA and Tomotsuka TAKAYAMA

¹正会員 博(工) 東亜建設工業株式会社 設計部西日本設計室 (〒550-0004大阪市西区靱本町1-5-15)

²フェロー 工博 京都大学防災研究所教授 気象・水象災害研究部門 (〒611-0011宇治市五ヶ庄)

Although caisson walls are sometimes collapsed by the actions of impulsive pressures induced by breaking waves, these huge pressures are generally not considered in the present design procedures for reinforced concrete slabs of caisson walls. The present paper proposes new design procedures which take the impulsive pressures into account for the design of the caisson wall. The limit state design method is employed for an ultimate state and an initial cracking state of the caisson wall. The actual wave pressure acting on the wall is estimated under the consideration of inner filling resistant force and wave pressure reduction due to the dynamic response of a caisson on a rubble mound. The validity of the proposed design procedures is confirmed by the fact that they can clearly distinguish damaged and undamaged caisson walls.

Key Words : *Design procedures, Caisson wall, Breaking wave impulsive pressures, Limit state design, RC slabs*

1. まえがき

近年, 外洋に面した大水深の高波浪海域に人工島や防波堤, シーバースなどの構造物が建設される事例が増えてきている. マウンド形状や急な水深変化などの設置条件によっては, このような構造物に強い衝撃砕波力や衝撃的揚圧力が作用する. 写真-1に示すむつ小川原港の事例のように, 衝撃砕波力の作用によって防波堤のケーソン壁に穴が明いたり, ケーソンが完全に破壊されたりした事例も報告されている¹⁾.

衝撃波力は一波一波の波圧強度や空間的なばらつきが大きいこと, ピーク値は強大であるが継続時間が短いことが特徴である²⁾. また, 衝撃波力を受ける部材の, 動的応答による発生断面力の特性や破壊に至るまでの耐力は, 通常の波力によるものと大きく異なっている³⁾. このため, 衝撃波力を受ける部材は設計上の取り扱いが難しく, ケーソン壁や岸壁の構造部材の設計手法はいまだ確立されていない.

著者らは衝撃波力を受ける鉄筋コンクリート部材(RC部材)に関する一連の研究において, 被災事例調査や数値シミュレーション, 大規模模型実験を行い, 衝撃波力に対するRC部材の応答特性, 破壊に至るメカニズムなどの検討を行い設計上解決すべき課題を明らかにしてきた^{1)~4)}.



写真-1 ケーソン壁の被災事例

本研究ではこれらの知見を基に検討を深め, 衝撃波力を受けるケーソン壁のRC部材の設計法を提案する. なお, 滑動や転倒などのケーソン全体の安定性に関する設計方法については検討対象としていない.

まず, 現行設計法における, 衝撃波力の取り扱いや問題点を整理した. 次に, 一連の研究で得られた知見に基づいて, 新しい設計法を考案した. この設計法を適用して過去の被災ケーソンの部材強度を照査し, 実際の被災レベルと比較することにより, 提

案した設計法の妥当性を検証している。

2. 現行設計法の問題点

現在、港湾や海岸施設の多くは、港湾の施設の技術上の基準・同解説（港湾設計基準）⁵⁾などの設計指針に準じて設計されている。また、RC部材の構造設計では、コンクリート標準示方書⁶⁾などの材料関係の設計指針が適用されることも多い。このうち、港湾設計基準は、港湾構造物の設計に関して広範囲かつ詳細な指針や解説が示されており、現行設計法の代表的な存在である。

これらの現行設計基準ではケーソン防波堤の滑動・転倒安定性を対象とした規定は示されているが、衝撃波力を受けるケーソン壁の設計については明確な基準が示されていない。現状では、衝撃波力やそれに対する部材の動的応答特性や破壊特性などを考慮せず、算定された波力をそのまま静的荷重として載荷し設計されている⁵⁾。

現行設計法で波力算定に適用されている合田式や衝撃波力係数を考慮した拡張合田式⁷⁾、広井式は、ケーソン全体の安定検討に適用するために考案された波力算定式である。衝撃波力係数を考慮した拡張合田式は、衝撃波力やケーソンの動的応答を考慮しているが、ケーソン全体と捨石マウンドから構成される固有振動周期数100ms～数sの振動系を対象としたものである。それに対してケーソン壁の固有振動周期は数ms～数10msであるため、衝撃波力係数がケーソン部材の動的応答を含めて部材設計における衝撃波力の評価に適用できるものかは明らかではない。

また、捨石マウンドやRC部材の弾性によるクッション効果によって衝撃波力が低減されると言われている⁸⁾が、設計における評価は困難であり安全代と見なされている。その他、中詰材を静止土圧で評価していること⁵⁾やRC版を3辺固定上辺自由版あるいは4辺固定版としてモデル化していること¹⁾の妥当性、破壊の進行状況を考慮せずに部材を設計していることなど、問題点が残されている。

3. 提案する設計法

(1) 提案する設計法の考え方

本研究で提案する設計方法は、ケーソンのRC部材が破壊されないことを要求性能として、限界状態設計法を適用するもので、ひび割れ限界状態と終局限界状態について照査を行うものである。ここで、ひび割れ限界状態は、使用限界状態に対応するものではない。衝撃波力を受けるケーソン壁は、一旦クラックが発生すると被災が急速に進展し破壊に至る³⁾ことを考慮して、クラックの発生によって限界状態を定義するものである。ただし、ひび割れ限界耐

力は主としてコンクリートの強度特性や部材厚によって決定されるため、ひび割れ限界だけで部材形状を決定すると、鉄筋量を小さくすることができる。この場合、ひび割れ発生とともに鉄筋の負担が急増して降伏し、ケーソンが急激に全半壊レベルの破壊に至る危険性が高い。したがって、全半壊レベルの破壊を対象として終局限界状態の照査も行うこととした。

ケーソン壁の断面力を算定する場合、現行設計法では標準的にケーソン壁を3辺固定上辺自由版あるいは4辺固定版でモデル化している。しかし、これらのモデルによって設計すると、衝撃波力の作用を受ける静水面付近で断面力が小さく算定され、被災しやすい部材構造となる⁴⁾。図-1は17事例の被災についてケーソン壁の破壊された範囲を、水平方向を隔壁スパン L_w 、鉛直方向を波高 H で無次元化したものである。静水面付近で破壊されているが天端付近では破壊を免れており、天端において蓋コンクリートや上部工がケーソン壁を単純支持している場合の被災の特徴をよく示している。したがって、ケーソン壁を3辺固定上辺単純支持版としてモデル化し、断面力を算定することが適当であると思われる。

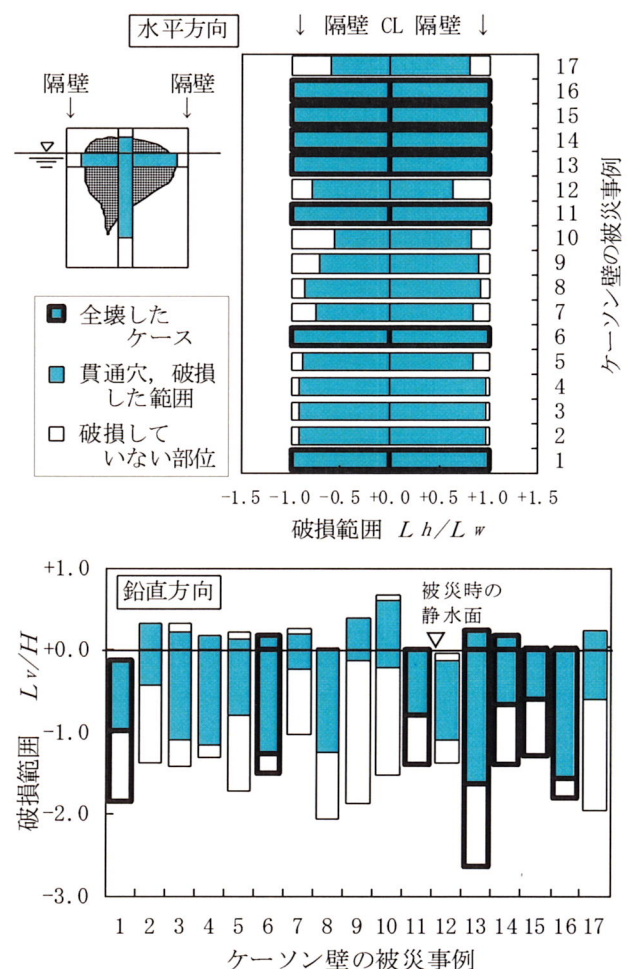


図-1 ケーソン壁の損傷位置

衝撃波力を受けるケーソン壁の動的応答による断面力の低減は考慮しないものとする。これは、ケーソン壁は局所的で作用時間の短い衝撃波圧ではなく、比較的衝撃性の低い波圧合力（衝撃波力）に対して応答しているためである。ケーソン壁の固有振動周期が数ms～数10msであるのに対して衝撃波力の作用時間は数10～数100msと長いため、動的応答による断面力の低減は見られない³⁾。

衝撃波力の作用を受けるケーソン壁が動的応答による低減効果を受けないことから、衝撃波力を考慮した拡張合田式⁷⁾を適用することによって、設計上静的な取り扱いが可能となる。ケーソンの被災事例にこの波力算定を適用して断面力を算定すると、ひび割れ耐力や終局耐力との比によって、被災レベルが分類できる⁴⁾。したがって、高マウンドや消波ブロックの不完全被覆のケースでは、拡張合田式で衝撃波力を算定し、安全係数で補正するものとする。なお、急勾配の海底地盤に設置されたケーソンに作用する波力は、数値シミュレーション⁹⁾や実験によって算定するものとする。

捨石マウンドのクッション効果についても、衝撃波力の作用時間内ではケーソンの慣性力が捨石マウンドの弾性力より卓越し、波力低減効果は小さい¹⁾ため、これを考慮しないものとした。中詰材は現地観測結果から、弾性体としての挙動が認められる。現行設計法のように静止土圧としてではなく、弾性体として取り扱う方が適切である。

限界状態設計法で適用する安全係数は、港湾設計基準に準ずるものとする。ただし、ひび割れ限界状態は終局限界状態に近い定義付けであるため、基本的には終局限界の安全係数を適用する。また、部材係数と荷重係数については、衝撃波力を受けるRC部材の破壊特性を考慮して修正を加えた。部材係数は、部材耐力の計算上の不現実性などが限界状態におよぼす影響を評価するものである。衝撃波力を受けるRC部材は、静的載荷によるひび割れ限界の50%程度の小さいひずみで表面にクラックが発生し、急速に破壊される。これに衝撃波力による部材のひずみが静的載荷に対して30%程度低減されていることを考慮すると、部材係数は1.5相当となる。終局限界についての部材係数は最大1.3⁵⁾であるから、これに乗じて2.0とした。

(2) 提案する設計法

ここで提案する衝撃波力の作用を受けるケーソンRC部材の設計法の設計フローを図-2に示す。まず、設計波やマウンド形状などの荷重に関する条件から、合田の方法¹⁰⁾などを適用して衝撃波力が作用する可能性を判定する。衝撃波力が作用しないものと判定された場合は、現行設計法に準じて設計を行う。

ここで提案する設計法は、限界状態設計法を適用して、ひび割れ限界状態と終局限界状態について照査を行うものである。ただし、ひび割れ限界状態は使用限界状態に対応するものではなく、ひび割れの

発生にともなうRC部材の断面破壊に対する照査を行うものである。断面破壊の限界状態に対する検討は、衝撃波力を静的荷重と見なして算定する設計断面力 S_d の設計断面耐力 R_d に対する比に構造物係数 γ_i を乗じて、 $\gamma_i S_d / R_d \leq 1.0$ であることを確認することによって行うものとする⁶⁾。なお、試設計によればひび割れ限界状態に対する検討によって部材厚が、終局限界状態に対する検討によって配筋が決定されることが多いようである。

設計断面力は、荷重に関する特性値から設計荷重を算出し、これを断面力の解析モデルに適用して算定する。このとき、安全係数として表-1に示した荷重係数や構造解析係数を考慮する。

衝撃荷重の特性値は、衝撃波力の強度と作用時間である。しかし、作用時間の特性による断面力の低減効果は小さい¹⁾ため、ここでは衝撃波力の強度のみを静的荷重として取り扱う。高マウンドや消波ブロックの不完全被覆状態のケーソン式防波堤に作用する波力は、衝撃波力を考慮した拡張合田式⁷⁾を適用して算定する。このとき、部材の剛性や捨石マウンドのクッション効果による波力や断面力の低減、中詰材の抵抗力は考慮しない。

急勾配の海底地盤に設置されたケーソンについては、模型実験や数値シミュレーション⁹⁾によって波力を算定する。このとき、縮尺効果による封入空気の影響を考慮して補正することもできる³⁾。

一般にケーソン壁のような平面形状に対して部材厚が小さい平板構造物は、部材に生じる曲げモーメントについて照査が行われている⁵⁾。ここでもこれに準じて、曲げモーメントあるいはそれにともない部材断面に生じる曲げ応力について照査を行う。部材に生じる断面力は、ケーソン壁を平板と見なした簡易な解析モデルあるいはケーソンの隔壁構造や中詰材などを考慮した動的数値シミュレーションによって求めることができる¹⁾。簡易なモデルでは、ケーソン壁を側壁や隔壁、底版で固定され、蓋コンクリートと上部工で単純支持された3辺固定上辺単純支持版として解析を行うものとする。ケーソン壁には算定された衝撃波力の最大値を等分布荷重に換算し部材の全面に載荷する。

設計断面耐力は、表-2に示したコンクリートや鉄

表-1 安全係数

安全係数		ひび割れ限界	終局限界
材料係数 γ_m	コンクリート	1.0	1.3
	鉄筋	1.0	1.0
荷重係数 γ_f	波力	1.3	1.3
構造解析係数 γ_i		1.0	1.0
部材係数 γ_b		2.0	1.15
構造物係数 γ_a		1.0	1.1

筋の強度などの特性値から材料の設計強度を算定し、これを断面耐力の解析モデルに適用して算定する。このとき、安全係数として表-1に示した材料係数や部材係数を考慮する。

断面耐力は、設計で仮定した形状の部材が保有す

る限界耐力であり、ひび割れ断面耐力と終局断面耐力について算定する。

ひび割れ断面耐力 M_{cu} は、式(1)に示すように、RC部材を弾性体と見なしたときに表面にクラックが発生する限界耐力とする。

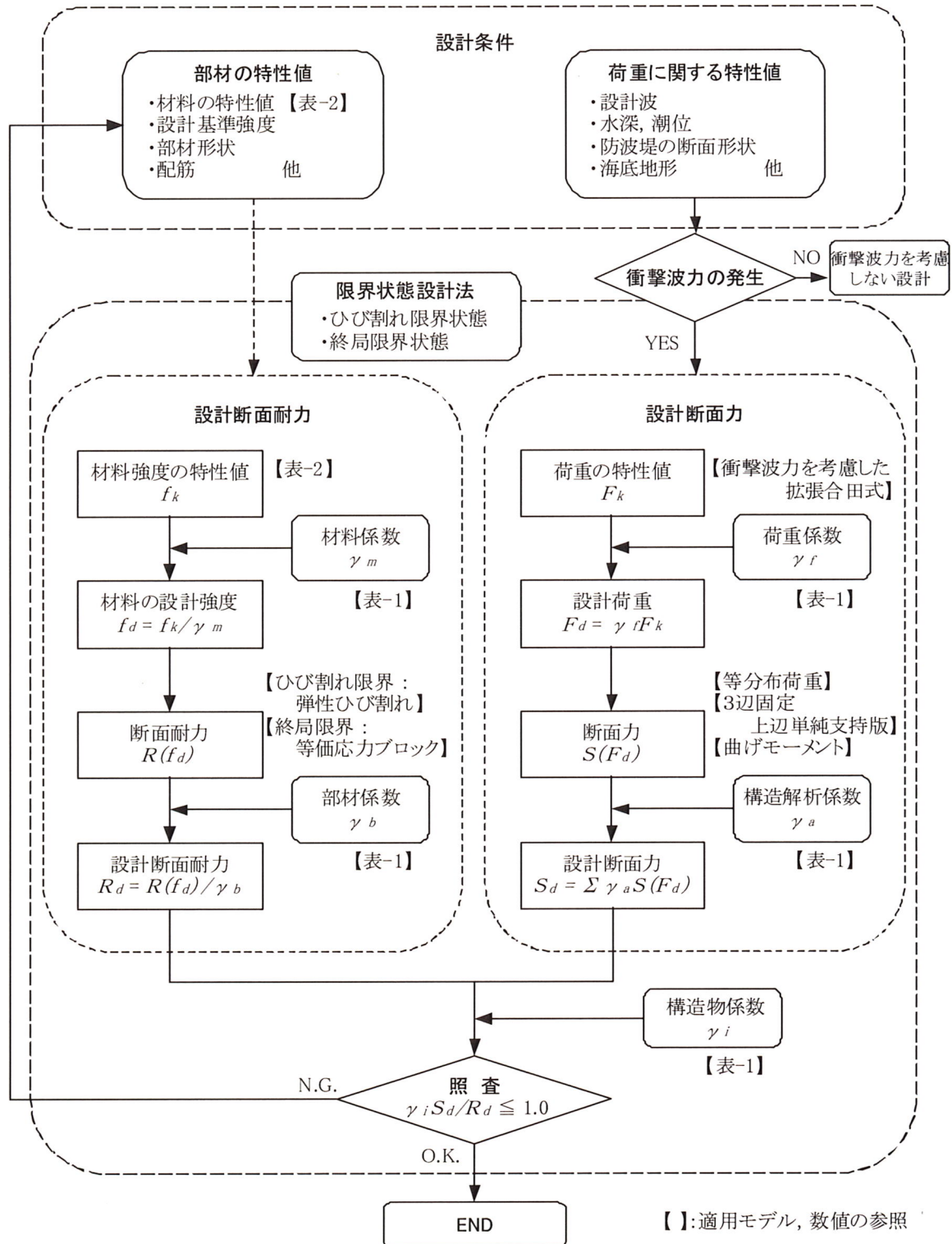


図-2 提案する設計法の設計フロー図

$$M_{cu} = (I_c + nI_s) \frac{2}{h_{rc}} \sigma_{tk} \quad (1)$$

ここに、 I_c ：コンクリートの断面2次モーメント、 I_s ：鉄筋の断面2次モーメント、 n ：鉄筋とコンクリートのヤング係数比、 h_{rc} ：断面厚さ、 σ_{tk} ：コンクリートの曲げ引張強度である。

終局耐力 M_u は、式(2)に示すように、終局限界状態におけるコンクリートの圧縮応力度の分布を等価応力ブロックと仮定した限界耐力⁶⁾である。

$$M_u = \beta x k_1 f'_{cd} \left(1 - \frac{\beta x}{2} \right) \quad (2)$$

ここに、 f'_{cd} ：コンクリートの設計圧縮強度、 x ：中立軸から圧縮縁までの距離である。設計基準強度 $f_{ck} \leq 50 \text{ N/mm}^2$ に対して、係数 $k_1 = 0.85$ 、分布幅 $\beta = 0.8$ である。

4. 提案した設計法の検証と試設計

(1) 提案した設計法の検証

提案した設計法を適用して過去の被災ケーソン¹⁾の部材強度を照査し、実際の被災レベルと比較することにより、提案した設計法の妥当性の検証を行う。

図-3は、終局限界状態について、ケーソン壁の終局耐力と衝撃波力によって発生した断面力を比較したものである。断面力は、荷重係数や構造解析係数、構造物係数を考慮したケーソン壁に発生する曲げモーメントで、終局耐力は材料係数や部材係数を考慮している。被災が多く発生している静水面付近のケーソン壁両端部における水平方向（鉛直軸回転）の曲げモーメントを示している。全半壊したケーソンは断面力が終局耐力より大きく、被災していないケーソンは同等か小さい値を示しており、設計法の妥当性を示している。

なお、全ての安全係数を1.0とした場合、全半壊ケーソンは断面力が終局耐力より大きく、クラックの発生したケーソンは同等あるいは小さいことから、壊滅的な被災の指標として終局限界状態が適用できる⁴⁾。

図-4は、ひび割れ限界状態について、ひび割れ耐力と断面力を比較したものである。ケーソン壁中央部の静水面付近における鉛直方向（水平軸回転）の

曲げモーメントを示している。全半壊やクラックが発生したケーソンは断面力がひび割れ耐力より大きいものに対して、被災していないケーソンは断面力の方が小さい。これは、ひび割れ限界状態がクラックの発生を判定する指標となることを示している。クラックの発生からケーソン壁の破壊までの進行が早いことを考慮すると、クラックが発生しないように設計することが重要となる。

なお、ひび割れ耐力はコンクリートの材料特性やケーソン壁の部材厚に依存するため、最も大きい断面力に対して設計を行うこととなる。今回の事例の中には、鉛直方向（水平軸回転）の断面力が水平方向（鉛直軸回転）のもの約3倍ある事例も見られた。この場合、鉛直方向の照査で部材厚が決まり、部材厚は一定であるため、水平方向の照査では所要部材耐力の約3倍のひび割れ耐力を持つ設計となってしまうことに注意が必要である。

(2) 提案した設計法による試設計

提案した設計法を適用して、被災したケーソンの衝撃波力に対する所要の壁厚を試算した。波圧の算定には衝撃波力を考慮した拡張合田式⁷⁾を適用し、ケーソン壁を3辺固定上辺単純支持版でモデル化し

水平方向（鉛直軸回転） M ：部材両端部、静水面部

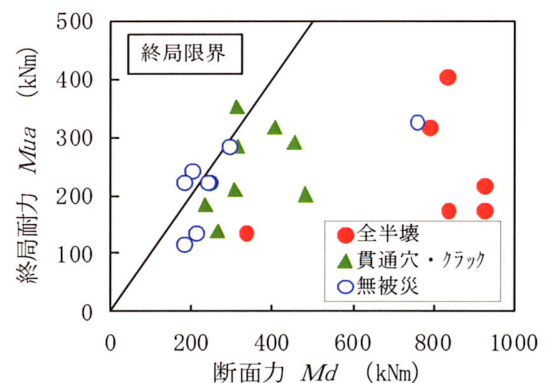


図-3 断面力と終局耐力

鉛直方向（水平軸回転） M ：静水面部、部材中央部

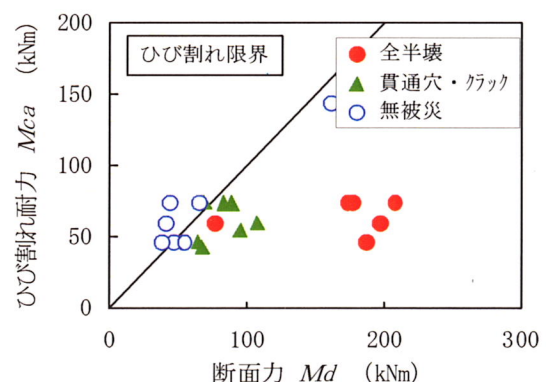


図-4 断面力とひび割れ耐力

表-2 材料特性

単位：N/mm²

材 料		ひ び 割 れ 界 限		終 局 限 界	
		21	24	21	24
コン ク リ ー ト	設計基準強度 f'_{ck}	21	24	21	24
	設計圧縮強度 f'_{cd}	-	-	16.2	18.5
	設計曲げ強度 f_{bd}	3.2	3.5	-	-
鉄 筋	規 格	-	-	SD295A	SD345
	設計降伏強度 f_{yd}	-	-	295	345

て曲げモーメントを算定している。なお、鉄筋のかぶりを十分確保しているため、若干壁厚が大きいものとなっている。

元設計の防波堤断面に設計波が作用したケースでは、現状のケーソン壁厚40～50cmに対して1ケースを除いて60～75cmが必要であり、壁厚が15～25cm程度不足していたことになる。これはむつ小川原港において壁厚45cmのケーソンが被災し、壁厚70cmのケーソンが被災しなかった事例¹⁾によく対応している。

また、消波ブロックの不完全被覆状態など、被災時の防波堤断面に被災時の波浪が作用したケースでは、壁厚60～100cmが必要となっている。消波ブロックの散乱による非常に大きい衝撃波力が作用して被災した、むつ小川原港や小本港のケースでは、例外的に壁厚100cmとかなり大きくなっている。同様に和泊港のケースでは、根固ブロックが大型で高マウンド状態となり強い衝撃波力が作用するため、壁厚が95cmと大きくなっている。クラックを許容しない設計であるため壁厚が大きくなる。また、完全に被覆された消波ブロック被覆堤であっても55～60cmの壁厚が必要となる場合があることに注意が必要である。

5. おわりに

衝撃波力を受ける防波堤ケーソン壁の設計法に関して以下の結論を得た。

- 1) 現行設計法ではケーソン防波堤の滑動・転倒安定性を対象とした規定はあるが、ケーソン壁の設計については明確に示されていない。現状では衝撃波力や部材の応答特性や破壊特性などを考慮せず、波力を静的荷重として取り扱い設計されている。
- 2) ケーソンのRC部材の設計法を提案した。限界状態設計法を適用し、ひび割れ限界状態と終局限界状態について照査を行うものである。ただし、ひび割れ限界状態は使用限界状態に対応するものではなく、衝撃波力を受けるケーソン壁は一旦クラックが発生すると被災が急速に進展し破壊に至る特性を考慮して、クラックの発生によって限界状態を定義するものである。
- 3) ケーソン壁に生じる断面力（曲げモーメント）は、ケーソン天端での蓋コンクリートや上部工による拘束効果を考慮して、3辺固定上辺単純支持版としてモデル化して算定するのが適当である。
- 4) RC部材の剛性や捨石マウンドのクッションによ

る波力低減効果は小さいため、提案した設計においては考慮しない。中詰材による断面力の低減も考慮しない。

- 5) 衝撃波力を受けるRC部材の破壊特性を考慮して、限界状態設計法で適用する安全係数を提案した。
- 6) 被災事例調査から抽出した被災したケーソンと被災していないケーソンを対象として、提案した設計法を適用して部材の安全性照査を行った。その結果、提案した設計法が妥当であることが示された。
- 7) 提案した設計法を適用して被災したケーソンに対して設計したところ、ケーソン壁の部材厚は60～100cm必要であることが示された。

謝辞：本研究を進めるに当たり、港湾空港技術研究所高橋重雄研究主監を始めとする多くの方々から適切なご助言を戴いている。ここに記して深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高橋重雄，津田宗男，下迫健一郎，横田弘，清宮理：防波堤ケーソン壁の破壊と衝撃碎波力について，海岸工学論文集，Vol. 45，pp. 751-755，1998。
- 2) 下迫健一郎，大木泰憲，高野忠志，津田宗男：RC梁に作用する衝撃波力および部材の応答特性に関する大規模水理模型実験，海岸工学論文集，Vol. 48，pp. 836-840，2001。
- 3) 高橋重雄，津田宗男，横田弘，高野忠志，清宮理：衝撃波力によるRC版の破壊メカニズムに関する基礎実験－水面付近の梁に作用する衝撃揚圧力－，海岸工学論文集，Vol. 46，pp. 811-815，1999。
- 4) 津田宗男，高山知司，高橋重雄：被災事例に基づく衝撃波力に対するケーソン部材の設計上の留意点，海洋開発論文集，Vol. 19，pp. 523-528，2003。
- 5) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，1181p，1999。
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書（構造性能照査編），257p，2002。
- 7) 高橋重雄，谷本勝利，下迫健一郎，細山田得三：混成防波堤のマウンド形状による衝撃波力係数の提案，海岸工学論文集，Vol. 39，pp. 676-680，1992。
- 8) 由井孝昌，服部昌太郎：衝撃碎波圧におよぼす直立壁体の変形効果，海岸工学論文集，Vol. 39，pp. 681-685，1992。
- 9) 有川太郎・磯部雅彦・高橋重雄：VOF法を用いた衝撃碎波圧の計算と適用性，海岸工学論文集，Vol. 48，pp. 831-835，2001。
- 10) 合田良実：港湾構造物の耐波設計－波浪工学への序説－，鹿島出版会，237p，1977。