

摩擦増大マットを用いたケーソン式 防波堤の耐震性能に関する研究

STUDY ON EARTHQUAKE RESISTANT PERFORMANCE OF
CAISSON TYPE BREAKWATER APPLYING FRICTION INCREASING MAT

尾崎竜三¹・長尾 毅²
Ryuzo OZAKI and Takashi NAGAO

¹正会員 博(工) 中央復建コンサルタンツ(株) 港湾・空港系グループ (〒533-0033 大阪市東淀川区東中島4-11-10)

²正会員 工博 国土技術政策総合研究所 港湾施設研究室 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

Seismic stability, which is on sliding and overturning, is verified for a design of a caisson type breakwater if necessary. Static method is used in the practical design, which doesn't take the dynamic response of the breakwater into account. In this study, based on the framework of the performance based earthquake resistant design for caisson type breakwaters, the procedure for the case of applying the friction increasing mat is presented. Firstly, the necessity of earthquake resistant design is judged by the schematic chart. Secondly, dimension of the breakwater for the evaluation of earthquake resistant performance is calculated by the proposed method. Finally, earthquake resistant performance is checked by the methodology based on single degree of freedom system.

Key Words : Earthquake resistant performance, breakwater, friction increasing mat

1. はじめに

地震時の慣性力に起因する荷重作用の方向が変化するため、特定の方向への荷重作用が卓越することがないと考えられることから、港湾構造物の主要な施設である防波堤の設計では、主に耐波安定性が照査され、地震動に対する安定性照査は省略されることが多い¹⁾。この現行設計法の措置の妥当性は、過去の地震時に強震動の影響による防波堤の被災事例が少ないことから裏付けられると言える。例えば、岸壁などの港湾構造物に被害が生じた1983年日本海中部地震²⁾、1993年釧路沖地震³⁾では防波堤には大きな被害は認められなかった。ただし、1994年三陸はるか沖地震⁴⁾においては基礎地盤の剛性低下などに起因する沈下が生じ、1995年兵庫県南部地震^{5,6)}では、沈下や0.3m程度の防波堤の滑動が生じた。

防波堤の耐震設計が必要となる条件としては、例えば、設計波高が小さいため耐波安定性の観点からは大きな堤体重量を必要としない場合が考えられる。しかしながら、防波堤の耐震設計を行うか否かは、これまで明確な判定指標が存在しなかったため、責任技術者の判断によっていた。さらに、防波堤の耐震実務設計では、静的な震度法を用い、安全率によって安全性を評価してきた。しかし、安全率は構

造物の安全性を定性的に示す指標でしかないため、設計法の性能規定化の流れを踏まえると、構造物の安全性を定量的に評価しうる信頼性設計法の導入⁷⁾または構造物の荷重応答を具体的に照査する設計法の導入が必要と考えられる。また耐震設計の合理化の観点から、設計地震動は地域別震度の形で与えるのではなく、工学基盤(S波速度で300~400m/s程度の地層)の時刻歴波形で与え、地盤の地震応答計算により地表面の地震応答を算出したうえで耐震性を照査するスタイルが望ましい⁸⁾。

著者らは設計地震動の表現形式の変化に対応した耐震性能照査体系を構築する必要があると考え、ケーソン式防波堤の耐震性能設計に関する研究を実施してきた⁹⁾。防波堤の設計では、堤体幅を小さくする観点から堤体底面に摩擦増大マットを敷設することがある。本稿では摩擦増大マットを敷設した防波堤の耐震性能照査の必要性判定、耐震性能照査用断面の設定方法、照査方法について検討する。

2. 耐震性能設計の枠組み

(1) 照査体系

摩擦増大マットを用いた防波堤の耐震性能照査フ

ローは摩擦増大マットを使用しない場合と同様に図-1のように提示される⁹⁾。手順として、耐波設計が行われた後に耐震性能の照査を実施する。最初に、工学基盤の加速度最大値 A_{max} や堤体諸元などに関するパラメータをもとに耐震性能照査の必要性を判定する。耐震性能照査が必要と判断される場合には、続いて耐震性能照査用の断面を仮定し、その堤体幅算出値 B_{eq} と耐波設計による堤体幅 B_w のうち、大きな堤体幅を照査用堤体幅として、一自由度系モデルを用いて防波堤の滑動・転倒の地震応答を算出し、耐震性能を照査する。ここで、摩擦増大マットを用いた性能照査について新規に提示する必要がある項目は太枠で囲んだ部分である。なお防波堤に要求される性能は港内を静穏に保つことである。一般に、防波堤に多少の滑動変形が生じて直ちに港内の静穏度の低下に結びつくわけではないが、変形を放置しておくとも波浪の収斂などにより大きな変形が生じる危険性が高い。このため、50cm程度の変形が生じると被災と認定されて原型復旧されることが多い。そこで本研究では、防波堤の限界状態として滑動では残留変形50cm、転倒は残留回転角 90° とする。

(2) 検討方法

耐震性能の照査方法には、防波堤ケーソンの地震時の滑動・転倒問題を一自由度系で評価するシステムを用いた。本検討は地震時にマウンドが破壊せず健全であるケースを扱っており、破壊モードとして滑動破壊と転倒破壊を考慮する。滑動については水平方向の運動方程式、転倒については防波堤底面端部まわりの角運動方程式¹⁰⁾の数値積分により防波堤ケーソンの地震応答を評価する。滑動および転倒それぞれに関する式(1)、(2)の右辺第1、2項の和で示される荷重効果が、第3項の抵抗力を上回るとき初めて積分が実施される。図-2に防波堤の荷重モデルを示す。なお、潮位については、本研究では抵抗力と荷重効果の比が最も小さくなる条件として朔望平均満潮面H.W.L.とする。摩擦係数については摩擦増大マットを考慮しない場合0.6であるが、摩擦増大マットを考慮する場合0.75とした¹⁾。

なお、文献9)にて一自由度系を採用した本手法を1995年兵庫県南部地震における神戸港防波堤モデルに適用し、手法の妥当性を確認している。

(滑動安全性)

$$\frac{W}{g} \frac{d^2 x}{dt^2} = k_h W + 2P_d - \mu W' \quad (1)$$

(転倒安全性)

$$I \frac{d^2 \theta}{dt^2} = a k_h W + 2b P_d - c W' \quad (2)$$

ただし、
$$P_d = \frac{7}{12} k_h \gamma_w H^2 \quad (3)$$

$$I = \frac{W}{g} \frac{(B^2 + h^2)}{3} \quad (4)$$

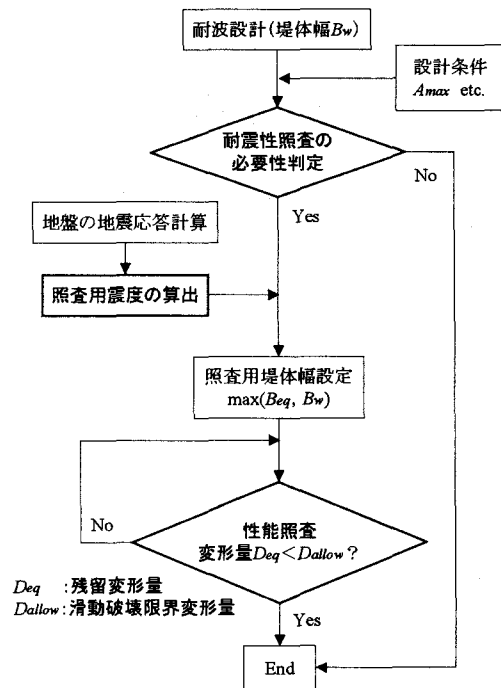


図-1 防波堤の耐震性能照査体系

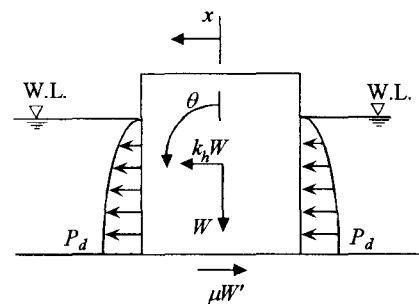


図-2 防波堤の荷重モデル

ここに、

k_h : 震度(= α/g)

α : 作用加速度(cm/s^2)

g : 重力加速度(= 980cm/s^2)

W : 単位奥行きあたりのケーソン重量(kN/m)

P_d : 単位奥行きあたりの動水圧合力(kN/m)

W' : 単位奥行きあたりの水中におけるケーソンの有効重量(kN/m)

H : ケーソン設置水深(m)

γ_w : 海水の単位体積重量(kN/m^3)

μ : ケーソンと捨石マウンド間の摩擦係数

I : 単位奥行きあたりの極慣性モーメント($\text{kN} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2/\text{m}$)

h : ケーソン高さ(m)

B : ケーソン幅(m)

$a \sim c$: 荷重のアーム長さ(m)

3. 耐震性能照査の必要性判定

耐震性能照査体系を構成する要素のひとつとして、まず耐震性能照査の必要性を判定する指標について

検討する。簡便性を考慮して、地震動に関する情報は防波堤ケーソン底面ではなく、工学基盤における加速度最大値を考慮する。工学基盤の加速度最大値により耐震性能照査が不要と判断されれば地盤の地震応答解析をスキップできるためである。さらに、耐波設計によりケーソンの堤体幅が決定していることから、堤体幅と水深の比(B/H)と工学基盤の加速度最大値の2つのパラメータを指標とした判定法を検討する。

摩擦増大マットを用いない場合と同様に、表-1に示す7断面を検討に用いた。また、入力地震波には、港湾地域で観測された八戸波、神戸波、大船渡波、秋田波、さらに模擬地震波として内陸直下型地震のstrike波、dip波、海溝型地震のsubduction波¹¹⁾、鉄道構造物用のレベル1、レベル2地震動対応の基盤地震波¹²⁾（以下JR1波、JR2波）の計9波形を用いた（表-2参照）。

各断面の地盤構造を対象に実施した一次元地震応答解析より得られた防波堤ケーソン底面における地震動を用いて、検討断面ごとに堤体幅を0.5m刻みで原設計の堤体幅から変化させ、各堤体幅に対して前章で示した一自由度系のモデルにより防波堤ケーソンの応答を評価した。図-3に工学基盤最大加速度に対して、残留変形が最大となるcase6を対象に、subduction波、八戸波、神戸波について残留滑動量のコンター図を示す。水平軸はケーソン幅と水深の

比(B/H)であり、鉛直軸は工学基盤の最大加速度である。図-3から同じ基盤最大加速度の条件でも波形が異なると滑動変形は大きく異なる結果となった。比較のために摩擦増大マットを用いない場合の残留変形が最大となった結果を図-4（subduction波、case6）に示す。これらの比較により摩擦増大マットを用いない場合に比べて、本稿で検討した摩擦増大マットの効果が発揮されることにより滑動に対して安全に、すなわち同じ残留変形量を生じさせるのに要する地震動が大きくなるのが分かる。

なお、防波堤ケーソンが滑動する際に、残留変形量は僅かなものであっても、地震応答の過程で非常に大きな変形量が生じ、その結果捨石マウンドから防波堤ケーソンが滑落する事態も想定される。防波堤ケーソンの残留滑動量と地震応答過程の最大滑動量の関係についても検討したが、最大滑動量はいずれも表-1に示したマウンド前面幅以内に収まっており、その滑動量はマウンドからの滑落を伴うほどのものではなかった。よって、滑動変形に関する耐震性能照査の必要性判定では、基本的に残留変形量に着目して整理しておけばよいと考えられる。

次に転倒モードについては、若干の回転挙動を示す場合もあるが、安定状態へ回復するため、転倒には至らないことが多く、転倒破壊が生じるのは非常に大きな加速度最大振幅の場合に限られる。滑動に対して転倒の条件が厳しい地震波形を検討した結果、

表-1 検討対象断面

	水深(-m)	堤体幅(m)	マウンド前面幅(m)
case1	11.5	7.5	6.5
case2	8.9	6.6	6.0
case3	12.2	5.5	6.5
case4	11.1	9.5	11.0
case5	11.8	7.5	5.0
case6	9.05	5.0	3.5
case7	11.05	5.0	4.5

表-2 地震波

地震波	卓越周波数(Hz)
八戸波	0.39
大船渡波	2.34
神戸波	2.88
秋田波	0.44
strike波	1.66
dip波	0.68
subduction波	0.60
JR1波	0.78
JR2波	1.34

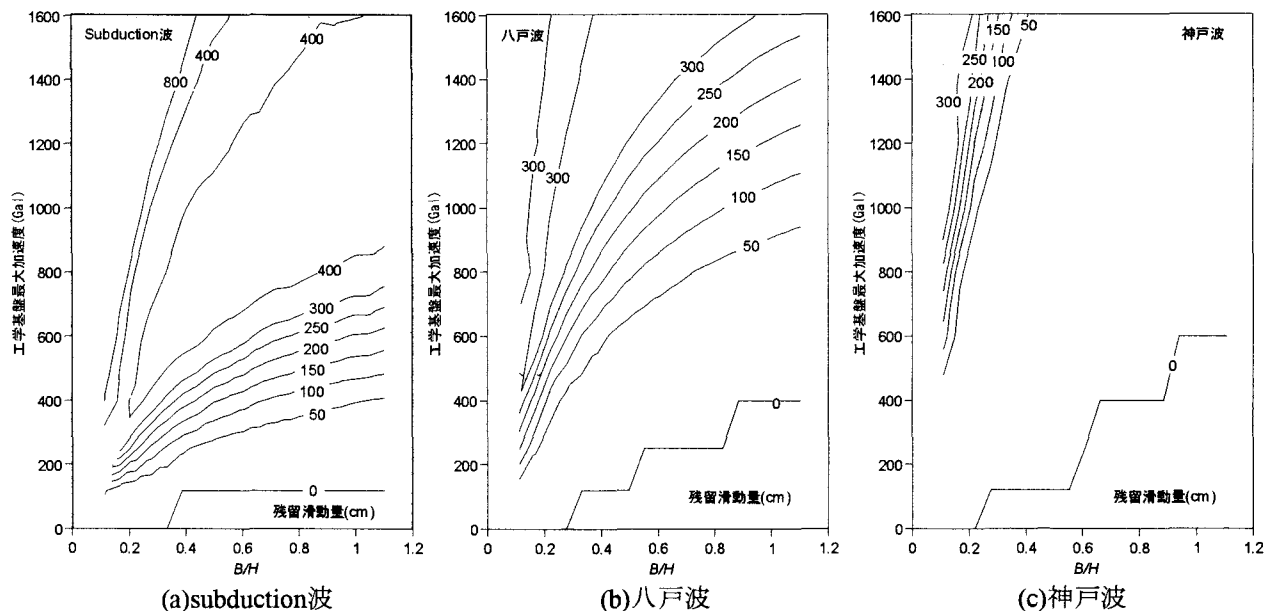


図-3 基盤最大加速度と残留滑動量の関係

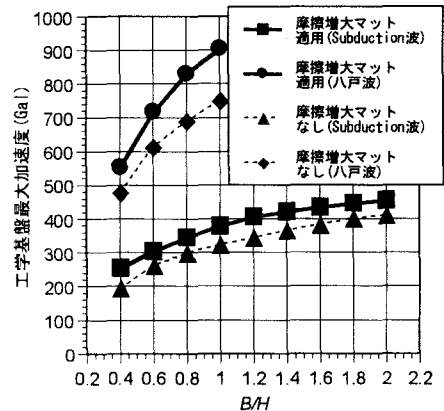
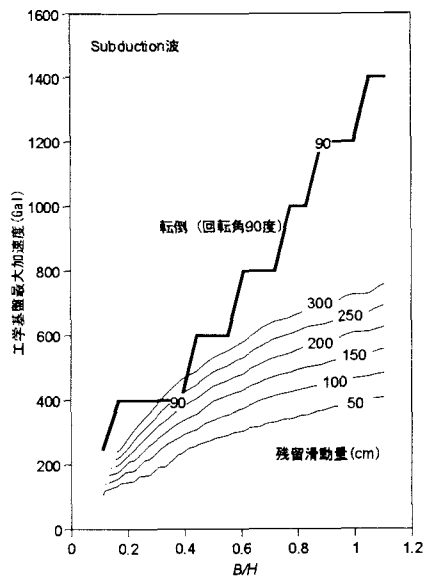
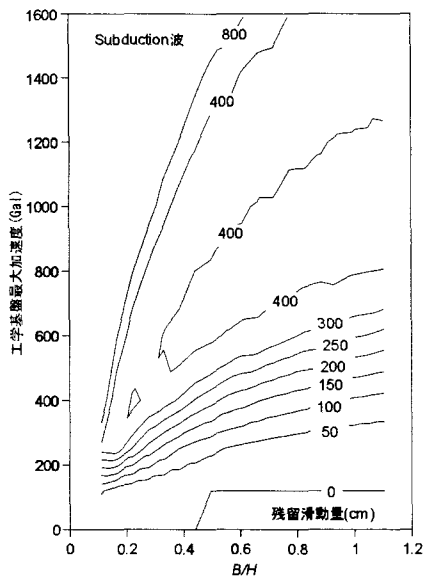


図-6 耐震性能照査の必要性判定図

図-4 基盤加速度と残留滑動量の関係 (摩擦増大マットなしの場合) 図-5 滑動破壊と転倒破壊の比較

subduction波に着目すると(図-5), 転倒が生じるのはケーソン幅と水深の比(B/H)が極めて小さく, かつ200cm程度以上の残留滑動量が生じた際に限られる. また図-4に示した摩擦増大マットを用いない場合と比較すると, 前述のように滑動破壊を生じさせるのに要する地震動が大きくなるため, 転倒破壊が先行しやすくなる場合もあると考えられる. しかしながら, 転倒と比較すると, 滑動モードは支配的であり, 防波堤の破壊モードとしては, 基本的に滑動を考慮すればよいと推測される. このため, 摩擦増大マットを用いた場合にも防波堤の転倒条件は基本的には照査する必要はないと言える. よって以降では, 滑動破壊を対象に議論を進める.

検討対象とした防波堤7断面について, 堤体幅を0.5m刻みで原設計の堤体幅から変化させ, subduction波によって50cm以上の残留滑動量が生じる条件を示すと図-6のようになる. 本図より, 基盤入力最大加速度, 防波堤の堤体幅と水深の比(B/H)の関係が判定ラインのどこに位置するかによって耐震性能照査が必要であるかを判断する. 様々な波形で検討した結果, 図-6に示すsubduction波による判定ラインが下限値となり, これが滑動破壊照査の判定指標となる. 一方で, ケーソン幅と水深の比(B/H)が2.0に達しても条件によっては滑動破壊が生じることが分かる. 堤体幅の増加は滑動抵抗力の増加とともに慣性力の増加ももたらすためである. なお図-6には参考情報として八戸波において50cmの滑動残留変形が生じる下限も併せて示している. この下限曲線は地震波形に大きく依存する. 従って, この判定指標に近い条件で必ずしも大きな残留変形が生じるわけではないことに注意が必要である.

4. 耐震性能照査

ここでは, 防波堤の耐震性能照査が必要と判定された場合の性能照査用断面の設定方法について検討する. 本来は耐波設計により必要と判定される堤体幅を用いて耐震性能照査を行い, 滑動量が判定基準を超える場合は堤体幅を増加させて再計算を行えばよいが, 最適解を得るためには何度も繰り返し計算を行わなければならない. そこで簡便性を考慮して, 最適な照査用断面を効率的に設定する方法について検討する.

(1) 最大変形量と残留変形量

図-3に示されるように, 基盤加速度最大値と防波堤ケーソンの残留滑動量との関係は地震波形による違いが大きい. 摩擦増大マットを用いない場合にも検討したが, 残留変形の発生仕方として, 数回の変形が累積していくもの, 1回の変形ではほぼ残留変形量に相当する変形が生じるもの, 正負の変形が繰り返されて最終的には最大変形量よりも小さな残留変形量に落ち着くものなど, 波形ごとに必ずしも決まった傾向を示すものではないことが分かった.

そのため最大変形と残留変形の関係を推定しておくことが耐震性能照査を効率的に行ううえで重要であることはいうまでもない. 各caseの検討結果より, 正負の加速度最大振幅(それぞれ acc_{max} , acc_{min})の和の絶対値を加速度最大振幅の絶対値の大きい方で除した値(R_{acc})により残留変形量と最大変形量の比(R_{def})を推定できる可能性があることが分かった. 最大変形は変形のベクトルの変化点から変化点までの差の最大値と定義し, 加速度については式(5)に示すパラメータにより整理した.

$$R_{acc} = \frac{|acc_{max} + acc_{min}|}{\max(|acc_{max}|, |acc_{min}|)} \quad (5)$$

R_{acc} , R_{def} の関係を図-7に示す。滑動の破壊基準が残留変形量で50cmであることを考慮して、表-1に示す7断面の工学基盤に表-2に示す9波形を振幅調整して入力し、得られる残留変形量が30cm~100cmになる103ケースを採用している。ばらつきは大きいものの、両者には正の相関があることが分かる。そこで、両者の関係を線形回帰した結果(図中の直線、式(6))を用いて加速度時刻歴波形から R_{def} を推定する。

$$R_{def} = 0.87R_{acc} + 0.52 \quad (6)$$

(2) 照査用断面の設定方法

前述した方法により、残留変形目標値(50cm)に対する最大変形目標値を防波堤ケーソン底面の加速度時刻歴から推定できるので、ここでは目標の最大変形量が生じるような断面の推定方法について検討する。入力地震動には摩擦増大マットを用いない場合の検討と同様に、様々な周波数成分を含む実際の地震波ではなく、正弦波を用いた。最大変形量 D_{max} が所定の値に達する入力加速度最大振幅を把握する。検討条件として、地震動の周波数を0.1~10Hz、防波堤ケーソン断面をcase1をベースに $B/H=0.4, 0.6, 0.8$ とし、まず D_{max} が25cm~150cmに達する加速度最大振幅を検討した。このうち25cmに対する検討結果を図-8に示す。防波堤の B/H ごとに異なる最大振幅となる。この振幅を重力加速度で除して、さらに震度法で滑動安全率が1.0をちょうど上回る限界の震度で除した値(R_{kh})について整理すると図-9のようになり、 B/H にかかわらず変形量毎にほぼ一定の関係となる。この関係は式(7)のとおりである。

$$\begin{aligned} R_{kh} &= a(D_{max})f^2 + b(D_{max})f + 1 \\ a(D_{max}) &= 0.0145D_{max} - 0.022 \\ b(D_{max}) &= 0.0074D_{max} + 0.8542 \end{aligned} \quad (7)$$

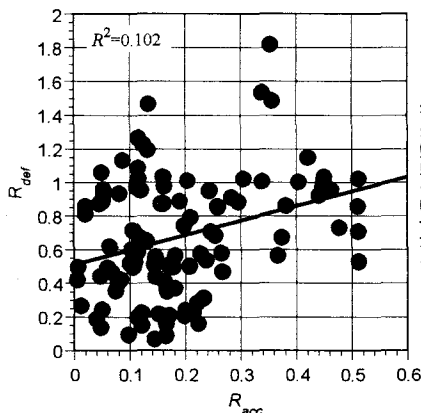


図-7 R_{acc} と R_{def} の関係

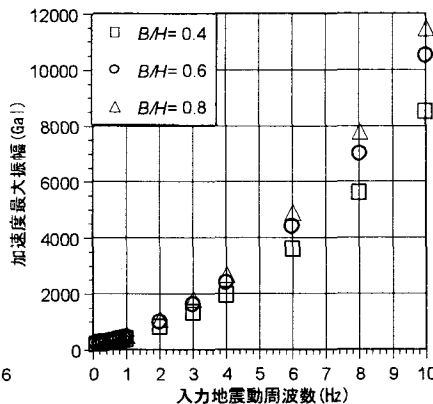


図-8 周波数毎の加速度最大振幅

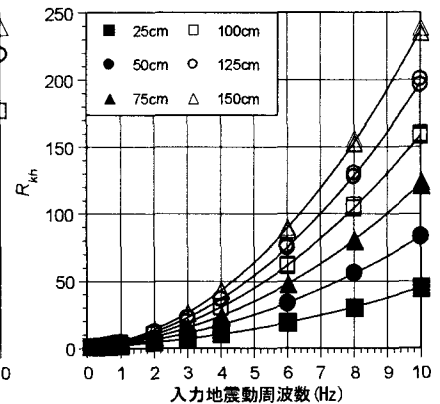


図-9 周波数毎の震度比

ここに、 f : 周波数(Hz)である。

以上は正弦波に対する検討であるため、図-9の R_{kh} の値は加速度フーリエスペクトルに対応している。よって、各周波数に対する値が周波数0Hzの振幅(1.0)と同じ値となるように、防波堤ケーソン底面に入力する加速度フーリエスペクトルにフィルター F を乗じることで、どの周波数の成分も一様に目標とする最大変形を生じるスペクトル(一様目標最大変形スペクトル)が得られる。フィルター F は式(7)の逆数として式(8)で示される(図-10参照)。

$$F = \frac{1}{a(D_{max,t})f^2 + b(D_{max,t})f + 1} \quad (8)$$

ここに、

$D_{max,t}$: 最大変形量目標値(cm)

$a()$, $b()$: 式(7)と同様

f : 周波数(Hz)

以上より、実際の地震波形のスペクトルにこのフィルターを乗じ、フーリエ逆変換することにより得られた加速度の最大振幅を重力加速度で除することにより、目標とする変形量に対応する照査用震度が得られる。

(3) 耐震性能照査

ここまで述べた照査用断面の設定方法の妥当性について検証する。図-7に示した R_{acc} と R_{def} の関係を検討した103ケースについて、本研究の方法により照査用震度を算出し、その震度を用いて安全率が1.0となる断面を設定し、設定した断面を対象に防波堤ケーソンの滑動量を評価した。

図-11に防波堤ケーソン底面の加速度最大値に対する耐震性能照査断面と耐波設計断面の堤体重量比(R_{weight})の関係を示す。残留滑動量が50cm以上か未満かによって記号を変えて表示した。実際には、 $R_{weight} < 1.0$ の場合、耐波設計による断面、すなわち $R_{weight} = 1.0$ の断面をもとに照査が行われる。図より、本研究の方法による場合、 R_{weight} が3.0以上と非常に大きくなる場合があることが分かる。そのような場合の滑動量を検討すると、目標値50cmよりも小さく、

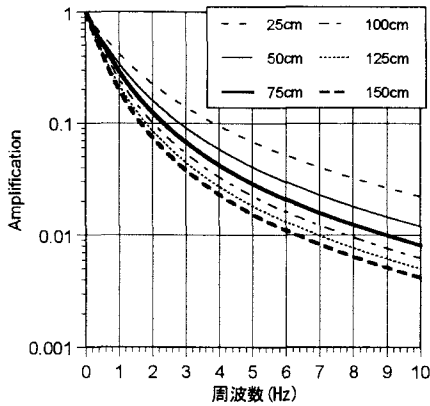


図-10 照査用震度算出用
フィルター

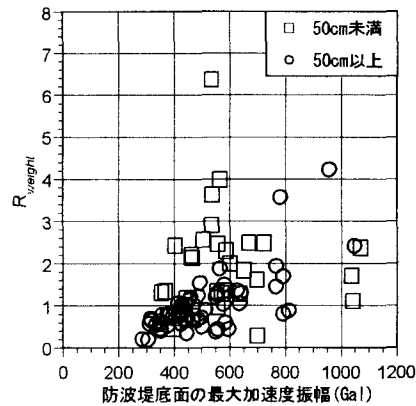


図-11 防波堤底面加速度最大値と
 R_{weight} の関係

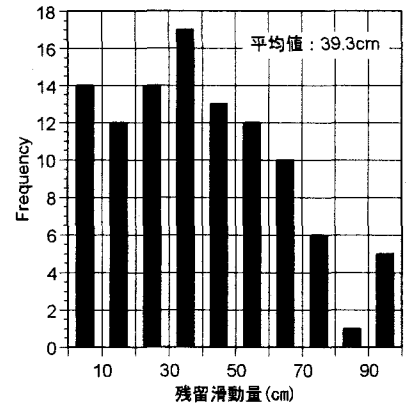


図-12 残留滑動量の頻度分布

不経済な断面となる傾向があることが分かった。さらに、全国の既設防波堤断面の堤体幅と水深の比 (B/H) の最大値もあわせて考慮すると、実際には照査用震度をもとに堤体幅を算出した後、 R_{weight} の上限値として3.0程度を設定しておくことが妥当と考えられる。

そこで、 $1.0 \leq R_{weight} \leq 3.0$ の範囲に堤体重量を補正した結果について、残留滑動量を算出した。残留滑動量の頻度分布を図-12に示す。残留滑動量は0～100cmの比較的狭い範囲に分布している。平均的には40cm程度の残留変形が生じる結果となり、目標値50cmをやや下回る。これは、耐震設計で要求される断面が耐震設計断面よりも大きい場合、滑動量が目標値を下回る可能性が高いためである。また、残留滑動量が目標値50cmを上回る例もあり、例えば残留滑動量が非常に大きい場合は断面を変更して繰り返し計算を実施する必要がある。図-7の関係はばらつきが大きいため、最適な断面を試行することなく推定することは困難であるものの、本研究の方法により、耐震性の観点から必要となる断面をある程度の精度で見積もることが可能となり、性能照査が効率的に行えると判断される。

5. まとめ

本研究では、摩擦増大マットを用いたケーソン式防波堤の耐震性能に関して検討した。本研究により得られた主な結論は次の通りである。

- ①耐震性能照査の必要性判定図を提案した。判定図より、基盤入力最大加速度、防波堤の堤体幅と水深の比 (B/H) の関係が判定ラインのどこに位置するかによって耐震性能照査の必要性を判断する。
- ②摩擦増大マットを用いない場合に比べて、摩擦増大マットの効果が発揮されることにより滑動に対して安全になる。しかしながら、転倒に比べると滑動モードは支配的であり、防波堤の破壊モードとして

は、基本的に滑動を考慮すればよいと推測される。
③耐震性能照査の必要性が認められる際の照査用断面の設定方法を示し、ケーソン式防波堤の耐震性能照査が効率的に行えることを確認した。照査用断面の設定手法は、試行することなく最適な断面を推定することは困難であるものの、耐震性の観点から必要となる断面をある程度の精度で見積もることが可能である。

参考文献

- 1) 運輸省港湾局：港湾の施設の技術上の基準・同解説、(社)日本港湾協会、1999。
- 2) 土木学会：1983年日本海中部地震震害調査報告書、1986。
- 3) 土木学会：1993年釧路沖地震震害調査報告、1994。
- 4) 三陸はるか沖地震災害調査委員会：平成6年(1994年)三陸はるか沖地震災害調査報告書、地盤工学会、1996。
- 5) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告、土木構造物の被害、第5章 港湾・海岸構造物、土木学会、1997。
- 6) 阪神大震災調査委員会：阪神・淡路大震災調査報告書(資料編Vol.1)、地盤工学会、1996。
- 7) 国土交通省：土木・建築にかかる設計の基本、2002。
- 8) 長尾 毅：港湾構造物の技術基準の改訂動向、第5回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集、土木学会鋼構造委員会、pp.9-20、2002。
- 9) 長尾 毅、尾崎竜三：ケーソン式防波堤の耐震性能設計に関する研究、構造工学論文集、Vol.50A、pp.219-228、2004.3。
- 10) 柴田 徹、関口秀雄：地盤の支持力、鹿島出版会、1995。
- 11) 香川 敬生、江尻 譲嗣：震源断層の破壊過程を考慮した震源近傍地震動の試算、「土木構造物の耐震設計に用いるレベル2地震動を考える」シンポジウム発表論文集、pp.1-6、1998.12。
- 12) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説、耐震設計、丸善株式会社、1999。