

# 防波堤形式のチャート式耐震診断システムの開発について

平井 淳<sup>1</sup>

<sup>1</sup>近畿地方整備局 神戸港湾技術調査事務所 技術開発課 (〒651-0082兵庫県神戸市中央区小野浜町7-30)

沿岸構造物のチャート式耐震診断システムは、耐震性が脆弱な護岸等を、高度なFEM解析等によらずに「簡単に」、「早く」抽出できるツールとして開発し、適用可能な構造形式を広げてきた。また2011年の東北地方太平洋沖地震を契機に、防波堤の耐震性能に関心が向けられた。しかし、現行のチャート式耐震診断システムでは、傾斜型護岸形式を準用して防波堤形式に対応させていた。そこで、防波堤の施設形状と地盤条件、地震動条件を基に二次元有効応力解析(FLIP)を用いたパラメトリックスタディを実施し、地震時の防波堤形式の挙動を精度良く把握できるよう改良を行った。

キーワード 簡易耐震診断手法, 地震応答解析, 防波堤形式

## 1. はじめに

中央防災会議によると、2043年までに南海トラフの海溝型巨大地震が発生する確率は、南海地震で60%程度、東南海地震で70~80%程度と言われている。2011年(平成23年)3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震と同じように、近畿地域においても近い将来、この大規模地震に伴い発生する津波により広範囲に甚大な被害が発生することが予想されている。

海溝型巨大地震に伴う津波から人命や資産を守るためには、防波堤や護岸をはじめとした沿岸構造物の耐震性や安全性の確保が必要不可欠である。沿岸構造物が巨大地震に対してどの程度沈下変形するかにより津波が越流するかが決まり、越流防止機能を保持しているかどうかにより背後への浸水被害が大きく異なってくる。

沿岸構造物が地震によりどの程度沈下、変形するかを把握し、津波に対して高さが足りない構造物について対策する必要がある。

しかし、2006年(平成18年)3月に海岸事業を所管する省庁で、全国の海岸堤防の状況を調査したところ、全国で約6割の海岸堤防が耐震性の確認ができていないという結果が出ている。この原因としては、我が国の海岸堤防の延長は約15000kmと広範囲に及び、構造形式も様々な形式が採用されていること(図1参照)。さらに地震後の施設の変位量を算定するためには、二次元有効応力解析(FLIP)による地震応答解析を実施する必要があり、膨大な時間と費用、高度な動的解析の専門知識を必要とすることからである。

そこで、近畿地方整備局神戸港湾空港技術調査事務所ではこの問題を解決するため、地震発生時の構造物の変位量(沈下量)を算定し、地震に対する危険性が高い施設のみを「簡単に」、「早く」抽出できるチャート式耐震診断システムを開発した。

本稿では、傾斜型堤防形式を準用して防波堤形式に対応させていたチャート式耐震診断システムにおいて、防波堤形式の精度向上に係る改良を行ったことから、その結果と今後の課題について述べるものである。

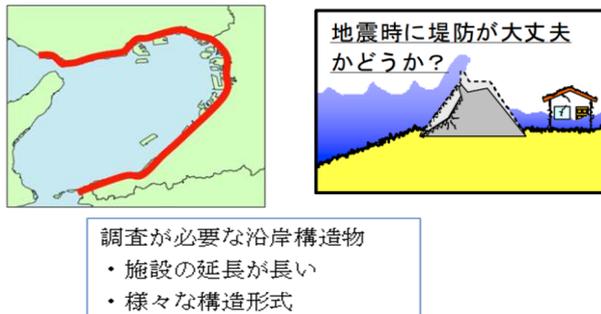


図1 広域な海岸保全施設

## 2. チャート式耐震診断システムの概要

チャート式耐震診断システムとは利用者が、耐震診断を実施したい沿岸構造物の規格形状や構造諸元、その地域の地震動の情報を入力するだけで地震後の変位量が算定されるシステムである。

チャート式簡易耐震診断システムで対応可能な構造形式は8つあり、直立型重力式護岸、傾斜型護岸、傾斜型堤防、自立式矢板護岸、控え直杭式矢板護岸、控え組杭式矢板護岸、栈橋式護岸、重力式防波堤に対応している。

チャート式耐震診断システムを開発するにあたって、まず全国の既存沿岸構造物の施設に関する情報を収集し、構造形式毎に平均な断面となる標準タイプの断面を決定した。チャート式耐震診断システムは、この標準タイプの断面の残留変位を基本変位量とし、これに補正係数の傾向を乗じることにより利用者が診断を実施する施設の残留変位量が決定される。

補正係数の傾向とは、標準タイプの断面を基に、地盤条件、施設形状、地震動条件について様々な組み合わせによる計算を予め実施し、その結果をデータベース化することにより基本変位量に対する補正係数としてとりまとめたものである。

利用者は構造物の情報を入力するだけで、対象構造物の地震による変位量が算出され、危険性を判断できる。以上の開発検討フローを図2に示す。

チャート式耐震診断システムは簡単に地震時の挙動を予測することが可能なため、港湾管理者や全国の整備局などを対象に貸出を行い全国で広く使われている。貸出を開始した2007年度から2015年度までに150件を越える実績があり、技術支援として出張講義等も行っている。

### チャート式耐震診断システムの開発検討フロー

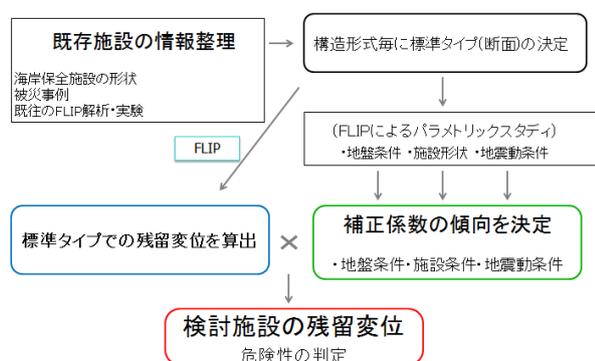


図2 チャート式診断システム開発フロー

## 3. 既往の防波堤形式の課題

既往のチャート式耐震診断システムの防波堤形式は、傾斜型堤防タイプのものを準用する形で作成されたものであり、より防波堤形式に適したシステムへと改良を行うための課題を下記に示す。

### (1) 課題の抽出と整理

既往の防波堤形式の課題として以下に示す項目が挙げられる。

#### a) 簡易モデルの改良

既往の剛梁と質点を用いた簡易モデルでは形状が無く、動水圧を考慮できないため改良を行った。

#### b) 施設形状の検討

防波堤形式で特徴的な床掘置換層、パラペットの形状について施設形状として考慮されていなかったため、地震後の沈下量にどのような影響を与えるのか照査、検討を行った。

#### c) 傾斜型堤防の耐震診断手法を準用した補正係数

補正項目（施設形状、地盤条件、地震動条件）の検討をして防波堤形式に適切な補正係数を設定する。

## 4. 課題の対応

### (1) 簡易モデルの改良

既往の防波堤形式では簡易モデルが使われており、動水圧の影響を考慮できなかった。そのため、新しく線形平面モデルを作成し、動水圧の考慮、FLIPに対応を可能とした。改良前と改良後のモデルを図3に示す。

### (2) 施設形状の検討

#### a) 液状化層の形状の検討

既往の重力式防波堤のチャート式耐震診断システムでは傾斜型護岸を準用していたため、液状化層については水平成層地盤としてモデル化をしている。しかし、重力式防波堤では、床掘置換工法により粘性土層に地盤改良を行う構造体であることから、床掘置換と水平成層地盤の断面による解析を行った。解析の結果に基づき、より安全側となるように、残留変位量に影響が大きい床掘置換の

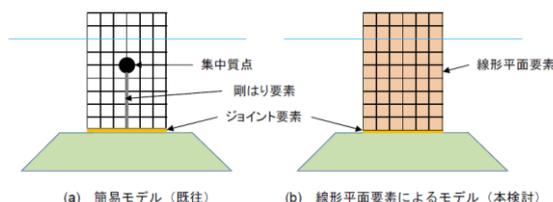


図3 防波堤形状のモデル改良

形状を採用した。

b)パラペットの有無に関する検討

パラペットの有無が防波堤の沈下量にどの程度の影響を与えるのか把握するために、高さや幅を変化させてFLIP解析を実施した。解析の結果、パラペットを考慮した方が沈下に影響を与えることがわかり、施設形状にパラペットの項目を取り入れた。

5. 防波堤形式の補正係数の設定

(1) 標準形状の設定

a)資料の収集・整理

各地方整備局から収集した合計114施設の第一線防波堤の資料の収集・整理を行った。表1に整理項目を示す。

b)防波堤形式の標準形状と解析範囲の設定

収集・整理した防波堤形状のデータの頻度分布から標準形状と解析範囲として適切であると考えられる最大値、最小値を設定し、標準形状は中央値から設定した。表2に設定した値を示す。

c)地震情報の収集・整理

全国の港の予測地震動を収集・整理した。収集した地震動の数は、51港312成分である。

(2) 防波堤形式に適したシステムへの変更

a)防波堤沈下挙動の影響因子と地震後の変位算出方法

チャート式耐震診断システムによる変位算定にあたり、地震時の沈下挙動に対する影響項目の抽出を行った。

それらは、施設形状による影響、地盤による影響、地震動による影響の三つの影響が想定される。本検討ではこの中で地震動条件と地盤条件が密接に関係していることから、この二つから定まる標準形状の変位量を基準変位とし、形状に関する補正を行うことで地震後の変位量の評価をすることとした。

表1 防波堤の施設形状整理項目

防波堤形状に関する項目	整理項目	備考
パラペット	上端、下端のD.L.	
上部工	上端、下端のD.L.	
ケーソン	上端、下端のD.L.	
	堤体幅	フーチング除く
マウンド	マウンド高	
	堤体から港外側マウンド法肩までの距離	
	堤体から港内側マウンド法肩までの距離	
	港外側法勾配	
地盤	液状化層厚	
腹付工	有無	
消波ブロック	有無	

・地震後の変位

=基準変位 (地震動条件,地盤条件により定まる標準形状の変位量)

×補正係数 (形状に関する係数)

b)施設形状に関する補正項目の検討

施設形状に関する補正項目として、①防波堤幅②水面から防波堤天端までの距離③マウンド高、④堤体からマウンド法肩までの距離⑤マウンド法勾配⑥液状化層厚⑦防波堤高パラペットの形状の7項目を想定した。補正係数については防波堤高Hで正規化したもの、及び防波堤高Hを用いるものとした。各項目を図4に示す。

表2 補正項目の標準形状と解析範囲の整理結果

形状に関する補正項目	標準形状	検討範囲		備考
		最小値	最大値	
ケーソン高さ H	15.0 (m)	3.9	30.4	
防波堤幅 W/H	0.7	0.2	1.5	
天端高-水面 H1/H	0.4	0.0	1.0	※1
マウンド高 D2/H	0.3	0.1	1.74	※2
マウンド法方までの距離 LH	0.6	0.6	1.9	※3、※4
マウンド法勾配1:n	1:2.0	1:4/3	1:3.0	
液状化層厚 D1/H	0.4	0.1	2.2	

※1: 浮力を考慮するため最小値0.0、最大値1.0と設定  
 ※2: 港湾基準より最小値0.1と設定  
 ※3: 港湾基準より最小値0.2と設定  
 ※4: 港内側の最大値で評価できると判断し最大値1.9と設定

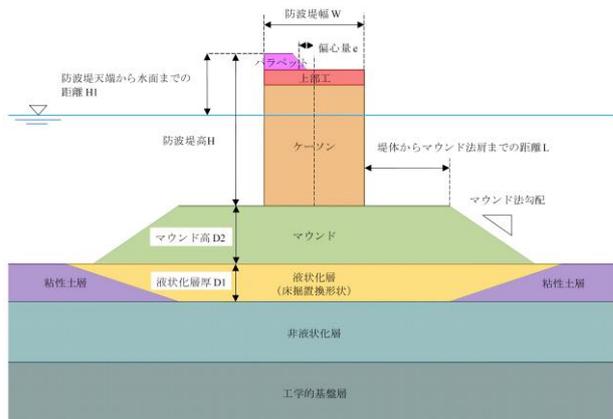


図4 施設形状に関する補正項目

(3) 解析ケース

標準形状 (図5) を基準として,表3に示す基準変位算定チャートの解析ケースを設定した。

(4) 基準変位算定チャートの検討

a)地震動指標の設定

重力式防波堤において,地震動と鉛直変位との関係が最も良い指標を選定することとし,検証の結果,最も相関が高い速度のPSI値を採用した。速度のPSI値とは地震動が港湾構造物の変形量に与える影響について評価する指標のひとつであり,フーリエスペクトルの二乗の周波数に対する積分値として定義される。したがって,加速度の最大値による評価よりも,スペクトル全体(全周波数領域)を対象に評価することができ,より地震動の特徴を含んだ評価指標といえる。

b)地震動条件,地盤条件による基準変位算定チャートの設定

速度のPSI値を地震動指標とし,地盤条件毎に基準変位

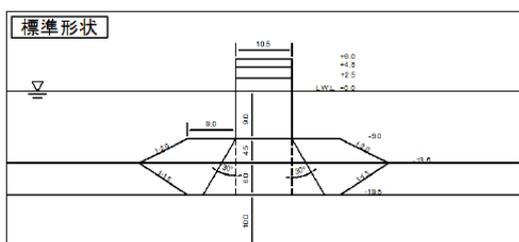


図5 標準形状

● : $N_{65}=5$    ● : $N_{65}=8$    ● : $N_{65}=10$    ● : $N_{65}=15$    ● : $N_{65}=20$    ● : $N_{65}=25$   
 ———— : 基準変位算定チャート

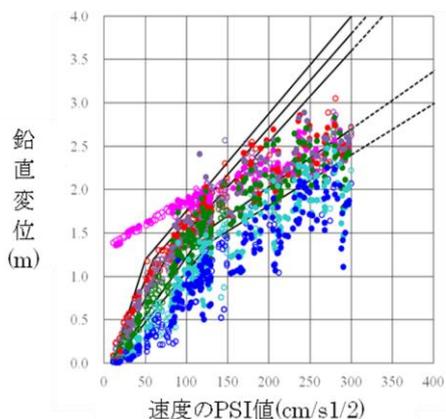


図6 基準変位 (速度のPSI値) と鉛直変位の関係

算定チャートを設定した。基準変位算定チャートは解析結果全体を包絡できるようなバイリニア型の直線により設定した。

図6に速度のPSI値による地震動指標と全地盤条件の鉛直変位との関係を示す。

(5) 施設形状に関する補正係数算定チャートの検討

a)防波堤高 (H)

施設形状に関する補正係数の検討例として,防波堤高Hの変化に対する鉛直変位,補正係数を図7,図8に示す。鉛直変位はHに比例して大きくなる傾向にあるが,速度のPSI値が45m/s<sup>1/2</sup>の場合,Hが20mを越えたあたりから変化が見られなくなった。

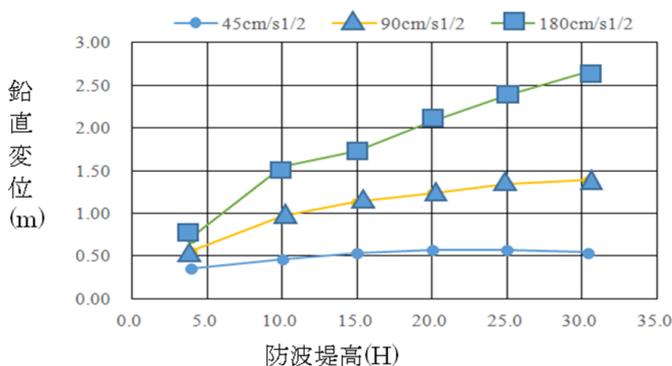


図7 鉛直変位の変化

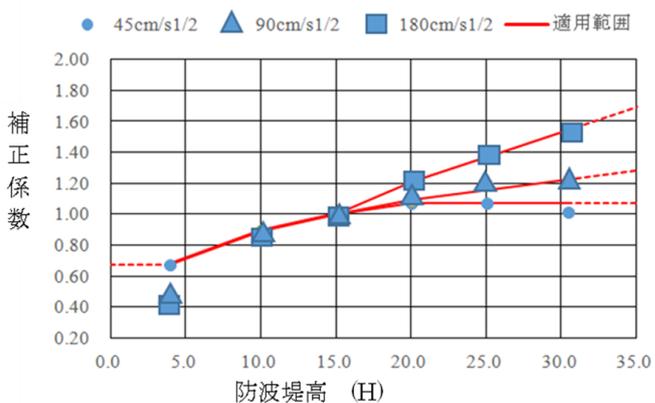


図8 補正係数への影響

表3 基準変位算定チャート

case No.	防波堤高		防波堤幅		防波堤天端から水面までの高さ		マウンド高		堤体からマウンド法肩までの距離		マウンド勾配		液状化層厚		地震動条件	地盤条件
	H	W	W/H	H1	H1/H	D2	D2/H	L	L/H	1:n	D1	D1/H				
	(m)	(m)		(m)		(m)		(m)			(m)					
地盤条件、地震動条件による基準変位	15	10.5	0.7	6	0.4	4.5	0.3	9	0.6	1:2	6	0.4	312ケース	6ケース		

補正係数は $H=15m$ を境に分布傾向が異なるため、それぞれで補正係数を設定している。 $3.9m \leq H \leq 15m$ では地震動レベルの違いによる影響があまりみられないため、全ての地震動で最大となる補正係数を設定した。 $15m \leq H \leq 30.2m$ においては地震動レベル毎に傾向が異なるため、それぞれの地震動に応じた補正係数を設定した。また、今回の解析範囲外については、 $3.9m > H$ では一定とし、 $30.2m < H$ ではそれぞれの外挿計算とし、安全側の設定とした。

## 6. チャート式耐震診断システムの精度検証

### (1) 被災事例等の比較検証

本業務で作成したチャート式耐震診断システムを用いて被災事例及び実験結果との比較検証を行った。比較対象は被災事例2例と模型実験1例である。全ての事例に対してチャート式耐震診断システムの予測沈下量は安全側の評価となった(図9)。

### (2) 二次元地震応答解析による解析結果との比較

防波堤を対象にFLIPによる二次元応答解析が実施されているKB港,S港,KT港の防波堤断面に対して、本チャート式による沈下量予想を実施し二次元応答解析結果との比較を行った。

比較検討の結果を図10に示す。これより、FLIP解析より安全側となる結果が得られることが確認できた。

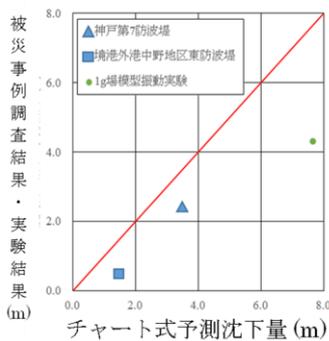


図9 被災調査・実験結果とチャート式との比較

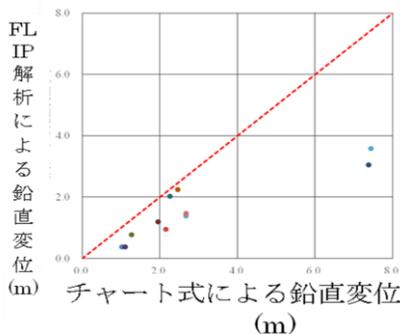


図10 チャート式と二次元地震応答解析の比較

## 7. 更なる精度向上への課題整理

### (1) 更なる精度向上への課題整理

今後さらなる精度向上を検討する際の基礎資料となるように整理した。課題は施設形状への対応と、地盤条件への対応の2種類の課題に大別することができる。それぞれの課題と想定される対応策を表4にまとめた。

表4の課題に対して試験的にFLIP解析を実施し、防波堤天端位置における変位量を比較し、課題に対する重要度を整理した結果、鉛直変位は施設形状に比べ地盤条件の変化が大きく影響していることがわかったことから、今後さらなる精度向上を検討するには地盤条件について優先的に検討するべきであると考えられる。

## 8. まとめ

チャート式耐震診断システムの対象断面の中でも防波堤形式については、傾斜型護岸タイプを準用した簡易的なものだった。

本検討ではこの問題に対応すべく、防波堤形式の改良を行った。全国の第一線防波堤の資料を収集・整理し、防波堤形式に適した施設形状、補正係数の設定を行った。改良した防波堤形式のチャート式耐震診断システムの精度確認のため、被災事例や二次元応答解析と比較した結果、安全側となる結果が得られた。

今後の課題として、チャート式耐震診断システムの貸出先から診断結果を収集・整理し、本システムの精度確認を行ったうえで、更なる精度向上に向けて取り組む必要がある。

表4 更なる精度向上への課題

分類	項目	課題
施設形状	腹付工	FLIP解析による再現性の確認
	消波ブロック被覆ブロック	・消波ブロックのパラメータ設定方法 ・FLIP解析による再現性の確認
地盤条件	液状化が発生しない硬質な砂地盤	・基礎マウンドの沈下特性の把握 ・FLIP解析による再現性の確認
	高置換SCP工法	・SCP地盤の物性値 ・FLIP解析による再現性の確認
	互層地盤	・FLIP解析による再現性の確認

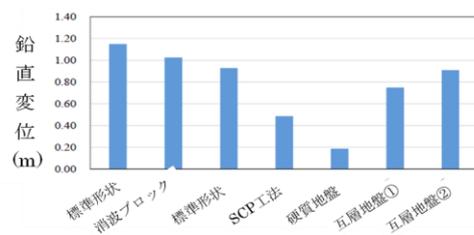


図11 各項目の防波堤形式に与える影響