

沿岸構造物のチャート式耐震診断システムの開発

DEVELOPMENT OF A SIMPLE SEISMIC PERFORMANCE EVALUATION TECHNIQUE FOR COASTAL STRUCTURES

東島義郎¹・藤田郁夫²・一井康二³・井合進⁴・菅野高広⁵・北村道夫⁶
 Michio HIGASHIJIMA, Ikuo FUJITA, Koji ICHII, Susumu IAI, Takahiro SUGANO, and Michio KITAMURA

¹正会員 近畿地方整備局 神戸港湾空港技術調査事務所 (〒651-0082 神戸市中央区小野浜町7-30)

²正会員 工修 近畿地方整備局 (〒650-0024 神戸市中央区海岸通29)

³正会員 工博 広島大学 大学院工学研究科社会環境システム専攻 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

⁴正会員 工博 京都大学 防災研究所地盤災害研究部門 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

⁵正会員 工博 (独) 港湾空港技術研究所 構造振動研究室 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

⁶ (財) 沿岸技術研究センター (〒102-0092 東京都千代田区隼町3-16)

It is important to know whether a coastal dike maintain its functions to protect the hinter-area against disastrous tsunami accompanying giant earthquake. However, it has been thought almost impossible because the length of dikes is extensive and the level of techniques needed for the evaluation is high and complicated. There is, therefore, an urgent demand for a practical seismic performance evaluation technique. The authors have developed and propose a simple technique depending on the results of hydraulic experiments as well as numerical analyses, taking into account the shape of a coastal structure and ground conditions.

Key Words : tsunami, dike, seismic performance evaluation technique

1. はじめに

近年, 巨大地震の発生と地震による津波の来襲が懸念されており, 今後30年間に南海トラフで大規模な地震が発生する確率は南海地震で50%程度, 東南海地震で60%と言われている¹⁾.

この地震動と地震により発生する津波によって, 阪神・淡路大震災とは比較にならないほどの広範囲の地域にわたり甚大な被害が発生することが危惧される。

海溝型地震に伴う津波に対して, 海岸堤防等の海岸保全施設が越流防止機能を保持しているか否かにより, 背後地への浸水状況が大きく異なる。被害もそれに応じて大きく影響される。したがって, 被災シナリオに基づく対策を検討する際には(図-1), 海岸堤防等が地震によって, どの程度変位(沈下)するかを把握することが重要である。

しかしながら, 我が国の海岸堤防の延長は約1万1千

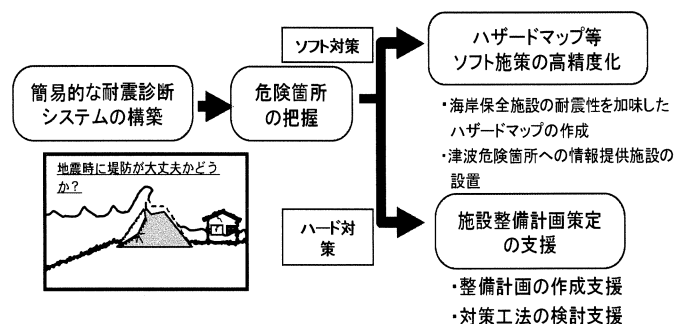


図-1 診断システムを活用したソフト・ハード対策

kmに及び, 構造形式もケーソンを基礎の上に置いた直立型の護岸であったり, 矢板を地盤に打ち込んだ護岸であったりと様々な構造が採用されている(図-2)。通常, 施設の変位量を算定するためには高度な解析(FEM解析など)を行う必要があるが, そのためには, 多くの費用・時間を要するし, 実際に長大な延長にわたり, 様々

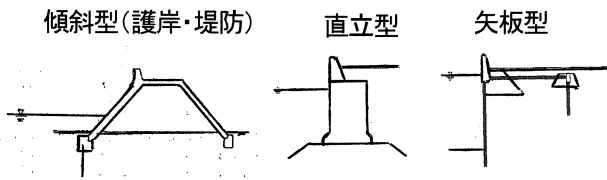


図-2 主な海岸堤防の構造のイメージ

な構造形式の海岸堤防の変位量を把握することは容易ではないと考えられる。

平成16年5月に海岸事業を所管する農林水産省農村振興局・水産庁、国土交通省河川局・港湾局で、全国の海岸堤防の状況調査が実施されたが、近畿地方では7割強、全国でも6割もの海岸堤防の耐震性の調査が未実施の状況であるという結果が出ている(図-3)。

このため、本研究では、沿岸構造物(主に海岸保全施設)の耐震性評価を早く、かつ安価に実施するための耐震診断システムの開発を行った。

2. チャート式耐震診断システムの開発

本研究では、直立型(重力式)および傾斜型(護岸タイプ・堤防タイプ)を検討対象とした。

本研究では、施設の形状と地盤の強度の情報から、施設の地震時の残留変形量を評価できる手法を開発するために、あらかじめ代表的な断面に対して二次元有効応力解析(FLIP)を数多く実施しておき、その解析結果を整理することで、変形量を簡易的に求めることができるシステムの開発を行った。

具体的には、まず、現況施設の諸元等の調査を行い標準的な形状や地盤条件、サイト増幅特性を考慮した地震動の設定を行い、次に、地震時の構造物の変位量に影響すると考えられるパラメータ(地盤の等価N値、護岸高・勾配等の施設形状、基盤最大加速度等)を変化させたFLIP解析を行い、各パラメータが変位に与える影響を

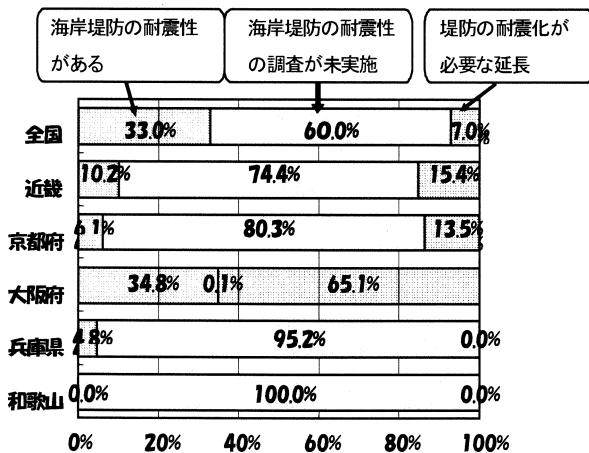


図-3 海岸堤防耐震化の状況(国土交通省、農林水産省調査結果(H16.5)より作成)

補正係数として求めることにより、各構造物の変位量を算出するシステムとした。

FLIPについては、耐震強化岸壁の変形照査を中心として種々の実務に使われており、また、解析精度の向上が図られているが、対象となる構造形式によって解析条件による精度の違いが出るため、適切な解析条件を設定する必要がある。そのため、1G場での模型振動実験、遠心载荷模型実験を実施するとともに、既往の被災事例との比較検討を行い、適切なパラメトリックスタディの解析条件を設定した。

本研究のフローを図-4に示す。

(1) 模型実験

a) 1G場での振動実験

平成15年度に実施された徳島県の既設護岸を対象とした1G場の模型実験による検討結果²⁾を基に、耐震診断システム開発に必要な当該護岸をモデルケースとした実験(表-1)を追加実施した。ただし、海溝型地震に伴う長継続時間の地震動の影響を検討するため、波数の多い正弦波(10波および90波)を加振波に採用した。なお、加振は実物換算で1Hzとし、100Galおよび170Galの段階加振を行った。各ケース毎の沈下量を図-5にまとめる。本実験結果より、以下のような考察が得られた。

- ・相対密度が低いほど、より小さい加速度レベルで液状化が発生し易く、沈下量も大きくなると考えられる。

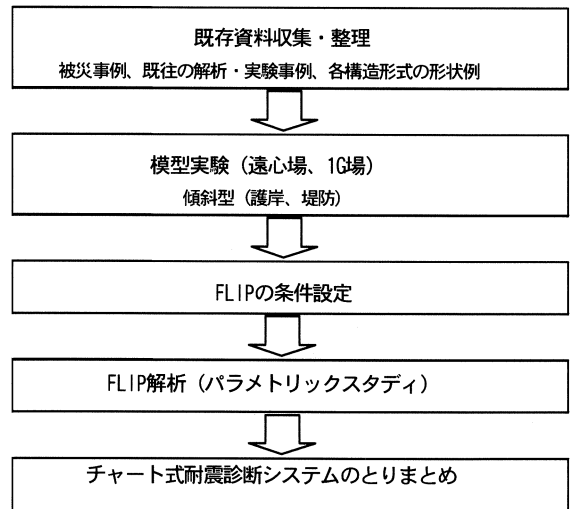


図-4 研究フロー

表-1 1G場の模型振動実験ケース一覧

ケース	追加実験項目	実施済実験項目
CS1	基礎地盤の相対密度Drの影響把握 Dr=30%程度	H15年度は、Dr=65~50%
CS2	裏埋土の不飽和土の強度増加の影響(変形の拘束)把握	背後地盤模型にガラスビーズ層を使用
CS3	透水係数について相似則を満足させた場合の液状化強度や沈下特性への影響把握	間隙水に水+グリセリンを使用

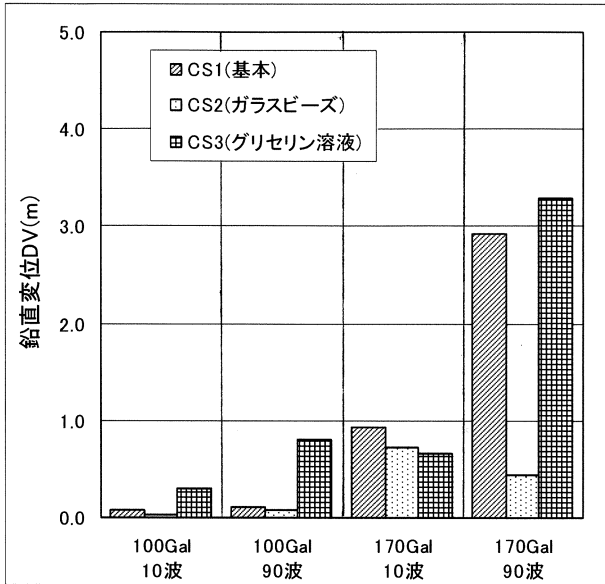


図-5 加振ステップ毎の沈下量 (実スケール換算)

- 透水系数が小さくなると水圧の消散が遅れるため、液状化が発生し易くなるが、沈下量には大きな影響を及ぼさないと考えられる。
- 細粒分の存在に伴う液状化強度の調整は、相対密度の調整よりも透水系数の調整で行うことが望ましい。
- CS2では、ガラスビーズ層が排水層の役割をし、背後地盤が液状化しにくくなり、変形量は大幅に小さくなった。透水条件の設定の重要性が確認できた。

b) 遠心载荷模型実験

1G場の模型振動実験の結果について、詳細に確認するために、より実態に近い遠心载荷模型実験を実施した。実験で用いた断面は、1G場の模型実験で対象とした断面である。実験モデルを図-6に示す。

実験の結果は、1G場の模型振動実験と整合する結果となった。

また、兵庫県南部地震での被災事例(淀川河川堤防)を用いて、遠心载荷模型実験の再現性を確認した。

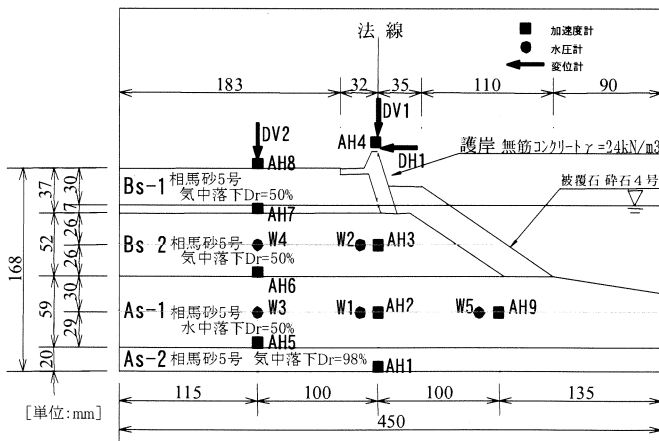


図-6 遠心载荷模型実験モデル

(2) FLIPの条件設定

本研究で用いる解析プログラムFLIPは、ケーソン式岸壁等への適用性が確認されており、耐震強化岸壁の変形照査を中心として種々の実務に使われているが、全ての構造形式や全ての状況に対して高い予測精度をもつには至っていない。実際には、種々の形式の被災事例や実験結果の解析を通じて、解析精度の向上が必要な部分に対してより合理的なモデルを提案するといった過程の繰り返しにより、解析手法の向上を図る必要がある。本システムを開発するにあたって、対象となる構造物の構造形式に合わせて、解析を実施する際の条件設定を行う必要がある。

実験とFLIP解析との比較検討により、以下のパラメトリックスタディの条件で解析を実施することとした。

- 改良型非線形反復計算法
- 過剰間隙水圧モデル temp 7モデル
- レーレー減衰 $\beta=0.002$
- 捨石の直背後の地盤は透水性がよいものとし、過剰間隙水圧の発生を考慮しない。

(3) FLIP解析 (パラメトリックスタディ)

a) 解析ケース

直立型(重力式)、傾斜型(護岸)、傾斜型(堤防)の3構造形式毎に、地盤条件、入力地震動、形状パラメータを設定し、表-2~表-4に示す解析ケースを実施した。

表-2 直立型(重力式)の解析ケース

構造形式	直立型(重力式)																			
地盤条件	等価N値で主に5刻み(5, 8, 10, 15, 20, 25)																			
入力地震動	直下型 神戸PI波 基盤最大加速度100gal刻み(100gal~600gal) 海溝型 海南波 基盤最大加速度100gal刻み(100gal~600gal) 撫養港波・羽田波 基盤最大加速度300gal(比較検討)																			
形状パラメータ	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Case</th> <th>ケーソン高 H (m)</th> <th>ケーソン幅 W (m) (W/H)</th> <th>置換砂厚 D1 (m) (D1/H)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td rowspan="5">10.0</td> <td>9.0 (0.9)</td> <td rowspan="3">5.0 (0.5)</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>6.5 (0.65)</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>10.5 (1.05)</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td rowspan="2">9.0 (0.9)</td> <td>0.0 (0.0)</td> </tr> <tr> <td>E</td> <td>10.0 (1.0)</td> </tr> </tbody> </table>			Case	ケーソン高 H (m)	ケーソン幅 W (m) (W/H)	置換砂厚 D1 (m) (D1/H)	A	10.0	9.0 (0.9)	5.0 (0.5)	B	6.5 (0.65)	C	10.5 (1.05)	D	9.0 (0.9)	0.0 (0.0)	E	10.0 (1.0)
Case	ケーソン高 H (m)	ケーソン幅 W (m) (W/H)	置換砂厚 D1 (m) (D1/H)																	
A	10.0	9.0 (0.9)	5.0 (0.5)																	
B		6.5 (0.65)																		
C		10.5 (1.05)																		
D		9.0 (0.9)	0.0 (0.0)																	
E			10.0 (1.0)																	
解析ケース	標準ケース(等価N値10、地震動:海溝型300gal、形状A) +標準断面で地盤条件5ケース(等価N値5, 8, 15, 20, 25) +W/Hの変更2ケース(W:ケーソン幅、H:ケーソン高さ) +置換砂厚の変更2ケース +標準断面で地震動13ケース(14ケース-1ケース) =23ケース																			

表-3 傾斜型（護岸）の解析ケース

構造形式	傾斜型（護岸）					
地盤条件	堤体（背後）地盤	等価N値5	等価N値10	等価N値15	等価N値20	等価N値25
	基礎地盤	○	○	○	○	○
	等価N値5	○				
	等価N値10	○	○			
	等価N値15	○	○	○		
	等価N値20	○	○	○	○	
等価N値25	○	○	○	○	○	
ケース数	5	4	3	2	1	
入力地震動	直立型と同じ					
形状パラメータ						
	Case	捨石傾斜	護岸高①(m)	護岸高②(m)	液状化対象層厚(m)	捨石厚(m)
A	1:1.5	4.0	3.0	7.0	1.0	10.0
B	1:1					
C	1:3					
D	1:1.5		0.5			
E			6.0			
F			0.0			
G	3.0	3.5				
H		10.5				
I		7.0				
J		0.5				
K					0.5	
L					3.0	
M						
解析ケース	標準ケース（等価N値10-10, 地震動:海溝型300gal, 形状A） +形状を変更した9ケース +基礎地盤と背後地盤条件の組合せ14ケース +標準断面で地震動13ケース =37ケース					

設定にあたっては、地盤条件については診断する際の補間が精度上問題ないレベルとなるよう等価N値で5刻みで5～25で設定した。

地震動については、直下型と海溝型の2種類について基礎最大加速度を100gal～600galの100gal刻みで設定した。また、比較のため、撫養港波（徳島県）および羽田波でも検討を実施した。

b) 解析結果

FLIPによるパラメトリックスタディの結果を評価して、各構造形式毎に次のような結果が得られた。

＜直立型（重力式）＞

- ・加速度が大きくなると、残留水平変位、残留鉛直変位ともに増大する（図-7）。
- ・重力式護岸の幅が広がる（W/Hが大きくなる）と、残留水平変位は抑制されるが、残留鉛直変位に対しては明確な相関はない。
- ・置換砂（液状化対象層）の厚さが厚くなると、残留水平変位、残留鉛直変位ともに増大する。
- ・地盤の等価N値が大きくなると、残留水平変位、残留鉛直変位ともに減少する。
- ・重力式護岸の残留水平変位と残留鉛直変位は、線形的な関係があると評価できる。

表-4 傾斜型（堤防）の解析ケース

構造形式	傾斜型（堤防）						
地盤条件	傾斜型（護岸）と同じ						
入力地震動	直立型と同じ						
形状パラメータ							
	Case	天端幅(m)	勾配	堤体高(m)	水深(m)	液状化対象層厚(m)	非液状化層厚(m)
	A	4.5	1:1.5	3.5	0.0	3.5	10.0
	B	3.0					
	C	6.0					
	D	4.5	1:1.25				
	E		1:3.0				
	F		1.5				
	G	1:1.5	3.5	6.0	-1.5		
	H			0.0	1.0		
	I				0.0		
	J				0.0		
	K				2.0		
L				5.25			
M				7.0			
解析ケース	標準ケース（等価N値10-10, 地震動:海溝型300gal, 形状A） +形状を変更した12ケース +基礎地盤と背後地盤条件の組合せ14ケース +標準断面で地震動13ケース =40ケース						

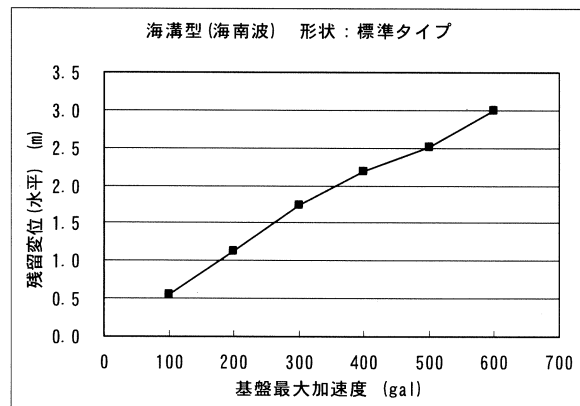


図-7 解析例（直立型の残留水平変位）

＜傾斜型（護岸）＞

- ・加速度が大きくなると、残留水平変位、残留鉛直変位ともに増大する。
- ・捨石部傾斜や捨石厚は残留水平変位に大きな影響を与えない（図-8）。
- ・基礎地盤の液状化対象層厚に対して、残留鉛直変位は影響を受けない。
- ・基礎地盤の等価N値が大きくなると、残留鉛直変位は減少する。

＜傾斜型（堤防）＞

- ・加速度が大きくなると、残留水平変位、残留鉛直変位ともに増大する。なお、重力式護岸や傾斜型護岸と比較すると水平変位は小さく、鉛直変位は大きい傾向にある。

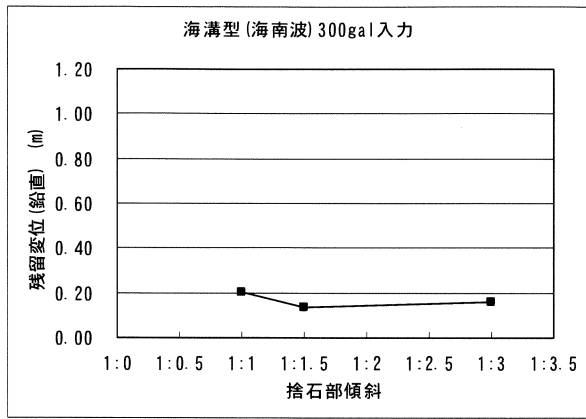


図-8 解析例 (傾斜型 (護岸) の残留鉛直変位)

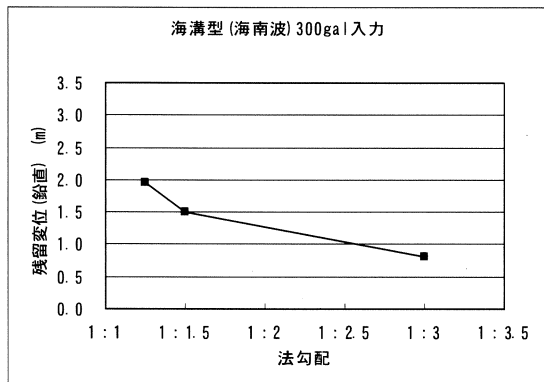


図-9 解析例 (傾斜型 (堤防) の残留鉛直変位)

- ・天端幅が増大すると、液状化の発生を抑制するため残留鉛直変位は減少する。
- ・法勾配が緩いと残留鉛直変位は減少する (図-9)。
- ・堤体高さが高いほど残留鉛直変位は大きくなるが、その増加率は減少していく。
- ・水深は、残留鉛直変位にほとんど影響しない。
- ・基礎地盤の液状化対象層厚が大きくなると、残留鉛直変位は増大するが、その増加率は減少していく。
- ・基礎地盤の等価N値が大きくなると、残留鉛直変位は減少する。

(4) 耐震診断システムのとりのまとめ

前述のFLIP解析によるパラメトリックスタディの結果を評価し、チャート式耐震診断システムのとりのまとめを行った。

各構造形式について、入力した項目から標準タイプにおける地震時の変位量を算定し、地盤条件、地震動、および形状によるパラメータが水平変位や鉛直変位に与える影響を補正係数として評価し、標準タイプの変位量にそれらを利用して施設の変位量を推定するものとした。

ただし、傾斜型 (護岸・堤防) については、それぞれ次の理由から水平変位については評価しなかった。

護岸) 実験結果と解析結果との整合性がとれていない。

堤防) 水平変位量が非常に小さい。

また、各護岸タイプの排水による沈下量は、液状化判

定条件を上回る残留鉛直変位量が想定される場合には、液状化対象層厚の3%を考慮するものとした。

直立型 (重力式) と傾斜型 (護岸) について、入力項目と出力項目および計算例を表-5に示す。

表-5 各護岸の計算例

<直立型 (重力式) >

入力項目	備考	入力例
高さ:H (m)		10.0
幅:W (m)		11.0
置換砂厚:D1 (m)		5.0
地盤の等価N値	0<等価N値≤25 (別途算定プログラムあり)	7
基盤最大加速度 (gal)	100gal~600galが概ね適応範囲	400
地震動のタイプ	1=直下型 2=海溝型 3=海南波 (海溝型) 4=撫養港波 (海溝型) 5=羽田波 (海溝型)	2

標準タイプの場合	残留水平変位 (m)	1.75
	残留鉛直変位 (m)	0.57
補正係数 (各パラメータ毎の補正係数の積)	水平変位	1.05
	鉛直変位	2.04

出力項目	備考	計算例
① 天端標高 (m)	値は、D.L表示	4.7
② 液状化の発生する可能性		高い
③ 残留水平変位 (m)		1.9
④ 残留鉛直変位 (沈下量) (m)	正の値=沈下	1.2
⑤ 津波高さ (m)	値は、D.L表示	4.1
⑥ 護岸形状による津波高さの補正係数	当面の間は、1.0	1.0
⑦ 排水沈下量 (m)	正の値=沈下	0.15
⑧ 地盤沈降量 (m)	正の値=沈下	0.95
⑨ 余裕高さ (m)	⑨=①-④-⑤×⑥-⑦-⑧	-1.70

<傾斜型 (護岸) >

入力項目	備考	入力例
地盤高さ (m)	概ね4.5~10が適応範囲	3.0
捨石厚 (m)	概ね0.5~3が適応範囲	1.0
勾配	概ね1:1~1:3が適応範囲	1:2
液状化対象層厚 (m)	基礎地盤対象で概ね0~10.5が適応範囲	6.0
背後地盤の等価N値	0<等価N値≤25	10
基礎地盤の等価N値	0<等価N値≤25ただし≥背後地盤等価N値	15
基盤最大加速度 (gal)	概ね100gal~600galが適応範囲	450
地震動のタイプ	1=直下型 2=海溝型 3=海南波 (海溝型) 4=撫養港波 (海溝型) 5=羽田波 (海溝型)	2

標準タイプの場合	残留鉛直変位 (m)	0.14
補正係数	鉛直変位	19.51

出力項目	備考	計算例
① 天端標高 (m)	値は、D.L表示	6.0
② 液状化の発生する可能性		高い
③ 残留鉛直変位 (沈下量) (m)	正の値=沈下	2.7
④ 津波高さ (m)	値は、D.L表示	4.5
⑤ 護岸形状による津波高さの補正係数	当面の間は、1.0	1.0
⑥ 排水沈下量 (m)	正の値=沈下	0.15
⑦ 地盤沈降量 (m)	正の値=沈下	0.95
⑧ 余裕高さ (m)	⑧=①-③-④×⑤-⑥-⑦	-2.3

以上を整理して、チャート式耐震診断システムの利用のフローを図-10に示す。

3. 今後の課題

本研究によって、海岸保全施設の地震時における沈下等の変位について、簡易な手法による推定がある程度可能になったと言える。ただし、その精度、使用面、対象範囲等については、まだ多くの課題が残されている。

地震時における施設の挙動については、詳細な検討方法においてさえ、その精度について解明すべき多くの課題が残されている。今回のチャート式耐震診断システムについても、より実挙動に近づけるために実際の被災事例や実験、詳細な解析手法との比較検討を継続して進める必要がある。

また、今回の検討は、直立型（重力式）と傾斜型（護岸・堤防）についてのみ行ったもので、その他の構造形式についての検討が残されている。

さらに、今回の構造形式においても限られた解析ケースの結果を評価したものであるため、より多くの施設の

条件に応じるために様々な施設に対しての試行とその結果の評価が重要になると思われる。

使用面においても計算プログラムは複雑ではないが、その入力項目のデータがなければならない。必要データが揃っていない施設については、その他の既存データをどう評価して必要データを補い、本システムを活用するかという課題も残されている。

4. おわりに

現時点で、傾斜型（護岸・堤防等）及び直立型構造物について、地盤の状況、施設の形状、地震をExcelのシートに入力することにより、構造物の変形量を求めることが可能な耐震診断システムを開発できた。

本システムは、あくまでも簡易法であり、安全側の評価結果が出るが、津波に対する危険箇所を抽出するにあたっての、まず初めの仕分けなどに活用できると考えている。例えば、

1. 耐震対策を実施する施設の抽出（優先順位付けなど）
2. 津波浸水シミュレーション（ハザードマップ作成など）

などが考えられる。実際に、国土交通省近畿地方整備局では平成17年度に自治体や海岸管理者を対象として本システムを提供し、その結果をさらに今後のシステムの改良に活かすことに取り組んでいる。すでに活用も始まっており、例えば、大阪府では、府所管の約70kmの海岸保全施設全延長に本システムを活用して耐震検討を実施しているところである。

また、今回開発したシステムは、直立型と傾斜型であるが、現在、矢板式の護岸についてもチャート式耐震診断システムを確立すべく検討を行っているところであり、また直立型と傾斜型についても適用範囲の拡大や使い勝手の向上のための改良を行っているところである。

謝辞：本研究は、「港湾における簡易耐震診断手法検討会（委員長 井合進：京都大学防災研究所教授）」の指導のもと実施しました。検討会委員各位に、ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部：海溝型地震の長期評価の概要（算定基準日平成18年（2006年）1月1日）。
- 2) 五洋建設株式会社：平成16年度極大地震下の護岸構造物の耐震性評価に関する1G場模型振動実験（基礎実験）報告書，pp200, 2004. 3.

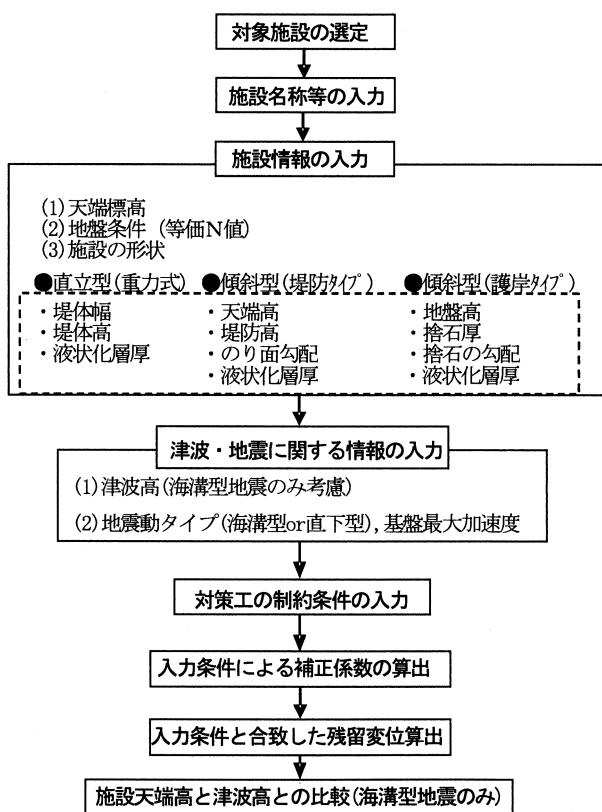


図-10 チャート式耐震診断システムフロー