

# 沿岸構造物の耐震性評価を安価で簡易に診断するシステムの開発について

竹田 晃<sup>1</sup>・河崎 尚弘<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>近畿地方整備局 神戸港湾空港技術調査事務所 技術開発課 (〒651-0082兵庫県神戸市中央区小野浜町7-30)

海溝型地震に伴う津波に対して、海岸保全施設などの沿岸構造物が越流防止機能を保持しているか否かの評価は、背後地への浸水状況や施設の利用制限等を把握するうえで非常に重要である。検討手法としては、模型実験や二次元有効応力解析プログラムFLIPを用いたパラメトリックスタディ等の結果から取りまとめを行い、チャート式耐震診断システムを開発した。これにより、海岸保全施設等の耐震変形性能が短時間に評価できる等、耐震性の評価を効率的且つ経済的に進めることが可能となった。

キーワード 耐震診断, 沿岸構造物, FLIP, 津波,

## 1. はじめに

近い将来、近畿地域において、大規模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（海溝型地震）で大規模地震が発生する確率は、東南海地震で60～70%程度、南海地震で50%程度（地震調査研究推進本部公表データ）と言われている。この大規模地震と地震により発生する津波によって、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様、広範囲の地域に甚大な被害が発生することが予想されている。

海溝型地震に伴う津波に対して、海岸保全施設等の沿岸構造物が越流防止機能を保持しているか否かにより、背後への浸水状況が大きく異なるため、被害もそれに伴って大きく影響される。そのため、被災シナリオに基づく対策を検討する際には（図-1）、護岸・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、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調査を実施したところ、全国で約6割において、海岸堤防の耐震性調査が未実施の状況であるという結果が出ている。この原因は、我が国の海岸堤防の延長は約1万km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に加えて、地震後の施設の変形量を算定するためには、計算の煩雑な二次元有効応力解析FLIP（以降、FLIP）を実施する必要があることから、多くの時間と費用を必要とするためである。

本稿では、模型実験やFLIPを用いたパラメトリックスタディ等の結果より、海岸保全施設の形状、地震動条件、

地盤条件等の情報から地震時の施設の残留変形量を安価で簡易に評価できるチャート式耐震診断システムの開発について報告する。

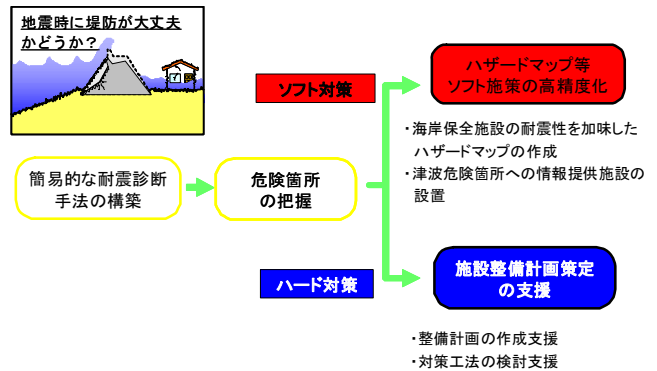


図-1 チャート式耐震診断システム活用イメージ

## 2. チャート式耐震診断システムの検討

本検討では、直立型（重力式）、傾斜型護岸及び堤防タイプの形状（近畿地域では約5割）、矢板型（控え・自立式）、栈橋型について検討対象とした（図-2）。各構造形式で、施設形状、地震動条件、地盤条件等から基準となる標準タイプを設定し、それらをパラメータとしてFLIPによるパラメトリックスタディを実施した。その結果を基に、各パラメータが地震時の施設の残留変形量に与える影響を定量的に評価し、チャート式診断システムを作成した。

FLIP解析は、構造形式により適切な解析条件を設定する必要があり、現在まで種々検討が実施されている。本検討で対象とした直立型（重力式）、矢板型（控え・自立式）及び栈橋型については、解析条件に関する検討は十分実施されてきたが、傾斜型護岸及び堤防タイプについては検討が十分ではなかった。そのため、既往の被災事例の収集や1G場の模型振動実験、遠心载荷模型実験を実施し、それらを再現できる解析条件を設定した。本検討のフローを図-3に示す。

事例、模型実験とFLIP解析の比較検討を基に、各構造形式についてFLIPの解析条件を設定した。設定した解析条件を表-1に示す。

表-1 FLIP解析条件一覧

構造形式	非線形反復計算法	構成則	レーレー減衰 ( $\alpha, \beta$ )
直立型(重力式)	改良型	tem7法	(0.002)
傾斜護岸タイプ	改良型	tem7法	(0.002)
傾斜堤防タイプ	従来型	従来法	(0.002)
矢板型(控え・自立式)	改良型	tem7法	(0.002)
栈橋型	改良型	tem7法	(0.002)

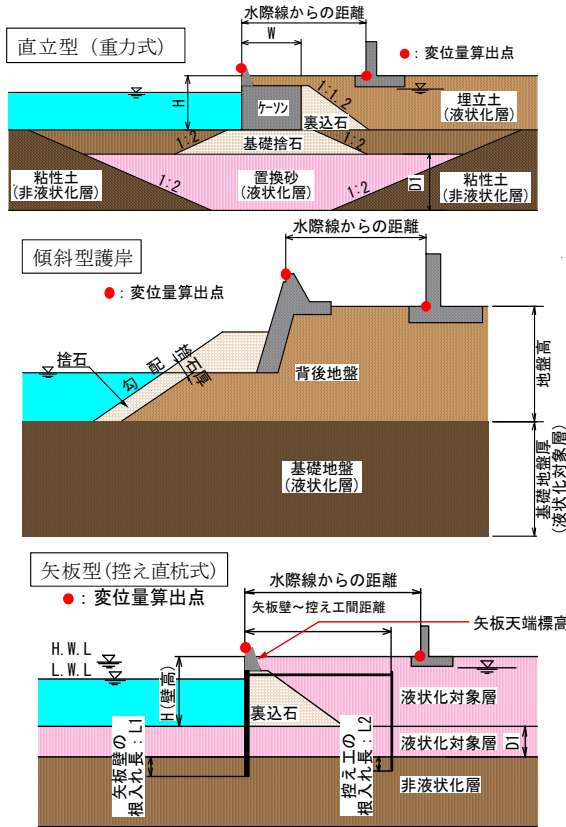


図-2 本検討対象施設の一例

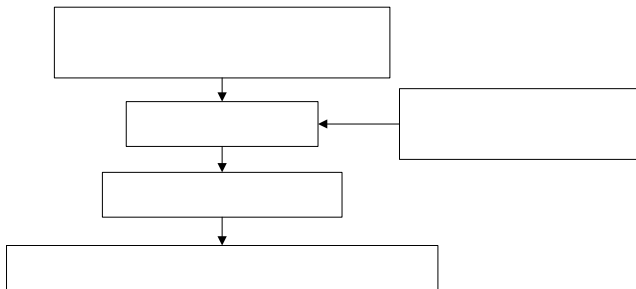


図-3 チャート式耐震診断システム検討フロー

(1) FLIP解析条件の設定

FLIP解析では、構造形式により、非線形反復計算法、構成則（FLIPでは、塑性せん断仕事に、負のダイレイタンスへの寄与係数Rを乗じて液状化の進行程度を表現しているが、寄与係数の算定方法がいくつか存在する。）を適切な条件に設定する必要がある。既往の被災

(2) FLIPによるパラメトリックスタディ

構造解析毎に、施設形状、地震条件、地盤条件等についてパラメータを設定した。一例として、直立型（重力式）の設定した解析ケースを表-2に示す。

開発したチャート式耐震診断システムが、全国的に広く適用できるようにするために、全国の海岸保全施設の形状について整理し、その結果により施設形状に関するパラメータを設定した。また、様々な地震特性を考慮するため、地震動については、全国各地の港湾を対象にサイト特性を考慮して作成された地震動を用いた。

表-2 検討ケース一覧：直立型（重力式）

構造形式	直立型(重力式)							
	埋立土	等価N値 5	等価N値 8	等価N値 10	等価N値 15	等価N値 20	等価N値 25	
地盤条件 <sup>a)</sup>	置換砂	○	○	○	○	○	○	
	埋立土	○	○	○	○	○	○	
	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	○	○	○	○	○	○		
入力地震動	神戸Pi波；基盤最大加速度100gal刻み(100gal～600gal) 海南波；基盤最大加速度100gal刻み(100gal～600gal) 撫養港波・東京波・青森港波等の全国各地を対象に、サイト特性を考慮し作成された予測地震動							
形状パラメータ								
	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)		5.0(0.5)			
	C		8.0(0.8)		5.0(0.5)			
	D		10.5(1.05)		5.0(0.5)			
	E		9.0(0.9)		0.0(0.0)			
	F		9.0(0.9)		10.0(1.0)			
	G		3.0(0.3)		5.0(0.5)			
	H		9.0(0.9)		19.5(1.95)			
	I		3.0	2.7(0.9)		1.5(0.5)		
	J		5.5	4.95(0.9)		2.75(0.5)		
	K	7.5	6.75(0.9)		3.75(0.5)			
L	16.0	14.4(0.9)		8.0(0.5)				
M	20.0	18(0.9)		10.0(0.5)				
解析ケース	標準タイプ(等価N値15, 海南波300gal, 形状A) + 形状を変更したケース45ケース + 標準断面で地盤条件を変更したケース37ケース + 標準断面で地震動を変更したケース30ケース =113ケース							

\* 等価N値とは、各土層のN値を有効上載圧力が65kPaの場合同一土層のN値に換算したものである。また、表中の○印は地盤条件の組合せを示したものである。

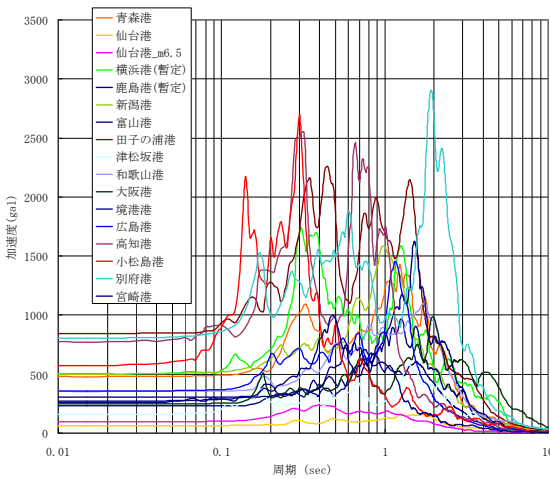


図4 地震動の加速度応答スペクトル

(3) 解析結果の評価

FLIPによるパラメトリックスタディの結果より、各パラメータと施設の残留変形量の関係を定量的に評価した。以下にその概要を示す。なお、地震動レベルについては、最大加速度振幅や継続時間、地震動特性を考慮できるPSIにより評価した。PSIとは、野津ら<sup>1)</sup>により提案されている地震動レベルを表す一つの指標であり、以下の式で定義される。

$$\text{加速度のPSI} : \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} a^2(t) dt} \quad (cm/s^{3/2})$$

$$\text{速度のPSI} : \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} v^2(t) dt} \quad (cm/s^{1/2})$$

a) 施設形状に関する評価

a-1) 直立型 (重力式)

- ・ケーソン幅Wが小さくなると、水平変位は大きくなるが、鉛直変位については明瞭な相関は見られない。
- ・置換砂層厚が大きくなると、水平変位・鉛直変位ともに大きくなる。

a-2) 傾斜型護岸タイプ

- ・捨石厚の鉛直変位に対する抑止効果は、ある厚さを超えると一定となる。これは、捨石勾配についても同様の傾向であった。
- ・地盤高は高くなると、鉛直変位は大きくなる。
- ・基礎地盤の液状化層厚と鉛直変位には明瞭な相関は見られない。

a-3) 傾斜型堤防タイプ

- ・天端幅が広がると、鉛直変位は小さくなる傾向である。
- ・勾配の鉛直変位に対する抑止効果は、ある勾配より緩くなると一定となる。
- ・堤体高、基礎地盤の液状化層厚はある一定値を超えると、鉛直変位はほとんど変化しない。

a-4) 矢板型 (控え直杭)

- ・等価N値が5~15の場合は、裏込石による変位抑止効果はあまり見られない。等価N値が20以上となると、裏込石の変位抑止効果が見られる。鋼部材の曲率比には裏込石の効果は見られない。
- ・矢板の非液状化地盤への根入れ長が長い方が矢板下端の変位は抑止されるが、固定条件が強くなるため、矢板に発生する応力は大きくなる。
- ・控え杭の非液状化地盤への根入れ長が長い方が控え効果が大きくなり、矢板天端変位は抑止され、矢板の応力は小さくなる。

a-5) 矢板型 (控え組杭：控え摩擦杭モデル)

- ・裏込石による変位抑止効果はあまり見られない。また、矢板の曲率比は変わらない。
- ・矢板の非液状化地盤への根入れ長が長い方が矢板下端の変位は抑止されるが、固定条件が強くなるため、矢板に発生する応力は大きくなる。
- ・控え杭の非液状化地盤への根入れ長が短い方が、控え杭の強さが弱まり、たわみ変位は小さくなる。また、地盤条件が悪い場合は、矢板が倒れ込むモードが支配的であるため、控え杭の根入れ長が長い方が控え効果が大きくなり矢板の曲率は小さくなる。しかし、地盤条件が良い場合は、たわみ変位が発生するため、控え杭の強さが弱い方が矢板に発生する応力は小さくなる。そのため、非液状化地盤への根入れ長が短い方が応力は小さくなる。

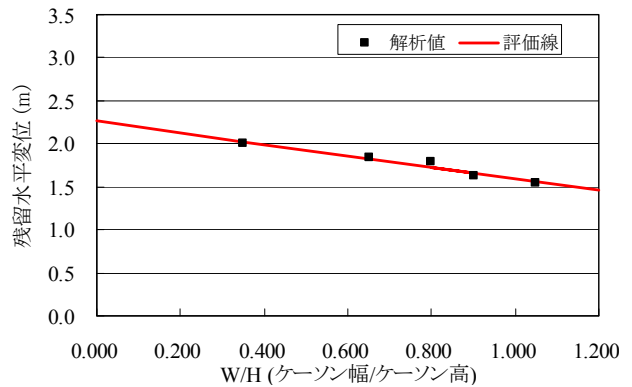


図5 施設形状に関する評価の一例：直立型 (重力式)

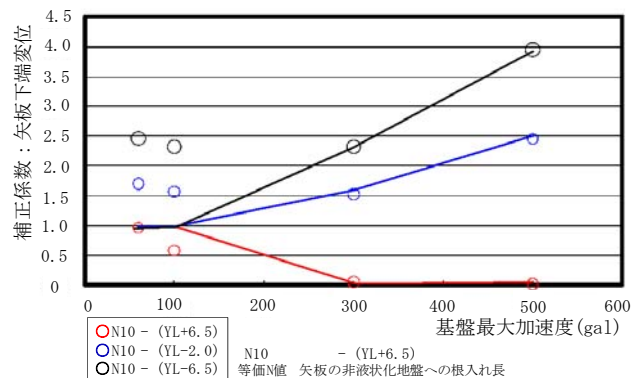


図6 矢板の非液状化地盤への根入れ長による矢板下端変位の補正係数の一例：矢板型 (控え直杭)

b)地震動条件に関する評価

b-1)各構造形式共通

- ・地震動レベルと施設の変位の関係は、速度のPSIと良く相関がある。

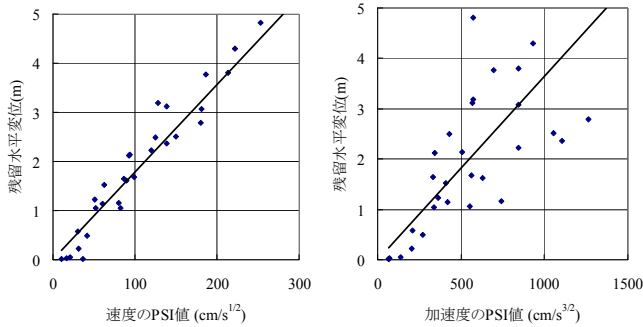


図-7 地震動レベルに関する評価の一例：直立型（重力式）

c)地盤条件に関する評価

c-1)直立型（重力式）

- ・施設の変位は、埋立土より置換砂の地盤条件の影響を強く受ける。
- ・等価N値が小さくなると、変位が大きくなる。

c-2)傾斜型護岸タイプ

- ・施設の変位は、基礎地盤よりも背後地盤の地盤条件の影響を強く受ける。
- ・等価N値が小さくなると、変位は大きくなる。

c-3)傾斜型堤防タイプ

- ・施設の変位は、堤体の地盤条件の影響をほとんど受けない。
- ・等価N値が小さくなると、施設の変位は大きくなる。

c-4)矢板型（控え直杭、控え組杭：控え摩擦杭モデル）

- ・地盤条件が悪い場合は、受働抵抗が十分得られず、海側にたわむ。地盤条件が良い場合は、受働抵抗がある程度得られるため、海側に対し反る様な形となる。
- ・地盤条件が良い方が矢板が海底面でたわむため、塑性化し易い。

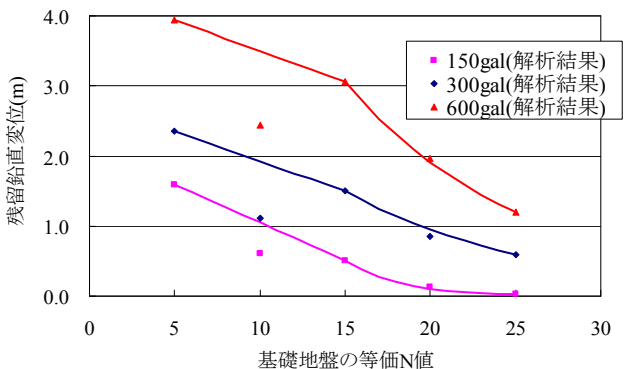


図-8 地盤条件に関する評価の一例：傾斜型堤防タイプ

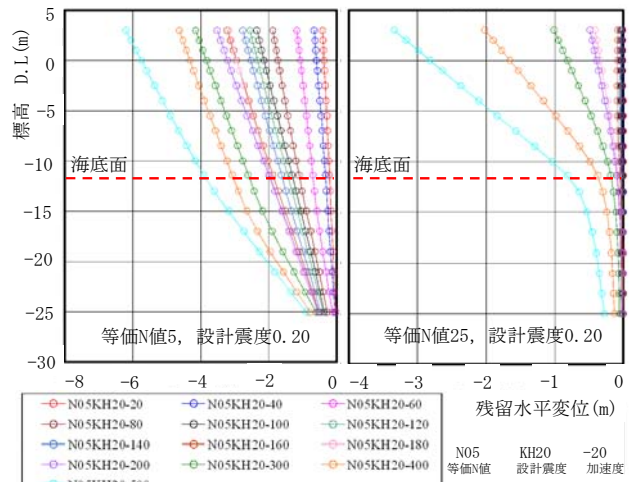


図-9 地盤の違いによる矢板の残留形状に関する評価の一例（等価N値5(左)、等価N値25(右)）：矢板型（控え直杭）

海岸保全施設には、図-2に示すように護岸法線から内陸に控えた位置にあるものも多い。図-5～図-9は護岸法線位置での変位と種々のパラメータとの関係を取りまとめたものであるが、これらの関係に加えて、護岸法線位置と護岸背後での変位との関係を考慮することでより詳細に施設の変位を把握することができる。

護岸法線位置と護岸背後での変位の関係を、護岸法線からの距離で取りまとめたものの一例を図-10に示す。直立型（重力式）の背後の水平変位は、護岸法線から45m付近で護岸法線位置の約半分の変位量となる。

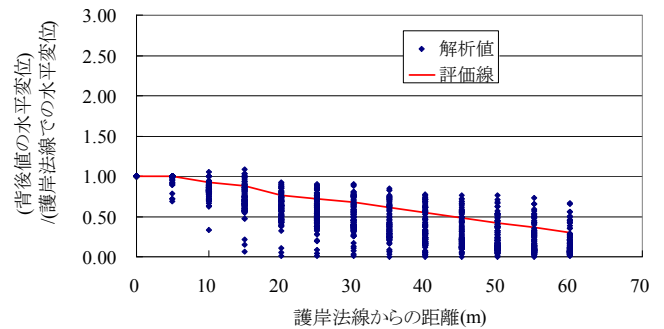


図-10 護岸法線からの距離を考慮した評価：直立型（重力式）

(4) チャート式耐震診断システムの取りまとめ

FLIPによるパラメトリックスタディの結果より、施設形状、地震動条件及び地盤条件等を入力すると、施設の残留変位が算出されるチャート式耐震診断システムを開発した。

残留変位は、FLIPのパラメトリックスタディより得られた各パラメータと残留変位の関係から入力値に合致した標準タイプの残留変位に対する補正係数をパラメータ毎に算出し、それらを標準タイプの変位量に乗ずることで算出する。直立型（重力式）の例を以下に示す。

$$\begin{aligned}
 (\text{対象施設の残留変位}) &= (\text{標準タイプの残留変位}) \\
 &\times (\text{施設形状に関する補正係数}) \\
 &\times (\text{地震動条件に関する補正係数}) \\
 &\times (\text{地盤条件に関する補正係数})
 \end{aligned}$$

ただし、傾斜型護岸タイプの残留水平変位については、FLIP解析で模型実験を再現できなかったため評価しない。また、傾斜型堤防タイプについては、水平方向がほとんど生じないため、残留水平変位について評価しない。

矢板型については、形状に関するパラメータの内、矢板、控え杭及びタイロッドの諸元については種類が多く、それぞれに補正係数を設定するためには非常に多くの解析が必要になる。一方、矢板、控え杭及びタイロッドの諸元は、設計震度と地盤条件により決定される。そこで、設計震度と地盤条件の組み合わせによる基本断面に対し、地震動条件をパラメトリックに変更させた基本チャートを作成することで、煩雑な補正係数の設定を回避することとした。矢板型（控え・自立式）の例を以下に示す。

$$\begin{aligned}
 (\text{対象施設の残留変位}) &= (\text{基本チャートの残留変位}) \\
 &\times (\text{施設形状に関する補正係数})
 \end{aligned}$$

直立型（重力式）について、チャート式耐震診断システムのインプット・アウトプットイメージを図-11に示す。

入力項目		値	注
高さ:H		14.00	(m) (3.0~20.0が概ね適用範囲)
幅:W		10.40	(m)
D1		17.00	(m)
埋立層の等価N値		10.40	5 ≤ 等価N値 ≤ 25
置換砂の等価N値		8.00	5 ≤ 等価N値 ≤ 25
速度のPSI値		105.47	(cm/s <sup>1/2</sup> )
W/H		0.74	自動計算 (0.35~1.05が概ね適用範囲)
D1/H		1.21	自動計算 (0.00~1.95が概ね適用範囲)

出力項目		値	注
標準タイプ	残留水平変位	1.62	(m)
	残留鉛直変位	0.50	(m)
補正係数 (水平変位)	(1H)=W/H	1.07	
	(2H)=D1/H	1.35	
	(3H)=H	1.31	
	(4H)=置換砂・埋立層の等価N値	0.96	
	(5H)=地震動レベル(速度のPSI)	1.17	
補正係数 (鉛直変位)	(1V)・(2H)・(3H)・(4H)・(5H)	2.13	
	(1V)=W/H	1.12	
	(2V)=D1/H	1.77	
	(3V)=H	1.45	
	(4V)=置換砂・埋立層の等価N値	1.01	
対象施設	(5V)=地震動レベル(速度のPSI)	1.17	
	(1V)・(2V)・(3V)・(4V)・(5V)	3.41	
	残留水平変位	3.5	(m) (参考) 345cm
	残留鉛直変位	3.5	(m) 水際からの距離を考慮したもの
		1.7	(m) (参考) 169cm
	1.7	(m) 水際からの距離を考慮したもの	

図-11 インプット・アウトプットイメージ  
: 直立型（重力式）

### 3. 液状化を考慮した組杭のモデル化手法

矢板型（控え組杭）構造のFLIP解析の際のモデル化は、地震時作用力以上の耐力を有することを前提に、杭下端節点と対応する地盤節点を水平・鉛直方向変位自由度を拘束したものが一般的である。従って、既存施設について耐震照査を実施する場合は、地震時作用力が施設の持つ押し込み耐力、引抜き耐力を上回る場合は、設計時に一般的に用いられるモデル化では挙動を詳細に表現することは難しい。本検討では、FLIPを用いて周辺摩擦に関するパラメータを変更した感度分析を実施し、液状化を考慮した杭の周辺摩擦のモデル化手法を検討した。

#### (1) 液状化を考慮した組杭に作用する周辺摩擦のモデル化の検討

杭下端固定モデルを図-12に示す。杭軸直角方向は地盤のすり抜けや地盤剛性の低下を考慮できる杭-地盤間相互作用ばね<sup>2)</sup>を配し、杭下端節点は地盤節点と水平・鉛直方向自由度を拘束している。それに対し、杭軸直角方向に杭と地盤間にジョイント要素を配することで杭の周面摩擦を表現することとした。このジョイント要素の滑り挙動に関する非線形特性を図-14に示す。図-14に示すジョイント要素のせん断強度は、隣接する土要素の有効拘束圧 $\sigma_c$ をもとに $\tau = \sigma_c \cdot \tan \phi_j$ で算定され、液状化の進行に応じて時々刻々と変化する。また、杭下端と地盤間には、引抜き挙動には抵抗せず、押し込み挙動については杭先端支持力まで抵抗する非線形ばねを配したモデルとした。（図-13）

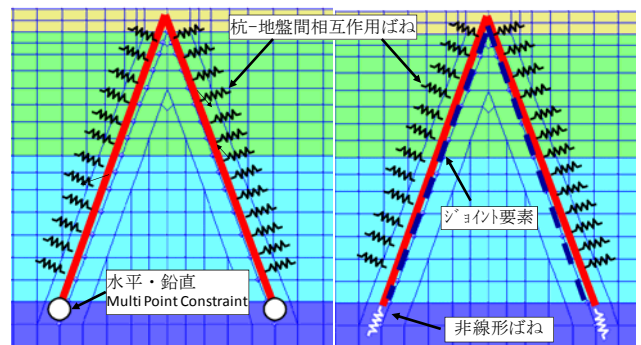


図-12 控え杭下端固定モデル 図-13 控え摩擦杭モデル

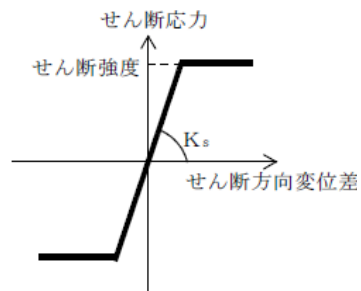


図-14 滑り挙動の非線形特性

(2) モデル化の解析と結果

解析モデルを図-15に示す。液状化層は等価N値5、控え組杭の支持層は等価N値25とし、土層部のパラメータを設定した<sup>3)</sup>。入力地震動については、和歌山県海南地区を対象に、サイト増幅特性を考慮した東南海・南海地震の予測地震動を用いて検討した。

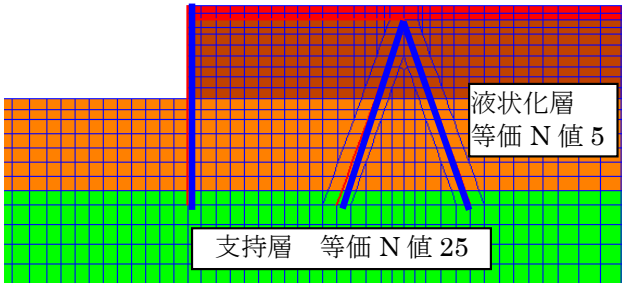


図-15 解析モデル

ジョイント要素に隣接する土要素の有効拘束圧と、そこから  $\tau = \sigma_c \cdot \tan \phi$  により算定されるせん断強度、およびジョイント要素のせん断応力の時刻歴を図-16に示す。これを見ると、40sec辺りまではジョイント要素のせん断応力は大きくなるが液状化の発生とともに隣接する土要素の有効拘束圧が小さくなり、せん断強度も小さくなっている。また、ジョイント要素のせん断応力にはせん断強度を超えるせん断応力は発生していない。これより、液状化の進行を考慮した周面摩擦は定性的に表現されていると考えられる。また、杭先端の非線形ばねの変位差—力の履歴を図-17に示す。これを見ると引抜き側に抵抗しない非線形ばねを適切に表現できていることがわかる。

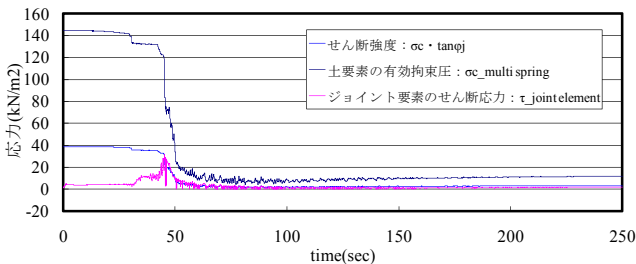


図-16 土要素の有効拘束圧とジョイント要素のせん断力

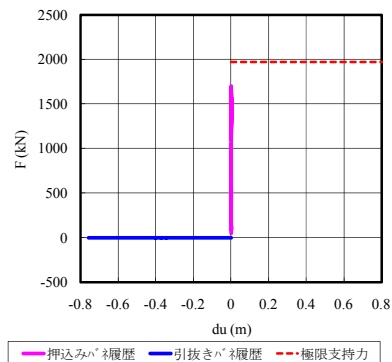


図-17 杭先端非線形ばねの変位差—力履歴

4. まとめ

チャート式耐震診断システムの開発によって、地震発生時における沿岸構造物の変形量が安価で簡易に算出でき、一定の精度を確保しながら、地震に対する危険性を評価することが可能となった。そのため、地震や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られる。具体的な利用方法としては、1. 耐震対策を実施する施設の抽出（優先順位付け等）、2. 津波浸水シミュレーション（ハザードマップ作成等）、3. 震災後、緊急物資等が受け入れ可能施設の評価が考えられ、今後、本システムが、耐震化事業の計画立案等の検討にさらなる有効活用がなされることを期待している。

今後、より実挙動に近づけるためには、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。例えば、矢板型（控え組杭）において、埋立土層の液状化による杭の周面摩擦低減を考慮できるモデル化手法を検討し、一定の評価ができるようになったが、モデル化の精度については、模型実験を実施しそれと比較検証し、定量的な評価を実施した上で解析精度の向上を図る必要がある。

本システムは、Excelプログラムを利用して作成しているだけでなく、事例集等も用意しているため、操作方法や入力方法の難易度は低い。しかし、施設変位評価を行うために、その施設の形状や土質条件等の必要情報が必要にならないため、情報が揃っていない施設についてどう情報を評価して補うのかという課題も残されている。

最後に、本システムは、簡易な評価法でもあり、また、精度的に課題が残されている部分もある。そのため、危険な施設の抽出にもれないよう安全側の評価を行うために各種の補正係数等が調整されていることを付記しておく。

参考文献

- 1) 岸壁の即時被災推定に用いる地震動指標に関する一考察，第28回関東支部技術研究発表講演概要集，2001年
- 2) 杭基礎のモデル化方法の検討，第2期FLIP研究会杭基礎作業部会，平成14年度成果報告書
- 3) 液状化による構造物被害予測プログラムFLIPにおいて必要な各種パラメータの簡易設定法，港研資料No. 869