

FLIPによる矢板式岸壁の耐震性評価について

中山裕章¹・酒井久和²・金子浩士³・足立雅樹⁴・井合進⁵・森浩章⁶・龍田昌毅⁷

¹正会員 工修 新日本製鐵株式会社 鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター (〒299-1147 千葉県富津市新富20-1)

²正会員 工博 若築建設株式会社 土木本部 技術研究所 (〒153-0064 東京都目黒区下目黒2-23-18)

³正会員 株式会社日本港湾コンサルタント 経営情報本部 (〒141-0031 東京都品川区西五反田8-3-6)

⁴正会員 工博 三井不動産建設株式会社 土木技術部 (〒103-0007 東京都中央区日本橋浜町2-31-1)

⁵正会員 工博 国土交通省 港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

⁶正会員 工修 沿岸開発技術研究センター 調査部 (〒102-0092 東京都千代田区隼町3-16住友半蔵門ビル6F)

⁷正会員 新日本製鐵株式会社 建材開発技術部 (〒100-8071 東京都千代田区大手町2-6-3)

矢板式岸壁を対象として、有効応力解析プログラムFLIPを用いた場合の地震応答解析結果と、陸側自由地盤部の1次元・非線形解析結果から得られる最大せん断応力を元にした等価加速度と地盤の等価N値から求められる簡易液状化判定とを比較検討し、FLIPの耐震評価手法の妥当性を検証した。モデル断面としては、矢板壁高13m(矢板前面水深10m)、設計震度(Kh=0.1, 0.2)、海底面以下の原地盤及び埋立土の等価N値(10,20)をパラメータとして設計し、設定した各断面に対し、最大加速度を100gal,200gal,350gal(2E波)に調整した八戸波を入力した。FLIPでは、初期応力状態を実際に近い状態を再現するように、3段階の自重解析を行った後、動的解析を実施する解析法を用いた。簡易液状化判定から得られる矢板式岸壁の被災予想とFLIPの解析結果を比較したところ、両者が適合する結果が得られた。

Key Words : sheet pile type quaywall, FEM, seismic response analysis, liquefaction

1. 目的

矢板式岸壁を対象として、有効応力解析プログラムFLIP¹⁾を用いた場合の耐震評価手法の妥当性を検証するために、FLIPによる地震応答解析結果と、陸側自由地盤の1次元・非線形解析結果から得られる最大せん断応力を元にした等価加速度と地盤の等価N値から求められる簡易液状化判定²⁾を元にした被災予想とを比較検討した。FLIPによる解析では、地震直前の応力状態を再現するために多段階自重解析法³⁾を用い、モデル断面において設計震度、海底面以下の地盤及び埋土の等価N値をパラメータとしたケーススタディを実施した。

2. 解析方法

本解析では、地震直前の応力状態を再現するため、多段階自重解析を行った³⁾。この解析は3段階からなり、第1段階では、海底面以下の地盤部分の自重解析、第2段階では、矢板本体のタイロッド取り付け点を固定した条件での矢板背後地盤を導入した自重解析、第3段階

では、矢板本体のタイロッド取り付け点に人工的に発生していた節点力を解消する解析を実施した。動的解析では、今までの過剰間隙水圧発生モデルを若干変更したプログラムを使用した。なお、本解析法の詳細は文献3)に、また被害事例解析結果は文献4)に示されている。

3. 解析対象断面

モデル断面としては、矢板壁高13m(矢板前面水深10m)と設定し、設計震度、海底面以下の原地盤及び埋立土の等価N値をパラメータとして設計した。解析対象断面の諸元を以下の①～④に、実施した解析の一覧表を表-1に示す。また、代表的な断面としてモデル番号qh2k1d1n2の断面図を図-1に示す。

①矢板壁高:H=13m(矢板前面水深10m)

②水平設計震度:Kh=0.1,0.2

③海底面以下の液状化層厚:

D1=0m(海底面以下は等価N値25の非液状化層),

D1=13m(海底面以下は等価N値10,20の液状化層)

④埋土の等価N値:N₆₅=10,20

(地下水面下のみ液状化を考慮)

表-1 解析一覧表

モデル番号	モデル			使用鋼材		
	Kh	D1/H	N ₆₅	前面矢板	控え鋼管杭	タイロッド
qh2k1d1n2	0.1	0	10	φ700t9	φ600t9	φ55
qh2k1d1n4			20			
qh2k1d3n2		1	10			
qh2k1d3n4			20			
qh2k2d1n2	0.2	0	10	φ700t12	φ700t9	φ60
qh2k2d1n4			20			
qh2k2d3n2		1	10			
qh2k2d3n4			20			

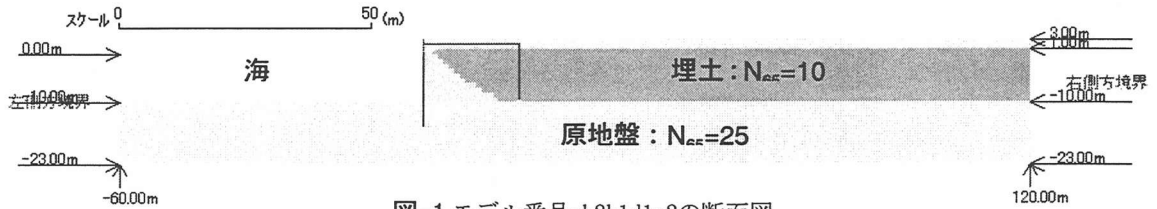


図-1 モデル番号qh2k1d1n2の断面図

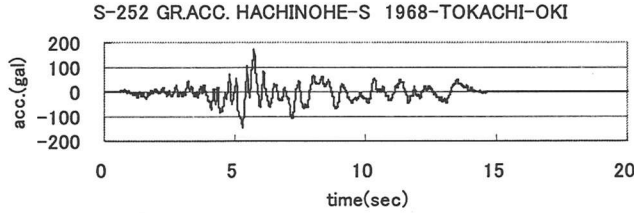


図-2 1968十勝沖地震の際の八戸港での
基盤での加速度波形(NS成分)

表-2 水平震度

埋土の 等価N値 N ₆₅	地表面最大 水平加速度			対応する 水平震度		
	入力加速度(gal)			入力加速度(gal)		
	100	200	350	100	200	350
10	104	195	272	0.11	0.20	0.22
20	99	182	273	0.10	0.19	0.22

表-3 埋土の液状化判定

埋土の 等価N値 N ₆₅	判定 位置 GL(m)	有効 上載圧 (kPa)	最大せん断応力 τ_{xy} (kPa)			等価加速度			液状化判定		
			入力加速度(gal)			入力加速度(gal)			入力加速度(gal)		
			100	200	350	100	200	350	100	200	350
10	-3.5	50	6.4	12.5	17.6	88	172	241	IV	II	II
	-7.5	89	13.2	25.5	36.4	102	197	281	IV	II	I
	-11.5	128	19.2	36.5	53.4	103	196	286	IV	II	I
20	-3.5	50	6.3	11.8	17.8	86	162	244	IV	IV	IV
	-7.5	89	12.8	24.6	37.2	99	190	287	IV	IV	III
	-11.5	128	18.7	35.9	54.7	100	192	293	IV	IV	III

※液状化判定 I:液状化する II:液状化する可能性が大きい
III:液状化しない可能性が大きい IV:液状化しない

4. 入力地震動

図-2に示す、1968年の十勝沖地震の際の八戸港での基盤での地震波(SMAC相当波, NS成分)の0秒~15秒までを取り出し、粘性境界とした解析モデルの底面境界に与えた。なお、最大加速度が100gal, 200galおよび350galとなるよう、加速度には一律に係数を乗じた。

5. 水平震度と簡易液状化判定による被災予想

水平震度及び簡易液状化判定結果を元に、被災予想を実施した。

(1) 水平震度

陸側自由地盤の1次元・非線形解析において、液状化層厚比(D1/H)が0.0の場合の地表面における最大水平加速度(α)を求め、それに応じた水平震度(Kho)を算出した。水平震度は、港湾構造物の被災例に基づき提案されている下式に従い算出した⁵⁾。

①地表面加速度が200gal以下の場合

$$Kho = \alpha / 980 \text{gal}$$

②地表面加速度が200galを超える場合

$$Kho = (1/3) \times (\alpha / 980 \text{gal})^{1/3}$$

算定結果を表-2に示す。これによると、埋土の等価N値にかかわらず、入力加速度の最大値が100galの場合は水平震度は概ね0.10、200galの場合は0.20、350galの場合は0.22である。

表-4 被災予想

設計 震度 Kh	液状化 層厚比 D1/H	埋土の 等価N値 N ₆₅	被災予想 入力加速度(gal)		
			100	200	350
0.1	0.0	10	○	×	×
		20	○	×	×
	1.0	10	○	×	×
		20	○	×	×
0.2	0.0	10	○	×	×
		20	○	○	×
	1.0	10	○	×	×
		20	○	○	×

(2) 埋土の液状化判定

陸側自由地盤の1次元・非液状化解析の結果として、埋土層の最大せん断応力が得られる。これを等価加速度に換算し、等価N値と合わせて液状化判定を実施した²⁾。表-3にD1/Hが0.0の場合の判定の過程と結果を、埋土の上部(GL-3.5m)、中部(GL-7.5m)及び下部(GL-11.5m)に分けて示した。これによれば、等価N値が10の場合は最大入力加速度が100galまで、等価N値が20の場合は最大入力加速度が350galまでが、液状化しないか、あるいはその可能性が低いと判定される。

(3) 被災予想

水平震度及び簡易液状化判定結果を元に、被災予想を以下の基準にて行った。なお、D1/Hが1.0の場合についても、D1/Hが0.0の場合の液状化判定を流用し被災予想を行った。

- : 水平震度が設計震度以下であり液状化の可能性が少なく、被災が軽微と予想されるもの
- ×: 水平震度が設計震度以上であるかまたは液状化が発生する可能性があり、被災が予想されるもの

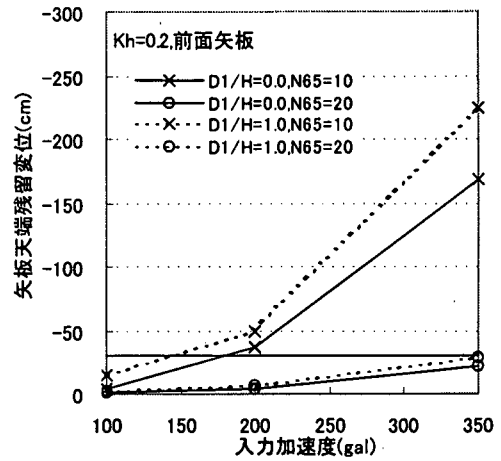
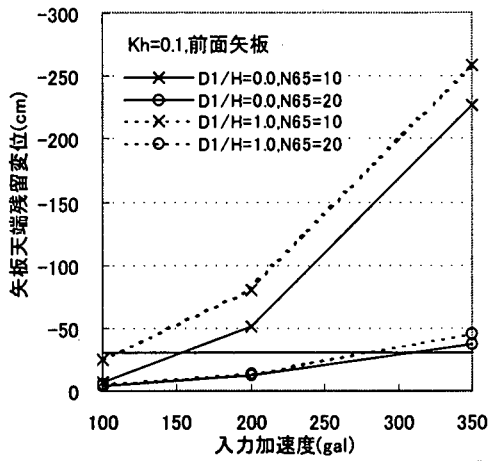


図-3 矢板天端残留変位

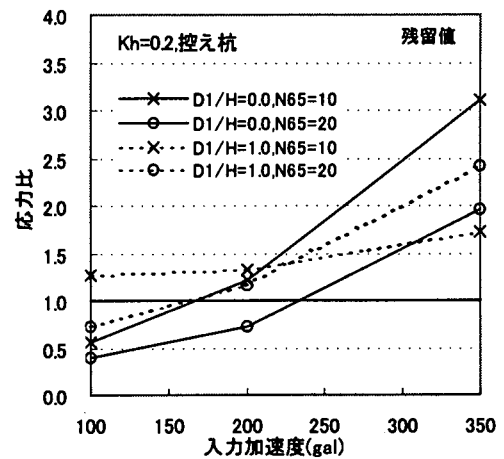
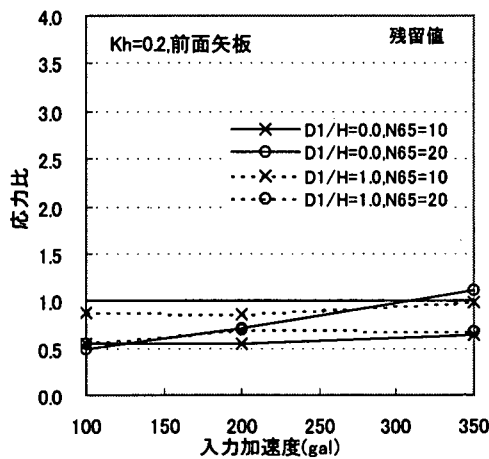
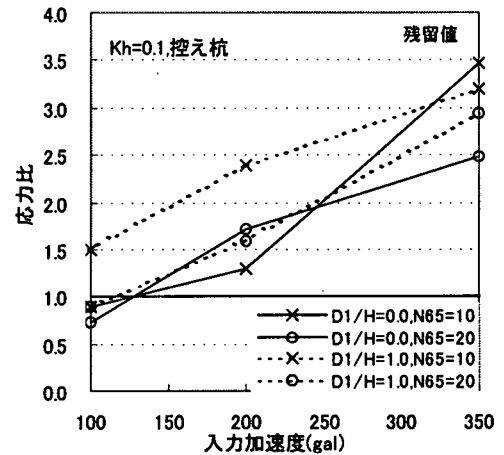
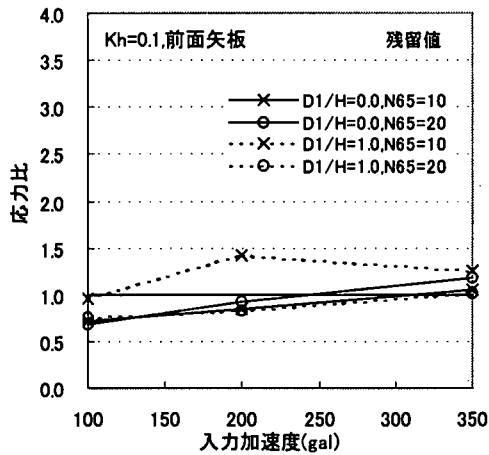


図-4 残留応力比

表-4に被災予想結果を示す。最大入力加速度が100gal以下であれば、設計震度に拘わらず被災は軽微と予想される。また最大入力加速度が200galのときは設計震度が0.2で埋土の等価N値が20であれば被災は軽微と予想されるが、その他の場合にはある程度の被災が予想される。また最大入力加速度が350galでは、どの断面でも被災が予想される。

6. 被災予想と解析結果との比較

簡易液状化判定による被災予想と、FLIPによる矢板天端残留変位及び鋼材に発生する応力の解析結果と

を比較した。

(1) 矢板天端残留変位

図-3に、各設計震度毎に矢板天端に生じた残留変位のFLIPの結果を示す。残留変位のマイナス値は、矢板が海側へはらみ出したことを示す。なお、図中に許容変位量の目安として30cmのラインを併せて示した⁵⁾。

最大入力加速度が100galのときは、全てのケースで変位量が30cmを下まわっており被災予想結果と一致する。最大入力加速度が200galの場合は、埋土の等価N値が20の場合に設計震度が0.1のときでも変形量が30cm以下と軽微であるが、10の場合は設計震度に拘わらず変位が30cm以上となり、被災予想通りの結果となった。最

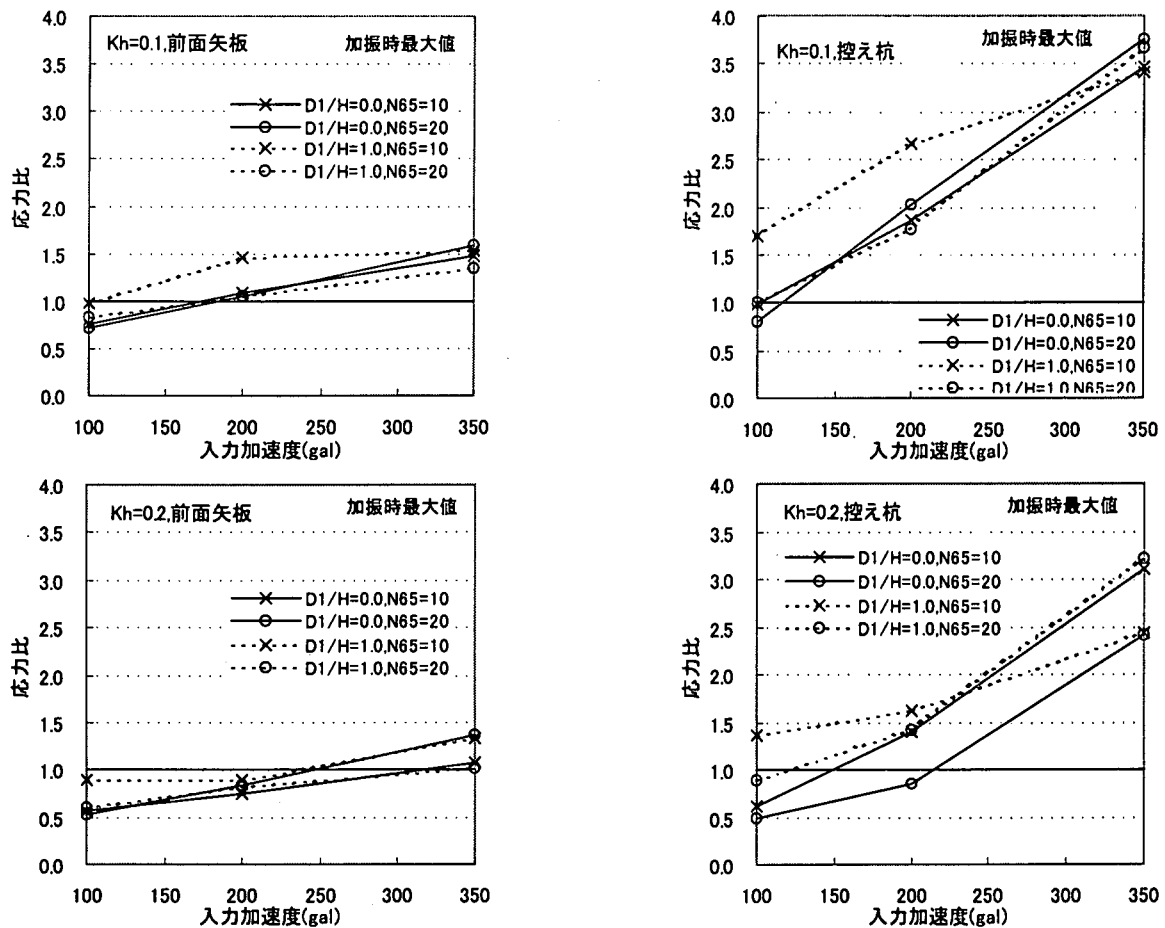


図-5 加振時最大応力比

大入力加速度が350galになると水平震度が設計震度を上回るため、残留変位が大きくなる傾向にある。

(2) 鋼材応力比

FLIPから得られた前面矢板と控え杭の、残留応力及び加振時最大応力との地震時許容応力度に対する比と、簡易液状化判定による被災予想とを比較した。図-4に残留応力を、図-5に加振時最大応力を示す。応力比が1.0以下であれば、許容応力度以下に収まっていることを示す。

a) 残留応力

図-4より、設計水平震度が0.1の場合、最大入力加速度が100galのとき埋土の等価N値が10のケースの控え杭で許容応力度が1.0を上回っているが、値としては1.5以下であり、被害は微小範囲内に留まっていることが予想される。最大入力加速度が200gal以上になると前面矢板及び控え杭ともに許容応力度を上回るようになる。

設計水平震度が0.2の場合は、水平震度が設計震度以下となる最大入力加速度200gal以下で、応力比は1.0以下もしくは許容応力度を上回っても1.5以下であり、被災程度は軽微と予想される。最大入力加速度が350galになると特に控え杭で多大な応力が発生してくる。

全体として、簡易被災予想の傾向と一致している。

b) 加振時最大応力

図-5に示した加振時最大応力に関しても、ほぼ残留応力と同様の傾向にあり、簡易液状化判定による被災予想の同様な傾向が得られた。

7. まとめ

以上より、矢板式岸壁において、簡易液状化判定から得られる被災予想と、FLIPの解析結果が適合する結果が得られた。よって、矢板式岸壁に対する今回のFLIPによる耐震性評価手法はほぼ妥当なものと考えられる。

謝辞: なお、本論文は、FLIPの改良と高度利用法の研究を推進する目的で設立されたFLIP研究会(事務局: (財)沿岸開発技術研究センター他)の活動の一環として実施された研究成果を取りまとめたものであり、本解析に用いたデータは運輸省(現国土交通省)港湾局海岸・防災課からご提供頂いた。

参考文献

- 1) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T. : Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Soils and Foundations, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992
- 2) 財団法人沿岸開発技術研究センター: 埋立地の液状化対策ハンドブック(改訂版), 1997
- 3) 井合他: 地盤の初期応力条件が矢板式岸壁の地震時挙動に与える影響の解析的検討, 第26回地震工学研究発表会, 2001
- 4) 岡他: 鋼矢板岸壁の被災事例による有効応力解析における初期応力状態のモデル化手法の検証, 第26回地震工学研究発表会, 2001
- 5) 社団法人日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 1999