

被災岸壁の静的弾塑性解析による 残存耐力の評価

川端規之*¹・原田典佳*²・寺内潔*³・山本修司*⁴・小泉哲也*⁵

^{1, 2}正会員 新日本製鐵株式会社 建材開発技術部 (〒100-71 東京都千代田区大手町 2-6-3)

³正会員 運輸省 港湾局 技術課

^{4, 5}正会員 運輸省 港湾技術研究所 計画設計基準部

港湾の岸壁は社会基盤施設の一つとして重要な機能を担っており、地震被災直後においても、緊急物資輸送、避難所、復旧工事の拠点として重要な役割を果たしている。このような施設の暫定使用あるいは余震などによる外力に対しては、岸壁の残存耐力を評価することが必要となる。本論文では、現地にて、残存耐力を速やかに評価する手法の一つとして、静的弾塑性解析による手法について述べる。

対象とする岸壁構造は、控え式の鋼矢板壁構造であり、地震荷重作用時(載荷ステップ)、地震終了時(除荷ステップ)、暫定使用時あるいは余震発生時(再載荷ステップ)の3段階の荷重ステップを考慮し、鋼矢板の変形モード及び最大変位量を指標とする残存耐力の評価を試みた。

Key Words: Harbor, Quay, Steel Sheet Pile, Earthquake Damage, Residual Resistant, Nonlinear Analysis, Temporary use, After Shock

1. はじめに

大規模地震の発生により、港湾の施設は甚大な被害を被ることがある^{1), 2), 3), 4)}。港湾の岸壁は社会経済活動において基盤的機能を担っているため、被災した岸壁の早期復旧は重要である。

また、被災直後にあつては、岸壁は緊急物資輸送施設、避難所、復旧工事の拠点などとして重要な役割を果たしている。このような緊急時における岸壁の暫定使用に当たっては、使用条件を満たすだけの構造および地盤の安定性・健全性の評価、すなわち、岸壁の「残存耐力」の評価を速やかに行う必要がある。また、被災により変形した岸壁は、余震により、さらに変形が増大する可能性があるため、暫定使用時の物資・群衆等の上載荷重の他、余震時作用外力に対する岸壁の残存耐力の評価も重要である。

ここでは、図-1に示すような控え式鋼矢板岸壁を対象として、被災直後に、現地により速やかに残存耐力評価を適切に行うための手法の一つとして、構造および地盤の静的弾塑性解析による手法について検討する。

2. 控え式鋼矢板岸壁の静的弾塑性解析

被災直後の鋼矢板岸壁の被災状況を把握するための指標として、比較的早期にかつ定量的に得られるものでは、鋼矢板の変形量が挙げられる。解析では、鋼矢板の変形モードと最大変位量を被災状況の指標として

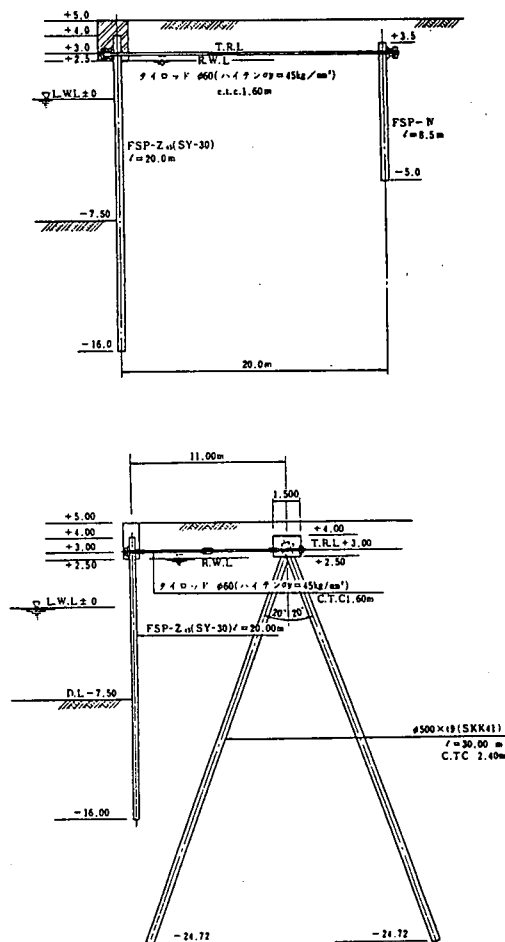


図-1 控え式鋼矢板岸壁の構造例

計算する。

控え式鋼矢板岸壁の変形モードを、過去の被災事例①,②,③から、図-2に示す「くの字」,「前傾くの字」,「前傾」の3種に分類する。

鋼矢板の変形モードおよび最大変位量は、地震時における控え工の安定性や、前面鋼矢板と控え工の剛性の比、地震時土圧、背面土の液状化等が影響するものと考えられる。解析では、タイロッド取付け点での支持条件を変化させ、くの字モードの場合は固定、前傾くの字モードの場合はバネ支承の支持条件とし、前傾モードの場合は頭部自由とする。

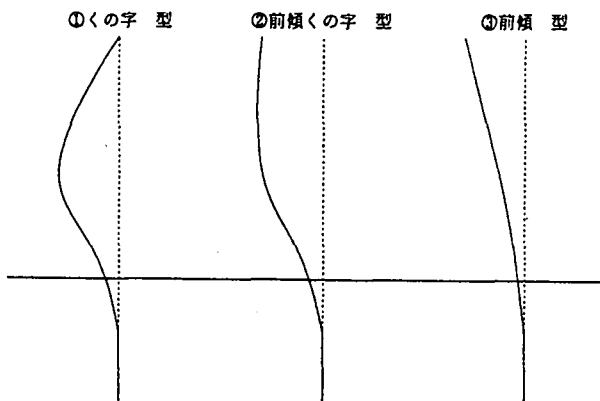


図-2 控え式鋼矢板岸壁の被災変形モード

また、地震発生から被災後までの荷重履歴を考慮するために、図-3に示すように地震時（載荷ステップ）、地震終了時（除荷ステップ）、暫定使用時あるいは余震発生時（再載荷ステップ）の3段階の荷重ステップを考慮する。載荷ステップでは地震時土圧を鋼矢板の背面に作用させ、除荷ステップでは地震後に土圧が地震時土圧から減少することを考慮し、その減少土圧分を鋼矢板の前面から作用させる。再載荷ステップでは被災後の暫定使用などによる土圧の増分を鋼矢板の背面に作用させる。除荷ステップでの解析結果が被災後の鋼矢板の残留変形を表すため、被災調査で得られる最大変形量に見合うまで載荷ステップにおける作用荷重を増加させ、繰り返し計算を行う。

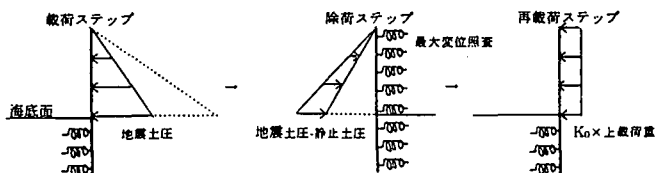


図-3 解析で考慮する荷重ステップ

鋼矢板に大きな変形が生じた場合、鋼矢板の応力状態は、塑性領域に至る可能性があるため、解析では鋼矢板の材料非線形性を考慮した弾塑性モデルとする。

また、鋼矢板に大きな変形が生じるのに伴い、地盤も大きな変形が生じるので、地盤に関しても弾塑性地盤反力モデルとする。さらに、鋼矢板及び地盤の弾塑性モデルは図-4及び図-5に示すように各荷重ステップの荷重履歴を考慮できるものとする。

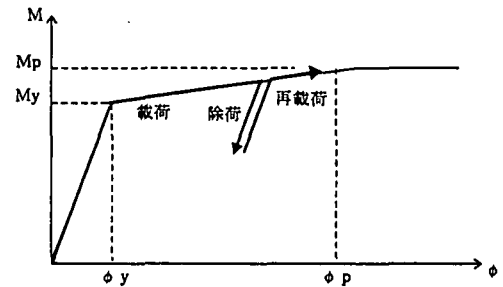
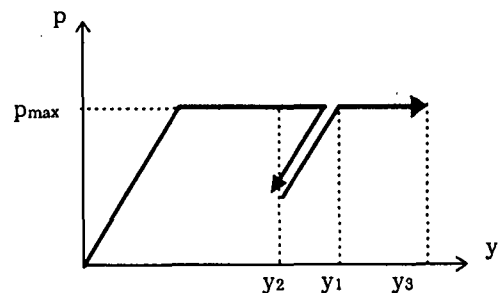


図-4 鋼矢板の弾塑性モデル



y_1, y_2, y_3 : 載荷, 除荷, 再載荷ステップでの変位

図-5 地盤反力の弾塑性モデル

3. 解析例

解析に用いる断面を図-6に示す。

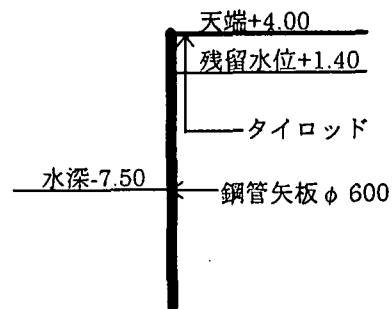


図-6 解析断面

表-1に示すように解析ケースは被災後の残留変形としての鋼矢板の最大変位量を30cmとし、変形モードはくの字,前傾くの字,前傾とする。

表-1 解析ケース

	最大変位量	変形モード
1	30cm	くの字
2	30cm	前傾くの字
3	30cm	前傾

タイロッド取付け点のバネ係数 K は、タイロッドの軸方向バネと控え工の変形を考慮して設定する。

タイロッドのバネ係数 K_1 は式(1)による。

$$K_1 = EA/L \quad (1)$$

E : タイロッドの弾性係数

A : タイロッドの断面積

L : タイロッド長

控え工の変形から求められるバネ係数 K_2 は式(2)による。

$$K_2 = P/\delta \quad (2)$$

P : タイロッド軸力

δ : タイロッド取付け点での控え工変位

式(1)、式(2)より、タイロッド取付け点のバネ係数 K は式(3)により求める。

$$K = K_1 * K_2 / (K_1 + K_2) \quad (3)$$

K_1 、 K_2 を求めるときに必要な諸量は設計図書などの数値を参考にすることができる。

解析例では、変形モードが前傾くの字の場合の載荷ステップで考慮するタイロッド取付け点のバネ係数はタイロッドが健全な状態の0.5倍とし、変形モードが前傾の場合の再載荷ステップで考慮するタイロッド取付け点のバネ係数は健全な状態のものをを用いている。

図-3より、載荷ステップにおける作用荷重は地表面で0、海底面で最大となる三角形分布とし、除荷ステップにおける作用荷重は載荷ステップと静止土圧の差分とする。再載荷ステップにおける作用荷重は上載荷重 1.0 tf/m^2 による増分とし、荷重強度は上載荷重に静止土圧係数をかけたものとする。

鋼管矢板の物性値を表-2に示す。ここで鋼管矢板の降伏モーメント M_y 、および全塑性モーメント M_p は式(4)、式(5)によって求める。

$$M_y = \sigma_y Z \quad (4)$$

$$M_p = 4/\pi M_y \quad (5)$$

表-2 鋼管矢板の物性

降伏応力	2,400kgf/cm ²
断面二次モーメント	110,000cm ⁴ /m
断面係数	3,660cm ³ /m
降伏モーメント	87.84tf*m/m
全塑性モーメント	111.84tf*m/m

ここで、鋼管矢板の M - ϕ 関係について、 M_p に対する ϕ_p はより式(6)によって求める⁵⁾。

$$\phi_p = 8 \phi_y \quad (6)$$

地盤モデルは、初期勾配に用いる地盤反力係数 k_h は式(7)により求め、地盤反力の最大値 $P_{\max}$ は地震時受働土圧とする。

$$k_h = 0.15N \quad (7)$$

ここで、 N 値は土質調査によるものである。

解析結果を、変形モードごとに図7、図8、図9に示す。

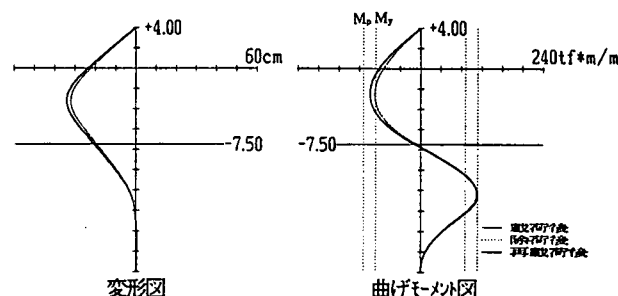


図-7 くの変形モードの解析結果

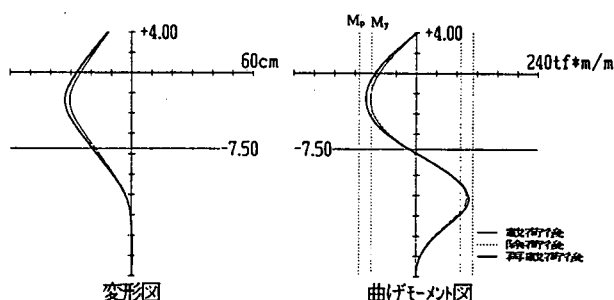


図-8 前傾くの字モードの解析結果

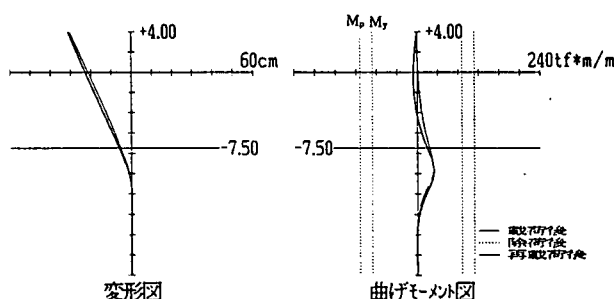


図-9 前傾モードの解析結果

いずれのケースにおいても除荷ステップでは背面土砂が抵抗側に作用するため、変形及び曲げモーメントの減少はあまり見られない。また、再載荷ステップでの変形増加は数 cm 程度である。

鋼管矢板の塑性化は、変形モードがくの字及び前傾くの字の場合は海底面より上と地中部の2ヶ所で発生しており、前傾の場合は塑性化が発生していない。

また、くの字、前傾くの字の再載荷ステップにおいて、海底面より上での曲げモーメントは、降伏モーメント以上の領域が広がり、鋼管矢板の塑性化が進展したことがわかる。

載荷ステップで作用させた三角形荷重の鉛直荷重に対する比を表-3に示す。

変形モードがくの字、前傾くの字の場合、この比は、

$\phi=30\sim35$ 度で設計震度 $k=0.15\sim0.2$ (水中における見かけの震度 $0.3\sim0.4$) 程度のクーロンの主働土圧係数に相当する。変形モードが前傾の場合は地震時において控え工が安定性を失っている状態を表現しているため、30cm の残留変形量に対して想定される土圧は、計算上小さいものとなる。

表-3 残留変形に対する想定荷重

変形モード	最大変位量	鉛直荷重に対する比
くの字	30cm	0.659
前傾くの字	30cm	0.643
前傾	30cm	0.066

4. 残存耐力の評価

解析例に示した各ケースについて、残留変形としての鋼矢板の最大変位量を、10cm, 30cm, 60cm とした場合の、除荷後及び再載荷後の最大変形量、最大曲げモーメントを図-10、図-11、図-12 に示す。

くの字モードの場合、残留変形が 10cm のときの最大曲げモーメントは降伏モーメントを越え、弾塑性領域にある。残留変形が 30、60cm のときは全塑性モーメントに達している。

前傾くの字モードの場合、残留変形が 10cm のときの

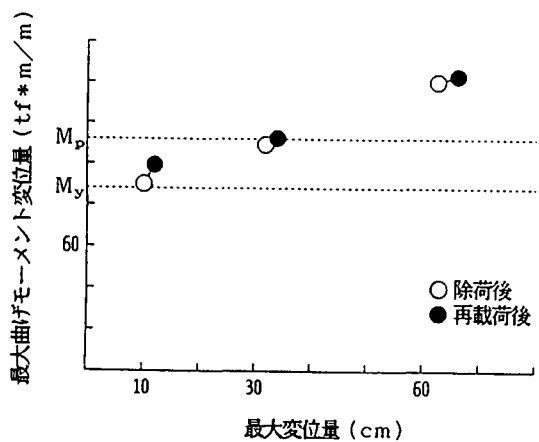


図-10 最大曲げモーメントの推移 (くの字)

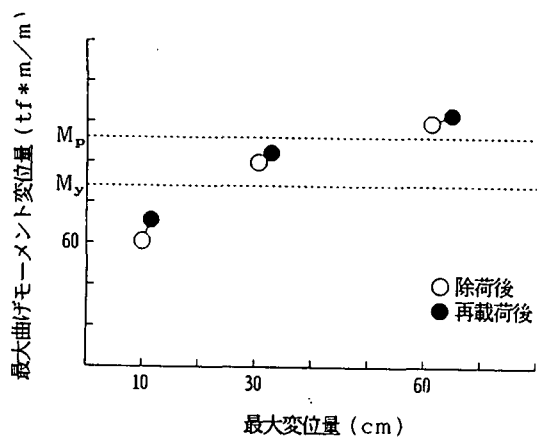


図-11 最大曲げモーメントの推移 (前傾くの字)

最大曲げモーメントは、再載荷後においても降伏モーメント以下であり、残存耐力は保持されている。残留変形が 60cm のときは全塑性モーメントに達し、30cm のときは両者の間で弾塑性領域内にある。

前傾モードの場合、残留変形が 60cm の場合でも、最大曲げモーメントは降伏モーメント以下である。

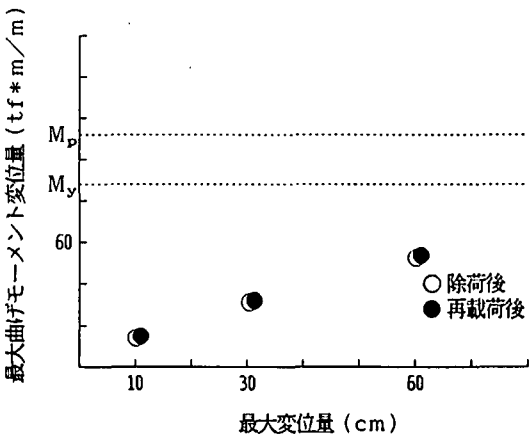


図-12 最大曲げモーメントの推移 (前傾)

5. おわりに

被災直後においては、岸壁の被害状況を十分に把握し、岸壁の残存耐力を把握することで、暫定使用の可能性や、補強の必要性、余震に対する安定性等の判断が必要となる。

今回の3段階の荷重ステップを考慮した静的弾塑性解析により、被災した控え式鋼矢板岸壁に上載荷重が作用した場合の挙動を解析し、残存耐力の評価に活用できることがわかった。

鋼矢板断面、海底地盤の土質条件などを变化させた場合の鋼矢板の挙動および残存耐力の評価への影響の把握、地震時土圧等を適切に評価した弾塑性計算の高度化、動的非線形解析による本解析手法の検証、実被災岸壁による事例解析、は今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 土田他：1983 年日本海中部地震港湾被害報告，港湾技術研究所資料 No. 511，1985
- 2) 上田他：1993 年釧路沖地震港湾被害報告，港湾技術研究所資料 No. 766，1993
- 3) 稲富他：1993 年北海道南西沖地震港湾施設被害報告，港湾技術研究所資料 No. 791，1993
- 4) 稲富他：1995 年兵庫県南部地震による港湾施設等被害報告，港湾技術研究所資料 No. 857，1997
- 5) 社団法人日本建築学会：鋼構造塑性設計指針，1975
- 6) 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，1989
- 7) W. F. Chen, D. J. Han : Tubular members in offshore structures, Pitman Advanced Publishing Program