

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

岡 由剛¹・三輪 滋²・石倉克真³・平岡慎司⁴・松田英一⁵・吉田 晃⁶

¹正会員 川崎製鉄株式会社 建材センター (〒100-0011 東京都千代田区内幸町2丁目2番3号)

²正会員 飛島建設株式会社 技術研究所 (〒270-0222 千葉県東葛飾郡関宿町木間ヶ瀬5472)

³正会員 東亜建設工業株式会社 土木本部設計部 (〒102-8451 東京都千代田区四番町5)

⁴正会員 大成建設株式会社 土木本部設計第二部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

⁵正会員 株式会社海洋河川技術研究所 (〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-18-5)

⁶ライト工業株式会社 開発本部 (〒102-8236 東京都千代田区九段北4-2-35)

1983年日本海中部地震の際に液状化により大きな被害を受けた秋田港大浜地区-10m・2号岸壁と、比較的被災の少なかった同1号岸壁を対象に有効応力解析プログラムFLIPによる被災変形量解析を行なった。ここで実施したモデル化手法は、地盤各部の初期応力状態がより実際に近い状態を再現するように、岸壁の構築過程を踏まえ自重解析を3段階に分けて行った後で動的解析を実施する解析モデルを用いた。解析の結果、自重解析を1段階で行う従来の解析モデルと比較して、両岸壁における被災変形量は大幅に減少し、1号岸壁では控え杭の発生曲げモーメントも低下した。また1号岸壁と2号岸壁では変形量に有意な差が見られ、実際の被災事例に近い結果が得られた。

Key Words : 有効応力解析, 被災変形量解析, 初期応力状態, 鋼矢板岸壁, モデル化手法

1. はじめに

1983年日本海中部地震の際に液状化により大きな被害を受けた秋田港大浜地区-10m・2号岸壁と、比較的被災の少なかった同1号岸壁を対象に、有効応力解析プログラムFLIPによる被災変形量解析を行ない、地盤各部の初期応力状態を改善した矢板式岸壁のモデル化手法を検証した。ここで実施したモデル化手法は、地盤各部の初期応力状態がより実際に近い状態を再現するように、岸壁の構築過程を踏まえ自重解析を3段階に分けて行った後で動的解析を実施する解析モデル(4段階法)を用いた。

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る。

2. 解析方法

解析の対象となる秋田港大浜地区-10m・1号岸壁及び2号岸壁は、新条川の河口を挟んで隣接してお

り、両者とも構造形式は控え式鋼矢板岸壁である。控え工の構造形式は1号岸壁が鋼管杭の直杭式、2号岸壁は2列の鋼管杭の頭部をコンクリートで剛結した構造である。図-1に両岸壁の断面図を示す。1983年日本海中部地震の際、2号岸壁では噴砂が観察され、U形鋼矢板が海側に大きく湾曲し、水面下6m付近の広範囲にわたりクラックあるいは折損が発生した。鋼矢板頭部での水平変位は、1.1~1.8mに達した。一方、1号岸壁では噴砂は確認されず、鋼矢板頭部での水平変位も5cmと小さく、被害が生じなかった。1号岸壁の背後地盤は原地盤の砂層で構成されるのに対し、2号岸壁の背後地盤は海砂を陸上まき出しによって造成されており、両者の液状化強度に大きな差があったことが確認されている¹⁾。

解析に用いた入力地震動は、港湾地域強震観測の一環として秋田港に設置された強震計で記録された波形を $V_s=390\text{m/s}$ の工学的基盤の入射波(2E)に引き戻し、それを大浜1号岸壁、大浜2号岸壁のそれぞれの法線直角方向に方位変換し、サイド解析断面の2E波を入力波とし、粘性境界とした解析モデルの底面境界に与えた。なお解析対象時間は地震動の主要部分60秒間である。

土の解析モデルのパラメータは、井合等が実施した同岸壁の被災解析¹⁾で用いた値を使用した。

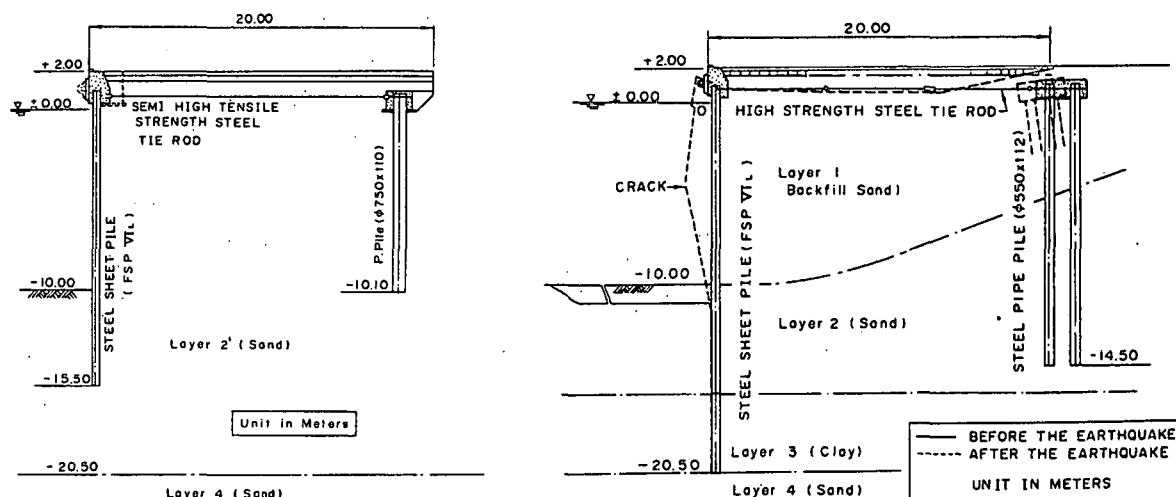


図-1 大浜1号岸壁（左側）及び大浜2号岸壁（右側）の断面図

有効応力解析では地震応答解析に先立って、地震前の地盤・構造物の状態を再現する必要がある、このため重力を考慮した静的解析（自重解析）を行う。従来は、岸壁完成後の状態をモデル化し重力に相当する荷重をかけていた。このとき鋼矢板や控え工と周辺地盤との摩擦を考慮したモデルとすると、重力により周辺地盤が沈下する際、鋼矢板や控え工に土要素がぶら下がる形となり、土要素に引張り力が生じるという問題があった。そこでまず原地盤のみで自重解析を行い、次に岸壁全体が海側にせり出さないよう鋼矢板のタイロッド取り付け点の水平方向変位を拘束した状態で地盤の自重解析を行う。このとき原地盤は既に沈下済みのため、鋼矢板の受働側の地盤と鋼矢板の摩擦を考慮しても前記のような問題は生じず、実際に近い応力状態を再現できると考えられる。最後に控え杭の受働側の地盤と控え杭の間の摩擦を考慮した状態で、鋼矢板のタイロッド取り付け点の拘束を解除する。このとき控え杭背後地盤が控え杭の変形に伴い引っ張られるのを防ぐため、控え杭と控え杭背後地盤を切り離す。以上のように初期自重解析を3段階に分けて実施することにより、鋼矢板及び控え杭とそれぞれの周辺地盤との摩擦を考慮し、かつ周辺地盤の応力状態がより現実に近い状態を再現することを狙った。

3. 解析結果

(1) 自重解析結果

図-2に4段階法と従来の方法による自重解析結果から、大浜1号岸壁の前面矢板及び控え杭の変形図および曲げモーメント分布図を示す。4段階法では、地盤との摩擦の影響を考慮したことにより控え杭の変形が小さくなっている。タイロッド張力はほとんど変わらないため、受働側地盤の反力が大きくなった影響を除き、前面矢板の曲げモーメントにほとんど違いは無いが、タイロッド取付点での変位量と载荷の履歴が違うことから変形モードは大きく異なっている。控え杭の曲げモーメント分布からは、従来

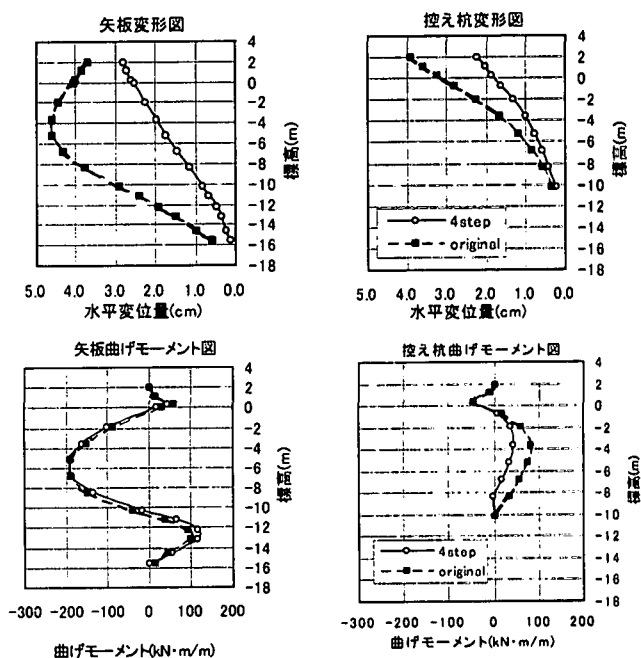


図-2 大浜1号岸壁の矢板及び控え杭の変位及び曲げモーメント分布（自重解析終了時）

の方法の計算結果では控え杭は半無限長の杭として扱うには根入れが不足しており、4段階法の方が設計時に期待した挙動を示していると言える。なお大浜2号岸壁でも岸壁の挙動は同様の傾向を示した。

(2) 地震応答と変形

従来の方法による大浜1号岸壁の地震応答解析では、控え杭が大きく海側に変形し、前面矢板も全体が海側に倒れて、矢板頭部の水平変位が2mを超える値となった。これに対し4段階法では控え杭の頭部変位が小さくなり、前面矢板も海底面付近がはらみだす変形モードになり、矢板頭部の水平変位は残留値で10.1cmと被災事例に近い値が得られた。一方大浜2号岸壁では、前面矢板の頭部水平変位の残留値が従来の方法で134cmに対し4段階法で99.5cmと小さくなっているが、いずれの方法でも控え杭は大き

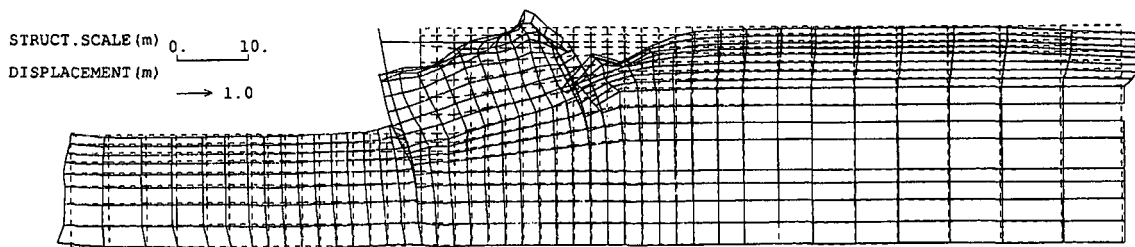


図-3 4段階法による大浜2号岸壁の地震応答解析終了時の変形図（初期自重解析終了時を基準とした変位量）

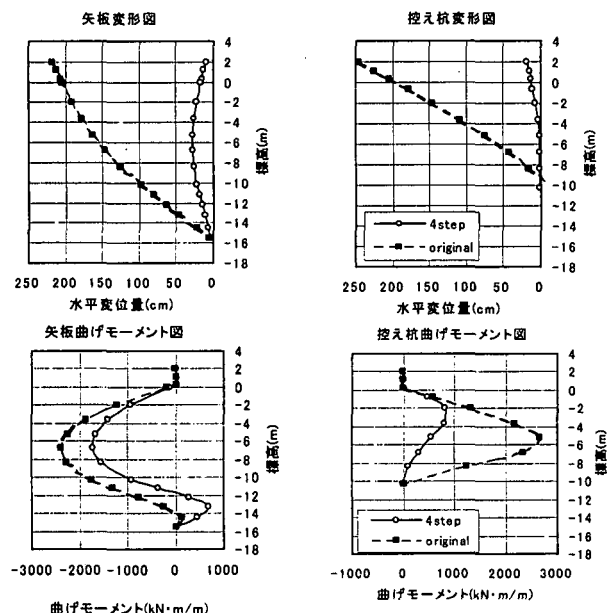


図-4 大浜1号岸壁の矢板及び控え杭の変位及び曲げモーメント分布（地震応答解析終了時）

く変形し前面矢板が全体に海側に倒れる変形モードとなっている。図-3に4段階法による大浜2号岸壁の地震応答解析終了時の変形図を示す。

(3) 曲げモーメント分布

図-4に4段階法と従来の方法による地震応答解析結果から、大浜1号岸壁の前面矢板及び控え杭の変形図および曲げモーメント分布図を示す。曲げモーメント分布から、従来の方法による計算結果では控え杭の周辺地盤の抵抗がほとんど発揮されず、全体が大きく変形していることがわかる。一方4段階法による結果では、控え杭の変形が抑えられ、前面矢板受働側地盤の反力が大幅に増加していることが表れている。

(4) 液状化程度

図-5に大浜1号岸壁の4段階法と従来の方法による地震応答解析終了時の過剰間隙水圧比分布図を示す。4段階法では自重解析時に控え杭と控え杭背後地盤を切り離したことにより、控え杭背後地盤で不自然に過剰間隙水圧が上昇する現象が収まっている。また

前面矢板及び控え杭の受働側地盤において、矢板及び杭近傍の要素の過剰間隙水圧の上昇が小さくなっている。さらに前面矢板背後の液状化しやすい領域の範囲が明らかに狭くなっている。これは初期自重解析時に従来の方法と比べて岸壁全体の変形量が小さくなっただけでなく、前面矢板の変形モードが海底面付近がはみ出す形状から頭部が倒れる形状になったのに伴い、前面矢板背後の主働崩壊領域が上方に狭くなったことと関連していると考えられる。一方大浜2号岸壁は、今回用いた入力地震動では矢板背後の埋土部分と海底面付近の地盤が完全に液状化するため、従来の方法と4段階法で明確な違いは表れなかった。

図-6に1号岸壁の前面矢板および控え杭の受働側地盤の有効応力経路図、せん断応力～せん断歪関係、軸差応力～軸差歪関係を示す。地震応答解析開始時、自重解析時の矢板及び控え杭の変形に伴いいずれも有効応力経路は破壊線近傍から開始し、破壊線に沿って動いている。ただし従来の方法に比べ4段階法で計算した場合の方が開始時の平均有効応力が大きい傾向にある。せん断応力～せん断歪関係、軸差応力～軸差歪関係からは、従来の方法では地震応答解析の初期段階から剛性が低下しており、変形に対してほとんど抵抗していないことがわかる。それに対して4段階法では、解析終了時まで抵抗していることが読み取れ、改善効果が表れている。

4. 結論

地盤各部の初期応力状態がより実際に近い状態を再現するように、岸壁の構築過程を踏まえ自重解析を3段階に分けて行った後で動的解析を実施する解析モデル（4段階法）を用いることにより、自重解析時の岸壁の変形が抑制され、前面矢板及び控え杭周辺地盤の初期応力状態が改善される。その結果、地震応答解析時に構造物周辺で不自然に過剰間隙水圧が上昇する現象が抑制され、大浜1号岸壁では被災事例を説明し得る解析結果が得られた。一方、大浜2号岸壁では4段階法を用いても実際と同様に大きな変形が発生する結果が得られ、解析モデルの妥当性が確認された。

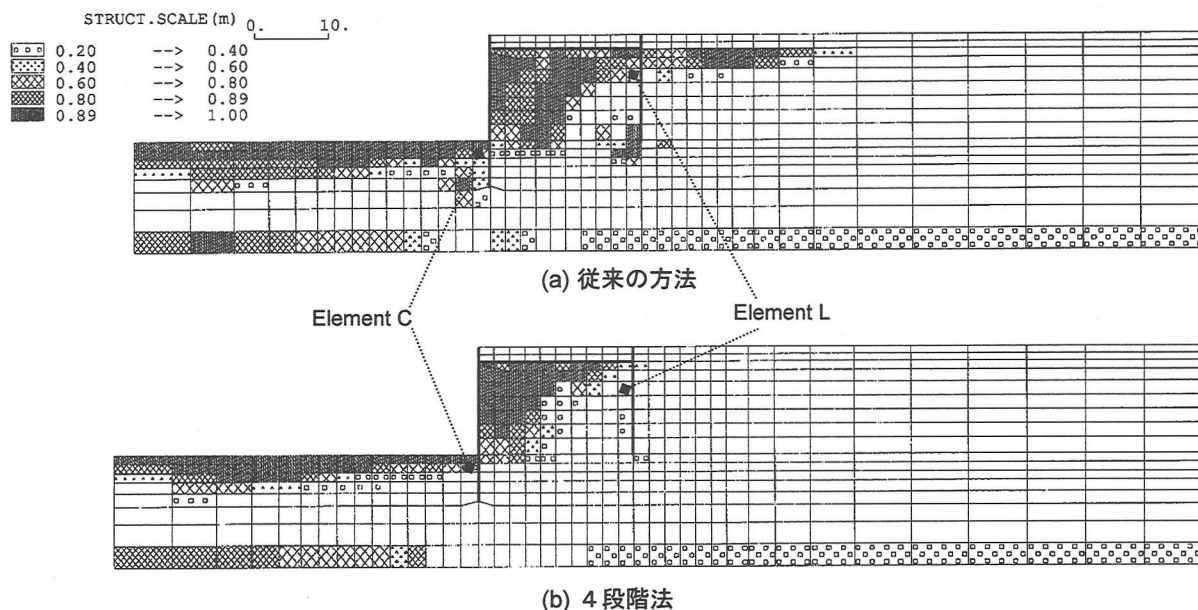


図-5 大浜1号岸壁の地震応答解析終了時の過剰間隙水圧比分布 (a)従来の方法による結果 (b)4段階法による結果

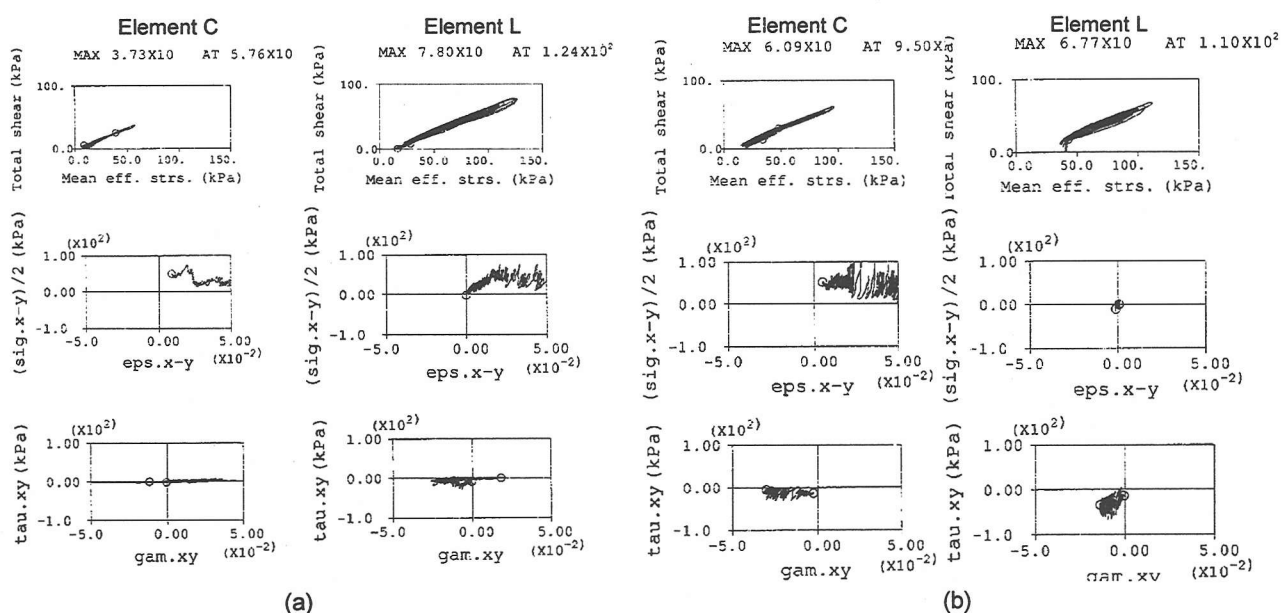


図-6 大浜1号岸壁の前面矢板及び控え杭受働側地盤の有効応力経路図(上段), 軸差応力~軸差歪関係(中段), せん断応力~せん断ひずみ関係(下段), (a)従来の方法による計算結果, (b)4段階法による計算結果

謝辞：本研究における秋田港大浜1号岸壁及び2号岸壁に関する資料は国土交通省東北地方整備局仙台港湾空港技術調査事務所より提供して頂いた。ここに関係者の方々に謝意を表します。

2) 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

参考文献

1) Iai, S. and Kameoka, T.: Finite element analysis of earthquake induced damage to anchored sheet pile quay walls, Soils and Foundations, Vol.33, No.1, pp.71-91, 1993