

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

井合 進¹・龍田昌毅²・小堤 治³・溜 幸生⁴・山本裕司⁵・森 浩章⁶

¹正会員 工博 港湾空港技術研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 新日本製鐵(株) (〒100-8071 東京都千代田区大手町2-6-3)

³正会員 (株)日本科学技術研修所 (〒151-0051 東京都渋谷区千駄ヶ谷5-10-9)

⁴正会員 工修 東電設計(株) (〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3)

⁵工修 基礎地盤コンサルタンツ(株) (〒102-8220 東京都千代田区九段北1-11-5)

⁶正会員 工修 (財)沿岸開発技術研究センター (〒102-0092 東京都千代田区隼町3-16)

矢板式岸壁の地震直前の応力状態(初期応力状態)が、その地震時挙動に与える影響について、有効応力解析プログラムFLIPを用いて検討した。初期応力状態の解析は、矢板式岸壁の施工過程を模擬することを念頭に、第1段階は海底面以下の地盤部分のみ、第2段階は矢板本体のタイロッド取り付け点を固定した条件で矢板背後地盤を導入、第3段階(自重解析最終段階)は矢板本体のタイロッド取り付け点に人為的に発生していた節点力の解消、の3段階で解析した。このような多段階自重解析による初期応力状態の基に矢板式岸壁の地震時挙動を解析したところ、施工過程を無視した単純1段階自重解析による初期応力状態に基づくものよりも、矢板式岸壁の地震残留変位、発生応力とも著しく小さい結果が得られた。

Key Words : Deformation, Effective stress analysis, Initial stress, Liquefaction, Sheet pile walls

1. はじめに

矢板式岸壁の地震時挙動には、その構造断面、入力地震動特性、地盤条件が著しい影響を与えることが知られている。特に、液状化の発生の有無は、その被災程度に著しい影響を与える。しかし、矢板式岸壁の地震直前の地盤応力状態(初期応力状態)が、その地震時挙動に与える影響については、かならずしも明らかにされていない。本研究では、この点を明らかにするため、有効応力解析プログラムFLIP¹⁾を用いて、解析的な検討を行った。なお、既往の関連研究に文献²⁾がある。

2. 多段階自重解析

解析には図-1に示す水深10m、設計震度0.1の矢板式岸壁断面を用いた。地盤条件としては、等価N値

25の原地盤上に等価N値10の埋土を用いて施工されているものとした。ここに、等価N値とは地盤のN値を有効上載圧力65kPaのものに換算した値であり、わが国の港湾施設の設計における液状化の予測・判定に広く用いられているものである³⁾。

前面矢板等の構造諸元は、以下のとおりである。

- ・ 前面矢板：鋼管矢板φ700t9、下端標高-15.0m
- ・ 控え工：鋼管杭φ600t9、下端標高-9.5m(前面矢板より19.0m背後に設置)
- ・ タイロッド：φ55

解析プログラムFLIPで使用する地盤パラメータは、等価N値をもとに、簡易法⁴⁾により設定した。

地震直前の地盤・構造物系の応力状態(初期応力状態)を再現するため、本研究では、矢板式岸壁の施工過程を模擬することを念頭に、以下のような多段階自重解析を行った。

(1) 第1段階(図-2(a)参照)

まず、岸壁建設前の原地盤の応力状態を模擬す

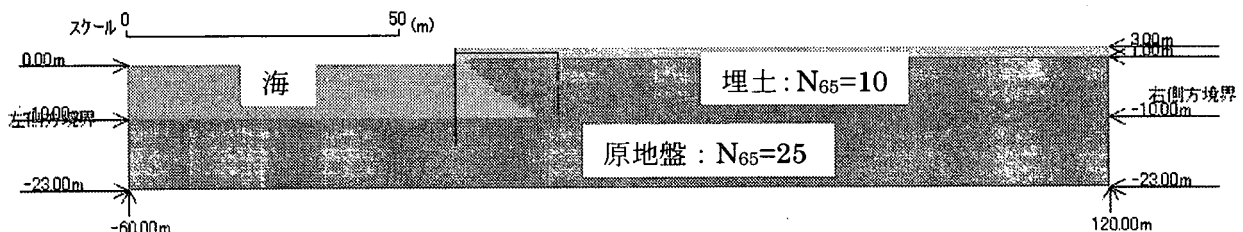


図-1 解析対象とした矢板式岸壁の構造断面

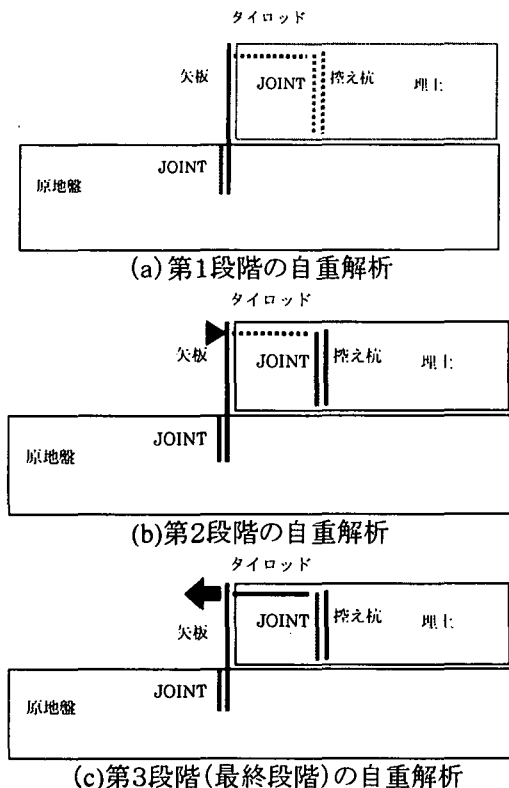


図-2 矢板式岸壁の多段階自重解析の各段階で考慮する主な解析要素の概念図

ることを念頭に、海底面以深の地盤および矢板壁のみを解析対象として自重解析を行った。なお、矢板壁の鋼材の自重はこの解析段階を含め、以降の解析段階でも無視した。

(2) 第2段階 (図-2(b)参照)

矢板式岸壁の建設では、その施工段階で、控え工周辺に土盛りして控え工の安定を確保しつつ

前面矢板への裏埋めを行う。これを簡易的に解析するため、自重解析の第2段階では、矢板のタイロッド取付け点を水平方向に固定し、矢板背後のすべての埋土および控え杭を加えて自重解析を行った。ただし、この解析段階では、控え杭の剛性はゼロとし、控え杭周囲の土の変形には影響を与えないようにした。

(3) 第3段階 (図-2(c)参照)

自重解析の最終段階である第3段階では、タイロッドを加え、控え杭の剛性も解析で考慮することとし、矢板のタイロッド取付け点に第2段階で生じた人為的な反力が解消されるまで逆向きの節点力を加えて解析した。矢板式岸壁の建設では、控え工背後の地盤を最後に埋立てするが、これを簡易的に解析するため、自重解析の第3段階でタイロッド取付け点の節点力を解消する解析では、控え杭とその背後地盤を切り離し、控え矢板背後の主働側地盤が海側に人為的に変形するのを防いだ。この解析により、控え杭と主働側埋土には、大きさが等しく向きが反対の水平方向外力が自動的に作用し、前段階で解析した埋土の K_0 がほぼ維持され、控え杭にも前段階で得られた土圧が作用することになる。結果的に、矢板式岸壁の施工において、控え工背後の土を最後に埋立てて施工した地盤の応力状態が模擬されるものと考えた。

以上の解析段階を通じて、それぞれ、矢板および控え杭受働側の鋼材と土の間の摩擦は、ジョイント要素 (摩擦角 15 度) を用いて解析し、それぞれ受働側土要素に作用すると思われる土圧を再現することとした。

このような多段階自重解析を実施した結果、各段階での矢板式岸壁の変位は、図-3 に示すとおり

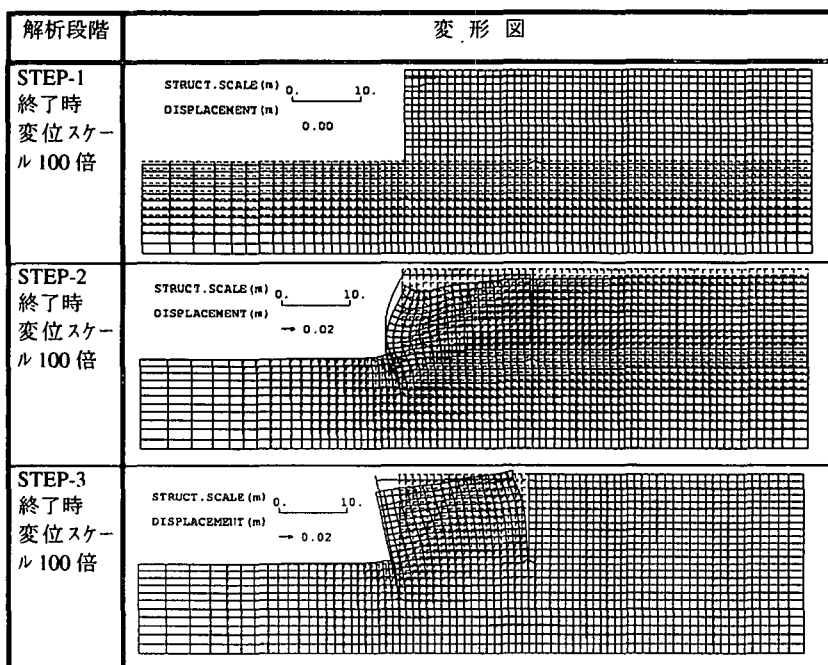
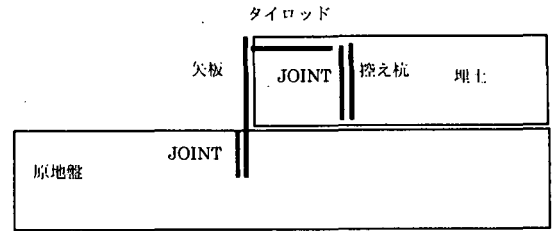


図-3 矢板式岸壁の多段階自重解析の各段階における変位の自重解析結果

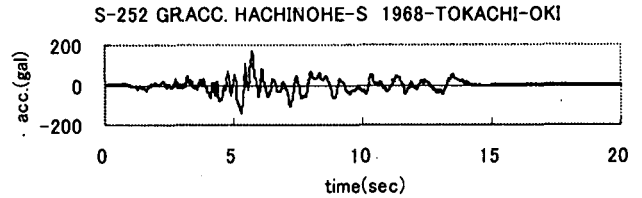
解析された。また、多段階自重解析の最終段階で得られた構造部材の最大応力は、表-1 のとおりとなった。矢板式岸壁の施工段階を無視した単純1段階自重解析解析（矢板と土との摩擦も無視）と比較して、構造部材に発生する応力は、矢板式岸壁の施工段階を模擬することを念頭において実施した多段階自重解析によるものの方が小さめの結果となった。

表-1 自重解析による各構造部材の最大応力

| 解析モデル | 前面矢板 | 控え杭 | タイロッド |
|---------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| 多段階自重解析 | 75 N/mm ² | 51 N/mm ² | 106 N/mm ² |
| 1段階自重解析 | 86 N/mm ² | 90 N/mm ² | 124 N/mm ² |



(a)動的解析モデルの概念図



(b)動的解析に用いた入力地震動波形

3. 矢板式岸壁の地震時挙動の解析

以上の多段階自重解析で求めた地盤・構造物系の応力状態を初期応力条件として、図-4(a)に示すようにすべての地盤構造要素を考慮した解析モデルを対象として、動的解析を行った。入力地震動波形としては、図-4(b)に示す1968年の十勝沖地震の際の八戸港での基盤地震波形（SMAC相当波、NS成分）の0~15秒までを取り出し、最大加速度を100Galに調整して、解析対象断面の底面（標高-23.0m）に入射波として与えた。

解析に用いたFLIPでの土の構成モデルについて

図-4 動的解析における諸条件

は、従来のモデル¹⁾（以下FLIP427と呼ぶ）に加えて、変相線を越える応力空間において塑性せん断仕事を負のダイラタンシーに寄与しないとする仮定を設けた修正モデル（以下FLIP427tmp3と呼ぶ）の両者を解析に用いた。

動的解析の結果得られた矢板式岸壁の残留変形および残留過剰間隙水圧比（ $1 - (\sigma'_m / \sigma'_{m0})$ ）を図-5に示す。

| 解析ケース | 残留変形図 | 過剰間隙水圧比分布図(残留値) |
|---|-------|-----------------|
| ケース1 初期条件: 1段階自重解析による。 FLIP427 | 136cm | |
| ケース2 初期条件: 1段階自重解析による。 FLIP427tmp3 | 97cm | |
| ケース3 初期条件: 多段階自重解析による。 FLIP427 | 37cm | |
| ケース4 初期条件: 多段階自重解析による。 FLIP427tmp3 | 8cm | |

図-5 1段階および多段階自重解析による初期応力条件の基で実施した動的有効応力解析結果

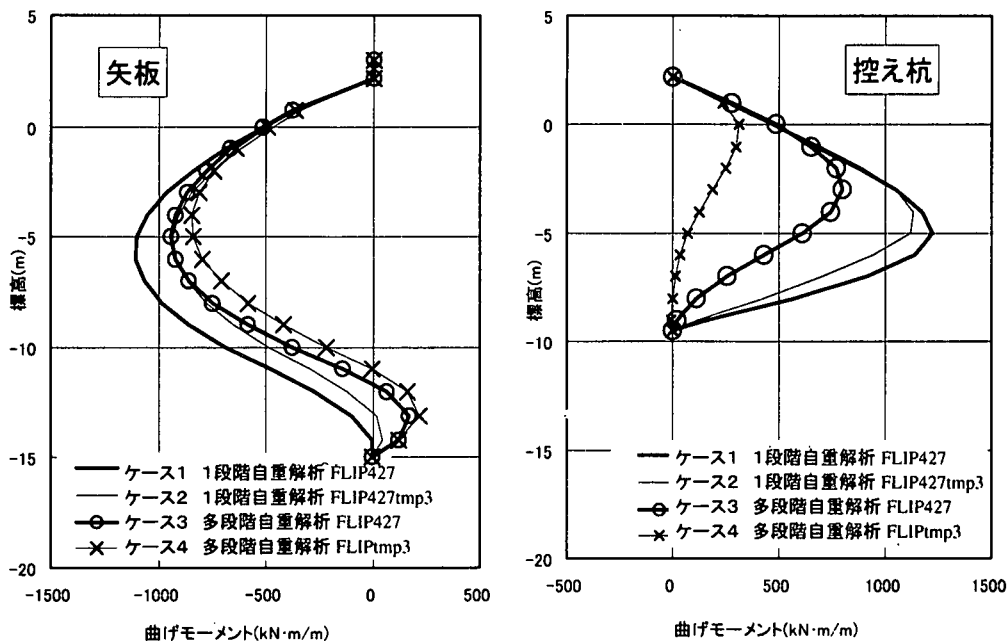


図-6 1段階および多段階自重解析による初期応力条件の基で実施した動的解析による残留曲げモーメント

図-5において、それぞれ、ケース1と2は1段階自重解析による初期応力条件のもとで動的解析した結果、ケース3と4は、多段階自重解析による初期応力条件を用いて動的解析した結果である。FLIPで用いた土の構成モデル（FLIP427とFLIP427tmp3）の相違により解析結果が異なるのは自明であるが、これら構成モデルの相違によらず、ケース1と3の比較ないしケース2と4の比較からわかるとおり、多段階自重解析による初期応力条件を用いて動的解析して得た残留変形は、1段階自重解析によるものよりも著しく小さい結果となっている。控え杭背後の地盤の過剰間隙水圧の上昇も、多段階自重解析によるものが、1段階自重解析によるものよりも、かなり抑えられていることがわかる。

動的解析の結果得られた矢板式岸壁の構造部材の残留モーメントを図-6に示す。前面矢板、控え杭のいずれにおいても多段階自重解析によるものが、1段階自重解析によるものよりも、小さい値を示している。特に、控え杭の曲げモーメントの相違が著しい。

これらの結果は、多段階自重解析により、控え工周辺の初期応力状態がより拘束性が高いものとなり、過剰間隙水圧の発生が抑制されるとともに、控え工の変位も抑制されたこと、また、前面矢板の受働側の抵抗も適切に表現されるようになり、これらが矢板式岸壁の地震時挙動に総合的に影響する結果となったと思われる。

4. 結論

本研究では、矢板式岸壁の地震直前の地盤応力状態（初期応力状態）が、その地震時挙動に与える影響

について、有効応力解析プログラムFLIPを用いて、解析的な検討を行った。初期応力状態の解析は、矢板式岸壁の施工過程を模擬することを念頭においた多段階自重解析により実施した。このような多段階自重解析による初期応力状態を用いて矢板式岸壁の地震時挙動を解析したところ、施工過程を無視した単純1段階自重解析結果によるものと比べ、矢板式岸壁の地震残留変位、構造部材の発生応力とも著しく小さい結果が得られた。このことから、矢板式岸壁のような地盤・構造物系の有効応力解析においては、初期応力条件の影響について十分に慎重な検討が必要なこと、また、初期応力条件の適切な評価が重要であることが明らかになった。

謝辞：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) 亀岡知弘・井合 進：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有効応力解析による検討、港研資料 No.751, 1993, pp.1-29
- 3) 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
- 4) 森田年一他：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タの簡易設定法、港研資料 No. 869, 1997, pp.1~36