

盛土の液状化対策としてののり尻に打設する 鋼矢板壁の挙動に関する検討

田中宏征¹・村田大宜¹・喜田 浩¹・岡本政信²

¹ 正会員 工修 住友金属工業(株) 建設技術部 (〒314-0255 茨城県鹿島郡波崎町砂山16)

² 正会員 工修 住友金属工業(株) 建設技術部 (〒100-8113 千代田区大手町1-1-3 大手セントラル)

盛土の液状化対策としての鋼矢板締切り工法に関し、対策効果や矢板の挙動の定量的把握を目指して動的有効応力解析および模型実験を行った。主な結果を以下に示す。①実大盛土モデルに対しても本工法の対策効果が確認された。無対策時との沈下量の比で見た効果は液状化程度が厳しくなると徐々に低下したが60%程度の値に収斂した。②鋼矢板の曲げモーメント漸増成分は盛土下の過剰間隙水圧比とよい相関があり、解析によれば入力波形や加速度によらず矢板剛性ごとの固有の関係を示した。③振動成分は振動加速度に比例的であるが、矢板壁のたわみ性のため、その評価に剛壁動土水圧を用いることには課題がある。④排水矢板による周辺地盤の強度保持が矢板の曲げモーメントに及ぼす影響の評価法として間隙水圧状態を考慮した地盤のせん断強度に基づく方法が考えられる。

key words: Liquefaction, Sheet pile wall, Earthfill, Earthquake, Effective stress analysis, model test

1. はじめに

盛土の液状化対策の一つにのり尻付近に鋼矢板を打設し、直下地盤の側方への流動を抑制することにより、沈下や変形を低減する鋼矢板締切り工法がある。本工法に関しては従来より各種の検討が行われており^{1), 2)}、著者らも模型実験等による検討を行い対策効果や矢板の挙動に関する知見を得ている^{3), 4)}。しかし、模型規模や地盤・地震動条件、矢板の剛性や支持条件によって結果が異なり、必ずしもそれらを統一的に解釈できる評価法は確立されていないのが現状である。

そこで、条件の異なる実験・解析結果の総合的な評価と、実大盛土に対する対策効果や矢板の挙動の定量的把握を目指して、動的有効応力解析等による検討を実施した。ここでは、その結果の一部を報告するとともに、既報の模型実験⁴⁾の結果に対しても同様の整理を行い、両者を比較検討する。また、模型実験では排水機能を付与

した鋼矢板(以下、排水矢板)にも着目し、普通鋼矢板との比較を通して効果とメカニズムを考察する。

2. 有効応力解析による検討

(1) 解析モデルと解析条件

解析には有効応力法による動的有限要素解析プログラム「FLIP」⁵⁾を用いた。解析モデルを図1に示す。盛土は高さ4m、天端幅8m、のり勾配1:2で、地盤は表層1mの非液状化地盤の下に図2に示す液状化強度特性を有する厚さ5mの液状化層が存在する条件とし、各層とも層中央の初期せん断剛性 G_0 が約1400tf/m²になるように設定した。矢板は長さ19mでジョイント要素は用いず、梁要素の節点と両側地盤要素の同一深度の節点の水平変位が等しくなるようにモデル化した。

表1 解析条件

入力波形	継続時間	入力加速度	矢板条件
正弦波	10秒(2Hz, 20波)	100, 150, 250, 400gal	無対策
八戸EW	21.6sec	100, 183, 250, 400gal	鋼矢板Ⅲ型
神戸NS	30.0sec	100, 250, 400gal	鋼矢板Ⅴ型

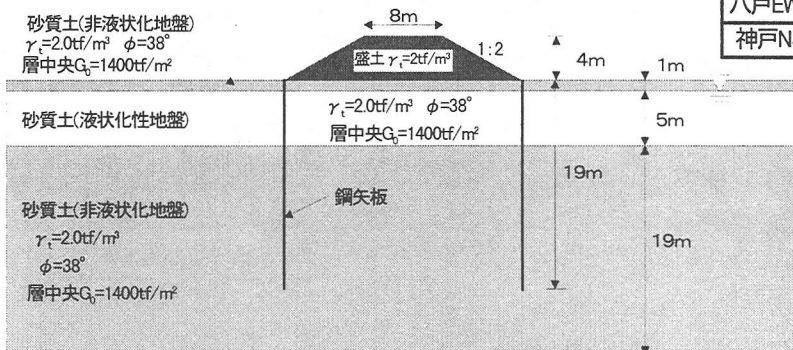


図1 解析モデル

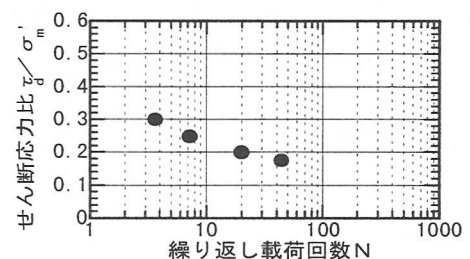


図2 液状化性土の液状化強度曲線

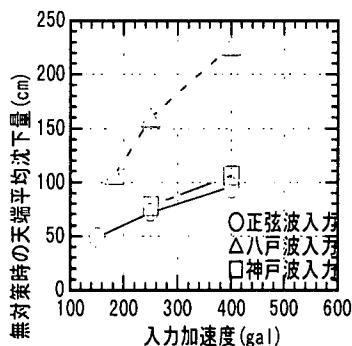


図3 入力加速度と盛土沈下量の関係

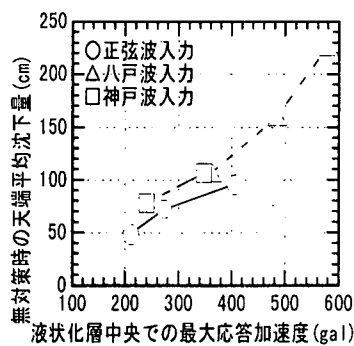


図4 液状化層の応答加速度と盛土沈下量の関係

境界条件は側方を粘性境界、底面を固定境界とした。解析は表1に示すように、入力波形および入力加速度、矢板対策の有無、矢板の剛性を種々組合せて実施した。

(2) 無対策時の盛土の沈下量について

各入力波形について入力加速度と無対策時の盛土天端の平均沈下量の関係を図3に、それを平地盤部の液状化層中央の最大応答加速度との関係で書直したものを図4に示す。図3によれば、八戸波で盛土沈下が最も大きく、神戸波と正弦波で同程度になっている。波形によって継続時間等が異なるために単純比較はできないが、図4では盛土沈下量が液状化層の応答加速度に比例的であり、八戸波では加速度増幅が他より大きく、盛土沈下も大きくなっていることがわかる。これは、今回の解析モデルの卓越周期が八戸波のそれに近かったためと考えられる。

(3) 鋼矢板締切り工法の対策効果について

鋼矢板対策時の盛土天端平均沈下量、のり尻下地盤(矢板)が水平方向に変形した面積、のり面中央下の地盤が水平方向に変位した面積をそれぞれ無対策時との比で表し図5に示す。図より以下のことがわかる。①矢板対策によりいずれのケースも盛土沈下量を40～60%に低減できている。また、矢板剛性が高いほど効果も大きい傾向はあるが顕著ではなく、加速度が大きい領域では矢板剛性の影響がなくなる。②応答加速度の増大に伴い対策効果は徐々に低下するが、400gal以上では矢板剛性や入力波形にかかわらず沈下量の比で見ても無対策時の60%程度の値に収斂している。③のり尻下の水平変位面積の比は加速度によらずほぼ一定であるが、のり面中央下の水平変位で見ると応答加速度の増加に伴い徐々に抑制効果が低下し、盛土沈下とよく似た傾向を示す。以上から、矢板近傍地盤の水平変位は条件によらず効果的に抑制されるが、これと盛土の沈下は必ずしも直接対応せず、液状化の程度が厳しくなると、矢板締切り内での直下地盤の変形が進行し盛土沈下が徐々に増加すると考えられる。

(4) 鋼矢板の曲げモーメントについて

鋼矢板の曲げモーメントは地盤の液状化に伴い一方向に

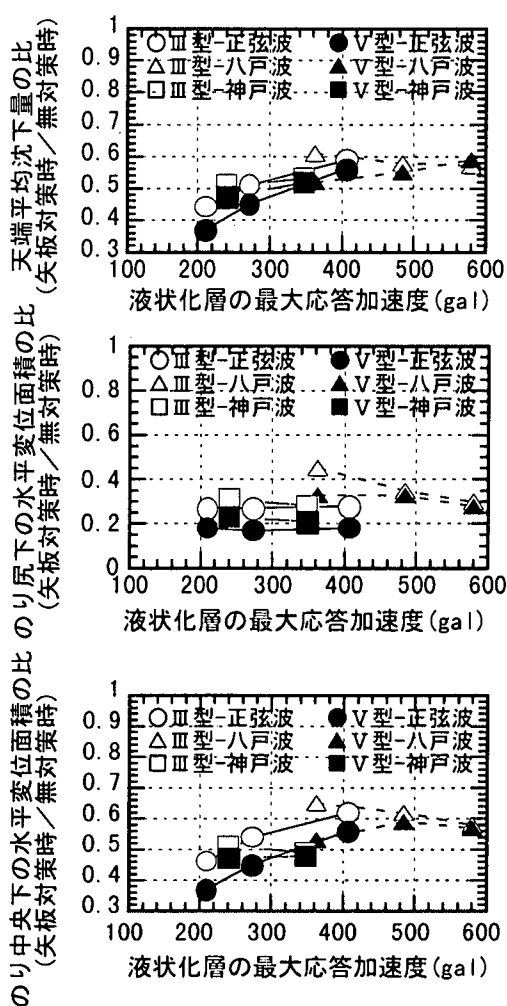


図5 天端沈下量、のり尻下およびのり中央下地盤の水平変位面積に関する無対策時と矢板対策時の比と液状化層の応答加速度の関係

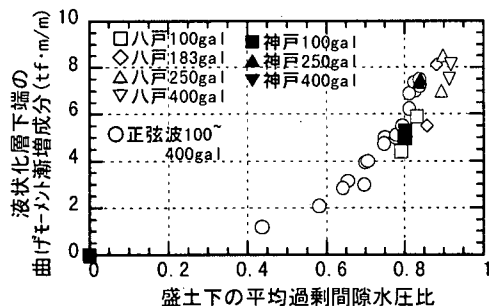
徐々に累加・蓄積される漸増成分とその周りを振動する振動成分に分けて見ることができる³⁾。

a) 曲げモーメントの漸増成分について

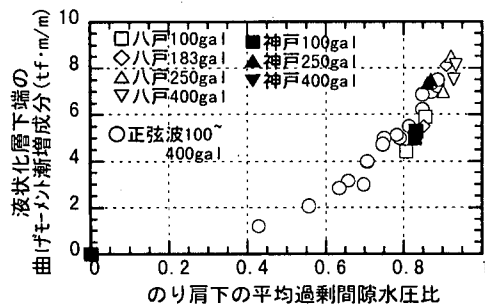
鋼矢板Ⅲ型対策の全解析ケースに関し、液状化層下端での曲げモーメントの漸増成分と盛土下全域の平均的な過剰間隙水圧比およびのり肩下位置での平均過剰間隙水圧比の関係を図6に示す。図より、入力波形や加速度によらず曲げモーメントの漸増成分と盛土下の過剰間隙水圧比は固有の関係を示し、のり肩下等の特定位置での過剰間隙水圧比を用いても非常によい相関を示す。次に、鋼矢板V型対策の解析ケースについても同様の整理を行い、Ⅲ型対策のケースと合わせて図7に示す。図よりV型のケースについても非常によい相関関係があり、同じ水圧比では矢板剛性が高いほど曲げモーメントが大きくなる傾向がある。以上より、曲げモーメントの漸増成分は矢板剛性に依りて盛土下の過剰間隙水圧比との関係で考えるのが有効と思われる。

b) 曲げモーメントの振動成分について

正弦波入力の解析ケースについて、地震終了直前での液状化層下端の曲げモーメントの振動成分と入力加速度および矢板頭部の応答加速度の関係を図8に示す。図には、剛



(a) 盛土下全域の平均的な過剰間隙水圧比による整理



(b) のり肩下の平均過剰間隙水圧比による整理

図6 盛土下の過剰間隙水圧比と曲げモーメント漸増成分の関係

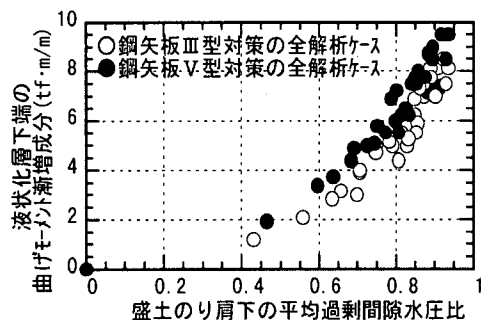


図7 盛土のり肩下の平均過剰間隙水圧比と曲げモーメント漸増成分の関係（矢板対策全解析ケース）

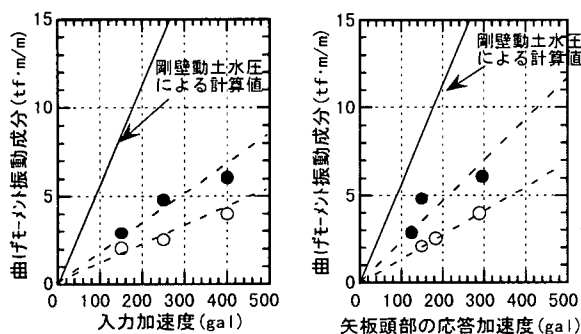


図8 曲げモーメント振動成分と入力加速度および矢板頭部の応答加速度の関係

壁動水圧の拡張式³⁾より求めた動土水圧(矢板の片面分のみ考慮)を与えた場合の計算値も示している。図より次のことが判る。①曲げモーメントの振動成分は剛壁動土水圧による計算値と同様に加速度に対して比例的な関係を示すが、モーメント値は計算値よりかなり小さい。②矢板の剛性が高いほど振動成分は大きい。以上より、曲げモーメントの振動成分は振動加速度と関連づけるのが有効と思われるが、剛壁動土水圧による計算では過大評価となる。

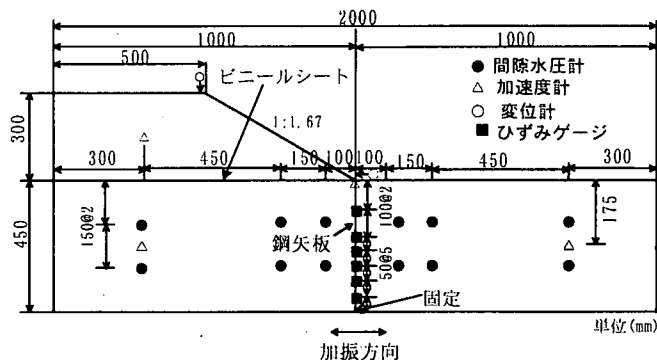


図9 実験模型と主な計測位置

3. 模型振動台実験による検討

(1) 実験概要

実験模型と計測位置を図9に示す。盛土は含水比20%に調整した砂7号を用い密度が約 1.3g/cm^3 となるように、地盤は砂7号を用い水中落下法で $D_r=60\%$ 程度になるように作成した。矢板模型は板厚3.2mmの鋼板で下端を土槽底面に固定した。実験は無対策、普通矢板対策、排水矢板対策(再現性確認のため同様の条件で2ケース実施)の3種類に対し計4ケース実施した。加振は振動数5Hzの正弦波30波で、目標台加速度が200, 300, 400galの3段階の加振である。なお、排水矢板の場合には幅15mm、高10mmのプラスチック製溝形部材の開口面にステンレスメッシュを張付けた曲げ剛性の小さい中空部材を矢板の盛土側表面に80mmピッチで6本設置し、片面のみを排水条件とした。

(2) 実験結果～矢板の曲げモーメントについて

ここでは矢板の曲げモーメントに注目して実験結果を報告する。なお、無対策時の盛土の挙動や矢板対策の効果に関しては既報の文献4)を参照されたい。

a) 曲げモーメントの漸増成分

盛土下の過剰間隙水圧比と曲げモーメントの漸増成分の関係を図10に示す。図中の曲げモーメント漸増成分には深さ35cmでの計測値を、盛土下の水圧比には天端下計測点の平均値を用いた。また、全ケースとも200gal加振では盛土下水圧、矢板曲げモーメントとも小さかったため、300gal加振時のデータも含めて図示している。なお、300gal加振時の曲げモーメントは200gal終了後の残留値を加えた値としている。図より、解析結果と同様に盛土下の水圧比と曲げモーメントの漸増成分には良い相関が見られる。ただし、排水矢板のケースは、天端下水圧比が同じでもモーメントの漸増成分が普通の鋼矢板の場合より小さい。これは、矢板近傍の水圧低減による地盤強度の保持の影響と推察されるが、この点に関しては後で別途考察を加える。

b) 曲げモーメントの振動成分

加振終盤での深さ35cm位置の振動成分値と加振加速度および矢板頭部の応答加速度値の関係を図11に示す。図には剛壁に対する動土水圧を用いた計算値も示してい

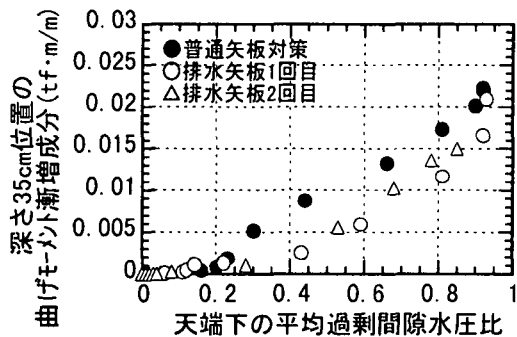


図10 盛土下の過剰間隙水圧比と曲げモーメント漸増成分の関係

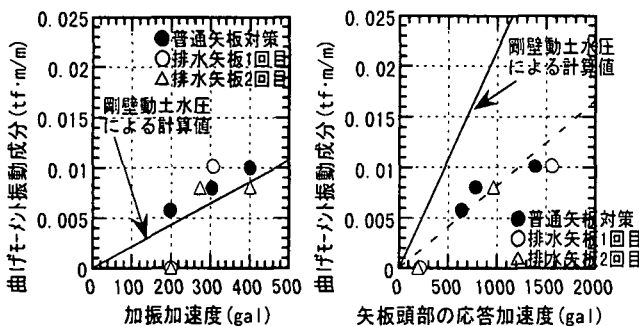


図11 曲げモーメント振動成分と入力加速度および矢板頭部の応答加速度の関係

る。解析結果と同様に曲げモーメントの振動成分はいずれの加速度にも比例的で、矢板頭部の応答加速度を用いると剛壁動土水圧による計算値は過大評価となる。しかし、加振加速度を用いた計算では実験値よりやや小さめの値になっている。これは、実験では矢板頭部で3倍程度の加速度増幅があり、入力加速度と地盤、矢板の応答が異なるためと考えられる。以上より矢板壁はたわみ性で、深さによって応答加速度や位相が異なるため、その評価に剛壁動土水圧を用いることには課題がある。

c) 排水矢板の曲げモーメントについて

図10で盛土下水圧比が同じでも排水矢板では普通矢板よりモーメントの漸増成分が小さくなる傾向があった。ここでは、この点について考察を加える。矢板近傍地盤の過剰間隙水圧の模式図を図12に示す。簡単のため普通矢板では水圧比が R_{v0} で一定、排水矢板では $R_v(x)$ とする。間隙水圧上昇時の土のせん断強度が、 $\tau_f = \sigma_v' \cdot \tan \phi' = (1 - R_v) \cdot \sigma_v' \cdot \tan \phi'$ で表されるとすると、両矢板の近傍地盤の水平方向のせん断強度の合力差 ΔS は次式のようにになる。なお、 α は図12の斜線部の面積で水圧低減による地盤の強度保持効果を表す一種の指標と考える。

$$\Delta S = \sigma_{v0}' \cdot \tan \phi' \cdot \int_0^L \{R_{v0} - R_v(x)\} dx$$

$$\alpha = \int_0^L \{R_{v0} - R_v(x)\} dx$$

水圧計測値からいくつかの時刻について α を算定し、これと図10の水圧比～モーメント漸増成分関係における普通矢板と排水矢板のモーメントの差分 ΔM の関係を調べ図13に

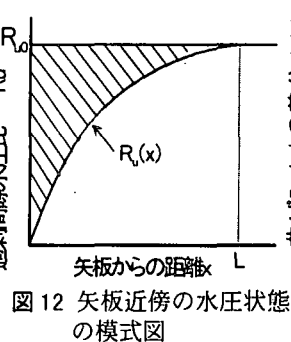


図12 矢板近傍の水圧状態の模式図

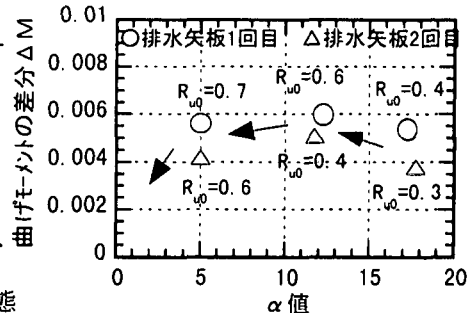


図13 α 値と ΔM の関係

示す。なお、図中の R_{v0} は α を算定した時刻の盛土下の水圧比である。2カスとも $\alpha \sim \Delta M$ 関係は同様の傾向を示し、 α の減少に伴い、一旦 ΔM が増加し、ピークをとった後、減少に転じる。これは、 $R_{v0} = 0.3 \sim 0.4$ 程度では矢板の変形と土圧が小さいのに対して α が大きいため ΔS が十分に発揮されておらず、 R_{v0} の増加により矢板への土圧が大きくなり、 α が減少して τ_f に相当する ΔS が発揮され、その後 α の減少に伴い ΔM が低下していくことに対応するのではないかと推察される。

4. あとがき

盛土の液状化対策としての鋼矢板締め切り工法に関し、動的有効応力解析および模型振動台実験により検討を行った。主な結果と今後の課題を以下に示す。

- ①解析により実大盛土に対しても対策効果が確認された。無対策時との沈下量の比で見た効果は液状化程度が厳しくなると徐々に低下した60%程度の値に収斂した。
- ②解析、実験結果とも鋼矢板の曲げモーメント漸増成分は盛土下の過剰間隙水圧比とよい相関を示し、解析によれば入力波形や加速度によらず矢板剛性ごとの固有の関係を示した。今後は、盛土形状や液状化層厚、地盤物性の影響等も考慮し、より詳細な検討を行う予定である。
- ③鋼矢板の曲げモーメントの振動成分は地盤や矢板の振動加速度に比例的であるが、その評価に剛壁動土水圧を用いることには課題があり、矢板のたわみ性を考慮したより合理的な評価法を検討する必要がある。
- ④排水矢板による周辺地盤の強度保持が矢板の曲げモーメントに及ぼす影響の評価法として間隙水圧状態を考慮した地盤のせん断強度に基づく方法が考えられる。今後より多くのデータに対し妥当性の検証を行う予定である。

参考文献

- 1) 岡村，堤他：矢板締め切り工を施した盛土の模型振動台実験，第33回地盤工学研究発表会，pp. 1035~1036, 1998
- 2) 布川，大春，高橋他：地震時盛土締め切り鋼矢板の挙動，第32回地盤工学研究発表会，pp. 1015~1036, 1997
- 3) 田中，喜田，松尾，堤：盛土の液状化対策として用いる締め切り鋼矢板の挙動に関する振動台実験，土木学会第51回年次学術講演会，III A, pp. 270~271, 1996
- 4) 村田，田中：鋼矢板による液状化対策を施した盛土の挙動に関する振動台実験，土木学会第53回年次学術講演会III A, pp. 300~301, 1998
- 5) Iai, S., Matsunaga, Y., Kameoka, T.: STRAIN SPACE PLASTICITY MODEL FOR CYCLIC MOBILITY, REPORT OF THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE, Vol. 29, No. 4, Dec. 1990.