控え工増設による既存矢板壁の補強効果に関する模型実験

MODEL TESTS ON REINFORCEMENT OF THE EXISTING ANCHORED SHEET PILE WALL BY AN ADDITIONAL ANCHORAGE

森川嘉之[1]・菊池喜昭[1]
Yoshiyuki MORIKAWA and Yoshiaki KIKUCHI

[1]正会員　工博　港湾空港技術研究所　地盤・構造部（〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1）

The flexible bulkhead such as anchored sheet pile wall is often employed for soil retaining work of port facilities in Japan. In recent years, existing sheet pile walls are requested to be reinforced for maintenance and to be functionally enhanced for large ships. To meet these requests, a reinforcement method called dual-anchored sheet pile wall, in which the second anchorage work is to be attached to the existing anchored sheet pile wall, is expected. The design method of dual-anchored sheet pile wall, however, has not been established. In this study, model tests of the dual-anchored sheet pile wall were conducted in order to understand its behaviors. This paper describes the effect of the additional anchorage work to reduce the load acting on the existing anchored sheet pile wall, such as the bending moment of the sheet pile and the tension of the tie rod.

Key Words : *Sheet pile wall, bending moment, model test, aluminum layered ground*

1．はじめに

港湾構造物の土留めとして，控え式矢板壁のようなたわみ性壁体がしばしば用いられる．大型化する岸壁に控え式矢板壁を適用するために，二段控え式矢板壁の有効性が提唱されてきた[1),2)]．二段控え式矢板壁とは，通常の控え式矢板壁のタイロッドの下方に別のタイロッドを設け，これによって矢板に働く曲げモーメントを低減させる工法である（**図-1**）．しかし，設計法について未解決な部分が多く，下段タイロッドの矢板側取付け位置が水中となるため施工が困難であった．そのため二段控え式矢板壁は実際に採用されるには至らなかった．そこで我が国では，高剛性の鋼矢板の開発で岸壁の大型化に対応してきた．近年，既存岸壁に対して，長年供用し劣化した岸壁のリニューアル，船舶の大型化のための増深，大型荷役クレーンの新設等のための機能強化，地震被災後の物流機能の確保のための耐震性向上などの要望が高まってきている．このような既存岸壁に対する要望への対応策として，二段控え式矢板壁への期待が再び高まってきた．**図-2** に本研究で対象とする二段控え式矢板壁の概念図を示す．**図-1** の左図[1)]は矢板壁新設時に二段のタイロッドを設ける構造，**図-1** の右図[2)]は増設したタイロッドを既設の控え杭に接続する構造である．これらに対して，本研究で対象とする二段控え式矢板壁は，タイロッドだけでなく控え杭も増設する構造である．

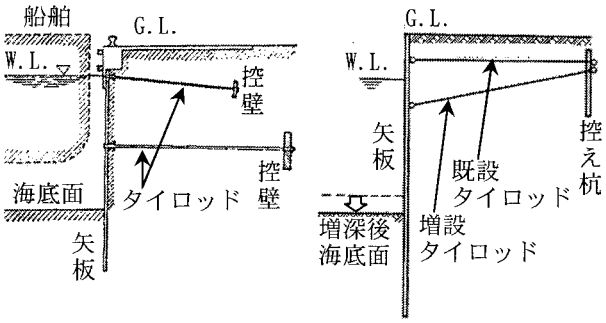


図-1 これまでに提案された二段控え式矢板壁の例[1),2)]

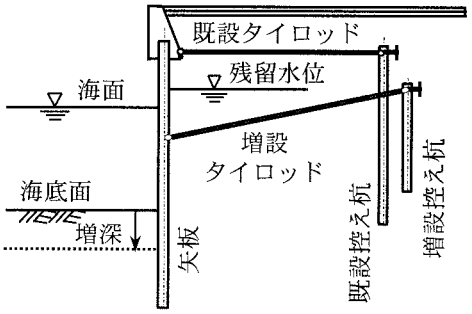


図-2 二段控え式矢板壁の概念図

近年，既存の控え式矢板壁にタイロッドを増設する工法が開発され，施工上の問題は解決されつつある．しかし，タイロッド増設工法は，増設前後の矢板の曲げモーメントや矢板に作用する土圧変化など

の設計上の取扱いが難しく，実用化に到っていない．このため，その設計法確立のために，タイロッド増設時の矢板壁の挙動の解明が必要である．

土留め壁の中間点に載荷するという点では増設タイロッドと切梁との役割は同じである．しかし，切梁が土留め壁の変形前に設置されるのに対し，増設タイロッドは矢板の変形後に設置される．したがって，周辺地盤の応答が異なると考えられ，土留め壁および切梁の設計法をそのまま二段控え式矢板壁の設計に準用するには無理がある．控え式矢板壁のようなたわみ性壁体の設計においては，構造物がどのような土圧や地盤反力を受けるかということが非常に重要である．1999 年に改訂された港湾の施設の技術上の基準・同解説 [3]においても弾性床上の梁理論を考慮した控え式矢板壁の設計法が示されるようになった．この設計法の提案に当たっては，チェボタリオフの行った実験結果 [4]や現地における計測結果との対比 [5]によって，その信頼性が確認されているが，実証的な検討が十分とは言えない状況にある．そこで本研究では，二段控え式矢板壁の挙動の把握を目的として模型実験を実施し，設計法の基礎となるタイロッド増設による既存タイロッドの張力や矢板の曲げモーメントの低減効果について検討した．

2．実験概要

岸壁のような構造物では，法線直角方向の二次元的な挙動が卓越する．このような問題を模型実験で取扱う場合，模型地盤内の応力状態が土槽壁面の摩擦の影響を受けてしまう．そこで，二次元状態を簡便に再現でき，手前側と裏側の土槽壁が不要なアルミ棒積層体で模型地盤を模擬することとした．アルミ棒積層体の材料は，径の異なる三種類のアルミ製の丸棒である．アルミ棒の寸法は，長さ 15cm，直径 1.5mm，2mm，3mm である．予備実験および大型模型実験の模型地盤作製に当たっては，これらのアルミ棒を重量比 1:1:1 で均一に混合して使用した．

(1) 予備実験

大型模型実験の載荷条件等を決めるために，小型土槽を用いた予備実験 [6]を行った．**図-3** に予備実験に用いた模型矢板壁の断面を示す．土槽のサイズは，幅 150cm，高さ 50cm，奥行き 15cm である．前面側の地盤高さ（矢板の根入深さ）は 25cm，背後地盤高さは 50cm である．アルミ棒積層体中にタイロッドを模擬することが困難であったため，模型矢板の前面側からの載荷でタイロッドの張力を模擬した．このため，これ以降タイロッドの張力を控え荷重と記載する．既設控え（上段）は変位固定条件である．実験は増設控え（下段）の設置高さを変えて二ケース実施した．前面地盤からの増設控え設置高さは，Case A が 17.5cm，Case B が 12.5cm である．

図-4，5 に予備実験結果を示す．**図-4** は増設控え

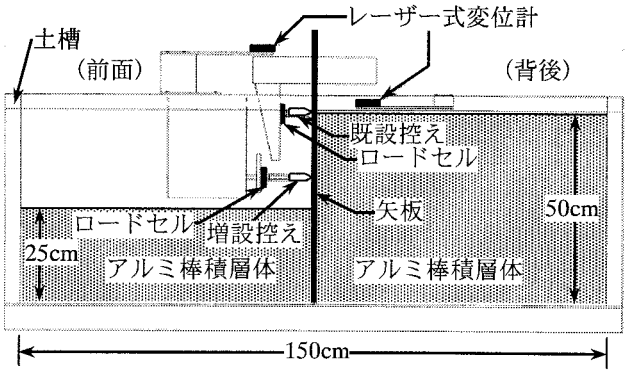


図-3 予備実験に用いた小型土槽

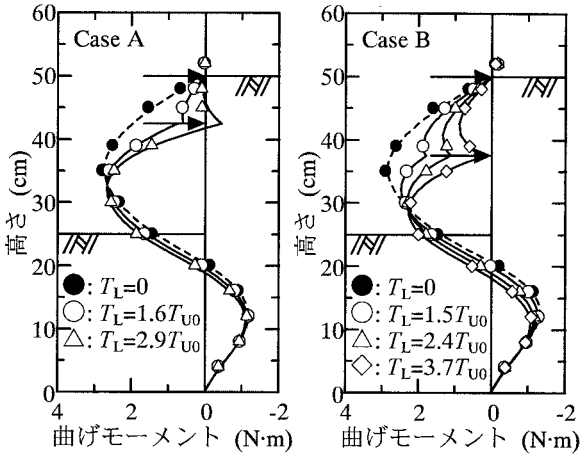


図-4 控え増設による矢板の曲げモーメント分布の変化

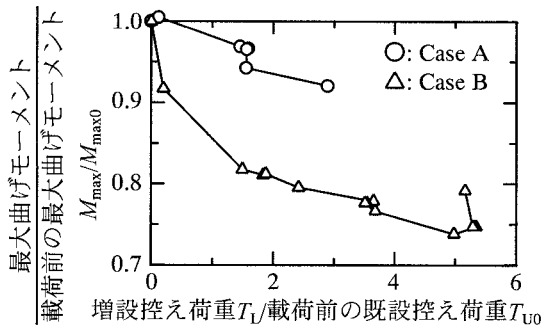


図-5 控え増設による矢板の最大曲げモーメントの変化

載荷による曲げモーメント分布の変化，**図-5** は増設控え載荷による矢板の最大曲げモーメントの変化である．T_L は増設控え荷重，T_{U0} は載荷前の既設控え荷重である．**図-4** を見ると，Case B では最大曲げモーメントを示す位置が変化し，矢板壁直立部（前面地盤より上の部分）全体の曲げモーメントが低減されている．これに対して Case A では，最大曲げモーメントの位置があまり変化せず，曲げモーメントの低減する範囲が最大曲げモーメントの位置の上部に限定されている．また**図-5** を見ると，増設控え荷重の大きさだけでなく，位置によって最大曲げモーメントの低減率が大きく異なっている．これらの図から，矢板の曲げモーメントの低減される範囲や低減率が，増設控えの載荷位置に大きく左右されることがわかる．

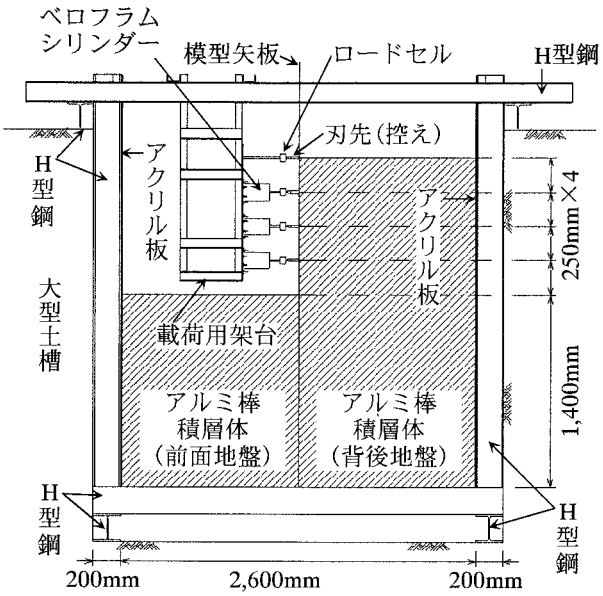


図-6 土槽および模型矢板壁の断面図

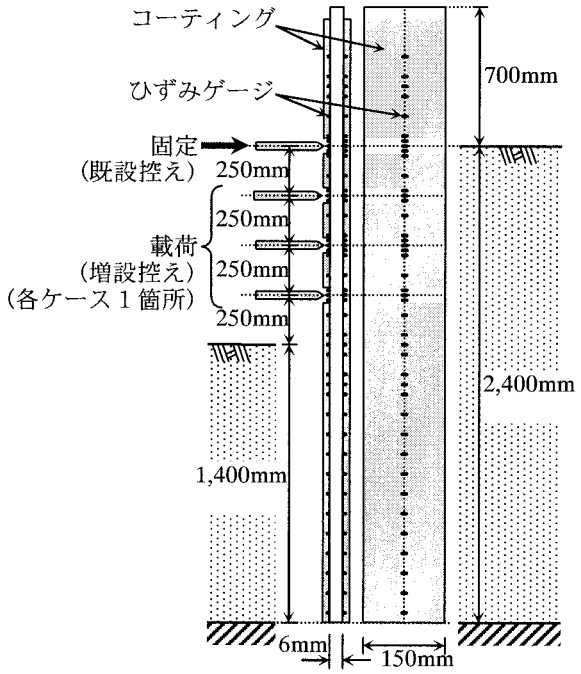


図-7 模型矢板（前面地盤側および断面）

(2) 大型模型実験

本実験は，幅 3m，奥行き 6m，深さ 3m のコンクリート土槽内に模型矢板壁を作成して行った．なお，模型矢板壁の奥行きは 15cm である．

a) 模型矢板壁および模型矢板

図-6 に大型模型実験の模型矢板壁の断面を示す．模型矢板壁は，土槽底面および側壁に設置した H 型鋼をフレームとしてその内部に作成した．土槽側壁に設置した H 型鋼には，模型地盤（アルミ棒）との摩擦を低減するため，アクリル板を貼付した．模型矢板壁の寸法は，幅 2.6m，奥行き 15cm で，地盤高さは矢板前面が 1.4m，背後が 2.4m である．

また，予備実験と同様，タイロッドの張力は前面側からの載荷で模擬することとした．既設控えは背後地盤と同じ高さに設置し，変位固定条件とした．増設控えはケースごとに高さを変えて設置し，荷重制御で載荷を行った．なお**図-6** には，載荷位置を明示するために，全ての設置高さに増設控えを図示している．既設および増設控えの先端の刃先の背後には，ロードセルを取付け，控え荷重を計測した．

図-7 に大型模型実験に用いた模型矢板を示す．模型矢板は厚さ 6mm の鉄鋼板を用いて作製した．鉄鋼板の長さは 3,100mm，幅は 15cm である．模型矢板には両面にひずみゲージを貼付した（42 段×1 列）．ひずみゲージ貼付後，ひずみゲージ保護のために，樹脂系接着剤（アラルダイト，厚さ 2mm で塗布）で模型矢板両面をコーティングした．ただし，**図-7** に示すように矢板前面の載荷予定位置付近はコーティングを施していない（背後地盤側は全面にコーティングを施した）．これは，載荷時に控え工の刃先がコーティングに食い込んで矢板の挙動を拘束するのを防ぐためである．載荷位置付近のひずみゲージついては，載荷用の刃先中央に切欠きを設け，ひずみゲージの直近のみ薄くコーティング剤を塗布して破損を防止した．なお，模型矢板の特性のばらつきや模型矢板毎に検定が必要になる点から，ケース毎に模型矢板を作製するのは現実的でないと判断し，同一の模型矢板を繰返し使用することとした．

実験結果の整理の際に，模型矢板両面のひずみから矢板の曲げモーメントを算出するための校正係数が必要となる．また，曲げモーメント分布を微分・積分して，たわみや地盤反力分布を算出するために，模型矢板の曲げ剛性が必要となる．そこで，模型実験に先立って矢板の検定を行い，ひずみゲージの校正係数と模型矢板の曲げ剛性を求めた．検定は矢板を単純梁とし，模型矢板の背後地盤側を上にした場合と前面地盤側を上にした場合の二回行った．曲げ剛性および校正係数は，中央部の載荷重とたわみを基に算出した．検定の結果，模型矢板の曲げ剛性は $0.56kN \cdot m^2$ であった．これは鉄鋼板のみの曲げ剛性とほとんど同じであり，模型矢板の曲げ剛性はコーティング材の影響をほとんど受けていなかった．

b) 実験手順

模型地盤作製および実験の手順は次の通りである．まず，フレーム底面に矢板を鉛直に設置し，矢板頭部を固定した．そして模型地盤の最下層として，矢板両側の底面フレームに直径 3mm のアルミ棒を一列敷き詰め，接着剤で固定した．この最下層のアルミ棒は，矢板下端の水平変位を拘束するため（ただし，矢板下端の回転は自由である），およびアルミ棒を平行に積み易くするためのものである．既設控えは，荷重が発生しないようにこの時点で矢板に接触させておく．次に矢板両側に高さ 1.4m の初期地盤を作製した．初期地盤作製中は，矢板に曲げが発生していないかひずみゲージの値を確認しながら，矢板の両側に均等にアルミ棒を積上げた．初期地盤完成後，2.4m の高さまで背後地盤を作製した．背後地盤の作製中の矢板の曲げを防ぐため，模型矢板

直立部全体に鋼板を当て，これを載荷用架台（図-6）の控え取付け穴から突き出した三本のボルトで支持した．背後地盤完成後，矢板上部の固定と矢板壁直立部の支持を取外し，模型地盤の完成とした．なお，初期地盤および背後地盤の作製に当たっては，均一な模型地盤を作製するため，埋立高さ 10cm 毎に所定の密度になるように高さとアルミ棒の重さを管理した．模型地盤の目標密度は 2.1g/cm^3 である．図-8 に各ケースの載荷前の矢板の曲げモーメント分布を示す．各ケースでほとんど差がなく，載荷前の状態の再現性は良好であったと考えられる．

背後地盤の完成後，増設控えを設置し，載荷を行った．実験は増設控えの設置高さを変えて三ケース実施した．増設控え設置位置の前面地盤からの高さは，Case 1 が 75cm，Case 2 が 50cm，Case 3 が 25cm である．各ケースにおいて，目標荷重まで所定の載荷ピッチで載荷し，除荷を行った．図-5 を見ると，増設控えの低い Case B では，載荷前の既設控え荷重の四倍程度の増設控え荷重で最大曲げモーメントの低減効果のほとんどが発揮されている．増設控え高さの高い Case A では二倍程度である．そこで，Case 1 の目標荷重を載荷前の既設控え荷重の二倍，Case 2，3 を四倍とした．増設控え載荷前の既設控え荷重は，0.23~0.25kN と各ケースともほぼ同じであった．

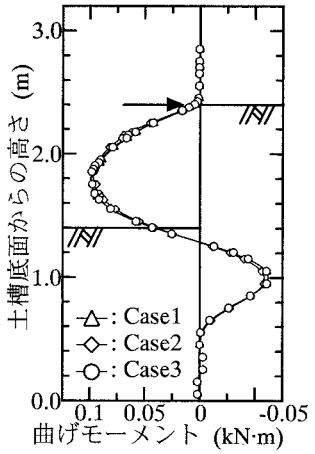


図-8 載荷前の矢板の曲げモーメント分布

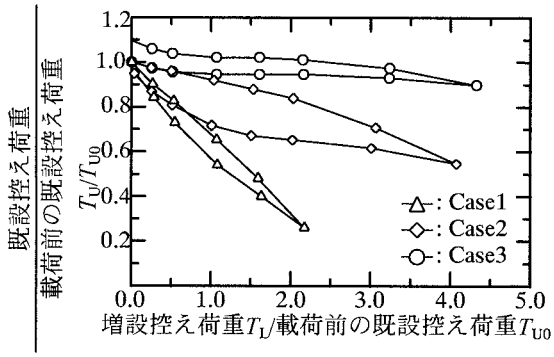


図-9 控え増設による既設控え荷重の低減効果

3．実験結果

図-9 に増設控え載荷による既設控え荷重の低減効果を示す．図-9 から，増設控えの載荷により既設控え荷重が低減され，増設控えが既設控えに近いほどその効果の大きいことがわかる．本論文には記述していないが予備実験でもこれと同じ結果が得られている[6]．仮に増設控えを既設控えと同じ位置に設置すれば，結果は傾き-1 の直線に近くなるはずである（地盤反力が発生するため，完全に傾き-1 の直線にはならない）．増設控えが低くなると，たわみが変化する領域も低くなる．したがって，増設控えが低いほど既設控え荷重の低減効果が小さくなるのは，増設控え荷重の地盤反力の発生に寄与する成分が大きくなるためと考えられる．

図-10 から図-12 に各ケースの曲げモーメント分布を示す．各曲げモーメント分布には 3 次のスプライン関数による近似曲線も示している．実験結果には測定上の誤差が含まれる．このような場合には，全てのデータ点を通る近似曲線を選ぶより，多少測定点からずれた近似曲線を選んだほうが望ましい場合がある．このため，スプライン関数は平滑化スプライン関数とした[7]．スプライン曲線は多項式の集まりであるため，微積分が容易であるというメリットがある．また，増設控え載荷後の曲げモーメント分布は，載荷点で折れ線となるため，載荷点では平滑化してはならない．そこで，載荷点の曲げモーメントを仮定し，載荷点の上部と下部に分けて近似曲線を求めた．増設控え載荷点の曲げモーメントは，以下の条件を満足するように仮定した．

- 曲げモーメント分布を微分して得られるせん断力分布の増設控え位置の不連続量が増設控え荷重と等しい．
- せん断力分布を微分して得られる地盤反力分布が増設控え位置で連続（滑らかでなくとも良い）

図-10 から図-12 には曲げモーメントの近似曲線を微積分して求めたたわみと地盤反力分布も示した．地盤反力を求める際，微分する前にせん断力分布を改めて 3 次のスプライン関数によって近似した．これは，微分の繰返しによるスプライン関数の次数の低下を避け，近似曲線の滑らかさを維持するためである．たわみ分布は曲げモーメント分布を二回積分して求めた．積分ではスプライン曲線の次数が下がらないので，たわみはモーメント分布の二回の台形積分で求めた．既設控えの位置でたわみが 0 となっていないのは校正係数の誤差や計測誤差，台形積分の誤差が積分によって累積したものと考えられる．

図-13 に増設控え載荷による最大曲げモーメントの低減効果を示す．図-10 から図-13 を見ると，増設控え位置の高い Case 1 では，最大曲げモーメントの位置がほとんど変化せず，若干増加している．また，曲げモーメントやたわみが減少する領域は，載荷前の最大曲げモーメントの位置より上の部分に限定されている．これに対して，増設控え位置の低

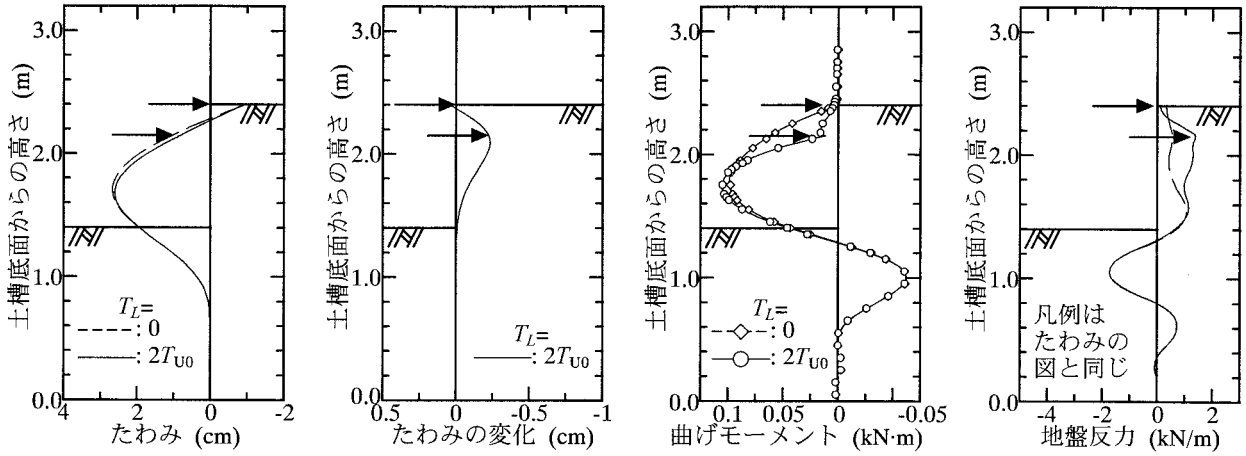


図-10 矢板壁の挙動（Case 1：増設控えの設置高さ前面地盤から75cm）

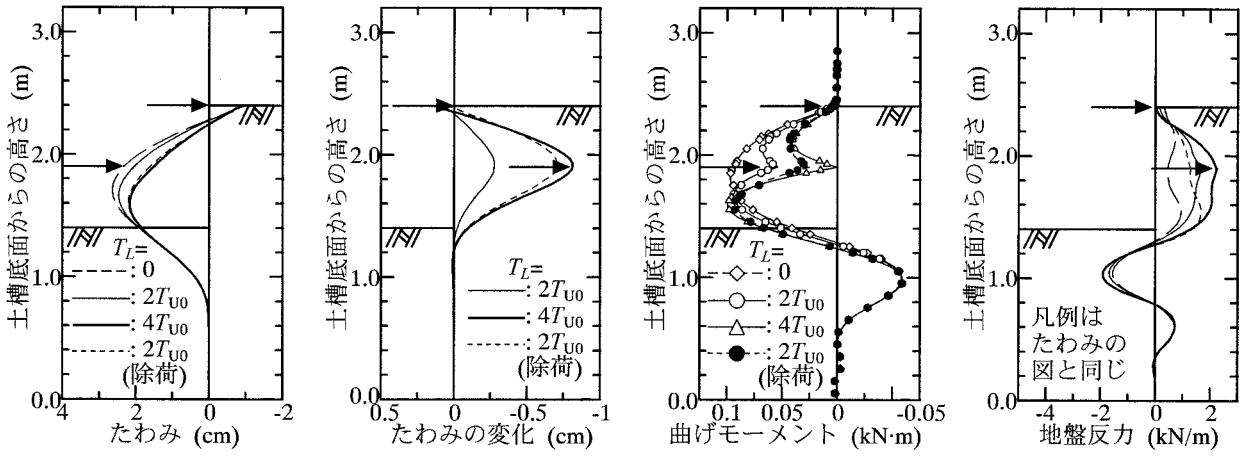


図-11 矢板壁の挙動（Case 2：増設控えの設置高さ前面地盤から50cm）

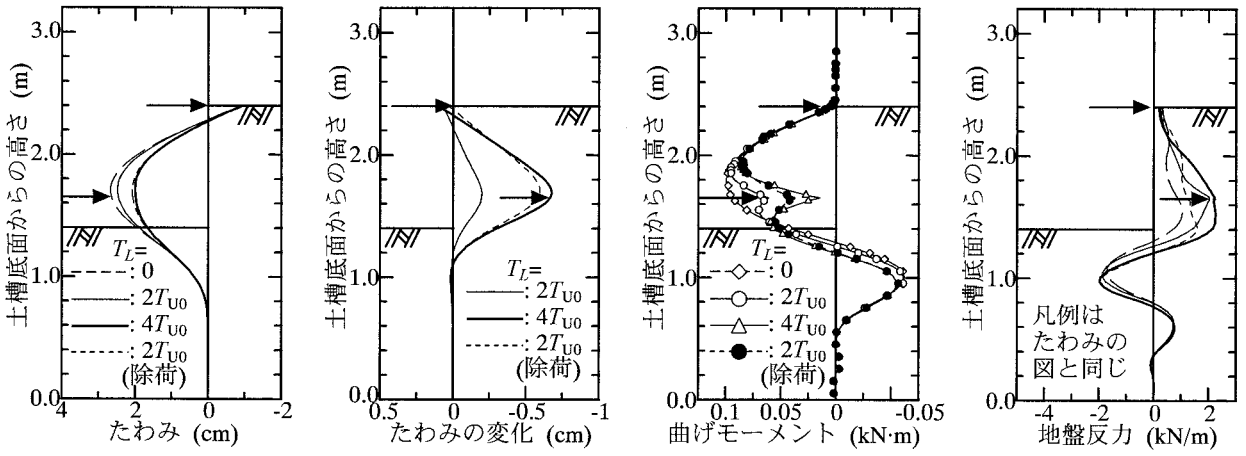


図-12 矢板壁の挙動（Case 3：増設控えの設置高さ前面地盤から25cm）

い Case 3 では，最大曲げモーメントの位置が載荷点から遠ざかる方向に移動し，大きく減少している．また，矢板壁直立部全体で曲げモーメントやたわみが減少している．三つのケースについて共通してみられるのは，載荷点から約 20cm 下方（この距離は矢板の剛性によって異なると思われる）より深い範囲の曲げモーメントが増加していることである．

以上のことから，増設控え載荷時の矢板の変形モードが，増設控えの設置高さによって次のように変化すると考えられる．**図-14** の左図のように，増設控え位置が高い場合は，ある高さで矢板がさらに曲がり．それよりも上部が地盤側へ押し戻されるような変形モードとなる．正の曲げモーメントがさらに増加するため，増設控えを載荷したにも関わらず最大曲げモーメントが増加するといった結果となる．増設控え位置が低い場合も，矢板の低い部分の曲げモーメントが増加するが，**図-14** の右図のように，負の曲げモーメントが正になる（逆に曲がる）変化のため，最大曲げモーメントが増加するようなことにはならない．増設控え高さが中間の Case 2 は，

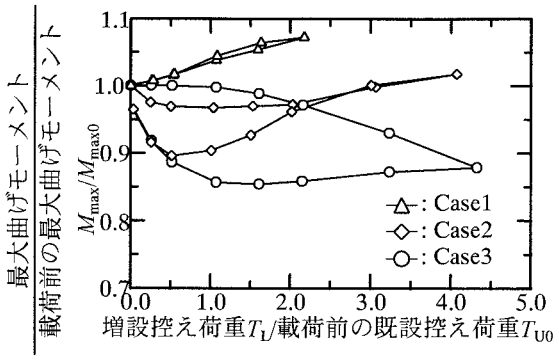
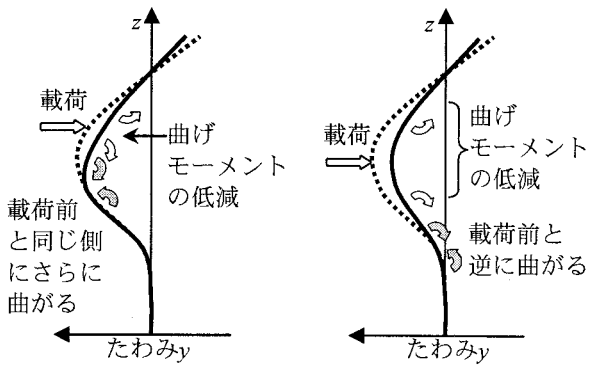


図-13 控え増設による最大曲げモーメントの低減効果



増設控えの位置が高い場合　増設控えの位置が低い場合

図-14 増設控えの位置による矢板の変形モードの違い

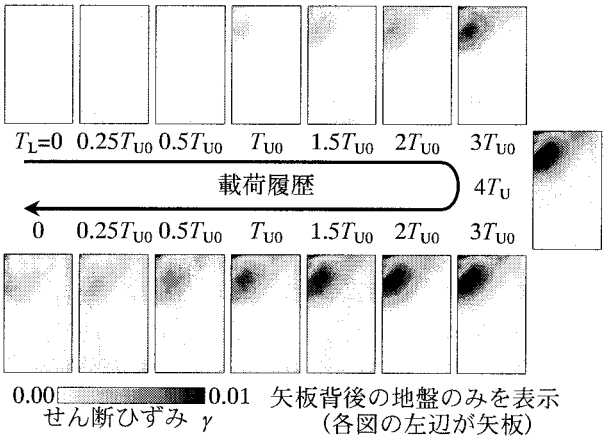


図-15 背後地盤のせん断ひずみ分布（例：Case2）

両者の中間であり，曲げモーメントの増加する部分の初期値がある程度大きかったため，載荷途中から最大曲げモーメントが増加に転じたものと考えられる．これらのことから，増設控えを載荷前の最大曲げモーメントの位置に設置するのが最も有利である．また，Case 2 と 3 の結果を比較すると，設置位置が最大曲げモーメントの位置と一致しない場合は，最大曲げモーメントの位置の上方よりも若干下方に設置する方が効果は大きい．

図-9，13 を見ると，Case2 や 3 で既設控え荷重や最大曲げモーメントの変化がループを描いている．これは次のように考えられる．**図-15** は写真撮影結果を基に算出した背後地盤のせん断ひずみ分布の例である．同じ増設控え荷重の載荷時と除荷時のせん断ひずみ分布を比較すると，除荷時にせん断ひずみが残留している．これは**図-11**，12 の除荷時にたわみが戻っていないことと対応している．一方，地盤反力は載荷時よりも小さくなっている．つまり，矢板のたわみが少し戻っただけで地盤反力が低下している．これは，背後地盤を受働化するには土留め壁を大きく背後に倒す必要があるのに対して，背後地盤を主働化するのに土留め壁を少し前面に倒すだけでよいことと対応している．このことは，実際の増設タイロッドの設置時に，一度，大きな張力を載荷して所定の張力まで除荷した方が，矢板の曲げモーメントや既設控え荷重の低減効果がより大きくなることを示唆していると思われる．

4．おわりに

二段控え式矢板壁の挙動を把握することを目的として模型実験を実施し，控え増設による既設控え荷重や矢板の曲げモーメントの低減効果について検討した．その結果，次のような結論を得た．

- 控えの増設によって，矢板の曲げモーメントおよび既設控え荷重といった既存矢板壁の負荷を低減することが出来る．
- 増設控えが既設控えに近いほど，既設控え荷重の低減効果が大きい．
- 最大曲げモーメントの低減や矢板直立部全体の曲げモーメントを低減するには，載荷前の最大曲げモーメントの位置に増設控えを設置するのが最も有利である．
- 一度，増設タイロッドに大きな張力を載荷して所定の張力まで除荷すると，載荷時よりも除荷時の方が矢板の曲げモーメントや既設控え荷重が低減されている．これは，矢板背後の地盤反力やせん断ひずみ分布が載荷時と除荷時で異なる点から説明できる．

参考文献

1) 石黒健：鋼矢板工法，pp. 9-10，山海堂，1963.
2) 石黒健，高橋邦夫：杭と矢板の縦梁解法，pp. 350-352，山海堂，1992.
3) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説（下），pp. 664-693，日本港湾協会，1999.
4) Tchebotarioff, G.P.: *Large scale earth pressure tests with model flexible bulkheads*, Princeton Univ., p. 111, 1949.
5) 高橋邦夫，菊池喜昭，朝木祐次：タイロッド式矢板壁の力学特性の解析，港湾技研資料，No. 756，1993.
6) Morikawa, Y., Kikuchi, Y. and Oka, S.: Model tests of anchored sheet pile walls on the effect of the second anchorage work, New Frontiers in Chinese and Japanese geotechniques (Proceedings of the 3rd Sino-Japan geotechnical symposium), pp. 428-434, 2007.
7) 菊池喜昭：軟弱粘性土地盤着底式くし形構造物の横抵抗特性に関する研究（第 3 章），港湾空港技術研究所資料，No. 1039，pp. 15-25，2003.