
隔壁型高剛性二重矢板壁の挙動特性

Static Behavior of Double Sheet-Pile Wall Structures with High Rigidity Partition

水谷 太作(Taisaku Mizutani) 芥川 博昭(Hiroaki Akutagawa) 米澤 洋(Hiroshi Yonezawa) 高橋 邦夫(Kunio Takahashi) 菊池 喜昭(Yoshiaki Kikuchi)

要旨：

従来の二重矢板構造物の耐荷力を向上させ、変形量を低減させるものとして、中詰部に隔壁を有する高剛性二重矢板壁を提案した。実験によってその変形挙動を調査した結果、次のような特徴が把握でき、提案構造物の合理性を確認できた。(1) 隔壁を有する高剛性二重矢板壁は、耐荷力の向上と変位の低減が可能である。同時に矢板の曲げ応力の低減にも有効である。(2) 二重矢板壁の抵抗機構や変形は外力の作用の仕方によって大きく影響を受けるが、とくに前壁に支配的な力が作用する場合に隔壁による変形低減効果がより顕著になる。(3) 隔壁は引張、圧縮、せん断の剛性が高く、また、深くまで配置するほど変形の低減に効果的であるが、せん断変形が卓越しない変形モードの場合には、継手がせん断ずれを起こす矢板壁のような隔壁でも有効である。

Synopsis：

New type double wall structures, which have steel structural partitions in their sand-fill part, are proposed. Their static behavior and validity of using partitions were examined through model tests. The results are as follow: (1) Partitions give high loading capacity and diminish deformation. (2) The loading condition affects deformation of a double wall. And partitions are more effective when the main load acts on its front sheet-pile wall. (3) Rigidity and depth of partitions play a leading part in the behavior of these types of double wall structures.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Static Behavior of Double Sheet-Pile Wall Structures with High Rigidity Partitions



水谷 太作
Taisaku Mizutani
エンジニアリング事業
本部 鋼構造研究所主
木建材・橋梁研究室
主任研究員(掛長)



芥川 博昭
Hiroaki Akutagawa
エンジニアリング事業
本部 建材技術部



米澤 洋
Hiroshi Yonezawa
エンジニアリング事業
本部 建設事業部土木
技術部



高橋 邦夫
Kunio Takahashi
運輸省 港湾技術研究
所 土質部基礎工研究
室長・工博



菊池 喜昭
Yoshiaki Kikuchi
運輸省 港湾技術研究
所 土質部 主任研究
官

1 緒 言

二重矢板壁は、2列に打設した鋼矢板あるいは鋼管矢板の間に中詰砂を中詰して構成される構造物である。優れた施工性、耐荷力、止水性などの特徴から、港湾や河川でのドライワークのための仮締切堤や、護岸、係船岸、防波堤などの永久構造物に利用されている。

川崎製鉄と運輸省は、1970年代から二重矢板式構造物の挙動特性について継続的な研究を実施してきた。これらの研究から二重矢板壁を矢板と中詰砂と地盤との複合構造物として挙動解析する沢田の方法¹⁾や大堀らの方法²⁾が提案され、設計や解析に利用されるようになってきている。

以前は、中詰のせん断抵抗と二重矢板壁全体の滑動抵抗などの極限の安定性を検討する方法が主流であったが³⁾、上述の解析法により、鋼矢板と中詰で構成される二重矢板壁のたわみ性に富んだ挙動特性を実態に近い形で評価できるようになった。

要旨

従来の二重矢板構造物の耐荷力を向上させ、変形量を低減させるものとして、中詰部に隔壁を有する高剛性二重矢板壁を提案した。実験によってその変形挙動を調査した結果、次のような特徴が把握でき、提案構造物の合理性を確認できた。(1)隔壁を有する高剛性二重矢板壁は、耐荷力の向上と変位の低減が可能である。同時に矢板の曲げ応力の低減にも有効である。(2)二重矢板壁の抵抗機構や変形は外力の作用の仕方によって大きく影響を受けるが、とくに前壁に支配的な力が作用する場合に隔壁による変形低減効果がより顕著になる。(3)隔壁は引張、圧縮、せん断の剛性が高く、また、深くまで配置するほど変形の低減に効果的であるが、せん断変形が卓越しない変形モードの場合には、継手がせん断ずれを起こす矢板壁のような隔壁でも有効である。

Synopsis:

New type double wall structures, which have steel structural partitions in their sand-fill part, are proposed. Their static behavior and validity of using partitions were examined through model tests. The results are as follow: (1)Partitions give high loading capacity and diminish deformation. (2)The loading condition affects deformation of a double wall. And partitions are more effective when the main load acts on its front sheet-pile wall. (3) Rigidity and depth of partitions play a leading part in the behavior of these types of double wall structures.

一方、近年のウォーターフロント開発などでは軟弱地盤、大水深での工事が増加し、より高い耐荷力と変形量の抑制が二重矢板壁にも要求されるようになってきている。これに 대응するものとして、「高剛性二重矢板壁」の研究を実施しているところである。

本論文では、この高剛性二重矢板壁の構造コンセプトを紹介するとともに、模型実験でこれまでに確認された静的挙動特性について報告する。

2 高剛性二重矢板壁のコンセプト

2.1 従来の高剛性化の方策

二重矢板式構造物の耐荷力を高め、変形量を低減するためには、次のような方法が一般に採られる。

- (1) 二重矢板壁の壁体幅の増大
- (2) 矢板の曲げ剛性の増大
- (3) 地盤改良
- (4) 中詰材の強度向上(礫材の利用など)

* 平成7年11月20日原稿受付

また、他工法との組合わせなどの補強的な対処法としては次のようなものがある。

- (5) 二重矢板壁頭部のRC頂版固定⁹⁾
- (6) 鋼管矢板井筒形式 (中防外側処分場護岸のキングポスト型)
- (7) 切梁の併用⁹⁾、アースアンカーの併用⁹⁾
- (8) 多段タイロッドの利用^{7,10)}

(1)~(4)の方法の効果についてはこれまでの研究でかなり明確になっているが、材料や施工上の制約によって耐荷力の向上に限界があったり、不経済となることもある。また、(5)~(8)の組合わせ補強的な対処法についても、施工性や経済性ととも、二重矢板式構造物としての挙動特性が必ずしも明確になっていないものもある。

2.2 新しい高剛性二重矢板壁の提案

上述のように、二重矢板壁の耐荷力を向上させるためには、地盤

の強度を高め、矢板の曲げ剛性を高めることを除くと、いかにして中詰部の強度を増加させるかということと、前後の矢板を連成させるかということが焦点となっており、2列の矢板と中詰の複合構造である二重矢板壁の一体性を高め、全体剛性を向上させることに帰着する。

そこで、施工性、経済性などを考慮して、Fig.1および2に示すように中詰部に鋼製部材を配した高剛性二重矢板壁を考案した。Fig.1は中詰部の天端からある程度の深さまでを鋼製トラスで連結するもの(トラス隔壁タイプ)で、頭部剛結効果と中詰部補強効果を併せ持ったものである。また、Fig.2は中詰の深部にまでパネル状の壁体を隔壁として配置するもので、必要に応じて地盤深部まで打設施工することを想定したもの(パネル隔壁タイプ)である。Fig.1に比べて二重矢板壁全体の一体性が高くなり、変形の低減が期待できる。

3 模型実験の目的と方法

3.1 目的

新しいタイプの高剛性二重矢板壁について、隔壁の剛性あるいは2列の本体矢板の連結の度合いによって、耐荷力、変形がどのように異なるかを把握し、設計手法を確立するために、模型を用いた静的実験を実施した。

中詰部に隔壁を配置するという意味では、通常の二重矢板壁においても施工上の理由から鋼矢板による仕切り壁が用いられることが多いが、この仕切り壁が全体の変形挙動にどの程度影響を与えているかが明確にはなっていない。そこで、トラス隔壁、パネル隔壁に加えて、鋼矢板のように継手のせん断ずれが生じるものを隔壁材とした場合についても検討するものとした。

3.2 実験方法

3.2.1 模型実験ケース

実験では、二重矢板壁の利用形態を考慮して、仮縮切堤型と埋立護岸型の二つの実験方法を採用した。仮縮切堤型とは二重矢板壁を構築後、前面の排水と掘削を行うものである。また、埋立護岸型は二重矢板壁を構築後、背面に土砂を埋め立てる形態のものである。

構造模型としては、パネル隔壁、トラス隔壁、継手ずれ隔壁の3種類の隔壁タイプの模型と隔壁なし模型、完全剛体模型の5種類を採り上げた。実験ケースをTable 1および2に示す。トラス隔壁は、矢板頭部から海底面までの24 cmの深さのもので、パネル隔壁、継手ずれ隔壁は最終掘削後の地盤面までの71 cmの深さのものである。また、いずれの隔壁も奥行き方向30 cm間隔で配置している。

3.2.2 模型実験方法

模型実験は、実物を参考に約1/25の寸法縮尺で実施した。仮縮切堤タイプの実験例をFig.3に、護岸タイプの例をFig.4に示す。

これまでの研究の多くは、背面からの土圧荷重が支配的な護岸型の二重矢板壁を対象としたものであったが、仮縮切堤型の場合に前壁を止水壁と想定して水圧荷重を負荷した実験では、背面荷重の場合とは変形挙動に相違が見られた⁹⁾。二重矢板縮切堤では土圧に比べて水圧荷重が支配的であるが、前後両壁の土水圧の分担は、現場の土質条件や止水壁の考え方などで異なってくる。今回は、前壁、後壁の一方のみに水圧が全て負荷される理想的な二つの場合を比較する形で、二重矢板壁の隔壁の効果を検討した。

実験は、簡便性、再現性を考慮して、乾燥砂を用いて行った。そ

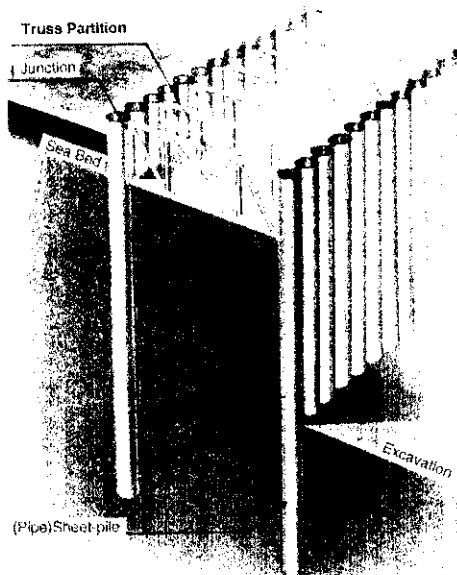


Fig. 1 High rigidity double wall (truss partition type)

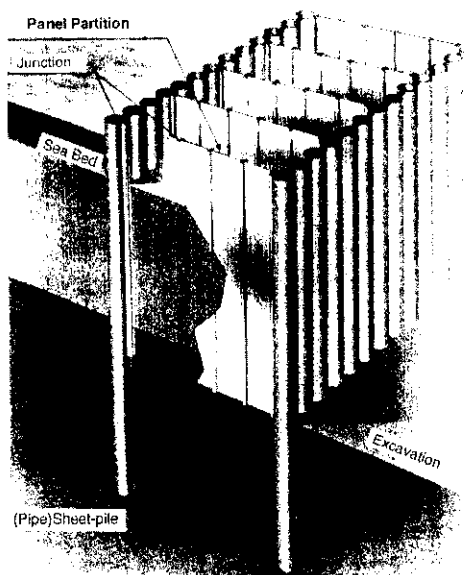


Fig. 2 High rigidity double wall (panel partition type)

Table 1 Test cases (cofferdam type, front ground excavation test)

	Case ^a	Type		Initial cofiguration		Excavation (cm)	Wall breadth (cm)
				Wall height (cm)	Embedment depth (cm)		
High rigidity double wall with partition	X-1, X-2	Panel partition		24	127	47	50
	Z-1, Z-2	Truss partition					
	J-1, J-2	Shear slip panel partition					
Conventional double wall	K-1	No partition	Narrow breadth	24	127	47	25
	Y-1, Y-2		Medium breadth				50
	L-1		Wide breadth				100
Rigid body like a caisson	F-1	Rigid body with leg-wall model		24	127 (leg : 80 cm)	47	50
	G-1	Rigid body model			127		
	H-1	Shallow rigid body model			47		

^aSuffixes of case ID of 1 and 2 denote the test conditions that water pressure acts on the front and rear wall, respectively.

Table 2 Test cases (quaywall type, lateral loading test using hydraulic jack system)

	Case ^a	Partition type	Wall height (cm)	Embedment depth (cm)	Wall breadth (cm)
High rigidity double wall with partition	JA1, JA2	Truss partition	71	80	50
	JB1, JB2	Panel partition			
	JC1, JC2	Shear slip panel partition			
Conventional double wall	JD1, JD2	No partition	71	80	50

^aSuffixes of case ID of 1 and 2 denote the distributed loading case with three jacks and top loading case with one jack, respectively.

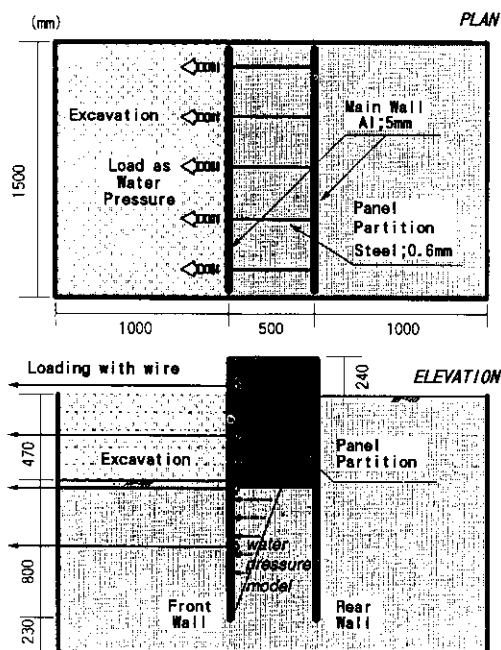


Fig. 3 Excavating test apparatus (case X-1)

こで、水圧荷重は水位差による静水圧が矢板下端で0となる水圧分布を仮定し、これを深さ方向に多段に設置したワイヤーに分配して負荷した。所定の前面水位低下量に相当する水圧荷重を負荷し、その後、前面地盤を所定深さまで掘削する。これを逐次繰り返す方法で実験を行っている。

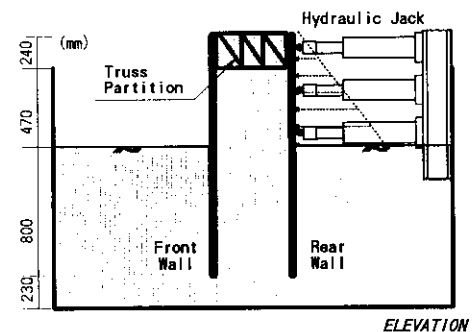


Fig. 4 Loading test apparatus (case JA1)

一方、護岸タイプの実験では、背面から油圧ジャッキで逐次載荷した。この際、係船力や波力などをイメージした頭部集中載荷のケースと、背面の埋立地盤の土圧をイメージして深さ方向に3段のジャッキで分布荷重を模して載荷するケースを実施した。3段の荷重は、地盤面から上部の土圧を対象として、水平力と地盤面まわりの転倒モーメントを勘案して各ジャッキの載荷点と荷重比を設定している。

実験には、鹿島産の6号珪砂を用い、構造物模型としては本体矢板の模型およびトラス模型には板厚5 mmのアルミ板を、パネル隔壁、継手ずれ隔壁には0.6 mmの亜鉛鉄板を用いた。また、剛体模型は3.2 mmの銅板を溶接で組立てた箱状の模型である。

模型全体の構築は、予め所定の位置に壁模型を仮固定しておき、層厚を10 cmずつ管理しながら砂を巻き出す方法をとった。地盤作成完了後、模型壁の仮固定を解除し、必要に応じて矢板先端まで

申請砂の投入を行った。

4 変位挙動の特性

4.1 仮締切堤型（前面掘削型）実験の結果

Fig. 5 および 6 に代表的なケースの前面掘削深さと前壁頭部水平変位（申請完了時を 0 とした値）の関係を示す。また、参考のために曲げモーメントから算出した変位分布を Fig. 7 に例示しておく。

4.1.1 水压を負荷する矢板の違いによる変位挙動差

いずれの構造形式も、頭部水平変位は水压荷重を前壁に負荷した場合の方が大きい。とくに、無隔壁のケース Y1, Y2 においてこの差が顕著である。

この要因として、前壁へ水压荷重を載荷する場合、根入れ部も含めた申請砂が引張状態となって剛性が低下し、後壁からの力を前壁深部へ伝達させる効果が小さくなり、後壁の反力も低下する現象が推定される。

隔壁がない場合は、前後壁の荷重伝達は頭部のタイロッドのみを介して行われる。申請部の軟化によって後壁は突出杭と同様に大きな変位を示し、小さな荷重分担しかできない。逆に、隔壁を有する場合は、隔壁が引張力を直接後壁に伝達することから、荷重分担が良好に行われる。

また、申請部の隔壁が大きくなせん断力を伝達するため、2列の矢板と隔壁とで構成されるH断面としての曲げ剛性が発揮され、壁全体の曲げ剛性で変形が支配され、水压を作用させる矢板の違いが小さくなるものと考えられる。

4.1.2 構造形式の違いによる変位挙動差

(1) 隔壁剛性の影響

隔壁の剛性に依じて頭部変位量が変化する結果となっている。すなわち、この実験の場合には、無隔壁(Y)、継手ずれ隔壁(J)、パネル隔壁(X)の順で隔壁剛性が大きくなっており、これに応じて頭部水平変位が小さくなっている。

(2) 隔壁深さの影響

頭部にトラス隔壁を用いたケース(Z)は、継手ずれ隔壁型(J)よりも変位量が大きくなっている。

隔壁の剛性よりも深さの影響が大きくなっているのは、これらの実験では水压荷重が根入れ部にまで負荷され、深いところでも変形しようとする実験であったためと考えられる。このことは、後述する背面からの頭部集中載荷の場合には、頭部を拘束するトラスタイプの隔壁を用いた方が変位量が小さくなっていることとも対応させて考えられる。

(3) 隔壁のずれ変形の影響

水压を後壁に負荷した実験では、パネル隔壁(X2)と継手ずれ隔壁(J2)の変位量の差は小さい。

この場合には、せん断変形モードがあまり強くなく、継手ずれの影響が顕在化しなかったものと思われる。

(4) 申請部の剛性の影響

剛体下部に壁杭を併設したケース(F1)とパネル隔壁(X1)を比較して、変位量にほとんど差がない。

このことから、力の伝達に必要な剛性の高い隔壁が設置された部分は、ほぼ剛体に近い挙動特性を示しているものと考えられる。

また、無隔壁で壁幅を変えたケース(K1, Y1, L1)の比較では、壁幅が広くなれば変位が小さくなる結果が得られている。

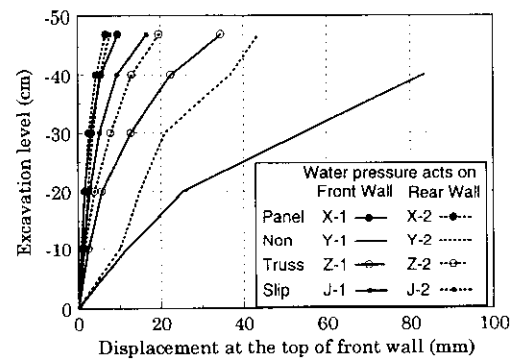


Fig. 5 Displacement curve (comparison of partition types)

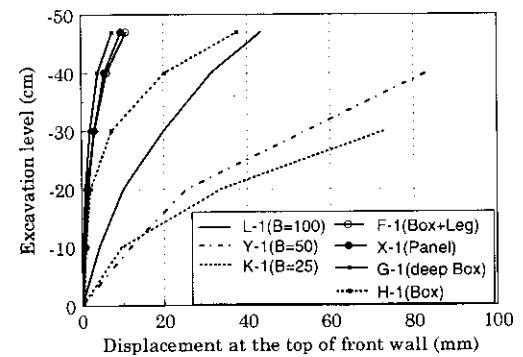


Fig. 6 Displacement curve (comparison of both wall breadth and rigidity as a wall box)

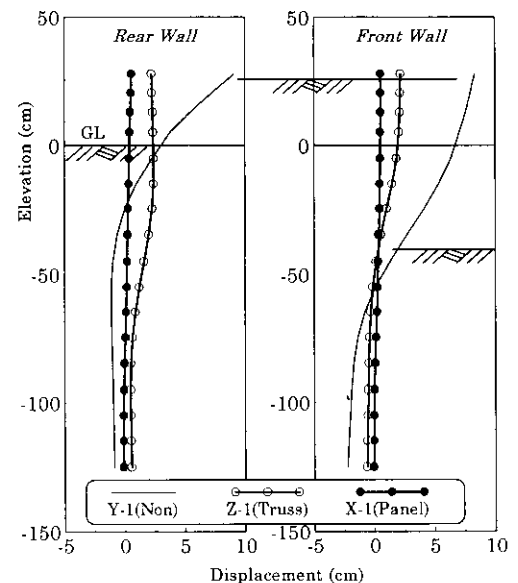


Fig. 7 Deformation of the wall (typical cases)

隔壁を設けることと壁幅を広げることが変位挙動に同じような効果を与えていることは興味深い。

従来の設計では申請部のせん断抵抗モーメントが壁幅 B の関数で示され、また、大堀らの方法でも申請部のせん断力は $\tau = BG\theta$ (G はせん断弾性係数、 θ はせん断変形角) のように壁幅 B との関係で整理されている。隔壁の評価の一つの方法を示唆するものと考えられる。

4.2 護岸型（背面載荷）実験の結果

背面からのジャッキ載荷実験について、Fig. 8(頭部集中荷重)およびFig. 9(分布荷重)に各ケースの荷重(合荷重)と頭部水平変位の関係を示す。

4.2.1 頭部集中載荷の場合

頭部集中荷重による場合は、隔壁の剛性に依りて頭部変位量が低下する傾向が明確に現れている。無隔壁型(JD2)以外の実験ケースでは最大荷重にはあまり差がないが、変位量が明確に異なり、初期剛性も大きく異なっている。

パネル隔壁型(JB2)では、変位10mm程度で最大荷重に達してから後の挙動に異なる傾向が現れている。

パネル隔壁模型に薄い板を用いたため、せん断剛性に比して面外曲げ剛性がかなり小さい模型となっている。このため、最大荷重に達したのちは、圧縮による隔壁の座屈が生じているものと考えられる。中詰砂が緩く、隔壁の面外変形に対する拘束が小さいことも影響していると思われる。

4.2.2 分布載荷の場合

パネル隔壁型(JB1)は初期剛性が非常に高い。しかし、最大荷重は各ケースともあまり差がなく、隔壁の剛性を高めた効果が反映されない結果となっている。頭部集中載荷の場合に比べると、無隔壁型(JD1)の荷重が大きいことが特徴的である。

頭部集中載荷は水平力よりも転倒モーメントが卓越した外力系であるのに対して、分布荷重では滑動が卓越するモードになりやすいことが一因と考えられる。滑動モードで変形する場合は、中詰部が圧縮力を伝達すれば前壁、中詰部、後壁が並進的な水平移動をするため、中詰部の弾性変形量以外には大きな相違がなくなってくる。

逆に、剛な隔壁では圧縮力が直接的に前壁に伝達されるが、中詰

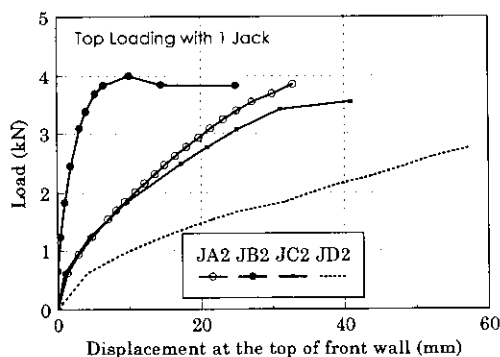


Fig. 8 Displacement curve (1-jack top loading tests)

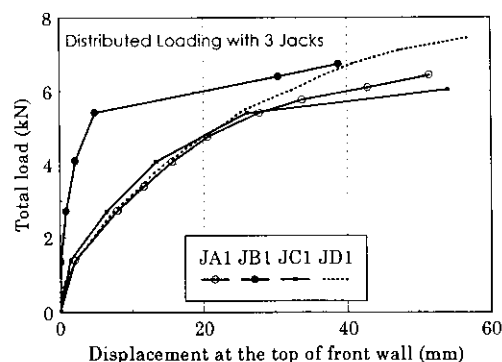


Fig. 9 Displacement curve (3-jacks loading tests)

が砂のみの場合(無隔壁)には前壁のより深いところへ力を分散させる効果が発揮されやすいことも考えられる。

壁幅、壁高、荷重系、抵抗力分布の4者のバランスで変形モードが変化すると考えられるが、これらによって隔壁の効果に相違が現れることは興味深く、今後の検討課題である。

5 曲げモーメント

変位量とともに矢板壁の曲げ応力は設計上の大きな評価項目である。ここでは、前壁および後壁に発生する最大曲げモーメントの状況を示す。曲げモーメントは中詰完了時を0として掘削施工にともなう増減分を表示している。また、最大モーメントを絶対値で評価したので、抽出した最大モーメントの発生点が壁の上部から根入れ部へと移っているケースもある。

また、Fig. 10に例示したように、曲げモーメント分布は前後の壁で異なっていることに注意を要する。

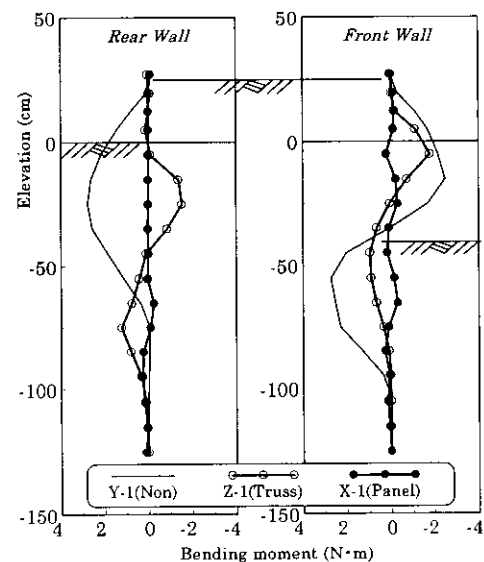


Fig. 10 Moment distribution (typical cases of excavation tests)

5.1 仮締切堤型（前面掘削型）実験の結果

前面の掘削深さと最大曲げモーメントの関係をFig. 11に示す。

前壁に水圧荷重を負荷したケース群(X1, Y1, Z1, J1)に関しては、頭部変位挙動と同様に前背面の矢板とも、パネル隔壁(X1)、継手ずれ隔壁(J1)で最大モーメントが小さく、トラス隔壁(Z1)、無隔壁(Y1)で大きな値となっている。

また、パネル隔壁、継手ずれ隔壁において、後壁のモーメントが非常に小さいことが特徴的である。板状の隔壁が入ることによって、中詰部が隔壁下端以深も含めて剛体的な挙動となり、後壁に曲げが発生しにくくなっているものと推定される。

一方、データは省略したが、後壁に水圧荷重を負荷した場合は、構造形式による発生モーメントの大小関係は前面負荷の場合とほぼ同じであったが、全体的に発生モーメントが小さくなっていることが一つの特徴であった。

5.2 護岸型（背面分布荷重載荷）実験の結果

背面からの載荷重と最大曲げモーメントの関係をFig. 12に示

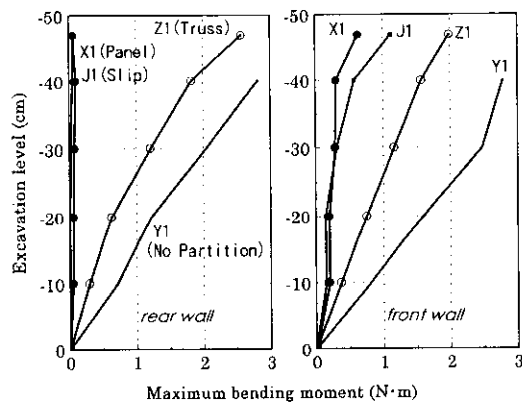


Fig. 11 Maximum moment curve (excavation tests)

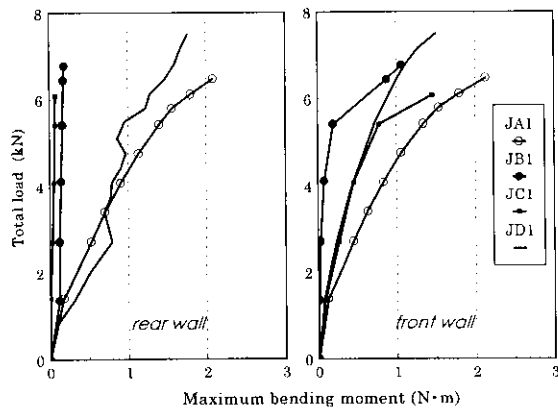


Fig. 12 Maximum moment curve (3-jacks loading tests)

す。

掘削型実験と同様に、パネル隔壁(JB)、継手ずれ隔壁(JC)で最大モーメントが小さく、トラス隔壁(JA)、無隔壁(JD)で大きな値となっている。

また、継手ずれ隔壁では前壁に比べて後壁のモーメントが小さいことが特徴といえる。

パネル隔壁では頭部変位挙動と同様にピーク荷重後に前壁のみの曲げモーメントが増加してゆく現象が特徴的である。隔壁の深部が座屈して荷重伝達しなくなり、頭部のみで荷重伝達することで前壁

の曲げが進行してゆく現象が考えられる。

6 結 言

大水深化、軟弱地盤への対応は、港湾分野での大きなニーズとなっている。これに応えるものの一つとして、二重矢板壁という在来工法の特徴を活かしながら、隔壁という形で工夫を加えた高剛性二重矢板壁という新たな構造物について採り上げた。

本論文では、その研究の中から模型実験による挙動調査によって、高剛性二重矢板壁が合理的な変形特性を有するものであることを紹介した。

模型実験結果を総括すると、従来の二重矢板壁および筆者らの提案する高剛性二重矢板壁は次のような挙動特性を有すると考えられる。

- (1) 二重矢板壁の挙動は外力の作用の仕方などによって、抵抗機構が異なり、耐荷力、変形量に大きな差が生じる。とくに、従来の隔壁がない二重矢板壁では、前壁に支配的な荷重を受けた場合に小さな抵抗しか発揮できない。
- (2) 二重矢板壁では、中詰部が圧縮、引張およびせん断に対して十分な耐力を有していることが重要であり、中詰部に隔壁を配置することで、耐荷力および剛性が向上する。
- (3) 転倒モーメントが卓越する荷重系の場合は、中詰部のせん断力も大きくなり、隔壁のせん断剛性が重要であるが、滑動モードが卓越する場合には、引張・圧縮力の伝達が要点となり、せん断ずれを生じる矢板のような隔壁でも有効となる。
- (4) 隔壁を配置することで、変位の低減のみならず、矢板の曲げ応力を低減する効果も期待できる。

模型実験では、ここに掲載した以外の実験ケースも含めて、土圧やせん断ひずみなどの詳細なデータも収集しており、抵抗機構や変形モデル、数値解析などの検討も進めているところである。

また、実構造物の建設において重要となる隔壁部材の構造解析や隔壁継手部の耐荷力試験なども別途実施し、隔壁に作用する引張力やせん断力に耐え得る継手構造などの検討も完了している。これらの結果については機会を改めて報告したい。

最後に、本研究は運輸省港湾技術研究所と川崎製鉄の共同研究で実施したものであることを付記する。また、研究を進めるに際して有意義なご助言をいただいた運輸省第二港湾建設局他の関係各位に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) M. Sawaguchi: "Lateral Behavior of a Double Sheet Pile Wall Structure," *Journal of the Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 14(1974)1, 45-59
- 2) 大堀晃一、井司喜博、高橋邦夫、上田 寛、原 道彦、川井 豊、堀田啓介: 「二重矢板式構造物の力学特性に関する研究」, 港湾技術研究所報告, 23(1984)1, 103-151
- 3) たとえば、日本港湾協会: 「港湾の施設の技術上の基準・同解説, 改訂版(下巻)」, (1989), 199-201
- 4) 柳生忠彦、藤原辰彦: 「頭部剛結二重矢板式締切堤の水平載荷試験及び解析について」, 埋立と浚渫, (1989)145, 38-55
- 5) たとえば、松岡國太郎編: 「仮締切り工の設計・施工ノウハウ」, (1994), [近代図書]
- 6) 小林道彦、鈴木義久、佐藤輝男: 「大規模二重矢板式山留め工による海底トンネルの施工」, 基礎工, 20(1992)8, 108-115
- 7) 原 道彦、石田昌弘、中尾 蔵: 「多段タイロッド式二重矢板壁の力学特性」, 第15回土質工学研究発表会講演集, (1980), 1529-1532
- 8) 藤井 喬、西平福宏: 「武豊火力発電所取水口二重締切りの例」, 土木施工, 15(1974)14, 143-149
- 9) 堀見雅樹、佐々木義昭、押田和雄、水谷太作、脇屋泰上: 「二重矢板壁を用いた掘削山留め兼用締切工に関する模型実験」, 土木学会第49回年次学術講演会, (1994), 1066-1067