

## 二重鋼矢板壁の津波作用時における構造評価

戸田和秀<sup>1</sup>, 岡由剛<sup>1</sup>, 楠本操<sup>1</sup>, 水谷太作<sup>1</sup>, 西山輝樹<sup>1</sup>, 永尾直也<sup>1</sup>, 恩田邦彦<sup>1</sup>

1 一般社団法人 鋼管杭・鋼矢板技術協会

### 概要

東日本大震災による津波来襲にも天端を維持していた二重鋼矢板壁を対象として、現地調査結果および入手できた設計計算時の条件に基づいて試設計ならびに再現解析を実施した。試設計の結果、2列の鋼矢板壁が発揮する抵抗モーメントを考慮すると、津波波力として津波高さの1.5倍程度の静水圧を作用させた条件で、実現を説明できる結果となった。再現解析では、津波高さの1.5倍の静水圧を作用させた条件で、二重鋼矢板壁根入れ部の鋼矢板と地盤の摩擦を考慮すると、鋼矢板に発生する応力度は降伏応力度未満となることを確認した。以上より、二重鋼矢板壁は、津波に対して壁体天端高さを維持するとともに、根入れ構造により地震および津波に有効な構造であることを確認した。

キーワード：二重鋼矢板壁，津波，再現解析（5つ以内）

### 1. はじめに

東日本大震災による津波来襲により、多くの土木構造物が被災した。筆者らは被災状況を調査する中で、東北地方の二重鋼矢板壁が津波来襲を受けたにも関わらず鋼矢板壁の天端を維持していたことを確認した。二重鋼矢板壁構造は、津波作用時の設計法が明確に定められておらず、津波波力の設定方法などに課題がある。そこで現地調査結果および入手できた設計計算時の条件に基づいて試設計ならびに再現解析を実施したので、その結果について報告する。

### 2. 現地調査概要

津波来襲を受けた東北地方の二重鋼矢板壁を対象として、震災後3カ月程度経過した時点で実施した現地調査結果を報告する。

#### 2.1 調査対象

岩手県で水門建設のために設置されていた二重鋼矢板壁の現地調査を実施した。調査対象を表1に示す。

表1 二重鋼矢板壁の調査対象一覧

	調査施設	構造明細	調査地点の揺れの大きさ
(1)	岩手県金石市 唐丹町下荒川 (水門工事)	SP-10H×L=10.5~13.5m (仮締切部) SP-III×L=12.5m (護岸部)等	震度 5強~6弱
(2)	岩手県下閉伊郡 山田町織笠 (水門工事)	SP-IVw、VL (仮締切 二重壁部) SP-III (仮締切 隔壁部)	震度 5弱~5強

#### 2.2 下荒川水門工事二重鋼矢板壁の調査結果

下荒川水門における二重鋼矢板壁の調査結果の概要を以下に示す。

本二重鋼矢板壁は、建設中の水門を起点に、水門内側と海側に設置されている(写真1)。また、護岸部にも二重鋼矢板壁が構築されている。

水門内側の二重鋼矢板壁は、鋼矢板、タイロッドとも健全な状態で維持されていた。水門の内側ということもあり、中詰土の流出もほとんど見られなかった。

海側の二重鋼矢板壁についても、一部建設途中で中詰めされていないと思われる部分を除き、鋼矢板およびタイロッドは健全であった。水門内側よりも津波の影響を大きく受けており、中詰土については一様に1m程度洗掘されていた(写真1)。また、二重鋼矢板壁の外側の水深を計測したところ、二重鋼矢板壁の両側で水深に差があることが分かった。津波の影響より、海側の海底面が大きく洗掘されており、少なくとも海側、水門側の差である2m程度の洗掘を受けたことが想定される(水門側も洗掘されている場合、海側の洗掘度がさらに大きい可能性も考えられる)。

また、護岸部の二重鋼矢板壁についても健全な状態を維持していた。

壊滅的な周辺状況とは対照的に、二重鋼矢板壁は天端を維持しており、鋼矢板による根入れ構造が地震および津波を受けた際にも高さを維持することに対して有効であったことが確認できた。



写真1 下荒川水門二重鋼矢板壁 被災状況

### 3. 二重鋼矢板壁における津波被災再現試設計

下荒川水門を対象として、二重鋼矢板壁構造の津波に対する効果を明らかにし、その有用性の検証を目的に、津波波力を考慮した試設計の結果を以下に示す。

#### 3.1 検討対象

検討対象は、写真 1 に示す水門から海側の二重鋼矢板壁とした。本地域は図 1 に示すように、湾奥に位置している。また、写真 2 は、津波時想定水位を示すものである。



図 1 対象地点 写真 2 全景(水門より海側)

#### 3.2 検討断面

施工時の設計計算書は入手できなかったが、「鋼矢板型式 10H、鋼矢板長  $L=10.50\text{m}$ 、壁体幅  $B=4.50\text{m}$ 」であることは把握できた。そこで入手できた条件をもとに、「鋼矢板二重式仮締切 設計マニュアル」<sup>1)</sup>に準じて設計上許容される限界の根入れ長を逆算し、検討断面を図 3 に示す断面と仮定した。

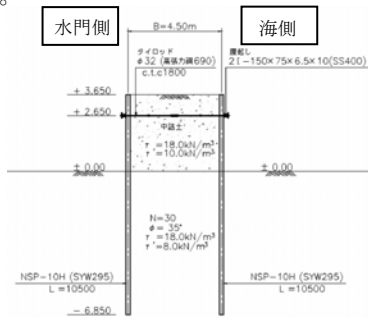


図 3 検討断面

### 3.3 津波波力の設定

#### 3.3.1 津波高さ

検討に用いる津波高さは、気象庁の発表「地震・火山月報(防災編)」<sup>2)</sup>の釜石市釜石港の推定値(図 4)を参考に、 $9.0\text{m}$ と仮定した。

番号	都道府県	調査地点名	実施官署	調査実施日	推定した津波の高さ
21	青森県	八戸市新湊(八戸検潮所付近)	青森地方気象台	3月30日	6.2m
22	岩手県	久慈市長内町(久慈検潮所付近)	盛岡地方気象台	3月29日	8.6m
23	岩手県	久慈市久慈港	盛岡地方気象台	3月29日	7.8m
24	岩手県	宮古市日立浜町(宮古検潮所付近)	盛岡地方気象台	3月28日	7.3m
25	岩手県	宮古市宮古港	盛岡地方気象台	3月28日	8.5m
26	岩手県	宮古市藤原伊川河口	盛岡地方気象台	3月28日	9.3m
27	岩手県	釜石市魚河岸町(釜石検潮所付近)	盛岡地方気象台	3月30日	9.3m
28	岩手県	釜石市釜石港	盛岡地方気象台	3月30日	8.4m
29	岩手県	大船渡市三陸町越喜菜	気象庁本庁	3月30日	16.1m
30	岩手県	大船渡市三陸町小石浜	気象庁本庁	3月30日	16.5m
31	岩手県	大船渡市白浜漁港	気象庁本庁	3月29日	16.7m
32	岩手県	大船渡市越前漁港	気象庁本庁	3月29日	13.4m
33	岩手県	大船渡市赤崎町長崎(大船渡地検所付近)	気象庁本庁	3月29日	11.8m
34	岩手県	大船渡市赤崎町山口	気象庁本庁	3月29日	10.0m
35	岩手県	大船渡市野々田	気象庁本庁	3月29日	9.7m

※「地震・火山月報(防災編)」<sup>2)</sup>に、一部修正・加筆

図 4 津波高さ

#### 3.3.2 津波波力の計算

##### (1) 津波波力

津波波力は、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」<sup>3)</sup>、国土交通省報道発表「津波に対し構造耐力上安全な建築物の設計法等に係る追加的知見について」<sup>4)</sup>、旧原子力安全・保安院「津波による波力について(コメント回答)」<sup>5)</sup>等を参考に、以下の3ケースとした。

- (a) 港湾基準に準拠し静水圧の 3.0 倍としたケース
- (b) 対象水門が湾奥に位置することを考慮し静水圧の 1.5 倍としたケース
- (c) 津波が本二重壁に対し水平方向に作用したと想定し静水圧としたケース

##### (2) 波圧分布

検討断面に作用させた波圧分布を、図 5 に示す。

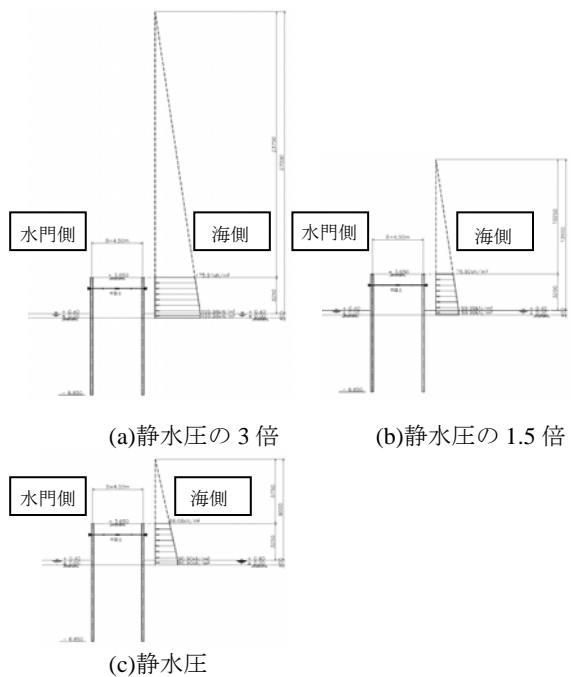


図 5 波圧分布

### 3.4 検討ケース

表 2 に示すケースについて検討を行った。

簡便法では、「鋼矢板二重式仮締切 設計マニュアル」<sup>1)</sup>に基づき、せん断変形、壁体の転倒、滑動に対する照査を行い、大堀らの方法「二重鋼矢板式構造物の力学特性に関する研究」<sup>6)</sup>では、二重鋼矢板の天端変形量および鋼矢板に作用する応力度を評価し変形に対する性能照査を行った。

表 2 検討ケース

検討ケース	設計法	外力		中詰土の内部摩擦角 $\phi$ せん断剛性 $G$
		津波高	津波波力の考え方	
ケース 1	簡便法	9m	静水圧の 3.0 倍	$\phi=30^\circ$ $G=a5.0\sigma_v^{0.7}\theta^{0.5}$
ケース 2			静水圧の 1.5 倍	
ケース 3			静水圧	
ケース 4	大堀らの方法	9m	静水圧の 3.0 倍	
ケース 5			静水圧の 1.5 倍	
ケース 6			静水圧	

### 3.5 検討結果

計算結果一覧を表3, 表4に示す。

表3 検討結果一覧 (簡便法)

設計条件		せん断変形照査		転倒照査	滑動照査
検討ケース	津波波力の考え方	鋼矢板無視	鋼矢板考慮		
		海底面	壁底面	壁底面	壁底面
ケース1	静水圧の3.0倍	0.097	0.492	0.600	2.006
ケース2	静水圧の1.5倍	0.210	1.072	1.254	3.981
ケース3	静水圧	0.254	1.293	1.468	4.565
備考		津波作用時として Fa=1.0			

※下線部は、備考で設定した許容値を超えていることを示す

表4 検討結果一覧 (大堀らの方法)

設計条件		天端変位 [mm]		鋼矢板応力度 [N/mm <sup>2</sup> ]	
検討ケース	津波波力の考え方	海側	陸側	海側	陸側
ケース4	静水圧の3.0倍	23.316	22.284	622.6	578.7
ケース5	静水圧の1.5倍	9.778	9.346	262.4	243.5
ケース6	静水圧	7.871	7.546	212.5	196.8
備考：許容値		10.95cm (壁高の3%)		295N/mm <sup>2</sup>	

※下線部は、備考で設定した許容値を超えていることを示す

### 3.6 試設計結果まとめ

現地調査により、二重鋼矢板壁は津波の襲来を受けたにもかかわらず、転倒等の変形は生じず壁体として安定を保っていたことから、次のことが考えられる。

#### (1) 簡便法

- (a) 津波波力として、津波高さの1.5倍程度の静水圧を作用させると、実現象を説明できる。
- (b) せん断変形の照査においては、2列の鋼矢板が発揮する抵抗モーメントを考慮するのが良い。

#### (2) 大堀らの方法

- (a) 津波波力として、津波高さの1.5倍程度の静水圧を作用させると、壁体天端の許容変位量、鋼矢板の発生応力度が許容値の90%程度となった。このことから、簡便法を用いて津波作用時の検討ができる。

## 4. 二重鋼矢板壁における津波被災再現解析

試設計においては、転倒に対する検討では、根入れ部の土と鋼矢板の摩擦を考慮していない。しかしながら実際には、その摩擦によっても転倒に抵抗しているものと推測される。鋼矢板の摩擦を考慮することで、より合理的な設計になると考えられるため、摩擦を考慮した再現解析結果を以下に示す。

### 4.1 検討概要

二重鋼矢板壁根入れ部の鋼矢板と地盤の間の摩擦を考慮する場合と考慮しない場合の2ケースで、再現解析を実施した。

### 4.2 使用プログラム

FLIP プログラムにより、二重鋼矢板壁を2次元断面でモデル化し、静的な Push-Over 解析を行う。二重鋼矢板壁の部材構成は表5に示す FEM 要素でモデル化した。

表5 構成部材

部材	FEM 要素
中詰土・海底地盤	四角形平面ひずみ要素
鋼矢板	2節点梁要素
タイロッド	等価な線形パネ
壁面摩擦角	ジョイント要素

### 4.3 土質条件

表6に土質条件を、表7に FLIP 解析用の土質条件を示す。港湾技研資料 No.869<sup>7)</sup>を参考に、今回の検討においては、通常的设计で用いる値+5度を用いることとした。

表6 土質条件

土層名	N 値	単位体積重量(kN/m <sup>3</sup> )		内部摩擦角 $\phi$ (°)
		湿潤 $\gamma$	水中 $\gamma$	
中詰土(1)	—	18.0	10.0	30
中詰土(2)	—	18.0	10.0	40
海底地盤	30	18.0	8.0	35

表7 FLIP 解析用の土質条件

土層名	N 値	単位体積重量(kN/m <sup>3</sup> )		内部摩擦角 $\phi$ (°)
		湿潤 $\gamma$	水中 $\gamma$	
中詰土(1)	10	18.0	10.0	35
中詰土(2)	30	18.0	10.0	45
海底地盤	30	18.0	8.0	40

### 4.4 津波波力

津波波力を荷重として載荷する。釜石港の津波高さの推定値を参考として 9m と仮定した。津波波力は、Step1 は静水圧相当、Step2、Step3 は港湾基準に従ってそれぞれ静水圧の1.5倍、3.0倍とした。なお、津波による横荷重を載荷する前に、海底面下の地盤、中詰土に自重を与えて、地盤の初期応力状態を再現する。このとき、鋼矢板と地盤の間の摩擦は考慮しない。

### 4.5 FLIP 解析モデル

図6に FLIP 解析モデルを示す。

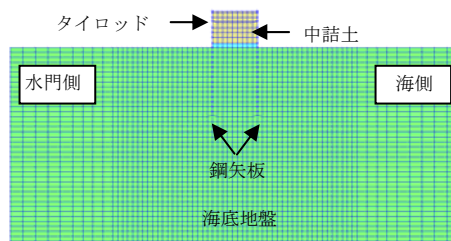


図6 FLIP 解析モデル



## 4.6 FLIP 解析結果

### 4.6.1 Case1 摩擦考慮

Case1 は鋼矢板と土の間の摩擦を考慮した解析である。解析は Step2 (静水圧×1.5, 325.9kN) まで荷重を載荷し、さらに Step2 から Step3 (静水圧×3.0) の荷重増分 365.0kN の 1.6%, 合計 331.8kN まで載荷した時点で鋼矢板に発生する曲げモーメントが全塑性曲げモーメント (Mp) に達した。解析結果を、図 7 に最大せん断ひずみコンター図を、図 8 に鋼矢板の変位および断面力の深度分布図を示す。

### 4.6.2 Case2 摩擦無視

Case2 は鋼矢板と土の間の摩擦を無視した解析である。解析は Step1 荷重の 90.0%, 合計 250.6kN まで載荷し、さらに荷重を増加した時点で鋼矢板に発生する曲げモーメントが Mp に達した。解析結果を、図 9 に最大せん断ひずみコンター図を、図 10 に鋼矢板の変位および断面力の深度分布図を示す。

### 4.7 再現解析結果まとめ

FLIP を用いた再現解析により、二重鋼矢板壁根入れ部の鋼矢板と地盤との摩擦を考慮した場合、津波波力として津波高さの 1.5 倍の静水圧を作用させても、鋼矢板に発生する曲げモーメントは Mp 未満であった。

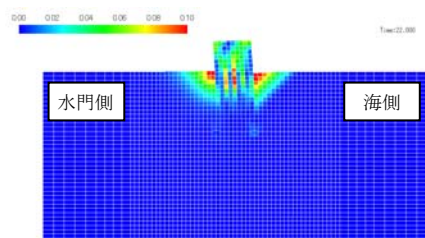


図 7 Case1 最大せん断ひずみコンター図

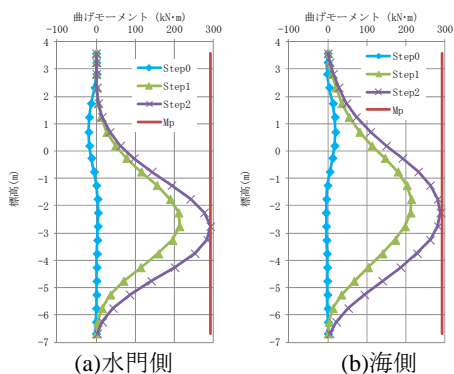


図 8 Case1 鋼矢板 曲げモーメント深度分布図

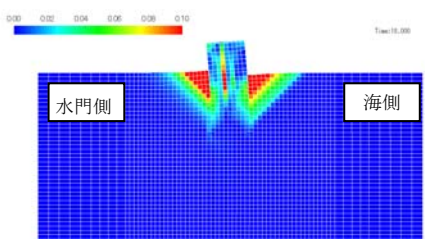


図 9 Case2 最大せん断ひずみコンター図

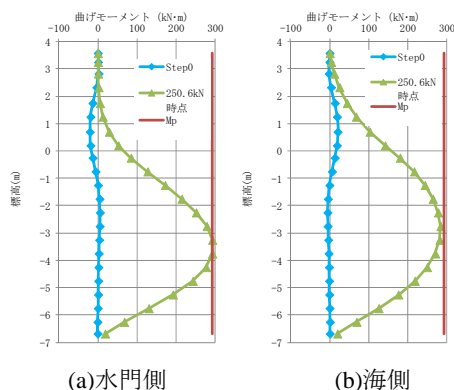


図 10 Case2 鋼矢板 曲げモーメント深度分布図

## 5. まとめ

二重鋼矢板壁は津波を受けても壁体の天端高さを保つ粘り強い構造であり、東日本大震災で津波襲来を受けた断面について試設計ならびに再現解析を実施した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 「鋼矢板二重式仮締切設計マニュアル」に基づいて、せん断変形、壁体の転倒、壁体の滑動に対する照査が可能である。
- (2) 簡便法や大堀らの方法を用いて津波作用時の計算を行う場合、津波高さの 1.5 倍の静水圧を設計断面に対して作用させると、転倒が発生せず天端を維持するという実現象を説明できる結果が得られた。
- (3) 壁体のせん断変形に対する安定性の照査を行う際には、2 列の鋼矢板が発揮する抵抗モーメントを考慮して検討するのが良い。
- (4) FLIP プログラムを用いて作用時の計算を行う場合には、二重鋼矢板壁根入れ部の鋼矢板と地盤の摩擦を考慮して検討するのが良い。

## 参考文献

- 1) 財団法人 国土技術研究センター: 二重鋼矢板式仮締切 設計マニュアル, 2001
- 2) 気象庁: 平成23年度3月 地震・火山月報 (防災編) p.122
- 3) 港湾の施設の技術上の基準・同解説検討委員会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (上・下), 2007
- 4) 国土交通省ホームページ 報道発表資料「津波に対し構造耐力上安全な建築物の設計法等に係る追加的知見について」(2011年11月17日)
- 5) 旧原子力安全・保安院ホームページ 地震・津波に関する意見聴取会 (第6回) 一配布資料「地震・津波6-2 津波による波力について (コメント回答)」
- 6) 森田ら: 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方法: 港湾技術研究所資料 No.869, 1997
- 7) 独立行政法人 港湾空港技術研究所: 港湾技術研究所資料 No.869, 2011

(2014.03.31 受付)

---

---

## Structural evaluation at the time of a tsunami action of a double steel sheet pile wall

Kazuhide TODA<sup>1</sup>, Yoshitake OKA<sup>2</sup>, Misao KUSUMOTO<sup>3</sup>, Taisaku MIZUTANI<sup>4</sup>,  
Teruki NISHIYAMA<sup>4</sup>, Naoya NAGAO<sup>4</sup>, Kunihiko ONDA<sup>4</sup>

1 Japanese Association for Steel Pipe Piles

### Abstract

It is aimed at the double steel sheet pile wall which was maintaining height in spite of having been subject to the influence of the tsunami by the Great East Japan Earthquake, trial design and reappearance analysis were carried out based on a field survey result and the design calculation conditions. The result of a trial design, when the moment of resistance which the steel sheet pile wall of two rows demonstrates is taken into consideration, when tsunami wave force was about 1.5 times the hydrostatic pressure of tsunami height, a result which can explain an actual phenomenon was brought. The result of the reappearance analysis, if friction of a steel sheet pile and the foundation is taken into consideration, when tsunami wave force was about 1.5 times the hydrostatic pressure of tsunami height, the stress intensity which occurs in a steel sheet pile checked that it was less than the degree of yield stress. As mentioned above, it checked that a double steel sheet pile wall maintained the height of a wall object to tsunami and was an effective structure in earthquake and tsunami by setting-depth structure.

Key words: double steel sheet pile wall, tsunami, reappearance analysis