

## 楕形鋼矢板壁工法マニュアル（案）

付属資料

## 1. ハット形鋼矢板の曲げ変形特性

### 1. 1 ハット形鋼矢板の諸元

#### (1) 形状

ハット形鋼矢板は、継手が壁体縁端に位置するため、継手のすべりが断面性能に影響せず継手効率を考慮する必要がない形状を有している。

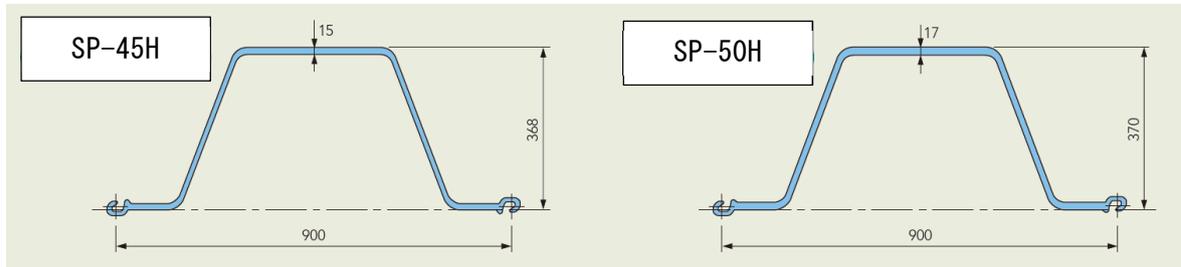


図1 ハット形鋼矢板 SP-45H、50H

#### (2) 断面性能

表1 寸法および鋼矢板1枚当たり (カタログ値)

型式	寸法			鋼矢板1枚当たり			
	有効幅 W mm	有効高さ H mm	厚さ t mm	断面積 cm <sup>2</sup>	断面二次 モーメント cm <sup>4</sup>	断面係数 cm <sup>3</sup>	単位重量 kg/m
SP-45H	900	368	15.0	187.0	40,500	2,200	147
SP-50H	900	370	17.0	212.7	46,000	2,490	167

表2 寸法および壁幅1m当り (カタログ値)

型式	寸法			鋼矢板1枚当たり			
	有効幅 W mm	有効高さ H mm	厚さ t mm	断面積 cm <sup>2</sup> /m	断面二次 モーメント cm <sup>4</sup> /m	断面係数 cm <sup>3</sup> /m	単位重量 kg/m <sup>2</sup>
SP-45H	900	368	15.0	207.8	45,000	2,450	163
SP-50H	900	370	17.0	236.3	51,100	2,760	186

#### (3) 継手嵌合角度および互換性

同型のハット形鋼矢板の継手嵌合角度は、±4度である。また、隣り合う型式間で嵌合が可能である。すなわち、SP-45HはSP-50HおよびSP-25Hと嵌合できる。

#### (4) 腐食時断面性能

腐食時の断面性能の算出手順は、以下の通りである。

- ① 以下に示す算定図により、腐食時断面性能低減率 ( $\eta$ ) を読み取り、%単位に丸める。  
(小数点以下を四捨五入)
- ② 丸めた  $\eta$  を  $I_0$ 、 $Z_0$  にそれぞれ乗じる。
- ③ 乗じて得られた値を有効数字3桁に丸め(4桁目を四捨五入し)て、 $I$ 、 $Z$  の値とする。

SP-45H と SP-50H の断面性能について、腐食代が片面 1mm（両面で 2mm）の場合の値を下  
表に示す。

表 3 腐食時断面性能（カタログ値）

型式	公称値（腐食前）		1mm、1mm 腐食時		
	$I_0$ ( $\text{cm}^4/\text{m}$ )	$Z_0$ ( $\text{cm}^3/\text{m}$ )	$\eta$ (%)	$I$ ( $\text{cm}^4/\text{m}$ )	$Z$ ( $\text{cm}^3/\text{m}$ )
SP-45H	45,000	2,450	85	38,300	2,080
SP-50H	51,100	2,760	87	44,500	2,400

$I_0$ 、 $Z_0$ ：腐食前の断面二次モーメントおよび断面係数

$\eta$ ：腐食時断面性能低減率（算定図より読み取り）

$I$ 、 $Z$ ：腐食時の断面二次モーメントおよび断面係数

**腐食時断面性能低減率の算定図**

$\eta$ ：腐食時断面性能低減率(%)

$t_1$ 、 $t_2$ ：鋼矢板各面の腐食代(mm)

$\alpha$ ： $t_2$ と $t_1$ の比  $\alpha = t_2/t_1$

本図表は直線の図示範囲のみ有効

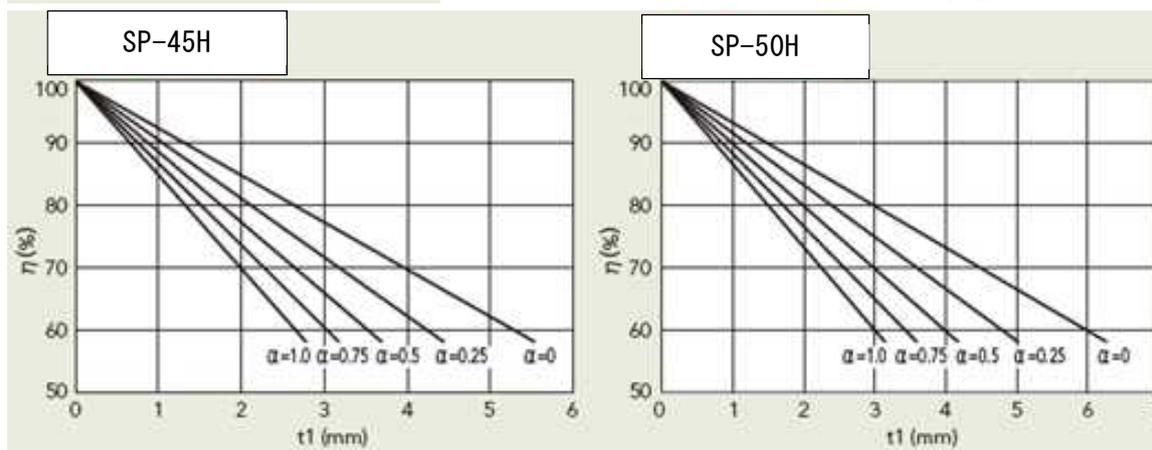
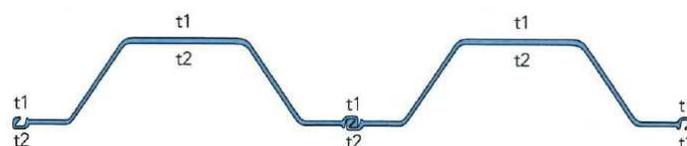


図 2 ハット形矢板の腐食断面性能低減率（カタログ値）

(5) 材質（カタログ値）

名称	規格記号	化学成分(%)						炭素当量(%)
		C	Si	Mn	P	S	N	Coq <sub>1</sub>
溶接用熱間 圧延鋼矢板 JISA 5523	SYW295	0.18以下	0.55以下	1.50以下	0.04以下	0.04以下	0.0060以下	0.44以下
	SYW390							0.45以下
	SYW430*							0.46以下

注：炭素当量=C+Mn/6+Si/24+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14

名称	規格記号	降伏点 または耐力 N/mm <sup>2</sup>	引張強さ N/mm <sup>2</sup>	試験片	伸び %	シャルピー吸収エネルギー(J)			試験片および 試験片採取 方向	
						試験温度 (°C)	標準試験片	サブサイズ試験片		
							10×10mm	10×7.5mm		10×5mm
溶接用熱間 圧延鋼矢板 JISA 5523	SYW295	295以上	450以上	1A号	18以上	0	43以上	32以上	22以上	Vノッチ 圧延方向
				14B号						
	SYW390	390以上	490以上	1A号	16以上					
				14B号						
	SYW430*	430以上	510以上	1A号	14以上					
				14B号						

\* [NS-SP10HのSYW430]をご検討の際は、あらかじめご確認ください。

## 1. 2 楕形鋼矢板壁工法における短尺矢板部(壁体部)の曲げ変形特性

### (1) 短尺矢板部(壁体部)の曲げ性能諸元

楕形鋼矢板構造の短尺矢板部(壁体部)は、鋼矢板の継手を互いに嵌合させた壁面構造として使用され、全塑性曲率を超えない範囲で使用されることを前提としている。そのため、短尺矢板の曲げ性能は、従来通り壁体としての曲げ性能を適用することができる。

ここでは、カタログ値に加えて、**塑性断面係数と全塑性モーメントを追記**して示す。

表 4 短尺矢板部(壁体部)の断面諸元 (ハット形鋼矢板 45H、50H)

型式	鋼矢板 1 枚あたり			壁幅 1m あたり		
	断面二次 モーメント	断面係数 Ze	塑性断面 係数 Zp	断面二次 モーメント	断面係数 Ze	塑性断面 係数 Zp
	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>4</sup> /m	cm <sup>3</sup> /m	cm <sup>3</sup> /m
SP-45H	40,500	2,200	2,546	45,000	2,450	2,830
SP-50H	46,000	2,490	2,892	51,000	2,760	3,210

黄色の網掛けは、提案値

表 5 短尺矢板部(壁体部)の曲げ性能諸元 (ハット形鋼矢板 45H、50H)

型式	材料規格	鋼矢板 1 枚あたり		
		降伏強度 $\sigma_y$	降伏モーメント My	全塑性モーメント Mp
		N/mm <sup>2</sup>	kN・m	kN・m
SP-45H	SYW430	430	946	1,095
SP-50H	SYW430	430	1,071	1,244
SP-45H	SYW390	390	858	993
SP-50H	SYW390	390	971	1,128

黄色の網掛けは、提案値

## (2) 短尺矢板部 (壁体部) のバイリニア型 M-Φモデル

最大曲げモーメント  $M_p$  と曲率の関係をバイリニア型でモデル化する場合、軸力を考慮しない場合には最大曲げモーメントに対する曲率  $\Phi_p$  は下記により算出できる。

$$\Phi_p = (\sigma_y Z_p) / (EI) = M_p / (EI)$$

$$\Phi_y = (\sigma_y Z_e) / (EI) = M_y / (EI)$$

ただし、

$\Phi_p$  : 軸力を考慮しない最大曲げモーメントに対する曲率 (1/mm)

$\Phi_y$  : 降伏モーメントに相当する曲率 (1/mm)

E : ヤング率 (N/mm<sup>2</sup>)、ヤング率 E は  $2.0 \times 10^5$  (N/mm<sup>2</sup>)

港湾の施設の技術上の基準・同解説 (H30 年度版) pp469、鋼材の特性値による

I : 断面二次モーメント (mm<sup>4</sup>)

$Z_p$  : 塑性断面係数 (mm<sup>3</sup>)

$Z_e$  : 断面係数 (mm<sup>3</sup>)

$\sigma_y$  : 降伏応力 (N/mm<sup>2</sup>)

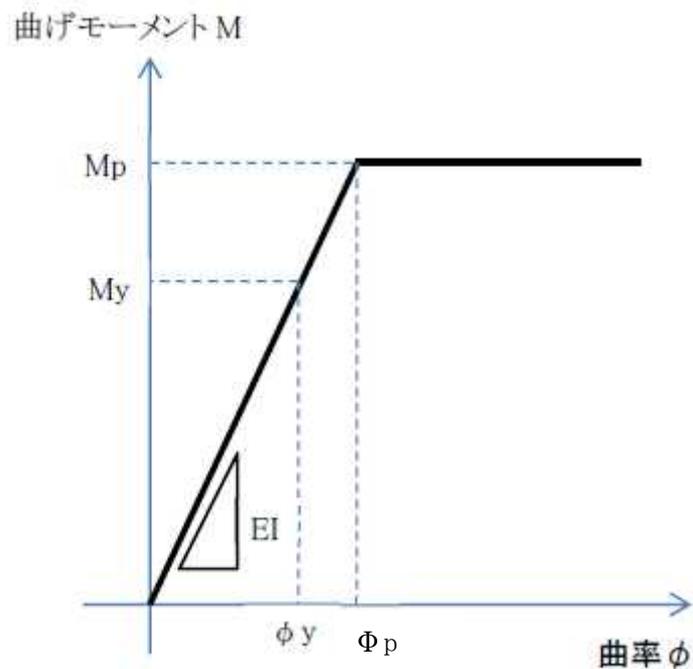


図3 梁要素 (バイリニア型) モデルと M-Φ 関係のイメージ

表-5 に示す「降伏モーメント」を  $M_y$ 、「全塑性モーメント」を  $M_p$  とすれば、バイリニア型の  $M-\Phi$  関係は、図-4 のように図示される。

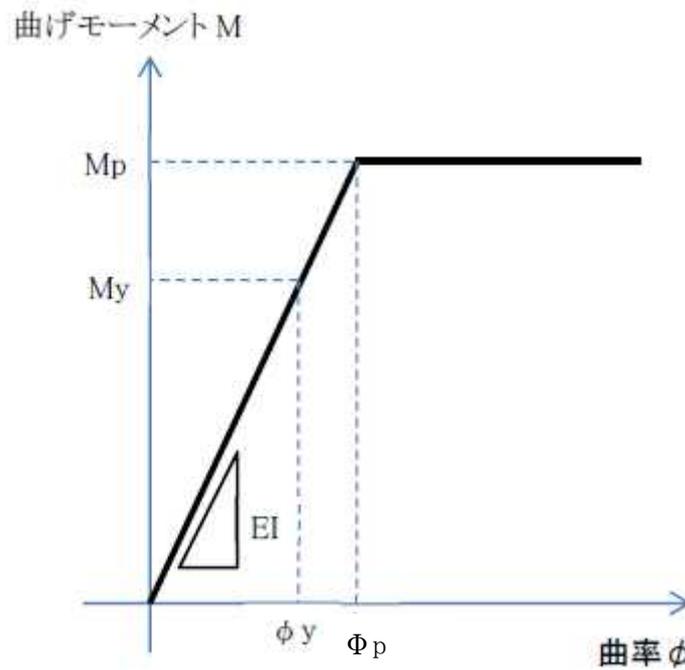


図 4 短尺矢板部（壁体部）のバイリニア型モデル模式図

表 6 短尺矢板部（壁体部）のバイリニア型  $M-\Phi$  関係諸元（鋼矢板 1 枚あたり）

型式	材料規格 降伏強度	降伏モーメント	全塑性モーメント	降伏曲率	勾配変化点 の曲率
		$M_y$	$M_p$	$\phi_y$	$\Phi_p$
		kN・m	kN・m	1/m	1/m
SP-45H	SYW430	946	1,095	0.011	0.013
SP-50H	$\sigma_y = 430\text{N/mm}^2$	1,071	1,244	0.011	0.013
SP-45H	SYW390	858	993	0.010	0.012
SP-50H	$\sigma_y = 390\text{N/mm}^2$	971	1,128	0.010	0.012

黄色の網掛けは、提案値

### 1. 3 楕形鋼矢板構造における長尺矢板部(単体部)の曲げ変形特性

#### (1) 長尺矢板部(単体部)の曲げ試験結果

楕形鋼矢板構造の長尺矢板部(単体部)は、液状化現象発生時には、短尺矢板部(壁体部)のような壁体としての使用で想定される変化量をはるかに超える大変形となることが想定されている。

そのため、ハット形鋼矢板を単体・単独の単柱として使用する形態を想定して、平成30年度にSP-50Hを、令和元年度にSP-45Hについて鋼矢板の曲げ載荷試験を行うとともに、FEM解析にて試験結果の検証を実施している。

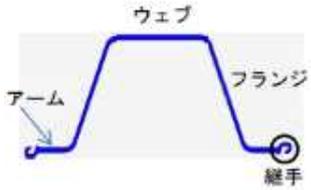
鋼矢板の曲げ載荷試験は、全長5.5mの試験体の端部を固定する片持ち梁について、固定部から1mの載荷位置を油圧ジャッキで強制的に変位を与える方法とした。

曲げ方向は、ハット形鋼矢板のアームが引張・ウェブが圧縮となる“正曲げ試験”と、逆にハット形鋼矢板のアームが圧縮・ウェブが引張となる“負曲げ試験”の2方向とした。

表7 ハット形鋼矢板(単体)の曲げ載荷試験数量表

試験年度	型式/規格	曲げ方向	試験数量	備考
平成30年度	SP-50H	正曲げ	1	
	SYW430	負曲げ	1	
令和元年度	SP-45H	正曲げ	1	
	SYW430	負曲げ	1	

表8 ハット形鋼矢板(単体)の正曲げ・負曲げの定義

正曲げ	アーム・継手側	引張縁	
	ウェブ側	圧縮縁	
負曲げ	アーム・継手側	圧縮縁	
	ウェブ側	引張縁	

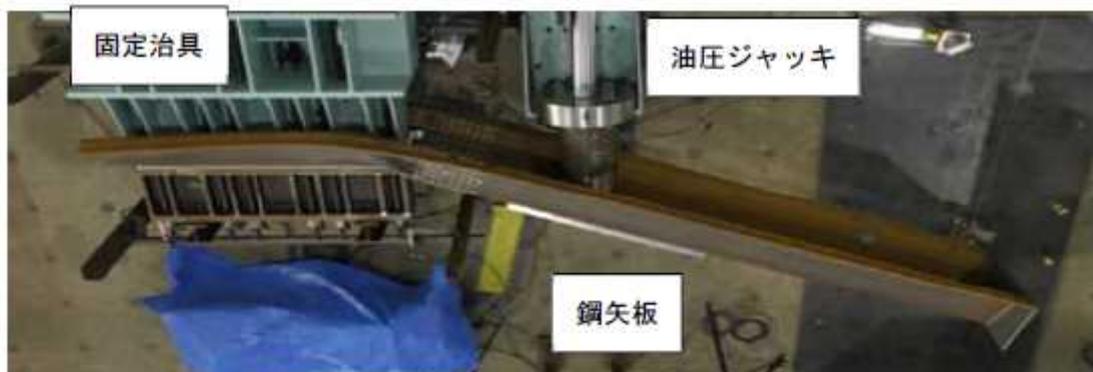


図5 曲げ試験後の鋼矢板 (SP-45H、正曲げ試験)

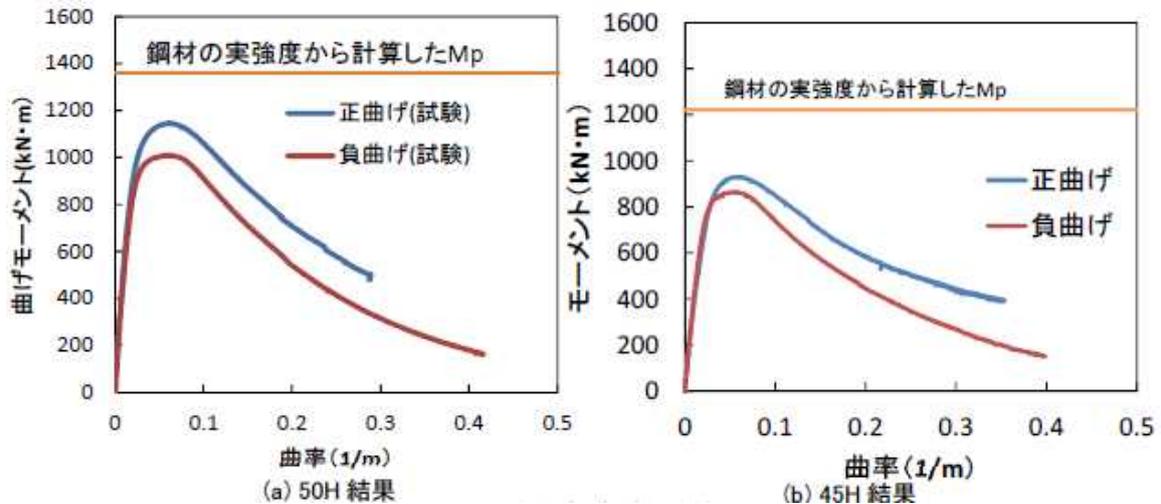
曲げ荷重試験の結果を M- $\Phi$  関係のグラフとして以下に示す。

曲げ荷重試験では、最大曲げモーメントが、壁体としてのハット形鋼矢板の全塑性曲げモーメントの計算値に比較して小さくなっている。

この理由としては、

- A) 単体曲げによる断面変形の影響。特に負曲げでは断面変形の影響は無視できない。
- B) 荷重点アーム長が短いことによる過大なせん断力が作用し、これによる影響により曲げ抵抗が減少。
- C) 矢板が斜めになっているため、荷重点に荷重方向とは別の方向の力が作用している影響。

が考えられるため、FEM による再現解析で考察し、 $M_y$ 、 $M_p$  の設計用値を検討する必要があることに留意しなければならない。



注1) Mは荷重点までの距離 1.0m をアーム長として算出している

注2)  $\Phi$ は $\Phi = \theta / h$ 、ただし、 $h=1.0m$ にて算出している

図6 ハット形鋼矢板（単体）の曲げ荷重試験結果

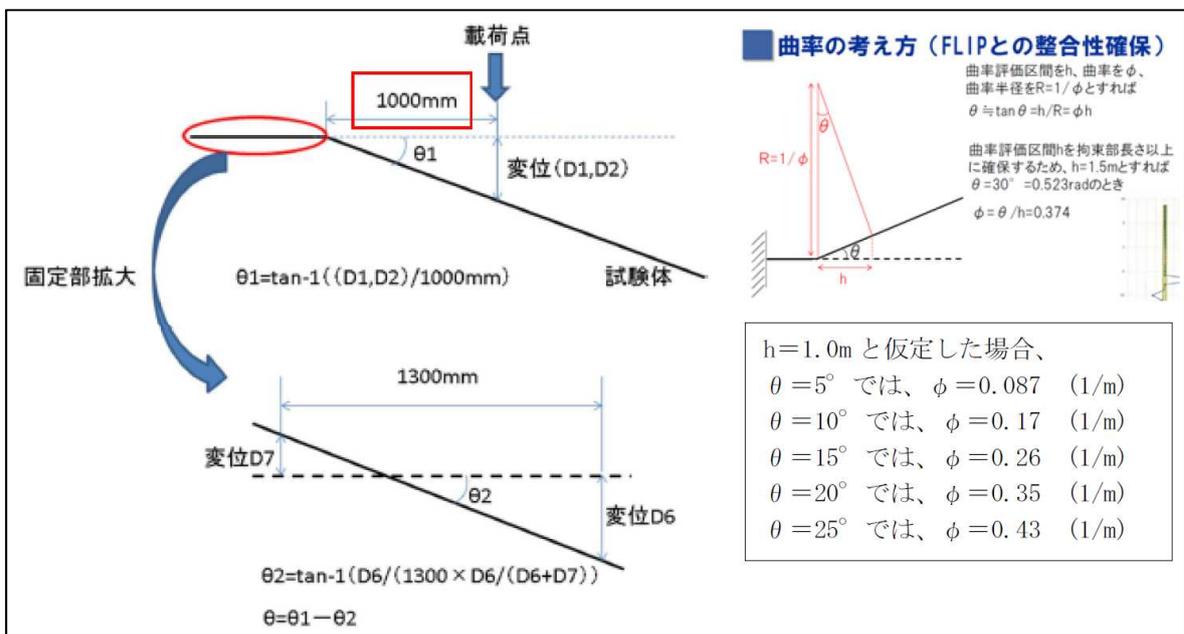


図7 試験における曲げ角度  $\theta$  と曲率  $\Phi$  の算出方法

片持ち梁方式曲げ載荷試験の M- $\Phi$  関係の特徴は以下のとおりである。

- ① いずれの矢板、曲げ方向でも載荷初期は曲げモーメントがほぼ線形に増加し、曲率 0.05 程度で最大値を取ったのち、曲率の増加とともに徐々に減少する。
- ② 正曲げと負曲げを比較すると、最大モーメントの値は正曲げの方が大きい。  
\*負曲げ試験では、最大曲げモーメントに達する前段階で矢板幅 900mm が大きく拡大して部材有効高も減少する変形が観られる。一方、正曲げ試験では、負曲げ試験ほど極端な変形とはならないが、連続矢板のように幅方向が横拘束されている状態に比較すると幅方向の変形が大きいことによるものと推察される。
- ③ 鋼矢板を連続壁として使用する場合、最大曲げモーメントとしては理論的に計算される全塑性モーメントの値が期待されるが、本試験のような単体の曲げ条件では矢板型式・曲げ方向によらず、最大モーメントは壁体の全塑性モーメントの値を下回った。

(曲げ試験の最大曲げモーメント) / (全塑性モーメントの計算値) の値を、以下に示す。

表 9 ハット形鋼矢板の曲げ載荷試験の低減係数

SP-50H	材料試験	計算値	曲げ試験	最大 M / 全塑性 M	補足説明
	降伏強度	全塑性 M	最大 M		
	N/mm <sup>2</sup>	kN・m	KN・m		
正曲げ	471	1360	1145	0.84	片持ち曲げ試験のせん断スパン比の影響を含む
負曲げ	471	1360	1008	0.74	

SP-45H	材料試験	計算値	曲げ試験	最大 M / 全塑性 M	補足説明
	降伏強度	全塑性 M	最大 M		
	N/mm <sup>2</sup>	kN・m	KN・m		
正曲げ	471	1212	929	0.77	片持ち曲げ試験のせん断スパン比の影響を含む
負曲げ	471	1212	863	0.71	

試験方法や境界条件など、試験結果に影響を与える因子を以下に示すが、 $\gamma_3$  と  $\gamma_4$  の影響は小さく  $\gamma_3=1.0$ 、 $\gamma_4=1.0$  とできることを別途確認している。

$$M_d = \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot \gamma_3 \cdot \gamma_4 \cdot M_p$$

$M_d$ : 設計・解析に用いる曲げモーメント

$M_p$ : 全塑性曲げモーメント

$\gamma_1$ : 鋼矢板の単体利用に関する補正係数

$\gamma_2$ : 荷重条件に関する補正係数(ここではせん断スパン比による係数)

$\gamma_3$ : 付加曲げモーメントに関する補正係数

$\gamma_4$ : 境界拘束に関する補正係数

## (2) 片持ち曲げ解析モデルによる検討

ハット形鋼矢板を単体利用する影響（ $\gamma 1$ ）とせん断スパン比の影響（ $\gamma 2$ ）を算定するため、曲げ載荷試験を模擬した鋼矢板の片持ち曲げ解析を行った。解析は最大曲げモーメントのピーク値を比較することに着目して実施した。

### 1) 解析モデル及び検討条件

モデル	概要図	断面形状
A	<p>固定部 1500mm 1000mm 載荷点</p> <p>モデルA：最大モーメントが単体利用およびせん断スパン比の影響をうける</p>	
B	<p>固定部 1500mm 2350mm 載荷点</p>	
C	<p>固定部 1500mm 3850mm 載荷点</p>	
D	<p>固定部 1500mm 3850mm 載荷点</p> <p>モデルD：矢板継手を中央に配置し、左右を循環境界とすることで壁体利用を模擬</p>	<p>循環境界</p>

図8 ハット形鋼矢板の片持ち曲げ解析モデル

#### 【検討条件】

- ・ 矢板全長：5500mm、固定部：1500mm でウェブの変位のみを拘束
- ・ 載荷点は、モデルAで1000mm（曲げ載荷試験に同じ）、モデルBで2350mm、モデルCで3850mmとし、せん断スパン比の影響が小さくなる設定
- ・ 材料強度：材料規格の降伏強度430MPa、バイリニア型の応力ひずみ曲線

モデルA～D、矢板形式50Hおよび45H、正曲げ・負曲げについて実施、M- $\phi$ 曲線を算出して、その最大曲げモーメントを比較することで、単体利用およびせん断スパン比が最大曲げモーメントに与える影響を評価した。

2) 解析結果

解析結果をM- $\Phi$ 関係で表示したものを以下に示す。

① SP-50H (SYW430) のM- $\Phi$

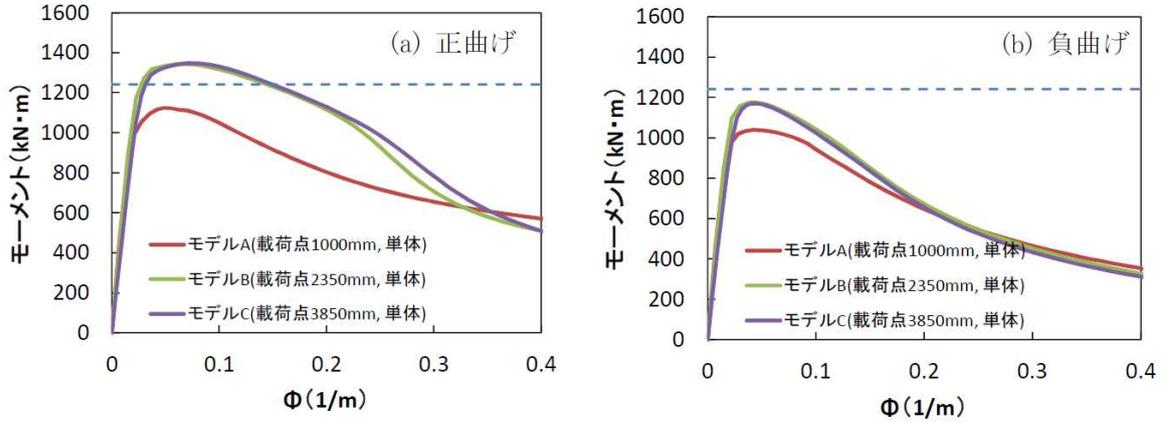


図9 片持ち曲げ解析から得られたM- $\Phi$ 曲線 (SP-50H、せん断スパン比の影響確認)

② SP-45H (SYW430) のM- $\Phi$

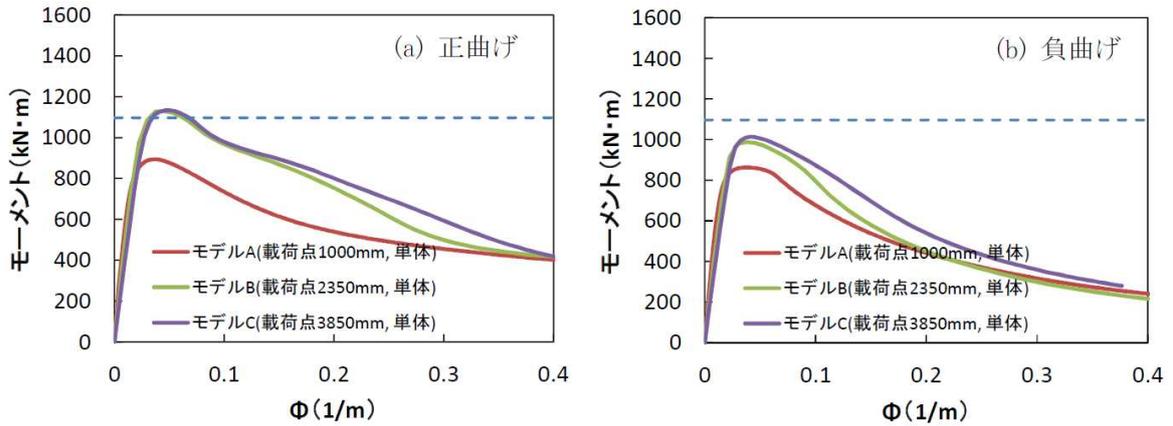


図10 片持ち曲げ解析から得られたM- $\Phi$ 曲線 (SP-45H、せん断スパン比の影響確認)

③ 最大曲げモーメントと固定部～荷点の距離の関係

固定部～荷点の距離が短くなるにつれて、最大曲げモーメントは減少するが、2350mm 以上ではほぼ一定値に収束する。したがって、モデルCではせん断スパン比の影響が最小化されると判断できる。

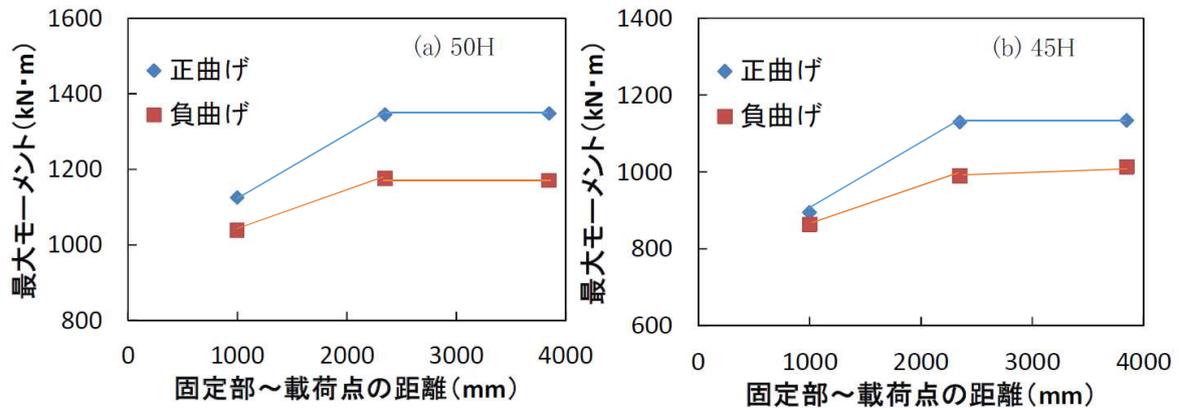


図 11 固定部～荷点距離と最大モーメントの関係

3) せん断スパン比の影響 ( $\gamma_2$ ) と単体利用の影響 ( $\gamma_1$ ) の算定

- ・上記③の結果から、モデルCから得られるM- $\Phi$ 曲線・最大Mはせん断スパン比の影響を無視できることが分かった。
- ・そのため、せん断スパン比の影響を含むモデルAと、せん断スパン比の影響が無視できるモデルCを比較することにより、せん断スパン比の影響 ( $\gamma_2$ ) を算定できる。
- ・また、モデルCと連続壁を模擬したモデルDを比較することで、純粋な単体利用の影響 ( $\gamma_1$ ) を算定できると考えた。

以下に、モデルA・C・DのM- $\Phi$ 曲線の比較図を示す。

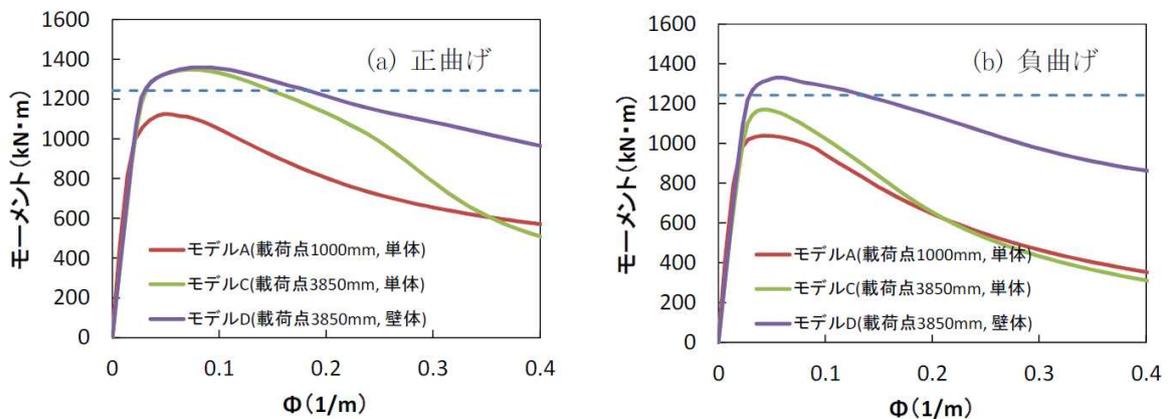


図 12 片持ち曲げ解析から得られたM- $\Phi$ 曲線の比較図 (SP-50H)

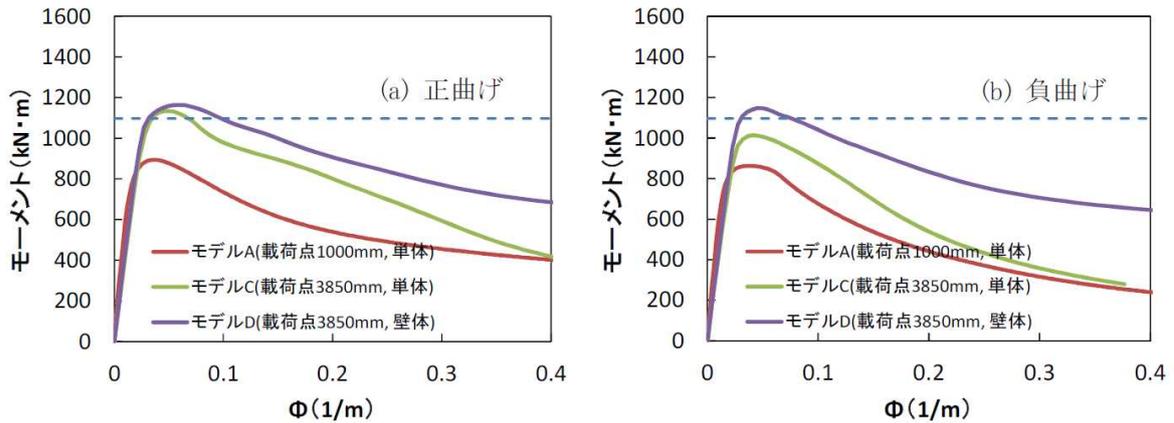


図 13 片持ち曲げ解析から得られたM- $\Phi$  曲線の比較図 (SP-45H)

- ・単体利用を模擬したモデルAおよびモデルCの最大曲げモーメントは、連続壁を模擬したモデルDと比較して小さな値となっている。
- ・特に曲げ載荷試験を模擬したモデルAでは、全塑性モーメントの値を大きく下回る結果を示しており、実際の試験と同じ傾向を示している。

表 10 片持ち曲げ解析による SP-50H の  $\gamma 1$  と  $\gamma 2$

SP-50H	片持ち曲げ解析			C/D	A/C	片持ち曲げ FEM 解析	実験 最大 M/ 全塑性 M
	最大M (kN·m)			単体利用 の影響	せん断スパン比影響		
	モデルA	モデルC	モデルD	$\gamma 1$	$\gamma 2$		
正曲げ	1125	1348	1360	0.99	0.83	0.82	0.84
負曲げ	1039	1171	1331	0.88	0.89	0.78	0.74

表 11 片持ち曲げ解析による SP-45H の  $\gamma 1$  と  $\gamma 2$

SP-45H	片持ち曲げ解析			C/D	A/C	片持ち曲げ FEM 解析	実験 最大 M/ 全塑性 M
	最大M (kN·m)			単体利用 の影響	せん断スパン比影響		
	モデルA	モデルC	モデルD	$\gamma 1$	$\gamma 2$		
正曲げ	894	1134	1164	0.97	0.79	0.77	0.77
負曲げ	846	1013	1148	0.88	0.84	0.74	0.74

- ・上記に示すように、解析から得られた  $\gamma 1$  と  $\gamma 2$  の積は、曲げ載荷試験における「最大モーメント/全塑性モーメント」の値と 5%以内の差で一致している。
- ・これにより、実験における最大モーメントの低減係数が、片持ち曲げ解析により得られた単体利用の低減係数 ( $\gamma 1$ ) およびせん断スパン比による低減係数 ( $\gamma 2$ ) の積で概ね表現可能であることが確認できた。

### (3) 実環境模擬解析モデルによる低減係数 $\gamma_1$ の検討

実際にハット形鋼矢板が楕円鋼矢板工法で使用される際は、短尺矢板と長尺矢板の組み合わせ構造となり、長尺矢板部（単体部）に正曲げと負曲げが複合的に発生するような使用環境となる。そこで、実使用環境において、最大曲げモーメントに影響を及ぼす因子がないか確認するため、実使用環境を模擬した鋼矢板の曲げ解析を実施した。

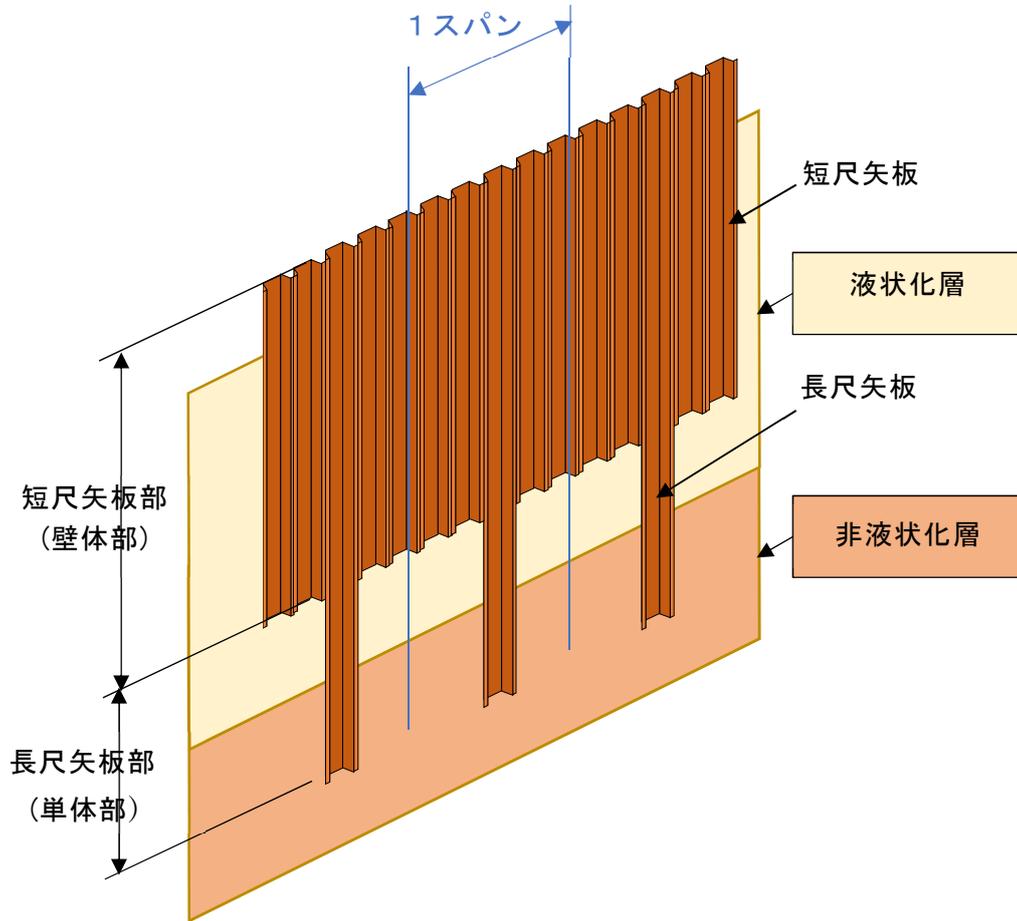


図 14 楕円鋼矢板工法の矢板組合せイメージ

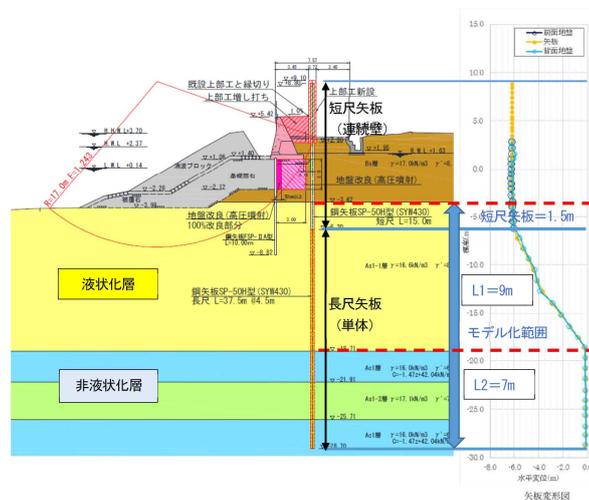


図 15 楕円鋼矢板工法における鋼矢板の変形イメージ

1) 解析モデル

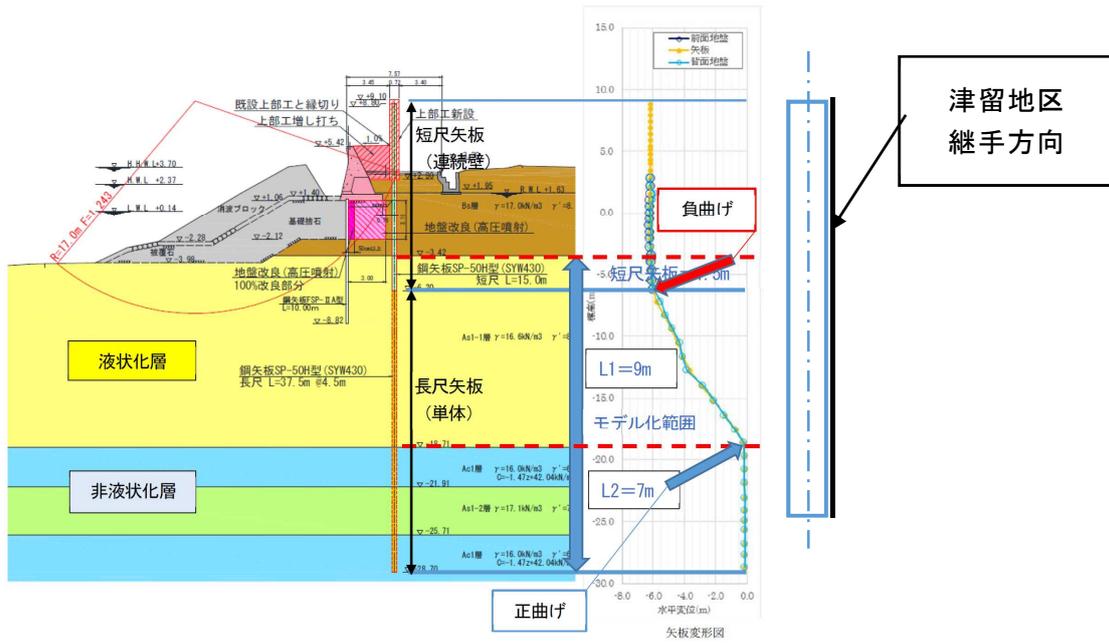


図 16 全体イメージ

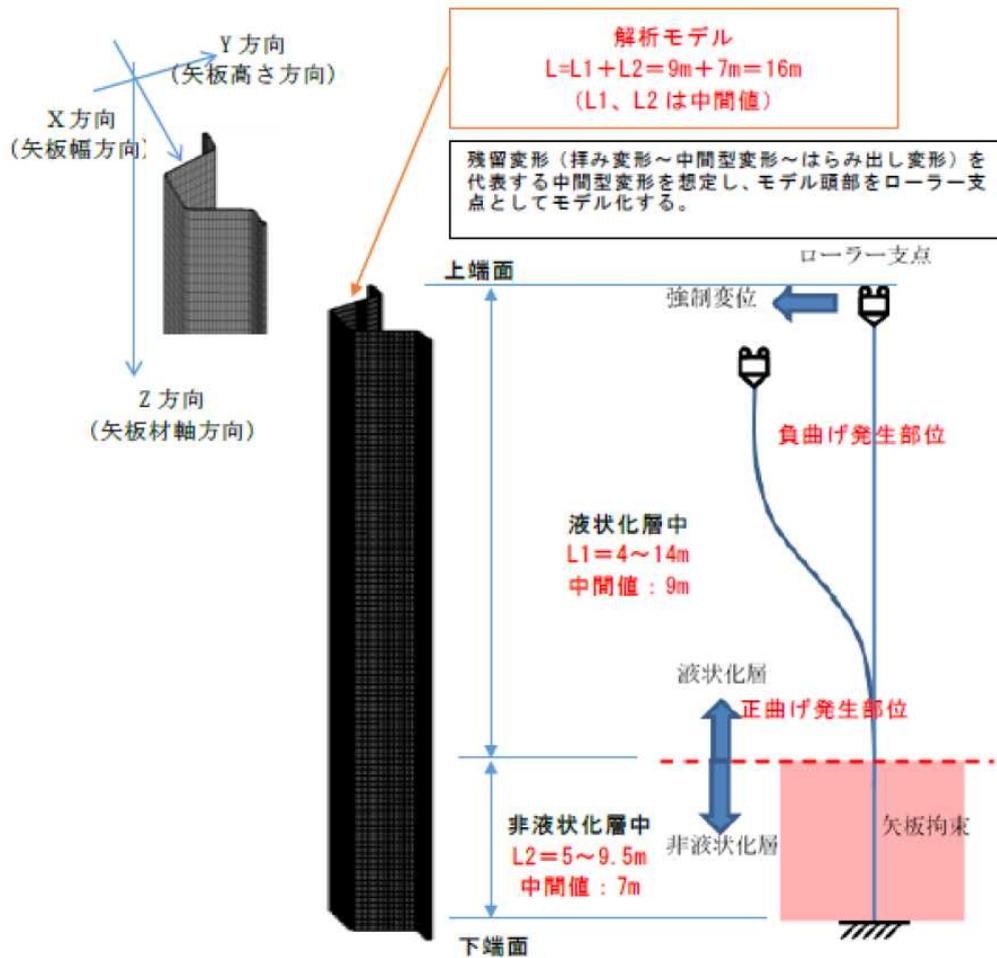


図 17 解析モデル化と強制変位の作用イメージ

曲げ方式は図 18 のように定義した。それぞれ、液状化層と非液状化層の境界で発生する曲げ方式が正曲げの場合を「順曲げ」、負曲げの場合を「逆曲げ」と呼称した。

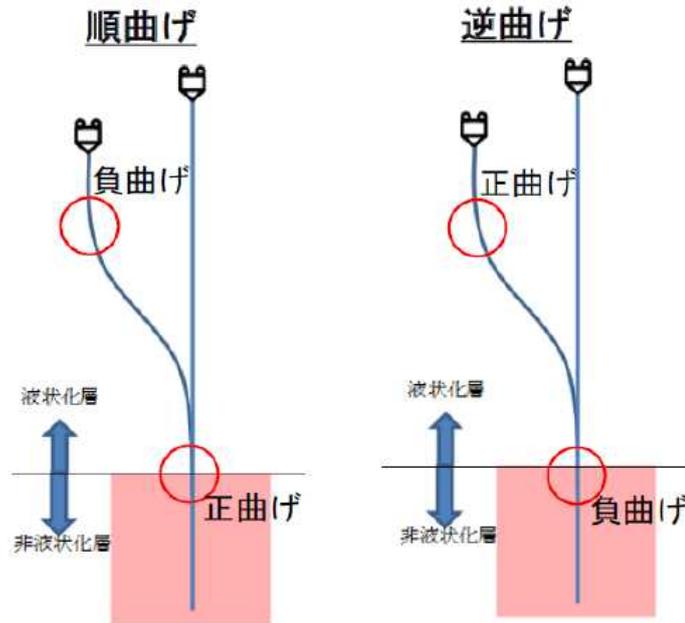


図 18 曲げ方式の定義

鋼矢板の境界条件として長尺矢板を想定した「単独」条件と、比較として連続壁での使用を想定した「壁体」条件を定義した。壁体条件ではモデル両端に循環境界条件を与え、壁体としてのふるまいを模擬した。この 2 つの境界条件を比較することで、長尺矢板部分で鋼矢板を単独使用した際、連続壁としての使用に対して  $M-\phi$  関係の劣化度合いを評価した。

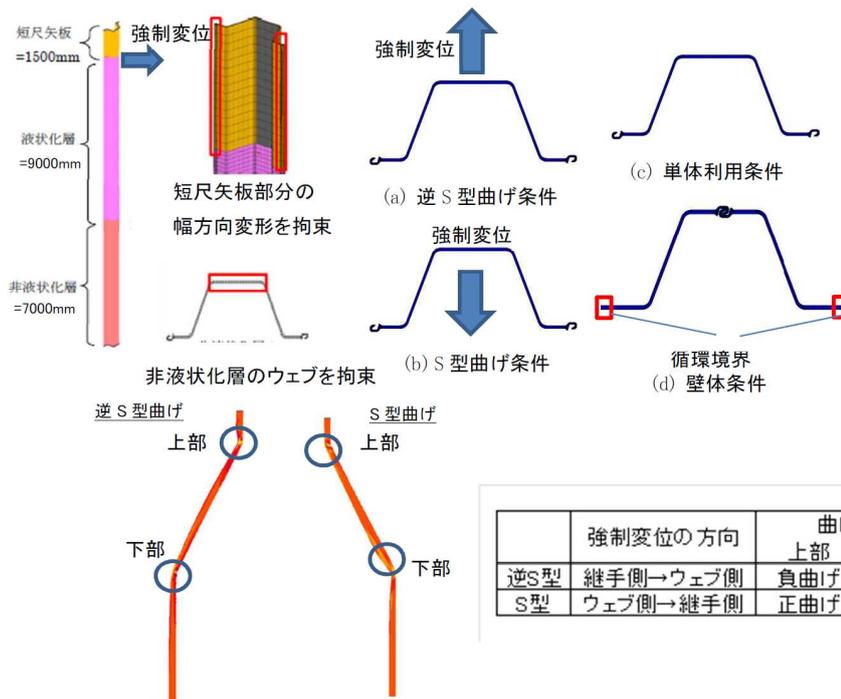


図 19 実環境模擬解析の概要

## 2) 解析結果

解析条件としては①矢板型式 ②逆 S 型曲げと S 型曲げ ③単体利用条件と壁体条件の組み合わせで 8 通りとした。

ここで、逆 S 型曲げと S 型曲げは短尺矢板部(壁体部)と長尺矢板部(単体部)の境界部分で鋼矢板に与える強制変位の方向により区別し、図 19(a)、(b)にその方向を示した。これにより逆 S 型曲げでは短尺矢板部(壁体部)直下(上部)で負曲げ、液状化層と非液状化層の境界部(下部)にて正曲げが発生する変形となり、S 型曲げはその逆となる。

表 12 解析条件一覧

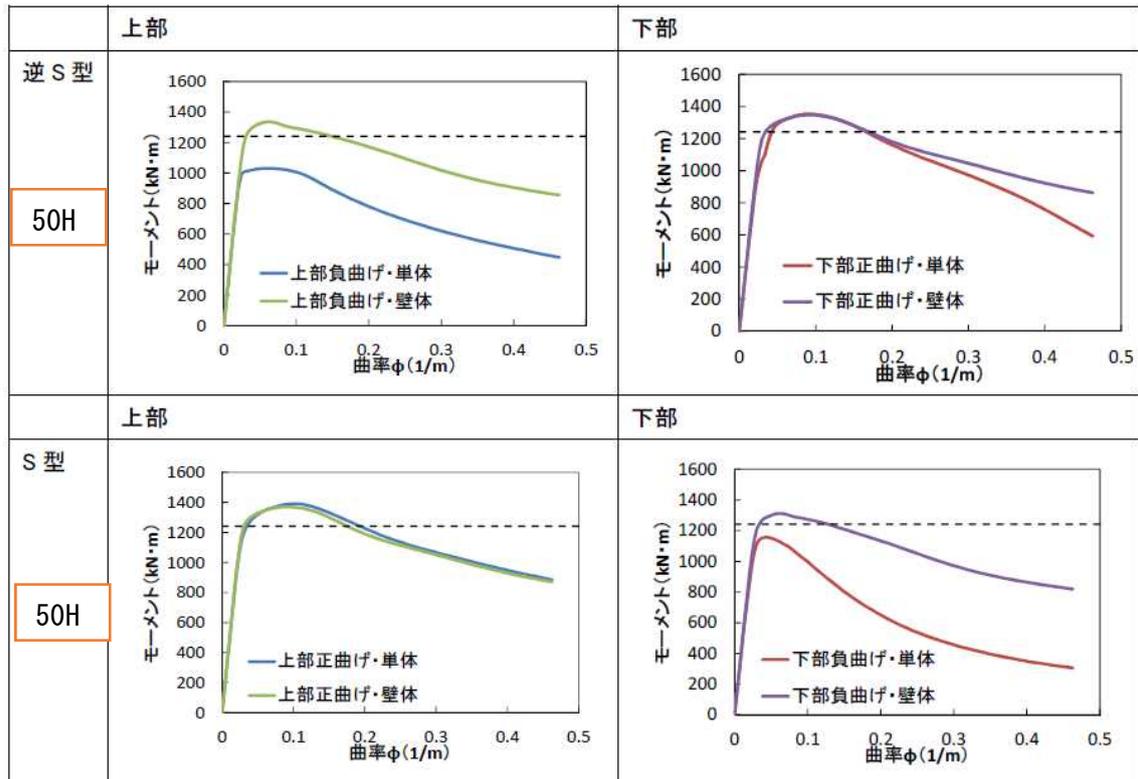
矢板型式	曲げ条件	単体/壁体
50H	逆S型	単体
		壁体
	S型	単体
		壁体
45H	逆S型	単体
		壁体
	S型	単体
		壁体

図 20 に各解析条件で得られた正曲げ・負曲げの M- $\phi$  曲線を示す。また、表 12 に各条件の最大モーメント値および単体利用条件と壁体条件の比較で算定した単体利用による低減係数  $\gamma_1$  を示す。

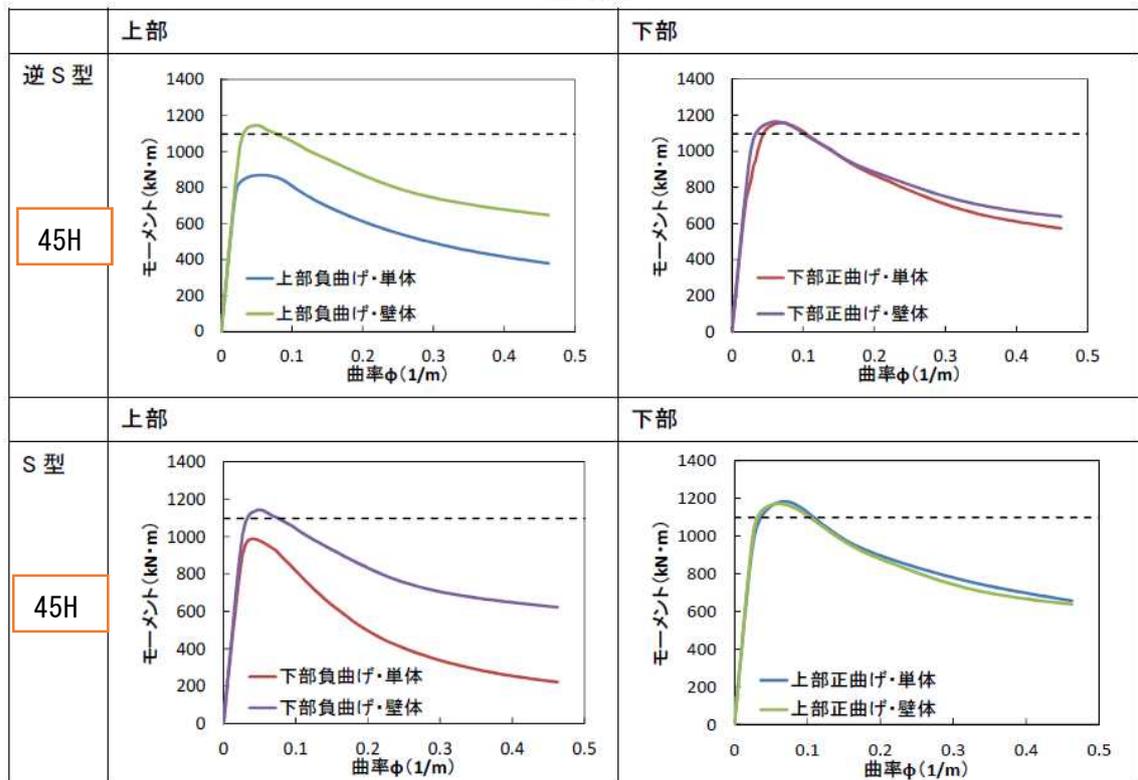
表 10、11 と表 13 を比較すると、正曲げにおける  $\gamma_1$  に大きな違いはないが、負曲げにおける  $\gamma_1$  は実環境模擬解析、逆 S 型曲げ条件の上端負曲げのみ他と比較して低い値を示している。

表 13 実環境模擬解析により算定した低減係数

50H逆S型曲げ				45H逆S型曲げ			
	単体 kN·m	壁体 kN·m	$\gamma_1$		単体 kN·m	壁体 kN·m	$\gamma_1$
下端正曲げ	1354	1335	1.01	下端正曲げ	1160	1164	1.00
上端負曲げ	1031	1348	0.76	上端負曲げ	869	1146	0.76
50HS 型曲げ				45HS 型曲げ			
	単体 kN·m	壁体 kN·m	$\gamma_1$		単体 kN·m	壁体 kN·m	$\gamma_1$
上端正曲げ	1391	1370	1.02	上端正曲げ	1184	1172	1.01
下端負曲げ	1156	1311	0.88	下端負曲げ	988	1143	0.86



(a) 50H



(h) 45H

図 20 実環境模擬解析で得られた M- $\Phi$  関係

図 21 に実環境模擬解析の内、鋼矢板サイズ 50H の逆 S 型曲げおよび S 型曲げ単体条件において負曲げ変形部の矢板幅とモーメントの関係、および曲率 0.46 における矢板変形状態を示す。

鋼矢板の負曲げ変形は矢板の幅が開くことが特徴だが、その傾向に違いがあり、図 21(a)に示す下部負曲げでは鋼矢板の幅は曲げの初期から徐々に開いていく傾向が見られる。一方、図 21(b)に示す上部負曲げでは曲げの初期はほぼ矢板幅が変化しない。ある程度曲げ変形が進んだところで急に矢板幅が開き始めるため、急激な断面変形によりモーメント最大値が低く抑えられ、その結果として見かけの  $\gamma_1$  が他よりも低い値になったと推定される。

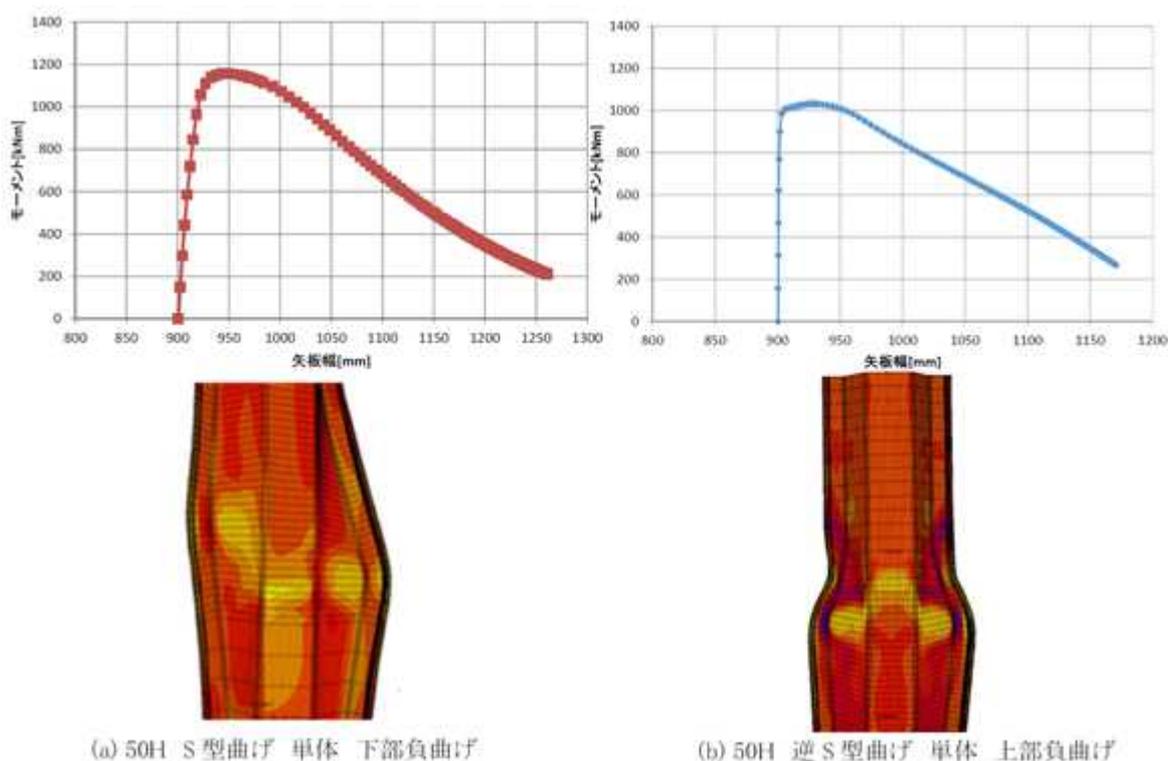


図 21 実環境模擬解析の負曲げにおける矢板幅の推移と変形状態

この要因として境界条件の差が挙げられる。片持ち曲げ解析、および実環境模擬解析の下部では、地盤の緩い拘束条件を模擬するため、曲げ発生個所直近の支持部で鋼矢板のウェブのみの変位を拘束している。そのため、下部負曲げでは変形の初期から矢板幅が開いていくと考えられる。一方で実環境模擬解析の上部では曲げ発生個所の直上に短尺矢板部（壁体部）があり、ウェブの変位に加えて矢板の幅方向変形も拘束しているため拘束が強い。したがって変形の初期では矢板幅が変化せず、上述の急激な断面変形を引き起こすと推定される。

なお、正曲げでは境界条件の違いによる同様の現象は確認できない。これは、これまで検証した変形の範囲では矢板幅の変化が負曲げに比較して非常に小さいため、実環境の上部と下部にて境界条件が異なっても断面変形の違いは無視できると考えられる。

以上の結果より、負曲げについて本来の単体利用にかかる係数  $\gamma_1$  は、表 12 の S 型曲げ・下端負曲げの値 (50H: 0.88、45H: 0.86) であるが、逆 S 型曲げ・上端負曲げの値 (50H: 0.76、45H: 0.76) ように、拘束の強い連続壁の直下で負曲げが発生する場合は、使用条件を踏まえた低減係数を考慮すべきと考えられる

#### (4) 単体利用にかかる低減係数 $\gamma_1$ の提案

ハット形鋼矢板の単体利用にかかる低減係数  $\gamma_1$  を、

- ① 鋼矢板の曲げ載荷試験と片持ち曲げ解析モデルによる検討結果、
  - ② 実環境模擬解析モデルによる検討結果
- として示し、まとめ案として総合して提案値とした。

表 14 載荷試験および FEM 解析により算定した単体利用にかかる低減係数  $\gamma_1$  のまとめ

型式	曲げ方向	①	② 実環境模擬解析		総合
		片持ち曲げ	逆 S 型曲げ	S 型曲げ	$\gamma_1$
SP-45H	正曲げ	0.97	1.00	1.01	0.97
	負曲げ	0.88	0.76	0.86	0.76 (短尺矢板部(壁体部)下端) 0.86
SP-50H	正曲げ	0.99	1.01	1.02	0.99
	負曲げ	0.88	0.76	0.88	0.76 (短尺矢板部(壁体部)下端) 0.88

黄色の網掛けは、提案値

なお、鋼矢板 1 枚あたりの全塑性モーメントは、降伏応力度に対して表 15 の値とし、ハット形矢板の単体利用を考慮した最大曲げモーメント  $M_{max}$  を以下の式で算定する。

$$M_{max} = \gamma_1 \times M_p$$

ここで、 $M_{max}$ ：単体利用のハット形矢板の最大曲げモーメント

$\gamma_1$ ：単体利用に係る低減係数

$M_p$ ：壁体利用のハット形矢板の全塑性モーメントで以下による

表 15 壁体利用の場合の全塑性モーメント  $M_p$  の値

型式	材料規格	降伏強度	鋼矢板 1 枚あたり (壁体利用)
		$\sigma_y$	全塑性モーメント
		N/mm <sup>2</sup>	$M_p$
SP-45H	SYW430	430	1,095
SP-50H	SYW430	430	1,244
SP-45H	SYW390	390	993
SP-50H	SYW390	390	1,128

(5) 長尺矢板部(単体部)のバイリニア型 M- $\Phi$  モデル

単体利用にかかる低減係数  $\gamma_1$  を踏まえて、長尺矢板部(単体部)のバイリニア型 M- $\Phi$  モデルを以下に示す。モーメントの最大値は、鋼矢板(壁体利用)の全塑性モーメントに単体利用に係る低減係数  $\gamma_1$  を乗じた値とする。

$\gamma_1$  は正曲げ方向と負曲げ方向で別の値とし、表 13 の数値をとって設定することとした。初期剛性は、短尺矢板部(壁体部)の設定に倣った。

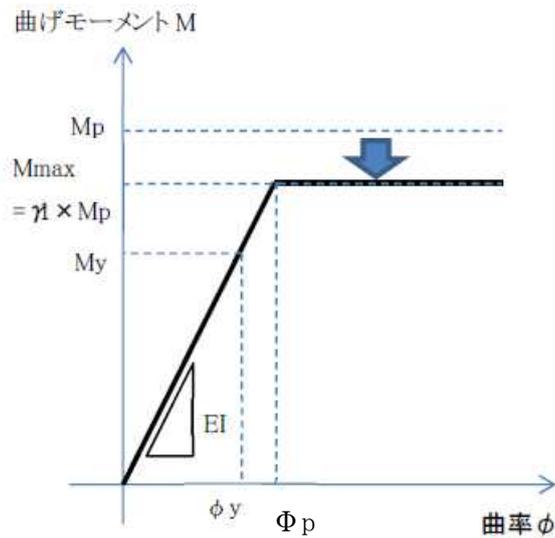


図-22 長尺矢板部(単体部)のバイリニア型 M- $\Phi$  関係模式図

表 16 長尺矢板部(単体部)のバイリニア型 M- $\Phi$  関係諸元 (鋼矢板 1 枚あたり)

型式 ／規格	曲げ方向	短尺矢板部(壁体部)の全塑性モーメント Mp	単体利用低減係数 $\gamma_1$	長尺矢板部(単体部)の最大モーメント Mmax	Mmax 時の曲率 $\Phi_p$	備考
		kN・m	—	kN・m	1/m	
SP-45H SYW430	正曲げ	1,095	0.97	1,062	0.013	
	負曲げ		0.86	942	0.012	
			0.76	832	0.010	短尺矢板部(壁体部)下端位置
SP-50H SYW430	正曲げ	1,244	0.99	1,232	0.013	
	負曲げ		0.88	1,095	0.012	
			0.76	945	0.010	短尺矢板部(壁体部)下端位置

型式 ／規格	曲げ方向	短尺矢板部(壁体部)の全塑性モーメント Mp	単体利用低減係数 $\gamma_1$	長尺矢板部(単体部)の最大モーメント Mmax	Mmax 時の曲率 $\Phi_p$	備考
		kN・m	—	kN・m	1/m	
SP-45H SYW390	正曲げ	993	0.97	963	0.012	
	負曲げ		0.86	854	0.011	
			0.76	755	0.009	短尺矢板部(壁体部)下端位置
SP-50H SYW390	正曲げ	1,128	0.99	1,117	0.012	
	負曲げ		0.88	993	0.011	
			0.76	857	0.009	短尺矢板部(壁体部)下端位置

#### 1. 4 楕円鋼矢板工法における短尺矢板部（壁体部）と長尺矢板部（単体部）のバイリニア型 M- $\phi$ 関係

楕円鋼矢板工法の設計マニュアル整備に向けた検討に使用するハット形鋼矢板のバイリニア型 M- $\phi$  関係については、曲げ試験および FEM 解析結果等を踏まえ、以下の通りとする。

- ① 短尺矢板部（壁体部）については、最大曲げモーメントとして降伏強度と塑性断面係数を用いて理論的に計算される全塑性モーメントを使用したバイリニア型 M- $\phi$  関係を適用する。
- ② 長尺矢板部（単体部）については、曲げ試験および FEM 解析結果を踏まえ、最大曲げモーメントとして、短尺矢板部（壁体部）の全塑性モーメントに所定の“単体利用にかかる低減係数  $\gamma_1$ ” を乗じた値を適用する。なお、低減係数  $\gamma_1$  は矢板形式・曲げ方向で異なる値となる。

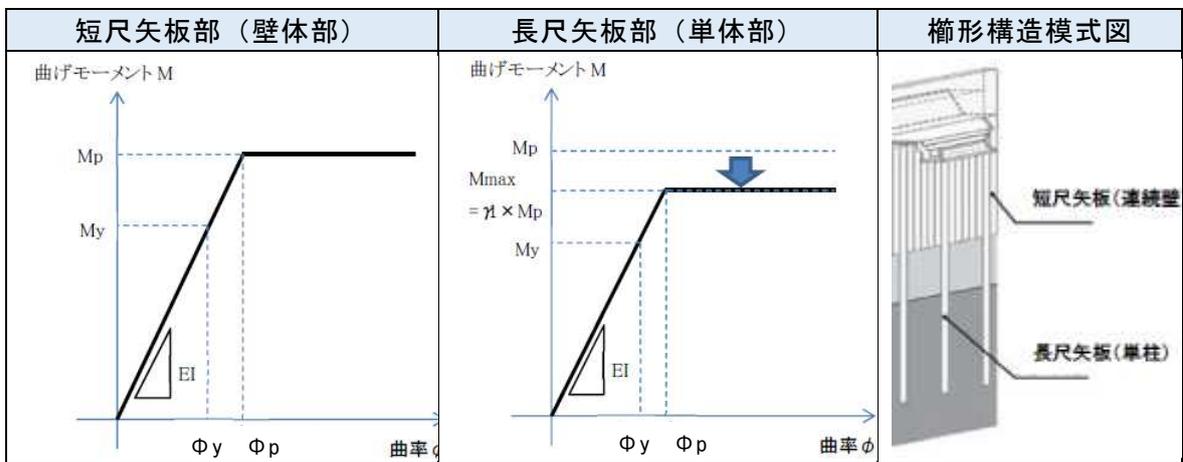


表 17 短尺矢板部（壁体部）のバイリニア型 M- $\phi$  関係諸元（鋼矢板 1 枚あたり）

型式	材料規格 降伏強度	降伏モーメント	全塑性モーメント	降伏曲率	Mp 時曲率
		My	Mp	$\phi_y$	$\phi_p$
		kN・m	kN・m	1/m	1/m
SP-45H	SYW430	946	1,095	0.011	0.013
SP-50H	$\sigma_y = 430\text{N/mm}^2$	1,071	1,244	0.011	0.013

表 18 長尺矢板部(単体部)のバイリニア型 M-Φ 関係諸元 (鋼矢板 1 枚あたり)

型式 ／規格	曲げ方向	短尺部の 全塑性モー メント Mp	単体利用 低減係数 γ1	長尺部の 最大モーメント Mmax	Mmax 時 曲率 Φp	備考
		kN・m	—	kN・m	1/m	
SP-45H SYW430	正曲げ	1,095	0.97	1,062	0.013	短尺矢板部(壁体 部)下端位置
	負曲げ		0.86	942	0.012	
			0.76	832	0.010	
SP-50H SYW430	正曲げ	1,244	0.99	1,232	0.013	短尺矢板部(壁体 部)下端位置
	負曲げ		0.88	1,095	0.012	
			0.76	945	0.010	

1. 5 参考：実機曲げ試験結果 (SP-45H、SP-50H)

(1) 材料試験結果

実験結果に対応する全塑性モーメントを計算するのに使用したのは、材料試験結果のうち、「採取位置：ウェブ」「方向：圧延方向 (L 方向)」の引張試験結果の「下降伏点」の平均値とした。

・採取位置と方向は鋼矢板の材料規格 (JIS A5523) に合わせている。

・下降伏点を使用したのは上降伏点や 0.2%耐力と比較して低い値であり、設計として安全側に立つためである。

降伏強度の規格値  $\sigma_y = 430 \text{ N/mm}^2$  に対し、下降伏点の平均値 = 471  $\text{ N/mm}^2$  で 9.5%程度高い値であった。

1) SP-50H (SYW-430)

載荷方向	採取部位	記号	板厚 (mm)	板幅 (mm)	断面積 (mm <sup>2</sup> )	上降伏応力 (MPa)	下降伏応力 (MPa)	引張強さ (MPa)	突合せ伸び (%)	破断位置
正曲げ	ウェブ	17-1	17.21	25.01	430.42	487	474	612	37	A
		17-2	17.12	25.02	428.34	503	478	615	37	A
		17-3	17.20	25.01	430.17	493	468	614	37	A
	フランジ	13-1	12.83	25.02	321.01	493	463	615	41	A
		13-2	13.25	25.01	331.38	496	466	620	41	A
		13-3	13.24	25.01	331.13	497	460	615	40	A
負曲げ	ウェブ	17-1	16.90	25.01	422.67	494	469	602	39	A
		17-2	16.88	25.01	422.17	487	472	603	38	A
		17-3	16.88	25.02	422.34	481	465	603	38	A
	フランジ	13-1	13.25	25.01	331.38	488	461	604	42	A
		13-2	13.18	25.02	329.76	503	469	608	42	A
		13-3	12.64	25.01	316.13	491	463	604	42	A

## 2) SP-45H (SYW-430)

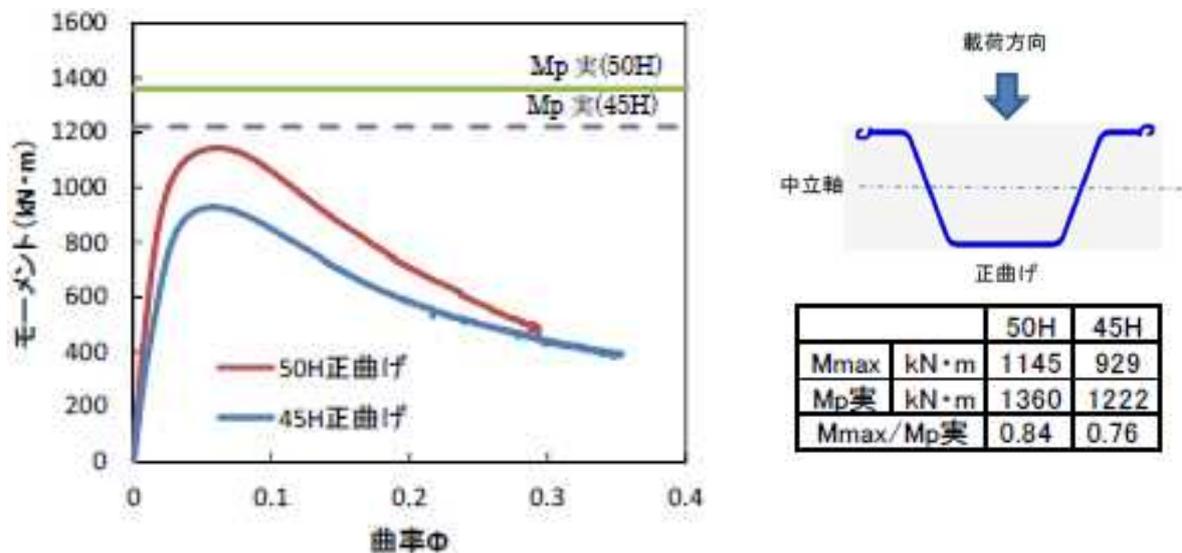
載荷方向	採取部位	試験片形状	採取方向	記号	板厚 (mm)	幅 (mm)	高さ (mm)	断面積 (mm <sup>2</sup> )	慣性モーメント (mm <sup>4</sup> )	上降伏応力 (MPa)	下降伏応力 (MPa)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	一様伸び (%)	突合せ伸び (%)	破断位置
正曲げ	ウェブ	JIS 5号	L	WA-1	15.28	25.02	-	382.15	90	486	475	481	627	13.8	40	A
				WA-2	15.12	25.01	-	375.27	90	511	477	485	626	14.1	39	A
				WA-3	15.27	25.01	-	383.13	90	515	494	499	627	13.8	39	A
		JIS 14A号	C	WA-4	-	-	5.00	19.86	25	482	474	481	638	13.2	25	A
				WA-5	-	-	5.01	19.70	25	481	475	480	635	13.0	24	A
				WA-6	-	-	5.01	19.71	25	481	463	479	634	13.0	25	A
	フランジ	JIS 5号	L	FA-1	11.30	25.02	-	282.67	90	521	501	502	627	13.6	36	A
				FA-2	11.53	25.01	-	288.48	90	501	499	490	622	13.5	35	A
				FA-3	11.65	25.02	-	291.69	90	517	487	512	619	13.1	34	A
		JIS 14A号	C	FA-4	11.89	25.01	-	297.35	90	508	490	492	625	11.7	27	A
				FA-5	11.90	25.01	-	297.58	90	502	489	489	626	11.4	27	B
				FA-6	11.90	25.01	-	297.52	90	507	491	491	626	11.9	25	B
負曲げ	ウェブ	JIS 5号	L	WB-1	15.34	25.01	-	383.59	90	481	471	475	624	13.7	39	A
				WB-2	15.15	25.01	-	378.97	90	503	472	479	624	14.6	39	A
				WB-3	15.35	25.01	-	383.82	90	510	474	481	625	13.2	39	A
		JIS 14A号	C	WB-4	-	-	5.00	19.86	25	481	465	480	634	13.1	26	A
				WB-5	-	-	5.01	19.67	25	475	457	474	635	13.7	27	A
				WB-6	-	-	5.01	19.87	25	479	471	475	635	13.6	27	A
	フランジ	JIS 5号	L	FB-1	11.29	25.02	-	282.26	90	512	489	511	618	14.2	35	A
				FB-2	11.58	25.02	-	289.80	90	505	493	502	620	13.6	36	A
				FB-3	11.57	25.02	-	289.47	90	508	483	501	619	13.4	35	A
		JIS 14A号	C	FB-4	11.96	25.00	-	299.04	90	504	493	493	625	12.1	28	B
				FB-5	11.94	25.01	-	298.60	90	501	488	488	624	11.9	28	B
				FB-6	11.94	25.01	-	298.68	90	501	490	490	625	11.9	26	B

## (2) SP-50H・45H (SYW430) の曲げ試験結果

出典：2020年2月4日 速報版

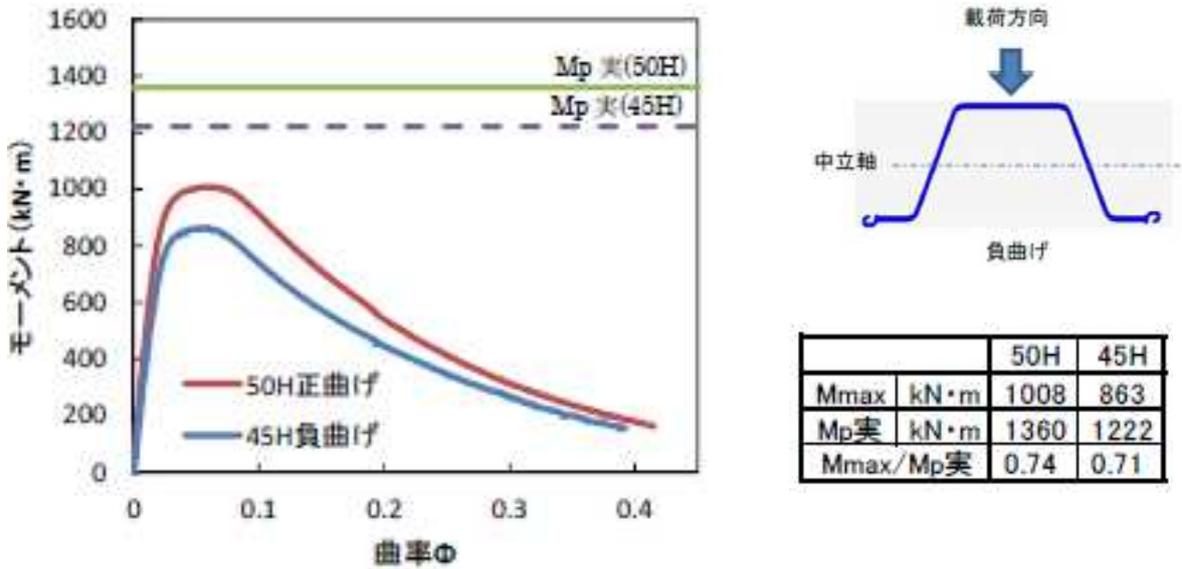
ハット形鋼矢板（単体）の大変形曲げ試験は、L=5.5mの矢板端部のウェブ部1.5mを固定して、アーム長1.0mの載荷点に加圧する片持ち梁方式の試験である。

### 1) 正曲げ試験結果



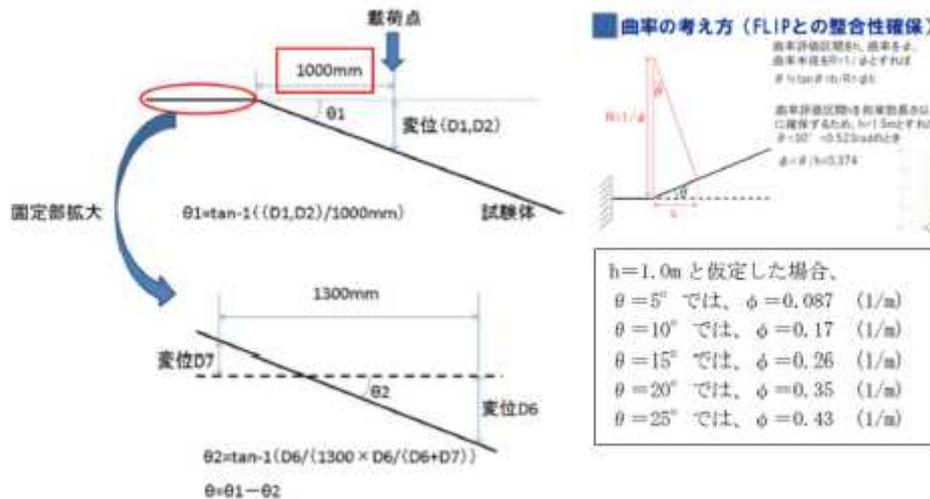
- Mmax および (Mmax/Mp 実強度) の比率は、ともに SP-50H の方が大きい。
- Mmax 時の曲率Φは、SP-50H と 40H でほぼ同じ値となる。
- 曲率Φ=0.3(1/m)付近における残存曲げモーメントは、SP-50H と SP-45H でほぼ等しい。

## 2) 負曲げ試験結果



- Mmax および (Mmax/Mp 実強度) の比率は、ともに SP-50H の方が大きい。
- Mmax 時の曲率  $\Phi$  は、SP-50H と 40H でほぼ同じ値となる。
- 曲率  $\Phi = 0.4 (1/m)$  付近における残存曲げモーメントは、SP-50H と SP-45H でほぼ等しい。

### 【荷重－曲げ角度関係】



#### 本試験における「真の曲げ角度 $\theta$ 」の算出方法

- 1) 試験体固定部から載荷点までの距離 1000mm と、載荷点変位  $D1 \cdot D2$  の幾何学的関係から、見かけの曲げ角度  $\theta_1$  を算出
  - 2) 試験体固定部の変位  $D6, D7$  と  $D6-D7$  の測定位置間の距離 1300mm の幾何学的関係から、固定部の曲げ角度  $\theta_2$  を算出
  - 3) 見かけの曲げ角度  $\theta_1$  から固定部の曲げ角度  $\theta_2$  を引いて真の曲げ角度  $\theta$  を算出
- なお、 $\theta_2$  の実験値は正曲げで  $0.065^\circ$ 、負曲げで  $0.060^\circ$  と非常に微小な値であった

1. 6 ハット形鋼矢板のバイリニア型 M-φ モデル一覧表

表 19 ハット形鋼矢板のバイリニア型 M-φ モデル一覧表

型式	材質	降伏強度 (特性値)	鋼矢板 1 枚あたり					連続矢板として使用する場合 (矢板 1 枚あたり)					単体として使用する場合 (矢板 1 枚あたり)								備考		
			断面二次 モーメント I	断面係数 Z	降伏モーメント My	塑性断面 係数 Zp	全塑性モー メント Mp	正曲げ・負曲げ方向共通				正曲げ方向				負曲げ方向							
								My	φy	Mp	φp	M-φ (バイリニア) (規格値ベース)	Mp	γ1	Mmax	φp	M-φ (バイリニア) (規格値ベース)	Mp	γ1	Mmax		φp	M-φ (バイリニア) (規格値ベース)
N/mm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	kN・m	cm <sup>3</sup>	kN・m	kN・m	1/m	kN・m	1/m	kN・m	—	kN・m	1/m	kN・m	—	kN・m	1/m	kN・m	1/m				
SP-45	SYW-430	430	40,500	2,200	946	2,546	1,095	946	0.011	1,095	0.013		1,095	0.97	1,062	0.013		1,095	0.86 (0.76)	942 (832)	0.012 (0.010)		SP-45H・SYW430の単体・片持ち 曲げ試験結果とFEM解析に基づく M-φモデル 負曲げの ( ) 内の数値は、短尺 矢板下端位置の拘束の影響を考 慮する場合
SP-50	SYW-430	430	46,000	2,490	1,071	2,892	1,244	1,071	0.011	1,244	0.013		1,244	0.99	1,232	0.013		1,244	0.88 (0.76)	1,095 (945)	0.012 (0.010)		SP-50H・SYW430の単体・片持ち 曲げ試験結果とFEM解析に基づく M-φモデル 負曲げの ( ) 内の数値は、短尺 矢板下端位置の拘束の影響を考 慮する場合
SP-45	SYW-390	390	40,500	2,200	858	2,546	993	858	0.010	993	0.012		993	0.97	963	0.012		993	0.86 (0.76)	854 (755)	0.011 (0.009)		SP-45H・SYW430のM-φモデルを ベースに降伏強度の特性値のσ y=390で算出したものである。 負曲げの ( ) 内の数値は、短尺 矢板下端位置の拘束の影響を考 慮する場合
SP-50	SYW-390	390	46,000	2,490	971	2,892	1,128	971	0.010	1,128	0.012		1,128	0.99	1,117	0.012		1,128	0.88 (0.76)	993 (857)	0.011 (0.009)		SP-50H・SYW430のM-φモデルを ベースに降伏強度の特性値のσ y=390で算出したものである。 負曲げの ( ) 内の数値は、短尺 矢板下端位置の拘束の影響を考 慮する場合
補足説明図			<p>腐食時断面性能低減率の算定図</p> <p>η: 腐食時断面性能低減率 (%)  t1, t2: 鋼矢板各面の腐食代 (mm)  α: t2とt1の比 α=t2/t1  本図表は直線の図示範囲のみ有効</p>																				

ハット形鋼矢板の正曲げ、負曲げの説明	<p>正曲げ状態の説明</p> <p>正曲げ状態では、矢板断面の継手側に引張応力が、ウェブ側に圧縮応力が発生している。</p> <p>正曲げの変形イメージ</p> <p>ハット形鋼矢板 (SP-45H) の正曲げ試験の試験終了時</p>	<p>負曲げ状態の説明</p> <p>負曲げ状態では、矢板断面の継手側に圧縮応力が、ウェブ側に引張応力が発生している。負曲げ状態では、矢板幅方向に広がる断面変形が顕著である。</p> <p>負曲げの変形イメージ</p> <p>ハット形鋼矢板 (SP-45H) の負曲げ試験の試験終了時</p>	<p>正曲げ・負曲げ方向の説明</p> <p>正曲げ: 継手側に引張応力が発生、 負曲げ: 継手側に圧縮応力が発生</p>
	<p>Φy = My / EI      Φu = Mp / EI      E = 200,000 N/mm<sup>2</sup></p>		