

くし形鋼矢板工法におけるハット形鋼矢板の曲げ性能に関する考察

浜口 正志*・大村 厚夫**・荻 定治***・横山 直弥****・大崎 晴之*****・妙中 真治*****・阿形 淳*****

* (一財)沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

** (一財)沿岸技術研究センター 調査役

*** 前 国土交通省 九州地方整備局 別府港湾・空港整備事務所 海岸課長

**** 前 国土交通省 九州地方整備局 別府港湾・空港整備事務所 沿岸防災調整官

***** 株式会社菅組 大分支店

***** 日本製鉄株式会社 技術開発本部 鉄鋼研究所 鋼構造研究部

大分港海岸津留地区前面護岸の越波・津波対策として検討した、くし形鋼矢板工法におけるハット形鋼矢板を対象とした単体の大変形曲げ試験を実施し、その変形特性を確認した。その結果、L2 地震動作用時に想定される大変形においても鋼矢板が破断に至らないことが確認された。

キーワード：くし形鋼矢板工法，ハット形鋼矢板，大変形，曲げ載荷試験，単体試験

1. はじめに

大分港海岸の海岸保全施設は、一級河川が複数流入する沖積低地を埋立造成した大分コンビナートと中小企業団地で構成される臨海工業団地の外形を形成しており、「台風による高潮や南海トラフ地震による津波等」の災害に備えた防護機能強化の緊急性が高まっている。大分港海岸直轄保全施設整備事業は、整備延長約 21km、総事業費約 300 億円、整備期間 19 年の計画で直轄事業として事業化されている。当該事業においては、地震による液状化現象が発生した場合でも所定の護岸機能を確保できる技術として「くし形鋼矢板工法」(図-1 参照)が国内の海岸事業として初めて採用されている。

2. くし型鋼矢板工法について

くし形鋼矢板工法は、地震時の護岸天端沈下を抑制するために非液状化層まで根入れした長尺鋼矢板でパラペット等の自重を支持し、連続する短尺鋼矢板をくし状に組み合わせることにより防潮壁を形成する構造である(図-1 参照)。本工法における長尺鋼矢板は、L2 地震時に全塑性を超える大きな曲率となることを許容しつつ、その後の津波来襲時においても防潮堤の必要天端高を確保し粘り強さを発揮する構造である。壁体には継手効率を考慮しなくてよいハット形鋼矢板を採用している。そのため、使用される鋼矢板には、大変形時においても破断など想定外の破壊に至らずに津波や越波に対する防潮堤の機能を保持することが求められている。

しかしながら、従来の鋼矢板材料は、短尺鋼矢板と同様に連続壁として使用されることを前提としており、長尺鋼矢板のように単体としての使用を想定していない。また、設計においても鋼矢板は全塑性に至らぬように使用されることを前提としており、これまでの性能評価でも

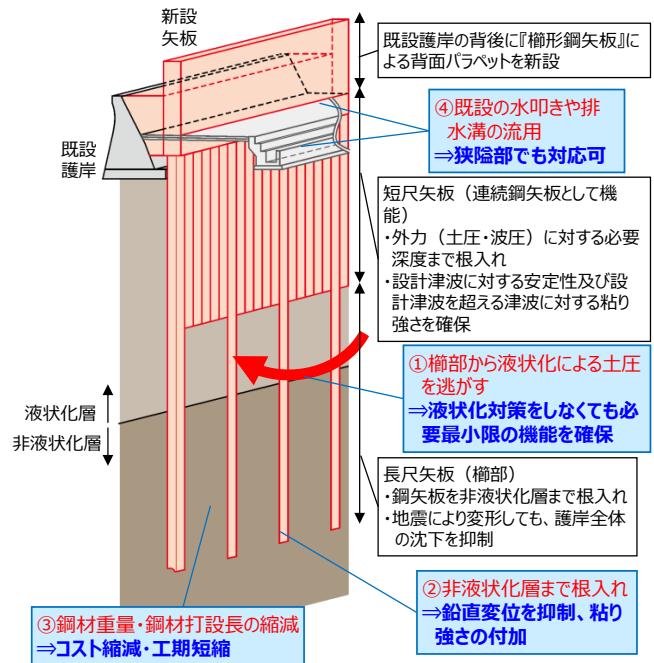


図-1 くし形鋼矢板工法の概念

曲率 0.02 (1/m) を超える曲げ変形性能は調査されていなかった。そのため、くし形鋼矢板工法を実現させるためには、鋼矢板の大変形時の曲げ性能を把握する必要がある。

3. 試験目的

こうした背景を踏まえ、採用予定のハット形鋼矢板を対象とした大変形曲げ試験を実施し、 $M-\phi$ 特性を把握するとともに、L2 地震動作用時に想定される大変形(塑性変形量)においても破断に至らないことを確認することを目的としている。

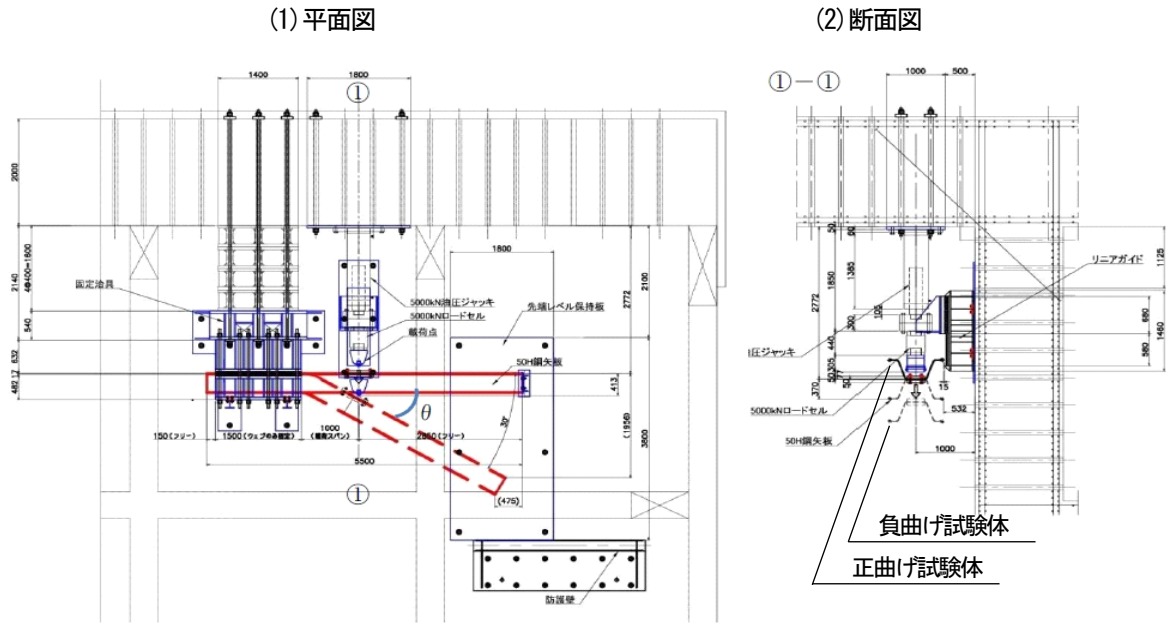


図-2 試験概要図

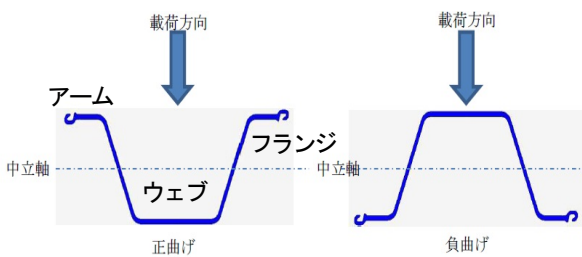


図-3 載荷方向の定義

4. 試験概要

試験はハット形鋼矢板 50H(型式 NS-SP-50H, 材料規格 SYW430)を対象とし, 片持ち曲げ試験により, 正曲げおよび負曲げ状態について実施した。

本試験では曲率 $\phi 0.1$ (1/m) を超える大きな曲率の構造試験を行うことを目的としたため, 従来行われている4点曲げ方式ではなく片持ち曲げ方式とし, 角度 θ の最終目標値を 25° 程度とした(油圧ジャッキストロークにてこの角度を達成できるように載荷位置を設定した。図-2参照)。

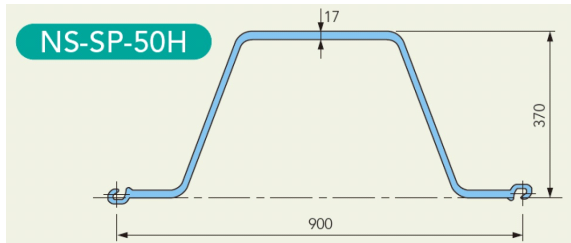
試験体長さは載荷試験が可能な範囲で実スケールに極力近づけた長さ(5.5m)で行った。図-2(2)にて正曲げの試験体を実線, 負曲げを破線で示す。

正曲げ・負曲げの定義を図-3に示す。鋼矢板断面の中立軸に対して, 鋼矢板ウェブ面が圧縮となる載荷方向を正曲げ, 引張となる方向を負曲げと定義し, 各載荷方向について1体ずつ試験を実施した。

鋼矢板の固定部は地盤にて拘束された部分に相当する

表-1 鋼矢板形状および諸元(NS-SP-50H)

	鋼矢板 1 枚あたり		
	降伏強度 σ_y	降伏モーメント Z_e	全塑性モーメント Z_p
	N/mm ²	kNm	kNm
50H	430	1,071	1,242



ため, 鋼矢板ウェブ面のみを治具ではさみつける方法で固定し, 鋼矢板断面形状の拘束を極力小さくする条件とした。

載荷は油圧ジャッキの押し出し量を手動にて制御し, 単調載荷にて行った。ひずみ速度の影響を無視するため, 載荷速度はおおよそ 1mm~3mm/分とした。

計測項目は, 油圧ジャッキの作用荷重, 試験体載荷点および先端部の水平変位, 大変形が予測される部位のひずみとした。

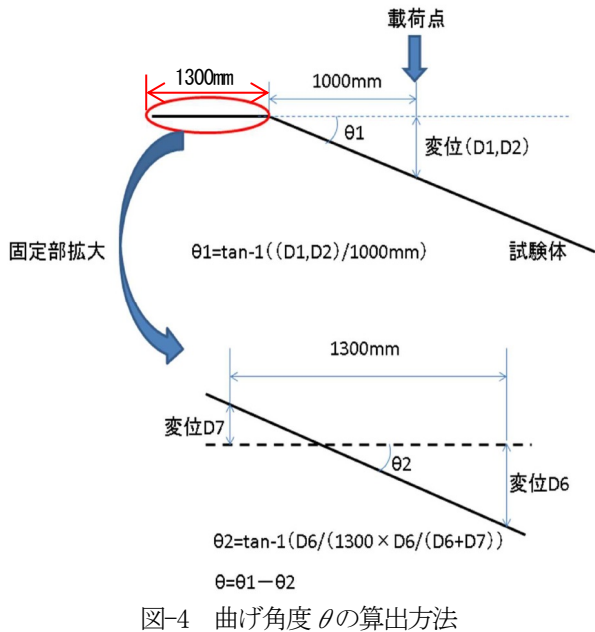
なお, 先行してハット形鋼矢板のウェブ面, フランジ面から材軸方向に各3本ずつ引張試験片を採取し, 対象鋼矢板の材料強度を把握した。

表-1に連続壁として使用される場合の鋼矢板形状および諸元を, 表-2に材料試験結果を示す。測定された材料強度は, 規格値の約1.1倍となった。

表-2 材料試験結果

載荷方向	採取部位	記号	板厚 (mm)	板幅 (mm)	断面積 (mm ²)	上降伏応力 (MPa)	下降伏応力 (MPa)	下降伏応力平均 (MPa)	引張強さ (MPa)	引張強さ平均 (MPa)
正曲げ	ウェブ	17-1	17.21	25.01	430.42	493	463	463	615	617
		17-2	17.12	25.02	428.34	496	466		620	
		17-3	17.20	25.01	430.17	497	460		615	
	フランジ	13-1	12.83	25.02	321.01	487	474	473	612	614
		13-2	13.25	25.01	331.38	503	478		615	
		13-3	13.24	25.01	331.13	493	468		614	
負曲げ	ウェブ	17-1	16.90	25.01	422.67	488	461	464	604	605
		17-2	16.88	25.01	422.17	503	469		608	
		17-3	16.88	25.02	422.34	491	463		604	
	フランジ	13-1	13.25	25.01	331.38	494	469	469	602	603
		13-2	13.18	25.02	329.76	487	472		603	
		13-3	12.64	25.01	316.13	481	465		603	

5. 試験体の曲げ角度の算出方法について



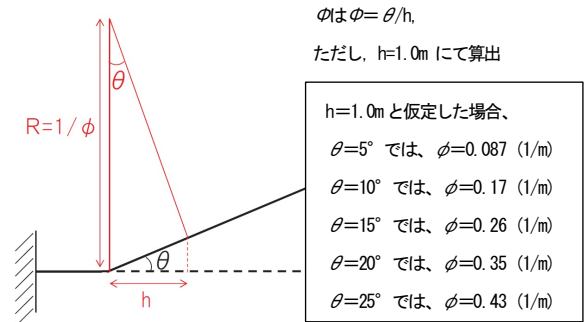
試験体の曲げ角度 θ については、試験における変位の測定結果を使用し、固定部の変位を補正するため図-4 のように算出した。算出方法の考え方を以下に記す。

なお、曲率 ϕ は、 θ を用いて図-5 に示す考え方で算出できる。

- 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 θ_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 θ_2 を算出
- 3) 見かけの曲げ角度 θ_1 から固定部の曲げ角度 θ_2 を引いて真の曲げ角度 θ を算出

6. 曲げ試験結果

正曲げおよび負曲げ試験の曲げモーメント M —曲げ角



度 θ 関係を図-6 に、試験前および試験後の試験装置全景を表-3 に示す。

(1) 正曲げ試験

載荷開始後、ほぼ線形に荷重が増加した後、曲げ角度 θ が約 3.6° で曲げモーメント M が $1145\text{kN}\cdot\text{m}$ に到達し、その後、荷重が減少に転じた。曲げ角度 θ が約 13.5° 、曲げモーメント M が約 $620\text{kN}\cdot\text{m}$ まで到達した時点で、荷重が不連続的に低下した。これは試験体が想定以上に変形した結果、載荷点を固定するボルトと載荷点のローラーが接触したためであり、最終的には曲げ角度 θ が 16.8° 曲げモーメント M が約 $480\text{kN}\cdot\text{m}$ まで減少した時点で載荷を中止した。

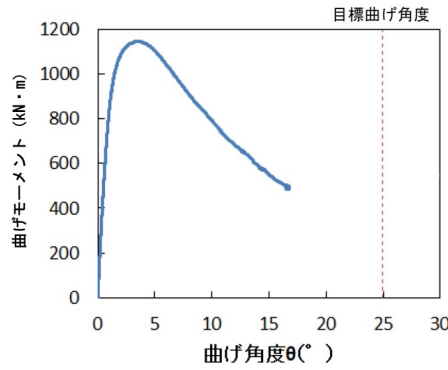
(2) 負曲げ試験

載荷開始後、ほぼ線形に荷重が増加した後、曲げ角度 θ が約 3.5° で曲げモーメント M が $1008\text{kN}\cdot\text{m}$ に到達し、その後荷重が減少に転じた。その後も荷重が連続的に減少を続け、曲げ角度 θ が 23.8° 、曲げモーメント M が約 $160\text{kN}\cdot\text{m}$ まで減少した時点で油圧ジャッキのストロークが限界を迎え、試験を終了した。

負曲げ試験体の特徴として、載荷により固定治具付近の試験体幅が大きく開いたことが挙げられる。製品規格の有効幅 900mm に対して、載荷終了後の試験体全幅は最大で 1279mm まで広がった。正曲げ試験と比べて荷重最大値が小さかったのは、この断面変形が影響しているものと推定された。

今回の試験において単体の正曲げ・負曲げの最大曲げモーメントは連続壁として使用される鋼矢板の全塑性モ

(1) 正曲げ試験



(2) 負曲げ試験

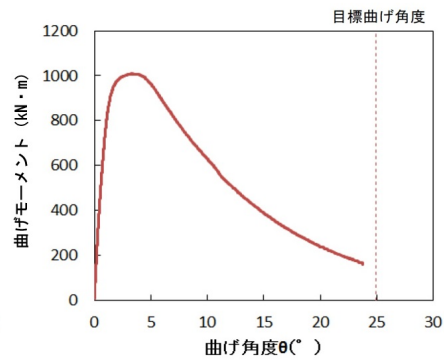


図-6 試験結果

表-3 試験装置全景

	試験装置全景 (試験前)	試験装置全景 (試験後)
正曲げ試験		
負曲げ試験		

ーメントと比べて小さくなった。その原因として、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ことが考えられる。他に、載荷点の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したこと、あるいは矢板が斜めになっているために、載荷点に載荷方向とは別の方向の力が加わっていることによる影響が生じたことが挙げられるが、実現場では問題とはならない。断面変形の影響については、今後 FEM による再現解析等により考察し、曲げモーメントの設計用値としてモデル化を検討する必要がある。

7. おわりに

鋼矢板の単体での大変形時における抵抗曲げモーメントは、曲げ試験における正曲げ・負曲げの方向に応じて曲げ特性が異なること、曲げ角度 $\theta=25^\circ$ で破断しないことが確認された。また、連続壁として使用される場合の全塑性曲げモーメントを下回ることが確認された。今後の課題として、設計において地震応答解析に用いる「長尺矢板

の曲げ変形特性」および終局曲げモーメントの低下を考慮した「長尺矢板の変形照査方法」について検討する必要がある。

謝辞

本稿は、国土交通省九州地方整備局別府港湾・空港整備事務所発注の「平成30年度大分港海岸改良技術検討業務」の成果の一部をまとめたものである。また、試験にあたり、大分港海岸護岸改良技術研究会(委員長：国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 菅野 高弘 上級専任研究員)において、貴重なご意見・ご指導をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 公益財団法人鉄道総合技術研究所：鉄道構造に適用するシートパイル基礎の設計・施工マニュアル(案)(第3版), 2014年。
- 2) 荻定治：大分港海岸直轄海岸保全施設整備事業について、波となぎさ No. 202, pp. 6-9, 2017年。