

新直線形鋼矢板「FLJ[®]」の製造技術の開発

Development of New Straight Type Steel Sheet Pile “FLJTM”

杉田 和範 SUGITA Kazunori JFE スチール 西日本製鉄所 (倉敷地区) 条鋼部 条鋼技術室 主任部員 (副課長)
高嶋由紀雄 TAKASHIMA Yukio JFE スチール スチール研究所 圧延・加工プロセス研究部 主任研究員 (副部長)・博士 (工学)
須崎健太郎 SUZAKI Kentaro JFE スチール 西日本製鉄所 (倉敷地区) 鋼材商品技術部 形鋼室 主任部員 (課長)

要旨

JFE スチールでは従来の直線形鋼矢板 (FL) と同等の有効幅・継手引張強度を有し、鋼材重量を 14% 削減した新直線形鋼矢板; J フラットパイル[®] JFESP-FLJ を開発した。開発にあたり、ブルームを素材とし、製品形状への圧延を形鋼工場単独で行う 1 ヒート製造プロセスを立案した。有限要素解析を活用して孔型形状とその圧延条件を設計し、目標の断面形状となる製品の圧延に成功した。製品を用いて継手引張試験を行い、目標の継手引張強度を確保できることを確認した。さらに、実機における圧延条件の最適化を行い、冷間での曲がりのプレス矯正技術を開発した。これらの結果、FLJ[®] を安定して大量に製造する技術を確認した。

Abstract:

JFE Steel has developed a new straight type steel sheet pile “FLJTM” that has the same effective width and joint tensile strength as the conventional “FL” with the weight of steel reduced by 14%. For the product development, a single-heating manufacturing process from CC bloom to products at a wide flange beam mill was adopted. Based on FEM simulations the groove profiles were optimized and the product with the target cross-sectional shape was successfully rolled. Joint tensile tests of the product were conducted, and it was confirmed that the target joint tensile strength could be secured. In addition, JFE steel has developed improved manufacturing techniques, such as optimizing rolling conditions of the mill, and straightening press technology. As a result, a stable mass production of FLJ was established.

1. はじめに

JFE スチールでは、新しい直線形鋼矢板; J フラットパイル[®] JFESP-FLJ (以下 FLJ[®]) (写真 1) を開発した。FLJ は継手を最適形状に改良・小型化することで、有効幅とウェブ厚と継手引張強度を従来の直線形鋼矢板 FL と同等としつつ、鋼材重量を 14% 削減している。

FLJ は直線形鋼矢板としては国内最軽量であり、高い経済性が期待できるため、従来の鋼矢板セル工法での適用に加え、様々な土木用途での構造部材として活用されている。活用例として、「アークジャケット工法」¹⁾、「アーバンウォール[®]工法」²⁾ および「Jドメール[®]」³⁾ などがある。

本論文では、この FLJ の製造技術の開発について、その製造プロセス、有限要素法解析を活用した孔型と圧延条件の設計、実機での圧延・矯正技術の確立について詳細に報告する。

2. FLJ[®]の製品形状と製造プロセス

2.1 FLJ[®]の製品形状

図 1 に FLJ と従来の FL の継手断面形状を重ねて示す。FLJ は継手を小型化することで、FL に対して軽量化を達成している。継手の小型化に当たっては、継手引張強度を従来と同等以上とするために、継手引張の有限要素解析を行

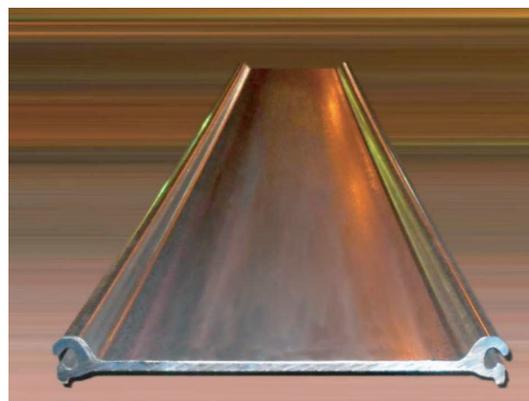


写真 1 FLJ[®]の外観

Photo 1 Appearance of FLJTM

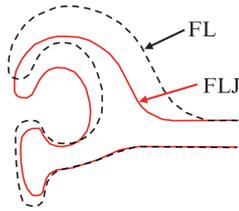


図1 継ぎ手形状の比較
Fig. 1 Shape of joint

い、最適な継ぎ手形状を設計している⁴⁾。

2.2 FLJ[®]の製造プロセス

図2に従来のFLおよびJES[®]形鋼の製造プロセスを示す⁵⁾。まず、鋼片工場の分塊圧延機（BMミル）で連続铸造製の矩形素材（CCブルーム）をH形断面となる粗形鋼片に圧延する。次にこの粗形鋼片を形鋼工場に搬送し、形鋼工場のブレークダウン圧延機（BDミル）、中間圧延機（S1ミル）、仕上げ圧延機（SFミル）で順に圧延し製品化している。鋼片工場と形鋼工場のそれぞれで素材を加熱する必要がある2ヒート圧延プロセスであり、省エネルギーやリードタイム短縮の観点から、改善が必要であった。

そこでFLJでは、図3に示すとおり、形鋼工場単独でブルームから製品への圧延を行う1ヒート製造プロセスとした。造形のための孔型数を確保するため、中間圧延について、ハット形鋼矢板と同様に⁶⁾、S1ミルとS2ミルの2台でのタンデム圧延を行うものとした。

FLJの製造プロセスの概要を以下に説明する。まずBDミルでは、矩形のブルームを素材として、4つの孔型で断面形状が略H形となる粗形鋼片への圧延を行う。続いてS1ミルとS2ミルでは、合計6つの孔型で各部の厚みを減じていくとともに、継手部となる素材の両端部分の形状を成型する圧延を行う。この中間圧延は、先述のとおりタンデム圧延とすることで圧延時間の短縮を図り、圧延途中での材料の温度低下を抑制している。最後のSFミルでは、3つの孔型で主として副爪の曲げ成形圧延を行い、製品断面形状とする。

3. FEMを活用した孔型形状の決定

3.1 孔型形状の考え方

FLJの各孔型形状の設計に対して、有限要素法（FEM）解析を活用した。まず製品断面形状から使用する素材を決定した。FLJの場合は矩形のブルームを素材とした。次に、配置できる孔型数を想定し、各孔型の概略設計を行った。そして、これらの孔型での圧延についてFEM解析を行い、想定した断面形状が得られるかを評価した。この評価結果から、孔型形状を修正していき、最終的な孔型形状とその圧延条件を決定した。

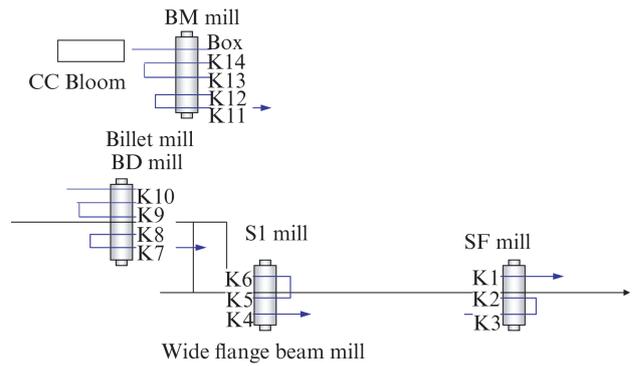


図2 FLおよびJES[®]形鋼の製造プロセス
Fig. 2 Manufacturing process of FL and JESTM shapes

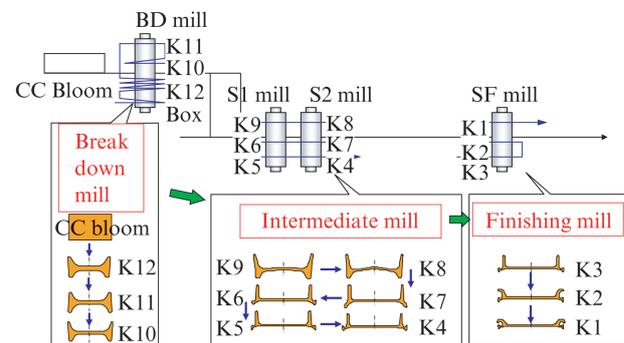


図3 FLJ[®]の製造プロセス
Fig. 3 Manufacturing process of FLJTM

3.2 圧延解析モデル

圧延解析には、汎用のFEM解析プログラムAbaqus Explicit 6.12を使用した。図4に解析モデルの一例を示す。FLJの断面の左右対称性を考慮し、左右対称の1/2モデルとした。初期長さ2000mmの素材を圧延入側に配置し、この素材に所定の初速度を与え、回転する剛体ロール間に噛みこませて全長を圧延する、という3次元の弾塑性解析モデルである。実圧延におけるテーブルローラとエプロンを模擬するために、材料の下側には剛体のテーブルを配置した。

表1に主な解析条件を示す。材料は炭素鋼を想定し、熱間での変形抵抗には美坂の式⁷⁾を用いた。圧延変形によるひずみについては、高温での圧延のため再結晶が起ると仮定し、1パスごとにひずみをリセットし、圧延後の長手中央断面形状を次の孔型での圧延前断面形状とした。

ロールの回転速度は40rpm、ロールと圧延材との摩擦条件はクーロン摩擦とし、摩擦係数は0.3、テーブルと圧延材の摩擦係数は0とした。

3.3 解析結果

FEM解析に基づき孔型形状を修正した例を以下に述べる。図5(a)に当初草案形状のK6孔型でのFEM解析結果

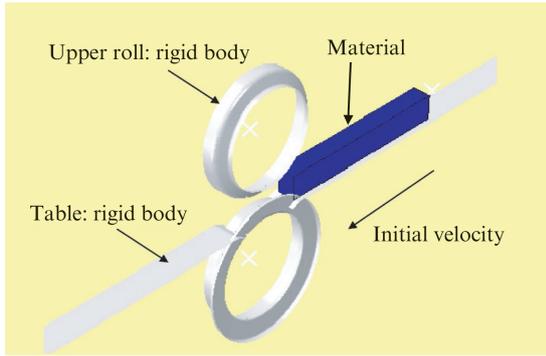


図4 解析モデルの概要
Fig. 4 Analytical model

表1 解析条件
Table 1 Analysis condition

Solver	Abaqus Explicit 6.12
Model	3D, 1/2Model
Material	Plain carbon hot-rolled steel
Roll rotational velocity	40 rpm
Contact condition; Material - Rolls	Coefficient of friction = 0.3
Contact condition; Material - Table guide	Coefficient of friction = 0.0

を示す。主爪上部で「噛み出し」が発生していた。圧延前における主爪部分の断面積が過大であることが原因であり、K6孔型より上流側の孔型形状を見直し、主爪部の断面積を小さくする必要があることが判明した。そこで上流側の孔型の継手下端部の断面積を減少させるように孔型形状を修正した。図5 (b) に、修正した条件で再度解析した K6 孔型の FEM 解析結果を示す。噛み出しがなくなり、目標とする断面形状が得られた。

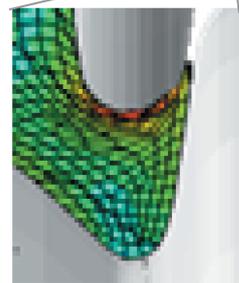
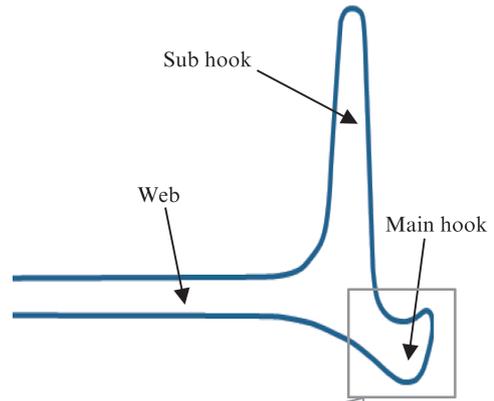
このように、K12 から K1 までの 12 個の孔型の圧延に対して FEM 解析を行い、孔型形状を順に適正化していった。

4. 実機圧延技術の確立

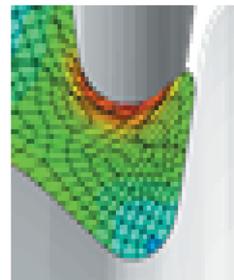
4.1 実機試圧延

前章までの検討から孔型形状を決定し、実機の孔型ロールを製作し実機試圧延を行った。図6に代表的な製品の継手断面形状を示す。製品の断面スタンプは、実線で示した継手の設計形状とよく一致しており、目標どおりの断面形状となる製品の圧延に成功した。

次に、試圧延材から継手引張試験片を切り出し、継手引張強度を測定した。継手引張試験は写真2に示すように、幅 100 mm、長さ 300 mm の FLJ 継手 2 体を噛み合わせ、その両端部に引張力を作用させる方法とした。また荷重は破壊まで単調に载荷した。



(a) Initial groove profile



(b) New groove profile

図5 有限要素解析の K6 の結果

Fig. 5 Analytical result; cross section of K6-pass

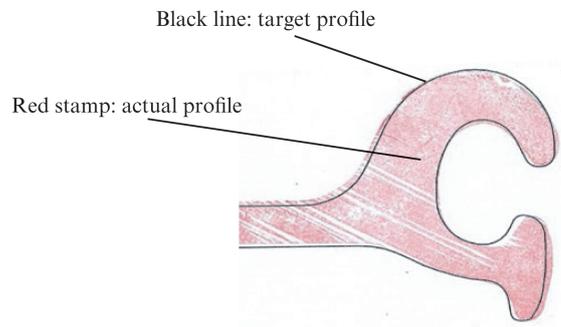


図6 製品の継手断面形状

Fig. 6 Joint cross section of product

図7に母材の降伏応力で整理した継手引張試験結果を示す。継手引張強度の実績は4.7~5.3 MN/mであり JIS 規格 3.92 MN/m を十分に満足することが確認できた。

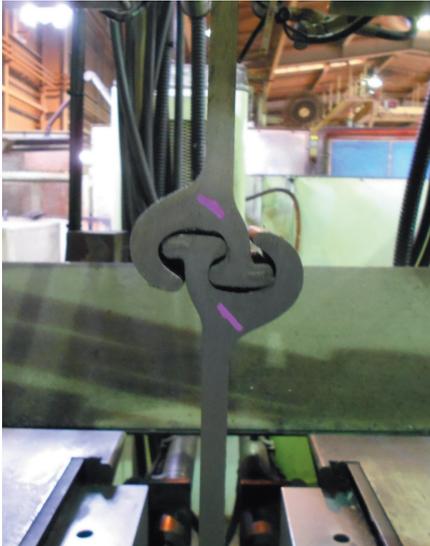


写真 2 継手引張試験
Photo 2 Picture of tensile test

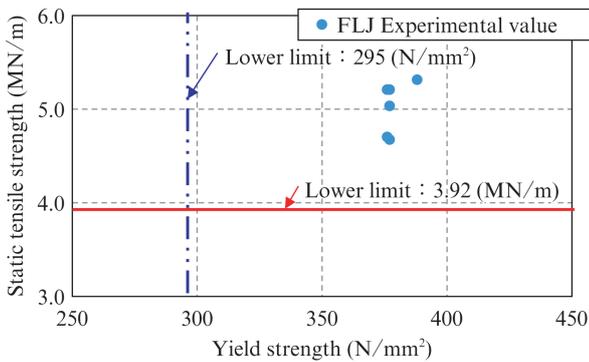


図 7 継手引張試験の結果
Fig. 7 Result of tensile test on FLJ™ joint

4.2 圧延条件の最適化

実機で工業的な量産技術を確立するために、様々な製造技術の向上策を実施した。はじめに、所定の継手形状を安定製造するための厚み管理の適正化について述べる。

FLJの主爪部に対して管理すべき寸法・形状の項目として、玉幅寸法と主爪上部の噛み出しの有無がある。中間圧延段階で主爪部の断面積が少ない場合、孔型の主爪圧延部に対して材料が未充填となり結果として製品の玉幅が不足し、逆に中間圧延段階で主爪部の断面積が過多の場合、製品の主爪上部に噛み出し痕が発生する場合がある。

そこで、粗圧延終了時（K10 圧延）のウェブの厚みを変化させ、K8 圧延時点での継手の断面積にどのような影響を与えるか調査する FEM 解析を実施した。

解析では、K10 孔型仕上がり時点でのウェブ厚として 2 水準を想定した。K10 孔型での圧延時点で材料の継手部も孔型に充填していると仮定すれば、K10 時点ではウェブ厚

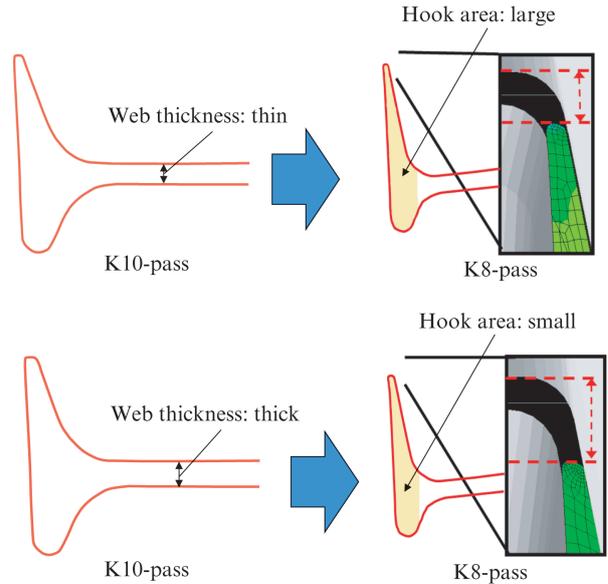


図 8 FEM 解析の結果

Fig. 8 Analytical result; cross section of K10-pass and K8-pass

が厚い条件のほうが継手部の断面積も大きい。この 2 水準の材料を K9 孔型および K8 孔型で圧延する解析を行った。この解析では K8 孔型での圧延後のウェブ厚が等しくなるように設定し、K8 圧延後の継手断面積を比較した。図 8 にこの結果を示す。K10 時点でウェブ厚みが厚く継手断面積が大きい条件のほうが、K8 圧延後には継手部の高さ寸法が小さくなり断面積も小さくなっている。この理由は、K9 および K8 孔型での圧延時に、ウェブ部分の压下量が大いいと圧延によるウェブの長手方向への延伸が大きくなり、これに合わせて継手部も長手方向に延伸し幅がりが小さくなるためと考えられる。

この解析結果に基づき K10 圧延時点でのウェブ厚の管理値を設定し、安定した継手部の形成を実現した。

実機圧延に当たっては、ハット形鋼矢板の圧延で導入した圧延のパス間で圧延ロールの傾きを調整して圧延での曲がりを抑制する「パス間レベリング制御」⁷⁾を FLJ の中間圧延と仕上圧延にも適用した。

また、これに加え

- ・BD 圧延後の材料のクロップ（材料の長手方向端）カット量の適正化
 - ・材料と圧延ガイドとの隙間管理の厳格化
 - ・各設備の隙間管理の厳格化とその標準化
- 等も行い、量産圧延技術を確立した。

5. プレス矯正技術の開発

5.1 プレス矯正の考え方

FLJ の実機圧延技術の開発と並行して、精整工程でも製品の左右方向の曲がりを冷間矯正する技術を開発した。

既存のU形鋼矢板では、ローラー矯正後に長手左右方向の曲がりが残存している場合、プレス矯正装置を用いて3点曲げの要領で曲がりを修正している。3点曲げを行う際の押し金型および受け金型は、製品外面の平坦部であるフランジ部、あるいは継手の根本部に当接させることができる。

これに対し、FLJをはじめとする直線形鋼矢板は、フランジが存在しないため曲がりをプレス矯正するための押圧・保持部が無く、プレス矯正が不可能であると考えられてきた。

そこで、押し金型および受け金型を継手部に当接させて曲がりの修正を行うこととした。まず、横押しで材料に変形ひずみの付与が可能か検証した。継手にかかる応力 σ は(1)、(2)式で算出される。

$$\sigma = M/Z \dots\dots\dots (1)$$

$$M = PL/4 \dots\dots\dots (2)$$

ここで M は曲げモーメント、 Z は断面係数、 P は荷重、 L は2つの受け金型の間隔である。FLJの軸方向の断面係数 Z_y は 846 cm^3 であり、 L を2mで設定し、 $P=874\text{ kN}$ で横押しすると、継手には $\sigma=463\text{ N/mm}^2$ の応力を負荷できる。

これはFLJの降伏点 295 N/mm^2 を上回るため、塑性ひずみの付与が可能である。そこで、金型と継手部を当接させるため、FLJ専用の金型を開発した。図9にFLJ専用金型の模式図を示す。継手の外面と当接すると継手に変形する懸念があるため、継手の内側に当接する設計とした。

5.2 実機矯正実験

図10に、専用金型を用いたプレス矯正の模式図を示す。押し金型と受け金型に専用の金型を設置し、面外変形と座屈を防ぐため、抑え金型を押し金型前に設置した。実機での矯正では、まず長手端部で3点曲げ矯正を開始し、材料を1mずつ長手方向に搬送していき、その都度3点曲げ矯正を行うという方法を採用した。この方法で、矯正した結果、面外変形や座屈は発生せず、曲がりの矯正が可能であることが実証できた。図11に代表的な製品の矯正前後の曲がり量を示す。曲がり量を低減することに成功し、製品の真直精度向上を達成した。

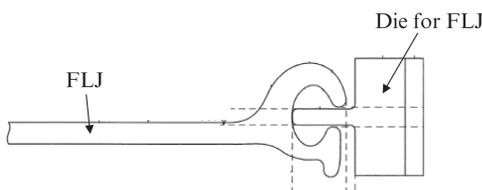


図9 FLJ[®]専用金型の模式図
Fig. 9 Die for FLJTM

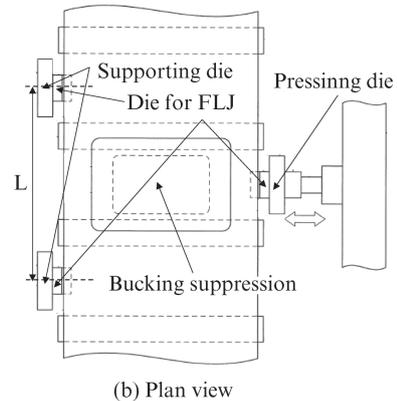
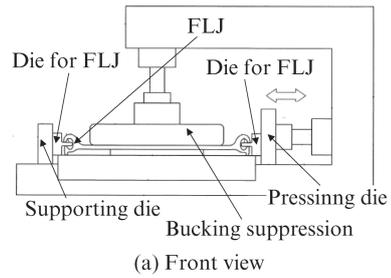


図10 専用金型を用いたプレス矯正方法

Fig. 10 Method for straightening of FLJTM with die for FLJTM

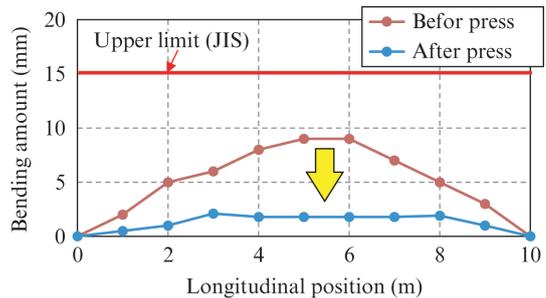


図11 プレス矯正結果

Fig. 11 Result of press straightening

6. おわりに

本報では、当社で開発した新直線形鋼矢板（FLJ）の製造プロセス、FEM解析を活用した孔型設計、圧延技術、プレス矯正技術などについて述べた。その要約を以下に記す。

- (1) 継手を小型化することで、従来と同等の有効幅・継手引張強度を有し、鋼材重量を14%削減（国内最軽量）することに成功した。製造プロセスは、形鋼工場単独でブルームから製品への圧延を行う1ヒートプロセスとした。
- (2) FEM解析を活用し、各孔型形状の設計を行った。その結果、目標どおりの断面形状となる製品の圧延に成功した。
- (3) 以下に示す圧延条件の最適化を実施し、量産圧延技術を確立した。

- (a) K10 圧延後のウェブ厚の管理値の設定
- (b) パス間レベリング制御の FLJ の中間圧延と仕上圧延への適用
- (c) BD 圧延後の材料のクロップ(材料の長手方向端)カット量の適正化
- (d) 材料と圧延ガイドとの隙間管理の厳格化
- (e) 各設備の隙間管理の厳格化とその標準化
- (4) 専用の金型を開発し、プレスによる曲がり矯正技術を確立した。

FLJ は、高い品質、高い信頼性、優れた経済性を有していることから、様々な用途の土木建築材料に適用されている。今後もユーザーニーズに対応した新形鋼とその製造技術の開発に取り組んでいく。

参考文献

- 1) 田中祐人, 塩崎禎郎, 末田明. アーク矢板土留め付きジャケット岸壁の開発. JFE 技報. 2010, no. 25, p. 51-59.
- 2) 松岡馨, 松井良典, 大場雄登. 都市型圧入ケーソン「アーバンリング

- 工法[®]・アーバンウォール[®]工法]. JFE 技報. 2019, no. 43, p. 40-45.
- 3) 土留め用高剛性壁体「Jドメール[®]」. JFE 技報. 2019, no. 43, p. 100-102.
- 4) 恩田邦彦, 河野謙治, 辻本和仁. 直線形鋼矢板 JFE-FLS の性能検討. 土木学会第 71 回年次学術講演会. 2016, p. 1743-1744.
- 5) 三浦啓徳, 河野幹夫, 山口昭, 清水満, 渡邊明之, 有光武. 疲労特性に優れた JES 形鋼のアンダーパスへの適用. 川崎製鉄技報. 2002, vol. 34, no. 4, p. 188-194.
- 6) ハット形 900 幅鋼矢板の製造技術. JFE 技報. 2010, no. 26, p. 36-67.
- 7) 美坂佳助, 吉本友吉. 落下ハンマ法による普通炭素鋼の熱間平均変形抵抗. 塑性と加工. 1967, vol. 8, no. 79, p. 414-422.



杉田 和範



高嶋由紀雄



須崎健太郎