

ウェブをスチフナ補剛した H 形鋼梁に関する実験的研究

幅厚比指標を用いた梁の塑性変形性能の評価

EXPERIMENTAL STUDY OF H-SECTION STEEL BEAMS WITH WEB STIFFENERS

Evaluation of Plastic Deformation Capacity of Beams Using the Width-Thickness Ratio Index

大月 智弘^{*1}, 石岡 拓^{*1}, 竹中 啓之^{*2}, 川又 哲也^{*3}

Tomohiro OTSUKI, Taku ISHIOKA, Hiroyuki TAKENAKA and Tetsuya KAWAMATA

The purpose of present study is to evaluate the effect of web stiffening plates on the plastic deformation capacity of H-section steel beams with thinner webs. In the present study, structural experiments were conducted on H-section steel beams reinforced with axial stiffeners attached to the web to verify the effectiveness of the reinforcement. The evaluation method using the width-thickness ratio index value, WF , proposed in a previous study was applied to the reinforced H-section steel beams, and its applicability was examined. In addition, numerical analyses were performed on the reinforced H-section steel beams to investigate the validity of the analytical model. The following results were obtained.

1. The reinforcement with stiffeners increased the proof stress increase ratio and the cumulative plastic deformation factor of the H-section steel beams.
2. H-section steel beams with web stiffeners can be evaluated with WF .
3. The analytical results for the deformation capacity of the analytical model simulating the experimental specimen were equivalent to the experimental results.

Keywords : *Cyclic loading, Reinforcement of the beam ends, Width-thickness ratio index*

繰り返し載荷, 梁端部補強, 幅厚比指標

1. はじめに

近年、鉄骨造建築物では大型化やロングスパン化の傾向があり、大きな曲げ応力に対応して梁せいの大きい H 形鋼を用いる機会が多くなっている。一方、H 形鋼の梁せいを大きくすることでウェブの幅厚比が大きくなると、比較的小さい曲げ変形でウェブの局部座屈が生じて耐力低下してしまい、変形能力が担保されない。一般に H 形鋼梁の断面においては、変形能力の確保のため、日本建築学会の規準¹⁾ および指針^{2)~4)} が定める幅厚比制限値または告示によって定める部材種別ごとの幅厚比区分⁵⁾ によってウェブ厚を決定するが、ウェブの局部座屈により変形能力が低下することに着目すると、鉄骨梁の端部のウェブに十分な補剛を行うことで、ウェブ全体の厚さを増大させることなく変形能力を増大させることができる。言い換えれば、変形能力を維持したままウェブ全体の厚さを低減することが可能となり、梁全体で考えたときに鉄骨数量を抑え、経済性に優れた架構となる(図 1)。端部の補剛方法については、図 2 のように鉄骨梁の軸方向に水平スチフナを配置する方法、軸に直交するリブを配置する方法、ウェブにカバープレートを配置する方法等があるが、本研究では溶接施工性を考慮し水平スチフナを対象とした。

本研究では、従来の幅厚比区分で部材種別が FB ラン

ク以下となるウェブ幅厚比を有する鉄骨梁および水平スチフナにより端部を補剛した鉄骨梁に対して構造実験を実施し、補剛効果として耐力上昇率および累積塑性変形倍率について評価する。また、既往の文献⁶⁾ で提案されている幅厚比指標 WF を用い、ウェブを補剛した鉄骨

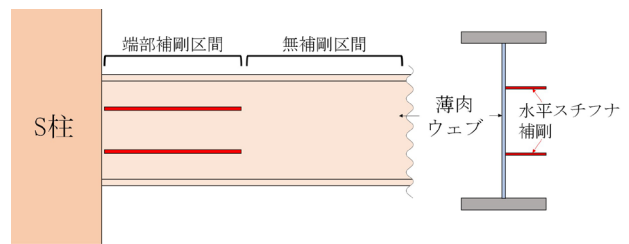


図 1 S 大梁薄肉ウェブ補剛

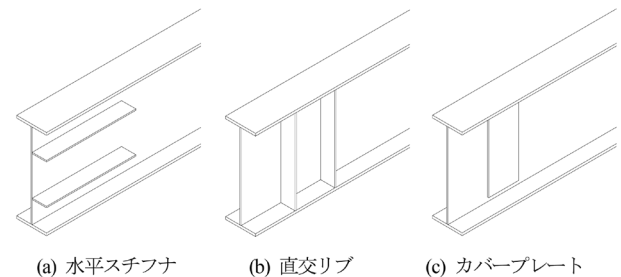


図 2 端部補剛方法

* 1 戸田建設(株)技術研究所 修士(工学)

* 2 戸田建設(株)技術研究所 博士(工学)

* 3 戸田建設(株)構造設計部 修士(工学)

Technology Research Institute, TODA CORPORATION, M.Eng.
Technology Research Institute, TODA CORPORATION, Dr.Eng.
Structural Design, TODA CORPORATION, M.Eng.

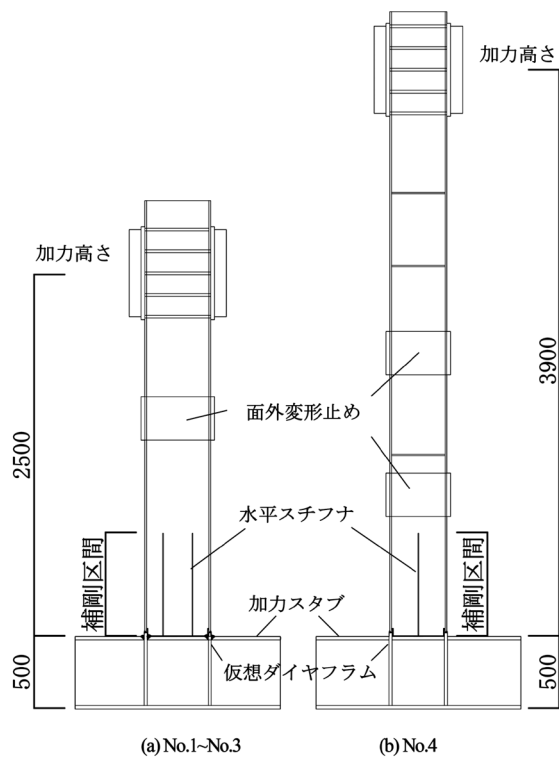


図3 試験体図

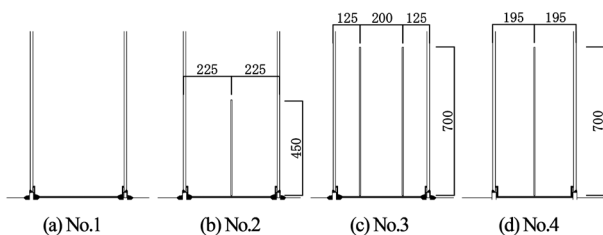


図4 端部補剛区間詳細

梁の耐力上昇率および累積塑性変形倍率について評価する。WFはH形断面要素の連成座屈効果を考慮した座屈耐力式をもととした、累積塑性変形倍率を評価する指標である。水平スチフナにより補剛した梁に対してWFを用いて変形性能を評価した例はまだ少なく、評価手法の適用性について検討する。さらに、試験体を模擬したモデルを対象に数値解析を実施し、耐力上昇率および累積塑性変形倍率、座屈性状を確認し、妥当性の検討を行う。WFによる評価手法を用いることで、H形断面梁に対しより合理的な設計が可能となる。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体の一覧を図3および表1に示す。また、図4に補剛区間の詳細を示す。試験体パラメータは梁断面、水平スチフナの枚数と補剛長さ、シアスパン比とした。No.1試験体は部材種別がFDランクとなるウェブ幅厚比

表1 試験体一覧

	No.1	No.2	No.3	No.4
梁せい [mm]	450			390
梁幅 [mm]	150			
ウェブ厚 [mm]	6			
フランジ厚 [mm]	12			
試験体長 [mm]	2500			3900
シアスパン比	5.87			10.66
ウェブ幅厚比	71			61
フランジ幅厚比	6			
スチフナ枚数	0	1	2	1
スチフナ厚 [mm]	-			
スチフナ幅 [mm]	-			
スチフナ長 [mm]	-		700	

表2 材料試験結果

使用箇所	鋼種	ヤング係数 [N/mm ²]	降伏点 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]	
No.1~3	フランジ	SN490B	203028	362.9	540.1
	ウェブ	SN490B	203861	393.8	572.4
No.4	フランジ	SN490B	202566	365.0	541.3
	ウェブ	SN490B	207053	399.8	571.2
共通	スチフナ	SS400	215459	296.8	437.9

を有する梁であり、No.2試験体はNo.1試験体を水平スチフナ1枚で補剛したもの、No.3試験体はNo.1試験体を水平スチフナ2枚で補剛したものである。No.4試験体は他の試験体に対しシアスパン比を増大させたものである。表2に本実験に用いた鋼材の材料試験結果を示す。

2.2 加力計画

図5に加力装置を示す。試験体は梁を90度回転させた片持ち梁形式とし、試験体の基端側は反力床に緊結した。梁の先端を水平ジャッキに接続し、水平力を与える。また、梁の中間に面外変形止めを設けて横座屈を防止している。シアスパン比の大きいNo.4試験体では面外変形止めを2か所設けた。

図6に加力計画を示す。加力は正負交番の繰返し载荷とした。加力制御は試験体の、水平ジャッキの加力高さに取り付けた変位計から算出される部材角で制御する。No.1~No.3試験体は1/800radを1サイクル、1/400rad、1/200rad、1/150rad、1/100rad、1/67rad、1/50rad、1/33rad、1/25rad、1/20radをそれぞれ2サイクルとした。No.4試験体は他の試験体に対してシアスパン比が大きいため、加力ステップを変更した。1/50radおよび1/33radでは10サイクル、1/25radでは6サイクルとし、他の部材角では同様のサイクルとした。

3. 実験結果

3.1 荷重変形関係

図7に実験結果の荷重変形関係を示す。縦軸はせん断力Qで、横軸は部材角θを表している。

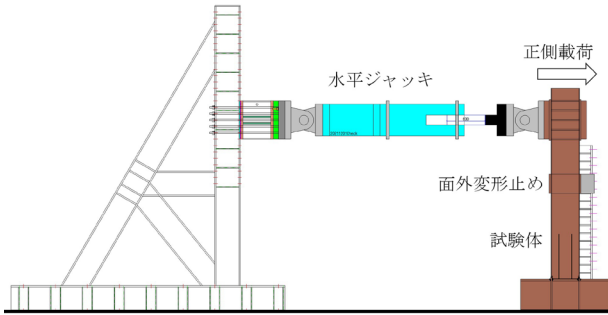


図5 加力装置図

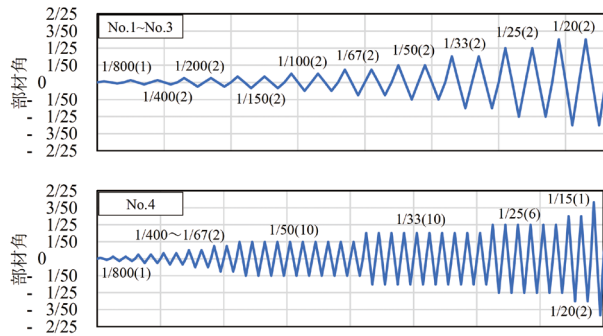


図6 加力計画

No.1試験体は1/50rad サイクルでウェブの面外変形が目立ち始め、1/33rad サイクル時に最大耐力に達した後、1/25rad サイクル時にウェブの面外変形が進行し最大耐力の90%を下回った。

No.2試験体は1/50rad サイクルでウェブの面外変形が目立ち始め、1/33rad サイクル時に最大耐力に達した後、1/25rad サイクル時に補剛範囲境界でのウェブの座屈により最大耐力の90%を下回った。

No.3試験体ではウェブの面外変形が見られず、1/25rad サイクル時に最大耐力に達した後、1/20rad サイクル加力時に引張側フランジが破断した。

No.4試験体は加力計画における多数回繰返し载荷の中では耐力低下を見せず、1/25rad サイクル時に最大耐力となった。その後、ゆるやかに耐力低下し1/15rad サイクルで補剛範囲でのウェブ局部座屈が進行した。

3.2 塑性変形能力

図8に累積塑性変形倍率の定義を示す。まず、荷重変形関係の縦軸を全塑性モーメント時に作用するせん断力 Q_p で基準化し、横軸を全塑性耐力時の弾性変形 θ_p で基準化する。ここで、 θ_p は Q_p を実験時の初期剛性で除して算出する。次に、各サイクルでそれ以前の最大モーメントを超える部分をつなぎ骨格曲線を作成する。そして縦軸の最大値を耐力上昇率 τ とし、最大耐力の90%となる点での塑性変形成分を累積塑性変形倍率 μ とし、式(1)により評価する。

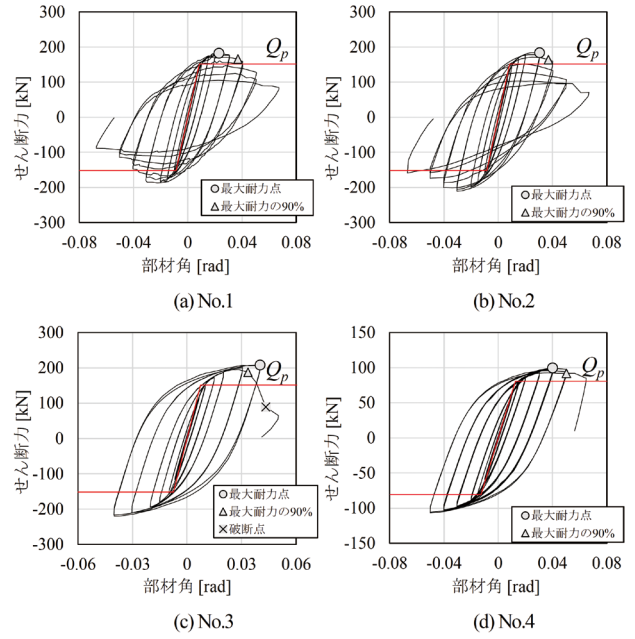


図7 荷重変形関係

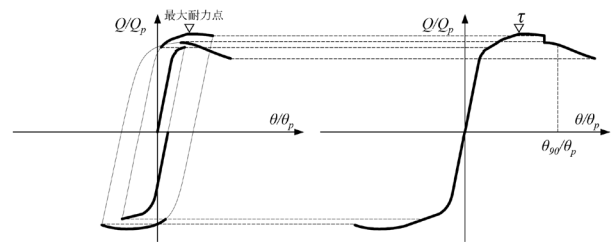


図8 累積塑性変形倍率の定義

$$\mu = \frac{\theta_{90}}{\theta_p} - 1 \quad (1)$$

ここで、 θ_{90} : 最大耐力の90%時点での部材角である。

また、既往の文献⁶⁾において提案された幅厚比指標による評価方法を示す。式(2)、式(3)および式(4)により幅厚比指標 WF を求める。補剛後のウェブの幅厚比については文献⁷⁾に基づき等価幅厚比を算出し、式(2)のウェブの幅厚比を等価幅厚比に置き換えて同様に算出する。

$$WF = \sqrt{\frac{1}{k^2} \left(\frac{d/t_w}{E/\sigma_{yw}} \right)^2 + \left(3.43 - \frac{25.0}{k^2} \right) \left(\frac{b/t_f}{E/\sigma_{yf}} \right)^2} \quad (2)$$

$$k = \begin{cases} 4.9 & \alpha < 1/6 \\ 5.75 - 5.1\alpha & 1/6 \leq \alpha \leq 1/2 \\ 3.2 & \alpha > 1/2 \end{cases} \quad (3)$$

$$\alpha = \left(\frac{1}{6} + \frac{A_f}{A_w} \right) \frac{\beta}{\lambda_w} \quad (4)$$

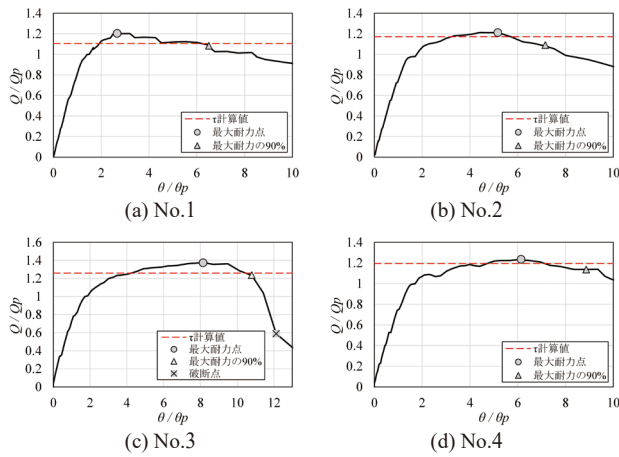


図9 試験体の骨格曲線

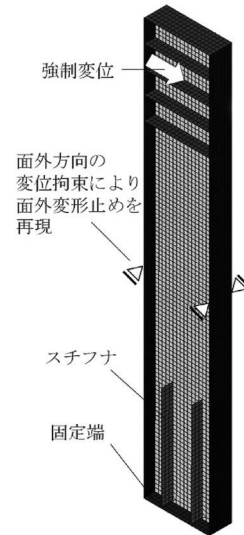


図10 解析モデルの例

表3 試験体の耐力上昇率と累積塑性変形倍率

	耐力上昇率		累積塑性変形倍率	
	実験値	計算値	実験値	計算値
No.1	1.20	1.11	5.51	1.27
No.2	1.21	1.17	6.15	3.36
No.3	1.37	1.26	9.79	7.67
No.4	1.24	1.19	7.86	4.31

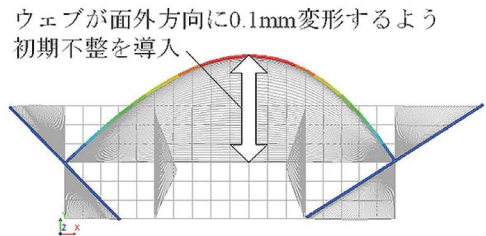


図11 初期不整の導入

ここで各記号は、 d : ウェブせい, t_w : ウェブ板厚, b : フランジ半幅, t_f : フランジ板厚, σ_{yw} : ウェブ降伏応力度, σ_{yf} : フランジ降伏応力度, E : ヤング係数, A_w : ウェブ断面積, A_f : フランジ断面積, λ_w : ウェブ辺長比, β : 曲げ応力勾配 ($0 \leq \beta \leq 2$, 0:均等曲げ, 2: 逆対称曲げ) である。

さらに、算出した WF を用いて式 (5) により τ の下限値を、式 (6) により μ の下限値を算出する。

$$\tau = 1.53 - 0.53 \cdot WF \quad (5)$$

$$\mu = 32(1 - WF)^2 \quad (6)$$

図9に各試験体の骨格曲線を、表3に試験体の τ および μ の実験値と計算値を示す。実験値を比較すると、No.1試験体に対してNo.2試験体の τ は1.01倍、 μ は1.12倍となった。No.3試験体では、 τ は1.13倍、 μ は1.78倍となった。ウェブ端部に水平スチフナを配置することにより τ , μ がともに上昇し、補剛効果が確認された。また、スチフナ枚数が1枚の時よりも2枚の方が高い補剛効果が得られた。特に μ については補剛効果が大きい。試験体の τ , μ はいずれも計算による下限値を実験値が上回っており、 WF を用いることで、 τ および μ を安全側に評価することができる。

4. 数値解析の検討

ここでは、試験体を模擬した解析モデルに対して実験と同様の繰返し载荷の強制変位を与える数値解析を実施し、モデルの妥当性を検討する。

4.1 解析概要

図10に解析モデルの例を示す。モデルは試験体を模擬した片持ち梁形式とした。解析は3次元有限要素解析を実施し、解析には汎用構造解析プログラム DIANA10.5を用いる。モデルは4節点のシェル要素でモデル化し、鋼材の厚みを要素特性として与えた。試験体のスタブに取り付け部分は固定端とし、モデルには試験体の面外変形止めを再現し面外方向の変位拘束を与えた。また、ウェブの局部座屈が生じやすくなるよう初期不整を導入した。初期不整は固有値解析の1次モードを求め、その形状に比例してウェブの面外変形の最大値が0.1mmとなるように設定した(図11)。鋼材の材料特性を図12に示す。鋼材の材料特性は材料試験結果に合わせた4直線のマルチリニアでモデル化し、硬化則は移動硬化と等方硬化を1:1とする複合硬化則とした。

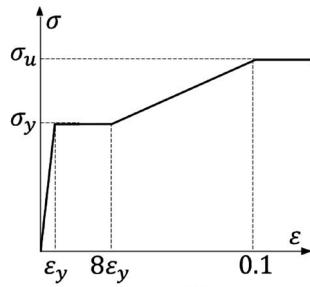


図12 材料特性

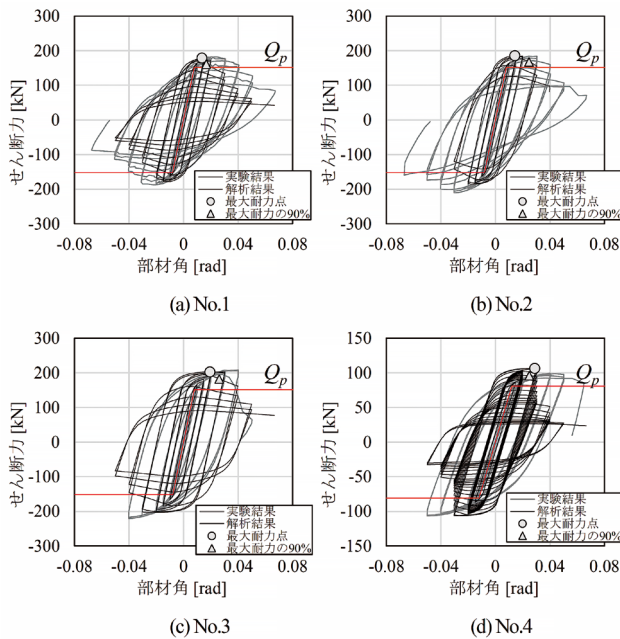


図13 解析モデルの荷重変形関係

4.2 解析結果

(1) 荷重変形関係と骨格曲線

図13に荷重変形関係を、図14に荷重変形関係から得られた骨格曲線を示す。図中には実験結果を合わせて示す。荷重変形関係において各モデルは実験結果と良い対応を示した。繰返し载荷における荷重変形関係においては各試験体で最大耐力後の耐力低下が実験結果よりやや早い傾向があるが、骨格曲線については耐力低下についてもよく対応している。解析結果から得られる ϵ および μ の一覧を表4に示す。解析結果はいずれも計算による下限値を超える値となった。また、解析結果は実験結果と概ね同等以下の値となった。このことから、数値解析により水平スチフナによる補剛効果について評価できることがわかった。

(2) 座屈性状

写真1に実験での最大耐力の90%となった時点の試験体の終局状態を示す。また、図15に実験結果で終局状態となった変形での解析結果における面外変形状況を示

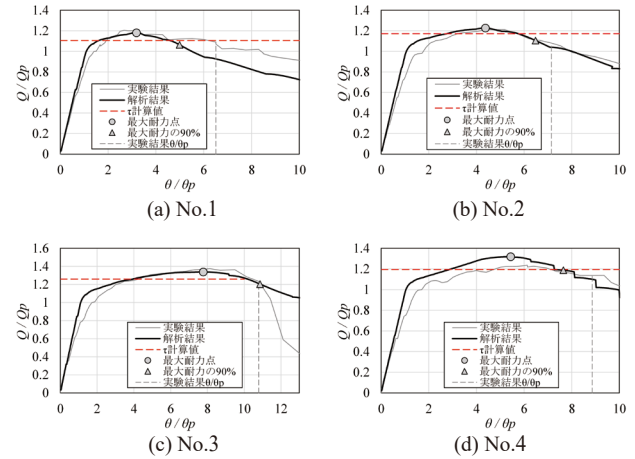


図14 解析モデルの骨格曲線

表4 解析モデルの耐力上昇率と累積塑性変形倍率

	耐力上昇率			累積塑性変形倍率		
	解析値	実験値	計算値	解析値	実験値	計算値
No.1	1.14	1.20	1.11	3.99	5.51	1.27
No.2	1.23	1.21	1.17	5.48	6.15	3.36
No.3	1.34	1.37	1.26	9.86	9.79	7.67
No.4	1.32	1.24	1.19	6.65	7.86	4.31

す。No.3試験体においてはウェブ面外変形が顕著になる前に引張フランジが破断したため写真からは判別が難しいが、No.1, No.2, No.4試験体においては座屈性状をよく再現できている。

5. おわりに

本研究では、部材種別がFBランク以下となるウェブ幅厚比を有する鉄骨梁および水平スチフナによりウェブを補剛した鉄骨梁を対象として構造実験を実施し、その補剛効果を確認した。また、幅厚比指標 WF を用いた評価方法の適用性について検討した。さらに、試験体を模擬した解析モデルを対象に数値解析を実施した。本実験、解析の範囲内であるが、得られた知見を以下に示す。

- 1) 鉄骨梁端部のウェブに水平スチフナを取り付けることで、梁の耐力上昇率および累積塑性変形倍率が上昇した。
- 2) 水平スチフナによりウェブを補剛したH形鋼梁に対して、幅厚比指標 WF を用いた評価が可能である。
- 3) 試験体を模擬した解析モデルの変形性能および座屈性状は実験結果と同等であった。

なお、 WF による評価方法の適用性に関して、スチフナの取付位置や端部の接合方式等についての解析的検討は、今後の課題である。

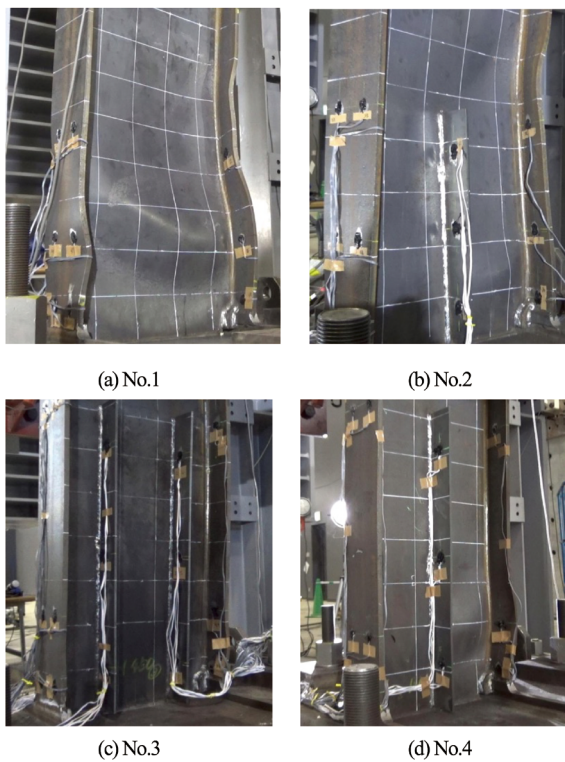


写真 1 試験体の終局状況

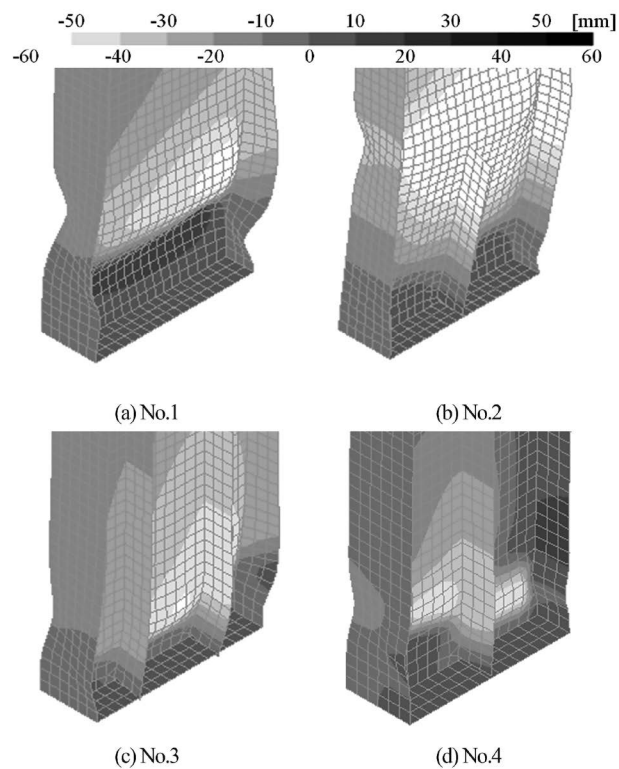


図 15 解析モデルの終局状況での面外方向変位量のコンター図

参考文献

- 1) 日本建築学会：鋼構造許容応力度設計規準，2019.10
- 2) 日本建築学会：鋼構造限界状態設計指針・同解説，2010.2
- 3) 日本建築学会：鋼構造塑性設計指針，2017.2
- 4) 日本建築学会：鋼構造座屈設計指針・同解説，2018.2
- 5) 建築物の構造関係技術基準解説書編集委員会：2020年度版建築物の構造関係技術基準解説書，2020.10
- 6) 五十嵐規矩男，末國良太，篠原卓馬，王韜：鋼構造 H 形断面梁の耐力及び塑性変形能力評価のための新規幅厚比指標と幅厚比区分，日本建築学会構造系論文集，第76巻，第668号，pp.1865-1872，2011.10
- 7) 星川努，原田幸博：ウェブを軸方向スチフナで補強した H 形鋼梁の塑性変形能力，鋼構造論文集，第20巻，第80号，pp.19-32，2013.12