

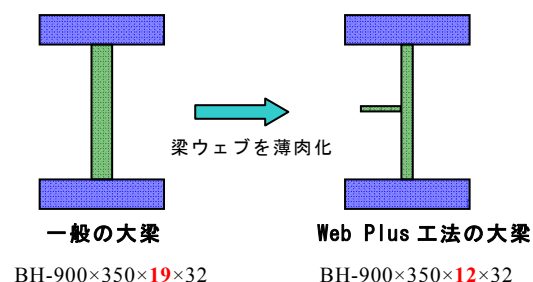
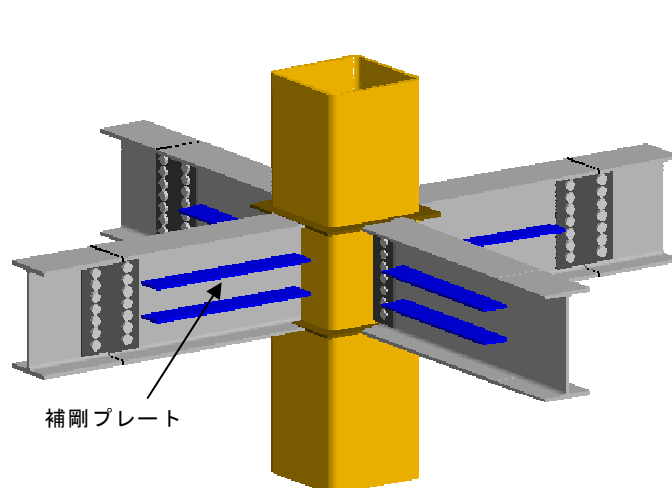
ウェブをプレート補強したH形鋼梁工法の開発

「Web Plus 工法」

堀 伸輔^{*1}・古宮 嘉之^{*1}・成瀬 忠^{*1}・茂木 順一^{*1}・今村 輝武^{*1}

Development on H-Section Beams Strengthened with Horizontal Web Stiffeners

Shinsuke HORI, Yoshiyuki KOMIYA, Tadashi NARUSE, Junichi MOGI, Terutake IMAMURA



本工法の主な適用範囲

- ・ 梁せい 1200mm 以下
- ・ 梁材種 400N 級、490N 級
- ・ 梁スパン／梁せい 8 以上
- ・ ウェブの幅厚比 400N 級：100 以下
490N 級：85 以下

研究の目的

事務所ビル、物流、商業施設などの躯体では、鉄骨造、CFT 造など鉄骨梁を有する躯体が採用される。当社では既に構造躯体でのコスト競争力強化の工法として、鉄骨造の柱部材を RC 造（MaRCS II 構法）や鉄筋挿入型 CFT 造（CFT Plus 工法）に置き換えるコストダウン工法を保有しているが、鉄骨梁については有効な工法がない。そこで、簡易な補強により H 形鋼梁のウェブを薄くし鋼材量を削減することで、コストダウン可能な工法の開発を目的として、ウェブの板厚を薄肉化し簡易な補剛材を設置した H 形鋼梁部材の構造性能を確認するため、梁部材の構造実験を実施した。また、FEM 解析によりパラメトリックスタディを行うことにより適用範囲の拡大を図った。

技術の説明

「Web Plus 工法」は、国土交通省告示第 1226 号及び第 596 号で示されている大梁鉄骨のウェブ幅厚比の規定値により、FB、FC ランクとなる梁に対して、大梁の端部に簡易な補剛材（補剛プレート）を設けることにより FA ランク相当とみなせる工法で、鋼材量を減らすことを可能にする工法である。梁ウェブの幅厚比が大きくなると、局部座屈が早期に生じるため、梁部材の耐力および変形性能において所定の性能が確保できなくなるが、梁端部の一定区間を補剛プレートで補剛することで、梁部材の耐力および変形性能について所定の性能を確保することが可能となる。

主な結論

ウェブの板厚を薄くした H 形鋼梁に、補剛プレートで補剛した梁部材の構造実験を実施した結果、FA ランク相当の耐震性能を保有することを確認した。また、FEM 解析により、実験結果を精度良く再現し、パラメータスタディにより適用範囲の検討を行った。以上の結果を以って、梁端部を簡易に補剛することで、国土交通省告示に規定された鉄骨梁幅厚比に拠らずに、許容応力度計算および保有水平耐力計算を行う設計・施工指針として纏め、「Web Plus 工法」として構造評定（都市居住評価センター）を取得した。

*1 本店 建築技術部 技術開発グループ

ウェブをプレート補強したH形鋼梁工法の開発 「Web Plus 工法」

堀 伸 輔^{*1} 古 宮 嘉 之^{*1}
成 瀬 忠^{*1} 茂 木 順 一^{*1}
今 村 輝 武^{*1}

要 旨

事務所ビル、物流、商業施設などでは、大スパンに対応するため鉄骨造、CFT 造などが採用される。当社では既に構造躯体でのコスト競争力強化の工法として、鉄骨造の柱部材については RC 造（MaRCS II 工法）や鉄筋挿入型 CFT 造（CFT Plus 工法）に置き換えるコストダウン工法を保有しているが、鉄骨造の梁においては有効な工法がない。そこで、コストダウン可能な工法として、簡易な補強により H 形鋼梁のウェブを薄くして鋼材量を削減する工法を考案した。本報では、コストダウン可能な工法の開発を目的として、ウェブの板厚を薄肉化して簡易な補剛材を設置した H 形鋼梁部材の構造性能を確認するため、梁部材の構造実験を実施した。その結果、ウェブの板厚を薄くした FC、および FD ランクの H 形鋼梁に、補剛 PL で補強した梁部材は、FA ランク相当の耐震性能を保有することを確認した。また、FEM 解析により、実験結果を精度良く再現することができた。これらの結果をもとに、本工法を設計・施工指針として纏め、国土交通省告示に規定された鉄骨梁幅厚比に拠らずに、許容応力度計算および保有水平耐力計算が可能な工法、「Web Plus 工法」として構造評定（都市居住評価センター）を取得した。

キーワード 鉄骨梁／H形鋼／S造／水平スチフナ／補強／変形性能

目 次

- | | |
|----------|-------------------|
| 1. はじめに | 3. 有限要素法による実験の再現性 |
| 2. 梁部材実験 | 4. まとめ |

DEVELOPMENT ON H-SECTION BEAMS STRENGTHENED WITH HORIZONTAL WEB STIFFENERS “Web Plus”

Shinsuke HORI	Yoshiyuki KOMIYA
Tadashi NARUSE	Junichi MOGI
Terutake IMAMURA	

Synopsis:

Office buildings, logistics and commercial facilities are CFT or steel frame structure with steel beams. The Authors have developed “MaRCS II” and “CFT Plus” as cost reduction method for the column members. We have developed “Web Plus” as a simple reinforcing method to reduce construction costs for the beam members. H-section steel beams are reduced by thinning the web, and reinforced with a horizontal stiffener. From experimental results for the purpose of knowing the structural performance of this beam, it was confirmed that this beam is regarded as the structural performance of FA. In addition, analysis by FEM simulates with good accuracy the experimental results. The effect of “Web Plus” has been confirmed by UHEC as Assessment of Technology.

*1 本店 建築技術部 技術開発グループ

1. はじめに

事務所ビル、物流、商業施設などでは、大スパンに対応するため鉄骨造、CFT 造などが採用される。当社では既に構造躯体でのコスト競争力強化の工法として、柱部材については RC 造（MaRCS II 工法）や鉄筋挿入型 CFT 造（CFT Plus 工法）に置き換えるコストダウン工法を保有しているが、梁部材においては有効な工法がない。そこで、簡易な補強により H 形鋼梁のウェブを薄くし鋼材量を削減することで、コストダウン可能な工法「Web Plus 工法」を開発した。本工法を採用することで、地上 16 階、延床面積 5,000m² の事務所ビルでは、地上躯体の鋼材量を 10%程度削減することが可能となる。

鉄骨系建物の H 形鋼梁は、幅厚比により部材の耐震性能がランク分けされている。幅厚比が大きくなると座屈現象が起き易くなることで耐震性能が低下する。そこで、鉄骨梁に幅厚比の大きいウェブを用いた場合、梁端部のウェブを水平スチフナ（補剛 PL）で補強することで耐震性能を向上させることが可能である。ここに、補剛 PL で梁ウェブを補強した梁部材の実験を実施したので、その概要および結果と、有限要素法（FEM）解析により実験結果を精度よく再現したので、その結果についても報告する。

2. 梁部材実験

2.1 実験概要

(1) 試験体

補剛 PL で幅厚比の大きいウェブを補強した H 形鋼梁の構造性能を確認することを目的として、梁部材の構造実験を実施した。試験体は、表-1 に示す実験変数により 13 体を計画した。また、図-1 に試験体図（B2, B4）と、主な試験体の補剛 PL 設置位置での梁断面を示す。

実験変数は、補剛 PL による補強量を検討するために、補剛 PL の枚数、設置位置、補剛範囲 L_0 （補剛 PL の長さ）、プレートの幅厚比とした。また、幅厚比によって決まる部材ランクによる構造性能の違いを確認するために、幅厚比による部材ランクを FC および FD ランクとした。（梁ウェブは FD および FC ランク、梁フランジは FA および FB ランク）梁ウェブの接合方法による補剛範囲への影響を確認するために、接合方法を溶接接合、お

よびボルト接合とした。

梁スパン（ L ）に対する梁せい（ H ）の比（ L/H ）を 2.2, 4.0, 5.3 とした。梁ウェブの幅厚比は 50~85, フランジの幅厚比は 4.0~8.6 とした。補剛範囲は $1.0H \sim 1.5H$ とした。

試験体の縮尺は 1/2 程度とした。破壊形式は、B9 試験体はせん断破壊とし、その他の試験体は梁端部での曲げ破壊を想定している。

(2) 荷重方法

荷重方法は、片持梁形式の一点集中荷重による正負交番繰返し荷重とした。荷重にはアクチュエータ（1000kN）を使用した。荷重サイクルは、梁フランジの降伏（計算による降伏モーメント M_y と比較）を確認するための 1 サイクルを荷重後、 δp （弾性剛性による全塑性モーメント（ M_p ）時の変形の計算値）に対し、1 δp から 6 δp もしくは 7 δp まで 各 1 サイクルを荷重する計画とした。荷重装置を図-2 に示す。

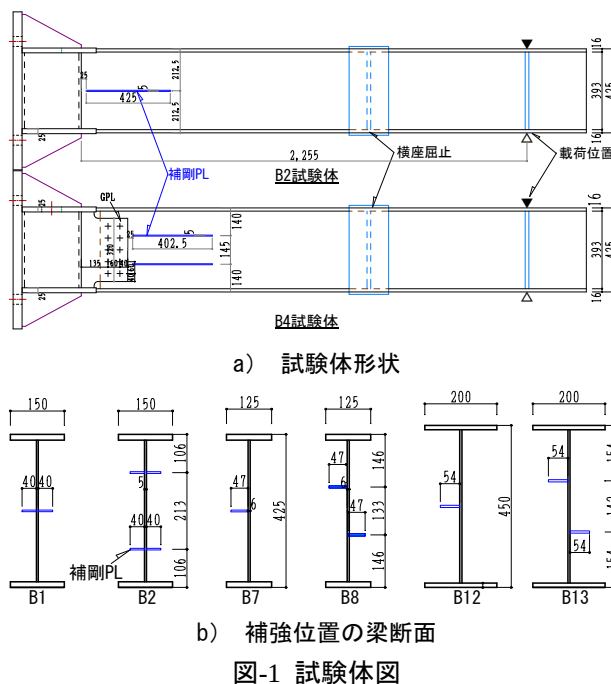


図-1 試験体図

表-1 試験体諸元

試験体名	B1		B2		B3		B4		B5		B6		B7		B8		B9		B10		B11		B12		B13											
梁断面 (mm)	425*150*5*16								370*125*6*16		425*125*6*16								425*130*6*16		450*200*9*12		450*200*6*12													
補剛PL	1枚		2枚						1枚		-		1枚		2枚				-		-		1枚		2枚											
	両側								片側		-		片側								-		-		片側											
幅*厚さ(mm)	40*5				72.5*5				47.2*6		-		47.2*6								-		-		54*6											
範囲(L_0/H)	1.0				1.5				1.0		-		1.0								-		-		1.5				1.35							
部材ランク	FD								FD																FC		FD									
梁ウェブ接合方法	溶接								ボルト		溶接																溶接									
せん断スパン比(L/H)	5.3		5.3		5.3		5.3		4.0		4.0		4.0		4.0		2.2		4.0		4.0		4.0		4.0											
破壊形式	曲げ																せん断		曲げ																	

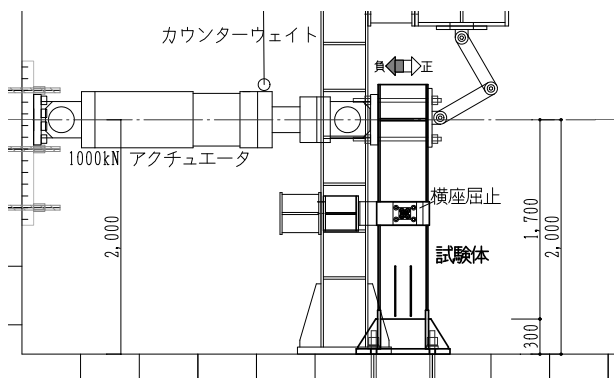


図-2 荷重装置

2.2 実験結果

(1) 破壊経過

図-3 に荷重 (M/M_p) -変形 (δ/δ_p) 関係を示す。荷重変形関係の荷重は梁端モーメント (M) を計算値の全塑性モーメント (M_p) で基準化し、横軸は部材変形 (δ) を弾性剛性による全塑性モーメント時変形の計算値 (δ_p) で基準化している。

写真-1 に B11, B12, B13 試験体の $-4\delta_p$ のサイクルピーク時における補剛範囲の破壊状況を示す。

B1~B8, および B10 試験体は, $2.0\sim 3.0\delta_p$ のサイクルにおいて, ウェブの局部座屈が発生した。その後, $3.0\sim 4.0\delta_p$ のサイクルで最大耐力に達した後, 荷重の繰返しでフランジの局部座屈が発生するとともに, 耐力低下しはじめた。局部座屈は B1, B2, B3, B4 および B8 試験体は補強端 (補剛範囲の梁中央側) に, B5, B6, B7 および B10 試験体は梁端のウェブに発生した。B11, B12 およ

び B13 試験体は, $2.0\sim 3.0\delta_p$ のサイクルで梁端のフランジとウェブに局部座屈がほぼ同時に発生した。最大耐力は局部座屈発生とほぼ同時であり, その後の荷重により徐々に耐力低下した。せん断スパンが 2.2 と小さい B9 試験体は, $2\delta_p$ のサイクルで補強端付近のウェブに局部座屈が発生したが, フランジの局部座屈は確認されなかった。その後の繰返し荷重において, 各サイクルの変形 0 付近でウェブの局部座屈の突出方向が音を伴い反転し, 一時的に耐力低下する履歴となった。最終破壊形式は, せん断局部座屈破壊となった。



B11 (無補剛) B12 (1 枚補剛) B13 (2 枚補剛)
写真-1 破壊状況 ($-4\delta_p$ サイクルピーク時)

(2) 耐力と変形性能

表-2 に各試験体の最大耐力の実験値と計算値, 累積塑性変形倍率の実験値を示す。試験体の耐力計算値は, 全塑性モーメント (式 [1]) 時の梁せん断力で, 補剛 PL の影響は無視して算定した。累積塑性変形は, 実験結果の正側の履歴を累積することにより算出した。文献 1) に

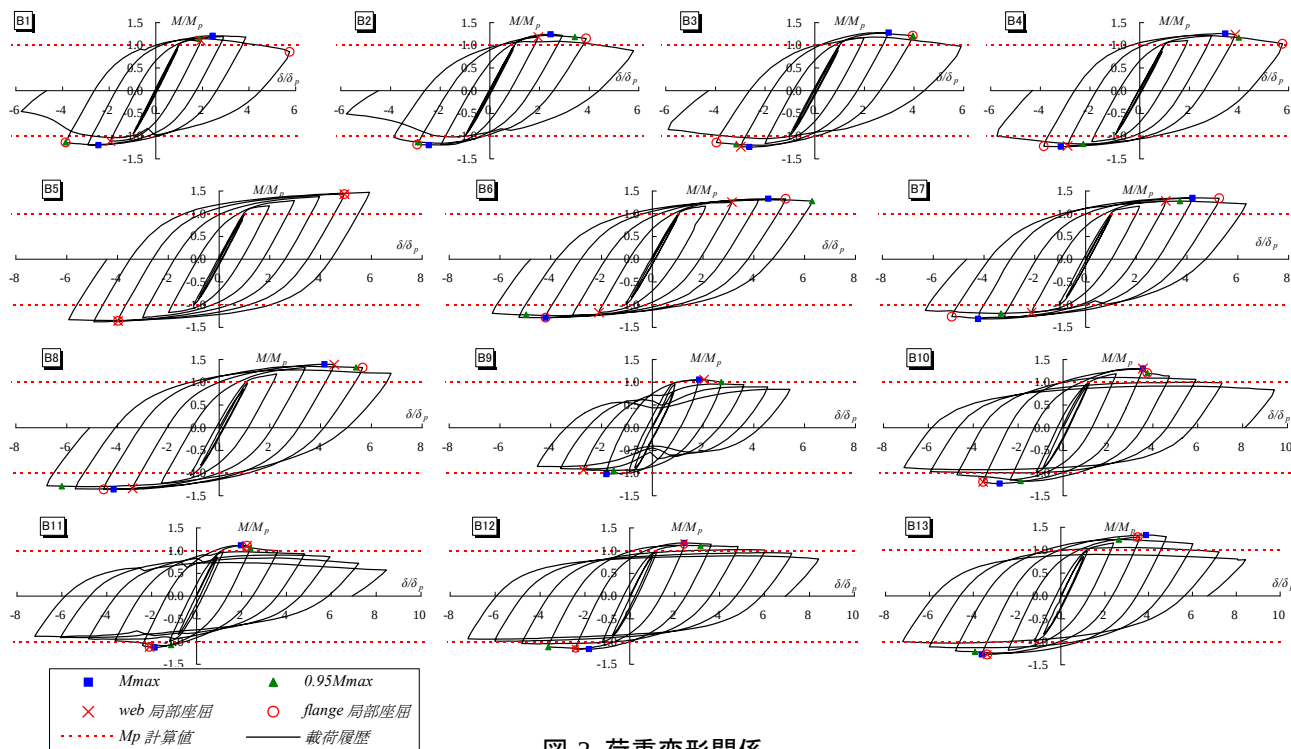


図-3 荷重変形関係

表-2 計算値と実験値

試験体名	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13
計算値 全塑性モーメント $cal M_p$	214	214	214	214	221	229	229	229	442	299	271	271	271
実験値 最大モーメント (正)	259	266	274	270	325	304	308	318	467	389	303	317	360
$exp M_{max}$ (負)	-257	-257	-266	-264	-303	-294	-300	-311	-452	-368	-307	-316	-346
累積塑性変形倍率	11.1	7.54	8.37	13.0	22.6	24.3	21.9	17.4	4.59	10.7	4.81	10.7	14.0
破壊形式	補強	補強	補強	補強	梁端	梁端	梁端	補強	せん断	梁端	梁端	梁端	梁端
$exp M_{max} / cal M_p$	1.21	1.24	1.28	1.26	1.47	1.33	1.35	1.39	1.06	1.30	1.12	1.17	1.33

モーメントは入力せん断力換算値 (kN)

破壊形式—補強：補強端局部座屈，梁端：梁端局部座屈，せん断：せん断局部座屈

は，累積塑性変形倍率 ($\eta = \delta$ (累積) / δ_p) により部材ランクを決定する方法が示されており， $\eta \geq 10$ で部材ランクが FA に対応する．実験での累積塑性変形倍率を評価する変形は，最大耐力から 5%低下した荷重での変形 ($R_{0.95}$) とした．

$$\text{全塑性モーメント： } M_p = \sigma_p \cdot Z_p \quad (1)$$

σ_p ：鋼材の材料強度 (N/mm²)

Z_p ：塑性断面係数 (mm³)

部材ランク FC および FD の試験体，および，補剛 PL により補強した試験体のすべてで，補剛 PL の影響を無視した全塑性モーメント計算値以上の耐力に対し安全側に評価できることを確認した．

座屈位置の違いは，補剛 PL の枚数および補剛範囲に影響されると考えられ，最終破壊形式が補強端局部座屈となり，梁端での破壊とならなかった B1, B2, B3, B4, B8 試験体は，補剛範囲が短く補強端での曲げモーメントが局部座屈耐力 (文献 2) を上回っていた．また，B9 試験体は，梁端部の全塑性モーメントに達した後，入力せん断力がせん断局部座屈計算値に達し，せん断局部座屈破壊となった．

最終破壊形式が梁端部局部座屈となった試験体においては，累積塑性変形倍率が FA ランクに相当する $\eta \geq 10$ の変形性能を有することを確認した．

補剛 PL の枚数による変形性能への効果については，B11 (補剛無)，B12 (1 枚)，B13 (2 枚) 試験体の累積塑性変形の包絡線 (図-4) を比較すると，補剛 PL の枚数を多くするほど変形性能が向上することが確認できた．

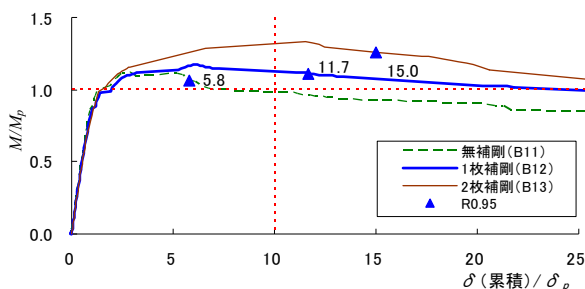


図-4 補剛 PL の枚数の違いによる変形性能の比較

3. 有限要素法による実験の再現性

本実験の結果を有限要素法 (FEM) 解析で再現させ，変形性能，座屈状況を比較する．

3.1 要素および境界条件

解析モデル及び境界条件を図-5 に示す．解析は DIANA を用いた．

鋼材は 4 節点曲面シェル要素でモデル化し，厚み方向に 3 層に分割する．境界条件については接合部の底面を完全固定とする．解析モデルの上部を載荷位置とし，梁のウェブ芯を図-5 の矢印方向に載荷し，載荷位置をローラー支持とし，面外への変形を拘束する．横座屈止位置では梁せいの中心を梁弱軸方向にバネ拘束する．横座屈拘束バネは，載荷装置の特性にあわせて，±5mm 以内の変形では剛性が 0 で自由に動くものとし，5mm 以上の変形では載荷装置の横座屈止治具の剛性により拘束した．横座屈拘束バネの荷重-変形関係を図-6 に示す．

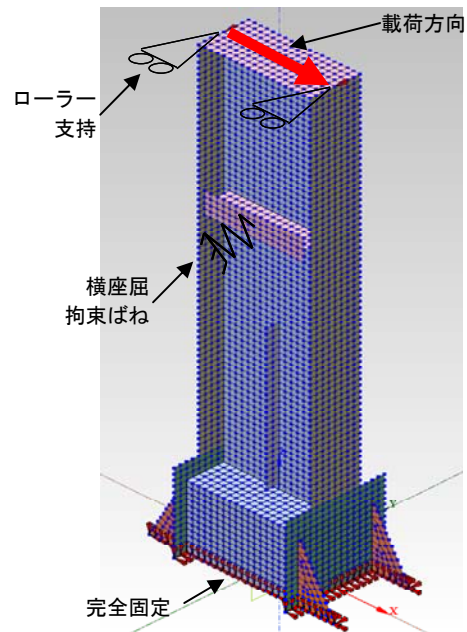


図-5 解析モデル及び境界条件

3.2 材料モデル

鋼材のモデルには，文献 3) に示されるサブレイヤモデル (フラクションモデル) を採用した．本モデルは，繰り返し載荷による Bauschinger 効果をシミュレートするこ

とが可能であり，材料の歪硬化特性を複数のモデル要素を並列に結合することで材料モデルを近似化している．本解析では，板要素を 3 層に分割し，その断面積割合（フラクシオン係数）を指定した．フラクシオン係数の計算（式〔2〕～〔4〕）には，多直線近以の応力-ひずみ曲線（Tri-linear）を採用した（図-7 参照）．各要素のヤング係数は共通で実験に使用した材料の値を用いた．

各要素のフラクシオン係数（ A_1/A ， A_2/A ， A_3/A ）及び要素 A_1 と A_2 の降伏応力度（ σ_1 および σ_2 ）の算定式を以下に示す．

$$\frac{A_1}{A} = \frac{E - E_1}{E - \frac{1-2\nu}{3}E_1} \quad [2]$$

$$\frac{A_1}{A} + \frac{A_2}{A} = \frac{E - E_2}{E - \frac{1-2\nu}{3}E_2} \quad [3]$$

$$\frac{A_3}{A} = 1 - \frac{A_1 + A_2}{A} \quad [4]$$

$$\sigma_2 = \sigma_1 + \frac{3E - (1-2\nu)E_1}{2(1+\nu)}(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \quad [5]$$

σ_1 ：使用材料の降伏応力度

A_1 ， A_2 ， A_3 ：各要素の断面積，

A ：各要素の断面積の総和

ν ：ポアソン比

E ， E_1 ， E_2 （ $= E_1/100$ ）：近以 Tri-linear 曲線のそれぞれ弾性係数，第 2 勾配及び第 3 勾配（図-7 参照）

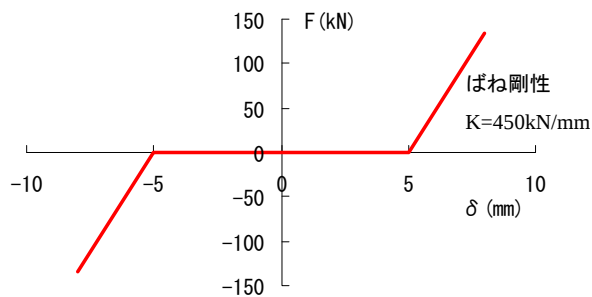


図-6 横座屈止バネの荷重-変形

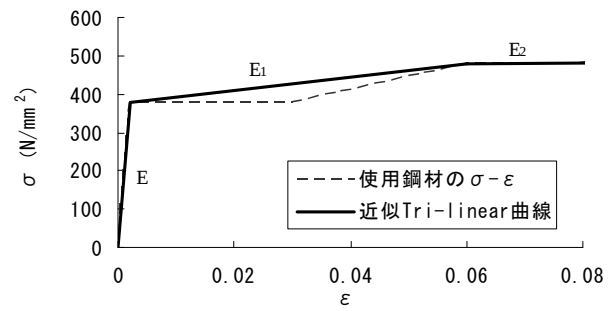


図-7 近以 Tri-linear 曲線

3.3 荷重サイクル

解析での荷重は図-5 に示す荷重位置の矢印を正方向とした一点集中荷重とした．荷重サイクルは，2.1(2)に示す実験と同じサイクルで，正負交番繰返し荷重とする．ただし，解析では弾性範囲である梁フランジの降伏を確認するために実施した 1 サイクル目を除くこととした．

3.4 実験と解析の結果比較

(1) 荷重変形関係

荷重試験を行った試験体 全 13 体について FEM 解析を行い，実験結果と比較した．

B11，B12 および B13 試験体の荷重（ M/Mp ）変形（ $\delta/\delta p$ ）関係について，実験結果と解析結果を比較し図-8 に示す．FEM 解析では，最大耐力，局部座屈の発生など，概ね実験の履歴を評価できることを確認した．しかし，解析では実験よりも早期に耐力低下する傾向がある．解析の耐力低下は，ウェブに局部座屈が発生した直後の正負逆方向への荷重サイクルに起こり，解析では座屈の状態が元に戻りにくいものと考えられる．

最大耐力および累積塑性変形について，実験結果と FEM 解析の結果の比較を表-3 に示す．表中の値は正荷重，負荷重の小さいほうの値とした．また，解析結果の実験値に対する比も合わせて示す．最大耐力の比は 0.96～1.17 であった．また，累積塑性変形倍率については，せん断局部座屈破壊した B9 試験体は，最大耐力の比が 1.26 と解析値が他の試験体と比較し大きい結果となったが，他の試験体は 1.0 程度以下と実験値に近い値となった．

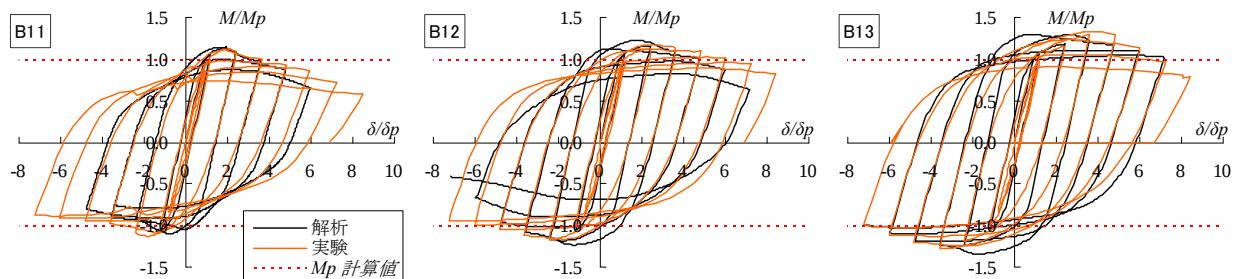
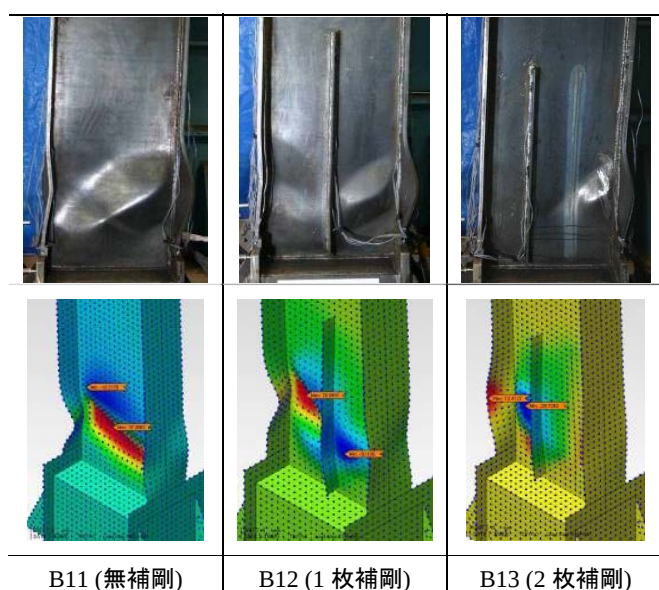


図-8 荷重変形関係（ M/Mp - $\delta/\delta p$ ）関係の比較

表-3 実験値と FEM 解析の比較

	最大耐力 (kN)			累積塑性変形倍率		
	実験	解析	解析/ 実験	実験	解析	解析/ 実験
B1	259	261	1.01	11.8	8.80	0.75
B2	266	274	1.03	8.50	4.00	0.47
B3	274	286	1.04	9.40	6.60	0.70
B4	270	284	1.05	14.0	7.20	0.51
B5	325	317	0.98	23.6	24.9	1.06
B6	304	294	0.97	25.3	24.8	0.98
B7	308	303	0.98	22.4	23.2	1.04
B8	318	307	0.96	18.4	18.9	1.03
B9	467	544	1.17	5.30	6.70	1.26
B10	389	432	1.11	11.7	12.8	1.09
B11	303	311	1.03	5.80	5.70	0.98
B12	317	332	1.05	10.9	7.90	0.72
B13	360	351	0.97	15.0	8.60	0.57

図-9 変位コンター図と破壊状況の比較
($-4\delta_p$ サイクルピーク時)

(2) 破壊状況

FEM 解析の結果の $-4\delta_p$ サイクルピークにおける変位コンターを図-9 に示す。図には、実験結果で示した写真-1 と同じ試験体 B11, B12 および B13 の 3 体を示す。写真-1 も比較のため合わせて示す。図中の矢印は、局部座屈で最も面外へ変形した位置を示す。解析結果と実験結果を比較し、局部座屈位置、破壊状況がよく対応していることを確認できる。

4. まとめ

本検討の結果、以下のことが分かった。

- (1) 梁端部を補剛 PL で補強した梁部材の繰返し載荷実験を行った結果、梁端部に有効な長さの補剛 PL を設置することで、梁ウェブが FD ランクの部材に対して、FA ランク相当の変形能力を確保することが可能である。
- (2) FEM 解析により、実験の荷重変形関係、局部座屈、および破壊性状を評価することが可能である。

参考文献

- 1) 日本建築学会：「建築耐震設計における保有耐力と変形性能（1990）」日本建築学会,1990
- 2) 日本建築学会：「鋼構造限界状態設計指針・同解説」日本建築学会,2010
- 3) 山田嘉昭 他：「塑性変形のサブレイヤモデルについて」東京大学研究速報，32 巻 10 号，1980