

鉛直段差付き大梁工法の開発「CutT 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-Shape Gap Beams Attached by T-Shape

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

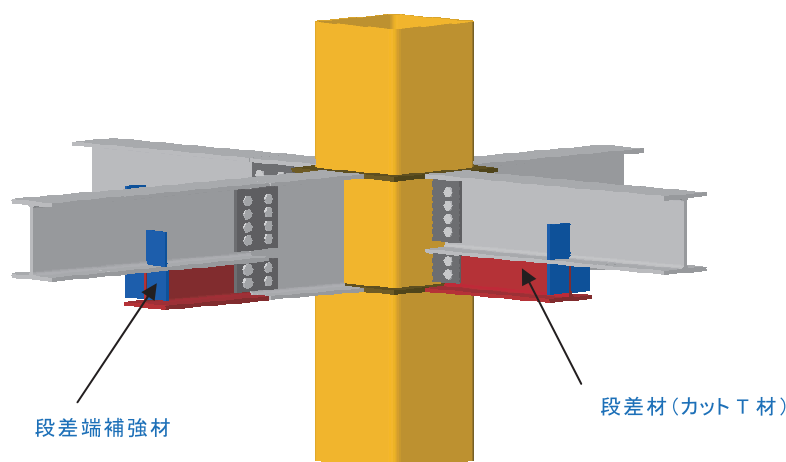


図-1 CutT Plus 工法



写真-1 梁部材実験 荷重状況

研究の目的

事務所ビル、物流、商業施設などでは、鉄骨造、CFT造など鉄骨梁を有する躯体が用いられる。当社では既に構造躯体でのコスト競争力強化の方法として、柱部材についてはRC(MaRCSⅡ工法)や鉄筋挿入型CFT造(CFT Plus 工法)、梁部材についてはウェブ厚を薄くし水平スチフナで補強する工法(Web Plus 工法)によるコストダウン工法を保有している。Web Plus 工法は主に大梁にビルトH材を用いた建物を対象としたコストダウン工法であり、大規模、大スパンの建物が対象となる。そこで、大梁にJIS材・外法一定材を用いた建物を対象としたコストダウン工法として「CutT Plus 工法」を開発した。

従来から梁端部にCT材を取り付けた補強方法は用いられていたが、耐力などの構造性能の評価方法を確立することを目的とした。

技術の説明

「CutT Plus 工法」は、地震時の応力が小さい梁中央部で梁の断面を決定し、応力が大きい梁端部には、一定区間の下フランジにカットT材を水平にすみ肉溶接で接合し、段差端部には局所破壊を防止するための段差端補強材を施すことで、梁部材としての必要な構造性能を確保することが可能な工法である。梁中央部の梁せいを小さくすることで、梁の鋼材量を削減しコストダウンが可能となる。また、梁せいを小さくすることで、梁中央部の有効高さを大きくとる事ができ、空間の有効利用が可能となる。

主な結論

梁端部に段差材(カットT)を接合したH形鋼梁部材の構造実験を実施した結果、梁部材の耐力および変形性能を確認し、その評価方法を確立した。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を行うことで適用範囲を検討した。その結果を、「CutT Plus 工法」の設計・施工指針としてまとめ、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

鉛直段差付き大梁工法の開発 「CutT 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，物流倉庫，商業施設などでは，鉄骨造，CFT造など鉄骨梁を有する躯体が用いられる．鉄骨系建物のコスト競争力を強化するため，鉄骨梁の鋼材を削減することで，鉄骨系建物に対する躯体のコストダウンを図る．

「CutT Plus工法」は，地震時に応力の小さい梁中央部で梁の断面を決定し，応力の大きい梁端部には，一定区間の下フランジにカットT材を水平にすみ肉溶接で接合することで，梁部材としての必要な構造性能を確保することが可能な工法である．梁中央部の梁せいを小さくすることで，梁の鋼材量削減が可能となる．また，梁中央部の有効高さを大きくとる事ができ，空間の有効利用が可能となる．

本工法は，梁部材の耐力など構造性能の評価方法が確立されていない．そこで，梁端部に段差材（カットT）を接合したH形鋼梁部材の構造実験を実施した．その結果，梁部材の耐力および変形性能を確認し，その評価方法を確立した．また，有限要素法解析により，実験結果を精度良く再現した．

本工法は，設計・施工指針として纏め，構造評定（都市居住評価センター）を2013年1月に取得している．

キーワード 鉄骨梁／H形鋼／曲げ耐力／変形性能／累積塑性変形倍率／鉛直段差／FEM解析

目 次

- | | |
|---------|------------|
| 1. はじめに | 4. 有限要素法解析 |
| 2. 実験概要 | 5. まとめ |
| 3. 実験結果 | |

Development on H- Shape Gap Beams Attached by T-Shape “CutT Plus method of construction”

Shinsuke HORI	Yoshiyuki KOMIYA
Tadashi NARUSE	Junichi MOGI
Terutake IMAMURA	

Synopsis:

Office buildings, logistics and commercial facilities are usually made of CFT or steel frame structures, the beams of which are steel members. The Authors have developed “CutT Plus” as cost reduction method for the steel beam members. The beam section of CutT Plus can be determined from the demand of center part of beam which is mostly smaller than the end part of that. And the end part of beam is reinforced with comparatively light steel part. This method also provides taller effective space. From the results of experiment and FEM for the purpose of investigating the structural performance of this beam, flexural capacity and deformation performance of this beam can be formulated with good accuracy. The effect of “CutT Plus” has been confirmed by UHEC as Assessment of Technology in January, 2013.

* 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，物流倉庫，商業施設などでは，鉄骨造，CFT 造など鉄骨梁を有する躯体が用いられる．鉄骨系建物のコスト競争力を強化するため，鉄骨梁の鋼材を削減することで，躯体のコストダウンを図る．

本工法は，地震時に応力の小さい梁中央部で梁の断面を決定し，応力の大きい梁端部には，一定区間の下フランジにカット T（以下，CT 材）を水平にすみ肉溶接で接合することで，梁部材としての必要な構造性能を確保することが可能となる．梁中央部の梁せいを小さくすることで，梁の鋼材量の削減が可能となる．

従来から梁端部に CT 材を取り付ける補強方法が用いられてきたが，梁部材の耐力など構造性能の評価方法が確立されていない．本稿では，梁端部に段差材（CT 材）を接合した H 形鋼梁部材の構造実験を実施し，その結果と評価方法を報告する．また，有限要素法解析により実験結果を精度よく再現したので報告する．

2. 実験概要

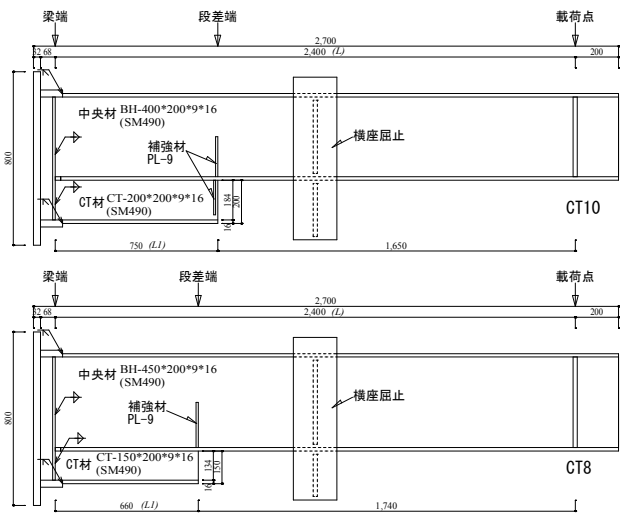
2.1 試験体

試験体は，梁スパンの片側半分を想定し，縮尺を約 1/2 とする 7 体を製作した．梁中央の断面を想定した部材（以下，中央材）を設置し，その梁端部の一定区間に中央材の半割（1/2 せい）の CT 材で補強した部材を基本形状とする．中央材の下フランジは，梁端の柱フェイスを模擬した鋼材には接合させないこととした．CT 材により梁せいの変わる位置（以下，段差端）には，試験体ごとに異なる縦スチフナ（以下，補強材）を設置し補強した．表 1 に各試験体の諸元を示し，図-1 に代表として CT10 と CT8 の試験体図と，各試験体の段差部の断面図を示す．

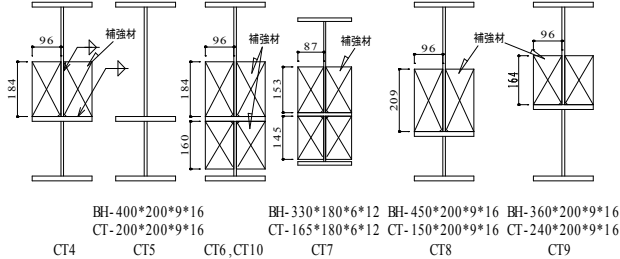
基本試験体の想定破壊形式は，段差端での曲げ破壊とする．CT6 試験体は，CT 材の補強区間を長くすることにより想定破壊形式を梁端曲げとする．実験変数は，中央材の部材ランク（FA，FC），CT 材の断面（中央材のせいに対する比 1/3，1/2，2/3），補強材の設置箇所および有無とする．

2.2 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（1,000 kN）を使用した．荷重サイクルは，弾性範囲（ $\delta p/2$ ）を 2 サイクル，その後 $\pm 2 \delta p$ ， $\pm 4 \delta p$ ， $\pm 6 \delta p$ を各 2 サイクル荷重する計画とした． δp は想定破壊位置の曲げモーメントが全塑性モーメントとなる時の変形の計算値とする．荷重装置を図-2 に示す．図で左方向の CT 材と中央材が開く方向を正荷重とし，CT 材が中央材を押し込む方向を負荷重とした．



試験体図 (CT10, CT8)



断面図 (段差端)

図-1 試験体詳細図

表-1 試験体諸元

試験体名称 / 主な実験変数			CT4	CT5	CT6	CT7	CT8	CT9	CT10
想定破壊形式			補強材(有)	補強材 無	ヒンジ位置	中央材FC	段差比 1/3	段差比 2/3	基本試験体
断面			段差端曲げ		梁端曲げ	段差端曲げ			
断面	中央材	mm	H-400×200×8.83×15.4			H-330×180×5.91×11.9	H-450×200×8.83×15.4	H-360×200×8.83×15.4	H-400×200×8.65×15.5
	CT材	mm	CT-200×200×8.83×15.4			CT-165×180×5.91×11.9	CT-150×200×8.83×15.4	CT-240×200×8.83×15.4	CT-200×200×8.65×15.5
	梁端	mm	H-600×200×8.83×15.4			H-495×180×5.91×11.9	H-600×200×8.83×15.4	H-600×200×8.83×15.4	H-600×200×8.65×15.5
幅厚比	中央材	ウェブ/(基準化)	41.8(51.2)			51.8(67.9)	47.5(58.1)	37.3(45.6)	42.7(53.5)
		フランジ/(基準化)	6.5(8.4)			7.6(9.7)	6.5(8.4)	6.5(8.4)	6.5(8.4)
	梁端	ウェブ/(基準化)	64.5(78.9)			79.7(104.5)	64.5(78.9)	64.5(78.9)	65.8(82.5)
		フランジ/(基準化)	6.5(8.4)			7.6(9.7)	6.5(8.4)	6.5(8.4)	6.5(8.4)
段差端の補強材			中央材	無	中央材+CT材	中央材+CT材	中央材	中央材	中央材+CT材
鋼材種			SM490			SM490			
鋼材降伏点			390 / 352			390 / 404	390 / 352		397 / 370
鋼材降伏点			390 / 352			390 / 404	390 / 352		397 / 370
梁スパン			2400			1980	2400		
段差部長さ			750		1350	620	660	750	750
CT材のせい/中央材のせい (段差比)			1/2				1/3	2/3	1/2
全塑性モーメント計算値			1.15		0.73	1.14	1.05	1.32	1.15
(梁せん断力換算)の比			1.15		0.73	1.14	1.05	1.32	1.15

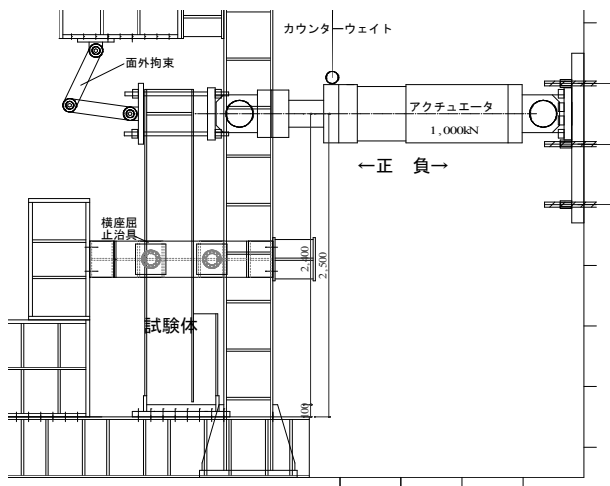


図-2 荷重装置

3. 実験結果

3.1 破壊経過

図-3 に荷重変形関係を示す。グラフの縦軸は想定破壊位置のモーメント M を全塑性モーメント計算値 M_p で基準化し、横軸は荷重点の水平変位 δ を全塑性モーメント時変位の計算値 δ_p で基準化した。写真 1 に CT4,CT6, CT10 試験体の $+4\delta_p$ サイクルのピーク時における破壊状況を示す。

CT6 試験体以外の段差端曲げ破壊を想定した試験体は、段差端において、中央材のフランジ、ウェブの順に局部座屈した後、徐々に耐力低下した。CT 材に補強材を設けていない CT4,CT5,CT8,CT9 試験体は、CT 材と中央材が

開く正方向 $+4\delta_p$ 前後の変形時に、CT 材ウェブと中央材フランジを接合するすみ肉溶接部が段差端位置で破断した。繰り返し荷重により破断域が拡大するも、急激な耐力の低下は確認されなかった。CT 材が中央材を押込む負方向 $-4\delta_p$ 以降、段差端の CT 材ウェブの局部座屈が確認された。一方、段差端の CT 材に補強材を設けた CT7,CT10 試験体では、CT 材ウェブの破断は確認されなかった。また、補強材自体の損傷は全試験体で確認されなかった。梁端曲げ破壊を想定した CT6 試験体は梁端においてフランジの局部座屈、ウェブの局部座屈発生後に耐力低下に至った。

最終破壊形式は、すべての試験体で想定した位置での曲げ破壊となった。

3.2 曲げ耐力

図-4 に各試験体の破壊位置の曲げ耐力の計算値と実験の最大耐力(正負の最小値)をプロットして示す。計算値は想定破壊位置の全塑性モーメントとし、荷重点での入力せん断力に換算して示す。段差端の曲げ耐力は中央材断面で算定し、梁端の曲げ耐力は中央材の下側のフランジは無視して算定した。

鉛直段差付き梁の曲げ耐力は、各試験体の破壊位置で算定した全塑性モーメントにより、実験結果を安全側に評価できることを確認した。また、破壊位置は補強長さにより調整が可能で、表-1 に示した全塑性モーメント計算値の梁入力せん断力換算値の比、梁端/段差端が 1.05 以上で段差端破壊させることが可能であることを確認した。

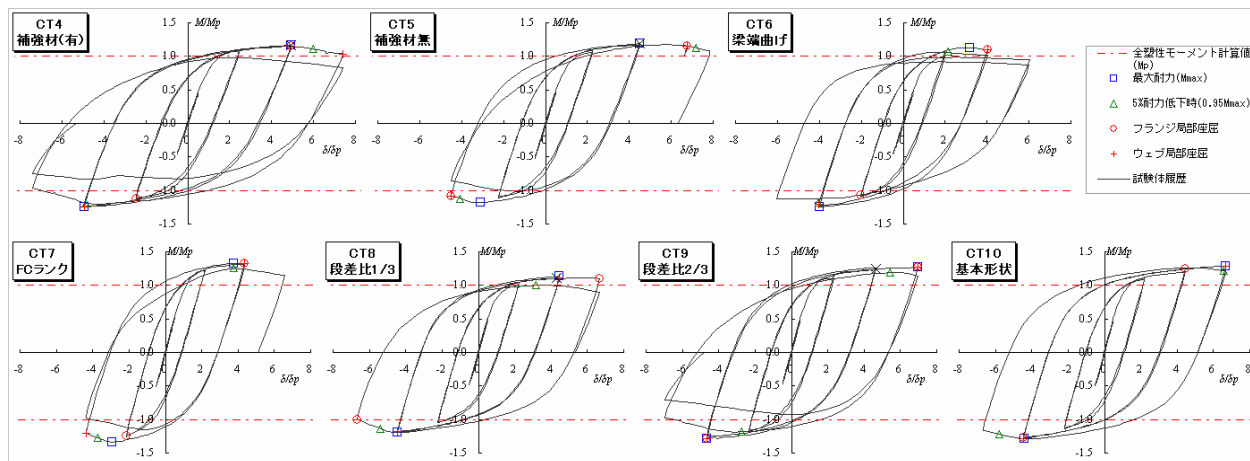


図-3 荷重変形関係



CT4

CT6

CT10

写真-1 破壊状況 ($+4\delta_p$)

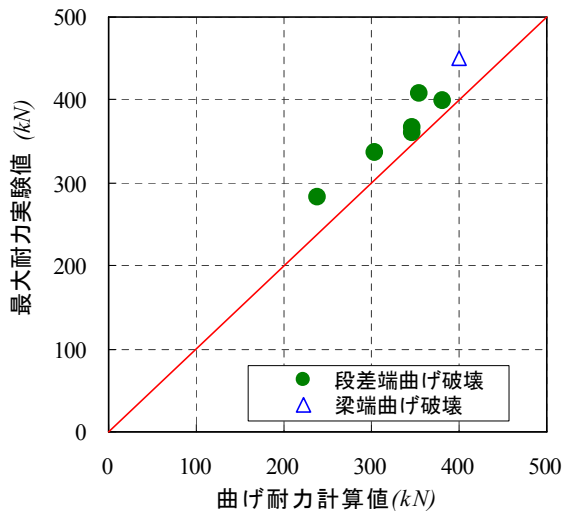


図-4 曲げ耐力 実験値と計算値の比較 (梁せん断力換算)

3.3 変形性能

部材の変形性能は累積塑性変形で評価することとし、正負荷重時の履歴をそれぞれ累積することにより算出した。文献 1) では、累積塑性変形倍率 ($\eta = \delta(\text{累積}) / \delta p-1$) を用いて部材ランクを決定する方法が示されており、 $\eta \geq 9$ で部材ランクが FA と対応する。実験の結果においては、累積塑性変形倍率を決定する際の変位は最大荷重から 5%低下した荷重での変位 ($R_{0.95}$) とした。

計算値は、文献 2) に示される幅厚比、梁スパン、横補剛間距離、断面 2 次半径を変数とした算定式を用いて算定し、実験値と比較した。算定式を式[1]に示す。図-5 に累積塑性変形倍率の計算値と実験値の比較を示す。

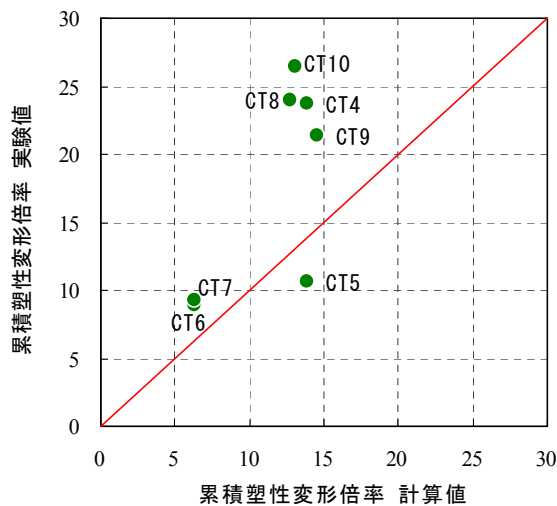


図-5 累積塑性変形倍率 (η) の計算値と実験値の比較

$$R_{0.95} = \sqrt{\frac{500}{k(l/i_x)(l_b/i_y)}} \cdot \sqrt{\frac{F}{\sigma_y}} \cdot \{110(\lambda_f - 0.65)^2 - 7\lambda_w + 11\} \quad [1]$$

k : 梁の両端支持条件による係数 0.7 (片持ち梁)

$$\lambda_f = \frac{b}{t_f} \cdot \sqrt{F/E}, \quad \lambda_w = \frac{d}{t_w} \cdot \sqrt{F/E}$$

降伏応力を考慮したフランジ, ウェブ幅厚比
(但し, $\lambda_f \leq 0.65$)

F : 鋼材の F 値, E : 鋼材のヤング係数

l, l_b : 梁半スパンおよび横補剛間距離(mm)

i_x, i_y : 強軸, 弱軸廻りの断面 2 次半径(mm)

累積塑性変形倍率は、CT5 試験体を除き式[1]による計算値で評価が可能であることを確認した。CT5 試験体は中央材に補強材を設置していないことで段差端中央材の局部座屈が早期に発生したためと考えられる。CT6 試験体の累積塑性変形倍率は他の試験体より低い。これは、破壊位置である梁端のウェブ幅厚比が他の試験体より大きく、実験では梁端ウェブの局部座屈が早期に発生し耐力低下したことによる。

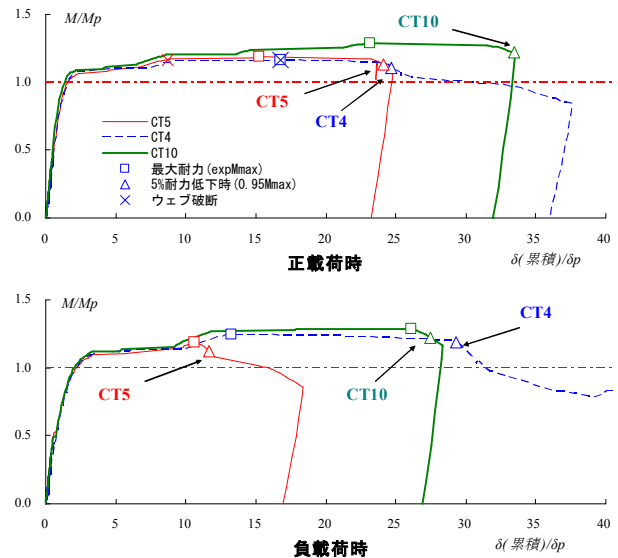


図-6 補強材の変形性能に対する効果

段差端の中央材および CT 材に設置した補強材の部材性能への効果を比較するため、累積塑性変形の包絡線に最大荷重から 5%耐力低下した点をプロット(Δ)し図-6 に示す。正載荷時 (中央材と CT 材が開く方向) を上図、負載荷時 (CT 材が中央材を押込む方向) を下図にそれぞれ分けて検討した。比較した試験体は、補強材なしの CT5 試験体、中央材に補強材を設置した CT4 試験体、および、中央材+CT 材に補強材を設置した CT10 試験体である。

正載荷時においては、CT 材に補強材を設置 (CT10 試験体) することで、CT 材ウェブの段差端での破断を防止することで変形性能が向上した。負載荷時においては、中央材に補強材を設置 (CT4, CT10 試験体) することで、段差端において中央材のフランジおよびウェブの局部座屈が抑制され変形性能が向上した。

4. 有限要素法解析

4.1 要素および境界条件

解析モデル及び境界条件を図-7 に示す。鋼材は 4 節点曲面シェルでモデル化し、厚み方向に 3 層に分割する。

境界条件は、接合部を想定した底面を完全固定とし、頂部(載荷位置)および試験体中央付近では、横座屈止めとなるようローラー支持とした。図の頂部フランジのウェブ芯を梁載荷位置とし、矢印で正載荷方向を示す。

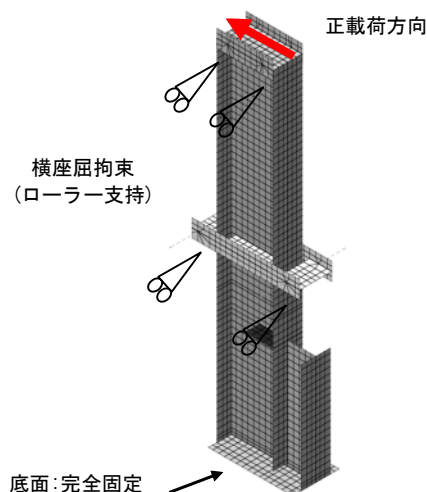


図-7 解析モデル及び境界条件

4.2 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（フラクシオンモデル）を採用した。本モデルにより、繰り返し載荷によるバウシinger効果を考慮した。また、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近似化している。本解析では、材料を 4 要素に分

け、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には、多直線近以の応力-ひずみ曲線(Tri-linear)を採用した。各要素のヤング係数は共通で鋼材引張試験結果を用いた。

4.3 実験と解析の結果比較

解析は、実験サイクルにあわせ、正負交番繰返し載荷として実施した。補強材の有無と破壊位置をパラメータとした CT4, CT6, CT10 試験体の 3 体の結果を本報で示す。各試験体の基準化した荷重変形($M/M_p - \delta/\delta_p$)関係の実験と解析との比較を図-8 に示す。縦軸は梁端部での曲げモーメントを全塑性モーメント計算値(M_p)で基準化し、横軸は載荷点での変位を全塑性モーメント時変位の計算値(δ_p)で基準化した。また、解析モデルの+4 δ_p 程度の変位コンター図を図-9 に示す。変位コンター図内には、各試験体の局部座屈位置を矢印で示す。

剛性、最大耐力、局部座屈は、概ね実験をトレースしていることを確認した。しかし、解析は実験よりも早期に劣化する傾向があり、段差端での破壊を想定した試験体では段差端中央材の局部座屈の進行が実験よりも早く進行する。また、梁端破壊を想定した CT6 試験体では、中央材側のウェブの局部座屈が早くに進行し耐力低下している。解析が実験よりも早期に劣化するのは、解析では損傷箇所が集中していることなどによると考えられる。破壊位置は実験と解析で同じ結果が得られた。また、実験による最大耐力と FEM 解析による最大耐力の比は 0.96 ~ 1.17 であった。

図-9 に示す局部座屈位置より、各試験体解析結果は、想定した破壊位置で座屈しており、写真-1 と比較すると、局部座屈位置などの破壊状況が、実験結果とよく対応していることが確認できる。

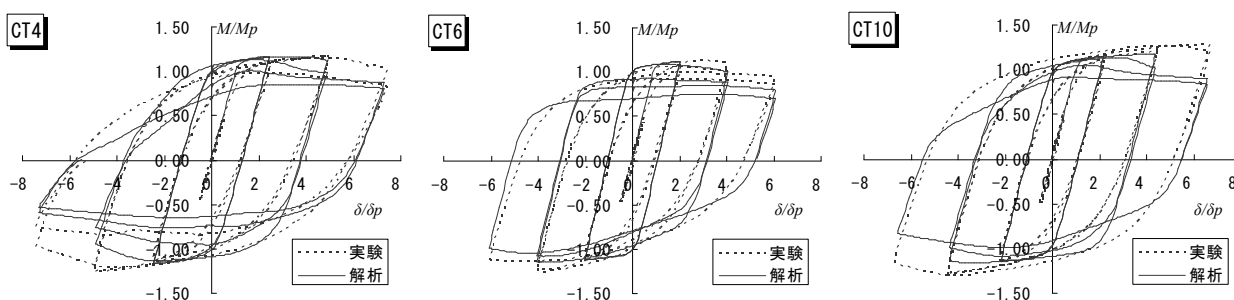


図-8 荷重変形関係 ($M/M_p - \delta/\delta_p$) 関係の比較

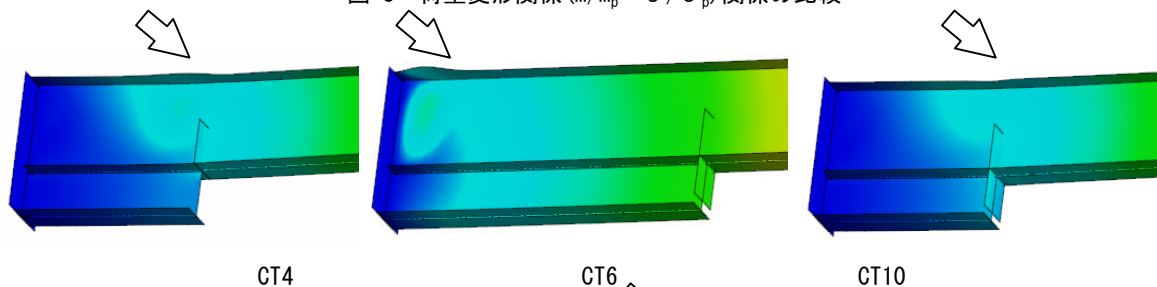


図-9 変位コンター図 (矢印: 局部座屈位置)

5. まとめ

(1)梁中央部のせいを小さくすることにより鋼材量の削減を可能とし、その効果を確認した。

(2)梁端部を CT 材で補強した鉛直段差付き梁の繰返し載荷試験を行い、その履歴性状と曲げ耐力を確認した。

(3)梁端部を CT 材で補強した鉛直段差付き梁について、部材の変形性能が式[1]で評価可能であることを確認した。

(4)段差端の補強材が変形性能に有効であることを確認した。

(5)仮定した要素および材料のモデル化による FEM 解析と実験結果は、荷重-変形関係、板要素の座屈状況など概ね対応している。

参考文献

- 1) 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) 牧野, 松井, 三谷: H 形鋼柱の局部座屈後の変形性状 その 4 塑性変形能力, 日本建築学会論文報告集 第 290 号, pp.45-55, 1980.4
- 3) 山田, 黄: 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, pp.464-467, 1980.10