

合成梁を有する鉄骨柱梁接合部の梁端破断に対する方杖補修について

高松 隆夫*, 玉井 宏章*, 三好 行則**

(平成20年10月31日受理)

Experimental Study on Knee-Brace Rehabilitation of Steel Beam-to-Column Connection with Composite Beams

Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI, Yukinori MIYOSHI

(Received Oct. 31, 2008)

Abstract

Many steel beam-to-column connections were damaged to both the 1994 Northridge and the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquakes, especially bottom beam flanges near by the connection with a composite beam. After those earthquakes, many studies have been carried out on brittle fractures of the beam-column connections. Most of those studies have employed moment-resisting frames to clarify fracture mechanism of connections. This experimental study was conducted on connections with a composite beam to propose a new method for rehabilitation of fractured bottom-flange near by the connection. Non-compression knee-brace was used to strengthen the bottom-flange.

Keywords : composite beams, non-compression knee-brace, beam fracture, rehabilitation, beam-to-column connection

1. はじめに

1994年ノースリッジ地震および1995年兵庫県南部地震において、鋼構造建築物の被害の中では、柱梁接合部に被害が集中した。特に、合成梁の鉄骨梁端下フランジが破断するという被害が多く見られた。合成梁では、スラブとの合成効果により、正曲げ時(スラブ上端が圧縮、鉄骨梁下フランジが引張となる場合)に中立軸が上昇するため、鉄骨梁下フランジでの引張ひずみが増大し、破断に至ることがよく知られている^{3), 4)}。

このような背景のもと、兵庫県南部地震以降、鋼材の破断に関する研究が数多く行われている。しかしながら、それらの研究の多くが、純鉄骨架構を対象としており、また、

鉄骨柱梁接合部を方杖やハンチ等で補強するという研究は行われているが、合成梁の破断に対する補修という研究は極めて少ない。また、梁端部の溶接部の脆性破断を防ぐため、梁のスカラップ形状について改良型スカラップを用いたり、ノンスカラップ工法が現在では使われているが、既設構造物へは適用できない。

本研究では、著者等の1人が提案している圧縮力を負担しないノンコンプレッション方杖²⁾(以後、NC方杖と呼ぶ)を用いた合成梁の梁端下フランジ破断に対する柱梁接合部の補修工法を提案し、繰返し載荷実験を行って、補修効果や問題点等を確認する。

研究目的は、以下の3点にある。

1) 合成梁の梁端破断後、NC方杖で補修すれば、正曲げ

* 広島工業大学工学部建築工学科

** 広島工業大学大学院工学系研究科建設工学専攻

表1 材料特性

名称	材質	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	σ_y / σ_u	σ_u (%)
柱	STKR400	389	429	0.91	30
梁(フランジ)	SS400	326	429	0.76	31
梁(ウェブ)	SS400	331	429	0.77	23
方杖	ABR400	300	412	0.73	26

σ_y :降伏応力
 σ_u :最大応力

ϵ_u :伸び量

表2 合成梁試験体の評価値

M_p^+ (kN・m)	M_p^- (kN・m)	K^+ (kN・m/rad)	K^- (kN・m/rad)	${}_sM_y$ (kN・m)	${}_sK$ (kN・m/rad)
222.5	127.1	42,400	15,850	74.5	11,350

M_p^+ :正曲げ全塑性モーメント K^+ :正曲げ剛性
 M_p^- :負曲げ全塑性モーメント K^- :負曲げ剛性
 ${}_sM_y$:純鉄骨降伏モーメント ${}_sK$:純鉄骨剛性

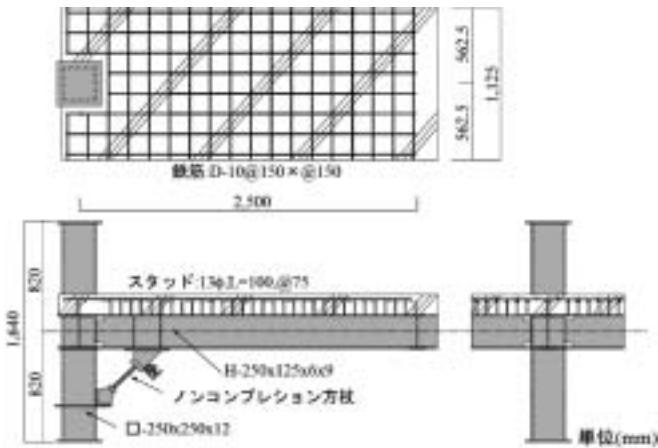


図1 合成梁試験体

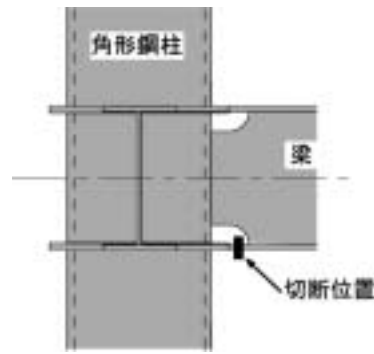


図2 切断位置

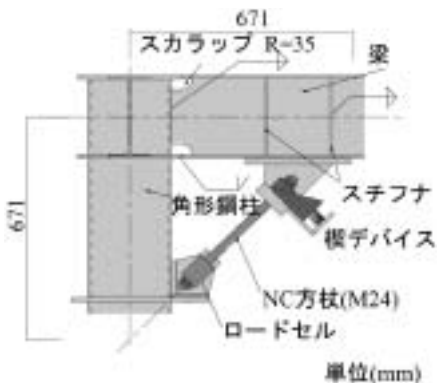


図3 接合部詳細図

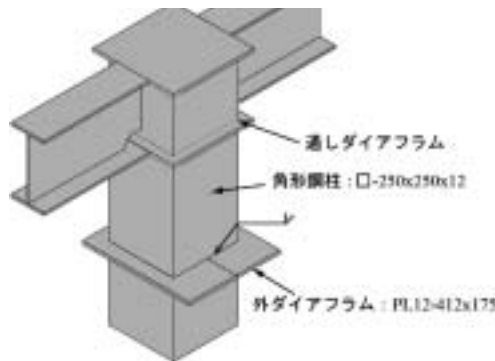


図4 外ダイアフラム詳細図



図5 方杖接合部形状

時の耐力をもとの鉄骨架構と同等程度にできる。

- 補修後の正曲げ時の剛性を確認する。
- 負曲げ時の剛性の変化からフランジ再接触の効果を調べる。

2. 実験概要

2.1 試験体

本実験は、図1に示す合成梁試験体を使用する。試験体は1体で、正曲げ単調載荷を行い、最大合成梁変形角0.06radを与えた(基本試験体)。その後、下フランジをディスクグラインダーで切断し、NC方杖を取付け、NC方杖による下フランジを補修した試験体(補修試験体)1体

を用意した。図2に下フランジの切断位置を示す。

合成梁試験体は、床スラブはデッキプレート捨て型枠としスラブ厚は100mm、幅は設計指針での有効幅である1,125mmとした。コンクリートは普通コンクリートで、スラブ筋はD10@150mmである。スタッドコネクタは13φ、L=100mmであり、所要本数は試験体が完全合成梁となるように「各種合成構造設計指針・同解説」¹⁾に準拠して算定した。柱梁接合部は、通しダイアフラム形式とする。試験体の柱およびパネルゾーンは、梁が終局曲げモーメントに達した場合においても塑性化しないように十分強く設計した。また、スカラップ形状はいわゆる旧スカラップを用いる。図3に柱梁接合部の詳細を示す。

表3 仮想仕事法による値と結果

I_a (mm^4)	I_b (mm^4)	l (mm)	l_a (mm)	l_b (mm)	α	K_r ($\text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$)
3.96×10^7	1.53×10^7	2,375	550	1,825	2.6	12,800

I_a : H形鋼の断面二次モーメント
 I_b : T字形の断面二次モーメント
 K_r : 方杖設置後の剛性
 l : 梁の長さ
 l_a : 梁端部から方杖までの距離
 l_b : 方杖から載荷点までの距離

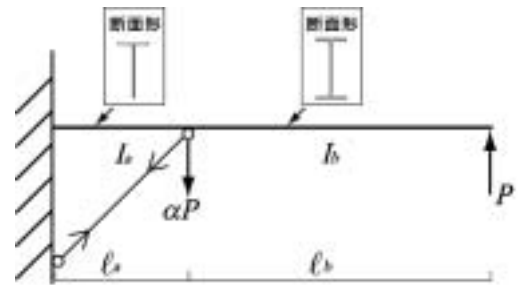


図7 簡易置換モデル

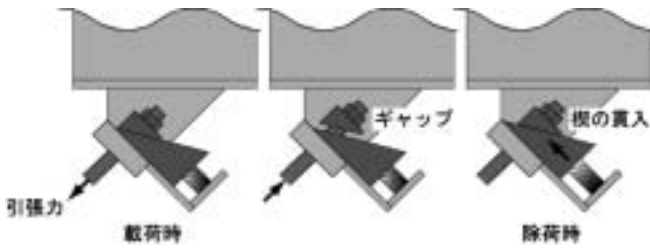


図6 NC方杖作動概念

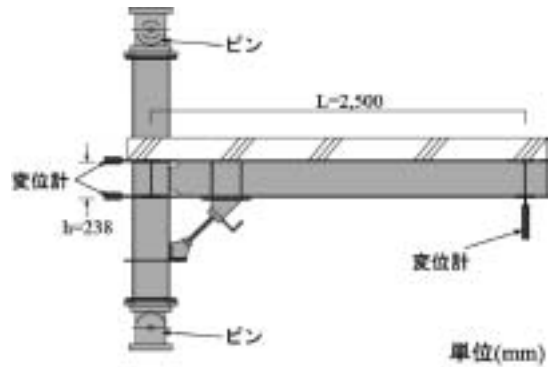


図9 変位計測定位置

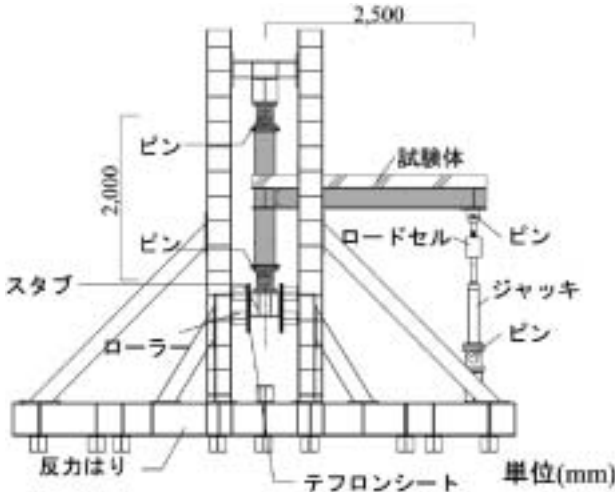


図8 載荷装置

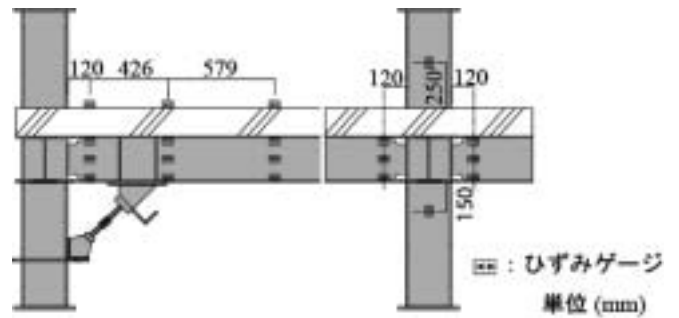


図10 ひずみ測定位置

表1に材料特性を、表2に合成梁試験体の評価値を、それぞれ示す。表2は、本試験体を完全合成梁とし、鋼材とRCスラブのヤング係数比 n を15とし、RCスラブを鋼材の等価断面に置換した計算値¹⁾である。また、表2の剛性は、柱端部を固定端とした片持ち梁として求めたモーメント-梁変形角関係の剛性を純鉄骨架構の剛性としている。

2.2 方杖の設計方法

方杖を取付ける目的は、鉄骨梁下フランジの破断による欠損を補い、耐力と剛性を回復させることにある。合成梁変形角 $1/20\text{rad}$ を与えた試験体はスラブが破壊しており、スラブとの合成効果は期待できない。このため、方杖補修試験体は、純鉄骨架構の耐力・剛性と同等以上とする。

方杖は、方杖設置位置を任意に設定した後、下フランジ欠損前と方杖補修後のモーメントの釣合いを考え、方杖に

必要な軸力を求める。なお、このときの中立軸は梁図心にあるとして算定している。また、断面を決定した後、仮想仕事法を用いて、剛性がもとの鉄骨架構以上となることを確認した。この時、梁端部の剛性は、フランジが欠損したT字形の剛性とし、それ以外の部分については、H形鋼の剛性にして計算した。これは、方杖を設置することで、方杖より先の部分については、下フランジが抵抗するようになるためである。今回、計算を簡単化するため、方杖軸力が作用する箇所までをT字形とした。その場合、実際よりも梁の剛性は低く出るため、計算値が純鉄骨の剛性と同等でも、実際は同等以上の剛性を確保したことになる。

柱に取付ける方杖接合部は、柱に取付けた外ダイアフラムに設置する。方杖接合部は、方杖が最大軸力を達しても、弾性域に留まるように設計した。図4に外ダイアフラムの詳細を示す。外ダイアフラムは、2枚の平鋼で柱を挟み込

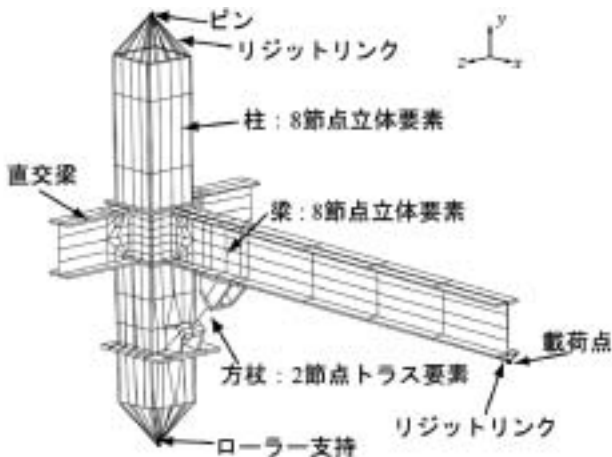


図 11 解析モデルと要素分割

表 4 解析用材料定数

	ヤング係数 (kN/mm ²)	ポアソン比	降伏応力 (N/mm ²)
柱	205	0.3	389
梁フランジ	205	0.3	326
梁ウェブ	205	0.3	331
方杖	205	0.3	300

除荷は、基本試験体で± 1/1000 の点で弾性載荷を行った後、破断後の方杖を設置していない無補修試験体で± 1/200 を、方杖を設置した補修試験体で± 1/120 の点で行う。最後に、補修試験体を載荷装置の限界まで載荷し、補修試験体の耐力・剛性を調べた。

むようにし、完全溶込み溶接接合した。また、梁側の方杖接合部には、鉄骨梁の面外変形を防ぐためにスチフナを設けた。

以上のことから分かるように、本研究で提案する補修工法は既存の柱や梁に特別な加工が必要なく簡単に取付けることができる。

図 5 に方杖接合部形状、および楔デバイスの形状を示す。また、図 6 に NC 方杖の作動概念を示す。また、図 7 には、仮想仕事法で用いたモデルを示す。表 3 には、仮想仕事法で求めた剛性、及び、図 7 中の値を示す。

図 6 に示すように、NC 方杖は塑性伸びを解消するだけでなく、常に引張力に抵抗するため、負曲げ除荷時の際にも負曲げ剛性に NC 方杖の剛性が加わることになる。

表 2, 3 より、方杖を設置した際の剛性が純鉄骨の剛性より高いことが確認された。

方杖接合部と柱フランジ、及び、外ダイアフラムは、高力ボルトで接合し、方杖接合部と柱は長締めの中ボルトで接合している。NC 方杖は、圧縮力を負担しないため、座屈をすることがなく、正曲げ及び負曲げ除荷時では安定した性能を示す。

2.3 試験体シリーズ

本実験での試験体名を次の通りとする。

破断する前の試験体を「基本試験体」、破断した試験体を「無補修試験体」、方杖で補修した試験体を「補修試験体」と以上の 3 つにする。

2.4 載荷方法

載荷は図 8 に示す加力フレームを組み、柱上端をピン支持、柱下端をピンローラ支持とし、梁先端部に取付けた油圧ジャッキにより鉛直上下方向に載荷を行う。載荷は、正負交番変位繰返し載荷を行い、合成梁変形角で制御する。

2.5 計測方法

変位計測定位置の詳細を図 9 に、ひずみ測定位置を図 10 に、それぞれ示す。計測は、荷重は油圧ジャッキ先端のロードセルにより鉛直荷重 P を計測し、変位は、図 9 に示す柱上下に設置したピンの軸を支持点とする変位計支持治具を用いて、試験体梁先端部に設置した変位計からの平均値として鉛直変位を計測する。方杖軸力は、方杖の先端に取付けたロードセルにより計測する。また、合成梁変形角は、梁先端部の鉛直変位による回転角から、柱の回転角を差し引いて求める。柱の回転角は、接合部パネル上下の通しダイアフラムの水平変位から求めた。変位の計測値より、柱の回転角 θ_c を次式で求めた。上下の通しダイアフラムの中心間距離は 238mm である。

$$\theta_c = \tan^{-1} \left(\frac{\delta_{DL} - \delta_{DT}}{h} \right) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 θ_{DL} : パネル下のダイアフラム水平変位、 θ_{DT} : パネル上のダイアフラム水平変位、 h : 通しダイアフラム中心間距離である。

試験体の合成梁変形角 θ は (1) 式を用いて、次式で求めた。

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{\delta_B}{L} \right) - \theta_c \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 δ_B : 梁先端部の変位、 θ_c : 柱の回転角、 L : スパンである。

3. 有限要素法解析

3.1 解析概要

本補修工法の補修効果を吟味するため、実験を行った合成梁試験体について有限要素法解析を行った。

検討する試験体は、無補修試験体と補修試験体である。載荷実験では、合成梁変形角 1/20rad 以上の変形を与え

表5 各試験体初期水平剛性および FEM 解析結果

試験体名	K^+ (kN・m/rad)	K^- (kN・m/rad)	K^+_{FEM} (kN・m/rad)	K^-_{FEM} (kN・m/rad)	K^+ / K^+_{FEM}	K^- / K^-_{FEM}
基本試験体	40,500	19,000	-	-	-	-
無補修試験体	4,000	13,000	4,000	10,750	1.00	1.21
補修試験体	14,000	13,000	14,000	10,750	1.00	1.21

K^+ : 正曲げ剛性(実験値)

K^+_{FEM} : 正曲げ剛性(FEM解析値)

K^- : 負曲げ剛性(実験値)

K^-_{FEM} : 負曲げ剛性(FEM解析値)

表6 基本試験体・補修試験体と純鉄骨の比較

試験体名	M_y (kN・m)	K^+ (kN・m/rad)
基本試験体	170.0	40,500
補修終局	75.0	13,000
純鉄骨	76.0	11,350

M_y : 降伏荷重

K^+ : 正曲げ剛性

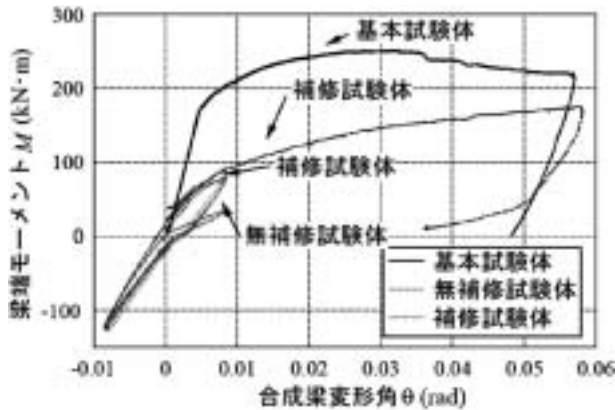


図12 全試験体結果

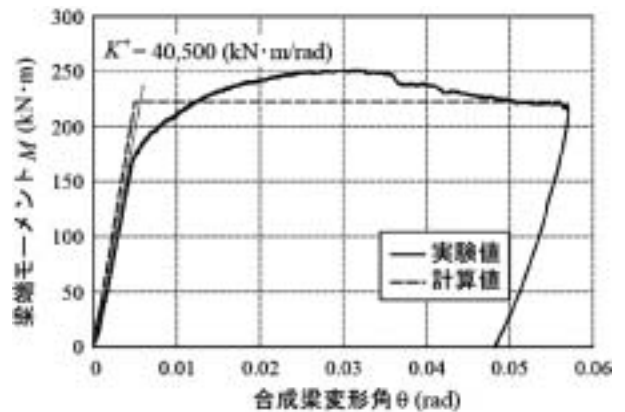


図13 基本試験体結果

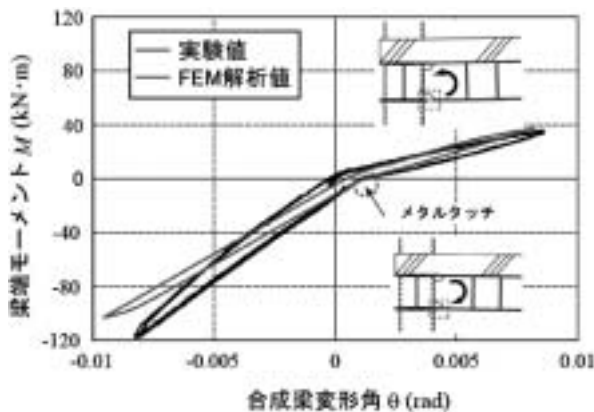


図14 無補修試験体結果

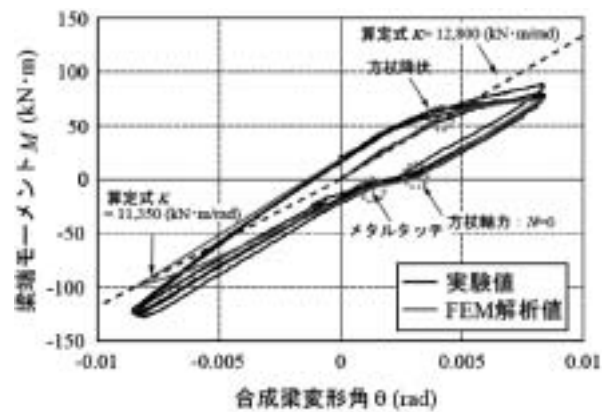


図15 補修試験体結果

たため、スラブが破壊しており、スラブの合成効果はないと考える。そのため、純鉄骨架構のみの解析を行う。また、下フランジをダイアフラムと節点を一体化せず分離させ、方杖を設置している。鋼材は等方性材料とし、降伏条件は Von-Mises の降伏条件を採用し、完全弾塑性モデルとする。解析プログラムには、汎用非線形構造解析ソルバー「MSC.Marc2005r2」を用いた。本解析に用いる材料定数を表4に示す。

3.2 解析方法

有限要素法解析の解析モデルを図11に示す。柱、ダイアフラム、梁の上フランジとウェブは完全に接合しているものとし、8節点立体要素で要素分割した。梁の下フラン

ジとダイアフラムには接触問題を適用した。柱上下のピン位置に節点を設け、柱上下端の各節点を剛リンク要素で接合した。純鉄骨架構に方杖を取付けて補修試験体として解析した。解析領域は全領域とした。要素分割数は1,025、節点数は2,043、全自由度数は12,258である。

方杖はトラス要素で要素分割した。断面性能については、M24の転造ねじアンカーボルトの公称断面積⁵⁾および断面二次モーメントを与えた。

3.3 境界条件

剛リンク要素で接合したピン位置の節点に対し、一端をピン支持、他端をY軸方向をローラー支持として、載荷点にも節点を設け梁先端部の下フランジの各節点を剛リン

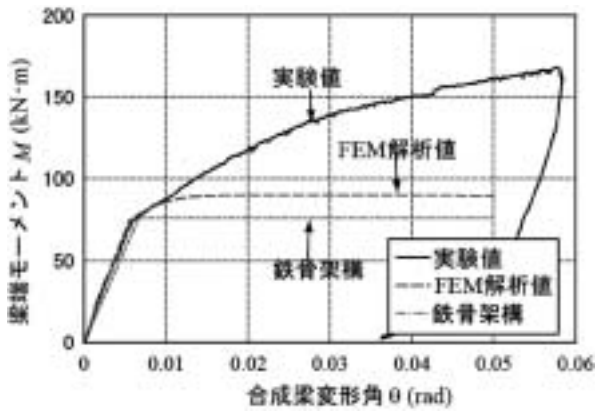


図16 補修試験体(終局性能)結果

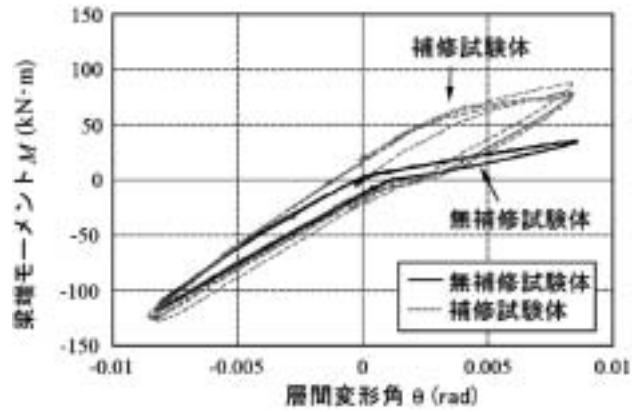


図17 無補修試験体と補修試験体

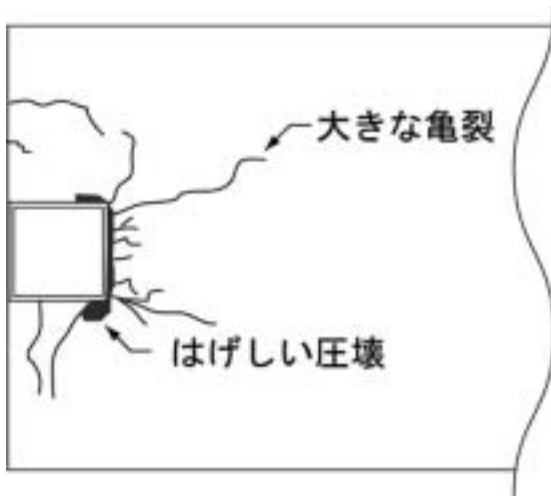


図18 コンクリートスラブ破壊状況



写真1 コンクリートスラブ破壊状況

ク要素で接合した。この荷重点の節点に対しては、Y軸方向に荷重する。

荷重は、変位で制御し、無補修試験体および補修試験体については、1/120radの変位を1サイクル与えた。また、補修終局試験体については、1/20radまで単調荷重を与えた。

3.4 下フランジの離間と接触

梁端下フランジは破断しているため、正負交番の荷重では、下フランジとダイヤフラムは離間と接触を繰り返す。そのため、接触問題を適用した。また、接触面には $\mu = 0.45$ のCOULOMB摩擦則を適用した。

4. 試験結果と考察

図12～15に各試験体の層梁端モーメント M -合成梁変形角 θ の関係を示す。図12に全試験体の結果を、図13に基本試験体の結果を、図14に無補修試験体の結果を、図15に補修試験体の結果を、そして、図16に荷重装置の性能限界まで補修試験体を荷重した際の結果を示す。

図13には、「各種合成構造設計指針・同解説」¹⁾に準じて求めた合成梁の計算値を、図14～15には、FEM解析の結果を併せて示す。図16には、FEM解析の結果、及び、比較のため片持ち梁として求めた純鉄骨架構の計算値を示している。表5には各試験体ならびに有限要素法解析の初期剛性を示す。また、各試験体剛性をFEM解析結果で除した値を示す。表6には、基本試験体と補修試験体および純鉄骨の降伏モーメントと剛性を示す。

○基本試験体

図13より、合成梁基本試験体は、合成梁の変形角0.03rad付近でスラブが破壊し、最大モーメント250kN・mまで達した。

図18、写真1には、柱付近でのスラブの破壊状況を示す。

また、完全合成梁として計算した剛性・耐力等の計算値は、実験結果とほぼ対応している。このことから、現在の「各種合成構造設計指針・同解説」で示している設計式で、試験体の剛性・耐力が容易に評価できることが分かる。

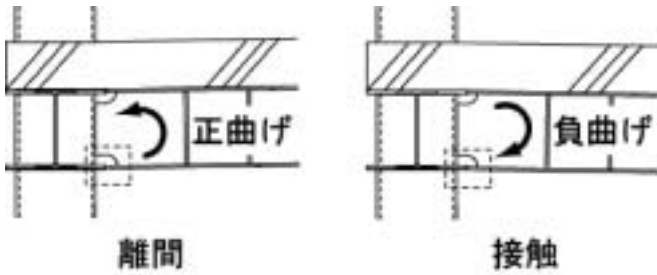


図 19 正曲げと負曲げ時における下フランジの離間と接触

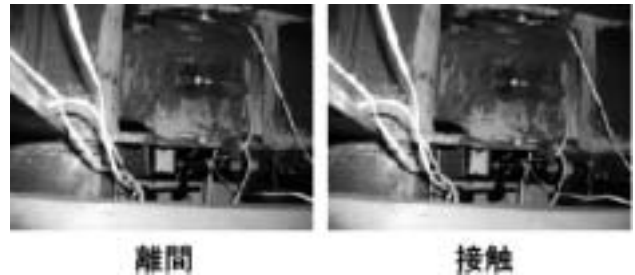


写真 2 下フランジの離間と接触

○無補修試験体

図 14, 表 5 より, 無補修試験体の正曲げ剛性は, 破断の影響で, 純鉄骨架構の 1/3 まで低下した。一方, 負曲げ剛性は, 下フランジの亀裂が閉じ, メタルタッチすることで応力が伝播して, 剛性が純鉄骨とほぼ同等となった。しかしながら, 基本試験体に較べると負曲げ剛性は低下している。これは, スラブの合成効果がなくなったためであると考える。

正曲げでは, 無補修試験体の試験結果と FEM 解析結果は良好に対応している。そのため, コンクリートの合成効果がほとんどないことが分かる。また, メタルタッチを再現しているため, 負曲げ剛性が正曲げ剛性に比べて上昇している。しかしながら, 負曲げでは, 試験結果と FEM 解析結果は良好に対応しているとは言えない。これは, 負曲げでは, スラブ内の鉄筋が抵抗し, 純鉄骨よりも負曲げ剛性が高くなったためであると考えられる。

○補修試験体

図 15, 表 2, 表 5 より補修試験体の正曲げ剛性は, 純鉄骨架構とほぼ同等となった。しかしながら, 除荷時に, 方杖軸力が 0 となることで, 剛性が無補修試験体と同等になる。負曲げ時には NC 方杖が抵抗しないため, 負曲げ剛性は, 無補修試験体と同じく, 純鉄骨架構と同等となった。

図 16 より, 補修試験体の終局状態では, 方杖が降伏後も耐力が上昇した。これは, 方杖のひずみ硬化, スラブの圧縮抵抗, 及び, 直交梁の捩れ抵抗が累加されたためと考えられる⁶⁾。

正曲げでは, 補修試験体の試験結果と FEM 解析結果は良好に対応している。しかしながら, 負曲げでは, 対応していない。これは, 無補修試験体と同じく, スラブ内の鉄筋の影響であると考えられる。

また, 負曲げ除荷では, NC 方杖の効果により剛性が負曲げ剛性より上昇している。

○補修効果

図 17 には, 無補修試験体と補修試験体の比較を示す。また, 図 19 には, 正曲げと負曲げの挙動を示す。写真 2 には, 下フランジの離間と接触時の写真を示す。

図 17, 表 5 より, 正曲げでは, NC 方杖の効果のため, 剛性は無補修試験体の 3 倍となっており, 純鉄骨と同等程度となる。負曲げでは, 無補修試験体と補修試験体の剛性は同じである。このことから, NC 方杖は正常に作動しており, 2 サイクル以降の正曲げでは安定した性能を示している。

また, 下フランジが引張力で破断した際, 脆性破断であれば, ネッキングによる断面減少が少ないため, メタルタッチ時の剛性・耐力への影響は少なく, 本実験結果と同等の再接触による効果が得られると考える。

5. まとめ

基本試験体と無補修試験体および補修試験体の荷重実験を行った。得られた知見は以下の通りである。

- 1) 補修試験体はスラブの合成効果はなく, 正曲げ剛性は純鉄骨架構とほぼ同等である。また, NC 方杖によって安定した正曲げ挙動を示す。
- 2) 破断後, 負曲げ時では, フランジの亀裂が閉じ, メタルタッチし剛性・耐力が回復するため, 負曲げ側では, NC 方杖が圧縮力を負担しなくても何ら問題ない。
- 3) 破断後, 負曲げ耐力は, フランジの幅厚比の関係上, 局部座屈による影響は小さいと考える。
- 4) 提案する補修工法により, もとの鉄骨架構と同等以上の剛性・耐力にすることができ, 十分有効である。

謝 辞

本研究は広島工業大学「高性能構造システム開発研究センター」(代表者: 高松隆夫教授) のプロジェクト研究の一環として実施しました。

参考文献

- 1) 日本建築学会: 各種合成構造設計指針・同解説, 1985.2.
- 2) 高松隆夫, 玉井宏章, 小畑寛行: ノンコンプレッション方杖で補強された H 形鋼柱梁接合部の復元力特性, 広

- 島工業大学紀要研究編, vol.40, pp.119-128, 2006.2.
- 3) 山田哲, 岡田健, 呉相勲, 和田章: 柱梁接合部における破断に着目した合成梁の変形能力に関する研究: その1. 実験計画と実験概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.801-802, 2001.9.
 - 4) 岡田健, 山田哲, 呉相勲, 和田章: 柱梁接合部における破断に着目した合成梁の変形能力に関する研究: その2. 合成梁の変形能力とスラブの効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.803-804, 2001.9.
 - 5) (社)日本鋼構造協会: 建築構造用転造ねじアンカーボルト・ナット・座金のセット, JSS II 13-2000, 2000.6.
 - 6) 桑村仁, 杉田朋哉, 横山幸夫: 鉄骨梁破断後の床スラブのバックアップ効果, 日本建築学会構造系論文集, 第547号, pp.169-176, 2001.9.