

(19) CES造十字型柱梁架構の復元力特性のモデル化に関する研究

前川 茜音¹・松井 智哉²

¹正会員 豊橋技術科学大学大学院 建築・都市システム学専攻
(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)
E-mail: a163542@edu.tut.ac.jp

²正会員 豊橋技術科学大学准教授 建築・都市システム学系
(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)
E-mail: matsui@ace.tut.ac.jp

CES 合成構造システムは、鉄骨鉄筋コンクリートから鉄筋を省略し、普通コンクリートに替えて繊維補強コンクリートを用いた構造システムであり、実用化に向けた研究が継続的に実施されている。柱、梁および柱梁接合部における接合部パネルの各々の復元力特性の評価法については提案されてきており、その妥当性についても検討されている。しかしながら、架構としてモデル化した場合の検討は少なく、その妥当性の検討が必要である。そこで、本研究では CES 造十字型柱梁架構の実験試験体を対象として、既往の柱、梁、接合部パネルのそれぞれの復元力特性評価法を用いて架構全体の復元力特性のモデル化手法について検討を行った。本論に示す手法により算出した柱梁十字架構の復元力特性は、実験結果と良好な対応を示した。

Key Words: CES beam column joints, beam, column, restoring force characteristics

1. はじめに

CES (Concrete Encased Steel) 合成構造システムは、鉄骨鉄筋コンクリートから鉄筋を省略し、普通コンクリートに替えて繊維補強コンクリート（以下 FRC）を用いた構造システムであり、実用化に向けた研究が継続的に行われている。本構造を用いた柱、梁、柱梁接合部については、これまでの構造実験により構造特性を明らかにするとともに終局強度、変形性能を含め復元力特性の評価方法について検討が行われており、SRC 構造と同程度以上の構造性能を発揮することが確認されている。

復元力特性の評価法については、既往の研究において柱、梁および柱梁接合部における接合部パネルの各々の評価法について提案されてきており、その妥当性についても検討されている^{1),2),3)}。しかしながら、架構としてモデル化した場合の検討は少ない。

本研究では CES 造十字型柱梁架構の実験試験体を対象として、既往の柱、梁、接合部パネルのそれぞれの復元力特性評価法を用いて、架構全体の復元力特性のモデル化手法およびその妥当性について検討を行う。

2. 実験概要

(1) 試験体概要と使用材料

試験体一覧を表-1 に示す^{4)~8)}。対象試験体は梁の曲げ破壊先行型と接合部破壊先行型を想定して計画した十字型柱梁接合部 19 体である。柱上下端部および梁左右端部にそれぞれピン支承を設けており、柱のピン支承間の距離は 1300mm または 1600mm、梁のピン支承間の距離は共通して 2250mm とした。柱断面のせいは 400mm、梁の断面は 300×400 を共通して用いた。これまで行われてきた構造実験では、破壊形式、パネルゾーンのフランジ、スチフナ、ウェブの厚さ、軸力比、柱長さ、柱断面形状、柱内蔵鉄骨形状などを変数としている。試験体は柱上下端部および梁左右端部にそれぞれ取付けられたピン支承を介して図-1 に示す載荷装置に設置する。

繊維補強コンクリートの補強繊維には直径が 0.66mm で、長さが 30mm のビニロンファイバー (RF4000) を使用した。体積混入率は 1.0% とし、水セメント比は 60% である。各試験体および使用材料の詳細については参考文献を参照されたい。

表-1 試験体一覧

試験体	A	C	D	B	BN25	BN40	JB-1	JB-2	JP-1	JP-2	JP-3	JP-4	JP-5	JP-6	JP-7	JP-8	JP-9	JP-10		
破壊形式	梁曲げ			接合部せん断			梁曲げ		接合部せん断						梁曲げ		接合部せん断			
FRC圧縮強度 (N/mm ²)	33.3	31.7	33.4	31.6	42.6	42.6	24.2	25.9	23.7	26.3	26.2	27.9	28.2	28.4	53.7	52.1	53.1	51.4	51.2	
柱	内蔵鉄骨 (強軸)	H-300×220×10×15										H-300× 300× 10×15	H-300×150 ×10×15	H-300×150×9×12						
	内蔵鉄骨 (弱軸)	—													H- 300×150 ×9×12	H-300×150 ×4.5×9		—		
	柱高さ h	1300						1600	1300	1600		1300								
	断面 b×D	400×400									300× 400	400×400		500× 400	400×400		300×400			
梁	内蔵鉄骨	H-300×150×6.5×9			H-300×200×9×19			H-300×150 ×6.5×9		H-300×150×12×25					H-300× 150× 6.5×9		H-300×150×12×25			
	梁長さ l	2250																		
	断面 b×D	300×400																		
接 合 部	ウェブ	10		19	4.5			10		4.5					9		4.5			
	フランジ	15	22		15										12					
	スチフナ	9	16		19			9		25					28					
	縦スチフナ	—																PL-4.5		—
軸力比	0.112	0.111	0.107	0.116	0.25	0.4	0.15	0.145	0.152	0.144	0.143	0.146	0.151	0.15	0.1					
軸力 N(kN)	775	760	760	775	2017	3227	885	885	885	885	755	1060	900	1040	1161	1095	894	771	771	

※単位 (mm)

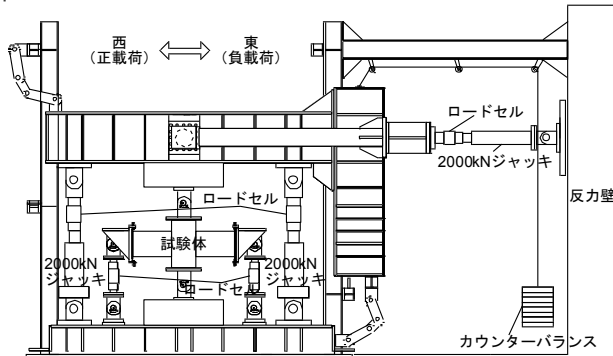


図-1 荷重装置

(3) 荷重方法

荷重方法は所定の一定軸力 N の下、静的漸増繰り返し水平力荷重を行った。ここで、表-1に示す軸力比 N/N_0 は式(1)による軸圧縮耐力 N_0 に対する作用軸力である。

$$N_0 = {}_c r_u \cdot \sigma_B \cdot {}_c A + {}_s \sigma_y \cdot {}_s A \quad (1)$$

ここで、 N_0 ：CES柱の終局軸圧縮耐力、 ${}_c A$ ：コンクリート部分の断面積、 σ_B ：コンクリートの圧縮強度、 ${}_s \sigma_y$ ：鉄骨の降伏応力度、 ${}_s A$ ：鉄骨部分の断面積、 ${}_c r_u$ ：圧縮側鉄骨比に応じて定まるコンクリートの低減係数⁹⁾である。

水平力荷重は変形制御とし、上下スタブの相対変位 δ と柱長さ h で与えられる相対部材角 $R (= \delta / h)$ で、主

に $R = 0.005, 0.01, 0.015, 0.02, 0.03 \text{ rad}$ および 0.04 rad を2サイクルずつ繰り返した後 0.05 rad の正載荷まで荷重を行い、実験を終了した。

計測変位は、水平変位、接合部パネルゾーンおよび梁端部の変形とした。また、鉄骨フランジおよびウェブのひずみをひずみゲージにより測定している。

3. CES柱梁十字型架構の復元力特性評価手法

(1) 梁および柱の復元力特性モデル

曲げモーメントを受けるときのCES梁およびCES柱の基本的な曲げ挙動は、材端に曲げひび割れが発生し、その後鉄骨が降伏し、最大耐力に達した後に徐々に耐力低下するという経過を辿る。そこで、CES梁およびCES柱の復元力特性モデルは図-2示すようにトリリニアでモデル化する。第1折れ点は曲げひび割れ発生点として曲げひび割れモーメント M_{cr} で評価し、第2折れ点は降伏点として終局曲げ耐力 M_u で評価する。

梁および柱の曲げひび割れモーメントは式(2)により算定する。

$$M_{cr} = 0.56 \sqrt{\sigma_B} \cdot Z_e + \frac{ND}{6} \quad (2)$$

ここで、 Z_e ：内蔵鉄骨を考慮した有効断面係数、 N ：

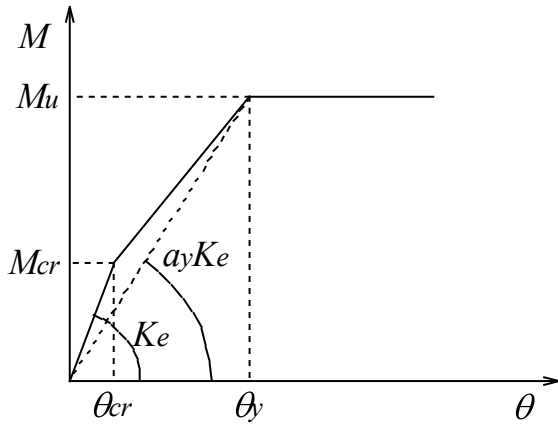


図-2 梁および柱の復元力特性モデル

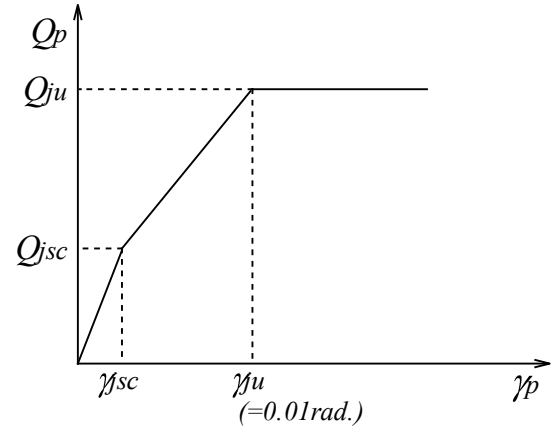


図-4 接合部パネルの復元力特性モデル

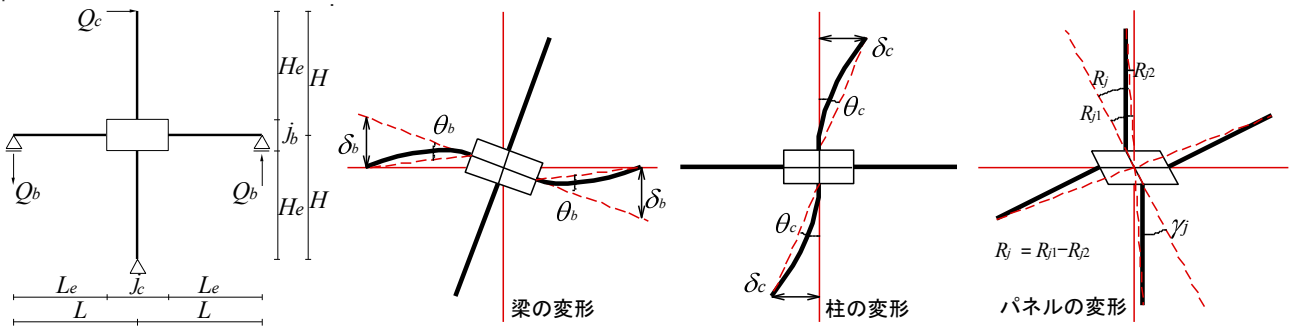


図-3 部材の変形モデル

作用軸力（梁の場合は $N=0$ ）， D ：部材せいである。

曲げひび割れモーメント時の回転角 θ_{cr} は(3)より得られる。

$$\theta_{cr} = M_c / k_e \quad (3)$$

$$K_e = \frac{I}{\frac{L_e}{3E_c I_e} + \frac{\kappa}{G A L_e}} \quad (4)$$

ここで、 K_e ：部材の初期剛性、 E_c ：コンクリートのヤング係数、 I_e ：等価断面 2 次モーメント、 G ：コンクリートのせん断剛性、 A ：梁の断面積、 κ ：せん断形状係数（ $=1.2$ ） L_e ：梁の可撓長さで、ここでは梁の半曲点位置から柱鉄骨フランジまでとした（図-3 参照）。柱の場合も同式において梁を柱に置き換えて算定する。

梁および柱の終局曲げモーメント M_u は一般化累加強度理論により算出する。第 2 折れ点である終局曲げモーメント時の部材角 θ_y は降伏時の剛性低下率 α_y を用いて算出するとし、内蔵鉄骨が H 形鋼の場合 $\alpha_y = 0.4$ 、交差型 H 形鋼の場合 $\alpha_y = 0.3$ とする²⁾。

(2) 接合部パネルの復元力特性モデル

CES 柱梁接合部における接合部パネルの復元力特性は図-4 に示すようにトリリニアでモデル化する。第 1 折

れ点はせん断ひび割れ発生点としてせん断ひび割れ耐力 Q_{jsc} で評価し、第 2 折れ点は終局せん断耐力 Q_{ju} で評価する。接合部パネルのせん断ひび割れ耐力 Q_{jsc} は式(5)により算定する。

$$Q_{jsc} = \tau_{jsc} \cdot c A_e \cdot \left(1 + n \frac{s_w A}{c A_e} \right) + n \left(\frac{s_f A}{c A_e} \right) \quad (5)$$

$$\tau_{jsc} = \sqrt{f_t^2 + f_t \sigma_0} \quad (6)$$

$$f_t = 0.4 \sqrt{\sigma_B} \quad (7)$$

ここで、 τ_{jsc} ：コンクリートのせん断ひび割れ強度、 f_t ：コンクリートの引張強度、 σ_B ：コンクリートの圧縮強度、 σ_0 ：CES 柱梁接合部コンクリートに生じる圧縮応力度、 n ：ヤング係数比、 $s_w A$ ：CES 柱梁接合部内強軸鉄骨ウェブの断面積、 $s_f A$ ：CES 柱梁接合部内弱軸鉄骨フランジの断面積、 A_e ：接合部コンクリートの有効断面積（ $=b_e \cdot d_e$ ）， b_e ：接合部コンクリートの有効幅で柱幅と梁幅の平均値（ただし、梁側面から柱側面までの長さは柱せいの 1/8 以下とする）， d_e ：接合部コンクリートの有効せいで、柱鉄骨せいと柱せいの平均値である。

接合部パネルのせん断ひび割れ発生時のせん断変形 γ_{jsc} は式(8)より算定する。

$$\gamma_{jsc} = Q_{jsc} / (G \cdot A) \quad (8)$$

$$G \cdot A = {}_sG \cdot {}_swA + {}_cG \cdot {}_cA_e \quad (9)$$

ここで、 $G \cdot A$ ：接合部のせん断剛性、 ${}_sG$ ：鉄骨のせん断弾性係数、 ${}_cG$ ：コンクリートのせん断弾性係数である。

接合部の終局せん断耐力 Q_{ju} は、式(10)により算定する。

$$Q_{ju} = {}_jF_s \cdot {}_j\delta \cdot {}_cA_e + \frac{1.2 \cdot {}_sw\sigma_y \cdot {}_swA}{\sqrt{3}} \quad (10)$$

$${}_jF_s = 0.018 \sigma_B + 3.2 \quad (11)$$

ここで、 ${}_jF_s$ ：コンクリートのせん断強度³⁾、 ${}_j\delta$ ：接合部の形状により決まる係数（十字形は 3，ト形および T 形は 2，L 形は 1）， ${}_sw\sigma_y$ ：接合部鉄骨ウェブの降伏応力度である。

内蔵鉄骨に十字形鉄骨を用いている場合については、文献 7)により終局せん断耐力時には弱軸鉄骨フランジのせん断降伏耐力の 7～8 割程度のせん断力が生じていることが報告されている。ここでは、せん断応力度分布や接合部スチフナによるフランジへのせん断力の伝達状況にもよることから、式(12)に示すようにせん断降伏耐力の 1/2 を累加して終局せん断耐力を算定することとした。

$$\sum \frac{0.5 \cdot {}_sf\sigma_y \cdot {}_sfA}{\sqrt{3}} \quad (12)$$

ここで、 ${}_sf\sigma_y$ ：鉄骨ウェブの規格降伏点、 ${}_sfA$ ：鉄骨ウェブの断面積である。

第 2 折点となる終局せん断強度時のせん断変形 γ_{ju} は、軸力の影響を若干受けるようであるが⁴⁾、定量的な評価には至っていない。既往の実験の結果においてせん断変形がおおよそ 0.015～0.02rad で最大耐力に達するが、せん断変形 0.01rad で概ね最大耐力に近いせん断力を発揮していることから、実験結果に基づき簡便に第 2 折れ点のせ

ん断変形を 0.01rad として設定した。

(3) 柱梁十字型架構の復元力特性

柱梁十字型架構の復元力特性は、3 (1)および 3 (2)で示した各部材の復元力特性を柱層せん断力（水平荷重）と層間変形角に換算して足し合わせるにより算定される。

梁と柱のモーメント M_b 、 M_c および接合部のせん断力 ${}_pQ_c$ の柱層せん断力への換算は以下の式(13)から(15)より算定した（図-5 参照）。

$$Q_c = \frac{L}{HL'} M_b \quad (13)$$

$$Q_c = \frac{I}{H'} M_c \quad (14)$$

$$Q_c = \frac{\frac{j_b}{2} \cdot L}{(L - \frac{j_c}{2}) \cdot H - \frac{j_b}{2} \cdot L} \cdot {}_pQ_c \quad (15)$$

ここで、 j_b ：梁の有効せい（梁鉄骨フランジ重心間距離）， j_c ：柱の有効せい（柱鉄骨フランジ重心間距離）である。

また、架構の層間変形角 R は、梁の回転角 θ_b 、柱の回転角 θ_c および接合部パネルのせん断変形 γ_j それぞれの層間変形角の換算値を足し合わせることで式(16)により算出した。

$$R = \frac{L_e}{L} \theta_b + \frac{H_e}{H} \theta_c + \left(1 - \frac{j_c}{2L} - \frac{j_b}{2H} \right) \gamma_j \quad (16)$$

4. 耐力評価法の検討

本章では、復元力特性の評価で用いる各種耐力の計算値と実験値の比較検討を行う。

図-6 に接合部パネルのせん断ひび割れ耐力の計算値と実験値の比較を示す。ここでは、コンクリートのひび割れ強度に式(6)の主応力度式を用いた場合と、SRC 規準による長期許容せん断応力度を用いた場合を示す。なお、図中には文献 10)のスラブ付き柱梁接合部、文献 11)のト型柱梁接合の実験結果も含めている。

長期許容せん断応力度とした場合は大きく過小評価する結果となっている。式(6)の場合も過小評価となるが、長期許容せん断応力度を用いた場合よりも実験結果に近く、計算値に対する実験結果の比の平均値は 1.85 となっている。

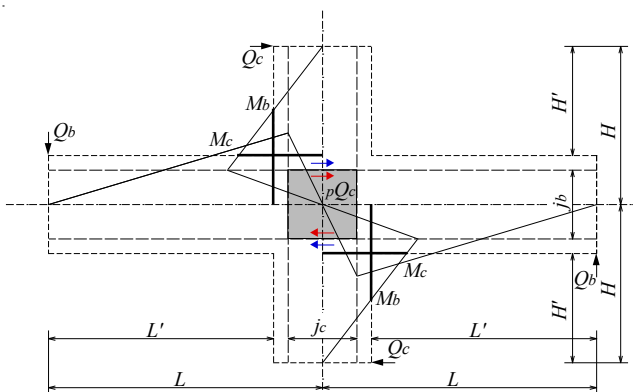


図-5 記号の説明

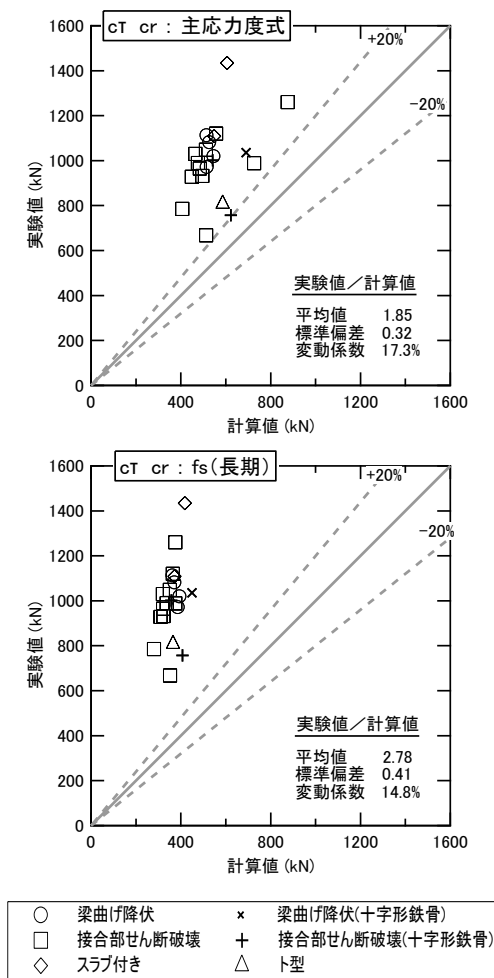


図-6 せん断ひび割れ耐力の比較

図-7 に接合部せん断破壊型試験体の終局せん断耐力の計算値と実験値の比較を示す。ここでは、コンクリートのせん断強度 JF_s に SRC 規準⁹⁾による式を用いた場合も併せて示す。

SRC 規準による場合は、実験結果を 2 割ほど小さく評価する結果を与える式となっており、一方で、式(11)を用いた場合は、終局せん断耐力の計算値は、実験値のほぼ平均値を与えていることがわかる。

図-8 は、接合部せん断余裕度（梁の終局曲げモーメント時の接合部入力せん断力に対する接合部の終局せん断耐力の比）と試験体の最大耐力との比較である。梁曲げ降伏型の試験体においては、計算耐力に対する実験値の比は 1.03 から 1.29 の範囲となっている。

5. 各部材の復元力特性算定結果

(1) 梁のモーメントー回転角関係

図-10に試験体JB-3, JP-7およびJP-9の梁のモーメントと回転角の算定結果を示す。

実験結果の梁および柱のモーメント M_b , M_c は式(13),

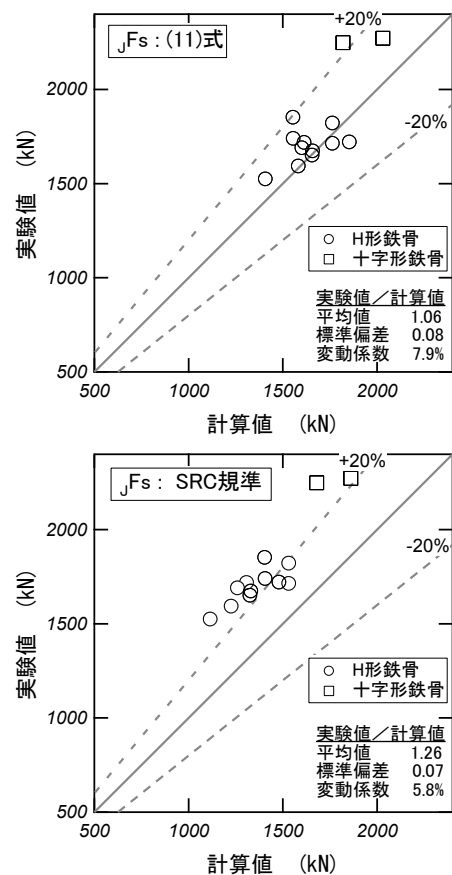


図-7 終局せん断耐力の比較

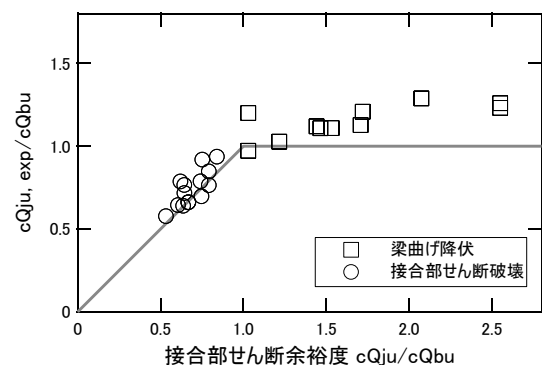


図-8 試験体の終局耐力の実験値と計算値の比較

(14)を用いて算定する。実験による梁および柱の部材回転角 θ_b , θ_c は以下の式(17)から(22)により算出した。図-9に示す鉄骨に取り付けた変位計より得られる変位を用いており、計測区間の回転角による材端の変位を部材長で除して算出している。

$$\theta_b = (\delta_{b東} + \delta_{b西}) / 2L' \quad (17)$$

$$\theta_c = (\delta_{c上} + \delta_{c下}) / 2H' \quad (18)$$

$$\delta_{b東} = \frac{\delta_8 - \delta_{10}}{j_b} \cdot l_2 + \frac{\delta_7 - \delta_9}{j_b} \cdot l_1 \quad (19)$$

$$\delta_{b西} = \frac{\delta_{13} - \delta_{11}}{j_b} \cdot l_2 + \frac{\delta_{14} - \delta_{12}}{j_b} \cdot l_1 \quad (20)$$

$$\delta_{c上} = \frac{\delta_3 - \delta_5}{j_c} \cdot h_l \quad (21)$$

$$\delta_{c下} = \frac{\delta_6 - \delta_4}{j_c} \cdot h_l \quad (22)$$

図-10 より、梁の曲げ破壊型試験体である試験体 JB-3 では計算値による降伏時の変形が実験に比べると若干小さいものの、梁の復元力特性を概ね捉えている。

(2) 接合部のせん断力-せん断変形角関係

図-11に試験体JB-3, JP-7およびJP-9の接合部のせん断力とせん断変形角の関係を示す。

パネルゾーン的作用せん断力 Q_c を式(15)、パネルのせん断変形角 γ_p については、図-9に示す鉄骨に取り付けた変位計より得られる変位、 δ_1 , δ_2 を用いて式(24)よりそれぞれ求めた。

$$\gamma_p = \frac{\sqrt{j_b^2 + j_c^2}}{j_b \cdot j_c} \cdot \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} \quad (24)$$

図-11 より、梁の曲げ破壊型試験体である試験体 JB-3 では、曲げ耐力時のせん断力で頭打ちになるため、せん断力 1500kN 付近までを比較すると、計算値は実験結果に概ね対応していると言える。接合部せん断破壊型試験

体である試験体 JP-7 および JP-9 は耐力を若干小さく評価しているが計算値は実験結果に概ね対応している結果となった。

6. CES 柱梁十字型架構の復元力特性算定結果

図-12に柱梁十字型架構における復元力特性の比較を示す。ここでは各強度で折れ点が定まり、5折れ線あるいは4折れ線で表される。

図-12より、計算により求めた復元力特性は実験結果の荷重-層間変形角関係の包絡線と大局的に見てよく対応している。特に梁の曲げ破壊型試験体では、図-10で梁の降伏点を小さめに評価している試験体JB-3を除く試験体A, C, D, JB-1およびJB-2においては、最大耐力まで荷重-層間変形角関係がよく一致している。

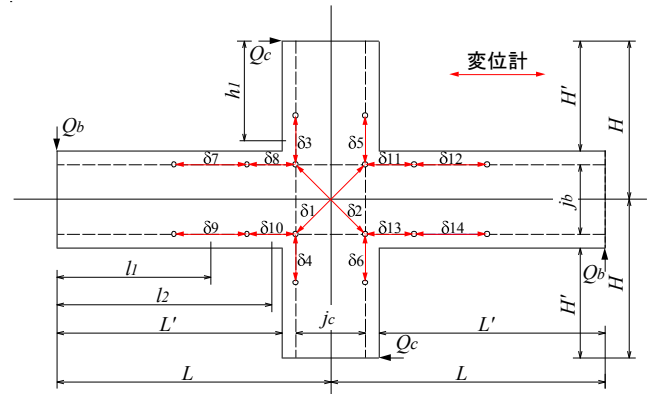


図-9 変位計取付図 (試験体北面)

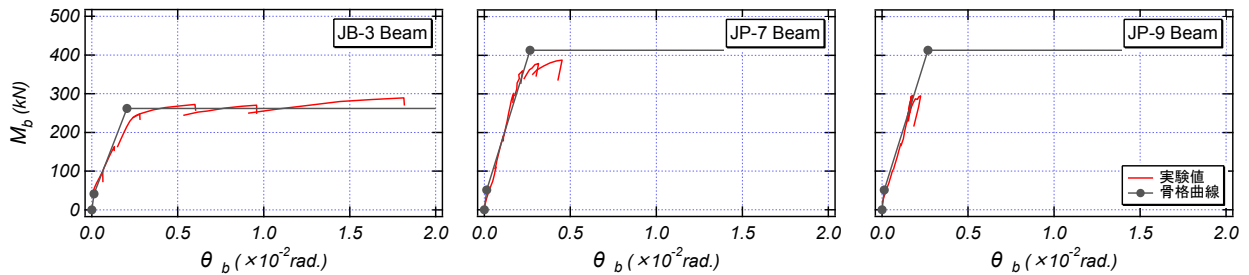


図-10 CES梁のモーメント-回転角関係

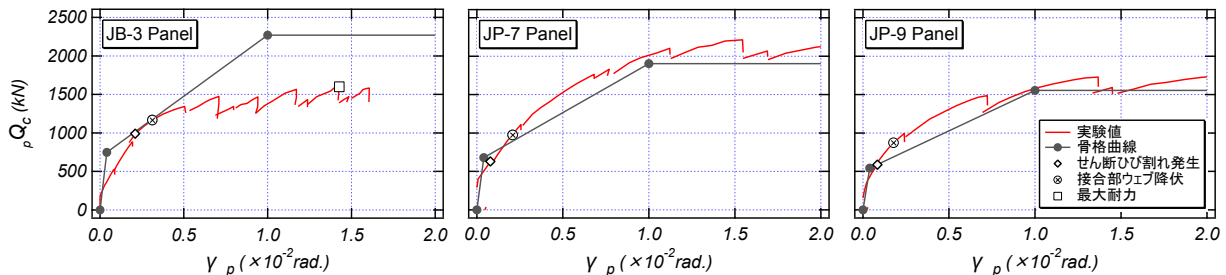


図-11 CES接合部のせん断力-せん断変形角関係

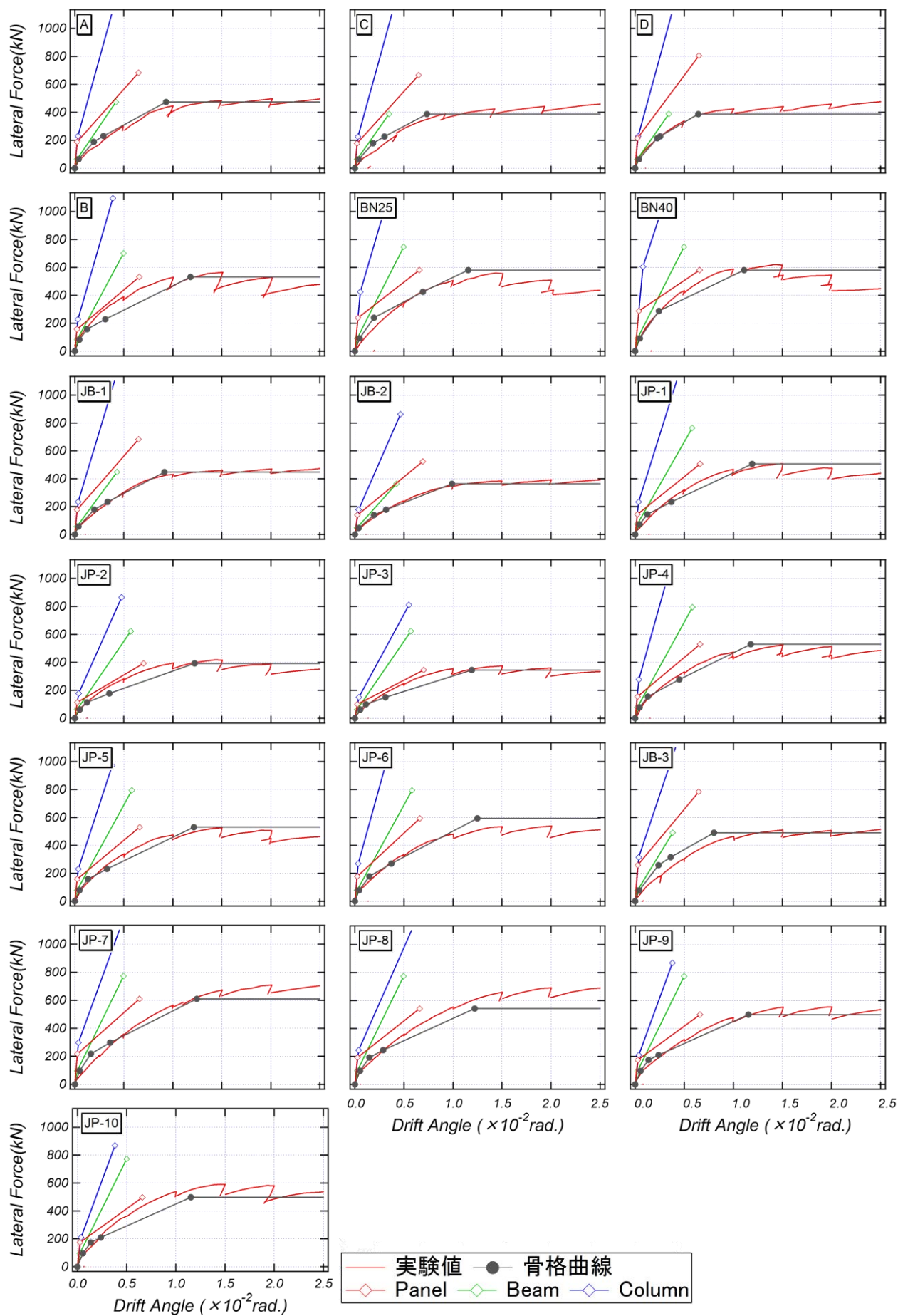


図-12 柱梁十字型架構における復元力特性のモデル

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) コンクリートのひび割れ強度に主応力度式を用いた場合と、SRC 規準による長期許容せん断応力度を用いた場合とで接合部パネルのせん断ひび割れ耐力の計算値と実験値を比較すると、主応力度式を用いた場合の方が実験結果に近い結果となった。
- 2) コンクリートのせん断強度にSRC規準による式を用いた場合と式(11)を用いた場合とで終局せん断耐力の計算値と実験値を比較すると、式(11)を用いた場合の方が、終局せん断耐力の計算値は、実験値と良い対応を示した。
- 3) 梁の曲げ耐力については、実験値/計算値の比は1.03から1.29の範囲であり、一般化累加強度で評価可能である。
- 4) 梁のモーメントと回転角関係より、試験体JB-3では計算値による降伏時の変形が実験に比べると若干小さいものの、概ね復元力特性を捉えている。
- 4) 接合部のせん断力とせん断変形角の計算値は、試験体JB-3、JP-7およびJP-9において実験結果に概ね対応している結果となった。
- 5) 本論に示した手法により算出した柱梁十字架構の復元力特性は、実験結果と良い対応を示した。

参考文献

- 1) 石鈞吉, 倉本洋, 藤本利昭, 松井智哉, 牧元祐太: H 型鉄骨内蔵 CES 柱の復元力特性のモデル化に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 693 号, pp.2019-2026, 2013.11
- 2) 藤本利昭, 大崎広貴: 内蔵鉄骨形状の異なる CES 部材の構造性能に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 83, No. 752 号, 2018. 10
- 3) 松井智哉: H 形鉄骨を用いた CES 内柱梁接合部の終局せん断強度に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.82, No.737, pp. 1125-1135, 2017.7
- 4) 松井 智哉・倉本 洋: CES 造柱梁接合部の構造性能に及ぼす作用軸力の影響, 日本建築学会構造系論文集, Vol.76, No.663,1025-1031, 2011.5
- 5) 小島 佑太・吉野 貴紀・小山 勉・松井 智哉: CES 造柱梁接合部のせん断抵抗機構に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, 2013.7
- 6) 小山 勉・小島 佑太・広瀬潤・松井 智哉: CES 造柱梁接合部の構造性能に及ぼすパネルゾーンの内蔵鉄骨フランジ幅の影響コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, 2014.7
- 7) 渡辺一葵・松井智哉: 十字形鉄骨を内蔵した CES 造柱梁接合部の構造特性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, 2018.7
- 8) 松井 智哉・渡辺 一葵・前川 茜音: 内蔵鉄骨形状の異なる CES 造柱梁接合部の静的加力実験その 1 実験概要と破壊性状, 日本建築学会大会学術講梗概集, C-I, 1347-1348, 2018.9
- 9) 日本建築学会: 鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2014.1
- 10) 吉野貴紀, 松井智哉, 倉本 洋: CES スラブ付梁柱接合部の静的加力実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.1123-1128, 2011.7
- 11) 倉本 洋, 松井智哉, 永田 諭, 藤本利昭: CES 合成構造システムにおける外部柱梁接合部の構造性能, 日本建築学会構造系論文集, No.624, pp.235-242, 2008.2

(Received August 30, 2019)

STUDY ON MODELING THE RESTORING FORCE CHARACTERISTICS OF CROSS SHAPED CES BEAM COLUMN FRAME.

Akane MAEKAWA and Tomoya MATSUI

Concrete Encased Steel (CES) structural system consisting of fiber reinforced concrete (FRC) and encased steels is a new composite structural system, and development study has been continuously to aim practical use. Currently, evaluation methods for each restoring force characteristics of beam, column, and joint panel have been proposed, and their validity has been studied. However, there is few examination of evaluation method of restoring force characteristics for cross shaped CES beam column frame, and examination of its validity is necessary. In this paper, skeleton curve of cross shaped CES beam column frame test specimens reported in the past was calculated. Calculated skeleton curve was validate against experimental results. Calculated restoring force characteristics of cross shaped CES beam column frame showed good agreement with the experimental results.