

(34) CES柱梁接合部における負担せん断力に関する解析的研究

松井 智哉¹・倉本 洋²

¹ 豊橋技術科学大学助教 工学部建設工学系 (〒441-8580愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)
E-mail:matsui@tutrp.tut.ac.jp

²正会員 豊橋技術科学大学准教授 工学部建設工学系 (〒441-8580愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)
E-mail:kura@tutrp.tut.ac.jp

本研究では、鉄骨と繊維補強コンクリートで構成されるCES合成構造の柱梁接合部を対象に3次元非線形FEM解析を実施することにより、接合部における応力伝達メカニズムを明らかにすることを目的としている。既往の実験結果と解析結果の比較より、解析手法の適用性について検討し、包絡線を概ね模擬可能であることを示した。また、解析結果よりせん断パネル部の鉄骨、インナーコンクリート、アウターコンクリートの応力分担メカニズムについて検討を行い、接合部パネルにおいてアウターコンクリート部はインナーコンクリート部に比べて広い領域で圧縮ストラットを形成しており、最大耐力時には、ほぼ等しいせん断力を負担していることを示した。

Key Words : CES beam-column joints, fiber reinforced concrete, FEM analysis, shear force distribution

1. はじめに

CES (Concrete Encased Steel) 構造システムは、鉄骨鉄筋コンクリート構造から鉄筋を省略し、コンクリートに繊維補強コンクリートを用いた鉄骨コンクリート合成構造であり、本構造が優れた構造性能を有することは柱および柱梁接合部を対象とした構造実験により確認されている¹⁾²⁾³⁾。今後その構造性能評価法を開発していくことが必要とされており、柱部材に関しては累加強度理論によって終局せん断耐力の推定が概ね可能であることを示している¹⁾。柱梁接合部についてもSRC規準⁴⁾に基づいて評価可能であることを示したが²⁾³⁾、地震時に柱・梁に応力を伝える重要な役割をもつ接合部においては、より定量的な評価手法が望まれる。本研究では、CES柱梁接合部の構造性能評価法の開発に向けて、3次元非線形FEM解析によって、その応力伝達メカニズムを解明することを目的としている。

2. 解析対象実験の概要

図-1に試験体概要を示す。試験体は文献2), 3)において報告されている内柱梁接合部2体 (CESJ-A, CESJ-B) と外柱梁接合部2体 (CESJ-AE, CESJ-BE) の計4体を対

象としており、階高約3.5mおよびスパン約6mの架構の低層部柱梁接合部を想定した約1/2.7縮尺モデルである。柱スパンは1300mm、梁スパンは2250mmであり、部材反曲点を模擬するために柱上下端部および梁端部にそれぞれピン支承を設けている。

実験変数は梁の曲げ耐力に対する接合部パネルのせん断耐力の比で表されるせん断余裕度とし、柱および梁の曲げ耐力は一般化累加強度理論により計算し、接合部パネルのせん断耐力はSRC規準によって求めている。したがって、図-2に示すように、柱内蔵鉄骨には両試験体共通でH-300×220×10×15を用いているが、梁内蔵鉄骨には試験体CESJ-A, CESJ-AEではH-300×150×6.5×9を、試験体CESJ-B, CESJ-BEではH-300×200×9×19をそれぞれ用いている。パネルゾーンに関しては、試験体CESJ-A, CESJ-AEのウェブ厚は10mmであるが、試験体CESJ-B, CESJ-BEではせん断余裕度を小さく設定するために、パネルゾーンのウェブ厚を4.5mmに変更している。各試験体のせん断余裕度は、CESJ-A : 1.56, CESJ-B : 0.78, CESJ-AE : 2.98, CESJ-BE : 1.26となる。

載荷方法は正負繰返し水平力載荷とし、内柱梁接合部試験体では775kNの一定軸力、外柱梁接合部を想定した試験体は変動軸力が与えられている。実験の詳細は文献2), 3)を、せん断余裕度の具体的な算定方法は文献5)を参照されたい。

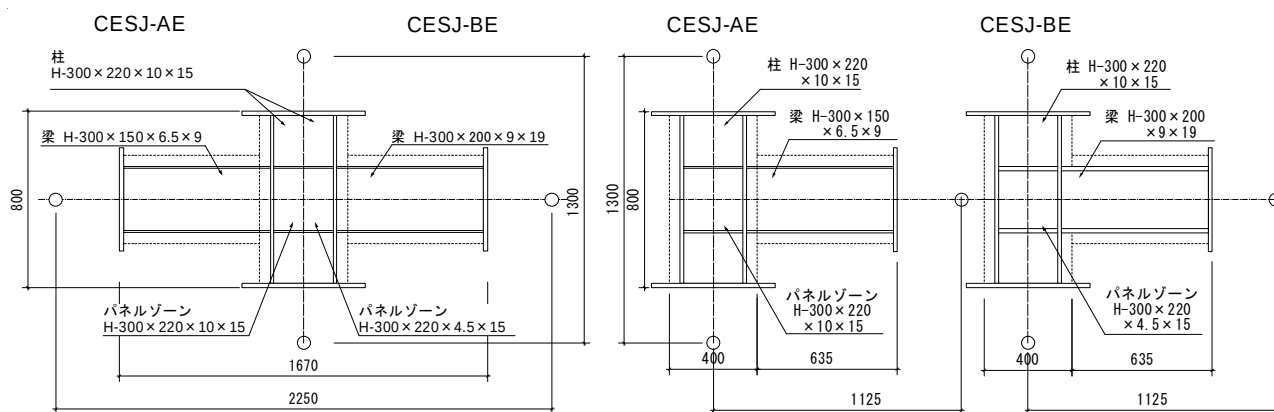


図-1 試験体概要図

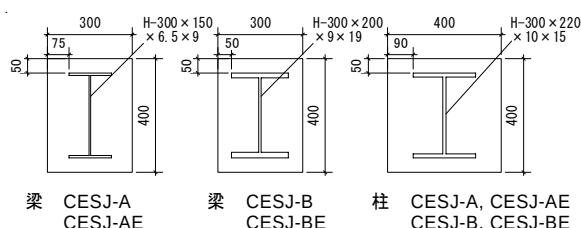


図-2 部材断面

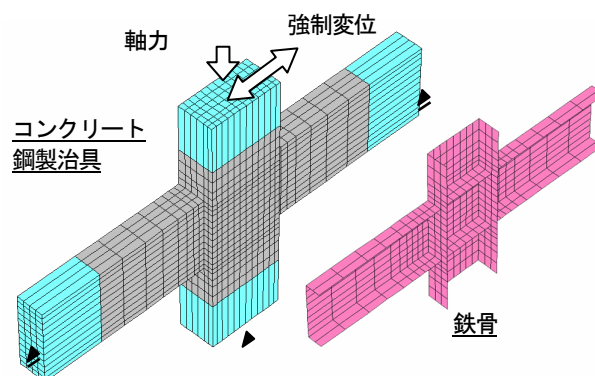


図-3 要素分割図 (CESJ-A)

3. FEM解析

(1) 解析の概要

図-3に要素分割図を示す。解析モデルは対称性を考慮した1/2モデルである。柱下端部はピン支持、梁端部はローラー支持（上下方向拘束）として、柱頂部において軸力を与え、正負水平繰り返しの強制変位を与えて解析を行った。このときの軸力は、CESJ-AとCESJ-Bでは一定軸力（387.5kN）、CESJ-AEとCESJ-BEでは変動軸力（CESJ-AE：-67～+713kN、CESJ-BE：-263～+1050kN）を与えており、正載荷時が圧縮方向軸力、負載荷時が引張方向軸力となる。なお、解析には3次元非線形FEM解析ソフト“FINAL”⁹⁾を使用した。

(2) 鉄骨のモデル化

鉄骨ウェブは四辺形平面応力要素でモデル化し、鉄骨フランジでは拘束効果を考慮するため面外曲げおよびせん断変形を考慮できる積層シェル要素を用いた。応力-ひずみ関係はバイリニアモデルで表し、履歴特性は等方硬化則を用いた。柱と梁の両端の治具（ピン支承）は、剛な六面体要素でモデル化し、鉄骨と剛結されている。

(2) コンクリートのモデル化

RC構造物のFEM解析に関しては長年の研究により数多くの解析手法が報告されているとともに精度良くシミュレートできることが示されている。しかし、今回の解析対象は繊維補強コンクリートを用いており、FEM解析

表-1 解析に用いたコンクリートの材料定数

	F_c (N/mm ²)	F_t (N/mm ²)	E_c (kN/mm ²)	ε_{c0} (μ)
CESJ-A	33.3	1.90	23.0	5000
CESJ-B	31.6	1.85	23.0	5000
CESJ-AE	40.0	2.08	21.9	5000
CESJ-BE	38.4	2.04	21.4	5000

F_c : 圧縮強度、 F_t : ひび割れ強度、 E_c : 弾性係数、 ε_{c0} : 圧縮強度時ひずみ

への適用方法は不明である。文献⁷⁾示されるSRC構造のFEM解析における構成則を参考に解析を行ったところ、実験結果と比べて降伏までの剛性が大きくなり、梁降伏破壊先行型のCESJ-A、CESJ-AEにおいて特に耐力の低下が早期に生じるといった相違点がみられた。その理由として、本構造には鉄筋がないためダボ作用によるコンクリートの損傷がないこと、繊維補強コンクリートのひび割れ後の挙動が普通コンクリートとは異なることなどが考えられる。そのようなことから、試行錯誤的な解析を行ない、次のような構成則を選択した。また、コンクリートモデルに使用した材料定数を表-1に示す。

コンクリートは六面体要素でモデル化し、応力-ひずみ関係においては、圧縮側の応力上昇域は修正Ahmadモ

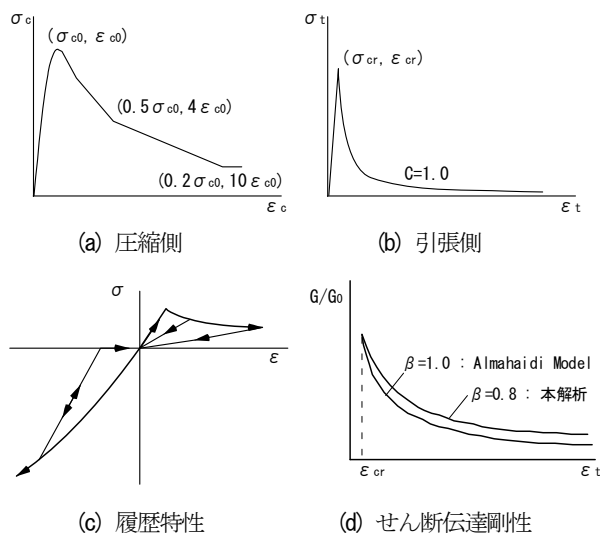


図-4 コンクリートの材料モデル

デル⁹⁾、軟化域はコンクリートの材料試験を参考に図-4(a)に示すように多折線でモデル化した。破壊条件は、Willam-Wankeの5パラメータモデル⁹⁾を用いた。ひび割れ後の圧縮強度の低減には、Collinsらによる低減係数⁹⁾を用いた。引張側のひび割れ後の軟化域は、ひび割れ発生後引張応力をほとんど負担しないものとして、出雲らのモデル¹⁰⁾において係数 $c=1.0$ としてモデル化した。また、繰返しによる剛性低下は考慮しない(図-4(c))。ひび割れ後のせん断伝達モデルは図-4(d)に示すAl-mahaidiモデル($\beta=1$ の場合)に対してひび割れ後のせん断伝達剛性がわずかに大きくなるように($\beta=0.8$)調整して多折線モデルでモデル化した。

コンクリートと鋼板の間の付着応力-すべり関係における剛性は無視できるほど十分に小さく設定することとした。

4. 解析結果

(1) せん断力 - 変形角関係

図-5に実験および解析によるせん断力と変形角Rの関係を示す。ここでせん断力は柱頂部の水平荷重、変形角は柱上部位位置での水平変形角とし、両者の比較は $R=0.03\text{rad}$ の第1サイクルまでとしている。また、最大耐力の解析値と実験値を表-2に示す。

CESJ-Aでは正載荷において降伏以前の変形域での剛性を大きめに評価しているが、負載荷側では良い対応を示している。降伏後は、実験において最大耐力を記録した $R=0.03\text{rad}$ (R : 水平変形角)よりも早めに耐力が低下しており若干異なるが、履歴ループで実験に近い紡錘形を描く点を含めて全体的に一致しているといえる。

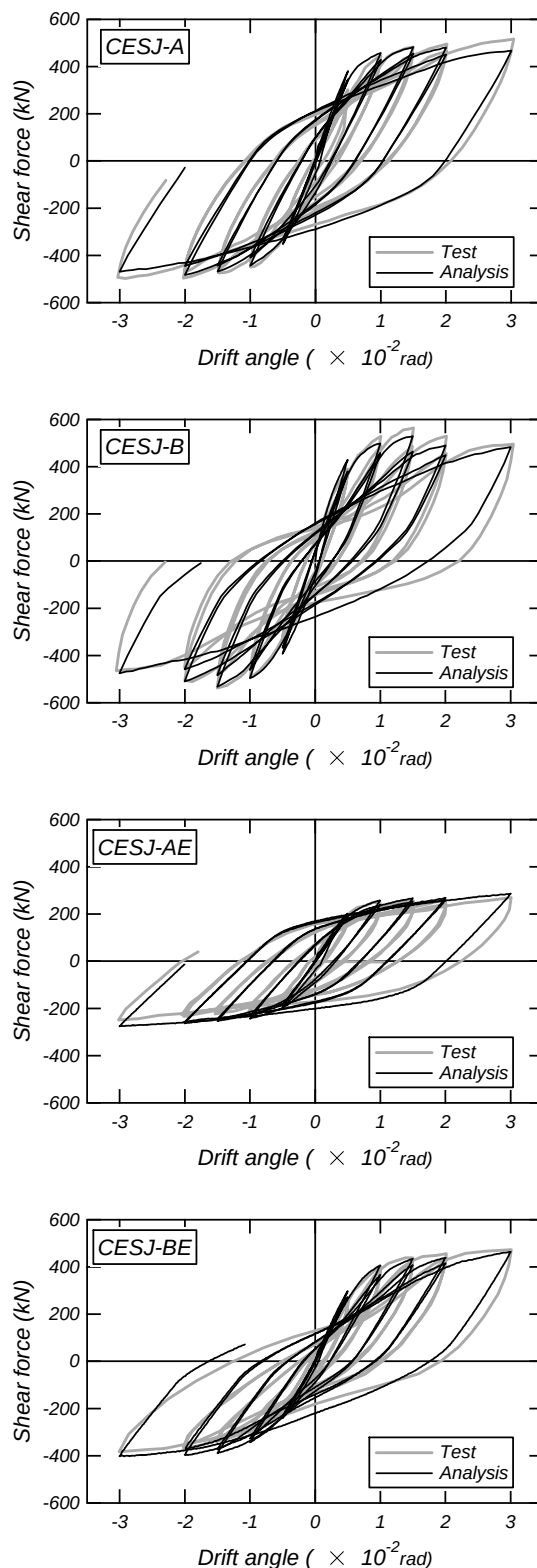


図-5 せん断力-変形角関係の比較

CESJ-Bでも最初の $R=0.005\text{rad}$ のサイクルでは剛性を大きく評価する傾向がみられる。その後の包絡線は正載荷でせん断力を小さめに評価しているが、負載荷側で良好な対応を示している。履歴ループに関しては実験では逆S字型のスリップ性状がみられるが、解析では紡錘型を

表-2 最大耐力の比較

	解析		実験		Qan/Qex
	Qana (kN)	Rana (rad.)	Qex (kN)	Rex (rad.)	
CESJ-A	483	0.015	517	0.03	0.93
CESJ-B	532	0.015	564	0.015	0.94
CESJ-AE	287	0.03	270	0.03	1.06
	-277	-0.03	-264	-0.03	1.04
CESJ-BE	464	0.03	473	0.03	0.98
	-402	-0.03	-383	-0.03	1.05

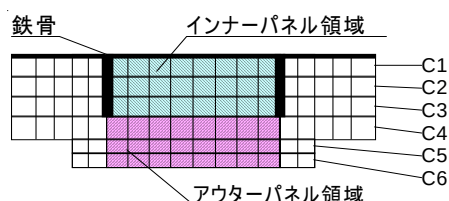


図-7 パネル部の要素（内柱梁接合部）

示しているように異なる結果となった。

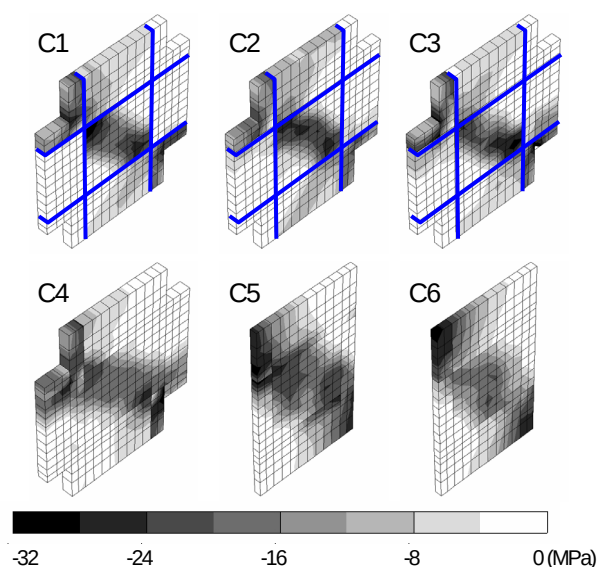
外柱梁接合部であるCESJ-AE、CESJ-BEでは、正載荷側の包絡線はほぼ一致し、良い対応を示している。軸力が引張となる負載荷側では実験に比べて剛性およびせん断力がわずかに大きくなっていることが傾向としてみられるが、表-2からわかるように最大耐力は概ね一致する結果となっている。

総じて本解析において包絡線は良い対応を示し、概ね模擬できる結果が得られたことから、次節では本解析結果を用いてパネル部の応力状態について検討を進める。解析手法に関しては、今後、繊維補強コンクリートのひび割れ後のせん断伝達剛性および軟化域、圧縮強度の低減に関してどのように設定していくかさらに検討が必要である。

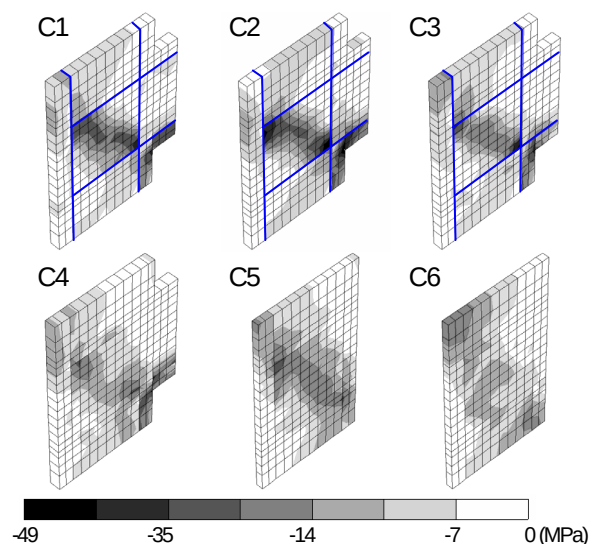
(2) 最小主応力分布

図-6にせん断余裕度が小さい試験体であるCESJ-BおよびCESJ-BEのパネル部コンクリートの最小主応力分布を示す。図中のコンクリート要素は図-7に示した要素C1からC6までの幅方向の断面を示している。

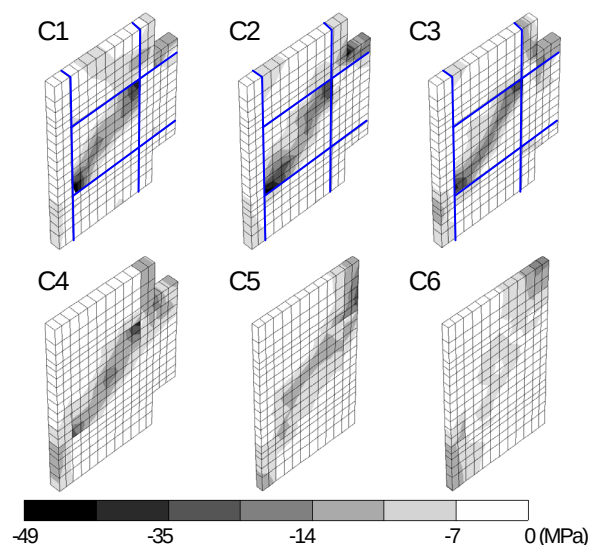
内柱接合部および外柱接合部両者ともに、要素C1からC3では柱および梁のモーメントから受ける圧縮力に対して、柱フランジと梁フランジに囲まれたインナーコンクリート部において斜めに圧縮ストラットを形成していることが確認できる。また、インナーコンクリート部の隅角部においては、コンクリート強度を超える高い圧縮応力が生じている。鉄骨に囲まれていないため拘束効果が小さいと考えられる要素C4からC6をみると断面幅方向の外側に向かうにつれて応力度レベルが小さくなっている。しかし、インナーコンクリート部での応力度レベルほど大きくはないが、広い領域において圧縮ストラ



(a) CESJ-B : R=1.0%



(b) CESJ-BE : R=1.5% (正載荷)



(c) CESJ-BE : R=1.5% (負載荷)

図-6 パネル部コンクリートの最小主応力分布

ットを形成している。

変動軸力を受けるCESJ-BEについてみると、圧縮軸力を受ける正載荷時に比べ、引張軸力を受ける負載荷時の鉄骨フランジ内に形成される圧縮ストラットの幅は小さく、応力度レベルも全体的に小さいものであり、軸力状態の相違によりパネル部の応力状態が大きく異なることが確認できる。

(3) 接合部パネルの負担せん断力

各試験体の接合部パネル部の中央高さ位置での負担せん断力の推移を図-8に示す。ここでのせん断力は図-7に示した鉄骨に囲まれたインナーコンクリート部およびアウターコンクリート部、鉄骨部に生じるせん断力である。また、鉄骨部のせん断力はウェブパネルのみとしている。

実験において接合部パネルのせん断破壊となった内柱

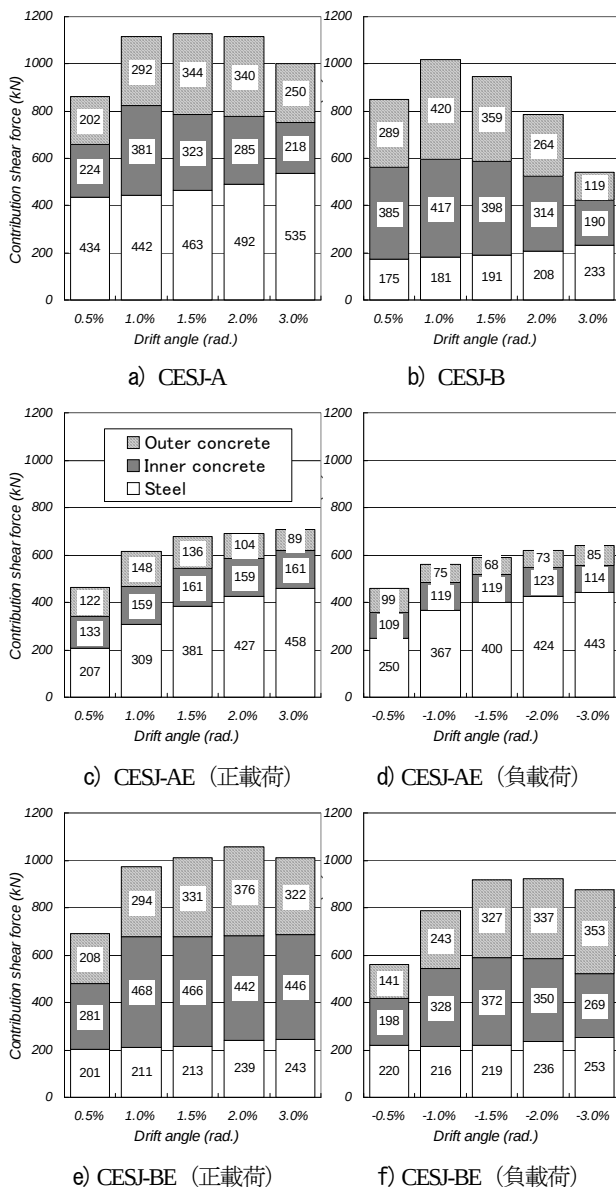


図-8 接合部パネルの負担せん断力の推移

梁接合部のCESJ-B (図-8(b)) では、最大せん断力(柱頂部での水平荷重)に達する $R=0.015\text{rad}$ までは、パネルのせん断力の大部分をコンクリートが負担していることがわかる。また、鉄骨に囲まれていないアウターコンクリート部においても半分程度の比較的大きいせん断力を負担している。この傾向は、CESJ-Aでも同様で、最大耐力付近ではインナーコンクリート部とアウターコンクリート部の同程度のせん断力を負担している。これは、図-6に示したようにアウターコンクリート部において比較的広い領域にわたって圧縮ストラットが形成されることによって生じたものと考えられる。最大耐力以降、変形が進むとともに耐力が低下していくとCESJ-Bでは当然ながらコンクリートの負担せん断力は減少していき、特にアウターコンクリート部の耐力低下が顕著である。

外柱梁接合部であるCESJ-AE、CESJ-BEにおいて正載荷時と負載荷時を比べると、鉄骨の負担せん断力に大きな違いはないが、負載荷でコンクリートの負担せん断力が減少している。つまり、今回の試験体においては軸力がコンクリートパネルのせん断力に大きく影響を及ぼすことがわかる。

また、 $R=1.0\%$ 以降インナーコンクリート部のせん断力あまり変化しておらず、せん断余裕度が特に大きく実験においても接合部パネルの損傷が少なかった CESJ-AE ではほとんど変動していない。

接合部パネルのコンクリートのみに着目して、そのせん断応力の推移を図-9に示す。前述の内容と重複するが CESJ-B では接合部のせん断力が最大となる $R=1.0\%$ でアウターコンクリートのせん断応力がインナーコンクリートを超える値に達する。また、CESJ-BE ではインナーコンクリート部のせん断応力は $R=1.0\%$ で最大値に達しているが、アウターコンクリート部は $R=2.0\%$ で最大値に達しており、最大せん断応力を発揮する時期に違いがみられる。

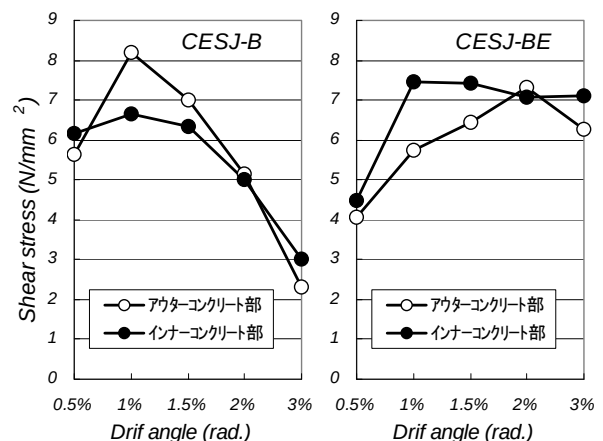


図-9 接合部パネル部コンクリートのせん断応力

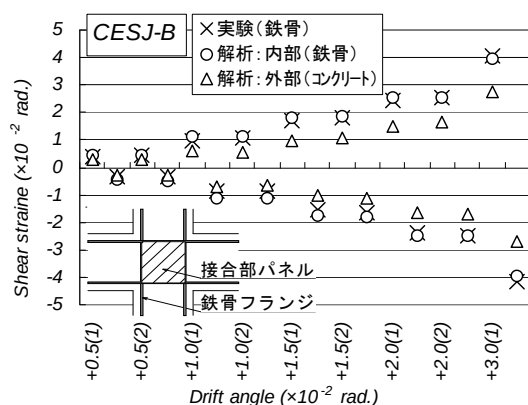


図-10 接合部パネルのせん断変形

(4) 接合部パネルのせん断変形

図-10に接合部パネルの幅方向に対して内部となる鉄骨と外部となるコンクリートのせん断変形を示す。また、比較のため鉄骨のせん断変形に対応する実験値をあわせて示す。

解析による鉄骨のせん断変形は、変形角が大きくなるとともに増大しており、実験結果と非常に良く一致している。内部と外部のせん断変形を比較すると、外部のせん断変形は内部の変形と同様に増大していく傾向にあるが、その値は小さいものであり、変形が内部の変形に追従して生じ、異なる挙動を示していることが確認できる。このことは、図-9にみられるようにインナーコンクリート部とアウターコンクリート部のせん断応力が増大する傾向が異なることに対応し、結果として内部と外部の接合部パネルの負担せん断力が同程度のものになったといえる。しかし、これらのことは接合部周辺の鉄骨フランジによる拘束効果を含めた鉄骨量の影響を受けると考えられ、今後さらに検討が必要である。

5. まとめ

CES合成構造柱梁接合部の3次元非線形FEM解析を行うことにより、接合部パネルの応力伝達について検討を

行なった。本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) 3次元非線形FEM解析による解析結果と実験結果の包絡線は概ね一致する結果が得られ、CES構造への適用性について確認することができた。
- (2) 軸力は接合部パネルに形成される圧縮ストラットの領域に影響を及ぼし、圧縮軸力時と引張軸力時では、接合部パネルの応力状態は大きく異なる。
- (3) 接合部パネルにおいてアウターコンクリート部はインナーコンクリート部に比べて広い領域で圧縮ストラットを形成しており、最大耐力時には、ほぼ等しいせん断力を負担している。

参考文献

- 1) 田口孝, 永田諭, 松井智哉, 倉本洋: H型鉄骨を内蔵したCES柱の構造特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.1273-1278, 2006.7
- 2) 永田諭, 松井智哉, 倉本洋: 鉄骨コンクリート造柱梁接合部の構造性能に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.1267-1272, 2006.7
- 3) 松井智哉, 岩瀬 勝洋, 永田 諭, 倉本洋: CES外柱梁接合部の構造性能に関する基礎研究(その1) 実験の概要と結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp.1261-1262, 2007.8
- 4) 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, 2001
- 5) 松井智哉, 倉本 洋: CES柱梁接合部の非線形FEM解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.1327-1332, 2007.7
- 6) 伊藤忠テクノソリューションズ(株): FAINAL/V99HELP
- 7) 後藤康明, 穴吹拓也, 城攻: SRC造内柱梁接合部におけるせん断応力分布分担に関する非線形有限要素解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, pp.1089-1090, 2005.
- 8) 長沼一洋: 三軸圧縮下のコンクリートの応力~ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, No.474, pp.163-170, 1995.8
- 9) Vecchio, F.J. and Collins, M.P.: The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, ACI Journal, Vol.83, No.2, pp.219-231, 1986.
- 10) 出雲淳一, 島弘, 岡村甫: 面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学, Vol.25, No.9, pp.134-147, 1987

ANALYTICAL STUDY ON SHEAR FORCE DISTRIBUTION OF CES BEAM-COLUMN JOINTS

Tomoya MATSUI and Hiroshi KURAMOTO

Three-dimensional non-linear FEM analyses of Concrete Encased Steel (CES) beam-column joints, which are composite structural systems consisting of steel and fiber reinforced concrete, were conducted to examine the shear force distribution for CES joints, together with verifying applicability of the analytical method for a CES structural system. The analytical results showed good agreement with the experimental ones on the story shear versus story drift relationship for CES beam-column joints. It is confirmed that concrete elements that are not surrounded with the steel flange also share the same shear force as elements surrounded with the steel flange.