

論文 片側に直交部材の付いた RC 偏心柱梁接合部の 3 次元非線形 FEM 解析

峯 あゆみ^{*1}・柏崎 隆志^{*2}・野口 博^{*3}

要旨：片側直交梁・床スラブ付き RC 立体柱梁接合部を対象に，直交部材の有無及び偏心率をパラメータとして 3 次元非線形 FEM 解析を実施し，実験結果との比較により解析手法の検証を行った。また，解析結果を用いて接合部の耐力，変形，応力状況の検討を行い，さらに，ひび割れの進展状況の検討では，柱梁接合部の表面だけでなく内部の破壊を視覚化し，損傷評価を行った。

キーワード：RC，立体柱・梁接合部，FEM，ひび割れ幅

1. はじめに

柱梁接合部のせん断耐力に影響を及ぼす要因として，柱に対する梁の偏心取付きや，直交梁や床スラブなどの直交部材がある。既往の RC 柱梁接合部の有限要素法 (FEM) 解析では，平面架構の試験体を対象とした研究が殆どで，立体架構中での解析はまだ数少ない。直交梁と床スラブの影響や，偏心接合部の破壊挙動を解明するには，横補強筋の拘束効果などを考慮することができる 3 次元解析が必要である。

本研究では，偏心柱梁接合部の解析を行い，履歴性状，破壊モード，変形，応力状況について実験結果と比較検討を行う。さらにひび割れ進展状況などの検討による接合部の損傷評価を

行い，偏心接合部の構造性能評価法の開発に役立てることを目的とする。

2. 解析概要

2.1 解析対象試験体

2004～2005 年に広沢らによって行われた，外柱に対応する RC 立体十字型部分骨組¹⁾²⁾³⁾の試験体について，3次元非線形 FEM 解析を行った。実験変数は，直交部材の有無と偏心率であり，実大の 2/3 スケールの準実大の試験体である。また，全て破壊モードは接合部破壊先行型になるよう計画されている。試験体概要を図-1 に，試験体諸元を表-1 に示す。また，実験に使用された材料の力学的特性を表-2 に示す。

	01-E000	01-E085	04-E000 E00s	04-E115 E80s
柱断面				
形状				
	偏心無・スラブ無	偏心有・スラブ無	偏心無・スラブ有	偏心有・スラブ有

図-1 試験体概要

*1 エヌ・ティ・ティ・システム開発 (株) (前千葉大学大学院) 工修 (正会員)

*2 千葉大学工学部デザイン工学科 (建築系) 助手 工修 (正会員)

*3 千葉大学工学部デザイン工学科 (建築系) 教授 工博 (正会員)

表-1 試験体諸元

試験体		01-E000	01-E085	04-E000	04-E115	E00s	E80s
軸力	σ_0 (N/mm ²)	5.88		6.00		6.10	
	b×D(mm)	400×500		500×450		500×400	
柱	主筋	10-D19		10-D22		10-D22	
	帯筋	2-D10@100		6-D10@70		6-D10@80	
梁	b×D(mm)	230×500		230×500		300×500	
	引張鉄筋	6-D19		6-D22		6D22	
	肋筋	4-D10@100		6-D10@100		6-D10@100	
接合部	偏心量e(mm)	0(e ₁ =0)	85(e ₁ =0.21)	0(e ₁ =0)	115(e ₁ =0.26)	0(e ₁ =0)	80(e ₁ =0.2)
	スラブ	t(mm)		185		120	
	スラブ筋			2-D10@200		2-D10@200	

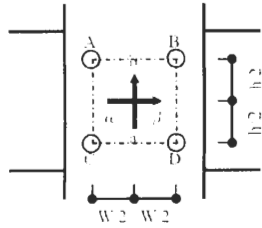


図-2 変位計位置

表-2 材料諸元

鉄筋				
径	鋼種	用途	降伏強度 [N/mm ²]	ヤング率 [N/mm ²]
D22	SD345	梁・柱主筋	362.1	2.10×10 ⁵
D10	SD295A	せん断補強筋	378.9	2.05×10 ⁵

コンクリート		
圧縮強度 [N/mm ²]	割裂強度 [N/mm ²]	ヤング率 [N/mm ²]
26.3	2.1	2.18×10 ⁴

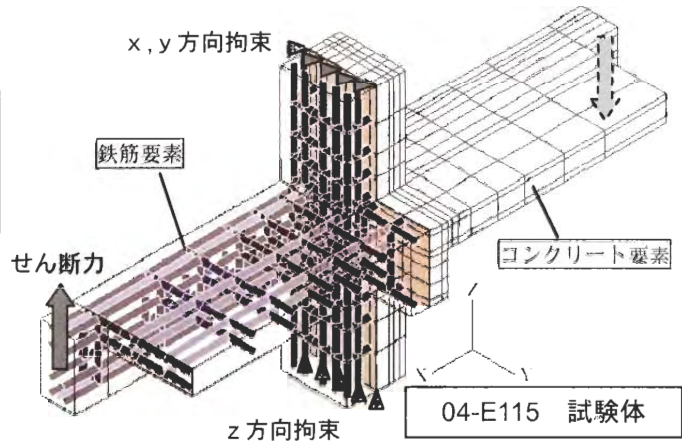


図-3 要素分割と境界条件

2.2 解析方法

解析には、本研究室で開発された3次元非線形 FEM 解析プログラム⁴⁾⁵⁾(以下オリジナルプログラム)を使用した。

コンクリートには、アイソパラメトリック 8 節点ソリッド要素を用い、Darwin-Pecknold の等価一軸ひずみに基づく直交異方性モデルを3次元に拡張したモデルにより表現した。3 軸応力下の破壊条件には、Willam, Warnke らの 5 パラメータモデルを用いた。応力-ひずみ関係には、野崎・小林・櫻井・余らにより開発されたモデルを導入した。また、圧縮側と引張側において、破壊エネルギーによる要素寸法に依存した限界ひずみを適用した。ひび割れ発生後の圧縮強度低減には、野口・飯塚式を用いた。

ひび割れモデルは、多方向固定ひび割れモデルを用い、ひび割れ方向のせん断伝達特性には Al-Mahaidi⁶⁾モデルを用いた。

鉄筋には、2 節点線材トラス要素を用い、応力-ひずみ曲線は、Ciampi らによって提案された修正 Menegotto-Pinto モデルを用いた。鉄筋とコンクリートとの付着は完全付着とした。

また、さらに解析結果の精度検証を行うためにオリジナルプログラムに加え、汎用解析プログラム DIANA9⁷⁾でも解析を行った。

2.3 試験体のモデル化

解析での要素分割と境界条件を、スラブ・直交梁付きで偏心のある 04-E115 試験体を例として、図-3 に示す。実験に忠実な要素分割を行うと節点数および要素数が多くなり、解析に長時間を要し、実用的でない。そこで、柱主筋、梁主筋は 2~4 本を 1 本にまとめ、降伏曲げモーメント M_y が等しくなるように設定した。また、柱梁端部の加力部分は応力集中を考慮して、コンクリート強度を上げて補強した。

境界条件と載荷方法については、実験と同様に、まず柱頭に一定軸力を載荷した後、柱脚部の中心一列を鉛直方向に、柱頭を水平二方向(x,y 方向)に拘束し、両梁端部に逆対称の鉛直方向荷重を作用させることによってせん断力を載荷した。

3. 解析結果

3.1 荷重変形関係

図-4 に荷重変形角関係を示す。なお、縦軸は各シリーズによって柱せん断力 Q_c の値が大きく異なるため、実験および解析による柱せん断力 Q_c を靱性指針によるせん断強度の計算値を柱せん断力に換算した $calQ$ で除して無次元化しており、横軸は層間変形角 R としている。

直交部材のない 01-E000,01-E085 試験体の初期剛性は、実験と良好な対応を示したが、直交部材の付いた 04-E000,04-E115 試験体は実験より約 1 割低い結果となった。耐力は直交部材付きの試験体が実験、解析ともに計算値との比が 1.1~1.2 と若干高めとなっている。解析では、全ての試験体で、最大耐力時に接合部コンクリート要素がひずみ軟化域に達しており、その際梁主筋の降伏は見られなかった。よって、直交部材と偏心の有無によらず、実験と同様に接合部の破壊モードは、接合部破壊先行型と判断で

きる。解析では、全ての試験体で耐力の低下があまり見られないが、これは鉄筋が完全付着であることと、実験時での繰り返し载荷による付着劣化、コンクリートのせん断劣化に比べ、解析は単調载荷で、付着劣化を少なめに評価したことによるものと思われる。

3.2 最小主応力分布

図-5 に最大耐力時の接合部水平断面 6 面（鉄筋位置とスラブ上面）の圧縮主応力コンターを示す。いずれの試験体も、圧縮ストラットを形成しているのが確認できる。直交部材および偏心のない 01-E000 試験体は応力が対称に伝達されているのに対し、直交部材付き試験体（04-E000, 04-E115）の圧縮主応力は直交梁とスラブに分散されており、直交部材のないものに比べ、圧縮主応力が若干低くなっていることが確認できる。また、偏心試験体（01-E085, 04-E115）は、偏心側に圧縮主応力が集中している。

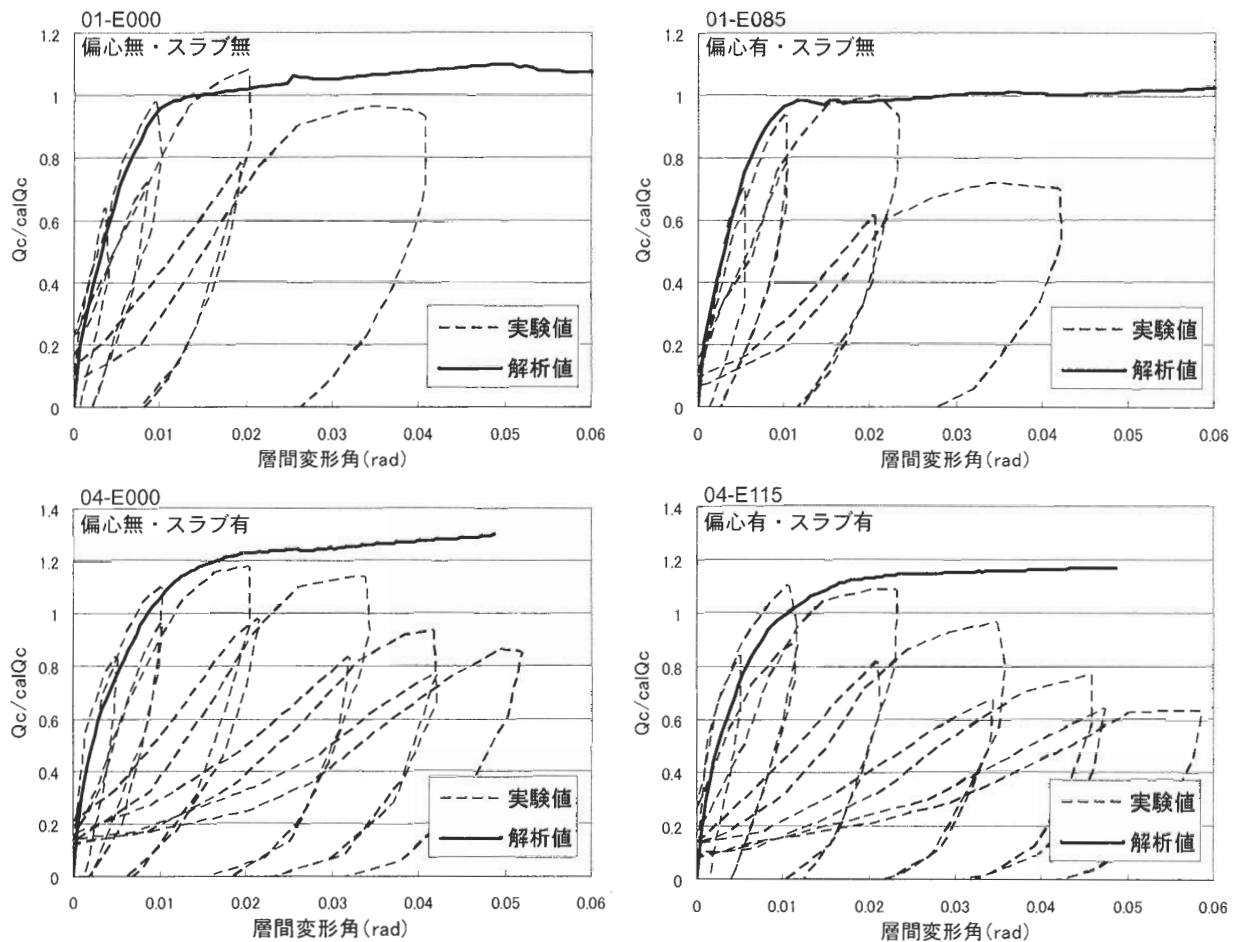


図-4 荷重変形角関係

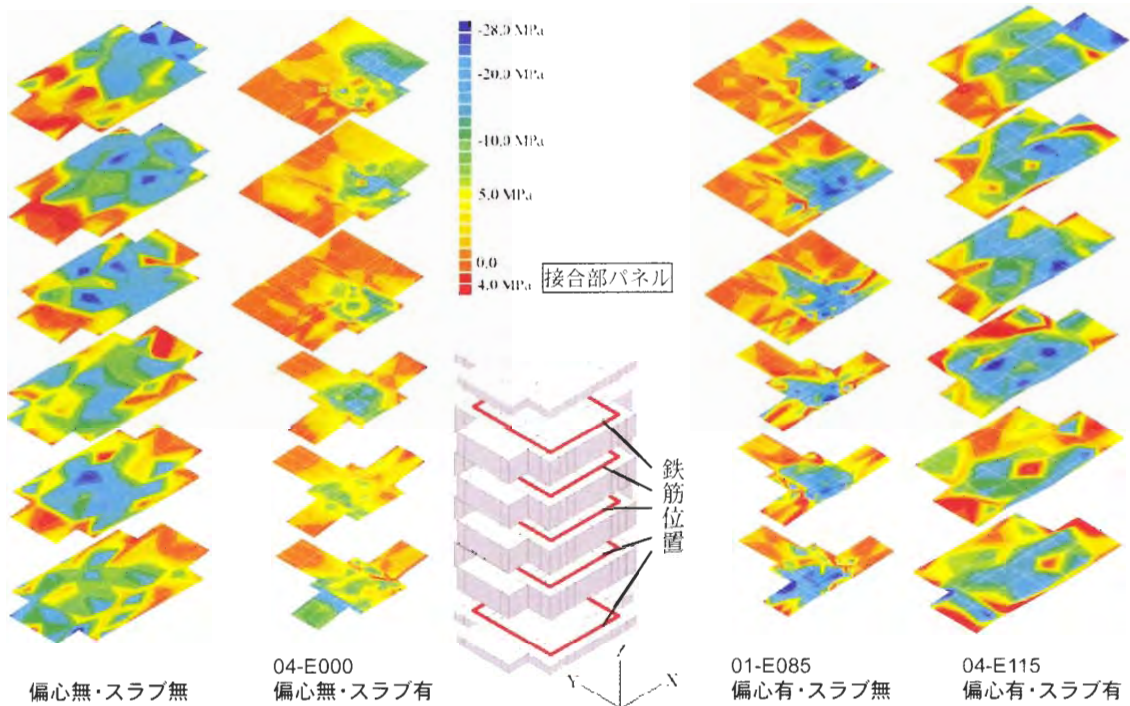


図-5 応力コンター

3.3 振り率

図-6 に接合部せん断力と振り率の関係を示す。振り率は式 (1) による振り各 θ_t の上下方向の変化率として式 (2) より算出した。ここで、 δ_i は各測定点における加力面外方向の変位である。実験での変位計位置を図-2 に示す。実験、解析とともに、偏心のない 01-E000, 04-E000 の 2 体はほとんど振り変形が見られないのに対し、偏心試験体の 01-E085, 04-E115 の 2 体は入力されるせん断力の増大に応じて振り率が増加している。しかし偏心率の大きい 04-E115 と比べて、偏心率の小さい 01-E085 の方が不安定に振れ、更に実験では正側において振り率が 04-E115 を上回っていることから、これは 04-E115 が直交部材によって振り拘束され、変形が抑制されていることによるものと考えられる。

$$\theta_t = \frac{(\delta_A - \delta_B)}{W} \quad (1)$$

$$\omega = \frac{{}_{AB}\theta_t - {}_{CD}\theta_t}{h} \quad (2)$$

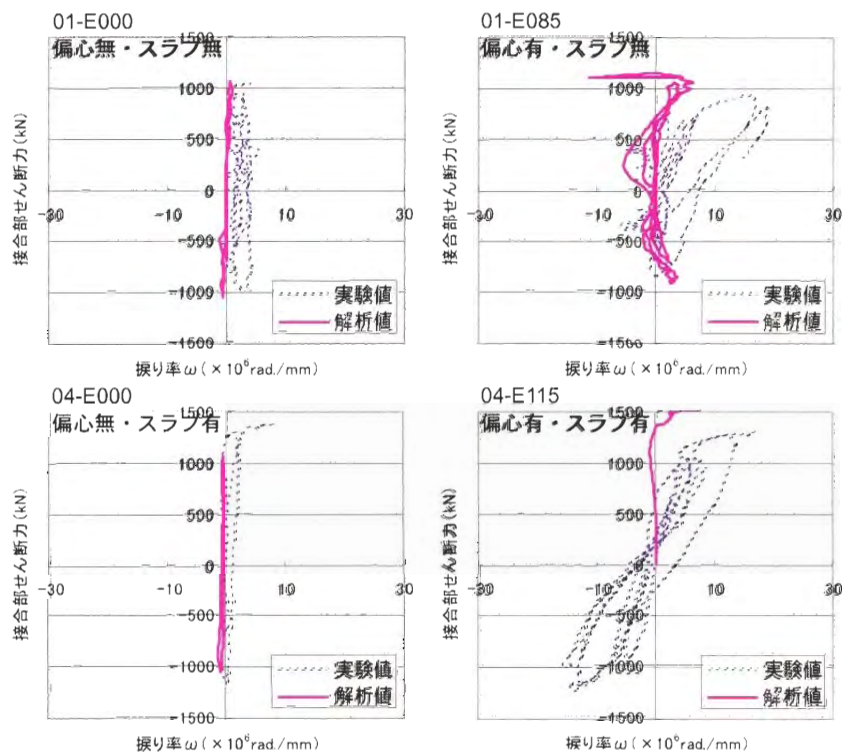
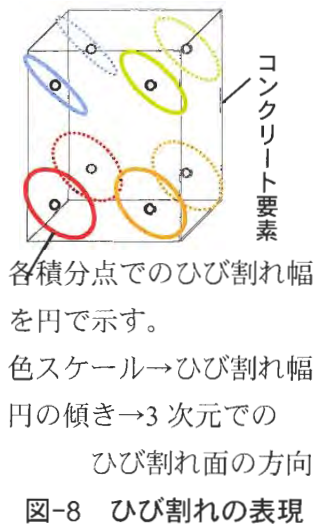


図-6 振り率の推移

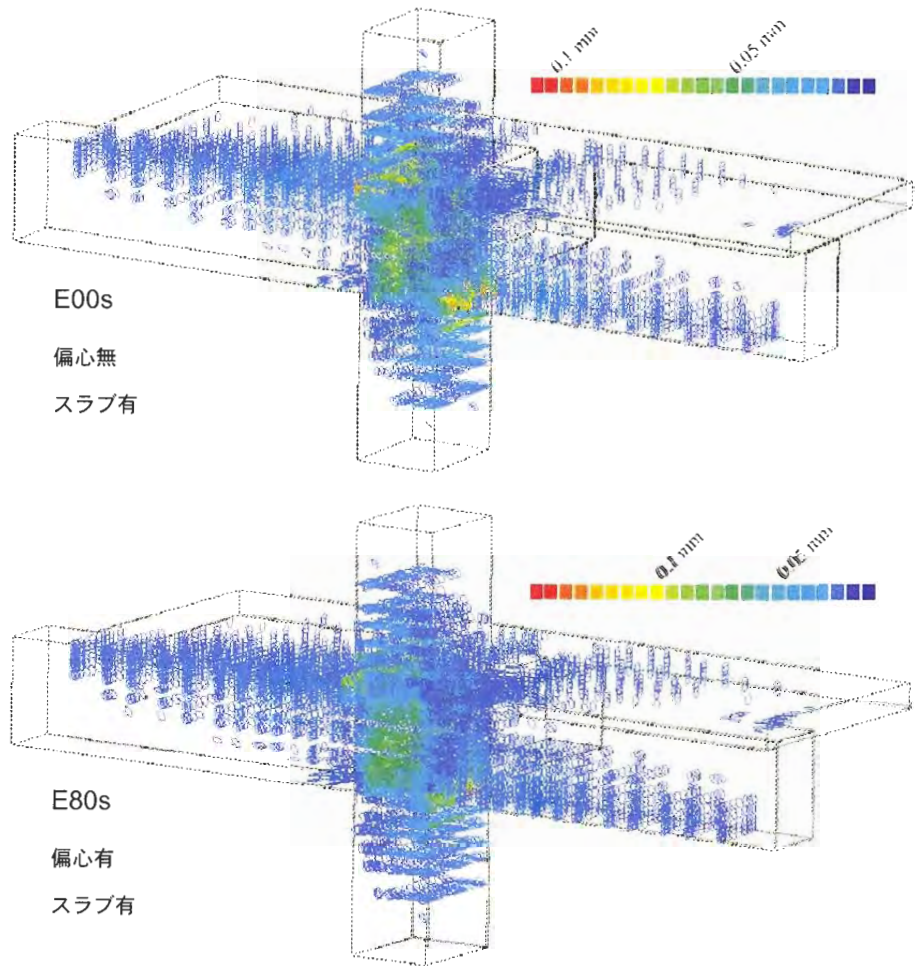


3.4 ひび割れ状況

図-7にDIANA9による解析から得られた3次元でのひび割れ状況を示す。DIANA9では引張主ひずみのベクトル図を用い、ひび割れ方向はベクトルに直交する方向、ひび割れ幅はひずみから算出し、

0.2 mmを超えたものを、発生するひび割れとして、円で表現した。図-8に示すように、各積分点でのひび割れ幅を円で示し、色スケールはひび割れの幅、円の傾きはひび割れの方向となっており、直線に見える積分点には断面に直交方向のひび割れが生じていることを表す。実験では最大強度時においてE00sに比べ、E80sの偏心面のコンクリートの剥落が顕著に見られる。更に、解析でも偏心のないE00sはひび割れが一様に広がっているのに対し、偏心試験体のE80sはひび割れの分布が偏心側に偏っていることなどから、偏心柱梁接合部では非偏心柱梁接合部に比べ、偏心面の接合部パネルに破壊が早期に進展すると思われる。

また、図-9に最大強度時の、DIANA9を用いたひび割れの表現と、オリジナルプログラムによる従来行ってきた、最小主応力方向をひび割れ方向として表現する方法の比較を示す。



DIANA9を用いたひび割れの表現は前述の通りで、オリジナルプログラムでのひび割れの評価は、コンクリート要素の各積分点での最小主応力方向をひび割れの方向とみなし、ベクトル図で表現した。オリジナルプログラムでの表現では、ひび割れの方向や分布状況などは実験時のひび割れ状況と概ね良好な対応であるが、ひび割れ幅の検討に適しているとは言えない。

実験時は両試験体ともに1/200rad.加力時に接合部にひび割れが生じ、1/200rad.時の東面（偏心面）接合部パネル内の最大ひび割れ幅はそれぞれE00sで0.20mm, E80sで1.00mmであった。これに対し、DIANA9での解析の最大耐力時の最大ひび割れ幅はE00sで0.69 mm, E80sで0.92mmと、偏心のない試験体のひび割れ幅を過大評価する結果となったが、ひび割れの顕著に現れる梁端部で最大ひび割れ幅の円がみられ、また接合部パネルの中心にも顕著なひび割れが

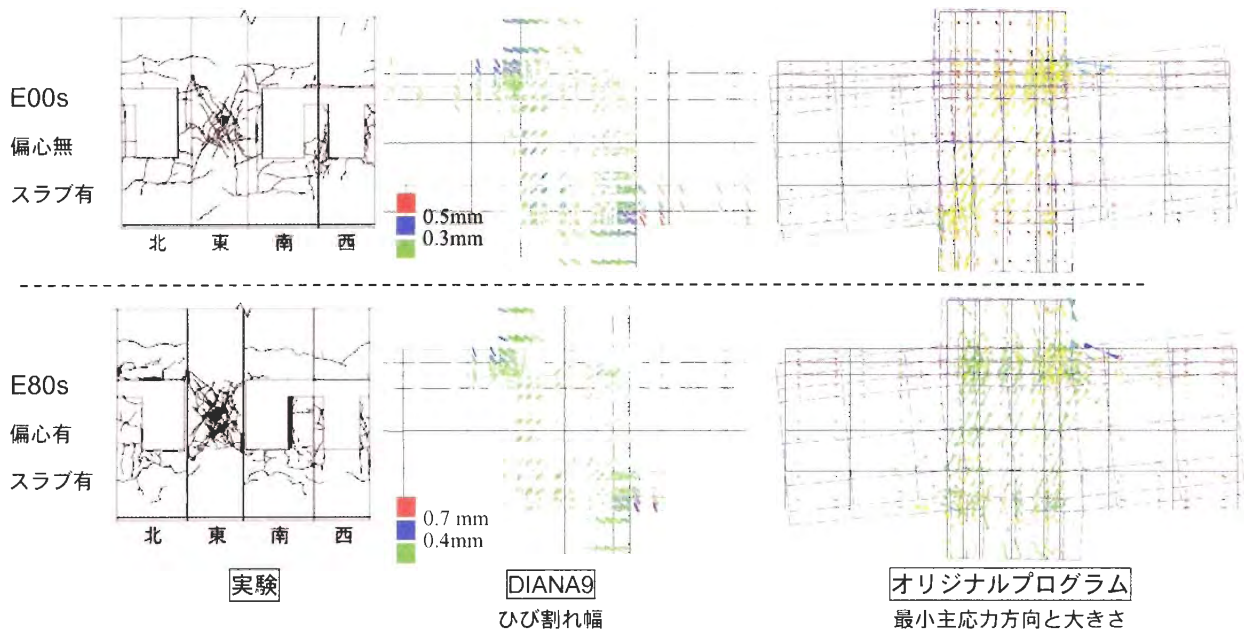


図-7 ひび割れの比較 (最大強度時)

発生することも表現されている。この点において、オリジナルプログラムでの表現よりも有用であると考えられる。

4. まとめ

片側直交梁付き RC 柱梁試験体の解析により、以下の結果を得た。

- (1) 最大耐力はやや高めであったが、初期剛性、破壊モードは概ね実験と良好に対応した。
- (2) 直交部材の影響による振り拘束など、実験で観察された現象に加え、応力分布などを解析的に検討できた。その効果は偏心接合部においても確認できる。
- (3) ひび割れ進展状況の検討から、偏心柱梁接合部は偏心側の損傷が厳しくなることを定量的、視覚的に検討することができた。

【謝辞】本研究を実施するに当たり、工学院大学・広沢雅也名誉教授、同・近藤龍哉助教授には貴重な実験データを提供していただきました。ここに記して深謝いたします。

【参考文献】

- 1) 鈴木公平・岡部紘之・高田知明・佐藤学・近藤龍哉・広沢雅也：片側直交梁・床スラブ付き RC 造偏心柱梁接合部の耐震性能に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），2004 年 8 月
- 2) 高田知明・小黒政史・佐藤学・近藤龍哉・

- 広沢雅也：片側に取り付いた直交部材が偏心接合部に及ぼす影響に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，2005 年
- 3) 小黒政史・高田知明・佐藤学・近藤龍哉・広沢雅也：片側に直交部材の付いた偏心柱梁接合部の耐震性能に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），2005 年 9 月
- 4) 内田和弘・野口博：梁貫通型接合部を有する柱 RC・梁 S 構造 2 層 2 スパン架構の力学的挙動に関する解析的研究，日本建築学会構造系論文集，No.514，pp.207-214，1998
- 5) 余勇・柏崎隆志・野口博：繰返し載荷時の RC 柱部材の性能評価に関する 3 次元 FEM 解析，コンクリート工学年次論文集，第 27 巻、第 2 号，pp.157-162，2005 年
- 6) Al-Mahaidi, R.S.H : Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Members, Report 79-1, Cornell Univ., 1979
- 7) TNO DIANA : DIANA Finite Element Analysis User's Manual Release 9, 2005 年
- 8) 野口博・余勇ほか：RC 構造部材の 3 次元繰返し載荷時の FEM 解析プログラムの開発（その 1, 2），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.67-70，2004 年 9 月