

# 論文 非梁貫通型柱 RC 梁 S 造架構ブレース付き十字型骨組の解析

清水 萌衣\*1・丸田 誠\*2・会田 知章\*3

**要旨**：柱鉄筋コンクリート梁鉄骨(RCS)構造では、梁が接合部を貫通する梁貫通型に対して、梁が接合部を貫通せずダイヤフラム等により応力伝達を行う非梁貫通型の研究は少なく、更にブレース付き非梁貫通型架構の研究は皆無である。そこで、本研究では実験未実施の非梁貫通 RCS ブレース付き骨組の数値実験を行い、ブレースが接合部せん断強度に与える影響を検討した。まず、梁貫通および非梁貫通 RCS 既往実験のシミュレーション解析を通して、解析の有効性を確認した後、非梁貫通 RCS ブレース付き骨組解析を行い、接合部強度がブレース効果を考慮した既往せん断強度式で、概ね評価できることが分かった。

**キーワード**：柱 RC 梁 S 構造, 非梁貫通型, ブレース, FEM 解析

## 1. はじめに

近年、柱が鉄筋コンクリート (RC) 構造, 梁が鉄骨 (S) 造の混合構造が普及してきた。既往の研究では、鉄骨梁が柱梁接合部 (以下, 接合部) を貫通する梁貫通型と、梁が接合部を貫通せずダイヤフラム等により応力伝達を行う非梁貫通型に大別され、梁貫通型より、非梁貫通型の実験・解析等の知見が少ない。さらに柱断面縮小の観点からブレース等の耐震要素を付加することが一般的に行われており、プレキャスト (PCa) を考えると接合部の中心とブレースの軸線とが偏心することがあり、実験等で確認され使用される場合が多い。

筆者らは、非梁貫通型柱 RC 梁 S 架構の新しい形式(図-1)について実験及び弾塑性有限要素解析 (以下 FEM) を用いた検討を行い、実用化してきた<sup>2)3)</sup>。

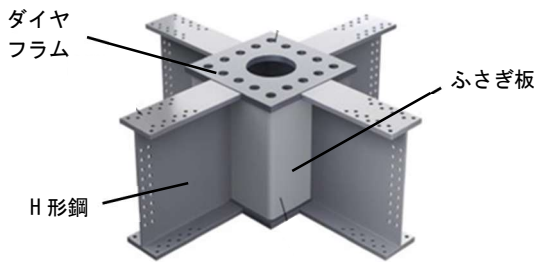


図-1 非梁貫通型接合部<sup>2)</sup>

しかし、ブレースが付加した接合部の耐震性能については実験を含めて検討がなされていない。梁貫通型 RCS でもブレース付きの実験数は多くない。かつ非梁貫通型 RCS 架構について、RC 柱を PCa とする場合、接合部の中心とブレースの軸線がずれ、その接合部内にウェブが無くその性状は明確でない。そこでブレース付き十字型骨組の耐震性能を解析によって明らかにし、ブレースからの軸力が接合部強度に与える影響について検討することを目的とする。

まず、既報<sup>4)</sup>の非梁貫通型 RCS 十字形骨組および小澤ら<sup>5)</sup>によるブレースを付加した梁貫通型 RCS 十字形骨組の計 2 体を対象に、解析法の検証も含め FEM 解析によりシミュレートする。文献<sup>4)</sup>では、実験と同様に梁端に載荷させたが、今回はブレース設置のため、載荷フレームを考慮したモデルを用い載荷する。その後、小澤らの試験体のシミュレーション後、これと同様なブレースが付いた、実験未実施である非梁貫通型 RCS 十字形架構について数値実験として解析を行う。

## 2. 解析対象とした試験体の概要

試験体は約 1/2 縮尺の十字形骨組で、表-1 に試験体一覧を、図-2 にブレースのない実験実施済の HJ02 の試験体概要を示す。試験体の材料諸元は、コンクリ

表-1 試験体一覧

試験体名	柱				梁	接合部			ブレース		
	断面 mm	Fc N/mm <sup>2</sup>	主筋	帯筋	断面	断面	Fc N/mm <sup>2</sup>	鋼管	ダイヤフラム	断面	θ
										mm	度
BR1*1	400 × 400	36	16-D22	4-D6 UHD685@40	400 × 125 × 9 × 22	400 × 125 × 6 × 22	36	SS400	-	70 × 70 × 9	54.5
HJ02*2		30	16-D25	4-D6 SD785@40	400 × 200 × 12 × 16	-	30		HT590	-	-
BJ01*3										70 × 70 × 9	54.5

\*1 小澤らのブレース付き試験体 \*2 丸田らのさや管型十字型試験体 \*3 数値実験の試験体

\*1 静岡理科大学 理工学部建築学科 (学生会員)

\*2 静岡理科大学 理工学部建築学科 教授 工博 (フェロー会員)

\*3 東京鉄鋼 (株) 技術部 工修 (正会員)

表-2 材料諸元 (コンクリート)

試験体名	弾性係数	圧縮強度	ポアソン比
	kN/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
BR1*	30.4	48.2	0.181
HJ02	28.6	32.1	0.206
BJ01			

\*接合部コンクリート

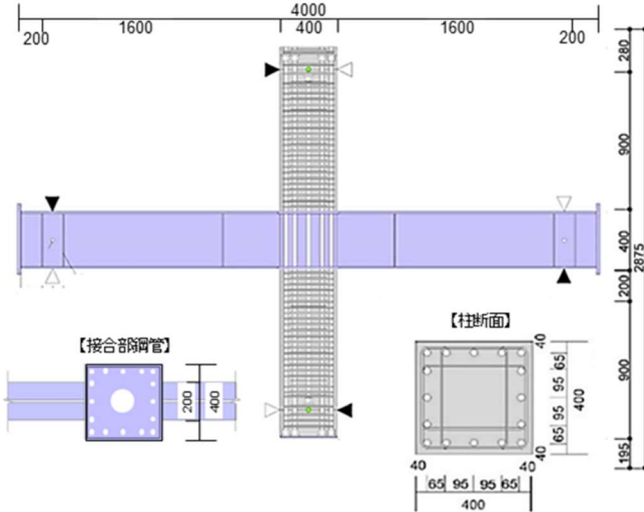


図-2 試験体概要

ートを表-2、鋼材を表-3に示す。梁と柱の部材せいは同寸法(400mm)であり、破壊形式は全て接合部せん断破壊型である。

BR1は、小澤らによって実施された実験で、接合部内をウェブとフランジが貫通している梁貫通型ブレース付き十字形骨組で、接合部の芯とブレース芯が偏心している。試験体詳細は文献5)を参照いただきたい。加力方法は、4ピンのロ形加力フレームに試験体の柱梁反曲点をピン接合し、加力梁に層間変形角  $R = \delta / h$  ( $h$ : 柱高さ)で制御し、正負交番繰返し载荷を行った。

HJ02の接合部はダイヤフラムと鋼管(ふさぎ板)で構成されている。加力方法は、柱に所定軸力を作用させた後、梁の両端に、層間変形角  $R = \delta / L$  ( $\delta$ : 梁端鉛直変位,  $L$ : 梁左右加力点間距離)で梁を制御し、正負交番繰返し载荷を行った。詳細は文献4)を参照されたい。

### 3. 解析概要

#### 3.1 試験体のモデル化

BR1とHJ02に対してFEM解析を行い、その妥当性を確認する。図-3にHJ02のモデル図を示す。試験体の対称性を考慮して奥行方向1/2モデルとしている。そのため、境界面においてはY方向の水平変位及びX、Y方向の回転を拘束した。HJ02をBR1と同様の载荷方法とし、両試験体とも、図-3のように柱梁の反曲点と加力フレ

表-3 材料諸元 (鋼材)

鋼材種	鋼種	寸法, 径	降伏応力	対象試験体
			N/mm <sup>2</sup>	
鋼管	SS400	PL2.3	361	BR1
		PL6	324	HJ02, BJ01
鉄骨梁 (フランジ)	HT590	PL22	426	BR1
	HT590	PL16	540	HJ02, BJ01
鉄骨梁 (ウェブ)	SN400B	PL9	352	BR1
	HT590	PL12	540	HJ02, BJ01
ウェブ (接合部)	SN400B	PL6	387	BR1
ダイヤフラム	HT590	PL19	533	HJ02, BJ01
柱主筋	SD490	D22	518	BR1
	SD980	D25	1024	HJ02, BJ01
帯筋	UHD685	D6	750	BR1
	SD785	D6	990	HJ02, BJ01
ブレース	SN400B	PL9	331	BR1, BJ01

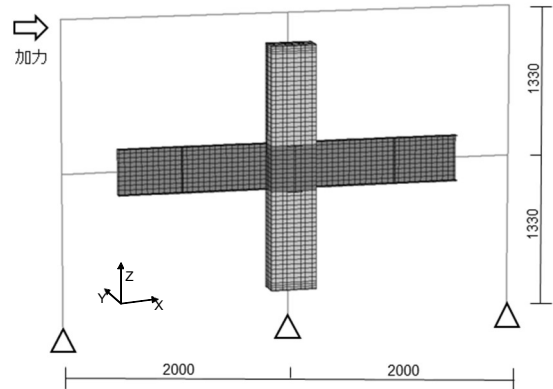
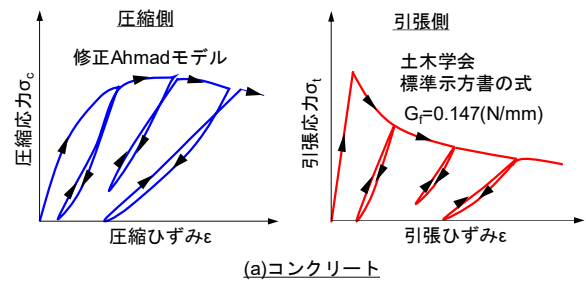
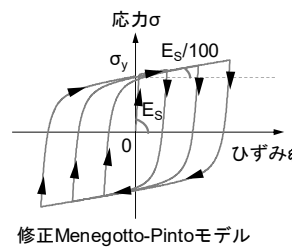


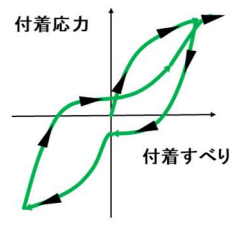
図-3 モデル図 (HJ02)



(a)コンクリート



(b)鋼材



(c)付着すべり~応力関係

図-4 材料構成則

ームをピン接合し、加力フレーム下端、下柱の反曲点、ブレース端部はピン支持とした。

コンクリートは六面体要素、主筋はトラス要素、鉄骨梁、鋼管およびダイヤフラムは四辺形積層シェル要素でモデル化し、帯筋は分散型の埋込鉄筋とした。なお、ブレースは四辺形要素とし、座屈は考慮しない。主筋-コンクリート間、鋼管および接合部ウェブ-コンクリート間の付着すべりは、厚さゼロとした接合要素を挿入することにより考慮している。またダイヤフラムと接合部ウェブの上下にも接合要素を挿入し、ダイヤフラム、接合部ウェブ-コンクリート間の離間を表現している。

### 3.2 材料構成則

コンクリートは、等価一軸ひずみに基づく直交異方性モデル<sup>6)</sup>で表現する。主応力-等価一軸ひずみ関係は圧縮側で三軸応力を考慮した修正 Ahmad モデル<sup>7)</sup>、軟化域で要素寸法依存性を考慮した Nakamura-Higai モデル<sup>8)</sup>を採用した。引張側ではひび割れが発生するまで線形弾性とし、引張軟化域特性を土木学会コンクリート標準示方書の式<sup>9)</sup>により、破壊エネルギーは 0.147N/mm とした(参考文献 9)を参照)。繰り返し応力下の履歴特性は曲線で表現するモデルとする<sup>10)</sup>。またコンクリートのひび割れは、非直交分散ひび割れモデル<sup>11)</sup>で表現した。鋼材の応力-ひずみ関係は Ciampi らの修正 Menegotto-Pinto<sup>12)</sup>モデルで表現し、包絡線は bi-linear を仮定し、降伏後の 2 次勾配は初期剛性の 1/100 とした(図-4 (b))。鋼管、接合部ウェブ-コンクリート間、およびダイヤフラム、

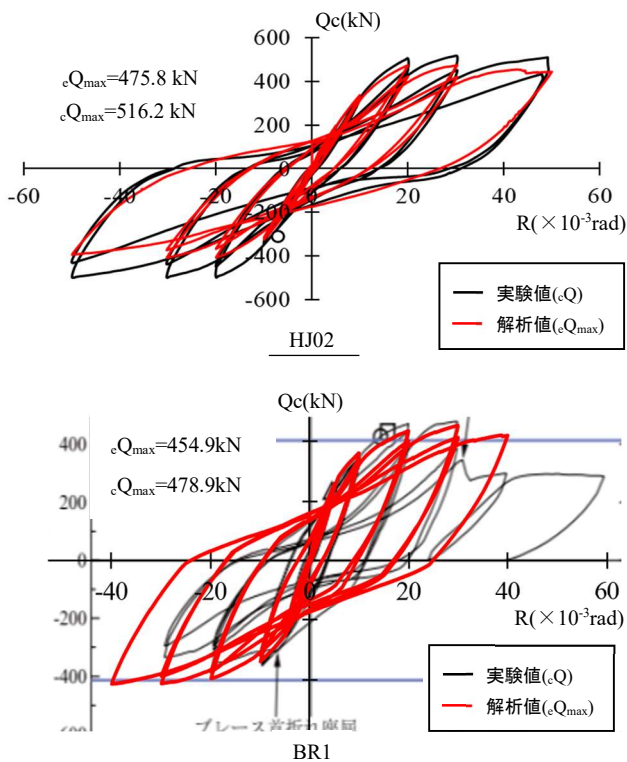


図-5 荷重-変形関係(数値実験)

接合部フランジとコンクリート間の付着特性は、佐藤ら<sup>13)</sup>の研究に基づいて付着強度を設定した。主筋-コンクリート間には CEB モデル<sup>14)</sup>を採用した。

### 3.3 解析結果

図-5 は、実験における荷重-変形関係に解析結果を加えたものを示している。縦軸は層せん断力  $Q_c$ 、横軸は層間変形角  $R(\times 10^{-3}\text{rad})$  である。HJ02 は、実験<sup>4)</sup>と同様に解析でも最大強度発揮後もほとんど耐力低下がなく、最大強度との比較は、解析値/実験値が 0.92 で概ね一致している。ブレース付き十字形 BR1 について、文献 5) で示す荷重-変形関係の上に解析結果を重ねている。実験では  $R=30 \times 10^{-3}\text{rad}$  に最大耐力に達し、 $R=-20 \times 10^{-3}\text{rad}$  の 1 サイクル目に首折れ座屈が生じるまで安定した紡錘形の履歴性状を示した。なお、 $R=30 \times 10^{-3}\text{rad}$  の 2 サイクル

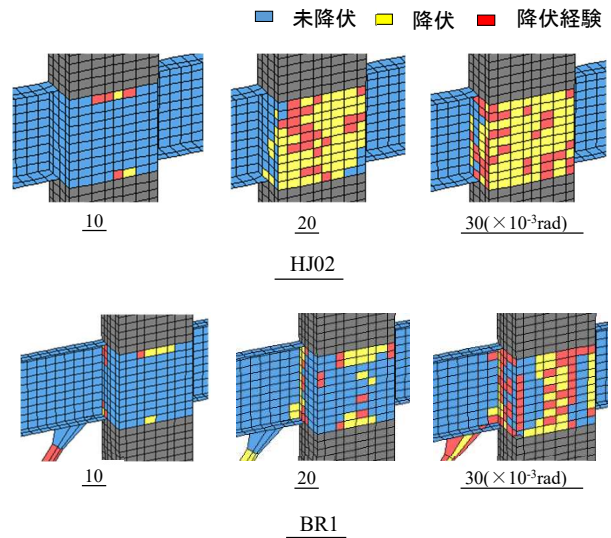


図-6 鋼材の降伏状況(解析)

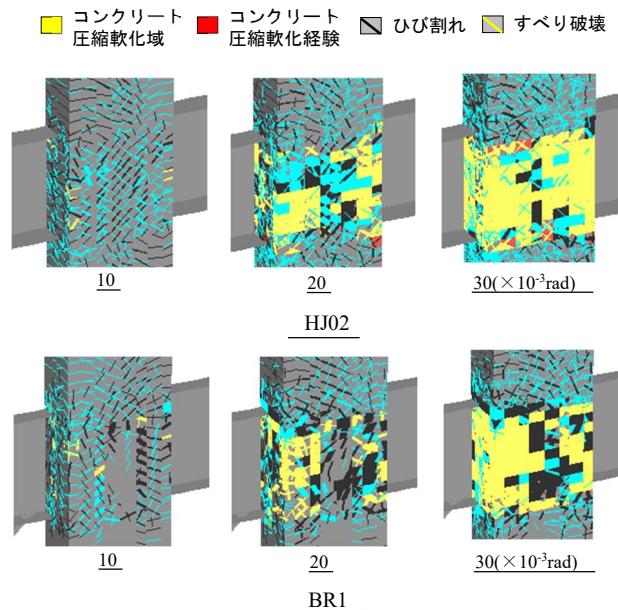


図-7 ひび割れ状況(解析)

目にピン支持側のブレース端部が破断している。解析でも同サイクルで最大強度を迎え、その後ほとんど耐力低下がなく、最大強度との比較は、解析値/実験値が 0.94 で概ね一致している。また、実験と解析で初期剛性および残留変形の若干の乖離があり、解析のブレース支持やコンクリートと鋼管の付着条件によるものと考えられるが、両試験体とも概ね実験と同様の履歴性状を示した。

解析結果を詳細に見るため、鋼材の降伏状況を図-6に、コンクリート表面のひび割れ状況を図-7に示す。凡例について既に降伏・圧縮軟化済みの箇所を経験とする。HJ02は、解析でも実験と同様に、 $R=10 \times 10^{-3} \text{rad}$ にふさぎ板の上下端で降伏がみられ、 $R=20 \times 10^{-3} \text{rad}$ では実験と同様に全体的に降伏した。この際のひび割れ状況を見ると、ふさぎ板の降伏に伴って接合部内の圧壊の傾向が確認できる。BR1は実験では $R=5 \times 10^{-3} \text{rad}$ でブレースが軸降伏し、 $R=15 \times 10^{-3} \text{rad}$ 付近で接合部ウェブおよびふさぎ板が降伏した。 $R=10 \times 10^{-3} \text{rad}$ にS梁下フランジ下面、 $R=20 \times 10^{-3} \text{rad}$ でS梁上フランジ上面のコンクリートに圧壊の傾向が見られた。解析では $R=5 \times 10^{-3} \text{rad}$ でブレースが降伏し、 $R=10 \times 10^{-3} \text{rad}$ で実験と同様の箇所に降伏が確認された。解析でのひび割れ状況を見ると、実験と同様に $R=20 \times 10^{-3} \text{rad}$ までにS梁フランジ上下面でコンクリートの圧壊の傾向が見られた。

接合部コンクリートの圧縮応力の伝達状況を確認するため、図-8にHJ02とBR1の $R=20 \times 10^{-3} \text{rad}$ の接合部コンクリートの主応力度分布を示す。接合部外側は正面から、接合部内側は裏面から見ている。HJ02に関して、梁フランジからダイヤフラムを介して接合部内全体に伝達していることが分かる。BR1は、文献5)では接合部コンクリートに斜め圧縮ストラットが形成されており、ブレース付加側では圧縮応力を示す赤色の範囲が狭く、ブレースの軸力の作用により圧縮応力が小さくなっていると報告されている。ここでも同様の結果がみてとれる。

BR1について、ブレース軸力が接合部に与える影響を検討するため、図-9に接合部に作用する水平せん断力の式<sup>5)</sup>を用いたパネルモーメント-変形関係を示す。文献5)で示すパネルモーメント-変形関係の上に解析結果を重ねており、 $jM_u$ とは、終局耐力の計算値<sup>5)</sup>である。ここでの履歴ループの乖離は、解析で各層間変位での柱軸力の最大値をとっていることが考えられる。文献5)では、最大耐力がブレースなし試験体と同様に $jM_u$ を上回る値を示し、ふさぎ板、接合部ウェブ降伏時のパネルモーメントと終局耐力がほぼ一致していると報告されている。解析では正側において同様の傾向を示していることから、ブレース軸力が作用しても接合部は想定通りの耐力を発揮していることが再現できている。

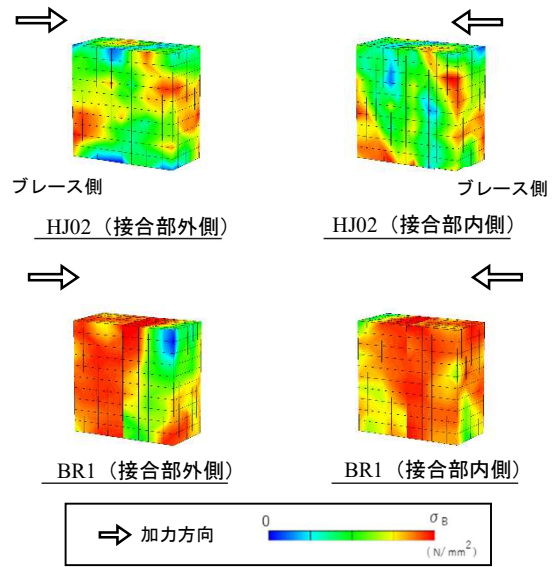


図-8 接合部コンクリートの主応力分布（解析）

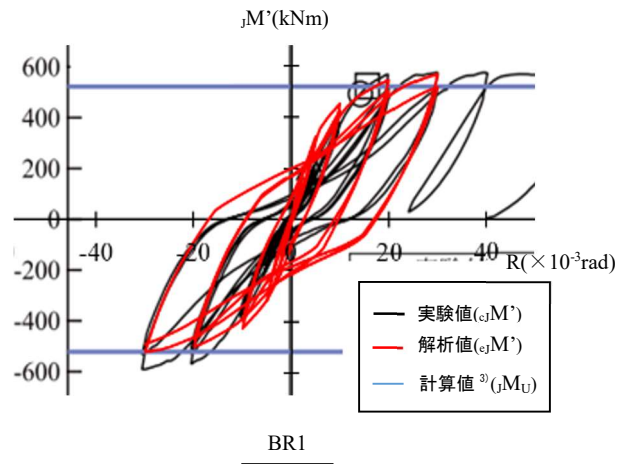


図-9 パネルモーメント-層間変形角関係 (BR1)

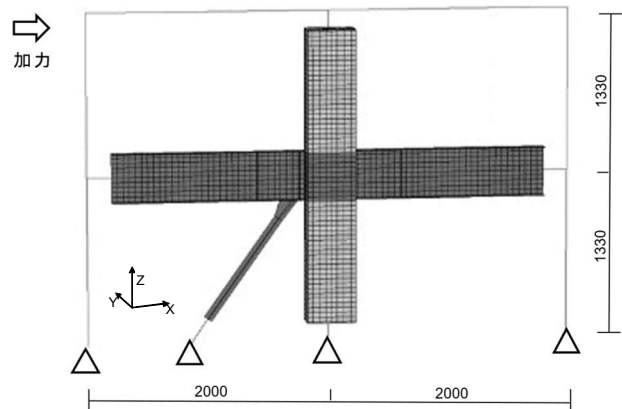


図-10 モデル図 (BJ01)

以上を鑑み、BR1、HJ02に対する解析結果は、実験と同様に接合部せん断破壊型を示した。

以上より、解析は実験を概ね良好にシミュレーションできていることから、その妥当性が確認された。

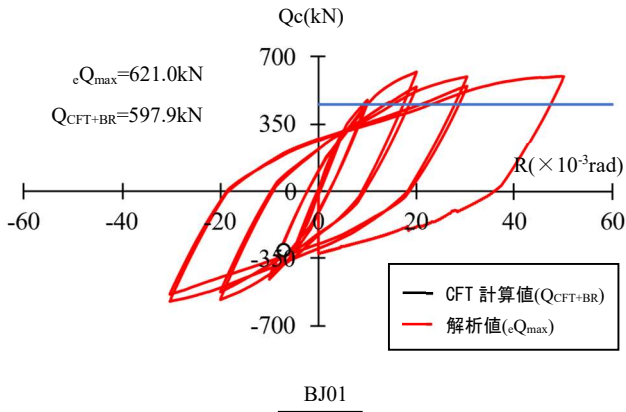


図-11 荷重-変形関係(数値実験)

#### 4. 非梁貫通型 RCS ブレース付き接合部の解析

これまで未実施の、ブレース付き非梁貫通型 RCS 構法の十字形架構について FEM 解析を用い、HJ02 に BJ01 と同サイズのブレースを取り付けた場合の解析検討を行う。

##### 4.1 解析概要

前章で示したブレース付き BR1 のモデルを参考に、図-10 に HJ02 に接合部の中心とブレースの軸線とが 54.5 度偏心したブレースを取り付けたモデルを BJ01 として示す。材料諸元と材料構成則は、ブレースに関しては BR1 を、RC や鋼材等は前章と同様である。

##### 4.2 解析結果

BJ01 の荷重-変形関係の解析結果を図-11 に示す。計算値は、CFT 指針式<sup>15)</sup> にブレースの影響を考慮した式(1)を用いた。

$$pQ_U = p_s Q_U + p_c Q_U + p_b Q_U \quad (1)$$

ここで、 $p_s Q_U$  : 鋼管降伏耐力、 $p_c Q_U$  : コンクリート降伏耐力、 $p_b Q_U$  : ブレース降伏軸力である。BJ01 は計算値 597.9kN に対し、解析値の最大強度は 621.0kN で計算値を上回り、解析値/計算値は 1.03 となった。図-12 に鋼材とコンクリートの解析結果を示す。解析結果の降伏状況を見ると、 $R=10 \times 10^{-3} \text{rad}$  でブレースが降伏し、ふさぎ板の上端で降伏がみられた。 $R=20 \times 10^{-3} \text{rad}$  で全体的に降伏が確認できた。その際のひびわれ状況から、ブレースなしの HJ02 と同様にふさぎ板の降伏に伴って接合部内の圧壊の傾向が確認できる。

図-13 に BJ01 の  $R=20 \times 10^{-3} \text{rad}$  の接合部コンクリートの主応力度分布を示す。十字形架構 HJ02 と同様に接合部コンクリートに斜め圧縮ストラットが形成されている。さらにブレース付加側では、HJ02 と比較して寒色の範囲が多く、ブレースの軸力の作用により圧縮応力が小さくなっていることから圧縮応力が低減していると考

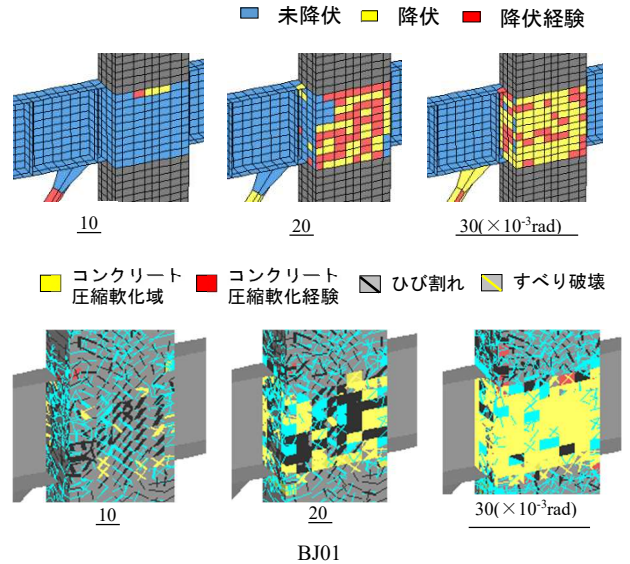


図-12 降伏状況・ひび割れ状況 (BJ01)

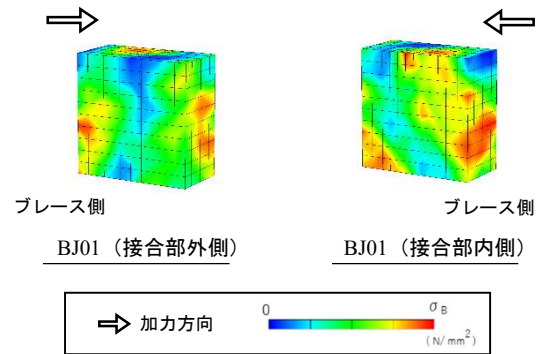


図-13 接合部コンクリートの主応力分布(解析)

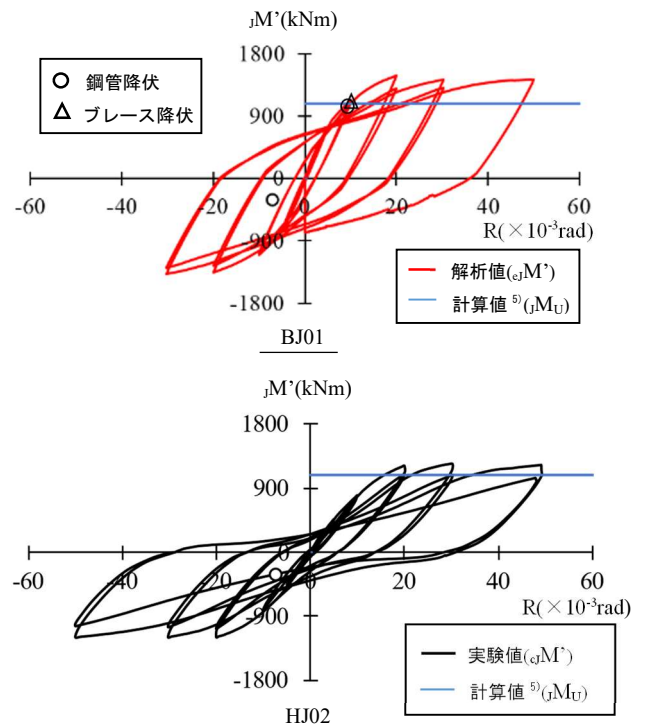


図-14 パネルモーメント-層間変形角関係 (BJ01)

えられる。ブレースが取りつく場合でも、ダイヤフラムとふさぎ板で接合部内に応力伝達した事が確認できた。

図-14 にパネルモーメント-変形関係を示す。接合部に作用する水平せん断力の式<sup>9)</sup>を用いており、 $\mu M_u$  は既往実験の終局耐力計算値<sup>4)</sup>である。また、比較のため HJ02 の結果も示す。BJ01 の最大耐力は HJ02 以上となった。ただし BJ01 と HJ02 は  $\mu M_u$  を上回る値を示している。解析では、ふさぎ板降伏時のパネルモーメントと終局耐力がほぼ一致していることが確認できた。よって、ブレース軸力が作用しても BJ01 の接合部は HJ02 と同様な破壊性状を示しているといえる。

以上より、接合部の中心とブレースの軸線とが偏心してブレースが取りついた RCS 骨組の解析から、ブレースは接合部応力低減に効果があった。ただし、接合部の最大耐力にはほとんど影響がなく、接合部せん断強度はブレースを考慮した CFT 指針式に基づく評価式で概ね安全側に評価することができた。ブレースが偏心していても接合部強度への影響は小さかった。

## 5. まとめ

非梁貫通型柱 RC 梁 S 構造のブレースを有する接合部の耐震性能の検討を目的に、実験のシミュレーション解析と十字形ブレース付き骨組の数値実験を行い、以下の知見を得た。

- (1) 小澤ら<sup>9)</sup>によるブレース付き十字形骨組と既往<sup>4)</sup>十字形骨組に対して FEM によるシミュレーション解析を行った結果、実験の復元力特性と概ね同等の結果が得られ、鋼板の降伏状況なども一致したことから、解析は実験を良好に模擬できた。
- (2) FEM によるコンクリートの圧縮応力伝達状況から、ブレース付き骨組および既往<sup>4)</sup>十字形骨組は接合部に圧縮ストラットが形成されており、両試験体において内部性状を良好に再現できている。
- (3) 解析より、非梁貫通型 RCS 十字形ブレース付き骨組は、ブレースおよび鋼板やコンクリートの損傷状況から、ブレースは接合部応力低減に効果があった。ただし、接合部の最大耐力にはほとんど影響がなかった。
- (4) 非梁貫通型 RCS 接合部せん断強度はブレースを考慮した CFT 指針式に基づく評価式で最大強度を概ね安全側に評価することができた。

## 謝辞

日本大学建築学科長沼一洋教授には解析で、SK サービス永井覚代表には全般に、多くのご助言をいただきました。ここに感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート柱・鉄骨梁混合構造設計指針，2021
- 2) 池沼良章，丸田誠，永井覚，田口千貴：非梁貫通型接合部を有する柱 RC 梁 S 架構骨組に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.2，pp1117-1122，2019
- 3) 清水萌衣，丸田誠，会田知章：さや管型柱 RC 梁 S 骨組の構造性状（その 11），日本建築学会大会学術講演梗概集，構造III，pp.1295-1296，2022.9
- 4) 丸田誠ほか：さや管型柱 RC 梁 S 骨組の構造性状（その 1）～（その 5），日本建築学会大会学術講演梗概集，構造III，pp.1471-1480，2018.9
- 5) 小澤潤治ほか：ブレースを有する柱 RC 梁 S 造十字形接合部の構造性能（その 1）～（その 2），日本建築学会大会学術講演梗概集，構造III，pp.1453-1456，2019.9
- 6) Darwin, D. and Pecknold, D.A. : Nonlinear Biaxial Stress - Strain Law for Concrete, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.103, No.EM2, pp.229-241, April 1977
- 7) 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，第 474 号，pp.163-170，1995.8
- 8) Nakamura, H, Higai, T : Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Seminar on Post-to Seismic Load, JCI-C51E, Vol.2, pp.259-272, 1999.10
- 9) 土木学会，コンクリート標準示方書「構造性能照査編」，2002
- 10) 長沼一洋，大久保雅章：繰返し応力下における鉄筋コンクリート板の解析モデル，日本建築学会構造系論文集，第 536 号，pp.135-142，2000.10
- 11) 長沼一洋，栗本 修，江戸宏彰：FEM による鉄筋コンクリート壁体の正負繰返し及び動的解析，日本建築学会構造系論文集，第 544 号，pp.125-132，2001.6
- 12) Ciampi, V., et al. : Analytical Model for Concrete Anchorages of Reinforcing Bars Under Generalized Excitations, Report No.UCB/EERC-82/23, Univ. of California, Berkley, Nov., 1982
- 13) 佐藤政勝ほか：平鋼および突起付鋼材とコンクリートの付着特性，2005.9
- 14) CEB : CEB-FIP Model Code 1990 , Bulletin D' Information, N.213/214, 1990
- 15) 日本建築学会：コンクリート充填鋼管構造設計施工指針，2008.10