

論文 梁端部に機械式継手を設けた柱梁接合部架構の静的載荷実験

杉本 訓祥*1・増田 安彦*1・勝俣 英雄*1・森岡 徹*2

要旨：RC超高層建物の施工性向上および短工期化を目的として、柱梁接合部をプレキャスト化することを基本とし、梁主筋の機械式継手を柱梁接合部に比較的近い場所に配置したり、柱梁接合部を貫通して梁主筋を接続したりする工法を開発し、柱梁接合部を含む部分架構を対象として構造性能確認実験を行った。実験結果を既報の結果も含めて検討した結果、開発した工法は、在来工法と同等程度の耐力・変形性能を有していた。特に、柱梁接合部に梁主筋貫通孔としてシース管を配置し、空隙にグラウト充填した工法は、在来工法と同等以上のエネルギー吸収能力を有していた。

キーワード：機械式継手，主筋貫通孔シース，等価粘性減衰定数

1. はじめに

超高層鉄筋コンクリート造（以下、RC造）建物の施工では、プレキャスト化（以下、PCa化）工法が採用されることが一般的で、施工性の向上、短工期化などが求められている。RC造の工期短縮に対しては、コンクリート打設がクリティカルパスとなるため、柱だけでなく、柱梁接合部もPCa化することが求められる。また、柱梁接合部のPCa化を計画する際、2方向の梁が取り付けられた状態の柱梁接合部は、運搬可能な寸法の制約から、2方向のどちらか一方については、鉄筋継手位置をできるだけ接合部に近づける必要がある。このような背景から、筆者らは、これまでに、接合部PCa化のための施工性の検証や、PCa化した部材の構造性能確認実験などを行い^{1),2)}、上述のような要求に応えるため、図-1に示すような施工方法を開発してきた。本報では、特に、梁主筋の継手位置を対象とした十字型柱梁接合部架構の構造性能確認実験について述べる。さらに、既報³⁾に述べた実験結果も含めて、部材の靱性能について検証を行う。

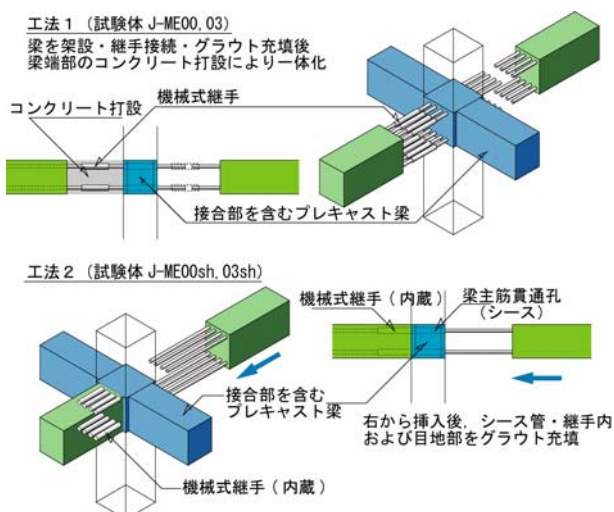


図-1 プレキャスト工法概念図

2. RC柱梁接合部架構の構造性能確認実験

2.1 試験体計画

試験体は合計5体とした。試験体一覧を表-1に、使用材料の特性を表-2に示す。試験体配筋詳細の例を図-2に示す。在来工法による試験体J-00を基準試験体とし、同一の形状・配筋で、PCa化を模擬して4体計画した。すなわち、左右の梁について、柱梁接合部に近い領域に、左右の梁ともにモルタル充填式スリーブ継手（以下、機械式継手という）を設け、梁危険断面からの距離を変数として2体を計画した（J-ME00およびJ-ME03）。また、一方の梁に機械式継手を設け、柱梁接合部に内蔵して梁主筋を貫通するシース管を配置し、他方の梁から突き出した梁主筋を貫通して差し込む工法³⁾を模擬した試験体（以下、シース管を設けた試験体、という）を2体計画した（J-ME00shおよびJ-ME03sh）。

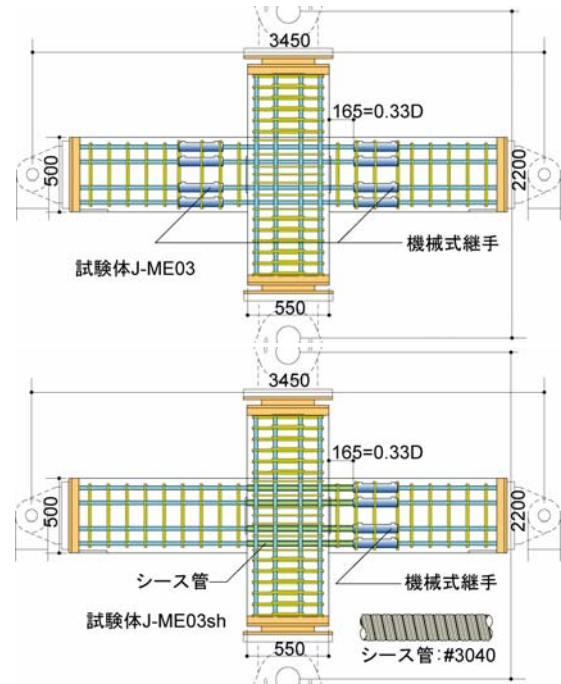


図-2 試験体配筋・形状

*1 (株)大林組 技術研究所 (正会員)

*2 (株)大林組 第二特定工種工事事務所 (正会員)

部材断面は、梁降伏が先行するように計画した。すなわち、柱梁耐力比を 2.0 程度とし、靱性指針⁴⁾に従って接合部せん断破壊が先行しないようにした。なお柱梁接合部には、7組のせん断補強筋（ ϕ -D10）を配置した。

加力は、図 - 3 に示す装置により静的正負交番繰返し载荷とした。また、軸力は軸力比 0.15 の一定軸力とした。また、試験体上下クレビス中心の相対水平変位を計測し、クレビス中心間距離（=2200mm）で除した値を層間変形角 R と定義し、制御変形角とした。载荷は、 $R = \pm 1/200$ 、 $1/100$ を 2 回ずつ繰り返した後、 $R = 1/100$ ずつ振幅を増加させ、 $R = 1/25$ の後は、 $R = 1/17$ （6%）まで载荷する計画とした。

2.2 実験結果

(1) 破壊経過

各試験体の損傷状況を図 - 4 に、荷重～変位関係を図 - 5 に示す。いずれの試験体も、層間変形角 $R = 1/200$ の加力サイクルにおいて、正負ともに梁の曲げひびわれおよび柱梁接合部の斜めひびわれが発生した。基準試験体 J-00 は、その後、 $R = 1/100$ から $R = 1/50$ の加力サイクルにかけて、梁主筋の降伏が確認された。その後、柱梁接合部および梁に多数のひびわれが発生し、柱にもひびわれが進展しながら $R = 1/33$ および $R = 1/25$ の加力サイクルでは耐力低下とともに柱梁接合部および梁の損傷が進み、 $R = 1/17$ までに最大耐力の 80% 以下まで耐力低下し、加力を終了した。梁両端に機械式継手を配置した試験体 J-ME00 および J-ME03 は、J-00 とほぼ同様の損傷経過となった。シース管を設けた試験体 2 体は、 $R = 1/100 \sim 1/50$ にかけて梁主筋の降伏とわずかに耐力低下が進んだが、荷重～変位関係上のスリップは見られず、梁端部の損傷より接合部においてかぶりコンクリートの剥落（特に右側のかぶりの剥落）などの損傷が激しい結果となった。

(2) 耐力評価

実験結果一覧を表 - 3 に示す。梁曲げ耐力は、平面保持を仮定した断面解析により求めた。梁せん断耐力および柱梁接合部のせん断耐力は、靱性指針により求めた。なお、各部材の破壊耐力は層せん断力に換算した。いずれの試験体も、梁曲げ降伏とした計算結果とよく対応しており、PCa 化工法の違いによる耐力への影響は見られない。これらの PCa 化工法によっても、在来工法と同等の耐力評価が妥当であるといえる。

(3) 主筋の歪性状

各試験体の主筋の歪度分布を図 - 6 に示す。図は、 $R = 1/100$ および $R = 1/50$ 時の上端 1 段筋、下端 1 段筋について示した。いずれの試験体も、梁端の 1D（D: 梁せい = 500mm、横軸の 775mm が 1.0D 位置）付近まで降伏歪に達していることがわかる。継手位置を 0.0D とした試験体は、継手の両端が降伏歪度を超過していることがわかる。

表 - 1 試験体一覧

	J-00	J-ME00	J-ME03	J-ME00sh	J-ME03sh
柱	B×D×H=550×550×2200 14-D25(SD490), 囲-D10@75(USD785) 接合部内: 7×□-D10(USD785)				
梁	B×D×L=375×500×3450 4+2-D25(SD490), 4-D10@125(USD785)				
継手	無し	両端		一端	
位置	—	0.0D	0.33D	0.0D	0.33D
シース	無し		有り	有り	

表 - 2 材料特性 単位: [N/mm²]

(a) コンクリートおよびグラウト

	圧縮強度	ヤング係数	割裂強度
柱・接合部	65.6	3.39×10^4	4.12
梁	55.3	3.20×10^4	3.69
グラウト	118	—	—

(b) 鉄筋

	降伏強度	ヤング係数	引張強度
D10(USD785)	890	1.91×10^5	1038
D25(SD490)	527	1.97×10^5	711

表 - 3 実験結果一覧（各耐力） 単位: [kN]

	J-00	J-ME00	J-ME03	J-ME00sh	J-ME03sh
YT1	604	615	612	584	598
YT2	686	696	700	705	704
Max.	705	713	704	713	704
V.my	626				
V.mu	664				
V.su	1005				
V.ju	826				

YT1, YT2: 1 段筋および 2 段筋降伏時層せん断力実験値, Max.: 最大耐力実験値（層せん断力）, V.my, V.mu: 梁曲げ降伏時層せん断力（2 段筋降伏時）, および梁曲げ終局時層せん断力（いずれも断面解析による）, V.su: 梁せん断耐力時層せん断力の計算値, V.ju: 接合部せん断強度時層せん断力の計算値（靱性指針解説による）

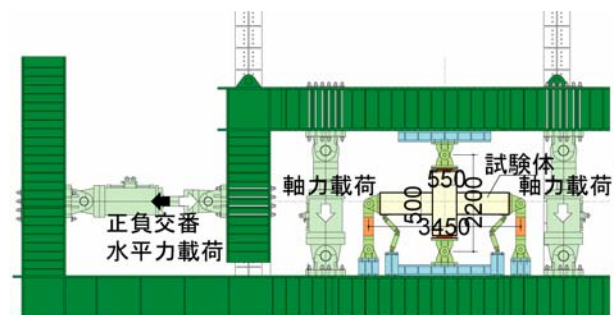


図 - 3 加力装置

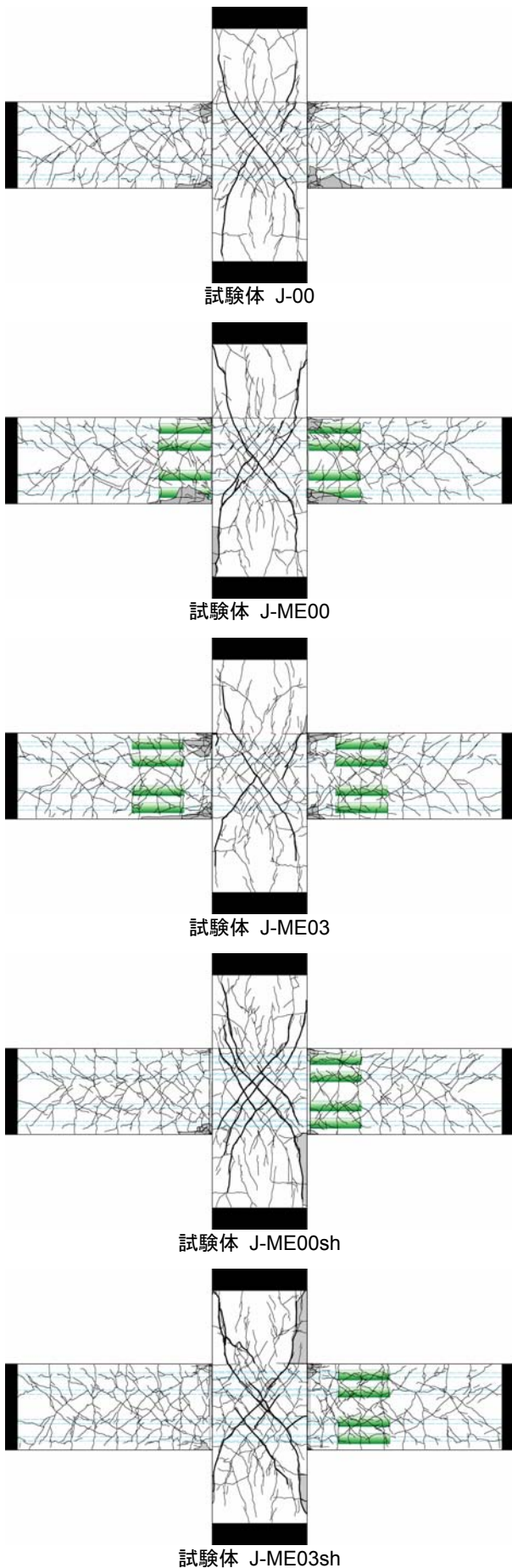


図 - 4 各試験体損傷状況 (層間変形角 $R=1/25$ 終了時)

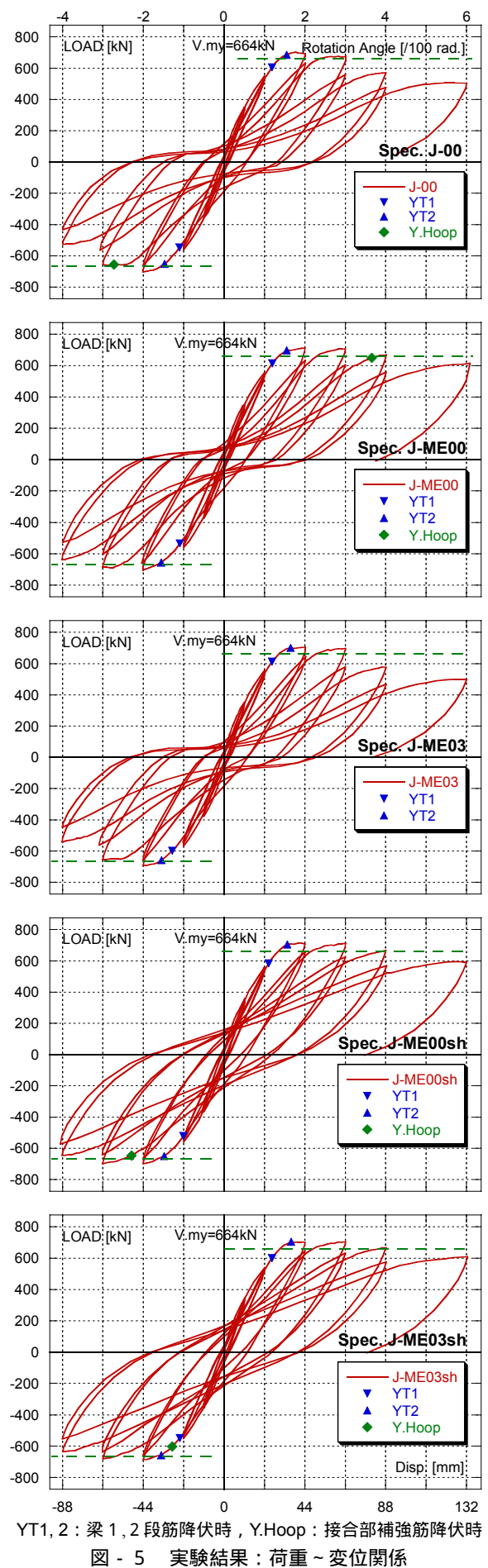


図 - 5 実験結果：荷重～変位関係

また、大変形時(R=1/50)では、圧縮側主筋の梁危険断面での歪度が小さくなっており、圧縮応力の負担が小さくなっていることがわかる。この傾向は J-ME00 J-ME03 において顕著に見られる。シース管を設けた試験体 J-ME00sh, J-ME03sh では、危険断面においても、スパン内と同程度の圧縮歪度が生じている。シース管の有無による相違と考えられる。

3. 実験結果の検討

ここでは、本報および既報³⁾の試験体を対象として、PCa 化工法による架構の構造性能について検討を行う。

3.1 既報の実験および結果概要

既報³⁾では、本報の実験シリーズのうち、J-ME00sh および J-ME03sh と同様の一方の梁に機械式継手を設け、柱梁接合部内に梁主筋を貫通するシース管を配置し、他方の梁から突き出した梁主筋を貫通して差し込む工法を在来工法と比較することを目的として、柱寸法や梁配筋量を変動因子として5体の部材実験を行っている。各耐力余裕度を、本報の試験体シリーズと対比して表-4に、実験結果の例を図-7に示す。その他の詳細については文献³⁾を参照されたい。なお、接合部耐力については、靱性指針による方法のほかに、文献⁵⁾に示される接合部曲げ終局モーメントの梁降伏時モーメントに対する余裕度についても示した。

本実験シリーズおよび既報³⁾のうち JB シリーズは、梁曲げ降伏により耐力が決定しており、JS シリーズは、柱梁接合部のせん断破壊により耐力が決定している。なお、文献⁵⁾に述べられる接合部曲げ終局状態に対しては、JS シリーズを除けば 1.5~2.0 倍程度の余裕度が確保できている。なお、既報³⁾の実験シリーズでは、JB シリーズは、いずれも梁 2 段筋の降伏が確認されている。一方、JS シリーズでは、梁 1 段筋のみが降伏し、2 段筋は降伏しておらず、梁の 1 段筋の降伏耐力計算値とほぼ同程度の最大耐力となっている。

3.2 エネルギー吸収性状

ここでは、各試験体の履歴エネルギー吸収性状を検討するため、等価粘性減衰定数 (h_{eq}) を比較する。各試験体の、同一変位振幅の 2 回目の加力サイクルについて、塑性率と h_{eq} の関係を図-8に示す。図には、TAKEDA モデル⁶⁾により求めた場合の h_{eq}^T と、性能評価指針⁷⁾による手法から求めた h_{eq}^P をそれぞれ示した。各 h_{eq} の評価式を、式(1)、式(2)に示す。なお、TAKEDA モデルによる h_{eq}^T の評価にあたり、ひびわれ点に対する降伏点の変形および強度の比は、実験結果の平均値 ($D_C/D_Y=0.036$, $Q_C/Q_Y=0.11$, 降伏点剛性の弾性剛性に対する比=0.33) とした。また、付着の余裕度の算定にあたっては、シース管およびグラウトを介して接合部内に配置された通し

主筋に対しては、グラウト強度を用いて付着強度を算出した場合の余裕度と、シース管周囲の付着強度と応力との関係から求めた場合の余裕度の小さい方を用いることとした。

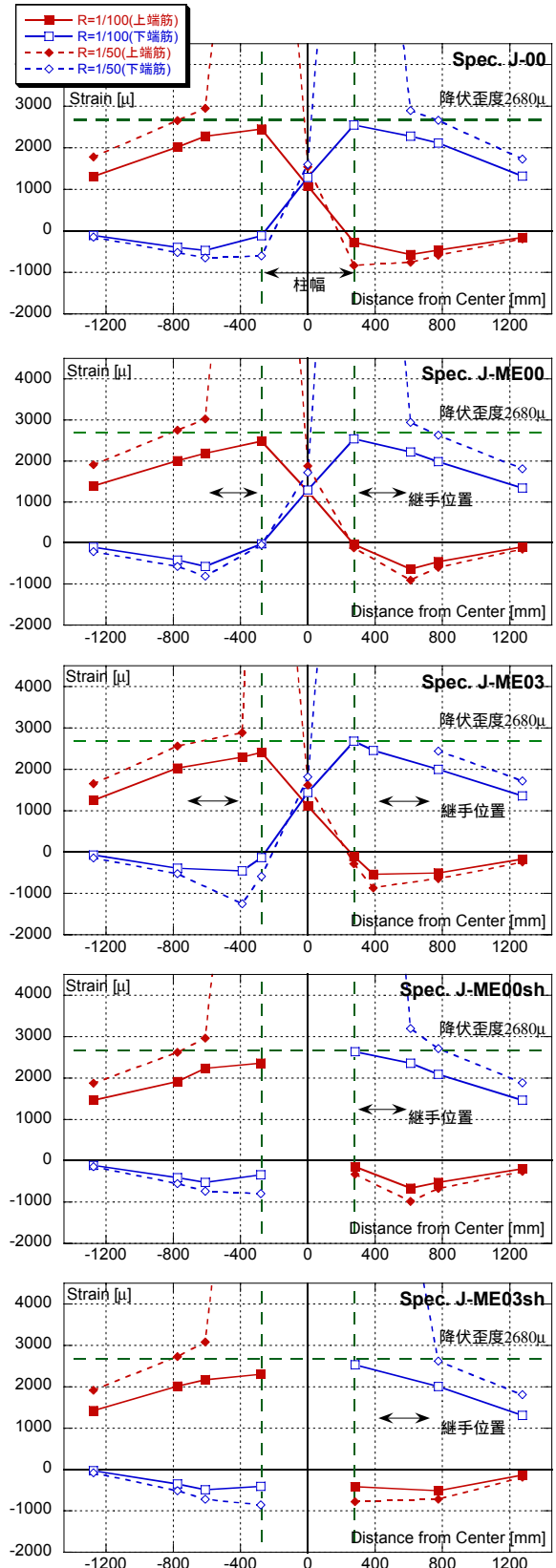


図-6 主筋歪度分布

図より、実験結果は、シー管の有無により、 h_{eq} が変動することがわかる。試験体 J-00, J-ME00, J-ME03 は、TAKEDA モデルと同程度かやや低い結果となっている。特に、J-ME00 がやや小さな値となっており、機械式継手が端部に接していることによる影響と推測される。一方、試験体 J-ME00sh, J-ME03sh は、試験体 J-00 に比べて同程度以上の値となり、TAKEDA モデルと同等以上の性能が確保できていることがわかる。既報³⁾の JB シリーズ試験体についても同様の傾向となっている。すなわち、試験体 JB-PCL, JB-PCH は、在来試験体 JB-RC に比べて、大きな h_{eq} が得られており、これが TAKEDA モデルと同程度となっている。従って、前章の耐力評価結果とあわせて、本報で述べた一方の梁に機械式継手を設け、柱梁接合部内に梁主筋を貫通するシー管を配置し、他方の梁から突き出した梁主筋を貫通して差し込む工法による柱梁接合部架構は、在来工法と同等程度以上の耐震性能を有していると判断できる。また、試験体 J-00, J-ME03, および JB-RC では、塑性率 2 程度以上の大変形時には、TAKEDA モデルによる h_{eq}^T を下回り、性能評価指針による h_{eq}^P に対応した結果となっている。

一方、JS シリーズの試験体の場合は、2 体の間にほとんど差がみられず、いずれも TAKEDA モデルと同等以上の h_{eq} が得られている。梁の 2 段筋の曲げ降伏に先行して接合部の破壊が生じた試験体であるが、エネルギー吸収性状は、比較的良好な結果となっており、さらに上述の試験体のようなシー管やグラウトの影響は見られない。これらの試験体 2 体は、いずれも梁 1 段筋のみが降伏しているため、梁曲げ降伏型の試験体（2 段筋まで降伏）の場合とは、塑性率の定義が異なるため、他の試験体と直接比較すべきではないが、接合部の損傷とエネルギー吸収性状の関係においては、通し主筋の付着や接合部せん断強度以外の要因も影響していることを示唆していると推察される。

$$h_{eq}^T = \frac{1}{\pi} \left[1 - \mu^\alpha \cdot \frac{D_C/D_Y + 1}{Q_C/Q_Y + 1} \cdot \{1 + \beta \cdot (\mu - 1)\} \cdot \frac{1}{\mu} \right] \quad (1)$$

$$h_{eq}^P = 0.09 + \frac{0.1}{B_f^2} \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\eta}} \right) \quad (2)$$

ここで、 h_{eq}^T : TAKEDA モデルによる等価粘性減衰定数、 h_{eq}^P : 文献⁷⁾による等価粘性減衰定数、 D_C/D_Y : 降伏変位に対するひびわれ変位の比（ここでは、各試験体の平均値から 0.036 とした）、 Q_C/Q_Y : 降伏荷重に対するひびわれ荷重の比（ここでは、各試験体の平均値から 0.11 とした）、 α : 剛性低下係数 (=0.4)、 β : 降伏点剛性に対する降伏後剛性の低下率 (=0.01 とする)、 μ : 塑性率、 B_f : 付着指標（表 - 4 の項目 4) [通し主筋付着余裕度の逆数]、である。

4. まとめ

鉄筋コンクリート造建物の施工の合理化を目標として開発されたプレキャスト化工法を対象として、構造的な確認実験を行い、既報³⁾の結果とあわせて、耐力・変形状および履歴特性に着目し、耐震性能について検討した。その結果、以下の知見を得た。

1. 梁曲げ降伏先行型として計画した試験体は、プレキャスト化工法であっても、在来工法と同等程度の耐力を有していた。
2. 主筋の降伏域は、概ね梁せいの 1 倍程度の領域となり、継手位置を 0.0D とした試験体では、継手の両端が降伏に至った。
3. 既報の結果とあわせて等価粘性減衰定数を比較し、プレキャスト化工法は、在来工法と同等程度以上の値となった。ただし、両端 0.0D 位置に継手を設けた試験体は、等価粘性減衰定数が小さくなった。
4. 一方の梁に機械式継手を設け、柱梁接合部内に梁主筋を貫通するシー管を配置し、他方の梁から突き出した梁主筋を貫通して差し込む工法の場合は、在来工法に比べて等価粘性減衰定数が高くなった。
5. 梁の降伏前に接合部が破壊した試験体（JS シリーズ）でも、等価粘性減衰定数は比較的大きく、この場合は、シー管とグラウト強度の影響は見られず、在来工法とプレキャスト化工法との間に相違はなかった。

表 - 4 試験体概要：各試験体の耐力余裕度

項目	本報	既報 ³⁾		
	J-Series	JB-RC, JB-PCL	JB-PCH	JS-RC JS-PC
1) 柱梁耐力比	2.11	2.65	2.14	1.41
2) 接合部せん断耐力余裕度	1.06	1.37	1.03	0.75
3) 接合部曲げ終局耐力余裕度	1.54	2.02	1.70	1.18
4) 通し主筋付着在来工法	1.04	1.22	—	0.91
5) 通し主筋付着シー管有り	1.48	1.57	1.57	1.17

各項目は以下の通り。

- 1) 曲げ終局モーメントの梁に対する柱の比。
- 2) 接合部せん断強度の梁降伏時せん断力に対する比⁴⁾。
- 3) 文献⁵⁾による接合部曲げ終局モーメントの梁曲げ終局モーメントに対する比。
- 4) 在来試験体の場合の通し主筋の付着強度の余裕度⁴⁾。
- 5) PCa 試験体の場合の通し主筋の付着強度の余裕度⁴⁾。ただし、材料強度としてグラウト強度を用いるか、シー管周長に対して求めるか、いずれか小さい方。

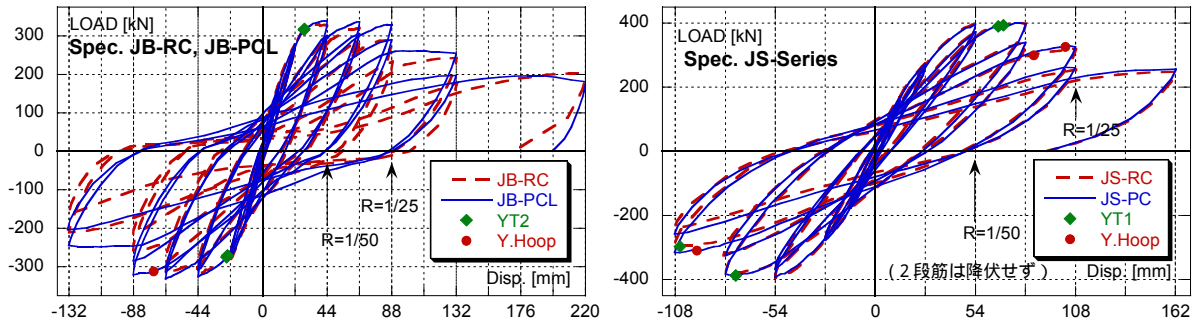
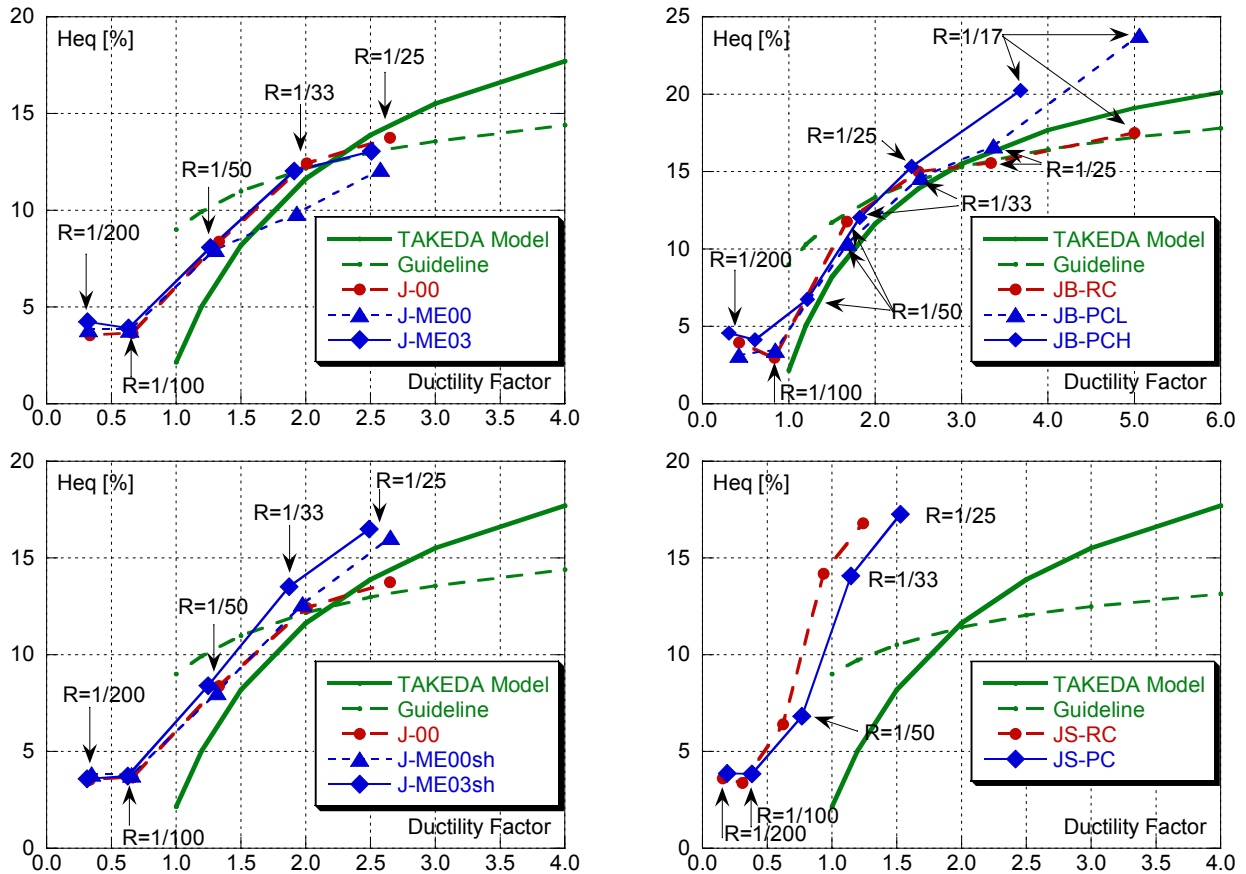


図 - 7 既報³⁾の荷重～変位関係(例)



TAKEDA Model: 式(1)による, Guideline: 式(2)による

図 - 8 各試験体の等価粘性減衰定数の比較

参考文献

- 1) 杉本訓祥, 増田安彦, 江戸宏彰: 柱梁接合部内のシース管内通し主筋の付着性能確認実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.817-822, 2004
- 2) 太田俊也, 畑戸龍夫, 根津定満, 杉本浩一, 増田安彦, 杉本訓祥, 江戸宏彰, 江村勝, 森岡徹, 後閑章吉: 柱梁接合部のプレキャスト化に関する実験研究(その1, その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.849-852, 2004
- 3) 藤生直人, 杉本訓祥: 高層 RC 建物の超短工期施工法の開発, コンクリート工学, Vol.47, No.8, pp.25-32, 2009.08
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1997
- 5) 楠原文雄, 塩原等: 鉄筋コンクリート造柱針接合部の終局強度におよぼす梁および柱主筋量の影響その4: 9自由度モデルに基づく柱梁接合部の終局強度, 地震工学会年次大会, pp.34-35, 2009
- 6) T.Takeda, M.A.Sozen, N.N.Nielsen: REINFORCED CONCRETE RESPONSE TO SIMULATED EARTHQUAKES, Journal of the Structural Division Proceedings of the ASCE, pp.2557-2573, 1970.12
- 7) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針(案)・同解説, 2004