

# 論文 部分的に高強度化した鉄筋を用いた RC 造十字形柱梁接合部の損傷抑制に関する実験的研究

村上 研<sup>\*1</sup>・岸田 慎司<sup>\*2</sup>・北山 和宏<sup>\*3</sup>・村田 義行<sup>\*4</sup>

**要旨**：部分高強度化鉄筋を梁主筋に用いることで、ヒンジリロケーションを実現させ、柱梁接合部の過度な損傷を防止し、実建物への適用性を検討することを目的とした。試験体変数としては、接合部補強比に焦点を当て実験を行った。4 試験体とも最大耐力後の耐力低下や接合部の変形及び損傷が抑制され、梁曲げ降伏型となった。また梁主筋を二段配筋にすることは、接合部の損傷低減に有効であった。この結果より破壊形式を決定する要因は、柱梁曲げ耐力比だけでなく、接合部補強比にもあり、さらに接合部補強比を適切に評価することで梁の強度境界位置で明瞭なヒンジリロケーションを形成することが分かった。

**キーワード**：鉄筋コンクリート造、柱梁接合部、部分高強度化鉄筋、ヒンジリロケーション、接合部降伏破壊

## 1. はじめに

梁にヒンジリロケーションを用いた柱梁接合部とは、複雑な応力が作用する柱梁接合部近傍では梁部材を降伏させずに、意図的に梁端部の主筋量を増やして塑性ヒンジを形成する位置を柱面から離れた位置に移動させた柱梁接合部のことである。しかし、鉄筋コンクリート (RC) 架構において、柱と梁の曲げ終局耐力の比 (柱梁曲げ耐力比) が 1 に近い場合、柱梁接合部の降伏破壊により梁の曲げ耐力が十分に発揮されない場合がある<sup>1)</sup>。これを防ぐために柱梁曲げ耐力比を大きくすると、柱の配筋が過密になって施工が困難になる。そこで、熱処理により部分的に高強度化した鉄筋 (以下、部分高強度化鉄筋) を柱主筋に用いることで、柱の主筋量を増やさずに柱梁曲げ耐力比を大きくできる。一方で、柱の曲げ終局耐力の増大だけでは柱梁接合部の降伏破壊の抑制には不十分である。そこで部分高強度化鉄筋を梁主筋に用いることで、降伏ヒンジ位置を梁端部から高強度部分と普通強度部分の境界位置 (以下、強度境界位置) へ移動させて (ヒンジリロケーション)、柱梁接合部を弾性に保持すれば、その損傷を低減できる。既往の研究<sup>2)</sup>では、接合部付近の鉄筋量を増やすことでヒンジ位置を柱梁接合部から移動させていたが、本研究では主筋に部分高強度化鉄筋を用いて、強度境界位置での明瞭なヒンジの形成を実現させ、柱梁接合部の損傷を防止し、当工法の実建物への適用性を検討することを目的とした。

基準試験体 MA-5<sup>3)</sup> は強度境界位置で降伏するときの節点モーメントの比として算出した柱梁曲げ耐力比が 2.05 で、接合部の損傷が顕著であった。今年度は、接合部横補強筋や梁主筋の配筋方法を試験変数として柱梁接

合部の破壊を防止し、梁主筋の強度境界位置で明瞭なヒンジ形成に至る要因の検討を目的に平面十字形柱梁部分架構に正負交番繰返し載荷実験を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

図-1 に試験体概要を、表-1 に試験体諸元、表-2、

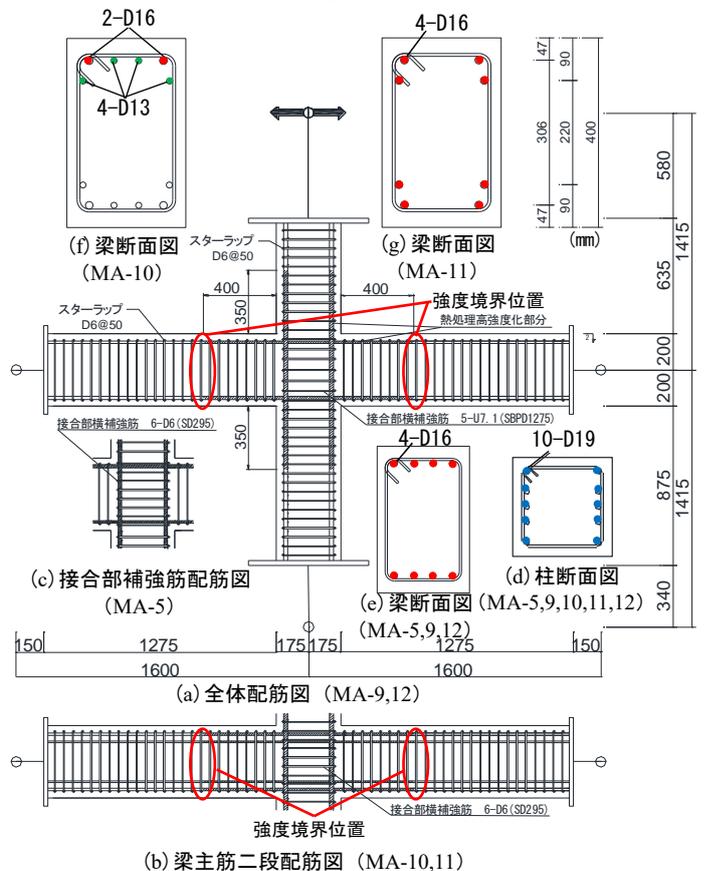


図-1 試験体形状及び各部材断面 (単位: mm)

\*1 芝浦工業大学 理工学研究科建設工学専攻 修士課程 (学生会員)

\*2 芝浦工業大学 建築学部建築学科教授 博士 (工学) (正会員)

\*3 東京都立大学大学院 都市環境学研究科建築学域教授 工博 (フェロー会員)

\*4 高周波熱錬株式会社 博士 (工学)

表一3 に鋼材とコンクリートの材料特性を示す。試験体は縮尺 1/2 スケールの平面十字形 4 体 (MA シリーズ) とし、梁断面を 250mm×400mm , 柱断面を 350mm×350mm, 柱芯から梁端部支持点までを 1600mm, 梁芯から上柱及び下柱支持点までを各々1415mm とした。表一1 中の接合部横補強筋比<sup>1)</sup>や強度境界位置で梁主筋が降伏時の入力せん断力に対する接合部せん断終局耐力の余裕度<sup>4)</sup>は、参考文献をもとに算出した。なお、接合部降伏による強度低下率 $\beta_j$ や接合部補強比では、梁主筋の降伏時引張力  $T_y$  の値に強度境界位置で梁曲げ降伏が生じるときの柱面での梁主筋の引張力を用いて算出した。

基準試験体は、柱梁曲げ耐力比 2.05 の試験体 MA-5 とした。柱、梁部材に部分高強度化鉄筋を使用し、各主筋の高強度範囲は、柱・梁せい (D) に対して 1D とした。

今年度実験を行った試験体は、接合部横補強筋の総断面積 (接合部横補強筋比) を基準試験体と同等とし、接合部横補強筋の降伏引張力の総和に対する梁主筋の降伏

引張力の総和の比 (接合部補強比)<sup>5)</sup>が柱梁接合部の最終破壊状況に与える影響の把握を目的に、設計を行った。試験体 MA-9 は、接合部横補強筋を基準試験体の D6 SD295 から U7.1 に変更し、接合部補強比を基準試験体 MA-5 の 0.37 から 1.14 とした。試験体 MA-10 は、梁を二段配筋とし、二段目の部分高強度化した梁主筋が柱梁接合部内において、接合部の損傷低減に寄与することを想定し、接合部補強比を基準試験体の 0.37 から 1.26 とした。梁の配筋方法<sup>6)</sup>は、一段目に 2-D16, 2-D13 の 4 本を配筋し、二段目に 2-D13 とした。試験体 MA-11 は、MA-10 同様に梁を二段配筋とし、基準試験体と梁主筋量を同等として、二段目の主筋を含む接合部補強比を 1.95 とした。試験体 MA-12 は、MA-9 をプレキャスト工法とし、梁主筋は接合部中央で、柱主筋は下柱上端にそれぞれネジ継手を使用し、梁部材はプレキャスト、柱部材は現場打ちを想定し、製作した。

表一1 試験体諸元一覧

試験体名		MA-5	MA-9	MA-10	MA-11	MA-12
作成年度		2018	2019			
試験体形状		一体打ち				PCa
配筋	梁主筋	一段目 4-D16	4-D16	2-D16 2-D13	2-D16	4-D16
	柱主筋	-	-	2-D13	2-D16	-
高強度範囲	梁主筋(mm)	10-D19				400
	柱主筋(mm)	350				350
軸力比		0.10	0.07	0.10	0.10	0.10
接合部横補強筋		2-D6 6組	2-U7.1 5組	2-D6 6組	2-D6 6組	2-U7.1 5組
接合部横補強筋比(%)		0.36	0.37	0.39	0.43	0.37
接合部補強比		0.37	1.14	0.27	0.38	1.14
主筋含む接合部補強比		-	-	1.26	1.95	-
強度低下率 $\beta_j$		1.58	1.82	1.36	1.52	1.80
接合部せん断余裕度		1.12	1.20	1.15	1.23	1.33
柱梁曲げ耐力比		2.05	1.99	2.07	2.17	1.95

表一2 鋼材材料特性

年度	鉄筋	降伏強度	降伏ひずみ	引張強度	弾性限界ひずみ
		(N/mm <sup>2</sup> )	%	(N/mm <sup>2</sup> )	%
2018	D6(SD295)*	438	0.44	519	0.24
	D16(SD345)	409	0.23	573	
	D16(SD700)*	870	0.67	930	0.47
	D19(SD345)*	397	0.41	562	0.21
	D19(SD700)*	871	0.67	920	0.47
2019	D6(SD295)*	347	0.40	504	0.20
	D13(SD345)	376	0.21	509	
	D13(SD700)*	948	0.74	1028	0.54
	D16(SD345)	401	0.22	558	
	D16(SD700)*	873	0.68	932	0.48
	D19(SD345)	403	0.26	557	
	D19(SD700)*	872	0.66	939	0.46
	U7.1*(参考値)	1257	0.92	1318	0.72

\* 0.2%オフセット

表一3 コンクリート材料特性

	圧縮強度	圧縮強度時ひずみ	割線剛性	割裂強度
	(N/mm <sup>2</sup> )	%	(×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )
MA-5	36.8	0.20	2.89	3.3
MA-9	36.2	0.25	2.89	2.9
MA-10	43.2	0.26	3.14	3.2
MA-11	41.2	0.26	2.98	2.6
MA-12梁	42.6	0.25	3.11	3.2
MA-12柱	45.5	0.25	3.05	3.1

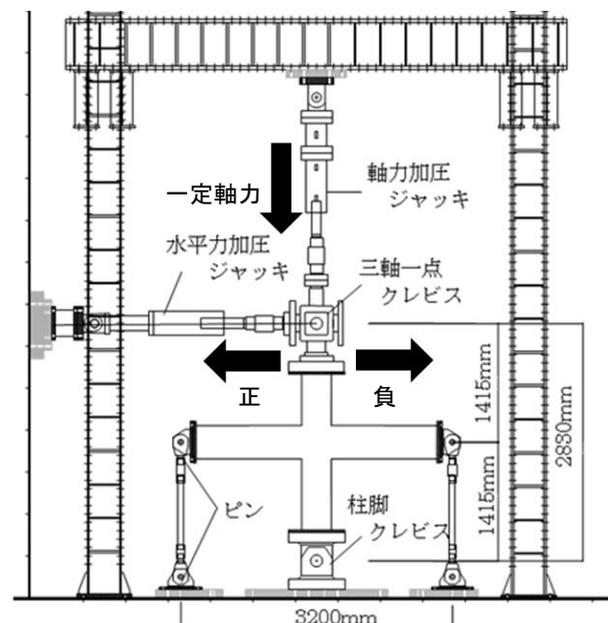
## 2.2 加力方法

加力装置を図一2 に示す。梁端部はローラー支持、下柱はピン支持とし、上柱の支持点にある鉛直、東西の各方向のジャッキを取り付け、柱に一定圧縮軸力 (軸力比 0.1) を与えた後に、水平方向に正負交番繰返し载荷を行った。水平力は層間変形角 R により制御し、層間変形角 0.125%の加力を 1 回、0.25%, 0.5%, 1%, 1.5%, 2%, 3%, 4%を各 3 回、その後、引き切りを 5%まで行った。

## 3. 実験結果

### 3.1 層せん断力と層間変形角関係及び破壊性状

層せん断力(Q)-層間変形角(R)関係を図-3、実験結果一覧を表-4 に示す。また、各試験体 R=4%時 1 サイクル目の破壊状況を写真-1 に示す。図中には、梁の曲げひび



図一2 加力装置図

割れ、接合部斜めひび割れ、鉄筋のひずみの値から判断した接合部横補強筋及び梁主筋の強度境界位置での降伏、最大耐力、平面保持の仮定から断面解析した強度境界位置での梁曲げ終局時の層せん断力を示す。

基準試験体 MA-5 は、接合部横補強筋が R=約 0.8%、梁主筋が強度境界位置で R=約 1.3%で降伏した。R=約 3.0%で最大耐力に達し、R=5.0%時の最大耐力後の耐力低下率は、約 21%であった。また、破壊状況から R=4%時で梁の強度境界位置より接合部の損傷が顕著であった。

基準試験体から接合部横補強筋を高強度鉄筋に変更した試験体 MA-9、プレキャスト工法試験体 MA-12 は、梁主筋が R=約 1.1%から 1.4%時に強度境界位置で降伏し、R=約 4%で最大耐力に達した。最大耐力後の耐力低下は、MA-9 が約 8%、MA-12 が約 1%になり、基準試験体 MA-5 よりも少なく、また最大耐力より前に接合部横補強筋が降伏しなかった。さらに、破壊状況から接合部よりも

梁の強度境界位置での損傷が顕著となった。

梁を二段配筋とした試験体 MA-10, MA-11 では、基準試験体と同様に接合部横補強筋が R=約 0.8%、梁主筋は、一段目、二段目を含む全主筋が強度境界位置で R=約 1.3%から 1.5%で降伏した。MA-10 が R=4%時、MA-11 が R=5%時に最大耐力に達した。最大耐力後の耐力低下は、両試験体とも約 1%と基準試験体 MA-5 よりも少なくなった。そして破壊状況も試験体 MA-9, MA-12 と同様に梁の強度境界位置での損傷が顕著となっていた。今年度の 4 試験体の履歴性状でスリップ性状や著しい耐力低下は、見られなかった。また、全試験体の柱主筋は、降伏しなかった。

### 3.2 各部材の変形成分

各試験体の正載荷ピーク時の層間変形に占める柱、梁及び柱梁接合部の変形成分を図-4 に示す。破線は直接計測した層間変形である。基準試験体 MA-5 は、最大耐

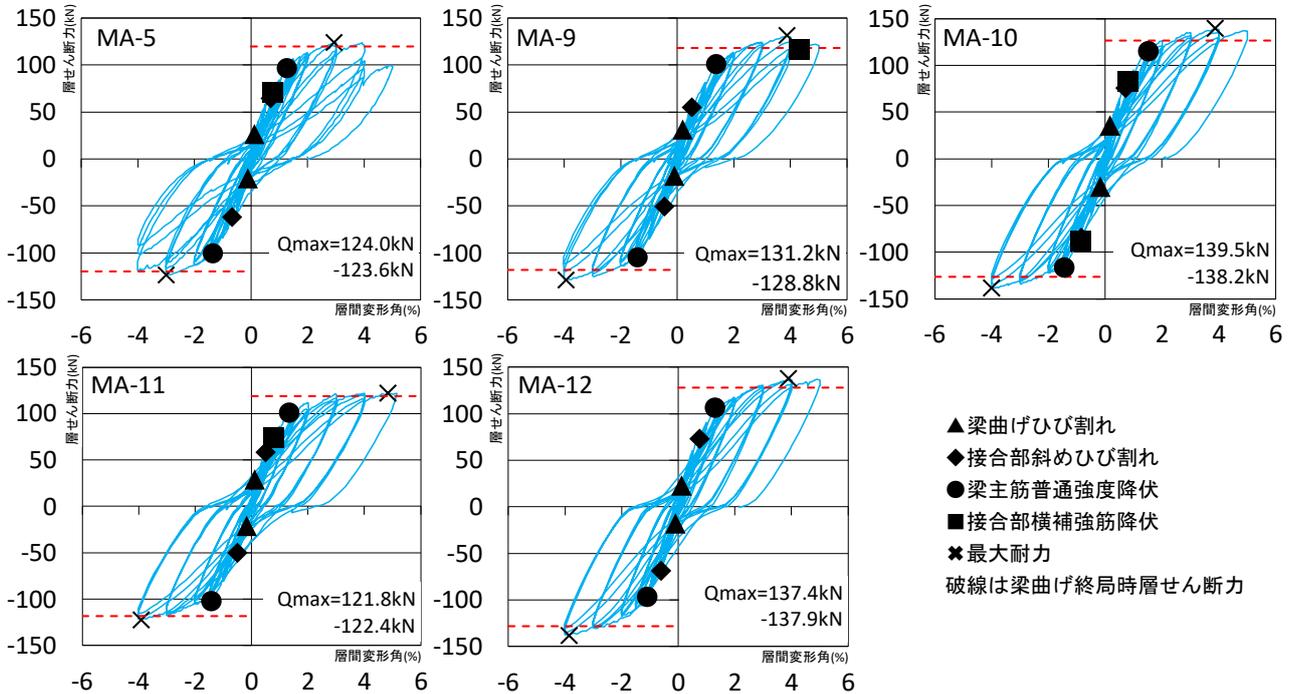


図-3 層せん断力 Q-層間変形角 R 関係

表-4 実験結果一覧

試験体	梁曲げひび割れ				試験体	接合部斜めひび割れ				試験体	最大耐力			
	正		負			正		負			正		負	
	Q(kN)	R(%)	Q(kN)	R(%)	Q(kN)	R(%)	Q(kN)	R(%)	Q(kN)	R(%)	Q(kN)	R(%)		
MA-5	26.0	0.12	-20.4	-0.12	MA-5	64.5	0.69	-62.0	-0.68	MA-5	124.0	2.94	-123.6	-3.01
MA-9	-18.0	-0.09	31.3	0.18	MA-9	54.8	0.50	-50.6	-0.47	MA-9	131.2	3.89	-128.8	-3.94
MA-10	35.7	0.18	-29.8	-0.17	MA-10	75.7	0.71	-84.8	-0.85	MA-10	139.5	3.87	-138.2	-4.00
MA-11	28.7	0.12	-20.8	-0.18	MA-11	58.4	0.50	-50.1	-0.50	MA-11	121.8	4.84	-122.4	-3.92
MA-12	22.4	0.13	-17.8	-0.10	MA-12	73.3	0.75	-68.6	-0.61	MA-12	137.4	3.89	-137.9	-3.86
試験体	梁主筋降伏(普通強度)				試験体	接合部横補強筋降伏								
	正		負			正		負						
	Q(kN)	R(%)	Q(kN)	R(%)	Q(kN)	R(%)	Q(kN)	R(%)						
MA-5	96.7	1.26	-100.4	-1.35	MA-5	71.2	0.76	正載荷から降伏						
MA-9	101.0	1.36	-104.8	-1.41	MA-9	116.5	4.30	未降伏						
MA-10	115.2	1.51	-116.7	-1.45	MA-10	82.8	0.80	87.9	-0.89					
MA-11	101.1	1.33	-101.8	-1.43	MA-11	74.2	0.78	正載荷から降伏						
MA-12	106.5	1.30	-96.5	-1.09	MA-12	未降伏		未降伏						

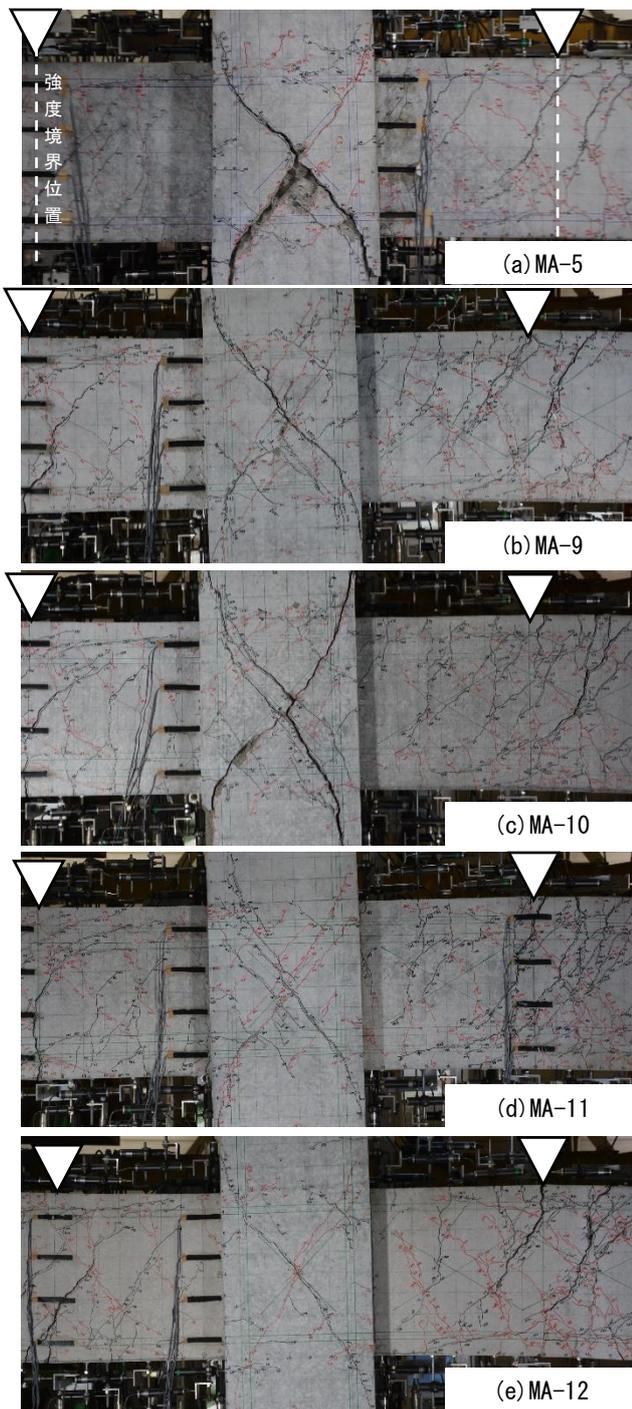


写真-1 破壊状況（層間変形角 4.0%）

力に達した R=3%時では、梁の変形量が全体変形量の約 60%を占めていたが、R=4%時には、接合部の変形量が約 50%を占めており、梁の変形量を上回った。

基準試験体 MA-5 と接合部横補強筋を高強度鉄筋に変更した試験体 MA-9 とプレキャスト工法試験体 MA-12 を比較すると、R=3%時では、梁の変形量は同等であったが、R=4%時に MA-9 と MA-12 では、梁の変形量が顕著であった。また基準試験体 MA-5 と梁を二段配筋とした試験体 MA-10、MA-11 を比較しても、R=4%時から MA-10 と MA-11 は、梁の変形量が著しい結果となった。

以上より、今年度実施した試験体 MA-9 から MA-12 の

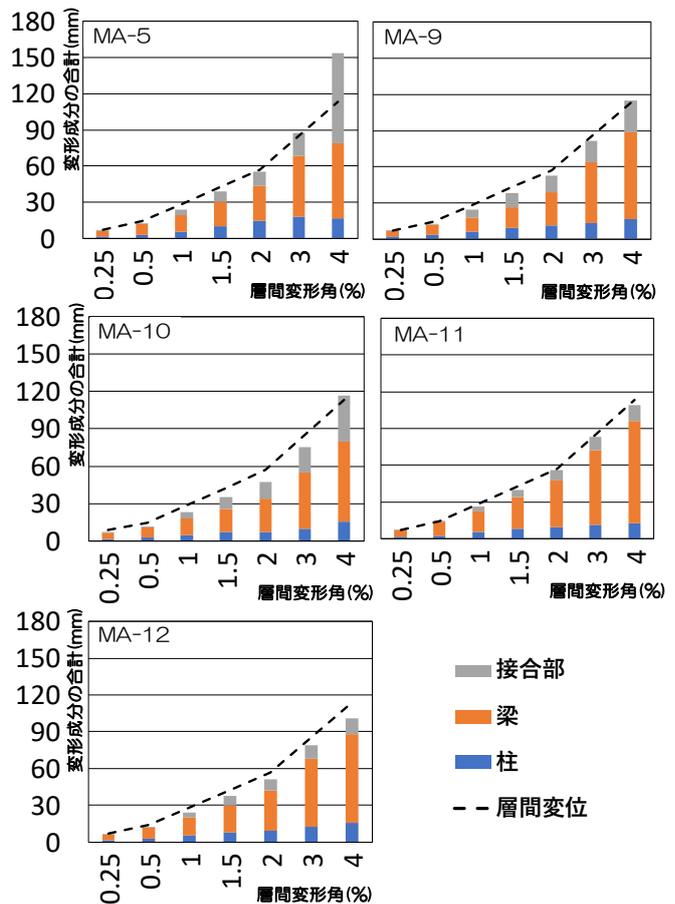


図-4 各部材の変形成分

4 体では、梁に明瞭なヒンジリロケーションが発現したことによって柱梁接合部の損傷が抑制され、最大耐力後の耐力低下がわずかであったと考える。

### 3.3 梁主筋のひずみ分布

基準試験体 MA-5、MA-9 の梁主筋と二段配筋の試験体 MA-11 の二段目の主筋のひずみ分布を図-5 に示す。図中には、各層間変形角正載荷時 1 回目の加力ピーク時での梁主筋のひずみの値を図示した。また強度境界位置は普通強度部分から強度が変化する部分を指し、強度の遷移領域は強度境界位置から 200mm となっている。基準試験体 MA-5 と接合部横補強筋を高強度鉄筋に変更した試験体 MA-9 を比較すると両試験体とも強度境界位置での降伏が起きていることがわかる。R=3%以降は強度境界位置だけでなく、普通強度部分でも降伏している。高強度範囲内や接合部内でのひずみの値は、大きな差異がなかった。また 3.2 節より梁を二段配筋とした試験体で梁に明瞭なヒンジリロケーションが発現し、接合部の変形が抑制されたことが分かった。そこで一段目の梁主筋である MA-5、MA-9 と二段目の梁主筋である MA-11 を比較すると、R=1%時に圧縮側の柱面（番号 13）位置の引張ひずみの値が大きかった。このことから接合部の変形に対し二段目の主筋が変形の抑制に寄与したと考える。

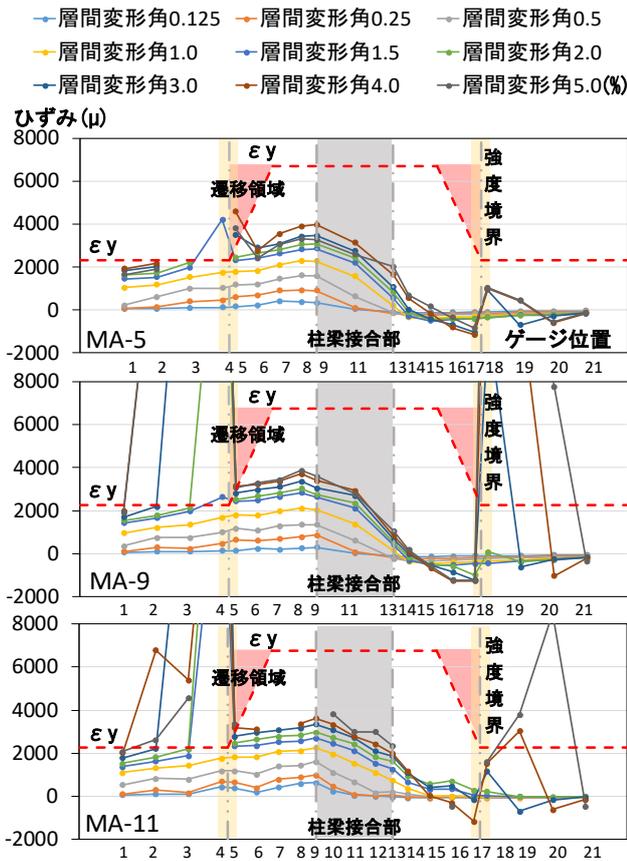


図-5 梁主筋のひずみ分布

### 3.4 ひび割れ幅

基準試験体 MA-5 と接合部横補強筋を高強度鉄筋に変更した試験体 MA-9、梁を二段配筋の試験体 MA-11 の接合部斜めひび割れ、梁端部の曲げひび割れ、梁主筋の強度境界位置の曲げひび割れ幅をクラックスケールを用いて計測した各層間変形角 1 回目の正加力ピーク時でのひび割れ幅の推移を図-6 に示す。

基準試験体 MA-5 は、最大耐力に達した R=3%時で接合部斜めひび割れが顕著となり、強度境界位置の曲げひび割れは、R=5%時で 2mm 程度となった。

今年度の試験体 MA-9 と MA-11 は、R=3%時で強度境界位置のひび割れが 2mm 以上となり、他のひび割れ幅と比較し、顕著であった。このことから基準試験体 MA-5 と比較し、接合部や梁端部より梁の強度境界位置での変形が著しかったことが分かる。

### 3.5 梁の曲率分布

図-7 に基準試験体 MA-5 と接合部横補強筋を高強度鉄筋に変更した試験体 MA-9、梁主筋の配筋を二段配筋とした試験体 MA-11 の実験より変位計で R=1.5, 4.0%時に計測した梁の曲率分布を示す。曲率は梁の上下に設置した変位計から算出された回転角から算出した

梁主筋が強度境界位置での降伏後の R=4%では、基準試験体と比較して、MA-9 と MA-11 の普通強度部分での曲率分布が大きくなっており、強度境界位置から普通強

度部分で梁の変形を多く負担している。

### 3.6 破壊形式の決定

基準試験体とした MA-5 は、梁主筋降伏後最大耐力に達した。その後接合部の変形成分が増加して、損傷も顕著となり最大耐力後の耐力低下も著しかった。柱梁接合部の損傷や接合部せん断余裕度を十分に確保していたことから破壊形式を接合部降伏型とした。接合部横補強筋を高強度鉄筋にし、接合部補強比を 1.14 とした試験体 MA-9 とプレキャスト工法試験体 MA-12 は、梁主筋降伏後に R=4%で最大耐力に達し、柱梁接合部の変形成分や損傷も低減された。梁の変形成分や強度境界位置の損傷が顕著なことから梁曲げ降伏型とした。接合部内の二段目の梁主筋が接合部横補強筋として接合部補強比に付加されることを想定した試験体 MA-10 と MA-11 は、他の 3 体と同様に強度境界位置で梁主筋が降伏した後に最大耐力に達した。基準試験体と同様に梁主筋降伏前に接合

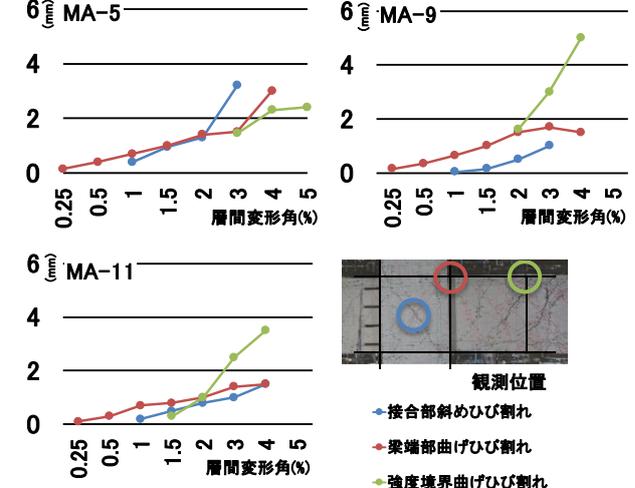


図-6 ひび割れ幅の推移

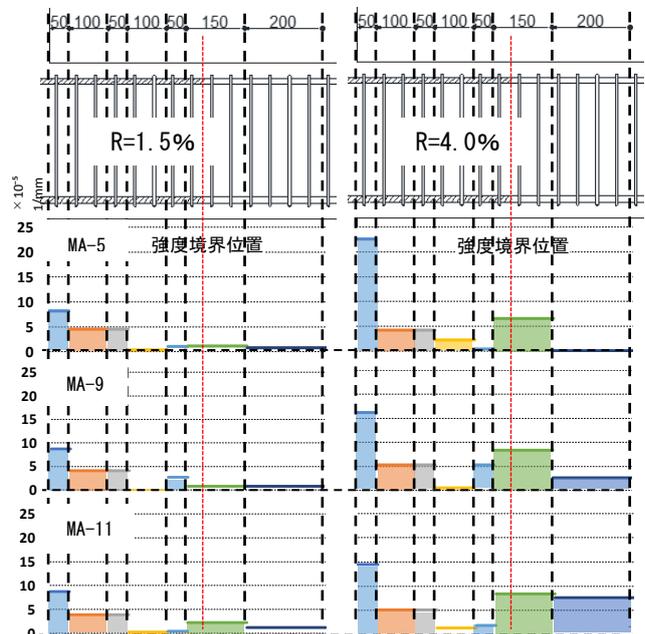


図-7 梁の曲率分布

部横補強筋が降伏していたが、最大耐力には、MA-10がR=4%、MA-11がR=5%で達した。接合部の損傷や変形成分が低減され、梁の変形成分や強度境界位置での損傷が顕著なことから梁曲げ降伏型とした。

#### 4. 接合部補強比における破壊形式の関係

図-8に部分高強度化鉄筋を用いた十字形柱梁接合部において接合部降伏破壊とヒンジリロケーションが発現した梁曲げ降伏破壊の試験体を接合部補強比と柱梁曲げ耐力比の関係性についてプロットしたものを示す。図中には既往の研究<sup>3),6)-8)</sup>を含む接合部降伏破壊型の試験体を△印で、梁曲げ降伏型の試験体を●印で各々示した。柱梁曲げ耐力比1.5以上の場合でも接合部補強比が0.5以下であるときは、接合部降伏破壊となっている。また接合部補強比が2.0以上ある場合で柱梁曲げ耐力比が1.1の試験体においては、柱主筋に高強度化鉄筋を使用しておらず、柱主筋が降伏し、接合部降伏破壊が生じた。しかし高強度化鉄筋を用い、柱主筋の降伏を防ぐことにより柱梁曲げ耐力比が1.4の場合でも接合部補強比を1以上確保していれば、梁曲げ降伏破壊となることが分かる。

#### 5. まとめ

部分的に高強度化した鉄筋を柱・梁主筋に用いた十字形柱梁接合部の実験を行い、下記の知見が得られた。

- (1) 柱梁曲げ耐力比が2.0程度の柱梁接合部においても、ヒンジリロケーションが形成されず、最大耐力に達した後に、柱梁接合部の変形成分や損傷が増加し、接合部降伏破壊を生じた。
- (2) 接合部横補強筋比を0.3~0.4%程度とし、接合部横補強筋に高強度鉄筋を使用し、接合部補強比を1.0以上にすることで柱梁接合部の変形成分や損傷が低減され、強度境界位置でのヒンジが形成された。
- (3) 接合部補強比を0.3~0.4程度として梁主筋を二段配筋にすると、梁の強度境界位置付近の損傷が顕著となってヒンジリロケーションが形成され、柱梁接合部の損傷が抑制されて最大耐力後の耐力低下は、ほとんど生じなかった。
- (4) 接合部補強比を1.0以上確保し、柱主筋に部分高強度化鉄筋を用いることで柱梁曲げ耐力比1.4の場合に明瞭なヒンジリロケーションを形成し、梁曲げ降伏破壊になることが分かった。
- (5) 今回のプレキャスト工法については、一体打ち試験体と比較して同等以上の性能であった。

#### 謝辞

本研究は、芝浦工業大学、東京都立大学、三井住友建設(株)、高周波熱錬(株)と共同で行ったものです。また本実験はアシス株式会社で試験体を製作し、東京都立

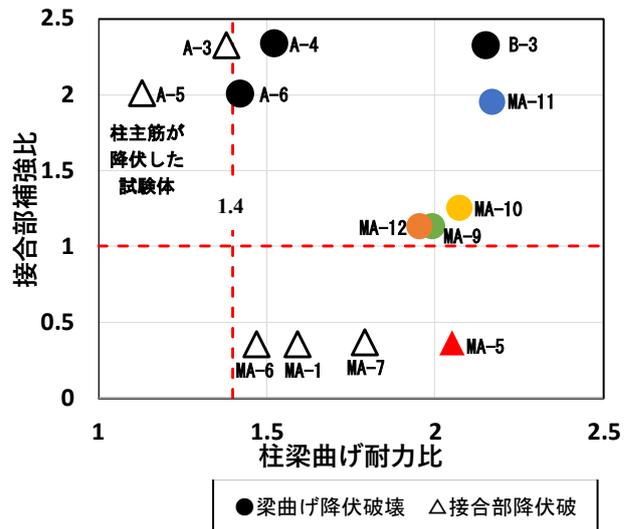


図-8 接合部補強比と柱梁曲げ耐力比関係

大学の大型構造物実験棟で行いました。北山研究室、岸田研究室をはじめ多くの方々に協力を得ました。ここに深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造保有水平耐力計算規準(案)・同解説,2016
- 2) 川野翔平,石川裕次,麻生直木,中根一臣：鉄筋コンクリート造ヒンジリロケーション柱梁接合部の耐震性能：コンクリート工学年次論文集,vol.37,No.2,pp.271-276,2015.7
- 3) 村上研,石川巧真,山谷裕介,岸田慎司,北山和宏,村田義行：部分的に高強度化した鉄筋を用いた鉄筋コンクリート柱梁部分架構の耐震性能評価(その4)(その5),日本建築学会大会(北陸)学術講演梗概集,pp.135-138,2019.9
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説,2018
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の等価線形化法に基づく耐震性能評価型設計指針(案)・同解説,2019
- 6) 中村直樹,岸田慎司,福山巧真,村田義行：部分的に高強度化した鉄筋を柱および梁主筋に用いたRC造十字形柱梁接合部の終局強度に関する研究,コンクリート工学年次論文集,vol.38,No.2,pp.319-324,2016.7
- 7) 北山和宏,村上研,岸田慎司,村田義行,小田稔：部分的に高強度化した鉄筋を用いた鉄筋コンクリート柱梁部分架構の耐震性能評価(その1)(その2),日本建築学会大会(東北)学術講演梗概集,pp.639-640,2019.2018.9
- 8) 岸田慎司,福山巧真,村田義行：部分的に高強度化した鉄筋を柱および梁主筋に用いたRC造十字形柱梁接合部の実験,コンクリート工学年次論文集,vol.37,No.2,pp.277-282,2015.7