

論文 多数回繰返し载荷を受ける RC 造建物のスラブ付十字形柱梁接合部の構造性能に関する実験的研究

草川 和広*1・今津 祥地郎*1・北嶋 圭二*2・中西 三和*3

要旨：鉄筋コンクリート(以降, RC)造建物の十字形柱梁接合部を対象に多数回繰返し载荷実験を行った。試験体は, 柱梁強度比 1.4 の試験体と柱主筋径および降伏強度のみを変え柱梁強度比を 1.9 と高くした試験体, またそれぞれにスラブを付けた試験体の計 4 体とした。柱梁強度比が 1.9 と十分に高い場合においても大変形を経験することで接合部への損傷が著しく生じた。また, スラブが付いた試験体でも同様に接合部の損傷が著しく生じ, いずれの試験体も接合部降伏破壊の様相を呈していた。

キーワード：柱梁接合部, 柱梁強度比, 多数回繰返し载荷, 接合部降伏破壊

1. はじめに

今後発生が予想される南海トラフを震源とする巨大地震において, 東北地方太平洋沖地震や熊本地震で確認された長周期地震動や多数回繰返しの強震動による被害が危惧されており¹⁾, 部材ごとに影響を明らかにする必要がある。RC 造建物の柱梁接合部の設計において, 現行の計算規準²⁾では梁曲げ降伏が先行する接合部であっても, 柱梁強度比(柱と梁の危険断面が曲げ終局強度に至る時の節点位置での曲げモーメントの比)が十分に高くない場合には, 接合部内に生じた斜めひび割れによって 4 分割された部分が, 柱ないしは梁部材と一緒に回転し変形が増大することにより, 接合部の破壊が急激に進展する接合部降伏破壊³⁾となることが指摘されている。

このような背景により, 既報⁴⁾では柱梁強度比を 1.2 とした試験体と, 同形状同配筋で柱軸力比を変え柱梁強度比を 1.9 と高くした RC 造十字形柱梁接合部を対象に载荷実験を行った。柱梁強度比が 1.9 の試験体においても, 柱の曲げひび割れと接合部斜めひび割れが繋がり接合部の破壊が進展したことや鉄筋の降伏状況, 接合部入力せん断力の急激な低下が生じていないことなどから, 最終破壊性状は接合部降伏破壊と判定された。また, 接合部に著しい損傷が生じるだけでなく, 接合部内の柱主筋の座屈に伴い柱の鉛直変位が急激に増加し, 柱の軸力保持能力の低下が生じており, 柱軸力比の影響を大きく受けていたと考察された。

本研究では, 柱梁強度比が 1.4 の試験体と, 柱軸力比は一定として柱主筋径および降伏強度のみを変え, 既報と同様に柱梁強度比を 1.9 と高くした試験体に対して载荷実験を行う。また, 既報で柱の曲げひび割れと接合部斜めひび割れが繋がり接合部の破壊が生じたことが観察されており, 実際の構造物のようにスラブが付いた場合

にも同様の現象が見られるか確認するためスラブ付きの試験体の载荷実験も同様に行う。試験体はスラブ無しで柱梁強度比が 1.4 および 1.9 の試験体と, 両者にスラブを付けた試験体の計 4 体とした。各試験体の比較検討の関連を図-1 に示す。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

表-1 に試験体概要を, 表-2 に材料試験結果一覧を, 図-2 に試験体形状および配筋詳細図を示す。試験体は, RC 造建物の十字形柱梁接合部を想定した 1/4 の縮尺試験体とし, 接合部せん断破壊が生じない梁曲げ降伏先行型の試験体を 4 体製作した。試験体名は, スラブ無しで柱梁強度比(CBR:Column-to-Beam Strength Ratio)1.4 の試験体を CBR1.4, スラブ無しで柱梁強度比 1.9 の試験体を CBR1.9, スラブ(SL)付きで柱梁強度比 1.4 の試験体を CBR1.4SL, スラブ付きで柱梁強度比 1.9 の試験体を CBR1.9SL とした。いずれの試験体も柱は 250×250mm, 梁は 220×330mm である。スラブ付きの試験体のスラブ厚は 50mm で, スラブ幅は柱面から片側 100mm とした。

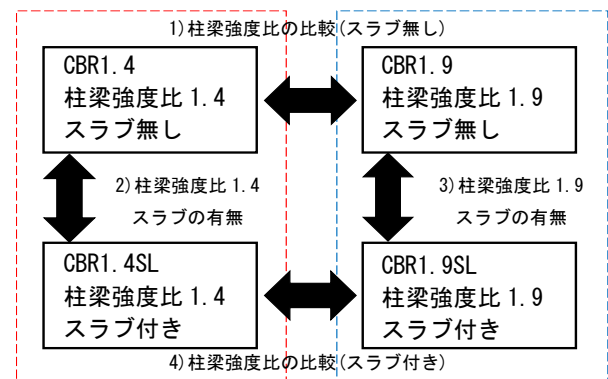


図-1 試験体の比較検討関連図

*1 日本大学大学院 理工学研究科海洋建築工学専攻 博士前期課程 (学生会員)

*2 日本大学 理工学部海洋建築工学科 教授 博士(工学) (正会員)

*3 日本大学 理工学部海洋建築工学科 元教授 工学博士 (正会員)

なお、表-1には柱梁接合部の挙動に及ぼす主な設計因子として、接合部せん断余裕度(接合部せん断終局強度と梁主筋降伏時接合部入力せん断力の比)、付着余裕度(付着強度と梁通し主筋が接合部両端で引張および圧縮の降伏強度に達した時に生じる付着応力の比)⁶⁾、柱梁強度比、柱梁接合部降伏による強度低下率 η を示している。表-1の計算結果は、表-2に示す材料試験結果を用いて算出した値である。なお、CBR1.4SLとCBR1.9SLはスラブによる効果を計算に考慮していない。

2.2 載荷概要

図-3に載荷装置および計測箇所を示す。実験は日本大学理工学部大型構造物試験センター内に設置されている通称建研式載荷装置を用いて行った。試験体は柱頭、柱脚をピン支持、左右の梁端部をローラー支持とし、地震時に生じる接合部の応力状態を再現した。水平力は、反力壁に取り付けた油圧ジャッキにより、柱頭の変位制御で正負交番繰返し載荷を行った。油圧ジャッキによって負荷した水平力はL字ビームを介して試験体に伝達され、L字ビームはパンタグラフ機構により水平に維持されている。柱軸力は、軸力用油圧ジャッキ上部にスライド支承を設けることで試験体の水平変位に追随し、常に柱頭図心に定軸力が作用するように荷重制御した。荷重の計測は水平加力用の油圧ジャッキに組み込まれたロードセルを用いた。また、梁端部に設置したロードセルにより梁せん断力を計測した。試験体の水平変位は、柱頭部分に取り付けたストローク式変位計を用いて計測した。また鉄筋のひずみは、主に接合部周辺の柱主筋、梁主筋、

せん断補強筋にひずみゲージを取り付け計測した。接合部の挙動は、試験体表面にメッシュ状に貼り付けた計測用マーカの座標を画像センサーにて計測した。

2.3 加力スケジュール概要

表-3に加力スケジュール概要、図-4に加力スケジュールを示す。実験は部材角(以降、Rと称す)R=1/500, 1/200, 1/100, 1/75, 1/50, 1/30, 1/20の漸増増分変位を与えた。各部材角の繰返し回数(サイクル数)は、継続時間の長い地震動の影響を見るために10回⁸⁾とした。

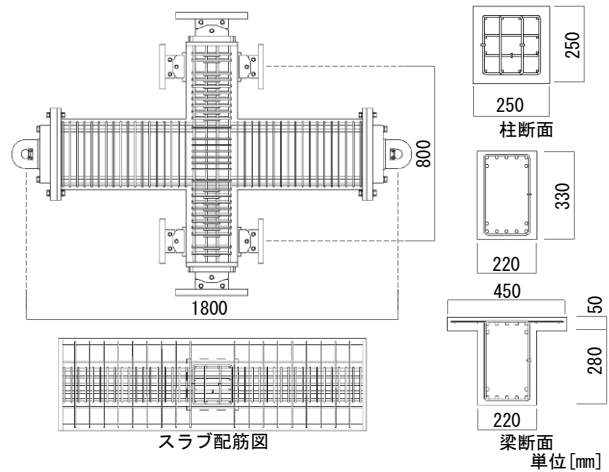


図-2 試験体形状および配筋詳細図

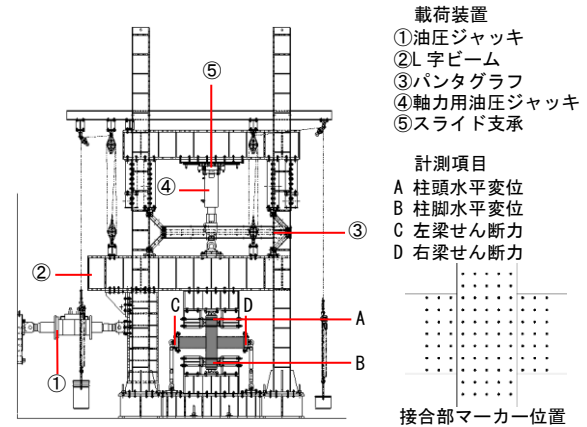


図-3 載荷装置および計測箇所

表-1 試験体概要

試験体名	CBR1.4	CBR1.4SL	CBR1.9	CBR1.9SL
載荷方法	静的漸増増分載荷			
コンクリート強度 [N/mm ²]	54			
梁	主筋	14-D13 (SD345)		
	せん断補強筋	2-S6@35 (KSS785)		
柱	主筋	12-D10 (SD295)	12-D13 (SD345)	
	せん断補強筋	4-S6@30 (KSS785)		
接合部	横補強筋	2-S6 (KSS785)		
	せん断余裕度	1.6		
	付着余裕度	1.2		
スラブ筋	4-D4 (SD295)		4-D4 (SD295)	
柱梁強度比	1.4		1.9	
強度低下率 β_1	1.4		1.6	
軸力比 η	0.15			

表-2 材料試験結果一覧

鉄筋	降伏強度	降伏ひずみ	引張強度	ヤング係数
	[N/mm ²]	[μ]	[N/mm ²]	[$\times 10^3$ N/mm ²]
D10	352	1772	508	208
D13	366	2066	547	196
D4	312	1820	508	199
S6	927	7052	1092	199
コンクリート	圧縮強度	圧縮時ひずみ	割裂強度	ヤング係数
	[N/mm ²]	[μ]	[N/mm ²]	[$\times 10^3$ N/mm ²]
CBR1.4	54	2500	3.2	31
CBR1.9	54	2467	2.9	30
CBR1.4SL	54	2517	3.2	30
CBR1.9SL	54	2251	2.9	31

表-3 加力スケジュール概要

部材角R[rad]	1/500	1/200	1/100	1/75	1/50	1/30	1/20
サイクル[C]	1~10	11~20	21~30	31~40	41~50	51~60	61~70
繰返し回数[回]	10						
目標変位[mm]	1.6	4.0	8.0	10.7	16.0	26.7	40.0
目標部材角[%]	0.2	0.5	1.0	1.3	2.0	3.3	5.0

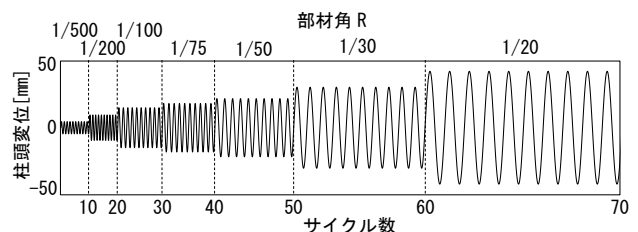


図-4 加力スケジュール

3. 実験結果

3.1 破壊過程および最終破壊状況

図-5 に各試験体の $R=1/75 \sim 1/30$ の正側載荷時ひび割れ図を、図-6 にひび割れ概念図を、写真-1 に各試験体の最終破壊状況を示す。CBR1.4 は、 $R=1/50$ までは柱フェイス位置の梁曲げひび割れが開く破壊が見受けられた。 $R=1/30$ では柱フェイス位置の梁曲げひび割れは開かなくなり、柱曲げひび割れと接合部斜めひび割れが顕著に開き閉じなくなった。そのことにより、接合部が4分割されて破壊が進行する接合部降伏破壊(図-6 a))の様相を示した。柱梁強度比を高くした CBR1.9 においても、CBR1.4 と同様に $R=1/50$ までは梁曲げ降伏型の破壊が見られたが、 $R=1/30$ から接合部降伏破壊の様相を示した。

スラブの付いた CBR1.4SL と CBR1.9SL は、 $R=1/50$ までは梁曲げひび割れが開く破壊が見受けられた。 $R=1/30$ では柱曲げひび割れおよびスラブのひび割れ、接合部斜めひび割れが顕著に開くようになり、スラブとともに接合部が4分割され破壊が進行し接合部降伏破壊の様相(図-6 b))を示した。

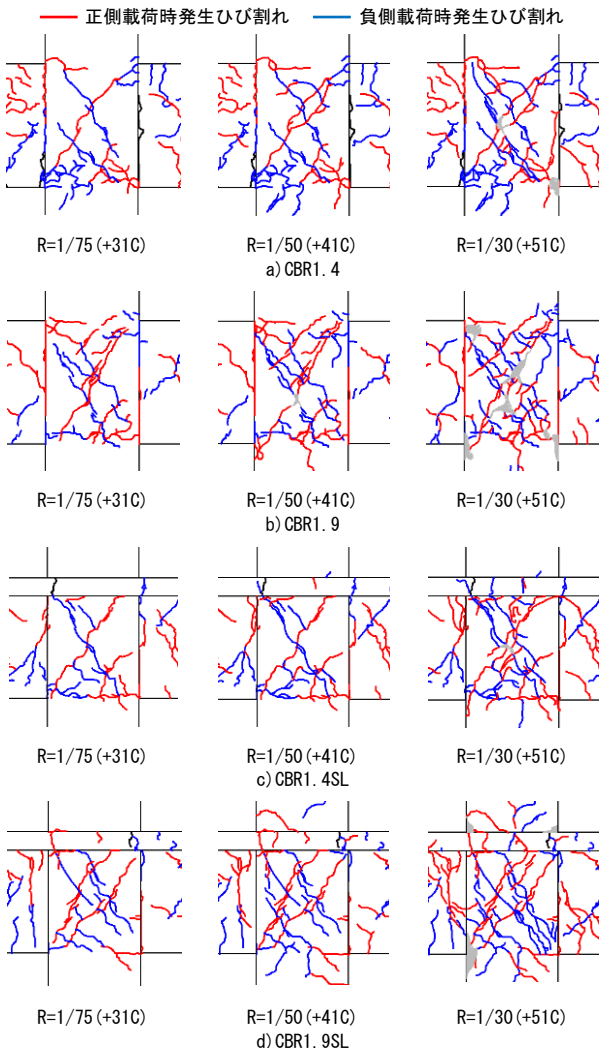


図-5 ひび割れ図

接合部降伏破壊をしないと考えていた柱梁強度比 1.9 の試験体や、スラブによって接合部のひび割れの発生や進展が生じないと期待していたスラブ付き試験体においても、最終的には接合部の破壊が著しく生じ接合部降伏破壊の様相を示した。

3.2 節点モーメント-部材角関係

表-4 に各試験体の最大耐力時節点モーメント(以降、最大耐力)一覧を、図-7 に各試験体の節点モーメント-部材角関係を示す。節点モーメントは、梁端部のロードセルで測定した梁せん断力から算出した左右の梁の節点位置でのモーメントの和であり、正側載荷時の値を正と定義した。また、主筋の降伏は引張または圧縮側の降伏ひずみに達した後、ひずみの伸縮が著しく生じた点と定義した。各試験体の最大耐力は、梁端曲げ終局で決まる最大耐力の計算値(梁の危険断面が曲げ終局強度に至る時の節点モーメント)を上回った。いずれの試験体も梁主筋は $R=1/100$ で降伏した。なお、スラブ付き試験体の CBR1.4SL と CBR1.9SL のスラブ筋は $R=1/200$ で降伏した。その後本来であれば降伏しないはずの主筋が、 $R=1/30$ の最大耐力を経験する直前もしくは最大耐力経験後の繰返し載荷で引張降伏した。また部材角が大きくなるにつれてスリップ性状が顕著に表れた。柱梁強度比

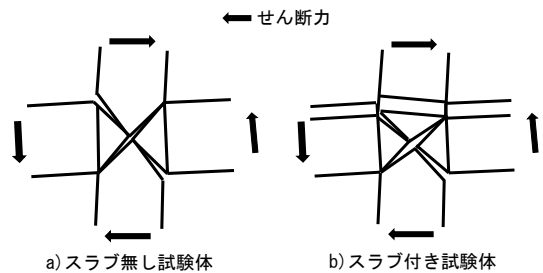


図-6 ひび割れ概念図

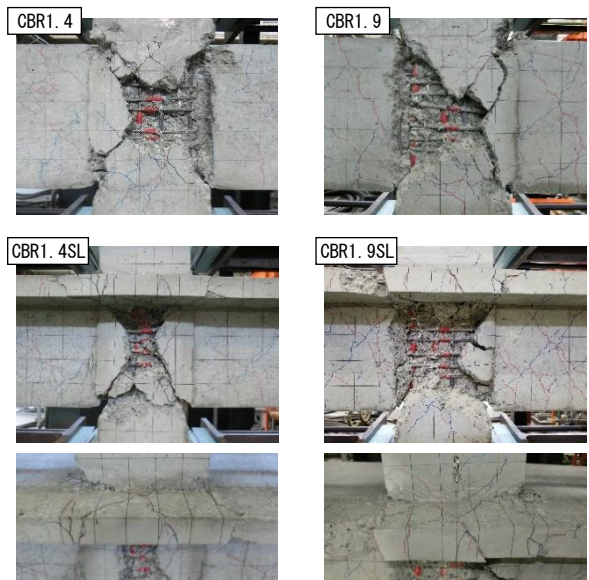


写真-1 最終破壊状況

やスラブコンクリート、スラブ筋による履歴ループや最大耐力への影響は見られなかった。

3.3 耐力低下の推移

図-8 に各試験体の耐力低下の推移を示す。耐力低下の指標は、各サイクルの最大節点モーメント M と最大耐力時の節点モーメント M_{MAX} の比(M/M_{MAX})とした。各試験体とも $R=1/50$ までの同一部材角の繰返し载荷による耐力低下はあまり見られず、 $R=1/30$ で最大耐力を経験した後、繰返し载荷によって顕著な耐力低下が生じた。各試験体ともに耐力低下の推移に大きな差異はなく、载荷終了時には最大耐力の 4 割まで低下した。

3.4 接合部入力せん断力一部材角関係

図-9 に各試験体の接合部入力せん断力一部材角関係を示す。接合部入力せん断力は、左右の梁の危険断面位置でのモーメントを応力中心間距離($7/8d$:一定)で除して求めた値から、柱のせん断力を差し引き算出した。各試験体の接合部入力せん断力の最大値は、梁主筋降伏時の接合部入力せん断力の計算値を上回った。 $R=1/30$ で最大耐力を経験後、同一部材角の 10 回の繰返し载荷によって接合部入力せん断力は徐々に低下するが、 $R=1/20$ に部

材角が上昇することで接合部入力せん断力が上昇しているため、接合部せん断破壊が生じていないと考えられる。

4. 柱梁接合部の挙動

本章では、スラブが無い CBR1.4 と CBR1.9 の柱梁接合部の挙動について、画像センサーで計測したマーカーの座標変位と鉄筋のひずみから詳細に検討する。

4.1 接合部の変形と鉄筋のひずみ

図-10 に各試験体の接合部の挙動を示す。各変位は、

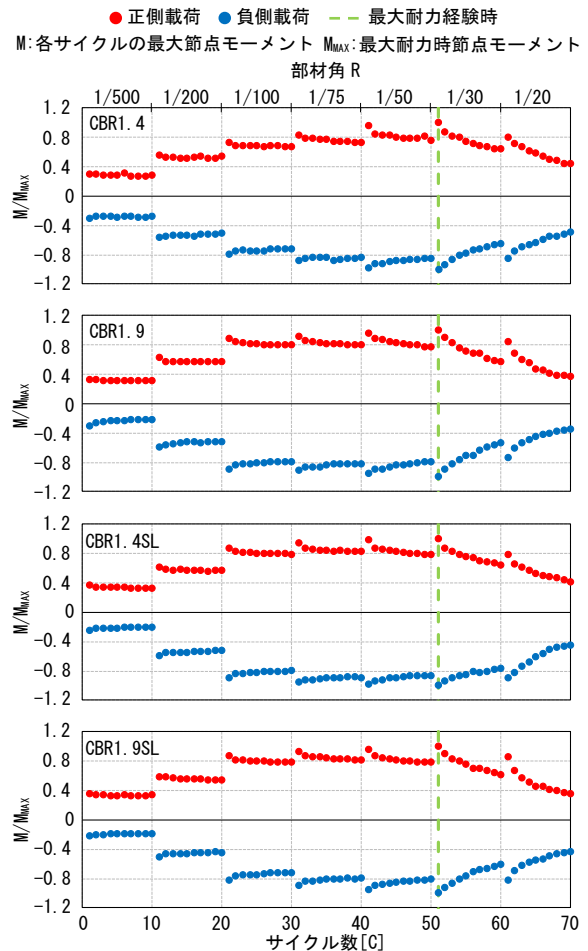


図-8 耐力低下の推移

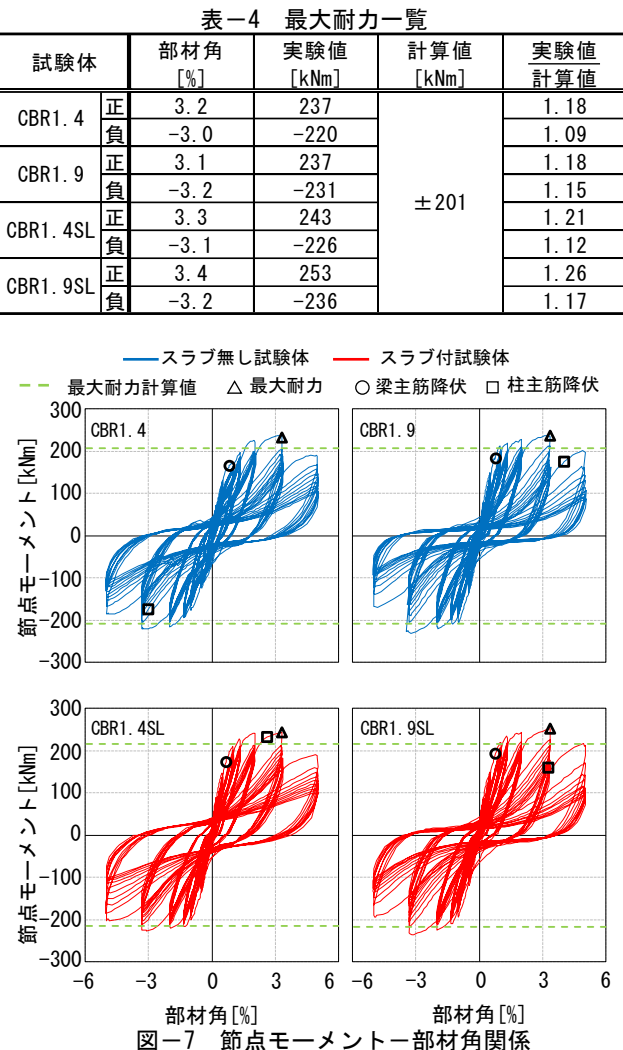


図-7 節点モーメント-部材角関係

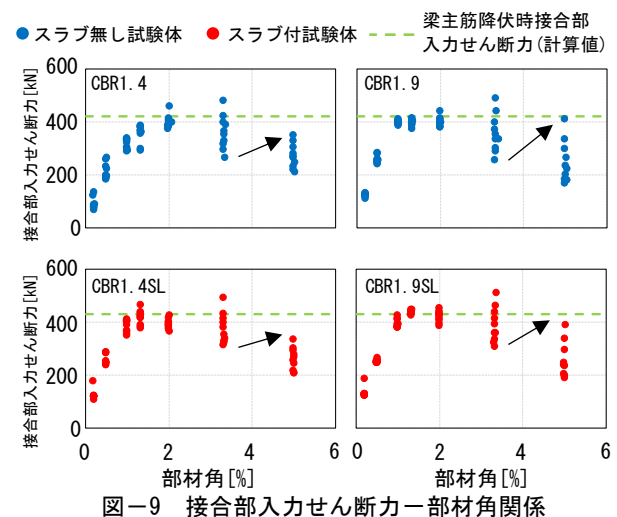


図-9 接合部入力せん断力一部材角関係

正側荷重時と負側荷重時で色分けして示している。鉛直変位(図-10 a)は、CBR1.4はR=1/30から、CBR1.9はR=1/20から圧縮側への変位が顕著に増加した。また、両試験体ともに正側および負側に荷重をしている際に引張側へ変位が生じ、除荷時に圧縮側へ変位が生じる挙動を示した。水平変位(図-10 b)は、両試験体ともにR=1/50で引張側への変位が顕著に表れた。鉛直変位の挙動と同様に、正負両方の荷重時には引張側へ変位が生じていた。このことから、荷重時には接合部が鉛直方向および水平方向に膨張していることがわかる。せん断変位(図-10 c)は、対角方向の変位を差し引いて算出した。R=1/50から変位が生じ始め、接合部の破壊が生じ始めたR=1/30で顕著な変位の増加が見られる。

図-11 に各試験体の節点モーメント-ひずみ関係を示す。柱隅部の主筋のひずみC1~C4は、正側荷重時に接合部上部の柱主筋(C1~C2)は引張、下部(C3~C4)は圧縮のひずみが生じており、柱の曲げモーメントに抵抗するひずみ挙動を示した。一方、接合部内側を通る柱主筋C5~C8は、接合部斜めひび割れが発生したR=1/100から正負両方の荷重時に引張のひずみが、除荷時には圧縮のひずみが生じる挙動を示した。これは、接合部の鉛直変位の正負荷重時に生じる膨張によるものだと考えられ、

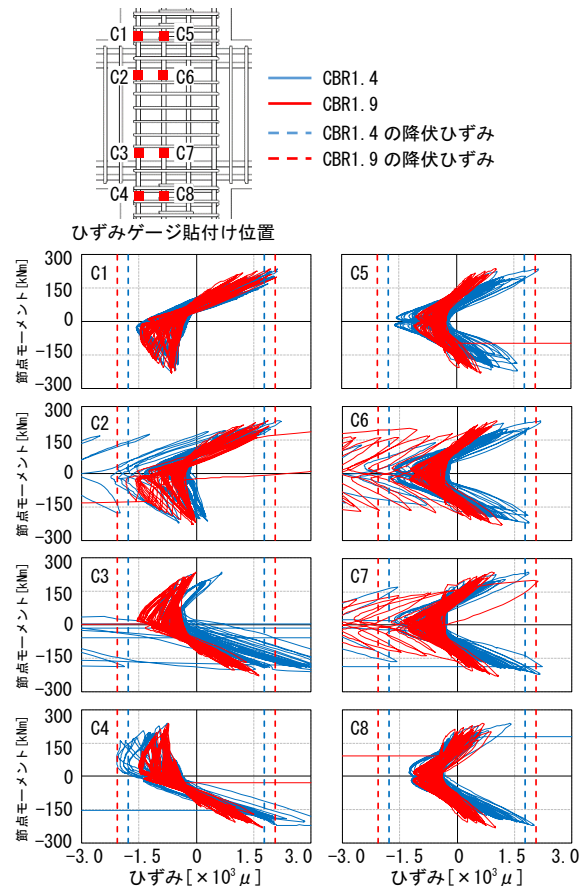


図-11 節点モーメント-ひずみ関係

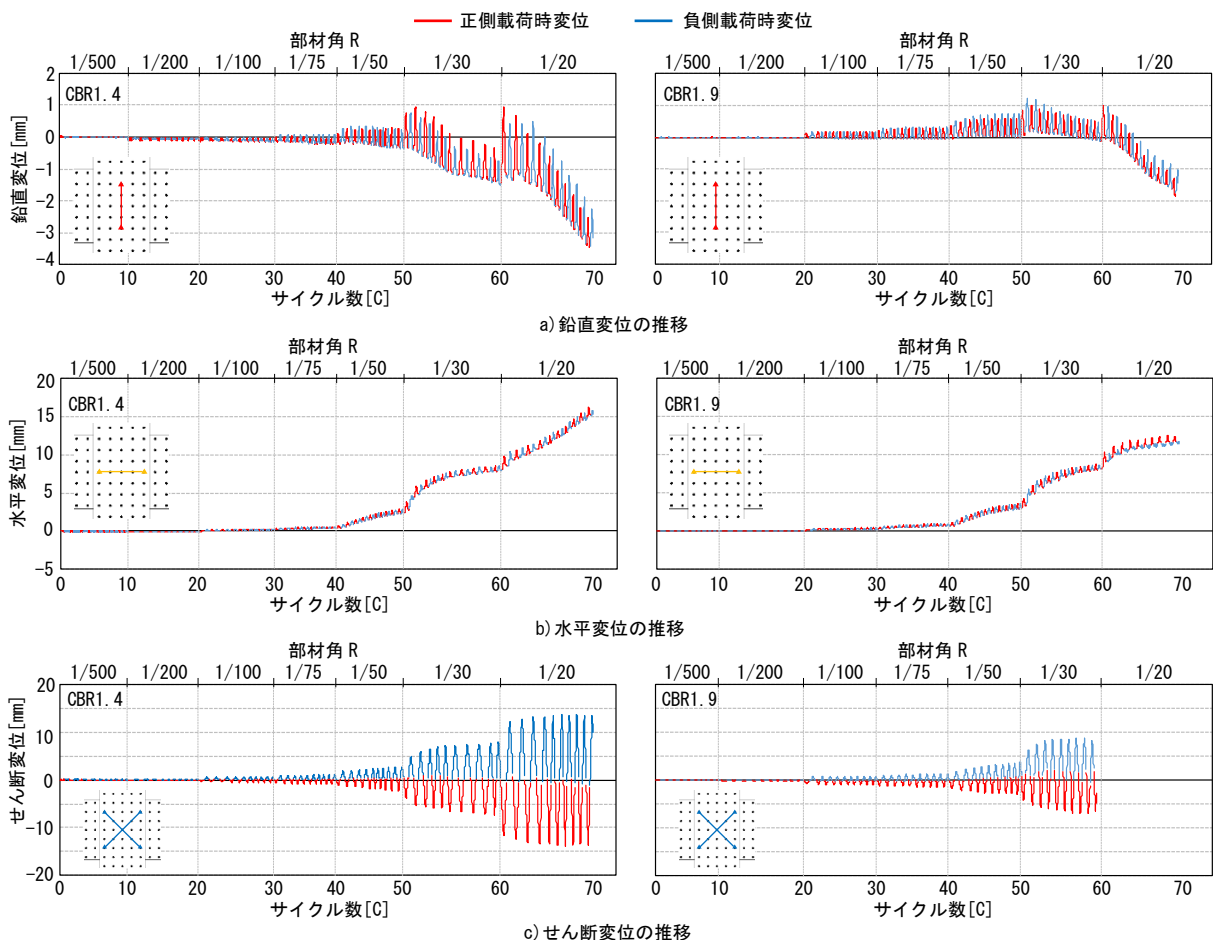


図-10 接合部の挙動

接合部の変形に伴う力を柱主筋で抵抗しているため、鉛直変位の増分量が大きい CBR1.4 の方が柱主筋の引張りずみが大きく生じている。また、除荷時に生じた接合部の圧縮方向の変位の増加に伴い、柱主筋も除荷時に圧縮側へ顕著なひずみが生じていた。接合部の鉛直方向の膨張により、本来であれば降伏しない柱主筋が引張降伏し接合部への損傷が進行したと考えられる。

4.2 接合部隅部の挙動

図-12 に各試験体の梁端部および接合部隅部の変位を示す。なお、CBR1.9 の $\delta 1 \sim \delta 3$ は、 $R=1/30$ で生じたコンクリートの剥落により計測用マーカーが剥がれたため計測を終了した。両試験体ともに $R=1/75$ までは部材角が大きくなるにつれて梁端部の変位量は増加していた。一方、接合部隅部の斜めの変位はあまり生じていないことから、 $R=1/75$ までは梁端部降伏型の挙動が支配的であったと考えられる。 $R=1/50$ では、梁端部の変位量と接合部隅部の斜めの変位量が増加した。 $R=1/30$ で両試験体の接合部隅部の斜めの変位量が顕著な増加を示した。また、梁端部の変位量は減少傾向を示していることから、 $R=1/30$ からは接合部降伏破壊の挙動が支配的であったと考えられる。

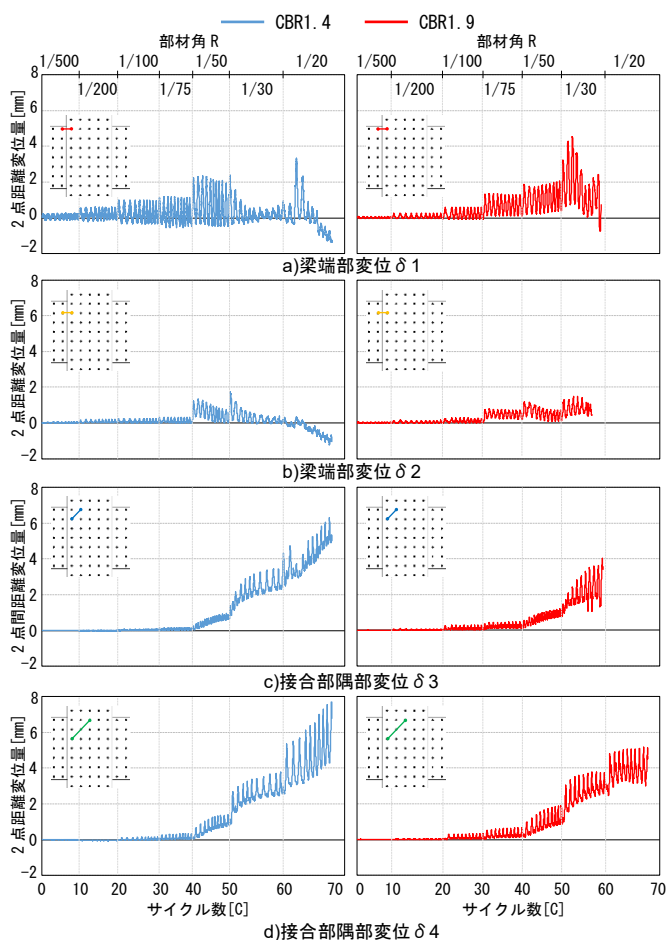


図-12 梁端部および接合部隅部の変位

5. まとめ

実験結果より得られた知見を以下に示す。

- 1) CBR1.4 と CBR1.9 の実験結果には大きな差異は見られなかった。柱梁強度比 1.9 で接合部降伏破壊をしないと考えていた試験体は、最大耐力を経験するまでは梁曲げ降伏型の破壊が見られたが、 $R=1/30$ から柱の曲げひび割れと接合部斜めひび割れが閉じなくなり接合部への損傷が著しく生じた。
- 2) スラブが付いた CBR1.4SL および CBR1.9SL においても、スラブが無い試験体と実験結果に大きな差異は見られなかった。また、スラブによって柱の曲げひび割れと接合部斜めひび割れが繋がらないと期待していたが、スラブが無い試験体と同様に、ひび割れが繋がりに閉じなくなることで接合部への損傷が生じた。
- 3) 全ての試験体とも、破壊過程や鉄筋の降伏状況、接合部入力せん断力の低下が生じていないことから最終破壊性状は接合部降伏破壊であると考えられる。
- 4) 接合部は正負両方の荷重時に水平・鉛直方向ともに膨張していた。鉛直方向の膨張によって、本来であれば降伏しない柱主筋が引張降伏し、接合部への損傷が進行したと考えられる。

参考文献

- 1) 大川出：東日本大震災の最終報告を踏まえて③長周期地震動の評価について、独立研究法人建築研究所，2012.6
- 2) 南海トラフの巨大地震モデル検討会他：南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動に関する報告，2015.12
- 3) 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，2016.4
- 4) 塩原等：鉄筋コンクリート柱梁接合部：見逃された破壊機構，日本建築学会構造系論文集，Vol73，No.631，pp.1641-1648，2008.9
- 5) 横澤輝他：多数回繰返し荷重を受ける高層 RC 造建物の十字形柱梁接合部の構造性能に関する実験的研究，Vol40，No.2，pp.229-234，2018
- 6) 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，1999
- 7) 塩原等：鉄筋コンクリート柱梁接合部における接合部降伏破壊の終局強度の実用的算定法，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp389，2014.9
- 8) 出水俊彦他：長周期地震動を受ける RC 造超高層建築物の構造性能(1,5,6)，日本建築学会大会学術講演会梗概集，pp.499-500，507-510，2009