

論文 多数回繰り返し変形を受けるRC造柱梁接合部の劣化性状

高橋 俊之*1・向井 智久*2・菊田 繁美*3・衣笠 秀行*4

要旨: 超高層RC造建物に使用される材料を用いた柱梁接合部を対象として、パラメータを同一変形における繰り返し数、柱梁接合部のせん断余裕度・付着余裕度として静的交番繰り返し载荷実験を行った。既往の研究で示された方法で接合部の変形を分離し、その結果から破壊モードを特定し、梁曲げ降伏した後に接合部が破壊する試験体に対して、繰り返し数と劣化性状（劣化指標として耐力低下率、エネルギー吸収低下率に着目）の関係や、既往の耐力式の精度について検討した。

キーワード: 多数回繰り返し、耐力低下、エネルギー吸収低下、靱性能、変形分離、柱梁接合部

1. はじめに

近い将来に発生するとされている東海、東南海、南海地震などの海溝型巨大地震が大都市を襲うと、数秒から十秒程度の周期で大きな揺れが数分から数十分に渡って継続する「長周期地震動」にさらされる可能性が指摘されている。大都市圏では数多くの超高層建物や免震建物が建設されており、その固有周期は2~6秒と長いいため長周期地震動に遭遇すると、多数回の大振幅変形を受ける可能性が高い。

一方、RC柱梁接合部の構造安全性を評価するために、数多くの柱梁接合部実験^{1~6)}が行われているが、これらの検討は、正負交番で2, 3回程度の繰り返し数であり、本研究で対象としているような多数回繰り返しに対する柱梁接合部の挙動に関する検討は行われていない。また、文献⁷⁾では、多数回繰り返し変形を受ける柱梁接合部の研究が行われており、その付着余裕度(付着強度/設計用付着応力度)は約1.3程度と比較的大きな余裕をもって設計されているものの、大変形時に接合部内の付着劣化が

進展し、耐力低下が確認されている。

そこで本研究では、多数回繰り返し変形を受けるRC造構造部材の復元力特性モデルを構築し、それらを用いた地震応答解析によって得られる応答および部材の損傷を把握することを目的とし、本論では多数回繰り返し変形を受ける柱梁接合部の劣化性状に関する検討を行った。具体的には、現行の設計法において許容される範囲内で接合部内主筋の付着余裕度を変化させ、かつ、接合部せん断余裕度を変化させた試験体を対象として、多数回繰り返し変形を受ける柱梁接合部の破壊モードを検討し、多数回繰り返しによる耐力低下やエネルギー吸収性能劣化について技術資料を得る。

2. 実験概要

2.1 試験体

図-1に試験体の配筋図、表-1に各試験体の詳細を、表-2に使用した鉄筋とコンクリートの材料試験結果を示す。試験体の検討対象建物は、高さ100m程度の超高層RC

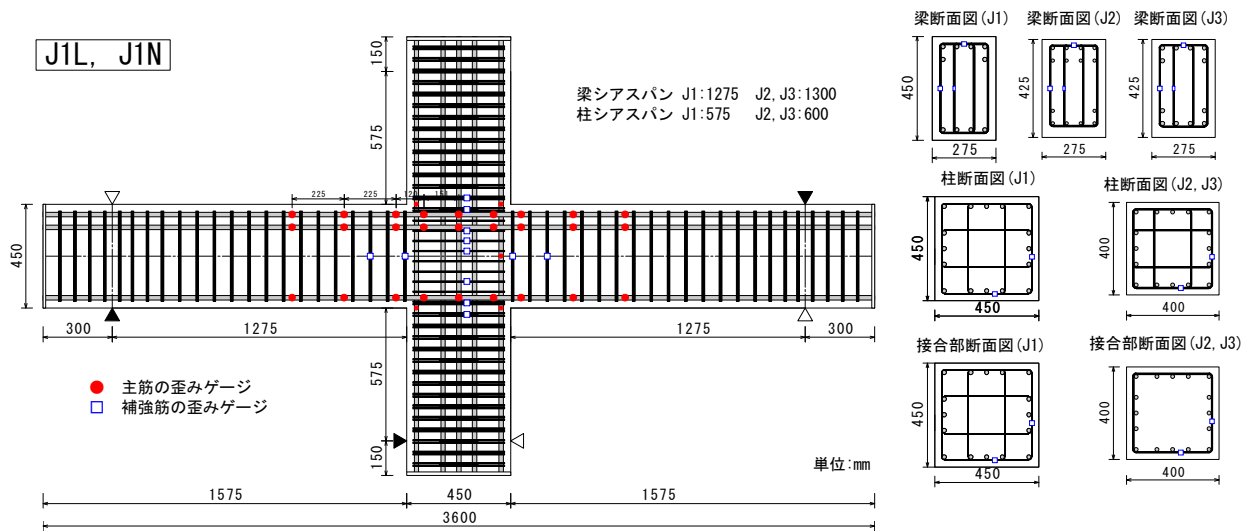


図-1 試験体の配筋図(試験体J1L, J1N)

*1 東京理科大学 理工学研究科 建築学専攻 (正会員)

*2 独) 建築研究所 国際地震工学センター 主任研究員 博(工) (正会員)

*3 戸田建設 技術研究所 (正会員)

*4 東京理科大学 理工学部建築学科 教授 工博 (正会員)

表-1 試験体の詳細

試験体	梁				柱				柱梁接合部	
	断面	F _c	主筋(引張鉄筋比)	補強筋(横補強筋比)	断面	F _c	主筋(引張鉄筋比)	補強筋(横補強筋比)	補強筋(横補強筋比)	
	b × D	N/mm ²	SD490	USD685	b × D	N/mm ²	SD490	USD685	USD685	
J1L	275 × 450	42	6-D19(1.39%)	4-D6@75(0.62%)	450 × 450	48	16-D19(0.99%)	4-D6@75(0.57%)	2-D6@75(0.29%)	
J1N			4-D19(0.93%)							
J2L	275 × 425	42	8-D16(1.36%)	4-D6@75(0.62%)	400 × 400	48	16-D19(1.26%)	4-D6@75(0.64%)	2-D6@75(0.29%)	
J2N			6-D16(1.02%)							
J3L			6-D19(1.47%)							
J3N			6-D19(1.47%)						2-D6@75(0.28%)	

建築物の下層階を対象とした縮尺1/2の基準試験体を含め合計6体(長周期対応載荷L試験体:3体, 通常対応載荷N試験体3体)である。各試験体は梁曲げ降伏先行形で、算定した各強度とその余裕度を表-3に示す。表中の梁の曲げ終局強度(精算), せん断強度(靱性A法), 接合部の設計用せん断力, せん断強度, 設計用付着応力度, 付着強度は, 文献⁸⁾を参考に算出した。なお, 表中の上段と下段は正負で配筋の異なる試験体のそれぞれの算定値であり、付着余裕度(緩和)は, 文献⁸⁾より付着強度 τ_j を1.25倍した値である。試験体の特徴は, J1は柱断面が大きく, J2はJ3の鉄筋を細く, 多めに配置されているため, J1, J2, J3の順に, せん断余裕度・付着余裕度ともに小さくなるものである。また, 梁のせん断強度(靱性A法)は塑性ヒンジ回転角 R_p を0とした算定値である。

2.2 加力計画

載荷プログラムは地震時のランダム応答を定振幅の振動に置き換えることで総入力エネルギーを消費する等価な繰り返し数を算定⁹⁾し, その値を元に各部材角10サイクルずつ繰り返して, 劣化が顕著となった場合, その部材角以降のサイクルを2回ずつ繰り返して, 表-4に示すようになった。加力は, 柱脚をピン支持, 梁の支点をピンローラ支持とし, 柱頭に水平力と軸力比が0.15となるよう鉛直軸力を載荷し, 両梁端で計測される変位から算定される層間変形角Rで制御した。

2.3 計測計画

変位計は, 各変形成分を算定するために, 図-2に示すように設置し, 文献¹⁰⁾を参考に, V1~V24の計測値を用いて, 梁変形角(R_{ib}), 梁端の回転変形角(R_{seb}), 接合部回転変形角(梁)(R_{spb}), 柱変形角(R_{ic}), 柱端の回転変形角(R_{sec}), 接合部回転変形角(柱)(R_{spc}), 接合部せん断変形角(R_{sp})に分離した。また, 歪みゲージは, 図-1に示すように, 梁と柱と柱梁接合部の主筋とせん断補強筋に貼付した。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

図-3に荷重-層間変形関係を示す。図中の縦軸の層せん断力は, 柱に作用するP- Δ 効果を考慮している。

全試験体ともに, R=1/800の荷重中に梁端に曲げひび割れが発生し, 続いてJ1試験体(以後J1)はR=1/100の荷重

表-2 材料強度

コンクリート			
試験体名	部位	圧縮強度 N/mm ²	ヤング係数 kN/mm ²
J1N	柱	54.8	31.88
	梁	46.6	31.93
J1L	柱	56.6	32.76
	梁	47.5	32.63
J2N	柱	49.7	30.64
	梁	46.5	30.30
J2L	柱	50.2	30.93
	梁	48.4	31.28
J3N	柱	52.2	31.41
	梁	46.2	29.22
J3L	柱	54.8	32.85
	梁	48.6	29.94

鉄筋			
呼び名	降伏強度 N/mm ²	ヤング係数 kN/mm ²	引張強度 N/mm ²
D19(SD490)	523.9	187	698
D16(SD490)	562.7	189	751
UHD6(USD685)	694.1	181	926

表-3 算定した各強度とその余裕度

	項目	単位	J1L	J1N	J2L	J2N	J3L	J3N
			値	値	値	値	値	値
梁	V _{bu} 曲げ終局強度(精算)	kN	185	185	185	184	233	232
	V _u せん断強度(靱性A法 R _v =0)	kN	640	635	594	586	598	587
	V _u /V _{bu} せん断余裕度		3.46	3.44	3.21	3.18	2.57	2.53
			2.56	2.54	2.81	2.78	2.70	2.66
接合部	V _j 設計用せん断力	kN	1096	1096	1196	1197	1378	1380
	V _{ju} せん断強度	kN	1871	1830	1423	1414	1513	1462
	τ_j 設計用付着応力度	N/mm ²	11.06	11.06	11.25	11.25	12.44	12.44
	τ_{ju} 付着強度	N/mm ²	11.19	10.99	10.44	10.38	10.98	10.67
	V _{ju} /V _j 接合部 せん断余裕度		1.71	1.67	1.19	1.18	1.10	1.06
	τ_j/τ_{ju} 接合部 付着余裕度		1.01	1.00	0.93	0.92	0.88	0.86
		1.21	1.19	1.06	1.05			
τ_j/τ_{ju} 接合部 付着余裕度(緩和)		1.27	1.24	1.16	1.15	1.10	1.07	
		1.52	1.49	1.32	1.32			

表-4 載荷プログラム

R	±1/800	±1/400	±1/200	±1/100	±1/50	±1/33	±1/25	±1/20
L試験体	1	2	10	10	10	2	2	2
N試験体	1	2	2	2	2	2	2	2

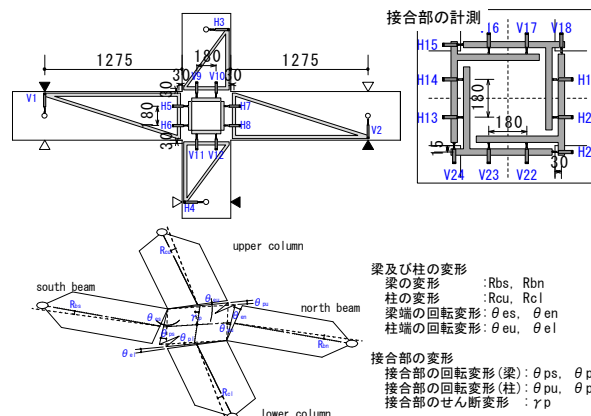


図-2 変位計設置位置と変形角の定義

中に, J2,J3はR=1/200の荷重中に接合部に斜めひび割れが発生し, その後, R=1/50で梁端部のコンクリートに

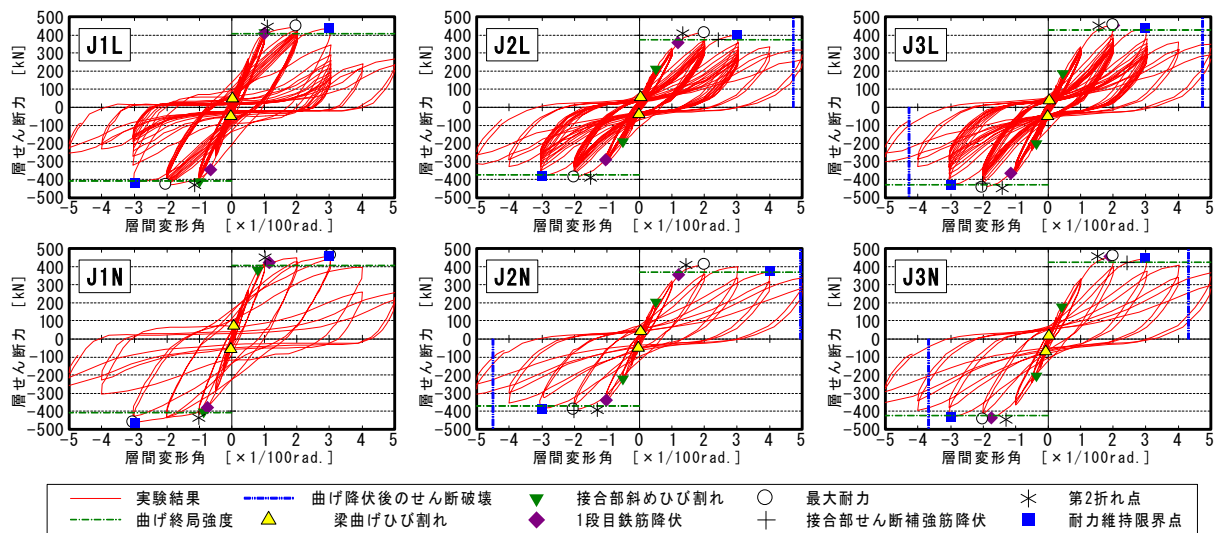


図-3 層せん断力-層間変形角関係

圧縮ひび割れが見られた。引張鉄筋は、左右の梁ともにヒンジ領域の鉄筋から $R=1/100$ 以降、1段目、2段目と順に降伏し、 $R=1/50$ 以降、接合部内の主筋が降伏した。J1は接合部内せん断補強筋の降伏は見られなかったが、J2Lは $R=1/33$ 、J2Nは $R=1/50$ 、J3Lは $R=1/50$ 、J3Nは $R=1/33$ の载荷中に降伏した。また、J1Nは $R=1/33$ で、その他の試験体は $R=1/50$ で最大耐力に達し、徐々に耐力は低下した。また、J1Lは $R=1/33$ の繰り返しで、J1Nは $R=1/25$ の2サイクル目にその他の試験体よりも顕著な耐力低下が確認された。

凡例の第2折れ点の算定法について以下に示す。第1折れ点は、実験値の初期のステップの点を用いて初期剛性 K を算出し切片のない $0.8K$ の剛性を有する直線と、実験結果の包絡線との交点とする。第2折れ点の荷重は実験値の $R=1/50$ の点とし、第2折れ点の変形は、原点・第1、2折れ点・ $R=1/50$ の点を結んだ骨格曲線に囲まれた面積が、 $R=1/50$ までの包絡線に囲まれた面積と等しくなる点として決定した。なお、第2折れ点以降の骨格曲線の荷重は一定とした(図-4)。また、耐力維持限界点とは、最大耐力に対する各部材角1サイクル目の耐力の割合が90%を維持できた部材角の最大値である。図中の計算値として、等価ブロック法による曲げ終局強度は文献⁸⁾を参考に、梁の終局曲げモーメントを算出し、それに応じた層せん断力である。図中の曲げ降伏後のせん断破壊とは、文献⁸⁾にて、梁降伏後の接合部せん断破壊する(接合部せん断変形が卓越する破壊と本論では定義)とされる層間変形角を、図-3の第2折れ点を塑性率 $\mu=1.0$ として算定した。

3.2 耐力の評価

表-5に最大層せん断力の実験値と算定値の比較を示す。算定値の層せん断力は図-3で示した曲げ終局強度で

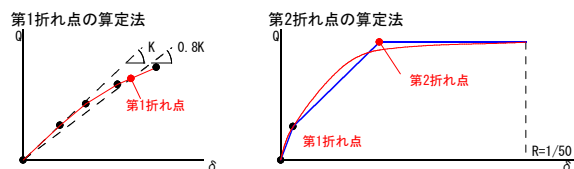


図-4 第1折れ点と第2折れ点の算出法

表-5 実験値と計算値の比較

		J1L	J1N	J2L	J2N	J3L	J3N
実験値	Q_{max} 最大層せん断力(正側)	447	460	411	410	455	458
	Q_{min} 最大層せん断力(負側)	431	463	390	394	447	448
算定値	Q_y 層せん断力	408	407	372	370	426	424
実験値 / 算定値	最大層せん断力(正側)	1.10	1.13	1.11	1.11	1.07	1.08
	最大層せん断力(負側)	1.06	1.14	1.05	1.06	1.05	1.06

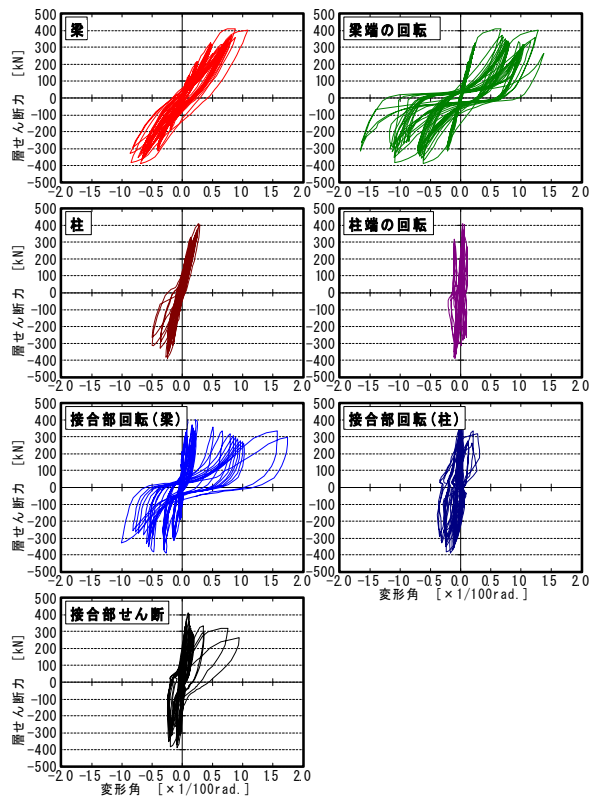


図-5 層せん断力と分離した変形の関係(J2L)

ある。最大層せん断力は、全試験体とも、1.0~1.1倍程度、実験値が計算値を上回り、精度良く評価出来ている。

3.3 分離した変形と破壊モード

図-5にJ2Lの層せん断力と分離した変形の関係を示す。文献⁷⁾では、接合部の損傷が大きい試験体では、層間変形は接合部の変形が大きく、接合部の損傷が小さい試験体では、梁のたわみと梁端の回転が多いとある。また、図中より、本実験の層間変形は梁変形(R_{sb})、梁端の回転変形(R_{seb})、接合部の回転変形(梁)(R_{spb})に寄与し、その他の変形は極めて小さい値であるため、本論では、繰り返しにより卓越した梁変形、梁端の回転変形、接合部の回転変形(梁)に着目して検討する。

図-6に正側の各変形角ピーク時における各変形成分の推移を示す。全試験体において、 $R=1/100$ までは、多数回繰り返した場合でも各変形成分の値の推移に大きな変動はない。そこで以下に、 $R=1/50$ の各変形成分について検討する。なお、図中色塗りはL試験体、図中色抜きはN試験体である。

図-6(a)のJ1は、 $R=1/50$ の繰り返しで梁変形が減少し、梁端の回転変形、接合部の回転変形(梁)が微増している。また、 $R=1/33$ 以降の繰り返しは、その傾向がより顕著となり、特に梁端の回転変形は大きく増加している。繰り返し数の異なるJ1LとJ1Nを比較した場合、 $R=1/50$ の2サイクル目まで梁端の回転変形はほぼ同じ値を示していたが、 $R=1/33$ 以降、繰り返し载荷経験の多いJ1Lの梁端の回転変形が大きく増加した。また、 $R=1/50$ において接合部内の主筋の歪みが大きく増加したことから、J1は梁曲げ降伏後に、梁端の回転変形が卓越する梁主筋の抜け出し変形の増加により劣化が進行し、耐力低下の割合が大きくなったと考えられる。

図-6(b)のJ2は、 $R=1/50$ は、J1同様の結果である。 $R=1/33$ 以降の繰り返しで、梁の変形・梁端の回転変形が減少し、接合部の回転変形(梁)が増加している。繰り返し数の異なるJ2LとJ2Nを比較した場合、 $R=1/33$ の2サイクル目まで、接合部の回転変形(梁)はほぼ同じ値を示していたが、 $R=1/25$ 以降繰り返し载荷経験の多いJ2Lの接合部の回転変形(梁)が大きく増加し、梁曲げ降伏後に接合部が破壊したと考えられる。また、繰り返し载荷経験の少ないJ2Nも $R=1/20$ で接合部の回転変形(梁)が大きく増加し、同様の破壊に至ったものと考えられる。

図-6(c)のJ3も、 $R=1/50$ は、J1同様の結果である。 $R=1/33$ 以降の繰り返しで、梁の変形・梁端の回転変形が減少し、接合部の回転変形(梁)が大きく増加し、J2と同じ破壊モードと考えられる。またこの変形の増加傾向はJ2より顕著であった。

このことから、接合部せん断余裕度に続いて付着余裕度が大きい試験体は、梁曲げ降伏後に梁端の回転変形が

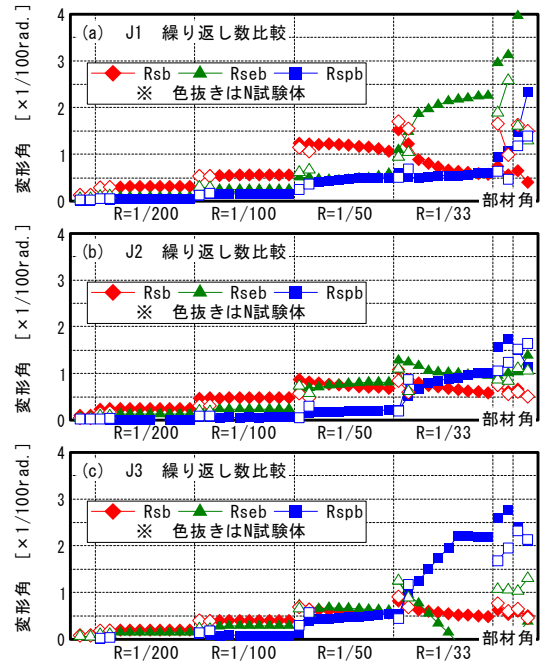


図-6 分離した変形の推移

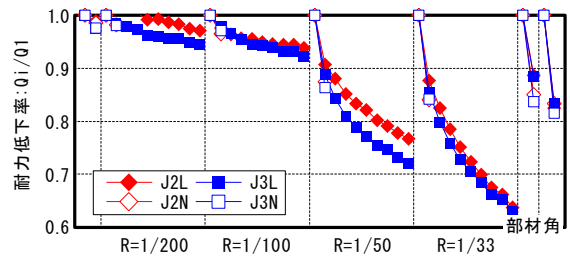


図-7 正側 耐力低下率の推移

増加し、梁に損傷が集中するが、接合部せん断余裕度の小さい試験体は、梁曲げ降伏後に接合部の回転変形(梁)が増加し、接合部に損傷が集中する破壊モードであった。

4. 梁曲げ降伏後の接合部破壊試験体の劣化性状

前章より、梁曲げ降伏後に接合部破壊に至ったJ2やJ3を対象に、接合部の劣化と耐力低下やエネルギー吸収低下との関係について検討する。

4.1 破壊モードと耐力低下

耐力低下には、荷重変形関係の包絡線上における耐力低下(剛性低下を含む)と、同一変形における各サイクル内の耐力低下(剛性低下を含む)がある。4.1.1は、前者の耐力低下を靱性能として扱い、それと破壊モードとの関係、4.1.2は、後者の耐力低下を耐力低下率として扱い、それと破壊モードとの関係をそれぞれ検討する。

4.1.1 破壊モードと靱性能

図-3より、耐力維持限界点が梁曲げ降伏後の接合部せん断破壊するとされる変形より小さく、文献⁸⁾で対象とする破壊モードと異なることを示唆している。

4.1.2 破壊モードと耐力低下率

図-7に正側の耐力低下率(Q_r/Q_i :同変形角におけるiサイ

クル目のピーク時耐力を1サイクル目のそれで基準化)の推移を示す。全試験体ともに $R=1/100$ までは、2サイクル目以降、やや耐力低下するものの徐々に耐力低下は収束し、耐力低下率は10サイクル目で0.9以上を保持する傾向にあった。せん断余裕度や付着余裕度の異なるJ2LとJ3Lを比較した場合、 $R=1/50$ の耐力低下率は10回の繰り返しで、J2Lは約0.77、J3Lは約0.72とせん断余裕度・付着余裕度の小さいJ3L試験体の耐力低下の割合がわずかに大きい。また、 $R=1/33$ の耐力低下率は10回の繰り返しで、J2Lは約0.64、J3Lは約0.63と、1/50同様、J3Lの耐力低下の割合がわずかに大きくなった。

繰り返し数の異なるL試験体とN試験体を比較した場合、 $R=1/20$ までの2サイクル目の耐力低下率はL・N試験体ともにほぼ同じ値を示しており、経験した繰り返し数が耐力低下率に与える影響は少ない。

このことから、梁部材のせん断余裕度が大きく($V_u/V_{bu}=2.5$ 以上)で、相対的に接合部せん断余裕度($V_{ju}/V_j=1.2$ 以下)や付着余裕度の値が小さい試験体($\tau_w/\tau_j=1.0$ 以下)は、接合部へ損傷が集中し、耐力低下の割合は大きくなるものと思われる。

4.2 破壊モードとエネルギー吸収低下

エネルギー吸収性能の検討に関して、エネルギー吸収量が1サイクル目と2サイクル目以降で履歴ループの形状が異なるため、本論では、2サイクル目のエネルギー吸収量を基準として検討する。エネルギー吸収低下には、耐力低下に伴う低下と除荷剛性の減少に伴う低下があるが、前者は4.1.2の耐力低下で扱うため、ここでは、後者のエネルギー吸収低下に着目し、4.2.1で2サイクル目のエネルギー吸収性能と4.2.2でそれ以降のサイクルのエネルギー吸収低下について検討する。

4.2.1 破壊モードと2サイクル目のエネルギー吸収性能

ここでは、2サイクル目のエネルギー吸収性能を評価するために、2サイクル目の等価粘性減衰定数 h_{eq} と塑性率 μ の関係を図-8に示す。なお、 $\mu=1.0$ の点は図-3における第2折れ点とし、2サイクル目の耐力低下を考慮したポテンシャルエネルギーで除している。

全試験体ともに $\mu=1.0$ 以降、塑性率が大きくなると等価粘性減衰定数は増加するが、徐々に増加の割合は小さくなる傾向にあった。また、せん断余裕度の異なるJ2とJ3を比較した場合や、繰り返し数の異なるL試験体とN試験体を比較した場合に、等価粘性減衰定数に大きな違いはなかった。

このことから、梁のせん断余裕度が大きくても($V_u/V_{bu}=2.5$ 以上)、接合部せん断余裕度($V_{ju}/V_j=1.2$ 以下)や付着余裕度($\tau_w/\tau_j=1.0$ 以下)が小さい場合、接合部回転変形が卓越するが、2サイクル目のエネルギー吸収性能に及ぼす影響は小さいことが確認された。

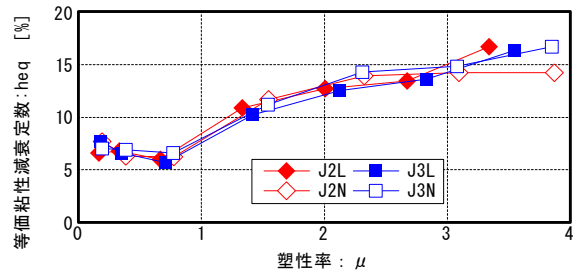


図-8 μ と h_{eq} の関係

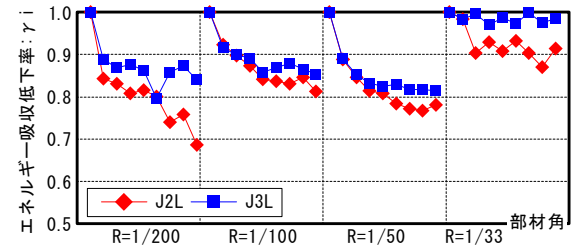


図-9 エネルギー吸収低下率の推移

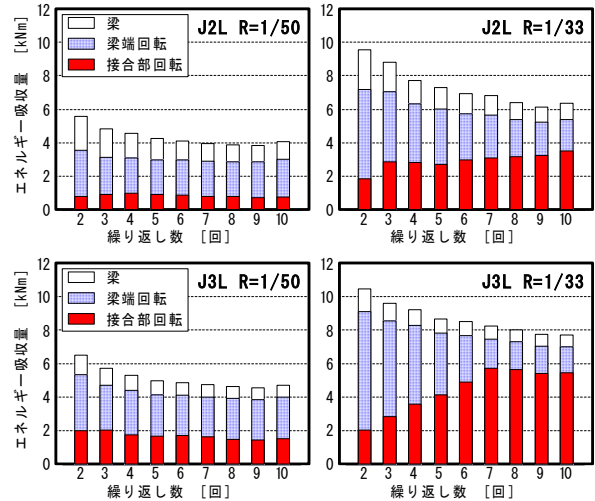


図-10 各変形成分のエネルギー吸収量の推移 (上段:J2L 下段:J3L)

4.2.2 破壊モードとエネルギー吸収低下率

ここでは、除荷剛性の減少に伴うエネルギー吸収低下に着目し、各ピーク時の正側の耐力で除し、以下の式で示す。式中の E_i は*i*サイクル目1ループでのエネルギー吸収量、 Q_i^+ は*i*サイクル目での正側のピーク時耐力とし、 i サイクル目の正側のエネルギー吸収低下率(以降 γ_i)を以下の式(1)に示す。

$$\gamma_i = (E_i / E_2) / (Q_i^+ / Q_2^+) \quad (1)$$

図-9に2サイクル目以降のエネルギー吸収低下率(同変形角における*i*サイクル目のエネルギー吸収量を2サイクル目のそれで基準化)の推移を示す。全試験体において、 $R=1/33$ までのエネルギー吸収低下率は、3サイクル目以降、徐々に緩やかになり、値は収束する傾向にあった。J2LとJ3Lを比較した場合、せん断余裕度や付着余裕度の大きいJ2Lのエネルギー吸収低下の割合が大きくなった。

このことから、梁曲げ降伏後に接合部回転変形(梁)が

卓越するJ3は、繰り返しによるエネルギー吸収低下の割合が小さいという結果となった。

そこで、図-10にB2LとB3Lの $R=1/50$ と $R=1/33$ の各変形成分によるエネルギー吸収量の推移を示す。J2L・J3Lともに $R=1/50$ の繰り返しは、梁の変形や梁端の回転変形によるエネルギー吸収量は減少するが、接合部の回転変形(梁)のエネルギー吸収量はほぼ一定である。また、 $R=1/33$ の繰り返しは、 $R=1/50$ 同様に、梁の変形や梁端の回転変形によるエネルギー吸収量は減少するが、接合部の回転変形(梁)によるエネルギー吸収量が増加し、特にせん断余裕度の小さいJ3Lのエネルギー吸収量は大きく増加した。このことから、接合部せん断余裕度や付着余裕度の小さいJ3Lは、接合部の回転変形(梁)が大きく増加し、接合部内の主筋の塑性化によってエネルギー吸収に寄与したと思われるが、接合部内鉄筋の挙動については、今後さらなる検討が必要である。

5. まとめ

本論では、RC造柱梁接合部試験体に対して、多数回正負交番繰り返し載荷実験を行い、破壊モードを特定し、梁曲げ降伏後に接合部破壊する試験体に対して、繰り返し数によって耐力低下やエネルギー吸収性能の低下度合いについて検討し、以下の知見を得た。

- (1) 接合部せん断余裕度や付着余裕度を大きくした試験体は梁に損傷が集中し、接合部せん断余裕度や付着余裕度を小さく試験体は接合部に損傷が集中した。また、梁に損傷が集中した試験体は接合部に損傷が集中する試験体よりも耐力低下は大きくなった。
- (2) $R=1/100$ までは多数回繰り返しした場合でも各変形成分の値は変化せず、耐力低下率は収束する傾向を示し、10サイクル目の耐力低下率は0.9以上を保持できた。一方、 $R=1/50$ 以降、繰り返しによって、接合部の破壊が進行し、耐力低下率は10回の繰り返しで収束する傾向は見られず、 $R=1/33$ の10サイクル目に約0.6まで低下した。また、本実験での接合部せん断余裕度の違いでは($V_{ju}/V_j=1.1\sim 1.2$ 程度)、接合部せん断余裕度の小さい試験体ほど、耐力低下の割合はわずかに大きい傾向が見られた。
- (3) 等価粘性減衰定数は、塑性率 $\mu=1$ 以降、せん断余裕度や付着余裕度が異なる場合や、繰り返し数が異なる場合に大きな違いは生じなかった。また、接合部せん断余裕度や付着余裕度の小さい試験体ほど接合部の破壊は進行するが、繰り返しによるエネルギー吸収低下の割合は小さくなった。その理由として、接合部の回転によって破壊する試験体は、接合部内の主筋の塑性化によってエネルギー吸収に寄与できたものと推察される。

参考文献

- 1) 楠原文雄, 塩原等: 多軸複合応力を受ける鉄筋コンクリート造柱梁接合部の復元力特性と損傷性能, コンクリート工学年次論文集, 第29巻第3号, pp235-240, 2007
- 2) 藤井栄, 村上秀夫, 山田稔明, 森田司郎: 高強度鉄筋コンクリート柱・梁接合部における梁通し筋の付着性状, コンクリート工学年次論文集, 第13巻第2号, pp483-488, 1991
- 3) 石渡康弘, 中澤敏樹, 藤本利昭, 荒川玄, 村上秀夫, 都祭弘幸, 関谷成人, 稲井栄一, 平石久廣: 超高強度材料を用いた鉄筋コンクリート造柱梁接合部の構造性能に関する実験研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp843-846, 2004
- 4) 濱田真, 吉松賢二, 石橋久義, 堀江啓: 梁主筋を機械式定着した接合部の実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp569-570, 1998年9月
- 5) 山内茂一, 千葉脩, 菊田繁美, 市村敦史, 大井貴之, 市川勝美, 和泉信之: プレキャスト鉄筋コンクリート造の柱梁部分に関する実験研究その1~その3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp543-548, 1998.9
- 6) 石川勝美, 大井貴之, 千葉脩, 和泉信之, 羽鳥敏明, 濱田聡, 菊田繁美: プレキャスト鉄筋コンクリート構造物の柱梁部分架構に関する実験研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp205-206, 2001年
- 7) 高稲宜和, 永井寛, 丸田誠, 鈴木紀雄: 多数回繰り返し地震荷重を受けるRC柱梁接合部の構造特性, コンクリート工学年次論文集, 第30巻第3号, pp.985-990, 2008
- 8) 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
- 9) 向井智久, 衣笠秀行, 野村設郎: 地震動を受けるRC構造物の限界応答変形量を保証するに必要な耐力算出法とその精度検証, 日本建築学会構造系論文集, pp.137-143, 2000.6
- 10) Kusahara, F and H. Shiohara: New Instrumentation for Damage and Stress in Reinforced Concrete Beam-Column Joint, Proceedings of the 8NCEE, April 18-22, 2006, San Francisco, California, USA, Paper No. 1214 (CD-ROM)

謝辞

本研究は、国土交通省の住宅・建築関連先端技術開発助成事業「長周期地震動を受ける既存RC造超高層建築物の構造部材性能評価・向上技術の開発」として、独立行政法人建築研究所、(株)熊谷組、佐藤工業(株)、戸田建設(株)、西松建設(株)、(株)間組、(株)フジタの7社により共同で行われた成果の一部です。また、接合部変形分離方法について東京大学楠原先生より貴重な御意見を頂きました。関係者各位に御礼申し上げます。