

論文 柱梁接合部の破壊形式と補強方法の有効性に関する実験的研究

立石眞男^{*1}・石橋一彦^{*2}

要旨：既往の実験から対角線ストラットとは異なる破壊形式が確認された。その破壊形式は梁降伏後接合部のコーナー部が裂断するもので、小さな変形でも斜め方向の微細な引張歪みが一般的に生じるものであった。また、その破壊形式に対する補強方法も提案されており、有効な成果が得られた。本研究では接合部鉛直面内の斜め方向に補強筋を配筋し、その補強筋量と形状をパラメーターとして実験を行い補強効果を検討するものである。

キーワード：柱梁接合部, 接合部破壊機構, 斜補強筋

1. はじめに

現在、鉄筋コンクリート接合部の研究が数多く行われており、数々の接合部せん断破壊機構が考えられている。しかし、未だにはっきりとその機構は解明されておらず、せん断機構としては「トラス機構」「コンクリート対角線圧縮ストラット機構」が一般的に考えられている。トラス機構は梁主筋の接合部内付着喪失によって消滅してしまうため、繰り返し載荷や大変形時のせん断機構はストラット機構説が最も有力である。接合部設計を盛り込んだ[文献1][文献2]でもストラット機構説を使用し、接合部強度に上限を設けることで接合部破壊を防ぐ方法をとっていることから、設計者の間でストラット説がかなり一般的に取り入れられている。しかし[文献3]において、ストラット機構による接合部ひび割れとは異なったひび割れが実験で確認された。この破壊機構は「層せん断力の低下は接合部せん断力の低下によるものではない」とストラット説との矛盾を指摘した[文献4]と似た破壊機構であった。通常接合部補強筋は帯筋でコアコンクリートの水平方向の拘束を主としている。[文献3]では接合部内に帯筋を配筋するよりも、接合部コーナーの斜めせん断ひび割れに直交して補強を行った方が接合部変形を抑制することが出来る事が実験的に分かった。そこで本研究では、[文献2]に則って接合部強度を終局強度以上に計画し、梁曲げ破壊先行型試験体を標準体とし、上記接合部コーナー部分に配

筋した「斜補強筋」の「断面積」と「形状」をパラメーターとして実験を行い、実験的に斜補強筋の定量化と適切な配筋方法を検討する。

2. 実験方法

2.1 試験体

表1に材料の力学的性質、表2に試験体設計条件、図1に試験体配筋図を示す。試験体はRCラーメンの内柱接合部及び外柱接合部を対象とした十字型とト型架構の1/2縮小モデルである。試験

表1 材料の力学的特性

鉄筋			斜補強筋			
		十字型	ト型			
D10 肋筋 帯筋	σ_y	359	344	D10 JCR1	σ_y	448
	E	163	156		E	190
	σ_t	474	497		σ_t	681
	ϵ_t	14.8	18.4		ϵ_t	13.7
D13 接合部 帯筋	σ_y	354		D10 JCR3 JCRト	σ_y	430
	E	169			E	192
	σ_t	497			σ_t	646
	ϵ_t	17.4			ϵ_t	16.0
D16 梁主筋	σ_y	354	362	D13 JCR2	σ_y	424
	E	179	163		E	195
	σ_t	520	519		σ_t	665
	ϵ_t	13.3	15.9		ϵ_t	15.1
D19 柱主筋	σ_y	384	378	σ_y :降伏点(MPa) E:ヤング係数 $\times 10^3$ (MPa) σ_t :引張強度(MPa) ϵ_t :伸び率(%)		
	E	177	165			
	σ_t	561	554			
	ϵ_t	16.0	15.8			

コンクリート

試験体名	十字型	ト型
圧縮強度(MPa)	23.2	24.6
最大圧縮応力時の歪み度(%)	0.18	0.2
ヤング係数 $\times 10^3$ (MPa)	24.1	25.4
割裂引張強度(MPa)	1.97	2.14

*1 千葉工業大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)

*2 千葉工業大学教授 工学部建築学科 博(工) (正会員)

体数は十字型とト型の全部で6体であり、試験体寸法は全試験体共通で柱及び梁断面が 350*350 及び 300*400 であり、使用鉄筋径及び材種は柱主筋、梁主筋、帯筋、肋筋毎に共通である。そのため、各部材強度はほぼ同一であり梁が曲げ降伏する時の柱の曲げモーメントに対する柱の強度の安全率は十字型で1.99で、ト型では2.34とかなり大きく、[文献3]の試験体JCRは1.91と今回の十字型試験体とほぼ同じである。梁の曲げ降伏に対する接合部せん断強度安全率は[文献1]及び[2]で評価して十字型で1.19及び1.36、JCRは1.18及び1.37、ト型では1.22及び1.23であった。JCR 1~3には鉛直斜めの補強筋が梁および柱の主筋の交点を通るように配筋されており、JCRで配筋した菱形補強筋D10-4組を標準として、JCR1は量的に少なくD10-2組、JCR2では量的に多くD13-4組を配筋した。JCR3には斜補強筋として、図2に示すように接合部コーナーの斜め45°方向には40d (dは鉄筋径)、梁及び柱の軸線方向に折り曲げて定着した区間がそれぞれ20dのものをD10-4組配筋し、標準試験体JCRと同等の効果を期待した。JCRトおよびAIJトは外柱接合部で梁主筋の末端に定着板を溶接し、定着板の内側を柱せいの3/4に位置させた。JCRトにはホームベース型斜補強筋D10-4組をそれぞれ配筋した。AIJトはこの補強を除いたものである。

表2 試験体設計条件

試験体	十字型試験体	ト型試験体
梁		
梁断面	300mm×400mm	
有効せい	357mm	
梁主筋	5-D16 (SD345)	
引張鉄筋比	0.92%	
肋筋	2-D10 @100 (SD295)	
肋筋比	0.47%	
梁スパン	3750mm	1875mm
柱		
柱断面	350mm×350mm	
柱軸力	N=481kN ($\sigma=3.92\text{MPa}$)	
有効せい	305mm	
柱主筋	8-D19 (SD345)	
引張鉄筋比	0.93%	
帯筋	4-D10 @100 (SD295)	
帯筋比	0.81%	
階高	1800mm	2050mm
接合部		
帯筋	4-D13 @100 (SD345)	
コンクリート強度	23.5MPa	

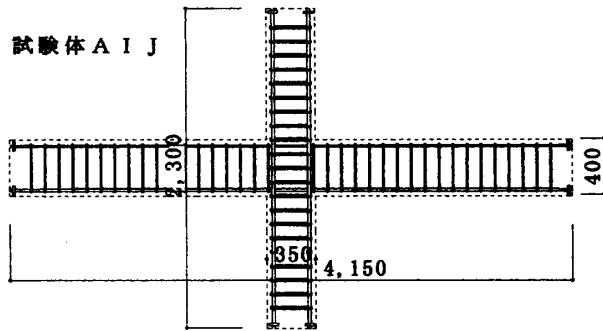


図1 試験体配筋 (単位mm)

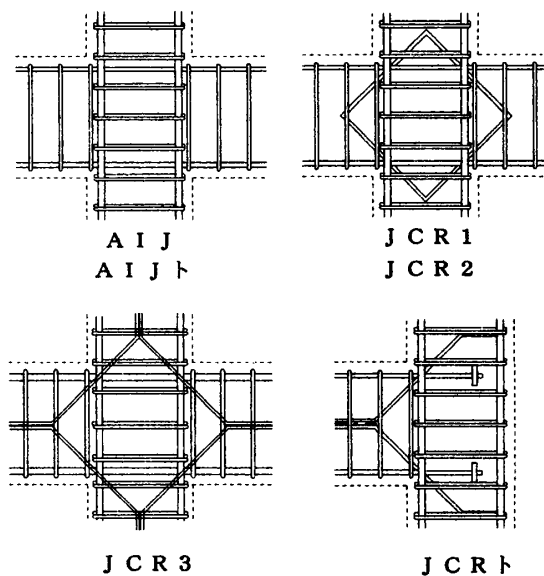


図2 各接合部配筋

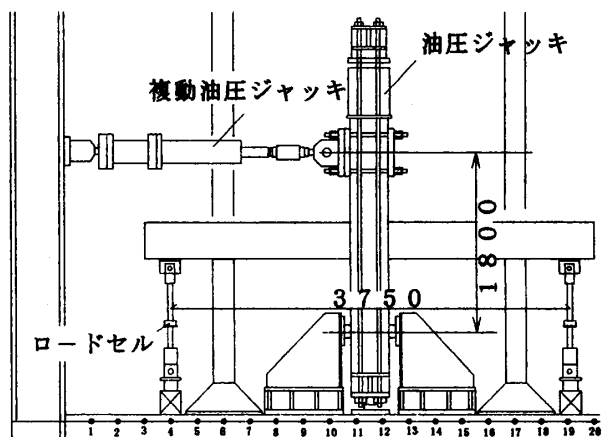


図3 十字型加力装置 (単位mm)

表3 加力ルール

回数	2	3	3	2	1
部材角(rad)	0.005	0.01	0.02	0.04	0.08

2.2 加力・測定方法

図3に十字型試験体加力方法を示す。柱頭に水平ジャッキを取り付け、柱脚をピン支持、梁両端をローラー支持として正負交番の繰り返し荷重を与えた。柱頭への荷重Qは、部材角Rを表3の加力ルールに従って制御して加えられた。十字型試験体の柱には3.9MPaの一定軸力を与え、ト型には同じ装置で柱せん断力を与えたが軸力を与えなかった。変形の測定のために、柱面および梁面で囲まれる長方形（接合部のコンクリート表面のパネルと名付ける）の対辺の midpoint 付近にゲージホルダーをピン・ローラーで支持させた。水平および鉛直の2系統のゲージホルダーの相対部材角をパネルのせん断変形角 γ と定義し、さらに鉛直のゲージホルダーには梁に沿って水平方向に同系統のゲージホルダーを剛接し、梁や柱の支点のたわみを測定した。上記部材角Rは後者のたわみによる梁と柱の相対変形である。

3. 実験結果

3.1 最終破壊状況

写真1にAIJ, JCR2, AIJトの最終サイクルでの破壊状況を示す。AIJ, JCR1, JCR3の3体で最終サイクルまでに接合部コンクリートの剥落が顕著に生じた。JCR2では梁付け根に圧壊によるコンクリート剥落が確認されたが、接合部に大きな破壊は見られなかった。同様にト型試験体でも接合部にコンクリート剥落は確認されず梁で剥落が見られたが、十字型のように激しい圧壊によるものではなく梁の曲げや付着ひび割れの剥落であった。十字型・ト型

両試験体共に、小さい変形角では梁にひび割れが集中して発生していた。しかし、十字型の場合R=0.02以降JCR2では新しいひび割れはほとんど発生しなかったのに対し、他の試験体では新しいひび割れが接合部にも発生した。JCRおよびJCR1, 2, 3では梁端の斜補強筋に沿った斜め45°のひび割れが発生したが、JCR3ではこのひび割れは少なく、幅は小さかったのに対し、JCRでは非常に数が多く幅が大きくなった。

3.2 変形性状

図4に荷重Q-部材角R曲線を、図5に前記接

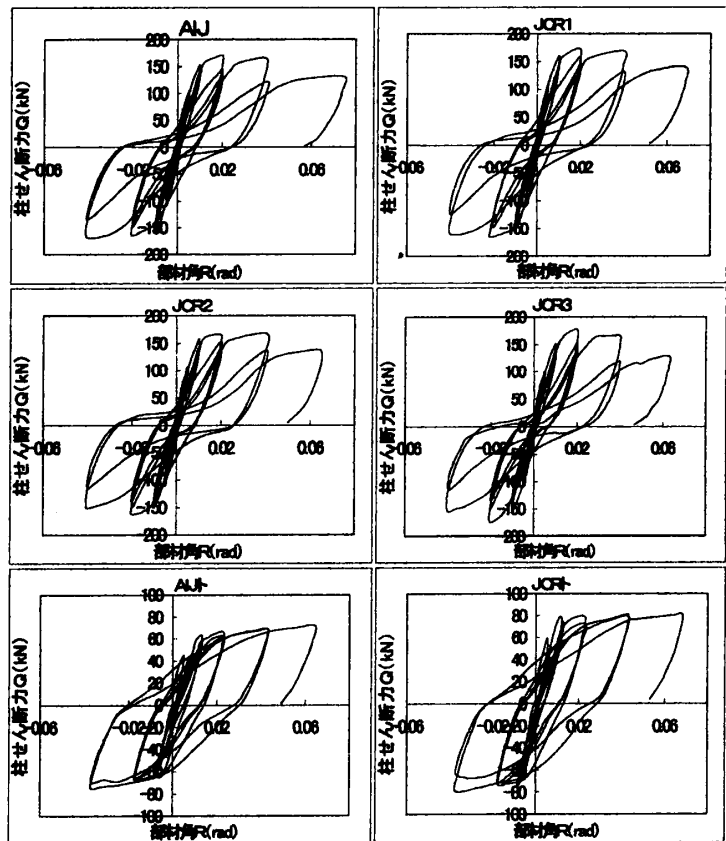
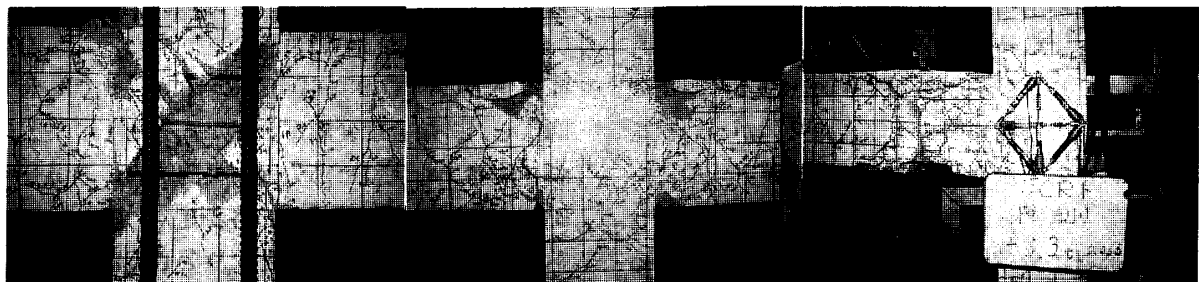


図4 荷重(Q) - 部材角(R) 関係



AIJ

JCR2

AIJト

写真1 最終破壊状況

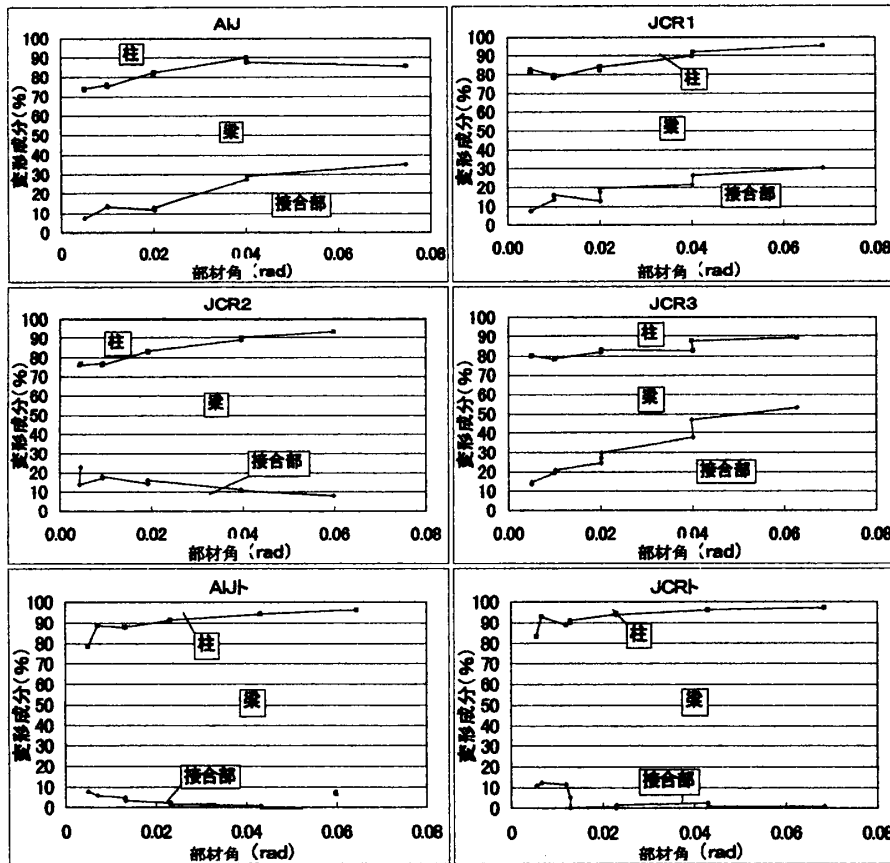


図5 変形成分比 (%)

合部せん断変形によって補正した各部材の変形の成分比を示す。Q-R曲線を見てみると、接合部コンクリートの剥落が見られたJCR1, JCR3では、最大荷重はR=0.02で記録されている。接合部コンクリートの剥落が見られなかったJCR2では、梁の曲げ圧壊や付着劣化による梁主筋抜け出しによって梁付け根でコンクリートの剥落が生じ、中の梁主筋が見えた。また、最大荷重はR=0.04で記録されており大変形時の残留耐力は大きい。十字型試験体はR=0.04の繰り返し荷重でスリップ性状を示したがト型ではスリップ性状は比較的小さかった。R=0.04の同一振幅での最大荷重の低下を見てみると、十字型試験体ではJCR1とJCR2が79%, 81%であり、AIJ, JCR3が72%, 74%となった。このように菱形の斜補強筋を配筋した2体が高い値を示していることから、菱形斜補強筋が形状的に有効であると考えられる。全体変形を柱、梁、接合部の各部材に分けた変形成分比 (%) を見てみると、柱の成分比は全て10%前後で低かった。ト型試験体は、柱、接合部が10%以下と低く、梁

のみ変形が集中しているのが分かる。十字型のAIJ, JCR1, JCR3試験体の接合部変形成分は最終サイクル時に30%~50%に増加したが、JCR2試験体では大変形時に10%以内に減少している。また、大変形時の同一部材角に対する柱変形成分の十字型試験体間の大小はひび割れ量の大小として現れるが、柱のひび割れの開きはどれも小さいものであった。

3.3 斜補強筋の歪み度

図7に斜補強筋を配筋した各試験体の斜補強筋斜め部分の中央測定点での荷重-歪み度(Q-ε)

曲線を示す。各辺中央の測定点は接合部コーナーのせん断ひび割れ上にあり、このひび割れの開きに大きく影響されると考えられる。JCR1では梁主筋が降伏したR=0.01で斜補強筋の中央が降伏歪み度近くになり、R=0.04では4辺ともこの位置で降伏した。[文献3]で菱形斜補強筋D10を4本配筋したJCR試験体では、斜補強筋各辺の中央のみが梁降伏後に降伏近くの歪み度に達して、両端では最終押し切りまで降伏歪みの半分以下に止まった。JCR1, 2では端部に測定点を設けなかったが、恐らく弾性を維持したと考えられる。JCR2では降伏に達しておらず、JCR3では全梁主筋が降伏したと認められたR=0.02までに斜補強筋は降伏した。また、この補強筋の斜辺の両端の測定点もR=0.04までに全て降伏した。接合部変形がわずかだったJCRトの斜補強筋でも、斜め部分の中央測定点のみがR=0.01で降伏した。降伏した各測定点は、ストラット機構を考えると圧縮域となり閉じるはずのひび割れの影響によって圧縮力を受けるはずであるが、図7に示すように各試験体共に圧縮歪みが引張歪

みに転化する傾向にある。また、圧縮から引張への転化が梁降伏前の早期に現れていることから、[文献3]で提案した破壊機構が早期に発生する現象であることを示唆しているといえる。

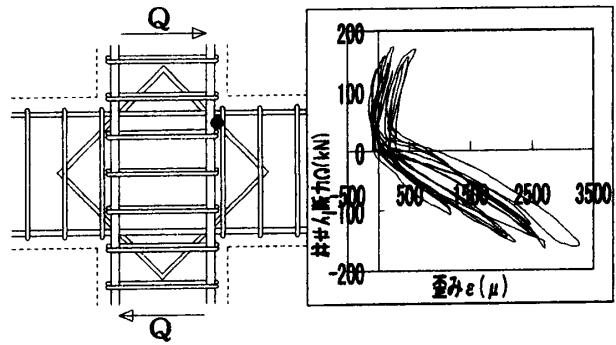
斜補強筋の降伏軸力の水平成分は梁主筋の降伏軸力に対して、0.13 (JCR1) ~ 0.43 (JCR2) 倍である。実験では十字型試験体の斜補強が原因の曲げ耐力上昇はAIJと比較して殆どなく、外柱試験体ではその効果がみられる。これはJCR3を含めて梁の軸方向力が斜補強筋の末端定着部から伝達された効果と思われる。

3.4 斜補強筋の断面積、形状による比較

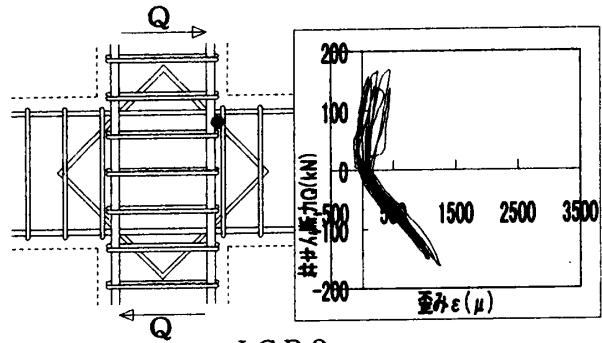
[文献3]や上記の結果をしてみると、[文献3]で使用した「菱形斜補強筋D10-4本」(JCR)及び「菱形斜補強筋D13-4本」(JCR2)が大変形時の接合部変形が小さく抑えられ、提案破壊形式に対して有効だったといえる。「菱形斜補強筋D10-4本」を標準と考え、本論文の実験の範囲での試験体比較を行うと、断面積増大→断面積減少→形状変更という順に斜補強筋の効果が低くなっていった。まず、断面積を比較してみるとJCR1はJCRより断面積が1/2になっており、接合部区間の梁主筋の歪み度分布はAIJと同様に降伏域が $R=0.01$ までに侵入する形であり、補強効果は少ないといえる。JCR2は断面積が1.8倍であり、接合部変形率は最も小さく抑えられた。形状が解放型となっているJCR3はJCRと同補強量だが、AIJよりも接合部変形が大きくなり斜補強筋による効果がなかったことから、形状による影響が大きいといえる。

3.5 斜補強筋の形状に対する考察

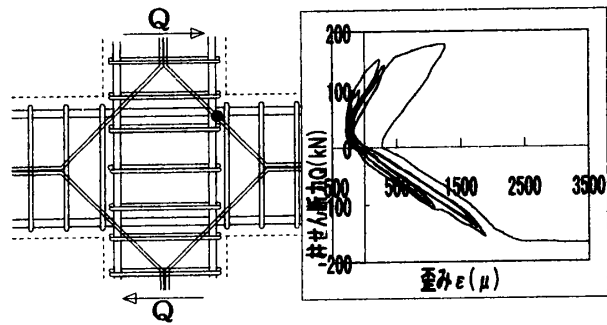
[文献3]のJCRと今回のJCR3それぞれの斜補強筋斜め部分の中央と両端の測定点の歪みを比較してみると、JCRでは中央の測定点でのみ降伏したのに対して、JCR3では最終サイクルまでに全長に亘って引張降伏した。図8に斜補強筋の応力と歪みを説明する破壊機構を示す。斜補強筋斜め部分には、接合部せん断ひび割れによって分けられた4つの領域の回転による開き抵抗する力が働いている。形状が閉鎖型の斜補強筋では、隅角部の支圧力によって補強筋の引張力



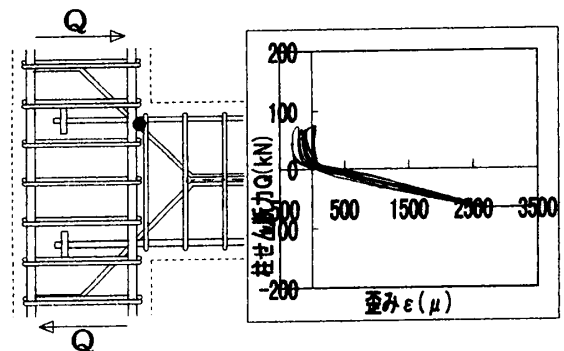
JCR1



JCR2



JCR3



JCRト

図7 斜補強筋Q-ε関係
が接合部内へと伝達され、接合部を拘束することにより接合部のせん断強度を確保し補強筋の外側の梁に曲げ破壊を集中させた(a)。一方、JCR

3のような開放型斜補強筋では、応力は柱、梁の部材方向へ伸びた定着部分へと伝達され、閉鎖型のような接合部拘束力が発生せず接合部は大きく変形した(b)。最終ひび割れ状況を比較すると、梁付け根で斜補強筋に沿って発生したひび割れはJCRでははっきりと大きく開いているのに対し、JCR3ではほとんど発生しておらずわずかに発生したひび割れの開きも小さいものだった。これは開放型が梁の部材方向の変形に抵抗してその応力が斜補強筋に及んだためと考えられる。以上のことから開放型の斜め補強部分では、接合部の回転に対しての抵抗力と梁、柱の部材方向への軸方向力に抵抗したために斜め部分が全域に亘って降伏したと考えられる。

3.6 接合部せん断変形の考察

図8に示す破壊機構では本実験で測定した接合部せん断変形 γ は、0になるはずである。しかし梁の曲げ降伏後に接合部破壊が激しかった場合には γ は増大する傾向があった。これは図8の3角形要素が剛体ではなく、せん断ひび割れの拡幅や剛体接点のコンクリートの局部圧壊が生じたことを示すものである。図8の要素の回転は直接測定されていないが、その変形要素は前述の梁と柱の変形成分に全て含まれている。接合部破壊が激しいとこの回転による変形成分が増大したと考えられるが実験では確認されていない。

4. まとめ

- ・安全率が1.99でも、梁降伏後に接合部破壊が生じる可能性の高い試験体では、本実験で行ったように斜めひび割れの開きに対して直交するよう配筋することで接合部変形の抑制が可能であることが確認された。
- ・提案する破壊機構は梁降伏前の小変形時から現れている。また、大変形時には梁主筋の付着劣化に連動すると思われる。
- ・斜補強筋の形状は閉鎖型のものが変形抑制に有効である。解放型の場合補強筋量を増す必要があると思われる。
- ・提案する接合部破壊形式には、せん断変形は含まれず梁と柱の回転要素だけとなるが、その成分比の増大の推移を分析することによって接

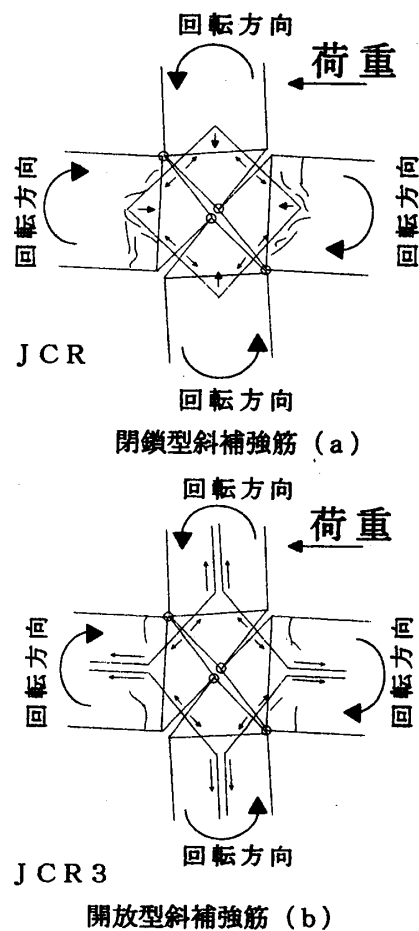


図8 破壊機構

合部破壊と補強効果を検証する必要がある。

【謝辞】

本研究の実施にあたり、千葉工業大学卒業生、太田泰弘、樋口貴久、広瀬稔、谷田部誠一郎君の協力を得た、ここに深く感謝する。

【参考文献】

- [1] 日本建築学会：鉄筋コンクリート建物の終局強度型耐震設計指針・同解説
- [2] 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(案)・同解説
- [3] 立石眞男、石橋一彦：RC柱・梁接合部破壊形式に対する補強効果についての実験的研究、建築学会大会学術講演梗概集、pp587-588 1998
- [4] 岸川聡史、塩原等：鉄筋コンクリート造十字型柱梁接合部の接合部破壊とせん断抵抗機構、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 20, No. 3, pp523-528, 1998