

論文 十字形内柱・梁接合部の内部ひび割れ観察に基づく破壊メカニズム

堀部明久*1・石橋一彦*2・鈴木武文*3・井口良平*4

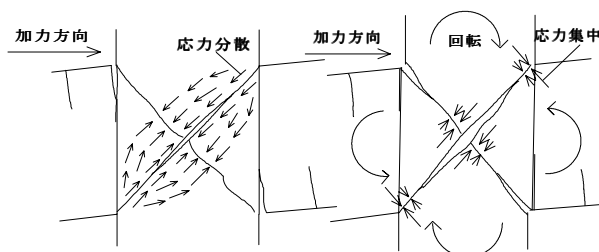
要旨: 柱梁接合部の破壊のメカニズムは、従来圧縮ストラットの圧壊や対角線ひび割れで分断される要素の破壊機構論で論じられてきた。本報告は十字形接合部試験体の加力実験終了後の激しい破壊状況における、内部ひび割れの直接的な観察を行って、機構成立後の破壊進行を推測して、従来の破壊機構の信憑性と斜補強筋による靱性保証能力を確認するものである。

キーワード: 柱梁接合部, 破壊機構, せん断ひび割れ, 付着, ひび割れ観察方法

1. はじめに

本研究は、鉄筋コンクリート造建物の柱梁接合部を対象とした文献 1), 2) 及び今回同様に行われた実験の十字形試験体の実験後の接合部破壊状況の詳細な観察を試みたものである。

柱梁接合部の破壊のメカニズムは従来圧縮ストラットの圧壊や、対角線ひび割れで分断されるマクロな要素の破壊機構論¹⁾で論じられてきた。後者の機構論では、対角線ひび割れで分断された4つの三角形は、剛体として相互に回転し、**図-1(b)**のように変形する。



(a) コンクリート圧縮ストラットによる機構 (b) 回転変形による提案された機構

図-1 接合部破壊機構

このような接合部の破壊機構を内部まで確認するため、接合部部分を切り出して内部ひび割れの観察を行い、破壊機構を推論する。

2. 実験方法

実験後のひび割れた試験体から接合部部分をコンクリートカッターで切り出し、接着剤でひび割れを固定した上で構面方向に切断する。

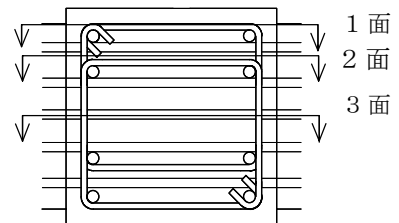


図-2 接合部切断箇所

切断箇所は**図-2**に示すように、柱主筋手前の表層(かぶり)部分(1面)、柱主筋1, 2本目の間(2面)、接合部中央内部(3面)とした。

ひび割れを固定するための接着剤には、エポキシ樹脂系注入接着剤を用い、観察のため、注入時に赤い発光塗料を混入した。

接着剤の注入は真空ポンプを用いて圧入する方式をとった。

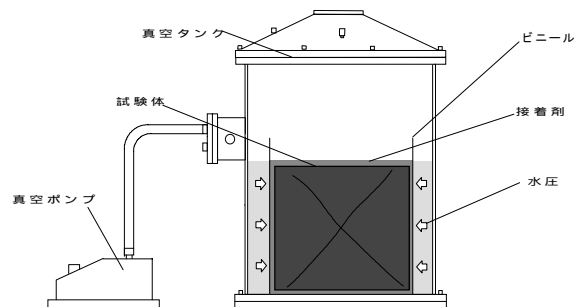


図-3 接着剤注入方法

*1 千葉工業大学 工学部建築学科 (正会員)
 *2 千葉工業大学教授 工学部建築学科 博(工) (正会員)
 *3 千葉工業大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)
 *4 千葉工業大学 工学部建築学科 (正会員)

図-3に示すように、試験体をビニール袋で覆い、真空タンクに投入し、袋の中で接着剤溶液に浸す。ここで接着剤が下部に溜まらないようにするために、袋の周りに水を入れ水圧をかける。真空引きによって、ひび割れ内の空気を吸い出した後に再び増圧する事によって接着剤をひび割れ内部まで浸透させた。この作業を全体と切り出した後の2段階について行った。

ひび割れの観察は、暗室でブラックライトを当てて、ひび割れ内に浸透した塗料を発光させてデジタルカメラで撮影して行った。また、各試験体のひび割れ状況を比較するために、観察領域を柱と梁の主筋中央の線で囲まれる部分と定めた。また撮影した写真を画像処理ソフトを用い、赤く発光した部分が黒くなるグレースケールで、ひび割れを鮮明に表示した。

3. 観察した試験体

3.1 配筋状況

内部ひび割れ観察を行った試験体の接合部配筋図を図-4、試験体接合部の諸元を表-2に示す。材料の強度及び文献3)に基づき材料強度を代入して求めたせん断余裕度 V_{ju}/V_j を表-3に示す。

各試験体とも断面及び主筋は、柱 35cm 角、梁 30cm × 40cm、柱主筋 8-D19(SD345)、梁主筋 5-D16(SD345)である。

AIJ は帯筋のみで接合部を補強した試験体、AIJN は接合部無補強の主筋のみの配筋の試験体。JCR は、パネルコーナー部分を斜めに補強

するように溶接閉鎖型の斜補強筋を配した試験体、JCR0 は斜補強筋のみで補強した試験体である。

JCRR0~4 は斜補強筋をリング形状とした試験体で、JCRR0 はリング筋のみ、JCRR1, 3 はリング筋と帯筋の組み合わせ、JCRR2, 4 は、直交2方向にリング筋を配した試験体である。JCRR3, 4 は JCRR1, 2 のリング筋の鉄筋径を太くして補強量を増やした。

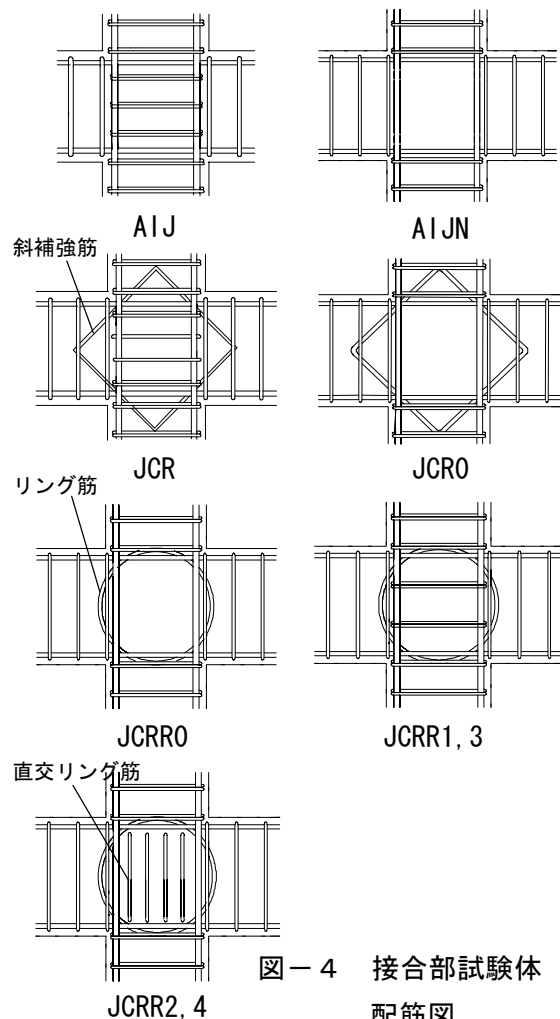


図-4 接合部試験体配筋図

表-2 試験体接合部の諸元

試験体名	AIJ	AIJN	JCR	JCR0	JCRR0	JCRR1	JCRR2	JCRR3	JCRR4
接合部帯筋	4-D10 (SD295A)	-	4-D10 (SD295A)	-	-	4-D10 (SD295A)	-	4-D10 (SD295A)	-
帯筋比	0.78%	-	0.78%	-	-	0.52%	-	0.52%	-
斜補強筋	-	-	4-D10 (SD295A)	4-D13 (SD295A)	-	-	-	-	-
リング筋	-	-	-	-	4-D13 (SD295A)	4-D13 (SD295A)	4-D13(2方向) (SD345A)	4-D16 (SD345A)	4-D16(2方向) (SD345A)
文献番号	1	-	1	2	-	-	-	-	-

表-3 コンクリート強度、梁主筋降伏点及びせん断余裕度

試験体名	AIJ	AIJN	JCR	JCR0	JCRR0	JCRR1	JCRR2	JCRR3	JCRR4
圧縮強度 (N/mm ²)	24.4	29.6	23.2	19.8	30.6	26.4	24.9	21.4	18.4
割裂強度 (N/mm ²)	1.99	2.48	1.99	1.94	2.40	2.10	2.10	2.26	1.64
ヤング係数 (10 ⁴ N/mm ²)	2.5	2.8	2.4	2.8	2.6	2.3	2.4	2.3	1.8
梁主筋降伏点 (N/mm ²)	375	396	375	396	396	387	387	404	404
せん断余裕度 V_{ju}/V_j	1.19	1.23	1.22	1.08	1.33	1.23	1.18	1.01	0.91

3. 2 最終破壊状況

柱と梁の最終相対部材角は、各試験体とも $R=0.06\sim 0.08\text{rad}$ であり梁主筋は降伏していた。従って全試験体共、相対部材角に占める梁曲げ降伏変形の割合が最も大きく、接合部の占める割合 α (%) は試験体ごとに異なった。各試験体最終の接合部のせん断変形角 γ_{\max} 及び α と破壊の関係について次に述べる。

帯筋のみで補強した AIJ ($\gamma_{\max}=0.031\text{rad}$, $\alpha=36.3\%$) は梁降伏後の繰り返し载荷によって接合部が激しく破壊した。

AIJN (0.044, 52.3) は帯筋による補強がなかったために、最終変形角でパネル奥深くまでコンクリートが剥落した。

JCR (0.009, 4.4) はパネルコーナー部分が斜めに補強されていたため、大変形時にも接合部に大きな破壊を生じることなく、接合部破壊を有効に抑制することができた。

JCR0 (0.028, 29.8) は接合部内の帯筋を取り除いた斜補強筋のみの配筋で、最終的にはコアコンクリートが拘束されていないために脆性的に破壊したが、変形角 0.04rad までは AIJ よりも接合部せん断変形は小さかった。

JCRR0 (0.024, 32.2) はパネルコンクリートの剥落は少ないが、水平耐力を保持することができなくなったために加力を終了した。

JCRR1 (0.025, 22.4), 2 (0.036, 31.5) は大変形時にパネルコンクリートが剥落した。JCRR2 は、直交方向に配した補強筋が露出した。

JCRR3 (0.011, 12.3) は、大変形時になっても、パネルコンクリートの膨張も少なくコンクリートの剥落はなかった。

JCRR4 (0.015, 14.6) は、最終的にパネルコンクリートが膨張し、コンクリートの剥落が発生した。

4. 観察結果

4. 1 各試験体の考察

ブラックライトで発光させた接合部のひび割れの状況を写真-1 に示す。

AIJ は、パネルのかぶりコンクリートが剥落した試験体であり、内部は激しく複雑に破碎していた。破碎は接合部内の帯筋の間に集中している。また、表面近くよりも内部の方が破碎域は分散している。また、パネルコーナー部分のひび割れは閉じており、図-1 (b) で提案された破壊機構は認められない。

AIJN は主筋で囲まれた長方形領域において、ひび割れが対角線方向に入っている。帯筋による拘束がないため内部の中央は激しく圧壊していて、表面より内部の方がひび割れが少なくなっている。

JCR はパネルコーナー部分を斜めに補強するように溶接閉鎖型の斜補強筋が配筋されており、大変形時にも接合部に大きなひび割れや圧壊などの破壊は生じることなく、斜補強筋以外はほぼ同一条件の AIJ に比較すると補強効果が顕著である。

JCR0 はパネルコンクリートが剥落したが、帯筋による拘束が無い場合、接合部を切り出す際にさらにパネル奥深くまで崩れ落ち、中央部分のみしか保存できなかった。内部ひび割れは、非常に激しく密に入り、破碎域も広がっている。

JCRR0 は観察領域対角線上にひび割れが入り表層部のひび割れ幅は内部と比べて2~3倍大きい。ひび割れの量も内部にいくにしたがって少なくなっている。

JCRR1 は表層部では帯筋に沿って水平にひび割れが分布し、柱主筋直近ではひび割れは鉛直になっている。全体的にひび割れは分散していて接合部内部にいくにしたがってひび割れは少なくなっていく。

JCRR2 は、帯筋がないため水平方向にひび割れが分布していないが、その代わりに破碎は接合部内の鉛直方向に入れたリング筋間に集中している。また対角線ひび割れもあるがほとんどのひび割れは鉛直方向に入っており、接合部内部に行くにしたがい鉛直ひび割れは分散せずに残っている。

JCRR3 の表層部は、ひび割れ幅は大きい

体的にひび割れが少ない。また、接合部内部はひび割れも少なく、ブラックライトを当てないとひび割れは確認し難い。帯筋付近に平行にひび割れが入り、接合部内部に行くに従いひび割れは分散し、数も少なくなっていく。

JCRR4 の表層部は、鉛直にリング筋があることと関係して、鉛直方向のひび割れが若干見られる。接合部内部に行くにしたがい鉛直方向のひび割れが目立ち始めるが、内部に行くにした

がいひび割れは少なくなり目視では確認し難くなっている。

帯筋を配した、AIJ, JCRR1, JCRR3 は、帯筋と帯筋の間にひび割れが集中する傾向があった。

直交リング筋を配した JCRR2, 4 では、鉛直に近い急な勾配のひび割れが確認できる。このひび割れは、平行するリング筋の高さを結ぶ対角方向に発生しており直交リング筋の付着力と接合部に働くせん断力によるものと考えられる。

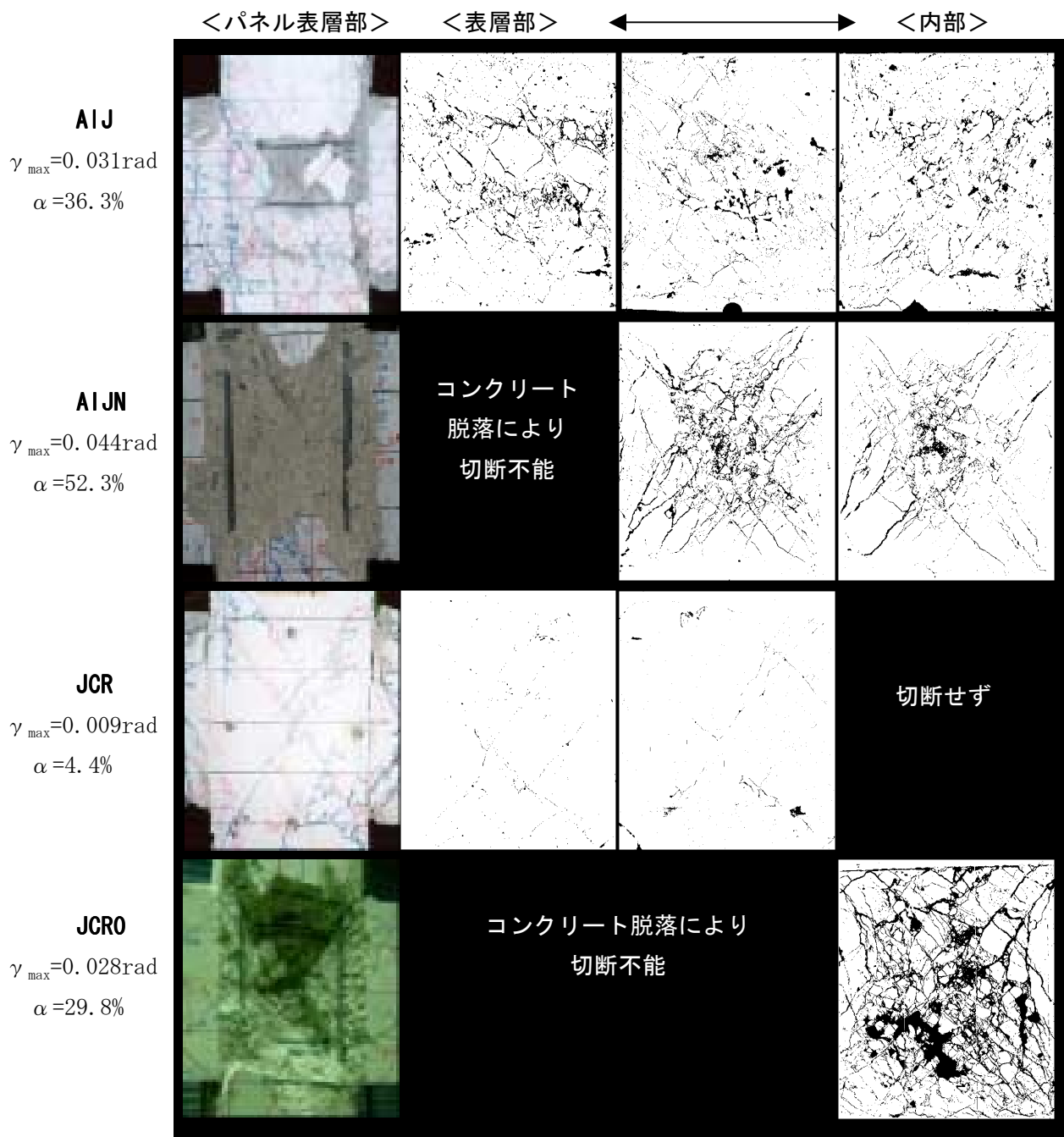


写真-1 接合部ひび割れ状況(1)

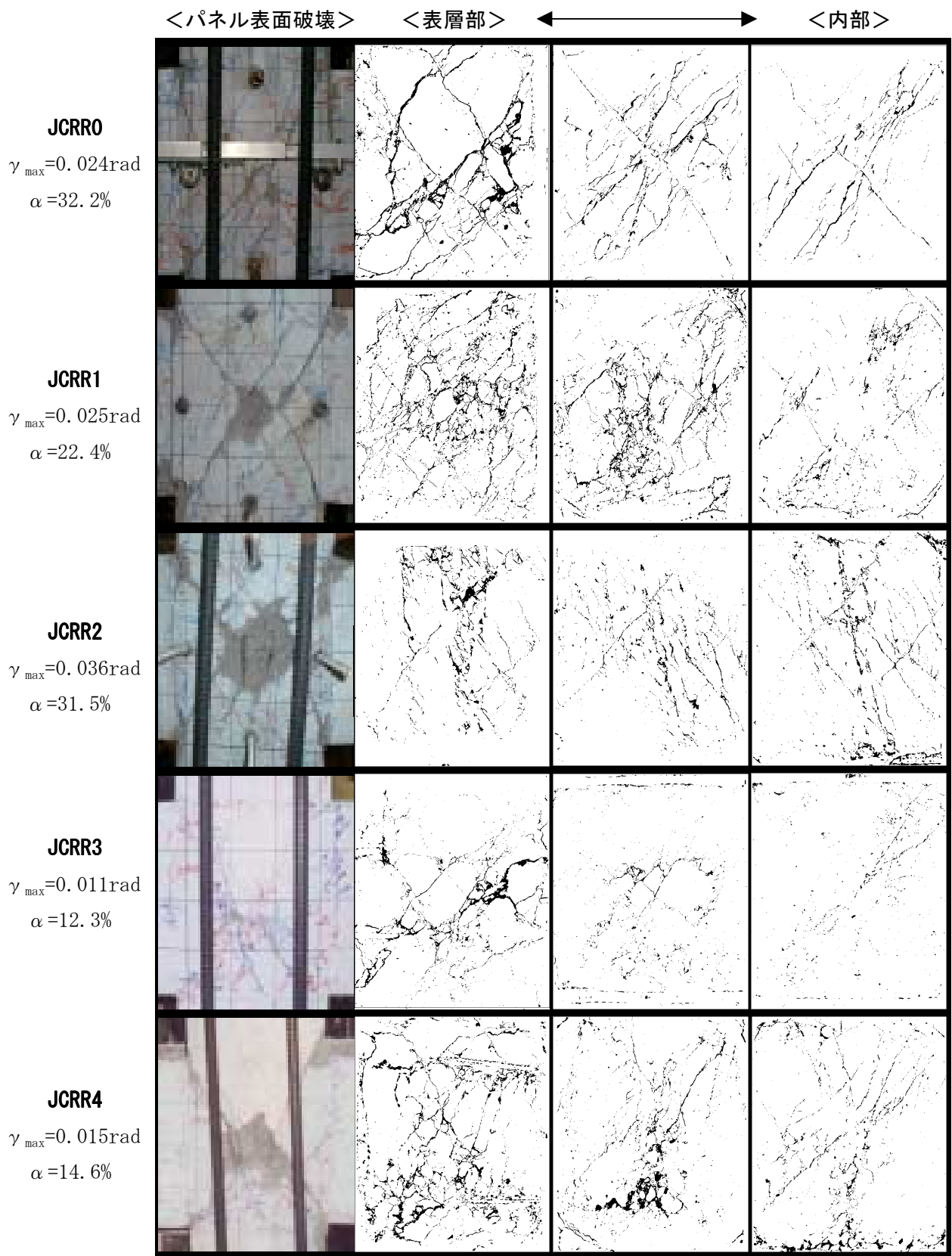


写真-1 接合部ひび割れ状況(2)

4. 2 破壊機構

AIJN ではパネル中央部に激しい圧壊が観られる。パネルの圧壊は、圧縮ストラットが正負荷重で交差する中央部から広がると考えられる。これより接合部中央は、**図-1(b)**のパネル中央の三角形の接触点が応力集中によって圧壊したと言えるため、**図-1(b)**の破壊機構は確かに発生したと考えられる。

文献1)でAIJにおいて報告されていたような、梁降伏後にコンクリートの表面で大きくなったとされているコーナー部分の開きは内部では確認されなかった。機構発生時からそれは明確には現れず、中央のコンクリートの圧壊だけが進行する機構であったと考えられる。

AIJN のように接合部に補強がないと上記機構の発生で中央部が激しく圧壊し、JCR のように十分補強があると上記破壊機構の進行を抑制することができた。

AIJ のように帯筋だけの場合は、上記機構のように集中した圧壊ではなく分散した破壊であるので**図-1(a)**の圧縮ストラット機構に移行したと考えられる。

4. 3 観察領域に対するひび割れ密度

ひび割れ密度を求めるため、まず画像情報処理ソフトを用いひび割れの画像を、発光塗料の赤を黒、その他の色を白として表示させた。次に、ひび割れの黒のピクセル数を、全体のピクセル数で除したもからひび割れ密度を求め、表面から内部へ至る密度の変化を**図-5**に示した。

接合部内部に行くにしたがいひび割れは少なくなり、ひび割れ幅も狭くなるのがわかった。

最終破壊状況からも明らかなように、斜補強筋・リング筋と帯筋の組み合わせ、またリング筋と帯筋の補強量の多い試験体の方が補強効果があり、それと対応してひび割れ密度も精度は劣るが、補強効果がある試験体ほど内部で小さくなる傾向が強い。

ひび割れ密度には 6%弱の上限値がある。この密度を超えると表面コンクリートは剥落すると考えられる。

JCR0 のひび割れ密度が突出して大きいのは、接合部を切断する際に崩れた部分が含まれているためである。

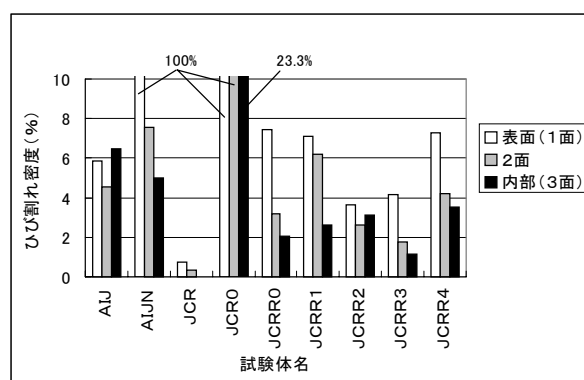


図-5 ひび割れ密度

5. まとめ

- (1) **図-1(b)**の剛体回転により、接合部コーナーが開くことはあまり確認できなかったが、接合部中央が圧壊することは確認された。
- (2) 斜補強筋・リング筋を入れると接合部コーナー部分が補強され、帯筋と併用すれば補強効果が上がる。
- (3) 帯筋だけだと応力とひび割れが分散し**図-1(a)**の圧縮ストラット機構のような破壊をする。
- (4) リング筋は斜補強筋ほどではないが、**図-1(b)**の提案された機構による破壊の進行を抑制することができる。
- (5) ひび割れ密度は表面から内部へ行くに従い小さくなっていく。

【参考文献】

- 1) 立石眞男, 石橋一彦: R C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, 建築学会大会論文, C-2, pp587-588, 1998
- 2) 鈴木武文: 柱梁接合部コーナー補強筋の効果に関する実験的研究(その1), 建築学会大会論文, C-2, pp849-850, 2000
- 3) 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, 丸善, 1997