

## 論文

## [2077] 二軸曲げを受ける鉄筋コンクリート柱の挙動と損傷度

正会員○小川淳二（東北大学工学部）

正会員 阿部良洋（東北工業大学工学部）

星 道夫（東北大学工学部）

生田真大（東北大学大学院）

## 1. はじめに

本研究は、実大のカンティレバー型鉄筋コンクリート造柱試験体を用いて、一定の軸方向荷重下で水平二軸の交番繰返荷重載荷による破壊実験を行い、各荷重段階で試験体の示す挙動と試験体表面に現われるコンクリートのクラック量や剥落量等損傷の程度を示すデータについて検討し、これらに基づいた損傷度指標の提案を試みる。損傷度指標は、多くの研究者から数多く提案されているが、いずれの損傷度指標も構造物が損傷を受けている時の荷重と変形のデータが使用されており、実用的には問題がある。一般の震災地では、構造物に損傷を与えた地震荷重の大きさや振幅の大きさ等は不明であり、従来型の損傷度指標では判定が不可能である。従って、荷重や変形のデータによらないコンクリートのクラック量や剥落量等を基にした損傷度の評価が可能となれば大変有意義である。

従来から行なってきた一軸の交番繰返載荷による破壊実験で得られる試験体の損傷形態は、震害構造物の柱などに発生している損傷の形態とは大きく相違しており、一軸の交番繰返載荷では、震害時の損傷形態を十分には再現しえない。また、地震力で振動させられている構造物の運動の軌跡は上下動成分を度外視しても、平面的にあらゆる方向の運動を含んでおり、更に面積を持つような軌跡もある。これらの一軸載荷法の重大な欠点を解消するために、二軸載荷法を取り入れて一定の軸方向荷重下で水平二軸の静的交番繰返載荷による破壊実験を行った。その結果、実際の震害に非常に近い損傷形態を再現する事が出来た。この実験結果に基いた損傷度の評価法は、実際の地震で起こる被害の程度を評価する方法として大いに有効であろう。

## 2. 試験体及び載荷装置

試験体は、3階から5階建の中低層の鉄筋コンクリート造建物の1階中柱の応力状態を想定して定めた。試験体の形状は、一端が自由端で、他端が強剛な基礎に固定された断面500×500mmのカンティレバー型の柱試験体である。柱主筋は、異形筋で8-D19 ( $P_t=0.34\%$ )である。一軸載荷試験体(LC型)の概略を図-1に、二軸載荷試験体(BC型)の概略を図-2に示した。BC型試験体の水平荷重の加力高さも、LC型試験体と同じく基礎天端より1,100mmである。しかし、軸方向荷重及び水平二軸荷重を伝達する機構(高さ490mm)を取り付けるためBC型試験体の柱長さは短くなっている。同機構の構造上の問題で、二軸荷重の加力芯同志は、140mmずれているが、両加力芯の中間点を共通の加力芯としている。従って、シャースパン比( $A/D$ )は2.2であり、曲げ破壊が先行する試験体である。試験体毎に使用材料、載荷パス等の概略をと表-1に示した。軸方向荷重の目標値は、28日コンクリート強度の13%と25%の二種類である。

LC型試験体用載荷装置の概略を図-1に示した。水平荷重載荷は、2台の圧縮用のオイル

ジャキを正負方向交互に使用し、あらかじめ定めておいた荷重プログラムに従って手動制御で行った。BC型試験体用荷重装置の概略を図-2に示した。水平荷重荷重は、引張・圧縮両用のオイルジャキを使用し、あらかじめ定めておいた荷重プログラムに従って手動制御で行った。水平荷重荷重機構は、引張・圧縮両用のオイルジャキに荷重変換器、位置決めターンバックルと試験体の変形を出来るだけ拘束しないよう回転軸を90度ずらしたクレビスを両端に配置したもので、二方向に自由なピン接合となっている。水平方向荷重プログラムは、基本的には繰り返し毎に塑性率が增大する二軸の交番繰返加力である。柱の主筋で計測された歪度が降伏歪度に達した時点の変位を降伏変位とし、塑性率算定の基準とした。降伏変位の実測値は、各試験体とも $R = 1/200 \text{ rad}$ 程度である。軸方向荷重は、柱の自由端に軸方向荷重及び水平二軸荷重伝達機構と球座を介してセットした軸方向荷重加力十字型梁と試験床下面にセットした4台のセンターホールジャッキとを4本の高張力鋼棒で連結し(LC型は2セット使用)、自動圧力調節可能な機構を組み込んだ電動オイルポンプで荷重を行なった。実測された軸方向荷重の平均値は、LC-1~4・14は約76tで、LC-5・10~13及びBC-1・2は約155tであり、BC-3~6は約172tであった。

### 3. 測定装置及び測定方法

水平変位は、柱の回転を考慮してNS・EW両方向とも二本ずつの作動トランス型の変位変換器を用いて柱頭変位として測定した。水平荷重は、水平荷重用オイルジャッキに取り付けたストレインゲージ型の荷重変換器を用いて測定した。軸方向荷重は、試験床下にセットしたセンターホールオイルジャッキに取り付けたストレインゲージ型の荷重変換器を用いて測定した。鉄筋の歪度は、ゲージ長2mmの箔ストレインゲージとゲージ長5mmの箔塑性ストレインゲージを使用し、鉄筋組立・基礎型枠組立完了後に、基礎天端から所定の鉄筋位置(異型鉄筋の節に当る場合には、節を削り取る)に、表・裏各1枚貼付して測定した。また、コンクリートの中に埋込まれるので、ゴム系シール材、エポキシ系接着剤等を使用して耐引張力・耐衝撃・耐水・耐湿処置を行った。

水平変位、水平荷重、軸方向荷重、柱軸方向変形、鉄筋の歪度等は、各変換器で電気信号に変換し、スキャナー付きのA/D変換器で数値化処理し、パソコンのフロッピーディスクに集録した。柱主筋の降伏点到達は、パソコンのプリントアウトにより確認した。パソコンから出力した水平変位と水平荷重をXYプロッター上にNS軸とEW軸と別々の荷重変位曲線を描き試験体挙動のモニターとした。また、水平変位と水平荷重は、電気信号のままXYレコーダ及びデジタルメーターに出力し、手動制御のモニターとした。

### 4. クラック・剝落の観測と測定

クラックの観測や測定を容易にするために、試験体には白色水性ペイントを塗布してある。クラックの観測・測定等は、N面とそれに直交するE面との2面(LC型はN・E・Sの3面)について行った。クラック観測は、荷重中常に行ない、クラックを発見する毎に鉛筆でなぞっておき、各塑性率荷重終了後の変位零時に、柱幅に裁断した透明アクリル板に、油性フェルトペンを使用して写し採った。ピーク時・変位零時に所定の位置から同一条件で撮った各面の写真と写し採ったクラック図とを突き合わせ、出来るだけ正確なクラック図を原寸で作製した。

表-1 試験体・実験諸元

$\mu$  : Displacement Ductility Factor

Spec.	Loading Program		Longitudinal		Transverse		Concrete		Axial Load (ton) (Ratio)
	Path	Steps ( $\mu$ )	Bars	$\sigma_y/\sigma_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Bars	$\sigma_y/\sigma_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )	<sup>28</sup> Fc (kg/cm <sup>2</sup> )	test Fc (kg/cm <sup>2</sup> )	
LC - 1	4	0.5-1-2-3-4-5-7-14	8-D19 pt=0.34%	4000 5820	NS 4-D10 @160	4020 5760	227	184	75.9(0.13)
LC - 2		0.5-1-2-3-5-7-10×2			EW 3-D10 @160			213	76.7(0.14)
LC - 3		1-2×5-3×5-5×5-7×2			EW 3-D10 @160			215	75.9(0.13)
LC - 4		0.5-1-2-3-5-7-10-14			EW 3-D10 @160			249	74.9(0.13)
LC - 5					EW 3-D10 @160			244	130.2(0.23)
LC - 10		1-2-3-5-7-10-14			NS 3-D10 @100			265	155.2(0.25)
LC - 11					EW 3-D10 @100			273	155.8(0.25)
LC - 12		0.5-1-2-3-5-7-10-14			EW 2-D10 @100			280	156.3(0.25)
LC - 13	EW 2-D10 @100		216	146.7(0.26)					
LC - 14	14	EW 2-D10 @100	209	76.0(0.13)					
BC - 1	!	1-3-5-10 (N.S-E.W)	8-D19 pt=0.34%	3717 5331	3-D10 @100 pw=0.43%	3845 5662	251	249	154.2(0.25)
BC - 2		0.5-1-3-5-7						280	157.0(0.25)
BC - 3		0.5-1-3-5-7 (N.S-E.W)						248	171.3(0.25)
BC - 4		10 (N.S-E.W)						249	173.1(0.25)
BC - 5		0.5-1-3-5 (NE.SW-NW,SE)						254	171.8(0.25)
BC - 6		0.5-1-3-5						232	171.7(0.25)

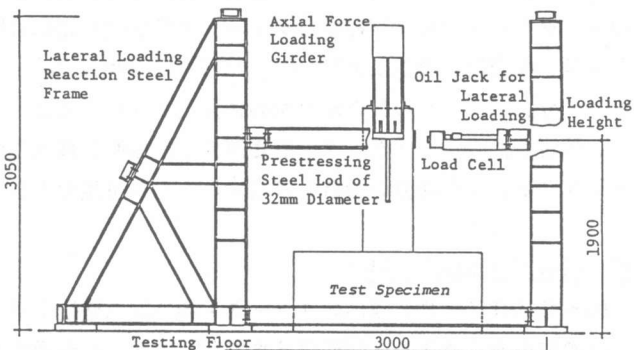
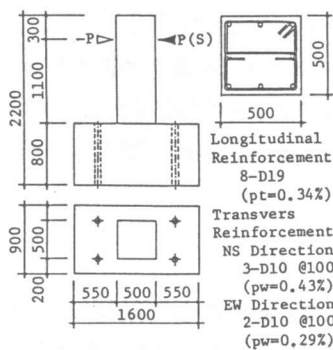


図-1 LC型試験体及び荷装置

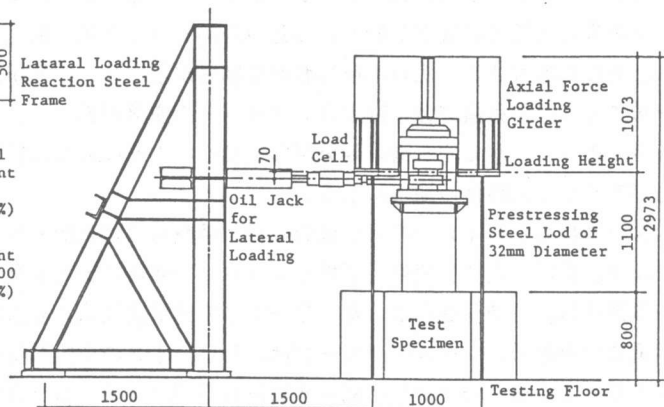
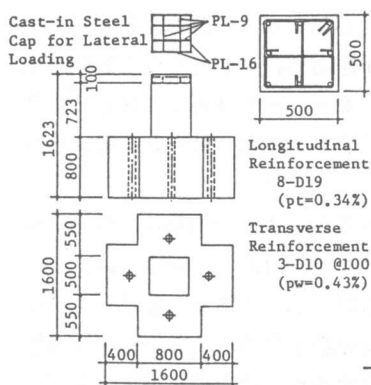


図-2 BC型試験体及び荷装置

クラックを短いリニアセグメントの集りで見なして、各リニアセグメントの始点と終点の座標をディジタイザで読取り、クラックパターンのベクトルデータ化を行なった。なお、柱下端と基礎天端との間に生じた水平クラックは、測定対象としていない。

クラックのベクトルデータを使用して、パソコンの画面上にクラック図を作画することが出来る。すなわち、パソコンのグラフィック座標系のうちのワールド座標系により縦700×横500の平面を設定するとパソコン画面の1ピクセルが試験体表面の1mm×1mmに相当するようになる。ここで設定した仮想平面にクラックのベクトルデータを使用して作図を行なうと、クラックの軌跡に当たるピクセルはONとなりクラック図が得られる。この情報はあくまで仮想平面上の情報であるため、パソコンのグラフィック画面(400×640ピクセル)上に取り出すためにはウィンドウを開きスクリーン座標系を使用し、400×500ピクセルの画面を必要な枚数繰り返し設定して仮想平面上の情報を処理する。

各ピクセルの色彩情報は、青(B)、緑(G)、赤(R)の3バイトのデータに分割されて計算機に取り込まれる。各ピクセル毎にこれら3バイトのデータを解析することにより当該ピクセルの色彩情報が判明する。また、各ピクセルは、重ね書きした場合最後に書き込まれた色彩情報を保持しているため、この手法をクラック量の算定に適用すると簡単に剝落部分の処理が可能となる。即ち、クラックを青で作画し、剝落部分の輪郭を赤で重ね作画し、更に剝落部分を赤で塗りつぶすと剝落部分に含まれるクラックの軌跡を示している青色のピクセルも赤色の情報に変更されてしまうので、画面上に残っている青色のピクセルの数により、その時点でのコンクリート表面に存在するクラックの量を割合簡単に算定することが可能である。1ピクセルは、柱表面積の1mm<sup>2</sup>に相当するので、青色を保持しているピクセルの総数を数えることにより、クラックの長さが近似的に算出される。又は、全部のクラックの幅が1mmであったと仮定した場合のクラックの等価面積が近似的に算出される。同様の手法を剝落図について適用すれば、剝落部分の面積を算出することが可能である。

## 5. 荷重変位曲線及び損傷

図-3にBC-6試験体のクラック・剝落図を塑性率毎に示した。試験体の破壊過程は、おおむね次の通りである。塑性率3までは、履歴変位が増大するにつれて新しいクラックの発生と既存クラックの進展が盛んである。塑性率3を越えると、新しいクラックの発生と既存クラックの進展は徐々に低下し始め、特定の既存クラック幅の拡大が起こり、剝落も発生する。更に、変位が増大すると広い面積にわたり剝落が起こり、鉄筋が露出し、帯筋間での主筋の座屈が起こる。最終段階では、拘束コンクリートの崩落が起こり、タイバーや帯筋(180、135度)のフックがはずれ拘束効果がなくなり、主筋に大きな座屈が見られ、軸方向荷重の支持力が無くなり試験体の崩壊に至る。

図-4にLC-12の荷重変位曲線を一軸載荷の代表例として示した。一軸載荷の荷重変位曲線は、非常に大きい変位(塑性率10)まで非常に安定したループである。同図には、一方向単調漸増荷重載荷を行なったLC-13の荷重変位曲線も点線で示してある。LC-12の荷重変位曲線のエンベロープカーブは、LC-13の荷重変位曲線と非常に大きい変位(塑性率10)まで良く合っている。図-5に円形載荷パスのBC-6の荷重変位曲線をNS・EW軸平面上に投影したものを重ね書きして二軸載荷の代表例として示した。両者は良く合っており、

同一振幅で繰り返し回数の少ない荷重法では先行荷荷の影響を余り受けない事を示唆している。同図には、一方向単調漸増荷重的な荷荷を行なったBC-4の荷重変位曲線も重ね書きしてある。BC-6の荷重変位曲線は、塑性率1~2近傍で最大耐力に達し、塑性率3まではBC-4の耐力とほぼ近い耐力を保持しているが、それ以降は急激な耐力低下を起し、塑性率5ではBC-4の耐力を大幅に下回っている。

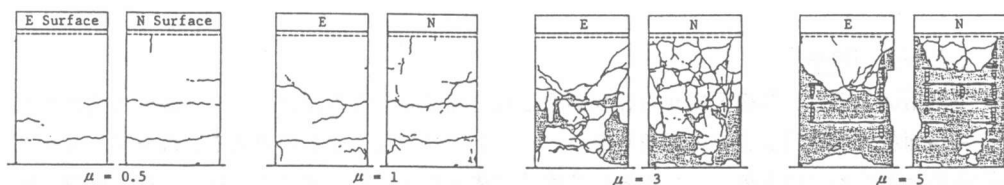


図-3 BC-6試験体クラック剝落図

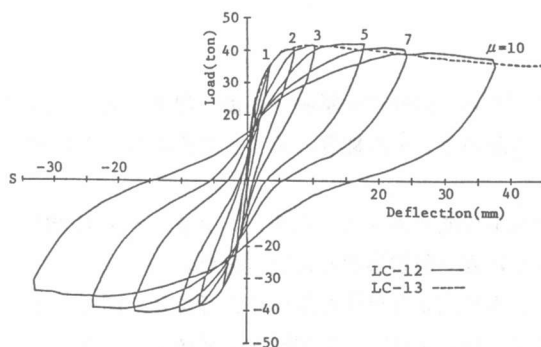


図-4 LC型試験体荷重変位曲線

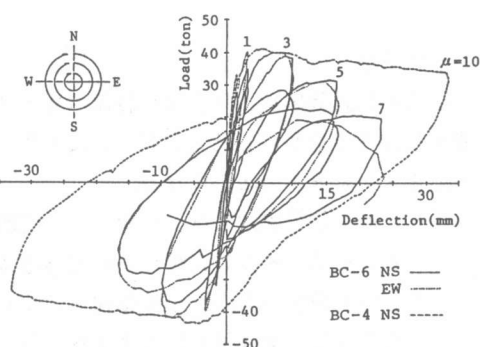


図-5 BC型試験体荷重変位曲線

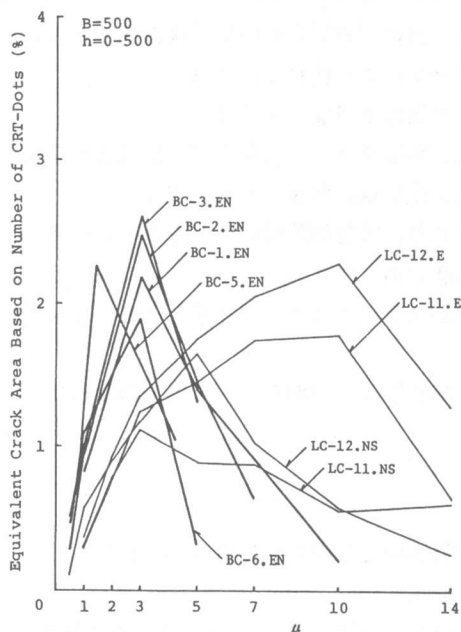


図-6 等価クラック面積率

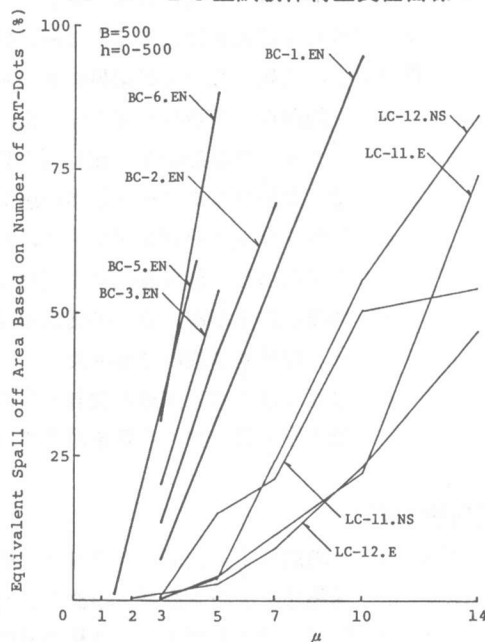


図-7 等価剝落面積率

## 6. 等価クラック面積率

等価クラック面積率は、基礎天端から柱幅高さと同柱全幅に囲まれるコンクリート表面に発生したクラックの等価面積と対象表面積との面積比をパーセンテージで示したものである。図-6に等価クラック面積率と塑性率との関係をLC型とBC型試験体とも示した。BC型試験体の等価クラック面積率は、塑性率1では1%で、塑性率3では2~2.5%にも達している。塑性率3以降は、剝落面積の増大により急激に低下している。

## 7. 等価剝落面積率

等価剝落面積率は、基礎天端から柱幅高さと同柱全幅に囲まれるコンクリート表面に発生した等価剝落面積と対象表面積との面積比をパーセンテージで示したものである。図-7に等価剝落面積率と塑性率との関係をLC型とBC型試験体とも示した。BC型試験体の等価剝落面積率は、塑性率3で10~30%となり、塑性率5では30~85%にも達している。

## 8. むすび

限られた試験体数、限られた荷重パス・プログラム、試験体の挙動や損傷の程度に大きく影響を与えると思われる軸方向荷重の大きさ、柱主筋の定着の問題等々不十分な点も多々あるが、一応まとめると次のようになる。

- 1) 二軸の荷重実験では、一軸の荷重実験では不可能であった、鉄筋コンクリート造構造物が地震被害を受けた場合の震害形態に非常に近い破壊形態を再現し得た。
- 2) 二軸荷重法の方が、一軸荷重法に比して、より大きな損傷を試験体に与える。同じ二軸の荷重法でも面積を持つような荷重パスの方が、より大きな損傷を試験体に与える。
- 3) 二軸の荷重実験から得られた等価クラック面積率や等価剝落面積率は、一軸の荷重実験から得られる結果とは大きく異なる。従って、震害建物等の損傷度評価方法を検討する場合には、二軸の荷重実験結果に基づいたデータにより検討されるべきである。
- 4) クラック剝落損傷度指標に従えば、次のような推測が可能であろう。
  - a) クラックが基礎面から柱幅高さ以内で、等価クラック面積率が1%前後の場合には、鉄筋コンクリート柱が経験した最大変位は、塑性率1以下であった。
  - b) 等価クラック面積率が2~2.5%であり、等価剝落面積率が10~30%である場合には、最大変位は、塑性率3程度であった。
  - c) 鉄筋の露出が起り、等価剝落面積率が30~85%である場合には、最大変位は、塑性率5程度であった。
  - d) 帯筋がはづれ、主筋が大きく座屈し、等価剝落面積率が50%以上の場合には、最大変位は、塑性率5を越えていた。

### 【関連文献】

- 1) 小川、他 "地震による鉄筋コンクリート柱の損傷評価とその許容限界(I)~(V)"、日本建築学会大会学術講演梗概集、昭59.10~63.10
- 2) 小川、他 "二方向加力時のRC造柱の損傷評価(I)~(II)"、日本建築学会大会学術講演梗概集、平1.10