

論文

[2080] RC柱部材の曲げ降伏後の繰り返し载荷によって発生する破壊のメカニズムについて

衣笠秀行\*1・野村設郎\*2・西村 徹\*3・西村俊彦\*3

1. はじめに

本研究は比較的低軸力下で、大変形の繰り返し载荷を受ける柱の破壊性状について考察を行い、曲げ圧縮部コンクリートの剥落にともなう発生する耐力低下がコンクリートの圧縮破壊によるのではなく、繰り返しによるひび割れのゆるみ・噛み合い劣化が進行することによって起こり得ることについて述べ、正負繰り返し载荷時に特有の破壊の可能性について論じるものである。

2. RC柱部材の繰り返し载荷実験

2.1 実験概要

試験体の形状及び配筋詳細を図-1に示す。試験体はシアスパン比2.5、部材断面=20cm×20cmであり、曲げ降伏がせん断破壊に先行して起こるよう設計されている。使用した鉄筋の材料特性を表-1に、各試験体のコンクリート圧縮強度 $\sigma_B$ を図-5中に示した。図-2に示す载荷装置を使用し、軸力比(=N/BD $\sigma_B$ )0.15の一定軸力Nを作用させた状態で図-5に示す一方向単調载荷及び3種類の繰り返し载荷を行った。変位計取り付け位置を図-3に示す。破壊の集中する部材端部の挙動を把握するため同図(b)に示す位置(試験体両面)に全ネジ棒(6 $\phi$ )を埋込み、これの相対変位の計測を行った。

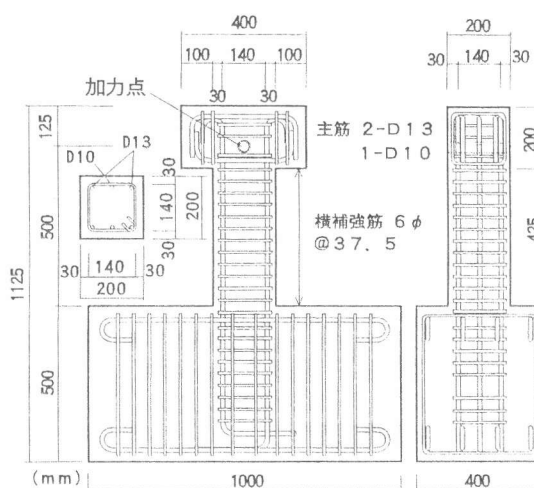


図-1 試験体形状および配筋詳細

2.2 繰り返し载荷による耐力低下

水平荷重P、変形角Rを図-4に示すように定義し、以下ではこれをそれぞれP、Rで略記する。また、P- $\delta$ 効果の補正を同図中に示すように行った水平荷重をP'と表すこととする。実験から得られた水平荷重P'-変形角R関係を図-5に示した。同図(a)に見られるように単調载荷下では曲げ降伏後160/1000 rad. までほぼ一定の水平荷重P'を維持しており部材は十分な変形能力を有していることが分かる。一方、繰り返し载荷を受けた3試験体(同図(b)~(d))では40~60/1000rad. の繰り返し载荷で耐力を低下させ破壊に至っている。図-6は、縦軸に各サイクルの正負ピーク時の平均水平荷重(P' avg)を、

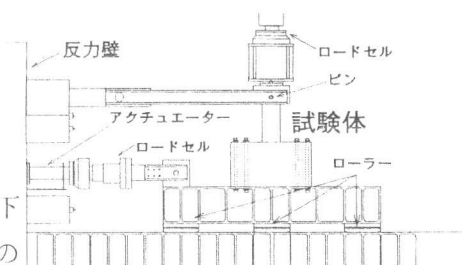


図-2 载荷装置

表-1 使用鉄筋材料特性

	降伏強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
6 $\phi$	3600	4900
D10	4900	6600
D13	4400	6000

\*1東京理科大学講師 理工学部建築学科、工博(正会員)

\*2東京理科大学教授 理工学部建築学科、工博(正会員)

\*3東京理科大学大学院 理工学部建築学科(正会員)

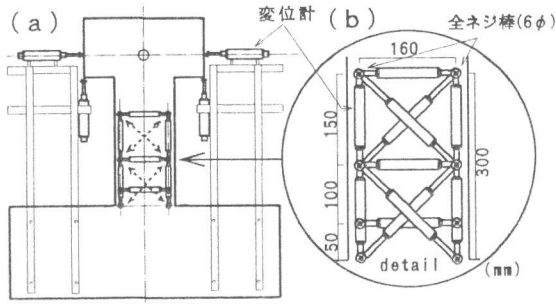


図-3 変位計取り付け位置

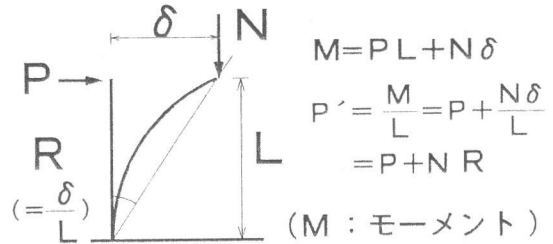
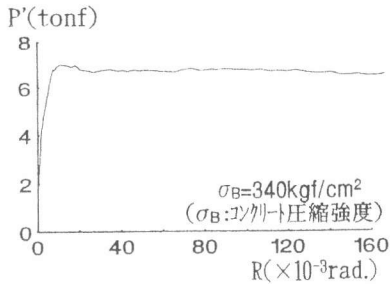


図-4 水平荷重P, 変形角Rおよび

P-δ効果を補正した水平荷重P'

横軸に各サイクルまでの累積履歴吸収エネルギー ( $E = \int P d\delta$ ) を取り示したものである。繰り返し荷重2は繰り返し変形角が小さく損傷が緩やかに進むため耐力低下の開始を特定することは困難であるが(図-5(c))、繰り返し荷重1と3では図-6から分かるようにそれぞれ13・14サイクルおよび5サイクル(図中●, ■印)から耐力を低下させていることがわかる。なお、耐力低下発生後も部材端部のせん断変形成分に顕著な増加は見られず、これらの耐力低下は曲げ圧縮部に観察されたコンクリートの剥落が原因で発生したものと考えられる(図-16参照)。

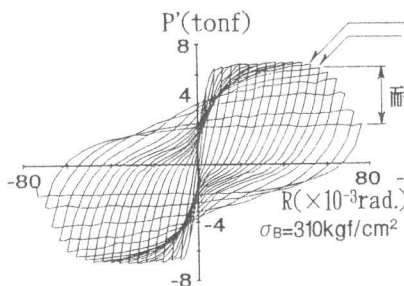


(a) 単調荷重

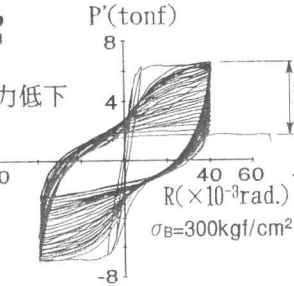
### 3. 柱端部の曲げ抵抗機構

#### 3. 1 中立軸位置の算定

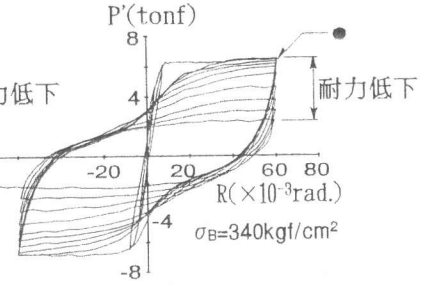
図-7に示すように柱端部の変形を、柱底面に集中させ、これによって得られるひずみ分布から同図(b)に示すように中立軸位置  $\ell$  を定義する。この中立軸位置を中心に同図(b)の◎点が回転したとして、図-8(a), (b)に示す関係を用い中立軸位置  $\ell$  と点◎の変位  $\delta x$ ,  $\delta y$  および回転角  $\theta$  (図-8(d)参照) と



(b) 繰り返し荷重1



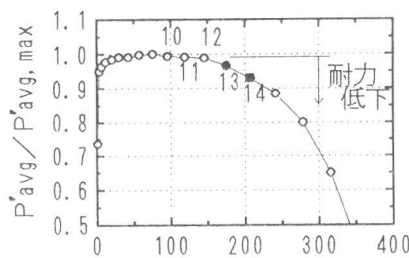
(c) 繰り返し荷重2



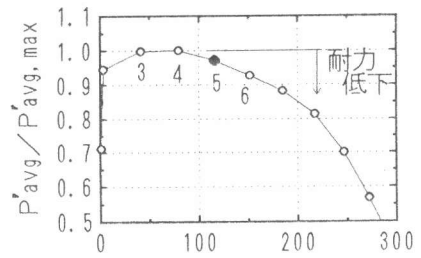
(d) 繰り返し荷重3

図-5 P-δ効果を補正した水平荷重P'-変形角R関係

の関係を導くと、図-8中の式③が得られる。この式は図-8(c)に示すように縦軸に  $\delta y + \delta x \tan \theta$  を、横軸に  $\tan \theta$  を取るとそのときどきの傾きの大きさが中立軸位置  $\ell$  となることを示している。なお、この様に  $(\delta y + \delta x \tan \theta) - \tan \theta$  関係の接線



(a) 繰り返し荷重1



(b) 繰り返し荷重3

図-6 正負ピーク時平均荷重P'avg-履歴吸収エネルギー関係

の傾きから得られる中立軸位置  $\ell$  は、柱底面に生じているひずみ分布の中立軸ではなく、ある瞬

間に生じたひずみ増分分布から定まる中立軸である。以下では特に断らない限り中立軸とは、以上の仮定に基づく柱底面のひずみ増分分布の中立軸である。また、これらは端部より15cmの位置の全ネジ棒の相対変位計測結果に基づき計算されるが、端部変形のほとんどはこれより下 (<15cm) の領域で生じており端部の劣化による全ネジ棒のぐらつきのための精度低下は特に問題とならないと考えられる。

### 3. 2 繰り返し载荷時の中立軸位置

単調载荷時の  $\delta y + \delta x \tan \theta - \tan \theta$  関係を図-9中に実線で示す。傾きがほぼ一定の直線となっており単調载荷時の中立軸位置  $l$  は約6.5 cm でほぼ一定に維持されていることが分かる。

繰り返し载荷時における同関係の一例として図-10(a)に繰り返し载荷1の耐力低下が発生する前の1サイクルを抜き出し、対応するP-R関係(同図(b))と比較示す。図中(a)から分かるように  $\delta y + \delta x \tan \theta - \tan \theta$  関係はすり鉢状となっており、図中④に示す中立軸位置の刻々変化する中立軸移動域と、図中⑥に示す中立軸位置  $l$  がほぼ一定値に保たれる中立軸安定域に分けることができる。同図(a)中に示した点線は単調载荷時のものであり、中立軸安定域の中立軸位置は単調载荷時のものとほぼ一致しているといえる。中立軸移動域はP-R関係(同図(b))の②→④および⑥→⑧にあっており、中立軸位置は反転载荷後の比較的低変形角域に移動し変形が増大すると固定されることが見て取れる。この領域は反転载荷によって引張側

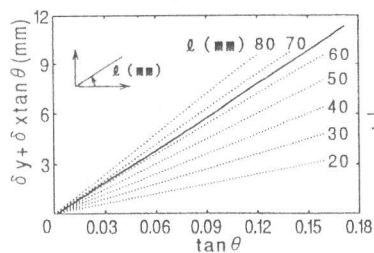


図-9 単調载荷時の  $\delta y + \delta x \tan \theta - \tan \theta$  関係

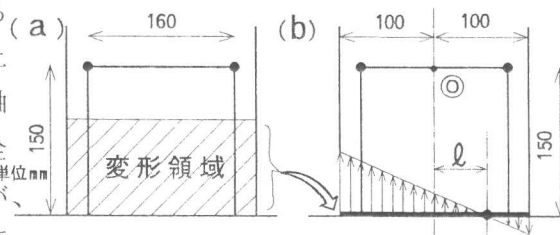
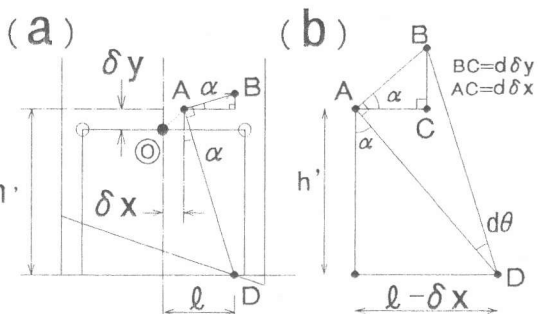


図-7 中立軸位置  $l$



$$\tan \alpha = \frac{l - \delta x}{h'} = \frac{d\delta y}{d\delta x} \quad \begin{matrix} AB \cos \alpha = d\delta x \\ AD \cos \alpha = h' \end{matrix}$$

ゆえに  $l = h' \frac{d\delta y}{d\delta x} + \delta x$  式①

$$\tan(d\theta) = \frac{AB}{AD} = \frac{d\delta x}{h'} \quad \text{式②}$$

式①と式②より  $\frac{d\delta y}{d \tan \theta} = l - \delta x$

これを  $\tan \theta$  で積分すると  $\delta y + \delta x \tan \theta = l \tan \theta + C$  式③

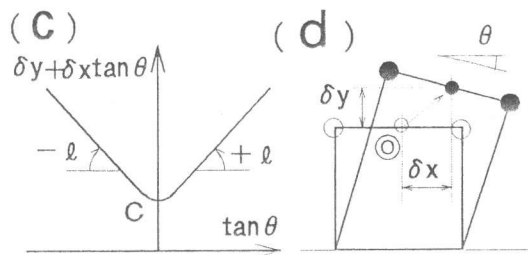


図-8 中立軸位置  $l$  の計算

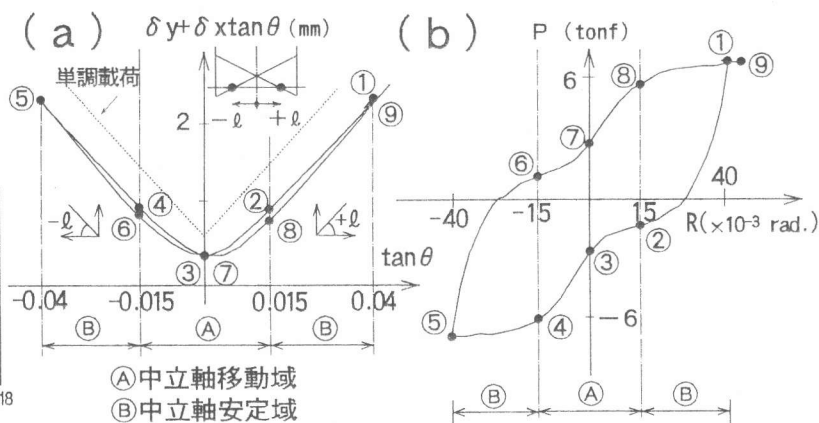


図-10 繰り返し载荷時の  $\delta y + \delta x \tan \theta - \tan \theta$  関係と対応する水平荷重P-変形角R関係

から圧縮側となったコンクリートのひび割れ閉鎖が盛んに行われ水平荷重Pの上昇が起こる領域であり、中立軸の移動が反転載荷時のひび割れ閉鎖にもなって起こり、これが終了することで中立軸の移動も止まるものと考えられる。

#### 4. 繰り返し載荷時の耐力低下

##### 4. 1 中立軸位置と耐力低下

図-11は繰り返し載荷時の3章で述べた中立軸安定域(図-10(a)の②)の載荷部分を抜き出し傾きを比較し示したものである。なお、繰り返し載荷1, 2, 3の中立軸移動域をそれぞれ一律 $\pm 15, 10, 20/1000\text{rad}$ の範囲と仮定した。図-11(a), (c)から繰り返し載荷1と3はそれぞれ●および■印で示した耐力低下開始のサイクル(図-6参照)を境に単調載荷時の傾き(図中の点線)から大きく外れていることが分かる。すなわち、耐力低下は中立軸位置 $l$ が単調載荷時の中立軸位置から外れ小さくなることによって発生している。繰り返し載荷2では耐力低下の進行が非常に緩やかなため耐力低下の開始からこの事を考察することは困難であるが、図-11(b)と図-5(c)の比較から、始めはほぼ単調載荷時と同じ位置にある中立軸位置が耐力

を低下させるのにもない徐々に小さな値となっていく様子がみてとれる。以上に述べたように中立軸位置と部材耐力の間には強い相関関係が存在することから、本試験体の場合、図-12に示すように中

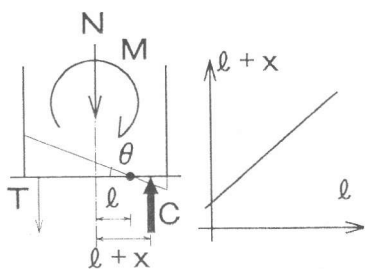


図-12 中立軸位置  $l$  と  
圧縮合力位置  $l+x$

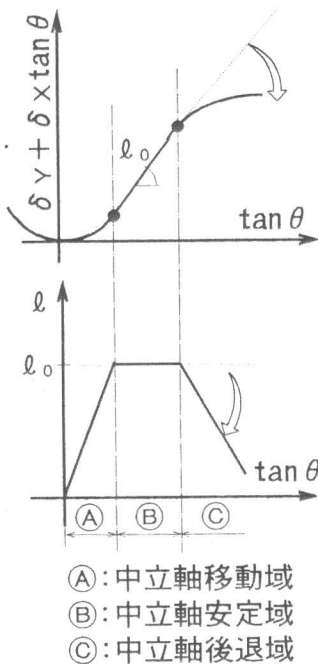


図-13 中立軸の移動・安定・後退

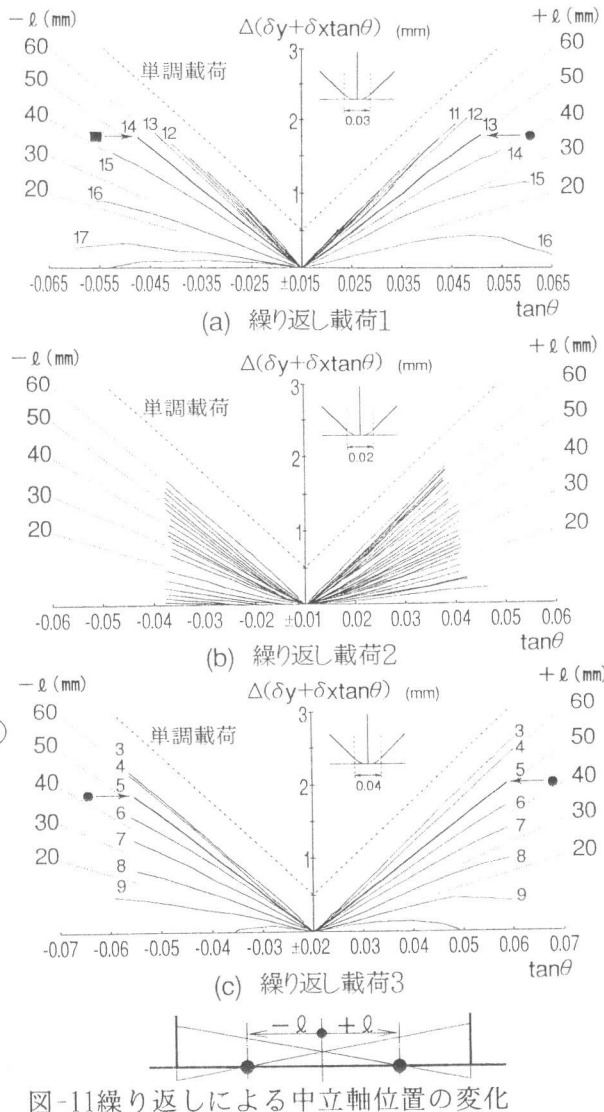


図-11 繰り返しによる中立軸位置の変化

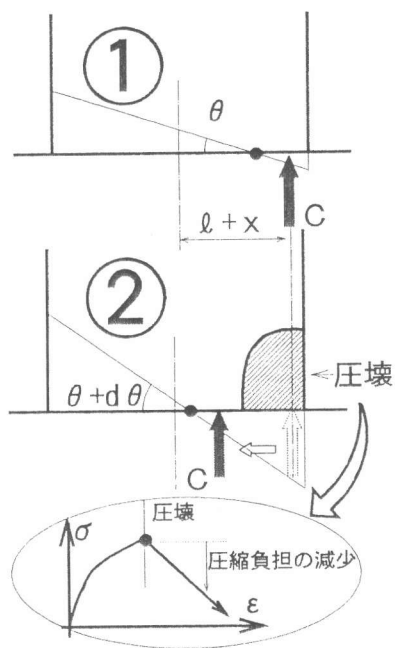


図-14 中立軸の後退と圧壊

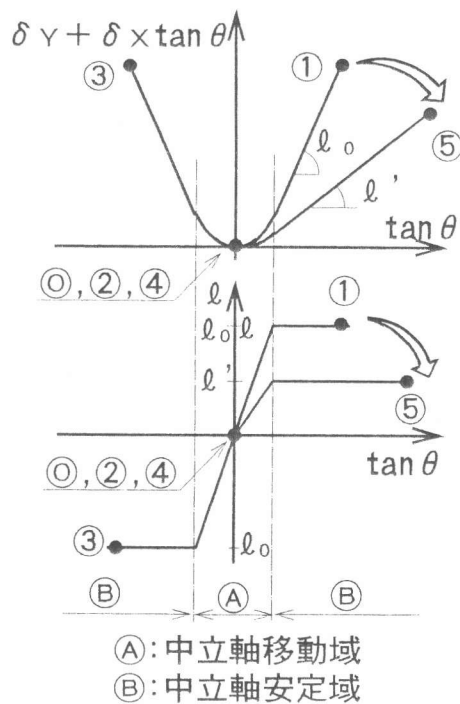
立軸位置  $l$  と圧縮合力位置  $l+x$  はほぼ1対1に対応していると考えてよいと思われる。すなわち、中立軸位置  $l$  の減少は圧縮合力位置  $l+x$  の減少であり、繰り返し載荷時に単調載荷時と同じ耐力を維持するためには中立軸位置を単調載荷時と同じ位置に形成する必要があることになる。

#### 4. 2繰り返しによる中立軸位置の低下

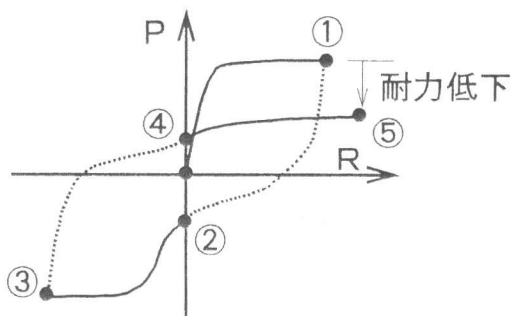
実験から得られた中立軸位置  $l$  の挙動は図-13のように①中立軸移動、②中立軸安定、③中立軸後退の3つに分けられる。中立軸の後退は図-14に示すように圧縮合力  $C$  が作用したことによる圧壊によって曲げ圧縮部（図中の斜線部）の圧縮負担が減少し圧縮合力位置が部材中央に向かって移動することによって発生する（図中①→②）。一方、図-11(b)から分かるように繰り返し載荷2では上に述べた③中立軸後退によってではなく、図-15(a)に示すような①中立軸移動と②中立軸安定を繰り返すことによって中立軸位置  $l$  を低下させている。

図-16に繰り返し載荷2の柱端部の破壊性状の一例として耐力低下前である第4サイクルと破壊の進んだ第18サイクルのものを示す（実験終了サイクルは31）。この図から繰り返し載荷によって曲げ圧縮部のコンクリートの剥落が進行する様子が見て取れ、図-11(b)にみられる繰り返し載荷による中立軸位置の低下はこれが原因で生じたものと考えられる。この圧縮部コンクリートの剥落が繰り返し疲労によりコンクリート強度が低下し圧縮破壊を起こしたためだとすれば上に述べた中立軸の後退は当然観察されていはずである。しかし、図-11(b)には中立軸の後退（図-13中の③）は見られず、このことはコンクリートの剥落が、図-14に示すような作用圧縮力  $C$  がコンクリートの強度（繰り返し疲労によって低下）を上回ったことによる圧縮破壊が原因で生じたものではなく、何らかの他の要因によるものであることを示すものである。

なお、繰り返し載荷1, 3（図-11(a), (c)）では耐力低下開始の2~3サイクル後から中立軸後退が観察される。しかし、耐力低下の開始前後ではこれは見られず、これらの試験体においても繰り返し載荷2と同様、曲げ圧縮破壊とは異なるメカニズムによってコンクリートの剥落が発生し、これによる劣化によってコンクリートの圧壊が誘発され、耐力低下の数サイクル後に中立軸



(a) 繰り返し載荷による中立軸の低下



(b) 繰り返し載荷による耐力低下

図-15 繰り返し載荷による中立軸の低下と耐力低下

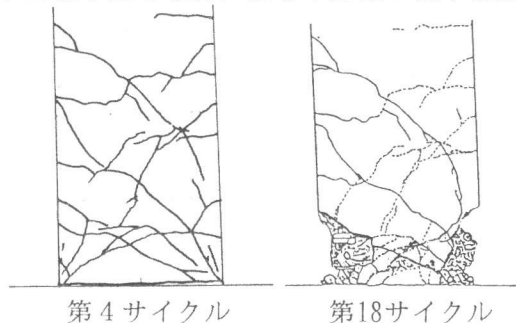


図-16 部材端部のひび割れ状況

後退が観察されたものと思われる。

本実験で観察された繰り返し载荷による中立軸位置 $\ell$ の低下は、反転载荷し一度逆方向に载荷（図-15(b)①→②→③）することによって移動した中立軸が（同図(a)①→②→③）、再载荷（図-15(b)③→④→⑤）時に中立軸移動域を経て、元の位置 $\ell_0$ と異なる位置 $\ell'$ に再形成されるために起こるものである（図-15(a)③→④→⑤）。反転载荷することにより中立軸移動域を経ることが、この中立軸位置 $\ell$ の低下に重要な働きをしていることが推察される。3.2節で考察したように中立軸移動は反転载荷時のひび割れ閉鎖にともなって起こるものであり、これらの破壊性状は、繰り返し载荷時におけるひび割れ開閉挙動と密接な関係にあることが推察される。

図-16に示したように、柱端部に発生したひび割れは複雑に交差しており、これによって端部コンクリートのブロック化が進行している。繰り返し载荷時の中立軸移動域を経て定まった中立軸位置が常に単調载荷時と同じ位置となるためには、ひび割れによってブロック化したコンクリートが図-17①に示すようにひび割れの閉鎖により再び一体となり、あたかも曲げ圧縮側にひび割れのない単調载荷時と同じ状態で曲げモーメントに抵抗する必要がある。しかし、繰り返しによりひび割れのゆるみ・噛み合いの劣化が進むと、逆方向载荷を受け（同図②）、再び载荷されたとき（同図③）、ブロック化の進んだコンクリート塊は元の状態（同図①）に戻れなくなり、この結果、中立軸移動域を経て定まる中立軸位置は低下することになる（図-17③の $\ell_0$ が $\ell'$ に低下）。繰り返し载荷を受けることによってこのようなひび割れのゆるみ・噛み合い劣化が徐々に進行することは充分予想されることであり、本実験の耐力低下はこれにより引き起こされたコンクリートの剥落が原因で発生したものと推察される。

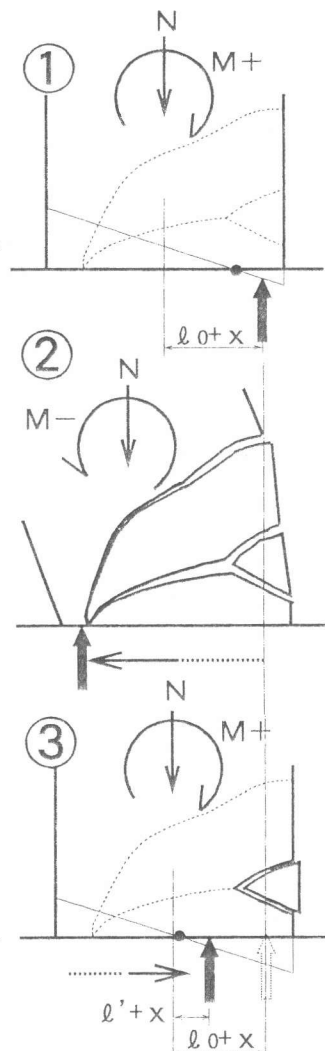


図-17繰り返しによるひび割れのゆるみ・噛み合い劣化

## 5. まとめ

比較的低軸力を受ける柱の、大変形の繰り返しによる曲げ圧縮部コンクリートの剥落にともなう耐力低下が、コンクリートの圧縮破壊によってではなく繰り返しによるひび割れのゆるみ・噛み合い劣化が進行することによって起こりえる。この破壊について次のように述べることができる。

単調载荷時の部材端部には中立軸位置がほぼ一定に保たれるある曲げ抵抗機構が形成される。繰り返し载荷時には载荷の方向が変わる度にこの単調载荷時の曲げ抵抗機構が、中立軸移動域を経ることによって一時的消滅と再構築を繰り返している。単調载荷時の曲げ耐力を繰り返し载荷下においても発揮するためには、次の2つの条件を満足する必要がある。①载荷の方向を変え一時的に消滅した単調载荷時の曲げ抵抗機構が再び構築されること（中立軸移動域を経て定まった中立軸位置が単調载荷時と同じとなること）。②構築された単調载荷時の曲げ抵抗機構が曲げ耐力時に作用する応力に対して破壊しないこと（中立軸の後退が起こらないこと）。本実験で観察された繰り返し耐力低下は条件①を満足できないために発生したものであり、単調载荷時には発生しない正負繰り返し载荷時に特有のものであると言える。