

正負交番荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの 力学的挙動に関する研究

西林 新蔵*・矢村 潔**・吉野 公*

(1982年6月17日受理)

Mechanical Behaviours of Reinforced Concrete Beams Subjected to Repeated Reversed Load

by

Shinzo NISHIBAYASHI*, Kiyoshi YAMURA**, Akira YOSHINO*

(Received June 17, 1983)

For the progress of research and design related to performance of concrete structures in seismic zones, it is necessary and much important to clarify the behaviours of concrete members subjected to the repeated reversed loading.

In this paper, an experimental investigations on the mechanical behaviours of reinforced concrete beams subjected to the actions of repeated reversed large deformations. The main factors adopted in this experimental works, are the magnitude of the deflection subjected to the mid span of the beams, reinforcement ratio and the amount of the shear reinforcement.

Repeated reversed loading test of the reinforced concrete beams controlled by the mid span deflection, were carried out. The late of damages which were carried through the cyclic actions, relations between load and deformations, and mechanism and the pattern of shear failures which is developed suddenly during cyclic loading, are discussed.

1. はじめに

過去の種々の強震記録からも明らかなように、強震時に土木構造物の応答が塑性域に及ぶのは避けられないことである¹⁾。そこで、鉄筋コンクリート構造部材の強震時における挙動を把握するための最も基本的な状態として、いわゆる降伏点を越えて塑性域まで及ぶ大変形を受ける、正負交番繰返し荷重を受ける、の2点について検討して

いくことが必要であろう。とくに鉄筋コンクリート構造でこのような状態のもとで問題となると考えられるのは、塑性域における変形能力、すなわち破壊に至るまでのじん性の程度、さらにきわめてぜい性的な破壊形態である斜ひびわれの進展に伴うせん断破壊現象があげられよう。

本研究は以上の観点から、鉄筋コンクリートはりが降伏点をはるかに越えるような正負交番繰返し大変形を受

* 土木工学科 Department of Civil Engineering

** 海洋土木工学科 Department of Ocean Civil Engineering

ける状態での劣化の進行の様子，さらには破壊性状等の力学的特性に関して，主として実験を通して検討し，鉄筋コンクリート構造部材の耐震性を明らかにしていくための基礎資料を得ることを目的とするものである。

2. 実験計画および実験方法

2.1 実験計画

本実験で採用した主たる要因は，主鉄筋量，せん断補筋筋（腹鉄筋）量，繰返し載荷における振幅である。それぞれの要因および水準の組み合わせを **Table I** に示す。

Table I Test program

Specimen No.	Reinforcement		Stirrup		Level repeated deflection (mm)
	Used bar	Ratio (%)	Used bar (mm)	Space (cm)	
R13-I	D13×4	$p=p'$ =1.23	6	6.0	±5, ±10, ±20
R13-II			6	10.0	
R13-III			6	16.5	
R13-IV			—	—	
R16-I	D16×4	$p=p'$ =1.92	9	10.0	±5, ±10, ±20
R16-II			6	7.0	
R16-III			6	16.5	
R16-IV			—	—	
R19-I	D19×4	$p=p'$ =2.78	9	8.0	±5, ±10, ±20
R19-II			—	—	
R19-III			6	12.5	
R19-IV			—	—	

表中のせん断補筋筋量は以下の通り決定されたものである。すなわち，それぞれのはりの曲げ終局耐力を算定し，その時に生じるせん断力に耐える腹鉄筋量を土木学会 RC 標準示方書の規定から求めたものが供試体記号の末尾が I に相当するものである。II, III は腹鉄筋量がそれぞれ I の 60%, 30% に相当する。

供試体の大きさは，断面が幅 12.5 cm，高さ 20 cm（有効高さ $d=16.5$ cm， $d'=3.5$ cm），長さ 170 cm の複鉄筋矩形はりである。また，それぞれの断面条件のはりについて別に一方荷重試験を行い，降伏強度，降伏たわみ，終局強度，終局たわみ等を測定した。この供試体については，供試体記号を **Table I** 中の対応する供試体の最初の R を省いて表わすことにする（例えば 13-I 等）。

2.2 使用材料

コンクリートには普通ポルトランドセメント，砕石（最大骨材寸法：20 mm），川砂を使用した。試験時材令における圧縮強度 410 kg/cm²，割裂引張強度 30 kg/cm²，ヤング係数 3.16×10^5 kg/cm² 程度であった。

主鉄筋には $\phi 13$ mm， $\phi 16$ mm， $\phi 19$ mm，の SD 30 異形棒鋼を使用した。腹鉄筋には $\phi 6$ mm， $\phi 9$ mm の SR 24 普通丸鋼を使用した。

2.3 実験方法

載荷試験はアムスラー型耐圧試験機を用い，スパン長 150 cm の 3 等分点載荷で行った。まずスパン中央変位が所定の変位水準に達するまで変位を増加させていき，しかる後除荷を行う。完全に除荷を行った後に残留変形量等を測定し，続いて供試体を支点上で反転させることによって逆方向載荷を行った。そしてスパン中央たわみが最初の位置から逆方向に所定の変位水準だけたわむまで逆方向の載荷を行い，再び除荷する。以上を 1 サイクルとして数サイクルの繰返しを行った。その間，適当な間隔毎に載荷反力，スパン中央たわみ，載荷点たわみ，せん断スパン中央たわみ，鉄筋ひずみ等の測定およびひびわれの進展状況の観察を行った。

なお，載荷試験はコンクリート材令 5～10 週で行った。載荷試験装置の概略を **Fig. 1** に示す。

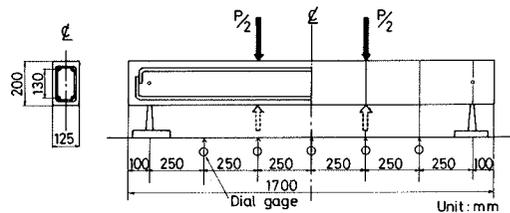


Fig. 1 Testing arrangement

3. 実験結果とその考察

3.1 一方荷重試験

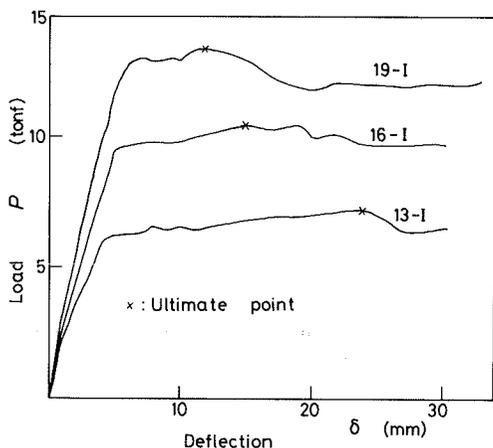
正負交番繰返し載荷試験に先だてて行った一方荷重試験の結果をまとめて **Table II** に示す。表中の曲率は載荷点たわみとスパン中央たわみからモーメントスパン内の曲率が一定であると仮定して算定したものである。また **Fig. 2** に I シリーズの供試体についての荷重～スパン中央たわみ曲線を示す。本実験では 16-IV, 19-IV シリーズが引張鉄筋の降伏前に斜ひびわれによるせん断破壊を生じ，それ以外はすべて曲げ破壊を生じた。

本実験ではすべての供試体が引張鉄筋と同量の圧縮鉄筋を有しているため，単鉄筋断面と比較して終局時の変

Table II. Test results of onside loading test

Specimen No.	Yield load (ton)	Ultimate load (ton)	Curvature ($\times 10^{-4} \text{cm}^{-1}$)		Ductility factor	Deflection (mm)		Type* of failure
			Yield	Ultimate		Yield	Ultimate	
13-I	6.0	7.00	1.89	12.07	6.38	4.20	25.00	F
13-III	6.0	6.59	1.76	11.44	6.56	4.45	24.50	F
13-IV	6.0	6.91	2.25	12.89	6.70	4.50	26.05	F
13-I	9.5	10.42	1.78	6.38	3.59	5.00	15.50	F
13-III	9.5	10.00	3.44	7.50	2.20	7.00	17.50	F
13-IV	—	8.17	—	2.09	—	—	5.95	S
13-I	13.0	13.40	2.35	7.13	3.06	6.50	15.50	F
13-III	13.0	13.40	2.00	8.32	4.16	6.50	17.00	F
13-IV	—	8.79	—	1.17	—	—	5.11	S

* F: Flexure failure S: Shear failure

Fig. 2 P- δ Curves

量がかなり大きくなっている。また上縁部コンクリートの圧壊後も急激な耐力の減少はみられず、むしろ一時的に減少した耐力が変形の増加につれて上昇していく傾向にある。これは、圧縮部コンクリートの圧壊後でも、圧縮鉄筋が圧縮力を受けもち、かつ引張鉄筋、圧縮鉄筋共はずみ硬化領域に入って応力が増大してくるためと考えられる。本実験ではスパン中央たわみが約30mmで載荷を中止しており、場合によっては最大耐力はもっと大きくなる可能性もある。いずれにしても多量の圧縮鉄筋の存在は、はりのじん性の向上に大きく寄与していることが明らかである。過去に行った同じ断面で圧縮鉄筋を有していない場合と比較して、19シリーズで終局時曲率で約50%の増加が認められた²⁾

本実験の結果を参考にして正負交番繰返し載荷試験における変位水準を5mm(降伏点変位附近)、10mm(19シ

リーズにおける終局変位)、20mm(13シリーズにおける終局変位)と定めた。

3.2 正負交番繰返し載荷試験

3.2.1 破壊性状

正負交番繰返し載荷におけるせん断による破壊形式を分類すると

A: 最初の載荷で降伏点に達するまでにせん断破壊する(静的せん断破壊)。

B: 降伏点を越えて塑性領域に入った後繰返し振幅に達するまでにせん断破壊する。

C: 逆方向載荷あるいは繰返し載荷途中でせん断破壊する。

D: 所定の繰返し回数には破壊しない。

これらの破壊形式で耐震上問題となるのは特にB, Cについてである。すなわち、Bは曲げ破壊の場合より塑性変形能力を減少させるものであるし、Cは繰返し載荷に対してはせん断耐力が曲げ破壊耐力よりも相対的に低くなることを示唆しているものである。

本実験での主たる要因である鉄筋比、繰返し振幅、腹鉄筋量を3次元立体モデルで表わし、それぞれの供試体のせん断破壊形式を示すとFig. 3のようになる。この図から、鉄筋比の減少、腹鉄筋量の増大、繰返し振幅の減

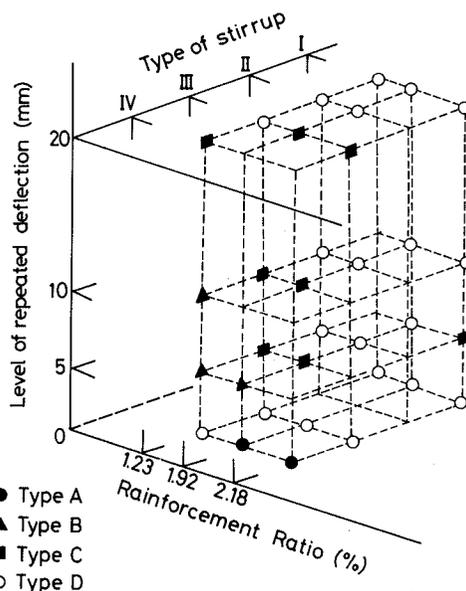


Fig. 3 Type of shear failure

少と共に、破壊性状がA→B→C→Dと移行する傾向がみられる。

繰返し載荷によるせん断破壊の進行状況に関しては後述する。

3.2.2 荷重～変形曲線

交番繰返し載荷試験における荷重～スパン中央たわみ曲線をIシリーズについてFig. 4に示す。これらの図から次のような特性を認めることができる。すなわち、まず最初の載荷で降伏し変形が増大する領域は先の一方

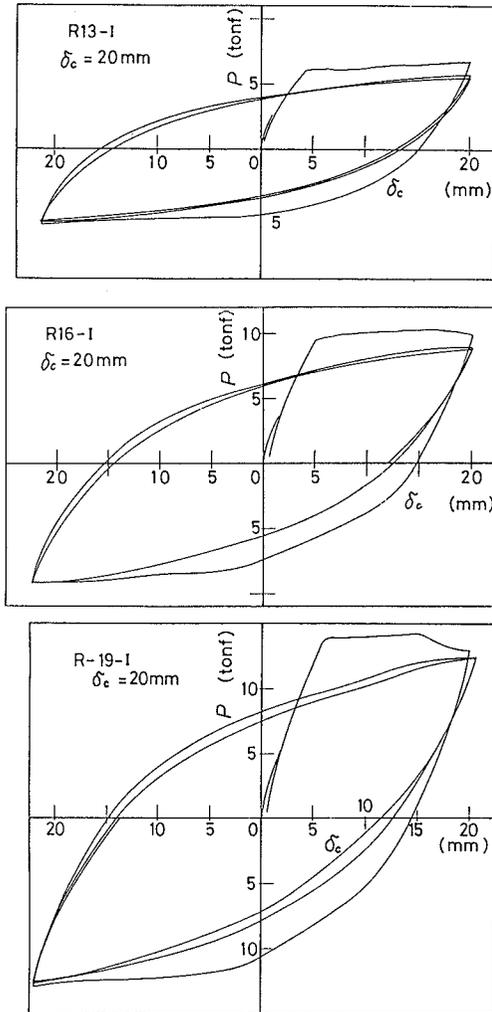


Fig. 4 $P-\delta$ curves of repeated reversed loading test
(a) I-20 series

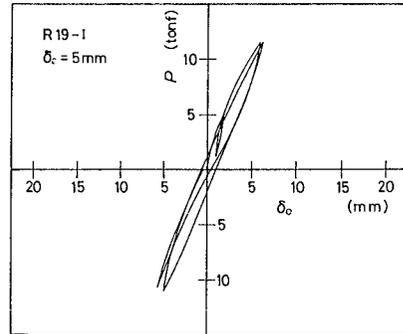
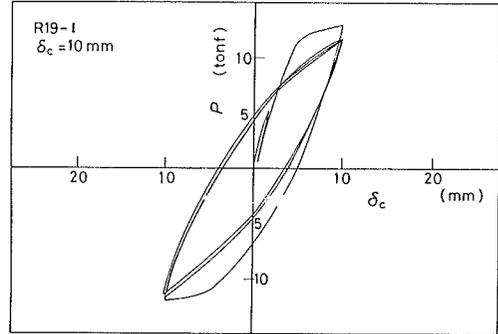


Fig. 4 $P-\delta$ curves of repeated reversed loading test
(b) R19-I series

載荷と同じである。次に除荷すると載荷時とほぼ同じ傾きをもってループを描き、したがって荷重が0の時点でほぼ載荷時に生じた塑性変形量に相当する残留変形が残る。次に逆方向載荷すると変形が増加するにつれて曲線が徐々に傾いてくるが、当初ほど降伏点が明確に表われない。この傾向は変位水準が大きいほど、鉄筋比が小さいほど顕著である。以後、除荷2回目以降の繰返し載荷によって、曲線は紡錘形ループを描きながら若干ではあるがループの大きさを小さくする傾向があり、その間でのエネルギーの消費が認められる。なお、荷重～スパン中央たわみ関係における腹鉄筋量の影響は、せん断破壊を生じるごく近傍を除いてほとんど認められなかった。

次にモーメントスパン内のモーメント～曲率関係の一例をFig. 5に示す。この図からも明らかなように繰返し変位水準がそれほど大きくない場合、除荷から逆載荷に移るループの中に逆S字形状を呈する傾向がわずかに認められる。これはピンチ効果と呼ばれるもので、除荷時から逆載荷にかけて最初の載荷で入っていた曲げひびわ

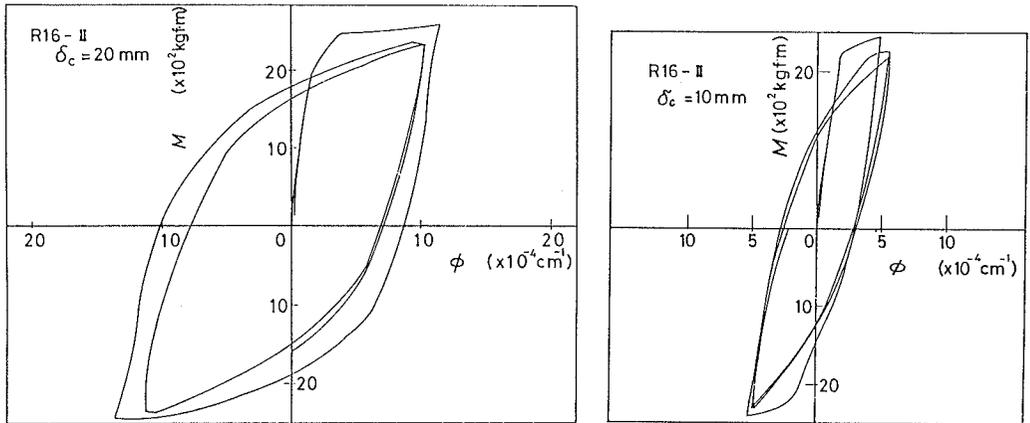


Fig. 5 $M-\phi$ curves.

れが閉じ、コンクリートの圧縮力が回復するため断面剛性が大きくなることによる。繰返し変位水準が大きくなると、塑性変形量が大きくなり、またひびわれ幅も大きくなるので、逆載荷時にひびわれが閉じなくなるためにこのような現象は表われない³⁾ 本実験で大部分の供試体でこのピンチ効果が明確に表われなかった原因としては、変位水準が大きいこと以外に、圧縮鉄筋量が引張鉄筋量と同量であったこと、ひびわれ附近での鉄筋とコンクリートの付着が破壊され鉄筋の拔出しがあったこと等によるものと考えられる。

3. 2. 3 繰返し載荷における荷重減退

Fig. 6 は I シリーズについて繰返し載荷における各上限での荷重の減退率 P_n/P_0 (n 回目の繰返し上限での荷重 (P_n) の 1 回目の所定の変位水準時の荷重 (P_0) に対する比) と繰返し載荷回数との関係を示したものである。この図から明らかなように荷重減退は、正方向載荷の 1 回目と 2 回目にはほとんどが生じており、逆方向載荷あるいは 2 回目以降の正方向載荷ではほとんど進行していない。また減退率は鉄筋比が大きい場合は繰返し振幅が大きいほど小さくなる傾向が認められる。このような傾向から判断して、この荷重減退の原因としては、コンクリート自体の劣化よりもむしろコンクリートと鉄筋の一体性の劣化すなわち付着破壊の進行に伴うゆるみと考えることができる。

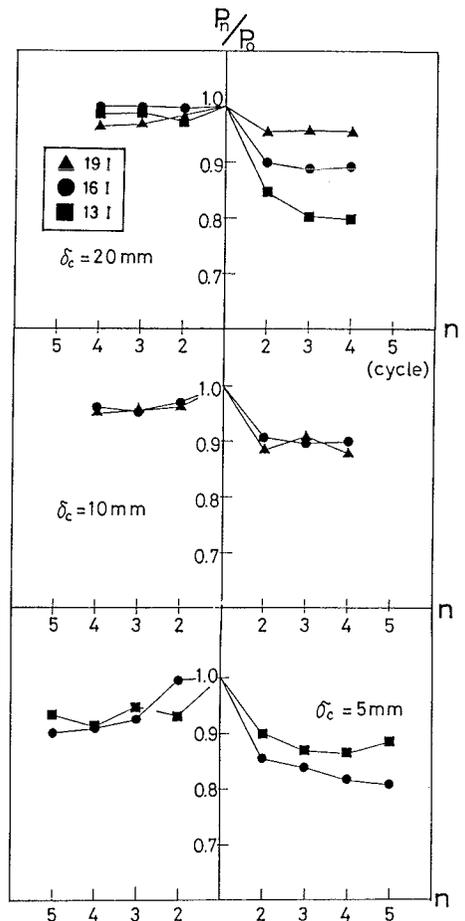


Fig. 6 Relation between P_n/P_0 and n .

3.2.4 セン断破壊の進行

先にも述べたように本実験で正負交番繰返し载荷途中で斜ひびわれの進展に伴う急激な耐力の減少すなわちせん断破壊を生ずる供試体がいくつかみられた。これは、静的には曲げ破壊が卓越していても、繰返し载荷を受けるとせん断破壊が卓越してくる場合があることを示すものである。本来いわゆるせん断破壊は曲げ破壊と比較してきわめて急激でぜい性的な破壊形態であり、鉄筋コンクリート構造の破壊形態としては、極力避けるべきものである。したがって本実験で認められたような現象は、鉄筋コンクリート構造の耐震性を検討していく上できわめて重大な問題を含んでいる。Fig. 7 に繰返し载荷途中でせん断破壊したはりのひびわれの進展状況を同一の鉄筋比、繰返し振幅条件で腹鉄筋量が大きく最後まで破壊しなかったはりのそれと対比して示す。この図から両者

のせん断スパン内におけるひびわれ性状が大きく異なることがわかる。すなわち、十分な腹鉄筋を有する場合は、せん断スパン内のひびわれも引張縁からほぼ垂直に発生しており、また支点附近にはひびわれが発生していないのに対し、腹鉄筋量の少ない場合には、载荷点と支点附近を結ぶ斜ひびわれがはっきりとみられる。これをさらに逆方向载荷すると前者はスパン直角方向の曲げひびわれが逆方向からも発達し連続するだけであるのに対し、後者は逆方向からも斜ひびわれが発生し、はり高中央附近で交叉する。そしてさらに繰返し载荷を続けると交叉した斜ひびわれの長さ、幅とも拡大しやがて破壊に至る。

最近の研究を通して、鉄筋コンクリート構造部材における斜ひびわれ発生後のせん断力は、いわゆるせん断補強筋以外に圧縮側コンクリート、ひびわれ面における骨材のかみ合わせ、主鉄筋のほぞ作用によっても分担されていることが明らかになりつつある⁹⁾。それが本実験のように正負交番大変形を受ける場合には、ひびわれ幅の拡大による骨材のかみ合わせ作用の低下、さらには逆方向時の曲げひびわれが圧縮側コンクリートにすでに入っており、それが斜ひびわれとつながって圧縮側コンクリートで保持されるせん断力の低下等によって、はりのせん断耐力が低下してくるものと考えられる。なお本実験では、斜ひびわれが急激に拡大しせん断破壊に至る前兆に関しては、荷重～たわみ曲線、モーメント～曲率曲線、繰返し载荷による上限荷重の減退の様子面を通して破壊直前まで予測することは困難であった。

4. 結 び

本研究では鉄筋コンクリート構造部材の耐震性を検討する基礎資料を得ることを目的として、正負交番繰返しの大変形を受ける状態での力学的挙動を実験によって把握することを試みたものである。以下に本実験で得られた結果をとりまとめて列挙し本論文の結びとする。

- (1) 引張鉄筋比と同量程度の圧縮鉄筋を有している鉄筋コンクリート断面では、圧縮鉄筋のない単鉄筋断面と比較して、曲げ破壊時の塑性変形能力が大幅に増加する。
- (2) 正負交番繰返し大変形をうける鉄筋コンクリートはりの荷重～たわみ曲線は、処女载荷領域を除いて紡錘形のループを描き、降伏点がそれほど明確でなくなる。また繰返し回数の増加と共に紡錘形ループは若干小さくなっていく。
- (3) 繰返し変位水準が小さい場合、モーメントスパン内のモーメント～曲率曲線でいわゆるピンチ効果が一部

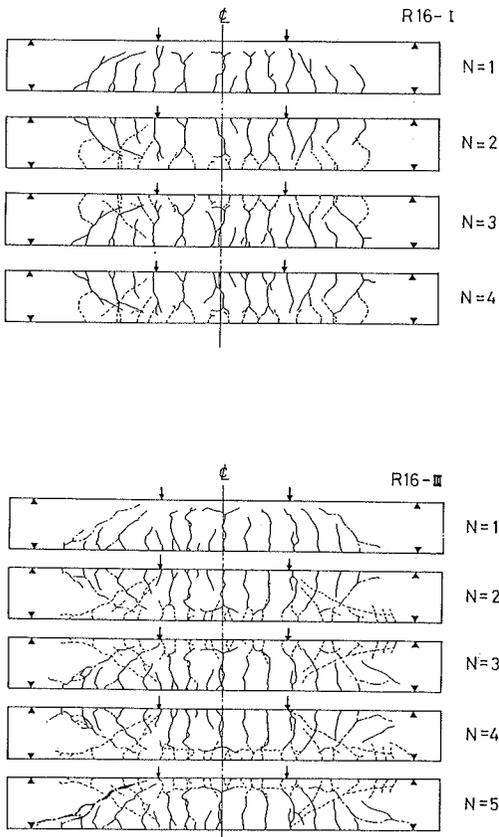


Fig. 7 Development of cracks

の供試体で確認された。

(4) 繰返し载荷による各上限での荷重減退は、正方向の1回目と2回目の間でその大部分が生じており、それ以降の繰返しによっては、ほとんど減退しない。

(5) 静的には曲げ破壊を生ずる状態でも、交番繰返しの大変形を受けると斜ひびわれの交叉、拡大によって繰返し途中でせん断破壊を生じる状態が確認された。これは繰返し载荷によってせん断耐力が相対的に曲げ耐力より大きく低下することを意味するもので、鉄筋コンクリート構造部材の耐震問題を考えていく上できわめて重大な問題といえる。

以上が本実験を通して得られた具体的現象であるが、今後、鉄筋とコンクリートの一体性の劣化の定量的な把握、およびせん断破壊に至るメカニズムの定量的把握を進めていくことがきわめて重要であろう。

最後に本研究を遂行していくにあたって多大の協力を賜った鳥取大学工学部土木工学科材料研究室、海洋土木工学科海洋材料学研究室の諸氏に対し感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 尾坂芳夫：1978年宮城県沖地震後におけるコンクリート土木構造物の耐震対策，コンクリート工学，Vol. 20, No. 9, 昭和57年9月。
- 2) 西林新蔵，矢村潔 他：大変形を受ける鉄筋コンクリートはりの力学的挙動に関する研究，鳥取大学工学部研究報告，第11巻，1号，昭和55年10月。
- 3) Robert Park, D. C. Kent, R. A. Sampson : Reinforced Concrete Members with Cycling Loading, Jour. of th Structural Division, ASCE July, 1972.
- 4) 檜貝勇：鉄筋コンクリート部材の諸性状—せん断一般—，—アメリカにおけるせん断の研究—，コンクリートライブラリー34号，土木学会，昭和47年8月。