

## RCはりのせん断耐力に及ぼす引張主鉄筋途中定着の影響に関する研究

### EFFECT OF BAR CUTOFF ON SHEAR STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE BEAMS

尾坂芳夫\*・鈴木基行\*\*・寺澤正人\*\*\*・小林茂敏\*\*\*\*

By Yoshio OZAKA, Motoyuki SUZUKI, Masato TERASAWA and Shigetoshi KOBAYASHI

This study had the purpose of experimentally investigating the influence of cutting off reinforcing steel bars in tension zones on the failure modes and shear strengths of reinforced concrete beams. The main variables were tensile reinforcement ratio, shear-span ratio, stirrup ratio, and cutoff location, and loading was static one-way monotonic loading. As a result, it was learned that the failure modes of such beams can be divided into four classes mainly according to cutoff location and stirrup ratio, and that shear strength depends on these factors also. Further, one side cyclic loading was done on two specimens and reductions were seen in shear strength of beam without stirrups and in deformability after yielding of beam with stirrups.

#### 1. まえがき

現行のコンクリート標準示方書<sup>1)</sup>においては、計算上曲げに対し不要になった引張主鉄筋の端は、原則としてコンクリート圧縮部に定着しなければならない、とされている。しかし、実際の橋脚や倒立T形擁壁等では、曲げに対し不要となった引張主鉄筋を曲げ上げせずに、コンクリート引張部に途中定着（以後cut offとよぶことがある）する場合がきわめて多い。

宮城県沖地震（1978年6月）や浦河沖地震（1982年3月）において、RC橋脚の軸方向主鉄筋のcut offした断面から発生した曲げひびわれが、斜め下向へ延び反対側の表面近くにまで達する被害が生じた<sup>2),3)</sup>。これら橋脚においては、軸方向主鉄筋の半分は、橋脚を下端固定の片持ばかりと考えて求めた曲げモーメントに対し不要となった断面でcut offされているが、実際にはせん断の影響でこの断面で連続している鉄筋は、斜めひびわれ

の下端の断面の曲げモーメントに相当する引張りを受けたものと思われる。

これら震害例から判断すると、現行RC示方書では、引張鉄筋のcut offが、部材の挙動に及ぼす影響を合理的に考慮されているとはいがたい。これに対し「コンクリート構造の限界状態設計法指針（案）」<sup>4)</sup>では、鉄筋の途中定着に関し、より具体的に規定されるようになった。しかし、cut off点付近のせん断耐力評価は、cut offしていない部材のせん断耐力評価式に基づいていること、およびcut offした位置のせん断耐力に及ぼす影響が取り入れられていないこと等のため、この指針により設計された部材の各部分が、せん断の作用に対しつり合いのとれた安全性を有しているかどうかは疑問である。

このような観点から、本研究では単鉄筋RC矩形はりを対象に、引張主鉄筋比、せん断スパン比、スターラップ比および途中定着位置を主な変動要因とし、これらが引張主鉄筋が引張部に途中定着されたRCはり（cut off部材という）の破壊型態やせん断耐力等の基本的特性に及ぼす影響を実験的に調べることを目的とした。なお、載荷は地震の影響を考慮して、交番繰り返し載荷すべきであるが、cut off部材の基本的特性を調べることに主眼をおいたので、一部供試体を除き静的単調漸増載荷

\* 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科  
(〒980 仙台市荒巻字青葉)

\*\* 正会員 工修 東北大学助手 工学部土木工学科（同上）

\*\*\* 飛島建設（株）技術本部土木技術部  
(〒102 千代田区三番町二番地)

\*\*\*\* 正会員 建設省土木研究所コンクリート研究室長  
(〒305 茨城県筑波郡豊里町大字旭)

とした。

## 2. 既往の研究とその問題点

引張主鉄筋の途中定着に関する組織的な研究は、P. M. Ferguson ら<sup>5)</sup>により行われた。彼らの研究は、cut off された RC 部材のせん断強度および付着強度に影響を及ぼす数々の因子について実験的に調べようとしたものである。しかし、各因子の影響の評価は定性的で、定量的な評価には至っていないこと、せん断耐力を支点から cut off 点までの距離および cut off する割合とに関連させて評価しようとしたが、あまりにもばらつきが大きく実用的でないこと、等重要な問題は残されたままであった。この原因として、実験に用いた供試体の数に比べ因子の数が非常に多いこと、部材の終局荷重にのみ着目し、終局に至る挙動の違いを考慮していないこと、等が考えられる。さらに、供試体の寸法が小さく、引張鉄筋比は高いため、実構造物との対応性にも問題がある。だが、Ferguson らの研究は、この分野で最初のもので、cut off すれば耐力が低下すること、スターラップの効果を調べたこと、cut off 点から発生した曲げひびわれが直接終局状態の原因とならない cut off 区間があること、等の有意義な結論を導き出していることは高く評価できる。

その後、Baron<sup>6)</sup>は、cut off 点において中立軸高さが変わることによりせん断応力が増加し破壊しやすくなる、として耐力式を導いている。だが、この式には、中立軸高さや応力再分配の生じる区間等、未知の変数が含まれているため実用的でない。また、Kao ら<sup>7)</sup>は、cut off のある部材は、cut off 点から 45° 方向に進展した斜めひびわれと交わる全スターラップおよび引張主鉄筋が降伏したとき、終局を迎えるとしてせん断耐力式を導いている。しかし、この評価式においては斜めひびわれ角度を 45° と限定していること、cut off 位置やスターラップ量によらず 1 つの耐力式、すなわちある特定の挙動や破壊型態を想定していること、スターラップのない部材には全くあてはまらないこと、等不十分な点がある。

わが国においては、この種の研究は宮城県沖地震以降行われるようになった。それは、主として途中定着種別がせん断強度に及ぼす影響<sup>8)</sup>や cut off が部材の耐震性能に及ぼす影響<sup>9), 10)</sup>を実験的に調べようとしたものである。中でも山本、石橋ら<sup>10)</sup>は、せん断スパン比が 2.2~5.7 の矩形および円形断面を有する橋脚について交番繰り返し荷重下で実験を行い、実用的設計法を提案している。しかし、彼らの研究においては、橋脚の下半分の区間で cut off する場合を対象にし、上半分の区間で cut off する場合については実験が行われていないことや、cut off 部材のせん断耐力は、cut off しない場合と比べ

てどの程度低下するのか明示されていないこと、等の不十分な点や疑問な点を有する。

以上みてきたように、既往の研究においては、各種変動要因に対して破壊型態や挙動の分類がなされておらず、また、それぞれの破壊や挙動型態に対する合理的な耐力評価法が確立されていないのが現状である。

本研究は、これら既往の研究を踏まえ、まず引張主鉄筋の cut off が部材挙動や耐力に及ぼす基本的影響を把握することが、合理的設計法を確立するうえできわめて重要であると考え行われたものである。

## 3. 実験概要

### (1) 供試体諸元

供試体は、断面寸法を一定（幅  $b=50$  cm、有効高さ  $d=40$  cm、はり高  $h=45$  cm）とした RC 単鉄筋ばかりである。引張主鉄筋は、片側のせん断スパン（試験側）の所定の 1 か所で cut off し、その割合は実際の橋脚や擁壁を考え 1/2 とした。他のせん断スパン（補強側）では、引張主鉄筋は cut off せずにすべて支点を越えて配筋した。補強側の腹部は、スターラップで十分補強し、破壊は試験側せん断スパンでのみ生じるようにした。

変動要因は次の 4 項目である。

- a) 引張主鉄筋比：スパン中央部で 8 D 13 ( $\rho_t = 0.487\%$  (0.507%)), 6 D 19 ( $\rho_t = 0.830\%$  (0.860%)) の 2 種
- b) せん断スパン比： $a/d=2.5, 3.5, 4.5$ , の 3 種
- c) cut off 位置：支点から cut off 点までの距離を  $L_{cut}$  とし、 $0.1 \leq L_{cut}/a \leq 0.57$  である。
- d) スターラップ比： $\rho_w=0\%, 0.057\%$  (0.063%), 0.151% (0.169%) の 3 種

$\rho_t=0.487\%$  は、RC 示方書<sup>11)</sup>により定められたはりの正、負鉄筋の最小鉄筋比 ( $15/\sigma_{sy}$ ,  $\sigma_{sy}$  は鉄筋の規格降伏点強度) に近いもの、0.830% は通常の橋脚等で採用されている引張鉄筋比に対応するものである。 $\rho_w=0.151\%$  は RC 示方書<sup>11)</sup>によるはりに関する最小スターラップ比 0.15% に対応するものである。

なお、本実験で用いる鉄筋比は、鉄筋の長さと重量とから公称断面積を求め、それをもとに算出した値である。JIS G 3112 で示される公称断面積を用いた場合の鉄筋比を( )の中に参考のため示してある。

表-1 に供試体諸元を示す、表中スターラップの項で 1 D 6 とは D 6 を 1 組、2 D 6 とは D 6 を 2 組同一位置に配筋することを表わす。また、スターラップの 1 組は必ず cut off 点から載荷点側 5 cm の位置に配筋した。

供試体寸法、配筋の一例を図-1 に示す。

### (2) 使用材料

コンクリートの示方配合を表-2 に示す。セメントは

表-1 供試体諸元および実験結果一覧表

供試体 No	$a/d$	せん断 長 $a$	引張主鉄筋 スパン (スパン中央 使用 鉄筋 及 鉄筋比 $\rho_t = 0.487$ )	カットオフ点		スターラップ		コンクリート強度		破壊につな がる曲げひ びわれ発生		破壊につな がる斜めひ びわれ発生		破 壊		挙動 分類	
				支点から の距離 Leut	$a$	Leut	鉄筋	間隔 $s$	鉄筋 比 $\rho_w$	$f'_c$	$f'_t$	Sc	位置	$S_d$	位置	$S_u$	型態
J-1	2.5	100	8 D13 $\rho_t = 0.487$	—	0	—	—	0	258	29.0	16.2	35	16.4	35	16.6	B S	IIb
J-2				—	0	—	—	0	267	29.1	15.6	40	17.0	40	17.6	B S	IIb
J-3				25	0.25	—	—	0	263	30.1	17.4	25	17.4	25	17.4	B S	I
J-4				25	0.25	1 D 6	20	0.057	293	30.1	17.0	25	17.0	25	17.0	B S	IIb
J-5				25	0.25	2 D 6	15	0.151	304	31.6	17.8	25	17.8	25	18.9	B S	IIb
J-6				35	0.35	2 D 6	15	0.151	283	28.5	16.5	35	16.5	35	17.8	B S	IIa
J-7				45	0.45	—	—	0	279	32.1	12.5	45	12.5	45	12.5	B S	I
J-8				45	0.45	1 D 6	20	0.057	241	28.9	11.1	45	13.3	45	13.3	B S	I
J-9				45	0.45	2 D 6	15	0.151	242	25.0	13.3	45	13.3	45	14.9	B S	II
K-1	3.5	140	8 D13 $\rho_t = 0.487$	—	0	—	—	0	238	28.1	6.0	125	—	—	13.3	F C	III
K-2				35	0.25	—	—	0	240	26.3	6.0	140	—	—	13.4	F C	III
K-3				35	0.25	1 D 6	20	0.057	307	32.5	6.1	130	—	—	13.6	F C	III
L-1	2.5	100	6 D19 $\rho_t = 0.830$	—	0	—	—	0	281	29.3	22.5	35	22.5	35	23.5	B S	I
L-2				10	0.10	—	—	0	251	27.9	22.0	10	22.0	10	22.0	B S	I
L-3				15	0.15	2 D 6	15	0.151	238	26.8	23.7	15	23.7	15	26.5	B S	IIa
L-4				25	0.25	—	—	0	253	26.9	18.1	26	18.1	26	18.1	B S	I
L-5				25	0.25	1 D 6	20	0.057	275	29.9	19.6	26	19.6	26	19.6	B S	I
L-6				25	0.25	2 D 6	15	0.151	261	29.9	16.5	29	16.8	29	25.1	B S	IIa
L-7				35	0.35	—	—	0	257	28.3	14.3	35	14.3	35	14.3	B S	I
L-8				35	0.35	2 D 6	15	0.151	205	26.2	13.0	35	20.7	35	21.8	B S	IIa
L-9				50	0.50	—	—	0	246	27.4	11.1	48	12.6	48	14.8	B S	IIa
M-1	3.5	140	6 D19 $\rho_t = 0.830$	—	0	—	—	0	241	24.8	15.0	60	16.0	60	19.9	B S	IIb
M-2				—	0	—	—	0	236	25.9	15.0	50	16.0	50	20.2	B S	IIb
M-3				25	0.18	—	—	0	219	26.6	19.1	25	19.1	25	19.1	B S	IIb
M-4				35	0.25	—	—	0	268	26.8	16.0	35	16.0	35	17.0	B S	I
M-5				35	0.25	1 D 6	20	0.057	251	29.0	16.3	37	17.1	37	19.4	B S	IIb
M-6				35	0.25	2 D 6	15	0.151	238	24.5	16.5	33	18.5	33	21.2	F C	III
M-7				46.5	0.33	—	—	0	272	27.7	12.8	47	13.9	47	14.8	B S	I
M-8				46.5	0.33	2 D 6	15	0.151	239	28.6	10.0	128	—	—	20.4	F C	III
M-9				50	0.36	2 D 6	15	0.151	245	26.6	11.2	50	12.8	50	18.9	B S	IIa
M-10				60	0.43	—	—	0	219	27.4	10.3	60	10.3	60	12.6	B S	I
M-11				60	0.43	2 D 6	15	0.151	270	30.4	11.9	62	11.9	62	16.5	B S	IIa
M-12				70	0.50	—	—	0	288	30.1	9.8	73	11.1	73	13.2	B S	IIa
M-13				70	0.50	2 D 6	15	0.151	267	28.4	10.0	70	11.0	70	16.7	B S	IIa
M-14				80	0.57	—	—	0	203	24.9	6.9	71	10.4	71	10.4	B S	IIa
M-15				35	0.25	—	—	0	202	25.3	11.0	35	13.7	35	13.7	B S	I
M-16				46.5	0.33	2 D 6	15	0.151	205	25.4	14.0	46.5	14.0	46.5	20.0	B S	IIb
N-1	4.5	180	6 D19 $\rho_t = 0.830$	—	0	—	—	0	247	27.0	5.6	180	—	—	15.6	F C	III
N-2				45	0.25	—	—	0	273	28.0	13.9	45	13.9	45	15.0	B S	IIb

・単位 :  $a$ , Leut,  $s$  [cm],  $\rho_t$ ,  $\rho_w$  (%),  $f'_c$ ,  $f'_t$  [ $\text{kg}/\text{cm}^2$ ], Sc,  $S_d$ ,  $S_u$  [ton] (せん断力), Leut/a = 0 は、カットオフせず。

・位置 : 支点からの距離(cm), 破壊型態 : BS;付着せん断破壊, FC;曲げ圧縮破壊

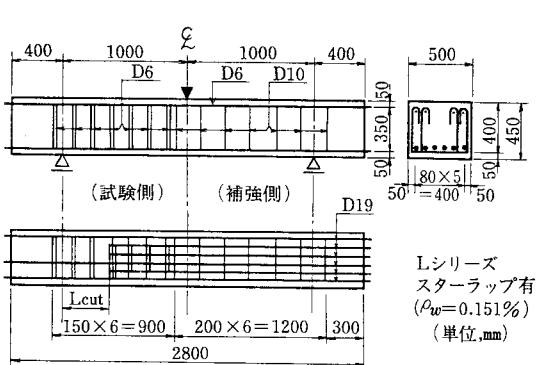


図-1 供試体寸法および配筋の一例

早強ポルトランドセメント、細骨材は川砂（比重 2.59）、粗骨材は砕石（比重 2.72）を用いた。鉄筋は引張主鉄筋として横フジ異形鉄筋 D 13, D 19 (ともに SD 35) を、

粗骨材 の最大 寸 (mm)	スラブ の範囲 (mm)	空気量 の範囲 (%)	水セメ ント W/C (%)	細骨材 率 S/A (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )			
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
20	8±2	3.5±0.5	62	52	183	295	927	898

なし

表-3 鉄筋引張試験結果

	呼び径	規 格	断面積 (cm <sup>2</sup> )	降伏 時 応 力 (kg/cm <sup>2</sup> )	引 張 度 (μ)	伸 び (%)	しほり (%)	ヤング半 ×10 <sup>4</sup> (kg/cm <sup>2</sup> )
加 工 品	D 6	SD30	—	4000	1980	6200	24	49
	D 13	SD35	—	4200	2130	6000	18	56
	D 19	SD35	—	4100	2020	6000	21	54
非 加 工 品	D 6	SD30	0.2835	3900	2210	6000	20	—
	D 13	SD35	1.217	4100	2170	6000	17	—
	D 19	SD35	2.766	3800	2130	5600	16	—

試験側スパンのスターラップとして D 6 (SD 30) を用いた。鉄筋の引張試験結果を表-3 に示す。表中, 加工

品とは JIS Z 2201 に従い、異形鉄筋を円形断面に加工して試験体としたものであり、非加工品とは母材のまま試験体としたものである。なお、非加工品の断面積は試料の重量と長さとから求めたものである。

### (3) 載荷方法

荷重は図-1 に示すように、スパン中央に集中荷重として破壊に至るまで漸増させ加えた。ロードセルで荷重を検出させながら各ステップで荷重、たわみ、鉄筋やコンクリートに生じるひずみおよび試験側スパンにおけるひびわれの発生や進展状況を追跡した。M-15, M-16 の2供試体については、所定の荷重で各5回ずつ片振りの繰り返し載荷を行った(6.(1) 参照)。

なお、両支点ともローラー支承で、支点反力は線荷重として作用し、載荷点ではヒンジおよび幅 10 cm の載荷板を介して荷重を加えた。

## 4. 単調漸増載荷における部材の挙動および破壊形態

### (1) ひびわれ状況

図-2 は、L, M シリーズのうちせん断破壊を生じた供試体について、破壊につながった斜めひびわれについて示したものである。

cut offしていない供試体では、荷重の増加とともに曲げひびわれがスパン中央からおよそ 15~20 cm 間隔で支点方向に順次発生し、L-1 では支点から約 35 cm, M-1, M-2 では約 50~60 cm の位置に発生した曲げひびわれがただちに斜めひびわれへと進展し、L-1 で約 1.0 t, M-1, M-2 では約 3~4 t の荷重の増加の後に、縦ひびわれの発生を伴いせん断破壊した。

cut off した供試体でも、スパン中央から順次曲げひびわれが発生するが、cut off 点あるいはそのきわめて近傍に曲げひびわれが発生すると、ただちに斜めひびわ

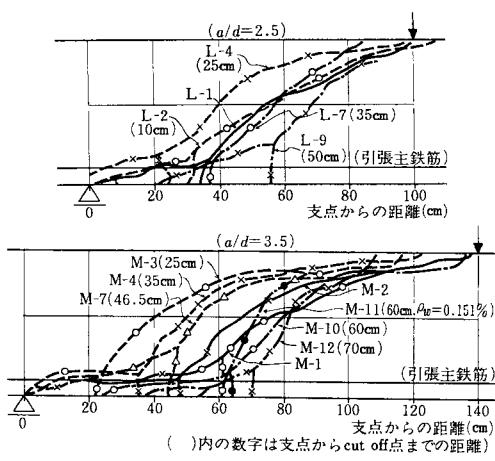


図-2 ひびわれ状況図 (L, M シリーズ)

れへと進展し、スターラップがなければ、ほとんど荷重の増加もなく、縦ひびわれの発生を伴い付着せん断破壊が生じた。よって、スターラップのない cut off 部材の終局限界状態は、cut off 点での曲げひびわれの発生によりもたらされる、といえる。スターラップで補強されせん断破壊したものでは、斜めひびわれ発生後、荷重の増加はあるものの、やはり cut off 点から発生した曲げせん断ひびわれが破壊の原因となった。

一般に、せん断破壊を起こす RC はりにおいて、破壊につながる斜めひびわれの発生位置は、 $a/d$  と密接な関係があることが Bower ら<sup>11)</sup>により指摘されている。しかし、cut off された供試体で、せん断破壊を引き起こす原因となる曲げ(斜め)ひびわれの発生位置は、 $a/d$  や鉄筋比等に全く関係なく、cut off 点であるといえる。

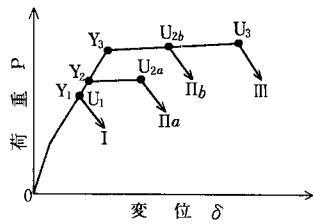
Ferguson ら<sup>5)</sup>は、 $a/d$  が 4.5 前後のものを対象に実験を行い、支点から 0.6 d 以内で cut off した場合には、cut off 点から発生した曲げひびわれは、直接破壊の原因とはならないとしている。しかし、本実験では、支点から 0.25 d の位置で cut off した場合で、そこから発生した曲げひびわれが破壊の原因となっている。このような相違は、 $a/d$  や引張鉄筋比等の違いによるものと思われる。

表-1 の実験結果一覧表には破壊形態を付着せん断破壊と曲げ圧縮破壊との 2 つに分類して載せてあるが、付着せん断破壊とは、縦ひびわれの発生を伴ったせん断破壊(せん断引張破壊ともいう)のことである。

### (2) 部材の挙動の分類

部材の降伏 ( $P-\delta$  関係 (供試体に加えた荷重  $P$  とはり中央のたわみ  $\delta$  との関係)において、部材剛性が初期のそれと比べて明らかに大幅に低下するときとする。) および終局 ( $P-\delta$  関係において最大耐力時とする。) が、どのような原因で生じるかを調べるために、引張主鉄筋、スターラップおよびスパン中央圧縮縁コンクリートにひずみゲージを貼付し、各荷重ステップごとにひずみを詳細に測定した。軸方向主鉄筋へのゲージの貼付にあたっては、付着が阻害されないようコーティングは必要最小限にするとともに、cut off 点付近では引張鉄筋の dowel action により鉄筋に曲げが生じることが考えられるので、ゲージは鉄筋の上、下面ではなく側面に、1 測点につき 1 枚ずつ貼付した。その結果、部材降伏および終局をもたらす原因の違いから部材挙動は図-3 に示すように I, II<sub>a</sub>, II<sub>b</sub>, III の 4 つの型に分類できることがわかった。

a) I 型：曲げひびわれの発生に伴い部材剛性はやや低下するものの、耐力上昇中に cut off 点から生じた曲げせん断ひびわれと縦ひびわれの発生により耐力を失

図-3  $P$ - $\delta$  関係模式図

うタイプである。部材降伏 ( $Y_1$ ) と終局 ( $U_1$ ) とは同一で、きわめて脆性的な破壊を生じる。図-4 (a) に、このタイプの  $P$ - $\delta$  関係の一例として M-7 の場合を示し、図-5 (a) にその供試体の最大荷重 ( $P_u$ ) 時の鉄筋の軸に沿ったひずみ分布を示す。この図からわかるように、I型挙動をする場合には終局時ですら、いずれの鉄筋においても降伏（引張試験の結果、降伏ひずみは約  $2200 \mu$  である）していないのが特徴である。cut off されない鉄筋（以後、連続鉄筋という）のひずみ分布は、cut off 点付近にピークをもつ三角形分布（底辺はほぼ有効高さに等しい）を示しているが、I型挙動をしたすべての供試体でこのような分布を示したわけではなかった。特に、cut off していない供試体（たとえば L-1）においては、このような応力集中は認められなかった。また、この挙動を示す供試体の支点の外側の鉄筋には、

終局時ですらほとんどひずみは生じていなかった。

b) II<sub>a</sub>型：これは、cut off 点で連続鉄筋が降伏することにより部材降伏 ( $Y_2$ ) が生じ、せん断破壊により終局 ( $U_{2a}$ ) を迎えるタイプである。このタイプの一例として M-11 の  $P$ - $\delta$  曲線を図-4 (b) に、またその供試体の鉄筋のひずみ分布を図-5 (b) に示す。スパン中央での鉄筋ひずみは、部材降伏以後あまり増加せず、cut off 点付近の連続鉄筋のひずみのみが増大し、せん断破壊により終局を迎える。終局時において、ひずみが特に増大する領域は、降伏時に応力集中を起こし三角形分布をしている領域とほぼ一致しており、cut off 点を中心には、ほぼ部材有効高さに等しい領域であった。終局時には、載荷点での鉄筋ひずみも増加するが降伏には至っていない。

表-4 は、部材降伏時および終局時において、支点の位置における鉄筋ひずみ  $\epsilon_{so}$ 、および支点外側においてひずみが 0 となる位置の支点からの距離  $l_0$  を示したものである。 $\epsilon_{so}$  や  $l_0$  は主として  $L_{cut}/a$  と  $\rho_w$  との影響を受けることがわかる。

c) II<sub>b</sub>型：部材降伏 ( $Y_3$ ) は、スパン中央での引張主鉄筋の降伏により生じ、cut off 点から発生した曲げせん断ひびわれが原因となりせん断破壊を生じ、終局 ( $U_{2b}$ ) を迎えるタイプである。部材降伏時には cut off 点付近で連続鉄筋の降伏は生じていないが、終局時には

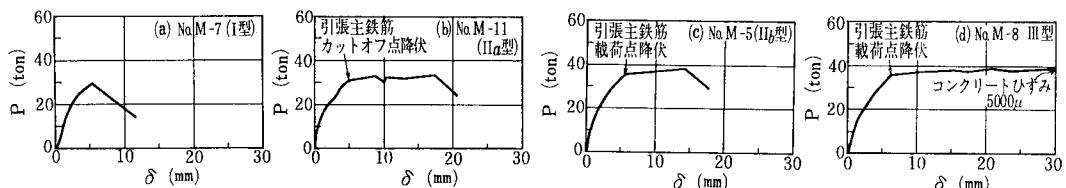
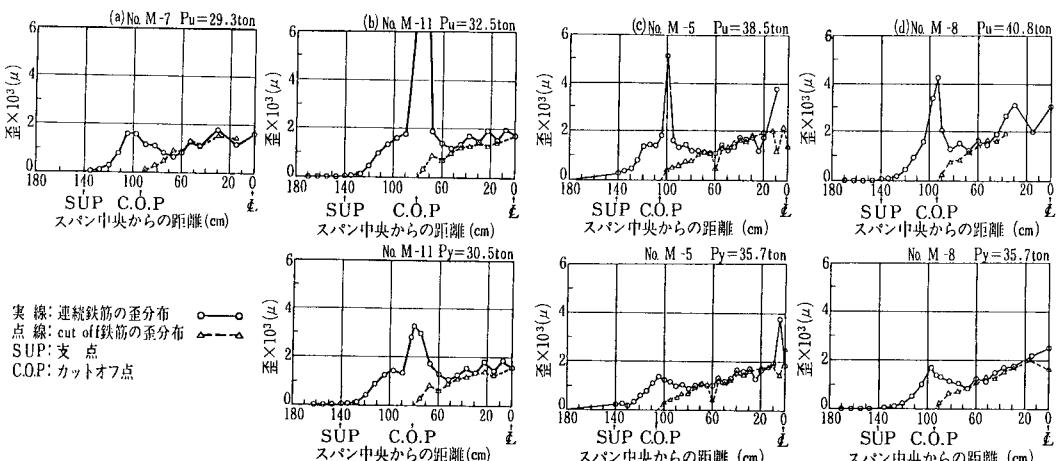
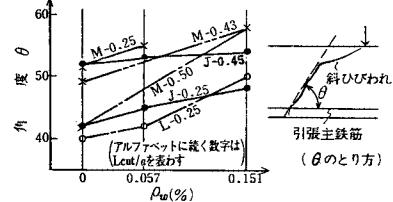
図-4  $P$ - $\delta$  関係図-5 部材降伏時 ( $P_y$ ) および最大耐力時 ( $P_u$ ) の引張主鉄筋ひずみ分布

表-4 支点外側に生じる鉄筋ひずみ

挙動 型態 No.	供試体 No.	$L_{cut}$ (cm)	$L_{cut}/a$	$\rho_w$ (%)	降伏時				終局時	
					$\varepsilon_{s0}$	$l_0$	$\varepsilon_{s0}$	$l_0$	$\varepsilon_{s0}$	$l_0$
	J-6	35	0.35	0.151			160			
	J-9	45	0.45	0.151			200			
	L-3	15	0.15	0.151	1000	22.5	1120	22.5		
	L-6	25	0.25	0.151	600	—	700			
	L-8	35	0.35	0.151	260	15.0	520	22.5		
IIa	L-9	50	0.50	0	180	12.0	260	12.0		
	M-9	50	0.36	0.151	0	0	260	12.0		
	M-11	60	0.43	0.151	0	0	0	0		
	M-12	70	0.50	0	150	—	150			
	M-13	70	0.50	0.151	0	0	0	0		
	M-14	80	0.571	0	0	0	0	0		

表-5  $L_{cut}$ ,  $\rho_w$  と挙動形態との関係

シリーズ	$L_{cut}$ (cm)	25									
		0	10	15	25	35	45	46.5	50	60	70
J	0	Ib		I	I						
	0.057			Ib	I						
K	0				Ib	Ia	Ia				
	0.057						III				
L	0		III								
	0.057										
M	0				Ib	I	I	I	Ia	Ia	Ia
	0.057										
N	0	III			Ib						

図-6  $\rho_w$  と斜めひびわれ角度  $\theta$  との関係

降伏に至っている。また、スパン中央断面の圧縮縁コンクリートは終局時においても終局ひずみに達していない。このタイプの一例として M-5 の  $P-\delta$  曲線を図-4 (c) に、その供試体の鉄筋のひずみ分布を図-5 (c) に載せる。

d) III型：これは、スパン中央での引張主鉄筋の降伏により部材降伏 ( $Y_3$ ) が生じ、コンクリートの圧壊により終局 ( $U_3$ ) を迎える典型的な曲げ圧壊型で、きわめてダクティリティーに富むタイプである。このタイプの一例として M-8 の  $P-\delta$  曲線を図-4 (d) に、その供試体の鉄筋のひずみ分布を図-5 (d) に載せる。II<sub>b</sub>, III型の場合、支点外側での鉄筋ひずみはほとんど生じていなかった。

I, II<sub>a</sub>, II<sub>b</sub>型挙動をする部材において、cut off 点が破壊面の起点となるのは、cut off 点で引張主鉄筋に応力集中が生じるためと思われる。ひずみの測定の結果、cut off された鉄筋（以後、cut off 鉄筋という）の cut off 点でのひずみは 0 で、断面に働く曲げモーメントに応じてひずみが増加するのに対し、連続鉄筋では、cut off 点付近で cut off 点を頂点とする局部的な三角形分布が存在することが本実験で確認できた（図-5 参照）。

### (3) スターラップ補強が部材挙動に及ぼす影響

表-5 は、cut off 位置およびスターラップ量と挙動形態との関係を示したものである。一般に、スターラップで補強すれば、部材挙動は I から II<sub>a</sub>, II<sub>b</sub>あるいは IIIへと移る。これは、スターラップがせん断伝達機構として重要な役割を果たし、斜めひびわれ発生後も耐力の増加が期待できること、鉄筋からコンクリートへ伝わる引張力の一部がスターラップで受け持たれるため縦ひびわれの発生が遅れること、等の理由によるものと思われる。しかし、同一スターラップ量であっても、cut off 位置の相違により挙動は異なる。

現行規定での最小スターラップ量に相当する 0.151 % のスターラップ補強により I 型挙動となることは防げるが、III型より耐力の低い II<sub>a</sub>型あるいはダクティリティーに乏しい II<sub>b</sub>型となる場合もあることから、これだけでは

はせん断破壊を防ぐ十分な補強量とはいえない。なお、Kao<sup>7)</sup>が導いたせん断耐力式は本論文でいう II<sub>a</sub>型に対応するものである。

CEB のせん断規定<sup>12)</sup> (refined method) によれば、スターラップを多く配筋すれば、斜めひびわれと軸線とのなす角度は大きくなると評価しているが、cut off が原因で生じた斜めひびわれ角度に対しても、やはり同様の傾向がみられた（図-6 参照）。

## 5. 単調漸増載荷におけるせん断耐力

### (1) 部材降伏時におけるせん断力

はり供試体載荷時の円柱供試体（ $\phi 100 \times 200$  mm）によるコンクリート圧縮強度  $f'_c$  は、202~307 kg/cm<sup>2</sup> の範囲にばらついている。 $f'_c$  がせん断強度に及ぼす影響については種々の見解があり<sup>13), 14)</sup>、現状では  $f'_c$  の効果を適切に評価する方法がないこと、実験での  $f'_c$  の範囲はあまり広くないこと、などの理由により本実験では得られたデータを  $f'_c$  で補正することは行っていない。図-7 は、部材降伏時におけるせん断力と  $L_{cut}/a$  との関係を示したものである。この図から次のことがわかる。

#### a) スターラップのないはり

引張主鉄筋を cut off することにより耐力に悪影響が出ることは、Ferguson<sup>5)</sup>により最初に指摘された。しかし、図-7 をみると cut off しても、耐力にその影響が出ない cut off 区間 ( $D_1$ ) が存在することが明らかとなつた（その区間は一般に、 $0 \leq L_{cut} \leq L_1$  における）。M シリーズでは  $L_1/a = 0.215$  となり、この  $L_1$  より支点側で cut off した場合には、cut off しない部材と同じ降伏荷重であるのに対し、 $L_{cut} \geq L_1$  の領域で cut off するとすべて I 型挙動をし、部材降伏荷重（耐力に相当する）は、 $L_{cut}/a$  に比例して低下することがわかった。

J シリーズでは  $L_1 = 0.25 a$ 、L シリーズでは、支点からわずか離れた位置で cut off してもその影響が出るので  $L_1 = 0$  となった。

#### b) スターラップのあるはり

一般に、せん断破壊するはりをスターラップで補強す

れば、せん断耐力は増加し曲げ破壊するようになる。しかし、cut off した供試体では、スターラップ補強により載荷点直下で引張鉄筋が降伏し、通常の曲げ降伏荷重以上の耐力が望める cut off 区間 ( $D_2$ ) (この区間は、 $L_1 \leq L_{\text{cut}} \leq L_2$  における) とスターラップ補強しても連続鉄筋が cut off 点で降伏し、通常の曲げ降伏荷重以上の耐力は望めない cut off 区間 ( $D_3$ ) ( $L_{\text{cut}} \geq L_2$ ) とが存在することがわかった。

区間  $D_3$  では、0.151 % のスターラップ量を配筋すれば、挙動が I から II<sub>a</sub> へと移行していること、および引張主鉄筋の降伏は、cut off 位置が同じならば、スターラップ量にはほとんど影響されないこと、から cut off 点で引張主鉄筋が降伏するときの荷重がスターラップ量に応じて増加するわけではない。よって、スターラップ量を多くしても cut off 点で引張主鉄筋が降伏する cut off 区間は、ほとんど変わらないと思われる。本実験では J, L, M シリーズの  $L_2/a$  の値は、それぞれ 0.35, 0.14, 0.36 となった。なお、区間  $D_2$  で cut off し、スターラップを配筋すると、スターラップ量に応じて耐力が回復する。たとえば、M シリーズでは、 $L_{\text{cut}}/a = 0.25$  で

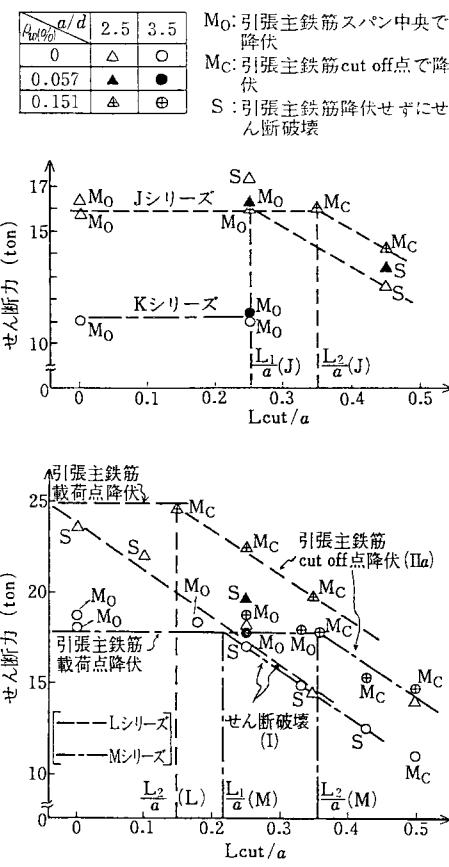


図-7 部材降伏時せん断力

は  $\rho_w = 0.057\%$ 、 $L_{\text{cut}}/a = 0.33$  では  $\rho_w = 0.151\%$  の配筋により通常の曲げ降伏荷重が期待できるようになった。

## (2) 部材終局時におけるせん断力（せん断耐力）

図-8 は J, K および L, M シリーズの供試体のせん断耐力を  $L_{\text{cut}}/a$  をパラメーターとして表わしたものである。この図から次のことがいえる。

a) 区間  $D_2$ ,  $D_3$  で引張主鉄筋が cut off され、スターラップがない場合には I 型挙動をするが、そのときのせん断耐力  $V_i$  は引張鉄筋比が同一ならば  $a/d$  によらず  $L_{\text{cut}}/a$  に比例して低下する。すなわち、

$$V_i = m + n \times (L_{\text{cut}}/a) \quad (t)$$

(ただし  $L_1 \leq L_{\text{cut}} \leq 0.5a$ ) と表わすことができる。L, M シリーズでは  $m = 24.1$ ,  $n = -27.0$  (相関係数 99.2 %), J シリーズでは、 $m = 22.5$ ,  $n = -20.5$  となった。

図-9 は、スターラップのないはりのせん断耐力について cut off していないはりのせん断耐力を 1 として表わしたものである。この図にみられるように、 $L_{\text{cut}}$  が大きくなると耐力は低下するが、 $L_{\text{cut}}/a = 0.35 \sim 0.45$  を底とし横ばいとなっている。本実験において M シリーズの  $L_{\text{cut}}/a = 0.43$ , L シリーズの  $L_{\text{cut}}/a = 0.35$  は、各シリーズで cut off していないはりにおいて斜めひびわれへと進展した曲げひびわれ発生位置と完全に一致しており、この位置で引張主鉄筋を cut off すれば（言い換

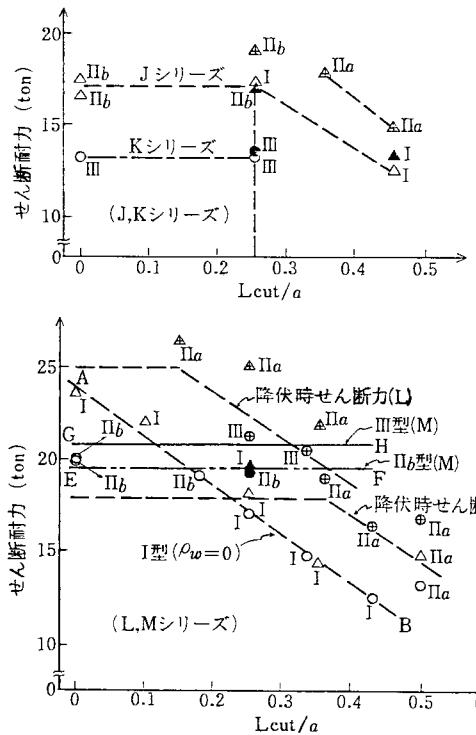


図-8 せん断耐力

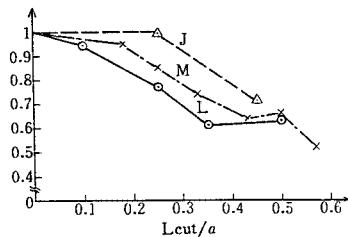


図-9せん断耐力低下の様子

えれば、最も破壊しやすいところで cut off すれば）、耐力が最も下がるのは当然といえる。この点より載荷点側で cut off した場合には、挙動形態が I から II<sub>a</sub>へと変化するため耐力が横ばいに転ずるものと思われる。

b) L シリーズ供試体で II<sub>a</sub>型挙動をした供試体では、部材降伏後 1.5~2.0 t (5~10 %) の耐力の増加がみられたが、M シリーズのものでは耐力の増加はほとんどみられないものもあった。 $\rho_w=0.151\%$  を有し II<sub>a</sub>型挙動をした L, M シリーズ供試体のせん断耐力  $V_{n\alpha}$  は次式で表わされる。

$$V_{n\alpha}=32.9-36.5 \times (L_{cut}/a) \quad (t)$$

ただし、 $0.2 \leq L_{cut}/a \leq 0.5$  (相関係数 94.9 %)

c) II<sub>b</sub>, III 型とも載荷点直下の引張鉄筋が降伏した後終局を迎えるが、どちらの型態をとるかは cut off 位置およびスターラップ量による決まる。M シリーズで II<sub>b</sub> および III 型挙動をした場合の最大耐力時のせん断力を図-8 に直線 EF, GH で示す。 $V_{EF}=19.6\text{t}$ ,  $V_{GH}=20.8\text{t}$  で、部材降伏後の荷重の増加は II<sub>b</sub> 型で約 1.8 t (約 10 %), III 型で約 3.0 t (約 17 %) であった。

d) 部材降伏後の変形性能 (ダクティリティー)

本実験での  $\rho_w$  は、主として 0 と 0.151 % の 2 種のみであったため、 $L_{cut}$  や  $\rho_w$  がダクティリティーに及ぼす影響は明らかとはならなかった。部材終局時すなわち耐力が急激に低下するときのはり中央のたわみ  $\delta$  を降伏時たわみ  $\delta_y$  で除した値 ( $\mu$ ) を変形性能の尺度として表示すると、I 型の場合、すべて  $\mu=1$  である。II<sub>a</sub> 型では J シリーズでは  $\mu=4\sim5$  であるが、L シリーズでは  $\rho_w=0.151\%$  であっても  $\mu=1\sim2$  であった。これに対し、II<sub>b</sub> 型は曲げ挙動的であるため J-1, J-4 で  $\mu=2.3$  であったものが J-5 では 11 となり、スターラップ量がダクティリティーの改善に大きく寄与することがわかる。なお、本実験で III 型をしたものは  $\rho_w$  が少ないにもかかわらずよい変形性能を示した（たとえば M-6 で  $\mu=6.4$ , K-2 で  $\mu=20$ ）。

## 6. 片振り載荷実験

M-15, M-16 は、片振り載荷のもとで、cut off が部材特性に及ぼす影響を調べようとしたものである。これ

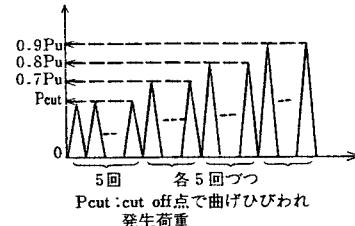


図-10 片振り載荷パターン

らの供試体の諸元は、それぞれ M-4 ( $\rho_w=0\%$ ) やび M-8 ( $\rho_w=0.151\%$ ) と全く同じである。

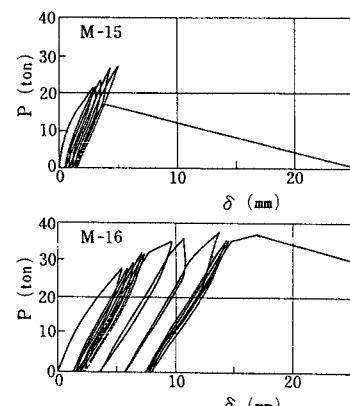
### (1) 載荷方法

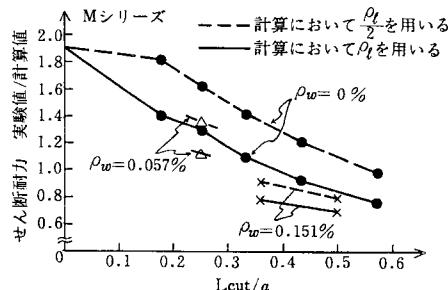
載荷は荷重制御方式として、cut off 点で曲げひびわれが発生したときの荷重および基本となる供試体 M-4, M-8 の終局荷重 ( $P_u$ ) の 70, 80, 90, …… % の荷重で各 5 回ずつ片振り載荷させた（図-10 参照）。

### (2) 実験結果および考察

図-11 に  $P-\delta$  曲線を示す。M-15 は、 $P=22.0\text{t}$  のとき cut off 点から曲げひびわれが発生したため、この荷重で 5 回繰り返した。しかし、この載荷では斜めひびわれへと進展しなかった。その後、 $P=24.0\text{t}$  (M-4 の  $P_u$  の 70 % に相当) で 5 回載荷した後、 $P=27.5\text{t}$  の 4 サイクル目に、cut off 点から生じていた曲げひびわれが斜めひびわれへと進展し、縦ひびわれの発生を伴い破壊した。引張主鉄筋は降伏していないので I 型挙動である。耐力は、単調漸増載荷の場合の 80 % であった。

M-16 については、M-8 の  $P_u$  (40.8 t) の 70 % に相当する  $P=28\text{t}$  の 1 サイクル目のとき、cut off 点から曲げおよび斜めひびわれが発生し、その後、 $P_u$  の 90 % に相当する  $P=36\text{t}$  では、斜めひびわれは圧縮縁から約 5 cm の位置にまで進展したが耐力の低下はみられなかった。M-8 の  $P_u$  に相当する  $P=40.0\text{t}$  の 1 サイクル目の載荷中、38.2 t で斜め引張破壊が生じ耐力を失った。

図-11  $P-\delta$  曲線 (M-15, M-16)

図-12 せん断耐力 実験値/計算値と  $L_{\text{cut}}/a$  の関係

M-8 では、スパン中央のたわみが 30 mm で圧縮縁コンクリートひずみが 5 000  $\mu$  に達し終局を迎えたのに対し、M-16 では、たわみが 15 mm のときせん断破壊を起こした。このように、スターラップがあると片振り載荷時の耐力は、単調漸増載荷時とほぼ同じであるにもかかわらず、挙動形態が変わり（III → II<sub>b</sub>）、部材降伏後の変形性能も大幅に低下することが認められた。

## 7. 設計上の問題点

図-12 には、M シリーズにおいて実験で得られたせん断耐力値と限界状態設計法指針（案）<sup>4)</sup>に示されているせん断耐力式（8.3.3）<sup>注1)</sup>による計算値との比を示している。計算にあたっては、材料およびその他の安全係数はすべて 1 とし、コンクリート圧縮強度、鉄筋降伏強度は実験で得られた値を代入した。また、すべての引張主鉄筋を考慮した場合（ $\rho_t$ ）と連続鉄筋のみを考慮した場合（ $\frac{\rho_t}{2}$ ）の 2 通りについて耐力計算を行った。

図-12 から、cut off しない場合（ $L_{\text{cut}}/a=0$ ）の実験値/計算値の比は 1.9 であるが、cut off すると  $L_{\text{cut}}/a$  の増加とともにこの比は直線的に低下し、やがて 1 以下となることがわかる。

同指針には、引張鉄筋の途中定着については、13.4 および 15.8.2 に規定されているが、後者によれば“連続鉄筋による部材の曲げ耐力が設計モーメントの 1.5 倍以上ある点から所定の定着長延ばすとともに、その間のせん断耐力（式 8.3.3 による）が、設計せん断力の 1.5 倍以上あれば cut off してよい”としている。これは、換言すれば、cut off の影響によりせん断耐力の低下を高々 1/3 と考えていることと同じである。しかし、すでに述べたように、cut off された部材のせん断耐力は、cut off 位置の影響を大きく受けるので、指針（案）の

式（8.3.3）に基づき計算された値を、cut off 位置によらず一律に 2/3 に低下させる方法は、合理的なものとはいえない。さらに、cut off された部材のせん断耐力を、このような方法で評価した場合に設計上重大な問題となることは、cut off 部材のせん断の作用に対する安全性が、cut off しない部材のもつ安全性に比べて極端に小さくなることである（図-12 参照）。これは、式（8.3.3）はあくまで cut off しない部材において、スターラップが降伏するときの部材のせん断耐力評価式であり、この式をもとにし、さらに、一定の低減係数を考慮しただけでは、cut off 部材の破壊機構を十分に説明できないためと思われる。

せん断スパンでモーメントが直線的に変化する場合、式（8.3.3）をもとに cut off 部分のせん断耐力の評価を行うには、たとえば、引張主鉄筋比として連続鉄筋のみを考慮し、求められた計算値に cut off 位置の影響を考慮するため、 $(1 - (L_{\text{cut}}/a))$  を剥ぎればよいであろう。このような方法で cut off 部分の耐力を評価すれば、cut off しない部材がせん断の作用に対し有する安全性とほぼ同等の安全性が得られる。

引張鉄筋の途中定着は、部材のせん断耐力や変形性能の低下をもたらすので、cut off する位置は慎重に決定されなければならない。原則的には、これらの影響がほとんどの区間で行うべきであろう。単調漸増載荷あるいは片振り載荷ですら、耐力や変形性能の著しい低下が認められたので、今後は交番繰り返し荷重下で引張鉄筋の途中定着が部材の挙動に及ぼす影響を詳細に調べ、それらを設計に反映させることが必要であろう。

なお、ACI 規定<sup>15)</sup>に従えば、引張主鉄筋の半分を cut off しようとする場合には、設計曲げモーメントの 1/4 以下の領域でしか cut off できないことになっている。

## 8. まとめ

本研究の範囲内で次のことがいえると思われる。

(1) cut off した RC はりの挙動形態は、引張鉄筋が降伏しないでせん断破壊するもの（I）、cut off 点での引張鉄筋が降伏し、その後せん断破壊するもの（II<sub>a</sub>）、曲げ降伏後せん断破壊するもの（II<sub>b</sub>）および曲げ降伏後曲げ圧壊するもの（III）、の 4 つに分類できる。

(2) cut off 部材では、cut off しても耐力にその影響のない cut off 区間（D<sub>1</sub>）、影響が生じるがスターラップ補強によりカバーできる区間（D<sub>2</sub>）、スターラップ補強しても耐力の回復が完全には望めない区間（D<sub>3</sub>）の 3 つが存在する。

(3) I、II<sub>a</sub>、II<sub>b</sub> では、必ず cut off 点から発生した曲げひびわれが斜めひびわれへと進展し、縦ひびわれの発生を伴いせん断破壊をする。特に、I 型では曲げひ

注)  $V_{sd} = [f_{vud}(1 + \beta_d + \beta_o + \beta_n)/\gamma_c + A_w \cdot f_{wsd} \cdot z(\sin\alpha + \cos\alpha)/s/\gamma_b] \cdot b_w \cdot d$   
 $f_{vud} = f_{vk}/\gamma_c = 0.94 f'_c 1/3 / \gamma_c \quad (\text{kg/cm}^2)$   
 $\beta_d = \sqrt{100/d} - 1 \geq 0 \quad (d: \text{cm})$   
 $\beta_o = \sqrt{100 \cdot p_w} - 1 \leq 0.73$   
 $\beta_n = M_0/M_d \leq 1, \quad z = d/1.15$

びわれと斜めひびわれの発生はほとんど同時できわめて脆性的である。II<sub>a</sub>, II<sub>b</sub>ではわずかの塑性変形能力がある。

(4) cut off 区間が D<sub>2</sub> あるいは D<sub>3</sub> で、スターラップのない部材は I 型挙動をする。このときのせん断耐力は、引張主鉄筋量が同じならば、せん断スパン比によらず、L<sub>cut</sub>/a に比例して低下する。

(5) cut off 区間が D<sub>3</sub> で  $\rho_w = 0.151\%$  の場合、部材は II<sub>a</sub> 型挙動を示し、せん断耐力は L<sub>cut</sub>/a に比例して低下する。

(6) cut off 部材の片振り載荷では、スターラップがないと耐力の低下、スターラップがある場合には変形性能の低下が認められた。

(7) cut off は、せん断耐力や変形性能への影響の少ない領域で行うべきであること、耐力へ影響が生じる位置で cut off する場合には、cut off 位置によりせん断耐力が低下することを考慮すべきであること、等設計上の提案を行った。

本研究で取り上げた鉄筋比、スターラップ比、せん断スパン比、cut off する位置およびその割合はすべて限られたものであるが、軸方向主鉄筋が途中定着された RC 部材の基本的特性はある程度解明されたと思われる。今後は、交番繰り返し荷重下での挙動や、せん断スパンでモーメントが曲線的に変化する場合の挙動を調べたり、解析的研究を行う必要があろう。

**謝 辞：**本研究の供試体作製にあたり、オリエンタル・コンクリート（株）仙台支店および同中新田工場の皆様方に多大なご協力をいただいたことに感謝します。また、実験やデータ整理にあたり、宮本 幹君（東北大大学院在学、久富和彦君（当時・東北大大学在学、現在・地域振興整備公団）の協力を得ました。なお、本研究の一部は文部省科学研究費補助金（No. 58850104）を受けて行ったものである。ここに付記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書、昭和 55 年版。

- 2) 研究代表者 佐武正雄：1978 年宮城県沖地震による被害の総合的調査研究、昭和 53 年度文部省科研費自然災害特別研究 (1), No. 302041, pp. 215~221, 昭和 54 年 3 月。
- 3) 研究代表者 酒井良男：1982 年 3 月 21 日浦河沖地震調査報告、昭和 56, 57 年度文部省科研費自然災害特別研究 (1), No. 56020014, 57020018, pp. 199~209, 昭和 58 年 2 月。
- 4) 土木学会：コンクリート構造の限界状態設計法指針(案)，コンクリートライブラー第 52 号、昭和 58 年 11 月。
- 5) Ferguson, P. M. and Matloob, F. N. : Effect of bar cutoff on bond and shear strength of reinforced concrete beams, ACI Journal, Vol. 56, No. 4, pp. 5~23, July 1959.
- 6) Baron, M. J. : Shear strength of reinforced concrete beams at points of bar cutoff, ACI Journal, Vol. 63, No. 6, pp. 127~134, Jan. 1966.
- 7) Kao, A. M. and Untrauer, R. E. : Shear strength of reinforced concrete beams with bars terminated in tension zones, ACI Journal, Vol. 72, No. 49, pp. 720~722, Dec. 1975.
- 8) 田村浩一・森地重暉：交番応力を受ける RC はりの鉄筋の途中定着種別とせん断強度に関する実験的研究、第 37 回土木学会年次学術講演会、V-47, 昭和 57 年 10 月。
- 9) 吉田武史・長谷川金二・岩崎敏男：鉄筋コンクリート橋脚の軸方向鉄筋段落しと耐震性に関する模型動的載荷実験、第 39 回土木学会年次学術講演会、V-172, 昭和 59 年 10 月。
- 10) 山本 強・石橋忠良・大坪正行・小林晋爾：鉄筋を途中定着した橋脚の耐震性能に関する実験的研究、土木学会論文集、第 348 号、V-1, pp. 61~70, 1984 年 8 月。
- 11) Bower, J. E. and Viest, I. M. : Shear strength of restrained concrete beams without web reinforcement, ACI Journal, Vol. 57, No. 4, pp. 73~98, July 1960.
- 12) CEB : CEB-FIP Model code for concrete structures, Bulletin d'information N. 124/125 E, Avr. 1978.
- 13) Taub, J. and Neville, A. M. : Resistance to shear of reinforced concrete beams, Part 1 Beams without web reinforcement, ACI Journal, Vol. 57, No. 11, pp. 193~220, Aug. 1960.
- 14) Kani, G. K. J. : Basic facts concerning shear failure, ACI Journal, pp. 675~690, June 1966.
- 15) ACI 鉄筋コンクリート構造設計基準 (318-71)  
(1985.5.15・受付)