

鉄筋コンクリートはりのせん断破壊  
に関する基礎研究FUNDAMENTAL STUDY ON SHEAR FAILURE OF REINFORCED  
CONCRETE BEAMS楡 貝 勇\*  
By Takeshi HIGAI

## 1. ま え が き

せん断力と曲げモーメントとを同時に受ける鉄筋コンクリートはりの力学的性状に関しては、現在までに数多くの研究が行われており、特に近年終局状態におけるせん断性状に関する研究が進んだため、世界的な傾向として、せん断力に対する設計方法が再検討されつつある。しかし、これまでになされた実験研究の大部分は静荷重を対象としたものであって、移動荷重・繰返し荷重など静荷重以外の荷重によるせん断力が作用する鉄筋コンクリート部材の力学的性状に関する系統的研究は、地震力を受ける柱に関する広範な研究を除き、少なくとも著者の知る限りにおいては、きわめて限られているといっても過言ではない状態である。

一方、現在のところせん断破壊機構の理論的な解明は不完全であり、せん断に関する規定の多くは実験結果を基礎として定められていることを考慮すると、従来の設計方法を改めて、許容せん断応力度の引き上げ、あるいは、腹鉄筋量の削減を伴うような設計方法を採用する場合には、静荷重以外の荷重が作用する場合についても検討を行って、その安全性を確かめておく必要があると考えられる。また、これまでの研究において取扱われてきたような荷重・材料・断面寸法などの条件とは異なった種々の条件下において広くせん断破壊の現象を把握することは、せん断破壊機構の解明をさらに進めるための基礎を造るものであると考えられる。

本論文は、上記のような観点から、静荷重以外の荷重作用のなかで土木構造物に縁の深い移動荷重および繰返し荷重に着目し、これらの作用を受ける鉄筋コンクリートはりのせん断性状を検討するための基礎的資料を得る目的で行った実験的研究の結果をとりまとめたものである。すなわち、約130個の矩形およびT形断面の鉄筋コ

ンクリートはりを用いた静的ならびに繰返し載荷試験の結果に基づいて、荷重が移動する場合の鉄筋コンクリートはりのせん断性状をはり各部のせん断強度に着目して論ずるとともに、繰返し荷重の影響を斜めひびわれ強さと斜めひびわれの発生に伴ってはりの内部に形成されるタイドアーチ(Tied arch)的な機構の耐力とに着目して論じたものである。なお、種々の条件下におけるせん断破壊現象の把握という前述の観点から、実験においては比較的新しい材料であり強度特性なども普通コンクリートといくぶん異なる面のある人工軽量骨材コンクリートを主に使用しているので、得られた結果の一般性を検討するために軽量鉄筋コンクリートはりのせん断特性についても論及した。

本研究の実施にあたっては、東京大学 国分正胤先生(現武蔵工業大学教授)のご懇切なるご指導を賜り、東京大学 岡村 甫先生から多くの貴重なご助言をいただいた。また、実験の実施にあたっては東京大学土木教室コンクリート研究室の方々ならびに当時同研究室に勤務されていた金井三郎氏より多大なるご援助をいただいた。ここに謹んで謝意を表し、厚く御礼申し上げる。

## 2. 移動荷重を受けるはりのせん断性状の検討

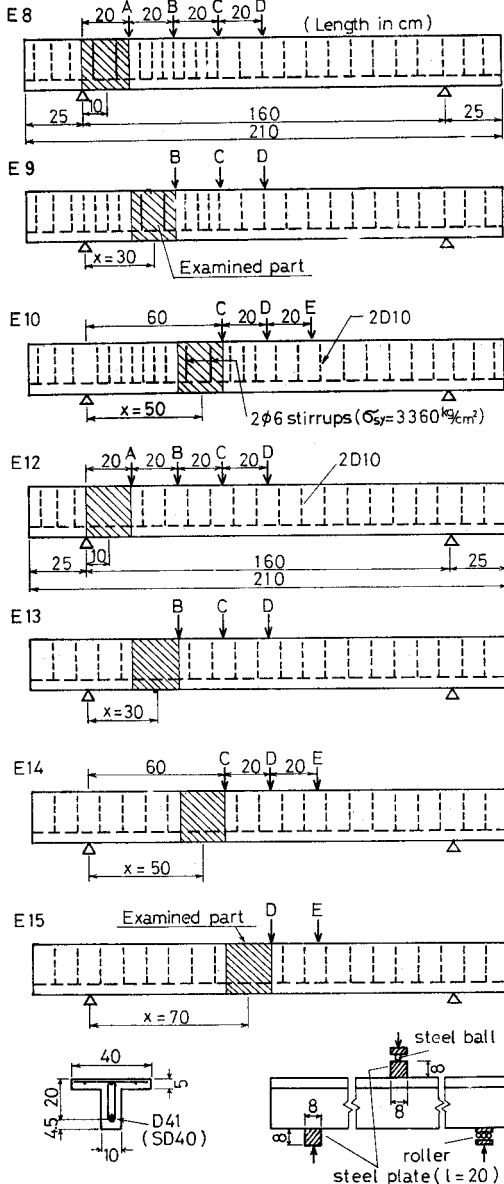
移動荷重を受けるはりのせん断力に対する現行の設計方法は、それぞれの点に最大せん断力を生ぜしめる荷重位置に着目して、力学的に求めたせん断力に基づいて断面の計算を行うものである。すなわち、着目部分に最大せん断力を生ぜしめる荷重位置がもっとも危険な載荷位置であると考えていることになる。しかしながら、既往の実験研究の大多数は載荷位置を固定して行ったものであって、荷重が移動する場合の鉄筋コンクリートはりのせん断性状に関しては十分な検討がなされているとはいえない状態である。これは、実験において実際に荷重を移動させることがかなり困難であり、結果の解析も容易

\* 正会員 工博 山梨大学助教授 工学部土木工学科

でないこと、また、従来の経験から上記のような考え方で設計を行っても安全であるということが認められているためと考えられるが、本研究においては以下に述べるような独特な実験方法を考案して、載荷位置が変化するのはのせん断性状の把握という面から移動荷重の影響を検討することとした。なお、荷重の移動に伴う衝撃的作用などはここでは取扱っていない。

(1) 実験方法

載荷位置の影響を検討する場合には、はり全体としてのせん断強度ではなく、はりのそれぞれの部分における



図一 移動荷重試験用の供試体

強度に注目することが必要であると考えに至った。そこで、せん断強度を求めたい部分（以後「試験部分」という）のせん断補強量を他の部分よりも著しく小さくすることによって、試験部分においてせん断破壊が起こるようにした鉄筋コンクリートばりの載荷試験を行って、荷重位置の相違がはり各部分のせん断強度に及ぼす影響を検討したのである。すなわち、荷重を移動させる代りに、試験部分の位置を同一とした試験ばりを 3~5 個製作し、これらのはりのそれぞれ異なった位置（せん断スパンと有効高さの比  $a/d=1.0\sim 5.0$ ）に載荷することによって、荷重位置の相違が試験部分のせん断強度に及ぼす影響を調べたのである。

供試体の形状寸法・載荷位置は 図一 に示したとおりであって、試験部分に 2φ6 mm スターラップを 10 cm ピッチに配置し（腹鉄筋比  $\gamma=A_u/b_0s=0.00565$ ）、その他の部分には 2 D 10 mm スターラップを 5~10 cm ピッチに配置した（ $\gamma=0.0285\sim 0.0143$ ）E 8~E 10 供試体、および、試験部分にはまったく腹鉄筋を配置せず、その他の部分には 2 D 10 mm スターラップを 10 cm ピッチに配置した E 12~E 15 供試体の 2 シリーズについて載荷試験を行った。なお、試験部分は、はりの有効高さ（ $d$ ）と等しい幅をもった区間であるが、便宜上、支点から試験部分中央までの距離（ $x$ ）によってそ

表一 載荷試験結果

(a) 試験部分にスターラップ配置

試験部 $x/d$	$a/d$	供試体 番号	コンクリート強度 ( $\text{kg/cm}^2$ )		破 せん断力 $S_u$ (t)	$\tau_u^{(1)}$ ( $\text{kg/cm}^2$ )
			$\sigma_c$	$\sigma_t$		
0.5	1.0	E8A	312	22.7	18.7	93.6
	2.0	E8B	323	22.7	12.0	60.0
	3.0	E8C	314	22.3	11.2	55.1
	4.0	E8D2	361	24.3	10.6	52.6
1.5	2.0	E9B	312	23.3	>14.8 <sup>2)</sup>	>73.9
	3.0	E9C	341	22.2	9.4	46.8
	4.0	E9D	317	22.8	9.1	45.5
2.5	3.0	E10C	221	20.1	>10.6 <sup>2)</sup>	>52.8
	4.0	E10D	263	21.0	8.8	44.2

(b) 試験部分にはせん断補強なし

0.5	1.0	E12A	289	22.5	17.3	86.4
	2.0	E12B	299	23.1	9.5	47.4
	3.0	E12C	264	20.6	8.5	42.5
	4.0	E12D	291	22.7	7.8	39.0
1.5	2.0	E13B	272	24.2	>11.9 <sup>2)</sup>	>59.5
	3.0	E13C	251	21.1	7.2	35.9
	4.0	E13D	321	20.4	5.8	29.2
2.5	3.0	E14C	259	21.0	>8.6 <sup>2)</sup>	>43.0
	4.0	E14D	251	22.1	7.0	35.0
	5.0	E14E	357	27.3	6.7	33.7
3.5	4.0	E15D	265	20.6	>8.3 <sup>2)</sup>	>41.6
	5.0	E15E	263	22.1	5.8	28.9

注 1)  $\tau_u = S_u / b_0 d$

2) 試験部分よりも支点側の部分でせん断破壊した。

の部分の位置を表わすこととした。

使用したコンクリートは、非造粒型の人工軽量骨材（最大寸法 15 mm）を用いた軽量コンクリートである。

上記のような 載荷試験方法を 採用したのは、荷重位置を実際に移動させて予備的な実験を行った結果、この種の実験によって荷重の移動がはりのせん断性状に及ぼす影響を把握することはかなり困難であると思われたためである。また、活荷重の影響が大きいはりにおいては荷重の移動に応じて正負に交番するせん断力が発生する場合があるので、移動荷重の影響の一つとして交番せん断力も考慮する必要があると思われた。しかし、予備実験の結果、正負に交番するせん断力によって斜めひびわれが交差して発生した場合でも、その部分のせん断強度はほとんど低下しないことが推測されたので\*、載荷位置をおのおの変えたはりの試験結果に基づいて、荷重の移動がはりのせん断強度に及ぼす影響を検討しても実用的にはさしつかえないものと考えたのである。

(2) 載荷位置の相違がせん断強度に及ぼす影響

試験部分と載荷点との距離 ( $a-x$ ) が  $0.5d$  の場合を除き、すべてのはりは試験部分においてせん断破壊を起こした。すなわち、大多数のはりにおいては、試験部に発生した斜めひびわれが発達して、主要な斜めひびわれ (major inclined crack) を形成し、最終的にはこの斜めひびわれがフランジのコンクリートを貫通してせん断破壊するに至ったのである。図-2 は一例として、試験部分が支点から  $1.5d$  の位置にある供試体 (E9-B, D) についてひびわれの状況を示

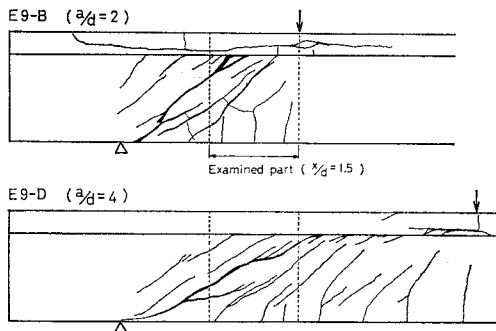


図-2 ひびわれおよび破壊状況の一例

\* 3.(4) 参照

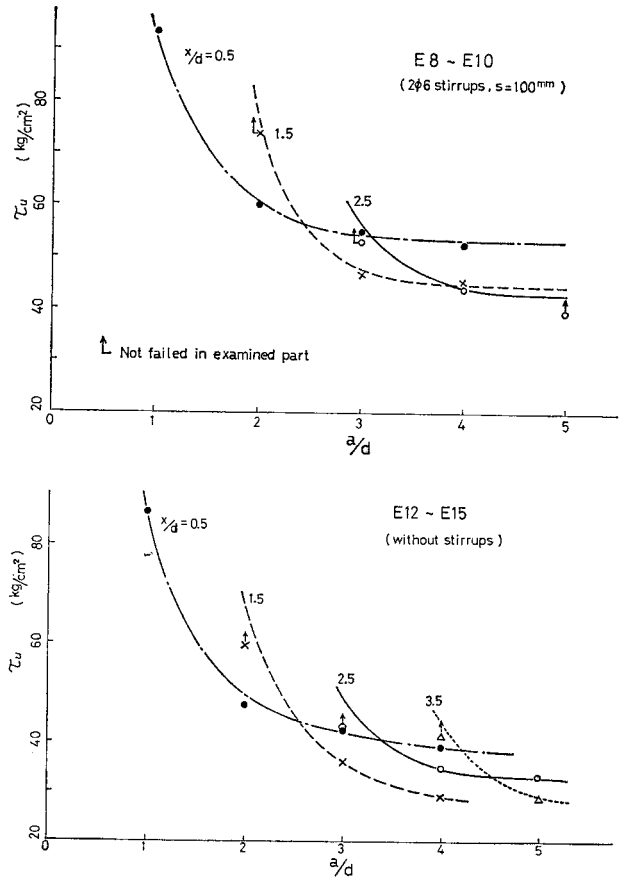


図-3 はり各部分のせん断強度

したものである。なお、( $a-x$ ) が  $0.5d$  の場合には、試験部分のせん断補強量がきわめて少ない（あるいはまったくない）にもかかわらず、より大きな補強を施した部分でせん断破壊を起こしている。これら載荷試験結果の概要は表-1 に示したとおりである。

破壊時における断面の平均せん断応力度  $\tau_u (=S_u/b_0d)$

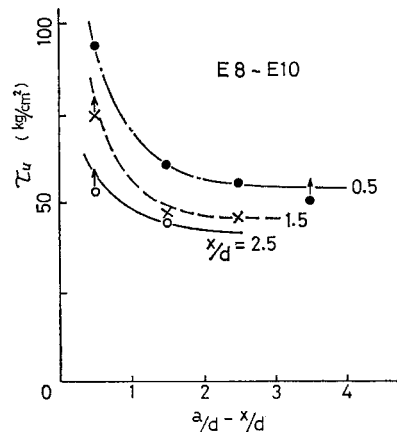


図-4 荷重作用位置がせん断強度に及ぼす影響

によってみかけのせん断強度を表わすと、図-3 に示すように、 $x/d$  が 0.5~3.5 の各部分のせん断強度は、荷重がその部分に接近するに従って増加し、特に  $(a-x)$  が  $1.5d$  以下となる場合の強度増加が著しいことが確かめられた。図-4 は、E8~E10 供試体について試験部分と載荷点との距離  $(a-x)$  とせん断強度  $(\tau_u)$  との関係を示したものであって、支点到近い部分  $(x/d$  小) において荷重の接近に伴う  $\tau_u$  の増加が著しいこと、また、荷重からの距離  $(a-x)$  が同一であれば、支点到近い部分ほど  $\tau_u$  が大であることを示している。

はり各部分のみかけのせん断強度がその位置  $(x/d)$  ならびに荷重の作用位置  $(a/d)$  に応じて変化するのは、Ferguson<sup>1)</sup> らの説明のように、荷重および支点反力が及ぼす圧力によってコンクリートに発生する局部的な鉛直方向の圧縮応力  $(\sigma_y)$  の影響で主引張応力が減少するためと考えられる。図-5 は試験部に配置したスターラップのひずみの測定結果を示したもので、横軸にははりの軸線について求めたせん断力  $(S)$  によるせん断応力度をとったものである。荷重が試験部分に接近するに従って同じせん断力に対するスターラップのひずみ  $(\epsilon_{sv})$  は減少しており、これらの結果は、各部分のせん断強度に関する上記の論旨を裏付けるものであると考えられる。著者の実験は軽量コンクリートを使用した鉄筋コンクリートはりを用いて実施したものであるが、普通コンクリートを使用した場合でも、少なくとも定性的にはこれと同様の結果が得られるものと考えている (4. 参

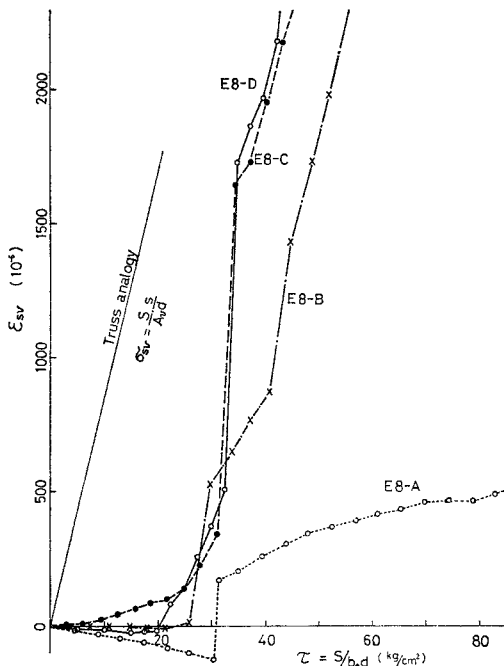


図-5 荷重作用位置とスターラップのひずみの関係

照)。

### (3) 設計への適用に関する考察

上述の特性、すなわち、支点付近のみならず支点からかなり離れた部分においても、みかけのせん断強度は荷重の接近に伴って著しく増加するという性質は、従来の実験からは確認されていないものであって、移動荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの設計においてはこの特性を考慮するのが合理的である。さらに、実用設計においては、載荷位置に応じてせん断強度が変化すると考えるよりも、逆に、せん断強度は一定であると仮定して、作用するせん断力の値を低減させる方法が簡便で適当であろう。

みかけのせん断強度  $\tau_u$  と  $(a-x)$  との関係は 図-4 に示したとおりであって、実験の数が必ずしも十分ではないが、 $(a-x)$  が  $2.5d$  程度以上の場合には試験部分における  $\sigma_y$  の影響が小さくなるため、載荷位置が変わっても  $\tau_u$  はほぼ一定であると考えてもさしつかえないように思われる。そこで、設計手法としては、たとえば  $(a-x)$  が  $2.5d$  のときのせん断強度  $(\tau_{u,2.5d})$  を基準にとり、これと任意の位置に荷重が作用するときのせん断強度  $(\tau_{u,a-x})$  との比率  $(R = \tau_{u,2.5d} / \tau_{u,a-x})$  に従って作用するせん断力を低減させることができる。図-6 は、はり各部分について上記の低減係数  $R$  を示したものであって、簡単のため直線式を適用すると安全側の近似式として次式が得られる。

$$R = 0.5 \{ 1.0 + (a-x) / 1.5d \} \leq 1.0 \dots \dots (1)$$

実験の範囲に限られているため数値的には検討の余地を残しているが、ウェブに圧縮応力  $(\sigma_y)$  を発生させるような支承および荷重条件のはりにおいては、着目部分から  $1.5d$  以内の位置に作用する荷重によるせん断力を式 (1) の係数  $(R)$  によって低減しても安全\*であると

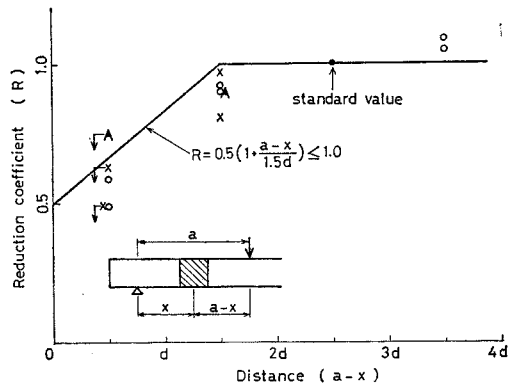


図-6 せん断力の低減係数

\* 集中荷重を受ける単純はりにおいては、最大せん断力図を  $1.5d$  だけ支点側へ平行移動することと等価である。

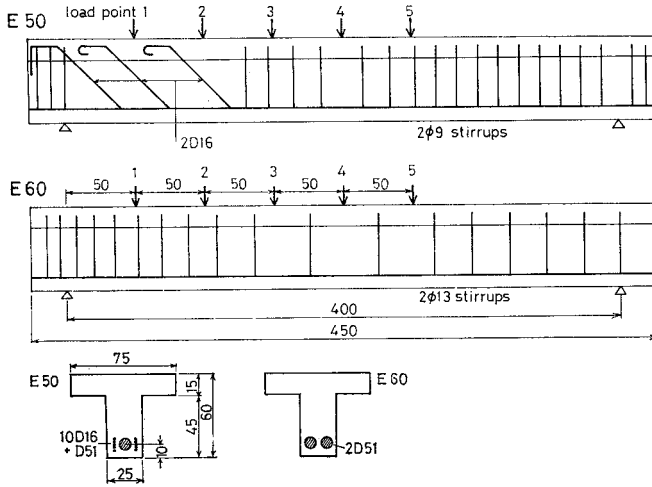


図-7 大型供試体の形状・寸法

考えられる。着目部分から  $1.5d$  以内の荷重によるせん断力を低減することは、通常行われているような  $a/d$  を変化させた実験に関していえば、 $a/d$  が 3.0 以下の場合にせん断強度が増加するという事に相当するのであって、たとえば Kani<sup>2)</sup> の広範なデータ、あるいは CEB の国際指針の改訂におけるディスカッション<sup>3)</sup> 等を参照しても、ほぼ妥当なものであると思われる。ただし、安全性に関する配慮から式 (1) の分母の  $1.5d$  を  $1.0d \sim 1.2d$  程度の控えめな値にすることも、実用設計においては必要となるかも知れない。

(2) に述べた結果は、軽量コンクリートを用いた比較的小型の供試体による実験から導かれたものであり、荷重の移動も実際には行っていないなど、実構造物の条件とは異なった面も少なくない。そこで、普通コンクリートを用いた大型ばり (E50, E60) に、5個の油圧ジャッキを使用した近似的な移動荷重を載荷する実験を実施して (図-7 参照)、より現実に近い条件で上記の設計方法の妥当性を検討することとした。

2個の大型ばりはともにせん断破壊荷重が 60t となるように設計したものであって、式 (1) の低減係数  $R$  を用い、かつ圧縮部コンクリートによるせん断抵抗 ( $\tau_c$ ) を  $0.8\sqrt{\sigma_c}$  と仮定して腹鉄筋量を決定したものである (式 (2) 参照)。

$$R \cdot S = b_0 d (\tau_c + K r_{s,y}) \dots\dots\dots (2)$$

E50 は折曲鉄筋を主体として、また、E60 はスターラップのみによってせん断補強を行った。なお、主鉄筋曲上げ位置の決定において、斜めひびわれの発達によって引張主鉄筋の応力が曲げ理論による値よりも増加することなどに関する考慮、いわゆるシフトルールの適用は行っていない。計算上主鉄筋が不要となる点から各曲上げ位置までの距離は  $0.34d$ ,  $0.72d$  お

よび  $1.02d$  である。

載荷試験にあたっては、5か所の載荷点にそれぞれ容量 100t の油圧ジャッキをセットしておき、まず支承側の載荷点1のみにたとえば 10t 載荷し、次に載荷点1および2におのおの 5t ずつ載荷し、ついで載荷点2のみに 10t 載荷する。これと同様の手続きを各載荷点について順次繰返すことによって荷重の移動を近似的に再現したのである。

折曲鉄筋を用いた E50 では、計算破壊荷重 (60t) が作用したときにはり中央部分の折曲鉄筋とスターラップが降伏した。

さらに荷重を増加し 75t を移動しているとき、載荷点3に 71.7t 載荷した状態でせん断破壊に至った (図-8 参照)。スターラップで補強した E60 の場合も計算破壊荷重が作用したときにスターラップの一部が降伏し、荷重が 70t ではり端部を除き、斜めひびわれが横切っているスターラップはすべて降伏した。しかし、その後も荷重の増加に耐え、載荷点3に 90t 載荷された時点で曲げ破壊を起こしたのであって、せん断耐力は非常に大であった。E50 では、曲げに対して不要となった主鉄筋を折曲げてせん断補強としたため、主鉄筋量は端部ほど小さくなっている。また、折曲鉄筋だけを用いてスターラップを併用していない区間が長く、この部分では斜めひびわれが主鉄筋に沿って発達することを制限できなかったため、主鉄筋をすべて支承部まで延長し、かつスターラップで補強した E60 に比べてせん断耐力が小さかったものと考えられる。しかし、いずれの場合にも計算破壊荷重が作用したときに腹鉄筋が降伏し始めており、計算値の 120~130% の荷重により、支承付近を除き、斜めひびわれと交差する腹鉄筋はすべて降伏点に達したのである。

腹鉄筋が降伏するとただちにはりがせん断破壊を起こすとは限らないのであるが、その後の耐力の余裕を算定

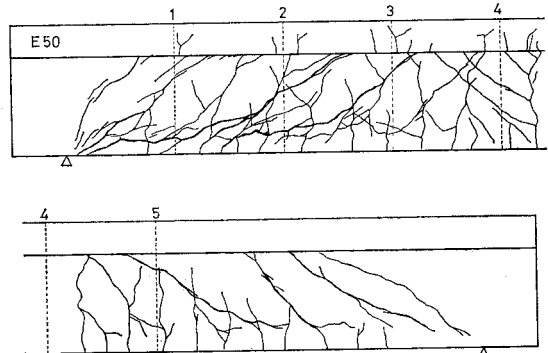


図-8 折曲鉄筋で補強した大型ばりのひびわれ状況

することは困難であり、一方、腹鉄筋が降伏すると斜めひびわれの幅も急激に増加するので、実用的には腹鉄筋の降伏をもってせん断破壊（終局限界状態）と考えざるを得ないものと思われる。上述の計算破壊荷重もこの意味の破壊荷重であって、本実験においては、破壊荷重の計算値と実験値はほぼ一致したということができよう。また、近似的な移動荷重を作用させた結果、図-8 にみられるようにスパン中央部には交番するせん断力によって斜めひびわれが交差して発生したのであるが、これに起因すると思われる強度低下の傾向は特に認められなかった。

これらの大型ばりによる実験の結果は、(1) に述べたような方法ではり各部のせん断強度を検討すること、ならびに、その結果を移動荷重を受けるはりの設計に適用することの妥当性を裏付けているものと考えられる。すなわち、ウェブに圧縮応力が発生するような支承および荷重条件の鉄筋コンクリートはりにおいては、集中荷重によるせん断力を低減して設計することが可能であり、その際、せん断力の低減係数として式(1)の  $R$  が一応のめやすになるものと思われる。

### 3. 繰返し荷重を受ける鉄筋コンクリートはりのせん断性状

静的な荷重を受ける鉄筋コンクリートはりのせん断破壊に関する研究は現在までに数多くなされており、せん断スパンとはりの有効高さとの比 ( $a/d$ ) がせん断性状に大きな影響を及ぼすことも確認されている<sup>(4),(5)</sup>。繰返し荷重を受ける場合でも、鉄筋コンクリートはりのせん断性状は、 $a/d$  の値によって当然相違するものと思われるが、せん断疲労に関する研究は少なく、特に  $a/d$  を広範囲に変えて行った実験の結果はほとんど公表されていない。そこで、 $a/d$  を 2.0~6.36 の間で4種に変えた鉄筋コンクリートはりの繰返し載荷試験を行って<sup>(6)</sup> そのせん断疲労性状を検討したのである。

#### (1) 実験方法

実験に用いたコンクリートは非造粒型の膨張頁岩を使用した人工軽量骨材コンクリートである。試験ばりは材令2日で脱型し、材令7日まで湿潤養生を行った後、載荷試験時まで実験室内に静置した。載荷試験開始時の材令は15日~58日であって、大多数のはりは材令21日以後に試験を開始した。

試験ばりは図-9に示したような腹鉄筋を用いない矩形断面のもので、鉄筋比は1.80~2.40%である。載荷試験にあたって、まず静的せん断破壊荷重の43%~83%に相当する所定の上限荷重を静的に載荷してひび

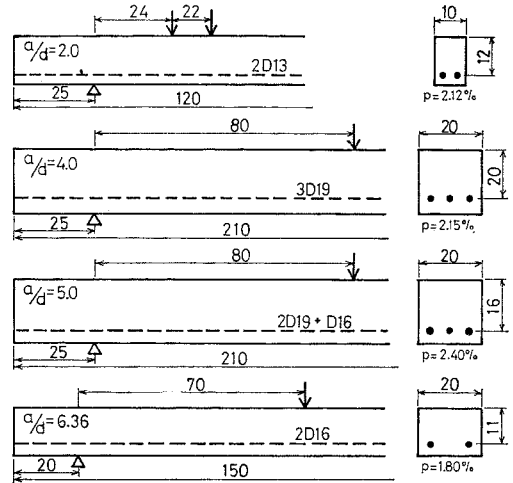


図-9 疲労試験用の供試体

表-2 繰返し載荷試験の結果

番号	圧縮強度 $\sigma_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	上限荷重 $P_{max}$ (t)	$P_{max}/P_s$	$\tau$ (kg/cm <sup>2</sup> )	載荷回数 (10 <sup>6</sup> )		破壊形式
					斜めひびわれ $N_c$	破壊 $N_u$	
$a/d=2.0$							
FC-1	353	(10.1)		(42.1)			Static, A
FC-2	358	(8.0)		(33.3)			Static, A
FC-4	358	4.0	0.43	16.7	>200		
		5.0	0.54	20.8	>200		
		6.0	0.64	25.0	95		A*
FC-5	325	5.5	0.62	22.9	17		A*
FC-6	325	5.5	0.62	22.9	15		A*
FC-7	390	5.0	0.52	20.8	59		A*
FC-8	360	6.0	0.64	25.0	14		A
$a/d=4.0$							
FT-1	420	(8.6)		(10.8)			Static, DT
FT-2	411	5.0	0.51	6.3	>200	>200	
FT-3	406	5.5	0.57	6.9	109	174	A*
FT-4	406	6.0	0.62	7.5	7	7	A
$a/d=5.0$							
FT-18	369	(7.0)		(10.9)			Static, DT
FT-13	317	5.65	0.83	8.8	0.2	0.2	DT
FT-14	297	5.0	0.76	7.8	0.3	0.3	DT
FT-15	287	4.3	0.66	6.7	39	>106	
FT-16	334	4.7	0.67	7.3	34	79	A
FT-17	317	4.3	0.63	6.7	241	>241	
FT-19	358	4.8	0.67	7.5	6	73	A
$a/d=6.36$							
FT-5	351	(7.6)		(11.5)			Static, DT
FT-6	351	5.7	0.78	8.6	0.05	0.05	DT
FT-7	362	4.9	0.65	7.4	44	44	DT
FT-8	340	4.2	0.58	6.4	>120	>120	
FT-9	327	4.5	0.63	6.8	>106	>106	

(注)  $\tau$  : 上限荷重時の平均せん断応力度 ( $\tau = S_{max}/bd$ )  
 A : アーチ破壊    A\* : アーチ破壊 (軸鉄筋の疲労破断)  
 DT : 斜引張破壊  
 $P_s$  : 静的せん断破壊荷重 (式(3),(4)による計算値)

われの発生状況を観察し、その後速度300回/分の繰返し荷重を作用させた。 $a/d$ が2.0のはりではこの静的載荷によって斜めひびわれが発生したが、 $a/d$ が4.0~

6.36 のはりでは静的載荷による斜めひびわれはまったく発生していなかった。

荷重の繰返し回数は 200 万回以下とし、200 万回の載荷によっても破壊に至らなかった場合には試験を中止した。なお、下限荷重は、荷重の衝撃的作用ならびに載荷中における試験ばりの移動を防止するために 1.0 t に保った。下限荷重は上限荷重の 17%~25% に相当している。

疲労試験の結果は表-2 に示したようである。なお、試験時のコンクリート圧縮強度 ( $\sigma_c$ ) は、静的載荷を行ったはりと繰返し載荷を行った各はりとはそれぞれ異なっているので、 $\sigma_c$  の相違による影響を排除するために疲労試験ばりの静的せん断破壊荷重 ( $P_s$ ) は下式による  $\tau_u$  を用いて計算した。これは、コンクリートの圧縮強度、鉄筋比が本実験程度の範囲であれば、腹鉄筋がない軽量鉄筋コンクリートはりの静的せん断強度 ( $\tau_u$ ) はほぼ下式で表わされることが認められており<sup>7)</sup>、今回の実験値も  $a/d$  が 2.0 のはりは式 (3) に、 $a/d$  が 4.0~6.36 のはりは式 (4) にほぼ一致することも確かめられたからである。

$$a/d=2.0; \tau_u=S_u/b_0d=2.05\sqrt{\sigma_c} \quad \dots\dots(3)$$

$$a/d=4.5; \tau_u=0.60\sqrt{\sigma_c} \quad \dots\dots(4)$$

## (2) せん断疲労破壊機構

表-2 に示したように、 $a/d$  を 6.36 としたはりは、上限荷重 ( $P_{max}$ ) を静的せん断破壊荷重 ( $P_s$ ) の 65~78% とした繰返し荷重を 500 回~44 万回載荷したときに、斜めひびわれの発生と同時にせん断破壊(斜引張破壊)を起こした。また、 $a/d$  を 2.0 とした場合には処女載荷によって斜めひびわれが発生したが、載荷点と支点との間における斜めひびわれ上部のコンクリートと引張鉄筋とでタイドアーチ的な機構を構成し、その後もさらに繰返し載荷に耐えており、最終的には圧縮部コンクリートの破壊あるいは斜めひびわれとの交差部における引張鉄筋の疲労破断によって疲労破壊(アーチ破壊)に至ったのであって、これら 2 種の  $a/d$  のはりの破壊形式は静荷重を受ける場合とほぼ同様であった。しかし、 $a/d$  がこれらの中間の場合には、静荷重においては斜引張破壊を起こしたのであるが、繰返し荷重による破壊形式は必ずしも静荷重のときと同じではなく、上限荷重の大きさによっても相違するなど、静的な場合に比べていっそう複雑であった。たとえば、 $a/d$  が 5.0 のはりでは  $P_{max}$  を  $(0.63\sim 0.67)P_s$  とした場合には斜めひびわれ発生後もさらに 40 万回以上の載荷に耐えたが、 $P_{max}$  を  $(0.76\sim 0.83)P_s$  に増加させると斜めひびわれの発生と同時にせん断破壊を起こしたのである。

せん断疲労破壊性状は複雑な様相を呈しているが、繰

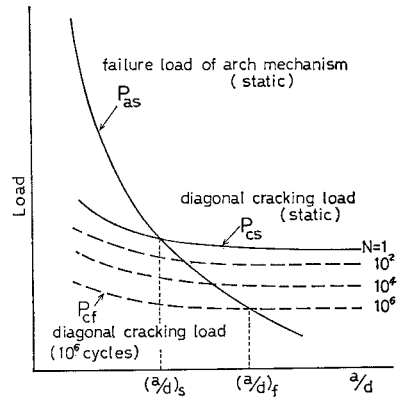


図-10 せん断疲労破壊機構(概念図)

返し載荷の影響を斜めひびわれ強度に及ぼす影響とアーチ機構の耐力に及ぼす影響とに分離して考察すれば、以下に述べるように、静的せん断破壊の場合と同様な仮説に基づく説明が可能である。繰返し載荷の場合には、上限荷重が静的斜めひびわれ荷重 ( $P_{cs}$ ) 以下であってもコンクリートの引張疲労によって斜めひびわれが発生する。たとえば、 $a/d$  が 5.0 のはりでは 3000 回および 240 万回の載荷に対応する斜めひびわれ荷重は、それぞれ  $P_{cs}$  の 76%、63% であった。すなわち、繰返し荷重を受けるはりの斜めひびわれ荷重は一定の値ではなく、載荷回数に応じて変化する値となる。一方、アーチ機構は斜めひびわれ発生後にはじめて形成されるものであり、また、斜めひびわれ発生以前の段階では、後にアーチ機構を形成する部分の応力は比較的小さい。それゆえ、斜めひびわれ発生時点におけるアーチ機構の疲労は無視できる程度のものであると考えられる。

したがって、 $a/d$  が  $(a/d)_s$  と  $(a/d)_f$  (たとえば、100 万回の載荷による斜めひびわれ荷重 ( $P_{cf}$ ) を示す曲線とアーチ機構の静的破壊荷重 ( $P_{as}$ ) を示す曲線の交点における  $a/d$ ) との間にある場合には、はりの破壊形式は  $P_{as}$  曲線によって二分される領域によってそれぞれ異なってくるのである(図-10 参照)。その一つは、上限荷重が疲労による斜めひびわれ荷重 ( $P_{cf}$ ) よりも大きく、かつ、アーチの静的破壊荷重 ( $P_{as}$ ) よりも大きい領域で、この領域では 100 万回以下の載荷によって斜めひびわれが発生し、それと同時に破壊が起こると考えられる。他の一つの領域は、上限荷重が  $P_{cf}$  よりも大きい  $P_{as}$  よりも小さい領域で、この場合には 100 万回以下の繰返しによって斜めひびわれは発生するが、アーチ機構によってさらに載荷に耐え、最終的にはアーチ機構が疲労破壊を起こすと考えられるのである。

上述の仮説を検証するためには、アーチ機構の耐力を知る必要がある。しかし、 $a/d$  が大きいはりにおいては斜めひびわれの発生と同時に破壊が起こるので、アーチ

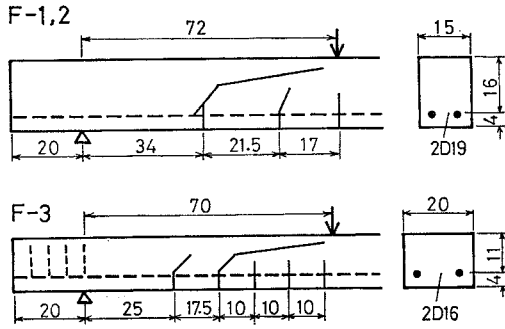


図-11 人工ひびわれを用いたはり

表-3 人工ひびわれを用いたはりの試験結果

番号	a/d	コンクリート強度		破壊荷重 (t)	$\tau_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\tau_u/0.6\sqrt{\sigma_c}$
		$\sigma_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_t$ (kg/cm <sup>2</sup> )			
F-1	4.5	276	24.1	8.95	9.35	0.90
F-2	4.5	280	23.0	10.80	11.2	1.08
F-3	6.36	329	21.5	2.38	5.41	0.50

機構の耐力を実験的に求めるのは非常に困難である。そこで 図-11 に示したような、あらかじめ人工的に斜めひびわれを発生させた鉄筋コンクリートはりの静的載荷試験を行って、a/d を 4.5 および 6.36 としたはりに形成されるアーチ機構の静的耐力を近似的に求めた。人工ひびわれは、コンクリートの付着を絶つために樹脂塗料を塗布した厚さ 0.3 mm の鉄板を型枠に取り付け、その後コンクリートを打ち込んで作製したものである。

載荷試験の結果は表-3 に示したようで、破壊時の平均せん断応力度  $\tau_u (=S_u/b_0d)$  によってアーチ機構の強度を表わすと、a/d が 4.5 の場合には、アーチ機構の強度は人工ひびわれを用いないはりの斜めひびわれ強度 ( $\tau_c = S_c/b_0d$ ) の 90~108% であって、両者はほぼ等しい値である。a/d を 6.36 とした場合には、 $\tau_u$  は  $\tau_c$  の 50% であって、a/d が大きくなるとアーチ機構の強度はかなり低下することが示された。

図-12 は、上述のようにして求めたアーチ機構の静的耐力に基づいて推定したせん断疲労破壊形式と、実験の結果とを比較したものである。図において、斜めひびわれ荷重、上限荷重の大きさは、アーチ機構の静的耐力 ( $P_{as}$ ) を 1.0 とした比率によって表わしている。上限荷重が I の領域にあれば斜引張破壊を起こし、II の領域に含まれる場合には、斜めひびわれ発生後にアーチ破壊を起こすと考えられるのであって、推定した破壊形式と実験の結果とは大略一致しており\*、鉄筋コンクリートはりのせん断疲労破壊機構に関する前述の仮説に基づく

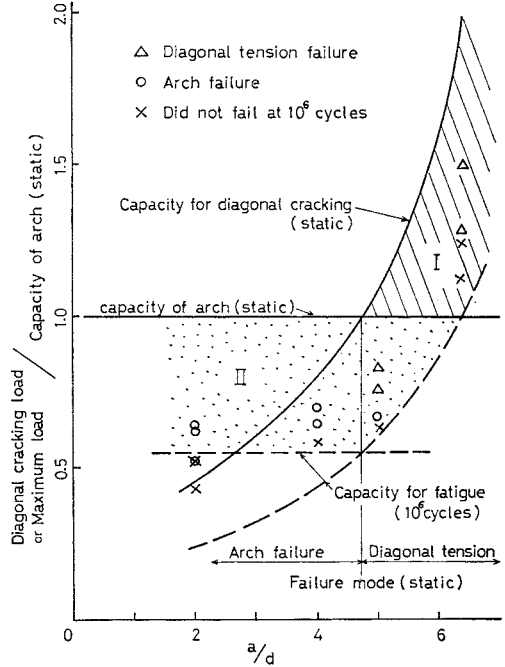


図-12 鉄筋コンクリートはりのせん断疲労破壊形式

説明がほぼ妥当なものであることが確かめられた。

(3) せん断疲労強度

疲労試験における上限荷重と斜めひびわれ発生および破壊までの載荷回数との関係は、それぞれ表-2 のようであった。

斜めひびわれ発生までの載荷回数 ( $N_c$ ) と上限荷重 ( $P_{max}$ ) との関係が式 (5) で表わされるものとして、実験結果から  $\alpha$  を求めると 0.066 であった。すなわち、軽量鉄筋コンクリートはりの斜めひびわれ強度は、100 万回の繰返し載荷によって静的強度の 60% に低下している。また、実験の数が十分ではないが、a/d の値が相違しても繰返し荷重が斜めひびわれ強度に及ぼす影響には有意な差異は認められなかった。

$$P_{max}/P_{cs} = 1.00 - \alpha \cdot \log N_c \dots\dots\dots (5)$$

$$P_{max}/P_{as} = 1.00 - \alpha' \cdot \log (N_u - N_c) \dots\dots\dots (6)$$

ここで、

$P_{cs}$  : 静的斜めひびわれ荷重

$P_{as}$  : アーチ機構の静的破壊荷重

斜めひびわれ発生後、破壊に至るまでの載荷回数 ( $N_u - N_c$ ) は、アーチ機構に対する載荷回数に相当し、( $N_u - N_c$ ) と上限荷重との関係が式 (6) で表わされると仮定すると、係数  $\alpha'$  は 0.071 であって、アーチ機構の強度は 100 万回の繰返し載荷によって静的強度の 57% に低下することを示している。この場合にも a/d の相違による影響は無視できる程度のものであった。

\* a/d=5 における若干の相違は、斜めひびわれ発生時の荷重の衝撃的作用の影響などと推測される。



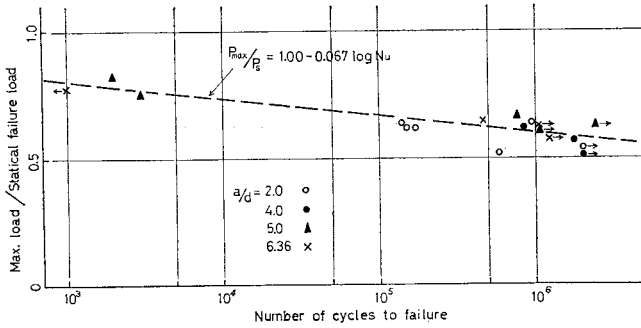


図-13 せん断疲労試験の結果

いずれにしても本実験の範囲では、軽量鉄筋コンクリートはりの 100 万回せん断疲労強度は静的せん断強度の 55~65% であった。破壊形式が相違するとせん断強度の低下率もいくぶん異なっているが、実験値の変動を考慮すると、斜めひびわれ発生と同時に破壊する場合(斜引張破壊)と、斜めひびわれ発生後にアーチ機構の疲労によって破壊する場合(アーチ破壊)とで、せん断強度の低下率に有意な差は認められないので、破壊形式とは無関係に試験結果を整理すると、100 万回疲労強度は静的せん断強度の約 60% である(図-13 参照)。

本実験における下限荷重(1.0t)は上限荷重の 24% 以下であって、これは活荷重によるせん断力が死荷重による値の 3 倍以上となる場合に相当している。したがって、ここで得られたせん断強度の低下率は多くの場合において安全側の値であると思われる。

鉄筋コンクリートはりのせん断疲労試験はきわめて限られているが、Chang<sup>9)</sup>は普通コンクリートはり(a/d=3.72)の疲労試験により、1000 万回疲労強度は静的せん断強度の 56% に低下すること、および、載荷回数が 100 万~1000 万回の範囲ではせん断強度はほぼ一定であることを示しており、この結果と本実験の結果とは大略一致している。鉄筋コンクリートはりの疲労強度はコンクリートの引張・圧縮疲労強度とも密接な関係をもつと考えられるので、無筋コンクリートの疲労試験結果を参照すると、普通コンクリートの 200 万回疲労強度は圧縮・引張(割裂)・曲げ強度とも静的強度との比率がほぼ等しいこと<sup>9)</sup>、また、普通コンクリート・軽量コンクリートとも 200 万回圧縮疲労強度は、静的強度の 56% で両者に差は認められないこと<sup>10)</sup>も報告されている。

これらの研究結果を考え合わせると、繰返し載荷によるせん断強度の低下率は、軽量コンクリートはりでも普通コンクリートはりとはほぼ同様と考えられ、したがって、

特に動荷重の影響が著しい鉄筋コンクリートはりの設計にあたっては、腹鉄筋の計算を行わない場合のコンクリートの許容せん断応力度( $\tau_{ca}$ )を、静的なせん断強度の 50~55% に制限するのが適当であると思われる。

(4) せん断補強に関する一考察

土木学会鉄筋コンクリート標準示方書では、作用する全せん断力に対して腹鉄筋を計算することとしているので、鉄筋の許容応力度が適切であれば腹鉄筋が疲労破断を起こす危険性はかなり小さいものと思われる。しかし、最近ではコンクリートにもせん断力の一部を負担させる考え方が一般的になりつつあり、そのような場合には繰返し荷重の作用が著しいはりの腹鉄筋応力の計算方法についても注意が必要である。

上記の観点から、図-14 に示したような軽量コンクリートはりを用いて、静的な繰返し載荷試験を行ってスターラップのひずみ性状を検討した。供試体 E2 は一方方向から 10 回、E3 では上下 2 方向からおのおの 5 回ずつ載荷を行った。試験結果の概要は表-4 のようである。

各供試体におけるスターラップのひずみの測定結果は図-15,16 のようで、いずれの場合にも荷重の繰返しに伴ってひずみは徐々に増加している。また、斜めひびわれが発生した後に荷重を増減すると、スターラップのひずみはほぼ荷重の大きさに比例して変化することが認められる。上記の傾向を単純化して示すと図-17 のようである。処女載荷時におけるせん断応力度 $\tau$ とスターラップの引張応力度 $\sigma_{sv}$ との関係は A 線で表わされるが、破壊荷重に近いような大きさの荷重が一回でも作用

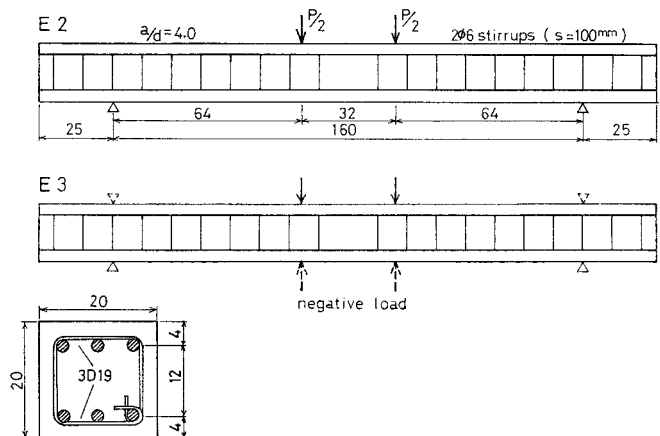


図-14 スターラップの応力検討用の供試体

表-4 低サイクル繰返し載荷試験結果

載荷方法	番号	軸力 (t)	コンクリート強度 (kg/cm <sup>2</sup> )		斜めひびわれ荷重 (t)	破壊荷重 (t)	破壊形式
			$\sigma_c$	$\sigma_t$			
一方向	E2	0	331	18.9	6	16.23	せん断, スターラップ降伏
二方向	E3	0	331	18.9	6	15.55	せん断, スターラップ降伏
一方向+軸力	E5	19.71	360	18.9	11	16.95	曲げ圧縮
二方向+軸力	E4	20.80	326	18.5	10	16.00	せん断

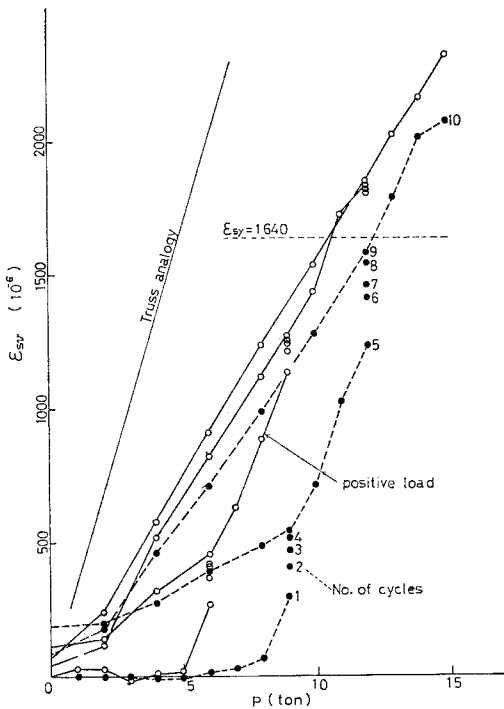


図-15 スターラップのひずみ (一方向載荷)

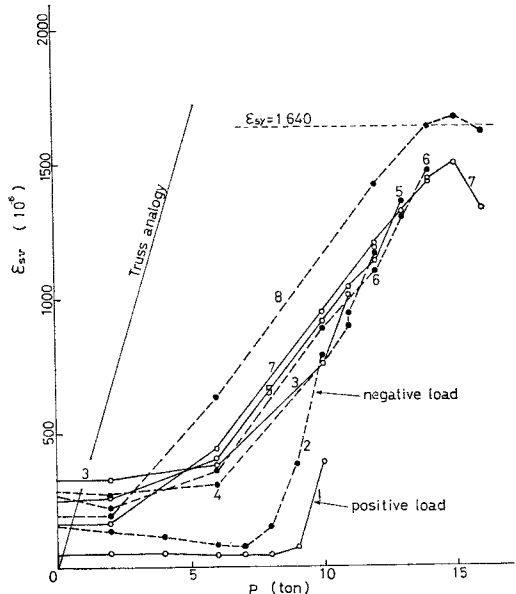


図-16 スターラップのひずみ (二方向載荷)

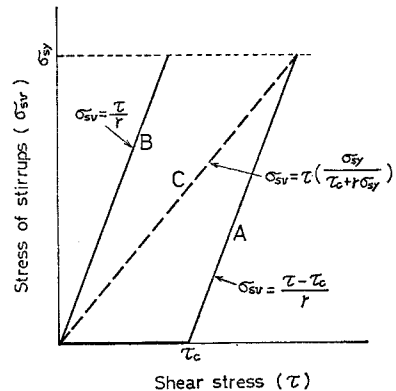


図-17 スターラップの応力

した後は  $\sigma_{sv}$  は増加して C 線で表わされるようになるのである。ここで、 $\tau_c$  は斜めひびわれ発生時のせん断応力度、 $r$  は腹鉄筋比、 $\sigma_{sy}$  はスターラップの降伏点応力度である。図-17 から明らかなように、一般に用いられている A 線でスターラップの応力を計算して、これがある許容応力度内におさえても、実際には繰返し荷重の影響で計算値よりも大きな応力が発生することになり、腹鉄筋が疲労破断を起こす危険性が大きいのである。

本実験においては非常に少ない回数の繰返し載荷しか行っていないので、この結果からただちに多数回の疲労荷重を受けるはりのせん断補強方法について言及することはできないが、少なくとも、上記の性状を考慮する必要があることは明らかである。そして、本章に述べた実験の結果から繰返し荷重を受けるはりのせん断補強方法に関して暫定的な提案を行うとすれば、腹鉄筋の応力を式 (7) で計算し、これを鉄筋の疲労強度から定まる許

容応力度以下に制限することが適当であると思われる。

$$\sigma_{sv} = \tau \cdot \sigma_{sy} / (0.55 \cdot \tau_c + r \sigma_{sy}) \dots\dots\dots (7)$$

#### 4. 軽量鉄筋コンクリートはりのせん断特性

本研究においては主として人工軽量骨材を使用した軽量コンクリートはりを用いて実験を行っている。それで、これらの実験から得られた結果の一般性を検討するために、軽量コンクリートはりのせん断破壊特性（主として破壊形式および破壊強度）を、普通コンクリートはりの場合と比較して検討した。

##### (1) 実験方法

使用したコンクリートは、非造粒型の人工軽量骨材（最大寸法 15 mm）を用いた軽量コンクリートおよび富

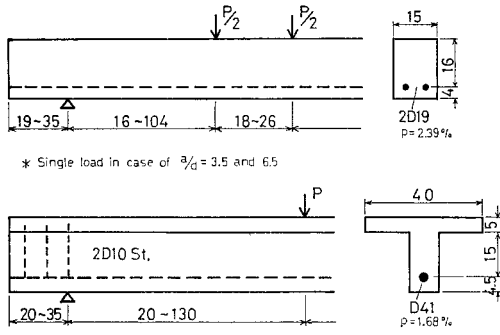


図-18 腹鉄筋を用いないはりの形状・寸法

土川産の骨材(最大寸法 25 mm)を用いた普通コンクリートである。

試験はり 図-18 に示したような腹鉄筋を用いない矩形および T 形はりで  $a/d$  を 1.0~6.5 の範囲で変化させたもの、ならびに、腹鉄筋を配置した T 形はりで  $a/d$  を 2.0 および 4.0, せん断補強の程度 ( $r\sigma_{sy}$ ) を  $11.6 \text{ kg/cm}^2$  ( $2\phi 6, s=10 \text{ cm}$ ) および  $58.2 \text{ kg/cm}^2$  ( $2D10, s=10 \text{ cm}$ ) に変化させたものである。試験はりの養生方法は 3. の場合と同様であるが、載荷試験時の材令は 8~9 日を標準とした。

表-5 矩形はりの試験結果

$a/d$	種類	番号	圧縮強度 $\sigma_c$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	$\tau_u$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	$\sigma_{u,300}^{(2)}$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	破壊形式 <sup>3)</sup>	せん断部強度比 <sup>4)</sup> (%)
1.0	N	N12	318	>100.8	>98.2	B	<83
	L	M12	304	82.5	81.8	S	
2.0	N	N 2	316	31.2	30.4	SC	107
		N 7	328	41.7	40.0	SC	
	L	M 2	293	35.7	36.0	SC	
		M 7	223	34.2	39.7	SC	
		B 3	315	37.9	37.0	SC	
3.5	N	N 1	316	14.6	14.2	DT	97 (DT88) (SC94)
		N 3	315	17.0	16.6	SC	
		N 4	380	15.6	13.9	DT	
	L	M 1	293	12.2	12.3	DT	
		M 3	286	15.6	16.1	SC	
		M 4	340	16.1	15.1	SC	
4.5	N	N 5	328	14.5	13.9	DT	76
		N 6	328	14.4	13.8	DT	
		N 9	326	15.2	14.3	DT	
	L	M 5	223	9.5	10.8	DT	
		M 6	233	9.2	10.5	DT	
		B 1	305	9.6	9.5	DT	
6.5	N	N13	359	14.7	13.4	DT	78
	L	M13	300	10.4	10.4	DT	

注 1) N: 普通コンクリート L: 軽量コンクリート  
 2)  $\tau_{u,300} = \tau_u \times \sqrt{300/\sigma_c}$   
 3) B: 曲げ破壊 S: せん断破壊 SC: せん断圧縮破壊  
 DT: 斜引張破壊  
 4) 軽量コンクリートはりと普通コンクリートはりの  $\tau_{u,300}$  (平均値) の比

表-6 T 形はりの試験結果

$a/d$	種類	番号	$\sigma_c$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	$\tau_u$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	$\tau_{u,300}$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	破壊形式	せん断強度比 (%)
1.0	N	TN 1	338	116.0	109.0	S	81
	L	E12A	289	86.4	88.1	S	
2.0	N	TN2B	303	53.9	53.6	S	85
	L	E16B	320	47.0	45.6	S	
3.0	N	TN3	305	30.0	29.7	SC	110
	L	E16C2	295	32.5	32.8	SC	
4.0	N	TN4	316	20.0	19.4	SC	98
	L	E16D	333	20.0	19.0	SC	
5.0	N	TN5	325	17.7	17.0	DT	109
	L	E16E	346	20.0	18.6	SC	
6.5	N	TN6	314	17.5	17.1	DT	85
	L	E16F	271	13.8	14.5	DT	

(2) 腹鉄筋がないはりのせん断破壊形式

破壊状況を目視観察した結果では、軽量コンクリートはりも普通コンクリートはりも、ともに次の2種類の形式のうちのいずれかで破壊を起こしている。その一つは、せん断スパンに発生している曲げひびわれが、荷重の増加に伴って載荷点および引張鉄筋方向に徐々に発達して斜めひびわれを形成するが、その後もさらに荷重の増加に耐えて、最終的には圧縮部まで深く侵入した斜めひびわれの上側のコンクリートが圧壊して破壊に至る、いわゆるせん断圧縮破壊 (Shear compression failure) であり、他の一つは、せん断スパンに発生していた曲げひびわれが、突然載荷点付近にまで達する斜めひびわれに発達し、この斜めひびわれの形成とほぼ同時に耐力が急激に低下する、いわゆる斜引張破壊 (Diagonal tension failure) である。

各試験はりの破壊形式は表-5, 6 に示した。せん断圧縮破壊から斜引張破壊へと移り変わる  $a/d$  の値 ( $(a/d)_T$ ) は、普通コンクリートはりにおいては矩形はりで 3.5, T形はりでは 4.5 程度と思われ、一方、軽量コンクリートを用いた場合には矩形はりで 4, T形はりでは 5.5 程度と考えられる。矩形はりよりも T形はりにおいて  $(a/d)_T$  が大きいことは、コンクリートの種類にかかわらず同様の傾向であるが、軽量コンクリートを用いると  $(a/d)_T$  が 1 程度大きくなるのが認められる。これは後述のように、主として軽量骨材のかみあい作用 (interlock action) によるせん断力の伝達が少ないため、軽量コンクリートはりの斜めひびわれ強度が低下することに起因する現象であって、普通コンクリートはりとの本質的な相違点ではない。

(3) せん断破壊強度

破壊時における断面の平均せん断応力度  $\tau_u (=S_u/b_0d)$  によってせん断強度を表わすこととして、軽量コ

ンクリートはりと普通コンクリートはりのせん断強度を比較した結果を 図-19 に示した。ただし、図-19 の比較にあたっては各はりにおけるコンクリートの圧縮強度 ( $\sigma_c$ ) の相違を補正するため、 $\tau_u$  は  $\sqrt{\sigma_c}$  に比例するものとして、 $\sigma_c=300 \text{ kg/cm}^2$  に換算した値 ( $\tau_{u,300}$ ) を用いた。

$$\tau_{u,300} = \tau_u \times \sqrt{300/\sigma_c} \dots\dots\dots(8)$$

図-19 は、軽量コンクリートはりと普通コンクリートはりのせん断強度の比率に関して  $a/d$  に3つの領域が存在することを示唆している。すなわち、第1は  $a/d$  が小さく軽量コンクリートはりのせん断強度が普通コンクリートはりの約 85% 以下に低下する領域であり、第2は  $a/d$  が中程度で両者のせん断強度がほぼ等しい領域であり、第3は  $a/d$  が大きく軽量コンクリートはりのせん断強度が普通コンクリートはりの 75~85% 程度に低下する領域である。破壊状況の目視観察においては第1、第2領域の間に明確な差異は認められなかったのであるが、せん断強度の関係は両領域で明らかに異なっているため、第1の領域では圧縮部のコンクリートが主としてせん断力によって破壊する、いわゆるせん断破壊 (Shear proper) を起こし、第2の領域ではせん断圧縮破壊を起こしたものと考えるのが妥当と思われる。いずれにしても、普通コンクリートはりに対する軽量コンクリートはりのせん断強度の比率は破壊形式によって相違するものであることが明らかであり、軽量コンクリートはりのせん断強度に対する評価が必ずしも一致していないのは、破壊形式に関する考慮が十分でなかったためであると考えられる。

このように、 $a/d$  の大きさによっては軽量コンクリートはりの挙動は普通コンクリートはりと若干異なるので、特に破壊形式が移り変わる  $a/d$  付近における実験結果は必ずしも普通コンクリートはりには適用できない面もある。しかし、一般のはり部材にはスターラップが

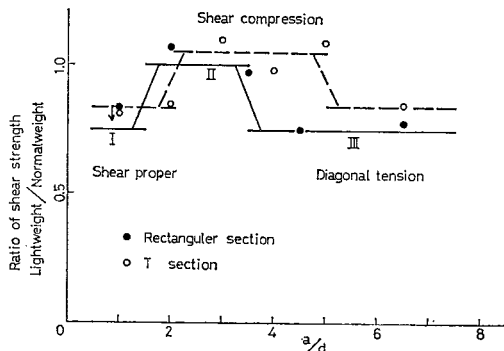


図-19 軽量コンクリートはりのせん断強度

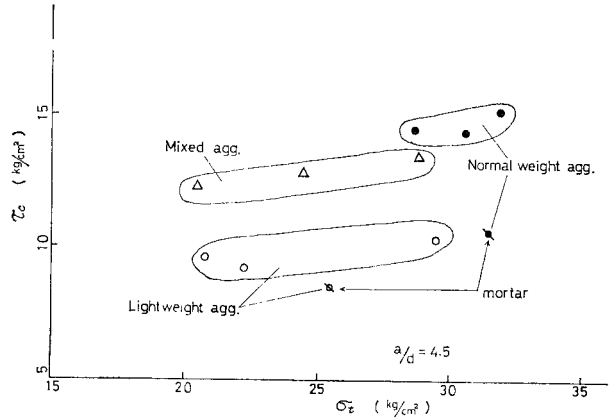


図-20 コンクリートの引張強度とはりの斜めひびわれ強度との関係

配置されており、斜めひびわれの発生と同時にせん断破壊を起こすことのないように設計されるのであるから、実際にはせん断破壊の形式はある程度限定されるのであって、腹鉄筋を用いないはりにおける破壊性状の部分的な相違の影響はかなり小さくなるものと思われる。

軽量鉄筋コンクリートはりのせん断強度が小さい理由として、i) 軽量コンクリートの引張強度が小さい、(ii) 軽量コンクリートは乾燥によりさらに引張強度が低下する、などがあげられている場合も多い。しかし、著者の実験によれば<sup>7)</sup>、乾燥による引張強度の低下がはりのせん断強度に及ぼす影響はほとんど認められていない。また、水中養生を行った場合の軽量コンクリートの引張強度は、普通コンクリートに比べていくぶん小さい傾向であるが大差ない値であって、上記 (i)、(ii) は軽量コンクリートはりのせん断強度が小さいことの主要因とはいえないのである。そこで、粗細骨材の一部 (40~80%) を軽量骨材でおきかえたコンクリートおよびモルタルを用いた鉄筋コンクリートはりの曲げせん断試験を行って骨材材質の影響を検討した。 $a/d$  を 4.5 としたはりの斜めひびわれ強度 ( $\tau_c$ ) とコンクリートの引張強

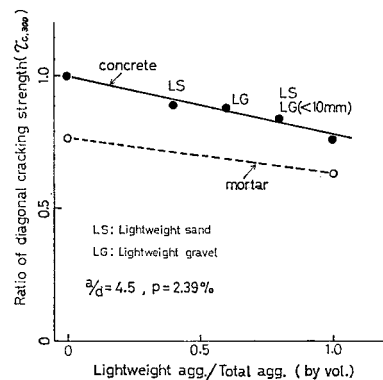


図-21 骨材の相違がはりの斜めひびわれ強度に及ぼす影響

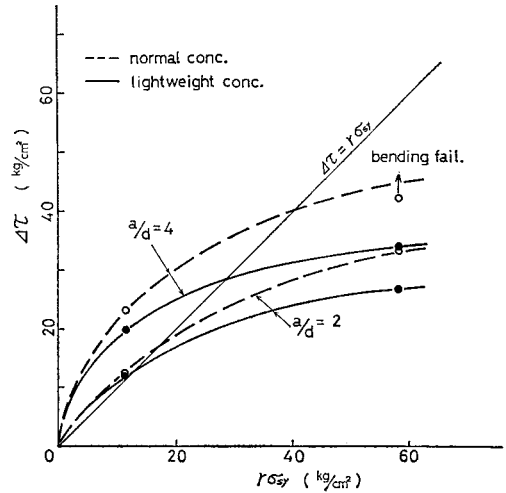
度 ( $\sigma_t$ ) との関係は 図—20 に示したとおりで、引張強度の値よりはむしろ骨材の相違の影響の方が大きいことが明らかである。また、全骨材中に占める軽量骨材の容積比と  $\tau_c$  とは密接な関連を示しており (図—21)、これらの結果は、骨材による interlock 作用が斜引張破壊強度に大きな影響を及ぼしていることを示唆していると考えられる。すなわち、軽量骨材は材質が弱い反面セメントペーストとの付着が良好であるため、曲げひびわれが骨材を割って発達するケースが多く、その結果、軽量コンクリートはりにおいてはひびわれ面における骨材の interlock 作用が減少して斜めひびわれの発生に対する抵抗が低下するためであると考えられるのである。

(4) 腹鉄筋のせん断補強効果

$a/d$  を 2.0 および 4.0 に、スターラップによるせん断補強の程度  $r\sigma_{sy}$  ( $=A_v \cdot \sigma_{sy} / b_0 s$ ) を 11.6 kg/cm<sup>2</sup> および 58.2 kg/cm<sup>2</sup> に変えた鉄筋コンクリート T 形ばりを用いて腹鉄筋のせん断補強効果について検討を行った。

載荷試験の結果は 表—7 に示したとおりである。 $r\sigma_{sy}$  を 58.2 kg/cm<sup>2</sup>、 $a/d$  を 2.0 とした普通コンクリートはり (NS 4) では曲げ破壊が先行したが、その他のはりはすべてせん断破壊を起こした。すなわち、 $r\sigma_{sy}$  が小さいはりはいずれもスターラップが降伏した後にせん断破壊を起こし、 $r\sigma_{sy}$  を大きくしたはりでは、上記 NS 4 を除き、いずれもスターラップが降伏する以前にせん断破壊を起こしたのである。

腹鉄筋を配置したはりと腹鉄筋を用いない同様のはりのせん断強度の差 ( $\Delta\tau$ ) を腹鉄筋の補強効果と考えると、 $\Delta\tau$  は軽量コンクリートはり、普通コンクリートはりとも  $a/d$  が大きい場合に大である。また、補強程度 ( $r\sigma_{sy}$ ) が大きいほど当然補強効果は大であるが、補強の効率 ( $\Delta\tau/r\sigma_{sy}$ ) は逆に低下することが認められる (図



図—22 スターラップのせん断補強効果

—22)。

腹鉄筋の補強効果  $\Delta\tau$  は軽量コンクリートはりにおいて小さい傾向があり、普通コンクリートはりの  $\Delta\tau$  に対して、 $r\sigma_{sy}$  が 11.6 kg/cm<sup>2</sup> の場合で 98~85%、 $r\sigma_{sy}$  が 58.2 kg/cm<sup>2</sup> の場合には 79% 以下にそれぞれ低下している。すなわち、軽量コンクリートはりにおけるスターラップの補強効果は普通コンクリートはりのそれよりも小さい傾向があり、 $a/d$  が大きい場合および補強程度がかなり大きい場合には普通コンクリートはりに比べて相対的に低下する場面があることが認められたのである。

このような相違は軽量コンクリートはりの腹鉄筋の設計において十分考慮されるべきものであるが、本論文の 2. で論じたような荷重位置の変化に伴うせん断強度の相対的な変化に対して大きな影響を及ぼすことはないものと考えられる。

本論文 2. および 3. に述べたことがらは、主として軽量コンクリートはりを用いた実験の結果によるものではあるが、本章の結果を勘案すれば、少なくとも定性的にはそれらを普通コンクリートはりに対しても拡張することが可能であり、定量的にも、比較的狭い範囲の例外を除き、ほぼ同様のことがいえると考えてさしつかえないものと思われる。

5. 結 論

移動する荷重および繰返し荷重の作用を受ける鉄筋コンクリートはりのせん断性状に関して実験的に検討を行った結果、本実験の範囲内で以下のことがいえると思われる。

(1) 移動荷重に対して合理的な設計を行うためには、はり各部分のせん断強度に着目する必要がある。直

表—7 腹鉄筋を配置した T 形ばりの試験結果

種類	$a/d$	番号	せん断補強 $r\sigma_{sy}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\tau_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )	補強効果 <sup>1)</sup> $\Delta\tau$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\Delta\tau/r\sigma_{sy}$
軽	2.0	E16B	0	320	47.0	—	—
		MS3	11.6	336	59.2	12.2	1.05
		MS4	58.2	336	73.8	26.8	0.46
量	4.0	E16D	0	333	20.0	—	—
		MS1	11.6	331	39.8	19.8	1.71
		MS2	58.2	343	53.8	33.8	0.58
普	2.0	TN2B	0	303	53.9	—	—
		NS3	11.6	352	66.3	12.4	1.07
		NS4	58.2	337	87.5	33.6	0.58
通	4.0	TN4	0	316	20.0	—	—
		NS1	11.6	326	43.5	23.5	2.02
		NS2	58.2	348	>62.5 <sup>2)</sup>	>42.5	>0.73

注 1) 腹鉄筋がないはりの  $\tau_u$  との差。

2) 曲げ破壊を起こした。

接支持され集中荷重が直接載荷される鉄筋コンクリートはりの各部分におけるみかけのせん断強度は、荷重作用位置がその部分に近づくに従って増加し、特に着目部分から約  $1.5d$  以内の距離に載荷される場合には急激な増加を示した。このような荷重の接近に伴う強度増加は支点に近い部分において著しいが、はり中央部においても同様の傾向が認められた。

(2) ウェブコンクリートに鉛直方向の圧縮応力を発生させるような支承および荷重条件の鉄筋コンクリートはりにおいては、上記の性質を利用して、集中荷重によるせん断力を低減して設計することが可能である。その際せん断力の低減係数として次式の値がめやすになるものと思われる。

$$R=0.5\{1.0+(a-x)/1.5d\} \leq 1.0$$

$a$  : 支点から載荷点までの距離

$x$  : 支点から着目部分までの距離

(3) 繰返し荷重を受ける鉄筋コンクリートはりのせん断破壊形式は、せん断スパンと有効高さとの比  $a/d$  の大きさによって、静的荷重による破壊形式とは相違する場合がある。また、繰返し載荷の場合の破壊形式は  $a/d$  の値によって変化するばかりでなく、上限荷重の大きさによっても相違する場合があることが認められた。

(4) 繰返し荷重によるせん断破壊は上述の如く複雑な現象であるが、繰返し荷重の影響を斜めひびわれの発生に及ぼす影響と、斜めひびわれ発生後にはり内部に形成されるアーチ機構に及ぼす影響とに分離して考えれば、基本的には静荷重を受ける場合と同様な説明が可能である。すなわち、繰返し載荷の場合にはコンクリートの引張疲労により静的斜めひびわれ荷重よりも小さな荷重によって斜めひびわれが発生する。しかし、斜めひびわれが発生した時点では、アーチ機構は繰返し載荷による悪影響をあまり受けておらず耐力も低下していない。そのため、斜めひびわれ荷重とアーチの耐力との相対的な関係が変化することとなり、静荷重の場合と破壊形式が相違するばかりでなく、上限荷重の大きさによっても相違する場合が生ずるのである。

(5) 下限荷重を上限荷重の 25% 程度以下とした場合、軽量鉄筋コンクリートはりの 100 万回せん断疲労強度は静的強度の 55~65%、平均 60% に低下し、破壊形式が相違してもこの低下率に有意な差異は認められなかった。

上記の数値は軽量鉄筋コンクリートはりによる実験値であるが、既往の諸研究を参照すると、繰返し荷重によ

るせん断強度の低下率は軽量コンクリートを用いた場合でも普通コンクリートを用いたはりとほぼ同様である。したがって、一般の鉄筋コンクリートはりのせん断疲労強度についても上記の試験値は適用できるものと思われる。

鉄筋コンクリートはりの設計において考慮すべきコンクリートの許容せん断応力度は、静荷重と動荷重の比率、荷重の繰返し回数などを考慮して定めるべきものであるが、特に動荷重の影響が著しい鉄筋コンクリートはりの設計においては、コンクリートの許容せん断応力度を静的な荷重に対するせん断強度の 50~55% 程度に低減するのが適当であると思われる。

(6) これらの結論は主として人工軽量骨材を用いた軽量鉄筋コンクリートはりの実験結果に基づくものである。しかし、この種コンクリートを用いた鉄筋コンクリートはりのせん断破壊特性を普通コンクリートを用いた場合と比較して検討した結果、そのせん断特性は普通コンクリートの場合とは若干異なる面もあるが、本研究の結果に重要な影響を及ぼすと考えられるような相違点は認められなかった。したがって、普通コンクリートを用いた一般の鉄筋コンクリートはりの場合でも、上記とほぼ同様の結果が得られるものと考えられる。

#### 参考文献

- 1) Ferguson, P.M.: Some implications of recent diagonal tension tests, *ACI Journal*, Aug. 1954.
- 2) Kani, G.N.J.: How safe are our large reinforced concrete beams?, *ACI Journal*, Mar. 1967.
- 3) C.E.B.: Bulletin D'Information N° 109, Apr. 1975.
- 4) ACI-ASCE Committee 426: The shear strength of reinforced concrete members, *Journal of Structural division*, Proc. of ASCE, Vol. 99, No. ST 6, June 1973.
- 5) Bresler, B. and MacGregor, J.G.: Review of concrete beams failing in shear, *Proc. of ASCE*, ST, Feb. 1967.
- 6) 国分正胤・絵貝 勇: 繰返し荷重を受ける鉄筋コンクリートはりのせん断性状, *セメント技術年報 XXV*, 1971.
- 7) 絵貝 勇: 軽量鉄筋コンクリート桁のせん断強度について, *土木学会コンクリートライブラリー*第 24 号, 1969 年 10 月.
- 8) Chang, T.S. and Kesler, C.E.: Fatigue behavior of reinforced concrete beams, *ACI Journal*, Aug. 1958.
- 9) 藤田嘉夫・海保康夫: コンクリートの引張り、圧縮および曲げに関する疲労性状, *セメント技術年報 XXI*, 1971 年.
- 10) 小林一輔・伊藤利治・芝田 憲: 人工軽量骨材コンクリートの圧縮疲労性状, *土木学会コンクリートライブラリー*第 24 号, 1969 年 10 月.

(1978.1.14・受付)