

論文

[2052] 輪荷重作用下での2径間連続RCばりの低サイクル疲労特性

正会員 園田恵一郎 (大阪市立大学)
 正会員 ○鬼頭 宏明 (大阪市立大学)
 上林 厚志 (大阪市立大学)
 土生川真二 (大阪市立大学大学院)

1. まえがき

近年、繰返し荷重下でのRC部材の挙動に関する研究が盛んに行われているが、その大半は地震荷重を対象とした定点繰返し荷重に対するものである。一方、橋梁構造物の桁に用いられるRCはり部材は、自動車の走行による移動繰返し荷重を受けており、定点繰返し荷重下とは異なった挙動を示すと考えられる。コンクリート構造物の設計法が許容応力度設計法から限界状態設計法へと移行されている今日、移動繰返し荷重下でのRCはりの挙動を明らかにすることは意義があるものと思われる。

本研究は2径間連続RCばりを対象とし、実橋の受ける荷重条件を再現できる装置を用いて、 10^4 回程度の低サイクル移動繰返し載荷実験を行い、その低サイクル疲労特性(ひびわれ性状、疲労耐力、破壊機構など)の究明を試みたものである。

2. 実験装置

橋梁構造物に作用する交通(自動車)荷重をシミュレートするために用いた移動繰返し載荷装置の概要を図1に示す。中央のポリウレタンゴム(20mm厚)で表面を覆われた鋼車輪(直径30cm, 幅15cm)に、サーボ機構により制御された一定荷重を与える。この車輪をモーターとクラッチの切り替えによって供試体上面を左右に速度 10m/minで牽引する。車輪の移動に伴う荷重の変動率は実測で約5%以内である。なお、これらの装置の運転と後述の各測定にはパーソナルコンピュータによる自動化システムを導入している。供試体は図1に示すように3点で支持され、両端の支点部では浮き上がりを抑えるために、供試体上面に丸鋼を置きシャフトで押さえている。

3. 供試体

本実験に用いた供試体は、全長 324cm, はり高20cm, 幅15cmで、主鉄筋として引張側および圧縮側に異形鉄筋D16を2本ずつ配筋した複鉄筋長方形断面はり25体である。このはりを片側スパン 150cmとする等スパンの2径間連続はりとして用いた。図2に供試体の断面図を示す。スターラップには異形鉄筋

D10またはD6を用い、その配置間隔(cm)を5, 7.5, 10, 12.5, 15.0と変化させた。配筋図の一例を図3に、各供試体の名称と諸元を表1に示す。表中、スターラップ鉄筋量は、 A_w/s [A_w (cm^2)はスターラップ

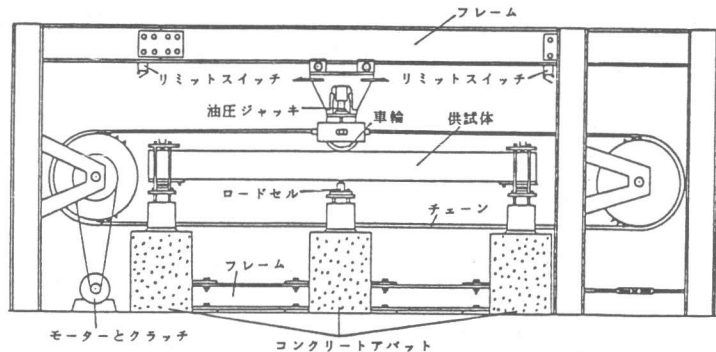


図1 移動繰返し載荷装置の概要

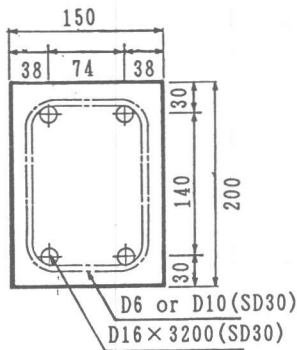


図2 配筋図(断面)

ブ間隔: s (cm)におけるスターラップ鉄筋の総断面積]を示す。

4. 実験方法と測定項目

移動繰返し載荷実験は、先に示した装置を用いて設計荷重を越える荷重を車輪に与え、図4に示す移動範囲を 10^4 回程度の規定回数で反復移動させて行った。供試体の変形量および断面欠損が著しく車輪の移動が困難になった時をその破壊とした。なお、規定回数以内で破壊に至らなかった供試体に対しては荷重を上げて再度同様の実験を行った。

測定項目は、スパン中央部の変位、その下面の曲げひびわれ幅と主筋ひずみおよび中間支点付近のせん断ひびわれ幅、主筋とスターラップのひずみであり、予め設定された回数に図4に示す測定位置(スパン中央)に車輪を静止し除荷時と載荷時の両方で測定した。図5に変位計とひびわれ幅測定用の π ゲージの取付位置を示す。なお、図3の配筋図中に鉄筋に貼付したひずみゲージの位置を示す。

移動繰返し載荷による耐力低下の程度を評価するためにその基準値として同供試体に対し静的耐力を調べた。すなわち、静的曲げ耐力を調べるために片側スパン中央で載荷する実験(静的曲げ耐力実験)と静的

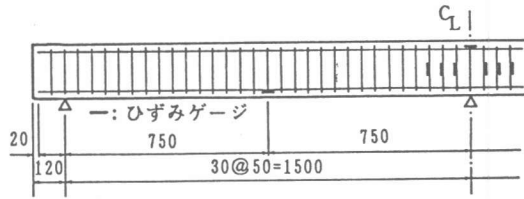


図3 配筋図(正面):スターラップ間隔 5cm

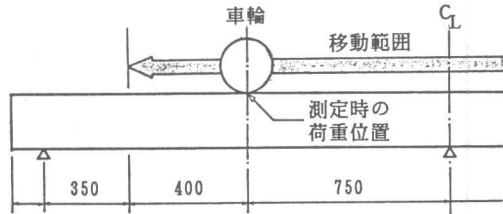


図4 車輪の移動範囲

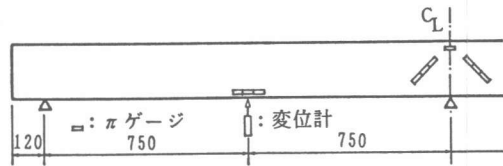


図5 測定器具の取付位置

表1 供試体の一覧

No	呼称	呼び名	[スターラップ]コンクリートの		
			間隔 (cm)	鉄筋量 (cm)	圧縮強度 (kgf/cm ²)
1	B10-150	D10	15.0	0.095	348.7
2	B10-150	D10	15.0	0.095	348.7
3	B10-75	D10	7.5	0.191	272.4
4	B10-100	D10	10.0	0.143	272.4
5	B10-125	D10	12.5	0.114	272.4
6	S10-125	D10	12.5	0.114	272.4
7	S10-75	D10	7.5	0.191	272.4
8	S6-50	D6	5.0	0.126	275.2
9	S6-75	D6	7.5	0.084	275.2
10	S6-100	D6	10.0	0.063	275.2
11	M10-150	D10	15.0	0.095	348.7
12	M10-150	D10	15.0	0.095	348.7
13	M10-150	D10	15.0	0.095	348.7
14	M10-150	D10	15.0	0.095	348.7
15	M10-75	D10	7.5	0.191	272.4
16	M10-100	D10	10.0	0.143	272.4
17	M10-125	D10	12.5	0.114	272.4
18	M10-150	D10	15.0	0.095	272.4
19	M10-75	D10	7.5	0.191	272.4
20	M10-75	D10	7.5	0.191	272.4
21	M10-125	D10	12.5	0.114	272.4
22	M10-125	D10	12.5	0.114	272.4
23	M6-50	D6	5.0	0.126	275.2
24	M6-75	D6	7.5	0.084	275.2
25	M6-100	D6	10.0	0.063	275.2

せん断耐力を調べるために、中間支点からスパン方向にはり高だけ離れた位置で載荷する実験（静的せん断耐力実験）を行った。

5. 実験結果

各実験の破壊荷重を一覧表にして表2に示す。

a) 静的曲げ耐力実験

破壊時のひびわれ状況は、いずれの供試体も、図6(a)に示すように載荷点直下で下面より進展した曲げひびわれとその上部、すなわちコンクリート圧縮部上縁における圧壊を伴った曲げ破壊形式を呈した。当然のことながらその耐力はスターラップの影響を受けず、一様な値となった。

b) 静的せん断耐力実験

静的曲げ耐力と異なり静的せん断耐力は、スターラップの間隔と量の違いに対する変化が見られる。いずれも図6(b)に示すような複数のせん断ひびわれを発生し、破壊に至った。表2より静的曲げ耐力との比をとると、せん断耐力はその1.3～1.5倍となるので、連続はりとしての静的耐力は曲げ耐力に支配される。

c) 移動繰返し載荷実験

表2に各供試体に対する載荷荷重と破壊までの繰返し回数、および破壊形式を示す。移動繰返し載荷下では、先に調べた静的耐力の約60%以下の荷重で破壊し、その大半がせん断破壊に至った。このような破壊形式をとるために、破壊荷重及び繰返し回数はスターラップの間隔と量に影響を受ける。図6(c)(d)に実験で観察された典型的な破壊形式を示す。

以下、測定、観察を行った各項目に対して考察を行う。

(1) 破壊進行状況

図6(c)に示した供試体では数回の移動繰返しで、はり全体に曲げおよびせん断ひびわれが生じた。左スパン中央では曲げひびわれの上端が枝分かれしY

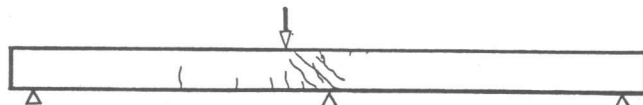
表2 実験結果一覧

実験名	Na	呼称	破壊荷重 (tf)	繰返し回数 N	破壊形式
静的曲げ	1	B10-150	9.1	—	曲げ
	2	B10-150	9.5	—	曲げ
	3	B10-75	9.5	—	曲げ
	4	B10-100	9.4	—	曲げ
	5	B10-125	9.0	—	曲げ
静的せん断	6	S10-125	13.5	—	せん断
	7	S10-75	14.5	—	せん断
	8	S6-50	17.5	—	せん断
	9	S6-75	15.5	—	せん断
	10	S6-100	12.5	—	せん断
反復移動載荷実験	11	M10-150	5.0	191	せん断
	12	M10-150	5.0	2491 ¹⁾	せん断
	13	M10-150	4.5	7024 ²⁾	せん断
	14	M10-150	4.0	12692	せん断
	15	M10-75	5.0	1434 ³⁾	せん断
	16	M10-100	4.5	9104 ⁴⁾	せん断
	17	M10-125	4.0	10146	せん断
	18	M10-150	4.0	3146	せん断
	19	M10-75	5.0	8038	せん断
	20	M10-75	6.0	500	曲げ
	21	M10-125	5.0	692	せん断
	22	M10-125	6.0	317	曲げ
	23	M6-50	5.5	1632 ⁵⁾	せん断
	24	M6-75	5.0	7846 ⁶⁾	せん断
	25	M6-100	4.0	6637 ⁷⁾	せん断

1)～7)は1)3.5tf, 2)4.0tf, 3)4.0, 4.5tf, 4)4.5tf, 5)3.0, 4.0, 4.5, 5.0tf, 6)3.0, 4.0, 4.5tf, 7)3.0tfの各荷重で10⁴回程度の先行実験で破壊しなかったため、その後、荷重を大きくして行った実験結果



a) 静的曲げ耐力実験: B10-75 (P=9.5tf)



b) 静的せん断耐力実験: S10-75 (P=14.5tf)



c) 移動繰返し載荷実験(曲げ破壊): M10-75, No. 20 (P=6.0tf, N=500)



d) 移動繰返し載荷実験(せん断破壊): M10-75, No. 19 (P=5.0tf, N=8038)

図6 各実験による破壊形式

字形になり、曲げ圧縮領域でのせん断ひびわれと思われるものが発生し、静的曲げ破壊形式とは異なる様相を示した。繰返し回数が500回近くになると中間支点付近のコンクリートの損傷が大きくなり、続いて左側のスパン中央において曲げ変形が急に大きくなり、破壊した。

一方、図6(d)の供試体は5.0t、500回の移動繰返しをしたところで中間支点の左側に約45度の角度で大きなせん断ひびわれが発生した。その後左スパン中央で多数のひびわれの進展がみられ、繰返し回数が7000を越えてから、中間支点上のコンクリートが剝離し始め、中間支点付近において変位が急増し、破壊に至った。

耐力を決定した中間支点近傍のせん断ひびわれの進展過程について述べる。中間支点から45度の角度で発生したせん断ひびわれは、輪荷重がこの地点を通過する度にそれに作用する応力の方向が反転し、擦り合わされ、やがてスリット化していく。これにより、骨材の噛み合わせによる抵抗力が低下していく。また、この擦り合わせによりせん断ひびわれ近傍の主鉄筋とスターラップの周りで、コンクリートが破碎され露出し、付着強度がほぼ失われる。

このように広い範囲でせん断に対しコンクリートが抵抗なくなるとスターラップ間隔内でせん断力を受け持つのは主筋だけとなり、スリット化したせん断ひびわれを不連続面として、両側の部材が剛体的な挙動を呈し、変形が大きくなるように観察された。

(2) スターラップのひずみ性状

図7に静的せん断耐力実験における荷重と中間支点と荷重点の間にあるスターラップのひずみの関係を示す。スターラップ間隔が5cm、7.5cmについてはそれぞれ3本および2本の平均値を示した。いずれも荷重が5tfを越えたあたりで、顕著なせん断ひびわれが発生し、スターラップに大きなせん断力が分担されている。以後、荷重が増すにつれてひずみは増加し降伏に至った。

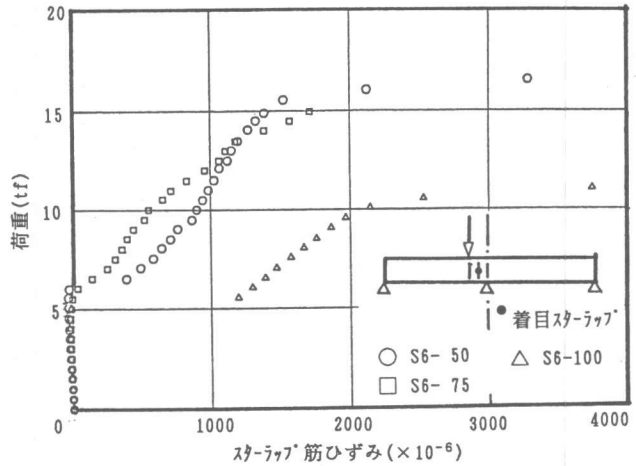


図7 静的せん断耐力実験でのスターラップの挙動

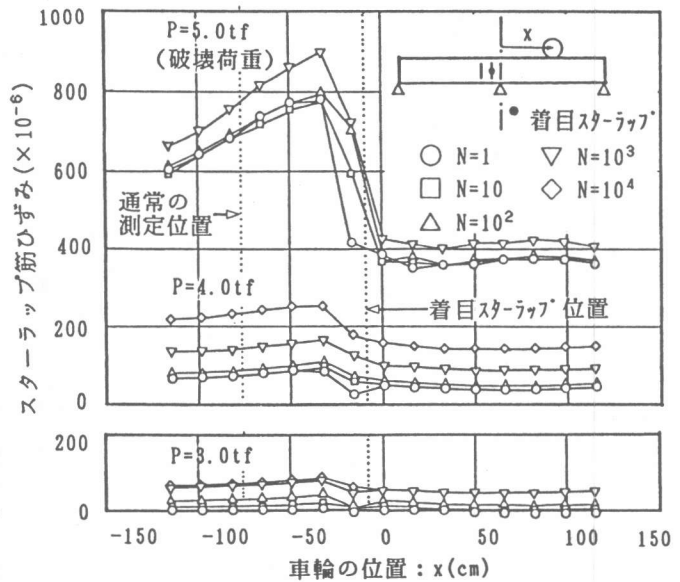


図8 荷重の移動に伴うスターラップの挙動(M6-75)

一方、移動繰返し载荷実験では4で述べた測定に加えて、規定の繰返し回数 ($N=1, 10, 10^2, 10^3, 10^4$) において輪荷重の1移動サイクル内にて連続的に着目スターラップのひずみを測定し、その変化(影響線)を図8に描いた。この図よりスターラップのひずみ、言い換えればそれに分担されるせん断力が輪荷重の移動に伴ってどのように変化してゆくかがよく分かる。このようにして得られたスターラップのひずみを通常の測定方法(左スパンの中央に荷重を移動させての測定)による結果と比較すると、移動中に荷重が左スパンの中央に位置したときのひずみは後者のそれに等しく、移動範囲の右端に荷重が位置したときの値は後者において荷重を取り除いたときの残留値にほぼ等しかった。このことを踏まえて図8を見ると、顕著なせん断ひびわれが発生していない荷重段階 ($P=3.0tf, 4.0tf$) では、スターラップに大きなせん断力が分担されていないにもかかわらず、その残留ひずみが次第に増加していることが分かる。これはコンクリート内部の細かなひびわれの進展に伴い、コンクリートとスターラップの付着切れが起こり残留応力が発生するためと思われる。 $P=5.0tf$ 载荷時において支配的なせん断ひびわれが生じるとスターラップのせん断力の分担は大きくなり荷重が通過する度に急激な振幅が生じている。しかしながら、この供試体では繰返し回数 $N=8038$ 回において破壊するまでに、スターラップは破断せず、 $N=8000$ の測定の際にもスターラップが降伏したと思われるような残留ひずみは測定されなかった。

(3) 疲労耐力

移動繰返し载荷による耐力低下を表す指標として、その破壊時の载荷荷重と静的耐力の比(静的耐力比)を用い、繰返し回数と耐力低下の関係を示す。

前述のように、曲げ破壊に支配される静的载荷下とは異なり、移動繰返し荷重下ではその耐力はせん断破壊に支配され、その値及び繰返し回数はスターラップの間隔と量に影響される。こ

表3 実験値で正規化した静的耐力比

No	呼称	破壊荷重 (tf)	繰返し回数 N	破壊形式	せん断耐力 (tf)	静的耐力比	
						せん断 S_{so}	曲げ S_{mo}
11	M10-150	5.0	191	せん断	12.5*	0.400	0.538
12	M10-150	5.0	2491	せん断	12.5*	0.400	0.538
13	M10-150	4.5	7024	せん断	12.5*	0.360	0.484
14	M10-150	4.0	12692	せん断	12.5*	0.320	0.430
15	M10-75	5.0	1434	せん断	14.5	0.345	0.538
16	M10-100	4.5	9104	せん断	14.0**	0.321	0.484
17	M10-125	4.0	10146	せん断	13.5	0.296	0.430
18	M10-150	4.0	3146	せん断	12.5*	0.320	0.430
19	M10-75	5.0	8038	せん断	14.5	0.345	0.538
20	M10-75	6.0	500	曲げ	14.5	0.414	0.645
21	M10-125	5.0	692	せん断	13.5	0.370	0.538
22	M10-125	6.0	317	曲げ	13.5	0.444	0.645
23	M 6-50	5.5	1632	せん断	17.5	0.314	0.591
24	M 6-75	5.0	7846	せん断	15.5	0.323	0.538
25	M 6-100	4.0	6637	せん断	12.5	0.320	0.430

*)、**)はスターラップ間隔以外の諸元の同一供試体の実験値から算出した算定値

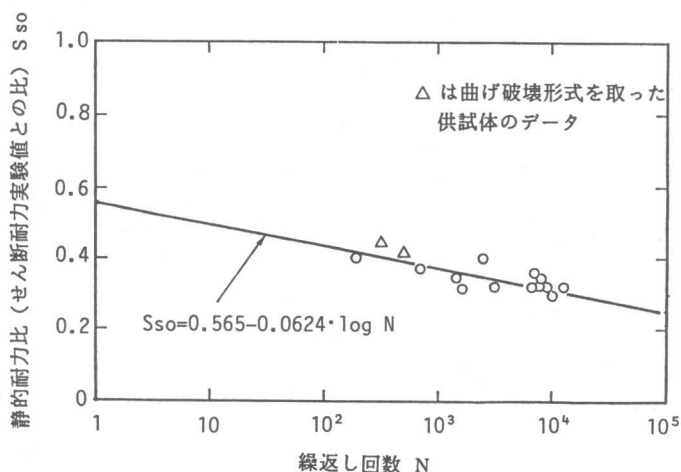


図9 最小2乗法による回帰直線

のことより移動繰返し荷重による耐力低下を評価するには、静的せん断耐力に対する比で破壊荷重を表すのが妥当であると考えられる。

表3に破壊荷重と繰返し回数、および静的せん断耐力実験結果を用いた静的耐力比を示す。表より 10^4 回程度の低サイクルの移動繰返し載荷による RC はりの耐力は静的耐力の $1/2$ 以下に低下することが分かる。また、図9に繰返し回数と静的耐力比の関係を示す。これらのデータを最小2乗法により回帰した直線とその式を図中に示す。回帰式は実験結果をよく表現できていると言える。この直線によると1回の移動繰返し載荷はその静的耐力を約0.6倍に低減させるのと等価な損傷をRCはりに与えるといえる。また、この直線の式を変形すると

$$S_{so} = 0.565(1 - \log N / 9.1) \quad \dots\dots(1)$$

となり、コンクリートに負担されるせん断力の移動繰返しに伴う減少を示す係数は、約 $0.11 (= 1/9.1)$ となる。定点繰返し載荷下のRCはりの疲労特性を論じた研究成果¹⁾では、この値が 0.07 と採られていることを考えると、移動繰返し載荷は、定点繰返し載荷よりもはり全体にわたる多数の曲げひびわれによるコンクリート部の有効断面積の減少など厳しい環境をRCはりに与えるといえる。

また、表3から 10^4 回程度の低サイクル移動繰返し荷重を受ける2径間RC連続ばりは、載荷荷重に対し、静的曲げ耐力比 (S_{mo}) が 0.6 を上回ると曲げ破壊をする危険性があり、静的せん断耐力比 (S_{so}) が 0.3 以上であればせん断破壊を起こす恐れがあるといえる。また、移動繰返し回数の面から見れば、曲げ破壊は比較的少ない繰返し回数で起こるといえる。

6. まとめ

2径間RC連続はり供試体15体に対する自動車の走行を想定した 10^4 回程度の移動繰返し載荷実験ならびに同形状の供試体10体に対する静的耐力実験を行い、移動繰返し載荷下でのその挙動を調べた結果、得られた知見を以下に列挙する。

- 1) 静的耐力はスターラップに影響されない曲げ破壊が支配的であったが、移動繰返し実験ではその耐力はせん断破壊に支配され、その値はスターラップの間隔と量の影響を受ける。
- 2) 静的せん断耐力を基準とした移動繰返し実験での耐力の比 (静的耐力比: S_{so}) は $1/2$ 以下となり、大幅な低下がみられた。
- 3) 静的耐力比と繰返し回数の関係を回帰した直線式はその関係をよく表現しており、その式より移動繰返し載荷に伴う耐力低下を示す係数は既存の定点繰返し載荷による係数を上回り、前者は後者より厳しい荷重条件をRCはりに課す。

以上のことより移動荷重を受けるRCはりの設計では、固定点荷重のみを受ける場合よりせん断に対するより十分な配慮が必要である。

最後に、本研究の実施に当たっては昭和62年度文部省科学研究費補助 [一般研究 (C) : 6255 0350] を受けたことを記し、ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) Okamura, H., Farghaly, S.A. and Ueda, T.: Behaviors of Reinforced Concrete Beams with Stirrups Failing in Shear under Fatigue Loading, Proc. of JSCE, No. 308, April 1981, pp. 109-122.