

論文

[2013] 鉄筋コンクリートはりの曲げおよびせん断疲労性状

正会員 ○高野昭信（読売東京理工専門学校）

正会員 西沢紀昭（中央大学理工学部）

正会員 堤 俊明（中央大学理工学部）

1. まえがき

鉄筋コンクリート構造物の繰返し载荷による疲労現象は、構造物の耐久性にとって重要な問題である。鉄筋コンクリート構造物の設計法が許容応力度法から限界状態設計法に移行し、限界状態に対する検討項目として疲労限界状態が規定されたことは周知の通りである¹⁾。鉄筋コンクリートはりの曲げあるいはせん断疲労性状に関しては、過去に多くの研究が行われているが、疲労破壊強度の解明を目的としたものが多く、载荷の初期から破壊に至る疲労挙動に関する研究は比較的少ない。

本研究は、繰返し载荷を中止することなく、ひずみや変位を連続的に測定するシステムを採用することにより、载荷の初期から疲労破壊に至るまでの疲労挙動を解明することを目的としている。本報告では、静的载荷実験において、曲げ破壊及びせん断破壊した試験体について、種々の荷重レベルで疲労実験を行った結果のうち、(1)破壊载荷回数及び破壊モードと土木学会のコンクリート示方書¹⁾との比較、(2)鉄筋及びコンクリートのひずみ、はりのたわみと繰返し回数との関係について考察したものである。

2. 実験概要

2.1 試験体

実験に用いたはり試験体の1例を図-1に示した。試験体の種類は表-3, 4に示したように

3種類である。いずれも断面は15×15cmで、長さは180cm(タイプI, II)と120cm(タイプIII)である。断面の有効高さd、せん断スパンa、使用鉄筋の種類および鉄筋量等は表-3, 4に示した通りである。タイプIは引張り鉄筋比、コンクリート強度を一定にして、曲げモーメント比(M/M_u)、せん断力比(V/V_u)の影響、タイプIIは引張り鉄筋比、曲げモーメント比、コンクリート強度などの影響、タイプIIIはせん断スパン比(a/d)の影響を各々調べるためであった。

2.2 使用材料

使用したセメントは早強ポルトランドセメント、細骨材および粗骨材は富士川支流の釜無川産であった。目標としたコンク

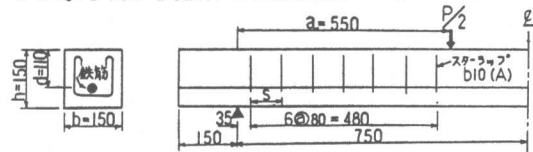


図-1 試験体の1例(タイプI)

表-1 コンクリートの配合

Type	f _c '	D _{max} (mm)	S (cm)	A (%)	W/C (%)	s/a (%)	Unit Weight(kgf/m ³)			
							W	C	S	CA
A	350	25	8±2	1.8±1	59	40	173	293	767	1139
B	300	25	8±2	1.8±1	72	43	178	247	745	1103
C	400	25	12±2	1.8±1	63	41	172	272	814	1135

表-2 鉄筋の強度特性

Type-Dia.	f _y	f _u	E _s
SDR24-D10(A)	34.8	50.4	1.69×10 ⁵
SD24-D10(B)	31.7	48.6	2.1
SD35-D16(A)	41.5	48.4	2.0
SD35-D16(B)	40.5	64.4	1.9
SD35-D19	42.9	61.5	2.1
SD35-D22(A)	39.3	63.5	1.9
SD30-D22(B)	36.6	55.1	2.1

Unit: f_y, f_u=kgf/mm², E_s=kgf/cm²

リートの圧縮強度は3種類であり、その配合を表-1に示した。はりの引張り鉄筋およびスターラップに使用した異形棒鋼の強度特性は表-2に示すようであり、入荷時期により、その特性値は異なっていた。

2.3 載荷方法

載荷方法はすべての実験において、左右対称の2点載荷とし、せん断スパン比 (a/d) は、表-3, 4に示すように5.0と2.5の2種類であった。繰り返し載荷にはハイドロパルス疲労試験機を使用し、載荷した応力波形はすべて5 Hzの正弦波であった。

最大載荷重(曲げモーメントおよびせん断力)は、疲労実験に用いたものと同じ試験体で静的載荷実験を行って求めた破壊曲げモーメント (M_u) あるいは破壊せん断力 (V_u) に基づいて決定し、最小載荷重は載荷中に試験体が不安定にならない程度の大きさとした(表-3, 4)。

繰り返し載荷回数は試験体が破壊するまでを原則とし、200万回で未破壊の場合には一旦載荷を中止して最大荷重を大きくして破壊まで載荷した。

2.4 測定項目及び測定方法

引張り鉄筋ではスパン中央、載荷点直下、載荷点と支点との中間点および支点の4箇所、スターラップは計算上の中立軸の位置にひずみゲージ ($l=5\text{mm}$) を貼付し、ひずみを測定した。コンクリート表面に関しては、スパン中央の圧縮側上縁、計算上の中立軸位置およびそれらの中間位置にひずみゲージ ($l=30\text{mm}$) を、せん断スパン内にロゼットゲージを、各々貼付してひずみを測定した。また、はりの中央点でたわみを測定した。

ひずみおよびたわみの測定には、載荷を中止することなく測定するための測定・解析システムを開発しこれを用いた。この方法は動ひずみ測定器の代わりに自動デジタルひずみ測定器を用いてひずみを測定するものであり、その概要は次の通りである。

ひずみを測定する繰り返し回数を予め設定し、これをパソコンに記憶させておき、このパソコンで疲労試験機の繰り返し回数を常時検出し、所定の繰り返し回数でひずみおよびたわみを連続的に自動計測しパソコンに記録する。これらの測定値の中から、30回の測定値をランダムにサンプリングし、最大値と最小値を探し記録するとともに、プロッタでひずみ-繰り返し回

表-3 静的載荷試験で曲げ破壊した供試体の疲労試験結果

供試体 N O .	供試体 の種類	p (%) (鉄筋)	γ_w (%) (鉄筋)	Mmax		M (tfm)		載荷回数 N (#10 ⁴)	強度 $f_{o'}$	破壊モード				
				M_u	Max	Min	静的			疲労				
FBC 1	I a/d=5 d=11cm	4.69 (2D22) (A)	1.19 (D10) (A)	0.70	1.60	0.23	1.14	1.14	353A	BC	BC			
2				0.65	1.48			4.50	336A					
3				0.60	1.37			66.68	352A			BT		
4				0.55	1.25			83.75	357A			BT		
5				0.50	1.14			>200	362A			UB		
FBT 1	I a/d=5 d=11cm	2.41 (2D16) (A)	1.90 (D10) (A)	0.45	0.71	0.16	0.16	>200	362A	BT	BT			
2				0.50	0.79			113.76	349A			BT		
3				0.60	0.94			41.3	347A			BT		
4				0.60	0.94			100.00	332A			BT		
5				0.65	1.02			40.00	381A			BT		
6				0.65	1.02			48.98	348A			BT		
7				0.70	1.10			64.86	367A			BT		
8				0.70	1.10			9.02	345A			BT		
9				0.75	1.18			1.96	372A			BT		
10				0.75	1.18			14.59	362A			BC		
11				0.80	1.26			2.00	372A			BC		
12	II a/d=5 d=10cm	4.68 (2D22) (B)	1.36 (D10) (B)	0.65	1.40	0.13	0.13	>200	422C	BT	UB			
13				0.76	1.63			70.90	426C			SC		
14				0.85	1.83			9.06	428C			SC		
15				3.45	1.19			0.65	1.28			>200	376C	UB
16				(2D19)	(D10)			0.75	1.48			57.60	374C	BT
17				(B)	(B)			0.85	1.65			28.83	377C	DT
18				2.35	0.73			0.65	0.85			>200	293B	UB
19				(2D16)	(D10)			0.77	1.00			61.68	307B	DT
20				(B)	(B)			0.87	1.13			5.78	303B	SC
21				2.34	0.63			0.63	0.76			104.36	367C	BT
22				(1022)	(D10)			0.75	0.90			>200	365C	UB
23				(B)	(B)			0.85	1.03			154.00	390C	BT
24				1.73	0.53			0.65	0.68			>200	392C	UB
25				(1D19)	(D10)			0.74	0.78			107.10	386C	BT
26	(B)	(B)	0.86	0.90	57.10	391C	BT							

p: 引張り鉄筋比, γ_w : スターラップの鉄筋比, M_u : 破壊モーメント, M: 載荷モーメント, BC: 曲げ圧縮破壊, BT: 曲げ引張り破壊, SC: せん断圧縮破壊, DT: 斜め引張り破壊, UB: 未破壊, $f_{o'}$ の後の記号: コンクリート配合

数関係を出しその状況が目視できるようにした。サンプリングの回数30回は、応力波形が5 Hzであること、1回の測定・転送時間等を考慮し、実際の応力波形の最大値と最小値の95%以上の点を少なくとも1回ずつ以上測定する確率が99%以上になるように定めたものである。

3. 実験結果および考察

3.1 静的破壊実験結果

表-3, 4に示した静的破壊モードは、疲労実験に用いたのと同じ試験体で静的載荷実験を実施して求めたものである。静的破壊実験で曲げ圧縮破壊および曲げ引張破壊した試験体で測定された曲げモーメントと引張り鉄筋の応力度及びコンクリートの圧縮応力度の関係は土木学会のコンクリート示方書¹⁾(以下、学会式と略記)による計算結果とよく一致することが認められた。

破壊モーメントについて、実測値と学会式による計算値との比を求めると次のようであった。

(1) 曲げ圧縮破壊した3体の平均値は1.10、(2) 曲げ引張破壊した6体については最小が1.02、最大が1.15で平均値は1.09であった。すなわち、曲げ破壊に対し、学会式による計算値はすべて安全側にあり、その差は10%以下で実測値とよく一致することが認められた。

静的にせん断破壊した試験体の設計は示方書の改訂以前であり、スターラップは許容応力度法に基づいて曲げ破壊耐力が作用したときに必要な鉄筋量の半分を配置した。実験後、学会式で計算をし直した結果は次のようであった。1) $a/d=2.5$ の場合、学会式によるせん断耐力は5.9tf、曲げ耐力に相当するせん断力は5.5tf、これに対し、2体の破壊せん断力の実験値5.9tfであった。この結果からみて、曲げ破壊とせん断破壊がほぼ同時に発生する可能性があるが、実験ではせん断破壊と判断した。2) $a/d=5.0$ の場合、学会式によるせん断耐力は3.9tf、曲げ耐力に相当するせん断力は2.7tf、また、コンクリートのみのせん断耐力は2.2tfであった。これに対して、2体の実験

表-4 静的載荷試験でせん断破壊した供試体の疲労試験結果

供試体 NO.	供試体 の種類	ρ (%) (鉄筋)	r _w (%) (鉄筋)	Vmax		V (tf) Max Min	載荷回数 N (#10 ⁴)	強度 f _c '	破壊モード	
				V _u	V _u				静的	疲労
FS 1	I a/d=5 d=11cm	2.41 (2D16) (A)	0.34 (D10) (A)	0.45	1.26	0.25	190.55	414A	S	BT
2				0.45	1.26		>200	416A		UB
3				0.50	1.40	112.20	440A	BT		
4				0.60	1.68	67.61	407A	S		
5				0.60	1.68	10.00	436A	S		
6				0.65	1.82	47.86	401A	S		
7				0.70	1.96	16.22	458A	S		
8				0.75	2.10	4.47	426A	S		
9				0.80	2.24	0.03	401A	S		
10	III a/d=2.5 d=11cm	2.41 (2D16) (A)	0.73 (D10) (A)	0.40	2.32	0.25	>200	390A	S	UB
11				0.40	2.32		>200	406A		UB
12				0.50	2.90	46.77	416A	BT		
13				0.50	2.90	97.72	398A	BT		
14				0.55	3.19	50.12	429A	S		
15				0.55	3.19	165.96	412A	BT		
16				0.60	3.48	42.66	423A	BT		
17				0.60	3.48	34.67	435A	BT		
18				0.70	4.06	13.18	449A	S		
19				0.70	4.06	0.24	396A	S		

V_u: 静的破壊せん断力, V: 載荷せん断力, S: せん断破壊, その他: 表-3

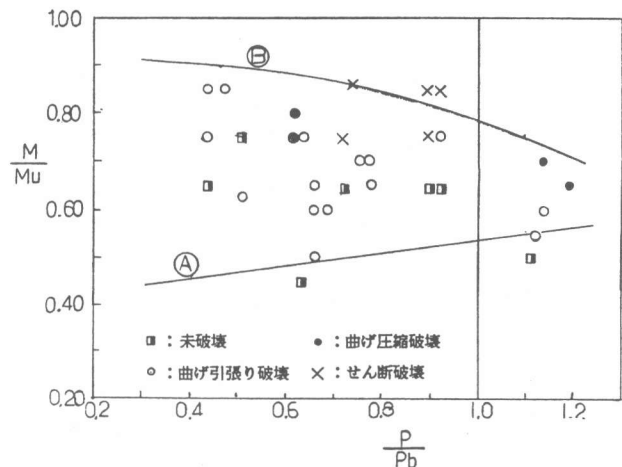


図-2 静的載荷実験で曲げ破壊した試験体の破壊モード

値は2.8tfであり、曲げ破壊の可能性が高いが破壊状況からせん断破壊と判断した。せん断耐力が低い理由としては、スターラップの間隔が28cmであることから、せん断に対してスターラップが有効に作用しなかったものと思われる。

3.2 疲労破壊モード

表-3, 4の右端に疲労破壊モードを示した。疲労破壊するまで連続して载荷したために、ひびわれの発生状況やその進行状況を詳細に観測することができなかった。したがって、ここでは疲労破壊した後の状況観察から破壊モードを判断した。

(1) 静的载荷実験で曲げ破壊した結果

表-3は静的破壊実験で曲げ圧縮破壊あるいは曲げ引張り破壊したものであるが、疲労破壊モードは静的破壊モードと異なるものがあることが分かる。図-2は、表-3の疲労破壊モードを曲げモーメント比(M/M_u)と引張り鉄筋比(p)のその釣合鉄筋比(p_b)に対する比(p/p_b)のグラフ上にプロットしたものである。図中のA線は学会式を用いて引張鉄筋の疲労繰返し回数200万回に対応するモーメントを示したものである。実験条件は供試体ごとに異なるので、その平均値で示した。A線は M/M_u の値が0.45~0.55の範囲にあり、これ以下では疲労破壊は生じないことになり、実験結果と良く対応することが認められる。B線は弾性計算で、引張鉄筋の応力度が降伏応力度に達するか、またはコンクリートの圧縮応力度が圧縮強度の0.85倍に達するときのモーメントの値を示したものである。

本実験の結果はほぼA線とB線の間であり、学会式で疲労破壊強度を推定すると、すべての場合、引張鉄筋の疲労強度で決定される。しかし、B線の近傍では曲げ圧縮破壊やせん断破壊が認められる。これは鉄筋あるいはコンクリートの応力-ひずみ関係が非線形の領域では、終局的な破壊メカニズムが複雑になるためと考えられる。

(2) 静的载荷実験でせん断破壊した結果

表-4において、 $a/d=5.0$ の破壊モードは曲げ破壊2体、他はせん断破壊である。学会式で求めたスターラップの引張応力度は、曲げ破壊した2体の場合 100 kgf/cm^2 以下であることから、引張鉄筋が疲労破壊したと考えられる。せん断破壊した試験体のスターラップの引張応力度は 1000 kgf/cm^2 以下であり、この場合もスターラップの疲労破壊は考えにくい。そこで、引張鉄筋の疲労破壊について検討すると、学会式で推定した疲労破壊回数と実験値とはほぼ対応している。静的破壊実験で前述したように、スターラップの間隔が28cmと大きいために、スターラップが有効に作用せず、引張鉄筋の疲労降伏が生じた後にコンクリートのせん断破壊が生じたものと思われる。

$a/d=2.5$ の破壊モードは、曲げ破壊とせん断破壊とが混在している。静的破壊実験で検討したように、静的なせん断耐力と曲げ耐力はほぼ等しい。学会式でスターラップの応力度を求めると、 500 (FS10)~ 1700 (FS19) kgf/cm^2 であり、この応力度では疲労破壊は生じない。しかし、スターラップの疲労耐力は、真直な鉄筋に較べて、 $2/3$ ~ $1/2$ に低下するとの報告がある。そこで、学会式で求めたスターラップの応力度を2倍にして、疲労強度を求めると、FS14~19の試験体はせん断破壊の可能性がある。一方、引張鉄筋の応力度は 1860 (FS10)~ 3250 (FS19) kgf/cm^2 であり、曲げ破壊とせん断破壊がほぼ同じ応力度で生じることがありうることを示している。

3.3 疲労強度と繰返し载荷回数の関係

3.2の検討から、表-3の疲労破壊は引張鉄筋の疲労強度によって決定されること、また、

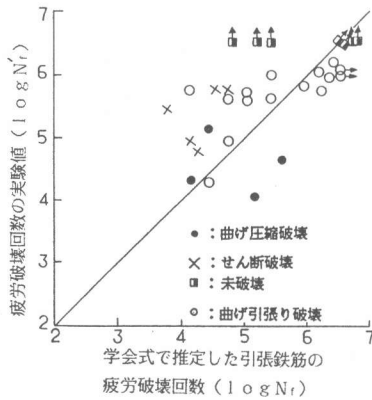


図-3 静的載荷実験で曲げ破壊した試験体の引張鉄筋の疲労破壊回数の推定値と実験値との比較

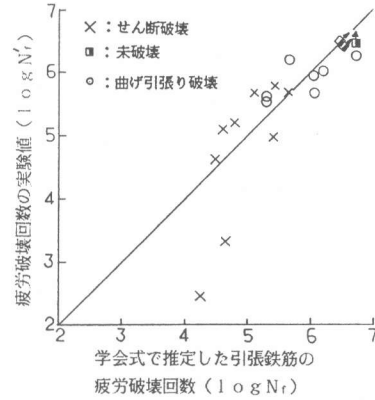


図-4 静的載荷実験でせん断破壊した試験体の引張鉄筋の疲労破壊回数の推定値と実験値との比較

表-4の場合にも疲労破壊は、引張鉄筋の疲労が原因であることが明かになった。そこで、表-3及び表-4の供試体について、学会式で求めた引張鉄筋の疲労破壊回数 N_f と疲労破壊回数の実験値 N_f' との比較を図-3及び図-4に示した。

図-3において、曲げ引張り破壊した結果については、学会式はほぼ安全側の推定値を与えることがわかる。せん断破壊と判断されたものは、いずれも実験値は推定値を上回っており、引張鉄筋が降伏した後にせん断破壊に移行したと思われる。

図-4では2体を除いて、推定値と実験値がよく対応することが認められ、引張鉄筋が降伏してせん断破壊あるいは曲げ破壊に至ったと考えられる。実験値の低い2体は、FS9とFS19であるが、引張鉄筋の応力度はそれぞれ、 3600 と 3250 kgf/cm^2 であり、降伏応力度に近かったためと考えられる。

3.4 荷重の初期から疲労破壊に至る挙動

図-5は疲労曲げ引張り破壊した試験体のはり中央部における引張鉄筋の最大ひずみ、はり中央部における圧縮縁コンクリートの最大ひずみ及びはり中央部の最大たわみ量と繰り返し載荷回数との関係の1例を示したものである。他の試験体についても同様の挙動を示すことが認められた。引張鉄筋の最大ひずみについては、載荷回数が増加してもその値はほとんど変化せず急激に破壊に至った。この現象は鉄筋だけの引張疲労挙動と同じであった。これは破壊の直前まではりの内部応力に大きな変化がないためと思われる。

圧縮縁コンクリートの最大ひずみは載荷回数の増加にともなって増加する傾向にある。この変化を大局的にみると、図に示したように2つの直線で表すことができそうである。この2直線の交点の繰り返し回数を N_y とすると、 $N \leq N_y$ ではひずみは $\log N$ に比例して増加するがその増加割合は小さい。 $N > N_y$ になるとひずみの増加割合が急に大きくなるが、この区間でもひずみは $\log N$ にほぼ比例していることが認められる。

はり中央部の最大たわみについては、圧縮縁コンクリートの最大ひずみと同様の挙動を示している。 N_y の値はひずみの場合とたわみの場合とでほぼ一致している。繰り返し回数が200万回で破壊しなかった場合にも N_y 点は認められた。この N_y 点の力学的意味は現在のところ明確ではないが、 N_y 点は引張側コンクリートにひび割れが発生し、その数やひび割れの生じている範囲が徐々に増加しある定常状態に移行する点に対応しており、鉄筋コンクリートはりの疲労挙動

を考える時の重要な限界点であると思われる。ひずみ測定のできた試験体について、 $10g N_u / 10g N_y$ の値を求めると、 $1.08 \sim 1.44$ の間にあり、その平均値は 1.24 であった。

4. 結論

単鉄筋コンクリートはりによる曲げ及びせん断疲労実験で得られた結論は以下の通りである。

(1) 静的破壊実験の結果は学会式による推定値に良く一致した。

(2) 疲労曲げ破壊は、作用モーメントが破壊モーメントの $45 \sim 55\%$ 以下では生じないことが、実験及び学会式による推定から確認された。

(3) 引張鉄筋の疲労で破壊が決まる場合でも、供試体の諸元（スターラップ量及び間隔、主筋量等）及び実験条件（作用モーメント及び作用せん断力、せん断スパン比等）によって、疲労破壊モードは種々に変化することが認められた。

(4) 载荷の初期から疲労破壊にいたる過程において、はり中央点のたわみ及び圧縮縁コンクリートの最大ひずみに明確な限界点の存在が認められた。

ここに報告した結果は、前述したようにコンクリート標準示方書が制定される以前に開始されたものであり、スターラップの計算など試験体の設計が現示方書と異なるところがあった。また、連続してひずみを測定することによる問題点、結論(4)に述べた限界点の力学的意義、スターラップの補強効果等を明かにするために、現在も実験を継続している。

【参考文献】

1) 土木学会：コンクリート標準示方書（昭和61年制定），設計編

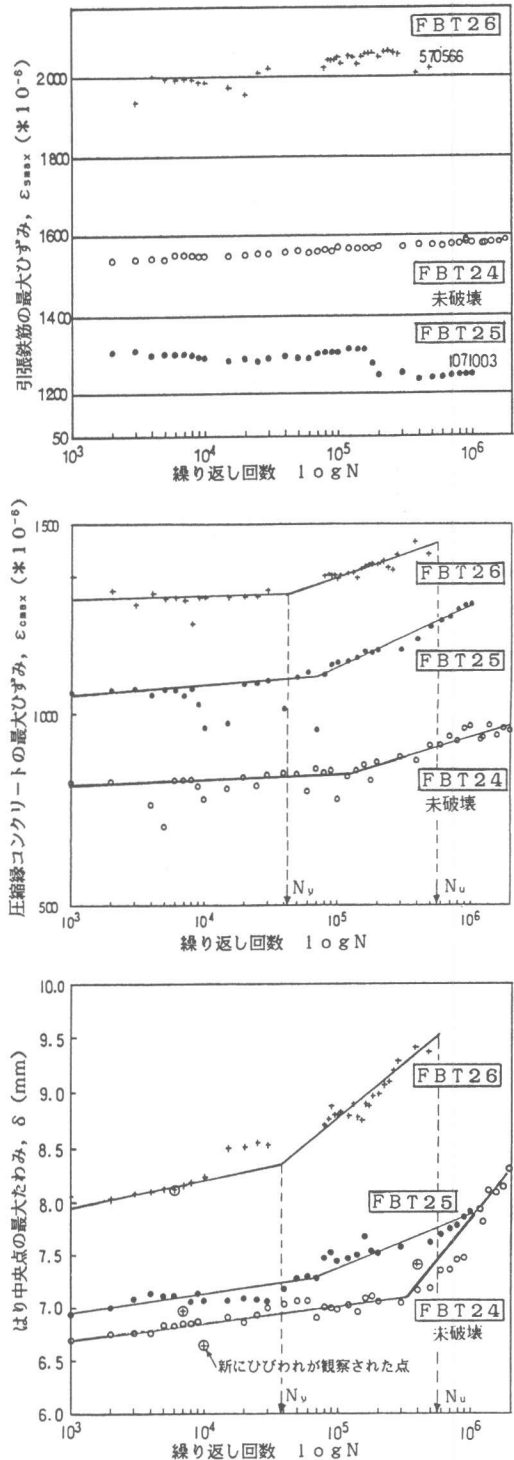


図-5 疲労曲げ引張破壊した試験体の引張鉄筋、コンクリートのひずみ及びたわみの測定結果の1例