

鉄筋コンクリートばりのせん断疲労に関する研究*

加賀美 一二三** ・ 二 木 和 夫***

三 浦 正 昭**** ・ 平 野 寛****

Study of the Shear Fatigue of Reinforced Concrete Beams

Hifumi KAGAMI, Kazuo FUTATSUKI,

Masaaki MIURA and Yutaka HIRANO

Abstract

This investigation, involving the testing specimens — 6 specimens for the steel bar under reinforced concrete beam, each 4 specimens for the steel bar over reinforced concrete beam and the deformed steel bar under and over reinforced concrete beams — subjected to 2 concentrated loads in the state of $a/d=1$ is to research for fatigue limits of reinforced concrete beam subjected to shearing repeated load.

Then, the authors described the variation of strain and deflection, and described that the judicatory standards by a/d of the failed boundary may be applied to reinforced concrete beams under repeated load as well as static load. Additionally, they described that the calculated values by the theoretical equations of deflection, bending moment and shear force agree well in the values of experiment.

Roughly speaking, the fatigue limits are thought that the steel bar under and over reinforced concrete beams are approximately 45 per cent, and the deformed steel bar under and over reinforced concrete beams are approximately 40 per cent for the failure loads of static tests.

1. 緒 言

本実験研究の目的は、せん断疲労限を振動数を毎分200回、繰返し回数を50万回および100万回として動的挙動下において考究せんとしたものである。既報¹⁾によれば、鉄筋コンクリートばりのせん断疲労限は、静的試験における破壊荷重の45%程度であると報告されている。また、これまで明確に定義されていなかった鉄筋コンクリートばりのせん断破壊およびせん断破断をFig.1のように定義した。すなわち、はりの一端両面に斜引張り応力による斜引張りひびわれが、断面の大部分に生じたときをもつてせん断破壊(shear failure)とし、せん断破断とは、その斜引張りひびわれが全断面に通つたときと、はりが破断(break down)したときの二段階とする。

さて、本研究においては、せん断破断が顕著にあら

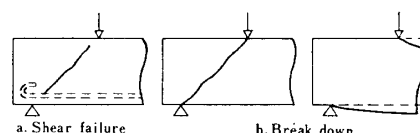


Fig.1 Definition of shear failure and break down of shear

われると考えられる a/d (a ; せん断スパン, d ; 有効高さ) が1に近い二点負荷の場合について、低鉄筋コンクリートばり (URC, under reinforced concrete beam), 丸鋼ばり (Steel bar beam) 6本, 異形ばり (Deformed steel bar beam) 4本, 計10供試体, 過鉄筋コンクリートばり (ORC, over reinforced concrete beam), 丸鋼, 異形ばり各4本, 計8供試体, 総計18供試体を造形し, スパンを120cmとして実施した。疲労試験における最高荷重は, これに先行して行なつた静的試験の破壊荷重をもととして, Table 1に示す値とし, 最低荷重は, 荷重位置の保持, はね上り防止の点から1.0tとした。

* 岡山市における土木学会中国四国支部講演会11月21日, 1967において発表

** 土木工学教室

*** 宇部興産株式会社

**** 大学院工学研究科土木工学専攻

Table 1 Maximum load and levels of load in the fatigue test

(Unit ; t)

Each terms Kind of beams		Static failure load, P_u	Fatigue test	
			Maximum load	Levels of load
Steel bar beam	URC	9.0	5.54	$0.62P_u$
		10.4	5.54	$0.53P_u$
	9.0	4.05	$0.45P_u$	
	ORC	18.1	9.06	$0.50P_u$
15.5		7.30	$0.47P_u$	
Deformed steel bar beam	URC	12.0	5.40	$0.45P_u$
		13.0	5.40	$0.42P_u$
	ORC	15.8	7.65	$0.48P_u$
		15.2	5.74	$0.38P_u$

せん断疲労限界は破壊荷重、ひずみ、たわみなどから検討した。まず、丸鋼URCは、最高荷重を静的試験の破壊荷重の62%、すなわち、 $0.62P_u$ として載荷すると56万回で破壊し、 $0.45P_u$ および $0.53P_u$ の場合は、破壊荷重が静的試験の破壊荷重よりも大きくなり、ひずみは $0.45P_u$ では安定であるが、他のはりでは、いくぶん不安定であり、たわみは安定している。丸鋼ORCでは、 $0.50P_u$ として載荷すると、初期に斜ひびわれを生じ、 $0.47P_u$ の場合も、再び斜ひびわれを生じたが、ひびわれの深さが浅く破壊とみなさなくてもよい程度であり、破壊荷重は、ともに10~20%程度低下した。またひずみの変化は大きい、たわみは安定している。つぎに、異形URCおよびORCは、最高荷重を $0.38P_u$ ~ $0.48P_u$ として載荷したところ、いずれも破壊荷重がかなり低下し、ひずみの変化も大きく、たわみは安定している。

本実験においては、せん断疲労限界は、確実に定義するにはいたらなかつたが、概略的には、丸鋼URCおよびORCは、 $0.45P_u$ 程度、異形はさらに低く、ともに $0.40P_u$ 程度と思われる結果となつた。さらに、動的挙動下におけるたわみ、曲げモーメントおよびせん断力の理論式について照査し、良好な結果をえた。

2. 実験供試体および実験方法

Table 2 Designed proportion of concrete

Max, size of, coarse aggregate, mm	Slump, cm	Air, %	W, kg	C, kg	w/c, %	s/a, %	S, kg	G, kg
20	3±1	2	185	223	83	38.7	753	1,195

セメントは普通ポルトランドセメント、骨材は粗骨材として碎石、細骨材として一般砂を用い、コンクリートの配合は、Table 2のごとくであり、 $\sigma_{ck} = 150\text{kg/cm}^2$ である。

鉄筋は、普通丸鋼と異形丸鋼とを使用し、公称径は、各々13mm, 12.7mm, 降伏点応力度は、各々2,995kg/cm², 3,740kg/cm²である。はり供試体の設計図は、Fig. 2のごとくである。

はり供試体の型わくは、底面鋼板、側面木製とし、養生は、打込み後2日目に脱型、3日目に水中養生に移し、6週間続けた後、試験前2週間を空中養生とした。ひずみ測定のためのペーパーストレインゲージの位置は、Fig. 3のようであり、はりの両側面にはり、その平均値をとつてその断面のひずみとした。

実験装置は、Photo. 1のごとき疲労試験機(30t)を用い、ひずみは増幅器を通し、ペン書きオシログラフに記録測定した。はりのスパン中央のたわみは、スチール製スケールにより測定した。また、くり返し回数が規定回数に達した後、荷重を静的破壊荷重の10%ずつ段階的に上昇し、各段階ごとに3000回のくり返し荷重を載荷して破壊せしめた。

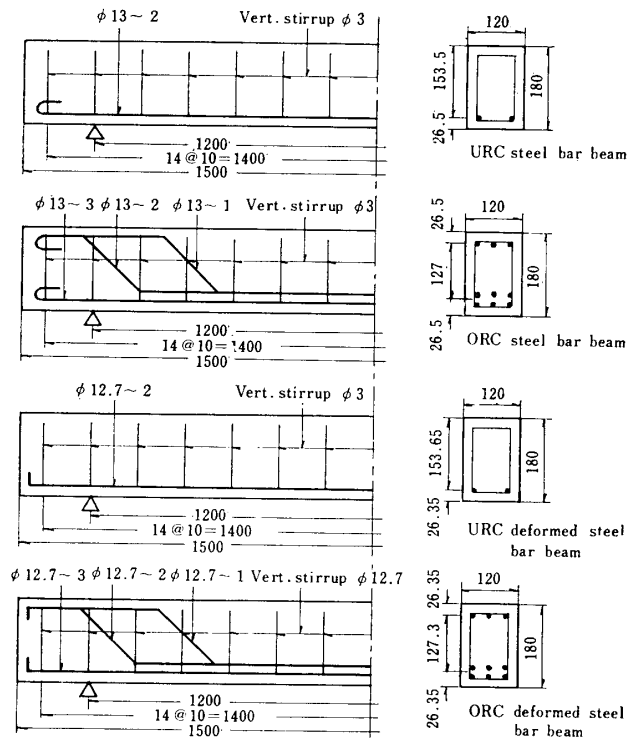


Fig.2 Details of reinforced concrete beam specimens

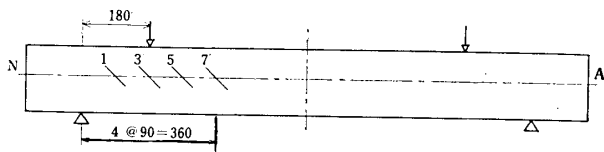


Fig.3 Positions of paper strain gauges

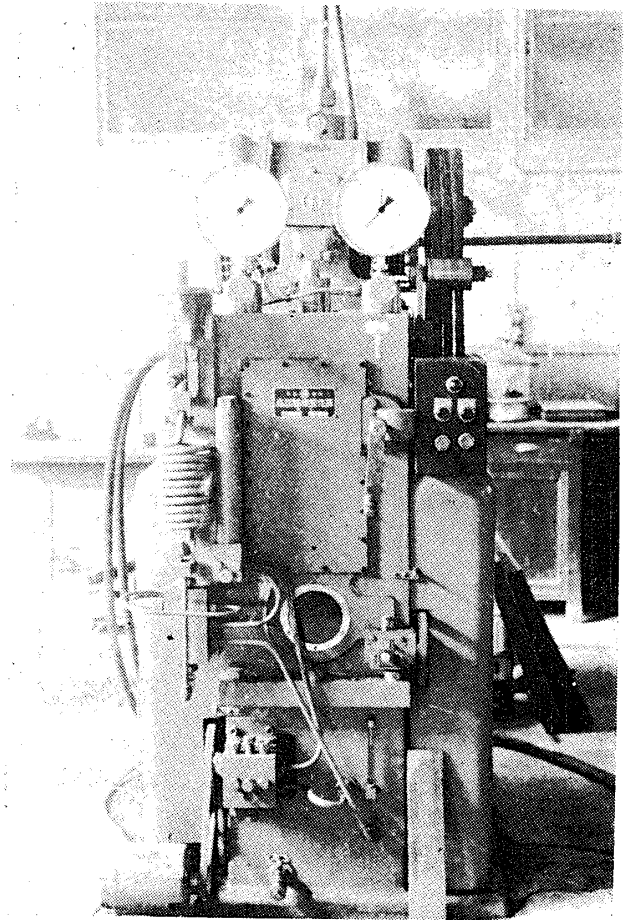


Photo.1 Experimental apparatus

3. 測定結果

3.1 圧縮試験の結果

はり供試体用コンクリートの圧縮強度を示すと、Table 3のごとくである。

Table 3 σ_{cy} for concrete specimens

Kind of beams	U R C					O R C			
	Steel bar beam			Deformed steel bar beam		Steel bar beam		Deformed steel bar beam	
Each terms	No. 1	No. 2	No. 3	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2
Kinds	No. 1	No. 2	No. 3	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2
Slump, cm	2.6	1.4	2.1	2.4	2.2	1.9	2.0	2.5	2.0
Air , %	2.2	1.8	2.2	2.1	2.1	2.1	2.2	2.0	2.1
σ_{cy} , kg/cm ²	138	155	144	185	180	146	133	145	158

3.2 供試体ばりのひびわれ状況

はり供試体のひびわれ状況は、丸鋼 URC, ORCは Photo. 2, a, b, Photo. 3, a, b, 異形 URC, ORC

は Photo. 4, a, b, Photo. 5, a, b に示すごとくである。

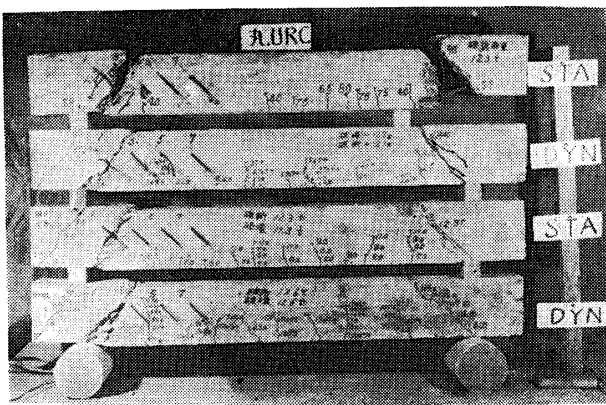


Photo.2 a Left side crack of URC steel bar beam Photo.2 b Right side crack of URC steel bar beam

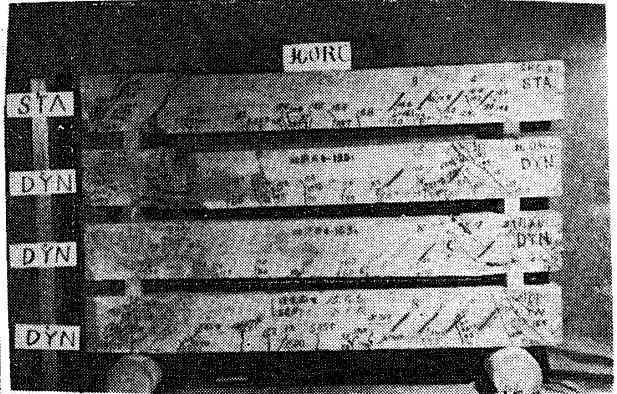
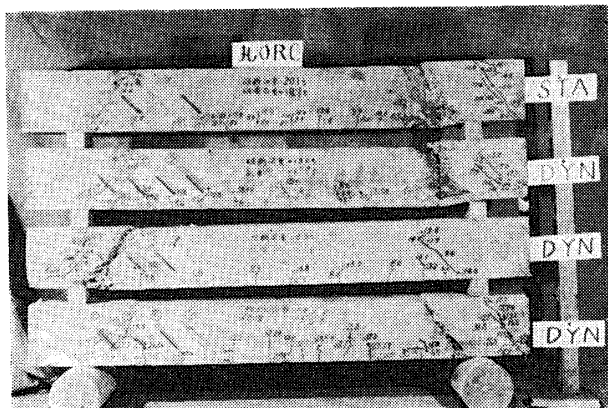


Photo.3 a Left side crack of ORC steel bar beam Photo.3 b Right side crack of ORC steel bar beam

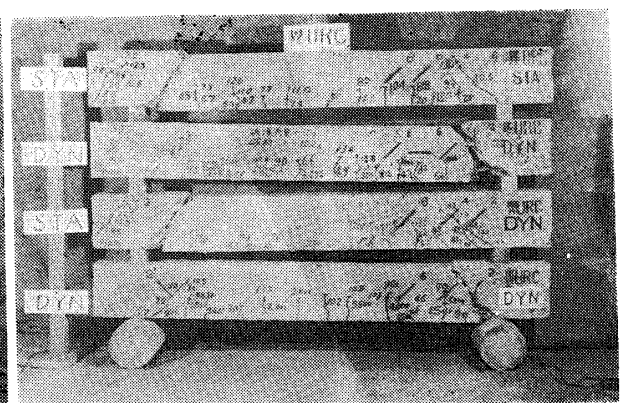


Photo.4 a Left side crack of URC deformed steel bar beam Photo.4 b Right side crack of URC deformed steel bar beam

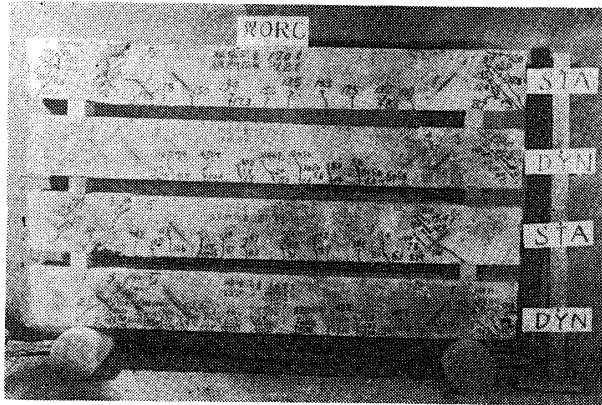


Photo.5 a Left side crack of ORC deformed steel bar beam



Photo.5 b Right side crack of ORC deformed steel bar beam

3.3 破壊および破断荷重の測定結果

破壊および破断荷重の測定結果を示すと、Table 4のごとくである。

Table 4 Loads of shear failure and break down

Each terms			Static test		Fatigue test			
			Failure load, $P_u(t)$	Break down, $P_{sd}(t)$	Failure load, $P_f(t)$	Break down $P_{fd}(t)$	Summary	
Kind of beams	No.							Levels of load, (t)
			Steel bar beam	URC	No. 1	9.0		
No. 2	10.4	12.3			11.6	12.6	$0.53P_u$	$10^6 \rightarrow$
No. 3	9.0	12.3			10.3	12.3	$0.45P_u$	$5 \times 10^5 \rightarrow$
ORC	No. 1	18.1		20.1	14.7	19.0	$0.50P_u$	$3.2 \times 10^5 \rightarrow$
	No. 2	15.5		16.3	13.9	18.1	$0.47P_u$	$10^6 \rightarrow$
Deformed steel bar beam	URC	No. 1	12.0	13.0	9.0	10.2	$0.45P_u$	$5 \times 10^5 \rightarrow$
		No. 2	13.3	15.1	9.0	10.6	$0.42P_u$	$10^6 \rightarrow$
	ORC	No. 1	15.8	21.2	12.75	15.3	$0.48P_u$	$5 \times 10^5 \rightarrow$
		No. 2	15.2	21.3	14.3	17.4	$0.38P_u$	$10^6 \rightarrow$

3.4 たわみの測定結果

はりスパン中央のたわみは、静的試験ではダイヤルゲージにより、疲労試験ではスチール製スケールによって測定した。丸鋼 URC, ORC, 異形URC, ORC ともに、ほとんど同様の測定結果を示すので、その一例を示すと、Fig. 4 a, b, Fig. 5 a, bのごとくである。

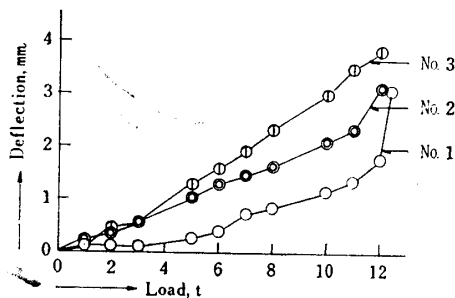


Fig.4 a Load-deflection of URC steel bar beam for static test

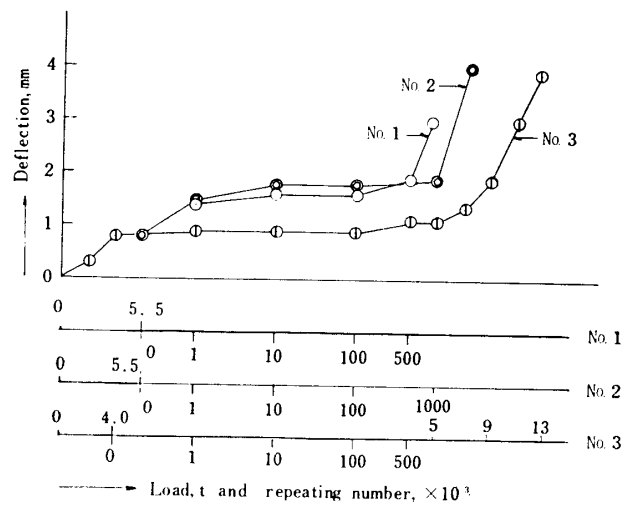


Fig.4 b Load and repeating number-deflection of URC steel bar beam for fatigue test

3.5 ひずみの測定結果

このひずみも丸鋼，異形ばりともに，たわみと同様ほとんど同傾向を示すので，その一例を示すと，Fig. 6 a, b, a', b'のごとくである。

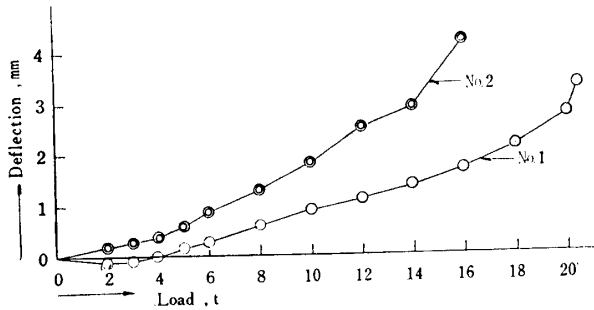


Fig. 5 a Load-deflection of ORC steel bar beam for static test

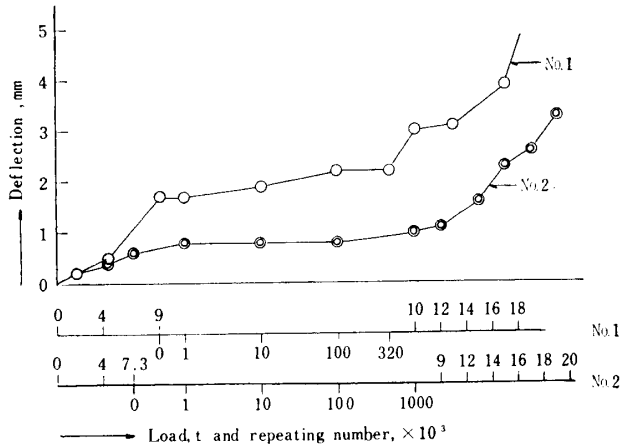


Fig. 5 b Load and repeating number-deflection of ORC steel bar beam for fatigue test

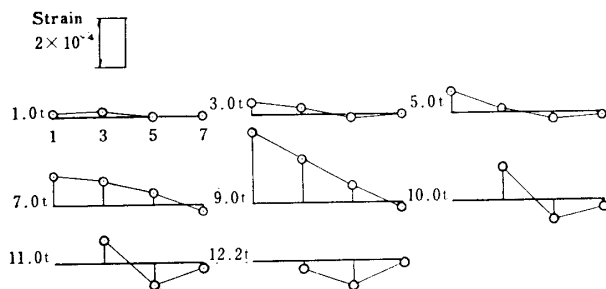


Fig. 6 a Strains of URC steel bar beam for static test (No. 2)

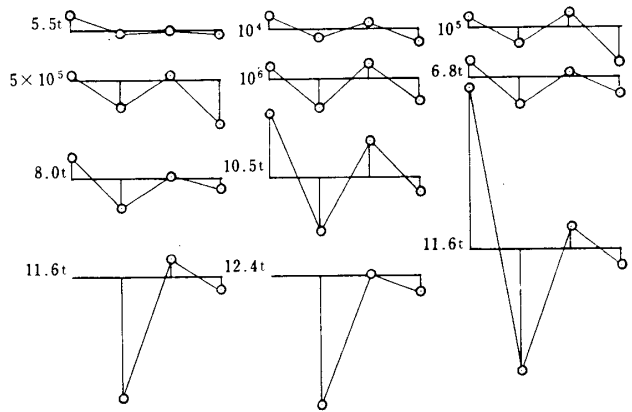


Fig. 6 b Strains of URC steel bar beam for fatigue test (No. 2)

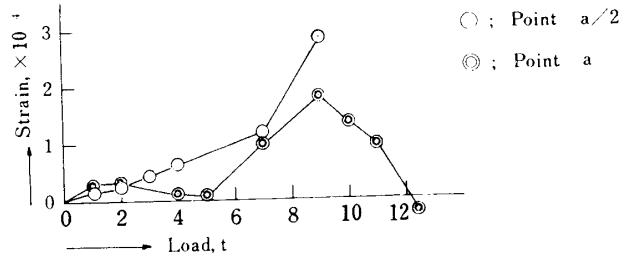


Fig. 6 a' Strains of a/2 and a of URC steel bar beam for static test (No. 2)

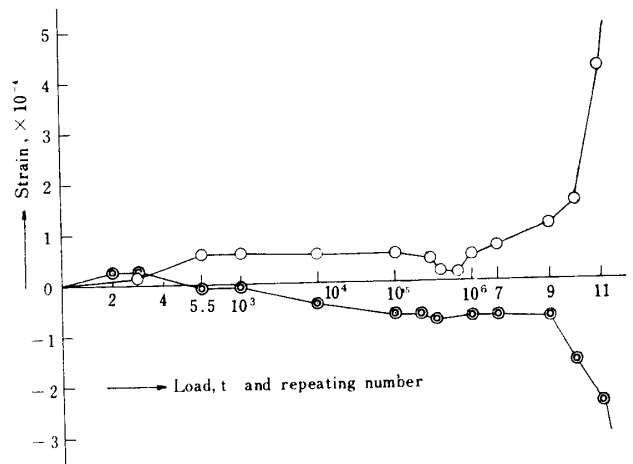


Fig. 6 b' Strains of a/2 and a of URC steel bar beam for fatigue test (No. 2)

4. 実験結果の考察

4.1 a/d による鉄筋コンクリートばりの破壊様相

の判定のくり返し荷重載荷時への適用について

既報²⁾により， $a/d=10\mu k$ ，ここに $\mu=n/(n+1)$ ，

この μ 中の n の値は，曲げ破壊の場合の塑性領域においては，コンクリートの応力分布形次数は 5 次程度，

したがって $\mu=0.834$, せん断破壊が先行する場合は, コンクリートの応力は弾性領域中であるから, その次数は1.3次程度, したがって $\mu=0.565$ と考えられる.

$$a/d \doteq 5.65k \sim 8.34k$$

ここで, せん断破壊領域は, a/d が約 $5.65k$ 以下, せん断一曲げ破壊領域は, a/d が約 $5.65k \sim 8.34k$, 曲げ破壊領域は, a/d が約 $8.34k$ 以上の場合である.

式中の k の値は, 次式より求めた.

$$URC \text{ の場合, } k = p\gamma_y/\mu, \quad \gamma_y = \sigma_{sy}/\sigma_{cy}, \quad p: \text{鉄筋比}$$

$$ORC \text{ の場合, } k = \frac{5250p + \sqrt{(5250p)^2 + 21000\mu\sigma_{cy}p}}{2\mu\sigma_{cy}}$$

その結果を示すと Table 5 のようである. 表中, S は静的試験, F は疲労試験, $S-F$ はせん断破壊を示す.

Table 5 Judgements of modes of failure of reinforced concrete beams

Kind of beams		$p, \%$	k	d, cm	a/d (Formula)	a/d (Experiment)	Judgement	Modes of failure (Experiment)	
Steel bar beam	URC	S	1.47	0.382	15.05	2.16~3.19	1.20	S-F	S-F
		F	1.44	0.375	15.35	2.12~3.13	1.17	S-F	S-F
		S	1.43	0.331	15.45	1.87~2.76	1.17	S-F	S-F
		F	1.46	0.339	15.15	1.92~2.83	1.19	S-F	S-F
		S	1.49	0.373	14.85	2.11~3.11	1.21	S-F	S-F
		F	1.47	0.368	15.05	2.08~3.07	1.20	S-F	S-F
	ORC	S	4.91	0.741	13.50	4.17~6.18	1.33	S-F	S-F
		F	4.95	0.742	13.40	4.19~6.19	1.34	S-F	S-F
		S	4.91	0.755	13.50	4.27~6.30	1.33	S-F	S-F
		F	4.88	0.754	13.60	4.26~6.29	1.32	S-F	S-F
Deformed steel bar beam	URC	S	1.38	0.333	15.37	1.88~2.78	1.17	S-F	S-F
		F	1.40	0.338	15.07	1.91~2.82	1.19	S-F	S-F
		S	1.36	0.339	15.57	1.92~2.83	1.16	S-F	S-F
		F	1.38	0.344	15.37	1.94~2.87	1.17	S-F	S-F
		S	4.59	0.731	13.83	4.13~6.10	1.30	S-F	S-F
	ORC	F	4.62	0.732	13.73	4.14~6.10	1.31	S-F	S-F
		S	4.66	0.721	13.63	4.07~6.01	1.32	S-F	S-F
		F	4.69	0.722	13.53	4.08~6.02	1.33	S-F	S-F
		S	4.66	0.721	13.63	4.07~6.01	1.32	S-F	S-F
		F	4.69	0.722	13.53	4.08~6.02	1.33	S-F	S-F

表より明らかなごとく a/d による破壊様相の判定はくり返し荷重載荷時においても成立することがわかったが, ORCがURCよりせん断破壊の様相が著しい.

4.2 ひずみに関する考察

(a) 最大ひずみの生ずる位置

静的試験の場合は, 大部分のはりにおいて, せん断スパンの中央にあたる $a/2$ の位置に最大ひずみを生じた. したがって, 静荷重載荷の場合には, 一般的に $a/2$ の点に最大ひずみを生ずるものと考えられる. つぎに, 疲労試験の場合は, 8本のはり中4本が $a/2$ の位置に, 残りの4本が a の位置に大体の傾向として最大ひずみを生じている. 4本のはりで, $a/2$ と a との間すなわち, Double shear 区間で最大ひずみが交互に現われる現象を呈した. これはくり返し荷重の影響で, せん断応力の再分配が行なわれたものと考えられる.

(b) くり返し荷重載荷時におけるひずみの変化

丸鋼ばりにおいては, URC はくり返し荷重載荷中のひずみの変化が小さく, ORC は大きい. これは, ORC は過鉄筋による応力再分配のために, ひずみの変化が大きいものと思われる. 異形ばりにおいては, URCおよびORCともにひずみの変化が著しい. これは, 異形鉄筋のふしの付着効果による応力再分配の影響のためと考えられる.

(c) 斜ひずみにおいては, URC は破壊までほぼ一定の割合にて漸増し, ORC はある限界点以後は急激に増加する. また, ともある限界点付近まではほぼ等しい. これらの実験性状は, URC は曲げ破壊が先行し, ORC は鉄筋量の関係にて曲げ抵抗が大きいいため, せん断力の影響がはりの破壊機構に大きく影響するものと考えられる.

4.3 たわみに関する考察

静的試験と疲労試験の場合, 丸鋼, 異形ばりともに URCがORCより大きいたわみを示す. すなわち, た

わみの大きいことははりとして曲げ応力度が大きく誘起されることであるから、その影響が大きくなり、URCはせん断曲げ破壊の領域に入り、ORCは断面に誘起される曲げ応力度が割合に小さいことになるので主としてせん断応力が影響してせん断破壊を示すことになると考えられる。破断時のたわみは3~4mmである。

4.4 ひびわれに関する考察

斜ひびわれは、丸鋼ばりの場合、URC、ORCともに静的試験、疲労試験とも、45°の傾斜角で生じたが、異形ばかりの場合は、斜ひびわれがスパン中央に向かって傾き、特にORCでその傾向が著しかった。これは、付着力が大きく、したがって、せん断抵抗応力が大きいため曲げに大きく影響され、中央に向かって傾斜するものと考えられる。また、曲げひびわれの長さは、静的試験時よりも、疲労試験時の方が長く中立軸をこえるものもあつた。これは、くり返し荷重の影響のために、引張り部コンクリートが塑性域に入り、中立軸が圧縮部へ移行したためと考えられる。また、丸鋼ORC、異形URC、ORCにおいて、Double shear crackの現象が現われた。これは、丸鋼URCに比してORCは、鉄筋量が多く、異形ばかりでは付着力が大きく安定であるから、斜引張り応力σ₁の影響が幅広く現われ、すなわち、くり返し荷重の影響により、ちく次、Peeling away actionによつて、いわゆるDouble shear crackの現象を生ずるものと考えられる。

4.5 破壊荷重および破断荷重に関する考察

各はり供試体の破壊および破断荷重を比較すると、Table 4より Table 6のようになる。丸鋼URCは、0.62P_uの場合には56万回で破壊したが、0.53P_uおよび

Table 6 Comparison of loads of shear failure and break down

Kind of beams	Degree of load	P _f /P _u	P _{fd} /P _{sd}	
Steel bar beam	URC	0.62P _u	—	1.03
		0.53P _u	1.12	1.02
		0.45P _u	1.14	1.00
	ORC	0.50P _u	0.81	0.95
		0.47P _u	0.90	1.11
		0.42P _u	0.69	0.70
Deformed steel bar beam	URC	0.45P _u	0.75	0.78
		0.42P _u	0.69	0.70
	ORC	0.48P _u	0.81	0.72
		0.38P _u	0.94	0.82

び0.45P_uの場合は、静的破壊荷重に比して、各々12、14%の増加をした。これは、せん断破壊がコンクリートによつて支配されることからして、丸鋼URCは鉄筋量が少ないから、鉄筋が降伏点に達し、くり返し荷重を受ければ、鉄筋はひずみ効果によつて強度が上昇するので、したがって、中立軸は容易に上昇しないがはりの強度は上昇するものと考えられる。丸鋼ORCは、0.50P_uおよび0.47P_uとすると、破壊荷重が20~10%程度低下した。これは、鉄筋量が多くコンクリート断面が小さいため、圧縮部コンクリートのせん断応力の疲労により、破壊強度が低下するものと考えられる。つぎに、異形URCは、0.45P_u、0.42P_uとすると、破壊荷重が静的破壊荷重に比して、各々25、30%低下し、異形ORCでは、0.48P_u、0.38P_uに対して、各々20.6%程度破壊荷重が低下した。異形ORCの破壊荷重の低下の理由は、丸鋼ORCと同じ理由と考えられるが、異形URCの場合には、付着力が大きく均一なはりとなつて、中立軸が理論通りに上昇し、丸鋼ばりのときよりもコンクリート断面は小となり、疲労の影響により、はりの強度が低下するものと考えられる。

5. 理論式による計算とその照査

鉄筋コンクリートばりについて、運動方程式より、動的挙動下におけるたわみ値U_{dyn}³⁾、曲げモーメントM_{dyn}およびせん断力S_{dyn}を求め照査した。

まず、たわみU_{dyn}の式は運動方程式を解くことにより

$$U_{dyn} = \frac{2}{\rho l} \sum_{n=1}^{\infty} \sin^2 \frac{n\pi}{l} x \left\{ \frac{P_0}{I p_n^2} + \frac{P'_0}{A(r^2 p_n^2 - \omega^2)} \right\} \quad (1)$$

これに p_n² = n⁴π⁴E/I⁴ρ を代入して、

$$U_{dyn} = \frac{2 l^3}{EI\pi^4} P_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^4} \sin^2 \frac{n\pi}{l} x + \frac{2 l^3}{EA\pi^4} P'_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^4} \sin^2 \frac{n\pi}{l} x \frac{1}{r^2 - \omega^2/p_n^2}$$

ここで、スパン中央のたわみを考えるから、x=l/2とし、n=1, 3, 5, 7 までとると、

$$U = \frac{0.0209 l^3}{EI} P_0 + \frac{0.0206 l^3}{EA} P'_0 \left\{ \frac{1}{r^2 - \omega^2/p_1^2} + \frac{0.0123}{r^2 - \omega^2/p_3^2} + \frac{0.00160}{r^2 - \omega^2/p_5^2} + \frac{0.000416}{r^2 - \omega^2/p_7^2} \right\} \quad (2)$$

つぎに、曲げモーメントは、荷重の影響として、P₀~P₀/2、P'₀~P'₀/2とし、sin²nπx/lの項は、モーメントの求点(せん断スパン; a)と荷重の影響点として、sin nπa/lとsin nπx/lの二項に分けると、(1)式は、

$$U_{dyn} = \frac{2}{\rho l} \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{n\pi}{l} a \sin \frac{n\pi}{l} x \left\{ \frac{P_0}{2 l p_n^2} + \frac{P_0'}{2 A (r^2 p_n^2 - \omega^2)} \right\} - \frac{r^2 P_0'}{\pi E I} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi}{l} a \cos \frac{n\pi}{l} x \frac{1}{r^2 - \omega^2 / p_n^2}$$

2階微分を求めると,

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = - \frac{l P_0}{\pi^2 E I} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \sin \frac{n\pi}{l} a \sin \frac{n\pi}{l} x - \frac{l r^2 P_0'}{\pi^2 E I} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \sin \frac{n\pi}{l} a \sin \frac{n\pi}{l} x \frac{1}{r^2 - \omega^2 / p_n^2}$$

$M = -EI \partial^2 u / \partial x^2$ より

$$M_{dyn} = \frac{l P_0}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \sin \frac{n\pi}{l} a \sin \frac{n\pi}{l} x + \frac{l r^2 P_0'}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \sin \frac{n\pi}{l} a \sin \frac{n\pi}{l} x \frac{1}{r^2 - \omega^2 / p_n^2}$$

これに, $x=a$ を代入すると,

$$M_u = \frac{l}{\pi^2} P_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \sin^2 \frac{n\pi}{l} a + \frac{l}{\pi^2} P_0' r^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \sin^2 \frac{n\pi}{l} a \frac{1}{r^2 - \omega^2 / p_n^2}$$

$= 120cm, a=18cm$ を代入

$$M_u = 6.5 P_0 + 12.2 P_0' r^2 \left\{ \frac{0.206}{r^2 - \omega^2 / p_1^2} + \frac{0.164}{r^2 - \omega^2 / p_2^2} + \frac{0.103}{r^2 - \omega^2 / p_3^2} + \frac{0.0565}{r^2 - \omega^2 / p_4^2} \right\} \quad (3)$$

同様に, せん断力は, (1)式の3階微分を求めて,

$$\frac{\partial^3 u}{\partial x^3} = - \frac{P_0}{\pi E I} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi}{l} a \cos \frac{n\pi}{l} x$$

$S = -EI \partial^3 u / \partial x^3$ より,

$$S_{dyn} = \frac{P_0}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi}{l} a \cos \frac{n\pi}{l} x + \frac{r^2 P_0'}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi}{l} a \cos \frac{n\pi}{l} x \frac{1}{r^2 - \omega^2 / p_n^2}$$

これに, $x=a=18cm, l=120cm$ を代入して,

$$S_u = 0.396 P_0 + 0.319 P_0' r^2 \left\{ \frac{0.809}{r^2 - \omega^2 / p_1^2} + \frac{0.476}{r^2 - \omega^2 / p_2^2} + \frac{0.103}{r^2 - \omega^2 / p_3^2} - \frac{0.147}{r^2 - \omega^2 / p_4^2} \right\} \quad (4)$$

式中, $P_0 = (P_2 + P_1) / 2$

$$P_0' = (P_2 - P_1) / 2$$

P_2, P_1 ; 各々最高荷重および最低荷重

r ; 断面2次半径

l ; 鉄筋コンクリートばりの断面2次モーメント

A ; 鉄筋コンクリートばりの断面積

ω ; 振動数

E ; ヤング係数

ρ ; コンクリートの単位重量

(2), (3), (4)式から計算した結果を示すと, Table 7, 8 のようである.

Table 7 Calculated values of U

Kind of beams	URC steel bar beam		ORC steel bar beam		URC deformed steel bar beam		ORC deformed steel bar beam		
	Each terms								
Levels of load		0.62 P_u	0.53 P_u	0.50 P_u	0.47 P_u	0.45 P_u	0.42 P_u	0.48 P_u	0.38 P_u
Repeating number		35	10.8	15	5.5	3	2.5	35.6	15
A_s , cm ²		$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^3$	$\times 10^4$	$\times 10^4$
bd , cm ²		2.65	2.65	7.96	7.96	2.54	2.54	7.62	7.62
p , %		184	182	161	163	181	184	165	162
ρ , %		1.44	1.46	4.95	4.88	1.40	1.38	4.62	4.69
c_{cy} , kg/cm ²		138	155	146	133	185	180	145	158
σ_{sy} , kg/cm ²		2,995	2,995	2,995	2,995	3,740	3,740	3,740	3,740
k		0.553	0.500	0.798	0.809	0.491	0.507	0.789	0.779
I , cm ⁴		5,171	4,710	6,076	6,614	4,707	4,992	6,734	6,373
A , cm ²		178	164	276	331	171	177	330	339
E , ($\times 10^5$) kg/cm ²		2.35	2.12	2.00	2.05	2.21	2.21	2.02	2.17
P_1 , kg		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
P_2 , kg		5,450	5,450	9,060	7,300	5,400	5,400	7,650	5,740
First value of eq. (2)		0.096	0.117	0.150	0.111	0.111	0.105	0.115	0.088
Second value of eq. (2)		0.098	0.127	0.243	0.184	0.120	0.112	0.192	0.137
U (Equation), cm		0.194	0.244	0.393	0.295	0.231	0.217	0.307	0.225
U_0 (Experiment), cm		0.190	0.181	0.220	0.080	0.100	0.120	0.090	0.130
U/U_0		1.02	1.35	1.79	3.69	2.31	1.81	3.41	1.73

Table 8 Calculated values of M_a and S_a

Kind of beams Each terms	URC steel bar beam		ORC steel bar beam		URC deformed steel far beam		ORC deformed steel bar beam	
Levels of load	$0.62P_u$	$0.53P_u$	$0.50P_u$	$0.47P_u$	$0.45P_u$	$0.42P_u$	$0.48P_u$	$0.38P_u$
Repeating number	19.7 $\times 10^4$	13.3 $\times 10^4$	6.3 $\times 10^4$	2.5 $\times 10^4$	7.6 $\times 10^4$	9.3 $\times 10^4$	13.3 $\times 10^4$	10 $\times 10^4$
I , cm ⁴	5,096	4,684	5,348	6,598	4,637	4,972	6,734	6,288
A , cm ²	130	133	223	312	145	173	329	291
First value of eq. (3)	20,960	20,960	32,700	26,980	20,800	20,800	28,110	21,910
Second value of eq. (3)	16,440	17,020	35,560	29,260	17,010	17,520	31,930	21,070
M_a (Equation), kg. cm	37,400	37,980	68,260	56,240	37,810	38,320	60,040	42,980
M (Experiment), kg. cm	49,050	49,050	81,540	65,700	48,600	48,600	68,850	51,660
M_a/M	0.76	0.77	0.84	0.86	0.78	0.79	0.87	0.83
First value of eq. (4)	1,277	1,277	1,992	1,643	1,267	1,267	1,713	1,335
Second value of eq. (4)	1,072	1,127	2,534	2,136	1,143	1,189	2,351	1,512
S_a (Equation), kg	2,349	2,404	4,526	3,779	2,410	2,456	4,064	2,847
S (Experiment), kg	2,725	2,725	4,530	3,650	2,700	2,700	3,825	2,870
S_a/S	0.86	0.88	1.00	1.04	0.89	0.91	1.06	0.99

Table 7, 8からわかるように、動的挙動下における理論式によるたわみ、曲げモーメントおよびせん断力の値は、実測値とほぼ一致する結果をえた。

6. 結 言

本実験ならびに理論研究の結果、えられた要項は、つぎのごとくである。

(1) 静的試験に適用された a/d の理論は、動的挙動下におけるはりの破壊機構にも適用できる。本実験では、すべてせん断破壊を示した。

(2) 最大ひずみの生ずる位置は、静的試験では $a/2$ 点であるが、疲労試験では $a/2$ と a との間の Double shear 区間に生ずることもある。動的挙動下におけるひずみの変化は、丸鋼 URC は構造機構上の関係上小さいが、ORC は応力再分配、特に、異形ばりでは付着効果などの要因も加わって、ひずみの変化が大きい。

(3) 斜ひびわれについては、丸鋼 URC を除く丸鋼 ORC、異形 URC、ORC において、Double shear crack の現象などのために幅広いひびわれを生ずる傾向がある。

(4) 疲労試験における破壊荷重は、静的破壊荷重に

対して、丸鋼 URC は10%程度増大したが、他の3種のほうでは低下した。

(5) 動的挙動下におけるたわみ、曲げモーメントおよびせん断力の誘導理論式は、実測値とほぼ一致することが立証できた。

以上が研究結果であるが、本実験においては、せん断疲労限は、確実に定義するにはいたらなかつたが、概略的には、丸鋼ばりは45%程度と思われるが、異形ばりはさらに低く、40%程度と考えられ、このことは、構造設計の原則として注意を要するものと思われる。

この実験を行なうにあたり、ご協力いただいた長谷川博氏、久保一(神戸市)、原暢彦(兵庫県)両君に、深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 加賀美一二三; 土木学会論文集, 137 (1967).
- 2) 加賀美一二三; 土木学会論文集, 92 (1963).
- 3) 加賀美一二三; セメント技術年報, XIX (1965).
- 4) Chang, T. S., Kesler, C. E.; ACI 29, No.12 (1958).

(昭和43年2月20日)