

鉄筋コンクリートばりのせん断疲労に関する研究

—過鉄筋コンクリートばりについて—

加賀美 一二三*・三浦 正 昭**

平野 寛**・有富 範 伊**

Study of the Shear Fatigue of Reinforced Concrete Beams

— Over Reinforced Concrete Beam—

Hifumi KAGAMI, Masaaki MIURA

Yutaka HIRANO and Noriyoshi ARITOMI

Abstract

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

As the last report, the shearing fatigue limits of the steel and deformed steel bar over reinforced concrete beams are thought to be approximately 45 percent for the static failure loads from N-S curve and the variations of strain, etc.

1. 緒 言

前報^①において低鉄筋コンクリートばりについて報告したが、本報告は、さらに過鉄筋コンクリートばり (Over reinforced concrete beam) について報告するものである。本実験も前回と同様に、せん断破壊が顕著に現われると考えられる a/d が 1 に近い 2 点負荷とし、丸鋼過鉄筋コンクリートばり (Steel bar over reinforced concrete beam)、異形過鉄筋コンクリートばり (Deformed steel bar over reinforced concrete beam) 各 6 供試体計 12 供試体を造形し、スパン 120cm、強制力の振動周期 rpm200 にて最低荷重は 1t とし、最高荷重は先行して実施した静的試験の破壊荷重を基として決定し疲労試験を実施した。本研究においても、既報の低鉄筋コンクリートばりの場合と同様に N-S 曲線、ひずみの変化などから、せん断疲労限界は丸鋼および異形過鉄筋コンクリートばりともくり返し回数 100 万回において、静的破壊荷重の 45% 程

度と認められた。さらに、たわみ、ひずみ、ひびわれおよび破壊、破断荷重より鉄筋コンクリートばりの破壊機構を考究し、静荷重載荷の場合に適用された a/d による鉄筋コンクリートばりの破壊様相の判定理論が、動荷重載荷の場合にも適用できることを立証し、またはりの運動方程式よりすでに誘導している動的挙動下におけるたわみ値、曲げモーメント値およびせん断力値を計算し照査したものである。

2. 実験供試体および実験方法

2.1 実験供試体

セメントは普通ポルトランドセメントを用い、骨材は、碎石粗骨材と一般砂にて、 $\sigma_{ck}=150\text{kg/cm}^2$ で、はり供試体用コンクリートの示方配合は Table 1 のごとくである。

鉄筋は普通丸鋼は公称径 13mm、異形丸鋼は公称径 12.7 mm のもので、降伏点応力度はおのおの 2995, 3740 kg/cm^2 である。はり供試体の設計図は

*土木工学教室

**大学院工学研究科土木工学専攻

Fig. 1のごとくである.

Table 1 Designed proportion of concrete

Maximum dimension of coarse aggregate mm	Slump cm	Air %	W kg/m ³	C kg/m ³	w/c %	s/a %	S kg/m ³	G kg/m ³
20	3±1	2	185	223	83	43	791	1102

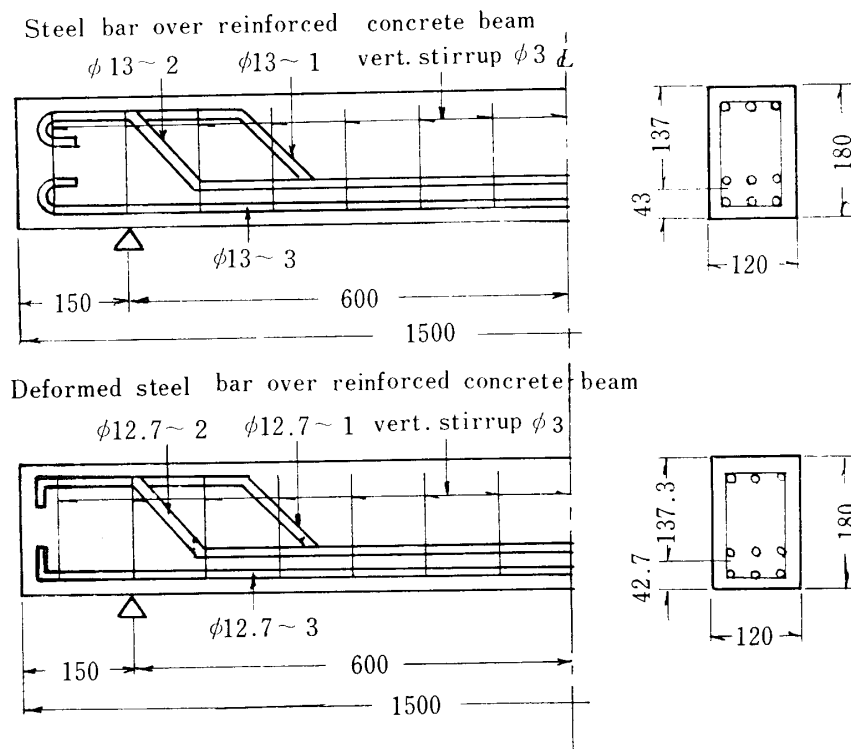


Fig. 1 Details of reinforced concrete beam specimens

はり供試体の型わくは底面、側面とも鋼板とし、コンクリート打込み後外部振動機によって2ヶ所、5～6秒の振動を与え締め固めた。また、各はり供試体ごとに圧縮試験用として、3本の円筒供試体を作成した。養生は8週間の水中養生後、試験前2週間を空中養生とした。

2・2 測定方法

実験装置はPhoto. 1のごときアムスラー型疲労試験機(30t)を用い、各荷重のひずみは、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、疲労試験では鋼製スケールにより測定した。

ひずみ測定のための paper strain gauge の位置はFig. 2のようにはり供試体の両側面に接着し、その平均値をとってその断面のひずみとした。

2・3 実験方法

振動周期 rpm200 のくり返し荷重を載荷し、最低荷重は1t、最高荷重は先行して実施した静的試験の破壊荷重 P_u を基にして、Table 2 に示すような荷重段



Photo. 1 Experimental apparatus

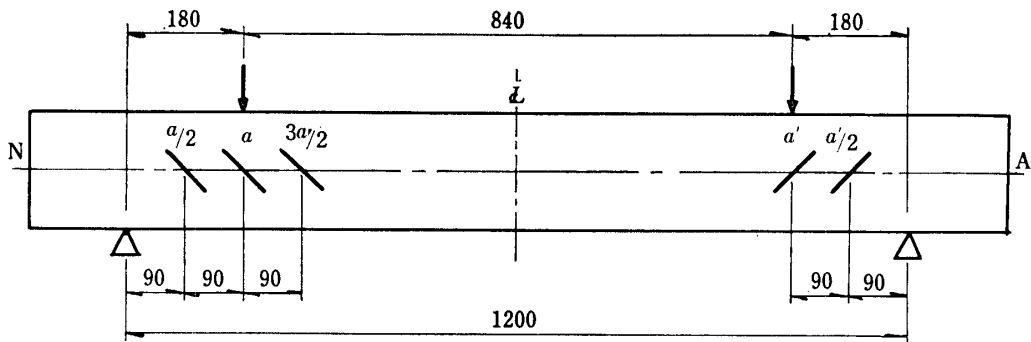


Fig. 2 Positions of Paper strain gauges

階として疲労試験を実施した。また、くり返し荷重載荷時にせん断破壊を生じたはりにはただちに荷重を上昇

し破断せしめ、破壊を生じないよりは100万回のくり返し荷重載荷後、同様に動的に破断せしめた。

Table 2 Load levels in the fatigue test

Kind of beams		Load levels (<i>t</i>)	Upper load (<i>t</i>)
Over reinforced concrete beam	Steel bar beam	S	Static failure load, $P_u = 16.0$
		1	$0.75P_u$ 12.0
		2	$0.72P_u$ 11.5
		3	$0.50P_u$ 8.0
		4	$0.45P_u$ 7.2
	Deformed steel bar beam	5	$0.72P_u$ 11.5
		S	Static failure load, $P_u = 16.0$
		1	$0.78P_u$ 12.5
		2	$0.70P_u$ 11.2
		3	$0.66P_u$ 10.5
4	$0.59P_u$ 9.4		
5	$0.45P_u$ 7.5		

3. 測定結果

3・1 はり供試体用コンクリートの圧縮強度

はり供試体用コンクリートの圧縮強度を示すと、Table 3のとおりである。

3・2 はり供試体の破断荷重と破壊荷重

各はり供試体の破断荷重と破断荷重を示すと、Table 4のとおりである。

3・3 たわみの測定結果

はりスパン中央におけるたわみの測定結果の一例として、静的試験の場合と疲労試験における荷重段階が

Table 3 σ_{cy} of concrete specimens

Kind of beams	Over reinforced concrete beam											
	Steel bar beam						Deformed steel bar beam					
	S	1	2	3	4	5	S	1	2	3	4	5
σ_{cy} , kg/cm ²	—	179	177	204	169	196	201	187	182	180	189	185

Table 4 Failure loads and break down loads

Kind of beams		Load levels		Repeating number	Load of diagonal crack(t)	Failure load (t)	Break down load (t)
Over re-inforced concrete beam	Steel bar	Static test	S	—	7.0	16.0	21.1
		$0.75P_u$	1	3,300	7.6	12.0	17.2
		$0.72P_u$	2	1×10^4	10.7	11.5	16.2
		$0.50P_u$	3	100×10^4	7.0	14.3	18.7
		$0.45P_u$	4	100×10^4	7.2	12.8	16.0
	Deformed steelbar	$0.72P_u$	5	8.5×10^4	10.7	11.5	18.7
		Static test	S	—	9.6	16.0	22.6
		$0.78P_u$	1	3,000	9.5	12.5	16.5
		$0.70P_u$	2	1×10^4	9.0	11.2	16.4
		$0.66P_u$	3	2×10^4	8.1	10.5	16.9
	$0.59P_u$	4	100×10^4	9.0	14.8	16.5	
	$0.45P_u$	5	100×10^4	7.2	15.8	18.1	

$0.45P_u$ の場合とを示すと, Fig. 3, a, bのとおりである.

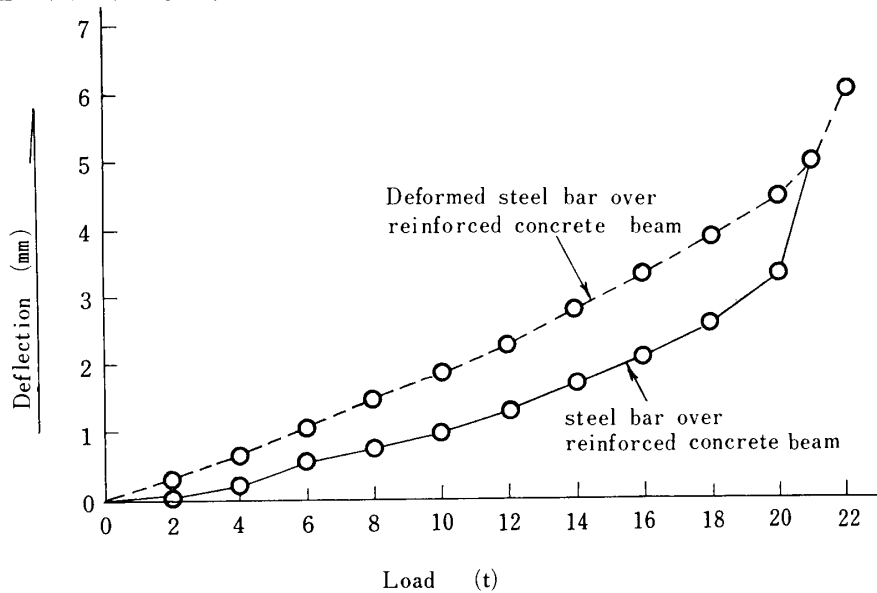


Fig. 3,a Load-deflection of over reinforced concrete beams for static test.

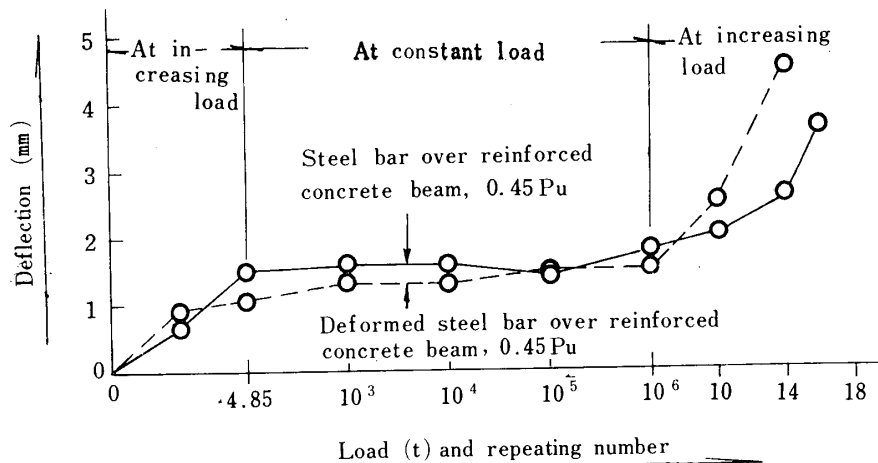


Fig. 3,b Load and repeating number—deflection of over reinforced concrete beam for fatigue test

Measured points of strains

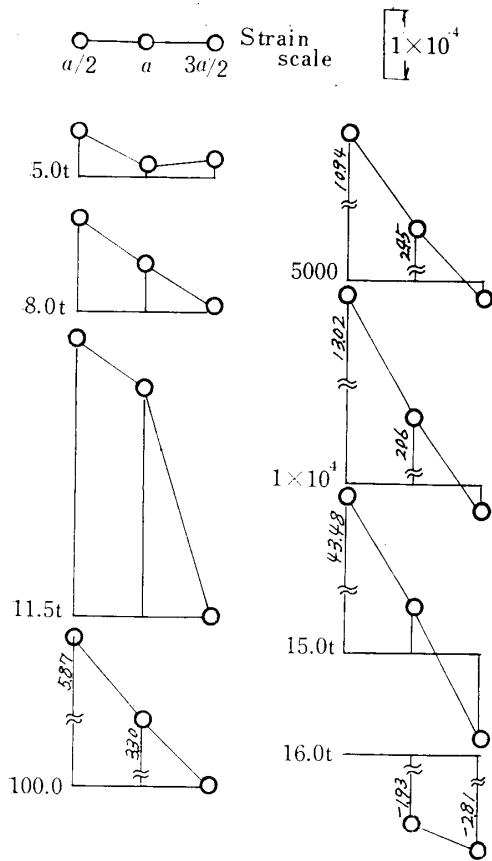


Fig. 4,a Strains of the steel bar over reinforced concrete beam, $0.72P_u$ for fatigue test

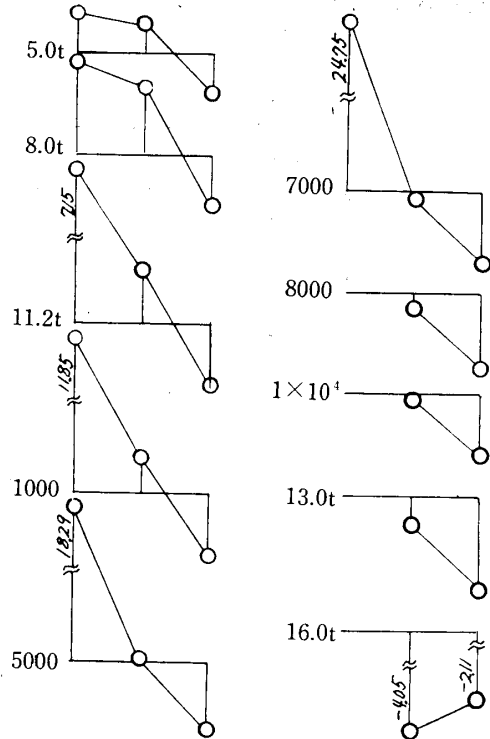


Fig. 4,b Strains of the deformed steel bar over reinforced concrete beam, $0.70P_u$ for fatigue test

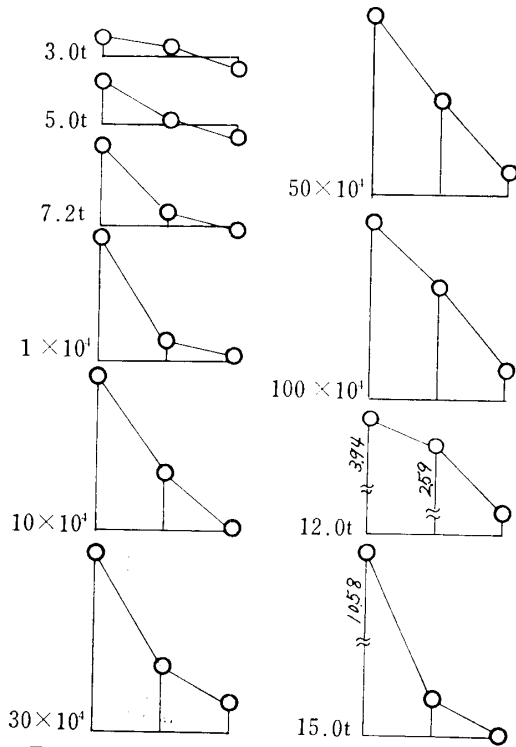


Fig. 5,a Strains of the steel bar over reinforced concrete beam, $0.50P_u$ for fatigue test

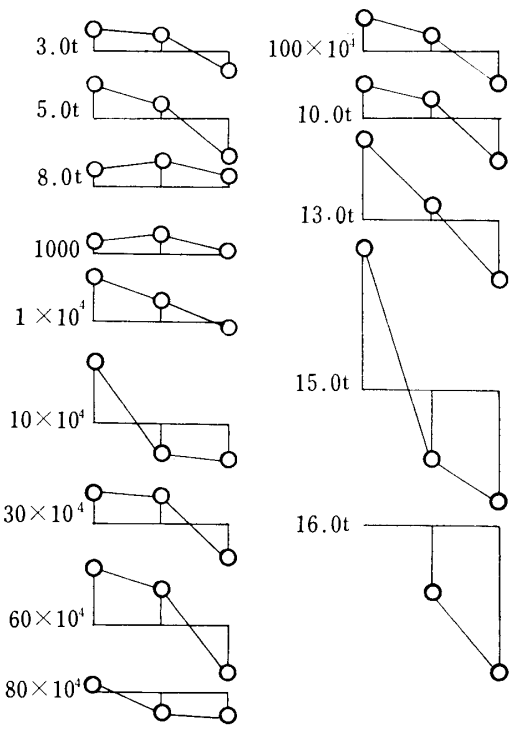


Fig. 5,b Strains of the deformed steel bar over reinforced concrete beam, $0.45P_u$ for fatigue test

3・4 ひずみの測定結果

ひずみの測定結果の一例を示すと、Fig. 4, a, b, Fig. 5 a, bのとおりである。また、縦軸にひずみ、横軸に荷重およびくり返し回数をとって、丸鋼過鉄筋

コンクリートばりの $0.50P_u$ と異形過鉄筋コンクリートばりの $0.45P_u$ の場合のひずみの変化を示すと、Fig. 6, a, bのとおりである。

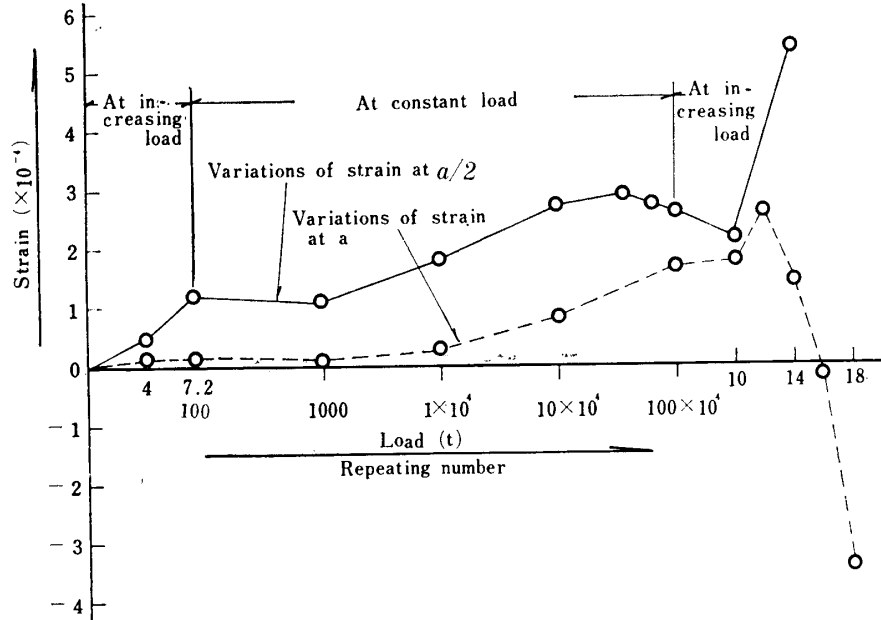


Fig. 6,a Variations of strain at $a/2$ and a of the steel bar over reinforced concrete beam, $0.50P_u$ for fatigue test

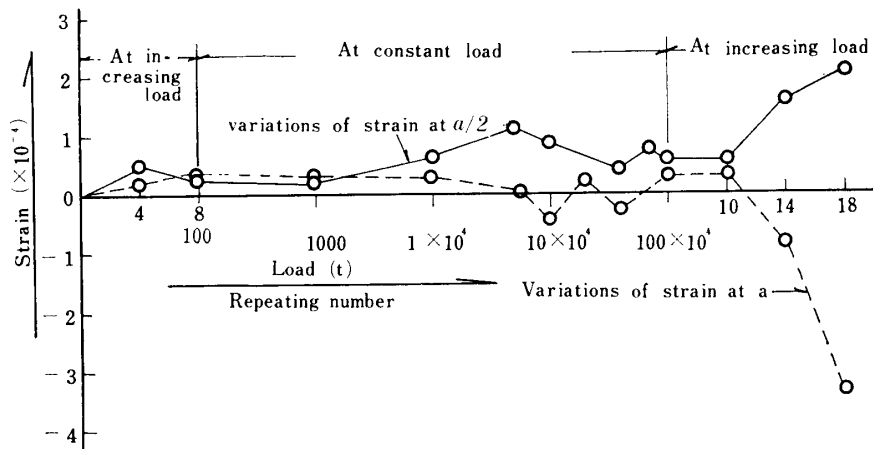
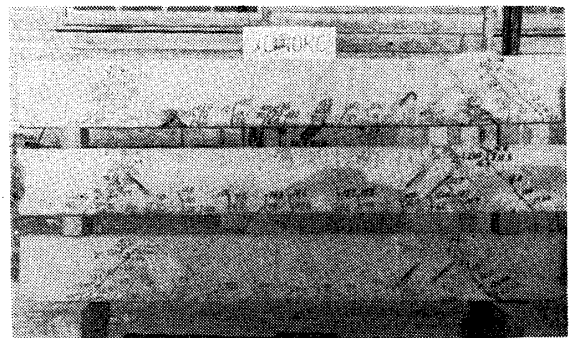
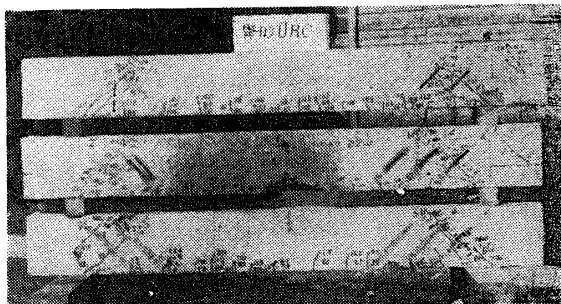


Fig. 6,b Variations of strain at $a/2$ and a of the deformed steel bar over reinforced concrete beam, $0.45P_u$ for fatigue test

3・5 はり供試体のひびわれ状況

はり供試体のひびわれ状況を示すと、Photo. 2, a,

bおよび Photo. 3, a, bとおりである



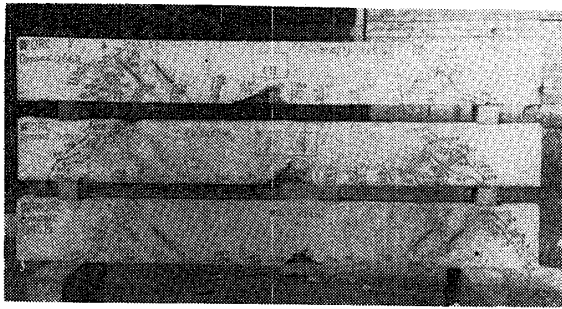


Photo. 2,a Left side crack of the steel bar over reinforced concrete beams

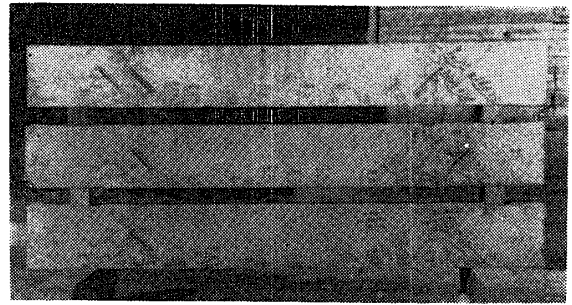


Photo. 2,b Right side crack of the steel bar over reinforced concrete beams

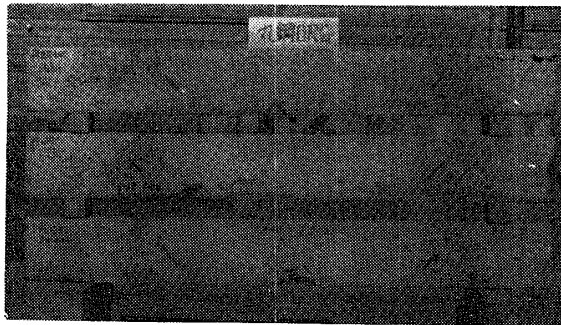


Photo. 3,a Leftside crack of the deformed steel bar over reinforced concrete beams

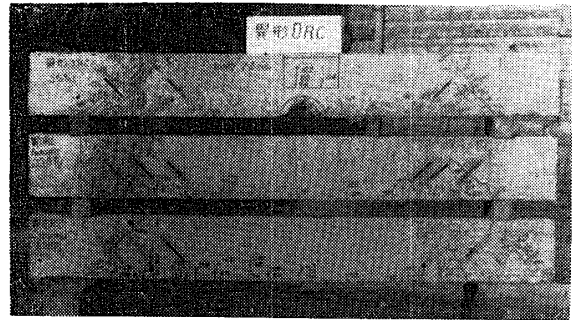


Photo. 3,b Right side crack of the deformed steel bar over reinforced concrete beams

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¹⁾のくり返し荷重載荷の場合への適用について

過鉄筋コンクリートばりについて、静的載荷の場合に適用された a/d による破壊様相の判定を、本疲労試験の場合に適用すると、Table 5のようになる。表中S-Fはせん断破壊を表す。

Table 5 から明らかなごとく、静的載荷の場合に適用された a/d による破壊様相の判定は、くり返し荷重載荷の場合の過鉄筋コンクリートばりの破壊機構にも適用できる。

4・2 たわみに関する考察

静的試験の場合、Fig.3, a からわかるように、異形

過鉄筋コンクリートばりの方が、丸鋼過鉄筋コンクリートばりより大きいたわみを示すが、疲労試験においては、Fig. 3, bのように同荷重段階 ($0.45P_u$) において、両はりとも同程度のたわみを示した。また、前報の低鉄筋コンクリートばりに比べて、過鉄筋コンクリートばりは主鉄筋量の関係で小さいたわみを示した。これは過鉄筋コンクリートばりは断面に誘起される曲げ応力度が割合に小さいこととなるので、主としてせん断応力が影響して、せん断破壊の様相を示すことになると考えられる。また、破断直前のたわみは4～5 mm程度である。

4・3 ひびわれに関する考察

4・3・1 曲げひびわれの分布様相

曲げひびわれの間隔は、異形過鉄筋コンクリートばりではほぼ等間隔に生じ、そのひびわれ長は、両はり

Table 5 Judgements of modes of failure of reinforced concrete beams

Kind of beams		p (%)	k	a/d (Formula)	d (cm)	a/d (Exp- eriment)	Judge- ment	Modes of failure	
Over reinforced concrete beam	Steel bar beam	Static test	4.9	0.708	4.00~5.90	13.50	1.33	S-F	S-F
		0.75 P_u 1	4.9	0.709	4.01~5.91	13.60	1.32	S-F	S-F
		0.72 P_u 2	4.9	0.701	3.96~5.85	13.50	1.33	S-F	S-F
		0.50 P_u 3	4.8	0.681	3.85~5.68	13.70	1.31	S-F	S-F
		0.45 P_u 4	5.0	0.721	4.07~6.01	13.30	1.35	S-F	S-F
	0.72 P_u 5	4.9	0.694	3.92~5.79	13.60	1.32	S-F	S-F	
	Defomed steel bar beam	Static test	4.7	0.683	3.86~5.70	13.53	1.33	S-F	S-F
		0.78 P_u 1	4.7	0.695	3.93~5.80	13.53	1.33	S-F	S-F
		0.70 P_u 2	4.7	0.699	3.95~5.83	13.65	1.32	S-F	S-F
		0.66 P_u 3	4.7	0.701	3.96~5.85	13.65	1.32	S-F	S-F
		0.59 P_u 4	4.6	0.690	3.90~5.75	13.73	1.31	S-F	S-F
	0.45 P_u 5	4.7	0.697	3.94~5.81	13.63	1.32	S-F	S-F	

とも主鉄筋量の関係で短かい。また、ひびわれ長の大きい曲げひびわれがスパン中央付近よりも支点近くに生じる傾向が認められた。これは曲げモーメントおよびせん断力の分布から、支点近くでは曲げの影響にせん断力の影響が加味されるためではないかと考えられる。

4.3.2 斜引張りひびわれに関する考察

両はりとも Double shear crack が生じ、前報の低鉄筋コンクリートばりに比してその現象が著しい。これは過鉄筋コンクリートであるため鉄筋量が多く、とくに異形過鉄筋コンクリートばりは、異形鉄筋により付着力が大きくなりとして安定であるから、斜引張り応力度 σ_1 の影響が均一に幅広く現われ、くり返し荷重の影響により逐次 Peeling away action によつて、いわゆる Double shear crack の現象を生じるものと考

えられる。

4.4 ひずみに関する考察

最大ひずみは、せん断スパンの中央にあたる $a/2$ の位置に生じる。また一定荷重載荷の動的挙動下におけるひずみの変化は、荷重段階が $0.50P_u$ 以上では著しく、 $0.45P_u$ 程度の荷重段階では Fig. 6, a, b からわかるように、わずかの変化は認められるがほぼ安定している。したがって、この点から過鉄筋コンクリートばりのせん断疲労限界は、 $0.45P_u$ 程度と考えられる。

4.5 破壊荷重および破断荷重に関する考察

Table 4 より、静的破壊荷重および静的破断荷重に対する疲労試験における破壊荷重および破断荷重(100万回くり返し荷重にて、破壊に達しないはりとは、漸増荷重下において)の比をとると、Table 6 のとおりで

Table 6 Comparison of failure loads and break down loads

Kind of beams				Failure load in fatigue test	Break down load in fatigue test
				Static failure load	Static break down load
Over re- inforced concrete beam	Steel bar beam	0.75 P_u 1	1	0.75	0.82
		0.72 P_u 2	2	0.72	0.77
		0.50 P_u 3	3	0.89	0.89
		0.45 P_u 4	4	0.80	0.76
		0.72 P_u 5	5	0.72	0.89
	Deformed steel bar beam	0.78 P_u 1	1	0.78	0.73
		0.70 P_u 2	2	0.70	0.73
		0.66 P_u 3	3	0.66	0.75
		0.59 P_u 4	4	0.93	0.73
		0.45 P_u 5	5	0.94	0.80

ある。

Table 6 からわかるように、疲労試験における破壊荷重および破断荷重ともに静的試験の場合より低下し、丸鋼および異形過鉄筋コンクリートばりとも同程度の低下をきたすようである。

4・6 N-S曲線に関する考察

Table 4 より、縦軸に破壊荷重比 S (静的破壊荷重に対する疲労試験の最高荷重の比)、横軸にくり返し回数比 N をとって、最小自乗法を適用して、 N - S 曲線を求めると、Fig. 7 のようである。

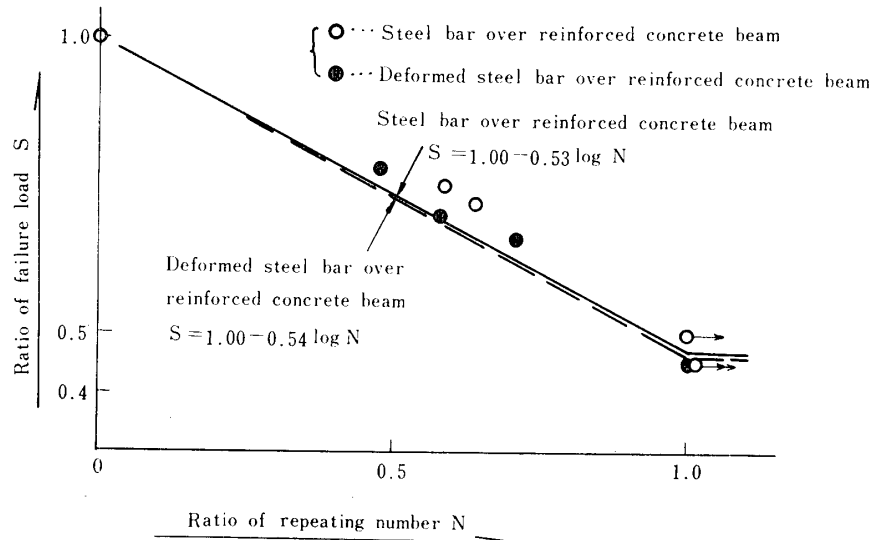


Fig. 7 N-S curve for over reinforced concrete beams

Fig. 7 から明らかなように、丸鋼および異形過鉄筋コンクリートばりにおいて、くり返し回数 100 万回時の破壊荷重比の値が、それぞれ、0.47, 0.46 である。このことから、過鉄筋コンクリートばりのせん断疲労限は、両はりとも $0.45P_u$ 程度と認められる。これはひずみの変化から求めたせん断疲労限と一致する。

既発表の鉄筋コンクリートばりの動的挙動下におけるたわみ²⁾、曲げモーメント²⁾ およびせん断力³⁾ の式から、その理論値を計算し、実験値と比較すると、Table 7, 8 のとおりである。Table 7 からわかるように、たわみの理論値と実測値は、ほぼ一致するが、Table 8 からわかるように、理論式より求めた曲げモーメントおよびせん断力は、等荷重載荷の場合の静的な曲げモーメントおよびせん断力より、いく分小さくなる結果を得た。

5. 動的理論式と実験結果の照査

Table 7 Calculated values of U

Kind of beams			Load and re-	U	U_0	U/U_0	
			peating number	(Equation)	(Experiment)		
Over re- inforced concrete beam	Steel bar beam	$0.75P_u$	1	12.0t	0.363	0.178	2.04
		$0.72P_u$	2	2,900	0.360	0.183	1.97
		$0.50P_u$	3	60×10^4	0.250	0.191	1.31
		$0.45P_u$	4	1,000	0.225	0.192	1.34
		$0.72P_u$	5	8,000	0.356	0.200	1.70
	Deformed steel bar beam	$0.78P_u$	1	1,000	0.394	0.150	2.63
		$0.70P_u$	2	5.0t	0.139	0.102	1.36
		$0.66P_u$	3	3,600	0.349	0.206	1.34
		$0.59P_u$	4	8,000	0.310	0.178	1.69
		$0.45P_u$	5	5,000	0.168	0.145	1.16

Table 8 Calculated values of M_{da} and S_{da}

Kind of beams				Load and re- peating number	M_{da} (kg·cm)	M_{sta} (kg·cm)	M_{da}/M_{sta}	S_{da} (kg)	S_{sta} (kg)	S_{da}/S_{sta}
Over re- inforced concrete beam	Steel bar beam	$0.75P_u$	1	6.2t	45,800	55,800	0.82	3,000	3,100	0.97
		$0.72P_u$	2	9.3t	68,200	83,700	0.81	4,440	4,650	0.96
		$0.50P_u$	3	25×10^4	58,500	72,000	0.81	3,850	4,000	0.96
		$0.45P_u$	4	12.0t	87,600	108,000	0.81	5,700	6,000	0.95
		$0.72P_u$	5	100	83,900	103,500	0.81	5,460	5,750	0.95
	Deformed steel bar beam	$0.78P_u$	1	750	96,900	112,500	0.86	6,060	6,250	0.97
		$0.70P_u$	2	5.0t	36,900	45,000	0.82	2,420	2,500	0.97
		$0.66P_u$	3	2500	79,400	94,500	0.84	5,240	5,250	1.00
		$0.59P_u$	4	5000	71,200	85,500	0.83	4,700	4,750	0.99
		$0.45P_u$	5	1000	53,200	64,800	0.82	3,490	3,600	0.97

6. 結 言

本実験ならびに理論的研究の結果えられた要項は、つぎのとおりである。

(1) 静荷重載荷の場合に適用された a/d による鉄筋コンクリートばりの破壊様相の判定理論は、くり返し荷重を受ける過鉄筋コンクリートばりの破壊機構にも適用できる。

(2) 低鉄筋コンクリートばりに比して、過鉄筋コンクリートばりはたわみが小さく、割合に小さな曲げ応力度の誘起となり、主にせん断応力に影響されて、せん断破壊の様相を呈することを立証している。

(3) すべてのはりにおいて、Double shear crack が生じ、低鉄筋コンクリートばりに比して、過鉄筋コンクリートばりは鉄筋量、付着力などの関係からはりとして安定となり、斜引張り応力度の影響が均一かつ幅広く現われ、この現象が著しい。また最大の曲げびわめは、スパン中央部よりも支点付近に生じる傾向が認められた。

(4) 最大ひずみはせん断スパンの1/2点に生じ、動的挙動下におけるひずみの変化は、荷重段階が $0.45P_u$ 程度でほぼ安定する。この点から過鉄筋コンクリートばりのせん断疲労限界は、 $0.45P_u$ 程度と考えられる。

(5) 疲労試験における破壊および破断荷重は、静的

破壊および破断荷重よりも小さくなる。

(6) $N-S$ 関係からくり返し回数100万回において、過鉄筋コンクリートばりのせん断疲労限界は、 $0.45P_u$ 程度と考えられひずみの結果と一致した。

(7) 動的挙動下のたわみの理論値は実測値とほぼ一致し、曲げモーメントおよびせん断力の理論値は、静的な曲げモーメントおよびせん断力よりもいく分小さい値となった。

以上が研究結果であるが、丸鋼過鉄筋コンクリートばり、異形過鉄筋コンクリートばりとも、せん断疲労限界は、静的破壊荷重の45%であると考えられる。

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、兼行啓治氏、42年度の卒論の井手雄生（千葉県）、会田憲義（北九州市）、小金健（熊谷組）、四郎丸聰（前田建設）の諸君に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 加賀美一二三：土木学会論文集，92（1963）。
- 2) 加賀美一二三：セメント技術年報，XIX（1965）。
- 3) 加賀美一二三：土木学会論文集，137（1967）。
- 4) Chang, T. S., Kesler, C. E.: ACI 29, No.12（1958）。
- 5) 加賀美，二木，三浦，平野：山口大学工学部研究報告 19, No.1（1968）。

（昭和43年10月4日受理）