

鉄筋コンクリートばりのせん断力に関する くり返し荷重の影響について

STUDY ON REPEATED LOADING EFFECT FOR SHEAR OF REINFORCED CONCRETE BEAMS

加賀美 一 二 三*
By Hifumi Kagami

緒 言

鉄筋コンクリートばりの静的実験の場合において、曲げ破壊よりせん断破壊が先行する場合の破壊様相は、せん断スパン中央部中立軸付近の部材コンクリートの斜ひびわれによる破壊、その後はり圧縮帯に破壊がおよぶ場合、主鉄筋にそうコンクリートの滑裂破壊の場合であり、また低鉄筋コンクリートばりは主鉄筋の疲労降伏などがあげられるが、本考察の第1部においてはせん断破壊が最も顕著にあらわれると考えられる a/d が 1 に近い2点負荷の場合について、くり返し荷重実験を実施しその破壊様相を考究することにした。すなわち、低鉄筋、過鉄筋コンクリートばりをおのおの 11 供試体造形し、スパン 1.20 m にて、強制力の振動周期 rpm 200, 400 の両場合、各荷重段階 0.35 Pu, 0.45 Pu, 0.55 Pu, 0.65 Pu および 0.75 Pu おのおのの場合の関連を考究するために、同時造形、同材料の供試体を試験する必要上くり返し荷重回数を2万回とし、後はりの静的破壊を実施した。せん断スパン内はり高さの中心軸に 45° 方向に貼ったスチンゲージ位置のコンクリートのひずみ分布の様相、 a/d の関係式⁹⁾、はりのたわみ測定値による破壊様相の吟味などより、定性的にくり返し荷重の場合のせん断破壊の立証をなしたことを示し、せん断くり返し荷重影響限は鉄筋比ならびに強制力の振動周期に影響されることを述べ、はりの運動方程式より誘導した動的挙動下のたわみ値 U_{dyn} ¹⁵⁾ の式より、動的せん断力値 S_{dyn} の式を導いたものである。

第2部においては a/d を約 1.2, 1.9 および 2.6 の荷重位置とし、荷重法は rpm 200 にて上限荷重を 10~30.10° 回程度負荷後、順次上昇せしめて破壊にいたらしめたもので、 a/d を変えて、動的挙動下の鉄筋コンクリートばりの破壊性状、上限荷重逐次上昇下のはりの諸性状、鉄筋として丸鋼、異形丸鋼を使用したのはりの比較などについて考察したもので、 a/d による破壊の限界は上限荷重逐次上昇挙動下のはり破壊においてもほぼ成立すること、せん断スパン a を変えても丸鋼、異形丸鋼ば

りとともに、低鉄筋コンクリートばりは過鉄筋コンクリートばりより大きいたわみを示すこと、上限荷重上昇挙動下破壊にいたるまで、せん断スパンの斜ひずみは、丸鋼ばりでは過鉄筋コンクリートばりが低鉄筋コンクリートばりより大きい値を示すが、異形丸鋼ばりはそれが明瞭でないこと、丸鋼、異形丸鋼ばりともにおのおの荷重段階におけるせん断スパン内の中央ひずみとくり返し回数との関係より、せん断くり返し荷重影響限はほぼ 0.45 Pu 程度と考えられること、丸鋼、異形丸鋼ばりともに破壊荷重は計算値にほぼ等しいこと、ひびわれの長さ短くその間隔が小さくほぼ等間隔であることより、動的挙動下においても異形丸鋼ばりが構造上安定と考えられることなどを述べ、すでに誘導しているためたわみ式、せん断力式にて第2部の実験も照査したが、かなりよく一致することを立証したものである。

第1部の実験ならびに考察

1. 実験供試体と測定方法

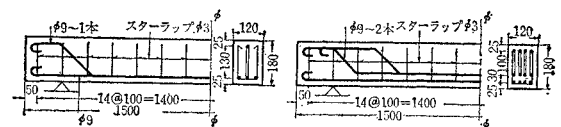
セメントは普通ポルトランドセメントを用い、骨材は砕石粗骨材と一般砂にて、使用コンクリートの示方配合は表-1のごとくである。

表-1 コンクリートの示方配合

粗骨材の最大寸法 mm	スランプ cm	空気量 %	使用水量 kg	セメント量 kg	水セメント比 %	細骨材率 %	細骨材量 kg	粗骨材量 kg
20	3	2	165~189	279	59~68	45	790	1022

鉄筋は公称径 9 mm, 実測断面積による降伏点応力度は 3115 kg/cm² である。低鉄筋および過鉄筋コンクリートばり供試体の寸法ならびに配筋図は図-1のごとく

図-1 低鉄筋(左図) 過鉄筋(右図) コンクリートばりの設計図



* 正会員 工博 山口大学教授 工学部土木工学科

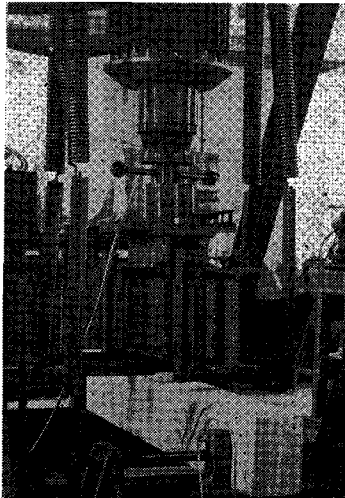
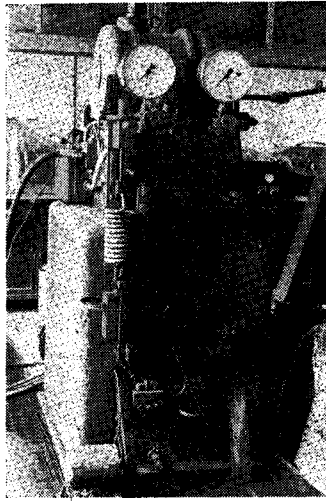
である。

はり供試体の型わくは底面鋼板、側面木製とし、各供試体ごとに同じコンクリートにて4個の円筒供試体を作り、2目目に型わくをはずし水中養生30日続け、後空中養生1週間とし、破壊実験を実施した。せん断スパン内はり高さの中心軸に45°方向にストレインゲージを貼り、片側3枚、両側に対称的とし、くり返し荷重時のひずみを測り、その平均値をひずみとした。

測定法は写真1のごとき疲労試験機を用い、荷重時のひずみは増幅器を通し、ペンオシログラフに記録測定した。

はりのたわみは8ミリの高速撮影による記録とスケールによる瞬間的直接続とりとより比較測定した。緒言に述べているようにくり返し荷重回数2万回後静的破壊を実施したが、0.65 Pu、0.75 Pu の場合はくり返し負荷中破壊した。

写真-1 アムスラー型疲労試験機と供試体設置状態



2. 測定結果

(1) 供試体コンクリートの破壊強度

URC を低鉄筋コンクリートばり、ORC を過鉄筋コンクリートばりとし、はり供試体用コンクリートの標準供試体強度を示すと表-2のごとくである。

表-3 各荷重における初斜ひびわれ、破壊荷重などの関係

供試体の種類	荷重振幅 t, 回数	初斜ひびわれ荷重 t	破壊荷重 t	写真よりの初斜ひびわれ位置	スパン中の非破壊斜ひびわれ位置		ストレーンゲージの初斜ひびわれ位置		
					中	非破側	下	上	
URC	静試験		14.5	16.5	中	非破側		下	
	rpm 200	0.35 Pu	1.0~5.8 (20 000)	15.5	19.5	中	非破側		上
		0.45 Pu	1.0~7.4 (20 000)	17.0	18.8	中	破側		下
		0.55 Pu	1.0~9.1 (20 000)	9.1 (4 000)	17.2	中	破側		上, 下
		0.65 Pu	1.0~10.7 (6 900)	10.7 (4 300)	17.0	中	非破側		上, 下
		0.75 Pu	1.0~12.4 (5 000)	12.4 (200)	12.4	中	破側		中
	rpm 400	0.35 Pu	1.0~5.8 (20 000)	14.5	17.0	中	非破側		中
		0.45 Pu	1.0~7.4 (20 000)	13.5	18.2	中	破側		下
		0.55 Pu	1.0~9.1 (20 000)	15.0	17.9	中	破側		上, 下
		0.65 Pu	1.0~10.7 (20 000)	10.7	17.4	中	破側		中
0.75 Pu		1.0~12.4 (2 800)	12.4 (1 960)	12.4	中	非破側		下	
ORC	静試験		14.9	19.3	中	非破側		下	
	rpm 200	0.35 Pu	1.0~6.8 (20 000)	14.0	22.5	中	非破側		中
		0.45 Pu	1.0~8.7 (20 000)	17.0	22.8	中	破側		中
		0.55 Pu	1.0~10.6 (20 000)	16.5	21.6	中	破側		中
		0.65 Pu	1.0~12.6 (20 000)	12.6 (830)	23.6	中	破側		上, 下
		0.75 Pu	1.0~14.5 (5 000)	14.5 (400)	23.6	中	非破側		上, 下
	rpm 400	0.35 Pu	1.0~6.8 (20 000)	16.0	22.2	上	非破側		中
		0.45 Pu	1.0~8.7 (20 000)	18.2	23.0	中	非破側		中
		0.55 Pu	1.0~10.6 (20 000)	18.5	23.9	中	非破側		中
		0.65 Pu	1.0~12.6 (15 000)	12.6 (4 070)	22.3	中	非破側		上, 下
0.75 Pu		1.0~14.5 (5 500)	14.5 (3 910)	14.5	中	破側		中	

表-2 供試体用コンクリートの強度

はり供試体の No.	URC-1	URC-2	URC-3	URC-4	URC-5	URC-6
概要 (荷重周期と荷重段階)	静試験供体 rpm 200; 0.35 Pu 供体	rpm 200; 0.45 Pu } 0.55 Pu } 供体	rpm 200; 0.65 Pu } 0.75 Pu } 供体	rpm 400; 0.35 Pu } 0.45 Pu } 供体	rpm 400; 0.55 Pu } 0.65 Pu } 供体	rpm 400; 0.75 Pu 供体
平均破壊荷重 t	41.5	46.5	47.1	46.9	52.5	51.4
平均破壊強度 kg/cm ²	235	262	267	265	297	291
はり供試体の No.	ORC-1	ORC-2	ORC-3	ORC-4	ORC-5	ORC-6
概要 (荷重周期と荷重段階)	静試験供体	rpm 200; 0.35 Pu } 0.45 Pu } 供体	rpm 200; 0.55 Pu } 0.65 Pu } 供体	rpm 200; 0.75 Pu } rpm 400; 0.35 Pu } 供体	rpm 400; 0.45 Pu } 0.55 Pu } 供体	rpm 400; 0.65 Pu } 0.75 Pu } 供体
平均破壊荷重 t	51.4	50.5	51.5	49.9	49.7	50.8
平均破壊強度 kg/cm ²	291	286	291	282	281	287

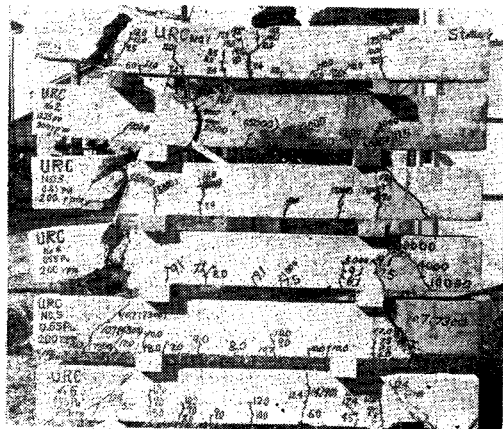
(2) 供試体ばりの初斜ひびわれならびに破壊荷重
各供試体の負荷時における初斜ひびわれ荷重、破壊荷
重などは表-3のごとくである。
表-3 中、ひずみ図より判別したひびわれの上, 中,

下は, そのゲージ位置および方向が確実なのは中だけ
であるので, 上, 下は参考のものである。

本実験における供試体の破壊様相は, 写真-2 (イ),
(ロ), 写真-3 (イ), (ロ)のごとくである。

写真-2 (イ) 低鉄筋コンクリートばりの右側の破壊様相

(1)



(2)



写真-2 (ロ) 低鉄筋コンクリートばりの左側の破壊様相

(1)



(2)

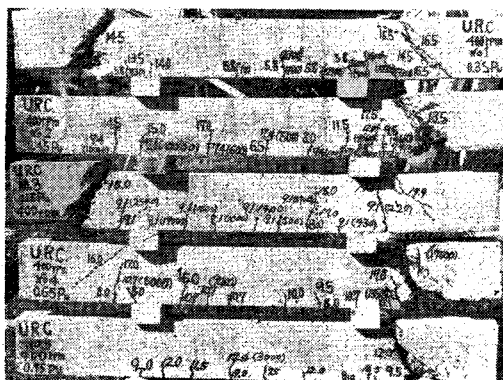
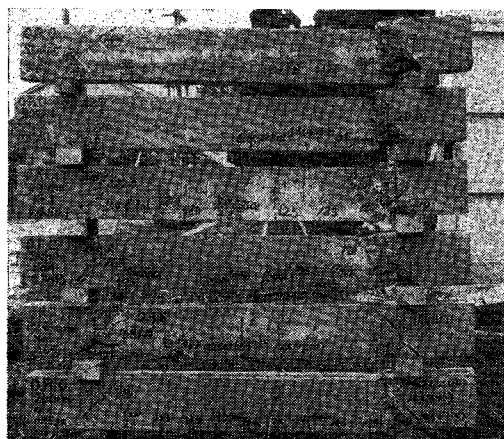


写真-3 (イ) 過鉄筋コンクリートばりの右側の破壊様相

(1)



(2)

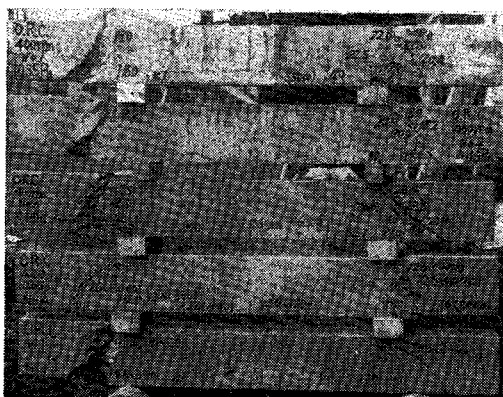
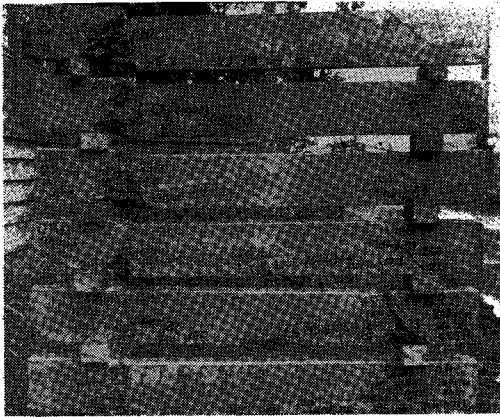


写真-3 (ロ) 過鉄筋コンクリートばりの左側の破壊様相 (1)



(2)



(3) たわみの測定

はりスパン中央においてスケールならびに高速撮影により測定した静荷重、くり返し荷重の 0.45 Pu, 0.55 Pu, 0.75 Pu の荷重段階のたわみは、図-2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 のごとくで、0.35 Pu の場合はせん断くり返し荷重影響限内と仮定され安定であり、0.65 Pu の場合は 0.55 Pu より推考できるので、両場合の図ははぶくことにする。

図-2 低鉄筋、過鉄筋コンクリートばりの荷重とたわみの関係

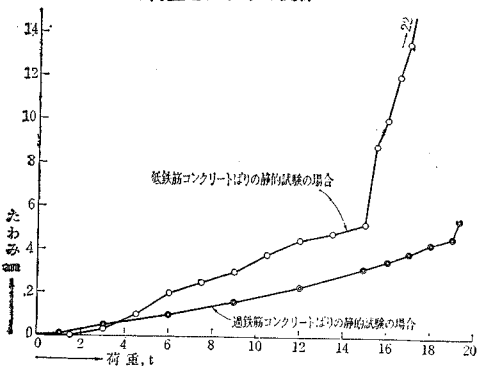


図-3 低鉄筋ばり, 0.45 Pu にて rpm 200, 400 の場合の荷重, くり返し回数とたわみの関係

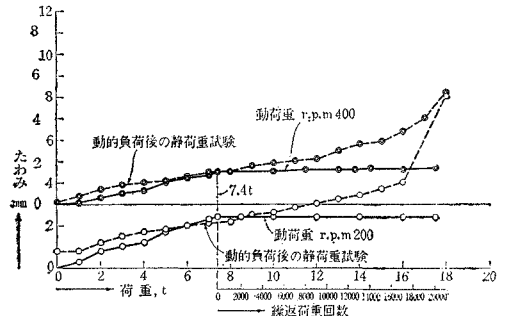


図-4 低鉄筋ばり, 0.55 Pu にて rpm 200, 400 の場合の荷重くり返し回数とたわみの関係

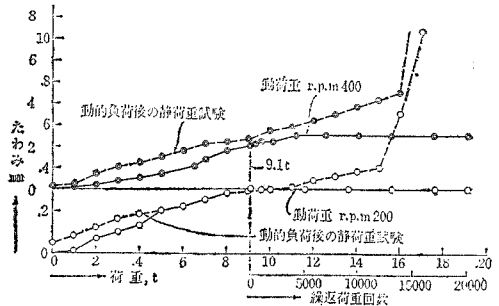


図-5 低鉄筋ばり, 0.75 Pu にて rpm 200, 400 の場合の荷重, くり返し回数とたわみの関係

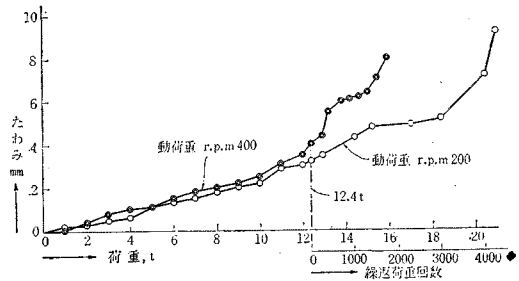
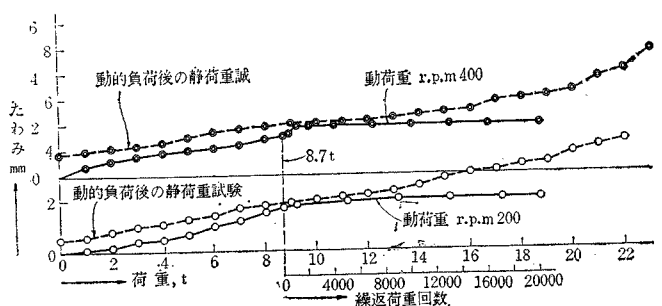
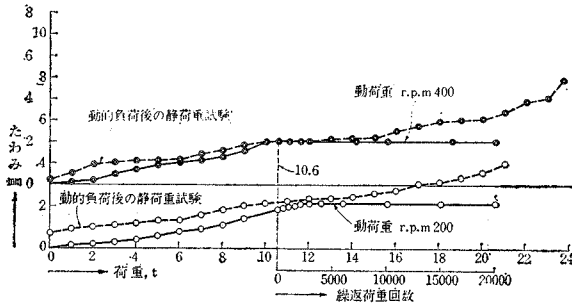


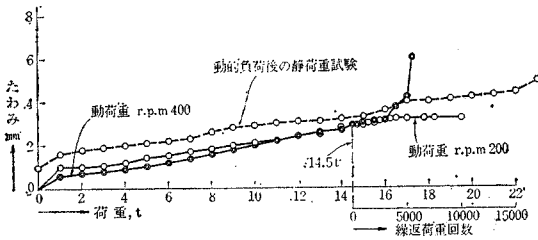
図-6 過鉄筋ばり, 0.45 Pu にて rpm 200, 400 の場合の荷重, くり返し回数とたわみの関係



図一七 過鉄筋ばり, 0.55 Pu にて rpm 200, 400 の場合の荷重, くり返し回数とたわみの関係

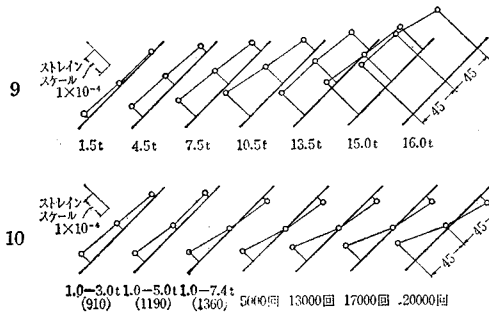


図一八 過鉄筋ばり, 0.75 Pu にて rpm 200, 400 の場合の荷重, くり返し回数とたわみの関係



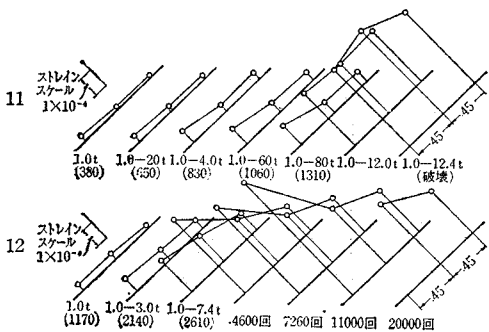
図一九 静荷重, 低鉄筋ばりの非破壊側における斜引張ひずみの分布様相

図一〇 くり返し荷重, 低鉄筋ばりの破壊側における rpm 200, 0.45 Pu の斜引張ひずみの分布様相



図一一 くり返し荷重, 低鉄筋ばりの破壊側における rpm 200, 0.75 Pu の斜引張ひずみの分布様相

図一二 くり返し荷重, 低鉄筋ばりの破壊側における rpm 400, 0.45 Pu の斜引張ひずみの分布様相

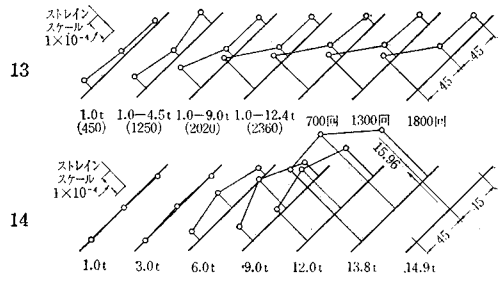


(4) せん断スパン内ゲージによる斜引張ひずみの測定

せん断スパン内ゲージにより, 低, 過鉄筋ばりの静荷重, くり返し荷重 200, 400 にて, おおの 0.45 Pu, 0.75 Pu の所定荷重段階に達するまでのひずみと, その後のくり返し回数に応ずるひずみの測定結果は 図一九, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 である。

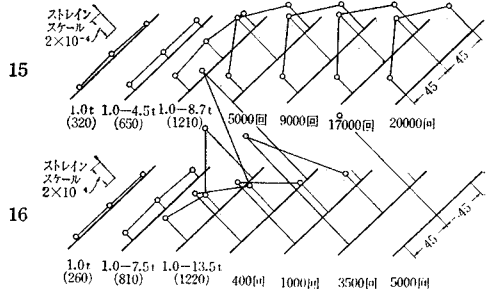
図一三 くり返し荷重, 低鉄筋ばりの非破壊側における rpm 400, 0.75 Pu の斜引張ひずみの分布様相

図一四 静荷重, 過鉄筋ばりの破壊側における斜引張ひずみの分布様相



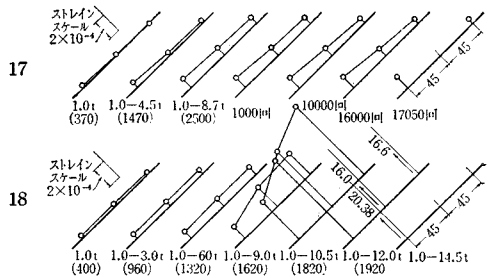
図一五 くり返し荷重, 過鉄筋ばりの破壊側における rpm 200, 0.45 Pu の斜引張ひずみの分布様相

図一六 くり返し荷重, 過鉄筋ばりの非破壊側における rpm 200, 0.75 Pu の斜引張ひずみの分布様相



図一七 くり返し荷重, 過鉄筋ばりの非破壊側における rpm 400, 0.45 Pu の斜引張ひずみの分布様相

図一八 くり返し荷重, 過鉄筋ばりの破壊側における rpm 400, 0.75 Pu の斜引張ひずみの分布様相



3. 実験結果の考察

(1) a/d による鉄筋コンクリートばりの破壊様相のくり返し荷重の場合への適用についての考察

鉄筋コンクリートばりについて、静的試験の場合のはり破壊の領域としての限界⁹⁾を本実験の場合に適用すると表-4となる。表中、S-F;せん断一曲げ破壊、S;せん断破壊とする。

表-4 はり供試体の破壊領域

供試体の種類	静試験	ρ %	k	理論上より	供試体の	実験上	破壊の判定	実験上の破壊様相	
				の a/d	の a/cm	の a/d			
URC	静試験	1.30	0.207	1.17~1.73	15.2	1.18	S-F	S-F	
	rpm 200	0.35 Pu	1.30	0.207	1.17~1.73	15.2	1.18	S-F	S-F
		0.45 Pu	1.33	0.190	1.07~1.58	14.8	1.22	S-F	S-F
		0.55 Pu	1.30	0.185	1.05~1.54	15.2	1.18	S-F	S-F
		0.65 Pu	1.32	0.185	1.05~1.54	15.0	1.20	S-F	S-F
	0.75 Pu	1.31	0.184	1.04~1.53	15.1	1.19	S-F	S-F	
	rpm 400	0.35 Pu	1.31	0.185	1.05~1.54	15.1	1.19	S-F	S-F
		0.45 Pu	1.35	0.196	1.11~1.63	14.6	1.23	S-F	S-F
		0.55 Pu	1.28	0.161	0.91~1.34	15.4	1.17	S-F	S-F
		0.65 Pu	1.32	0.166	0.94~1.38	15.0	1.20	S-F	S-F
0.75 Pu		1.32	0.169	0.96~1.41	15.0	1.20	S-F	S-F	
ORC	静試験	2.87	0.536	3.03~4.47	13.8	1.30	S	S	
	rpm 200	0.35 Pu	2.84	0.537	3.03~4.47	13.9	1.29	S	S
		0.45 Pu	2.98	0.544	3.07~4.54	13.3	1.35	S	S
		0.55 Pu	2.91	0.540	3.05~4.51	13.6	1.32	S	S
		0.65 Pu	2.76	0.530	2.99~4.42	14.3	1.26	S	S
		0.75 Pu	2.90	0.545	3.08~4.55	13.7	1.31	S	S
	rpm 400	0.35 Pu	2.90	0.545	3.08~4.55	13.7	1.31	S	S
		0.45 Pu	2.83	0.541	3.06~4.51	14.0	1.29	S	S
		0.55 Pu	2.84	0.541	3.06~4.51	13.9	1.29	S	S
		0.65 Pu	2.93	0.542	3.06~4.52	13.5	1.33	S	S
0.75 Pu		2.86	0.538	3.04~4.49	13.8	1.30	S	S	

各供試体に対し、おのおのの荷重段階におけるくり返し荷重実験後ならびに塑性領域のはり破壊実験の破壊様相は、静荷重実験の場合における理論関係が成立する。

(2) せん断くり返し荷重実験におけるたわみに関する考察

図-2より図-8の測定結果に対する考察をする。

a) 低鉄筋ばりと過鉄筋ばりの比較 低鉄筋ばりが静的、くり返し荷重ともに過鉄筋ばりより大きいたわみ値を示したが、これは主鉄筋量に影響されるものといえる。

b) rpm 200 と 400 との比較 荷重段階が 0.55 Pu 程度までは、rpm 200 の場合が 400 の場合より大きいたわみ値を示すが、それ以後の荷重段階では後者が大きいたわみ値となる。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、低鉄筋ばりはせん断一曲げ破壊の領域に入り、過鉄筋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、荷重段階 0.55 Pu 以後はせん断破壊以後のずれに

よる大きいたわみの現象とみられ、過鉄筋ばりは実験的にこれを立証しているといえる。低鉄筋、過鉄筋ばりともに荷重段階が塑性領域に入ると、一般には荷重の上昇はきわめてわずかでもたわみの急増があり破壊にいたるものと考えられる。

(3) せん断くり返し荷重実験におけるせん断スパン内の斜引張ひずみに関する考察

この場合の実験の一部を示したのが図-9より図-18であるが、所定荷重段階に達して後各荷重段階におけるくり返し荷重回数増加にともなう斜引張ひずみの変化は、荷重段階 0.45 Pu, 0.55 Pu には低鉄筋、過鉄筋ばりともほとんど変化がない。0.65 Pu, 0.75 Pu の段階にいたると、rpm 200 の場合は過鉄筋ばりが低鉄筋ばりより早く斜引張ひびわれであるせん断ひびわれが入り、rpm 400 の場合は過鉄筋ばりは復元が未完と考えられるため、低鉄筋ばりが早い結果を示したものと考えられるが、要は低鉄筋ばりは曲げの影響を多く受け、過鉄筋ばりはせん断力の影響をうける前記(2)の場合のたわみ値に関する考察にはほぼ一致する。

4. せん断くり返し荷重影響限

本実験において各荷重段階に達してからくり返し荷重回数とわみの測定をなし、その一部を図-2より図-8に示しているのであるが、これらを見ると 0.45 Pu の場合はもちろん 0.55 Pu の段階にては、rpm 200, 400 ともにたわみ増加はみられない。しかしながらせん断スパン内ゲージによる斜引張ひずみの測定においては、本実験中の一部を図-9より図-18に示しているが、この場合は 0.45 Pu の場合もその荷重に達してからくり返し荷重回数 2 万回にいたる間、きわめてわずかのひずみの変化がみられるものもあるが、以上のたわみ、ひずみの測定結果から帰納するとき、鉄筋コンクリートばりが終局にはせん断破壊を主体として破壊する荷重状態にてくり返し荷重をかけた場合、ある上限荷重下にてはせん断破壊様相を起さない上限荷重の限度を、せん断くり返し荷重影響限と仮定すれば、本実験の範囲においてはせん断くり返し荷重影響限は 0.45 Pu 段階を仮定しても差し支えないものと考えられる。

5. 動的せん断力の式と実験結果の照査計算

鉄筋コンクリートばりについて、運動方程式よりたわみ値 $U_{dyn}^{15)}$ 、曲げモーメント値 $M_{dyn}^{15)}$ の式を誘導しているが、このたわみの一般式よりせん断力の式を求めるとつぎのごとくなる。すなわち、昭和 40 年度のセメント技術年報中のたわみ値の式は式(a)である。

$$U = \frac{2}{pl} \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{n\pi}{l} a \sin \frac{n\pi x}{l} \left\{ \frac{P_0}{lP_n^2} + \frac{P_0' \sin \omega t}{A(r^2 P_n^2 - \omega^2)} \right\} \dots \dots \dots (a)$$

式中、 $p_n^2 = \pi^4 n^4 E / pl^4$ を代入すると、

$$U = \frac{2l^3}{\pi^4 n^4 E} \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{n\pi}{l} a \sin \frac{n\pi}{l} x \left\{ \frac{P_0}{I} + \frac{P_0'}{A \left(r^2 - \frac{\omega^2}{p_n^2} \right)} \right\} \dots\dots\dots(b)$$

いま、 U について3次微分係数を求め、せん断力の式 $S = EI\theta^3 U / \theta x^3$ にあてはめると

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

2点負荷のせん断力の式は

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

本実験の場合の条件である $a=18\text{ cm}$, $l=1.2\text{ m}$ を用いて $\sum_{n=1}^{\infty}$ の項を計算し整理すると

$$S_{dyn} = 0.0988(P_1 + P_2) + 0.0796(P_2 - P_1) \left\{ \frac{0.809}{r^2 - \frac{\omega^2}{p_1^2}} + \frac{0.476}{r^2 - \frac{\omega^2}{p_2^2}} + \frac{0.103}{r^2 - \frac{\omega^2}{p_3^2}} - \frac{0.147}{r^2 - \frac{\omega^2}{p_4^2}} \right\} (3)$$

以上の式中の符号は

- P_1 = 下限荷重
- P_2 = 上限荷重
- r = 還動半径
- I = 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 = 強制力の振動数 ($2\pi/T$)
- T = 強制力の振動周期
- E = コンクリートの動的弾性係数
- p = コンクリートの単位容積の質量

本実験の場合の低鉄筋、過鉄筋ばりのくり返し荷重段階 $0.45 P_u$, $0.55 P_u$ について、rpm 200, 400 の両場合

表-5 低鉄筋、過鉄筋ばりの $0.45 P_u$, $0.55 P_u$ の場合の S_{dyn} の計算結果

計 算 項 目	rpm		200				400			
	荷重段階		URC		ORC		URC		ORC	
	$0.45 P_u$	$0.55 P_u$	$0.45 P_u$	$0.55 P_u$	$0.45 P_u$	$0.55 P_u$	$0.45 P_u$	$0.55 P_u$		
$A_s, \text{ cm}^2$	2.37	2.37	4.75	4.75	2.37	2.37	4.75	4.75		
$bd, \text{ cm}^2$	178	182	160	163	175	185	168	167		
$\rho, \%$	1.33	1.30	2.98	2.91	1.35	1.28	2.83	2.84		
$\sigma_{cy}, \text{ kg/cm}^2$	262	262	286	291	265	297	281	281		
$\sigma_{sy}, \text{ kg/cm}^2$	3 115	3 115	3 115	3 115	3 115	3 115	3 115	3 115		
k	0.190	0.185	0.544	0.540	0.191	0.161	0.541	0.541		
$I, \text{ cm}^4$	9 336	7 645	3 523	3 732	9 867	7 926	6 821	6 201		
$A, \text{ cm}^2$	193	174	176	179	198	172	251	244		
$E, \text{ kg/cm}^2$	$2.51 \cdot 10^6$	$2.51 \cdot 10^6$	$2.50 \cdot 10^6$	$2.50 \cdot 10^6$	$2.51 \cdot 10^6$	$2.50 \cdot 10^6$	$2.50 \cdot 10^6$	$2.50 \cdot 10^6$		
$P_1, \text{ kg}$	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000		
$P_2, \text{ kg}$	7 400	9 100	8 700	10 600	7 400	9 100	8 700	10 600		
式(3)の第1項値, kg	731	998	958	1 146	830	998	958	1 146		
式(3)の第2項値, kg	730	937	1 472	1 414	1 701	2 653	1 829	1 880		
$S_{dyn}, \text{ kg}$	1 461	1 935	2 430	2 550	2 531	3 651	2 787	3 026		

の S_{dyn} を計算すると表-5となる。

第2部の実験ならびに考察

1. 実験供試体と測定方法

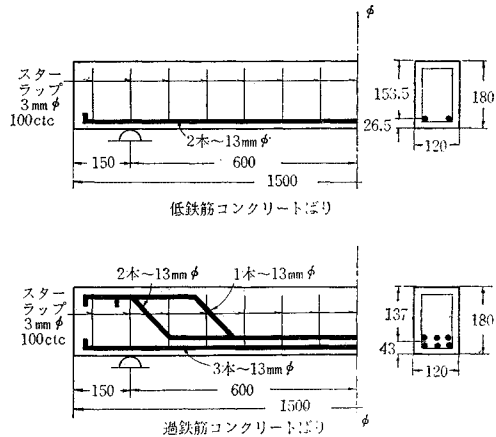
コンクリートの材料は第1部の場合と同様にて、示方配合は表-6のごとくである。

表-6 コンクリートの示方配合

粗骨材の最大寸法 mm	スランブ cm	使用水量 kg	セメント kg	水セメント比 %	細骨材率 %	細骨材材料 kg	粗骨材量 kg
20	3±1	185	223	83	38.7	753	1 195

鉄筋は公称径 13 mm の丸鋼、異形丸鋼を用いたが、前者は SR 41 に属し σ_{sy} が $2 900 \text{ kg/cm}^2$, σ_{su} が $4 195 \text{ kg/cm}^2$ 、後者は SD 49 に属し σ_{sy} が $3 620 \text{ kg/cm}^2$, σ_{su} が $5 410 \text{ kg/cm}^2$ である。低鉄筋および過鉄筋コンクリートばり供試体の寸法ならびに配筋図は 図-19 のごと

図-19 異形丸鋼ばりの配筋図(丸鋼ばりはフック部のみ異なる)



くである。

供試体型わくは第1部の場合と同様にて、2日目に脱型し水平養生5週間続け、後空中養生1週間とし破壊実験を実施した。せん断スパン内はり高さの中心軸に45°方向と、中心軸より下部は35°方向、上部は55°方向にストレインゲージを片側3枚、両側に対称的に貼りそれらを測り

写真-4 曲げ破壊実験の荷重位置様相

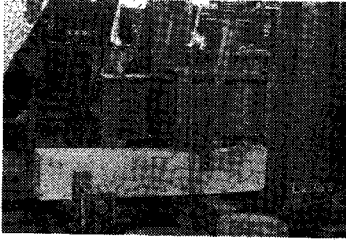
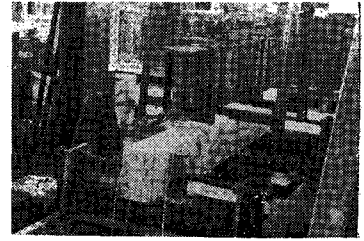


写真-5 せん断-曲げ破壊実験の荷重位置様相



写真-6 せん断破壊実験の荷重位置様相



その平均値をその位置のひずみとした。

測定法は第1部と同様にて、荷重法は下限荷重 1.0t とし上限荷重を 10~30.10³ 回程度負荷後、順次上昇せしめてついに破壊にいたらしめた。第2部実験においては、S; せん断破壊, S-F; せん断-曲げ破壊, F; 曲げ破壊の3場合を仮定して実験したもので、これらの荷重状態は写真-4, 5, 6のごとくである。

2. 測定結果

(1) 供試体用コンクリートの破壊強度, その他

URC, ORC の符号は第1部の場合と同様とし、実験結果を示すと表-7のごとくである。

表-7 供試体用コンクリートの諸値

供試体の種類	URC						ORC					
	丸鋼ばり			異形丸鋼ばり			丸鋼ばり			異形丸鋼ばり		
	S	S-F	F	S	S-F	F	S	S-F	F	S	S-F	F
平均破壊強度 kg/cm ²	145	164	145	154	147	154	166	149	166	151	159	151
スランプ cm	2.2	2.8	2.2	2.5	2.6	2.5	2.5	2.6	2.5	2.6	2.3	2.6
エントラプトエア %	2.4	2.3	2.4	2.2	2.6	2.2	2.5	2.1	2.5	2.2	2.5	2.2

第2部実験に用いたコンクリートの圧縮応力-ひずみ曲線において、破壊強度のひずみ値は 20~24.10⁻⁴ 程度であり、圧縮応力-弾性曲線において割線弾性係数は

表-8 URC (丸鋼ばり), S の場合のシアースパン内3カ所の引張ひずみ値, 10⁻⁴

載荷荷重 (下限荷重 1.0t) 上 限荷重 t	荷重くり返し回数	下部ゲージ平均ひずみの最大値	中央ゲージ平均ひずみの最大値	上部ゲージ平均ひずみの最大値
	10 ³			
1.0	0	0.05	-0.05	0.04
1.0	1.7	0.00	-0.24	-0.06
3.0	1.91	0.42	0.12	0.07
3.0	3.70	0.55	0.24	0.06
4.0	3.81	0.71	0.27	0.15
4.0	5.70	0.80	0.29	0.05
5.0	5.80	0.94	0.41	0.05
5.0	8.70	1.13	0.51	0.11
7.0	8.88	2.73	1.60	0.55
7.0	10.7	4.14	2.77	0.61
9.0	10.81	6.16	5.31	4.22
9.0	11.0	9.34	ゲージ破壊	7.17
9.0	11.68	24.9		ゲージ破壊
9.0	12.31	35.4		
11.0	12.85	ゲージ破壊		
11.0	13.6(はり破壊)			

2.6.10⁵ kg/cm² 程度より漸次小となり、破壊時には 8~9.10⁴ kg/cm² 程度である。

(2) 供試体ばりのシアースパン内ゲージによるひずみ値の様相

a/d を変えて動的挙動下の鉄筋コンクリートばりの破壊性状の考察にあたり、各荷重時のシアースパン内ゲージによりそのひずみ様相を測定したが、本実験がせん断力関係の考察を主目的とするので、測定値は URC (丸鋼ばり) の S の場合のみ表-8 に例示し、せん断くり返しの場合についての結果を図示すると、図-20, 21,

図-20 URC (丸鋼ばり), S の場合のひずみ分布様相

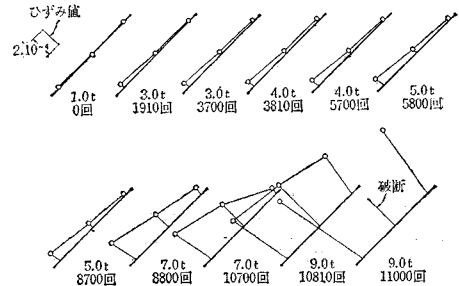


図-21 ORC (丸鋼ばり), S の場合のひずみ分布様相

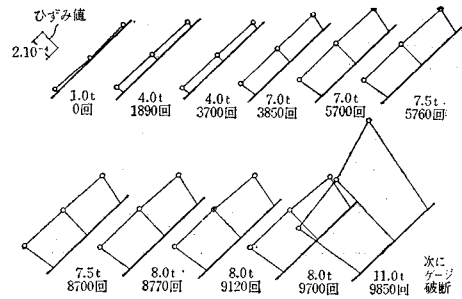
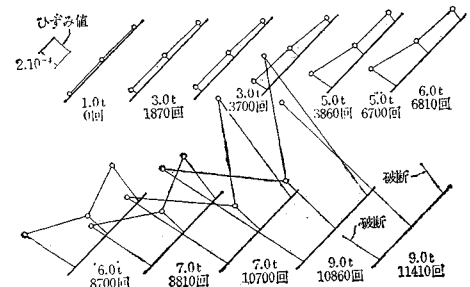


図-22 URC (異形丸鋼ばり), S の場合のひずみ分布様相



22, 23 となる。

(3) シアースパン中央ゲージひずみ—くり返し回数
の関係

各荷重段階に応じ、くり返し回数漸増下のシアースパン中央ゲージひずみ値の関係 (*S*, *S-F*, *F* の3場合) を図示すると、図-24, 25, 26, 27 となる。

(4) 荷重およびくり返し回数とたわみとの関係

丸鋼, 異形丸鋼ばりともに *S*, *S-F*, *F* の場合のたわみは、ほぼ同傾向を示すので *S* の場合のみ図示すると図-28, 29 となる。

(5) 供試体ばりのひびわれ様相の写真

丸鋼ばりの場合; 写真-7(イ), (ロ), 写真-8(イ), (ロ) に示す。

図-23 ORC (異形丸鋼ばり), *S* の場合のひずみ分布様相

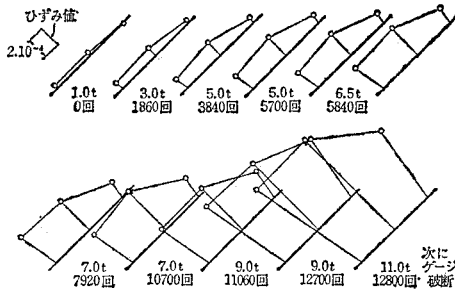


図-24 URC (丸鋼ばり) のくり返し回数と中央ゲージひずみとの関係

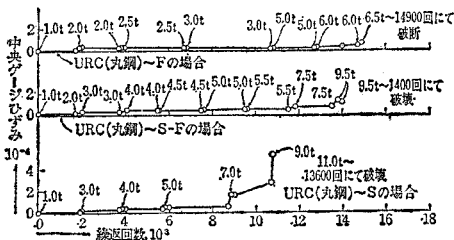


図-25 ORC (丸鋼ばり) のくり返し回数と中央ゲージひずみとの関係

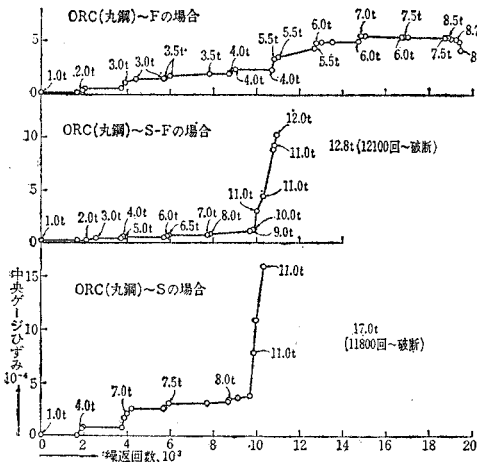


図-26 URC (異形丸鋼ばり) のくり返し回数と中央ゲージひずみとの関係

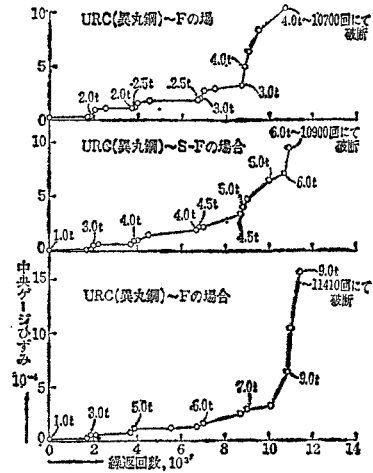


図-27 ORC (異形丸鋼ばり) のくり返し回数と中央ゲージひずみとの関係

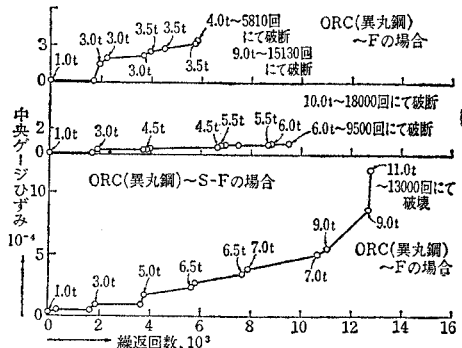


図-28 丸鋼ばりの荷重と中央たわみとの関係

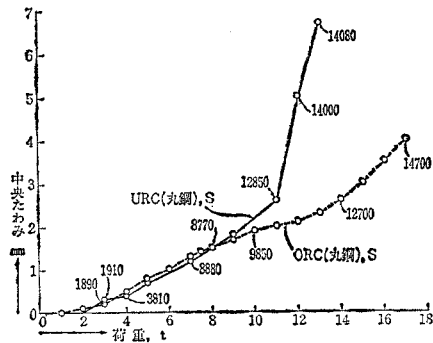


図-29 異形丸鋼ばりの荷重と中央たわみとの関係

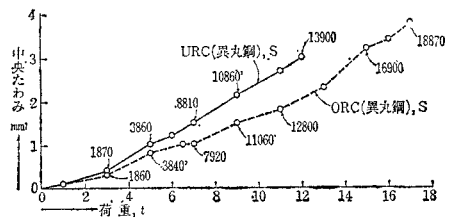


写真-7 (イ) URC ばりの右側のひびわれ様相

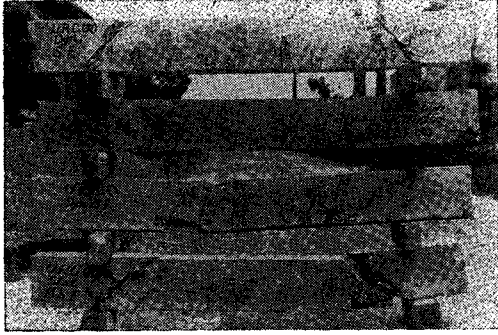


写真-9 (イ) URC ばりの右側のひびわれ様相

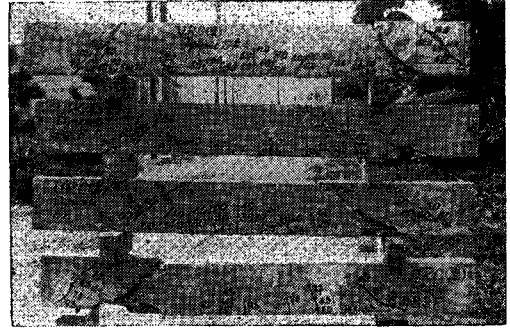


写真-7 (ロ) URC ばりの左側のひびわれ様相



写真-9 (ロ) URC ばりの左側のひびわれ様相

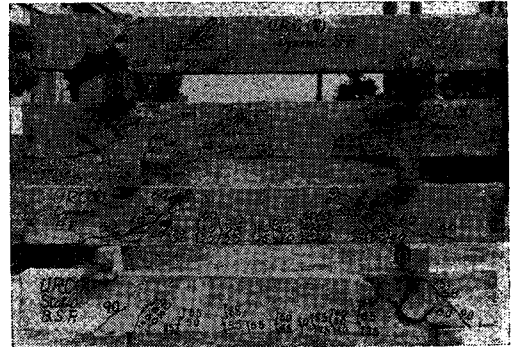


写真-8 (イ) ORC ばりの右側のひびわれ様相



写真-10 (イ) ORC ばりの右側のひびわれ様相

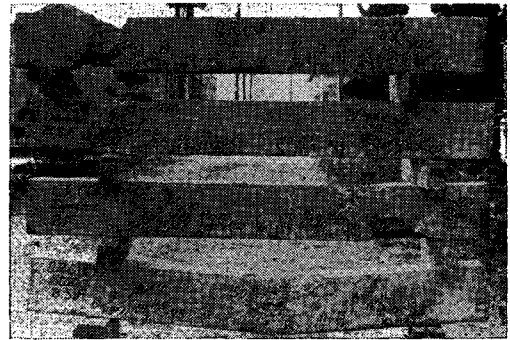


写真-8 (ロ) ORC ばりの左側のひびわれ様相

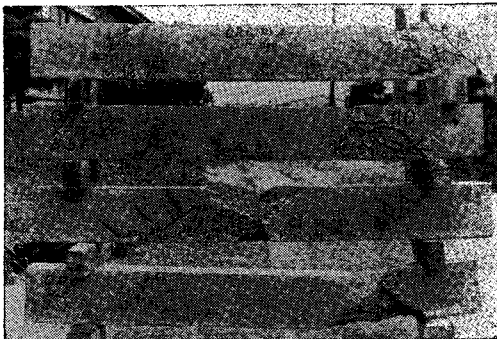
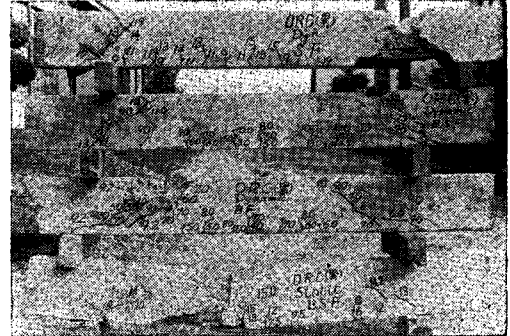


写真-10 (ロ) ORC ばりの左側のひびわれ様相



異形丸鋼ばりの場合；写真-9（イ），（ロ），写真-10（イ），（ロ）に示す。

3. 実験結果の考察

（1） a/d によるはり破壊様相の考察

第2部の実験における静的ならびに動的負荷による破壊様相は、既報告の理論式⁹⁾による計算結果と比較すると表-4と同様に表-9のごとくなる。

表-9 はり供試体の破壊領域

はり供試体	各項目		p %	k	理論上より の a/d	供試体 の d , cm	実験上 よりの a/d	破壊の 判定	実験上 の破壊 様相
	S	$S-F$							
URC	丸鋼 ばり	S	1.41	0.338	1.91~2.82	15.3	1.18	S	S
		$S-F$ (静実)	1.39	0.295	1.67~2.46	15.5	1.87	$S-F$	$S-F$
		$S-F$	1.39	0.295	1.67~2.46	15.5	1.87	$S-F$	$S-F$
		F	1.39	0.334	1.89~2.79	15.4	2.60	$S-F$	$S-F$
	異形丸鋼 ばり	S	1.40	0.395	2.23~3.29	15.5	1.16	S	S
		$S-F$ (静実)	1.45	0.428	2.42~3.57	15.0	1.93	S	S
		$S-F$	1.45	0.428	2.42~3.57	15.0	1.93	S	S
		F	1.41	0.398	2.25~3.32	15.4	2.60	$S-F$	$S-F$
ORC	丸鋼 ばり	S	4.74	0.715	4.05~5.96	13.6	1.32	S	S
		$S-F$ (静実)	4.71	0.723	4.08~6.03	13.7	2.12	S	S
		$S-F$	4.71	0.723	4.08~6.03	13.7	2.12	S	S
		F	4.71	0.706	3.99~5.89	13.7	2.92	S	$S-F$
	異形丸鋼 ばり	S	4.83	0.733	4.14~6.11	13.5	1.33	S	S
		$S-F$ (静実)	4.73	0.722	4.08~6.02	13.8	2.11	S	$S-F$
		$S-F$	4.87	0.726	4.10~6.05	13.4	2.16	S	S
		F	4.76	0.731	4.13~6.10	13.7	2.92	S	S

表-9にみるように、動的負荷による破壊様相は、URC, ORC の両場合とも理論式⁹⁾で計算して判定しても、第1部の場合と同様に実際の破壊様相にほとんど一致するものといえる。

（2）たわみの関係

図-28, 29に S の場合のみ例示したが、 F はもちろん $S-F$ の場合には丸鋼ばりはURCがORCに対し急上昇曲線を描き大きいたわみを示すが、 S の場合は図示のようにURCが塑性領域までほとんど等しく、異形丸鋼ばりはURC, ORCとも荷重上昇にともなって急上昇曲線を描かない。丸鋼ばりにおいてはURCはせん断一曲折破壊に支配されやすく、ORCは主としてせん断破壊が生ずるが、異形丸鋼ばりはコンクリートとの付着が大きく、曲げを受ける場合の斉等分布をもたらし、さらに鉄筋の上半分はフシの中間コンクリート部が鉄筋断面積とほとんど同様に近い作用をなし、断面2次モーメントの大きさをなすものと仮定され、URCもORCと同様たわみの急増はなく、曲げ応力の影響はかなり大きいシアースパンまで小さく、はりの内応力様相はせん断応力に影響されることが大きくなるものと考えられる。このことは表-9, URC, ORCの異形丸鋼ばりの破壊様相にあらわれているものといえる。

（3）シアースパン内中央ゲージひずみの関係

丸鋼ばりは図-24, 25のごとくせん断、せん断一曲折、曲げ破壊荷重位置の各場合とも、シアースパン内の中央ゲージひずみがORCの方がURCよりも大きくなる。これはORCが各場合ともくに S の場合は、URCより早く顕著にせん断ひびわれがあらわれせん断破壊となるが、曲げ要素の次第に加わるものは一般にせん断一曲折破壊となる。

異形丸鋼ばりはたわみの項の吟味のように主鉄筋の力学的効果が認められ、URC, ORCともシアースパン内中央ゲージひずみが図-26, 27のごとくほとんど等しく大きくあらわれ、両場合ともせん断ひびわれが早く顕著にあらわれせん断破壊が多くなる。

せん断破壊の場合はくり返し回数-荷重-中央ゲージひずみの関係より、0.45Puの荷重段階前後よりひずみ増進が認められる。すなわち、せん断くり返し荷重影響限はほぼ0.45Pu程度と考えられる。

（4）ひびわれの分布とその伸びの関係

写真-7, 8, 9, 10にてみるように各荷重位置の場合とも、丸鋼ばりにおいてはURCは曲げモーメント部にてひびわれ数はORCとほとんど同じ程度であるが伸びは大きく、ORCは主鉄筋位置より上位にはわずかしか伸びない。異形丸鋼ばりも各場合ともURC, ORCともひびわれ数はほぼ同数であるが、URCがORCと同様上位に伸びない。したがって、異形丸鋼ばりの場合は各荷重位置の場合せん断破壊の現象が多い。ゆえに、丸鋼ばりの場合はURCはせん断一曲折破壊の傾向、ORCはせん断破壊、異形丸鋼ばりはURC, ORCともにせん断破壊の傾向となると考えられる。

4. 第2部の場合の理論式による計算とその照査

第2部の実験において、0.45Pu荷重段階において前述の動的たわみと動的せん断力の2式により、 U と S とに関して照査計算をしてみると表-10の結果となる。

表-10中の S の項にみるように、動的せん断力の値はよい結果がえられている。

結 言

第1部の実験ならびに考察よりえられたことからは

（1）静的実験において適用された a/d によるはり破壊の限界は、くり返し荷重後の静的破壊ならびに弾塑性限界内の負荷による破壊においても適用できる結果を示した。

（2）低鉄筋ばりは過鉄筋ばりより大きいたわみを示し、割合に大きい曲げ応力度の誘起となり、前者はせん断一曲折破壊、後者はせん断応力に影響されせん断破壊様相を呈する立証となり、ともに荷重段階が塑性領域に

表—10 第 2 部の実験の資料による U_{dyn} , S_{dyn} の計算結果

各 項 目	URC								ORC							
	丸 鋼 ば り				異 形 丸 鋼 ば り				丸 鋼 ば り				異 形 丸 鋼 ば り			
	S	S-F (静実)	S-F	F	S	S-F (静実)	S-F	F	S	S-F (静実)	S-F	F	S	S-F (静実)	S-F	F
A_s , cm ²	2.58	2.58	2.58	2.58	2.61	2.61	2.61	2.61	7.74	7.74	7.74	7.74	7.83	7.83	7.83	7.83
d , cm	15.3	15.5	15.5	15.4	15.5	15.0	15.0	15.4	13.6	13.7	13.7	13.7	13.5	13.8	13.4	13.7
P_u , t	10.6	6.8	6.8	4.9	13.3	7.9	7.9	6.0	16.6	10.4	10.4	7.5	14.8	10.1	9.6	6.9
0.45 P_u , t	4.8	3.1	3.1	2.2	6.0	3.4	3.4	2.7	7.5	4.7	4.7	3.4	6.7	4.5	4.3	3.1
初期ひびわれ t	5.0	3.0	3.0	2.0	5.0	3.5	2.0	2.0	7.0	5.0	3.5	3.0	6.5	6.0	3.0	3.0
せん断ひびわれ t	9.0	8.5	4.0	4.5	6.0	6.0	4.5	4.0	11.0	8.0	6.5	5.6	11.0	10.0	9.0	4.0
破断荷重 t	11.0	8.5	7.5	6.0	11.0	7.5	7.5	6.0	14.0	14.0	11.0	8.5	15.0	10.0	9.0	7.0
0.45 P_u 位置のたわみ cm	0.07		0.14	0.17	0.10		0.13	0.11	0.04		0.13	0.03	0.10		0.09	0.06
式による U_{dyn} cm	0.104		0.114	0.068	0.112		0.089	0.064	0.188		0.169	0.130	0.179		0.091	0.081
静実の S kg	2400	1550	1550	1110	3000	1700	1700	1350	3750	2350	2350	1700	3350	2250	2250	1550
式による S_{dyn} kg	2410		1180	491	2380		994	572	3340		1900	1080	3780		1150	877

入ると荷重増はきわめてわずかであるがたわみの増加が進み破壊にいたる。

(3) 各荷重段階におけるせん断スパンの斜引張りひずみは過鉄筋ばりが低鉄筋ばりより大きい値を示し、低鉄筋ばりはせん断一曲げ破壊、過鉄筋ばりはせん断力の影響が考えられる。

(4) 各荷重段階のたわみ測定、せん断スパン内斜引張りひずみの測定などより、せん断くり返し荷重影響限は荷重段階 0.45 P_u 程度と考えられる。

(5) 一般に動的荷重下のせん断力は式(1)にて示される。

第 2 部の実験ならびに考察よりえられたことからは

(1) 上限荷重逐次上昇くり返し荷重挙動下の丸鋼ばり、異形丸鋼ばりともに、 a/d によるはり破壊の限界はほぼ成立する。

(2) 丸鋼、異形丸鋼ばりともにシアースパンを変えても、低鉄筋ばりは過鉄筋ばりより大きいたわみを示す。これは前者はせん断一曲げ破壊、後者はせん断応力に影響されるせん断破壊様相を示すことを意味する。

(3) 本実験の荷重挙動下、せん断スパンの中央斜ひずみは、丸鋼ばりは過鉄筋ばりが低鉄筋ばりより大きい値を示し、異形丸鋼ばりでは両者がほとんど等しい。すなわち丸鋼ばりでは低鉄筋ばりはせん断一曲げの影響、過鉄筋ばりはせん断力の影響が考えられるが、異形丸鋼ばりの場合は明瞭でない。

(4) 丸鋼、異形丸鋼ばりともに、各荷重段階のせん断スパン内中央ひずみとくり返し荷重回数との関係より、くり返し荷重影響限はほぼ荷重段階 0.45 P_u 程度と考えられる。

(5) 動的挙動下においても、異形丸鋼ばりは丸鋼ばりにくらべひびわれ間隔は小にて、全スパンにわたり平均し、大きいひびわれを生ずることなく力学的に安定で

ある。

(6) ある荷重段階において、動的挙動下のせん断力の式値と実験値とを照査したが、この場合もよく一致する。

本研究は昭和 39, 40 年度の文部省交付による総合研究費による研究の一部であり、本実験にご協力頂いた長谷川博氏、39 年度の卒論の岡崎(道路公団)、坂村(大林組)、実村(東洋建設)、畑島(森コンサルタント)、米倉(広大大学院)の諸君と 40 年度の卒論の岩田(宇部興産)、小畑(大林組)、片田(神戸市)、古賀(佐賀県)、富田(京阪電鉄)、村上(福岡県)の諸君に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) Chang, T.S., Kesler, C.E.: ACI, Vol. 29, No.12, 1958
- 2) Nordby, G.M.: ACI, Vol. 30, No. 2, 1958
- 3) Chang, T.S., Kesler, C.E.: ACI, Vol. 30, No. 2, 1958
- 4) Stelson, T.E., Cernica, J.N.: ACI, Vol. 30, No. 2, 1958
- 5) Verna, J.R., Stelson, T.E.: ACI, Vol. 59, No. 10, 1962
- 6) 中山紀男: セメントコンクリート, No. 198, 1963
- 7) Verna, J.R. Stelson, T.E., : ACI, Vol. 60, 1963
- 8) Cernica, J.N., Charignon, M.J., : ACI, Vol. 60, No. 9, 1963
- 9) 加賀美一二三: 土木学会論文集, 29 号, 1963
- 10) 西堀忠信: プレストレストコンクリート, Vol. 6, No. 2, 1964
- 11) 山田・北川・小長: 材料, Vol. 13, No. 127, 1964
- 12) Sinka, B.P., Gerstle, K.H., Turlin, L.G.: ACI, Vol. 61, No. 8, 1964
- 13) 野口・立花・田中・小須田: プレストレストコンクリート, Vol. 6, No. 1, 1964
- 14) 加賀美一二三: 山口大学工学部研究報告, 第 15 卷 1 号, 1965
- 15) 加賀美一二三: セメント技術年報, XIX, 1965
- 16) 国分・岡村: 土木学会論文集, 122 号, 1965
- 17) 中山紀男: 土木学会論文集, 122 号, 1965
- 18) 国分・多田・立花・松本: 土木学会論文集, 122 号, 1965

(1965.12.4・受付)
(1966.5.9)