

V-2 コンクリートの疲労に関する実験的研究

九州大学大学院 学生員 松下 博 通

1. まえがき

コンクリート部材の繰返し疲労破壊に対しては、その200万回時間疲労限界荷重は静的破壊荷重の50～60%、また、疲労限は繰返し回数 10^7 回までには存在しないといわれている。本報告はこれらのことを実験的に検討するため、静的破壊形式の異なる種々のRCはりおよび矩形断面と工形断面のRCはりについて繰返し疲労試験を行ない、200万回時間疲労限における耐久限度を求める実験を行ない、次に、プレーンコンクリート円柱状試体の圧縮疲労試験により、その耐久限度を求めるのと同時にその変形特性を調べた結果を報告するものである。

2. RCはりの疲労試験

表-1に示したように、供試体の形状、コンクリートの種類、主鉄筋の種類などを変えた7種のRCはり供試体について曲げ疲労試験を行った。供試体の形状寸法は図-1に示す通りで、使用したコンクリートの強度はいずれも250～350 kg/cm^2 である。繰返し荷重は正弦変化のものであり、繰返し速度は300回/分とした。

疲労試験を行った供試体の本数は、それぞれ3～6本であり、 P_1 - N 曲線の式を推定するには無理であるが、繰返し荷重の最小荷重を0.5 τ に固定したときの200万回疲労限における最大荷重は、ある程度まで推定されたので、その値と静的破壊荷重とともに表-1に示した。なお、疲労破壊形式は、いずれも静的破壊形式と一致した。ここで、RCはりの疲労破壊に関して修正 Goodman の関係が成立するならば、その200万回疲労限における耐久限度線図が描かれるが、これらはいずれも図-2に示す近似した2直線の間に含まれる。これらより、RCはりの場合には、コンクリートの種類や静的破壊形式などが異っても、静的強度($N=1$)に対する疲労強度の割合には大きな差異はないものと考えられる。

繰返し荷重によるはりの変形性状に関しては、中央たわみ量やひびわれ幅の変化を調べたが、本実験の限りでは、異形鉄筋と主鉄筋に使用したはりでその変化の割合が小さく、ひびわれ幅も小さく繰返し荷重を受ける場合に優れているようである。

表-1. RCはり供試体の種類および試験結果

はり	コンクリート	主鉄筋	静的破壊形式	P_s (t)	200万回疲労限にて P_1 (t)	P_2 (t)	P_m (%)	P_r (%)
A	普通	D19	鉄筋引張	6.50	3.80	0.50	33	25
		$\phi 19F$	"	5.20	3.15	"	35	26
		$\phi 19$	ボンド	4.10	2.59	"	38	26
	軽量	D19	鉄筋引張	6.85	4.10	"	34	26
		$\phi 19F$	"	5.50	3.60	"	37	28
B	普通	D19	斜引張	6.75	4.32	"	36	28
	軽量	D19	"	6.50	3.85	"	34	26

F: 主鉄筋にフックをつけたもの

P_1 : 繰返し荷重の最大荷重 $P_m = \frac{1}{2} (P_1 + P_2)$

P_2 : " 最小荷重 $P_r = \frac{1}{2} (P_1 - P_2)$

P_s : 静的破壊荷重

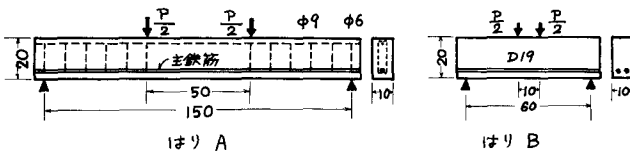


図-1 RCはりの形状寸法

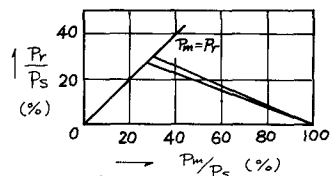


図-2 RCはりの耐久線図

3. PCはりの疲労試験

図-3に示す矩形断面およびI形断面を有するプレテンションPCはりについて曲げ疲労試験を行った。試験開始時のはりの有効プレストレス量は、矩形断面PCはりの上縁で 0 kg/cm^2 、下縁で 142 kg/cm^2 、I形断面PCはりの上縁で 26 kg/cm^2 、下縁で 85 kg/cm^2 である。繰返し荷重の最小荷重は、矩形断面PCはりで 0.5 t とし、9本の供試体と、I形断面PCはりでは $2.0, 4.0, 6.0 \text{ t}$ の3通りについてそれぞれ4, 6, 5本の供試体を疲労試験した。疲労試験結果より P - N 曲線を描き、それより求めた200万回疲労限度における最大荷重と静的破壊試験結果とともに表-2に示した。これより疲労破壊形式は矩形断面PCはりの場合には静的破壊形式と一致したが、I形断面PCはりの場合には疲労破壊形式が最小荷重によって異なり、最小荷重の大きい場合に静的破壊形式と一致した。したがって本実験のように設計荷重と比較して過大な繰返し荷重と受けるPCはりの疲労破壊に關しては、断面形状や有効プレストレス量の変化を把握し、そこに加わる応力状態を明らかにしてゆかねばその破壊形式は論じえないものと考えられる。200万回疲労限度における耐久限度線図を表-2から描いてみると図-4の通りである。I形断面PCはりの耐久限度線図は修正 Goodman の関係からいくぶん異なり、平均荷重軸に対して下に凸の形状を示した。これは従来より片振り試験 ($P_2 = 0$) によって耐久線図を描いた場合に危険側となり注意されるべきである。また前記したように、曲げを受ける場合のPCはりの応力分布を明らかにしなければならぬが、このことを調べるにはコンフリートが繰返し荷重と受ける場合の応力-ひずみ曲線の変化を明らかにしなければならぬ。また、繰返し荷重によって有効プレストレスが減少することが考えられるが、この点も明らかにしなければならぬ。図-5に繰返し荷重によって荷重-中央点たわみ曲線がどのように変化するかの1例を示した。静的載荷試験の場合と同様に、この曲線は大きく2直線で示されるが、荷重繰返し後は残留たわみが生じ、この原因には有効プレストレス量の減少やコンフリートの残留ひずみ量などが考えられ、次に曲線勾配の急変化は、はり下縁のプレストレスが零になる点と考えられ、この点が荷重繰返しによって荷重の小さい方に移行することにより有効プレストレスが減少していることが示されている。また、繰返し回数の増大とともに曲線の初期の勾配がゆるやかになることから、コンフリートの弾性係

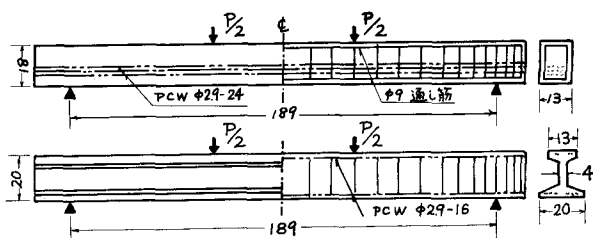


図-3 PCはりの形状寸法

表-2. PCはりの試験結果

はり断面形状	静的破壊形式 (N=1)	P_B (t)	200万回時間限度に於ける		疲労破壊形式	$\frac{P_m}{P_B}$ (%)	$\frac{P_2}{P_B}$ (%)
			P_2 (t)	P_1 (t)			
矩形	コンクリートの圧縮破壊	9.2	0.5	5.2	コンクリートの圧縮破壊	31	26
		9.2	2.0	5.6	PC鋼線引張切断	41	20
		9.0	4.0	5.8	コンクリートの圧縮破壊と鋼線引張切断が起った	54	10
I形	コンクリートの圧縮破壊	9.2	6.0	7.0	コンクリートの圧縮破壊	71	5

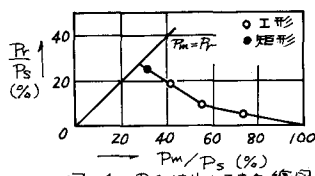


図-4. PCはりの耐久線図

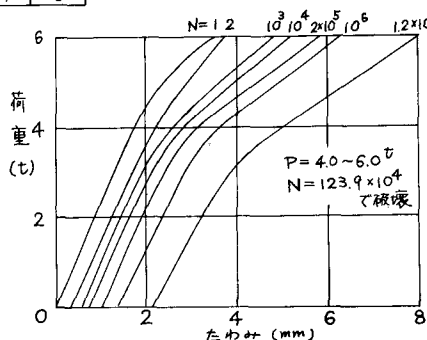


図-5 荷重-たわみ曲線の変化

って本実験のように設計荷重と比較して過大な繰返し荷重と受けるPCはりの疲労破壊に關しては、断面形状や有効プレストレス量の変化を把握し、そこに加わる応力状態を明らかにしてゆかねばその破壊形式は論じえないものと考えられる。200万回疲労限度における耐久限度線図を表-2から描いてみると図-4の通りである。I形断面PCはりの耐久限度線図は修正 Goodman の関係からいくぶん異なり、平均荷重軸に対して下に凸の形状を示した。これは従来より片振り試験 ($P_2 = 0$) によって耐久線図を描いた場合に危険側となり注意されるべきである。また前記したように、曲げを受ける場合のPCはりの応力分布を明らかにしなければならぬが、このことを調べるにはコンフリートが繰返し荷重と受ける場合の応力-ひずみ曲線の変化を明らかにしなければならぬ。また、繰返し荷重によって有効プレストレスが減少することが考えられるが、この点も明らかにしなければならぬ。図-5に繰返し荷重によって荷重-中央点たわみ曲線がどのように変化するかの1例を示した。静的載荷試験の場合と同様に、この曲線は大きく2直線で示されるが、荷重繰返し後は残留たわみが生じ、この原因には有効プレストレス量の減少やコンフリートの残留ひずみ量などが考えられ、次に曲線勾配の急変化は、はり下縁のプレストレスが零になる点と考えられ、この点が荷重繰返しによって荷重の小さい方に移行することにより有効プレストレスが減少していることが示されている。また、繰返し回数の増大とともに曲線の初期の勾配がゆるやかになることから、コンフリートの弾性係

数が低下していることが示されている。曲線の後期の勾配も荷重繰返しによる減少にゆるやかになるが、これはひびわれが減少に上昇しているためであると考えられる。このことは、図-6に示した曲げひびわれ幅の平均値と中央応力ひずみ量の関係は一次的な関係がみられることから推測される。

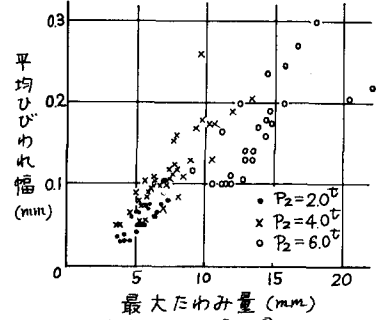


図-6 平均ひびわれ幅と最大たわみ量の関係

4. プレーンコンクリートの圧縮疲労試験

$\phi 75 \times 15 \text{ cm}$ のプレーンコンクリート円柱状試体による圧縮疲労試験を行った。試験は、耐久限度を求めるものと、応力ひずみ曲線の変遷を調べる2通りとした。プレーンコンクリートの耐久限度線図は、O. Graf や小西博士の論文に発表されているが、

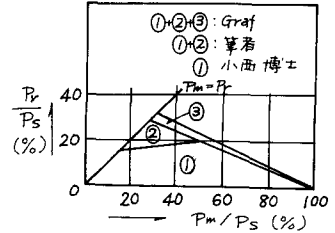


図-7 圧縮耐久線図

本実験では、まず最小荷重と静的破壊荷重の5%として最大荷重と荷重繰返し回数との関係 P - N 曲線の形状を調べた。最大荷重も一定の場合、凡口の数試体を圧縮疲労試験した場合の破壊時の繰返し回数 N_i の平均値は、 N_i のばらつきが $\log N_i$ で正規分布に従うとして、平均値 $\bar{N} = \sqrt[N]{N_1 \cdot N_2 \cdots N_n}$ として P - N 曲線を求めてみると、横軸 (N の対数) に対してわずかに上に凸の傾向がみられる。これは、従来より材料の疲労試験において、平均応力一定の場合、応力振幅と破壊時繰返し回数の対数の間には直線関係が成立するという仮定および時間疲労限における耐久限度線図も修正 Goodman の関係と同様の関係式が成立するとの仮定から考えれば考えることである。 P - N 曲線から200万回時間疲労限における最大荷重を求め、同時に最小荷重の大きさを静的破壊荷重の30%, 40%について試験した結果より耐久限度線図を描くと図-7に示す通りである。これから、筆者の実験結果では、O. Graf の試験結果に近似しているが、Graf の範囲はいくぶん過大であり、小西博士の範囲は、最小荷重の小さな部分で過小評価されているようである。

繰返し荷重による応力ひずみ曲線の変遷

の一例を図-8に示す。これは $N = 690$ 万で疲労破壊したものである。疲労破壊する場合、加力曲線は最初の荷重繰返しでは上に凸であるが次第に一直線となり、その後の繰返し荷重により逆に下に凸の形となる。これは

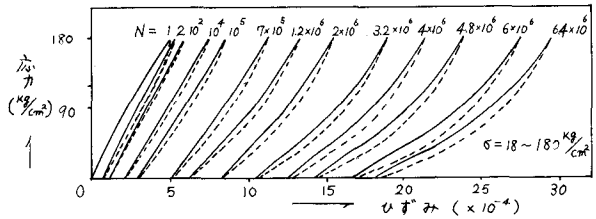


図-8 応力ひずみ曲線の変遷

繰返し荷重によりコンクリート内部の微細なひびわれが発生し、その部分のなじみの影響で低応力部分のひずみ量の増加が大きくなるであろう。荷重1サイクルによるヒステリシス損失は、加力曲線が上に凸から一直線になるまでは減少するが、以後の荷重繰返しによって次第に増大していく。繰返し荷重による残留ひずみ量および総ひずみ量(これは、繰返し荷重によるクリープひずみとして考えてよい)の変化は、その例を図-9に示した。これは $N = 1$ における最大ひずみ量が $350, 500, 600 \times 10^{-6}$ の大きさの最大荷重をとり、最小荷重を $N = 1$ で 50×10^{-6} のひずみが生じる大きさとする繰返し荷重を加えたものであるが、初期の荷重繰返しによってひずみは著しく増大するが、その後の荷重繰返しによって、繰返し回数と一次的にひずみは増大してやがて破壊に至っている。△印で示したも

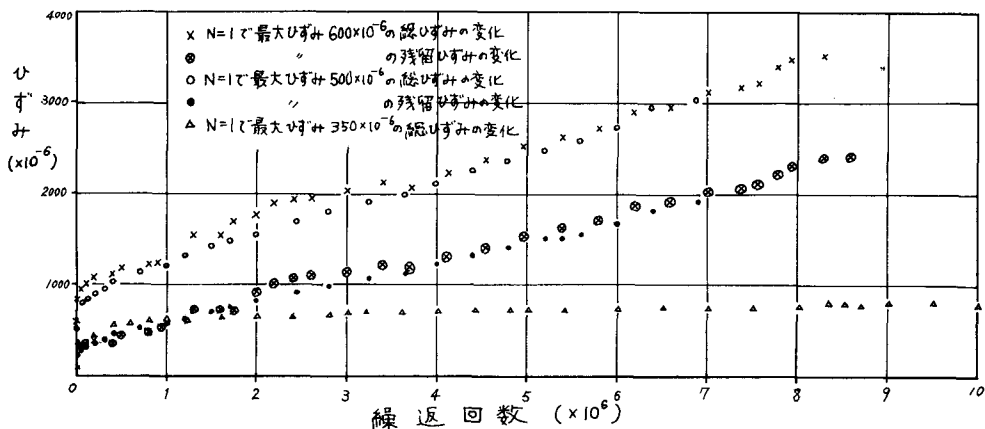


図-9 繰返回数と総ひずみおよび残留ひずみの関係

のは、1400万回荷重を繰返しても破壊に到らなかつたものであるが、ひずみ量には200万回以後の荷重繰返しによつて大きな変化はみられなかつた。疲労破壊時直前の総ひずみ量の値にはほぼ等しいものがあり、 $2000 \sim 3500 \times 10^{-6}$ であったが、長期間にわたつて荷重を繰返したもののほとんどそのひずみ量が大きかつた。これは疲労破壊時の総ひずみに一定持続荷重を受けた場合のクリープひずみに相当するものが含まれているため、疲労による

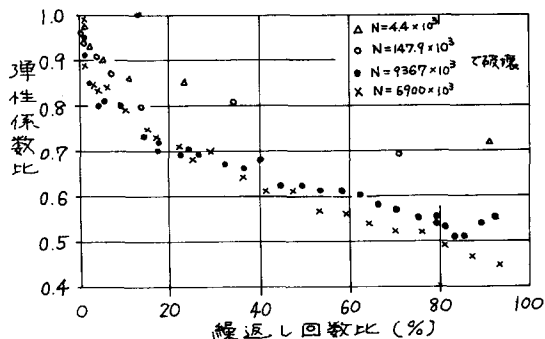


図-10 繰返し回数比と弾性係数比の関係

ひずみ量は総ひずみ量からそのクリープひずみと差引いたもので考えらるゝものであると考えられる。図-10に繰返し荷重による弾性係数の低下の傾向を示した。破壊時繰返し回数に対する任意繰返し回数の比と繰返し回数比とあるならば、弾性係数の低下率は繰返し回数比が一定はほぼ同一であると思われる。図-11に残留ひずみ量と弾性ひずみ量(総ひずみ量-残留ひずみ量)の関係を示した。両者には一次的な関

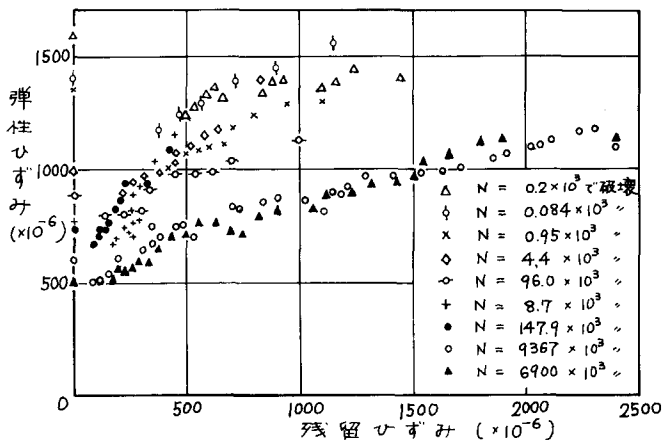


図-11 残留ひずみと弾性ひずみの関係

係がみられるが、高い応力と繰返えされる場合ほど残留ひずみ量の増大が弾性ひずみ量の増大に比較して小さいようである。これらの結果から繰返し荷重を受けるコンクリートのひずみ変化をとりえうれば疲労現象の把握も可能であると思われる。本研究を行なうに際し、九大徳光助教授、九工大出光講師の御指導をはじめ、九大土木実験室の御協力を得ました。ここに深く感謝する次第であります。又本研究に際し昭和44年度吉田研究奨励金を授与されましたことをここに感謝いたします。