

プレテンション PC 梁の疲労強度に関する研究

—プレテンション PC 梁の疲労性状—

松 下 博 通*
牧 角 龍 憲**

1. ま え が き

一般に PC 梁などの構造部材の安全率は、終局荷重の設計荷重に対する比で求められる。PC 梁は、RC に比べてかなり高い曲げモーメントまで曲げひびわれが発生せず、全断面有効な有利な構造部材として扱われるが、ひびわれ発生後は RC 梁とほぼ同じ挙動を示し、静的破壊荷重以下の荷重でも繰返しによる破壊、いわゆる疲労破壊を生じる。このため、実働荷重下での PC 構造物の安全率、いいかえればその終局耐力を知ろうとするとき、特に鉄道のまくらぎや橋梁などの、運行荷重が作用する部材においては、繰返し荷重下の疲労強度を把握することが重要となる。

PC 梁の疲労強度に関しては、過去多くの研究報告がなされているが、そのほとんどは実験結果の報告にとどまっており、疲労強度あるいはその推定方法は、未だ明確に把握されていない。その試験結果も、動的安全係数（設計荷重に対する疲労破壊荷重の比）が 1.6¹⁾ から 2.6²⁾ と、あるいは疲労強度（静的破壊荷重に対する疲労破壊荷重の比）が 0.48¹⁾ から 0.8³⁾ と大きくばらついており、これらの結果から PC 梁の設計に際し、疲労強度を考慮するのは困難な状態にある。また、PC 梁の疲労強度を推定する方法として、C.E. Ekberg ら⁴⁾はコンクリートと PC 鋼材の繰返し荷重下での応力と、それらの耐久線図からの推定、R.F. Worner ら⁵⁾は PC 鋼材の疲労強度からの推定、F.S. Ople ら⁶⁾は不等分布繰返し応力を受けるコンクリートの疲労強度からの推定を示しているが、前者はその応力算定が複雑であり、後二者は実験による裏付けがなく、一般的とはいえない。

そこで本研究では、PC 梁の疲労強度を、構成材料である PC 鋼材およびコンクリートの疲労強度に PC 梁系全体の挙動を組合せることにより推定することを目的として、まず本稿では、PC 梁の疲労に関するこれまでの研究概要と繰返し荷重下の挙動について調べた結果を述べ、構成材料の疲労強度をもとにした理論的解析による

PC 梁の疲労強度の推定方法の基礎資料を概説するものである。プレテンション PC 梁の疲労試験は I 形断面梁と長方形断面梁の 2 種類について行い、I 形断面梁では繰返し最小荷重を数種類変化させて試験し、同一最小荷重の場合、最大繰返し荷重と疲労寿命の関係は直線で近似されること、最小繰返し荷重の大きさの違いにより、たわみやひびわれなどの疲労性状ならびに疲労破壊形式が異なることなどの結論を得ている。ここにその報告をする。

2. PC 梁の疲労に関する既往の研究

2.1 PC 梁の疲労強度

Rowe⁷⁾ および Nordby⁸⁾ らの Review によれば、PC 梁の疲労に関する最初の研究は、1934 年に Freyssinet が RC と PC の電柱により行ったもので、次に 1946 年に、Abeles, 1948 年に Campus が行った鉄道用 PC まくらぎの疲労試験が続いている。Freyssinet は RC 梁が疲労破壊したときに PC 梁は未損傷であったことによりその疲労に対する安全性を、Abeles は 2^{1/2} 年使用後のまくらぎと未使用のものの挙動を比較し、その間に顕著な差がみられないこと、ならびに荷重繰返しが鋼線とコンクリートの付着に何ら影響していないことを、Campus は繰返し回数 100 万回ごとに上限荷重を増加させて 1000 万回までの試験を行い、その破壊形式が大きくばらつくこと、ならびに厳密な耐久線図を描くのは難しいことなどを示している。

1950 年代に入って PC 梁の開発普及とともに、疲労試験の報告も増えてきている。繰返し荷重の大きさの影響について、猪股¹⁾, Abeles²⁾, Lin¹⁰⁾, Bate³⁾ らは、設計荷重以下の繰返し荷重を受ける場合、荷重繰返しによる影響はほとんどなく、静的破壊に対する安全率も、繰返しの結果減少しないことなどを示している。しかしながら、ひびわれ発生荷重以上の繰返し荷重を受ける場合には、ひびわれやたわみが繰返し回数とともに増加し、静的破壊荷重より小さな荷重であっても破壊に至るため、動的安全係数および疲労強度の検討が必要であることを指摘している。この動的安全係数および疲労強度

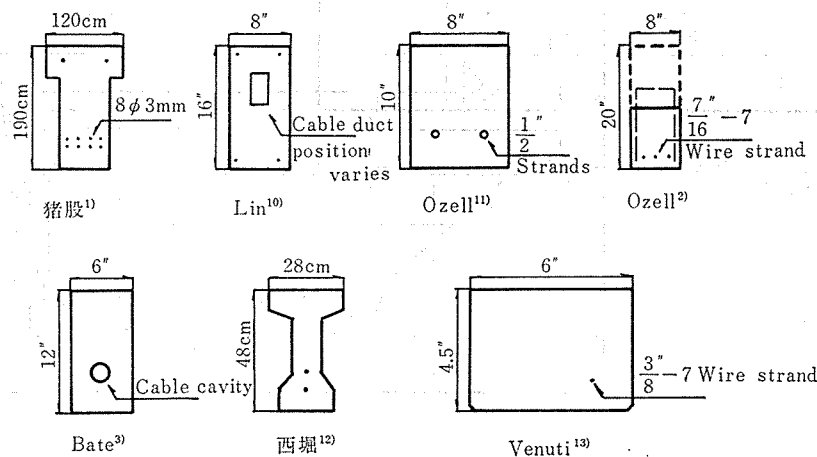
* 九州大学工学部土木工学教室講師

** 九州大学大学院工学研究科博士課程

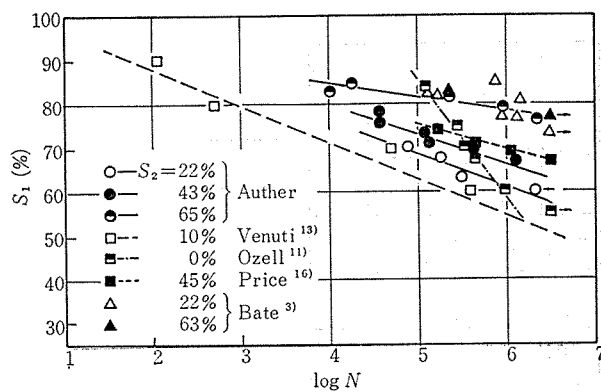
表一 各研究者の疲労強度および動的安全係数

年	研究者名	疲労強度	動的安全係数	梁種類 ^{*1}	繰返し最小荷重 ^{*2}	試験条件その他
1953	猪股俊司 ¹⁾	0.48~0.60	1.61~1.84	A	0.10~0.16	スパン 160 cm 2点荷重, 200 万回疲労強度
1955	T.Y. Lin ¹⁰⁾	—	2.20 ^{*a} , 2.60 ^{*b}	B	設計荷重×0.5 ^{*3}	連続桁スパン 15 m 3点支持 2点荷重 ^{*a} 鉄筋 無 ^{*b} 有
1956	A.M. Ozell ¹¹⁾	—	2.0	A	0	スパン 6 m 1点荷重
1956	A.M. Ozell ¹²⁾	—	2.6	A	設計荷重×0.5	合成桁スパン 6 m 2点荷重, 86 万回で算定
1963	S.C.C. Bate ³⁾	0.7~0.8	2.2	B	0.22~0.63	スパン 3 m 2点荷重, 100 万回疲労強度
1964	西堀忠信 ¹²⁾	0.5	—	B	上下限モーメント比 0.4	スパン 7 m 2点荷重, 100 万回疲労強度
1965	W. J. Venuti ¹³⁾	0.55	—	A	0.1	スパン 180 cm 2点荷重, 200 万回疲労強度

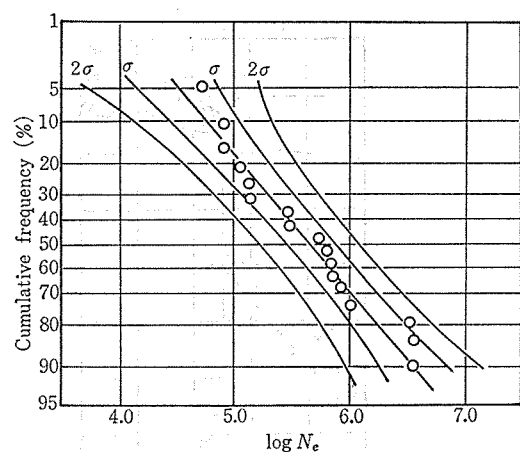
(注) ^{*1} A: プレテンション, B: ポストテンション
^{*2} 静的破壊荷重に対する比
^{*3} 50 万回繰返しごとに 500 万回まで繰返し荷重を増加



図一 各研究者の試験供試体断面



図二 各研究者の S-N 曲線



図三 Experimental plot and control curves for log-normal distribution¹³⁾ (R=0.60)

は、それぞれ設計荷重および静的破壊荷重に対する疲労破壊荷重の比で表わされるが、各研究者が報告している値をまとめると表一のようなになる。また図一にそれらの試験供試体断面寸法を示す。表一に示されるように、各研究者によりかなり値が異なっており、これから繰返し荷重の大きさや供試体断面などの試験条件に、PC 梁の疲労強度が顕著に影響されることがうかがえ

る。またこれらの疲労破壊形式は、Venuti¹³⁾ および角田¹⁴⁾の報告を除いたすべて静的試験時のコンクリートの圧縮破壊と異なる PC 鋼線の引張疲労破断による破壊を示しており、そのため多くの研究者が材料の疲労強度も重要であることを指摘している^{4), 5), 15), 16)}。

このPC梁の疲労強度を推定するための $S-N$ 曲線、繰返し荷重と疲労寿命の関係を縦軸に、静的破壊荷重を100としたときの繰返し荷重の比、横軸に疲労寿命の対数をとって図-2に示す。各研究者により、 $S-N$ 曲線がかなり異なるとはいえ、同一供試体においては、疲労寿命の対数と繰返し荷重の大きさの関係は直線で近似できることがわかる。

Venuti¹³⁾ は、この疲労寿命が同一繰返し荷重下にあっても大きくばらつくことを指摘し、90本のプレテンションPC梁の疲労試験からその分布が図-3に示すようにほぼ対数正規分布に従うことを報告している。さらに彼は、繰返し最大荷重の大きさにより疲労破壊形式が異なり、低いときは鋼線の引張破断による破壊、高いときはコンクリートの圧縮破壊による破壊、その中間では早

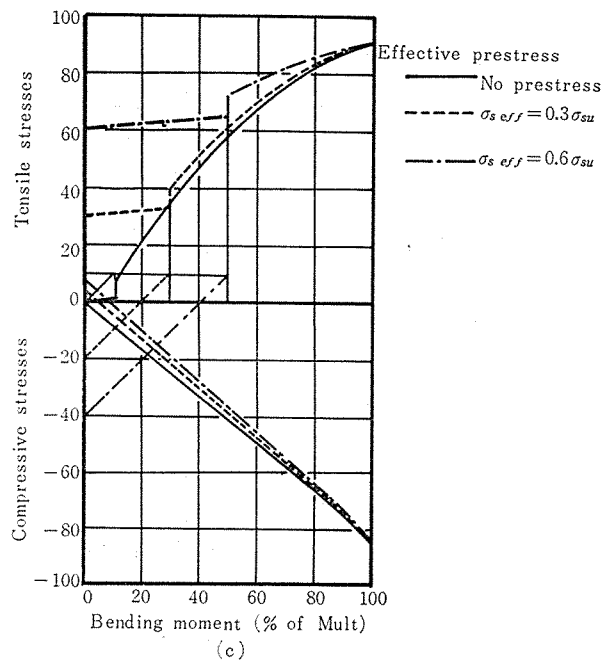
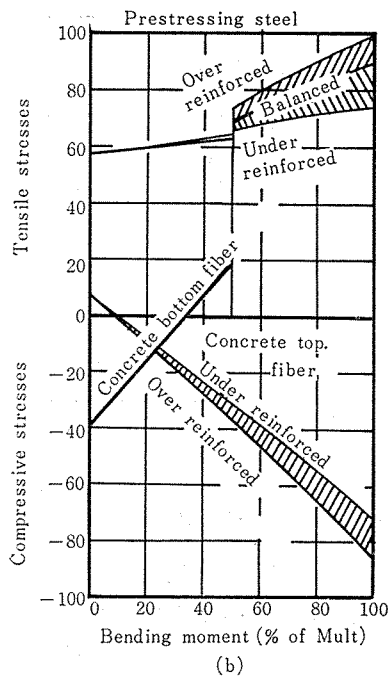
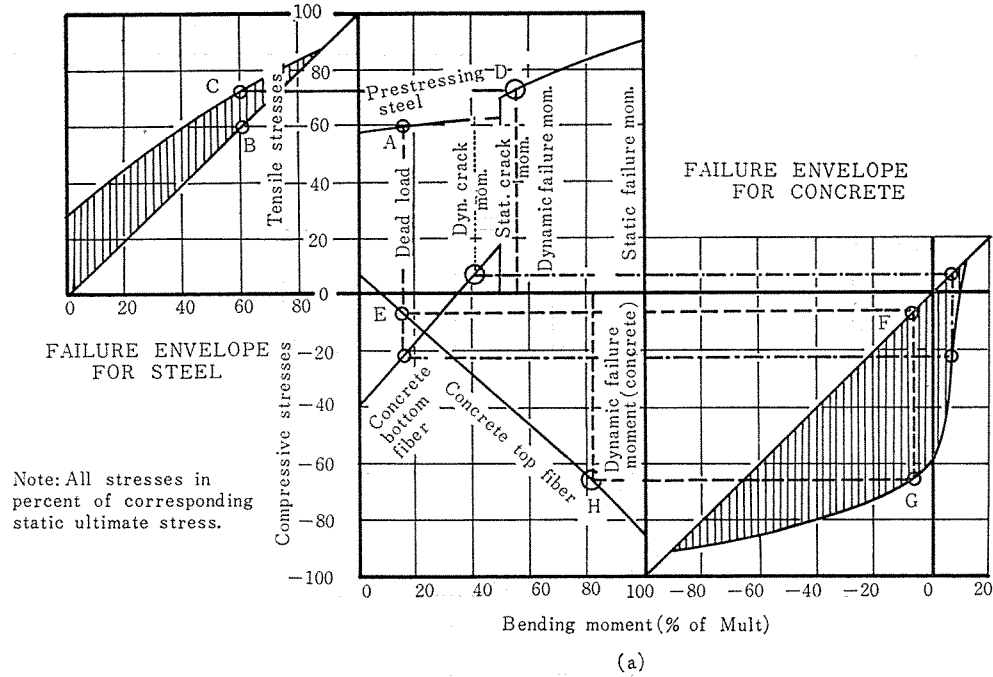


図-4 Stress-moment diagram by Ekberg⁴⁾

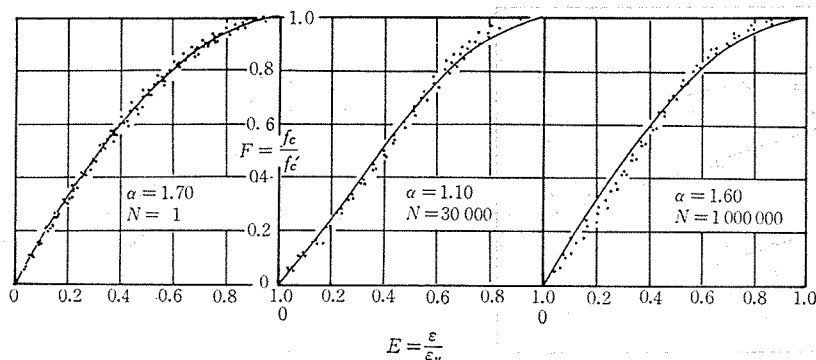


図-5 荷重繰返しによるコンクリートの応力-ひずみ曲線の変化⁵⁾

$$F = \alpha E + \left(3 - \frac{\alpha}{2}\right) E^2 + (\alpha - 2) E^3$$

い疲労寿命で破壊するのが、コンクリートの圧縮破壊による破壊形式をとることなどを示している。

2.2 PC 梁の疲労強度推定

1957年 Ekberg¹⁾は、構成材料の疲労強度から PC 梁の疲労強度および破壊形式を推定する方法として、PC 鋼材比とプレストレス量の影響も含めて、材料の耐久線図と PC 梁のモーメントストレス図を結びつけた考えを示している。図-4 にその概略を示すが、繰返し荷重下の各材料の上下限繰返し応力により PC 梁の疲労寿命を求めるもので、次のように推定する。図-4 (a) の左側は PC 鋼材の耐久線図、中央がモーメントと材料の応力の関係で上側が鋼材、下側がコンクリートで、右側はコンクリートの耐久線図である。下限繰返し荷重として死荷重を考えると、鋼材およびコンクリートの応力はそれぞれ 図-4 (a) 中の A, E で、その応力を平行にそれぞれの耐久線図に結びつける。鋼材に関しては A すなわち B が下限繰返し応力で、そのときの疲労限は C の大きさとなり、それをモーメントストレス図に平行に戻すと D となる。この D の応力を生じるモーメントが PC 梁の疲労破壊モーメントになる。コンクリートに関しても同様に E-F-G-H をたどり、H の応力を生じるモーメントがコンクリートによる梁の疲労破壊モーメントとなる。この場合は鋼材の疲労による破壊モーメントが小さく、鋼材の疲労破断による破壊形式で疲労破壊モーメントは D の応力を生じるモーメントであることが推定される。Ekberg はさらに、PC 鋼材比の影響およびプレストレス量の影響をモーメントストレス図にそれぞれ図-4 (b), 図-4 (c) のように表わし、鋼材比により疲労寿命、疲労破壊形式が異なること、プレストレス量が小さくなるほど疲労強度も小さくなることなどを示している。このプレストレス量が小さくなれば疲労強度が小さくなることは角田¹⁴⁾, Xercavins¹⁵⁾ らにより実験的に確かめられている。

Worner ら⁵⁾は 1966 年、コンクリートと PC 鋼線の試験結果ならびにプレテンション PC 梁の疲労試験結果をもとに、PC 鋼材の疲労寿命から PC 梁の疲労寿命を推定する方法を示している。Worner らはコンクリートの応力-ひずみ曲線を 3 次式で表示し、図-5 に示すようにその曲線が荷重繰返しとともに変化すること、ひびわれ発生断面で必ず疲労破壊が生じること、コンクリートと鋼線の付着が荷重繰返しとともに変化することなどを示し、ひびわれ断面における鋼線の繰返し応力を次のように算定するとしている。すなわち、まずある鋼線応力を定め、その鋼線ひずみを用いたひびわれ断面におけるひずみのつり合いと、荷重繰返し後のコンクリートの応力-ひずみ曲線を用いた内力のつり合いの両者を満足する中立平面高さを求め、その状態が生じる曲げモーメントの大きさを算定する。同様の方法でいくつかの鋼線応力と曲げモーメントの関係を求めた後、実際の繰返し荷重下での鋼線応力を求めるもので、疲労寿命のばらつきも含めた鋼線の S-N 曲線式に代入することにより、鋼線の疲労破断で破壊する PC 梁の疲労寿命が推定できるとしている。しかしながら、その算定において多くの仮定が含まれており、同様の推定方法として Price¹⁶⁾, Hanson ら¹⁷⁾の報告もあるが、まだ明確な算定に至っていない。

Ople ら⁶⁾は 1966 年、圧縮部のコンクリートの破壊が PC 鋼材の破壊に先だって起こるような PC 曲げ部材の疲労寿命に関して、不等分布応力を受けるコンクリートの疲労寿命をもとにした推定方法を報告している。

Ople らは、梁の圧縮部における不等分布応力を想定してコンクリートの偏心圧縮疲労試験を行い、図-6 にみられるように荷重の偏心量すなわち応力度勾配によりその疲労強度が変化することを示している。そして、供試体寸法と応力度勾配の関係を 図-7 に示す。コンクリート試験供試体と PC 梁におけるコンクリートの応力度

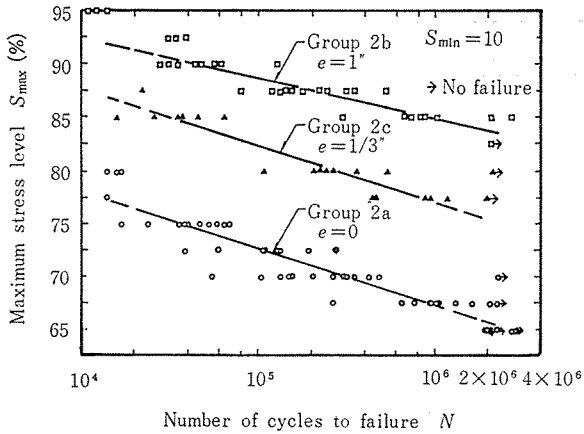


図-6 Maximum stress versus fatigue life⁶⁾

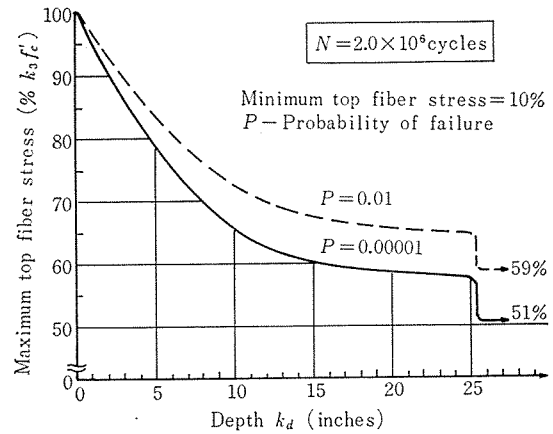


図-8 Fatigue strength versus compressive depth k_d

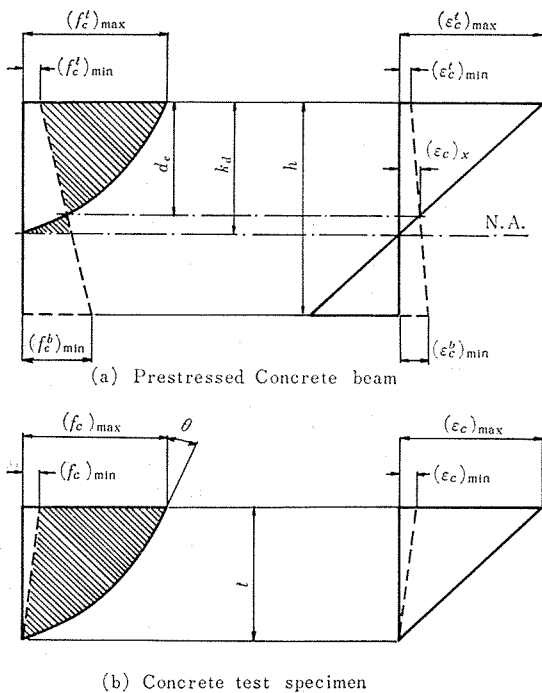


図-7 Stress and strain distribution⁶⁾

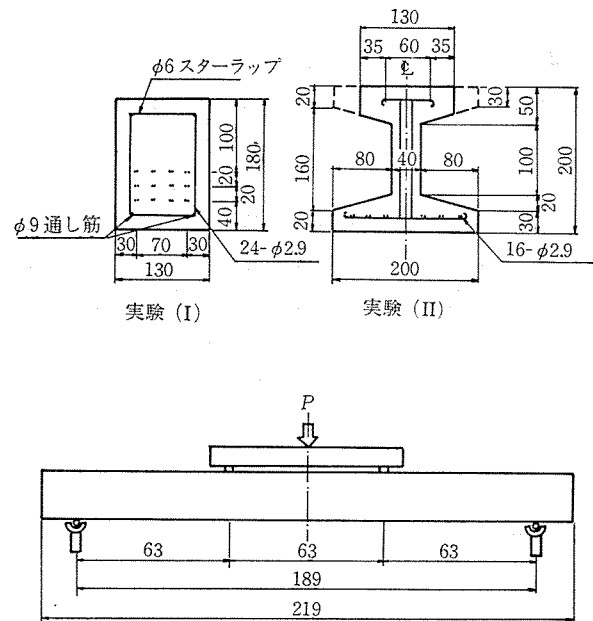


図-9 供試体断面および荷重方法

分布の関係、および統計的に解析したコンクリートの疲労寿命のばらつきを考慮して、図-8に示すような圧縮部の高さ k_d と 200 万回疲労強度の関係を求めている。この上縁応力度はコンクリート梁の極限圧縮応力度の百分率で示し、普通 $k_3=0.85$ を用いるとし、200 万回の疲労寿命の場合、破壊率、 $p=0.00001$ 、下限応力度 $0.10 f'_c$ に対し、上限応力度は PC 梁部材上縁で $0.50 f'_c$ までとることができるとしている。以上 PC 梁の疲労強度とその推定方法に関する過去の研究を簡単に述べたが、繰返し荷重の大きさの影響について、過去繰返し最小荷重の影響を扱ったものはなく、その点を明らかにするため、次にプレテンション PC 梁により最小荷重を数種変

化させた疲労試験を行い、その疲労強度、疲労性状を調べてみた。

3. プレテンション PC 梁の疲労試験

3.1 試験供試体

試験供試体として実験 I では長方形断面、実験 II では I 形断面のプレテンション PC 梁を用いた。その断面寸法を図-9に示す。プレストレスは $\phi 2.9$ mm 2 本よりストランド ($E_s=2.055 \times 10^6$ kg/cm², $\sigma_{sy}=188.4$ kg/mm², $\sigma_{su}=202.7$ kg/mm²) を実験 I では 12 組、実験 II では 8 組用いて導入し、導入緊張応力はそれぞれ 130.9 kg/mm², 136 kg/mm²、有効緊張応力はそれぞれ 104.6 kg/mm², 103.4 kg/mm² である。したがって有効プレストレス量は、梁上縁および下縁でそれぞれ実験 I 供試体

表-2 コンクリートの配合

種 別	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)			
			水	セメント	細骨材	粗骨材
実験 I	41	37	180.4	440	634.9	1189.1
実験 II	41	40	176.3	430	702.9	1136.7

で 0, 141.8 kg/cm², 実験II供試体では 26.3 kg/cm², 85.0 kg/cm² となる。表-2 にコンクリートの配合を示す。実験IIの梁供試体は3回に分けて打設した。これをA, BおよびCと区別する。梁供試体は打設後高温蒸気養生を行い, 材令1日で鋼線をカットしてコンクリートにプレストレスを導入し, その後室内に放置し空中養生とした。また梁供試体と同時にφ10×20 cm 円柱供試体を打設し, 圧縮強度および弾性係数を測定した。

3.2 試験方法

疲労試験機は森試験機製作所製曲げ疲労試験機で, その容量は静的・動的ともに10t, 繰返し速度は300回/分である。載荷は支持点を両端ともローラ支承とし, スパン189 cm の3等分, 2点載荷とした。その載荷状況を写真-1 に示す。

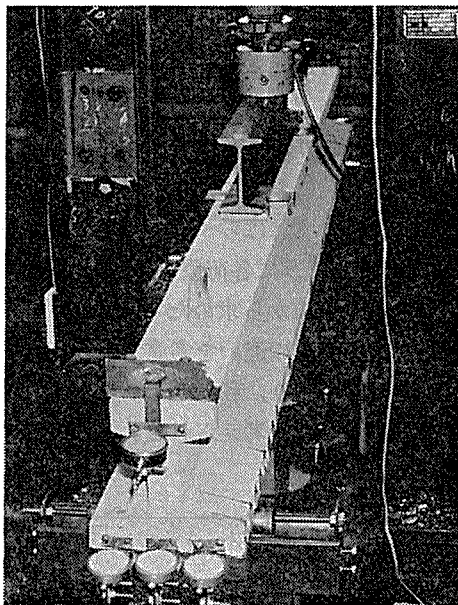


写真-1 載荷状況

本試験では繰返し最小荷重 P_2 を一定のもとに, 繰返し最大荷重 P_1 を変化させて, 疲労破壊するまでの繰返し回数ならびにその間のPC梁の挙動をとらえた。繰返し最大荷重 P_1 の大きさはひびわれ荷重以上でかつ数百回の荷重繰返しでは破壊しない範囲内で定め, 最小荷重 P_2 は実験Iではほぼ片振りに近い0.5tとし, 実験IIでは最小荷重が疲労強度に及ぼす影響も調べるため, 梁下縁応力が0となる4t前後を基準にして2.0, 4.0t

および6tの3種類とした。

また, 任意回数繰返し後に試験機をとめて除荷し, 残留変形を測定し, さらに静的に繰返し最大荷重まで載荷試験をして, たわみ量, ひずみ分布, およびひびわれ幅を測定し, 荷重繰返しによるPC梁の力学的性状の変化を測定した。たわみはダイヤルゲージによりスパン中央点で測定した。

ひずみは実験I, 実験IIとも, スパン中央部における長さ変化を標点間隔25 cm のホイットモアひずみ計(1/1000 mm/目盛)により測定した。その標点位置を図-10 に示す。

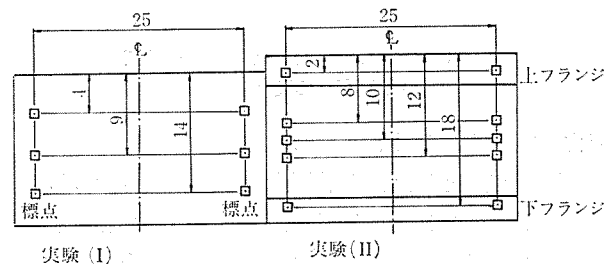


図-10 ひずみ測定用標点位置

ひびわれ性状の測定はひびわれ分布および本数の目視により, ひびわれ幅はクラックメータにより行った。

なお, 荷重繰返し回数200万回で供試体が破壊しない場合, その時点で試験を中止した。

3.3 試験結果および考察

疲労試験に先立って行った漸増載荷によるPC梁の静的試験結果, ならびにφ10×20 cm 円柱供試体の試験結果を表-3 に示す。

表-3 静的試験結果

	コンクリート φ10×20 cm		P C 梁		
	圧縮強度 (kg/cm ²)	引張強度 (kg/cm ²)	破壊荷重 (t)	破壊形式	
実験 I	537	30.0	9.2	コンクリートの圧縮破壊	
実験 II	A	457	33.4	9.2	〃
	B	415	29.1	9.2	〃
	C	525	38.1	9.2	〃

梁の破壊形式はいずれもコンクリートの圧縮破壊であった。曲げ引張ひびわれは, 実験Iでは4.5t前後, 実験IIでは5.0t前後で, 載荷点直下およびスパン中央点付近に生じ, 荷重増加とともにそのひびわれ幅, 本数ともに増加した。そのひびわれの発生により当然, ひずみ分布および中立軸位置の変化が予想されるが, スパン中央部のひびわれ断面とその近傍で測定した中立軸位置の

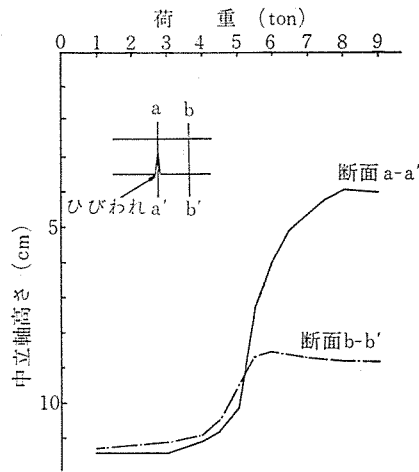


図-11 ひびわれ断面およびその近傍での中立軸高さの変化

変化(実験II)を 図-11 に示す。

全断面有効とした弾性計算上の中立軸高さは 11.2 cm であるが、ひびわれ発生断面においてはひびわれが発生する 5t 前後から急激に中立軸が上昇し、上フランジ直下まで上昇するのに対し、その断面から 5 cm 離れた断面においてはひびわれ発生後は逆にほぼ一定の中立軸位置を示している。このことから曲げモーメントによる変形あるいは応力はひびわれ断面に集中すると考えられる。

(1) PC 梁の疲労寿命および破壊形式

疲労試験結果を表-4 に示す。破壊形式は実験 I ではすべてコンクリートの圧縮破壊であったが、実験 II では繰返し最小荷重の大きさによって破壊形式が異なり、鋼線の引張疲労破断による破壊、鋼線の引張破断とそれに伴うコンクリートの圧縮破壊およびコンクリートの圧縮破壊の 3 通りの破壊形式が観察され、最小荷重 6.0t のグループのみ静的破壊試験と同じコンクリートの圧縮破壊であった。実験 I と実験 II において異なる結果が得られたのは、PC 鋼材比、有効プレストレス量および断面形状の違いに起因するものと考えられるが、Venuti は、PC 鋼材比および断面形状が実験 I に近い梁を用いた試験で、最小荷重一定で最大荷重を静的破壊荷重の 50% から 90% まで変化させた場合、疲労破壊形式が異なることを報告しており、供試体条件の違いのほかに、繰返し荷重の大きさが PC 鋼線およびコンクリートに及ぼす影響にも起因すると思われる。これらのことから PC 梁の疲労強度を推定する場合、一構成材料の疲労強度のみでは論ずることができず、Ekberg が示した荷重の大きさによる各構成材料の繰返し応力とそれぞれの耐久線図を結びつけて求めるモーメント・ストレス図の考え方をを用いる必要がある。

表-4 疲労試験結果

	梁 No.	最小荷重 (t)	最大荷重 (t)	破壊時繰返し回数	破壊形式
実験 I	1	0.5	4.5	$200 \times 10^4 \rightarrow$	破壊せず コンクリートの圧縮破壊
	2	0.5	5.0	$200 \times 10^4 \rightarrow$	
	3	0.5	5.3	110.5×10^4	
	4	0.5	5.5	17.2×10^4	
	5	0.5	6.5	3×10^4	
実験 II	A-2	2.0	5.5	$200 \times 10^4 \rightarrow$	破壊せず PC 鋼線の引張破断
	A-3	2.0	5.8	30×10^4	
	A-4	2.0	6.2	17×10^4	
	A-5	2.0	6.5	7×10^4	
	B-2	4.0	6.0	123.9×10^4	PC 鋼線の引張破断とそれに伴うコンクリートの圧縮破壊
	B-3	4.0	6.2	40.1×10^4	
	B-4	4.0	6.4	13.0×10^4	
	B-5	4.0	6.6	11.9×10^4	
	B-6	4.0	6.8	3.6×10^4	
	B-7	4.0	7.0	3.67×10^4	
	C-2	6.0	7.0	224×10^4	
	C-3	6.0	7.25	86.7×10^4	
	C-4	6.0	7.5	22.2×10^4	
	C-5	6.0	7.6	1.03×10^4	
C-6	6.0	7.75	1.9×10^4		

次に、繰返し最小荷重 P_2 が一定のもとでの、すなわち疲労破壊形式が同一の場合の最大荷重 P_1 と疲労寿命 N との関係を、横軸に N の対数を、縦軸に P_1 の静的破壊荷重に対する比 S (%) をとり、各グループごとにプロットして 図-12 に示す。同一最小荷重下では、両者の間に直線関係が認められるが、最小荷重の大きさによりその直線は異なり、また断面形状によっても異なっている。今回の試験においては同一繰返し条件下で 1 本ずつしか行っておらず、ばらつきを無視することになるが、図-12 に示すように各荷重レベルで 18 本の梁の試験を行い、その平均値から求めた Venuti の $S-N$ 曲線に比べて、最小荷重の違いを考慮すれば、ほぼ妥当な $S-N$ 曲線を示しており、各繰返し荷重における代表値に近い値が測定されたと考えられる。これより 2×10^6

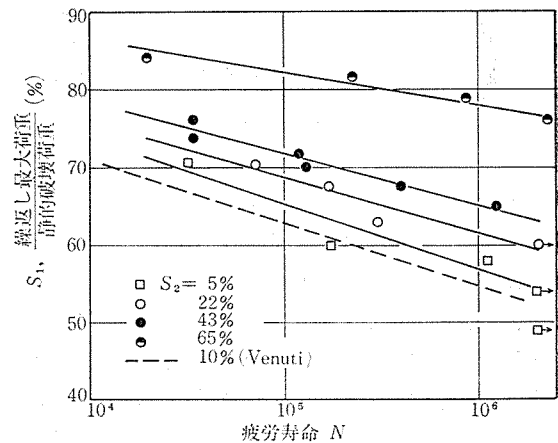


図-12 繰返し荷重比と疲労寿命の関係

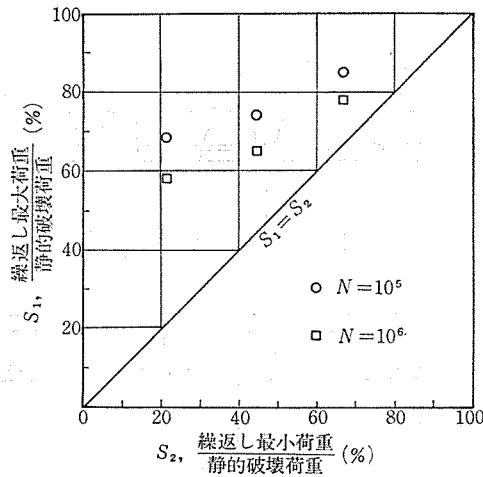


図-13 時間耐久線図

回疲労破壊荷重は実験Ⅰで 5.2t, 実験Ⅱでは最小荷重 2.0, 4.0 および 6t でそれぞれ 5.6t, 5.8t および 7.0t となる。これらの静的破壊荷重に対する比は順に 56%, 61%, 63% および 76% となる。

さらに、実験Ⅱによる S-N 曲線から、各グループの 10^5 回, 2×10^6 回時間疲労限を求め、静的破壊荷重に対する繰返し最大荷重および最小荷重の比をそれぞれ縦軸、横軸にとり、時間耐久線図を描いたのが 図-13 である。

プレーンコンクリートが圧縮繰返し応力を受ける場合、その時間耐久線図は直線となること、いわゆる修正 Goodman の関係の成立することが知られているが、部材においては、図-13 に示されるように直線関係はみられないようである。これは梁の疲労が、その構成材料の疲労の組合せで形成され、繰返し荷重の大きさによって疲労破壊形式が異なることもあるためと考えられる。

次にたわみやひびわれなどの変形状態においても、疲労寿命や疲労破壊形式にみられるような繰返し荷重の大きさの影響があるか否かを検討してみた。

(2) たわみ性状について

実験Ⅱでの各グループの荷重-たわみ曲線の一例を図-14~図-16 に示す。いずれの場合でも、1回目の載荷でひびわれが発生し、 $N=2$ においては $N=1$ のときより梁下縁応力が 0 になる荷重でひびわれが開口するため、荷重-たわみ曲線の折点は低い荷重で明確に生じ、 $N=2$ 以降の繰返しでその折点を示す荷重の変化はあまりみられない。しかしながら疲労破壊した繰返し回数あまり変わらない梁であっても、残留および最大たわみは繰返し荷重の大きさによりかなり異なっている。

すなわち破壊近傍で A-3 梁は最大たわみが 6mm 程度であるのに対し、B-3 梁は 10mm, C-4 梁は 18mm 程度を示しており、残留たわみもそれぞれ 1mm, 2.2

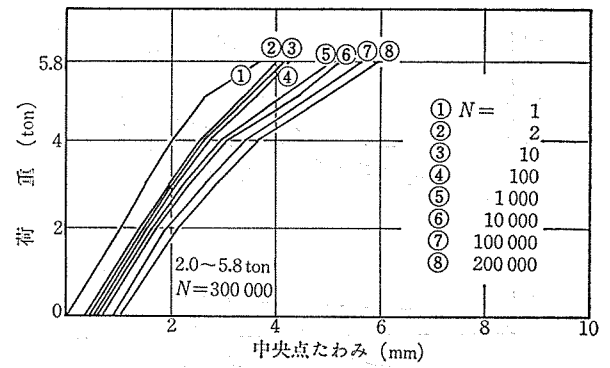


図-14 荷重-たわみ曲線 A-3 梁

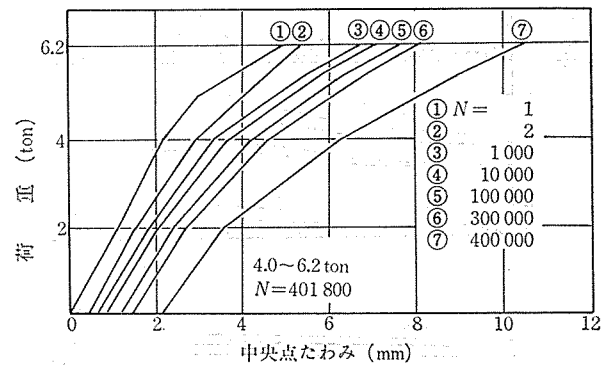


図-15 荷重-たわみ曲線 B-3 梁

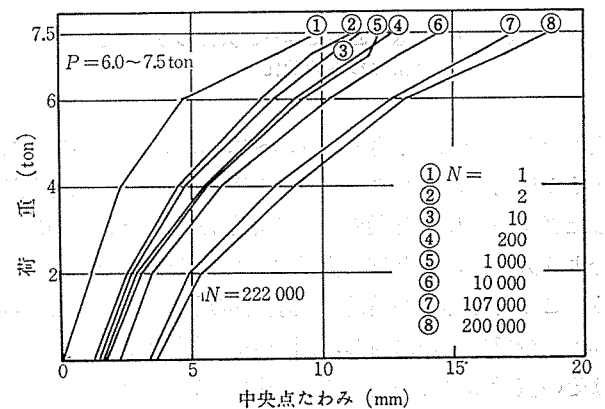
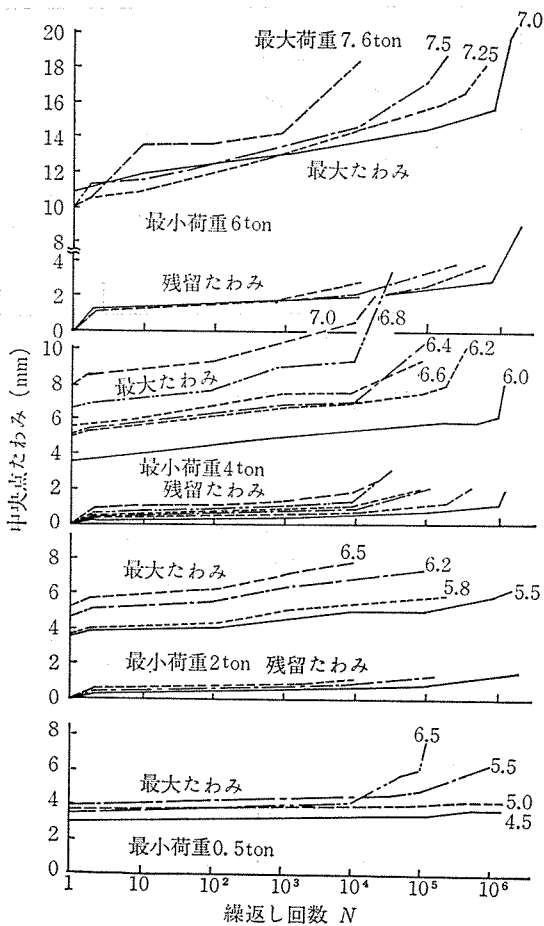


図-16 荷重-たわみ曲線 C-4 梁

mm, 3.6mm と最小繰返し荷重が大きくなるにつれて大きくなっている。また、A-3 梁と B-3 梁において繰返し最大荷重はそれぞれ 5.8t, 6.2t とほぼ同程度であるのに対し、変形状態が異なるのは、最小繰返し荷重の大きさにより疲労破壊形式とともに疲労寿命が異なり、その寿命の長短により差が生じたと考えられ、この点でも最小繰返し荷重の影響は大きいことがうかがえる。図-17 に、繰返し回数に伴う最大たわみ残留たわみの変化を示す。図-17 に示されるように、PC 鋼線の疲労破断により破壊した最小荷重 2t のグループ A の各



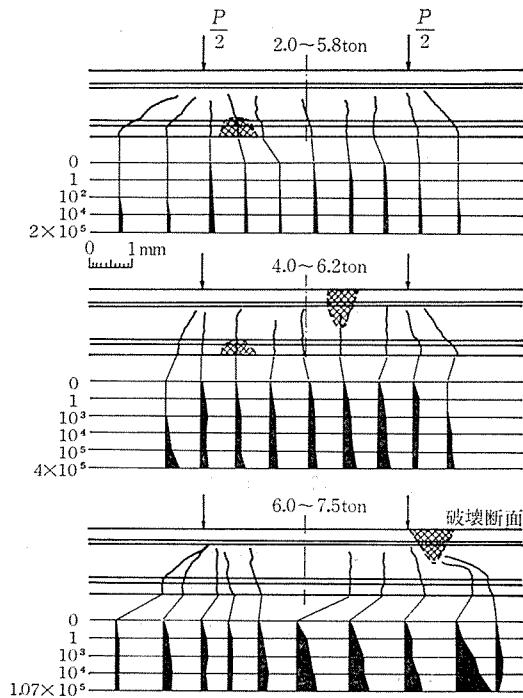
図一七 繰返し回数に伴う最大たわみおよび残留たわみの変化

梁のたわみ増加は小さく、1.5~2.0mm 程度の増加であるのに対し、コンクリートの圧縮破壊により疲労破壊したグループCの各梁のたわみ増加は残留たわみの増加分より大きく、また破壊直前に急激な増加を示している。このとき静的載荷時の破壊荷重近傍のたわみは22mm 前後であるのに対し、同一破壊形式を示したC梁ではその値近くまでのたわみの増加を示しており、これらのことから繰返し荷重の大きさによる疲労破壊形式の違いとたわみ性状の違いは関連があるものと考えられる。

(3) ひびわれ性状について

静的載荷試験において実験Iの場合は4.5t 付近、実験IIでは5.0t 付近で、スパン中央あるいは載荷点直下に曲げひびわれが発生した。その後荷重増加につれて既存のひびわれがその幅を増大するとともに、新しいひびわれが等モーメント区間に発生した。

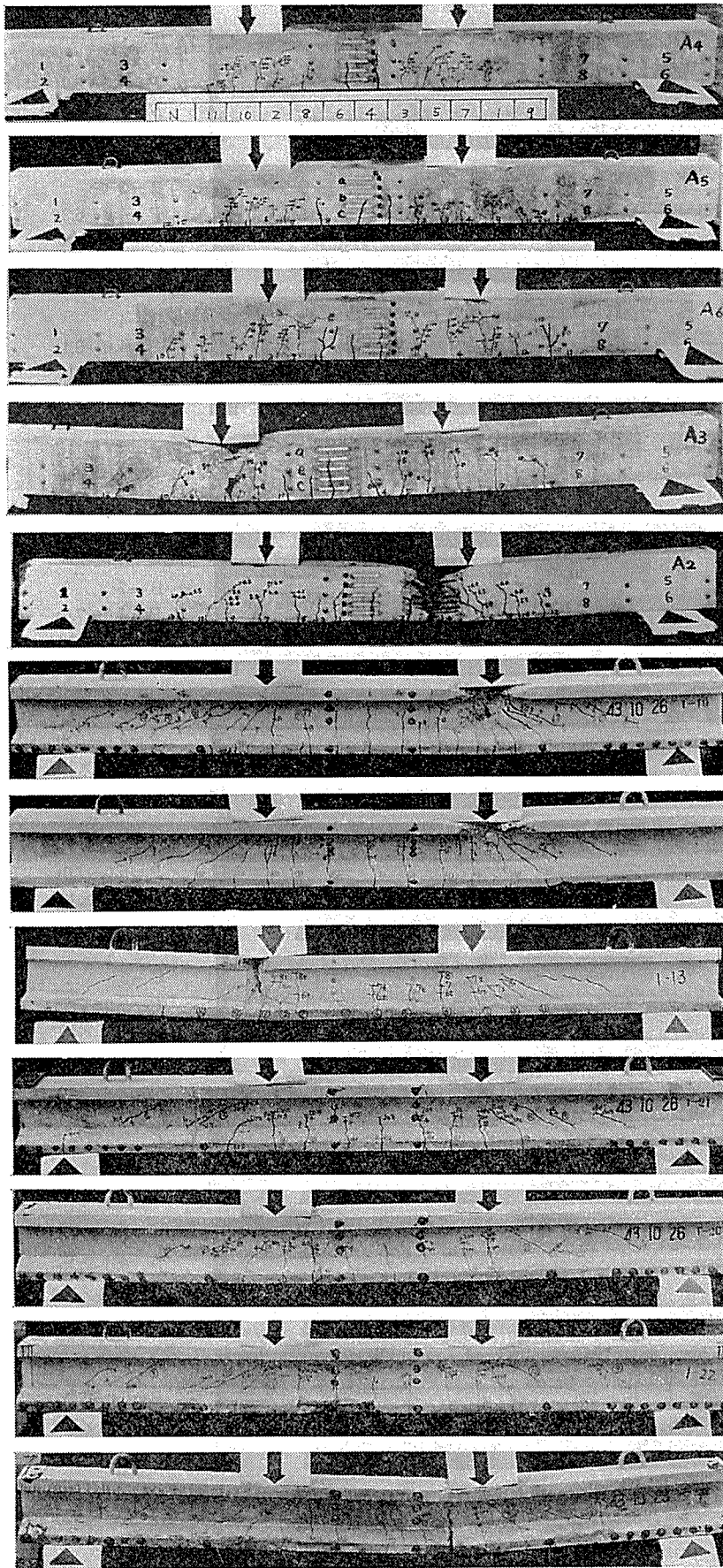
疲労試験においては最大荷重をひびわれ発生荷重以上としているため、 $N=1$ からひびわれがある状態で、その後荷重繰返しとともにひびわれ幅が増加し、また新し



図一八 最大荷重時のひびわれ幅の変化

いひびわれが発生する。斜引張ひびわれは、実験I, II いずれも $10^2 \sim 10^4$ 回の間に発生し、その後の荷重繰返しによる発生は認められなかった。

写真一2 に破壊時の破壊形式およびひびわれ状況を示す。いずれの梁においてもひびわれ断面において破壊が生じているが、繰返し荷重の大きさにより破壊形式が異なるとともにその破壊位置も異なっていることがわかる。実験Iにおいて、静的載荷および繰返し載荷いずれの場合もコンクリートの圧縮破壊による破壊であったが、すべて載荷点直下で破壊が生じている。同様に実験IIにおいても、コンクリートの圧縮破壊を示した静的載荷供試体および繰返し最小荷重6.0t (グループC) の供試体の破壊は載荷点直下で、コンクリートの圧縮破壊が生じている。これに対しPC鋼線の引張破断により破壊した実験IIの繰返し最小荷重2.0t および4.0t のグループの供試体はいずれも、載荷点直下から等モーメント区間に10~20cm 入った位置で破壊を生じている。図一八に任意回数繰返し後に観察した最大荷重時のひびわれ幅の変化を示すが、コンクリートの圧縮破壊が生じた供試体においては最大ひびわれ幅を示す断面と破壊断面が一致しているのに対して、鋼線の引張破断が生じた供試体においては必ずしも最大ひびわれ幅を示す断面に破壊は生じておらず、逆に破壊断面に隣接したひびわれが最大ひびわれ幅を示す傾向がみられた。またそのひびわれ幅も破壊近傍で $N=30$ 万回で破壊した繰返し荷重2~5.8t の梁の最大ひびわれ幅が0.1mm であるの



実験 I

$P=0.5\sim 4.5t$
 $N=200$ 万回破壊せず

$P=0.5\sim 5.0t$
 $N=200$ 万回破壊せず

$P=0.5\sim 5.3t$
 $N=110.5\times 10^4$

$P=0.5\sim 5.5t$
 $N=17.2\times 10^4$

$P=0.5\sim 6.5t$
 $N=3\times 10^4$

実験 II

A-1
 静的載荷
 $P_u=9.2t$

B-1
 静的載荷
 $P_u=9.2t$

C-1
 静的載荷
 $P_u=9.2t$

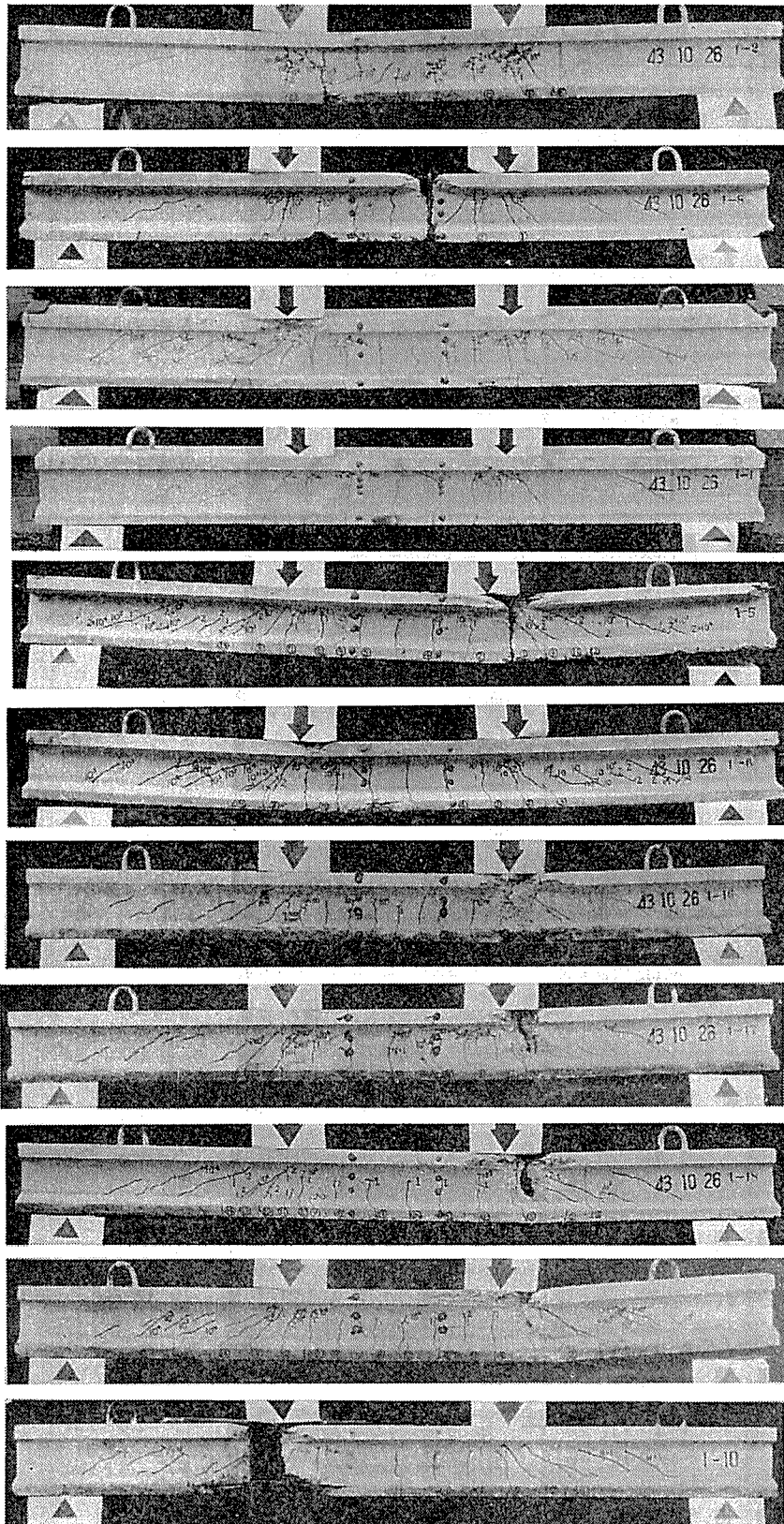
A-2
 $P=2.0\sim 5.5t$
 $N=200$ 万回破壊せず

A-3
 $P=2.0\sim 5.8t$
 $N=30\times 10^4$

A-4
 $P=2.0\sim 6.2t$
 $N=17\times 10^4$

A-5
 $P=2.0\sim 6.5t$
 $N=7\times 10^4$

写真-2 (a)



B-2
 $P=4.0\sim 6.0t$
 $N=123.9\times 10^4$

B-3
 $P=4.0\sim 6.2t$
 $N=40.1\times 10^4$

B-4
 $P=4.0\sim 6.4t$
 $N=13.0\times 10^4$

B-5
 $P=4.0\sim 6.6t$
 $N=11.9\times 10^4$

B-7
 $P=4.0\sim 7.0t$
 $N=3.67\times 10^4$

B-6
 $P=4.0\sim 6.8t$
 $N=3.6\times 10^4$

C-2
 $P=6.0\sim 7.0t$
 $N=224\times 10^4$

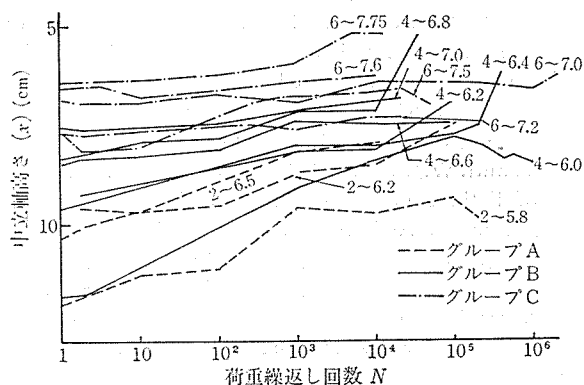
C-3
 $P=6.0\sim 7.25t$
 $N=86.7\times 10^4$

C-4
 $P=6.0\sim 7.5t$
 $N=222\times 10^4$

C-5
 $P=6.0\sim 7.6t$
 $N=1.03\times 10^4$

C-6
 $P=6.0\sim 7.75t$
 $N=1.9\times 10^4$

写真-2 (b)



図—19 荷重繰返しによる中立軸高さの変化

に対し、 $N=22$ 万回で破壊した繰返し荷重 $6\sim 7.5\text{t}$ の梁では 0.75mm とかなり異なった値を示しており、他の梁においても同様のことがみられた。これらのことからひびわれ性状においても最大および最小繰返し荷重の影響は大きいことがうかがえる。またこのひびわれ性状の違いにより、たわみの違いも生じたものと思われるが、さらにひびわれ幅が増大するとともにひびわれ長さも増加することから、中立軸高さも荷重繰返しとともに変化することが考えられる。図—19 に最大荷重時の中立軸高さとして繰返し回数との関係を示す。この中立軸高さは、断面の各位置におけるひずみ測定結果から求めたもので、実験Ⅰでは測点数が少ないため、実験Ⅱについてのみ示している。いずれの梁においても荷重繰返しとともに中立軸高さが減少することがみられるが、破壊時近傍の中立軸高さなど、やはり繰返し荷重の大きさにより異なっている。静的破壊時近傍の中立軸高さは 5cm 程度であるが、鋼線の引張破断により疲労破壊したグループ A の梁は $8\sim 10\text{cm}$ の中立軸高さまで減少し、それに対し、鋼線の引張破断に伴いあるいは独自にコンクリートの圧縮破壊が生じたグループ B、C の梁はほぼ $5\sim 6\text{cm}$ の中立軸高さまで減少し破壊に至っている。

このように荷重繰返し下において引張りひびわれの伸展などにより中立軸高さが増加するため、PC 梁の疲労強度を推定する際、その構成材料の応力はこの中立軸高さの変化を無視して論ずることはできないといえる。

以上述べてきたことから、繰返し荷重によるたわみやひびわれ幅の変化は、その最大荷重の大きさのみならず最小荷重の大きさ、いかえれば荷重振幅の大きさにも影響されることが考えられ、またコンクリートが圧縮破壊する位置と鋼線が引張破断する位置が違うこと、ならびに最大ひびわれ幅を示す断面以外で鋼線が引張破断することから、等モーメント区間内であっても各断面で応力が異なることが考えられる。そのため力学的つり合い

条件式を求めるにあたってひびわれなどの影響による補正を行う必要があり、コンクリートおよび鋼線の繰返し応力も繰返し回数に伴い変化することを考慮して求める必要があろう。

4. ま と め

以上 PC 梁の疲労強度に関して、既往の研究と PC 梁の疲労試験結果について述べてきたが、ここでは、PC 梁の疲労強度推定に際して考慮すべき事項を述べ、まとめとする。

- 1) PC 梁の疲労強度は鋼材比や、プレストレス量などの供試体条件のほか繰返し最小荷重の大きさによって変化するが、その耐久限度線図には単一材料の疲労耐久限度線図の関係式、いわゆる修正 Goodman の関係は適用できない。
- 2) PC 梁の疲労強度はその構成材料の疲労強度に依存することはいうまでもないが、繰返し荷重の大きさにより疲労破壊形式が異なることから、一構成材料の疲労強度のみでは論ずることはできない。
- 3) したがって、Ekberg が示した繰返し荷重下の各構成材料の繰返し応力とそれぞれの耐久線図を結びつけて疲労強度を推定するモーメント・ストレス図の考え方で疲労強度を論ずるのが妥当であろう。
- 4) 一定繰返し荷重下であっても、たわみやひびわれの増大ならびに中立軸位置の移動により各構成材料が受ける繰返し応力の大きさは変化することが考えられ、モーメント・ストレス図を描く場合、そのような PC 梁の系全体の疲労を考慮する必要がある。
- 5) たわみやひびわれ幅の荷重繰返しによる変化は繰返し最大荷重のみならず繰返し最小荷重の大きさにも影響され、特に繰返し最小荷重がひびわれ荷重 P_f を超えると顕著になる。

終りに、本研究を行うに際し、九州大学工学部土木工学教室徳光善治教授には貴重な御意見を頂き、また PC 梁製作に際してはオリエンタルコンクリート(株)鳥栖工場の方々に御援助いただいた。ここに深謝致します。なお、本研究には第 1 回斎藤記念プレレストレストコンクリート奨励金が授与された。ここに御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 猪股俊司：プレレストレストコンクリートに関する研究、土木学会論文報告集、第 17 号、昭 28、pp. 47~80
- 2) Ozell, A.M. and J.F. Diniz : Composite Prestressed Concrete Beams under Repetitive Loading, Journal of PCI, March 1958, pp. 19~28
- 3) Bate, S.C.C. : A Comparison between Prestressed-concrete and Reinforced-concrete Beams under Repeated Loading, Proc. Instn. civ. Engrs., Vol. 24,

- March 1963, pp. 331~358
- 4) Ekberg, C.E., R.E. Walther and R.G. Slutter : Fatigue Resistance of Prestressed Concrete Beams in Bending, Proceeding of ASCE, Vol. 83, ST 4, July 1957, pp. 1304-1~17
 - 5) Worner, R.F. and C.L. Hulsbos : Probable Fatigue Life of Prestressed Concrete Beams, Journal of PCI, April 1966, pp. 16~39
 - 6) Ople, F.S. JR and C.L. Hulsbos : Probable Fatigue Life of Plain Concrete with Stress Gradient, Journal of ACI, Jan. 1966, pp. 59~81
 - 7) Rowe, R.E. : An Appreciation of the Work carried out on Fatigue in Prestressed Concrete Structures, Magazine of Concrete Research, March 1957, pp. 3~8
 - 8) Nordby, G.M. : Fatigue of Concrete—A Review of Research, Journal of ACI, August 1958, pp. 191~218
 - 9) Abeles, P.W. : Static and Fatigue Tests on Partially Prestressed Concrete Constructions, Journal of ACI, Dec. 1954, pp. 361~376
 - 10) Lin, T.Y. : Strength of Continuous Prestressed Concrete Beams under Static and Repeated Loads, Journal of ACI, June 1955, pp. 1037~1059
 - 11) Ozell, A.M. and J.F. Diniz : Fatigue Tests of Prestressed Concrete Beams pretensioned with 1—2 inch Strands, Journal of PCI, June 1958, pp. 79~88
 - 12) 西堀忠信 : PC 桁の疲労について, プレストレストコンクリート, April 1964, pp. 40~46
 - 13) Venuti, W.J. : A Statistical Approach to the Analysis of Fatigue Failure of Prestressed Concrete Beams, Journal of ACI, Nov. 1965, pp. 1375~1394
 - 14) 角田和夫, 西堀忠信, 土門正明 : PC 桁の曲げ疲労試験について, 第 8 回日本道路会議論文集, pp. 855~857
 - 15) Xercavins, P. : Recherche de la valeur optimum de la tensivir des armatures de précontrainte, Second Congress of the F.I.P. Amsterdam, 1955.(猪股俊司 : プレストレストコンクリートの設計および施工, 技報堂から引用)
 - 16) Price, K.M. and A.D. Edwards : Fatigue Strength of Prestressed Concrete Flexural Members, Proc. Instn. civ. Engrs., Vol. 47, Sept. 1970, pp. 205~227
 - 17) Hanson, J.M., C.L. Hulsbos and D.A. Van Horn : Fatigue Tests of Prestressed Concrete I-Beams, Proceedings of ASCE, ST 11, Nov. 1970, pp. 2443~2464

◀ 刊行物案内 ▶

プレストレストコンクリート世界の動向と 新道路橋示方書による設計計算例

本書は第7回技術講習会のためのテキストです。その内容は、前半は世界における PC の動向として、諸外国の特殊な PC 橋施工例 Alm 橋ほか数橋と LNG タンクについて、また建築構造物については最近世界的に関心の高まってきたアンボンド PC 工法をとりあげ、その理論と利用法について詳しく説明されている。後半には新しいコンクリート道路橋示方書に基づいた設計計算例として、静定構造物についてはポストテンション単純Tげた橋について、また不静定構造物については連続げた橋について詳細折込付図を添付し詳述されている。実務者には必携の図書としてお勧めいたします。希望者は代金を添えプレストレストコンクリート技術協会にお申し込みください。

体 裁 : A 4 判

定 価 : 3,000 円 送 料 : 400 円

内 容 : プレストレストコンクリート世界の動向——(A) 土木構造物——Alm 橋, Ruck-A-Chucky 橋, Columbia 斜張橋, Brotonne 橋, Carpinto 橋, Fos-sur-Mer, Montori-en-Bretagne の各 LNG タンクほか, (B) 建築構造物——アンボンド PC 工法の発達の歴史, アンボンド PC 鋼材と防せい材, アンボンド PC 部材の曲げひびわれおよび曲げ破壊耐力, 曲げひびわれおよびたわみ特性と普通鉄筋の必要性, アンボンド PC 部材の曲げ疲労耐力, フラットスラブ構造, Ⅲ種アンボンド PRC 構造, 新コンクリート道路橋示方書による設計計算例, (C) 静定構造物設計計算例——設計計算の対象, 材料強度・許容応力度等, 曲げモーメントが作用する部材としての設計, せん断力が作用する部材としての設計, (D) 不静定構造物設計計算例——不静定構造物の断面力の算定, 設計条件, 各部の設計ほか, 折込付図 4 枚