

プレストレスト コンクリート桁の疲労に関する研究について

野 口 功*

1. ま え が き

プレストレスト コンクリート桁（以下 P C 桁と略す）の静的試験については国の内外においてすでに多くの報告があり、いくつかの理論式が提案されているが、試験による実測値と計算値が比較的良好に一致し、それらのうちのあるものは設計の際にも実用されている。P C 桁は補強材である P C 鋼材が常に高い応力で緊張されているので、疲労に対する性状に関して問題になることも少なくない。しかしながら P C 桁の疲労強度に関する実験報告は比較的少なく、後述する文献以外にはそう沢山ないようである。もつとも古い報告は Freyssinet¹⁰⁾ によつて 1936 年に発表されたもので、これは鉄筋コンクリートと P C のポールの疲労強度を比較したもので、P C の方が疲労に対して優つているという報告である。わが国においては猪股博士の報告⁹⁾ があり、これは諸外国の P C 桁の疲労に関する報告の中にもしばしば参考文献として引用されている。

国鉄においても数年来 P C まくら木を大量に敷設し、その疲労に対する抵抗性もだんだん認識されるようになってきているが、特に最近鉄道橋に P C を利用する場合が非常に多くなつてきたので、ここで改めて P C 桁の疲労に関する研究をまとめて、疲労に対する性状を知つておくのも、むだではないと思う。

P C 桁の疲労曲げ破壊強度と静的曲げ破壊強度の関係を求めた研究のうちから主なものを表—1 にまとめてみた。疲労強度に影響する要素は、P C 鋼線の量、引張強度、緊張応力度、コンクリートの強度、疲労荷重の振幅、くり返し回数および速度、P C 鋼線とコンクリートとの付着の有無等々が考えられる。これらの要素について一つ一つ回答を与えるには文献の数が少なすぎるが、疲労曲げ破壊強度は、静的曲げ破壊強度の 50~65% 程度である。

Xercavins¹¹⁾ は P C 鋼材の緊張応力度と P C 桁の疲労強度の関係について報告している。これによると、他の条件が同じ場合 P C 鋼材の緊張応力を高くすればするほど疲労強度は高くなるという結論を得ている（表—1）。これに対して R.E. Rowe⁶⁾ は P C 鋼材の有効

プレストレストを抗張力の 76% にも達する値で使用できるのは Xercavins が実験に使用した P C 鋼材の降伏点応力度 (0.2% 永久ヒズミ) が引張強度の 99.4% (引張強度 152 kg/mm², 降伏点応力度 150 kg/mm²) という特別なものであるため、非常に高い応力で緊張されても、なおかつ弾性限界内にあるからだとして述べている。しかし R.E. Rowe は P C 鋼材の緊張力を高めれば疲労に対して強くなることは否定していない。C.E. Ekberg^{14,15)} 等も P C 鋼材の緊張力を高めれば疲労強度が増すことを述べ、彼等の提出している図—1 のグラフによつても求められる。

表—1 からわかるごとく、静的荷重による桁の破壊は P C 鋼材量の特に少ない場合（表—1⁵⁾—D.E.）をのぞいて一般に圧縮側コンクリートの圧壊またはコンクリートの斜めひびわれによつてひきおこされるが、疲労荷重による破壊は一般に鋼材の切断によつてひきおこされる。ただ Billington¹⁹⁾ の報告にある付着のないポストテンションの場合には P C 鋼材の応力が桁全長にわたつて均等に変化するため、応力の振幅が小さくなり、P C 鋼材は疲労に対して楽になるため、P C 桁の疲労破壊が圧縮側のコンクリートにおいておこつている。このため付着のない場合には桁の静的強度に対する疲労強度の割合が高くなると述べられている。

連続桁の疲労に関しては T.Y. Lin の報告¹²⁾ があるのみである。これによると連続桁の疲労破壊は中央支点上 P C 鋼材の破断によつてひきおこされる。中央支点上の P C 鋼材が破断される疲労荷重の大きさは静的破壊荷重の 67% で、一般の単純桁の場合より多少高目の値を示している。連続桁の場合には中央支点上の P C 鋼材が切断されても構造物としては静定化するだけで、破壊とはいえない。Lin の報告では中央支点上の P C 鋼材が切断された後に連続桁としての静的強度の 84% の静的強度が残つていたと述べている。これはスパン部分の P C 鋼材が疲労によつて破断していないため、後に述べる疲労限度以下のくり返し荷重を受けた桁の静的強度は低下しないということからも当然のことであろう。連続桁が疲労荷重を受けた場合に、静定化という一つの段階をとることも数多い連続桁の利点の一つに数えられ

* 正員 土木学会文献調査委員会委員、国鉄技師、構造物設計事務所

表-1 疲 勞 曲 げ 破 壊

論 文	P C 方 式	桁断面およびスパン	P C 鋼 線			コンクリート圧縮強度 kg/cm ²				
			断 面 積	引張強度 kg/mm ²	有効プレストレス%					
5) 猪股俊司	A プレテンション φ3 単線	矩形 $h=18.5\text{ cm}$ $b=12\text{ cm}$ スパン $l=1.6\text{ m}$ T形 $h=19\text{ cm}$ $b_1=12\text{ cm}$ $b_2=8\text{ cm}$ スパン $l=1.6\text{ m}$	0.51	205	42	530 (円筒)				
	B		0.51	205	46	530 (")				
	C プレテンション φ2 単線		0.565	172	39	530 (")				
	D プレテンション φ3 単線		0.33	234	40	530 (")				
	E		0.33	234	52	530 (")				
11) Xercavins	A ポストテンション φ5 鋼線	矩形 $h=23\text{ cm}$ $b=14\text{ cm}$ スパン $l=1.8\text{ m}$	0.487	152	51	380 (立方)				
	B		"	"	64	" (")				
	C		"	"	76	" (")				
15) A.R.E.A.	A プレテンション ワイヤースtrand	矩形 $h=45\text{ cm}$ $b=42\text{ cm}$ スパン $l=5.5\text{ m}$	0.532	188	43	620 (円筒)				
	B		"	"	"	540 (")				
	C		"	"	"	400 (")				
12) T.Y. Lin	A ポストテンション 2 連続 Magnel の集中ケーブル	矩形 $h=40.6\text{ cm}$ $b=20.3\text{ cm}$ スパン $2 \times 7.5\text{ m}$	0.76	179	47	580 (立方)				
	B ポストテンション 2 連続 Magnel の集中ケーブル, 引張縁に鉄筋配置						0.37(軟鋼) 41(降伏点 32)	179	47	580 (")
								0		
19) Billington	付着のないポストテンション Magnel 集中ケーブル	T形 $h=80\text{ cm}$ $b_1=30\text{ cm}$ $b_2=15\text{ cm}$ スパン $l=11\text{ m}$	0.344	178.5	53 (推定)	500 (立方)				

* 有効プレストレスは引張強度に対する%

** この試験においては疲労荷重の大きさを順時上げて行つたので、荷重の低いときからの通算のくり返し回数を示す。

る(表-3)。ただこの実験では疲労荷重の振幅が他の実験の例にくらべて小さいというところに問題が残されている。

強度に関しては P.W. Abeles^{2),3)} 猪股博士⁵⁾, W. Eastwood¹⁶⁾ B.T.C. Research Dept²¹⁾ 等によつて結論されているが、疲労限度以下のくり返し荷重によつては桁の静的強度は全然低下しない。Eastwood は逆にわずかながら高くなつていと報告している。

疲労限度以下のくり返し荷重をうけた P C 桁の静的

表-2 W.Eastwood によつてなされたひびわれに対する疲労の実験結果

桁	コンクリート圧縮強度 σ_{78} (立方体)		桁下縁応力度の上下限	ひびわれ発生までのくり返し回数	くり返し回数	*疲労をうけた桁の強度比
1	518 kg/cm ²	グラウトなし	0~157 kg/cm ²	クラックなし	2.0×10 ⁶	104%
2	595 kg/cm ²	"	-17.5~174	可視的クラックなし	10.0×10 ⁶	98%
3	350 kg/cm ²	"	-17.5~174	"	"	104%
4	658 kg/cm ²	"	-28~185	0.3×10 ⁶	1.0×10 ⁶	104%
5	693 kg/cm ²	グラウト	-42~199	0.25×10 ⁶	1.0×10 ⁶	103%
6	448 kg/cm ²	グラウト	-42~199	0.25×10 ⁶	1.0×10 ⁶	107%

* 疲労をうけた桁の強度比とは疲労をうけない桁の静的強度に対する疲労をうけた桁の静的強度の%

パーシャル プレストレッシングの場合には設計荷重によつて桁の引張縁のコンクリートに引張応力が働くために、疲労によるひびわれの問題がおこってくる。

猪股博士⁵⁾ は圧縮強度 400~500 kg/cm² のコンクリートによつて製作した P C 桁の曲げ引張りによるひびわれの疲労限度を 35 kg/cm² と推定している。

W. Eastwood¹⁶⁾ は Lee-McCall 鋼棒を用いた P C 桁についての実験を行い表-2 のような結果を得ている。この表から 2×10⁶ 回のくり返しに対する曲げ引張りの疲労限度はグラウトを行わない場合に 15~20 kg/cm², グラウトを行つた場合には 35 kg/cm² 程度と推論することができよう。

P.W. Abeles²⁾ はプレテンションで鋼線をよく分布させ、さらに緊張しない鋼線を加えた桁において実験を行つた結果、modulus of rupture 70~77 kg/cm² のコンクリートにおいて曲げ引張りの疲労限は 45 kg/cm² であり、くり返し荷重によつて引張り縁にひ

表-3 T.Y.Lin¹²⁾によつてなされた P C 連続桁の疲労試験結果

桁	A	B	C	D
載荷方法 鉄筋 設計荷重(t)	静 なし 5	静 あり 5	くり返し なし 5	くり返し あり 5
ひびわれ荷重(t) 中央支点				
測定値	6.7	7.2	7.2	8.0
計算値(弾性理論)	7.0	7.0	6.5	6.5
スパン				
測定値	11.0	10.5	10.2	10.5
計算値(弾性理論)	11.3	11.3	10.5	10.5
終極荷重(t) 静荷重のみ				
測定値	17.8	20.8		
計算値(プラスチック ヒンジ理論)	18.8	20.8		
くり返し荷重 最初のワイヤーの切断(t) くり返し回数			11.0(5.0) 3.2×10 ⁶	13.0(8.0) 4.4×10 ⁶
約半数のワイヤーの切断(t) くり返し回数			12.0(8.6) 3.7×10 ⁶	14.0(10.0) 5.1×10 ⁶
破壊までの静的試験(t)			15.0	18.0

註 () 内はくり返し荷重の下限: くり返し回数は試験開始のときからの通算のくり返し回数

試験結果一覧表

静的キレツ荷重(静的破壊荷重に関する%)	静的破壊		疲労破壊			備考		
	モーメントまたは荷重	破壊状態	モーメントまたは荷重の振幅	くり返し回数	静的破壊に対する%		疲労破壊の状態	
51	2.95t-m(計算値)	—	0.3~1.57t-m	2.0×10 ⁶	53	P C 鋼線破断		
55	3.01t-m	斜めひびわれ	0.3~1.57t-m	2.0×10 ⁶	52	”		
—	2.94t-m(計算値)	—	0.3~1.43t-m	2.0×10 ⁶	49	”		
49	1.93t-m	P C 鋼線破断	0.42~1.13t-m	2.0×10 ⁶	59	”		
60	1.94t-m	”	—	—	—	—		
43	4.84t-m	コンクリートの圧壊	0.33~2.76t-m	1.0×10 ⁶ (推定)	57	P C 鋼線の破断		
50	”	”	0.33~3.25t-m	” (”)	67	”		
57	”	”	0.65~3.9t-m	” (”)	81	”		
41	51.4t-m	コンクリートの圧壊	3.45~26.0t-m	1.52×10 ⁶	51	P C 鋼線の破断		
40	48.0t-m	”	3.45~26.1t-m	0.97×10 ⁶	54	”		
42	46.4t-m	”	3.45~24.9t-m	0.95×10 ⁶	54	”		
スパン 62	17.8t	中央支点コンクリート圧壊	8.6~12.0t	**3.2×10 ⁶	67	中央支点上の P C 鋼線約半分破断		
中央支点 38					20.8t	”	67	”
スパン 50								
中央支点 35	—	—	2.0~8.0t	**4.5×10 ⁶	—	荷重点のコンクリートの圧壊		

疲労試験によつて中央支点上の P C 鋼線約半分が破断したが、その後で静的試験を行い、A桁は 15.0t (疲労試験を行わない桁の静的破壊荷重の 84%) B桁は 17.2t (同上 83%) まで静的載荷能力があつた。

ひびわれの発生を見ない場合には、静的ひびわれ強度になんら影響を与えないと報告している。

Magnel^{7),8)} は付着を有するポストテンション桁においてコンクリートの modulus of rupture が 84 kg/cm² である場合、ひびわれに対する疲労限度は 30 kg/cm² であるとしている。

T.Y. Lin¹²⁾ の報告によると表-3 に示すように中央支点上縁における最初のひびわれ発生はくり返し荷重をうけた場合より、静的荷重をうけた場合の方が早くおこつており、載荷点における下縁のひびわれ発生荷重は静的荷重の場合より、くり返し荷重の場合の方が早い。これはくり返し荷重のかけ方が、荷重の低いところから 50 万回程度のくり返し回数の荷重をかけては順次荷重を高めて行つたので、この間にひびわれモーメントの再配分が行われたためと想像される。軟鋼材を配置したことによる影響は、ひびわれに対しては静的、くり返しともに 5~10% の荷重の増加となるが、破壊に対しては 18% の増加となつており、軟鋼材を配してもひびわれ荷重はそれほど大きくならない。Magnel^{7),8)} と Billington¹⁹⁾ の報告は同じ形の桁について行われた実験の報告であるが、Billington の方は桁の一端はケーブルをループ状にまわしてアンカーし、付着のない P C 桁で、Magnel の方は付着を有する桁である。この 2 つの報告を比較して見ると静的荷重に対するひびわれ安全率が付着のある場合に 2.5、ない場合に 1.88、くり返し荷重に対するひびわれ安全率は付着のある場合に 1.51、ない場合に 1.4 で、これによるとくり返し荷重を受ける場合は付着のあるなしによつて、ひびわれに対する安全率はあまり変わらないということになる。

P C 鋼材のアンカー部分の疲労という問題も一般に心

配されていることがらの一つである。

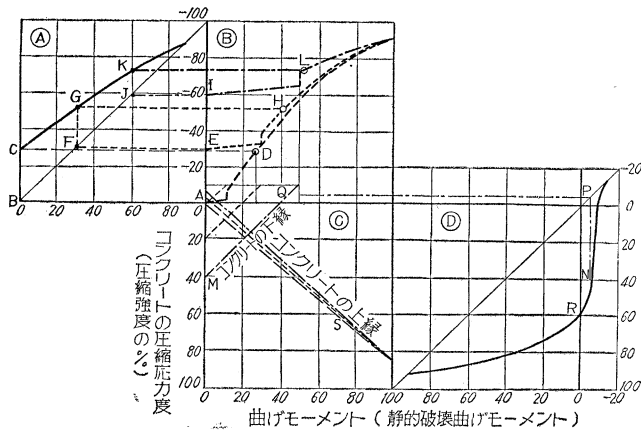
アンカー部分の疲労は P C 鋼材とコンクリートとの間に付着がない場合に特に問題となるが、W. Eastwood¹⁶⁾ は Lee McCall 鋼棒で、また Billington¹⁹⁾ は桁の一端でケーブルをループ状にアンカーした Magnel ケーブルでグラウトを行わない桁について試験を行つたが、いずれの場合にもアンカーに異状をみとめていない。プレテンションの P C 桁で行つた試験についてもコンクリートと鋼線との付着が疲労によつて切られたという報告はあげられていない。

以上に述べたことがらを要約すると次のようになる。

1. P C 桁の疲労破壊強度は普通の場合、静的破壊強度の 50~65% である。付着のない場合にはこの値はさらに高くなる。
2. 疲労破壊荷重は静的ひびわれ荷重より高い。したがつて P C 桁にひびわれが発生していなければ、一般に疲労破壊に対する心配は無用である。
3. 他の条件が同じ場合には P C 鋼線の緊張応力を高めれば、それだけ疲労強度は増加する。
4. コンクリートのひびわれに対する疲労限度は単純桁の場合 35 kg/cm² 程度であるが、P C 鋼材とコンクリートとの間に付着のない場合にはこれより多少低く、補強用の鉄筋を配置した場合は多少高くなる。連続桁のひびわれについては単純桁と異なる。
5. 連続桁は疲労に対して、単純桁より構造上有利である。
6. 疲労限度以下のくり返し荷重を受けても静的強度に影響がない。

図-1 C.E. Ekberg 等の提出した P C 桁の疲労図

参 考 文 献



【図-1 の説明】

応力は P C 鋼材に対しては鋼材引張強度に対する％、コンクリートはコンクリートの圧縮強度に対する％で表わされている。

図-1 ①は鋼材の引張り圧縮の 10⁶ 回くり返しの疲労限度を示すもので、例えば、疲労荷重による下限応力度が 0 なら上限は引張強度の 30％、下限応力度が高くなるにつれて振幅はせまくなり、およそ 90％ で振幅は 0 となる。

図-1 ②は P C 桁にかかる曲げモーメントと鋼材応力度の関係を示すものである。コンクリートにひびわれを生じると鋼材の応力は急激に高くなる。疲労破壊が鋼材の破断によつてひきおこされる場合、例えば鋼材の緊張応力度が引張強度の 60％ とすると、疲労応力度の上限は K で応力 K を生じる曲げモーメントは L となり、この場合の疲労曲げ強度は静的強度の約 50％ となる。図-1 ②の曲線は鋼材の緊張応力度、鋼材の断面積によつて形が変わつてくる。図における-----線は鋼材にプレストレスがない場合、.....線は引張強度の 30％ の有効プレストレスの場合、-----線は 60％ の有効プレストレスの場合を示す。

図-1 ③はコンクリートの 16⁶ 回くり返しの疲労限度を示すもので、例えばコンクリートの下限応力度が 0 なら下限応力度は圧縮強度の 60％、また上限応力度が 0 なら下限応力度は引張応力度となり、圧縮強度のおよそ 6％ となる。

図-1 ④はコンクリートの上縁および、下縁応力度と曲げモーメントの関係を示すもので、例えば無載荷でコンクリートの下縁圧縮応力度が圧縮強度の 40％ の場合、疲労荷重によるひびわれ応力は P となり、下縁に引張応力度 P を生ずる曲げモーメントは Q で、約 43％ である。また桁が疲労によつて上縁コンクリートの圧壊を生ずる場合、無載荷のときの上縁応力度を 0 とすると、コンクリートの圧縮上限応力度は R すなわち 60％ となり、応力 R を生ずる曲げモーメントは約 70％ となる。

P.W. Abeles :

1) "Fatigue tests on partially prestressed concrete members" 4th Congress Int. Assn. Bridge and Structural Engineering: 1953

2) "Static and fatigue tests on partially prestressed concrete construction" Jour. of A.C.I. Vol.26, No.4, 1954-12

3) "Prestressed reinforced concrete sleepers tested as simply supported beams" Concrete and Constructional Engineering 1947-4

4) "Composite [partially prestressed concrete slabs strength under repeated and static loading" Engineering Vol. 178, No.4628, 1954

猪股 俊司 :

5) "プレストレスト コンクリート桁に関する研究" 土木学会論文集第 17 号, 1953

"Fatigue tests in bending of prestressed concrete beams" Proc. of A.C.I. 1952~53

R.E. Rowe :

6) "An Appreciation of the work carried out on fatigue in prestressed concrete structures" Magazine of Concrete Research Vol.9, No.25, 1957-3
Cement and Concrete Assoc. Technical Report

G. Magnel :

7) "Nouvel essai de fatigue d'une poutre en béton précontraint" Le béton précontraint 3^e ed. 1953, Science et Technique No.7/8, 1953

8) "Essai de fatigue d'une poutre en béton précontraint" Proc. of the International Congress of prestressed concrete 1951

F. Campus, R. Jacquemin :

9) "Essais d'endurance sur traverses des voies ferrées en béton armé ou précontraint" Bull. Université Liège 1947, Annales des Travaux Publics de Belgique Vol.103, No.2, 1950

Freyssinet :

10) "A revolution in the technique of the utilisation of concrete" The Structural Engineer Vol.14, No. 15 1936-5

P. Xercavins :

11) "Recherche de la valeur optimum de la tension des armatures de précontrainte" 2^e Congress de F.I.P. 1955

T.Y. Lin :

12) "Strength of continuous prestressed concrete beams under static and repeated loads" Jour. of A.C.I. Vol.26, No.10, 1955-6

C.E. Ekberg :

13) "Dynamic tests of a 55 foot Andek bridge member" Concrete Products Company of America 1956

C.E. Ekberg, R.E. Walther, R.G. Slutter :

14) "Fatigue resistance of prestressed concrete beams in bending" A.S.C.E. Jour. of the Structural Div. 1957-7

15) "Static and fatigue tests on prestressed concrete railway slabs" A.R.E.A. Bulletin No.544, 1958-6-7 W. Eastwood :

16) "Fatigue tests on Lee-McCall prestressed concrete beams" Civil Engineering and Public Works Review 1957-7

W. Soete, R. Vancrombrugge :

17) "La résistance á la fatigue ondulée des fils utilisée en béton précontraint" Annales des Travaux Publics de Belgique Vol.102, No.5, 1949-10 (Library Translation No.25 Cement and Concrete

Assoc. "The resistance to fatigue of wires used in prestressed concrete")

P. Lebellet :

18) "Coefficients de sécurité de pièces fléchies en béton précontraint" Institute Technique du Bati- ment. Circulaire Série J. No.5, 1954-2-15

D.P. Billington :

19) "The dynamic testing of self-anchorage in a prestressed concrete beams" Précontrainte No.2 1952

M. Roš :

20) "Vorgespannter Beton" Eidgenössische Mater- ialprüfungs und Versuchsantalt für Industrie, Bauwesen und Gewerke Report No.155, 1946

British Transport Commision Research Department:

21) "Static and fatigue tests made on prestressed concrete beams using 0.276 in diameter wire.

書 評

橋 梁 工 学 古 川 一 郎 著 森 北 出 版 刊

本書は、長く各県の道路・河川課長等を歴任、ついで二、三の大学において研究され、現在橋梁メーカーの顧問をされている古川一郎氏の最近の労作である。橋梁工学は、最近の進歩はめざましく、しかも広汎な分野を包含するため、これを限られた紙数にまとめ、新制大学の教科書、新進技術者の参考書とすることは、なかなか困難な仕事であるが、本書は、ほぼ著者の意図するところを達成したものとえよう。

内容は、総論、荷重、材料の性質

と許容応力度、単純桁の応力、単純トラスの応力、木橋、リベット接合、溶接合、I形桁橋とプレート ガーダー、合成桁、単純トラス橋の構造、ゲルバー橋の12部よりなり、プレート ガーダー、トラスの設計例および道路構造令、関連設計示方書、その他を添付している。

現今、実用上、溶接桁、合成桁がよく設計されるが、この項の解説はやや簡単にすぎ、初学者には多少理解されにくい点もあるが、これとても、もちろん重要な点を欠いている

わけではなく、全体を通じて設計に必要な基本事項は、簡潔に要領よくまとめられており、設計側は図示をもつて詳細に解説されている。また適当に挿入されている演習問題は、その解答と相まつて、読者の理解をたしかめ、かつ本文の足らざる点をよく補足している。

本書は、新制大学、工業高校の教科書、参考書として、また実務に従事する新進技術者の参考書として適当なものと思われる。

著者：正員・日本橋梁KK常任顧問、A5判376ページ、上製箱入、定価600円、昭34.2.1発行。

お詫び……44巻3号・17ページの著者肩書のうち、正員 工博 日本大学教授、とあるは正員 日本大学教授の誤りにつき訂正いたします。

工業技術院監修・日本規格協会協纂

資 材 便 覧 1959 年 版

A5版 総クロース函入 ¥1200 ㊦90

火 薬 読 本 浜田 顯吉 郎 著

A5版 ¥400 ㊦30

火薬類の取扱および発破作業の操作規準

発破研究会編 ¥100 ㊦20

機 械 化 土 工 必 携 小 竹 秀 雄 著

¥650 ㊦50

土木機械の使用法を漫画風に図解、一覽明解

土 木 工 事 法 規 の 知 識 鳥 井 秀 夫 著

¥300 ㊦30

土木工事万端に関する法規事務の案内書で、類書少く便利な実用書

鉾山技術工業図書専門 白 亞 書 房

TEL (67) 0666 (66) 7262 振替東京 113368 東京都中央区日本橋兜町 2~36