

論文

[2003] 曲げ繰り返しを受ける PC 梁の鋼材応力の推移

正会員 ○牧角龍憲（九州大学工学部）

正会員 松下博通（九州共立大学工学部）

中村 順（九州大学大学院）

1. まえがき

昭和61年制定のコンクリート標準示方書では、PC梁はRC梁と本質的には同じ範ちゅうに属するものとされ、ひびわれを許すPC梁（パーシャルPC、以後PPCと称する）についてはRC同様疲労限界状態に対する検討が規定された。PPCでは、そのひびわれ幅の制御に異形鉄筋を用いるのが一般的であり、その場合、疲労破壊は異形鉄筋の疲労破断によってもたらされることはよく知られている。

したがってPPC梁の疲労についての照査を行う場合、異形鉄筋の繰り返し荷重下での応力状態を把握することが不可欠である。このとき、鉄筋に作用する繰り返し応力の主たる要因である応力振幅についてPPCとRCを比べてみると、RCはその振幅が常に引張応力の領域であるのに対し、PPCでは圧縮と引張の2つの領域にまたがる。そこで本研究では、コンクリートのクリープ等による鉄筋応力の増分を考慮しつつ、主鉄筋の応力振幅の領域の違いによる梁の疲労性状への影響を調べた。

2. 実験概要

実験で使用した梁の形状寸法と荷重状態を図1に示す。鋼材比は、鉄筋の性状を把握しやすくするために釣合鋼材比近傍の値とした。各鋼材の特性を表-1に示す。コンクリートの使用材料として、セメントには早強ポルトランドセメント、粗骨材には角閃岩砕石（最大寸法13mm）、細骨材には除塩海砂（F.M.=2.54）を用い、W/C=34%、スランプ10cmの配合とした。材令7日まで、室内で湿布養生した後、PC鋼棒規格引張強度の70%の緊張力で、導入時の梁上縁の応力がゼロになるようにプレストレスを導入し、その直後にグラウトを注入した。

繰り返し荷重の大きさは、鉄筋の繰り返し応力が(a)最小・最大ともに引張応力で応力振幅がRCと同様に片振りになる、(b)最小は圧縮応力で最大が(a)と同じ、(c)最小は圧縮応力で振幅が(a)と同じになる3とおりとした。これらの荷重は、疲労試験前に行った静的試験結果から求めた、図-2のモーメント-ストレス図を用いて定めた。その際、処女載荷時に生じる鉄筋残留ひずみの影響を小さくするために、設計断面耐力（17ton）の60%程度までの荷重を数回繰り返した後の荷重-ひずみの関係を用いた。静的破

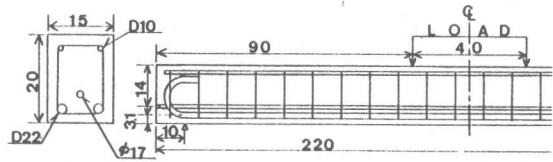


図1. 供試体の形状寸法及び荷重状態 (cm)

表1. 使用材料

	種類	降伏点 (kgf/cm ²)	引張強さ (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)
鉄筋	SD 30	3518	5398	2.10x10 ⁶
PC鋼棒	SBPR95-110	10791	11864	2.05x10 ⁶

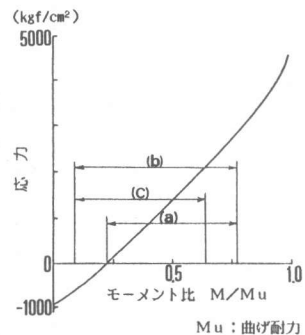


図2. モーメントストレス図

壊荷重は16.5tonで、鉄筋の引張降伏後のコンクリートの圧縮破壊であった。

疲労試験には油圧サーボ式疲労試験機（容量30ton）を用いて、載荷速度は1Hzとした。鋼材ひずみは、十分な絶縁コーティングを行って鋼材表面に貼付した抵抗線ひずみゲージを用いて、任意回数繰り返し後に、残留ひずみから最大荷重時までの値を測定した。

3. 有効プレストレス量について

鉄筋応力により疲労寿命を検討するPPCでは、有効プレストレス量ならびにそれによる鉄筋応力の的確な算定が必要となる。とくに、鉄筋比が大きな断面では、時間依存の変形に及ぼす鉄筋の影響、すなわち、プレストレス力が鉄筋に吸収されてコンクリートに作用する力が減少する影響を十分考慮しなければならない。

表-2に、プレストレス導入直後および疲労試験前における、引張鉄筋とコンクリート下縁の応力について、2とおりの理論値を比較して示す。表中の

(1)は、付着のある異形鉄筋が乾燥収縮及びクリープの収縮変形を拘束することを考慮し求めたもので、応力変化のある場合のひずみ変化応答をもとに、断面力・モーメントの釣合条件ならびに、コンクリート及び鋼材の両構成材のひずみ・曲率の適合条件の4つの条件式より算出した¹⁾。(2)は、鉄筋の拘束を無視し、有効プレストレス力による断面の応力を三角形分布とした簡便式を用いて求めたものである。本実験のように引張鉄筋断面積がPC鋼材の約3倍と大きい場合、有効プレストレスによる鉄筋応力は顕著に異なってくる。図-3に各梁の荷重と鉄筋応力の関係を示すが、方法(1)による初期値を用いた理論値と1回目の実測値はほぼ近似しており、このことからPPCでは鉄筋の影響を考慮した有効プレストレスの算定が必要であることが認められる。この2つの理論値の鉄筋応力の差異が疲労寿命推定に及ぼす影響についても検討してみた。

4. 鋼材応力と疲労寿命の関係

疲労試験の結果、梁はすべて鉄筋の疲労破断（脆性破断）により破壊した。それらの疲労寿命の実測値を、鉄筋応力から算定した疲労寿命推定値と比較して表-3に示す。鉄筋応力からの疲労寿命推定には、示方書に規定された設計疲労強度式の原典である、二羽ら²⁾の式を用いた。表より前述の方法(1)及び(2)による鉄筋応力からの推定値は、初期値が大きく異なっているのにも

表2. 有効プレストレス量

	Pt	Ec	手法	Pe	σ_{se}	σ_{ce}
NO.1	17.44	3.65x10 ⁵	(1)	17.0	-775	-78
			(2)	16.8	-489	-101
NO.2	17.45	3.32x10 ⁵	(1)	17.0	-822	-75
			(2)	16.8	-522	-98
NO.3	17.45	3.38x10 ⁵	(1)	17.0	-813	-75
			(2)	16.7	-514	-98

Pt : 初期張力 (ton) Pe : 有効張力 (ton)
 Ec : プレストレス導入時コンクリートの弾性係数 (kgf/cm²)
 σ_{se} : 主鉄筋有効プレストレス (kgf/cm²)
 σ_{ce} : 下縁コンクリート有効プレストレス (kgf/cm²)

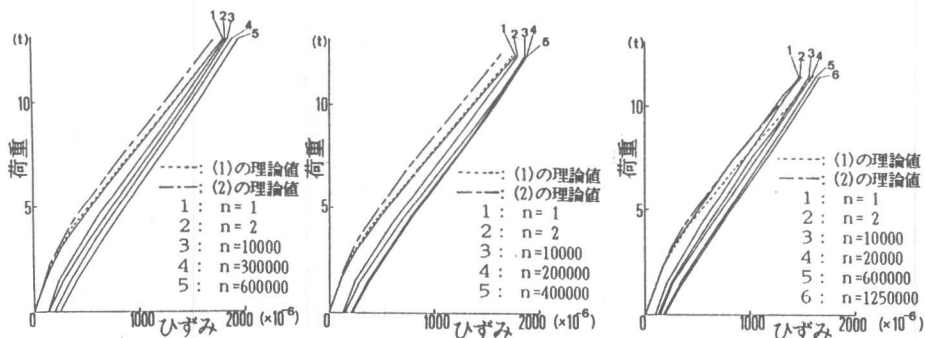


図3. 理論及び実測による鉄筋の荷重-ひずみ図

関わらず安全側にほぼ同じ値を示した。疲労寿命算定に限っていえば、方法(2)の簡便式によって求めてもさしつかえないと言えよう。

表3. 疲労寿命の実測値及び理論値

	荷重振幅 (t)	LogN	理論値				LogN		2回目載荷時の実測値			LogN
			手法	σ_{min}	σ_{max}	LogN'	LogN'	σ_{min}	σ_{max}	LogN'	LogN'	
NO.1	3.6 ~ 12.9	5.83	(1)	-236	2917	5.26	1.11	25	2860	5.48	1.06	
			(2)	.19	3012	5.29	1.10					
NO.2	1.5 ~ 12.3	5.62	(1)	-730	2696	5.27	1.07	-554	2694	5.36	1.05	
			(2)	-289	2804	5.37	1.07					
NO.3	1.5 ~ 11.4	6.11	(1)	-721	2379	5.62	1.09	-603	2045	6.12	1.00	
			(2)	-288	2490	5.76	1.06					

一方、図-3にみられるように、いずれの鉄筋にも

LogN : 実測疲労寿命 LogN' : 推定疲労寿命
 σ_{min} : 最小荷重時鉄筋応力 (kgf/cm²) σ_{max} : 最大荷重時鉄筋応力 (kgf/cm²)

残留応力が生じるとともに荷重-応力関係における処女載荷時と2回目以降の傾きが異なっており、厳密には荷重履歴(とくに1回目の)の影響も考慮すべきと考えられる。そこで、表-3には、2回目載荷における実測値を用いて求めた推定疲労寿命も示しているが、いずれの繰り返し荷重条件下でも十分な精度の推定結果が得られている。また、2回目以降の傾きはほとんど変化していないことから、荷重繰り返しを受ける期間のほとんどは2回目載荷時の応力状態が基本になるものと考えられる。

5. 荷重繰り返しに伴う鋼材応力の変化

次に、荷重履歴の影響について検討する。ただし、鉄筋応力が圧縮・引張両側にまたがり判別

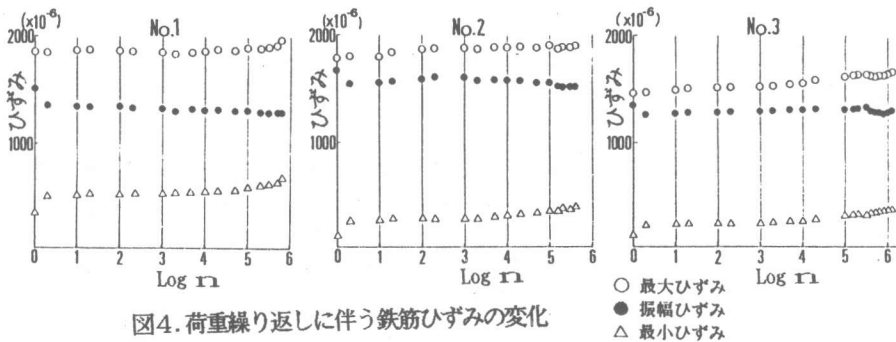


図4. 荷重繰り返しに伴う鉄筋ひずみの変化

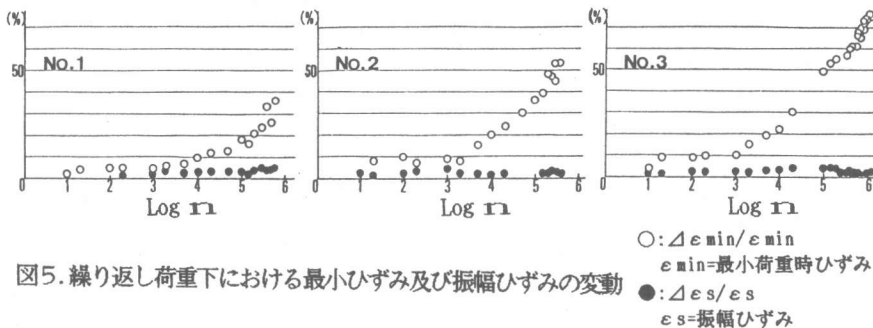


図5. 繰り返し荷重下における最小ひずみ及び振幅ひずみの変動

○: $\Delta e_{min}/e_{min}$
 e_{min} =最小荷重時ひずみ
 ●: $\Delta e_s/e_s$
 e_s =振幅ひずみ

しにくいため、載荷荷重による鉄筋ひずみを用いて検討する。

図-4に、最小荷重、振幅荷重及び最大荷重による鉄筋ひずみの荷重繰り返しに伴う変化を示す。いずれの繰り返し荷重条件下でも、最小ひずみは回数とともに漸増しているが、振幅ひずみはほとんど増加せず、逆にわずかであるが減少する傾向にある。

この変動の度合を明確にするために、2回目載荷時の鉄筋ひずみに対するひずみ変動の比率を図-5に示す。図より、振幅ひずみの変動はほとんどなく、最大で5%程度であるのに対し、最小ひずみの変動は50~75%と極めて大きくなっており、荷重履歴の影響を顕著に受けていることが認められる。

そこで、これらのひずみ変動がもたらす疲労寿命推定値の誤差を、2回目載荷時の実測値から求めた推定疲労寿命に対する比率で、図-6に示す。図から、最小応力の変動はかなり大きくとも推定寿命に及ぼす影響は小さく、振幅応力の変動の影響はかなり大きいことがわかる。しかしながら、いずれの場合も本実験結果の変動の範囲では、応力変動が推定寿命の変化率に及ぼす影響は5%以下であり、推定精度上からほぼ無視できるものと考えられる。

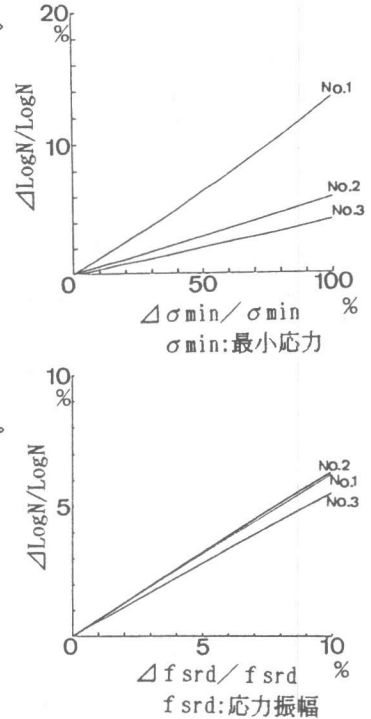


図6. 最小ひずみ及び応力振幅の変動による疲労寿命の変化率

6. まとめ

疲労限界状態を考慮するPC梁において、繰り返し荷重により圧縮及び引張の両側にまたがる鉄筋応力の変化を測定し、疲労寿命推定式の妥当性について検討した。得られた結果をまとめると次のようになる。

(1) 繰り返し荷重下の鉄筋応力の挙動は、最小応力の応力域（圧縮あるいは引張）にほとんど影響されず、示方書規定の疲労寿命算定式でほぼ妥当な寿命推定が行える。

(2) 疲労寿命算定に限って言えば、鉄筋の拘束を考慮しない方法(2)の簡便式によって求めてもさしつかえない。

(3) 荷重繰り返しに伴って鉄筋応力は変動するが、それによる推定疲労寿命の変動はたかだか5%であり、推定精度上から無視できる。ただし、厳密な算定を行う場合には、処女載荷による残留変形の影響を十分考慮する必要がある。

最後に、本研究は昭和61, 62年度科学研究費補助金を得て行ったものであることを付記し、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 猪俣俊司：プレストレスト コンクリートに対するクリープの影響，プレストレスト コンクリート，Vol. 18, No2, 1976
- 2) 二羽淳一郎，前田詔一，岡村甫：異形鉄筋の疲労強度算定式，土木学会論文集 第354号/V-2, 1985