

(107) 外ケーブルのフレットング疲労強度に与える応力振幅とすべり振幅の影響

北海道大学	工学研究科	正会員	○ 上田 多門
同	上		佐藤 公紀
同	上	正会員	角田 與史雄
住友建設(株)	PC設計部	正会員	新井 英雄

1. はじめに

プレストレストコンクリート構造の適用が増加している外ケーブルは、その偏向部でフレットングの影響により、ケーブルの疲労強度は通常の疲労強度よりかなり低下し¹⁾²⁾、20 MPaの応力振幅でも疲労破断が生じる³⁾。フレットング疲労で考慮すべき因子として、応力振幅、平均応力(最小応力)といった通常の疲労の場合に考慮されるものの他に、フレットングを引き起こす接触面圧(腹圧力)、すべり振幅、接触部の材料の種類などが上げられ³⁾⁴⁾、疲労強度の定量化は通常の疲労強度の場合より困難である。

このような状況の中で、著者らは実験的にフレットング疲労強度を明らかにしようとする研究を行ってきており⁵⁾⁶⁾、実験条件が異なるとフレットング疲労強度が異なること⁷⁾、すべり振幅の大きさ、腹圧力の大きさにより、疲労強度への影響の仕方が異なる可能性があることなどを明らかにしている⁸⁾⁹⁾。本研究では、フレットング疲労強度に特に大きな影響を与えと考えられる応力振幅とすべり振幅⁷⁾に対し、その影響を定量化するために、すべり振幅をほぼ一定にし、応力振幅のみを変化させて実験を行った。その上で、著者の既往の研究⁷⁾では直接示すことができていなかった、応力振幅とすべり振幅の疲労強度に与える影響を分離して示し、実験方式の違いによる疲労強度の違いの理由を説明している。

2. 実験概要

実験方式は、応力振幅、すべり振幅、接触力(腹圧力)の3つの要因を独立して制御することができる図-1に示すものである。3本のPC鋼より線を拘束具により、フレットングを生じさせるものである。応力振幅を与えるPC鋼より線は、真中の1本だけである。このPC鋼より線の両端を膨張材を用いた定着具により固定し、この定着具を通してアクチュエーターにより、所定の応力振幅を与えた。すべり振幅は、応力振幅が与えられるのが真中の1本で、その両側の2本には応力振幅を与えないことから、PC鋼より線間の接触点で生じることになる。その大きさは式(1)で表すことができる。

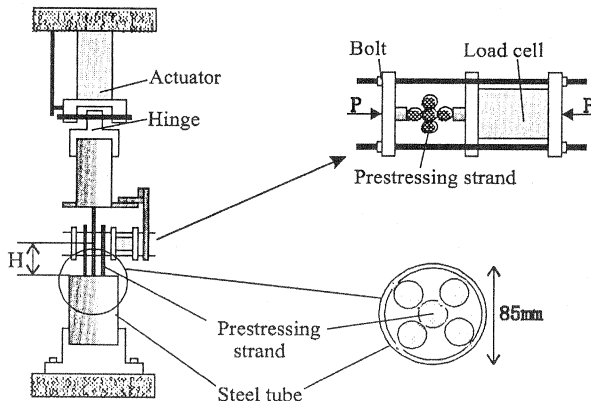


図-1 载荷方法

$$S_r = H(\varepsilon_{r,center} - \varepsilon_{r,outer}) = H\left(\frac{\sigma_r}{E} - \frac{r\sigma_r}{E}\right) = H(1-r)\frac{\sigma_r}{E} \quad (1)$$

ここに、 H : PC 鋼より線の接触点と固定点との間の距離、 $\varepsilon_{r,center}$ 、 $\varepsilon_{r,outer}$: 中心と外側の PC 鋼より線のひずみ振幅、 r : 接触部の摩擦により外側の PC 鋼より線に伝わる力を表すための係数 ($r < 1$)、 E : PC 鋼より線のヤング係数。拘束具の位置を変えることより H を変え、すべり振幅の大きさを変えることができる。接触力は、拘束具のボルトの締め付け具合を変えることにより変えることが可能で、その大きさはロードセルで測定した。

今回は、2 体の供試体 HS4 と HS5 を用意した (表-1 参照)。すべり振幅と接触力を一定の条件で、応力振幅のみを変えて実験を行った。応力振幅、すべり振幅、接触力を独立に制御できる本研究での実験方式と同じ方式で著者らが行った既往の実験⁷⁾での条件を参考に以下の条件を採用した。すなわち、すべり振幅は、0.04 mm 程度の供試体群が多くあることより、0.04 mm とした。接触力は、中程度の値として 700 から 1000N の供試体群があることより、800 N 程度を目指したが、操作上の問題から HS5 で少し値が大きくなってしまった。応力振幅は、すべり振幅と接触力が上記の条件を満足する供試体には 98 MPa と 49 MPa とがあるので、30 MPa および 130 MPa とした。なお、最小応力度は静的引張強度の 60% とした。以上の実験条件を表-1 の供試体 HS4 と HS5 の欄にまとめて示す。また、参考とした既往の実験での供試体の条件も表-1 に示してある (表中の供試体 HT5、HT9、HT12、HM3、HS3)。

表-1 各実験の条件および結果

Specimen	R ⁴⁾ m	F_{cont} N	S_r mm	σ_r MPa	Grout	N_f 10 ⁴
HS4	—	1082	0.040	30	No	300 ⁵⁾
HS5	—	838	0.040	130	No	46.8
HT5 ¹⁾	—	733	0.043	98	No	200 ⁵⁾
HT9 ¹⁾	—	850	0.038	98	No	41.1
HT12 ¹⁾	—	882	0.035	49	No	76.0
HM3 ¹⁾	—	980	0.049	98	No	47.8
HS3 ¹⁾	—	784	0.042	98	No	200 ⁵⁾
SE1 ²⁾	3	455	0.00061	98	No	36.0
SE5 ²⁾	3	455	0.00031	49	No	117.7
SE6 ²⁾	3	455	0.00018	29	No	110.8
SE7 ²⁾	3	455	0.00013	20	No	400
SE9 ²⁾	3	455	0.00013	20	No	774
SC1 ³⁾	3	3161	0.00089	118	Yes	26.0
SC2 ³⁾	3	3161	0.00059	78	Yes	78.6
SC3 ³⁾	3	3161	0.00037	49	Yes	115.7
SC4 ³⁾	3	3161	0.00037	49	No	69.1
SC6 ³⁾	3	3161	0.00015	20	Yes	1,000 ⁵⁾

1) Specimens with S12.7⁷⁾, 2) Specimens with 2S15.2¹⁾

3) Specimens with 19S15.2¹⁾, 4) Bent radius at deviator

5) No fatigue fracture

3. 実験結果および考察

3. 1 フレッシング疲労性状

供試体 HS4 は 300 万回載荷しても、多少フレッシングによって生じた錆の粉が見られたが、破断はしな

かった。300 万回載荷後静的な載荷試験を行ったが、静的破断強度の規格値まで破断は生じなかった。PC 鋼より線が定着具から抜け出しそうになったことから、途中で載荷を中止した。試験後の PC 鋼より線にはフレッキング痕が見られたが、静的載荷試験の結果より疲労載荷中に疲労ひび割れは発生しなかったものと考えられる。

供試体 HS5 は 46.8 万回余り載荷した後に疲労破断が生じた。疲労破断の前にフレッキングによる錆の粉が発生し、また、試験後の PC 鋼より線の破断箇所には明確なフレッキング痕が見られた。

3. 2 今回のフレッキング疲労強度と既往の実験結果との比較

既往の著者の研究⁷⁾において、今回の実験条件と概ね同じである 5 体の供試体も含め、フレッキング疲労強度 (応力振幅) σ_r を以下の式で表現できると仮定した。

$$\sigma_r = DN_f^c \quad (2)$$

ここに、 $D = D_0 F_{cont}^a S_r^b (1 - \sigma_{min} / f_u)$ 、 D_0 、 a 、 b 、 c : 定数、 F_{cont} : 接触力、 S_r : すべり振幅、 σ_{min} : 最小応力度、 f_u : 静的引張強度。

最小応力度はすべて静的引張強度の 60% であり、すべり振幅と接触力はほぼ同じ値であるので、簡単のために D は定数として回帰分析を行うと、指数部 c の値は -0.73 となった。なお、回帰分析の際、応力振幅 98 MPa のデータが多いため、まず疲労寿命 N_f の対数の平均を取り、その値に供試体の数の分だけの重みをつけて計算を行った。

今回の実験方式と異なる方式の実験結果との比較を試みる。著者らの既往の実験として、2 本の PC 鋼より線 (2S15.2) を変更させてフレッキングを生じさせる実験 (図-2 参照) と、実際の PC 構造物で使われる外ケーブルにできる限り近づけるために多数の PC 鋼より線 (19S15.2) による実験 (図-3 参照) とがある。これらの実験方式では、すべり振幅が応力振幅に比例して生じることになるため、疲労強度式は次式で表現される。

$$\begin{aligned} \sigma_r &= D_0 F_{cont}^a S_r^b (1 - \sigma_{min} / f_u) N_f^c = D_0 F_{cont}^a (k \sigma_r)^b (1 - \sigma_{min} / f_u) N_f^c \\ \therefore \sigma_r &= (D_0 k^b)^{\frac{1}{1-b}} F_{cont}^{\frac{a}{1-b}} (1 - \sigma_{min} / f_u)^{\frac{1}{1-b}} N_f^{\frac{c}{1-b}} = D' N_f^{\frac{c}{1-b}} \end{aligned} \quad (3)$$

今、2 本の PC 鋼より線による実験供試体群の間では、 k 、 F_{cont} 、 f_u 、 σ_{min} が一定であるので上式の D' は一定値となる。同様に、多数の PC 鋼より線による実験供試体群の間でも D' は一定値となる。それぞれの供試体群に対し、回帰分析を行うと N_f の指数部の値は、 -0.52 と -0.54 とほぼ同じ値となるが、本研究での実験方式から求められた N_f の指数部の値 -0.73 とは異なっている。両者の指数部の比較より、 $b = -0.38$ が求められる。

以上の回帰分析結果より、式(2)で表現される応力振幅とすべり振幅とが疲労強度に与える影響に対する仮定の妥当性が示されたといえよう。すべり振幅は応力振幅と同様に大きくなると疲労寿命は小さくなるが、指数部の逆数 $1/b = -2.63$ と $1/c = -1.37$ より、その度合は応力振幅よりも大きくなっている。そして、図-2 および図-3 で示される実験方式の場合、すべり振幅は応力振幅と比例して生じており、そのために実験から求められる N_f の指数部の値は、すべり振幅を一定とした図-1 に示す実験方式の値と異なっているのである。両実験方式の違いにより、応力振幅と疲労寿命のみで表現したいわゆる S-N 曲線はその傾きが、すべり振幅が一定である場合のほうが大きくなる。すなわち、見かけ上、繰返し回数の違いによる疲労強度の変化は大きくなる。

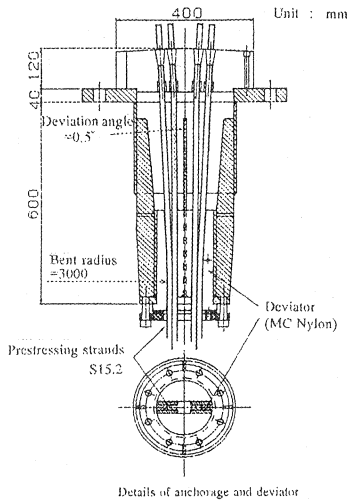


図-2 2S15.2 による実験方式

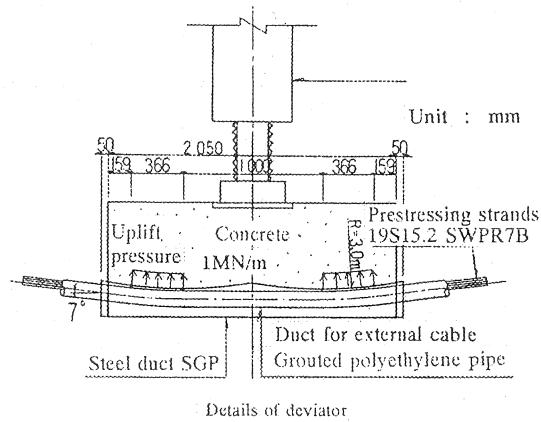


図-3 19S15.2 による実験方式

4. おわりに

すべり振幅が一定である PC 鋼より線のフレッティング疲労実験を行った結果、以下のことが結論として導かれた。

(1) 既往のすべり振幅が応力振幅に比例して生じる実験より求められるフレッティング疲労の $S-N$ 曲線と、すべり振幅が一定の条件より求められる $S-N$ 曲線とでは、その傾きが異なる。これはすべり振幅が疲労強度に影響を与えており、すべり振幅が大きいほど疲労寿命が短くなるからである。

(2) すべり振幅がフレッティング疲労寿命に与える影響は、応力振幅が疲労寿命に与える影響より大きい可能性がある。

今後応力振幅、すべり振幅、接触力を独立して制御できる実験方式によりさらに実験データを積み、フレッティング疲労強度式の構築を図る予定である。

参考文献

- 1) 新井英雄・藤田学・梅津健司・鮎子多浩一・上田多門：大容量 PC 鋼より線の曲げ配置部におけるフレッティング疲労特性、土木学会論文集、V-44、1999.8
- 2) Gregor P. Wollmann, David L. Yates, John E. Breen, and Michael E. Kreger: Fretting Fatigue in Post-Tensioned Concrete Beams, ACI Structural Journal, Vol.93, No.2, pp.172-179, March 1996
- 3) 河本実：金属の疲れと設計、機会工学体系 7、コロナ社、pp.224-229、1972
- 4) R.B. Waterhouse (佐藤準一訳)：フレッチング損傷とその防止法、養賢堂、pp.130-164、1984
- 5) 森脇渉・佐藤靖彦・上田多門・角田與史雄：高腹圧力下における PC 鋼より線のフレッティング疲労に関する研究、土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集、第 5 部、pp.970-971、1998.10
- 6) Tamon Ueda, Masaki Sato, Yuta Tanaka, Yoshio Kakuta and Hideo Arai: Prediction of Fretting Fatigue Strength of Prestressing Tendon, Proceedings of the Seventh East Asia - Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, August 27-29, 1999, Kochi, Japan, Vol.1, pp. 237-242, 1999
- 7) 上田多門、佐藤公紀、角田與史雄、新井英雄：外ケーブルのフレッティング疲労強度に与える実験手法の影響、第 9 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、pp.541-546、1999.10