

(103) 外ケーブルのフレット疲労強度に与える実験手法の影響

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

近年、外ケーブルを用いた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。外ケーブルを用いた場合の特徴の1つに、外ケーブル偏向部での外ケーブルのフレット疲労がある。フレット疲労の影響で、ケーブルの疲労強度は通常の疲労強度よりかなり低下することが知られている<sup>1)・2)</sup>。フレット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の因子の他に、フレット疲労を引き起こす接触面圧、すべり振幅、接触部の材料の種類などが上げられる。因子が多いということは、それだけ、疲労強度を明らかにすることが難しくなるということでもある。

このような状況の中で、実験的にフレット疲労強度を明かにしようとする研究は進められているが<sup>3)・4)・5)・6)</sup>、この研究においてフレット疲労の各因子に関する実験条件は異なっている。本研究では、実験条件が異なる各研究におけるフレット疲労強度の比較を行い、フレット疲労因子と関係付けながら、各フレット疲労強度の差異について論じる。

2. フレット疲労の各因子<sup>6)・7)</sup>

通常の疲労にはないフレット疲労独特の因子として、接触面圧<sup>6)</sup>(締め付け圧力<sup>7)</sup>ともいう)とすべり振幅<sup>7)</sup>(相対すべり量<sup>6)</sup>ともいう)とがある。接触面圧はフレット疲労を引き起こす接触面に鉛直に作用する力を接触面積で割ったものである。すべり振幅は接触面での材料間の相対変位によるすべりの振幅を意味する。接触面圧の影響としては、200MPa程度の大きさまでの範囲では、接触面圧が大きいほど疲労強度が低下することが知られているが、ある程度以上となるとほとんど低下を起さなくなるといわれている。あまり接触面圧が大きいと、接触面で生じるフレット疲労亀裂が磨耗してしまい、疲労強度が増加することもあり得るとされている。すべり振幅は、数 $\mu\text{m}$ から数10 $\mu\text{m}$ の範囲では、大きいほど疲労強度は低下するが、ある値以上となるとほとんど疲労強度の低下がなくなるという報告<sup>7)</sup>、もしくは、疲労強度が増加するという報告がある<sup>6)</sup>。

以上のように、接触面圧とすべり振幅はフレット疲労の明確な因子であることには間違いはないが、定性的にも、定量的にも一致した見解がある状況とはなっていない。

3. 既往のフレット疲労実験と疲労寿命

フレット疲労破断が観察されている既往の実験的研究に注目し、実験手法が異なる以下の3種類の研究に関し比較を試みる。

3.1 PC鋼より線を束ねた外ケーブル(19S15.2)を用いたフレット疲労実験<sup>1)</sup>

実際の橋梁に用いられる大容量PC鋼より線を供試体として、応力振幅を変数として行われた実験である。供試体とその载荷状況は図-1に示すようである。PC鋼より線に予め所定の応力(引張強度の60%)を導入した上で、偏向部を模擬したコンクリートブロックを鉛直方向に押し下げることにより、PC鋼より線に新たに応力振幅を与えている。この方式ではその構造上、偏向部のPC鋼より線に作用する腹圧力とPC鋼より線に作用する応力とは比例している。腹圧力はPC鋼より線の単位長さ当たりに作用するPC鋼より線



表-1には、参考文献1)の場合の式(2)で求められた接触箇所1箇所当たりの接触力を示してある。ただし、 $n = 4$ である。

一方、隣り合うPC鋼より線間の相対変位は、偏向部において内側に配置されたPC鋼より線と外側に配置されたPC鋼より線とで、両端の定着部間の長さが概ね次式で表される微小な長さだけ異なることより生じる<sup>1)</sup>。

$$(R + \phi)\theta - R\theta = \phi\theta \quad (3)$$

ここに、 $\phi$  : PC鋼より線の直径、 $\theta$  : 偏向角。偏向部を模擬したコンクリートブロックを押し下げたとき、各PC鋼より線は強制的に一定の長さだけ伸びることになる。つまり、もともとの長さが異なるPC鋼より線が一定の長さ $\Delta L$ だけ伸びるので、生じるひずみが異なる。ひずみが異なれば、偏向部以外の直線部において相対変位が生じる。この相対変位の大きさは $\Delta L$ に比例する。さらに、一定の伸び量 $\Delta L$ は、PC鋼より線の応力振幅と比例関係にあるので、結局、相対すべりの大きさ、すなわち、すべり振幅 $S_r$ は応力振幅 $\sigma_r$ と比例関係にある。

$$S_r = k_1 \sigma_r \quad (4)$$

ここに、 $k_1$  : 比例定数。参考文献1)の場合、

$k_1 = 7.52 \times 10^{-6}$ となり、各供試体でのすべり振幅は表-1に示す値となる。

### 3.2 2本のPC鋼より線(2S15.2)を用いたフレットング疲労実験<sup>1), 8), 9)</sup>

実際の外ケーブルを簡素な供試体で置き換え、フレットング疲労実験を容易に行えるようにしたものである。前節で述べた多数のPC鋼より線の場合では、正確な評価が困難であった接触力をより正確に捉えることができるという利点も有する。2本のPC鋼より線を偏向部で接触させ、応力振幅と偏向部の曲げ半径を変数として、フレットング疲労実験を行っており、載荷装置と供試体の様子は図-2に示すようである。なお、最小応力は引張強度の60%である。

この実験では、いずれの供試体においても、偏向部においてフレットング痕が3箇所観察され、3箇所のいずれかのフレットング痕位置で疲労破断が生じている。破断箇所となるフレットング痕位置が特定できないため、ここでは簡単のため、偏向による腹圧力が3箇所に均等に作用するものとして1箇所当たりの接触力を求める。求めた接触力は表-1に示す。

すべり振幅は、前節と同様の方法で求めることができる。したがって、応力振幅と比例関係にあり、

$$S_r = k_2 \sigma_r \quad (5)$$

表-1 各実験の条件および結果

Specimen	R m	F <sub>cont</sub> N	S mm	σ <sub>r</sub> MPa	Grout	N <sub>f,exp</sub> 10 <sup>4</sup>	N <sub>f,cal</sub> 10 <sup>4</sup>
HT1 <sup>1)</sup>	—	92	0.142	98	No	200*	118.5
HT2 <sup>1)</sup>	—	92	0.127	98	No	200*	118.5
HT3 <sup>1)</sup>	—	367	0.045	98	No	200*	79.3
HT4 <sup>1)</sup>	—	367	0.015	49	No	200*	177.4
HT5 <sup>1)</sup>	—	733	0.043	98	No	200*	64.9
HT6 <sup>1)</sup>	—	637	0.012	49	No	200*	151.2
HT7 <sup>1)</sup>	—	367	0.069	98	No	69.6	79.4
HT8 <sup>1)</sup>	—	367	0.035	98	No	119.8	79.4
HT9 <sup>1)</sup>	—	850	0.038	98	No	41.1	62.2
HT10 <sup>1)</sup>	—	1960	0.038	98	No	15.00	48.8
HT11 <sup>1)</sup>	—	1715	0.040	131	No	12.12	36.2
HT12 <sup>1)</sup>	—	882	0.035	49	No	76.0	137.6
HT13 <sup>1)</sup>	—	1470	0.011	49	No	72.7	118.6
HM1 <sup>1)</sup>	—	7840	0.042	98	No	19.90	32.7
HM2 <sup>1)</sup>	—	2940	0.042	98	No	58.2	43.4
HM3 <sup>1)</sup>	—	980	0.049	98	No	47.8	59.7
HS1 <sup>1)</sup>	—	4900	0.041	98	No	76.6	37.4
HS2 <sup>1)</sup>	—	6860	0.042	98	No	200*	33.9
HS3 <sup>1)</sup>	—	784	0.042	98	No	200*	63.7
SE1 <sup>2)</sup>	3	455	0.00061	98	No	36.0	74.6
SE2 <sup>2)</sup>	4	455	0.00061	98	No	27.0	74.6
SE3 <sup>2)</sup>	5	455	0.00061	98	No	74.0	74.6
SE4 <sup>2)</sup>	5	455	0.00061	98	No	34.0	74.6
SE5 <sup>2)</sup>	3	455	0.00031	49	No	118.0	166.7
SE6 <sup>2)</sup>	3	455	0.00018	29	No	110.8	306
SE7 <sup>2)</sup>	3	455	0.00013	20	No	400	472
SE8 <sup>2)</sup>	4	455	0.00061	98	No	130.0	74.6
SE9 <sup>2)</sup>	3	455	0.00013	20	No	770	472
SC1 <sup>3)</sup>	3	3161	0.00089	118	Yes	26.0	47.3
SC2 <sup>3)</sup>	3	3161	0.00059	78	Yes	78.6	76.5
SC3 <sup>3)</sup>	3	3161	0.00037	49	Yes	115.7	131.1
SC4 <sup>3)</sup>	3	3161	0.00037	49	No	69.1	111.4
SC5 <sup>3)</sup>	5	1896	0.00037	49	Yes	143.7	152.1
SC6 <sup>3)</sup>	3	3161	0.00015	20	Yes	1,000*	371

- 1) Specimens in this study with 5S15.2
- 2) Specimens in previous study 1),8),9) with 2S15.2
- 3) Specimens in previous study 1) with 19S15.2

と表すことができる。なお、 $k_2 = 6.25 \times 10^{-6}$ であり、計算されるすべり振幅は表-1に示すようである。

### 3.3 接触力を直接測定できるフレッティング疲労実験<sup>3), 4)</sup>

前2節でのフレッティング疲労実験においては、いずれも供試体であるPC鋼より線を偏向させることによりフレッティングを生じさせる方式であった。この方式では、接触力(腹圧力)は偏向部の曲げ半径とPC鋼より線の引張力より計算できるが(式(1)参照)、直接測定できるものではなかった。そこで、図-3に示すように横一列に並ぶ3本のPC鋼より線をより線と鉛直方向に設置した拘束具により拘束することにより、この拘束力により接触力を与える実験方式を取り、接触力を直接測定できるようにしたものである。まず、所定の最小応力(引張強度の60%)を与えてから、拘束力を加え、その後応力振幅を与えている。

多くの場合は、接触箇所はPC鋼より線間で1箇所であったが、PC鋼より線の設置の微妙な差などが原因で、複数箇所のフレッティング痕が観察される場合もあった。ロードセルで測定された拘束力をフレッティング痕の数で除して、1箇所当たりの接触力を求めると表-1のようになる。

この方式では、応力振幅を受けるPC鋼より線は中央の1本だけである。したがって、応力振幅を受け伸び縮みするPC鋼より線と、振幅を受けず伸び縮みしないPC鋼より線の間で相対変位が生じる。相対変位の大きさは、PC鋼より線の拘束端から接触している箇所までの距離 $H$ と応力振幅 $\sigma_r$ の大きさに比例する。より正確には、すべり振幅 $S_r$ は次式で表現できる。

$$S_r = H(\varepsilon_{r,center} - \varepsilon_{r,outer}) = H\left(\frac{\sigma_r}{E} - r\frac{\sigma_r}{E}\right) = H(1-r)\frac{\sigma_r}{E} \quad (6)$$

ここに、 $\varepsilon_{r,center}$ 、 $\varepsilon_{r,outer}$  : 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。表1に実測されたひずみに基づいて計算されたすべり振幅を示す。

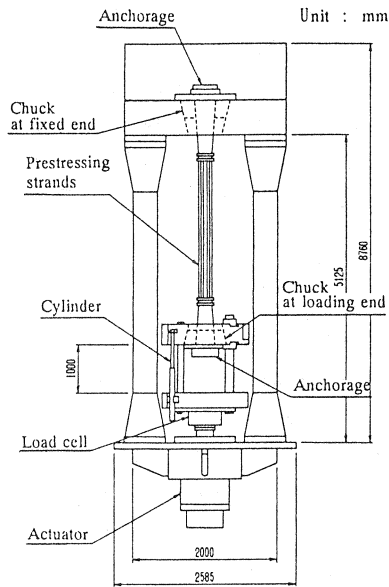


図-2 供試体と載荷状況(実験データ2)<sup>1)</sup>

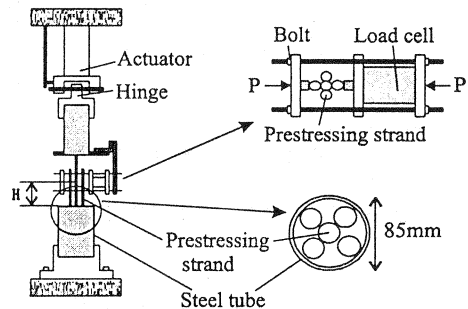


図-3 供試体と載荷状況(実験データ3)

### 3. 4 疲労寿命の比較と各因子

フレッティング疲労に影響を与える 4 つの因子、応力振幅  $\sigma_r$ 、接触力  $P'_{cont}$ 、すべり振幅  $S_r$ 、最小応力  $\sigma_{min}$  を考慮し、各因子が独立に影響を及ぼすと仮定し、フレッティング疲労寿命  $N$  を表す式を次式とする。

$$N = DP'_{cont}{}^a S_r{}^b \sigma_r{}^c (1 - \sigma_{min} / f_u) \quad (7)$$

ここに、 $D$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $c$ ：定数、 $f_u$ ：PC鋼より線の引張強度

前3節で示した3種類の実験では、全てにおいて応力振幅とすべり振幅が比例することを考慮し、式(7)を以下のように書き改める。

$$N = D'P'_{cont}{}^a \sigma_r{}^d \quad (8)$$

ここに、 $D' = Dk^b(1 - \sigma_{min} / f_u)$ 、 $d = b + c$ 、 $k$ ：すべり振幅と応力振幅との間の比例定数(各実験方式により異なる)

式(8)に基づき、3.1から3.3で示した各実験データ(以降、実験データ1、実験データ2、実験データ3と各々を呼ぶこととする)に対し、回帰分析を行った結果が表-2である。実験データ1と実験データ2では、接触力が正確に求められない点、また、接触力が実質上変数となっていない点(実験データ1では2種類の接触力のみ、実験データでは1種類の接触力のみ)を考慮し、偏向部の曲げ半径が3mの場合のみを回帰分析の対象とした。したがって、実験データ1と実験データ2とは、次式に基づき回帰分析を行っている。

$$N = D''\sigma_r{}^d \quad (9)$$

ここに、 $D'' = D'P'_{cont0}{}^a$ 、 $P'_{cont0}$ ：偏向部の曲げ半径が3mのときの接触力

実験データ1と実験データ2とは、応力振幅の指数部の  $d$  の値が概ね同じであるが、実験データ3では  $d$  の値がかなり異なる。このことから推測されることは、すべり振幅の指数部  $b$  の値が、実験データ1、2と実験データ3の間で異なるのではないかということである。実験データ1と2において推定されるすべり振幅の大きさは0.0009mm以下であり、実験データ3の場合の振幅の大きさは0.011mm以上である。フレッティング疲労に

関するこれまでの知見として、0.008mm以下ではすべり振幅が大きいほど疲労寿命が短くなり、それ以上ではすべり振幅の影響が見られない<sup>7)</sup>、0.02~0.03mmを境として、これ以下ではすべり振幅が大きいほど疲労寿命が短くなり、これ以上ではすべり振幅が大きいほど疲労寿命が長くなる<sup>6)</sup>などが言われている。すべり振幅の大きさによる疲労寿命への影響のし方の差異が、指数部  $b$  の大きさの差となり得ると考えられるのである。また、既往の知見では、0.001mm以下のすべり振幅に対する実験データは存在しておらず、この領域での知見はないとも言える。

これまでは、PC鋼より線の応力方向のすべり振幅に注目して来たが、偏向部ではケーブルをつぶす方向

表-2 各実験データに対する定数の値

	$D'$ or $D''$	$a$	$d$
Experimental data 1 without grouting	$3.47 \times 10^9$	-	-2.03
Experimental data 1 with grouting	$4.23 \times 10^9$	-	-2.03
Experimental data 2	$1.56 \times 10^9$	-	-1.90
Experimental data 3	$3.34 \times 10^8$	-0.37	-0.78

にケーブル全体が変形することが考えられ、PC 鋼より線の応力と直交する方向のすべり振幅も存在すると考えられる。この大きさを推定することは容易ではないが、0.001mm のオーダーよりは大きいことが充分に推測される。となれば、応力振幅と直交する方向のすべり振幅の影響もあるとされており<sup>7)</sup>、この点も考慮する必要がある。

接触力の指数部の  $a$  は実験データ 3 から求められるが、その絶対値の比較から、応力振幅とすべり振幅の影響より小さいと考えられる。実験データ 1 と 2 とでは、偏向部の曲げ半径を変えることにより、接触力を変えている。実験データ 2 では、フレットング痕の数が偏向部の曲げ半径を変えても同じ 3 箇所であるので、接触力は変わっていないとも考えられるが、表-1 で示されているように、曲げ半径が大きい場合(理論的に接触力が大きい場合)の方が疲労寿命が長くなっている。

最小応力の大きさは実験データ 1、2 と実験データ 3 とで異なる。それは、偏向部において PC 鋼より線が曲げられ、それによる付加的な応力が存在するからである。最小応力  $\sigma_{\min}$  は付加的な曲げ応力  $\sigma_b$  を考慮すると次式で算定される。

$$\sigma_{\min} = \sigma_{\min 0} + \sigma_b \quad (10)$$

ここに、 $\sigma_{\min 0}$  : 直線部の PC 鋼より線の最小応力、 $\sigma_b = \frac{\phi E}{2R}$

実験データ 3 においてはこの曲げ応力は存在しない。回帰分析結果からこの曲げ応力の影響を直接確かめることは不可能であり、今後の検討課題といえる。

#### 4. おわりに

既往のフレットング疲労実験結果を相互比較することにより、以下のことが結論として導かれた。

- (1) フレットング疲労に影響を与える因子として、応力振幅、すべり振幅、接触力がある。
- (2) 応力振幅とすべり振幅の疲労寿命に与える影響は、接触力のそれより大きいと推定される。

#### 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トング疲労特性、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) 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 鋼より線のフレット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
- 4) 佐藤公紀・上田多門・角田與史雄・新井英雄：PC 鋼より線のフレットング疲労に関する疲労強度式の研究、土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集、第 5 部、1999.9
- 5) 斎藤宗・佐藤昌志・阿部富治・日紫喜剛啓：大偏心外ケーブル PC 橋におけるケーブルのフレットング疲労試験、第 8 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、プレストレストコンクリート技術協会、pp.599-604、1998.10
- 6) 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
- 7) R.B. Waterhouse (佐藤準一訳)：フレットング損傷とその防止法、養賢堂、pp.130-164、1984
- 8) 梅津健司・藤田学・新井英雄・上田多門・鮎子多浩一：外ケーブル偏向部における PC ストランドのフレットング疲労性状の研究、鋼構造論文集、Vol.5、No.17、pp.57-66、1998.3
- 9) 住友建設：外ケーブルフレットング疲労試験報告書(未公表)、1998.10