

PC ストランドのフレットング疲労強度に与える応力振幅と相対滑り量の影響

北海道大学大学院工学研究科

○伊藤智之

同上

正会員 上田多門

1. はじめに

PC 構造物の外ケーブル方式は内ケーブル方式に比べて、ケーブルの維持管理が容易であること、部材内に緊張材が少ないため施工が容易になること、大容量の緊張材を使用することが可能となり構造物の強度を上げることができるとなどの長所を持っているが、その反面、偏向部や定着部の構造などにおいて問題を抱えている。

外ケーブル方式の緊張材に PC ストランドを使用した場合、PC ストランドは偏向部において複数段に重なり合って PC ストランド間で偏向による腹圧力が作用する。PC ストランドは互いに点接触するので、接触部で腹圧力による応力が集中している。この腹圧力が作用している状況下で活荷重によって PC ストランドの軸方向に応力振幅が生じ、それに伴って相対滑りが PC ストランド間に生じる。この結果、接触部において摩耗および亀裂が発生し、さらに進行すると破断に至る。この一連の現象が外ケーブル方式におけるフレットング疲労である。フレットング疲労の諸因子として、上に挙げた腹圧力、応力振幅、相対滑り量の他に、金属の材質、表面処理方法が知られている。

本研究では、フレットング疲労に支配的に影響を与えると思われる応力振幅、腹圧力、相対滑り量をパラメータとして実験を行った。本研究の目的は応力振幅と相対滑り量のフレットング疲労強度に与える影響について実験的検討から明らかにすることである。また、同じ実験方式である既往の研究と本研究の実験結果を用いてフレットング疲労強度式を導き出すことができた。

2. 実験概要

実験方式は、フレットング疲労に支配的に影響を与えると思われる応力振幅、腹圧力、相対滑り量の3つの因子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。供試体に5本のPC鋼より線を使用し、膨張材により中央の1本のみを上下端で定着し、外側の4本は下端のみを定着した。外側の4本の中から2本のPC鋼より線を拘束器により締め付けることで中央と外側のPC鋼より線の間に腹圧力を作用させる。相対滑り量は中央の1本にのみ応力振幅を与えて、その両側の2本には応力振幅を与えないことで、中央のより線と外側のより線間の接触点で生じる。その大きさは式(1)で表すことができる。

$$S_r = H(\varepsilon_{center} - \varepsilon_{out}) = H(1-r) \frac{\sigma_r}{E} \quad (1)$$

S_r : 相対滑り量、 H : 中央と外側のPC鋼より線の接触点と固定点との間の距離

ε_{center} 、 ε_{out} : 中央と外側の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

E : PC鋼より線のヤング係数

相対滑り量は拘束器の位置を変えることで拘束位置 H を変え、その大きさを調節することができる。腹圧力は拘束器のボルトの締め付け具合を変えることで調節し、ロードセルにより測定した。

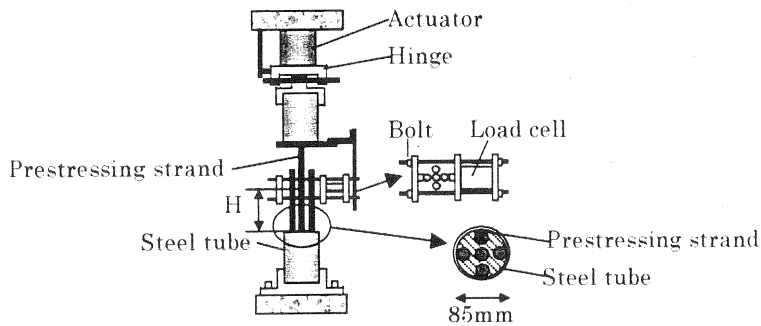


図-1 載荷方法

3. 実験結果及び考察

3. 1 各実験結果

本研究と既往の研究^{1), 2), 3)}の各実験結果を表-1に示す。表中の1)は応力振幅のフレットィング疲労強度に与える影響について調べるため応力振幅を変化させて腹圧力を800N程度に、相対滑り量を0.04mm程度にした。表中の2)は相対滑り量のフレットィング疲労強度に与える影響について調べるため相対滑り量を変化させて応力振幅98MPa、腹圧力を400N程度にした。実験上の都合により多少目標とした設定からずれてしまった供試体もある。供試体HIは本研究の実験で行われた供試体で、供試体HT¹⁾、HM²⁾、HS³⁾については本研究と同じ実験方式で行われた既往の研究の供試体である。

表-1 各実験結果

HI3、4、6、7、8はPCストランドが破断せずに疲労載荷を中止して、実験を終了した供試体である。それぞれの供試体に対して疲労試験の後に静的引張試験を行った結果、フレットィング疲労の影響があったと考えられ供試体はHI3だけであった。HI3は疲労試験後の静的引張試験によりフレットィング痕で破断したと、試験成績表による引張荷重よりも静的引張試験による引張荷重が低下していたことから、フレットィング疲労による疲労亀裂が入っていたと考えられる。

	供試体	腹圧力(N)	相対滑り量(mm)	応力振幅(MPa)	疲労寿命(回)
1)	HI1	830	0.065	160	443,867
	HI2	827	0.038	80	508,384
	HI3	639	0.039	40	*)3,000,000
	HS2	588	0.042	98	*)2,000,000
	HS3	838	0.04	130	468,000
	HS4	1082	0.037	30	*)3,000,000
	HM3	980	0.049	98	478,319
	HT6	733	0.043	98	*)2,000,000
	HT11	850	0.038	98	411,350
	HT14	882	0.035	49	760,154
2)	HI4	259	0.111	98	*)2,000,000
	HI5	307	0.08	98	1,419,058
	HI6	403	0.021	98	*)3,000,000
	HI7	401	0.105	98	*)2,000,000
	HI8	392	0.082	98	*)2,000,000
	HS2	588	0.042	98	*)2,000,000
	HT9	367	0.069	98	695,500
	HT10	367	0.035	98	1,197,875

*) PCストランドが破断せずに実験を終了した。

3. 2 疲労強度式の提案

フレットング疲労に支配的に影響を与えると思われる応力振幅、腹圧力、相対滑り量の3つの因子を考慮すると、式(2)のような形態の式となる。

$$N = (F_p)^a \cdot (F_{sl})^b \cdot (\sigma)^c \cdot D \quad (2)$$

ここで、a,b,c,D:定数、N: 疲労寿命、 F_p : 腹圧力に関する項、 F_{sl} : 相対滑り量に関する項、 σ : 応力振幅に関する項

式(3)、(4)は表-1の1)、2)の実験データをそれぞれ用いて重回帰分析により指数及び定数を決定した疲労強度式である。

$$N = D' \cdot (\sigma)^c \quad (3)$$

$$N = D'' \cdot (F_{sl})^b \quad (4)$$

$$D' = 7.55 \times 10^{17}, c = -1.51, D'' = 4.00 \times 10^3, b = -0.13$$

式(3)は腹圧力、相対滑り量が同じような値であることから、それぞれ平均値を求め、定数として扱った。式(4)も腹圧力、応力振幅について同様のことを行った。

3. 3 疲労寿命に与える応力振幅の影響

図-2において式(3)と、土木学会示方書の設計疲労強度式⁴⁾を比較した時、前者の直線が後者の直線よりも下に位置している。これは、疲労強度がフレットング疲労によって通常の疲労強度よりも低下していることを示している。疲労強度が土木学会示方書の設計疲労強度式よりも上に位置している範囲があるが、この範囲のフレットング疲労のデータはなく、この範囲において、フレットングの影響がある場合の方が、ない場合より疲労強度が高くなるかどうかは、現時点では不明である。本論文で提示するフレットング疲労の式は、実験データの範囲である、応力振幅 30~160MPa が適用範囲である。

また、疲労強度式と本研究とは実験方式が異なる既往の実験結果とも比較を試みた。図-2中に示す2S15.2の要素試験は、ストランド2本を偏向部を模擬した箇所を引張ることにより、フレットング疲労を与える方式である。本論文の実験方式と比較すると相対滑り量が1桁程度以上小さい。本実験結果は、この方式から求められた疲労強度式より大きくなっている。3.4でこの差異について論じる。

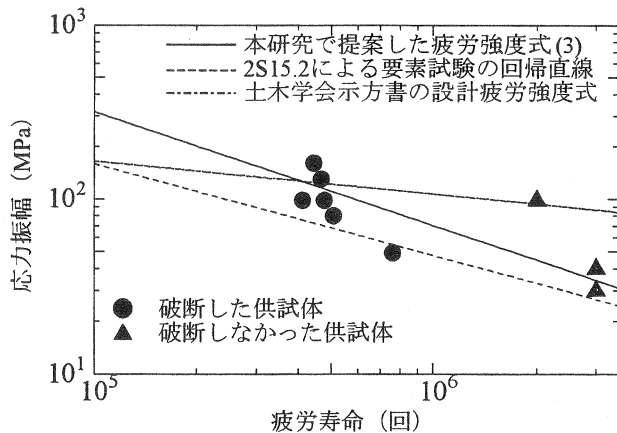


図-2 応力振幅-疲労寿命の関係

3. 4 疲労寿命に与える相対滑り量の影響

図-3において実験データのプロットの分布と式(4)から、疲労寿命に与える相対滑り量の影響はほとんどないと考えられる。本研究で提案した疲労強度式(4)の適用範囲は相対滑り量 0.021~0.111mm であることから、相対滑り量がどの値においても影響がないということはない。

3. 3で示したように、相対滑り量が 0.001mm 以下の既往の実験⁵⁾では相対滑り量が疲労寿命に十分に影響を与える結果が出ている。したがって相対滑り量はある値以上になると疲労寿命に影響を与えなくなると考えられる。この点は、フレットング疲労に関する、従来の知見⁶⁾とも定性的に一致している。

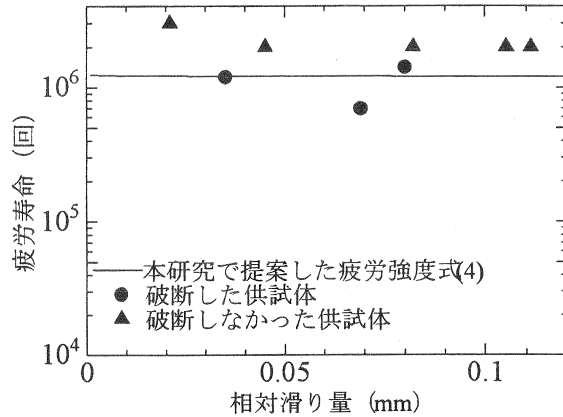


図-3 相対滑り量-疲労寿命の関係

4. おわりに

本研究の実験的検討から以下のことが結論として導き出された。

- 1) PC スtrandはフレットング疲労により通常フレットングの影響がない疲労強度より疲労強度が低下する。
- 2) 疲労寿命に与える応力振幅の影響は応力振幅が大きいほど疲労寿命は小さくなるが、その程度は、フレットングの影響のない通常の場合より小さい。
- 3) 疲労寿命に与える相対滑り量の影響は本研究の実験範囲 (0.011~0.142mm) においてはほとんど影響はない。

今後より多くの実験データを集めることにより疲労強度式はより精度の高いものになり、フレットング疲労の挙動もより明らかになるであろう。

参考文献

- 1) 田中雄太：偏向部における外ケーブルの疲労強度に関する研究、北海道大学修士論文、1997
- 2) 森脇渉：高圧力下におけるPC鋼より線のフレットング疲労性状、北海道大学卒業論文、1998
- 3) 佐藤紀：PCより線のフレットング疲労に関する疲労強度式の研究、北海道大学卒業論文、1999
- 4) コンクリート標準示方書(設計編)、pp35-36
- 5) 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 No.627/V-44、pp.205-222、1999.8
- 6) 上田多門、佐藤紀、角田與史雄、新井英雄：外ケーブルのフレット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