

V-12

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

北海道大学工学部○学生員 佐藤 公紀
 北海道大学大学院 正会員 上田 多門
 北海道大学大学院 フェロー 角田 興史雄
 住友建設(株) 正会員 新井 英雄

1. はじめに

PC 構造物にプレストレスを与えるための緊張材の配置方式には、主桁を構成するウェブなどの内部に配置する内ケーブル方式と、床版やウェブの外側に配置する外ケーブル方式がある。外ケーブル方式は内ケーブル方式と比べて、部材内に緊張材が少ないため施工が容易になること、大容量の緊張材の使用が可能であること、ケーブルの維持管理が容易であることなどの長所を有するが、その反面、偏向部(デビエータ)や定着部の構造などにおいて問題を抱えている。

PC 鋼より線を束ねて緊張材とした場合、デビエータでは鋼材が複数段に重なり、外側の鋼材から内側の鋼材へ偏向による腹圧力が作用する。鋼より線相互は点接触するので、接触部では腹圧力による応力が集中している。その状況にあつて活荷重により鋼材に軸方向応力変動が生じ、それに伴う相対すべりが PC 鋼より線あるいは素線間に生じると、接触箇所に磨耗および亀裂が発生する。さらに進行すると破断に至る。この一連の現象をフレットング疲労という。フレットングとは、一般には微小振幅の相対運動を受ける接触 2 面間に生じる磨耗現象を指す。¹⁾

PC 鋼より線のフレットング疲労特性に関する研究は外国、国内とも数例報告されているが、その中で田中²⁾はフレットング現象を伴う PC 鋼より線の疲労強度式を提案した。そこで本研究は、より多くのデータを用いて解析することによって、田中の疲労強度式の信頼性を高めることを主な目的として行った。

2. 既往の研究

(1) 新井らの研究¹⁾

新井らは、要素試験として裸の PC 鋼より線 S15.2 を 2 本重ねたものと、実橋で用いられる外ケーブルを想定した大容量である 19S15.2 の試験体(保護管; 高密度ポリエチレン管、保護管内はグラウトを充填)、の 2 種類の試験を行っている。19S15.2 を用いた試験体の偏向部構造は、桁側面に設けるデビエータをモデル化したタイプと、エクストラドーズド PC 橋の主塔サドルをモデル化したタイプを用いている。

(2) 田中の研究²⁾

田中は、橋梁における偏向部の状況を再現するモデル化された供試体(PC 鋼より線 S12.7)を用いて、応力振幅、腹圧力、相対すべり量をパラメータとして実験を行い、その結果を基にした解析によって疲労強度式を提案している。

$$N = (f_p)^a \cdot (f_{\sigma})^b \cdot (\sigma)^c \cdot (f_{\sigma})^d \cdot D \quad (a, b, c) = (-0.91, -0.13, -1.34) \quad , D = 1.78 \cdot 10^{11}$$

N ; 疲労寿命

f_p ; 腹圧力に関する項

f_{σ} ; 相対すべり量に関する項

σ ; 応力振幅に関する項 , f_{σ} ; 最小応力に関する項

Study on the Equation for Fretting Fatigue Strength of Prestressing Strands
 by Masaki Sato, Tamon Ueda, Yoshio Kakuta, and Hideo Arai

(3) 森脇の研究³⁾

森脇は、田中と同じ、橋梁における偏向部の状況を再現するモデル化された供試体（PC 鋼より線 S12.7）を用いて、主に高い腹圧力を作用させた試験を行い、その場合の田中の疲労強度式の適合性を調べている。

以上 3 つの研究結果では、PC 鋼より線についてフレットングによる疲労寿命の低下が確認されており、また、重大なフレットングは PC 鋼より線の素線間ではなく、隣接する PC 鋼より線間において発生していることも示されている。

3. 実験概要および実験結果

(1) 実験概要

本実験では、田中、森脇と同様、橋梁における偏向部の状況を再現するモデル化された供試体を用いた。Fig.1 に示す実験装置、供試体によって、腹圧力、相対すべり量、応力振幅の 3 つのパラメータを分離しての実験が可能となっている。

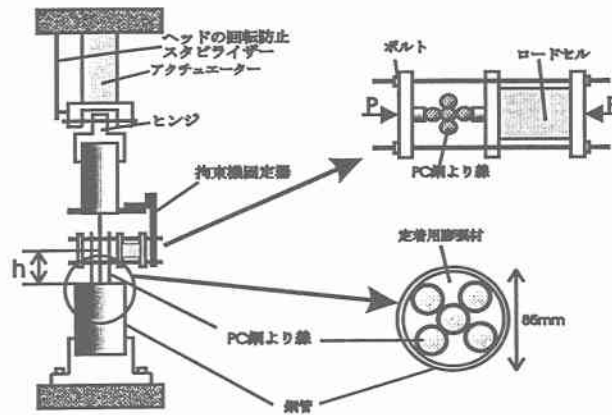


Fig.1 Test set up

供試体には 5 本の PC 鋼より線（S12.7）が使われており、中心の一本のみ上下端で固定されている。周りの 4 本は下端のみで固定されている。上下端の定着には、中空の鋼管に大きな膨張圧を発生する定着用膨張材（静的破砕材）を詰め、その膨張圧により PC 鋼より線を定着する。これにより、ボルトなどの定着具を用いた疲労試験の際に懸念される、定着具部分での疲労破断を避けることができる。

上下の鋼管を通して、中心の PC 鋼より線のみに応力振幅を与えることにより、中心の PC 鋼より線だけが延びる状態になり、外側に配置された 4 本の PC 鋼より線との間に延びの差を生じる。これが PC 鋼より線間の相対すべり量となる。また、Fig. 1 中の h の位置にある拘束器の位置を変えることにより、相対すべり量を変えることができる。すなわち、中心、外側の PC 鋼より線のひずみをそれぞれ $\varepsilon_{\text{center}}$ 、 ε_{out} とすると、長さ h の部分でおこる相対すべり量 Δ は中心と外側の PC 鋼より線の延びの差であるから、

$$\Delta = h \cdot \varepsilon_{\text{center}} - h \cdot \varepsilon_{\text{out}} = h \cdot \Delta \varepsilon$$

となり、一定の応力振幅下でおこる一定のひずみ差においては、拘束位置を変えることによって相対すべり量を操作することができる。

さらに、拘束器を用いて PC 鋼より線を外側から締め付けることにより、中心と外側の PC 鋼より線間に腹圧力を生じさせている。腹圧力を測定するため、拘束器にはロードセルを取り付けている。

(2) 実験結果

実験結果を Table 1 に示す。

Table 1 Experimental results

Contact force (N)	Relative slip amplitude (mm)	Stress range (MPa)	Fatigue life (回)
4900	0.041	98	766,497

フレットング痕、破断形状は Fig. 2 に示す。
明らかなフレットング痕は、図に示す 1 つだけだったが、フレットング痕と疑われるものが 1～2 箇所確認された。これにより、腹圧力が破断箇所以外に分散していた可能性も否定できない。後に示す疲労強度式から算出される疲労寿命と、実験値との差の一因であると考えられる。

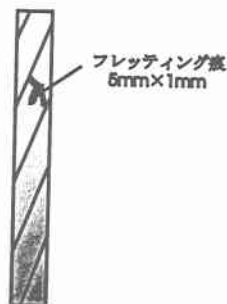


Fig. 2 Evidence of fretting fatigue

4. 疲労強度式の提案及び考察

田中らの研究²⁾では、2. (1) に示すような疲労寿命式が提案されている。

$$\cdots N = (f_p)^a \cdot (f_{\sigma})^b \cdot (\sigma)^c \cdot (f_p)^d \cdot D \quad (4.1)$$

そこで本研究では、この式について、より多くのデータを用いて分析し、以下の結果を得た (Table 2)。分析は、式 4.1 の両辺の対数を取り ($\log N = a \cdot \log f_p + b \cdot \log f_{\sigma} + c \cdot \log \sigma + \log D$ … 最小応力と引張強度の比は全データにおいて一定 (0.6) なので、最小応力の項は定数 D に含めた)、重回帰分析を行った。

Table 2 Experimental and calculated results

	Contact force (N)	Relative slip amplitude (mm)	Stress range (MPa)	N _{ex}	N _{cal}	log(N _{ex})/log(N _{cal})
This test	4900	0.041	98	766497	272852	1.06
Test by Tanaka	367	0.069	98	695500	608585	1.01
	367	0.035	98	1197875	593014	1.05
	850	0.038	98	411350	461659	0.99
	1960	0.038	98	150000	358750	0.93
	1715	0.04	131	121260	252253	0.94
	882	0.035	49	760154	1167491	0.97
Test by Moriwaki	1470	0.011	49	727275	957390	0.96
	7840	0.042	98	198995	236979	0.99
	2940	0.042	98	582297	318637	1.05
Elemental test of 2S15.2	980	0.049	98	478319	446560	1.01
	455	0.0009	98	360000	483264	0.98
	455	0.0009	98	270000	483264	0.96
	455	0.0009	98	740000	483264	1.03
	455	0.0009	98	340000	483264	0.97
	455	0.0005	49	1180000	1212210	1.00
	455	0.0003	29	1108000	2425017	0.95
	455	0.0002	20	4000000	3956504	1.00
	455	0.0009	98	1300000	483264	1.08
	455	0.0002	20	7700000	3956504	1.04
Fatigue test of multi strands	473	0.000341	118	260000	357584	0.98
	473	0.000248	78	786000	620087	1.02
	473	0.000155	49	1157000	1145687	1.00
	2956	0.0005	49	691000	689030	1.00
	284	0.000155	49	1437000	1336703	1.01

$$N = P^a \cdot SL^b \cdot \sigma^c \cdot D \quad (4.2)$$

N; 疲労寿命 (回)

P; 腹圧力 (N)

SL; 相対すべり量 (mm)

σ ; 応力振幅 (MPa)

$$D = 2.04 \cdot 10^9$$

$$(a, b, c) = (-0.30, 0.04, -1.36)$$

(1) 腹圧力に関する考察

1) 2S15.2 による要素試験¹⁾について
偏向角 θ はいずれの試験体とも 0.5 度で、鋼材の下限応力度は、引張強度の 60% である 1120MPa となっている。ここで、緊張力 T ($=f_{pu} \cdot A \rightarrow f_{pu}$; 下限応力度、A; PC 鋼より線の公称断面積) の軸直角方向分力である腹圧力 R は、

$$R = 2 \cdot T \cdot \sin(\theta/2) = 1367N$$

となる。ここで、解体後に観察されたフレットング痕は、曲げ半径に関わらず 3 箇所

であり、破断はフレット痕 3箇所のうち、真ん中または端部で起こっているため、全ての接触点当りの腹圧力 P は同じと考え、

$$P = 1367 / 3 = 455 \text{ N}$$

とした。⁴⁾

2) 大容量 PC 鋼より線の疲労試験¹⁾について

以下の式 (4.3) により、腹圧力 P を決定した。²⁾

$$P = c_{go} \cdot L \cdot \{ c_{ly} \cdot (n-1) \cdot T/R \} \quad (4.3)$$

c_{go} ; グラウトによる影響を補正する係数 = 0.16

…通常外ケーブル構造において使用される PC 鋼より線は、シース内をセメントなどでグラウトして使用される。グラウトによって PC 鋼より線間の隙間が埋められると、すべて接点間に作用すべき PC 鋼より線の腹圧力がグラウト部分にも分散してしまうと考えられるので、グラウトによる PC 鋼より線間の腹圧力の低減を考慮し、その度合いを c_{go} で表す。

L ; フレット痕の間隔 (cm)

…PC 鋼より線には「より」があるので接点間に周期的な間隔が発生する。 T/R は、PC 鋼より線の表面に凹凸が無いものとした際の PC 鋼より線長さあたりの腹圧力なので、接点あたりの腹圧力は T/R に L を乗じたものとなる。新井らの実験で使用された住友電工製の PC 鋼より線 S15.2 は、よりピッチが線形の 1.4 倍で、外周素線は 6 本なので、

$$1.4 \cdot 15.2 / 6 = 3.55 \text{ mm}$$

となる。すなわちよりピッチはおおよそ 3.5cm であり、実測でもその値となっている。よって、PC 鋼より線間の接点の周期的間隔を 3.5cm と考え、フレット痕の間隔も 3.5cm とした。

n ; PC 鋼より線の重なっている本数

…マルチストランドケーブルの場合、偏向部では PC 鋼より線が多段に重なるが、偏向部外側の PC 鋼より線間に作用する腹圧力は内側の PC 鋼より線に伝達するため、偏向部から 1 本目と 2 本目の間の腹圧力が最も大きくなり、 $(n-1) \cdot T/R$ となる。19S15.2 の場合、疲労試験後の解体調査の結果より、 $n = 4$ とした。

c_{ly} ; PC 鋼より線の重ねあわせの影響を補正する係数 = 0.54

…実際の偏向部における PC 鋼より線の配置は複雑で、横方向にずれたり隙間が空いたりしているので、外側の PC 鋼より線から内側の PC 鋼より線に伝達する腹圧力は、線形的に足しあわされた値より小さくなることが予想される。この低減の度合いを c_{ly} で表す。

R ; PC 鋼より線の曲げ半径 (cm)

…最初の 4 データは 300cm、残りの 1 データは 500cm。

T ; PC 鋼より線の張力 = $f_{pu} \cdot A$

f_{pu} ; 鋼材の下限応力度 (引張強度の 60% = 1120Mpa)

A ; PC 鋼より線の公称断面積 (2673.3mm² 試験成績書より)

(2) 相対滑り量に関する考察

1) 2S15.2 による要素試験、大容量 PC 鋼より線の疲労試験¹⁾ について

偏向部において、全ての PC 鋼より線は様な応力振幅を受けていると仮定すると、隣接する PC 鋼より線の相対滑り量は、偏向部と接する部分の長さの差にひずみ振幅を乗じたものとなる。よって、最も腹圧力が大きいと考えられる、偏向部から 1 本目と 2 本目の PC 鋼より線間の相対滑り量 SL は、

$$SL = \alpha \cdot \{(R+d) \cdot \theta - R \cdot \theta\} \cdot \sigma / E = \alpha \cdot (d \cdot \theta \cdot \sigma / E) \quad (4.4)$$

α ; グラウトによる影響を補正する係数 = 0.31

d ; PC 鋼より線の径 (mm) = 15.2mm

θ ; PC 鋼より線の曲げ上げ角度 (rad)

σ ; PC 鋼より線軸方向の応力振幅 (MPa)

E ; PC 鋼より線の弾性係数 (MPa)

R ; PC 鋼より線の曲げ半径 (cm)

となる²⁾。ここで、グラウトによる影響を補正する係数とは、グラウトによって、ケーブル軸直角方向の動きだけでなく、ケーブル軸方向の動きも拘束される可能性があるため、それによる相対滑り量の低減の度合いを示したものである。

2) 疲労強度は、相対滑り量が増大するに従って低下するが、0.008mm 以上ではほぼ一定になるという研究結果が、文献 4) に示されている。Fig.3 に、本実験で使用したデータについて、相対滑り量が 0.008mm 以上、以下での疲労寿命—相対滑り量の関係を示す。

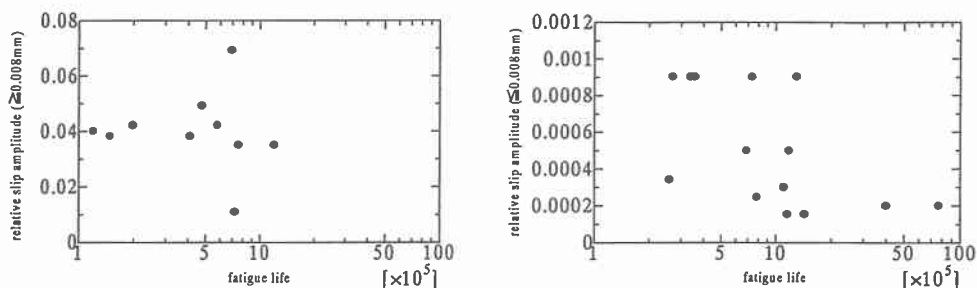


Fig.3 Relative slip amplitude—Fatigue life

0.008mm 以上 (左) では相関は見られない一方、0.008mm 以下 (右) では相関がみられる。しかし、0.008mm 以下のデータは全て新井らの研究¹⁾ (2S15.2 による要素試験、大容量 PC 鋼より線の疲労試験) によるものであり、これらの相対滑り量は 1) に示したように応力振幅に比例するため、相対滑り量が疲労寿命に与える影響は本研究においては応力振幅の項に含まれると言える。つまり、本研究において提案した疲労強度式 (4.2) においては、0.008mm 以上、以下に関わらず相対滑り量の項は意味をなさないと言える。

3) 本研究において提案した疲労強度式 (4.2) において、相対滑り量の項の指数部が正であることは、文献 4) に示されている、疲労強度は相対滑り量が増大するに従って低下する、という研究結果と矛盾している。

4) 本研究では重回帰分析によって疲労強度式を求めたが、Table 3 にその結果の一部を示す。

ここで「Coefficient」は、各パラメータの指数部を示している。

Table 3 Results of multiple regression analysis

	Coefficient	Standard error	t
Contact force	-0.30	0.1531821	-1.97065
Relative slip amp.	0.04	0.0675407	0.56539
Stress range	-1.36	0.2531001	-5.36996

各説明変数（パラメータ）の Coefficient の有意性は、 t 値で判定することができる。 t 値 = (Coefficient) / (Standard error) で、 t 値が高い変数ほど、目的変数（本研究では疲労寿命 N にあたる）を説明する上での貢献度が高いと言える。また、 F 値 = $(t \text{ 値})^2$ が 1 未満の変数は経験的に不要な変数と言われている⁵⁾。よって表 (4.2) より、統計的に見ても、相対滑り量は説明変数として有意ではない可能性が高いと言える。

(3) 疲労強度式に関する考察

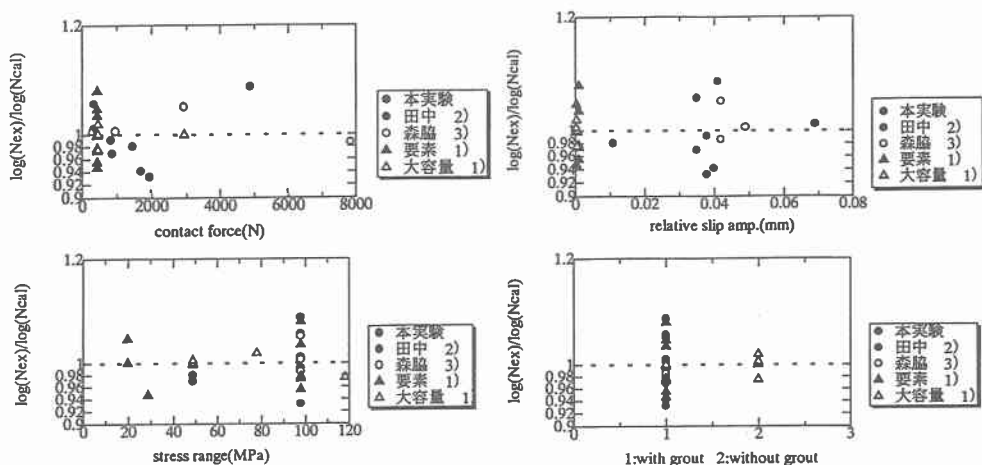


Fig.4 Experimental and calculated results

Fig.4 は、横軸に腹圧力、相対すべり量、応力振幅の各パラメータと、グラウトの有・無をとり、縦軸には疲労寿命の実測値 N_{ex} と予測値（計算値） N_{cal} の対数比をとったものである。グラフより、疲労強度式としては十分な精度を有していると言える。また、提案した疲労強度式の寄与率は 0.65 で、 p 値は $1.37 \cdot 10^{-5}$ である。ここで寄与率とは、目的変数 y の変動のうちで、説明変数 x を使った回帰式によって説明のつく変動の割合を示す指標であり、 p 値は、統計的有意性を検定する統計的仮説検定に用いる数値である。一般に、 p 値が 0.05 より小さければ、回帰式には意味がないという帰無仮説を棄却できる。つまり、 p 値 ≤ 0.05 ならば回帰式には意味があると判断されるので、提案した疲労強度式は統計的に意味のある式だと言える。

5. まとめ

(1) 田中が提案した疲労強度式¹⁾は、P C 鋼より線のフレットング疲労に関する疲労強度式として、十分な精度を有していると言える。

(2) 田中の疲労強度式において、相対すべり量の項は疲労強度式にほとんど貢献していないと考えられるので、相対すべり量の項を除いた疲労強度式について、今後検討する必要があると思われる。

6. 参考文献

- 1) 新井英雄、藤田学、梅津健司、鮎子田浩一、上田多門；大容量 P C 鋼より線の曲げ配置部におけるフレットング疲労特性（投稿中）
- 2) 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
- 3) 森脇渉；高腹圧力下における P C 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
- 4) 梅津健司、藤田学、新井英雄、上田多門、鮎子田浩一；外ケーブル偏向部における P C 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 第 5 巻第 17 号、1998
- 5) 内田治；すぐわかる EXCEL による多変量解析、東京図書、1996