

## スパイラル補強 PE 保護管を使用した偏向部のフレットング疲労強度試験

極東鋼弦コンクリート振興株式会社 技術部 正会員 ○黒輪亮介  
 同 上 正会員 渡辺孝司  
 同 上 正会員 板谷英克  
 株式会社コベルコ科研 技術本部 構造技術部 柳井 博

### 1. はじめに

プレストレストコンクリート橋の外ケーブル構造において、外ケーブルの偏向を保持するデビエーターやサドル部では、ケーブルの曲げ配置半径を小さくしその構造の縮小化を図っている。しかし、曲げ配置半径を小さく設定した PC 鋼より線の疲労設計では、フレットング疲労による疲労強度の低下を無視ことが既往の研究によって明らかとなっている。

FKK 外ケーブル E システムには、デビエーター内部に使用する保護管として、環状支承体付デビエーターとゴム緩衝材付デビエーターの 2 種類があり、裸鋼材を使用する方式（保護管+グラウト）はもちろんのこと、ポリエチレン系の被覆鋼材を使用する場合にも適応できるシステムとなっている。このような FKK の技術は、従来、FI（フレッシュインターナショナル）との技術の共有の中で裏付けられていた。

一方、近年我が国においては、PC 鋼より線のフレットング疲労強度について各方面で数種類の実験が行われ、フレットング疲労性能に対する被覆材や保護管内に充填されるグラウトの有効性が確認されている<sup>1) 2) 3)</sup>。そこで、FKK の国内における技術として、前記した 2 種類のデビエーターシステムを用いグラウト方式にて、フレットング疲労試験を実施し、そのフレットング疲労強度を確認した結果について報告を行う。

### 2. 試験概要

#### (1) デビエーターに使用した保護管の構造

本試験に使用した保護管の構造を図-2.1 に示す。両保護管は 2 重管構造となっており、外管には SUS 製のフレキシブルシース、内管にはその内面を硬鋼線のスパイラルで補強した PE 管（以下、スパイラル補強 PE 管と称す）を配置する構造となっている。また、フレキシブルシースの両端には環状支承体及びスリーブ付端板あるいは熱収縮ゴム緩衝材を配置し、デビエーター端部での応力集中を防ぐ構造となっている。また、環状支承体付デビエーターに配置されるインサート鋼管はフレキシブルシースとスパイラル補強 PE 管の接触を促がしデビエーターに作用する応力を分散させる機能を有している。

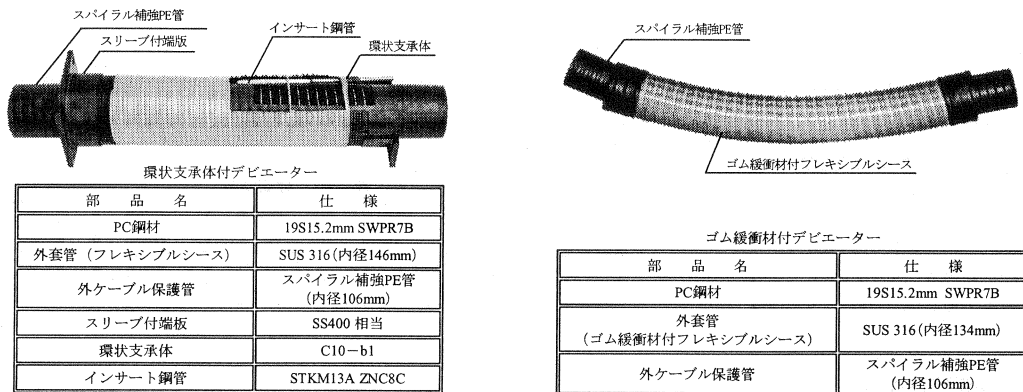


図-2.1 FKK デビエーターシステム

(2) PC 鋼より線

試験対象としたケーブルは 19S15.2 (SWPR7BL) であり、その機械的性質は表-2.1 に示す通りである。

表-2.1 PC 鋼より線の機械的性質

品名	直径 (mm)	断面積 (mm <sup>2</sup> )	引張荷重 (kN)	降伏荷重 (kN)	伸び (%)
PC鋼より線 7本より 15.2mm (JIS G 3536-SWPR7BL)	15.2	138.7	267(≧261)	252(≧222)	7.1(≧3.5)

( ) 内は規格値

(3) 試験装置

試験装置の全景を図-2.2 に示す。中央の試験体ブロックは箱桁内のデビエーターを模擬したもので、環状支承体付デビエーターとゴム緩衝材付デビエーターを配置した試験体をそれぞれ製作した。デビエーター内のケーブル配置形状は、19S15.2 を使用した場合の最小曲げ半径である R=3000mm、偏向角度を 14° (円弧配置部一ヶ所当りの偏向角は 7°) とし、更にケーブルの中央には直線区間を設けることで実橋における外ケーブルの挙動に近づくようにした。また、本試験ではいずれの場合もケーブル保護管 (PE 管) 内に緊張力を導入後、グラウトを充填したが、疲労試験終了後ケーブルの解体を行う必要があるため、定着体ブロックとロードセルの間にノングラウト区間を設け、そこで緊張力を解放できる構造とした。

疲労試験は、アクチュエーターにて試験体ブロックに鉛直荷重を載荷させることにより、ケーブルに応力振幅を与える機構とした。鉛直変位の測定を試験体中央部に設置した変位計にて行い、A、B 両端の反力台後方に設置したロードセルにより荷重の振幅を計測した。また、疲労試験中に PC 鋼より線が破断した場合に、その時点での繰返し載荷数や破断回数を確認できるように、荷重の振幅や鉛直荷重を記録する X-T レコーダーや両端ラムチェア内部のノングラウト部分に加速度計を設置した。

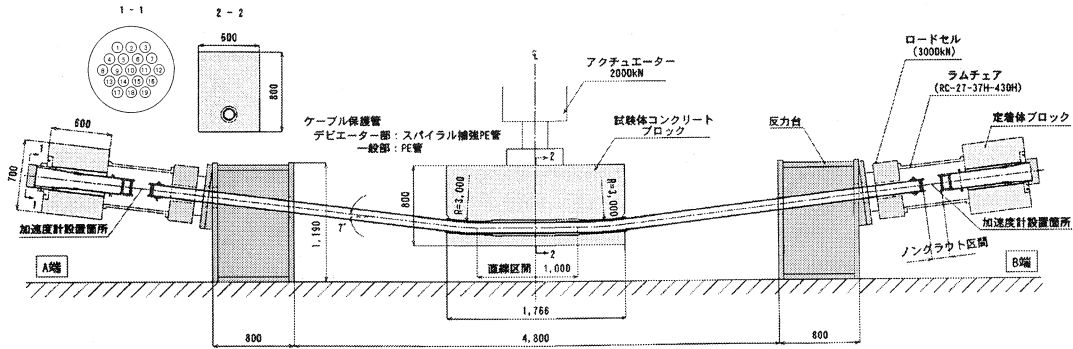


図-2.2 試験装置全景

(4) 載荷条件

本試験での載荷条件を表-2.2 に示す。試験体設置後に、A、B 両端に設置したロードセルが下限荷重である 2975kN 以上となるようにケーブルに緊張力を導入した後、グラウトの注入作業を行い圧縮強度が 30N/mm<sup>2</sup> に達した時点で疲労試験を開始した。

応力振幅は 50N/mm<sup>2</sup> とし、実橋の挙動と同様 PC 鋼より線の破断が進行しても応力振幅が設定値以下とならないよう荷重制御とした。

表-2.2 載荷条件

試験ケース	デビエーターの種類	下限荷重 (kN)	上限荷重 (kN)	応力振幅 (N/mm <sup>2</sup> )
CASE-1	環状支承体付デビエーター	2975(0.6Pu)	3107	50
CASE-2	ゴム緩衝材付デビエーター	2975(0.6Pu)	3107	50

3. 試験結果および考察

(1) 疲労試験の結果

各試験体の疲労試験の結果を表-3.1 に示す。CASE-2 では 50 万回の繰返し载荷以降、下限荷重が载荷条件である 2975kN を下回っているが、その差はごくわずかであり応力振幅も 50N/mm<sup>2</sup> 以上を満足していることから、試験結果に大きな影響はないものと判断した。疲労試験中、両ケース共に繰返し载荷に伴う大きな変位増幅もなく、また加速度計にも異常な波形は見られなかった。

300 万回の繰返し载荷を終了した後、ケーブルの緊張力を解放し、PE 管内部のグラウトを解体して PC 鋼より線を全長に渡り目視で確認した。PC 鋼より線同士のフレットングによる磨耗痕と思われるものや小さなフレットングコロージョン (赤錆) と思われるものが確認できたが、定着部を含め破断している素線は無かった。この結果から、2 種類の FKK デビエーターシステムは、保護管内にグラウトを充填することで、応力振幅 50N/mm<sup>2</sup> の繰返し载荷に対して 300 万回以上の疲労寿命を有することが確認できた。また、本試験とほぼ同条件 (曲線部 R=3000mm、偏向角 14°、応力変動 50N/mm<sup>2</sup>) で保護管に鋼管 (ディアボロ管) を使用して行われた実験では、300 万回の繰返し载荷後に 13 箇所素線破断を確認している。このことから、素線の破断が無かった FKK デビエーターシステムは、鋼管に比べて同等以上の耐フレットング性能を有しているものと考えられる。また、被覆鋼材を使用して行われた実験と比較しても同様のことがいえ、PC 鋼より線の疲労寿命に与えるグラウト充填の効果は大きいものと考えられる。

表-3.1 疲労試験の結果

繰返し回数 (回)	ロードセル荷重平均値(A・B端)				応力振幅 (N/mm <sup>2</sup> )		変位量 (mm)		振動速度 (Hz)	
	CASE-1		CASE-2		CASE-1	CASE-2	CASE-1	CASE-2	CASE-1	CASE-2
	最大荷重(kN)	最小荷重(kN)	最大荷重(kN)	最小荷重(kN)						
1	3109	2977	3121	2983	50	52	10.1	10.8	1.1	1.2
5×10 <sup>5</sup>	3111	2977	3105	2969	51	52	10.2	10.8	1.1	1.2
1×10 <sup>6</sup>	3112	2978	3105	2970	51	51	10.1	10.7	1.1	1.2
1.5×10 <sup>6</sup>	3113	2978	3105	2970	51	51	10.3	10.8	1.1	1.2
2.0×10 <sup>6</sup>	3112	2977	3105	2970	51	51	10.5	10.8	1.1	1.2
2.5×10 <sup>6</sup>	3111	2975	3105	2970	51	51	10.7	10.7	1.1	1.2
3.0×10 <sup>6</sup>	3112	2976	3105	2969	51	52	10.7	10.8	1.1	1.2

(2) 引張試験の結果

疲労試験終了後、図-3.1 に示すデビエーター内の曲線区間に配置される PC 鋼より線について、その残存耐力ならびにフレットング疲労による亀裂の発生の有無を確認する目的で全本数について、静的引張試験を行った。その結果を図-3.2 に示す。なお、試験片は試験体中央から A・B 端に分けて採取した。したがって試験片の合計は 19 (本) × 2 (A・B 端) = 38 (本) となる。また、採取の際には曲線配置された箇所が試験片の中央付近に位置するように留意した。引張試験において CASE-1 では 6 本、CASE-2 では 7 本の PC 鋼より線が規格引張荷重 (261kN) を満足せず、試験片の中央付近で破断に至った。破断荷重の最も低いものは CASE-1 で 184kN、CASE-2 で 140kN であった。更に、これらの破断面はフレットング疲労特有の断面直角方向に剪断分離した形で破断しており (図-3.3)、疲労試験終了後に目視では確認できなかった微細な亀裂を有していたものと考えられる。また、その亀裂深さが長いものほど低荷重で破断に至っている傾向が見られた。

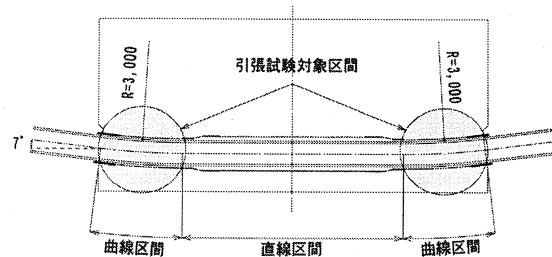


図-3.1 引張試験対象区間

疲労試験中にこれらの亀裂発生に伴う変位の増幅を確認できなかったのは、グラウトの付着効果及びフレットングコロージョンの進行を防ぐ効果により、その亀裂の深さが強度を失うまでの長さに達していなかったためと考えられる。また、これらの亀裂が 300 万回以降の繰返し载荷を行った場合に、伝播して破断に至る可能性については現時点では明確な判断には至っていない。今後更に調査を続ける予定である。

図-3.2 中に示すケーブル断面図は、各試験ケースにおける PE 管内部での PC 鋼より線の配置状況を確認するため、疲労試験終了後にデビエーター内の直線配置部中央でケーブルを切断した断面図である。ここで、PC 鋼より線の番号は図-3.1 中に示す通り A 端側定着ブロックから見た番号とする。規格引張荷重を満足しなかった PC 鋼より線の断面方向に対する位置は、CASE-1 と CASE-2 の間に共通した傾向は見られなかった。

PC 鋼より線 番号	引張荷重 (kN)			
	CASE-1		CASE-2	
	A端	B端	A端	B端
1	272	269	190	270
2	271	271	237	259
3	270	269	270	270
4	234	270	140	271
5	270	270	234	271
6	270	271	270	271
7	270	275	271	271
8	271	271	271	272
9	260	270	261	270
10	270	272	271	271
11	269	271	158	270
12	271	262	155	270
13	248	271	238	271
14	223	270	269	273
15	271	271	270	270
16	184	271	268	272
17	250	271	269	272
18	267	271	269	272
19	269	272	270	270

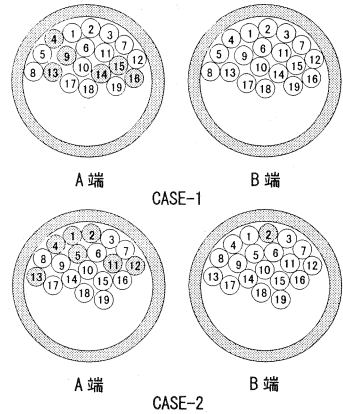


図-3.2 引張試験の結果

規格値以下で破断した PC 鋼より線

このことから、フレットングにより疲労強度が低下する PC 鋼より線は、ケーブル緊張後に断面内に配置される状況によって異なるものと思われる。

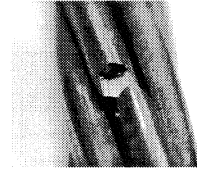


図-3.3 静的引張試験で破断した

PC 鋼より線断面

#### 4. まとめ

FKK 外ケーブル E システム用デビエーターを対象に行ったフレットング疲労強度試験から以下の事が明らかとなった。

- (1) 環状支承付デビエーター及びゴム緩衝材付デビエーターの 2 種類の FKK デビエーターシステムは、 $50N/mm^2$  の応力振幅に対し 300 万回の疲労寿命を十分に有している。
- (2) FKK デビエーターシステムは、鋼管 (ディアボロ管) を使用した場合や被覆鋼材を使用した場合と比べても同等以上の耐フレットング性能を有している。
- (3) FKK デビエーターシステムは、それぞれ外套管に若干の違いはあるものの、ほぼ同様なシステムと考えれば試験数は  $N=2$  となり、疲労試験としてかなり信頼性の高いものである。
- (4) 既往の実験結果や今回の実験結果から、グラウトは PC 鋼より線の疲労寿命を延ばすのに大きな効果があると考えられる。
- (5) 疲労試験後の引張試験において、CASE-1 では 6 本、CASE-2 では 7 本の PC 鋼より線が規格引張荷重を満足していなかったが、素線の 5%破断を疲労寿命とした場合、300 万回の繰返し載荷後においても CASE-1、2 共に残存耐力はかなり残されていると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 新井, 藤田, 梅津, 鮎子, 上田: 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
- 2) 篠崎, 渡辺, Thiru, 濱田: アンボンドマルチケーブルのフレットング疲労強度について, 第 57 回土木学会年次学術講演会講演概要集 第 5 部, pp.1227-1228, 2002
- 3) 出水, 古賀, 田口, 松田: PC 外ケーブル偏向部のフレットング現象の FE 解析, 平成 14 年度土木学会関西支部研究発表会講演概要集, pp.564-565, 2003