

ディビーター部におけるスパイラル補強 PE 管を使用した外ケーブルのフレットング疲労特性

黒輪 亮介*1・渡辺 孝司*2・板谷 英克*3・柳井 博*4

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ィビーターやサドルでは、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、フレットングによる疲労強度の低下を無視できないことが既往の研究によって明らかとなっている。

フレットング (fretting) とは、接触する 2 つの部材の接触面に微小な振動によって生じるすべり運動のことをいい、さらに、フレットングが生じる部分に繰返し応力が加わり疲労が同時に起きている状態がフレットング疲労である。この場合には、フレットング摩耗によって発生した微細な初期亀裂を起点として疲労亀裂が伝播するため、フレットングがない場合に比べて疲労限度が著しく低下することが知られている。ディビーター部においては、ケーブル緊張後に生じる腹圧力と活荷重によって生じる応力変動により PC 鋼より線にフレットング疲労が生じる。

ディビーター部のフレットング疲労については、これまでいくつか試験が行われており、保護管内ヘグラウ

トを充填することや防錆被覆ケーブルを適用するといったことがフレットング疲労に対して有効であるとされている^{1),2),3)}。これらの試験では、ディビーター部の保護管材料として一般的に用いられることの多い PE (ポリエチレン) 管や鋼管を使用している。

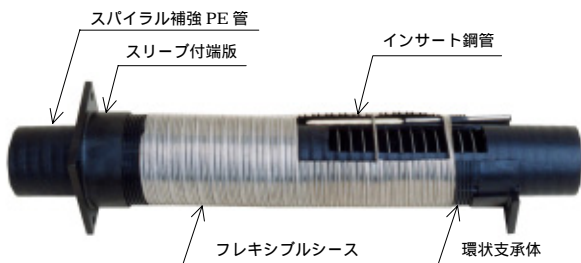
一方、FKK 外ケーブル E システムには、環状支承体付ディビーターとゴム緩衝材付ディビーターの 2 つのシステムがあり、後述するとおり前者とは若干異なる材料を使用している。

本来、このような疲労特性はシステム全体で評価されるべきで、異なる材料を使用した場合には同様な試験を行ってもその疲労特性が異なる可能性がある。

本報告は、以上のような背景から前述した 2 種類のディビーターシステムを用いた大容量ケーブルによるフレットング疲労試験を実施した結果より、その疲労特性を確認した結果について報告するものである。さらに PC 鋼材の応力振幅分布や摩擦係数の測定などから、その構造特性を検証した結果についてもあわせて報告する。

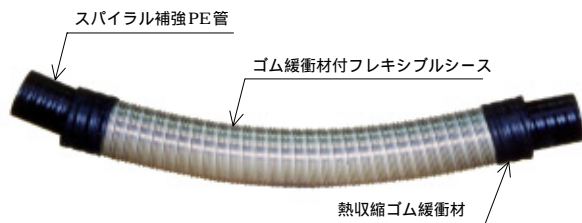
2. ディビーターの構造

本試験に使用した保護管の構造を図-1 に示す。両保護



部 品 名	仕 様
PC 鋼材	19S15.2mm SWPR7B
外套管 (フレキシブルシース)	SUS 316 (内径146mm)
外ケーブル保護管	スパイラル補強 PE 管 (内径106mm)
スリーブ付端版	SS400 相当
環状支承体	C10 - b1
インサート鋼管	STKM13A ZNC8C

(a) 環状支承体付ディビーター



部 品 名	仕 様
PC 鋼材	19S15.2mm SWPR7B
外套管 (ゴム緩衝材付フレキシブルシース)	SUS 316 (内径134mm)
外ケーブル保護管	スパイラル補強 PE 管 (内径106mm)

(b) ゴム緩衝材付ディビーター

図-1 ディビーターの構造

*1 Ryosuke KUROWA : 極東鋼弦コンクリート振興 (株) 技術部
 *2 Kouji WATANABE : 極東鋼弦コンクリート振興 (株) 技術部
 *3 Hidekatsu ITAYA : 極東鋼弦コンクリート振興 (株) 技術部
 *4 Hiroshi YANAI : (株)コベルコ科研 技術本部 エンジニアリングメカニクス事業部

管は2重管構造となっており、外管にはSUS製のフレキシブラス、内管にはスパイラル補強PE管を使用している。フレキシブルシースの両端には環状支承体およびスリーブ付端板、あるいは熱収縮ゴム緩衝材を配置することによりディ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、環状支承体付ディ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管の接触を促し、ディ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。

本報告で紹介するスパイラル補強PE管とは、図-2に示すように通常のPE管の内面をスパイラル形状とし、さらに硬鋼線(SW-B 2.9mm)を配置したものであり、以下のような特長を有する。

- 硬鋼線で補強されているため強度、可撓性に優れる。
- 緊張材とのフリクションロスを低減する。
- 防錆材の充填効率が良い。

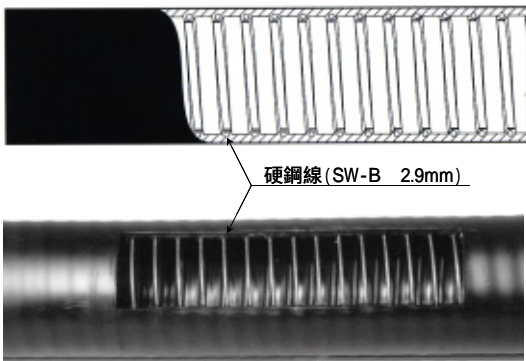


図-2 スパイラル補強PE管の構造

3. 試験概要

3.1 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-1に示すとおりである。

3.2 試験装置

試験装置の全景を図-3に示す。中央の試験体コンクリートブ

表-1 PC鋼より線の機械的性質

品名	直径 (mm)	断面積 (mm ²)	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	261 (272)	222 (258)	3.5以上 (7.4)

()内は実測値

ックは箱桁内のディビエーターを模擬したもので、環状支承体付ディビエーターとゴム緩衝材付ディビエーターを配置した試験体をそれぞれ製作した。また、その両端には定着体を埋め込んだコンクリートブロックを配置した。ケーブル保護管は、試験体となるディビエーター部にスパイラル補強PE管を使用し、これ以外は一般的に用いられるPE管を配置した。ディ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とし、偏向角度は14度(円弧配置部1ヶ所当りの偏向角は7度)とした。

本試験ではいずれの場合もケーブル保護管内に緊張力を

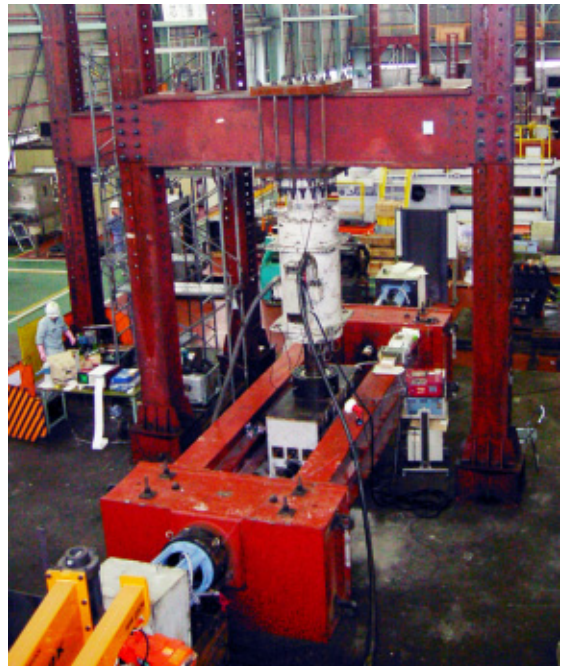
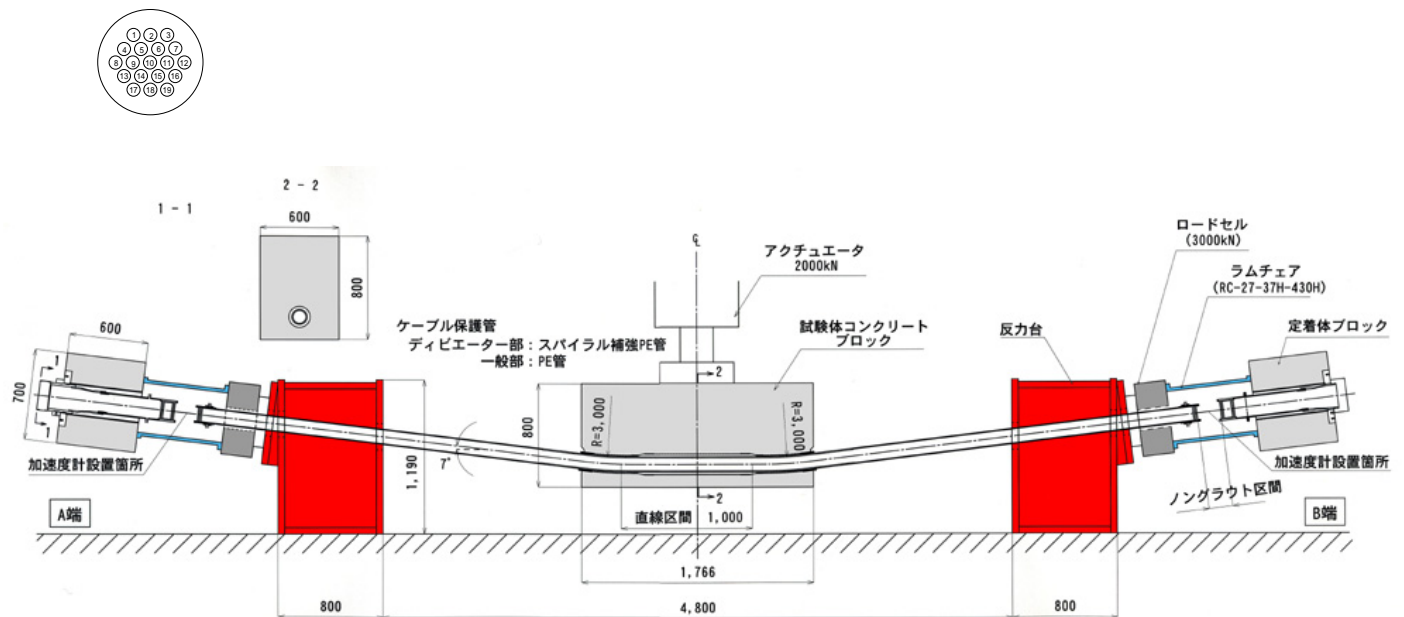


写真-1 試験状況 (株式会社コベルコ科研)



導入後、セメントグラウトを充填したが、疲労試験終了後に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、中央のアクチュエータ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。試験中は、試験体中央部に設置した変位計にて鉛直変位を測定し、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を計測した。また、X-T レコーダーにて荷重の振幅や鉛直荷重を記録し、さらに両端ラムチェア内のノングラウト部分の PC 鋼より線には加速度計を設置した。これにより、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した。なお、加速度計の設置箇所は図-4 に示すとおり、A 端側の No.7, 8, 17、B 端側の No.4, 12, 19 の PC 鋼より線とし、19 本のうちどれが破断してもそれを感知できるようにした。ここで、PC 鋼より線の番号は、図-3 中に示す A 端側から見た定着ブロック孔位置とする。

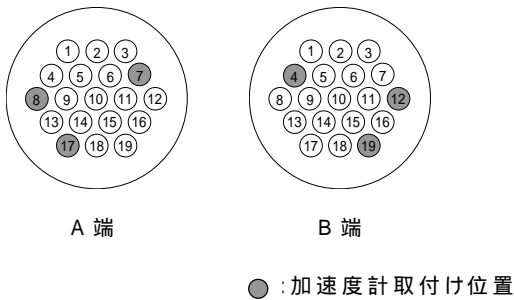


図-4 加速度計を取付けた PC 鋼より線番号

3.3 載荷条件

本試験での載荷条件を表-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

表-2 載荷条件

試験ケース	ディビエーターの種類	下限荷重 (kN)	上限荷重 (kN)	応力振幅 (N/mm ²)
CASE-1	環状支承体付ディビエーター	2975 (0.6P _u)	3107	50
CASE-2	ゴム緩衝材付ディビエーター	2975 (0.6P _u)	3107	50
CASE-3	環状支承体付ディビエーター	2975 (0.6P _u)	3160	70
CASE-4	ゴム緩衝材付ディビエーター	2975 (0.6P _u)	3160	70

(=0.6P_u, P_u: 19S15.2 規格引張荷重) 以上となるようにケーブルに緊張力を導入した。緊張作業は 5000kN 型ジャッキを使用し、A 端側から片引き緊張で行った。その後、セメントグラウトの注入作業を行い、その圧縮強度が 30N/mm² に達した時点で疲労試験を開始した。応力振幅は 50N/mm² および 70N/mm² 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。また、繰返し載荷数の上限は 300 万回とした。

4. 試験結果

4.1 応力振幅 50N/mm² (CASE-1 および CASE-2)

4.1.1 疲労試験の結果

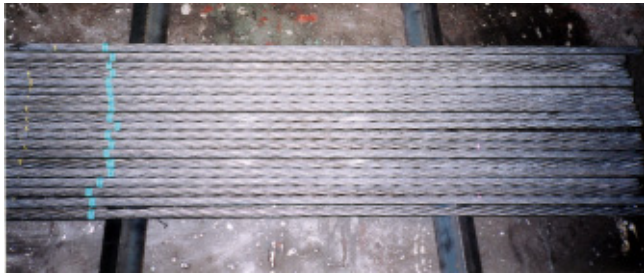
応力振幅 50N/mm² で行った疲労試験の結果を表-3 に示す。ここで、CASE-2 では 50 万回の繰返し載荷以降、下限荷重が載荷条件である 2975kN を下回っているが、その差はごくわずかであり応力振幅も 50N/mm² 以上を満足していることから、試験結果に大きな影響はないものと判断した。

疲労試験中、両ケース共に繰返し載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 万回の繰返し載荷を終了した後、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。写真-2 に示すように、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、これら 2 種類のディ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/mm² の繰返し載荷に対して 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/mm²)で保護管に鋼管(ディアボロ管)を使用して行われた試験¹⁾では、300 万回の繰返し載荷後に 13 箇所の素線破断を確認している。このことから、本システムは鋼管と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。さらに被覆鋼材を使用して行われた試験^{2),3)}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および保護管としてスパイラル補強 PE 管を

表-3 疲労試験結果 (CASE-1, 2)

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 ²)		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 ⁵	3111	2977	3105	2969	51	52	10.2	10.8	1.1	1.2
1×10 ⁶	3112	2978	3105	2970	51	51	10.1	10.7	1.1	1.2
1.5×10 ⁶	3113	2978	3105	2970	51	51	10.3	10.8	1.1	1.2
2.0×10 ⁶	3112	2977	3105	2970	51	51	10.5	10.8	1.1	1.2
2.5×10 ⁶	3111	2975	3105	2970	51	51	10.7	10.7	1.1	1.2
3.0×10 ⁶	3112	2976	3105	2969	51	52	10.7	10.8	1.1	1.2



(a) 疲労試験終了後はつり出した PC 鋼より線 (一部)



(b) フレッシングコロージョン (赤錆)

写真-2 解体した PC 鋼より線

使用する効果は大きいものと考えられる。

4.1.2 引張試験の結果

疲労試験終了後、図-5 に示すディ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シング疲労による亀裂発生の有無を確認する目的で静的引張試験を行った。なお、試験片は試験体中央から A・B 両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。引張試験の結果を表-4 に示す。

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、すなわち曲線配置区間で破断に至った。破断荷重の最も低いものは CASE-1 で 184kN、CASE-2 で 140kN であった。さらに、これらの破断面は写真-3 に示すようなフレッシング疲労特有の亀裂面と引張面を有するような破断形状をしており、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、その亀裂深さが深いものほど低荷重で破断に至って

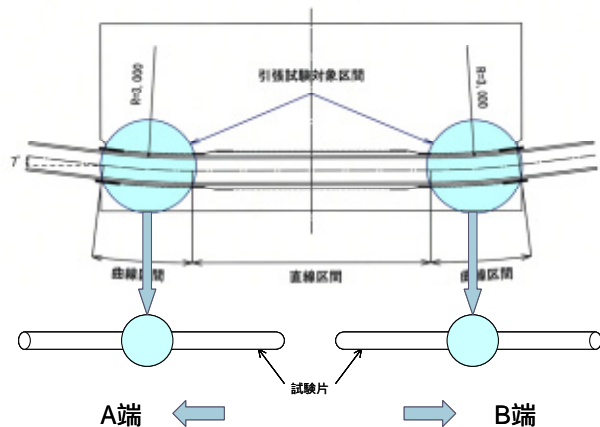


図-5 引張試験対象区間

表-4 引張試験の結果 (CASE-1, 2)

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	270	190
2	271	271	259	237
3	270	269	270	270
4	234	270	271	140
5	270	270	271	234
6	270	271	271	270
7	270	275	271	271
8	271	271	272	271
9	260	270	270	261
10	270	272	271	271
11	269	271	270	158
12	271	262	270	155
13	248	271	271	238
14	223	270	273	269
15	271	271	270	270
16	184	271	272	268
17	250	271	272	269
18	267	271	272	269
19	269	272	270	270

■・・・規格引張荷重 (261kN) 以下

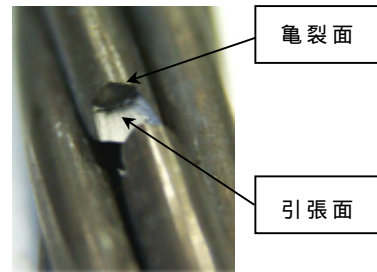


写真-3 引張試験後の破断面

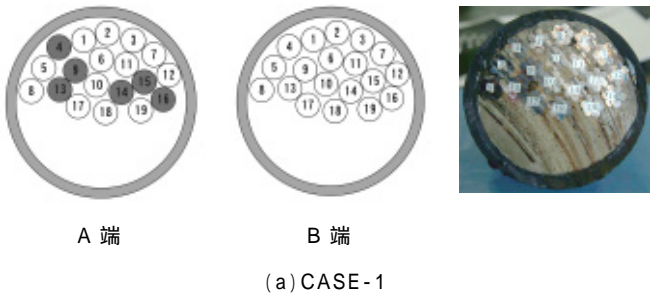
いる傾向が見られた。

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とフレッシ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は達していなかったためと考えられる。一方、規格を満足しなかった試験片を 19S15.2 の素線全本数である 133 本に対する割合で表すと、CASE-1 では 4.5 (%)、CASE-2 では 5.3 (%) となり、両ケース共に 300 万回の繰返し載荷後に引張試験を行っていることを考慮すれば、それ以降の繰返し載荷に対しても余寿命は充分にあると考えられる。図-6 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ィ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。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 の間で共通した傾向はとくに見られなかった。このことから、フレッシ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。

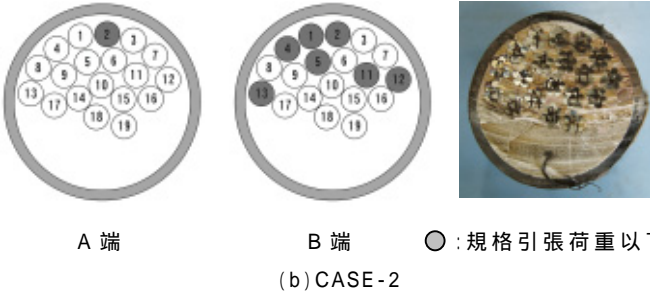
4.2 応力振幅 70N/mm² (CASE-3 および CASE-4)

表-6 素線破断した PC 鋼より線番号と亀裂深さ

CASE-3			CASE-4			
PC鋼より線番号	亀裂深さ (mm)		PC鋼より線番号	亀裂深さ (mm)		
A 端側	5	2.4	A 端側	3	2.1	
		2.2		6	1.5	
	8	2.0		9	1.5	
	9	2.1			2.1	
	10	2.3		11	1.8	
		2.5			1.1	
	11	1.8		12	1.6	
	13	1.8		15	2.2	
		1.6		16	2.6	
	14	1.9		17	2.1	
	15	2.1		18	0.7	
		2.2		B 端側	3	3.0
		2.0			4	0.8
		2.3				0.9
2.0	2.0					
17	1.8	5	2.0			
B 端側	4		1.8	1.9		
	5	1.6	8	1.6		
	9	1.8		1.2		
	14	2.1	9	2.0		
17	1.7	16	2.9			
18	2.1	18	1.4			
-						
破断数合計		22箇所	破断数合計		23箇所	
平均亀裂深さ (mm)		2.0	平均亀裂深さ (mm)		1.8	



(a) CASE-1



(b) CASE-2

図-6 ケーブル断面(中央部)

4.2.1 疲労試験の結果

応力振幅 70N/mm^2 で行った疲労試験の結果を表-5 に示す。CASE-3 では、繰返し載荷数が 276 万回を越えたところで、また CASE-4 では 251 万回を越えたところで加速度計に反応が見られ、素線が破断したことを感知した。その上で疲労試験は 300 万回まで繰返し載荷を続行した。疲労試験が終了した後、ケーブルを解体したところ、表-6 に示すとおり CASE-3 で 22 箇所、CASE-4 で 23 箇所の素線破断が認められた。その破断面はいずれもフレットング疲労特有のものであり、写真-4 に示すように 1 本の PC 鋼より線で数箇所破断しているものもあった。亀裂面の深さは、0~3mm の間であり、早期に破断したも程その亀裂面は深いものと思われる。これは、荷重制御で試験を行った場合には、素線の破断が進行するにつれて残りの素線に負荷が掛かるようになり、亀裂が深くないうちに破断すると考えられるからである。



写真-4 数箇所の素線破断が見られた PC 鋼より線

4.2.2 S-N 回帰線

本試験における CASE-1 から CASE-4 までの疲労試験結果を表-7 に示す。また、図-7 は初破断における繰返し載荷数を S-N 線図にプロットしたものである。同図には、土木学会コンクリート標準示方書に示されている PC 鋼より線の設計疲労強度式と文献¹⁾で提案されている設計疲労強度式を合わせて表示した。文献¹⁾で報告されているとおり、土木学会で示されている式では危険側になる恐れがあるが、同文献で提案されている設計疲労強度式よりは安全側にあると思われる。

4.2.3 破断回数の推移

素線の破断回数と繰返し載荷数の関係を図-8 に示す。

繰返し回数 (回)	ロードセル荷重平均値(A・B端)				応力振幅		変位量 (mm)		振動速度 (Hz)	
	表-5 疲労試験結果(CASE-3(N/mm^2))				CASE-3	CASE-4	CASE-3	CASE-4	CASE-3	CASE-4
	CASE-3		CASE-4							
	最大荷重 (kN)	最小荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	最小荷重 (kN)						
1	3177	2992	3169	2983	70	71	16.2	16.5	1.0	1.1
5×10^5	3177	2991	3168	2983	71	70	16.3	16.5	1.0	1.1
1×10^6	3177	2991	3169	2982	71	71	16.3	16.5	1.0	1.1
1.5×10^6	3177	2992	3168	2982	70	71	16.3	16.6	1.0	1.1
2.0×10^6	3177	2992	3168	2983	70	70	16.3	16.6	1.0	1.1
2.5×10^6	3178	2991	3169	2982	71	71	16.4	16.7	1.0	1.1
3.0×10^6	3176	2992	3169	2982	70	71	16.9	17.0	1.0	1.1

表-7 疲労試験結果一覧 (CASE-1~CASE-4)

試験ケース	デビエーターの種類	応力振幅 (N/mm ²)	繰返し载荷回数 (×10 ⁶ 回)				破断箇所数
			初破断 (素線1本目)	2%破断 (素線3本目)	5%破断 (素線7本目)	停止時回数	
CASE-1	環状支承体付デビエーター	50	破断せず	破断せず	破断せず	300	破断せず
CASE-2	ゴム緩衝材付デビエーター	50	破断せず	破断せず	破断せず	300	破断せず
CASE-3	環状支承体付デビエーター	70	2.7632	2.7633	2.7664	300	22
CASE-4	ゴム緩衝材付デビエーター	70	2.5160	2.7260	2.7600	300	23

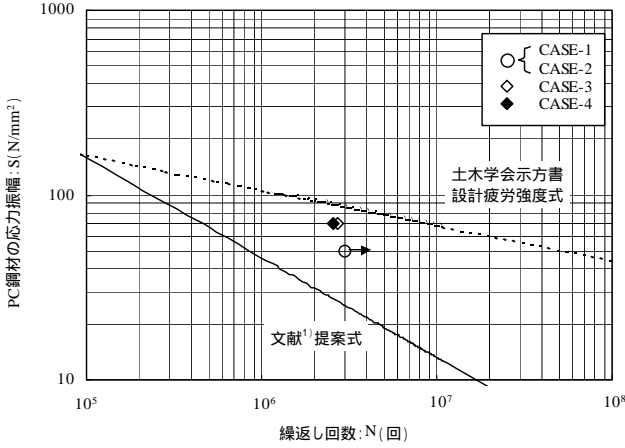


図-7 PC鋼より線の疲労強度式 (初破断時)

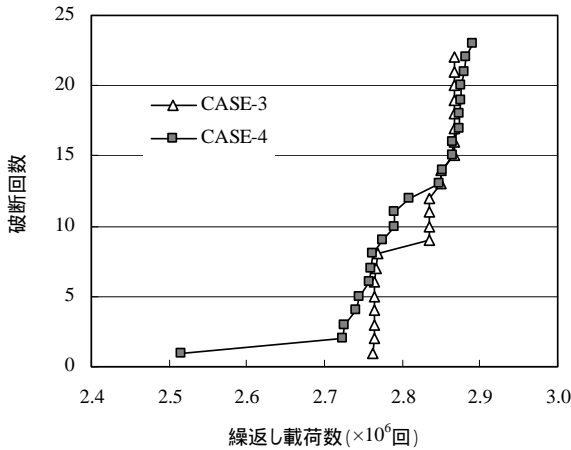


図-8 フレッシング疲労による破断の推移

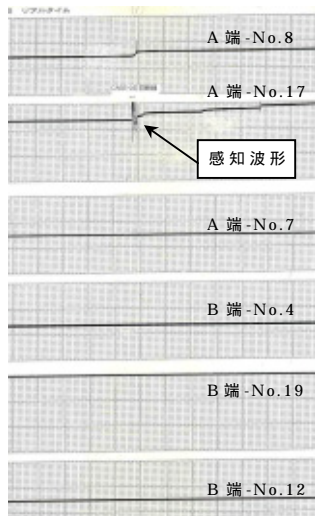


図-9 加速度計感知波形の例

これは、加速度計による感知波形から破断回数の推移を確認したものである。同図から、初破断以降 300 万回以内に断続的に破断していることが確認できる。しかし、いずれの場合も 70N/mm²の応力振幅に対して 250 万回以上の疲労寿命を有している。なお、感知波形は PC 鋼より線に破断があった場合に図-9 のように記録される。

4.2.4 素線の破断位置

図-10 は、素線の破断位置を試験体側面に対して示したものである。素線の破断はすべて曲線区間に配置されていた PC 鋼より線で、1 本で最大 4 箇所破断しているものもあった (CASE-4, No.4)。これより、フレッシング疲労が起こる位置

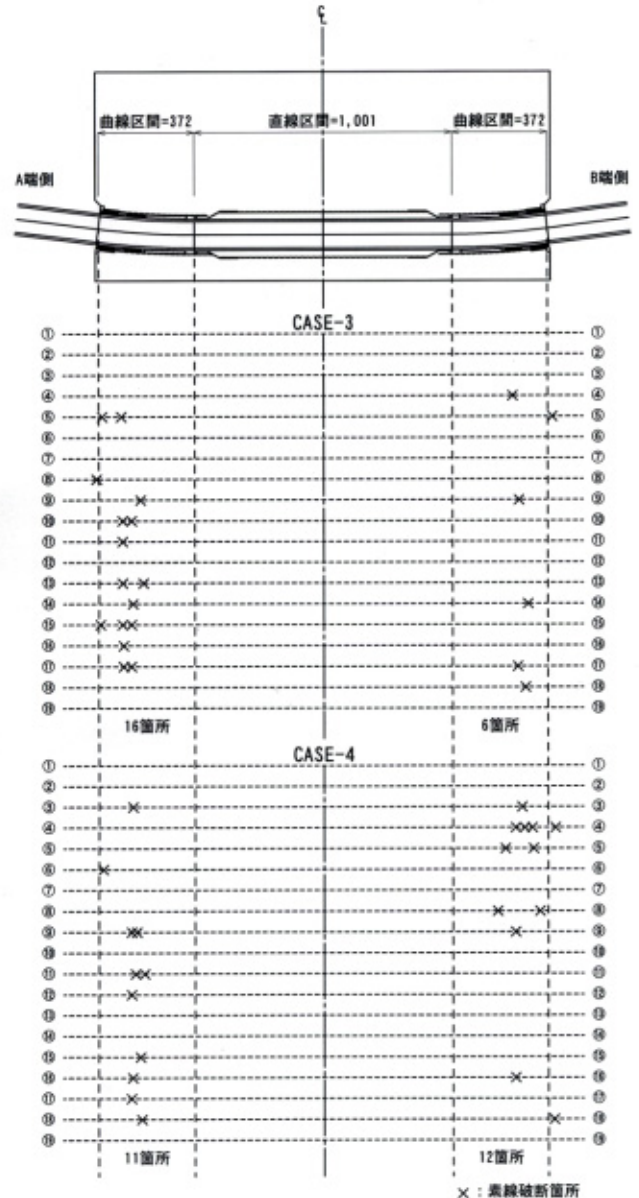
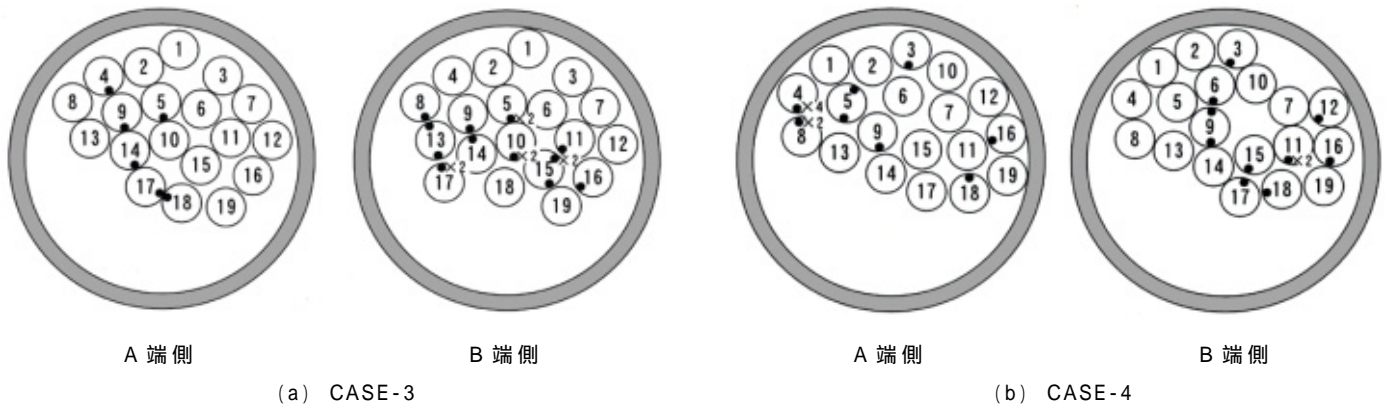


図-10 試験体側面に対する素線の破断位置



：素線の破断位置 (添字は破断数)

図-11 試験体側面に対する素線の破断位置

は、ディビエーター内の曲線配置部分で、後述するとおり軸方向の応力振幅に加えて曲げによる応力振幅も作用する位置である。

図-11は、素線が破断したPC鋼より線の位置をケーブルの断面方向に対して示したものである。ここで示すケーブル断面は、試験体中央部ではなく両曲線配置区間の外側より切り出した断面である。試験体中央部としなかったのは、破断した素線がどのPC鋼より線と接触していたかという相互関係をより明確にするためであり、図に示すように各断面位置において、ケーブル緊張後のPC鋼より線の配置状況が若干異なっていたからである。

フレットング破断したPC鋼より線の断面方向に対する位置は、両ケースの間でとくに一貫した傾向は見られなかった。しかし、応力振幅がある程度大きくなった場合には、接触しているPC鋼より線すべてにフレットング疲労による素線破断が生じる可能性があると考えられる。

破断面の亀裂の起点はすべてPC鋼より線外周部にあることから、いずれもPC鋼より線内の素線間同士の接触ではなく、他のPC鋼より線との接触によりフレットング破断したものと考えられる。

また、前述したとおりスパイラル補強PE管の内面には硬鋼線が配置されているため、ケーブル緊張後のPC鋼より線は硬鋼線とも接触することになる。このため、試験当初はこの接触によってもフレットング疲労による素線破断が生じるのではないかと懸念されたが、両ケース共にそのような現象はなかった。これは、PC鋼より線に比べ硬鋼線の表面硬度が小さいため、逆にフレットングに対しては緩衝材的な作用をしたためと思われる。

4.2.5 引張試験の結果

CASE-3、4についても疲労試験中に破断しなかったPC鋼より線について4.1.2と同様な方法で試験片を採取し静的引張試験を行った。その結果を表-8に示す。なお、CASE-4については伸びの計測も同時に行ったのでその結果も付記しておく。

両ケース共に試験片は14本で、このうちCASE-3では4本、CASE-4では6本が規格破断荷重を満足せず、試験片中央付近、すなわちディビエーターの曲線配置区間で破断した。さらに、その破断面は写真-3と同様なものであったことから、この場合においても潜在的にフレットング疲労による亀裂を有していたPC鋼より線が存在していたものと考えられる。

表-8 引張試験の結果 (CASE-3, 4)

PC鋼より線 番号	CASE-1 引張荷重(kN)		PC鋼より線 番号	CASE-2 引張荷重(kN)		伸び(%)	
	A端	B端		A端	B端	A端	B端
1	271	274	1	216	197	2.8	2.1
2	260	271	2	274	267	7.2	4.3
3	273	270	7	206	190	2.2	1.9
6	272	271	10	265	225	3.5	2.3
7	140	272	13	145	277	1.4	7.4
12	270	243	14	276	236	6.9	2.7
19	205	273	19	276	260	7.0	3.0

■ … 規格値以下

また、引張試験終了後に破断した箇所とは異なる位置に写真-5に示すようなフレットング疲労による亀裂と思われるものが見受けられた。これより、1本のPC鋼より線の中でもフレットングを受ける部分は一箇所とは限らず、また疲労強度が低下する程度も一様ではないことが分かる。

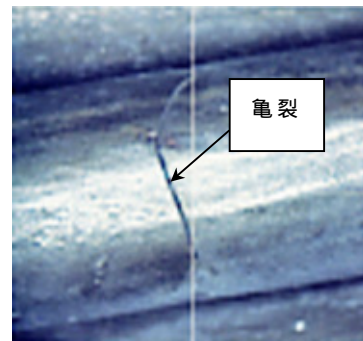
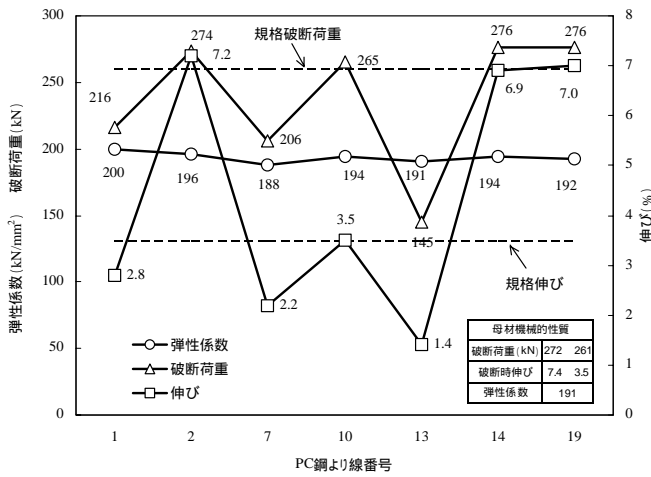


写真-5 引張試験後に確認された素線の亀裂

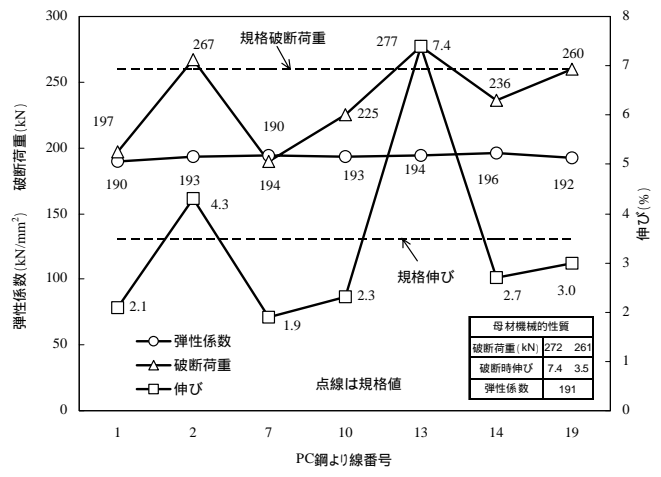
(中央の白線は撮影機の走査線)

図-12は、CASE-4の引張試験において伸びを測定した結果について、破断荷重、弾性係数を合わせて示したものである。

規格破断荷重を満足しなかったPC鋼より線の伸びは、規格の伸び(3.5%)を下回り、その値は破断荷重にほぼ比例して上下する傾向となった。さらに、母材の実測値と比較すると引張試験を行ったすべての試験片が母材の伸び(7.4%)以下となった。一方で、弾性係数には大きな変化は見られなかった。一般的に、PC鋼より線が繰返し载荷による応力振幅を受けると、材料の硬化や初期伸びの解消などにより、その延性能力は低下する傾向があ



(a) A 端側



(b) B 端側

図-12 破断荷重と伸びの関係 (CASE-4)

り、本試験においても同様な傾向が見られた。

5. ディビエーターシステムの構造特性

以上、フレット疲労試験の結果から、スパイラル補強 PE 管を用いた 2 種類のディビエーターシステムが耐フレット疲労性能に優れていることを確認できた。そこで、それらの要因を把握すると共に、本ディビエーターシステムの基本的な構造特性を明らかにするため、フレット疲労試験に加えてディビエーター内の摩擦係数の測定および応力振幅の測定を行った。

5.1 摩擦係数の測定

測定は図-3 に示した試験装置を用いて 2 種類のディビエーターシステムについて行った。緊張作業は A 端側から片引きで行い、摩擦係数の算出にあたっては、A 端側、B 端側のロードセル測定値をそれぞれ P_A 、 P_B として式 (1) を適用した。

$$\mu = \frac{\ln \frac{P_A}{P_B}}{\alpha} \quad \dots (1)$$

その結果、両システムの摩擦係数は 0.08 ~ 0.10 となった。一般的に適用されている PE 管の摩擦係数は 0.15 ~ 0.30 であり、冒頭に述べたように、それと比べると小さい値である。摩擦係数が小さいことは、緊張作業時に計上すべき応力損失分が小さいことであり、ディビエーター部においてはフレット疲労の一要因である腹圧力を低減できることになる。よって、このことは本ディビエーターシステムが耐フレット性能に優れる要因であると考えられる。

5.2 応力振幅の測定

フレット疲労に大きな影響を及ぼす応力振幅を計測するため、図-13 に示すように、ディビエーター内部の PC 鋼より線 No.17 および No.19 に対してひずみゲージを貼付け、応力振幅を測定した。測定は疲労試験と同様に A、B 両端に設置したロードセルが下限荷重 ($=0.6P_u$) 以上となるようにケーブルに緊張力を導入した後、中央のアクチュエータで応力振幅 (50N/mm^2 、 70N/mm^2) を与える方法とした。なお、測定

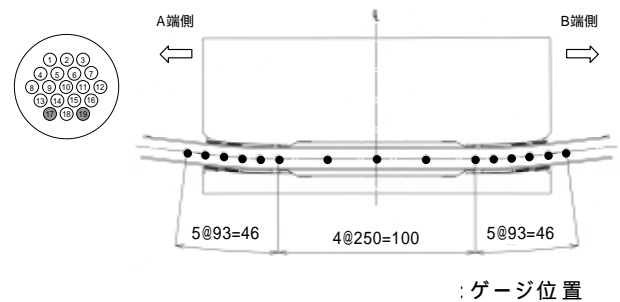


図-13 ゲージ貼付け位置

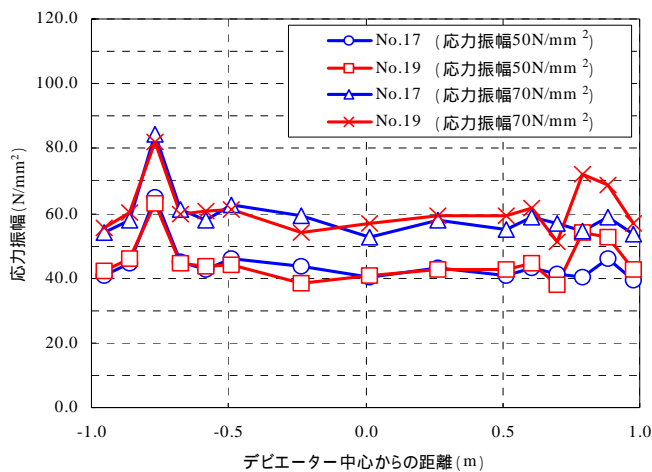
時ダクト内にはグラウトは充填していない。測定結果を図-14 に示す。

ディビエーター曲線部の円弧端において、応力振幅が増幅しているのは、その個所で配置形状が直線から円弧に変化するため、曲げによる影響が生じていると思われる。図-10 に示したとおり、この近傍で素線が破断していることから、この部分の応力振幅がフレット破断に及ぼす影響は大きいと思われる。

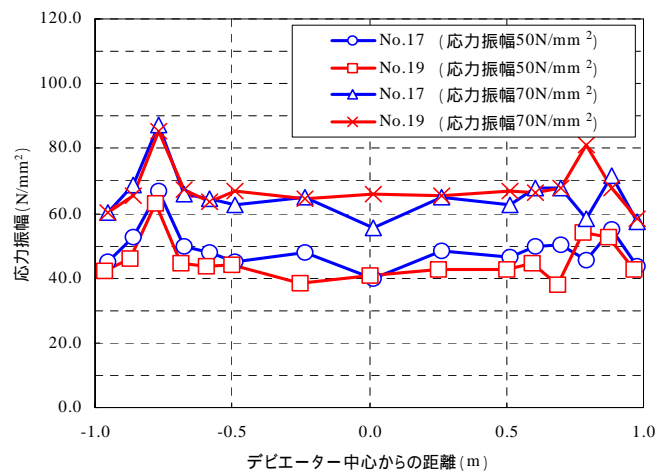
文献¹⁾においても、鋼管と PE 管を使用したディビエーターを用いて同様な応力振幅の測定を行っているが、アクチュエータによる応力振幅を 50N/mm^2 とした場合、直線から円弧に変化する部分に最大で 80N/mm^2 近い応力振幅が作用している。また、各測点間で応力振幅に大きな差が生じている。これに対し、本ディビエーターシステムを使用した場合、応力振幅は最大でも 67N/mm^2 と小さく、ディビエーター内での応力振幅にも大きな差が生じていない。これは、保護管との摩擦係数が小さくディビエーター内のケーブル全長で応力を負担することができるためと思われる。よって、これについても耐フレット性能を向上させる大きな要因として考えられる。

5.3 グラウト充填性の効果

既往の研究でも報告されているように、ケーブルダクト内にセメントグラウトを充填することで耐フレット性能は向上する。これは、グラウトを充填することにより、PC 鋼より線同士のすべり運動



(a) 環状支承体付ディビエーター



(b) ゴム緩衝材付ディビエーター

図-14 ディビエーター内 PC 鋼より線の応力振幅測定結果

が抑制されることに加え、グラウトがフレッシング磨耗に対して緩衝材の役割を果たすことによると思われる。同様のことが被覆鋼材を使用した場合の被覆材料に対してもいえる。

スパイラル補強 PE 管においては、内面がスパイラル形状になっており、また硬鋼線が配置されているため PC 鋼より線との接触面積が小さいことから、一般的な PE 管を使用した場合に比べグラウトの充填性が向上すると考えられる(写真-6 参照)。したがって、通常の PE 管を使用した場合よりもフレッシング疲労に対して有利であると思われる。

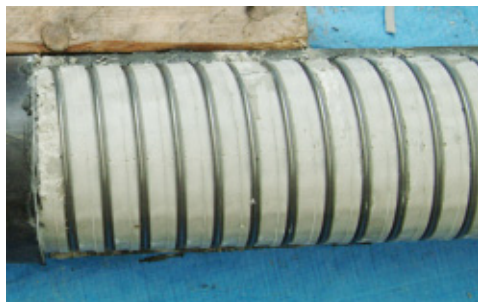


写真-6 スパイラル補強 PE 管内のグラウト充填状況

6. まとめ

スパイラル補強 PE 管を使用した 外ケーブルシステム用ディビエーターを対象に行ったフレッシング疲労強度試験から以下のことが明らかとなった。

- (1) 環状支承体付ディビエーターおよびゴム緩衝材付ディビエーターの 2 種類のシステムは、 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) 両ディ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シング性能を有している。
- (3) 両ディ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 $n=4$ 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) 裸鋼材を使用した場合においても本ディビエーターシステムを用い、グラウトを充填することで 300 万回以上の疲労寿命を得ることができる。

- (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。しかし、素線全本数に対する割合は 5% 程度であることから、300 万回以降の疲労寿命は十分に残されていると考えられる。
- (6) 両ディビエーターシステムは、応力振幅 70N/mm^2 に対しても、250 万回以上の疲労寿命を有していることから、これらの基本的な構造は、エクストラロード橋のサドル部にも応用することが可能であると思われる。

7. あとがき

近年、外ケーブル構造の PC 橋梁は、その解析手法、施工技術の進歩などにより、構造形式が多様化している。それに伴い、使用される定着具や PC 鋼材などに要求される性能もまたさまざまである。

今回実施したようなフレッシング疲労試験や定着システムに関する試験については、冒頭で述べたようにシステム全体でその性能を評価しなければならない。したがって、おのおのに要求される性能に対してこれらの試験を実施することが最良であると思われるが、一般的にこのような試験は、それが大容量であればある程大掛かりな試験となり、多額な費用、そして試験期間が必要となる。さらに、試験条件を変えて行くなれば殊更である。したがって、このような試験はおのおのが貴重なデータとなり得る。よって、本試験で得られた成果についても今後の設計・施工の一助となり、資料となれば幸いである。

最後にフレッシング疲労試験を実施するにあたって、その準備から本報告を行うまで多くの方から多大な御指導、御援助を賜った。ここに関係各位に感謝の意を表します。

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シング疲労特性, 土木学会論文集, No.627/V-44, 205-222, 1999.8
- 2) 篠崎, Thiru, 渡辺, 濱田: 大偏心外ケーブルトラス橋の偏向部材の疲労耐久性について, 第 57 回土木学会年次学術講演会講演概要集 第 5 部, 2002
- 3) 出水, 古賀, 田口, 松田: PC 外ケーブル偏向部のフレッシング現象の 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, 2003