

PE 被覆全素線塗装型 PC 鋼より線の疲労特性 — 外ケーブル曲げ偏向部におけるフレット疲労 —

神津 和大*1・平井 圭*2・黒沢 亮平*3・池田 尚治*4

耐軸疲労性能に優れた PE 被覆全素線塗装型 PC 鋼より線を取り上げ、プレストレストコンクリート橋の外ケーブルの偏向部を対象とした疲労試験を行った。その結果、ケーブル張力の下限値 $0.6 P_u$ 、軸方向の応力振幅 $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ 、繰返し回数 301 万回の条件において、疲労試験中の素線の破断は確認されなかった。試験終了後に偏向部付近の鋼材の状態を観察したが、PE 被覆の破れは確認されず、PE 被覆内部のエポキシ塗膜のつぶれや素線の露出は確認されなかった。さらに、試験体の偏向部を切り出した試験材を用いて引張試験を行った結果、PE 被覆全素線塗装型 PC 鋼より線は、曲げ疲労試験後においても、JIS G 3536 に規定される機械的性質を満足していることが確認された。

キーワード：全素線塗装型、防食 PC 鋼より線、外ケーブル、曲げ疲労、フレット疲労

1. はじめに

桁橋の外ケーブルやエクストラード橋の大偏心ケーブルには、主に PC 鋼材が使用されている。供用中の橋梁は、車などの活荷重による応力変動を受けるため、PC 鋼材の耐疲労性能が橋梁の安全性と耐久性に大きく影響を及ぼすことになる。とくに、偏向部やサドル部のようなケーブルが曲げ配置された部分では、腹圧力下での軸変動応力を受けるため、使用されるケーブルの曲げ配置部における耐疲労性能についても確認することが必要である。

近年、外ケーブルに使用される PC 鋼材には、長期にわたる確実な耐腐食性能が求められることから、グラウトと裸線の組合せに代わり、防食 PC 鋼より線の採用が増加している。そのなかでも全素線塗装型防食 PC 鋼より線（以下、全素線塗装型と記す）は、PC 鋼より線の各素線の表面に薄膜のエポキシ樹脂の均一かつ連続的な防錆層を形成しており、無防食の PC 鋼より線と同等の力学的特性を有する他、定着には PC 鋼より線と同一の定着具が使用できるという優れた特長をもっている。また、PC 鋼より線の疲労強度は、金属素地同士の接触部分の微小摩擦によるフレットという現象に依存するが、全素線塗装型は、各素線に単独でエポキシ樹脂の塗膜が形成され、金属素地同士の接触点がないため、フレットによる影響を受けず、優れた耐軸疲労性能を有していることが確認されている¹⁾。なお、全素線塗装型を外ケーブルとして使用する場合には、ポリエチレン (PE) シースを被覆し、充填材 (グリスマたはワックス) を充填した PE 被覆全素線塗装型 PC 鋼より線（以下、PE 被覆全素線塗装型と記す）を使用する。

本稿では、耐軸疲労性能に優れた PE 被覆全素線塗装型の曲げ配置部における耐疲労特性を明らかにするために行われた試験の概要とその結果について報告する。なお、試

験対象は、プレストレストコンクリート橋の外ケーブルの偏向部とした。

2. 試験の概要

2.1 試験体

PE 被覆全素線塗装型の形状を図 - 1 に示す。また、試験体の断面および試験材の番号を図 - 2 に、試験材の諸元を表 - 1 に示す。試験体は、JIS G 3536 に規定される呼び径 15.2 mm の PC 鋼より線の各素線をエポキシ樹脂で塗装し、さらに PE 被覆を施し、被覆内部にグリスマたはワックスを充填した PE 被覆全素線塗装型の 19 本タイプである。試験体の長さは約 9 000 mm、試験体の断面は、19 本を組み合わせた六角形とし、試験体の全長にわたり平行に配置した。

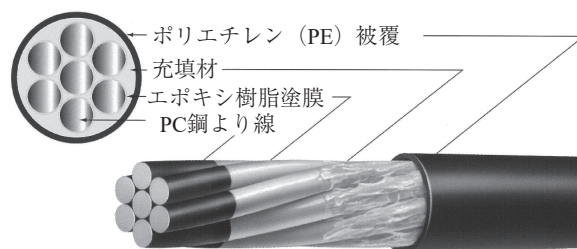


図 - 1 PE 被覆全素線塗装型の形状

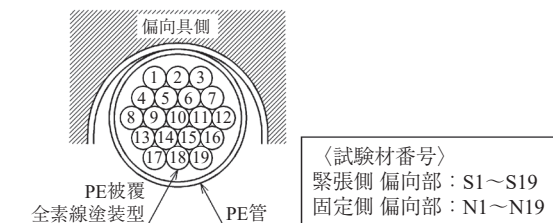


図 - 2 試験体断面および試験材番号

*1 Kazuhiro KOZU: 黒沢建設 (株) 技術部 正会員

*2 Kei HIRAI: 黒沢建設 (株) 技術部 正会員

*3 Ryohei KUROSAWA: 黒沢建設 (株) 代表取締役 名誉会員 博 (工)

*4 Shoji IKEDA: 横浜国立大学 名誉教授 名誉会員 工博

表 - 1 試験材（PE 被覆全素線塗装型）の諸元

項目		規格値
PC 鋼より線	JIS 記号	SWPR7BN
	呼び名	7 本より 15.2 mm
	公称断面積	138.7 mm ² (19 本 : 2 635.3 mm ²)
	0.2 % 永久伸びに対する試験力 Py	222 kN 以上 (19 本 : 4 218 kN 以上)
	最大試験力 Pu	261 kN 以上 (19 本 : 4 959 kN 以上)
	伸び	3.5 % 以上
エポキシ樹脂塗膜	標準塗膜厚さ	0.2 mm
ポリエチレン被覆	標準被覆厚さ	2.1 mm
	標準外径	20.5 mm



写真 - 1 試験状況 (1)

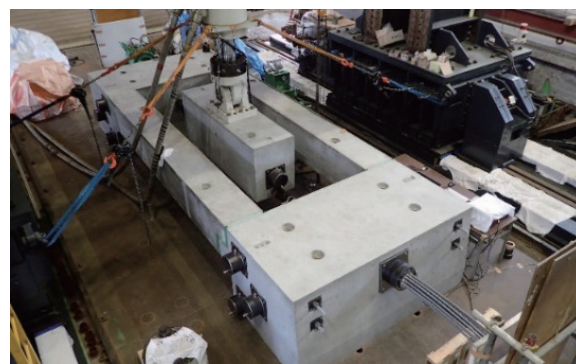


写真 - 2 試験状況 (2)

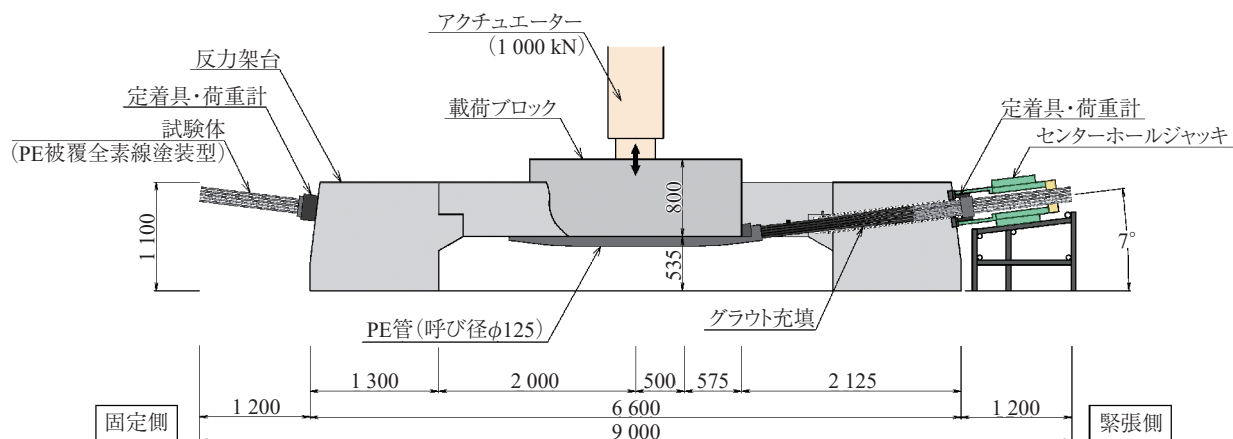


図 - 3 試験概要図

2.2 試験方法

(1) 試験装置および試験概要

試験状況を写真 - 1 ~ 2 に、試験概要図と荷重ブロックの形状および寸法を図 - 3 ~ 4 に示す。疲労試験には、容量 ± 1 000 kN のアクチュエーターが設置された鋼製の荷重フレームとコンクリート製の反力架台および荷重ブロックを用いた。反力架台と荷重ブロックは、荷重荷重による変形が生じないように、プレストレストコンクリート構造とした。

図 - 3 に示すように、外ケーブル偏向部を再現したコンクリート製荷重ブロックをアクチュエーターに設置し、ケーブル偏向角度が 7° となる状態から加振することにより実橋の偏向部に繰り返し作用する腹圧力の状態を再現し

た。また、図 - 4 に示すように、試験体は偏向具を設置した荷重ブロックにより、中央付近の 2 箇所で曲げ配置され、偏向部の曲げ半径 R を 3 000 mm とし、荷重ブロック中央に試験体が偏向具と接触することのない 1 000 mm の直線区間を設けた²⁾。

(2) 試験体の設置および緊張

試験体の設置は、偏向部に PE 管 (呼び径φ125) を挿通した試験体の端部を反力架台に仮固定したあとに所定の偏向角となるように荷重ブロックの高さを調整し、荷重ブロックの位置を保持しながら、センターホールジャッキ (容量 : 4 000 kN) を用いて片側から緊張を行った。写真 - 3 に示すように、試験体両端の定着は、くさび定着方式とリングナットを組み合わせた定着方式とし、リングナットには

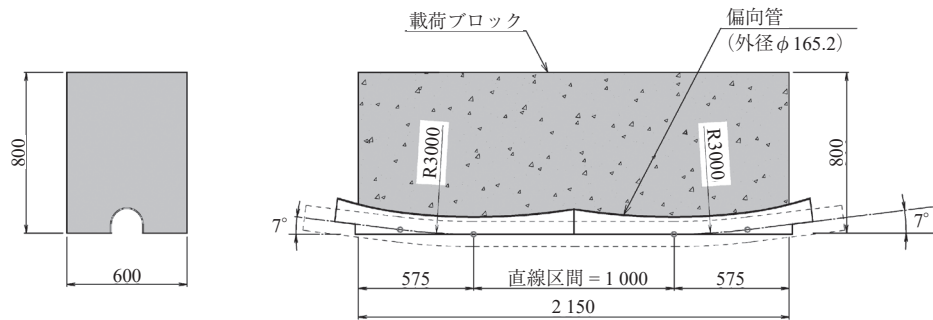


図 - 4 荷重ブロックの形状および寸法

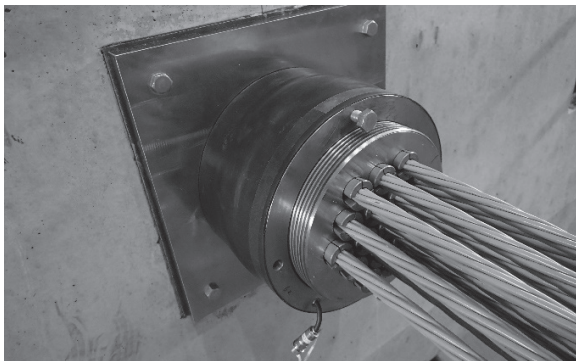


写真 - 3 試験体の定着部（リングナット部：荷重計）



写真 - 4 試験体の曲げ角度確認（7°～7.5°）

表 - 2 試験条件

項目	内容	備考
応力導入装置	アクチュエーター	容量 ± 1000 kN
制御方式	変位制御	
試験体	PE 被覆全素線塗装型ケーブル	19 S 15.2 mm
鋼材断面積	2 635.3 mm ²	138.7 mm ² × 19
曲げ角度（片側）	7°	
ケーブル張力の下限値	2 975.4 kN	0.6 Pu
ケーブル曲げ反力の下限值	725.2 kN	2 × 2 975.4 kN × sin7°
応力振幅	50 ± 1 MPa	
荷重振幅	131.8 ± 2.6 kN	(50 ± 1 MPa) × 2 635.3 mm ² ÷ 1000
振動数	1.3 Hz	
繰返し载荷数	301 万回	

ロードセル機能を付与した荷重計を採用し、試験中のケーブル張力を測定した。なお、写真 - 4 に示すように、試験体の設置および緊張・定着後に測定された試験体の曲げ角度は、片側 7°～7.5°であった。

緊張後の定着背面は、実橋の外ケーブル構造と同様にグラウトを注入した（図 - 3 に示すグラウト充填の表記箇所）。このとき、アンカーヘッド背面にフランジ付の鋼管を取付けて二重管構造とすることで、グラウト注入後のケーブル張力の調整と解放を可能とした。

(3) 試験条件

試験条件の一覧を表 - 2 に、試験中のアクチュエーターの振幅波形を図 - 5 示す。荷重および振幅条件は、ケーブル張力の下限値を 0.6 Pu (2975.4 kN) とし、軸方向の応力振幅を 50 MPa ± 1 MPa（荷重振幅：131.8 kN ±

2.6 kN）となるように腹圧力を作用させ、繰返し载荷数を 300 万回程度、振動数を 1.3 Hz とした。なお、アクチュエーターの振幅波形の各サイクル変位量に差異が生じているのは、アクチュエーターの制御方式を変位制御としたことにより、試験中のケーブル張力と応力振幅が規定値内に納まるように、アクチュエーターの変位・振幅を調整したためである。

(4) 計測

計測項目と計測機器の一覧を表 - 3 に示す。試験体の緊張作業は、ジャッキに接続した圧力センサーと固定側の荷重計にて管理し、試験時のケーブル張力は、試験体定着後の荷重計の示度（緊張側と固定側の平均）にて管理した。

緊張中の荷重計（固定側）と圧力センサーの示度は、図 - 6 に示すように比例関係にあるが、3 000 kN 付近での誤

表 - 3 計測項目と計測機器の一覧

計測項目	計測機器	計測頻度
試験体の導入力	ナット型荷重計	1回/分 (1回/秒でモニタ表示)
ジャッキの荷重	圧力センサー	緊張作業時の任意の点で手動計測
載荷ブロックの変位	レーザー変位計	1回/分 (1回/秒でモニタ表示)
アクチュエーターの荷重・変位	疲労試験機制御装置	1回/分 (1回/秒でモニタ表示)

表 - 4 試験体の応力振幅の抜粋

経過時間 [時間]	繰返し载荷数 [回]	変位振幅 [mm]	平均荷重値 [kN] (≥ 2975.4)	荷重振幅 [kN] (129.1 ~ 134.4)	応力振幅 [N/mm ²] (49 ~ 51)
0.0	0	7.20	3 016.0 ~ 3 148.0	132.0	50.1
72.0	336 960	7.10	2 982.1 ~ 3 114.5	132.4	50.2
168.0	786 240	7.00	2 987.0 ~ 3 120.3	133.3	50.6
192.6	901 370	7.10	3 025.9 ~ 3 157.1	131.2	49.8
310.9	1 455 010	7.15	2 994.5 ~ 3 125.8	131.3	49.8
405.8	1 899 140	7.10	2 979.8 ~ 3 113.0	133.2	50.5
478.4	2 238 910	7.10	2 982.7 ~ 3 114.1	131.4	49.9
574.1	2 686 790	7.05	2 985.6 ~ 3 117.9	132.3	50.2

注1) () 内の数値は各項目の目標値を示す。

注2) 点線部の前後で再緊張によるケーブル張力の調整を行った。

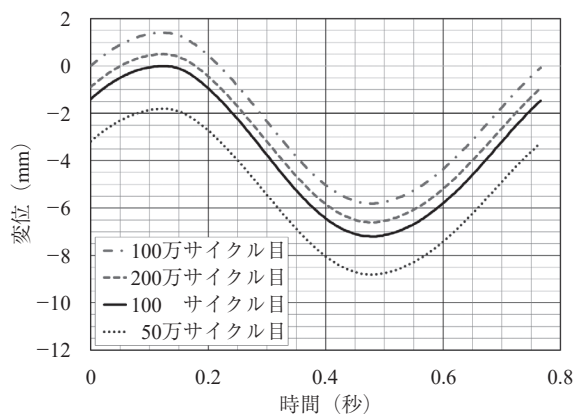


図 - 5 アクチュエーターの振幅波形

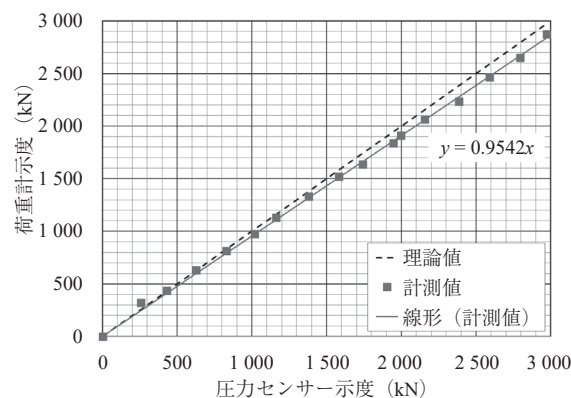


図 - 6 荷重計と圧力センサーの示度

差は約5%であり、荷重計の示度の方が小さい値を示した。また、アクチュエーターによる繰返し载荷が適切に行われているかを確認するため、アクチュエーターの反力（ケーブル曲げ反力）と変位および載荷ブロックの変位についても計測を行った。なお、緊張側と固定側の荷重計の示度は、ほぼ同じ値を示した。

1秒ごとに数値をモニタ表示してケーブル張力および応力振幅を調整した。計測頻度は1回/分とし、試験の周波数が1.3 Hz (1サイクル約0.77秒)であったので、ケーブル張力の上下ピーク値は、その最小公倍数にあたる約77分に1回 (18.7回/日)の間隔で記録された。

(5) 疲労試験後の確認項目

疲労試験終了後の試験体において、ケーブルの張力を解放したのち、鋼材破断の有無と偏向部のPE被覆の状態を目視にて確認した。また、PE被覆内部の全素線塗装型において、偏向部のエポキシ塗膜の状態を目視にて確認し、

塗膜厚さを電磁式膜厚計にて計測した。さらに、試験体の偏向部分を切り出した試験材を用いて引張試験を行い、機械的性質を確認した。

3. 試験結果

3.1 荷重および振幅

試験体の応力振幅の抜粋を表 - 4に、荷重計の平均示度と繰返し载荷数の関係 (1分ごとのプロット) を図 - 7に示す。試験中の荷重計の平均示度は、最小値が2977.8 kNであり、ケーブル張力の下限値の2975.4 kNを下回ることにはなかった。また、試験体の応力振幅は、最小値が49.4 MPa、最大値が51.0 MPaとなり、試験条件の50 MPa \pm 1 MPaを満足する結果であった。また、図 - 8に示すように、アクチュエーターに発生する反力（ケーブル曲げ反力）は、計算値が725.2 kNであるのに対し、ケーブル張力の下限値において741.1 ~ 755.6 kNを示した。

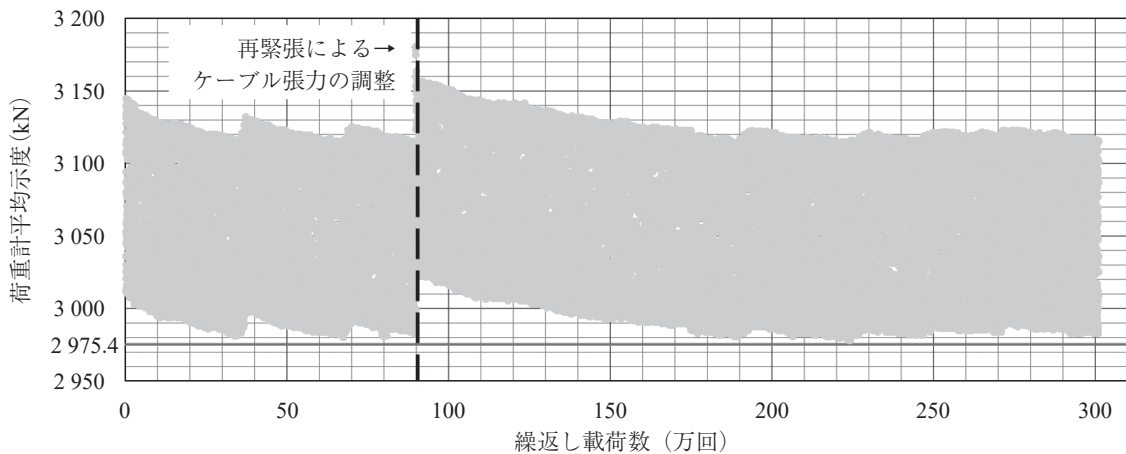


図 - 7 測定日時—平均荷重値 (1分ごとのプロット)

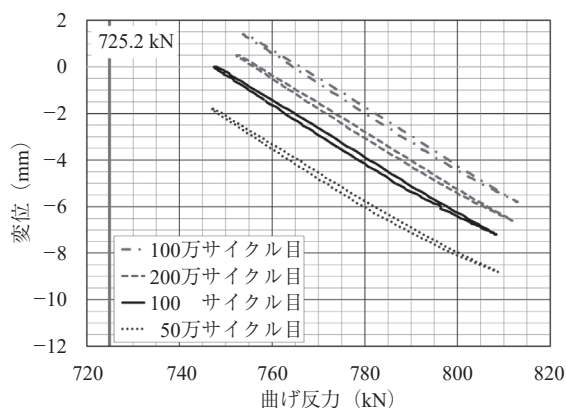


図 - 8 サイクルごとのアクチュエーター荷重値 (ケーブル曲げ反力)

本試験では、ケーブル張力を保持するために調整したアクチュエーターの変位量が、試験体のリラクゼーションや試験体断面(六角形)の崩れなどの影響により過大となり、試験体と反力架台の貫通孔の内側が接触するおそれが生じた。そこで、試験開始から約192時間(载荷サイクル約90万回)後、試験を一時中断し、試験体の再緊張によるケーブル張力の調整を行った。

3.2 外観および塗膜厚さ

緊張側の偏向部付近の試験材(外観上でPE被覆の変化が大きい試験材S1~S12)の状況を写真-5~6に示す。PE被覆にはわずかな変形が確認されたが、被覆の破れは生じず、PE被覆内部の全素線塗装型においても、素線の破断や塗膜のつぶれ、素線の露出は確認されなかった。

試験体の偏向部分(緊張側と固定側2箇所)を切り出した試験材を対象に、PE被覆を除去して、各側線の頂点6箇所の塗膜厚さを計測した。計測された塗膜厚さの最小・最大・平均値を表-5に、表中の試験材の番号と測定位置を図-9に示す。全素線塗装型の疲労試験前の塗装厚さは、平均で198 μ m(規定値120~280 μ m)であったのに対して、疲労試験後の試験材の塗膜厚さは165~247 μ m(平均:206 μ m)であった。いずれの試験材においても全素線塗装型の規定値を満足する結果であり、疲労

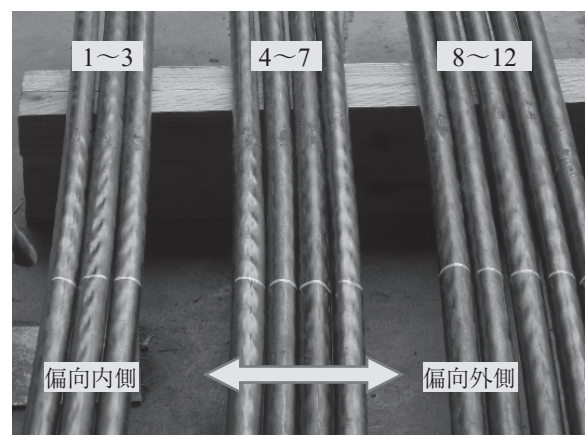


写真 - 5 疲労試験後の試験材外観 (試験材番号 S1 ~ S12)



写真 - 6 疲労試験後のPE被覆内部 (試験材番号 S2)

試験前後の腹圧力による塗膜厚さへの影響は見られなかった。

3.3 引張試験

疲労試験後の試験体の機械的性質の変化を確認するため、試験体の偏向部分を切り出した試験材を用いて引張試験を行った。試験方法は、腹圧力が大きく、曲げ疲労の影響

表 - 5 ケーブルの偏向部におけるエポキシ層の塗膜厚さ (疲労試験後)

試験材番号	固定側 (N)			試験材番号	緊張側 (S)		
	塗膜厚さ [μm]				塗膜厚さ [μm]		
	最小	最大	平均		最小	最大	平均
N1	183	236	210	S1	192	223	207
N2	168	231	206	S2	180	240	210
N3	171	231	208	S3	175	230	209
N4	184	226	207	S4	183	228	201
N5	167	227	205	S5	179	224	203
N6	177	237	209	S6	171	247	213
N7	187	224	202	S7	186	228	207
N8	180	233	206	S8	183	245	213
N9	182	230	203	S9	170	240	212
N10	172	215	190	S10	174	237	201
N11	177	217	193	S11	211	235	222
N12	178	226	198	S12	176	227	201
N13	184	218	198	S13	188	235	219
N14	173	217	196	S14	171	239	211
N15	184	227	209	S15	181	235	203
N16	176	233	204	S16	182	244	208
N17	178	221	207	S17	182	222	204
N18	185	238	217	S18	180	235	204
N19	165	225	201	S19	172	237	199

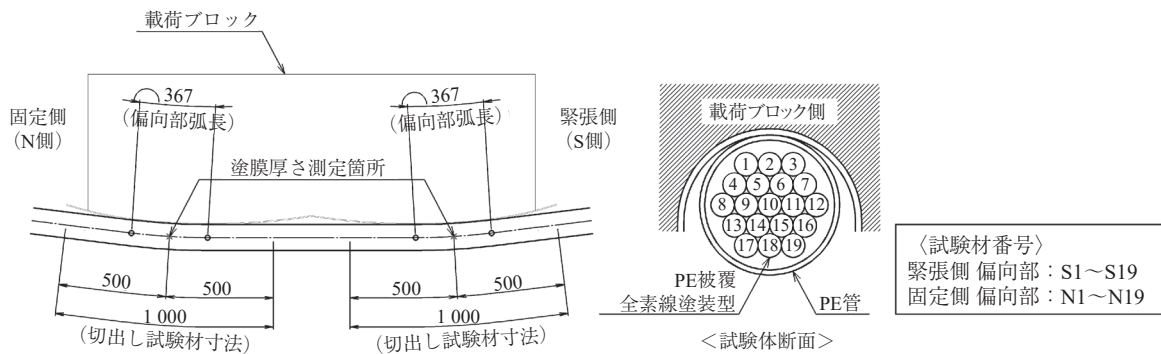


図 - 9 試験材の番号と測定位置

響を大きく受けたと考えられる偏向内側の試験材 7 本 (試験材番号 N1 ~ N7, S1 ~ S7 の計 14 本) を対象に, JIS Z 2241 に準じた引張試験を行い, 偏向外側の試験材については, 外観上で PE 被覆の形状の変化が大きかった緊張側の試験材 12 本 (試験材番号 S8 ~ S19) を対象に, 試験材の片側を圧着グリッ加工し, センターホールジャッキを用いて破断荷重の確認を行った。偏向内側試験材の引張試験結果の一覧を表 - 6 に, 試験材番号 S2 の荷重 - 伸びの関係を図 - 10 に示す。また, 引張試験の状況を写真 - 7 に示す。試験の結果, 疲労試験後の試験材に機械的性質の変化はなく, JIS G 3536 に規定される機械的性質を満足することが確認された。

4. ま と め

PE 被覆全素線塗装型 PC 鋼より線 (PE 被覆全素線塗装型 19 S 15.2 mm) を用いて, プレストレストコンクリート橋の外ケーブルの偏向部を対象とした疲労試験(試験条件:

ケーブル張力の下限値 0.6 Pu, 軸方向の応力振幅 50 MPa ± 1 MPa, 繰返し回数 301 万回) を行った結果, 以下の事項が確認された。

- (1) 疲労試験後の偏向部の PE 被覆にはわずかな変形が確認されたが, 被覆の破れは生じず, PE 被覆内部の全素線塗装型においても, 素線の破断や塗膜のつぶれ, 素線の露出は確認されなかった。
- (2) 疲労試験後の偏向部における, PE 被覆内部の全素線塗装型の塗膜厚さは, 平均で 198 μm (規定値 120 ~ 280 μm) であったのに対して, 疲労試験後の試験材の塗膜厚さは 165 ~ 247 μm (平均: 206 μm) であった。偏向部のすべての試験材において塗膜厚さの規定を満足する結果であり, 曲げ疲労による塗膜への影響は見られなかった。
- (3) 疲労試験後の偏向部の機械的性質の変化を確認するため, 偏向部分を中央として切り出した試験材を用いて引張試験を行った。試験の結果, 疲労試験後の

表 - 6 疲労試験後の引張試験結果

固定側 (N)				緊張側 (S)			
試験材番号	0.2% 永久伸び に対する試験 力 [kN]	最大試験力 [kN]	伸び** [%]	試験材番号	0.2% 永久伸び に対する試験 力 [kN]	最大試験力 [kN]	伸び** [%]
	222 以上	261 以上	3.5 以上		222 以上	261 以上	3.5 以上
N1	243	279.0	○	S1	243	279.6	○
N2	241	278.6	○	S2	243	279.6	○
N3	243	279.2	○	S3	243	279.2	○
N4	242	278.4	○	S4	244	278.3	○
N5	243	278.7	○	S5	244	279.5	○
N6	242	278.5	○	S6	241	278.3	○
N7	243	279.5	○	S7	244	279.3	○

※ 3.5% の伸びを確認後、計測器を取外して試験を再開。

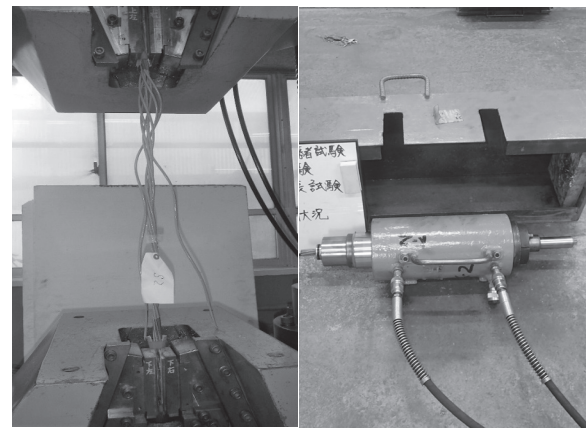
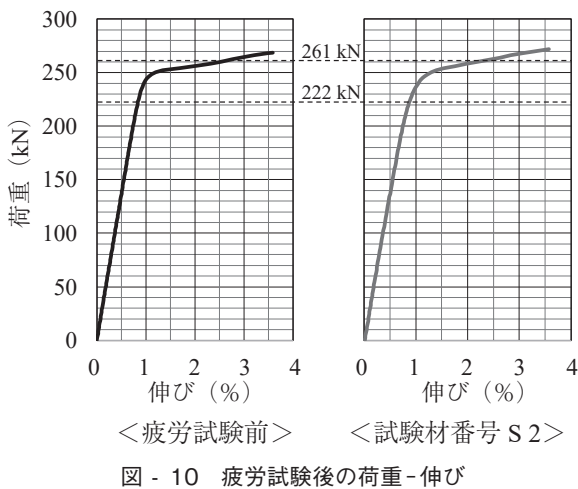


写真 - 7 疲労試験後の引張試験状況

機械的性質に変化はなく、JIS G 3536 に規定される機械的性質を満足することが確認された。

謝 辞

本試験を実施するにあたり、国立研究開発法人土木研究所に多大なご支援を賜った。また、実験の遂行には黒沢建設(株)の山口隆裕氏の協力を得た。ここに記して、謝意を表します。

参考文献

- 1) (財)土木研究センター：全素線塗装型 PC 鋼より線を使用した PC 構造物の設計・施工ガイドライン，2010.3
- 2) 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

【2021 年 1 月 8 日受付】



図書案内

PC 技術規準シリーズ

PC 構造物高耐久化ガイドライン

2015 年 4 月

定 価 4,950 円 (税込) / 送料 300 円

会員特価 4,100 円 (税込) / 送料 300 円

公益社団法人 プレストレストコンクリート工学会 編
技報堂出版