

(116) 大偏心外ケーブルPC橋におけるケーブルのフレットング疲労試験

鹿島技術研究所 ○齊藤 宗
 北海道開発局開発土木研究所 佐藤 昌志
 北海道開発局帯広開発建設部 阿部 富次
 鹿島技術研究所 正会員 日紫喜剛啓

1. はじめに

近年、プレストレストコンクリート(PC)橋梁において、省力化や急速施工、維持管理等の観点から、PC ケーブルを部材外に配置する外ケーブル方式の採用が増えている。さらに、図-1に示すように、外ケーブル方式の応用として、外ケーブルを中間支点上で橋面より上に突出させて偏心量を大きくした、大偏心外ケーブル方式による橋梁も増えつつあり、現在、北海道・帯広において施工中である土狩大橋(大偏心外ケーブル方式5径間連続箱桁橋)にも採用されている¹⁾。

大偏心外ケーブル方式では、中間支点上の偏向塔を介してケーブルが主桁に定着されるため、内ケーブル方式と異なり、主桁とケーブルとの間の付着がない構造となる。そのため、活荷重によって、ケーブルは、斜張橋の斜材と同じように自由に応力変動することとなる。特に、偏向部では、内側のストランドと外側のストランドとの間で、微小な相対変位差が生じることとなる。このストランド間の相対変位により、隣接するストランド同士がこすれ合う現象のことを、一般にフレットング(fretting)という。

フレットングが生じた場合、ストランドは、①腐食し易い、②傷つきやすい、等が発生し、その結果疲労強度が低下すると言われている²⁾。

しかし、フレットングと疲労強度との関係について検討した例はほとんどなく、実橋への適用にあたっては、フレットングが生じる場合のストランドの疲労性状を確認することが必要となる。

土狩大橋についても、偏向塔並びに主桁内偏向部に着目した200万回の繰返し载荷によるフレットング疲労試験が実施され、その範囲では特に問題がないことが報告されている¹⁾。しかしながら、PCケーブルのフレットング疲労性状については、曲げ半径や応力振幅と繰返し回数との関係など、まだ未解明な部分が多い。

そこで、繰返し回数に対する安全性及び、実際の施工で偏向部に設置されるPC鋼線重なり防止用スペーサーのフレットング疲労に対する影響を確認するため、1,000万回の繰返し载荷によるフレットング疲労試験を行うこととした。

筆者らは、これまでに、試験の途中経過として、200万回繰返し終了時点での試験結果について報告してきた³⁾。本論文は、その後実施した、1,000万

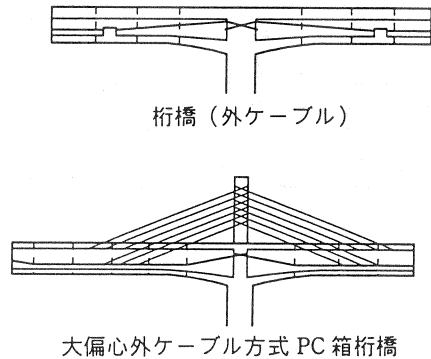


図-1 PC橋構造形式

表-1 土狩大橋の橋梁諸元

構造形式	大偏心外ケーブル方式 5径間連続PC箱桁橋
橋長	610m
支間割	94m+3@140m+94m
幅員	23m(一部拡幅部あり)
主桁断面	3室箱桁(一部、4室箱桁)
偏向塔	RC独立1本柱(1面吊り)
ケーブルシステム	ディビダーク式外ケーブルシステム 19S15.2B

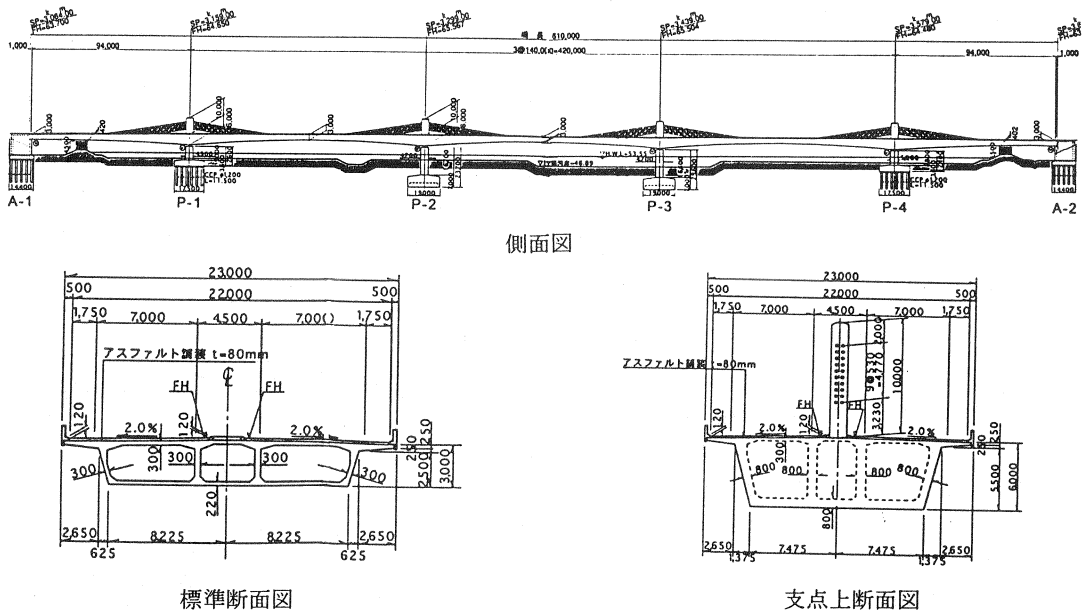


図-2 土狩大橋一般図

回までの繰返し載荷試験及び、試験後の試験体調査を中心に、本ケーブルの安全性について報告を行うものである。

2. 土狩大橋の概要

土狩大橋は、帯広・広尾自動車道の、道東自動車道との分岐点となる帯広ジャンクションから約4km南にあり、十勝川を横断する橋梁である。表-1に土狩大橋の橋梁諸元を、図-2に土狩大橋の一般図を示す。

3. 試験概要

3.1 試験体

試験は、土狩大橋における偏向塔側ケーブル定着部周辺を模擬するため、曲がり部を有するコンクリートブロック(反力床に固定)とそれに接続した反力フレーム間にケーブルを張り、反力壁に取り付けたアクチュエータ(動的載荷能力1,960kN)によりケーブルに軸方向応力変動を与えた。ケーブルシステムは、実橋と同様ディビダーク式外ケーブルシステムを用いたが、試験装置の載荷容量の制約か

表-2 試験体ケーブルの仕様

項目	仕様		備考
ケーブル	形式	ディビダーク外ケーブルシステム 9S15.2(SWPR7B)	実橋のケーブルサイズの約1/2
	定着体	MCシステム	
	断面積	1,248mm ²	
	引張荷重	2,349kN	
	降伏荷重	1,998kN	
保護管	材質	高密度ポリエチレン(PE)	偏向部は内側凹型厚肉管使用
	外径	89mm	
スペーサ	9S15.2用		実橋に準ずる
グラウト	ノンブリージング型		ポゾリスGF1720

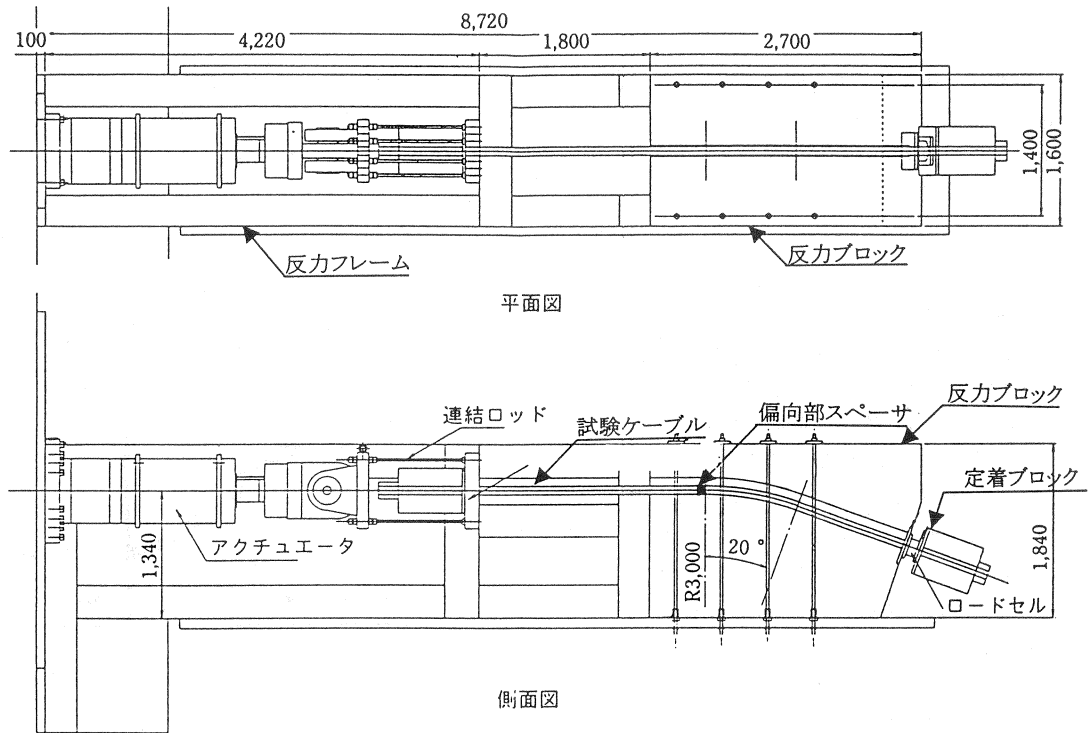


図-3 試験体及び載荷装置概要図

ら、ケーブル容量は7本よりストランドを9本用いた9S15.2(SWPR7B)とした。これは、実橋のほぼ1/2の規模である。表-2に試験体ケーブルの仕様を示す。実橋では偏向部の自由長部側端部にPC鋼線の交差重なりとフレットングを防止するスペーサの設置を予定しているため、本試験でも実橋に準じたスペーサを取り付けて試験を行った。図-3に、試験体及び載荷装置の概要を示す。

3. 2 試験条件

本疲労試験における試験条件をまとめて表-3に示す。偏向部の曲げ内半径Rについては、主桁側がR=3.0mであり、塔側(R=4.0m)より条件が厳しいため、本試験ではR=3.0mとし、偏向部の長さは1047mm(角度で20°)

とした。応力振幅は、土狩大橋におけるケーブルの軸応力変動を考慮して49N/mm²とし、載荷速度は、試験装置の性能を考慮して1.2Hzとした。

大偏心外ケーブル方式における許容応力度は、設計で用いた $0.6\sigma_{pu}$ (ケーブル引張荷重の60%)とし¹⁾、繰返し載荷時の下限荷重もケーブル引張荷重の60%とした。

載荷回数は、まず、PTI基準⁴⁾を参考に200万回をまでをSTEP1とし、STEP1で異常が見られなければSTEP2として、1,000万回までとした。一般に、鋼材の疲労による強度低下は、200万回程度(STEP1)の繰返し回数で下げ止まり疲労限に近づくといわれている⁵⁾が、フレットングを伴う疲労に関してはこれを試験的に確認した例がないため、STEP2として1,000万回まで載荷することとした。試験は、アクチュエータを荷重制御することで実施し、試験中は、試験体端部に取り付けた加速度計により、ストランド素線の破断検出を常時行った。また、疲労試験の途中には、試験体の状況を確認する静的載荷試験を数回実施し

表-3 試験条件

応力振幅 (N/mm ²)	曲げ内半径 (m)	下限荷重 (kN)	上限荷重 (kN)	載荷速度 (Hz)
49	3.0	1,409	1,470	1.2

た。

3.3 計測

計測は、初期緊張導入時の緊張管理や、偏向部のひずみ分布状況をはじめとする試験中の試験体の状況を確認する目的で、静的載荷試験実施時に、ストランドひずみや試験体変位、固定側張力等について実施した。ストランドひずみは、偏向部での応力変動の伝わる範囲を知るため、軸方向に16点のひずみゲージを貼付して計測を行った。

4. 試験結果

4.1 計測結果

疲労試験は、STEP 1(200万回)の終了時点で特に異常が見られなかった。その後、STEP2として、繰返し載荷試験を続け、1,000万回の繰返し載荷試験を行った。STEP1, STEP2とも、疲労試験中は、破断検出用加速度計の記録に異常が見られなかった。また、疲労試験中に定着部や定着ブロック等に、外観上の異常は認められなかった。

図-4に、ケーブル軸方向の位置とストランドの応力振幅の関係を示す。ここで、ストランドの応力振幅は、自由長部の上限荷重時と下限荷重時のひずみの差から演算したもので、最大応力振幅(約49N/mm²)で除した値を示している。なお、ひずみゲージは上側ストランドの表面に貼付したものである。図-4には、

疲労試験前と疲労試験後の値を示したが、いずれも、ストランドの応力振幅は偏向部始点から遠くなるほど小さくなり、偏向部の始点から約900mmの位置でほぼゼロとなることから、今回のR=3.0mの場合、偏向部の始点から900mm以上離れた部分には応力変動が伝わらず、フレットングが発生しないことが分かる。

4.2 解体調査

疲労試験終了後、試験ケーブルを解体し内部調査を行った。観察は、まず試験ケーブルの張力を、約1,000kNとして、張力が残っている状態で行った。その結果、グラウトは全長にわたって空隙なく充填されており、偏向部に数本のひび割れが確認された。ただし、約1,000kNの張力が残っている状態でも、最大0.08mm程度のひび割れ幅であったことから、特に問題はないと思われる。

次に、グラウトを除去し内部のストランドを観察したが、ストランド素線の破断は1本も確認されなかった。

4.3 フレットング痕調査

疲労試験後、試験ケーブルのPE管を剥し、グラウトを除去してストランド(PC鋼より線)を取り出し、ストランド表面

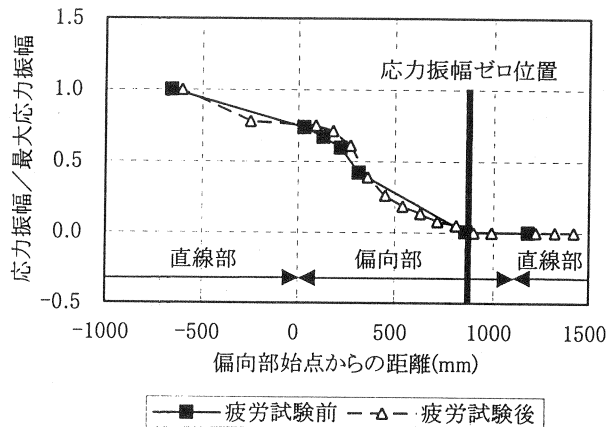


図-4 応力振幅分布図



写真-1 フレットング痕 I



写真-2 フレットング痕 II

のフレット痕調査を実施した。今回の試験では、ストランド表面に明らかにフレット痕と思われるもの(写真-1)と、ストランド挿入時やPE管との擦れによって生じた傷(写真-2)とが確認されたが、明確

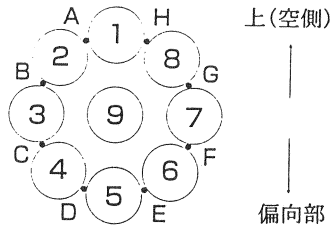


図-5 スtrand名称図

に両者を区別することは難しいので、ここでは、ストランド表面にある全ての傷をフレット痕として扱う。図-5にPE管内部でのストランド位置図を、表-4に各ストランドのフレット

表-4 フレット痕個数表

ストランドNo.	フレット痕数
1	12
2	33
3	38
4	61
5	48
6	48
7	47
8	70
9	112
合計	469

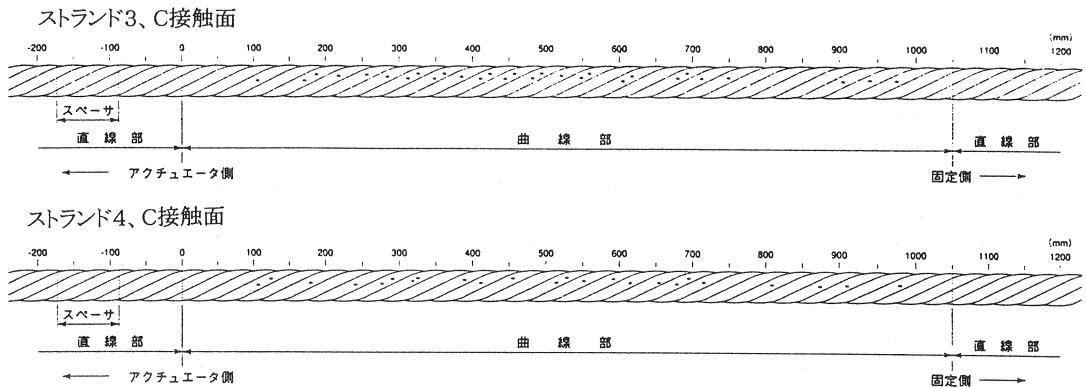


図-6 フレット痕図の一例

痕個数を示す。なお、図-5は固定ブロック側からアクチュエータ側を見た断面である。ここで、ストランドNo.は一番上にあるストランドを1とし、そこから反時計回りに2,3,・・・の順番とし、中心にあるストランドを9とした。表-4より、ストランド9のフレット痕個数が一番多いことがわかるが、これは、ストランド9がケーブル中央にあるストランドで、ストランドとストランドの接触面が一番多いためと考えられる。

図-6にフレット痕の分布図の一例を示す。図-6はストランド3とストランド4の接触面Cを示したもので、図中の黒い点がフレット痕である。この図より、フレット痕は、スペーサに近い、偏向部(曲線部)始点近傍を除いて、ほぼ偏向部(曲線部)全長にわたってあることが分かる。これは、スペーサの近傍はスペーサがあるため、ストランド同士が触れず、フレット痕が発生しないためである。しかし、今回の試験では、写真-2に示す

表-5 残留強度一覧表

ストランドNo.	引張強度(kN)		残留強度率(%)
	疲労試験前	疲労試験後	
1	270	271	100
2	270	271	100
3	270	271	100
4	270	271	100
5	270	271	100
6	270	271	100
7	270	271	100
8	270	271	100
9	270	272	101
平均	270	271	100

ように、フレッキング痕は表面の薄皮が少々傷ついた程度であり、強度低下につながるような大きな傷は発見されなかった。

4. 4 残留強度

疲労試験終了後、試験ケーブルに用いた全ストランド(合計9本)の引張試験を行い、各ストランドの残留強度を確認した。表-5に試験結果を示す。その結果、疲労試験前のストランドの引張強度 271kN に対して、疲労試験後のストランド引張強度は 271kN~274kN と疲労試験による強度低下は認められなかった。従って、今回のフレッキング痕程度では、残留強度に及ぼす影響はなかったものと考えられる。

5. まとめ

大偏心外ケーブル方式の偏向部におけるフレッキングによる疲労性状を把握する目的で、土狩大橋の偏向部を対象にモデル化した試験体を用いて、1,000万回繰返し载荷によるフレッキング疲労試験を実施した。今回の試験は、ディビダーク外ケーブルシステム 9S15.2(SEPR7B)を使用し、偏向部の曲げ内半径 3.0m、下限荷重はケーブル引張強度の 60%、応力振幅 49N/mm²、载荷速度 1.2Hz、繰返し回数 1,000万回の条件で実施した。その結果以下のようなことが確認された。

- ①偏向部における応力振幅は、曲線部始点から約 900mm の位置でほぼゼロとなる。よって、曲線部始点から 900mm 以上離れたところには、応力振幅は伝わらず、ストランド間の微小ずれによるフレッキングは発生しないものと考えられる。
- ②グラウトは十分に充填されており、疲労試験後のひび割れも最大で 0.08mm と構造上問題となるものではなかった。
- ③疲労試験後、ストランド素線の破断は見られなかった。
- ④強度低下に繋がるようなフレッキング痕は発見されなかった。
- ⑤疲労試験後のストランドの引張強度は、疲労試験前の強度と同等であり、疲労試験による強度低下は認められなかった。

以上のことから、今回の試験条件の範囲において、本ケーブルシステムのフレッキング疲労に対する繰返し回数 1,000万回に対する安全性が確認された。

なお、本試験にあたりご指導、ご検討いただいた角田委員長はじめ「土狩大橋技術検討委員会」の委員各位の皆様に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1)渡邊政義 他：土狩大橋の計画と設計，プレストレストコンクリート，Vol.39, No.2, 1997
- 2)R.B.Waterhouse：フレッキング損傷とその防止法，p.130, 1984.10
- 3)石原美光 他：大偏心外ケーブル PC 橋ケーブルのフレッキング疲労試験，土木学会北海道支部論文報告集，Vol.54, pp.410-413, 1998.2
- 4) Post-Tensioning Institute：Recommendations for Stay Cable Design, Testing and Installation by Post-Tensioning Committee on Cable-Stayed Bridges, August.1993
- 5)伊藤学：鋼構造学，p.37, 1985.11