

論文 斜材ケーブル破断時の張力変動に及ぼすグラウト充填の影響に関する実験的研究

小野 聖久*1・服部 雅史*2・長田 光司*3・野島 昭二*4

要旨：斜張橋やエクストラードズド橋の斜材ケーブルにおける変状を張力測定により評価するためには、斜材ケーブルが素線の破断により張力低下していくことが前提となる。しかし、グラウトが充填された斜材ケーブルの素線破断に伴う張力変動の程度については必ずしも明らかになっていないため、供試体を用いた確認実験を行った。結果、グラウトで充填された斜材ケーブルは、充填されていないケーブルに比べ張力低下は小さく、切断部付近では鋼材のひずみは増加し、切断部から十分離れた箇所ではひずみが減少することが確認された。

キーワード：斜張橋，斜材，張力減少，グラウト，附着切れ長

1. はじめに

近年、道路構造物のメンテナンスの重要性が認識されており、すべての道路橋について5年に1回の近接目視による点検が義務化されている^{1),2)}。一般的な橋梁は、近接目視が比較的容易ではあるが、橋梁数が膨大であるため、すべて部位を点検するためには点検の高度化による効率化等が必要となっている。

一方、斜張橋やエクストラードズド橋（以下、斜張橋等）の点検において斜材ケーブルの劣化状況を評価することは、橋梁全体の安全性を評価するうえで重要であるが、一般に斜材ケーブルは高密度ポリエチレン管等の保護管で被覆されている。そのため、外観の近接目視等だけでは内部のPC鋼材の状況を確認することは困難であり、斜張橋等における点検の課題となっている。著者らは、斜材ケーブルは素線が破断すると張力が変化することに着目し、高次振動法を用いた張力測定により健全度評価を行う手法についての検討を行ってきた³⁾。張力測定による点検は、写真-1に示すように路面から斜材全長の健全度を確認できるため、非常に有効な点検手法である。しかし、保護管の内部に複数本のPC鋼線（以下、素線という）が配置され、さらにグラウトが充填されているタイプの斜材ケーブルでは、素線が腐食し、破断してもグラウトを介して他のPC鋼材に張力が伝達するため、グラウト充填されていない場合と比べ異なる張力変動となることが予想される。

そこで、グラウトの有無が張力低下に与える影響について、実験により検討を行った。

2. 斜張橋等の斜材の点検について

2.1 斜材の点検方法

斜張橋等の斜材を点検・調査する方法としては、近接目視以外に、以下の方法が実用化されている。

(1) カメラ等で保護管を直接点検する方法

この方法は、斜材点検ロボット等の装置に搭載したビデオカメラで保護管の表面のき裂等の変状を撮影し、確認する方法である。保護管に変状が確認された場合は、内部の変状を確認するためにさらに詳細調査を別途実施する必要がある。

(2) 内部の鋼材の腐食を確認する詳細調査方法

保護管の外側から内部の鋼材の腐食状況を確認する詳細調査方法としては、渦流探傷法、漏洩磁束法等を用いた技術等がある。渦流探傷法はセンサー（コイル）に交流電流を流し、センサーを動かすことでケーブル素線の腐食状態を調査する方法であり、著者らは、外観や張力測定により異常が発見された斜材について、点検する方法を検討している⁴⁾。



写真-1 実橋での高次振動法による張力測定状況

*1 中日本高速道路（株） 技術・建設本部 環境・技術企画部 工修（正会員）

*2 中日本高速道路（株） 技術・建設本部 環境・技術企画部 工修

*3 中日本高速道路（株） 技術・建設本部 環境・技術企画部 博士（工学）（正会員）

*4 中日本高速技術マーケティング（株） 技術部（正会員）

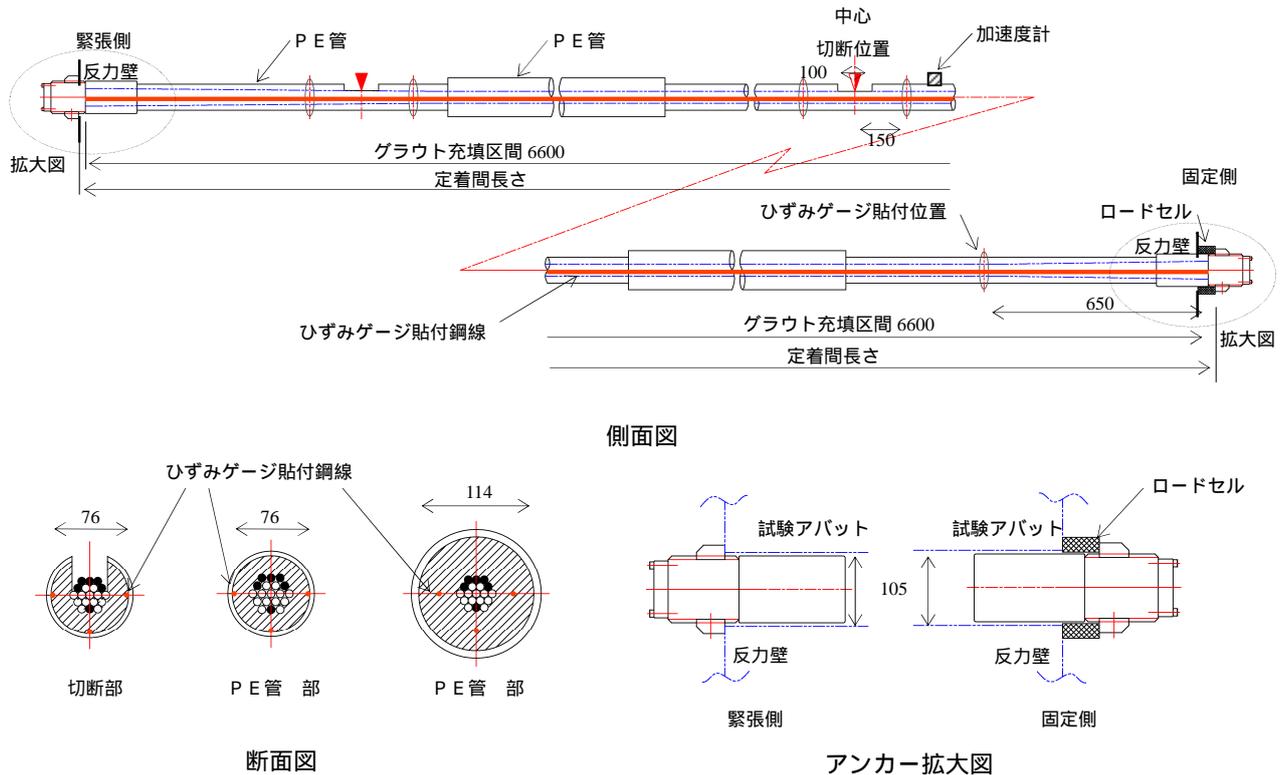


図 - 1 供試体

(3) 斜材全体の緊張力を確認する方法

この方法は、内部の素線が破断すると斜材ケーブルの張力が変化することを利用し、ケーブルの張力を固有周期により測定する方法で、内部の PC 鋼材の状態を間接的に確認することができる。次節に高次振動法を用いた張力測定について詳述するが、いずれの方法も測定精度を向上させるためには、初期値を試験し、測定時との変動量により評価する方法が有効である。

2.2 高次振動法を用いた張力測定

高次振動法を用いた張力振動測定は、複数の高次振動数とモード次数の関係より、ケーブル長とケーブルの単位重量がわかれば、式(1)より曲げ剛性値とケーブル張力を算出することができる測定方法である。

$$f_i^2 = \frac{\pi^2 EI}{4\rho AL^3} i^4 + \frac{T}{4\rho AL^2} i^2 \quad (1)$$

f_i : 固有振動数[Hz], i : 次数, T : 張力[N],
 EI : 曲げ剛性[N・m²], L : ケーブル長[m],
 ρA : 単位長さあたり重量[kg/m]

著者らは、振動測定の方法等を適切に行うことで高次振動法を用いた張力推定により、十分健全度評価がおこなえることを実橋での測定結果より確認している³⁾(写真-1)。

3. 破断実験の概要

3.1 目的

斜張橋等の斜材ケーブルの健全度を張力測定により

表 - 1 PC 鋼線の材料特性

項目	特性値	備考
呼び径 (mm)	7.00	
線径 (mm)	7.00±0.05	
引張強さ (N/mm ²)	1619 以上	切断荷重を公称断面積で除した値
耐力 (N/mm ²) 【0.2% Off-set】	1426 以上	引張試験における荷重伸び曲線の直線部分に対し伸び0.2%の隔たりをもつ平行線を引き原曲線との交点を求め、その荷重を公称断面積で除した値
伸び (%)	4.5 以上	100 mm の標点距離に対する破断後突き合わせた伸び



写真 - 2 供試体の状況

行う場合、斜材ケーブル内の素線の変状によりケーブルの張力が変化することが前提となっている。保護管内がグラウトされず独立した素線がそれぞれ自由に伸縮する場合は、破断した素線の断面積に応じて線形的に張力が減少していくが、保護管内部にグラウトが充填されており十分定着されている斜材ケーブルにおいては、素線の破断に応じてどのような張力低下が起こるかは明らかになっていない。そこで、グラウト充填が素線破断時の張力低下に及ぼす影響とそのメカニズムを確認するために、供試体での破断実験を行った。

3.2 供試体

破断実験に使用した供試体は、斜張橋等の斜材の素線が1本ずつ破断していくことを想定し、平行線ケーブル 7×19 (引張荷重 $P_u=1183\text{kN}$,断面積 $A=731\text{mm}^2$) を用いた。定着長約 6.6m のアバットに緊張力 $0.4P_u (=470\text{kN})$ で定着し、緊張後に保護管内にグラウトを充填した。保護管は計測用のひずみゲージの設置のため、切断位置付近の中央部と端部では 76mm とし、中央部と端部の間では 114mm と径を変え、切断位置では保護管とグラウトに 100mm の切り欠きを行った。供試体の概要図を図 - 1、写真 - 2 に示す。PC 鋼線 (素線) とグラウトの仕様をそれぞれ表 - 1、表 - 2 に示す。また、比較のため図 - 1 と同様に平行線ケーブル 7×19 を用いてグラウト充填をしなかった供試体 (以下、グラウト無という) についても同様の実験を行った。

3.3 計測方法

(1) 張力の計測

張力の計測は、固定側アンカー部にロードセルを挿入して計測し、素線破断による張力変化を高次振動法より算出した値と比較を行った。切断試験開始時のロードセルによる張力の値は、グラウト有が 470kN、グラウト無が 488kN であった。また、高次振動法での測定方法による影響があるか確認するために、加速度計を健全部、破断部近傍それぞれに設置し、場所により固有振動数が変化するかを確認した。

表 - 2 グラウトの材料特性

使用材料	セメント	普通ポルトランドセメント
	混和剤	マスターフロー-151
配合	水セメント比	45%
	混和剤セメント比	1.2%
重量	セメント	25kg
	水	11.25kg
	混和剤	300kg
圧縮強度	材齢 28 日	43.7MPa

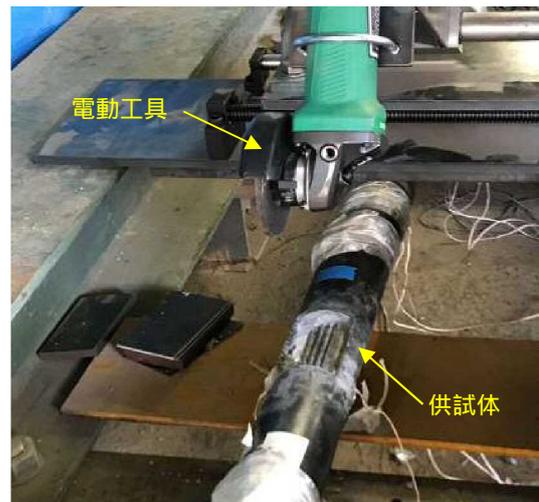
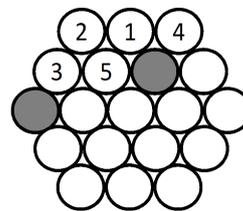


写真 - 3 切断に用いた電動工具



ハッチングした素線は、実験終了後に破断が確認された PC 鋼線

図 - 2 PC 鋼線の切断順序

(2) ひずみ

供試体のひずみについては、図 - 1 に示すように、素線にひずみゲージを設置するとともに、ひずみゲージを 350mm ピッチに設置した緊張をしない鋼線 (3.03mm (SWRH62B)) を保護管内に3箇所配置しグラウトと付着することで、グラウト内のひずみ分布を確認した。

3.4 切断方法

PC 鋼線の破断には、電動工具(写真 3)を使用して、図 2 に示す順序で1本ずつ素線を切断した。切断状況はカメラで確認しながら、予定の PC 鋼線以外は切らないように注意しながら行ったが、図 - 2 のハッチングの2本については実験後解体時に切断を確認したものであり、1～5の素線切断時に刃が接触し切断したものと考

えられる。本実験では、5本目切断時に6~7本目が切断したもとして結果をまとめている。

4. 切断実験結果

4.1 中央部の切断結果

(1) ロードセルによる張力の変動

反力壁間中央部で PC 鋼材素線を切断した時の、ロードセルによる張力測定値のグラウトの有無の比較結果を図 - 3 に示す。

グラウト無し供試体では、各素線を 1 本ずつ切断することが出来たが、グラウト有り供試体では、合計 7 本の切断に対して、写真 - 4(1)に示す状況下で切断を行っており、各素線の切断完了時点を確定することが出来なかった。このため、図中では 1 本目から 4 本目切断までの外観観察結果から切断を確認した時点を切断本数としてプロットしており、実際には図中の点より右側にシフトすると思われる。

切断前各素線は均等に張力を負担していたと仮定すれば、1 本あたりの素線が負担していた張力はグラウト無が 25.6kN、グラウト有が 24.7kN である。グラウト無供試体では、各素線切断毎にこの値の 97%に相当する 24.8 kN が低下している。一方でグラウト有り供試体では、7 本切断後の張力低下量は 105.6kN であり、切断前の 7 本で負担していた張力(24.7 × 7=172.9)の 61%であった。

(2) 素線のひずみ

グラウト有のケーブルの切断に伴う、内部の素線の応力状態の変化を検討ために、素線に設置したひずみについて確認した。中央部付近の上側(切断側)、下側、端部のひずみについて、切断ステップ毎の測定結果を図 - 4 に示す。切断部付近では鋼材のひずみは増加(引張)し、切断部から十分離れた箇所ではひずみが減少(圧縮)することが確認された。

(3) グラウト内のひずみ分布

グラウト内に 3 本配置したひずみゲージ貼付鋼線 (3.03) のひずみの平均値について切断ステップ毎の分布として図 - 5 に示す。

素線に設置したひずみゲージの結果同様、切断部付近ではひずみが増加(引張)しており、端部付近ではひずみが減少(圧縮)した。ひずみは切断位置から 1.0m 付近で 0 となり、1.5m 付近からはほぼ一様な結果となった。

4.2 高次振動法による張力測定結果

切断前および素線を 1 本切断する毎に行った高次振動法による張力測定結果(算出張力)とロードセルによる測定結果(導入張力)を表 - 3 に示す。

今回の実験は極めて短いケーブルで実施したため、高次振動法による測定結果に与える保護管およびグラウトによる斜材ケーブルの剛性の変化の影響が実橋と比べて

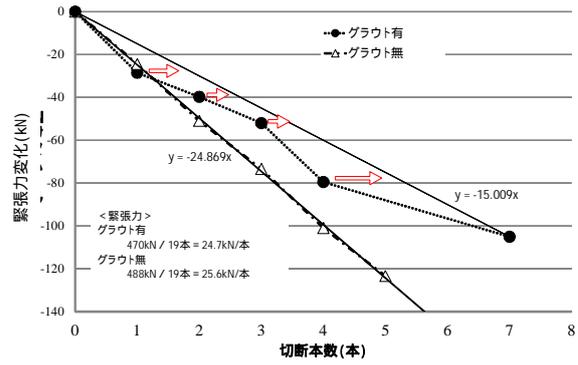
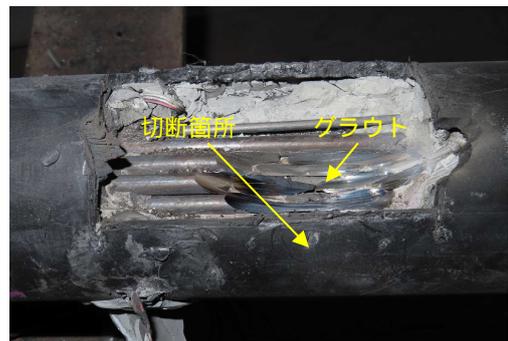
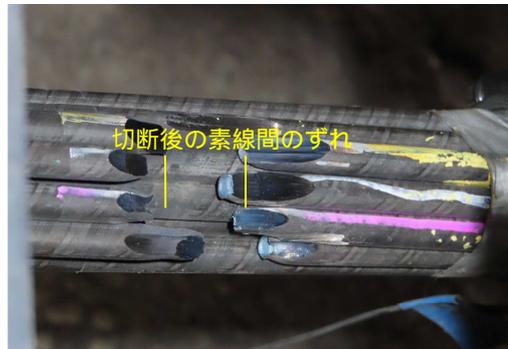


図 - 3 ロードセルの張力変化



(1)グラウト有 3本切断時の状況



(2)グラウト無 4本切断時の状況

写真 - 4 PC 鋼線の切断状況

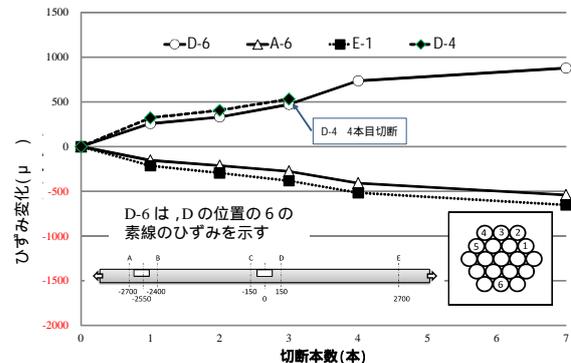


図 - 4 素線のひずみの変動

大きくなる。このため、本実験結果をそのまま実橋に適用するには無理があるが、高次振動法による算出結果はグラウト有りの場合の方がロードセル計測結果との乖離が大きくなる傾向が示された。この結果を踏まえると、グラウト有りの場合は確実に初期値を計測し、初期値との変動に着目した管理を行うことが重要と思われる。

5. グラウト充填が張力低下に及ぼす影響に関する考察
5.1 グラウトがある場合における鋼材切断に伴う張力低下に関するモデル化

グラウトがある場合における鋼材切断に伴う張力低下について、図-6に示すように両端固定の長さ l の鋼材の中央で切断した場合の理論値との比較を行うこととした。

今回想定したモデルは、図に示すように切断位置から両側に $x/2$ の位置までは付着が無く（この範囲を以下、付着切れ部と記す）、 $x/2$ より離れた位置では、鋼材はグラウトと完全に一体化する（この範囲を以下、付着部と記す）モデルとした（以下、切断部定着モデルと記す）。

このモデルでは、切断後の付着切れ部と付着部の張力は釣合っている。このため、付着切れ部の張力は切断後に残存している鋼材に引き継がれることとなり、切断前後の鋼材断面積の割合に応じてひずみは増加する。また、切断前後で鋼材長 l は変化しない。このため、付着切れ部ではひずみ増加に伴い鋼材が伸びるが、定着部では同じ長さ分鋼材が短くなる。以上の条件から誘導される切断前後の張力の比は式(2)の通りとなる。

$$\frac{T_n}{T_0} = \frac{1}{1 + (A_0/A_n - 1)x/l} \quad (2)$$

ここに、 T_0 ：切断前の張力、 T_n ：素線 n 本切断した時の張力、 A_0 ：切断前の断面積、 A_n ：素線 n 本切断した時の断面積、 l ：鋼材を固定している反力壁の定着端距離、 x ：切断による付着切れ長さ

5.2 切断部定着モデルへ実験結果を換算した付着切れ長の算出

式(2)について T_n/T_0 と x/l の関係について $n=1 \sim 7$ を図-7に示す。

今回の実験では最終的に7本切断した時の T_7/T_0 が0.78であったことから、 x/l は約0.5となり、付着切れ長 $x=3.3\text{m}$ となる。著者らが実際の斜材ケーブルで高次振動法による測定を行った結果から、温度や交通量等による影響を補正することで、5%以上の変動が生じれば検出が可能であったため、斜材ケーブルの素線が破断し張力低下した場合、 $T_n/T_0=0.95$ となる時点で異常の検出が可能になると考えられる。

100mの斜材ケーブル長を想定し、付着切れ長が本実

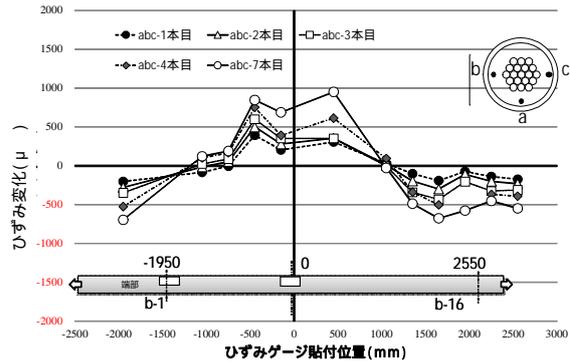


図-5 グラウト内のひずみ分布

表-3 導入張力と算出応力の差

切断本数	グラウト有			グラウト無		
	導入張力 (kN)	算出張力 (kN)	算出/導入	導入張力 (kN)	算出張力 (kN)	算出/導入
0本	481.4	676.5	1.41	488.5	511.1	1.05
1本	452.9	661.9	1.46	464.1	484.5	1.04
2本	441.7	535.0	1.21	437.6	465.7	1.06
3本	429.4	476.4	1.11	415.1	452.0	1.09
4本	416.2	491.3	1.18	387.6	431.5	1.11
5本	377.4	455.9	1.21	365.2	427.7	1.17

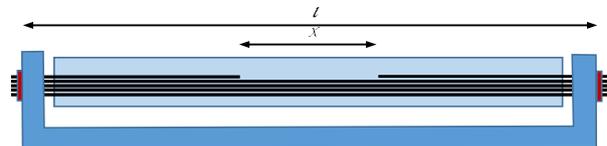


図-6 切断部定着モデル

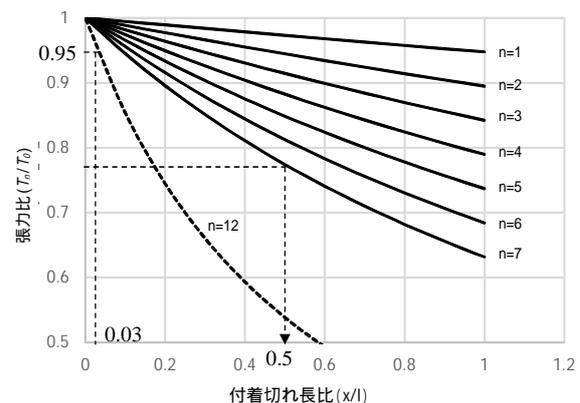


図-7 付着切れ長比による張力低下の割合 (素線本数19本の場合)

実験結果と同じ3.3mとすると $T_n/T_0=0.95$ となる場合の断面減少量は $A_n/A_0=0.38$ となる。このように、斜材ケーブル長が長くなると全長に対する付着切れ長の比が小さくなるため、より大きな断面減少が生じるまで高次振動法に

よる張力変動の検出は困難となる。一方で今回の実験は平行線ケーブル 7×19 を使用したが、実橋の斜材ケーブルの素線数は100本以上であり、グラウトに直接接していない部分は実橋の方が多い。このため、内部で素線破断が生じると切断に伴う付着切れ長さは長くなる。このため、より大きな張力低下が生じることとなる。

5.3 実験の計測結果（ひずみ変化状況）に基づく付着長の推定結果に関する考察

グラウト内のひずみは中央部の付着切れ部の伸び量に相当する長さが両端で圧縮となる。実際の鋼材はグラウトに付着で定着されているため、付着定着区間ではグラウトのひずみは圧縮側に变化し、付着定着が完了し鋼材がグラウトと一体化して挙動する位置からグラウトひずみは一定となる。図-5より定着長位置を読み取ると1.6mとなるが、この区間で直線的にせん断力を伝達していると仮定すれば、筆者らが検討した切断部定着モデルにおける付着切れ長に換算すると0.8mとなる。つまり、張力変動から逆算した7本切断時の換算付着切れ長さとグラウトのひずみ計測から推定した付着切れ長とは2倍の差が生じていることとなる。この差は切断時にグラウトに付着定着せず、鋼材間でスリップして張力が低下した影響と考えられ、その程度を確認するためには、追加の検討が必要と考えられる。

鋼棒では付着定着長は一般に65とされており⁵⁾、既往の研究では平行ケーブルを使用している場合も合計断面積が等価となる直径の65倍を定着長となるとされている⁶⁾。本実験では定着長は片側1.98mとなり、この値は図-5から読み取った付着定着範囲1.6mとほぼ一致している。しかしながら、前述の検討の結果からすべての素線の張力がグラウトとの付着により定着されるのではなく、グラウトと直接接していない素線では破断時に鋼材間でスリップして張力の一部が解放されている可能性が示された。

6. 結論

グラウトが充填された斜材ケーブルの素線が破断した時の張力変動について検証を行うために、供試体を用いた破断実験を行った。結果として、グラウトが充填された

斜材ケーブルについて、以下の知見が得ることができた。

- 1) グラウトが充填された斜材ケーブルは、充填されていないケーブルに比べ張力低下の割合は小さい。
- 2) 切断部付近では鋼材のひずみは増加し、切断部から十分離れた箇所ではひずみが減少する。
- 3) 平行ケーブルでは内側の素線破断時にグラウトに定着されず、鋼材間でスリップして張力が解放される可能性が高い。

今回のような実験は過去に事例がなく実験方法の検討段階から試行錯誤しながらの実験であった。筆者らは今後も継続してグラウト充填が張力変動に及ぼす影響や破断位置による振動数変化などに関して検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局：道路橋定期点検要領，平成26年6月
- 2) 東日本高速道路（株）・中日本高速道路（株）・西日本高速道路（株）：保全点検要領 構造物編，平成29年4月
- 3) 若林 大，服部 雅史，野島 昭二，立松 秀之：斜張橋斜材ケーブルの張力測定による健全性の評価，第27回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，p.613-616，2018年11月
- 4) 酒井 秀昭，大橋 岳：斜材点検用非破壊検査装置の開発と運用—自走式斜材点検装置—斜材点検用非破壊検査装置の開発と運用—自走式斜材点検装置—，コンクリート工学，55巻8号，p.651-656，2017年8月
- 5) 例えば，（公社）日本道路協会：道路橋示方書・同解説 コンクリート橋・コンクリート部材編，平成29年11月
- 6) 高橋 功，貝原 巨利，長田 光司，野島 昭二：PC鋼材の破断に伴うプレストレストの変化に関する実験的検証：プレストレストコンクリート技術協会第14回シンポジウム論文集，p607-610，2005年11月