

斜ケーブルの点検・調査技術の性能に関する実験的検討

中日本高速道路(株) 正会員 Dr. ès sc. ○牧田 通
中日本高速技術マーケティング(株) 正会員 博士(工学) 熊谷紳一郎
中日本高速技術マーケティング(株) 立松 秀之
中日本高速道路(株) 工修 北川 寛和

キーワード：斜ケーブル，点検，調査，非破壊検査，実験的検討

1. はじめに

斜ケーブルは斜張橋やエクストラードロード橋（以下，斜張橋など）を構成する主要な部材であり，橋梁全体の挙動に大きな影響を及ぼすものである。そのため，斜ケーブルの状態を正確に把握することは斜張橋などの健全性を評価する上で不可欠である。本稿は，斜ケーブルの状態を把握するための非破壊検査技術と斜ケーブルの張力測定技術の中で実用化されたものを選定し，その性能を確認するために実施した実験的検討の結果について報告するものである。

2. 検討対象の技術

2.1 非破壊検査

斜ケーブル自由長部の鋼材の腐食による減肉や破断などの変状を保護管の上から検知することを目的として使用される非破壊検査技術を対象とした。実用化されている技術の中から電磁的な手法の2種類を選定した。

(1) NDT①

斜ケーブルを構成する個々の鋼材の表面に円周方向の渦電流を発生させて，渦電流の変化の有無により鋼材の変状を検知する技術。

(2) NDT②

斜ケーブルを軸方向に飽和磁化させて，鋼材内を通る磁束の量により鋼材の変状を検知する技術。

2.2 張力測定

実用化されている技術の中から3種類を選定した。

(1) CFM①

斜ケーブルに加振して測定した振動加速度を周波数分析し，得られた低次（1次または2次）の固有振動数と斜ケーブルの断面構成から別途算出した斜ケーブルの曲げ剛性より張力を算定する方法。

(2) CFM②

斜ケーブルに加振して測定した振動加速度を周波数分析し，得られた複数の固有振動数を用いて張力を算定する方法。

(3) CFM③

斜ケーブルを磁化させて鋼材の磁気特性を測定し，磁気特性と応力の関係から鋼材の現有応力を算定する方法。

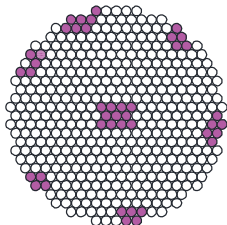
3. 試験概要

3.1 非破壊検査

実物大の斜ケーブル供試体にさまざまな変状を模擬し，選定した非破壊検査技術によりそれらの変

表-1 非破壊検査供試体の諸元

構成	φ7mm × 421本
外径 (PE管外径)	φ185mm
公称断面積	16,200mm ²
単位重量 (PE管除く)	127kg/m
長さ	8.7m



●: 破断を模擬した素線

図-1 断面減少率10%を模擬したケーブル供試体の断面

表-2 模擬した変状

区間	変状	断面減少率 (%)	めっき消失率 (%)
①	健全 (l=1,200mm)	0	0
②	6本断面減肉* (l=150mm)	1.0	
③	4本破断 (l=150mm)		
④	8本破断 (l=150mm)	2.0	
⑤	8本破断 (l=50mm)		
⑥	21本破断 (l=150mm)		
⑦	32本破断 (l=150mm)	7.5	
⑧	43本破断 (l=150mm)	10	
⑨	334本亜鉛めっきなし (l=1,200mm)	0	

l: 素線における破断・減肉・めっき消失の長さ

* 断面減肉はφ7mm→φ3.5mmとなるよう素線を細らせた

状が検知可能か試験した。供試体の斜ケーブルとしては、中日本高速道路(株)が管理する12橋の斜張橋などのうち9橋で使用されている平行線ケーブルを模擬したものとした。供試体のケーブル構成は中日本高速道路(株)が管理する斜張橋などで最大容量の斜ケーブルと同じ亜鉛めっき鋼線φ7mmを421本束ねたものとし、厚さ11.5mmのポリエチレン管で被覆した。表-1に供試体の諸元を示す。供試体には破断・減肉・亜鉛めっき消失の3種類の変状を模擬した素線を配置した。全部で8パターンの変状を模擬した断面を設定し、ケーブルの長さ方向に900mm(区間②~⑧の区間長)の間隔でそれら変状断面を設けた。表-2に模擬した変状を示す。実際の橋梁では保護管の変状箇所から劣化因子が侵入し外周の素線に変状が多く発生する状況が想定されるが、水蒸気となった水分によりケーブル内部の素線においても変状が発生することが考えられることから、供試体のケーブル中心近くにも変状を模擬した素線を配置した。図-1に素線の破断により断面が10%減少した状態を模擬したケーブル供試体の断面図を示す。

非破壊検査の実施者には検査対象が平行線ケーブルであること以外は伝えていない状態で検査を実施してもらい、検知した変状を報告してもらった。変状の検知精度だけではなく、検査の実施に要した時間や検査機器の取扱いなどの作業性に関する観点からも技術を評価した。

3.2 張力測定

定着板間距離16.746mのアバットにセットした19本よりPC鋼より線21.8mmを供試体として使用した(図-2)。供試体に3つの異なる水準の緊張力を導入し、選定した張力測定技術の測定精度を試験した。供試体に導入した緊張力は定着端部に設置したロードセルにより測定し、その測定値を基準値として各張力測定技術の測定精度を定量的に評価した。斜ケーブルには鋼材の防食のためにグラウトを注入しているものがあることから、張力測定への影響を把握するためにグラウトの有無を試験条件として設定した。グラウト有りの供試体では内径35mmのポリエチレン製スパイラスシースを保護管として使用した。表-3に試験の条件を示す。

非破壊検査技術の試験と同様に、張力の測定精度だけではなく、測定の実施に要した時間や測定機器の取扱いなどの作業性に関する観点からも技術を評価した。

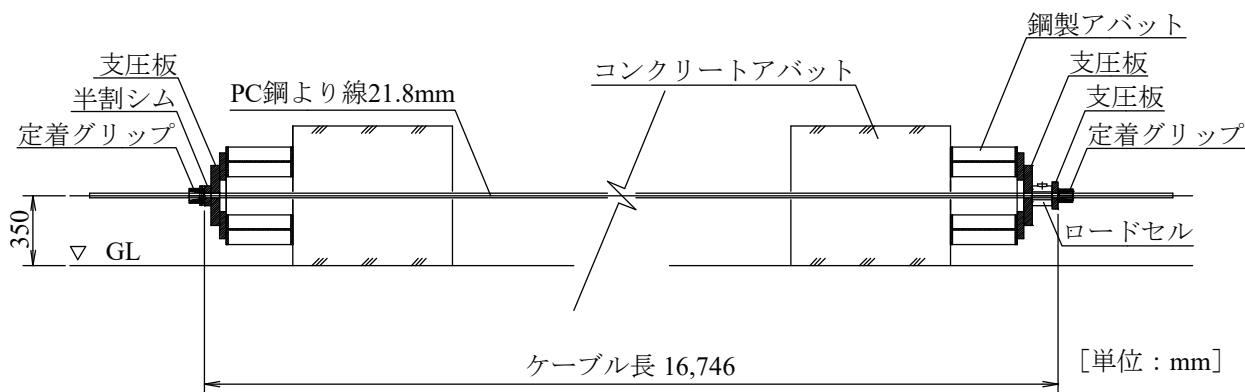


図-2 張力測定試験の供試体

表-3 張力測定の試験条件

	条件①		条件②	条件③	備考
緊張力 (kN)	23 (0.04 F_{ptk})		230 (0.4 F_{ptk})	401 (0.7 F_{ptk})	$F_{ptk} = 573\text{kN}$
グラウト	なし	あり	なし	なし	

F_{ptk} : 19本よりPC鋼より線21.8mmの最大試験力

4. 試験結果

4.1 非破壊検査

表-4に各技術の試験結果を示す。

(1) NDT①

断面減少が生じている断面は検知したものの、断面減少率は検査データから評価できなかった。断面減少している長さ方向の範囲についても評価できなかった。垂鉛めっきが消失している断面は検知し、供試体の垂鉛めっき消失率80%に対してほとんど残存していないと評価した。垂鉛めっきが消失している長さ方向の範囲についてもほぼ正確に評価できた。

検査の準備・実施 (区間②～④) ・撤収に要した時間はそれぞれ約10分・約1分・約10分で、全作業を2人で実施した。検査機器は1人で持ち運びが可能で、検査も人力で機器を移動させて実施した。

(2) NDT②

断面減少が生じている断面位置を35～105mmの誤差で検知し、区間③の4本の素線が破断している断面を誤差最小で、区間⑦の32本の素線が破断している断面を誤差最大で検知した。断面減少率は-0.1～-1.2%の誤差で評価し、区間②の6本の素線が減肉し断面減少率が1.0%である断面を誤差最小で、区間⑤の8本の素線が破断し断面減少率が2.0%である断面を誤差最大で評価した。断面減少している長さ方向の範囲は、区間⑤の8本の素線が破断している範囲を100mmと評価して誤差が+50mmであったこと以外、すべて正確に評価した。破断・減肉が生じている素線の断面内での位置の特定はできなかった。垂鉛めっきの消失は検査データから評価できなかった。

検査の準備・実施 (区間②～④) ・撤収に要した時間はそれぞれ約70分・約10分・約40分で、全作業を5人で実施した。検査機器は5人で荷卸しし、運搬にはホイストクレーンを使用した。検査は人力で機器を移動させて実施した。

4.2 張力測定

(1) CFM①

定着グリップから1.6m (供試体のケーブル長 L の約1/10) 離れた位置で加振し、加速度計によりケーブル供試体の振動加速度を測定した。加速度計の設置位置の振動加速度の測定値への影響を把握する

表-4 非破壊検査技術の試験結果

		NDT①			NDT②		
変状の検知	発生箇所	発生のみを検知			ケーブル長さ方向に35~105mmの誤差で検知, 断面内の位置特定は困難		
	発生範囲	評価困難			区間⑤のみ+50mmの誤差, それ以外は正確に評価		
	発生程度	評価困難			断面減少率を-0.1~-1.2%の誤差で評価		
作業性	時間	準備	実施	撤収	準備	実施	撤収
		約10分	約1分	約10分	約70分	約10分	約40分
	機器取扱い	運搬・検査時の移動ともに人力			運搬はホイストクレーン, 検査時の移動は人力		
	必要人員	2人			5人		

ために、加速度計の設置位置を定着グリップから1.6m (約1/10L) , 3.2m (約1/5L) , 8.3m (約1/2L) 離れた3箇所に变化させて、それぞれの位置で振動加速度を測定した。

グラウトなしの供試体では-5.3~+3.1%の誤差で、グラウトありの供試体では-13.8%の誤差で張力を算定した。加速度計の設置位置は振動加速度の測定値にほとんど影響はなく、得られた張力もほぼ同じであった。張力が大きいほど誤差がプラス側に大きくなり、条件②の230kN (0.4F_{ptk}) の張力をもっとも精度良く算定された。

測定の準備・実施(算定含む)・撤収に要した時間はそれぞれ約15分・約10分(1箇所あたり)・約5分で、全作業を2人で実施した。測定に必要な機器はすべて人力で運搬した。

(2) CFM②

CFM①と同様に加振し、加速度計の設置位置を3箇所に变化させた。グラウトなしの供試体では+3.1~+4.0%の誤差で、グラウトありの供試体では-6.1~-6.6%の誤差で張力を算定した。加速度計の設置位置は振動加速度の測定値にほとんど影響はなく、得られた張力もほぼ同じであった。張力の大きさによらず誤差はほぼ一定であった。測定の各作業に要した時間と作業人員はCFM①と同様であった。

(3) CFM③

グラウトなしの供試体のみを対象として-2.3~-1.5%の誤差で張力を算定した。張力の大きさの誤差への影響は見られなかった。

測定の準備・実施(算定含む)・撤収に要した時間はそれぞれ約20分・1分未満(1箇所あたり)・約10分で、全作業を2人で実施した。測定に必要な機器はすべて人力で運搬した。

5. おわりに

2018年8月にイタリアで落橋した斜張橋は今日多く見られるマルチケーブル形式のものではないが、落橋の原因は斜ケーブルの鋼材の腐食劣化であったとも考えられている¹⁾。今後、このような事象を起こさないよう、斜ケーブルを含む斜材システムの維持管理を適切に実施していく所存である。

参考文献

1) Calvi, P. M., Moratti, M., O'Reilly, G. J., Scattarreggia, N., Monteiro, R., Malomo, D., Calvi, P. M., Pinho, R.: Once upon a Time in Italy: The Tale of the Morandi Bridge, Structural Engineering International, Published online: 20 Dec. 2018, DOI:10.1080/10168664.2018.1558033