

磁歪センサによる外ケーブル補強効果の経時的検証

(株)高速道路総合技術研究所 橋梁研究室 正会員 ○竈 本 武 弘
 同 上 正会員 長 谷 俊 彦
 (株)千代田コンサルタント 福 田 暁
 (株)K&Tこんさるたん 正会員 肥 田 研 一

1. はじめに

外ケーブル補強工法において、ケーブル張力を正確に把握することは補強効果の検証や構造物の安全性を照査する上で重要な計測項目である。計測方法には、ロードセルを用いる方法、ケーブルを振動させ、振動数と張力の関係から求める方法等種々あるが、本件では鋼材の透磁率と応力変化の關係に着目した磁歪センサ(以下EMセンサという)を用いて外ケーブルの張力を測定した¹⁾。

本報告は、外ケーブルで補強後4年経過したPC合成桁橋に対しEMセンサを用いて導入プレストレスの経時変化について調査したものである。

2. EMセンサの概要

本件で使用したEMセンサの構造は、図-1に示すように1次コイル、2次コイルと温度センサを含んだ円筒形コイルで、外ケーブルの任意の位置にセットでき、その位置での張力を測定できる²⁾。

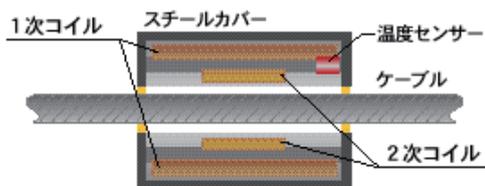


図-1 EMセンサの構成

鋼材の応力度により透磁率(鋼材を通過する磁気の度合い)が変化する磁気弾性特性を利用して、軸応力を測定するものである。実測の際には、鋼材の透磁率には温度依存性があることから測定結果に対して補正を行い、外ケーブルの現有応力の算出を行う。EMセンサによる応力の算出には、式-1が用いられる。

$$\mu(\sigma, T) = \mu(0, 0) + m_1\sigma + m_2\sigma^2 + \alpha T \quad \dots\dots \text{式-1}$$

ここに、 $\mu(\sigma, T)$: 応力 σ 、温度 T のときの透磁率

m_1, m_2 : 温度が一定状態にある場合の実験定数

α : 応力が一定状態にある場合の実験定数

3. 調査概要

3. 1 橋梁概要

調査の対象とした橋梁は、昭和48年に建設されたポストテンションPC単純合成桁で、PC鋼材の破断により減少したプレストレスを補うことを主目的として、平成15年にG1桁およびG5桁に対し外ケーブル工法による補強が実施されている。補強概要を表-1、補強概要図を図-2に示す³⁾。

表-1 外ケーブル補強概要

補強桁	外ケーブル		
	ケーブル種別	本数	導入緊張力
G1	F170TS	2本/桁	888kN/本
G5	F70TS	2本/桁	428kN/本

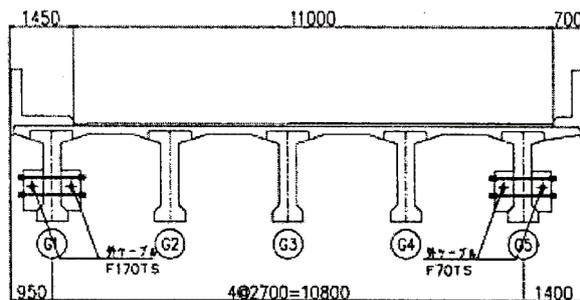


図-2 補強概要図

3. 2 計測概要

計測は、図-3に示すように、外ケーブル4箇所を対象とし、EMセンサを用いて張力を計測した。EMセンサは外ケーブル補強時に補強効果を確認するため設置されたものであり、設置時に行ったキャリブレーションで求めた表-2に示す諸係数を使用し張力を算出した。図-3中の●印は、EMセンサ設置位置および外ケーブルの温度計測位置である。ここで、温度計測位置はEMセンサ設置位置と同じところとしている。

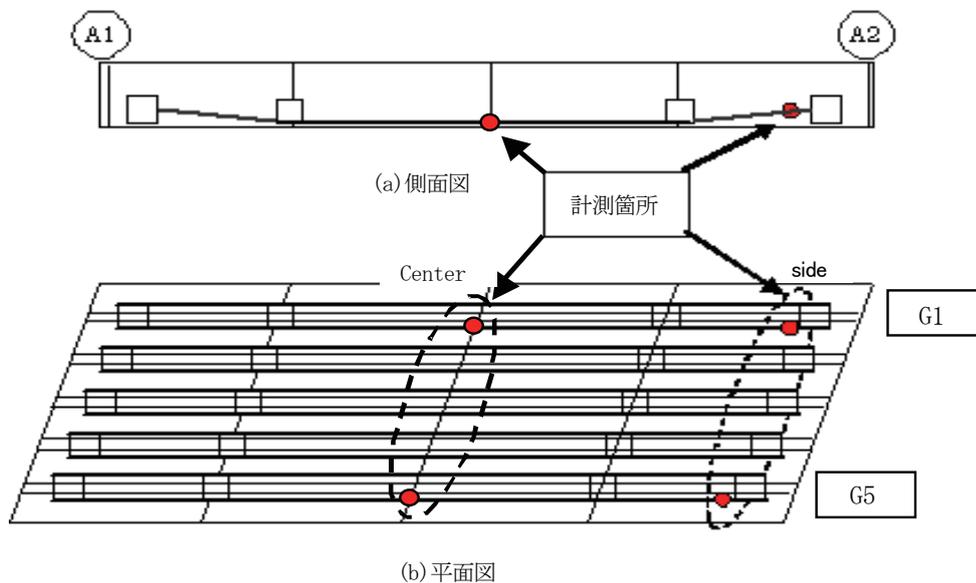


図-3 張力計測位置

4. 調査結果と考察

4. 1 張力計測結果

本計測による張力計測結果を表-3、温度計測結果を表-4に示す。

表-2 EMセンサの更正值

計測ケーブル	m_1	m_2	α	$\mu(0,0)$
G1	3.6877	0.4487	-0.0045	5.3949
G5	2.9899	-0.1895	0.0054	3.735

表-3 張力計測結果

計測張力 (kN)			
G1-Center	G1-Side	G5-Center	G1-Side
792.1	783.7	424.0	422.9

表-4 温度計測結果

計測温度 (°C)				
G1-Center	G1-Side	G5-Center	G1-Side	外気温
29.4	29.0	29.6	29.5	26.8

4. 2 張力の経時変化

外ケーブル張力は、補強時から幾度と計測されている。計測された張力には、外気温によるコンクリートの温度変化による張力変動も含むため、式-2を用いて温度補正を行い外ケーブル張力の経時変化を検証した。

$$\Delta P = \{(t-t_0)\alpha_c - (t_c-t_{c0})\alpha_s\} \cdot E_s \cdot A_s \quad \dots\dots \text{式-2}$$

- ここに ΔP : 温度による変動張力 (kN)
- t : 計測時の外気温度 (°C)
- t_0 : 初期計測時の外気温度 (°C)
- t_c : 計測時の外ケーブル温度 (°C)
- t_{c0} : 初期計測時の外ケーブル温度 (°C)
- α_c : コンクリートの線膨張係数 ($\alpha_c = 10 \times 10^{-6}$)
- α_s : 炭素鋼の線膨張係数 ($\alpha_s = 10.7 \times 10^{-6}$: 平成20年度版理科年表より)
- E_s : 鋼材の弾性係数 (kN/mm²)
- A_s : 鋼材の断面積 (mm²)

表-5 に温度補正した張力の経時変化, 図-4 に温度補正した張力の経時的な変化率を示す。

表-5 温度補正した張力の経時変化

ケーブル番号	測点番号	項目	単位	経過年数					備考	
				0.000	0.005	1.351	3.636	3.953		
				2004/2/16	2004/2/18	2005/6/23	2007/10/5	2008/1/29		
G1	center	計測値	計測張力	kN	823	812	750	746	792	・今回測定時の外気温: 26.8°C ・気象庁HPより過去測定日の福岡地方12時の外気温を参考値として以下に示す 2004/2/16: 11.4°C 2004/2/18: 13.6°C 2005/6/23: 29.9°C 2008/1/29: 8.0°C
		温度補正	外気温度t	°C	11.4	13.6	29.9	26.8	8.0	
			ケーブル温度tc	°C	13.7	15.2	30.8	29.4	10.6	
			変動張力ΔP	kN	0.00	1.16	0.39	-2.72	-0.16	
			温度補正張力Ts	kN	823	813	751	743	792	
		%	100.0%	98.8%	91.2%	90.3%	96.2%			
	side	計測値	計測張力	kN	819	807	745	739	784	
		温度補正	外気温度t	°C	11.4	13.6	29.9	26.8	8.0	
			ケーブル温度tc	°C	13.2	14.8	30.5	29.0	10.5	
			変動張力ΔP	kN	0.00	0.95	0.05	-2.98	-0.99	
温度補正張力Ts			kN	819	808	745	736	783		
	%	100.0%	98.6%	91.0%	89.8%	95.6%				
G5	center	計測値	計測張力	kN	430	430	416	423	424	
		温度補正	外気温度t	°C	11.4	13.6	29.9	26.8	8.0	
			ケーブル温度tc	°C	14.8	15.7	30.9	29.6	10.9	
			変動張力ΔP	kN	0.00	2.39	2.36	-0.93	1.41	
			温度補正張力Ts	kN	430	433	419	422	425	
		%	100.0%	100.5%	97.3%	98.0%	98.9%			
	side	計測値	計測張力	kN	429	430	427	422	423	
		温度補正	外気温度t	°C	11.4	13.6	29.9	26.8	8.0	
			ケーブル温度tc	°C	13.7	15.3	30.2	29.5	10.6	
			変動張力ΔP	kN	0.00	0.86	1.50	-3.09	-0.26	
温度補正張力Ts			kN	429	431	428	419	423		
	%	100.0%	100.5%	100.0%	97.8%	98.6%				

コンクリート線膨脹係数 $\alpha_c = 1.000 \times 10^{-5}$ 炭素鋼線膨脹係数 $\alpha_s = 1.070 \times 10^{-5}$
 $F170T \quad E_s \cdot A_s = 1.942 \times 10^8 \text{ N/mm} \quad E_s = 200,000 \text{ (N/mm}^2) \quad A_s = 970.9 \text{ mm}^2$
 $F70T \quad E_s \cdot A_s = 7.678 \times 10^7 \text{ N/mm} \quad E_s = 200,000 \text{ (N/mm}^2) \quad A_s = 383.9 \text{ mm}^2$
 温度補正張力 $T_s = T + \Delta P$ 温度変動応力 $\Delta P = \{(t - t_0) \cdot \alpha_c - (t_c - t_{c0}) \cdot \alpha_s\} E_s \cdot A_s$

4. 3 考察

G1 ケーブルの計測張力は, 2004 年の緊張後 2005 年までに 10% 程度の減少しており, 2007 年の計測では 2005 年の張力とほぼ等しい値となっている。2008 年の計測では 2004 年計測値に対し, 4% 程度の減少量となっている。

また, G5 ケーブルは, 緊張後 2005 年までに 0~3% 程度の減少しており, 2007 年の計測では 2005 年の張力ほぼ等しい値となっている。2004 年の緊張後から今回の計測までに 2% 程度の減少量となっている。

(1) G1, G5 ケーブルの挙動の違い

今回の計測では計測時期を秋期(2007 年 10 月), 冬期(2008 年 1 月)の 2 時期で計測したが, G1 側のセンサでは, 2 時期

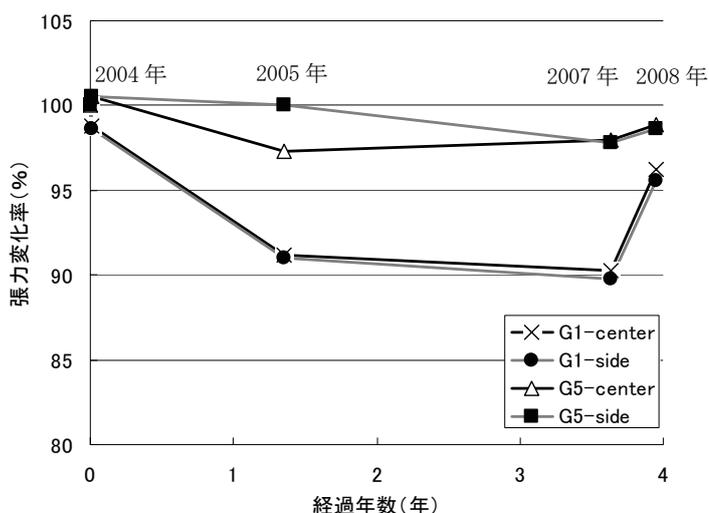


図-4 温度補正した張力の経時的な変化率

の計測結果がばらついた。ばらつきの大きさは、最大 47kN（導入緊張量の 6%程度）であった。

この原因として、EM センサは温度依存性が大きく、センサ設置前に行ったキャリブレーションの不備があることも考えられる。よって経時的な変化を把握するためには、緊張時の環境とほぼ同じ条件である「冬期計測(2008年の計測)」の結果を用い、判断することとした。この結果、G1の外ケーブルは、初期値の4%程度減少量となっていることがわかった。

(2) 桁中心側と桁端部側との張力差

G1 ケーブルの張力は、桁端部側よりも桁中心側が大きな値を示しており経過年数ごとに差が拡大する傾向にある。また、G5 ケーブルも桁中心側が大きな値を示すことがあった。本ケーブルは、両引きで緊張されており、一般には定着端より偏向装置の摩擦等により偏向装置を越えた桁中心側の張力が、偏向装置より定着側にある桁端部側より小さくなる。しかし桁中心側と桁端部側の張力差は張力の1%程度であり、EM センサが一般に3%程度の誤差を有することから²⁾、桁中心側と桁端部側の張力差はEM センサの測定誤差によるものと考えられる。

(3) 外ケーブルの張力減少量

本橋外ケーブルの減少量は2~4%程度であり、鋼材のリラクゼーション率3~5%と同程度である。したがって本橋の外ケーブルは、緊張後から鋼材のリラクゼーションなどで張力が減少した後、張力の減少は生じていないことが確認できた。

(4) 温度補正の必要性

本件では張力の経時変化を検証するため、コンクリートの温度変化による張力変化を補正した。しかし補正前、補正後の張力差は、導入された張力に比べ極めて小さく、今後の計測時には補正を行う必要はないと思われる。

5. まとめ

本調査により以下に示すような知見が得られた。

- 1) EM センサは、温度依存性が高いので設置時のキャリブレーションを正確に行うことが必要である。
- 2) 計測時期をセンサ設置時期に合わせ、環境条件を近づけることで測定誤差を小さくすることができる。
- 3) 本橋の外ケーブルは、緊張後から鋼材のリラクゼーションなどで張力が減少した後、張力の減少は生じていないことが確認できた。
- 4) コンクリートの温度変化による張力変化は、導入された張力に比べ極めて小さく、今後の計測時には補正を行う必要はないと思われる。

参考文献

- 1) 長田光司, 下登新一, 野島昭二, 藤原保久: 外ケーブルにより補強する PC 橋の定着部に関する検討, プレストレストコンクリート技術協会, 第 13 回シンポジウム論文集, PP. 457~460, 2004. 10
- 2) 羅黄順: EM センサによる PC 鋼材の実応力測定: プレストレストコンクリート, Vo143, No. 6, PP. 99~103, 2001. 11
- 3) 西川孝一, 石村勝則, 野島昭二, 江良和徳: 外ケーブルにより補強する PC 合成桁の補強効果の検証, プレストレストコンクリート技術協会, 第 13 回シンポジウム論文集, PP. 451~456, 2004. 10