

TOPICS の紹介

今号の『SE通信』のキーワードは

『既設PC橋における補強外ケーブル張力のモニタリング』です。

塩害環境下に建設されたコンクリート橋は、橋体の変状が顕在化した段階で内部鋼材の腐食や破断を伴う場合が多く、内部鋼材の破断が確認されたケースでは、主桁の耐荷性能を回復させるための補強対策として「外ケーブル補強工法」が広く採用されています。

対策後の維持管理においては、外ケーブル張力を定期的に測定し、張力の経時変化を捉えることが非常に重要であり、主桁の変状の有無や詳細点検の必要性を判断するための材料になり得ると考えられます。その手段の一つとして、磁歪法によってPC鋼材の実応力を測定することができ、測定精度や長期耐久性に優れる「EMセンサー」の活用が期待されますが、これまで、新設橋梁施工時の緊張管理に用いられるなどの事例は多数あるものの、ケーブル張力のモニタリングを目的とした使用事例は少ないのが現状です。

そこで、昨年に館山市殿の協力を得て、館山湾に面して建設されたPC橋に外ケーブル補強工法を行う工事において、試験的にEMセンサーを設置し、工事完了後の補強ケーブル張力についてモニタリングを行ってきました。

今号では、外ケーブル補強工法を適用した既設PC橋において、外ケーブル張力のモニタリングを実施した事例についてご紹介します。



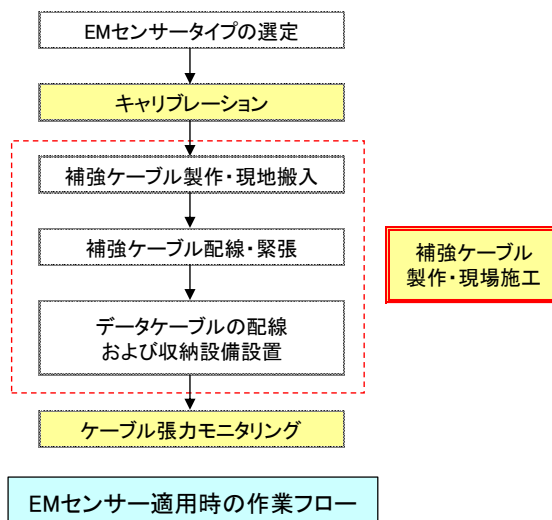
橋梁概要および作業フロー

外ケーブル補強工法にEMセンサーを用いてケーブル張力を定期的に測定することにより、モニタリングを行ってきた事例について、橋梁概要を以下に示します。

- ・橋 梁 名：館山大橋
- ・構造形式：PC単純ポス TENT 桁橋(5径間)
- ・最大支間：18.8m
- ・ケーブルタイプ：F100TS (7×φ11.1、SWPR7BL) L=15.3m×2本
- ・対象ケーブル：P2-P3 径間 G6 主桁補強外ケーブル
- ・センサー台数：2台(上流側、下流側各1台)
- ・施工年月：2015年4月

EMセンサーによるケーブル張力のモニタリングを実施する場合には、右に示すようにEMセンサーの「キャリブレーション」や「補強ケーブル製作・現場施工」において、通常の外ケーブル補強工法に加えて、実施または配慮すべき事項があります。

以降では、上記事項について、実例を踏まえた手法や手順を示すとともに、工事完了後の「ケーブル張力モニタリング」における測定方法や測定結果についてもご紹介します。



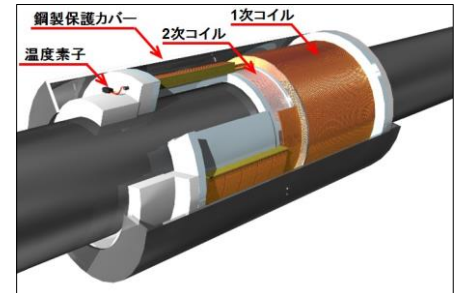
● EMセンサーの原理

EMセンサー(Elasto-Magnetic sensor)は、磁歪法による鋼材の実応力を測定するセンサーで、鋼材の透磁率 μ と応力 σ 、温度 T が相関関係をもつという原理を利用しています。

透磁率 μ と応力 σ 、温度 T の関係式は(1)式で表すことができ、(1)式におけるセンサーの応力係数 m_1 、 m_2 、温度係数 α は、応力キャリブレーション、温度キャリブレーションによって求めることができます。

$$\mu(\sigma, T) = \mu(0,0) + m_1\sigma + m_2\sigma^2 + \alpha T \dots (1)$$

また、EMセンサーは、①ケーブル自由長部に設置可能なため任意の位置で張力を測定できる、②ひずみではなく直接応力(張力)を測定できる、③ケーブルに直接貼り付けたり固定したりしないことから応力伝達系に影響を与えない、といった特長があります。



EMセンサー構造図

● 応力キャリブレーション

現場での緊張作業に先立ち、当社の山口工場において、本工事で使用する同タイプ、同ロットのケーブルにEMセンサーを組み込んだ引張試験体を製作し、引張試験を行ってキャリブレーションを実施しました。

下記載荷ステップごとにEMセンサー出力値(透磁率)を測定し、各ケーブルの応力 σ - 透磁率 μ 関係から、EMセンサーの応力係数 m_1 、 m_2 を決定しました。

- ・最大荷重：650kN(F100TS引張強度 P_u の60%以上)
- ・載荷ステップ：100kNごと
- ・試験体：ケーブル2本(センサー2台)
- ・測定回数：3回/各ステップ(平均値を採用)

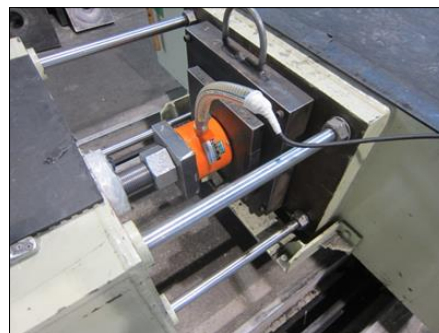
なお、引張試験には5500kN引張試験機を使用しましたが、最大荷重が試験機定格荷重の約12%となり、荷重値の誤差が大きくなると予想されたため、1MN型のロードセルをケーブル定着部に設置し、この荷重値とEMセンサーの出力値によってキャリブレーションを実施しました。



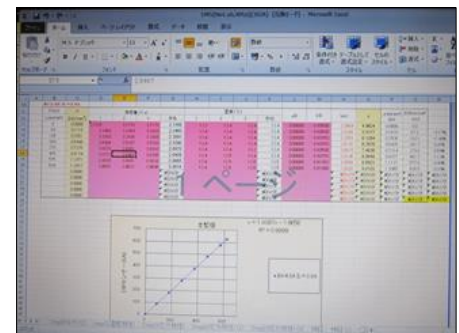
応力キャリブレーション状況



EMセンサー設置状況



ロードセル設置状況



計測結果パソコン画面

● 温度キャリブレーション

恒温槽内において、ケーブルが無応力状態でのEMセンサーの温度と出力値(透磁率)を測定し、それぞれのEMセンサーの温度 T - 透磁率 μ 関係から、温度係数 α を決定しました。

- ・測定温度：5点(-20℃、0℃、10℃、20℃、40℃)
- ・試験体：センサー2台
- ・測定回数：3回/各温度(平均値を採用)



恒温槽および槽内状況

● 補強ケーブル製作・現地搬入

応力キャリブレーション試験終了後に、試験ケーブルを切断してEMセンサーを取り出し、現場に納入するケーブルの定着体(マンション)圧着前にEMセンサーを組み込んで製作しました。

補強ケーブルは、直径2m弱のコイル状に巻かれた荷姿で納入します。

上記荷姿とするために、ケーブル巻き終わり側(現場配線時の引き出し側)の端部にEMセンサーをテープで固定しますが、ケーブル運搬中の衝撃などによるセンサーの損傷を避けるため、EMセンサーを緩衝材(エアキャップ)で保護して現地に搬入しました。



補強ケーブル荷姿

● 補強ケーブル配線・緊張

足場上に補強ケーブルを荷降ろしたのち、EMセンサーが設置されたケーブル引き出し側から梱包を解いて展開し、配線を行いました。

配線後、EMセンサーを当該橋梁の設計断面である支間中央部に移動させ、緊張作業中にEMセンサーが移動しないよう、補強ケーブル外面とEMセンサー内面とのクリアランスにゴム板および樹脂製スペーサを配置して固定しました。

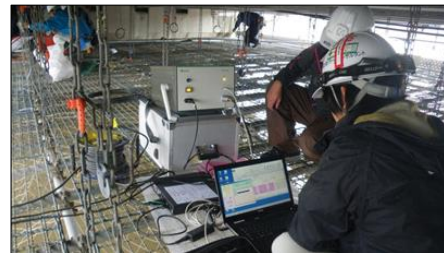
緊張作業では、当該主桁の上流側および下流側に配置された補強ケーブル2本を同時に緊張し、緊張ポンプ圧力とケーブル伸び量で管理して必要緊張力を導入しましたが、各荷重段階におけるケーブル張力をEMセンサーでも測定し、ケーブル定着完了後に測定した張力を工事完了後に実施するモニタリングの初期値としました。



EMセンサー固定状況



緊張管理状況



ケーブル張力計測状況

● EMセンサー信号ケーブルの配線および収納設備設置

工事完了後の測定において、足場組立や橋梁点検車などの手配を不要とするため、管理者と協議の上、EMセンサーの信号ケーブルを当該径間起点側の橋脚(P2)まで延長し、橋座上に設置したキャビネット内に信号ケーブルを収納して存置することとしました。

信号ケーブルは、EMセンサーから定着体の鋼管口までは補強ケーブルに沿わせ、定着体鋼管口からキャビネットまでは両者間に張り渡したSUS製のワイヤーに沿わせて、SUS製のホースバンドで固定して配線しました。



EMセンサー付近配線状況



補強ケーブル部固定状況



偏向部付近配線状況



定着体付近配線状況



信号ケーブル収納状況



信号ケーブル存置状況

測定概要

EMセンサーによるケーブル張力の測定は、センサーの信号ケーブルを存置しているP2橋脚の橋座部で実施しました。

測定に必要な機器（パソコン、EMセンサー測定器、小型発電機（インバータ付））は、すべて測定箇所を持ち込み、収納ボックスの施錠を解いて機器の接続を行いました。

また、使用する資機材の運搬および梯子の設置・撤去時に路側帯を通行する歩行者や自転車を適切に誘導すること、ケーブル張力測定時に関係者以外が測定箇所に立ち入らないよう監視することを目的として、誘導兼監視員を配置しました。

橋座部への機器持ち込み、限られたスペースでの機器接続や測定など、作業上の制約はありましたが、一連の作業を概ね50分で終わることができました。



ケーブル張力測定状況

測定時期および測定結果

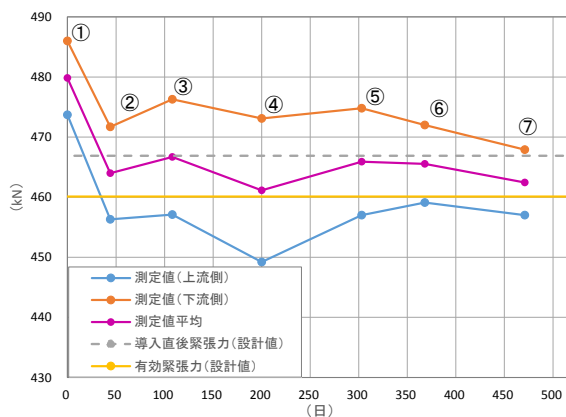
工事期間中は、緊張力導入完了後にケーブルのリラクゼーションなどによる張力の低下が比較的初期に見られることから、竣工前（約1.5ヶ月後）にも測定を行いました。

また、工事完了後は、外気温による張力の変動状況などを把握する必要が考え、緊張力導入完了後の1年間は、7月（夏季）、10月（秋季）、2月（冬季）、4月（春季）の計4回の測定を実施しました。

2年目については、上記の測定結果を踏まえ、管理者とも協議した上で1年目と同様の調査時期、頻度とし、現在2年目夏季までの測定が完了しています。

ケーブル張力の経時変化に着目すると、竣工前の計測では、ケーブルのリラクゼーションと考えられる張力の低下（14kN～17kN）が確認されました。しかし、その後の張力変動は小さく安定しており、また測定値の平均が有効緊張力以上であることから、工事完了後も所定の張力が保持され、橋体の安全性は確保されていると考えられます。

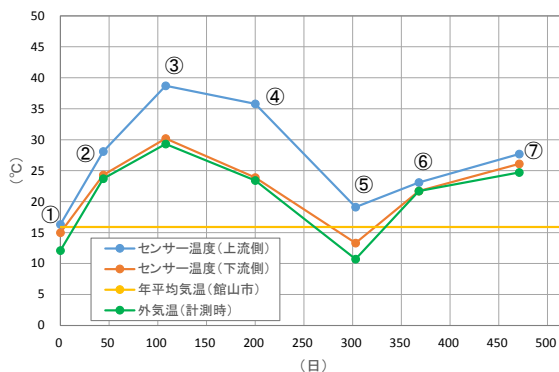
今後も継続して、長期的に補強ケーブルの張力を測定していく予定です。



ケーブル張力の経時変化

EMセンサーによるケーブル張力計測結果

項目	単位	2015年				2016年			
		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	
計測日・時期	月日	4月11日	5月25日	7月28日	10月28日	2月9日	4月15日	7月27日	
	日	0	44	108	200	303	368	471	
	—	導入時	竣工前	竣工後					
		春季	—	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	
計測値	上流側	kN	473.7	456.3	457.1	449.2	457.0	459.1	457.0
	下流側	kN	486.0	471.7	476.3	473.1	474.8	472.0	467.9
	平均	kN	479.9	464.0	466.7	461.2	465.9	465.6	462.5
センサー温度(計測時)	上流側	°C	16.3	28.1	38.7	35.8	19.1	23.1	27.7
	下流側	°C	15.0	24.3	30.2	23.9	13.3	21.7	26.1
外気温(計測時)	°C	12.1	23.7	29.3	23.4	10.7	21.7	24.7	
導入直後緊張力	kN	466.9	—	—	—	—	—	—	
有効緊張力	kN	—	460.1	460.1	460.1	460.1	460.1	460.1	



計測時のセンサー温度および外気温の経時変化

以上のように、ケーブルの張力をEMセンサーで定期的に測定するモニタリング手法が、外ケーブル補強を実施した橋梁の維持管理において広く普及していくことが期待されます。

【お問合せ】

メルマガに対するご意見、エスイー製品に関する問合せや資料請求は下記までご連絡下さい。

株式会社エスイー 橋梁技術部 <http://www.se-kyoryokozo.jp/contact/>

【WEBサイト】

製品サイトでは、カタログ、設計施工要領、CADデータ等のダウンロードができます。

橋梁構造事業分野サイト <http://www.se-kyoryokozo.jp>

株式会社エスイー <http://www.se-corp.com>