

EMセンサを用いたPC鋼材の引張力モニタリング実験

A test of EM sensor application on PC tendon tensile force monitoring

黒川章二*・羅黄順**

Shoji Kurokawa and Sunaryo Sumitro

Ming.L.Wang***・嶋野慶次****

Ming.L.Wang and Keiji Shimano

*正会員 木更津工業高等専門学校教授 環境都市工学科 (〒292-0041 木更津市清見台東 2-11-1)

**正会員 工博 (株)計測リサーチコンサルタント企画開発チーフエンジニア (〒140-0013 東京都品川区南大井 3-22-7)

*** PhD Professor of Illinois University (842 West Taylor Street Chicago, Illinois 60607-7023)

****正会員 木更津工業高等専門学校 環境都市工学科 (〒292-0041 木更津市清見台東 2-11-1)

Elasto-Magnetic (EM) actual-stress measurement method by utilizing the sensitivity of incremental magnetic permeability due to stress change has been being developed. Previously, it has been proved that EM measurement method enable to measure actual-stress of steel wire, PC bar and PC strand contactlessly without destroying their polyethylene covering sheath. Furthermore monitoring tensile force of PC tendon is the most important issue in PC structure maintenance management. Therefore, in this paper, in order to grasp the reliability of EM sensor for field-application purpose, a test of tensile force monitoring on PC tendon of outer cable PC beam by utilizing EM sensor was conducted. As the result of the test, it is confirmed that EM stress measurement technology can provide adequate accuracy and reliability to monitor tensile force of PC tendon during a life-cycle of PC structure.

Key Words : Tensile force monitoring, PC tendon, Elasto-Magnetic sensor

1. まえがき

近年、構造物の高材齢化に対するメンテナンスのあり方が問われている。構造物を経済的かつ合理的に保守するためには、建設、検査、劣化、補修・補強、維持管理、破壊などを要因とするライフサイクルコストの評価が要求されている。保守計画最適化のために構造物のライフサイクルモデルを作成し、検査費用と精度について検討しなければならない¹⁾。保守計画において、鋼材の応力モニタリングが必要である。ライフサイクルコストの低減を図るためには、鋼材応力計測に対して、安価であること、容易に計測できること、残留応力を含む実在応力が計測できること、計測精度が高いこと、鋼材および保護被覆を傷つけないことなどが要望される。

鋼材の透磁率が応力および温度の影響を敏感に受けることを利用したEM(Elasto-Magnetic)センサによる応力計測方法が開発されている²⁾。従来型の応力計測方法と比較して、前記の要望を大いに満足することが予想されたので、それを用いて各種鋼材の応力計測を実施した。鋼線、PC鋼棒、PC鋼ストランドの引張試験において

高精度の実験結果が得られ、ポリエチレン被覆も傷つせずに計測できることが実証された³⁾。

PC構造物のメンテナンスにおいて、施工から供用完了までの長期に及ぶPC鋼材の実在引張力モニタリングは重要課題である。緊張材引張力の計測は、定着直前までは比較的容易に行うことができるが、定着以後において難しい問題がある。EMセンサの利用によりその問題が解消され则认为、外ケーブル方式のPC梁において、ライフサイクルにおいて予想される主な場面における緊張材引張力の計測実験を行った。EMセンサによる計測結果について、ロードセルおよびひずみゲージによる計測結果と比較した。EMセンサを用いたPC鋼材の引張力モニタリングはPC梁の維持・管理に適合することが判明した。

2. 実験内容

外ケーブル方式のPC梁4体(梁の記号: PCS1, PCS2, PCS3, PCS4)を製作し、図-1に示したような場面において、プレストレスの導入、プレストレス力経時変化測定、

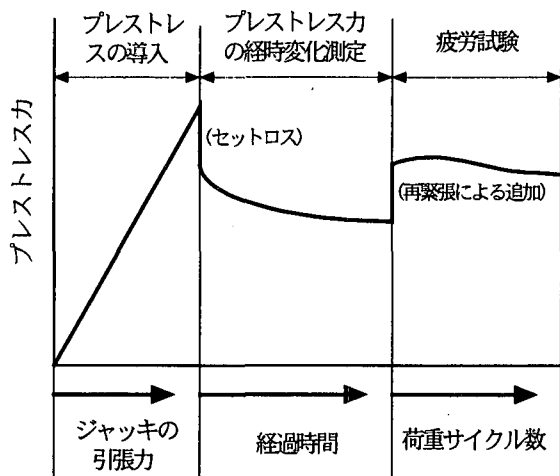


図-1 プレストレス力モニタリング実験計画

疲労試験を実施した。PC鋼材の引張力計測実験の内容は、PC鋼より線の引張試験における引張力計測、プレストレス導入における引張力計測、緊張材定着時のセットロス計測、緊張材のリラクセーションやコンクリートのクリープおよび乾燥収縮などによるプレストレス力経時変化の計測、梁が破壊するまでの載荷試験における応力計測、繰返し荷重履歴後の引張力計測、再緊張における引張力計測である。

PCS4について、プレストレス導入の直後に静的載荷試験を行った。

PCS2について、プレストレス導入後プレストレス力の経時変化を測定し、再緊張した直後に静的載荷試験を行った。

PCS3について、プレストレス導入後プレストレス力の経時変化を測定し、再緊張を行ってから疲労試験を実施した。プレストレス補強時のEMセンサによる計測効果の把握を目的として、疲労試験中、適時に繰返し載荷を中断して再緊張による緊張材力の計測をした。

PCS1について、プレストレス導入後プレストレス力の経時変化を測定し、疲労試験を行った。適時繰返し載荷を中断して、荷重無し、下限荷重、上限荷重における緊張材力を計測した。

3. EMセンサを用いた応力計測方法

3.1 計測原理

図-2は磁性体のヒステリシス環線である。横軸が磁界、縦軸が磁束密度である。強磁性体である鋼材の場合、磁界を強くするにつれて磁束密度が高くなり、さらに大きな磁界を与えると飽和状態になる。その後に磁界を弱めると減少率が安定した下降経路がある。鋼材の透磁率は応力と温度の影響を敏感に受ける。本応力計測方法は、応力計測を必要とする鋼材において、透磁率の測定により応力を計測しようとするものである。図中に示すよう

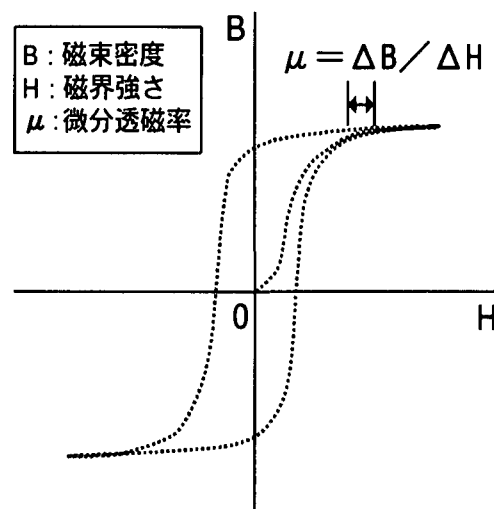


図-2 ヒステリシス環線

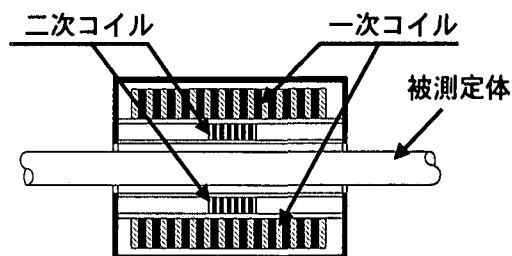


図-3 EMセンサ

に安定した経路における微分透磁率を用いれば、鋼材の特性として、鋼材の微分透磁率を応力および温度の関数として高精度に表現することができる。これがEMセンサの基本原理である⁴⁾。

3.2 計測システム

EM (Elastic-Magnetic) センサは図-3に示すような円筒型コイルである。鋼材に接着する必要がないことから、任意位置に容易にセットすることができる。1次コイルおよび2次コイルからなり、温度センサを内部の鋼材に設置できるようにしている。

計測システムは、現場測定における利便性を配慮してつくられた。電源装置、計測器、ノートパソコン、EMセンサから構成される。24VDC/100VAC電源からの電気をコンデンサに蓄えて、200~300Vのパルス電圧を1次コイルに印加すると2次コイルに誘導電流が発生する。誘導電流の電圧測定から透磁率を計測する。また、それと同時に鋼材の温度を計測する。透磁率計測値および温度計測値をもとにリアルタイムで応力を計測する。

3.3 キャリブレーション

構造物における鋼材の応力計測を行う場合、最初に、まだ荷重を受けたことがない同種の鋼材について、引張

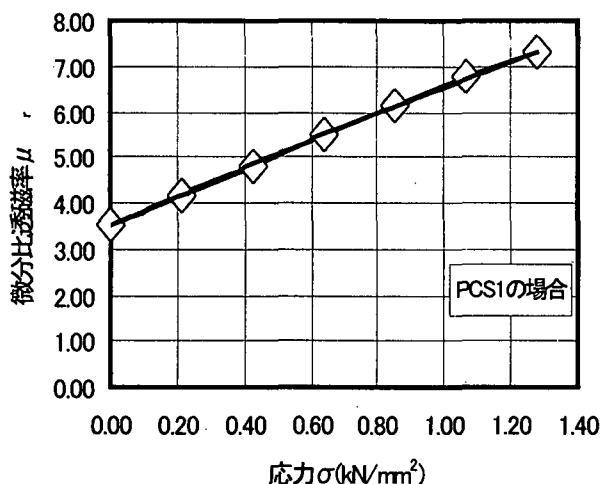


図-4 一定温度における微分比透磁率と応力との関係

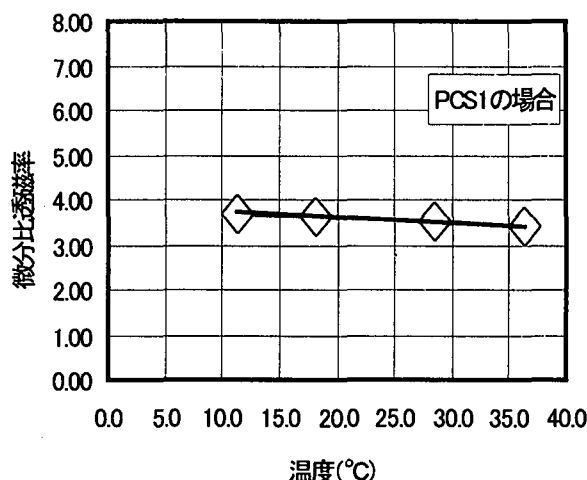


図-5 一定応力における微分比透磁率と温度との関係

試験を行い、それぞれの応力に対応して透磁率および温度を測定する。その結果から、応力を透磁率と温度の関数(キャリブレーション関数という)で表現する。その関数が計測対象鋼材の透磁率特性である。つぎに、計測対象となっている鋼材において透磁率と温度を計測する。その透磁率および温度をキャリブレーション関数にあてはめて応力に関する方程式を作る。これにより、鋼材の応力を解くことができる。

まだ力を受けた経験のない鋼材について、微分比透磁率 μ_r を応力 σ および温度 T の関数で表す。近似精度を保ち、 μ_r と T とが与えられた場合の σ を容易に解くために、 μ_r を σ の2次式と T の1次式とで近似する。

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

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

$$\mu_r(\sigma, T) = \mu_r(0, T) + m_1 \sigma + m_2 \sigma^2 \quad (2)$$

$$\mu_r(0, T) = \mu_r(0, 0) + \alpha T \quad (3)$$

式(2)における $\mu_r(0, T)$ 、 m_1 、 m_2 は一定温度 T における

鋼材の引張試験により決定する。式(3)における $\mu_r(0, 0)$ 、 α は、無応力状態において、鋼材の温度に伴う微分比透磁率の測定により決定する。

図-4 は、 $30 \pm 1.5^\circ\text{C}$ の温度環境で行った鋼より線についての実験結果である。相関係数が0.9998である高い精度のキャリブレーション結果が得られた。図-5 は、恒温槽の中に鋼より線を入れて各温度に対する鋼より線の微分比透磁率を測定した結果である。相関係数が0.9969のキャリブレーション結果がえられた。

各種鋼材について、予めキャリブレーションを済ませておけば、計測が要求される鋼材の応力は、透磁率と温度を計測することにより、式(1)を用いて算定することができる。

4. 供試体

供試体は図-6 に示したアウトケーブル方式のPC梁である。長さを2100mmとし、断面は幅を150mm、高さを180mmとした。端部は緊張材を定着できるように長方形断面とし、内部は緊張材およびEMセンサを設置できるような溝形断面とした。溝は幅50mm、高さ120mmである。緊張材の有効高さは120mmである。

コンクリート用材料は、普通ポルトランドセメント、千葉県房総産の山砂および山砂利である。コンクリートの示方配合を表-1 に示し、材齢28日におけるコンクリートの強度試験結果を表-2 に示した。使用したPC鋼材

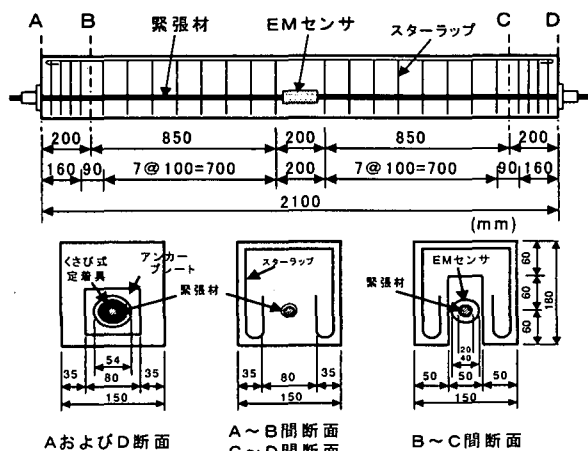


図-6 供試体

表-1 コンクリートの示方配合

最大寸法 (mm)	スラップ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m³)				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤 (ml)
20	7.5	5.0	47	40.9	160	340	720	1060	34

表-2 コンクリートの性質

供試体の記号	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
PCS1, PCS2	35.4	2.96	28900
PCS3, PCS4	37.1	3.08	32500

表-3 PC鋼材の性質

種類	降伏荷重 (kN)	引張荷重 (kN)	ヤング係数 (kN/mm ²)
SWPR7BN φ15.17mm	264	235	191

は JIS G3536 SWPR7BN の鋼より線である。その性質を表-3 に示した。スターラップには SD295A φ6mm の異形棒鋼を用いた。

PCS1 および PCS2 は、同一バッチのコンクリートを使用した。PCS1 は疲労試験に使用し、PCS2 は静的載荷試験に使用した。PCS3 および PCS4 は、同一バッチのコンクリートを使用した。PCS3 は疲労試験に使用し、PCS4 は静的載荷試験に使用した。PCS1 および PCS2 は材齢 71 日、PCS3 および PCS4 は材齢 57 日にセンターホールジャッキを用いてプレストレスを導入した。鋼より線の引張強さの 70% まで緊張したところでくさびにより定着した。

5. 鋼より線の引張試験

製品に付けられている引張試験成績表は、図-7 におけるタイプ A のひずみセンサによるひずみ測定値を用いて作られる。タイプ W のようにひずみゲージを直接鋼より線に接着して測定したヤング係数は、試験成績表の値と異なる。本研究においてはタイプ W による計測を行う必要があるため、そのひずみによる応力-ひずみ関係を作った。図-8 にその結果を示す。axial-stress - axial-strain 関係がタイプ A であり、ヤング係数は 191 kN/mm² である。axial-stress - wire-strain 関係がタイプ W であり、ヤング係数は 210 kN/mm² である。

EM センサによる引張力計測は、19.6 kN 毎に、降伏後においてはわずかな荷重刻み毎に行った。EM センサによる計測値 Y と試験機荷重 X との関係を図-9 に示した。Y = 1.013 X の関係が相関係数 0.9997 で得られた。試験機荷重に対する EM センサ計測値の誤差が 1.3% で、全荷重範囲にわたり両計測値はほぼ一致している。このことから鋼材応力の全範囲における計測に EM センサの利用が可能であるといえる。

タイプW

タイプA

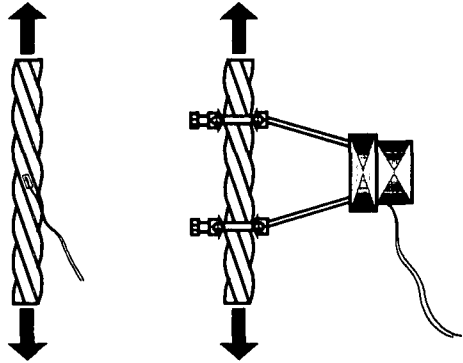


図-7 鋼より線に装着したひずみセンサ

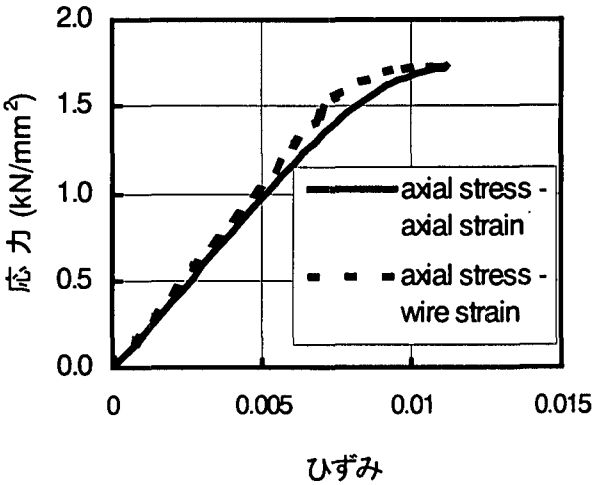


図-8 鋼より線の応力-ひずみ曲線

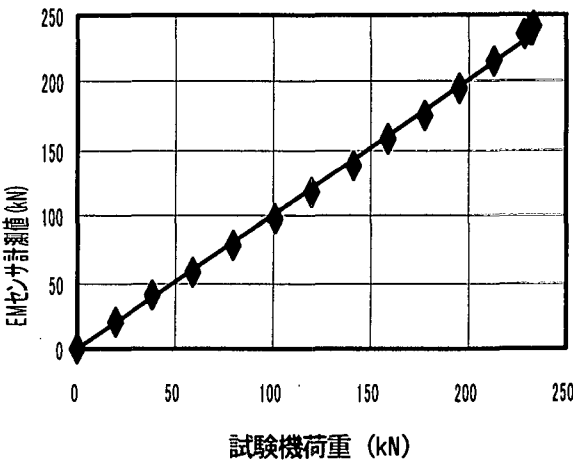


図-9 EMセンサによる計測値と試験機荷重の関係

6. プレストレス導入におけるプレストレス力計測

ジャッキにより緊張材に引張荷重を加えた。梁の定着端部にセットしたロードセル(PCS1、PCS4のみ)、梁中央の緊張材にセットしたEMセンサおよびひずみゲージによるプレストレス力計測結果を図-10に示した。ジャッキによる引張荷重は、ジャッキに付属したロードセルにより測定した。引張荷重を19.6kNずつ増加させてプレストレス力を計測した。鋼より線の引張強さの70%に達したところでジャッキを開放し、くさびを用いて定着した。EMセンサ、端部ロードセル、ひずみゲージにより、定着直後のプレストレス力を計測して、各センサにより計測したセットロスと比較した。

EMセンサ、端部ロードセル、ひずみゲージによる計測値を評価するために、センサによる計測値Yとジャッキ荷重Xとの関係について原点を通る直線により近似させた。図-10にその近似直線を描いた。その直線の傾きはジャッキ荷重に対するセンサ計測緊張材力の倍率である。ジャッキに付属のロードセルは精確にセットし、セット状態のまま荷重検定をした。ジャッキ荷重が信頼できるものとすれば、くさびが開放された状態での直線緊張

であることから、摩擦損失もなく、直線の傾きが1に近いほど精度が良いといえる。緊張荷重をXとして、各種センサによりプレストレス力Yの測定結果を比較する。なお、ひずみゲージによる応力計測については、前述のタイプWの鋼材ヤング係数 210kN/mm^2 を用いた。

表-4に4体の供試体における計測実験から得られたセンサ計測値とジャッキ荷重との近似直線および相関係数を示した。どの直線とも高い相関係数をもち、それぞれの直線は精度よく近似されている。したがって、直線の傾き(倍率と呼ぶ)の平均値およびバラツキがセンサの信頼性を表すことになる。

EMセンサの場合、倍率は0.971~1.002の範囲で平均値が0.984、標準偏差が0.013である。平均的にはジャッキ荷重とくらべて1.6%だけ小さく、計測毎のバラツキがきわめて小さい。計測値の95%が信頼できる倍率は 0.984 ± 0.025 である。

端部ロードセルの場合、倍率は0.925~0.977の範囲で平均値が0.951、標準偏差が0.037である。平均的にはジャッキ荷重とくらべて4.9%だけ小さく、計測毎のバラツキが大きい。計測値の95%が信頼できる倍率は 0.951 ± 0.073 である。

ひずみゲージの場合、倍率は0.955~1.048の範囲で

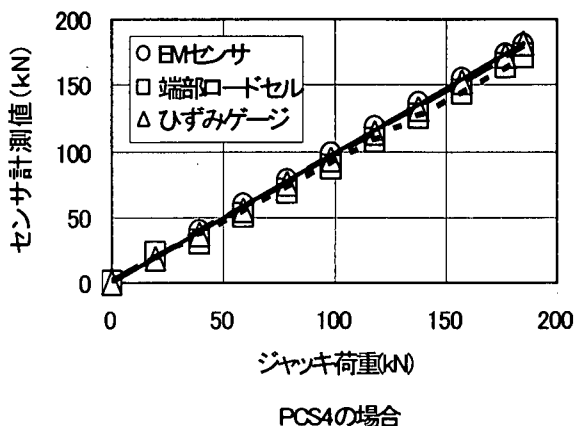
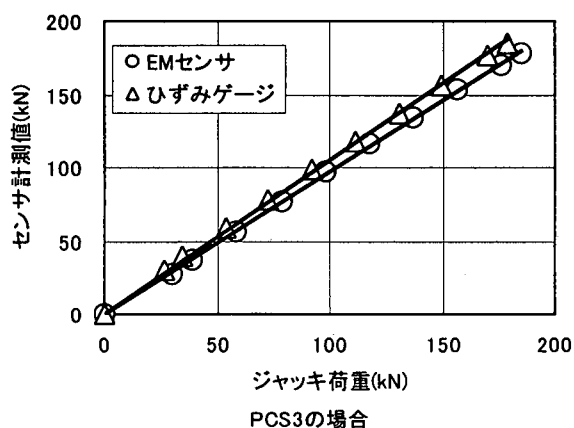
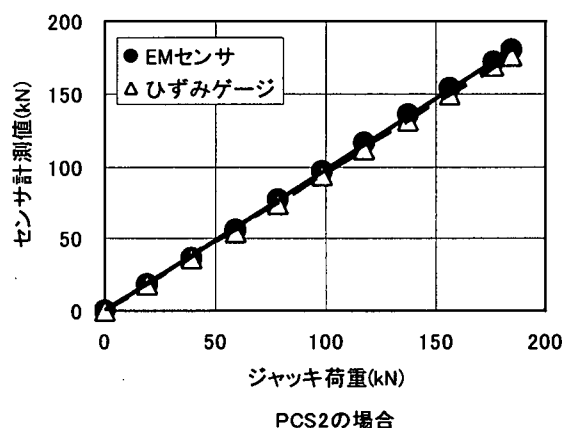
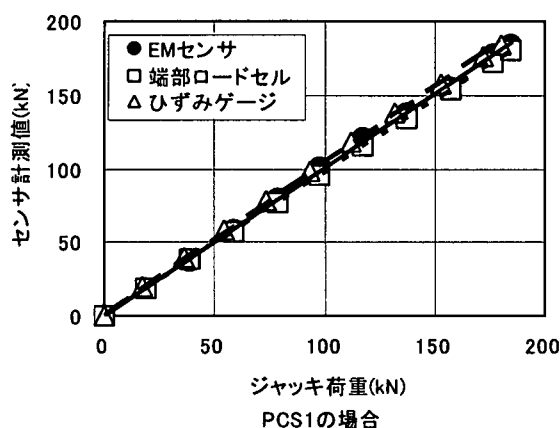


図-10 各種センサによるプレストレス力の計測結果

表-4 センサ計測値Yとジャッキ荷重Xの関係

供試体	EMセンサ		端部ロードセル		ひずみゲージ	
	関係式	相関係数	関係式	相関係数	関係式	相関係数
PCS1	$Y=1.002X$	0.9993	$Y=0.977X$	1.0000	$Y=1.036X$	0.9993
PCS2	$Y=0.982X$	0.9997	—	—	$Y=0.955X$	0.9998
PCS3	$Y=0.971X$	0.9996	—	—	$Y=1.048X$	0.9991
PCS4	$Y=0.983X$	0.9998	$Y=0.925X$	0.9979	$Y=0.970X$	0.9996
平均	$Y=0.984X$		$Y=0.951X$		$Y=1.002X$	

平均値が1.002、標準偏差が0.047である。平均的にはジャッキ荷重とくらべて0.2%だけ大きく、計測毎のパラッキが大きい。計測値の95%が信頼できる倍率は 1.002 ± 0.092 である。

計測値の95%が信頼できる倍率は、EMセンサが0.984~1.009、端部ロードセルが0.878~1.024、ひずみゲージが0.910~1.094である。

以上のことから、データ数が少ないので明確ではないが、本実験の範囲では、EMセンサーの信頼度は、ロードセルおよびひずみゲージよりもかなり高いと言える。その原因として次のことが考察される。端部ロードセルは、鋼より線を通して、PC梁のアンカープレートとくさび定着具との間に挟みこんでセットする。ロードセルの中心に対する鋼より線の偏心、複数からなるくさびの挿入差などにより、純圧縮を受けるべきロードセルへの偏心圧縮作用の生起が考えられる。ひずみゲージの場合、7本の素線からなる鋼より線において対称位置の素線の両側面に貼付したひずみゲージが7本の素線の平均ひずみを安定して検出できるかどうかの問題がある。それらと比較して、EMセンサは、セットによる拘束を受けることなく、原理的にも全素線の応力積分値が鋼より線の引張力となるように仕組みられている。

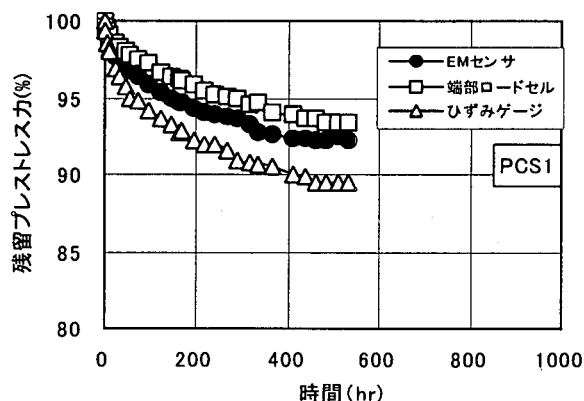


図-11 PCS1におけるプレストレスカの経時変化

表-5 定着前後のプレストレスカ

供試体	ジャッキ		EMセンサ		端部ロードセル		ひずみゲージ	
	定着前 (kN)	定着後 (kN)	定着前 (kN)	セットロス (%)	定着前 (kN)	定着後 (kN)	セットロス (%)	定着前 (kN)
PCS1	185	185	139	24.6	180	128	28.9	180
PCS2	184	180	134	25.6	—	—	—	177
PCS3	185	178	130	27.0	—	—	—	179
PCS4	185	180	140	22.2	173	124	28.3	181

定着前後のプレストレスカの計測値を表-5に示した。両定着間距離が短いことから、大きなセットロスが現れた。セットロスは、いずれのセンサにも共通して、PCS3、PCS2、PCS1、PCS4の順に大きい。この原因としてくさびによる定着効果に施工誤差が生じたと考えられる。また、いずれの供試体にも共通して、端部ロードセル、ひずみゲージ、EMセンサの順に大きなセットロスが生じている。セットロスの平均値は、端部ロードセルの場合に28.6%、ひずみゲージの場合に27.9%、EMセンサの場合に24.9%である。センサによるセットロス平均値の最大差は3.7%であり、応力モニタリングにおいて無視できない値である。本モニタリング実験において、計測差がPC梁の終局強度に及ぼす影響について後で検討する。

7. プレストレスカ経時変化の計測

20℃の室内に放置した供試体について、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮、PC鋼材のリラクセーションが複合して生じるプレストレスカの減少量を計測した。PCS1にはEMセンサとロードセルおよびひずみゲージをセットし、PCS2およびPCS3にはEMセンサおよびひずみゲージをセットした。EMセンサは梁中央の緊張材にセットした。端部ロードセルは定着端アンカープレートとくさび定着具との間にセットとした。ひずみゲージは梁中央の緊張材における対称両側面に貼付した。プレストレス導入直後を原点として、時間が経ってからのプレストレスカを計測した。供試体PCS1についてはEMセンサ、端部ロードセル、ひずみゲージを用いた。供試体PCS2についてはEMセンサ、ひずみゲージを用いた。いずれの場合も、プレストレス導入直前における緊張材でプレストレスカを計測した。PCS1およびPCS2についての計測結果をそれぞれ図-11および図-12に示した。縦軸は残留プレストレスカ、横軸は経過時間である。

図-11によれば、残留プレストレスカは全般にわたり端部ロードセル、EMセンサ、ひずみゲージの順に大きい。端部ロードセル、EMセンサ、ひずみゲージの計測

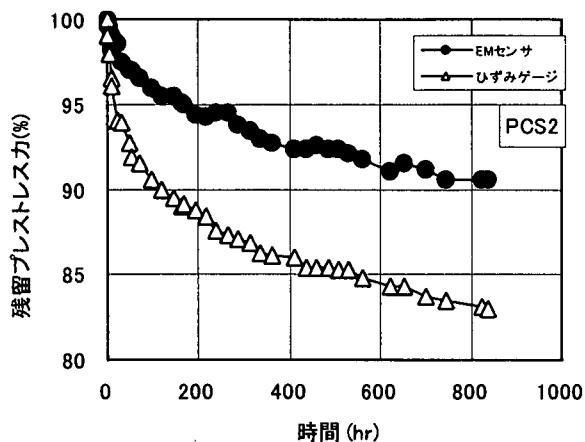


図-12 PCS2におけるプレストレス力の経時変化

値は、200 時間においてそれぞれ 95.5、94.1、92.1%、400 時間においてそれぞれ 93.8、92.4、90.1%、500 時間においてそれぞれ 93.4、92.3、89.5%である。EMセンサによるプレストレス力は、端部ロードセルに比べて、1.0～1.4%小さく、ほぼ一定の差が保たれている。ひずみゲージによるプレストレス力は、EMセンサに比べて、2%以上小さく、時間経過につれてその差が拡大している。図-12によれば、EMセンサおよびひずみゲージの計測値は、200 時間においてそれぞれ 94.3、88.8%、400 時間においてそれぞれ 92.4、85.9%、500 時間においてそれぞれ、92.2、85.2%である。ひずみゲージによるプレストレス力は、EMセンサに比べて、200 時間において 5.5%小さく、時間経過につれてその差が拡大している。図には表していないが、PCS3 の場合に、200 時間における残留プレストレス力は、EMセンサにより 94.5%、ひずみゲージにより 91.2%が計測された。

数週間にわたる測定ではクリープや零点移動が生じるとされているひずみゲージによると、プレストレス力残留率は、他のセンサによる場合よりかなり小さく、供試体ごとの測定値のバラツキが大きい。EMセンサによる計測値は、併設したロードセルのそれと近い値を示し、供試体ごとのバラツキが供試体特性のバラツキに対応すると思われる程度に小さい。少ないデータの範囲であるが、EMセンサにより信頼できる計測が行えると思われる。

8. 載荷試験

8.1 載荷方法およびセンサ装着状況

載荷システムおよびセンサ装着状況を図-13 に示した。載荷システムは最大荷重 200kN のパルセータ型疲労試験機と門形載荷装置からなる。静的載荷試験と疲労試験とも同じ載荷形式とした。スパン 2000mm の単純支持である。スパン中央について対称な間隔 200mm の 2 点振り分け荷重を作用させた。

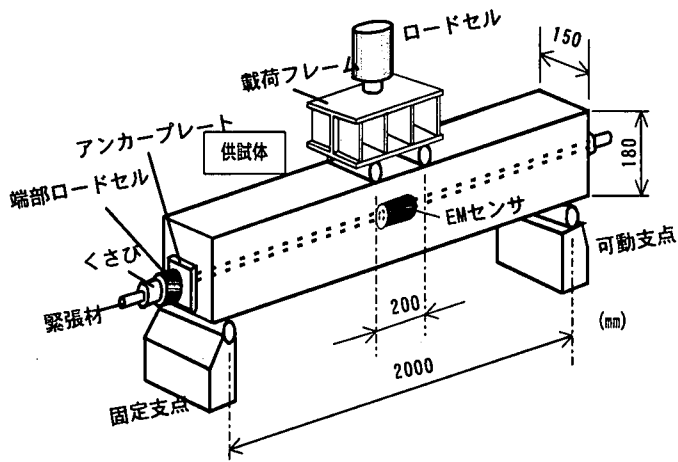


図-13 載荷方法およびセンサ装着状況

図-13 に示すように、すべての梁においてスパン中央の緊張材に EM センサをセットし、ひずみゲージ 2 枚を緊張材の対称表面に貼付した。圧縮縁コンクリートにひずみゲージを貼付した。PCS1 および PCS4 において、定着部のアンカープレートくさび定着との間にロードセルを装着した。スパン中央に変位計を取り付けた。

8.2 静的載荷試験

荷重は、漸増させてひびわれが発生した後除荷し、漸増させて最大ひびわれ幅が 0.2mm に達した後除荷し、漸増させて最大ひびわれ幅が 0.4mm に達した後除荷し、破壊するまで漸増させた。

供試体は、PCS2 および PCS4 である。PCS4 はプレストレスの導入に引き続いて静的載荷試験を実施した。PCS2 は、載荷試験の直前に初緊張と同じよう PC 鋼材引張強さの 70% までジャッキで緊張した後ジャッキを開放してくさびにより緊張材を定着させた。

PCS4 の場合、ひびわれ荷重が 28.9kN、0.2mm 最大ひびわれ幅荷重が 29.4kN、0.4mm 最大ひびわれ幅荷重が 31.1kN、破壊荷重が 36.6kN である。破壊形式はコンクリートの曲げ圧縮破壊である。荷重と緊張材力計測値との関係を図-14 に表した。載荷前の緊張材力はセンサによって異なる。その原因については定着前後のプレストレス力を示した表-5 に見られる。荷重に伴う緊張材力の増加量は、ひびわれが発生するまではどのセンサもほぼ同じ傾向を示している。ひびわれが発生した後、緊張材力の増加率が大きくなり、EM センサと端部ロードセルはほぼ同じ変化が見られるが、ひずみゲージではそれより変化率が大きい。

PCS2 の場合、ひびわれ荷重が 27.5kN、0.2mm 最大ひびわれ幅荷重が 30.8kN、0.4mm 最大ひびわれ幅荷重が 31.4kN、破壊荷重が 36.5kN である。破壊形式はコンクリートの曲げ圧縮破壊である。載荷直前の緊張力について、EM センサによる計測値は PCS4 の場合に近い値を示している。ひずみゲージによる計測値は、PCS4 の場合より

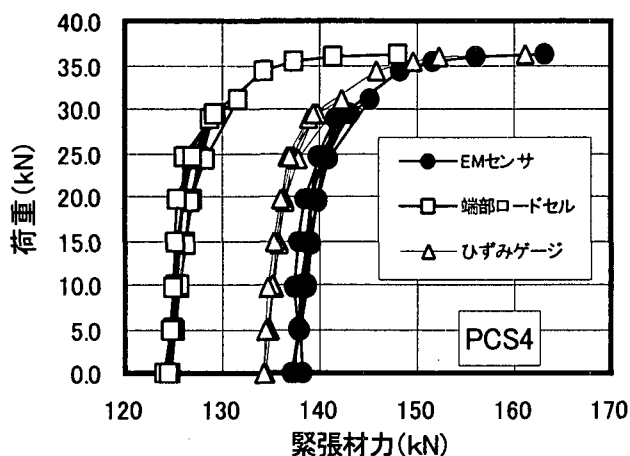


図-14 静的載荷における荷重と緊張材力との関係 (PCS4)

も大幅に小さい。これは、ひずみゲージがプレストレス力の減少量を大きく計測したことによると考察される。ひびわれが発生した後においてはPCS4の場合と同様の傾向が現れた。荷重による緊張材力増加量の計測ではEMセンサはロードセルとほぼ同じ計測傾向を示した。

8.3 疲労試験

繰返し荷重を受けたPC梁における緊張材の引張力モニタリング実験を行うために疲労試験を実施した。

疲労試験はPCS1およびPCS3について行った。図-13に示した載荷形式で、図-16に示す4.2Hzの繰返し荷重を載荷した。いずれの場合も下限荷重は10kNである。PCS1の場合、プレストレス力の経時変化計測に続いて疲労試験を行った。上限荷重は、圧縮縁コンクリートひずみが0.001となる荷重である28.4kNとして180万回まで載荷し、その後、圧縮縁コンクリートひずみが0.0014となる荷重である29.4kNとして450万回まで載荷した。適時、試験機を止めて、除荷時、下限荷重時、上限荷重時の緊張材力を計測した。450万回で疲労試験を打ち切って静的載荷試験をした。33.4kNの荷重でコンクリート

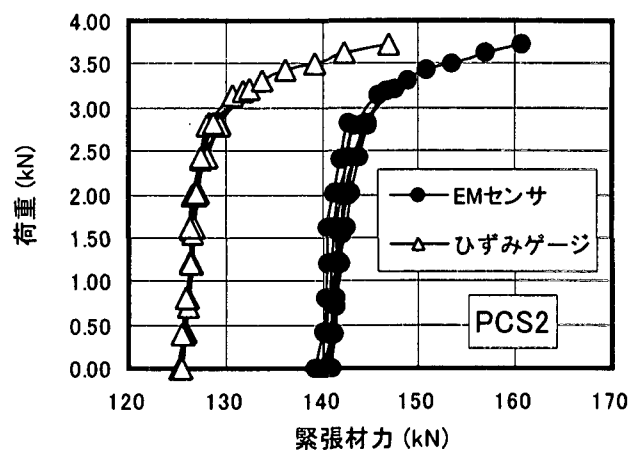


図-15 静的載荷における荷重と緊張材力との関係 (PCS2)

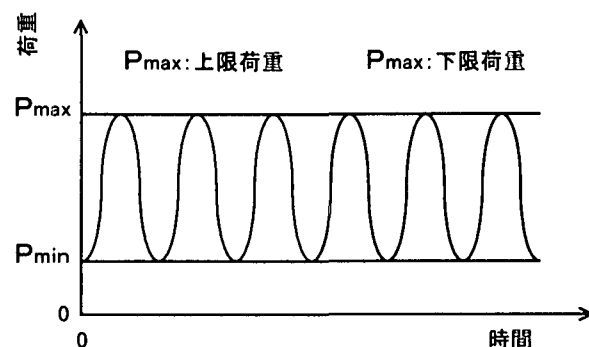


図-16 繰返し荷重

の曲げ圧縮破壊によりPC梁が破壊した。

PCS3の場合、載荷直前に初緊張と同じようにPC鋼材引張強さの70%までジャッキで緊張した後ジャッキを開放してくさびにより緊張材を定着させた。上限荷重は、圧縮縁コンクリートひずみが0.001となる荷重である28.8kNとした。300万回で再緊張した後で上限荷重を32.2kNに増やした。314.5万回の荷重載荷で疲労破壊した。破壊形式は圧縮縁コンクリートの圧縮破壊である。疲労試験荷開始前、125万回の荷重履歴後、300万回の荷重履歴後に再緊張試験を行い、緊張材力を計測した。

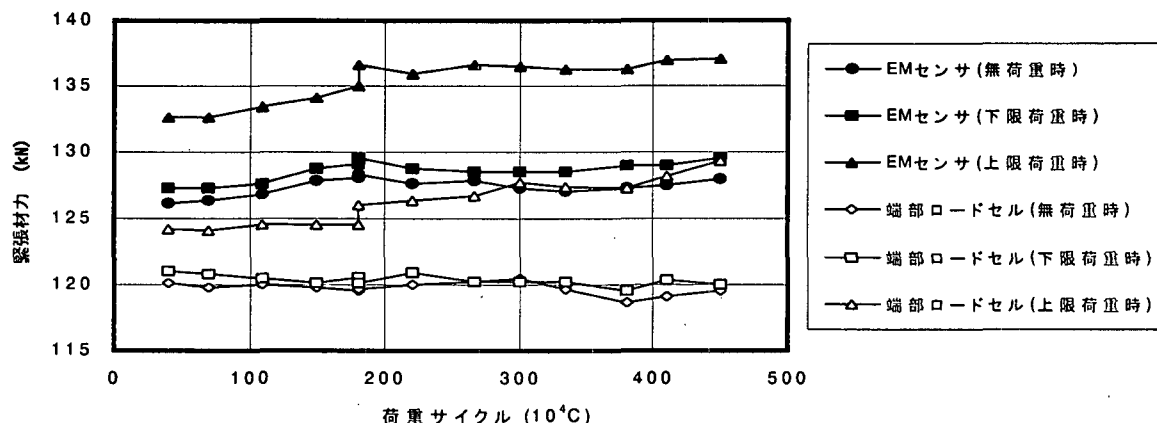


図-17 荷重サイクルに伴う緊張材力の変動

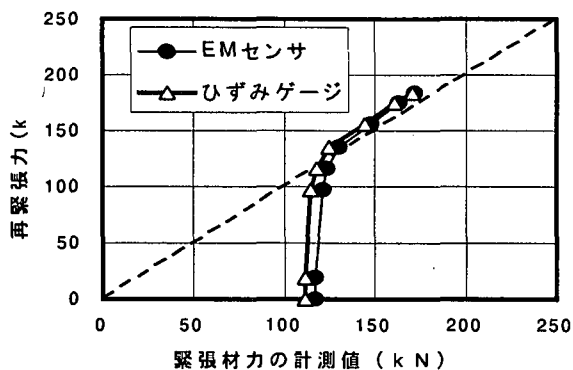


図-18 再緊張による緊張材力の計測

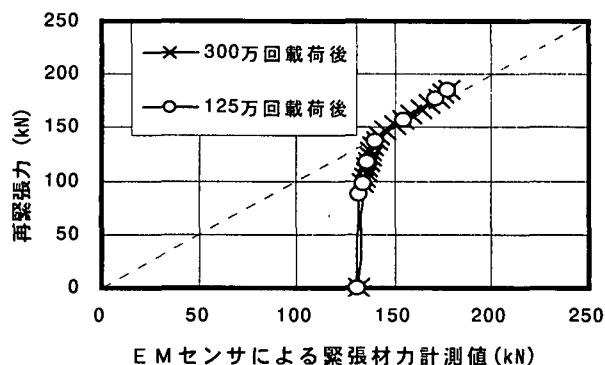


図-19 繰返し荷重履歴後の再緊張による緊張材力の計測

8.4 繰返し荷重履歴後の緊張材力の計測

PCS1 について、適時に疲労試験を中断し、荷重が0、下限荷重、上限荷重のときの緊張材について、EMセンサと端部ロードセルにより計測した。

図-17 に荷重サイクルに伴う緊張材力変動を表した。出だしの値に、EMセンサとロードセルとの間で荷重による緊張材力増加量以上の差がある。これは、EMセンサとロードセルによる緊張時の応力計測の差、両センサによるセットロス計測の差、緊張材のリラクセーションとコンクリートのクリープおよび乾燥収縮によるプレストレス力の減少量についての計測差が累計されたものである。疲労試験直前のプレストレス力計測値は、表-5および図-11により、EMセンサで128kN、端部ロードセルで119kNである。上限荷重を増やした180万回において、いずれのセンサとも荷重増加の影響を計測している。荷重履歴回数に伴う緊張材力の変化量については、両センサ間で幾分起伏の違いがあるが、同じような傾向を示している。

繰返し荷重履歴後の緊張材力モニタリングにおいて、EMセンサとロードセルは、荷重履歴回数に伴う緊張材力の変化量を同じように計測すると言える。

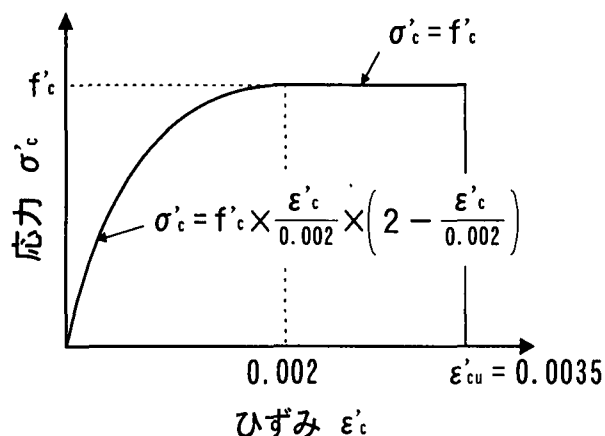


図-20 コンクリートの応力-ひずみ曲線

8.5 再緊張したときの緊張材力の計測

再緊張による補強における正しい緊張材力の検出方法を検討するために、再緊張したときの緊張材力の計測を行った。PCS3において、疲労試験前、125万回の荷重履歴後、300万回の荷重履歴後に、定着端から突き出して残した緊張材をセンターホールジャッキに通して再緊張した。

疲労試験前の再緊張におけるジャッキの再緊張力と緊張材力との関係を図-18 に示した。緊張材力の計測はスパン中の緊張材にセットしたEMセンサおよびひずみゲージを用いて行った。図中の破線においてジャッキの緊張力と緊張材力が等しい。緊張材力は、ジャッキの緊張力が小さいうちはわずかに増え、緊張力が大きくなると破線を超えて破線と平行になる。これは摩擦抵抗などが加わり、緊張材力よりも緊張力が大きくなることを表している。定着くさびが緩んだと観察されるのは計測線が破線と平行になってからである。したがって、そのときのジャッキ荷重を緊張材力と見積もることは過大評価したことになる。繰返し荷重履歴後の再緊張による緊張材力の計測結果を示す図-19 においても同様の傾向が現れている。正確な緊張材力を検出ためには内部の緊張材力を直接に計測することが求められる。ひずみゲージは、EMセンサに似た傾向を示しているが、初期バランスを長く保持できないため、信頼できない。実在応力が測定できるEMセンサは最適である。

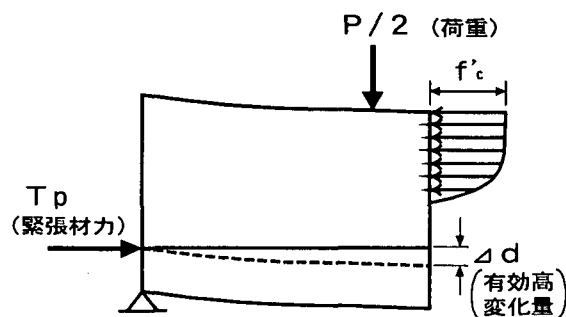


図-21 終局荷重計算モデル

表－6 静的載荷における終局荷重

供試体	終 局 荷 重 (kN)							静的載荷試験までの経歴
	実験値	EMセンサ計測緊張材力を用いた場合		端部ロードセル計測緊張材力を用いた場合		ひずみゲージ計測緊張材力を用いた場合		
		計算値	計算値/実験値	計算値	計算値/実験値	計算値	計算値/実験値	
PCS4	36.3	34.5	0.950	32.0	0.882	34.9	0.961	プレストレス導入直後に載荷試験
PCS2	36.5	34.0	0.932	—	—	31.0	0.849	レラクセーション、クリープ、乾燥収縮
PCS1	33.3	30.3	0.910	31.7	0.870	28.9	0.868	レラクセーション、クリープ、乾燥収縮 繰り返し荷重

9. 終局荷重

静的載荷試験を行った PC 梁について、試験時の緊張材力の計測値を用いて、終局荷重を計算した。用いたコンクリートの応力－ひずみ関係を図-20 に示した。アウトケープ PC 梁においてはたわみにより有効高さが変化するため、図-21 に示したモデルにより有効高さ変化量を考慮した終局荷重の計算を行った。たわみは実験値から採り、プレストレス力によるそり上りについては計算値を用いた。計算結果を表-6 に示した。プレストレス導入直後の静的載荷では、ひずみゲージによる緊張材力計測値を用いた計算値が実験値の 96.1%で、EMセンサによる場合が 95.0%である。数週間にわたるプレストレスの経時変化が生じた場合、繰返し荷重を受けた場合のいずれにおいてもEMセンサによる緊張材力計測値を用いた計算値が実験値に最も近い。

終局時の緊張材力には、プレストレスの導入、セットロス、緊張材の経時変化、荷重履歴などの影響が集積されている。したがって、この計算結果から、PC 梁における PC 鋼材の引張力モニタリングについてはEMセンサがロードセルやひずみゲージよりも優れていると考察される。

10. まとめ

EMセンサを用いて、PC 梁における PC 鋼材の引張力モニタリング実験を行った。各場面で引張力計測に用いたEMセンサについてまとめると

- (1) 鋼より線の引張試験において、応力全域について、EMセンサによる引張力測定は精度が高い。
- (2) プレストレス導入時の鋼より線の引張力計測において、EMセンサの信頼度は、ロードセルおよびひずみゲージよりもかなり高い。
- (3) EMセンサによる緊張材のセットロス計測値はロードセルおよびひずみゲージ計測値よりも小さい。
- (4) 長期にわたるプレストレス力残留率の計測結果から、長期モニタリングに対してEMセンサにより信頼で

きる計測が期待される。

- (5) PC 梁での荷重による緊張材力増加量の計測ではEMセンサはロードセルとほぼ同じ計測傾向を示した。
- (6) 繰返し荷重履歴後の緊張材力モニタリングにおいて、EMセンサとロードセルとは、荷重履歴回数に伴う緊張材力の変化量を同じように計測した。
- (7) 再緊張における緊張材力の計測においては、実在応力を計測できるEMセンサが適当である。
- (8) EMセンサによる緊張材力計測値を用いて計算した PC 梁の終局荷重計算値は各場面で実験値に近い。すなわち、各場面における計測でEMセンサは信頼性が高いと言える。その根拠としてEMセンサが拘束のない非接触型であることによると考察される。
- (9) 本計測方法はセンサ内における PC 鋼材の温度が全域にわたり一様であることを前提条件とする。キャリブレーションおよび現場計測においてその条件で計測する必要がある。

参考文献

- 1) 本城勇介, 上木淳, スミトロ・スナリオ, 松井義昌, 加登文士: 土木構造物の維持管理における検査の精度と頻度の影響に関する研究, 土木学会年次講演会概要集, Vol. 56, CS6-004, pp. 262~263, 10, 2001
- 2) Z. L. Chen, M. L. Wang, T. Okamoto and S. Sumitro, : A new magneto-elastic stress/corrosion sensor for cable-stayed bridge using measurement of anhysteretic curve, 2nd Workshop on ATUEDM, Kyoto, July 11-13, 2000
- 3) 黒川章二, 羅黄順, Ming L. Wang, 嶋野慶次: 磁歪センサによる各種鋼材の応力計測、プレストレストコンクリート技術協会 第11回シンポジウム論文集, pp. 101~106, 2000, 11
- 4) 羅黄順: EMセンサーによるPC鋼材の実応力測定、プレストレストコンクリート, Vol. 43, pp99~103, Nov, 2001

(2002 年 4 月 19 日受付)