

PC 梁における鉄筋の実応力計測によるプレストレスの推定について

木更津工業高等専門学校	正会員	○黒川章二
(株)計測リサーチコンサルタント	正会員	工学博士 羅 黄順
(株)千代田コンサルタント	正会員	肥田研一
木更津工業高等専門学校	正会員	嶋野慶次

1. はじめに

PC 構造物のヘルスマonitoringにおいて、プレストレスは必要不可欠な計測対象である。PC 部材に内在する PC 鋼材あるいは鉄筋の実応力を計測することができれば、プレストレスの推定が可能になる。鋼材の実応力計測は EM (Elasto-Magnetic) 実応力計測システムを用いて行うことができる^{1,2)}。本システムの計測原理は、鋼材における透磁率と応力および温度との間の相関性をもとにしている³⁾。鋼線、PC 鋼棒、異形鉄筋、PC 鋼より線、37φ7mm 鋼ストランドについて行った実応力計測において、ポリエチレンやビニールなどの被覆を傷つけることなく、精度のよい計測結果が得られた⁴⁾。PC テンドンに EM センサを装着して、プレストレスの導入、長時間の静置、繰返し荷重履歴後の静的載荷における外ケーブル PC 梁の PC テンドン引張力モニタリング実験を実施して、EM 実応力計測システムが諸荷重履歴を受ける長時間モニタリングに適合することが証明された⁵⁾。新設 PC 構造物の場合、PC テンドンに既製品の EM センサを容易に装着することができるが、既設構造物の場合、はつり出した PC テンドンに現場巻き EM センサを装着する。

既設構造物において PC テンドンのはつり出しが困難な場合、はつり出しが容易な位置にある鉄筋に EM センサを装着して、鉄筋の実応力計測にもとづいてプレストレスを推定することが考えられる。そこで、本研究においては、EM センサを装着した鉄筋の実応力計測から、PC 梁のプレストレスを推定した。EM センサを装着した PC テンダンの実応力計測、コンパレータによるコンクリートひずみ計測、ひずみゲージによるコンクリートひずみ計測による推定値と比較した。

2. EM 実応力計測システム

計測原理は鋼材の透磁率と応力および温度との相関関係である。図-1に示したマイナーヒステリシスのインクリメント透磁率が応力とほぼ直線関係に近い点を探し出して、インクリメント透磁率を応力および温度の関数として表現する。まだ力を受けたことがない鋼材でその相関性を解いておけば、供用中の鋼材のインクリメント透磁率と温度との測定によりその鋼材の実応力を計測することができる。

計測システムは、EM センサ、電源装置、計測器、パソコンにより構成される。EM センサは、図-2に示すように、一次コイル及び二次コイルと温度センサを内蔵した円筒型コイルである。一次コイルに変動電流を流すとコイル内部の磁界強さが変化し、ソレノイドの中の鋼材に磁束密度の変化が生じて、2次コイルに誘導電流が発生する。その誘導電流の電圧測定から鋼材の透磁率を計測する。

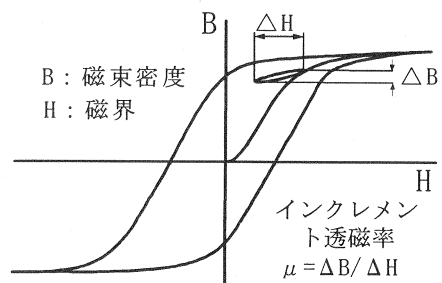


図-1 ヒステリシス環線

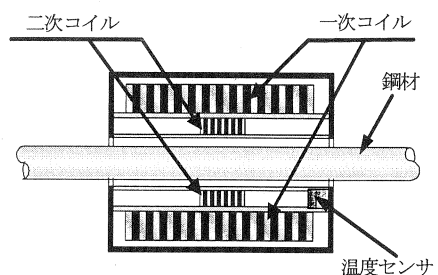
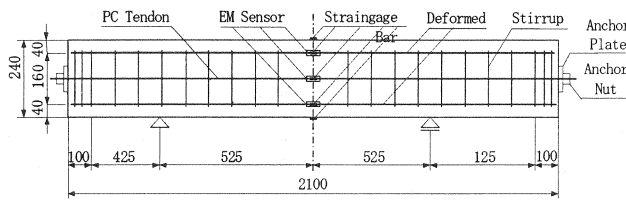


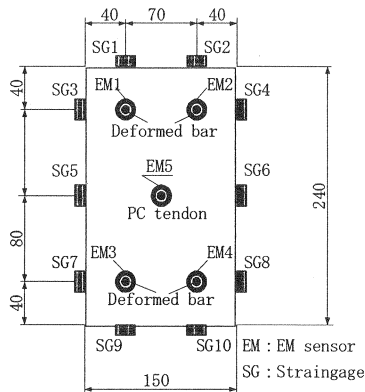
図-2 EMセンサ



図—3 供試体およびセンサ装着位置

3. 供試体およびセンサ装着位置

供試体は、図—3～4に示したポストテンション方式のPC梁で、PC tendonとコンクリートとを付着させたボンドPC梁 (BPCBと称す) と付着させないアンボンドPC梁 (UPCBと称す) である。長さを2100mmとし、断面は幅150mm、高さを240mmとした長方形である。シーに通したPC tendonを断面の図心位置に配



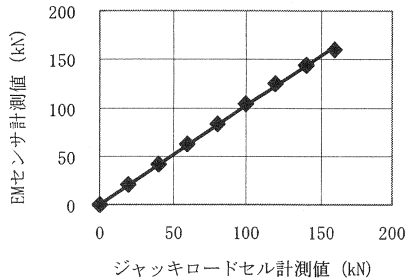
図—4 断面およびセンサ装着位置

置した。PC tendonには JIS G 3101 SBPR 1080/1230 φ15 の PC 鋼棒、主鉄筋には JIS G 3112 SD295A D13 の異形棒鋼、スターループには JIS G 3112 SD295A D6 の異形棒鋼を用いた。コンクリートは、普通ポルトランドセメントを用い、プレストレス導入時(材齢35日)に、圧縮強度が37.9MPa、引張強度が2.87MPa、ヤング係数が34400MPaである。材齢35日にプレストレスを導入した。導入引張力が160kNに達した時点で定着した。BPCBにはプレストレス導入直後にグラウトを注入した。

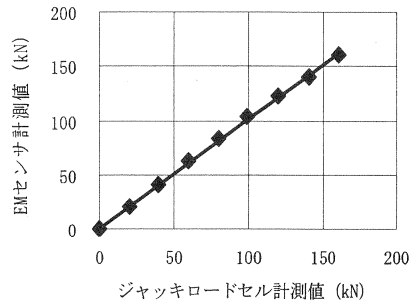
図—4にスパン中央断面における各種センサの装着位置を示した。EM1～4が異形鉄筋に装着したEMセンサである。EM5はPC tendonに装着したEMセンサである。SG1～10はコンクリート表面に接着したひずみゲージである。また、梁高さの中央線においてスパン中央対称として200mm間隔にコンパレータ(コンタクトゲージ)によるひずみ計測用の標点を梁の両側面に設定した。

4. プレストレス導入の計測実験

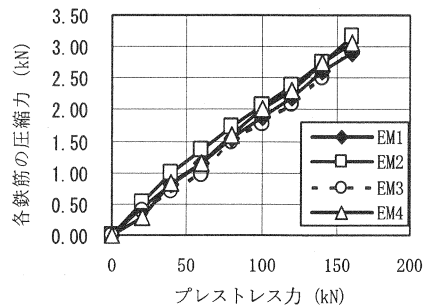
図—5, 図—6によれば、ジャッキロードセル計測値に対するPC tendonのEMセンサ計測値は、BPCBで1.024, UPCBで1.016, 平均で1.020である。図—7～10によれば、EMセンサによる鉄筋の平均圧縮力計測値は、計算値に対して、BPCBで1.080, UPCB



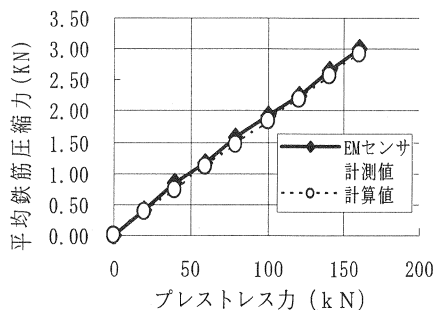
図—5 BPCBのPC tendonにおけるプレストレス力計測値



図—6 UPCBのPC tendonにおけるプレストレス力計測値



図—7 BPCBにおける各鉄筋のEMセンサ圧縮力計測値とプレストレス力との関係



図—8 BPCBにおける鉄筋の平均圧縮力とプレストレス力との関係

で1.040, 平均で1.060である。

ひずみゲージによるプレストレスひずみ計測結果を図-11~14に示す。計算値に対する平均計測値は、BPCBで1.075, UPCBで1.102, 平均で1.089である。計算値に対する計測値の値から判断すると、EMセンサによる鉄筋圧縮力計測の方が

ひずみゲージによるプレストレスひずみ計測より信頼できるといえる。

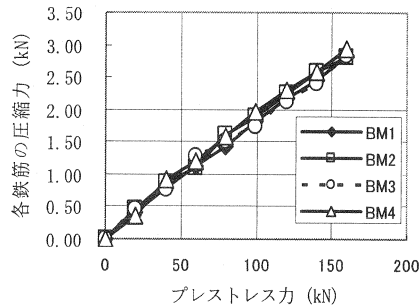


図-9 UPCBにおける各鉄筋のEMセンサ圧縮力計測値とプレストレス力との関係

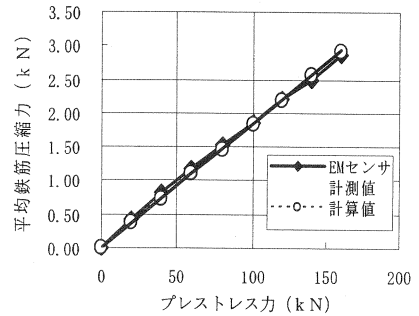


図-10 UBPCBにおける鉄筋の平均圧縮力とプレストレス力との関係

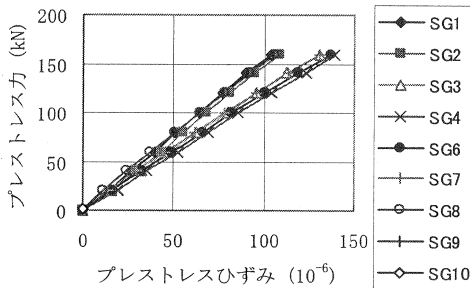


図-11 ひずみゲージによるBPCBのプレストレスひずみ計測結果

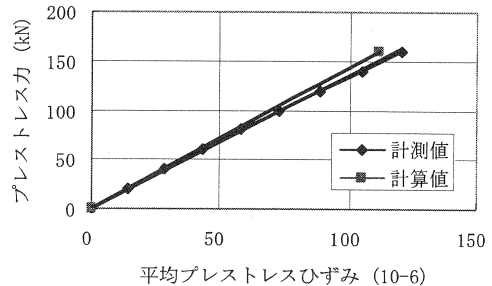


図-12 ひずみゲージによるBPCBのプレストレスひずみ計測平均値

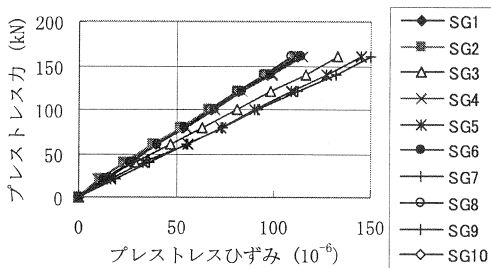


図-13 ひずみゲージによるUPCBのプレストレスひずみ計測結果

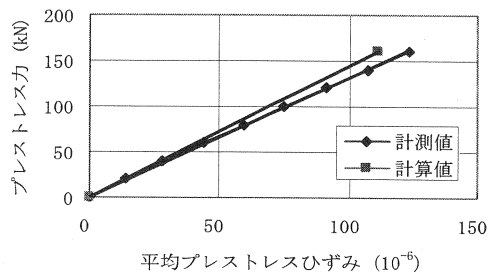


図-14 ひずみゲージによるUPCBのプレストレスひずみ計測平均値

5. 長期モニタリング実験

5. 1 実験内容

4種類の計測方法について実証実験を行った。表-1に計測実験名とその特徴を示した。計測-1ではEMセンサを使用して直接にPC tendonの引張力を計測する。計測-2では、EMセンサにより鉄筋の応力を計測し、その結果からコンクリートの乾燥収縮・クリープによるひずみを算定して、さらにPC tendonのリラ

表—1 計測実験記号とその特徴

計測実験名	計測-1	計測-2	計測-3	計測-4
使用センサ	EM センサ	EM センサ	コンパレータ	ひずみゲージ
測定量	応力	応力	ひずみ	ひずみ
測定対象物	PC テン ドン	鉄筋	コンクリート	コンクリート
コンクリートのク リープ・乾燥収縮	計測の必 要なし	計測が必要	計測が必要	計測が必要
PC テンダンのリ ラクセーション	計測の必 要なし	推定計算が 必要	推定計算 が必要	推定計算 が必要
プレストレス力	直接計測	推定計算	推定計算	推定計算

クセーションを推定したのちプレストレス力を計算する。計測-3はコンパレータにより、計測-4はひずみゲージによりコンクリートの乾燥収縮・クリープによるひずみを計測し、PC テンダンのリラクセーションを推定した後プレストレス力を計算する。

5. 2 PC テンダンのリラクセーション算定方法

導入プレストレス力に対する任意時刻の純リラクセーション値を推定し、その結果を用い、コンクリートのクリープ・乾燥収縮および PC テンダンのリラクセーションを同時に考慮した見かけのリラクセーションを計算した。PC テンダンの最終的な純リラクセーション R_{pn} は文献⁶⁾ により推定した。任意時間での PC テンダンの純リラクセーション値 R_{pt} は次式⁷⁾ により推定した。

$$\frac{R_{pt}}{R_{pn}} = \sqrt[3]{\frac{(2.21+m)m}{1+(3.6+m)m}} \quad (1)$$

ここに

m : プレストレス導入後の経過時間(月数、30日)

見かけのリラクセーションはコンクリートのクリープ・乾燥収縮および PC テンダンのリラクセーションを同時に考慮したつぎの推定式⁸⁾ により計算した。

$$R_{at} = \left\{ 1 - E_p \frac{\Delta \varepsilon_{cs} + \Delta \varepsilon_{cc}}{\sigma_{pt} - \sigma_{pc}} \right\} R_{pt} \quad (2)$$

ここに

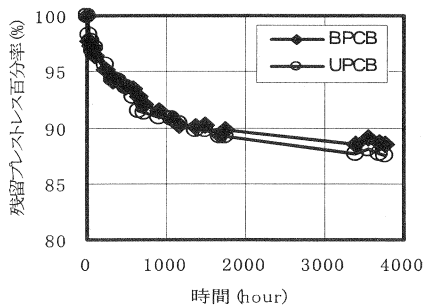
σ_{pt} : PC テンダンの初期引張応力

σ_{pc} : PC テンダンのリラクセーションが全く生じない限界応力

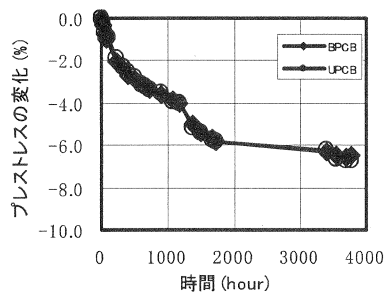
$$(0.5 f_{pu})$$

f_{pu} : PC テンダンの引張強度

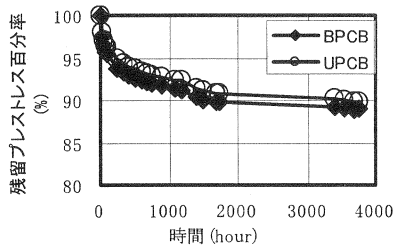
ε_{cs} : コンクリートの乾燥収縮ひずみ



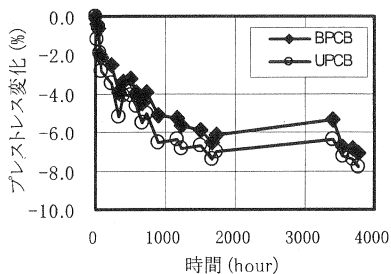
図—15 EM センサでのPC テンダンの応力計測による残留プレストレス



図—16 EM センサでの鉄筋応力計測に基づくコンクリートのクリープ・乾燥収縮によるプレストレスの変化



図—17 EM センサでの鉄筋応力計測に基づく残留プレストレス



図—18 コンパレータでのコンクリートひずみ計測に基づくコンクリートのクリープ・乾燥収縮によるプレストレスの変化

ϵ_{cc} : コンクリートのクリープひずみ

5. 3 プレストレスモニタリング実験

プレストレス導入直後のプレストレス力は、BPCB では 157.5kN、UPCB では 151.0kN である。材齢 35 日にプレストレスを導入し、その直後からモニタリングを開始した。終了までの時間は 3762 時間である。

計測-1 においてはプレストレス導入直前の応力をゼロとして PC テンダンの実引張力を計測した。残留プレストレス百分率と経過時間の関係を図-15 に表した。

計測-2 の場合、プレストレス導入直前の応力をゼロとして EM センサにより鉄筋応力を測定した。コンクリートと鉄筋との付着が完全であるとして、その結果から、プレストレス導入直後を原点として算定した鉄筋ひずみをコンクリートのクリープ・乾燥収縮ひずみと見なした。任意時刻におけるコンクリートのクリープ・乾燥収縮によるプレストレス力の減少率は図-16 に示すとおりである。これに PC テンダンのリラクセーション計算値を加味したプレストレスの残留百分率と時間との関係を図-17 に示した。ばらつきの少ない安定した状況を示した。

計測-3 の場合、プレストレス導入直後からコンパレータにより表面コンクリートのクリープ・乾燥収縮ひずみを測定した。図-18 によりかなりのばらつきがみられ、PC テンダンのリラクセーション計算値を加味したプレストレスの残留百分率と時間との関係は図-19 に示すとおりである。

計測-4 の場合、ひずみゲージにより表面コンクリートのクリープ・乾燥収縮ひずみを測定した。測定結果を示す図-20 によれば、プレストレスが、BPCB においては時間の経過につれて滑らかに減少しているが、UPCB においては初期に急激に減少してその後は BPCB に似た減少率を示した。プレストレス導入から 3762 時間後のひずみは、BPCB の場合、計測-2 の値の 79%、計測-3 の値の 73% であり、UPCB の場合、計測-2 の値の 124%、計測-3 の値の 108% である。このように、計測-4 の計測値は、計測-2 および計測-3 の計測値とかけ離れている。EM センサおよびコンパレータは被測定物と非接触であるが、ひずみゲージは被測定物に接着剤で貼付した。したがって、ひずみゲージのクリープや接着性能の低下が測定結果に影響したといえる。図-20 のデータに PC テンダンのリラクセーション値を加味したプレストレス残留百分率と時間との関係は図-21 に示す通りである。BPCB と比較して、UPCB では、コンクリートのクリープ・乾燥収縮によるプレストレスの大幅な減少に起因して、PC テンダンの見かけのリラクセーションがきわめて小さくなり、最終的な残留プレストレスの差は 1.2% である。

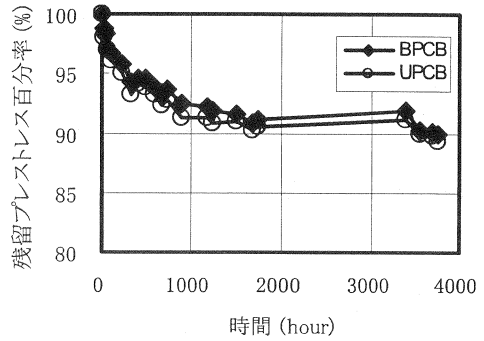


図-19 コンパレータを用いたコンクリートひずみ計測にもとづく残留プレストレス

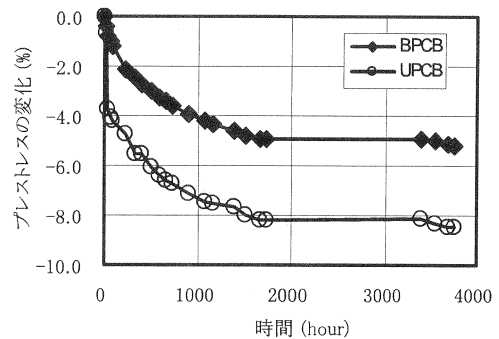


図-20 ひずみゲージを用いたコンクリートひずみ計測にもとづくクリートのクリープ・乾

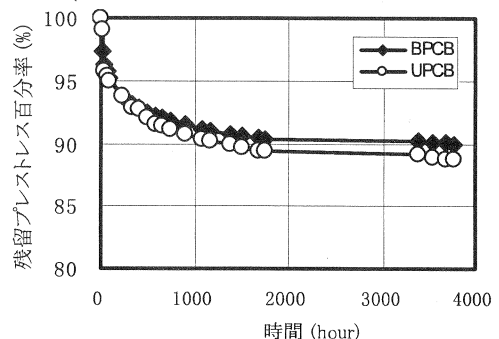


図-21 ひずみゲージを用いたコンクリートひずみ計測にもとづく残留プレストレス

プレストレス導入から 3762 時間後のコンクリートのクリープ・乾燥収縮によるプレストレス力減少率、PC テンダンのリラクセーションによるプレストレス力減少率、それらを合算したプレストレス力の減少率 η を表-2 にまとめた。ひずみゲージを用いた計測-4 を除くと、 η は 3 つの計測方法で近似した値を示している。したがって、計測-2 すなわち EM センサを用いて鉄筋の実応力を計測することによるプレストレスの推定方法は実用上十分な精度でプレストレスを推定することができると思われる。

表-2 3762 時間後のプレストレス力

実験記号	計測-1		計測-2		計測-3		計測-4	
	BPCB	UPCB	BPCB	UPCB	BPCB	UPCB	BPCB	UPCB
Rccs(%)	—	—	6.51	6.75	7.09	7.83	5.17	8.41
Rat (%)	—	—	4.55	3.44	4.43	3.24	5.92	2.74
η (%)	88.5	87.6	88.9	89.2	88.5	88.9	90.0	88.8
Rccs : コンクリートのクリープ・乾燥収縮によるプレストレス力減少率								
Rat : PC テンダンのリラクセーションによるプレストレス減少率								
η : プレストレス力の減少率								

6. まとめ

4 つの計測方法について得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 鉄筋に装着した EM センサにより、プレストレス導入時および長期間にわたり、信頼性の高いプレストレスの計測が可能である。この方法は既設の PC および RC 構造物のヘルスマonitoring に適している。
- (2) PC テンダんに EM センサを装着すれば、PC テンダンのリラクセーションの影響も含めて、直接にプレストレス力を精度よく計測することができる。新設 PC 構造物のヘルスマonitoring に最適である。
- (3) 長期計測において、ひずみゲージおよびコンパレータによるひずみ計測には大きなばらつきが生じるが、EM 実応力計測システムによる計測値のばらつきは小さい。

7. 参考文献

- 1) Chen, Z., Wang, M. L. : Magnet-elastic permeability measurement for stress monitoring in steel tendon and cables. Proc. of the SPIE 7th Annual Symposium on Smart Structures and Material, Health Monitoring of the Highway Transportation Infrastructure, Vol. 3995, pp. 492-500, 2000
- 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, Vol. 43, No. 6, Nov2001, pp. 99 ~103.
- 3) 黒川章二, 羅黄順, Ming L. Wang, 嶋野慶次: パルス型 EM 現象を利用したケーブルの応力測定について, 土木学会第 56 回年次学術講演会, CS6-053, pp. 360~361, 2001. 10
- 4) 黒川章二, 羅黄順, Wang, M. L., 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
- 5) 黒川章二, 羅黄順, Wang, M. L., 嶋野慶次: EM センサを用いた PC 鋼材の引張力モニタリング実験, 土木学会応用力学論文集, Vol. 5, pp. 817~826, 2002. 8
- 6) 土木学会: 2002 年制定コンクリート標準示方書[構造性能照査編], pp. 42~44, 2002. 4
- 7) 猪股俊司: プレストレストコンクリート部材中での PC 鋼材のリラクセーション, プレストレストコンクリート vol. 14, No. 3, 1972, 3
- 8) G. Drex : Interferens de Cause a effets dans le calcal des perts de precontrainte. Contributions techniques francaises. 7th Congress de FIP New Yok 1974