

(26) 主塔サドルにおける被覆PC鋼より線のフレットング疲労特性

住友建設(株) PC設計部 正会員 新井 英雄
 住友建設(株) 技術研究所 正会員 藤田 学
 同 上 正会員 ○梅津 健司
 北海道大学 工学研究科 正会員 上田 多門

1. はじめに

プレストレストコンクリート橋の外ケーブルのような曲げ配置半径の小さいPC鋼より線の疲労強度は、直線配置の条件下での疲労強度に比べ、フレットングが伴うため低下することが知られている。PC鋼より線のフレットング疲労性能に影響を及ぼす要因として、応力振幅、永久応力、相対滑り、腹圧力、被覆材の種類、保護管の材質、グラウト充填の有無等が挙げられるが、これらは相互に連成して作用するので、個々の要因を抽出して論ずるためには、適切な条件下で多種の疲労試験を実施する必要がある。筆者らは、外ケーブルを想定した大容量PC鋼より線19S15.2について、曲げ配置半径を3.0m、下限応力度を引張強度の60%に固定した条件で、フレットングに着目した疲労試験を行い、その疲労特性について研究してきた^{1), 2)}。それにより19S15.2のフレットングを考慮した設計疲労強度式を提案すると共に、エクストラドーズドPC橋の主塔サドルの一構造である保護管内部のグラウトを拘束した構造は、フレットング疲労の抑制に有効であることを確認した。

近年、緊張材について防食の観点から、耐食性を有する材料により被膜したPC鋼より線が開発され、PC橋の外ケーブルや斜ケーブルに利用されてきている。被覆の材料として、ポリエチレン(PE)等の熱可塑性特殊樹脂³⁾や、エポキシ樹脂、グリース+PE管等を用いた製品がある。PC鋼より線に被覆材を施した場合、フレットング疲労性能は向上すると推察されるが、その定量的把握を行った研究は少ない。

エクストラドーズドPC橋の斜ケーブルに、熱可塑性特殊樹脂により被覆したPC鋼より線27S15.2を用いた実績があるので⁴⁾、筆者らはその主塔サドルをモデル化した試験体を作成し、被覆材が及ぼすフレットング疲労強度の向上を確認することを目的に疲労試験を実施した。本稿では、試験により得られた曲げ配置部における被覆材の性状や、被覆PC鋼より線の疲労特性について報告する。

2. 試験の諸元

2.1 試験体

試験体のモデルとしたエクストラドーズド橋の主塔サドル構造を図-1に示す。サドルにおいてケーブルに生じる左右張力の不均衡に対しては、PC鋼より線とグラウトの付着と、鋼製内管と主塔コンクリート切欠き定着面との機械的接合により抵抗する構造としている。

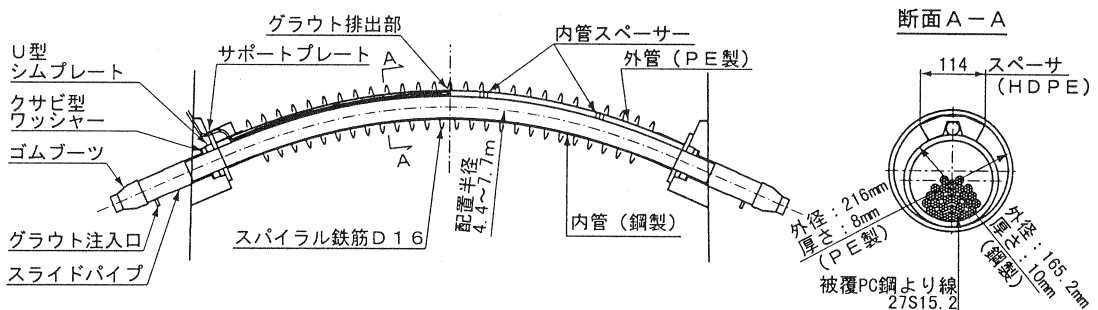


図-1 主塔サドル構造

今回の疲労試験に供したケーブルの構造を図-2、図-3に示し、その諸元を以下に示す。

- PC鋼材 : PC鋼より線19S15.2 SWPR7B 断面積=2673.3mm² (試験成績書より)
- 被覆材 : 熱可塑性(ポリエチレン系)特殊防錆樹脂、表面被覆厚さ=0.4~0.6mm
付着を改良するために表面に溝加工が施されている。
樹脂はPC鋼より線の内部空隙にも完全充填されている。
- サドル部保護管 : 鋼管SGP100A、外径φ114.3mm、肉厚4.5mm
- 保護管内部 : 高強度セメントグラウト充填

緊張材は、被覆PC鋼より線S15.2を19本束ねたものである。またPC鋼より線の撚り方向と順方向に、19本全体も緩やかに撚られており、サドル(軸方向長さ:2150mm)内では半周撚られている。実橋の斜ケーブルは、自由長部では27S15.2のさらに外側にPE被覆が施され、サドル内ではPC鋼より線とグラウトの付着を良くするためにその外側のPE被覆は施さない構造としているので、試験体も同様の構造にした。

2.2 試験装置及び準備工

試験は、論文¹⁾²⁾で紹介した装置と同一のものを用いた。サドルにおけるケーブル試験体の曲げ配置半径は3.0m、偏向角は14°とした(図-2参照)。

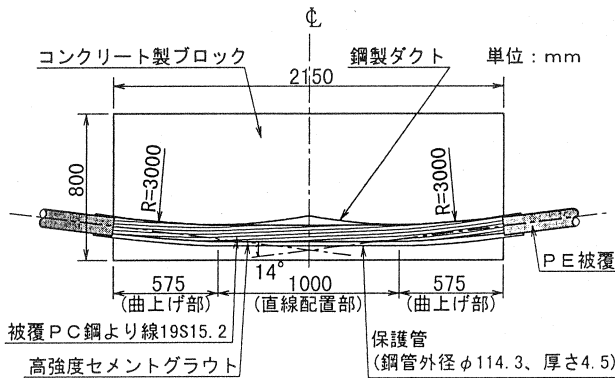


図-2 試験体サドルの構造

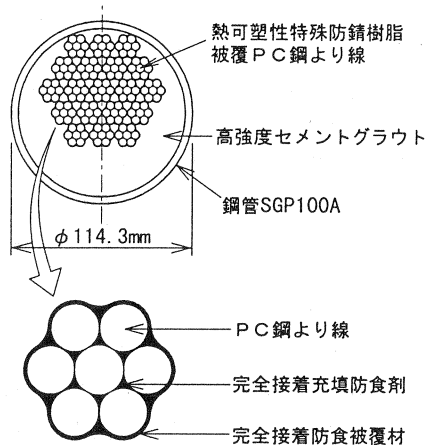


図-3 サドル中心における試験体ケーブルの断面

図-3のようにマルチPC鋼より線はPC鋼より線が層状に重なっているため、曲げ配置されるサドルでは、引張に伴う腹圧力が外側の層から内側の層へと累加される。マルチPC鋼より線とその保護管である鋼管の接触面における腹圧力 p の計算値を表-1に示す。実橋⁴⁾の斜ケーブルは27S15.2であるのに対し、試験体ケーブルはアクチュエータ能力により19S15.2を採用したが、腹圧力 p については表-1に示すように、試験体は実橋より約2割大きくなっており厳しい条件としている。

準備工として、試験体ケーブルを試験装置にセットした後、片引きにより引張強度の60%を緊張導入した。その際のサドルにおける被覆PC鋼より線と鋼管との摩擦係数 μ の測定値は、0.09/ラジアンであった。両端の引張力は、緊張作業中はこのように摩擦損失分の差があったが、導入直後は定着時のプルインにより均等とすることができた。その後、サドル保護管内にグラウトを注入し、養生した。繰返し載荷開始日におけるグラウトの圧縮強度は55.4N/mm²であった。

表-1 PC鋼より線の腹圧力

	実橋 ⁴⁾	試験体
PC鋼より線	27S15.2	19S15.2
引張力 T (kN)	3620 (設計荷重最小時)	2994 (下限応力時)
曲げ配置半径 r (m)	4.4	3.0
腹圧力 p (kN/m)	823	998

ここに、 $p = T / r$

2.3 載荷条件

疲労試験は、主塔サドルをモデル化したコンクリートブロックをアクチュエータにより鉛直方向に一定の変位振幅を与えることにより、ケーブル試験体に軸方向ひずみ変動を生じさせて応力振幅を与える機構によって行った。

試験の載荷条件を表-2に示す。試験体の応力振幅及び下限応力は、実橋の斜ケーブルについて設計⁴⁾で求められたB活荷重による最大応力変動が41N/mm²であったことや、永久荷重時の応力が最大で0.59 fpudであったことを踏まえ、少し割り増して設定した。

アクチュエータによる載荷は変位制御で行い、300万回の繰返し載荷を行った。

表-2 載荷条件

P C鋼材応力 (N/mm ²)			アクチュエータ 鉛直変位 全振幅(mm)	振動数 (Hz)
全振幅 σ_r	下限 σ_{min}	上限 σ_{max}		
50 (=0.027 fpud)	1120 (=0.60 fpud)	1170 (=0.63 fpud)	8.7	1.05

ここに、fpud：引張強度(=1860N/mm²)

3. 試験結果

3.1 サドルにおけるグラウトのひび割れ状況とP C鋼より線の応力振幅分布

300万回の繰返し載荷後、保護管である鋼管を剥がし、グラウトのひび割れを調査した。下面から見た試験体グラウトのひび割れ描写を図-4に示す。応力振幅50N/mm²を与えたところ、ほとんどのひび割れ幅は振幅最小時が0.04mm、振幅最大時が0.08mmと軽微であった。

その後、最下層のP C鋼より線が露出する程度に少し下面のグラウトをはつきり、最下層のP C鋼より線にひずみゲージを貼付け、応力振幅50N/mm²を与えて、応力振幅分布を測定した。その結果を図-5に示すが、サドル中央に行くに従って、摩擦により応力振幅が減少していることが分かる。なお、図に示した「固定側」「緊張側」とは、試験体ケーブルに緊張力を片引き導入したときの方向を示したものである。

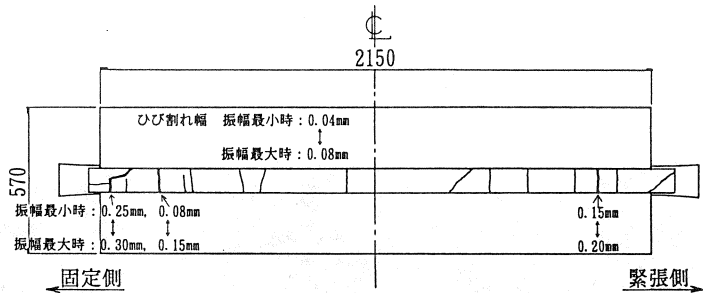


図-4 高強度セメントグラウトのひび割れ状況(平面図)

3.2 被覆材の損傷状況

試験体を解体し、被覆材の変状を観察した。P C鋼より線相互やP C鋼より線と鋼管との接触箇所において、被覆材が押し潰されてP C鋼より線の素線が露出している箇所が多く見られた(写真-1)。これは被覆材が、緊張材の曲げ配置に伴う腹圧力に抗しきれずに、潰れて破れたものと考えられる。

3.3 素線の破断箇所

サドル内においてP C鋼より線の素線の破断は、9ヶ所確認された。素線の破断箇所を図-6、表-3に示す。破断箇所では写真-2のように被覆材が押し潰されて、P C鋼より線の素線が露出しており、そのほとんどにおい

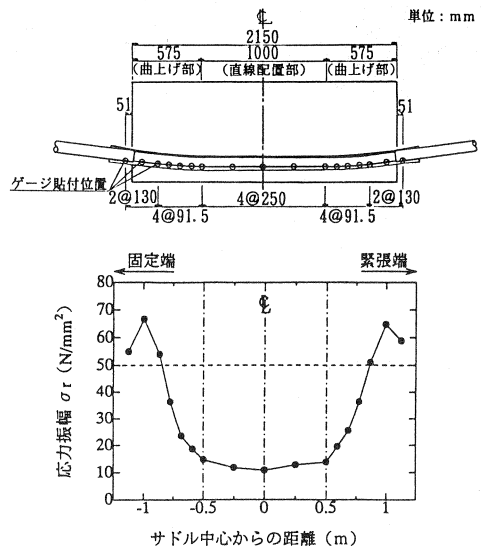


図-5 サドルにおけるP C鋼より線の応力振幅分布

てフレットング・コロージョンによる赤錆の発生が見られた。これはPC鋼より線の素線相互、またはPC鋼より線と鋼管とが被覆材を介さずに直に接触した箇所フレットング疲労による破断が生じたものと判断される。

破断箇所は、ケーブル軸方向に関しては曲上げ端付近に集中していた。この原因としては、フレットング疲労における大きな因子である応力振幅が、図-5より分かるように曲上げ端の方がサド

表-3 PC鋼より線の素線の破断箇所

曲上げ部	PC鋼より線 No.	破断位置 (mm) ※1	破断の起点
固定側	6	815	PC鋼より線と鋼管の接触部
		850	
		880	
	8	820	
緊張側	12	815	PC鋼より線相互の接触部
		745	
		780	
		820	
		855	

※1)破断位置は、サドル中心からの距離を示す。

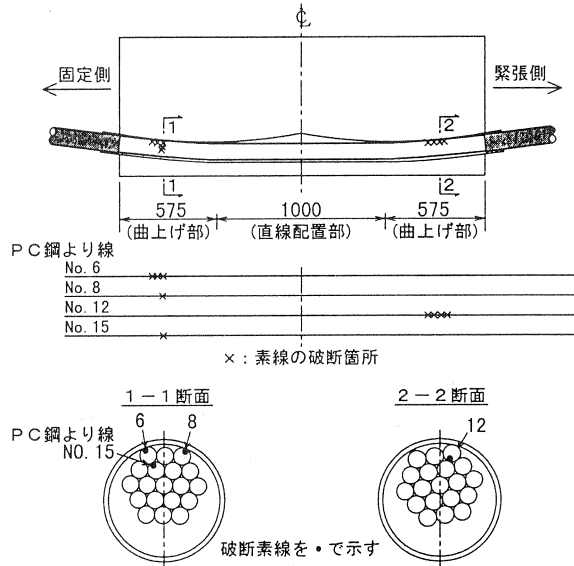


図-6 PC鋼より線の素線の破断箇所

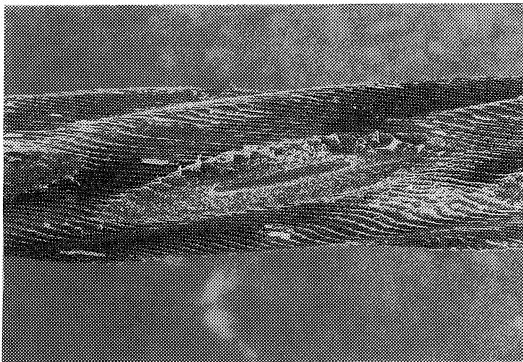


写真-1 被覆材の損傷

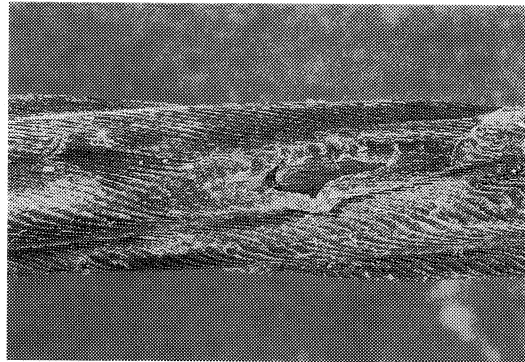


写真-2 PC鋼より線の素線の破断箇所

ル中心部より大きかったことが考えられる。また断面では、破断箇所は円弧配置の内側層に集中していた。これは、緊張材の引張力に伴う腹圧力が、円弧内側ほど累加されるので、フレットング疲労に関して厳しい条件にあったためと考えられる。

鋼管における曲げ配置の内側の、PC鋼より線が接触した痕跡を写真-3に示す。今回の試験でPC鋼より線の鋼管との接触部で4ヶ所の破断が確認された。

3. 4 疲労寿命

疲労試験中、加速度計を用いた破断感知システ

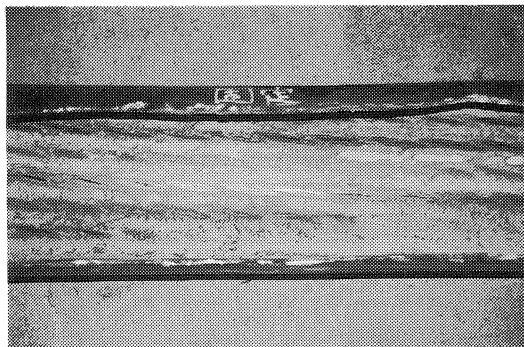


写真-3 鋼管内面におけるPC鋼より線の痕跡

ム^{1) 2)}の記録によって、試験体19S15.2の全素線数133本(=19×7)に関する初破断及び2%破断、5%破断を求めた結果を表-4に示す。表-4には、筆者らの報告²⁾における試験体M-3(19S15.2)の疲労試験結果も参考として記す。M-3は、応力振幅($\sigma_r = 50\text{N/mm}^2$)、下限応力、曲げ配置半径、偏向角が今回の試験体と同一条件で、今回の試験と異なる条件は、保護管:PE管、保護管内部:普通ポルトランドセメントによるグラウト充填、PC鋼より線は被覆を施していない標準のものを用いたことである。

報告²⁾では、19S15.2のフレッキング疲労試験により、M-3の結果を含めたS-N線図を示した。同図に今回の試験体の結果をプロットしたものを図-7に示す。表-4より今回の試験体の疲労寿命は、M-3試験体のそれに比べ、初破断と5%破断が1.3倍、

2%破断が1.7倍延びている。また今回の試験結果には、P

C鋼より線と鋼管との接触部における破断4ヶ所が含まれているが、それを除外してPC鋼より線相互の破断のみに着目した場合には、5ヶ所の破断になり、300万回の繰返し载荷終了時において5%破断に至っていないので、さらに疲労寿命は伸びることになる。

このように熱可塑性特殊樹脂により被覆したPC鋼より線と高強度セメントグラウトを用いた場合は、裸PC鋼より線と普通セメントグラウトを用いた場合に比べ、疲労寿命が伸びる可能性が示された。

アメリカのPTI規準における斜張ケーブルに関する試験基準⁵⁾では、疲労に関する安全性を確認するために行う試験において満足すべき項目の中に次の2つがある。

- ①200万回の繰返し载荷の疲労試験において、素線の破断数が、全素線数の2%以下であること。
- ②200万回の繰返し载荷後、ケーブル試験体を疲労試験装置にセットしたまま、規格引張荷重の95%の引張力が生じるよう载荷し、ケーブル及び定着体に異常がないこと。

同基準では、少なくとも3本の試験体について試験を行わなければならないとされている。今回の疲労試験では、項目②は試験装置の構造上、実施が困難であったので確認していない。また試験体数が1本であるため、完全ではないものの、①に関しては2%破断が生じたのは2,078,000回であったので満足していた。

3.5 他のサドル形式におけるフレッキング疲労寿命との比較

筆者らは、エクストラドーズドPC橋のサドルの他の形態(図-8)をモデル化した試験体の疲労試験について、論文²⁾において試験体M-6として報告した。その構造は、斜ケーブルのサドル出口において、保護管である鋼管内面にテーパを付け、かつ鋼管端面にポリエチレンスペーサを密着配置したものである。同構造は、内部グラウトを拘束するため鋼管に応力を伝達することができ、それに伴いPC鋼より線の応力負担及び相対滑りを軽減したものであった。試験体M-6は、裸PC鋼より線19S15.2を用いたもので、試験条件

表-4 素線破断時の繰返し载荷回数

	繰返し载荷回数	
	今回の試験体 被覆PC鋼より線	M-3 ²⁾ 裸PC鋼より線
初破断(素線破断1本目)	1,477,000	1,157,000
2%破断(素線破断3本目)	2,078,000	1,227,000
5%破断(素線破断7本目)	2,645,000	2,027,000
300万回までの破断箇所数	9	13

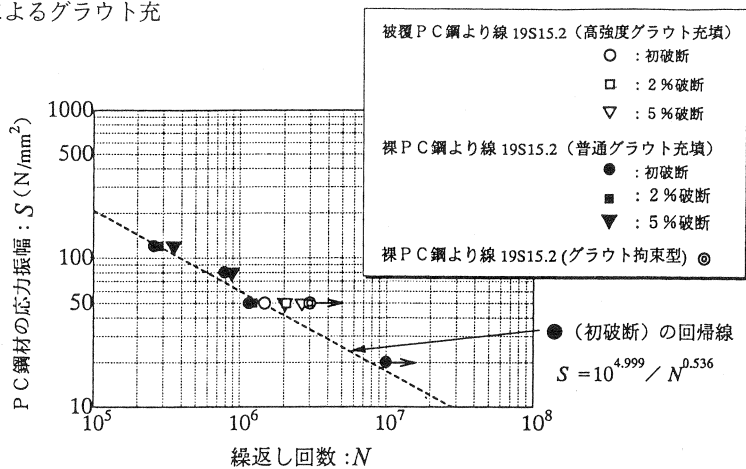


図-7 PC鋼より線 19S15.2のフレッキング疲労試験による S-N 線図

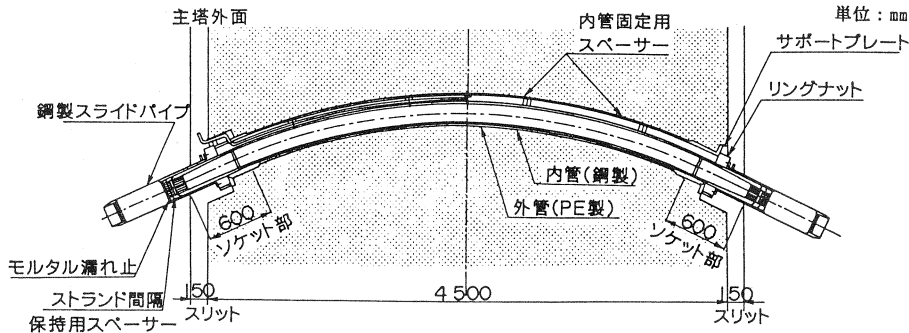


図-8 エクストラドーズドPC橋の主塔サドル構造の他の例

は応力振幅、下限応力、曲げ配置半径、偏向角が今回の試験体と同一であった。M-6の結果を図-7に◎で示すが、300万回の繰返し載荷によってPC鋼より線に破断は生じず、疲労に対し健全であることが確認されたものであった。

図-7より今回の試験体の疲労寿命は、裸PC鋼より線の普通グラウト充填の試験体M-3と、グラウト拘束型の試験体M-6の中間に位置する結果が得られた。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- ①エクストラドーズドPC橋の主塔サドルをモデル化した試験体について、被覆PC鋼より線の応力振幅を $50\text{N}/\text{mm}^2$ として疲労試験を行った結果、200万回の繰返し載荷によって素線の破断数が2%以下であることを確認した。
- ②熱可塑性(ポリエチレン系)特殊樹脂で被覆したPC鋼より線と高強度セメントグラウトを用いた緊張材は、裸PC鋼より線と普通セメントグラウトを用いた緊張材に比べ、フレッキング疲労性能が向上することを確認した。ただし、その疲労寿命は内部グラウトを拘束した試験体ほどには延伸しなかった。
- ③PC鋼より線19S15.2の引張応力度を引張強度の60%とし、曲げ配置半径を3.0mとした条件下では、PC鋼より線の被覆材として用いた熱可塑性特殊樹脂は、被覆厚さが0.4~0.6mmの場合、腹圧力により押し潰される性状が見られた。
- ④PC鋼より線と保護管である鋼管との接触部において、フレッキング疲労によるPC鋼より線の破断は、内部グラウトを拘束した試験体M-6では生じなかったが、グラウトを拘束していない今回の試験体では生じた。従ってPC鋼より線の曲げ配置半径が小さく、グラウトを拘束しない条件下の疲労設計においては、PC鋼より線と鋼管の接触部におけるフレッキングの影響を無視できないと考えられる。

最後に、本研究を実施するに際し、多大な御協力を頂きました住友電気工業(株)殿に、紙面を借りて厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 梅津健司・藤田学・新井英雄・上田多門：外ケーブル偏向部のフレッキング疲労特性に関する研究，プレストレストコンクリート技術協会第6回シンポジウム論文集，pp.281~286，1996.10
- 2) 新井英雄・藤田学・梅津健司・鮎子多浩一・上田多門：大容量PC鋼より線の曲げ配置部におけるフレッキング疲労特性，土木学会論文集，V-44，1999.8
- 3) 南伊佐男・田中徹・千桐一芳：完全防錆ストランドの開発，プレストレストコンクリート，Vol.39, No.4, pp.37~45, 1997.7
- 4) 岡米男・中川洋三・能登谷英樹・植田卓文：蘆原橋の設計と施工，プレストレストコンクリート，Vol.39, No.2, pp.66~75, 1997.3
- 5) Post-Tensioning Institute Committee on Cable-Stayed Bridges：Recommendations for Stay Cable Design, Testing and Installation, pp.21~22, August.1993