

プレストレストコンクリート格納容器のテンドンシステム に関する実証試験

竹 本 靖

Proving Tests of the Tendon System for a Prestressed Concrete Containment Vessel

Yasushi Takemoto

Abstract

This paper describes results of proving tests for the unbonded-BBRV-1,000-t tendon system for a PCCV. Friction loss, ultimate strength of large tendons, and strain distribution in anchor region were investigated using full-scale tendons and test beds.

The test results show that friction coefficients μ and λ are well under design values, the ultimate strength of tendons satisfies the specification, and the anchor region of buttress is sufficiently sound.

概 要

PCCV に用いられる、アンボンド方式・BBRV・1,000 t 級テンドンシステムについて、PCCV 本体の実大部分模型であるテストベッドを利用し、テンドン緊張時の摩擦損失、テンドンの引張耐力およびバットレス定着部のひずみに関する実証試験を行なった。対象としたテendonは、逆U、フープおよび開口廻りのもの4種12本であり、実際の工事と同じ材料・機器・方法を用いている。その結果、摩擦係数は、設計仮定値を優に下廻る良好な値が得られた；テendon引張耐力は、規格値を充分クリアーした；定着部の健全性が証明された、等の満足できるものであった。

1. はじめに

日本原子力発電(株)敦賀2号機に於て、我国として初めて採用されるプレストレストコンクリート製格納容器(PCCV)のテendon(緊張材)システムは、BBRV工法、アンボンド方式、1,000 t 級という特徴を有しており、通常の土木・建築工事に用いられてきたものと比べて、テendon容量が大きいこと、長大であること、緊張時に一次防錆剤による潤滑油効果を期待すること、といった我国では未経験の問題を抱えている。このため、PCCVの実大部分模型であるテストベッドを製作し、実際の材料および機器を用いて緊張試験を行ない、以下の各項について実証データを得ることとなった。

- a. テendon緊張時の摩擦係数 μ , λ
(摩擦損失試験)
- b. 長大テendonの引張耐力(耐力有効率試験)
- c. バットレスの健全性(定着部ひずみ測定)

なお、本実証試験は、日本原子力発電(株)より、(株)大林組、清水建設(株)、(株)竹中工務店3社の共同企業

体工事事務所が受注したもので、上記の他に、材料および施工関連の試験工事数項目も、あわせて実施された。

当技術研究所は、試験用地を提供すると共に、上記3項目に関して、試験スケジュールの推進、データの収集と解析、結果のとりまとめ等を担当した。

2. 摩擦損失および耐力有効率試験

2.1. 試験方法

2.1.1. 供試体 図-1は、PCCVのテendon配置状態である。図中に示したように、代表的なテendon4種をとり出し、それぞれ2~3本ずつを供試体とした。表-1に供試テendonの種類と諸元を、テendon材料を表-2に示す。テendonの構成は、平行に束ねた7φ鋼線163本に軽い撚りをかけたもので、端部は、写真-1で分かるように、ボタンヘッド方式(BBRV工法)である。

表-1、備考欄に記入したように、1Mおよび2M両テendonは、摩擦損失試験後、耐力試験に供され、3テendonは、定着部ひずみ測定用のみに供された。

2.1.2. 緊張 供試テendonを順に、図-2に示すテ

ストベッドのシースに挿入し、一端を荷重計をはさんで定着、他端から荷重計を組込んだ専用ジャッキで緊張した。緊張スケジュールとしては、緊張端荷重 P_0 が 50t に達したところを伸び測定の原点とし、以後 100~700t 間を 100t ピッチで、最大荷重 776t(規格耐力の 75%) まで、 P_0 と定着端荷重 P_1 および伸び出し長さ l を測

定、その後、同様な荷重階で除荷した。この載荷サイクルを、テンドン毎に 3 回くり返している。

耐力試験は、専用ジャッキの容量 (900t) が不足なので、摩擦損失試験終了後、定着端側にあらかじめセットした定着ブロックと、500t ジャッキ 3 台を用いて、逆側

テンドン種類	No.	r m	α ラジアン	l m	備考
逆Uテンドン (最長)	1	U 22.45	$\pi/2$	82.45	耐力テスト兼用
		M "	"	86.20	
		L "	"	82.45	
フープテンドン (シリンダー)	2	U 22.45	1.808	49.76	耐力テスト兼用
		M "	"	53.51	
		L "	"	49.76	
	3			11.50	定着部歪測定用
逆Uテンドン (最短)	4	U 15.90	$\pi/2$	29.70	
		M "	"	"	
		L "	"	"	
ドームフープテンドン					
大開口廻り	5	U 10.00	1.12	23.00	
		L "	"	"	

表-1 供試テンドン

	テンドンNo.	引張荷重kg	降伏荷重kg	伸び%	レラクセーション%
鋼線	1, 5	6,770	6,300	7.3	0.57
	2, 3, 4	6,751	6,140	7.2	0.56
	規格値	6,350以上	5,600以上	4.5以上	3.0以下
一次防錆剤	Visconorust 1702 Amber				
シース	0.6m鋼板コルゲートシース, 亜鉛メッキ, 内径140mm				

表-2 テンドン材料

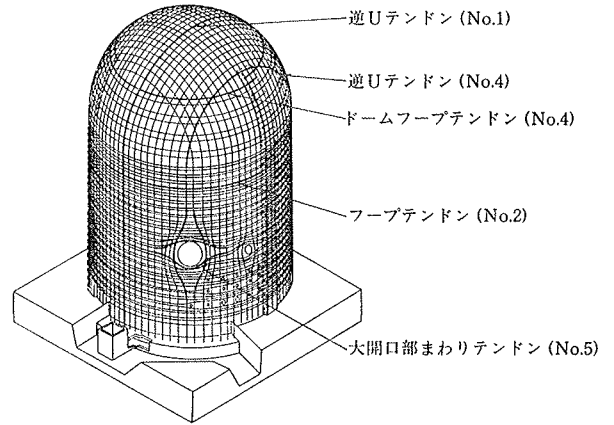


図-1 PCCV のテンドン配置

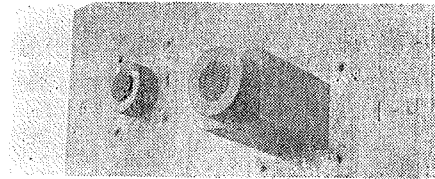


写真-1 定着部

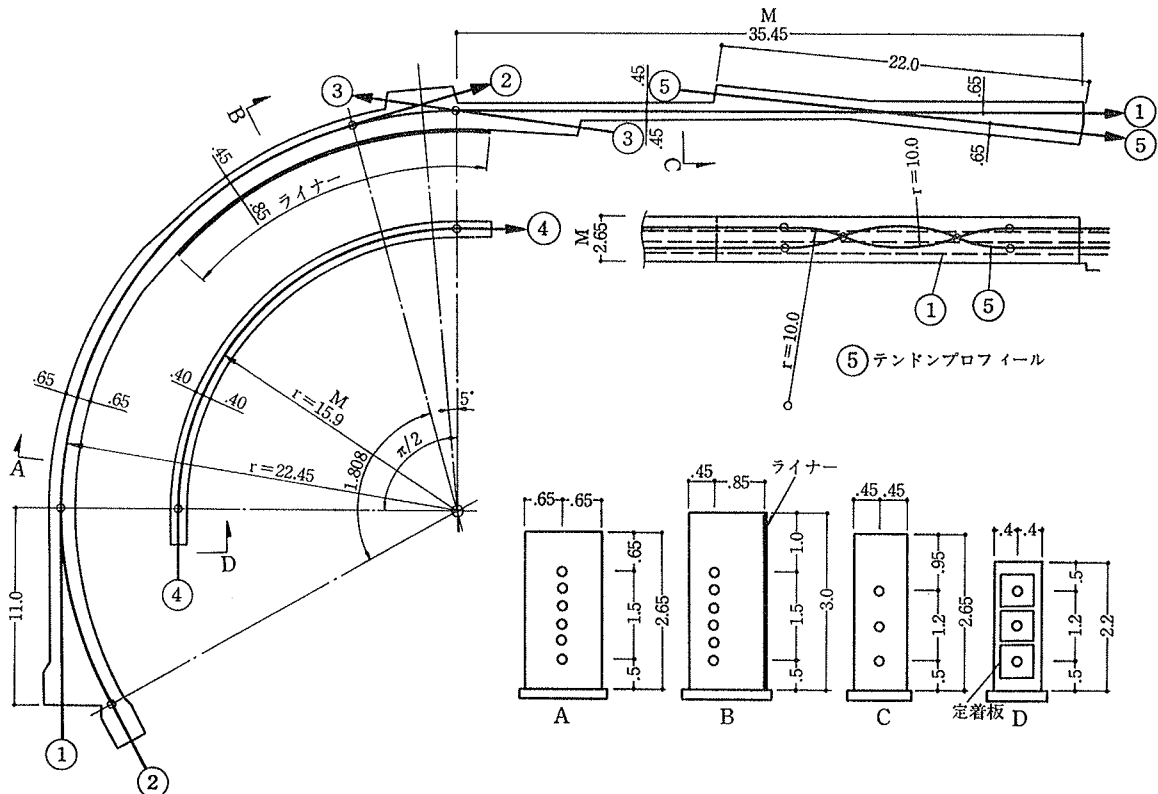


図-2 テストベッド

から、テンドンを構成する素線の一部が切断し耐力低下が始まるまで緊張した。

2.2. 試験結果

2.2.1. 摩擦損失 図-3に No. 1 テンドン 3 本の P_0 - P_1 関係を示す。図から分かるように、荷重の大きさにかかわらず P_0 - P_1 比はほぼ一定で、摩擦理論を裏づけている。除荷時は載荷時の逆数に近い（他のテンドンでも、ほぼ同様の結果である）。除荷開始後しばらくの P_1 一定区間は、 P_0/P_1 が所定の勾配に達するまで、 P_0 の減少が P_1 に影響しない現象を示している。

得られた各テンドンの摩擦損失データから、以下の二つの方法で、摩擦係数 μ および λ を求めた。

平均 μ : 周知の摩擦損失式 $P_0 = P_1 \cdot e^{\mu\alpha + \lambda l}$ に対して $\lambda = 0$ を仮定し、全テンドン11本、3 サイクル、上位3 荷重(600, 700, 776 t) のデータから、

$$\mu = \frac{1}{\alpha} \cdot \log \frac{P_0}{P_1}$$

を求め、それらを算術平均したものの。

最少自乗法による $\mu \cdot \lambda$: 上記全データを、最少自乗法で処理し、1 組の μ , λ を求めた。

$$\mu \Sigma \alpha^2 + \lambda \Sigma \alpha \cdot l = \Sigma \alpha \cdot \log \frac{P_0}{P_1}$$

$$\mu \Sigma \alpha \cdot l + \lambda \Sigma l^2 = \Sigma l \cdot \log \frac{P_0}{P_1}$$

以上の結果を、設計仮定値と共に、表-3 に示す。

最少自乗法による μ , λ から、テンドン毎の P_0/P_1 比を逆算した値に比べて、各実測値がどの程度バラツいて

摩擦係数	設計仮定値	実 測 値	
		平 均	最少自乗法
μ	0.14	0.123	0.120
λ	0.001	0 仮定	0.000075

表-3 摩擦係数

いるかを調べると、実測値/計算値は、 $1 \pm 6\%$ の範囲に分布しており、標準偏差 $\sigma = 2.22\%$ であった。

2.2.2. テンドン伸び 緊張端で測定した伸び出し長さ Δl と荷重 P_0 の関係は、一例として図-4 で示すように、ほぼ完全な比例であった。図の除荷時初期の曲線部分は、図-3 の P_1 一定範囲と対応しており、伸びの減少が、逆方向摩擦の影響で、まだテンドン全長に及んでいないことを示している。

テンドンの見かけのヤング係数は、各テンドン共、第1 サイクルで素線の値より2% 前後低く、2・3 サイクルでほぼ素線並みとなった。ヤング係数平均値をもとにした伸び長さ逆算値からの、実測値のバラツキは、 $\sigma = 2.26\%$ であった。

2.2.3. テンドン耐力 図-5 に、耐力試験時の荷重-伸び関係の一例を示す。摩擦損失試験最終サイクルの最大荷重のまま、定着側から耐力試験の加力を行なったので、定着荷重 P_1 時を原点として、以後の増分を伸び値にしている。2 M テンドンは、最大荷重時に素線の1 本が切れ、さらに変形を伸ばした時、2 本続けて切れたので、載荷を終えた。1 M テンドンの場合は、最大荷重で連続的に素線3 本が切れた。両テンドン共母材破断で、ボタンヘッドを含めて、アンカー部分に異常は生じなかった。破断直前の素線ひずみは、一部に貼附したひずみゲージによれば約2.2% であった。

各最大耐力と、その規格値に対する比、耐力有効率を表-4 に示す。

テンドン No.	規格耐力 t	実測耐力 t	耐力有効率
1 M	1,035	1,090	1.053
2 M	1,035	1,064	1.028

表-4 耐力有効率

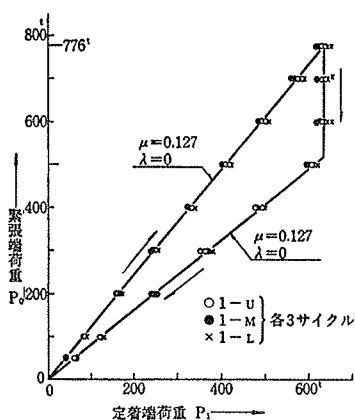


図-3 No. 1 テンドン P_0/P_1 比

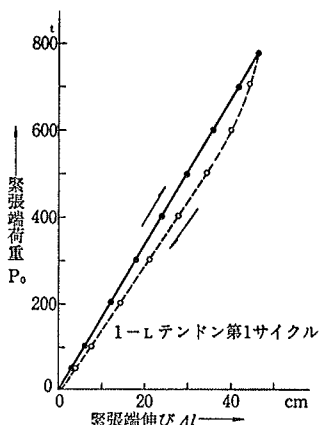


図-4 荷重/伸び比

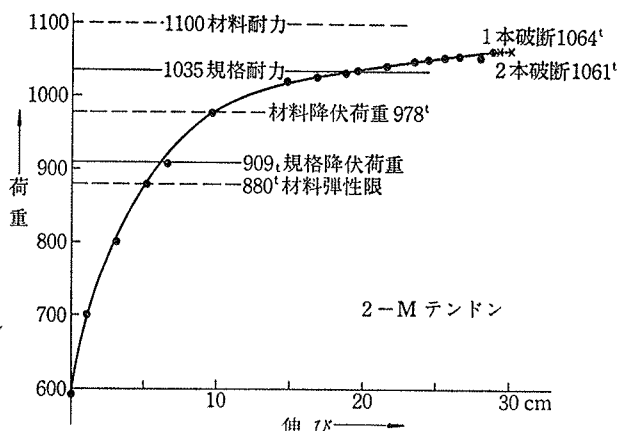


図-5 耐力試験荷重/伸び比

3. バットレス定着部のひずみ測定

3.1. 試験方法

前述した摩擦損失試験の一部を利用し、実大バットレスのテンドン緊張時に於ける健全性（コンクリートおよび補強筋）を、定着部近傍のひずみ測定によって確認することとした。

テストベッドほぼ中央に設けたバットレスで定着される No. 2 テンドン 3 本、および逆方向からの定着を想定した No. 3 テンドンの計 4 本を順に (3→2_U→2_L→2_M) 緊張し、各荷重段階で、近傍のコンクリート（モールドゲージ埋込み）と、補強筋（ひずみゲージ貼付）のひずみを測定した。さらにその後、4 本のテンドンが緊張・定着された状態から、2_U テンドンを、規格耐力の 85% まで過緊張し、定着具および周辺コンクリートの異常発生の有無を確かめた。ゲージの位置と方向は、

- コンクリート：定着板直下のテンドン軸方向
- 同位置の直交方向（水平・垂直）
- バットレス付根の入り隅水平方向
- 鉄筋：割裂補強かんざし筋
- バットレス外側垂直筋
- バットレス付根入り隅水平筋
- 定着板直下垂直筋

図-6 に、バットレス部分の形状と配筋を示す。この部分は特に、実機 PCCV を想定して、鋼板ライナーや、ダミーのたてシースが配置され、鉄筋もシリンダー中腹部に相当するものが配置されている。

表-5、表-6 に、バットレス部分のコンクリートの調合と強度試験結果を示す。なお、高強度であること、相当なマスコンクリートであること、打設時が盛夏期（8月3日）であること、といった不利な条件が重なったので混練水の過半を氷に置換えて、コンクリート温度

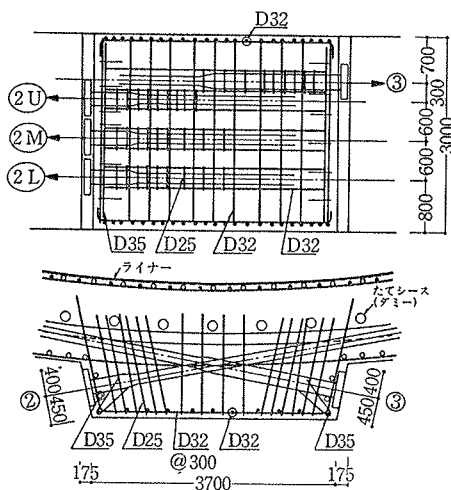


図-6 バットレスの形状と配筋

基準強度	目標スランプ	W/C	セメント	水	砂	砂利	ポゾリス	ハイフルード
420	10±2.5	40%	360	144(水80)	735	1114	3.6	1.62

表-5 コンクリートの調合 kg/m³

養生条件	材令週	圧縮強度 kg/cm ²	引張強度 係数kg/cm ²	ヤング係数×10 ⁵ kg/cm ²	
				E _{1/2}	E _{2/3}
標準水中	9	48I	43	3.49	3.39
	13	507	-	3.75	3.65
抜取りコア	27	490	-	3.65	3.52

表-6 コンクリートの機械的性質

の上昇を低減した。ひずみ測定試験時の材齢は、11~12 週である。

3.2. FEM 解析

ひずみ測定と対応させて、バットレス部分を対象に 3 次元 FEM 弾性解析を行なった。解析モデルとしては図-7 に示す範囲をとった。これは、応力分布上、载荷によって全体曲げの影響が出ない領域と考えたものである。境界条件は、No. 2 テンドン緊張によって反力が生じる側の端部を固定、他端をフリーとした。メッシュ割りには、载荷点近傍（ゲージ配置範囲）を比較的確かくし、上下方向は、ゲージ配置レベルに合わせた。これにより、6 面体要素数 145、総節点数 882、支持条件 28、未知数 2,562 となっている。

解析モデルに対する地盤の拘束と自重の影響および鉄筋とシース（断面欠損）の存在は無視した。仮定材料定数は、 $E_c=3.6 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\nu=1/6$ である。

荷重条件は、2_U、2_M 両テンドンがそれぞれ単独で緊張された 2 ケースとし、図-7 に示したような载荷点に等分布で作用するものとした。

解析結果の出力は、各要素内 Gauss 積分点で行ない、各ゲージ位置に対して直線補間によって換算し、実測値

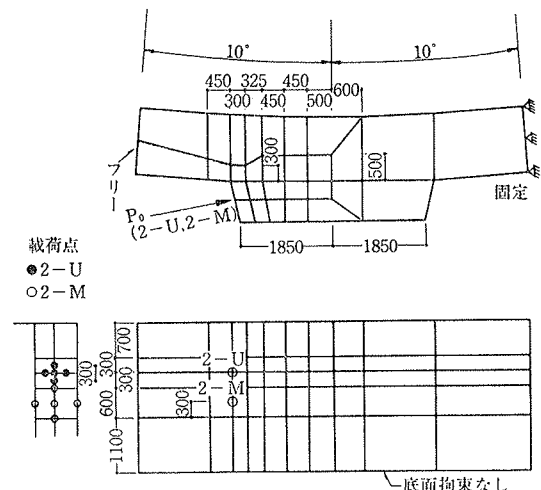


図-7 FEM 解析モデル

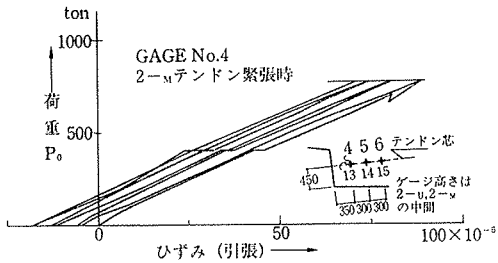


図-8 コンクリート P₀-ε 曲線

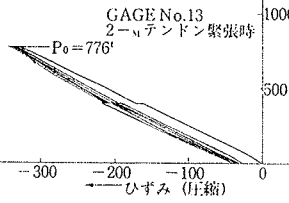


図-9 コンクリート P₀-ε 曲線

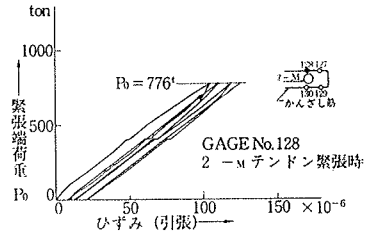


図-10 鉄筋 P₀-ε 曲線

と直接比較できるようにした。

3.3. 試験結果

各テンドンの緊張により、定着部近傍でテンドン軸方向に圧縮、直交方向に引張のひずみが発生する(コンクリート、鉄筋とも)。この状況を、図-8, 9, 10で、P₀-ε 曲線の代表例として示す。

一方、バットレス付根入り隅部分では、緊張端側で引張、逆側で圧縮となる。

図から分かるように、設計緊張力 P₀=776t まで、どの測定点についても荷重とひずみの関係はほぼ直線で、ヒステリシス、残留ひずみとも、ごく僅かである。P₀=400t でのおどり場は、この時点でジャッキストロークの盛替を行なった影響である。

2Uテンドン緊張時の、バットレス軸方向および上下方向のひずみ分布を、図-11, 12に解析結果と共に示す。実測値と解析値は、分布形状としてはよく合っている。またコンクリートの割裂ひずみと、これに対応するかんざし筋のひずみも、実・解がよく一致している。これに対し、コンクリートの軸方向圧縮ひずみは、定着板に近い位置で実測値がかなり大きい。この部分は、ひずみ勾配が急で、要素分割に合わないことや、シースによる断面欠損を無視したことなどが原因と思われる。

この試験ではテンドン間隔が 0.6 m で、図-11から分かるように、隣接テンドン緊張時に、ひずみが約50%累加されるようになっているが、実機では 0.9 m 間隔なので、隣接テンドンの緊張の影響をほとんど受けない。したがって想定する最大ひずみとして、1本緊張時の値をとっておけばよいことになる。

コンクリート各最大ひずみを、3軸応力状態を考慮して応力度に換算すると、軸方向圧縮で約 120 kg/cm²、割裂応力度で約 15 kg/cm² となり、設計基準強度に対して充分低いレベルにある。補強筋の引張応力度は、最大 200 kg/cm² 程度にしかない。

2Uテンドンの過緊張によっても、各ひずみは弾性的挙

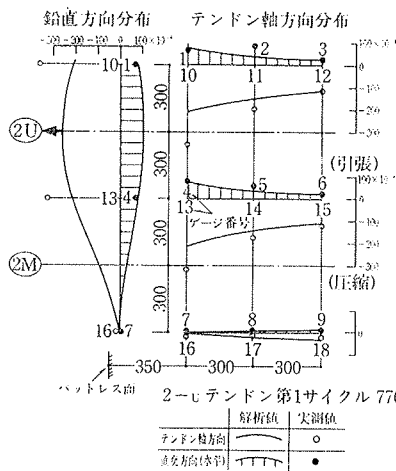


図-11 コンクリートのひずみ分布

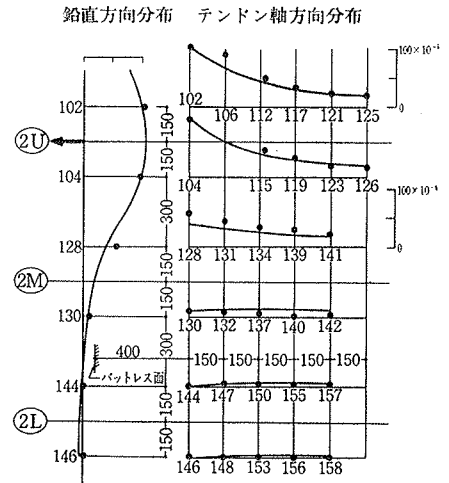


図-12 かんざし筋のひずみ分布

動を示し、定着具の異常な変形や、周辺コンクリートのひび割れは生じなかった。

4. まとめ

- (1) BBRV 1,000t 級テンドンの緊張時摩擦係数として、設計仮定値を下廻る良好な値が得られた。
- (2) 見かけのヤング係数は、1回目の緊張で素線よりやや低くなったが、2, 3回目では、ほぼ素線並みとなった。
- (3) 最大耐力は規格値を充分クリアーし、かつ、母材破断であった。
- (4) 設計緊張力に対し、定着部近傍のコンクリートと補強筋はすべて健全かつ弾性的挙動を示し、補強筋の量と配置は現設計で充分であることが分かった。
- (5) 規格耐力の85%までの過緊張に対し、定着具とその周辺のコンクリートに異常の発生はなかった。

謝辞: 本試験という貴重な体験の機会を賜った日本原子力発電(株)、計画からまともに至る随所で多くのご助言を戴いた日本構造橋梁研究所猪股博士および三菱重工(株)、終始ご苦労願ったJV 構成各社と緊張作業担当のピースコンクリート(株)の皆様に、深く感謝の意を表します。