

PCCV 用 テンドンの摩擦損失等測定試験

牧 野 靖*

1. はじめに

日本原子力発電(株)敦賀2号機のプレストレストコンクリート格納容器(PCCV)に採用が予定されているテンドンシステムは、BBRV工法、アンボンド方式、1000t級という3点で特徴づけられているが、これは、通常の土木建築工事に用いられる各システムと比べて容量が大きいこと、長大である(最長約160m)ことおよび、緊張時に一次防せい剤による潤滑油効果を考慮して摩擦損失を小さく見込んでいることなどの、わが国では未経験の問題を含んでいる。

このため、実機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・機器および手順により緊張試験を行い、以下の各項についての実証データを得ることとした。

- 1) テンドン緊張時の摩擦係数：設計上の仮定値の妥当性
- 2) 長大テンドンの引張耐力：規格耐力に対する安全度(耐力有効率)
- 3) バットレス定着部のひずみ分布：補強筋の適否を含む同部分の健全性

2. 試験工事概要

工事名：日本原子力発電(株)敦賀2号機 PCCV

摩擦係数等実証試験

場 所：東京都清瀬市(株)大林組技術研究所構内

期 間：ベッド製作 昭和54年3～8月

緊張試験 同年9～11月

発注者：日本原子力発電(株)

施工者：大林組、清水建設、竹中工務店共同企業体、清瀬工事事務所

緊張作業担当 ピー・エス・コンクリート(株)
データ収集・解析 大林組技術研究所

なお、本試験工事では、テストベッドを利用して、材料および施工に関連する各種項目についても数多くの実証データを採取したが、本編では、前記設計関連3項目に限って報告させていただくこととする。

* 日本原子力発電(株)建設部土木建築課長

3. 試験方法

3.1 供試テンドン

図-1に示すような、半球ドーム型・3バットレス方式のPCCVにおいて、鉛直方向逆Uテンドンおよび水平方向フープテンドンの中から代表的な4種類のテンドンを取り出し、各々2～3本を供試体とした。表-1に供試テンドンの種類と諸元を示す。定着部ひずみ測定にのみ用いたNo.3を除く全11本が摩擦損失試験用であり、さらにそのうち1M、2Mの両テendonは、耐力試験にも供された。

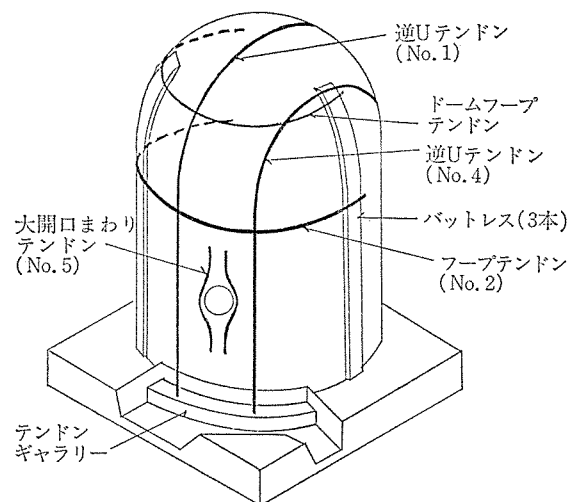


図-1 対象としたPCCV

表-1 供試テンドン

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) ドームフープテンドン	4	U	15.90	$\pi/2$	29.70	
		M	"	"	"	
		L	"	"	"	
大開口廻り	5	U	10.00	1.12	23.00	
		L	"	"	"	

テンドンは、平行に束ねた 7φ 鋼線 163 本に軽いよりをかけたもので、BBRV工法のボタンヘッド方式で定着される。緊張・定着後は、シース中へのグリース注入により鋼材は保護されるが、テンドン製作からグリース注入までの期間は、減摩剤を兼ねた一次防せい剤が塗布される。鋼線および一次防せい剤とシースの材料を表-2に掲げる。

表-2 テンドン材料

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	6770	6300	7.3	0.57
2, 3, 4	6751	6140	7.2	0.56
規格値	6350 以上	5600 以上	4.5 以上	3.0 以下
一次防せい剤	Visconorust 1702 Amber			
シース	0.6mm 鋼板コルゲートシース, 亜鉛メッキ, 内径 140mm			

3.2 テストベッド

実機 PCCV の一部を切り出して横たえた形のテストベッド (図-2) を製作した。小型のベッドは、曲率半径の小さい部分を想定したものである。実機では、テンドン両端から 2 台のジャッキで緊張するが、この場合は形状の対称性を考慮して、テンドン全長の 1/2 を片側緊張するようベッドを計画した。大開口廻り No. 5 テンドンは、ベッドの直線部を利用して、垂直面内で曲率を持たせた。パットレスを含むベッド中央部約 20 m の範囲は、施工性調査その他の目的のため、ライナーを始め、配筋等が実機を想定したものとなっている。

3.3 摩擦損失試験

テストベッドの完成後、供試テンドンを順に、ウィン

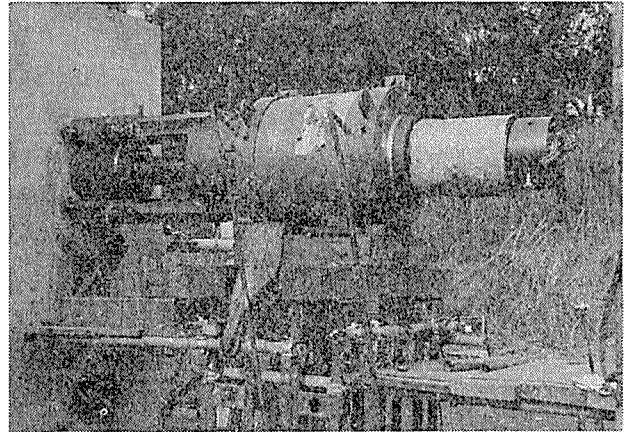


写真-1

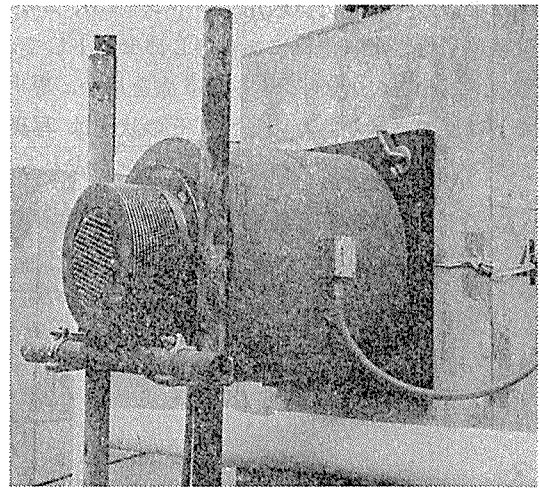


写真-2

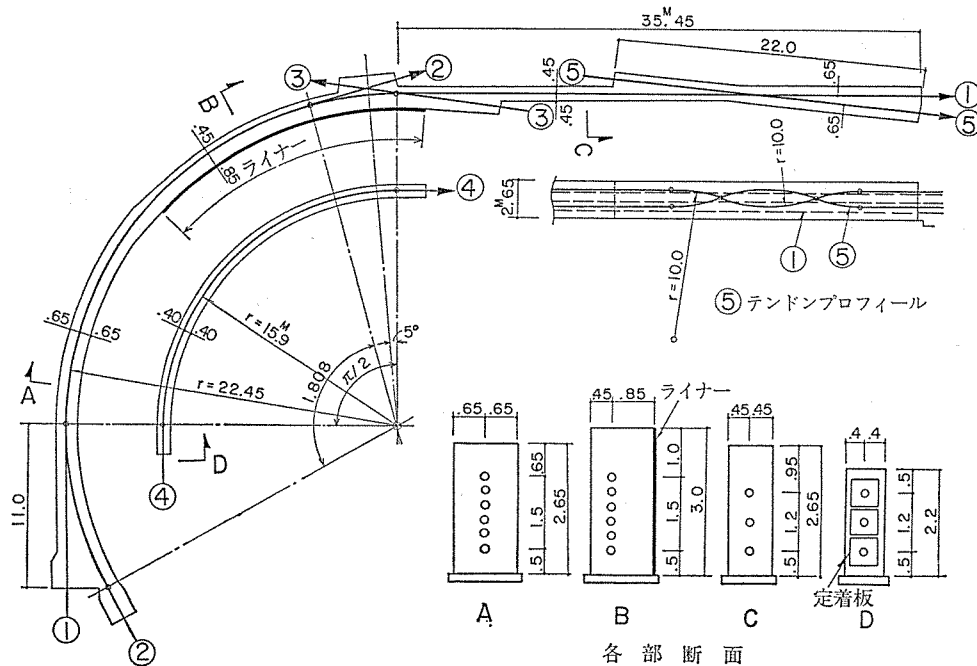


図-2 テストベッド

研 究

チを用いてシース中に挿入し、一端をセンターホール型荷重計をはさんで定着、他端には同荷重計を装着した専用ジャッキ (BBRV, 900 t 級) をセットした。両端部の状況を写真-1、写真-2 に示す。鋼線端のボタンヘッドは、定着側が工場加工、ジャッキ側が現場加工である。

載荷スケジュールとしては、緊張端荷重 P_0 が 50 t に達したところを伸び測定の原因とし、以後 100~700 t 間を 100 t 刻みで、設計導入力 776 t (規格耐力の 75%) まで、 P_0 と定着端荷重 P_1 、および伸出し長さ $4l$ を測定、その後同じ荷重階で除荷した。この載荷サイクルを各テンドンにつき 3 回ずつ繰り返した。 P_0 、 P_1 は、デジタル荷重指示計により、並行して記録した。

3.4 耐力試験

テンドンの最大耐力までの緊張は、専用ジャッキの容量では無理なので、耐力試験用テンドン (1M, 2M) の摩擦試験終了後、定着端側にあらかじめセットしておいた定着ブロックと、500 t ジャッキ 3 台を用い、専用ジャッキとは逆の方向から緊張した。その状況は写真-3 のとおりである。最大耐力は、テンドンを構成する素線

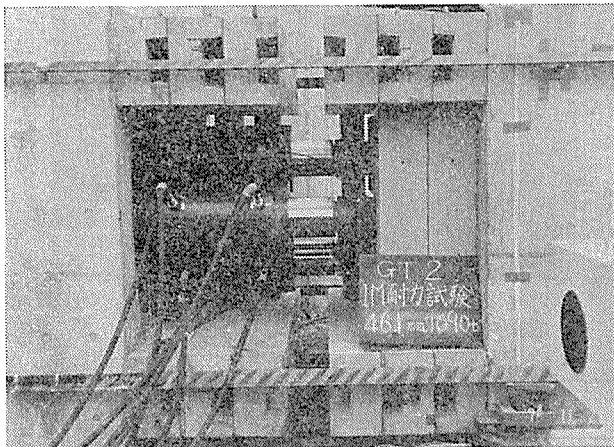


写真-3

の一部が切断して耐力低下が始まる時の値とした。

3.5 定着部ひずみ測定

(1) 測定方法

テストベッドのほぼ中央部に設けたバットレスには、テンドン No. 2 および No. 3 が定着されている。No. 2 テンドン 3 本の摩擦試験時および、特に逆方向からの定着を想定した No. 3 テンドンの緊張時に、バットレス部コンクリートおよび補強鉄筋のひずみを測定した。さらにその後、それら 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、定着具とその周辺コンクリートの異常発生の有無を観測した。

ひずみ測定ゲージの種類と位置・方向は、

コンクリート：モールドゲージ、ゲージ長 60 mm

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
補強鉄筋：箔ゲージ、ゲージ長 6 mm
割裂補強かんざし筋 (水平)
バットレス外周、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-3 に、バットレス部の形状・寸法と配筋を示す。写真-4 は、コンクリート打設前のゲージ配置状況である。表-3、表-4 に、バットレス部コンクリートの調査と、強度試験結果を示す。高強度・マスコンクリート・夏期打設という不利な条件が重なったので、混練水の過半を氷に置きかえ、打設時コンクリート温度を低下させた。ひずみ測定時の材令は、11~12 週であった。

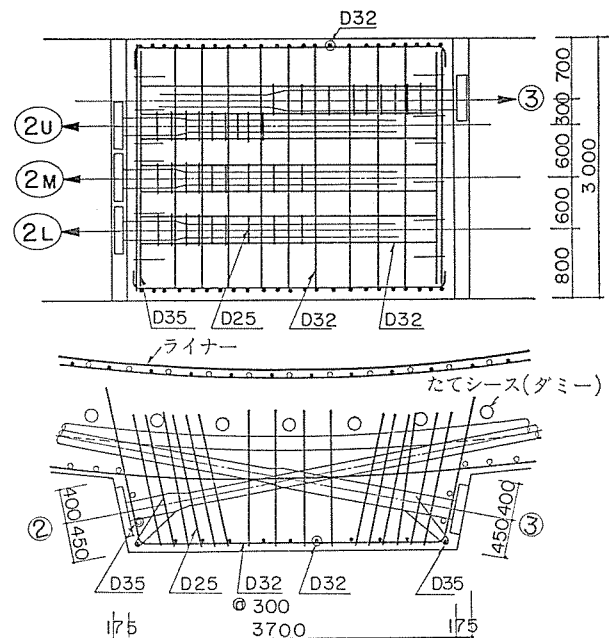


図-3 バットレスの形状と配筋

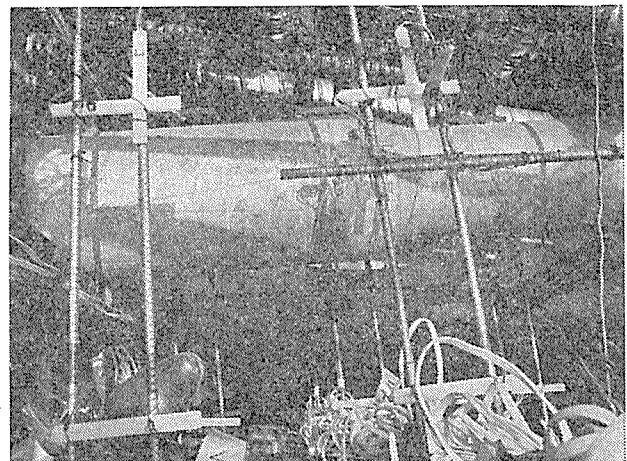


写真-4

表-3 コンクリートの調合 (kg/m³)

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

表-4 コンクリートの機械的性質

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 1/4	E 1/3
標準水中	9	481	43	3.49	3.39
	13	507	—	3.75	3.65
抜取りコア	27	490	—	3.65	3.52

(2) 有限要素法による解析

ひずみ測定と対応させて、バットレス部を対象に、3次元有限要素法弾性解析を行った。図-4に解析モデルを示す。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、他端を自由とした。メッシュ割りは、載荷点近傍のゲージ配置範囲を比較的に大きく

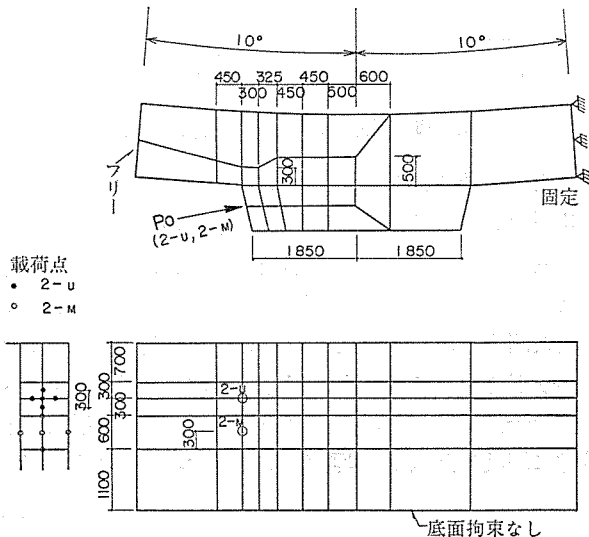


図-4 バットレスの解析モデル

し、上下方向は、ゲージ配置に合わせた。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 2562 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、2U、2M 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-4に示したような載荷点に等分布で作用するものとした。

解析結果(IBM 370/158 使用)の出力は、各要素内 Gauss 積分点で行い、各ゲージ位置に対して直線補間によって換算し、実測値と直接比較できるようにした。

4. 試験結果と考察

4.1 摩擦係数

緊張試験によって得られた緊張端荷重 P_0 と定着端荷重 P_1 の関係を、No. 1 テンドン3本の例について、図-5に示す。図でわかるように、載荷時・除荷時とも、両荷重はほぼ完全な直線関係にあり、摩擦理論が成り立っていることを示している。除荷開始後 $P_0=500 \text{ t}$ 近くまでの P_1 一定区間は、 P_0/P_1 比が所定の値に達す

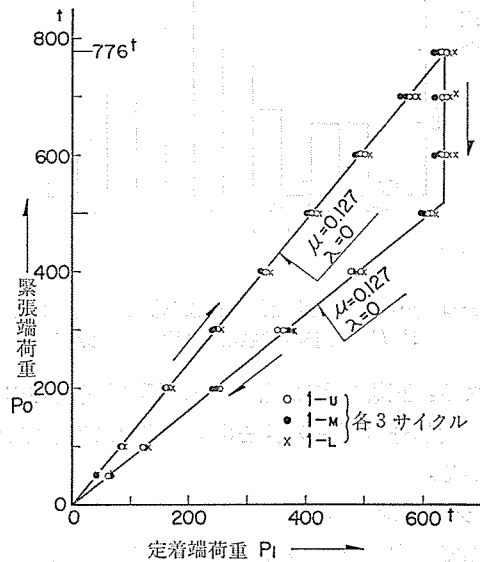


図-5 No. 1 テンダンの P_0/P_1 関係

るまで、逆方向摩擦によって P_0 の減少が P_1 に影響しない、という現象である。

得られた各テンダンの摩擦損失データ(11 テンドン、3 サイクル、上位3荷重、合計 99 データ)を用いて、以下の二つの方法で、摩擦係数 μ および λ を求めた。

- 1) 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、データ毎に、

$$\mu = 1/\alpha \cdot \log P_0/P_1$$

を求め、それらを算術平均する。

- 2) 最小自乗法による μ, λ : 全データを最小自乗法で処理し、1組の μ, λ を求める。

$$\mu \cdot \sum \alpha^2 + \lambda \cdot \sum \alpha \cdot l = \sum \alpha \cdot \log P_0/P_1$$

$$\mu \cdot \sum \alpha \cdot l + \lambda \sum l^2 = \sum l \cdot \log P_0/P_1$$

以上の結果を、設計仮定値とともに、表-5に示す。

表-5 摩擦係数

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

最小自乗法による μ, λ を用い、テンドン毎の P_0/P_1 比 ($=e^{\mu\alpha + \lambda l}$) を逆算した値(計算値)と比べて、各実測値がどの程度ばらついているかを見るために、実測値と計算値の比を求め、柱状図で分布を示すと、図-6の

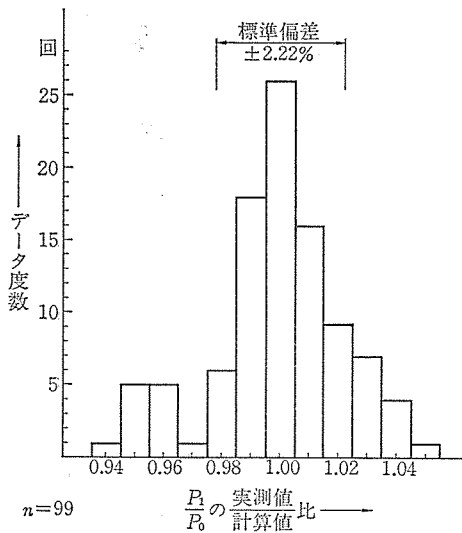


図-6 $\mu \cdot \lambda$ 値 (最小自乗法による) から逆算した P_1/P_0 に対する実測値の比の度数分布

ようになる。正規分布に似た形で、標準偏差が $\pm 2.22\%$ となり、大部分のデータが $\pm 5\%$ の範囲に入っていることがわかる。

4.2 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 の関係は図-7 で例を示すように、ほぼ完全な比例であった。

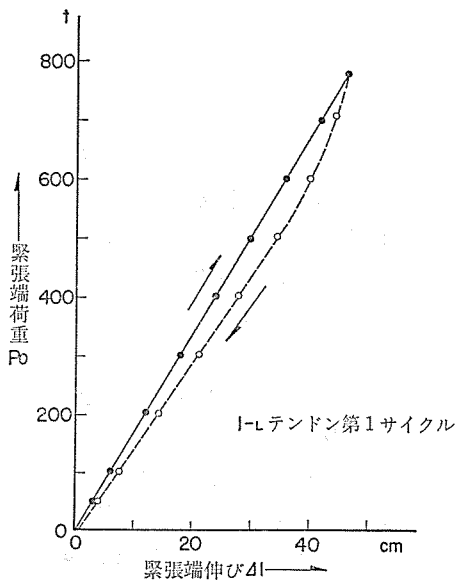


図-7 $P_0/\Delta l$ 関係

図の除荷時初期の曲線部分は、図-5 の P_1 一定範囲と対応するものである。テストベッド中間の数個所に設けた観測用開口部でのテンダンの動きも、端部伸びに見合った合理的なものであった。

テンダンの見かけのヤング係数は、各 tendon とも、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に戻った。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ばらつきは、標準

偏差にして 2.26% であった。

4.3 テンダンの耐力

図-8 に耐力試験時の荷重-伸び曲線の例を示す。摩擦試験最終サイクル最大荷重のまま、定着側から別のジャッキで耐力試験の加力を行ったので、定着荷重 P_1 が原点となっている。材料弾性限以下の範囲でも曲線となっているが、これも図-5、図-7 で見られた逆方向摩

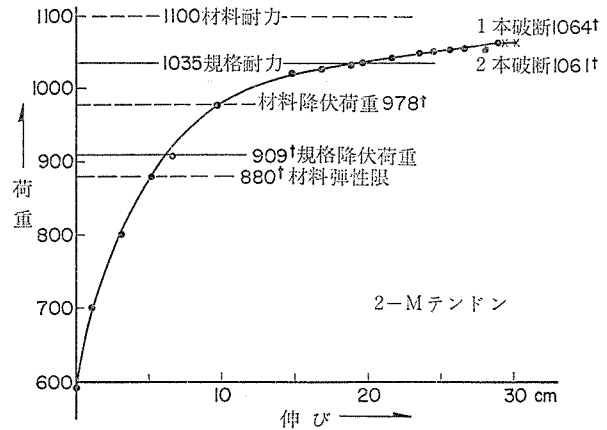


図-8 耐力試験時 荷重-伸び関係

擦による現象である。

2 M tendon 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 tendon では、連続的に素線 3 本が切れた時が最大耐力となった。両 tendon とも母材破断で、ボタンヘッドを含めてアンカー部分に異常は全くなかった。素線の一部が切れて、アンカーヘッドから飛び出し、防護材に埋没した状況を写真-5 に示す。破断直前の素線

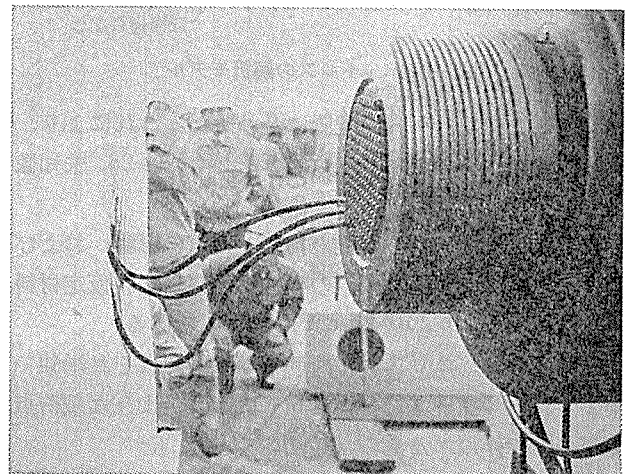


写真-5

表-6 耐力有効率

tendon No.	規格耐力 t	実測耐力 t	耐力有効率
1 M	1035	1090	1.053
2 M	1035	1064	1.028

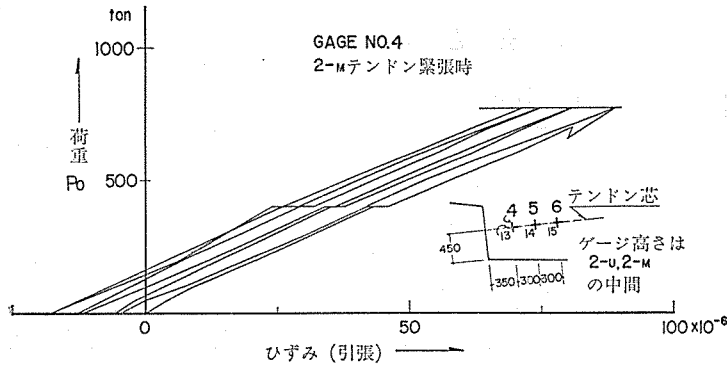


図-9 コンクリートの P_0/ϵ 関係 (割裂方向)

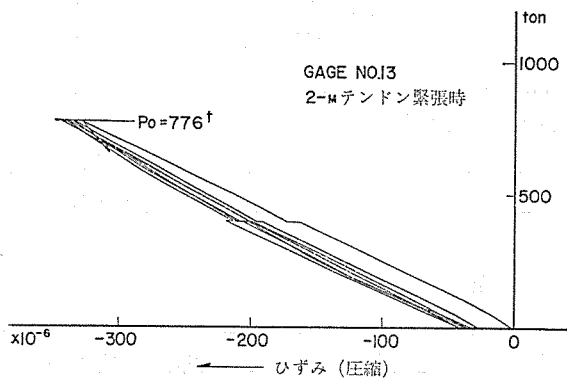


図-10 コンクリートの P_0/ϵ 関係 (軸方向)

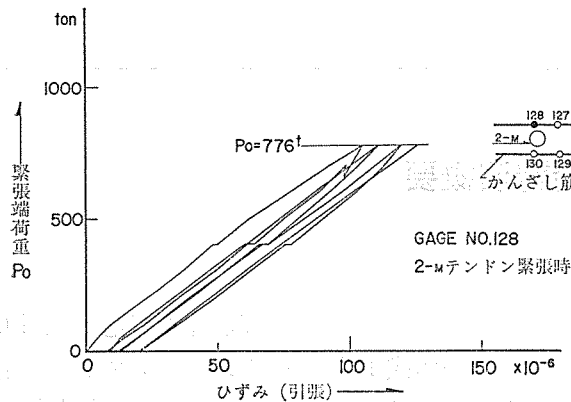


図-11 補強筋の P_0/ϵ 関係

ひずみは、貼付したひずみゲージによれば、約2.2%であった。両テンドンの最大耐力と規格値、およびそれらの比(耐力有効率)を表-6に掲げる。

4.4 定着部ひずみ

(1) ひずみの分布とレベル

テンドンの緊張によって定着部周辺に生ずるひずみは、軸方向圧縮・直交方向引張、さらにバットレス付根の曲げ引張・圧縮のいずれも、予期された分布形状を示し、コンクリートと鉄筋の各ひずみの対応性も良好であった。代表的なゲージ位置での荷重-ひずみ関係を、図-9、図-10、図-11に示す。各図からもわかるように、

設計導入力 $P_0=776t$ まで、どの測定点についても、荷重とひずみは直線関係にあり、ヒステリシスや残留ひずみもほとんどない。 $P_0=400t$ での直線のずれは、この時点でジャッキストロークの盛替えを行った影響である。

コンクリートのひずみを、3軸応力状態を考慮して応力度に換算すると、軸方向圧縮で最大約 120 kg/cm^2 、割裂応力で同約 15 kg/cm^2 となり、設計基準強度 420 kg/cm^2 に対して、充分低いレベル

と言える。一方、補強筋の引張応力度は最大約 200 kg/cm^2 に止まっている。

(2) 解析値との比較

2Uテンドン緊張時の、コンクリートと鉄筋(かんざし筋、図-3でのD25)のテンドン軸方向と鉛直方向ひずみ分布を、図-12、図-13にそれぞれ実測値(点)、解析値(曲線)あわせて掲げる。

実測値と解析値は、分布形状がよく合っているほか、コンクリート割裂ひずみ、およびこれに対応するかんざし筋のひずみは、ひずみレベルとしてもよく一致している。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の方がかなり大きい。原因としては、この部分が局部的にひずみ勾配が急で、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考えられる。

(3) 過緊張時の挙動

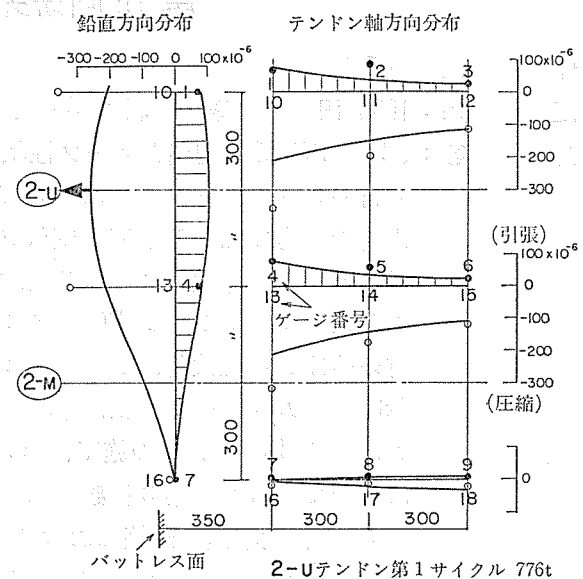


図-12 コンクリートのひずみ分布

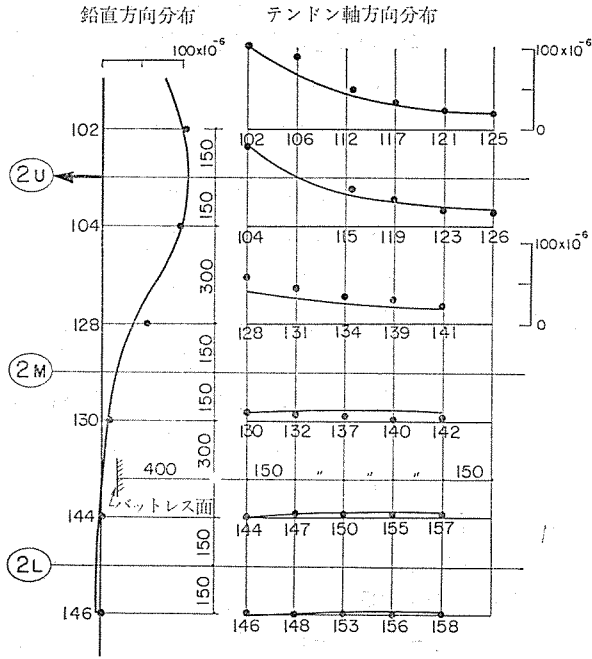


図-13 補強筋のひずみ分布

2 U テンドンの過緊張時には、各部のひずみは依然弾性的な挙動を示し、観察によっても、定着具の異常な変形や、周辺コンクリートのめり込み・ひびわれ等は全く発見できなかった。

5. ま と め

- 1) BBRV, アンボンド方式, 1000 t 級テンドンの緊張時摩擦係数として, 設計仮定値を下回る良好な値が得られた。
- 2) テンドンの見かけのヤング係数は, 処女載荷時には素線の値よりやや低くなるが, 2 回目以後はほとんど素線並みに戻る。
- 3) 最大耐力は, 規格値を充分上回った。破断の状況は逐次的であり, かつ, 母材破断で, アンカーヘッド・ボタンヘッドに損傷はなかった。
- 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終始弾性的挙動を示し, バットレス部の諸寸法や, 補強筋の量と配置等は, 現設計で充分余裕があることがわかった。
- 5) 規格耐力の 85% までの過緊張によっても, 定着具とその周辺のコンクリートに何ら異常は発生しなかった。

謝 辞

本実験の計画, 実施, まとめ各段階で, 有益なご助言を頂戴した諸先生方, およびご苦勞願った協力各社の皆様方に, 紙上を借りて感謝の言葉を献げます。

◀ 刊行物案内 ▶

第 19 回研究発表会講演概要

体 裁 : B 5 判 38 頁

定 価 : 1000 円 送 料 : 250 円

内 容 : (1) PC 橋の初期クリープ性状について, (2) コンクリートの収縮を考慮した PC 鋼材のレラクセーションについて, (3) 現場打一体式 PC ラーメンのプレストレス導入時歪応力に関する研究—壁付フレームの応力測定と解析—, (4) アンボンド PC 梁の低サイクル疲労性状に関する実験的研究, (5) 高プレストレス (250 kg/cm² 級) を導入したプレテンション PC パイル, (6) コンクリートの圧縮じん性増大による PC 部材の曲げじん性改善, (7) プレストレストコンクリートの塩分許容限度について, (8) ゴムシューの試験, (9) PC タンク振動実験について, (10) スリップフォームによる PC タンクの施工, (11) 海上で連結した浮波可能なコンクリート浮ブロックについて, (12) 第 3 種設計法による PC スラブの空港舗装への適用性に関する研究, (13) 「特別講演」建築における PRC (Ⅲ種コンクリート構造) の利用 (特別講演に限り概要はありません), (14) 高強度コンクリートを用いた岐関大橋の設計施工について, (15) 白山林道ロックシェッドの設計と施工, (16) 押出し工法の設計施工上の問題点, (17) 東北新幹線岩切線路橋の施工について (押出し工法)