

1 年間緊張状態で放置した原子炉用テンドンに関する試験報告

久 富 洋*
 堺 博 信**
 富 岡 敬 之***

1. はじめに

プレストレスト コンクリート製原子炉圧力容器(PCRV)に関する各種試験研究の一環として、ヒンクレイポイントBタイプのPCRVRに配置されている標準的テンドンと、長さおよび角変化が等しくなるような円弧テンドンを定め、その円弧テンドン4本を円弧ブロック試験体中に配置し、テンドンの摩擦およびプレストレッシング作業の施工性を調べた。その試験終了後、そのブロック試験体をそのまま用いてテンドンを緊張定着し、昭和46年8月25日より昭和47年9月15日までの約1年間放置し、その間の緊張力の低下、および1年後の防錆剤の防錆効果および、1年間使用後のPC鋼材のレラクセーション特性を調査した。

以上の実験結果、および別に実験室で行ったテンドンの引張破断試験結果を併せて報告する。

2. 試験の目的

(1) 緊張力低下測定試験

防錆剤を塗布したテンドンの両端におおの 300 t のセンターホールタイプロードセルを取付け緊張定着し、それぞれ1日後、2日後、3日後、5日後、1週間後、2週間後、1か月後、6か月後、1年後の緊張力の低下の傾向を調べた。

テンドンの緊張力の減少はPC鋼材のレラクセーション、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮によって生じる。コンクリートのクリープおよび乾燥収縮の値はコンクリートの置かれている環境条件によって大きく変化する。今回の試験で、テンドンを定着したコンクリート試験体は屋外に放置され、温度、湿度、応力状態、試験体大きさ等、実際の圧力容器のおかれている環境条件とかなり異なっている。したがって、今回の試験結果は実際の圧力容器における値とは当然異なっているが、一応

の参考として求めたものである。

(2) 防錆剤の効果調査

1年後に緊張力を解放し、PC鋼材をシース内から取り出し、どの程度さびているかを調べ、防錆剤の防錆効果をチェックした。

(3) レラクセーション特性試験

1年間緊張状態にあったPC鋼材を実験室に持ち帰り高温でレラクセーション試験を行い、その結果から実際の原子炉において緊張後30年経過時のレラクセーション値を推定した。実際の原子炉において、テンドンは緊張して約1年後から高温にさらされると考えられるからである。また参考として、1年間緊張後のPC鋼材の機械的性質も測定した。

(4) テンドンの定着試験

上記の各種試験に用いたテンドンと同じCCLシングルストランド・システム7T 17.8 mm テンドンを別途製作し、実験室にて300 t アムスラータイプ横型万能試験機を用い、引張破断試験を行い、テンドンの破断荷重より定着効率を求め、また、テンドン破断時の伸びを求めた。

3. 供 試 材

(1) コンクリートブロック

コンクリートブロックは、大型ブロック(断面寸法1000 mm×1000 mm、半径19.140 m、円弧角86°49'07")と端ブロック(縦500 mm×横535 mm×長さ620 mm)2個を用いた。図—1に大型ブロック、図—2に端ブロックの形状を示す。各ブロックのコンクリート設計強度は大型ブロックが370 kg/cm²、端ブロックが450 kg/cm²である。おおのの示方配合を表—1に示す。また、シリンダー供試体(φ150×300 mm)の試験結果を表—2に示す。

(2) シ ー ス

標準シースには内径70.7 mm、肉厚2.8 mm、ジョイントシースには内径82.7 mm、肉厚3.2 mmのJIS G 3444に規定されるガス管を用いた。また、シースカ

* 清水建設株式会社 研究所

** 極東鋼弦コンクリート振興株式会社 技術部

*** 神鋼鋼線工業株式会社 開発部

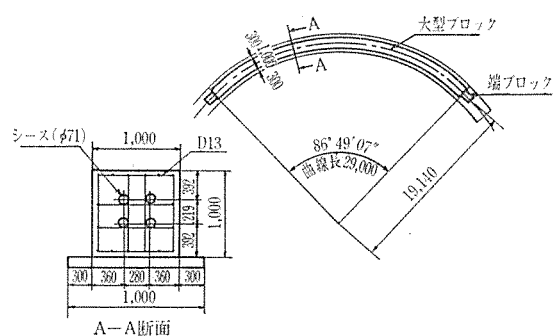


図-1 大型ブロック

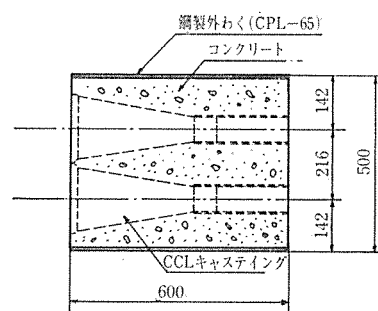


図-2 端ブロック

表-1 コンクリートブロックの示方配合

	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ の範囲 (cm)	単位水量 W (kg)	単位セメント 量 C (kg)	水セメント 比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単位細骨 材量 S (kg)	単位粗骨 材量 g (kg)	混 和 剤
大 型 ブ ロ ッ ク	25	7±1	146	374	39	37.7	692	1 157	AE 剤使用
端 ブ ロ ッ ク	20	4±1.5	176	430	41	43	753	1 015	減水剤使用

表-2 コンクリート供試体試験結果

	28 日圧縮強度 (kg/cm ²)		ヤング率 (kg/cm ²)	ポアソン 比
	現場養生	標準養生		
大型ブロック	370	412	3.07×10 ⁵	0.192
端ブロック	508	552	3.36×10 ⁵	0.205

アップラーは、ゴムパイプに軟鉄製板バンドを巻いた形式とした。

(3) P C 鋼 材

P C 鋼材は神鋼鋼線工業(株)製スタビライズドφ17.8 mm 7本よりダイ成形ストランド(*1 ダイフォームストランド)を使用した。テンドンはストランド7本で構成され、1年経過試験には2テンドン、定着効率試験には6テンドンをを用い、また比較材としてφ17.8 mm 19本より P C ストランド3テンドンの試験をした。P C 鋼材の機械的性質を表-3に示す。

表-3 P C ストランドの機械的性質

種 別	直 径 (mm)	引 張 荷 重 (kg)	降伏点荷重 (kg)	伸 び (GL=600 mm) (%)	記 事
ダイフォーム ストランド	spec. 18.0	37 730	33 960	4.0	British Rope 社 規格
	act. 18.0	39 460	35 700	5.2	
18本よりスト ランド	spec. 17.8 ^{+0.4} _{+0.2}	39 500	33 600	3.5	神鋼鋼線工業(株) 規格
	act. 17.9	41 400	38 200	5.3	

表-4 防錆剤試験に使用した防錆油
(商品名: シェル アルバニア EP 1) の性状

混和ちょう度 60回 @ 25°C	滴 点 °C	原料鉱油粘度 cSt @ 98.9°C	チムケンOK値 lbs
325	182	16	50

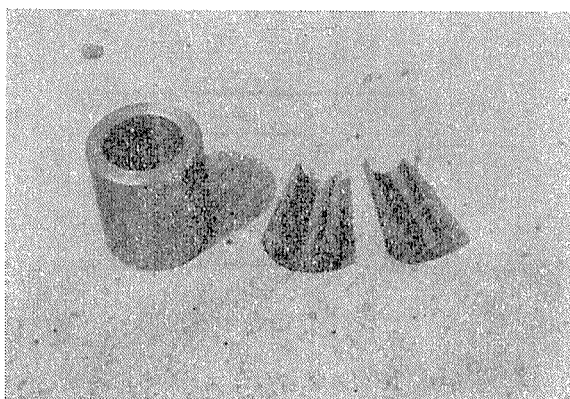
*1 同仕様のイギリス British Ropes 社製のストランドの商品名をダイフォームと呼ぶ。わが国ではこの名称で知られているため、本報告では以後この名称を使用する。

(4) 防 錆 剤

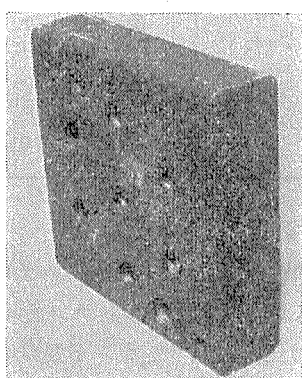
防錆剤としてはシェル石油社製の Shell Alvania EP grease No. 1 を使用した。その特性を表-4に示す。

(5) 定 着 具

定着具は CCL シングルストランドシステム・7 T 17.8 を使用した。定着具はトランペットシース(端ブロックに埋込み)、支圧板、グリップ(スリーブおよびウェッジ)7個より構成される。これらを図-3~5に示す。



図—3 実験で使用された CCL シングルストランドシステム 7 T 17.8 用グリッパ (ウェッジおよびスリーブ)



図—4 実験で使用された CCL シングルストランドシステム 7 T 17.8 用支圧板

4. 試験結果

(1) 緊張力低下測定試験結果

緊張力の測定結果は表—5 に示すとおりであり、図—6 はそれをグラフに表わしたものである。テンドン 2 本について測定したが、2 本とも同じような減少の傾向を



図—5 大型ブロックにとりつけられた端ブロックの状況

示している。固定側の緊張力が緊張後数日間増加しているのは、放置している間に摩擦がやや小さくなり、緊張力がわずかに平均化されたためと考えられる。

1 年後の緊張力の減少率はテンドン 2 本の平均で、固定側で 7.2%、緊張側で 7.5% である。固定側の減少率と緊張側の減少率とにさほどの差がないことから、1 年後でも摩擦による荷重損失の割合は緊張直後とあまり変わっていないと考えられる。図—7 にそれらの関係を示す。したがって、テンドン全体としての緊張力の減少率は大体 7.5% 位と考えてよいであろう。緊張力の長期測定状況を図—8 に示す。

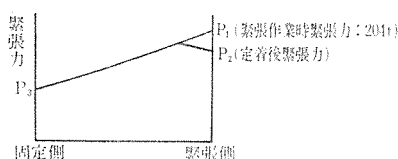
通常のブルーイングされた PC 鋼材を用いた PC 構造物において、緊張してから 1 年後の緊張力の減少率は 10% 前後であり、本試験ではスタビライズド PC 鋼材を用いているため、緊張力の減少率がやや小さいことが認

表—5 緊張力の長期測定結果

(単位: t)

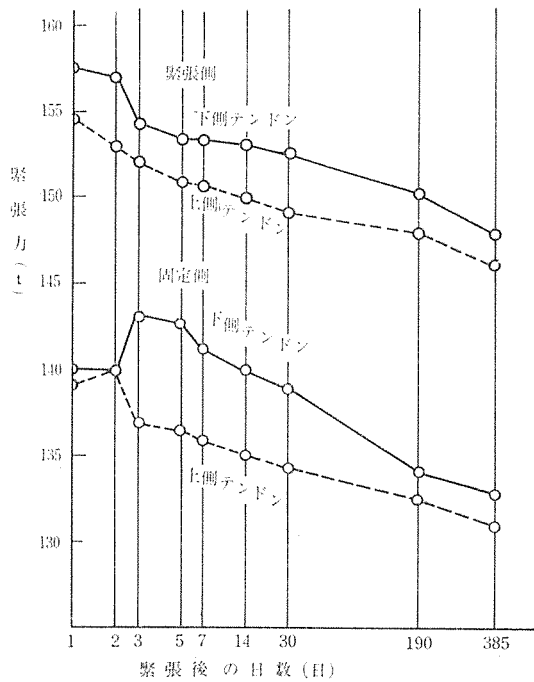
		緊張直後	1 日後	2 日後	3 日後	5 日後	1 週間後	2 週間後	1 か月後	6 か月後	1 年後
上側 ³⁾ テンドン	緊張側 $P_2^{1)}$	157.0	154.5	153.0	152.0	151.0	151.0	150.0	148.0	148.0	146.0
	減少量 ²⁾		2.5	4.0	5.0	6.0	6.0	7.0	8.5	9.0	11.0
	固定側 $P_3^{1)}$	142.0	139.0	140.0	136.5	136.5	136.0	135.0	133.5	131.5	130.5
下側 ³⁾ テンドン	緊張側 $P_2^{1)}$	160.0	157.5	157.0	154.0	153.5	153.5	153.0	152.5	150.0	147.5
	減少量 ²⁾		2.5	3.0	6.0	6.5	6.5	7.0	7.5	10.0	12.5
	固定側 $P_3^{1)}$	142.0	140.0	140.0	143.0	141.0	141.0	140.0	139.0	134.5	133.0
	減少量 ²⁾		2.0	2.0	+1.0	1.0	1.0	2.0	3.0	7.5	9.0

注 1) 緊張側 P_2 、固定側 P_3 は下図の模式図に示すものである。

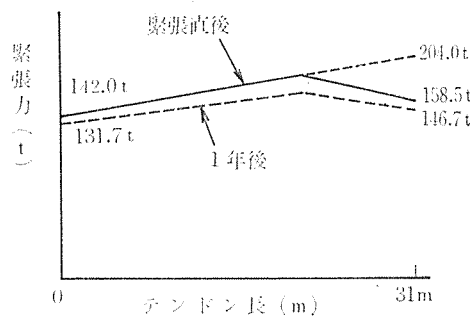


注 2) 減少量は緊張直後との差である。

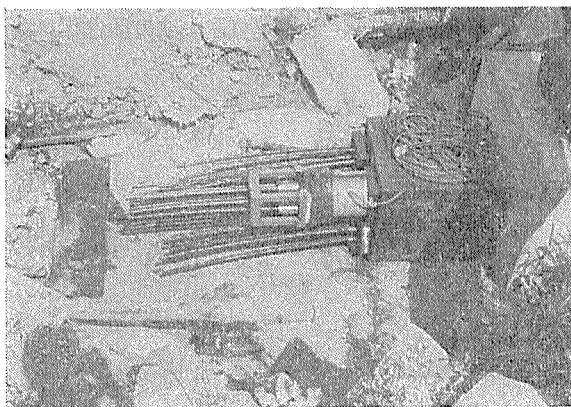
注 3) 上側テンドン、下側テンドンとは実験したケーブルのうち、コンクリートブロック中で位置的におのおの上および下に配置したテンドンをいう。



図—6 緊張力の長期測定結果



図—7 テンドンの緊張力の分布



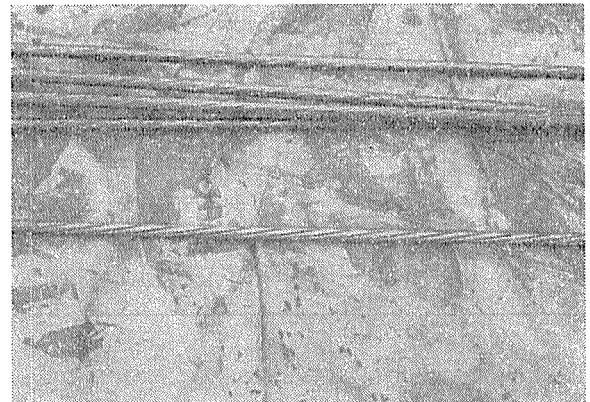
図—8 緊張力の長期測定状況

められる。

(2) 防錆剤の効果調査

グラウトしない場合、PC鋼材の腐食防止に用いる被覆材料は構造物の耐用年数の間、および予期される温度範囲でひびわれがはいったり、もろくなったり、液状になったりしないことが必要である。

本試験において1年経過後、緊張力を解放しPC鋼材をシースから抜き出したとき、PC鋼材の表面はグリースで完全に被覆されていた。グリースは粘度がやや低下し、さらっとした感じになり、やや茶色っぽく変色していた。グリースをふき取ったPC鋼材の表面には全然さびが認められず、表面は完全に平滑で銀色の金属色そのままであった。これにより、グリース(Shell Alvania EP 1)の防錆効果が1年間完全であったことが認められる。グリースをふき取ったPC鋼材の状況を図—9に示す。



上4本はコンクリートブロックから引き出した状態でグリースのついたストランド、下1本はグリースをふき取ったストランドを示す。

図—9 1年後のPC鋼材の状況

(3) レラクセーション特性試験結果

a) 機械的性質試験結果 レラクセーション試験をする前に1年間緊張状態で放置したPC鋼材の機械的性質が変化しているかどうか調べるため、未使用のPC鋼材と比較して引張破断試験を参考までに行ってみた。試験結果を表—6に示す。

未使用材は緊張材と同一のコイルから採取したものでないため、これらの機械的性質の比較は必ずしも適当ではないが、試験結果より1年間緊張後のPC鋼材の機械的性質にはさしたる変化がないものと考えられる。

表—6 1年間緊張したダイフォームストランドの機械的性質試験結果

特性 供試材	断面積 (mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	0.2% 降伏応力 (kg/mm ²)	降伏比 (%)	伸び GL=100mm (%)	弾性係数 (kg/mm ²)
1年間緊張材	35.5	180.3	156.8	87.1	6.3	20 900
未使用材	35.5	177.1	155.2	87.6	7.2	21 000

b) レラクセーション試験結果 1年間緊張されて

いたφ17.8mmダイフォームストランドおよび比較材として未使用のダイフォームストランドの2種類を使用して微高温レラクセーション試験を実施した。φ17.8mmダイフォームストランドのレラクセーション試験はJIS規格に準拠すると初荷重が27.2tと大きくなり、試験機の能力を越えるので、本試験では、ストランドを解きほぐして中心素線を取り出し、その中心素線について試験した。

試験条件については、初荷重は規格降伏荷重の80%である4400kg、試験温度は20℃、40℃、60℃、80℃の4水準、その他載荷条件等はJIS規格に準拠して行った。なお、規格降伏荷重としてはBritish Ropes社規格を採用した。

試験結果は表-7および図-10にまとめて示す。こ

表-7 1年間緊張したダイフォームストランド（芯線）の高温レラクセーション試験結果（n=2）

試験温度 および 時間	(単位 %)				
	20℃ 10 h	40℃ 10 h	60℃ 10 h	60℃ 100 h	80℃ 10 h
供試材					
1年間緊張材	0.51	0.75	1.02	1.56	1.54
未使用材	0.65	0.84	1.18	1.64	1.70

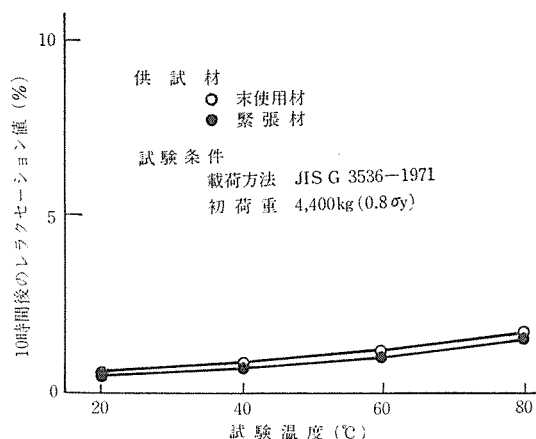


図-10 1年間緊張したダイフォームストランド（芯線）の高温レラクセーション特性

の結果より明らかなように、緊張材は未使用材に比べてややレラクセーション値が小さくなっている。これはプレストレスングや再負荷された場合にレラクセーションが小さくなるのと同様の効果により、緊張材のレラクセーションが小さくなっているものと思われる。

c) 30年後のレラクセーションの推定 実際の原子炉と類似させた図-11のような場合の30年後のレラクセーション値の推定を行ってみた。この場合、1年後60℃に昇温される際の初荷重は1年間20℃で緊張され

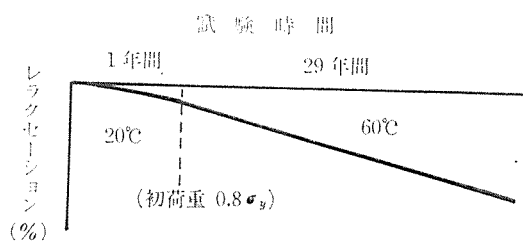


図-11 実際の原子炉に類似させた場合のレラクセーション条件

たことによるレラクセーション量分だけ、 $0.8\sigma_y$ より低下することになる。したがって、表-7は初荷重を $0.8\sigma_y$ とした場合の結果であり、表-7の高温レラクセーション値を推定に適用する場合、厳密に言えば、初荷重の差だけやや大きな値が得られることになる。しかし、スタビライズド材はレラクセーションが小さいため、1年間緊張による荷重減少も小さく、かつ高温における初荷重の影響も小さいので、 $0.8\sigma_y$ の初荷重で行った結果とほとんど変わらないと考えて、 $0.8\sigma_y$ の初荷重のもとでの高温レラクセーション結果より、60℃における29年後のレラクセーション値をLarson-Miller Parameter法により推定してみた。この方法はレラクセーション時の塑性ひずみがArrheniusの式で表わされると仮定して求める方法である。

すなわち、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ は

$$\dot{\epsilon} = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

で表わされる。

ここで、

A: 定数

Q: レラクセーション時のみかけの活性化エネルギー

R: ガス定数

T: 試験温度 (°K)

式(1)を積分すると、

$$\epsilon = A' \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)t \quad (2)$$

となる。

ここで、

ϵ : ひずみ (レラクセーション時一定)

t: 試験時間

式(2)の両辺の対数をとって整理すると、

$$\frac{Q}{2.3RT} = \log \frac{A'}{\epsilon} + \log t \quad (3)$$

となる。 $\log(A'/\epsilon) = C$ (材料定数)、 $Q/2.3R = P$ とすると、

式(3)より

$$T(C + \log t) = P$$

の関係が成立する。このPをLarson-Miller Parameter

と呼び、この P とレラクセーション値の関係はPC鋼線の場合 $C=20$ とおくと1本の線であらわされ、この関係より、長時間後のレラクセーション値を推定する方法がLarson-Miller Parameter 法である。

いまここで、表-7の高温レラクセーション結果をLarson-Miller Parameter 法で整理すると図-12のようになる。この図の関係より推定される 60°C の29年間のレラクセーション曲線を図-13に示す。この結果

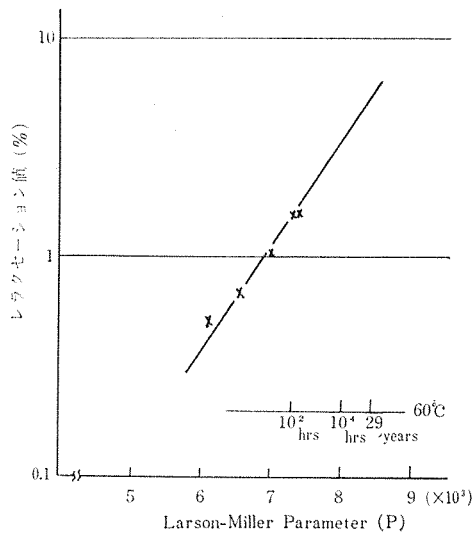


図-12 ダイフォームストランドの Larson-Miller Parameter マスター カーブ

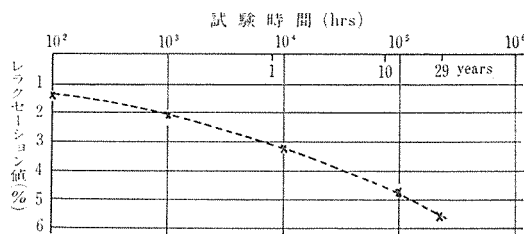


図-13 図-12 の Larson-Miller Parameter マスターカーブから推定される 29 年間のレラクセーション曲線

60°C における 29 年後のレラクセーション値は 5.56% である。

なお、長時間のレラクセーション値を推定する方法として、ASTM E-328-67 T Part A に、1000 時間レラクセーション結果を両対数にとり、長時間側へ外挿することにより、長時間後のレラクセーション値を求める方法が示されている。今回 60°C における試験は 100 時間までしか行っておらず、長時間側へ外挿する場合、1000 時間試験結果に比べて、より誤差が大きくなるが、この 100 時間試験結果を外挿してみると、その推定レラクセーション曲線は図-14 となり、29 年後のレラクセーション値は 7.25% となる。したがって、両推定法ともほ

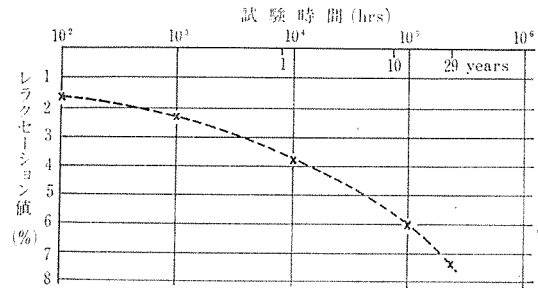


図-14 表-7 の 60°C の 100 時間試験より両対数外挿法で推定したレラクセーション曲線

ぼ妥当な値を示しているものと考えられる。

次に、この推定結果より、実際の原子炉における 30 年後のレラクセーション値を考えてみる。この場合、 20°C から 60°C に昇温される際に熱膨張が生じるが、鋼線とコンクリートの熱膨張係数はほとんど等しいので、熱膨張による影響は無視してよいと考え、図-15に示す 20°C における 1 年間の推定レラクセーション曲線と Larson-Miller Parameter 法により推定された図-13 のレラクセーション曲線を合成した。この結果を図-16に示す。なお、合成の際、昇温は瞬間的に行うと仮定している。この図より推定すると、30 年後の推定レラクセーション値は 6.75% である。

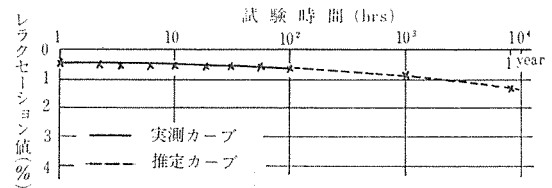


図-15 20°C における 1 年間の推定レラクセーション曲線

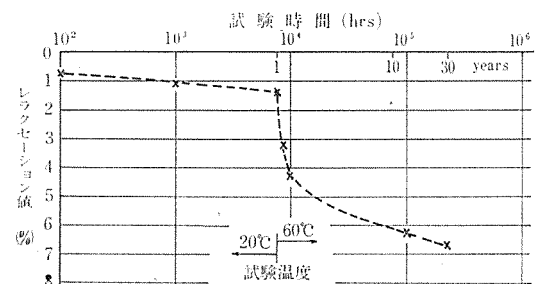
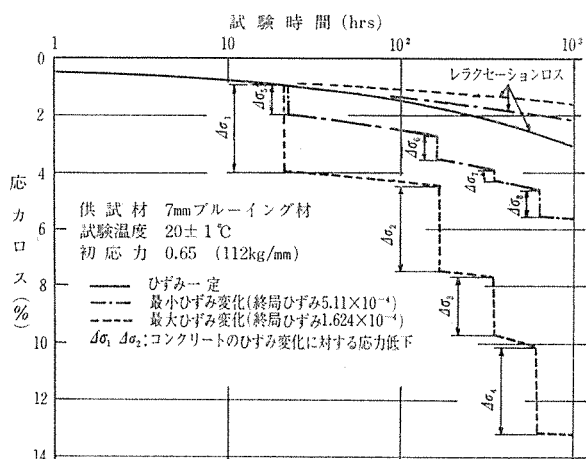


図-16 実際の原子炉に類似させた場合の推定レラクセーション曲線

なお、この推定レラクセーションは鋼材のみの純レラクセーションであり、実際には緊張力は鋼材のレラクセーションだけでなく、コンクリートのクリープや乾燥収縮が生じるため、この原因による緊張力の低下もまた生じてくる。また、コンクリートのクリープや乾燥収縮のためひずみは一定にならず、ひずみは時間の経過とともに減少していく。このひずみの減少量の最大と最小を想



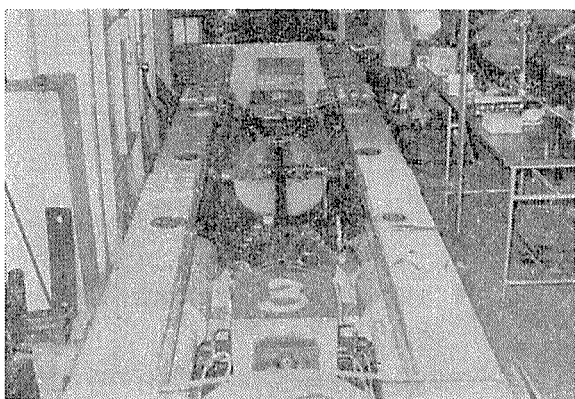
図—17 コンクリートのクリープや乾燥収縮によるひずみ変化を考慮したときのレラクセーション挙動

定して、1000 時間までのひずみ減少量を段階的に減少して試験させた結果は 図—17 のようになる。コンクリートの収縮やクリープを考慮した際の鋼線のレラクセーションは、一定ひずみ下のレラクセーションに比べて 1000 時間後で 65～75% の値を示し、400 時間以後ではほとんどレラクセーションを生じなかったことを示す。また、一般に常温では鋼線の純レラクセーションによる応力低下はコンクリートのクリープや乾燥収縮を含む全応力低下量の 10～35% 程度である。

したがって、原子炉の場合でも、30 年後の PC 鋼材の有効応力はコンクリートのクリープや乾燥収縮のすべてを考慮した場合、先に求めた 30 年後の推定レラクセーションを用いて計算した有効応力より大きくなると考えられる。

(4) テンドンの定着試験結果

図—18 に示すように 300 t アムスラー タイプ横型試



300 t アムスラータイプ横型万能試験機に tendon をセットした状態

図—18 定着試験状況

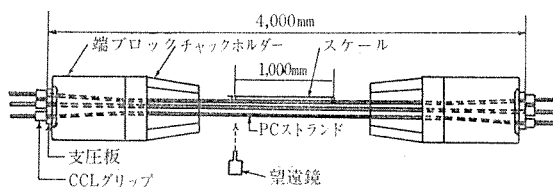
験機を使用して CCL シングルスランドシステム 7 T 17.8 mm テンドンの引張破断試験を行った。

まず、テンドンの引張長さをそろえるために、図—19



図—19 テンドンのつかみ長さをそろえるために CCL ジャッキで緊張している状態

に示すように CCL 30 t ジャッキでポンプ圧力 100 kg/cm² (4.71 t) まで 1 本ずつ緊張して定着し、しかるのちに、試験機でテンドン全体を破断するまで緊張し、破断荷重および破断時伸びを測定した。破断時伸びの測定はスチールの一端をストランドに固定し、他端は移動可能にして、ストランドに平行に取付ける。伸びの測定長は 1000 mm として固定端より 1000 mm の位置にマーキングをして、各荷重段階ごとのマーキングの移動量（伸び量）および破断時の伸びを測定する。図—20 に試験方法の概略を示す。テンドンのつかみ間隔は 4 m とした。



図—20 テンドン引張試験方法

PCR/V に関する ACI-ASME 案では、定着具に定着されるテンドンの破断荷重は付着を生じさせない用い方をする場合、そのテンドンの保証引張荷重の 100% 以上でなければならないとある。また、定着具に定着されるテンドンの破断時の伸びは 2% 以下であってはならないとある。

本試験の結果得られた破断荷重および定着効率および破断時伸びを 表—8, 9 にまとめて示す。また荷重—伸び曲線の代表例を 図—21 に示す。

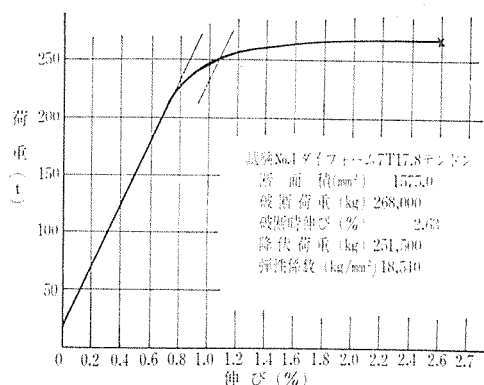
保証引張荷重に対する定着効率は 19 本よりストランドの場合平均 100.3%, ダイフォームストランドの場合 102.0% であり、破断時伸びは 19 本よりストランドの

表—8 19 本よりストランドよりなるテンドンの試験結果

試験 No.	破断荷重 (kg)	定着効率 (%)		破断時伸び (%)	記 事
		act. に対し	spec. に対し		
1	272 500	94.0	98.5	2.12	側ストランド 素線 1本切断
2	278 000	96.0	100.5	2.53	側ストランド 素線 1本切断
3	282 000	97.4	102.0	2.75	側ストランド 素線 1本切断
平均 値	277 500	95.8	100.3	2.47	

表—9 ダイフォームストランドよりなるテンドンの試験結果

試験 No.	破断荷重 (kg)	定着効率 (%)		破断時伸び (%)	記 事
		act. に対し	spec. に対し		
4	268 000	97.0	101.5	2.63	芯ストランド 素線 4本切断
5	269 500	97.5	102.0	2.79	{ 芯ストランド 素線 4本切断 側ストランド 素線 1本切断
6	269 000	97.3	101.8	2.79	側ストランド 素線 1本切断
7	269 500	97.5	102.0	2.76	側ストランド 素線 3本切断
8	270 500	97.9	102.4	2.93	側ストランド 素線 1本切断
9	270 000	97.7	102.2	2.91	側ストランド 素線 1本切断
平均 値	269 417	97.5	102.0	2.80	



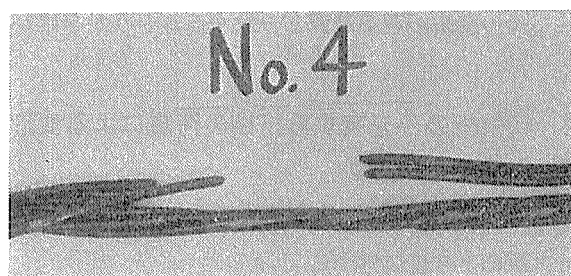
図—21 テンドンの荷重-伸び曲線図

場合は平均 2.47%, ダイフォームストランドの場合平均 2.80% であり, とともに ACI-ASME 案を満していることが認められる。

実際引張荷重に対する定着効率は 19 本よりストランドの場合平均 95.8%, ダイフォームストランドの場合平均 97.5% となり, ダイフォームストランドの方が定着効率がよく, またばらつきも小さく, 破断時伸びも大きいので, PCR V 用テンドンとしてより好ましいと考えられる。

破断状況の代表例を 図—22 に示す。

テンドンの破断時に定着具の異状は全然認められず, 定着具が十分な強度を有し, 確実な定着性能を有していることが明らかとなった。



図—22 テンドンの破断状況

5. む す び

PCR V に用いられるテンドンに関する諸試験の一つとして, 今回は実物大モデル供試体中で 1 年間緊張状態に保ったテンドンの緊張力の低下測定, および防錆効果の調査, および緊張解放後の PC 鋼材のレラクセーション特性の調査結果, およびテンドンの定着効率試験結果を報告した。いずれの結果も, PCR V 用テンドンとして満足すべき性能を有していることが判明した。今後とも, PCR V に関する試験研究を続けていくことが必要であるが, 本報告がこれら研究のワンステップとして, なんらかのお役に立てば幸いとするところである。

なお, 最後に本試験において大型ブロック供試体の製作を担当しかつ測定の協力を得たオリエンタルコンクリート株式会社に感謝の意を表するものである。

1974.1.7・受付