

供用期間中におけるPCCVの長期挙動評価手法に関する研究

山口 恒 雄 山 本 幹 夫 小 柳 光 生

(原子力本部技術部)

山 田 守 野 口 昌 也

(原子力本部技術部)

An Method for Evaluating Long-term Behavior on PCCVs

Tsuneo Yamaguchi Mikio Yamamoto Mitsuo Koyanagi

Mamoru Yamada Masaya Noguchi

Abstract

This paper outlines a method for evaluating the long-term behavior of prestressed concrete containment vessels (PCCVs) in Japan, and compares the measured and evaluated results. The proposed method modifies the calculation method of the JSCE Design Guideline for PCCVs to take account of environmental conditions, load conditions and structural specifications. The correspondence of measured and evaluated results is judged to be quite good.

Furthermore, experimental studies on tensile force redistribution of unbonded tendons due to temperature change were conducted to improve the accuracy of the evaluation method. The experimental results clearly showed that the tensile force redistribution affects the long-term behavior of PCCVs.

概 要

本報告は、我が国におけるPCCVの長期挙動評価に関して筆者らがこれまでに提案した手法の概要と、この手法による計算値と測定値との対応性について述べたものである。提案した評価手法は、設計段階で用いた既往の手法と基本的には差はないが、実機PCCVでの測定値を対象として評価するため、長期挙動に係わる環境条件、荷重条件、構造条件を考慮して、改良を加えたものである。また、テンドンの温度変化に伴う張力再配分の問題については別途に実験研究を実施し、それが測定値におよぼす影響量を求めた。この結果、ひずみ、テンドン張力等の測定値と計算値との対応性が非常に良好になることが認められ、PCCVの長期挙動評価にこの評価手法が役立つことが確認された。

1. はじめに

我が国では、日本原子力発電(株)の敦賀発電所2号機、関西電力(株)の大飯発電所3/4号機、九州電力(株)の玄海発電所3/4号機でプレストレストコンクリート原子炉格納容器(PCCV)が採用されている。これらのPCCVでは、テンドン(緊張材)の緊張完了後、多くの日を経ずして構造性能確認試験(SIT)が実施され、内圧時の変位およびひずみが詳細に求められている。SIT以降においても、ひずみと温度が定期的に測定され、ひずみの経時変化に関する検討が行われている。また、プラント運転開始後、1年、3年、5年では、供用期間中検査(ISI)が実施され、代表テンドンの張力変動量も求められている。

これらの測定値に基づいてPCCVの長期挙動が検討され、残存プレストレスから構造健全性が評価されている。測定値そのものは、環境条件、荷重条件、構造条件の影響を受ける。環境条件は温度、相対湿度条件で、これらはコンクリートのクリープ、乾燥収縮ひずみに影響をおよぼし、荷重条件は、SIT時内圧または温度荷重等の荷重履歴で、アンボンドテンドンの張力再配分に影響をおよぼす。さらに構造条件は、鉄筋等鋼材の剛性寄与やプレストレス条件で、これらからでも、クリープひずみは影響を受ける。以上の影響量は、構造健全性評価の上では小さいといえるが、これらを考慮して検討することにした。特にテンドンの張力再配分の影響については、前記の電力3社の3年半にわたる共同研究で実験的に求めるとも

に、摩擦理論による評価式⁹⁾を用いて検討した。

この一連の研究は、長期挙動評価手法の信頼性向上を目的としたものである。以下にこの研究の概要を述べる。

2. PCCVの概要

我が国で採用されたPCCVは、半球ドーム型3バットレスあるいは2バットレスPCCVで、テンドンには1,000tアンボンドテンドンが用いられている。テendonは、水平投影面に対し、直交2方向に配置される逆U型テendonと、円周方向に配置されるドームフープテendon、円筒フープテendonとで構成される。テendon本数、テendonの緊張順序は、各プラントで微妙に相違するが、個々のテendonの緊張・定着作業にはほとんど差はない。特に、テendonを所定の張力で緊張・定着した直後において、その定着端張力をロックオフ荷重として求め、それから約80℃に加熱したグリースをテendonダクトにグラウトする手順はほぼ同じである。また、ISI時において検査対象テendonの選定は各プラントで相違するが、それらのテendonの定着端張力をリフトオフ荷重として求める手法もほぼ同じである。なお、プレストレッシングシステムとして、敦賀2号機、玄海3/4号機ではBBRV、大飯3/4号機ではVSLが採用されているが、ロックオフ荷重、リフトオフ荷重を求める手法（テendon定着端にセンターホールジャッキをセットしてテendonを緊張し、定着治具間に予め挟み込んでおいたフィラーゲージが引き抜ける時の荷重をテendonの定着端張力とする）には差がない。

3. PCCVの長期挙動評価手法

PCCVの設計に於いては、後述のTable 3に示すとおり、土木学会「プレストレストコンクリート標準示方書」（53年度版）¹⁾（以下、土木学会示方書と略す）に基づいて、テendonの張力ロスを算定している。ここではこの設計で用いられている計算手法に改良を加え、より精度の高い評価手法としたものの概要を示す²⁾。

3.1 コンクリートの躯体ひずみ評価手法

コンクリート躯体ひずみ測定値との整合性をより良好とするために、設計計算式に対して下記の①および②の補正を行った。

① 湿度の季節変動を考慮する。

② テendon、鉄筋、ライナの鋼材およびテendonダクトによる断面欠損の影響をコンクリートの弾性係数に反映するとともに、2軸応力効果を考慮する。

クリープひずみ評価式および乾燥収縮ひずみ評価式をそれぞれ下記に示す。

$$\varepsilon_{creep}(\sigma) = \phi(t, t_0) \cdot \varepsilon_0 ; \varepsilon_0 = (\sigma_0 - v_e \cdot \sigma_\phi) / E_e \quad \cdots (1)$$

$$\varepsilon_{creep}(\phi) = \phi(t, t_0) \cdot \varepsilon_\phi ; \varepsilon_\phi = (\sigma_\phi - v_e \cdot \sigma_0) / E_e \quad \cdots (2)$$

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cs}(t, t_0) \quad \cdots (3)$$

ここで、 $\phi(t, t_0)$ ：湿度の季節変動を考慮したクリープ係数、 v_e 、 E_e ：コンクリートの等価ポアソン比および等価弾性係数、 $\varepsilon_{cs}(t, t_0)$ ：湿度の季節変動を考慮した乾燥収縮ひずみ

3.1.1 湿度の季節変動がクリープおよび乾燥収縮に

およぼす影響 土木学会示方書¹⁾のクリープ係数および乾燥収縮ひずみは、各々(4)、(5)式で表されている。しかし、後述のFig. 1～6の図に見られるように、ひずみ測定値は、夏季が谷、冬季が山となるような周期的な変動性状がある。RCスラブの測定結果³⁾等を参考に、PCCVのコンクリート躯体のひずみ測定値における周期的な変動も、季節における湿度変化が原因と考え、変動性状をSin波形で表されるものとする。この内、Table 1に示す同示方書の値を基準にしてSin波形で±10%の幅で振幅するものと仮定し、かつ式の単純化を計るために設定したフローひずみに対する基本クリープ係数(ϕ_{f0})および基本収縮ひずみ(ε_{s0})を各々(6)、(7)式で表すこととした⁴⁾。

$$\phi(t, t_0) = \phi_{f0} \cdot \beta_d(t - t_0) + \phi_{f0} [\beta_f(t) - \beta_f(t_0)] \quad \cdots (4)$$

$$\varepsilon_{cs}(t, t_0) = \varepsilon_{s0} [\beta_s(t) - \beta_s(t_0)] \quad \cdots (5)$$

$$\phi_{f0} = A + A/10 \times \sin[2\pi(t - t_0 + \Delta t^*)/365 \cdot C] \quad \cdots (6)$$

$$\varepsilon_{s0} = B + B/10 \times \sin[2\pi(t - t_0 + \Delta t^*)/365 \cdot C] \quad \cdots (7)$$

ここで、 t_0 、 t ：載荷時および考える時点でのコンクリート有効材齢(日)で、 $\sum(T+10) \cdot \Delta t^*/30$ より各々求める、 T ：温度(℃)、 Δt^* ：温度が T ℃である期間の日数、 Δt^* ：10月1日を基準とし、その基準日と載荷日の間の日数に有効材齢の定数 C を乗じたもの、 C ：有効材齢の定数 $(T+10)/30$ 、 A ：相対湿度条件から決まる定数(湿度70%の場合、1.80、80%の場合、補間により1.50)、 B ：相対湿度条件から決まる定数(湿度70%の場合、227、80%の場合、補間により164)

3.1.2 コンクリートの等価弾性係数 コンクリートの設計基準強度(強度管理材令91日)は、大飯3、4号機が450kgf/cm²、その他のプラントが420kgf/cm²である。コンクリートの等価弾性係数は、SIT時に実施されたコンクリート供試体の圧縮試験時の測定結果を基に、鋼材およびシースによる断面欠損の影響を考慮して求めた。等価弾性係数をTable 2に示す。表に示すとおり、鋼材の影響はシースの断面欠損の影響と相殺され、等価弾性係数(E_e)はコンクリートの弾性係数(E_c)とほぼ等しい値となっている。

3.2 テendonの張力評価手法

テendonの張力ロスにおよぼす影響は、クリープに乾燥収縮を加えた躯体コンクリートの変形の経年変化分が最も大きい。測定値との整合性を良好にするためには、躯体コンクリートの変形の経年変化分を精度良く評価するとともに、弾性ロスおよびリラクセーションについても計算精度を上げる必要がある。しかし、全体の張力ロスに占めるリラクセーションロスの割合は、大きくとも10～20%程度と考えられる。設計計算式ではTable 3に示す土木学会示方書¹⁾が用いられているが、ここで提案する各種張力ロスの評価は、コンクリートの弾性ロス(ΔF_1)については、FEM解析による計算値を、コンクリートの変形の経年変化分のクリープロス(ΔF_3)およ

び乾燥収縮ロス (ΔF_d) は、提案したひずみの評価手法による結果が後述の4.1節で示すとおり測定値と良く対応しているため、ひずみ計算値を用いることとした。なお、リラクセーションロス (ΔF_r) については、設計手法と同一手法を用いる。

テンドン張力の提案評価式を Table 3 に示す。

4. 実機PCCVにおける長期挙動測定値と計算値

PCCV の SIT は、敦賀2号機が1986年2月、大飯3号機が1991年2月、大飯4号機が1992年2月、玄海3号機が1993年2月に実施された。これらのPCCVでは、SIT以降、今日に至るまで、コンクリート躯体のひずみが年2~4回のペースで定期的に測定されている。また、PCCVのISIも、敦賀2号機で1987年12月、1990年9月、1993年5月の3回実施され、大飯3号機では1993年2月と1995年9月、大飯4号機では1994年3月と1996年10月に、玄海3号機でも1995年2月に1回実施されおり、テンドンの定着端張力が測定されている。

Table 1 土木学会示方書¹⁾の相対湿度と ϕ_{f_0} および ϵ_{s0} の関係

Relationship between Relative Humidity and ϕ_{f_0} and ϵ_{s0}

相対湿度	ϕ_{f_0}	ϵ_{s0}
70%	2.0	250
90%	1.3	100

Table 2 等価弾性係数 (E_e)
Equivalent Young's Modulus

	E_e ($\times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$)	備考、 E_c ($\times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$)
敦賀2号機	3.92	3.95
大飯3号機	4.08	4.18
大飯4号機	3.76	3.81
玄海3号機	3.97	3.99

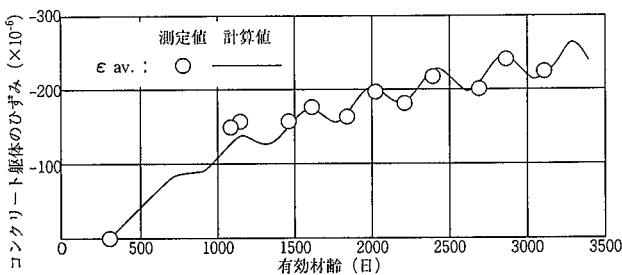


Fig.1 敦賀2号機ドーム部
Dome Section, Tsurumi #2

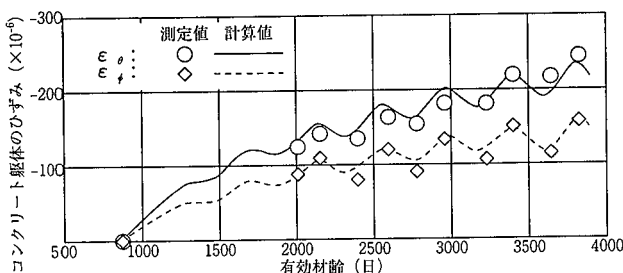


Fig.2 敦賀2号機円筒部
Middle Section of Cylinder, Tsurumi #2

4.1 コンクリート躯体のひずみ

Fig.1~2に、敦賀2号機PCCVのドーム部、および円筒中腹部におけるひずみ測定値と計算値の比較を示す。Fig.3~4に大飯3号機PCCVのドーム部、円筒脚部におけるひずみ測定値と計算値の比較を示す。Fig.5~6に玄海3号機PCCVのドーム部および円筒中腹部におけるひずみ測定値と計算値の比較を示す。これらの図で、横軸は有効材齢 t (PS導入までを20℃、それ以降を25℃とする温度条件で求めたもので、PCCVの設計で設定している条件に合わせている。)、縦軸はSIT開始直前の時点におけるひずみを原点とし、そこからの変動量を示している。ひずみの測定値は複数の測定点の平均値で表している。なお、計算値の算定には敦賀2号機、大飯3号機PCCVに関しては相対湿度条件を70%としたが、玄海3号機に関しては、外部塗装に保湿性の高いウレタン系塗料が使われていることを考慮して、相対湿度条件を80%とした。Fig.4に示した大飯3号機PCCVの円筒脚部に関しては、脚部の外部拘束による熱応力考慮の有無についても比較した。

Fig.1~6に見られるように、季節における相対湿度の変化、および円筒脚部の外部拘束による熱応力を考慮することにより、ひずみ測定値と計算値との対応性は全般的に良好となっており、実機PCCVのコンクリート躯体ひずみはかなりの精度で予測できるといえる。

Table 3 テンドン張力評価式
Evaluation Formula of Tendon Tensile Force

設計 計算 式 (土木 学会)	弾性変形 ロス (tf)	$\Delta F_1 = A_p \cdot \frac{1}{2} \cdot n \cdot \sigma_c$
	リラクセー ション ロス (tf)	$\Delta F_2 = A_p \cdot \Gamma(t) \cdot f_i \left(1 - 2 \times \frac{\Delta F_3 + \Delta F_4}{f_i} \right)$
	クリープ ロス (tf)	$\Delta F_3 = A_p \times \frac{n \times \phi(t, t_0) \times \sigma_c}{1 + n \times \frac{\sigma_c}{f_i} \left[1 + \frac{1}{2} \phi(t, t_0) \right]}$
	乾燥収縮 ロス (tf)	$\Delta F_4 = A_p \times \frac{E_p \times \epsilon_s(t, t_0)}{1 + n \times \frac{\sigma_c}{f_i} \left[1 + \frac{1}{2} \phi(t, t_0) \right]}$
提案 評価 式	弾性変形 ロス (tf)	$\Delta F_1 = E_p \cdot A_p \cdot \Delta \epsilon$
	リラクセー ション ロス (tf)	$\Delta F_2 = \Gamma(t) \cdot F_0 \cdot \left\{ 1 - 2 \times (\Delta F_3 + \Delta F_4) / F_0 \right\}$
	クリープ ロス (tf)	$\Delta F_3 = E_p \cdot A_p \cdot \epsilon_{creep}$
	乾燥収縮 ロス (tf)	$\Delta F_4 = E_p \cdot A_p \cdot \epsilon_s$

ここで、 E_p : テンドンのヤング係数

A_p : テンドンの断面積

$\Delta \epsilon$: FEM解析から求めるテンドン緊張作業時の構造体ひずみ変動量

$\Gamma(t)$: LARSON-MILLER法によるリラクセーション係数

F_0 : テンドンの初期平均張力

ϵ_{creep} : (1), (2)式から求めるコンクリートのクリープひずみ

ϵ_s : (3)式から求めるコンクリートの乾燥収縮ひずみ

4.2 テンドンの定着端張力

Table 4～6 に、敦賀発電所 2 号機、大飯発電所 3 号機および玄海発電所 3 号機の代表テンドンのリフトオフ荷重測定値と計算値との比較を示す。表に見られるように、(測定値/計算値)の比は、1 年 ISI の結果で 0.97～1.04, 3 年 ISI の結果で 0.98～1.05, 5 年 ISI の結果で 0.97～1.03 となった。リフトオフ荷重の測定誤差が、導入張力の±2.0%程度であるといわれていることを考慮すると、測定値と計算値との対応性は比較的良好であることが認められる。

しかし、実際には、リフトオフ荷重測定値はテンドン

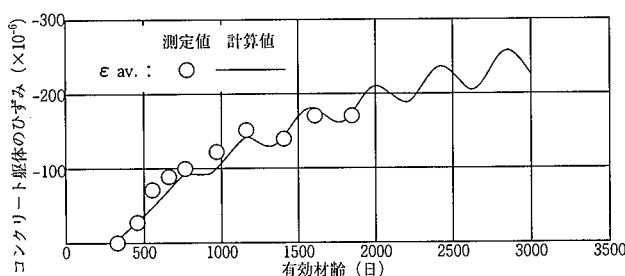


Fig.3 大飯 3号機ドーム部
Dome Section, Ohi #3

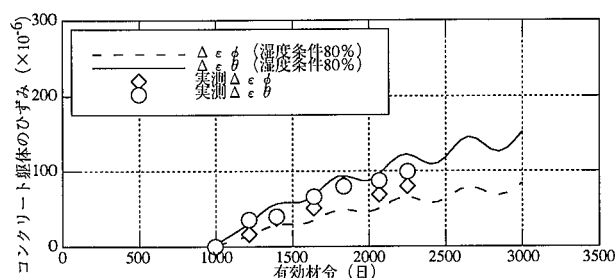


Fig.5 玄海 3号機ドーム部
Dome Section, Genkai #3

の定着端における張力を検出したものであるのが、本評価法はテンドンの平均張力の変動量を算定したものである。また、リフトオフ荷重測定値の中には、同一テンドンでもその両端での張力変動量に大きな差を生じているものや、テンドン本来は減少していくべき張力が増大するものなど、本評価法では説明のつかない現象も見られる。

このような現象は、テンドンの張力再配分が影響したものと考えられる。しかし、実機PCCVでのコンクリート躯体ひずみ測定、テンドンの定着端張力測定だけでは、張力再配分性状を把握できないため、5章で述べるような縮尺模型実験を実施した。

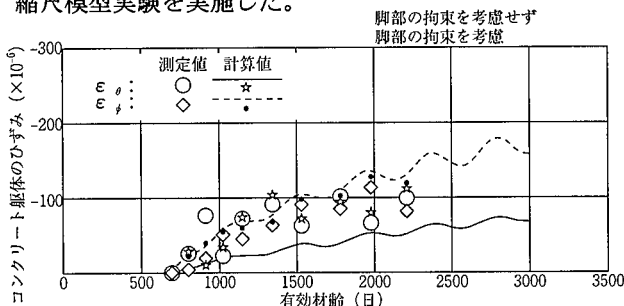


Fig.4 大飯 3号機円筒脚部
Bottom Section of Cylinder, Ohi #3

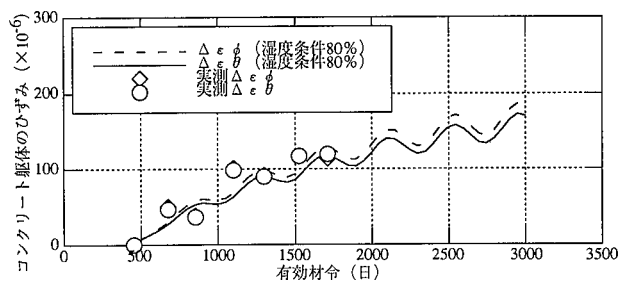


Fig.6 玄海 3号機円筒部
Middle Section of Cylinder, Genkai #3

Table 4 敦賀2号機のテンドン張力測定値と計算値の比

Comparison of Tendon Force between Evaluated Value and Measured Value in Tsuruga #2

検査テンドン	ロックオフ荷重・T0	1年ISI:T1						3年ISI:T3						5年ISI:T5					
		① 測定値				② 計算値 (①/②)		① 測定値				② 計算値 (①/②)		① 測定値				② 計算値 (①/②)	
		測定値	ΔF1	ΔF2	ΔF3	ΔF4		測定値	ΔF2	ΔF3	ΔF4			測定値	ΔF2	ΔF3	ΔF4		
円筒フープテンドン	H5	691	653	1.7	7.7	20.6	3.9	657	(0.99)					650	8.2	27.9	8.9	638	(1.02)
	H10	690		7.4															
	H25	699		17.3				654	8.0	25.6	6.8	641	(1.02)						
	H37	689	627	31.7	7.7	20.6	3.9	632	8.0	25.6	6.8	617	(1.02)	622	8.2	27.9	8.9	612	(1.02)
	H44	689		27.0				630	8.0	25.6	6.8	622	(1.01)						
	H54	690		6.9										633	8.2	27.9	8.9	638	(0.99)
	H58	682	644	11.1	7.7	20.6	3.9												
	H86	693		29.3										616	8.2	27.9	8.9	619	(1.00)
	H102	689	634	6.8	7.7	20.6	3.9	636	8.0	25.6	6.8	642	(0.99)	627	8.2	27.9	8.9	637	(0.98)
	H115	686		21.0				641	8.0	18.9	6.8	631	(1.02)						
ドーム逆U型テンドン	H119	692	636	10.4	7.7	15.3	3.9												
	H141	697	649	2.9	7.9	13.9	4.6	650	8.2	17.6	8.0	660	(0.98)	639	8.4	19.1	10.5	656	(0.97)
	H150	679		6.8				631	8.2	24.5	8.0	632	(1.00)						
	H157	687		6.3										651	8.4	26.7	10.5	635	(1.03)
	H161	690	631	11.8	7.9	19.4	4.6												
	V16	687	655	-0.1	8.0	10.7	3.9												
	V23	691	661	8.7	8.0	10.7	3.9	663	8.2	13.3	6.8	654	(1.01)	653	8.4	14.4	8.9	651	(1.00)
	V31	688		10.2				655	8.2	13.3	6.8	650	(1.01)	645	8.4	14.4	8.9	646	(1.00)
	V50	693		17.4										652	8.4	14.4	8.9	644	(1.01)
	V56	688	655	11.1	8.0	10.7	3.9												
逆U型テンドン	V63	686		4.5				681	8.2	13.3	6.8	653	(1.04)	666	8.4	14.4	8.9	650	(1.02)
	V82	690		16.1				677	8.2	13.3	6.8	646	(1.05)						
	V85	693	663	7.6	8.0	10.7	3.9												

Table 5 大飯3号機のテンドン張力測定値と計算値の比較

Comparison of Tendon Force between Evaluated Value and Measured Value in Ohi #3

検査 Tenden		ロックオフ 荷重: T0	1年 ISI: T1							3年 ISI: T3						
			① 測定値	張力ロス計算値				②計算値 (①/②)	① 測定値	張力ロス計算値			②計算値 (①/②)			
				ΔF1	ΔF2	ΔF3	ΔF4			ΔF2	ΔF3	ΔF4				
円筒フープ Tenden	H10	673	634	4.0	7.1	19.5	3.7	639 (0.99)								
	H18	675		5.5					644	7.6	23.4	6.2	632	(1.02)		
	H24	672	634	16.8	7.1	19.4	3.7	625 (1.01)								
	H29	682		5.4					652	7.4	23.2	6.2	640	(1.02)		
	H45	672	650	5.0	7.1	19.4	3.7	637 (1.02)	640	7.5	23.2	6.2	630	(1.02)		
	H71	675	646	19.6	7.4	14.4	3.7	630 (1.03)								
	H81	675		6.0					649	7.9	20.7	6.2	634	(1.02)		
	H101	672	640	1.7	7.2	18.4	4.2	641 (1.00)	651	7.6	22.2	7.0	634	(1.03)		
逆U型 Tenden	V18	692	679	0.7	8.3	12.5	3.7	667 (1.02)								
	V29	692	658	8.7	8.3	12.5	3.7	659 (1.00)	661	8.8	15.0	6.2	653	(1.01)		
	V40	681		5.7					651	8.6	15.0	6.2	646	(1.01)		
	V56	686	662	11.4	8.1	12.5	3.7	650 (1.02)								
	V63	689		0.0					666	8.7	15.0	6.2	659	(1.01)		
	V80	667	655	11.3	7.8	12.5	3.7	632 (1.04)								
	V86	667		14.1					637	8.3	15.0	6.2	623	(1.02)		

Table 6 玄海3号機のテンドン張力測定値と計算値の比較

Comparison of Tendon Force between Evaluated Value and Measured Value in Genkai #3

検査テンドン	ロックオフ 荷重: T0	1年ISI: T1						
		① 測定値	張力ロス計算値				②計算値 (①/②)	
			ΔF1	ΔF2	ΔF3	ΔF4		
円筒 フープ テンドン	H15	688	650	8.8	9.3	20.1	2.9	647 (1.00)
	H58	685	641	19.1	9.3	20.1	2.9	634 (1.01)
	H62	690	649	6.1	9.3	20.1	2.9	652 (1.00)
	H86	690	652	6.4	9.3	19.9	2.2	652 (1.00)
	H126	685	646	12.5	9.4	16.1	2.2	645 (1.00)
フープ 型 テンドン	H153	696	664	12.1	9.5	13.2	2.6	659 (1.01)
	H164	699	660	3.0	9.5	14.6	2.6	669 (0.99)
逆U 型 テンドン	V8	630	614	0.8	9.0	8.6	2.6	609 (1.01)
	V23	634	613	7.3	9.0	8.6	2.6	607 (1.01)
	V55	646	631	3.9	9.0	8.6	2.6	622 (1.01)
	V68	635	620	5.7	6.9	9.0	8.6	605 (1.03)

5. テンドン張力再配分に関する模型実験

5.1 実験目的

実験は、加熱実験、長期挙動実験、無応力供試体実験より構成されている。各々の実験目的は以下の通りである。

- (1) 加熱実験 緊張・定着されたテンダンの加熱・冷却時における張力再配分性状を求め、それが定着端張力の変動量にどのような影響をおよぼすかを把握する。
- (2) 長期挙動実験 テンダンの張力分布を長期間にわたって求め、自然環境条件下の変動性状を把握する。
- (3) 無応力供試体実験 自然環境下のRC部材の乾燥収縮ひずみの変動性状を求める。

5.1.1 テストベッドと供試体 Fig.7とFig.8にテストベッドの概要を示す。図に示されるように、テストベッ

ドは直径4mのRC円柱とRC矩形ブロックで構成される。テンドン供試体5mmPC鋼線と12mmPC鋼より線で、所定の位置に配置した後、緊張端位置に設置したセンターホール型ジャッキにより片引きで緊張定着した。テンドン張力は、両端ではロードセル、中間部ではテストベッドに切欠きを設けてひずみゲージにより測定した。

Table 7にテンドン供試体として用いた5mmPC鋼線と、12.4mmPC鋼より線の材料定数を示す。Table 8に供試体の一覧を示す。無応力供試体はFig.9に示す形状で、大小2体である。コンクリートは、目標強度 420kgf/cm^2 、水セメント比40.3%の生コンを使用し、1993年10月28日から11月18日の間に4回に分けて打設した。コンクリートの4週強度は 449kgf/cm^2 、弾性係数は $2.61 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ であった。

5.1.2 加熱実験 供試体はTable 8に示すH5.0シリーズ9体とHL12.4シリーズ11体の計20体である。実験パラメータは、テンダンの初期張力分布に係わる角度変化量とセットロスの有無、および摩擦係数(5mmPC鋼線と12.4mmPC鋼より線と異なる)である。測定項目は、テンダンの張力、ひずみ、温度である。

テンダンの緊張、加熱、冷却は以下のように行った。まず、緊張力導入前に初期値を測定し、変動量をモニターしながら所定の緊張力(H5.0シリーズは2.0tf、HL12.4シリーズは10.0tf)まで緊張した。次に、供試体に電流を流すことにより加熱し、上昇温度 5°C 毎に測定しながら 80°C まで加熱した。 80°C までの加熱に要した時間は、H5.0、HL12.4シリーズとも数分であった。除熱は自然冷却とし、低下温度 5°C 毎に測定した。

5.1.3 長期挙動実験 供試体はTable 8に示すHL12.4シリーズ11体とL12.4シリーズ24体の計35体である。HL12.4シリーズは、加熱実験終了後の供試体をそのままの状態で再利用し、L12.4シリーズは所定の

張力 (10tf) で緊張・定着した供試体を用い、1994 年 5 月から 1996 年 11 月までの 2 年半にわたって、2 回/週の割合で張力、ひずみ、温度を測定した。

5.1.4 無応力供試体実験 Fig.9に示す供試体 (大小 2 体) を、テストベッドと同じ自然環境下に置き、前述の長期挙動実験と同時に、ひずみ、温度を測定した。

5.2 実験結果および考察

5.2.1 加熱実験 代表例として、5mmPC 鋼線の H5.0-2.2(セットロス無し)、および 12.4mmPC 鋼より線の HL12.4-4.2(セットロス有り)の緊張時、定着時(加熱前)、最大加熱時および除熱後のテンドンのひずみ分布^{2),5),6)}を Fig. 11~12 に示す。また、H5.0-2.2 供試体の緊張端と定着端の加熱時と除熱時におけるテンドンの温度と張力との関係^{2),5),6)}を Fig. 13 に示し、同じ供試体の中間部におけるテンドンの温度とひずみ (初期張力によるひずみを含む) との関係^{2),5),6)}を Fig. 14 に示す。テン

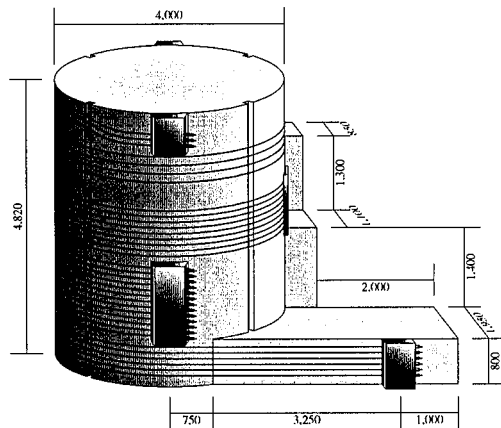


Fig.7 テストベッド概観
Over View of the Test Bed

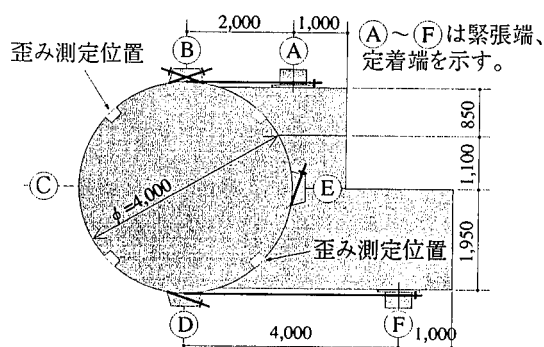


Fig.8 テストベッド平面図
Plan Figure of the Test Bed

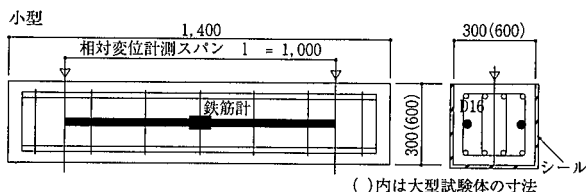


Fig.9 無応力供試体
Drying Shrinkage Specimens

ドンの摩擦係数に関する既往の研究では、Fig. 10に示される関係が得られている^{7),8)}。

緊張端張力を T_A 、定着端張力を T_B とすると、 $T_B = T_A \cdot e^{-\mu \alpha_{AB}}$ (μ は摩擦係数、 α_{AB} は A と B との間の角度変化) として近似的に表わされている。この状態で、緊張端側からテンドン張力を除荷していくと、 T_B は変化しないで、 T_A が T_A' 、 T_A'' に移動する。 T_A が T_A'' に到達後、 T_A を再緊張すると、 T_A'' は T_A''' に移動し、逆に、 T_A をさらに除荷すると、 T_A''' が T_A'''' に移動するだけでなく、 T_B も T_B'' に移動する。

これらの性状は、除荷時または再緊張時のテンドンの移動に対応する逆フリクションの作用によるものと考えられている。すなわち、A 端側から除荷する場合、A 端側からテンドンの伸びを戻すことになり、テンドンの移動量は A 端側が大きくなり、その移動量に対応して予め作用していた摩擦力が解放されるとともに、逆方向の摩擦力が作用するためと考えられている。再緊張の場合も同様である。なお、 T_A'' が T_A'''' に移動する性状については、 T_A が T_A'' に到達した時点で、逆フリクションがテンドン全域にわたって作用していることになるため、それ以上の除荷荷重に対して摩擦力で抵抗できず、 T_B も T_B'' に移動し、あたかも B 端側からテンドンを緊張した時の張力分布になると考えられている。

Table 7 テンドンの材料定数
Mechanical Properties of Tendon

	断面積 (cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)	線膨張係数 (1/°C)
5mmPC 鋼線	0.1964	2.101×10^6	13.58×10^{-6}
12.4mmPC 鋼より線	0.9290	2.065×10^6	8.734×10^{-6}

Table 8 供試体
Specimens

供試体名	角度変化(°)	定着端	緊張端	セットロス
H5.0-1.1	0	A	B	≒0
H5.0-2.1~2	314.9	B	B	≒0
H5.0-3.1~2	157.5	A	D	あり
H5.0-4.1~2	314.9	B	B	あり
H5.0-5.1~2	157.5	A	D	あり
HL12.4-1.1	0	A	B	≒0
HL12.4-2.1~2	321.4	B	B	≒0
HL12.4-3.1~2	159.9	A	D	≒0
HL12.4-4.1~2	320.9	B	B	あり
HL12.4-5.1~2	160.0	A	D	あり
HL12.4-6.1~3	152.6	B	D	あり
L12.4-1.1~3	159.9	A	D	≒0
L12.4-2.1~3	245.1	A	E	≒0
L12.4-3.1~3	159.7	A	D	あり(小)
L12.4-4.1~3	244.8	A	E	あり(小)
L12.4-5.1~3	159.6	A	D	あり(大)
L12.4-6.1~3	245.1	A	E	あり(大)
L12.4-7.1~3	168.5	A	F	≒0
L12.4-8.1~3	168.5	F	A	≒0

一方、Fig. 11～14に示されるように、両端が固定され、張力分布が均一でない tendon が熱を受け、温度が上昇する時の張力分布は、一様に減少するのではなく、高張力側の張力減少が大きく、低張力側の張力減少が小さくなる性状がある。また、温度が低下する時の張力分布は、昇温時のように顕著ではないが、高張力側の張力増大が小さく、低張力側の張力増大が大きくなる性状がある。すなわち、昇温、降温の温度履歴を受ける tendon では、Figs. 13～14に見られるように、高張力側では、張力減少、低張力側では、張力増大となり、tendon 張力の均一化が進行するといえる。

このような緊張・除荷時における tendon の移動と加熱・除熱時における tendon の移動との基本的な差は、前者では、緊張端または除荷端側の移動量が大きく、他端側の移動量が0またはそれに近いのに対し、後者では、両端での移動量が0の状態、中間部に熱膨張または熱収縮による移動が生ずることである。そして、加熱・除熱時の tendon の移動が、予め作用していた摩擦力を解放し、その後逆フリクションが作用するような性状を示すまでには移動せず、予め作用していた摩擦力が緩和される程度にしか移動しないことが考えられる。

予め作用していた摩擦力が緩和されるということは、tendon の張力勾配が変化することと等しい。換言すれば、tendon の張力勾配から求めている摩擦係数 μ が、見掛け上変化するのと同じであるといえる。

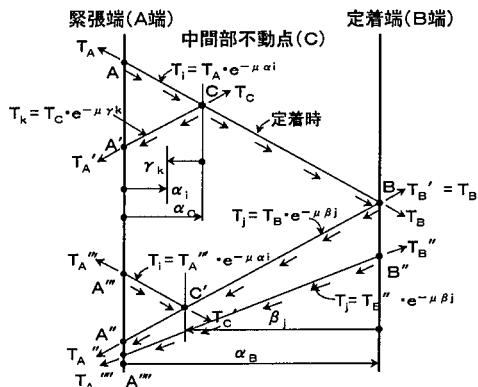


Fig. 10 摩擦力分布と tendon 張力 (片引き緊張)
Friction Force Distribution and Tendon Tensile Force.
(Tensioning from One Side)

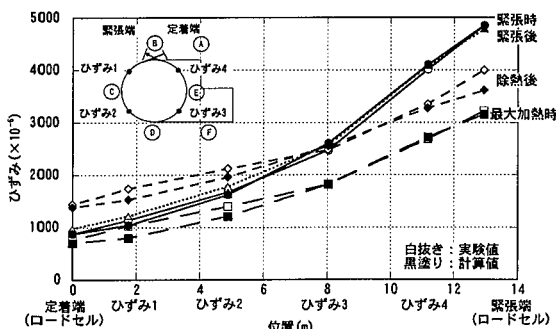


Fig. 11 実験値と計算値のひずみの比較 (H5.0-2.2)
Comparison of Experiment and Calculated Strain Values
(H5.0-2.2)

これを見掛けの摩擦係数 μ^* として、Fig. 15に示すように加熱実験の最大加熱時と除熱後の張力勾配から求める。これらの図において、張力勾配は両端部および各ひずみ測定点での隣り合う2点間の張力差をその長さで除した値であり、最大加熱時および除熱後の見掛けの摩擦係

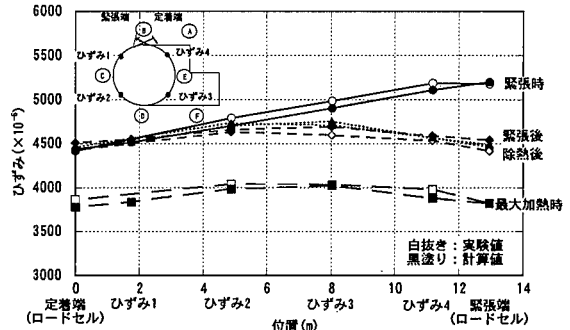


Fig. 12 実験値と計算値のひずみの比較 (HL12.4-4.2)
Comparison of Experiment and Calculated Strain Values
(HL12.4-4.2)

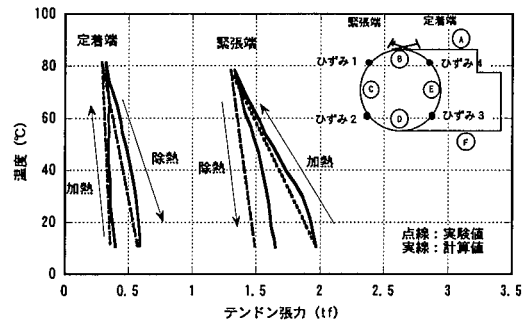


Fig. 13 温度と端部張力の関係 (H5.0-2.2)
Temperature and Mid-portion Strain Relations (H5.0-2.2)

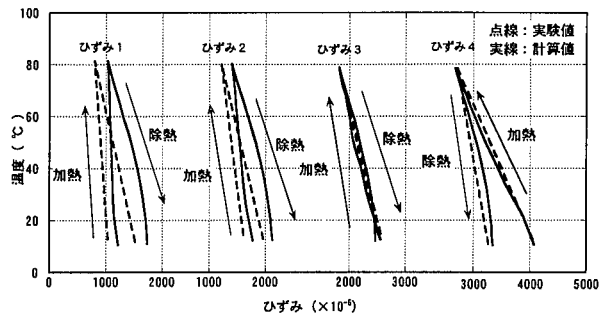


Fig. 14 温度と中間部ひずみの関係 (H5.0-2.2)
Temperature and Mid-portion Strain Relations (H5.0-2.2)

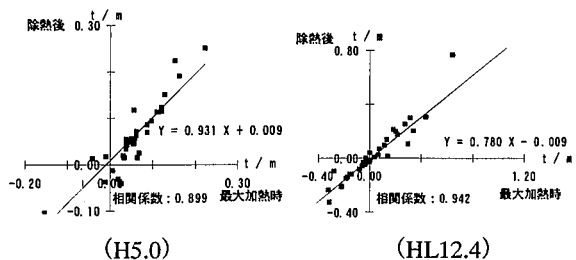


Fig. 15 最大加熱時および除熱後における張力勾配
Tensile Force Gradient at Max Temperature and
after Cooling.

Table 9 計算条件
Condition for Calculation.

供試体	Δt (°C)	TA (t)	αC (rad)	μ (1/rad)	μ^* (1/rad)
H5. 0-2. 2	最大加熱時 68. 4	2. 00	0. 0242	0. 3123	0. 2748
	除熱後 -68. 5	1. 28	0. 0000	0. 2748	0. 1731
H5. 0-4. 2	最大加熱時 64. 5	2. 00	1. 0497	0. 4020	0. 3538
	除熱後 -63. 9	1. 03	0. 6823	0. 3538	0. 2229
HL12. 4-4. 2	最大加熱時 70. 2	9. 97	2. 6166	0. 0282	0. 0250
	除熱後 -68. 9	8. 26	2. 5913	0. 0250	0. 0157

ここで、H5. 0については、 $A_s(\text{cm}^2)=0. 1954$, $E_s(\text{kg}/\text{cm}^2)=2. 101 \times 10^6$, $\alpha B=(\text{rad})=5. 4906$
 HL12. 4については、 $A_s(\text{cm}^2)=0. 9290$, $E_s(\text{kg}/\text{cm}^2)=2. 065 \times 10^6$, $\alpha B=(\text{rad})=5. 6057$
 $\alpha s=1. 0 \times 10^{-5}(1/^\circ\text{C})$, $l_1=20\text{cm}$, $l_2=18\text{cm}$, $a=200\text{cm}$.

Table 10 各測点での測定値と計算値の比率の平均値
Average Ratio of Measurement Value to Calculation
Values at Each Measurement Points.

供試体	ひずみの測定値/計算値の値		供試体	ひずみの測定値/計算値の値	
	最大加熱時	除熱後		最大加熱時	除熱後
H5. 0-1. 1	-	-	HL12. 4-1. 1	-	-
H5. 0-2. 1	1. 00	1. 02	HL12. 4-2. 1	1. 02	0. 99
H5. 0-2. 2	1. 05	1. 06	HL12. 4-2. 2	1. 03	1. 00
H5. 0-3. 1	0. 96	1. 03	HL12. 4-3. 1	1. 04	1. 01
H5. 0-3. 2	0. 98	1. 05	HL12. 4-3. 2	1. 02	1. 01
H5. 0-4. 1	0. 93	1. 00	HL12. 4-4. 1	1. 01	0. 98
H5. 0-4. 2	1. 06	1. 05	HL12. 4-4. 2	1. 02	0. 99
H5. 0-5. 1	0. 92	0. 98	HL12. 4-5. 1	1. 07	1. 03
H5. 0-5. 2	0. 94	1. 01	HL12. 4-5. 2	1. 08	1. 03
平均値	0. 98	1. 02	平均値	1. 04	1. 00
変動係数	0. 098	0. 074	変動係数	0. 050	0. 036

数 μ^* はそれぞれ $0.88 \times \mu$ (μ は緊張時), $0.63 \times \mu$ (μ は最大加熱時) となり, いずれも始めの μ より小さい値を示す。

次に, 実験結果について, 山口, 山本⁹⁾ が提案している摩擦理論による張力変動評価式を用いて検討する。計算に用いた条件をTable 9に示し, 計算で得られたテンドンのひずみ分布および温度と張力またはひずみの関係を各々, Fig. 11~12およびFig. 13~14に併記する。また, 全供試体についてTable 9の条件と同様にして求めたひずみの計算値と測定値の比率の平均値 (各供試体毎に全測定点で計算値と測定値の比を求め, 相加平均を算出) をTable 10に示す。

全供試体について見ると, Table 10に示すとおり, ひずみの測定値と計算値の比率の平均値および全測定点での変動係数は, H5.0シリーズが最大加熱時で各々0.98, 0.098, 除熱後で1.02, 0.074, また, HL12.4シリーズについては, 最大加熱時で各々1.04, 0.050, 除熱後で1.00, 0.036でありひずみの測定値と計算値はほぼ対応しているものと考えられる。なお, 見掛けの摩擦係数 μ^* はFig. 11~12の実験値からわかるとおり非線形を示しているが, 計算において一定値として扱っても本実験での温度範囲内ではTable 10に示すとおり実験値との対応性はそこなわれていないことが分かる。

以上の結果をまとめると, 次のことがいえる。

- 1) 摩擦力の作用で張力分布が不均一なテンドンが熱を受けると, 高張力側の端部の張力減少が大きく, 低張力側の端部で小さくなる張力再配分性状を示す。
- 2) 除熱(冷却)時での戻り量(増分量)は, 除熱前に対してほぼ平行移動ないしは, 低張力側が若干大きい。
- 3) 温度履歴を受けて, 端部張力が変動したとしても, 温度が元に戻れば, 平均張力も元に戻る。
- 4) これらの張力再配分性状は, 見掛けの摩擦係数を用いた摩擦理論による評価式⁹⁾ でほぼ説明できる。

5.2.2 長期挙動実験と無応力供試体実験 Fig. 16に代表例として L12. 4-1. 1供試体の端部張力と温度の経時変

化を示す¹⁰⁾。張力は経時的に漸減する傾向が見られるが, 夏季には若干回復する性状があることも認められる。気温は年間 1~31°Cの範囲で変化している。Fig. 17にLシリーズ全体の間中部ひずみ, 定着, 緊張端ひずみについて各平均値の経時変化を示す¹⁰⁾。またHL12. 4-3, 5, 6シリーズの端部の代表的な材齢のひずみ変動も示す。以上はいずれも任意の角度範囲で緊張しているタイプである。一方, Fig. 18に, HL12. 4-2, 4 シリーズの計4本の定着端, 緊張端でのひずみの経時変化(張力減少量に相当)を示す¹⁰⁾。これは360°緊張(全周巻き付け)タイプでFig. 17の場合と異なる。これら図に, テストベッドに埋込んだ円周方向鉄筋(かぶり10cm)ひずみ平均値の動きを比較して示す。

Fig. 17からひずみ変動性状は, 端部と中間部とでは相違している。鉄筋ひずみは同位置のコンクリート躯体ひずみ, すなわち乾燥収縮ひずみとみなすことができるが, 2年半で 40×10^{-6} の値であった。この変化量は中間部ひずみとおおまかに対応していることが分かる。一方, Lシリーズ定着端, 緊張端でのひずみの経時変化はFig. 18の HLシリーズのひずみ変化の約5倍と大きい。テストベッドはマッシブなためコンクリート乾燥収縮が少ない上に, クリーブもほとんど生じないと判断されたにも関わらず両端で大きな張力ロス(ひずみ減少)を生じた理由として, テンドン定着端近傍におけるコンクリートひびわれ発生の影響を受けたことが考えられる(ひび割れは今回のテストベッド固有のものであるが, その影響はひずみ量で $150 \sim 200 \times 10^{-6}$ 程度)。

一方, Fig. 18のHLシリーズ(HL12. 4-2, 4)のテンドン端部ひずみと鉄筋ひずみ(躯体ひずみ相当)との対応関係は良好である。これは全周巻き付けのために, 定着端近傍に顕著なひびわれを生じず, 結果として張力ロスの影響を受けにくかったものと思われる。

HLシリーズの中間部ひずみは, 加熱試験時の高温履歴によりひずみゲージが損傷し測定できなかったが, その挙動を推測すると, 端部ひずみ挙動(Fig. 18)から判断してFig. 17の中間部ひずみと同等かあるいはそれ以下の少ないひずみ変動と推察される。

以上の結果から, テンドンの平均張力に対応するひずみ(Lシリーズ中間部ひずみ, HLシリーズ端部・中間部ひずみ)と鉄筋(コンクリート躯体)のひずみの変動性状を比較すると, 両者はほぼ近似している。また, ひずみ変動性状には, 季節における環境条件(温度, 相対湿度)の変化による影響も現れていることも認められた。

無応力供試体で得られたひずみ(乾燥収縮ひずみ)の経時変化をFig. 19に示す¹⁰⁾。図中に示す実線は, CEB/FIP Model Code 1990から求めた相対湿度毎の算定値である。大型, 小型供試体のひずみは, 約2年半の時点でそれぞれ60~70, 45×10^{-6} 程度であり, 雰囲気湿度を55~70%RHと考えると算定値よりもやや大きい。また通常, 乾燥収縮ひずみは小型の方が大きくなるはずであるが, 逆転した理由は鉄筋比の差(大型0.44%, 小型1.77%)の影響が考えられる。一方, テストベッドの乾燥収縮ひずみをFig. 17の鉄筋ひずみと考えると算定値と

の対応は良好といえる。

以上の結果をまとめると、以下のことがいえる

1) 長期にわたる環境条件の変化によって、テンドン
は張力変動を生ずる。特に端部張力は、冬季に張力減少
するが、夏季には若干、張力が回復する傾向にある。

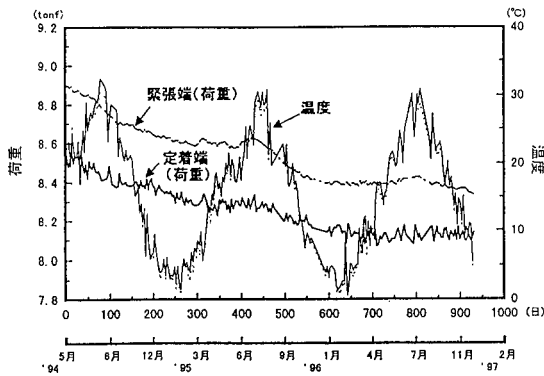


Fig.16 HL12.4-1.1の端部張力の動き
Tensile Force at Tendon End (HL12.4-1.1)

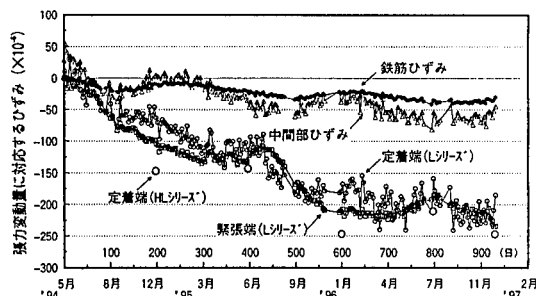


Fig.17 テンソン中間部ひずみと鉄筋ひずみの関係
Relation between Tendon Strain and Rebar Strain

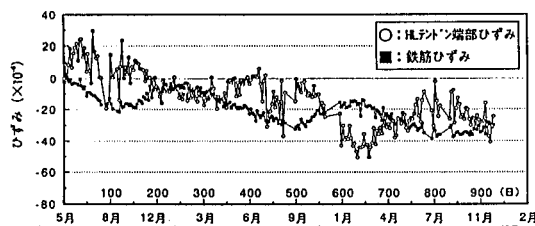


Fig.18 HLテンソン端部ひずみと鉄筋ひずみの関係
Relation between Tendon Strain and Rebar Strain

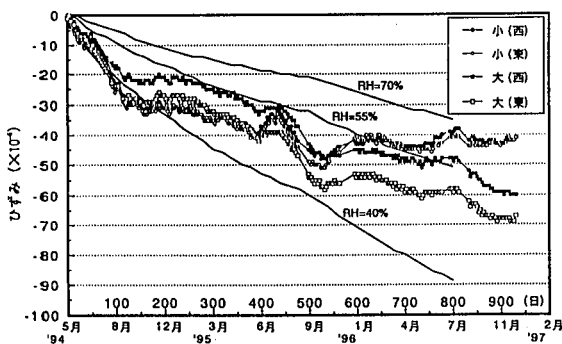


Fig.19 無応力供試体の収縮ひずみの動き
Strain of Drying Shrinkage Specimen

2) テンドン平均張力の変動に相当するひずみは、コンクリート躯体のひずみとほぼ対応する。

6. 実機PCCVにおけるテンドン張力再配分の影響

ここでは、5章で述べた評価手法を用い、実機PCCVにおけるテンドンの張力再配分の影響量について検討する。

敦賀2号機PCCVでは、構造性能確認試験(SIT)時に円筒部フープテンドンと逆Uテンドンからそれぞれ1本選択され、それらの両端における張力が測定された。加圧開始前の張力は、4点のうち3点までがロックオフ荷重(定着直後の張力)より大きかった。また、加圧時の張力増分は、構造体の変形量に対応する増分より小さく、さらに、減圧完了後では張力増分が残存するものがあることも認められた¹¹⁾。

これらはグリース充填時のテンドンの温度変化や加圧時における構造体の変形で、テンドンに張力再配分が現れた影響によるものと考えられる。なお、テンドンの張力再配分には、初期の張力分布が密接に関係するため、代表例として大飯3号機PCCVのH101フープテンドンを取り上げ検討することにする。

検討条件として2種類設定する。一つは、グリース充填時の熱により80℃まで一様に上昇（基準温度0℃）した後、0℃まで降下する状態、他の一つは、緊張端から5.9mまでの領域のテンドンが部分的に±30℃の温度変化を受ける状態である。

Fig. 20にH101フープテンドンの初期張力分布と80℃一様加熱および除熱後の張力分布を示す。図に見られるように、張力分布は張力再配分により変化する。そして、平均張力は、最大加熱時ではテンドンの熱膨張に対応する張力減少が生じるが、除熱後では元に戻り変化しない。

Fig. 21にはFig. 20の除熱後の状態から30℃で部分的に加熱および冷却された時の張力分布を示す。この場合、テンドンの片側から熱膨張または熱収縮を生じさせることになるため、張力再配分後の張力分布は、緊張・除荷時における張力分布と近似したものになる。平均張力はテンドンの熱膨張または熱収縮に相当する分、変化することになるが、その変化量は小さい。

これらの加熱時および除熱後の端部張力変動量を初期の端部張力に対する比率で表し、Table 11に示す。

これらの結果に見られるように、テンドンの配置条件と弾性ロスによる張力減少量によっては、グリース充填時温度による張力再配分で、端部張力がロックオフ荷重より増大することもあり得るといえる。また、加圧時の張力変動性状についても、構造体の変形量をテンドン温度の低下に置き換えれば説明できそうである。そして、80℃一様加熱条件は、グリース充填時温度に対応するもので、通常は起こり得ないと考えられると、テンドンの温度変化が平均張力におよぼす影響量は小さいともいえる。しかし、部分加熱の結果に見られるように、テンドンの温度が日照等で局部的に20～30℃変化する場合があるとすると、端部張力は初期張力の2～3%程度変動する場合もある。

7. まとめ

(1) ひずみ測定値と計算値の対応性 コンクリートのクリープ、乾燥収縮ひずみに対する既往の評価式（土木学会式）を用いても、PCCVの2軸応力効果、相対湿度の季節間における変化の影響を考慮すると、測定値と計算値の対応性は非常に良好になることが確認された。なお、2軸応力効果は、鉄筋剛性を含めた等価弾性定数を用いて考慮した方が良い。

(2) テンドン張力測定値と計算値との対応性 リフトオフ荷重測定値と計算値との対応性も、測定誤差を考慮すると良好であるといえる。

Table 11 加・除熱後の端部張力変動量
Changes of Tensile Force after Heating and Cooling.

		加・除熱後の端部張力 ／初期端部張力
80℃一様加熱	加熱時	-13.0%
	除熱後	+1.0%
30℃部分温度変動	加熱時	-4.0%
	除熱時	-0.5%

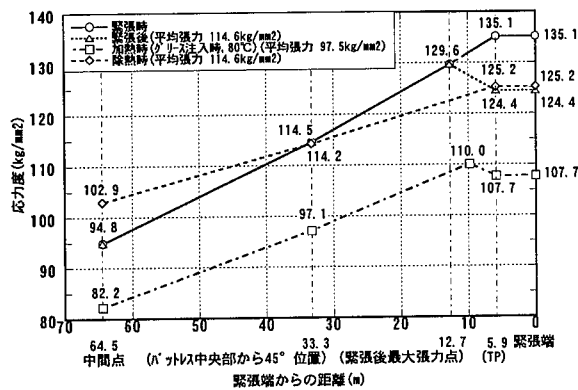


Fig. 20 大飯3号機 H1017-°テンション張力分布
(直線部 $\lambda=0$)

Tensile Force Distribution at H101 Hoop Tendon of KON#3
(Straight Portion of Tendon $\lambda=0$)

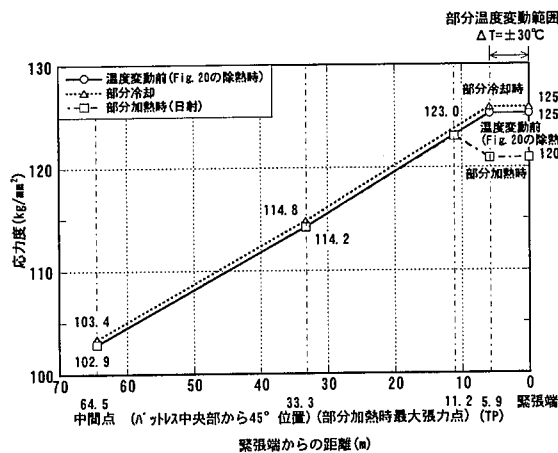


Fig. 21 大飯3号機 H1017-°テンション張力分布
(部分加熱 $\mu=0.067$)

Tensile Force Distribution at H101 Hoop Tendon of KON#3
(partially heated $\mu=0.067$)

(3) テンダンの温度変化に伴う張力再配分 グリー スグラウト時のような温度をテンドンが受けると張力再配分が生じ、定着端張力は2~3%程度変動する場合があることが確認された。また、張力再配分が生じて温度が元に戻れば、平均張力は元に戻ることも確認された。

(4) 長期挙動評価手法の適用性と信頼性 これまでに得られた全てのひずみ測定値、およびテンドン張力測定値と計算値とは、定性的、定量的に良く一致し、適用性、信頼性があるといえる。

謝 辞

本研究は、日本原子力発電（株）、関西電力（株）、九州電力（株）からの受託研究の一環として行われたもので、関係各位のご指導を戴くとともに、実機PCCVのデータ等を提供していただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：プレストレストコンクリート標準示方書（53年度版）
- 2) M. Yamamoto et al. : In-service inspections and R&D of PCCVs in Japan, Prestress Loss in NPP Containments on WANO/OECD workshop with the participation of RILEM, FIP, (1997. 8)
- 3) 武田他：床スラブの長期たわみに関する研究，コンクリートジャーナル，vol. 14, P.10~18, (1976)
- 4) T. Yamaguchi et al. : A prediction method for long-term behavior of prestressed concrete containment vessels trans. of the 13th SMIRT VOL. IV, PP. 143~148, (1995. 8)
- 5) 山口他：熱を受けるテンダンの張力再配分に関する研究，日本建築学会学術梗概集，B-2構造Ⅱ，PP. 1025~1026, (1995. 8)
- 6) T. Yamaguchi et al. : Study on the tensile force redistribution of heated tendon trans. of the 14th SMIRT, VOL. H, PP 25~32, (1997. 8)
- 7) 日本建築学会：プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説，1975.1
- 8) W. Zerna : Beton u. Stanbetonbau, 7 Jg, Ht.11, (1952. 11)
- 9) 山口他：熱を受けるテンダンの張力再配分に関する一考察，日本建築学会学術講演梗概集，B-2構造Ⅱ，P1025~1026, (1995. 8)
- 10) 小柳他：テンドン張力の長期挙動に関する実験研究，日本建築学会学術梗概集，B-2構造Ⅱ，PP. 1119~1120, (1998. 9)
- 11) 田村他：日本原子力発電敦賀2号機PCCVの構造性能確認試験，プレストレストコンクリート，VOL. 28, PP. 113~125, (1986)