

論文 プレストレストコンクリート製原子炉格納容器における長期テンドン緊張力測定システムの開発

日野 吉彦*1・杉田 裕行*1・清水 明*2・野坂 泰介*3

要旨: プレストレストコンクリート製原子炉格納容器 (PCCV) はテンドンと呼ばれる緊張材によって格納容器全体を絞めつけることで異常時の内圧に耐える構造としている。国内の PCCV ではテンドン張力をリフトオフ試験と呼ばれる方法で定期的に確認している。しかしながら、リフトオフ試験は非常に大掛かりな試験であるため短いインターバルで度々行うことが難しい。これを解決するために、簡便かつ継続的な張力測定が可能なシステムとして電気式シム型ロードセルを用いたテンドン緊張力測定システムを開発した。本論文では当該システムに対して約 11 年間に亘って実施した一連の性能確認試験の結果について報告する。

キーワード: PCCV, テンドン, リフトオフ試験, ロードセル, キャリブレーション, 長期信頼性, 多系統法

1. はじめに

プレストレストコンクリート製原子炉格納容器 (PCCV) はテンドンと呼ばれる緊張材によって格納容器全体にプレストレスを与え、異常時の内圧に耐える構造としている。このため、PCCV の維持管理において、設計で要求されるテンドン張力が保持されていることを継続的に確認することは PCCV の信頼性確保の観点から非常に重要である。

日本国内の PCCV では供用期間中検査 (ISI) において、リフトオフ試験によるテンドン張力測定が定期的に行われているが、リフトオフ試験はテンドン定着部に油圧式ジャッキを設置してジャッキにてアンボンドのテンドンを直接引張ることによって張力を確認するという大掛かりなものである。このため、日常的に張力測定を実施することは困難であり、容易かつ継続的にテンドンの張力変動を確認するための測定システムの開発が待たれる状況である。

これに対し、大林組ではリフトオフ試験に替わる方法として電気式シム型ロードセル (以下、ロードセルと称する) によるテンドン緊張力測定システムの開発を行い、2006 年にその試作品を完成した。本システムはテンドン張力の継続的な自動定時測定が可能であり、テンドン張力の継時変化を適切に捉えることが可能であり PCCV の信頼性向上が見込めること、大規模な装置が不要となること、定着部の一部としての設置が可能であり、原子炉の運転状況や天候に左右されない張力測定が可能ながメリットとして挙げられる。

本論文ではその試作品を用いた実証実験結果を示すことでその有用性を示す。具体的には長期に亘る性能や耐久性を確認する目的で、試作品のロードセルをテスト

ベッドに取り付け、2006 年 11 月より約 11 年間に亘って張力測定を実施した (2018 年 10 月に取り外し)。本論文では、上記長期測定を含め、本システムに対して行った一連の性能確認試験の結果について報告する。

2. ロードセルの概要

2.1 設置状況

テンドン定着部の構造を図-1 に、本論文で提案する測定システムの概念図を図-2 及び図-3 に示す。

PCCV における PC 鋼より線を用いたテンドンの端部はくさびにてアンカーヘッドに固定され、シムと呼ばれる半割れドーナツ状の部材を介して支圧板に荷重を伝達する。一方、ロードセルは、図-2 に示すようにシムと同様の半割れドーナツ状の部材として設計されている。このため、シムをロードセルに置き換えることで既設の PCCV にも設置が可能である。また、ロードセルはテンドン定着部の一部として設置されるため、測定のための特別な作業が不要である。このため、原子炉の運転状況や天候に左右されない継続的な張力測定が可能である。

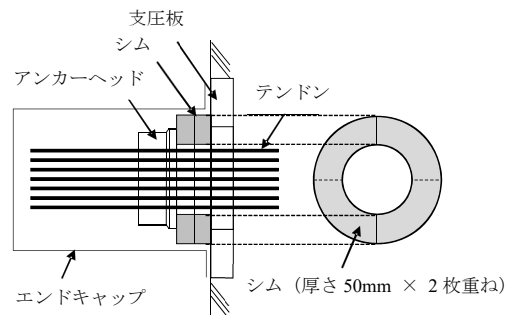


図-1 テンドン定着部の構造

*1 株式会社大林組 原子力本部 工学 (修士) (正会員)

*2 株式会社大林組 原子力本部 工学 (学士)

*3 株式会社大林組 原子力本部 工学 (修士)

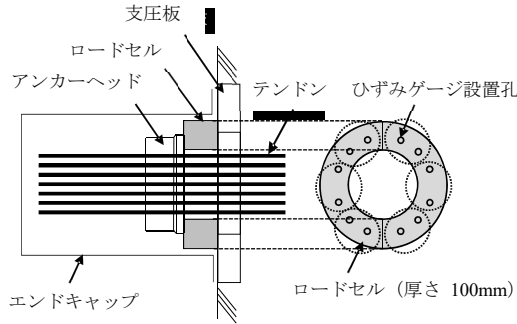


図-2 ロードセル形状及び設置位置

2.2 多系統法

図-3 に本システムで適用した多系統法についての概念図を示す。

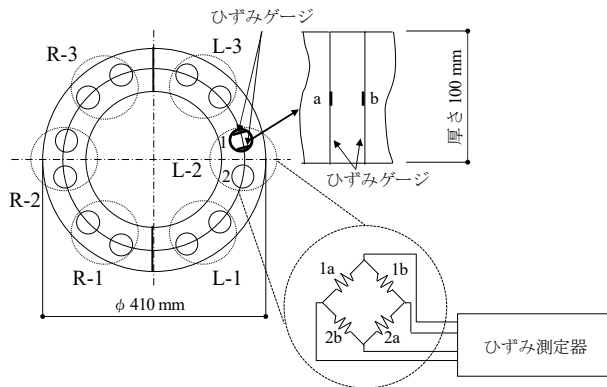


図-3 ロードセルの多系統法概念図

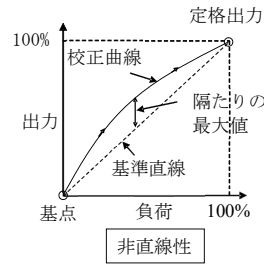
開発したロードセルは長期測定時に一部のひずみゲージに不良が生じて計測を継続できるように文献¹⁾に示す多系統法を採用し、それぞれ独立した6系統のブリッジ回路を形成することで長期測定に対して信頼性の高いシステムとしている。具体的には図-3に示すように、12個の孔を設け、1つの孔に2枚のひずみゲージを取付け、隣り合う2つの孔内に設置される4枚のひずみゲージで1系統のブリッジ回路を形成している。なお、テンドン張力値については6系統(チャンネル)の出力の平均値を基本とし、各々のひずみゲージの挙動に応じて後述する方法で補正する。

3. ロードセルの基本性能

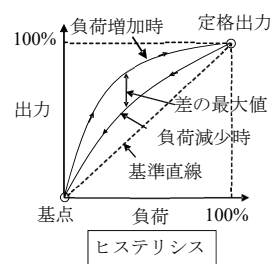
3.1 目的

ロードセルの校正係数と測定精度を確認するために力基準機によるキャリブレーションを実施する。測定精度の判定指標は図-4に示す非直線性、ヒステリシス、繰り返し性とした。

非直線性 = 隔たりの最大値 / 定格出力(RO)



ヒステリシス = 差の最大値 / 定格出力(RO)



繰り返し性 = 最大出力差 / 定格出力(RO) (%)

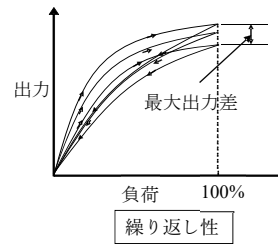


図-4 精度確認のための判定指標

3.2 試験方法

ロードセルのキャリブレーションを10MN力基準機により実施する。加力装置の概略を図-5に示す。

キャリブレーションは、下記の2ケースについて実施する。なお、2)の「使用荷重レンジ」については実機において5~7MN程度の張力が想定されるため、常時計測で想定される変動の範囲として設定した。

- 1) 定格荷重 8MN, 全荷重レンジ 0MN~8MN
- 2) 定格荷重 8MN, 使用荷重レンジ 4MN~8MN

試験手順を以下の(i)~(v)に、各加力サイクルを図-6に示す。

- (i) 試験体を力基準機にセットする。
- (ii) キャリブレーションは 0MN~8MN (全荷重レンジ) → 4MN~8MN (使用荷重レンジ) の順番に実施する。
- (iii) 0MN~8MN の全荷重レンジのキャリブレーションは、0MN~8MN の繰り返し荷重を3度実施し、その後1度の追加荷重を行う。追加荷重においては8MNに10分程度荷重を保持した後除荷する。ロードセルのひずみは1MNピッチで測定する。
- (iv) 4MN~8MN の荷重レンジのキャリブレーションは、0MNから定格荷重(8MN)まで予備荷重し、10分程度荷重を保持した後に荷重レンジ下限値(4MN)まで除荷する。この後、8MNから4MNまでの繰り返し荷重を3度実施し、1MNピッチでロードセルのひずみを測定する。
- (v) それぞれの荷重結果より校正係数、非直線性、ヒステリシス及び繰り返し性を求める。

3.3 試験結果

キャリブレーション結果を表-1 に示す。これより、使用荷重レンジ 4~8MN における非直線性、ヒステリシス、繰返し性は全て 1%RO 未満（定格出力 RO に対する比）であり、テンドン張力の測定に際して十分な計測精度を有することを確認した。

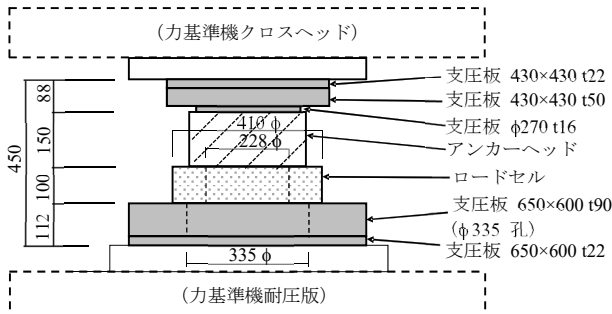


図-5 キャリブレーション加力装置

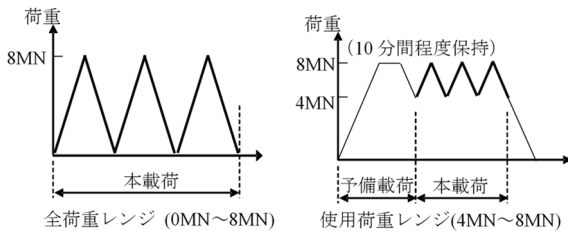


図-6 加力サイクル

表-1 力基準機によるキャリブレーション結果 (取付け前)

	荷重レンジ		判定の目安値* 1
	4MN~8MN (使用荷重レンジ)	0MN~8MN (全荷重レンジ)	
校正係数($\times 10^{-3}$)	1.822	1.805	—
非直線性	0.23%RO	2.79%RO	4%
ヒステリシス	0.09%RO	1.56%RO	4%
繰返し性	0.02%RO	0.47%RO	4%

*1: 既存の荷重計等の仕様を参考に設定した。

4. ロードセルの長期測定

4.1 目的

本システムの長期計測に対する信頼性を確認するため、テストベッドにロードセルを設置し、2006年11月より約11年間に亘って張力測定を実施した。

4.2 測定方法

(1) 校正係数の再設定

ロードセルのテストベッドへの取付けに際して、現地テストベッドへの設置後に校正のとれた油圧ジャッキにより、再度キャリブレーションを実施し校正係数を再設定する。キャリブレーションの方法は、定着部に取り付けた油圧式ジャッキにてテンドンを緊張し、その時の油圧ジャッキの緊張力とロードセルひずみの関係から校正係数を求めるものとする。現地でのキャリブレーション

によって求めた校正係数を表-2 に示す。同表に示す校正係数は表-1 に示す校正係数と 1 割程度の差異を生じている。これは、力基準機による場合はドーナツ型のロードセルに均等に力がかかるのに対して、現地ではテンドン張力のばらつきによってロードセルにかかる力に多少の偏り（偏芯圧縮）が生じることが原因と考えられる。なお、長期測定には表-2 における平均の校正係数 1.640×10^{-3} を用いることとした。

表-2 現地キャリブレーションによる校正係数

	1回目	2回目	3回目	平均
ロードセルひずみ(μ)	4208	4113	4200	4174
ジャッキ緊張力(MN)	6.84	6.85	6.84	6.84
校正係数($\times 10^{-3}$)	1.625	1.665	1.629	1.640

(2) ロードセルの設置

試験に用いるテストベッド（ピーエス三菱水島テンドン製作所に設置）にはテンドンを通すためのシースが配置されており、試験には長さ 7.0m の直線のシースを使用した。テendonは日本国内の実機と同様の 10MN 級テンドン（PC 鋼より線、径 12.7mm \times 55 本にて構成）を用い、油圧ジャッキにてテendonに約 6.9MN の初期張力を導入した。定着部のテendonはアンカーヘッドにくさび定着し、図-7 に示すようにロードセルと熱電対を設置した。また、定着部はエンドキャップにて完全密閉し、エンドキャップ内及びシース内に防せい材を充填した。さらに、ロードセル及び熱電対より伸びる配線はエンドキャップ外にてデータロガーに接続し、4 時間ピッチでデータを取得することとした。長期測定システム概念図を図-7 に示す。また、ロードセルの設置状況と外観を写真-1 に示す。

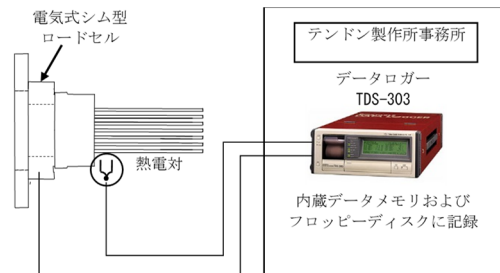


図-7 長期測定システム概念図



写真-1 ロードセルの設置状況と外観

4.3 測定結果

tendon張力の長期測定結果を図-8 に示す。なお、各チャンネル位置は「2.2 多系統法」における図-3 に示す。

図-4-3 から L-3, R-1~R-3 について安定したひずみを測定できているのがわかる。一方、L-1, L-2 のひずみは赤枠で示すように、明らかな不連続が生じているのがわかる。従って、6 系統中 4 系統が健全であること、かつ健全なデータを容易に選別できることがわかった。

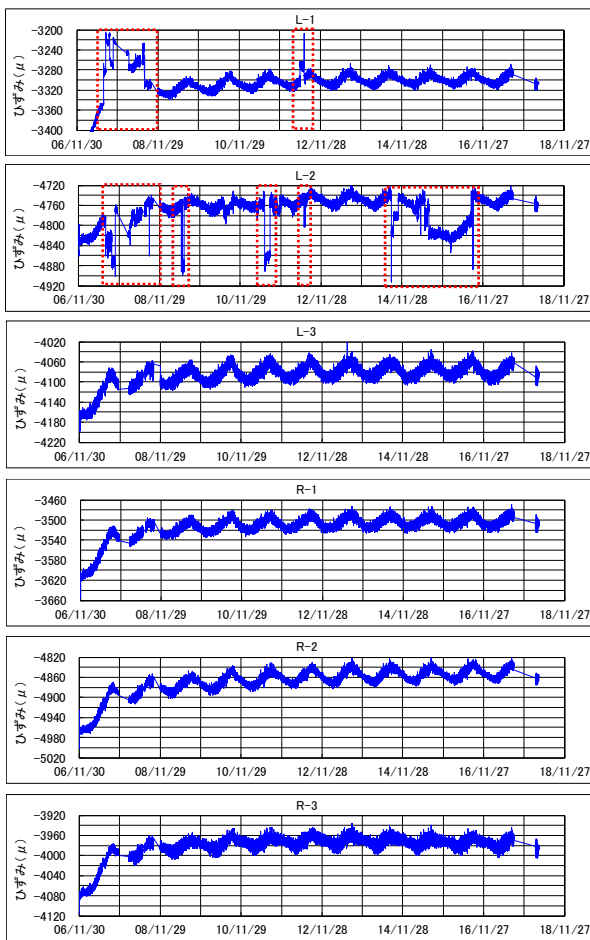


図-8 ロードセルによる tendon張力長期測定結果

4.4 データの補正

文献1)を参考に健全なデータを選別して tendon張力を補正する。健全なデータを用いた tendon張力(以降、補正後データと呼称)の算定方法・結果を以下に示す。

図-9 に各チャンネルの感度係数 c_i を、図-10 に補正後データの tendon張力を、図-11 に tendon定着部内に設置した熱電対の温度を示す。なお、図-10 には後述する「4.5 計算値との比較」の計算値を併せて示す。

ロードセルは図-3 に示すように半割れドーナツ状であることから、各系統位置 (R1~R3, L1~L3) で均等な応力とはならず偏在が生ずる。この応力の偏在により、

各チャンネルの感度は図-9 のように異なる。従って、図-10 の補正後データを算定する際には式(1)にて各系統の感度を考慮することとした。

$$P_{補正} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_{i補正} \times \varepsilon_i}{n} \quad (1)$$

$$\alpha_{i補正} = \frac{\alpha}{c_i} = \alpha \times \frac{\varepsilon_{初期の平均}}{\varepsilon_i} \quad (2)$$

ここに

- $P_{補正}$: 補正後の tendon張力
- α : 校正係数 (=1.640×10⁻³)
- $\alpha_{i補正}$: 各系統に対する校正係数
- $\varepsilon_{初期の平均}$: 初期における全系統の平均ひずみ
- ε_i : i 系統のひずみ
- n : 健全な系統の数
- c_i : i 系統の感度係数

補正した tendon張力測定値を図-10 に示す。これより開発したロードセルでは安定した張力が測定されており、長期測定に対して信頼性が高いことがわかる。なお、張力の波形の変動は図-11 に示す温度の変動に対応したものであり温度変化により張力が変化していることが確認できる。なお、測定値にはロードセルの温度依存性による影響が含まれているが、本システムは図-3 に示すようにブリッジ回路を形成しており、温度の影響はブリッジ内で相殺されるため、概ね温度変化による張力変化の傾向は捉えられていると判断している。

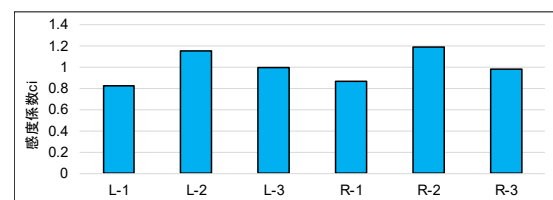


図-9 各チャンネルの感度係数 c_i

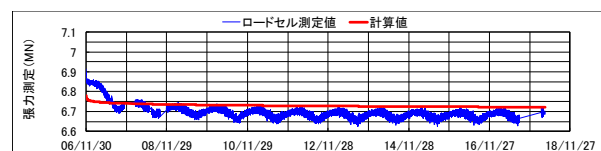


図-10 tendon張力測定値
(L-1, L-2 を除外して算定)

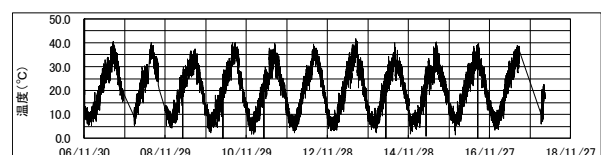


図-11 定着部内温度

4.5 計算値との比較

ロードセルの測定値の妥当性を確認するため、テンドン張力の初期値から経時的に減少した量を測定値と計算値とで比較する。経時的な減少量としてはコンクリートのクリープ・乾燥収縮、PC 鋼材のリラクゼーションの影響が考えられる。また、ロードセルの測定値において張力導入後1年間は定着部周辺の局所的な応力によるクリープの影響と考えられるテンドン張力の減少が生じたため、計算値はその影響が小さくなった1年後の計測値を起点とし、これにリラクゼーションの影響を考慮した値とした。なお、リラクゼーションの影響については Larson-Miller の文献²⁾で提案されている手法を用いた。また、Larson-Miller Parameter を算定する際の温度は図-11 に示すテンドン定着部内に設置した温度計の値の概ね平均である 20℃とした。

図-10 より、ロードセルの測定値は季節による変動はあるものの、全体的な低下傾向は計算値と概ね同等であり、最終的な張力(2018年4月2日正午)を比較すると、測定値は計算値と 0.26%程度の差異であった。このことから、ロードセルの測定値は経時的な張力減少を捉えられており、本計測結果は妥当であることがわかった。

5. 長期測定後の性能

5.1 リフトオフ試験結果との比較による精度確認

(1) 目的

本検討では長期測定後においてもロードセルの精度が十分に確保されていることを確認するため、「4. ロードセルの長期測定」で用いた試験体に対してリフトオフ試験を実施し、リフトオフ試験による測定値とロードセルによる測定値の両者を比較する。

なお、日本国内の原子力発電所における PCCV の供用期間中検査(ISI)では信頼性の高さからこのリフトオフ試験が適用されている。

(2) 試験方法

リフトオフ試験は、図-12 に示すようにテンドンの余長部に油圧ジャッキを設置して載荷する試験であり、予めアンカーヘッドとシムの間に挟んだ測定板と呼ばれる薄板が抜ける瞬間(テンドン張力とジャッキによる緊張力が釣り合った状態)の荷重を測定することでテンドン張力を求める方法である。

試験方法は以下の通りである。

- (i)油圧式ジャッキを使用して一旦荷重を載荷し、測定板をアンカーヘッドとロードセルの間に挿入後、荷重を除荷する。測定板は左右から挿入する。
 - (ii)ジャッキにより再度荷重を載荷し、測定板が抜けたときのジャッキ荷重をリフトオフ力とする。
- なお、リフトオフ試験は3回実施するものとする。

リフトオフ試験の実施状況を写真-2 に示す。

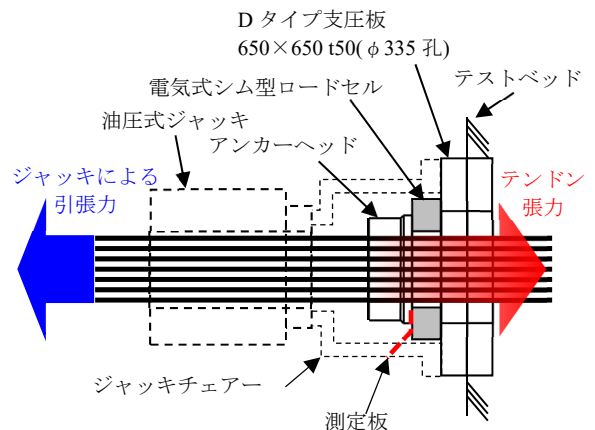


図-12 リフトオフ試験

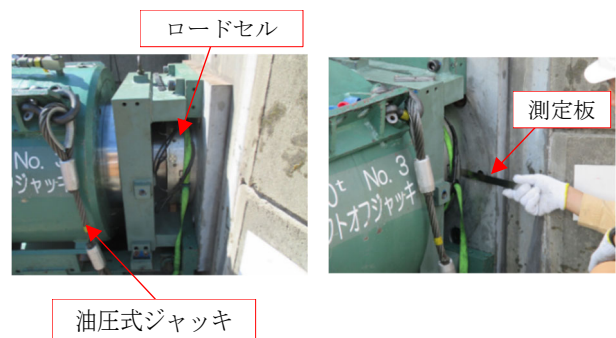


写真-2 リフトオフ試験の実施状況

(3) 試験結果

試験結果を表-3 に示す。これより、リフトオフ試験による測定値はロードセルによる測定値とほぼ合致しており、長期測定後においてもロードセルは高い精度を維持していることを確認した。

表-3 リフトオフ試験結果

回数	リフトオフ試験		ロードセル 測定値
	左	右	
1回目	6.63 MN	6.60 MN	6.65MN
2回目	6.64 MN	6.60 MN	
3回目	6.62 MN	6.60 MN	

5.2 取り外し後のキャリブレーションによる確認

(1) 目的

取り付け前に実施した力基準機によるキャリブレーションと同様に、長期測定後のロードセルに対してキャリブレーションを実施し、校正係数及び計測精度(非直線性、ヒステリシス、繰り返し性)の確認を行う。

(2) 試験方法

力基準機によるキャリブレーション方法については前

述した「3. ロードセルの基本性能」と同様とした。

(3) 試験結果

キャリブレーション結果を表-4 に示す。ロードセルの使用荷重レンジ4~8MNにおける非直線性、ヒステリシス及び繰返し性は1%RO未滿であり、長期測定後においてもロードセルとして十分な計測精度を有することを確認した。

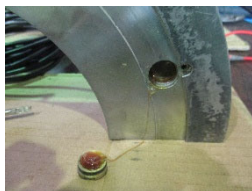
表-4 力基準機によるキャリブレーション結果
(取外し後)

	荷重レンジ		判定の目安値 ^{*1}
	4MN~8MN (使用荷重レンジ)	0MN~8MN (全荷重レンジ)	
校正係数($\times 10^{-3}$)	1.755	1.762	—
非直線性	0.34%RO	2.87%RO	4%
ヒステリシス	0.57%RO	1.15%RO	4%
繰返し性	0.10%RO	1.27%RO	4%

*1: 既存の荷重計等の仕様を参考に設定した。

6. 長期測定時のデータ不連続部に対する考察

「4. ロードセルの長期測定」において、ロードセルの一部のチャンネル(6系統中2系統)で不連続なひずみが生じた。この原因を追求するためにロードセルを解体し、ひずみゲージの状況を確認した。



a) 防せい材が侵入した場合



b) 防せい材が入らなかった場合

写真-3 ロードセル解体状況



写真-4 ひずみゲージを密閉していた蓋

写真-3 に長期測定後のロードセルの解体状況、写真-4 にひずみゲージを密閉していた蓋の側面を示す。

不連続なひずみを生じたチャンネルには写真-3 に示すような防せい材の侵入が確認された。一方、健全なチャンネルでは防せい材の侵入がなかった。一般的に、ひずみゲージは絶縁を保った状態での計測が必要であり、異物が侵入するとひずみゲージの絶縁低下によって不具

合を生ずることがある。不具合を生じたひずみゲージは絶縁抵抗の低下が見られたことから、不連続なひずみを生じた原因は防せい材の浸入によるものと推察される。

防せい材が浸入した原因については写真-4 に示すように、蓋の縁にOリングが取り付けられており、Oリングが蓋と本体に押し付けられる構造になっていなかったため、防せい材の浸入を完全に阻止することができなかったものと考えられる。

したがって、本システムについて防せい材の浸入を防ぐべくOリングの納まりに改良を施せば、さらに信頼性の高い測定システムになると考えられる。

7. まとめ

本論文ではPCCVの新たな tendon 緊張力測定システムの提案を行った。

以下に得られた知見についてまとめる。

- (1) 本論文の電気式シム型ロードセルは tendon 定着部のシムと置き換え可能であり、既設のPCCVに適用可能である。
- (2) 多系統法を採用した電気式シム型ロードセルは約11年間に亘り安定した張力が測定されており、長期測定に対する信頼性は高いことがわかった。
- (3) 不具合を生じたチャンネルはデータに明らかな不連続点が生じ、健全なデータと選別することは容易であることがわかった。
- (4) 本測定値は計算値と概ね同様の傾向となったことから、妥当な結果となっていることがわかった。
- (5) 長期測定後についても良好な性能を示した。
- (6) ロードセルの一部のチャンネルに不連続なデータが生じたことに対し、ひずみゲージ内に防せい材が浸入したことが要因と推察され、防せい材の浸入を防ぐ改良を施すことで本システムのさらなる信頼性向上を図れる。

謝辞

本研究における実験の実施において株式会社ピーエス三菱の小栗一容氏には多大なるご協力をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 山本幹夫: PCCV tendon 緊張力測定用ロードセルの長期安定性に関する改良, 日本建築学会大会梗概集, pp1029-1030, 2002.8
- 2) F.R. Larson and J. Miller, A Time-Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses, Trans. ASME, Vol 74, July, 1952, p 765-7