

プレストレストコンクリート製格納容器における新しい緊張力測定システム

竹崎真一・村角保行^{*1}・尾崎昌彦^{*2}・河合郁朗^{*3}・大橋弘見^{*4}

Keywords: PCCV, anchored load, lift-off load, in-service inspection

PCCV, 定着荷重, リフトオフ荷重, 供用期間中検査

1. 序

我が国の原子力発電所のプレストレストコンクリート製格納容器（以下，PCCV）では，プレストレス工法としてアンボンドポストテンション工法が用いられ，使用されている緊張システムは10MN（1000tf）級である．PC鋼材（以下，テンドン）はコンクリート内に埋設されたシース内に挿入されている．シース内および定着具を保護する目的で設置されているエンドキャップ内にはグリースが充填されている．

PCCVが所定の性能を確保していることを確認する目的で，供用期間中検査（以下，ISI：In-service Inspection）において，定期的に定着端部での残留緊張力の測定を実施している^{1)～3)}．現行の残留緊張力の測定では，まずエンドキャップを外し，内部に充填されたグリースを除去する．その後，油圧ジャッキ（重量：約1.3tf）を定着端にセットし，この油圧ジャッキによりテンドンを引張り，2枚のフィラーゲージ（厚さ0.3mm，ステンレス製）をシムとアンカーヘッドの間に挟み込んだ後，再度テンドンを引張ることで，フィラーゲージが抜けた時の荷重（以下，リフトオフ荷重）を測定する方法を採用している．図-1に現行のリフトオフ荷重測定方法を示す．

この方法では，測定にテンドン緊張工事と同様な手間がかかる上，屋外作業となるフープテンドンでは天候の影響を受けることとなる．

以上のような背景を踏まえ，本研究では，これまでの測定方法と同等の精度を確保しつつ，より簡便な測定システムの開発を試みたものである．

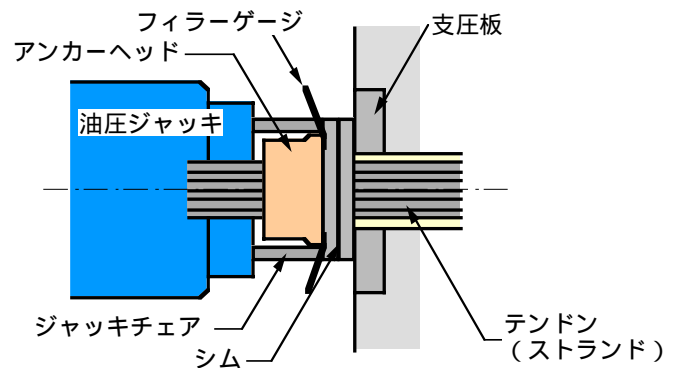


図-1 フィラーゲージ法によるリフトオフ荷重測定
Lift-off load measurement by filler gage method

2. 研究概要

2.1 測定システム

新たに提案する緊張力測定方法では，油圧を利用したロードセル（以下，シム型ロードセル）を用いる．その形状は，支圧板とアンカーヘッド間に設置されているシムと径，厚みが等しい形状であり，既存のPCCVに対しても緊張力解除することなく，既設のシムからシム型ロードセルに取り替えて使用することが可能である．シム型ロードセルは，常時設置しシムとして機能する．一方，緊張力測定時には，シム型ロードセル内に油を送り，油圧を発生させることで，シム型ロードセルがアンカーヘッドを押し上げた時の油圧を外付けの圧力センサーにより測定し，端部緊張力を求めようとするものである．

測定に必要な機器システムは，シム型ロードセル，油圧ポンプ，増圧シリンダ，変位計，圧力センサー及びこれらのデータを記録するためのデータロガーである．

シム型ロードセルによる測定の特徴を以下に示す．

（1）測定システムが現在使用している油圧ジャッキに比べて軽量であるため，測定作業を省力化できる．

* 1 エンジニアリング本部原子力部

* 2 関西電力株式会社

* 3 日本原子力発電株式会社

* 4 関電興業株式会社

(2) 緊張材定着端部を保護する目的で設置されているエンドキャップを設置したまま測定ができるため、充填防錆材の除去・再充填が不要である。

2.2 縮小モデルによる試験

実大モデル試験に先立ち、実大の1/10に相当する1MN級の縮小モデルを製作し、緊張力測定試験を実施して、シム型ロードセルの緊張力測定への適用性の確認と基本データの取得を行った。

本試験での主な確認事項は以下の通りである。

- (1) シム型ロードセルに用いた機構の成立性
- (2) 測定作業が円滑に実施できるか
- (3) 従来の測定法と同程度の精度（評価誤差2%以下）を維持し得るか

2.3 実大モデルによる試験

実機PCCVを想定して10MN級の実大モデルを作成し、実機相当の緊張力を作用させた試験を実施した。

本試験での主な確認事項は以下の通りである。

- (1) 既存PCCV定着部のシムを緊張力解除することなくシム型ロードセルに取り替える場合の作業性の確認
- (2) 実機緊張力レベルにおけるシム型ロードセルの信頼性および測定精度の確認
- (3) 長期間に亘る測定装置の信頼性・測定精度の維持
- (4) 油量の変化を用いた緊張力評価手法の妥当性

3. 縮小モデルによる試験

3.1 試験概要

1MN級シム型ロードセルの機構を図-2に示す。シム型

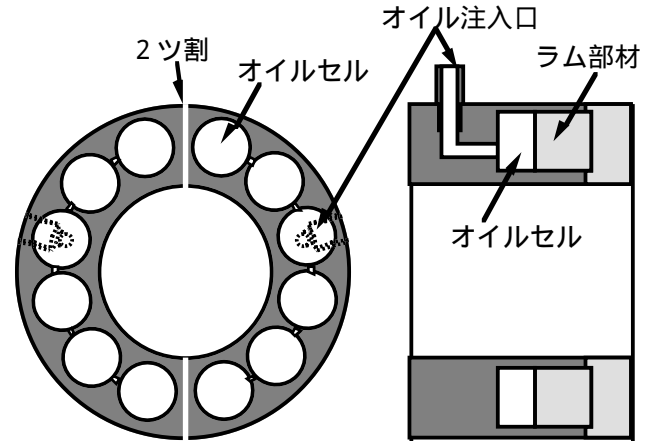


図-2 1MN シム型ロードセル
1MN class shim-type load cell

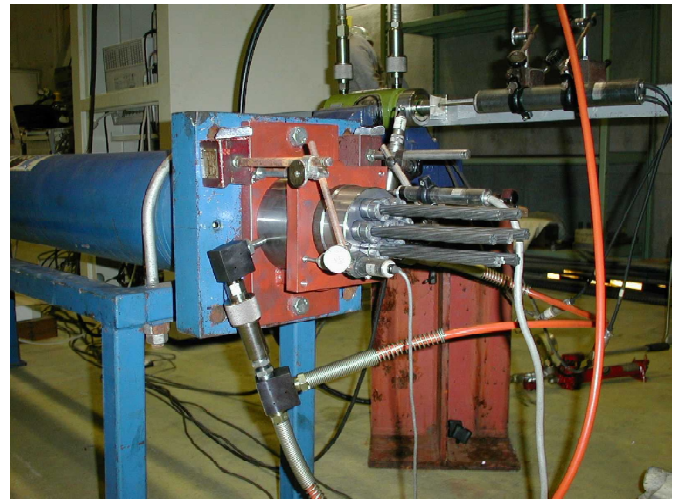


写真-1 縮小モデルによる実験状況
Reduced-scale model test

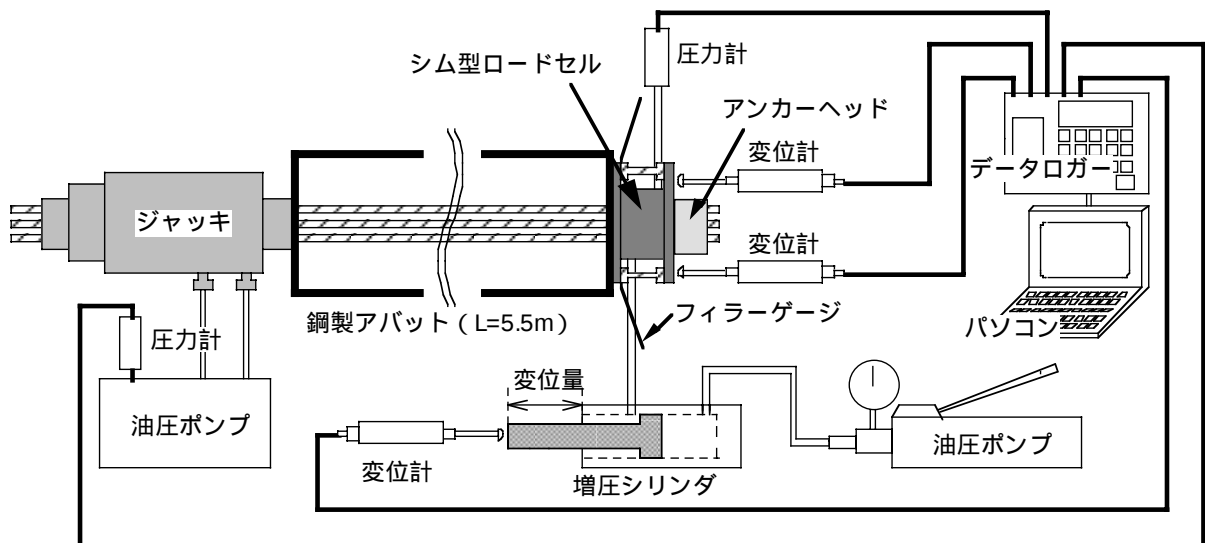


図-3 測定システム（1MN級）
Outline of measuring system (1MN class)

ロードセルは、緊張力解除することなく緊張システムへ設置することを考慮し、シムと同様に2つ割りとし、それぞれに6つのオイルセルを設けた。材質は、クロムモリブデン鋼鋼材（JIS-G4105）である。

測定システム概念図を図-3に示す。

試験は、長さ5.5mの鋼製アバットを用いた緊張システムにより実施した。試験状況を写真-1に示す。導入緊張力レベルは、300kN、600kN、800kNの3つとし、緊張力レベルの違いによる測定精度への影響を確認する。

測定項目は、増圧シリンダ変位、アンカーヘッド浮上がり変位、シム型ロードセル荷重、緊張ジャッキ荷重である。なお、増圧シリンダ変位は、シム型ロードセル内に送り込まれる油量を示すものである。

3.2 試験結果

シム型ロードセル荷重 - 増圧シリンダ変位関係の一例を図-4に示す。なお、同図にはシム型ロードセル荷重 - アンカーヘッド浮上がり変位関係も併せて示している。

増圧シリンダ変位は、最初のフィラーゲージが抜けるまでほぼ線形に増大する。その後、最初のフィラーゲージが抜けた直後に変位（油量）の増大が顕著となる。これは、シム型ロードセル荷重が導入緊張力を上回り、シム型ロードセルがアンカーヘッドを押し上げるため、シム型ロードセル内に送り込まれる油量が増加するためである（図-5参照）。2枚目のフィラーゲージが抜けた時のシム型ロードセル荷重 - 増圧シリンダ変位関係に特に変化はみられない。これらの傾向は、いずれの緊張荷重レベルにおいても共通に見られた。また、アンカーヘッドの浮上がり変位は、増圧シリンダ変位とほぼ同様な傾向を示した。

表-1、表-2に導入緊張力とリフトオフ荷重の関係を示す。これらの結果、導入緊張力（A）とリフトオフ荷重の平均値（B）は良い対応を示しており、両者の差は最大でも2%であった。

以上のように、リフトオフ荷重と増圧シリンダの変位量の変化には相関性が認められる。そこで、増圧シリンダ変位とシム型ロードセル荷重を用い、具体的な緊張力評価法を検討した。検討に用いた評価方法は下記に示す2種類である。評価法の概念を図-6に示す。

CASE 1：ある測定点における接線剛性が初期の接線剛性の1/2になった時を緊張力として評価する方法

CASE 2：CASE 1で評価された位置に対し、その前後で区分し、各々最小2乗法により直線近似し、その2直線の交点を緊張力として評価する方法

上記2種類の方法で評価された緊張力を、実際の導入

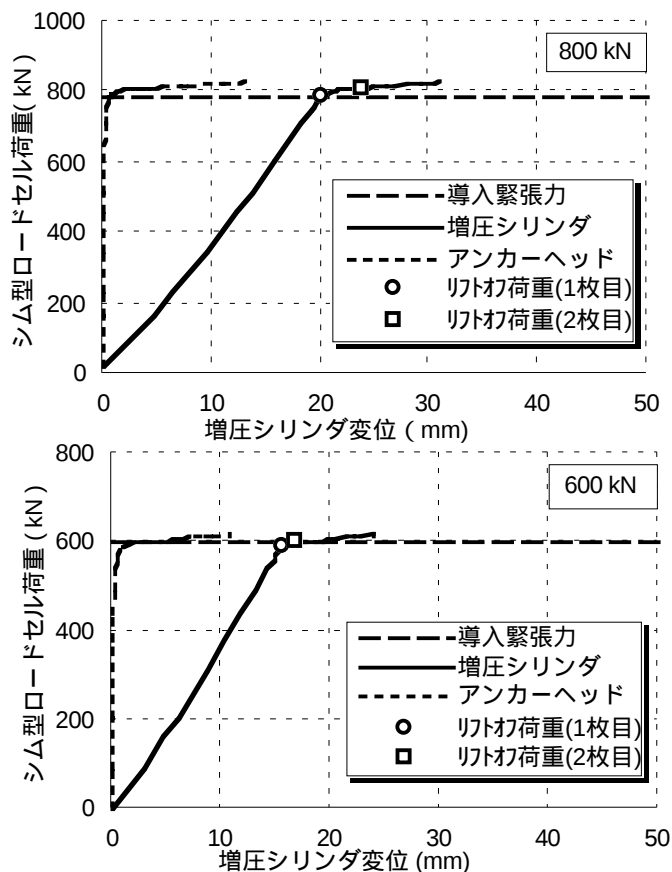


図-4 シム型ロードセル荷重 - 増圧シリンダ変位関係
Load cell load and projection length of amplifying cylinder relationships

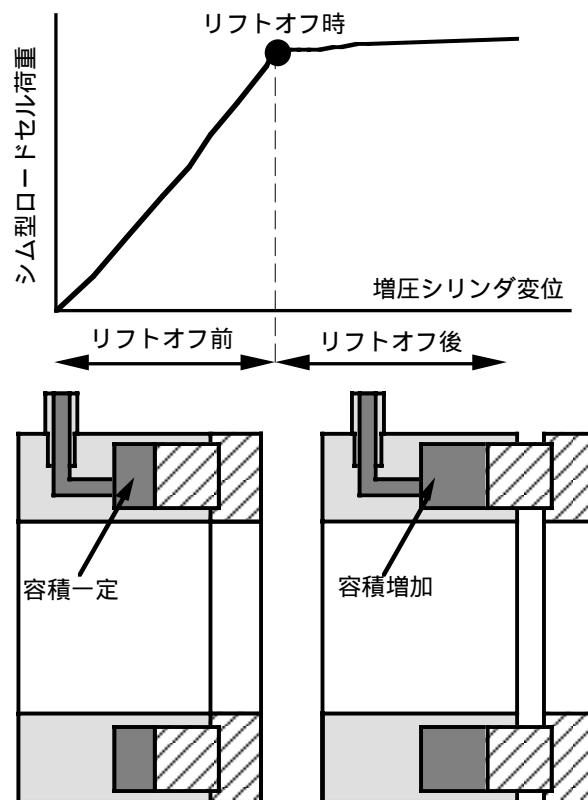


図-5 ロードセルラムの移動による油量変化
Change of injected oil quantity caused by load cell ram movement

緊張力と比較して表-1，表-2に示す．これらの結果，CASE 2によって評価された緊張力（D）は，導入緊張力（A）に対していずれの緊張力レベルにおいても2%以下の誤差（D/A）となり，CASE 2により評価された緊張力は導入緊張力と良好な対応を示した．

表-1 試験結果一覧（800kN）
List of test results (800kN)

	導入緊張力 A (kN)	リフト荷重 (平均値) B (kN)	B/A	評価緊張力		C/A	D/A
				CASE 1 C (kN)	CASE 2 D (kN)		
No.1	760	757	1.00	735	753	0.97	0.99
No.2	760	763	1.00	742	757	0.98	1.00
No.3	787	795	1.01	783	787	1.00	1.00
No.4	787	784	1.00	784	793	1.00	1.01
No.5	786	800	1.02	787	800	1.00	1.02

表-2 試験結果一覧（600kN）
List of test results (600kN)

	導入緊張力 A (kN)	リフト荷重 (平均値) B (kN)	B/A	評価緊張力		C/A	D/A
				CASE 1 C (kN)	CASE 2 D (kN)		
No.1	594	588	0.99	589	593	0.99	1.00
No.2	594	592	1.00	583	587	0.98	0.99
No.3	594	592	1.00	577	586	0.97	0.99
No.4	595	591	0.99	583	593	0.98	1.00
No.5	600	591	0.98	581	595	0.97	0.99

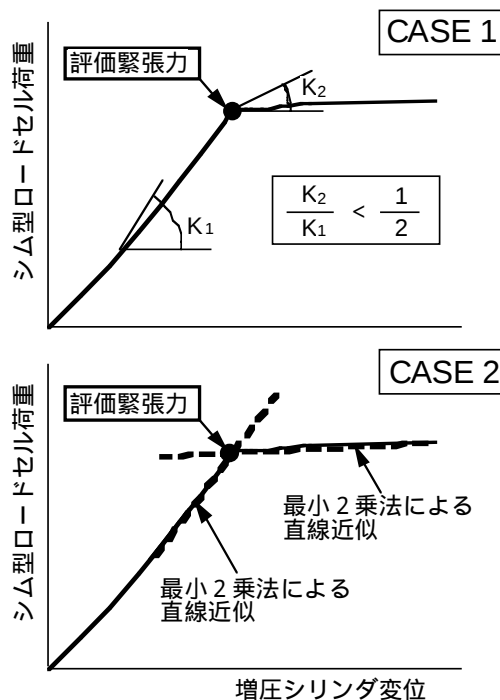


図-6 緊張力評価法
Evaluation method of anchored load

3.3 実大モデルへの反映事項

縮小モデルによる試験の結果，下記の事を確認した．

- (1) 定着端部における緊張力を従来のフィラーゲージ法（以下、現行法）と概ね同程度の精度で測定できる．
- (2) 定着端部にシム型ロードセルを設置しても特に問題は生じない．

一方，実用化に向けては，下記の点について確認する必要がある，実大モデル試験において確認する．

- (1) 長期間に亘る測定装置の信頼性・測定精度の維持
- (2) 合理的で，より精度の高い緊張力評価法の設定

4. 実大モデルによる試験

4.1 試験概要

写真-2に10MN級シム型ロードセルを示す．実大モデルシム型ロードセルは，既存PCCVのシムをシム型ロードセルに取り替えることを考慮し，既存PCCVのシムと同形状とした．また，縮小モデル同様，二つ割形式とした．シム型ロードセルの各々には7つのオイルセルを設けた．シム型ロードセルの材質は，ニッケルクロムモリブデン鋼鋼材（JIS-G4103）である．

試験は，コンクリートブロック（1.1m×1.1m×1.6m）に実機と同じ10MN級VSLシステムを再現し，テンドン定着端部に10MN級シム型ロードセルを設置して実施した．試験方法は図-7に示す通りである．

本試験の目的は，実機緊張力レベルでの試験を実施し，シム型ロードセル荷重と油量の変化を測定することで，両者の関係から，合理的でより精度の高い緊張力の評価法を検討することである．また，フィラーゲージを用いたリフトオフ荷重測定を実施することで，現行法と



写真-2 10 MN 級シム型ロードセル
10 MN class shim-type load cell

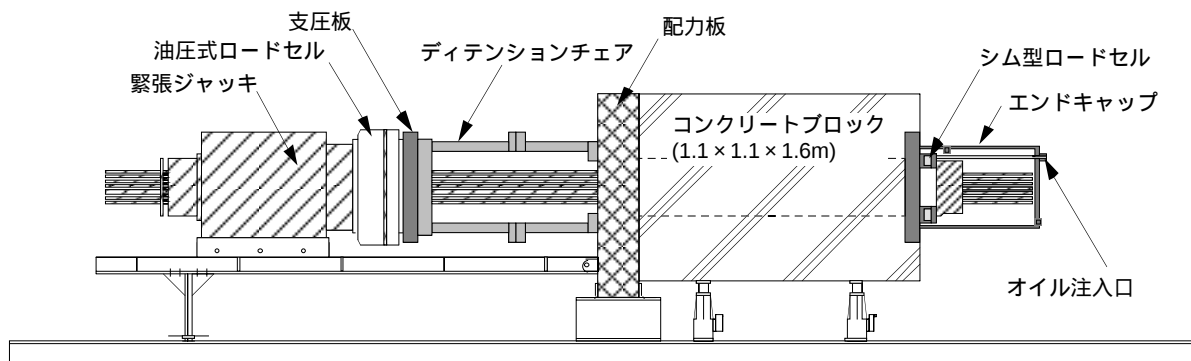


図-7 実大モデルによる試験

Full-scale model test

の精度を比較する。なお、本試験に用いた測定システムは、1MN級試験で用いたものとほぼ同様であり、図-3に示す通りである。

時間の経過及び気象条件の差異が計測装置および測定精度へ与える影響を調査する目的で季節間変動追従試験を実施する。試験期間は約1年とし、各季節（3カ月）ごとに緊張力測定を実施する。各回の測定では、気温・湿度の異なる朝、昼、夕等を選定して実施する。試験期間中はシム型ロードセルに緊張力（6.5MN）が作用した状態で保管する。また、導入緊張力確認のため、フィラーゲージを用いた現行法によるリフトオフ荷重測定も実施する。

シム型ロードセルによる緊張力測定では、従来のフィラーゲージ法に代わり、シム型ロードセル内に送り込まれる油量の変化によってリフトオフ荷重を評価する。一方、現行法によるリフトオフジャッキでの緊張力測定においても、油圧により定着端部で緊張するというメカニズムは同じである。そこで、実機におけるリフトオフ荷重と油量の変化との関係を把握するとともに、実機における作業性等を確認する目的で、関西電力大飯発電所3号機PCCVのISI時の現行法による緊張力測定の際に、リフトオフジャッキに送り込まれる油量の測定を実施した。

4.2 試験結果

緊張力測定試験は、下記に示す2種類の試験を実施した。

TEST1：現行法による緊張力測定。導入緊張力は6.5MN

TEST2：シム型ロードセルによる緊張力測定。導入緊張力は5.5MN、6.5MN、7.3MN

TEST1、TEST2の結果を表-3、表-4に示す。

TEST1の結果、現行法であるフィラーゲージによるリ

フトオフ荷重測定結果は、導入緊張力に対し最大4%の誤差を生じた。

TEST2の結果、1MN級シム型ロードセルによる緊張力測定試験では導入緊張力とシム型ロードセルによる緊張力測定結果の差は最大で2%であったのに対し、10MN級シム型ロードセルによる緊張力測定試験では、最大で

表-3 TEST1の試験結果

Test results of the Test1

	導入緊張力 A (MN)	荷重 (a) *1 (MN)	荷重 (b) *2 (MN)	(a), (b)の 平均値 B (MN)	A / B
No.1	6.50	6.23	6.36	6.30	0.97
No.2	6.52	6.25	6.34	6.30	0.97
No.3	6.53	6.23	6.35	6.29	0.96

* 1：1枚目のフィラーゲージが抜けた時

* 2：2枚目のフィラーゲージが抜けた時

表-4 TEST2の試験結果

Test results of the Test2

		導入緊張力 A (MN)	評価緊張力 CASE 2 B (MN)	B / A
5.5 MN	No.1	5.42	5.61	1.04
	No.2	5.44	5.62	1.03
	No.3	5.48	5.68	1.04
6.5 MN	No.1	6.30	6.51	1.03
	No.2	6.25	6.50	1.04
	No.3	6.25	6.51	1.04
7.3 MN	No.1	7.20	7.16	0.99
	No.2	7.24	7.17	0.99
	No.3	7.24	7.16	0.99

4%であった。なお、TEST2で用いた緊張力の評価法は縮小モデルにより提案されたCASE 2である。

季節間変動追従試験は現在実施中である。

大阪3号機I S Iでのリフトオフ荷重測定において、リフトオフジャッキに送り込まれる油量の変化とリフトオフジャッキ荷重を測定した結果の一例を図-8に示す。なお、油量変化に基づくリフトオフジャッキ荷重の評価方法は前述と同様、CASE 2である。

現行法であるフィラーゲージ法によるリフトオフ荷重測定結果と油量の変化を用いたリフトオフ荷重測定結果との差は最大でも1.2%であり、両者は良好な対応を示した。また、緊張力測定作業は円滑に実施できることを確認した。

6. まとめ

今回実施した縮小モデル、実大モデルによる緊張力測定試験により下記のことを確認した。

- (1) シム型ロードセルに用いた機構および測定システムは、実機PCCVでのテンドン緊張力測定に採用していく上で技術上問題はない。
- (2) リフトオフ荷重とシム型ロードセルに送られる油量の変化を表わす増圧シリンダの変位量の間には相関性がある。
- (3) 1MN級シム型ロードセル試験では、導入緊張力と評価荷重の差は最大で2%であり、現行法とほぼ同程度の精度であった。

7. 今後の予定

実機PCCVでは、シム型ロードセルがテンドン定着端に設置された後、エンドキャップ内には防錆を目的にグリースが注入される。注入の際のグリースの温度は最高で90℃であり、この温度によりシム型ロードセルに不具合が生じないことを確認する必要がある。

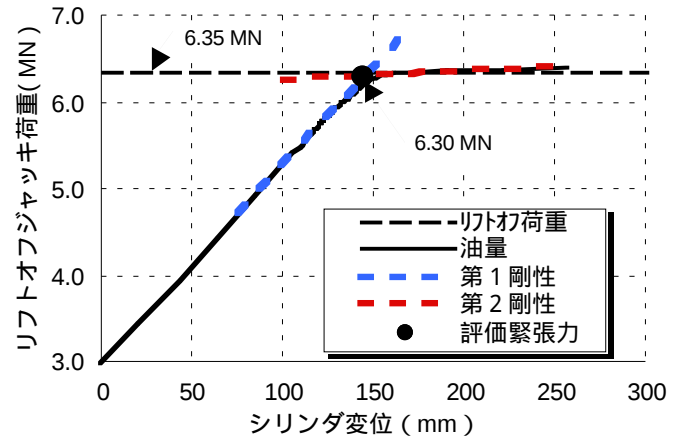


図-8 ジャッキ荷重とジャッキへ送られる油量の関係
The relation between the lift-off jack load and the injected oil quantity to the jack

グリース注入による影響確認試験は、季節間変動追従試験終了後に実施する。試験方法は、シム型ロードセルを90℃に熱した作動油内に投入した後、取り出し、自然冷却させた後、再度コンクリートブロックに設置し、緊張力測定試験を実施することで、加熱前後での測定精度の差異を確認する。

また、現在用いている緊張力評価法での評価誤差は最大で4%である。今後さらに評価精度の高い緊張力評価法を検討していく予定である。

参考文献

- 1) 北野 剛人, 船越 淳久, 村角 保行, 小林 裕他, 実機PCCVのテンドン張力の経時変化予測(その1~その3): 日本建築学会大会学術講演梗概集B, pp1603~1608, 1993.9
- 2) 尾崎 昌彦, 阿部 琢志, 村角 保行, 相川 勇治他, 実機PCCVのテンドン張力の経時変化予測(その4~その6): 日本建築学会大会学術講演梗概集B-2, pp1019~1024, 1995.8
- 3) Ozaki, M., Abe, T., Murazumi, Y., Aikawa, Y.: Study on the evaluation of the prestressing force prediction of PCCV tendons using Monte Carlo simulation. SMiRT-13, Volume IV Div.H, pp.83-88, Aug., 1995