

太径ストランドを用いたPCCV緊張システム

— 緊張システムの確証試験 —

高橋 英雄・西山 隆・竹崎 真一・村角 保行*1

Keywords : PCCV, VSL, prestressing system, tendon, friction coefficient

PCCV, VSL工法, 緊張システム, テンドン, 摩擦係数

1. はじめに

現在、わが国のPWR型原子力発電所におけるプレストレストコンクリート製原子炉格納容器(PCCV)の緊張システムには、VSL工法の場合、7本よりφ12.7mmストランド(以後、E5ストランドと称す)を用いた10MN級(55本のE5ストランドで構成されるテンドン:以後、E5-55テンドンと称す)の緊張システムが採用されている。

将来、PCCVが大型化された場合に、従来の10MN級を超えた緊張システムをPCCVに採用することが考えられる。この大容量化した緊張システムをPCCVに採用し、定着部数の低減を計ることで、従来の緊張システムを採用するよりも、プレストレス工事の施工手間やコストの低減が可能となる。

そこで、緊張システムを大容量化するために、従来のE5ストランドよりも太径である7本よりφ15.2mmストランド(以後、E6ストランドと称す)を用いた緊張システムを開発し、その実用化のための確証試験を行った。

本報は、確証試験として実施した摩擦係数試験、低サイクル疲労試験及び静的引張試験の結果を報告するものである。

2. 緊張システムの概要

E6ストランドを用いた緊張システムとしては、12MN級(46本のE6ストランドで構成されるテンドン、以後、E6-46テンドンと称す)の緊張システムを開発した。

図-1にPCCVに用いる緊張システムの定着部を示し、図-2に12MN級緊張システムのアンカーヘッドでのストランド配置を示す。また、表-1にE6ストランドの機械的性質を示す。

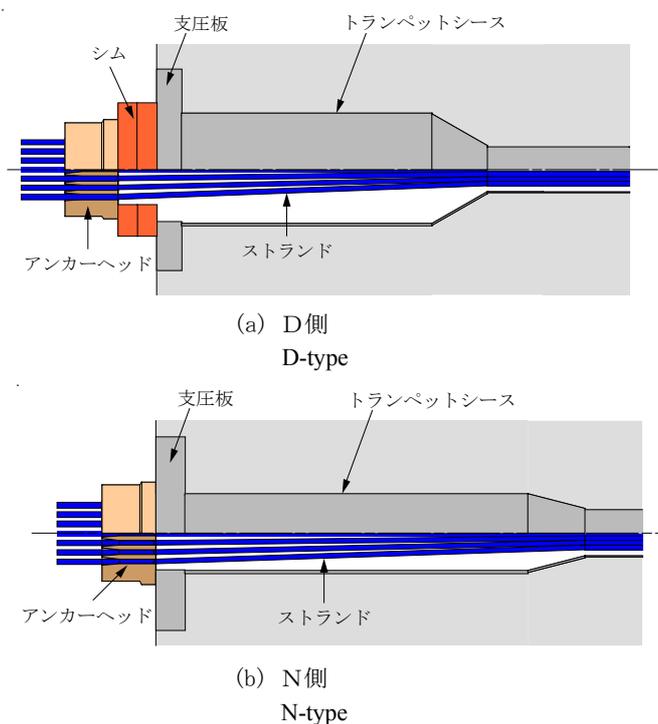


図-1 PCCVに用いる緊張システムの定着部
Tendon anchorage

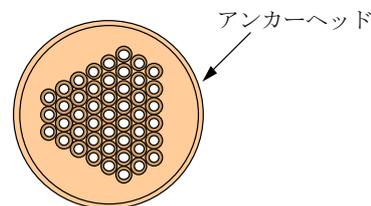


図-2 12MN級アンカーヘッドでのストランド配置
Strand pattern on the 12MN class anchorhead

表-1 機械的性質
Mechanical properties

ストランド	断面積 (mm ²)	降伏荷重 Py (kN)	引張荷重 Pu (kN)	伸び (%)
E6	138.7	156	183	3.5

*1 設計本部原子力部

3. 試験概要

3.1 摩擦係数試験

摩擦係数試験では、E6-46 テンドンとシースの摩擦係数を確認するための試験を行った。

また、本試験では、E6-46 テンドンから 9 本の E6 ストランドを抜き取った E6-37 テンドンとシースの摩擦係数の確認試験も行い、摩擦係数とストランド本数との関係についての検討も行った。

摩擦係数試験では、写真-1 に示す鉄筋コンクリート製の試験体を用いた。

試験体の断面は、幅 1.0m × 高さ 1.2m とし、長さは、(直線部：2.5m) + (曲率半径 10m の円弧部：10.472m) + (直線部：2.5m) の全長 15.472m とした。

試験体内に設置したシースの内径は、E6-46 テンドンにおいて、シース内断面積に対するテンドン断面積の割合が、既存 PCCV (E5-55 テンドン) と同じになるように内径を $\phi 160\text{mm}$ とした。

表-2 に試験に使用したテンドン (E6-37 及び E6-46) の諸元を示す。

表-3 に摩擦係数試験で実施した試験一覧を示す。

TEST-1, 2 は E6-46 を、TEST-3, 4 は E6-37 のテンドンをを用いた試験、TEST-1, 3 は D 側を加圧端、N 側を受圧端、TEST-2, 4 は N 側を加圧端、D 側を受圧端にした試験である。

試験手順としては、一次防錆材を塗布したストランドを試験体のシース内に通した後、D 側定着部にシムとアンカーヘッド、N 側定着部にはアンカーヘッドをそれぞれ設置し、その両端に緊張ジャッキを設置した。次に、受圧端側の緊張ジャッキにより始めに予備緊張を与え、その後、加圧端側の緊張ジャッキにより片引き载荷した。最大荷重 0.85Py に到達後、緊張ジャッキにより载荷していた荷重を除荷し、試験を終了した。試験は各試験ケースで 3 回行った。

計測項目は、両端の緊張ジャッキによる緊張荷重とテンドンの伸び量であり、最大荷重 0.85Py になるまで 1000kN 毎に緊張ジャッキを停止し、計測を行った。

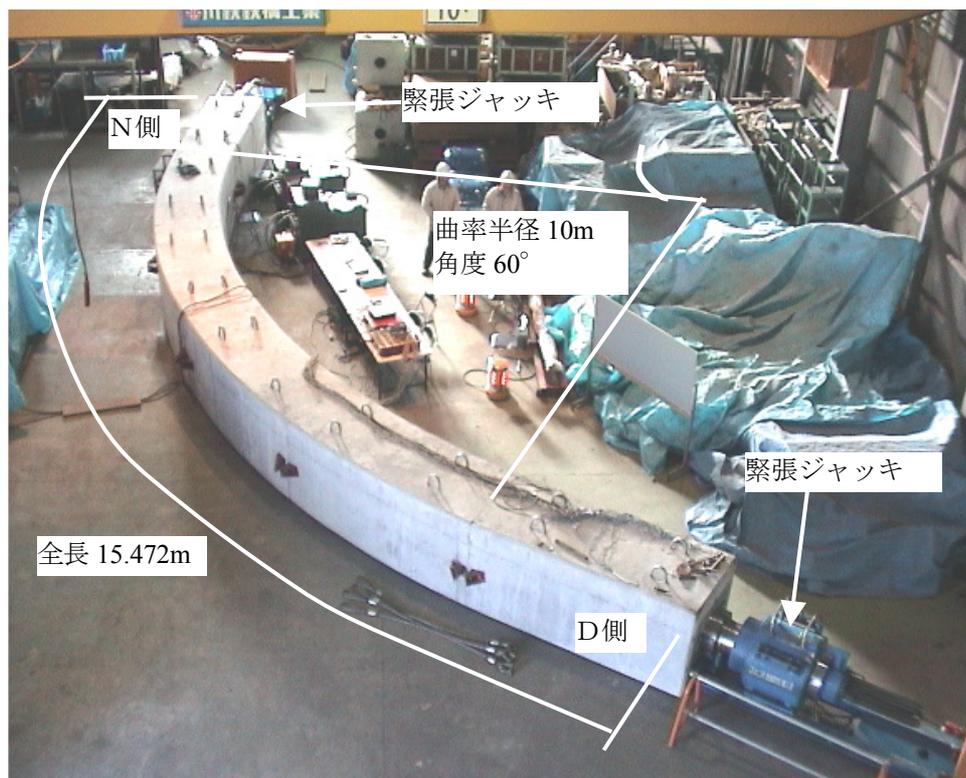


写真-1 試験体 (摩擦係数試験)

Test apparatus (friction coefficient test)

表-2 テンドン諸元

Tendon specification

テンドン	降伏荷重 Py (kN)	引張荷重 Pu (kN)	0.85Py (kN)
E6-37	8214.0	9657.0	6981.9
E6-46	10212.0	12006.0	8680.0

表-3 試験一覧 (摩擦係数試験)

List of tests (friction coefficient test)

	テンドン		加圧端	受圧端
	E6-37	E6-46		
TEST-1		○	D 側	N 側
TEST-2		○	N 側	D 側
TEST-3	○		D 側	N 側
TEST-4	○		N 側	D 側

3.2 低サイクル疲労試験及び静的引張試験

低サイクル疲労試験では、ASME Sec III Div. 2¹⁾に基づき、実機対応の実大のテンドン及び定着具を用い、テンドンの規格引張荷重の 40%~80% の範囲で 50 回の繰返し载荷を行い、テンドンが破断しないことを確認した。

静的引張試験では、通商産業省告示第 452 号²⁾ (以後、告示第 452 号と称す) に基づき、定着具及び定着される緊張材が、下記の計算式により計算した荷重以上の荷重

に耐え、かつ、破断時の伸び率が最小標点距離 2.5メートルで 0.02 以上であることを確認した。

(日本工業規格 G3536 PC 鋼線及び PC 鋼より線で規定する緊張材の引張荷重) × (当該緊張材の本数)

低サイクル疲労試験及び静的引張試験では、写真-2 に示す鉄筋コンクリート製の試験体を用いた。

試験体の断面は、幅 1.1m × 高さ 1.1m × 長さ 2.5m である。写真-3 に定着部を示す。

TEST-1 は、最初に低サイクル疲労試験を行い、試験終了後、引き続き、静的引張試験を行った。

TEST-2 は、TEST-1 終了後、テンドンを全て新品に交換し、静的引張試験を行った。

低サイクル疲労試験の試験方法としては、緊張ジャッキで $0kN \rightarrow 0.8Pu \rightarrow 0.4Pu$ の順に予備荷重を行い、その後、緊張ジャッキで荷重範囲 $0.4Pu \sim 0.8Pu$ の繰り返し荷重試験を 50 回行った。

静的引張試験の試験方法としては、緊張ジャッキで片引き荷重を行い、テンドンが破断するまで荷重した。

静的引張試験の計測項目は、破断荷重、破断時の伸び量及び破断に至るまでの緊張荷重-伸び量関係である。

4. 試験結果

4.1 摩擦係数試験

図-3 に TEST-1~TEST-4 の摩擦係数 μ と緊張荷重との関係を示す。摩擦係数 λ は、告示第 452 号の参考値 0.001 とした。摩擦係数 μ 及び λ は、プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説 (以後、PC 規準と称す) ³⁾ で定義される、角度変化に対する摩擦係数及び単位長さ当りに対する摩擦係数である。

E6-46 テンドンの TEST-1, 2 での摩擦係数 μ は、緊張荷重 $0.85Py$ において既存 PCCV における設計値である 0.14 以下であった。

E6-37 テンドンの TEST-3 の 1 回目の摩擦係数 μ は 0.14 以下であったが、それ以降の TEST-3 の 2, 3 回目及び TEST-4 では 0.14 を上回っていた。これは、同じ試験体で TEST-1 → 2 → 3 → 4 の順に各 3 回づつ試験を実施したため、試験回数が増す毎に、シース内面がテンドンから

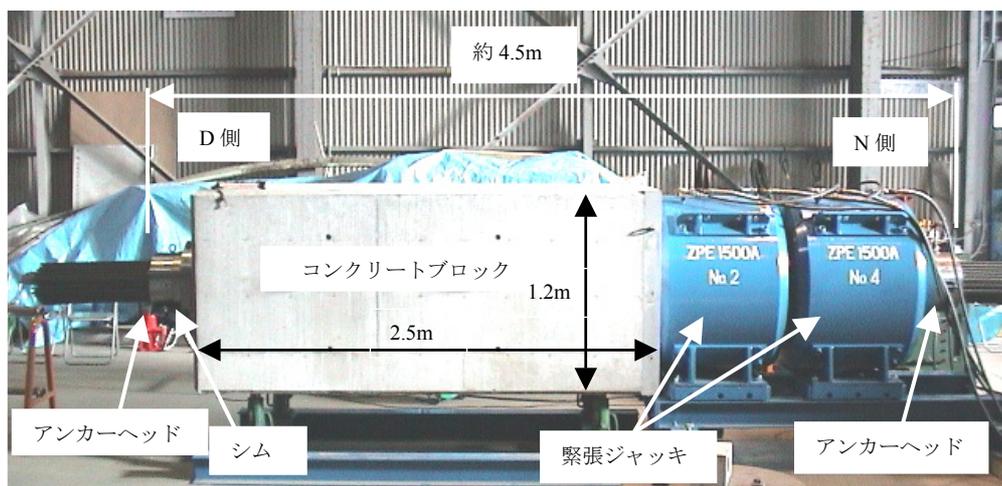
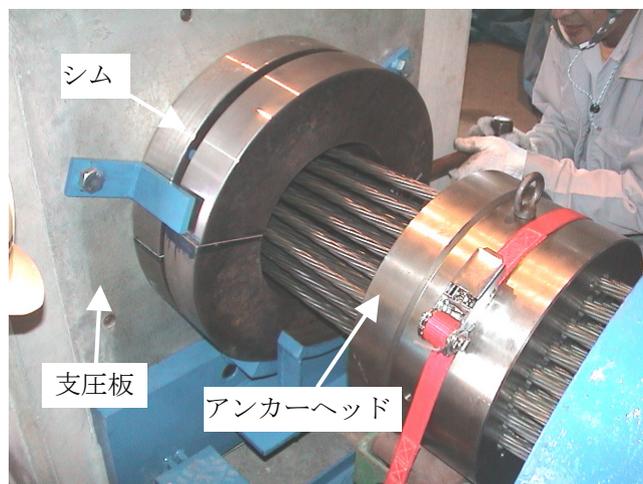


写真-2 試験体 (低サイクル疲労試験及び静的引張試験)
Test apparatus (low cycle fatigue tensile test and static tensile test)



(a) D側定着部
Tendon anchorage of D type



(b) N側定着部
Tendon anchorage of N type

写真-3 定着部
Tendon anchorage

太径ストランドを用いたPCCV緊張システム

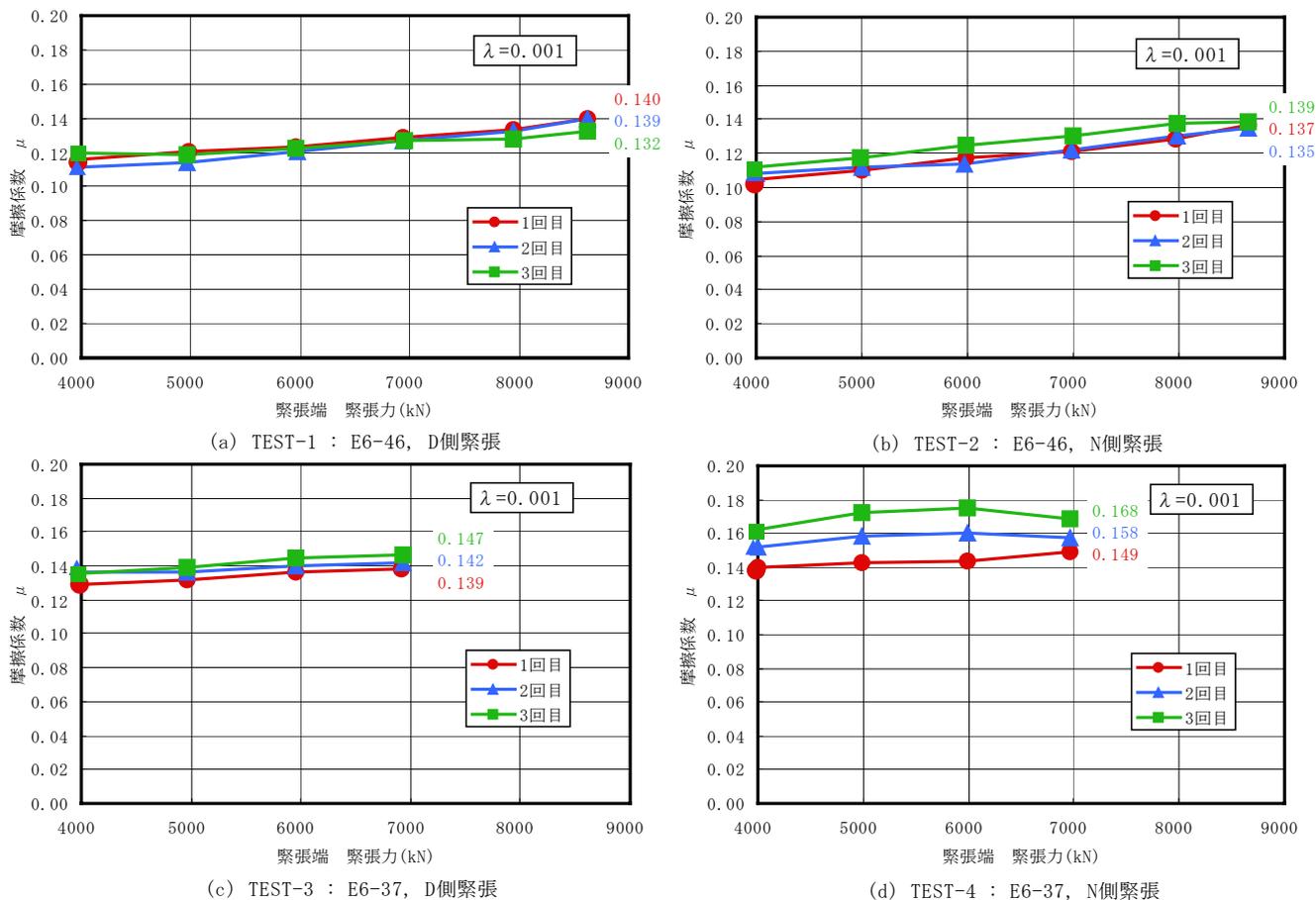


図-3 緊張荷重－摩擦係数関係

Prestressing load and friction coefficient relationships.

受ける支圧の繰り返しでへこんだため、摩擦係数が大きくなったと考えられる。TEST-4 終了後に試験体を解体し、シース内の目視検査を行い、シースの円弧中心側に緊張時のストランドによるへこみ跡がついていることを観察した。写真-4 にシースのへこみ跡を示す。

試験結果から以下のことが確認できた。

- (1) 緊張荷重の増加とともに摩擦係数 μ は大きくなる傾向を示す。
- (2) 緊張方向（加圧端と受圧端の位置関係）が、摩擦係数に与える影響は小さい。
- (3) 比較的試験回数の少ない TEST-1 と TEST-3 を比較すると、ストランド本数を少なくし、 tendon 断面積に対するシース内断面積の割合を大きくしても、摩擦係数に及ぼす影響は小さい。

図-4 に一例として PC 規準により求めた TEST-1 の緊張力分布を示す。

図-5 に PC 規準により求めた緊張力分布から算定した伸び量及び計測した伸び量と緊張荷重との関係を TEST-1~4 の各 1 回目について示す。緊張力分布から伸び量算定に用いたストランドのヤング係数は PC 規準により

$E=200\text{kN/mm}^2$ とした。

全試験ケースにおいて、PC 規準により求めた緊張力分布から算定した伸び量と計測した伸び量は、ほとんど同じであった。

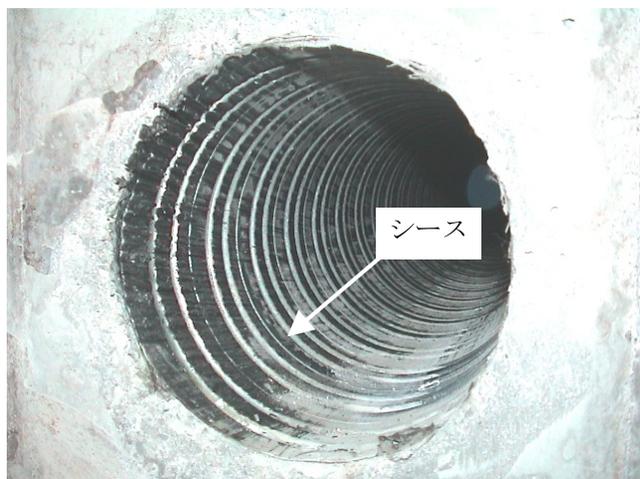


写真-4 シースのへこみ跡
Dent of the sheath

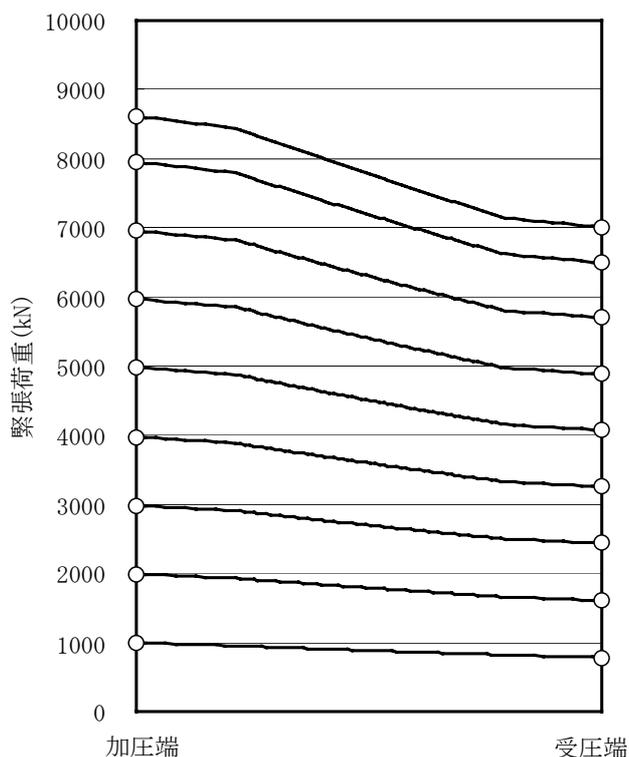


図-4 緊張力分布
Prestressing load distribution

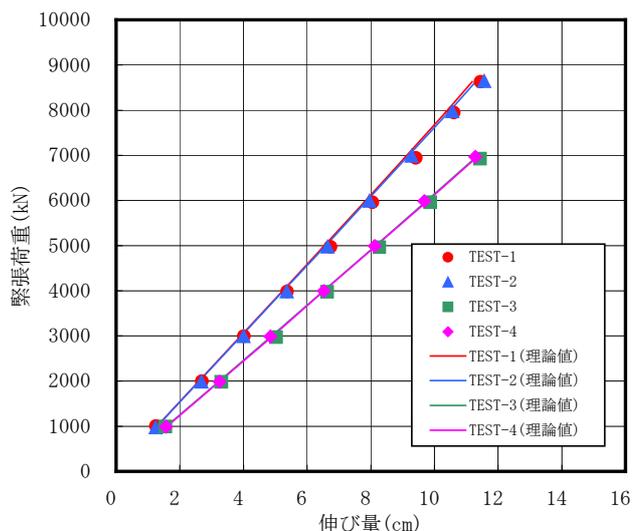


図-5 緊張荷重—伸び量関係
Prestressing load and elongation relationships.

4. 2 低サイクル疲労試験及び静的引張試験

図-6 に低サイクル疲労試験での荷重サイクルを示す。

低サイクル疲労試験では、繰返し回数 50 回目においても、テンドンには破断しなかった。

表-4 に静的引張試験の試験結果である最大荷重 (破断荷重) と伸び量を示し、図-7 に緊張荷重—伸び量関係を示す。

E6-46 テンドンの TEST-1 及び TEST-2 での最大荷重は、13055kN 及び 13029kN と E6-46 の規格引張荷重 12006kN を超えており、破断後の定着具も健全であった。破断時のテンドン伸び量は 5.53%及び 5.24%であり、告示第 452 号での判定値である 2%以上を十分満足するものであった。

図-8 にストランド素線の破断箇所を示す。また、写真-5 に破断したストランドの素線を示す。

TEST-1 は、D 側アンカーヘッドのくさび位置でストランドの素線のうち 1 本が破断した。また、TEST-2 は、N 側アンカーヘッドのくさび位置でストランドの素線のうち 2 本が破断した。

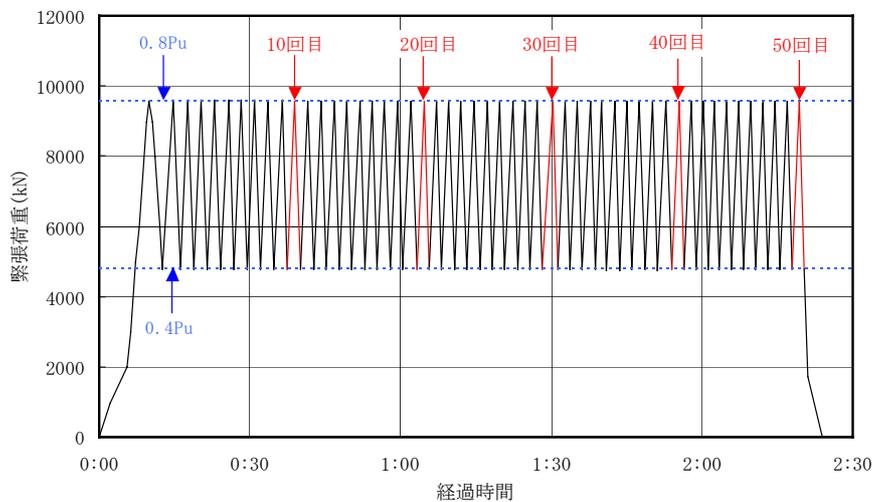


図-6 荷重サイクル
Load cycle

表-4 静的引張試験結果
Test result of static tensile test

	最大荷重 (kN)	伸び量 (%)
判定値	12006 以上	2.0%以上
TEST-1	13055	5.53
TEST-2	13029	5.24

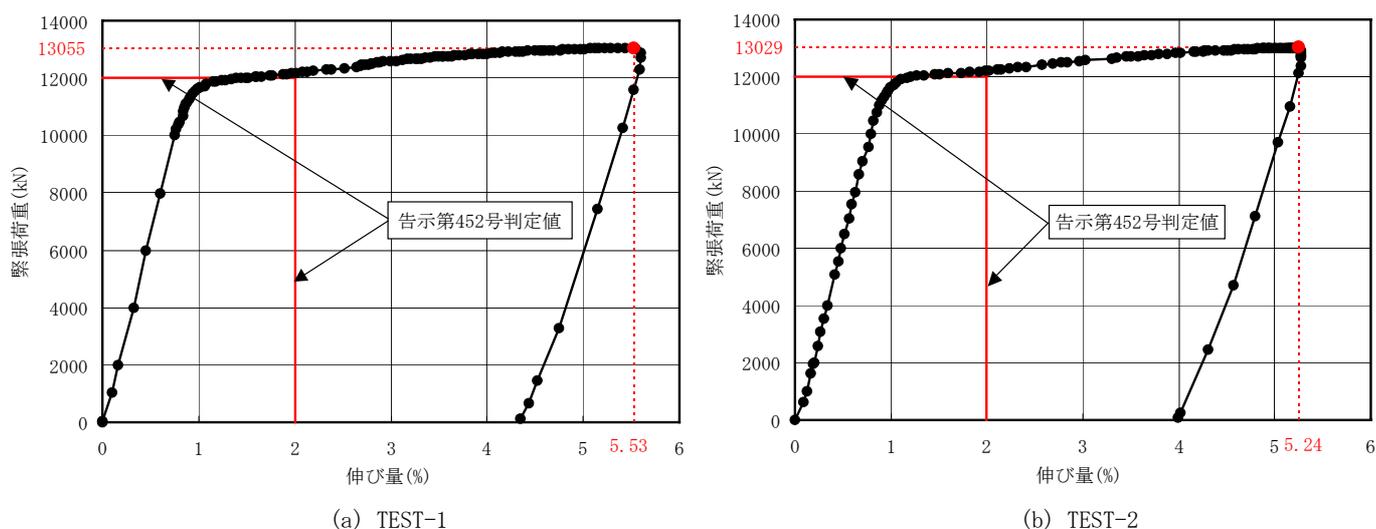


図-7 緊張荷重—伸び量関係
Prestressing load and elongation relationships

5. まとめ

摩擦係数試験、低サイクル疲労試験及び静的引張試験の試験結果から、以下のことが確認できた。

- (1) E6-46 テンドンを用いた場合の摩擦係数 μ は、PCCVで用いている設計用摩擦係数 $\mu = 0.14$ 以下である。
- (2) E6-37 テendonは、E6-46 テendonの試験後に同じ試験体で試験を繰り返したために、摩擦係数 μ が0.14を超える結果もあった。
- (3) E6-46 テendonは、ASME で規定されている繰り返し回数 50 回においても破断しない。
- (4) E6-46 テendon及びその定着具は、告示第 452 号に規定されている E6-46 テendonの規格引張荷重以上の荷重に耐え、破断時のテendon伸びは 2%以上である。
- (5) E6-46 テendonを用いた 12MN 級緊張システムは、基本的にはPCCVに適用可能なシステムである。

参考文献

- 1) ASME : Boiler & Pressure Vessel Code, Section III Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components, Division 2 Code for Concrete Reactor Vessels and Containments, 2001
- 2) 通商産業省 告示第 452 号 : コンクリート製原子炉格納容器に関する構造等の技術基準, 1990
- 3) 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, 1998

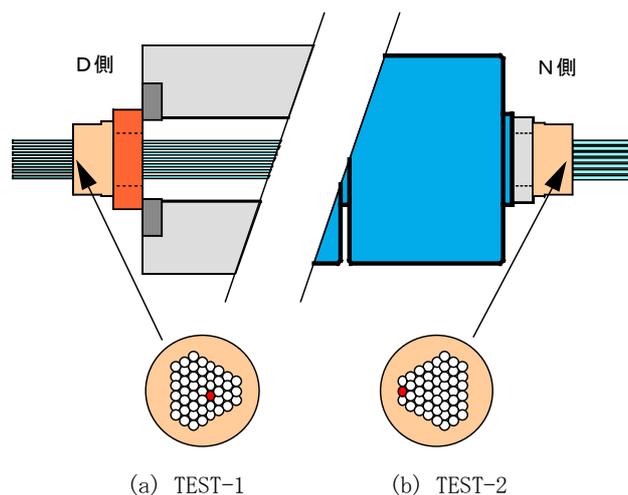


図-8 破断箇所
Ruptured point

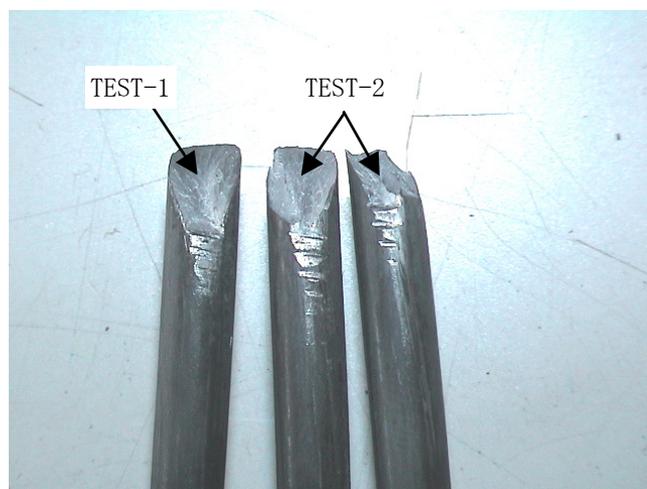


写真-5 破断断面
Ruptured section