

PCNetセグメントの開発 - セグメントリング載荷試験および内水圧試験 -

大阪支店 三輪泰之
本社 加藤竜一
本社 別所辰保

概要：(財)先端建設技術センターに、シールドトンネル用セグメントとして「PCNetセグメント」の技術審査の申請を行った。その技術審査の要となったリング載荷試験および内水圧試験について紹介するとともに、電動トルクレンチによる緊張方法の開発内容についても報告するものである。

キーワード：シールドトンネル，PCNetセグメント，TWグリップ，トルク緊張管理，電動トルクレンチ，内水圧，リング載荷試験，2セグメントクロス

本報告は、切羽側面でプレストレスを導入することを目的として開発されたTWグリップの緊張管理方法と、本緊張方法によって組立てられたセグメントリングに、外荷重および内水圧を作用させ、理論値との対比を行った結果を報告するものである。

1. プレストレスの導入

PCNetセグメントは、網目状に配置されたPC鋼より線を切羽側より挿入・緊張するため、これらの作業をセグメント幅の約1/3程度の作業スペースで行わなければならない。よって、このような狭隘な作業空間でも、TWグリップおよび電動トルクレンチを使用することでRCセグメントと同等の組立速度での作業が可能であり、軽作業化が図れる。

(1) TWグリップおよび支圧板

TWグリップ及び支圧板を写真-1,2に示す。

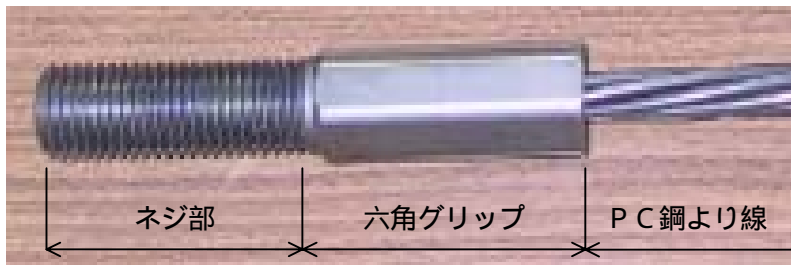


写真-1 TWグリップ

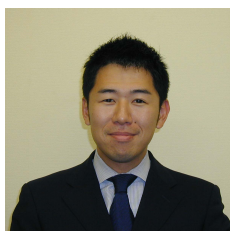


写真-2 六角スリーブ付支圧板

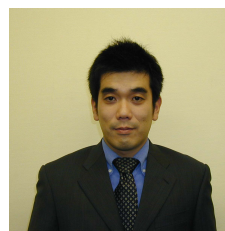
TWグリップとは、ネジ部、六角グリップ、PC鋼より線で構成されており、六角グリップ部にPC鋼より線を圧着したものである。TWグリップを六角スリーブ付き支圧板に挿入後、電動トルクレンチを使用し、ナットを回すことにより、PC鋼より線が緊張される。このとき、TWグリップと支圧板の六角部でPC鋼より線の回転を防ぐ。



大阪支店
支店長付
三輪泰之



技術本部
開発技術
第二部
加藤竜一



技術本部
開発技術
第一部
別所辰保

(2) 電動トルクレンチによるトルク緊張試験

a) 試験概要

鋼製アバットを利用した緊張装置を用いて緊張試験を行った。緊張作業は、固定側に設置した油圧ジャッキで、TWグリップのたるみを取るため予備緊張(約10kN)を行い、その後電動トルクレンチを用い本緊張を行った。固定側に設置したロードセルより、設定したトルク値に対する緊張力の測定および本緊張開始時から終了時までの所要時間の計測を行った。

緊張力のばらつきは±10%を目標とし、トルク値と緊張力の関係からトルク係数(K値)を算出し、ハイテン用ボルトのトルク係数値(K=0.100~0.150)と同等値を目標とした。試験装置を写真-3に示す。

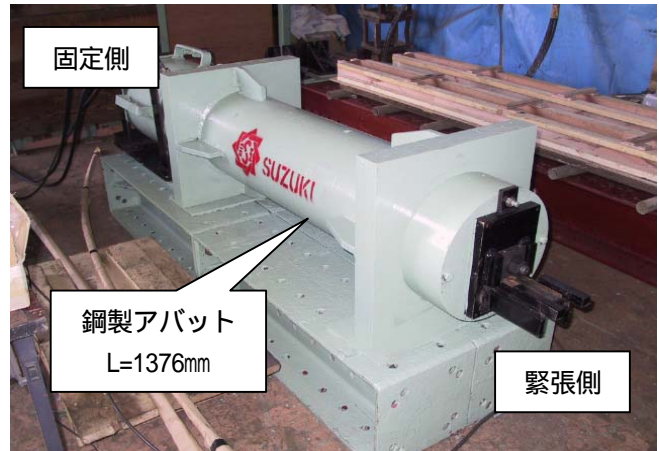


写真-3 緊張装置

b) 使用機材および材料

TWグリップは3本を繰り返し使用し、ナットおよびワッシャーは損傷がみられた場合に交換した。また、TWグリップのネジ部・ナット・ワッシャーには、モリコートペーストを塗布した。電動トルクレンチは、ITH社(ドイツ製)のEDS-75(最大トルク値:750N・m)を使用し、TWグリップ用ロングソケットを装着させ試験を行った。設定トルク値は、500N・m, 400N・m, 300N・m, 200N・mの4通りとした。緊張作業状況を写真-4に示す。

- ・ TWグリップ : 1S12.7 L=2.2m
- ・ 支圧板 : 1S12.7用(六角スリーブ付き)
- ・ ナット : ハイテン用ナット M24
- ・ ワッシャー : ハイテン用
- ・ 電動トルクレンチ : EDS-75 (ITH社 ドイツ製)
 最大トルク値 750N・m
 回転数(無載荷時) 49回転/min
 重量 7.0kg

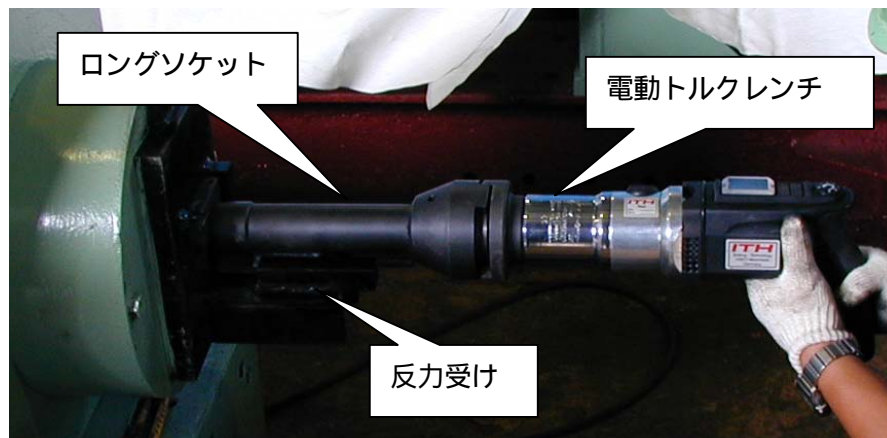


写真-4 緊張状況

c) 試験結果

設定トルク値毎に、TWグリップ3本を各3回緊張し、9回の試験を行った。このとき、図-1~4に示すトルク値と緊張力の関係から緊張力のばらつきを確認した。

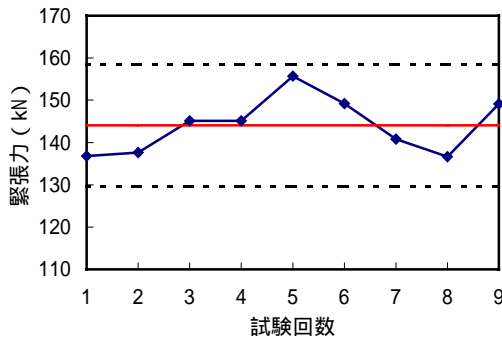


図-1 緊張力の分布(500 N·m)

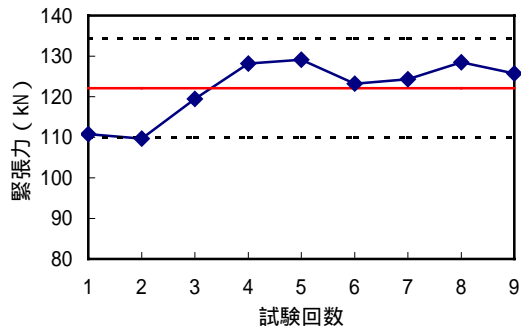


図-2 緊張力の分布(400 N·m)

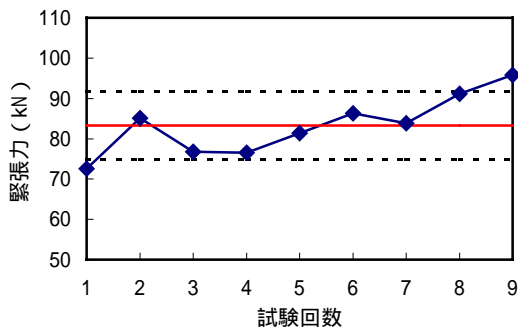


図-3 緊張力の分布(300 N·m)

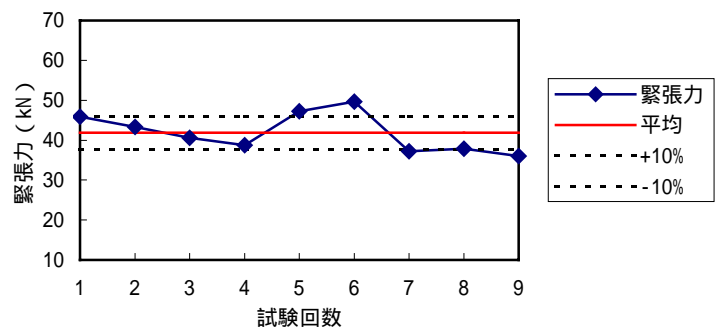


図-4 緊張力の分布(200 N·m)

以上より、緊張力のばらつきが±10%以内となっていない場合も多少あるが、ほぼ±10%以内のばらつきで緊張可能であった。

ここで、各設定トルク値の平均緊張力とトルク値を算出し、その関係を図-5,6に示す。

表-1 トルクと平均緊張力の関係

トルク (N·m)	平均緊張力 (kN)	K 値 トルク係数
200	41.85	0.201
300	83.29	0.151
400	122.13	0.137
500	144.02	0.145

トルク係数の算出は JIS より、

$$Tf = K \cdot d \cdot N$$

ここで、

Tf : トルク値 (N·m)

K : トルク係数

d : ナットの有効径 (m)

N : 緊張力 (kN)

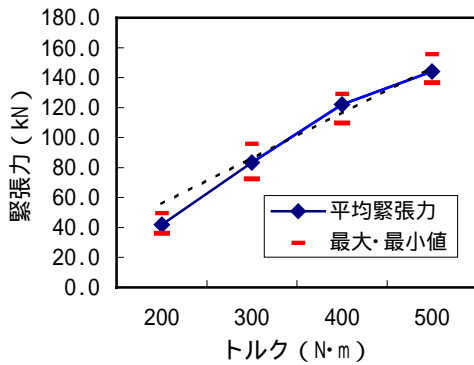


図-5 トルク値と緊張力の関係

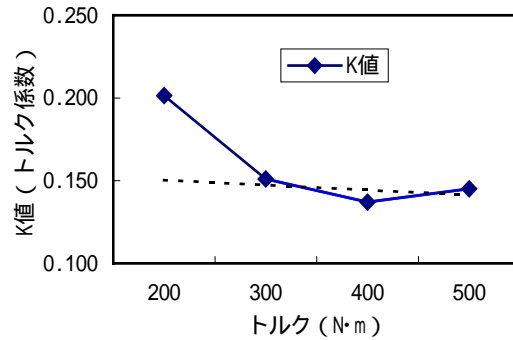


図-6 トルク値とトルク係数の関係

以上の結果より、トルク値を上げることで緊張力も上昇し、ほぼ比例関係であった。しかし、設定トルク 300N・m 及び 200N・m のとき、ばらつきが大きく、平均緊張力の $\pm 10\%$ 外の結果となることがあった。K 値については、緊張力に比例関係がみられることからトルク値 200N・m の場合を除き、0.140 ~ 0.150 程度でありほぼ一定値が得られた。

次に、ケース における所要時間と伸びより、回転数を算出しトルクと回転数の関係を表-2、図-7 に示す。

表-2 トルクと回転数の関係

トルク (N・m)	緊張力 (kN)	所要時間 (秒)	回転数 (回/分)
200	41.85	28.3	3.0
300	83.29	41.8	4.6
400	122.13	59.1	5.0
500	144.02	69.8	5.2

TW グリップのネジピッチは 3.0mm

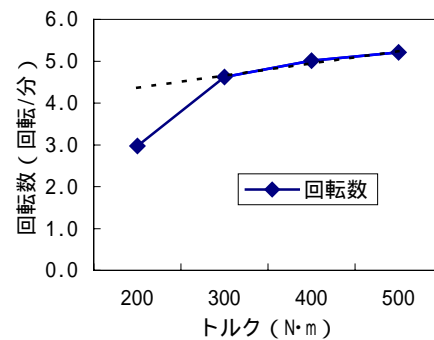


図-7 トルクと回転数の関係

以上の結果より、設定トルクが 300N・m ~ 500N・m の場合、回転数はほぼ一定の値であったが 200N・m の場合には、K 値が高いことから回転数は低かった。このことから、電動トルクレンチ (EDS-75) を使用した TW グリップ緊張作業における回転数としては、設定トルクが 300N・m ~ 500N・m の場合は、1 分間に約 5 回転、設定トルク 200N・m の場合は、1 分間に約 3 回転であった。

d) まとめ

緊張力はトルクの設定に応じて、ばらつき $\pm 10\%$ 以内で確実に緊張力を導入することができた。よって、電動トルクレンチを用いた TW グリップの緊張作業は、トルクによる緊張管理で行うことが可能である。但し、機械及び TW グリップの性質によって多少緊張力に差が生じる。このことから作業開始時にはキャリブレーションを行い、トルクと緊張力の関係から K 値 (トルク係数) を算出し、その結果より目標とする緊張力に見合うトルク値を設定する必要がある。なお、トルクレンチの最大トルクに対して低いトルク (今回は 200N・m 最大トルクの 27% 程度) に設定した場合、緊張力にばらつきが大きく、K 値も大きくなる傾向がみられた。このことから、トルクレンチは機械性能 (最大トルク) の 50 ~ 70% 程度で使うことが望ましいと考えられ、目標緊張力に応じて機械の選定を行う必要がある。また、作業時間においても機械選定を行うことで、1 分間に約 5 回転で緊張することが可能であり、組立作業時間は RC セグメントと同等以上の速度で可能であると考えられる。

以上のことから、TW グリップを使用したトルク緊張管理は可能であることが確認できた。

2. セグメントリング載荷試験

(1) 試験概要

試験は、実際に近い設計条件を用いて試設計を行った。その際断面力の算定には、はり-ばねモデルを用いた。設計に必要な、継手曲げ試験やせん断試験の要素試験を行い、得られた回転ばね定数、せん断ばね定数を用いて内水圧載荷試験を行った。

(2) 試設計

a) セグメント形状

供試体の形状、寸法を表-3、図-8に示す。

表-3 セグメント形状及び寸法

セグメント外径	2 5 5 0 mm
セグメント厚さ	1 7 5 mm
幅	7 5 0 mm
分割	6 等 分 割

Kセグメントは、軸方向挿入型

b) 設計条件

土被り : 30 m
 地下水位 : 25 m
 内水圧 : 0.3 MPa
 地盤ばね定数 k : 40 MN/m³
 側方土圧係数 : 0.4
 また、入力定数を表-4に示す。

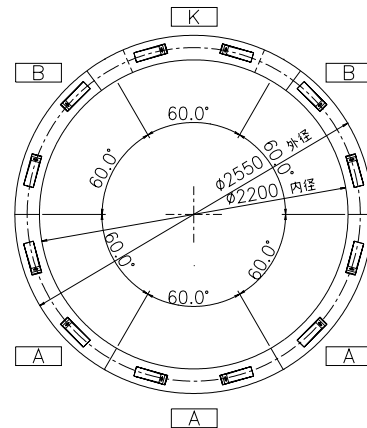


図-8 セグメント形状及び寸法

表-4 試設計の入力定数

弾性係数 : E (kN/m ²)		33 × 10 ⁶
断面積 : A (m ²)		1.75 × 10 ⁻¹
断面二次モーメント (m ⁴)		4.47 × 10 ⁻⁴
回転ばね定数 : k (kN・m/rad)	k 1	9240
	k 2	2270
半径方向せん断ばね定数 : ksr (kN/m)		162,500
接線方向せん断ばね定数 : kst (kN/m)		162,500

要素試験で得られた値

c) PC 鋼材の配置とプレストレス力の算定

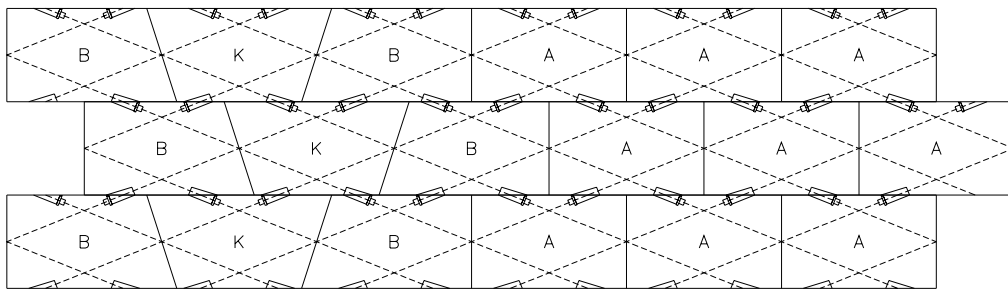
本試験では、内水圧の作用するセグメントを考えているため、リング軸方向よりリング周方向のプレストレスが大きく導入出来る PC 鋼材の配置を行った。配置形状を図-9 に示す。

2)の条件により算定した断面力の最大曲げモーメントと軸力に、プレストレス力を軸力として加算し、コンクリートの応力度の算定を行う。このとき、部材に引張応力が発生しないようにプレストレス力を決定した。使用鋼材、導入プレストレス等を表-5 に示す。

表-5 導入プレストレス力

使用鋼材	1S12.7
鋼材長(mm)	2010
初期緊張力(kN)	138.2
導入プレストレス力(kN)	120.5

切羽側(緊張側)



坑口側

図-9 PC 鋼材の配置

(3) 回転ばね定数 (セグメント継手曲げ試験)

a) 試験概要

内水圧試験に先立ち、セグメント継手の回転ばね定数を要素試験により確認した。試験は、図-10 に示すように2点荷重で行った。荷重幅は、「シールド工用標準セグメント 日本下水道協会」に準拠している。

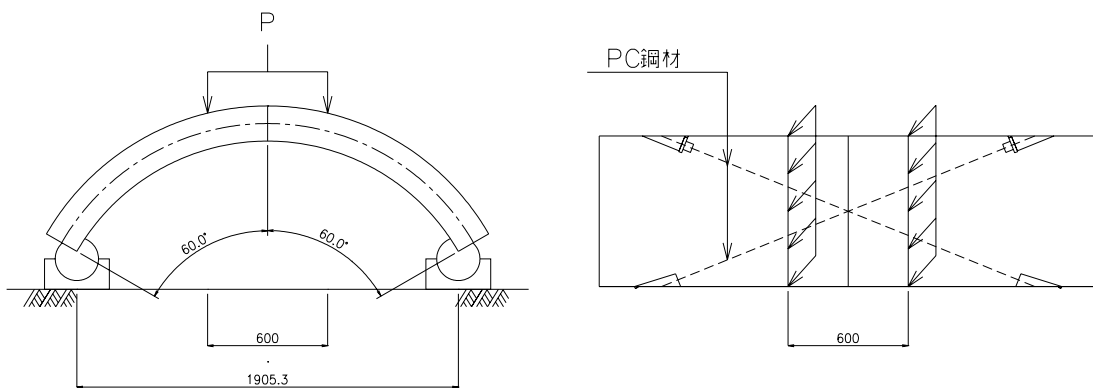


図-10 セグメント継手曲げ試験概要図

b) 試験方法

セグメント2ピ - スを地組した後、PC鋼材を挿入し、油圧ジャッキを用いて緊張することでプレストレスを導入した。導入するプレストレス力は、110kN、および55kNを目標とした。プレストレス導入後、グラウトは行わず、アンボンド構造とした。荷重方式は2点荷重方式とし、1kNの荷重ピッチで荷重を行った。写真-5に荷重試験状況を示す。



写真-5 試験状況

c) 試験結果

図-11に荷重と鉛直変位の関係を示す。

セグメント継手面の目開きが始まるまでは、プレストレス力の大きさが鉛直変位に与える影響は大きく、110kNのプレストレスを導入した場合には剛性一様として解析した理論値に近い値を示していた。また、目開き発生荷重(変曲点)は、解析値上の変曲点(目開き発生荷重)より高い値を示した。目開き発生以降も、プレストレスの大きさが影響を及ぼしており、突き合わせ理論より高い剛性が認められた。

また、P=110kNの場合、第3勾配まで、P=55kNでは第2勾配まで荷重したが、除荷すると鉛直変位は、0となりPCNetセグメントは変形復元能力に優れていることを示している。

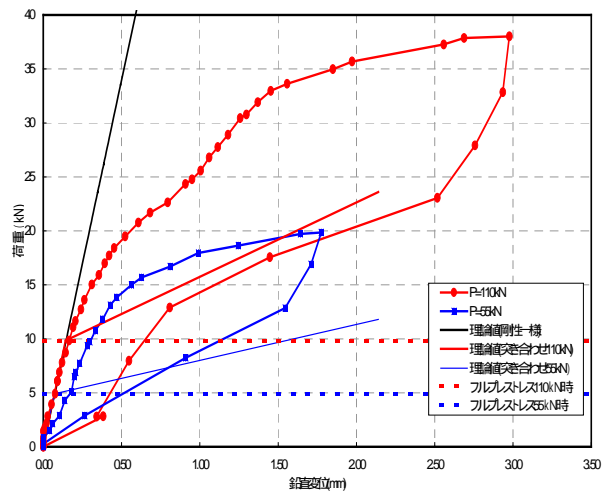


図-11 荷重-変位曲線

次に、図-12と表-6に曲げモーメントと目開き量から算出した回転角の関係と、算出した回転ばね定数を示す。

表に示すようにプレストレスの大きさにより回転ばね定数は相違している。

また、軸力110kNの試験においては、k2が確認され、軸力55kNにおいては、k2は確認できず、k1からk3に移行した。これより、k2は軸力の強弱によって現れ、PCの特長と考えられる。

算出された回転ばね定数は、リング荷重試験の設計に用いた。

表-6 算出した回転ばね定数

プレストレス力 (kN)	回転ばね定数 (kN・m/rad)		
	k 1	k 2	k 3
110	9240	(2270)	520
55	5670	-	360

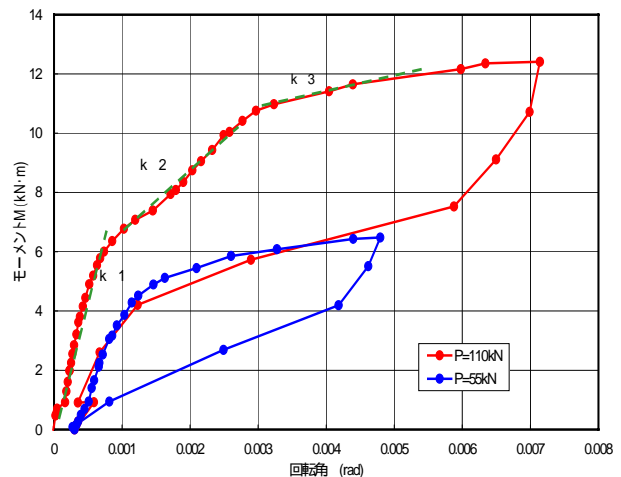


図-12 曲げモーメントと回転角の関係

(4) 内水圧载荷試験

a) 試験概要

供試体形状

内水圧载荷試験は図-13 に示すように、セグメントリングを3段組立て行った。

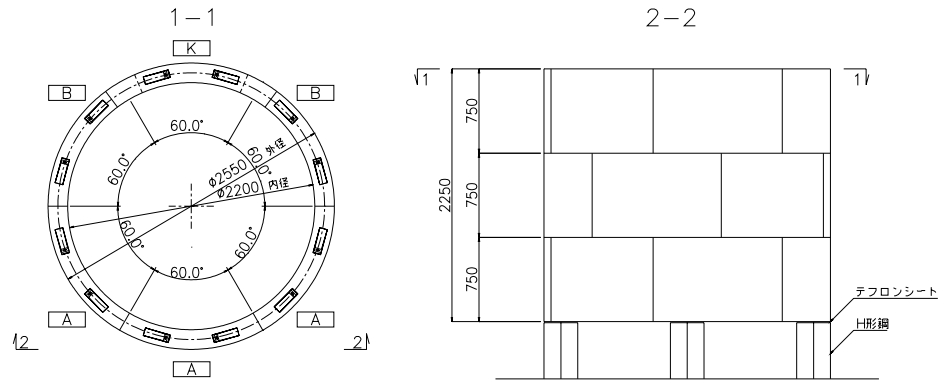


図-13 供試体形状

载荷方法と試験ケース

外荷重としての軸力は写真-6 に示すように、組立てたセグメントリングの外周にアンボンドPC鋼より線(1S17.8)を2本/リングに設置し緊張を行った。

外荷重としての曲げモーメントは写真-6 に示すように、PC鋼棒を用いて集中荷重により第2リングのみに载荷した。

内水圧は、組立てたセグメントリングの内側にスチールセグメントリングを設置し、3リング全てに水圧を载荷した。

また、試験ケースは図-14 に示すように軸力を载荷後、曲げを集中荷重として(PV) 载荷し、その後内水圧を 0.3Mpa まで载荷させた。

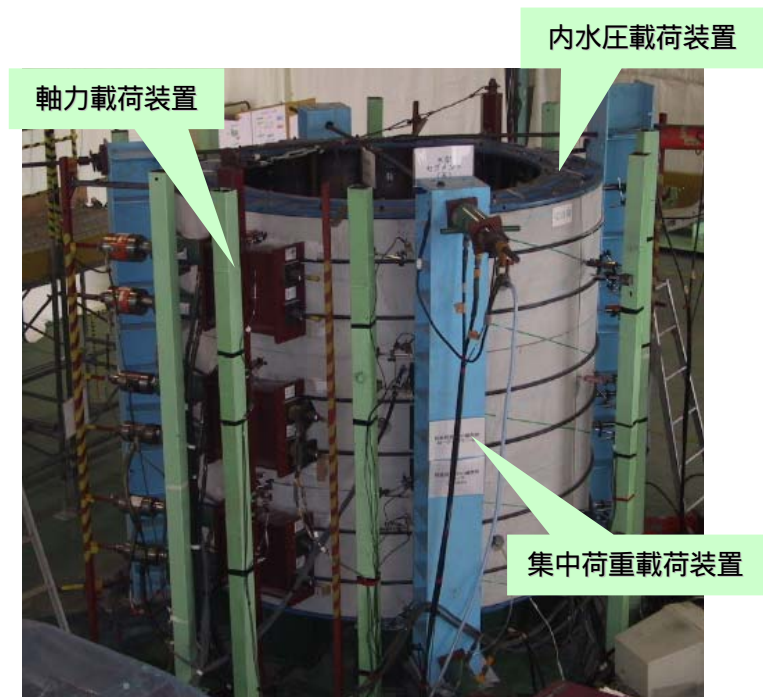


写真-6 载荷試験装置

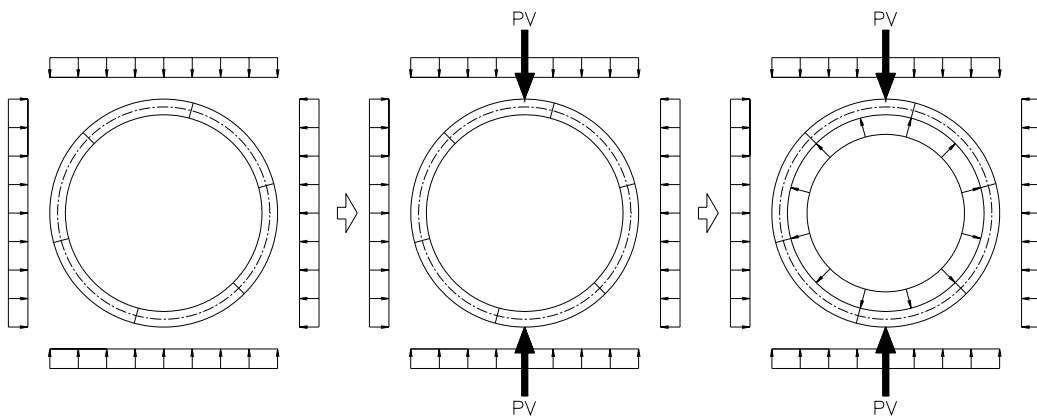
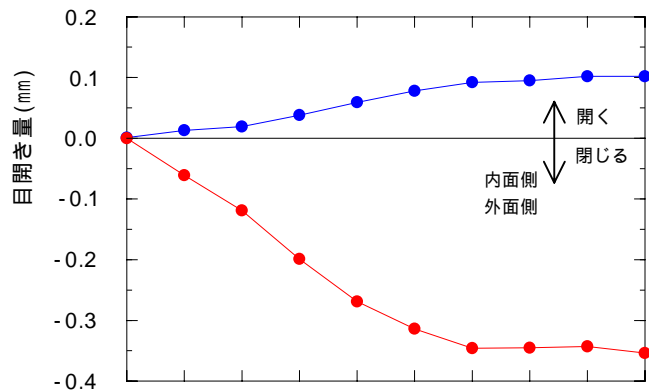


図-14 試験ケース

b) 目開き量および止水性能

「セグメントシール材による止水設計手引き(社)日本トンネル技術協会」によると、「中小口径のシールドトンネルにおいて、設定目開き量が特に与えられていない場合は、設定目開き量を2mmとして設計してもよい。」と記載されている。

また、「内水圧が作用するトンネル覆工構造設計の手引き」((財)先端建設技術センター)では、内水圧0.265MPaの実験例が紹介されている。過去の下水道シールドトンネルの事例においては、この内水圧は比較的高い値である。



軸力(kN)	0	120	270	270	270	270	270	270	270	
集中荷重(kN)	0	0	0	50	100	150	190	190	190	
内水圧(MPa)	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.2	0.3

図-15 荷重の種類と目開き量の関係

そこで本実験では、セグメントシール材の検討を行うにあたり、条件を設計水圧0.3MPa、目開き量3mmとして設計を行った。

集中荷重載荷点近傍での目開き量の計測結果を、セグメントリング内面側と外面側でそれぞれまとめ図-15に示す。

内面側の目開きは、主として曲げモーメントを负荷させるための集中荷重によるところが大きい。また、内水圧0.3MPaを负荷させた場合の目開き量は0.01mm以下となっており、プレストレスカ効果が認められる。

目開き量の最終値は0.1mm程度と非常に小さな値となり、目視による漏水も認められず十分な止水性を有していることが確認できた。

c) 荷重と変位の関係

鉛直方向の変位と水平方向の変位の関係を図-16に示す。

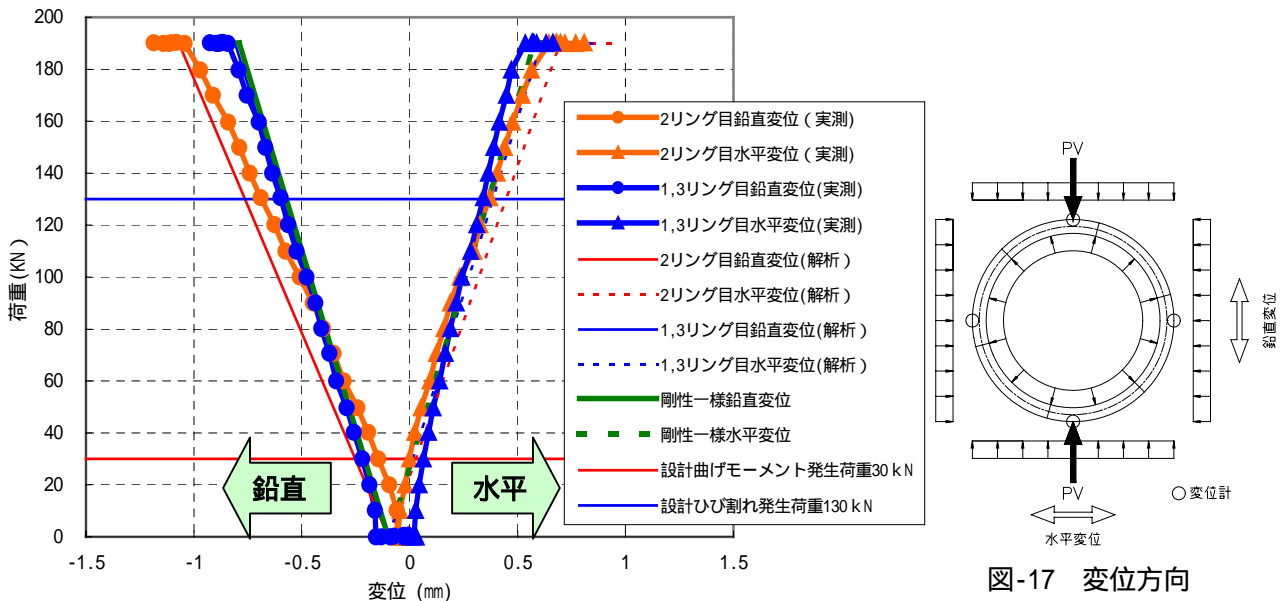


図-16 荷重と変位の関係

図-17 変位方向

載荷点直下の鉛直変位はリング内側に、載荷点から90°の水平変位はリング外側への変形が計測された。1, 3リング目(上下部リング)も変形していることより、リング継手間の応力の伝達も確認できた。

本試験中に得られたモーメント-回転角の関係(図-18)より算出した一次勾配の、回転ばね定数($k = 6500\text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$)と、せん断試験より得られた、せん断ばね定数

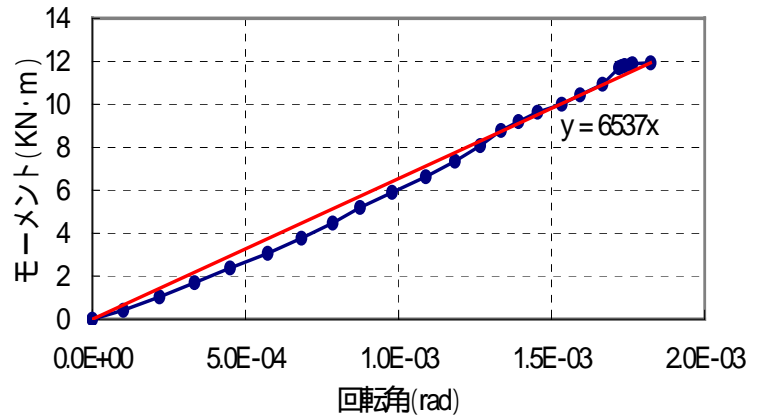


図-18 曲げモーメントと回転角の関係

($k_s = 162,500\text{kN}/\text{m}$)をセグメント継手・リング継手のそれぞれのばねとして評価した、はり-ばねモデルでの解析値、および、剛性一様モデルでの解析値との比較を行った。その結果、リングの変形の挙動は、剛性一様より若干変形が大きく、はり-ばねモデルより変形が小さく、解析値の中間的な結果を示し、PCNetセグメントはシールドセグメントとして成立し、設計条件で要求された性能を満足する構造であることが確認できた。

また、内水圧載荷前の外荷重としての土水圧による最大設計曲げモーメントに対し、載荷最大曲げモーメント $M = 37.90\text{kN}\cdot\text{m}$ (集中荷重換算 = 190kN)まで載荷したが、ひび割れ等の異常が見られず、荷重-変位の関係においても概ね直線性を示し、十分な耐荷力をもつことが確認された。

内水圧載荷中では鉛直変位は内側(-:マイナス)・水平変位は外側(+:プラス)方向に変形した。

内水圧作用時において、継手部の目開き量から算出される回転ばね定数は $6500\text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$ から $2500\text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$ に移行した。その結果、変形は鉛直荷重の影響を受け、鉛直荷重載荷時と同方向に増加した。以上により解析値との妥当性が確認できた。

d)まとめ

最終内水圧まで漏水はみられず、高い止水性を持つことが確認された。

内水圧試験の結果より、内水圧荷重に対してもはり-ばねモデルによる計算方法での解析は妥当であり、軸力および曲げモーメントを負荷させた状態で、内水圧を 0.3MPa まで載荷させたが、ひび割れ等の異常がみられず、高い耐荷性能を持つことが判明した。

謝辞

本試験は、PCNet研究会(幹事会社:(株)ピーエス三菱、石川島建材工業(株)、賛助会員:鈴木金属工業(株))で行いました。本試験の計画・実施は石井浩司主任研究員によるもので、その結果に緊張管理および若干の技術評価を加えたものです。

参考文献

- 1)トンネル標準示方書[シールド工法編]・同解説:土木学会
- 2)シールド工事用標準セグメント:日本下水道協会
- 3)トンネルライブラリー第6号セグメントの設計:土木学会
- 4)セグメントシールド材による止水設計手引き:(社)日本トンネル技術協会
- 5)内水圧が作用するトンネル覆工構造設計の手引き:(財)先端建設技術センター 編