

PCNetセグメント(プレストレスを導入したセグメント)の施工実績について

戸田哲哉¹・幸長茂雄²・工藤英樹³・植浦歎共⁴・中村修⁵

- ¹ 正会員 大成・戸田・井上特定建設工事共同企業体(〒555-0021 大阪市西淀川区歌島3丁目緑道公園内)
² 正会員 大成・戸田・井上特定建設工事共同企業体(〒555-0021 大阪市西淀川区歌島3丁目緑道公園内)
³ 正会員 大成・戸田・井上特定建設工事共同企業体(〒555-0021 大阪市西淀川区歌島3丁目緑道公園内)
⁴ 正会員 石川島建材工業株式会社 (〒541-0053 大阪市中央区本町4丁目2番地12号東芝大阪ビル内)
⁵ 正会員 株式会社ピーエス三菱 (〒104-8215 東京都中央区銀座7丁目16番地12号G-7ビル内)

PCNetセグメントは、内水圧が作用するトンネルに有利なPC(プレストレスコンクリート)製のセグメントとして開発したもので、RCセグメントに比べてセグメント内の鉄筋量が減るので、材料費を低減できる。また、PC緊張作業をシールドマシン内で行うため、組立完了と同時にプレストレス導入が完了し、PC鋼材の挿入と緊張は切羽側のセグメント側面で行うため、完全内面平滑なトンネルを構築することが可能となることを特徴としたセグメントである。今回は当工事において、外径4.35m×幅1.2m×厚さ0.3m×6分割のPCNetセグメント100リングの実証施工を行った。本報文では、実証施工前に実施した各種試験と、実証施工の状況および結果を報告する。

キーワード: シールドトンネル, セグメント, 内水圧, プレストレス, 緊張ジャッキ

1. 路線概要

大阪市都市環境局は、大阪市北部において新たな大下水道幹線やポンプ場の建設を内容とする抜本的な浸水対策事業を策定し、これに「淀の大放水路」の愛称をつけて事業を推進している。新高～御幣島幹線下水管渠築造工事(その9-3)は、「淀の大放水路」建設工事の一環で大野処理区内の新高～御幣島下水道幹線(全長4km)のうち西淀川区野里3丁目の発進立坑から淀川区三津屋中3丁目の到達人孔までの管渠延長2,126m、内径3.75mの管渠を施工するものである。なお、PCNetセグメントは、1,522リング目から1,621リングまでの100リングで施工した。通過部は、土被り11mでN値1～2程度の「非常に柔らかい粘性土」であり、平面線形は直線で中間には曲線半径1,000mの縦断勾配がある。

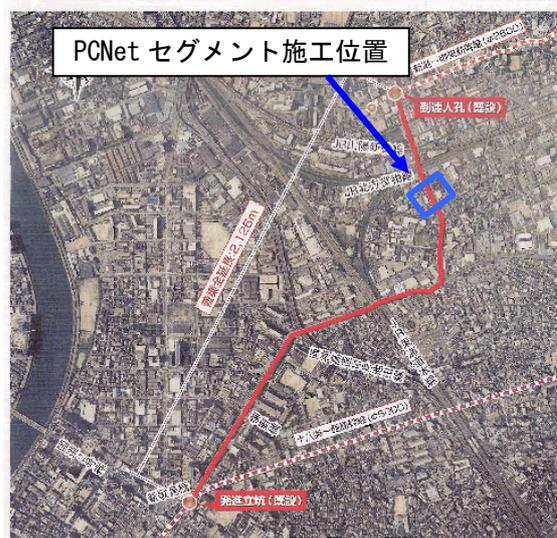


図-1 路線概要図

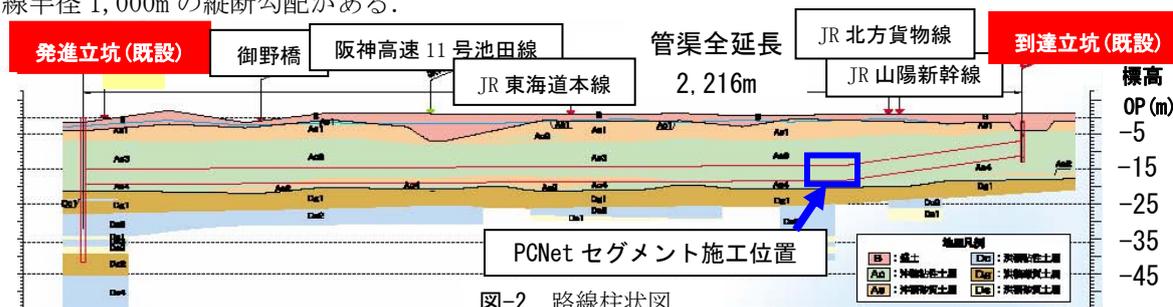


図-2 路線柱状図

2. PCNetセグメント

PCNetセグメントは、内水圧が作用するトンネルに有利なPC（プレストレストコンクリート）製のセグメントとして開発したもので、以下の特徴を有している。

(1) 構造上の特長

a) 継手部がトンネルの内面に露出しない。

セグメント本体および継手部には、リング継手面でプレストレスが導入されて定着される。そのため、トンネル内面に継手金物などが露出せず、トンネル内面は完全に平滑となり、内面仕上げを省略することができる。

b) セグメント本体の鉄筋量を低減することができる。

セグメントに発生する断面力に応じて、プレストレスが導入されるため、鉄筋量を低減することが可能となる。

(2) 耐久性および止水性について

a) ひび割れ発生を抑制でき、耐久性に優れている。

断面力に見合うプレストレス量（圧縮応力）を与えることで、ひび割れ発生を抑制でき、耐久性に優れている。このため、下水道のような腐蝕性環境下のトンネルにおいても、適切なかぶりを考慮しておけば二次覆工の省略が可能となる。

b) 止水性に優れ、内水圧を受ける構造物に最適である。

セグメント継手部・リング継手部にシーラ材を配置し、継手部の目開きを抑えることが止水対策の基本となるが、高い内水圧を受ける場合には、RCセグメントでは全断面が引張状態となり、貫通ひび割れが発生する。これに対しPCNetセグメントは、プレストレスを導入し予め圧縮力を導入することから、継手部の目開きを抑制できるだけでなく、貫通ひび割れの発生も抑止でき、止水性に優れた覆工体を構築できる。

(3) 施工性について

a) 鉄筋量が減少する。

PC鋼材が主構造となることから、使用鉄筋量が少なく済み、コンクリートの打設が容易となり、セグメント製造の効率化も図ることができる。

b) 組立ボルトが不要である。

配置したPC鋼材を組立時にも活用するので、リングを構成するための組立ボルト等は不要である。

c) トンネル円周方向と軸方向のプレストレスが同時に導入できる。

円周方向のPC鋼材と軸方向PC鋼材とを2回に分けて緊張する一般的なタイプと異なり、PC鋼材配置を「たすきがけ」にしたことから、緊張は1回ですみ、円周方向と軸方向のプレストレスの導入が同時にできる。プレストレスをセグメントの組立にも利用し、組立完了時にプレストレス導入完了となる。

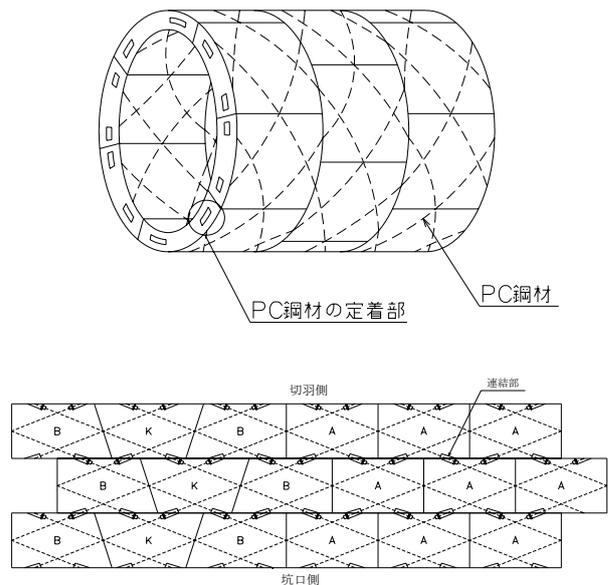


図-3 PCNetセグメント概要図

3. モデル供試体による確認

PCNetセグメントの開発にあたり、たすきがけに配置したPC鋼線によって導入されるプレストレスの効果を確認するため、セグメント単体曲げ試験・継手曲げ試験・リング載荷試験を行った。ここでは、継手曲げ試験とリング載荷試験について報告する。

(1) モデル実験の条件

供試体の構造は、比較的施工実績の多い深度を想定した設計条件とし、はりばねモデルを用いて発生断面力の算定、その断面力に対し決定した。

- ・土被り…… 30 m
- ・地下水頭…… 25 m
- ・内水圧…… 0.3 MPa
- ・セグメント…… 外径 2.55m×幅 0.75m
×厚さ 0.125m×6等分割

(2) 継手曲げ試験

内水圧試験に先立ち、セグメント継手の剛性(回転ばね定数)を要素試験により確認した。

a) 試験方法

試験方法としては、セグメント2ピースを地組みした後、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力を導入し、セグメント背面から曲げモーメントを作用させた。

導入するプレストレス力(P)は、設計上必要なプレストレス110kN、およびその1/2の55kNの2ケースとした。なお、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。



写真-1 継手曲げ試験状況

b) 試験結果

図-4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、プレストレスの大きさが鉛直変位に与える効果は大きく、110kNのプレストレスを導入した場合には剛性一様とした解析値に近い値を示した。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、プレストレスの効果により理論値より高い剛性が確認できた。また、載荷荷重と変形量の増加を傾きとして評価し、P=110kNの場合、第3勾配まで、P=55kNでは第2勾配まで載荷したが、除荷すると鉛直変位は0となり、プレストレスの効果による変形復元能力を有していることも確認できた。

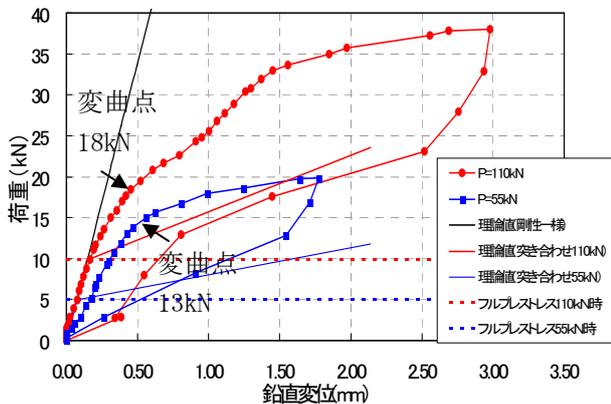


図-4 荷重-変位曲線 (継手曲げ試験)

次に、図-5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-1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。P=110kNの試験においては、 $k\theta_2$ が確認され、P=55kNにおいては、 $k\theta_2$ は確認できず、 $k\theta_1$ から $k\theta_3$ に移行した。 $k\theta_2$ はPCの緊張力の強弱によって現れたと考えられる。

また、M22を用いた金具継手の場合の鋼板式短ボルトと比較して、回転ばね定数が大きく剛性の高い結果を得た。

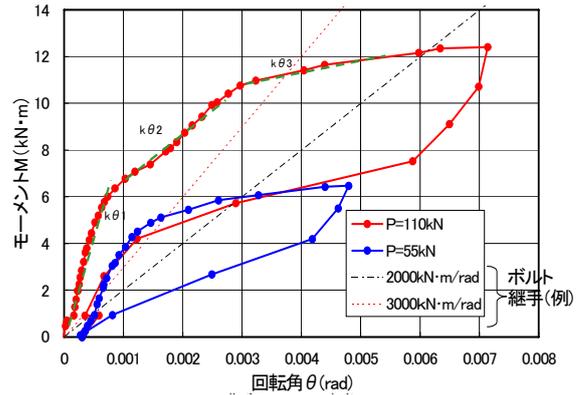


図-5 曲げモーメントと回転角の関係

表-1 回転ばね定数(継手曲げ試験)

プレストレス P (kN)	回転ばね定数(kN・m/rad)		
	$k\theta_1$	$k\theta_2$	$k\theta_3$
110	9240	(2270)	520
55	5670	—	360

(3) リング載荷試験¹⁾

a) 試験方法

リング載荷試験は、設計手法の妥当性、構造特性および止水性能を確認するために実施した。

内水圧載荷試験は図-6に示すように、外径2.55m×幅0.75m×厚さ0.175m×6等分割のセグメントリングを3段組立てて行った。

載荷方法は、組立てたセグメントリングの外周に1リングあたり2本のアンボンドPC鋼より線(1S17.8)を緊張することにより外荷重として軸力を導入した。また、外荷重としての曲げモーメントは、PC鋼棒を用いて集中荷重(Pv)を第2リングのみに載荷した。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、PCNetセグメントとスチールセグメントの空間に水を充填・加圧することにより3リングすべてに水圧を作用させた。また、試験ケースは図-7に示すように軸力を載荷後、曲げを集中荷重として載荷し、その後内水圧を0.3Mpaまで載荷させた。

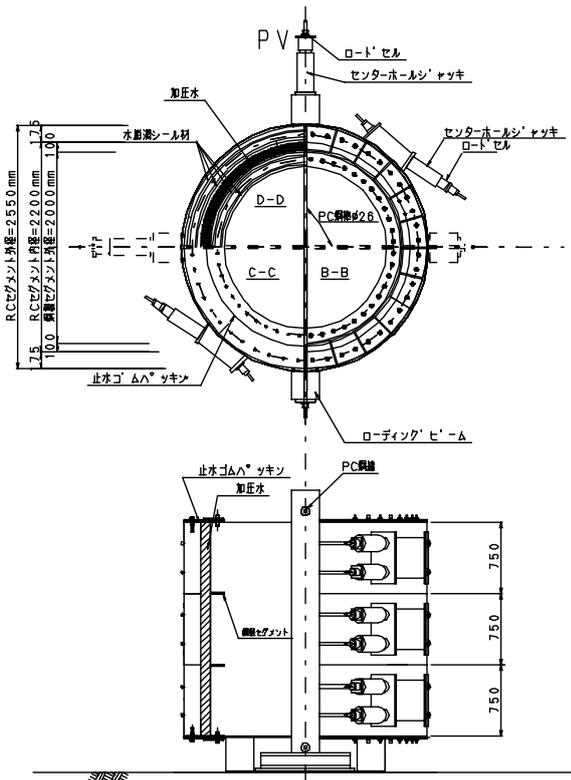


図-6 リング載荷試験状況

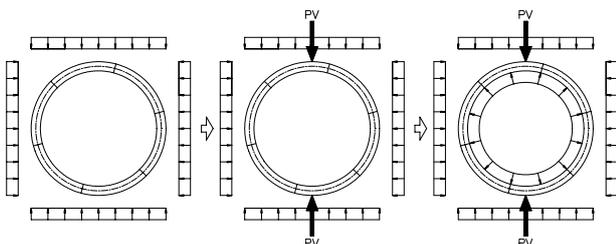


図-7 リング載荷試験載荷方法

b) 試験結果

軸力および曲げモーメント荷重は、コンクリートの引張ひずみが計算上のひびわれ発生値である 84μ となるまで集中荷重 (190kN) を載荷させた後で、内水圧荷重を作用させた。荷重と変位の関係を図-8 に示す。

・ 曲げモーメント載荷過程

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、1・3 リング目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。また、ここでは載荷試験で得られた実測値と、剛性一様モデルでの解析値、およびはりばねモデルでの解析値のふたつの解析値と比較し評価した。

その結果、リングの変形の挙動は、剛性一様モデルより若干大きく、はりばねモデルより小さい結果となった。また、実測のコンクリートひずみを用いて断面力の比較 (図-9) をした結果においても、はりばねモデルでの解析値と近似した値であった。

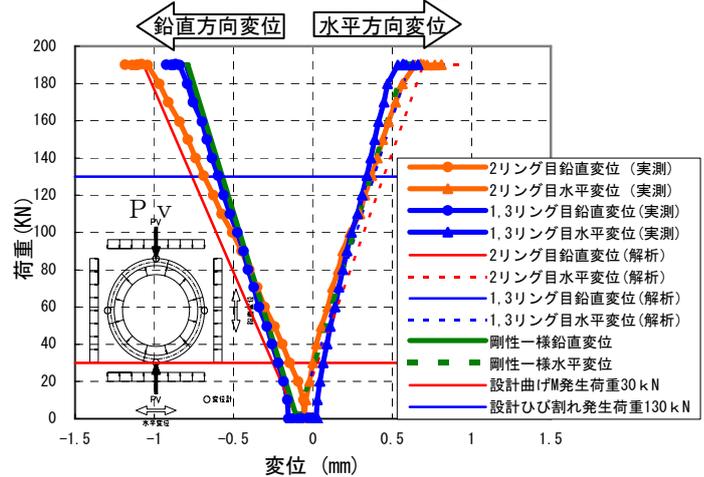
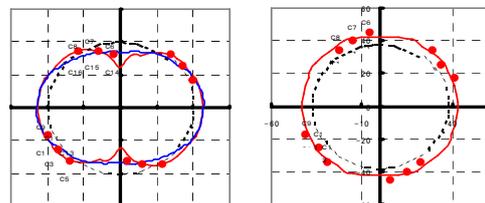
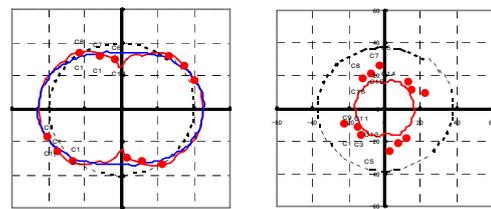


図-8 荷重-変位曲線 (リング載荷試験)



190kN モーメント載荷時

190kN 軸力載荷時



190kN+0.3Mpa モーメント

190kN+0.3Mpa 軸力

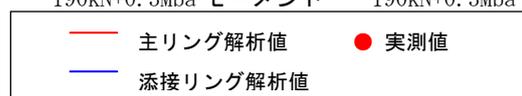


図-9 断面力の比較 (リング載荷試験)

・ 内水圧載荷過程

図-8 に示すように、内水圧載荷中、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 6500kN・m/rad から 2500kN・m/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。また、断面力の比較においても、はり-ばねモデルでの解析値と近似した値で、曲げモーメント載荷過程と同様の傾向であった。内水圧作用時の軸力の減少は解析値より小さく、引張力の作用が小さい結果となった。また、載荷試験後の有効プレストレスの低下率は計算上 4.3%に対して 4.4%とほぼ一致する結果を得た。

c) リング載荷試験のまとめ

0.3MPa の内水圧において漏水は無く、高い止水性を持つことが確認された。また、目開き量も、実測値は 0.1mm 程度と極めて小さかった。

軸力および曲げモーメントを作用させた状態で、内水圧を 0.3MPa まで加圧させたが、ひび割れ等の異状は無く、高い耐荷性能を持つことが確認できた。

また、土水圧・内水圧荷重に対して、はり-ばねモデルによる解析値と近似していたことから、解析の妥当性が確認できた。

4. 実証施工

各種セグメントの性能試験により、セグメントに要求される剛性、止水性を満足することを確認し、さらに今回採用した構造で、継手曲げ試験・組立試験を実施し工事の施工に臨んだ。

以下の(1)～(3)に、本工事の特記仕様を示す。

(1) セグメント形状

- ・セグメント種別・・・二次覆工省略型鉄筋コンクリート製（内面平滑型）
- ・セメントの種類・・・高炉B種（JIS R 5211）
- ・セグメント内径・・・3.75 m
- ・セグメント外径・・・4.35 m
- ・セグメント厚・・・0.3 m
- ・セグメント幅・・・1.2 m

コンクリートは、過度な振動を与えず、シース管の配置を乱さず確実にを行うために、土木学会『高流動コンクリート施工指針』ランク I に準拠した高流動コンクリートを使用した。

(2) セグメントの設計条件

- ・土圧算定方法・・・全土被り荷重
- ・土水圧の考え方・・・土水一体
- ・断面力算定手法・・・修正慣用計算法

曲げ剛性の有効率(η)と曲げモーメントの割増し率(ζ)は、 $\eta=0.8 \cdot \zeta=0.2$

- ・内水圧・・・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による。
- ・耐震設計・・・耐震設計は、「大阪市における管路施設の耐震設計マニュアル（案）」による。

(3) セグメントの構造細目

二次覆工省略型RCセグメントの構造細目は表-2の通りである。それに対し、今回PCNetセグメントは、主鉄筋・配力鉄筋はともにD10を用い、純かぶりは外面側は30mm内面側は40mmを確保し、引張鉄筋比は、D10を10本配置し0.25%とした。また、ひび割れ幅は、外面側0.16mm(C=40)に対し0.058mm、内面側0.20mm(C=50)に対し0.113mmである。

表-2 セグメント構造の条件

項目	単位	数値
最小かぶり	内面側(mm)	35
	外面側(mm)	20
引張鉄筋比	上限(%)	1.2
許容ひび割れ幅	Wa	0.004C

C: 主鉄筋純かぶり

(4) 施工方法について

PCNetセグメントは施工に際し、短ボルト式継手のボルト締結に代わり、PC鋼線の挿入および緊張が作業手順として必要となる。



写真-2 PC鋼線の挿入と緊張作業

a) セグメントの位置決め

本工事では、PCNetセグメントがPC鋼線を2本同時に緊張することを基本としているが、緊張の不均在が生じてリング継手面に大きな周方向のずれが発生しないように、リング継手面に鋼製のピンを設け、さらに位置決めを容易にするために、樹脂製の調芯ピンを設けた。（写真-3）

b) PC緊張装置（ジャッキ）

本工事での施工にあたり、切羽面へ緊張ジャッキを持ち運び、セットするために、開発試験当初7kgあったものを3kgまで軽量化し施工性の向上を図つ

た。また、緊張した PC 鋼線を固定するボルトを締め込むために、エアラチェットを用い軽作業化を図った。(写真-4)

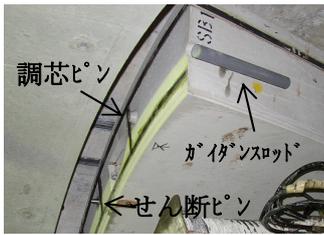


写真-3 位置決めガイド



写真-4 緊張装置

c) 組立時間

施工時間は、PC 鋼線の挿入・緊張作業を切羽面で行うため、一般部が約 40 分かかるのに対し、1 時間程度要した。

d) 緊張力管理

緊張力は、毎 PC 鋼線緊張時にアナログゲージで確認した。さらに管理記録として、油圧変換器を介してデータロガーに取り込み、印字することとした。

e) ひずみ計測結果

前述の緊張管理の他に、緊張後の PC 鋼線の緊張力の変化を確認するために、PC 鋼線のひずみ変化を計測した。図-10 に 1595 リング目における PC 鋼材引張ひずみの計測結果の一部を示す。計測にあたっては、PC 鋼より線の素線に箔歪ゲージを貼付し計測した。

PC 鋼材は A1-A2 セグメント間に配置したものであり、5 および 6 リング先を組立時および掘進時の変化である。既設 PC 鋼材の引張ひずみは、新たなセグメント組立て作業時にシールドジャッキを一旦解放する影響により減少し、掘進作業時にはシールドジャッキ反力が増大する影響を受けて増加していることがわかる。この場合には変動率は 3%程度であり、施工時のみの現象であることから、構造の安全性には影響を与えないものと考えられる。

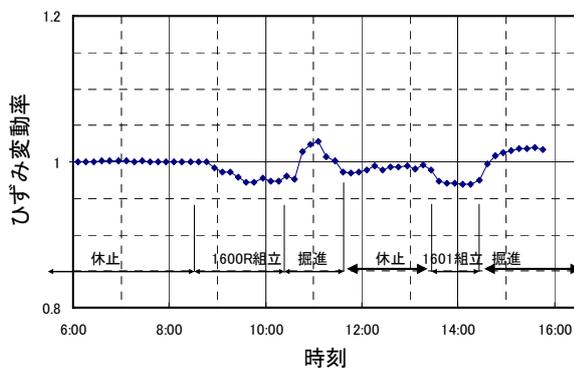


図-10 緊張後の緊張力(ひずみの変動率)の変化

e) 出来形(真円度)

図-11 に、セグメントがマシンのテールを抜けて約 30 リング程度施工した以降に計測した真円度の計測結果を示す。真円度は縦断勾配部で 20mm という値を計測したが、おおむね鉛直方向は 15mm・水平方向は 10mm 以下であり、出来形管理基準である 30mm を満足した。

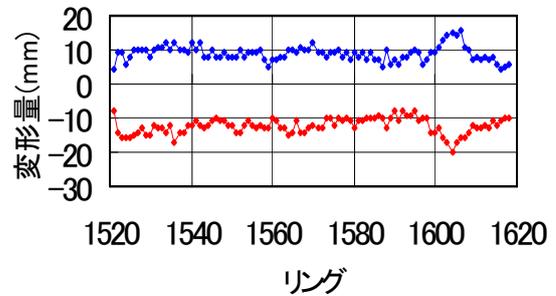


図-11 真円度計測結果

表-3 に実測値と解析値との比較を示す。剛性一様モデルでの解析値よりは大きな値となったが、はり-ばねモデルの解析値とおおむね近似した値となった。また、施工時のジャッキ推力・裏込め注入の不均一等に加え、土水圧の作用で発生する曲げひび割れ、および継手面の目開きによる漏水は確認されなかった。

表-3 実測値と解析値との比較

	実測値	解析値	
		剛性一様	はり-ばね
水平方向(mm)	10mm 以下	2.5	14.2
鉛直方向(mm)	15mm 以下	5.2	16.3

5. まとめ

PCNet セグメントは、出来形・止水性ともに実用上十分な性能を有していることが確認できた。今後、本工事で得られた知見をもとに施工上の問題点である、緊張作業の更なる簡素化・高速化を図り、施工性・覆工品質のさらなる向上を進めていく予定である。

最後に、適応現場を提供いただいた大阪市都市環境局殿に謝辞を表します。

参考文献

- 1) (財)先端建設技術センター編:内水圧が作用するトンネル覆工構造設計の手引き, pp. 242~261, 1999. 3
- 2) (財)先端建設技術センター:先端建設技術・技術審査証明報告書 PCNet セグメント, pp. 31~37, 2003. 7