

PCNetセグメントの技術概要

株式会社 ピーエス三菱 正会員 ○別所 辰保
株式会社 ピーエス三菱 加藤 竜一
石川島建材工業株式会社 若林 正憲

1. 概要

従来のシールドトンネルの一次覆工には、鉄筋コンクリート製セグメント（以下RCセグメントと呼ぶ）、鋼製セグメントが一般的に用いられ、これらがセグメント継手やリング継手により結合されて一次覆工が構築される。継手ボックス部分は、トンネル内面でその穴埋め処理を行うことが多く、継手の数が多いことから施工効率はあまりよくない。また、RCセグメントを用いたシールドトンネルに高い内水圧が作用する場合には、ひび割れが発生し、止水性の低下などの問題が生じる。

これらの問題を解決する方法として、PCNetセグメントを開発した。

PCNetセグメントは、プレストレストコンクリート構造（以下PC構造と呼ぶ）のセグメントであり、たすきがけ状に配置したPC鋼材の緊張端をセグメントリング継手面に設けることに特徴がある。

セグメントをPC構造とすることでボルトなどによる継手をなくすことができ、高い内水圧に対してもひび割れを抑制し止水性を高めることができる。

また、PC鋼材の緊張端をリング継手面に配置することにより、トンネル内面における穴埋め処理をなくすことが可能である。

そのため、幅広いトンネルの用途に対して、二次覆工の省略が可能となる。

PCNetセグメントは、たすきがけ状に配置されたPC鋼材を緊張するので、トンネル軸方向、円周方向に同時にプレストレスが導入される。また、エレクターにてセグメントを把持した状態でプレストレスを導入するので、セグメント1ピースごとの仮止めが必要ない。

2. 開発の趣旨と開発目標

開発の趣旨は、次のとおりである。

- ・ トンネル内面における継手ボックス部の穴埋めが不要で、平滑な内面を施工できる。
- ・ セグメント本体部や継手部にプレストレスが導入されることにより、断面力によるひび割れを抑制し、セグメント本体部の水密性や継手部の止水性が保持できる。

以上のことにより、幅広いシールドトンネルの用途に対して、二次覆工の省略が可能である。

開発目標は、次の3点である。

- ・ トンネルの横断方向および縦断方向に所定のプレストレス量を確実に導入でき、セグメント本体部、継手部およびセグメントリングは、プレストレス量に見合った所要の剛性と強度とを確保できる。
- ・ トンネル内面においてPC鋼材の定着を必要としないため、内面の平滑性が確保できる。
- ・ トンネル円周方向と軸方向にプレストレス力が導入されるので、高い内水圧が作用するトンネルの場合においても、止水性の高い構造物を構築できる。

上記の開発目標を掲げ、財団法人先端建設技術センターに建設技術審査を依頼し、審査証明書を頂いた。本稿では、種々の試験のうち、継手曲げ試験、内水圧試験について報告する。

3. 構造の概要

一般に円形構造におけるPC鋼材の配置は、円周方向、軸方向に分けて、各々配置される。この場合の円周方向のPC鋼材は、内外面のいずれかに定着部を設ける必要がある。円形構造であるPCタンクの場合は、外面側にフランジを設けて定着を行うことが多い。

PCNetセグメントでは、図-1および図-2に示すようにたすきがけ状に配置したPC鋼材を切羽側のリング継手面で定着し、内面側における定着部(箱抜き部)を無くしている。また、PC鋼材の接続も同様にリング継手面で行う。

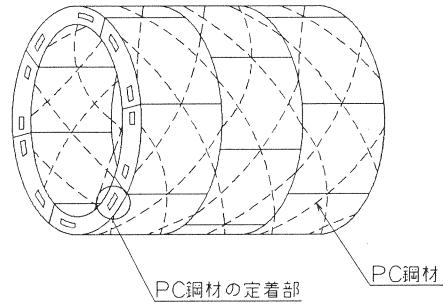


図-1 PCNetセグメントの概略図

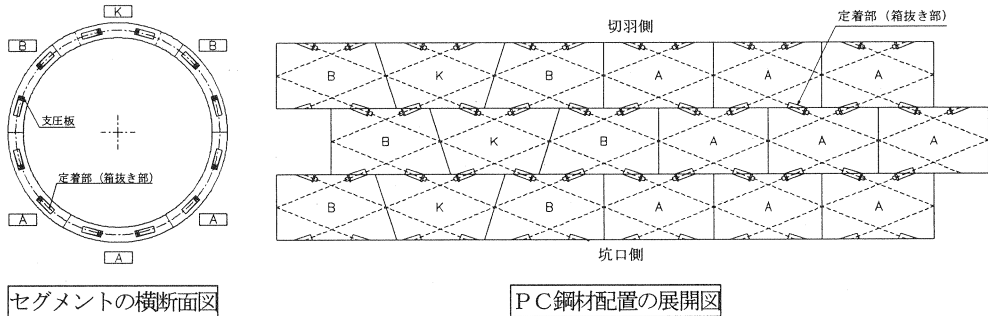


図-2 PCNetセグメント (2セグメントクロス) におけるPC鋼材配置の概要図

PC鋼材の配置には図-2に示したものの他に、図-3に示すようなセグメントピース単体内で交差配置する方法もある。図-2に示すものをPC鋼材が2セグメントにわたって、たすきがけ状に交差していることから、このPC鋼材の配置を「2セグメントクロス」と呼ぶことにし、一方、図-3に示すPC鋼材配置を「1セグメントクロス」と呼ぶこととする。

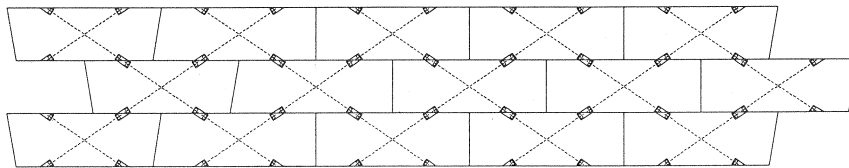


図-3 PCNet (1セグメントクロス) におけるPC鋼材配置の概要図

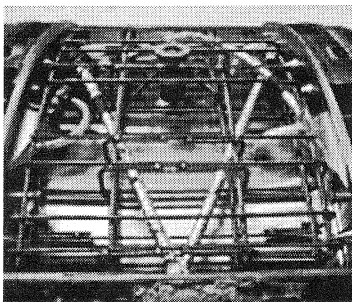


写真-1 配筋状況

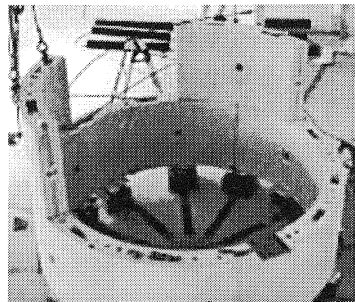


写真-2 縦組み状況

4. 継手曲げ試験

試験の目的は、セグメント継手の基本特性である回転ばね定数を求めることである。継手曲げ試験は、外径2.55m、厚さ17.5cm、幅0.75m、6等分割のセグメント ($\sigma_{ck}=42\text{N/mm}^2$) を2ピース用い、図-4に示すように2点载荷で行った。なお本実験で得られた回転ばね定数は、リング载荷試験での設計計算に用いている。

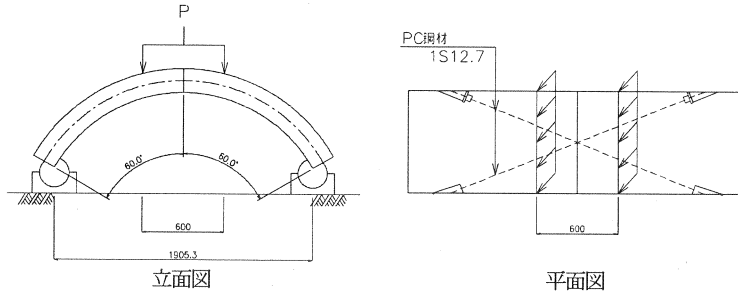


図-4 継手曲げ試験の概要図

試験の結果を下記に示す。

図-5は荷重と継手部の鉛直変位との関係を示したものである。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のプレストレス力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、目開きの発生荷重(変曲点)は、解析上の値より高い値を示した。目開きの発生以降も、プレストレスの大きさが影響を与え、レオンハルトらによる「Betongelenke」の理論値と比較して剛性が高いことが確認された。

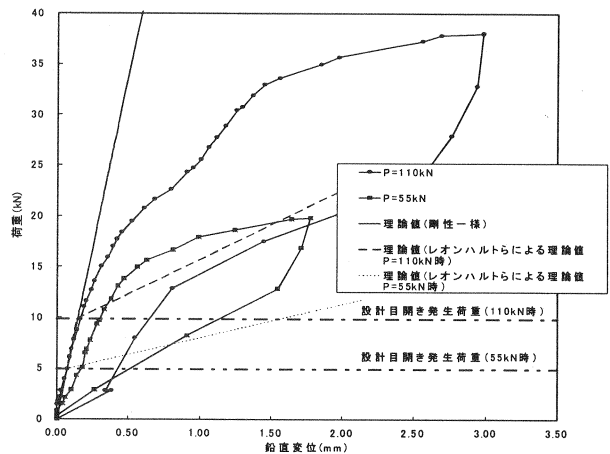


図-5 荷重と変位の関係

また、導入プレストレス力が $P=110\text{kN}$ の場合には、第3勾配まで、 $P=55\text{kN}$ の場合には第2勾配まで载荷を行ったが、除荷すると鉛直変位は0となり、PCNetセグメントは変形の復元性の面で優れていることが確認できた。

表-1 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)		
	kθ1	kθ2	kθ3
110	9240	(2270)	520
55	5670	-	360

また、目開き量から算出した回転角と曲げモーメント関係から回転ばね定数を算出した結果を表-1に示す。導入プレストレス力が110kNの場合には第2勾配(kθ2)が確認されたが、導入プレストレス力が55kNの場合にはこれが確認できず、kθ1からkθ3に移行した。これは導入プレストレス力の大小によるものと考えられ、本セグメントの特徴の一つと考えられる。

5. 内水圧試験

本試験は、PCNetセグメントの止水性の確認を行うとともに、リング構造としての耐荷性能と変形性能とを確認することを目的とする。

3リングにて組立てた供試体(継手曲げ試験と同形状のセグメント)で、土被り30mを想定した試設計から得られたセグメントリングに発生する断面力(軸力、曲げモーメント)をPC鋼材を用いて作用させ、さらに内水圧を負荷させる試験である。試験の手順および試験装置の写真を図-6、写真-3に示す。

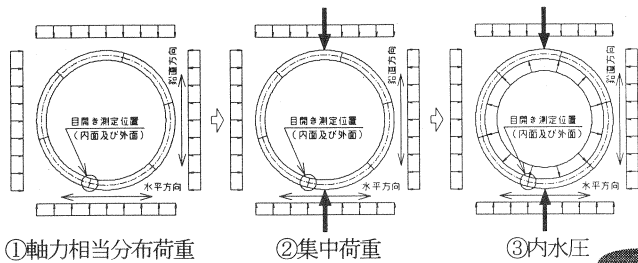


図-6 試験の手順

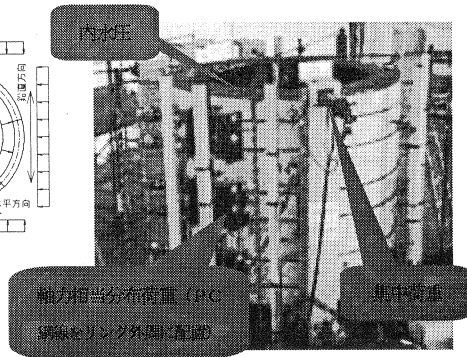


写真-3 試験状況

試験の結果を下記に示す。

本セグメントを用い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た試験の結果、作用させた内水圧 0.3MPa までには漏水がみられず、高い止水性を保持していることが確認された。また、集中荷重近傍の目開き量を測定した結果を図-7に示す。目開き量は 0.1mm 程度と極めて小さい結果が得られた。

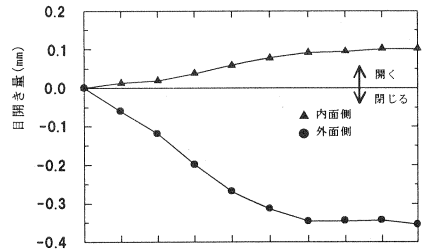
次に荷重と変位に着目する。集中荷重は 2リング目 (中央リング) のみに載荷した。集中荷重と、2リング目および 1, 3リング目 (上下リング) の鉛直方向の変位と水平方向の変位との関係を図-8に示す。

鉛直変位はリング内側に、水平変位はリング外側に、それぞれ発生した。また、1, 3リング目も変形していることから、リング継手間の応力の伝達を確認できた。

リング載荷試験から得られた回転ばね定数と、せん断試験から得られたせん断ばね定数とを用いたはり-ばねモデルでの解析結果、および、剛性-様モデルによる解析結果と試験値とを比較した結果、PCNetセグメントを組立てたリングの変形は、はり-ばねモデルと剛性-様モデルの中間に位置し、リングとして十分な剛性を有していることが確認できた。

6. まとめ

- ・継手曲げ試験から、荷重と変位との関係は、継手面の目開きが発生するまでは剛性-様モデルを用いた解析結果に近く、目開きが発生した以降はレオンハルトらによる「Betongelenke」の理論による結果よりも高いことが確認された。
- ・PCNetセグメントを用い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た試験の結果、組立てられたリングは、十分な剛性と耐力とを有しており、設計上必要となる剛性および耐力は、はり-ばねモデルを用いて設計を行えば十分に確保できることが確認された。また、作用させた内水圧 0.3MPa までには漏水がみられず、高い止水性を保持していることが確認された。



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	0.1	0.2	0.3

図-7 荷重の種類と目開き量の関係

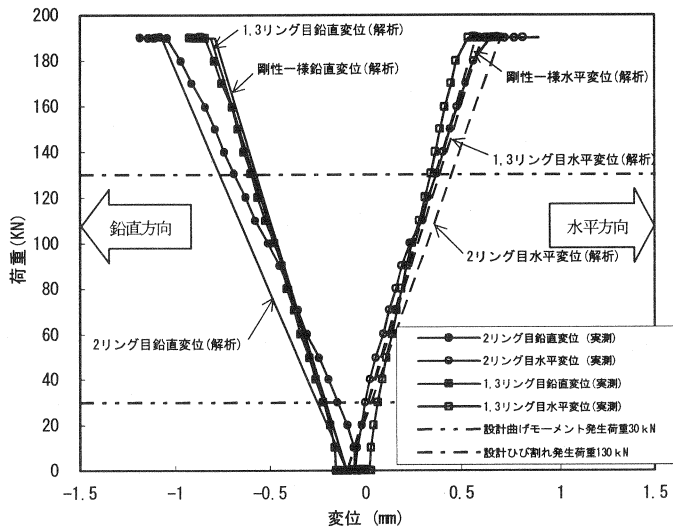


図-8 荷重と変位との関係