

PCNet セグメント施工性能実証試験

にいたか みてしま —新高～御幣島幹線下水管渠築造工事(その9)—

技術本部	技術推進部	中村修
土木本部	土木部	高橋弘樹
大阪支店	土木工事部	山本龍男

概要：PCNet セグメント工法は、シールドセグメントにらせん状に PC 鋼材を配置し、円周方向と軸方向同時にプレストレスを導入しながら組み立ててトンネル覆工を構築する工法である。RC 構造で計画されていた内水圧を受ける下水管渠の一部を、本工法に置換えて施工性能実証試験を行うことができたのでその結果を報告する。

Key Words：PCNet セグメント、シールド工法、プレキャスト、セグメント

1. はじめに

平成 10 年より開発を続けてきた PCNet セグメント工法は、平成 15 年に先端建設技術センターの技術審査証明を取得し、平成 17 年度に大阪市都市環境局の淀川北部 3 区における「淀の大放水路」の一部において施工性能実証試験を行った。これは本工法の初の実施工となるため、施工前に実際に使用される部材を用いて組立試験を行い、最終的な施工性能の確認を行った。また、PC グラウトの注入方法についても試験を行い最適な注入方法について検討を行った。それらの結果を基に平成 17 年 11 月～平成 18 年 3 月にかけてセグメント組立、グラウト注入を行い写真-1 に示すように完了した。

本稿ではこれらの事前の試験および実証試験について報告する。



写真-1 施工完了状況

2. PCNet セグメント工法概要

2.1 構造の特徴

PCNet セグメント工法とは、セグメントを組立てながら PC 鋼材を緊張・定着することにより、円形・矩形等の断面形状を有する管構造を構築するポストテンション方式のコンクリート製セグメント工法である。

従来の RC セグメント工法はボルト締結による組立が主流であり、ボルト設置の箱抜き跡埋めが必要であったが、PCNet セグメント工法では緊張端をセグメントリング継手面に設けることにより、内面に露出する



中村修



高橋弘樹



山本龍男

金物が無く跡埋め処理が不要となり内面の平滑性が確保できる。また、PC鋼材をたすきがけ状に配置することで、縦・横断方向にプレストレスを確実に導入することができ、施工時の安全性も高く組立精度も良好である。さらに、PC構造であるため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、部材厚や鉄筋量の低減が可能で耐震性にも優れた構造である。部材厚の低減は掘削土量の低減にも効果が期待でき、環境負荷が少ない工法であるとも言える。

2.2 PC鋼材配置

PCNet セグメント工法におけるPC鋼材配置イメージを図-1に示す。図のようにPC鋼材はたすきがけ状に配置され、リング毎に接続されるためらせん状に連続する。これを平面的に展開したものを図-2に示す。PC鋼材の配置は、既設のPC鋼材緊張定着端にカップラーを取り付け、セグメント組立時に切羽側からPC鋼材を挿入して接続することによって行う。

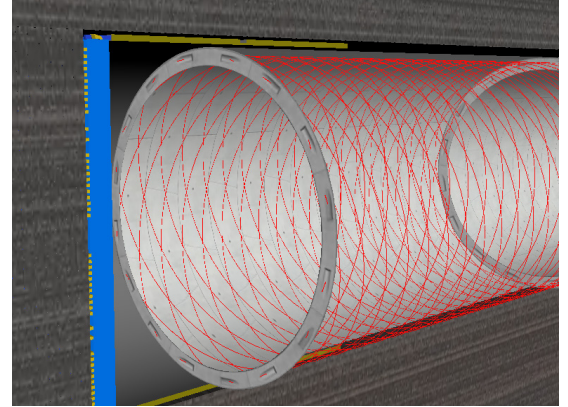


図-1 PC鋼材の配置例

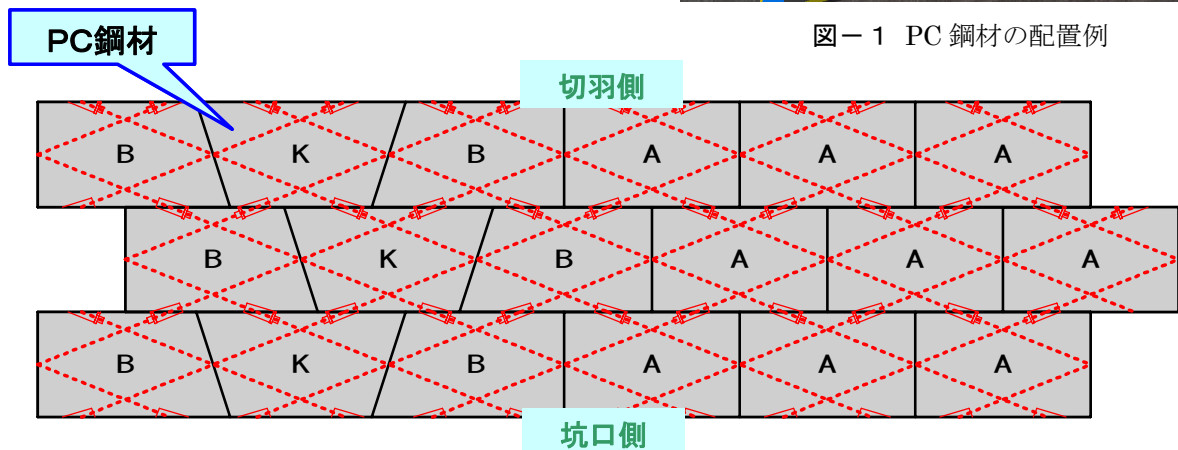


図-2 PC鋼材配置展開図

プレストレスの導入は図-3に示すように切羽端面のPC鋼材緊張端にジャッキを取り付け、2本を同時に片引きにて行う。これによりピース間継手とリング間継手両者に同時にプレストレスが導入される。プレストレスの導入イメージを図-4に示す。

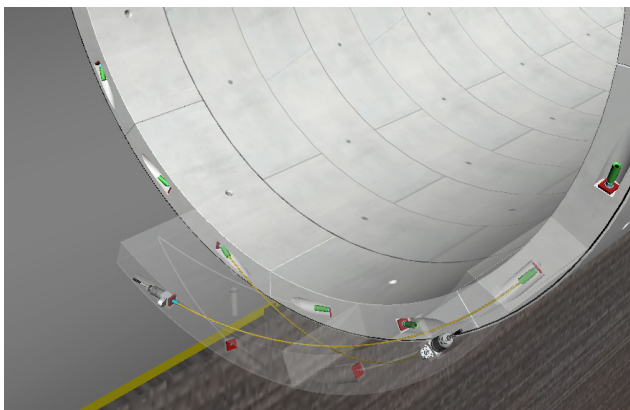


図-3 PC鋼材の緊張

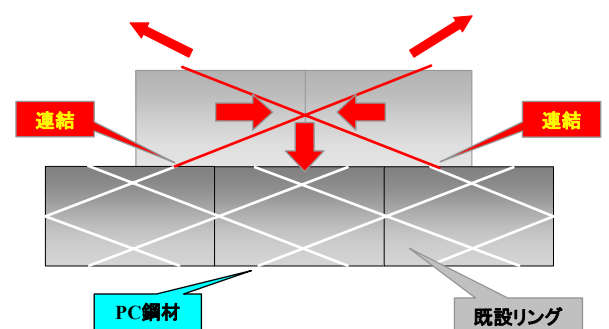


図-4 プレストレスの導入状況

2.3 PC 鋼材接続具

PC 鋼材の接続は PCNet セグメント工法用に開発したネットカップラーを用いて行う。ネットカップラーは PC 鋼材の緊張・固定端の余長部分にねじ込み接続し、新たな PC 鋼材をくさびで接続するものである。ネットカップラーのイメージ図を図-5 に、取り付け状況を写真-2 に示す。

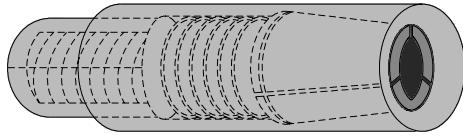


図-5 NET カップラー



写真-2 NET カップラー

3. 工事概要

本工事では、「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3丁目の到達人孔までの管渠延長2,126m、内径 3,750mm の管渠を施工した。このうち PCNet セグメントは、1,521 リング目から1,622 リングまでの102 リングを RC セグメントの置換えとして施工した。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、中間には曲線半径 1,000m の縦断勾配変化があった。施工は大成・戸田・井上特定建設工事共同企業体が行い、当社は石川島建材工業(株)と共同してセグメントの製作、組立作業およびグラウト作業の技術指導を行った。

シールド機は RC 区間と同一の泥土圧シールド機をそのまま用い、外形 $\phi 4,490 \times$ 機長 6,685 の防爆仕様であった。セグメントの形状は図-5 に示すように外形 4,350mm、部材厚 $t=300$ mm、幅(トンネル延長方向)は 1,200mm で断面を 6 等分割とした。

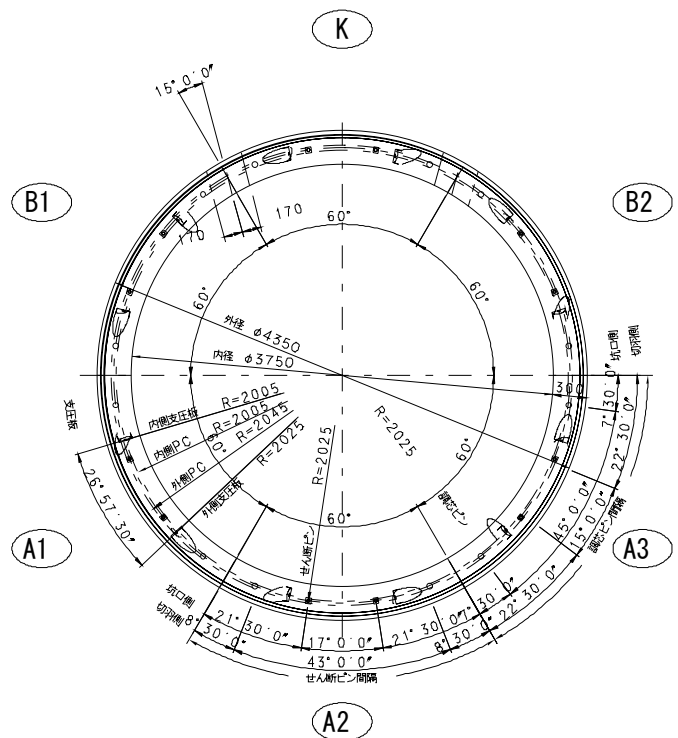


図-5 断面形状寸法

4. 事前試験

4.1 概要

実証試験を行う前に、特にプレストレス導入作業時に留意すべき点を抽出し、効率的に現場における組立作業が行えるような対策を検討するために、実際のセグメントを用いて組立試験を行った。また、PCNet セグメントのグラウト注入作業は、円周状に注入することが一般の橋梁上部工とは全く異なる条件であるため、PCNet セグメント工法の PC グラウトとして最適な材料、注入方法、排気孔の位置を検討するための試験を行った。

4.2 仮組試験

4.2.1 試験の目的と内容

一般的なシールドセグメント製品の組立試験は、地上に 2 リングを水平に組み上げる(リングを寝かせて上方へ積み上げる。以降「水平仮組」とする：写真-3)ことによって行うが、これには自重による変形の

影響が無く、実際の施工の状況とは異なった組立方法であると考えられる。

そのため、本試験においては一般的な上記の水平仮組試験を行った後、地上に2リングを横方向に組み立て（リングを起こして前方へ組み立てる。以降「鉛直仮組」とする：写真-4）、実際の施工に近い状態での組立て施工性、組上がり状況の確認を行った。

水平仮組試験内容は以下の通りである。

- 1)セグメントの組立および緊張作業手順の確認
- 2)PC 鋼線の接続の確認
- 3)導入プレストレス力の確認
- 4)PCNet セグメントの組上がり精度の確認



写真-3 水平仮組試験



写真-4 鉛直仮組試験

4.2.2 試験結果と考察

1)セグメントの組立および緊張作業手順の確認

セグメントの組立と緊張作業手順における検討事項は、1リングの最終ピースであるKセグメント組立時のPC鋼材緊張順序であった。図-6に示すように緊張順序はA、Bの2通りが考えられたが、緊張順序Aの場合には⑩⑪を緊張した際に発生したKセグメントとB1、B2セグメント間に発生した4mmの目違いが②⑨を緊張しても残留したことから、緊張順序Bの場合には目違いは1mm以下であったことから、出来形に着目すると緊張順序Bが有利であると考えられた。ただし、シールドマシン内での作業性および安全性に不明な点が残るため、最終的な緊張順序の決定は現地にて実際の組立作業試行後に行った。

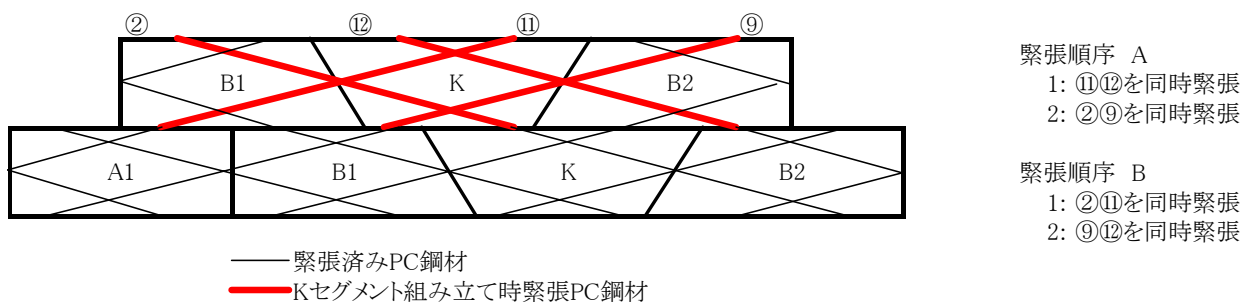


図-6 Kセグメントの緊張順序展開図

2)PC 鋼線の接続の確認

PC鋼材の挿入は容易であったが、カップラーへの接続にはグリップ頭部を軽打して接続が可能となる状況であった。この原因は、PC鋼材が切羽端面より挿入されてカップラーに到達する際に、PC鋼材の軸芯とカップラーの軸芯が一致しないため、また、両者に折れ角が発生しているためであった。

この状況への対策として、カップラーの角度をPC鋼材軸線と一致させるため、テーパプレートを支圧板とワッシャーの間に追加使用した。その結果、再度の試験時には容易に接続可能であった。

3)導入プレストレスの確認

導入プレストレス力は、1リングあたり12本のPC鋼材について緊張端と固定端の導入時の緊張力を、ロードセルを用いて計測し確認した。その結果、固定端緊張力の計算値との差異は約3%であり、十分な精度でプレストレスが導入可能であることを確認した。

4)PCNet セグメントの組上がり精度の確認

水平仮組試験の場合セグメント組上がり精度の確認は、内径寸法、トンネル延長方向・円周方向の目違いを計測して行った。このときの内径寸法は最大3mm、目違いについては最大1mmの誤差であり、問題のない精度で組み立てられることを確認した。鉛直仮組試験の場合には、第1リング鉛直仮組完了から第2リング鉛直仮組完了時の形状変化は1~2mmとわずかであった。また、第1リングの変形量が縦-4mm、横+6mmとやや扁平であったが組立てには問題がなかったことを確認した。

4.3 PC グラウト試験

4.3.1 試験の目的

一般的なPCグラウトの注入は、空隙が残留しないよう下方より上方へ向かって行い、必要に応じて排気孔を設けることが基本である。PCNetセグメント工法ではPC鋼材配置形状がらせん状であるため、下方より注入しても頂部を超えると下方へ向かって落ち空隙が残留する可能性が高い。このため、PCNetセグメント工法のPCグラウトとして最適な材料、注入方法、排気孔位置を検討するための試験を行った。写真-5にグラウト試験の状況を示す。



写真-5 グラウト試験全景

4.3.2 PC グラウト材料

現在PCグラウトに用いられるセメント系の材料には高粘性および低粘性のものがあり、橋梁上部工の主鋼材等の太径のシースには高粘性が用いられるのが一般的であるが、細径の鋼材には低粘性が用いられることもあり、事前試験ではそれぞれの充填性を確認した。表-1に使用材料と配合を示す。

表-1 PC グラウト配合

W/C (%)	セメント(C) (kg)	水(W) (kg)	混和剤 (g)	混和剤率 (%)
45	75.0	33.75	750	1.0

混和材：高粘性 ポゾリス GF-1720

低粘性 ポゾリス GF-1700

4.3.3 試験方法

本工場の状況に合わせ内径φ3,750のPCNetセグメント用に形状を保持した透明シース内に、1T12.7のPC鋼より線を挿入し、下方より上方に向かってグラウト注入を行うこととした。PCグラウトは4リング360°を一度に注入したため、セグメント継目のPC鋼材緊張・定着・接続部の箱抜きを通過する必要があった。この部分についてはグラウトホースを用いてバイパスを設け、連続して注入できるようにしているため、

試験においても同様の中間バイパスを設けた。

試験ケースは表-2, 図-7のように排気孔の数と位置, 粘性をパラメーターとして6ケース設定した。グラウトの充填状況は, 注入・硬化後にシースを解体して目視により確認した。

表-2 試験ケース

Case	粘性	排気孔	備考
1	高粘性(GF1720)	排気孔なし	下図(a)参照
2	高粘性(GF1720)	排気孔 1箇所 (頂部のみ)	下図(b)参照
3	高粘性(GF1720)	排気孔 2箇所	下図(c)参照
4	低粘性(GF1700)	排気孔なし	下図(a)参照
5	低粘性(GF1700)	排気孔 1箇所 (頂部のみ)	下図(b)参照
6	低粘性(GF1700)	排気孔 2箇所	下図(c)参照

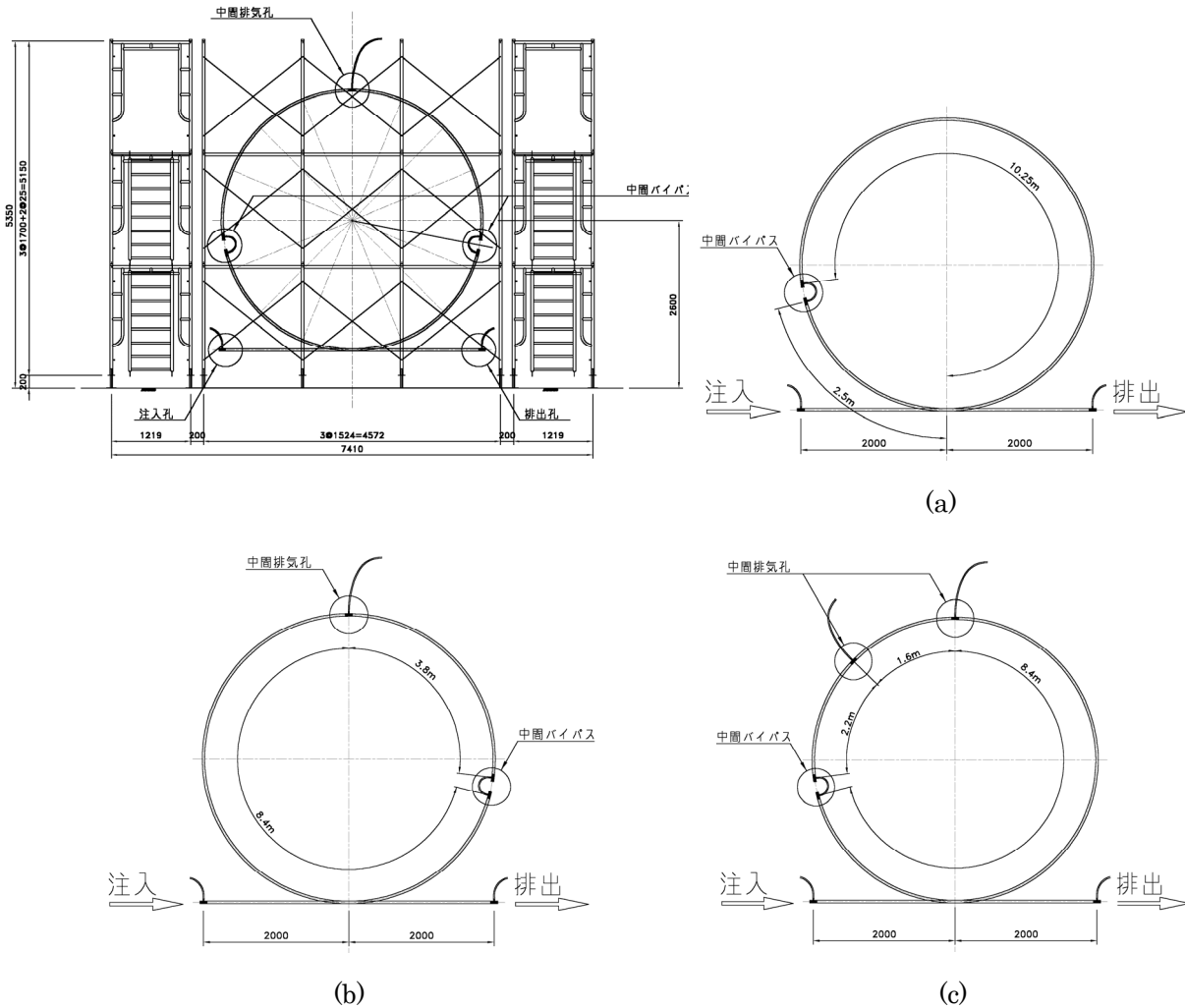


図-7 試験ケース

4.3.4 試験結果と考察

実験の結果明らかになった事柄を以下に列記する。

- 高粘性を用いた Case-1,2,3 は、全て先流れのために頂部から下る方向の 50~100cm の範囲に空隙が発生した。
- 低粘性で排気孔がない Case-4 も、先流れのために同上の位置に空隙が発生した。
- 低粘性で排気孔を設けた Case-5,6 では、先流れで一旦空隙が発生するが、排気孔から排気されて未充填箇所はほとんど発生しない。
- 排気孔の数による違いは、高粘性の Case-1,2 の差は多少見られたが、低粘性の Case-5,6 の差はほとんど無い。
- 中間バイパスの充填性に与える影響は確認されなかった。

多少の勾配による先流れや、空隙発生を抑止には高粘性グラウトの使用が有効であるとして、現在 PC グラウトには高粘性タイプを用いることが多いが、PCNet セグメントのようならせん状の PC 鋼材配置形状においては先流れを防止することができず、かえって粘性の高さが巻き込んだエアの排出の妨害となっていることが確認できた。このようならせん形状では最底部より左右同時に同速度で注入して頂部より排出すると完全な充填が可能であると考えられるが、注入速度の管理が困難であり現実的ではない。片押しの場合には必ず頂部を超えることになり、エアの巻き込みは避けられないが、これをいかに効率よく排出するかを考えた方が現実的である。効率よいエアの排出には低粘性のグラウトが適しており、実証試験においてはこれを用いた。さらに、注入されたグラウトが排出された排出口から逆向きに注入することによりわずかに残留しているエアも排出されることが確認できたため、実証試験においてはこの逆注入方式とした。

5. 実証試験

5.1 概要

PCNet セグメントの組立は RC セグメント区間の一部置換えであったため設備の変更は不可能であり、シールド機は RC セグメント区間と同一の外形 $\phi 4,490 \times$ 機長 6,685 の泥土圧シールド機をそのまま使用した。

5.2 セグメント組み立て

5.2.1 施工要領

組立は下方の A セグメント 3 ピースから行い、左右の B セグメントを組立てた後最後に K セグメントを組立て、1 リングを完成させた。セグメントの形状は 6 等分割セグメントであるため、配置は左右に 15° ずらした千鳥配置であった。以下の写真 6~15 に 1 リングの組立手順を示す。



写真-6 掘進ジャッキ戻し
掘進が完了し、最初のセグメントを設置するために、掘進ジャッキを戻した状況。



写真-7 カップラー取付け
既設の PC 鋼材緊張端に接続用カップラーを取り付けている状況。



写真-8 セグメントの把持・移動
セグメントをエレクターにて把持し、所定の位置まで旋回・移動する。



写真-9 カップラー，調芯ピン
左が既設，右が新設側。カップラーと調芯ピンが確認できる。



写真-10 PC 鋼材挿入状況
PC 鋼材は人力にて一本ずつ挿入した。



写真-11 挿入・接続完了
グリップの突出量にてカップラーへの接続状況の確認を行った。



写真-12 緊張状況
同時に二本の PC 鋼材を緊張した。



写真-13 定着作業
所定の緊張力が導入された後、エアラチェットにてナットを締め付けた。



写真-14 Kセグメント組立前
既にカップラーは取り付けられている状況。



写真-15 Kセグメント組立状況
Kセグメントの組立が終われば1リング完成。

RCセグメントの組立て作業は、組み立てるリング上でボルト締結等が行われるが、PCNetセグメントの場合は、これまで示してきたように、組み立てるリングの切羽側端面の掘進ジャッキ部分でPC鋼材の挿入や緊張を行う必要があった。これは狭隘な空間での作業であるため、事前試験時に作業効率が懸念されていたが、RCセグメント用のシールド機の設備を改造することなく作業することが可能であった。さらに作業効率を向上させる必要がある場合には、足場を改造して作業環境を整備することが効果的であると考えられる。

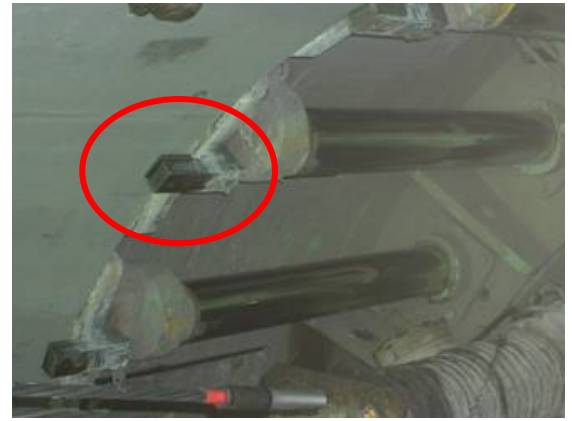


写真-16 セグメント落下防止装置

RCセグメントはセグメントピースをエレクターで把持・回転して所定の位置へ移動し、既設セグメントとボルト締結後エレクターの把持を解放するが、PCNetセグメントの場合は、PC鋼材挿入・緊張のため既設セグメントとの接合が完了する前にエレクターの把持を解放する必要があった。その場合、完全に接合されていないセグメントをシールドジャッキ反力にて保持する状態があり、落下事故の危険性が考えられた。そのため、写真-16に示すように、セグメント落下防止装置をスプレッダーシューに取り付け、作業時の安全性を確保した。

5.2.2 緊張システム

本試験で使用したPC鋼材の規格は以下の通りであった。

SWPR7BL 1S12.7

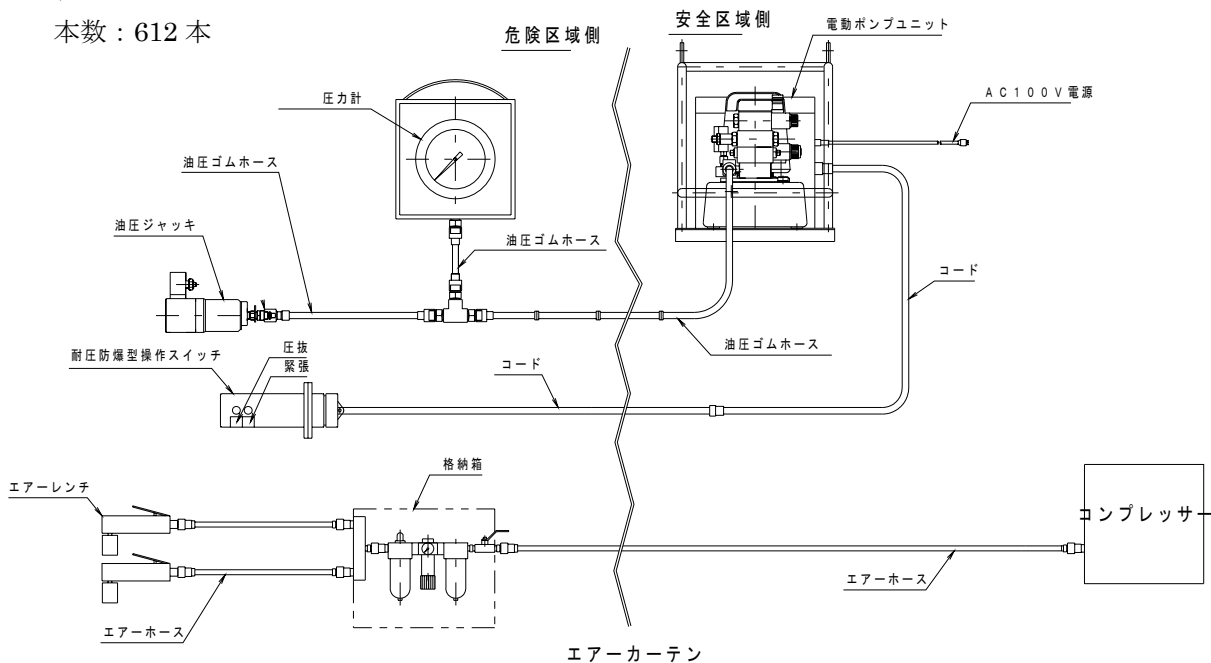
引張荷重 : 183kN 以上

降伏点強度 : 156kN 以上

公称断面積 : 98.71mm²

長さ : 3.3m

本数 : 612本



ジャッキ仕様		ポンプユニット仕様	
搬量	160 kN	吐出圧力 高圧	70 MPa
ストローク	40 mm	低圧	7 MPa
圧力	66.4 MPa	吐出量 高圧	0.35 L/min
受圧面積	24.1 cm ²	低圧	2.5 L/min
必要油量	約 0.1 L	モーター	450W 100V

図-8 緊張システム

本試験では、多数の PC 鋼材を狭隘な空間で効率よく緊張するために、**図-8**に示すような緊張システムを開発した。施工箇所は可燃ガス発生の可能性があったため、エアーカーテンを境界として切羽側（危険区域側）の機材は防爆仕様とした。防爆仕様が困難な油圧ポンプやコンプレッサーはエアーカーテン後方の安全区域側に設置し、切羽から遠隔操作可能なスイッチを用意した。油圧ポンプおよびジャッキは2組用意し、PC 鋼材2本同時緊張とした。

写真-17に緊張システムの主要機器を示す。ジャッキ・ラムチェアは作業性向上のため、チタン、アルミニウムを多用した特別仕様で、徹底的な軽量化を図っている。また、ジャッキは軽量化のために油圧系統を一方のみとしたため、別途ストロークを戻すための治具を準備した。

写真-18には緊張スイッチと圧力計の坑内設置状況を示す。これらの機器は切羽近くのシールドジャッキ操作盤横に取り付け、立ち姿勢のまま操作できるようにした。

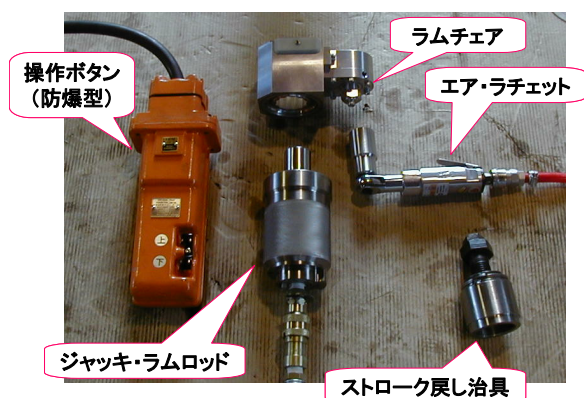


写真-17 緊張システム主要機器



写真-18 緊張スイッチと圧力計

緊張力の管理は PC 鋼材長が短く本数が多いことから、荷重計の示度と鋼材の伸び量により行うことを基本とした。ただし、PC 鋼材長が約 3.3m と短いため緊張時の伸びが少ないこと（約 23mm）、緊張力-伸び関係が直線となる範囲が少ないことなどの理由により伸び量の管理は補助的なものとし、緊張力（圧力計示度）による管理を主とした。

緊張力の導入は**写真-17**に示す操作ボタンを押すことによって開始され、**写真-18**に示す圧力計の示度を目視により確認しながら最終緊張力まで継続して行った。最終緊張力と**写真-19**に示すようなジャッキシリンダーに取り付けたゲージにより伸び量を確認した後、**写真-20**に示すデータロガーにより圧力を印字記録し管理した。緊張管理は全ての鋼材について行った。

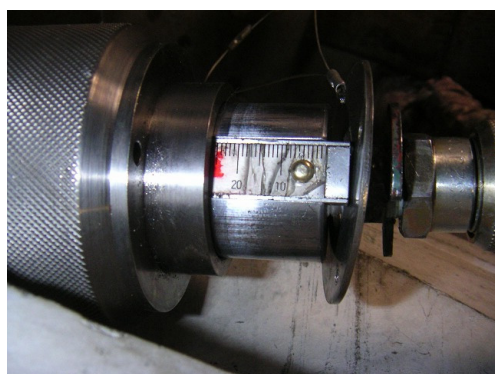


写真-19 伸び量の測定状況



写真-20 データロガー

5.2.3 実施工程

PCNet セグメント組立の一日の平均的な施工サイクルを図-9に示す。

作業は昼夜二交代制で行い、間に掘進休止の時間が設定されていた。作業開始と終了時には立坑より切羽までの移動時間も含まれている。標準的な施工サイクルは組立に1.25時間と掘進に0.5時間で合計1.75時間であり、一日片番当たり4リングの施工速度であった。

PCNet セグメント 102 リングの組立は平成 17 年 11 月 17 日より開始し同年 12 月 8 日に完了した。昼夜施工で暦日 22 日間であるが坑内設備調整の 2.5 日間と休日 3 日間の計 5.5 日間には作業を休止したため、実質 16.5 日で 102 リング、一日片番当たり平均 $102/16.5 = 3.1$ リングの施工速度であった。

図-10に組立の進捗状況を示す。横軸の「日数」は片番を一日と表現しているため、暦日 22 日間は横軸で 44 日間に相当する。PCNet 区間開始部分は、RC セグメントとの接続管(SSPC)組立のため、また、作業に慣れるまでは特に慎重に組立作業を進めたために進捗が遅いが、日曜を過ぎた週初めからは片番当たり 4 リングの一定したペースで組立が進行した。日によっては 5 リング組立が可能と思われる状況もみられたが、試験施工であり慎重に作業を進めるために 4 リング組立で余裕をもって終了した。

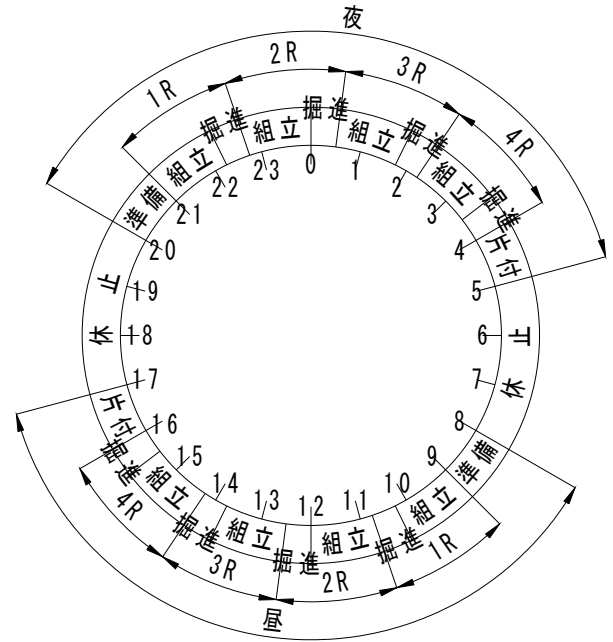


図-9 一日の施工サイクル

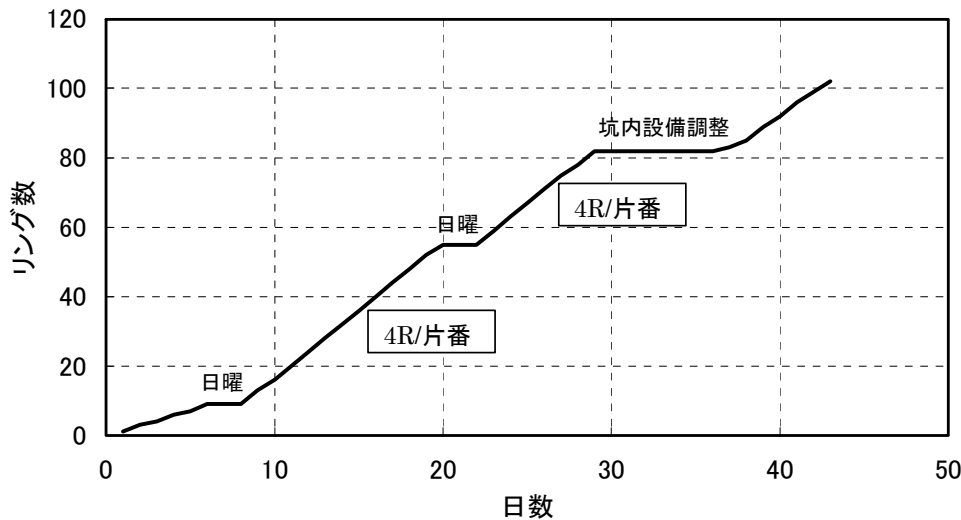


図-10 組立進捗状況

セグメント 1 リングの幅は 1.2m であるため、一日当たりの施工速度は $1.2m \times 4 \text{ リング} \times 2 = 9.6m$ であるが、これはこの規模の RC セグメントにおける標準的な施工速度 12.8m/日の 75%の施工速度であった。施工速度の向上のためには、シールド機の改造による足場等の改良や緊張管理の簡略化等の対策があり、標準的な施工速度と同程度までの速度向上は可能であると考えられる。

5.3 グラウト工

5.3.1 施工要領

PCNet セグメントにおけるグラウト注入の目的は、P C鋼線とシーす間および定着切欠部を充填し鋼材および定着具の腐食を防止することである。PCNet セグメントのグラウトは一般の橋梁上部工で行うグラウトとは異なり円周状に注入するため、事前試験の結果を踏まえ混和剤は低粘性を使用し、1周毎に注入後逆注入もあわせて実施した。(図-11参照)

グラウトの注入時期はセグメント組立が完了して後方台車が通過した後に速やかに行う予定であったが、掘進作業が終了してシールドマシンを解体した後に行った。

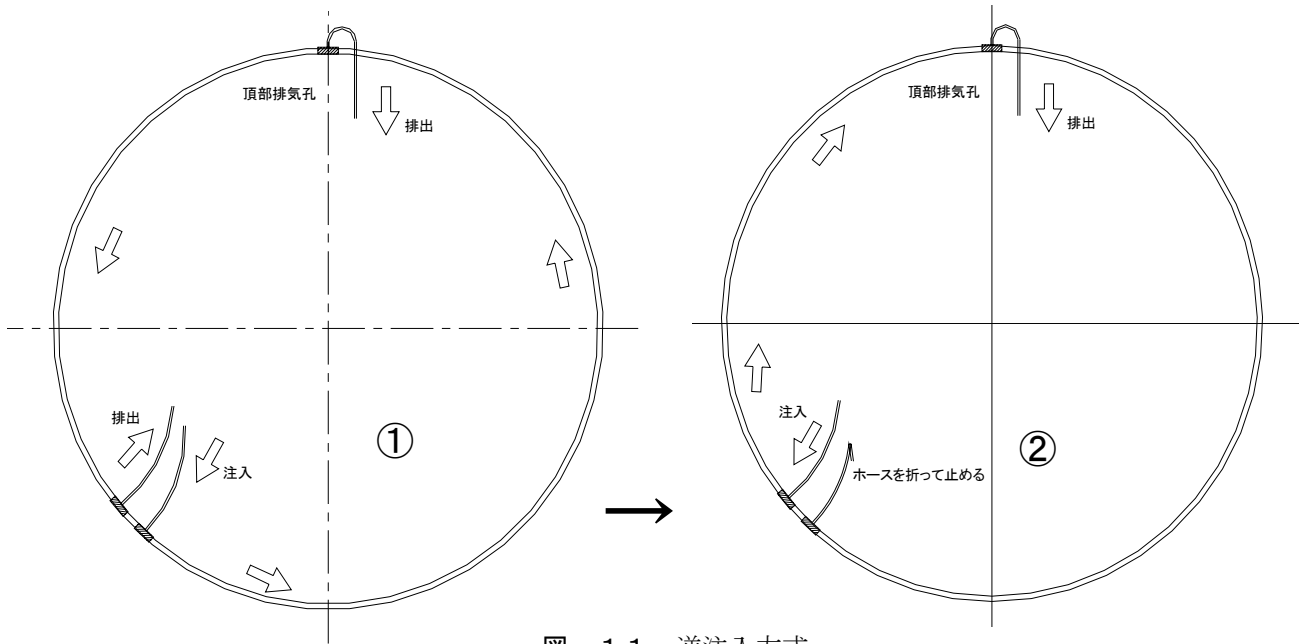


図-11 逆注入方式

- ① 注入孔よりグラウトを注入し、頂部の排気孔および排出孔よりグラウトが排出されたらグラウトホースを折り一旦注入を止める。
- ② 排出孔から逆方向に再注入し、頂部の排気孔よりグラウトを再度排出し、残留エアを除去する。

グラウト注入作業は写真-21に示すように台車上にミキサ、ポンプ等のプラントを組み立て、坑内の軌条設備上を順次移動しながら連続して行った。逆注入方式としたため、グラウトポンプは注入側と排出側のそれぞれに二台準備した。



写真-21 グラウトプラント

グラウト施工に先立ち、注入、排出、排気孔にグラウトホースをセットし、通水試験を行い閉塞が無いことを確認した(写真-21)。

その後、坑外で組み立てたグラウトプラントを坑内に搬入、施工位置まで移動し、別途準備した作業足場台車(写真-22)を使用して注入作業を行った。写真-23、24は坑内での作業状況である。

グラウトが確実に充填されたことを確認するために、ポンプごとに流量計を設置して注入された量を印字記録して累計し、設計数量以上のグラウトが注入されたことを確認しながら作業を行った。グラウト注入を開始すると排出口からは最初に外部からシース内に浸入していた地下水が排出され、その後希釈されたグラウトに変化し、徐々に注入されたグラウトと同等のグラウトが排出された。そのため、排出グラウトの品質が安定するまで継続してグラウトを注入し、希釈されたグラウトは全て計量した後廃棄し、注入量から差し引いたものを最終的な注入量とした。

グラウトの品質管理は一般のPC上部工に用いるグラウトの品質管理を準用した。管理項目は以下の通りである。

- 流動性試験
- ブリーディング率および膨張率試験
- 塩化物量試験
- 圧縮強度試験

残留地下水により希釈されたグラウトを排出する必要があったため、一般のPCグラウトに比較して設計値よりも多量の材料を使用した。以下に使用材料の実績を示す。

グラウト数量(設計値) : 4.437m³

グラウト数量(実績) : 6.380m³

実績値/設計値 = 1.438

注入本数 : 318本



写真-21 グラウト注入前



写真-22 作業足場台車



写真-23 坑内作業状況



写真-24 坑内作業状況

6. 出来形

6.1 真円度

図-12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。このグラフにおいて横軸はトンネルの延長方向を表し、縦軸の正方向は水平方向内径寸法の設計値との差、縦軸の負方向は鉛直方向内径寸法の設計値との差を表す。

真円度は縦断勾配変化部で20mmというやや大きな値を計測したが、おおむね鉛直方向15mm、水平方向10mm以下であり、セグメント継手の影響を無視した剛性一様での解析値である鉛直方向5.2mm・水平方向2.5mmに対しては大きな値となったが、セグメント継手の影響を考慮したはりばねモデルでの解析値である鉛直方向16.3mm・水平方向14.2mmに対して近似した値となった。また管理基準とされる図心直径の1/150の値21mm以下であった。これは前後のRCセグメント区間と比較してやや小さな値であった。

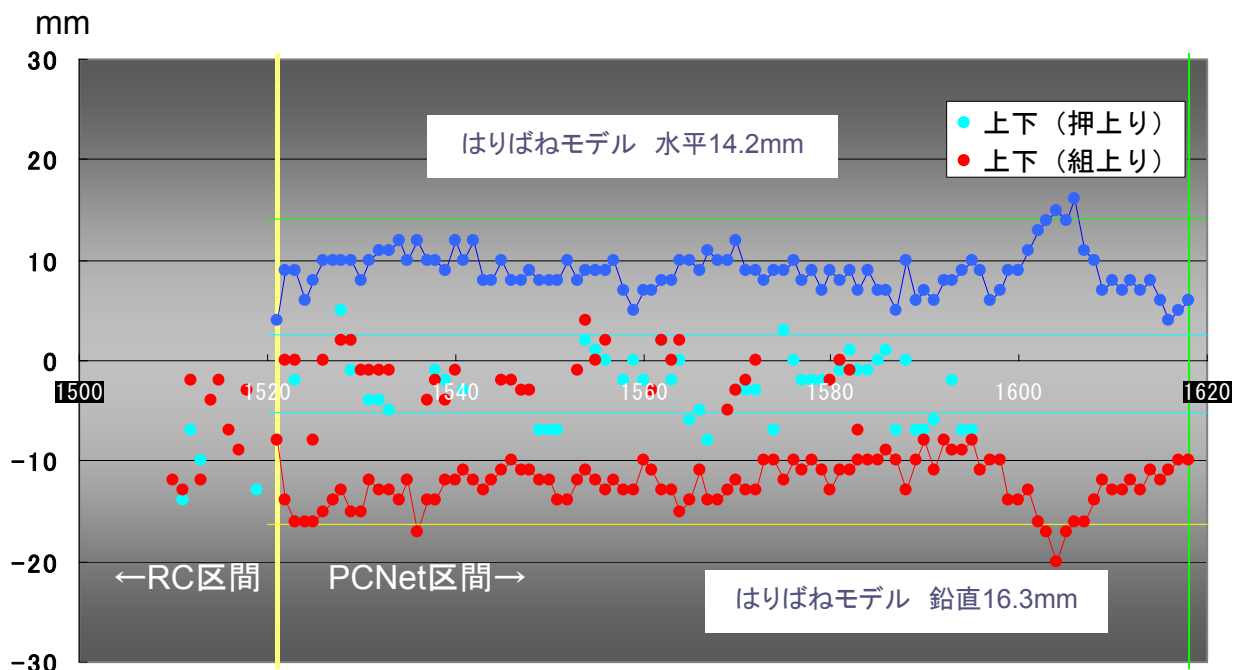


図-12 真円度計測結果

7. おわりに

PCNet セグメント工法の実証試験として約120m区間について問題なく下水管渠を構築することができ、本工法初の施工実績とすることができた。今後はさらに工法の改良を進め優れた性能を持つ本工法の普及に努めたい。

謝辞

本実証試験の実施を許可いただいた大阪市都市環境局様には篤く御礼申し上げます。本工法の開発、実証試験の実施にあたっては株式会社大林組、鹿島建設株式会社、清水建設株式会社、大成建設株式会社より貴重なご助言をいただいている。また、大成・戸田・井上特定建設工事共同企業体には試験実施場所をご提供いただいただけではなく、施工上のご指導、ご助言をいただいた。これら関係各位に深く御礼申し上げます。また、本工法の共同開発者である石川島建材工業株式会社の関係各位にも御礼申し上げます。