

(52) 新しい円周方向PCシステムの実用化

住友建設(株) 技術研究所	正会員	○大館 武彦
同 上 技術部	正会員	近藤 真一
同 上 東京支店	正会員	川田 直良
住友電気工業(株) 特殊線事業部	正会員	鮎子多 浩一

1. はじめに

従来の一般的なPC円形容器の円周方向PCシステムには、PC鋼材を容器壁体に定着させるための定着方法やPC鋼材とシースとの摩擦による平均導入緊張力の減少に伴うPC鋼材量の増加等の経済性、施工性の課題があった。著者らは、このような課題を解決するため、新しい円周方向PCシステムを考案し、性能試験を経て実用化した。本稿では、新しい円周方向PCシステムの概要とその性能試験結果について報告する。

2. 従来の円周方向PCシステムと新しい円周方向PCシステムの内容

2-1 従来の円周方向PCシステム

従来の一般的な円形容器の円周方向PCシステムには、以下の様な課題がある。

- ① PC鋼材を容器壁体に定着させるために定着柱（ピラスター）を設けるか、あるいは壁厚を厚くして切り欠き定着（図-1）させており、コンクリートや型枠の材料を多く必要とする。
- ② 定着部に大きなプレストレス力が作用し、局部応力が生じるため、補強筋を配置する必要性があり鉄筋が多く必要となるとともに組み立てが煩雑になる。
- ③ PC鋼材とシースの摩擦により、PC鋼材の平均導入緊張力が小さくなり、円周方向に効率的にプレストレスを与えることができないためPC鋼材量が多く必要となる。

構造物に使用するPC鋼材量は、断面に配置された各PC鋼材の平均導入プレストレス力により決まる。緊張直後のプレストレス力は、コンクリートの弾性変形、PC鋼材とシースの摩擦、定着具およびジャッキ内部の摩擦、定着具におけるセットにより減少するため、これらの要因の影響を小さくすることでPC鋼材1本あたりの緊張力を大きくすることができる。特に、PC鋼材とシースの摩擦によるプレストレス力の減少は、PC鋼材およびシースの種類、配置形状により異なるため鋼材を配置するうえで、角変化の大きい円形構造物の円周方向にプレストレスを導入する場合は、摩擦を小さくすること

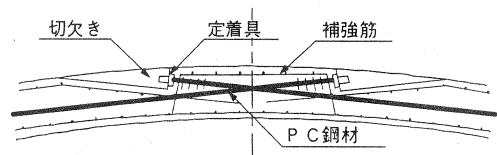


図-1 従来のPCシステムの一例

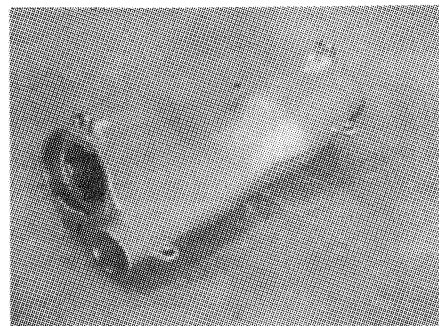


写真-1 Xアンカー（1S21.8用）

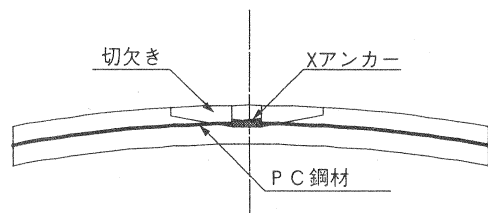


図-2 Xアンカーを用いた場合の概略図

が経済性を高めるうえで有効な手段の一つであるといえる。現在、円形構造物の円周方向にプレストレスを導入する手段としては、裸PC鋼（より）線を使用するのが一般的であるが、プレストレスの損失が大きいため、PC鋼材量が多く必要になるとともにPC鋼材を円周方向に2分割以上にして配置する必要がある、定着箇所も増加するため経済性、施工性に優れているとはいえない。そこで著者らは、経済性、施工性を改善するために、摩擦係数の小さいプレグラウトPC鋼材あるいはアンボンドPC鋼材と2つの定着具をX型に一体化した定着具（Xアンカー：写真-1）を用いた円周方向PCシステムを新たに考案した（図-2）。

2-2 新しい円周方向PCシステム

プレグラウトPC鋼材およびアンボンドPC鋼材は、従来工法で一般的に使用している裸PC鋼（より）線に比べて摩擦係数が小さく、摩擦によるプレストレス力の減少量の低減を図ることができるため、PC鋼材の必要鋼材量を減らすことが出来る。また、PC鋼材1本あたりのプレストレス力の減少量が小さいため両引きすることで円周方向に360度に配置することが可能になり、定着箇所を減らすことが出来る。施工性の面でも従来システムである裸PC鋼（より）線とシースの場合は、緊張後にグラウトを注入する必要があるが、新システムでは、鋼材とポリエチレンシース間にあらかじめエポキシ樹脂が充填されているため、現場でのグラウト作業が省略できるとともに品質が確保されやすい。またXアンカーには、緊張力を支圧板によりコンクリートに伝達させないため局部応力が生じない、切り欠きを小さくできるため補強筋が少なくすむなどの利点がある。Xアンカーは、現在までにシールド施工におけるP&PC工法ですでに適用されており、優れた施工性は実証されている。

3. 新しい円周方向PCシステムの性能確認

本PCシステムを実用化するに際し、基礎的な性能試験としてXアンカー試験とPC鋼材（プレグラウトPC鋼材、アンボンドPC鋼材）の摩擦係数測定試験を行った。Xアンカー試験は、円形容器に限らずPC鋼材の大容量化に対応した定着具としての耐力とコンクリート内に配置した場合の周辺コンクリートに対する影響を確認するために行った。PC鋼材摩擦係数試験は、円形容器に、アンボンドPC鋼材またはプレグラウトPC鋼材を使用するにあたり、角変化の大きい円周方向に使用した場合においても、摩擦係数の規定値を使用できるか確認するために行った。特に、プレグラウトPC鋼材は、橋梁上部工の主ケーブルや横締めケーブルとして最近使用事例が増加しているものの、円形容器の円周方向のPC鋼材としての適用例はないため、摩擦係数の確認は重要と考えられる。

3-1 Xアンカーの性能試験

(1) 試験概要

21.8mm PC鋼より線用のXアンカー定着具について、緊張時の定着性能と健全性を確認するためにXアンカー定着具の性能試験を行った。試験は、中央にXアンカー定着具を配置した21.8mm PC鋼より線を、500kN横型引張試験機にセットして引張試験を行った。荷重の載荷は、PC鋼より線が破断するまでとした。表-1に、使用した21.8mm PC鋼より線の機械的性質を示す。なお、定着具は、実施工ではコンクリート中に埋設されるが、本試験では空中にあるため定着具にねじれが発生する可能性があり、そのねじれによって起こる定着具端部角折れによるPC鋼より線の異常破断をさけるために、定着部にポリエチレンスペーサーを付けて試験を行った。写真-2に試験状況を示す。

表-1 21.8mm PC鋼より線の機械的性質

呼 び 名	0.2 % 永久伸び に関する荷重 (kN)	引張荷重 (kN)	伸 び (%)
19本より21.8	495以上	573以上	3.5以上

(2)試験結果

PC鋼より線の破断荷重は、575kN となり、グリップの部分で破断した。PC鋼より線の規格引張荷重に対する定着効率（接続効率）は 100.3%となった。また、Xアンカー埋設部品など定着具に、著しい変形や損傷は確認されなかった。従って、プレストレストコンクリート工法設計施工指針（土木学会）¹⁾の基準である「定着効率（接続効率）は緊張材の規格引張荷重の 95%以上とする」を満足する結果が得られた。

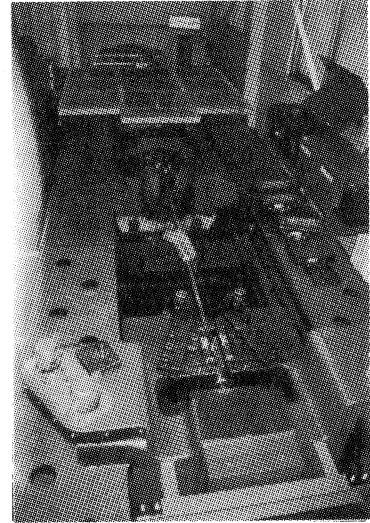


写真-2 Xアンカー性能試験状況

3-2 Xアンカー定着部の強度試験

(1)試験概要

試験は、縦 3000mm × 横 1000mm × 厚さ 255mm のコンクリート供試体に、Xアンカーをかぶり 35mm で中央に配置し、ジャッキ緊張用の切り欠きを設け、コンクリート強度が所定の強度に達した時点で油圧ジャッキにより緊張力を導入する方法で行った。コンクリートの設計基準強度は 40N/mm² とした。緊張力を導入するPC鋼線は、1S21.8 の裸PC鋼より線を用いた。図-3 に試験体図とコンクリート表面ゲージの位置を示す。

測定項目は、以下のとおりである。

- ① Xアンカーによる摩擦損失の測定
- ② コンクリート表面のひずみ測定
- ③ 補強筋のひずみ測定

Xアンカーによる摩擦損失の測定は、試験体端部を緊張側とし、Xアンカー定着部を固定側にして、ロードセルにより測定を行い、緊張側と固定側の荷重差より摩擦係数 μ を算出した。なお、本試験において、緊張力の損失は、長さあたりの摩擦係数 λ に比べて、角度による摩擦係数 μ の方の影響が大きいので、 λ を規定値である 0.004(1m あたりの摩擦係数)と一定として μ を求めた。コンクリートひずみと補強筋ひずみの測定は、試験体の両端部から緊張力を与えることにより、Xアンカーを両引き緊張として使用した場合を想定した。Xアンカー周辺部には、定着具の周辺に作用する偶力に対してコ字に加工した D13 の鉄筋を組み合わせた補強筋を配置した。(写真-3)

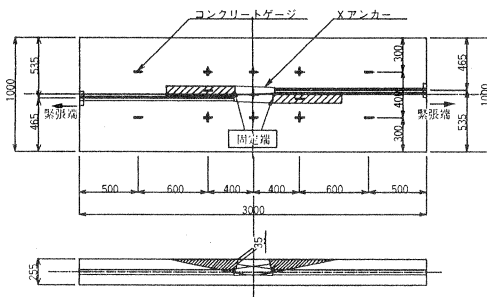


図-3 試験体図

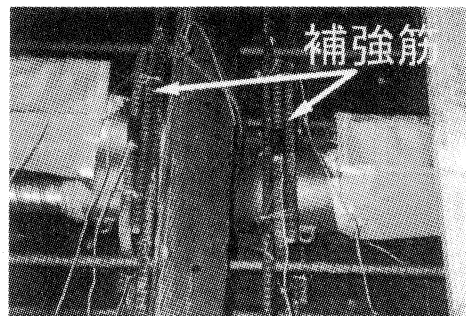


写真-3 Xアンカー配置状況

(2) 試験結果

本試験における 21.8mm Xアンカーは 12 度の曲げ角度を有しており、緊張端と固定端との緊張力の差から算出される摩擦係数は $\mu=0.14 \sim 0.16(1/rad)$ 程度と、プレグラウト鋼材およびアンボンド鋼材の規定値より少し高めの値となった。しかし、21.8mm Xアンカーを実構造物に適用する場合の Xアンカーの摩擦による緊張力の損失は、全体の緊張力損失の割合に比べて小さく、Xアンカーによる摩擦損失分を緊張時に引き越すことで所定の緊張力を導入することが可能である。図-4 に、試験体上面中央部の緊張方向と直交方向のコンクリートひずみを示す。

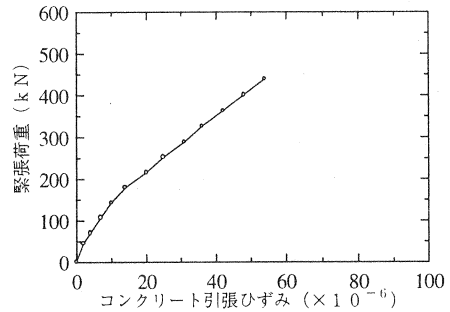


図-4 コンクリートひずみ

コンクリートひずみは、最大緊張力時において、試験体上面中心で $\epsilon=60 \times 10^{-6}$ 程度であり、コンクリートにひび割れが発生すると推測されるひずみ $\epsilon_r=100 \times 10^{-6}$ には至らなかった。コンクリート表面のひび割れ観察においても、ひび割れは見られず、健全であった。また、補強筋に生じるひずみは、小さく、最大荷重時においてもひずみに大きな変化は見られなかったが、コンクリートには、Xアンカーのねじれの拘束力および緊張力差による偶力が働くことも考えられるので、本試験のように簡単な補強筋を設置した方が安全といえる。

3-3 プレグラウト鋼材およびアンボンド鋼材の摩擦係数試験

(1) 試験概要

図-5 に示すように、PC鋼材を、曲げ半径 $\phi 1400mm$ (鋼材中心) で円形試験体のコンクリート壁内に 360 度配置した。試験は、アンボンドPC鋼より線、プレグラウトPC鋼より線の 2 種類の鋼材について行った。試験方法は、緊張側および固定側にロードセルを設置した状態で片引き緊張を行い、ロードセルにより両端の緊張荷重を測定した。摩擦係数 μ は、得られた緊張荷重を用いて、式(1)を用い算出した。荷重の載荷は、各鋼材につき 3 回づつ続けて行った。

$$P = P_0 \times e^{-(\mu + \lambda l)}$$

$$\mu = (-\ln(P/P_0) - \lambda \cdot l) / \alpha \quad \text{式(1)}$$

ただし、

P ; 固定端における緊張荷重(N)

P₀ ; 緊張端における緊張荷重(N)

α ; 緊張端から固定端まで全角変化(rad)

本試験では、 $\alpha = 360 \text{度} = 6.283 \text{rad}$

λ ; PC鋼材の長さ 1m あたりの摩擦係数

本試験では、

アンボンドPC鋼より線 $\lambda = 0.002 (1/m)$

プレグラウトPC鋼より線 $\lambda = 0.003 (1/m)$

l ; 緊張端から固定端までの全長(m)

本試験では、 $l = 10.2m$

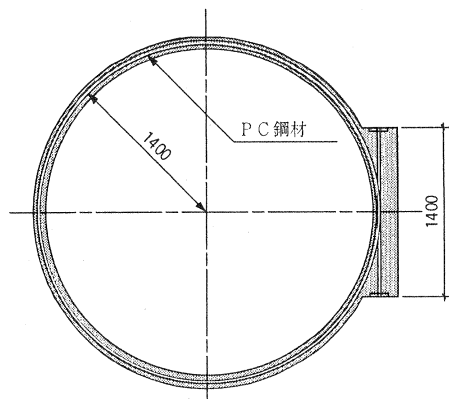


図-5 摩擦係数測定試験体

(2) 試験結果

プレグラウトPC鋼より線の場合、1回目の載荷時において $\mu = 0.1(1/rad)$ 程度で規定値と同程度となり、2回目以降の平均摩擦係数は $\mu = 0.089 \sim 0.1(1/rad)$ 程度と少し小さい値となった。アンボンドPC鋼材の場合の平均摩擦係数は、 $\mu = 0.028(1/rad)$ 程度と規定値の $\mu = 0.06(1/rad)$ よりかなり小さい値となった。従って、円形構造物の円周方向にプレグラウトPC鋼より線を使用するときは $\mu = 0.1(1/rad)$ 、 $\lambda = 0.003(1/m)$ 、アンボンドPC鋼より線を使用するときは、 $\mu = 0.06(1/rad)$ 、 $\lambda = 0.002(1/m)$ と規定値を使用できることを確認した。

(3) プレグラウトPC鋼材の摩擦係数とちよう度との関係

プレグラウト鋼材の樹脂の硬化が摩擦係数に与える影響について確認した。プレグラウトPC鋼材は、温度履歴と経過時間により、樹脂の硬化の進行の度合が異なるため、本試験では、コンクリート打設前から摩擦係数試験時までの試験体温度の測定結果から緊張可能時間を1.0とした時の硬化度を算出し、その時点での摩擦係数を測定した。本試験では、2年型の樹脂タイプのPC鋼材を使用した。図-6に、摩擦係数と硬化度との関係について示す。硬化度0.05時の摩擦係数の平均は $\mu = 0.089 \sim 0.1(1/rad)$ 、硬化度0.6時の摩擦係数の平均は $\mu = 0.077 \sim 0.094(1/rad)$ であり、緊張可能時間の半分以上の時間が進行しても、摩擦係数にはほとんど変化は見られず、樹脂の性能が維持されていることがわかる。このことから、ある程度硬化が進行しても緊張可能時間内であれば、摩擦係数の既定値を使用できることを確認した。

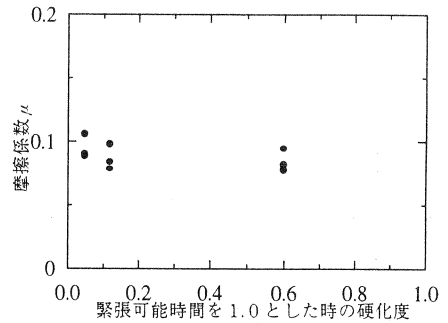


図-6 摩擦係数と硬化度との関係

4. 新しい円周方向PCシステムの経済性

新しい円周方向PCシステムと従来の円周方向PCシステムの経済性について、必要PC鋼材量で比較した。比較の条件として、円周方向に曲げ半径5mに鋼材を配置する場合を想定した。新しいシステムは、21.8mm

プレグラウトPC鋼より線とXアンカーを使用し、360度配置の両引きとした。また、従来のシステムは、21.8mm裸PC鋼より線と通常の定着具を使用し、180度配置の2分割とした。その時の平均緊張力は、図-7に示すとおり、プレグラウトPC鋼より線で329kN、裸PC鋼より線で265kNとなり、緊張端にて同じ緊張力を導入した場合、プレグラウトPC鋼材を使用することにより裸PC鋼より線の約1.2倍の平均緊張力となる。単純計算で、裸PC鋼より線で50段配置の場合、プレグラウトPC

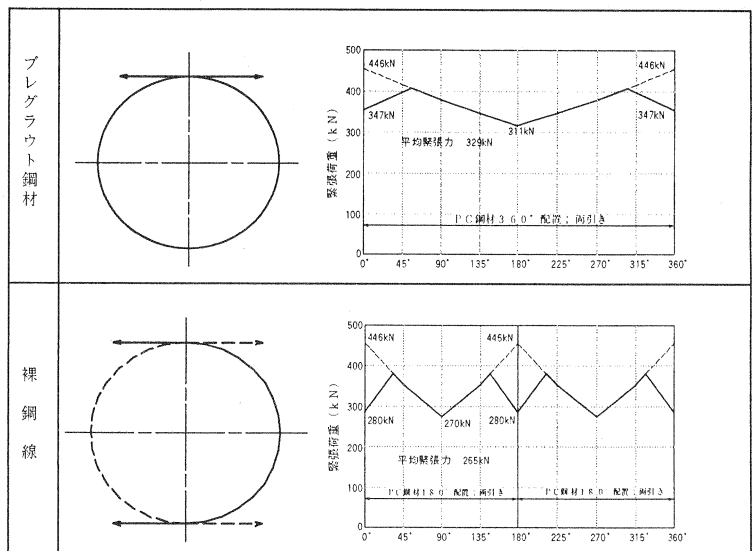


図-7 各鋼材の平均緊張力

鋼より線にすると41段配置となる。また、裸PC鋼より線を50段配置した場合の定着箇所は2分割のため200カ所となるが、プレグラウトPC鋼より線の場合、41段配置の82箇所となる。このように、新しい円周方向PCシステムでは、従来の円周方向PCシステムに比べて、PC鋼材量および定着箇所数を少なくすることが可能であり、経済的であるといえる。構造物の種類や規模によっても異なるが、プレグラウトPC鋼材およびアンボンドPC鋼材を用いる新しい円周方向PCシステムは、従来の円周方向PCシステムに比べて、一般的にPC鋼材の単価は高くなるものの、PC鋼材量および定着具の減少、グラウト作業が必要ないことから、従来の円周方向PCシステムに比べて約8～10%程度の工費の低減が可能になると考えられる。

5. まとめ

- (1) プレグラウトPC鋼材およびアンボンドPC鋼材とXアンカーを用いた新しい円周方向PCシステムは、従来の円周方向PCシステムが有している経済性、施工性の課題を解決できることを確認した。
- (2) Xアンカーは、土木学会の基準を満足する性能を有していることを確認した。また、21.8mm用Xアンカーをコンクリート内に配置した試験体のXアンカー周辺のコンクリートにひび割れなどの異常は確認されなかった。
- (3) プレグラウトPC鋼材およびアンボンドPC鋼材を円周方向に360度に配置する場合の設計において、角変化による摩擦係数 μ は、規定値を使用できることを確認した。
- (4) 新しい円周方向PCシステムは、従来の円周方向PCシステムに比べて概算で工費8～10%程度の低減が可能になると考えられる。

6. おわりに

本円周方向PCシステムは、下水道事業団発注のクリーンピア千曲の卵形消化槽（施工：住友・北野特定建設共同企業体）で初めて採用された。今後、このPCシステムは円形容器のみならず、版状構造物の中間にプレストレスを与える場合などの幅広い適用が考えられる。

参考文献

- 1) プレストレストコンクリート工法設計施工指針、コンクリートライブラリー66、土木学会、平成3年