

[115] プレストレストコンクリート圧力トンネルの開発

正会員○吉	川	弘	道	(間組)	技術研究所
	蓮	井	昭	則	(間組)
正会員	福	留	和	人	(間組)

1. 概 要

プレストレストコンクリート圧力トンネル（以下P C 圧力トンネルと略す。）は、トンネルの覆工材にプレストレストコンクリートを適用し、水圧によって生じる軸引張力に対抗させるものである。プレストレストコンクリートを使用することにより、耐荷力の増大、ひびわれに対する安全性の向上、さらにその鋼材量や緊張力を調整することにより、地山条件の変化に柔軟に対応できるなど、多くの利点が得られる。このため、掘削断面の減少、工期の短縮が可能となり、従来工法に比べて大幅な経済性の向上が期待される。しかし、P C 圧力トンネルの施工について、海外では数例報告があるものの我国ではまだ例がなく、研究も充分でない事を考えると、慎重な検討が肝要である。

PC圧力トンネルの開発に際して、まず、その具備すべき諸性能を明確にする必要がある。図-1は要求される諸性能と各々に関与する機能要因の相関性を示すとともに、主要検討項目を列挙し一覧したものである。このような要因分析と開発プロセスに従って、PC圧力トンネルの研究・開発を着手し、その主要項目を完了した。本文は、これらのうち、緊張システム、設計手法と試設計、および実物大試験体による実証実験について報告するものである。

2. 基本構造と緊張システム

P C 圧力トンネルの基本構造は図-2に示すとおりで、円周方向に P C 鋼材を一周配置し、トンネル内側に設けた定着部で緊張作業を行なうことができる。定着部は軸方向左右交互に配置し、緊張力の均一化を図った。補強鉄筋は、軸方向と円周方向に配置される。また、緊張力の導入方法として、新しい緊張システムを完成し、容易に所要の緊張力を与えることが可能である（写真-1）。本緊張システムは、2本のP C 鋼より線を平行に円周方向に配置し、これを1組とする。これを2個の緊張用ブロックで連結し、両ブロック間にセットしたジャッキによって1組のP C 鋼より線を同時に緊張する。このため、本システムは次のような特徴をもっている。①2本のP C 鋼より線を1組とするため、確実で安定した緊張作業が行なえる。②構造体に反力を必要としない。③P C 鋼より線の偏心量が少なく、かつ定着部を大きく必要としない。本緊張システムを用いて、緊張作業を実施し、鋼材降伏点応力度の90%まで載荷したが、この間、作業性は良好

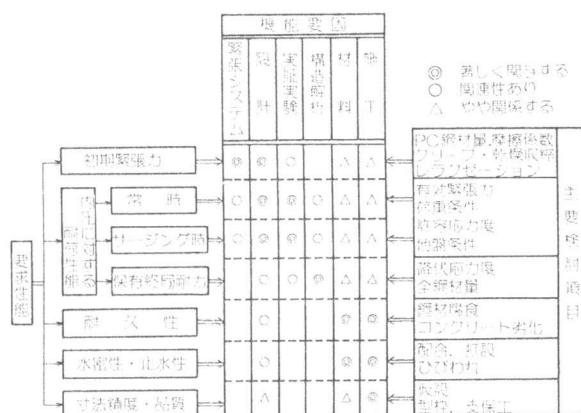


図-1 要求性能と機能要因の相関性

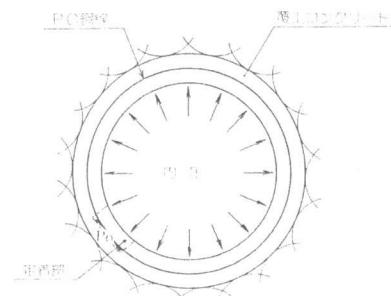


圖-2 基本構造

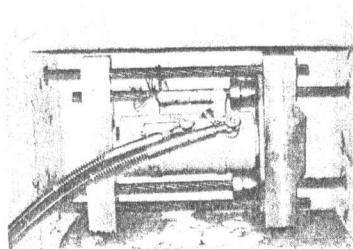


写真-1 緊張狀況

であった。また、従来から行なわれている鋼線伸びとジャッキ荷重による緊張管理を実施することができ、摩擦係数 μ が既知であれば、これまでと同様の管理手法が適用できると判断される。

3. 試 設 計

代表的な圧力トンネルを想定し表-1に示す設計条件を設定し、試設計を試みた。設計手法として以下の項目を基本とする。(1)考慮した荷重は、緊張力、自重、内圧(常時、サージング時)の組合せとし、荷重段階として、緊張直後、常時内圧時、サージング内圧時の3段階とする。(2)自重および内圧による断面力の計算では地盤反力を考慮し、これを弾性バネで表現する。(3)適用示方書として、コンクリート標準示方書、プレストレストコンクリート標準示方書(いずれも土木学会)を用い、許容応力度設計法を主とし、一部に終局強度設計法を採用する。(4)緊張力の損失として、P C鋼材の摩擦、コンクリートのクリープ、乾燥収縮、P C鋼材のレラクゼーションによるものを考慮し、適用示方書に準じて算定する。設計標準幅を72cmとし、この間にP C鋼より線を2組、4ケーブル配置する。

以上のような設計手法と設計条件のもとに設計計算を実施した結果、図-3に示す相互作用図を得た。断面力の算定では、断面欠損をもつ定着部と一般部に分けて行ない、定着部はP C鋼材の偏心による曲げモーメントが算入される。一般部は全断面有効とし、定着部の内圧作用時には第Ⅲ種P Cとし引張力の程度に応じて補強鉄筋を配置した。材料の許容応力度はいずれも適用示方書に準じた。図中では、荷重段階として緊張直後、常時内圧時、サージング内圧時の3段階によって示し、いずれも設計荷重による断面力が部材耐力の相撲曲線によって包絡されており、所要の安全性が満足されていることがわかる。

4. 実証実験

実験方法……本実験は、前述した設計概念やその手法の妥当性を確認するとともに、実物体の試験体により緊張時の挙動、内圧に対する耐荷機構を実験的に調査するものである。実験項目は、実験Ⅰ～Ⅲによって構成され、その実験概要は表-2に示すとおりである。実験Ⅰは実物大部分モデルを用い、緊張力導入時の定着部付近の挙動をることを目的とする。試験体は定着部外周側の補強鋼材として、異形鉄筋を用いたもの(補強鉄筋型)および鉄板を配置したもの(補強鉄板型)の2種類を用いた。実験Ⅱは実物大半周モデルを用い、左右各1カ所に定着部をもち、2組、4ケーブルが配置されている。これは設計上の標準断面を模擬したものである。実験手順としては数サイクルの緊張実験を行なった後、定着および定着部の充てんを完了し、試験体内側に反力ブロックなどを準備し、内圧試験をA、B、Cの3シリーズに分けて実施した。また、外周側にP C鋼材を巻き付けることによって外部拘束効果を与えたが、その本数を変える(0～28本)ことによりその拘束度を変化させた。実験Ⅲは試験体として中心角 β をも

表-1 設計条件

設計条件	
基 本	荷 重
基 本	自 重
基 本	内 圧
基 本	紧 張
基 本	地 盤
基 本	其 他
基 本	荷 重
基 本	内 圧
基 本	紧 張
基 本	地 盤
基 本	其 他

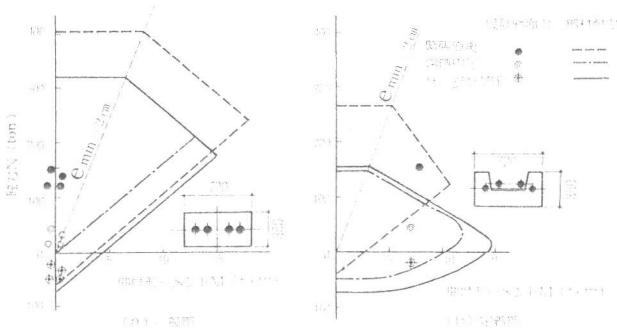


図-3 相互作用図(設計断面力と部材耐力の比較)

表-2 実験項目概要

実験名	モデル名	構造方式	荷重	実験内容・評価項目
実験Ⅰ	部分モデル 定着部付近 鉄板補強型	定着部 偏心 偏心 偏心	緊張力	定着部とその周辺部の緊張力分布特性を計測する。 定着部の挙動を観察する。
実験Ⅱ	大半周モデル	定着部 偏心 偏心 偏心	緊張力 内圧	定着部における内圧作用時の挙動を観察する。 定着部における内圧作用時の挙動を観察する。
実験Ⅲ	部分モデル 鉄板補強型	定着部 偏心 偏心 偏心	緊張力 内圧 内圧 内圧	定着部における内圧作用時の挙動を観察する。 定着部における内圧作用時の挙動を観察する。 定着部における内圧作用時の挙動を観察する。

つ円弧形のモデルを用い、試験体両端の荷重をロードセルで測定し、PC鋼より線とシースとの摩擦係数を算出した。実験結果……図-4は、実験Ⅰの結果を断面力によって表わし、計算値と比較したものである。図中の計算値は全断面有効とした弾性計算によるもので、実測値とほぼ合致し、PC鋼材偏心による曲げモーメントが概略算出できることがわかる。実験Ⅰでは補強鋼材について2種類の試験体を用いたが、本実験の範囲では大きな違いは認められなかった。図-5は実験Ⅱの緊張力導入後の軸力分布を示したもので、PC鋼材とシースとの摩擦の影響を見ることができる。すなわち両定着部間で最大の軸応力を示し、頂部にむかって減少している（図中の ϕ 、 μ については実験Ⅲに後述する）。図-6、7は内圧作用時の軸力変化をAシリーズ（CY-1～5）について示したものである。Aシリーズは最大内圧負荷を常時内圧時の設計値付近とし部材を弾性域にとどめ、主として周辺拘束度の影響を調べた。外部拘束度をRとし、次式のように定義する。

$$R = \frac{\sigma_c^* - \sigma_c}{\sigma_c^*} = \frac{N^* - N}{N^*} \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

ここで、 σ_c^* 、 N^* は無拘束時の円周方向応力および軸力、 σ_c 、 N を拘束時の円周方向応力および軸力を表わす。試設計では周辺地盤の弾性係数を5.000 kg/cmとしたが、実験モデルでは、拘束PC鋼線を22本とすると両者は力学的にほぼ等価となる。この時の拘束度は、 $R = 0.11$ であり、サイクル2、6、7（CY-2, 6, 7）で実施されている。また図中の計算値は軸対称モデルを用い、有限要素法により算出したものである。本実験では拘束度が $R = 0 \sim 0.14$ の範囲であるため各サイクルの差異が明確に表われているとは言い難いが、図-6、7では計算値と実測値はほぼ一致し、拘束度の違いが概略認められた。本シリーズで実施した拘束度を地盤の弾性係数に換算すると、 $E = 0 \sim 6.500 \text{ kg/cm}$ となる。このような範囲での弹性挙動を見ると（図-7）、軸力Nに大きな違いではなく、20%以内であることがわかった。Bシリーズ（CY-6, 7）では設計値と同等の拘束状態で、内圧を $P = 9 \text{ kg/cm}^2$ まで負荷したが、ほとんど直線的で安定した挙動が観察された。図-8は緊張および内圧作用時の断面の応力およびひずみの変化を示したものである。実測値は計算値と大略一致し、弾性計算により充分算出できることがわかる。さらにCシリーズ（CY-8）では周辺拘束を

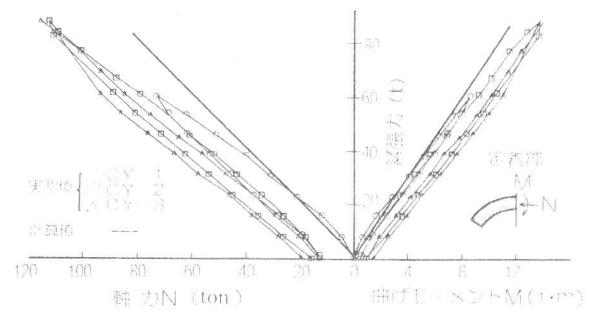


図-4 緊張力による定着部の断面力（実験Ⅰ. 鉄板補強型）

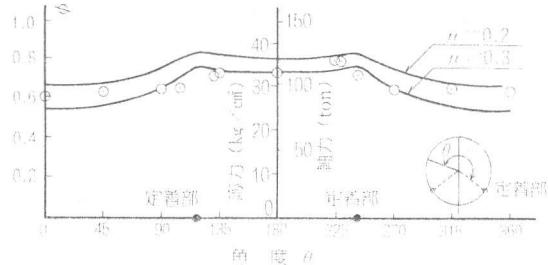


図-5 緊張力分布（実験Ⅱ. 緊張定着時）

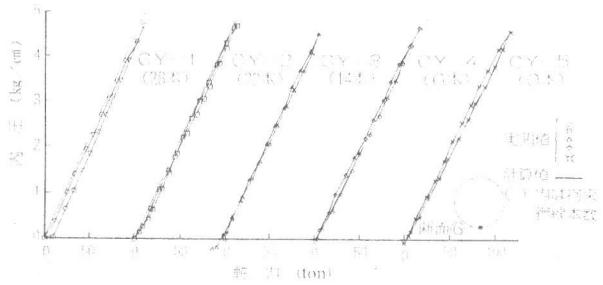


図-6 内圧と軸力の関係（実験Ⅱ. Aシリーズ）

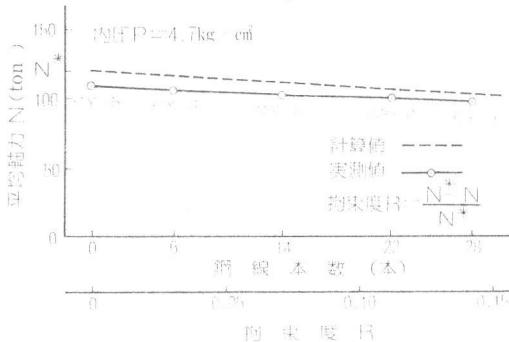


図-7 内圧による軸力と拘束度の関係（実験Ⅱ. Aシリーズ）

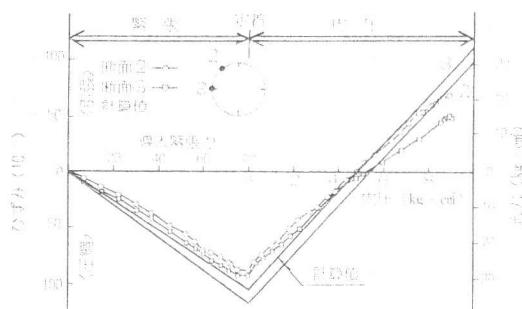


図-8 応力とひずみの変化（実験Ⅱ. CY-7）

解除し($R = 0$)、負荷を続けたが、載荷装置の負荷能力が限界となり、試験体には耐力が残っていたものの $P = 10.7 \text{ kg/cm}^2$ で実験Ⅱを終了した。このように実験Ⅰ、Ⅱでは、設計最大圧 $P = 8.5 \text{ kg/cm}^2$ を越える耐荷力を実証するとともに、従来の弾性計算により緊張時、内圧作用時とも充分実測値を予測できることが確認された。

次に実験Ⅲから得られた摩擦係数を図-9に、また、この値を用いてシミュレーションした結果を図-10に示す。

ここで緊張端の導入力(ジャッキ荷重) P_0 と導入直後の各点の緊張力 P_t を用いて、緊張力の有効率 ϕ を次式のように定義する。

$$\phi = P_t / P_0 \quad \dots \dots \dots (2)$$

実験Ⅲでは、 P_0 が緊張側の荷重(ジャッキ荷重) P_t が他端の固定側の荷重となる。有効率 ϕ は一般に次式で与えられる。¹⁾

$$\phi = e^{-(\mu\alpha + \lambda x)} \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 μ は曲線配置による角変化1ラジアンあたりの摩擦係数、 λ は単位長さあたりの摩擦係数を示し、 α 、 x は定着部中心からの角度および距離である。本実験では α を一定とし、 μ を実験的に算出した。図-9からわかるように、試験体の中心角に関係なくほぼ同様の μ が測定され、減摩剤塗布による効果も明瞭に認められた。これらの平均値をとると、減摩剤を用いた場合 $\bar{\mu} = 0.223$ 、未使用の時に $\bar{\mu} = 0.346$ となり、いずれも変動係数は約10%であった。また、実験Ⅱにおいても減摩剤を使用したが、導入時の緊張力分布(図-5)を見ると $\mu = 0.2 \sim 0.3$ であることが判断される。さらに、これらの実測結果を用いて緊張力の有効率 ϕ を試設計の設計条件のもとに試算し、図-10に示した。この結果 μ のはらつきを考慮すると $\phi = 0.6 \sim 0.8$ となることが予想され、設計時には大きな影響を与える。今回の試設計では $\mu = 0.19$ を用いたが、実験Ⅲの結果から考えるとやや小さく、修正が必要である。

5.まとめ

P C 圧力トンネルの開発プロセスのうち、その主要項目である緊張システム、試設計および実証実験を完了し、本文述べたように充分な成果を得たと言える。これらのことからP C 圧力トンネルの有利性が確認され、実用化の目処がついたと考えられる。さらに、施工性、経済性などの検討を加え、実施設計および実構造物への適用を行ないたいと考えている。最後に、P C 圧力トンネルの開発にあたっては猪股俊司博士および極東鋼弦コンクリート振興株式会社の関係者の皆様に有益な御指導をいただき、ここに深く感謝いたします。

<参考文献>

- 1) 土木学会：プレストレストコンクリート標準示方書 1979年
- 2) P. Matt, F. Thurnherr, I. Uherkovich : Prestressed concrete pressure tunnels, Water Power & Dam Construction, May 1978, PP. 23~31
- 3) David T. Swanson : PRESTRESSED CONCRETE PRESSURE TUNNELS, RETC 1981 PROCEEDINGS VOLUME I, PP. 519~532
- 4) 吉川弘道：鉄筋コンクリート構造物の終局強度設計法、間組研究年報、1979年、PP. 105~118

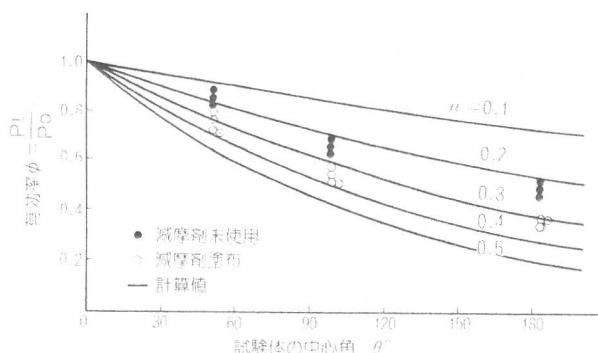


図-9 摩擦係数試験結果

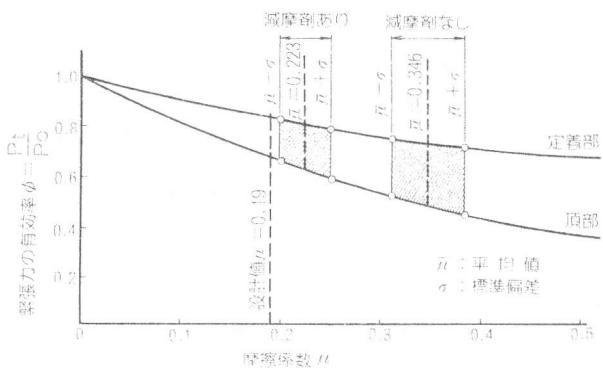


図-10 摩擦係数と緊張力有効率の関係

図-9からわかるように、試験体の中心角に関係なくほぼ同様の μ が測定され、減摩剤塗布による効果も明瞭に認められた。これらの平均値をとると、減摩剤を用いた場合 $\bar{\mu} = 0.223$ 、未使用の時に $\bar{\mu} = 0.346$ となり、いずれも変動係数は約10%であった。また、実験Ⅱにおいても減摩剤を使用したが、導入時の緊張力分布(図-5)を見ると $\mu = 0.2 \sim 0.3$ であることが判断される。さらに、これらの実測結果を用いて緊張力の有効率 ϕ を試設計の設計条件のもとに試算し、図-10に示した。この結果 μ のはらつきを考慮すると $\phi = 0.6 \sim 0.8$ となることが予想され、設計時には大きな影響を与える。今回の試設計では $\mu = 0.19$ を用いたが、実験Ⅲの結果から考えるとやや小さく、修正が必要である。

以上の結果から、P C 圧力トンネルの開発プロセスにおける緊張システムの設計、試設計、実証実験が順調に進み、最終的に実用化の目処がついたと言える。

最後に、猪股俊司博士および極東鋼弦コンクリート振興株式会社の関係者の皆様に有益な御指導をいただき、ここに深く感謝いたします。