

論文 プレストレスを導入した PIC タイドアーチの力学特性

松田 浩^{*1} 鶴田 健^{*2} 崎山 毅^{*3} 原田哲夫^{*1}

要旨：ポリマー含浸コンクリート製アーチと緊張材（P C 鋼棒など）からなる複合タイドアーチを製作し、集中荷重、分布荷重による載荷試験を行い、その弾性および破壊時の力学的特性について検討した。また、タイを緊張してプレストレスを導入した場合についても同様の実験を行い、プレストレスの影響などについて検討を行った。高強度コンクリートからなる埋設型枠材をアーチ構造とすると、軸圧縮力が卓越し、曲げによる引張応力が小さくなり、ひび割れ防止に対して有効となることなどがわかった。

キーワード：複合タイドアーチ構造、高性能埋設型枠材、プレストレス

1. まえがき

近年、コンクリート工事のプレキャスト化、ひび割れ防止、高耐食性化、コンクリート被覆・補修材料などが注目され[1]、ポリマーコンクリートパネルなど[2][3]を高耐久性埋設型枠として用いる新材料・新工法が開発されてきている。ポリマーコンクリートは、遮塩・遮水性、耐凍害性、耐摩耗性、化学抵抗性に優れており、さらに、表面を粗面処理すればコンクリート構造物の有効断面として考慮できるなどの特長を有しているが、引張強度の大幅な増大はみられず、コンクリート系材料特有の曲げひび割れが生じ易い材料であることには変わりがない。したがって、高強度コンクリート系材料においては材料強度の面からだけではなく、構造的な観点からも高強度材料の高付加価値化を追究すべき余地が残されているものと考えられる。

省力・迅速施工法を目的として開発された既往の工法としてP C 床版を利用した埋設型枠工法などがある。P C 床版埋設型枠工法はプレストレスを導入したP C 版を用いることにより、現場打コンクリート打設時にはP C 床版下縁のひび割れ発生を防止するとともに、現場打コンクリート硬化後には三種P C 部材の有効断面として設計できるなど、応力制御機能を合わせもっている[4]。しかし、型枠スパンが長くなると、コンクリート打設時の重量が大きくなり支保工が必要になったり、作業用機械などの重量制限が問題になることも考えられる。

筆者らはポリマーコンクリートなどの高強度圧縮特性を有するコンクリート系材料の有効活用の一つとして、ポリマー含浸コンクリート（以下P I C）製のアーチを製作し、その力学的特性について実験的な研究を行ってきた[5]。アーチ構造は一般に曲率中心方向の分布荷重作用下では軸圧縮力状態となり、荷重作用による曲げ引張りが減少するから、コンクリートのように引張りに弱い材料のひび割れ防止に対して有利になる。また、アーチ構造では極く小さな支支点の水平変位によってその力学的特性が著しく変化するので、これに着目した構造処理をする必要がある。その処理方法として、タイドアーチ構造として水平推力をタイに受け持たせる構造を用いた。アーチ構造を《アーチ+タイ》からなる自旋式のタイドアーチとすると、支持力負担のための基礎

* 1 長崎大学助教授 工学部構造工学科、工博（正会員）

* 2 小沢コンクリート工業(株)技術研究所、工修（正会員）

* 3 長崎大学教授 工学部構造工学科、工博（非会員）

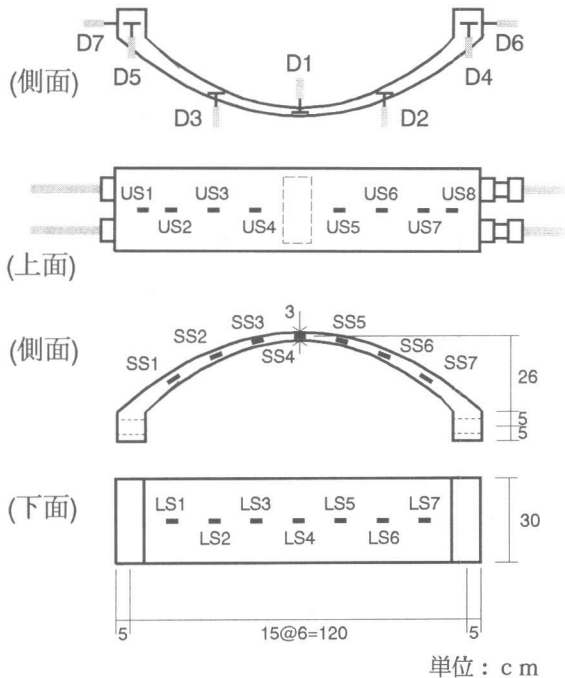
構造も軽減できる。さらに、タイを緊張することによりアーチリブには負曲げモーメントが作用することになり、応力制御機構としてのプレストレス、および、形態抵抗機構としてのアーチ構造の両面の長所が発揮できるものと考えられる。

本論文は、タイ材にPC鋼棒、PC鋼より線、CFRPより線を用い、また、これらのタイ材を緊張することによりプレストレスを導入した場合に対して、集中荷重、分布荷重（半載荷、満載荷）による載荷試験を行い、弾性および破壊時挙動特性等について、これまで行ってきた実験結果も併せてとりまとめるとともに、プレストレスの影響などについて検討したものである。

2. 供試体および実験方法

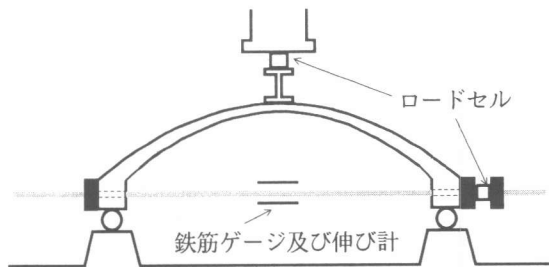
図－1に示すように、スパン120cm、ライズ26cm、断面幅30cm、中央部の厚さ3cmおよび端部厚さ6cmの変断面放物線アーチ部材を作製した。水平推力の処理形式としては、緊張材を用いアウトケーブル形式で受けもたせるタイドアーチ構造とした。表－1に、PIC、および、緊張材として用いた鋼棒、鋼より線、CFRPより線の物性値を示す。緊張材の伸び剛性が非常に大きい場合は、2ヒンジアーチに近い挙動を示すことを考慮して断面積が大きい鋼棒を用いた。CFRPより線の定着には、ハイテク繊維材の定着法として、現在、研究開発が進められている方法[6]を用いた。

集中荷重載荷はアーチ中央部に荷重計を介して200tf万能試験機で荷重制御により行った。また、アーチでは最も不利な状態となる分布荷重半載荷も行った。載荷はセメント袋及び砂袋を用いた。分布荷重載荷では荷重制限上破壊までには至らせてない。支承部は両端とも回転および移動を可能とし軸方向の拘束の影響をなくした。タイ材の緊張によるプレストレスの導入は、定着ナットの手締めにより行った。実験に際しては、供試体のたわみ、水平反力、PICのひずみなどを計測した。供試体に設置したひずみゲージおよび変位計等の設置状況は図－1に示すとおりである。



表－1 PICおよび緊張材の物性値

P I C	圧縮強度	1500	kgf/cm ²
	曲げ強度	240	kgf/cm ²
	引張強度	120	kgf/cm ²
	弾性係数	3.5×10 ⁵	kgf/cm ²
緊 張 材	項目	断面積	弾性係数
	種類	mm ²	kgf/cm ²
	PC鋼棒	415.5	2.06×10 ⁶
	PC鋼より線	51.6	2.01×10 ⁶
	CFRPより線	76.0	1.44×10 ⁶



図－1 供試体形状および載荷装置

3. 実験結果および考察

緊張材として、P C 鋼棒、P C 鋼より線、および、C F R P より線を用いた供試体の載荷実験結果について以下に示す。以下の図では P C 鋼棒を丸印、P C 鋼より線を四角印、C F R P より線を三角印で表し、白印、および、黒印は、それぞれ、プレストレスなし、および、プレストレス有りの場合を示す。

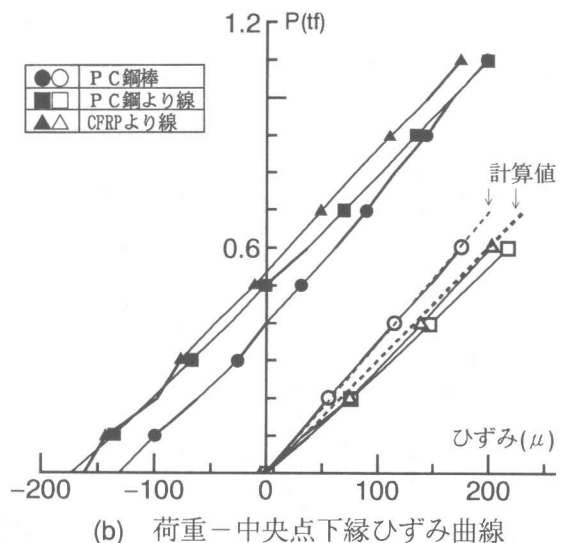
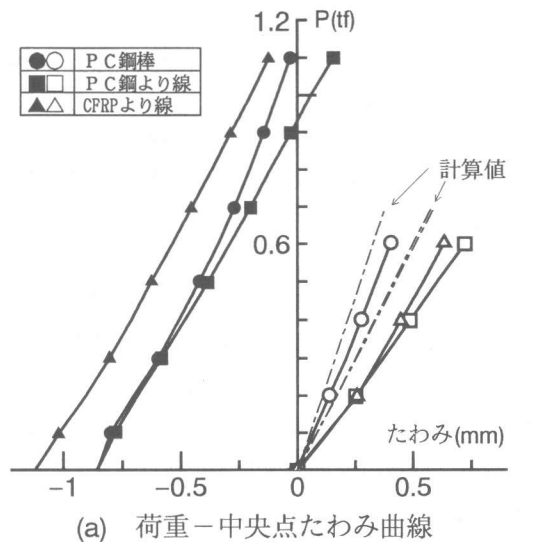
3. 1 ひび割れ発生前の挙動

(1) 集中荷重

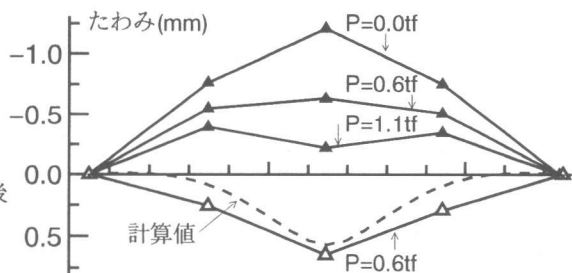
図 2 (a) および (b) は、中央点集中荷重を受ける場合の荷重－中央点たわみ曲線および荷重－中央点下縁ひずみ曲線である。点線は緊張力導入前の計算結果であり、実験結果よりやや大きな値となっている。プレストレスを導入しない場合、荷重たわみ曲線は緊張材の種類により剛性が明確に異なっており、当然のことながら、弾性係数と断面積の大きな P C 鋼棒を用いた場合が最も剛となっている。一方、荷重－下縁ひずみ曲線では、緊張材の種類による違いはたわみの場合ほどみられない。本実験でのプレストレスは、アーチ部材上面にひび割れが発生しない程度（中央点下縁ひずみ約 150μ ）の緊張力を導入した。同一の下縁ひずみ量に対する初期たわみは、緊張材の種類に拘らず同じ量であるべきであるが、この程度の緊張力はナットの手締めで導入したこと、緊張力としては非常に小さい量であること、さらには 2 本の緊張力を同じ量に制御することが困難だったことなどの理由により、誤差が生じたものと考えられる。

また、緊張力導入前後の載荷試験結果を比べると、荷重－たわみ曲線の傾きがごくわずかであるが増大している。図 3 は C F R P より線を用いた供試体における緊張力導入前後（ $\triangle$ ：緊張力導入前、 $\blacktriangle$ ：緊張力導入後）のたわみ分布を示したものであるが、この図からもたわみ量の減少が窺える。同一スパン長のアーチにおいてアーチのライズ高を大きくすると、同一荷重に対する変形量は小さくなる。

のように、本実験では構造系自体には剛性の変化はないにも拘らず、たわみ量が小さくなるのは、



図－2 集中荷重載荷試験結果



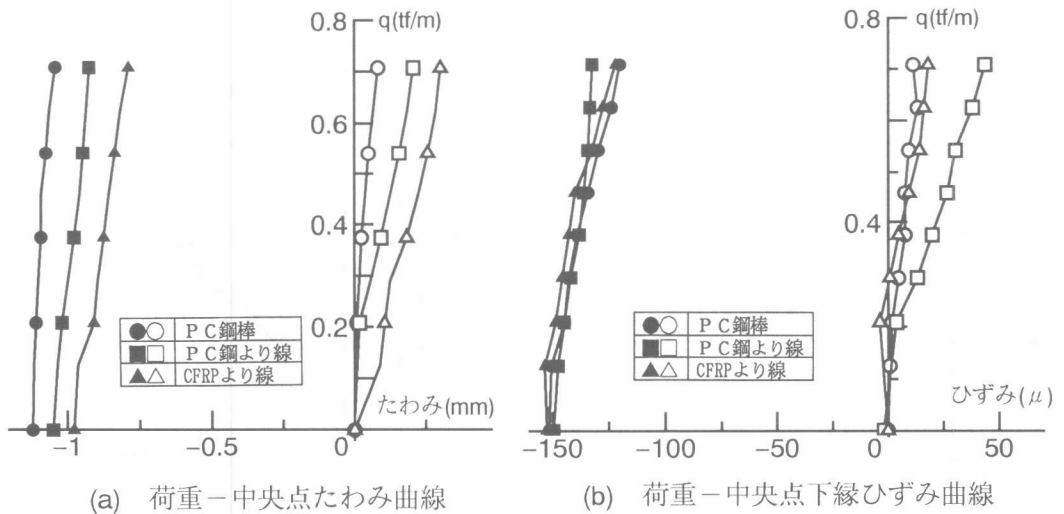
図－3 たわみ分布（集中荷重）

アーチ構造特有の形態抵抗機構によるもので、プレストレスによりアーチのライズ高がわずかに増大し、その結果、鉛直荷重に対するたわみが減少したものと考えられる。

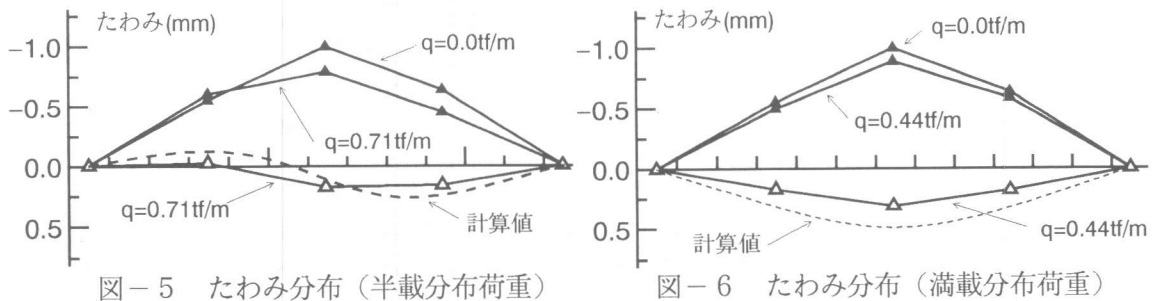
(2) 分布荷重

図4 (a) および (b) は、半載荷分布荷重を受ける場合の荷重－中央点たわみ曲線および荷重－中央点下縁ひずみ曲線である。緊張材の影響は集中荷重載荷の場合と同様に、緊張力導入前後の載荷試験においてたわみ量がごくわずかであるが減少している。分布荷重は最大 0.7tf/m 程度までしか載荷できなかったが、分布荷重によるたわみおよびひずみの増加量はわずかであり、アーチ特有の分布荷重に対する有効性が示されている。満載荷分布荷重に対しても同様な実験を行ったが、その結果は半載荷の場合と同じような結果が得られた。

図5 および図6 は、各々、緊張力導入前後の半載および満載荷重によるたわみ分布を示したものである。半載荷の場合はアーチに特徴的な逆対称モードの変形が進行していることがわかる。このような逆対称変形モードが進行すると分岐座屈などの座屈安定性が重要になってくるが、コンクリートには鋼のような変形性能はなく、また、コンクリート自体が圧縮には強く引張りには弱いという材料特性を示すため、コンクリートアーチは鋼アーチとは異なった座屈特性を示すことが考えられる。本実験では小さな分布荷重強度しか載荷してないので、今後、半載荷の荷重条件下でコンクリート系アーチ構造の破壊実験を行い、定量的に耐荷力を評価する必要がある。



図－4 半載荷荷重載荷試験結果



図－5 たわみ分布 (半載分布荷重)

図－6 たわみ分布 (満載分布荷重)

3. 2 破壊挙動

図-7は、緊張材にP C鋼棒、P C鋼より線、および、C F R Pより線を用いた場合の中央点集中荷重載荷による破壊試験における荷重と中央点のたわみの関係を示したものである。同図中において、実線は実験で得られた結果であり、点線は線形弾性計算結果である。計算結果と実験結果と比較すると、ほぼ一致していることがわかる。

図-7に示すように、P C鋼棒の場合には $P=2.9\text{tf}$ で、また、P C鋼およびC F R Pより線の場合には $P=2.4\text{tf}$ で荷重が低下し、その荷重値のときアーチスパン中央部下縁にひび割れが発生し、急激に断面中央部付近までひび割れが進行した。しかしながら、中央部下縁にひび割れが発生しても、上縁部のP I Cは 1500kgf/cm^2 の圧縮強度を有するので耐力を維持できる。また、たとえ中央部上・下縁にひび割れが発生していても（塑性ヒンジ的な構造モデル）、まだ2ヒンジアーチと3ヒンジアーチの中間程度の構造系として安定性を維持できる。ひび割れ発生時の計算値は、中立軸より下縁側の $1/3$ の断面の応力がP I Cの曲げ引張強度（ 240kgf/cm^2 ）に達したときの荷重値を、それ以上の荷重に対する構造系の限界荷重値とした。いずれの緊張材を用いた実験でも、ひび割れ発生荷重はほぼ一致している。

スパン中央部下縁にひび割れが発生した後の構造系の荷重とたわみの関係（実験結果）もほぼ直線を示している。限界荷重を超えたひび割れ発生後の点線部分（計算値）は、P C鋼棒では断面の $2/3$ を有効とした場合の計算結果で、P C鋼より線、C F R Pより線では、緊張材の伸び量がP C鋼棒の場合よりも大きくひび割れ幅が大きくなり有効断面も小さくなると考えられるので、 $1/3$ だけを有効とした計算結果である。実験結果と比較すると、P C鋼棒ではよく一致しているが、P C鋼より線、C F R Pより線の場合はそれほど一致していないが、ひびわれ後の直線の傾きは同程度となっている。なお、P C鋼棒の場合と同様に断面の $2/3$ を有効とした計算値は、ひび割れ発生後の直線の傾きがかなり異なる。したがって、アーチのスパン中央部下縁にひび割れが発生した後の構造系は、緊張材の伸び量によって有効断面が変動するような挙動を示すものと考えられる。

さらに載荷を続けると、P C鋼棒および鋼より線の場合 $P=3.8\text{tf}$ で、C F R Pより線の場合 $P=4.3\text{tf}$ で最大荷重に達した。このときアーチスパンの $1/4$ 付近（左右いずれか1カ所）の上縁にひび割れが発生し破壊に至った。供試体の破壊形状の模式図を図-8に示す。

ポリマーコンクリートが有する高強度特性をアーチ系の構造部材により適確に反映させ、実構

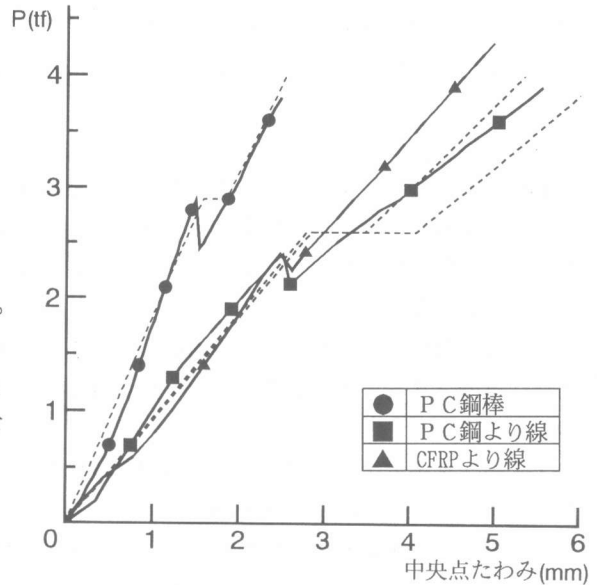


図-7 破壊載荷試験結果（集中荷重）

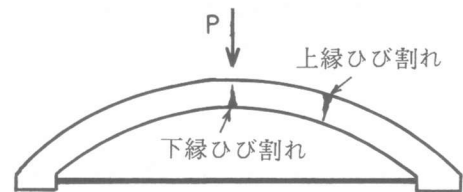


図-8 破壊形状模式図

造に適用するためには、各種荷重に対するコンクリート系タイドアーチ構造の耐荷力特性の定量化のための実験、および、線形弾性解析にとどまらず、ひび割れ発生から崩壊に至るまでに変化する構造系の合理的なモデル化と定量化のための非線形解析を充実すべきである。

4. まとめ

本研究で得られた結果は、以下のようにまとめられる。

(1) 本実験で用いたような複合タイドアーチにプレストレスを導入することにより、通常の P C のように応力を制御できるばかりでなく、鉛直荷重に対する変形量をわずかではあるが減少させることができる。

(2) 分布荷重に対する変形量の増加は小さく、アーチ構造特有の軸圧縮力が卓越し、ひび割れ防止に有効となる。埋設型枠のスパン長が長くなるような場合には、このようなアーチ構造が有効である。

(3) 複合タイドアーチ構造は、応力制御機構としてのプレストレス、および、形態抵抗機構としてのアーチ構造の両面の長所が発揮できる。

(4) 本研究で用いたような複合タイドアーチ構造は、まず、アーチクラウン下面にひび割れが発生し、その後、アーチスパン $1/4$ 付近上面にひび割れが発生し破壊に至る挙動を示す。

(5) 高強度コンクリートからなるアーチの実用化のためには、耐荷力の定量化のための実験、および、ひび割れ発生から崩壊に至るまでに変化する構造系のモデル化と定量化のための非線形解析を充実すべきである。

謝 辞

本研究は、文部省科学研究費・奨励研究(A)、日本証券財団、および、トステム建材産業振興財団の補助の一部で行われたことを付記し、ここに謝意を表します。また、実験およびデータ整理は長崎大学工学部構造工学科の小林康晃君、相場健一君、安東祐樹君をはじめ当研究室の学生に手伝って頂きました。ここに感謝申し上げます。最後に、本論文に対して貴重なご意見を戴いた査読者に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 小林茂敏：コンクリート系新材料の開発について－1990年代に期待される建設材料の展望－、平成2年度土木研究所講演会講演集、建設省土木研究所、pp. 57-70、1991. 1
- [2] 内藤隆史・松岡康訓・新藤竹文・小沢満三・鶴田健：ポリマー含浸コンクリートによる高耐久性埋設型枠の開発、土木学会論文集、No. 435/VI-15、pp. 21-23、1991
- [3] 藤田浩二、出光隆、山崎竹博、渡辺明：ポリマーコンクリート埋設型枠で被覆した R C 供試体の海岸暴露試験、土木学会西部支部研究発表会、pp. 826-827、1992. 3
- [4] 渡辺明：P C 板埋設型枠の利用による新省力・迅速施工法に関する研究、文部省科学研究費一般研究(B)研究成果報告書、1983. 3
- [5] 松田浩・鶴田健・崎山毅・原田哲夫：高耐久性 P I C 版を用いたアーチの構造特性に関する基礎的研究、構造工学論文集、Vol. 39A、pp. 97-104、1993. 3
- [6] 原田哲夫・出光隆・渡辺明・高山俊一：静的破砕剤を用いた F R P 緊張材の定着方法、プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、pp. 251-256、1990