

論文 少数主桁構造に対応する外ケーブル式アーチ床版に関する実験研究

木田 哲量^{*1}・阿部 忠^{*2}・加藤 清志^{*3}・福島 慶太^{*4}

要旨：本研究は、長支間に対応できるタイドアーチ構造とした外ケーブル式アーチ床版の開発を行ない、同床版をモデルとした外ケーブル式アーチはり供試体を用いた基礎実験である。その結果、外ケーブルに鉄筋 D16 を用いた場合の耐力が 60.0kN、PC 鋼棒 U19 の場合が 74.4 kN と PC 鋼棒を用いた方の耐力が大きいことが分かった。また、外ケーブルの PC 鋼棒に引張力を作用させたことによって、曲げ耐力は大幅に向上した。したがって、同一寸法を有する RC はりに比して、外ケーブル式アーチ構造は耐力増加と軽量化が図られることから実用的にも評価できる構造形式である。

キーワード：外ケーブル式アーチはり、静荷重、走行荷重、耐力、

1. はじめに

近年、建設事業費の縮減により、鋼道路橋の構造形態の見直し、合理化、省力化および現場施工の省力化が図られている。たとえば、鋼桁橋梁は多数主桁構造から少数主桁構造へと移行されている。これに対応するための長支間を有する耐久性の高い床版が要求される。これらのことから各研究機関および企業では、長支間に対応できる新床版の開発が行われている^{1), 2), 3), 4)}。このような背景から筆者らも、少数主桁構造の長支間に対応可能なタイドアーチ構造とした外ケーブル式アーチ床版の開発を行なった⁵⁾。そこで本研究では、外ケーブル式アーチ床版をモデルとした外ケーブル式アーチはりの供試体を用いて静荷重実験、走行荷重実験を行い、その実験曲げ耐力および破壊メカニズムより、外ケーブル式アーチ床版構造の実用性を評価した。

2. 外ケーブル式アーチ床版構造の特徴

本提案外ケーブル式アーチ床版の概要を図-1に示す。

アーチ構造とした合成床版には、(株)東京鐵

骨橋梁、大阪大学で考案開発^{3), 4)}された「アーチデッキスラブ」がある。この床版は、アーチ底面に鋼板を用いて圧縮力を確保し、水平反力は両主桁に取付けた横締め鋼材とスタッドジベルで確保する構造である。そして、主桁と合成床版はスタッドジベルで連結した合成桁として解析している。これに対して「外ケーブル式アーチ床版」は、タイドアーチ構造とし、床版の底面をアーチ構造とすることで、圧縮力をコンクリートで確保する。そして、水平反力は外ケーブルで確保することで、アーチ支点到及ぼす水平力を吸収できる構造となる。また、外ケーブル式とすることで、主桁のスタッドジベルに大きな水平力は作用しない構造となる。

3. 供試体の材料および寸法

供試体には、外ケーブル式アーチ床版の実用性を評価することから、外ケーブル式アーチは

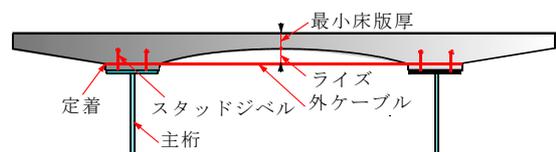


図-1 外ケーブル式アーチ床版の概念図

*1 日本大学 生産工学部土木工学科教授 工博(正会員)
 *2 日本大学 生産工学部土木工学科助教授(正会員)
 *3 日本大学 生産工学部土木工学科教授 工博(工学)
 *4 日本大学大学院生産工学研究科

りと同一支間を有する RC はりの2種類とし、同一実験を行って耐力を評価する。

3.1 使用材料

RC はり供試体の使用材料は、コンクリートには、普通ポルトランドセメントと最大寸法 20mm の粗骨材を使用し、設計基準強度は 30N/mm² とした。鉄筋は SD295A, D16 を使用した。RC はりの材料特性値を表-1(1)に示す。また、外ケーブル式アーチはり（以降、アーチはりと呼ぶ）供試体のコンクリートには、普通ポルトランドセメントと最大寸法 20mm の粗骨材を使用し、設計基準強度を 50N/mm² とした。鉄筋は SD295A, D10 を使用し、外ケーブルは、異形鉄筋 SD295A, D16 および PC 鋼棒 C 種 1号 U19 を用いた。アーチはりの材料特性値を表-1(2)に示す。なお、表-1に示すコンクリートの圧縮強度は実験時の結果である。また、鉄筋・PC 鋼棒はミルシートの結果である。

3.2 RC はりおよびアーチはり供試体の寸法

(1) RC はり

表-1 材料特性値

(1) RCはり

コンクリート	鉄筋 (SD295A, D16)		
圧縮強度 N/mm ²	降伏点 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	ヤング係数 kN/mm ²
38.5	358	578	200

(2) 外ケーブル式アーチ・スラブ

コンクリート	鉄筋 (SD295A, D10)		
圧縮強度 N/mm ²	降伏点 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	ヤング係数 kN/mm ²
74.3	368	568	196

外ケーブル材料	降伏点 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	ヤング係数 kN/mm ²
鉄筋SD295A, D16	368	568	196
PC鋼棒C種1号U19	1178	1279	200

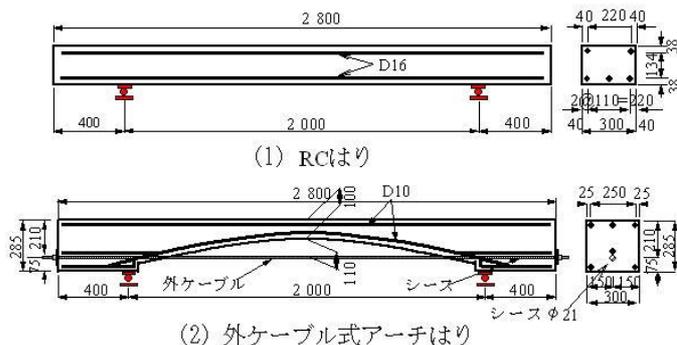


図-2 供試体寸法および鉄筋・PCケーブルの配置

RC はりは、アーチはりの支間および幅と同一寸法とする。そこで、RC はりの寸法は道示 II に規定する支間 2.0m の RC 床版を設計し、厚さ、および所要鉄筋量を配置した。すなわち、支間長は 200cm、幅 30cm、高さ 21cm とし、鉄筋は引張側に 3 本 ($A_s = 7.95\text{cm}^2$)、圧縮側に 2 本 ($A_s' = 5.96\text{cm}^2$) 配置し、有効高さを 17.2cm とした。RC はりの寸法および鉄筋の配置を図-2(1)に示す。なお、供試体は静荷重実験および走行荷重実験において各 3 体を用いる。

(2) アーチはり

供試体は支間 200cm で、アーチのクラウンの厚さを 10cm (RC はり高さ h の約 1/2) とする。また、アーチのライズは道路橋 RC 床版の規定 (道路橋 RC 床版は支持桁上でハンチを設け、その傾斜は 1:3 とする) からハンチの高さ程度を考慮して 11cm とする。また、支点部の寸法は、外ケーブルの定着点に水平反力を受ける支圧板 (10cm×10cm) およびシースとのかぶり (7.5cm) を考慮して厚さ 28.5cm とした。鉄筋は D10 を上縁に 3 本 ($A_s = 2.14\text{cm}^2$)、下縁部に 3 本 ($A_s = 2.14\text{cm}^2$) 配置した。ここで、供試体寸法および鉄筋・外ケーブルの配置を図-2(2)に示す。

4. 実験方法

道路橋に作用する大型自動車の荷重を想定した輪荷重を考慮した荷重で実験は1) 静荷重実験と2) 走行荷重実験を行う。各実験方法を図-3に示す。

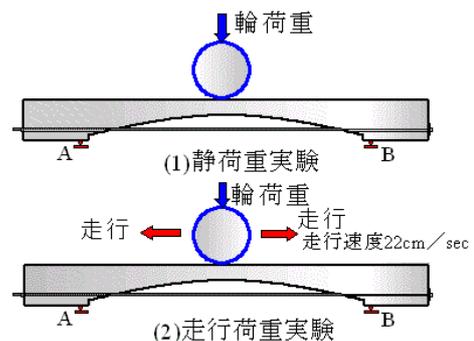


図-3 実験方法

4.1 静荷重実験（試験体；S）

静荷重実験は図-3(1)に示すように、最大曲げ応力が生じる支間中央に車輪を停止した状態での曲げ実験である。実験では、荷重を 5.0kN ずつ増加させて最大荷重までの載荷と 0kN までの除荷を繰り返す漸増繰り返し載荷とした。

なお、アーチはりの場合は、外ケーブルに鉄筋 D16 を用いた場合と PC 鋼棒 U19 を用いた場合、および外ケーブルに初期引張力 0kN, 10kN, 20 を与えた場合の実験を行って比較検討する。

4.2 走行荷重実験（試験体；R）

走行荷重実験は図-3(2)に示すように、輪荷重が供試体上を走行した後に支間中央で荷重を停止させた状態での曲げ実験である。走行方法は、車輪を載荷させて支間中央を起点に、左右両支点方向に各 100cm, 全長 400cm を 18sec(平均走行速度 22cm/s)で走行させる。荷重は 1 走行ごとに 5.0kN ずつ増加させる。この荷重増加と走行をはりが破壊するまで繰り返す。なお、計測は一往復走行後に元の支間中央に車輪を停止して、たわみ・ひずみを計測する。

5. 実験耐力および破壊モード

本実験における RC はりおよびアーチはりの最大耐力および破壊モードを表-2に示す。

5.1 RC はり

RC はりにおける静荷重の場合の最大曲げ耐力の平均値は 82.1kN, 走行荷重の場合は 68.7kN であり、その耐力比は 0.84 となり、走行荷重が作用することにより 16%耐力が低下した。

5.2 アーチはり

アーチはりにおける静荷重の場合の最大曲げ耐力は、外ケーブルに鉄筋 D16 を用いた供試体 S-RC-0 は 60.0kN, 外ケーブルに PC 鋼棒 U19 を用いた供試体 S-PC-0 は 74.4kN であり、外ケーブルに PC 鋼棒を用いた場合の方が 1.24 倍の耐力向上が見られた。次に、PC 鋼棒に初期引張力を 10kN 作用させた供試体 S-PC-10 の最大曲げ耐力は 85.0kN, 初期引張力 20kN 作用させた供試体 S-PC-20 は 94.8kN であり、引張力 0kN の

表-2 実験最大耐力および破壊モード

(1) RC はり供試体

供試体	実験耐力 (kN)	平均値 (kN)	耐力比 R/S	破壊モード
S-1	80.9	82.1	-	曲げ破壊
S-2	85.1			曲げ破壊
S-3	80.4			曲げ破壊
R-1	68.9	68.7	0.84	曲げ破壊
R-2	69.6			曲げ破壊
R-3	67.5			曲げ破壊

S：静荷重実験，R：走行荷重実験，1：供試体番号

(2) アーチはり供試体

供試体	実験耐力 (kN)	最大水平力(kN)	破壊モード
S-RC-0	60.0	97.1	曲げ破壊
S-PC-0	74.4	130.7	曲げ破壊
S-PC-10	85.0	152.4	曲げ破壊
S-PC-20	94.8	183.3	曲げ破壊
R-PC-0	74.9	141.8	曲げ破壊
R-PC-10	75.4	149.7	曲げ破壊

実験方法 (S：静荷重実験，R：走行荷重実験)

外ケーブル (RC：SD295A-D16, PC：C種1号U19)

引張力 (0：0kN, 10：10kN, 20：20kN)

供試体 S-PC-0 の耐力に比して、それぞれ 1.14 倍, 1.27 倍となり、引張力に比例して耐力が向上した。

次に、静荷重の最大曲げ耐力と走行荷重の最大曲げ耐力を比較すると、供試体 S-PC-0 では 74.4kN, R-PC-0 では 74.9kN と、ほぼ同等な耐力が得られた。

5.3 RC はりとアーチはりの比較

静荷重が作用した場合のアーチはりと RC はりの曲げ耐力を比較する。外ケーブルに鉄筋 D16 を用いた場合は、RC はりの曲げ耐力の 73%, 外ケーブルに PC 鋼棒を用いた場合は 91%である。しかし、PC 鋼棒に初期引張力 10kN 作用させた場合は、RC はりと同等な曲げ耐力が得られた。また、初期引張力 20kN 作用させた場合は、RC はりに対して 1.15 倍の耐力となった。次に、走行荷重が作用した場合の平均曲げ耐力は、RC はりの場合は 68.7kN, アーチはりの場合は 75.2kN であり、アーチはりが約 10%上まわった。したがって、RC はりの厚さ 21cm に対して、アーチはりはクラウン部の厚さが 10cm であるが、外ケーブルに初期引張力を与えることで RC はりと同等以上の耐力が得られた。

6. 破壊状況

アーチはりのひび割れ状況の一例を図-4に示す。

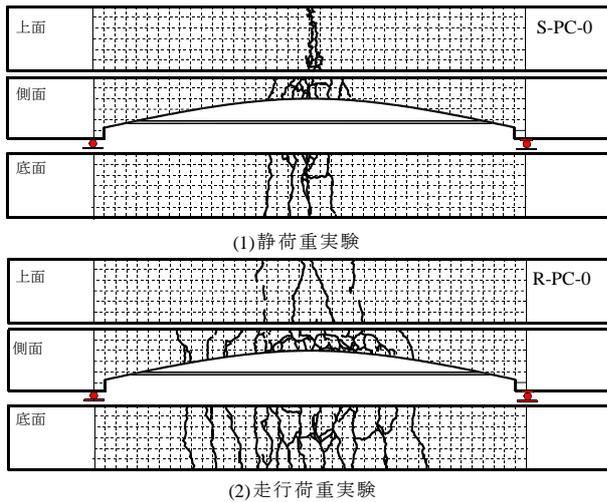


図-4 ひび割れ状況

静荷重の場合のひび割れ状況は図-4(1)に示すように、載荷位置に集中し、支間中央では、ひび割れが貫通している。なお、静荷重の場合の供試体 S-RC-0, S-PC-10, 20 も類似したひび割れ状況を示している。

次に、走行荷重が作用した場合は図-4(2)に示すように、はり構造の場合の曲げ領域（せん断スパン比 $a/d = 3.0$ 以上）に集中しているが、せん断スパン比 ($a/d = 3.0$) 以内の領域にはひび割れ損傷を受けていない。走行荷重が作用した場合は供試体 R-PC-0, 10 とともに、同様なひび割れ状況を示している。

7. 荷重とたわみ・荷重とひずみの関係

本実験における静荷重の場合の荷重とたわみの関係を図-5, 走行荷重の場合を図-6, 静荷

重と走行荷重の場合を図-7に示す。また、荷重と最大たわみの関係を図-8に示す。

7.1 荷重とたわみの関係

(1) 静荷重の場合

図-5より、外ケーブルを鉄筋にした場合の供試体 S-RC-0 は、荷重値 50kN からたわみの増加が著しく、最大荷重時 60kN でたわみは 25.8mm, 荷重 0kN 時の残留たわみは 10.2mm である。また、外ケーブルを PC 鋼棒にした場合の引張力 0kN の供試体 S-PC-0 は、最大荷重 74.4kN でたわみが 22.7mm, 残留たわみは 3.65mm である。

次に、PC 鋼棒に初期引張力 10kN を作用させた供試体 S-PC-10 は、最大荷重 85kN でのたわみが 22.9mm, 残留たわみが 0.32mm である。なお、初期引張力 20kN の供試体 S-PC-20 は、供試体 S-PC-10 同様に荷重増加に比例してたわみも線形的に増加し、最大荷重時 94.8kN でたわみが 26.6mm となり、外ケーブルに引張力を 20kN 作用させたことから残留たわみも 0.32mm である。したがって、外ケーブルに初期引張力を作用させることで、耐力も向上し、残留たわみの増加も抑制できた。

(2) 走行荷重の場合

図-6より、引張力 0kN の供試体 R-PC-0 では最大荷重が 74.9kN のときのたわみが 21.3mm, 残留たわみは 0.85mm である。また、初期引張力 10kN の供試体 R-PC-10 では、最大荷重が 75.4kN のときのたわみが 20.8mm, 残留たわみが 0.93mm である。

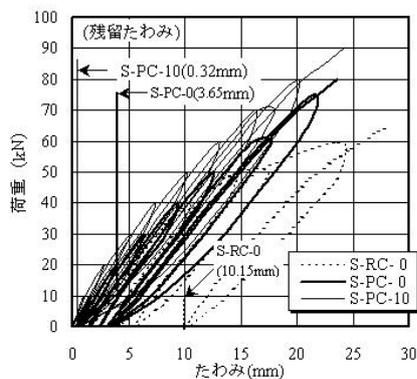


図-5 荷重とたわみの関係
(静荷重)

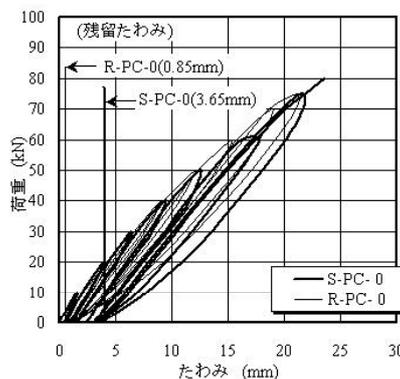


図-6 荷重とたわみの関係
(走行荷重)

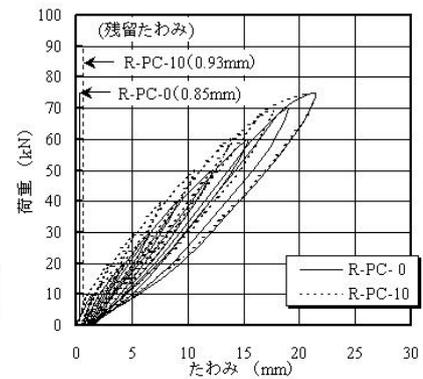


図-7 荷重とたわみの関係
(静荷重・走行荷重)

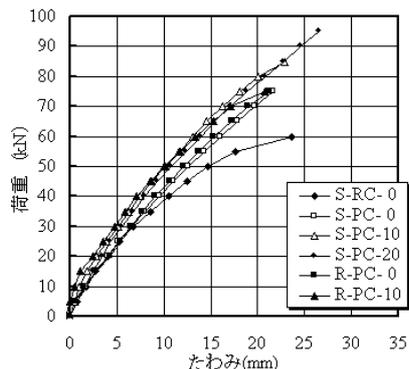


図-8 荷重と最大たわみの関係

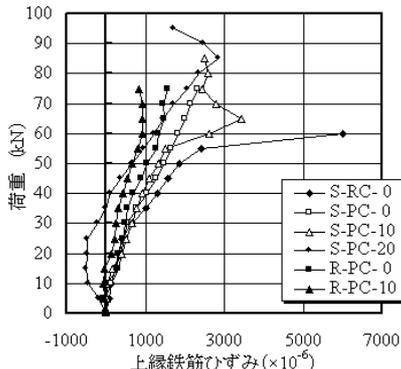


図-9 荷重とひずみの関係
(上縁鉄筋)

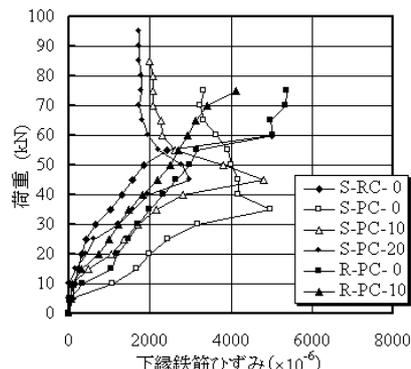


図-10 荷重とひずみの関係
(下縁鉄筋)

(3) 静荷重と走行荷重の比較

図-7より、静荷重および走行荷重の場合ともに急激なたわみの増加がみられず、線形的に増加している。

(4) 最大たわみ

図-8より、外ケーブルに鉄筋を用いた場合は引張鉄筋が降伏後の荷重でたわみの増加が著しい。これに対して外ケーブルにPC鋼棒を用いた場合は、ほぼ線

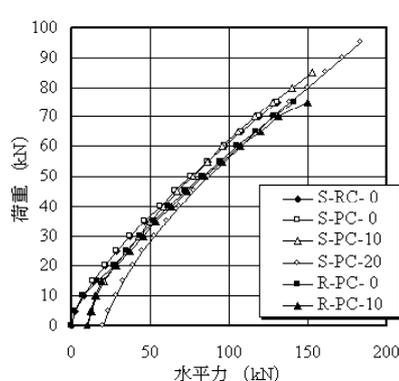


図-11 外ケーブルの水平力

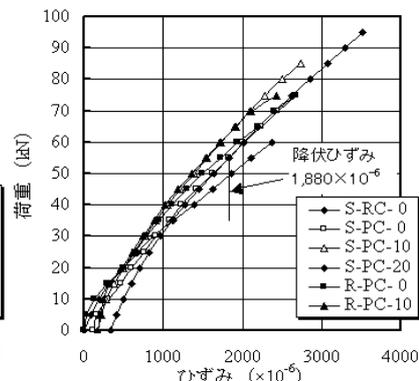


図-12 荷重とひずみの関係

形的に増加している。なお、たわみはほぼ線形的に増加しているが、支間中央のひび割れが貫通したことから荷重を除荷した。

7.2 荷重とひずみの関係

本実験における支間中央の上縁鉄筋の荷重とひずみの関係を図-9、下縁鉄筋の荷重とひずみの関係を図-10に示す。なお、本供試体に用いた鉄筋 D10 の降伏ひずみは $1,860 \times 10^6$ である。

(1) 上縁鉄筋の荷重とひずみの関係

図-9より、静荷重の場合の供試体 S-RC-0 の上縁鉄筋は荷重値 55kN から降伏し、終局荷重 60kN で最大ひずみは $6,000 \times 10^6$ である。次に、供試体 S-PC-0 では荷重値 60kN で降伏し、終局時の最大ひずみは $2,300 \times 10^6$ である。また、供試体 S-PC-10 では荷重値 60kN で降伏し、荷重値 65kN で最大ひずみ $3,400 \times 10^6$ となり、その後の荷重増加に対してひずみは減少し、終局時のひずみは $2,500 \times 10^6$ である。供試体 S-PC-20

では荷重値 70kN で降伏するが、その後の荷重増加に対しても急激なひずみの増加は見られず、上縁の鉄筋は曲げ引張力を受ける結果となった。

走行荷重の場合の上縁鉄筋は、供試体 R-PC-0、R-PC-10 とともに終局時においても降伏に至っていない。

(2) 下縁鉄筋の荷重とひずみの関係

図-10より、静荷重の場合、供試体 S-RC-0 の下縁鉄筋は上縁と同様に荷重値 45kN で降伏し、最大荷重 60kN で最大ひずみ $5,000 \times 10^6$ である。また、供試体 S-PC-0 では荷重値 20kN で降伏し、荷重値 35kN で最大ひずみ $5,000 \times 10^6$ となるが、その後の荷重増加に対してひずみは減少し、終局時でひずみは $3,300 \times 10^6$ である。これは、この断面において上縁鉄筋および下縁鉄筋ともに塑性変形しているため、一種の塑性ヒンジが形成と評価した。次に、PC鋼棒に引張力 10kN および 20kN 作用させた供試体 S-PC-10、

S-PC-20 も引張力に反比例して、ひずみは減少している。供試体 S-PC-0, 10, 20 の場合の下縁鉄筋のひずみは、最大耐力の約 1/2 の荷重付近で最大ひずみとなり、ひび割れは貫通して、ヒンジ状態となり、上縁鉄筋に荷重が分担され、下縁鉄筋のひずみが減少したものと考えられる。

次に、走行荷重の場合、供試体 R-PC-0, R-PC-10 ともに終局耐力は近似している。供試体 R-PC-0 の降伏荷重は 30kN であり、終局時のひずみは $5,300 \times 10^{-6}$ である。また、引張力 10kN の供試体 R-PC-0 の降伏荷重は 45kN であり、終局時は $4,100 \times 10^{-6}$ である。

8. 外ケーブルの水平力およびひずみ

本実験による荷重と外ケーブルに生じる水平力の関係を図-11に示す。また、荷重と外ケーブルの引張ひずみの関係を図-12に示す。なお、外ケーブルの鉄筋 D16 の降伏ひずみは 1880×10^{-6} 、PC 鋼棒 U19 の降伏ひずみは 5890×10^{-6} である。

8.1 外ケーブルの最大水平力

図-11より、静荷重および走行荷重ともに荷重の増加に比例して鉄筋および PC 鋼棒のひずみは線形的な増加が見られる。なお、水平力は表-2に併記した。

8.2 外ケーブルの荷重とひずみの関係

図-12より、静荷重の場合の外ケーブルに鉄筋を用いた供試体 S-RC-0 は、荷重値 55kN で降伏し、終局時のひずみは 2400×10^{-6} である。また、静荷重の場合の外ケーブルに PC 鋼棒を用いた供試体 S-PC-0 の終局時のひずみは 2700×10^{-6} 、供試体 S-PC-10 の終局時のひずみは 2700×10^{-6} 、供試体 S-PC-20 の終局時のひずみは 3500×10^{-6} であった。

次に、走行荷重の場合の外ケーブルが PC 鋼棒引張力 0kN の供試体 R-PC-0 の終局時のひずみは $2,700 \times 10^{-6}$ となり、引張力 10kN の供試体 R-PC-10 の終局時のひずみは $2,400 \times 10^{-6}$ となった。なお、本実験では、外ケーブルに用いた PC 鋼棒は全て降伏に至らなかった。

9. まとめ

(1)外ケーブル式アーチはりの引張材を鉄筋 SD295, D16 とした場合の終局曲げ耐力は 60kN である。また、外ケーブルを PC 鋼棒とした引張力 0kN の場合の終局曲げ耐力は 74.4kN であり、引張材に PC 鋼棒を用いることで曲げ耐力の向上が見られる。

(2)外ケーブルの PC 鋼棒に初期引張力 10kN 作用させた場合の終局曲げ耐力は 85.0kN、同じく 20kN 作用させた場合には 94.8kN となり、初期引張力を 10kN 増加するごとに約 10kN の耐力が向上している。

(3)支間 200cm, 高さ 21cm, 幅 30cm, 引張鉄筋 D16 を 3 本 (有効高さ 17.2cm), 圧縮鉄筋 D16 を 2 本配置した RC はりと比較すると、外ケーブル PC 鋼棒に初期引張力を作用させることで、RC はりと同等以上の耐力が得られた。したがって、RC 床版と比較すると大幅な軽量化が図られる。

(4)外ケーブルに PC 鋼棒を用いた場合は、供試体に作用する水平反力を PC 鋼棒が降伏することなく補えることから、床版取り付け部に大きな水平反力を負担させないものと考えられる。

参考文献

- 1)八部順一ほか：少数主桁用リブ付きプレキャスト PC 床版の実験的研究，第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文集，pp.149-154，1998.11
- 2)阿部幸夫，久保圭吾，高木優任，武内隆文：各種合成床版の構造と適用例，第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文集，pp.23-30，1998.11
- 3)加々良直樹，櫻井 孝，松井繁之：アーチ型合成床版の力学特性，土木学会第 56 回年次学術講演会，pp.410-411，2001.10
- 4)加々良直樹，秦 裕彰，櫻井 孝，大西弘志，松井繁之：アーチ型合成床版の静的および動的荷重下の構造挙動に関する研究，第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp.91-96，2003.6
- 5)福島慶太，木田哲量，阿部 忠，加藤清志：外ケーブル式アーチ型ビームの耐力に関する実験研究，日本大学部生産工学部学第 36 回術講演会，pp.29-32，2003.