

長支間対応型外ケーブル式アーチ床版の力学特性

日大生産工(院) 田村章后 日大生産工 阿部 忠・水口 和彦・木田 哲量・櫻田智之

1. はじめに

我が国の橋梁技術は、戦後の復興とともにめざましい発展を遂げてきたが、社会情勢の変化に伴い、鋼橋においても合理化および省力化に関する研究・開発が進められている¹⁾。筆者らは床版の長支間化に対応可能なタイドアーチを用いた外ケーブル式アーチ床版の研究開発を行なっている²⁾。そこで本研究では、実橋RC床版の1/2モデルとした外ケーブル式アーチ床版供試体と更なる軽量化を図るために、最小版厚を10mm 薄くした同一形状の外ケーブル式アーチ床版供試体を作製して静荷重・走行荷重実験を行い、耐力性能と力学特性を検証し、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

2.1 タイドアーチ構造 タイドアーチ構造を Fig. 1 に示す。タイドアーチ構造は、アーチ部に輪荷重 P が作用すると、アーチ内部に軸圧縮力が作用して抵抗する構造である。アーチ部材を支持する両支点には荷重による変位を阻止するための鉛直反力 (V_A, V_B) と水平反力 (H_R) が生ずる。アーチ部の水平力 (H) を構造内部に吸収する構造とするならば、通常の床版部材よりも耐力力の向上が図られる構造となる。そこで、水平力を構造内部に吸収するためのタイ材にPC鋼棒を用いてタイドアーチ構造とすることで、長支間化に対応することが可能となる。

2.2 使用材料

(1) RC床版供試体 RC床版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5mm以下の砕砂および5~20mmの砕石(JIS A 5005)を使用した。コンクリートの圧縮強度は35N/mm²である。また、鉄筋はSD295A, D10を使用した。鉄筋の降伏強度は368N/mm², 引張強度は568N/mm², ヤング係数は200kN/m²である。

(2) 外ケーブル式アーチ床版供試体 外ケーブル式アーチ床版供試体のコンクリートには、早強ポルトランドセメントと5mm以下の砕砂および5~20mmの砕石(JIS A 5005)を使用した。コンクリートの圧縮強度は74.6N/mm²である。また、鉄筋はSD295A, D10を使用した。その降伏強度は379N/mm², 引張強度は526N/mm², 弾性係数は200kN/mm²である。外ケーブルには、直径15mmのC種1号SBPR1080/1230のPC鋼棒を使用した。降伏強度は1194N/mm², 引張強さは1273N/mm², 弾性係数は200kN/mm²である。

3. 供試体寸法および鉄筋配置

(1) RC床版供試体 本実験に用いたRC床版供試体は道路橋示方書・同解説³⁾(以下、道示)に規定するT荷重の1/2モデルであることから、道示の規定に基づいて、大型車両の1日1方向あたりの計画交通量が2000台以上を想定して床版厚を決定し、鉄筋を配置した。よって、全長1470mm, 支間1200mm, 厚さ130mmの等方性版とした。また、鉄筋は複鉄筋配置とし、主鉄筋および配力筋を100mm間隔とし、圧縮側は引張側の1/2を配置した。有効高さは主鉄筋方向が105mm, 配力筋方向は95mmとした。ここで、RC床版供試体の供試体名称をRC13とし、RC床版の供試体寸法および鉄筋配置を Fig. 2 に示す。

(2) 外ケーブル式アーチ床版供試体

1) 外ケーブル式アーチ床版(ARC100)

本実験に用いた外ケーブル式アーチ床版供試体は、RC床版同様に道示の規定に基づいて設計し、その1/2

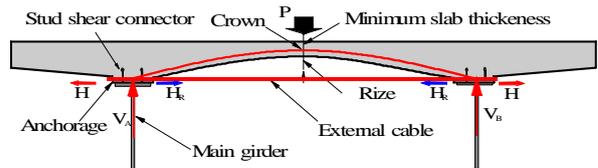


Fig. 1 Tied arch structure.

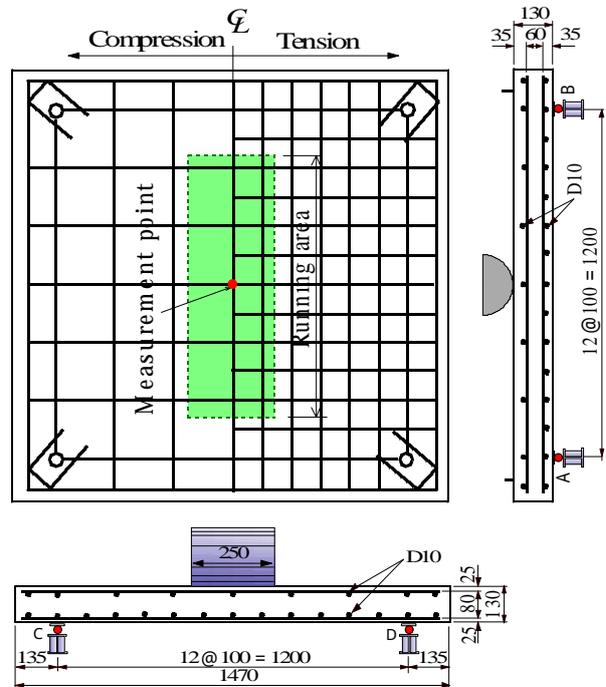


Fig.2 RC slab specimen dimensions and re-bar arrangement.

Mechanical Properties of Longnizing of External cable Style Arch slab

Shogo TAMURA, Tadashi ABE, Kazuhiko MINAKUCHI, Tetsukazu KIDA and Tomoyuki SAKURADA

モデルとした。よって、支間 1200mm，クラウン部厚さ 100mm，支点部の高さ 260mm，ライズ 100mm とした。また，鉄筋は複鉄筋配置とし，外ケーブルに初期引張力を導入することから引張・圧縮側および軸直角・軸方向ともに 100mm 間隔に配置した。外ケーブルの配置間隔は応力分布を考慮して床版中央から 400mm 間隔で 3 本配置した。外ケーブルを固定する支圧板は，並列に配置されている PC 鋼棒に均等な水平力が作用するように，供試体側面に鋼板を配置した。なお，外ケーブル式アーチ床版の重量はハンチを含めた通常の RC 床版の重量とほぼ同等である。

2) 軽量化外ケーブル式アーチ床版 (ARC90)

軽量化を目的とした外ケーブル式アーチ床版供試体は，ARC100 に対して，支間中央部のクラウン部の厚さを 10mm 減少させ最小床版厚を 90mm としたものであり，供試体寸法および鉄筋配置については ARC100 と同様である。ここで，ARC100 および ARC90 の供試体寸法および鉄筋配置を Fig.3 に示す。

4. 実験方法

(1) 静荷重実験 静荷重実験は，最大応力が生じる支間中央に車輪を静置した状態で載荷させる実験である。荷重の載荷方法は 10kN ずつ増加させる段階荷重とし，50kN ごとに荷重を 0kN に減少させる包絡荷重とし，供試体が破壊するまで荷重の増減を繰り返した。静荷重実験は，外ケーブルに初期引張力 20kN 導入した後にいった。

(2) 走行荷重実験 走行荷重実験は，耐力低下の著しい支間中央に車輪を停止させ，載荷位置から左右に $\pm 450\text{mm}$ 走行させた後，元の支間中央で停止させる実験である。なお，走行平均速度は 1 走行 0.90m を 6.5sec で走行する 0.14m/sec とした。荷重の載荷方法および初期引張力は静荷重実験と同様とした。なお，外ケーブル式アーチ床版においては ARC90 のみ走行荷重実験を行った。

5. 結果および考察

5.1 実験耐力

(1) 静荷重実験 静荷重実験における最大耐力を Table.1 に示す。Table.1 より，供試体 RC13-S1, S2 の最大耐力はそれぞれ 240.2kN, 235.2kN となり，その平均耐力は 237.7kN である。また，外ケーブル式アーチ床版供試体 ARC100-S, 90-S の最大耐力はそ

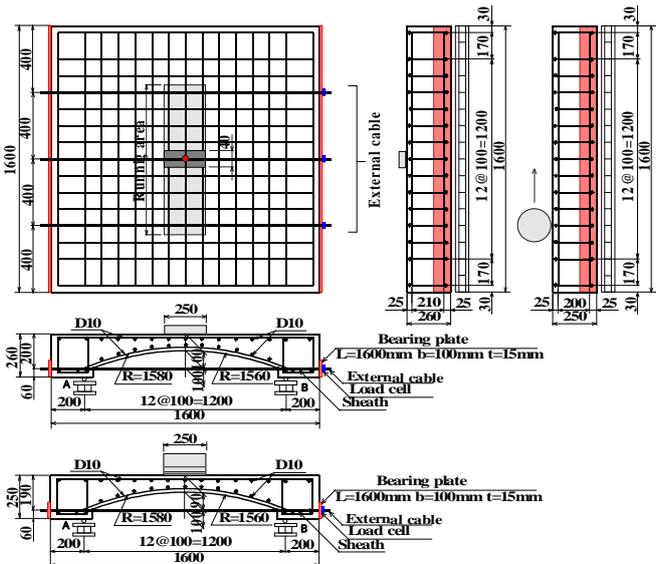


Fig.3 External cable style Arch slab specimen dimensions and re-bar arrangement.

れぞれ 367.4kN, 265.38kN である。ここで，供試体 ARC100-S, 90-S と RC13-S の最大耐力を比較すると，供試体 RC13-S に比して供試体 ARC100-S, 90-S でそれぞれ 1.55 倍，1.12 倍の耐力の向上が見られた。

(2) 走行荷重実験 走行実験における最大耐力を Table.1 に示す。なお，走行荷重実験の最大耐力とは，一往復走行を維持した最大荷重とする。Table.1 より，供試体 RC13-R1, R2 の最大耐力はそれぞれ 170.0kN, 170.4kN となり，その平均耐力は 170.2kN である。また，外ケーブル式アーチ床版供試体の最大耐力は供試体 ARC90-R1, R2 でそれぞれ 180.54kN, 177.6kN となり，その平均耐力は 179.07kN である。ここで，供試体 ARC90-R と供試体 RC13-R の最大耐力を比較すると，供試体 RC13-R に比して供試体 ARC90-R の耐力は 1.05 倍となっており，床版厚を 10mm 薄くした場合でも通常の RC 床版と同等以上の耐力を有している。

5.2 ひび割れ状況

(1) 静荷重実験

1) RC 床版供試体 (RC13-S)

静荷重実験における RC 床版供試体のひび割れ状況を Fig.4(1) に示す。Fig.4(1) より，供試体下面には降伏

Table.1 Maximum load-carrying capacity and load-carrying capacity-ratio

Test specimen	Maximum load carrying capacity (kN)	Average load carrying capacity (kN)	Load-carrying capacity ratio	
			ARC90-S,100-S,90-R/RC13-S.Ave	ARC90-R/RC13-R.Ave
RC13-S1	240.2	237.7	1.00	1.00
RC13-S2	235.2			
RC13-R1	170.0	170.2	0.72	1.00
RC13-R2	170.4			
ARC100-S	367.4	179.07	1.55	1.05
ARC90-S	265.38			
ARC90-R1	180.54	179.07	0.75	1.05
ARC90-R2	177.60			

RC: RC slab, ARC: Arch slab, S: static, R: running

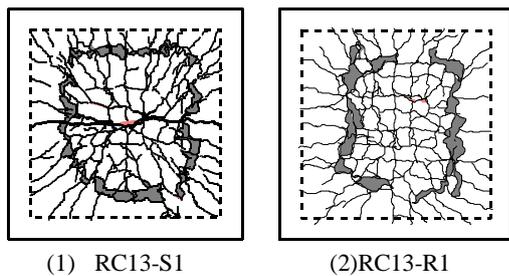


Fig.4 Crack pattern of bottom side of RC slab.

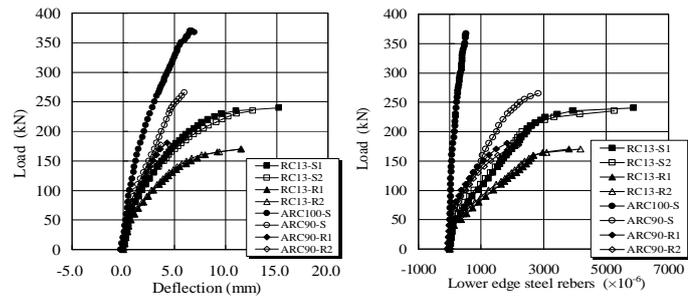


Fig.6 load vs. Deflection. Fig.7 load vs. Lower edge steel reber.

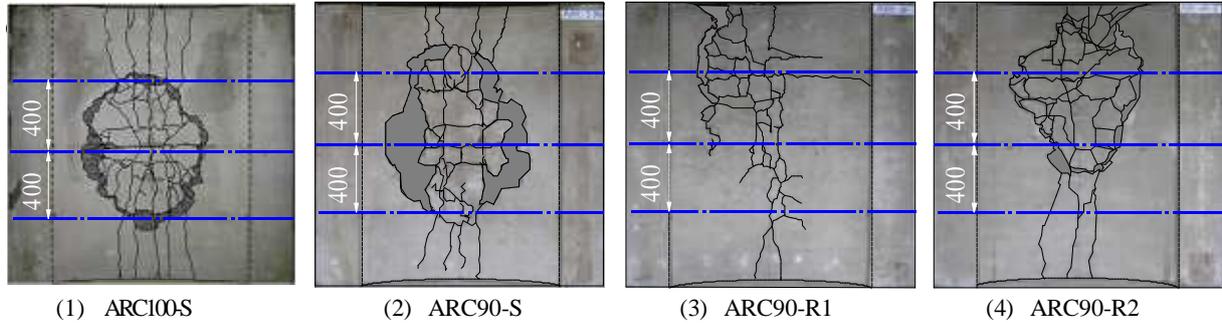


Fig.5 Crack pattern of bottom side of arch slab.

線方向にひび割れが発生し、底面コンクリートがはく離している。これはダウエル効果によるものである。また、ひび割れは主鉄筋および配力筋の配置位置に発生しており、その発生域は支間内全域に及んでいる。

2) 外ケーブル式アーチ床版供試体(ARC100-S, 90-S)

外ケーブル式アーチ床版供試体のひび割れ状況を Fig.5 に示す。Fig.5(1), (2)より、静荷重実験供試体は、床版厚の違いに関わらず初期段階は荷重の増加に対して荷重載荷位置直下付近にひび割れが発生し、その後の荷重増加によって橋軸方向へのひび割れの進展が見られ、供試体下面の端部間を結ぶひび割れに発展した。さらに荷重を増加させると、供試体下縁から上縁方向へひび割れが伸延し、上縁の圧縮鉄筋付近まで進展した。最終的には、荷重増加中に押抜きせん断破壊を呈した。

以上のことから、静荷重実験における RC 床版供試体と外ケーブル式アーチ床版供試体の破壊状況を比較すると、外ケーブル式アーチ床版供試体の場合は外ケーブルに初期引張力を作用させることでアーチ底面が圧縮域となることから RC 床版供試体に比してひび割れ発生領域が狭く、ひび割れも抑制されている。

(2) 走行荷重実験

1) RC 床版供試体(RC13-R)

走行荷重実験における RC 床版供試体のひび割れ状況を Fig.4(2)に示す。Fig.4(2)より、RC 床版の底面に配置した主鉄筋の位置にひび割れが発生している。終局時のひび割れ状況は、荷重が走行することから、軸直角方向の底面の主鉄筋がぶり内はダウエル効果が及ぶ範囲ではく離破壊している。終局時は輪荷重が走行中に押抜きせん断破壊となった。

2) 外ケーブル式アーチ床版供試体(ARC90-R)

外ケーブル式アーチ床版供試体のひび割れ状況を

Fig.5 に示す。Fig.5(3), (4)より、走行荷重実験供試体 ARC90-R1, R2 は、走行および荷重の増加に伴って供試体 ARC-S と同様の過程でひび割れが生じた。最終的には、供試体 ARC90-R1 は曲げを伴う押抜きせん断破壊、供試体 ARC90-R2 は押抜きせん断破壊となった。なお、供試体 ARC90-R1 が曲げを伴う押抜きせん断破壊となったことの原因には支持条件が考えられるが、この問題に関しては今後の検討課題とする。

5.3 荷重とたわみの関係

RC 床版供試体および外ケーブル式アーチ床版供試体の荷重と支間中央のたわみの関係を Fig. 6 に示す。

(1) 静荷重実験

1) RC 床版供試体(RC13-S)

静荷重実験における RC 床版供試体の荷重とたわみの関係を Fig.6 に示す。Fig.6 より、両供試体ともに荷重 70kN 付近までは線形的にたわみは増加し、その後の荷重増加に伴いたわみの増加が著しい。なお、終局時のたわみは供試体 RC13-S1, S2 でそれぞれ 15.2mm, 12.64mm である。

2) 外ケーブル式アーチ床版供試体(ARC100-S, 90-S)

静荷重実験における外ケーブル式アーチ床版供試体の荷重とたわみの関係を Fig.6 に示す。なお、本実験での初期引張力は 20kN としたが、その時のたわみ値は供試体 ARC100-S, 90-S でそれぞれ -0.160mm, -0.275mm であったことから、これを初期値とする。Fig.6 より、供試体 ARC100-S, 90-S は荷重の増加に伴いほぼ線形に増加している。なお、終局時のたわみは供試体 ARC100-S, 90-S でそれぞれ 7.12mm, 5.95mm である。

(2) 走行荷重実験

1) RC 床版供試体(RC13-R)

走行荷重実験における RC 床版供試体の荷重とたわ

みの関係を Fig.6 に示す。Fig.6 より、両供試体ともに荷重 50kN 付近までは線形的に増加し、その後の荷重増加で急激にたわみが増加している。なお、最大たわみは供試体 RC13-R1, R2 でそれぞれ 9.2mm, 11.5mm である。

2) 外ケーブル式アーチ床版供試体(ARC90-R)

走行荷重実験における外ケーブル式アーチ床版供試体の荷重とたわみの関係を Fig.6 に示す。なお、本実験での初期引張力は 20kN としたが、その時のたわみ値は ARC90-R1, R2 でそれぞれ -0.245mm , -0.225mm であったことから、これを初期値とする。Fig.6 より、供試体 ARC90-R1, R2 は、荷重の増加に対して比較的類似した挙動を示しており、最大たわみは A RC90-R1, R2 でそれぞれ 4.29mm, 3.68mm である。

また、走行荷重が作用した場合の供試体 RC13-R, 供試体 ARC90-R の比較を行うと、供試体 RC13-R に比して供試体 ARC90-R はたわみの増加が少ない。これは、外ケーブルに PC 鋼棒を用いることでアーチ効果が発揮され、たわみが抑制されたためと考えられる。

次に、静荷重と走行荷重によるたわみを比較すると、供試体 RC13, 供試体 ARC90 ともに走行荷重が作用した場合、静荷重と比してたわみの増加傾向が大きい。これは走行荷重が作用することで静荷重に比してひび割れが広範囲に発生するなど剛性の低下が著しいためである。

5.4 荷重と鉄筋ひずみの関係

RC 床版供試体および外ケーブル式アーチ床版供試体における荷重と支間中央の軸直角方向(主鉄筋)のひずみの関係を Fig.7 に示す。なお、本供試体に用いた鉄筋の降伏ひずみは RC 床版供試体の場合は 1840×10^{-6} , 外ケーブル式アーチ床版供試体は 1895×10^{-6} である。

(1) 静荷重実験

1) RC 床版供試体(RC13-S)

静荷重実験における RC 床版供試体の荷重とひずみの関係は Fig.7 に示すように、両供試体ともに荷重 60kN 付近まで直線的にひずみは増加し、荷重 205kN 付近までは線形的に増加した。その後の荷重に対してひずみの増加が著しくなり、終局時では供試体 RC13-S1, S2 でそれぞれ 5870×10^{-6} , 5260×10^{-6} である。

2) 外ケーブル式アーチ床版供試体(ARC100-S, 90-S)

静荷重実験における外ケーブル式アーチ床版供試体における荷重とひずみの関係は Fig.7 に示すように、供試体 ARC100-S は荷重 100kN, ARC90-S は荷重 50kN 付近までは荷重の増加に対し直線的なひずみの増加となり、その後の荷重増加でひずみの増加が大きくなるもの、終局時のひずみは供試体 ARC100-S, 90-S でそれぞれ 520×10^{-6} , 2499×10^{-6} となっている。

(2) 走行荷重実験

1) RC 床版供試体(RC13-R)

走行荷重実験における RC 床版供試体の荷重とひずみの関係は Fig. 7 に示すように、降伏荷重は両供試体とも 125kN 付近である。両供試体とも荷重 160kN 付近まで線形的に増加するもののその後の荷重増加においてひずみの増加が著しく、終局時のひずみは供試体 RC13-R1, R2 で、それぞれ 3810×10^{-6} , 4180×10^{-6} である。

2) 外ケーブル式アーチ床版供試体(ARC90-R)

走行荷重実験における外ケーブル式アーチ床版供試体の荷重とひずみの関係は Fig.7 に示すように、供試体 ARC90-R1, R2 ともに荷重 50kN まではひずみは直線的に増加し、その後の荷重増加でも増加傾向が大きくなるものの線形的になっている。終局時のひずみは、供試体 ARC90-R1, R2 で、それぞれ 1828×10^{-6} , 2197×10^{-6} である。

以上のことから、静荷重・走行荷重のいずれの場合においても、供試体 ARC100, 90 は外ケーブルに PC 鋼棒を用いることでアーチ効果が発揮され、供試体 RC13 に比して供試体下面の引張主鉄筋にはあまり負荷がかからず、荷重の増加に対して引張力が生じるがひずみの増加は小さい。

5. まとめ

静荷重実験における供試体 ARC100-S, 90-S と供試体 RC13-S の耐荷力を比較すると、供試体 RC13-S に比してそれぞれ 1.55 倍, 1.12 倍となった。また、走行荷重実験においても供試体 ARC90-R は最小床版厚を 90mm としたにも関わらず供試体 RC13-R と同等以上の耐荷力を有していることから、設計床版厚の減少、さらには長支間化が可能となり、外ケーブル式アーチ床版の実用性が評価できる。

供試体 RC13, 供試体 ARC100, 90 ともに最終的な破壊モードは押抜きせん断破壊となった。また、供試体 ARC100, 90 の場合は外ケーブルに引張力を導入することで床版底面が圧縮域となり、供試体 RC13 に比して破壊域が狭くなるためひび割れも抑制される。

荷重とたわみの関係より、静荷重・走行荷重が作用した場合においても、供試体 ARC100, 90 は供試体 RC13 に比してたわみが抑制されていることからアーチ効果が発揮されていると考えられる。

荷重と下縁鉄筋ひずみの関係より、静荷重・走行荷重が作用した場合においても、供試体 ARC100, 90 はアーチ効果が発揮され、供試体 RC13 に比して供試体下面の引張主鉄筋への負荷は少ない。

参考文献

- 1)塩川義之：合理化形式の鋼橋，pp.7-10 (1998)。
- 2)木田哲量ほか：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.2，pp.1975-1980 (2004)。
- 3)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，(2002)