

(47) 長大アーチ橋へのコンクリート充填鋼管の適用

Application of concrete-filled tube to long span arch bridge

劉 玉 擎*, 彦 坂 熙**
Yuqing LIU and Hiroshi HIKOSAKA

*工博 九州大学大学院助手 建設システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

**工博 九州大学大学院教授 建設システム工学専攻 (同上)

Application of CFT (concrete-filled steel tube) is one of the promising techniques for extending the span of arch bridge. A new type of steel-concrete composite arch bridge has been developed recently in China, in which CFT arches resting on and integral with flexible CFT columns are used. Each opposite joint is tied with multiple prestressing cables to prevent horizontal opening of arch span and to balance the horizontal arch thrust. Static characteristics of a prototype arch bridge are investigated through 3-dimensional nonlinear finite element analysis and the effect of prestressed ties on the bridge performance is discussed.

Key Words: concrete-filled tube, arch bridge, static characteristic

1. 序論

近年、土木構造物の大型化や多様化に伴って、鋼とコンクリートに代表される異種材料を組合せた合成断面の部材をもつ構造システムが注目されつつある。中国では 1990 年頃より、耐荷性能や施工性などの観点から、コンクリート充填鋼管を主構とする合成アーチ道路橋が既に数十橋建設されている¹⁾。日本ではこの形式の橋梁の建設実績はまだなく研究例^{2,3,4)}も極めて少ないが、コンクリート充填鋼管の終局耐荷特性、耐震性能および充填コンクリートの信頼性などの解明に従って今後採用される可能性が高いものと考えられる⁵⁾。

自碇式のタイドアーチ橋、ランガー桁橋、ローゼ桁橋は、タイまたは補剛桁に生じる引張力がアーチの変形の抑制効果を有するため、地盤条件によらずに選択できる橋梁形式である。中国では、支承部の維持管理の不要、固定アーチ橋に用いられる架設工法の採用およびスパンの長大化などを目的とし、アーチリブと橋脚とを剛結してタイにプレストレスを導入するコンクリート充填鋼管アーチ橋の開発が進められている。本研究では、この形式の橋梁を架構式合成タイドアーチ橋と称し、日本の道路橋示方書に従って静的力学挙動の解析および終局強度の照査を行い、その構造的メリットを論じる基礎資料を提示する。

2. 中国における合成アーチ橋の建設概況

中国における合成アーチ橋は、単管または 2～6 本組合せた鋼管トラスをアーチリブとして架設した後、鋼管弦材内にコンクリートを充填し、完成系は鋼

管とコンクリートが一体の充填式合成アーチとして設計される。スパンは完成したもので 200m、工事中のものでは 360m に達する。アーチ軸線の形状にはほとんど放物線または双曲線が用いられており、ライズスパン比は 1/3～1/6 の間にある¹⁾。

図-1 によく用いられるアーチリブの断面形式を示す。図-1(a)は円形鋼管にコンクリートを充填する単管式で、ほとんどスパン 100m 以下の都市部の道路橋および歩道橋に採用されている。

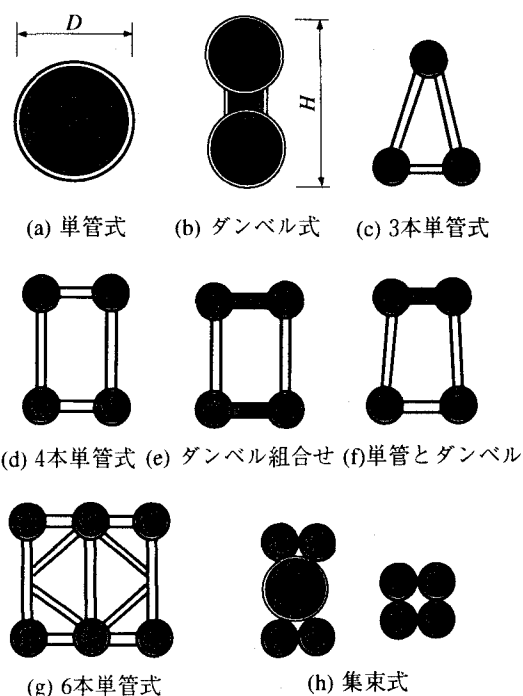


図-1 アーチリブの断面形式

図-1(b)は2本の鋼管を、繋ぎ材としての2枚の鋼板で溶接接合し、鋼管内および繋ぎ鋼板間にコンクリートを充填するダンベル式である。ダンベル式断面を用いたアーチ橋の数はほかの断面より多いが、この形式の断面をもつ合成柱の力学特性の詳細はまだ不明である。

図-1(c)~(g)は、鋼管あるいはダンベルを複数列並べて、各列を鋼管腹材で繋いだ組合せ式の断面構造を示すものである。組合せ式断面をもつアーチ橋のスパンは一般に100mを超え、充填式合成アーチ橋として最大スパン($L=360\text{m}$)の広東省丫髻沙大橋は6本単管の組合せ式の断面構造を採用している。

図-1(h)は2~5本の単管を束ねた集束式断面である。スパン $L=140\text{m}$ の四川省峡門口大橋は集束式断面のアーチリブを用いており、そのリブは5本鋼管の中間にある鋼管の直径をスプリング部の180cmから、クラウン部の0cmに縮小する変断面である。

3. 架構式合成タイドアーチ橋の構造的特徴

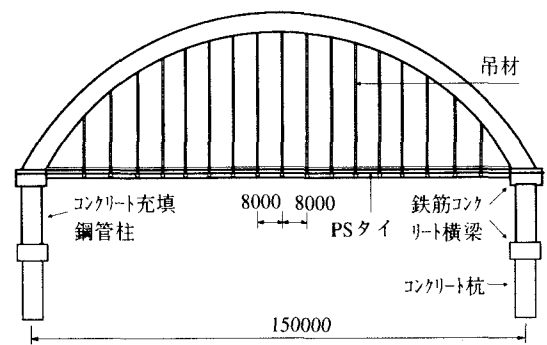
アーチ橋のスパンを長大化するために、アーチリブの圧縮耐力の増大、スプリング部の水平変位の拘束および架設工事への橋梁部材自身の合理的併用などが考えられる。架構式合成タイドアーチ橋は上述のことを考慮して開発され、中国でコンクリート充填鋼管を用いて最初に建設された四川省東河大橋はこの形式の橋梁である。ここでは、建設中の広東省深圳北駅大橋を例として架構式合成タイドアーチ橋の構造的特徴を述べる。

図-2に一般図およびリブの構造と寸法を示す。本橋は汽車駅の鉄道線をまたぐスパン $L=150\text{m}$ の2主構の下路式アーチ橋で、ライズスパン比 $f/L=1/4.5$ および双曲線の離心率 $m=1.167$ のアーチ軸線を採用している。アーチリブは、断面 $D750\times 12\text{mm}$ のコンクリート充填鋼管の4本弦材、水平材($D400\times 10\text{mm}$)および鉛直材と斜材($D245\times 10\text{mm}$)の鋼管腹材で組立てた断面 $3\times 2\text{m}$ のプレストリブである。リブの弦材には標準強度32MPaの低膨張コンクリートを充填している。

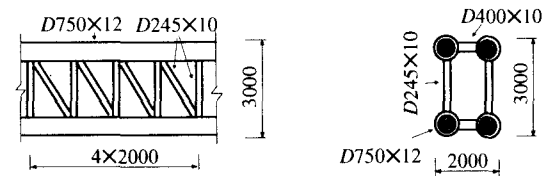
図-3に本橋の床組断面を示す。横桁はPS鋼棒によりプレストレスを導入した鋼箱桁を用い、4本の吊材によりアーチリブに吊られている。橋面荷重は床版を介して横桁に伝えられ、縦桁は横桁断面より小さい鋼箱桁で、各横桁を連結するものである。

図-4にアーチリブと橋脚との剛結部の構造諸元を示す。橋脚は2本の断面 $D2800\times 30\text{mm}$ のコンクリート充填鋼管柱と鉄筋コンクリート横梁からなるラーメンで、アーチリブはこのラーメン橋脚の横梁に剛結されている。各リブのタイは16束の12本 $7\phi 5\text{mm}$ 鋼より線からなり、縦桁上の保護ケースに入れてラーメン橋脚の横梁に定着する(図-3参照)。タイの緊張に

より生じる作用力に抵抗するため、ラーメン橋脚の鉛直方向にはプレストレスを導入している。



(a) 一般図



(b) リブの構造

(c) リブの断面

図-2 深圳北駅大橋の一般図(単位:mm)

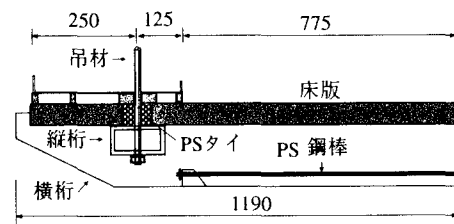


図-3 床組断面(単位:cm)

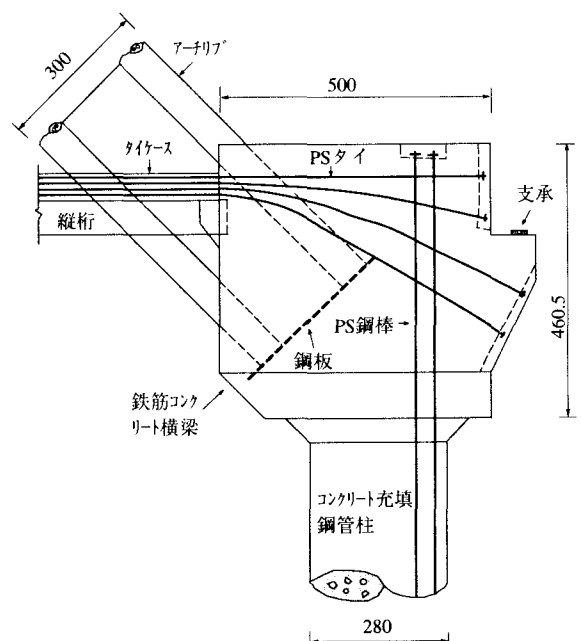


図-4 リブと橋脚との剛結部(単位:cm)

表-1に設定したタイの緊張力を示す。タイはアーチリブの中空鋼管の架設後、コンクリートの充填後、縦・横桁の架設後および橋面の舗装後の4段階に分けて緊張されている。第1段階の緊張力は鋼管および充填コンクリートの自重により決定し、2束のケーブルにそれぞれ緊張力 1150kN を与える。第2段階の緊張力は縦・横桁の自重を考慮し、4束のケーブルにそれぞれ緊張力 1150kN を与えると同時に、ラーメン橋脚の鉛直方向の PS 鋼棒を緊張する。第3段階の緊張力は床版および橋面舗装などの自重により計算し、6束のケーブルにそれぞれ緊張力 1100kN を与える。第4段階では活荷重の作用に対し2束のケーブルに緊張力各 800kN を与え、残りの2束のケーブルは最後に緊張力を調整するものである。

表-1 タイの緊張力の設定

緊張段階	緊張段階の設定	緊張力の計算に考慮する荷重	緊張力 $F(\text{kN})$
1	鋼管リブの架設後	リブ鋼管と充填コンクリートの自重	2300
2	コンクリートの充填後	縦・横桁の自重	4600
3	縦・横桁の架設後	床版、橋面舗装などの自重	6600
4	橋面の舗装後	活荷重	1600

4. 静的力学挙動の解析および考察

本研究は、タイにプレストレスを与えることによる、架構式合成タイドアーチ橋の静的力学特性の変化を解析的に考察する。図-5に本橋の3次元有限要素骨組の解析モデルを示す。アーチリブ、ストラットおよび橋脚ははり要素で、タイは非抗圧トラス要素でモデル化する。縦桁、横桁および床版などからなる床組系は橋軸方向に拘束されていないため、その剛度を考慮せず、自重を作用力に等値してリブの吊材位置に作用させる。また、本解析では杭と地盤の影響を無視して橋脚下端を固定拘束と仮定し、すべての部材の幾何学的非線形性を考慮している。

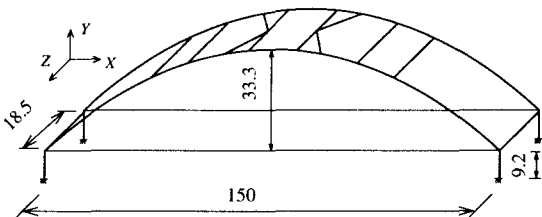
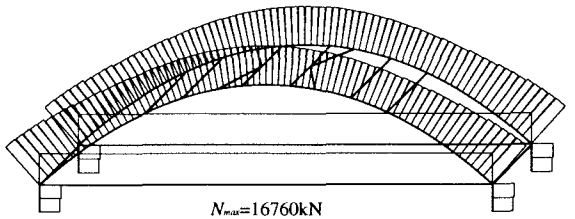
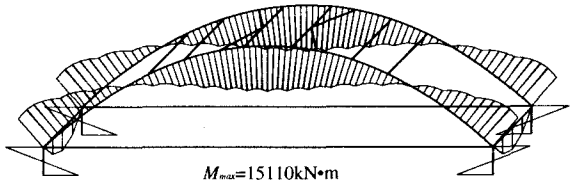
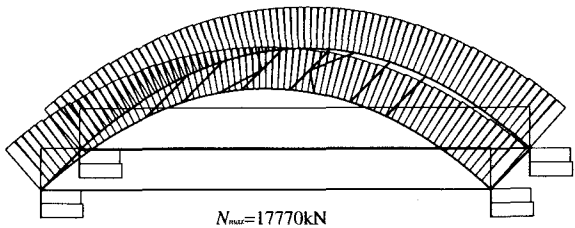
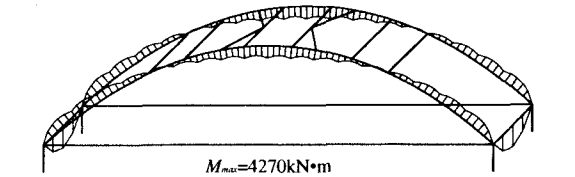


図-5 3次元骨組の解析モデル (単位:m)

タイに与える第3段階までの緊張力は、死荷重により生じたスプリング部の水平推力に抵抗するものである。図-6に緊張力 $F=13500\text{kN}$ を与えた場合、および緊張しない場合における、死荷重状態下の曲げモーメント M と軸力 N の分布を示す。 M の最大値は両者ともアーチリブのクラウン部に生じ、緊張する場合の $M_{\max}$ は緊張しない場合のそれより約 70% 低減している。 N の最大値は両者ともアーチリブのスプリング部に発生し、緊張する場合の $N_{\max}$ は緊張しない場合より約 10% 増大している。また、橋脚のコンクリート充填鋼管柱は、緊張する場合に曲げモーメントの作用を受けず、軸圧縮状態になっている。したがって、タイにプレストレスを導入することにより、死荷重状態下のアーチリブおよび橋脚は偏心が大きな圧縮状態から軸圧縮状態に移行し、優れた圧縮耐荷特性をもつコンクリート充填鋼管の採用が有利であると考えられる。



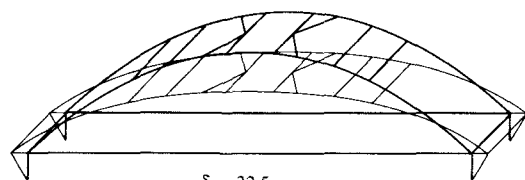
(a) 緊張しない場合



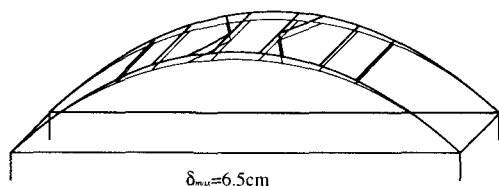
(b) 緊張力 $F=13500\text{kN}$ を与えた場合

図-6 M と N の分布

図-7に緊張力 $F=13500\text{kN}$ を与えた場合、および緊張しない場合における、死荷重状態下の変形モードを示す。緊張しない場合はアーチリブクラウン部のたわみが $\delta=32.5\text{cm}$ 、スプリング部の水平変位が 14.0cm であるが、緊張する場合にはたわみ、水平変位とも非常に小さい。



(a) 緊張しない場合



(b) 緊張力 $F=13500\text{kN}$ を与えた場合

図-7 変形状態

第4段階までの緊張力は、死荷重および活荷重の一部により生じるスプリング部の水平推力に抵抗するものである。図-8に第4段階までの緊張力 $F=15100\text{kN}$ を与えた場合における、死荷重状態下の曲げモーメント M と軸力 N の分布を示す。軸力 N の最大値は第3段階までの緊張力を与えた場合の $N_{\max}$ より増大するが、スプリング部の曲げモーメントは緊張しない場合と符号が変わっている。したがって、緊張力の設定方法が今後の研究課題の1つになると思われる。

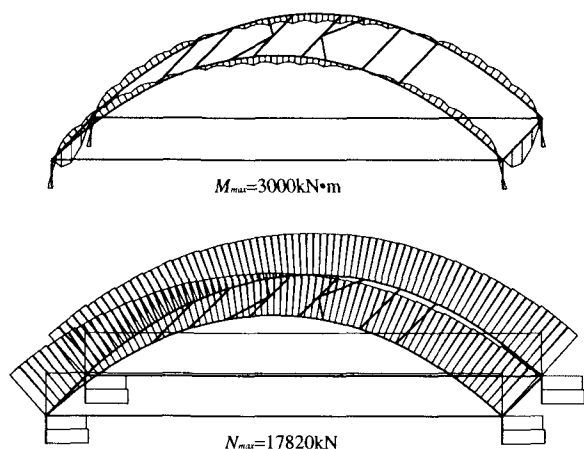


図-8 $F=15100\text{kN}$ による緊張後の M と N の分布

5. 静的終局強度の照査

アーチ橋では断面力が荷重に対して線形でなく、設計荷重時のみの照査では荷重に対して所定の安全率が必ずしも確保されないため、道路橋示方書⁶⁾により設計荷重の1.7倍の荷重に対して終局強度を照査する。本研究では、第3段階までの緊張力をタイに与える場合および与えない場合に、以下のような活荷重の載荷形式による本橋の静的終局強度を考察する。

a) 全支間載荷：

等分布活荷重 p_2 をアーチ支間の全長に、等分布活荷重 p_1 をアーチ支間の中央に載荷する。

b) 半支間載荷：

等分布活荷重 p_2 をアーチ支間の片側半分に、等分布活荷重 p_1 をアーチ支間の1/4点付近に載荷する。

ここに、 p_1 、 p_2 は道路橋示方書に規定される2種類の等分布活荷重である。載荷長さを10mとし、橋幅5.5mに分布する等分布活荷重 p_1 および p_2 (主載荷荷重) を2本のアーチリブのうち1本のはり要素(図-5)のアーチ支間中央または1/4点付近に、 $p_1/2$ 、 $p_2/2$ (従載荷荷重) を上記主載荷荷重以外のリブのはり要素に載荷する。

有限要素解析では、まず第3段階までの緊張力 $F=13500\text{kN}$ および1.7倍の死荷重による断面力を算出し、それを初期断面力として上述の活荷重および衝撃荷重に対する荷重係数 k を1.7まで漸増させる荷重増分法により行う。ただし、衝撃荷重は鋼橋の衝撃係数に基づいて与える⁶⁾。図-9、10にそれぞれ全支間と半支間載荷時の本橋の面内曲げモーメント M および軸力 N の分布を示す。 M の最大値は全支間載荷時のアーチクラウン部、半支間載荷時の支間1/4点付近に生じるが、 N は両載荷形式ともスプリング部で大きい。

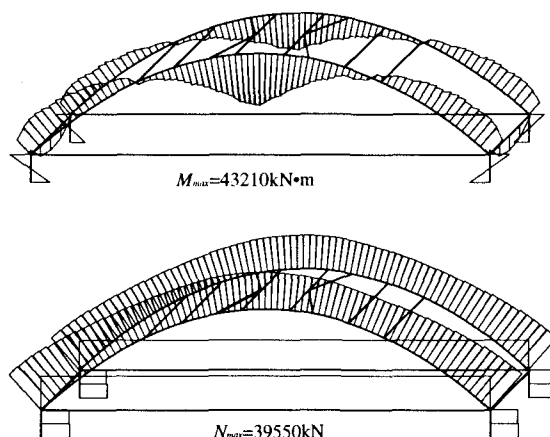


図-9 全支間載荷時の M および N の分布

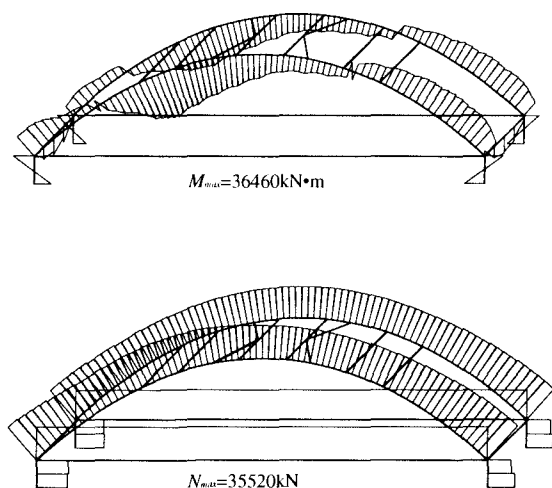
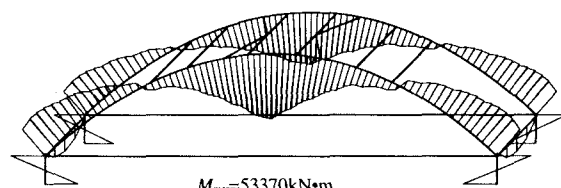


図-10 半支間載荷時の M および N の分布

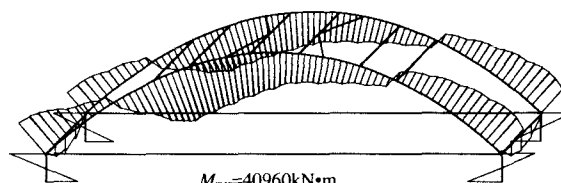
表-2 に本橋の終局強度照査の結果を示す。終局強度は $\sigma_u = 1.7\sigma_{cal}$ で、 σ_{cal} は局部座屈に対する鋼管の許容応力を表す⁶⁾。圧縮応力 σ_c は引張側コンクリートの抵抗を無視し、軸力および面内・面外曲げモーメントの作用を考慮して求めたものである。表-2 より、アーチリブは終局強度照査を満足し、 σ_u/σ_c が 1.2 以上である。

タイを緊張する場合との比較のために、図-11 に全支間と半支間載荷時における緊張しない場合の面内

曲げモーメント M の分布を示す。両載荷形式とも、軸力 N はリブ全長にわたって緊張する場合の N より約 5% 減少しているが、曲げモーメント M は大きく増大し、特にスプリング部の M は緊張する場合の M の 1.6 倍以上となっている。表-3 にタイを緊張しない場合のスプリング部、支間 1/4 点およびクラウン部の曲げモーメント・軸力と終局強度の照査結果を示す。表-2, 3 の照査結果から、緊張する場合のリブの安全率は緊張しない場合より上がることがわかる。



(a) 全支間載荷時



(b) 半支間載荷時

図-11 緊張しない場合の M の分布

表-2 タイを緊張する場合の終局強度照査

載荷形式	照査項目	スプリング	支間 1/4 点	クラウン
全支間	軸力 N (kN)	39550	27680	30200
	面外 M (kN·m)	5460	1220	50
	面内 M (kN·m)	16250	3500	43200
	圧縮応力 σ_c (MPa)	252.0	123.8	297.3
	終局強度 σ_u (MPa)	349.9	349.9	349.9
	σ_u/σ_c	1.4	2.8	1.2
半支間	軸力 N (kN)	35500	29120	27000
	面外 M (kN·m)	4640	1520	920
	面内 M (kN·m)	20970	36460	19940
	圧縮応力 σ_c (MPa)	252.1	274.4	190.7
	終局強度 σ_u (MPa)	349.9	349.9	349.9
	σ_u/σ_c	1.4	1.3	1.8

表-3 タイを緊張しない場合の終局強度照査

載荷形式	照査項目	スプリング	支間 1/4 点	クラウン
全支間	軸力 N (kN)	37850	25000	29640
	面外 M (kN·m)	3270	510	80
	面内 M (kN·m)	28690	9050	53370
	圧縮応力 σ_c (MPa)	284.5	133.3	339.7
	終局強度 σ_u (MPa)	349.9	349.9	349.9
	σ_u/σ_c	1.2	2.6	1.0
半支間	軸力 N (kN)	34170	26070	26640
	面外 M (kN·m)	2880	840	640
	面内 M (kN·m)	33710	40960	30330
	圧縮応力 σ_c (MPa)	290.3	278.2	232.6
	終局強度 σ_u (MPa)	349.9	349.9	349.9
	σ_u/σ_c	1.2	1.3	1.5

6. 結語

本研究は、中国におけるコンクリート充填鋼管を主構とするアーチ橋の建設状況を調査し、アーチリブと橋脚とを剛結してタイにプレストレスを導入する合成タイドアーチ橋に日本の設計基準を適用してケーススタディーを行ったものである。すなわち、この形式の合成アーチ橋の3次元静的力学挙動を解析的に考察するとともに、タイにプレストレスを導入しない場合とも比較検討した。本解析により得られた知見を要約すれば、以下の通りである。

(1) タイにプレストレスを導入することにより、死荷重状態下のアーチリブおよび橋脚は偏心が大きな圧縮状態から軸圧縮状態に移行し、優れた圧縮耐荷特性をもつコンクリート充填鋼管の採用が有利となる。

(2) 活荷重の作用を考慮してタイにプレストレスを導入する場合、死荷重状態下のスプリング部の曲げモーメントは緊張しない場合と符号が変わっている。

(3) 等分布活荷重をアーチの全支間および半支間に載荷することにより、設計荷重の1.7倍の荷重に対する終局強度を照査した。タイにプレストレスを導入する場合の安全率は導入しない場合より上がる。

本研究で扱った架構式合成タイドアーチ橋は、アーチスパンの長大化を目的の1つとして提案されたものである。この形式のアーチ橋の構造的特徴は、軸圧縮力が卓越するアーチリブにコンクリート充填鋼管を採用すること、リブと橋脚とを剛結すること、およびリブの水平推力をプレストレスされたタイに受けさせ、床組の断面はスパンの大きさによって変わらないことにある。アーチ橋のスパン長大化を実現するには、架構式合成タイドアーチ橋における活荷重の作用を考慮

したタイの緊張力の設定や耐震性能の照査などについて研究課題が多く残されているが、未開発の橋梁形式として今後研究を進めるべきであると考えられる。

終わりに、本文で引用した深圳北駅大橋の詳細資料を提供頂いた福州大学陳宝春助教授に深甚なる謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 劉 玉擎, 陳 宝春, 彦坂 熙: 中国における鋼管コンクリート合成アーチ橋および水平旋回架設工法の発展, 橋梁と基礎, Vol.33, No.2, pp.41-44, 1999.2.
- 2) 佐々木保隆, 大森邦雄, 田中忠夫, 中井 博: コンクリートを充填した鋼アーチリブを用いたアーチ橋の構造特性に関する検討, 土木学会構造工学論文集, Vol.40A, pp.1425-1436, 1994.3.
- 3) 三浦昌弘, 松田 浩, 崎山 毅, 森田千尋: プレストレスを導入した鋼・コンクリート合成タイドアーチの構造特性, 土木学会第52回年次学術講演会, I-A, pp.284-285, 1997.9.
- 4) 劉 玉擎, 彦坂 熙, 陳 宝春: コンクリート充填鋼管を主構とする中路式アーチ橋の静力学的および非線形地震応答特性, 日本鋼構造協会鋼構造論文集, Vol.6, No.23, 1999.9.
- 5) 日本鋼構造協会: 土木分野におけるコンクリート充填鋼管構造の現状と今後の課題, JSSC テクニカルレポート, No.44, 1998.8.
- 6) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, I 共通編・II 鋼橋編, 1996.12.