

コンクリート充填鋼管アーチ橋の 非線形地震応答特性

劉 玉 擎¹・陳 宝 春²・彦 坂 熙³・立石裕之⁴

¹正会員 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)

²非会員 工修 福州大学助教授 土木建築工程系 (中国 福州市工業路 523 号)

³正会員 工博 九州大学大学院教授 建設システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

⁴学生員 九州大学大学院院生 建設システム工学専攻 (同 上)

アーチ橋の主構であるアーチリブは常時荷重下でも大きな軸圧縮力と曲げモーメントを受けており、地震時にはそれらがさらに増大する。優れた耐力やじん性などが期待できるコンクリート充填鋼管を主構とするアーチ橋は、未開発の橋梁形式として今後検討すべきであると考えられる。本研究はコンクリート充填鋼管中路式アーチ橋を対象として、この形式のアーチ橋の耐震性能を解析的に調べ、コンクリートを部分的充填した場合との比較により構造的メリットを論じる基礎資料を提示するものである。

Key Words: concrete-filled tube, arch bridge, seismic response

1. 序論

コンクリート充填鋼管構造は、一般に大きな剛性、耐力、じん性を期待でき、施工性、経済性の面からも有利な構造として、土木および建築分野で近年盛んに使用されている。特に平成7年1月の兵庫県南部地震以降、コンクリート充填鋼管構造が改めて脚光を欲び、研究と実用化が活発に行われている。

中国では、コンクリート充填鋼管をアーチリブに適用した事例が既に数十橋報告されている¹⁾。比較的小断面の鋼管を2～6本組み合わせるアーチリブを構成し、アーチ面内および面外の断面性能を上げるとともに、充填コンクリート量を減らしてアーチリブの自重を軽くしているのが特徴の1つである。鉄筋コンクリートアーチ橋に比べて施工性、経済性に優れている点を採用理由とされているが、その耐震性能の詳細は不明である。本研究は、コンクリート充填鋼管アーチ橋の耐震性能を解析的に調べ、コンクリートを部分的充填した場合との比較により構造的メリットを論じる基礎資料を得んとするものである。日本にはこの形式の橋梁の施工実績や研究例はほとんどないため、中国の既設橋の中から地震時の挙動が複雑とされる中路式アーチ橋を選んで、ケーススタディーを行う。ただし、入力地震動、耐震性照査基準等はすべて日本の土木学会指針²⁾および道路橋示方書³⁾に従う。動的解析に当たっては、4本のコンクリート充填鋼管弦材と鋼管腹材から構成される立体トラス形式アーチリブの軸力と曲げモーメントの相関関係、幾何学的および材料非線形を考慮して行う。

2. 中路式アーチ橋の構造と解析モデル

図-1 に解析対象橋の一般図およびアーチリブの構造と寸法を示す。本橋はスパン $L = 136\text{m}$ 、ライズスパン比 $l/L = 1/5$ の2主構中路式固定アーチ橋である。アーチリブには、直径 $D550 \times 8\text{mm}$ のコンクリート充填鋼管4本を橋軸直角方向 ($D400 \times 8\text{mm}$) および鉛直方向と斜方向 ($D219 \times 8\text{mm}$) の鋼管部材で組立てた、立体トラスを採用している。横桁および縦桁には鉄筋コンクリートのI形梁とT形梁を用い、両者の間隔はそれぞれ 810cm と 100cm である。縦桁は連続梁として No.7 横桁で伸縮装置を設けており、横桁は110本の直径 5mm の高強度鋼線からなる吊材によりアーチリブに吊られている。表-1 は鋼管、吊材およびコンクリートの材料特性である。

表-1 材料特性

材料特性	コンクリート	鋼管	吊材
強度(kgf/cm^2)	$f_c = 275$	$f_y = 3600$	$f_y = 11000$
ヤング率(tf/cm^2)	$E_c = 332$	$E_s = 2100$	$E_s = 2040$
ポアソン比	$\nu_c = 0.2$	$\nu_s = 0.3$	$\nu_s = 0.3$

図-2 は本橋の3次元有限要素骨組の解析モデルで、各部材の質量を各節点に集中する。アーチリブ、ストラット構、支柱、縦桁および横桁ははり要素で、吊材は非抗圧トラス要素でモデル化する。アーチリブの両端支点は固定、主桁の両端部および主桁と No.7 横桁間は橋軸直角方向の面内回転のみ自由とする。

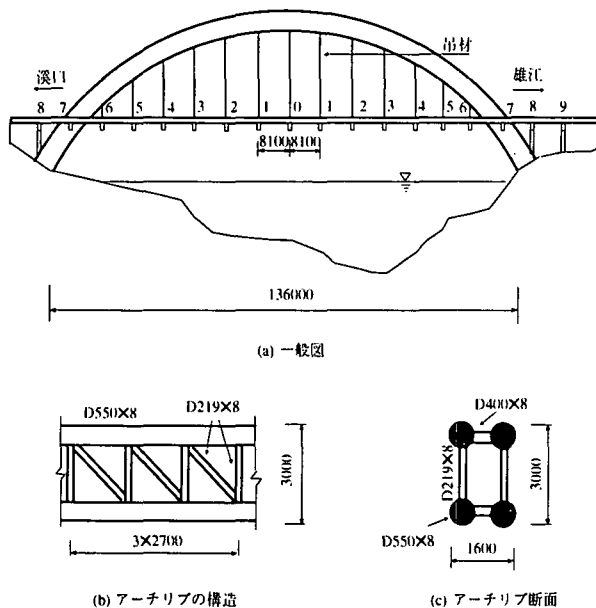


図-1 対象橋の構造 (単位: mm)

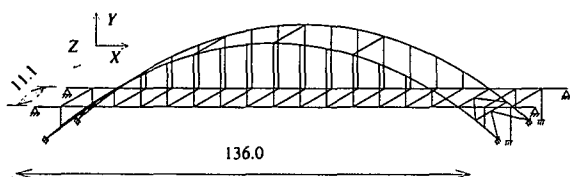


図-2 解析モデル (単位: m)

3. 材料非線形モデル

本橋のアーチリブにはコンクリート充填鋼管弦材と鋼管腹材からなる立体トラスが採用されており、このような組合せ部材の曲げ耐力を引張側弦材または圧縮側弦材の軸方向耐力により決定する。すなわち、橋軸方向の降伏曲げモーメント M_y を次式にて求める。

$$M_y = N_y h$$

$$N_y = \min\{2N_{cy}, 2N_{ty}\}$$

ここに、 h はアーチリブの上、下弦材の中心軸間距離 (図-3) を表し、引張側弦材の降伏耐力 N_{ty} および圧縮側弦材の座屈耐力 N_{cy} の算定式は文献2)に詳述されているので参照されたい。本研究では鋼材のひずみ硬化を考慮せず、終局曲げモーメント $M_u = M_y$ とする。

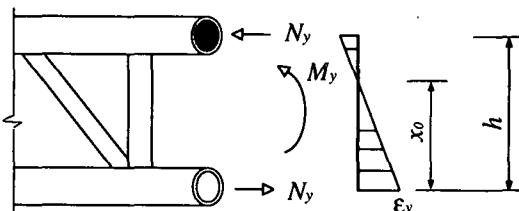


図-3 アーチリブ断面の力学状態

アーチリブの降伏曲率は断面の平面保持を仮定して、次式にて求められる。

$$\phi_y = \frac{\epsilon_y}{x_0}$$

ここに、 $\epsilon_y = \min\{N_{ty}/(E_s A_s), N_{cy}/(E_s A_s)\}$ 、 x_0 は引張側コンクリートの抵抗を無視し、圧縮側コンクリートを線形弾性状態にあると仮定して、弦材軸方向の力のつり合い条件より求めた、引張側弦材の中心から中立軸までの距離である。

道路橋示方書³⁾によれば、コンクリート充填鋼製橋脚の地震時保有水平耐力および許容塑性率を算出する際には、引張側および圧縮側鋼材の終局ひずみを5%としてよい。本解析のコンクリート充填鋼管アーチリブの終局曲率も、引張側の鋼材ひずみを $\epsilon_u = 0.05$ として次式にて算定する。

$$\phi_u = \frac{\epsilon_u}{x_0}$$

橋軸直角方向についても、同様の考え方で求められる。表-2に上述の評価方法により求めたアーチリブの面内・面外降伏曲げモーメントおよび降伏・終局曲率を示す。

表-2 アーチリブの材料非線形特性

断面形式	方向	M_y & M_u (tf·m)	$4N_{ty}$ (tf)	$4N_{cy}$ (tf)	ϕ_y (1/m)	ϕ_u (1/m)
充填鋼管	面内	2402	1960	3773	0.0009	0.0261
	面外	1029	1960	3773	0.0021	0.0609
中空鋼管	面内	2306	1960	1882	0.0007	0.0044
	面外	1009	1960	1882	0.0017	0.0102

曲げモーメントと曲率関係は軸力の変動によって変化するので、アーチリブのように軸力変動が大きい部材ではこの影響を無視し得ない。本解析では図-4のような $M-N$ 相関関係により軸力変動の影響を考慮する。

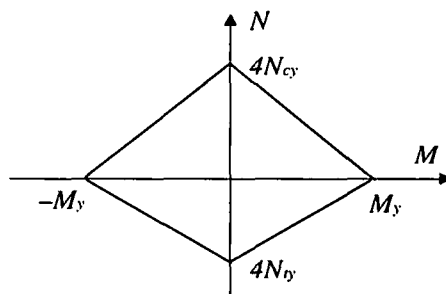


図-4 曲げモーメントと軸力の相関関係

4. 地震応答特性の解析結果および考察

解析対象は上記のコンクリート充填鋼管アーチ橋および比較のための、鋼管リブにコンクリートをスプリング部から No.5 横桁に対応する断面まで部分的充填した、同一諸元のアーチ橋の2つのモデルである。入力地震波は地盤種別をⅠ種地盤として道路橋示方書の標準波形タイプⅡ-Ⅰ-Ⅰ(図-5)を用い、それぞれ橋軸方向および橋軸直角方向に作用させる。数値解析は $\beta = 0.25$ のニューマークβ法を用いた直接積分法により行い、曲げモーメントと曲率の復元力特性は標準型バイリニアモデルを用いる。

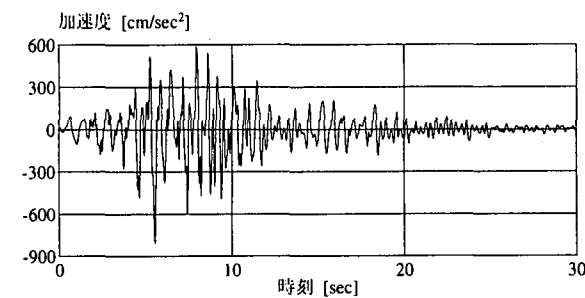


図-5 入力地震波

図-6 に死荷重載荷時の面内曲げモーメント M_{zz} および軸力 N の分布を示す。 M_{zz} の最大値はコンクリート全体充填鋼管アーチ橋のスプリング部、部分充填鋼管アーチ橋のリブと主桁の結合部に生じるが、 N は両橋ともスプリング部で最大となっている。

表-3 に全体充填鋼管および部分充填鋼管アーチリブの最大応答軸力と曲げモーメントを示す。橋軸方向および直角方向の地震動入力の何れの場合でも、応答軸力はスプリング部で、応答曲げモーメントはリブと主桁の結合部で大きな値を生じている。橋軸方向地震動入力の場合には、両橋のスプリング部の最大軸力 N はそれぞれ死荷重載荷時の N の約 1.3, 1.2 倍となり、結合部の面内最大曲げモーメント M_{zz} は死荷重載荷時の M_{zz} の約 9.5, 3.3 倍となっている。直角

方向地震動入力の場合には、両橋のスプリング部の最大軸力 N はそれぞれ死荷重載荷時の N の約 1.5, 1.7 倍となり、結合部の面外最大曲げモーメント M_{yy} は死荷重載荷時の M_{zz} の約 10.8, 3.5 倍となっている。よって、アーチリブの地震応答曲げモーメントはコンクリート全体充填鋼管の場合より、部分充填鋼管の場合の方がかなり小さい。

本解析では全体充填鋼管および部分充填鋼管アーチ橋のリブは、ともに橋軸方向地震動入力時に降伏せず、直角方向地震動入力時に全体充填鋼管アーチ橋のリブが主桁との結合部で降伏する。部材曲率で定義した最大応答塑性率 μ_{max} ($\mu_{max} = \phi_{max}/\phi_y$) はリブと主桁の結合部で 4.5 となっているが、これは次式で表した許容塑性率 $\mu_u = 19.7$ よりかなり小さい。

$$\mu_u = 1 + \frac{\phi_u - \phi_y}{\alpha_\mu \phi_y}$$

ここに、 α_μ はタイプⅡの地震動に対する許容塑性率の算出に用いる安全係数を表し、 $\alpha_\mu = 1.5$ とする³⁾。 ϕ_y 、 ϕ_u は表-2 に示したアーチリブの降伏および終局曲率である。

図-7 に直角方向地震動入力時のリブと主桁の結合部の面外曲げモーメントおよび軸力の時刻歴応答を示す。全体充填鋼管アーチ橋では、応答曲げモーメント M は時刻 $t = 7.26\text{sec}$ に最大値となっている。この時、最大曲げモーメント ($M_{max} = 883 \text{ tf}\cdot\text{m}$) は降伏曲げモーメント ($M_y = 1029 \text{ tf}\cdot\text{m}$) を超えていないが、軸力の影響を考慮した降伏曲げモーメントには達している。ただし、応答塑性率は $\mu = \phi/\phi_y = 1.5$ でかなり小さい。最大応答塑性率 ϕ_{max} は曲げモーメントおよび軸力ともに卓越する時刻 ($t = 7.96\text{sec}$) に発生している。両橋の応答 M および N の最大値は入力地震波加速度が最大値となる時刻 ($t = 5.54\text{sec}$) よりかなり遅れて生じる。

表-3 最大応答断面力

断面形式	部材断面	死荷重		橋軸方向		直角方向	
		軸力 $N(\text{tf})$	面内 $M_{zz}(\text{tf}\cdot\text{m})$	軸力 $N(\text{tf})$	面内 $M_{zz}(\text{tf}\cdot\text{m})$	軸力 $N(\text{tf})$	面外 $M_{yy}(\text{tf}\cdot\text{m})$
全体充填鋼管	スプリング	647.0	189.0	829.6	331.8	998.0	617.9
	結合部	620.0	82.7	712.4	790.6	732.7	883.0
	支間 1/4 点	563.0	40.0	621.3	672.9	679.8	235.8
	クラウン	519.0	144.0	525.3	252.4	590.0	816.3
部分充填鋼管	スプリング	502.3	141.5	616.7	348.3	873.0	664.3
	結合部	418.5	217.0	450.3	715.1	498.3	761.0
	支間 1/4 点	372.4	13.8	388.0	197.1	445.9	52.9
	クラウン	342.1	111.8	345.4	122.4	379.3	367.8

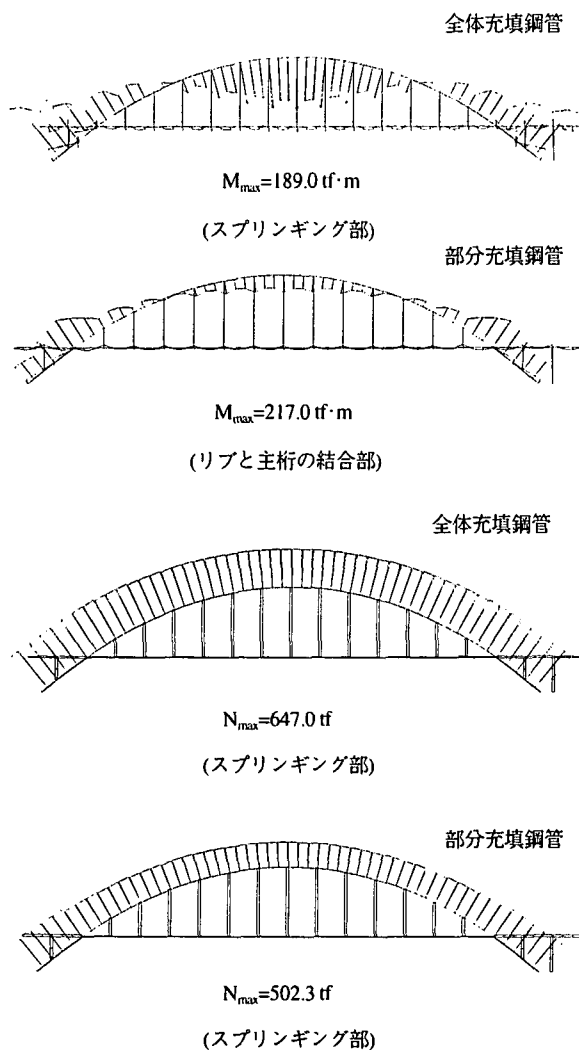


図-6 死荷重載荷時の M と N の分布

5. 結語

コンクリート充填鋼管立体トラスを主構とする合成アーチ橋の地震時3次元動的挙動を解析的に考察するとともに、リブにコンクリートを部分的充填する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) コンクリート充填鋼管アーチ橋はタイプⅡの橋軸方向地震動入力時にはアーチリブが弾性状態にあるが、直角方向地震動入力時にはアーチリブがリブと主桁の接合部で降伏した。

(2) コンクリート充填鋼管アーチリブの、直角方向地震動入力時の最大応答塑性率は許容塑性率の25%程度であり、十分な塑性変形能力を保有している。

(3) 部分充填鋼管の面内曲げモーメントは、死荷重載荷時にリブと主桁の結合部で最大となり、地震応答曲げモーメントは全体充填鋼管の場合に比べてかなり小さくなっている。

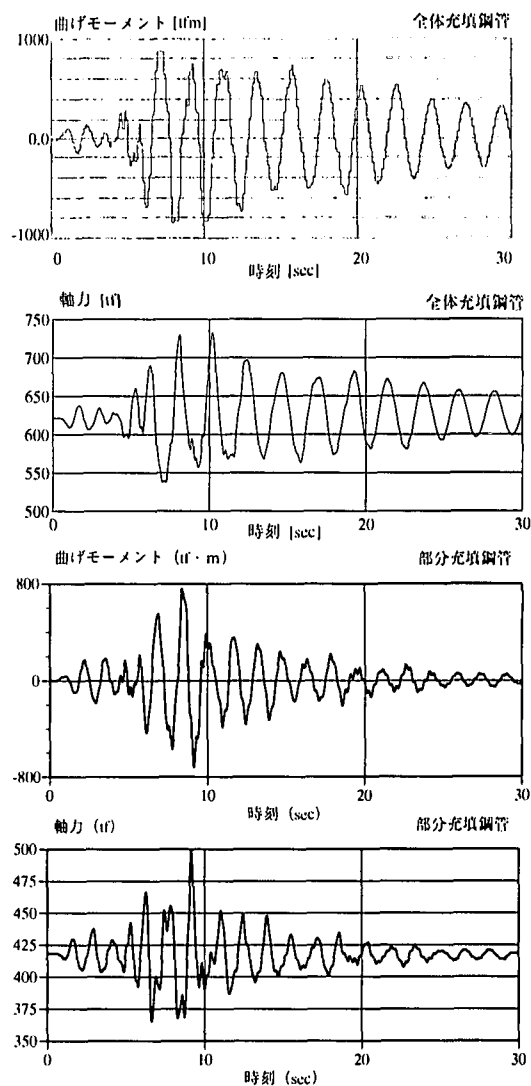


図-7 リブの面外 M と N の時刻歴応答

本研究で扱った中路式アーチ橋では、アーチリブの鋼管全体にコンクリートを充填すると、部分充填に比べて地震応答曲げモーメントが大きくなっている。コンクリートの最適な充填範囲についてさらに検討していく必要があると考えられる。また、今回面内・面外曲げモーメントおよびねじりモーメントの相関関係の影響を考慮しておらず、鋼管によるコンクリートの拘束効果の影響を含めて、今後の研究課題としたい。

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) 土木学会: 鋼構造物設計指針, PART B, 合成構造物, 1997.9.
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, V耐震設計編, 1996.12.