

# コンクリート充填鋼管を用いたアーチ橋の 耐震性能に関する考察

劉 玉 擎<sup>1</sup>・彦 坂 熙<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 九州大学大学院助手 建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 九州大学大学院教授 建設デザイン部門 (同 上)

兵庫県南部地震以降、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橋梁の主要な部材に適用する開発研究が行われている。コンクリート充填鋼管を主構とする長大アーチ橋も、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により組立てられたプレーストリップアーチ橋を対象として、この形式のアーチ橋の非線形耐震性能を解析的に考察し、入力地震波の影響を論じるものである。

**Key Words:** concrete-filled tube, arch bridge, seismic performance

## 1. 序論

コンクリートを充填した鋼管を圧縮部材として用いれば、コンクリートの圧縮耐力上昇、鋼管の座屈強度の増大、部材のじん性向上に加え、施工性および経済性の観点からメリットが極めて大きい。コンクリート充填鋼管を主構とするアーチ橋は、コンクリート充填鋼管の耐震性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。

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を主構とするアーチ橋は、このような立体トラスアーチリブを、等価断面をもつ1本のはり要素でモデル化して動的解析を行うことができる<sup>1)</sup>。しかし本研究では、アーチリブの弦材および腹材をそれぞれ1本のはり要素で表現し、コンクリート充填鋼管アーチ橋の耐震性能を解析的に考察する。動的解析に当たっては、鋼とコンクリートの拘束効果および充填コンクリートにより生じた鋼管リブの初期応力を考慮して、アーチリブ弦材の降伏および終局特性を評価する。

## 2. コンクリート充填鋼管の非線形モデル

### (1) 鋼管およびコンクリートの応力とひずみ関係

軸力と曲げを受けるコンクリート充填鋼管の拘束効果は、次の原因によって生じると考えられる。

- (a) 鋼管がコンクリートの体積膨張を拘束する。充填コンクリートは3軸圧縮応力状態、鋼管は軸方向圧縮、円周方向引張の2軸応力状態となる。
- (b) 充填コンクリートが鋼管半径方向の収縮変形に抵抗する。充填コンクリートは2軸圧縮応力状態、鋼管は軸方向引張、円周方向引張の2軸応力状態となる。

コンクリートを充填した鋼管は終局時に全塑性状態に達し、ミーゼスの降伏条件に従うものとする。2軸引張状態にある充填鋼管の引張側軸方向の降伏応力は中空鋼管の降伏応力 $\sigma_y$ の $\beta_t$ 倍に上昇し、圧縮・引張の2軸応力状態にある充填鋼管の圧縮側軸方向の降伏応力は中空鋼管の $\sigma_y$ の $\beta_c$ 倍に低下する。 $\beta_t$ 、 $\beta_c$ の値は鋼管の円周方向応力および次式のミーゼス降伏条件により決められる。

$$\sigma_z^2 - \sigma_z \sigma_\theta + \sigma_\theta^2 = \sigma_y^2 \quad (1)$$

ここに、 $\sigma_z$ 、 $\sigma_\theta$ は充填鋼管の軸方向および円周方向の応力である。

鋼管半径方向の側圧 $\sigma_r$ を受ける充填コンクリートの圧縮強度および変形能力は、普通コンクリートのそれらより大きくなる。充填コンクリートの圧縮応力とひずみの関係は次式で表され、 $\epsilon_c > 0.002$ では一定とする。

$$\sigma_c = (\sigma_a + k\sigma_r) \frac{\epsilon_c}{0.002} \left( 2 - \frac{\epsilon_c}{0.002} \right) \quad (2)$$

ここに、 $\sigma_{ck}$ ,  $\sigma_c$ ,  $\varepsilon_c$  はそれぞれコンクリートの設計基準強度、応力およびひずみである。 $k$  はコンクリートの拘束係数を表し、一般的に  $k=4.1$  とする。側圧  $\sigma_r$  は次式にて与えられる。

$$\sigma_r = \frac{2t}{D-2t} \sigma_\theta \quad (3)$$

ここに、 $D$ ,  $t$  は鋼管の直径および板厚である。また  $\sigma_\theta = \alpha \sigma_y$ ,  $\alpha$  は鋼管の円周方向応力の大きさを表すパラメータで、一般的に  $\alpha=0.19$  とする<sup>2)</sup>。それゆえ、式(1)のミーゼス降伏条件により、 $\beta_s$ ,  $\beta_c$  はそれぞれ 1.08, 0.89 となる。

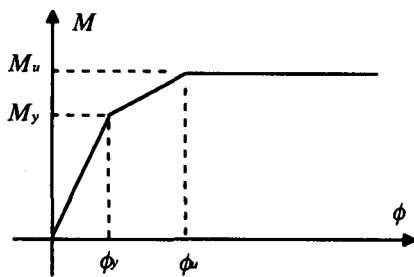
充填コンクリートの終局ひずみは鋼管の径厚比および降伏ひずみに依存し、次式にて与える<sup>3)</sup>。

$$\varepsilon_{cu} = \frac{1.474(\sigma_y/E_s)}{D/t/100} + 0.006 \quad (4)$$

ここに、 $E_s$  は鋼管のヤング率である。

## (2) 曲げモーメントと曲率関係の設定

大規模地震時にはアーチ橋の主構が塑性化することが予想されるので、コンクリート充填鋼管の材料非線形特性を考慮する必要がある。本解析では、引張側鋼管の円周 45 度位置のひずみが降伏ひずみに達した状態で降伏モーメント  $M_y$  を、また圧縮外縁コンクリートのひずみが終局ひずみに達した状態で終局モーメント  $M_u$  をそれぞれ定義する<sup>3)</sup>。図—1 に本解析で設定した曲げモーメントと曲率のトリリニアモデルを示す。



図—1 曲げモーメントと曲率関係

コンクリート充填鋼管の降伏および終局曲げモーメントは次の仮定に従って、微小要素に分割した断面の力のつり合いにより求める。

- コンクリートの引張応力を無視する。
- ひずみの平面保持を仮定する。
- 鋼管のひずみ硬化(硬化係数 0.01)を考慮する。
- 鋼管および充填コンクリートの拘束効果を考慮する。

コンクリート充填鋼管断面の力のつり合いは次式で表される。

$$N = \sum_{i=1}^n \Delta \sigma_{si} \cdot \Delta A_{si} + \sum_{i=1}^n \Delta \sigma_{ci} \cdot \Delta A_{ci} = 0 \quad (5)$$

$$M = \sum_{i=1}^n \Delta \sigma_{si} \cdot \Delta A_{si} \cdot X_i + \sum_{i=1}^n \Delta \sigma_{ci} \cdot \Delta A_{ci} \cdot X_i \quad (6)$$

ここに、 $\Delta \sigma_{si}$ ,  $\Delta \sigma_{ci}$  は  $i$  番目微小要素内の鋼管およびコンクリートの応力で、 $\Delta A_{si}$ ,  $\Delta A_{ci}$  は  $i$  番目微小要素内の鋼管およびコンクリートの断面積である。 $X_i$  は  $i$  番目微小要素内から中立軸までの距離を表す。鋼管の降伏ひずみ  $\varepsilon_y$  およびコンクリートの終局ひずみ  $\varepsilon_{cu}$  をそれぞれ引張側円周 45 度位置の鋼管要素および圧縮外縁のコンクリート要素に与え、式(5)により  $\varepsilon_y$  および  $\varepsilon_{cu}$  に対応する中立軸位置を求める。降伏および終局曲げモーメント  $M_y$ ,  $M_u$  は式(6)により計算する。

コンクリート充填鋼管の降伏および終局曲率は次式にて求められる。

$$\phi_y = \frac{\beta_s \varepsilon_y}{\frac{D}{2} + \frac{D}{2} \cos \frac{\pi}{4} - x_0} \quad (7)$$

$$\phi_u = \frac{\varepsilon_{cu}}{x_0} \quad (8)$$

ここに、 $x_0$  は鋼管の圧縮外縁から中立軸までの距離である。

## (3) 曲げモーメントと軸力の相関関係の設定

曲げモーメントと曲率の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な部材ではこの影響を無視し得ない。本解析では、次式の  $M_{yy}$ ,  $M_{zz}$  および  $N$  の相関関係により軸力変動の影響を考慮する。

$$\sqrt{\left(\frac{M_{yy}}{M_y}\right)^2 + \left(\frac{M_{zz}}{M_y}\right)^2} + \left(\frac{N - N_{0y}}{N_y}\right)^2 = 1 \quad (9)$$

$$\sqrt{\left(\frac{M_{yy}}{M_u}\right)^2 + \left(\frac{M_{zz}}{M_u}\right)^2} + \left(\frac{N - N_{0u}}{N_y}\right)^2 = 1 \quad (10)$$

ここに、 $M_{yy}$ ,  $M_{zz}$  は鉛直方向および橋軸直角方向回りの曲げモーメントで、 $M_y$ ,  $M_u$  は降伏および終局曲げモーメントである。 $N_y$  はコンクリート充填鋼管の圧縮耐力で、次式にて求められる。

$$N_y = (\sigma_s + k\sigma_r) A_s + \beta_c \sigma_c A_c \quad (11)$$

$N_{0y}$ ,  $N_{0u}$  は降伏および終局状態の最大曲げモーメントに対応する軸力で、式(5)の  $N$  を 0 から  $N_y$  まで変化させることにより求められる。本解析では、曲げモーメントの降伏に伴う軸方向剛度と耐力の低減を考えていない。

3. 解析対象橋の構造と解析モデル

図-2 に解析対象橋の一般図を示す。本橋はスパン 230m、ライズ 48m の中路式固定アーチ橋で、アーチリブは断面 D812.8×14mm のコンクリート充填鋼管弦材 4 本を、水平方向 (D508.0×12mm) と斜方向 (D318.5×9mm) の中空鋼管腹材で組立てたプレストリブ (弦材中心軸距離: 4×4m) である。アーチリブの横つなぎ材は水平方向 (D508.0×22mm) と斜方向 (D318.5×9mm) の中空鋼管腹材からなるトラスで、床組直下およびクラウン部付近に配置される。鋼箱型断面の縦桁は床組直下の横つなぎ材上の支承を介してアーチリブと結合している。アーチリブの鉛直材は断面 D508.0×22mm の中空鋼管を、吊材は直径 10cm のケーブルを採用している。

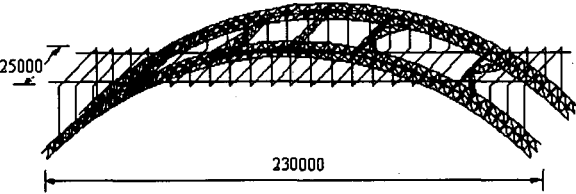


図-2 解析対象橋の一般図 (単位: mm)

動的解析は集中質量系の 3 次元骨組解析モデル (図-2 参照) を用い、床版、舗装の質量も各部材の質量とともに各節点に集中する。リブ、縦・横桁および鉛直材ははり要素で、吊材は非抗圧トラス要素でモデル化する。支承条件として、アーチリブの両端を固定とし、横つなぎ材と縦桁の間を各方向に対する変位拘束および回転自由とする。縦桁の両端では各方向に対する回転自由とし、鉛直方向と直角方向の変位を拘束、橋軸方向変位を自由とする。

4. 地震応答特性の解析結果および考察

本研究では、上述のアーチ橋を対象として、この形式の橋梁の大規模地震時非線形挙動への入力地震波の影響を検討する。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<sup>4)</sup>タイプ I-I-1 ( $a_{max}=318.8\text{cm/sec}^2$ )、タイプ II-I-1 ( $a_{max}=-812.02\text{cm/sec}^2$ ) を用い、橋軸方向に作用させる。数値解析は  $\beta=0.25$  のニューマーク  $\beta$  法を用いた直接積分法により行い、構造減衰をひずみエネルギー比例減衰として、部材別エネルギーを評価することにより減衰マトリックスを計算する。桁および鉛直材などの鋼製部材の減衰定数を 0.02、コンクリート充填鋼管の減衰定数を鋼構造とコンクリート構造の減衰定数の平均値である 0.025 と仮定する。アーチリブ弦材の曲げモーメントと曲率の復元

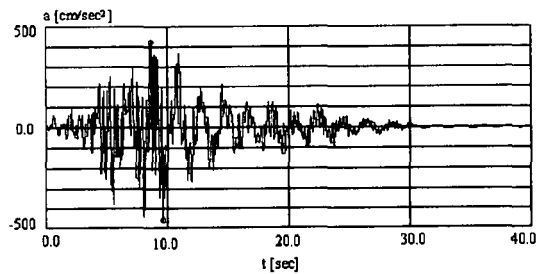
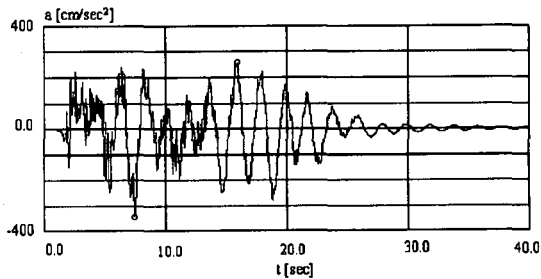
力特性は標準型トリリニアモデルを採用し、部材の幾何学的非線形性および材料非線形性を考慮する。降伏および終局特性は鋼とコンクリートの拘束効果、および充填コンクリートにより生じた鋼管リブの初期応力を考慮して評価している。閉合した中空鋼管にコンクリートを順次充填していく架設工法を用いることとし、その解析により得られた鋼管リブの初期圧縮応力を表-1 に示す。

表-1 鋼管リブの初期圧縮応力 (MPa)

| 弦材  | スプリング部 | 支間 1/4 点 | クラウン部 |
|-----|--------|----------|-------|
| 上弦材 | 89.8   | 57.7     | 92.2  |
| 下弦材 | 82.8   | 72.4     | 31.8  |

本橋の面外 1 次振動周期は 3.58sec となっており、アーチリブと床組の橋軸直角方向の対称振動モードである。面内 1 次振動周期は 1.96sec で、橋軸方向の反対称振動モードとなっている。

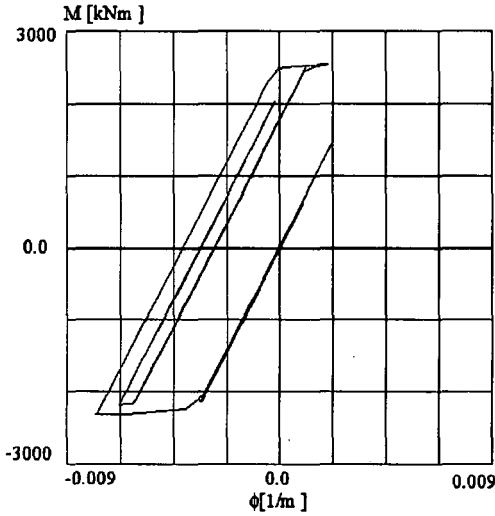
図-3 にタイプ I およびタイプ II 地震波入力の場合におけるアーチリブ支間 1/4 点の橋軸方向加速度の時刻歴応答を示す。タイプ I 地震波入力の場合の最大応答加速度は入力最大加速度を超えているが、タイプ II 地震波入力の場合の最大応答加速度は入力最大加速度の約 50% となっている。



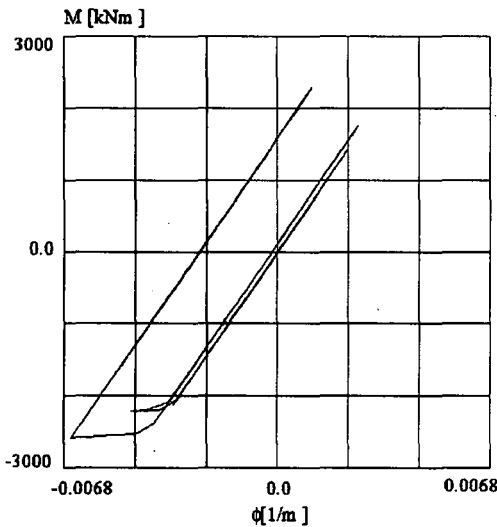
(b) タイプ II 地震波入力

タイプ I 地震波入力の場合は、アーチリブ上・下弦材とも左・右スプリング部で降伏しているが、タイプ II 地震波入力の場合は、下弦材のみ左・右スプリング部で降伏している。ただし、部材曲率

で定義した最大応答塑性率は塑性率の許容値（タイプⅠの場合:  $\mu_p=4.1$ , タイプⅡの場合:  $\mu_p=7.2$ ）を超えていない。図—4 にアーチリブ下弦材の右スプリング部の曲げモーメントと曲率の応答履歴を示す。



(a) タイプⅠ地震波入力



(b) タイプⅡ地震波入力

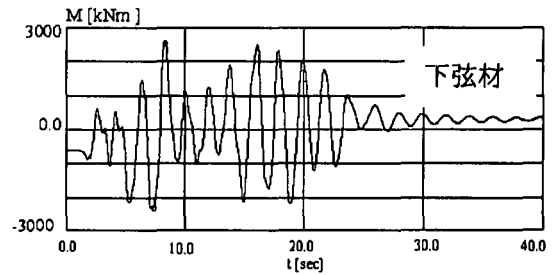
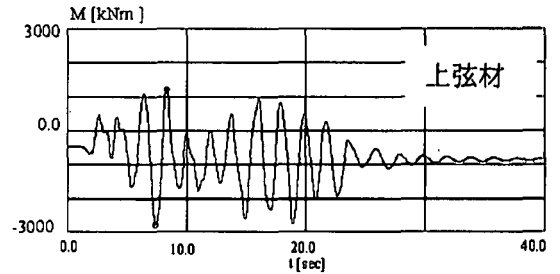
図—4 曲げモーメントと曲率の応答履歴

図—5 に上・下弦材の右スプリング部の曲げモーメントの時刻歴応答を示す。両地震波入力の場合とも上弦材の残留曲げモーメントが入力前のものより増大しているが、下弦材の残留曲げモーメントが入力前のものより減少している。これは降伏後の弦材断面力が剛度変化に応じて発生したものである。

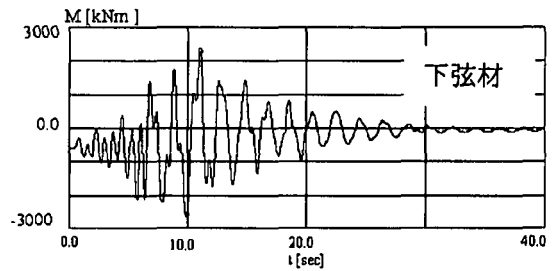
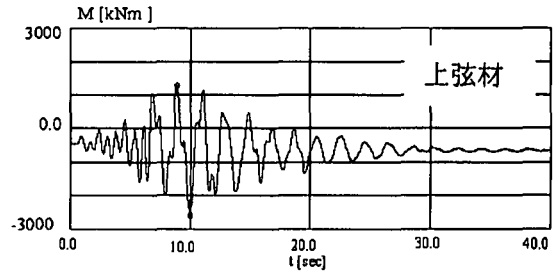
## 5. 結語

本研究は、鋼とコンクリートの拘束効果および充填コンクリートにより生じた鋼管リブの初期応力を考慮して、コンクリート充填鋼管ブレストリブアーチ橋の橋軸方向地震波入力時における非線形挙動

を解析的に検討したものである。鋼管アーチリブにコンクリートを充填することにより、長大アーチ橋の橋軸方向の耐震性能を向上できることがわかった。ただし、橋軸直角方向地震波入力などの検討は今後の課題としたい。



(a) タイプⅠ地震波入力



(b) タイプⅡ地震波入力

図—5 曲げモーメントの時刻歴応答

## 参考文献

- (1) 劉 玉擎ほか: 架構式合成タイドアーチ橋の構造特性および耐震性能, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.1475-1484, 2001.3.
- (2) 日本建築学会: コンクリート充填鋼管構造設計施工指針, 丸善株式会社, 1997.10.
- (3) 村田清満ほか: コンクリート充填円形鋼管柱の変形性能の再評価, 土木学会論文集, No.640/ I -50, 2000.
- (4) 日本道路協会: 道路橋の耐震設計に関する資料, 1997.