

# 上路式鋼アーチ橋の2次元弾塑性地震応答性状とそのモデル化

宇都宮大学 学生員 柳 智子  
 宇都宮大学 正員 中島 章典  
 宇都宮大学 正員 斉木 功

## 1. はじめに

上路式補剛鋼アーチ橋は、アーチ部材の軸圧縮力によって構造系全体を支持する形式であり、もともと地盤条件が良好な山岳地帯において採用されることが多く、大規模な震災事例はほとんどない。しかし、1995年に起きた兵庫県南部地震以後は耐震設計に際して、従来の地震動に加えて、構造物には兵庫県南部地震クラスの地震動に対する安全性の確保が必要とされている。

そこで本研究では、一般的な諸元の上路式補剛鋼アーチ橋を対象とし、コンクリート床版を含む補剛桁のモデル化およびアーチクラウン部のポスト部材のモデル化に注意を払って、設定したタイプの解析モデルの固有振動特性を検討した。次に、それらモデルに対して、Bernoulli-Euler 梁および Timoshenko 梁<sup>2)</sup>を用いて、複合非線形性を考慮した平面骨組の地震応答解析を行った。そして、せん断変形およびせん断応力の降伏に及ぼす影響やコンクリート床版の剛性の考慮が2次元の大地震時応答性状に及ぼす影響を検討した。

## 2. 解析モデルの諸元と材料特性

解析対象は図-1に示すような橋長  $L=105\text{ m}$ 、アーチライズ  $15\text{ m}$  の上路式補剛鋼アーチ橋とし、図-2、図-3に示すように補剛桁はI型断面、アーチリブおよびポストは無補剛の箱型断面とした。鋼材のヤング係数は  $205.8\text{ kN/mm}^2$ 、せん断弾性係数は  $79.2\text{ kN/mm}^2$ 、補剛桁、ポスト、アーチリブの降伏応力はともに  $313.6\text{ N/mm}^2$  とした。

一方、コンクリート床版は、2次元解析のため対称性を考慮して図-2の半分の断面諸元を用いた。コンクリートのヤング係数は  $25\text{ kN/mm}^2$ 、圧縮強度は  $23.5\text{ N/mm}^2$  とした。

## 3. 解析方法とモデル化

この上路式補剛鋼アーチ橋を解析するにあたり、以下ののような FEM 平面骨組にモデル化した。

図-1のように、各ポストの両端に回転ヒンジを考慮した解析モデルを 154 節点、139 要素に、両端を剛結したモデルを 126 節点、139 要素に分割した。また、これらのモデルに加えて、コンクリート床版を補剛桁と別々の部材とし、仮想要素で剛結させ、全体では 203 節点、236 要素に分割してモデル化した。アーチリブの両端はヒンジであり、補剛桁の両端は可動支承としている。次に、鋼断面の分割数は、ウェブは断面の高さ方向に 20 分割し、フランジは分割していない。コンクリート床版は断面の高さ方向に 20 分割とした。したがって、モデルタイプを表-1のように、T-mhs を基本タイプとして計 6 タイプを設定した。

弾塑性解析においては、鋼材の応力ひずみ関係はバイリニア移動硬化型とし、降伏後の弾性係数をヤング係数の 0.01

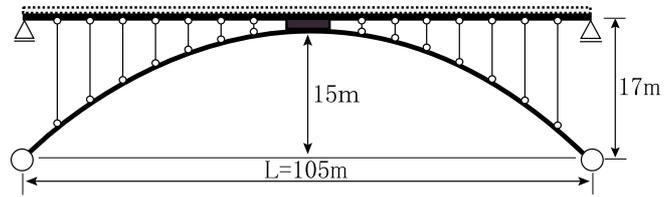


図-1 解析モデルの全体図

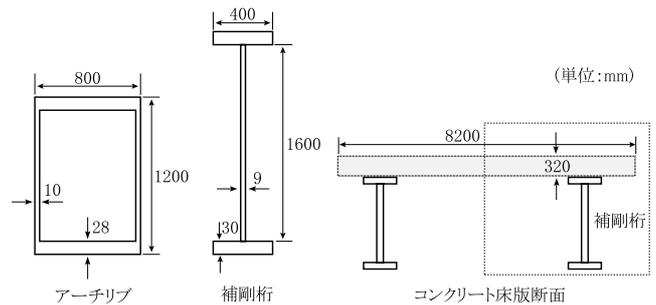


図-2 アーチリブおよび補剛桁断面図

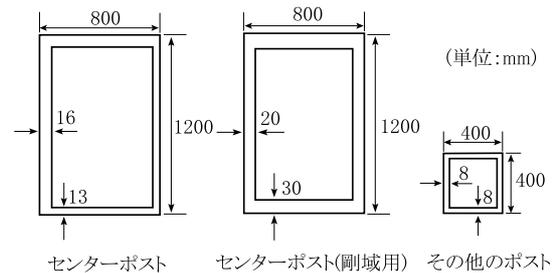


図-3 ポスト断面図

表-1 検討項目別モデルタイプ

タイプ	梁部材のタイプ	ポスト両端の境界条件	床版剛性の考慮法
T-mhs	Timoshenko	ヒンジ	断面一体
B-mhs	Bernoulli	ヒンジ	断面一体
T-ms	Timoshenko	剛結	断面一体
T-mh	Timoshenko	ヒンジ	無視
B-m	Bernoulli	剛結	無視
T-mhs'	Timoshenko	ヒンジ	部材別に考慮

倍とした。また、幾何学的非線形性は微小ひずみ・有限変位理論により考慮した。コンクリートの応力ひずみ関係には鋼材と同様の構成則を用い、ヤング係数および降伏応力（圧縮強度）をコンクリートの特性に対応させた。時刻歴応答解析には、時間積分間隔を  $\Delta t=0.001$  秒として、Newmark の  $\beta$  法 ( $\beta=1/4$ ) を適用した。本解析では、入力する地震波データは JR 鷹取駅記録を 2 倍に拡大して使用した。なお、減衰

Key Words: 鋼アーチ橋, モデル化, 複合非線形解析, 固有振動特性, 耐震設計

〒 321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学工学部建設学科 Tel.028-689-6210 Fax.028-689-6230

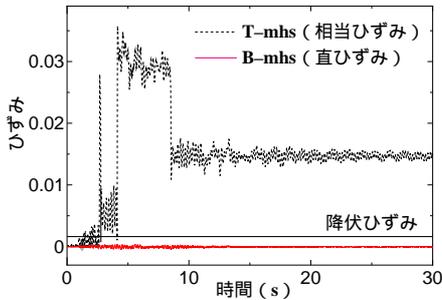


図-4 センターポストひずみの時刻歴

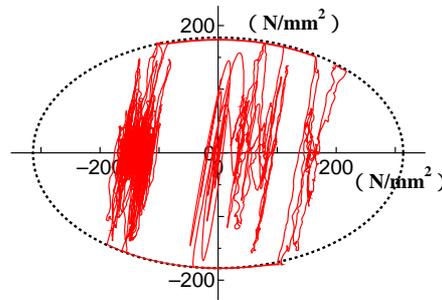


図-5 Mises の降伏曲面

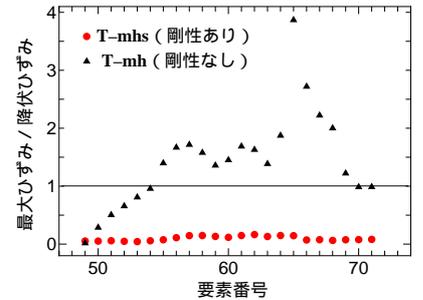


図-6 補剛桁の最大ひずみ分布

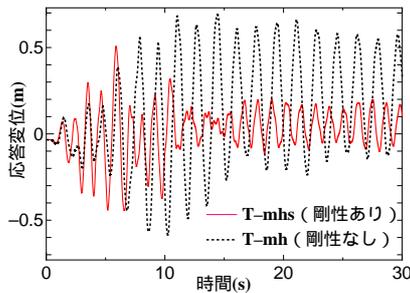


図-7 補剛桁 3L/4 点の鉛直方向変位時刻歴応答曲線

については弾性状態の1次固有振動モードに対して減衰定数1%の質量比例型とした。また死荷重の大きさは、全長で4.14MNとする。弾塑性地震応答解析においては、コンクリート床版も含めた補剛桁断面に等価な単位体積質量を設定すると共に、死荷重を静的に载荷した後、地震波を入力し解析を行っている。

表-2 固有周期 (秒)

タイプ	T-mhs	B-mhs	T-mh	T-mhs'
1次モード	1.196	1.180	1.683	1.150
2次モード	0.540	0.529	0.721	0.536
3次モード	0.377	0.374	0.404	0.376
4次モード	0.285	0.273	0.394	0.324
5次モード	0.209	0.200	0.261	0.217

4. 固有値解析および弾塑性地震応答解析結果

ここでは、先に決定した6つのモデルタイプのうち、以下の4つのモデルの1次～5次振動の固有周期を表-2に示す。上記の基本タイプに対して、タイプB-mhsはせん断変形の影響を無視したタイプである。まず、タイプT-mhsはせん断変形の影響を各断面のウェブのみに考慮させている。この2タイプを比較すると、タイプB-mhsに対して基本タイプの方が1次から5次振動までのすべてにおいて、固有周期が長くなっており、1次で約1.3%の差異が生じている。次に、タイプT-mhはタイプT-mhsに対して床版剛性を無視したタイプである。この両者の固有周期を比べると違いは一目瞭然である。固有周期だけを見ても最大で約30%もの差異が生じている。また、T-mhs'は床版と補剛桁を別の部材にモデル化したものであるが、一体断面の場合と中立軸をとる位置が変化するため、センターポストや他のポストの長さが一体断面のものより幾分長くなる。そのため、両者で固

有周期が一致しないという結果が得られた。このように、各タイプごとに固有周期の差異が認められた。よって、動的解析結果に以上のモデル化の影響が生じると考えられる。

図-4はタイプT-mhsとタイプB-mhsのセンターポストウェブ最外縁における直ひずみおよび相当ひずみの時刻歴応答曲線の結果を、図-5は直応力とせん断応力の関係を示す。この結果から、せん断変形を考慮したタイプT-mhsでは、降伏ひずみを遥かに超え塑性化が生じていることがわかる。以上のことから、細長比の小さいセンターポストは直応力のみでは塑性化せず、せん断応力の影響が大きいという結果が得られた。また、センターポストは補剛桁とアーチリブの相対的な橋軸方向変位を支持するため、特に大きな地震力が作用する。したがって、センターポストのモデル化には注意を払う必要があると言える。次に、図-6には補剛桁左半分の各要素の最大ひずみ分布を示す。この図から、コンクリート床版の剛性を考慮しているタイプT-mhsでは、最大ひずみは小さいが、床版剛性を無視したタイプT-mhでは、部材の半分以上が塑性化していることがわかる。また、図-7には補剛桁の鉛直方向変位時刻歴応答曲線を示す。この図から、最大変位も変位の時刻歴も明らかに異なっていることがわかる。以上のことから、弾塑性地震応答解析を行う際には、コンクリート床版の剛性を考慮することは必須であると言える。

5. おわりに

本研究では、コンクリート床版を含む補剛桁のモデル化において、一体化断面と仮要素を用いて剛結した部材別断面とでは、ポストやセンターポストの長さが変化してしまうため、低次の固有周期の大小関係が変化するという結果が得られた。また、弾塑性地震応答解析において、鋼アーチ橋のセンターポストの降伏には、せん断応力が大きく影響することから、その影響を考慮したモデル化が必要であることを示した。さらに、コンクリート床版剛性はその有無が解析結果に大きな影響を及ぼすことから、床版剛性を考慮することは必須であることを確認した。

参考文献

- 1) 日本鋼構造協会次世代土木鋼構造研究特別委員会：橋梁システムの動的解析と耐震性, pp.189-207,1999.4.
- 2) 後藤芳顕, 奥村徹, 鈴木昌哉：非線形はりモデルを用いた鋼製橋脚の耐震解析における幾何学的非線形性とせん断変形の影響, 土木学会論文集, pp.157-172,2002.1.
- 3) 土木学会地震工学委員会・地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造物の耐震設計法の開発に関する研究小委員会：地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造物の耐震設計法の開発, pp.378-382, 2000.3.