

# 上路式鋼アーチ橋の地震時応答特性に関する一考察

A Study on Seismic Response Characteristics of Upper-Deck Type Steel Arch Bridges

株式会社ドーコン 正会員 桜井 勇人 (Hayato Sakurai)  
 株式会社ドーコン 正会員 小林 竜太 (Ryuta Kobayashi)  
 株式会社ドーコン 正会員 工藤 浩史 (Hiroshi Kudo)  
 株式会社ドーコン 正会員 池田 準 (Jun Ikeda)

## 1. はじめに

上路式鋼アーチ橋のアーチリブのように橋梁全体系の挙動や安定に大きな役割を担う部材において、高い軸力作用下でかつ地震時にその軸力が変動するような部材の動的挙動は十分解明されていない。このような部材に対して現行の道路橋示方書<sup>1)</sup>では、可逆性を有し力学的特性や挙動が弾性範囲内にある限界の状態である限界状態1を超えないことが規定されている。一方、アーチ橋等の特殊構造の橋梁では、地震時の挙動が複雑であることや急峻・狭隘な地形に架橋されていることが多いことから補強対策が未実施の橋梁で地震被害が報告されている。このような観点から、本検討では、上路式鋼アーチ橋の大規模地震時における動的応答特性を把握することを目的として数値解析的な検討を行った。

## 2. 検討対象とした鋼アーチ橋の概要

図-1 に検討対象の基本諸元を示す。本検討の対象とした鋼アーチ橋は、橋長 163.4m、アーチ支間長  $L=105\text{m}$ 、アーチライズ  $H=20\text{m}$  (ライズ比  $L/H=5.25$ )、有効幅員 7.5m の 2 ヒンジを有する逆ローゼ形式である。アーチリブは  $\phi 1400\text{mm}$  の鋼管構造であり、アーチ構台上のピン支承の上沓は、アーチリブと端支柱両方を支持している。また、橋台部の支承板支承は橋軸方向に可動であり、端支柱の端ではピボット支承が補剛桁を支持している。

## 3. 構造解析の概要

### 3.1 解析モデル

図-2 に解析モデルを示す。軸力変動の影響を加味するため補剛桁・アーチリブ・縦桁・横桁・横支材・支柱はファイバー要素、床版・橋台は弾性梁要素でモデル化

し、横構や対傾構は材端をピン結合として軸力のみ伝達させた。アーチ構台は堅固な岩盤上に設置されているためモデル化はせず、ピン支承をバネ要素でモデル化した。可動支承は摩擦抵抗を考慮したバイリニアモデルとした。

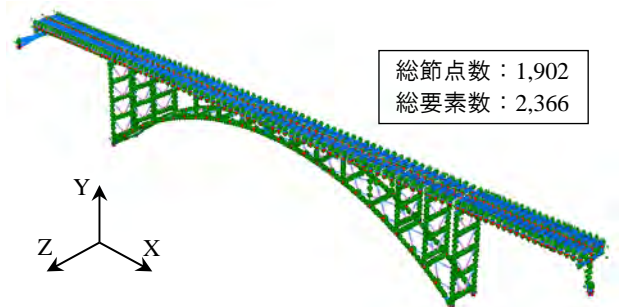


図-2 構造解析モデル (立体骨組モデル)

床版と補剛桁は、重心位置まで剛な仮想部材を設けて、相互にピン結合してそれぞれの剛性を考慮したモデルとした<sup>2)</sup>。部材の要素分割は図-3 に示すように格点間を4分割することを基本とした。また、下横構とアーチリブは鋼管の半径を考慮して剛な仮想部材に接続させた。

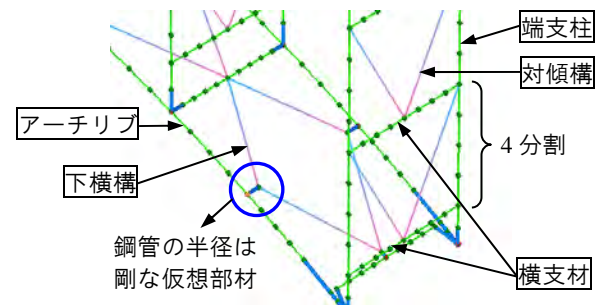


図-3 部材の要素分割状況

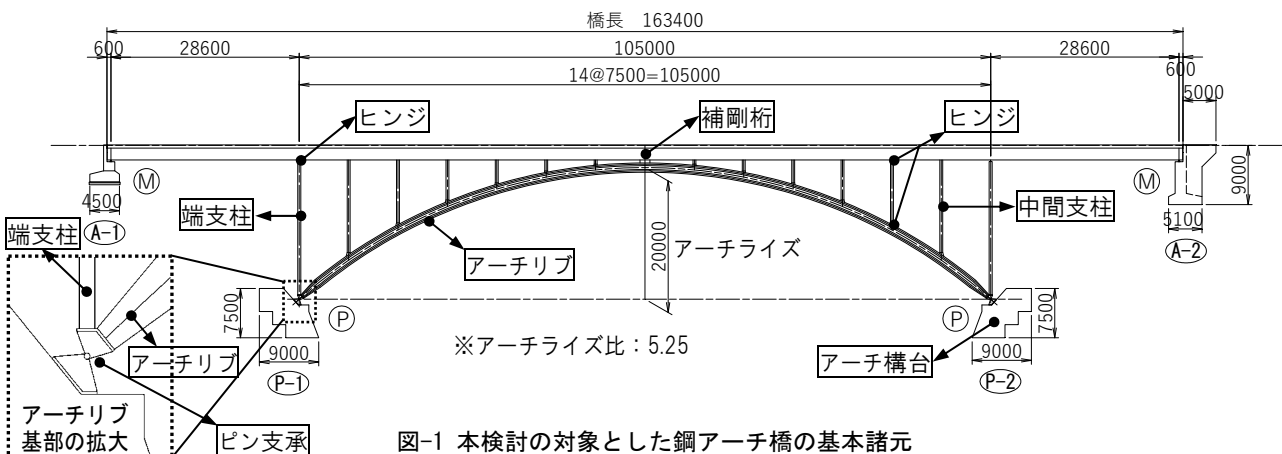


図-1 本検討の対象とした鋼アーチ橋の基本諸元

### 3. 2 材料構成則

上述のように、アーチ橋である対象橋梁の主要な部材はレベル2地震動に対して可逆性を有する弾性範囲内にある限界の状態である限界状態1を超えないことが要求されるため、本解析では部材の材料非線形性は考慮しないものとした。よって、ファイバー要素に対する応力-ひずみ関係は弾性係数 ( $E=200\text{GPa}$ ) を傾きとする線形関係とした。適用したファイバーモデルは Timoshenko 梁理論に基づく曲げによるせん断変形を考慮した2節点アイソパラメトリック梁要素とした。なお、本解析では、せん断変形の影響を適切に考慮するために有効せん断断面積を与え、円環形状であるアーチリブの有効せん断断面積は文献 3) を参考にして全断面積の 1/2 と設定した。

### 3. 3 地震応答解析法

動的解析法には直接積分法に基づく時刻歴応答解析を適用した。アーチ橋のように部材がスレンダーでひずみや変位が大きくなると、これらの影響を無視した微小変位解析では解析精度が低下するため弾性有限変位解析を行った。なお、数値積分法は Newmark- $\beta$  法 ( $\beta=1/4$ ) を適用し、積分時間間隔  $\Delta t$  は 1/100 秒と設定した。

入力地震動は、道路橋示方書【耐震設計編】のレベル2地震動における標準加速度波形（I種地盤用のタイプII地震動1波目）とし、これをモデル下端に入力した。

なお、地震応答解析の初期状態を構築するため、事前にアーチリブの自重を補剛桁が負担しないよう架橋時の施工ステップを考慮した死荷重解析を実施した。

## 4. 解析結果および考察

### 4. 1 固有振動解析結果

本橋の振動特性を把握するためサブスペース法による固有振動解析を実施した。表-1 に橋軸方向および橋軸直角方向における刺激係数の大きいモードを抽出した。

表-1 固有振動解析結果

モード 次数	f(Hz)	T(s)	刺激係数			モード 減衰定数
			X	Y	Z	
1	1.043	0.959	22.930	-0.004	-0.004	0.021714
2	1.221	0.819	-0.001	-0.008	-35.528	0.021237
5	2.884	0.347	-3.002	0.001	0.000	0.020012
6	2.913	0.343	25.639	-0.008	-0.004	0.020827
8	4.192	0.239	-13.109	-0.154	-0.078	0.022021
70	4.635	0.216	-0.064	-0.096	11.091	0.029201
77	5.187	0.193	0.054	0.173	-12.918	0.023984
78	5.456	0.183	-12.568	0.049	-0.036	0.021545
80	5.749	0.174	-5.719	0.009	-0.002	0.020153
95	7.154	0.140	-0.018	0.039	-2.382	0.028422
96	7.872	0.127	0.148	-0.023	5.798	0.043040
97	8.044	0.124	15.096	1.248	-0.054	0.090300

※f: 固有振動数, T: 固有周期

図-4 には橋軸方向および橋軸直角方向における主要な振動モードを示す。これより、橋軸方向に着目すると、1次および6次モードで刺激係数が大きくなっているが8次、78次、97次等でも比較的大きな刺激係数が確認できる。また、橋軸直角方向に着目すると、2次モードが卓越しており、続いて70次、77次となっている。

これより、1) 特にアーチ面内である橋軸方向の振動特性が複雑であること、2) 橋軸直角方向では道路橋示方書におけるレベル2地震動タイプIIの標準加速度応答

スペクトルの最大値周期帯付近で卓越していることから、地震動入力時に大きく振動するものと推察できる。

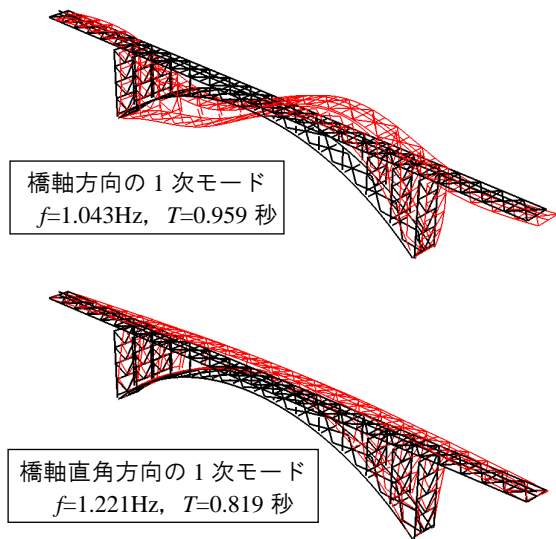


図-4 固有振動解析で得られた主要な振動モード形状

### 4. 2 減衰特性のモデル化

減衰はひずみエネルギー比例型とし、減衰定数として鋼部材には 0.02, RC 床版には 0.03, 基礎バネには 0.10 を仮定して、剛部材（オフセット部材）は全て 0 とした。地震応答解析で考慮する減衰は Rayleigh 型減衰とした。ここで、Rayleigh 曲線の設定にあたっては、本橋は極めて複雑に振動するため刺激係数の大きい2つのモードを選択することが合理的とならない場合がある。そこで、本解析では Rayleigh 型減衰の係数  $\alpha$  と  $\beta$  を、各振動モードにおける刺激係数を重みとしてモード減衰定数と Rayleigh 型減衰による減衰定数の残差の2乗和が最小となるように最小2乗法で設定することとした<sup>4)</sup>。図-5 に設定した Rayleigh 減衰曲線を示す。モード減衰定数を表す点の大きさは刺激係数に対応しており、設定した曲線は全体にわたり平均的になっていることが分かる。

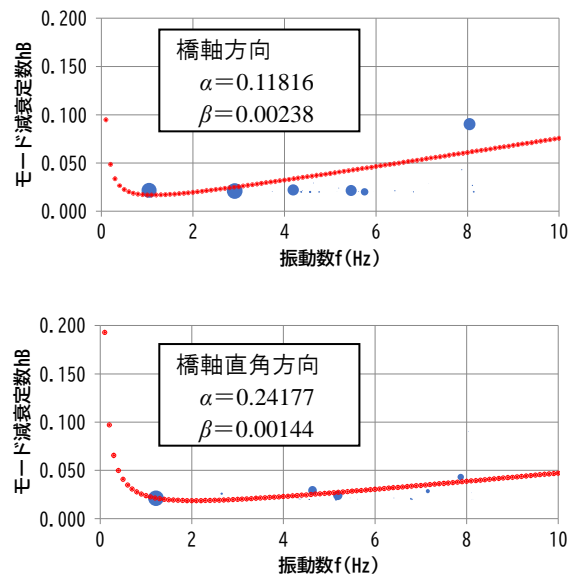


図-5 Rayleigh 型減衰の設定

4.3 地震応答解析結果

(1) 橋軸方向地震波入力時の応答特性

図-6 に橋軸方向地震波入力時における各種応答波形を示す。図より、アーチ支間中央部の最大水平変位は約105mm、アーチ支間1/4点における最大鉛直変位は約200mmであった。図-4 に示した橋軸方向の1次モードにおいてもアーチ支間1/4点の鉛直変位が大きくなっているため、固有振動解析と整合した結果が得られている。アーチリブ基部の軸力波形に着目すると、9秒付近で若干の引張力が発生しているが、その程度は非常に小さい。

図-7 はファイバー要素でモデル化した主要な部材に対して、塑性化（降伏）した箇所を着色して示している。図より、補剛桁の一部で引張降伏が発生しており、これも1次モードで上側引張となっている箇所と合致しており、想定された応答となっている。なお、その他のアーチリブや支柱等では部材の塑性化は確認されなかった。

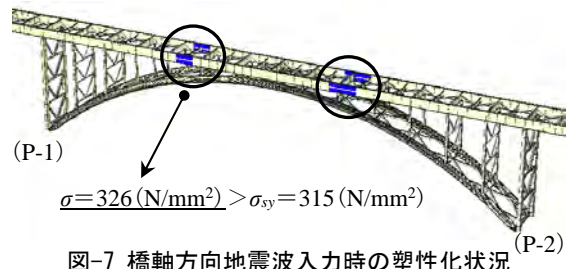
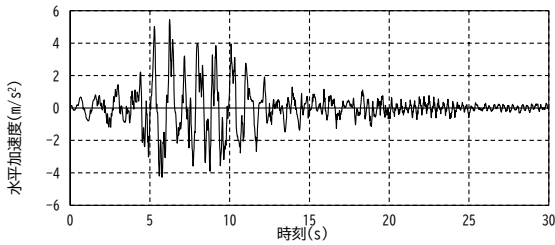


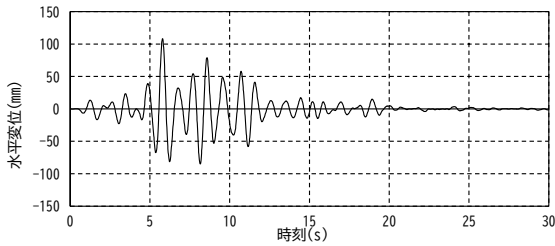
図-7 橋軸方向地震波入力時の塑性化状況

(2) 橋軸直角方向地震波入力時の応答特性

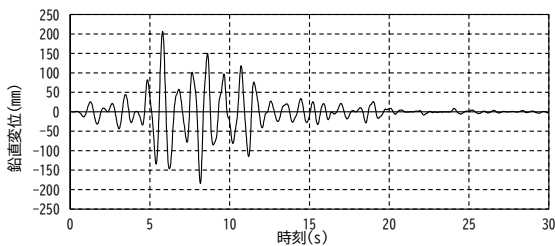
図-8 に橋軸直角方向地震波入力時における各種応答波形を示す。図より、アーチ支間中央部における水平変位は約300mmであった。アーチリブ基部の軸力波形は右側と左側で正負が逆転しており、支間中央部の変位に応じてアーチリブ基部に偶力として押込み力・引抜き力が作用した。この作用力は1基あたり20,000kN程度とピン支承部の耐力を大きく超過するレベルであった。



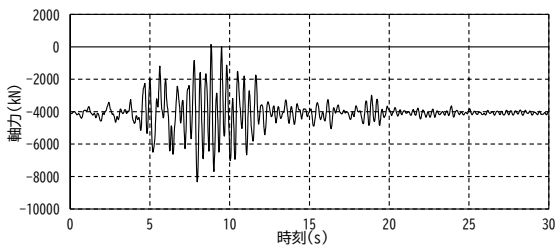
(アーチ支間中央部における面内水平加速度波形)



(アーチ支間中央部における面内水平変位波形)

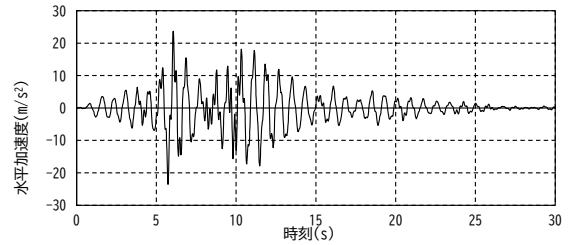


(アーチ支間1/4点における面内鉛直変位波形)

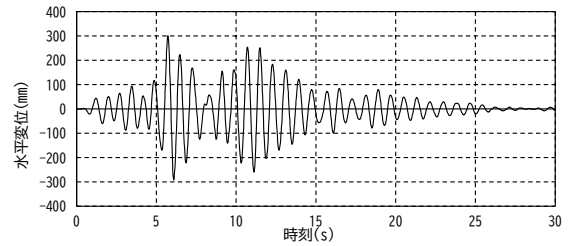


(P-1 右側のアーチリブ基部の軸力波形)

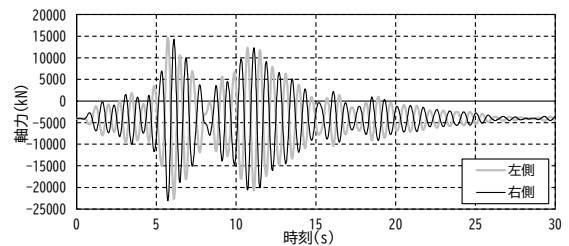
図-6 橋軸方向地震波入力時の各種応答波形



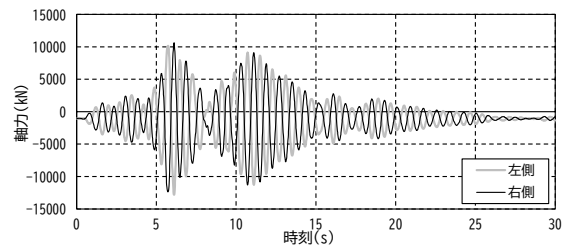
(アーチ支間中央部における面外水平加速度波形)



(アーチ支間中央部における面外水平変位波形)



(左右のアーチリブ基部の軸力波形)



(左右の端支柱基部の軸力波形)

図-8 橋軸直角方向地震波入力時の各種応答波形

図-9 はファイバー要素でモデル化した主要な部材に対して、塑性化（降伏）した箇所を着色して示している。図より、橋軸直角方向地震波入力時では、橋軸方向地震波入力時には見られなかったアーチリブ基部や支柱および横支材で部材の塑性化が発生し、特に大きな圧縮力が作用するアーチリブ基部の応力度は降伏応力度を大きく超過することが確認された。

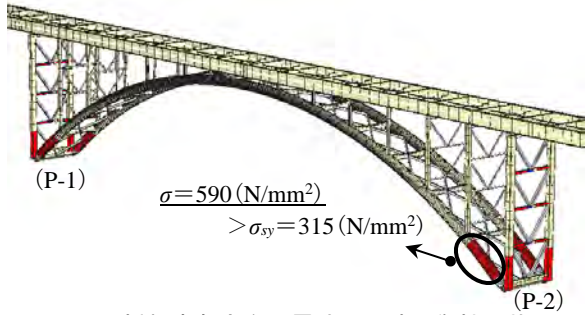


図-9 橋軸直角方向地震波入力時の塑性化状況

(3) 水平 2 方向地震波入力時の応答特性

道路橋示方書に準じた耐震設計では、地震時における橋梁の挙動が支配的となる 2 方向に対して独立に地震力を作用させ、その応答値を用いて設計することとなっている。しかし、アーチ橋は極めて複雑な動的挙動を呈する橋梁であるため、水平 2 方向に地震波を入力した場合の応答特性についても検討することとした。ここで、入力は 3.3 で示した標準加速度波形の最大値を、橋軸方向と橋軸直角方向にそれぞれ  $1/\sqrt{2}$  倍して同時に入力した。

なお、水平 2 方向入力時の Rayleigh 型減衰の設定では、橋軸方向 (X 軸) と橋軸直角方向 (Z 軸) の刺激係数の二乗平方根により合成し、これを重みとして係数を設定した。図-10 に設定した Rayleigh 減衰曲線を示す。

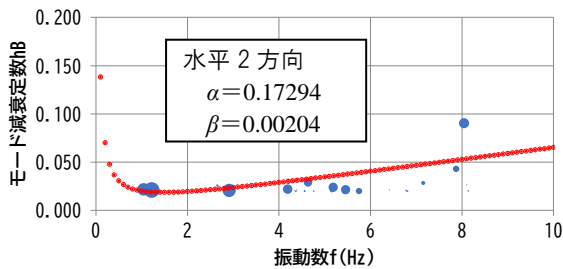


図-10 水平 2 方向入力時の Rayleigh 型減衰の設定

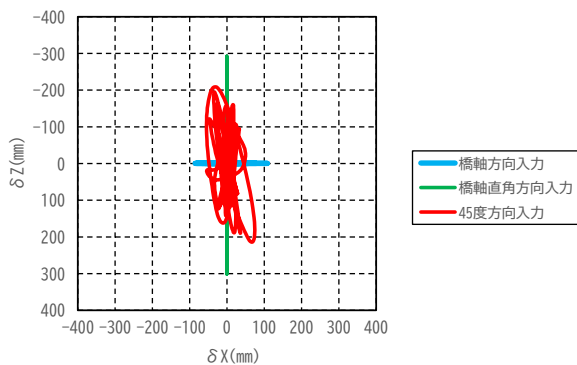


図-11 アーチ支間中央部の水平変位履歴(リサージュ)

図-11 にアーチ支間中央部における水平変位履歴図(リサージュ)を示す。図より、水平 2 方向に同時に入力した場合は、橋軸方向と橋軸直角方向のそれぞれに入力した場合と比較して最大応答変位は小さいことが確認された。よって、橋軸方向および橋軸直角方向で独立に地震力を作用させて性能を照査することで、水平 2 方向地震力に対しても安全性は確保されると考えられる。

5. まとめ

本検討で得られた知見を要約すると、以下のとおりである。

- 1) 橋軸方向地震波入力時では、アーチ支間 1/4 点における鉛直方向の変位応答が支配的となる。この傾向は、固有振動解析で得られた振動モードと合致し、この変形に起因して補剛桁の一部で引張降伏が発生した。よって、同形式のアーチ橋に対して耐震診断を行う場合は、この点に着目する必要がある。また、アーチリブには軸力変動が確認され、一時的に引張軸力が作用したが、その程度は小さいものであった。
- 2) 橋軸直角方向地震波入力時では、アーチ支間中央部において面外方向の大きな水平変位が発生する。アーチリブ基部の応答軸力波形より、左右のアーチリブで同時刻の軸力が正負逆転することが確認されたため、面外方向の振動により偶力として支持するピン支承部に押し込み・引抜き力が発生すると考えられる。その作用力のレベルは非常に大きいことからピン支承の損傷が懸念される。また、橋軸方向地震波入力時には見られなかったアーチリブ基部、支柱および横支材において部材の塑性化が認められた。
- 3) 水平 2 方向地震波入力時では、その応答が橋軸方向および橋軸直角方向に入力した場合よりも小さいため、橋軸方向および橋軸直角方向で独立に地震力を作用させて性能を照査することで、水平 2 方向地震力に対しても安全性は確保されると考えられる。
- 4) 鋼アーチ橋ではエネルギー吸収を期待できる部材がなく、特に橋軸直角方向加震時の応力レベルが非常に高くなる。よって、当て板等による部材補強では現実的に対応が困難であると推察され、耐震化対策としてはエネルギー吸収が期待できる制震ダンパー等を効果的に配置し、地震時の応答そのものを低減させることが肝要であると考えられる。

参考文献

- 1) 公益社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V【耐震設計編】，2017.11.
- 2) 公益社団法人 土木学会：2018 年制定 鋼・合成構造標準示方書【耐震設計編】，2018.5.
- 3) 社団法人 日本鋼構造協会：ファイバーモデルを用いた鋼橋の動的耐震解析の現状と信頼性向上，2011.2.
- 4) 臺原 直，大月 哲，矢部 正明：非線形動的解析に用いる Rayleigh 減衰のモデル化に関する提案，第 2 回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.371-378，土木学会，1996.