

RCアーチ橋の耐震検討

北沢 正彦¹・幸左 賢二²・渡辺 典男³

¹正会員 阪神高速道路公団 工務部（〒541 大阪府大阪市久太郎町四丁目1-3）

²正会員 PH.D. 阪神高速道路公団 工務部（〒541 大阪府大阪市久太郎町四丁目1-3）

³正会員 大成建設株式会社 土木設計第一部（〒163-06 東京都新宿区西新宿一丁目25-1）

1. はじめに

本検討は、旧道路橋示方書で設計された既設 RC アーチ橋の耐震診断を行うものである。

図1.1に本検討の対象となる橋梁の一般図を示す。本橋は、橋長186m、アーチ支間長100m、アーチライズ25mの上路式RC固定アーチ橋である。下部構造は直接基礎5基、深礎基礎2基からなり、上部構造はRC中空床版桁である。補剛桁は、メナーゼヒンジおよび滑り支承により支持されている。

詳細設計時の耐震設計は、修正震度法により行われており、大規模地震時の耐震性が明らかにされていない。そこで、現行示方書の地震時保有水平耐力法レベルの標準波形を用いて、本橋の大規模地震時における耐震性を検討した。

以下に、橋軸方向の検討結果を中心に、本橋の振動性状を確認するとともに、動的解析結果および耐力照査結果を報告する。

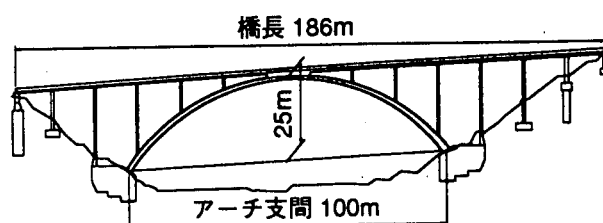


図1.1 一般図

表2.1 橋軸方向の代表的な固有値

モード次数	振動数(Hz)	刺激係数	備考
1	1.023	21	逆対称1次モード
6	3.195	9	橋脚および鉛直材の振動モード
13	3.552	8	逆対称2次モード
21	7.091	11	補剛桁の振動モード

2. アーチ橋の振動性状

表2.1に本橋の橋軸方向における代表的なモードの固有値を示す。また、図2.1に固有振動モード図を示す。

1次モードは、アーチリブの変形が中心となり、アーチリブの変形により補剛桁が変形し、全体としてクラウン部を中心とした逆対称型のモード形状となる。

6次モードは、橋脚が他の部材に影響されずに独立して振動するモードであり、上端をピン、下端を固定とした柱の挙動となり中央部で大きく変形していることがわかる。

13次モードは、アーチリブの逆対称モードと鉛直材の振動モードが複合したモードである。

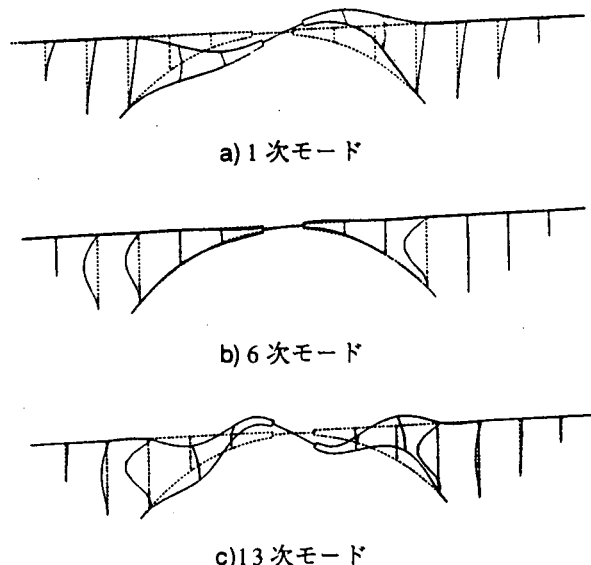


図2.1 橋軸方向の代表的な固有振動モード

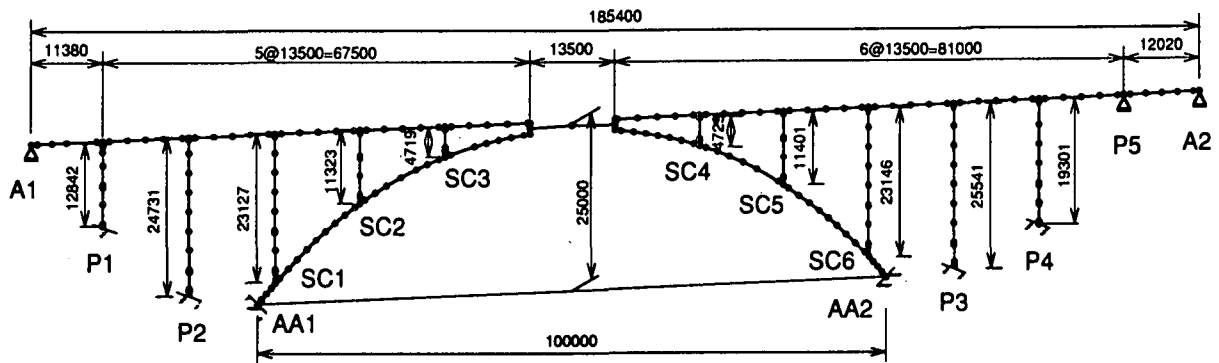
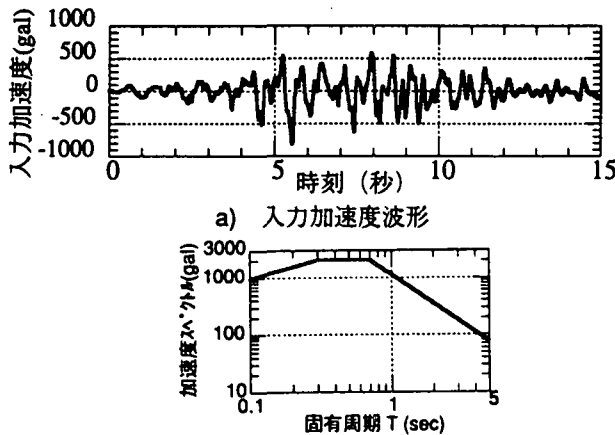
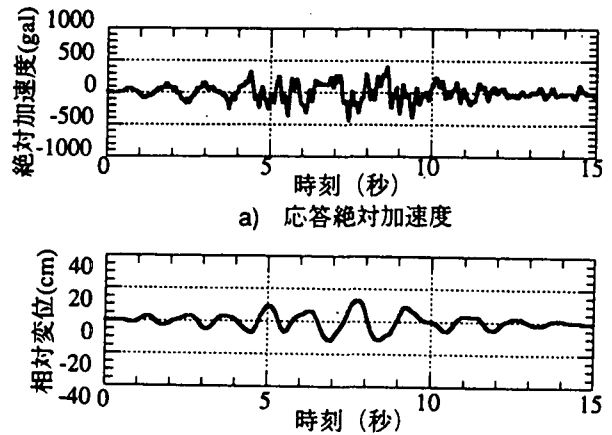


図3.1 解析骨組みモデル図



b) 標準加速度応答スペクトル

図3.2 入力地震波（タイプⅡ地震動Ⅰ種地盤）



b) 応答相対変位

図3.3 時刻歴応答波形（アーチクラウン部）

3. 動的解析

(1) 解析方法

解析方法は、全部材を非線形はり要素に置換した解析モデルに対し時刻歴応答解析を行った。数値解析法はNewmark- β 法（ $\beta=0.25$ ）を採用し積分間隔を0.0005secとした。図3.1に骨組みモデル図を示す。

a) 非線形履歴モデル

構成部材は、全て Degrading Tri-linear 型の非線形履歴モデル（武田モデル）によりモデル化した。

b) コンクリートの応力度－ひずみ関係

コンクリートの応力度－ひずみ関係は、道路橋示方書Ⅴ耐震設計編によりコンクリートの終局ひずみ ϵ_{cu} を算出したとき、 ϵ_{cu} が 0.0035 以上の部材についてはそのままⅤ耐震設計編の関係を使用し、0.0035 以下の部材については道示Ⅲコンクリート橋編の関係を使用した。

c) 減衰モデル

全部材を非線形要素としてモデル化するため、部材減衰は一律 2% とし、卓越する固有モード（1 次と 21 次）に対し Rayleigh 減衰により与えた。

d) 入力地震波

入力地震波は、地震時保有水平耐力レベルのタイプⅡ地震動Ⅰ種地盤用の標準波形¹⁾を使用した。

図3.2に地震波形および加速度スペクトル図を示す。これは、神戸海洋気象台波形を振幅調整したもので、データ間隔は0.01sec、最大加速度は812galである。入力時間は主要動を含む15秒間とした。

(2) 動的解析結果

a) 時刻歴応答波形

図3.3にアーチクラウン部における水平方向の絶対加速度および相対変位応答波形を示す。構造物の塑性化により、主要モードの周期が1秒から1.5秒程度まで長周期化した。

b) 塑性ヒンジの発生箇所および時間

図3.4に塑性ヒンジの発生箇所とその時間を示す。ここでは塑性ヒンジ形成を最外縁鉄筋の降伏で定義する。塑性ヒンジは、アーチリブではスプリング部およびクラウン部周辺、橋脚・鉛直材ではP2、P3、SC1、SC3、SC4、SC6の下端および中央部、補剛桁ではクラウン部周辺で見られた。

以下に、塑性ヒンジの形成順序について説明する。最初のヒンジは、鉛直材SC4下端において時刻3秒のときに発生する。その後、約5.6秒で脚柱部材の下端および中央部が降伏する。8秒前後でアーチスプリング部、アーチリブと補剛桁のクラウン部周辺に発生する。

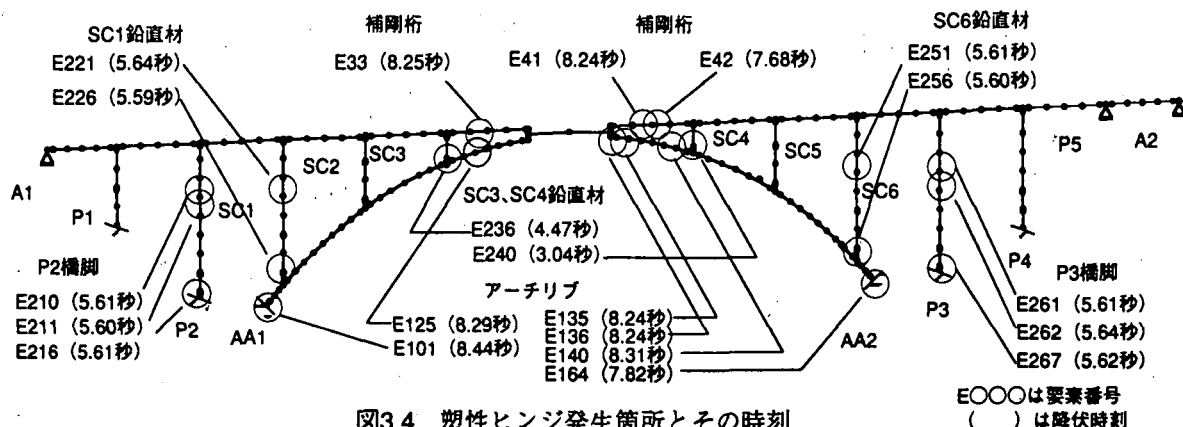


図3.4 塑性ヒンジ発生箇所とその時刻

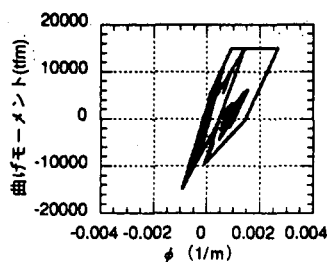


図3.5 M-φ履歴曲線（アーチスプリング部）

塑性ヒンジの形成と振動モードの関係は次のように考えられる。アーチスプリング部のヒンジは、主に1次モードにより形成され、アーチクラウン部周辺のアーチリブおよび補剛桁は13次モードの影響が大きい。また、橋脚・鉛直材の下端および中央部のヒンジは、主に6次モードおよび13次モードにより形成される。このように、塑性ヒンジの形成が複数の振動モードに起因していることがわかる。

c) 曲げモーメント-曲率関係

図3.5に代表としてアーチスプリング部における曲げモーメント-曲率関係を示す。応答モーメントは降伏モーメントを上回るが、最大曲率は降伏曲率 ϕ_y の3倍程度であり、終局曲率 $\phi_u = 0.02$ 1/mに比較して十分小さな応答であった。アーチリブの損傷程度が小さいことが伺える。他の部材についても応答が比較的小さいことを確認した。この要因の一つとして、塑性ヒンジの形成により構造物が長周期化し応答が低減したものと考えられる。

4. 耐力照査

以下に、曲げ耐力およびせん断耐力について照査方法と結果を示す。アーチ橋は全体系の耐力を算定することが困難であり、本検討の照査は部材単位で行った。

(1) 曲げ耐力照査

a) 耐力照査方法

曲げ耐力の照査は、下式により定義した許容曲率塑性率 μ_a と最大曲率塑性率 μ_{max} を比較して、部材ごとに行う。

$$\mu_a = 1 + \frac{\phi_u - \phi_y}{\alpha \phi_y} \quad (4a)$$

$$\mu_{max} = \frac{\phi_{max}}{\phi_y} \quad (4b)$$

ここに、 ϕ_y ：降伏曲率、 ϕ_u ：終局曲率、 α ：安全係数 $\alpha = 1.5$ 、 ϕ_{max} ：最大応答曲率

b) 耐力照査結果

図4.1に代表としてアーチリブおよび鉛直材(SC3、SC4)の曲げ耐力照査結果を示す。全ての部材において、最大曲率塑性率が許容値内に収まることを確認した。特に、アーチリブは許容値に対し十分に余裕があり、本橋の耐震性の高さを裏づけるものである。

(2) せん断耐力照査

a) 耐力照査方法

せん断耐力の照査は、せん断耐力 P_s と最大応答せん断力 S_{max} を比較して、部材ごとに行う。せん断耐力 P_s は、道路橋示方書V耐震設計編²⁾に準拠して下式により算出する。

$$P_s = S_c + S_s \quad (4c)$$

$$S_c = 10 C_c C_e C_{pt} \tau_c b d \quad (4d)$$

$$S_s = \frac{A_w \sigma_{sy} (\sin \theta + \cos \theta)}{10 \times 1.15 a} \quad (4e)$$

ここに、 S_c ：コンクリートが負担するせん断耐力 (tf)、 τ_c ：コンクリートが負担できる平均せん断応

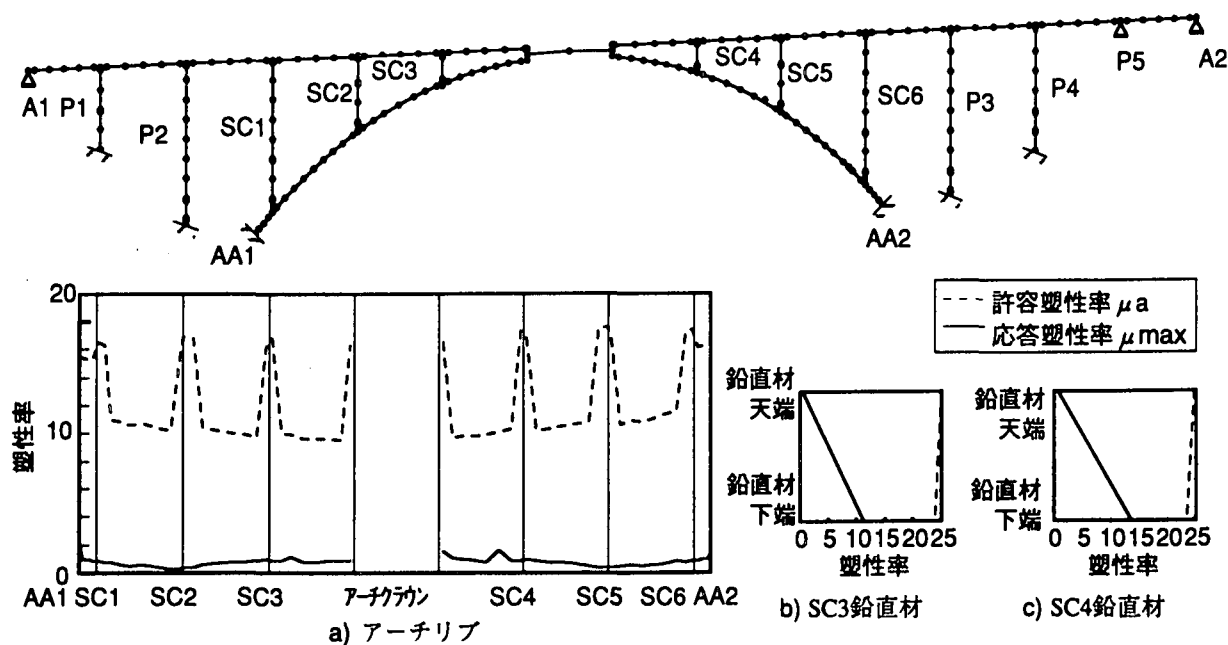


図4.1 アーチリブおよび橋脚の最大塑性率分布

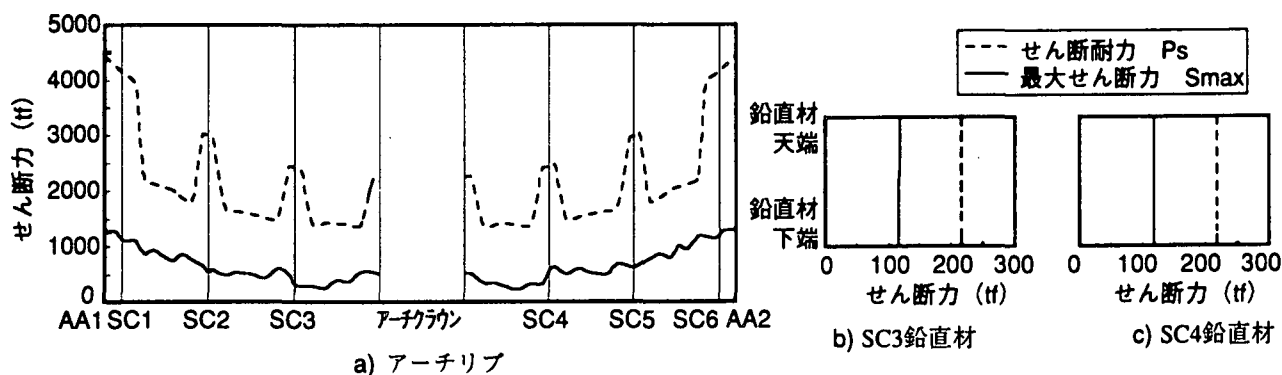


図4.2 アーチリブおよび橋脚の最大せん断力分布

力度 (kgf/cm^2) ($=3.6\text{kgf/cm}^2$)、 C_c ：荷重の正負交番作用の影響に関する補正係数(0.8)、 C_e ：橋脚断面の有効高 d に関する補正係数、 C_{pt} ：軸方向引張鉄筋比 p_t に関する補正係数、 S_s ：帯鉄筋が負担するせん断耐力(tf)、 A_w ：帯鉄筋の断面積(cm^2)、 σ_{sy} ：帯鉄筋の降伏点 (kgf/cm^2)、 θ ：帯鉄筋と鉛直軸とのなす角度 (度)、 a ：帯鉄筋間隔(cm)

b) 耐力照査結果

図4.2に代表としてアーチリブおよび鉛直材(SC3、SC4)のせん断耐力照査結果を示す。照査結果より、最大応答せん断力がせん断耐力以内に入っていることを確認した。最大せん断力は、最も厳しい状態でも耐力の半分程度であることがわかる。

において複数のモードの影響を受けることを確認した。また、耐力照査では、本橋は橋軸方向地震に対して耐震性の高い構造形式であることを確認した。

なお、本検討は、阪神高速道路公団「既設長大橋梁の耐震安定性に関する検討会」の一環として行われたものである。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料、平成9年3月
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書V耐震設計編、平成8年12月

5. まとめ

地震時保有水平耐力照査法レベルの地震波を用いて、既設 RC アーチ橋の耐震検討を実施した。その結果、非線形動的解析では、塑性ヒンジの形成過程