

## RC アーチ橋の耐震性に関する研究

溝口敦司<sup>1</sup>, 川島一彦<sup>2</sup>, 庄司学<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 東京工業大学大学院 理工学研究科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

<sup>2</sup>フェロー会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (同上)

<sup>3</sup>正会員 工修 東京工業大学助手 工学部土木工学科 (同上)

### 1. まえがき

1995年の兵庫県南部地震では様々な構造形態の橋梁が甚大な被害をうけ、これに伴い1996年11月には道路橋示方書が大幅に改定された<sup>1)</sup>。この改訂では、震度法を主体とした耐震設計から地震時の塑性変形性能まで考慮する地震時保有耐力法に全面的に移行され、特に斜張橋や吊橋および上・下路式のアーチ橋の設計においては動的解析による設計が義務づけられた。そこで、兵庫県南部地震以前に震度法によって耐震設計された既存のアーチ橋が兵庫県南部地震相当の地震動を受けた場合の耐震性能について検討することは現在、急務となっている<sup>2)</sup>。

また、アーチ橋は谷部に架橋されることが多々あるが、谷部などの不整形な地形では地盤条件が異なるため、アーチ橋に作用する地震動も異なり、アーチ橋の耐震性に大きな影響を与えることが予想される。しかし、現在の耐震設計では、橋梁全体が一様な地震動を受けるという仮定の下で解析(一様入力による解析)が行われており、地形や地盤の影響によって地震動が一様でないという仮定した場合の解析(多点入力による解析)は行われていない。そのため、地形や地盤の変化によって入力地震動が一様とならない場合のアーチ橋の地震応答について検討することは重要であると考えられる。

以上の背景を踏まえ、本研究では、兵庫県南部地震以前に震度法によって耐震設計された既存のRCアーチ橋を対象として、これに兵庫県南部地震クラスの地震動が作用した場合の地震応答特性を、地形・地盤の影響を考慮して、解析的に検討を行ったので、その結果を報告するものである。

### 2. 解析対象橋および解析モデル化

解析対象としたのは、図-1に示すようなアーチ支間長150m、アーチライズ27mの上路式RC固定アーチ橋である。本橋は昭和55年の道路橋示方書に基づいて、橋軸方向・橋軸直角方向ともに、設計水平震度 $k_h=0.18$ で静的に耐震設計されている。

解析対象橋は、アーチリブ、鉛直材、補剛桁が組合わさった複雑な構造であり、ここでは、それらが橋軸方向に加振された場合を想定し、離散型の骨組モデルでモデル化した。アーチ橋の限界強度は、アーチ軸線の形状、支持形式、補剛材の有無、補剛桁とアーチリブとの固定条件、アーチリブの細長比や断面形状など、様々な要因がある。本解析においては、これらの材料非線形性として、アーチリブの曲げに伴う塑性ヒンジ化を考慮することとした。そこでアーチリブに非線形梁要素を用い、各部材の曲げモーメント-曲率関係はTakeda型バイリニアモデルでモデル化した。

アーチリブに作用する軸力と曲げモーメントの相関関係としては、解析対象橋の自重によりアーチリブに生じる初期軸力に相当する降伏曲げモーメントを求め、アーチリブに作用する曲げモーメントがこの値に達した時にアーチリブは塑性化すると仮定した。本来、アーチリブが降伏曲げモーメントに達する際の軸力は自重による初期軸力とは異なるため、以上の仮定より得られる降伏曲げモーメントが近似値であることに注意する必要がある。減衰定数は部材要素毎に5%とし、運動方程式における減衰マトリックスはRayleigh減衰を仮定した。

入力地震動としては、兵庫県南部地震の際に神戸海洋気象台で観測されたNS成分記録を用いた。

### 3. 一様入力地震動を受ける場合の地震応答特性

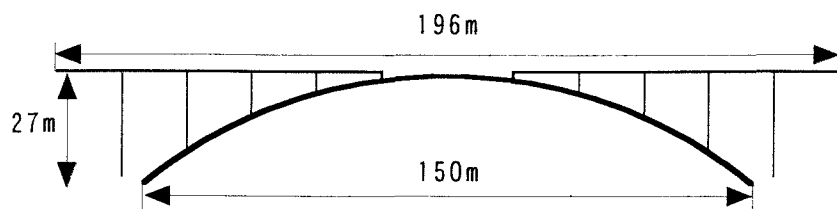


図-1 解析モデル

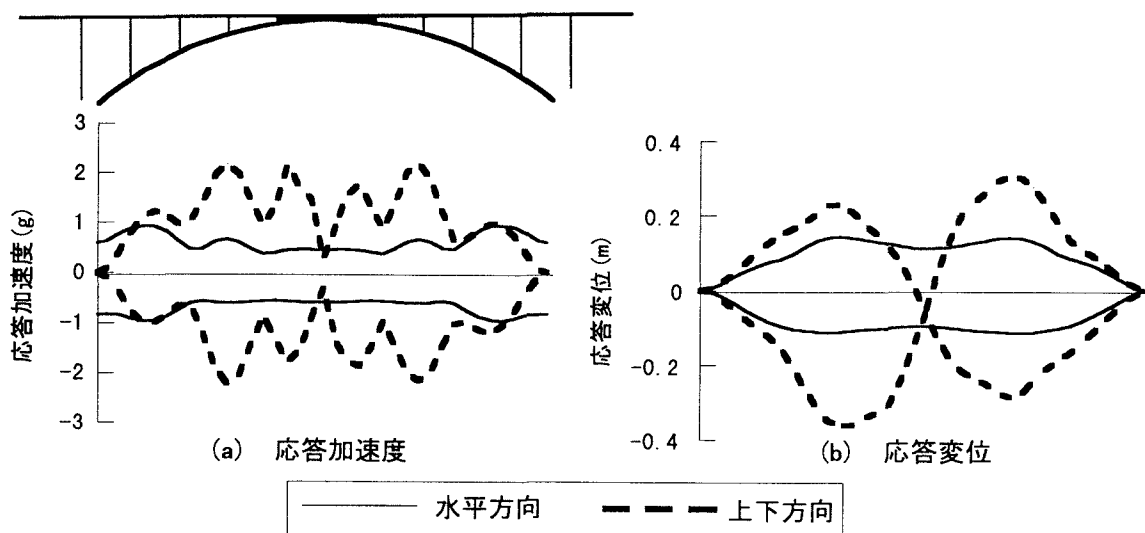


図-2 一様入力時にアーチリブに生じる最大応答加速度及び応答変位

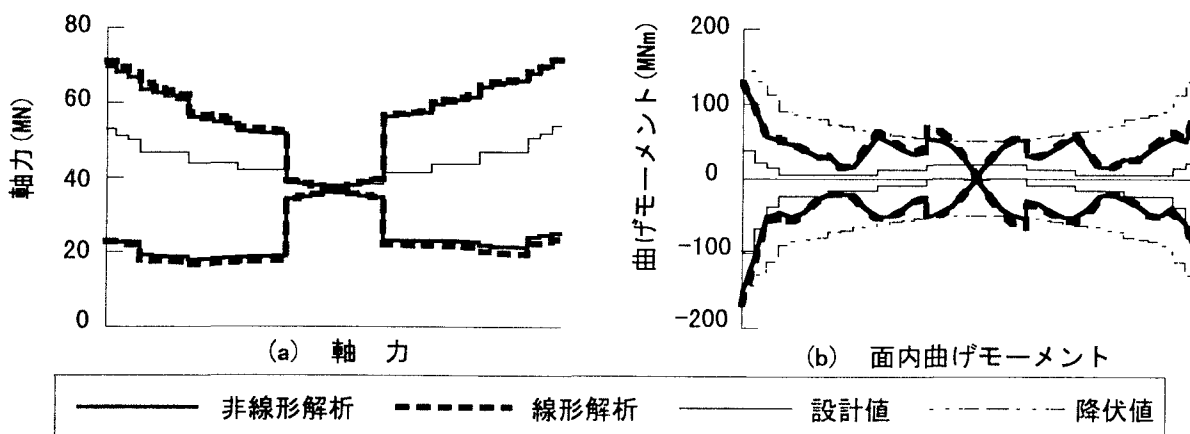


図-3 一様入力時にアーチリブに生じる最大断面力

非線形動的解析により求めたアーチリブに生じる最大応答加速度および変位を求めた結果を、図-2 に示す。アーチリブに生じる応答変位や応答加速度は上下方向のほうが水平方向よりも大きく、上下方向の応答加速度はアーチリブ 1/3 上で  $2.2g$  程度に達する。最大軸力および曲げモーメントを示した結果が図-3 である。アーチリブに生じる最大軸力は、アーチ端部で  $70\text{MN}$  程度であり、設計軸力を大きく上回っている。曲げモーメントはアーチ基部付近で最大となり、 $160\text{MNm}$  程度と設計曲げモーメントを上回る。

図-4 はアーチクラウン端部における曲げモーメント-曲率の履歴を示した結果である。最大曲率応答は  $0.0035(1/\text{m})$  であり、曲率じん性率は最大で  $1.45$  と大きくないが非線形域にある。本解析では、軸力変動による降伏曲げモーメントの変動を評価していないため、軸力および曲げモーメントの変動の影響を考慮し、高軸力下でのアーチリブの動的耐力について、今後検討していく必要がある。

#### 4. 多点入力を受ける場合の地震応答特性

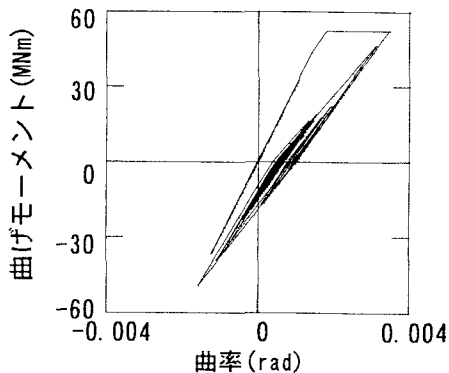


図-4 アーチクラウン端部における曲げモーメントの履歴

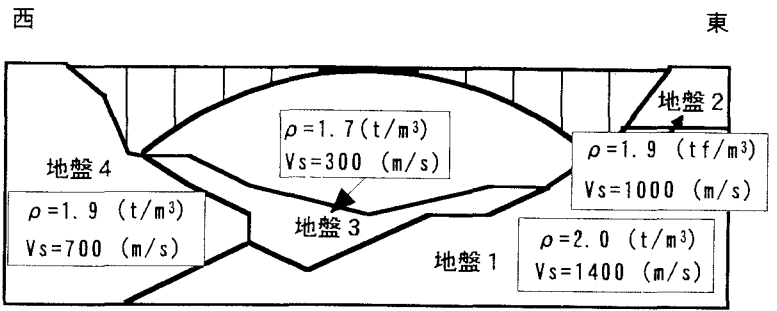


図-5 解析対象としたアーチ橋とその周辺地盤

周辺地盤は、図-5に示すように4種類の地盤からなっており、地盤1・2・4が風化花崗岩層、地盤3が洪積層となっており、アーチリブ基部付近の地盤の地震動応答が両側で異なることが予想される。そこで、解析対象橋の固定点に入力される地震動を求めるために、図-6に示すように基盤面での応答加速度を重複反射理論によって推測し、それより推定された基盤面の応答加速度を地盤モデルに入力し、周辺地盤の地震動応答を検討することとした<sup>3)</sup>。水平方向240m、上下方向80mの範囲を対象として、水平方向に20m間隔、上下方向に10m間隔にメッシュ分割し、2次元有限要素モデルでモデル化した。

せん断剛性係数  $G$ 、減衰定数  $h$  のひずみ性は、等価線形法を用いて解析に取り入れることとした。側面境界にはエネルギー伝達境界を、また底面境界に剛体基盤を仮定した。

図-7には、一次元モデルで計算した地表面および基盤面での加速度を、図-8には2次元の地盤モデルで求めたアーチ基部における地盤加速度を示す。基盤面における最大加速度は0.628gとなり、地表面における最大加速度は0.835gであるから、基盤面から地表面の間で1.3倍増幅したことになる。西側と東側のアーチ基部付近の最大応答加速度は、それぞれ1.035g、0.812gとなり、西側の方が東側よりもアーチ基部の加速度が大きい。これは、西側の地盤が東側の地盤に比べて軟らかく、基盤面に対する加速度の増幅率が東側に比べて西側が大きいためである。このようにアーチ橋に作用する入力地震動は地形・地盤の影響を大きく受けているといえる。

以上のようにして求めたアーチリブ基部の地盤の加速度応答を橋軸方向に作用させた場合にアーチリ

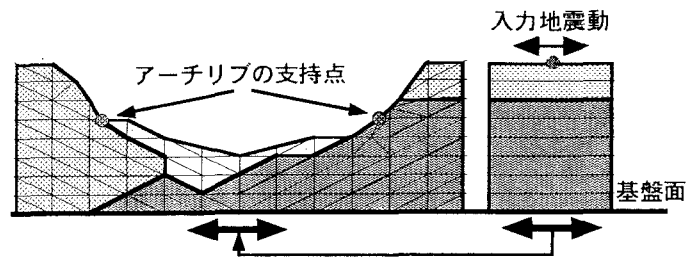


図-6 地盤解析の進め方

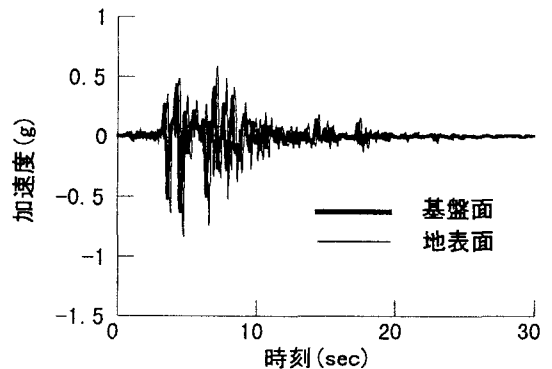


図-7 地表面と基盤面での地震動加速度の比較

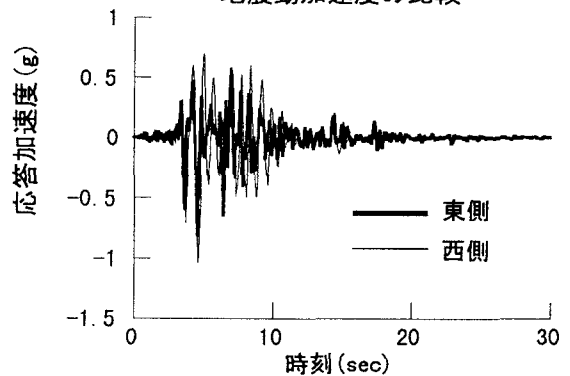


図-8 アーチ基部での地震動加速度

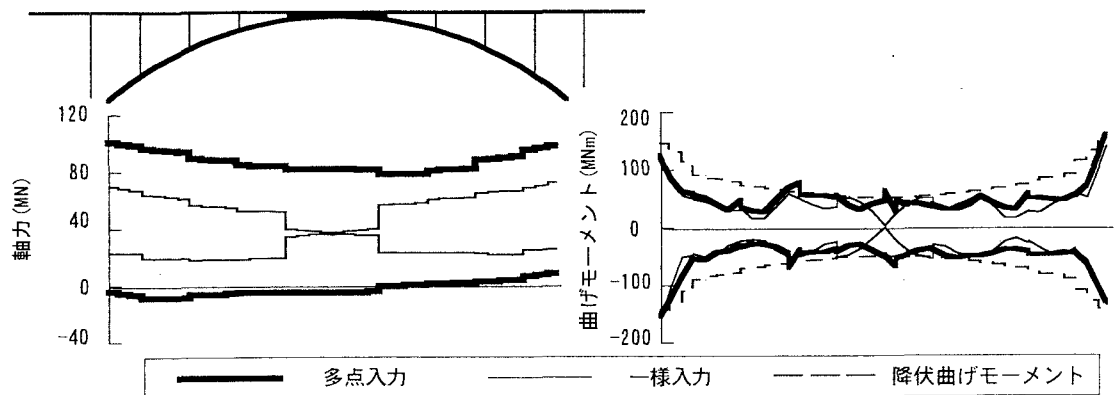


図-9 アーチリブに生じる最大断面力

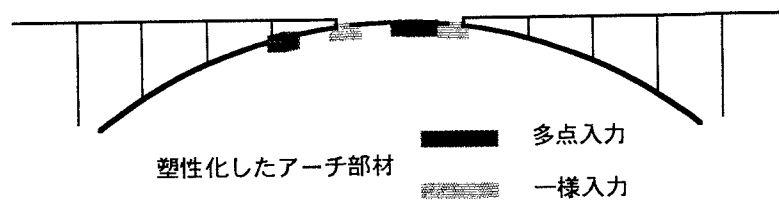


図-10 動的解析により塑性ヒンジ化するアーチリブの範囲

ブに生じる最大軸力および最大曲げモーメントを図-9に示す。ここでは、一様入力した場合の結果との比較を示している。一様入力の場合に比べ、多点入力の場合にはアーチリブに生じる断面力が大きくなり、軸力については変動幅が100MN以上となり、最小軸力に着目するとアーチ基部付近で10MN程度の引張力が生じる。また、曲げモーメントについては、図-10に示すようにアーチ中央部やアーチ1/3点付近で塑性化する。これらは一様入力の場合と同様にいずれも終局状態には達していないが、軸圧縮力を受ける部材として設計されるアーチリブに曲げ塑性化が生じるという点が重要である。

## 5. 結論

- (1) 神戸海洋気象台記録の水平成分を入力すると、水平方向に1g程度、上下方向には2.2gの応答が生じる。水平方向の加振にもかかわらず、上下方向には水平方向を上回る応答加速度が生じ、アーチ橋の耐震設計において上下方向の応答の影響を無視できない。
- (2) 震度法で設計されたアーチ橋に一様入力に作用させた場合、アーチリブには20~70MN程度の軸

力変動が生じ、アーチクラウン端部で曲率じん性率1.45程度の塑性化が生じる。

- (3) 地形・地盤条件を考慮し、多点入力に作用させた場合には、アーチリブには、100MN以上の軸力変動が生じ、アーチ基部付近で10MN程度の引張力が生じる。

謝辞：本解析にあたって、(株)新構造技術の若狭忠雄氏、(株)地震工学研究所の宇高竹和氏、内田治氏に様々な御教示をいただきました。ここに記して厚くお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，1996
- 2) 榊原泰造、川島一彦、庄司学：動的解析に基づく上路式2ヒンジ鋼製アーチ橋の耐震性に関する検討，構造工学論文集，Vol. 44A, 761~767, 1998年3月。
- 3) Lysmer, J., Udaka, T., Tsai, C., and Seed, H. B. : FLUSH-A Computer Program for Approximate 3-D Analysis of Soil-Structure Interaction Problems, Report No. EERC 75-30, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1975.