

コンクリートアーチ橋の非線形動的解析

森拓也¹・武村浩志²・幸左賢二³・松田宏⁴・永井篤⁵

¹正会員 (株)ピー・エス 本社土木技術部 主任研究員 (〒170 東京都豊島区北大塚1-13-17)

²正会員 (株) ピー・エス 本社土木技術部 (〒170 東京都豊島区北大塚1-13-17)

³正会員 Ph.D 阪神高速道路公団 工務部 課長補佐 (〒541 大阪市中央区久太郎町4-1-3)

⁴正会員 日本電子計算株式会社 科学技術事業部 課長 (〒135 東京都江東区東陽2-4-24)

⁵住友建設株式会社 技術・設計部 主任 (〒160 東京都新宿区荒木町13-4)

1. はじめに

平成8年12月の道路橋示方書の改訂により、従来の耐震設計法は大幅な変更がなされ、設計地震動として内陸直下型地震である兵庫県南部地震についても考慮することとなった。新示方書によれば、地震時の挙動が複雑ではない橋については、震度法および地震時保有水平耐力法を用いることができるが、アーチ橋や斜張橋のように地震時の挙動が複雑な橋に対しては、動的解析を用いるよう規定されている。したがって今後は、道路橋示方書に定めるタイプⅠやタイプⅡの地震動に対して部材の非線形性を考慮した動的解析が頻繁に行われることにな

るが、新しい道路橋示方書に準拠して耐震設計を行った例はまだ少なく、その適用にあたっての問題点や不明点も十分に解決されているとはいえないのが現状である。

本稿では、図－１に示すようなアーチ支間140mの比較的大規模なコンクリートアーチ橋を対象に、新示方書に基づいて行った耐震設計例について報告し、震度法による応答断面力と非線形動的解析との比較、および非線形動的解析を行う上での問題点について述べるものである。

2. 解析モデルと解析方法

解析モデルは図-2に示すような集中質点系による骨

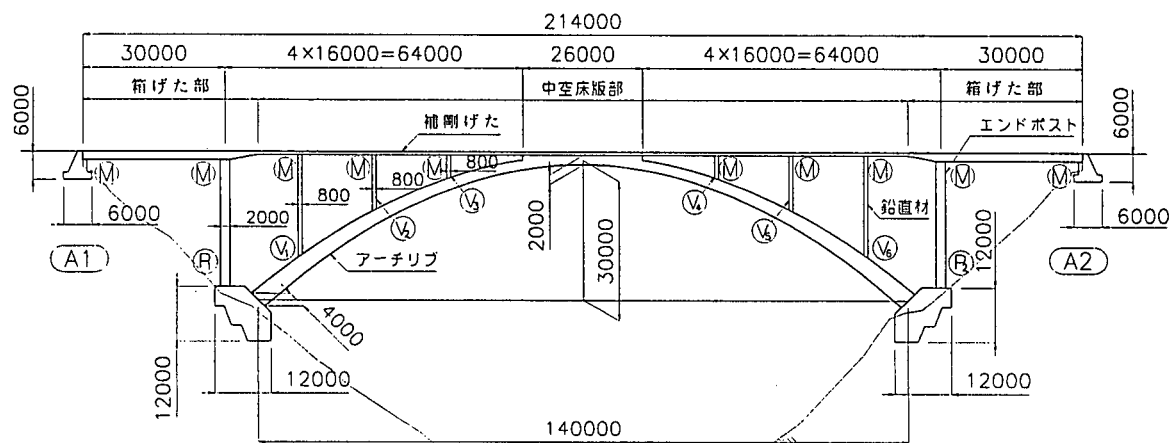


図-1 (a) 対象橋梁

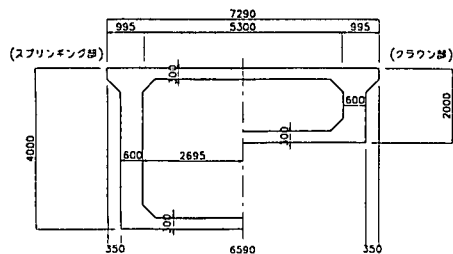


図-1 (b) アーチリブ断面図

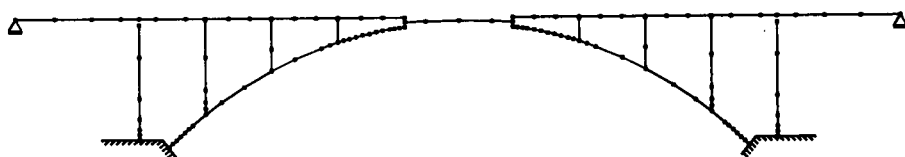


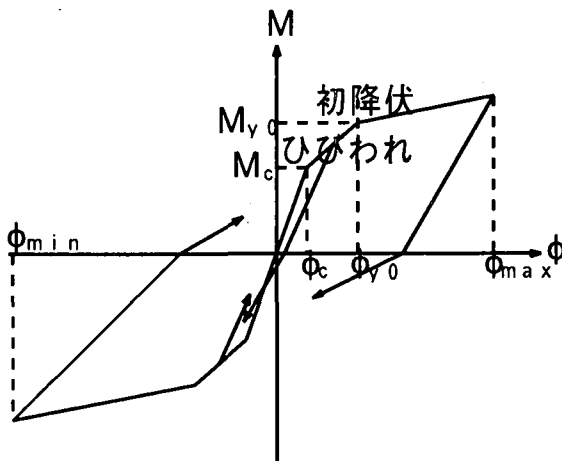
図-2 解析モデル

組みモデルとした。

震度法および震度法の照査としての弾性動的解析における各部材の剛性は、コンクリート全断面を有効と見なし算出される剛性（以下、コンクリート総断面の剛性）とした。一方、非線形動的解析においてはアーチリブ、エンドポスト、鉛直材が地震時に塑性化することを想定して非線形部材とした。ただし、補剛げたはP C部材であることから降伏時以降の挙動について未解明な部分もあることを考慮して弾性部材とし、初降伏に至らないように設計するものとした。補剛げたの剛性については、コンクリート総断面の剛性を用いて非線形動的解析を行った結果、補剛げた全体の約2/3の部材が初降伏モーメントを越す応答曲げモーメントとなったことから、実際の大地震時における曲げ剛性の低下を考慮して、この範囲の部材剛性として降伏剛性を用いることとした。ここで、降伏剛性とは各部材の曲げ－曲率（以下、M－ ϕ ）関係において、原点と初降伏点とを結ぶ直線勾配に相当する曲げ剛性である。

動的解析における非線形部材の履歴特性モデルとしては、そのM－ ϕ 関係を図－3に示すようなコンクリートのひびわれ、初降伏、終局モーメント点通る剛性低下型トリリニアモデル（武田型）とした。また、減衰はLayleigh減衰を用いた。

本耐震設計で用いた入力地震動および解析方法について表－1にまとめて示す。



図－3 履歴特性モデル

3. 安全性の判定

本耐震設計では、各部材が以下の項目を満足するように鉄筋配置を決定した。

(1)震度法および震度法の照査としての動的解析

- ① 曲げモーメントに対してコンクリート応力度、鉄筋応力度が許容応力度以下であること。
- ② セン断力、ねじりモーメントに対してコンクリートのせん断応力度が最大値以下であり、必要な斜引張鉄筋および横方向鉄筋が配置されていること。

(2)非線形動的解析による耐震設計

- ① 非線形部材の応答曲率が許容曲率以下であること。許容曲率は下式により算出した。

$$\phi_a = \phi_{y0} + \frac{\phi_u - \phi_{y0}}{\alpha}$$

ここで、 ϕ_a ：許容曲率（1/m）
 ϕ_{y0} ：初降伏曲率（1/m）
 ϕ_u ：終局曲率（1/m）
 α ：安全係数（タイプⅡ地震に対して1.5とした。）

- ② 各断面のせん断耐力が応答せん断力以上であり、ねじりモーメントに対する必要横方向鉄筋量が配置されていること。
- ③ 塑性化を想定していない部材（P C部材である補剛げた）が塑性化しないこと。
- ④ アーチリブにおいては、スプリング部付近およびクラウン部付近以外の中間部材が塑性化しないこと。

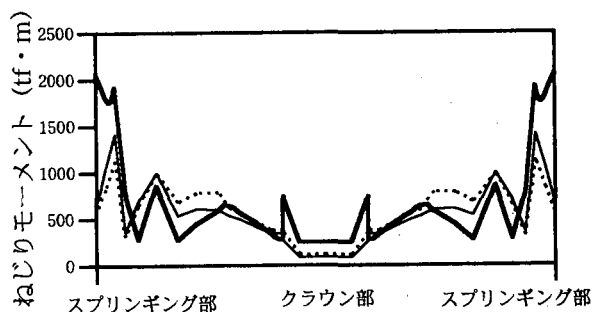
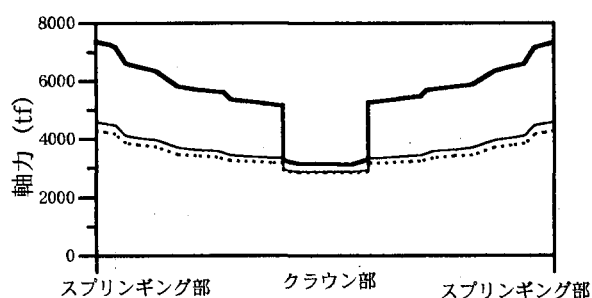
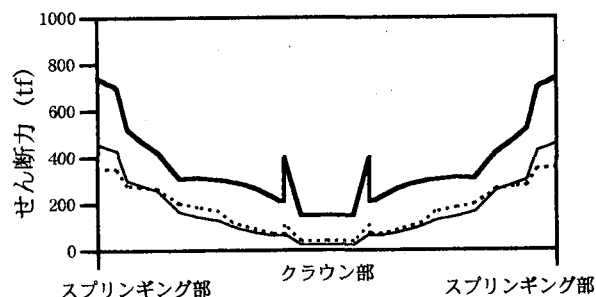
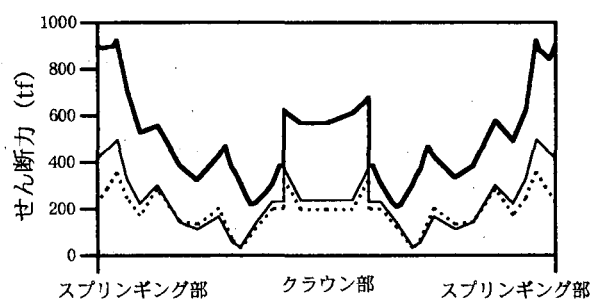
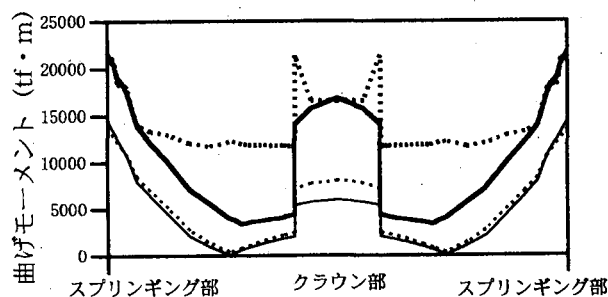
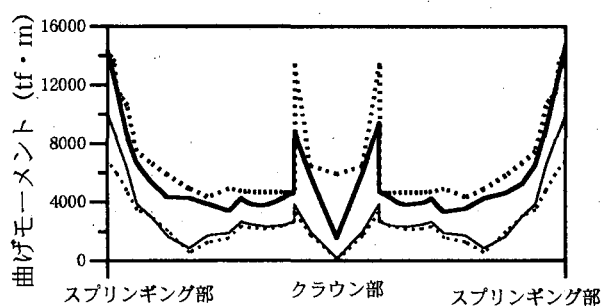
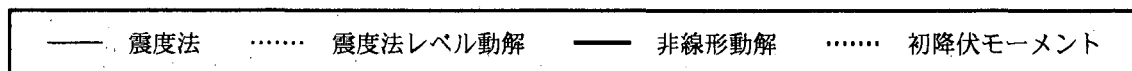
4. 耐震設計結果

(1)断面力の比較

震度法、震度法の照査としての動的解析および非線形動的解析によって算出したアーチリブの断面力を図－4に示す。曲げモーメントに対しては初降伏モーメントもあわせて示した。震度法は固有値解析によって求めた固有周期から設計水平震度を算出したものであり、本橋では橋軸方向 $T=1.17\text{sec}$ $k_h=0.19$ 、橋軸直角方向 $T=1.06\text{sec}$ $k_h=0.20$ である。また、非線形動的解析による断面力は、入力地震動3波の平均値である。

表－1 入力地震動および解析方法

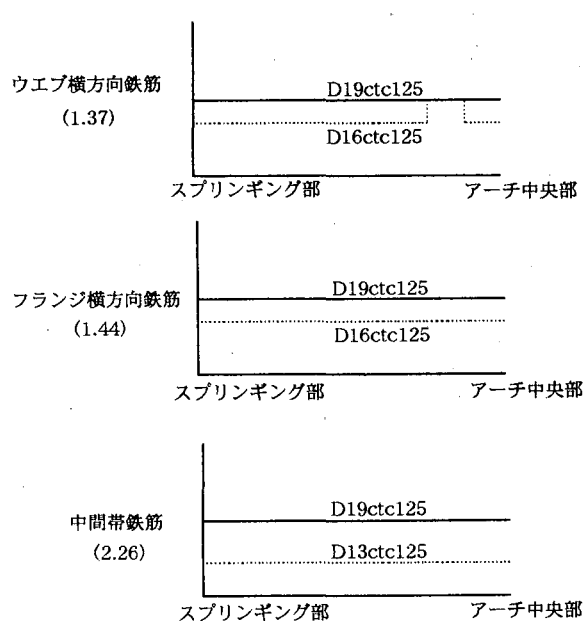
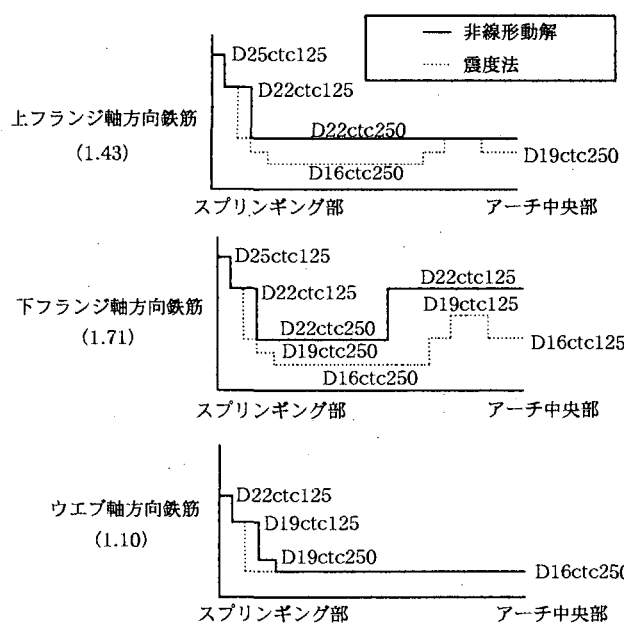
	弾性動的解析 (震度法による耐震設計結果の照査)	非線形動的解析
入力地震動	震度法による耐震設計結果の照査に用いる地震入力（Ⅰ種地盤）	地震時保有水平耐力による耐震設計結果の照査に用いる地震入力（タイプⅡ、Ⅰ種地盤）
解析方法	応答スペクトル法	非線形時刻歴応答解析



(a) 橋軸方向

(b) 橋軸直角方向

図-4 アーチリブの断面力



() 内の数値は、非線形動解によって決定した鉄筋量を、震度法によって決定した鉄筋量に対して比で表したもの

図-5 アーチリブの鉄筋配置

震度法と震度法の照査としての動的解析による断面力を比較すると、橋軸方向、橋軸直角方向地震時ともに比較的良好一致している。また、非線形動的解析では断面力は格段に大きくなり、塑性化が生じたスプリング部やクラウン部においても1.5～2倍の応答断面力となった。

(2)鉄筋配置の比較

上記断面力に対して、安全性の照査によって決定されたアーチリブの鉄筋配置の比較を図-5に示す。図からほとんどの断面において非線形動的解析による耐震設計によって鉄筋量が決定されていることが解る。各鉄筋の増加率をみると、軸方向鉄筋だけでなく、横方向鉄筋の増加率も大きくなっており、アーチ橋においては曲げモーメントに対してだけでなく、せん断力やねじりモーメントに対する鉄筋も大きく増加することが明らかになった。また、中間帯鉄筋も大きく増加しているが、これは道路橋示方書Ⅴ編に準じて、外周に配置された帯鉄筋と同材質、同径の鉄筋を同間隔で配置したことによる。本耐震設計では多量の中間帯鉄筋を配置したことによって、表-2に示すように許容曲率に対して若干余裕のある結果となった。

図-5をもとに、アーチリブ全体の鉄筋量の増加率を試算した結果、非線形動的解析による耐震設計により約45%の増加であった。

5. まとめと今後の課題

今回行ったアーチ支間140mのコンクリートアーチ橋を対象とした耐震設計について以下にまとめる。

- ① 震度法と震度法の照査としての動的解析による応答断面力は比較的良好一致した結果が得られた。
- ② タイプⅡに対する非線形動的解析では、大きく断面力が増加する結果となった。
- ③ アーチリブの鉄筋は主として非線形動的解析による耐震設計で決定され、それによる鉄筋量の増加は約

45%であった。各鉄筋種類ごとの増加量をみると、曲げモーメントに対する軸方向鉄筋のみでなく、せん断力、ねじりモーメントに対する横方向鉄筋の増加も大きな要因であった。

また、今回のコンクリートアーチ橋の耐震設計において、いくつかの点で設計上の対応について容易に判断しかねることがあった。それらを紹介し、今後の課題としたい。

- ① アーチリブのように大きな軸力を受ける部材に対して、どの程度の塑性化を許容するか。その損傷度の把握をもとに決定していく必要がある。
- ② アーチ橋の橋軸直角方向地震時には、アーチリブには大きなねじりモーメントが作用し、ひびわれの発生が予測される。ひびわれ発生後にはねじり剛性が低下することが知られているが、試算によれば、そのねじり剛性の値によって応答値は大きく変化することとなる。タイプⅠやタイプⅡのような大地震時に対してどのように剛性を評価し、どのように安全性を照査するかについて検討する必要がある。
- ③ 橋軸方向地震時には、アーチリブの軸力は大きく変動する。その影響をどのように解析で評価するかについての研究とともに、十分な精度を有する解析ソフトが必要である。
- ④ アーチ橋の建設ではしばしば架設用の鋼材がアーチリブに埋め込まれたり、壁厚の薄い中空断面である場合など、十分な中間帯鉄筋を配置することが困難な場合がある。このような場合の設計上の対応とともに、施工性が良く、有効な配置方法についての研究が必要である。

参考文献

- 1)道路橋示方書・同解説、Ⅰ編、Ⅲ編、Ⅳ編、Ⅴ編：日本道路協会 平成8年12月

表-2 最大応答曲率と許容曲率

	橋軸 方向		橋軸直 角方向	
	スプリング部	クラウン部	スプリング部	クラウン部
最大応答曲率 ϕ_{max}	0.003049	0.010412	0.000898	0.000045
初降伏曲率 ϕ_{y0}	0.000656	0.001345	0.000381	0.000390
許容曲率 ϕ_a	0.010972	0.018075	0.005702	0.003881
曲率塑性率 ϕ_{max}/ϕ_{y0}	4.6	7.7	2.4	初降伏せず
余裕率 ϕ_{max}/ϕ_a	0.28	0.58	0.16	

単位：1/m