論文 長周期地震動に対する長大スパンRCアーチ橋の挙動に関する検討

河野 直也*¹·中野 友裕*²·中村 光*³·田邊 忠顕*⁴

要旨:長大スパンRCアーチ橋の長周期地震動に対する挙動を把握するために,入力加速度 に漸増正弦波を用いて非線形動的解析を行った。各方向に単独入力し,それぞれの方向で最 も厳しい正弦波の周期を求め,その正弦波を用いて水平2方向同時入力を行った。その結果, 長大スパンアーチ橋では橋軸直角方向に最も厳しい正弦波を入力させると橋軸方向の入力 加速度が小さくても2軸曲げの影響を受け鉄筋が降伏することが示された。 キーワード:長大スパン RC アーチ橋,共振正弦波,2軸曲げ,Flexibility法

1. はじめに

アーチ橋は自重や活荷重に対して主として圧 縮力で抵抗する構造形式であり、アーチ部材の 軸圧縮力によって構造系を支持するという特徴 を有する。この特性は圧縮に強いコンクリート の特性を合理的に引き出すことが可能であるこ とから、近年、大規模なコンクリートアーチ橋 が多く建設されている。今後の設計施工技術の 発展を考えれば、コンクリートアーチ橋はさら に長大化することが予想される¹⁾。

著者らは、これまでに長大スパンRCアーチ 橋は、道路橋示方書1種地盤タイプ2地震動ク ラスの地震力が作用しても鉄筋は降伏しないこ とを確認している²⁾。しかし、長大スパンRCア ーチ橋の固有周期は長く、長周期地震動に対す る応答特性を解明することが求められる。

また,既往の実験・解析により,コンクリート製橋脚では,共振波形が入力されると極めて 小さな加速度入力でも鉄筋降伏さらには終局に 至ることが明らかにされている³⁾。

そこで本研究では,長周期地震動に対する応 答を把握するために,加速度を漸増させた共振 正弦波を用いて非線形動的解析を実施した。

また動的解析には、力の釣合いから剛性マト

リクスや等価節点力を算定する Flexibility 法⁴⁾を 用いることで断面力状態を評価し、長大スパン アーチ橋の損傷評価に関する検討を行った。

2. 解析対象とするRCアーチ橋およびそのモ デル化と固有値解析

2.1 解析対象構造物

解析対象とするのは、文献¹⁾で試設計されたス パン長 600m、ライズ 100m を有する長大スパン RCアーチ橋であり、スパンライズ比は 6.0 であ る。

解析橋梁の構造および断面諸元を図-1に示 す。アーチリブは3室の箱型変断面で,アーチ 中央部に近づくほど断面が小さくなっている。 アーチリブの断面形状は,アーチスプリンキン グ部において幅23m,高さ11.5m,アーチクラウ ン部で幅11.5m,高さ6mとなっている。

コンクリートの圧縮強度は 60MPa, 圧縮強度 時のひずみは 0.004, 鉄筋の降伏強度は 685MPa としている。

2.2 構造物のモデル化

上記の長大アーチ橋を,3次元はり要素を用い て,33節点46要素にモデル化する(図-2)。 補剛桁は線形要素で,鉛直材とアーチリブは非

- *1 大分工業高等専門学校専攻科 機械・環境システム工学専攻 (正会員)
- *2 東海大学講師 工学部土木工学科 博(工) (正会員)
- *3 名古屋大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 工博 (正会員)

*4 名古屋大学名誉教授 社会基盤技術評価支援機構専務理事 工博 (正会員)



表一1 固有值解析結果

モード	固有周期	刺激係数		
次数	[秒]	橋軸方向	橋直方向	鉛直方向
1	7.006	0.000	7.307	0.000
2	4.327	0.000	0.000	0.000
3	3.416	-4.328	0.000	0.000
4	1.803	0.000	0.000	1.157
5	1.483	0.000	-3.390	0.000
6	1.256	0.000	0.000	0.000
7	1.146	0.000	1.353	0.000
8	1.117	-2.630	0.000	0.000
9	1.005	0.000	0.000	5.945
10	0.763	0.000	0.000	5.461



図-2 モデル化

線形要素とし、アーチクラウン部付近の鉛直材6本と補剛桁の接合条件はピン、他の部材同士の 接合は剛接とする。なお、非線形要素は、 Fiber-Model⁵⁾を用いてモデル化している。

解析に用いるはり要素として部材内の断面力 分布を基礎にして剛性マトリクスや等価節点力 を算定する Flexibility 法を用いる⁴⁾。

2.3 固有値解析

上記のモデルについて固有値解析を行った。 表-1に10次までの固有周期ならびに3方向の 刺激係数を示す。3方向とも刺激係数が0である 場合は、回転方向に刺激係数が存在している。 橋軸直角方向の1次固有周期は全体の1次、橋 軸方向の1次固有周期は全体の3次となってい る。全体の2次のモードは、回転方向の変形が 卓越するモードであるので、本解析では、検討 しないものとした。

3. 単独入力による応答解析

3.1 解析条件

時刻歴応答解析は Newmark の β 法(β =0.25) により行い,質量マトリクスとして集中質量を 用いた。減衰マトリクスは Wilson-Penzien の方 法^のにより,初期剛性に対する全固有モードを考 慮することとした。なお,減衰定数は,道路橋 示方書の各次モード等価減衰定数の算出方法を 用いた。

3.2 入力正弦波

入力正弦波は、図-3に示すように時間 5T (T:入力波周期)ごとに振幅を 20gal 増加させ た漸増正弦波を用いた。また、正弦波の周期を 変化させ、各方向 11 パターンの解析を行った。 周期は、各方向の1 次固有周期付近から 0.5 秒ず つ変化させた。



(a) 橋軸方向

(b) 橋軸直角方向

図-4 単独入力による降伏加速度

3.3 各方向の応答

橋軸方向へ単独入力する場合の漸増正弦波の 周期は,2.0秒から6.5秒まで0.5秒間隔の10パ ターンと初期の構造物の固有周期を加えた計11 パターンの解析を行った。それぞれの漸増正弦 波での入力波周期と鉄筋の初降伏時における加 速度をプロットしたものを図-4(a)に示す。橋 軸方向単独入力の場合,共振正弦波を入力した 場合の降伏時加速度が最も小さいことがわかる。

橋軸直角方向へ単独入力する場合も、橋軸方 向と同様に11パターンの解析を行うが、漸増正 弦波の周期は, 5.0 秒から 9.5 秒まで 0.5 秒間隔 とした。橋軸直角方向における漸増正弦波での 入力波周期と鉄筋の初降伏時の加速度をプロッ トしたものを図-4(b)に示す。橋軸直角方向の 場合には,橋軸方向とは異なり,降伏時加速度 が最も小さいのは、共振正弦波を入力した場合 ではなく、初期の構造物の固有周期よりも0.5秒 程度長い場合であった。これは、鉄筋が降伏す る以前に、コンクリートにひび割れが生じ構造 物の固有周期が長く変化したことによるものと 考えられる。橋軸方向単独入力の場合, 面内方 向ではアーチそのものが開きにくいのでひび割 れが開きにくく長周期化が見られなかったと考 えられる。

4. 水平2方向同時入力による応答解析

4.1 入力正弦波

単独入力による応答解析により最も厳しい入 力正弦波の周期が求められた。そこで、最も厳 しい条件において水平 2 方向同時入力を行うこ ととした。入力正弦波としては、振幅を漸増さ せる漸増正弦波と振幅を一定とする一定正弦波 を用いる。橋軸方向へ加速度漸増の波を入力す る場合、時間 5T ごとに振幅を 12gal ずつ増加さ せた波を使用し、橋軸直角方向へは一定正弦波 を用いた。橋軸直角方向に入力する一定正弦波 は、0gal から 40gal まで 5gal ずつ変化させ、そ れぞれについて解析を行った。橋軸直角方向へ 漸増正弦波を入力する場合も同様に解析を行う が、加速度の漸増量は 2gal とし、橋軸方向の加 速度は、0gal から 240gal まで 30gal ずつ変化さ せて解析を行った。

4.2 動的解析結果

橋軸方向の加速度を漸増させた場合に,鉄筋 が初めに降伏した時刻における漸増正弦波の振 幅の値と橋軸直角方向に入力した一定正弦波の 振幅の値をプロットしたものを図-5(a)に示 す。また,橋軸直角方向の加速度を漸増させた 場合を図-5(b)に示す。

図-5(a)を見ると,橋軸直角方向の一定正弦 波が 0gal から 30gal までは橋軸方向は 240gal か ら 120gal まで徐々に低下していくが,一定正弦



図-6 アーチクラウン部の変位応答

波が35gal になると,降伏に至る橋軸方向の加速 度が急激に低下し,30gal 程度で鉄筋が降伏して しまうことがわかる。

水平2方向同時入力を行う場合,断面は2軸 曲げ状態となる。また,橋軸直角方向には断面 が大きく,小さな応答曲率でも鉄筋が降伏する。 したがって,橋軸直角方向の加速度が35galの場 合に橋軸方向の加速度が30gal程度であっても2 軸曲げの影響を大きく受け,鉄筋が降伏したも のと考えられる。

一方,図-5(b)を見てみると,橋軸方向の一 定正弦波を大きくしていくと,橋軸直角方向の 加速度が徐々に低下していき,急激な変化は起 こらなかった.

4.3 アーチクラウン部の変位応答

橋軸方向へ漸増正弦波を入力する場合に2軸 曲げを大きく受けたと考えられる橋軸直角方向 に35galの一定正弦波を入力した場合と,橋軸直 角方向に30galの一定正弦波を入力した場合の 応答を比較する。両方のアーチクラウン部にお ける変位応答を図ー6に示す。図ー6(a)から橋 軸方向の変位はあまり変化がないことがわかる。 橋軸直角方向の変位は、30galを入力した場合よ り、35galを入力した場合の方が1m程度大きく 変位している(図-6(b))。図-6(c)は、各時 刻における橋軸方向の変位と橋軸直角方向の変



位をプロットしたものである。橋軸方向の変位 がほぼ同一の値であっても橋軸直角方向へ大き く変位していることがわかる。

4.4 アーチスプリンキング部における応答

4.3 と同様の場合において,鉄筋が初めに降伏 したのは,左側アーチスプリンキング部であっ た。左側アーチスプリンキング部の M- ϕ 履歴を 図-7に示す。最大曲率は,面外曲げでは,一 定正弦波 30gal の場合 440 μ /m に対し,一定正弦 波 35gal では 500 μ /m であり,面内曲げでは,一 定正弦波 30gal の場合 290 μ /m に対し,一定正弦 波 35gal では 330 μ /m であった。

図-8に左側アーチスプリンキング部の M-M-Nを示す。黒線で描かれているのは、2方 向相関を考慮した各軸力における2方向降伏モ ーメントの組合せである。一定正弦波 30galの 場合を図-8(a)に、一定正弦波 35gal の場合を 図-8(b)に示す。鉄筋の初降伏時における点を 図中の×印で示している。どちらも軸力変動の 影響は小さく、本解析条件では、鉄筋の降伏に は軸力変動の影響は小さいものと考えられる。

5. 単独入力による終局時加速度

5.1 入力条件

入力波は、3.に使用したものと同様のものを使 用した。なお、アーチ橋の破壊の判定は断面が 終局状態に達したとき、すなわちコンクリート が終局ひずみに達したときを用いている⁷⁾。本研 究では同様の考えから、ファイバーモデルによ り、構造物を構成する断面内のコンクリートが 初めて終局ひずみに達した時点をアーチ橋の終 局とみなすことにした。



5.2 各方向の終局時加速度

橋軸方向の終局時の加速度を図-9(a)に示 す。橋軸方向は,鉄筋降伏時と同様に構造物の 長周期化はあまり顕著なものではないが,最も 小さい終局時加速度を示した場合の入力波周期 は初期の構造物の固有周期よりもやや長くなっ ていることがわかる。

橋軸直角方向の終局時の加速度を図-9(b) に示す。橋軸直角方向も鉄筋降伏時と同様に構 造物は長周期化し,それは鉄筋降伏時よりも顕 著で最も小さい終局時加速度を示した場合の入 力波周期は初期の構造物の固有周期よりも 1.5 秒程度長くなっている。したがって,初期の構 造物の固有周期よりも長い入力波周期において 共振することになり,その場合,小さな加速度 で終局に至ることになる。このことは,橋軸直 角方向へ入力される長周期の地震動がたとえ振 幅が小さくても終局に至る可能性があることを 示している。

6. まとめ

本研究では、振幅が小さくても長周期になる 遠方に震源がある場合の地震を想定して、長周 期正弦波を用いて解析を行った。長大スパン RC アーチ橋を建設する際に必要となる長周期入力 波に対する以下の知見を得た。

 1方向単独入力において,橋軸直角方向では, 鉄筋が降伏に至る前に,コンクリートのひび 割れにより構造物が長周期化し,初期の構造 物の固有周期よりも長い周期の正弦波を入 力すると,非常に小さな振幅でも鉄筋が降伏 に至る。

- 2) 2 方向同時入力の場合,2 軸曲げの影響を受け,橋軸直角方向にある一定以上の共振正弦波が作用すると,橋軸方向への振幅が小さくても鉄筋が降伏する可能性がある。
- 8) 終局時では,橋軸直角方向の長周期化が進み, 初期の構造物の固有周期よりも大きく変化し,その周期に近い波を入力すると小さな振幅でも終局に至る可能性がある。
- 4) 長大スパンRCアーチ橋は既存地震波では降 伏しなかったにも関わらず、長周期入力に対 し降伏・終局に至る可能性が示され、アーチ 橋として現行の設計基準によれば耐震性に 問題ない場合であっても、長周期に対して十 分な検討を行う必要がある。

参考文献

- 土木学会構造工学委員会:コンクリート長大アーチ橋-支間600mクラス-の設計・施工,構造工学シリーズ13,2003
- 河野直也,中野友裕,中村光,田邉忠顕:Flexibility法を用いた長大スパン RC アーチ橋の地震応答の評価,コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.907-912, 2005.6
- 河野弘来、山崎淳:コンクリート構造橋脚の異なる地震波 形による応答挙動に関する実験、コンクリート工学年次論文 集、Vol.24、No.2、pp.1015-1020、2002
- 中野友裕,田邉忠顕:コンクリート構造物の数値解析への Flexibility法の適用に関する研究,土木学会論文集,No.725/ V-58, pp15-28, 2003.2
- 5) 芳村学,青山博之,川村満:2方向外力を受ける鉄筋コン クリート構造物の解析その1 2軸曲げを受けるRC柱の解 析,日本建築学会論文報告集,第298号,pp.31-41,1980
- Wilson, E.L.and Penzien, J.: Evaluation of Orthoganal Damping Matrices, International Journal for numerical methods in engineering, Vol.4, pp.5-10, 1972
- 7) 松永昭吾,矢葺亘,村井洋行,小倉裕介:断層変位を受ける既設アーチ橋の耐震安全性に関する研究,コンクリート 工学年次論文集 Vol.25, No.2, pp.1345-1350, 2003.7