レベル2地震動下における上路式逆ローゼ鋼アーチ橋の動的挙動

Seismic Response Behavior with Level 2 ground motion of Upper-Deck Lohse Type Steel Arch Bridges

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	小林 竜太	(Ryuta KOBAYASHI)
株式会社ドーコン	正会員	次村 英毅	(Hideki TSUGIMURA)
株式会社ドーコン	○正会員	関下 裕太	(Yuta SEKISHITA)

1. はじめに

現行の道路橋示方書【耐震設計編】¹⁾におけるアーチ 橋の耐震性能照査手法は、下路式アーチの場合と上・中 路式アーチの場合で大きく異なる。下路式アーチの場合 には、一部の特殊なアーチ(長スパンのニールセンアー チ橋等)を除いて1次振動モードが卓越する構造系であ ることから、地震時の挙動が複雑でない橋梁として取り 扱うことができる。一方,上・中路式アーチの場合には, 低次の振動モードだけでは動的挙動を適切に評価できな いため地震時の挙動が複雑な橋梁として位置付けられて いる。従って、上・中路式アーチ橋の場合には、静的照 査法では十分な精度で地震時挙動を予測できないことか ら、動的照査法による耐震性能照査が必要不可欠となる。 このような観点から、本研究では上路式の2ヒンジ逆 ローゼ鋼アーチ橋を対象として、レベル2地震動下にお ける動的挙動を把握することを目的として、ファイバー モデルを用いた弾塑性有限変位動的解析を実施した。

2. 解析対象の概要

図-1 には解析対象の基本諸元を示している。本研究 で対象としたアーチ橋は、アーチ支間長 145.0m、側径 間支間長 36.0m、アーチライズ 23.5m (アーチライズ 比:6.17)の上路式2ヒンジ逆ローゼ鋼アーチ橋である。 ここで、本アーチ橋はローゼ形式であることから、アー チリブと補剛桁を軸剛性 EA と曲げ剛性 EI を有する弦 材として考え、アーチリブ支点部をヒンジ固定とした上 で、両弦材間を両端ヒンジの支柱で連結した構造である。

3. 数値解析の概要

3.1 解析モデル

図-2 には解析モデルを示している。本解析では、材 料非線形を考慮し、かつ、アーチリブの軸力変動および 2 軸曲げの影響を考慮するために床版要素を除いた全て の骨組要素にファイバーモデルを適用することとした。 本解析で用いたファイバー要素は、Timoshenko 梁理論 に基づいた曲げによるせん断変形を考慮した3節点アイ ソパラメトリック梁要素である。なお、床版要素は簡略 化して弾性梁要素を用いてモデル化を行っている。また、 アーチ支間中央部のセンターポストは、その断面構成か ら塑性化しないものと判断して剛体要素を用いてモデル 化した。アーチ支点部の境界条件は、橋軸直角方向軸回 りの回転成分のみを自由とし、他の自由度成分は全て拘 束した。また、補剛桁支点部の境界条件は、橋軸方向の





並進方向移動を固定支承側では拘束,可動支承側では自 由とし,いずれも橋軸直角方向軸回りおよび鉛直方向軸 回りの回転成分を自由とし,他の自由度成分は全て拘束 している。ここで,本解析では変位法に基づいた汎用の 骨組構造解析コード UC-win/FRAME(3D)を使用した。

3.2 アーチリブおよび支柱のモデル化

アーチリブおよび支柱は、断面内の補剛材も含めて全 てファイバー要素を用いてモデル化を行った。図-3 に は要素分割およびアーチリブの断面内分割状況を示して いる。アーチリブは有効破壊長領域およびアーチの曲率 が考慮できるように要素分割(8分割)を行った。なお、 支柱(端支柱,中間支柱)の材端結合条件は、いずれも 一般設計で仮定しているようなピン結合とした。

3.3 下横構のモデル化

下横構は、入力地震動を橋軸直角方向に作用させた場 合に部材座屈する可能性があることから、幾何学的非線 形による部材座屈が表現できるように1つの部材を4分 割して、材端結合条件はピン結合を仮定した(図-3)。 なお、入力地震動を橋軸方向に作用させた場合には下横 構は座屈しないものと考えられることから、橋軸方向地 震波入力時の解析モデルではこのようなモデル化は行わ ず、1つの梁要素によって表現することとした。

3.4 上横構,対傾構および横桁のモデル化

上横構および端支柱の対傾構は,1つの梁要素(但し, 部材交点には節点を設ける)でモデル化を行い,材端結 合条件はいずれもピン結合を仮定した。また,横桁に関 しても1つの梁要素を用いてモデル化(但し,アーチリ ブの横桁は対傾構との交点に節点を設ける)を行ってい るが,材端結合条件は全て剛結合としている。

3. 5 RC 床版および補剛桁のモデル化

図-4 には RC 床版および補剛桁に対するモデル化の 概念図²⁾を示している。本解析では RC 床版の材料非線 形は考慮していないが、補剛桁-床版間のスラブアンカ ーの非線形性(バネ要素で表現)は考慮することとした。 これは、床版と補剛桁は非合成桁として設計されている ものの、活荷重に対しては合成桁として挙動し、レベル 2 地震動下においてもズレ止め用のスラブアンカーが存 在することで完全に独立した挙動とならないものと考え られるためである。従って、本解析ではスラブアンカー の挙動をより実態に近い形で評価するために、1m 間隔 に配置されたスラブアンカーに合わせて補剛桁および RC 床版の要素分割を行った。図中の水平剛部材は、補 剛桁と RC 床版がスラブアンカーのバネを介して一体と なって挙動するように追加した部材であり, 補剛桁と RC 床版の中立軸のズレを考慮するために鉛直剛部材も 配置している。なお、この鉛直剛部材は各スラブアンカ ー位置に設けることとし, 主桁上フランジ面に相当する 鉛直剛部材の上端に非線形バネ要素を挿入した。ここで, 補剛桁は、アーチリブと同様に断面内の補剛材も含めて 全てファイバー要素を用いてモデル化を行っている。

3. 6 スラブアンカーの非線形特性

スラブアンカーの非線形特性には図-5 に示すような Tri-linear 型の骨格曲線を設定した。ここで、降伏点お よび大きなズレを開始する点は既往の実験結果³⁾を参考 にして定めた。なお,スラブアンカーの形状寸法(φ 13mm, 500mm)が、実験供試体とほぼ同一であること から,実験結果における荷重-相対変位関係をそのまま 適用することとした。図中,降伏点(変位 0.2mm 時 点) はスラブアンカーが降伏した時点であり, 最大荷重 値に到達した段階から剛性をゼロとして大きなズレが開 始するものと仮定した。ここで、履歴法則に関しては、 繰り返し載荷実験が実施されていないことから、簡略化 して移動硬化則による剛性低下を考慮しない履歴モデル を用いた。なお、これら非線形特性は橋軸方向地震波入 力時のモデルにのみ設定し、橋軸直角方向モデルでは補 剛桁の面外剛性が面内剛性よりも小さいことから, ほと んどズレは生じないものと判断して完全合成とした。







図-5 スラブアンカーの非線形特性



図-6 材料構成則(鋼材の応カーひずみ関係)

表-1 鋼材の力学的特性値

材 質	降伏応力	弾性係数	ポアソン比
	σ_y (MPa)	E_s (GPa)	ν_s
SM400A	235.0	206.0	0.3
SM520A	355.0	206.0	0.3

表-2 コンクリートの力学的特性値

設計基	準強度	弾性係数	;	ポアソン比
σ_{ck} (MPa)	E_c (GPa)		ν_{c}
24	.0	25.0		0.167

3.7 材料構成則および材料特性値

図-6 にはファイバー要素を適用した鋼部材の応力-ひずみ関係を示している。本解析では降伏後の塑性硬化 を考慮した Bi-linear モデルとし,硬化則には移動硬化 則を適用した。ここで,塑性硬化(2次勾配)は弾性係 数の 0.01 倍と仮定した。表-1,2 には,それぞれ鋼材 および床版コンクリートの力学的特性値を示している。

3.8 地震応答解析法

動的非線形解析は、直接積分法による時刻歴応答解析 とし、材料非線形と幾何学的非線形を考慮した弾塑性有 限変位動的解析(複合非線形解析)を実施した。数値積 分法には Newmark- β 法($\beta = 1/4$)を適用し、積分時間 間隔 Δt は 1/100 秒と設定した。入力地震波形は、道路 橋示方書【耐震設計編】¹⁾のレベル2 地震動における標 準波形(I種地盤用のタイプII地震動)とし、これをア ーチ支点部に入力した。なお、動的応答解析は、死荷重 を作用させた静的自重解析を行った後に実施している。 粘性減衰は主要な2つの振動モードにおける固有振動数 に対して h=2.0%を与えた Rayleigh 型減衰を採用した。

4. 解析結果および考察

4.1 固有振動解析結果

表-3 にはサブスペース法に基づいた固有振動解析結 果を 10 次までに限定して示している。図-7 には固有 振動モードの一例として,橋軸方向および橋軸直角方向 の第1次振動モードを示している。これより,2次の橋 軸方向および1次の橋軸直角方向における刺激係数が大 きいことが分かる。しかしながら,5次モード以降にお いても刺激係数の大きなモードが存在することから,本 アーチ橋は複雑な動的挙動を呈するものと推察される。

4.2 動的非線形解析結果

(1) 橋軸方向地震波入力時

図-8 には橋軸方向地震波入力時における各種応答波 形を示している。図より、アーチ支間中央部における水 平方向変位は最大でも 30mm 程度と小さいが、アーチ 支間 1/4 点における鉛直方向変位は 120mm 程度(水平 方向変位は最大で 40mm 程度)と大きいことから、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に なるものと推察される。また、アーチリブ基部および端 支柱基部における応答軸力波形(降伏軸力 N_y用いて無 次元化している)に着目すると、いずれも軸力変動が確 認されるとともに、端支柱基部に比較してアーチリブ基 部の応答軸力が若干大きく評価されている。また、端支 柱基部では時刻 10sec 付近において負の軸力(引張軸 力)が発生しているが、その程度は小さいことが分かる。

図-9 には補剛桁支点上におけるスラブアンカーの荷 重-相対変位履歴を示している。図より,支点部近傍で は両支点部ともに降伏点を超過しており,RC 床版にズ レが生じていることが分かる。これは固定支承側におい て顕著であり,相対変位量は 6.0mm を超過している。 しかしながら,アーチ支間内(中央径間)では降伏点に は至らないことを確認しており,局所的なずれは生じる が橋梁全体としてはその程度は小さいものと考えられる。

図-11(a)には鋼部材の塑性化状況を示している。図 中,赤色で示した領域は塑性化した部位を表現している が,橋軸方向地震波入力時では着色されておらず,いず れの部材も塑性化には至っていないことが分かる。

(2) 橋軸直角方向地震波入力時

図-10 には橋軸直角方向地震波入力時における各種 応答波形を示している。図より,アーチ支間中央部にお ける面外方向の水平変位は最大で400mm 程度と大きい

Mada	固有振動数	刺激係数			
Mode	(Hz)	橋軸方向	直角方向	鉛直方向	
1	0.80	0.00	40.01	0.00	
2	1.09	-8.67	0.00	-0.81	
3	1.40	-0.22	0.00	-8.52	
4	1.87	0.00	-1.01	0.00	
5	2.48	-3.00	0.00	27.32	
6	2.55	-8.33	0.00	-11.04	
7	2.99	-2.24	0.00	-22.55	
8	3.03	0.00	-8.20	-0.01	
9	3.18	-14.06	0.00	0.29	
10	3.53	0.00	-3.29	0.00	

表-3 固有振動解析結果【橋軸方向モデル】

橋軸方向1次:f=1.09Hz 橋軸直角方向1次:f=0.80Hz 図-7 固有振動モードの一例 Displacement(mm) 75 0 -75 -150 150 Time(sec) (アーチ支間中央部における面内水平変位波形) 150 Displacement(mm) 75 \sim -75 -150 Time(sec (アーチ支間 1/4 点における面内鉛直変位波形) 0.6 0.4 0.2 ź 0.0 -0.2 -0.4 -0.6 15 Time(sec) (左アーチリブ基部の応答軸力波形) 0.6 0.4 0.2 N/N_y 0.0 -0.2 -0.6 15 25 Time(sec) (左端支柱基部の応答軸力波形)





ことが分かる。なお、鉛直方向変位量は水平方向変位と 比較して小さくわずかであった。一方、アーチリブ基部 および端支柱基部における応答軸力波形に着目すると、 橋軸方向地震波入力時と同様にいずれの部位も軸力変動 が確認され、降伏軸力 N_y には至っていないものの橋軸 方向地震波入力時と比較して応答軸力が大きく評価され ていることが分かる。また、端支柱基部で発生する負の 軸力(引張軸力)も、その程度は橋軸方向地震波入力時 と比較して大きくなっていることが確認できる。

図-11(b)には鋼部材の塑性化状況を示している。図 より,橋軸方向地震波入力時では部材の塑性化は見られ なかったが,橋軸直角方向入力時では端支柱基部,可動 支承側の端支柱対傾構,下横構およびアーチリブ横桁に おいて部材が塑性化した。特に,下横構あるいは端支柱 対傾構では部材が座屈するような変形状態が確認される。 しかしながら,主要部材であるアーチリブや補剛桁は塑 性化することなく,いずれも弾性応答であった。これは, 面外水平荷重に抵抗するアーチリブの下横構や対傾構等 の2次部材が塑性化することでエネルギー吸収が図られ るためアーチリブの応答が低減されたものと推察される。

図-12 には塑性化した下横構および端支柱部基部の 応力-ひずみ履歴を示している。図より、下横構では降 伏ひずみの7倍程度のひずみレベルとなっており、端支 柱基部と比較して塑性化の程度が大きいことが分かる。



図-12 下横構および端支柱基部の応カーひずみ履歴

5. まとめ

本研究で得られた知見を要約すると以下の通りである。

- 1)橋軸方向入力時では、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。また、部材の塑 性化は確認されなかったが、補剛桁支点部近傍にお いて局所的に床版のズレが発生する可能性がある。
- 2)橋軸直角方向入力時では、アーチ支間中央部において大きな面外方向の水平変位が発生する。また、下横構や対傾構等の2次部材において塑性化が確認されたが、主要部材であるアーチリブや補剛桁に関しては塑性化することなく弾性応答であった。
- アーチリブおよび端支柱では軸力変動が確認され、 その程度は橋軸直角方向入力時の方が大きい。

参考文献

- 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】,2002.3.
- 2) 宇佐美勉 編著,日本鋼構造協会 編:鋼橋の耐震・ 制震設計ガイドライン,技報堂出版,2006.9.
- 山田真幸,サトーンペンポン,三木地壽,市川篤司, 入部孝夫:RC 床版と鋼フランジ間の付着とスラブ アンカーによるせん断抵抗の評価,構造工学^{⇒→} Vol.47A, pp.1161-1168, 2001.3.