

論文 コンクリートアーチ橋の構造パラメータと断層変位に対する耐震性能に関する一検討

角本 周^{*1}・手嶋 和男^{*2}・矢葺 巨^{*3}・松永 昭吾^{*4}

要旨：コジャエリ地震や集集地震では、極めて大きな地表面断層により橋に被害が生じており、日本においても、このような断層に対して高い耐震性能を示す構造の検討等が望まれている。そこで、コンクリートアーチ橋を対象として、構造パラメータが断層変位に対する耐震性能に与える影響について、強制変位解析により検討を行った。

キーワード：上路式コンクリートアーチ橋，断層変位，強制変位解析

1. はじめに

1999年に発生したコジャエリ地震や集集地震では、数mにも及ぶ極めて大きな地表面断層による橋の被災事例が生じている^{1),2)}。このような大きな地表面断層は、日本においても濃尾地震等で生じており、断層変位に対する耐震性能の照査方法や、断層変位に対して高い耐震性能を示す構造形式の検討が望まれている³⁾。

本報告は、橋の構造形式の一つである上路式コンクリートアーチ橋を対象として、その構造パラメータが断層変位に対する耐震性能に与える影響について、強制変位増分解析により検討を行った結果を示すものである。

2. モデル橋の設定

2.1 構造寸法

検討は、アーチ支間150m、ライズ比 $S/f=5.0$ のローゼタイプを基本モデルとし、アーチ支間、ライズ比、アーチリングと補剛桁との剛性比をパラメータとして、モデル橋を設定した。

モデル橋において、アーチリングの軸線形状は、アーチ支間やライズ比等の設定に関わらずハイパボリック曲線 ($m=2.5$) で設定した。ただし、ランガータイプでは、鉛直材間のアー

チリングの軸線は直線とした。

部材の結合は、鉛直材とアーチリングは剛結合するものとし、鉛直材と補剛桁はアーチクラウンから2本目までは可動支承で結合、その他は剛結合するものとした。モデル橋の概要を、図 - 1 および図 - 2 に示す。ここで、各タイプに対する部材厚は、既設のコンクリートアーチ橋の部材厚より、表 - 1 のように設定した⁴⁾。

2.2 鋼材配置

コンクリートアーチ橋を構成する各部材の鋼材配置は施工方法によって異なるが、本検討では、表 - 2 のように設定した。ここで、アーチリングの鋼材配置は鉄筋のみを想定し、既設のアーチ橋では軸方向鉄筋比が1.0~2.0%程度であることから⁵⁾、耐震性能に与える影響を検討するために3ケースの軸方向鉄筋量を設定した。なお、アーチリングおよび補剛桁には横拘束筋に相当する鉄筋は配置しないものとした。

2.3 永久荷重作用時の断面力

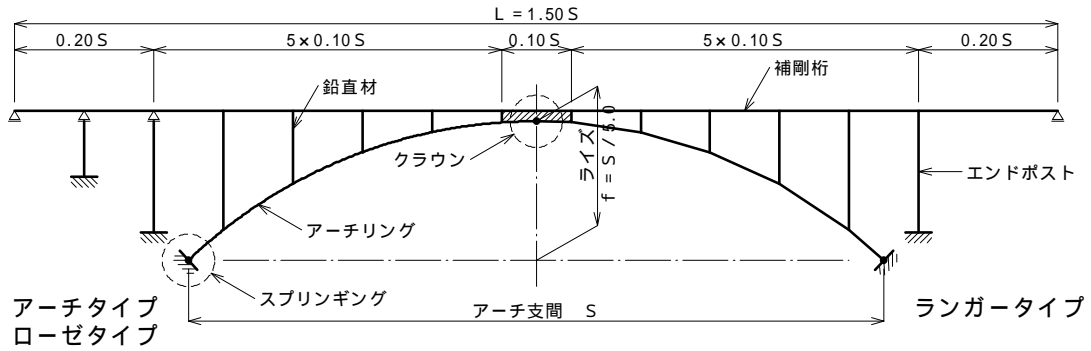
本検討では断層変位に対して部材が塑性化した状態を検討することから、永久荷重作用時の断面力の差異の影響は無視できるものとし、完成構造系に対して全死荷重を載荷した場合の断面力を永久荷重作用時の断面力とした⁴⁾。

*1 オリエンタル建設(株) 福岡支店技術部 工修 (正会員)

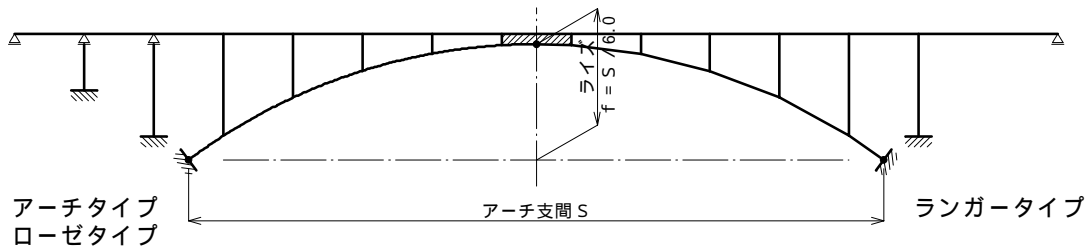
*2 オリエンタル建設(株) 福岡支店技術部長 (正会員)

*3 九州大学大学院 工学研究院 工修 (正会員)

*4 (株)建設技術研究所 九州支社道路・交通部 工修 (正会員)



(a) ライズ比 = 5.0

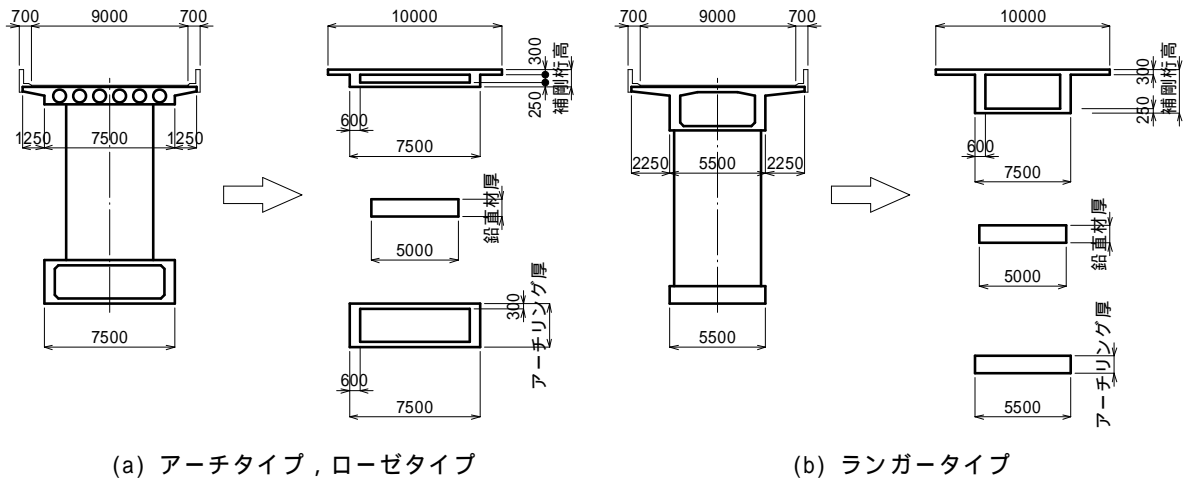


(b) ライズ比 = 6.0

図 - 1 モデル橋

3. 解析方法

すモデル化した断面形状をもとに，永久荷重作



(a) アーチタイプ，ローゼタイプ

(b) ランガータイプ

図 - 2 部材寸法の設定と解析におけるモデル化

3.1 解析モデル

モデル橋に対する解析モデルを，図 - 3 に示す。解析モデルは，全ての部材をはり要素でモデル化し，アーチリング，補剛桁，補剛桁と剛結合した鉛直材，ランガータイプのエンドポストを非線形はり要素とした。

3.2 部材の非線形モデル

部材の曲げモーメント - 曲率関係は，道路橋示方書・耐震設計編に従って³⁾，図 - 2 に示

用時の軸力（初期軸力）に対して算出した。なお，アーチリングおよび補剛桁は，横拘束筋を配置しないものとしたことから，部材最外縁のコンクリートひずみが0.002に達した状態を終局時とした³⁾。解析に用いるアーチリング，鉛直材およびエンドポストの骨格曲線は，算出されたひび割れ時，鉄筋初降伏時，終局時より，図 - 4 に示すように $M_y = M_u$ となるように補正して設定した。

表 - 1 各解析ケースにおける部材厚の設定

アーチ支間 (m)	ライズ比	剛性比	アーチリング		補剛桁 (m)	鉛直材 (m)	エンドポスト (m)
			スプリングング	クラウン			
150.0	5.0	アーチ	3.750	2.600	0.900	0.900	2.400
		ローゼ	3.000	2.000	1.500	0.900	2.400
		ランガー	1.250	1.000	3.000	0.900	2.400
	6.0	アーチ	3.750	2.600	0.900	0.800	2.000
		ローゼ	3.000	2.000	1.500	0.800	2.000
		ランガー	1.250	1.000	3.000	0.800	2.000
180.0	5.0	ローゼ	3.600	2.300	1.800	1.000	2.900
120.0	5.0	ローゼ	2.400	1.700	1.200	0.800	1.900
90.0	5.0	ローゼ	1.800	1.400	0.900	0.600	1.400

表 - 2 各部材の鋼材配置の設定

部材	鋼材配置
アーチ リング	軸方向鉄筋比 1.0%, 2.0%および 3.0% となる鉄筋を配置。
補剛桁	活荷重作用時 0.0N/mm ² となるように P C 鋼材を配置。 終局荷重作用時の安全率を満足する鉄 筋を上下縁に配置。
鉛直材 エンドポスト	軸方向鉄筋比 2.0%となる鉄筋を配 置。

3.3 軸力変動の影響のモデル化

アーチ橋に面内変形が作用した場合には、アーチリングには軸力変動が生じる。そこで、本検討では、アーチリングには軸力変動を考慮し

た非線形モデルを用いた。なお、軸力が異なる場合、骨格曲線は図 - 4 に示すようにひび割れ後の剛性低下率が異なるが、本解析では全ての軸力において初期軸力に対するひび割れ後の剛性低下率を用いている。

3.4 断層変位のシミュレーション

本検討では、断層変位としては面内変位のみを対象とした。面内変位としては、アーチ支間部に断層があるものと想定し、右岸側が鉛直もしくは水平方向に変位するものとした（アーチアバットと橋台が同量で変形）。想定した断層変位を、図 - 5 に示す。

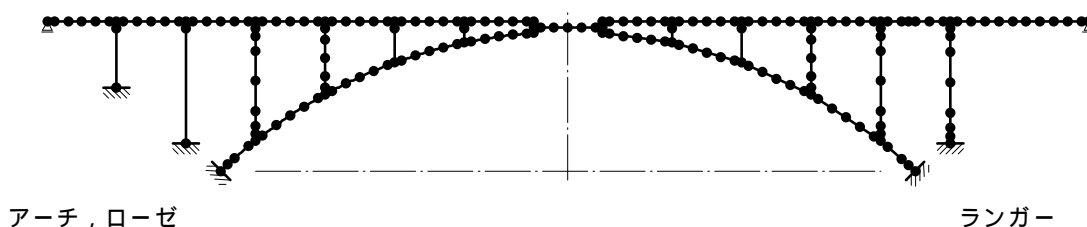
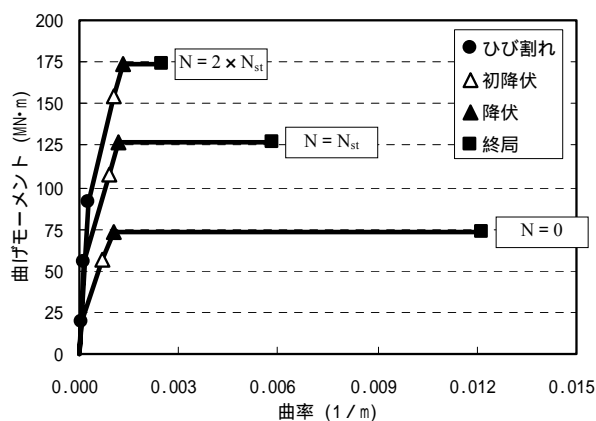
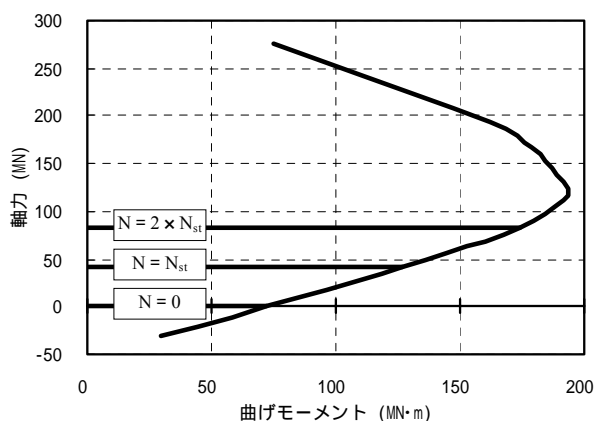


図 - 3 解析モデル



(a) 骨格曲線



(b) 終局時の M - N 曲線

図 - 4 アーチリングの非線形特性 (部材厚 3.0m, 軸方向鉄筋比 2.0%)

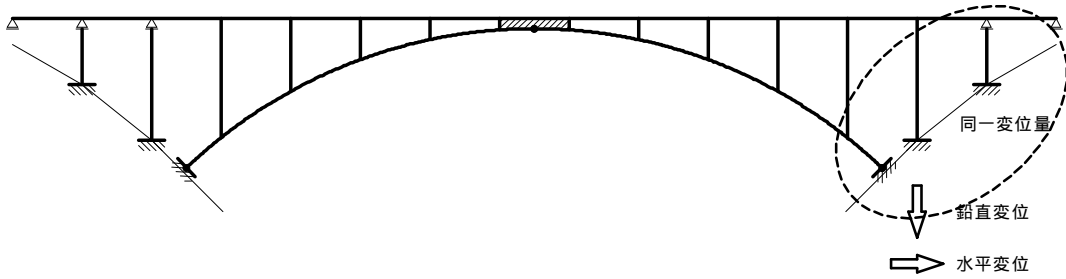
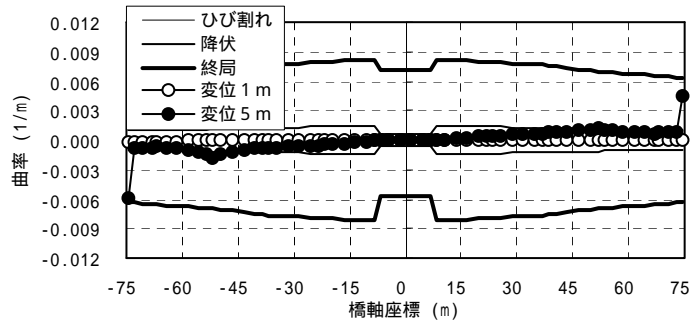


図 - 5 想定した断層変位

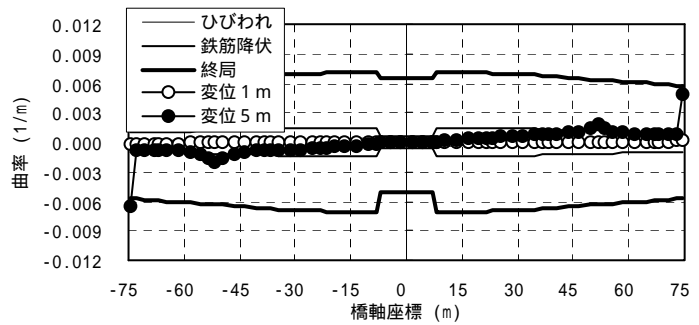
4. 解析結果

4.1 鉛直変位

アーチ支間150mのローゼタイプのモデル橋（軸方向鉄筋比2.0%）におけるアーチリングの応答曲率を，図 - 6 に示す。なお，図中のひび割れ，降伏および終局時の各曲率は，初期軸力に対して算出された曲率である。ライズ比5.0の基本モデルにおいては，鉛直変位1mではひび割れ曲率に達していない。鉛直変位がさらに大きくなると，永久荷重作用時の曲げモーメントの影響で左岸側のスプリング部が先行して降伏し，鉛直変位5mではほぼ終局曲率に達する結果となった。一方，ライズ比が大きいと，応答曲率が若干大きくなる傾向にある。



(a) ライズ比 5.0



(b) ライズ比 6.0

図 - 6 鉛直変位時のアーチリングの応答曲率

ローゼタイプのモデル橋において，アーチ支間とスプリングが降伏曲率および終局曲率に達する鉛直変位との関係を，図 - 7

に示す。今回の検討で設定したアーチリングの部材厚に対しては，アーチ支間が長いほど終局

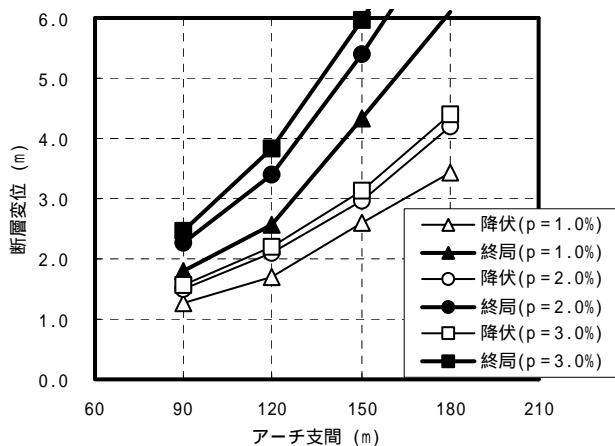


図 - 7 アーチ支間，軸方向鉄筋量の影響

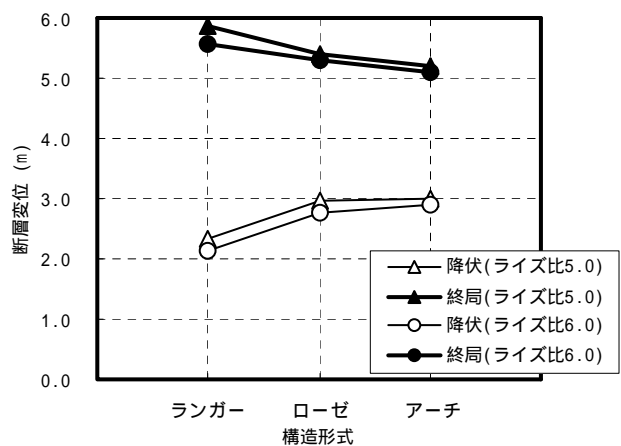


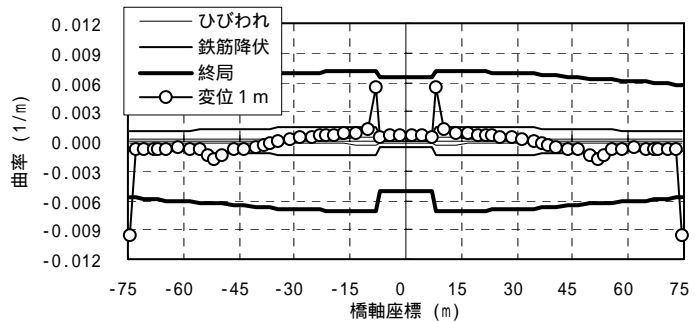
図 - 8 構造形式，ライズ比の影響

曲率に達する鉛直変位は累乗的に大きくなる。また、アーチリングの軸方向鉄筋比が多くなるほどスプリング部が終局曲率に達する断層変位量は大きくなり、軸方向鉄筋比が1.0%から2.0%に増加した場合には20%程度の増加となる。軸方向鉄筋比の増加に伴う終局曲率に達する断層変位量は、軸方向鉄筋比が増加することともなう部材の終局曲率の増加率にほぼ一致する。

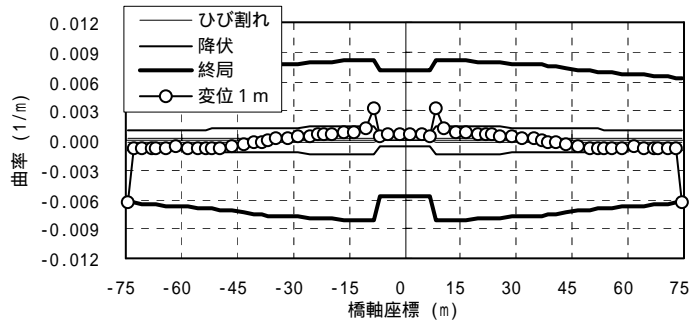
アーチ支間150mのモデル橋におけるアーチリングと補剛桁との剛性比と終局曲率に達する鉛直変位の関係を、図-8に示す。補剛桁に対するアーチリングの剛性比が小さいほど、断層変位量に対する応答曲率は大きくなるが、アーチリングの剛性が小さいほど終局曲率も大きくなるので、アーチリングに関してはランゲータイプの方が断層変位に対する耐震性能が良い(終局曲率に達する断層変位が大きい)結果となっている。なお、ライズ比が大きいと、断層変位に対する応答曲率は若干大きくなる傾向にあるが、終局曲率に達する断層変位量に関しては逆に若干小さい結果となっている。

4.2 水平変位

アーチ支間150mのローゼタイプのモデル橋(軸方向鉄筋比2.0%)におけるアーチリング



(a) ライズ比 5.0



(b) ライズ比 6.0

図-9 水平変位時のアーチリングの応答曲率

の応答曲率を、図-9に示す。ライズ比5.0の基本モデルにおいては、鉛直変位1mでスプリング部およびクラウン部で降伏曲率を超える。しかしながら、アーチリングが開く方向の水平変位に対してはアーチリングの軸力が低下するため、図-4に示すように終局曲率は死荷重作用時の終局曲率より大きくなることから、水平変位1mでは終局曲率には達していない。ライズ比が大きいと応答曲率は小さくなる傾向にあり、さらに軸力の変動量も大きくなること

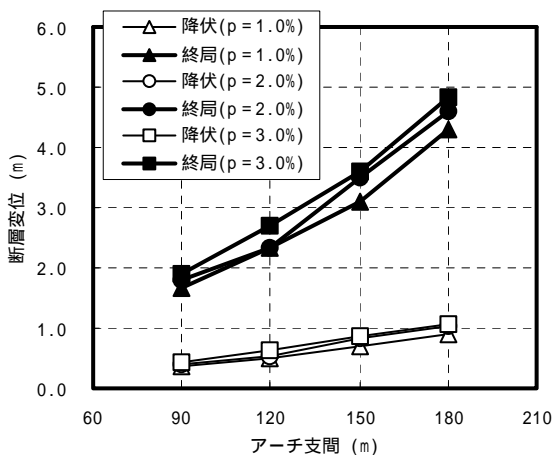


図-10 アーチ支間，軸方向鉄筋量の影響

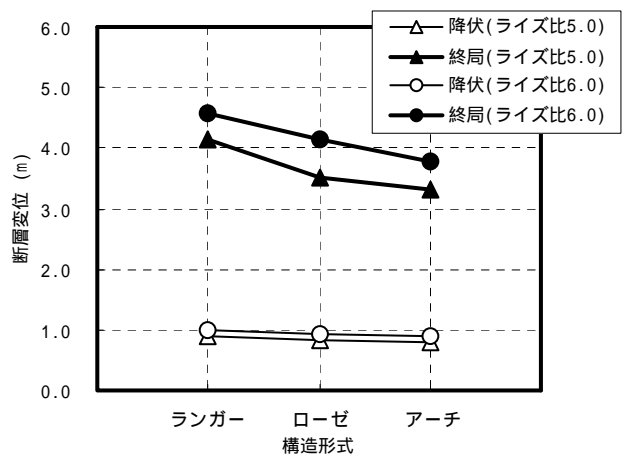


図-11 構造形式，ライズ比の影響

から、終局曲率に対する安全率は大きくなる。

ローゼタイプのモデル橋において、アーチ支間とスプリングが降伏曲率および終局曲率に達する水平変位との関係を、図 - 10に示す。アーチ支間が長いほど終局曲率に達する水平変位は大きくなるが、鉛直変位の場合に比べて、その増加の比率は線形的である。また、アーチリングの軸方向鉄筋量が多くなるほどスプリング部が終局曲率に達する断層変位量は大きくなるが、その比率は、鉛直変位の場合に比べて小さい。これは、鉛直変位に比べて水平変位は曲げ変形に対する軸方向変形の比率が大きいためと考えられる。

アーチ支間150mのモデル橋におけるアーチリングと補剛桁との剛性比と終局曲率に達する水平変位の関係を図 - 11に示す。補剛桁に対するアーチリングの剛性比が小さいほど、変位量に対する応答曲率は大きくなるが、アーチリングの剛性が小さいほど終局曲率も大きくなることから、鉛直変位と同様にアーチリングに関してはランガータイプの方が断層変位に対する耐震性能が良い結果となっており、また、剛性比の相違が終局曲率に達する断層変位量に与える影響の程度も大きい傾向にある。

なお、ライズ比が大きいと、鉛直変位の場合とは逆に、終局曲率に達する断層変位は大きくなる傾向にあり、また、ライズ比の相違が終局曲率に達する断層変位量に与える影響の程度も大きい結果となっている。

5. まとめ

本検討の結果をまとめると、以下のとおりである。

(1) アーチ支間が長いほど断層変位量に対する耐震性能は向上するが、その影響は水平変位に比べて鉛直変位の方が顕著である。

(2) ライズ比が大きいと、鉛直変位に対する耐震性能は若干低下するが、水平変位に対する耐震性能は逆に増加する。

(3) アーチリングの剛性が補剛桁に比べて小さいランガータイプのアーチ橋の方が、アーチリングに関しては断層変位に対する耐震性能が良い傾向にある。

以上、コンクリートアーチ橋の断層変位に対する耐震性能を、構造パラメータを変化させて検討したが、軸力変動に伴う終局状態の評価など、今後はファイバーモデル等を用いたより詳細な検討が必要である。

なお、本報告は、(社)日本コンクリート工学協会九州支部における「断層変位を受けるコンクリート系橋梁の耐震安全性に関する研究専門委員会(委員長:大塚久哲九州大学大学院教授)」において検討した結果をとりまとめたものである⁶⁾。

参考文献

- 1) 川島一彦, 橋本隆雄, 鈴木猛康: トルコ・コジャエリ地震による交通施設の被害概要, 第3回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.409-416, 1999.12
- 2) 運上成樹: 烏溪橋の被害(1999年9月21日台湾集集地震)に関する一考察, 第3回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.417-420, 1999.12
- 3) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 耐震設計編, 2002.3
- 4) (社)土木学会: コンクリート長大アーチ橋の設計・施工技術の現状と将来, 構造工学技術シリーズ, No.19, 2000.9
- 5) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, コンクリート橋編, 2002.3
- 6) (社)日本コンクリート工学協会・九州支部: 断層変位を受けるコンクリート系橋梁の耐震安全性に関する研究専門委員会報告書, 2002.11