

# 論文 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

松永 昭吾\*1・矢葺 亘\*2・村井 洋行\*3・小倉 裕介\*4

**要旨**：国内の道路橋においては断層変位を受けることを想定し、それに対する耐震安全性を照査した事例は少ない。しかしながら、1999年に台湾で発生した集集地震のように諸外国では断層変位による土木構造物の甚大な被災事例が報告されている。そこで、本研究では国内に建設されている既設コンクリートアーチ橋を対象として、断層変位を受けることを想定した耐震安全性の照査を行った。照査に用いる解析手法は、材料非線形を考慮した変位漸増解析を用いた。

**キーワード**：耐震性能、断層変位、アーチ橋、変位漸増解析、材料非線形、軸力変動

## 1. はじめに

国内における道路橋の設計では、地震が構造物に及ぼす影響として、地震による地盤の振動、すなわち地震動に対して耐震設計を行うのが一般的である<sup>1)</sup>。しかし、近年、諸外国では、断層変位により土木構造物が被災した事例が相次いで報告されている<sup>2)3)4)</sup>。例えば、1999年に発生したトルコのコジャエリ地震及び台湾の集集地震では、それぞれ水平方向に最大4~5m程度および鉛直方向に最大9~10m程度に達する断層変位が出現し、断層による永久変位が原因となって道路橋を含む多くの構造物が被災した。

そこで、本研究では、コンクリートアーチ橋の断層変位に対する脆弱性と安全性を明らかにすることを目的として、断層変位に対する耐震性能照査を行う。対象は、断層変位を考慮せずに設計された国内の既設道路橋3橋とする。こ

こでは、アーチ支間に生じる0.5m~2m(あるいは7m)程度の比較的大規模な断層変位を想定する。主としてアーチ部材に着目するが、逆ランガー・アーチ橋(B橋)については、補剛桁が全体剛性に与える影響が大きいため、補剛桁とアーチ部材の両方について着目する。

## 2. 対象橋梁と解析モデル

### 2.1 対象橋梁

対象とする3橋の概要を表-1に示す。A橋は、平成2年道路橋示方書<sup>5)</sup>(以下、道示)に拠り設計されているアーチ支間180mの比較的大規模なアーチ橋で、アーチリングは中空断面、上部工は、PC2主版桁(支間14.2m~16.8m)である。B橋は、平成8年道示<sup>6)</sup>に拠り設計されている上路式の逆ランガー・アーチで、平成7年に発生した兵庫県南部地震クラスの大規模

表-1 対象橋梁の概要

対象橋梁名	A橋	B橋	C橋
形式	ローゼ・アーチ	逆ランガー・アーチ	中路吊り形式アーチ
適用示方書	平成2年道示	平成8年道示	昭和55年道示
橋長	270.0m	176.0m	105.0m
アーチ支間/ライズ (支間ライズ比)	180.0m/27.5m (6.5)	116.0m/22.338m (5.2)	92.0m/17.0m (5.4)
地盤種別	I種	I種	I種

\*1 (株)建設技術研究所 九州支社道路・交通部 主任 工修(正会員)

\*2 九州大学 大学院工学研究院助手 工修(正会員)

\*3 八千代エンジニアリング(株) 九州支店技術第二部 副部長(非会員)

\*4 八千代エンジニアリング(株) 東京事業部耐震保全部 主任 工修(正会員)

地震動に対して十分な耐震性能を有するよう設計されている。具体的には、アーチリング、エンドポスト、鉛直材は鉄筋の降伏を許容し、補剛桁は橋軸方向および橋軸直角方向とも地震応答が初降伏以内となるよう設計されている。C橋は、昭和55年道示に拠り設計された中路吊り形式アーチ橋であり、2本の鉄筋コンクリートリブアーチが横つなぎ梁および下横梁によって結合され、補剛桁が吊り鋼材でアーチリングから吊られた特殊な構造を有している。

対象とした3つのアーチ橋は、アーチ支間が92mから180mであり、比較的長大支間を有している。また、各橋梁とも強固な岩盤に支持されている。

図-1~3にそれぞれA橋、B橋、C橋の橋梁一般図(側面図)を示す。

## 2.2 解析手法

解析手法には、材料非線形を考慮した非線形はり要素を用いた静的な非線形変位漸増解析を

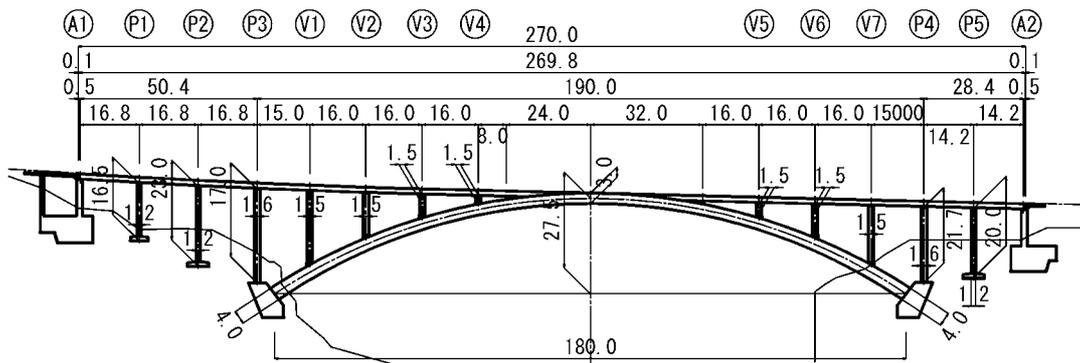


図-1 A橋全体一般図(側面図)(単位:m)

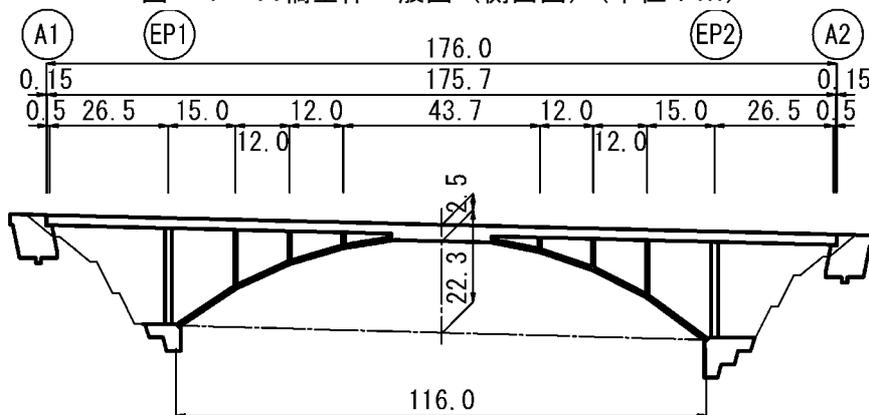


図-2 B橋全体一般図(側面図)(単位:m)

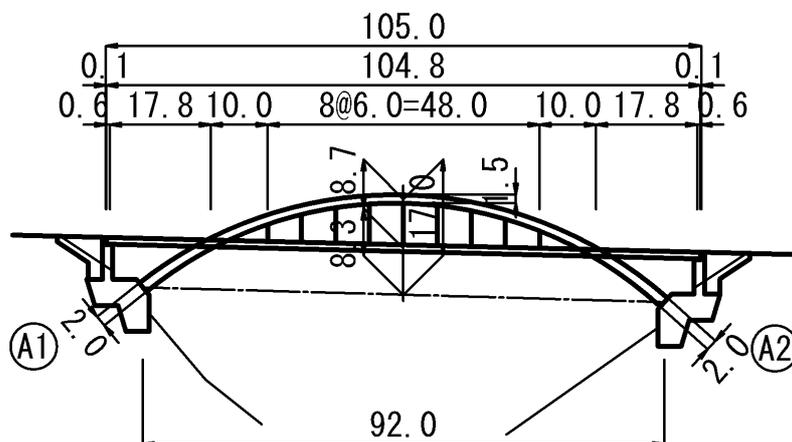
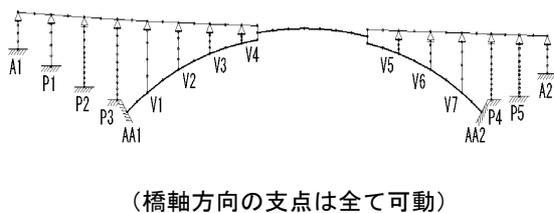


図-3 C橋全体一般図(側面図)(単位:m)

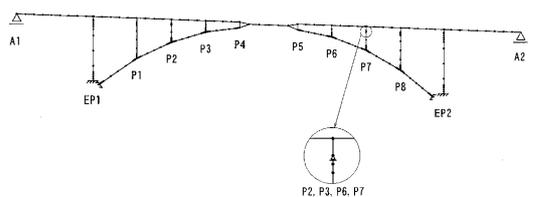
用いる。ここで、アーチ橋の場合、主部材であるアーチ部材が軸力部材であることから、軸力変動の影響が部材の終局耐力に与える影響が無視できないことが想定される<sup>6)</sup>。そこで、ローゼ・アーチ橋(A橋)については、アーチ部材、鉛直材、エンドポストおよび橋脚を軸力変動の影響を考慮できる非線形はり要素としている。他の2橋(B橋、C橋)については、応答軸力を算出し、軸力の変動量を確認した。また、B橋は、逆ランガー・アーチであり補剛桁が全体剛性に占める割合が高いことから、補剛桁についても非線形はり要素を用いる。一方、A橋、C橋では補剛桁は線形とした。また、C橋吊り材は非圧縮でモデル化した。

図-4~6に各橋梁の解析モデル図を示す。全



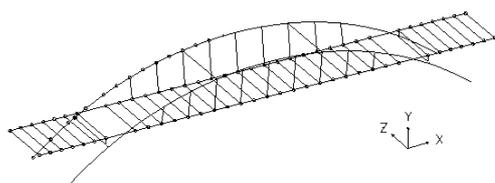
(橋軸方向の支点は全て可動)

図-4 A橋解析モデル



(EP1, P1, P8, EP2の支点は剛結, 他は橋軸方向可動)

図-5 B橋解析モデル



(橋軸方向の支点は可動)

図-6 C橋解析モデル

ての下部構造基礎は、変位、回転ともに固定としている。橋軸方向の上部工支承条件は、図に示すが、橋軸直角方向はすべて固定である。

RC非線形部材の曲げモーメント~曲率関係(以下、M- $\phi$ 関係)の骨格曲線は、道示に従い各断面形状、鋼材配置と初期軸力によりコンクリートのひび割れ、最外縁鉄筋の降伏、コンクリートの圧縮ひずみから算定しており、A橋についてのみ非線形部材に関して軸力変動の影響を考慮している。また、B橋の補剛桁は道示IIIに従ってプレストレスによる初期鋼材ひずみを考慮してM- $\phi$ 関係を算出した。図-7にA橋のアーチスプリング部の軸力~曲げモーメント相関関係(以下、N-M関係)、図-8,9にB橋で用いたスプリングと補剛桁のM-

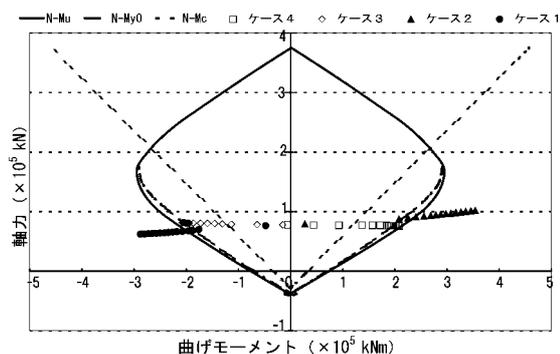


図-7 A橋スプリング(AA2側)の軸力(N)~曲げモーメント(Mc, Myo, Mu)相関関係図

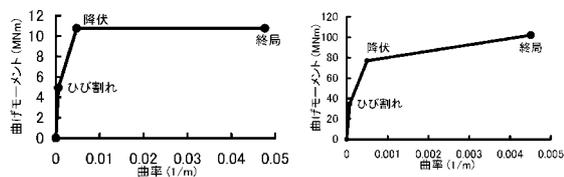


図-8 B橋アーチスプリングの曲げモーメント~曲率関係図

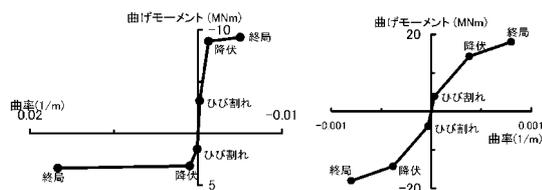


図-9 B橋の補剛桁曲げモーメント~曲率

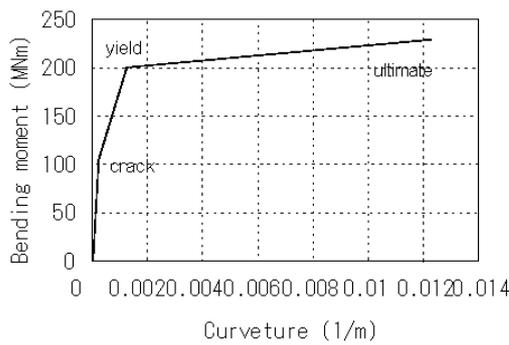


図-10 C橋アーチリングの曲げモーメント-曲率関係の例



(鉛直下方のケースはA橋のみ。面外方向については、A橋はケース5、B橋、C橋はケース4とする)

図-11 解析ケース

$\phi$  関係、および、図-10 にC橋アーチ部材で用いた  $M-\phi$  関係の例を示す。

断層変位は、アーチ支間を挟んだ片側全ての下部構造基部に強制変位として変位を漸増して与える。

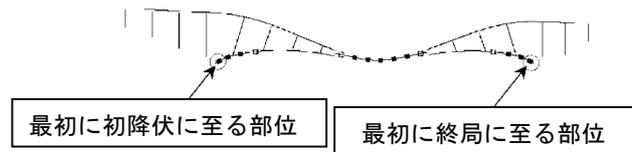
(2) 解析ケース

面内方向の解析ケースは、図-11 に示す。橋軸方向について、アーチが開く方向(ケース1)と閉じる方向(ケース2)、鉛直方向について鉛直上方(ケース3)とアーチ支間を挟んで左右非対称とするA橋のみ鉛直下方(ケース4)とする。面外方向は、A橋についてはケース5、B橋、C橋についてはケース4とする。

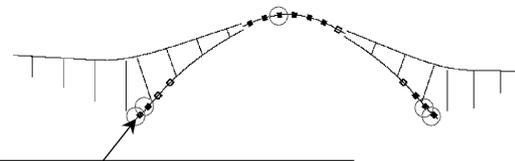
表-2 A橋解析結果(アーチスプリング部初降伏時および終局時)

ケース	方向	アーチリング:初降伏時				アーチリング:終局時			
		断層変位量 (m)	応答曲率 (mm-1)	降伏曲率 (mm-1)	終局曲率 (mm-1)	断層変位量 (m)	応答曲率 (mm-1)	降伏曲率 (mm-1)	終局曲率 (mm-1)
ケース1	橋軸方向(開く方向)	0.40	0.647	0.624	10.726	6.50	12.278	0.602	12.243
ケース2	橋軸方向(閉じる方向)	0.45	0.676	0.669	6.697	2.10	5.456	0.686	5.361
ケース3	鉛直方向(上方)	3.45	0.643	0.641	9.444	(7m以上)	-	-	-
ケース4	鉛直方向(下方)	3.25	0.653	0.640	9.475	(7m以上)	-	-	-
ケース5	橋軸直角方向(面外方向)	0.30	0.308	0.293	3.650	2.25	3.711	0.293	3.650

※ケース1~ケース4において最初に降伏、終局する部位はスプリング部、ケース5はクラウン部



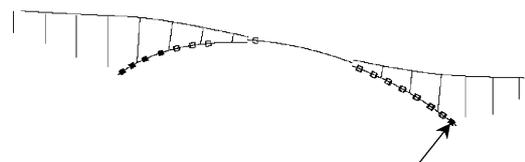
(a) ケース 1



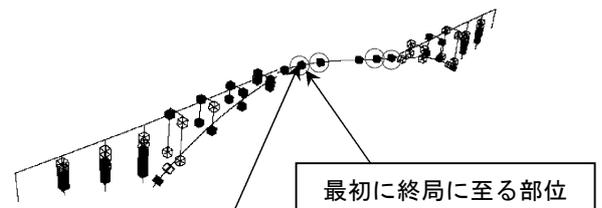
(b) ケース 2



(c) ケース 3



(d) ケース 4



(e) ケース 5

□ : ひび割れ, ■ : 初降伏, ○終局

(変位量 7m 時, 変形量は 30 倍)

図-12 A橋変形図

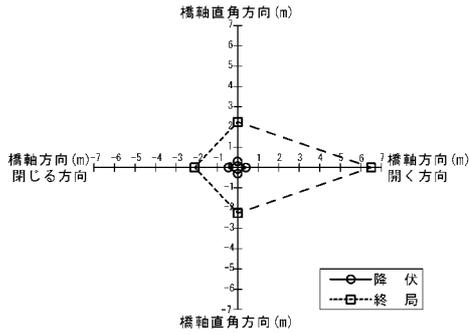
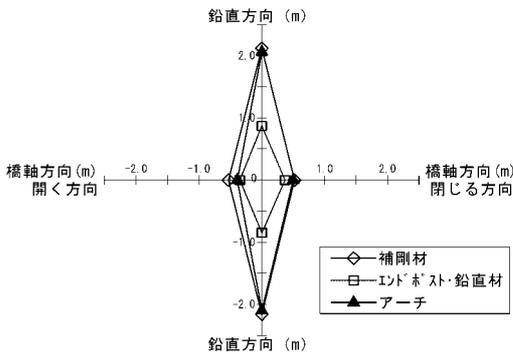
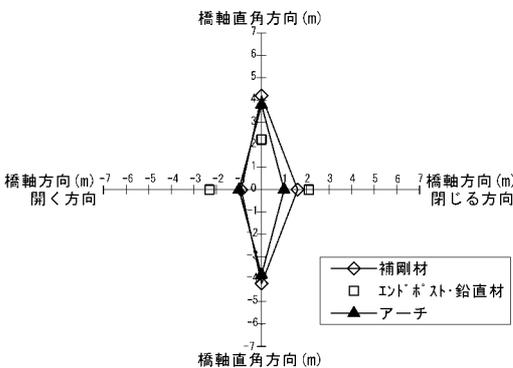


図-13 A橋アーチ部材の橋軸方向-橋軸直角方向降伏および終局変位



(a) 降伏変位



(b) 終局変位

図-14 B橋各部材の橋軸方向-橋軸直角方向降伏および終局変位

### 3. 解析結果

#### 3.1 A橋（アーチ橋）の解析結果

表-2に解析結果を、図-12に各ケースの変形図を示す。面内変形（ケース1～4）については全てアーチスプリング部から初降伏となり、終局に至ることがわかった。また、ケース1では、初降伏、終局ともにアーチスプリング部から発生するが、対象橋梁が左右非対称であるため、最初に初降伏に至る要素(AA1

表-3 ケース1（開く方向）におけるイベント

断層変位量 (m)	応答曲率 (塑性率)	イベント	
		イベント	値
0.25	12.3	ひび割れ	0.23
		降伏	1.24
		終局	12.3

表-4 ケース2（閉じる方向）におけるイベント

断層変位量 (m)	応答曲率 (塑性率)	イベント	
		イベント	値
0.25	12.3	ひび割れ	0.23
		降伏	1.24
		終局	12.3

表-5 ケース3（鉛直上方）におけるイベント

断層変位量 (m)	応答曲率 (塑性率)	イベント時点の曲率	
		イベント	値
0.25 未満	1.46	ひび割れ	0.23
0.25 未満	1.46	降伏	1.24
0.50	3.58 (2.887 φ <sub>y</sub> )		
1.00	8.71 (7.024 φ <sub>y</sub> )		
1.50	13.8	終局	12.3
2.00	24.2 (19.51 φ <sub>y</sub> )		

表-6 ケース4（橋軸直角方向）におけるイベント

断層変位量 (m)	曲率 (1/m) (塑性率)	イベント	
		イベント	値
0.25	1.71	ひび割れ	1.74
0.50	5.89 (0.622 φ <sub>y</sub> )		
0.75	8.77	降伏	9.46
1.00	16.5 (1.744 φ <sub>y</sub> )		
1.50	55.3 (5.846 φ <sub>y</sub> )		
2.00	92.9	終局	92.9

側)と最初に終局に至る要素(AA2側)が異なっている。また、アーチリングの軸力変動の影響により最初に初降伏に至ったとき、最初に終局に至ったときの降伏曲率、終局曲率が異なっていることがわかる。面外方向の変位を受ける場合(ケース5)では、アーチクラウン部から初降伏、終局に至ることがわかった。また、図-13に橋軸方向-橋軸直角方向のアーチ部材の降伏および終局変位図を示すが、A橋では、アーチリングが閉じる方向あるいは面外方向の変位を受ける場合に比べ、アーチリングが開く方向の断層変位に対し高い変形性能を有することがわかる。鉛直方向変位を受ける場合は、上方、下方ともに7m程度の変位では終局に至っていない。

### 3.2 B橋（逆ランガーアーチ橋）の解析結果

横軸に橋軸方向，縦軸に橋軸直角方向の断層変位方向による対象橋梁の降伏および終局に至る変位をプロットしたものを図-14に示す。橋軸方向の方が降伏および終局に至る変位性能が劣っており，橋軸直角方向ではエンドポスト，鉛直材は断層変位7mにおいても終局に至らない結果となった。

### 3.3 C橋（中路式アーチ橋）の解析結果

表-3~6にC橋の各ケースにおけるイベントを示す。これらの表より橋軸方向の変位に関して耐震性能に余裕がなく，イベントが発生する変位量が25cm以下となっている。一方，橋軸直角方向には比較的余裕があるためアーチ橋を計画する場合，断層と橋梁との交差角に注意する必要があるといえる。

### 3.4 考察

アーチ橋において，塑性化はアーチリングのスプリング部とクラウン部に集中することがわかった。橋軸直角方向変位の場合，ランガーではスプリング部に，アーチ橋ではクラウン部に損傷が集中する傾向にある。

また，B橋にみられるように平成8年道示により部材のじん性に関して改善が図られている。横拘束筋の増量により降伏以降の許容できる損傷の程度が大きいため変位吸収を目的とした塑性変形に対しても有利に働いていることがわかる。即ち，部材の塑性化により変位吸収を期待する場合，高いじん性が望ましいといえる。これらは，橋梁直下に活断層が確認された場合でも，断層の入力方向に応じた変形性能の高い構造形式を適切に選択することや，従来の地震動に対する補強方法と同様に，部材の塑性化後の変形性能を高めることで落橋を防止する十分な可能性があることを示している。

## 4. まとめと課題

本検討により，変位の入力に対する塑性化の部位の違いや補強の可能性を確認できた。しかしながら，断層変位を受ける場合は，変位量が

そのまま残留変位として残るため，修復性の照査においては別途要求性能を定める必要がある。また，アーチ形式により断層変位に対し耐震性能が高い方向，すなわち，変位吸収性能の高い方向が異なるため，橋梁計画段階においては，経済的な変位吸収デバイスの検討や支間の長大化による変位吸収の検討に加え，交角の適切な設定も検討課題となる。

### 謝辞

本論文を作成するにあたり，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」（委員長：大塚久哲九州大学院教授）での議論が有益であった。記して謝意を表す。

### 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，丸善，2002.3
- 2) 大塚久哲，松田泰治，矢葺亘，栗木茂幸：921集集地震（台湾）被害調査報告書，九州大学大学院工学研究科建設システム工学専攻建設振動工学研究室，2000.2
- 3) Japan Society of Civil Engineers: The 1999 Ji-Ji Earthquake, Taiwan - Investigation into Damage to Civil Engineering Structures -, 1999
- 4) Japan Society of Civil Engineers: The 1999 Kocaeli Earthquake, Turkey - Investigation into Damage to Civil Engineering Structures -, 1999
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，丸善，1990.2
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，丸善，1996.12
- 7) 大塚久哲，水取和幸，首藤政徳：RC構造部材の材料非線形解析モデルに関する基礎的考察，土木構造・材料論文集，第16号，pp. 61-70, 2000