

断層変位方向によるRCアーチ橋の耐震性能に関する解析的研究

Analytical study on seismic characteristics of RC arch bridge subjected to fault movement directions

中野友裕*・河野直也**・田邊忠顕***

Tomohiro NAKANO, Naoya KAWANO and Tada-aki TANABE

*博(工) 東海大学講師, 工学部土木工学科 (〒259-1292 平塚市北金目 1117)

**大分工業高等専門学校専攻科, 機械環境システム専攻 (〒870-0152 大分市牧 1666)

***工博 名古屋大学名誉教授, 社会基盤技術支援機構専務理事 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町 1)

The seismic performance of bridges subjected to fault displacement is of great importance. Present paper deals with response of RC arch bridge to various fault movement directions by finite element considering with biaxial flexure with axial force. The parametric studies have been carried out on fault type and fault slip angle. The results have shown that it is necessary to investigate not only compressive ultimate strain but also tension strain of section for seismic design of RC arch bridge across a fault.

Key words: fault movement direction, RC arch bridge, bi-axial bending, varying axial force, 3D ultimate surface

キーワード: 断層変位方向, RCアーチ橋, 2軸曲げ, 軸力変動, 3次元終局曲面

1. はじめに

わが国には多数の内陸型活断層が存在している。道路、鉄道に代表される交通施設などでは、極力断層位置を避けるように設計が行われ、断層変位を受けないことを前提とした慣性力に基づく耐震設計・耐震照査が中心となっている。しかし、地震時の構造物応答においては、種々の不確定性が存在することから、考えられる可能性について多方面から検討すべきであることは論を待たない。

従来、断層変位に対しては、その対策の困難さから、工学的・科学的な取組みはなされてこなかったわけであるが、1998年のトルコ・コジャエリ地震¹⁾や台湾・集集地震²⁾のように、地震動による被害のみならず断層変位の被害が顕著であることを受けて、わが国においても断層変位を受ける構造物への工学的対応に関する研究が活発になりつつある。また現在の技術ではその存在の把握が困難と考えられている伏在断層も存在しており、実際、2000年の鳥取県西部地震³⁾においては、賀祥ダムが伏在断層による地震に直撃されている⁴⁾。これらを鑑みるに、断層変位を受ける場合の土木構造物の挙動を把握することは、極めて重要であると考えられる。

地下構造物については文献^{5),6)}、工学的対応策については文献^{7),8)}をはじめ多くの成果が得られているが、アーチ橋についても同様な視点から、松永ら⁹⁾、角本ら¹⁰⁾が断層変位を受けるRCアーチ橋の挙動特性について報

告している。

アーチ橋に関するこれらの検討においては、軸力の影響を考慮した単軸曲げの $M-\phi$ 骨格曲線に基づいて検討が行われており、各断面における面内、面外方向の単軸曲げが卓越する方向の断層変位についての限定的な結果であることは否めない。また、Kawashima¹¹⁾らはRCアーチ橋の動的解析において、本来圧縮力を受け持つように設計されているアーチ部材に引張力が作用する危険性を指摘している。特に断層変位がさまざまな方向に生じ得る変形挙動であることを考えると、文献 9),10)で述べられているように、軸力変動を考慮した2軸曲げ解析や、文献 11)で報告されているRCの純引張破壊の可能性も検討する必要があると考えられる。

そこで本研究では、力の内挿関数を基にしたはり要素解析手法である Flexibility 法¹²⁾とファイバーモデルを、様々な方向の断層変位を受けるRCアーチ橋の解析に適用した。解析においては、軸力変動と2軸曲げを考慮し、RCアーチ橋の耐震安全性と断層変位の方角ごとに発生しうる挙動について、数値解析の評価を行った。

なお、破壊の基準として、コアコンクリートが道路橋示方書¹³⁾の終局ひずみに達したときの他、断面全体が引張領域に入りコンクリートが一切引張力を受け持たなくなったときも断面破壊と判定することで、引張に関する安全性の評価も行っている。

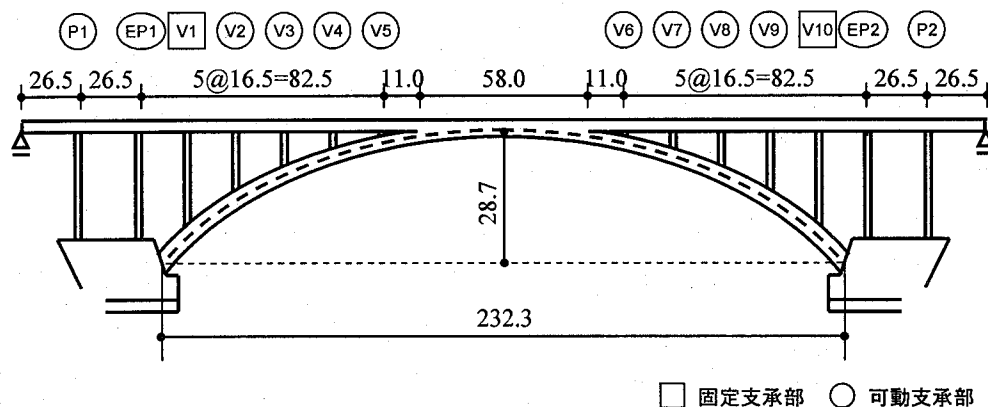


図-1 RCアーチ橋全体一般図（側面図：単位[m]）

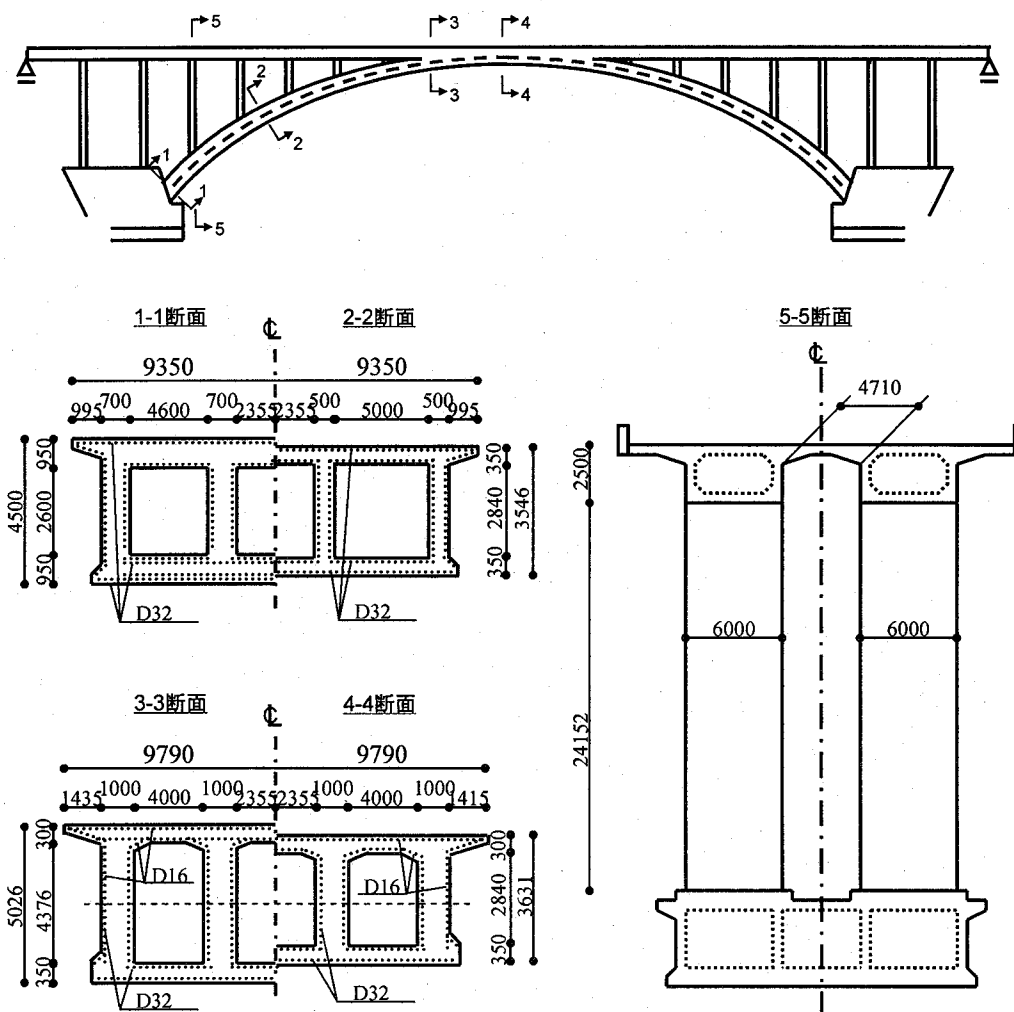


図-2 RCアーチ橋断面図（抜粋：単位[mm]）

2. 解析の概要

2.1 解析対象としたRCアーチ橋

対象とするRCアーチ橋の一般図を図-1に、断面図を図-2にそれぞれ示す。これは解析結果の考察を行いやすくするために、橋軸および橋軸直角方向に関して対称となるように実際に存在するRCアーチ橋の構造を参考として修正したものである。アーチ支間は232.3[m]、ライ

ズは28.7[m]と比較的大規模な上路式固定アーチ橋であり、アーチリングは3室の中空断面である。また、補剛桁は1室中空断面のものが、上下線それぞれに独立した橋脚・エンドポスト・鉛直材の上に設置されている構造となっている。

アーチアバットは剛な岩盤の上に設置されており、アーチリング、エンドポスト、橋脚を支持している。そのため、相互作用はないものと判断している。

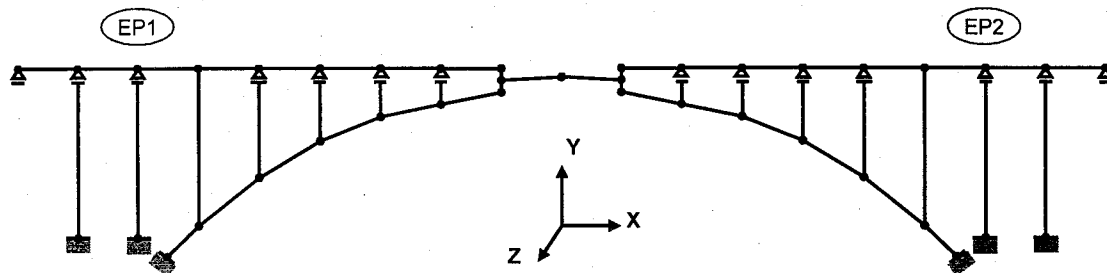


図-3 RCアーチ橋の解析モデル

表-1 材料諸元

	アーチリング	補剛桁	鉛直材・EP・橋脚
コンクリート設計基準強度 f'_{ck} [MPa]	39.2	34.3	23.5
軸方向鉄筋降伏点[MPa]	345	345	345
横拘束筋 種別・径	D19	D16	D19
横拘束筋間隔[mm]	150	200	150~300
横拘束筋降伏点[MPa]	295	345	295

2. 2 RCアーチ橋のモデル化

図-1に示すアーチ橋を、3次元はり要素を用いてモデル化した。解析モデルは図-3に示す53節点、62要素であり、鉄筋コンクリート部材は全てファイバーモデルでモデル化している。アーチアバットに固定されている左右のアーチリング・エンドポスト・橋脚は固定支持とし、補剛桁両端は、可動支承を介して固定支持点に支持されている。なお、可動支承は橋軸方向可動、橋軸直角方向固定のばねにモデル化している。

2. 3 材料モデルと解析アルゴリズム

図-3に示す各部材には、断面ごとにファイバーモデルを適用して材料非線形性を考慮した。ファイバーモデルを適用する際のコンクリート構成則は、道路橋示方書に基づき算出される諸元を用いるが、道路橋示方書による算定では、断面に作用する曲げの方向により異なる諸元が得られる。本解析では2軸曲げを直接扱うことから、2方向の曲げごとに算定される諸元のうち、最大圧縮力の小さくなるコンクリート構成則を用いることにした。

構成則の包絡線および終局ひずみは、断層直上に構造物が存在していると想定しているため、道路橋示方書においてタイプII地震動に対して算定される値を採用した。

材料の除荷・再載荷履歴には、コンクリートについてはDarwin-Pecknoldモデル¹⁴⁾を、鉄筋についてはBi-Linearモデルをそれぞれ用いることにした。表-1に各部材の材料諸元を、図-4にスプリング部のコンクリート構成則を示す。

上記のモデルにファイバーモデルを適用し、各断面の2軸曲げと軸力変動を評価した。せん断とねじりは弾性としている。この仮定のもと、力の内挿関数により剛性マトリクス、断面力、ひずみ・曲率分布を算出するFlexibility法に基づく収斂計算を行うことで、アーチ橋の

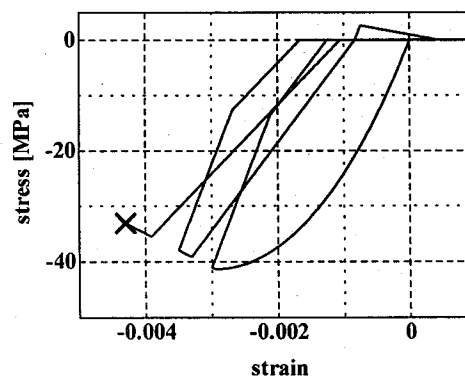


図-4 スプリング部コンクリート構成則

挙動解析を実施した。Flexibility法による解析は力の内挿関数を基にしていることから、剛性法のような要素分割を施さなくても、断面力、曲率・ひずみ分布などが矛盾なく得られるため、図-3のような要素分割であってもひずみの局所化なども追跡することができる。また文献¹⁵⁾によれば、実験などで得られた構成則諸元を使用するためには、要素寸法は供試体と同程度とする必要のあることが示されている。Flexibility法では積分点間の距離が剛性法の要素寸法に対応するので、要素寸法依存性は積分点間距離により影響を受ける。そこで道路橋示方書の元となった星隈らの実験¹⁶⁾と同程度の寸法となるように積分点を設定することで、圧縮軟化域での整合性を取ることができると判断した。なおFlexibility法のアルゴリズムは、文献^{12),17)}を参照されたい。

2. 4 想定した断層変位のモデル化

断層変位には大きく分けて正断層・逆断層・横ずれ断層があるが、本研究ではそのような分類に基づかず、3座標平面(X-Y平面・Y-Z平面・X-Z平面)内に断層変

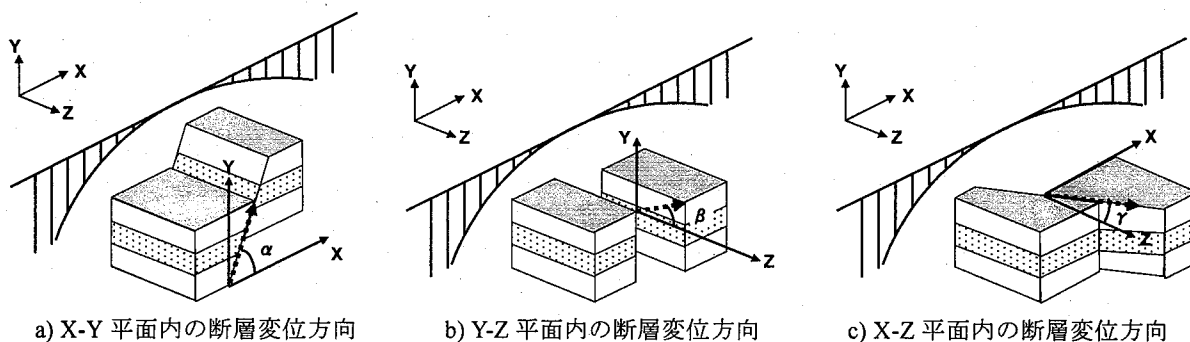


図-5 想定した断層変位の方向

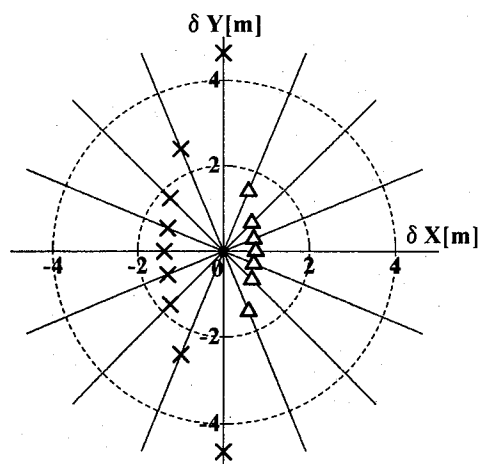


図-6 X-Y 平面内断層変位方向による終局時変位
(× : 圧縮による終局 / Δ : 全断面引張)

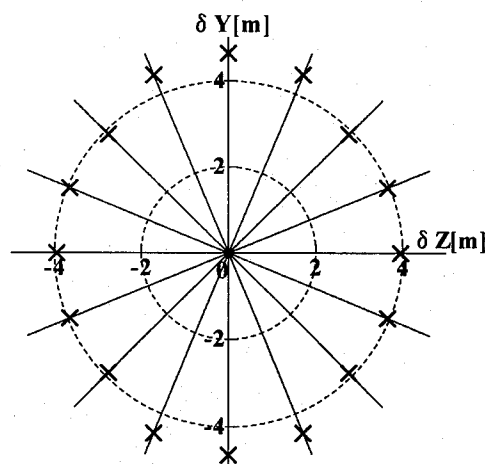


図-7 Y-Z 平面内断層変位方向による終局時変位
(× : 圧縮による終局)

位のベクトルが存在する状況ごとに分類した¹⁸⁾(図-5)。実際には断層変位による地表の動きには回転成分などの複雑な因子も現れるが、それらをすべて包含する場合、挙動に対する考察が行いにくくなることを考慮して、本稿ではこのようなモデル化としている。

図-5の a)は、断層変位ベクトルが X-Y 平面内に存在する場合で、その方向を X 軸とのなす角 α で表している。このことは、 $\alpha < 90^\circ$ の場合に正断層、 $\alpha > 90^\circ$ の場合に逆断層になることを示している。また、 $\alpha = 0^\circ$ 、 180° の場合はそれぞれ、支間中央で地割れもしくは褶曲が発生した場合を想定することになる。

同図 b)は、断層変位ベクトルが Y-Z 平面内に存在する場合で、その方向を Z 軸とのなす角 β で表している。これは橋軸直角方向面内でさまざまな方向にずれ断層が生じた場合を想定している。

同図 c)は、断層変位ベクトルが X-Z 平面内に存在する場合で、その方向を Z 軸とのなす角 γ で表している。これは水平面内でさまざまな方向にずれ断層が生じた場合を想定していることになる。

これらの α 、 β 、 γ に対し、 22.5° ずつ角度を変化させ、その方向に断層変位が生じた場合の挙動を解析した。断層変位の入力、図-3 のモデルにおいて左側固定点を固定とし、右側固定点 4ヶ所を断層方向に応じて静的に変位を増分させることで変位を与えた。

2. 5 断層変位によるアーチ橋の破壊の判定

文献⁹⁾では、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。本研究では同様の考えから、ファイバーモデルにより、断面内のコアコンクリートが終局ひずみに達した時点(図-4の×印)をアーチ橋の終局とみなすが、引張についても検討する必要があると考え、中立軸が断面外に存在し、全コンクリートファイバーが引張領域に入った上で引張力を受け持たなくなった場合も破壊したとみなすことにした。したがって、破壊の分類として終局破壊と引張破壊とを区別して用いることとする。

3. 解析結果

3. 1 X-Y 平面内断層変位方向による終局時変位

図-6に、断層変位方向が X-Y 平面内にある場合(図-5a に対応)の終局時変位を、角度 α ごとにプロットした図を示す。X 軸方向に断層変位が増大する場合、すなわちアーチが開く方向に変位する場合には、断面に引張破壊が生じる結果となった。逆に、X 軸方向に断層変位が減少する場合、すなわちアーチが閉じる方向の場合には、引張破壊は生じず、コンクリートが終局ひずみに達して破壊する形態となった。

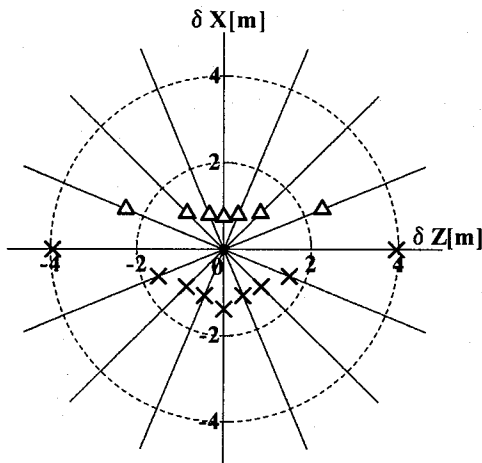


図-8 X-Z 平面内断層変位方向による終局時変位
(×: 圧縮による終局/Δ: 全断面引張)

3. 2 Y-Z 平面内断層変位方向による終局時変位

図-7 に、断層変位方向が Y-Z 平面内にある場合 (図-5b に対応) の終局時変位を、角度 β ごとにプロットした図を示す。橋軸直角方向に断層変位が発生する本ケースでは、いずれの場合もコンクリートが終局ひずみに達することで破壊に至ることが分かる。

3. 3 X-Z 平面内断層変位方向による終局時変位

図-8 に、断層変位方向が X-Z 平面内にある場合 (図-5c に対応) の終局時変位を、角度 γ ごとにプロットした図を示す。図-6 と同様、X 軸方向に断層変位が増大する場合、すなわちアーチが開く方向に変位する場合には、引張破壊が生じる結果となった。ただし、断層変位の方向が Z 軸に近づくにつれて、わずかなではあるが引張破壊時断層変位の X 方向成分は増大している。この点は図-6 と異なる点である。これは、X-Z 平面内方向の断層変位の場合、アーチ橋に対して面外曲げが生じることになるため、断面に 2 軸曲げ状態が発生し、圧縮ひずみが生じやすくなったためであると考えられる。

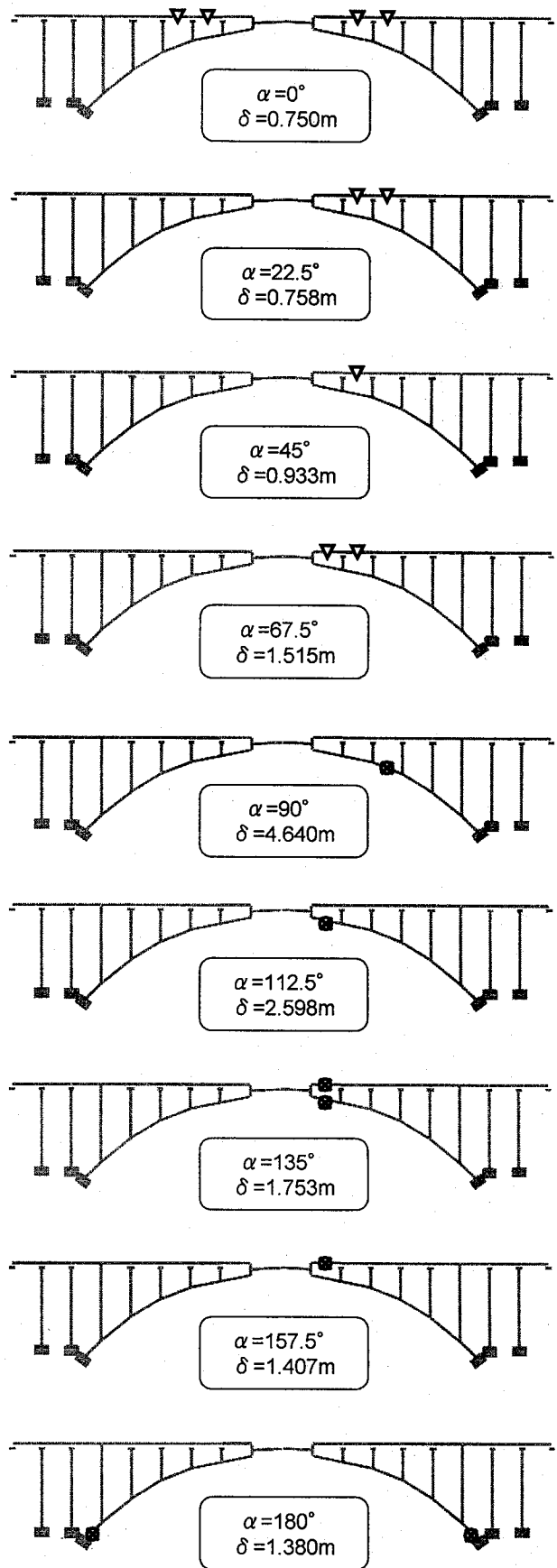
また、X 軸方向に断層変位が減少する場合、すなわちアーチが閉じる方向の場合には、引張破壊は生じず、コンクリートが終局ひずみに達して破壊する形態となる。この点については、図-6 に共通する。

4. 解析結果に基づく考察

4. 1 断層変位方向による破壊状況の相違

図-9～図-11 に、想定した断層変位ごとの破壊状況を示す。なお、対称性により同一となる方向については省略している。

まず、X-Y 平面内に断層変位方向がある場合 (図-5a、図-6 に対応)、大きく分けて 2 つの破壊形態が生じる可能性がある。ひとつは引張方向の変位が含まれるこ



∇ 引張破壊した要素 ⊗ 終局に至った要素

図-9 X-Y 平面内断層変位方向による破壊状況

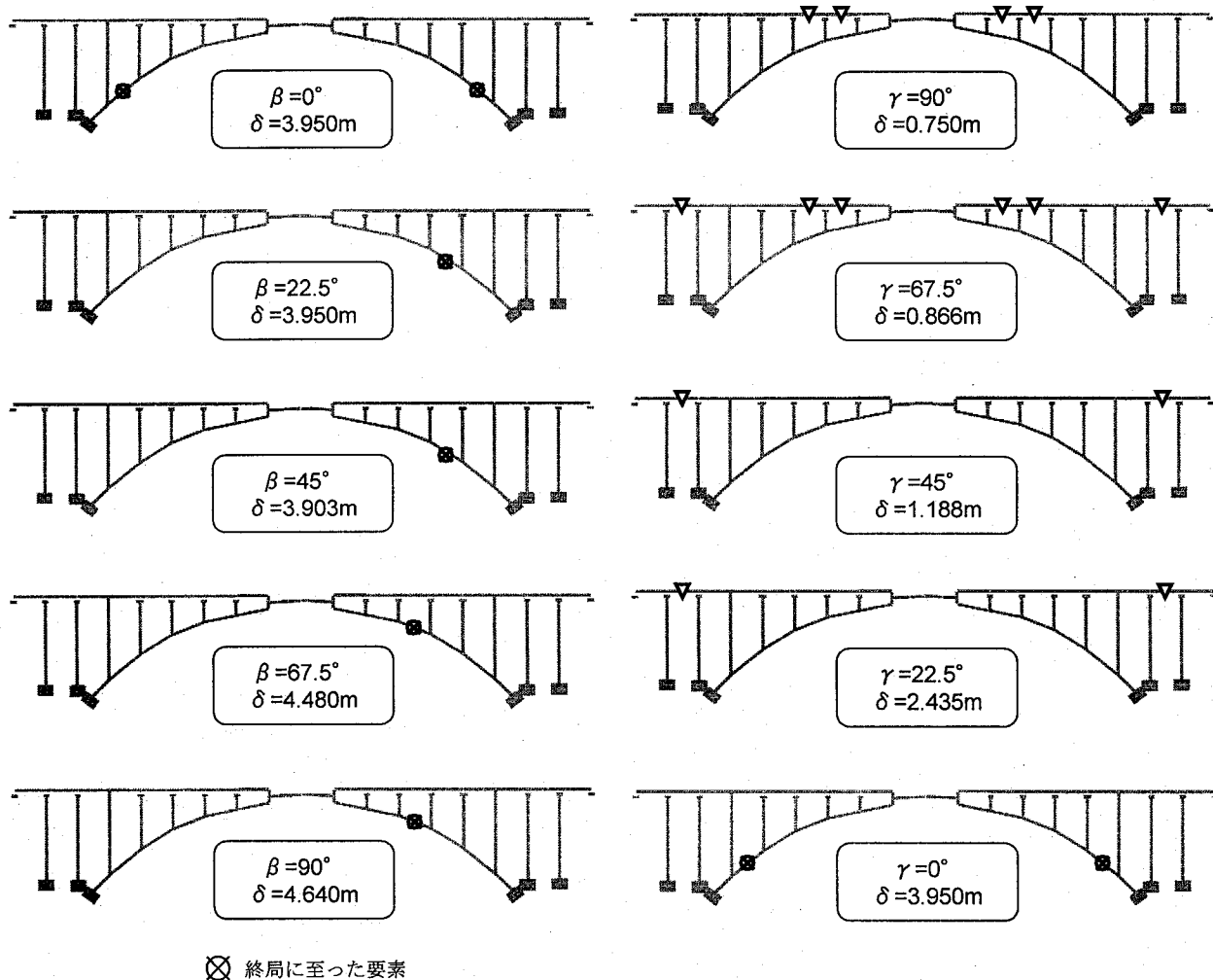


図-10 Y-Z 平面内断層変位方向による破壊状況

とにより補剛桁が全断面引張となる場合であり、他方は圧縮方向の変位により補剛桁もしくはアーチ部材のコンクリートが終局に達する場合である。対称的な橋軸直角軸に関して力が対称となる、 $\alpha = 0^\circ$ と 180° では、損傷位置も対称になるが、それ以外の場合には非対称な損傷となっている。

Y-Z 平面内に断層変位方向がある場合（図-5b、図-7 に対応）、すなわち断層変位が橋軸直角面内である場合には、いずれの場合もアーチ部材のコンクリート終局による破壊となる。 β の値により損傷位置は異なってくるが、破壊時断層変位量としておおむね 4[m] 以上となっている。この断層変位のケースにおいては他のケースに比較すると優れた変形性能を有している。

X-Z 平面内に断層変位方向がある場合（図-5c、図-8 に対応）には、X-Y 平面内に断層変位方向がある場合（図-9）と近い傾向が見られる。これはアーチの開閉成分である X 軸方向の変位がアーチ橋の損傷に大きな影響を与えることを示すものである。この場合もアーチが開く方向の $\gamma > 0^\circ$ の場合には補剛桁が引張損傷し、アーチの閉じる方向である $\gamma < 0^\circ$ の場合にはアーチ部材のコンクリートが終局に至る破壊形式となる。

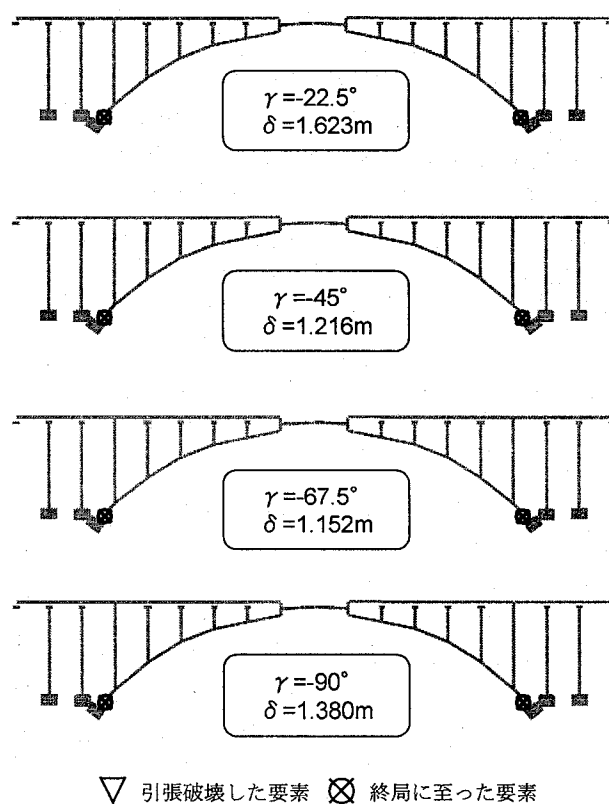
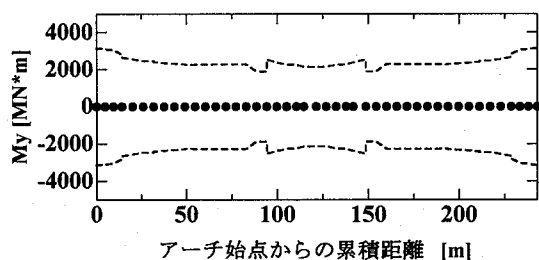
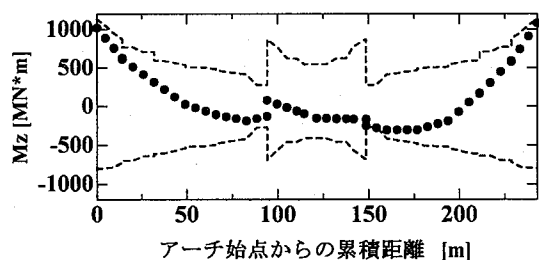


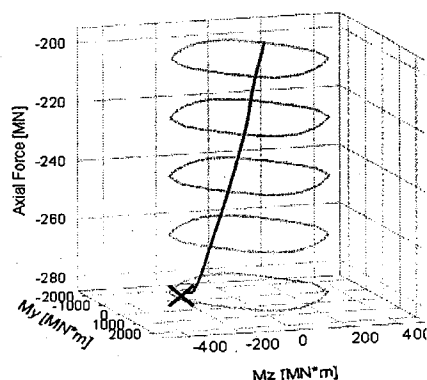
図-11 X-Z 平面内断層変位方向による破壊状況



a) アーチリングモーメント分布 (面外)



b) アーチリングモーメント分布 (面内)



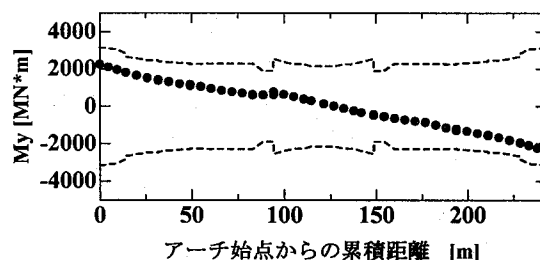
c) 軸力-2方向モーメント相関図

図-12 $\alpha=135^\circ$ でのアーチリング破壊箇所断面力

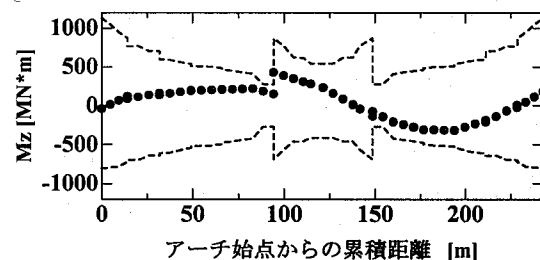
変形能については橋直方向の断層変位である $\gamma=0^\circ$ が優れているが、その他は比較的小さくなることから、X軸（橋軸）方向の断層変位がアーチ橋の変形能に大きな影響を及ぼしていると言える。

4. 2 終局時断面力に関する検討

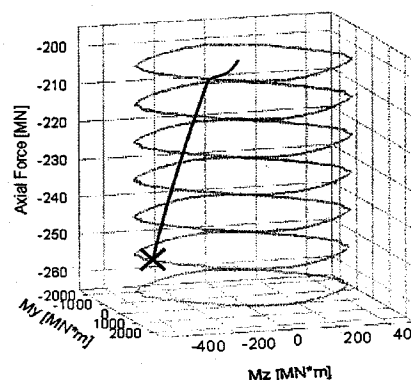
図-12 a), b) に断層変位方向 $\alpha=135^\circ$ の終局時点でのアーチ部材内モーメント分布を示す。軸の下添字 y, z はそれぞれ部材軸 y 軸, z 軸まわりであることを表している。また図中の点線は、アーチ部材各箇所における終局モーメントを表している。これらの図より、アーチクラウン部右側（図-9 参照）の部材が終局に達していることが分かるが、その断面の軸力-曲げモーメント変動履歴を示したのが、同図 c) である。図中の角ばった円形は、各軸力における当該断面での2方向終局モーメントを軸力ごとにプロットしたものである（以下、終局曲面）。当該断面の軸力は 194[MN] (死荷重作用時) から徐々に増加していき、279[MN] まで変動している。しかし、その間、



a) アーチリングモーメント分布 (面外)



b) アーチリングモーメント分布 (面内)



c) 軸力-2方向モーメント相関図

図-13 $\beta=67.5^\circ$ でのアーチリング破壊箇所断面力

終局曲面の大きさにほとんど変化は見られない。

$\alpha=135^\circ$ では、各部材は面内曲げのみを受けるため、 y 軸まわりのモーメント M_y は発生せず（同図 a), N - M_z 平面内で履歴を描いている。

同様に $\beta=67.5^\circ$ の終局時点でのアーチ部材内モーメント分布および、終局に至ったアーチ部材（図-10 参照）の軸力-曲げモーメント変動履歴を、図-13 に示す。同図 a), b) より、この場合は面内だけでなく面外方向の曲げも作用している。ともにモーメントの値は終局よりも小さくなっているが、2つのモーメントを同時に受けることにより、同図 c) に示すように終局曲面に達することになる。図-12c) および図-13c) を、 M_y - M_z 平面に投影した図を、図-14 に示す。 $\alpha=135^\circ$ の場合には M_z のみが増加しているが、 $\beta=67.5^\circ$ の場合には M_y も作用し、面内だけでなく面外の曲げモーメントも作用していることが分かる。このことから、面内モーメントのみ、あるいは面外モーメントのみを考慮する解析では、終局挙動を十分に捉えられないものと考えられる。

5. まとめ

現在の耐震設計において明確には考慮されていない断層変位を受ける橋梁構造物について、完全対称RCアーチ橋を対象とした数値解析的検討を行った。断層に対しては原則として断層を避けるようにするのが最善であることは論を待たないが、敢えて断層と交差せざるを得ない場合には、以下のような挙動特性をRCアーチ橋が示すことを考慮することができると考えられる。

- 1) 断層変位にアーチが開く成分が含まれる場合、コンクリートが終局ひずみに到達する以前に、部材が全断面引張となる可能性がある。
 - 2) 断層変位にアーチが閉じる成分が含まれる場合には、引張による断面破壊は発生せず、コンクリートが終局ひずみに達することで終局に至る形式の破壊となる。
 - 3) 2軸曲げの影響が引張方向の断層変位に若干有利に働く可能性はあるものの、その効果は微小であると考えられる。
 - 4) 橋軸直角方向の断層変位に対してアーチ橋は優れた変形能を示すことから、あらかじめ断層変位方向が分かっている場合には、その変位方向と直交する方向に橋軸を設定することが有利であると考えられる。
- ただし、これらの結果は本解析で対象としたアーチ橋に関するものであり、RCアーチ橋の構造一般に適用するにはそれぞれの構造諸元について検証を行う必要がある。また、前記したように、今回の断層のモデル化は複雑な断層挙動を非常に単純化したものであるため、その援用には回転成分などが無視できる場合に限定される。今後は地表-構造物一体化の解析により、これらの知見を吟味する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 川島一彦, 鈴木猛康, 橋本隆雄: トルコ・コジャエリ地震による交通施設の被害概要, 橋梁と基礎, pp.45-51, 2000.2
- 2) 運上茂樹: 1999年9月21日台湾集集地震による橋梁被害, 道路, pp.55-58, 2000.2
- 3) 土木学会鳥取県西部地震調査団: 2000年10月6日鳥取県西部地震被害調査報告, 土木学会誌, vol.85, pp.80-83, 2000.
- 4) 大町達夫, 小島直之, 村上敦: ダムサイト直下の伏在断層による地震時の地盤変位と貯水位変動, 土木学会論文集, No.710/I-60, pp.337-346, 2002.7
- 5) 松川亮平, 川島一彦, 渡邊学歩: 基礎免震による断層変位を受ける橋梁基礎の耐震対策, 構造工学論文集 Vol.51A, pp.689-699, 2005.3
- 6) 高田至郎, Nemat HASSANI, 福田克己: 断層を横断する地

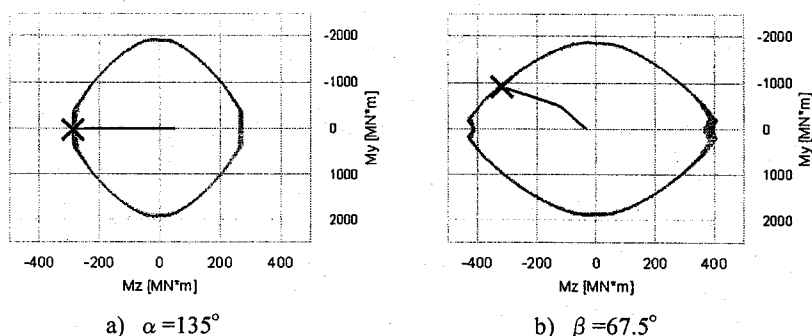


図-14 アーチリング破壊箇所における2方向モーメント相関

- 中管路の設計法の提案, 土木学会論文集 No.668/I-54, pp.187-194, 2001.1
- 7) 常田賢一: 土木構造物における地震断層の工学的対応に関する考察, 土木学会論文集 No.752/I-66, pp.63-77, 2004.1
 - 8) 水口知樹, 阿部雅人, 藤野陽三: 1999年集集地震における地表地震断層による落橋現象の再現と対策の試み, 土木学会論文集 No.710/I-60, pp.257-271, 2002.7
 - 9) 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
 - 10) 角本周, 手嶋和夫, 矢葺亘, 松永昭吾: 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, コンクリート工学年次論文集 Vol.25, No.2, pp.1333-1338, 2003.7
 - 11) Kawashima, K. and Mizoguti, A.: Seismic Response of a Reinforced Concrete Arch Bridge, 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, No.1824, 2000
 - 12) 中野友裕, 田邊忠顕: 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, pp.15-28, 2003.2.
 - 13) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説/V耐震設計編, 日本道路協会, 2002.3
 - 14) Darwin, D. and Pecknold, D.A.: Analysis of Cyclic Loading of Plane R/C Structures, Computers and Structures, Vol.7, pp.137-147, 1977
 - 15) 例えば, 土木学会: 非線形解析によるコンクリート構造物の性能照査一手順と検証例・照査例一, コンクリート技術シリーズ 66, pp.21-26, 2005.9
 - 16) 星隈順一, 川島一彦, 長屋和宏: 鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査に用いるコンクリートの応力-ひずみ関係, 土木学会論文集 No.520/V-28, pp.1-11, 1995.8
 - 17) Spacone, E., Ciampi, V. and Filippou, F.C.: Mixed Formulation of Nonlinear Beam Finite Element, Computers and Structures, Vol.58, pp.71-83, 1996
 - 18) 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

(2005年9月10日受付)