

論文 非線形動的解析に基づく断層変位作用下のRCアーチ橋の損傷評価

中野 友裕*1・福島 康宏*2・藤田 亮一*2

要旨: 従来行われてきた断層変位に対する橋梁構造物の挙動・損傷評価は主に、最終的な残留変位量を静的に作用させるものである。しかし、実際に断層変位が作用した場合には、地震加速度の影響は無視できないと考えられる。そこで本研究では、強制変位を受けながら地震加速度の作用を受ける場合の解析アルゴリズムを構築し、地震加速度とともにRCアーチ橋の支持点に比較的小さな相対変位が生じる場合の損傷を評価した。その結果、断層変位が作用する場合には、支持点ごとに異なる強制変位が生じるため、アーチ橋の損傷に影響を及ぼす可能性の高いことが明らかになった。

キーワード: 運動方程式, 地表断層変位, 基線補正, 断面損傷係数

1. はじめに

わが国は地震列島とも呼ばれるように、非常に地震の多い国で、大きな震災を幾度となく経験してきた。それに伴って耐震設計も大幅に改良されてきた。特に1995年に発生した兵庫県南部地震の被害とその教訓は、耐震構造の強化などを含む対策のあり方全般での重大な契機となった。

兵庫県南部地震では、都市直下を震源とするプレート内地震がもたらす強烈な地震動が主因となって構造物が損傷したため、基準の強化については主に大きな加速度に対応するものとなっている。一方、諸外国では1999年に相次いで発生したトルコ・コジャエリ地震、台湾・集集地震において、地表面に発生した断層変位による永久変位を受けた橋梁系構造物の被災が生じている。

断層変位が生じる場合、橋梁の支持点が独立して移動する現象と、断層近傍で生じる加速度の2つの要因を考慮する必要があると考えられる。しかし、既往の研究では、多くの場合、最終的な断層変位量を静的に入力して橋梁損傷を算出している¹⁾。従って、断層変位が作用した場合の動的挙動を明らかにすることは、今後の耐震設計において極めて重要であると考えられる。

以上の背景をもとに、本研究では、断層変位が生じる場合の加速度・変位同時作用時の橋梁系構造物の応答を評価するための解析手法を提示し、RCアーチ橋が支持点間に比較的小さな断層変位を受けながら加速度を生じる場合の評価を行った。損傷の評価には断面レベルで損傷を評価できる断面損傷係数^{2,3)}を用いることで、要素の入り組んだアーチ橋に対する評価をしている。なお、本研究においては、第一著者が解析手法の構築、解析の実施、全体の統括を、第二・第三著者が地震加速度記録の変換手法の開発と入力波形選択に関する方向性の設定を行っている。

2. 加速度・変位同時作用を考慮した運動方程式

2.1 運動方程式の定式化⁴⁾

構造全体に対する運動方程式は、減衰を無視すると絶対座標系で以下のように表される。

$$M\ddot{u} + Ku = F \tag{1}$$

ここに、 M は質量マトリクス、 K は剛性マトリクス、 u は絶対変位、 F は構造系に作用する外力である。ここで、各マトリクス、ベクトルを次のように分ける。

$$M = \begin{bmatrix} M_S & 0 & 0 \\ 0 & M_A & 0 \\ 0 & 0 & M_B \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$K = \begin{bmatrix} K_{SS} & K_{SA} & K_{SB} \\ K_{AS} & K_{AA} & K_{AB} \\ K_{BS} & K_{BA} & K_{BB} \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$u = \begin{Bmatrix} u_S \\ u_A \\ u_B \end{Bmatrix} \quad F = \begin{Bmatrix} F_S \\ F_A \\ F_B \end{Bmatrix} \tag{4}$$

ここに添字 A は支持点 A に関する自由度、添字 B は支持点 B に関する自由度、S は支持されていない自由度(以下、荷重制御点)であることを表す(図-1)。

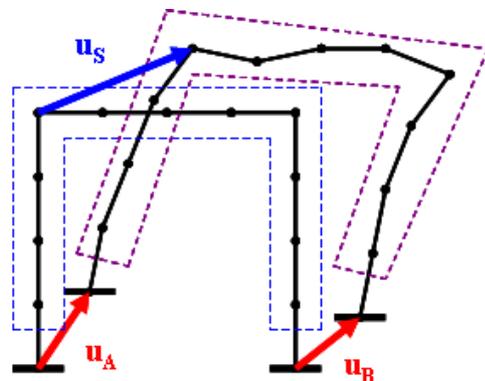


図-1 変位ベクトルの分割

*1 東海大学 工学部土木工学科准教授 博(工) (正会員)

*2 日本技術開発(株) リサーチエンジニアリング事業部 修(工) (非会員)

いま、静的に u_A , u_B の変位を与えた場合、次の方程式が成り立つ。

$$\begin{bmatrix} K_{SS} & K_{SA} & K_{SB} \\ K_{AS} & K_{AA} & K_{AB} \\ K_{BS} & K_{BA} & K_{BB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{S0} \\ u_A \\ u_B \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{S0} \\ F_{A0} \\ F_{B0} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

ここに、 u_{S0} は静的な支持点変位による荷重制御点の変位、 F_{S0} は、死荷重などの常時荷重、 F_{A0} , F_{B0} は支点反力である。第1行を展開すれば、

$$K_{SS}u_{S0} + K_{SA}u_A + K_{SB}u_B = F_{S0} \quad (6)$$

次に、動的効果により発生する荷重制御点の変位量を u_{S1} とおくと $u_S = u_{S0} + u_{S1}$, $F_S = F_{S0}$ であるから、式(1)に代入して1行目を展開すると、次式が得られる。

$$M_S(\ddot{u}_{S0} + \ddot{u}_{S1}) + K_{SS}(u_{S0} + u_{S1}) + K_{SA}u_A + K_{SB}u_B = F_{S0} \quad (7)$$

ここに式(6)を代入すると、

$$M_S\ddot{u}_{S1} + K_{SS}u_{S1} = -M_S\ddot{u}_{S0} \quad (8)$$

また、式(6)を変形すれば、

$$u_{S0} = K_{SS}^{-1}(F_{S0} - K_{SA}u_A - K_{SB}u_B) \quad (9)$$

であるから、式(8)は次のように書ける。

$$M_S\ddot{u}_{S1} + K_{SS}u_{S1} = M_S K_{SS}^{-1}(K_{SA}\ddot{u}_A + K_{SB}\ddot{u}_B) \quad (10)$$

式(10)を解けば、 u_{S1} , \ddot{u}_{S1} が得られるが、ここで得られる u_{S1} , \ddot{u}_{S1} は式(5)から得られる変位を基準としていることに注意する必要がある。従って、絶対変位、絶対加速度を求める際には式(9)を用いて

$$u_S = u_{S1} + K_{SS}^{-1}(F_{S0} - K_{SA}u_A - K_{SB}u_B) \quad (11)$$

$$\ddot{u}_S = \ddot{u}_{S1} - K_{SS}^{-1}(K_{SA}\ddot{u}_A + K_{SB}\ddot{u}_B) \quad (12)$$

と計算できる。

2.2 増分形の運動方程式と近似解法

上述の式(10)は弾性の場合の運動方程式であるから、非線形の場合には増分形に表記を改める必要がある。式(10)を増分形で表すと、

$$M_S\Delta\ddot{u}_{S1} + K_{SS}'\Delta u_{S1} = M_S [K_{SS}']^{-1} (K_{SA}'\Delta\ddot{u}_A + K_{SB}'\Delta\ddot{u}_B) \quad (13)$$

となる。ここに上添字 t は接線剛性であることを示す。この場合、運動方程式の右边が外力項となるわけであるが、解法の過程で接線剛性マトリクスが変化することから、外力項が一定値にならないという問題が発生する。また、軟化する場合には、剛性マトリクスの逆行列が定まらないという問題も生じるため、対応できない場合が出てくる。

そこで、式(13)を用いる代わりに式(8)を参照して、

$$M_S\Delta\ddot{u}_{S1} + K_{SS}'\Delta u_{S1} = -M_S\Delta\ddot{u}_{S0} \quad (14)$$

を解くことを考える。具体的には剛性方程式(5)を増分形で解き、そこで得られた u_{S0} と前ステップ・前々ステップでの値から数値的に $\Delta\ddot{u}_{S0}$ を算出することで式(8)の解が得られる。

2.3 減衰を考慮した運動方程式

式(8)あるいは式(14)を解けば、断層挙動による加速度・変位両作用を考慮した解が得られるわけであるが、これらの式の u_{S1} , \ddot{u}_{S1} は、一般的な運動方程式で言うところの相対変位・相対加速度に相当する。この運動方程式に減衰を考慮する場合、ダッシュポットで考えるならば、減衰力は相対速度に比例するから、式(8)の場合、

$$M_S\ddot{u}_{S1} + C_S\dot{u}_{S1} + K_{SS}u_{S1} = -M_S\ddot{u}_{S0} \quad (15)$$

とすればよい。ところで、式(15)において左辺に出てくる M_S , K_{SS} は、一般に用いられる解析手法において得られるマトリクスと全く同一である。このことから、一般の動的解析に用いられている減衰マトリクスの設定を用いれば、減衰の効果も問題なく考慮できる。

3. 変位波形の算出方法

3.1 地震動の設定方法

近年開発された震源断層を考慮した地震動の設定方法には、理論的手法・半経験的手法・経験的手法があるが、断層が地表面まで達した場合の断層ずれ変位を直接算出するまでには至っていない。

地表断層変位を直接評価する手法として水本ら⁵⁾は、深部から地表面間に発生する断層部をジョイント要素で、周辺岩盤をソリッド要素でモデル化し、3次元 FEM により直接、地表面断層変位を求めている。水本らの考案したモデルは、放射性廃棄物処分場安定性評価手法の一つとしてすでに応用され、実績ある手法と考えられる。

一方、観測記録を直接2階積分すれば、定義では変位が得られるわけであるが、発散してしまう場合が多い。この問題について Boore⁶⁾は、Iwan ら⁷⁾に基づく加速度時刻歴波形から積分した速度時刻歴波形の基線補正方法を提案している。また、太田ら⁸⁾は、地表面の加速度記録より積分されて得られる速度波形および変位波形において、バックグラウンドノイズの影響を計算過程から除きながら計算する EPS 法を導入し変位波形を算出する手法を提案している。

以上のように、断層近傍の変位波形を求める手法は種々提案されているが、本研究では Boore の手法を用いることとする。

3.2 加速度記録の変位波形への変換手法⁶⁻⁷⁾

Boore の基線補正による変位時刻歴波形の算出方法は、以下の手順となる。

- (i) 記録開始時間から地震波到達時間までのプリーベント部の平均値を、加速度時刻歴波形全体から減ずる。
- (ii) 補正した加速度時刻歴波形を積分し、速度時刻歴波形を求める。
- (iii) 速度時刻歴波形の基線を補正する。具体的には、波形全体から、時間 $t_1 \sim t_2$ では

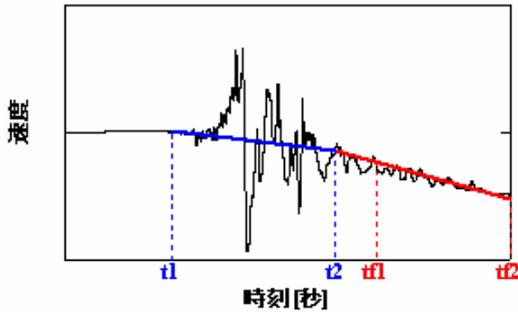
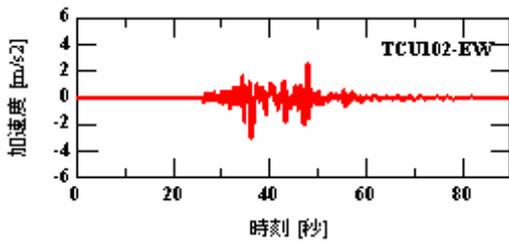
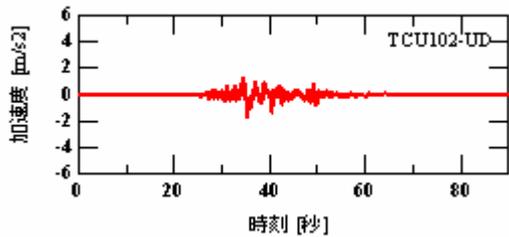


図-2 速度時刻歴波形の基線補正のイメージ



a) TCU102 観測加速度波形 EW 成分

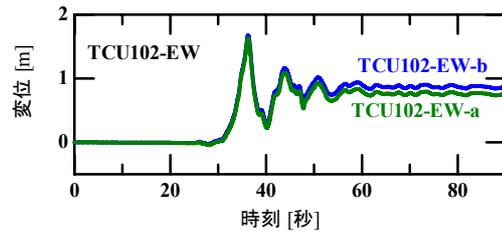


b) TCU102 観測加速度波形 UD 成分

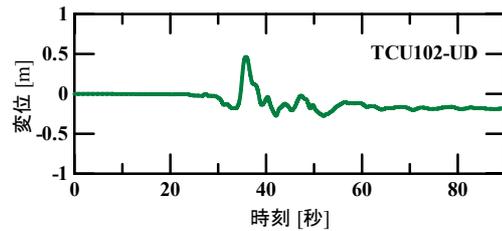
図-3 加速度波形

表-1 積分パラメータ[秒]と残留変位 (TCU102)

	t_1	t_2	t_{f1}	t_{f2}	残留 [m]
TCU102EW-a	20.0	30.0	65.0	90.0	+0.76
TCU102EW-b	20.0	70.0	65.0	90.0	+0.87
TCU102UD	20.0	70.0	65.0	90.0	-0.18



a) TCU102 変位波形 EW 成分



b) TCU102 変位波形 UD 成分

図-4 積分結果

$$v_1(t) = a_m(t - t_1) \quad (16)$$

時間 $t_{f1} \sim t_{f2}$ では

$$v_2(t) = a_m(t_2 - t_1) + a_f(t - t_2) \quad (17)$$

を減ずる。

(iv) (iii)で基線補正された速度時刻歴波形を積分し、変位時刻歴波形を求める。

(16)式、(17)式における a_m, a_f について Iwan ら⁷⁾は、 a_f については (t_{f1}, t_{f2}) において、速度を 1 次式 $v_2(t)$ でフィッティングし、 a_m については $(t_1, 0)$ と $(t_2, v_2(t))$ を結ぶことで得るとしている (図-2)。ここで、時刻 t_1, t_2 は任意に与えることができるが、Iwan らは、記録開始からの加速度が初めて 50[gal] を超える時刻としている。

一方 Boore では $t_2 \geq t_1$ の条件を付与している以外に制約を設けていない。また、 t_2 について Iwan らは、それ以降の加速度が 50[gal] を超えない時刻、または最終変位を最小にするように選ぶとしている。 t_{f1} は強震動が十分収まった時刻、 t_{f2} は通常記録終了時刻である。

この積分手法を用いると、 t_1, t_2, t_{f1}, t_{f2} の値の決め方によって変位波形に残留変位が出る。それを利用すれば、

さまざまな残留変位を有する変位波形が得られる。このことは断層変位運動を正確に表現するという観点からは不十分であるが、設計・解析において数値的に構造物の挙動をシミュレートする上では有利な点になると考える。すなわち、ある残留変位を設定し、その変位になるような t_1, t_2, t_{f1}, t_{f2} を上記の仮定を崩さない程度に設定し波形を作成した上で、2章で述べた定式化に基づく解析を実施すれば、断層変位による加速度・変位同時入力時の応答を予測することができる。

3.3 作成した変位波形

今回対象とする地震動は、1999 年台湾集集地震において観測された TCU102 地点での加速度記録である。

この点は地表に現れた断層の下盤側に存在しており、TCU102 に最も近い GPS 観測点 G103 で 0.9[m] (NS -0.58[m], EW +0.67[m], UD -0.08[m]) の移動が観測されている。

TCU102 地点の加速度 EW, UD 成分記録を、図-3 に示す。これらの加速度記録から前述した手法で表-1 のように t_1, t_2, t_{f1}, t_{f2} を計算した変位波形が図-4 である。

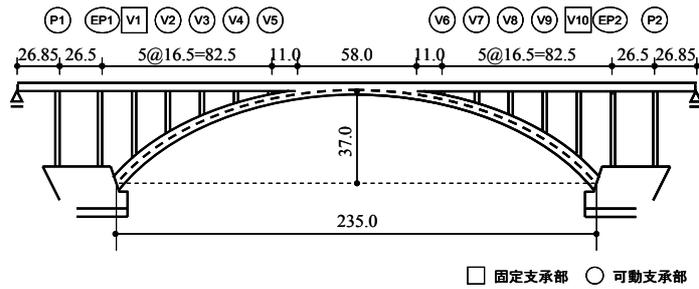


図-5 解析対象RCアーチ橋

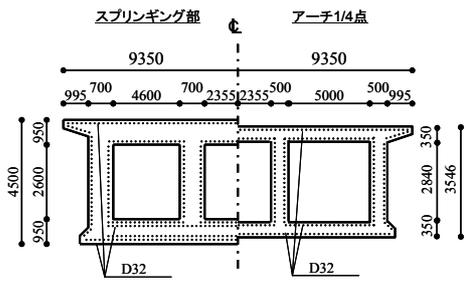


図-6 アーチリング断面図



図-7 RCアーチ橋の要素分割

表-2 使用材料（応力の単位は[MPa]）

部材	コンクリート 圧縮強度	鉄筋	PC 鋼材
アーチリブ	$\sigma_{ck}'=40.0$	SD295A	$\sigma_{pu}=1030.0$
補剛桁	$\sigma_{ck}'=35.0$	SD295A	$\sigma_{pu}=1030.0$
鉛直材	$\sigma_{ck}'=24.0$	SD295A	—
エンドポスト	$\sigma_{ck}'=24.0$	SD295A	—

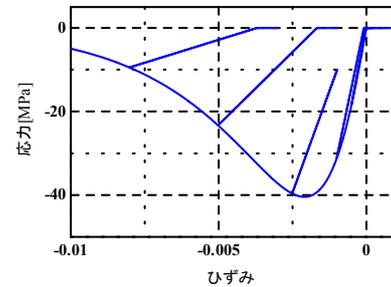


図-8 コンクリート構成則

これらの変位波形を組み合わせて入力し、4章において動的応答解析を実施する。

4. 動的応答解析に基づく断層変位・加速度同時作用下のRCアーチ橋の損傷評価

上述した手法を用いて、RCアーチ橋を対象とした断層変位作用下の非線形動的解析を行う。既往の研究では、支持点間に生じる変位差を無視した、全支持点に同一加速度を入力する動的応答解析（以下、一様加速度入力）が主流であるため、一様加速度入力も併せて実施し、考察を行う。

4.1 解析対象構造物

解析の対象とする構造物は、図-5、図-6に示すRC固定アーチ橋である。アーチ支間は235.0[m]の大規模なもので、基礎は直接基礎である。鉛直材のうち、図に示すV1とV10は補剛桁と剛結であり、その他は鋼製可動支承を介して補剛桁とつながっている。使用材料を表-2に示す。

4.2 解析モデルと解析条件

図-5に示したRCアーチ橋を186要素177節点の2次元はり要素でモデル化する（図-7）。要素分割・剛域設定などについては文献⁹⁾で述べられている方法を参考に行っている。なお、補剛桁端部は橋軸方向および回転方

向Freeとし、それ以外の鋼製支承については、可動域±50mmで変位が拘束されるbi-linearモデルでモデル化した。

コンクリート構成則は、コンクリート標準示方書³⁾で断面損傷係数を算出する際に用いられるものを用いている（図-8）。鉄筋についてはbi-linearとし、ヤング係数については降伏後の2次勾配を0としている。

時刻歴応答解析における数値積分法はNewmarkのβ法（β=0.25）による直接積分を用いて、時間間隔0.005秒、応答解析時間90秒とした。減衰マトリクスはWilson-Penzienに従い、初期剛性に対する全モードを考慮した¹⁰⁾。各部材の減衰定数は、アーチリング・補剛桁・鉛直材・エンドポスト・橋脚ともに非線形部材であることから0.02とし、鋼製支承は0.03とした¹¹⁾。なお、このモデルによる1次固有周期は1.401秒である。

4.3 波形の入力

地震応答解析として、前述した2つの変位波形（TCU102EW-aとTCU102EW-b）を左の支持点と右の支持点に入力し、同時に上下動成分TCU102UDも作用させた。その際、波形の組み合わせ方として、左に波形a、右に波形bを入力するとアーチの開く断層変位（ケース1）、左に波形b、右に波形aを入力するとアーチの閉じる断層変位が生じていることになる（ケース2）。また、

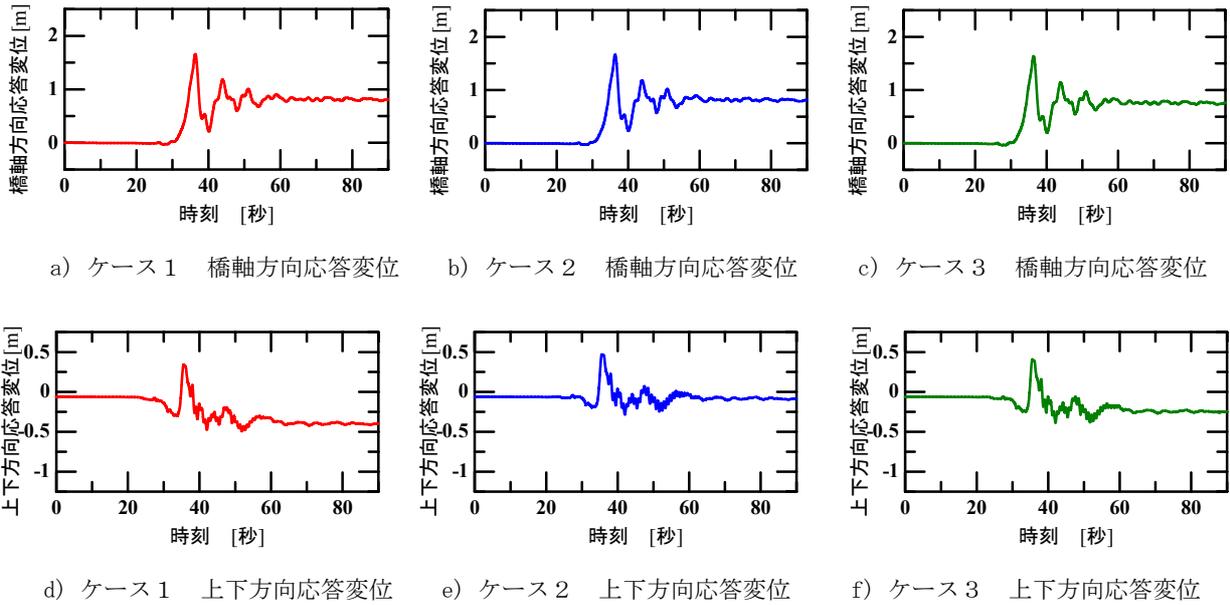


図-9 アーチクラウン部の応答変位

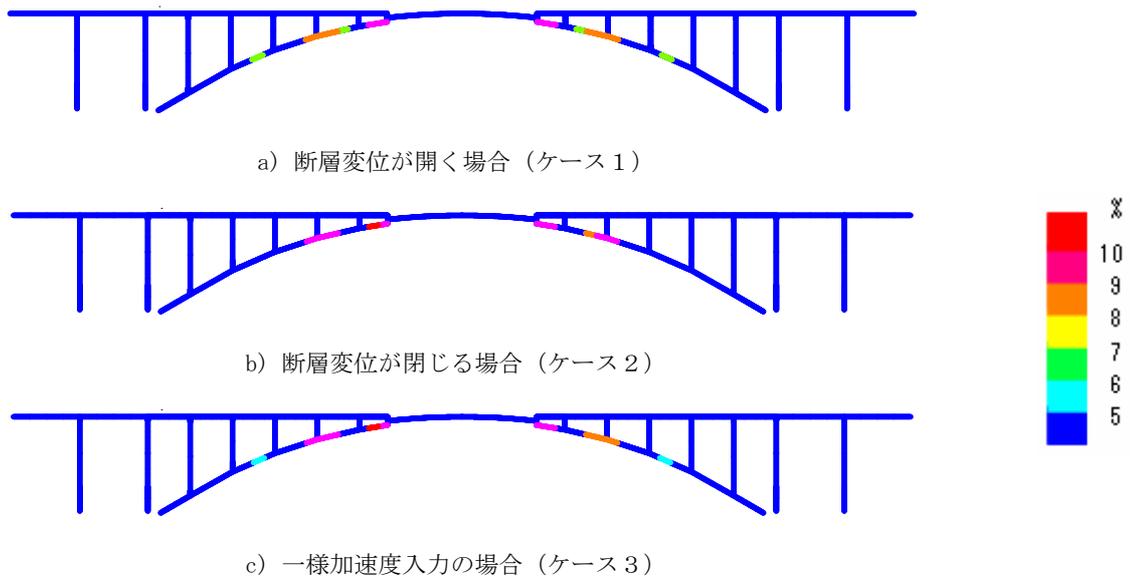


図-10 各解析ケースにおける断面損傷係数

これらの波形 a と b は、同一の波形を積分したものであるから、微分したときの加速度波形は同一になる。そこで比較のため、一般に行われる一様加速度入力も実施した (ケース3)。なお、変位波形の有効桁数を十分に確保しておけば、左右の全支持点に波形 a だけ、あるいは波形 b だけを入力した場合の絶対加速度・絶対変位の応答が、一様加速度入力の結果を絶対加速度・絶対変位で表現したものと同一になることを確認している。

4.4 解析結果と考察

(1) 絶対変位応答

図-9 にケース1～3のアーチクラウン部の絶対変位応答をそれぞれ示す。支持点が橋軸方向に76cmと87cm、

下方向に18cm移動しているため (表-1 参照)、a)～f) のいずれもそれらの移動を含めた橋軸方向 (上下方向) の変位である点に注意されたい。

これらの結果から、橋軸方向の変位応答には、アーチの開く方向 (ケース1)・閉じる方向 (ケース2) の断層変位を考慮したものと、一様加速度入力 (ケース3) との間に大きな差は生じていないが、上下方向の応答では、90秒時点において、アーチの開く方向 (ケース1) で-0.397m、アーチの閉じる方向 (ケース2) で-0.082m、一様加速度入力 (ケース3) で-0.245mとなっている。

(2) 断面損傷係数

アーチ橋のように断面形状や寸法の異なる多くの部材

から構成される構造物の損傷状態を、変位を代表値として評価することは困難である。この点から、森下ら¹²⁾は鋼製橋脚に対して断面損傷を基準とする動的耐震照査法を、また土屋ら²⁾はRC断面に対する断面損傷係数を提案している。これらの考え方に共通するのは、断面レベルでの損傷を評価することで、さまざまな形状の構造物に適用可能な照査を行うとするものである。本研究では、コンクリート標準示方書³⁾に取り入れられている土屋らの断面損傷係数を用いて、RCアーチ橋の損傷を評価することにする。

図-10 に各解析ケースにおける最終的な断面損傷係数を示す。いずれのケースについても、アーチリングに損傷が発生している。最も断面損傷係数の大きな部分は、いずれの場合もアーチリングと補剛桁が一体になる位置でのアーチリングであるが、断面損傷係数は解析ケースにより差が発生している。アーチの開く断層変位を伴うケース1では損傷係数は0.098であるが、アーチの閉じる方向の断層変位を伴うケース2では、0.103である。また、一様加速度入力の場合3では、0.101となっており、ケース1とケース2の間の値になっている。このことは、アーチの開く断層変位が存在すると圧縮力が低減されることで断面損傷係数が小さくなること、またアーチの閉じる方向の断層変位により圧縮力が増加することで断面損傷係数が大きくなることを示しており、妥当な結果と考えられる。

今回の解析においては、トルコや台湾で発生したような大きな断層変位ではなく、支持点間の距離が129mm程度変化するという極めて小さい支持点移動を考慮したものであったが、RCアーチ橋の損傷程度に差が生じることが示された。235m離れたアーチ橋の支点間において129mmという距離の変化を生じさせる地震は珍しいものでなく、十分に現実的であると考えられることから、地震加速度と強制変位の相乗効果について一層の検討が必要であると考えられる。

5. 結論

断層変位を想定した加速度・変位同時入力時の動的応答解析手法および、それらを用いたRCアーチ橋の地震応答解析を実施した。また、損傷の評価として断面損傷係数を用いることで、断層変位による損傷の変化についても検討した。その結果、比較的小規模な断層変位であっても、RCアーチ橋の損傷に及ぼす影響は少なくなく、損傷程度が大きくなる場合のあること、また、通常行われている一様加速度入力の場合と比べた場合、断層変位の方向によって損傷増加の場合と損傷低下の場合のあることが示された。

これらの結果をもとに、今後はさらに大規模な断層変

位の発生時における現象の解明と対策について考える必要がある。

謝辞 本研究を遂行するにあたり、九州大学工学研究院・古川愛子博士からは、波形積分に関する貴重なアドバイスをいただいた。また、台湾集集地震の加速度記録は、台湾中央気象局のサイト (<http://www.cwb.gov.tw/>) からダウンロードさせていただいた。ここに記して、関係各位に深甚なる謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) たとえば、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
- 2) 土屋智史，前川宏一：多方向入力を受けるRC棒部材断面の損傷指標，土木学会論文集 No.718/V-57，pp.45-57，2002.11
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書（耐震性能照査編），土木学会，2002.12
- 4) 中野友裕，太田良巳：断層運動による変位・加速度同時入力を考慮した運動方程式の定式化，第62回年次学術講演会講演概要集，土木学会，pp.999-1000，2007.9
- 5) 水本学千，坪井利弘，三浦房紀：3次元FEMによる断層モデルの解析に関する基本的検討，土木学会論文集 No.780/I-70，pp.27-40，2005.1
- 6) Boore, D. M. : Effect of baseline corrections on displacements and response spectra for several recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake, Bull. Seism. Soc. of Am. 91, pp.1199-1211, 2001
- 7) Iwan, W. D. , Moser, M. A. and Peng C. Y. : Some observations on strong-motion earthquake measurement using a digital accelerograph, Bull. Seism. Soc. Am. 75, pp.1225-1246, 1985
- 8) 太田良巳，アイダン・オメル：加速度記録から地盤の変位応答を求める手法について，第29回土木学会地震工学研究発表会報告集，pp.1046-1051，2007.8
- 9) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，pp.(2-1)-(2-90)，1998
- 10) Wilson, E. L. and Penzien, J. : Evaluation of Orthogonal Damping Matrices, International Journal for numerical methods in engineering, Vol.4, pp.5-10, 1972
- 11) 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
- 12) 森下邦宏，宇佐美勉，阪野崇人，葛西昭：鋼製橋脚の動的耐震評価法に関する検討，土木学会論文集 No.710/I-60，pp.181-190，2002.7