

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

東海大学工学部 正会員 ○ 中野 友裕
 日本物理探鑛(株) 正会員 太田 良巳

1. はじめに

断層運動に代表される地表面の相対変位が生じると、橋梁は支持点の移動による影響を受ける。このことは、強震記録とともに地表変位・残留変位も耐震設計上重要であることを示している。本稿では、慣性力作用時に支点の変位差を伴う場合の運動方程式を定式化し、台湾集集地震の観測記録を用いて実際のラーメン橋の挙動を動的応答解析により求めたので報告する。

2. 支持点の変位差を伴う運動方程式の定式化

全自由度の変位ベクトルを X で表すと、減衰を無視した運動方程式として次式が得られる。

$$M\ddot{X} + KX = F \tag{1}$$

ここで X を、固定端自由度の集まり u_1, u_2 およびそれ以外の自由度の集まり X_s に分ける。

$$X = [X_s \quad u_1 \quad u_2]^T \tag{2}$$

いま、静的に u_1, u_2 の強制変位を与えたときの変位を X_s^0 とすると、 F_1, F_2 を反力として、

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_s^0 \\ u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} \tag{3}$$

(3)式の第1行を展開すると、

$$X_s^0 = -K_{11}^{-1}(K_{12}u_1 + K_{13}u_2) \tag{4}$$

次に、(4)式で表される静的な変形 X_s^0 から動的作用により発生している変形を X_s^1 とおくと、絶対変位は $X_s = X_s^0 + X_s^1$ であるから、(1)式を書き直した次式、

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 & 0 \\ 0 & M_{u1} & 0 \\ 0 & 0 & M_{u2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X}_s \\ \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_s \\ u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} \tag{5}$$

の第1行に着目して(6)式が導かれる。

$$M_s(\ddot{X}_s^0 + \ddot{X}_s^1) + K_{11}(X_s^0 + X_s^1) + K_{12}u_1 + K_{13}u_2 = 0 \tag{6}$$

これに(3)式から導かれる関係 $K_{11}X_s^0 + K_{12}u_1 + K_{13}u_2 = 0$ を代入すると

$$M_s\ddot{X}_s^1 + K_{11}X_s^1 = -M_s\ddot{X}_s^0 \tag{7}$$

(7)式は更に(4)式を代入することにより、

$$M_s\ddot{X}_s^1 + K_{11}X_s^1 = M_sK_{11}^{-1}(K_{12}\ddot{u}_1 + K_{13}\ddot{u}_2) \tag{8}$$

この方程式を解くと、 X_s^1 が得られる。この X_s^1 は静的な変形 X_s^0 を基準とした位置からの動的作用による変形であるから、絶対変位量 X_s を求めるためには(4)式を用いて X_s^0 を求めておく必要がある。すなわち、

$$X_s = X_s^0 + X_s^1 = -K_{11}^{-1}(K_{12}u_1 + K_{13}u_2) + X_s^1 \tag{9}$$

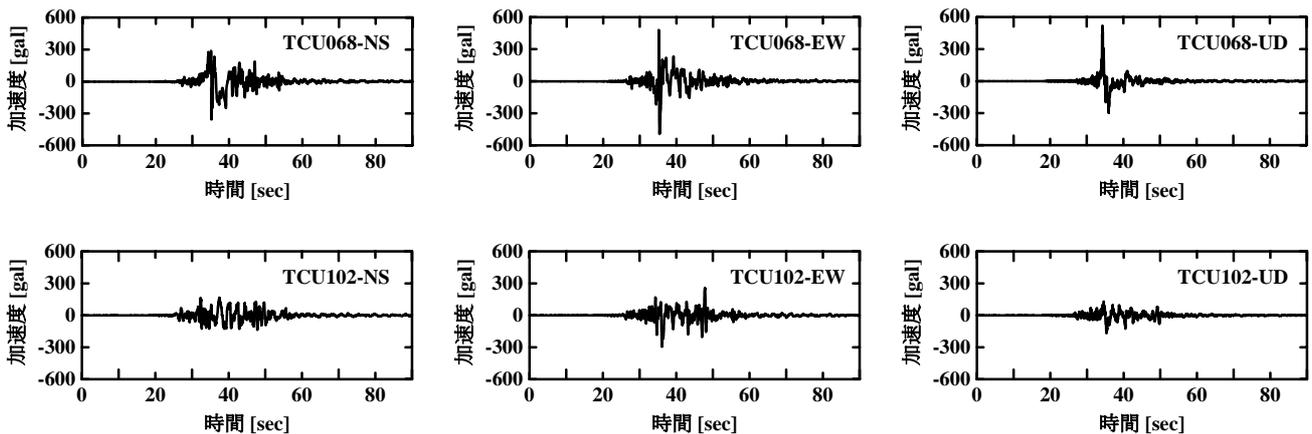


図-1 台湾集集地震時に断層近傍で観測された加速度波形 (上段: TCU068 地点 / 下段: TCU102 地点)

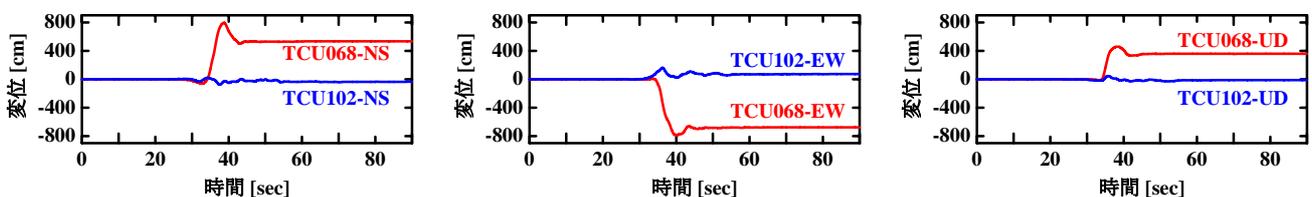


図-2 EPS 法により算出された変位波形

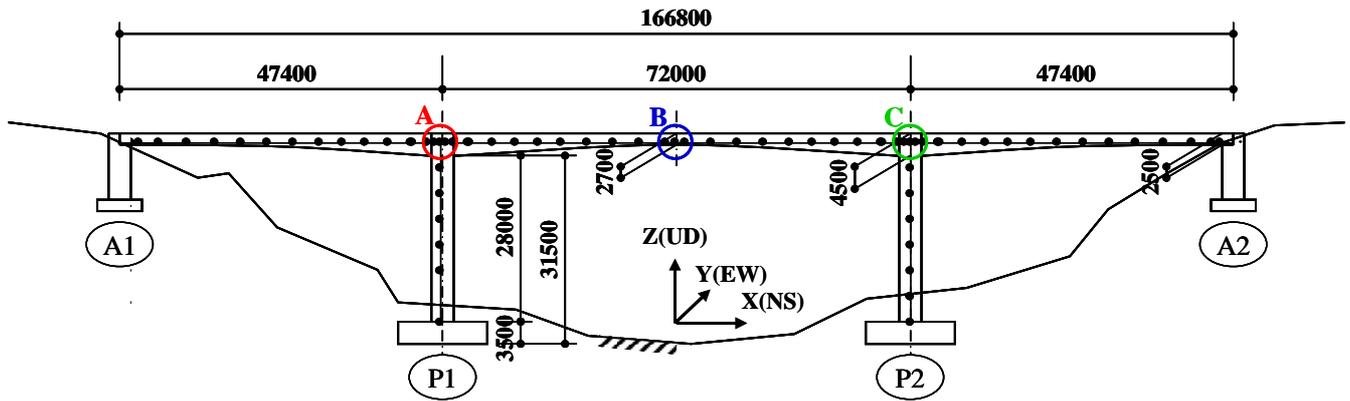


図-3 解析対象とした3径間連続ラーメン橋²⁾(単位: mm)

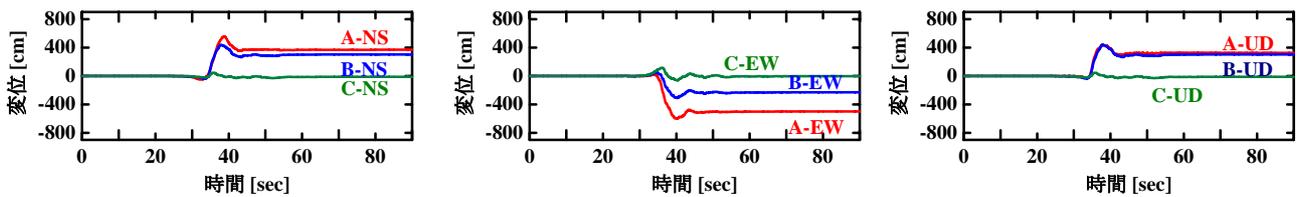


図-4 点A, B, Cにおける絶対変位応答波形

3. 強震記録による地表面の永久変位の推定

地震時に得られた加速度記録を積分すると、速度や変位を求めることは可能である。しかし、実際に加速度記録を積分すると、多くの場合、電子記録に存在するバックグラウンドノイズによって速度・変位のグラフが発散する方向の応答を示す。そこで数値積分する際に、加速度記録の値はある一定の値 (EPS) 以下のものを計算から省くような計算過程を追加するEPS法を用いて変位波形を算出する¹⁾。

EPS法を用いて、1999年台湾集集地震において観測された2観測点 (TCU068・TCU102) の加速度波形から変位を算出した。観測加速度波形を図-1に、EPS法により算出された変位波形を図-2にそれぞれ示す。

4. ラーメン橋を対象にした動的応答解析

3章で作成された地震動を2章の運動方程式に基づいて作用させることにより、断層運動による加速度・変位同時作用時の構造物の応答を計算することができる。そこで、文献²⁾において試設計されている3径間連続ラーメン橋を対象にした弾性応答解析を行った。

図-3に示すように、ラーメン橋を3次元はり要素を用いて73節点72要素にモデル化した。地震波はA1, P1にTCU068の3成分, P2, A2にTCU102の3成分を入力した。なお、支持点はいずれも完全固定とした。

図-1, 図-2の地震波形を入力したときの構造物の応答を、図-3中に示す点A, B, Cの位置における絶対変位応答で表したものを図-4に示す。TCU068の波形を入力した側にあるA点では、残留変位が大きく発生するのに対し、TCU102の波形を入力した側にあるC点では、いずれの方向においてもほとんど残留変位が生じていない。また、いずれの変位応答波形を見ても、最終的な変位量に収斂する前に振動が発生していることがわかる。このことは断層運動をモデル化するには変位を静的に漸増させるだけでは不十分であり、慣性項を考慮した解析が必要であることを示している。

5. まとめ

断層運動のような支持点間の相対変位が作用する構造物系の応答には、支持点の強制変位差だけでなく、慣性力も無視できないほどに影響を与えることが解析的に示された。

参考文献

- 1) 太田良巳: 地震断層の運動に伴う地震動および地表変形の特性に関する基礎的研究, 東海大学大学院海洋学研究所修士学位論文, 2006
- 2) 日本道路協会: 道路橋の耐震設計に関する資料-PCラーメン橋・RCアーチ橋・PC斜張橋・地中連続壁基礎・深礎基礎等の耐震設計計算例-, pp.(2-1)-(2-90), 1998

キーワード 断層変位, 運動方程式, EPS法, 動的応答解析

連絡先 〒259-1292 神奈川県平塚市北金目1117 東海大学工学部土木工学科 TEL 0463-58-1211