

I-37 橋桁衝突を考慮した動的解析への時間域BEMの適用

愛媛大学工学部 学生員 ○上田拓也
愛媛大学工学部 正 員 中畑和之

1. はじめに

兵庫県南部地震に代表されるようなレベル2地震動下では、橋梁構造物において落橋の危険性が指摘されている。このためには橋桁衝突による衝撃力を緩和させ、橋桁の落下を防止する連結緩衝部材¹⁾の設置が不可欠である。緩衝部材の最適設計のために、本研究では地震時の連結部の動的挙動を模擬し、連結部の負荷および衝撃力を推定することを試みる。ここでは、橋桁連結部(ジョイント)において橋桁同士の繰返し衝突・分離を考慮した数理モデルを構築し、このモデルを時間領域の逐次解法である時間域境界要素法²⁾に組み入れることによって、橋梁全体を対象とした動的非線形解析を行う。

2. 動的非線形解析法

2.1 時間域 BEM

図-1に示すように、橋桁は均質等方な線形弾性体と仮定すれば、橋桁 D に対する境界積分方程式は容易に導くことができる。

$$\frac{1}{2}u_i(\mathbf{x}, t) = \int_0^t \int_{\partial D} G_{ij}(\mathbf{x}; \mathbf{y}, t - \tau) s_j(\mathbf{y}, \tau) d\tau dS_y - \int_0^t \int_{\partial D} S_{ij}(\mathbf{x}; \mathbf{y}, t - \tau) u_j(\mathbf{y}, \tau) d\tau dS_y \quad (1)$$

ここで、 u_j と s_j はそれぞれ橋桁表面 ∂D の変位と表面力の j 方向成分を表す。また、 G は動弾性問題の基本解であり、 S は基本解に対応する表面力である。上式に含まれる変位 u および表面力 s を時間に関して一次関数、空間に関して要素内一定の形状関数で離散化すると以下ようになる。

$$\mathbf{B}^0 \mathbf{u}^N - \mathbf{A}^0 \mathbf{s}^N = \sum_{M=1}^{N-1} [\mathbf{A}^{N-M} \mathbf{s}^M - \mathbf{B}^{N-M} \mathbf{u}^M] \quad (2)$$

N は総時間ステップであり、 $\mathbf{A}^M$ と $\mathbf{B}^M$ は係数行列²⁾である。橋桁 $\bar{D}$ についても境界積分方程式を構成し、同様の手順で離散化すると

$$\bar{\mathbf{B}}^0 \bar{\mathbf{u}}^N - \bar{\mathbf{A}}^0 \bar{\mathbf{s}}^N = \sum_{M=1}^{N-1} [\bar{\mathbf{A}}^{N-M} \bar{\mathbf{s}}^M - \bar{\mathbf{B}}^{N-M} \bar{\mathbf{u}}^M] \quad (3)$$

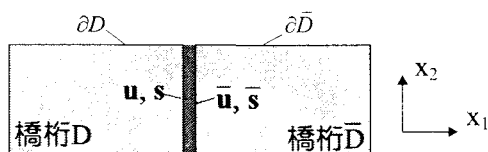


図-1 橋桁境界 ∂D と境界上の変位 u 、表面力 s

となる。各時間ステップ毎に、 D と $\bar{D}$ の領域でそれぞれ変位および表面力の x_1 方向と x_2 方向の成分、すなわち、 $u_1, u_2, s_1, s_2, \bar{u}_1, \bar{u}_2, \bar{s}_1, \bar{s}_2$ の8つの未知数がある。式(2)と(3)から、 x_1 方向と x_2 方向の合計4つの境界積分方程式が構成されるので、4つの条件が境界条件として与えられれば未知数の数は4つとなり、式(2)と(3)を連立させて解くことによって、界面上のすべての変位と表面力を求めることができる。

2.2 ジョイントの衝突・分離挙動のモデル化

図-2に示すように、ジョイント部は衝撃緩和材(長さ g)をもち、応力状態によって slip contact 状態(滑りを許容した接触状態)、stick contact 状態(固着した接触状態)、separation 状態(向かい合う境界が分離して非接触の状態)の3つの状態に変化する³⁾。接触面の法線方向を n 、接線方向を t とすると、接触した状態では表面力は常に連続($s = -\bar{s}$)であるから、接触面の未知量は $s_n, s_t, u_n, u_t, \bar{u}_n, \bar{u}_t$ の6つとなる。これらの状態は時間によって変化するものの、図-2に示すように常に2つの境界条件が与えられるので、6つの独立な物理量のうち未知量は4つとなる。4つの未知量は式(2)と(3)の境界積分方程式を解くことによって求めることができる。本モデルでは変位差 $u_n - \bar{u}_n$ が衝撃緩和長さ g を超えると contact 状態に変化し、ある時刻において法線方向の表面力 s_n が0より大きくなると separation 状態に移行する。

3. 地震時の橋桁挙動のシミュレーション

本解析では、橋桁は線形弾性体(縦波波速5196m/s、横波波速3000m/s、密度7800kg/m³)としている。橋梁の各スパン長は100m、スパン数は8つとし、橋梁両端の橋台部に、地震動として振幅0.1m、周波数2Hz

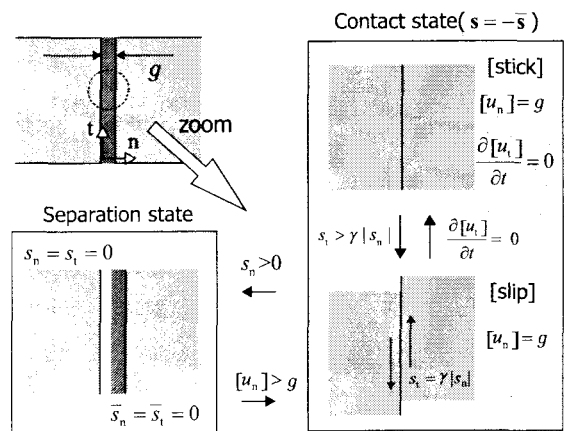


図-2 接触面の状態推移

の正弦波1波を x_1 方向の変位として与えた。

3.1 ジョイントに衝撃緩和材を設置しない場合

後に示す衝撃緩和材をもつ橋梁の挙動と比較するために、ジョイントに衝撃緩和材がない場合、即ち、橋桁と橋桁は剛に結合されている場合 ($u = \bar{u}, s = -\bar{s}$) の地震時の橋梁の挙動を図-3と4に示す。図-3は点A,B,C,Dにおける x_1 方向の変位の時刻歴応答、図-4は橋梁全体の変位分布を表している。

3.2 橋桁間に衝撃緩和材がある場合

ジョイント部に衝撃緩和材を有する橋梁における地震時の挙動を図-5と6に示す。図-5は点A,B,C,D,Eにおける x_1 方向の変位の時刻歴応答、図-6は橋梁全体の変位分布である。図-3と4では、地震動を入力すると橋梁全体が一様に振動しているが、図-5と6では変位の発生が局所的であることがわかる。これは、ある橋桁が変位しても衝撃緩和長さ g を越えるまでは隣接する橋桁に接触せず、橋桁同士が接触すると応力が伝達し隣接する橋桁に変形が生じるためである。各橋

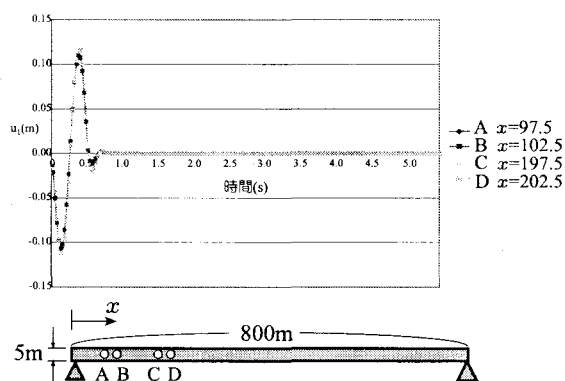


図-3 衝撃緩和材を設置しない橋梁の点A,B,C,Dにおける変位の時刻歴応答

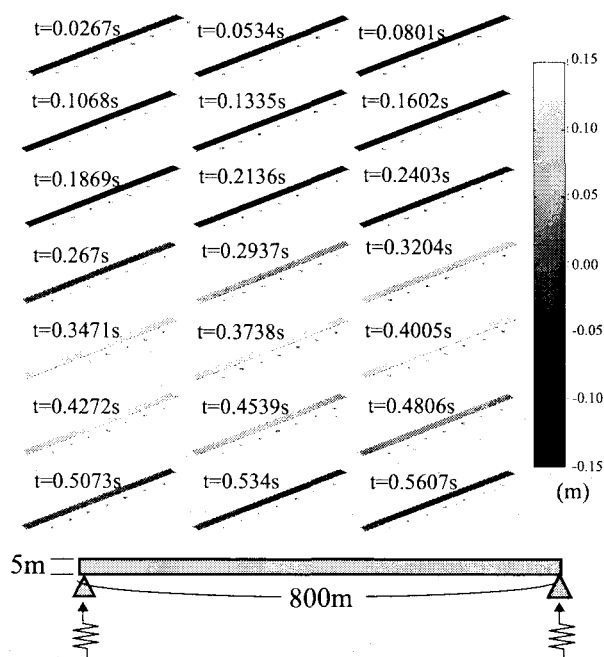


図-4 衝撃緩和材を設置しない橋梁の変位分布

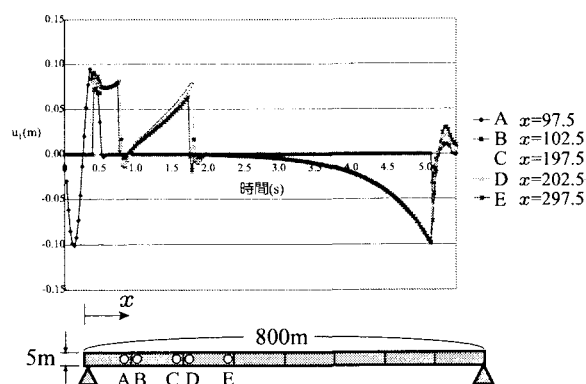


図-5 衝撃緩和材を有する橋梁の点A,B,C,D,Eにおける変位の時刻歴応答

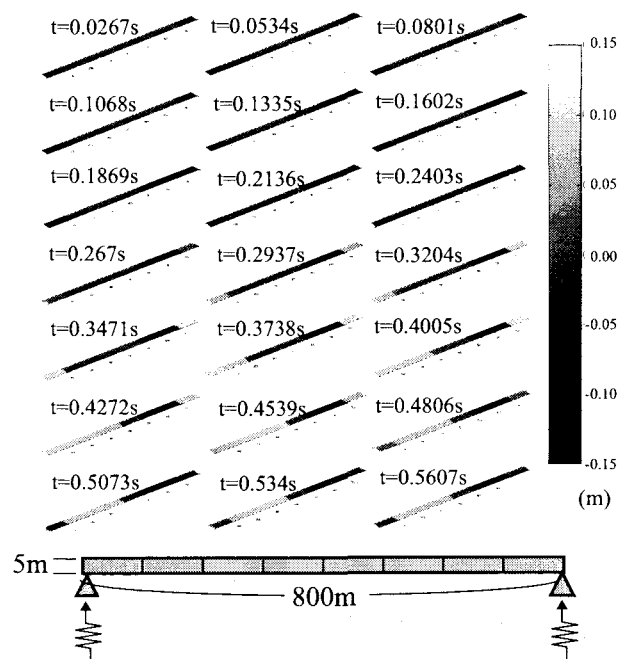


図-6 衝撃緩和材を有する橋梁の変位分布

桁間で時間差を伴った応力の伝達が起こることによって橋梁全体の揺れが長時間継続することがわかる。

4. おわりに

橋梁のジョイントに橋桁同士の接触・分離挙動を模擬した数値モデルを構築し、ジョイントを含め橋梁全体を対象とした地震動シミュレーションモデルを開発した。今後はジョイント部の応力・変位を吟味することで、ジョイントに作用する負荷・衝撃等を詳細に検討していく予定である。また、橋脚等を考慮し、より現実的なシミュレーションを行いたいと考えている。

参考文献

- 1) 越峠雅博, 運上茂樹, 足立幸郎, 長屋和宏: 落橋防止構造における緩衝材の効果に関する検討, 第2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.423-426, 1998.
- 2) 福井卓雄: 境界要素法の研究-高速・高精度計算法の開発と応用-, 京都大学博士論文, 1998.
- 3) 中畑和之, 廣瀬壮一: 時間域 BEM による界面剥離部の超音波伝播シミュレーション, 超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集, Vol.12, pp.17-22, 2005.