

衝撃的地震入力動による RC橋脚の引張破壊とその対策

竹宮宏和¹・西尾研二²

¹正会員 工博 岡山大学教授 環境理工学部 環境デザイン工学科 (〒700 岡山県岡山市津島中3)

²岡山大学大学院

本研究は、RC橋脚を対象に想定した衝撃的地震入力の下で引張破壊が発生する可能性をコンピュータシミュレーションにより検討したものである。解析手法としては、一様な2次元半無限弾性体への帯状載荷による時間領域グリーン関数に基づいた境界要素法と有限要素法のハイブリッド法で逐次積分を採っている。また、橋脚下端に緩衝材を設けることにより、橋脚内の引張応力がどの程度、低減するかについての考察も加えた。

Key Words : 2D-Green's function, Coupling of FEM and BEM, Impulsive seismic loading, Tensile stress failure

1. はじめに

地震による構造物の応答性状は、従来、振動という概念で取り扱われる。これは、地震動の入力により構造物は慣性力を得て全体が揺れる振動数帯域を対象としている。しかし、高振動数成分を含む衝撃載荷の場合は、対象系内に応力波が発生し伝播する。そして、与えられた境界条件のもとで反射が生じる。したがって、場合によっては、これらの応力伝播波が相乗される。

兵庫県南部地震は直下型で、体感的には衝撃的地震動と呼ばれ、これまでの地震とは異なった地震動を引き起こした。そして、神戸の建物、橋梁などの構造物に甚大な被害を生じさせた。それらの多くは構造力学的に曲げ、せん断破壊として破壊メカニズムが説明された。しかし、RC橋脚、煙突において、引張破壊現象以外では説明が難しい破壊の痕跡もかなり見られた。そこで、直下型地震特有の直達波による衝撃的な縦揺れの中に、地震計では記録されないほどの短周期成分の波が存在していたのではないかと考えられる。

本研究では、この衝撃的地震動の単純なモデル化を行い、橋脚底面に衝撃的地震力が作用した際、引張破壊を起こす可能性を検討する。解析手法として、対象とする地盤を一様な半無限弾性体とし、構造物はソリッド要素の有限要素法でモデル化し、地盤と構造物の相互作用を考慮した2次元FEM - BEMハイブリッド法(時間領域)¹⁾を採った。さらに、衝撃的地震波を緩和するために、緩

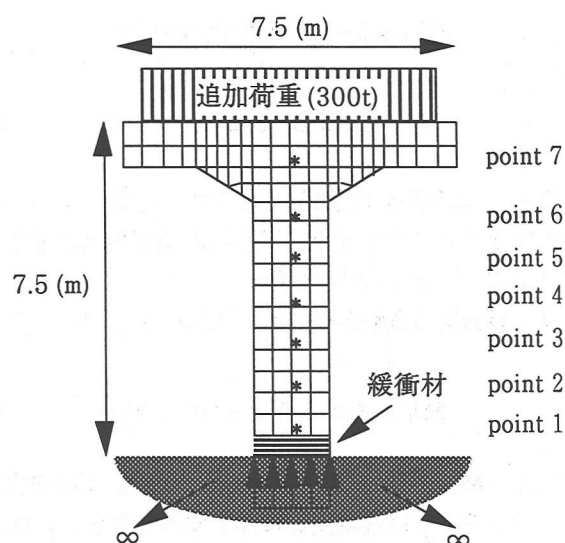


図-1 FEMとBEMのハイブリッド解析モデル

衝材を導入する設計を採った場合の衝撃破壊の回避の程度を調べた。

2. 定式化

(1) 解析モデルと解析手法

解析対象モデルとして、図-1に示す一様な高架橋の橋脚断面を考える。一様な2次元半無限弾性体の衝撃載荷による時間領域グリーン関数²⁾を、構造物とのインターフェイス面、地表面に関して離散化し、初期境界値問題の時

表-1 地盤-構造物 物性表

	ヤング係数 (kN/m ²)	密度 (tf/m ³)	ポアソン比
構造物	2.94×10 ⁷	2.50	0.20
地盤	1.92×10 ⁷	2.00	0.33
緩衝材	1.00×10 ⁶	1.80	0.35

間領域BEMに導入した。

有限要素と境界要素のインターフェイス上の変位 $\mathbf{u}$ 、表面力 $\mathbf{T}$ は、2次元半無限弾性体のグリーン関数から計算される影響マトリックス $\mathbf{F}$ を用いて表す。それらは合積の離散化表現によって時間刻み Δt に対して与えられる。ここでは、境界要素法における境界変位と表面力を変換マトリックス $\mathbf{D}$ を介して、各有限要素法の節点変位と節点力に対応づける。これらの節点変位を $\hat{\mathbf{u}}$ 、節点力を $\hat{\mathbf{T}}$ とすると、次式で与えられる。

$$\hat{\mathbf{u}}_b^m = \mathbf{D}\mathbf{F}_{bb}^0\mathbf{T}_b^m + \mathbf{D}\sum_{j=1}^m \mathbf{F}_{bb}^j\mathbf{T}_b^{m-j} \quad (1)$$

$$\hat{\mathbf{T}}_b^m = \mathbf{S}\hat{\mathbf{u}}_b^m - \mathbf{S}\cdot\mathbf{D}\sum_{j=1}^m \mathbf{F}_{bb}^j\mathbf{T}_b^{m-j} \quad (2)$$

ただし

$$\mathbf{S} = \mathbf{D}^T[\mathbf{F}_{bb}^0]^{-1} \quad (3)$$

ここに、上添字 m は現時刻に相当する時間刻み Δt での離散化のタイムステップを、下添字 b は有限要素と境界要素のインターフェイス節点を示す。

一方、構造物の運動方程式は有限要素法により、

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \hat{\mathbf{f}}(t) + \hat{\mathbf{T}}(t) \quad (4)$$

ただし、 $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$ はそれぞれ質量、減衰および剛性マトリックスを、 $\hat{\mathbf{f}}$ は有限要素に作用する外力を、 $\hat{\mathbf{T}}$ はインターフェイス上に作用する有限要素側での節点力を表す。また、 $\ddot{\mathbf{u}}$ 、 $\dot{\mathbf{u}}$ 、 $\mathbf{u}$ はそれぞれ有限要素法で定義される加速度、速度、変位である。

全体系の解析のためには、式(2)と(4)を連立させ、インターフェイスでの変位の適合条件および力のつり合い条件を用いて次の支配方程式を解く。

$$\begin{bmatrix} \bar{\mathbf{K}}_{ss} & \bar{\mathbf{K}}_{sb} \\ \bar{\mathbf{K}}_{hs} & \bar{\mathbf{K}}_{hh} + \mathbf{S} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{u}}_s \\ \hat{\mathbf{u}}_h \end{bmatrix}^m = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{S}\cdot\mathbf{D}\sum_{j=1}^m \mathbf{F}_{bb}^j\mathbf{T}_b^{m-j} \end{bmatrix} + \hat{\mathbf{q}}^m\Delta t \quad (5)$$

ただし、 $\bar{\mathbf{K}}$ は実行剛性マトリックス、

$$\bar{\mathbf{K}} = \mathbf{K} + \frac{1}{\delta(\Delta t)^2}\mathbf{M} + \frac{\gamma}{\delta\Delta t}\mathbf{C} \quad (6)$$

であり、右辺第2項は、

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{q}}^m\Delta t = & \hat{\mathbf{f}}^m + \mathbf{M}\left\{\frac{1}{\delta(\Delta t)^2}\hat{\mathbf{u}}^{m-1} + \frac{1}{\delta\Delta t}\dot{\hat{\mathbf{u}}}^{m-1} + \left(\frac{1}{2\delta} - 1\right)\ddot{\hat{\mathbf{u}}}^{m-1}\right\} \\ & + \mathbf{C}\left\{\frac{\gamma}{\delta\Delta t}\hat{\mathbf{u}}^{m-1} + \left(\frac{\gamma}{\delta} - 1\right)\dot{\hat{\mathbf{u}}}^{m-1} + \frac{\Delta t}{2}\left(\frac{\gamma}{\delta} - 2\right)\ddot{\hat{\mathbf{u}}}^{m-1}\right\} \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 $\hat{\mathbf{u}}_s$ は構造物のインターフェイス以外の節点変位、 $\hat{\mathbf{u}}_h$ はインターフェイス上の節点変位である。ここでは、Newmarkの数値積分法を採用しパラメータ $\delta=0.4$ 、 $\gamma=0.6$ を使用している。

有限要素には、4節点アイソパラメトリック要素を、境界要素には定応力要素を用いている。また、構造物内の応力は、FEMの剛性マトリックスを作成する際に用いる変位-応力変換マトリックスにより、積分点において求められる。

解析に用いた地盤、構造物の物性値を表-1に示す。解析モデルについては、橋脚が受け持つ桁の重量を考慮するため、桁の載っている部分に同質量を付加している。その際、橋脚の柱部分の鉛直方向に約20 kg/cm²の静的応力が発生する。また、地盤の物性値は地中に埋設されている基礎部を考慮し、実際の地盤より堅いものとなる値を与えている。

(2) 衝撃的地震動の単純化

衝撃的地震動を以下のように仮定し、図-2にその時間変化を示す。

$$V(t) = V_0 \sin\left(\frac{4\pi}{T_0}t\right) \left[H(t) - H\left(t - \frac{T_0}{2}\right) \right] \quad (8)$$

ここに、 V_0 は最大速度であり、 $H(t)$ はHeaviside関数を定義する。弾性体の衝突理論により求めた地震波速度 $V(t)$ と構造物への地震力 $F(t)$ の関係は、

$$F(t) = -\frac{2G(1-\nu)}{c(1-2\nu)}V(t) \quad (9)$$

ここで、 G ：構造物のせん断弾性剛性、 c ：構造物内の波動伝播速度、 ν ：ポアソン比である。

式(9)で示した地震力をFEM構造物の底面に外力として作用させる。最大速度 V_0 は100(kine)とすると、地震力の強度は $F=9000(\text{kN/m}^2)$ となる。解析モデルに用いた地震力

表-2 地盤-構造物 物性表

	ヤング係数 (kN/m^2)	密度 (tf/m^3)	ポアソン比
構造物	2.50×10^7	2.40	0.33
地盤	1.37×10^5	1.80	0.48

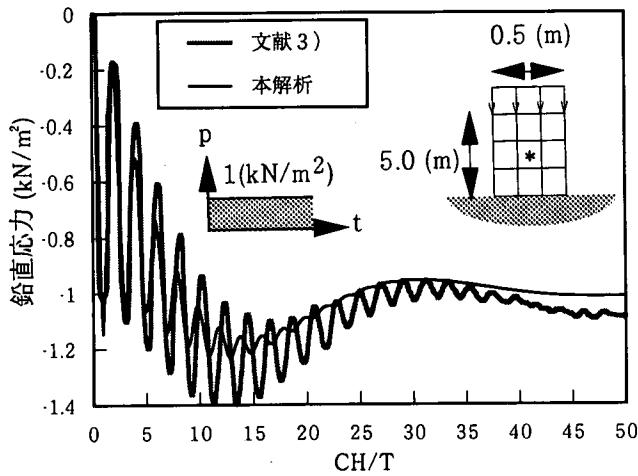


図-3 鉛直応力の時刻歴応答

の周期は便宜上、反射波と直達波が重なり最も大きな引張応力が発生するように決定しており、 $T_0/2 = 0.006$ (sec) とする。

3. 解析結果と考察

本解析手法の検証例として、1次元弾性棒と2次元半無限弾性体を結合させたモデルの解析結果³との比較を示す。解析モデルとしては、構造物上部にHeaviside型の载荷を作用させ、寸法を高さ5(m)、幅0.5(m)とし、用いた物性値を表-2に示す。図-3は*印断面での平均鉛直応力の時刻歴を示しており、文献3)では、構造物を1次元として取り扱った違いはあるものの、全体的に一致している様子がみられる。

図-4は、図-1に示すRC橋脚の代表的な中心軸上の節点の鉛直応力の時刻歴を示したものである。応力は各要素の積分点において評価し、引張応力を正、圧縮応力を負とする。また、緩衝材がない場合を実線、緩衝材がある場合を破線で示す。図-4より、RC橋脚の下端から上方に向かって、まず最初に圧縮応力波が伝わり、引き続いて引張応力波が上端に向かって進む。前者の圧縮波は上端の自由境界条件の下で反射された後、引張応力となって下方に向かうが、後続の引張応力波と重なってさらに大きな引張応力となる。この最大引張応力は、point6で発生している。緩衝材がある場合の時刻歴についても、同

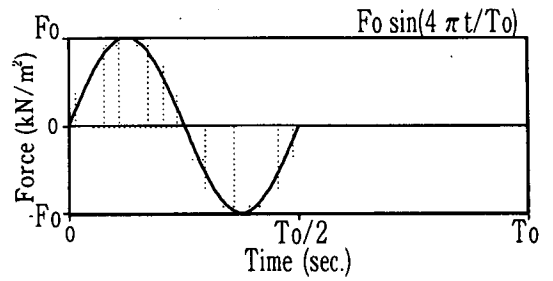


図-2 衝撃的地震動図

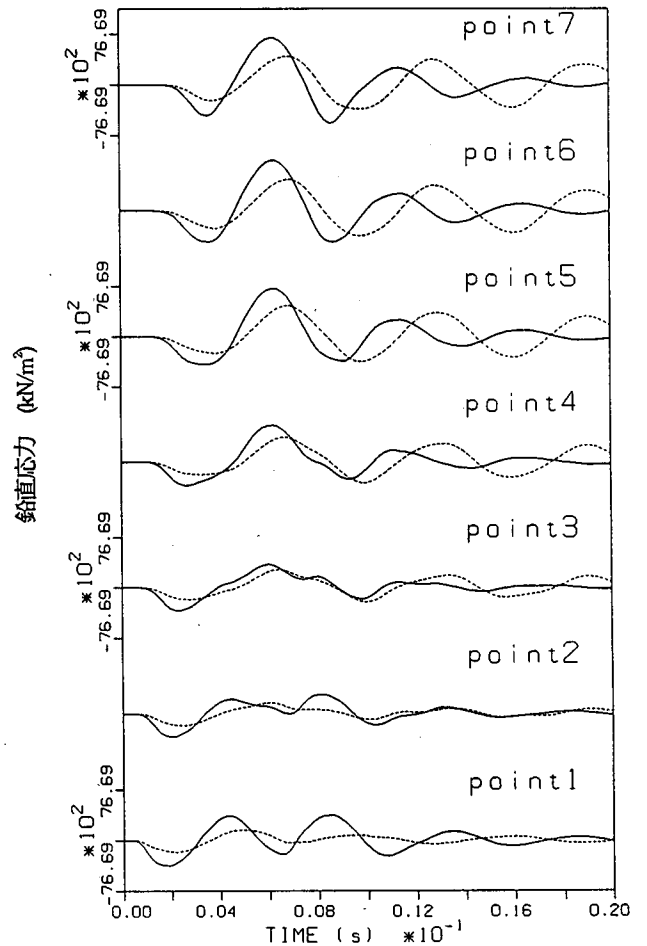


図-4 鉛直応力の時刻歴応答 ($V_0 = 100$ kine)

様の現象が生じているが、橋脚底面から入射される地震力が緩衝材により低減され、引張応力は緩衝材を設けない場合と比較して小さくなっていることが確認できる。

図-5に、地震波速度をパラメータにした最大圧縮、引張応力のプロフィールを示す。また、静的応力を破線で示し、コンクリートの引張限界強度を $3000(\text{kN/m}^2)$ と定め、*印付きの実線で示している。これから引張破壊が発生する断面の範囲が地震波速度に応じて特定できる。図-5からは、大きな引張応力が橋脚天端から下方へ向かって橋脚高さの1/4程度の範囲で見られる。これは、橋脚の柱部分と天端との結合部分付近である。地震波速度が50 (kine)以上になると、橋脚は引張破壊を起こすのに十分な

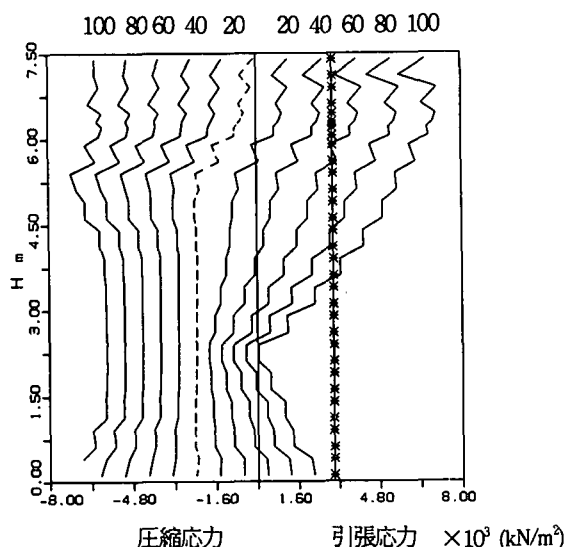


図-5 任意の速度入力による応力分布図 (緩衝材がない場合)

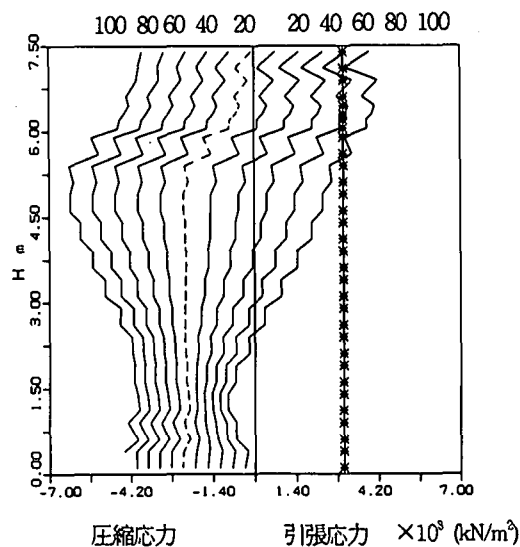


図-6 任意の速度入力による応力分布図 (緩衝材がある場合)

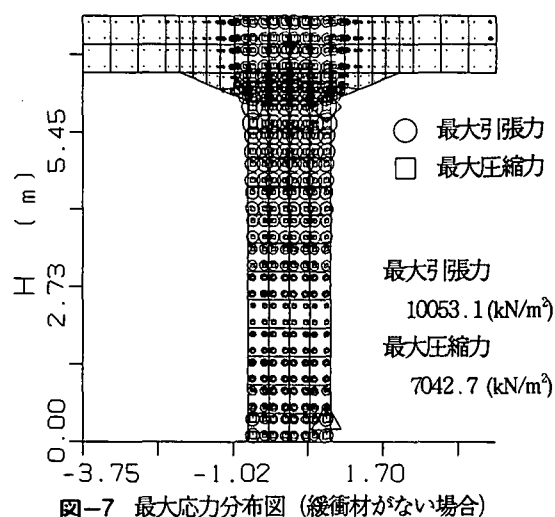


図-7 最大応力分布図 (緩衝材がない場合)

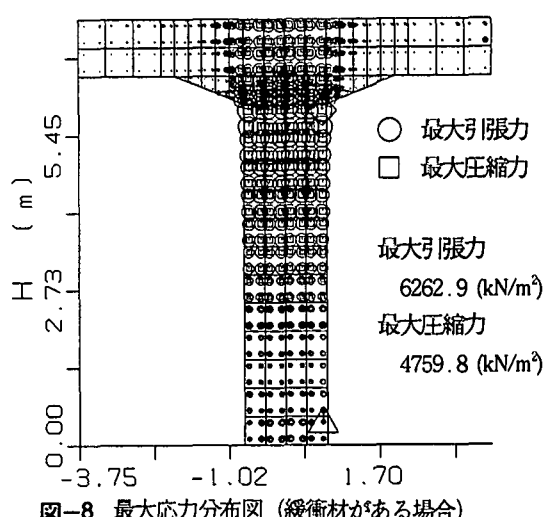


図-8 最大応力分布図 (緩衝材がある場合)

引張応力が発生する。図-6より、引張応力が緩衝材を設けない場合と比較して低減していることが分かる。70(kine)以下の地震波速度において、よい低減効果を示していると考えられる。

図-7にRC橋脚断面全体の最大応力分布図を示す。天端と柱部分との結合部分、橋脚底面において圧縮、引張ともに大きな値をとっていることが確認できる。特に、前者の結合部分付近では、上端部の慣性力と衝撃的地震波の波動伝播特性の影響干渉の結果と考えられる。図-8に緩衝材がない場合の最大応力分布図を示す。図-7と比較して、最大応力の低減している状況が分かる。

4. 結論

本研究では、衝撃的地震動を想定して、RC橋脚が引張破壊を起こす過程を調べた。その結果、現在の観測地震波の周期成分では発生しない引張応力が、今回想定した衝撃的地震波入力により発生したことで、兵庫県南部地震の際のRC橋脚の引張破壊の原因

が衝撃的地震波であることが推論される。高架橋などのトップ・ヘザーな構造物の引張破壊現象は、応力波の伝播特性のみならず、上端部の慣性力による効果が大きく、その質量が大きくなるにつれ、同効果が支配的になる。引張破壊が起こり得る場所は、天端との結合部分付近で可能である。また、橋脚下端に緩衝材を設けることにより、ある程度以下の地震波速度に対して、引張応力をコンクリートの引張強度限界以下に抑えることができる。

参考文献

- 1) 竹宮宏和、堀内深：衝撃的地震動によるRC構造物の引張破壊現象の可能性、第3回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集
- 2) Takemiya, H. and Guan, F. (1993) ,Transient Lamb's Solution for Surface Strip Impulsive, EM Vol 119, No 12, ASCE, pp. 2385 - 2403
- 3) 石崎太郎、岩崎英治、林正：弾性地盤上に置かれた棒の衝撃応答、土木学会第50回年次学術講演会