

I-A 120 境界要素法による地盤－構造物の動的応答解析

三井建設

正会員 斯波 明宏

東海大学海洋学部 正会員 北原 道弘

1. はじめに

1995年1月17日に発生した「兵庫県南部地震」では橋脚、橋桁及び支承部等が甚大な被害を受けた。そこで本研究では橋脚の動的応答を調べるために、地盤－橋脚－橋桁部の3つの領域の相互作用を考慮した橋脚のモデル化を行い、橋脚頂部の周波数応答とモードに着目した解析を行った。

2. 解析手法

解析手法としては、地盤の半無限性や地盤及び構造物の形状の変化を考慮するのに適した境界要素法を採用した。以下、解析手法について要約する。

まず、線形・等方・均質な動弾性波動問題の基礎式は次のようになる。

$$\rho\{(c_L^2 - c_T^2)\nabla\nabla\cdot\mathbf{u} + c_T^2\nabla\nabla\cdot\mathbf{u}\} + \mathbf{b} = \rho\ddot{\mathbf{u}} \quad (1)$$

ここに ∇ はナブラ作用素、 ρ は密度、 $cr = \sqrt{\mu/\rho}$ と $cl = \sqrt{(\lambda+2\mu)/\rho}$ は横波と縦波の波速、 λ 、 μ はラメ定数である。

基礎式(1)を次に示す Fourier 変換

$$\hat{\mathbf{u}}(\mathbf{X}, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{u}(\mathbf{X}, t) e^{i\omega t} dt \quad (2)$$

により、周波数域に変換する。ここに ω は角振動数である。外部問題を考えるときには、全変位 $\mathbf{u}$ は入射波による変位 $\mathbf{u}^i$ と散乱波による変位 $\mathbf{u}^s$ の和で表される。散乱波動場に対して Green の公式を適用すると領域に対する積分方程式が得られ、これに極限操作を加えることにより、境界上の点 $\mathbf{x}$ に対する積分方程式を次のように導くことができる。

$$\begin{aligned} \mathbf{C}\hat{\mathbf{u}}(\mathbf{x}, \omega) &= \int_{\partial D} \mathbf{U}(\mathbf{x}, \mathbf{y}; \omega) \hat{\mathbf{t}}(\mathbf{y}, \omega) ds_y \\ &\quad - \int_{\partial D} \mathbf{T}(\mathbf{x}, \mathbf{y}; \omega) \hat{\mathbf{u}}(\mathbf{y}, \omega) ds_y \\ &\quad + \hat{\mathbf{u}}^i(\mathbf{x}, \omega) \quad (\mathbf{x} \in \partial D) \end{aligned} \quad (3)$$

上式(3)の左辺は自由項 (free term) と呼ばれ、境界がなめらかな場合は $\mathbf{C}=1/2 \mathbf{I}$ となる。

また式(3)の $\mathbf{U}$ は基本解と呼ばれ、定常動弾性2次元問題に対しては次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \mathbf{U}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}; \omega) &= \frac{i}{4\mu} [H_0^{(1)}(k_T r) \mathbf{I} \\ &\quad + \frac{1}{k_T^2} \nabla\nabla\{H_0^{(1)}(k_T r) - H_0^{(1)}(k_L r)\}] \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 $r = |\mathbf{X} - \mathbf{Y}|$ は距離、 $H_0^{(1)}$ は第一種0次の Hankel 関数、 $k_L = \omega/cl$ と $k_T = \omega/cr$ はそれぞれ縦波及び横波の波数である。

図-1に示すように半無限地盤($e=1$)上に構造物($e=2$)が存在する場合、半無限地盤表面($c_1+c_2+c_3$)上で式(3)が成立し、構造物表面(c_4+c_5)上でも入射波を除いた式(3)と同様な積分方程式が成立する。地盤と構造物の境界(c_1, c_3, c_4)上で与えられた境界条件、及び地盤と構造物の共通の境界(c_2 と c_5)上の変位と表面力の連続条件を利用して地盤－構造物系に対する積分方程式系を得る。以下に解析例を示す地盤－橋脚－橋桁連成系についても定式化の要点は同じである。

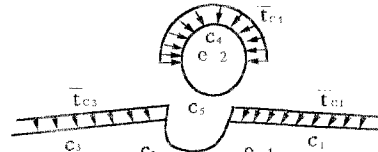


図-1 地盤－構造物図

3. 解析結果

地盤を考慮した逆T字型橋脚部分の動的応答を調べるために以下の3つの解析モデル①, ②, ③を考えた。

- ①地盤－橋脚－集中重量 (橋桁部) (図-2)
- ②地盤－橋脚－橋桁 (両端可動支承) (図-3)
- ③地盤－橋脚－橋桁 (両端回転支承) (図-3)

モデルのスケールは実際の1/5とし、地盤は左右にそれぞれ30m、橋脚高さは9m、橋桁長さは約30mとした。橋桁部については、モデル①の場合は橋桁に相当する重量を橋脚頂部に付加し、モデル②は橋桁の支承構造を可動に、モデル③は回転 (ヒンジ) 支承とした。但し、橋脚と橋桁は簡単のため剛結としている。地盤を領域I、橋脚部を領域II、左側橋桁部を領域III、右側橋桁部を領域IVとし、それぞれの領域の物性値は表-1のように設定した。また入射波は橋脚の真下から鉛直上方に進行する平面SV波とした。

表-1 各領域の物性値

領域	単位体積重量 (t/m ³)	ポアソン比	せん断波速度 (m/s)
I	1.8	0.333	200
II	2.5	0.150	2064
III	2.5	0.150	2064
IV	1.0	0.333	8786

周波数領域での動的応答を調べるために、本研究で

は橋脚頂部中央点に着目した周波数応答とこれに対応したモード解析を行った。まず図-4はモデル①の周波数応答曲線であり、横軸は周波数(Hz)を表している。1Hz に小さな第1ピークが見られ、7Hz あたりに大きな第2ピークがある。図-5, 6はそれぞれ1Hz, 7Hz のモード図である。1Hz のモードは橋脚全体のスウェイ、7Hz のモードは橋脚部分のロッキングが支配的になっている。

次にモデル②の場合の周波数応答曲線を図-7に示す。モデル①に比べて低振動数側にピークが集中しており、より現実に近い応答を示しているように思われる。モードについては1Hz の場合(図-8)がスウェイと柱部分の1次モード、4Hz の場合(図-9)はロッキングが卓越している。

最後にモデル③の場合の周波数応答曲線(図-10)であるが、橋桁の両端をヒンジ支承にしているため、橋脚頂部の変形が拘束され応答量が非常に小さい。ま

た図-11は7Hz, 図-12は13Hz の場合のモード図で、橋脚部分だけでなく橋桁部分のモードが卓越してくるのが分かる。

4. まとめ

地盤-橋脚-橋桁連成系の動的応答について検討する場合、そのモデル化の方法によって応答特性が大きく変わり、モデル化には細心の注意を要することが分かった。今後、橋桁支承部をモデル化に取り入れるることにより、支承部を含めた局所応力変動が解析可能な地盤-橋脚-橋桁連成系の応答解析法へと手法を拡張することが必要と考えている。

参考文献

- [1] Niwa, Y., Kitahara, M. and Ikeda, H.: The BIE approach to transient wave propagation problems around elastic inclusions, Theoretical and Applied Mechanics, Vol.32, pp.183-198, 1984.

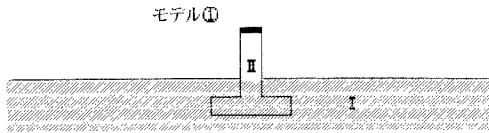


図-2 モデル図

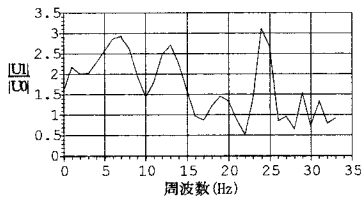


図-4 周波数応答

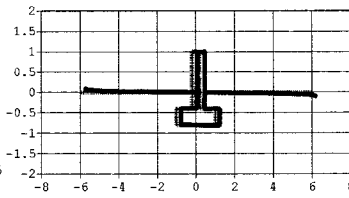


図-5 モード図 (1 Hz)

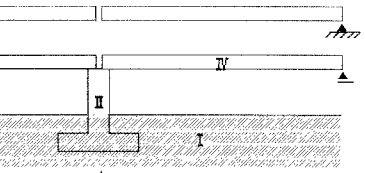


図-3 モデル図

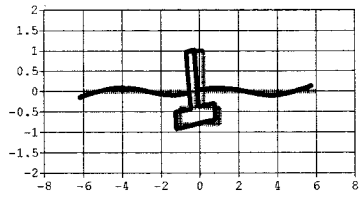


図-6 モード図 (7 Hz)

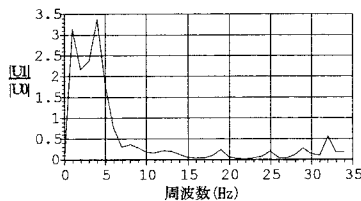


図-7 周波数応答

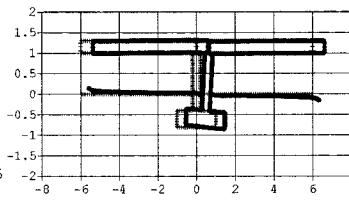


図-8 モード図 (1 Hz)

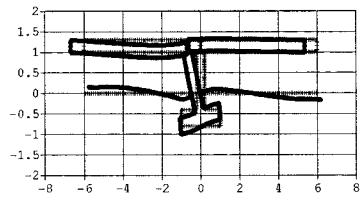


図-9 モード図 (4 Hz)

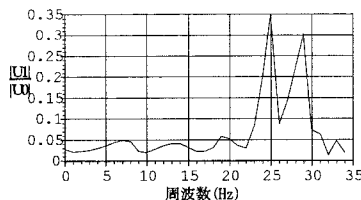


図-10 周波数応答

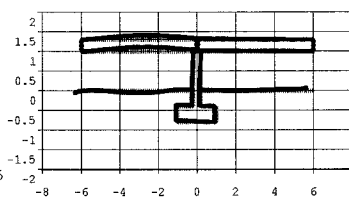


図-11 モード図 (7 Hz)

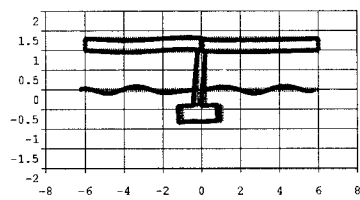


図-12 モード図 (13 Hz)