

(38) 無反射境界F. E. M. による建造物の動的解析

東京大学工学部

○岩下 和義

東京大学地震研究所

伯野 元孝

1. 序

現在、地盤・構造物系の地震動に対する数値解析の手法として最も多く用いられているのは、有限要素法であるといえよう。その際に、有限要素法はいわゆる領域法であり、無限もしくは半無限領域を解析の対象とする際に領域の周囲に人為的な境界を設定する必要がある。ところがこの境界により本来は領域の外つまり無限遠方に伝播していくはずの波動が反射され解析領域内にとどまり、しばしば解析結果を無意味なものにしてしまう。解析方法はいくつか提案されているが、Cundall¹⁾の提案した無反射境界が考へられていると思われる。鈴木・伯野は²⁾この方法を三次元弾性波動問題に応用した。本稿では、この方法を用い、今まで困難だったケーソンの三次元的動的解析を有限要素法により時間領域において行なった。そしてケーソンの根入れ深さやその地上高、周囲の地盤条件、入力条件などがケーソンの振動特性にどのような影響を与えるかについて考察した。

2. 解析手法ならびに解析モデル

解析は、無反射境界を持つ有限要素法により行なった。ケーソンならびに地盤を $5 \times 5 \times 5 (m^3)$ の立方体要素に分割して解析モデルを作製した。Fig. 1に解析モデルの一例とその媒質を示す。図のInner Regionが解析領域でありBoundary Regionが境界処理領域である。有限要素作製の際には、モデルの対称性を考え領域の半分をモデル化した。ケーソンの断面は $10 \times 20 (m)$ とし、根入れの深さは0, 5, 15 m、地上高は0, 5, 15 mと変化させる。地盤条件としては、ケーソンと同じ硬さの水平層がケーソン下面に接している、少し離れた所にある、硬い層はない場合の3通りを設定した。媒質は、ケーソン部のせん断波速度 V_s を200%、ポアソン比 ν を0.3、周囲の軟弱地盤の V_s を100%、 ν を0.4とする。媒質はすべて線形弾性体とし、内部減衰は考へていない。入力の方向はすべてケーソンの短辺方向(Fig. 1でのX軸方向)とする。入力条件としては、入力点をケーソン頂上部の各節点とし2.0Hzの正弦波一波を加える、モデル下方より2.0Hzの正弦波一波を加える、モデル下方より地震波を加える場合の3通りとする。観測点は、ケーソン全体の振動状態を調へるためにケーソンの対称軸上の節点とした各節点変位を求めた。解析にはルンゲクッタ法を用い、 $\Delta t = 0.01$ 秒として600ステップ、6秒間解析した。

3. 解析結果

まず、ケーソン頂部に水平方向の正弦波を一波加えた。Fig. 2にケーソンも硬い層もない場合つまり半無限弾性体の表面加振問題、Fig. 3にケーソンの根入れ深さ15 m、地上高5 m、硬い層なしの場合、Fig. 4に深さ15 m、高さ15 m、硬い層なしの場合の3例のモデルの概略図と入力波形、各観測点のX軸方向変位を示す。Fig. 2より波動が無反射境界により処理され反射波がないことがわかる。Fig. 3の場合にも波動はすぐに周辺地盤に消散し消滅さ

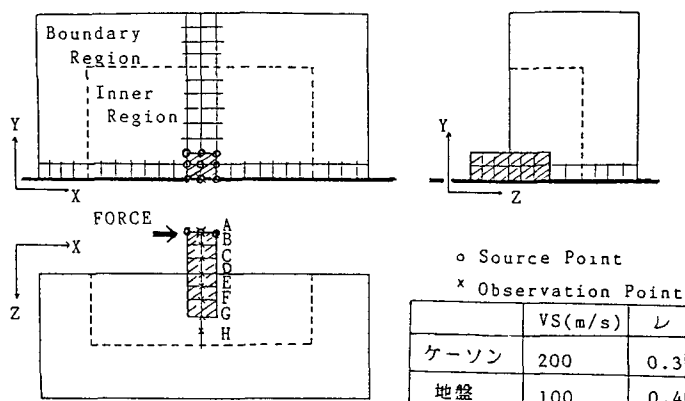


Fig. 1 解析モデルの一例と媒質

(根入れ15 m、地上高15 m、硬い層なしの場合、

図中の斜線部がケーソン、太線はモデルの対称面とする)

れている。Fig. 4の地上高15mの場合には、加振後ケーソンは減衰を示しながら自由振動している。特に地上の観測点A～Cは大きく揺れている。地上高5mの場合には大きく揺れないが、15mの場合には、深さや地盤条件を変えても同様に振動した。Fig. 5に地盤条件は同じ、地上高を15mとし、深さを0, 5, 15mと変えた場合のケーソン頂部の観測点Aの変位のピーク値とその時刻との関係を片対数グラフで示す。この図は減衰の状態を表現しており傾きが大きいほど減衰が大きい。内部減衰は考えていないので、働いている減衰力は逸散減衰のみであり、Fig. 5で点が一直線上に並ぶことより逸散減衰は粘性減衰に似た対数的な減衰であると思われる。Fig. 5より地上高が同じでも根入れが深いほど逸散減衰が大きくなると思われる。この図より、系を1質点系とみなし

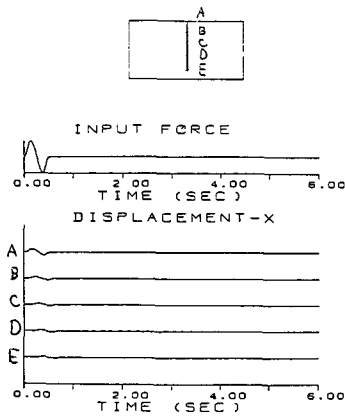


Fig. 2 応答変位例と入力波形
(ケーソン、硬い層なしの場合)

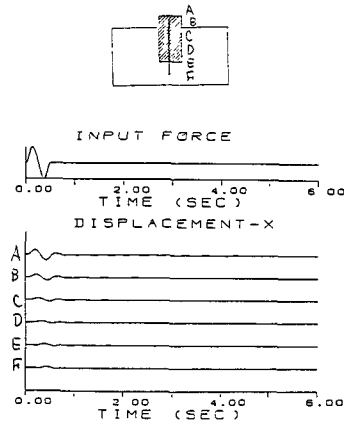


Fig. 3 応答変位例と入力波形
(ケーソンの根入れ15m、地上高5m、
硬い層なしの場合)

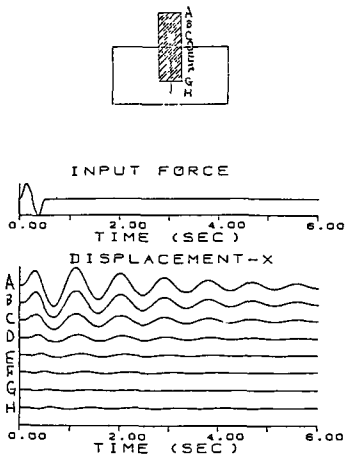


Fig. 4 応答変位例と入力波形
(ケーソンの根入れ15m、地上高15m、
硬い層なしの場合)

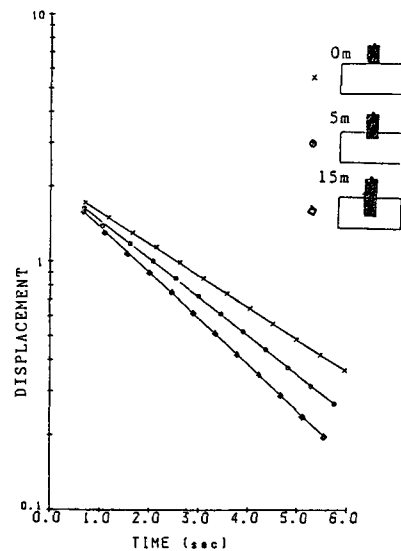


Fig. 5 根入れ深さと逸散減衰の関係
(ケーソン頂部の点Aの変位のピーク値とその
時刻の片対数図、ケーソンの地上高は15m)

て等価減衰定数 h を求め、Table. 1に示す。地上高15mの場合のみ求めた。これから、ケーソンの根入れが深いほど逸散減衰は大きく、下方に硬い層が存在する場合にはない場合と比べて減衰は小さくなり、また建造物の地上部の大きさにより振動特性は大きく異なってくると思われる。

次に、Fig. 6のようにモデルの下方より2 Hzの正弦波一波をせん断波として加えた。この際にモデルは深さ方向（Z軸方向）に大きくとった。Fig. 7にケーソンの深さ5m、高さ15m、硬い層なしの場合の各観測点の応答変位を示す。下方より入力した場合にもケーソンに波動が伝わりケーソンは減衰自由振動を行なった。その際の卓越周期と減衰定数 h はTable. 1の頂点加振の場合とほとんど同じ値であった。地中の点では振動はすぐにおさまっている。

次に、外力として地震動を入力した。入力動は、El Centro (1940)のNS成分を多重反射理論により、モデルの媒質を考えて地下の波動におおしたものをを用いた。入力動の速度成分を10秒分、Fig. 8, 9に時刻歴とフーリエスペクトルの形で示す。このうちの前の6秒分を用いた。入力点はFig. 6の太線上の各節点としX軸方向に入力した。ケーソンの深さ15m、高さ15m、硬い層なしの場合の観測点A, D, Hの変位のX方向成分をFig. 10.1~3に、加速度のX方向成分をFig. 11.1~3に示す。この場合にもケーソン上の方各観測点は、大きく共振している。入力波の卓越振動数は0.4 Hzであるが、観測点Aは1 Hzで振動している。地中の観測点は地上に比べ変位、加速度ともに小さく共振することもない。基礎は地表に比べてかなり応答が小さいことがわかる。

以上より、無反射境界を用いることにより、地下逸散減衰を自然に取り入れた地盤・建造物系の3次元解析が行なえると思われる。

[参考文献]

- 1) Cundall P.A., et al, 1978, Solution of infinite dynamic problems by finite modeling in the time domain, Proc 2nd Int. Conf. Appl. Num. Modelling, Madrid
- 2) 鈴木崇伸・伯野元彦, 1984, 消波境界を持った有限要素法による波動伝播解析, 東京大学地震研究所彙報, Vol. 59, pp.327~366

Table. 1 各モデルの卓越周期と減衰定数 h
(ケーソンの地上高15mの場合、図の斜線部は硬い媒質($V_s=200\%$, $\nu=0.3$)を示す。)

モデル	卓越周期 (SEC)	減衰定数 h
	0.89	0.060
	0.92	0.052
	0.95	0.045
	0.87	0.022
	0.90	0.019
	1.25	0.018
	0.67	0.014

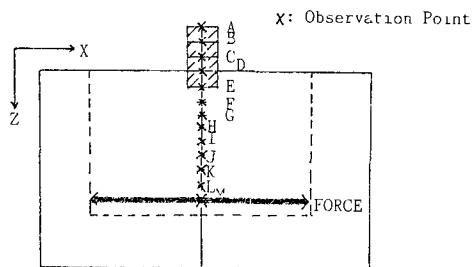


Fig. 6 下方より入力する時の解析モデル1例
(根入れ5m、高さ15m、硬い層なしの場合、Z-平面はFig. 1と同じ太線は入力する節点を示す)

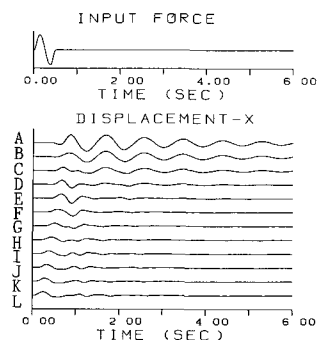


Fig. 7 下方より入力した場合の応答変位と入力波形の例
(根入れ5m、高さ15m、硬い層なしの場合、Fig. 6のモデルを用いた)

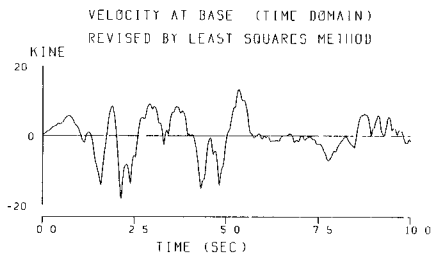


Fig. 8 入力動の速度成分
(このうち0~6secをス軸
方向に入力した)

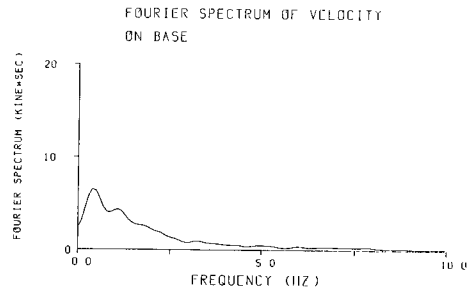


Fig. 9 入力動の速度のフーリエスペクトル

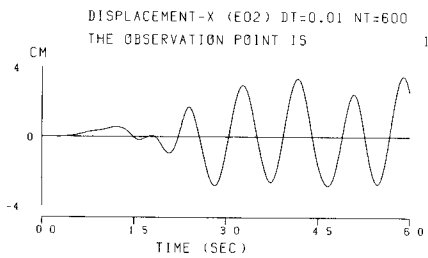


Fig. 10.1 観測点Aの変位(X方向)

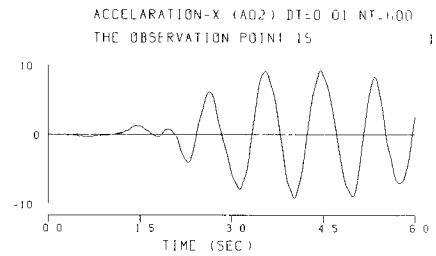


Fig. 11.1 観測点Aの加速度(X方向)

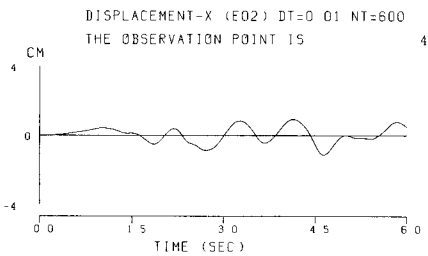


Fig. 10.2 観測点Dの変位(X方向)

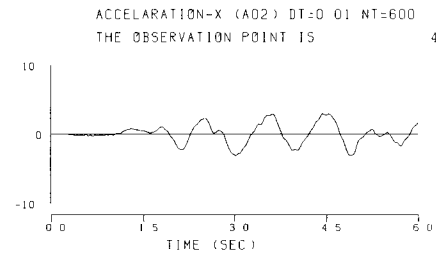


Fig. 11.2 観測点Dの加速度(X方向)

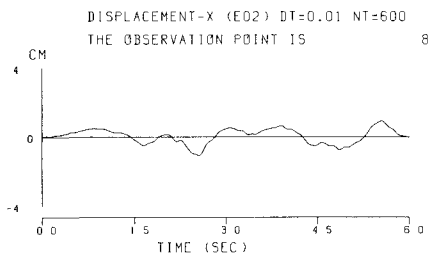


Fig. 10.3 観測点Hの変位(X方向)

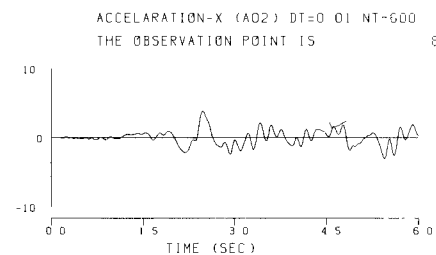


Fig. 11.3 観測点Hの加速度(X方向)