土木学会第50回年次学術講演会（平成７年９月）

I －679

拡張個別要素法による地盤－構造物系の動的解析

東洋大学　正会員　鈴木 崇伸
東洋大学　正会員　伯野 元彦

1．はじめに

地盤－構造物系の動的解析としては連続体近似の範囲内で有限要素法による方法が一般的である。一方で構造物モデルを非連続な小要素の組合せで表現し、ニュートンの運動方程式によって小要素の位置と回転量を追跡していく個別要素法（DEM;Distinct Element Method ）が提案されて以来、地盤の解析においても新しい研究がいろいろとなされている。もともと個別である小片をバネと拘束力で一体化して解析を進める個別要素法においては、滑動・剥離・回転といった剛体的挙動は要素間の相互作用力の変化で自然に表現されるため、破壊に到るようなシミュレーションに適していると考えられる。この個別要素法の考え方を推し進めて、連続体的挙動から破壊現象までを統一的に計算できる拡張個別要素法（Extended DEM）が提案されている。拡張個別要素法は有限要素法などと同じく領域型の解析手法であり、境界条件によって構造物の挙動は大きく変わってくると考えられる。

一般に地表面や地層の不規則性あるいは人工構造物の存在により、振動性状は複雑なものとなり、解析モデルの外部へ逸散する波動が引き起こされる。仮想境界でこの逸散波が反射されると、波動エネルギーがいつまでも解析モデル内に閉じ込められることになり、計算の前提条件との間に差異を生じる。今回の拡張個別要素法の解析では、計算が簡単で汎用性のある粘性境界を仮想境界での処理方法に適用してみる。すなわち仮想境界付近では拡張個別要素は剛体運動に移行せず、弾性振動するという条件で粘性境界処理を行い、地盤のような自由表面をもつ半無限の領域中の構造物を対象に計算する方法について考察を進め、拡張個別要素モデルで表された構造物－地盤系の動的問題について解析し、境界処理方法の有用性について検討する。

2 拡張個別要素法における粘性境界処理

（1）境界条件式

拘束力を受けて安定した状態にある個別要素モデルを考えると、安定条件をこさない範囲でバネーマスモデルと等しくなる。図－１に示すような一列に並んだ簡単なモデルのｘ軸方向に波動が進行する場合に進行波を吸収する境界条件を求めてみる。要素の質量をｍ、個別要素重心間のバネ定数を軸方向の変形に対してｋｎ、軸直角方向の変形に対してｋｔとすれば、離散化された振動系の最大角振動数は次式となる。

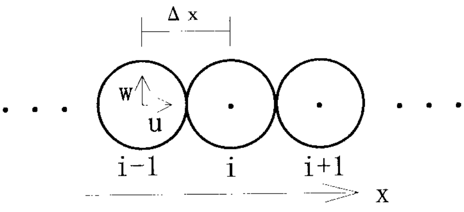
$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_n}{m}} = \frac{c_n}{\Delta x}, \quad \omega_t = \sqrt{\frac{k_t}{m}} = \frac{c_t}{\Delta x} \qquad (1)$$

ただしωは自由度間を波動が進行する時間の逆数、ｃは位相速度、またｃの添え字はｋの添え字に対応している。

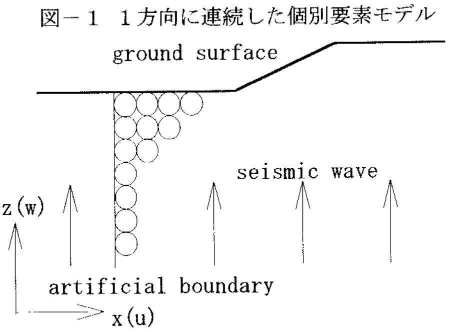
応力表現の粘性境界の式に式（１）を代入すれば離散化した系での条件式が得られる。この条件式を式（２）に示す。

$$\sigma = \rho c_n v_n = \rho \Delta x \omega_n v_n = m \omega_n v_n$$
$$\tau = \rho c_t v_t = \rho \Delta x \omega_t v_t = m \omega_t v_t \qquad (2)$$

境界に接する要素の速度を定数倍した減衰力を仮想境界に作用させてやれば、有限要素法の場合と同様に進行波を処理できる。



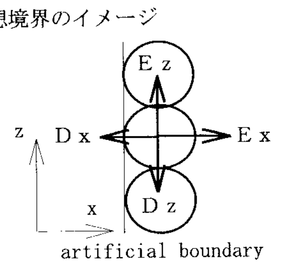
図－１　１方向に連続した個別要素モデル



図－２ 仮想境界のイメージ

（2）仮想境界における処理方法

拡張個別要素法を地盤のような半無限領域の応答計算に応用する場合、有限要素法の場合と同様に仮想境界を設定して解析モデルをつくらなくてはならない。図－２に示すようにｚ軸に平行な直線境界を考える。この仮想境界の外側は内部領域と独立して１次元の波動解析が可能な水平地盤とし、そこでの変位をu_f（ｚ）とする。境界から要素にはたらく力Ｆｂは、仮想境界の外側の領域から受ける弾性復元力Ｅと内部領域から外側へ逸散する波動成分



図－３　境界要素に働く力

に対する減衰力Ｄに分解できる。

$$F_b = E + D \tag{3}$$

図－３に示した境界に接する要素に作用する力を考えてみると、外部領域からの弾性復元力はｕｆから計算される応力を要素に係わる長さだけ積分することにより求められる。境界(s1, s2)に接する要素に作用する力Ｅは

$$E = \int_{s_1}^{s_2} \sigma_f ds \tag{4}$$

となる。また逸散波成分に対して境界から作用する力は（１）で述べた減衰力であり、要素に作用する力Ｄは境界での要素の運動速度と境界外側の運動速度との相対差から、次式で与えられる。

$$D = m\omega(\dot{u} - \dot{u}_f) \tag{5}$$

境界の外側の領域の１次元波動を独立に計算し、以上求めた力Ｅ，Ｄを境界の要素に作用させれば、半無限領域の応答計算を行うことができる。

３．解析例

（１）運動方程式

互いに接触している円形個別要素でモデル化された構造系においてｉ要素の運動自由度$\mathbf{x}$＝（ｘ，ｚ，ϕ）は次の運動方程式に従う。

$$\mathbf{M\ddot{x}} = \mathbf{F_i} + \mathbf{F_e} + \mathbf{F_b} \tag{6}$$

但しＭは各自由度の慣性抵抗を対角にならべたマトリクスであり、Ｆｉは要素間の相互作用力、Ｆeは体積力等の外力、Ｆbは境界条件にしたがう表面力である。個別要素法により運動を追跡する構造からある程度離れた位置では、要素の剛体運動は起こらないと仮定すれば、先に述べた力をＦbとして作用させることにより仮想境界処理を行える。

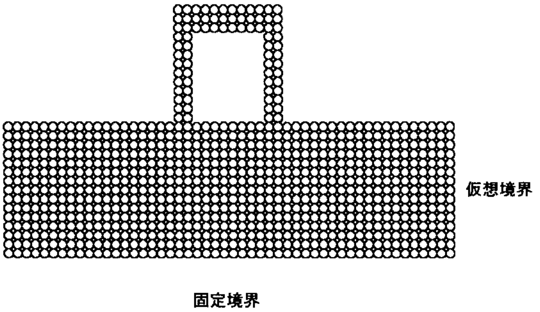
（２）１層ラーメン－地盤系の動的解析

地盤－構造物系の動的問題の例題としてフーチング支持された軟弱地盤上の１層ラーメンに強い振動が加わったときの挙動をシミュレーションしてみる。解析モデルは図－４に示すように、高さ１３ｍ、幅１０ｍの鉄筋コンクリート造である。このモデルに振幅０．５Ｇ，加振周波数３Ｈｚの基盤振動を加えたときの破壊の様子を追跡してみる。図－５に加振開始後５秒後の要素位置を示すが、上床と柱の接続部ですべりを生じ、またフーチング周囲の地盤が乱れているのがわかる。この解析方法により、すべりが進行するにつれて上床部は落下しはじめ、柱は倒壊し、周辺地盤が徐々に乱れていく様子が再現できる。

４．まとめ

拡張個別要素法を地盤－構造物系の動的解析に適用するための基礎的な研究を行い、簡単な例題として１層ラーメンの動的破壊シミュレーションを行った。今後は動的破壊基準やＥＤＥＭ解析のモデル化誤差の研究を進めていく予定である。

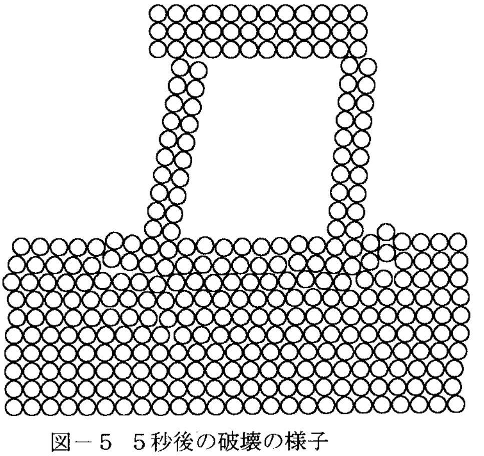
（関連研究）T. Suzuki& M. Hakuno:Viscous Boundary for Wave Propagation problem by DEM,IACM Proc. of WCCM3, 1994



上部工　ρ=2300kg/m3
E=2.6E9N/m2
c=2.0E2N/m2

地盤　ρ=1800kg/m3
E=5.0E7N/m2
c=5.0E4N/m2

図－４ 解析モデル



図－５ ５秒後の破壊の様子