

I-431

埋設部を有する構造物の動的挙動解析法

(財)電力中央研究所 正会員 花田和史

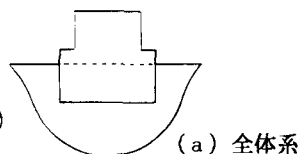
1. まえがき

水平成層地盤中に埋設された構造物の動的挙動解析を行うことを目的として、Gutierrez(参-1)はFV法(Flexible Volume法)とFB法(Flexible Boundary法)などの部分構造解析法を提案している。両者は本質的に同一の手法であり、両手法の長所のみを持つ計算法が存在しよう。FV法では田治見(参-2)が既に示しているように3次元点加振解を有効に使用し得るし、FB法では「相互作用剛性」や「有効入力」を明確に定義できこれらが定まれば計算量はFV法より少なく済む。一方、点加振解を用いる田治見の手法では、加振点を要素の代表点とし要素面積を加振点の支配する面積として与えて加振解の発散を防止しているため、このままでは一般の有限要素法によるルーティンを適用し難い。以下に、点加振解を用いて有限要素法と結合し計算量を削減し得る計算法を示し、理論解との照合結果を記す。

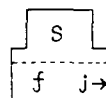
2. 部分構造法とその変形

部分構造法において対象とする系の概念を図1に示す。図1(a)は全体系を、(b)は構造物のみの系を、(c)は全体系より構造物を排除した地盤を、(d)は構造物によって置換された自然地盤の一部を、また(e)は建設前の自然地盤をそれぞれ示している。図中の矢印は矢印側から見る接面を表している。系の動的剛性行列を Z ($=-\omega^2 M + i\omega C + K$;ここに M , C , K はそれぞれ質量, 減衰, 剛性行列であり ω は角振動数、 i は虚数単位を表す)とし、対応する変位を u 、力を q で表すと全体系の振動方程式は次のようになる。

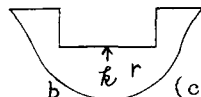
$$\begin{bmatrix} Z_{ss} & Z_{sf} & Z_{sj} & 0 & 0 \\ & Z_{ff} & Z_{fj} & 0 & 0 \\ & & Z_{jj} + Z_{kk} & Z_{kr} & 0 \\ \text{sym.} & & & Z_{rr} & Z_{rb} \\ & & & & Z_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_s \\ u_f \\ u_j \\ u_r \\ u_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ q_b \end{bmatrix} \quad \cdots (1)$$



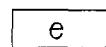
(a) 全体系



(b) 構造物系



(c) 残余地盤系



(d) 掘削地盤系



(e) 自然地盤系

FV法では全体系(a)を(b)-(d)の部分系と(e)の部分系に分割し、FB法ではこれを(b)の部分系と(c)の部分系に分割する。

FV法では、(e)に作用する地震力 q_b による各部の応答を w で表すと、最終的に次式が成立する。

$$\begin{bmatrix} Z_{ss} & Z_{sf} & Z_{sj} \\ Z_{ff} - Z_{ee} + Z_{11} & Z_{fj} - Z_{ek} + Z_{12} \\ \text{sym.} & Z_{jj} + Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_s \\ u_f \\ u_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ Z_{11}w_e + Z_{12}w_k \\ Z_{21}w_e + Z_{22}w_k \end{bmatrix} \quad \cdots (2)$$

ここに $Z_{11} \sim Z_{22}$ は、自然地盤系(e)において点加

図1 全体系と部分系

振した際に得られる e, k に関する柔性行列 X の逆行列 Z_0 の成分であり、 $Z_0 \cdot X = 1$ が成立する。

自然地盤系（ e ）をさらに（ c ）と（ d ）に分割し F B 法の表現法を採れば、（2）式は次に示すように変形される。

$$\begin{bmatrix} Z_{ee} & Z_{ef} & Z_{ej} \\ & Z_{ff} & Z_{fj} \\ s y m. & & Z_{jj} + Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_e \\ u_f \\ u_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ Z_{ke} w_e + Z_{22} w_k \end{bmatrix} \quad \cdots (3), \quad Z_0 = \begin{bmatrix} Z_{ee} Z_{ek} \\ Z_{ke} Z_{22} \end{bmatrix} \quad \cdots (4)$$

（4）式では $Z_{22} = Z_{kk} + Z_i$ と置くことができる。 Z_i は F B 法より得られる相互作用剛性行列を表している。（3）式はこのように F B 法と全く同一の式であるが、右辺の w は自然地盤（ e ）の地震応答であり Z_{22} は自然地盤を対象として得られる点加振解から誘導される剛性行列である。また $Z_0 \cdot X = 1$ と（4）式を用いることによって、 X の e, k に関する全逆行列を算出する必要はなく k 部分のみを対象として Z_{22} を求めることができる。逆行列の演算には元の 3 乗に比例する時間を要するため、3 次元体を 2 次元化して扱える本手法では計算量を大幅に削減することができる。これらの操作が可能となるには Z_{ke} と Z_{kk} が与えられ、これらと同一節点で Z_{22} が得られている必要がある。このため、1 要素面積を各節点に振分け、節点を構成する要素毎に加え合わせて、節点の支配する面積を定めておく。

（3）結果

上記の手法をコード化し理論解との対比による検証を実施した。検証の内容は以下のとおりである。
①田治見によって既に得られている地盤要素の代表点演算方式の結果と本手法の結果を比較する。
②半無限弾性地盤の表面載荷に関する厳密解（参一 3：武藤等による無次元振動数が 4 を超す大型基礎）と本結果を比較する。
③構造物地中部の物性を周辺地盤物性と同一にして、地表面載荷の場合と比較する。
④本コードに付与した地盤任意点挙動の計算を②の場合に実施し、③の地下構造挙動と比較する。
⑤ F V 法による結果と本手法による結果を③の場合で比較する。

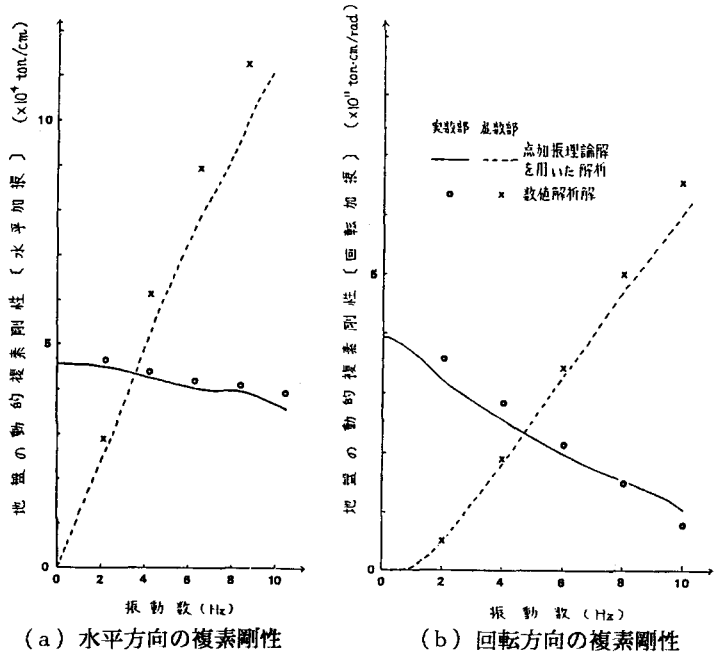


図 2 半無限弾性地盤の表面載荷剛板に作用する地盤反力

検討結果の一例（②対応）を図 2 に示す。本例では $V_s=400\text{m/sec}$ 単位体積重量 1.8ton/m^3 の地盤が 55m の剛基礎に作用する地盤反力が示されている。本計算では地盤を $10\text{m} \times 10\text{m}$ とし、基礎を $11\text{m} \times 11\text{m}$ 等分している。本手法により複素剛性が妥当に評価されていると言えよう。その他の検討結果も例示を割愛するが同様に妥当であり、本手法の有効性が確認された。他の結果に関しては当日会場にて紹介する予定である。