

構造物の地震応答解析における サブストラクチャー法と全体解析法との比較

曹 増延¹ · 渡辺 啓行² · 有賀 義明³ · 大塚 俊男¹ · 吉田 昌稔¹

¹ 開発計算センター(株) 科学システム事業部第一技術室 (〒135 東京都江東区深川2-2-18)

² 埼玉大学 工学部建設工学科 (〒338 埼玉県浦和市下大久保255)

³ 電源開発(株) 建設部設計室 (〒104 東京都中央区銀座6-15-1)

本研究では時間領域におけるサブストラクチャー法の適用性について全体解析法との比較検討を行った。同一物理対象に対しても解析手法によって解析対象の固有特性が変り、地震応答解析の結果もある程度異なることが明らかになっている。構造物の幾何学的特性、材料特性、解析の目的及び利用される環境に応じて解析手法を適切に選択すべきことを指摘している。

Key Words: numerical analysis, substructure method, direct method, interaction, time domain

1. まえがき

動的解析では、複雑で大規模な構造物、或いは異なる材質から構成される構造物に対して、構造要素によって全体をいくつかのサブストラクチャーに分け、接触面における連続条件により連成させる方法(サブストラクチャー法)がよく用いられる。また、この方法を用いれば、膨大な自由度のある構造物の解析でも計算機のメモリと計算時間がかなり節約できるというメリットがある。しかし、この方法と全体解析法とがどのような関係にあるか、また、どのような構造物に適用すべきかについてはまだ十分に解明されていない。本研究では、三次元構造物と基礎との連成系を対象として、数値解析(FEM)によりこの問題を検討する。周知のとおりサブストラクチャー法には部分モード法とインピーダンス法等がある^{1),2),3),4)}。一般的には振動数領域で応用されることが多いが、解析結果の精度が採用する固有モード数に依存するので、ここでは接触面モデルとして全体解析法との比較を時間領域で行う。研究結果の信頼性のために、本研究でサブストラクチャー法と全体解析法を比較する時に基礎から半無限自由地盤へのエネルギーの逸散と自由地盤の運動による構造物-基礎連成系への影響をも考慮している。

2. 構造物-基礎連成系

本研究で用いる構造物-基礎の連成系モデルを図-1に示す。この連成系モデルの解析を2種類の解析方法で比較検討する。一つは構造物と基礎を接触面で分け

て、連続条件で連成させるサブストラクチャー法(以下 Substructure-法という)である。もう一つは構造物と基礎を一体として解析する全体解析法(以下 Direct-法という)である。Substructure-法では、地震動を基盤面から入力し、構造物からのフィードバック及び自由地盤からのエネルギーの流入を考慮して基礎の地震応答を求める。求めた基礎の応答のうち構造物との接触面での応答を上部構造への入力として構造物底面に加え、構造物の応答解析を行う。逆に構造物の応答のうち接触面での反力を次の時間ステップでの基礎へのフィードバックとして基礎の表面に加える。このような連成系は(1.1)~(1.3)式で表わされる。関連する解析手順は図-2(a)に示す。

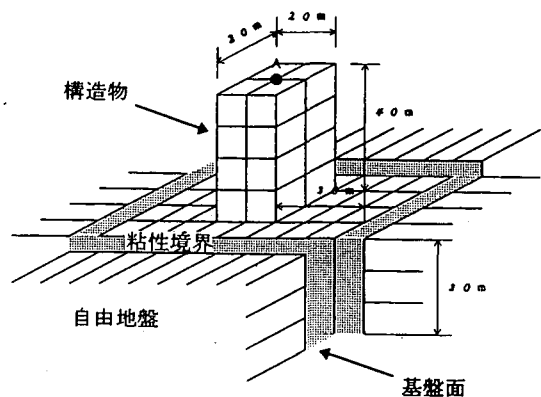
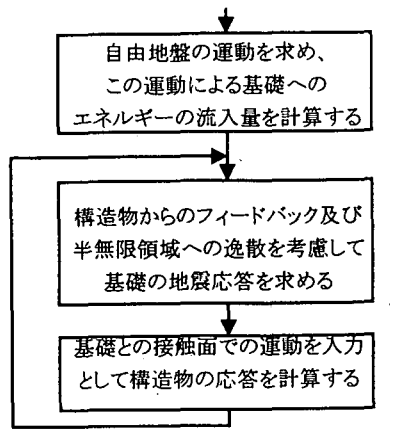
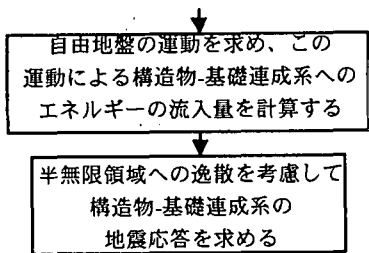


図-1 比較検討に用いる構造物-基礎連成系モデル



(a) サブストラクチャー法の解析手順



(b) 全体解析法の解析手順

図-2 解析方法に応じる解析手順の比較

$$\begin{cases} [M_s] \{\ddot{u}_s\} + [C_s] \{\dot{u}_s\} + [K_s] \{u_s\} = \{T_f\} & (1.1) \\ [M_f] \{\ddot{u}_f\} + [C_f] \{\dot{u}_f\} + [K_f] \{u_f\} = \\ \quad \{T_e\} + \{T_g\} + \{T_s\} & (1.2) \\ [M_g] \{\ddot{u}_g\} + [C_g] \{\dot{u}_g\} + [K_g] \{u_g\} = \{T_e\} & (1.3) \end{cases}$$

ここに、 $[M]$, $[C]$, $[K]$ は順に質量、減衰、剛性マトリックスであり、下添字 s, f, g は構造物、基礎、自由地盤を意味する。 u は変位ベクトルを意味し、 $\dot{\cdot}$ と $\ddot{\cdot}$ は時間に対する一回微分と二回微分を示す。 $\{T_e\}$ は岩盤面からの入力地震動であり、 $\{T_g\}$ は自由地盤の運動による基礎へのエネルギーの流入である。各マトリックスとベクトルの構成についてはここで省略する。関連文献を参照されたい^{5),6)}。ここで、説明しなければならないのは基礎と構造物との連続条件である。そのうち、基礎の運動による構造物へのエネルギーの流入は $\{T_f\}$ で表す。

$$\{T_f\} = -[M_{sf}] \{\ddot{u}_{fs}\} - [C_{sf}] \{\dot{u}_{fs}\} - [K_{sf}] \{u_{fs}\} \quad (2)$$

ここに、 $[M_{sf}]$, $[C_{sf}]$, $[K_{sf}]$ は基礎と構造物の接触面

にある節点に関する質量、減衰、剛性マトリックスである。 $\{u_{fs}\}$ は基礎に関する方程式、即ち、式(1.2)を解くことによる接触面での応答である。構造物の運動による基礎へのフィードバック $\{T_s\}$ は次の式で表す。

$$\{T_s\} = [K_s] \{u_{sf}\} \quad (3)$$

ここに、 $\{u_{sf}\}$ は構造物に関する方程式、即ち、式(1.1)を解くことによる接触面での応答である。

構造物と基礎とを一体として解析する Direct-法には次の運動方程式を用いる。

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} M_s & M_{sf} \\ M_{fs} & M_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_s \\ \ddot{u}_f \end{Bmatrix} + \\ \begin{bmatrix} C_s & C_{sf} \\ C_{fs} & C_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_s \\ \dot{u}_f \end{Bmatrix} + \\ \begin{bmatrix} K_s & K_{sf} \\ K_{fs} & K_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_s \\ u_f \end{Bmatrix} = \\ \begin{Bmatrix} 0 \\ T_e \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ T_g \end{Bmatrix} & (4.1) \\ [M_g] \{\ddot{u}_g\} + [C_g] \{\dot{u}_g\} + [K_g] \{u_g\} = \{T_e\} & (4.2) \end{cases}$$

Direct-法に関する解析手順は図-2(b)に示す。

3. 数値解析による解析手法の比較

(1) 解析モデル

数値解析に用いるモデルは図-1に示したように構造物・基礎・自由地盤から構成される。上部構造物と基礎は8節点ソリッド要素で離散化される。以上で述べたように構造物と基礎の間の連続条件については Substructure-法と Direct-法の二手法で考える。解析結果の精度及び比較の信頼性のため、両方法に用いる数値モデルのメッシュは完全に同じで、比較的細かくしている。

構造物と基礎の物性は線形とし、表-1に示す値を用いる。

地震動は最大加速度値 $0.2G$ に規準化した EL-Centro NS 地震波を、基盤面から時間刻み 0.01 秒で入力する。

(2) 解析結果

図-3に Substructure-法と Direct-法による点Aの加速度応答の時刻歴を示す。最大値は両方法の結果がよくあっていると考えられる(差が約1.8%)。応答

表-1 解析用物性値

項目	値	単位
剪断弾性係数 G	7.84×10^6	kN/m^2
密度 ρ	2.4	t/m^3
ポアソン比 ν	0.2	--
減衰定数 h	5%	--

波形は大体合っているが、時によって両方の差が大きくなったり、小さくなったりすることが分かる。特に2.5~4.1秒の間に両者の差異がはっきり認められる。全体的には Direct-法 による応答が大きい。言い換えれば、Direct-法による応答波形にはある一定値を超えるピークが多い。図-4には加速度応答の最大値の等高線を示す。図から明らかなように構造物の上部及び基礎では両方法による最大加速度の分布がよく合っているが、構造物の下部及び基礎の表面に近い所、即ち、構造物と基礎との接触面の近傍では、両方の差が比較的明瞭になる。

(3) 考察

なぜ同一構造物の同一地震波に対する応答が違うか、Substructure-法 と Direct-法 は本質的にはどこが違うかについて以下に考察する。

地震波が入力基盤から基礎に入射される。基礎は地震動を構造物へ伝え、同時に構造物からのフィードバックも受ける。この連成系の物理モデルは一つしかないが、解析手法によっては数値モデルが同一とならない可能性がある。Substructure-法では基礎と構造物はそれぞれの固有モードを持っているが、Direct-法では全体の総固有モードが表現されている。具体的に言えば、両方法における数値モデルの固有振動数と固有モードが異なる。Substructure-法では基礎がそれ自身の固有モードを持って地震波を構造物へ伝え、構造物が自身の固有モードを持って基礎に伝えて来た励起に反応する。構造物の固有振動数と基礎から伝えてきた波の卓越振動数との関係により波がフィルターされることが考えられ、全体構造の固有モードが励起されない可能性が存在する。Direct-法 では構造物と基礎が総合的な固有モードを持って励起に反応する。この原因により、同一地震波（卓越振動数が一定であるので）に対しても応答に差が出てくる。

数値モデルにより解析対象の特性が変わることは図-5に示す伝達関数からわかる。図は入力基盤面から構造

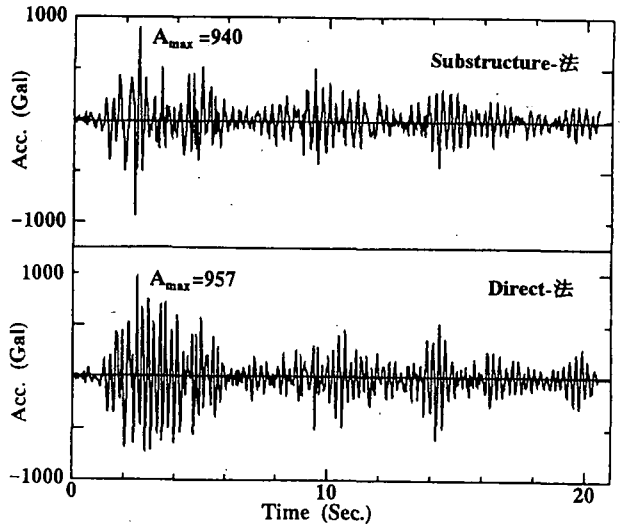


図-3 点 A の加速度応答歴の比較

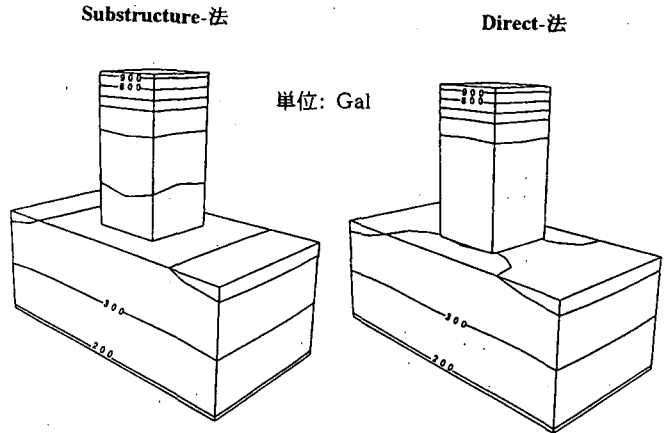


図-4 最大加速度応答の分布の比較

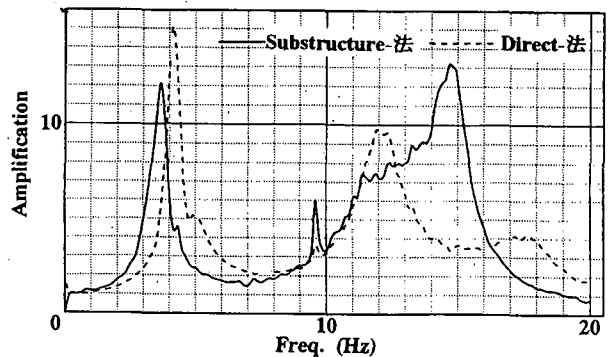


図-5 加速度伝達関数の比較 (構造物天端/入力基盤)

Mode 1
f = 4.105 Hz

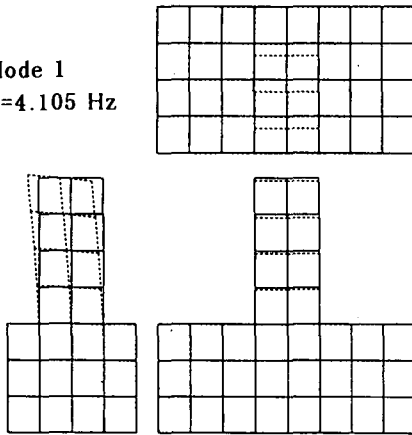


図-6 一次固有モード図

物天端の同一点までの加速度の伝達関数であるが、解析方法による両方の差異が明らかになっている。ピーク1とピーク2に対応する振動数はそれぞれ10.8%、21.5%の差がある。

この検討に用いたモデルの精度を確かめるために、三次元固有値解析を行った。例として、Direct法の数値モデルにおける一次の固有振動数と固有モードを図-6に示す。固有値解析により得た固有振動数と図-5に述べた伝達関数から得た固有振動数とはほぼ一致しており、前者がやや大きい(1%)。これは時刻歴解析に減衰項が導入されていることが原因と考えられる。

(4) サブストラクチャー法と全体解析法の選択

これまでの検討結果を踏まえ、解析手法を選択する際に基本的に考慮すべき事項を簡明に述べる。

解析対象が幾何的に、或いは材料的に複雑、且つ、自由度数が非常に大きい場合、Substructure法を選び、その逆の場合は、Direct法を採用するのが賢明であろう。一般的な場合、物理量の精度と解析の便宜性の間に主な矛盾の解決を目指して解析方法を選ぶのがよいと考えられる。

4. まとめ

以上の検討によりサブストラクチャー法と全体解

析法による解析結果への影響及び関連する原因が明らかになった。構造物-基礎連成系の同一物理対象に於いても解析手法に対する数値モデルが異なる。従って、固有モードと励起に対する応答もある程度異なる。具体的な解析対象、解析目的、計算機などの解析環境に応じて、解析手法を適宜選択すべきと考えられる。

参考文献

- 1). R.W.Clough, J.Penzien: <<Dynamics of Structures>>, McGraw-Hall Inc., 1975
- 2). 中井正一他: 切欠き型サブストラクチャー法の分類と適用(その1)、(その2), 日本建築学会大会, 1985
- 3). 渡辺 啓行: << 地盤工学の動的 method と実例 >>, リアライズ社, 平成4年12月
- 4). J.P.Wolf: Dynamic Soil-Structure Interaction, Printice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1985
- 5). Zengyan Cao: "Earthquake Response of Dam - Reservoir - Foundation System and its Analytic Methods", Doctoral dissertation, Saitama Univ., Sept., 1995
- 6). 三浦 房紀・沖中 宏志: 仮想仕事の原理に基づく粘性境界を用いた三次元構造物-基礎系の動的解析手法, 土木学会論文集, 第404号/I-11, 1989年4月