

(50) 地盤と構造物の動的相互作用解析システム

SUBSSIP-2Dの拡張

岡山大学工学部 正員 ○竹宮 宏和

村本建設㈱ 正員 福島 成人

大豊建設㈱ 正員 陸田 貴志

1. まえがき

著者らは、地震時の地盤と構造物の動的相互作用解析を主体にした、有限要素法による耐震解析システム（SUBSSIP-2D）の開発に従事して来た。そして、既にその有効性をいくつかの例題解析で示して来た。その後、上記SUBSSIP-2Dの拡張を試み、特に構造物の基礎のモデル化において新しい要素の追加、基礎のモデル化において半無限基礎面の導入、地盤-基礎系のサブストラクチャ化のバリエーションについての検討を行ったので、ここに報告する。

2. SUBSSIP-2Dの概要

適用分野

(1) 構造物

- a. 長大橋梁 : つり橋、斜張橋、連続高架橋 等
- b. 護岸構造物、ダム 等
- c. 産業施設 : 原子炉建屋、貯蔵タンク、高煙突、送電鉄塔、高炉、パイプライン系 等
- d. 海洋構造物 : 原油屈削用プラットフォーム 等
- e. 地中埋設構造物: 地中タンク、沈埋トンネル、埋設パイプライン系 等

(2) 地盤系

- a. 1次元波動伝播解析
- b. 2次元波動伝播解析
- c. 擬似3次元波動伝播解析

(3) 地盤-基礎系

- a. 剛体基礎
- b. 弾性基礎
- c. 群杭基礎

(4) 地盤-基礎-上部構造物系

- a. 2次元解析（面内、面外）
- b. 擬似3次元解析

システムの特徴

- (1) 動的サブストラクチャ法の適用: 従来の解析法である一体解析法に比べて、各部分系に最も適した定式化を採れ、それらの動的解析結果を総合しているため、各部分系間の相互作用が把握し易い。特に、地盤と基礎の間のキネマティックな相互作用、および下部構造系と上部構造系との慣性連成振動を明確に評価できる。
- (2) 多点入力系としての定式化: 進行性の地震入力に対処できると共に、複数の混合基礎形式の長大構造物を扱える。
- (3) モジュール形式の解析システム: 各部分系の変更に対して、既に計算済みの諸量を活用できるため経済性がある。
- (4) 地盤の非線形性: 地盤振動に対する等価線形化と、局所的非線形性に対する直接積分応答解析から対処している。

システムの構成

(1) 解析モデル

- a. 2次元解析 : 平面歪モデルによる面内および面外振動解析

(2) 有限要素モデル

- a. 要素 : 2次元平面（アイソパラメトリックソリッド）、梁（線要素）、ヘルヌーイ・オイラー梁、ジョイント要素
- b. 側方境界: 単純境界、粘性境界、伝達境界
- c. 下方境界: 剛基礎、半無限基礎

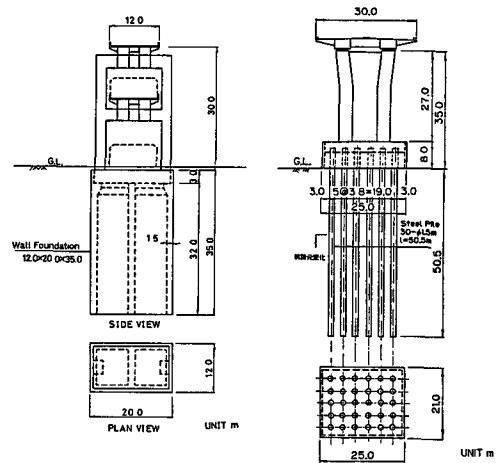


図1 連壁基礎（左）と群杭基礎（右）の断面図

(3) 地震入力

- a. 基礎面上の一様入力(入射波あるいは合成波)：面内、面外、
- b. 実体波の斜め入射：P波、SV波、SH波
- c. 表面波：レーリ波、ラブ波

(4) 解析手法

- a. サブストラクチャ解析法：地盤(あるいは下部構造)インピーダンス法(接触面モデル、接触体モデル)、部分モード法
- b. 一体解析法

(5) 応答計算法

- a. 振動数応答法 b. 時刻歴応答法 c. 応答スペクトル法

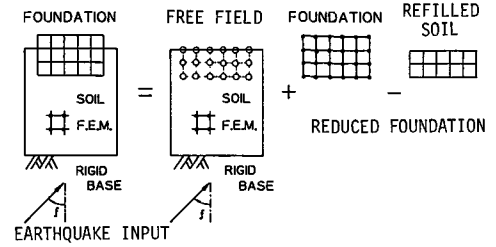


図2 地盤-基礎系のサブストラクチャ化

3. SUBSSIP-2Dの拡張

(1) ペルヌーイ・オイラー梁要素の導入：基礎部の解析で梁要素を用いる場合、通常これを線要素として定義するが、本研究では、基礎部の断面の広がりやを考慮したペルヌーイ・オイラー梁要素(図3)を導入した。これは、ペルヌーイ・オイラーの平面保持の仮定により、その特性を考慮したものであり、線要素としての梁の各節点を通る断面は、その節点の自由度に応じて剛体変位するものとする。したがって、地盤のソリッド要素と基礎とのインターフェイス(添字gb)は梁要素の節点(添字b)の運動で規定され縮退される。この関係を座標位置のみから決定される変換マトリックス[T]を用いて表わすと、

$$\{U_{gb}\} = [T]\{U_b\} \quad (1)$$

よって、運動方程式は、絶対座標系で式(1)を用いて

$$\begin{bmatrix} [D_{gg}] & [D_{gb}][T] \\ [D_{gb}]^T & [D_{bb}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{U_g\} \\ \{U_b\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{P\}_I - \{P\}_L - \{P\}_R \\ \{P\}_b \end{Bmatrix} \quad (2) \quad \text{ここに} \quad [D] = [K] - \omega^2[M]$$

与えられる。ここに添字ggは基礎とのインターフェイス以外のソリッド要素の節点を表わし、 $\{P\}_I$ は上部構造物から基礎への作用力、 $\{P\}_L$ 、 $\{P\}_R$ は左および右側方境界に働く作用力である。また、 $[K]$ 、 $[M]$ は地盤-基礎系の剛性、質量マトリックスで、特に梁要素の質量マトリックス $[M_b]$ には節点集中質量を採用し、断面の回転による影響として質量回転慣性モーメントをも考慮している。

(2) 擬似半無限基盤層(可変層)の導入：地盤と構造物の動的相互作用場において、波動の線形重ね合わせから自然地盤内の波動と相互作用より生じる放射波をそれぞれ定式化した。前者では連続体の半無限基盤と離散系の表層部を連続させており、基礎面入力を想定すれば入射波振幅で規準化された表層内部の応答が求まる。一方、放射波の場に対しては伝達境界の作成の際、剛基盤を仮定している。このため基盤設の定深さは表面波の振幅が実質上零となるように配慮されねばならない。Lysmer, Chenらによる考え方に沿って、成層地盤下の擬似半無限体層(せん断波速度Vs)を、振動数fにより $h = 1.5 L_s / 9 = (1/6)(V_s / f)$ を満足するように変動する可変厚さ L_s を導入した。

(3) 地盤-基礎系におけるサブストラクチャ化：地盤-基礎-上部構造物系の地震応答解析に、SUBSSIP-2Dでは動的サブストラクチャ法を採って、まず基礎とその周辺地盤より成る下部構造系と上部構造系に分離している。従って地盤-基礎系としての解析が上部構造物と共に併列して行われるが、前者の解析でさらに一体解析とサブストラクチャ解析が考えられる。地盤と基礎の動的相互作用解析にサブストラクチャ化を施すに当たり、それらの物理的なインターフェイスにおいて分離する接触面モデル法と、基礎の内部にも仮想的に地盤との共有節点を探る接触体モデル法(図2)がある。前者の基礎入力に対する応答解析では、有効入力を計算するのに基礎の堀り断面を有する地盤内の波動伝播を求めなければならないが、後者においては自然地盤内の伝播を扱えばよい。そのため基礎が杭、地中梁等の複雑な構成の弾性基礎形式に容易に適用できる利点がある。この場合の地盤-基礎系としての運動方程式は、一般に

$$\begin{bmatrix} [D_{ss}^F] & [D_{sf}^F] & [D_{sb}^F] \\ [D_{fs}^F] & [D_{ff}^F] & [D_{fb}^F] \\ [D_{bs}^F] & [D_{bf}^F] & [D_{bb}^F] + [X_b] - [D_{bb}^S] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{U_s\} \\ \{U_f\} \\ \{U_b\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{P_s\} \\ \{P_f\} \\ \{P_b\} + \{P_b^0\} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

ここに上添字Fは基礎を、Sは根入れ基礎部を置換した地盤を意味し、下添字sは基礎部における上部構造物との共有節点を、bは地盤と

の共有節点を、そして f はそれ以外の節点を指す。上式 (3) を s 節点についてのみに縮合すると

$$[X_s]\{U_s\} = \{P_s\} + \{P_s^0\} \quad (4)$$

の表現となり、 $[X_s]$ は上部構造物との共有節点に関しての地盤-基礎系としての下部構造系インピーダンスを定義し、また外力 $\{P_s^0\}$ は同節点への有効入力の評価したものである。ところで、有効地震入力 $\{P_s^0\}$ を求めるのに、一度地盤インピーダンスが評価されておれば、自然地震応答 $\{U_b^*\}$ との積で

$$\{P_s^0\} = [X_b]\{U_b^*\} \quad (5)$$

と求められる。この評価法の利点は、自然地震内の波動解析を対象とするため波動の伝播性を容易に考慮することができることにある。

4. 数値解析例および考察

解析構造物として連壁基礎と群杭基礎 (図1) を対象とした。その有限要素モデル図を図4に示す。まず最初に連壁基礎について、ベルヌーイ・オイラー梁要素 (CASE1, CASE2) と従来の梁要素 (CASE3) によるモデル化 (図5) の検討を行った。図5には各ケースにおける伝達関数を示してあるが、モデル化の相異による違いは、ほとんど見られない。ただ、CASE2のようにベルヌーイ・オイラー梁要素を用いた場合に、演算時間において大幅な短縮が見られ、同要素導入の有効性が認められた。また、前述の2種の基礎構造物の応答特性を比較すると、連壁基礎は全体としてロッキングが支配的となり剛体的な挙動を示すのに対し、群杭基礎はフレキシブルな挙動を示し、低振動数領域においては、地盤の振動モードの影響を大きく受けると言える。

つぎに擬似半無限基盤層を仮定しての仮想有限境界の妥当性を検討した。連壁基礎については図6、図7、図10・aから判るように、対象とした全振動数領域において、従来の固定基盤面で十分な精度の解が得られている。一方、群杭基礎については、図8、図9、図10・bより擬似半無限基盤層の効果は、杭頭インピーダンス、有効入力に大きく現われるものの同基礎が地盤振動に大きく影響を受けることから、伝達関数にはそれほど大きな差となって現われていないことが判る。

最後に、地盤-基礎系の解析で、一体解析をした場合の基礎天端における下部構造インピーダンスと有効入力を、接触体モデルによるサブストラクチャ解析した場合の解と比較したものを表1に掲げておく。両者の結果は非常に良い一致を示していることが判る。

《 参考文献 》

- 1) Takemiya, H.: Seismic Analysis of Multi-span Continuous Girder Bridge with Emphasis on Soil-Foundation-Superstructure Interaction, Proc. JSCE, Struc. Eng./Earthq. Eng., Vol. 1, No. 2, pp. 77-85, 1984. 10.
- 2) Takemiya, H., Yokoyama, K. and Oishi, H.: Seismic Analysis of An Under ground Structure, Proc. Int. Sym. Dym. Soil Struc. Int., pp. 65-74, 1984. 9
- 3) 竹宮宏和、平松和明: "地盤との相互作用における近接橋梁基礎の応答性状"、第36回中四国学術講演会、1984年7月。
- 4) Chen, J. C., Lysmer, J. and Seed, H. B.: "Analysis of Local Variations in Free Field Seismic Ground Motion", EERC-81-03, Jan. 1981, PP. 22-PP. 12.

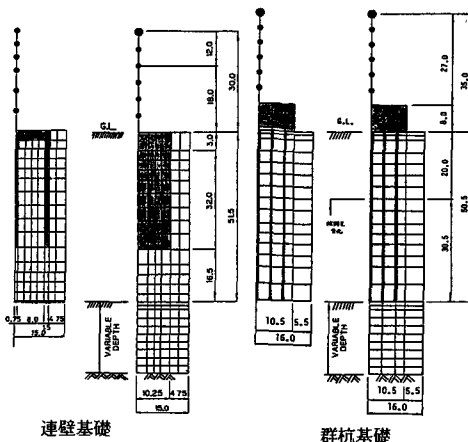


図4 有限要素モデル図

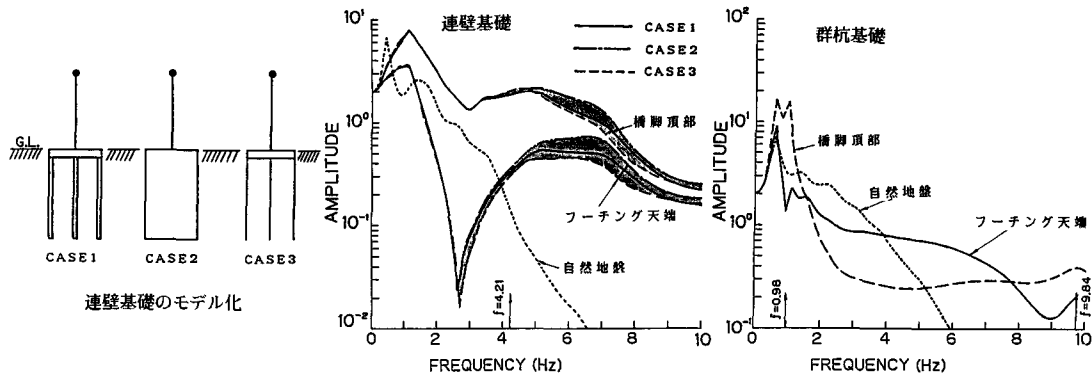


図5 伝達関数 (モデル化の違いによる効果)

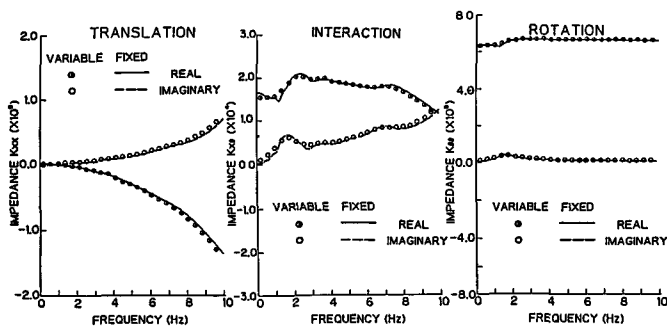


図6 フーチング天端でのインピーダンス (連壁基礎)

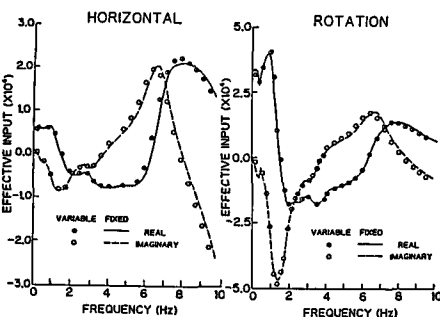


図7 フーチング天端での有効入力 (連壁基礎)

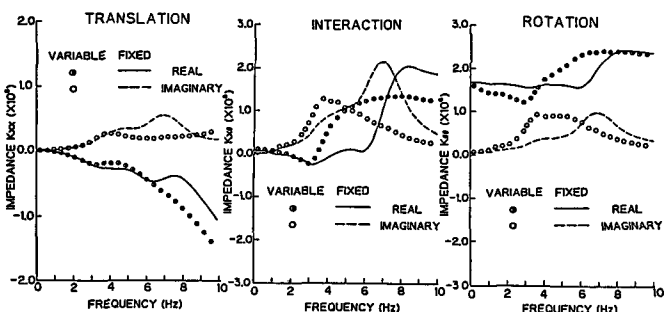


図8 フーチング天端でのインピーダンス (群杭基礎)

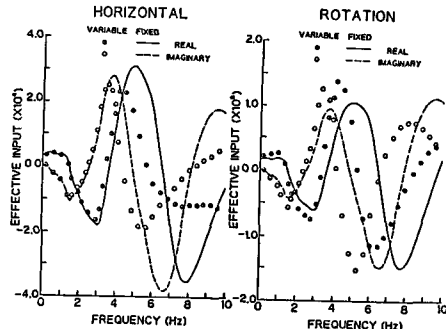


図9 フーチング天端での有効入力 (群杭基礎)

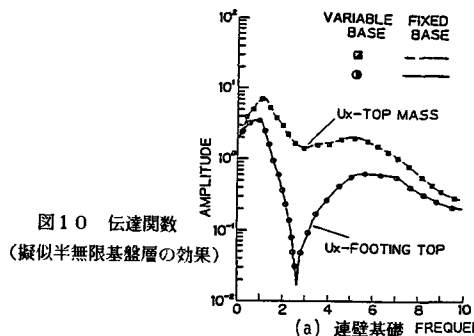
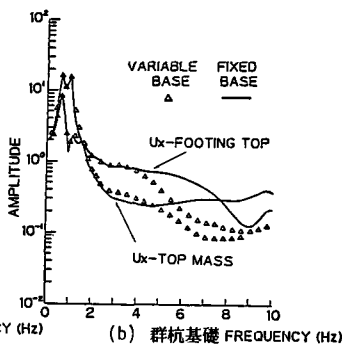


図10 伝達関数
(擬似半無限基盤層の効果)



(a) 連壁基礎 (b) 群杭基礎

表1 地盤一基礎系に対するサブストラクチャ解析と一体解析の比較

IMPEDANCE FUNCTIONS			
FREQUENCY	IMPEDANCE	SUBSTRUCTURE ANALYSIS (INTERBODY METHOD)	COMPLETE ANALYSIS
0.976 (Hz)	K_{xx}	$9.3083 \times 10^4 + 2.0340 \times 10^4 i$	$9.3006 \times 10^4 + 2.0340 \times 10^4 i$
	K_{xy}	$1.5827 \times 10^4 + 3.8730 \times 10^4 i$	$1.5827 \times 10^4 + 3.8732 \times 10^4 i$
	K_{yz}	$6.2919 \times 10^4 + 2.7389 \times 10^4 i$	$6.2919 \times 10^4 + 2.7391 \times 10^4 i$
1.953 (Hz)	K_{xx}	$-2.5910 \times 10^4 + 3.8990 \times 10^4 i$	$-2.5915 \times 10^4 + 3.8993 \times 10^4 i$
	K_{xy}	$1.9783 \times 10^4 + 5.6945 \times 10^4 i$	$1.9783 \times 10^4 + 5.6943 \times 10^4 i$
	K_{yz}	$6.5756 \times 10^4 + 3.4873 \times 10^4 i$	$6.5756 \times 10^4 + 3.4873 \times 10^4 i$
2.930 (Hz)	K_{xx}	$-9.0092 \times 10^4 + 6.6285 \times 10^4 i$	$-9.0092 \times 10^4 + 6.6285 \times 10^4 i$
	K_{xy}	$1.9634 \times 10^4 + 4.3905 \times 10^4 i$	$1.9634 \times 10^4 + 4.3906 \times 10^4 i$
	K_{yz}	$6.6302 \times 10^4 + 2.2593 \times 10^4 i$	$6.6302 \times 10^4 + 2.2593 \times 10^4 i$

EFFECTIVE INPUT

FREQUENCY	EFFECTIVE INPUT	SUBSTRUCTURE ANALYSIS (INTERBODY METHOD)	COMPLETE ANALYSIS
0.976 (Hz)	P_x	$6.2401 \times 10^4 - 4.6760 \times 10^4 i$	$6.2399 \times 10^4 - 4.6756 \times 10^4 i$
	P_y	$4.0497 \times 10^4 - 2.4040 \times 10^4 i$	$4.0497 \times 10^4 - 2.4038 \times 10^4 i$
1.953 (Hz)	P_x	$-3.9336 \times 10^4 - 6.0387 \times 10^4 i$	$-3.9336 \times 10^4 - 6.0385 \times 10^4 i$
	P_y	$-1.6466 \times 10^4 - 2.7422 \times 10^4 i$	$-1.6466 \times 10^4 - 2.7422 \times 10^4 i$
2.930 (Hz)	P_x	$-4.4689 \times 10^4 - 2.8370 \times 10^4 i$	$-4.4687 \times 10^4 - 2.8370 \times 10^4 i$
	P_y	$-1.4268 \times 10^4 - 9.8278 \times 10^4 i$	$-1.4268 \times 10^4 - 9.8285 \times 10^4 i$

(a) WALL FOUNDATION

IMPEDANCE FUNCTIONS			
FREQUENCY	IMPEDANCE	SUBSTRUCTURE ANALYSIS (INTERBODY METHOD)	COMPLETE ANALYSIS
0.976 (Hz)	K_{xx}	$-1.6529 \times 10^4 + 1.4756 \times 10^4 i$	$-1.6557 \times 10^4 + 1.4757 \times 10^4 i$
	K_{xy}	$3.5528 \times 10^4 + 7.3444 \times 10^4 i$	$3.5443 \times 10^4 + 7.3451 \times 10^4 i$
	K_{yz}	$1.5350 \times 10^4 + 8.2758 \times 10^4 i$	$1.5350 \times 10^4 + 8.2759 \times 10^4 i$
1.953 (Hz)	K_{xx}	$-8.5043 \times 10^4 + 9.9483 \times 10^4 i$	$-8.5070 \times 10^4 + 9.9467 \times 10^4 i$
	K_{xy}	$-5.2351 \times 10^4 + 2.5087 \times 10^4 i$	$-5.2409 \times 10^4 + 2.5089 \times 10^4 i$
	K_{yz}	$1.4597 \times 10^4 + 2.1532 \times 10^4 i$	$1.4597 \times 10^4 + 2.1532 \times 10^4 i$
2.930 (Hz)	K_{xx}	$-2.0207 \times 10^4 + 1.3542 \times 10^4 i$	$-2.0201 \times 10^4 + 1.3539 \times 10^4 i$
	K_{xy}	$-3.0487 \times 10^4 + 6.9362 \times 10^4 i$	$-3.0471 \times 10^4 + 6.9347 \times 10^4 i$
	K_{yz}	$1.2810 \times 10^4 + 5.2944 \times 10^4 i$	$1.2811 \times 10^4 + 5.2836 \times 10^4 i$

EFFECTIVE INPUT

FREQUENCY	EFFECTIVE INPUT	SUBSTRUCTURE ANALYSIS (INTERBODY METHOD)	COMPLETE ANALYSIS
0.976 (Hz)	P_x	$3.4635 \times 10^4 - 4.192 \times 10^4 i$	$3.4634 \times 10^4 - 4.1920 \times 10^4 i$
	P_y	$2.570 \times 10^4 - 2.4055 \times 10^4 i$	$2.570 \times 10^4 - 2.4055 \times 10^4 i$
1.953 (Hz)	P_x	$-8.2248 \times 10^4 - 6.6273 \times 10^4 i$	$-8.2254 \times 10^4 - 6.6276 \times 10^4 i$
	P_y	$-4.8189 \times 10^4 - 3.4112 \times 10^4 i$	$-4.819 \times 10^4 - 3.4113 \times 10^4 i$
2.930 (Hz)	P_x	$-1.6339 \times 10^4 + 1.1180 \times 10^4 i$	$-1.6339 \times 10^4 + 1.1179 \times 10^4 i$
	P_y	$-7.2670 \times 10^4 + 6.5030 \times 10^4 i$	$-7.2669 \times 10^4 + 6.5026 \times 10^4 i$

(b) GROUPED PILE FOUNDATION