

分布質量モデルによる構造物－杭基礎・地盤連成系の地震応答解析

Earthquake Response Analysis of A Structure-Pile-Soil System by Distributed-Mass Models

北海学園大学工学部 正会員 佐々木康彦(Yasuhiko Sasaki)

北海学園大学大学院 ○学生員 白井 良明(Yoshiaki Shirai)

1. まえがき

兵庫県南部地震では構造物などに大きな被害を受け多数の死者を出した。被害の大きさに人々は大きなショックを受け、耐震技術の見直しが要求された。そのような背景から動的解析や耐震設計の研究が行われている。

近年は構造物－地盤連成系での解析が重要視されている。地盤については有限要素法を用い積極的な解析が行われている反面、構造物は質点系にモデル化されることが多い。構造物－地盤連成系の応答挙動を考えるには、全体系のモデルをできるだけ忠実に再現する必要があると考えている。

本研究では、構造物もできるだけ忠実に再現した構造物－杭基礎・地盤連成系の解析を汎用ソフト TDAPⅢを用いて行い、基本的な地震時の応答特性を検討した。

2. 解析モデルおよび解析手法

本研究では地盤との連成効果を探るために2つの解析モデルを用意した。構造物については図1に示す橋脚を用いる。図2に示すモデルは構造物－基礎・地盤の連成モデルであり連成系モデルとする。

構造物についてはできるだけ忠実に再現するために、床版と主桁部分を連続体でモデル化する。その際、上部構造の奥行きを考慮するために、上部構造物の重量と橋脚の重量の比から単位奥行き当りの重量を求め、床板と主桁の2層とし、床板に鉄筋コンクリートの単位体積重量を与え、上部構造の重量になるように主桁の単位体積重量を算定し表1に示すように分布質量系でモデル化した。また、要素には平面ひずみ要素を用いた。

地盤については5層の成層地盤を想定し、解析領域として、水平方向については対称軸に±30m、鉛直方向に20mとし、表2に示す物性値の地盤を想定し平面ひずみ要素を用いた。また、地盤には、側面および底面に粘性境界を用いて、エネルギーの反射をなくした。

基礎についてはフーチングに平面ひずみ要素を用い、鋼管杭は3×3=9本で、長さは10mとし材質がSKK400で外形が750mm、板厚が12mmの鋼管杭を用いた。要素には梁要素を用い、杭頭がフーチングに固定されているものとした。また、本研究では2次元解析を行うため、文献1)を参考に、断面積および断面2次モーメントを奥行き方向にある本数分を乗じる形でモデル化した。

図3に示すモデルは地盤連成を考慮に入れないモデルである。これは地盤の影響を連成系モデルと比較するために用意し、これを構造物単体モデルとする。なお鉄筋コンクリートについては単位体積重量 24.5 kN/m³、ヤング率 29.4 GPa、ポアソン比 0.2 を用いた。また、本研究

では材料の非線形は考慮していない。

解析は直接積分法で行い、Newmark β 法を用い、 $\beta = 0.25$ 、時間間隔は $\Delta t = 0.01$ 秒とした。減衰については、構造物は減衰定数 $h = 0.05$ 、基礎は $h = 0.1$ 、地盤は $h = 0.02$ とし、ひずみエネルギー比例型で計算し、等価減衰行列を作成した。なお、モードは30次まで考慮した。

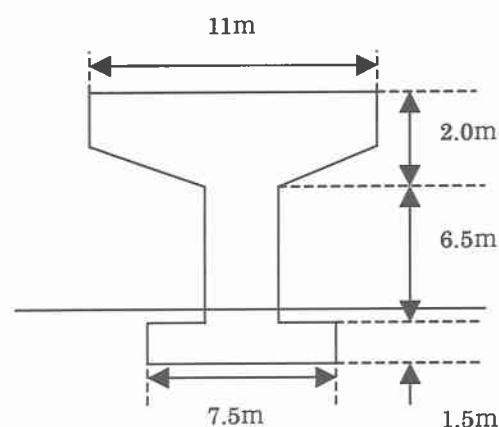


図1 橋脚の寸法

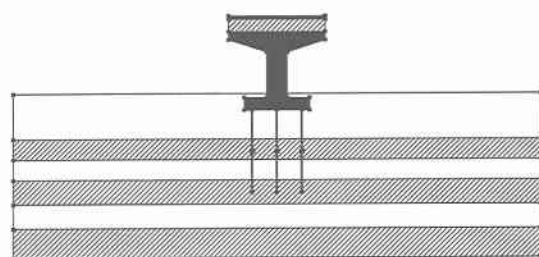


図2 構造物－杭基礎・地盤連成系モデル

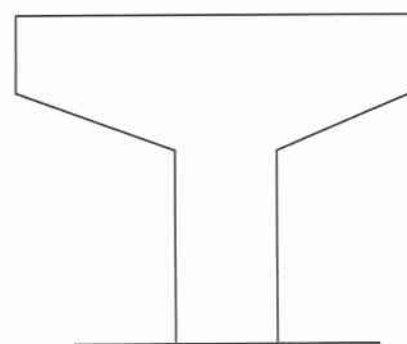
図3 構造物単体モデル
(完全剛体地盤)

表 1 上部構造の物性値

	単位体積重量 (k N/m)	ヤング率 (GPa)	ポアソン比	減衰定数
床版	24.5	29.4	0.20	0.02
主桁	111.3	206	0.20	0.02

表 2 地盤の物性値

	地盤の種類	深度 (m)	層厚 (m)	単位体積重量 (k N/m)	せん断波速度 (m/s)	ポアソン比	減衰定数
1	粘性土	8.0	8.0	16.7	171	0.47	0.02
2	砂質土	10.5	2.5	16.7	172	0.47	0.02
3	粘性土	13.5	3	16.7	171	0.47	0.02
4	砂質土	16.4	2.9	18.6	197	0.47	0.02
5	砂質土	20.0	3.6	18.6	295	0.47	0.02

3. 入力地震波

入力地震波については、図 4 に示す神戸海洋気象台で観測された水平加速度(N-S成分)を用いた。なお、この水平加速度は地表面での加速度である。構造物単体モデルについてはこれが入力地震動となるが、連成系モデルでは基盤面での入力水平加速度が必要となる。そこで、重複反射理論を用いて、基盤面での水平加速度を算定しそれを入力加速度とする。通常重複反射理論を用いて、基盤面での水平加速度を算定すると、基盤面での反射波を考慮にいたした加速度と入れない加速度があるが、本研究では、反射波を考慮に入れない加速度を用いる。

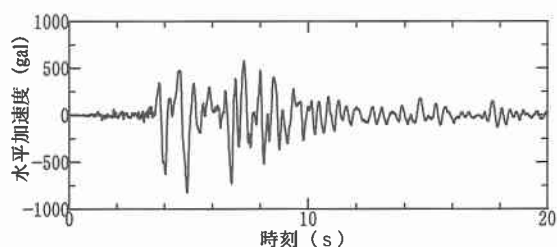


図 4 神戸海洋気象台観測加速度記録

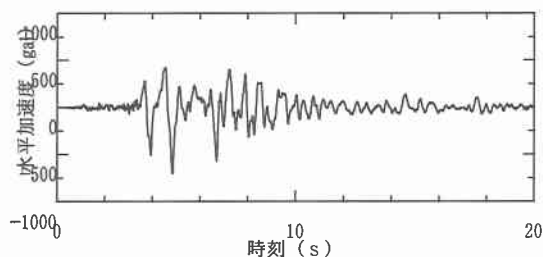


図 5 基盤面で算定された入力地震波

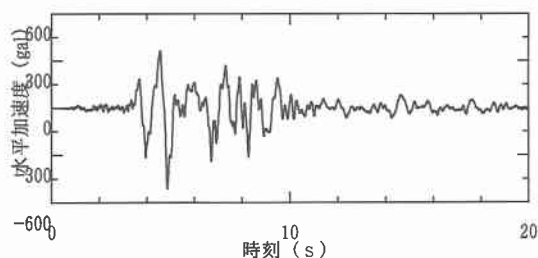


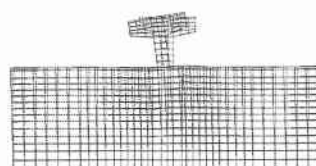
図 6 解析後の基盤面応答加速度

基盤面で算定された加速度を図 5 に示す。最大値は地表面で入力した地震波の 15% 程度の減少となった。これは、想定した地盤の層厚が薄く、極端な軟弱地盤ではないので、基盤面から地表面への増幅率がそれほど大きくなかったと推測できる。

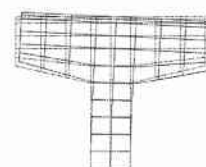
解析後の基盤面での応答加速度を図 6 に示す。基盤面で入力した加速度より最大値は 35% 程度の減少がみられる。これは、加速度入力後にエネルギーが底面から逸散された結果である。

4. 解析結果

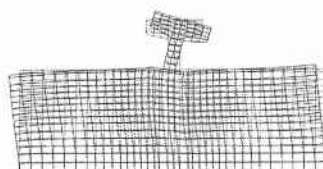
はじめに、各解析モデルの振動モード図を 3 次モードまで図 7 に示す。



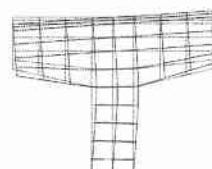
1 次モード：1.7Hz



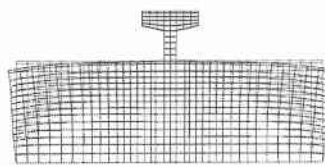
1 次モード：3.4Hz



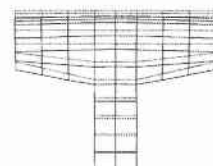
2 次モード：2.6Hz



2 次モード：19Hz

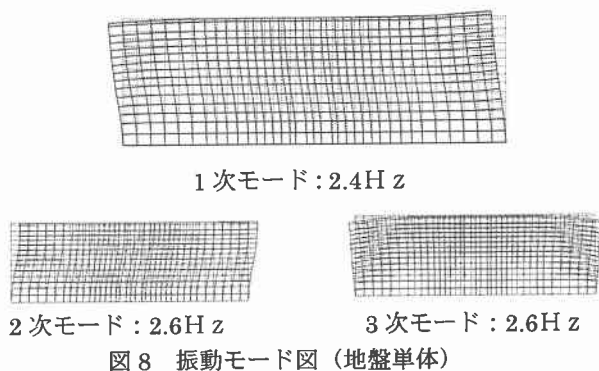


3 次モード：2.7Hz



3 次モード：29Hz

図 7 振動モード図（連成系モデル・構造物単体モデル）



構造物について着目すると、両解析モデルとも 1, 2 次モードは曲げ、3 次モードについては伸びとなった。図 8 に地盤単体での振動モードを示す。1, 2 次モードは水平動、3 次モードは上下動が卓越している。

次に、連成系モデルの対称軸上における主要な位置での応答特性を検討する。着目した位置での最大加速度と応答倍率を表 3 に示す、また、各位置での水平加速度の応答波形を図 9 に示す。

基盤面から橋脚基部までの応答倍率は 1.3 倍程度にしかならなかった。これは、図 5 に示す重複反射理論により算定された基盤面の入力加速度の最大値は 700 gal で基盤面から地表面に対して増幅率が低かったためだと推測できる。これに比べて、構造頂部での応答倍率は 2.4 倍になり、構造物での増幅が著しいことがわかる。

次に、応答波形の振動数特性を調べるためにスペクトル解析を行った。基盤面での卓越振動数は 1.2~2.5Hz 程度であった。これは、入力地震波の卓越振動数および地盤単体の 1 次モードが卓越した結果と考える。杭先端に関しても大きな相違はなかった。このことから、基盤面と杭先端では入力地震波の卓越振動数と地盤単体の 1 次モード成分が卓越していることがわかる。

杭頭および橋脚基部では卓越振動数はともに 1.5Hz であった。これは、地表面に近づくにしたがって連成系モデルの 1 次モードに近い振動数成分が卓越してくることを示している。

構造頂部でのフーリエスペクトルを図 10 に示す。他の 4 箇所と大きく違った点は、振動数が 1.4Hz, 1.9Hz にピークがあり、2 つの振動数が卓越している。また、高振動数成分はほとんど含まれていない。これは、地盤の振動モードの影響がなくなり 2.5Hz 程度の値が相対的に下がったためだと推測でき、構造頂部では連成系の 1 次モード成分が卓越したと考えられる。

以上の結果より対称軸上では基盤面、杭先端では地震波の卓越振動数と地盤単体のみの 1 次モード成分が卓越し、そこから対称軸上に波動が伝播されていくと、構造物の影響を受け、地盤の振動数の影響が少なくなり、最終的には連成系の 1 次モード成分が卓越していくと考えられる。

表 3 対称軸上の最大加速度と応答倍率

	最大加速度 (gal)	応答倍率
構造頂部	1252	2.4
橋脚基部	718	1.3
杭頭	723	1.4
杭先端	604	1.1
基盤面	529	—

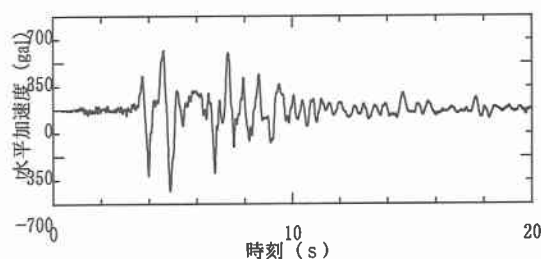
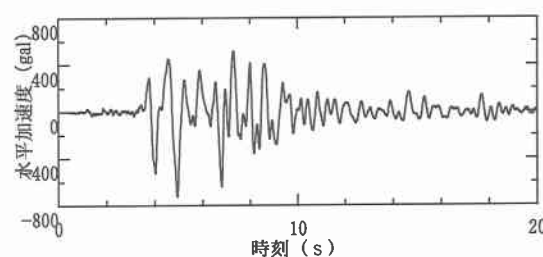
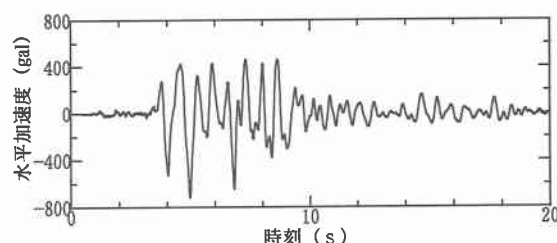
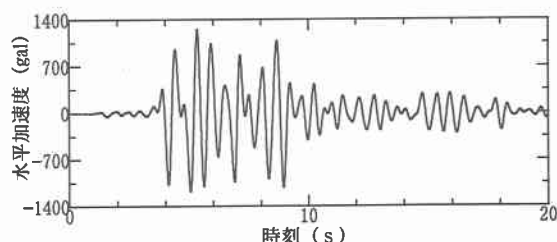


図 9 連成系モデルの主要な位置での応答加速度

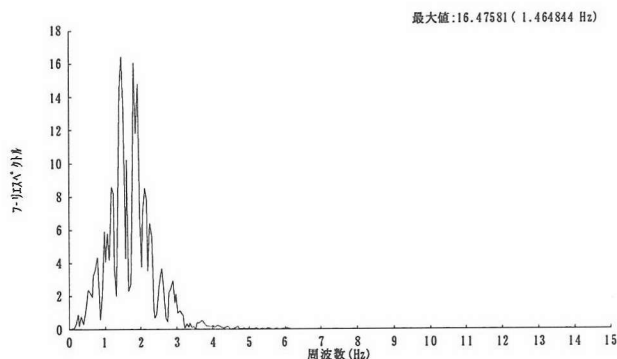


図 10 構造頂部でのフーリエ振幅スペクトル

地盤を完全剛体とした構造物単体モデルと地盤の連成を考慮した連成系モデルとの比較結果について述べる。図 11 は構造物単体モデルでの上部構造中心部の水平加速度である。その最大値は 1705gal で連成系モデルより 1.3 倍大きくなった。

先に述べた連成系モデルにおける振動数特性との比較のために、構造物単体モデルにおける上部構造での水平加速度のフーリエスペクトルを図 12 に示す。卓越振動数が 3.4Hz にあり、構造物単体モデルの 1 次モードに対応している。

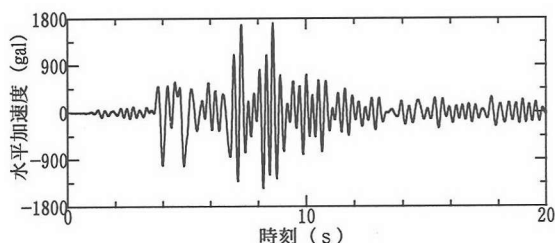


図 11 上部構造中心部の水平加速度

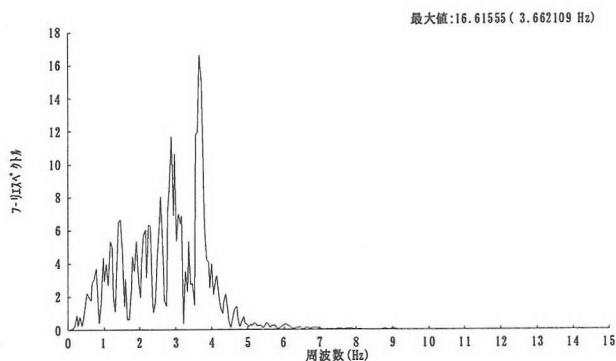


図 12 上部構造中心部でのフーリエ振動スペクトル

また本研究では地震動を水平方向のみに入力したが、両解析モデルともに上部構造最端部で比較的大きな鉛直加速度が発生していた。図 13 に連成系モデルの場合の鉛直加速度を示す。鉛直加速度の最大値は 600 gal であった。なお、その応答性状は同じ位置での水平加速度と類似していた。

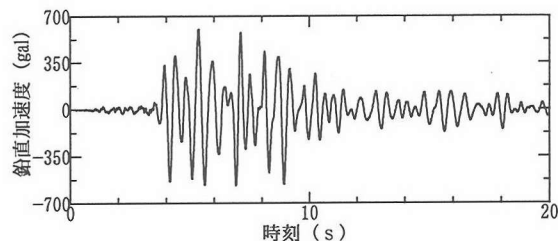


図 13 上部構造最端部の鉛直加速度

5. まとめ

本研究では、実物をできるだけ忠実に再現した構造物—杭基礎—地盤連成系モデルと構造物単体モデルとの比較や、基本的な位置での応答特性に着目し、地震応答解析を行った。

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 解析後の基盤面における水平加速度は粘性境界によりエネルギーが逸散するため、基盤面入力加速度よりも最大値が小さくなる。
- 2) 基盤面では入力地震動の卓越振動数と地盤単体の 1 次モードに対応する振動数成分が卓越する。波動が構造物に向けて伝播していくことにより、連成系モデルの 1 次モードに対応した振動数成分が卓越していく。
- 3) 構造物単体モデルでは 1 次モードに対応する振動数成分だけが卓越していた。

今後の課題として、構造物、基礎、地盤の非線形性を考慮すること、さらには入力動として衝撃的な波形を用い、基盤面からの波動伝播特性を解明することを考えている。

参考文献

- 1) 葛西 昭、河村 康文、宇佐美 勉：鋼製橋脚—基礎—地盤連成系の大地震挙動、構造工学論文集 V o 146.A, pp.745-756、2000.
- 2) 土木学会：動的解析の方法、動的解析と耐震設計第 2 巻、(株)技報堂出版、1999.
- 3) 日本道路協会：道路示方書・同解説 (V 耐震設計編)、丸善、2002.
- 4) (株)アーク情報システム：TDAP III 理論説明書 Ver 2.10、2000.
- 5) 日本建築学会：入門・建物と地盤との動的相互作用、丸善、1999.
- 6) 土木学会地震工学委員会：実務の先輩たちが書いた土木構造物の耐震設計入門、丸善、2002.