

2次元有限要素法による地盤・杭・構造物系の地震応答解析における地盤の奥行き方向解析幅に関する一考察

淵本 正樹 田蔵 隆
(技術研究所) (技術研究所)

Problems on Earthquake Response Analysis of Soil-Pile-Structure System Using Two-Dimensional Finite Element Method

by Masaki Fuchimoto and Takashi Tazoh

Abstract

With the advances in the analytical procedures, a two-dimensional finite element method taking into account nonlinear behavior of ground is frequently adopted in the analysis of the seismic response soil-pile-structure systems in recent years. Unfortunately, the differences between results obtained from two-dimensional analysis and those obtained from three-dimensional analysis remain to be clarified. In two-dimensional analysis, it is crucial to define the analytical width of the soil elements in the direction normal to the analytical plane. This is generally defined as being identical in length to the width of the footing in the direction normal to the analytical plane. However, there is little knowledge as to whether the results obtained from the two-dimensional analysis based on this assumption are overestimated or underestimated, compared with those obtained from the three-dimensional analysis. This paper discusses a parametric study executed to examine the appropriate width of soil elements in two-dimensional analysis by varying the width of soil elements in the two-dimensional analysis. Reasonable results were obtained from the analysis where the width adopted was identical to the length of the footing in the case that the ground behaves elastically, however it was not possible to identify the suitable width of soil elements in the analysis taking into account liquefaction of ground.

概 要

地盤の非線形性、あるいは液状化を考慮した杭基礎・地盤・上部構造物系の地震応答解析が盛んに行われているが、2次元(有限要素法)解析と3次元解析の差異に関する議論はほとんどなされていない。2次元解析で問題になるのは、地盤の奥行き方向解析幅 T_g をどのように定めるかである。一般にはフーチングの奥行き幅 T_f が用いられているが、このことが杭の断面力応答にとって設計的に安全側の値となるのか、このことさえも明らかにされていない。本研究はこの問題に対する基礎的な検討を目的として、きわめて簡単な杭基礎・地盤・上部構造物系のモデルにおける地盤の奥行き方向解析幅 T_g をパラメータとして、それがどの程度であれば、2次元解析の応答が3次元解析の結果に近くなるのか、数値シミュレーションを試みた。その結果、線形解析では慣用的に用いられている方法でも3次元解析結果と同等の結果が得られるものの、非線形解析では地盤の奥行き方向解析幅をフーチングの奥行き幅の2倍としたケースで3次元解析結果との一致度が高いことが分かった。しかし、有効応力解析の場合には3次元解析結果との一致度は低く、杭体に生ずる曲げモーメントを過大に評価する可能性があることが分かった。

§ 1. はじめに

地盤・杭・構造物系は3次元的な拡がりを持つことから、3次元モデルで表現して解析することが理想的である。しかし、一般に3次元解析に要する演算時間ならびに計算機の容量は非常に膨大となり、実務においては3次元的な挙動が十分に表現できる2次元モデルの作成方法の確立が望まれている。

2次元有限要素法により地盤・杭・構造物系を解析する場合、地盤の奥行き方向解析幅をどのように定

めるかが問題となる。一般にはフーチングの奥行き幅を地盤の奥行き方向解析幅としているが、適切な地盤の奥行き方向解析幅を定める明確な基準はない。

既往の研究として例えば、大平ら¹⁾、横山ら²⁾、船原ら³⁾の事例があるが、地震応答解析における地盤の奥行き方向解析幅に対する明快な結論は導き出されていない。

2次元解析と3次元解析の結果の違いはどこから発生するのか。上部構造物の加速度応答が同じであれば、2次元解析と3次元解析で上部構造物の慣性

力に差異は生じない。地盤変形による杭の応答を考えた場合、2次元解析における地盤の奥行き方向解析幅の違いで杭に作用する外力と杭を支持する地盤反力は変化する。これらの影響を受け、上部構造物の加速度応答は変化することになり、地震応答の問題は杭頭に静的な集中荷重を作用させた場合のように、地盤反力と等価にするような単純な問題に帰着させることはできない。

本研究では構造物の加速度と変位および杭頭の曲げモーメントに対する評価で、地盤の奥行き方向解析幅をフーチング幅と同じとした場合に3次元解析結果とどの程度の差異が発生するかを中心に基礎的な検討を行った。検討対象として2種類の地盤と2種類の構造物を考え、地盤の奥行き方向解析幅をパラメータにとり、(1)地盤を弾性体とした場合、(2)地盤を全応力状態の非線形モデルで表現して解析した場合、(3)地盤の液状化を考慮した場合の3種類の数値解析を実施し、2次元解析モデルの地盤の奥行き方向解析幅と3次元解析結果との関係を考察した。

§ 2 . 検討対象と解析条件

2.1 検討対象の概要

地盤・杭・構造物系に対する3次元解析と2次元解析による動的応答の基本的性質を理解するために、図-1に示すような単純な構造系を対象に検討を行った。

上部構造物はせん断変形型の1質点ばね系モデルとし、2列×2列の4本の基礎杭（杭径0.6m、杭長18m）によって支持されている。フーチングの幅は4m、奥行き幅は4m、深さは2mであり、剛な構造とした。上部構造物の慣性力の大きさによる影響を検討するため、質点の重量を1.4MN（構造物I）と4.2MN（構造物II）とした場合について考えることとした。固有周期はいずれも0.5sとなるようにせん断ばね定数を定めた。上部構造物と杭は弾性体と仮定した。また、地盤は均質一様地盤モデル（地盤A：卓越周期0.8s）と2層地盤モデル（地盤B：卓越周期0.5s）について考えた。

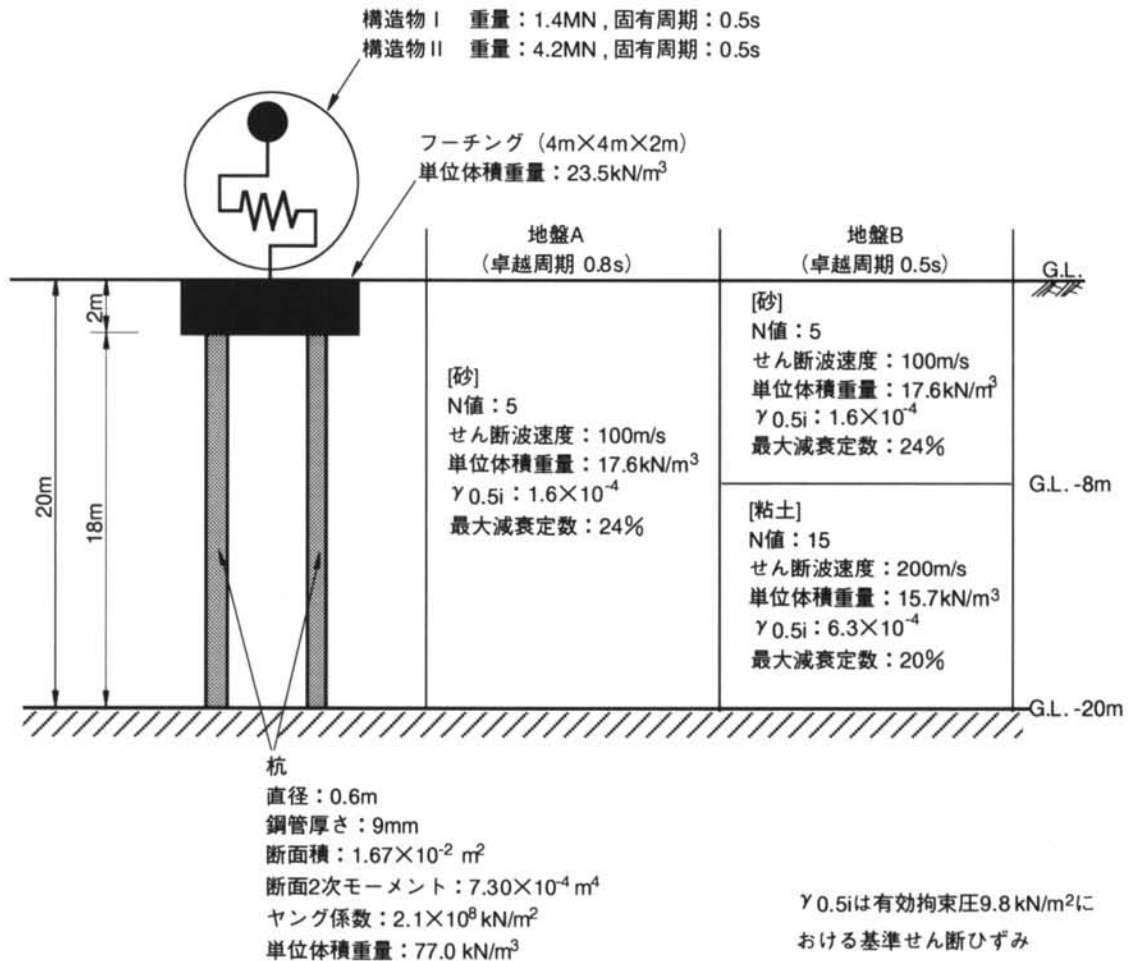


図-1 地盤・杭・構造物系モデル

2.2 有限要素法解析モデル

図-2(a)(b)に有限要素法解析モデルを示す。2次元解析では、幅160m、深さ20mの地盤を4節点平面ひずみ要素によりモデル化した。3次元解析では、幅160m、奥行き40m、深さ20mの範囲を1/2モデルとして8節点立体要素によりモデル化した。1/2モデルであるため、3次元モデルでは奥行き80mの解析に相当する。解析モデルの底面境界は完全固定とした。また側方境界には1次元の自由地盤モデルを取り付け、2次元および3次元解析モデルの境界部で地盤震動が等しくなるようにした。

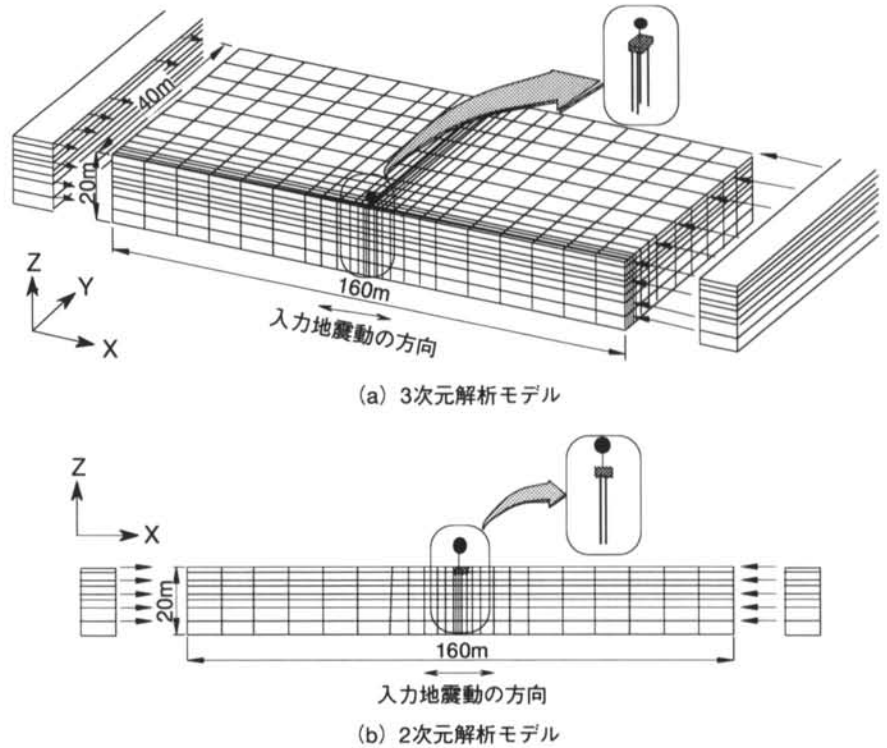


図-2 有限要素法による解析モデル

2.3 解析パラメータと解析ケース

地盤の奥行き方向解析幅が2次元解析の結果に与える影響を分析するために、地盤の奥行き方向解析幅をパラメータとした検討を実施する。

図-3に地盤の奥行き方向解析幅をパラメータとした2次元解析モデルの概念図を示す。地盤の奥行き方向解析幅が大きいほど地盤の影響が強くなり、杭の挙動は地盤の挙動に大きく支配されるようになる。

通常、杭基礎の設計では群杭効率などの観点から、杭間隔を杭径Dの2.5倍とするのが一般的である。ここでは図-4に示すようにフーチング幅の標準的寸法を7Dと考え、直径0.6mの杭に対するフーチング幅の基本寸法を4mとした。地盤の奥行き方向解析幅 T_g はフーチング幅の1/4倍(モデル1： $T_g=1m$)、1/2倍(モデル2： $T_g=2m$)、1倍(モデル3： $T_g=4m$)、2倍(モデル4： $T_g=8m$)、4倍(モデル5： $T_g=16m$)とする5つの2次元解析モデルを設定した。

これら5つの2次元解析モデルと3次元解析モデルに対して、地盤を弾性体と仮定した解析(以下、「線形解析」と記す)、修正 Ramberg - Osgood モデルを用いて地盤の非線形性を考慮した解析(以下、「非線形解析」と記す)、おわんモデル⁹⁾を適用して液状化を考慮した解析(以下、「有効応力解析」と記す)を実施した。

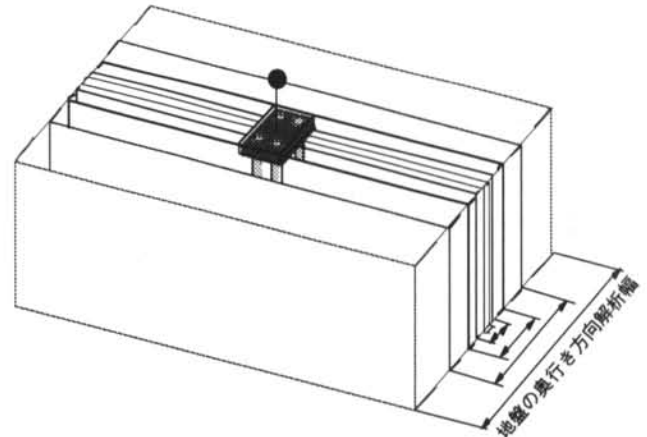


図-3 5つの2次元解析モデルの概念図

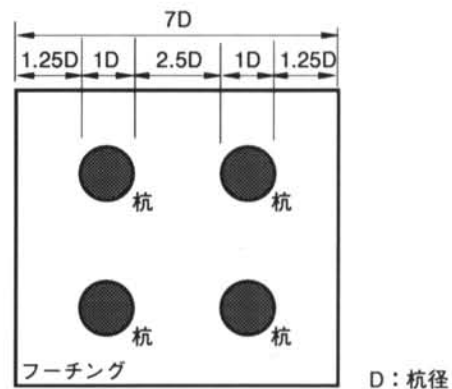


図-4 フーチング幅の基本寸法

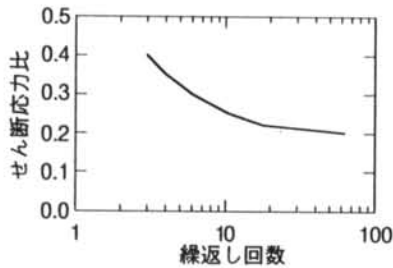


図-5 砂地盤の液状化強度曲線
(有効拘束圧: 9.8kN/m²)

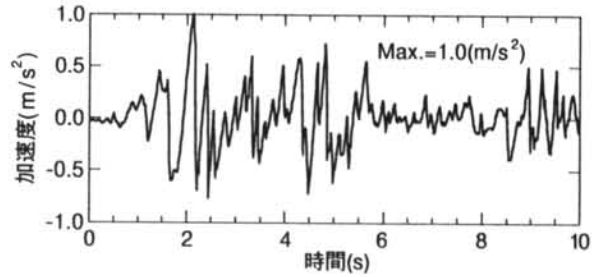


図-6 入力地震動

2.4 地盤の減衰と液状化パラメータ

線形解析では地盤の減衰として Rayleigh 減衰を仮定し、地盤の1次モードと2次モードに対して減衰定数が10%となるように係数を決定した。非線形解析および有効応力解析については、履歴減衰のみを考慮した。

図-5に有効応力解析で用いた砂層の液状化強度曲線を示す。これは9.8kN/m²の有効拘束圧が作用した状態での繰返し回数とせん断応力比の関係である。

2.5 入力地震動

入力地震動として、El Centro 波のNS成分の10秒間の加速度記録を用いた。図-6に入力地震動の時刻歴波形を示す。入力地震動の最大値は100Galであり、入力方向は図-2に示すX方向である。

§3. 固有値解析

上部構造物の1次モードが卓越するモードの固有周期を表-1に示した。

地盤Aの場合、2次元解析による構造物の1次固有周期は、地盤の奥行き方向解析幅をフーチング幅の4倍(Tg=16m)としたモデル5で3次元解析結果との一致度が高い。ただし、地盤の奥行き方向解析幅をフーチング幅と同じとしたケースでも、3次元解析結果との差異は5%以下である。地盤Bの場合は構造物の質量によらず、地盤の奥行き方向解析幅をフーチング幅と同じとしたモデル3(Tg=4m)で、2次元解析の結果が3次元解析結果と一致する。

地盤の奥行き方向解析幅をフーチング幅より小さく設定したケースでは3次元解析との差異が顕著となる傾向にある。また、構造物Iよりも質量が大きい構造物IIの方が、地盤の奥行き方向解析幅の変化に

解析モデル	構造物の1次固有周期 (s)			
	地盤A 構造物I	地盤A 構造物II	地盤B 構造物I	地盤B 構造物II
モデル1 (Tg= 1m)	0.54 (1.07)	0.60 (1.19)	0.53 (1.05)	0.59 (1.12)
モデル2 (Tg= 2m)	0.52 (1.04)	0.56 (1.10)	0.52 (1.02)	0.55 (1.05)
モデル3 (Tg= 4m)	0.51 (1.02)	0.53 (1.05)	0.51 (1.00)	0.53 (1.00)
モデル4 (Tg= 8m)	0.51 (1.01)	0.52 (1.02)	0.51 (0.99)	0.51 (0.98)
モデル5 (Tg=16m)	0.50 (1.00)	0.51 (1.01)	0.50 (0.99)	0.51 (0.97)
3次元解析	0.50 (1.00)	0.51 (1.00)	0.51 (1.00)	0.52 (1.00)

()内は3次元解析結果に対する比

表-1 地盤・杭・構造物系の固有値解析の結果

伴う構造物の1次固有周期の変動が大きいことが分かる。

自由地盤の1次モードが卓越する固有周期は、2次元と3次元の両解析モデルとも、地盤Aの場合は0.5s、地盤Bの場合は0.8sであり、自由地盤の1次元解析結果と一致している。

§4. 線形解析

2次元解析と3次元解析から得られた応答波形の一致度を定量的に把握するため、式(1)に示すJ値⁵⁾を用いて比較することとした。

$$J = \int_{t_0}^{t_1} \{x_{3D}(t) - x_{2D}(t)\}^2 dt / \int_{t_0}^{t_1} \{x_{3D}(t)\}^2 dt \quad (1)$$

ここで、 x_{3D} と x_{2D} はそれぞれ3次元解析と2次元解析から得られた応答波形で、 t_0 と t_1 はそれぞれ波形の一致度を判定しようとする区間の開始時刻と終了時刻である。J値が小さいほど比較する2つの波形の一致度が高いことを示し、完全に一致する場合にはゼロとなる。本検討では t_0 と t_1 をそれぞれ0sと10sとし、全解析時間を対象とした。計算の時間間隔 dt は0.01sである。

一例として図-7に地盤Bで構造物IIのモデルを

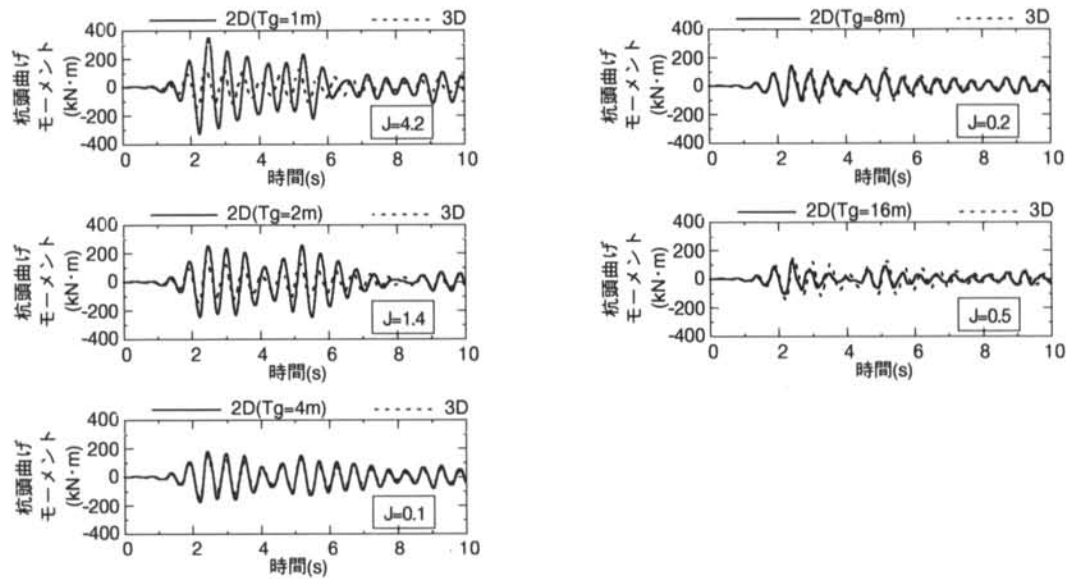


図-7 応答波形の一致度とJ値の関係

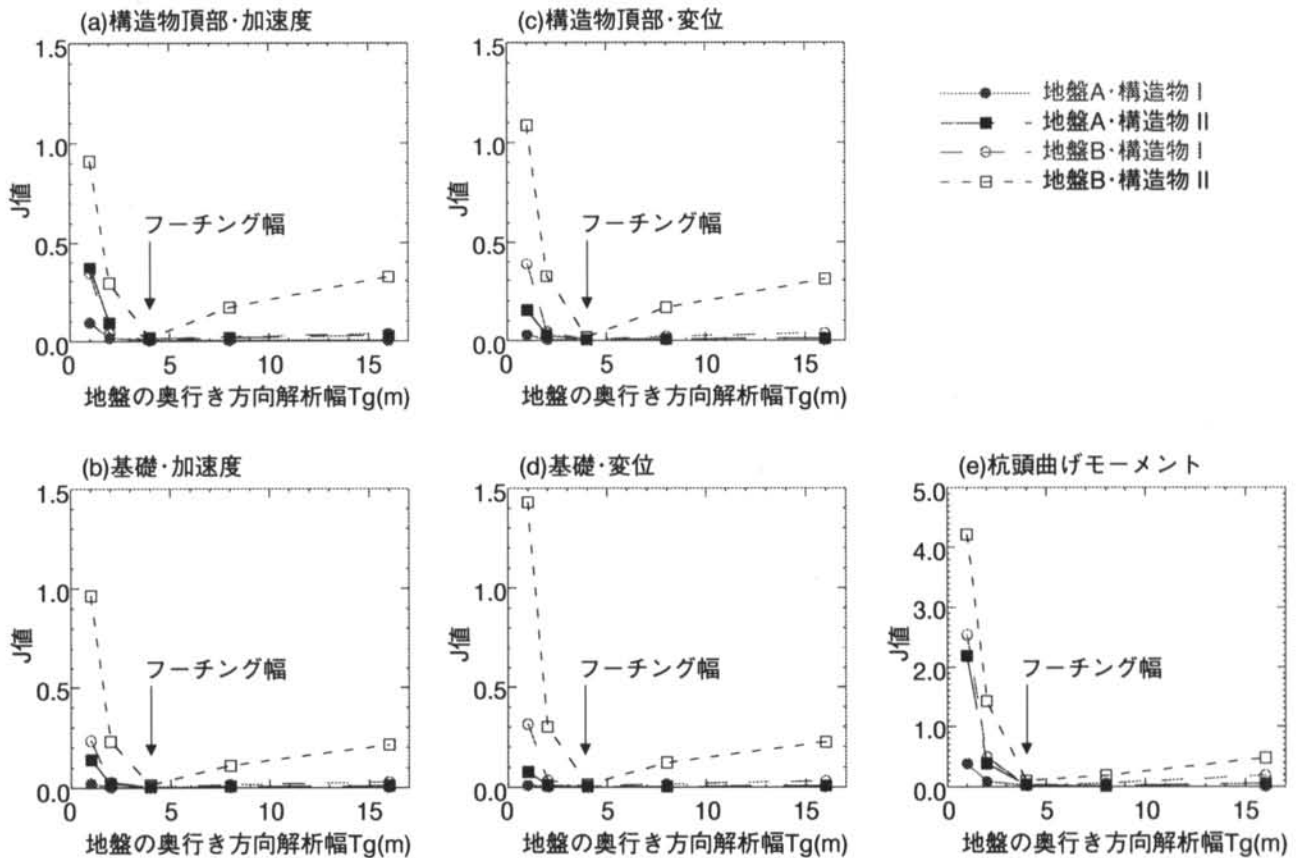


図-8 J値と地盤の奥行き方向解析幅の関係（線形解析）

対象とする解析から得られた杭頭曲げモーメントの波形とJ値を示す。各図の実線は2次元解析の結果であり、破線が3次元解析の結果である。J値が0.1以下であれば、2つの波形の一致度は非常に高いと判断できる。

図-8に構造物頂部および基礎における加速度と変位、さらに杭頭曲げモーメントのJ値と地盤の奥行き方向解析幅の関係を示す。加速度、変位、杭頭曲げモーメントのいずれの波形に注目した場合でも、地盤の奥行き方向解析幅をフーチング幅と同じとし

たモデル3でJ値は最小となっている。またモデル3のJ値は0.1以下であり、2次元解析と3次元解析による応答波形は、ほぼ一致することが分かる。

2つの構造物と2つの地盤モデルを組み合わせた4つの地盤・杭・構造物系の解析結果から、これまで慣例的に行われていた地盤の奥行き方向解析幅をフーチング幅と等しくとる方法で2次元解析モデルを作成した場合でも、地盤を弾性体と仮定するならば、3次元解析結果に近い応答が得られることが分かった。

§ 5. 非線形解析

本章では、地盤のせん断ひずみに依存する非線形性を考慮した地震応答解析を行う場合の最適な地盤の奥行き方向解析幅について考察する。

図-9に構造物頂部および基礎における加速度、変位ならびに杭頭曲げモーメントのJ値と地盤の奥行き方向解析幅の関係を示す。加速度、変位、杭頭曲げモーメントのいずれの波形に注目した場合でも、

地盤の奥行き方向解析幅をフーチング幅の2倍としたモデル4 ($T_g=8m$)でJ値は最小となる。線形解析の場合には、地盤の奥行き方向解析幅をフーチング幅とすることでJ値を0.1程度とすることができたが、非線形解析では、J値が0.1以下となることは少なく、2次元モデルと3次元モデルによる応答解析結果の一致度は線形解析の場合ほど高くない。

図-10に最大曲げモーメントの深度分布を示す。地盤Aの場合、上部構造物モデルがI、IIのいずれであっても、同様の傾向を示している。すなわち、杭頭付近では地盤の奥行き方向解析幅をフーチング幅の2倍($T_g=8m$)あるいは4倍($T_g=16m$)としたモデルで3次元解析結果に近い結果が得られるが、杭先端付近では地盤の奥行き方向解析幅をフーチング幅の2倍としたモデル4 ($T_g=8m$)の結果が3次元解析の結果とほぼ一致する。

地盤Bの場合、構造物Iでは地盤の奥行き方向解析幅をフーチング幅と同じにしたモデル3 ($T_g=4m$)で3次元解析結果との一致度が高く、構造物IIでは地盤の奥行き方向解析幅をフーチング幅の2倍としたモデル4 ($T_g=8m$)の結果が3次元解析による深度分布に

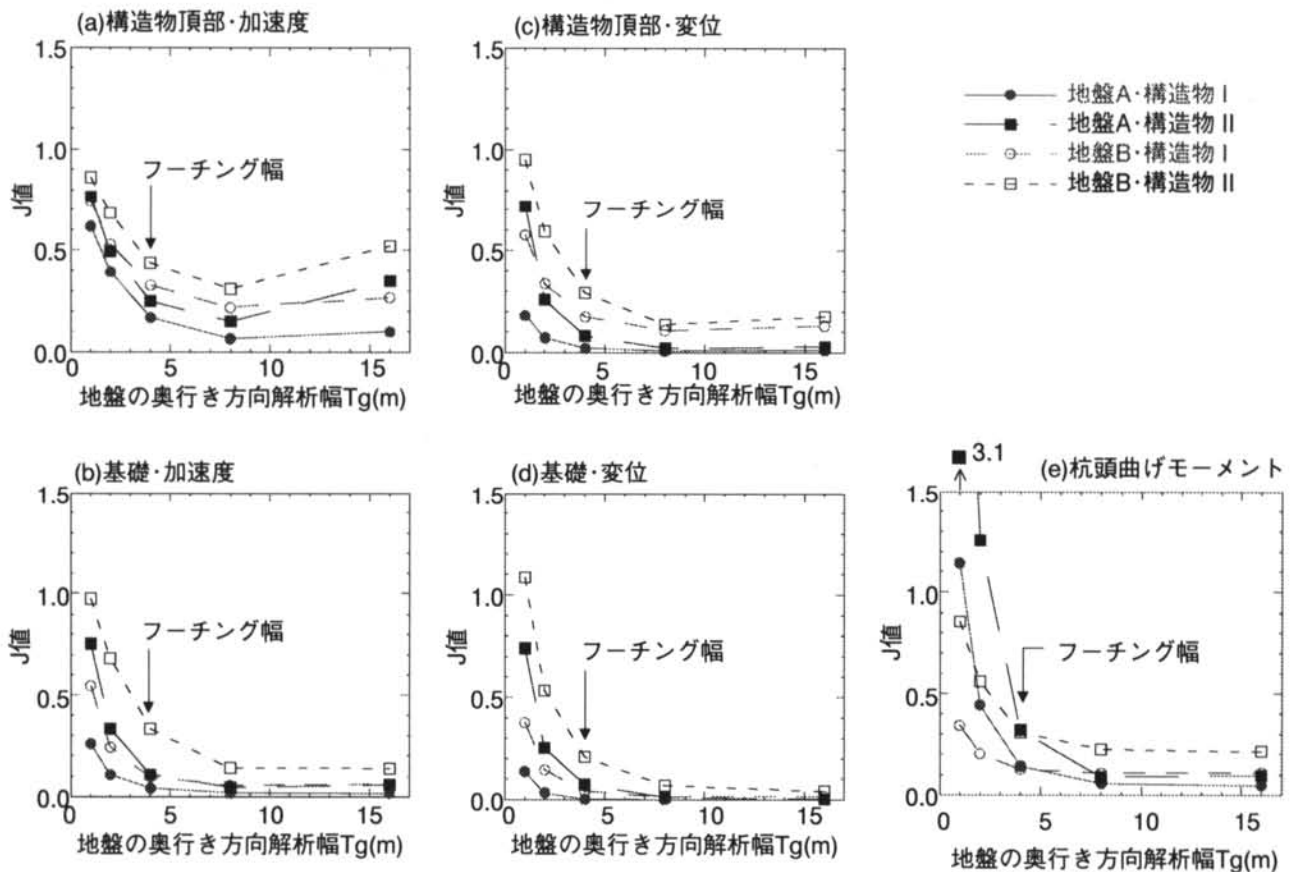
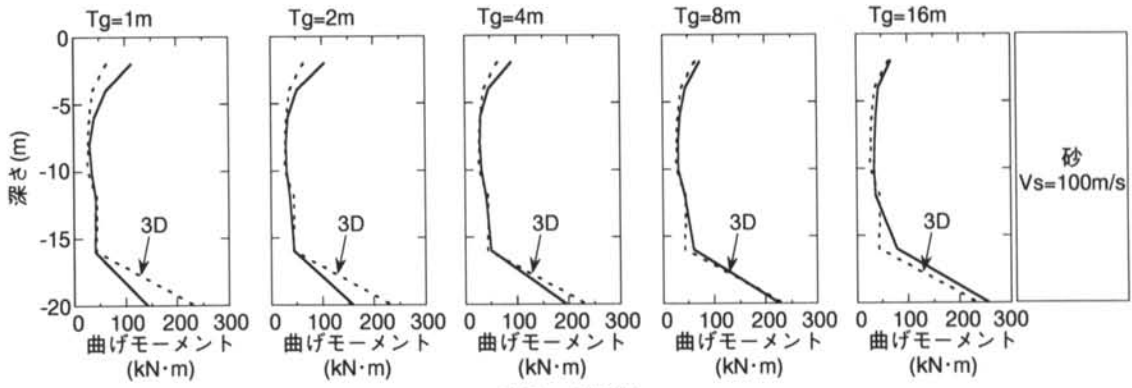
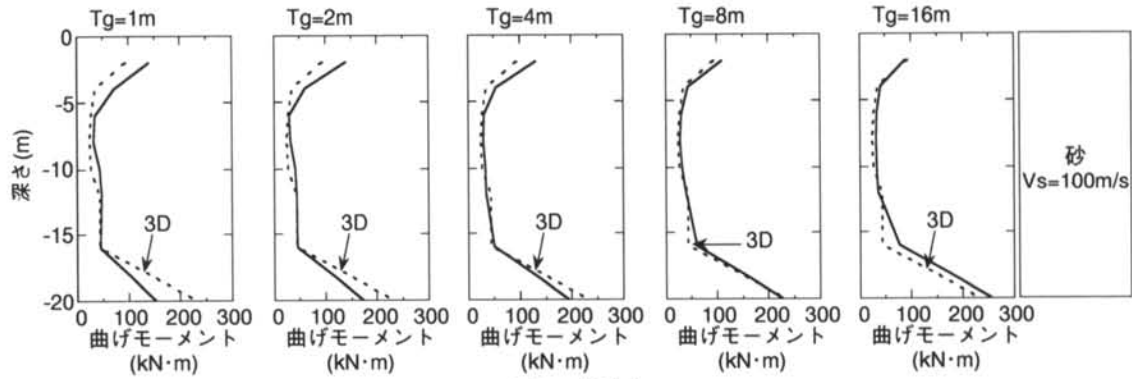


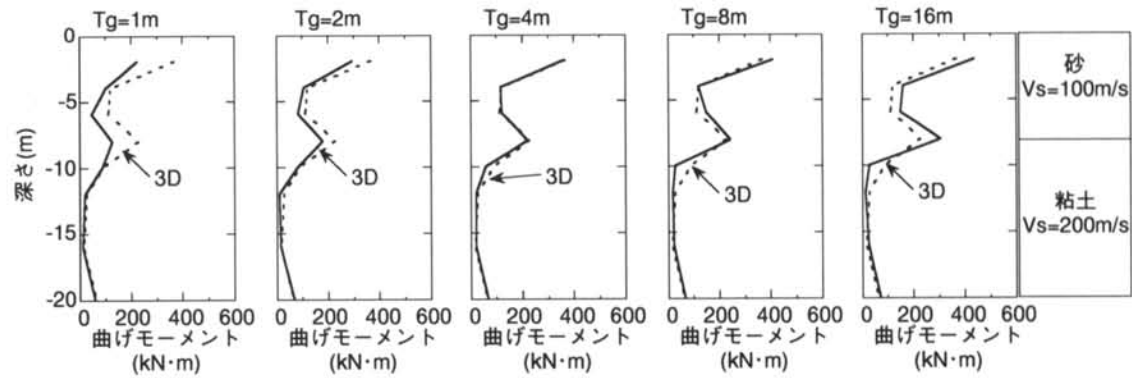
図-9 J値と地盤の奥行き方向解析幅の関係 (非線形解析)



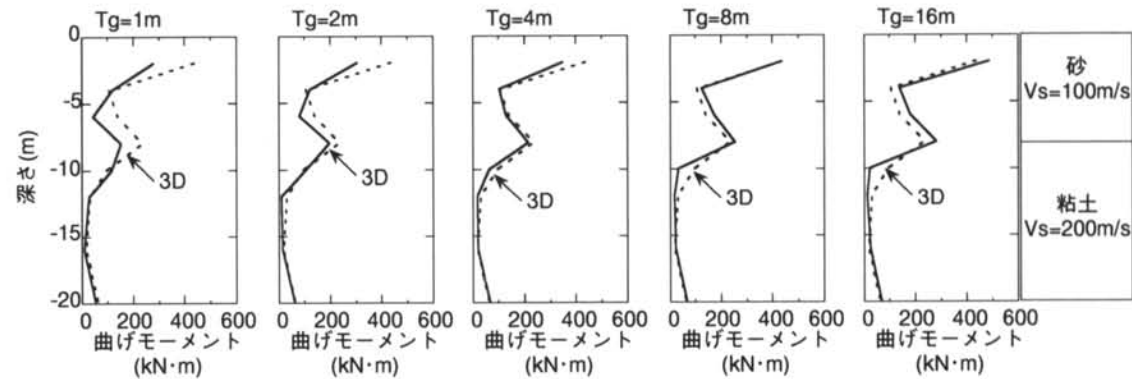
(a) 地盤A・構造物 I



(b) 地盤A・構造物 II



(c) 地盤B・構造物 I



(d) 地盤B・構造物 II

図-10 杭の最大曲げモーメントの深度分布 (非線形解析)

最も近い。J値による杭頭曲げモーメントの比較では、地盤の奥行き方向解析幅を大きくするほど一致度が高くなる傾向にあったが、最大値の分布としては、地盤の奥行き方向解析幅がフーチング幅よりも大きくなると、GL-8mの地層境界以浅で曲げモーメントを過大に評価する結果となっている。地盤の奥行き方向解析幅が大きくなるほど、より大きな質量をもつ地盤の震動が杭に対して強制変形として作用したためと考えられる。

杭頭曲げモーメントの最大値に注目した場合、地盤の奥行き方向解析幅をフーチング幅の2倍としたモデル4(Tg=8m)で3次元解析に最も近い値が得られるとは限らず、地盤モデルがAで構造物モデルはIIの結果では20%程度の差が生じている。また、地盤の奥行き方向解析幅をフーチング幅と同じにしたモデル3(Tg=4m)では3次元解析結果との差は最大で40%に達している。

非線形解析による検討の結果をまとめると以下のように書ける。

- ・ J値による応答波形の比較では上部構造物の慣性力の大小、地盤条件によらず、地盤の奥行き方向

析幅をフーチング幅の2倍とした2次元解析結果が3次元解析の結果に最も近いことが分かった。

- ・ 最大応答値を比較した場合、地盤の奥行き方向解析幅をフーチング幅と同じとする手法では、3次元解析結果との差異は40%に達する場合がある。また地盤の奥行き方向解析幅をフーチング幅と2倍とした場合でも、3次元解析との一致度は必ずしも十分ではない。

§ 6. 有効応力解析

本章では、地盤の液状化を考慮した場合、2次元モデルにおける地盤の奥行き方向解析幅が解析結果に及ぼす影響と3次元解析結果との関係を考察する。

構造物頂部および基礎における加速度と変位そして杭頭曲げモーメントのJ値と地盤の奥行き方向解析幅の関係を図-11に示す。どの応答波形に注目した場合でも、J値と地盤の奥行き方向解析幅との間に一定の傾向は認められない。またJ値が0.1以下となるケースも少なく、2次元解析結果と3次元解析

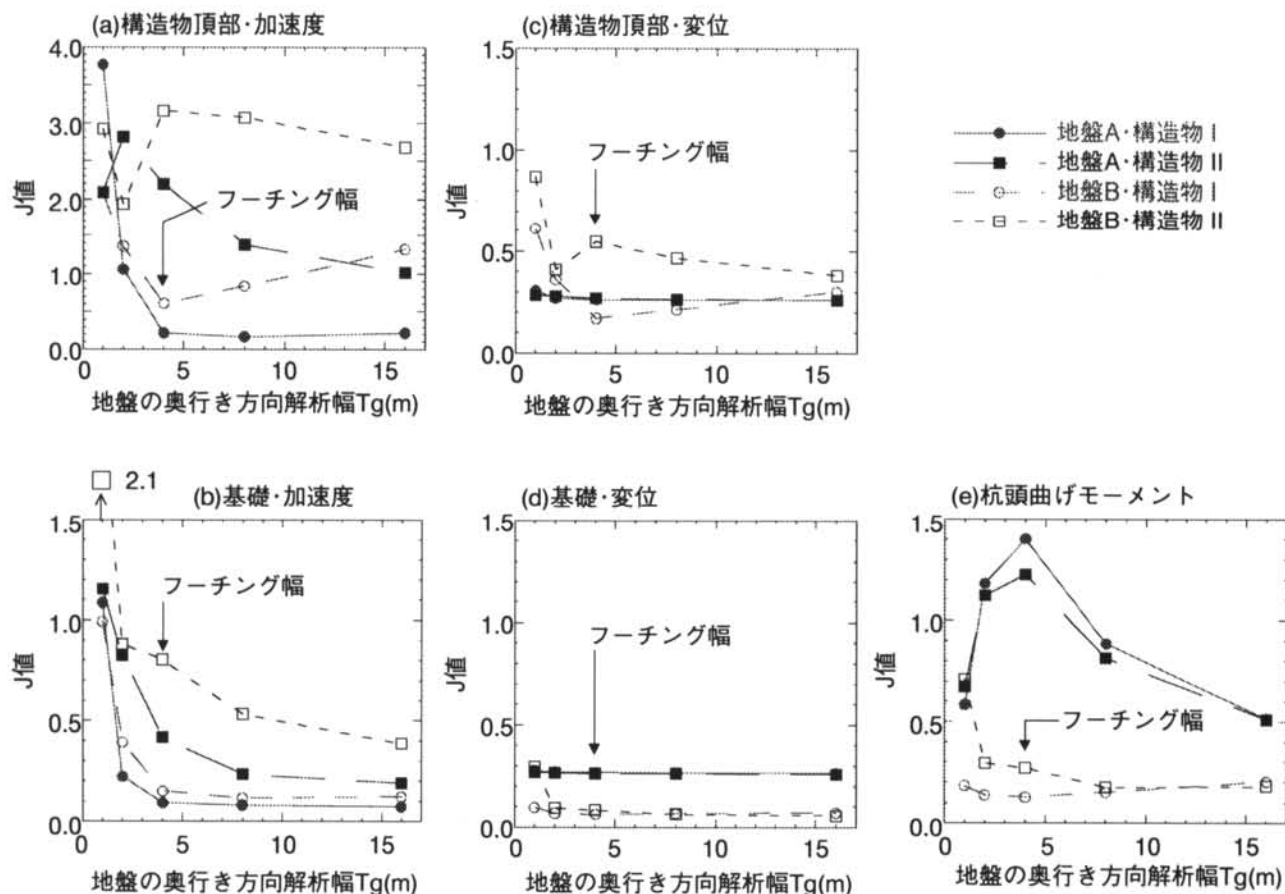


図-11 J値と地盤の奥行き方向解析幅の関係（有効応力解析）

結果の一致度は低いことが分かる。特に杭頭曲げモーメントのJ値が0.1以下となることはなく、地盤Aと地盤Bでは全く異なる傾向を示している。

一例として図-12に地盤モデルをB、上部構造物モデルをIIとした解析による構造物頂部の加速度と杭間の地盤(GL-6~8m)の過剰間隙水圧比の波形を示す。過剰間隙水圧比が上昇をはじめる2s以降で3次元解析と2次元解析の加速度応答は大きく異なることが分かる。図-13は地盤モデルがB、上部構造物モデルがIIの場合の過剰間隙水圧比の最大値分布を示したものである。2次元解析の結果はいずれも、3次元解析による結果とは異なる分布状態となっている。また、地盤の奥行き方向解析幅を小さく

とるほど過剰間隙水圧比が0.95を超える領域が広くなることが分かる。

地盤の奥行き方向解析幅が小さいモデルでは地盤の剛性は相対的に小さく評価されるため、構造物近傍の地盤は構造物慣性力により大きく変形し、過剰間隙水圧は大きくなる。おわんモデルでは過剰間隙水圧に基づき地盤の剛性を算定しているため、過剰間隙水圧の時間的な変化と分布状態が異なる場合、地盤の剛性の評価には顕著な差異が生ずることとなる。この結果、2次元解析と3次元解析により得られた構造物頂部の加速度応答波形には、非線形解析の場合以上に大きな差異が生じたものと考えられる。

図-14に杭の最大曲げモーメントの深度分布を示

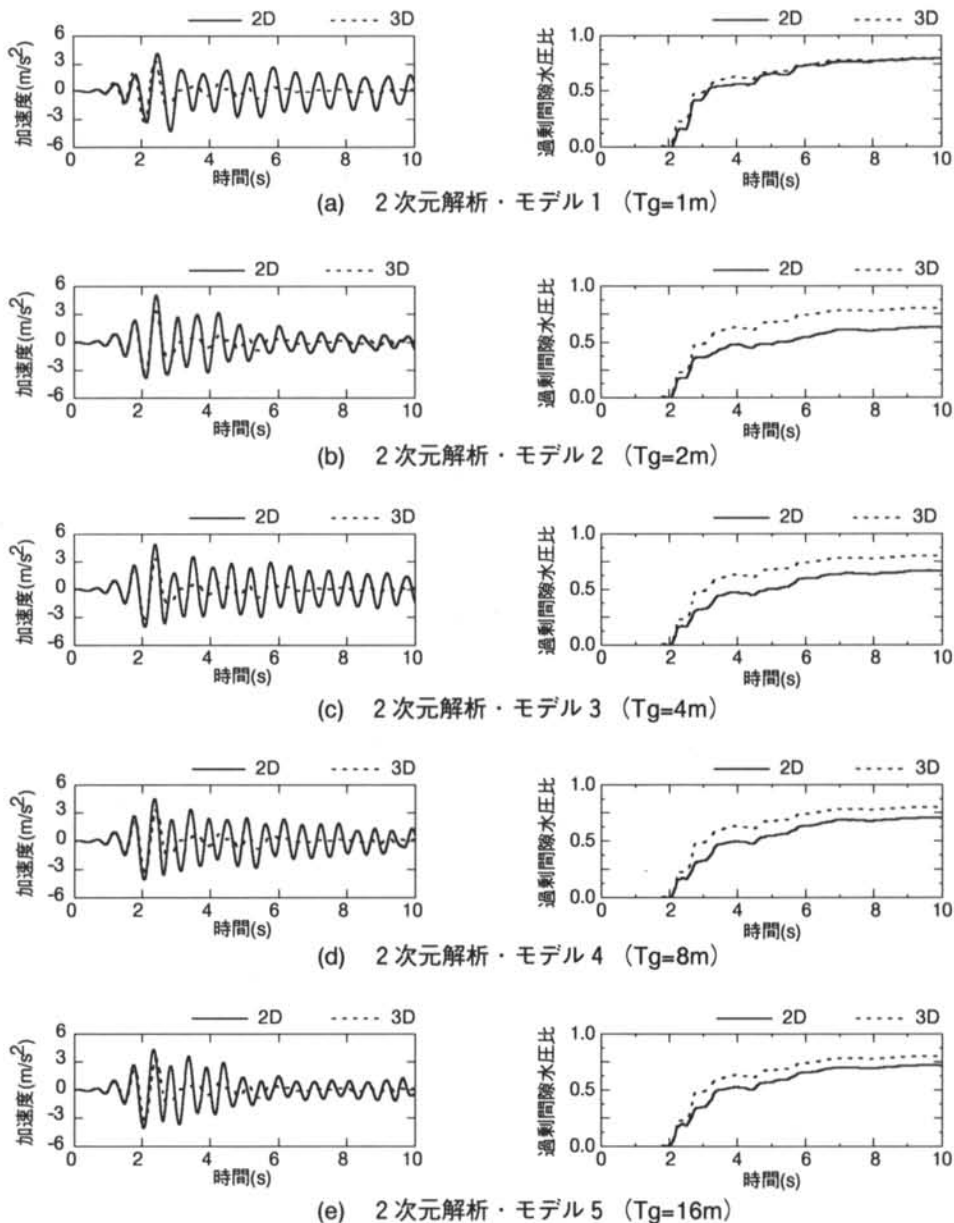
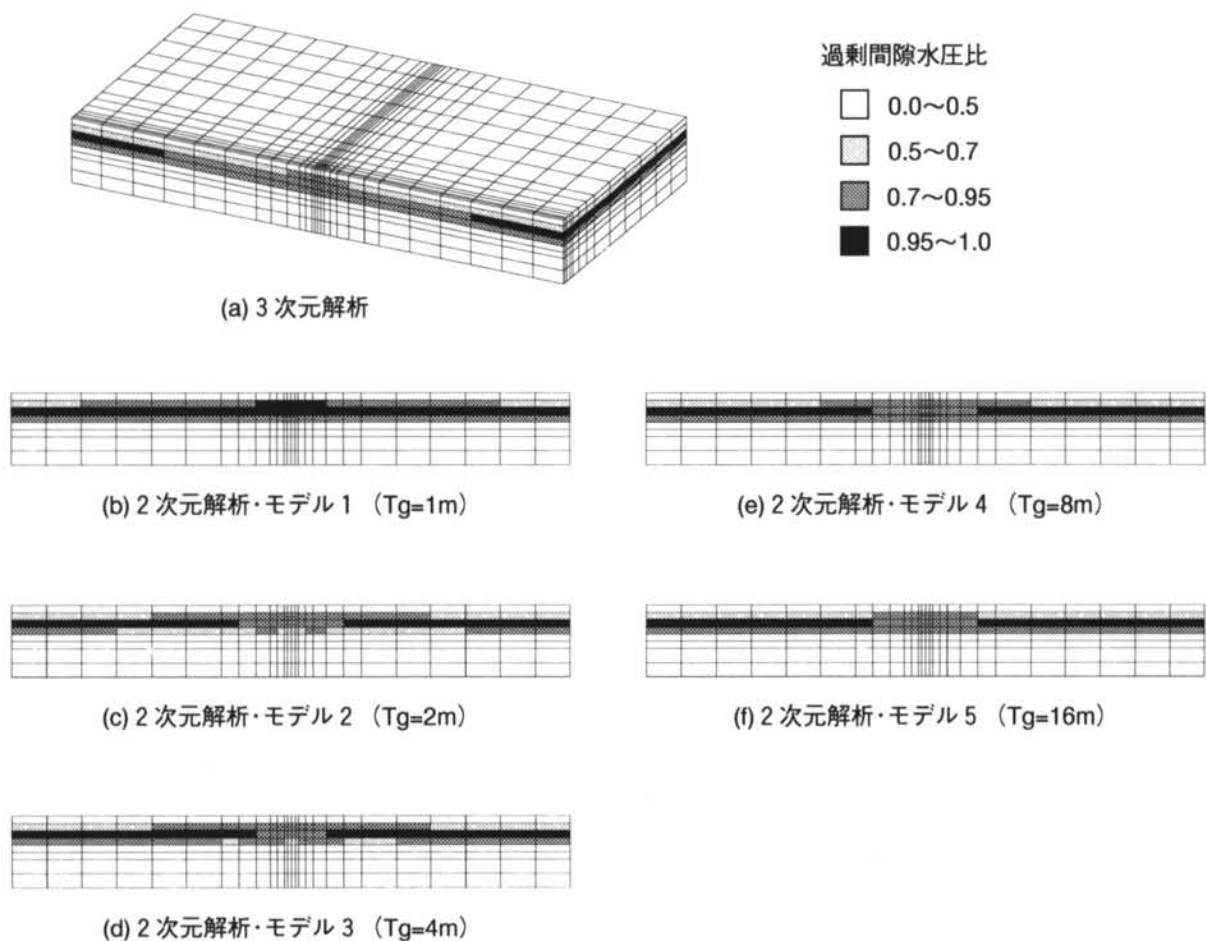


図-12 構造物頂部の加速度と杭頭近傍地盤の過剰間隙水圧比の時刻歴 (地盤B・構造物II)



図一 13 過剰間隙水圧比の最大値分布 (地盤B・構造物II)

す。大きな曲げモーメントが発生する深度は液状化層と非液状化層の境界に対応しており、この曲げモーメントは地盤変形によって生じたものと考えられる。

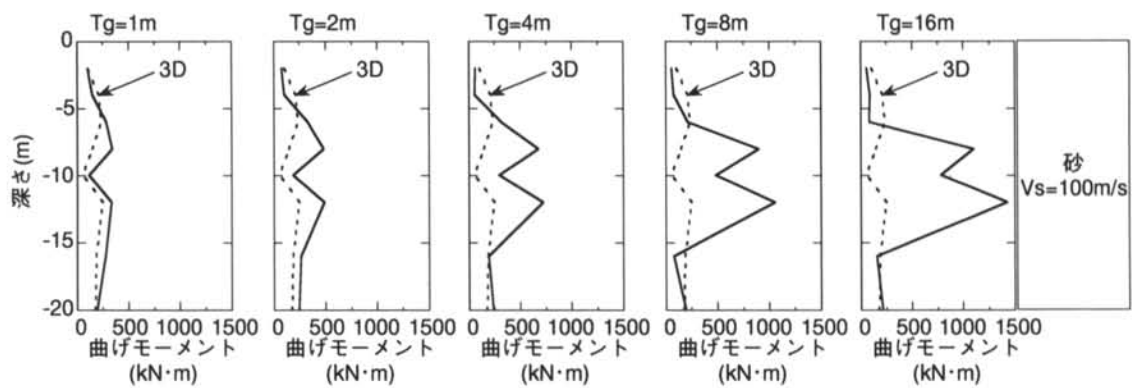
上部構造物の重量に拘わらず、また地盤モデルがA、Bのいずれであっても、地盤の奥行き方向解析幅を最も小さくとしたモデル1 ($T_g=1m$)で3次元解析に最も近い深度分布が得られている。地盤の奥行き方向解析幅が大きいほど、地中部で生ずる曲げモーメントは3次元解析結果よりもかなり大きくなっている。地盤の奥行き方向解析幅をフーチング幅と同じとしたモデル3 ($T_g=4m$)について見ると、地盤Aの場合には3次元解析結果の約3倍、地盤Bの場合でも約1.5倍の曲げモーメントが生ずる結果となっている。

解析の目的が液状化する地盤の領域を特定することならば、図一13に示したように、地盤の奥行き方向解析幅を大きくとって解析する方が3次元解析に近い結果を得ることができる。しかし液状化が生ずる領域が同じであっても、2次元解析モデルで地盤

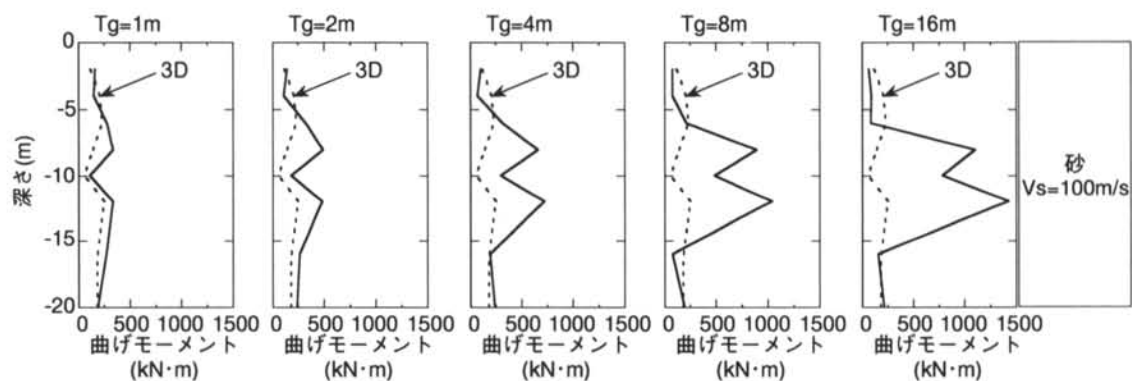
の奥行き方向解析幅が大きい場合、杭はより大きな質量をもつ地盤からの強制変形を受けることとなり、曲げモーメントは過大に評価される。2次元解析により3次元解析と等価な結果を得ようとするならば、液状化する地盤の領域が一致することが必要であるが、液状化する領域を合わせるように地盤の奥行き方向解析幅を設定すると杭に作用する地盤変形は過大に評価される。

有効応力解析に関する検討結果を以下にまとめる。

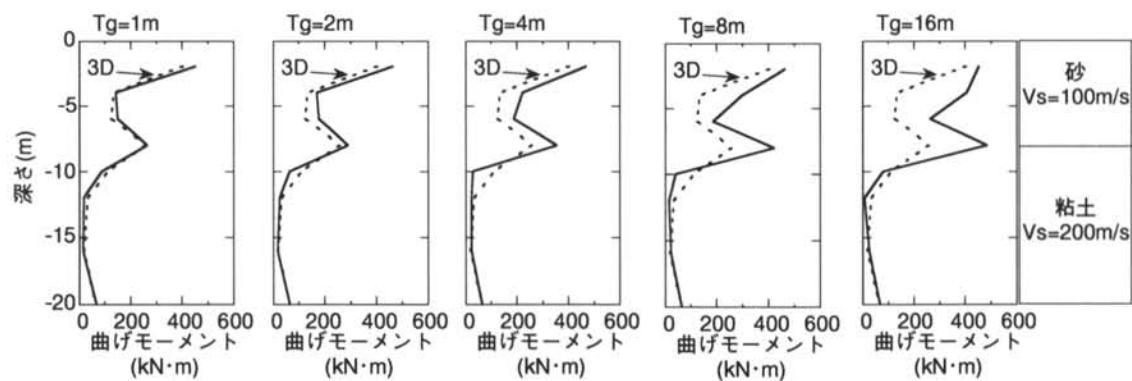
- ・ J値による2次元解析と3次元解析の応答波形の一致度の判定では、最適な地盤の奥行き方向解析幅は見出せなかった。
- ・ 地盤の奥行き方向解析幅を小さくした2次元モデルでは、地盤の剛性が相対的に小さく評価されるため、上部構造物の慣性力によって、より大きく変形し、過剰間隙水圧比は3次元解析よりも大きく評価される。
- ・ 地盤の奥行き方向解析幅を最も大きくとったモデル5 ($T_g=16m$)により得られた杭の曲げモーメントの最大値は3次元解析による値よりもかなり大き



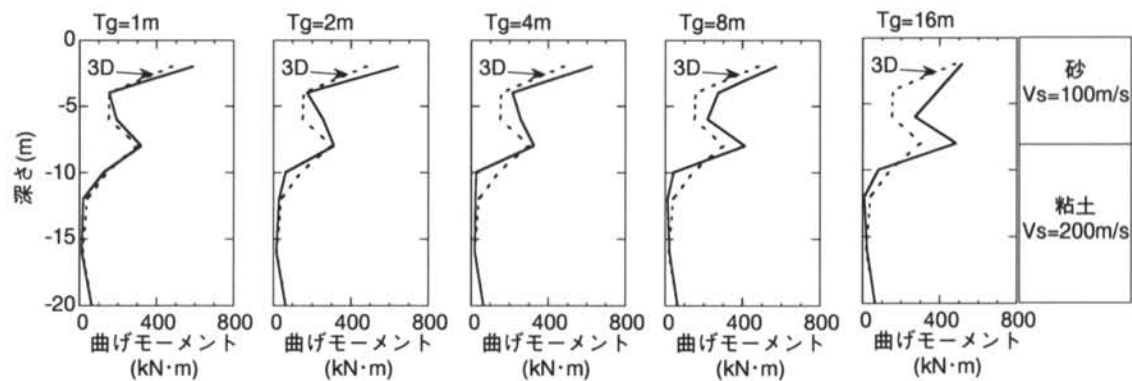
(a) 地盤A・構造物 I



(b) 地盤A・構造物 II



(c) 地盤B・構造物 I



(d) 地盤B・構造物 II

図-14 杭の最大曲げモーメントの深度分布 (有効応力解析)

い。これは、地盤の剛性が同程度であっても、地盤が杭を押す力(強制変形)は3次元解析の場合よりも大きくなっているためである。

- ・有効応力解析において、2次元解析と3次元解析の結果が一致するためには、過剰間隙水圧の発生状態が一致し、地盤の剛性が同等となること、さらに地盤が杭を変形させる力が等価となることが必要である。

§ 7. まとめ

本報告では、(1)地盤を弾性体と仮定した場合、(2)地盤の非線形性を考慮した場合、さらに(3)地盤の液状化を考慮した場合について、2次元解析と3次元解析の比較から、3次元的な挙動を適切に表現するための地盤の奥行き方向解析幅に関する検討を行った。本研究の結論をまとめると以下のように書ける。

- ・弾性解析では2次元解析モデルにおける地盤の奥行き方向解析幅をフーチング幅とすることで、3次元解析結果とほぼ一致する結果が得られる。
- ・非線形解析の場合は、2次元モデルにおける地盤の奥行き方向解析幅をフーチング幅の2倍とすることで定性的には3次元解析結果を模擬できる。

・有効応力解析の場合、3次元的な挙動を十分に表現するための適切な地盤の奥行き方向解析幅を見出すことはできなかった。

・2次元解析モデルの地盤の剛性はその奥行き方向解析幅によって大きく変化する。非線形解析と有効応力解析の場合には、地盤のせん断ひずみによって地盤の剛性はさらに大きく変化するため、2次元解析により得られる加速度、変位、曲げモーメントは、地盤の奥行き方向解析幅により非常に大きく変化する。

・2次元有限要素法により液状化を考慮した地盤・杭・構造物系の地震時挙動を解析する場合、杭に生ずる曲げモーメントを過大に評価する可能性がある。

本検討では上部構造物のIとII、ならびに地盤モデルのAとBの、それぞれの組み合わせによる結果の比較から、杭の地震応答が上部構造物の慣性力に大きく影響される場合と、地盤変形に支配される場合で有効な地盤の奥行き方向解析幅の差異を見出そうとしたが、明快な結論を得ることはできなかった。特に、有効応力解析に関しては、2次元解析と3次元解析の結果の差異は予想以上に大きく、この点に関するより多くの検討が今後必要と考えられる。

<参考文献>

- 1) 大平彰, 田蔵隆, 中桧新, 清水勝美: “地盤反力の三次元的効果を考慮した群杭基礎構造物の二次元有限要素法解析モデルの作成方法”, 土木学会論文集, No.356/I-3, pp.303-312, 1985
- 2) 横山正義, 泉博允, 西橋秀一, 杉原豊: “杭基礎構造物の地震時挙動と連成振動解析(その1)”, 第18回土質工学研究発表会, pp.595-598, 1983
- 3) 船原英樹, Misko Cubrinovski, 藤井俊二, 北澤巧次: “遠心力場における杭基礎～地盤模型の液状化実験”, 大成建設技術研究所報, 第29号, pp.87-92, 1996
- 4) 福武毅芳, 松岡元: “任意方向繰返し単純せん断における応力・ひずみ関係”, 土木学会論文集, No.463/III-22, pp.75-84, 1993
- 5) 田蔵隆, 清水勝美, 佐藤正義, 広瀬利光, 小山和夫: “非線形震動に伴う地盤の卓越周期と減衰定数の時間的変化の同定”, 第19回地盤工学研究発表会, pp.93-96, 1987