

## I-559

## 地盤の非線形地震応答が杭基礎構造物の動的応答に及ぼす影響

清水建設(株)技術研究所

正会員

田 蔵 隆

正会員

清 水 勝 美

## 1. は じ め に

ウォーターフロント開発の例に代表されるように、杭基礎構造物を非常に軟弱な地盤に建設しようとした場合、強震動に伴う地盤の非線形地震応答に対する配慮が耐震安全性向上のためにきわめて重要である。本報は地盤の非線形地震応答が杭基礎構造物の動的応答に及ぼす影響について、杭基礎模型に対する振動実験ならびに数値解析の結果に基づき考察したものである。

## 2. 地盤の非線形地震応答が杭の曲げひずみ応答に及ぼす影響

地盤の非線形地震応答に伴う杭基礎構造物の動的応答特性研究のために、せん断土槽を用いた群杭基礎構造物模型の振動実験が行われている<sup>1)</sup>。図1および図2はその実験結果の一部について示したものである。

図1は入力最大加速度 $A_{0max}$ を25Gal、100Gal、200Galとした場合の正弦波スイープ加振による上部工の加速度記録に基づく共振曲線であり、図2は3列×3列の杭配置におけるコーナーと中央の位置にある杭の曲げひずみの周波数応答関数(単位加速度当たり)について示したものである。

図1の各共振曲線ならびに図2の各応答曲線のいずれにおいても、共通して二つのピークが見られることが分かる。これらは地盤の1次固有振動数 $f_{g1}$ と上部工と杭基礎・地盤との連成系の1次固有振動数 $f_{s1}$ に対応しており、 $f_{g1}$ は基礎・地盤系の地盤震動に伴う相互作用(Kinematic Interaction)、 $f_{s1}$ は上部工が振動することによって発生する慣性力による相互作用(Inertial Interaction)に支配された卓越振動数であると言える。

図1において、入力最大加速度が大きくなるに従い共振点が低振動数側に移行し、その応答倍率が低下するという現象が認められるが、これらは地盤の非線形地震応答によるものである<sup>1)</sup>。また、図2において、 $f_{g1}$ のピークに対応する応答倍率 $\beta_{g1}$ は、入力最大加速度が大きくなるに従い大きくなっていることが分かる。このことは、地盤の非線形地震応答が顕著になるに伴い、杭の曲げひずみの応答倍率は線形地震応答で得られる応答倍率より大きくなることを表しており、強震時における杭の曲げひずみ応答を線形地震応答で評価した場合過小評価されることになり、杭基礎の耐震設計上の重要な留意点であると言えよう。一方、 $f_{s1}$ に対応する応答倍率 $\beta_{s1}$ は $\beta_{g1}$ の場合とは逆の状態にあり、地盤の非線形応答が杭の曲げひずみ応答に有利に働くという結果になっている。入力最大加速度が大きくなると $\beta_{g1}$ が大きくなり、また逆に $\beta_{s1}$ が小さくなるのは、いずれも地盤の非線形地震応答による特徴的な現象であり、前者は地盤の非線形地震応答に伴い地盤変位が大きくなるために生じた結果で、後者は上部工の加速度応答が小さくなるために生じたものである。

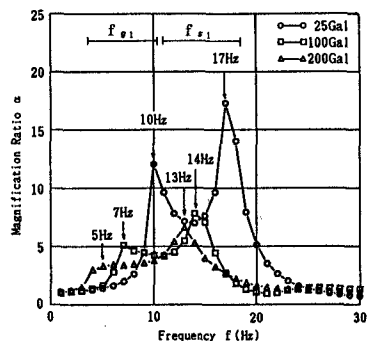


図1 上部工の共振曲線

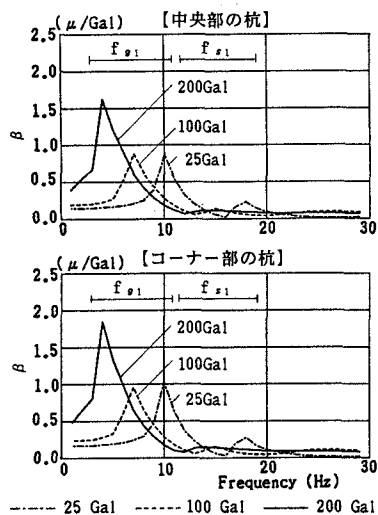


図2 コーナー部杭および中央部杭の杭頭部の単位加速度当たりの曲げひずみ応答曲線

### 3. 提案手法に基づく数値シミュレーション

地盤の非線形応答を考慮した杭基礎構造物の地震応答解析法として、筆者らは地盤の非線形地震応答を考慮した場合の有効入力動と杭頭インピーダンスをそれぞれ別々に算定し、動的サブストラクチャー法の理論に従って地震応答解析を行う方法を提案した<sup>1)</sup>。

図3は上部工の加速度応答に関して、提案手法に基づいて行った地盤の非線形応答を考慮した地震応答解析の結果と振動実験から得られた記録を対比したものである。なお、有効入力動係数は有効入力動に関する模型振動実験から求めた曲線<sup>2)</sup>を用い、杭頭インピーダンスは上部工を1質点ばね系モデル、杭基礎・地盤系を三次元弾性波動論に基づく連続系とした地震応答解析モデル<sup>3)</sup>において、解析結果が図1の共振曲線の $f_{s1}$ と $\alpha_{s1}$ が一致するように求めた地盤の等価せん断剛性 $G_{eqs1}$ と等価減衰定数 $h_{eqs1}$ を用いて定めた。解析結果と実験記録の対応関係はかなり良い状況にあると言え、提案した手法の有効性が窺えよう。

図4は線形地震応答解析の結果について示したものであり、この解析モデルは $A_{0max}$ を25Galとした場合の $f_{s1}$ と $\alpha_{s1}$ が解析の結果得られるように定めた等価せん断弾性係数と等価減衰定数を用いた解析モデルである。図3の非線形地震応答解析の結果に比較して、図4の線形地震応答解析の結果は振幅および位相特性に十分でないところが多く見られる。

図5は上部工の加速度応答のフーリエスペクトルに関して、非線形地震応答解析および線形地震応答解析の結果をそれぞれ実験結果と比較したものであるが、非線形地震応答解析の方の一致度が高いと見ることができよう。

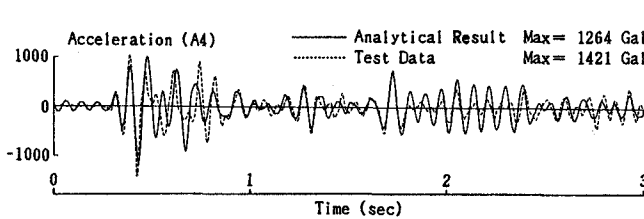


図3 非線形地震応答解析結果と実験結果の比較

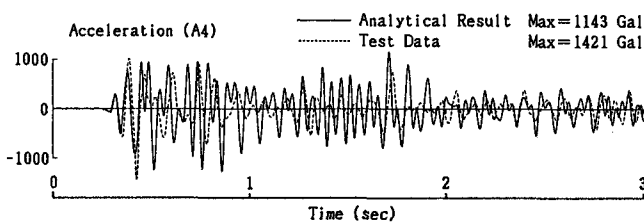


図4 線形地震応答解析結果と実験結果の比較

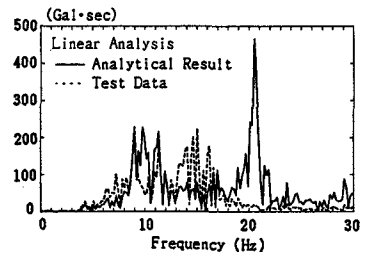
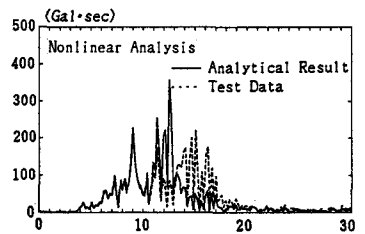


図5 非線形解析および線形解析より得られた上部工の加速度記録に対するフーリエスペクトル

### 4. あとがき

杭基礎模型に対する振動実験の結果から、地盤の非線形地震応答が不利な働きをする場合があることを明らかにした。このことは地盤の非線形地震応答を考慮して杭基礎構造物の耐震設計を行うことの必要性を示したものであり、軟弱地盤を対象とした構造物の場合、特にその配慮は重要となろう。

### < 参考文献 >

- (1) 田蔵、清水、佐藤、社本：地盤の非線形震動特性を考慮した杭基礎構造物の地震応答解析法の提案、第20回地震工学研究発表会、1989年7月。
- (2) 佐藤、田蔵、清水、社本、石川：地盤の非線形応答に伴う群杭基礎の有効入力動、土木学会第43回年次学術講演会、1988年10月。
- (3) 大平、田蔵、中松、清水：軟弱地盤中の基礎杭の地震時挙動特性に関する研究、土木学会論文集、第362号、1-4、1985年10月。