

地盤の非線形性と斜杭基礎の制震効果

清水建設(株)	フェロー会員	木全宏之
清水建設(株)	正会員	○ 坂井康伸
清水建設(株)	正会員	小林 望
清水建設(株)		竹中 恵
富山県立大学	フェロー会員	田蔵 隆

1. はじめに

斜杭基礎は直杭基礎に比べ、制震性が高い基礎形式であることが知られている。これは、直杭基礎では上部構造物の地震時慣性力に地盤と杭の曲げ剛性で抵抗するのにに対し、斜杭基礎では地盤と杭の曲げ剛性に加え、杭の軸剛性によっても抵抗できることによると考えられる。

上部構造物、基礎・地盤の動的相互作用は、上部構造物の慣性力の影響（Inertia interaction）と地盤振動による影響（Kinematic interaction）に大別されるが、斜杭の制震効果は主として慣性力の影響（Inertia interaction）に対して確認されたものであり、地盤振動による影響（Kinematic interaction）については未だ未解明な部分が多い。

以上のことから、本報は、地盤振動による影響（Kinematic interaction）に着目して斜杭基礎の制震効果を確認することとし、入力地震動の加速度レベルを変化させた二次元 FEM による非線形動的解析を実施することで、地盤の非線形性が斜杭基礎の制震効果に及ぼす影響についても併せて検討することとした。

2. 二次元 FEM 非線形動的解析

(1) 解析モデルおよび定数

解析モデルを図-1 に示す。解析モデルにおいて杭は単純化した二列杭とし、直杭モデルと傾斜角 10° の斜杭モデルとした。慣性力の影響（Inertia interaction）を極力小さくするため上部工はモデル化しないこととし、地盤振動による影響（Kinematic interaction）において、地盤の非線形性が斜杭基礎の制震効果に及ぼす影響について検討することとした。

杭およびフーチングははり要素でモデル化し、地盤はソリッド要素でモデル化した。境界条件について、底面境界は固定境界、側方境界は繰返し境界とした。また、杭先端は剛接合とした。平面ひずみ状態を仮定し、奥行き方向解析幅は杭間隔と同じ 1.0m として、二次元 FEM 非線形動的解析を実施した。

解析に用いた定数を表-1 に示す。杭およびフーチングは線形要素、地盤は非線形要素とした。地盤の非線形特性は修正 Ramberg-Osgood モデルで表現し、規準ひずみ $\gamma_{0.5}=5 \times 10^{-4}$ 、最大減衰定数 $h_{\max}=0.25$ とした。地盤のひずみ依存曲線を図-2 に示す。

なお、筆者らは斜杭基礎の地震時挙動について、遠心模型振動実験による検討を行っており、上記の解析モデルや定数は遠心模型振動実験モデルを念頭に想定したものである。遠心模型振動実験による検討の詳細については、今後報告の予定である。

表-1 解析定数

項 目		杭 ($\phi 300$)	フーチング ($1500^{\square} \times 90^H$)	地盤 ($V_{s0}=100\text{m/s}$)
単位体積重量	$\rho \text{ (kN/m}^3\text{)}$	78.5	117.75	15.0
ポアソン比	ν	—	—	0.45
ヤング係数	$E \text{ (kN/m}^2\text{)}$	2.1×10^8	2.1×10^8	4.439×10^4
断面積	$A \text{ (m}^2\text{)}$	0.006	0.9	—
断面二次モーメント	$I \text{ (m}^4\text{)}$	6.0×10^{-5}	0.0114	—
減衰定数	h	0.02	0.02	$h_{\max}=0.25$

キーワード：斜杭基礎 制震効果 地盤非線形 二次元 FEM 非線形動的解析

〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目 16 番 1 号 清水建設株式会社 土木技術本部 設計第二部 TEL 03-3561-3895

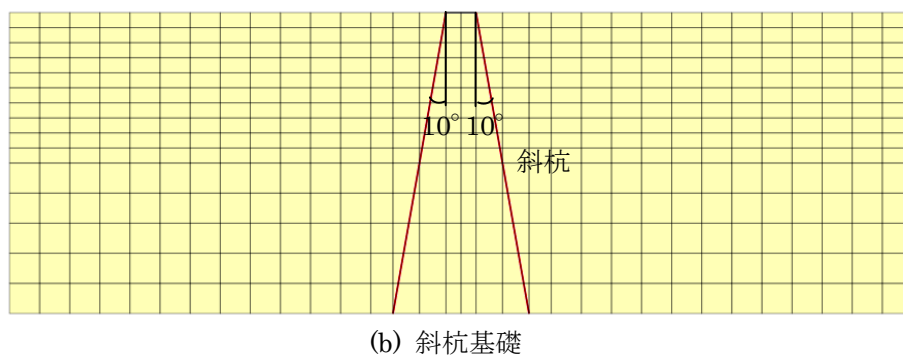
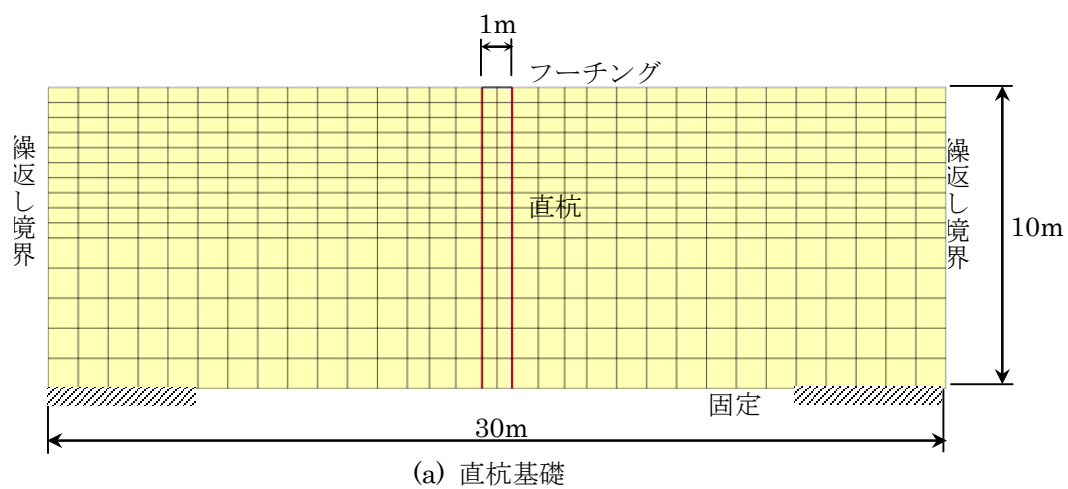


図-1 解析モデル

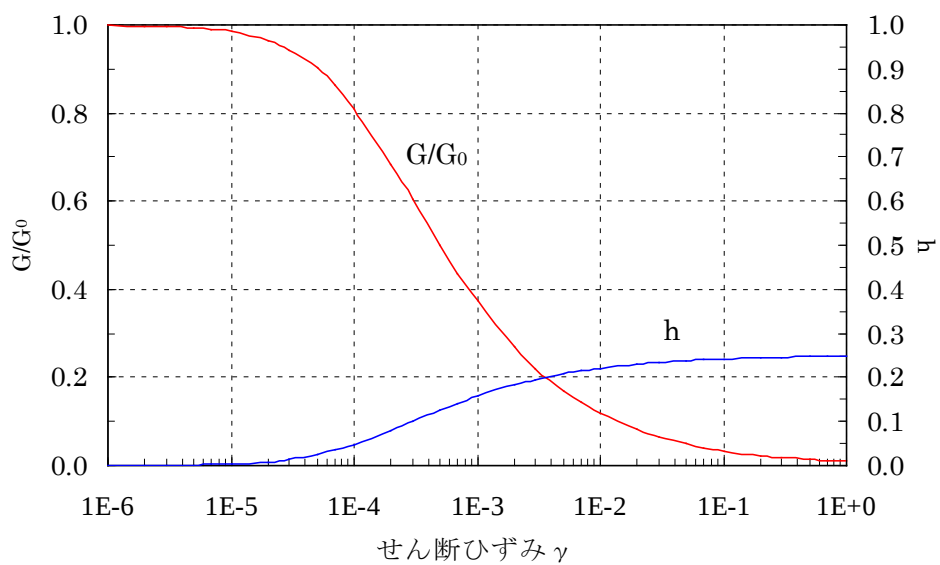


図-2 地盤のひずみ依存曲線

(2) 入力地震動

入力地震動として、EL-Centro 波 (EL Centro, May 18 1940, S-N) を用いた。EL-Centro 波の時刻歴加速度波形と応答スペクトルを図-3 に示す。検討では、最大加速度を 50Gal (ケース 1) と 200Gal (ケース 2) に振幅調整し、入力地震動として適用することとした。

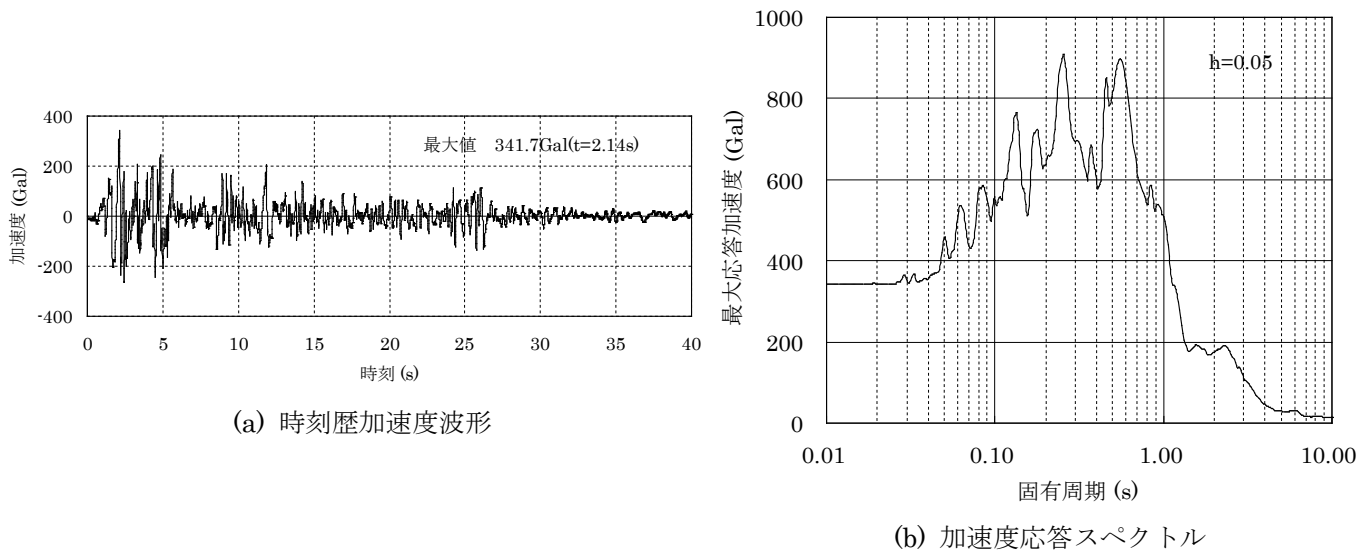


図-3 EL-Centro 波(EL Centro,May 18 1940,S-N)

3. 制震効果

二次元 FEM 非線動的形解析結果として、杭の最大水平相対変位分布、最大軸力分布および最大曲げモーメント分布を図-4 に示す。また、杭頭の水平相対変位、軸力および曲げモーメントについて、直杭基礎の応答に対する斜杭基礎の応答の周波数伝達関数を図-5 に示す。

図-4 より、ケース 1、ケース 2 とも杭頭の水平変位は直杭基礎より斜杭基礎の方が小さく、入力加速度の大きさ、すなわち地盤の非線形性の程度に係わらず、斜杭基礎の制震効果が現れている。杭に発生する軸力は深さ方向全長にわたり、また、曲げモーメントは地表面付近で斜杭の方が直杭より大きい。これは、斜杭基礎の水平変位を抑える効果（制震効果）の代償として、杭体の断面力が大きくなることを示している。

ケース 1 とケース 2 の解析結果の比較では、直杭基礎、斜杭基礎とも水平変位、軸力および曲げモーメントはケース 2 の方が大きい。入力加速度が大きく地盤がより軟化したケース 2 では地盤変形が増大し、地盤振動による影響がより顕著に現れたものと考えられる。

一方、図-5 に示す周波数伝達関数は応答倍率が 1 であれば斜杭基礎は直杭基礎と同じ応答を示し、応答倍率が 1 以下の領域が斜杭基礎の制震性能を表わすものであるが、水平変位の直杭基礎に対する斜杭基礎の応答倍率は 1 を下回り、斜杭基礎の制震効果が認められる。

水平変位の応答倍率が概ね全周波数帯にわたって 1 を下回っていることが注目されるが、特に地盤の 1 次固有周波数 2Hz~3Hz 以下の低周波数側で 1 を大幅に下回っていることから、より大きな制震効果が認められる。これに対応し、直杭基礎に対する斜杭基礎の軸力および曲げモーメントの応答倍率は、低周波数側で最大 5~7 と大きく、高周波数側では小さく 1 近くの値となっている。また、軸力および曲げモーメントは、概ね同様の応答倍率特性を示していることも注目される。

ケース 1 とケース 2 の解析結果の比較では、水平変位、軸力および曲げモーメントのいずれも応答倍率特性に大きな差異は認められず、地盤の非線形性の程度の差による影響は認められない。

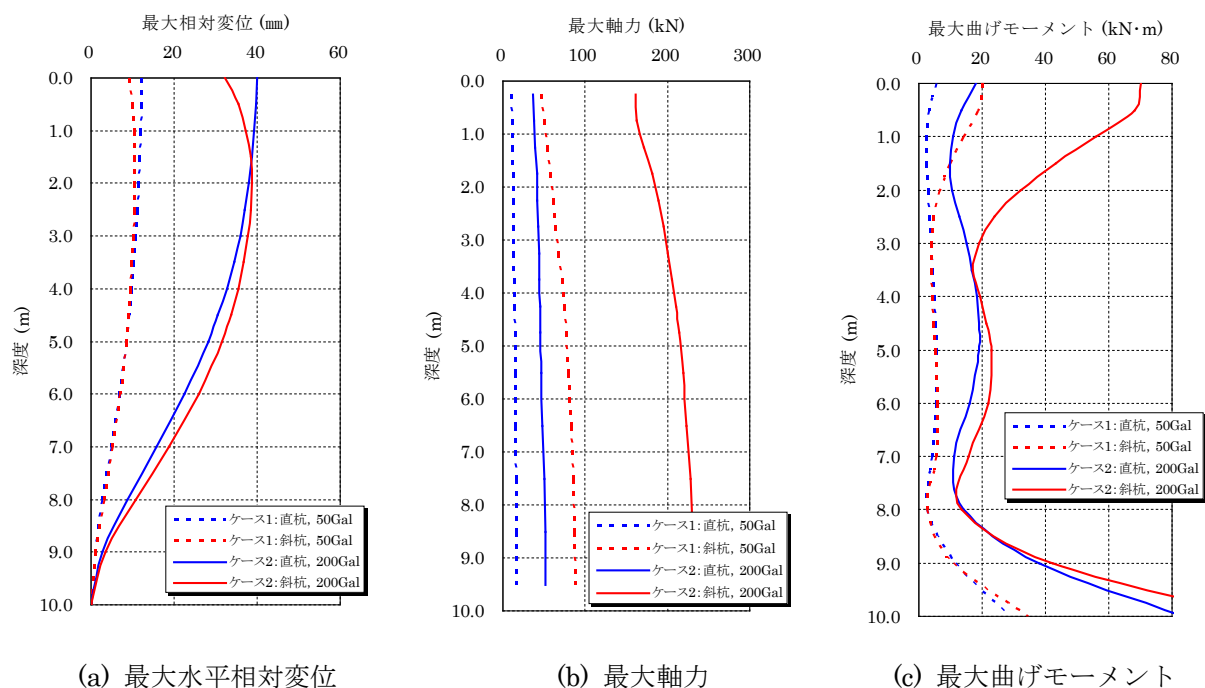


図-4 杭の最大水平相対変位分布，最大軸力分布および最大曲げモーメント分布

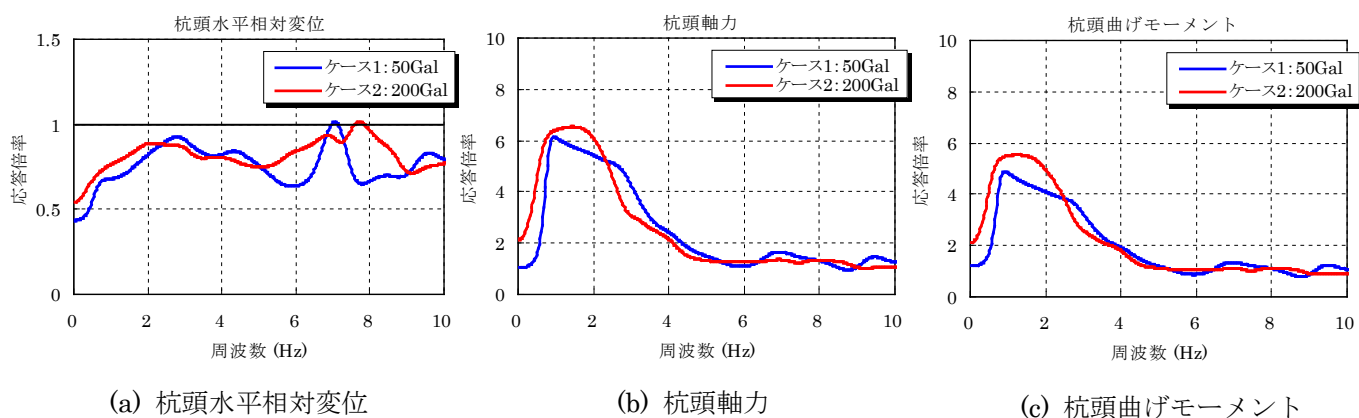


図-5 直杭基礎に対する斜杭基礎の杭頭応答の周波数伝達関数

4. まとめ

入力地震動の加速度レベルを変化させた二次元 FEM 非線形解析を実施し，地盤の非線形性が斜杭基礎の制震効果に及ぼす影響について検討した。

検討の結果，得られた知見をまとめると，以下のようになる。

- i) 全周波数帯にわたって直杭基礎に対し斜杭基礎の制震効果が認められ，低周波側では制震効果がより顕著である。
- ii) 直杭基礎に対し斜杭基礎の杭体は，軸力および曲げモーメントが増大する。
- iii) 斜杭基礎の杭体の軸力と曲げモーメントが増大する比率は両者同程度である。
- iv) 制震効果に対して，地盤の非線形性の程度の差による影響は認められない。

今後，入力地震動の種類やレベル，地盤剛性等を変化させ，斜杭基礎の制震効果についてより詳細な検討を行っていく予定である。