

杭基礎構造物の各種地震応答解析とその注意点

森 伸一郎¹, 三浦 房紀², 張 鋒³, 岸下 崇裕⁴, 岩上 憲一⁵, 砂坂 善雄⁶

¹フェロー 博士(工学) 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

²正会員 工博 山口大学教授 工学部知能情報システム工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

³正会員 博士(工学) 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

⁴正会員 工修 株式会社フジタ 技術センター土木研究部 (〒243-0125 神奈川県厚木市小野2025-1)

⁵正会員 株式会社構造技術センター 福岡支社 (〒812-0011 福岡県福岡市博多区博多駅前3-5-7)

⁶正会員 工修 鹿島建設株式会社 土木設計本部設計技術部 (〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30)

土木学会地震工学委員会の杭基礎耐震設計研究小委員会では、杭基礎に関わる地震応答、液状化、耐震設計の諸問題をそれぞれ A, B, C の3つのワーキンググループ (WG) で分担して活動してきた。本報告では WG-A の活動として実施した杭基礎構造物の線形および非線形の一斉動的解析の結果を考察し、各解析法の特徴を明らかにする。また、杭基礎の地震応答解析法における注意点を整理して述べる。

Key Word: pile foundation, seismic response, dynamic analysis, FEM, frame analysis, interaction, nonlinearity

1. はじめに

土木学会地震工学委員会の杭基礎耐震設計研究小委員会では、1997～2000年の4年間、杭基礎に関わる地震応答、液状化、耐震設計の諸問題をそれぞれ A, B, C の3つのワーキンググループ (WG) が分担して活動してきた。WG-A は延べ16名の委員で構成された(後掲)。このWGでは、杭基礎の地震応答を主題として、地震時挙動を合理的に反映した地震応答解析法について検討し、実務設計における利用技術を開発することを目標に活動してきた。活動の概要(委員各自の研究内容、技術検討内容の話題提供と検討課題に関する討議により問題点を抽出し、総意により一斉解析を行った)は既に報告されている¹⁾。

実務設計では動的解析を行う機会が少なく、ましてや杭基礎などの動的相互作用を正面から捉えた動的解析を行う機会は皆無に近いことがWG内での意見交換から判明した。しかし、将来の性能設計への移行を考えた場合、非線形地震応答を合理的に評価するための手段としての動的解析技術の開発が急務である。各種の解析法の特徴を比較してその得失を洗い出すことがことが重要であるとの認識から、

総意により一斉解析を完遂することを後半の目標にした。

本報告では、検討課題と共通認識を確認した後、一斉解析の概要を述べその結果の考察を行う。さらに、杭基礎の動的相互作用解析における注意点を述べる。

2. 検討課題と共通認識

杭基礎構造物の地震応答を研究するに当たって、取り上げるべき検討課題を次に挙げる。

- 杭基礎の地震被害(被害事例の整理と分析)
- 杭基礎の地震時挙動(観測と解析)
- 杭基礎の変形・強度・復元力特性
(杭体と地盤中の杭、破壊域までの特性)
- 杭基礎の地震応答解析法
(2D/3D, 静的/動的, 全応力/有効応力)
- 地盤と杭基礎の動的相互作用
- 地盤の動的ばね値
- 減衰
- 有効入力

これらに関する話題提供やそれに伴う議論では、

次のようなことが改めて共通認識として得られたと考えられる。

- 地震時の振動による地盤変形の杭への影響について考えない設計はあり得ない。
- 考えるべき地震動の大きさが大きくなったので、杭体の強非線形域の特性を解析に取り入れる必要がある。
- 3次元解析に関する研究が広まりつつあり、3次元解析特有の知見を整理し、実務で広く利用されている2次元解析との比較が不可欠である。
- 研究で広く利用される FEM 解析と実務で利用される Frame 解析の系統的な比較が必要である。
- Penzien 型モデルのような一次元モデルと Frame 解析において、地盤が強い非線形域に入ったときの地盤ばね効果の評価が重要である。
- 杭基礎の地震応答解析手法には種々あるが、実務においては FEM 解析やフレーム（骨組）解析が一般的である。2次元 FEM の際には3次元的な効果のモデル化が問題となることが多い。そのため、極めて大きい地震動の下での地盤と杭材の非線形性やそれらに伴う動的相互作用のモデル化が重要な課題となる。

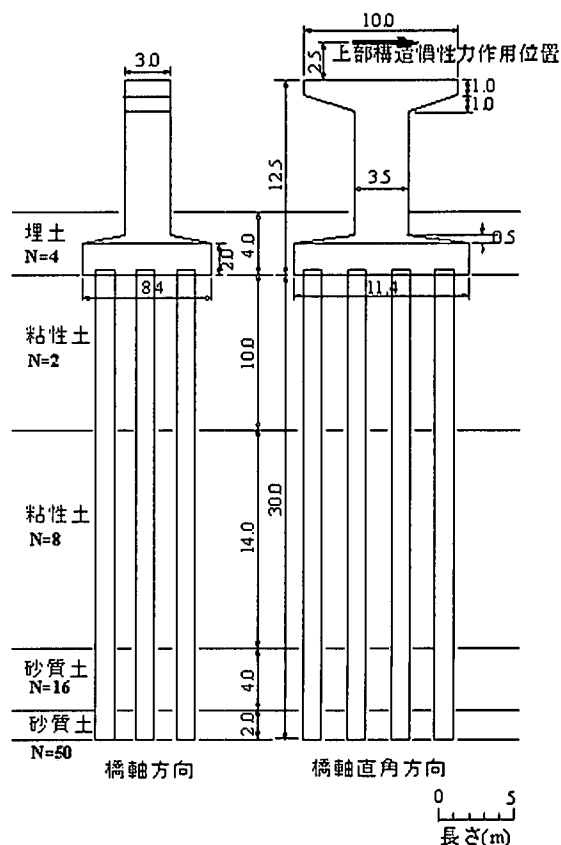


図-1 解析対象である橋脚基礎と地盤

3. 異なる手法による一斉解析

(1) 検討目的

上述のような共通認識を WG-A の活動に展開するべく、同一の杭基礎構造物に対し異なる解析手法による一斉解析を行うこととした。解析対象を改訂された設計規準により新たに試設計する構造物とし、解析方法による結果の違いを検討すること、耐震設計に動的解析を用いる際の留意点を明らかにすることを目的とした。

静的解析を行った後、動的解析へ移ることや線形解析を行い非線形解析に移ることが必要との認識で一斉解析を着手したが、ボランティア活動であるため解析条件の統一化や進捗を揃えることが困難を極めた¹⁾。2000年度に解析条件の統一を図り、再度、下記の手法と担当者で線形及び非線形の動的解析を行った。

(2) 解析手法

WG-A を中心に委員の使用できる解析プログラムを利用することを前提として、次の解析手法が用いられた。カッコ内は担当した委員であり、解析方針や解析条件の統一、解析結果の突き合わせと解析条件の確認はこれらの委員で行った。

- [1] 3次元 FEM (張委員)²⁾
- [2] 2次元 FEM (岸下委員)³⁾
- [3] 2次元 Frame (岩上委員)⁴⁾

[4] Penzien 型モデル：1次元（砂坂委員）⁵⁾

[5] Penzien モデル：1次元（森委員）⁶⁾

(3) 検討対象と統一検討条件

解析対象は、新設を想定する道路橋基礎であり、大塚ら⁷⁾による。設計は道路橋示方書⁸⁾に則って、福島委員⁹⁾が担当して行い、一斉解析参加委員が全員でチェックした。図-1 に橋脚基礎と地盤を示す。

(a) 地盤

地盤は、比較的軟弱な層厚が 14m あり、支持層深さは 32m である。物性は設計用の数値として層毎の平均 N 値、 ϕ 、C、単位体積重量があるのみで、地下水位、弾性波速度 V_s 、 V_p 、動的変形特性 $G \sim h \sim \gamma$ などはなく、これらは必要に応じて土質、N 値から設定するものとする。表-1 に地盤の設計定数を示す。

動的解析の場合には、線形の応答を決定付ける

表-1 地盤の設計定数

| 番号 | 土質 | 層厚 m | 平均 N値 | 単位体積重量 (t/m^3) | 内部摩 擦角 (deg.) | 粘着力 (kN/m^2) | せん断 波速度 (m/s) | せん断剛 性 (kN/m^2) | ポアソン 比 |
|----|-----|---------|----------|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------------|-----------|
| 1 | 埋め土 | 4 | 4 | 1.8 | - | - | 127 | 29028 | 0.49 |
| 2 | 粘性土 | 10 | 2 | 1.7 | 0 | 19.6 | 126 | 26989 | 0.49 |
| 3 | 粘性土 | 14 | 8 | 1.8 | 0 | 78.4 | 200 | 72001 | 0.49 |
| 4 | 砂質土 | 4 | 16 | 1.9 | 31 | 0 | 202 | 77528 | 0.49 |
| 5 | 砂質土 | 2 | 50 | 2.0 | 42 | 0 | 295 | 174048 | 0.49 |

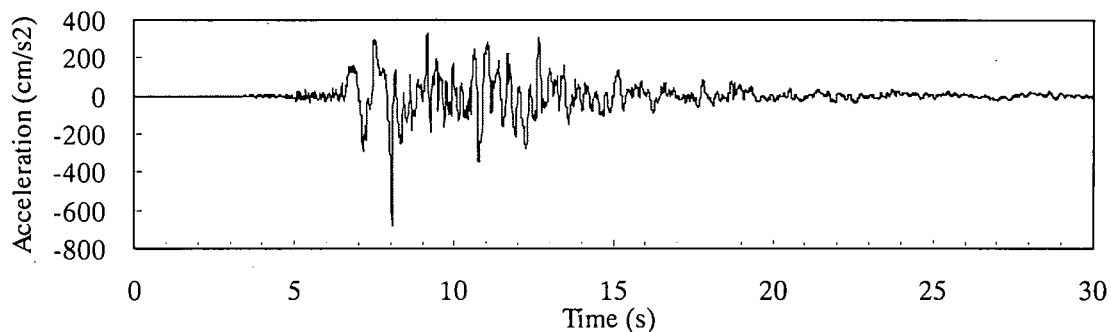


図-2 解析に用いる入力地震動 (KPI-83m NS成分)

パラメータを統一する必要がある。土の密度，せん断波速度，ポアソン比，は表-1に示すものとする。動的変形特性 $G \sim \gamma$ ， $h \sim \gamma$ については，等方圧密状態でせん断をかけた場合の $\tau \sim \gamma$ 関係の骨格曲線の割線剛性を微小ひずみでの剛性で正規化した剛性比とせん断ひずみの関係 $G/G_0 \sim \gamma$ ，および繰り返し载荷をして得られる履歴減衰 $h \sim \gamma$ として与えるものとする。過去の多くの試験の文献から整理して求められた今津・福武¹⁰⁾の式(平均値)による。この式の有効範囲(基となる試験結果の分布する範囲)は，せん断ひずみで $3 \cdot 10^{-3}$ 程度であり，それ以上では適用できないことに注意する必要がある。 10^{-2} 程度までは外挿可能であろうが，それ以上の適用は無謀である。工学的な判断が求められる。

(b) 橋脚と杭基礎

橋脚は断面が $3.0\text{m} \times 3.5\text{m}$ の T 型橋脚で，橋脚重量は 336ton である。道路橋示方書による上部工の設計水平力は 1200ton とする。橋脚は橋軸方向が弱軸の矩形断面で，M- ϕ スケルトンはトリリニアとし，復元力特性は武田モデル¹¹⁾とするが，せん断先行のため杭から降伏するため実際には非線形領域には入らない。杭は場所打ちコンクリート杭とし，直径 1.2m，長さ 30m で $3 \times 4 = 12$ 本で構成され，10m 以深は鉄筋を段落ととする。加力・加振方向は 4 列並んだ方向である。杭の M- ϕ スケルトンはトリリニアとし，復元力特性は武田モデル¹¹⁾とする。

(c) 入力地震動

動的解析には，1995 年兵庫県南部地震の際に神戸ポートアイランドで観測されたアレー地震観測記録の-83m (NS 成分) の加速度記録(図-2)とする。地震動は，原則として配付した記録の最初から 0-30 秒の解析を行う。ただし，計算時間を短くしたいときには，5-20 秒の解析を行う(3D-FEM の場合)。

(d) 減衰

減衰マトリックスにはレーリー減衰，剛性比例，質量比例，部材別ひずみエネルギー比例(フルマトリクス)などがあるが，レーリー減衰を基本とする。線形時の地盤の 1 次と 2 次の振動数で減衰定数 2%

となるように設定する。剛性比例の場合，地盤の 1 次と 2 次の振動数の平均振動数で減衰定数 2% となるように設定する。非線形線形解析においては，減衰を大きめに評価することになるので，同様な方法で 1% とする。

(4) 解析モデル

図-3 に，(a)3 次元 FEM モデル(張)，(b)2 次元 FEM モデル(岸下)，(c)2 次元 Frame モデル(岩上)，(d)Penzien 型モデル(砂坂)，(e)Penzien モデル(森)を併せて示す。相互作用と関係する周辺の地盤の要素の数は，おおよそではあるが，4200 (3D-FEM)，800 (2D-FEM)，120 (2D-FRAME)，30 (1D-FRAME) となり，前者ほど自由度が大きい分，挙動に対する表現能力が高いと考えられる。

なお，ここでは森¹²⁾に従い，オリジナルの Penzien モデル¹³⁾とその考え方を踏襲しつつも若干異なるモデルを総称して Penzien 型モデルと呼ぶ。

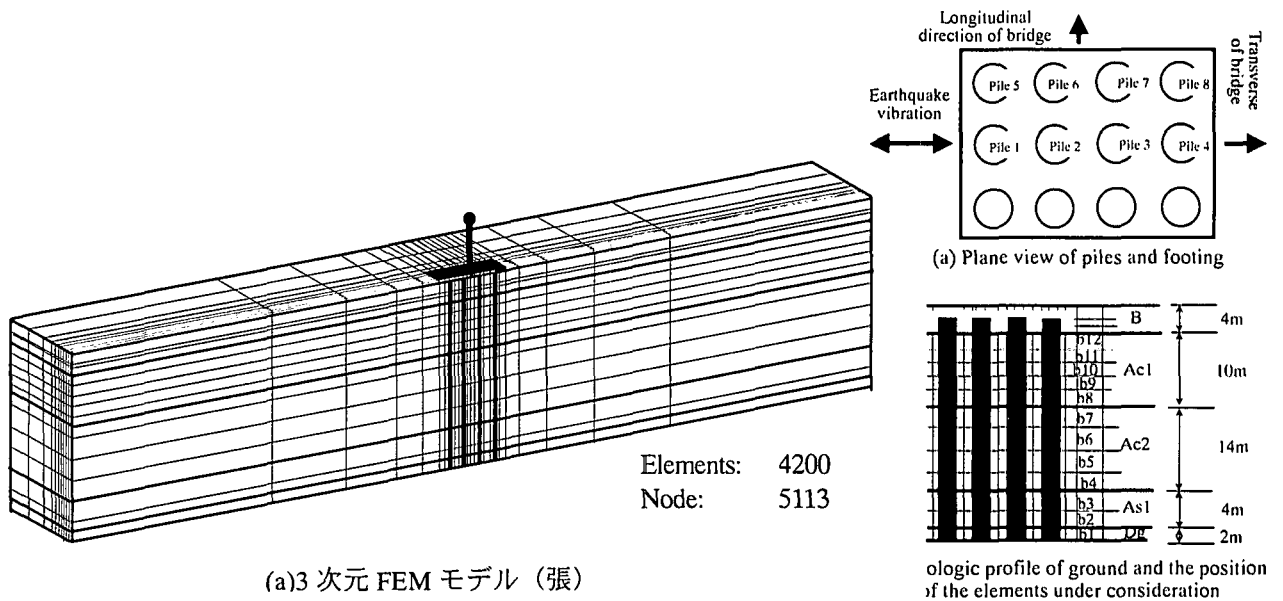
(5) 結果と考察

はじめに，杭基礎の応答で重要な曲げモーメントについて見る。図-4 に Penzien モデル(森)，図-5 に Penzien 型モデル(砂坂)，図-6 に 2D-Frame モデル(岩上)，図-7 に 2D-FEM(岸下)，図-8 に 3D-FEM(張)による曲げモーメント図を示す。それぞれの図で(a)は線形解析，(b)は非線形解析の結果である。

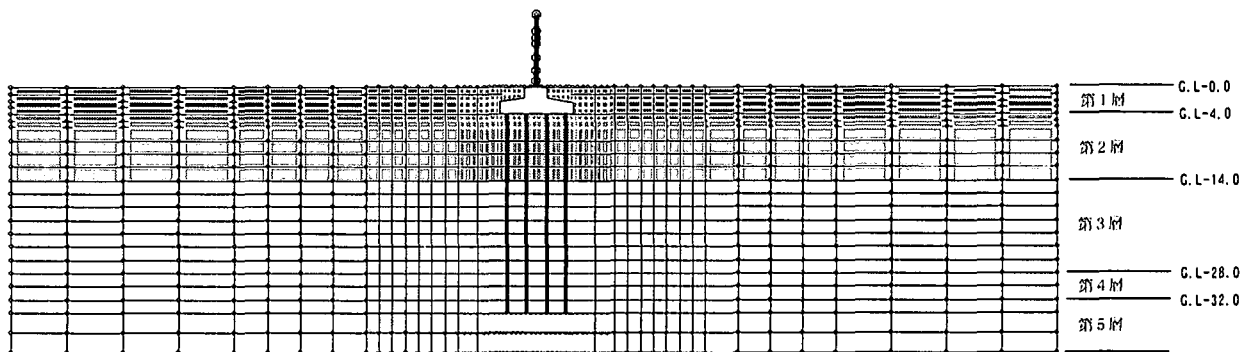
森・平田⁹⁾による Penzien モデルの解析によれば，杭頭部(-4m : A)，浅部層境界(-14m : B)，深部層境界(-28m と-32m : C)のおよそ 3 箇所曲げモーメントが大きくなる。深部層境界付近の曲げモーメントは，入力が大きくなると地盤の非線形化により増大するが，相互作用ばねの非線形性を考慮するとその程度が緩和され分布形状もなだらかになることが指摘されている。そこでこの 3 箇所について着目して考察する。

(a) Penzien 型モデル

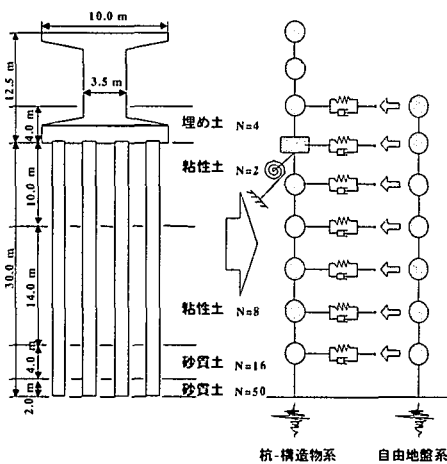
図-5 の Penzien 型モデルの結果には上部構造物を除去した場合の解析を行い，その結果を kinematic,



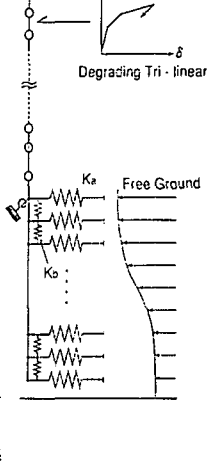
(a) 3次元 FEM モデル (張)



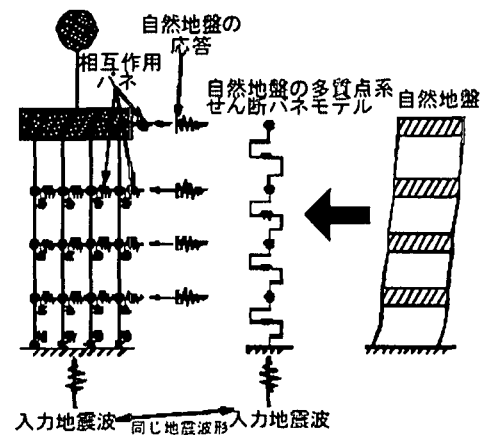
(b) 2次元 FEM モデル (岸下)



(c) Penzien モデル (森)



(d) Penzien 型モデル (砂坂)



(e) 2次元 Frame モデル (岩上)

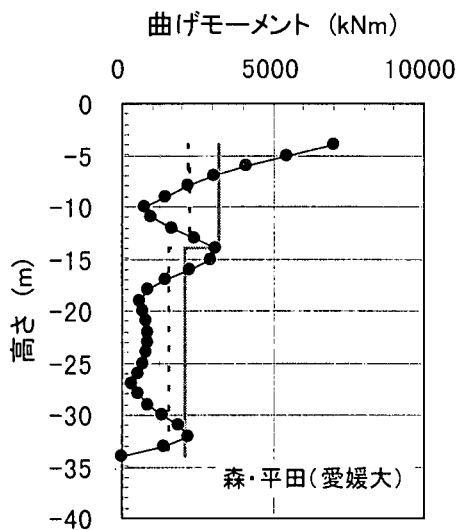
図-3 一斉動的解析に用いたモデル

全体系の解析結果から kinematic を差し引いたものを inertial として示している。これによれば、杭の曲げモーメントはおおよそ深さ 20m 以浅は構造物の慣性力が、それ以深は地盤の変形が主として寄与している。また、非線形でも同様の傾向であるが地盤変形の相対的な比率が大きくなっている。深さの違う曲げモーメントの比率 A : B : C は、線形時で

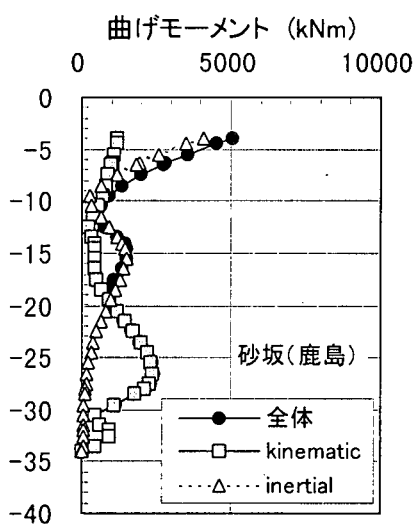
1 : 0.30 : 0.47 であり、非線形時で 1 : 0.48 : 0.50 である。非線形で B の割合が相対的に増えている。

(b) Penzien モデルと 2D-Frame モデル

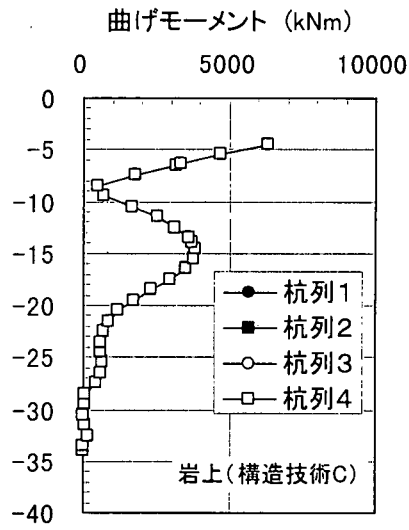
図-4 の Penzien モデルでは、比率 A : B : C は、線形時で 1 : 0.44 : 0.31 であり、非線形時で 1 : 0.49 : 0.58 である。図-3 の 2D-Frame モデルでは、比率 A : B : C は、線形時で 1 : 0.48 : 0.02 であり、非線形



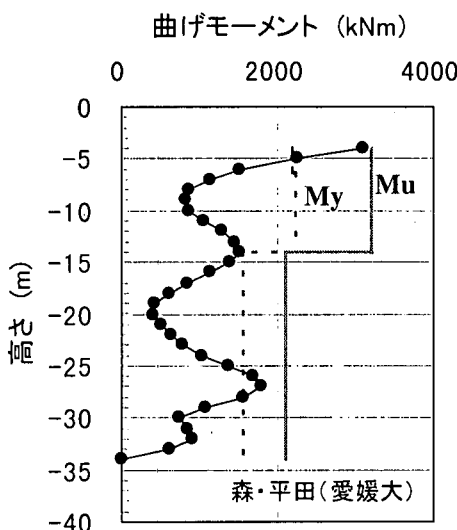
(a)線形解析



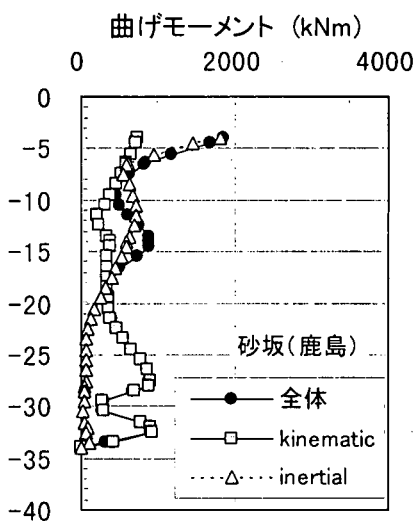
(a)線形解析



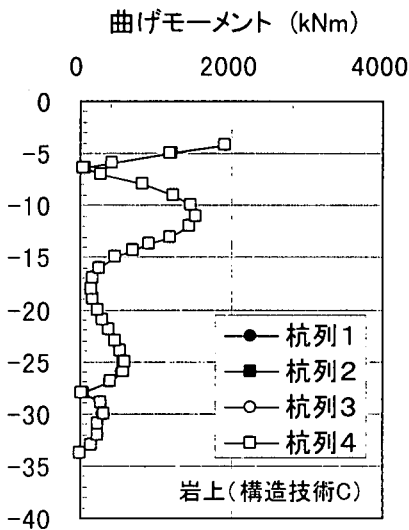
(a)線形解析



(b)非線形解析



(b)非線形解析



(b)非線形解析

図-4 Penzien モデルによる
曲げモーメント分布

図-5 Penzien 型モデルによる
曲げモーメント分布

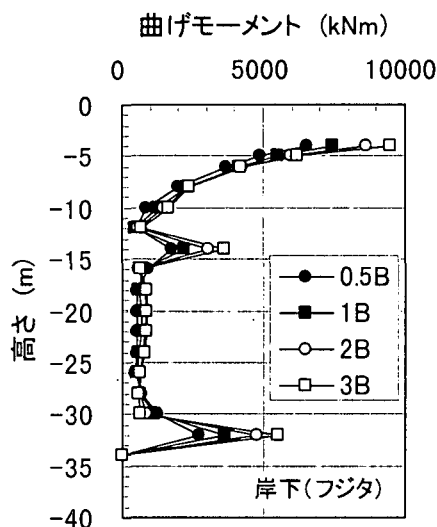
図-6 2D-Frame モデルによる
曲げモーメント分布

時で 1 : 0.80 : 0.16 である。以上の 3 モデルは主に地盤ばねのモデル化と算定方法が異なるためであると考えられる。2D-Frame モデルの比率が他の 2 つと大きく異なる。また、2D-Frame モデルでは 4 本の杭にモデル化しているが、線形時には 4 本は同一の応答であり、非線形時においても 0.1~0.5%程度の差であり同一の応答と見なせる。

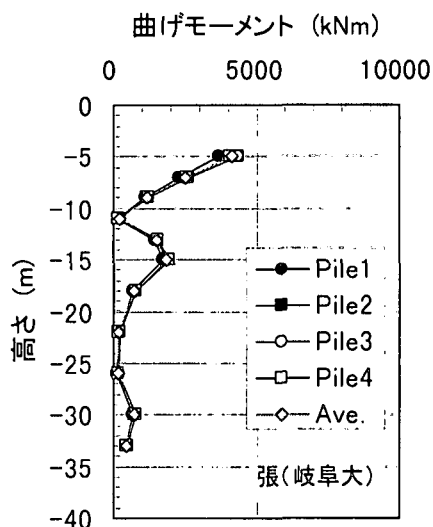
(c) 3D-FEM モデル

図-8 の 3D-FEM モデルの結果を考察する。図には加振方向に 4 本が配列された 3 列の内、中央の列の 4 本の杭が順に pile1 から pile4 まで示されてい

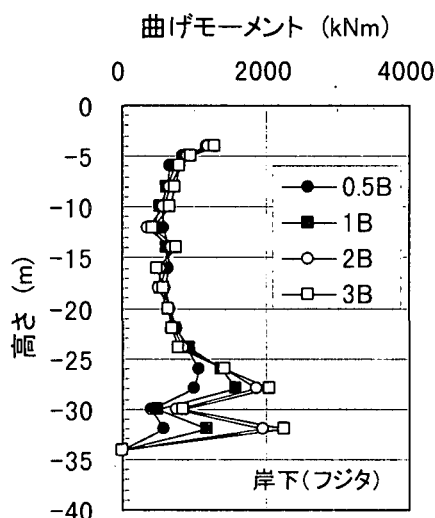
る。線形時には解析対象となる 8 本の杭の曲げモーメント分布は相似である。杭頭の曲げモーメント (A) は外側列の中 2 本、中央列の中 2 本、外側列の端部 2 本、中央列の押し側 1 本、同引き側 1 本の順に大きく、最後の 1 本が他より一層小さい。曲げモーメントの平均値に対する最大と最小の値は、+5%と-12%である。B 部では+5%と-5%であり、C 部では+4%と-6%である。したがって、線形時には杭の曲げモーメントの最大値は平均値に 5%程度割増せばよいことになる。一方、非線形時には各杭で分布形状や大きさが大きく異なる。B、C の



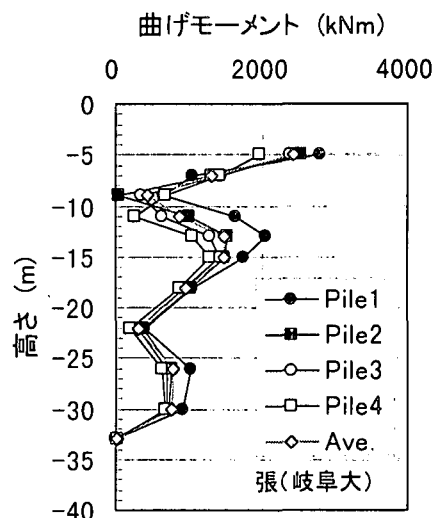
(a)線形解析



(a)線形解析



(b)非線形解析



(b)非線形解析

図-7 2D-FEM モデルによる
杭の曲げモーメント分布

図-8 3D-FEM モデルによる
杭の曲げモーメント分布

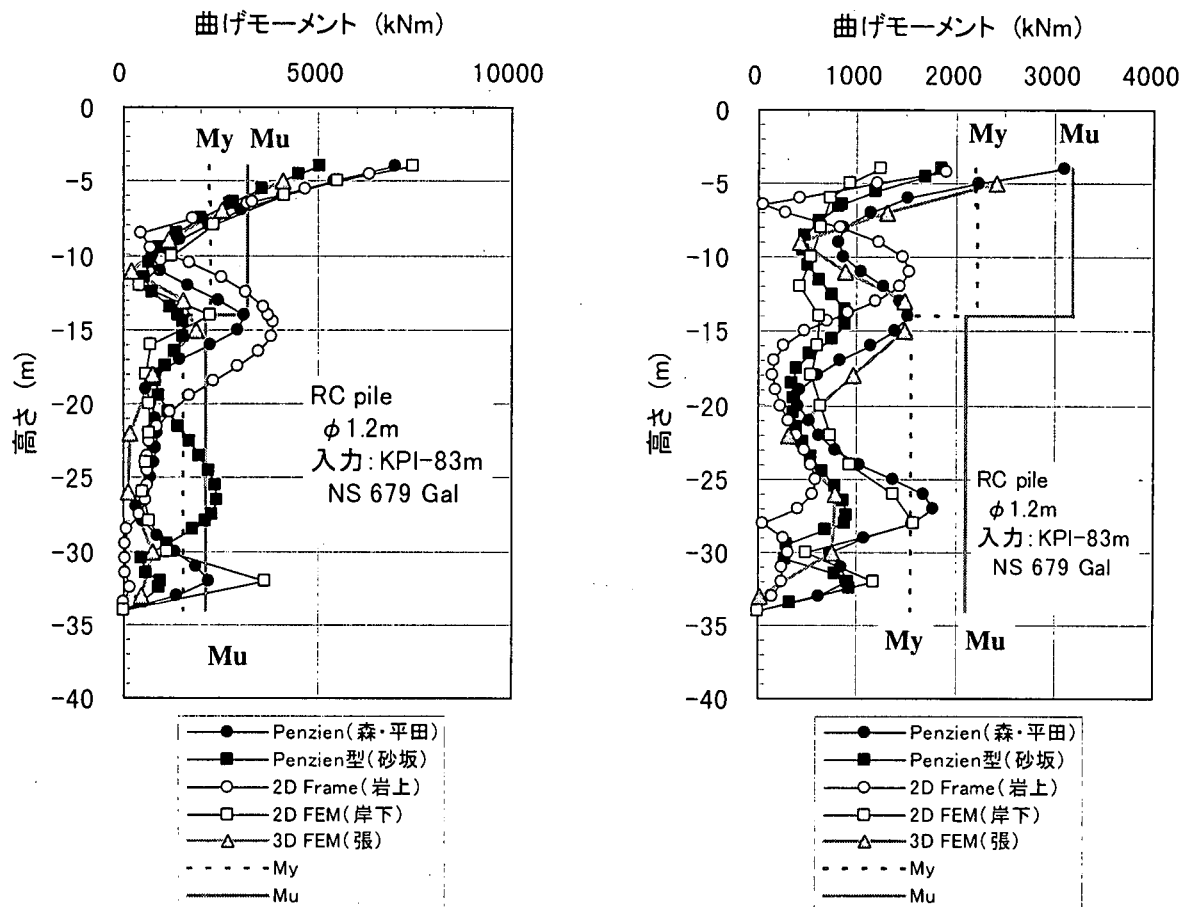
部分の極大値の現れる位置が異なっている。線形時と同様に平均値に対する最大と最小の値を求めると、A部で+15%と-19%、B部で+30%と-18%、C部で+29%と-14%である。したがって、この解析の場合、非線形時では杭の曲げモーメントの最大値は平均値に30%程度割増す必要があることになる。

また、平均値のA:B:Cは線形時で1:0.45:0.18であり、非線形時で1:0.65:0.33である。以降、平均値で評価する。

(d) 2D-FEM モデル

最後に図-7の2D-FEMモデルの結果を考察する。図には、フーチング幅をBとしたときに地盤の部分の解析奥行きを0.5B~3Bまで変化させたときの

解析結果を重ねて示している。線形解析では解析幅を大きくするほど曲げモーメントが大きくなることが読み取れる。また、A:B:Cは0.5Bで1:0.27:0.42に対して3Bで1:0.38:0.58へと変化しており、解析幅を大きくするほど地中部の曲げモーメントの比率が大きくなることがわかる。非線形時にはその傾向が一層顕著となる。A:B:Cは0.5Bで1:0.54:0.91に対して3Bで1:0.58:1.75へと変化しており、他の解析法と比べて深部層境界でのモーメントの評価が過大であることが特徴である。このケースでは、比率や大きさからは0.5B~1B程度が好ましい。そこで、以降は1Bのケースに着目して考察する。



(a) 線形解析による杭の曲げモーメント

(b) 非線形解析による杭の曲げモーメント

図-9 全ての解析法による杭の最大曲げモーメント分布

図には示さないが、この解析では3本4列の杭が4本の杭としてモデル化されている。4本の杭の内、外側の2本の応答は同じであり、内側の2本の杭も同じである。平均値に対して最大と最小の値は線形時にはA部で2%、B部で7%、C部で13%であり、非線形時にはA部で2%、B部で4%、C部で6%である。3D-FEMに比べて線形時に深層部の違いがやや大きいことと非線形時に違いが小さいことが指摘できる。

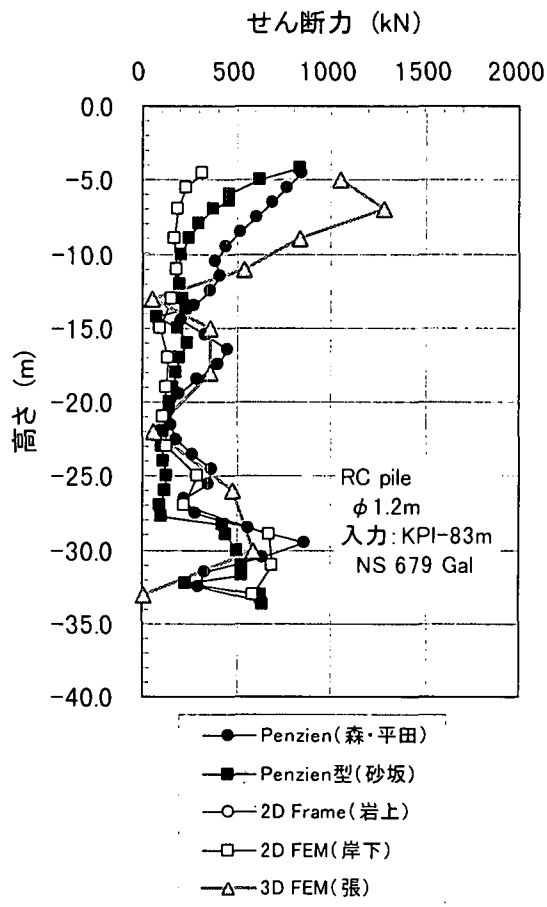
(e) 各モデルの比較

これまで、主に各解析法の特徴をモーメント分布の形状などに注目して考察した。ここでは、分布形状に加えて大きさについても比較検討する。

図-9に全ての解析法による杭の最大曲げモーメント分布を示す。(a)は線形解析、(b)は非線形解析の結果である。杭頭部(-4m:A)、浅部層境界(-14m:B)、深部層境界(-28mと-32m:C)のおよそ3箇所曲げモーメントが大きくなることは前述したが、A部においては2D-FEM、Penzienモデル、2D-Frameが他より大きい。Penzienモデルは、フーチング部分に対する水平ばねを杭のばねとして算定したものを与えており、フーチング部分の水平抵抗を過小評

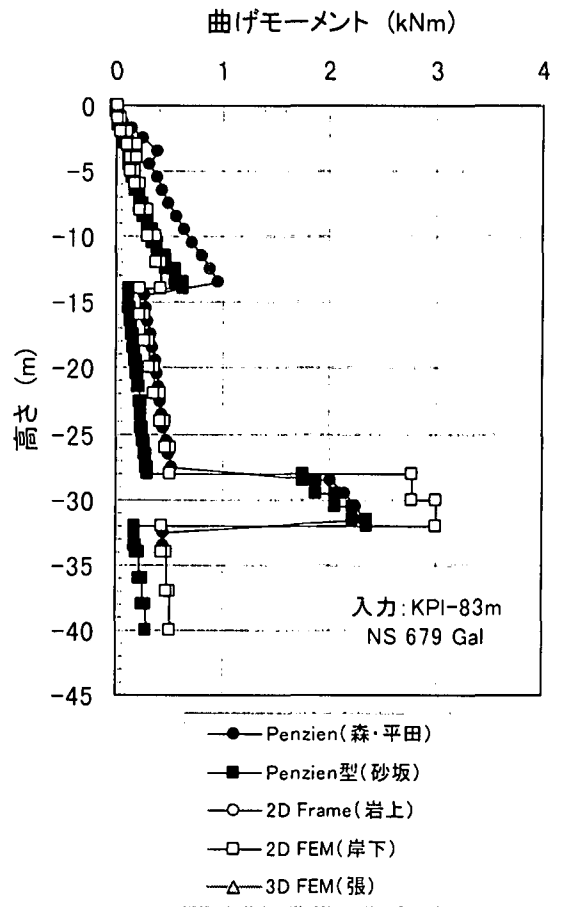
価したために大きくなったものと考えられる。2D-frameモデルはA部のほかにB部でもひととき大きいことから、そもそも水平ばねが過小評価されていると考えることができる。道路橋示方書のばねを用いた場合、線形解析時にはばねを過小化すると言える。C部では解析法による違いが大きく現れている。2D-FEMが最も大きく評価し、2Dframeが最も小さく評価している。前者は地盤の変形をまともに受けるという解析法の特徴であると言えそうだが、後者については前述のばねの過小評価に起因すると言える。また、ここに示されたPenzien型モデルだけが-26m付近に大きなモーメント分布の膨らみを示しているが、その理由はわからない。3D-FEMと比較すると杭頭曲げモーメントの大きさだけでは、Penzien型モデルに近いが、分布形状と大きさの両方から見たとき、Penzienモデルと2D-FEMがよく似ている。

一方、非線形解析ではB部のモーメントのピーク位置(深さ)やその大きさが解析法によって著しく異なる。B部では3D-FEM、Penzienモデルが大きく、2D-FEMが最も小さい。2D-Frameの位置が1Dモデルと異なるのはばねの違いによるものと考えら



非線形解析による杭のせん断力

図-10 全ての解析法による杭の最大せん断力分布



非線形解析による地盤せん断ひずみ

図-11 全ての解析法による地盤の最大せん断ひずみ分布

れる。C 部においても大きく異なり、Penzien モデルと 2D-FEM が大きくその後に 3D-FEM が続く。2D-Frame の値が最も小さい。3D-FEM と比較すると A 部では Penzien モデルと 2D-Frame が、B 部では Penzien モデルが、C 部では Penzien 型モデルに近いが、分布形状と大きさの両方から見たとき、Penzien モデルがよく似ていると言える。

(f) せん断力

これまで曲げモーメントについて見てきたが、せん断力分布を見て地盤との力のやりとりを見てみる。図-10 に非線形解析におけるせん断力分布を示す。図には一部の解析法のみ示している。3D-FEM と比べて Penzien モデルと Penzien 型モデルは-15m 以浅ではせん断力が小さい。これは杭周辺の地盤反力が後者 2 者では小さいことを意味しているが、地盤ばねの非線形性を 3D-FEM に比べて過大に評価しているためと考えられる。-15m 以深ではためであるが、3D-FEM と Penzien モデルとはよく一致しており大局的には地盤ばねの評価は 3D-FEM 相当であると言える。

(g) 地盤のせん断ひずみ

図-11 に各解析法による地盤の最大せん断ひずみ分布を示す。ひずみ分布が異なるのは、0.5%を越える動的変形特性を確定せずに解析担当者に任せただけのために大きいひずみ領域における変形特性が異なっていたためであると考えられる。このような大きなひずみレベルの動的変形特性については実験データが少ない上、それより小さいひずみレベルでの挙動に比べて著しく異なることから、今後の研究やデータの蓄積が必要と考えられる。

以上の動的解析によれば、解析条件の違い、線形・非線形の違いや 1 次元・2 次元・3 次元の違いなどによらず、地中部には、地盤の変形に起因する杭応力が発生し、これを無視した設計はもはやあり得ないことを物語っている。

地盤の非線形性のモデル化（構成関係の違い）が結果を大きく作用する。異なる構成モデルでも同様な結果を導くためのパラメータの設定技術の開発が望まれる。

4. 杭基礎の動的相互作用解析の注意点

一斉解析を行ってわかったことの多くはこのケーススタディーにのみ成立することかもしれない。しかし、この結果を活かすために、これまでの知見や経験を交えて、本章で杭基礎の動的相互作用解析の注意点として纏める。

本章の執筆に先立って連名者よりいくつかの意見を戴いたが、執筆内容のほとんどは第一著者によるものであり、連名者の合意を得たものではないことを予め記しておく。

(1) 位置の異なる杭の評価と杭の集約

1D モデル (Penzien 型モデル) では 12 本が 1 本に集約されるので、位置の異なる杭の水平力の分担率の違いは表現できない。2D-Frame では、杭によって異なるばねを設定することにより分担率の違いを表現することはできるが、水平ばねと鉛直ばねについては各杭との同じものが用いられているので、地盤変形が杭に及ぼす影響は同じであり、水平方向荷重に対する各杭の挙動に差はない。ロッキングによる杭の軸力変動分が各杭で異なるとは言え、1D モデルでもロッキングばねへの各杭の寄与分に応じて軸力応答を算定することは容易である。したがって、複数の杭に対して杭の打設角度、水平地盤ばねや地盤の入力変位に違いがなければ 1D モデルとの差はないと言える。

(2) 周辺地盤のモデル化

地盤を、不規則領域からの振動もしくは構造物の振動の影響を受けない「自由地盤」と影響を受ける「周辺地盤」に分けると、FEM では境界内の領域は基本的に周辺地盤である。前述のように、境界を遠くに設けた場合に境界近くの周辺地盤の挙動は自由地盤と見なせるほどになるかもしれないが、構造物基礎の近傍では、基礎と地盤との力のやりとり(動的相互作用)による応力が自由地盤の応力に比べて大きいものとなる。構造物と地盤の全体をモデル化した FEM では、この動的相互作用は自然と考慮されるが、1D または 2D の質点系モデルでは、工夫が必要である。

(3) Penzien 型モデルと杭周面の逸散減衰

Penzien 型モデルの詳細については森に譲る¹²⁾。オリジナルの Penzien モデル¹³⁾では、杭基礎の逸散減衰を、運動エネルギーで等価として算定された有効質量に対して、地盤と構造物の相対加速度と乗じた力を動的相互作用力として考慮している。森・平田の解析⁷⁾はオリジナルの Penzien モデルである。また、河村¹⁴⁾は杭基礎の近傍の地盤を実体のある

土柱として捉えようとすることを提案したが、これは絶対加速度に比例する慣性力と土柱として結合されたせん断ばねによる抵抗力の 2 者を考えようとするものである。森¹²⁾¹⁵⁾はこの考え方を採用しており、宮本¹⁶⁾は後者の抵抗力を採用している。砂坂⁹⁾は宮本の解析法によっている。また、Penzien 型モデルでは側方からのばねの他にダッシュポットを設けているものが多いが、これによっても逸散減衰を考慮している。

2D-Frame モデルでは周辺地盤を水平ばねのみに置き換えており、土柱としての効果は算入していない。周辺地盤の合理的なモデルを行わないのであれば、同じ断面の直杭の群杭を集約しない 2D、3D のモデル化は不要である。しかし、曲げと軸力が干渉する軸力変動を考慮した部材に杭をモデル化する場合には、2D、3D のモデル化は重要となってくる。

(4) 水平地盤ばね

Penzien 型モデル (1D モデル) や 2D-Frame 解析では周辺地盤の変形を地盤ばねを介して作用させるが、ばねの評価如何で応答が大きく変化する。地盤ばねの評価には、設計規準によるもの、Mindlin-2 解を利用するもの¹³⁾¹⁷⁾、薄層要素法 (TLE) を利用するものなど千差万別である。薄層要素法では周波数依存の複素ばねを評価しうるので動的相互作用を適切にモデル化できるが、非線形解析では複素ばねは扱えず、相互作用を単純な機械ばね (周波数依存のばねではないと言う意味) で表すのであるから表現力には無理がある。

なお、Mindlin-2 解を利用したばね算定は薄層要素法より容易であるとは言え、複雑な計算の手間が必要であるため、実務で使いにくい。三輪・森¹⁸⁾は誰でも利用できる簡易評価式を開発している。

実際の挙動を再現できるのが理想的であるので、杭頭加力や地震波入力の際の線形応答が再現できる解析であることが求められる。線形時 (弾性体内での微小変形時) には、PS 検層によって測定される V_s 、 V_p の物性を有する弾性体中の杭を想定した際の理論解から得られるばねであることが望ましい。設計規準に示された水平ばねの評価式は、杭頭加力の実験から得られた荷重～杭頭変位関係や荷重～杭ひずみ分布を基に逆算された水平地盤反力係数の実験値に基づいている。すなわち、ある程度非線形領域に入った際の杭の特性長に匹敵する深さで浅の表層の結果に基づいていると考えられる。したがって、設計規準などの杭の水平ばね評価式に基づく、線形時のばねを過小評価することになる。このことは特に深い位置でのばね評価に著しい影響があると考えられる。

(5) 水平地盤ばねの非線形性

水平地盤ばねの非線形性については我が国では定説がないと言える。ちなみに、米国では API-RP2A (アメリカ石油協会の Offshore platforms の設計規準)¹⁹⁾や工兵隊の技術規準「深い基礎の設計」²⁰⁾には、標準的な p-y 曲線が載っているらしい。我が国では、双曲線型のモデルや R-O モデルが準用されることが多いが、物理的あるいは実験的な根拠に乏しい。また、バイリニアでモデル化されることもある。これらのモデル化は、単に土、コンクリート、鋼材の非線形特性として用いられてきたものの準用であって、合理的な根拠に関する研究が望まれる。

実験的な研究では、杭頭載荷の実験が豊富であるがこれらの実験データは地表に近い表層地盤の特徴を反映したものであり、特に地表から離れた深い地盤の特徴を反映した実験が望まれる。なぜなら、浅い地盤で見られた地盤反力の上限の存在は表層の全般破壊で説明されるが、深い地盤ではどのような非線形特性になるのか不明であるからである。上限値は存在しないことが予想される。(もしそうであれば、表層付近には、双曲線型やバイリニアのような上限を持つタイプを、深い部分には R-O のような上限を持たないタイプが想定される。)

すなわち、地盤の水平ばねの復元力特性は、微小変形時の勾配を微小ひずみ時の地盤の変形特性を用いて算出することと大変形時に上限を有するのか有さない(接線勾配が一定となるような)のかを判断した上で特性を決定することが重要である。

(6) 杭のモデル化

2D-FEM では、加力・加振方向に配置される各杭の応答は異なる。3D-FEM では、その方向の杭に加えて、加力・加振の方向と直交する方向に配置される各杭の応答の違いも表現できる。なお、FEM では、線形解析であれば図の対称条件を用いて左右半分のモデル化でよいが、非線形解析では加振方向へのモデル化領域に対称条件を持ち込むことはできない。図のようなモデルが必要である。この点は、3D-FEM でも同じである。しかしながら、後者ほどモデルの作成や結果の解釈の面で実務に歓迎されるものと考えられる。

その他、応答が大きく非線形性が強くなる場合には、地盤と杭の間のすべり、剥離などの幾何学的な非線形応答を評価する要望が出てくる。これには、ジョイント要素を導入するほか、非線形のバイリニアばねで地盤と杭を結合する方法も採られる。

(7) 杭の分割

また、杭の軸方向分割は、3D-FEM, 2D-FEM, 2D-Frame, Penzien 型モデルの順で、12, 16, 30, 30

である。これらのモデルにおける要素分割は担当者が独自に決めたものであるが、解析法とのバランスが良く取れているものと思われる。

杭の軸方向分割で考えなければならないことは、考慮する振動数のせん断波が精度良く伝播できる水平成層の鉛直方向分割に併せることと弾性床上の梁としての精度に見合うようにすることの2点である。前者は良く知られているが、後者は意外と考慮されていないことが多い。後者については、横山²¹⁾が弾性床(連続ばね)上の梁と弾性支承(離散ばね)上の梁の比較計算から、 $1/(10\beta)$ 以下にすることを提案しており、著者はこれを目安としている。ただし、 β は杭の特性値であり、 $\beta = (kD/4EI)$ ¹⁴⁾と表され、 k : 水平地盤反力係数(N/m³)、 D : 杭の直径(m)、 E : 杭のヤング係数(N/m²)、杭の断面2次モーメント(m⁴)である。

(8) 軸力変動を考慮できる杭の構成モデル

入力地震動が大きくなると杭に生じる引っ張り軸力が大きくなり、コンクリート系の杭には全断面有効でない状態が出現する。その際には杭の曲げ剛性やせん断剛性が大きく変動して、応答が変化し杭の分担率に大きな違いをもたらす。また、変形性能も大きく変わることから、軸力変動を考慮できる杭の構成モデルの導入が必須となってくる。

酒向・宮本²²⁾は変動軸力の考慮が重要であることを2D-Frame モデル(あるいは複数の杭に分割した Penzien 型モデルと見る)を用いて例示した。立石・古池²³⁾は2D-FEM モデルに2D-Frame をばねを介して結合して解いた。孫・後藤²⁴⁾は酒向・宮本のモデルに類似の解析を行った。

(9) FEM の要素分割と境界条件

FEM 解析の場合、動的相互作用を忠実に評価したいという目的から、水平成層地盤にせん断波が鉛直下方から入射することを前提として考えられることが多い。その場合には、せん断波の重複反射や下方への透過(逸散)が考慮されている必要がある。重複反射理論はこのことが考慮された理論である。FEM モデルや質点系モデルの場合には、鉛直方向の伝播が再現できるように、考慮する振動数に対する波長の1/4以下にすることが要請される。さらに、下方端部にダッシュポットを設けることによって、下方への波動の逸散をある程度実現される。

また、水平成層地盤中に不規則領域があったり構造物を含む領域があったりすると、その領域の応答と水平成層地盤領域との応答の違いが波動として周辺地盤に向かって射出される。射出された波動は地盤に逸散して行くはずであるが、系の境界で反射を繰り返し閉ざされた系の中に閉じこめられてしまう

ことによって系の応答を過大評価するということが起こる。このような逸散減衰を正当に評価するために、エネルギー伝達境界、無反射境界、粘性境界などの境界に対する工夫が施されるのが一般的である。このような波動逸散のための境界処理に関する研究開発は1970年代、80年代に精力的になされた。

しかし、非線形解析や液状化を対象とした有効応力解析の研究が活発になるに連れて、その困難さから逸散減衰を念頭に置いた境界処理はなされないことが多くなっている。このような境界の処理に対する技術を適切に導入することは一般に困難であるため、攪乱波動が境界に到るまでに十分減衰することを図って境界を不規則領域から遠く離れた場所に設定することによって対処することが多い。その場合には、攪乱波動が境界に達するまで伝播する必要があるが、そのためには水平方向も鉛直方向と同等の間隔で要素分割を行う必要がある。

具体的には、分割長さを攪乱波動として想定する周期（例えば構造物の2次や3次の卓越周期）の波の波長の4分の1以下にする必要がある。SH波入力問題では攪乱波動はSH波とLove波であるので、S波の波長を想定すればよい。また、通常多いSV波入力問題では攪乱波動は、SV波とRayleigh波が主であるのでS波の波長を想定すれば概略十分である。このときP波を想定すると異常に長い要素でも良いことになるが間違いである。また、不規則領域から離れて境界近くで横方向に長い扁平な要素分割をしている例をよく見かけますが、その長さの2倍の波長以下の周期の波は要素によって拘束され波動の逸散減衰は評価されていないと考えた方がよい。

(10) 2D-FEM 解析の奥行き

構造物と地盤の動的相互作用解析を2次元のFEMで行おうとしたとき、奥行き方向に続かない独立した構造物の場合、構造物と3次元の地盤との相互作用を2次元モデルにどのように考慮するかが問題になる場合が多い。

解析の考慮する地盤の奥行きについて、大平ら²⁵⁾はフーチング奥行き²⁶⁾の2倍を考えている。

石原・三浦²⁶⁾は、3~12階の建物に対して5種類の杭配置を組み合わせ、上部構造物-杭-地盤を3次元FEMによりモデル化して地震応答解析を行い、その結果と等価な結果の得られる2次元FEMモデルの奥行き方向モデル化幅について検討した。ここで等価とは、構造物や基礎の各質点の加速度に着目している。3次元モデルと等価な2次元モデルに考慮する奥行き方向幅の建物幅に対する比率は、上部構造の基礎に対する相対加速度と基礎のロッキング角加速度とでは異なるとしている。論文によれば、前者は1.4、後者は1.2である。上部の応答と

基礎のロッキング応答が同時に3次元モデルの応答の3%以内に収まるモデル化幅の比率は、建物の階数によらず杭本数（建物の平面規模）に依存し、杭本数が多くなるほど比率は1に近づく。杭配置が2×2から6×6に増えると、最適比率は2.1から1.2に変化する。最適な比率を用いた2次元モデルでは、振幅は異なるが杭頭のひずみ波形が3次元モデルによく一致したことを述べている。すなわち、彼らによれば1~2倍の間にあることになる。

岸下・三浦²⁶⁾は、今回の一斉解析の結果から、解析奥行きを広げると曲げモーメントは増大することを指摘しているが、前述の考察で示したように、他の解析結果との比較からは1倍または0.5倍でも良いと思われる。

解析奥行きをフーチング奥行きに対する比率として検討されている事例が多いが、杭基礎の場合は杭の部分に注目して、杭本数や杭の断面積を基本的なパラメータにして検討することが重要と考えられる。

Penzienモデルで算定される有効質量は、土柱の面積に換算するとフーチングより下の地盤部分と同程度かそれ以下の面積になることが多い。

(11) 3次元解析と2次元解析の比較

3次元解析と2次元解析の比較に関する研究についていくつか紹介する。黒澤ら²⁷⁾は、軟弱層に建つ杭基礎の超高層建物を対象に、杭・構造物系のモデル化を2次元および3次元液状化解析において比較している。それによれば、上部構造物の加速度応答は両者とも概ね等しかったが、伝達関数は2次元で表現できない振動数もあったこと、過剰間隙水圧と杭の応力は2次元の方が安全側に評価したことを述べた上で、杭の応力は2次元解析で概ね評価が可能であるとしている。

鈴木ら²⁸⁾は、杭基礎の円筒形の構造物を対象に2次元および3次元液状化解析を行い杭の応力について比較している。それによれば、基礎中心部の杭については、最大曲げモーメントは2次元と3次元の結果はよく一致するものの、加振直角方向の側端部の杭については2次元より3次元解析の方が杭頭部で大きく2次元では評価は困難としている。

(12) 3次元解析における杭の水平力分担の変化

3次元でも非線形化が進めば、平面的な杭の位置による応力分担が平坦化される研究がある。三浦²⁹⁾は、薄層要素法により杭の周囲に非線形化の影響を考慮した剛性下部を設けて群杭の水平剛性を評価し、杭頭のせん断力分布は隅杭ほど大きくなる様子が、非線形化が進めば一様分布に近づくことを明らかにしている。

しかし、今回の一斉解析における3次元解析の結

果は、逆の傾向であり、線形では分担率に大きな違いがなかったものが、非線形になると分担率が大きく異なっている。前者の解析が等価線形解析で後者が非線形解析であるためであろうか？今後の検討課題である。

また、3次元解析において多数の群杭を少ない数の杭で評価しようと言う研究³⁰⁾もある。

(13) 減衰

減衰については、応答値の大小を左右するため極めて重要であるが、深く吟味されない場合も散見される。物理的な機構がよくわかっていないことやモデル化が多種多様であることがその理由と考えられる。

非線形解析では、減衰力（減衰マトリクス）と要素の非線形の復元力特性から応答の結果として得られる履歴減衰が併せて評価されることに注意が必要である。特に非線形性が強い場合には履歴減衰が支配的であろうと考えられるが、非線形解析の場合、前者の減衰力は線形応答の際に必要な減衰であり、Rayleigh 減衰（質量比例減衰と剛性比例減衰の線形和： $C = \alpha M + \beta K$ ）であることが多い。この減衰は線形和を形成する各項の比例係数 α 、 β の2つのパラメータを与える必要があるが、一般的には、構造物（地中構造物や土構造物の場合には地盤）の1次と2次の振動数に対して、または構造物と地盤の1次の振動数に対して一定の微小な減衰定数（例えば1~2%）になるようにパラメータを決める場合が多い。

n 次のモード減衰 h_n は、

$$h_n = (\alpha / 2) / \omega_n + (\beta / 2) \omega_n$$

で表されるので着目する2つの角振動数 ω_1, ω_2 から比例係数を求める。

また、Rayleigh 減衰と言いながら、質量比例分の係数をゼロにした場合、剛性比例減衰になるので、高次の振動数に対しては過大な減衰を設定することになる。

要素ごとに減衰を設定し、振動数に依存しないひびきエネルギー比例型の減衰を用いることもあるが、このタイプの減衰は、非線形化によって固有モードの変化が大きくないことを前提としていることに注意する必要がある。

5. まとめと今後の課題

本報告では、杭基礎耐震設計研究小委員会のWG-Aの活動報告として、最後の2年間にわたって実施した一斉解析について結果を考察した。また、今後の動的解析の一つの指針とするべく注意点を纏

めた。

最後に、WG-Aの委員氏名を掲げて、これまでの活動に対して謝意を表します。

WG-A 委員（延べ16名）

三浦 房紀 山口大学工学部（小委員会委員長）
森 伸一郎 愛媛大学工学部（WG-A 主査）
福島 弘文 JR 東日本コンサルタンツ（幹事）
岩上 憲一 構造技術センター
上島 照幸 電力中央研究所
大滝 健 東急建設技術研究所（途中退任）
大塚 久哲 九州大学工学部
岸下 崇裕 フジタ技術研究所
清宮 理 早稲田大学理工学部
砂坂 善雄 鹿島建設土木設計本部
竹宮 宏和 岡山大学環境理工学部（途中退任）
田蔵 隆 清水建設技術研究所
谷川 雅一 日特建設技術本部
張 鋒 岐阜大学工学部
松岡 利一 建設技術研究所
渡辺 泰介 東急建設技術研究所（後任）

参考文献

- 1) 森 伸一郎, 三浦 房紀: 杭基礎構造物の地震応答解析法, 杭基礎の耐震に関するワークショップ, pp.1-7, 1999.8
- 2) 張 鋒, 木村 亮, 盧 志偉: 軸力変動を考慮できる AFD モデルを用いた杭基礎・地盤・上部工一体系弾塑性動的解析, 杭基礎の耐震設計法に関するシンポジウム, 土木学会, 2001.9. (掲載予定)
- 3) 岸下 崇裕, 三浦 房紀: 2次元 FEM 解析による杭基礎の動的挙動について, 杭基礎の耐震設計法に関するシンポジウム, 土木学会, 2001.9. (掲載予定)
- 4) 大塚 久哲, 岩上 憲一: 2次元フレーム解析による杭基礎の動的挙動について, 杭基礎の耐震設計法に関するシンポジウム, 土木学会, 2001.9. (掲載予定)
- 5) 砂坂 善雄: 杭基礎式構造物の多質点系モデルによる地震応答解析について, 杭基礎の耐震設計法に関するシンポジウム, 土木学会, 2001.9. (掲載予定)
- 6) 森 伸一郎, 平田 昭博: 地盤-杭基礎構造物系の地震応答に及ぼす系構成要素の非線形性の影響, 杭基礎の耐震設計法に関するシンポジウム, 土木学会, 2001.9. (掲載予定)
- 7) 大塚久哲, 久納淳司, 五瀬伸吾: 橋脚-基礎一体モデルの地震時挙動に関する考察, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.1705-1710,

- 1998.12
- 8) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，1996.12
 - 9) 福島 弘文：杭基礎を用いた RC 橋脚の耐震性の検討，杭基礎の耐震に関するワークショップ，pp.101-105，1999.8
 - 10) 今津 雅紀，福武 毅芳：砂礫材料の動的変形特性，第21回土質工学研究発表会，pp.509-512，1986.
 - 11) T. Takeda, M.A. Sozen and N.N. Nielsen: Reinforced concrete response to simulated earthquakes, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.96, No.ST12, pp.2557-2573, 1970.12
 - 12) 森 伸一郎：杭基礎構造物に対する質点ばね系モデルの提案とその実被害への適用，応用力学論文集，土木学会，Vol. 3, pp. 609-620, 2000.8.
 - 13) Penzien, J., Scheffey, C.F. and Parmelee, R.A.: Seismic Analysis of Bridges on Long Piles, J. of the Eng. Mech. Div., Proc. of ASCE, Vol. 90, No. EM3, pp. 223 -254, 1964.6.
 - 14) 河村 壮一：埋立軟弱地盤に建つ杭支持建物の地震動観測と解析（その 7）Penzien 型モデルと集約型モデル，日本建築学会大会学術講演概要集，pp.415-416, 1975.10.
 - 15) 森 伸一郎，滝本 幸夫他：液状化地盤における杭基礎構造物の動的相互作用と液状化解析の適用性，構造物の基礎と地盤との動的相互作用に関するシンポジウム，pp.173-180, 1990.
 - 16) 宮本 裕司ほか：非線形，液状化地盤における杭基礎の地震時応答性状に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集，第 471 号，pp.41-50, 1995
 - 17) 杉村 義広：軟弱地盤における長尺支持ぐい基礎の地震時振動性状に関する研究，早稲田大学博士論文，211pp., 1972.10.
 - 18) 三輪 滋，森 伸一郎：群杭基礎の相互作用ばねの簡易評価式に関する検討，土木学会第 25 回地震工学研究発表会講演論文集，pp.837-840，1999.7.
 - 19) American Petroleum Institute (API) Recommended Practice 2A (RP2A) "Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms", Twentieth Edition (July 1, 1993), its Supplement 1 (February 1, 1997), <http://www.api.org/>
 - 20) U.S. Army Corps of Engineers Engineering Division: Design of Deep Foundations, Technical Instructions, TI 818-02, 1998.
 - 21) 横山 幸満：くい構造物の計算法と計算例，山海堂，343p., 1977.
 - 22) 酒向 裕司，宮本 裕司：変動軸力を考慮した杭基礎の地震応答に関する解析的検討，日本建築学会構造系論文報告集，第 523 号，pp.79-86, 1999.
 - 23) 立石 章，古池 章紀：軸力変動を考慮した動的非線形解析による杭基礎の耐震性に関する一考察，土木学会第 25 回地震工学研究発表会講演論文集，pp.585-588，1999.7.
 - 24) 孫 利民，後藤 洋三：杭基礎を有する RC 橋脚の非線形地震応答解析，土木学会第 25 回地震工学研究発表会講演論文集，pp.837-840，1999.7.
 - 25) 大平，田蔵，中桧，清水：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，第 356 号/I-3, pp.303-312，1985.
 - 26) 石原 哲哉，三浦 房紀：構造物－杭－地盤系の相互作用解析における 3 次元解析と 2 次元解析との比較，土木学会論文集，No.501/I-29, pp.123-131, 1994.10
 - 27) 黒澤 到，福武 毅芳，藤川 智，大槻 明，宇野 壽郎：二次元および三次元液状化解析の比較による杭・構造物系のモデル化の検討，第 9 回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.1351-1356, 1994.12
 - 28) 鈴木 健，福武 毅芳，大槻 明，：円筒形構造物の杭基礎の液状化挙動（その 2：二次元と三次元の比較），第 49 回土木学会年次学術講演会概要集（I 部），pp.1636-1637, 1994.10
 - 29) 三浦 賢治：地盤ばね，逸散減衰，入力動に及ぼす土の非線形性，第 4 回構造物と地盤の動的相互作用シンポジウム－非線形動的相互作用の現状と課題－，日本建築学会，1995.10
 - 30) 藤川 智，上田 稔，熊崎 幾太郎，上村 均，福武 毅芳：動的非線形解析における群杭モデルの簡略化の検討，土木学会第 24 回地震工学研究発表会講演論文集，pp.629-632, 1997.7