

杭基礎構造物の地震応答解析法

森 伸一郎¹，三浦 房紀²

¹正会員 工博 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)

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) に分けて活動している。本報告では WG-A の活動内容を述べるとともに、杭基礎の地震応答解析法の違いとその使い分けに関して議論していることを紹介する。

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、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) に分けて活動している。WG-A 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、実務設計で使える手法を開発することを目標に活動している。そのためには、極めて大きい地震動の下での地盤と杭材料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。

WG-A は 13 名の委員で構成され (後掲)、2 ヶ月に 1 度のペースで研究会合が持たれている。

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 次元的效果のモデル化が問題となることが多い。

2. 活動方針と共通認識

(1) 検討課題

杭基礎構造物の地震応答を WG-A で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

その他に、地震応答解析の研究に関連することとして次の項目についても念頭に置くこととした。

- 耐震設計法
- 健全度調査
- 免震制震工法
- 最新技術・将来展望

(2) 活動の目的と方針

1997 年 7 月～1999 年 3 月、1999 年 4 月～2001 年 3 月の 2 期 4 年の最後に、杭基礎の耐震設計法の現状と課題をまとめ、実務設計に有用な手法を開発もしくは提示すること目標としている。大まかに、前半に話題提供を中心とした検討課題に関する議論、中盤に WG-A としての実施課題への取り組み、後半に活動成果のまとめを割り当てることを活動方針としている。なお、主査は 1998 年 9 月より三浦から森に交代した。

(3) 話題提供と得られた共通認識

WG-A に関連する話題提供や資料提供は、およそ次の通りであった。

- 大型せん断土槽による杭基礎の地震時挙動解明と杭応力算定法の提案：水野二十一
- PHC 杭の変形性能に関する実験：津田和義
- 場所打ちコンクリート杭水平加力実験：宮本和徹
- 繰り返し荷重下での高剛性耐震ジョイント杭の挙動：三浦房紀
- 東灘処理場の杭被害と数値解析：中山 学
- 地震被害における杭頭部の被害形態：森伸一郎
- 橋脚-基礎一体モデルの地震時挙動：大塚久哲
- 3次元構造物-地盤系の非線形動的解析：三浦房紀
- 土木構造物の新しい耐震設計の視点：大塚久哲
- 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評価：立石 章
- 杭基礎の3次元動的非線形解析プログラム：竹宮宏和
- 2次元・3次元非線形動的解析事例：田蔵 隆
- 3次元弾塑性静的/動的解析による杭基礎の耐震検討：張 峰

これらの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、これらの知見を整理する必要があるとともに、実務で広く利用されている2次元解析へのフィードバック技術の開発が不可欠である。
- FEM 解析が実務でも広く行われているとはいえ、まだまだ一部に限られており、そこで得られた知見を非線形性を取り入れやすい FRAME 解析で利用できる技術の開発が必要である。
- 現象の理解や FRAME 解析のために、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。

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。解析対象として、

はじめは 1995 年兵庫県南部地震による被害を受けた構造物を対象とすることが検討された。しかし、土木構造物においては種々の理由によりデータ提供が困難であること、被害要因が多く絡み合ったり個々の構造物で被害要因が異なったりして解析手法の良否を判断するのに適さないとの意見があったこと等の理由で対象から外した。解析対象として、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て一斉解析を行うこととした。

(2) 解析手法

解析手法は、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、次のものを実施することが決議された。

- 3次元線形/非線形・静的/動的 FEM
- 2次元線形/非線形・静的/動的 FEM
- 3次元線形/非線形・静的/動的 FRAME
- 2次元線形/非線形・静的/動的 FRAME
- 線形/非線形・動的 Penzien 型モデル

また、動的な地盤ばねを算定するために薄層要素法による計算も予定されている。

(3) 検討対象

試設計されるのは、新設を想定する道路橋基礎で大塚ら²⁾による。設計は道路橋示方書²⁾に則って行う。図-1 に橋脚基礎と地盤を示す。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。

橋脚は断面が 3.0m×3.5m 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（または武藤モデル）

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 (tf/m ³)	内部摩 擦角 (deg.)	粘着力 (tf/m ²)
1	埋め土	4	4	1.8	-	-
2	粘性土	10	2	1.7	0	2
3	粘性土	14	8	1.8	0	8
4	砂質土	4	16	1.9	31	0
5	砂質土	2	50	2.0	42	0

杭前後側面の地盤応力変位の比較

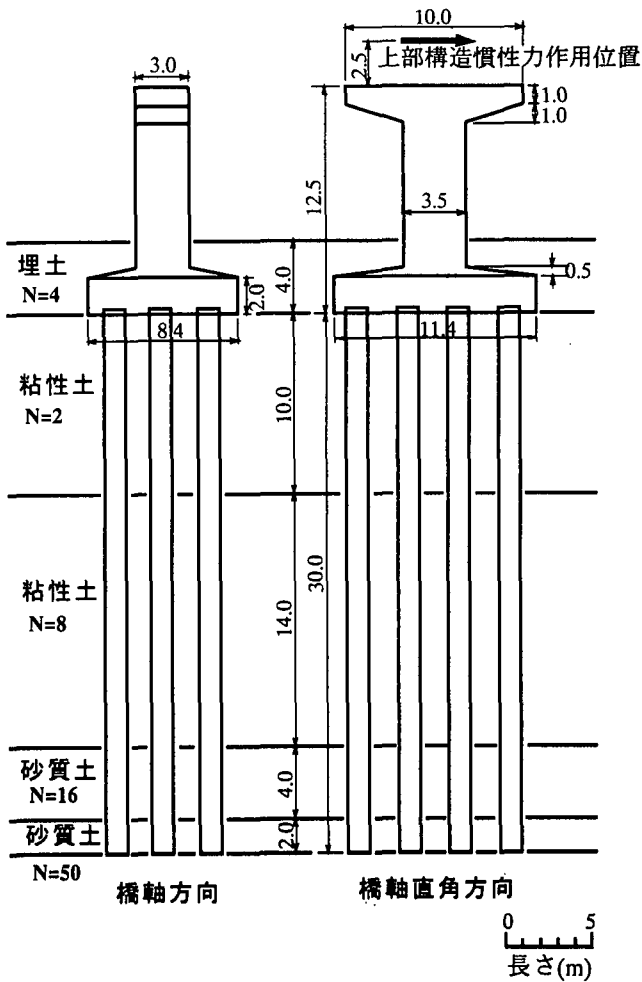


図-1 検討対象の橋脚基礎と地盤

とする。杭は場所打ちコンクリート杭とし、直径1.2m、長さ30mで3×4=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とする。

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。

(4) 検討手順

[第1ステップ]: 線形静的解析(慣性力載荷)

目的: 各解析法による杭頭水平抵抗, 杭の応力分布,

[第2ステップ]: 線形動的解析(杭端地震波入力)

目的: ①各解析法による杭の応力分布, 杭前後側面の地盤応力変位の比較

: ②静的解析(慣性力杭頭載荷)と動的解析(杭先端地震波入力)の比較

: ③地盤ばねの検証

[第3ステップ]: 線形解析結果の検討

[第4ステップ]: 構造・地盤材料の復元力特性設定

目的: 非線形動的/静的解析に用いるため

[第5ステップ]: 非線形静的解析

[第6ステップ]: 非線形動的解析(杭端地震波入力)
目的: 各解析法による杭の応力分布, 杭前後側面の地盤応力変位の比較, 線形と非線形の比較, 非線形解析での重要点の抽出, エネルギー等価則の検討

(5) 中間結果

解析手法により進捗状況はばらついているが、これまでに、一斉解析の準備検討である設計検討, 静的線形解析, 動的線形解析, 動的非線形解析など, 解析結果が本ワークショップの直前におおよそ出揃った。

ところが、条件や手順を統一することが困難であるため、十分に成果として報告する段階には到っていない。しかも、解析結果を集めて比較検討する段になって同じ解析条件で比較できるものが揃っていないことがわかった。これは、ボランティアワークとして実施しているため、担当者の興味のある解析だけが先行されたこと、主査が解析を担当できなかったため条件や進捗の統一に十分な指導ができなかったことによると思われる。この2点についてはワークショップ以降に解消されるべく改善の意見が出されているので、厳密な比較検討は次の機会に譲りたい。

そこで、第一段階の結果として、本原稿執筆までに間に合った解析を紹介するとともに、実施結果を比較できるものは比較し、そうでないものは簡単に整理分析してみる。なお、対象は3D-FEM(張委員), 2D-FEM(岸下委員), 2D-FRAME(大塚委員),

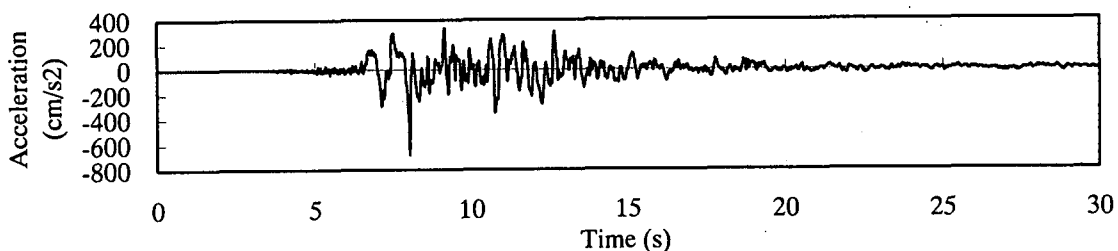


図-2 入力地震波の加速度時刻歴 (KPI-83m: NS成分)

1D-FRAME いわゆる Penzien 型 (砂坂委員) である。

はじめに、モデルについて考察する。図-3 に 4 つのモデルを併せて示す。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。すなわち、1D モデルでは 12 本が 1 本に集約されるので、杭の力の分担率の違いは表現できない。2D-FRAME では、各杭のばねは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。ただし、このモデルではロッキングによる杭の軸力変動分が各杭で異なる。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。

また、杭の軸方向分割は、前述の順で言えば、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。

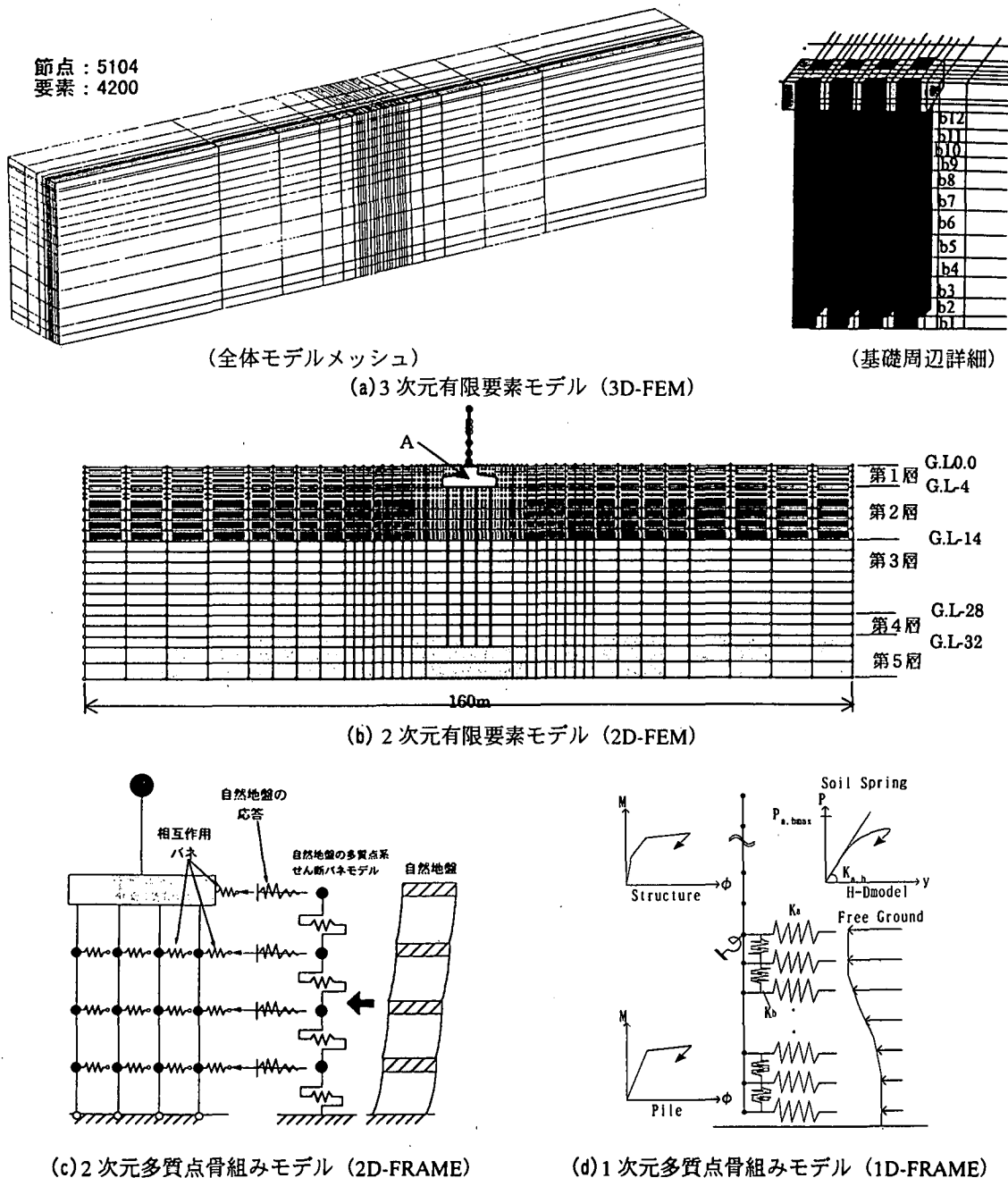


図-3 一斉解析で用いられている解析モデル

次に結果を見てみよう。

基礎に水平力を载荷する静的解析は 2D-FEM と 2D-FRAME で実施されている。図-4 に曲げモーメント分布を示す。最大値は杭頭部に出ており、前者が 107 tf・m、後者は 833 tf・m であり、その差は大きい。地中部の極大値は前者で-6m 付近、後方で-13m 付近である。これらのことから、見かけの杭の相互作用ばね値は前者に比べて後者は著しく小さいことが考えられる。これは、後者が、道路橋示方書に基づいたばね値を採用していることに起因するものと考えられる。図では判別しにくい、前者で杭の非線形性を考えた場合、-15m 付近まで線形の約 1/2 となっている。杭頭の 1 点を除きひび割れモーメントにも達していないので、見直しが必要である。

動的解析は、全ての方法で解析が行われている。

図-5 に線形動的解析による杭の最大曲げモーメント分布を示す。2D-FEM と 2D-FRAME では、静的解析と同様に後者は前者より大きい。しかし、10m 以浅ではほぼ同様の大きさである。このことから、杭頭部付近では、地盤変形の杭応力への影響は地盤の水平ばね特性の大きさに対する感度が鈍いことが考えられる。また、3D-FEM と 2D-FEM とは同様の分布傾向であるが、3D-FEM の方が総じて大きい。この比較に当たっては、前者は杭と地盤の接触面積を考えたモデル化になっているのに対して、後者では杭を梁要素としてモデル化していることに起因する可能性が高い。単に、2次元か3次元かという比較は禁物である。

図-6 に非線形動的解析による杭の最大曲げモーメント分布を示す。奇しくも 3D-FEM と 1D-FRAME というモデルの自由度の極端に違う例である。大きさを別にすれば、-10~-15m で 200 tf・m 前後のモーメントが生じている。これはほぼ降伏モーメントに相当する。これらの解析モデルでは、杭と地盤の両方に非線形性がモデル化されており、地盤の非線形化によって、地中部の杭の曲げが助長されることがわかる。また、-10m 以浅では 2つのモデルによる結果の差が大きく、1D-FRAME では、-5m 以浅で終局モーメントを超えている。これはモデル化の次元の違いによるのか、地盤の非線形化の違いによるのか、また別の理由によるのかわからない。

上述の非線形化による地盤変形に起因する杭地中部の応力増加の考察を確認するために、線形・非線形動的解析が行われ、提出された 3D-FEM 解析の結果を見てみる。

図-7 に 3D-FEM 解析による線形・非線形動的解析による杭の最大曲げモーメントを示す。線形では、杭頭が最大にならないという分布を示しているもの、大局的には杭頭に近い浅い部分に大きな応力が発生しており、相対的に地中部の応力は小さい。ただし、

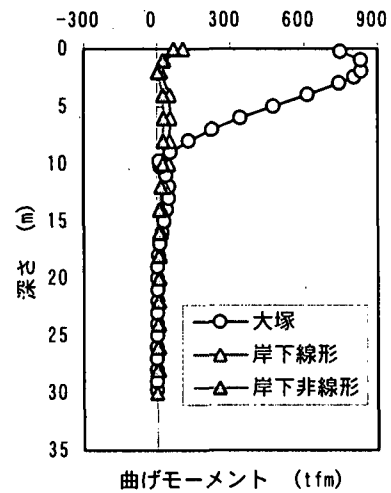


図-4 静的解析による曲げモーメント分布

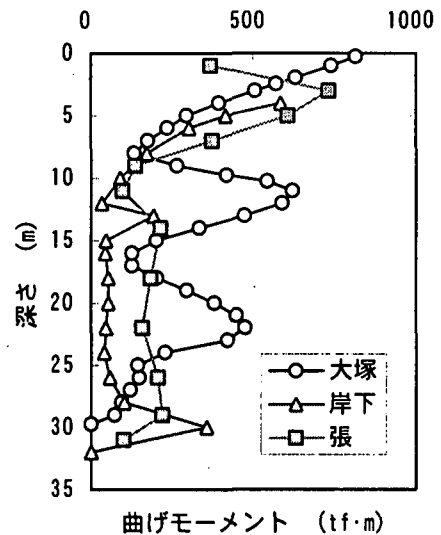


図-5 線形動的解析による杭の最大曲げモーメント分布

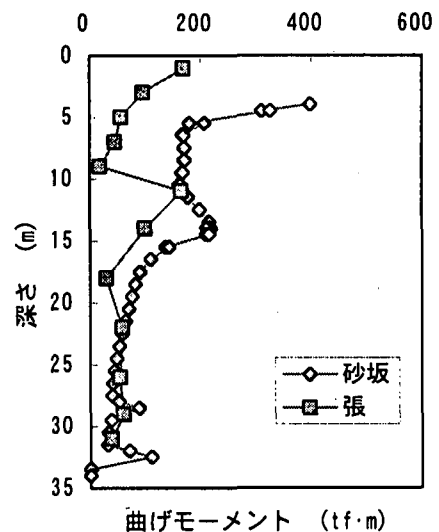


図-6 非線形動的解析による杭の最大曲げモーメント分布

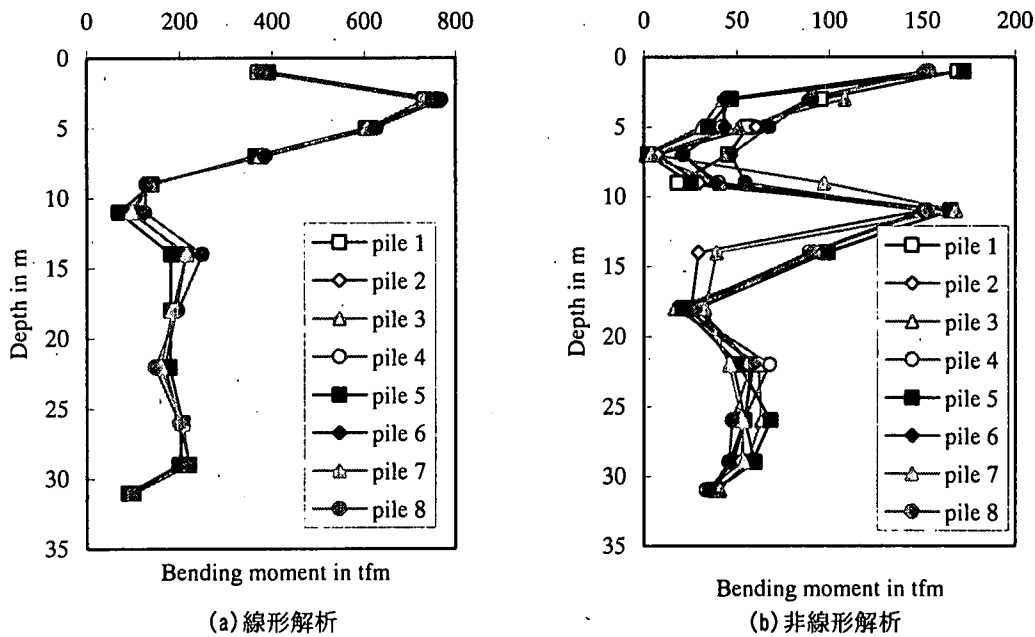


図-7 3D-FEM 解析による線形・非線形動的解析による杭の最大曲げモーメント

その大きさは降伏モーメントに達している。一方、非線形解析の方は、杭頭部と地中部-11m では同じ大きさの曲げモーメントが発生しており、その大きさは降伏モーメントを下回るものの大きなものとなっている。すなわち、相対的には非線形化によって地中部の曲げモーメントは、杭頭部に比べて目立って大きくなるのがわかる。

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。

そのほか、設計者の実務上の簡略図面を読み違えて、鉄筋の本数がわずかに異なることがあった。実務と研究、設計と解析の情報の確実な伝達が重要である。

4. 関連する研究：3 次元解析と 2 次元解析の比較に関する研究

WG-A では、3 次元解析と 2 次元解析の比較に関する議論が比較的多くなされた。そこでこれに関する研究についていくつか紹介する。石原・三浦 (1994) 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。すなわち、基礎のロッキングとスウェイを考慮した上部構造の応答加速度が 3 次元モデルと一致するような 2 次元モデルは存在しない。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。

黒澤ら⁴⁾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⁵⁾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。

副題からははずれるが、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⁶⁾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低下部を設けて郡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。

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、杭基礎の地震応答に関する研究について述べた。一斉解析も第一段階を終えたところで、十分な内容が報告できなかったが、現状を把握することができ、解決すべき課題が絞られてきた。ここでは報告できない様々な課題が浮上してきたが、このWorkshop以降、WG-Aメンバーは解決して新たな段階へ入ることを決意している。予定通りに進み、準備ができれば、広く呼びかけて会員参加の一斉解析を実施したいと考えている。

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 (13名)

三浦 房紀 山口大学工学部 (委員長)
森 伸一郎 愛媛大学工学部 (WG-A 主査)
福島 弘文 マエダ技術本部 (WG-A 幹事)
上島 照幸 電力中央研究所
大滝 健 東急建設技術研究所
大塚 久哲 九州大学工学部
岸下 崇裕 フジタ技術研究所
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
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

参考文献

- 1)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
- 2)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 1996.12
- 3)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.501/1-29, pp.123-131, 1994.10

- 4)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
- 5)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
- 6)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一, 日本建築学会, 1995.10

液状化 WG の活動と将来計画

1. はじめに

地震による杭の被害は、上部構造の慣性力に伴う水平力、軸力変動が原因であるものと地盤の変形に起因して発生するものに分けることができる。液状化 WG が対象とするのは、このうち、地盤の変形に伴う被害、特に、液状化に伴う被害である。ここでは、液状化 WG の活動計画を紹介する。

2. 被害に関する文献調査

杭基礎の被害は、1995年兵庫県南部地震以前はその実例はそれほど多いとはいえなかった。しかし、兵庫県南部地震の際には、非常に多くの被害が発生した。これらの被害は、いくつかの報告（たとえば文献1, 2）にまとめられていると共に、建築学会、土木学会、地盤工学会などに多くの被害報告が行われている。

被害の報告と共に、その被害のメカニズムを検討するために多くの研究も行われている。これらには、振動台実験、遠心力載荷試験の様に、被害のメカニズムを一般的に捉えようとする研究、個々の被害を取り上げて、その被害の原因を探求する研究などがある。

これらの研究は、事例として非常に重要である。そこで、本 WG では、まず、これらの被害および研究の事例を集めることを一つの目的とした。

兵庫県南部地震以前については、先にも述べたように事例もそれほど多くないこと、過去にまとめられたものもあるので、ここでは、兵庫県南部地震以後の被害事例、振動台や遠心力を用いた実験の結果に焦点を絞り、事例を集める。

調査範囲を広げ発表されている全ての被害を集めることが出来ればよいかもしれないが、現在の WG の陣容を考えると、これを行うことは非常に困難である。幸い、本 WG には、被害に詳しいスタッフもそろっている。そこで、観点を換え、杭基礎に関する被害のメカニズムを研究しようとしたとき、ある程度の資料が得られるような物件に関してのみ被害物件を集めることにした。これは、実験についても同様で、なるべく詳細なデータが公表されているものを中心としてデータを集めることにした。

調査の対象としたものは、以下に示すとおりである。

- ・地盤工学研究発表会
- ・土木学会阪神・淡路大震災学術講演会

- ・土木学会地震工学研究発表会
- ・土木学会年講
- ・建築学会大会
- ・日本地震工学シンポジウム
- ・地盤工学会地震時の地盤・土構造物の流動性と永久変形に関するシンポジウム(1998)
- ・建築研究所報告&建築学会近畿支部報告
- ・建築研究所資料
- ・BTL 委員会
- ・基礎工

調査の結果は、表-1に示すような、スプレッドシートにまとめることにした。表-1では、調査項目と調査内容の例が示されている。この調査は、この表だけで全てが分かるということまでを目的としたわけではなく、一覧を作成し、情報が必要な人がこれを基に必要な文献を取り出せることを目的としたものである。多方面の利用が考えられることから、調査項目はかなり多く挙げてあるが、一方では、項目として挙げた全ての情報が論文や報告に示されているわけではないので、空白の部分も多いのは仕方がない。しかし、同じ構造物に関する報告がいくつかの報告に分離して報告されており、それぞれに別の情報が示されていることもあるので、同じ構造物はなるべく集めることにした。なお、構造物名は、WG としては同定できるものもあるが、一方では調査時に名前を公表しない事を条件にしているものもあることから、この調査では全て示さないことにしている。

3. 事例解析

杭の被害のメカニズムを検討するための解析も、数多く行われている。それにも関わらず、ここで、新たに、事例解析を行おうとするのは、次のような理由からである。

個々の被害を解析する報告はある。これらの解析結果を否定するつもりは毛頭ないが、一般の技術者から見れば、問題がないわけではない。

たとえば、被害を説明するのに、ある解析が行われ、結論が得られているとする。しかし、本当にそれだけで説明できるのか、というより、それ以外のメカニズムでは説明できないのかということがわからない。兵庫県南部地震は、非常に大きな地震であり、構造物が壊れたという結果を説明するだけであれば、いくつかの方法があ

表-1 液状化及びそれに伴う側方流動に関する被害事例および実験事例リスト例

実被害		杭										地盤									
対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象			
対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象			
1 護岸近傍	建築(鉄筋コンクリート造3階建て、23.3x7.5m)	昭和56年	東灘区	基礎(フーチング形式、サイス等)	フーチング 1.65m埋め込み	杭頭および杭先端条件 フーチングに6cm埋め込み、PC鋼線で55cm定着、杭先端は洪積砂質土層に打ち	杭形式 PC(A種)	杭径φ(mm)と板厚t(mm)	40	杭長さ(m)	20	杭の破損状況 杭頭および液状化層と非液状化層の境界でクラック。液状化層は、GL-5mの地点で最大変位となるようなくの字変形。	最大杭変位(m)とその深さ 0.6(GL-5m)	護岸までの距離(m)もしくは斜面勾配	6	地表面地盤変位(m)	-	液状化層厚(m)	6	地下水位までの深さ(m)	2
2 水平地盤	建築(鉄骨造3階建て、30x9.5m)	1964-70	浜江区	基礎(フーチング形式、サイス等)	フーチング 1.5m埋め込み	杭頭および杭先端条件 フーチングに6cm埋め込み、PC鋼線で55cm定着、杭先端は洪積砂質土層に打ち	杭形式 PC(A種)	杭径φ(mm)と板厚t(mm)	35.45	杭長さ(m)	28	杭の破損状況 杭頭被害はほとんどなかったものの、GL-9mで大きく変形(クラックあり)。GL-3~6mでクラックが見られた。	最大杭変位(m)とその深さ 0.4-0.2(杭頭)	護岸までの距離(m)もしくは斜面勾配	350	地表面地盤変位(m)	-	液状化層厚(m)	6	地下水位までの深さ(m)	3

模型実験		杭										地盤				評価法						
対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象		
対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象	対象		
21 護岸近傍	構造物 橋脚	実験方法、スケール 大型振動台		基礎(フーチング形式、サイス等)	フーチング 0.3m埋め込み	杭頭および杭先端条件 杭頭、杭先端ともに固定	杭材料 (かっこ内はプロトタイプ) 鋼管杭	杭径φ(mm)と板厚t(mm)	60	杭長さ(m)	1.5	杭の破損状況 なし	最大杭変位(m)とその深さ -	護岸までの距離(m)もしくは斜面勾配	0.5	地表面地盤変位(m)	0.5	液状化層厚(m)	0.5-1.0	地下水位までの深さ(m)	0.0-1.0	杭ひずみ 杭ひずみ
22 護岸近傍	単杭	遠心(50G)		基礎(フーチング形式、サイス等)	フーチングなし	杭頭自由、杭先端固定	真鍮	杭径φ(mm)と板厚t(mm)	260	杭長さ(m)	7.5	杭の破損状況 なし	最大杭変位(m)とその深さ 0.5(杭頭)	護岸までの距離(m)もしくは斜面勾配	2-14.5	地表面地盤変位(m)	0.6-0.2	液状化層厚(m)	3.75-7.5	地下水位までの深さ(m)	0-3.75	杭ひずみ 杭ひずみ
斜面(2, 23.4%)	地中壁	振動台		基礎(フーチング形式、サイス等)	なし	杭頭自由、壁下端固定	塩化ビニール	杭径φ(mm)と板厚t(mm)	煙10cm、厚さ1cm	0.3	杭の破損状況 なし	最大杭変位(m)とその深さ -	護岸までの距離(m)もしくは斜面勾配	2%	地表面地盤変位(m)	-	液状化層厚(m)	0.25	地下水位までの深さ(m)	0.1	杭変位 杭変位	

りそうである。

解析のために、特殊な手法が使われていたり、非常に高度の手法が使われていると、一般の技術者は同じ手法を自分が求めたいと思っている構造物に適用することが出来ない。

論文として発表されるのは、うまく行った事例で、うまく行かなかった事例に付いては発表されないのが普通である。また、うまく行ったように見える方法でも、うまく行くために非常に多くの努力が必要であったケースもあると考えられるが、論文などの発表だけを見ていると、その様なことはなかなかわからない。

また、これほど明確な言い方でなくても、多くの技術者にとって、自分の使える手法で被害をどの程度説明できるかと言うことを知ることは重要であろう。

そこで、本WGでは、実被害を、なるべく多くの方法で解いてみて、どの程度現象の説明が出来るかということ を明らかにすると言う意味で、事例解析を行うことにした。

このような趣旨から、与えられたデータに基づいて、普通に用いられるであろう様な考え方にに基づき、被害を解析するということを基本的な考え方とした。さらに、余裕があれば、被害と合わそうとすれば、どのような点の修正が必要かとか、どのような点がわからないといけないかというような、検討もしたいと考えている。

解析手法も、特殊なものではなく、多くの技術者が使えるものを用いることにした。もちろん、これ以外に、特殊な手法でも可能であれば検討することとした。さらに、解析に用いる条件等はオープンにしているし、FEMのメッシュ等、データもオープンにしているので、趣旨に賛同していただける方であれば、WG委員でなくても解析を行っていただくことは構わない。というより、WGとして、非常に歓迎である。

このような趣旨から、解析対象は、なるべくデータが公開されているものが好ましい。また、異なる要因による被害は、あった方がよい。そこで、被害を次の三つに分類する事にし、それぞれについて解析対象を探すことにした。

- ①液状化に伴う地盤の流動が主要因と考えられる被害
- ②液状化に伴う動的な繰返し载荷が主要因と考えられる被害 (すなわち、流動が起こっていない)
- ③液状化が発生せず、地盤の動的な繰返し载荷が主要因と考えられる被害。

杭の被害として、これ以外に、上部構造物の慣性力が要因のものもあるが、本WGの検討とはあまりにかけ離れていることから、ここでの分類には入れていない。

これらについて、いくつかの事例をピックアップし、解析に用いることの出来るデータの量、解析対象として

の好ましさを勘案して、最終的な解析対象を選定した。なお、この過程で、③の液状化が原因ではない杭の被害については、WG1で行うのが自然と考えられるので、本WGでは行わないことにし、WG1にその解析を依頼することにした。

いくつかの検討の結果、次の三つを検討対象とすることにした。

- ①液状化：大成建設で調査している、上部構造のない杭の被害
- ②流動：魚崎浜の阪神高速とケーソン
- ③流動：神戸商船大学の護岸際の建物

次に、解析手法であるが、次のような手法を考えている。

①地震時における被害

手法	地盤	ばね
応答変位法	全応力	線形
		非線形
	有効応力	線形
		非線形 有効応力依存
有限要素法	FLUSH	
	液状化解析コード	

②流動による被害

- ・有限要素法
- ・応答変位法：地盤変位 (外力) の求め方として次のものを考える
 - 流動圧
 - 静的有限要素法
 - 経験式

対象構造物の内、①に付いては、本ワークショップで別途詳細な報告があることから、以下では残りの二つの構造物について、簡単に紹介する。

3.1 魚崎浜サイト³

図-1に対象構造物とケーソンの断面を示す。杭は、場所打ち杭で、 $\phi=1500\text{mm}$ 、 $L=41.5\text{m}$ である。図-2は周辺の地表に現れた亀裂を表したものであるが、亀裂は護岸に平行に走っており、海側への流動が起こったことがわかる。図-3は地震後行われた地盤の永久変位に関する調査結果を基にして、このサイトの地表の水平変位が護岸からの距離に応じてどのように減少していくかを示したものである。ケーソン位置では約2mの水平変位がある。

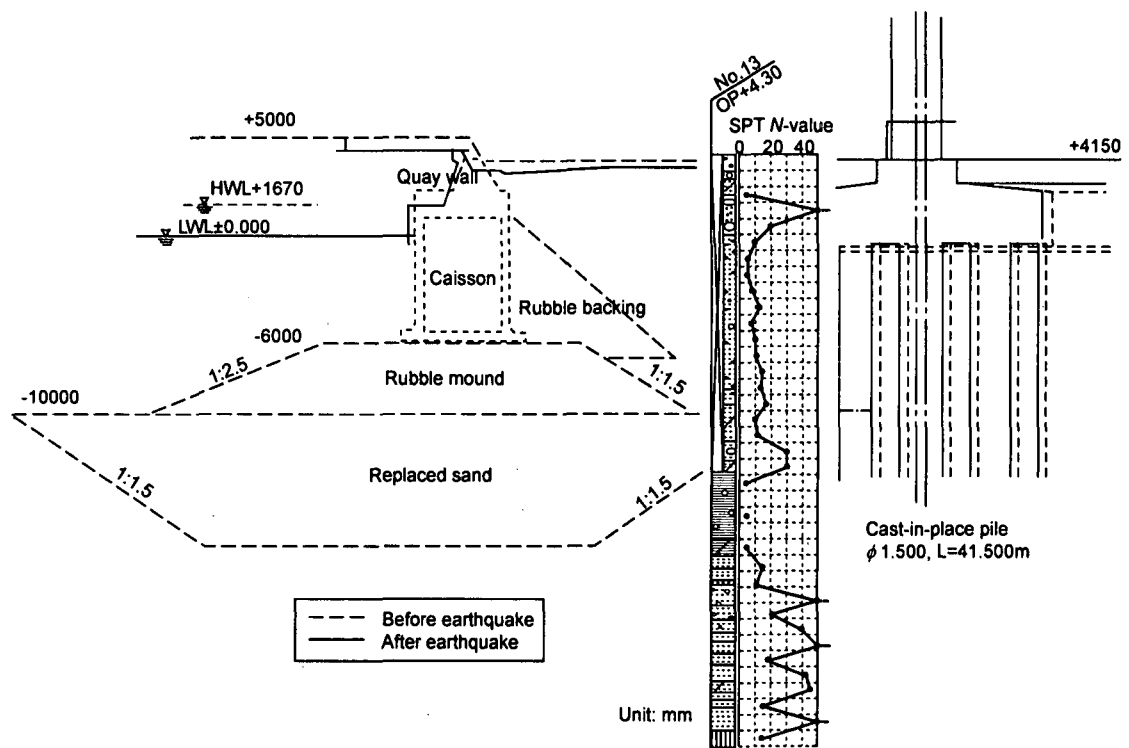


図-1 断面図

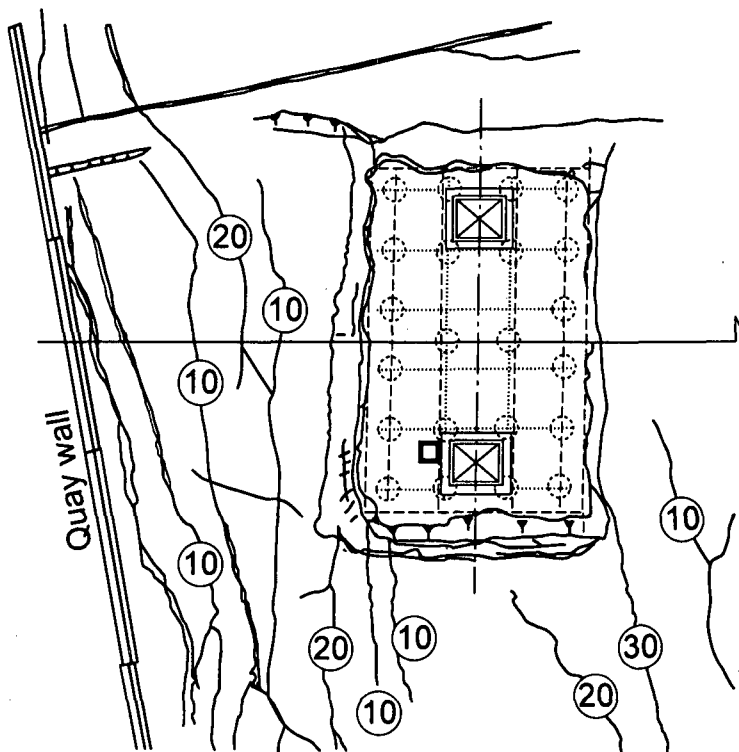


図-2 構造物周辺の亀裂

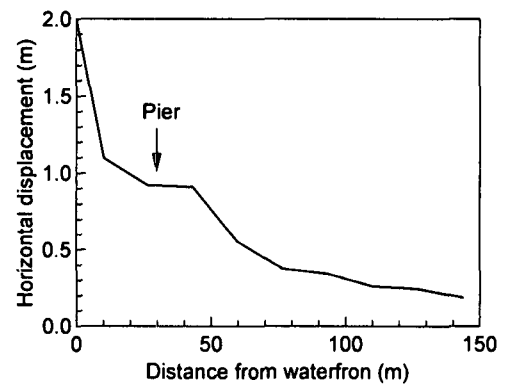


図-3 水平方向の変位

3.2 神戸商船大学サイト⁴

図-4に地震後の永久変位, 図-5に地盤の変位量と護岸からの距離の関係を示す。建物は、護岸のすぐ近傍に位置する。

図-6に柱状図を示すが、液状化層の深さは約10mである。また、図-7に杭の被害形態を示すが、地中でおれている。また、護岸に近い側の杭の方が被害が大きいのが特徴である。

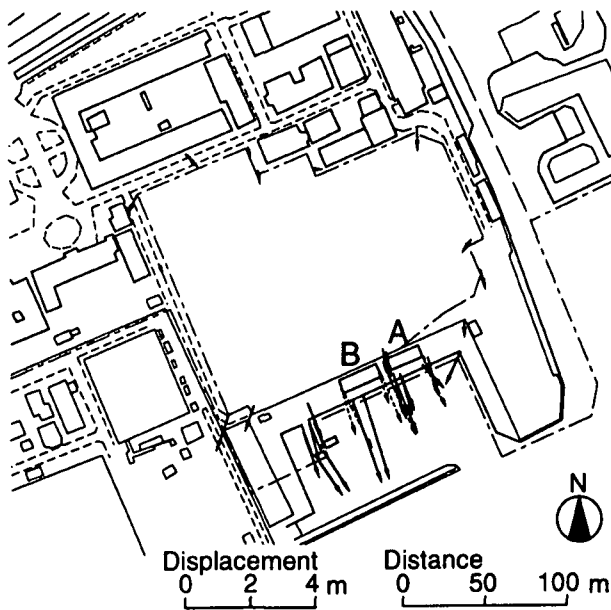


図4 平面図と永久変位ベクトル

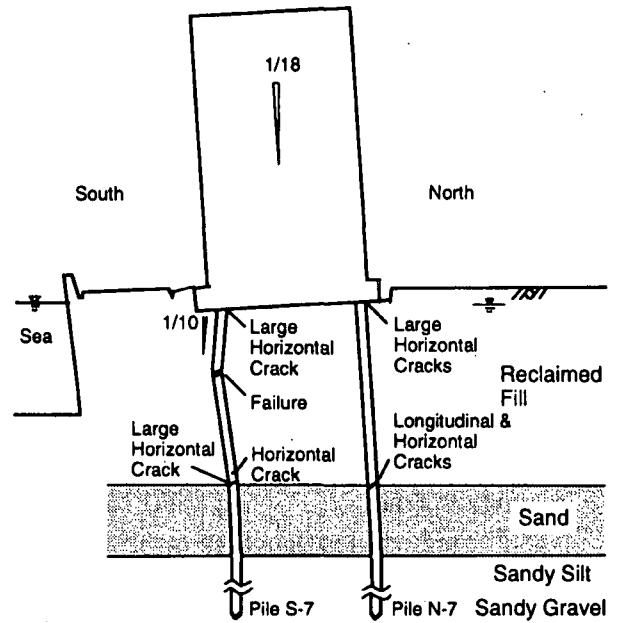


図7 被害形態

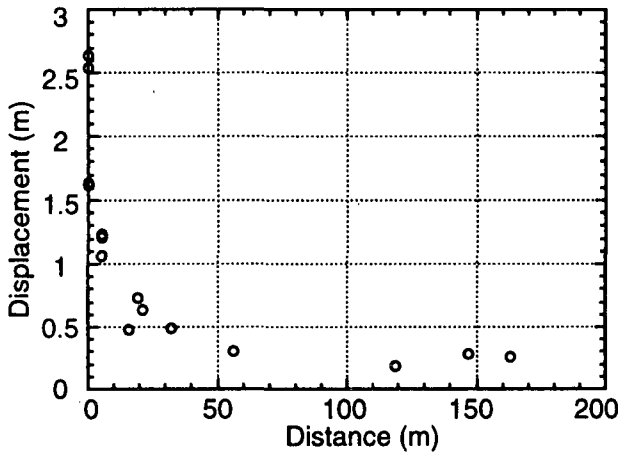


図5 水平変位の護岸からの距離による減衰

参考文献

- 1) 日本建築学会近畿支部基礎調査構造部会 (1996) : 兵庫県南部地震による建築基礎の被害調査事例報告書
- 2) 阪神・淡路大震災調査報告書委員会 : 阪神・淡路大震災調査報告書, 丸善
- 3) 金谷守, 吉田望 (1998) : 護岸構造物の地震時挙動に関する一斉実験・解析, 地震時の地盤・土構造物の流動性と永久変形に関するシンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp. 159-192
- 4) 時松孝次, 大岡弘, 社本康広, 浅香美治 (1997) : 兵庫県南部地震の側方流動による杭の破壊・変形モード, 日本建築学会構造系論文集, No.495, pp. 95-100

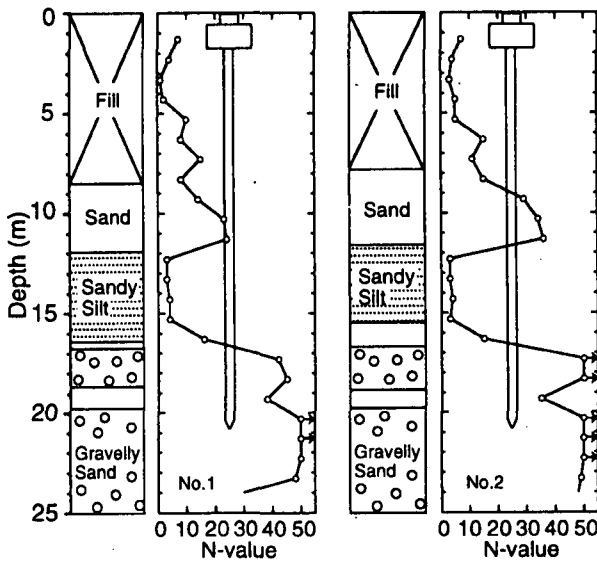


図6 柱状図

土木学会 杭基礎耐震設計研究小委員会

WG-C活動報告

1. 活動の目的

WG-Cの目的は杭基礎の新しい耐震設計を提案することにある。兵庫県南部地震の被害にも見られるように、杭基礎は上部工の地震時慣性力および地盤の変形に依存すると考えられる。そのため、杭基礎の耐震設計を検討する場合には地盤と構造物の動的相互作用を考慮する必要がある。また、地盤の液状化およびそれに伴う側方流動の影響の評価も重要である。そこで、耐震設計の検討にあたっては、現状の設計法とその問題点を整理し、それについて調査・研究を行うとともに、動的問題を検討するWG-A、液状化・側方流動の影響を検討するWG-Bの成果を取り入れ、新しい耐震設計法を提案する。また、現在多くの杭の新工法および新技術が提案されているが、それも体系立てて整理し、新しい工法についての今後の発展性についてまとめる。

2. 調査・研究の方針

上記目的を達成するため、以下の4ステップで調査・研究を進める。

STEP 1	現 行 設 計 法 の レ ベ ル の 整 理
	<ul style="list-style-type: none"> ・ 各種基準等の整理（一般的な設計法のレベル） ・ 詳細な設計法として用いられる手法の整理
STEP 2	現 行 設 計 法 の 問 題 点 の 整 理
	<ul style="list-style-type: none"> ・ STEP 1の手法について問題点の整理
STEP 3	問 題 点 に 対 す る 調 査 ・ 研 究
	<ul style="list-style-type: none"> ・ 論文等の調査（実験・解析・実観測等）
STEP 4	新 し い 設 計 手 法 の 提 案
	<ul style="list-style-type: none"> ・ 現象をできるだけ再現できる手法とする。 ・ あまり複雑な手法とはしない。

3. 調査・研究対象

耐震設計の対象とする杭の工法および材料は次のとおりとする。

杭 工 法	打込み杭・埋込み杭・場所打ち杭等の一般的な工法
杭 材 料	RC・PC・PRC・SC・鋼

なお、新しい杭基礎の工法および技術についてはそれを体系立てて整理し、今後の発展性等についてまとめる。

4. 調査・研究の進め方

以下の4グループに分けて調査・研究を進める。

グループ	調査・研究対象項目
I	地盤動の影響評価（外力）
II	地震時挙動の評価（解析）
III	安全性の評価（照査）
IV	新工法・新技術

5. 調査・研究の現状および成果

1) 研究の現状

WG-Cは平成11年8月までで12回の会合を開いた。

現在、STEP 1, STEP 2を終了し、STEP3の段階を行っている。その内容は次のとおりである。

①STEP 1においては各種基準の調査を行い、設計の現状を把握した。

②STEP 2においては各グループの検討課題をまとめた。

③STEP 3においては、STEP 2の検討課題に基づいて調査・研究の方向を定めた。

そしてその方法に基づいて各グループの報告書目次およびキーワードを整理した。

現在その目次に従って、調査・研究を進めている。

2) 成果

①各グループの検討課題（表1）

②WG-C報告書目次（案）

③各グループの検討課題および成果のイメージ

表-1 各グループの検討課題

グループ	課題	作業内容	メンバー ○：リーダー	備考
I. 地震動の影響評価 (外力)	1) 地震動 ① 地震規模 ② 慣性力 ③ 入力方向 2) 地盤変位の影響 3) 液状化時の影響 4) 地震時土圧	<ul style="list-style-type: none"> ■ 活断層の評価 ■ 地震動の取り扱い(全国一律の定義とするか?) ■ L1・L2の定義(道示と鉄道基準) ■ 基盤の評価 ■ 地震動の入力方法(時刻歴か応答スペクトルか?) ■ 設定周波数帯域(衝撃波の評価は?) ■ 地震動の予測手法 ■ 地表面または工学的地震基盤における地震動の大きさ ■ 深層・浅層 ■ 波動伝播速度の推定 ■ 不整形地盤と地盤急変部の影響評価 ■ 地盤変位の評価(設計入力値は?) ■ 液状化の影響(設計入力値は?) ■ 地震動の方向性(鉛直動の評価・入力成分) ■ 設計入力地震動のあり方 ■ 位相問題と継続時間 	○中山(奥村組) 西村(鉄道総研) 泉(大成建設) 小阪(中央復建) 増田(日技)	<ul style="list-style-type: none"> ■ 問題点の整理 ■ 基準等の根拠の整理
II. 地震時挙動の評価 (解析)	1) 解析手法 ① 線材ばね ② FEM等 2) 静的解析と動的解析との関連 3) 構造物・杭基礎のモデル化 ① 地盤抵抗のモデル化 ② 杭体のモデル化 4) 被害解析との整合性	(1)杭基礎の計算方法 <ul style="list-style-type: none"> ■ 静的解析での計算モデル 線材ばねモデル/有限要素法/震度法/応答変位法 ■ 動的解析での計算モデル 有限要素法/質点系モデル(ベンツェンモデル) ■ 地盤のモデル化 静的解析/動的解析 ■ 杭体のモデル化 コンクリート系(RC・PHC・SC)/鋼管系 (2)現状問題点 <ul style="list-style-type: none"> ■ 計算モデル上の問題点 2次元と3次元/軸力変動 他 ■ 入力条件での問題点 地盤ばねのモデル/減衰定数/降伏点と塑性率 他 ■ 計算結果の解釈上の問題点 2次元と3次元/静的と動的/軸力の効果 	○清宮(早大) 西村(鉄道総研) 木村(京大) 中山(奥村組) 小池(川鉄) 片山(新日鐵) 小阪(中央復建) 増田(日技)	<ul style="list-style-type: none"> ■ 現状問題点の整理 ↓ ■ 道路・鉄道・港湾・建築の基準での解析法,モデル化等をまとめる。
III. 安全性の評価 (照査)	1) 限界状態(耐震性能)の設定 ① 構造物の機能との関連 ② 安定性の限界状態 ③ 杭部材・7-フグの限界状態 ④ 上部構造物との安全性配分 2) 評価指標と制限値 ① 構造物の機能面 ② 安定性 ③ 杭部材	<ul style="list-style-type: none"> ■ 杭基礎の変形性能の明確化 ■ 降伏点の明確化→塑性率の明確化 ■ 杭基礎の限界状態の設定 ↓ ■ 上部構造物の限界状態との関連性整理 ■ 構造物の機能と要求水準 ■ 鉄道橋・道路橋での限界状態把握 ■ 地盤工学会発表資料にて地盤破壊の終局限界点を調査 ■ 沈下の限界点/鉛直方向変位のチェック ■ 杭頭の固定状態の問題 ■ 杭基礎の変形性能特性に及ぼす諸因子の影響整理(鉄道橋・道路橋示方書等) ● 各種要因(材料,荷重,抵抗)のバラツキの調査 	○溝口(ネツレン) 西村(鉄道総研) 清宮(早大) 木村(京大) 福井(土研) 増田(日技) 近藤(JR西日本) 津田(日本ヒューム) 小池(川鉄) 宮坂(大洋基礎) 小阪(中央復建)	<ul style="list-style-type: none"> ■ 現状問題点の整理 ↓ ■ 道路・鉄道・港湾,建築の基準での設定および照査指標・根拠等をまとめる。
IV. 新工法・新技術	1) 基礎として免震の工夫 2) 地盤改良,直接基礎との併用 3) 新しい杭基礎 4) 設計精度とコスト	<ul style="list-style-type: none"> ■ ジョイント杭や杭頭結合の新しい考え方など、現在提案されている新工法・新技術を紹介する 耐震/免震/制震 	○宮坂(大洋基礎) 津田(日本ヒューム) 板谷(旭化成) 泉(大成建設) 溝口(ネツレン) 近藤(JR西日本)	<ul style="list-style-type: none"> ■ 新工法・新技術のリスト

WG-C 報告書

目次 (案)

I. 地震の影響評価 (外力) (グループ1)

杭基礎の耐震設計に用いる外力、主として地震動の設定の考え方について記述する。

1. 地震動

1.1 地震規模の設定

活断層の評価

1.2 設計地震動の設定

L1, L2地震動の考え方

1.3 設計入力地震波の設定

周波数特性, 位相特性, 入力方向, 入力位置

2. 地盤変位の影響

2.1 地盤変位の影響

地盤変位量の算出方法

2.2 地形の影響評価 (不整形地盤)

加速度, 変位等の補正方法

2.3 液状化の影響

液状化, 液状化に伴う側方流動の設計法

3. 地震時土圧

3.1 地震時土圧の値

大加速度の対応した土圧の算定法

3.2 影響の評価

荷重の組合せ

II 地震時挙動の評価 (グループ2)

杭基礎構造物の地震時の挙動、断面力や変形量など計算や破壊形式の特定の方法について記述する。

1. 静的解析による解析

外力を荷重や強制変位に置き換え、静的解析する。材料非線形性は考慮

1.1 梁ばねモデルによる解析

1.2 骨組みによる解析 (静的非線形Push over Analysis)

1.3 有限要素法

使用する要素の種類: 梁要素, ばね要素, 平面ひずみ要素, 立体要素など

1.4 計算方法

地震外力の評価, 震度法, 応答変位法

2. 動的解析による解析

外力を時系列であたえ時々刻々の応答値を計算して断面力, 変形量, 破壊過程などを計算する。

2.1 有限要素法

2.1.1 モデル化の範囲: 範囲と奥行き, 境界条件 (自由, 粘性など)

- 2.1.2 二次元モデル：
- 2.1.3 三次元モデル
- 2.2 多質点系モデル
 - 質量、減衰およびばね定数によるモデル
- 2.3 計算方法
 - 2.3.1 時刻歴解析
 - New-Mark β 法
 - 2.3.2 応答スペクトル法
- 3. 地盤のモデル化
 - 3.1 静的解析でのモデル化
 - 3.1.1 バネモデル： ばね定数と極限值の設定
 - 3.1.2 入力地震動の位置
 - 3.2 動的解析でのモデル化と地盤の挙動の評価
 - 3.2.1 等価線形モデル： SHAKEによる地盤剛性の低下の計算
 - 3.2.2 Ramberg Osgood モデルとH-Dモデルによる評価：
 - 履歴特性の表示の仕方
 - 3.2.3 減衰の取り扱い： レーリー減衰の計算、SHAKEによる計算
 - 3.2.4 時刻歴解析
- 4. 杭体のモデル化
 - 4.1 鋼管杭のモデル化 (M- ϕ 関係)：SC、CFCを含む
 - 4.2 鉄筋コンクリート系の杭のモデル化 (M- ϕ 関係)：場所打ち杭、PC杭を含む
 - 4.3 群杭の効果：群杭を考慮する条件 有効抵抗土圧による補正
 - 4.4 杭頭の固定条件：完全固定、ばね固定、ピン構造、スリップ構造など
 - 4.5 杭先端の固定条件
 - 4.6 鉛直力の影響：時刻ごと評価、上載荷重として一定値、破壊基準の取り扱い
- 5. 解析法の提案
 - 極力現象に忠実な計算モデルと、設計に用いるのに適当なモデルについて言及する。
 - 5.1 解析モデル
 - 5.2 非線形性の設定

Ⅲ. 安全性の評価 (グループⅢ)

- 1. 杭基礎の耐震性能
 - 1.1 設定の考え方
 - 1.2 地震動レベルと耐震性能
 - 1.3 耐震設計の考え方
- 2. 耐震性能の照査
 - 2.1 杭部材のモデル化
 - 2.2 杭基礎の降伏点
 - 2.3 杭基礎の安定レベルの照査指標制限値
 - 2.3.1 応答塑性率の照査
 - 2.3.2 部材の損傷レベルの照査
 - 2.3.3 最大応答変位量および残留変位量

IV. 新工法・新技術（グループIV）

1. 地震対策
 - 1.1 地震動対策
 - 1.2 液状化対策
2. 構造による分類
 - 2.1 制震構造
 - 2.2 耐震構造
 - 2.3 免震構造
 - 2.4 地盤改良併用構造
3. 技術開発の現状
4. 各新工法・新技術の特徴
 - 4.1 耐震構造
 - 4.1.1 杭基礎高靱性化に関する新工法・新技術
 - 4.1.1.1 杭体の高靱性化
 - 4.1.1.2 可撓性継手の利用
 - 4.1.1.3 小径杭や摩擦杭の使用による杭基礎全体の高靱性化
 - 4.1.2 杭頭結合部の改良法
 - 4.1.2.1 ノンカット結合法
 - 4.1.2.2 圧着結合法
 - 4.1.2.3 一柱一杭結合法
 - 4.2 免震構造
 - 4.2.1 杭頭結合部の改良法
 - 4.2.1.1 杭頭ピン結合法
 - 4.2.1.2 杭頭ローラー結合法
 - 4.2.1.3 杭頭免震装置結合法
 - 4.2.1.4 その他杭頭新結合法
 - 4.2.2 杭体構造免震化に関する新工法・新技術
 - 4.2.2.1 免震継手の利用
 - 4.2.2.2 免震カバーの利用
 - 4.3 地盤改良との併用工法
 - 4.3.1 固結工法
 - 4.3.2 遮断壁を設ける方法
 - 4.3.3 密度増大工法
 - 4.3.4 粒度改良工法
 - 4.3.5 飽和度低下工法
 - 4.3.6 間隙水圧消散工法

WG-C 各グループの検討課題および成果のイメージ

I. グループ I の検討課題

1. 地震動

1.1 地震規模の設定

活断層の評価

- 想定断層（切迫度の高い起震断層とその他）
破壊過程

1.2 設計地震動の設定

L1, L2地震動の考え方

- 地震動強さ
再現期間

1.3 設計入力地震波の設定

周波数特性、位相特性、入力方向、入力位置

- 周波数帯域の設定
設計レベルにおける位相の設定
設計で考慮すべき地震動の入力方向（水平2方向の合成、鉛直方向の取り扱い）
工学的基盤の定義および設計段階での割り切り

2. 地盤変位の影響

2.1 地盤変位の影響

地盤変位量の算出方法

- 簡便でしかも精度のよい地盤変位量の推定の仕方

2.2 地形の影響評価（不整形地盤）

加速度、変位等の補正方法

- 地盤剛性急変部付近等の増幅度合いの推定方法

2.3 液状化の影響

液状化、液状化に伴う側方流動の設計法

- 基礎杭に対する液状化時または側方流動の影響評価（荷重 or 変位）

3. 地震時土圧

3.1 地震時土圧の値

大加速度に対応した土圧の算定法

- 強震時に杭に作用する力（土圧）の評価

3.2 影響の評価

荷重の組み合わせ

- 設計レベルにおける常時と地震時土圧との関係（照査段階）

II. グループ II の問題点と検討課題

1. 計算モデル上の問題点

- ① 二次元モデルと三次元モデルの選択の判断
- ② 群杭の三次元効果を簡略化する妥当性
- ③ 変位波形の多点入力：鉛直方向の多点入力波形の作成とプログラムの改良
- ④ 境界条件の設定：モデル化の範囲と境界の取り扱い
- ⑤ 軸力変動の影響：現状では時刻ごとの変動を考慮するモデル化難しい
- ⑥ 簡易な計算の提案：設計で多大な計算時間を避ける

⑦鉛直方向のばねの有無：摩擦杭と支持杭の差

2. 入力条件での問題点

- ①ばねモデルをバイリニヤー化する妥当性、逐次塑性化
- ②軸力の影響をどう組み込むかと軸力の影響度の一般化
- ③地盤の減衰の設定の妥当性
- ④モーメント曲率関係での降伏点の定義と塑性率の精度

3. 計算結果の解釈上の問題点

- ①二次元モデルと三次元モデルでの計算結果の差の評価：二次元モデルでどこまで三次元効果を反映できるか、三次元モデルにしなければ良い計算結果が得られない条件はなにか
- ②静的解析と動的解析での計算結果の評価：動的解析を優先させるならどのような条件の時場合分けするか
- ③軸力の効果をうまく把握できるか

4. 今後の検討課題

4.1 計算法の課題

- ①各入力データが計算結果に及ぼす影響度：鋭敏なパラメーターと鈍いパラメータを選別する
- ②同一条件下での計算事例を作成する

4.2 各機関での杭基礎の耐震設計法

各機関の設計法を用いた試設計

- ①鉄道関係
- ②道路橋関係
- ③港湾関係

Ⅲ. グループⅢの成果のイメージ

1 杭基礎の耐震性能

1.1 設定の考え方

耐震標準による構造物の設計は、構造物全体の变形性能を荷重-変位曲線によって適切に評価し、地震時の安全性を確保することが重要であり、想定する地震動（L1地震動とL2地震動^{*)}）と構造物に必要とされる耐震性能を定め、それを確保することを基本とする。耐震性能を設定する場合、構造物の重要度・構造物への影響度と安全性、被災した場合の大きさと初期投資額の大きさの問題等も考慮する必要がある。

(*) L1地震動：構造物の設計耐用期間内に数回程度発生する確率を有する地震動、
L2地震動：構造物の設計耐用期間内に発生する確率は低い非常に大きい地震動)

1.2 地震動レベル(L1地震動とL2地震動)と耐震性能

基礎の耐震設計は上部構造物の耐震性能を考慮して行うものとし、杭基礎の降伏点を地震時杭基礎が主な原因となり変位が急増し始める点と定義して、鉄道・道路橋案での耐震性能に対する杭基礎の状態の概念は表1、2のとおりである。

表－1 耐震性能に対応する杭基礎の状態（鉄道の場合）

構造物の耐震性能	杭基礎の安定レベル	杭基礎の状態（地盤・部材）
耐震性能 I (L1)	安定レベル 1	杭基礎が降伏していない状態
耐震性能 II (L2)	安定レベル 2	杭基礎が降伏し、杭部材が降伏したり地盤抵抗が上限値に達するが、十分な支持力を保持している状態
耐震性能 III (L3)	安定レベル 3	多くの部材が損傷したり、地盤抵抗が上限値に達するが構造物の崩壊は生じない安定性を保持している状態

表－2 耐震性能に対応する杭基礎の状態（道路橋の場合）

設計で考慮する地震動	目標とする杭基礎の耐震性能	
橋の供用期間中に発生する確率が高い地震動 (L1)	健全性を損なわない	
橋の供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度を持つ地震動 (L2)	杭基礎の変位により橋の安全性が損なわれない	
	杭体に復旧に支障となるような過大な損傷が生じない	基礎が降伏していない状態 杭基礎が降伏するが基礎に過大な損傷を生じさせない

1.3 耐震設計の考え方

杭基礎の耐震設計では、静的非線形解析により大変形領域での地盤の塑性化の状況や杭部材の損傷過程を把握し、解析上の荷重－変位曲線から得られる構造物全体系の等価固有周期と降伏震度により応答値を算定して耐震性能に必要な指標を得るものとする。

静的非線形解析では上部構造物と地盤を一体としてモデル化し、地盤ばねや構造部材に非線形性を考慮することとする。この場合、地盤抵抗特性は、バイリニア型にモデル化した杭先端の鉛直地盤抵抗特性・杭周面の鉛直地盤抵抗特性・杭の水平地盤抵抗特性の初期勾配、上限値を用いる。

応答値の算定について、鉄道橋では「振動モードが比較的単純で、かつ非線形化する部位が明確な場合は、所用降伏震度スペクトルを用いて応答値の算定を行ってよい」となっている。

道路橋では、地盤反力および変位を算出し、基礎の降伏に達しないように耐震設計すること原則としているが地震時保有水平耐力法を基本としている。これは、震度法により耐震設計した構造断面が地震時保有水平耐力法を満足しない場合には地震時水平耐力法を満足するように構造断面を変更し、震度法により定めた断面を回らないように設計するとしている。

図－1に鉄道における非線形スペクトル法の検討フローを、図－2に道路橋における地震時水平耐力法による基礎の設計手順を示す。

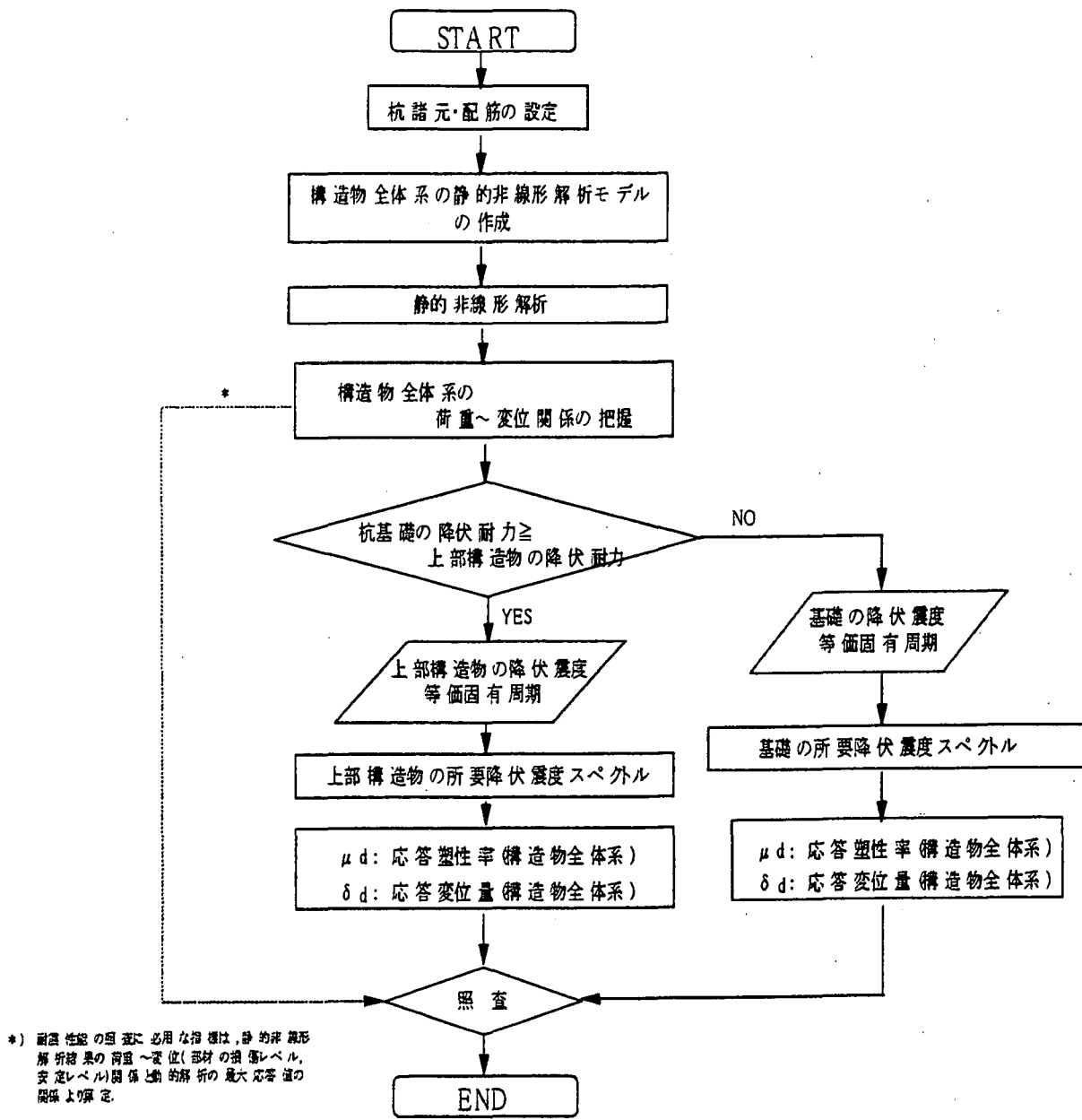


図-1 非線形スペクトル法の検討フロー (鉄道橋)

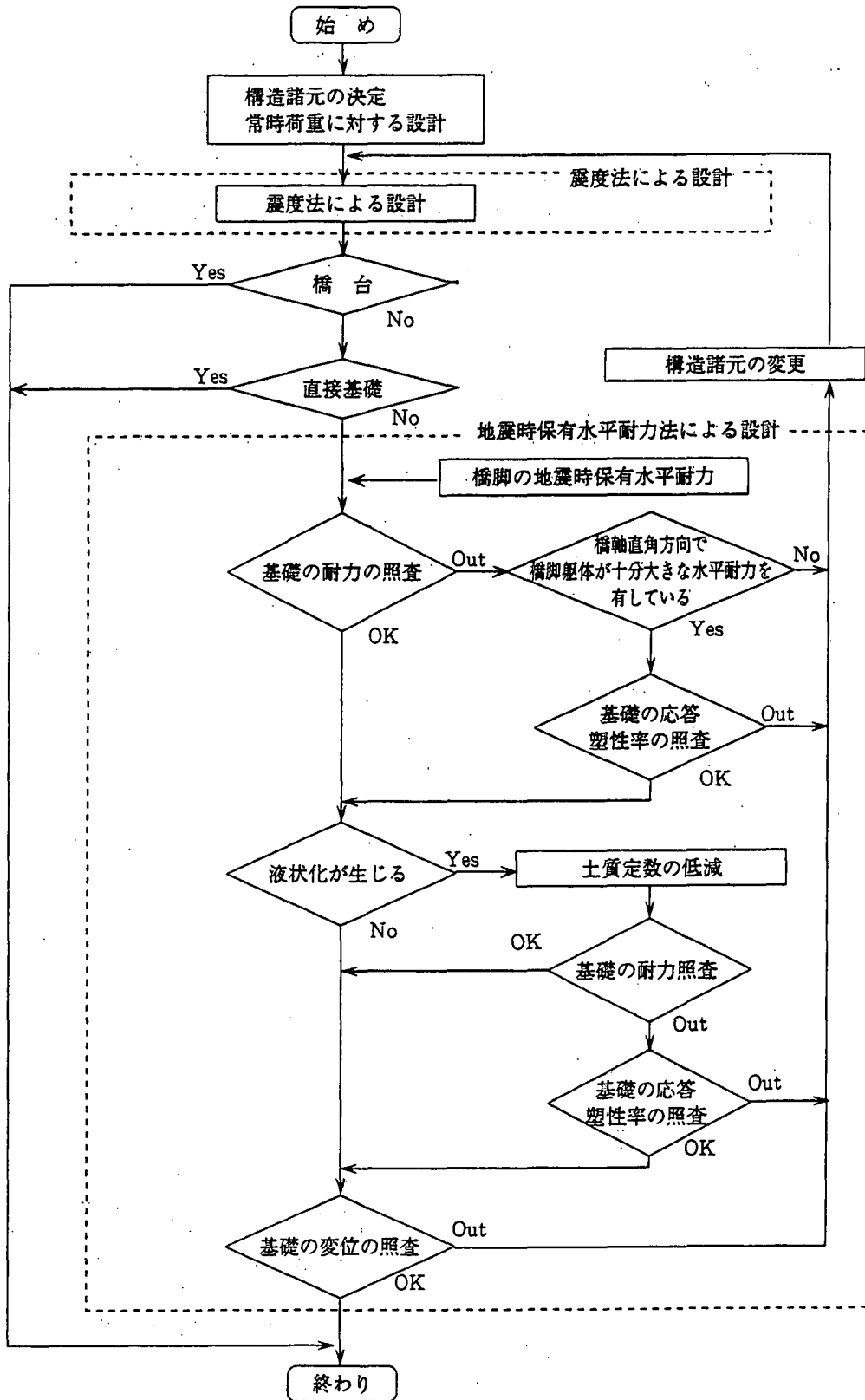


図-2 地震時保有水平耐力法による杭基礎の設計手順 (道路橋)

2. 耐震性能の照査

耐震性能の照査にあたっては、構造物に応じた方法を用いて行う。この場合、設計地震動に応じて所要の耐震性能を満足することを照査するものとする。

2.1 杭部材のモデル化

一般に杭部材の非線形性は、曲げモーメントと曲率の関数を用い、部材に作用する軸方向力が部材の塑性化に及ぼす影響を適切に考慮するものとする。

鉄道橋および道路橋における、一般的な軸方向が作用する場合の例を曲げモーメント～曲率関係のモデルとして図2に示す。

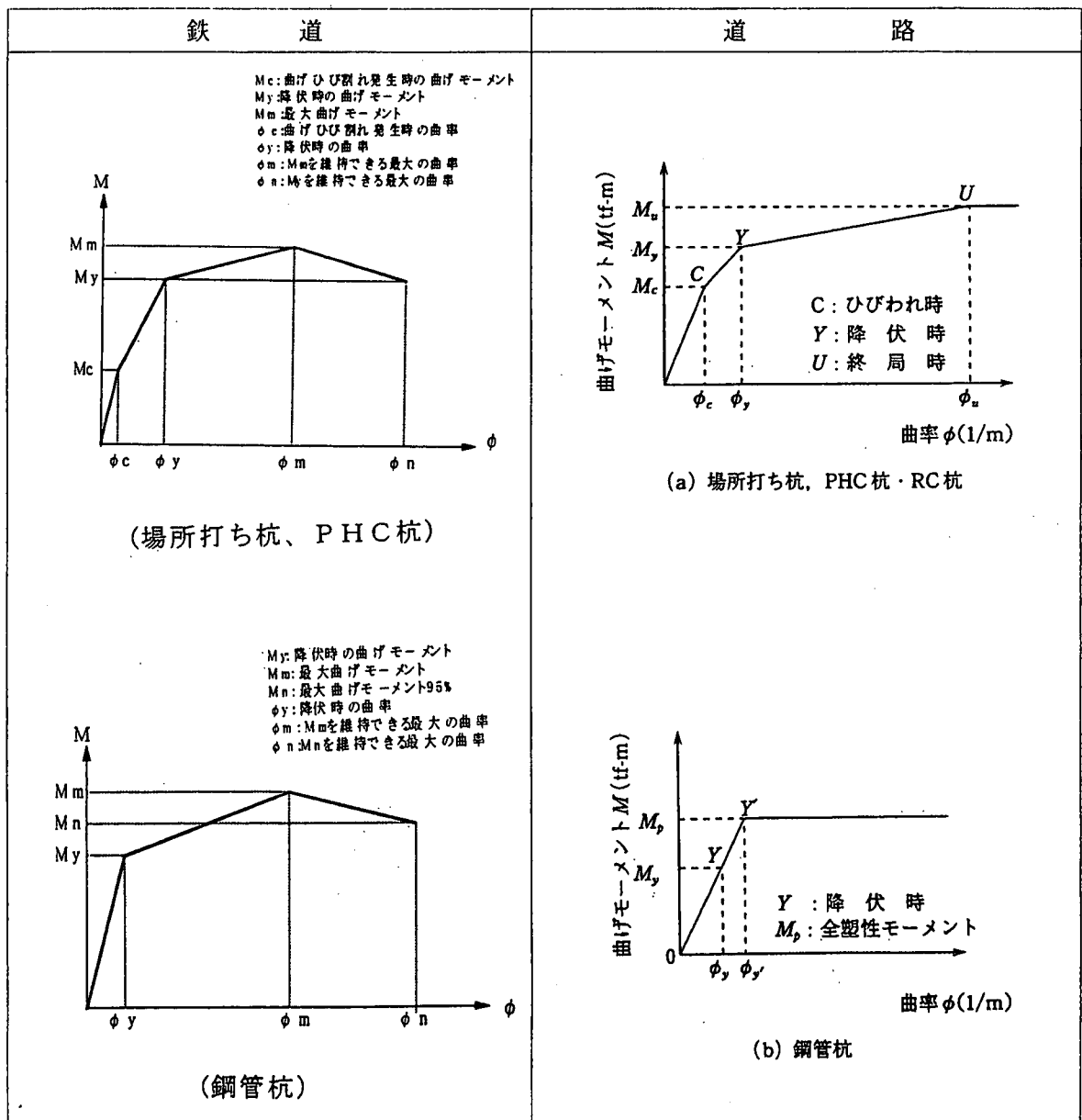


図2 鉄道・道路橋における杭基礎の曲げモーメント～曲率モデル

2.2 杭基礎の降伏点

杭基礎の降伏点は、構造物全体系の荷重～変位曲線において、主に杭基礎が要因となり変位が急増する点とする。これは、地盤抵抗側の上限値または杭部材そのものの降伏耐力到達によって規定することができる。鉄道の例を表3に示す。

表3 杭基礎の降伏点

基礎の状態	
押込み側	最外縁の杭頭反力が設計鉛直支持力の上限値に達するとき
引抜き側	全体の半数の杭頭反力が、設計引抜抵抗力の上限値に達する時（杭本数が奇数となる場合、中央の杭は考慮しない）
杭部材	全体数の半数の杭が降伏耐力に達する（杭本数が奇数となる場合、中央の杭は考慮しない）

2.3 杭基礎の安定レベルの照査指標と制限値

杭基礎の安定レベルの照査は次の指標を用いて行う。

- ① 応答塑性率 ② 部材の損傷レベル ③ 最大応答変位量および残留変位量

2.3.1 応答塑性率

応答塑性率の制限値は、地震後の残留耐力を考慮して定める必要がある。残留耐力は、地盤抵抗の塑性化および杭部材の損傷等から定まり、残留耐力が同程度であっても、地盤抵抗の塑性化程度と部材の損傷程度の割合は構造物によってことなる。鉄道では杭の載荷試験等により表4のように制限値の目安を設定している。また、道路橋では基本的には橋脚耐力より基礎の耐力が大きいこと（降伏させない）となっているが、やむを得ない場合L2地震動に対し、4程度としている。

表4 安定レベルと塑性率の制限値の目安

安定レベル	塑性率の制限値			杭基礎の状態
	場所打杭	PHC杭	鋼管杭	
安定レベル1	1	1	1	杭基礎が降伏している状態
安定レベル2	3 ¹⁾	3	5 ²⁾	杭体が最大曲げ応力に達したり一部の杭の地盤抵抗が上限値に達した状態
安定レベル3	8	3 (8) ³⁾	8 ²⁾	杭体の鉄筋の一部が座屈したり、多くの杭の地盤抵抗が上限に達した状態

ここに、 μ_L ：基礎の応答蘇生率（ $\delta d / \delta y$ または $\theta d / \theta y$ ）

δd ：基礎の応答変位

θd ：基礎の応答回転角

δy ：基礎の降伏変位

θy ：基礎の降伏回転角

1)基礎の降伏が、部材耐力で決定されない場合は、鋼管杭同様5程度としてよい。

2)塑性化する恐れのある範囲に中詰めコンクリートを施工した場合

3)塑性化する恐れのある範囲の帯鉄筋を強化し、中詰めコンクリートを施工した場合。

2.3.2 部材の損傷レベルの照査

杭基礎における各部材の損傷レベル照査は、各部材の構造特性に応じて、所要の損傷レベルを満足するものとする。

構造物の耐震安定レベルと基礎部材の損傷レベルは図3のように規定できる。また、基礎の損傷レベルは表5のように設定してもよい。

ここで、L1地震動に対する検討では、損傷レベル1以内であることを原則とする。基本的に安定レベル1、2、3と、部材の損傷レベル1、2、3はそれぞれ対応しているので、杭部材の損傷レベルが表中のレベル以内であれば、それぞれに対応する基礎の安定レベルを満足することとなる。

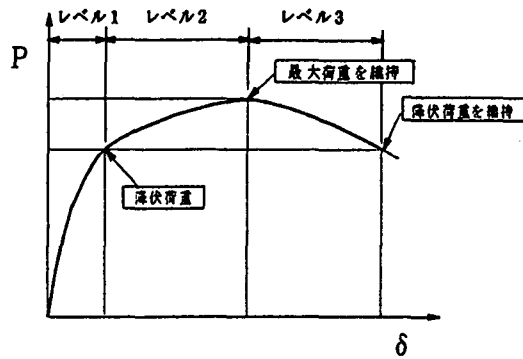


図4 構造物の耐震性能と基礎部材の損傷レベル

表5 基礎の安定レベルに対応する部材の損傷レベル

	安定レベル 1	安定レベル 2	安定レベル 3
場所打ち杭	1	2	3
R C 杭	1	2	3
P H C 杭	1	2 ²⁾	2 ²⁾
鋼管杭	1	2	3

注) 1)フーチングおよび安定レベル2、3における損傷レベルは曲げに対してまげ耐力を超えないこととするが、一般にはせん断に対する検討で断面緒元が決まる。

2)P H C 杭の損傷レベルは、鉄筋コンクリート部材に準じて次の通りとしてよい。

損傷レベル1：P C 鋼材が降伏するまでの範囲

損傷レベル2：損傷レベル1を超え、コンクリートの圧縮線のひずみが0.0035に達するまでの範囲

損傷レベル3：損傷レベル3を超え、降伏耐力を維持できる範囲

2.3.3 最大応答変位量および残留変位量

設計応答変位量および残留変位量が基礎の各安定レベルに対する変位量および残留変位量の制限値を超えないことを確認するものとし、この場合の設計応答変位量および残留変位量は、動的解析により得られた最大応答変位量および残留変位量に構造解析係数を乗じて求めることとする。

基礎の変位と残留変位の照査は、構造物全体系の安全性および必要な機能を確保するために必要である。構造物全体系の安全性および必要な機能は損傷レベルに応じて定めるが、上部構造物や落橋防止工事等の構造形式や特性により異なり、これらの特性を考慮して構造物全体系について照査するものとする。

例えば、鉄道における応答変位量および残留変位量の制限値の基本的な考え方は下のとおりである。

1) 安定レベル1

列車の走行性を確保するとともに、有害な残留変位をを生じさせない。

2) 安定レベル2

構造物の機能に有害な変位を生じさせないこと、および地震時において列車の走行(徐行)が可能な範囲内に残留変位を留めること。

3) 安定レベル3

落橋等が生じるような過大な変位を基礎に生じさせないこと、および補修・補強により構造物の再利用が可能な範囲に残留変位量を留めること。

IV. グループIVの成果のイメージ

1 地震対策

1.1 地震動対策

地震動対策として、耐震構造と免震構造がある。

1.2 液状化対策

液状化の発生を許さない場合は、地盤改良との併用となる。

液状化の発生を許す場合は、地盤による強制変形に追従できるように、または流動圧に耐えられるように、杭体または杭基礎全体の高靱性化に関する技術開発が中心になっている。

2 構造による分類

2.1 制震構造

制震技術が見当たらない。

2.2 耐震構造

耐震技術として、杭材料の高耐力化と高変形性能化との二方向に分かれている。免震効果も併せ持つ技術が多い。

2.3 免震構造

上部構造への地震入力を低減させる免震技術は、杭頭部において、ピンやローラー構造、または免震支承を用いた結合法の実用化による技術開発が主になっている。

2.4 地盤改良併用構造

液状化の発生を防止するために、様々な工法が開発されている。

3 技術開発の現状

開発途中の技術が多く、近年中に実用化される見通し。

免震効果の確認方法がなく、評価手法の確立が必要。

4 各新工法・新技術の特徴

4.1 耐震構造

4.1.1 杭基礎高靱性化に関する新工法・新技術

4.1.1.1 杭体の高靱性化

特徴：主に杭の曲げ剛性の増大による高耐力化が図られている。具体的な方法として、鋼管の使用または配筋量や寸法・断面積の増大により、変形量が小さくなる。

例：SC杭、PRC杭等の既製杭、ソイルメント合成鋼管杭、場所打ち鋼管コンクリート杭、拡頭杭・フレックス杭等の場所打ち杭

a) SC杭

1) 概要

2) 特長

b) PRC杭

1) 概要

2) 特長

c) ソイルメント合成鋼管杭

1) 概要

ソイルメント合成鋼管杭とは、地中に造成したソイルセメント柱の中に、リブ付鋼管を挿入して完成するソイルセメントと鋼管の合成杭である。

鋼管表面に設けたリブにより、ソイルセメントと鋼管の一体化を図り、上部工からの荷重を鋼管からソイルセメントを介して地盤に伝達することができる基礎杭である。

2) 特長

① ソイルセメントと鋼管杭の合成により、合理的設計が可能
ソイルセメントとリブ付鋼管の一体化により、ソイルセメント柱径を有効径とする地盤の鉛直及び水平支持力を得ることができる。したがって、地盤の支持力はソイルセメントが受け持ち、杭体応力は高強度で高靱性の鋼管が負担する合理的な杭の設計が可能である。

② 支持力性能が優れている
ソイルセメント柱造成中の孔内はスラリー化したソイルセメントで満たされた状態となり、孔壁の崩壊は起りにくく、周辺地盤、先端地盤を緩めることもなく、また、スライムの発生がないため、支持力性能が優れている。

③ 排土が少なく、産業廃棄物を殆ど出さない
現地盤の土砂を材料として利用し、ソイルセメント柱を造成するため、掘削排土が少なくなっている。また、ソイルセメント柱造成時、セメントミルク注入量相当分の土量を口元管を用いて先行掘削するので、セメントミルク混じりの土などの産業廃棄物をほとんど出さない。

④ 工期の短縮が可能
高能率の掘削攪拌機械を用いてソイルセメント柱を造成するため、工期を短くすることができる。

⑤ 低振動・低騒音
杭体造成工事を低振動、低騒音で施工することができるので、

市街地での杭工事に適している。

d) 場所打ち鋼管コンクリート耐震杭

1) 概要

場所打ち鋼管コンクリート耐震杭とは、従来の場所打ちコンクリート杭の耐震性をより向上させるため、杭頭など曲げモーメント、せん断力の大きい部分に、内面リブ付鋼管を使用し、鋼管コンクリート杭とした複合場所打ちコンクリート杭である。

2) 特長

- ① 杭頭拡大をしなくても、十分な必要抵抗曲げモーメントが得られる。
- ② 杭頭拡大杭に比べ、曲げ剛性(EI)が小さいので、杭に発生する曲げモーメントが小さい。
- ③ 鋼管の外径、厚さ、材質を変えることにより、設計の自由度が得られる。
- ④ せん断耐力が非常に大きい。
- ⑤ 靱性が大きいので、耐震性能が優れている。
- ⑥ コンクリートの回り込み不良などの施工上の不安が無い。

e) 拡頭杭

1) 概要

2) 特長

f) プレダックス耐震杭工法

1) 概要

プレダックス耐震杭工法とは、X形配筋を場所打ちコンクリート杭の杭頭に配筋することにより、杭頭のせん断耐力、靱性を向上させた耐震杭工法である。

2) 特長

- ① 経済的な新しい配筋方法である。
- ② 杭体や杭頭結合部の曲げ耐力、せん断耐力の向上に有効である。
- ③ 杭体や杭頭結合部の靱性向上になる。

4.1.1.2 可撓性継手の利用

特徴：杭頭部は剛結合、地盤構成に応じて任意の深さにジョイントを設け、地盤変形や、地震エネルギー逸散、吸収型新技術

例：高靱性ジョイント杭（一般型、ヒンジ型）

a) 高靱性ジョイント杭

1) 概要

高靱性ジョイント杭とは、高靱性能ジョイントを有する一種の耐震性基礎杭である。構造物と杭との結合部近傍や硬い地層と軟らかい地層との境界に、この耐震ジョイントを積極的に用いることにより、従来の基礎杭の靱性や変形性能を高め、地震時における杭基礎の耐震性を向上させることができる。

2) 特長

- ① 液状化の発生に伴う側方移動などの地盤変状にも対応でき、地震による基礎杭の破壊を防止できる。
- ② ジョイントを設けることにより、地震時に杭に発生する曲げモーメントが小さくなるため、杭径が小さくでき、杭基礎工事コストの低減ができる。
- ③ 任意の深さに設けられることにより、合理的設計ができる。

4.1.1.3 小径杭や摩擦杭の使用による杭基礎全体の高靱性化

特徴：杭一本当りの剛性が小、弾性変形量が大きくなる。

例：EZ 工法($\phi 100\sim 500\text{mm}$)、マイクロパイル ($\phi 7''\sim 10''$) 等

a) EZ 工法

- 1) 概要
無排土回転埋設杭
- 2) 特長

b) マイクロパイル工法

- 1) 概要
- 2) 特長

4.1.2 杭頭結合部の改良法

4.1.2.1 ノンカット結合法

a) NCP 結合法

- 1) 概要
- 2) 特長

4.1.2.2 圧着結合法

a) K T P C 耐震杭工法

1) 概要

K T P C 耐震杭工法とは、場所打ちコンクリート杭の杭本体及び杭頭結合部にプレストレスを与えた PRC 杭工法の一つである。

K T P C 耐震杭工法は、建物の引き抜き力に対して、基礎構造と下部支持杭の結合部を鉄筋定着結合のほかに、アンボント[®]超耐久 SC ストランドを使用して、あらかじめ初期緊張力（プレストレス）を与えておくことにより、引抜き力や衝撃的荷重に対して、ひび割れを無くし、終局の耐力効果を高めた場所打ち PRC 耐震杭工法である。

2) 特長

- ① プレストレスによって、杭体と基礎構造を緊結
- ② 杭体の終局曲げ・せん断耐力と耐震性能の向上
- ③ 地震時の衝撃的荷重による杭頭破壊の防止
- ④ 水圧による浮力、短期引抜き力等に対するひび割れ防止
- ⑤ アンボント[®]超耐久 SC ストランドによる杭体の耐久性の向上

4.1.2.3 一柱一杭結合法

a) いちいち工法

1) 概要

一柱一杭工法とは、靱性に優れた場所打ち耐震杭（杭頭部に内面リブ付き鋼管を使用した場所打ちコンクリート杭）の頭部に、鉄骨柱を直接埋め込むことにより、上部構造に発生する力を杭に直接伝える“結合部耐震強化工法”である。図-4.1.2.3.1 に工法概念図を示し、図-4.1.2.3.2 に施工手順図を示す。

2) 特長

- ① 杭頭部結合状態の明確化
上部構造で発生する力を杭にスムーズに伝達することができる。
- ② 杭頭の地震被害の防止
杭頭結合部の地震被害を防止できる。
- ③ 地中梁を鉄骨造とすることによる工期短縮

従来工法のフーチング・基礎梁築造するための根切り・鉄筋・型枠・コンクリート工事が低減されるため、工期短縮が図れる。
図-4.1.2.3.3 に従来工法との比較図を示す。

- ④ 基礎工事コストの低減
前記の理由により、基礎工事コストも低減できる。
- ⑤ 残土発生量の低減
掘削土量が減るため、場外残土処分量が低減できる。

4.2 免震構造

特徴：杭体曲げモーメントの低減（耐震性の向上）または上部構造へ伝達する地震力の低減（免震効果）を図るための、エネルギー逸散型杭頭結合法の開発が主になっている。

4.2.1 杭頭結合部の改良法

4.2.1.1 杭頭ピン結合法

- 1) 概要
ピン結合（球座型）
- 2) 特長

4.2.1.2 杭頭ローラー結合法

- 1) 概要
低摩擦性樹脂を利用したローラー結合
- 2) 特長

4.2.1.3 杭頭免震装置結合法

- 1) 概要
積層ゴムをベースとした免震支承を利用した杭頭結合法
- 2) 特長

4.2.1.4 その他杭頭新結合法

- 1) 概要
軸棒型、発泡スチロールを利用した結合法など
- 2) 特長

4.2.2 杭体構造免震化に関する新工法・新技術

4.2.2.1 免震継手の利用

- 1) 概要
- 2) 特長

4.2.2.2 免震カバーの利用

- 1) 概要
- 2) 特長

4.3 地盤改良との併用工法

4.3.1 固結工法

4.3.1.1 深層混合法

- 1) 概要
- 2) 特長

4.3.1.2 注入固化工法

4.3.1.3 生石灰パイル工法

4.3.1.4 事前混合処理工法

4.3.2 遮断壁を設ける方法

間隙水圧の遮断による液状化発生の防止や、液状化地盤による流動圧、側方移動による強制変位などから杭基礎を保護するための新工法。

例：排水機能付鋼材締切工法、締め固め工・矢板工などとの併用工法、連続地中壁工法

- 4.3.2.1 締め固め工・矢板工などとの併用
- 4.3.2.2 排水機能付鋼材
- 4.3.2.3 連続地中壁

4.3.3 密度増大工法

- 4.3.3.1 サトコンパクション工法
- 4.3.3.2 振動棒工法
- 4.3.3.3 バイプロローテーション工法
- 4.3.3.4 重錘落下締固め（動圧密）工法
- 4.3.3.5 バイロタンパー工法
- 4.3.3.6 転圧工法
- 4.3.3.7 爆破工法
- 4.3.3.8 群杭工法

4.3.4 粒度改良工法

- 4.3.4.1 置換工法

4.3.5 飽和度低下工法

- 4.3.5.1 ディープウェル工法
- 4.3.5.2 排水溝工法

4.3.6 間隙水圧消散工法

- 4.3.6.1 グラベルドレーン工法
- 4.3.6.2 人工材料ドレーン
- 4.3.6.3 周辺巻立てドレーン

