

3次元FEMによる杭基礎一体系耐震性能評価

張 鋒¹・木村 亮²

¹正会員 工博 岐阜大学工学部助教授 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

²正会員 工博 京都大学大学院助教授 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

本研究は、杭基礎・地盤・上部工一体系の3次元有限要素解析により、杭基礎と地盤の相互作用を正しく評価でき、信頼できる解析手法の開発により、設計指針への提言、設計に使われている簡便法の精度の照査、あるいは設計に直接に使うなど役に立つ群杭基礎の耐震評価手法の確立を目的とする。

Key Words: Constitutive model, stress-strain relation, group-pile foundation, in situ test, finite element method, static and dynamic analyses, elastoplasticity

1. まえがき

大地震の場合、杭基礎の塑性化と地盤の降伏が予想され、杭基礎と地盤の相互作用を適切に評価するためにこの非線形挙動を考慮しなければならない。その3次元FEM評価手法を確立するのに、以下に示すような幾つかの問題を解決しなければならない。

- 地盤の一般応力状態での非線形特性を適切に評価できるモデルの確立。
 - 簡単で、品質のいい地盤材料不攪乱試料のサンプリング技術の確立。
 - 杭部材の非線形特性、とくにRC杭の軸力変動による曲げ非線形特性への影響を考慮できるモデルの確立。
- 近年の地盤材料構成式の発展が目覚しく、一般応力状態での力学挙動を表現できるモデルが確立しつつある。また、杭部材の軸力変動による影響を適切に表現できる非線形特性モデルも提案されている。コンピューターの発達と計算力学の進展にともない、杭基礎・地盤・上部工一体系の3次元有限要素解析により、杭基礎と地盤の相互作用を正しく評価することができつつある。本研究は信頼できる解析手法の確立により、設計指針への提言、設計に使われている簡便法の精度の照査、あるいは設計に直接に使うなど役に立つ耐震評価手法の開発を目的とする。

2. 上部工・杭基礎・地盤一体系耐震性能評価

2.1 分離法

図1に分離法の考え方を示す。

- 上部工・杭基礎・地盤一体系をSway-Rockingモデル(S-Rモデル)に置き換える
- 三次元弾塑性静的有限要素解析により地盤と基礎の相

互作用の非線形等価バネを求める

- SRモデルを対象とする骨組の弾塑性時刻歴動的解析により、地震による等価バネに作用する地震力を求める
- この地震力を外力として、上部工を除いた基礎・地盤を対象に、再び三次元弾塑性静的有限要素解析により杭の発生断面力を求める

2.2 応答変位法

2.3 上部工・杭基礎・地盤一体系の動的解析法

図2に検討の対象とする2種類地盤の構成を示す。図3杭基礎配置および解析メッシュを示す。図4に中空ねじりせん断の地盤の非線形性をDrucker-Pragerモデルで評価する時挙動を示す。図5に杭の非線形性を評価するトリリニアモデルを示す。図6に3次元弾塑性静的解析による等価非線形バネのスケルトン曲線を示す。図7に入力地震動を示す。図8に分離法、一体系動的解析による柱下端のM-関係の比較を示す。図9に分離法、一体系動的解析による柱上端応答加速度の比較を示す。図10に分離法、応答変位法、一体系動的解析による杭発生曲げモーメントの比較を示す。

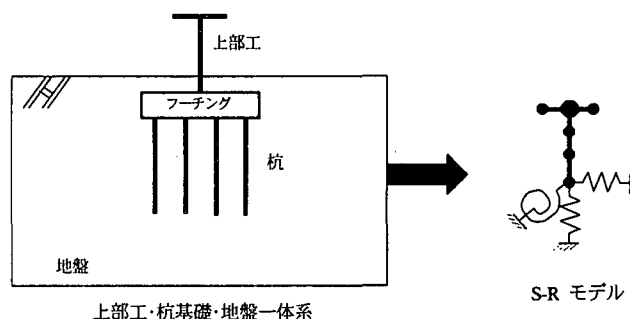


図1 分離法

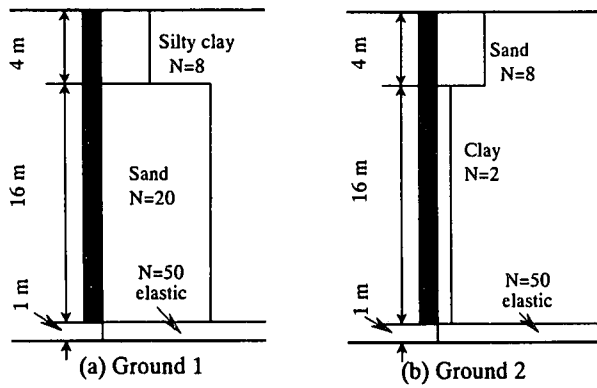


図2 2種類地盤

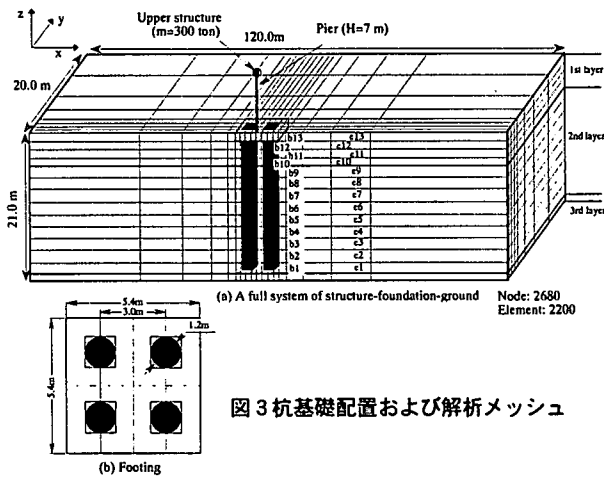


図3 杭基礎配置および解析メッシュ

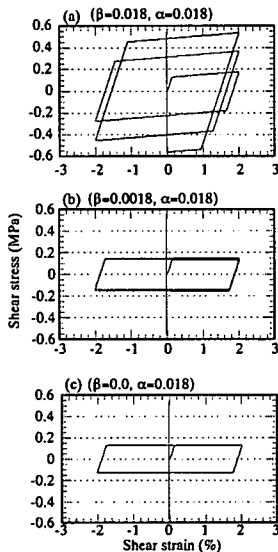


図4 中空ねじりせん断地盤の非線形性：Drucker-Prager モデル

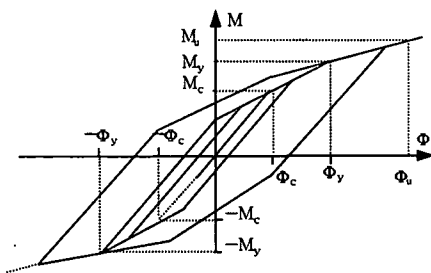


図5 杭の非線形性：トリリニアモデル

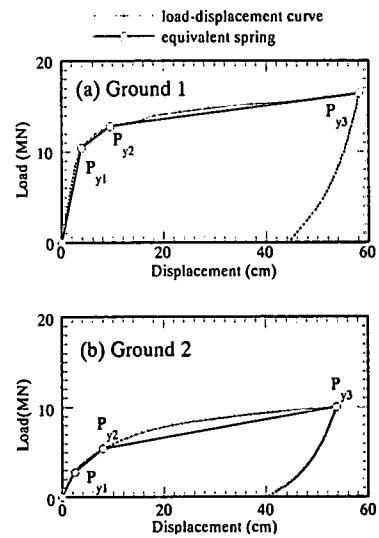


図6 等価非線形バネのスケルトン曲線

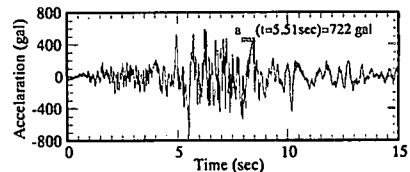


図7 入力地震動

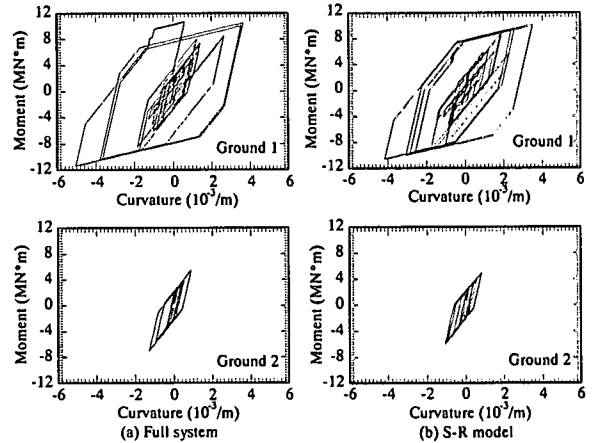


図8 分離法、一体系動的解析による柱下端のM-φ関係の比較

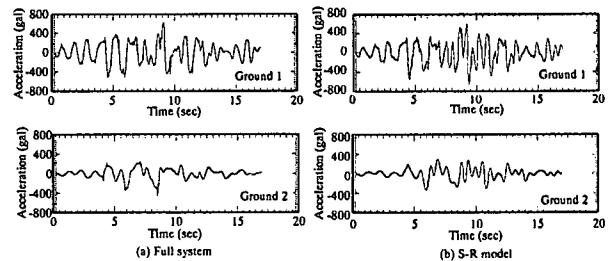


図9 分離法、一体系動的解析による柱上端応答加速度の比較

2.4 結論

- 上部工だけに着目すると、分離法が十分である。
- 杭基礎に着目すると、慣性力よりも、地盤変形の方が

杭の発生断面力に大きく影響を与える。

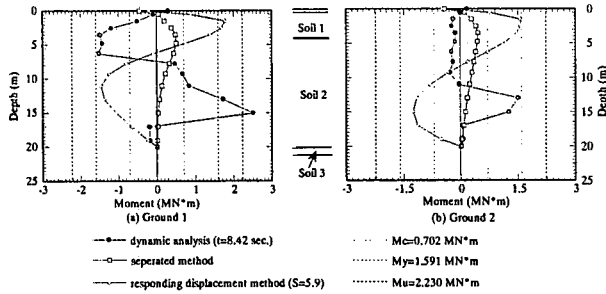


図10 分離法、応答変位法、一体系動的解析による杭発生曲げモーメントの比較

3. 非線形特性の影響－杭基礎の静的問題

3.1 杭断面積の影響

図11に杭面積を考慮したHybrid要素の概念を示す。図12に剛性比の差による生じた単純梁の荷重・変位関係の変化を示す。図13にHybrid要素の有無による荷重・変位曲線の変化を示す。

3.2 地盤の非線形特性の影響

図14、15に異なる地盤非線形モデルを使った3次元弾塑性解析による単杭・群杭の荷重・変位関係の比較を示す。図16に2本杭周辺地盤の応力経路を示す。図17に単杭の断面力分布の比較を示す。

3.3 杭基礎の静的繰り返し水平載荷時の挙動

3.4 結論

- 地盤非線形特性のモデル化の差異による地盤・杭基礎の相互作用の評価に影響がかなり大きい。
- 杭基礎周辺地盤の抵抗が繰り返し載荷時の初期載荷方向に大きく依存する。
- 群杭間の土の抵抗が杭基礎後方地盤のものとほぼ一致する。

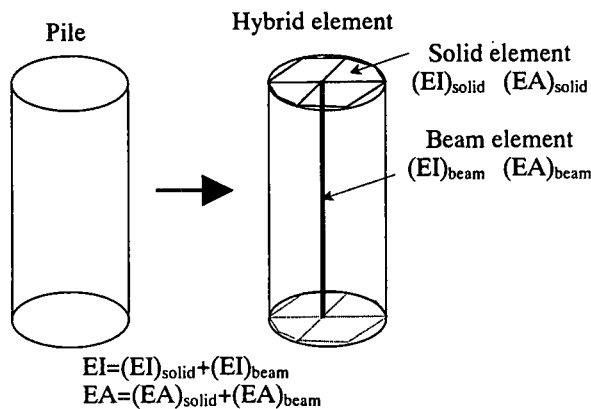


図11 杭面積を考慮したHybrid要素

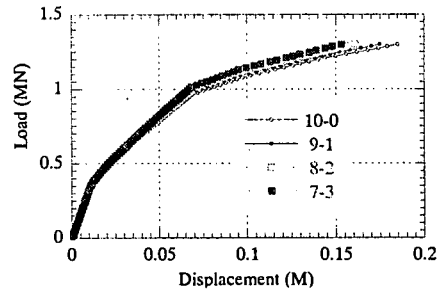


図12 剛性比の差による単純梁の荷重・変位関係の変化

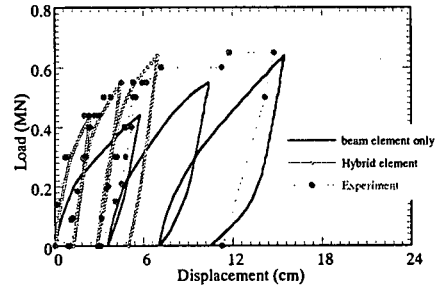


図13 Hybrid要素の有無による荷重・変位曲線の変化 (地盤モデル: tij model)

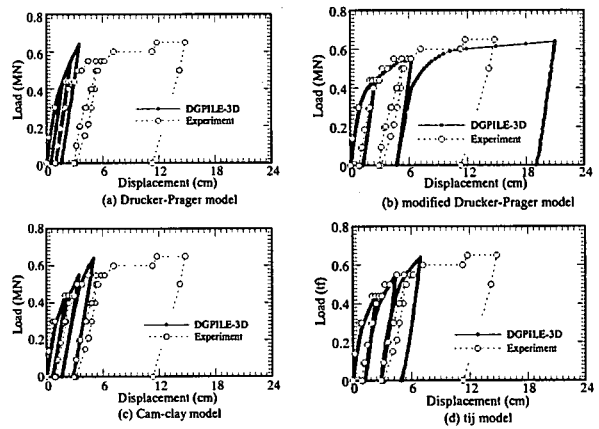


図14 単杭の荷重・変位関係の比較

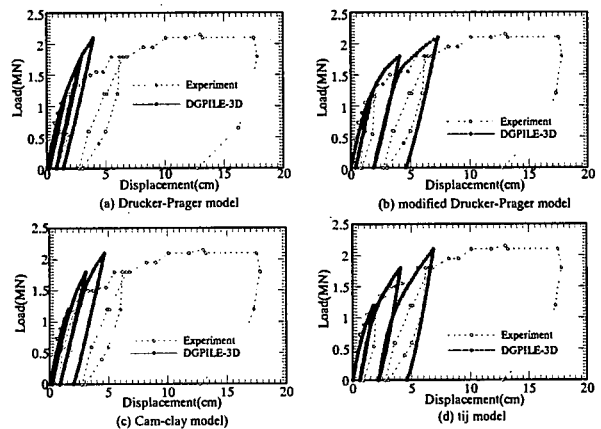


図15 2本杭の荷重・変位関係の比較

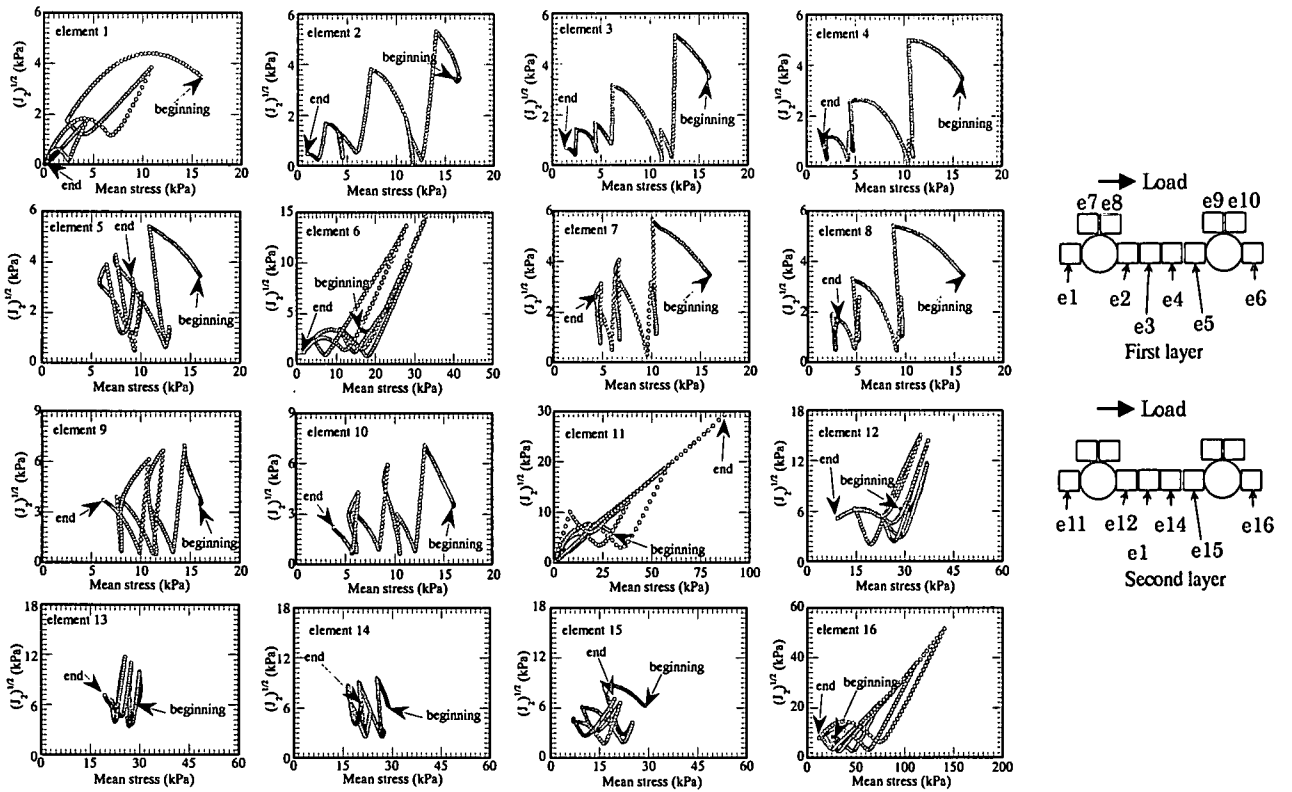


図 16 2本杭周辺地盤の応力経路(tij model)

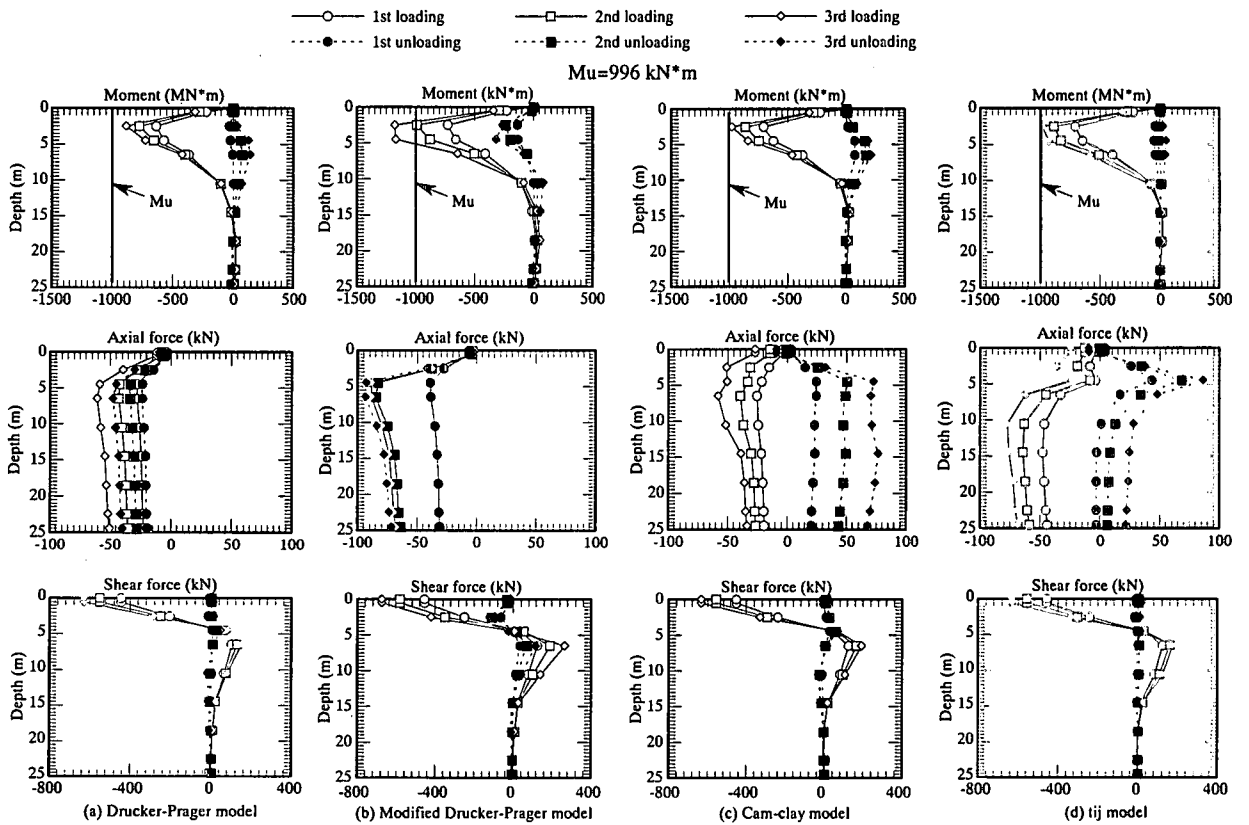


図 17 単杭の断面力分布の比較

4. 非線形特性の影響－杭基礎の動的問題

4.1 非線形特性のモデル化

杭部材の非線形特性

これまで、杭の軸力変動が曲げ剛性の非線形特性に及ぼす影響の適切な評価が困難とされてきた。軸力を考慮した RC 部材の非線形モデルとして代表的な Multi-Spring model や Fiber model がある。これらのモデルでは、RC 部材が2方向の曲げ・せん断および軸力を受ける場合、ファイバーの軸ひずみは2方向の曲げひずみおよび軸ひずみの合計から評価できるとしている。しかし、MS model や Fiber model は、主に建築分野で用いられてきたものであり、気中の構造物には適応しているが、杭部材のような地盤中の構造物では、地盤・杭基礎の相互作用を考慮する必要がある。地盤と杭基礎のひずみの適合条件を満足していなければならない。そこで、本研究では梁要素のつりあい式の弱形式を再定式化し、杭基礎において軸力変動の影響を表現できる有限要素の梁理論を提案した。一方、MS model や Fiber model の分割方法を使い、RC 部材の断面をファイバー要素に分割し、それらの要素に図 18 に示す鉄筋とコンクリートそれぞれの応力～ひずみ関係を与え、杭の非線形特性を考慮した。図 19 に一方向載荷時の単純梁の曲げモーメント・曲率関係および終局曲げモーメント・軸力関係を示す。図 20 に繰り返し載荷時の単純梁の曲げモーメント・曲率関係の実験的検証を示す。

地盤の非線形特性

図 21, 22 に一般応力状態での単純載荷および繰り返し載荷時の応力・ひずみ関係、ストレス・ダイレイタンス関係を示す。

4.2.地震時上部工・杭基礎・地盤一体系動的挙動

図23に検討の対象とする高架橋の寸法を示す。図24に群杭基礎の配置および地盤構成を示す。図25に有限要素解析のメッシュを示す。図26に基盤面に入力する地震動を示す。図27に異なる鉛直断面における最大せん断ひずみの分布を示す。図28にある時刻($t = 3.10 \text{ sec}$)における群杭の断面力分布を示す。図29にある時刻($t = 3.10 \text{ sec}$)における群杭の荷重分担率を示す。図30に異なる非線形特性の評価手法による杭曲げモーメント分布の比較を示す。図31に変位・加速度応答値の比較を示す。

4.3 結論

- 地盤非線形特性のモデル化の差異による地盤・杭基礎の相互作用の評価に影響がかなり大きい。
- 群杭間の土の挙動が杭基礎遠方地盤のものとはほぼ一致する。
- RC 杭の軸力変動の影響がかなり大きく、前方・後方・中間杭の荷重分担率を大きく左右する

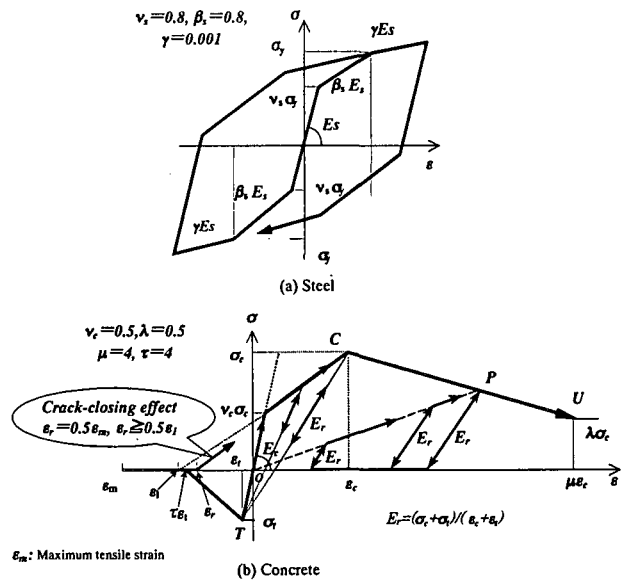


図 18 鉄筋とコンクリートの非線形特性

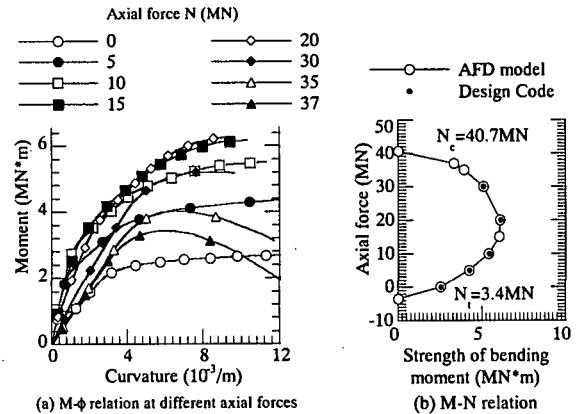


図 19 一方向載荷時の単純梁の曲げモーメント・曲率関係

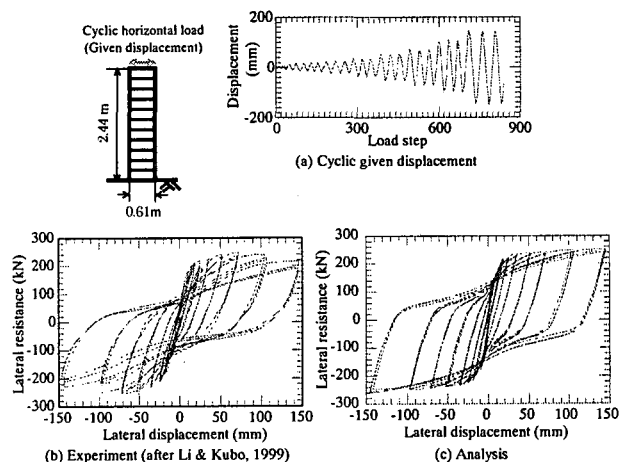


図 20 繰り返し載荷時の単純梁の曲げモーメント・曲率関係の実験的検証

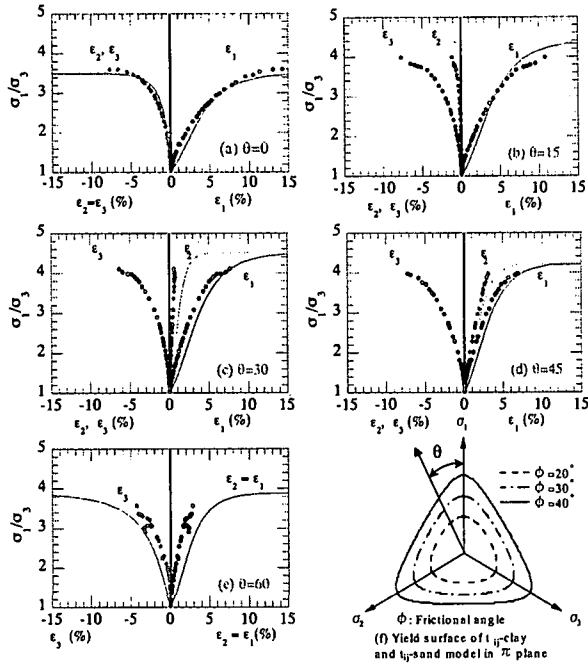
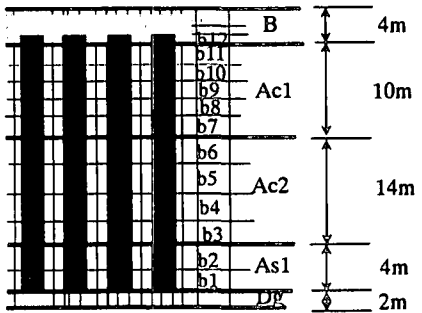
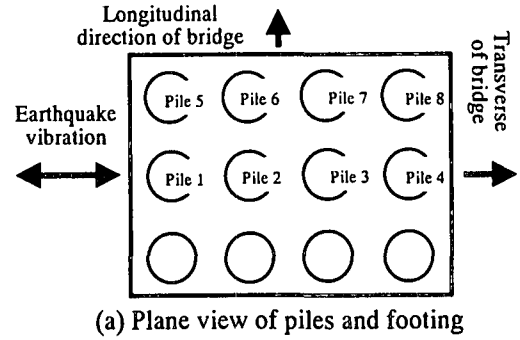


図 2 1 一般応力状態で単純載荷時の 応力・ひずみ関係 (After Nakai & Matsuoka, 1986)



(b) Geologic profile of ground and the position of the elements under consideration

図 2 4 群杭配置および地盤構成

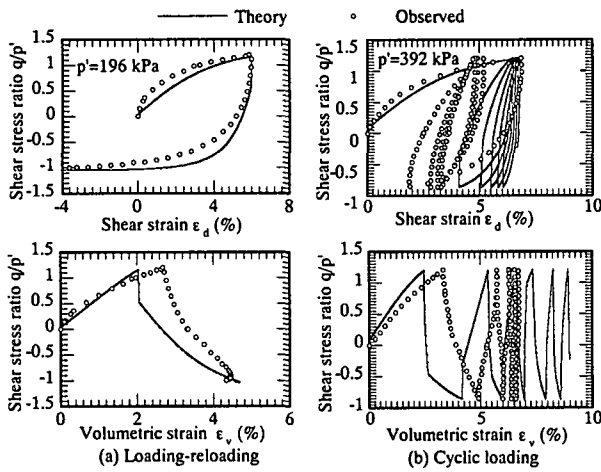


図 2 2 一般応力状態で繰り返し載荷時の 応力・ひずみ関係 (After Chowdhury et al., 1999)

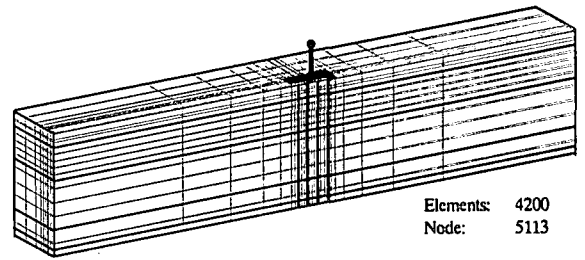


図 2 5 有限要素解析メッシュ

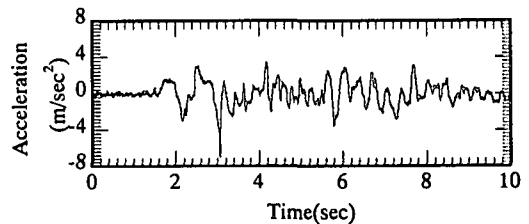


図 2 6 入力地震動

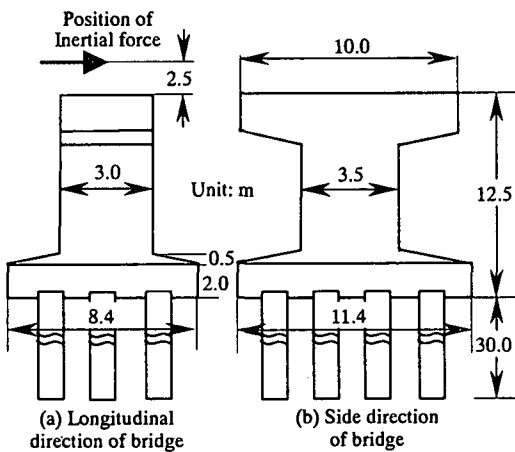


図 2 3 高架橋寸法

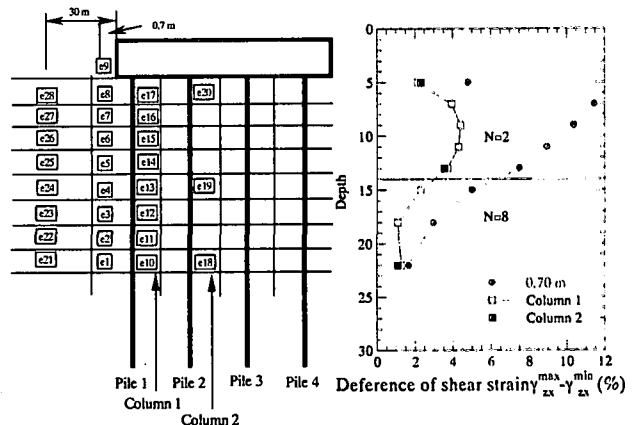


図 2 7 異なる鉛直断面におけるせん断ひずみ分布

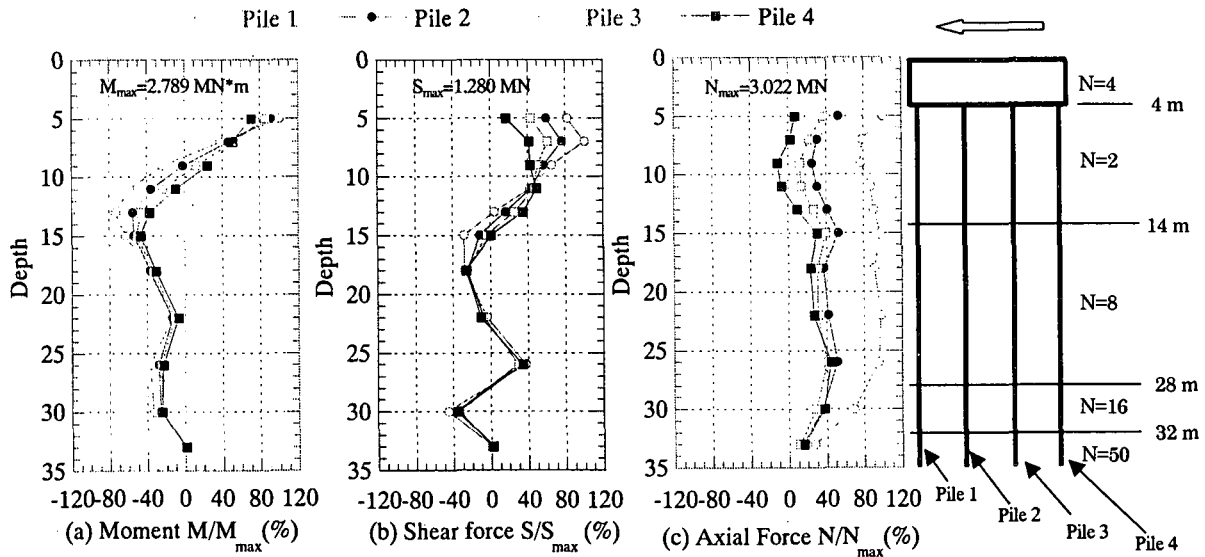


図 28 群杭の断面力分布 (t = 3.10 sec)

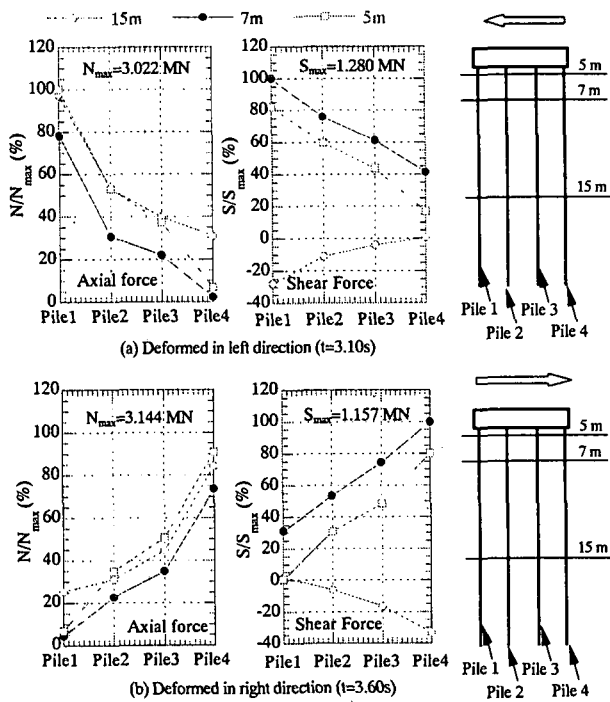


図 29 群杭の荷重分担率

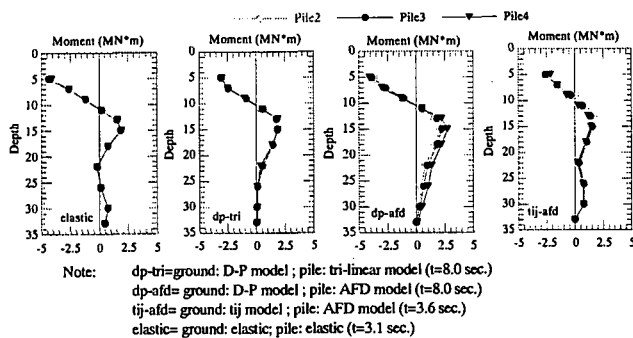


図 30 異なる非線形特性の評価手法による杭曲げモーメント分布の比較

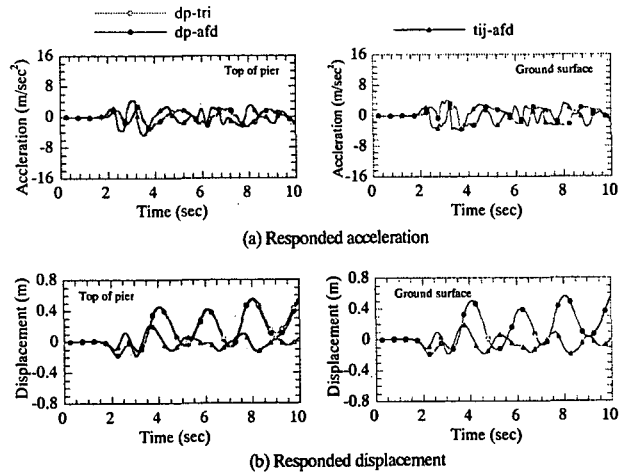


図 31 変位・加速度応答値の比較

5. 地盤調査、室内試験の重要性—12 本群杭現位置水平載荷試験の検証

5.1 レキ土のサンプリング技術および群杭現位置水平載荷試験の検証

土の力学挙動を正しく把握するために、室内試験が不可欠と思われる。品質のいい不攪乱試料を用いて実験するのはきわめて重要であるが、サンプリング技術には制限がある。自然堆積した粘土地盤の場合には、普通のサンプリング技術で不攪乱試料を採集することができる。また、砂質地盤に対して、密度調整により現場に近い室内試料の用意が可能である。しかし、埋め立て地盤のようなレキ材を主とする地盤の場合には、技術の信頼性、費用、施工場所の制約など、不攪乱試料の採集は難問視されている。この場合は、ブロックサンプリング方法、ラインドリルサンプリング方法があるが、地表面付近の土にしか適用できない。それゆえに、試料の整形がほぼ

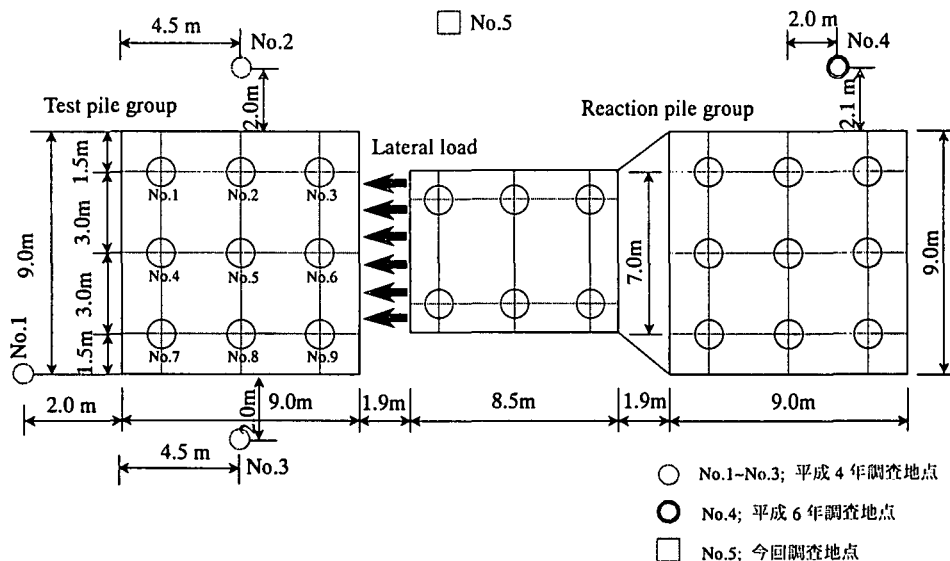


図 3 1 ポーリング調査地点および試験杭位置図

不可能である。もちろん、凍結サンプリング法、あるいは試料の乱れを最小限に抑えることができる大口径のサンプリング技術も開発されているが、費用がかかるために頻りに使うことができない。

一方、現位置載荷試験のひとつとしてよく使われている孔内水平載荷試験についてはポーリング中の孔壁の乱れによる初期剛性の低下がよく知られている。したがって、小型、軽量、操作が簡単かつ信頼性のあるレキ混じり土のサンプリング技術が必要となってくる。

用いて、室内試験で得られた土の力学特性を評価するとともに、水平孔内載荷試験、標準貫入試験、粒度調整試料の CD 試験等種々の方法で得られた地盤特性と比較することにより、数値解析に用いられる地盤特性の評価手法を検証する。さらに、この埋め立て地盤で実施した群杭基礎の水平載荷試験への適用性を今まで確立された解析手法を用いて検証する。

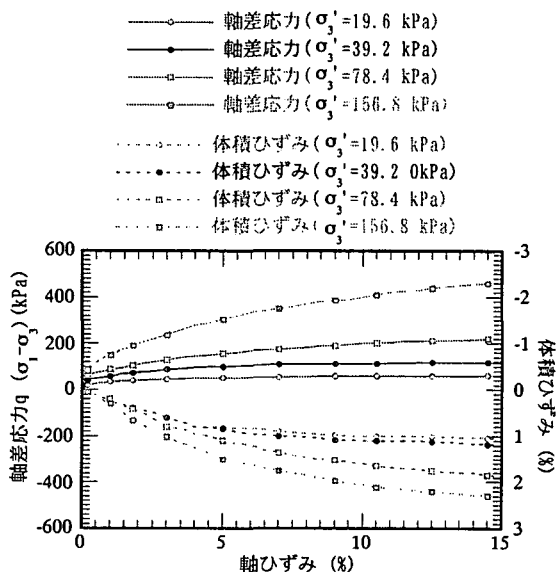


図 3 2 粒度調整試料を用いた CD 試験の応力・ひずみ関係

本研究では、小型、軽量であることを第一条件に、レキ混じり土を含めた D~C_L 級岩盤を対象として浅い深度のサンプリングに適し、サンプリング試料の端面整形のみで力学試験用供試体を提供できる採取装置を用いて、レキ材の埋め立て地盤の不攪乱試料を採取した。これを

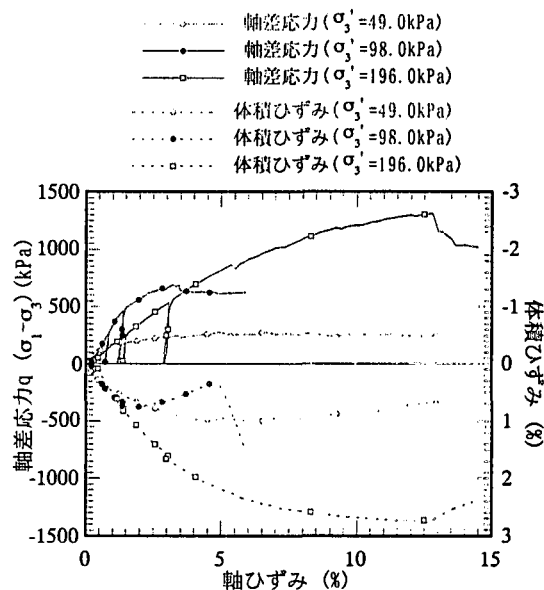


図 3 3 不攪乱試料を用いた CD 試験の応力・ひずみ関係

図 31 にポーリング調査地点および試験杭位置を示す。図 32 に粒度調整試料を用いた CD 試験の応力・ひずみ関係を示す。図 33 に不攪乱試料を用いた CD 試験の応力・ひずみ関係を示す。図 34 に異なる試料を用いた試験で得られた Mohr-Coulomb 破壊強度(ピーク強度)を示す。表 1 に種々の試験により得られた変形係数の比較を示す。図 35 に単調載荷時(最大 8MN)の群杭基礎の荷重・変位関係

の比較を示す。図 36 に水平荷重 8MN 時の杭曲げモーメント分布の比較を示す。

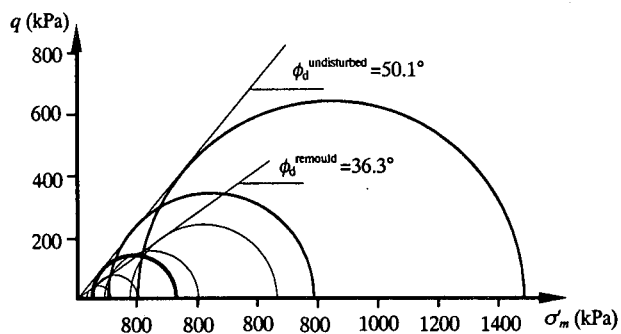


図 3 4 異なる試料を用いた試験で得られたMohr-Coulomb破壊強度(ピーク強度)

表 1 種々の試験により得られた変形係数の比較

	変形係数 E_{so} (MPa)	変形係数 E_{so} 平均値 (MPa)	弾性係数 E (MPa) 平均値 (変動範囲)
N 値に基づく総値 ($E=7/10 N$)	1.40~16.1	7.00	-----
水平孔内載荷試験	0.33~2.40	1.03	-----
CD 試験 (粒度調整試料)	3.00~16.1	15.0	-----
CD 試験 (不攪乱試料)	17.6~31.8	30.0	224 (117~310)

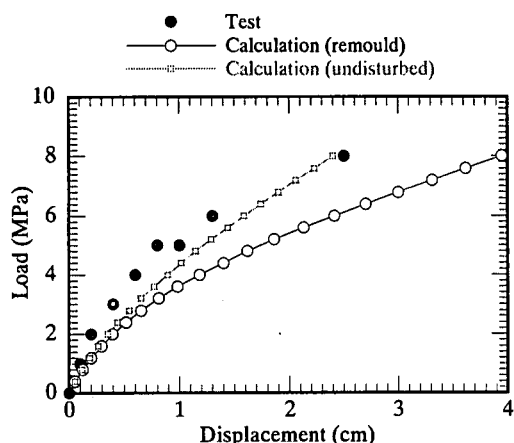


図 3 5 単調載荷時(最大8MN)の荷重・変位関係の比較

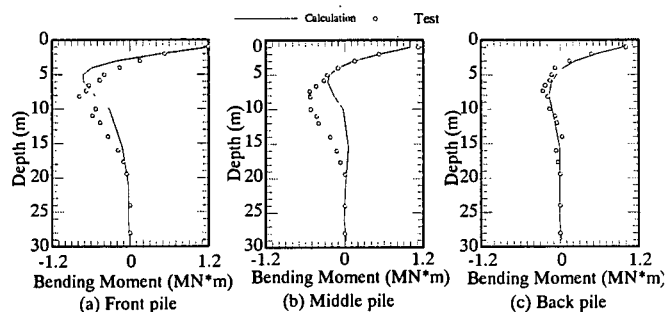


図 3 6 水平荷重8MN時に杭の曲げモーメント分布の比較

5.2 結論

- 孔内水平載荷試験で得られた剛性はばらつきが大きく、ボーリング中の孔壁の乱れにより、実際よりかなり低く評価されている。
- 経験式で算出した剛性も実際よりかなり小さい。
- 粒度調整試料による CD 試験の値が不攪乱試料の値より小さい
- きちんとした室内試験のデータに基づいた解析はそこその精度が得られる。

参考文献

1. Zhang, F., Yashima, A., Kimura, M. and Uzuoka, R.: 3-D FEM Analysis of Laterally Cyclic Loaded Group-Pile Foundation Based on an Axial-Force Dependent Hysteretic Model For RC, Proc. of Int. Conf. on Geotechnical and Geological Engineering (GeoEng2000), Melbourne, CD-ROM, 2000.
2. Oka, F. et al.: Application of Laval type large diameter sampler to soft clay in Japan, Soils and Foundations, Vol. 36, No.3, pp. 99-111, 1996.
3. 幸左 賢二・鈴木 直人・木村 亮・木村 嘉富・森田 悠紀雄: 終局状態に着目した実物大杭基礎の水平載荷試験, 土木学会論文集, No.596/III-43, pp. 249-260, 1998.
4. Kimura, M. and Zhang, F.: Seismic evaluation of pile foundations with three different methods based on three-dimensional elasto-plastic finite element analysis, Soils and Foundations, Vol. 40, No.5, pp. 113-132, 2000.
5. Zhang, F., Kimura, M., Nakai, T. and Hoshikawa, T.: Mechanical behavior of pile foundations subjected to cyclic lateral loading up to the ultimate state, Soils and Foundations, Vol. 40, No.5, pp. 1-18, 2000.
6. 西方 佐男・鎌山 隆: 軟岩のコア採取装置の開発ならびに採取試料の品質, 電力土木, No.285, 2000.1.
7. Chowdhury, E. Q., Nakai, T., Tawada, M. and Yamada, S.: A model for clay using modified stress under various loading conditions with the application of subloading concept, Soils and Foundations, Vol. 39, No.6, pp. 103-116, 1999.
8. Lai, S.-S., Will, G. T. and Otani, S.: Model for inelastic biaxial bending of concrete member, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 11, pp. 2568-2584, 1984.
9. Li, K. N. and Kubo, T.: Analysis of circular RC member in MS/fiber model, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Hiroshima, St. II, AIJ, 1999.
10. Nakai, T. and Matsuoka, H.: A generalized elastoplastic constitutive model for clay in three-dimensional stresses, Soils and Foundations, Vol. 26 No. 3, pp. 81-98, 1986.
11. Nakai, T.: An Isotropic Hardening Elastoplastic Model for Sand Considering the Stress Path Dependency in Three-Dimensional Stresses, Soils and Foundations, Vol.29, No.1, pp. 119-137, 1989.

SEISMIC EVALUATION OF PILE FOUNDATION USING 3-D FINITE ELEMENT ANALYSES ON A FULL SYSTEM

Feng ZHANG, and Makoto KIMURA

It is commonly known that the dynamic behavior of a group-pile foundation is not only related to its own mechanical properties, but also to the upper structure supported by the foundation, and to the surrounding ground. The most important thing in the dynamic analysis of a full system that consists of superstructures, a foundation and a ground, however, is that the individual nonlinear behavior of soils and piles should be properly evaluated. In the numerical analysis, particular attention is paid to the stress-strain relation of the soil which, to the author's point of view, plays a dominant role in the mechanical behavior of the pile foundation. Such constitutive models as Drucker-Prager model, Cam-clay model, and *tij* model are adopted for the analysis in order to find the differences in the results due to the application of different constitutive models. In this paper, a new beam theory is proposed for reinforced concrete material (RC material). The theory is based on a weak form in which the axial-force dependency in the nonlinear moment-curvature relation is considered. Its validity is verified by experimental result RC cantilever beam. On the other hand, a new sampling device, which is very simple and easy operated, is developed to collect undisturbed samples in a reclaimed ground composed of gravel materials that contains boulders with a diameter larger than 100mm. By using the samples, drained conventional triaxial compression tests (CD tests) are conducted to investigate the mechanical behavior of the gravel materials. Results obtained from in situ tests such as borehole horizontal loading test, or from the CD tests with remould sample are also compared to investigated the mechanical behavior of gravel materials with different testing methods. Then a real-scale lateral loading test on a 9-pile foundation that built in the reclaimed ground is simulated with a 3-D finite element analyses based on the experimental data from the CD tests using the samples collected by the new sampling device. The importance of the sampling of undisturbed samples in gravel materials in relation to the numerical simulation of the mechanical behavior of lateral loading group-pile foundation, is also verified. The purpose of the paper is to provide an accurate numerical way of evaluating the dynamic behavior of a pile foundation in earthquake.