

応答変位法に基づいた地盤変位を受ける杭基礎の最適杭径に関する考察

齊藤正人¹

¹埼玉大学工学部建設工学科 助手
(〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)
E-mail:saity@post.saitama-u.ac.jp

強震時、杭基礎は慣性力のみならず、地盤の強制変位により大きく損傷を受けることが既往の研究により明らかにされている。こうした地盤変位を受ける杭基礎を照査し、その結果、杭に要求される変形性能を満足しない場合、杭径をどのように変更すれば損傷を抑制することができるのだろうか？本研究では、耐震設計で頻繁に用いられる応答変位法の基本式から、曲げひずみと杭径の関係を誘導し、曲げひずみを極大化させる杭径（不適径）の存在を明らかにした。また、不適径は、杭先端の拘束条件によらず、一般的な杭径諸元の範囲よりもおよそ常に大きい値となることが判明した。それらの特性を弾性波動論に基づく理論解と比較した結果、杭頭部に生じる曲げひずみと杭径の関係は良好に一致した。

Key Words : kinematic bending, kinematic interaction, pile foundations, seismic deformation method

1. はじめに

過去の地震被害調査や数多くの解析的・実証的研究により、軟弱地盤に埋設される杭基礎については、慣性力のみならず、地盤変形の影響を受けることが明らかにされている。そのため、近年の耐震設計法においては、地盤変形の影響を考慮した耐震照査が実施される場合が多い¹⁾。Nikolaou and Gazetas²⁾の線形動的解析に基づく研究によれば、地盤変形による杭の曲げひずみは、一様地盤では杭頭近傍で増加し、硬軟2層からなる地盤においては、その層境界付近で無視し得ない程度の大きな曲げひずみが生じることを明らかにしている。地盤変形を考慮した耐震設計法としては応答変位法があり、実務設計の有効な手段として耐震設計に定着している。室野、西村³⁾は、慣性力と地盤変形の位相差に着目し、これに基づく杭の応力発生メカニズムの解明と、地盤変位の影響を中心とした設計と慣性力の影響を中心とした設計の2段階法を提案した。Luo et al.⁴⁾による被害事例の検証解析も、この手法に基づいて実施されており、過去の地震被害を説明できることが実証されている。しかし、未解明の点が未だ幾多も残されている。それは“地盤の強制変位を受ける杭径に、最適径は存在するのか”という問題である。

例えば、地盤変位を受ける杭の耐震照査において、地盤変形に対する杭の変形性能が、要求性能を満足できなかった場合を想定する。この場合、当然、主鉄筋本数を増加させて耐力を増加させたり、帯鉄筋を増加させて靱性能を確保するように努力するに違いない。しかし、この考え方には一つ大きな見落としがある。それは、その杭のプロポーションが最適であるという前提に基づいていると言う点である。もしかしたら、現在よりも杭径を大きくし、杭断面の曲げ剛性を増加させれば、杭体の損傷を抑制できるかもしれない。こうしたとき、もしも杭の損傷を最小にする最適径が存在するならば、できる限りその杭径に近づく方向で断面諸元を変更すればよく、要求性能を満たすために余計な鉄筋を追加しなくても済むのかもしれない。あるいは、杭の損傷を極大化させる杭径が存在するならば、こうした杭径を可能な限り避けることで、損傷を抑制することができるであろう。設計当初にそうした杭径が把握できていれば、その杭径に合わせて杭本数を調整し、鉛直支持などの常時設計への対策を講じることも可能である。しかし現時点において、地盤変形を受ける杭の損傷と杭径の関係についての研究は、余り実施されていないのが現状である。

そこで本研究では、耐震設計で頻繁に用いられている応答変位法を用いて、その基本式から曲げひずみと杭径の関係を誘導した。そして、杭頭の曲げひずみを極大化させる杭径の存在とその特性を、2つの異なる杭先端の拘束条件下（ヒンジ固定・完全固定）において明らかにした。また、これらの関係を弾性波動論に基づく理論解と比較し、その妥当性について検証した。本報告は、以上の検討内容について報告するものである。

2. 応答変位法による曲げひずみと杭径の関係

本章では、応答変位法による曲げひずみと杭径の関係を誘導し、その特性について考察する。以下に、応答変位法の基本式を示す。

$$E_p I \frac{\partial^4 u_p}{\partial z^4} = -KD(u_p - u_s) \quad (1)$$

ここで、 u_p は杭の変位振幅、 u_s は表層地盤の変位振幅、 E_p と I は杭のヤング率と断面 2 次モーメント、 K は杭側面に作用する単位杭長当りの水平地盤反力度、また D は杭の直径である（ $D = 2a$ で a は杭の半径を表す）。

本検討においては、表層地盤は弾性・均質であり、剛な基盤層に支持されているものとする。また杭頭を完全固定、杭先端をヒンジ固定の場合と完全固定の場合とする。また本検討では、一様地盤を対象とすることから、Nikolaou and Gazetas²⁾の研究結果に従い、杭頭部に着目することにする。表層地盤の変位振幅は次式を仮定する。

$$u_s = \hat{u}_{suf} \sin \frac{\omega}{V_s} z \quad (2)$$

ここで $\hat{u}_{suf}$ とは、基盤に対する地表面の相対変位振幅を表す。杭先端をヒンジ固定と仮定して、式(1)から杭の曲げひずみを求めれば次式となる。

$$\varepsilon_p = -\frac{a \left(\frac{\omega}{V_s} \right)^2}{1 + \frac{\omega^4}{4\lambda^4 V_s^4}} (\hat{u}_{suf} \sin \frac{\omega}{V_s} z) \quad (3)$$

ここで、

$$\lambda_p^4 = \frac{KD}{4E_p I}$$

式(3)を利用して、表層地盤の 1 次卓越振動数（ $\omega = \omega_g$ ）における杭頭位置の曲げひずみ $\tilde{\varepsilon}_p (z = H)$ を求めてみる。ただし、相互作用ばね KD の評価式として、Gazetas and Dobry⁵⁾ による以下の算定式を用いた。

$$KD = 1.2E_s \quad (4)$$

図-1 に曲げひずみ ε_p と杭径（杭半径 a ）の関係を示す。全体的な傾向について考察すれば、杭半径 a が非常に小さい場合、杭頭の曲げひずみは零に収束する。そして、杭半径 a が大きくなると、いずれのケースにおいても曲げひずみが最大となる径が現れる。そしてその最大点以降、曲げひずみは径の増加に伴い減少する特徴が見られる。つまり、曲げひずみを最小にする最適径はなく、その代わり、曲げひずみを極大化させる不適な径（以下、不適径）が存在することがわかる。そしてその不適径は、図-1(a)(b)(c)間の比較により、杭長 H が大きいほど大きな値を取ることがわかる。地盤と杭の剛性比 E_s/E_p （ E_s は地盤のヤング率）については、杭長が等しい場合、剛性比の減少に伴い、不適径の値は増加する傾向が見られる。また、実際的な杭径の範囲（杭半径 $a = 0.1\text{m}$ から 1m 程度）では、杭半径 a と曲げひずみの関係は線形と見なし得る特性を示していることがわかる。そのため、不適径は常に杭径を増加させる方向に位置しており、このことから、地盤変形を受ける杭の杭径は、可能な限り小さくすることが望ましいと判断できる。また、この範囲においては、地盤と杭の剛性比 E_s/E_p がほぼ同一の曲線に収束しており、剛性比 E_s/E_p におよそ依存しない特性となる。つまり、杭部材や地盤の剛性変化は、この範囲においては、曲げひずみに然程の影響を与えないということである。つまり、地盤変形に対して杭の剛性を強化させる対策を講じて、曲げひずみを著しく減少させることはできないということである。それよりは、杭径をできるだけ小さくする努力をした方が、余程、杭の曲げひずみを減少させることができるといった解釈が可能である。

これら特性については、式(5)に示すように、更に曲げひずみを表層地盤の平均せん断ひずみ γ_s （ $=\hat{u}_{suf}/H$ ）で正規化することで統括される。

$$\frac{\tilde{\varepsilon}_p}{\gamma_s} = \frac{H \varepsilon_p|_{\omega=\omega_g, z=H}}{\hat{u}_{suf}} = -\frac{\beta_1 \left(\frac{a}{H} \right)}{1 + \beta_0 \left(\frac{a}{H} \right)^4 \left(\frac{E_p}{E_s} \right)} \quad (5)$$

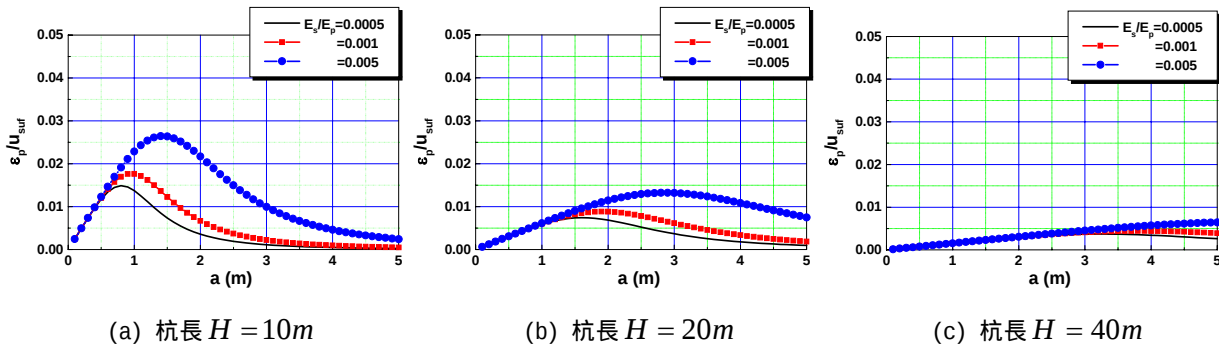


図-1 杭長 H と地盤と杭の剛性比 E_s/E_p をパラメータとした杭頭曲げひずみと杭径との関係

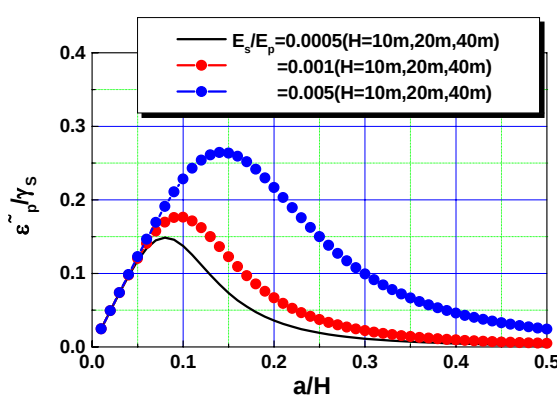


図-2 基礎径長比 a/H と地盤の単位平均せん断ひずみを受ける杭頭曲げひずみ $\tilde{\varepsilon}_p$ の関係 (杭先端ヒンジ固定)

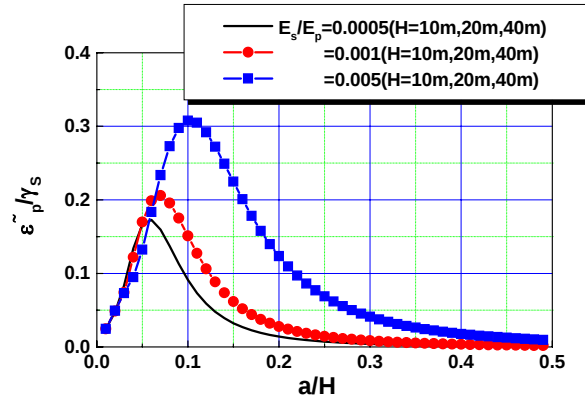


図-3 基礎径長比 a/H と地盤の単位平均せん断ひずみを受ける杭頭曲げひずみ $\tilde{\varepsilon}_p$ の関係 (杭先端完全固定)

ここで,

$$\beta_0 = \frac{5\pi^5}{384} \cong 3.985$$

$$\beta_1 = \frac{\pi^2}{4} \cong 2.467$$

式(5)によれば, 平均せん断ひずみ γ_s で正規化した曲げひずみは, 基礎径長比 a/H と杭と地盤の剛性比 E_p/E_s の関数となることがわかる. 図-2に基礎径長比 a/H と正規化された曲げひずみの関係を示す. 図-1に示した杭長の異なる全ての曲線が, 同じ杭と地盤の剛性比 E_p/E_s を持つ曲線に一致することがわかる.

次に, 杭先端の拘束条件を完全固定条件とした場合について検討してみる. 曲げひずみは次式から求まる.

$$u_p = e^{\lambda_p z} (A \cos \lambda_p z + B \sin \lambda_p z) + e^{-\lambda_p z} (C \cos \lambda_p z + D \sin \lambda_p z) + \frac{1}{1 + \frac{\omega^4}{4\lambda_p^4 V_s^4}} \left(\hat{u}_{surf} \sin \frac{\omega}{V_s} z \right) \quad (6)$$

ここで, A, B, C, D は杭頭と杭先端の境界条件から定まる未定係数である. 上記と同様に, 表層地盤の1次卓越振動数 ($\omega = \omega_g$) における杭頭位置の曲げひずみ $\tilde{\varepsilon}_p$ ($z = H$) を条件として付加し, 表層地盤の平均せん断ひずみ γ_s で正規化すれば, 図-3に示すような結果が得られる. 杭先端をヒンジ固定した場合と同様に, 杭長の異なる全ての曲線が, 同じ杭と地盤の剛性比 E_p/E_s を持つ曲線に一致することがわかる. また, それらの関係も同様に, 杭の曲げひずみを極大化する不適径が存在することが理解できる. そしてその不適径の値は, 杭先端をヒンジ固定とした場合と対比して, いずれの剛性比 E_p/E_s においても, およそ 0.7 倍程度低下することがわかる. しかし, この低下によっても, 不適径が一般的な杭径の諸元 (基礎径長比 $a/H \leq 0.05$) の範囲に入らないと判断することができる. つまり杭頭部の曲げひずみは, 杭先端の境界条件によらず, 杭径を減少させることで抑制することができることがわかった.

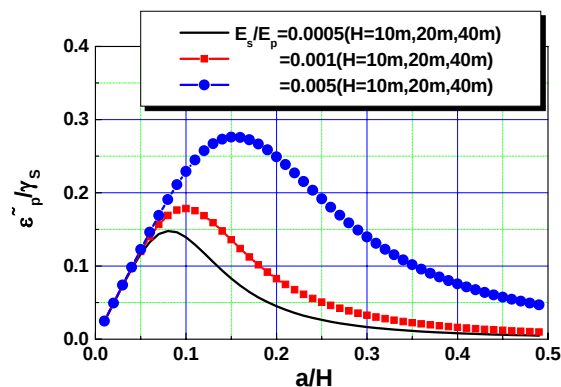


図-4 田治見の理論解⁶⁾に基づく基礎径長比 a/H と地盤の単位平均せん断ひずみを受ける杭頭曲げひずみ $\tilde{\varepsilon}_p$ の関係(杭先端ヒンジ固定)

3. 理論解との比較

これを弾性波動論に基づく理論解と比較してみる。杭先端をヒンジ固定条件とした理論解には、田治見の単杭に関する理論解⁶⁾を用いた。また、杭先端を完全固定とした理論解には、大平らの理論解⁷⁾を用いた。いずれも、式の誘導に関する詳細は、当該論文を参照されたい。ただし、いずれの理論解においても、地盤の強制変形によるKinematic応答のみを抽出していることをお断りする。また本解析では、地盤の密度 $\rho = 1.8 \text{ t/m}^3$ 、ポアソン比 $\nu = 0.45$ 、減衰定数 $h_g = 0.05$ を用いるものとする。

理論解から誘導された基礎径長比 a/H と正規化された曲げひずみの関係を図-4に示す。図-4によれば、1) 不適径が存在すること、2) 杭長の異なる全ての曲線が、同じ杭と地盤の剛性比 E_p/E_s を持つ曲線に一致すること、そして、3) 杭先端が完全拘束条件となった場合、ヒンジ固定条件の場合と対比して不適径が低下することが、応答変位法による正規化した曲げひずみと基礎径長比 a/H との関係と良好に一致することがわかる。また、本報告では割愛するが、表層地盤のポアソン比と減衰定数の違いが不適径に及ぼす影響を評価した結果、それらの影響は無視し得る程度のものであったことをここに報告する。

4. 結論

以上の検討により、地盤の強制変形を受ける杭の杭頭部においては、杭先端の拘束条件に依存せず、杭径を極大化させる不適径が存在することが明らかとなった。また、その不適径は、概して一

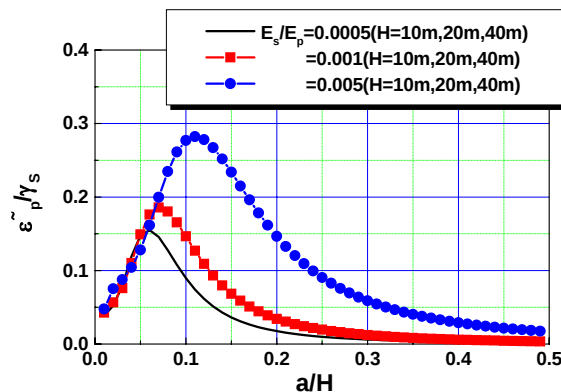


図-5 大平らの理論解⁷⁾に基づく基礎径長比 a/H と地盤の単位平均せん断ひずみを受ける杭頭曲げひずみ $\tilde{\varepsilon}_p$ の関係(杭先端完全固定)

般的な杭径諸元の範囲よりも大きいことが明らかとなった。今後、地盤条件の違いや、Nikolaou and Gazetas²⁾ が指摘している2層系地盤での層境界付近で生じる曲げひずみについて検討していく予定である。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善，1999.
- 2) Nikolaou, A., Gazetas, G.: Seismic design procedure for kinematically stressed piles, *Proc. of 14th int. conf. on soil mech. and found. engrg.*, pp.253-260, 1997.
- 3) 室野剛隆，西村昭彦：杭基礎の耐震設計における地盤変位と慣性力の組合せ，地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，Vol.3，pp.1-8，1999.
- 4) Luo, X., Murono, Y., Nishimura, A.: Verifying adequacy of the seismic deformation method by using real examples of earthquake damage, *Soil Dyn. and Earth. Engrg.*, No.22, pp.17-28, 2002.
- 5) Gazetas, G., Dobry, R.: Horizontal response of piles in layered soils, *J.Geotech. Engrg.*, ASCE, Vol.110, No.6, pp.937-956, 1984.
- 6) 田治見宏：深い基礎を有する構造物の地震応答について，第2回日本地震工学シンポジウム，pp.55-60，1966.
- 7) 大平 彰，田蔵 隆，中松 新，清水勝美：軟弱地盤中の基礎杭の地震時挙動特性に関する研究，土木学会論文報告集，No.362/I-14，pp.417-426，1985.

(2003.9.11)