地盤変形を受ける杭基礎の最適杭径に関する基本特性

埼玉大学 工学部 正会員 齊藤 正人

1.はじめに

近年の耐震設計においては、軟弱地盤に埋設される杭基礎について、慣性力のみならず、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.なぜなら,地盤変形が杭に及ぼす影響とその重要性につい て、過去の地震被害や地震観測において報告されてきたこと、また数多くの解析的・実証的研究により、そ れらの現象解明が進展したためである.Nikolaou and Gazetas¹⁾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²⁾ 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.³⁾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.こ のように、地盤の強制変位を受ける杭の挙動について、耐震設計に反映されるまでに研究が為されたと考え られる.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靭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変形を抑制 できるかもしれない.あるいは杭径を小さくし,杭に作用する側壁土圧を低減する方が変形を抑制するのか もしれない.こうしたとき,もしも杭の変形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、設計当初に最適径がある程度把握できるのであれば、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 ける杭の最適径に関する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,上記問題に対する基礎的な検討として,一様弾性地盤における単杭を対象とした最適 杭径に関する理論的考察を実施した.本考察では,最適径の基本特性を3次元波動論に基づく単杭の理論解 (田冶見の理論解)から導き出した.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.理論解の概要

本節では,理想化された状態における杭の曲げひずみの理論解を誘導する.本検討では杭径の異なる杭の 損傷を定量的に把握するため,Nikolaou and Gazetas¹⁾の研究と同様に,無次元量である杭の曲げひずみ ε_p を評価指標に用いる.理論解析モデルを図-1 に示す.表層地盤には円柱座標系(r, θ, z)を設定し,表層地盤 厚と基礎長を等しくHで与える.また杭半径をaとする.理論誘導過程においては,以下の条件を仮定した. (a)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.地盤材料の減衰特性は振動数に依存しない非 粘性型 Voigt モデルとする.(b)入力はSH波の調和振動入力とする.(c)基礎とその周辺地盤は水平加振時 も完全密着条件を満足する.(d)杭頭は完全固定 杭先端はヒンジ固定とする.田治見の理論解を参照すれば, 表層地盤の卓越振動数において,地盤の強制変位を受ける(慣性力の影響を無視した)杭頭の曲げひずみの

キーワード 杭基礎,地盤変形,地盤変位,曲げひずみ,

連絡先 〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 255 埼玉大学工学部建設工学科 048-858-3560

一般解が次式として得られる.

$$\varepsilon_{p}\Big|_{\omega=\omega_{g},z=H} = \sum_{n=1,3...}^{\infty} \frac{a}{n^{4}/\tilde{\alpha}_{2}\Omega_{n} + \tilde{\xi}_{n}^{2}} (\frac{n\pi}{H^{2}})u_{g}e^{i\omega t} \quad (1)$$

$$\Xi \equiv \mathcal{C} \quad ,$$

$$\widetilde{\alpha}_{2} = \chi \left(\frac{4}{\pi}\right)^{2} \left(\frac{H}{a}\right)^{2} \left(\frac{\mu}{E_{p}}\right) \quad , \quad \tilde{\xi}_{n} = \sqrt{n^{2}(1+i2h_{g})-1}$$

$$\Omega_{n} = \frac{K_{1}(x_{a}) + K_{1}(y_{a})\frac{2K_{1}(x_{a}) + x_{a}K_{0}(x_{a})}{2K_{1}(y_{a}) + y_{a}K_{0}(y_{a})}$$

$$x_{a}K_{0}(x_{a}) + K_{1}(x_{a}) - K_{1}(y_{a})\frac{2K_{1}(x_{a}) + x_{a}K_{0}(x_{a})}{2K_{1}(y_{a}) + y_{a}K_{0}(y_{a})}$$

$$x_{a} = \frac{\omega_{g}\tilde{\xi}_{n}a}{\sqrt{1+i2h_{g}}V_{p}}, \quad y_{a} = \frac{\omega_{g}\tilde{\xi}_{n}a}{\sqrt{1+i2h_{g}}V_{s}}$$

ここで,
$$\chi = 1/(1 - b^4/a^4)$$
:中空断面を有する杭の補正係

数でbは中空断面の内半径 $.h_{g}$ は地盤の減衰定数 $.V_{p}$ と

 V_s は P 波速度と S 波速度である.また E_p と μ は杭のヤング率と地盤のせん断弾性係数である. u_s は基盤 層からの地動入力振幅, ω は角振動数, ω_s は表層地盤の非減衰固有角振動数, K_m は第2種変形m次ベッセ ル関数である。



3.解析結果とまとめ

解析パラメータは,杭長Hと地盤と杭の剛性比E,/E,とする.ただし,E,は土材料のヤング率である.杭 長 H については,10m,20m,40mの3種類を,また地盤と杭の剛性比 E_s/E_pについては,1/2000,1/1000, 1/200の3種類とする.また本解析では、地盤の密度 $\rho = 1.8t/m^3$ 、ポアソン比v = 0.45、減衰定数 $h_s = 0.05$ を 用いるものとする.横軸に杭径a,縦軸に式(1)から得られた曲げひずみ振幅を,地動入力振幅u。で除した 値を図-2に示す. 杭径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, 杭径が大きくなる 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,当初考えていた曲げひずみを最小にする最適径はなく, その代わり,不適な杭径(不適径)が存在することがわかる.そしてその不適径は,杭長Hが大きいほど大 きな値を取ることがわかる.更に,杭長Hが大きいほど,杭径の違いが杭の曲げひずみに及ぼす影響が低下 することが理解できる.地盤と杭の剛性比 Es/En については,杭長が等しい場合,剛性比の減少に伴い,不 適径は増大する傾向が見られる.しかし,一般的な杭径の取る範囲は,およそ図中に枠囲いした範囲と考え られる.この範囲における杭径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.そして,不適径 は常に杭径を増加させる方向に位置している、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いった解釈ができる.ただし杭の設計は常時荷重や上部からの慣性力の影響を考 慮する必要があり,これらの荷重により杭径の下限値が決まるであろう.

参考文献: 1)Nikolaou, A., Gazetas, G.: Seismic design procedure for kinematically stressed piles, Proc. of 14th int. conf. on soil mech. and found.engrg,pp.253-260,1997.2)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, SDEE., No.22, pp.17-28, 2002.

杭頭完全固定 Η 杭先端ヒンジ固定 7 調和振動入力 $u_g e^{i\omega t}$



図-1 杭基礎の理論解析モデル