液状化地盤において鉛直荷重を受ける鋼管単杭の曲げ座屈応力度

BUCKLING STRESS OF STEEL PILE WITH VERTICAL LOAD
IN LIQUEFIED SOIL木村 祥裕*¹, 時松 孝次*²

Yoshihiro KIMURA and Kohji TOKIMATSU

When slender steel piles beneath buildings experience high axial compression forces as a result of vertical loads increased by P- Δ effects with inertia forces acting on the buildings and then the soil liquefies, buckling of the piles may occur even though they are restrained laterally by the liquefied soil. This paper describes the evaluation of the buckling length of slender piles in liquefied soil with the unified and triangular distributions of the coefficient of the subgrade reaction. The relationship between the buckling length of the slender piles and the soil-pile interaction is presented.

Keywords : Steel Pile, Flexiable Buckling Length, Coefficient of Subgrade Reaction, liquefaction, Energy Method, FEM Analysis

鋼管杭, 曲げ座屈長さ, 地盤反力係数, 液状化, エネルギー法, 有限要素解析

1. 序

性能設計法の導入により, 上部構造のみならず杭基礎においても, 想定される地震外力に対して, 保有耐力及び塑性変形性能を明確にする必要性が増してきている。このため, 杭基礎の塑性化を許容し, 大変形時においても耐荷能力を維持できる鋼管杭等の高靱性部材の有効性が再確認されている。

しかし, 「建築耐震設計における保有耐力と変形性能1990」¹⁾では, 鋼管杭について局部座屈に対する径厚比制限を設けているものの, 軸圧縮荷重に対しては支持力の検討だけで, 曲げ座屈に対する細長比制限等を規定していない。これは, 一般に軟弱地盤であっても, 地盤は杭の曲げ座屈に対して水平変形を十分に拘束することができると考えられているためである。しかし, 地震時に地盤が液状化した場合, 水平地盤反力係数が大幅に低下するため, 杭の曲げ座屈に対して地盤の変形拘束効果はほとんど期待できなくなる。さらに, 地震時に上部構造物の慣性力によって生じる転倒モーメントが偶力として杭に作用すると, 上部構造物の自重だけが杭に作用する場合と比べて, 圧縮応力の大幅な増加が予想されることから, 細長比の大きい杭は曲げ座屈を生じる可能性がある。

既往の研究²⁾では地盤の液状化時に杭の側方変位の影響を考慮

して, 地盤反力と杭の弾性座屈荷重の関係を示している。しかし, 鋼管杭の曲げ座屈に対して, 杭の材料特性及び地盤反力変位関係等の非線形挙動や地盤反力係数分布の影響を検討しておらず, 水平変形拘束を受ける杭の曲げ座屈長さを把握するに至っていない。

本研究では, 地震時に液状化により地盤反力係数が低下した場合に, 上部構造物の自重及び転倒モーメントによる偶力等の鉛直荷重を受ける鋼管杭の曲げ座屈荷重に及ぼす地盤反力係数分布の影響を明らかにする。杭の曲げ座屈荷重をエネルギー法により求め, 弾性固有値解析及び地盤と鋼管杭の非線形挙動を考慮した弾塑性大変形解析を行い, その妥当性を検証する。さらに地盤により水平変形拘束を受ける鋼管杭の曲げ座屈長さを提示する。本論文は, 2章:弾性曲げ座屈荷重の提示, 3章:地盤反力係数の非線形性を考慮した低減係数の評価, 4章:液状化地盤中の弾塑性曲げ座屈応力度の評価法の提案で構成されている。

2. 液状化地盤において鉛直荷重を受ける鋼管杭の弾性曲げ座屈荷重

本章では, 液状化地盤において鉛直荷重を受ける鋼管杭の弾性座屈荷重式を誘導し, 地盤反力係数分布の違いが座屈荷重に与え

*¹ 長崎大学工学部構造工学科 助教授・博士(工学)

*² 東京工業大学大学院建築学専攻 教授・工博

Assoc. Prof., Dept. of Structural Engineering, Faculty of Eng., Nagasaki University, Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture and Building Engineering, Graduate School of Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

る影響について検討する。

2. 1 鋼管杭の弾性曲げ座屈の仮定条件

液状化地盤において、地盤により水平変形拘束を受ける鋼管杭の曲げ座屈荷重を算定するために、以下の仮定を用いる。

- 1) 杭は単杭とする。
- 2) 杭に作用する外力は図1に示すように鉛直荷重のみとする。
- 3) 杭の材端支持条件は通常の圧縮材と同様、座屈荷重を安全側として評価するために単純支持とし、杭頭の移動は考えない。
- 4) 水平地盤反力係数を図1のような水平変形に対する弾性バネに置換する。
- 5) 杭に作用する単位長さ・杭幅当たりの地盤反力係数を次式とする。

$$K_c = k_{hi} B (\text{MN/m}^2) \quad (1)$$

$$k_{hi} = 80 E_0 B^{-\frac{3}{4}} (\text{MN/m}^3)$$

ここで、 k_{hi} は文献3)に示される地盤反力係数で、変形係数 E_0 及び鋼管径 B から求められる。ただし、 k_{hi} の式中の B はcmで表された無次元量である。本解析で用いる K_c の値は0.01, 0.1, 1MN/m²である。本論文で使った K_c と E_0 の関係は、表1に示す通りである。

- 6) 地盤反力係数分布は図2に示すように、深度方向に(i)等分布、(ii)三角形分布とする。それぞれの場合の K は次式で表される。

(i) 等分布

$$K = K_c \quad (2)$$

(ii) 三角形分布

$$K = 2K_c \frac{x}{l} \quad (3)$$

図1 鉛直荷重を受ける鋼管杭及び地盤解析モデル

表1 単位長さ・杭幅当たりの地盤反力係数 K_c と変形係数 E_0

$K_c (\text{MN/m}^2)$	$E_0 (\text{MN/m}^3)$
0.01	0.0047
0.1	0.047
1	0.47

B=50cm の場合

(i) 等分布

(ii) 三角形分布

図2 鋼管杭の曲げ座屈変形と地盤反力係数分布

2. 2 鋼管杭の弾性曲げ座屈荷重式の誘導

地盤による水平変形拘束を受ける鋼管杭が曲げ座屈するときのポテンシャルエネルギーは文献4)より次式となる。

$$U = \frac{1}{2} \int_0^l (EI u''^2 - P u'^2 + K u^2) dx \quad (4)$$

ここで、 EI は鋼管杭の曲げ剛性、 P は鉛直荷重であり、 K は(2)式または(3)式に示す通りである。 l は材長、 x は材軸の座標、 u は座屈変形である。

(i) 地盤反力係数分布が等分布である場合

地盤反力係数分布が等分布の場合、(4)式における K を(2)式とし、座屈変形を近似的に次式とする。

$$u = a \sin \frac{n\pi x}{l} \quad (5)$$

ここで、 n は座屈波数、 a は振幅である。(4)式を変分し、釣り合い方程式を求めると、座屈荷重 P_{cr} は次式となる⁴⁾。

$$P_{cr} = \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 EI \alpha \quad (6)$$

ここで、 α は地盤による座屈荷重の上昇率として次式で表される。

$$\alpha = n^2 + \left(\frac{\pi}{l} \right)^4 \frac{K_c}{n^2 EI} \quad (7)$$

n は(6)式の P_{cr} が最小となる自然数であり、 $K_c=0$ の場合、常に1となる。そのとき、 $\alpha=1$ となり、(6)式はEuler座屈荷重を表す。

(ii) 地盤反力係数分布が三角形分布である場合

地盤反力係数分布が三角形分布の場合、(4)式における K は等分布の場合と杭中央で値が等しくなる(3)式を用いる。杭の座屈変形に対する地盤反力係数は材軸方向に一様でないため、座屈変形を近似的に次式のように仮定する。

$$u = a \sin \frac{\pi x}{l} + b \sin \frac{2\pi x}{l} \quad (8)$$

(3)、(8)式を用いて(4)式を変分し、釣り合い方程式を求めると、座屈荷重 P_{cr} は次式となる。

$$P_{cr} = \frac{5}{2} \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 EI + \frac{5}{8} \left(\frac{l}{\pi} \right)^2 K_c - \sqrt{\frac{9}{4} \left[\left(\frac{\pi}{l} \right)^2 EI - \left(\frac{l}{\pi} \right)^2 \frac{K_c}{4} \right]^2 - \frac{256}{81} \frac{K_c^2}{l^4} \left(\frac{l}{\pi} \right)^8} \quad (9)$$

ただし、(8)式は1次の座屈モードの近似式であることから、(9)式の適用範囲は P_{cr} の極小値以下となる。 $K_c=0$ の場合、(9)式も(6)式と同様、Euler座屈荷重を表す。

2. 3 地盤による水平変形拘束を受ける鋼管杭の弾性曲げ座屈荷重

前節でエネルギー法より求めた曲げ座屈荷重式を弾性固有値解析⁵⁾により検証する。杭を材長方向に50分割した線要素でモデル化し、地盤反力係数を水平変位に対するバネに置換する。バネ剛性 k は地盤反力係数 k_{hi} に鋼管径 B 及び杭単位長さに対するばね要素間の距離 d の比を乗じることで $k = k_{hi} B d$ (MN/m)として求められる。

図3(a)にエネルギー法及び弾性固有値解析から求めた座屈応力度と細長比との関係を示す。縦軸は弾性座屈荷重 P_{cr} を杭の断面積 A で除した弾性曲げ座屈応力度 σ_{cr} 、横軸は杭の細長比 λ ($=l/i$)である。細破線は(6)及び(7)式、細実線は(9)式から求められる座屈曲線で

あり、曲げ座屈荷重が最小となる波数 n について示している。また、オイラー座屈曲線を併記している。○, □は地盤反力係数分布が等分布及び三角形分布の場合の弾性固有値解析結果である。 $K_c=0.01\text{MN/m}^2$ の場合、 $\lambda \leq 150$ の範囲でsin半波である1次モードが卓越しており、各式から求められる曲げ座屈荷重はほぼ等しくなっている。 K_c が大きくなるに従い、最小曲げ座屈荷重を与える座屈変形は高次モードへと移行していく。特に $\lambda \leq 150$ で高次モードが卓越する $K_c=1\text{MN/m}^2$ の場合、地盤反力係数分布の違いが曲げ座屈荷重に及ぼす影響は大きくなり、等分布(○)に比べて三角形分布(□)では座屈荷重が最大20%程度小さくなっている。また、図3(b)に等地盤反力係数分布の座屈荷重式で採用されている波数 n を示す。 K_c が大きいくほど、細長比が大きくなるに従って、座屈波数 n は増加し、高次モードへと移行するが、 K_c が小さい場合、 n は1である。本論文で提示した単純支持の曲げ座屈荷重式と数値解析結果は概ね対応しており、前節でエネルギー法により求められた曲げ座屈荷重式の有効性が示されている。

従って、これらの座屈荷重式はある程度の精度があると考えられるが、座屈モードを一つもしくは二つの波形で仮定しているため、 K_c が大きい場合、細長比が大きくなるに従って、座屈応力度が単純には小さくならず、一部で大きくなる現象が生じている。これは、実際の弾塑性座屈とは異なる傾向であり、(6), (7), (9)式に対応し、かつ数値解析結果に対応したより簡便で実用的な近似式を提示する。

地盤反力係数分布が等分布の場合、 l に関する(6)式の極小値は次式となり、 $n=1$ で P_{cr} が極小値となるときの l よりも大きい範囲($l \geq \pi\sqrt{EI/K_c}$)で座屈荷重の下限値を次式とする。

$$P_{cr} = 2\sqrt{EI K_c} \quad (l \geq \pi\sqrt{EI/K_c}) \quad (10)$$

(10)式を(6)式の形で表すと、 α は次式となる。

図3(a) 地盤反力係数分布が異なる鋼管杭の弾性曲げ座屈応力度

図3(b) 座屈波数 (等分布)

$$\alpha = 2 \left(\frac{l}{\pi} \right)^2 \sqrt{\frac{K_c}{EI}} \quad (11)$$

また、三角形分布の場合、同様に(6)式において極小値までは(7)式、 $\pi\sqrt{EI/K_c} \leq l \leq \pi\sqrt{2EI/K_c}$ の場合、(11)式とする。 $l \geq \pi\sqrt{2EI/K_c}$ の場合、次式を用いて、曲げ座屈荷重を近似する。

$$\alpha = 1 + \frac{3}{2} \left(\frac{l}{\pi} \right)^2 \sqrt{\frac{K_c}{EI}} \quad (l \geq \pi\sqrt{2EI/K_c}) \quad (12)$$

図3中の太実線及び太破線は、(6)式の α に(11), (12)式の等分布、及び三角形分布の場合の近似式による曲線である。

3. 液状化地盤において鉛直荷重を受ける鋼管杭の弾塑性曲げ座屈性状

実際の地盤は前章の仮定と異なり、水平地盤反力係数は杭の水平変位によって変化する。そこで、杭の材料特性及び地盤反力変位関係の非線形性を考慮した鋼管杭の弾塑性座屈性状及び弾塑性曲げ座屈荷重を検討する。

3.1 解析概要

図4に鋼管杭の材料特性を示す。鋼管の応力歪関係は文献6)の引張試験結果を元にRound House型にモデル化している。

図5に解析モデル⁵⁾を示す。鋼管杭の各節点にバネ要素を配置することで地盤反力係数を表現している。バネ要素は水平方向の地盤反力のみを伝達するものとする。また、地盤反力係数分布は前章で用いた等分布、三角形分布とし、 K_c の値は0, 0.01, 0.1, 1MN/m²である。

通常、杭の製作時及び施工時に生じるたわみを考慮して、図6に示すような形状初期不整を杭に与える。初期不整は弾性固有値解析から得られる1次、2次モードを用い、最大値を1/5000, 1/10000としている。

図4 鋼材の材料特性

図5 地盤による水平変形拘束を受ける杭の弾塑性解析モデル

図6 杭初期不整

図7 地盤反力変位関係

図7に地盤反力変位関係を示す。ここで、横軸は地盤の水平変位、縦軸は地盤反力であり、基準変位 y_1 及び基準反力 p_1 で無次元化している。地盤の非線形性を考慮するため、地盤反力変位関係が基礎構造設計指針⁷⁾の設計式で表される非弾性地盤と、 K_c が一定の弾性地盤について検討する。非弾性地盤では、基準値 $(y_1, p_1) = (1, 1)$ における割線剛性を K_c としている。

3. 2 地盤特性の違いが鋼管杭の弾塑性曲げ座屈性状に与える影響

(i) 地盤反力係数の違い

図8(a)～(d)に細長比 $\lambda=115$ で地盤反力係数が異なる場合の杭の座屈性状を示している。図8(a)に杭の平均軸応力－平均軸歪関係を示す。縦軸は杭に作用する鉛直荷重 P を鋼管断面積 A で除した平均軸応力 σ_x であり、横軸は杭頭の鉛直変位を材長 l で除した平均軸歪 ε_x を百分率(%)で示している。地盤反力係数分布は三角形分布である。地盤反力係数が相対的に大きくなるにつれて鋼管杭の最大荷重は上昇しているものの、 $K_c=1\text{MN/m}^2$ の場合でも座屈応力度は降伏応力度

($\sigma_y=0.4\text{kN/mm}^2$)の80%程度にしか達していない。また、 $K_c=0.01\text{MN/m}^2$ の場合、 $K_c=0\text{MN/m}^2$ と比較して曲げ座屈荷重はほとんど上昇していない。

図8(b)に平均軸歪と水平変位の関係を示す。縦軸は杭で最大となる水平変位 u を杭長 l で除したものである。図中、 $\triangleleft$ は座屈発生に伴い、水平変位が急増する点であり、 K_c が小さいほど、座屈発生時の軸歪は小さい。また、座屈発生後の大変形領域($\varepsilon_x \geq 0.15\%$)において $K_c=0, 0.01, 0.1\text{MN/m}^2$ における杭の水平変位はほぼ等しくなっている。これは、非弾性地盤の場合、水平変位の増加に伴い地盤反力係数が大幅に低下するためである。

図8(c)に最大荷重時における杭の水平変形分布を示す。縦軸は杭の材軸方向の位置 x を材長 l で除したものであり、横軸は各位置における水平変位 u を材長 l で除したものである。

図8(d)に最大荷重時における杭の作用曲げモーメント分布を示す。縦軸は(c)と同様であり、横軸は各位置における作用モーメントである。図中の $\blacktriangle$ はそれぞれ、鋼管杭の降伏モーメント M_y 、全塑性

図8 地盤反力係数値が異なる鋼管杭の弾塑性曲げ座屈性状
(三角形分布, $\lambda=115$, 地盤非弾性)

図9 地盤反力係数分布及び土圧－変位関係が異なる鋼管杭の弾塑性曲げ座屈性状($\lambda=115$, $K_c=0.1\text{MN/m}^2$)

図10 材長が異なる鋼管杭の弾塑性曲げ座屈性状
($K_c=0.1\text{MN/m}^2$, 三角形分布, 地盤非弾性)

モーメント M_p である。

地盤反力係数が小さい場合、水平変形分布及び曲げモーメント分布は杭中央で最大となる $\sin$ 半波形となっており、地盤反力係数が小さくなるにつれて、水平変形及び曲げモーメントの値は大きくなっている。地盤反力係数が相対的に大きい $K_c=1\text{MN/m}^2$ の場合、水平変形、作用モーメントともに $l/4$ の位置で最大となっており、作用モーメントは $2l/5$ より下では反転している。

(ii) 地盤反力係数分布及び地盤反力変位関係の違い

図9(a)～(d)に細長比 $\lambda=115$ 、 $K_c=0.1\text{MN/m}^2$ で地盤反力変位関係及び地盤反力係数分布が異なる場合の杭の座屈性状を示している。図9(a)に杭の平均軸応力－平均軸歪関係を示す。地盤反力変位関係は弾性及び非弾性であり、地盤反力係数分布は等分布及び三角形分布である。弾性地盤では等分布の場合の最大荷重は三角形分布の場合よりも5%程度高いものの、曲げ座屈が発生する時の平均軸歪はほぼ等しい。また、非弾性地盤では地盤反力係数分布の違いによらず、平均軸応力－平均軸歪関係はほぼ等しくなっている。弾性地盤に対して非弾性地盤の最大荷重は70%程度に低下している。

図9(b)に杭の平均軸歪と水平変位の関係を示す。弾性地盤に比べて非弾性地盤では座屈が早期に発生するとともに座屈後の水平変位は増加している。しかし、地盤反力係数分布の違いによる水平変位の差異はほとんど見られない。本章では非弾性地盤の初期勾配 K_c を図7における $y/y_1=1$ の時の割線剛性と定義している。そして、基礎構造設計指針⁸⁾ では $y_1=1\text{cm}$ としていることから、 K_c は水平変位 u が 1cm 時の剛性である。しかし、実際に水平変形が急激に増大し、座屈が発生する時点での水平変位は図9(b)に示す $\triangleleft$ の位置で $u/l=0.002\sim 0.003$ である。例えば $\lambda=115$ ($l=2000\text{cm}$) の場合、 $u=4\sim 6\text{cm}$ に相当する。つまり、座屈時の地盤反力係数は図7の割線剛性 K_c よりも非常に小さくなっているため、 $K_c=0.1\text{MN/m}^2$ の非弾性地盤では地盤反力係数分布の違いが座屈性状にあまり影響を及ぼしていないものと思われる。

図9(c)に最大荷重時における水平変形分布を、図9(d)に最大荷重時における杭の作用曲げモーメント分布を示す。同じ軸歪時では弾性地盤における杭の最大変形は非弾性地盤の場合よりも小さい。しかし、弾性地盤における杭の最大荷重は非弾性的の場合よりも大きくなっており、そのときの杭の水平変形も弾性地盤の場合の方が非弾性地盤の場合より大きくなっている。これは、最大荷重に達するまでの間に弾性地盤における杭の方がより大きな水平変形、曲げモーメントに耐えうることを示している。また、弾性地盤では地盤反力係数分布によらず、杭頭から $l/4$ の位置で水平変形が最大となっているが、非弾性地盤では $\sin$ 半波の座屈変形となり、弾性地盤と比較して地盤による座屈拘束の効果は相対的に小さくなっている。作用モーメントについても、弾性地盤では地盤反力係数分布によらず、杭頭から $l/4$ の位置で最大となっており、 $2l/3$ より下で作用モーメントが反転している。

(iii) 液状化地盤の層厚の違い

図10(a)～(d)に液状化地盤の層厚が異なる場合の杭の座屈性状を示している。図10(a)に杭の平均軸応力－平均軸歪関係を示す。ここで想定している層厚は 10m 、 20m であり、そのときの杭の細長比は $\lambda=58$ 、 115 である。地盤反力係数分布は図8と同様、三角形分布である。細長比の小さい $\lambda=58$ の杭の座屈応力度は $\lambda=115$ の杭よりも高い

ものの、降伏応力度には達していない。

図10(b)に杭の平均軸歪と水平変位の関係を示す。 $\lambda=115$ の杭に比べて、 $\lambda=58$ の杭では座屈後も水平変位の増加は緩やかである。

図10(c)に最大荷重時における杭の水平変形分布、図10(d)に作用モーメント分布を示す。 $\lambda=58$ 、 115 の杭ともに水平変形分布に大きな差は見られないものの、曲げモーメント分布では $\lambda=58$ の方がより $\sin$ 半波に近くなっている。これは、杭長の短い方が杭自体の曲げ剛性が高く、地盤による座屈拘束が相対的に小さくなるためである。

3. 3 地盤反力係数の非線形性を考慮した低減係数評価

図11に弾性地盤と非弾性地盤における杭の最大荷重を示す。縦軸は非弾性地盤における杭の曲げ座屈応力度 $\sigma_{ps,cr}$ に対する降伏応力度 σ_y の割合であり、横軸は弾性地盤における杭の曲げ座屈応力度 $\sigma_{es,cr}$ に対する降伏応力度 σ_y の割合である。各プロットは地盤反力係数 $K_c=0.01\sim 1\text{MN/m}^2$ 、細長比 $\lambda=29\sim 115$ (液状化層厚 $5\text{m}\sim 20\text{m}$) の範囲における杭の曲げ座屈応力度を弾塑性大変形解析より求めたものである。 $\triangle$ は等分布、 ∇ は三角形分布を示している。横軸 $\sigma_{es,cr}/\sigma_y=0.5\sim 0.75$ で、非弾性地盤における杭の曲げ座屈応力度は弾性地盤の場合に比べて低下している。これは、図9(b)の平均軸歪－水平変位関係からも明らかのように、図7で仮定した $K_c(y/y_1=1)$ と、鋼管杭が座屈して水平変形が急激に増加する時の $K_c(y/y_1=0.002\sim 0.003)$ が異なり、杭の座屈発生時における非弾性地盤の地盤反力係数が弾性地盤の場合よりも小さいためである。

そこで、図7のような非弾性地盤の地盤反力変位関係において、座屈発生時に最大となる水平変位を $u/l=0.002$ と仮定し、そのときの地盤水平変位 y/y_1 における割線剛性を K_c' とする。 K_c' に対する K_c の比、すなわち地盤剛性の見かけ上の低下率を次のように近似する。

$$\chi = \sqrt{l_0/l}, \quad l_0 = 500(\text{cm}) \quad (13)$$

ここで、 l は杭長、 l_0 は $y/y_1=1$ となる 500cm である。

表2に杭長 l と低下率 χ の値を示す。表中 y/y_1 は座屈発生時の地盤水平変位である。杭長が長くなるにつれて見かけ上地盤反力係数が低下することから、杭の弾塑性曲げ座屈荷重を評価する際、修正された K_c' を用いる必要がある。

図11 地盤反力変位関係及び地盤反力係数分布の違いが弾塑性曲げ座屈応力度に及ぼす影響

表2 非弾性地盤における地盤反力係数の低下率

l (cm)	500	1000	1500	2000
y/y_1 at K_c'	1.0	2.0	3.0	4.0
$\chi (=K_c'/K_c)$	1.000	0.707	0.577	0.500

4. 液状化地盤において鉛直荷重を受ける鋼管杭の弾塑性曲げ座屈応力度評価

本章では、液状化地盤において鉛直荷重を受ける鋼管杭の弾塑性曲げ座屈荷重の算定に当たり、現行の設計指針⁸⁾、設計基準⁹⁾における圧縮材の耐力規定を準用する可能性を検討する。

図12に鋼管杭の弾塑性座屈応力度と一般化細長比との関係を示す。縦軸は曲げ座屈応力度 σ_{cr} を降伏応力度 σ_y で除したものであり、横軸は一般化細長比 λ_c である。杭の一般化細長比 λ_c は、その杭の弾性座屈荷重 P_{cr} に対する降伏荷重 P_y の割合として次式で表される。

$$\lambda_c = \sqrt{P_y/P_{cr}} \quad (14)$$

ここで、 P_{cr} は l の範囲によって、(7)、(11)、(12)式の α を(6)式に代入することで求められる。また、非弾性地盤の K_c について、(13)式の低下率 χ に K_c に乗じた修正値 K_c' を用いて、座屈荷重 P_{cr} を算定している。図中の実線は限界状態設計指針⁸⁾の座屈曲線であり、点線は鋼構造設計基準⁹⁾の座屈曲線である。各曲線の算定式は図中に示される通りである。 $\lambda_c \leq 0.7$ では、数値解析結果より得られた杭の曲げ座屈荷重は鋼構造設計基準を上回っているが、 $\lambda_c \geq 0.7$ では、概ね鋼構造設計基準と限界状態設計指針の間に収まっている。

以上より、(6)式で示した座屈荷重式を(14)式の一般化細長比に用いることで、通常の圧縮材と同様、限界状態設計指針を準用できる。

5. 結

本論文では液状化地盤において、鉛直荷重を受ける鋼管単杭の曲げ座屈について検討した。既往の研究では検討されていなかった杭及び地盤反力係数の非線形性を考慮した数値解析を行い、杭の弾塑性座屈挙動及び曲げ座屈応力度を評価した。解析対象の範囲は液状化地盤を想定し、地盤の変形係数 $E_0 \leq 500(\text{kN/m}^3)$ 、杭の細長比 $\lambda \leq 150$ 以下もしくは液状化層厚20m以下である。本論文で得られた結論を以下に示す。

- 1) エネルギー法及び弾性固有値解析によって、液状化地盤において鉛直荷重を受ける鋼管杭の弾性曲げ座屈荷重式を(6)式に示した。さらに、地盤反力係数及びその分布の違いが鋼管杭の弾性曲げ座屈荷重に与える影響を明らかにした。
- 2) 弾塑性大変形解析によって、地盤反力変位関係の非線形性が杭の弾塑性座屈荷重に及ぼす影響を明らかにした。地盤反力変位関係が一定の場合に比べて、非線形の場合には $\sigma_{cr}/\sigma_y = 0.5 \sim 0.75$ の範囲で座屈荷重の低下が見られた。これは、杭の座屈発生時における地盤反

図12 液状化地盤において鉛直荷重を受ける鋼管杭の弾塑性曲げ座屈応力度と設計式の比較

力係数が低下しているためであり、その低下率を(13)式に示した。

3) 液状化地盤において、地盤により水平変形拘束を受ける鋼管杭の弾塑性曲げ座屈荷重は、細長比の小さい範囲($\lambda_c \leq 0.7$)では限界耐力設計指針の座屈設計式よりも上回るが、細長比の大きい範囲($\lambda_c \geq 0.7$)では良い対応を示している。鋼管杭の許容圧縮応力度は、本論文で提示した(14)式の一般化細長比を用いることで、通常の圧縮材と同様、限界状態設計指針を準用できる。

謝辞

本研究の一部は平成14年度前田記念工学振興財団研究助成を受けた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築耐震設計における保有耐力と変形性能(1990)，1990. 10
- 2) 三浦房紀，朱媛媛：地盤の側方変位を受けている単杭の座屈荷重に関する基礎的研究，土木学会論文集，pp. 143～pp. 153，2001. 7
- 3) 地盤工学会：地盤・基礎構造物の耐震設計，2001. 1
- 4) Timoshenko: Elastic Stability, McGraw Hill, 1961
- 5) Prakash V., Powell G. H. and Campbell S.: Drain-2DX Base Program Description and User Guide Version 1.10, 1993
- 6) 木村祥裕，小河利行，佐伯英一郎：製造方法の異なる冷間成形鋼管の局部座屈挙動，鋼構造論文集，第8巻第29号，pp. 27～pp. 34，2001. 3
- 7) 日本建築学会：基礎構造設計指針・同解説，1988. 1
- 8) 日本建築学会：鋼構造限界状態設計指針・同解説，1998. 10
- 9) 日本建築学会：鋼構造設計基準・同解説，1970

(2005年2月7日原稿受理，2005年6月8日採用決定)