鋼製パイプ断面を有する柱杭一体構造の有効座屈長

（株）オリエンタルコンサルタンツ　正会員　○大森貴行
熊本大学准教授　大学院自然科学研究科　正会員　葛西　昭
熊本大学　大学院自然科学研究科　学生会員　小原　礼

１．緒言

鋼管杭基礎などがフーチングを経ずにそのまま橋脚となる柱杭一体構造は，地形改変が小さいことや，施工工数が少ないことなど，経済性，施工性においてメリットがあり，過去[1)]にはパイルベント基礎などの実績がある(図-1)．しかし，地震時における抵抗特性や耐荷性能を考えたとき，地盤の相対的な剛性の変化により変形モードが異なるなど，耐荷性能を評価するための知見は十分ではない．

本論文では，この様な背景を受けて，下端がバネ支持された柱杭一体構造の有効座屈長 l_{cr} に着目し，基礎の特性値βとの関係を明らかにする．

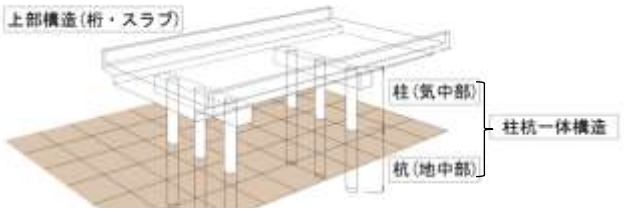


図-1　パイルベント基礎のイメージ

２．研究対象

研究の対象は，下端がばね支持された単柱橋脚で，鋼管柱は標準的なサイズとなる外径 D=500mm，板厚 t=9～25mm，材質は SKK490 材を扱う．鋼材のヤング率 E=200GPa とし，ポアソン比μ=0.3 とする．柱長は，最大細長比 l/r=120 以下(l=柱長 h,r= 断面二次半径)とし，細長比パラメータ$\bar{\lambda}$や径厚比パラメータ R_t は以下の範囲を満足する．

$$0.2 \leqq \bar{\lambda} = {}^{1}/_{\pi}\sqrt{{}^{\sigma_y}/_{E}}\,{}^{l}/_{r} \leqq 0.4 \quad (1)$$

$$0.03 \leqq R_t = {}^{R}/_{t}\,{}^{\sigma_y}/_{E}\sqrt{3(1-\mu^2)} \leqq 0.08 \quad (2)$$

一方杭長は，半無限長の杭となるβL_e＞3 以上(L_eは杭長)となる 10m とし，地盤の剛性はαE_0=10MN/m^2～300MN/m^2 とする．本研究で対象とする検討ケースは，PP h(m)-t(mm)-αE_0(MN/m^2)の形式で表-1 に示す．

３．解析モデルと解析方法

解析モデルを図-2 に示し，諸定数を表-2，表-3 に示す．杭先端部は変位固定回転自由のヒンジ端とし，地盤内には水平方向と鉛直方向の地盤バネを設け，道示 IV[2)]に基づき下式により算定する．

$$k_H = k_{H0}\left({}^{B_H}/_{0.3}\right)^{-3/4} \quad (3)$$

$$k_{H0} = {}^{1}/_{0.3}\,\alpha E_0 \quad (4)$$

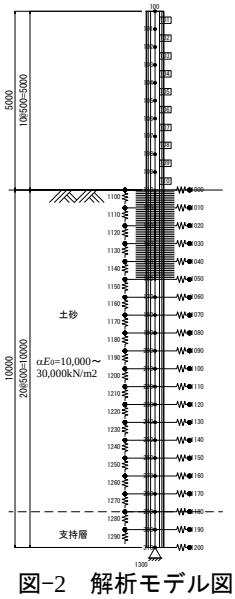


図-2　解析モデル図

表-1　検討ケース

CASE	柱頂部境界条件		h(m)/L(m)			断面寸法(mm)				地盤剛性α E_0(MN/mm^2)						
						Φ500										
	自由端	固定端	1/10	5/10	10/10	t=9	t=14	t=19	t=25	10	50	100	150	200	250	300
PP1-9-*	○		○			○				○	○	○	○	○	○	○
PP1-14-*	○		○				○			○	○	○	○	○	○	○
PP1-19-*	○		○					○		○	○	○	○	○	○	○
PP1-25-*	○		○						○	○	○	○	○	○	○	○
PP5-9-*	○			○		○				○	○	○	○	○	○	○
PP5R-9-*		○		○		○				○	○	○	○	○	○	○
PP5-14-*	○			○			○			○	○	○	○	○	○	○
PP5-19-*	○			○				○		○	○	○	○	○	○	○
PP5-25-*	○			○					○	○	○	○	○	○	○	○
PP10-9-*	○				○	○				○	○	○	○	○	○	○
PP10-14-*	○				○		○			○	○	○	○	○	○	○
PP10-19-*	○				○			○		○	○	○	○	○	○	○
PP10-25-*	○				○				○	○	○	○	○	○	○	○

表-2　断面諸元

部材名	規格	断面積 (m^2)	単位重量 (kN/m)	断面二次モーメントI(m^4)	ヤング率E (GN/m^2)	曲げ剛性 EI(GN・m^2)	ポアソン比
鋼管	φ500，t=9mm	0.01388	1.09	0.000418	200	0.0836	0.3
	φ500，t=14mm	0.02138	1.68	0.000632	200	0.1264	0.3
	φ500，t=19mm	0.02871	2.25	0.000832	200	0.1664	0.3
	φ500，t=25mm	0.03731	2.93	0.00106	200	0.2120	0.3

キーワード　柱杭一体構造，有効座屈長，杭の特性値，部分係数，チャン式
連絡先　〒151-0071　東京都渋谷区本町 3-12-1　住友不動産西新宿ビル 6 号館　㈱ｵﾘｴﾝﾀﾙｺﾝｻﾙﾀﾝﾂ　TEL 03-6311-7890

$$B_H = \sqrt{D/\beta} \tag{5}$$

$$\beta = \sqrt[4]{k_H D/4EI} \tag{6}$$

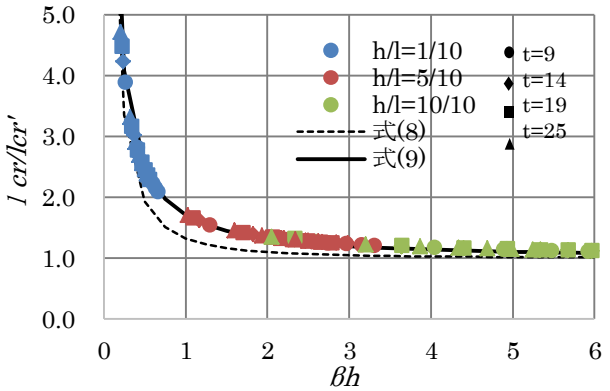
ここに k_H は水平方向地盤反力係数，D は杭径，k_{H0} は平板載荷試験の値に相当する水平方向地盤反力係数，B_H は基礎の換算載荷幅である．

4．有効座屈長と杭の特性値 β との関係

解析は軸力 N=1kN を柱頭部に作用させ，得られた固有値 ω の内，1 次の固有値 ω を下式に導入し，有効座屈長 l_{cr} を求める．

$$l_{cr} = \pi\sqrt{EI/\omega N} \tag{7}$$

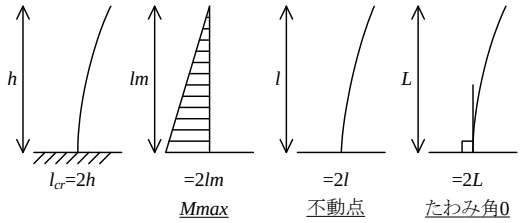
ここで EI は鋼管の曲げ剛性，π は円周率である．地盤と杭の剛性差が有効座屈長 l_{cr} に与える影響を確認するために，縦軸に有効座屈長 l_{cr} を下端固定としたときの有効座屈長 l_{cr}'=2h で除して無次元化した値，横軸に地盤の特性値βに柱長 h を掛け合わせ無次元化した値を図-3 に示す. 図よりβh が大きくなるにつれて，すなわち相対的に地盤の剛性が大きくなるにつれて有効座屈長が l_{cr}'に近づくことが確認できる．また，有効座屈長 l_{cr} - βh の関係は柱長や板厚に依存することなく連続した曲線として表される．以上から下端がバネ支持された柱杭一体構造の有効座屈長 l_{cr} は，βh の関数で表される [3]．



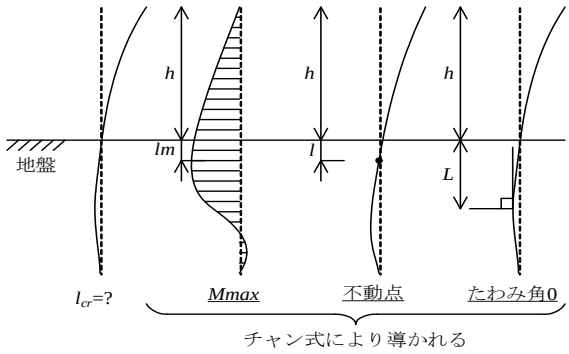
図−3　有効座屈長とβh の関係

5．有効座屈長の簡易推定式

下端固定の単純支持された柱の有効座屈長は，柱長を h としたとき 2 h で示され，M_{max} の作用位置や不動点の位置，たわみ角 0 点と一致する(図-4)．一方，下端がバネ支持された柱杭一体構造の場合，地表面位置で杭が変位することや，鋼管と地盤の剛性差により地盤内の変形モードが異なること等から，有効



図−4　単純支持され柱の有効座屈長



図−5　ばね支持された柱の有効座屈長

座屈長 l_{cr} と M_{max} の作用位置や不動点の位置，たわみ角 0 点とはそれぞれ異なる(図-5)．ここで，柱の座屈モードが M_{max} の位置近傍で凸となる形状と仮定したとき，下端がバネ支持された柱杭一体構造の有効座屈長は，チャンの式 [2] lm に h を加えた長さの 2 倍とした式(8)による．

$$l_{cr} \fallingdotseq 2\left[h + 1/\beta \tan^{-1}\left\{1/(1+2\beta h)\right\}\right] \tag{8}$$

図-4 に式(8)の推定線を示す．ここで確認される誤差は解析の精度α_1や変形モードに影響する無次元量 βh との相関関係α_2によるものと想定され，それぞれを部分係数として考慮すると式(8)は式(9)となる．

$$l_{cr} = 2\alpha_1\left[h + 1/\beta \tan^{-1}\left\{1/(1+2\alpha_2\beta h)\right\}\right] \tag{9}$$

ここでα_1=1.05，α_2=0.1 としたときの推定線は図-4 の通りとなり，解析値と一致する．なお，相関関数は 0.999，標準偏差は 0.042 であった．

6．結言

柱杭一体構造の有効座屈長 l_{cr} は，基礎の特性値β に柱長 h を掛け合わせた無次元量 βh の関数で表され，簡易式で定義することができる．

参考文献

1) 解説・河川管理施設等構造令 第 62 条 橋脚
2) 道路橋示方書・同解説 H24. 3 Ⅳ下部構造編
3) 第 2 回 KABSE ｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ 2015. 12 鋼製パイプ断面を有する柱杭一体構造の圧縮強度に関する解析的研究