(㈱オリェ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 社会環境工学科 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ことなど、耐荷性能 を評価するための知見は十分に得られていない.

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*lcr*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 厚は *t*=9~25mm,材質は SKK490 材を扱う.鋼材の ヤング率 *E*=200GPa とし,ポアソン比は*µ*=0.3 とする. 柱長は,最大細長比 *l*/*r*=120 以下とし,細長比 パラメータ *λ*7(1)や径厚比パラメータ *Rt*(2)は以下の範囲を満足する.

$$0.2 \leq \bar{\lambda} = 1/\pi \sqrt{\sigma_y / EI/r} \leq 0.4 \tag{1}$$

0.03  $\leq Rt = R/t \sigma_y/E \sqrt{3 - (1 - \mu^2)} \leq 0.08$  (2) 一方杭長は、半無限長の杭となる $3/\beta$ 以上となる 10mとし、地盤の剛性は $\alpha E0=10$ MN/m<sup>2</sup>~300MN/m<sup>2</sup>

とする.本研究で対象とする検討ケースは, *PP h*(m) -*t*(mm)-*αE*<sub>0</sub>(MN/m<sup>2</sup>)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に基づき下式により算定する.

$$k_H = k_{H0} (B_H / 0.3)^{-3/4} \tag{3}$$

$$k_{H0} = \alpha E_0 / 0.3 \tag{4}$$

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

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

*kH*<sub>0</sub>は平板載荷試験の値に相当する水平方向地盤反 力係数, *BH* は基礎の換算載荷幅である.

| 5000 | 1 08 500=5000 |                                  |                |      |          |                   |
|------|---------------|----------------------------------|----------------|------|----------|-------------------|
| -    |               |                                  | 1100           |      | 睢        |                   |
|      |               | /// \\// \\                      | <del>5</del> - | =    |          | <b>\\\</b> @1010  |
|      | 20@50.0=10000 |                                  | 110 E          | -    | 2        | <b>~~~</b>        |
|      |               |                                  | 11201          |      |          | AN-0010           |
|      |               | ±₩<br>αE₀=10,000~<br>30,000kN/m2 | 1130           |      |          |                   |
|      |               |                                  | 11401          |      | 1        | AAAAA 1040        |
|      |               |                                  | 1150           |      | <b>P</b> | - NO 50           |
|      |               |                                  | 1160           | -    | Þ        |                   |
|      |               |                                  | 1120           | -    | ₩        | <b>W6</b> 1070    |
|      |               |                                  |                | -    | ₩        | - <b>W</b> -01080 |
|      |               |                                  | 1100           | -    | ₩        |                   |
| 8    |               |                                  | 1190           | _    | H.       | -We 100           |
| 2    |               |                                  | 1200           |      |          |                   |
|      |               |                                  | 1210           |      | Π        |                   |
|      |               |                                  | 1220           |      | IT       |                   |
|      |               |                                  | 1230           | -1   | M        | <b>W•</b> 1130    |
| -    |               |                                  | 1240           | 1    | Ħ        | -W-#140           |
|      |               |                                  | 1250           | -1   | Ħ        |                   |
|      |               |                                  | 1260           | -1   | Þ        | -W-#160           |
|      |               |                                  | 1270           | -    | ١÷       | -W•1170           |
|      | -             |                                  | 1280           | -1   | ₩        | ₩ <b>@</b> 180-   |
|      |               | 支持國                              | 1              | -    | ₩        | <b>~~~</b>        |
| ,    |               | 入时间                              | 1230           | _;   | Щ        |                   |
|      |               |                                  |                | 1300 |          |                   |

100

|           |         |     |           |      |          | -14   |      | ~ " " "                    |      |    |    |     |     |     |     |     |
|-----------|---------|-----|-----------|------|----------|-------|------|----------------------------|------|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| CASE      | 柱頂部境界条件 |     | h(m)/L(m) |      | 断面寸法(mm) |       |      | 地盤剛性 $\alpha E_0(MN/mm^2)$ |      |    |    |     |     |     |     |     |
|           | 自由端     | 固定端 | 1/10      | 5/10 | 10/10    | Φ 500 |      |                            |      |    |    |     |     |     |     |     |
|           |         |     |           |      |          | t=9   | t=14 | t=19                       | t=25 | 10 | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 |
| PP1-9-*   | 0       |     | 0         |      |          | 0     |      |                            |      | 0  | 0  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| PP1-14-*  | 0       |     | 0         |      |          |       | 0    |                            |      | 0  | 0  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| PP1-19-*  | 0       |     | 0         |      |          |       |      | 0                          |      | 0  | 0  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| PP1-25-*  | 0       |     | 0         |      |          |       |      |                            | 0    | 0  | 0  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| PP5-9-*   | 0       |     |           | 0    |          | 0     |      |                            |      | 0  | 0  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| PP5R-9-*  |         | 0   |           | 0    |          | 0     |      |                            |      | 0  | 0  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| PP5-14-*  | 0       |     |           | 0    |          |       | 0    |                            |      | 0  | 0  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| PP5-19-*  | 0       |     |           | 0    |          |       |      | 0                          |      | 0  | 0  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| PP5-25-*  | 0       |     |           | 0    |          |       |      |                            | 0    | 0  | 0  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| PP10-9-*  | 0       |     |           |      | 0        | 0     |      |                            |      | 0  | 0  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| PP10-14-* | 0       |     |           |      | 0        |       | 0    |                            |      | 0  | 0  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| PP10-19-* | 0       |     |           |      | 0        | _     |      | 0                          |      | 0  | 0  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| PP10-25-* | 0       |     |           |      | 0        |       |      |                            | 0    | 0  | 0  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |

表-1 検討ケース

| 表⁻2 断面的儿 |                    |             |                |                     |                 |                     |              |  |  |  |  |  |
|----------|--------------------|-------------|----------------|---------------------|-----------------|---------------------|--------------|--|--|--|--|--|
| 部材名      | 規格                 | 断面積<br>(m2) | 単位質量<br>(kN/m) | 断面二次<br>モーメントlx(m゚) | ヤング率<br>(kN/m2) | 曲げ剛性<br>(EIx kN・m2) | ポアソン比<br>(µ) |  |  |  |  |  |
| 鋼管       | $\phi$ 500, t=9mm  | 0. 01388    | 1. 09          | 0. 000418           | 200, 000, 000   | 83, 600             | 0.3          |  |  |  |  |  |
|          | φ500, t=14mm       | 0. 02138    | 1.68           | 0. 000632           | 200, 000, 000   | 126, 400            | 0.3          |  |  |  |  |  |
|          | $\phi$ 500, t=19mm | 0. 02871    | 2. 25          | 0. 000832           | 200, 000, 000   | 166, 400            | 0.3          |  |  |  |  |  |
|          | $\phi$ 500, t=25mm | 0. 03731    | 2. 93          | 0. 001060           | 200, 000, 000   | 212, 000            | 0. 3         |  |  |  |  |  |

図-2 解析モデル図

※上部工重量として柱天端に 100kN を載荷する

### 4. 解析結果

解析は軸力 *N*=1kN を柱頭部に作用させ,得られた 固有値λの内,1次の固有値λを下式に導入し,有効 座屈長 *lcr* を求める.

 $lcr = \pi \sqrt{EI/\lambda N}$ (6)

ここで EI は鋼管の曲げ剛性,  $\pi$ は円周率である. 地盤と杭の剛性差が有効座屈長 lcrに与える影響を 確認するために,縦軸に有効座屈長 lcrを下端固定 としたときの有効座屈長 lcr'=2hで除して無次元化 した値,横軸に地盤の特性値 $\beta$ で示した値を,柱長 h=1m, 5m, 10mのそれぞれについて図-3 に示す. 図より $\beta$ 値が大きくなる毎に,すなわち相対的に地 盤の剛性が大きくなる毎に,有効座屈長が lcr'に近 づくことが確認できる.またその感度は柱長が小さ い h=1mの方が h=5m や h=10m に比べて大きい.

次に柱長 h が有効座屈長に与える影響について確認するために、横軸を基礎の特性値 $\beta$ に柱長 h を掛け合わせた値を図-4 に示す.図より $\beta$ h が大きくなるに従って、有効座屈長は l=2h に近づくことが確認でき、有効座屈長 lcr と $\beta$ h のグラフは柱長や板厚に関係なく連続した曲線として表されることが分かる.以上から、下端がバネ支持された一柱一基礎構造の有効座屈長は、 $\beta$ h の関数で表される<sup>1)</sup>.







5. 有効座屈長の推定式



図-6 ばね支持された柱の有効座屈長

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2hで示され,*Mmax*の作用位置や不 動点の位置,たわみ角0点と一致する(図-5).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,有効座 屈長*lcrとMmax*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-6).ここで,柱の座屈 が*Mmax*の位置近傍で生じると仮定したとき,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 ン式<sup>2)</sup>*lm*+*h*の2倍とした下式(7)により求められる.

 $Mmax(= lcr) = 2[h + 1/\beta \tan^{-1}\{1/(1 + 2\beta h)\}]$ (7)

図-4に式(7)の推定線を示す.ここで確認される誤 差は解析の精度α1やβとの相関関係α2,βhとの相関 関係α3によるものと想定され,それぞれ部分係数と して考慮すると式(7)は式(8)となる.

 $lcr = 2\alpha 1[h + 1/\beta^{\alpha 2} \tan^{-1}\{1/(1 + 2\beta h)^{\alpha 3}\}]$ (8)

ここでα1=1.05, α2=1.00, α3=0.3としたときの推 定線を図4の通りとなり,解析値と一致する.この時 相関関数は0.999,標準偏差は0.028である.

## 6. 結言

柱杭一体構造の有効座屈長 *lcr* は,基礎の特性値β と柱長 *h* の関数で表される.

参考文献)1)第2回 KABSE シンポジウム 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
2)道路橋示方書・同解説 H24.3 IV下部構造編