

くい—地盤系の剛性の評価（その1）

—くいの鉛直ばね定数—

山原 浩
森 信夫

§ 1. はじめに

くいを有する構造物を動的解析しようとするとき、くいによって支持される系の剛性（ばね定数）の評価が必要になる。地中にあるくいは周囲地盤との間に力学的相互作用を生ずるため、その復元力機構はかなり複雑なものになる。

構造物がロッキング振動する場合や機械基礎が上下動の加振力を受ける場合には、くいはその頭部において鉛直の力を受けることになる。しかし現在のところ、くいの鉛直ばね定数を算定する適当な方法がないことが、くいを含む構造物の振動解析を行なう際のひとつの障害になっている。そこで本論文では、くいの鉛直ばね定数の算定について理論的方法を示すとともに、くいの鉛直載荷試験に関する既往の実測資料と比較することにした。

自然の地盤は、もともと完全な意味での弾性体ではなく、むしろ弾塑性体としての特性を示す。さらにその弾性域であっても著しい非線形性を示す。地盤を非線形弾塑性体として扱うことは解析的に非常な困難をともなううえに、そのような土の物性も明らかにされていない。しかし地盤の動力学的問題に関する既往の研究では、ほとんどすべての場合、地盤を完全弾性体として扱ってきた。それらの結果が比較的小さい振幅またはひずみ領域において、実際の事象に実用上よく合致することが知られている。

そこで本論文でも、地盤を均質な完全弾性体としてその理論解を示すことにした。これらの結果は、機械基礎の振動のごく微小振幅の場合にはそのまま適用して実用上問題はない。また構造物の地震応答解析においてくいを弾塑性モデルに置きかえるならば、その初期剛性または弾性領域における特性を与えるものとして実用に供することができる。

§ 2. 釣合方程式

図一に示すように、くい頭に荷重 P_0 が加えられたとき、その反力はいきの周面と先端に分布する。地盤はいき周面摩擦力によって、同図に示すように変形する。

いま、くいと周面土との間のすべりが無いものとし、くい周面土による単位長さ当りのばね定数を k (kg/cm²) とすれば、深さにおける軸力と摩擦力との釣合いから次式が得られる¹⁾。

$$\frac{dP_z}{dz} = -ku_z \quad \dots\dots(1)$$

また、くい体に沿った微小長さ dz における軸長の変化はつぎのように表わされる。

$$\frac{du_z}{dz} = -\frac{P_z}{AE} \quad \dots\dots(2)$$

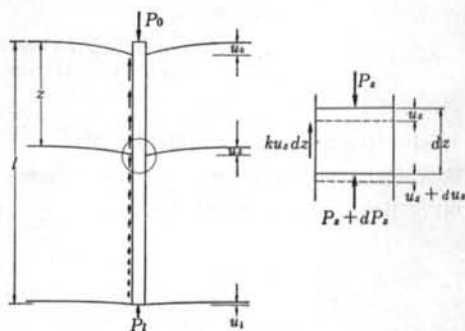
ただし、 P_z : 深さにおける軸力(kg), u_z : 深さ z におけるくいの変位(cm), A : くい材の断面積(cm²), E : くい材のヤング率(kg/cm²)である。

式(2)より、

$$\frac{d^2u_z}{dz^2} - \frac{1}{AE} \frac{dP_z}{dz} \quad \dots\dots(3)$$

となるから、これを式(1)に代入すれば、つぎの方程式が得られる。

$$\frac{d^2u_z}{dz^2} - \frac{1}{AE} u_z = 0 \quad \dots\dots(4)$$



図一 地中にあるくいの力の釣合

これは定係数の線形2階微分方程式であるから、その解は c_1, c_2 積分定数としてつぎのように表わされる。

$$u_z = c_1 e^{\alpha z} + c_2 e^{-\alpha z} \quad \dots\dots(5)$$

ただし、

$$\alpha = \sqrt{\frac{k}{AE}} \quad \dots\dots(6)$$

である。また式(2)および式(5)より、

$$P_z = AE\alpha(c_2 e^{-\alpha z} - c_1 e^{\alpha z}) \quad \dots\dots(7)$$

が得られる。

ここで境界条件をつぎのように与える。

$$\left. \begin{aligned} z=0 \text{ のとき } P_z &= P_0 \\ z=l \text{ のとき } u_z &= u_1 \end{aligned} \right\} \dots\dots(8)$$

ただし、 u_1 ：くい先端における変位 (cm) である。式(5)および式(7)より積分定数 c_1 および c_2 を定めると、それぞれつぎのようになる。

$$c_1 = \frac{AE\alpha u_1 - P_0 e^{-\alpha l}}{2AE\alpha \cosh \alpha l} \quad \dots\dots(9)$$

$$c_2 = \frac{AE\alpha u_1 + P_0 e^{\alpha l}}{2AE\alpha \cosh \alpha l} \quad \dots\dots(10)$$

これらを式(5)および式(7)に代入し整理すると、つぎの2つの式が得られる。

$$u_z = \frac{AE\alpha u_1 \cosh \alpha z + P_0 \sinh \alpha (l-z)}{AE\alpha \cosh \alpha l} \quad \dots\dots(11)$$

$$P_z = \frac{P_0 \cosh \alpha (l-z) - AE\alpha u_1 \sinh \alpha z}{\cosh \alpha l} \quad \dots\dots(12)$$

ここで、くい先端部の地盤のばね定数を K_p とすれば、

$$u_1 = \frac{P_1}{K_p} \quad \dots\dots(13)$$

であるから、式(12)において $z=l$ として式(13)を代入すれば、

$$P_1 = \frac{K_p P_0}{K_p \cosh \alpha l + AE\alpha \sinh \alpha l} \quad \dots\dots(14)$$

となる。さらに式(13)および式(14)より、

$$u_1 = \frac{P_0}{K_p \cosh \alpha l + AE\alpha \sinh \alpha l} \quad \dots\dots(15)$$

が得られる。よって式(11)を式(14)および式(15)に代入すれば、くい体に沿った変位と軸力の分布について次式が得られる。

$$u_z = \frac{AE\alpha \cosh \alpha z + (K_p \cosh \alpha l + AE\alpha \sinh \alpha l) \sinh \alpha (l-z)}{AE\alpha (K_p \cosh \alpha l + AE\alpha \sinh \alpha l) \cosh \alpha l} P_0 \quad \dots\dots(16)$$

$$P_z = \frac{AE\alpha \{ \sinh \alpha \cdot \cosh \alpha (l-z) - \sinh \alpha z \} + K_p \cosh \alpha \cdot \cosh \alpha (l-z)}{(K_p \cosh \alpha l + AE\alpha \sinh \alpha l) \cosh \alpha l} P_0 \quad \dots\dots(17)$$

したがって、くいの鉛直ばね定数 K_0 は

$$K_0 = \left(\frac{P_z}{u_z} \right)_{z=0} = \frac{AE\alpha (K_p \cosh \alpha l + AE\alpha \sinh \alpha l) \cosh \alpha l}{AE\alpha + (K_p \cosh \alpha l + AE\alpha \sinh \alpha l) \sinh \alpha l} \quad \dots\dots(18)$$

として表わされる。

式(18)からわかるように、くいの鉛直ばね定数は、くい周面土による単位長さ当りのばね定数 k と、くい先端地盤のばね定数 K_p がわかれば計算できる。したがって地盤を均質な完全弾性体とし、これら2つの定数を弾性論にもとづく解を用いて算定することにしよう。

§ 3. 地盤定数の算定

3.1 くい周面土による単位長さ当りのばね定数 k

図-2に示すように、地中にあるくいの薄い一部分を取出し、その外周に地盤反力が一様に分布すると考える。したがって側面に沿った微小長さ $a d\theta$ における応力 ΔP は、

$$\Delta P = \frac{P}{2\pi a h} \cdot a h d\theta = \frac{P}{2\pi} d\theta \quad \dots\dots(19)$$

となる。

一方、半無限弾性体の z 軸上の深さ D なる点に鉛直の力 ΔP が作用したとき、任意の点 (x, y, z) における z 方向の変位 $\Delta \zeta$ は、Mindlin²⁾ によってつぎのように与えられている。

$$\Delta \zeta = \frac{\Delta P}{16\pi(1-\nu)\mu} \left[\frac{(z-D)^2}{R_1^3} + \frac{3-4\nu}{R_1} + \frac{5-12\nu+8\nu^2}{R_2} + \frac{(3-4\nu)(z+D)^2-2Dz}{R_2^3} + \frac{6(z+D)^2 z D}{R_2^5} \right] \quad \dots\dots(20)$$

ただし、 $R_1 = \sqrt{r^2 + (z-D)^2}$ 、 $R_2 = \sqrt{r^2 + (z+D)^2}$ 、 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ である。

式(20)において、 $r=a$ 、 $z=D$ とおくと、

$$\Delta \zeta = \frac{\Delta P}{16\pi(1-\nu)\mu} \left[\frac{3-4\nu}{a} + \frac{5-12\nu+8\nu^2}{\sqrt{a^2+4D^2}} + \frac{2(5-8\nu)D^2}{\sqrt{(a^2+4D^2)^3}} + \frac{24D^4}{\sqrt{(a^2+4D^2)^5}} \right] \quad \dots\dots(21)$$

となる。ただし、 μ : Lamé の定数 ($\mu=G$)、 G : 剛性率、 ν : ポアソン比である。したがって式(19)を式(21)に代入し、側面の応力による円板の中心の変位 ζ は、

$$\zeta = \int_0^{2\pi} \frac{P}{32\pi^2(1-\nu)\mu} \left[\frac{3-4\nu}{a} + \frac{5-12\nu+8\nu^2}{\sqrt{a^2+4D^2}} + \frac{2(5-8\nu)D^2}{\sqrt{(a^2+4D^2)^3}} + \frac{24D^4}{\sqrt{(a^2+4D^2)^5}} \right] d\theta \quad \dots\dots(22)$$

より計算される。すなわち、

$$\zeta = \frac{P}{16\pi(1-\nu)a\mu} \Delta_f \quad \dots\dots(23)$$

ただし、

$$\Delta_f = 3-4\nu + \frac{5-12\nu+8\nu^2}{\sqrt{1+16Z^2}} + \frac{8(5-8\nu)Z^2}{\sqrt{(1+16Z^2)^3}} + \frac{384Z^4}{\sqrt{(1+16Z^2)^5}} \quad \dots\dots(24)$$

である。ここで Z は無次元化深さで次式によって定義する。

$$Z = \frac{D}{2a} \quad \dots\dots(25)$$

したがって、地中にある円板の周面摩擦によるばね定数 $(K_f)_z$ は次式で与えられる。

$$(K_f)_z = \frac{16\pi(1-\nu)a\mu}{\Delta_f} \quad \dots\dots(26)$$

これを計算すると図-3のようになる。

図-3からわかるように、地中にある円板の側面のばね定数は、深さ方向に関して一定ではない。しかしくいの単位長さ当りのばね定数 k を深さの関数として与えることは計算上はなほ面倒になるので、くいの全長にわたる平均値として k の値を与えることにする。すなわち、くい全長にわたる $(K_f)_z$ の平均値 $(\bar{K}_f)_z$ は、

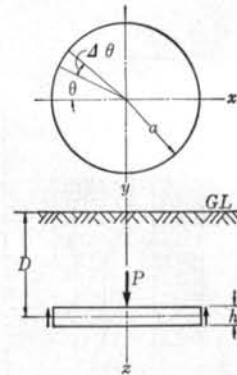


図-2 地中にある薄い円板

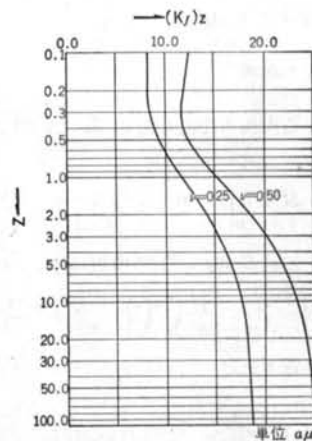


図-3 式(26)の計算グラフ

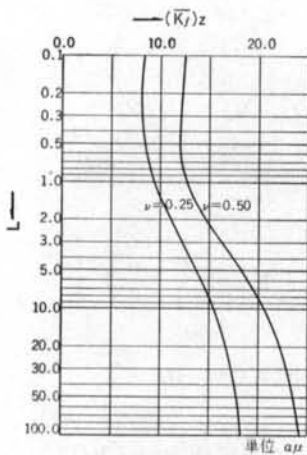


図-4 くい全長にわたる平均ばね定数

$$(\bar{K}_f)_z = \frac{1}{L} \int_0^L (K_f)_z dZ \quad \dots\dots(27)$$

であるから、

$$k = \frac{(\bar{K}_f)_z}{l} \quad \dots\dots(28)$$

として k の値を定める。ただし、 L はくいの無次元化長さで次式で定義する。

$$L = \frac{l}{2a} \quad \dots\dots(29)$$

実用の便宜上、式(27)の $(\bar{K}_f)_z$ を表-1 および図-4 に示した。

3.2 くい先端部の地盤のばね定数 K_p

図-5 に示すように、地表面から D なる深さにある円板に、鉛直の力 P が作用したとする。いま円板の底面における接地応力を均等分布に仮定すれば、円板面の微小部分 $rdrd\theta$ に作用する力 ΔP は、

$$\Delta P = \frac{P}{\pi a^2} r dr d\theta \quad \dots\dots(30)$$

となり、それによる円板の中心の変位 $\Delta \zeta$ は式(30)より、

$$\Delta \zeta = \frac{\Delta P}{16\pi(1-\nu)\mu} \left[\frac{3-4\nu}{r} + \frac{5-12\nu+8\nu^2}{\sqrt{r^2+4D^2}} + \frac{2(5-8\nu)D^2}{\sqrt{(r^2+4D^2)^3}} + \frac{24D^4}{\sqrt{(r^2+4D^2)^5}} \right] \quad \dots\dots(31)$$

となる。よって、鉛直荷重 P による円板の中心の変位 ζ は、

$$\zeta = \frac{P}{16\pi(1-\nu)\mu} \cdot \frac{1}{\pi a^2} \int_0^{2\pi} \int_0^a \left[\frac{3-4\nu}{r} + \frac{5-12\nu+8\nu^2}{\sqrt{r^2+4D^2}} + \frac{2(5-8\nu)D^2}{\sqrt{(r^2+4D^2)^3}} + \frac{24D^4}{\sqrt{(r^2+4D^2)^5}} \right] r dr d\theta \quad \dots\dots(32)$$

となる。これを計算すれば、

$$\zeta = \frac{P}{8\pi(1-\nu)a\mu} \Delta_p \quad \dots\dots(33)$$

ただし、

L	$(\bar{K}_f)_z$			
	単位 $a\mu$			
	$\nu=0.25$	$\nu=0.30$	$\nu=0.40$	$\nu=0.50$
0.0	8.38	8.98	10.47	12.57
0.1	8.34	8.93	10.41	12.51
0.2	8.30	8.87	10.30	12.34
0.3	8.30	8.84	10.20	12.15
0.4	8.37	8.88	10.18	12.04
0.5	8.49	8.93	10.24	12.03
0.6	8.66	9.14	10.36	12.10
0.7	8.85	9.33	10.53	12.25
0.8	9.05	9.52	10.71	12.42
0.9	9.26	9.73	10.91	12.62
1.0	9.46	9.94	11.12	12.83
2.0	11.13	11.63	12.88	14.76
3.0	12.34	12.85	14.19	16.26
4.0	13.18	13.72	15.13	17.37
5.0	13.81	14.37	15.84	18.20
6.0	14.30	14.78	16.38	18.85
7.0	14.69	15.27	16.82	19.37
8.0	15.02	15.60	17.19	19.80
9.0	15.28	15.88	17.49	20.17
10.0	15.51	16.11	17.74	20.48
20.0	16.72	17.35	19.11	22.14
30.0	17.26	17.91	19.72	22.89
40.0	17.56	18.22	20.07	23.31
50.0	17.76	18.43	20.30	23.59
60.0	17.90	18.57	20.46	23.79
70.0	18.01	18.68	20.58	23.94
80.0	18.09	18.77	20.68	24.06
90.0	18.16	18.84	20.76	24.16
100.0	18.22	18.90	20.82	24.23

表-1 くい全長にわたる平均ばね定数

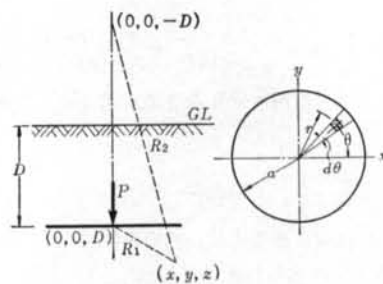


図-5 地中にある薄い円板

$$\Delta_p = 3 - 4\nu + (5 - 12\nu + 8\nu^2)(\sqrt{1 + 16Z^2} - 4Z) + (5 - 8\nu)(2Z - \frac{8Z^2}{\sqrt{1 + 16Z^2}}) + 2Z - \frac{128Z^4}{\sqrt{(1 + 16Z^2)^3}} \quad \dots\dots(34)$$

である。よって、無次元化深さにおけるばね定数 $(K_p)_Z$ は、

$$(K_p)_Z = \frac{8\pi(1-\nu)\alpha\mu}{\Delta_p} \quad \dots\dots(35)$$

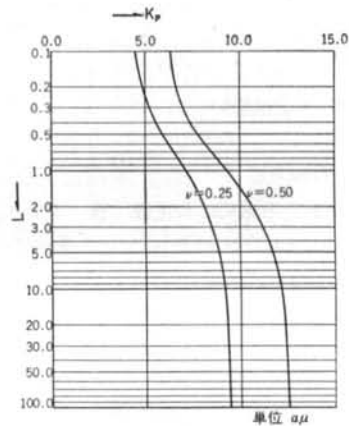
となる。したがって、くい先端部のばね定数 K_p は、無次元化深さ Z を無次元化長さ L に置きかえることによって式(35)をそのまま採用することができる。すなわち、

$$K_p = (K_p)_Z = \frac{8\pi(1-\nu)\alpha\mu}{\Delta_p} \quad \dots\dots(36)$$

ただし Δ_p は、式(34)の Z を L に置きかえたものになる。なお実用の便宜のため、式(36)を計算し表—2 および図—6 に示した。

L	K_p			
	単位 $\alpha\mu$			
	$\nu=0.25$	$\nu=0.30$	$\nu=0.40$	$\nu=0.50$
0.0	4.19	4.49	5.24	6.28
0.1	4.43	4.69	5.35	6.31
0.2	4.77	5.01	5.62	6.50
0.3	5.16	5.40	6.00	6.87
0.4	5.55	5.79	6.40	7.30
0.5	5.91	6.15	6.78	7.73
0.6	6.21	6.47	7.12	8.12
0.7	6.48	6.70	7.41	8.46
0.8	6.71	7.00	7.67	8.76
0.9	6.91	7.18	7.89	9.03
1.0	7.09	7.36	8.09	9.26
2.0	8.05	8.36	9.19	10.60
3.0	8.78	9.66	9.92	11.18
4.0	8.68	9.00	9.92	11.49
5.0	8.82	9.15	10.07	11.69
6.0	8.91	9.24	10.18	11.83
7.0	8.98	9.32	10.26	11.93
8.0	9.04	9.37	10.32	12.00
9.0	9.08	9.42	10.37	12.06
10.0	9.11	9.45	10.41	12.11
20.0	9.27	9.61	10.59	12.34
30.0	9.32	9.66	10.65	12.41
40.0	9.34	9.69	10.68	12.44
50.0	9.36	9.71	10.70	12.47
60.0	9.37	9.72	10.71	12.49
70.0	9.38	9.73	10.72	12.50
80.0	9.38	9.73	10.73	12.50
90.0	9.39	9.74	10.73	12.51
100.0	9.39	9.74	10.73	12.52

表—2 くい先端部地盤のばね定数



図—6 くい先端部地盤のばね定数

以上のように地盤を均質な弾性体として仮定すれば、地盤の剛性率 $G(=\rho V_s^2)$ が与えられれば、くいの鉛直ばね定数を計算することができる。

§ 4. 数値計算例

4.1 荷重—沈下特性

図—7 に示すような地盤条件に打込まれた2本の試験くい(660φと1016φ)について、本論による計算値と載荷試験結果⁴⁾と比較してみよう。土質および標準貫入試験のN値より、土の横波速度 V_s とポアソン比 ν を表—3 に示すような3種の場合に仮定する。

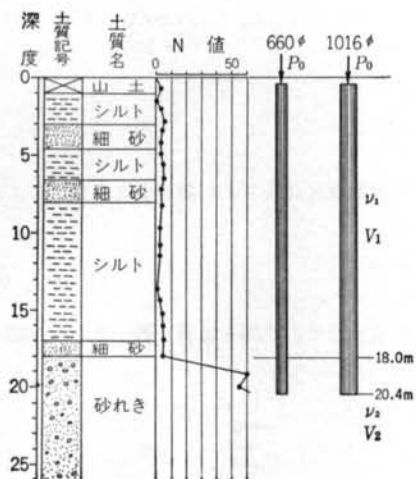
(1) 660φ 鋼管くい

くいの諸元：

外径 $2a$: 660.4mm, 厚さ : 10.3mm, 長さ : 20.0m, 鋼材断面積 : 210.4cm², 先端支持面積 : 3,425cm², 鋼材ヤング率 $E=2,100t/cm^2$

くいの無次元化深さ：

くいの先端支持面が砂れき層面 ($l=18m$) にあるとし



図一七 試験ぐいと地盤条件

$$L=l/2a=27.3$$

ぐい全長にわたる平均ばね定数：表一より、

$$V_{s1}=100\text{m/sec のとき } (\bar{K}_f)_z=1.09 \times 10^4\text{t/m}$$

$$V_{s1}=150\text{m/sec のとき } (\bar{K}_f)_z=2.45 \times 10^4\text{t/m}$$

ぐいの単位長さ当りのばね定数：式(2)より、

$$V_{s1}=100\text{m/sec のとき } k=6.05 \times 10^2\text{t/m}^2$$

$$V_{s1}=150\text{m/sec のとき } k=13.6 \times 10^2\text{t/m}^2$$

ぐい先端部の地盤のばね定数：表二より、

$$V_{s2}=250\text{m/sec のとき } K_p=3.66 \times 10^4\text{t/m}$$

$$V_{s2}=300\text{m/sec のとき } K_p=5.26 \times 10^4\text{t/m}$$

以上の諸数値を式(8)に代入すれば、ぐいの鉛直ばね定数はつぎのようになる。

$$\text{Case 1 } K_v=2.01 \times 10^4\text{t/m}$$

$$\text{Case 2 } K_v=2.59 \times 10^4\text{t/m}$$

$$\text{Case 3 } K_v=2.70 \times 10^4\text{t/m}$$

これらの計算結果を用い、ぐい頭変位について載荷試験結果と比較すると図一八のようになる。

(2) 1016φ 鋼管ぐい

ぐいの諸元：

外径 $2a$: 1016mm, 厚さ : 10.3mm, 長さ : 20m, 鋼材断面積 : 325.4cm², 先端支持面積 : 8,107cm², 鋼材ヤング率 : $E=2,100\text{t/cm}^2$

ぐいの無次元化深さ：

ぐいの先端支持面が砂れき層面 ($l=18\text{m}$) にあるとして、

$$L=l/2a=17.7$$

ぐい全長にわたる平均ばね定数：表一より、

$$V_{s1}=100\text{m/sec のとき } (\bar{K}_f)_z=1.62 \times 10^4\text{t/m}$$

$$V_{s1}=150\text{m/sec のとき } (\bar{K}_f)_z=3.61 \times 10^4\text{t/m}$$

ぐいの単位長さ当りのばね定数：式(2)より、

$$V_{s1}=100\text{m/sec のとき } k=8.90 \times 10^2\text{t/m}^2$$

$$V_{s1}=150\text{m/sec のとき } k=20.0 \times 10^2\text{t/m}^2$$

地盤	上部層 (シルト $N < 5$)			下部層 (砂れき $N > 50$)		
	V_{s1}	ν_1	γ_1	V_{s2}	ν_2	γ_2
case 1	100	0.4	1.65	250	0.3	1.80
case 2	150	0.4	1.65	250	0.3	1.80
case 3	150	0.4	1.65	300	0.3	1.80

V_{s1} : 上部層の横波速度 (m/sec)

V_{s2} : 下部層の横波速度 (m/sec)

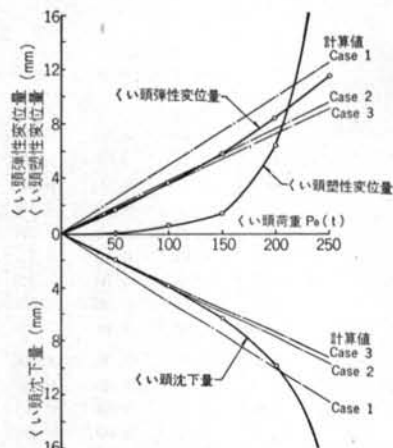
ν_1 : 上部層のポアソン比

ν_2 : 下部層のポアソン比

γ_1 : 上部層の単位体積重量 (t/m³)

γ_2 : 下部層の単位体積重量 (t/m³)

表一三 地盤の諸定数の仮定値



図一八 荷重—沈下特性に関する計算値と実測値の比較 (660φ 鋼管ぐいの例)

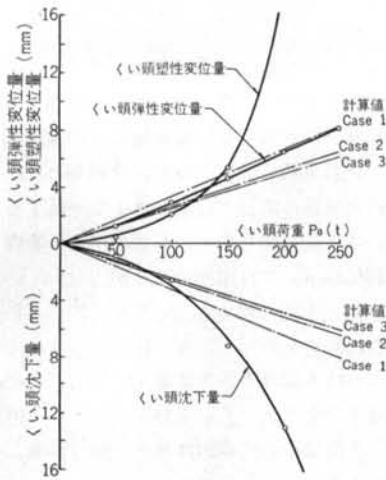


図-9 荷重一沈下特性に関する計算値と実測値の比較 (1016φ鋼管ぐいの例)

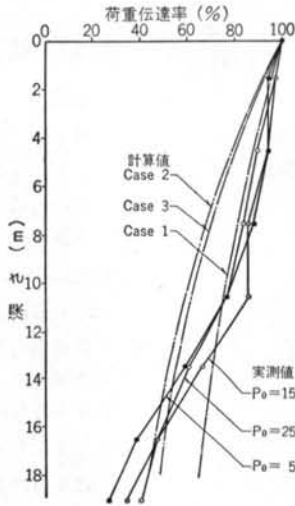


図-10 荷重伝達率による計算値と実測値の比較 (660φ鋼管ぐいの例)

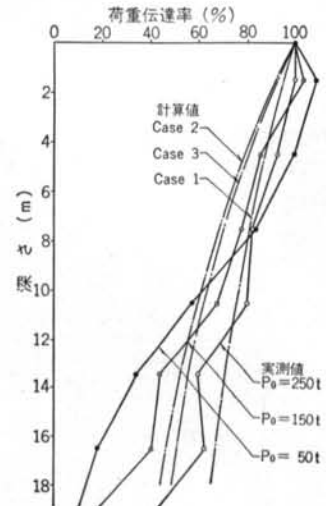


図-11 荷重伝達率による計算値と実測値の比較 (1016φ鋼管ぐいの例)

ぐい先端部の地盤のばね定数：表-2より、

$$V_{s2}=250\text{m/sec のとき } K_p=5.58 \times 10^4 \text{t/m}$$

$$V_{s2}=300\text{m/sec のとき } K_p=8.04 \times 10^4 \text{t/m}$$

以上の諸数値を式(8)に代入すれば、ぐいの鉛直ばね定数はつぎのようになる。

$$\text{Case 1 } K_0=3.05 \times 10^4 \text{t/m}$$

$$\text{Case 2 } K_0=3.93 \times 10^4 \text{t/m}$$

$$\text{Case 3 } K_0=4.12 \times 10^4 \text{t/m}$$

これらの計算値によって、荷重一沈下特性の実測結果と比較すると図-9のようになる。

図-8および図-9からわかるように、いずれも弾性変位量に関しては、計算値と実測値はかなりよく一致している。また、荷重の小さい領域では塑性変位量も少ないので、ぐい頭沈下量に関しても計算値は実測値とよく一致する。

4.2 ぐい体に沿った荷重伝達特性

ぐい体に沿った軸力分布は、理論的には式(7)によって与えられる。深さ z における軸力 P_z とぐい頭荷重 P_0 の比を荷重伝達率と呼ぶことにすれば、荷重伝達率は式(7)より次式によって表わされる。

$$\frac{P_z}{P_0} = \frac{AE\alpha \{ \sinh \alpha l \cdot \cosh \alpha(l-z) - \sinh \alpha z \} + K_p \cosh \alpha l \cdot \cosh \alpha(l-z)}{(K_p \cosh \alpha l + AE\alpha \sinh \alpha l) \cosh \alpha l} \quad \dots(8)$$

前記の諸数値を式(8)に代入して得られる荷重伝達率の計算値を、載荷試験による実測値と比較すると図-10および図-11のようになる。この場合の実測値とはぐい体に沿って貼付けられたストレインゲージから読取ったもので、なかには断線や絶縁抵抗の低下によって測定不能となった個所もあり、実測値そのものにも問題がある。たとえば、荷重伝達率が100%を越えたり、深くなるにつれて荷重伝達率が増えたりする部分があるが、これらはすべて測定誤差によるものであろう。しかし全体的な値としては、計算値は実測値に比較的よく合っているといえよう。

実測値では浅い領域において荷重伝達率のこう配が小さく、深くなるにつれてそのこう配が大きくなる傾向を示している。一方、計算値では、荷重伝達率のこう配は深くなるにつれて減少する。この傾向の差は、計算ではぐい体に沿った周面土のばね定数(k)を一定としているのに対し、実際には図-3に示すように k は浅い部分で小さくなることから説明されよう。また計算では上部層の土の定数を一定としているが、実際には深くなるにつれて多少は堅くなっていることも影響する。理論解析において k を深さの関数として与えると、計算が著しく煩雑になる。実用的には

くい頭におけるばね定数を大過なく評価できればよいのであるから、 k の値を平均的に一定としても十分目的を達することができる。もし特殊な場合として、くい体に沿った荷重伝達率を問題にするならば、やはり実状に応じて k の値を変化させなくては正確な評価はできなくなるであろう。

§ 5. 結論

本研究では、地盤を表層と支持層からなる完全弾性体と考え、くいの鉛直ばね定数を弾性論を用いて理論的に解くことを試みた。計算値を既往の載荷試験結果と比較したところ、弾性変位量に関してはかなりよく一致することがわかった。沈下量に関しても、荷重の小さい範囲（極限支持力の約 $1/3$ 以下）では塑性変位量が少ないので、計算値は実測値とよく一致する。したがって、くいを含む構造物の動的解析を行なうとき、比較的小さい変位領域で考えるならば本論はそのまま適用される。比較的大きな変位領域までを考え、くいを弾塑性モデルに置きかえるならば、本論はその初期剛性または弾性領域における特性を与えるものとして適用される。

〈参考文献〉

- 1) 山肩邦男：“支持杭の沈下に関する理論的考察” 日本建築学会論文報告集 No.68 昭和36年6月
- 2) R. D. Mindlin: “Force at a Point in the Interior of a Semi-Infinite Solid” Journal of Applied Physics Vol. 7, No. 5 May 1936
- 3) 川崎製鉄株式会社：“大型鋼杭試験報告書”（限定版）