

「第4編 基礎」関係

資料4.1 動力的支持力公式による杭の軸方向支持力の推定方法

(1) 打撃ハンマーによる動力的支持力算定式（Hiley の式）

Hiley の動力的支持力算定式は、杭の極限支持力が打込み時の貫入抵抗に等しいと仮定し、損失を除いた有効エネルギーが、杭が抵抗に抗して貫入するときになす仕事及び杭、地盤、キャップなどを弾性変形するときになす仕事に費やされるものとして、エネルギーの平衡方程式をたて、これから導かれたものである¹⁾。

以下に、Hiley の動力的支持力算定式を示す。

$$R_u = \frac{e_f E}{S + \frac{C_1 + C_2 + C_3}{2}} \cdot \frac{W_H + e^2 W_P}{W_H + W_P} \dots\dots\dots (式 4-1-1)$$

$$R_a = \frac{R_u}{F_s} \dots\dots\dots (式 4-1-2)$$

ここに、

R_u ：杭の極限支持力（kN）

R_a ：杭の許容支持力（kN）

W_H ：ハンマー（ラム）の重量（kN）

W_P ：杭の重量（kN）

E ：打撃エネルギー（kN・m）

ドロップハンマー、単働スチームハンマーでは $E = W_H \cdot h'$

ディーゼルハンマーでは $E = 2W_H \cdot h'$

e_f ：ハンマーの効率（0.6～1.0）²⁾

e ：反発係数（完全弾性体の場合は 1、完全非弾性体の場合は 0）

S ：杭の最終貫入量（m）

C_1 ：杭の弾性変形量（m）

C_2 ：地盤の弾性変形量（m）

C_3 ：キャップの弾性変形量（m）

h ：ハンマーの落下高（m）

F_s ：安全率 3.0 以上

実用的には、Hiley の式を簡略化した次の式³⁾が用いられている。

$$R_u = \frac{e_f E}{S + \frac{K}{2}} \dots\dots\dots (式 4-1-3)$$

$$R_a = \frac{R_u}{F_s} \dots\dots\dots (式 4-1-4)$$

ここに、

K：リバウンド量（m）

ただし、式 4-1-3、式 4-1-4 中の記号は、式 4-1-1、式 4-1-2 に準ずる。

(2) 道路橋示方書の式

道路橋示方書⁴⁾には、波動理論に基づいて導かれた、打撃工法における杭の動的な先端支持力を求める式が示されている。

(3) バイブロハンマーによる動力学的支持力算定式

代表的な式として、次のものを示す⁵⁾。

$$R_u = \frac{10.2 P_w}{\alpha A v + \beta} \dots\dots\dots (式 4-1-5)$$

ここに、

R_u ：杭の動的極限支持力（kN）

P_w ：杭の打止め時のモータ実出力（kW）

α ：貫入速度係数（1/cm）

A ：計算振幅（cm）

v ：打止め時の杭の貫入速度（cm/s）

β ：土性係数

① 杭の打止め時のモータ実出力（ P_w ）

モータ実出力は、電圧、電流値を測定して式 4-1-6 により求める。

$$P = 1.3 I_A E / 1000 \dots\dots\dots (式 4-1-6)$$

ここに、

P ：杭の打止め時のモータ実出力（kW）

I_A ：打止め時の最大電流値（A）

E ：打止め時の最低電圧値（V）

② 速度係数

速度係数の値は、表 4-1-1 のとおりである。

表 4-1-1 貫入速度係数

振動周波数（ f ：Hz）	α 値
$f \leq 15$	0.15
$15 < f \leq 25$	0.20
$f > 25$	0.55

f ：振動周波数（Hz）

③ 杭の貫入速度の測定

最終打ち止まり付近に目視可能な間隔（5 又は 10cm）であらかじめマーキングをし、その間

隔毎に要する時間を計測することにより、毎秒当たりの貫入速度（cm/s）を算定する。最終貫入速度は 1cm/s 以下となることを目安とする。

④ 土性係数

振動による土の抵抗の低減率と振動貫入の特殊性を考慮した土性係数の値は、表 4-1-2 のとおりである。

表 4-1-2 土性係数 β の値

土 性	β
砂レキ	0.15
砂	0.20
粘性土	0.30

⑤ 計算振幅

計算振幅の値は、式 4-1-7 によって求められる。

$$A = \frac{K/g}{W_V + W_P} \times 100 \dots\dots\dots (式 4-1-7)$$

ここに、

- A：計算振幅（cm）
- K：偏心モーメント（N・m）
- g：重力加速度（m/s²）
- W_V：バイブロハンマの振動質量（kg）
- W_P：杭質量（kg）

(参考文献)

- 1) 鋼管杭・鋼矢板技術協会：鋼管杭－その設計と施工－，鋼管杭・鋼矢板技術協会（2009），pp.451-455
- 2) R.D.Chelis:Pile foundations,McGraw Hill（1961）, pp.29-31
- 3) 日本建築学会：建築鋼ぐい基礎設計施工基準・同解説，技報堂（1963），p.32
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV下部構造編，丸善（2012），pp.554-556
- 5) バイブロハンマ工法技術研究会：バイブロハンマ設計施工便覧，バイブロハンマ工法技術研究会（2010），pp.87-88

資料4.2 チャンの式

1. 基本方程式

$$\text{地上部} \quad EI \frac{d^4 y_1}{dx^4} = 0 \quad (0 \leq x \leq -h) \quad \dots\dots\dots \text{(式 4-2-1)}$$

$$\text{地中部} \quad EI \frac{d^4 y_2}{dx^4} + E_s y_2 = 0 \quad (x \geq 0) \quad \dots\dots\dots \text{(式 4-2-2)}$$

2. 境界条件を考慮した解

E_s を一定として一般解を求め、境界条件を考慮すると、次のようになる。

(1) 頭部自由、 $h=0$ の場合

$$y_2 = \frac{T}{2EI\beta^3} e^{-\beta x} \cos \beta x \quad \dots\dots\dots \text{(式 4-2-3)}$$

$$i_2 = \frac{-T}{2EI\beta^2} e^{-\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x) \quad \dots\dots\dots \text{(式 4-2-4)}$$

$$M = \frac{-T}{\beta} e^{-\beta x} \sin \beta x \quad \dots\dots\dots \text{(式 4-2-5)}$$

$$S = T e^{-\beta x} (\sin \beta x - \cos \beta x) \quad \dots\dots\dots \text{(式 4-2-6)}$$

(2) 頭部固定、 $h=0$

$$y_2 = \frac{T}{2EI\beta^3} e^{-\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x) \quad \dots\dots\dots \text{(式 4-2-7)}$$

$$i_2 = \frac{-T}{2EI\beta^2} e^{-\beta x} \sin \beta x \quad \dots\dots\dots \text{(式 4-2-8)}$$

$$M = \frac{-T}{2\beta} e^{-\beta x} (\sin \beta x - \cos \beta x) \quad \dots\dots\dots \text{(式 4-2-9)}$$

$$S = -T e^{-\beta x} \cos \beta x \quad \dots\dots\dots \text{(式 4-2-10)}$$

(3) 頭部自由、 $h>0$ の場合

$$y_1 = \frac{T}{6EI\beta^3} \{ \beta^3 x^3 + 3\beta^3 h x^2 - 3\beta(1+2\beta h)x + 3(1+\beta h) \} \quad \dots\dots\dots \text{(式 4-2-11)}$$

$$y_2 = \frac{T}{2EI\beta^3} e^{-\beta x} \{ (1+\beta h) \cos \beta x - \beta h \sin \beta x \} \quad \dots\dots\dots \text{(式 4-2-12)}$$

$$i_1 = \frac{-T}{2EI\beta^2} \{ \beta^2 x^2 + 2\beta^2 h x - (1+2\beta h) \} \quad \dots\dots\dots \text{(式 4-2-13)}$$

$$i_2 = \frac{-T}{2EI\beta^2} e^{-\beta x} \{ (1+2\beta h) \cos \beta x + \sin \beta x \} \quad \dots\dots\dots \text{(式 4-2-14)}$$

$$M_1 = -T(x+h) \dots\dots\dots (式 4-2-15)$$

$$M_2 = \frac{-T}{\beta} e^{-\beta x} \{ \beta h \cos \beta x + (1 + \beta h) \sin \beta x \} \dots\dots\dots (式 4-2-16)$$

$$S_1 = -T \dots\dots\dots (式 4-2-17)$$

$$S_2 = -T e^{-\beta x} \{ \cos \beta x - (1 + 2 \beta h) \sin \beta x \} \dots\dots\dots (式 4-2-18)$$

(4) 頭部固定、 $h > 0$ の場合

$$y_1 = \frac{T}{12EI\beta^3} \{ 2\beta^3 x^3 - 3(1 - \beta h)\beta^2 x^2 - 6\beta^2 h x + 3(1 + \beta h) \} \dots\dots\dots (式 4-2-19)$$

$$y_2 = \frac{T}{4EI\beta^3} e^{-\beta x} \{ (1 + \beta h) \cos \beta x + (1 - \beta h) \sin \beta x \} \dots\dots\dots (式 4-2-20)$$

$$i_1 = \frac{T}{2EI\beta^2} \{ \beta^2 x^2 - (1 - \beta h)\beta x - \beta h \} \dots\dots\dots (式 4-2-21)$$

$$i_2 = \frac{-T}{2EI\beta^2} e^{-\beta x} (\beta h \cos \beta x + \sin \beta x) \dots\dots\dots (式 4-2-22)$$

$$M_1 = \frac{T}{2\beta} (1 - \beta h - 2\beta x) \dots\dots\dots (式 4-2-23)$$

$$M_2 = \frac{T}{2\beta} e^{-\beta x} \{ (1 - \beta h) \cos \beta x - (1 + \beta h) \sin \beta x \} \dots\dots\dots (式 4-2-24)$$

$$S_1 = -T \dots\dots\dots (式 4-2-25)$$

$$S_2 = -T e^{-\beta x} (\cos \beta x - \beta h \sin \beta x) \dots\dots\dots (式 4-2-26)$$

ここに、

- y_1 : 地上部の杭の変位 (m)
- y_2 : 地中部の杭の変位 (m)
- x : 地表面からの深さ (m)
- h : 杭頭の地上からの高さ (m)
- i_1 : 地上部におけるたわみ角 (ラジアン)
- i_2 : 地中部におけるたわみ角 (ラジアン)
- M_1 : 地上部の曲げモーメント (kNm)
- M_2 : 地中部の曲げモーメント (kNm)
- N : 標準貫入試験値 (N 値)
- S_1 : 地上部のせん断力 (kN)
- S_2 : 地中部のせん断力 (kN)
- n_h : 横方向地盤反力定数 (kN/m³)
- H : 杭頭に働く水平力 (kN)
- E_s : 地盤の弾性係数 (kN/m²)
- B : 杭幅 (又は直径) (m)
- EI : 杭の曲げ剛性 (kNm²)

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_h B}{4 EI}} \quad (\text{m}^{-1}) \dots\dots\dots (\text{式 4-2-27})$$