

1. 本研究の目的と意義

交通標識および商店や飲食店等で用いられる看板のような構造物では、自重による鉛直荷重よりも、風による水平荷重に抵抗することを主目的となっている。本研究では、鉛直な杭が水平力（および曲げモーメント）を受け、地盤との相互作用によって水平荷重を支持するケースを対象とし、支柱と杭が一体となった構造の設計法を検討し、重複反射解析法を適用することによって、杭の有限長や地盤の層構造を考慮できる解析手法を提案する。

水平荷重を受ける杭は、Chang の公式で計算され、均質地盤における無限長の杭の挙動に基づいて設計されてきた。この方法では地盤条件が十分に考慮されず、また、設計杭長が大きすぎる傾向がある。このため、供用されている交通標識や看板の多くは、地中に剛なコンクリート躯体を埋設する形式となっている。（参考文献に規定、解説されている）

提案する解析法によって地盤の層構造を適切に考慮し、杭の設計が変形に基づいて合理的に行われることによって、支柱-杭構造の設計を合理的かつ経済的にすることが可能になれば、現状のコンクリート躯体を用いる方法の有力な代替案になると期待できる。

2. 水平力を受ける杭の解析手法

1) Chang の公式による解析法

水平力を受ける杭のたわみを図1に示すように定義すると、支配方程式と変位などの関連は以下ようになる。

$$-EI \frac{d^4 \delta}{dz^4} = p \quad \begin{cases} \theta = -\frac{d\delta}{dz}, & M = -EI \frac{d\theta}{dz} = EI \frac{d^2 \delta}{dz^2}, \\ Q = \frac{dM}{dz} = -EI \frac{d^2 \theta}{dz^2} = EI \frac{d^3 \delta}{dz^3}, & p = \frac{dQ}{dz} = \frac{d^2 M}{dz^2} = -EI \frac{d^3 \theta}{dz^3} = EI \frac{d^4 \delta}{dz^4} \end{cases}$$

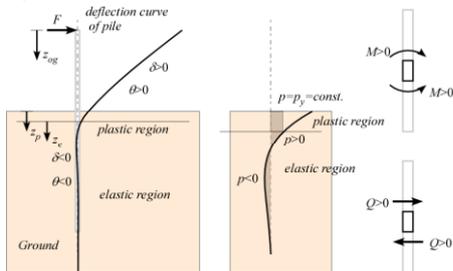


図1 水平力を受ける杭のたわみの定義

これを均質地盤において無限長を仮定して得られる Chang の公式は以下のように、挙動を図2に図示する。

$$\delta = \left(\frac{Q_0 + \beta M_s}{2\beta^2 EI} \cos \beta z - \frac{M_s}{2\beta^2 EI} \sin \beta z \right) e^{-\beta z}, \quad \theta = \left(\frac{Q_0 + 2\beta M_s}{2\beta^2 EI} \cos \beta z + \frac{Q_0}{2\beta^2 EI} \sin \beta z \right) e^{-\beta z}$$

$$M = \left(M_s \cos \beta z + \frac{Q_0 + \beta M_s}{\beta} \sin \beta z \right) e^{-\beta z}, \quad Q = \left(\frac{Q_0}{\beta} \cos \beta z - (Q_0 + 2\beta M_s) \sin \beta z \right) e^{-\beta z}$$

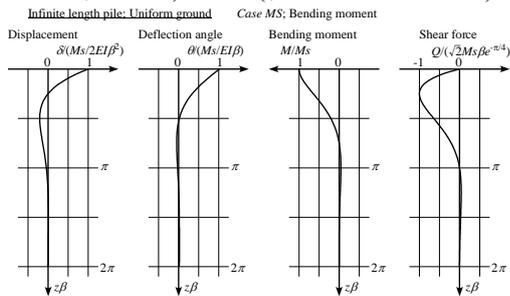


図2 Chang の公式による解析解（曲げモーメントのみ作用）

2) 重複反射解析法

提案する重複反射解析法では、Chang の公式と同じ支配方

程式を用いて有限長さ杭を解析することができる。また、図3に示すような層状地盤における有限長の杭に対しては、杭を複数のセグメントに分割して、所定の境界条件の下で解くことにより一般解を展開し、得られるマトリックス方程式を数式的に解くことによって計算できる。

$$\{Q\}_z = [S_z] \{A\}$$

$$\begin{cases} Q \\ M \\ \theta \\ \delta \end{cases} = \begin{bmatrix} 2\beta^2 EI e^{-\beta z} (\cos \beta z - \sin \beta z) & 2\beta^2 EI e^{-\beta z} (\cos \beta z + \sin \beta z) & 2\beta^2 EI e^{-\beta z} (-\cos \beta z - \sin \beta z) & 2\beta^2 EI e^{-\beta z} (\cos \beta z - \sin \beta z) \\ 2\beta^2 EI e^{-\beta z} (\sin \beta z) & 2\beta^2 EI e^{-\beta z} (-\cos \beta z) & 2\beta^2 EI e^{-\beta z} (-\sin \beta z) & 2\beta^2 EI e^{-\beta z} (\cos \beta z) \\ -\beta e^{-\beta z} (-\cos \beta z - \sin \beta z) & -\beta e^{-\beta z} (\cos \beta z - \sin \beta z) & -\beta e^{-\beta z} (\cos \beta z - \sin \beta z) & -\beta e^{-\beta z} (\cos \beta z + \sin \beta z) \\ e^{-\beta z} \cos \beta z & e^{-\beta z} \sin \beta z & e^{-\beta z} \cos \beta z & e^{-\beta z} \sin \beta z \end{bmatrix} \begin{cases} a \\ b \\ c \\ d \end{cases}$$

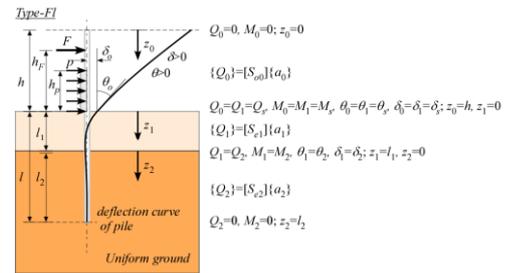


図3 層状地盤におけるたわみの定義

2層地盤における8個の未定定数は以下のマトリックスを解くことによって得られる。この解析法は、一般の多数層の地盤にも拡張して展開することが可能である。

$$\begin{bmatrix} [S_{z,1}]_{z=0} & [0] \\ [S_{z,2}]_{z=0} & -[S_{z,2}]_{z=0} \\ [0] & [S_{z,2}]_{z=0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{A_1\} \\ \{A_2\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q_z \\ M_z \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{Bmatrix} \Rightarrow \text{solve and find } [a_1, b_1, c_1, d_1, a_2, b_2, c_2, d_2]$$

得られた、この場合の杭の挙動は図4のようにになる。

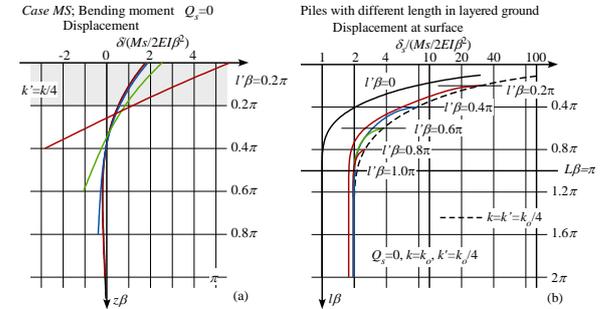


図4 重複反射法による結果 (a) 長さが異なる杭の挙動 (b) 杭長が連続して変化する場合の地表面変位

図示のように、重複反射解析手法では杭長が変化することによって杭の変位が敏感に変化することが分かる。上部に剛性が低い層を有する層状地盤では、杭が下層に伸びるほど杭の水平変位が抑制できることが分かった。

3. 支柱-杭構造の試設計

Chang の公式に基づく既往の設計法に対して、提案する重複反射法を用いた設計の優位性を示すために、所定の条件において支柱-杭構造を試設計し、その結果を比較・検討する。

条件は均質地盤、層状地盤の2ケースとし、円筒鋼管を用い、柱-杭の断面は地上部分と地中部分で等しく、支柱部と杭部が一体となったものを考える。

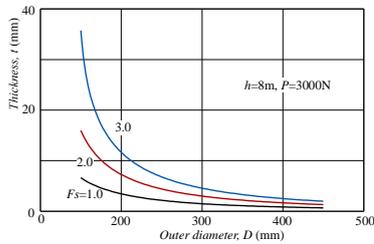


図5 鋼管の外径—板厚による安全率の関係

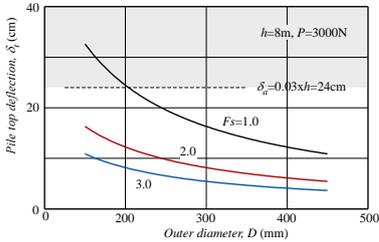


図6 鋼管の水平変位—外径による安全率の関係

図5, 図6を参考に, 杭の試算基本断面を表1の区切りの良い数字を用いた3 ケースとした。これに基づいて, 以下の条件の下で試設計した。

- ・ 支柱の天端における水平変位が支柱高さの 3%以下となる ($\delta_g = 0.03 \times h = 24\text{cm}$) (試算で用いた仮定値)
- ・ 支柱の地表面における水平変位が 1cm 以下となる ($\delta_s \leq 1\text{cm}$) (地盤の変形を弾性限度内に抑える)

表1 円筒鋼管の断面

ケース	Case 1	Case 2	Case 3
外径 D	20cm	30cm	40cm
必要厚さ t	8mm	3mm	2mm

1) 均質地盤における試算結果

杭長 l は, 通常行われるように, $l\beta = \pi$ に対応する長さとした。また地盤条件として N 値を 5, 10, 20 の 3 ケースとした。

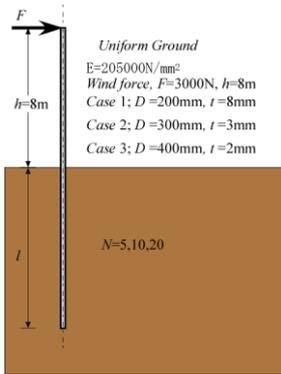


図7 均質地盤における杭基礎の条件

表2 均質地盤における試算結果

ケース	Changの公式			重複反射法		
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 1	Case 2	Case 3
外径 D	20cm	30cm	40cm	20cm	30cm	40cm
厚さ t	8mm	3mm	2mm	8mm	3mm	2mm
N値=5: 剛性の低い地盤						
δ_s, δ_g	17.8, 0.54cm	13.2, 0.44, cm	8.6, 0.34cm	22.5, 0.95cm	18.9, 0.93, cm	15.9, 0.94cm
(β)	4.2m (0.755/m)	4.4m (0.713/m)	4.9m (0.645)	1.8m	1.7m	1.6m
N値=10: 剛性の比較的低い地盤						
δ_s, δ_g	16.6, 0.37cm	12.3, 0.30cm	7.9, 0.23cm	23.7, 0.84cm	21.3, 0.87cm	19.9, 0.94cm
(β)	3.5m (0.897/m)	3.7m (0.848/m)	4.1m (0.767/m)	1.3m	1.2m	1.1m
N値=20: 剛性の高い地盤						
δ_s, δ_g	15.6, 0.26cm	11.5, 0.21cm	7.4, 0.16cm	23.8, 0.69cm	22.6, 0.75cm	23.3, 0.86cm
(β)	3.0m (1.067/m)	3.2m (1.009/m)	3.5m (0.913/m)	1.0m	0.9m	0.8m

計算結果を比較すると, Chang の公式によるものよりも重複反射法による方が明らかに杭長が短くなっている。地盤の剛性が低い場合には2倍以上, 剛性が高い場合には3倍以上の

差があることが分かる。

2) 層状地盤における試算結果

Chang の公式は均質な地盤にしか適用できないため, 必要な杭長さまでの深さで重み付相加平均による N 値を以下の式で求めながら, 繰返し計算により杭長を計算した。

$$N_a = \frac{N_1 \times l_1 + N_2 \times l_2}{l}$$

また, 杭長 l は半波長 $l\beta = \pi$ に対応する長さとした。下層地盤として N 値を 5, 10, 20 の 3 ケースとした。

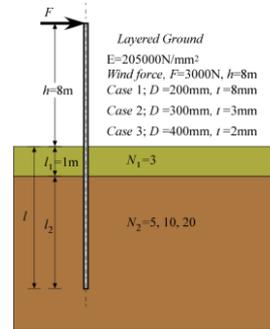


図8 層状地盤における杭基礎の条件

表3 均質地盤における試算結果

ケース	Changの公式			重複反射法		
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 1	Case 2	Case 3
外径 D	20cm	30cm	40cm	20cm	30cm	40cm
厚さ t	8mm	3mm	2mm	8mm	3mm	2mm
N値: N'=3, N=5; 下層地盤の剛性が低い地盤						
平均N値	Na=4.5	Na=4.5	Na=4.6	—	—	—
δ_s, δ_g	18.0, 0.57cm	13.3, 0.46, cm	8.7, 0.35cm	20.9, 0.98cm	17.3, 0.97, cm	13.6, 0.94cm
(β)	4.3m (0.734/m)	4.6m (0.395/m)	5.0m (0.632)	2.3m	2.1m	2.0m
N値: N'=3, N=10; 下層地盤の剛性が比較的低い地盤						
平均N値	Na=8.0	Na=8.1	Na=8.3	—	—	—
δ_s, δ_g	17.0, 0.42cm	12.3, 0.30cm	8.13, 0.26cm	20.7, 0.98cm	16.6, 0.92, cm	13.9, 0.99cm
(β)	3.7m (0.849/m)	3.7m (0.849m)	4.4m (0.726/m)	2.1m	2.0m	1.9m
N値: N'=3, N=20; 下層地盤の剛性が高い地盤						
平均N値	Na=14.3	Na=14.7	Na=15.1	—	—	—
δ_s, δ_g	16.1, 0.31cm	11.8, 0.25cm	7.6, 0.19cm	20.2, 0.92cm	16.9, 0.96cm	13.5, 0.97cm
(β)	3.2m (0.981/m)	3.4m (0.934/m)	3.7m (0.851/m)	2.0m	1.8m	1.7m

均質地盤と比較すると杭長は明らかに長くなったが Chang の公式による試算結果と比較すると, 杭長は依然として半分以下であった。これは重複反射解析法では地盤の層状態に合わせて杭長を分割して計算するため, 各層の剛性の影響を直接反映できるためと考えられる。

4. まとめ

・ 杭長の影響を適切に考慮して杭の許容変位に基づいた設計を可能にする重複反射法を用いた計算では, 許容変位を適切に考慮することが難しい Chang の公式に比べると杭長が格段に短くてもよいということが明らかになった。これによって, 許容変位に対する信頼性を確保しつつ, より合理的で経済的な設計が可能になることが分かった。ただし, 原位置における検証は別途必要である。

・ これまで, 看板や標識に対する基礎はコンクリートの重量躯体を埋設することによる基礎構造が圧倒的に多く採用されてきたが, 重複反射解析法による従来より短い杭長の杭基礎構造が代替案として検討可能になることが分かった。これにより, コンクリート躯体の建設に要する工事期間の短縮, 掘削等による専有面積の最小化が可能になる。

参考文献: 道路標識設置基準・同解説; 日本道路協会 (1987), 建築基礎構造設計指針; 日本建築学会 (2001)