

双曲線水平地盤反力モデルに基づく杭の水平抵抗に関する解析法の提案

An Analytical Method for Behavior of Laterally Loaded Pile Based on Hyperbolic Subgrade Reaction Model

富永晃司 Koji TOMINAGA (広島大学大学院国際協力研究科)
有木廣江 Hiroe ARIKI (日本建築総合試験所)

我が国では1993年に法定計量単位が国際単位系(SI単位)に変更され、建築構造設計においても全てSI単位を使用することになった。この改変により、実験結果などに基づいた設計式を使用するに際して、単位の取り間違いをする可能性が潜在することになった。ここに、杭の水平抵抗の設計において、その水平地盤反力係数に水平変位の平方根に反比例する経験式を推奨している日本建築学会編「建築基礎構造設計指針」の中でも、その可能性は潜在している。本論文では取り扱いに間違いの可能性が少なく、かつ比較的簡単に扱える杭基礎の水平抵抗解析法として、水平地盤反力と杭変位量の関係を1次の双曲線関数で評価する方法を提示し、6件の現場水平載荷実験結果との比較検討を行った結果を報告する。

キーワード：杭、杭の水平抵抗、建築、地盤反力係数、水平荷重、設計、非線形 (IGC:E04)

1. はじめに

建築物や橋梁などの構造物基礎の設計において、作用外力により発生する基礎部材応力が許容応力度以内に収まること、設計の基本条件となる。そして、さらに精度の高い設計が必要となる場合には、構造部材の変形をも考慮した設計が要求される。

ここに、平成10年に改定された建築基準法では、建築構造設計の基本思想が仕様設計から性能設計へと変わり、対象とする構造物の変形をも考慮した構造設計が要求されるようになってきた。すなわち、上記のように精度の高い性能設計を行うためには構造部材のみならず構造系全体の線形から非線形そして極限状態に至るまでの解析が必要である。この状況は、基本的には構造設計上2次設計までを必要としない基礎構造に関しても同じである。

日本における建築物の基礎構造設計は、そのほとんどが杭基礎を対象とした設計となる。杭基礎の設計では、鉛直支持に関する事項と共に、地震や台風による水平力を受ける杭に関する事項も重要となる。ここに、杭基礎の水平抵抗に関する解析法としては、極限地盤反力法、極限平衡法、弾性支承梁法、境界要素法および有限要素法などがあるが、実務的には作用荷重に対する杭体の変形あるいは応力などが比較的簡単に得られる有利さから、弾性支承梁法(所謂、Chang式)が多く用いられている。これらの点を考慮して、「建築基礎構造設計指針」¹⁾(以降、学会指針と略記)では杭基礎の水平抵抗に対する設計法として、弾性支承梁法に基づいた杭-地盤系に非線形性を組み込んだ解析法が推奨されている。

一方、我が国では1993年に法定計量単位をそれまでのメートル法から国際単位系(SI単位)とする計量法が施行され、建築構造設計においても全てSI単位を使用する

ことになった。この改変により、構造設計で採用されている実験結果などに基づいた設計式を使用するに際して、単位の取り間違いをする可能性が潜在することになった。このような設計上の無意識的誤りは、地盤の非線形性を表すために水平地盤反力係数 k_h として、水平変位 y の0.5乗に反比例する経験式を推奨している学会指針の中にも、その可能性は潜在している。

ここに、本論文では取り扱いに間違いの可能性が少なく、かつ比較的簡単に扱える杭基礎の水平抵抗に関する非線形解析法として、水平地盤反力 p ~水平変位量 y 関係を次式に示す1次の双曲線関数(a および b は定数)で評価する方法を提案している。

$$p = \frac{y}{ay + b} \quad (1)$$

杭の水平地盤反力 p と水平変位量 y との関係を1次双曲線関数で表す方法は、文献2)で取り入れられているが、現場実験結果との関係が明確でないので、本論文ではこの点についても検討を加えた結果を提示する。なお、本論文は、文献3)の内容に加えて、学会指針の解析例⁴⁾と提示した解析法で解析した結果との比較検討した内容を加筆した論文構成となっていることをお断りしておく。

2. 解析法の誘導

2.1 基本方程式および一般解

本解析法における杭-地盤系全体解析モデル、およびある要素(例えば、要素*i*)における地盤反力 p ~水平変位量 y 関係の双曲線モデルを図-1示す。ここに、同図(b)において、例えば平均値(p_i, y_i)で規定される割線勾配を、この要素での一様な連続ばね(言い換えれば、水平

地盤反力係数 k_{hi}) とみなし, かつ杭体断面定数が一定と仮定すれば, 要素間の水平抵抗を表す基本方程式は, 式(2)で表せる. なお以降では, 要素 i は添字 i で表すこととした.

$$\frac{d^4 y_i}{dx_i^4} + \frac{k_{hi} B_i}{K_i} y_i = 0 \quad (2)$$

ここに, B_i : 杭径 (m), K_i : 杭の曲げ剛性 ($\text{kN}\cdot\text{m}^2$), y_i : 水平変位 (m) および x_i : 要素 i の上端からの深さ (m).

式(2)の一般解は, 次式のように与えられる.

$$y_i = e^{\beta x_i} (A_1 \cos \beta x_i + A_2 \sin \beta x_i) + e^{\beta x_i} (A_3 \cos \beta x_i + A_4 \sin \beta x_i) \quad (3)$$

ここに, $\beta_i = [k_{hi} B_i / 4K_i]^{1/4}$ (1/m), および $A_1 \sim A_4$: 未定積分定数.

式(3)中の未定積分定数は, 要素 i 上端位置 ($x_i=0$) の各物理量 (撓み角 $\theta_i = -dy/dx_i$, 曲げモーメント $M_i = -K_i d^2 y_i / dx_i^2$, せん断力 $Q_i = -K_i d^3 y_i / dx_i^3$) により決定される. したがって, 要素 i 中の任意位置での各物理量は, この要素上端の各物理量をもって表されるので, 同要素上・下端 (図-1(a)中の節点 i および節点 $i+1$) の各物理量の関係は, $x_i=L_i$ とした次式で表される.

$$\begin{pmatrix} y_i \\ \theta_i \\ M_i \\ Q_i \end{pmatrix}_{\text{上端}} = \begin{pmatrix} C_h C & -(S_h C + C_h S) / 2\beta_i & -S_h S / 2EI\beta_i^2 & (S_h C - C_h S) / 4EI\beta_i^3 \\ \beta_i (C_h S - S_h C) & C_h C & (S_h C + C_h S) / 2EI\beta_i & S_h S / 2EI\beta_i^2 \\ 2EI\beta_i^2 S_h S & EI\beta_i (S_h C - C_h S) & C_h C & (S_h C + C_h S) / 2\beta_i \\ 2EI\beta_i^3 (S_h C + C_h S) & -2EI\beta_i^2 S_h S & \beta_i (S_h C - C_h S) & C_h C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_{i+1} \\ \theta_{i+1} \\ M_{i+1} \\ Q_{i+1} \end{pmatrix}_{\text{下端}} \quad (4)$$

ここに, $C_h = \cosh(\beta_i L_i)$, $S_h = \sinh(\beta_i L_i)$, $C = \cos(\beta_i L_i)$ および $S = \sin(\beta_i L_i)$.

一方, 対象要素下端とその直下の要素上端における各物理量は連続であるので, 杭頭から杭先端へと各物理量を順次関係式(4)をもって伝達させれば, 杭頭と杭先端の各物理量は式(5)のように (4×4) マトリックスを介して関係付けられる. ここに, 添字 p, o はそれぞれ杭先端および杭頭を意味している.

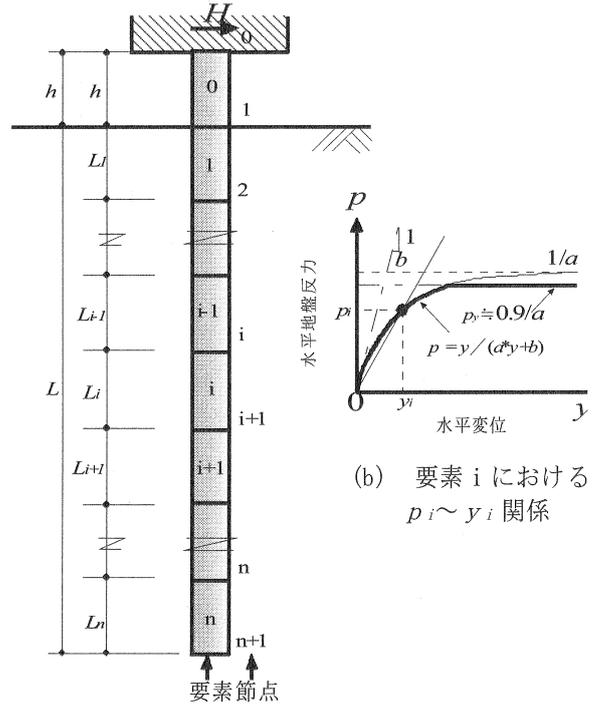
$$\begin{pmatrix} y_p \\ \theta_p \\ M_p \\ Q_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_o \\ \theta_o \\ M_o \\ Q_o \end{pmatrix} \quad (5)$$

なお, 杭頭突出部の解は, 式(2)で $k_{hi}=0$ とした方程式に基づいて同様の方法で導かれる.

2.2 解析法の実杭への適用

前項で示した杭頭と杭先端の各物理量を関係付ける式(5)を実杭の問題に適用する場合, 杭頭および杭先端の条件に対応した境界条件を考慮しなければならない.

ここに, 例えば先端支持杭の現場水平加力実験結果を解析する場合には, 杭頭自由および杭先端ピンの条件が想定されるので, $M_o=0, Q_o=-H$ (杭頭作用荷重) および $y_p=0, M_p=0$ が既知量として与えられる. したがって, 式(5)において杭頭と杭先端のそれぞれの既知と未知の



(a) 杭-地盤系全体解析モデル

図-1 解析モデル

物理量を考慮して, 部分マトリックス (2×2) の関係式に組み替えれば, 杭頭における未知物理量 (y_o および θ_o) を決定する関係式として, 次式が導かれる.

$$\begin{pmatrix} y_o \\ \theta_o \end{pmatrix}_{\text{未}} = - \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{31} & a_{32} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} a_{13} & a_{14} \\ a_{33} & a_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_o=0 \\ Q_o=H \end{pmatrix}_{\text{既}} \\ = \frac{-1}{a_{11}a_{32} - a_{12}a_{31}} \begin{pmatrix} a_{13}a_{32} - a_{12}a_{33} & a_{14}a_{32} - a_{12}a_{34} \\ a_{11}a_{33} - a_{13}a_{31} & a_{11}a_{34} - a_{13}a_{32} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_o=0 \\ Q_o=H \end{pmatrix}_{\text{既}} \quad (6)$$

なお, 式中の既および未は, それぞれ既知および未知の物理量を意味する.

以上のように決定した杭頭の全物理量を杭頭から杭先端へと式(4)により順次伝達させて, 全節点の物理量を決定することができる.

本解析法では, 各要素の水平地盤反力係数 k_{hi} は, その要素の水平変位 y_i (具体的には, 上下端の平均変位を採用) により図-1に示す双曲線関数に基づいた割線勾配を与えることにしている. したがって, 各要素における最適な水平地盤反力係数は一義的に決まらないので, 具体的には以下の手順による繰り返し計算を行うことになる.

- 1) まず, 全要素の杭体曲げ剛性に弾性剛性を与え, 水平地盤反力係数として適当な k_{hi} 値 (すなわち, 双曲線の初期接線勾配) を与えて, 対象杭頭荷重に対する全節点の物理量を計算する.
- 2) ついで, 手順 1) の計算結果を基に各要素の平均水平変位 y_i による水平地盤反力係数 k_{hi} を用い, 再計算を行う. ただし, 各要素の杭体曲げ剛性に関しても, 手順 1) の

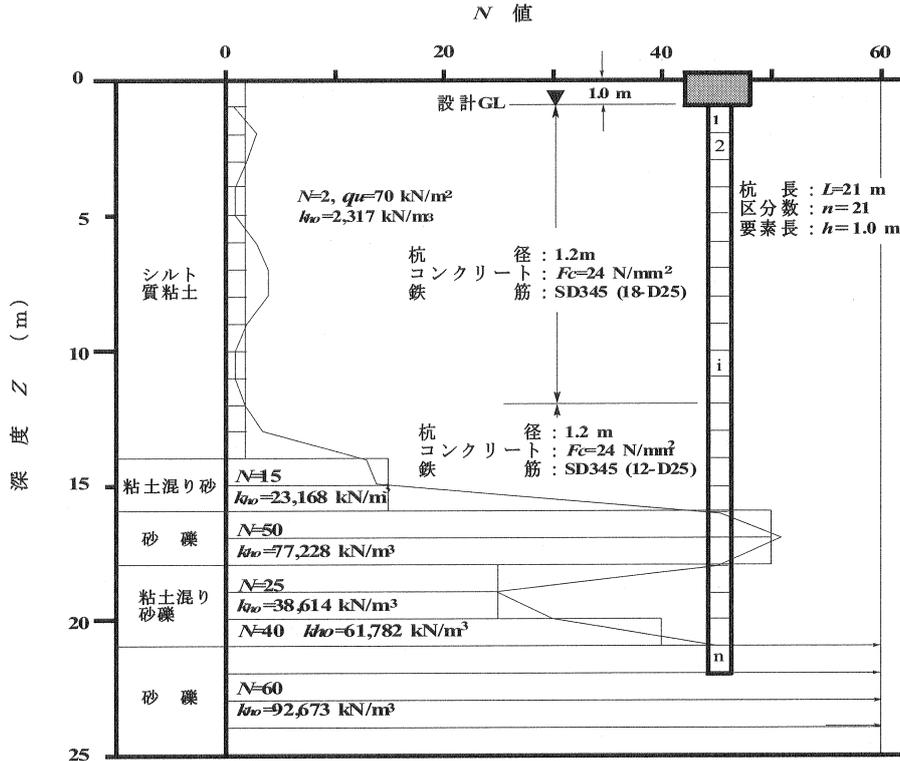


図-2 日本建築学会編「建築基礎構造設計指針」⁴⁾の解析例

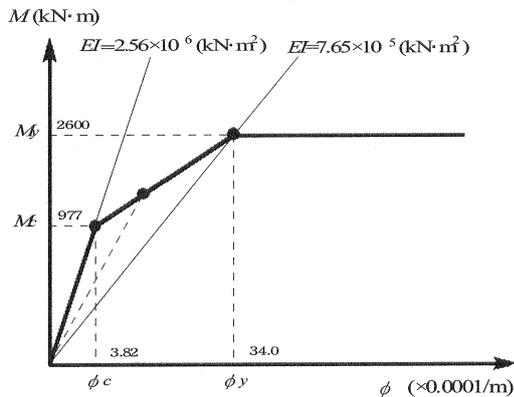


図-3 杭体曲げ剛性の解析用モデル

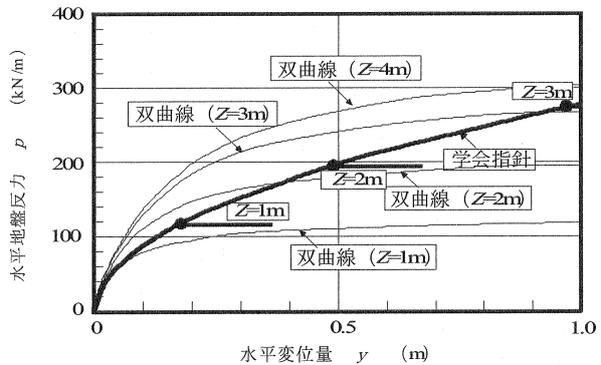


図-4 地盤ばねの解析用モデル

計算結果による各要素の平均曲げモーメントに基づいて再評価する。

- 3) 再計算による全要素の平均水平変位 y_i と手順 2) での y_i との差が、許容値以内に収まっているか否かの判定を行う。
- 4) 手順 3) で否の場合は、全てが許容値に収まるまで手順 2)~3) を繰り返し、対象杭頭荷重に対する最適解を求める。

ここに、杭体の曲げ剛性の非線形性は、手順 2)~4) の繰り返し計算において、各要素の平均曲げモーメント(対象要素の上・下端の相和平均)に対応した曲げ剛性を用

いていることから自動的に考慮されている。

3. 学会指針の解析例⁴⁾への適用および解析結果の考察

3.1 学会指針の解析例の概要

本解析法に適用する計算例として、杭-地盤系が終局状態に至るまでを想定した、図-2 に示す学会指針の杭基礎設計例⁴⁾を採用した。その杭-地盤系の構成概要は、以下の通りである。

地盤は、設計 GL-13m までは N 値 2 前後のシルト質粘性土層、それ以下は N 値 15 から 40 の粘土混じり砂礫層と N 値 50 および 60 以上の砂礫層との互層であり、杭先端は N 値 60 以上の砂礫層（支持層）に 1m 根入れされている。また、杭は場所打ち鉄筋コンクリート杭（GL-1m～GL-12m間の上部配筋：18-D25，GL-12m以下で深部の下部配筋：12-D25）とし、杭頭部はパイルキャップに 1m 根入れして接合されている。

以上の状態に対して実際の解析においては、杭は上部と下部で杭配筋を異にしているが、全長にわたって上部の杭体と同じと仮定し、杭頭条件には学会指針の計算例と同じ条件の杭頭固定を与えた。ただし、降伏曲げモーメント M_y に達した後は、杭頭部に塑性ヒンジ（杭頭曲げモーメントは M_y を保持し、回転は自由）を設定した。また、パイルキャップ下端面を載荷面と仮定し、杭軸方向に 21 等分割（要素長=1m）したモデルを設定した。なお、杭体の曲げモーメント M ～曲率 ϕ 関係は、図-3 に示すように、文献4) にならってコンクリートのひび割れ曲げモーメント M_c および降伏曲げモーメント M_y を変化点とするトリリニア関係を適用した。

一方、解析法に適用する水平地盤反力に関しては、水平地盤反力が式(1)の双曲線関数で表されるとすれば、係数 $a(\text{m}^2/\text{kN})$ および $b(\text{m}^3/\text{kN})$ の逆数は、それぞれ図-1(b) に示す収斂値および初期勾配を意味している。これらの初期勾配および収斂値が、それぞれ学会指針¹⁾で提案されている水平地盤反力係数 k_{hi} および塑性水平地盤反力 p_y と関連付けられ、同指針で推奨されているこれらの評価式を基に、以下のように係数 a および b を決定することができる。

- 1) 初期勾配 $1/b$ すなわち初期剛性は、学会指針の N 値による基準水平地盤反力係数 k_{ho} （水平変位量 $y=1.0$ cm 時の水平地盤反力係数）の評価式（以降、指針推奨式と略記）に対して、補正係数 α を組み込んだ式(7)で評価することとした。ちなみに、指針推奨式と等しい場合は、砂質地盤で $\alpha=80/B^{0.75}$ および粘性土地盤で $\alpha=60/B^{0.75}$ （ B : cm 単位による杭径）となる。

$$1/b = \alpha \times 700 \times N \quad (7)$$

- 2) 収斂値 $1/a$ は、文献5)で提示されている地盤応力の極限值が1次双曲線関数の収斂値に対して約 0.9 となる事象から、学会指針による極限水平地盤反力 p_y と、次式で関係付けることとした。

$$1/a = p_y / 0.9 \quad (8)$$

なお、極限水平地盤反力に必要な砂質土の内部摩擦角 ϕ および粘性土の粘着力 c_u は、それぞれ文献6)および文献7)（ c_u = 一軸圧縮強さ/2 として SI 単位に変換）で提案されている下式で評価した。

$$\phi = \sqrt{20 \times N + 20} \text{ (度)} \quad (9)$$

$$c_u = 20.0 + 2.5 \times N \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad (10)$$

ここに、 N は標準貫入試験による N 値である。

また、砂質地盤および粘性土地盤の単位体積重量 γ (kN/m^3) は、それぞれ文献8)に提示されている 18.0 および 15.0 と仮定した。

以上より計算上与えられる各要素の水平地盤反力 p ～水平変位量 y 関係として、深さ 4m までの4つの要素において補正係数 $\alpha=60$ を与えた場合の関係曲線を図-4 に示しておく。なお、同図中には指針推奨式による p ～ y 関係を併記してある。ただし学会指針の関係曲線は、対象深さの地盤が粘性土であるため、図中の黒丸付き横棒で示したように極限水平地盤反力 p_y が異なるが、深さに関係なく同じ曲線を描くことに注意されたい。

この図から、指針推奨式と同じ補正係数 $\alpha=60$ とした場合、水平変位量 y が小さな領域では双曲線モデルの浅い要素に近い関係曲線を示すが、 y の増大に伴い深い要素の関係曲線へと移行する性状を示すことが指摘できる。

3.2 解析結果とその考察

前項の解析例に対して、双曲線モデルによる解析解（以降、双曲線解と略記）と学会指針による解析解（同じく、指針解と略記）の相関性について検討を加えるため、双曲線モデルの初期勾配として式(7)における α 値を 30 から 100 に変化させた解析を行った。ただし、解析の終了は、杭頭部曲げモーメント M_o および地中部曲げモーメント M_{max} が共に降伏曲げモーメントに達した時を杭一地盤系の終局状態として、解析を終了した。

これらの解析結果のうち、まず杭頭水平荷重 H ～杭頭水平変位量 y_o 関係を指針解と比較して図-5 に示した。なお、 M_o および M_{max} が、それぞれひび割れ曲げモーメント M_c および降伏曲げモーメント M_y に達した時を、図中に黒丸および黒三角印で記入してある。この図から、以下のことが読み取れる。

- 1) 双曲線解において α 値が増大すると、同じ杭頭水平荷重時の水平変位量は減少し、かつ杭頭部および地中部の曲げモーメントがひび割れ曲げモーメントおよび降伏曲げモーメントに至る水平変位量も減少する性状がある。
- 2) 指針解は、杭頭水平変位量 y_o が低領域では大きな α 値の双曲線解と良い一致を示す。しかし、その後 y_o の増加に対してその一致度は小さな α 値の解へと移行していく。

ついで、曲げモーメントに関する相関性を見るために、双曲線解と指針解による杭頭水平荷重 H ～杭頭曲げモーメント M_o 、地中部最大曲げモーメント M_{max} および M_{max} 発生深さ L_{max} の関係を比較して図-6 に示した。なお、同図中にはひび割れ曲げモーメント M_c および降伏曲げモーメント M_y を記入してある。この図から、以下のことが指摘できる。

- 3) 指針解の杭頭曲げモーメント M_o および地中部最大曲げモーメント M_{max} 値は、水平荷重 H の増加に対して、上記2)の H ～ y_o 関係と同じように低荷重域における大

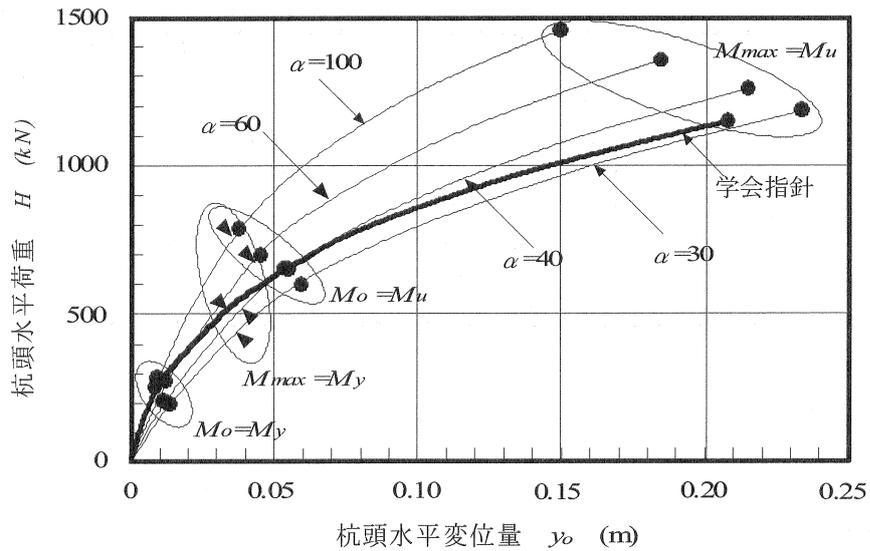


図-5 杭頭水平荷重 H ～水平変位量 y_0 関係の比較

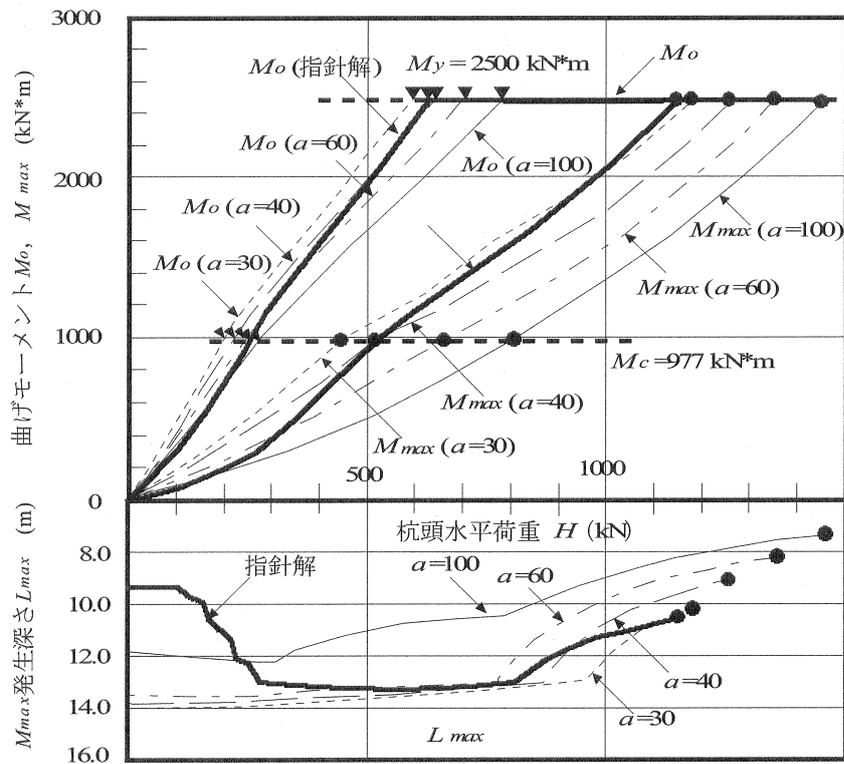


図-6 杭頭曲げモーメント M_0 、地中部最大曲げモーメント M_{max} 、および M_{max} 発生深さ L_{max} ～杭頭水平荷重 H 関係の比較

きな α 値の双曲線解から小さな α 値の双曲線解へと推移している。

- 4) 指針解による地中部最大曲げモーメントの発生深さ L_{max} は、低荷重域ではいずれの双曲線解よりもかなり浅い値を示しているが、杭頭部がひび割れ曲げモーメント M_c に達した後は、急速に双曲線解の深さに近づく傾向が示されている。なお、 $\alpha=60$ までの双曲線解

の L_{max} は $\alpha=100$ のそれよりかなり深くなる性状が示されている。

- 5) 杭-地盤系が終局状態に至った時の杭頭水平変位量 y_0 を杭頭曲げモーメント M_0 が降伏曲げモーメント M_y に達した時の y_0 で除した値 (以降、塑性率 μ と呼称) は、指針解では $\mu=3.92$ であるのに対して、双曲線解では $\alpha=30$ おける $\mu=4.03$ から $\alpha=100$ の $\mu=3.98$ と

表-1 解析で対象とした現場実験概要

実験	杭種	杭径 (mm)	肉厚 (mm)	曲げ剛性 EI ($\times 10^5$) (kN \cdot m ²)	先端深さ (GL-m)	荷重作用位置 (GL+m)	変位測定位置 (GL+m)	GL約10m間の土質	杭頭条件
No.1	PC	300	60	0.14	13.0	0.10	0.10	砂質土	自由
No.2	PC	600	100	3.53	15.6	0.19	0.19	砂質土	自由
No.3	S	600	95	1.66	24.0	0.20	0.10	砂質土	自由
No.4	S	800	16	6.54	15.5	0.25	0.05	砂質土	自由
No.5	S	800	12.7	5.26	36.5	0.40	0.40	ローム	自由
No.6	B	1000	500	12.25	18.0	0.0	0.0	粘性土	固定

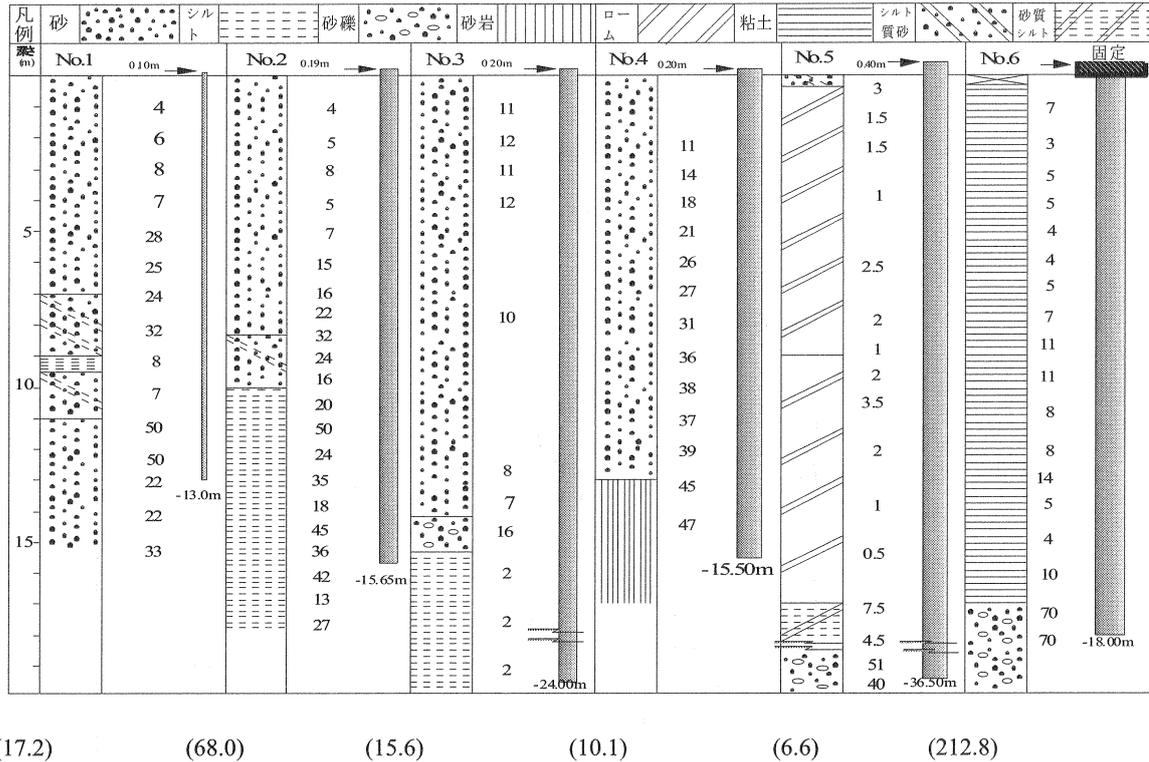


図-7 実験現場土質柱状図と杭姿図 (杭姿図左欄数値はN値を、下部括弧内数値は最適 α 値を表す)

若干大きな値を示すが、ほぼ同じ程度の塑性率を示す結果となった。

4. 現場水平載荷実験結果との比較検討

4.1 水平加力実験概要および解析入力定数の決定

解析対象とした現場水平載荷実験は、文献9)に掲載されている全208件の中から、以下に示す選択条件に基づいて取捨選択した6件である。これらの実験概要および土質柱状図等を、それぞれ表-1および図-7に示す。ここに、取捨選択した条件は、①地表面から杭径の約10倍までほぼ同一の土質であること、②解析で必要とする情報が示されていること、③鉛直の単杭で実験が行われていること、および④実験時に杭体の曲げ歪値が測定されていること、などである。

提案する解析法で実験結果を解析する目的は、前述したように水平地盤反力モデルの実務的に扱いやすい作成法を提示すること、および実杭の水平挙動と同モデルによる解析結果との関係を把握することにある。したがって、まず杭体に関しては塑性等の複雑要因を除くため、杭体が弾性限界までを解析対象とし、文献10)を参考にして杭体弾性限界は杭頭水平荷重 H ~水平変位量 y_0 の両対数関係における折れ点で判定した。

上記の各実験における最適 α 値を定める方法として、まず各荷重階の H ~ y_0 関係に対応する α 値を逆解析する。ついで、これら各荷重階の逆算 α 値を用いて H に対する y_0 関係を計算し、これらの値と各荷重階の実測値との差の二乗和が最小になる α 値を最適 α 値と見なすことにした。ちなみに、各実験において逆解析で得られた最適 α 値を、図-7の下欄()内に数値で示してある。

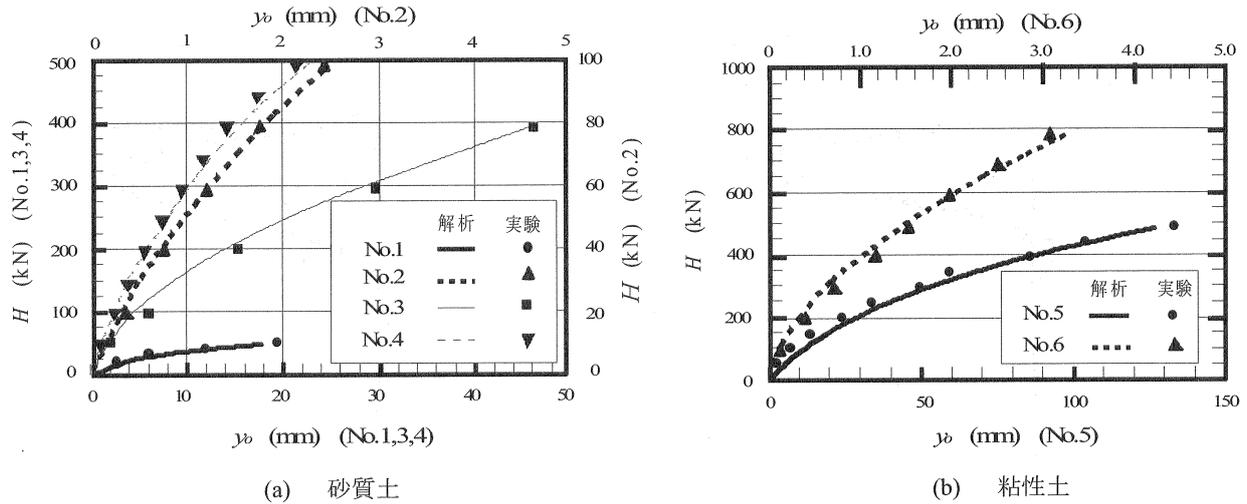


図-8 杭頭水平荷重 H ～水平変位量 y_b 関係の比較

4.2 解析結果とその考察

前項の逆解析による最適 α 値を用いた各実験結果を解析した結果のうち、杭頭水平荷重 H_0 ～水平変位量 y_b 関係を図-8に示した。ただし、砂質土および粘性土別にまとめ、かつ実験結果による関係曲線を併記してある。これらの図から、以下のことが指摘できる。

- 1) 逆算により決定した最適 α 値を用いれば、全ての実験において解析値は、実験値をよく表現できる。
- 2) 最適 α 値に関しては、砂質土では10.1～68.0に分布し、地表面から深さ約5.0m間の平均 N 値が増大すると低下する傾向がある。これに対して、粘性土では2件と数が少ないので明確な傾向は不明であるが、 N 値が増加すると、逆に大きくなる傾向が見られる。
ついで、曲げモーメントの深さ方向分布について、解析値と実験値との比較を図-9に示した。これらの図から、以下のことが読み取れる。
- 3) 解析結果は、いずれの実験結果に対しても定性的傾向を良く表現出来ているが、杭頭自由の場合には定量的に若干大きな曲げモーメント分布を示す傾向が見られる。
- 4) 杭頭固定のNo.6では、杭頭部は良い一致を示すが、地中部は実験値より小さな分布値を示している。

5. おわりに

本論文では文献3)で示した、取り扱いに間違いの可能性が少なく、かつ比較的簡単に扱える杭基礎の水平抵抗に関する非線形解析法として、水平地盤反力 p ～水平変位量 y 関係を1次の双曲線関数で表した解析法を紹介した。そして、学会指針で示されている主にシルト質粘土層中に根入れされた場所打ちコンクリート杭の解析例を提案した解析法で解析し、比較検討を加えた。さらに、文献3)で示した現場水平載荷実験結果との比較検討を行

った内容を提示した。

しかし、解析対象とした水平載荷実験は、わずかに6件と稀少であり、特に水平地盤反力 p ～水平変位量 y 関係として適用した双曲線関数を決定付ける係数(a , b)と地盤定数との関係を求めるまでには至らなかった。この点について、今後さらに杭の現場水平載荷実験結果を収集し、解析結果との比較検討を加え、明らかにしていく予定である。

参考文献

- 1) 日本建築学会編：「建築基礎構造設計指針」,pp.262-296,2001.
- 2) 日本建築学会編：「建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計」,pp.183-186,2006.
- 3) 有木廣江, 富永晃司：「双曲線水平地盤反力モデルに基づく杭の水平抵抗に関する解析法」,日本建築学会中国支部研究報告集, 第30巻, pp.169-172, 2007
- 4) .日本建築学会編：「建築基礎構造設計指針」,pp. 464-468, 2001.
- 5) J.M.Duncan and C.Y.Chang : "Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils.", S.M., ASCE, pp. 1629-1653, 1970.
- 6) 日本建築学会編：「建築基礎構造設計指針」,pp. 113-116, 2001.
- 7) 大崎順彦：「建築基礎構造」,技報堂出版,p.399,1991.
- 8) 岸田英明, 中井正一：「地盤反力～変位関係の非線形性」,土と基礎, Vol.25, No.8, pp.21-28, 1977.
- 9) 建築業協会編：「杭の水平載荷試験結果に関する報告書」, 1979.
- 10) 土質工学会 (現：地盤工学会) 編：「杭基礎の設計法とその解説」,pp.448-450,1985.

(2007年6月29日 受付)

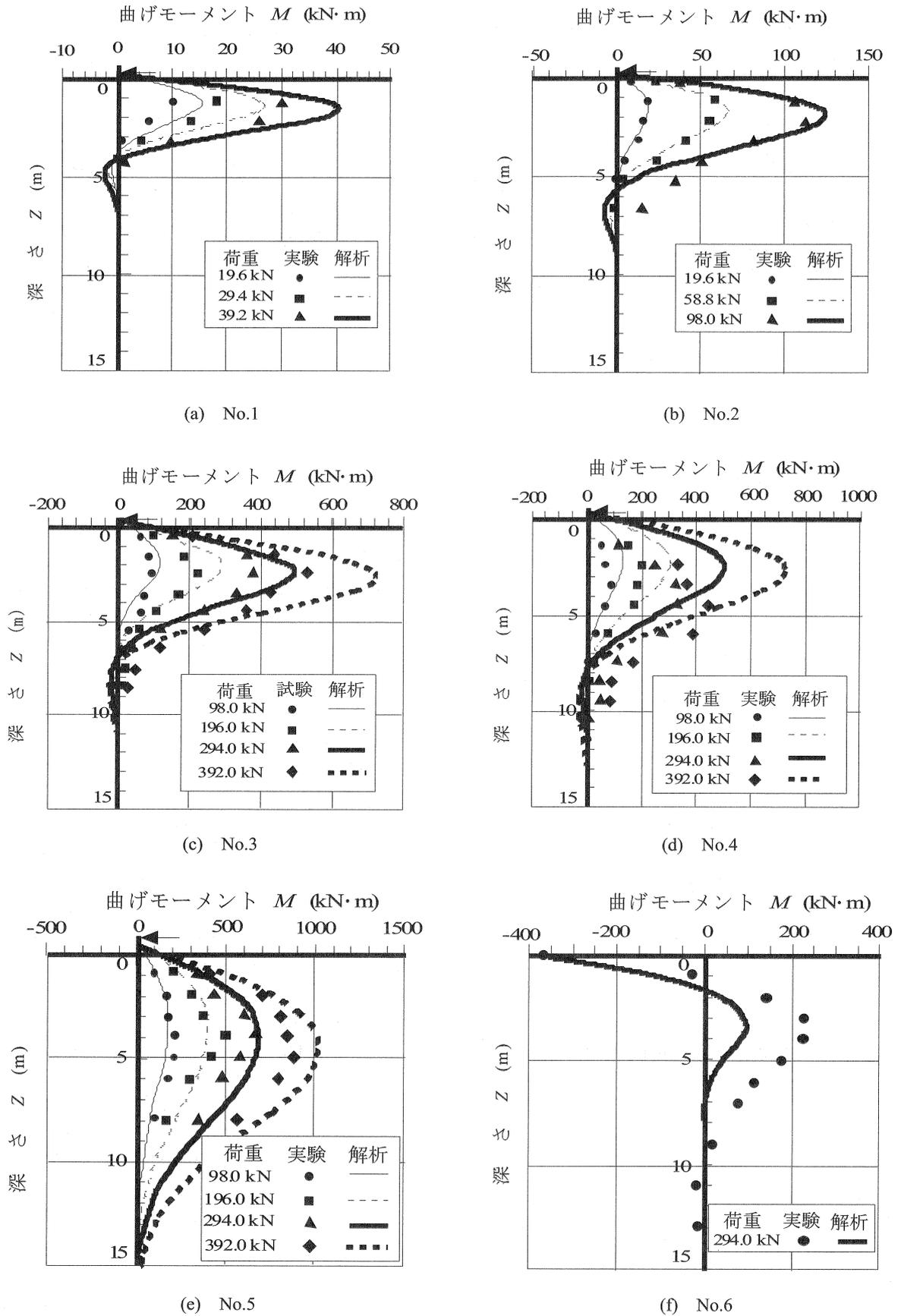


図-9 曲げモーメントの深さ方向分布比較