データベースに基づいた杭の使用限界状態照査に用いる鉛直バネ定数の推定

Estimation of vertical spring constant of piles used for serviceability limit state based on a pile loading tests database.

高木 克典*, Kieu Le Thuy Chung**, 本城 勇介***, 吉田 郁政**** Katsunori TAKAGI, Chung Thuy KIEU LE, Yusuke HONJO, Ikumasa YOSHIDA

*中日本高速道路株式会社(〒460-0003名古屋市中区錦2-18-19)
**岐阜大学学生、工学研究科生産開発システム専攻(〒501-1193岐阜県岐阜市柳戸1-1)
***岐阜大学教授,工学部社会基盤工学科(〒501-1193岐阜県岐阜市柳戸1-1)
****武蔵工業大学教授,工学部都市基盤工学科(〒158-8557東京都世田谷区玉堤1-28-1)

A statistical analysis on a database of pile loading test is carried out to obtain vertical spring constant for serviceability limit state design. A database of 133 vertical pile loading tests carried out in different locations in Japan is first screened for good quality tests including the ultimate load conditions. The load-displacement curves of the database after screening are then mathematically fitted to Weibull curves from which the vertical spring constant $K_{r0.33}$ is calculated $(K_{r0.33}$ is K_{v} at the ratio of load to ultimate load of 0.33). The best model for estimation of $K_{v0.33}$ based on the available soil and pile parameters that are regarded as significant explanatory variables is finally chosen with the uncertainties of the model.

Key Words: vertical spring constant, serviceability limit state キーワード: 鉛直バネ定数, 使用限界状態

1 序論

1.1 研究の背景と目的

限界状態設計法(信頼性設計法と言っても同義で ある)では、特に設計計算モデルの不確実性を定量 的に把握することが重要である.たとえば Paikowskyら(2002)¹⁾は、AASHTOの杭の設計法に関 する研究で打ち込み杭に関する非常に大きなデー タベースを基に研究を進めて、この点を明らかにし た.PT/LT2000と呼ばれるデータベースは、杭数で 389本、サイト数で210(ほとんどがアメリカ東部) のデータを含むものであり、これはすべて打ち込み 時の動的観測データと静的載荷試験結果を含んで いる.この結果を基に、杭打ち公式や動的観測に基 づく種々の支持力推定法を比較し、それぞれの精度 を詳細に検討している.わが国においては岡原ら (1991)²⁾の研究が知られている.

本研究では、土木研究所を中心に収集された杭の データベースを元に、使用限界状態に関するパラメ ータの推定を行う. このデータベースの1部には合計 133本の鉛直載荷杭に関するデータがある. そしてこのデータを用いて, 杭の鉛直バネ定数に関する 最適なモデルを検討していく. なお本研究は,現在米 国で進行中の AASHTO 基準の改定に関する研究の一 部をなすものであることを申し添える. (Paikowsky, 2006)³⁾

1.2 道路橋示方書による杭のバネ定数の求め方

道路橋示方書 $W(2002)^{4}$ によると、杭の軸方向バネ定数 K_{ν} は、杭頭によって単位量の杭軸方向の変位を生じさせる杭軸方向力として、定義される.この値は、杭基礎の弾性沈下量を推定するのに用いられるものである.

*K*_vは杭の鉛直載荷試験による杭頭荷重一杭頭沈下 量曲線から求めることが望ましいが,一般的な杭基 礎の設計にあたっては,支持力と同様,推定式によ って求められることが多い.

既往の載荷試験に基づく推定法は、多数の載荷試

験による実測 K,から式(1)の a を逆算し,施工法別 に根入れ比 L/Dとの関係で整理している.式(2)にそ の推定式を示す.

$$K_{v} = \alpha \frac{A E_{p}}{L} \tag{1}$$

ここに,

 K_{v} : 杭の軸方向バネ定数(kN/m) A_{p} : 杭の純断面積(mm^{2}) E_{p} : 杭のヤング係数(kN/mm^{2}) L: 杭長(m)

αは式(2)により算定する.

打込み杭(打撃工法) a=0.014 (L/D)+0.72打ち込み杭(バイブロハンマ工法) a=0.017 (L/D)-0.014場所打ち杭 a=0.031 (L/D)-0.15 (2) 中堀り杭 a=0.010 (L/D)+0.36プレボーリング杭 a=0.013 (L/D)+0.53鋼管ソイルセメント杭 a=0.040 (L/D)+0.15

本論文の最後に,今回の研究で推定した *K_{v0.33}*と, 道路橋示方書(2002)⁴⁾による *K_v*との比較を行っている.

2. 本研究の方法

2.1 研究の手順

研究の手順は、次の通りである.

- 杭の鉛直載荷試験に関するデータベースの中から、本研究で使用するデータについてスクリーニングを行う.データのスクリーニングで異常データの発見、原因調査、そして場合によっては削除を行う.データベースには、杭に関するさまざまなデータがあるが、本研究において必要な値としては、杭の荷重と対応する変位、そして杭の極限支持力が特に重要である.
- 2. 1 で選んだデータを用いて、荷重~変位量曲線 のモデルを推定する.用いるモデルとしてはワ イブル分布曲線、双曲線モデルの2つを用いた. 杭の支持形式、施工方法によってどちらのモデ ルが妥当なのか調べる.モデルの妥当性を調べ るためには、AIC(赤池情報量基準)⁵⁾を用いた.
- 3. 2で決めたモデルを用いて,載荷試験結果から杭

の使用限界状態における鉛直バネ定数を求める. 使用限界状態については極限支持力の3分の1 の荷重に対応するバネ定数を,使用限界状態に 対応するバネ定数とした. それは, 実際に頻繁 に作用する荷重は、安全率の関係上この程度で あると判断したためである.(実際は、極限荷重 の荷重の2分の1の場合も行っている.この結 果は紙面の関係上,結論のみ記す.)そして,こ の杭の鉛直バネ定数を各杭の特性値(周面およ び先端の土質, 杭種, 施工方法, 杭径, 杭長, 杭の剛性など)によって推定する式を,重回帰分 析により求めた.式に取り込む変数の選択は基 本的に AIC と地盤工学的考察によった、求めら れた杭のバネ定数は、その不確実性を含めて構 造物の使用限界状態の限界状態設計に用いるこ とができる.

2.2 データベースの概要

2.2.1 データの項目

本研究で用いるデータベースは土木研究所を中心 に収集されつつある杭の鉛直載荷試験に関してのデ ータである.このデータベースは,現時点で支持杭に 関して 116 本,摩擦杭に関しては 17 本,合計 133 本の杭のデータがある.データベースの内容は次の 通りである.

- a) 一般項目
 資料番号,試験場所,対象構造物,試験杭施工日,
 試験日,試験目的
- b) 試験杭仕様 支持形式,杭種,施工法,杭外径,杭長,突出長, 杭頭レベル,換算断面積,断面二次モーメント, 弾性係数,Fカットの有無
- c) 試験仕様
 載荷方向,載荷方法,試験種類,試験名称,載荷方式,載荷点高さ,単・組杭種別,杭頭拘束条件, 載荷装置,サイクル数,測定項目
- d) 試験結果(押込み杭)
 第一限界抵抗力,第二限界抵抗力,荷重,変位
 量,ひずみ,N値,判定理由

2.2.2 極限支持力の決定

荷重~沈下曲線モデルから極限支持力の決定を行う.極限支持力の決定方法としては,地盤工学会基準「杭の鉛直載荷試験方法・同解説-第1回改訂版-」 (2002)⁶⁾を参考にした.地盤工学基準には極限支持力は第2限界抵抗力,そして降伏荷重を第1限界抵 抗力と記している. 第2限界抵抗力は地盤工学会旧 基準では「杭先端直径の10%相当の杭先端沈下量が 生じたときの荷重と杭頭の荷重~沈下量曲線が沈 下量軸にほぼ平行とみなされる荷重のうち、小さい ほうとする.」と定義している.現在の基準では先 端直径の 10%相当の先端変位量に至るまでに最大 荷重が現れた場合は、その荷重を極限支持力とする ように変更している. すなわち, 押込み試験の杭頭 荷重~先端変位量曲線では,図-1のA曲線の挙動が 一般的であり、B曲線の挙動を示した場合の取り扱 いについてはこれまであまり議論されてこなかっ た. 旧基準によれば、B曲線の場合の第2限界抵抗 力は Panとなる.しかし、杭の支持力が極限状態に 達した荷重は図中の Pmax であり、これを第2限界抵 抗力とする方が妥当である.よって,現在の基準に おいてはA曲線だけでなくB曲線のような荷重~変 位量曲線も考慮して前述のような定義に変更して いる.



図-1 押込み試験の杭頭荷重~先端変位量曲線

なお、判定に用いる荷重~先端変位量曲線は、段 階載荷方式であれば、各新規荷重段階での最終値を 結ぶものとし、連続載荷方式においては新規荷重の 包絡線とする.

第2限界抵抗力の判定において,先端変位量を測 定していない場合には,先端変位量の代わりに杭頭 変位量を用いてもよい.ただし,杭頭変位量は先端 変位量より杭体の圧縮変形量だけ大きいことから, 杭頭変位量で判定すると,先端変位量で判定した第 2限界抵抗力より小さくなることに注意を要す.

また、日本建築学会が杭径の10%の変位量に対応 する荷重を、打込み杭では極限荷重、場所打ち杭で は基準支持力とした.鉄道関係においては杭頭の変 位量が杭径の10%のときの荷重を基準支持力と呼 び、道路橋示方書では荷重~変位量曲線が変位量軸 にほぼ平行とみなしうるときの荷重、あるいは、こ のときの変位量が杭径の10%を超える場合には、杭 径の10%のときの荷重を極限支持力としている. (地盤工学会(2002))⁶⁾.

本研究において第2限界抵抗力を道路橋示方書に 従い極限支持力と呼ぶこととする.

2.3 各杭の荷重~変位量曲線パラメータの推定

杭の載荷試験の荷重~変位関係から荷重~変位の モデル曲線を検討する.モデル曲線としては以下の 2つの曲線を用いる.

2.3.1 ワイブル分布曲線

土木研究所の岡原ら(1991)²⁾によれば、杭の支持 機構は施工法(打込み、場所打ち、埋め込み)や支持 形式(支持、摩擦)によって異なり、それは杭頭荷重 R-変位量 S曲線に反映されると考えることができる. しかし、R-S曲線は杭の諸元、すなわち杭径・杭長・ 地盤の土質等によって異なるため、施工法や支持形 式の R-S曲線に及ぼす影響は何らかの形で曲線を正 規化しなければならない. ここでは、荷重 Rを極限 支持力 R_u 、また、変位量 Sは杭径 Dで除して正規化 た $R/R_u \sim S/D$ 曲線で比較する.

ワイブル分布曲線式は式(3)で表される.

$$\frac{R}{R_{u}} = 1 - \exp\left\{-\left[\frac{S/D}{S_{Y}/D}\right]^{m}\right\}$$
(3)

ここに、R:杭頭荷重、R_u:極限支持力 S:杭頭沈下量、S_y:降伏沈下量

D:杭径, m:変位指数

降伏沈下量 S_y とは、降伏支持力 R_y 時の杭頭沈下量 をいい、 R_y はワイブル分布曲線式では常に $R_y=0.63 R_u$ の関係にある.また変位指数 mは、 $R/R_u \sim S/D$ 曲線の 曲がり具合(図-2)を表す.



図-2 ワイブル分布曲線

ワイブル分布曲線では降伏沈下量 S_wと変位指数 m をパラメータとして非線形回帰分析を行う.極限支 持力は荷重~変位量より、地盤工学会(2002)⁶⁾基準 の極限支持力の判定により求められたものを用い る.

2.3.2 双曲線モデル

双曲線は式(4)によって表すことができる.

$$\frac{R}{R_u} = \frac{\left(\frac{S}{D}\right)}{\left(b + a \times \frac{S}{D}\right)} \tag{4}$$

ここに, R: 杭頭荷重, R: 極限支持力

S:杭頭沈下量, D:杭径,

a, b:パラメータ

ここで,式を簡単にするために, R/R_u=x, S/D=yとお くと、式(5)となる.

$$y = \frac{x}{(b+ax)} \tag{5}$$

パラメータ a, bについて, aの逆数は x が無限大に なったときの yの漸近線 ymax, bの逆数は初期接線勾 配の逆数である(図-3).



式(5)を変形すると,

v

$$\frac{x}{y} = b + ax$$

(6)

のようになり, x と x/y は直線関係にある.以上で 示した双曲線モデルを線形最小2乗法によりデー タにあてはめることができる.

2.4 杭のバネ定数の推定

2.4.1 重回帰分析による杭のバネ定数の推定

今回の研究の最終的な目標は,杭の使用限界状態 における鉛直バネ定数を推定する式の選択である. 杭の使用限界状態とは,基礎構造の変位・傾斜が原 因で、上部構造物に対して変形、変位、振動、外観 などの観点から使用上の要求を満足できなくなる

限界の状態のことをいう ⁷⁾. 一般に使用限界状態に 達する確率は,終局状態に達する確率に比べて非常 に高いので,バネ定数の評価も,比較的頻繁に作用す る荷重を考える必要がある.この研究では,極限支持 力 R₁の 1/3 程度の荷重が作用した場合の構造物の状 態により,使用限界状態について検討するものとし た.

杭のバネ定数の推定は, 杭や周辺地盤に関する情 報(説明変数)より,重回帰分析を行って推定する. これらの説明変数は次の通りである.

- (a) 周面 N 値(杭長にわたっての平均値. ただし総杭 長は,杭の埋め込み長と同じとした.また,建築 基礎構造物設計指針⁷⁾より換算N値の上限は100 とする)
- (b) 先端 N 値(杭の根入れ先端部分の N 値. 先端付近 で得られたデータを代表値とした.ただし周面 N 値と同様に換算 N 値の上限は 100 とする)
- (c)支持形式(支持杭,摩擦杭)
- (d) 杭種(鋼管杭, PC · PHC 杭, RC 杭, SC 杭, H 鋼杭, 場所打ち杭)
- (e)施工方法(打込み、中堀り、プレボーリング、ベ ノト, リバース)
- (f) 杭長 (m) L
- (g)杭径(m) D
- (h) 杭体の弾性係数 (MN/m²) E
- (i)細長比(杭長/杭径) L/D
- (j)杭断面積(m)A
- (k)周面土質(粗粒土,細粒土,混合:なお,周面土 質の分類については杭の土質周面に対して,土質 名称が C(粘土), M(シルト), O(有機質土), Pt(高 有機質土), V(火山灰質粘性土)が, 全体の層厚の 70%以上のときは細粒土, G(礫), GF(細粒分混じり 砂), GS(砂礫), S(砂), SF(細粒分混じり砂), SG(礫 室砂)が70%のときは粗粒土とする.R(石)がある ときは分類が分からないので、R(石)の部分は全 体の層厚から省いて算出した.なお,埋め込み長 まで土質が分類されていないときは分類不明と した)

(1) 弹性係数×杭断面積 EA(MN)

(m) 弹性係数×杭断面積/杭長 EA/L(MN/m)

以上の説明変数を使ってモデルの推定を行う. 回帰 モデルの式としては,被説明変数をもっとよく説明 できる説明変数の組み合わせを,AIC と地盤工学的 な考察により選択した.

被説明変数については,推定したワイブル曲線に おいて, 原点と R/R_{μ} (=0.33) についての傾き $K_{\mu 0.33}$ を求める(図-4).そして、この値は無次元なので、 道路橋示方書のバネ定数(単位 KN/m)と比較する場 合は, 求められた傾きに R_{μ}/D を乗じて $K_{\mu \eta 33}$ とする

(式(7)). この値を被説明変数とする.

$$K_{\nu 0.33} = K_{\nu 0.33} \times \frac{R_u}{D}$$
(7)





図-4 ワイブル分布曲線によるバネ定数の検討

2.4.2 分散不均一性の除去

回帰分析を行った際,分散の不均一性が現れる場合がある⁸⁾. 今,線形モデル

$$y_i = \alpha + \beta x_i + u_i \tag{8}$$

を考えて誤差分散不均一性の検出を行うとする.ま ず,残差 e_iをプロットしてみて,残差を包む帯が x の増加とともに発散する(幅が広くなる)ならば,誤 差分散は,xとともに増大する(図-5).



図-5 不均一な分散を持つ残差

反対に,帯が収縮する(幅が狭くなる)ならば, 誤差 分散はxとともに減少する.残差のプロットを含む 帯が2本の平行線で挟まれるならば,分散は均一で ある.このように,説明変数に対して標準化誤差を プロットすることにより,分散の不均一性を調べる ことができる. 分散不均一性が確認された場合不均一性の除去を 行う必要がある.分散の不均一性が現れる場合,た いていは説明変数の増加とともに残差の標準偏差も 増加する傾向にある.この性質を考慮して,残差の 標準偏差がxに比例すると想定する.すなわち,

$$Var(u_i) = k^2 x_i^2, \qquad k > 0$$
 (9)

と仮定する. 式(8)の両辺を x_iで割り,

$$\frac{y_i}{x_i} = \frac{\alpha}{x_i} + \beta + \frac{u_i}{x_i} \tag{10}$$

というモデルを考え,変数と係数を次のように定義 しなおす.

$$y' = \frac{y}{x}, x' = \frac{1}{x}, \alpha' = \beta, \beta' = \alpha; u' = \frac{u}{x}$$
 (11)

これらの新しい変数を用いて、式(10)を

$$y_i' = \alpha' + \beta' x_i' + u_i' \tag{12}$$

ただし、変換されたモデルにおいては、 u_i の分散 は一定であり、 k^2 に等しいということに注意する. もし、誤差項について仮定(9)が成り立つならば、モ デルをうまくあてはめるためには、y/xを被説明変 数とし、1/xを説明変数とするのが望ましい.この とき変換された変数に関するモデルが、

$$\frac{y}{x} = a' + \frac{b'}{x} \tag{13}$$

と表せるならば、変換前の変数に関する式は、

$$y = b' + a'x \tag{14}$$

と表せる. すなわち,変換されたもとの定数項は, もとのモデルのxの回帰係数であり,その逆のこと もいえる.

このような変換を行うことによって分散不均一の 除去を行うことができる.

3. 解析結果と考察

3.1 荷重~変位量曲線の同定

非線形回帰分析を行うにあたって、杭のデータベ ースの中から使用できるデータを選択した.選択の 基準は、杭の極限支持力が得られているかと言うこ とが第一の条件であった.すなわち、荷重~変位量曲 線で極限支持力が明解な範囲まで載荷されている試 験結果を選んだ.その結果 63 本の杭について解析を 行っていくこととする.

3.1.1 ワイブル分布曲線と双曲線モデルの非線形包掃分析結果

杭のバネ定数の推定を行うには、まず荷重~変位 量曲線のモデルを決定しなければならない. そのた めに、まずデータベースの値を用いてワイブル分布 曲線、双曲線モデルのパラメータの推定を行った.

表-1,表-2は2つのモデル曲線について非線形回 帰分析を行った結果である.この2つの表からわか ることは、中掘り杭のコンクリート杭についてのワ イブル分布曲線における *S_y/Dと、双曲線のbの*変動 係数の値が *100%を超えていることから、このデータ* の中に、飛びぬけて他と異なる試験結果があると推 測される.解析結果を見ると、1つの解析結果が他に 比べて大きく異なった値を示していた.この杭に関 する解析結果を除いた変動係数の結果を表-3 に示 す.この表を見ると *S_y/D、bと*もに変動係数の値が 減少している.よって、この異常値と思われる杭の 解析結果は除いて、このあとに続く解析を行ってい く.

表-1	ワイブル分布曲線モデルの工法別の推定結果

支持形式	施工法	杭種		データ数	平均值	標準偏差	変動係数
		细笛	Sy/D	11	0.025	0.019	0.742
	けいみだ	」 「」	m		1.023	0.196	0.191
	11 20741		Sy/D	4	0.033	0.028	0.869
		コンシット	m	4	1.384	0.260	0.188
	場所打ち枯		Sy/D	6	0.015	0.013	0.876
支持精	·あり151 つわ		m	0	0.744	0.150	0.202
又可加		细告	Sy/D	22	0.054	0.048	0.897
	市場坊	邺門 日	m	~~~	0.890	0.203	0.228
	中地们	<u> コンクリート</u>	Sy/D	11	0.059	0.079	1.342
		コンシウード	m		0.945	0.216	0.228
	プレボー		Sy/D	3	0.039	0.007	0.180
	リング		m	3	0.994	0.066	0.066
		细笛	Sy/D	4	0.041	0.021	0.522
	けいみだ	当正	m	4	1.110	0.260	0.234
麻密坊	麻密は		Sy/D	4	0.020	0.014	0.704
岸垸们		コンプリード	m	+	1.012	0.145	0.144
	提訴打ち持		Sy/D	2	0.006	0.004	0.573
	ולאכין דות השי		m	2	0.904	0.305	0.338

表-2 双曲線モデルの工法別の推定結果

支持形式	施工法	杭種		データ数	平均值	標準偏差	変動係数
		名音	а	11	0.837	0.370	0.442
	オエンス エリオカ	到'官	b		0.018	0.008	0.447
	1120711		а	4	0.367	0.253	0.690
		コンシット	b	4	0.045	0.043	0.944
	提びなたな		а	6	0.929	0.137	0.147
ᇂ볁뷶	物が打りつれ		b	0	0.009	0.007	0.792
又行机		细笛	а	22	0.799	0.183	0.229
	市場技	当正	b	22	0.039	0.034	0.865
	中堀机		а	11	0.803	0.275	0.343
		コンシシート	b		0.051	0.081	1.580
	プレボーリ		а	3	0.745	0.028	0.037
	ング	1200-1	b	3	0.034	0.007	0.212
		细笛	а	4	0.621	0.291	0.469
	+++++	当正	b	4	0.043	0.028	0.642
麻椒坊	ゴンの机		а	4	0.712	0.161	0.226
痔 疠机		コンシリート	b	4	0.016	0.011	0.684
	提びなたな		а	2	0.552	0.379	0.686
	物7/15/15/11		b	2	0.005	0.001	0.196

表-3 異常値を除いた結果

				データ数	平均値	標準偏差	変動係数
			Sy/D	10	0.035	0.027	0.760
	支持杭中堀杭コン		m	0.936	0.225	0.240	
支持杭		コンクリート		データ数	平均値	標準偏差	変動係数
			а	10	0.821	0.282	0.344
		b	10	0.026	0.023	0.857	

3.1.2 AICによる荷重~変位量曲線のモデル式の選択

荷重~変位量曲線モデルの推定のためにワイブル 分布曲線,双曲線モデルについてAICを用いてモデ ル式評価を行った.表 4a~4f にその結果を示し た.AIC が小さいほど,モデルは妥当なモデルといえ る.なお,ID番号とは杭体個々の載荷試験の認識番 号であり,杭種はコンクリートと鋼管の2つに分類 して,結果を載せた.コンクリート杭はPC・PHC杭, RC杭,SC杭,鋼管は鋼管杭,H鋼杭とした.なお, SC 杭は外殻鋼管つきコンクリートのことで鋼管と コンクリートどちらにも属すると考えられるが,今 回は弾性係数の大きさを目安としてコンクリートに 分類した.

表-4a 支持杭,場所打ち杭の結果

ID番号	支持形式	杭種	施工方法	AIC(ワイブル)	AIC(双曲線)
5108		場所打ち杭	ベノト	-105.5	-112.7
5110		場所打ち杭	ベノト	-62.4	-57.5
5112	놓다	場所打ち杭	ベノト	-197.5	-160.9
5113	又行机	場所打ち杭	リバース	-174.2	-206.6
5114		場所打ち杭	リバース	-133.6	-112.0
5109		場所打ち杭	ベノト	-75.6	-69.1
小さい値の数				4	2

表-4b 摩擦杭,場所打ち杭の結果

ID番号	支持形式	杭種	施工方法	AIC(ワイブル)	AIC(双曲線)
5128	摩擦杭	場所打ち杭	ベノト	-44.1	-42.1
小さい値の数		物川打られ		-69.8	1

表-4c 支持杭,打込み杭の結果

ID番号	支持形式	杭種	施工方法	AIC(ワイブル)	AIC(双曲線)
		コンクリート			
5076		PC·PHC杭		-55.9	-84.8
5078	ᆂᅝᅓ	PC·PHC杭	tT23 Z	-19.1	-41.1
5075	又行机	PC・PHC杭	11 2007	-48.0	-47.0
5077		PC・PHC杭		-62.7	-88.5
小さい値の数				1	3
		鋼管			
5003		鋼管杭		-58.6	-67.4
5005		鋼管杭		-152.8	-200.9
5006		鋼管杭		-60.7	-55.6
5011		鋼管杭		-120.1	-158.8
5015		鋼管杭		-53.7	-78.2
5016	支持杭	鋼管杭	打込み	-103.2	-107.5
5017		鋼管杭		-64.1	-48.7
5018		鋼管杭		-106.5	-92.2
5023		鋼管杭		-71.9	-83.6
5024		H鋼杭		-45.5	-59.0
5010		鋼管杭		-99.6	-93.8
小さい値の数				4	7

表-4d 摩擦杭,打込み杭の結果

ID番号	支持形式	杭種	施工方法	AIC(ワイブル)	AIC(双曲線)
		コンクリート			
5125		RC杭		-25.9	-39.1
5122	麻瘿拮	PC・PHC杭	tT23 Z	-93.4	-86.7
5123	序尔机	PC・PHC杭	11207	-87.5	-80.4
5126		RC杭		-114.5	-105.3
小さい値の数				3	1
		鋼管			
5118		鋼管杭		-45.5	-81.5
5119	麻瘿拮	鋼管杭	tT23 Z	-24.7	-42.9
5132	序尔机	H形鋼	11207	-119.6	-118.8
5133		H形鋼		-113.5	-106.5
小さい値の数				2	2

表-4e	支持杭.	中堀り	杭の結果
~ ~~	~~~~~	1 / 14 /	

ID番号	支持形式	杭種	施工方法	AIC(ワイブル)	AIC(双曲線)
		コンクリート			
5089		PC·PHC杭		-44.4	-35.7
5090		PC・PHC杭		-70.2	-68.4
5092		PC·PHC杭		-59.1	-49.1
5094		PC·PHC杭		-19.2	-20.3
5095		PC·PHC杭		-108.6	-149.0
5081	支持杭	PC·PHC杭	中掘り	-97.1	-99.7
5087		PC·PHC杭		-97.4	-98.2
5096		PC・PHC杭		-90.3	-89.8
5105		SC杭		-144.2	-141.3
5080		PC・PHC杭		-126.1	-114.7
5085		PC・PHC杭		-86.8	-61.2
小さい値の数				7	4
		鋼管			
5045		鋼管杭		-300.4	-223.3
5047		鋼管杭		-113.9	-113.7
5046		鋼管杭		-86.6	-74.2
5048		鋼管杭		-101.8	-104.4
5049		鋼管杭		-101.3	-95.6
5050		鋼管杭		-99.6	-116.4
5051		鋼管杭		-86.5	-108.9
5053		鋼管杭		-69.4	-80.7
5054		鋼管杭		-113.16	-113.15
5055		鋼管杭		-123.0	-100.4
5056	호분坊	鋼管杭	市場に	-105.3	-126.8
5057	又可加	鋼管杭	モヨロク	-78.7	-71.3
5068		鋼管杭		-68.3	-83.3
5033		鋼管杭		-47.3	-66.4
5042		鋼管杭		-147.0	-149.2
5043		鋼管杭		-75.7	-82.5
5044		鋼管杭		-108.4	-79.1
5060		鋼管杭		-136.9	-116.0
5061		鋼管杭		-73.0	-71.4
5062		鋼管杭		-82.6	-89.1
5065		鋼管杭		-60.0	-64.0
5070		鋼管杭		-126.9	-109.0
小さい値の数				11	11

表-4f 支持杭,プレボーリングの結果

ID番号	支持形式	杭種	施工方法	AIC(ワイブル)	AIC(双曲線)		
コンクリート							
5101		PC・PHC杭		-74.3	-68.7		
5106	支持杭	SC杭	プレボーリング	-101.8	-81.2		
5107		SC杭		-129.0	-128.3		
小さい値の数				3	0		

AIC の結果を見てみると,ほとんどの場合,小さい 値(表中に太字で表示)の数がワイブル分布曲線モ デル,双曲線モデルどちらも同じくらいの数になっ ている.

表-5 AIC 結果の合計

	AIC(ワイブル)	AIC(双曲線)
合計	-6184.1	-6285.7

支持形式,施工方法別に AIC 結果を見るのではな く,AIC の合計に意味があると考えられる.AIC の合 計(表-5)を見てみると,双曲線の方が AIC は小さい 結果となった.ただし,この結果は 63 本の杭全体の 結果であり,1 本あたりについて考えると,それほど 違いはないと考えられる. つまり両者にはほとん どデータへの当てはまりに置ける差は無いと言え る.従って両者からそれぞれ割線勾配を求めてバネ 定数を算定してもほとんど差は無いと考えられる.

今回の研究では,主に杭の降伏荷重の決定が容易 であることと,最近の道路関係のデータはほとんど ワイブル曲線で整理されていることを考慮し,土木 研究所の岡原ら(1991)²⁾の研究にも用いられている ワイブル分布曲線を荷重~変位量曲線モデルとする.

3.2 杭のバネ定数の推定式の提案

杭のバネ定数の推定式の決定には,重回帰分析を 用いた.定性的な説明変数(支持形式,杭種,支持形 式,周面土質)は,観測データがそのカテゴリーに属 するかどうかで0または1の値で表した⁶⁾.例えば 支持形式では,支持杭は1,摩擦杭は0というように 分けた.

最良の推定式の決定には、AICを用いる. 被説明変数 $K_{v0.33}$ に説明変数を1つずつ増やしていき、AICの値が一番小さくなったときのモデルを、最良の推定式とした.

AIC を指標として, 説明変数の選択を行ってゆく と, 場所打ち杭の $K_{va,33}$ が他の杭と著しく異なってい ることがわかった(図-6). $K_{va,33}$ のモデル式の精度を 上げるために, 場所打ち杭のデータ 7 本を別途解析 することとし, 残りの 56 本について解析した(本論 文ではこの場所打ち杭の結果は示していない).



図-6 K_{0.33}(MV/m)の杭種別による標準偏差の比較

3.2.1 推定結果と残差プロット

場所打ち杭を除く56本の杭のデータを使って、まず2.4.1で記 されている13の項目について種々の重回帰分析モデルを 作成し、AICを用いて最適なモデルを探した.結果的

表-6 重回帰分析の結果検討したモデル

モデル番号	説明変数	R^2	AIC
1	<i>周面土質,EA,杭長,杭径</i>	0.5017	484.7
2	<i>周面土質,EA/L</i>	0.3303	495.2
3	周面土質,EA,杭長	0.4755	485.2

に表-6に示す3つのモデルに絞り込んだ.

AIC が最小という点では,表-1 のモデル 1 が最適 となる.しかし,物理的意味を考え,より最適なモデ ルを検討した.モデル2は EA/L が剛体上に立てられ た杭のバネ定数であるという意味で,もっとも物理 的な意味が明確なモデルである.しかし,決定係数 R,AIC どちらもモデル1や3よりかなり劣る.モデル 1 は EA の中に杭径の情報を含み,これらの2項間(EA と杭径)に重共線性の発生する可能性があり,また 杭長,杭径と EA の三つの項を含むことの物理的な 解釈も難しい.よって,モデル 3 を妥当なモデルと 考えた.この式は,バネ定数は,EA が増加するほど 大きく,また杭長が長いと小さくなることを示し, これは上記のバネ定数は杭が空中で剛体上に立て られた場合には EA/L に一致するするという事実と 整合している.このとき得られた式を(15)に示す.

$K_{v0.33}(MN/m) = 182.3 + 9.7 \times$ 粗粒土 + 107.9 × 細粒土 + 0.04 × EA(MN) - 4.9 × 杭長(m) (15)

このモデルにおいて残差プロットを行った結果、残 差の分散の不均一性が確認された(図-7).分散 は, *K_{va.33}*の推定値が大きくなるほど増加しており, 先に述べた分散不均一な場合に一致する⁸⁾.



図-7 K_{0.33}(MV/m)の推定モデルについての残差プロット

分散不均一の除去には、このモデルの中で支配的 な説明変数である EA で式の両辺を除して再度回帰 分析を行う.

バネ定数推定モデルを,

$$K_{\nu}(MN/m) = a_0 + a_1 \times 粗粒 \pm + a_2 \times 細粒 \pm + a_3 \times EA - a_4 \times 杭長$$
(16)

とする. 両辺を EA で除すると,

$$\frac{K_{\nu}}{EA} (1/m) = \frac{1}{EA} a_0 + \frac{\underline{\mathbb{H}}\underline{\mathbb{H}}\underline{\mathbb{H}}}{EA} a_1 + \frac{\underline{\mathbb{H}}\underline{\mathbb{H}}\underline{\mathbb{H}}}{EA} a_2 + a_3 + \frac{\underline{\overline{\mathbb{H}}}\underline{\mathbb{H}}}{EA} a_4$$
(17)

そして,式(17)について重回帰分析をする.重回帰 分析の結果,得られる *I/EA*の係数が a_o <u>粗粒土/EA</u>の 係数が a_i , *細粒土/EA*の係数が a_o 切片は a_o *杭長/EA* の係数が a_4 となる.この結果の残差プロットを,図 -8 に示した.これを見ると,分散は均一になったと 見ることができる.よってこのモデルを妥当なモデ ル式とする(式(18)).

(18)



図-8 K_{vo.33}/EA (1/m)の推定モデルについての 残差プロット

3.2.2 杭のバネ定数推定式の考察

式(18)について道路橋示方書のバネ定数 K_vと比較 してみた.比較した結果,モデル式の K_{v0.33}と道路橋 示方書の K_vとの誤差の平均は 92.7 (MV/m),変動係数 は 0.801 となった(図-9).



図-9 推定した K_{v0.33} (MV/m)の値と道路橋示方書を
 もとに出した K_v (MV/m)との誤差のヒストグラム

モデル式の K_{v0.33}(MN/m)と道路橋示方書のバネ定

数の関係において,モデル式の $K_{ra,33}$ は道路橋示方書 よりも,全体的に大きいという結果が出た(図-10). バネ定数が大きいということは,ある荷重に対して 計算される変位量が小さいということを表してい る.つまり,設計に際し,道路橋示方書はモデル式 の $K_{ra,33}$ よりも安全側の値を与えると考えられる.な お変動係数は今回,

$$c.o.v = \frac{\sigma_{Kv}}{K_{v}}$$

ただし、の₁₆:残差の標準偏差 K: :推定式により求めた値

として、個々の杭について変動係数を求め,その平 均を全体の変動係数とした.





また,モデル式の *K_{v0.33}*と,載荷試験結果より求めた *K_{v0.33}*との比較を図-11 に示した.



図-11 モデル式による K_{v0.33}と 載荷試験結果より求めた K_{v0.33}との比較

さらに,表-7にEAを考慮する前とした後の残差の 変動係数を示す.この表を見ると,EA を考慮したほ うが,変動係数が小さくなっていることがわかる.

表-7 残差の変動係数の比較

	変動係数
実測K _{v0.33} とEAを考慮する前の式 (15)による推定K _{v0.33} の残差	0.62
実測K _{v0.33} とEAを考慮した式(18)に よる推定K _{v0.33} の残差	0.57

4. 結論

本研究で,推定された杭の鉛直バネ定数は, *K_{v0.33}*は,

$k_{\nu 0.33}(MN/m) = 225.6 + 15.9 \times$ 粗粒土 + 81.2×細粒土 + 0.0357 × $EA(MN) - 5.24 \times$ 杭長(m)

と, 推定された.

また,極限支持力 R_uの 1/3 を使用限界状態として 求めた K_{v0.33}と同様に,極限支持力の 2 分の 1 を使用 限界状態と考えたバネ定数 K_{v0.5}の推定も行った.そ の結果,

$$K_{v0.5}(MN/m) = 204.9 + 6.19 \times$$
 粗粒土+46.9×細粒土
+0.0319×EA(MN)-4.94×杭長(m)

と推定された.

ただし,重回帰分析を行う際,場所打ち杭について 推定された K_{ra.33}は,他の杭種の標準偏差より大きか ったため,推定式の精度を上げるために除いて解析 を行った.最終的に,解析に用いた鉛直杭のデータ は,56本のデータを用いた.

推定されたバネ定数 $K_{vo.33}$ は,図-10を見ると,道路橋示方書よりも全体的に大きめの値をとっている. つまり,道路橋示方書は安全性に余裕をもって設定してあると考えられる.

なお本研究は,使用可能であった 56 本の載荷試験 から統計的に求められたものであるから,その結果 の利用に当たっては,そのデータでカバーされてい る適用範囲を十分に考慮して適用すべきであること を申し添える.

参考文献

- Paikowsky, S. G. et al. : Load and resistance factor design for deep foundations : final report, NCHRP 24-17, 2002.
- 2) 岡原 美知夫,高木 章次,中谷 昌一,木村 嘉富: 土木研究所資料 単杭の支持力と柱状体基礎の 設計法に関する研究,pp. 23-31, 1991 年
- Paikowsky, S. G., and Lu, Y. : Establishing Serviceability Limit State in the Design of Bridge Foundations:Foundation Analysis and

Design, Geotechnical Special Publication No. 153, ASCE, pp. 49-58, 2006

- 日本道路協会:道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造 編, pp. 373-374, 2002 年
- 5) 鈴木義一朗:情報量基準による統計解析入門, 講談社,1996
- 6) 地盤工学会:地盤工学会基準 杭の鉛直載荷試 験方法・同解説-第一回改訂版, pp. 19-47, 2002
 年
- 7) 日本建築学会:建築基礎構造設計指針,2002年
- 8) S. チャタジー・B プライス 佐和隆光・加納悟 訳:回帰分析の実際, pp. 21-57, 79-111, 1990 年
- 5) 坂元慶行・石黒真木夫・北川源四郎:情報量統 計学,共立出版,1983年

(2006年9月8日受付)