

III-B27

杭の水平支持力設計法に関する信頼性解析とコード・キャリブレーション

岐阜大学大学院
岐阜大学

学生会員
正会員

伊庭 英樹
本城 勇介

1 はじめに

本研究では、「確率に基づいた限界状態設計法」による設計基準の開発のため、現行の設計基準で設計された杭の水平支持力に関する部分について信頼性を解析し、この設計法がどの程度の信頼性を持っているのかを把握する。そしてこの結果を基に限界状態設計法のレベルⅠへのコードキャリブレーションを行うときの、部分係数のとり方について考察を加えることを目的としている。特に部分係数の決定で、荷重側と抵抗側の係数の大きさをどのように配分するかということは大きな問題であり、この点に興味がある

2 研究方法

2.1 手順

- 1) 杭の水平抵抗力を評価する標準的な手法である林-Changモデルのプログラムを作成する。そして杭の水平支持力の設計をいくつかの典型的なケースについて、現行設計基準に基づき試設計する。
- 2) 杭の水平抵抗力を評価する上で最も重要な設計パラメータである水平方向地盤反力ばねの不確実性を評価する。建設省土木研究所（1993）の資料にこの詳しい分析があり、本研究ではこれを用いる。
- 3) 水平力を発生させる主な原因である地震外力の不確実性評価には、壇と神田（1996）が提案した上下限値を有する極値分布を用いる。
- 4) その後HasoferとLindが定義した信頼性指標 β を、現行の設計法で設計された杭の水平支持力について1次近似信頼性解析により求める。
- 5) 総合的な考察を行う。

2.2 信頼性解析

基本変数 $\bar{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ を正規化し $\bar{Z} = (Z_1, Z_2, \dots, Z_n)$ とする。限界状態破損面 $g(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$ は標準正規空間 $f(z_1, z_2, \dots, z_n) = 0$ に写像される。 Z 空間において、破損面と原点間の最短距離 β （HasoferとLindの安全性指標 β ）は、

$$\beta = \min_{Z \in \text{Cao}} \left(\sum_{i=1}^n Z_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{図-1参照}) \quad (2.2.1)$$

と表される。

設計点（原点に最も近い破損面上の点）は $(\beta\alpha_1, \beta\alpha_2, \dots, \beta\alpha_n)$ の座標を持ち、 α_i （感度係数）は、

$$\alpha_i = - \left\{ \sum_{k=1}^n \frac{\partial f}{\partial z_k} (\beta\bar{\alpha})^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \frac{\partial f}{\partial z_i} (\beta\bar{\alpha})$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n$$

ただし、 $f(z_1^*, \dots, z_n^*) = 0$, $\bar{z}^* = \beta\bar{\alpha}$

2.3 信頼性解析における基本変数

2.2で示したHasoferとLindの安全性指標 β を求める基本変数を表-1に示す。

表-1

項目	記号	平均	変動係数	分布形
限界降伏歪み (1)	S_y/D (%)	鋼管杭 4.1 PC杭 3.6 PHC杭 3.8	10.5 7.8 7.6	対数正規分布
地盤の増幅率 (2)	$10\pi/\sqrt{f_0}$	47.4	0.3	対数正規分布
基盤最大速度 (3)	v_{sat}	東京 5.13	0.52	上下限値を有する極値分布 $U=1.37$ $w=53.69$ $r=15.0$
k_H の不確実性 (4)	k_{sat}	1.584	0.96	対数正規分布

- (1) 土研（1993）表（p104）による
- (2) 壇・神田（1986）が金井ら（1966）に基づき、東京地区で試算した値
- (3) 壇・神田（1986）地震の統計解析による。
- (4) 土研（1993）の図5.13（p110）による。

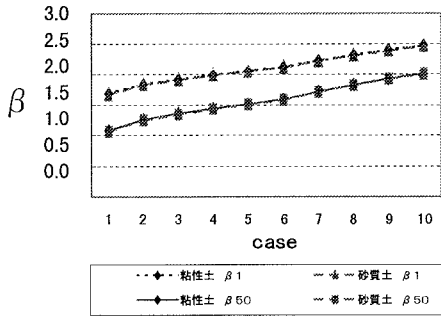
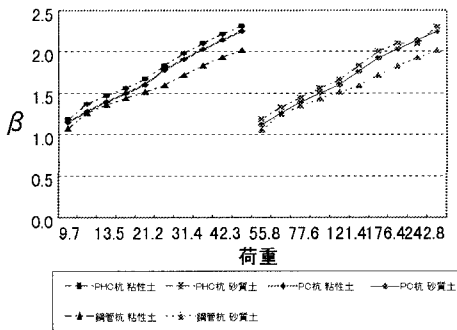
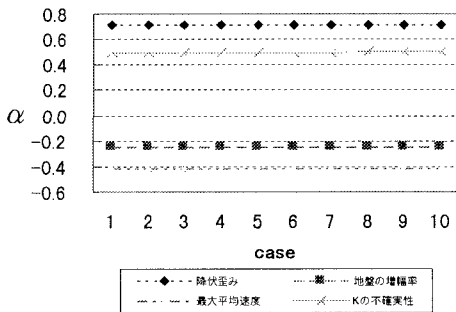
3 信頼性解析の結果と考察

信頼性解析は、それぞれの地盤条件（粘性土及び砂質土）で、各杭種（鋼管杭、PC杭、PHC杭）のそれぞれについて頻度高く使用されていると考えられる杭径と板厚を10ケースずつ選んで（表-2に一例を示す）、年最大地表面加速度に対応する β （ β_1 ）、50年最大地表面加速度に対応する β （ β_{50} ）を求めた。それぞれの杭について、半無限長杭で各地盤条件における設計荷重を道示（1994）の設計法に従い求めた。杭頭水平荷重は地表面加速度に比例し、また設計荷重は100年再現期待値と仮定している。道示（1994）の設計法では、杭径1500mm以下の杭については杭頭許容変位15mm以下、それ以上の径の杭については、この杭頭許容変位を杭径の1%以下とすることを規定している。信頼性解析の結果の一部を以下に示す。図-2、図-3は β 及び β と荷重との関係を示す。

表-2 鋼管杭

ケース	杭径	板厚	曲げ剛性	水平方向地盤反力係数	設計荷重
1	319	10.3	1966	1956	8.83
2	400	9	3381	2190	13.02
3	450	9	4872	2034	14.74
4	500	10	7665	1878	16.84
5	550	10	10209	2243	22.23
6	600	11	15015	2100	24.83
7	700	12	26460	1888	29.66

8	800	13	43680	1721	34.64
9	900	14	68250	1584	39.77
10	1000	15	101640	1866	53.78


図－2 鋼管杭についての β_1 と β_{50}

図－3 β_{50} と荷重との関係

図－4 感度係数 α （鋼管杭 粘土）

これらの図より次のことが観測される。

- ① どの杭においても杭径が大きくなるにつれて β も大きくなっており、右上がりの良く似た分布となっている。これは現行設計法では、杭頭許容変位量を、どの場合も杭径とは無関係に同じ値（15 mm）として設計しているにもかかわらず、性能関

数では降伏歪みを杭径に対する割合で定義しているためである。従って、杭径が大きくなると、絶対的な限界杭頭変位は大きくなり、性能関数は、より大きな安全性余裕をもことになる。

- ② どの杭種についても粘性土地盤の場合と砂質土地盤の場合とで、同一ケース（ほぼ同じ杭径）の β はほぼ一致している。おなじ杭種でみれば、粘性土地盤と砂質土地盤で β_1 や β_{50} にほとんど差がないのは、これらが表－1にあるように同じ不確実性を持つように設定されているためである。
- ③ β_1 は1.7～2.7、 β_{50} は1.1～2.3程度に分布している。ユーロコードなどで推奨されている目標信頼性指標が、終局限界状態に対して、 $\beta_{T1}=4.7$ 、 β_T （使用期間）＝3.8、使用限界状態に対して、 $\beta_{T1}=3.8$ 、 β_T （使用期間）＝1.5と規定していることと比べると、終局限界状態に対するものとしては低く、使用限界状態としてはほぼ妥当と判断できると思われる。
- ④ β_{50} は β_1 よりどの場合も0.6程度小さい。 β_{50} の場合は、それだけ大きい地震動が起こる確率が高いので、結果的に β_{50} は β_1 に比べて小さくなる。

図－3には、 β と荷重の関係プロットした。どの場合も荷重が大きくなるにつれて β も大きくなるという右上がりの分布を示している。これは荷重が大きくなるにつれて、設計される断面（杭径など）が大きくなるからである。また、砂地盤中の杭の方が、粘性土地盤のそれに比べて右側へシフトするのは、後者の k_H の方が前者の k_H より大きく、同じ杭径でより大きな水平荷重を支持できるからである。従って、今回の解析方法によれば、ある与えられた水平荷重に対して杭の設計を行うと地盤が固い（N値が大きい）ほど、 β は低くなる。この理由は地盤が固いと k_H は大きくなり、 k_H が大きくなると設計される杭の径は小さくなり、杭径が小さくなると現行設計法では降伏変位を絶対値（15 mm）で規定しているため、性能関数では杭頭歪みで規定していることに対して不利となり、小さい β が計算されることになる。

図－4に感度係数 α の分布を示した。これより次のことがわかる。

- ① 地盤定数の不確実性は、地震動の不確実性より大きかった。支配的な抵抗側要素（ k_H ）の分離係数 α は、0.7程度、荷重側のそれは-0.4程度であった。
- ② 降伏歪み、水平方向地盤反力係数など抵抗側の不確実性の感度が極めて高い。特に鋼管杭の降伏歪みの感度が高い
- ③ どの地盤どの杭においても、それぞれの α は杭径（すなわち水平荷重）に無関係である。これは性能関数に導入されている S_y/D 、 H/D などの変数が、杭径に無関係となっているためである。

参考文献

- 1) 岡腹・高木・中谷・木村：土木研究所資料番号2919号 1991
- 2) 壇・神田：建築学会構造系論文報告集、第363号、pp50-56、1986。