

杭基礎における杭施工データを用いた対策工の意思決定に関する一考察

株式会社 技研製作所 正会員 〇鈴木 直樹
正会員 石原 行博

1. はじめに

筆者らは鋼管杭圧入中の施工データを用いて地盤情報および杭基礎支持力等を推定し、構造物の信頼性を高める観測施工の方法を模索している¹⁻³⁾。施工データを用いた支持力推定により杭の全数確認が容易となり、更に設計時よりも推定の確からしさが多少向上する。しかし観測後の推定値の確からしさがそこまで大きくない場合、推定値が設計値より小さい際に支持力向上のための対策工を講じるか否かの意思決定方法は明らかでない。本稿では観測後の推定値の不確実性や対策工の費用等に対するパラメトリックな解析により、意思決定の指標（以降、アラーム）の設定方法について考察を行う。

2. 問題の設定

次のような問題を考える。性能関数 $Z=\ln(R/L)$ について、抵抗 $R=\gamma XY$ と表されるとする。ここに、 γ は部分係数、 X は地盤・施工情報による変数、 Y は計算モデル、 L は荷重である。図-1 に示すように施工データにより、設計時の抵抗 R は図中の赤実線から観測後に赤点線に更新される。仮にその平均値が低下する場合でも、ばらつきが抑えられ、その結果破壊確率 $P_f=P(Z<0)$ が小さくなる場合がある。もし X の推定値がアラームを下回った場合、杭に対して別途対策工を講じる必要がある。このときの最適なアラーム及びその設定方法について考察する。なお設計時の X, Y, L について、既往データから確率分布が既知とする。

3. 試算条件

破壊確率および期待総費用 $C_{tot}(=C_p+C_cP_c+C_fP_f)$ の試算条件を記載する。算出に必要な各値は文献^{4,5)}等を参考に表-1 の通り設定する。設定に用いた主な前提条件は以下の通りである。なお、表-1 にない各記号の定義は付録表に示す。

- ① 杭打設以外の建設費用や維持管理費等は対策工の有無の判断に影響しないとし無視する。
- ② X, Y はそれぞれ対数正規分布に従い互いに独立である。単純化のため L は一定値であり、 X, Y, L は平均値相当で評価しているとする。
- ③ X の観測値は正規分布に従い、変動係数 $COV_{ob}(=\sigma_{x,ob}/\mu_{x,ob})$ は既知とする。
- ④ 破壊費用 C_f は杭打設費用 C_p に比例し、比例定数は k_f で表される⁴⁾。
- ⑤ 破壊確率を 10^{-1} 倍下げるために、基準杭打設費用 C_{p0} の k_p 倍の杭打設費用 C_p が追加されるとし⁴⁾、ここではある地盤条件に対して杭径の変化または杭本数が工費へ与える影響から k_p を 0.4 と設定する(図-2)。詳しい地盤条件、支持力算定方法は文献¹⁾に譲る。
- ⑥ 目標破壊確率 P_{fi} は C_{tot} を最小化するように設定されている(すなわち期待費用最小化原則に従っている)。ここでは文献⁴⁾式 2.16 (p.42)および k_p から k_f を算定する。
- ⑦ 対策工は X を μ_x にすることを目標に実施し、その変動係数 COV_c は既知である。対策工費用 C_c は観測値によらず一定とし、 C_p の k_c 倍で表される。なお、ここでは観測後に杭長を延長する対策工を想定している。対策工が $COV_c=0.1$ で実施でき、かつ観測値によらず全ての杭に対策工が実施された場合、破壊確率は $10^{-1.27}$ 倍程度に低

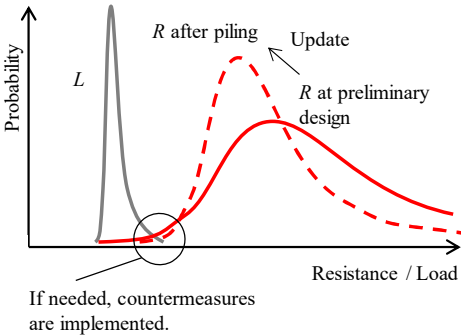


図-1 施工データによる抵抗更新の概念図

表-1 パラメータの設定

Symbols	Values	Notes
γ	0.33	部分係数
P_{fi}	0.7%	目標破壊確率
μ_x	1.0	X の平均値
μ_y	1.0	Y の平均値
μ_z	0	L の平均値
COV_X	0.3	X に関する変動係数
COV_Y	0.3	Y に関する変動係数
COV_R	0.43	抵抗に関する変動係数
COV_{ob}	0.0-0.3	X に対する観測値の変動係数
COV_c	0.1	対策工後の X に関する変動係数
k_p	0.4	杭打設費用増加率
k_f	35.2	破壊費用比
k_c	0.5-2.0	対策工費用比

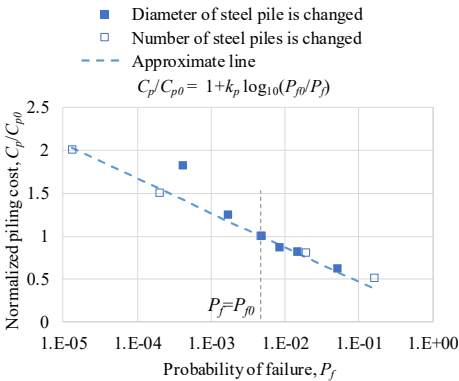


図-2 杭打設費用と破壊確率の関係 ($k_p=0.4$)

減される．対策工の費用は現場条件に大きく左右されるが，ここでは $k_c=0.5-2.0$ の範囲と仮定する．

⑧ 対策工の意思決定自体には追加費用が発生しない．

4. 試算結果と考察

次の方法で設定されるアラーム x_{al} を前述の条件により試算する．

- a) 観測後の破壊確率が目標破壊確率以下となるように，対策工を講じる．
- b) 期待総費用を最小化するように，対策工を講じる．

設定されるアラーム $x_{al,a}$, $x_{al,b}$ はそれぞれ次式で表される．

$$x_{al,a} = \min \{ x_{al} \in X \mid P_{f,t} < P_f (\mu_{x,ob} < x_{al}) \}$$

$$x_{al,b} = \arg \min_{x_{al}} (C_{tot})$$

まず方法 a)により，観測値の変動係数 COV_{ob} と破壊確率が目標破壊確率以下となるようなアラーム $x_{al,a}$ を算出し，その関係を図-3 に示す． COV_{ob} が大きい，すなわち観測値に事前の設計段階と同程度の不確実性がある場合， $x_{al,a}$ は設計値 μ_x 程度となる．対して COV_{ob} が小さい場合 $x_{al,a}$ も小さくなり，ここでは $x_{al}/\mu_x=0.7$ 程度になる．

次に，図-4 に $COV_{ob}=0.1$, $k_c=1.5$ の場合の， x_{al} の C_{tot} への影響を示す． C_{tot} は対策工費用 $C_c P_c$ ，破壊時の費用 $C_f P_f$ ，杭打設費用 C_p の和である． x_{al} が小さい場合は対策工が実質的に行われなため， C_{tot} は設計時の期待総費用と同じである．対して， x_{al} が大きくなるにつれ，破壊確率は下がるものの対策工の割合は増える．ここでは期待総費用が $x_{al}/\mu_x=0.55$ 程度で極小値をとり（図中青丸），最小化されていることが確認できる．適切な施工データの活用と対策工の実施により，期待総費用が最小化されている．

COV_{ob} および k_c を表-1 の範囲で変化させ，各ケースで先ほどと同様に期待総費用を最小化する方法b)によるアラーム $x_{al,b}$ を図-5 に示す． $COV_{ob}=0$ の場合，図-3 と同じく $x_{al}/\mu_x=0.7$ 程度となる．対して， COV_{ob} が大きくなるとアラームが小さくなり， k_c が大きくなるほどその傾向は顕著となっている．この傾向は図-3 と異なっている．

以上，観測後の破壊確率を目標破壊確率以下にするためには，アラームを大きく設定する必要がある一方で，期待総費用を最小化するためには，アラームを小さく設定する必要がある．これは観測情報の信頼性があまり高くない，かつ観測情報をもとに対策するのに比較的費用を要する場合，アラームを下げて対策工を実施しにくくするほうが経済合理性が高いことを意味している．

5. おわりに

本稿では，杭の施工データを構造物の信頼性向上に用いる際に発生する意思決定の課題に関して，意思決定の指標が期待破壊確率または期待総費用を参考に決定するとの仮定のもと，考察を行った．

適切な施工データの活用と対策工の実施により，期待総費用が最小化できることが確認できた．今後，施工管理に必要となるデータの収集，整理を行う他，設計時の部分係数の低減も視野に入れ検討する．

参考文献 1) Suzuki, N. and Ishihara, Y.: Case study on the application of press-in piling data to design and construction of pile foundations for reducing the expected total cost, International Conference on Case Histories and Soil Properties (ICCS), 2019. 2) 鈴木直樹, 石原行博：鋼管杭の圧入完了直後の荷重沈下関係から第二限界抵抗を推定する方法に関する一考察，土木学会年次学術講演会講演概要集，2019. 3) 国際圧入学会：圧入工法における施工データの利用に関する技術資料 I. 地盤情報の推定，2017. 4) 本城勇介, 大竹 雄：信頼性設計法と性能設計の理念と実際—地盤構造物を中心として，技報堂出版，2018. 5) ISO 2394:1998: General principles on reliability for structures, International Organization for Standardization, 1998.

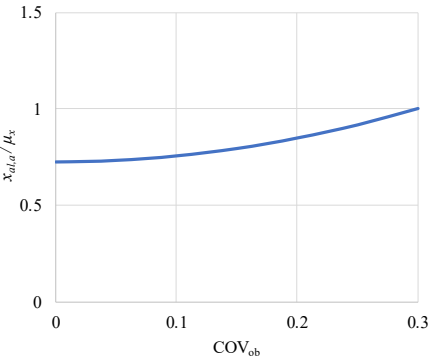


図-3 観測値の変動係数と目標破壊確率を満たすアラームの関係

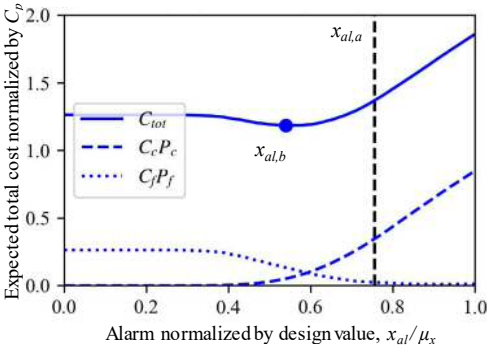


図-4 アラーム x_{al} と期待総費用の関係 ($COV_{ob}=0.1$, $k_c=1.5$)

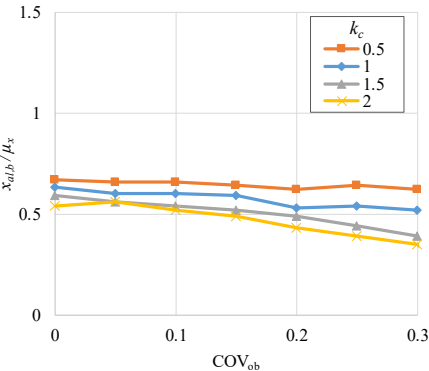


図-5 観測値の変動係数と期待総費用を最小化するアラームの関係

付録表 記号の定義 (表-1 を除く)

Symbols	Note
X	地盤・施工情報による変数
Y	計算モデル
Z	性能関数
L	荷重
C_{tot}	期待総費用
C_p	杭打設費用
C_{p0}	基準となる杭打設費用
C_c	対策工費用
C_f	破壊費用
P_f	破壊確率
P_{f0}	基準となる杭の破壊確率
P_c	対策工が必要となる確率
x_{al}	X に関するアラーム
μ_x	X の平均値および設計値
$\mu_{x,ob}$	観測・推定後の X の平均値
$\sigma_{x,ob}$	観測・推定後の X の標準偏差