

杭の載荷試験による地盤ばね定数の同定

九州工業大学 学生員 ○村田洋平 国土交通省 非会員 南野能克
九州工業大学 正会員 山口栄輝 港湾空港技術研究所 正会員 菊池喜昭

1. はじめに 近年,性能照査型設計の導入が検討され,高精度の地盤ばね定数の推定が要求されるようになってきた.精度良く地盤ばね定数を推定しようとする場合には,現地において杭の載荷試験を実施することが望ましいと考えられる.港湾空港技術研究所では,杭の載荷試験から得られる杭頭変位を用いて,地盤ばね定数を推定する方法¹⁾を提示しているが,多層地盤への適用ができないという問題がある.そこで,本研究では,二層で構成される地盤を対象に,杭の載荷試験結果から地盤ばね定数を推定する手法を提示する.この推定法の有効性は,数値計算例より検討し,地盤ばね定数を精度よく推定する方法についても検討する.

2. 解析手法

2.1 杭の水平変位の解析法(順解析) 港湾構造物では,地盤をC型地盤とS型地盤に分類し,それぞれの地盤反力 q は,地中深さ x と杭の水平方向変位(たわみ) v を用いて次式で表されるとしてきている¹⁾.

$$q = Bk_c v^{1/2} \quad q = Bk_s x v^{1/2} \quad (1), (2)$$

ここに, B は杭の幅, k_c, k_s はそれぞれC型,S型地盤の地盤ばね定数である.

本研究では,杭頭に水平力 P が作用した杭(図-1)を解析対象とする.この杭と地盤反力の関係を弾性地盤反力法でモデル化すると,下記に示す境界値問題が導かれる.

$$EIv'''' + Bk_s x v^{1/2} = 0 \quad \text{for } -a < x < L \quad (3)$$

$$-EIv'' = 0, \quad EIv''' = P \quad \text{at } x = -a \quad (4)$$

$$EIv'' = 0, \quad -EIv''' = 0 \quad \text{at } x = L \quad (5)$$

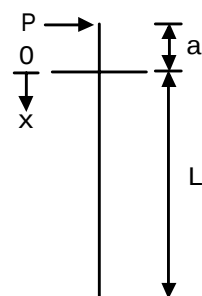


図-1 解析対象

EI は杭の曲げ剛性, a は自由長, L は根入れ長である.この境界値問題はS型地盤について記したものであるが,式(3)の x を取り除き, k_s を k_c と取り替えることでC型地盤として取り扱える.

この境界値問題に,重み付き残差法と2節点梁要素を適用し,有限要素方程式を誘導する.得られる有限要素方程式は非線形であるため,Newton-Raphson法で線形化し,繰返し計算より水平変位を求める.

2.2 地盤ばね定数の推定法(逆解析) 地盤ばね定数の同定は,上層と下層の地盤ばね定数 k_{s1}, k_{s2} を任意に与えたときに求まる各節点のたわみ V^I と載荷試験で得られたたわみ $\bar{V}^I$ の残差二乗和 E を最小化することで行う. E は次式で表される.

$$E = \sum_{I=1}^N \frac{C_I}{2} (V^I - \bar{V}^I)^2 \quad (6)$$

ここに, I は節点番号, N は総節点数である.また C_I は係数であり,載荷試験でたわみが得られている節点では1,それ以外の節点では0の値を取るものとする.

3. 数値計算例 本研究で提示した地盤ばね定数推定法の有効性を数値計算例より検討する.計算例には,地盤構成の異なる4ケースを取り上げた.その概要を図-2に示し,地盤構成と杭頭に作用させる荷重を表-1に示す.杭頭荷重は,各地盤において杭が降伏に達する程度の大きさ(降伏荷重)とした.杭の諸元は,幅7.0cm,曲げ剛性 $2.35 \times 10^6 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$ である.

この解析モデルについて,まず順解析を行い,次に,順解析より得られたたわみを載荷試験結果と見なして,地盤ばね定数の推定を行った.しかし,この載荷試験結果には,実際の実験値のような誤差が含まれていない.そこで,乱数を発生させ,それをもとに, $\pm 10\%$ の範囲で順解析結果に誤差として加えたものを載荷試験結果と見なした逆解析も行った.解析結果を表-2にまとめている.この表を見ると,誤差を含まない

キーワード: 杭の載荷試験, 多層地盤, 地盤ばね定数, 逆解析

連絡先: 〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1 Tel(093)884-3109 Fax(093)884-3100

順解析結果をもとに地盤ばね定数の推定を行った場合、全てのケースにおいて正解値が得られている。このことは、本研究で提示した逆解析手法が有効に機能していることを示している。±10%の誤差を加えた場合は、上層の地盤ばね定数は精度良く推定できているものの、下層の地盤ばね定数の精度は低くなることがわかる。

4. 逆解析の精度の改善 3.の逆解析の結果、推定される下層の地盤ばね定数の精度が低くなることがわかった。これは、杭の下方になるにつれ、変形量が小さくなることに起因していると考えられる。そこで、3.で用いた杭を杭Aとし、それより剛性の高い杭B（幅10.0cm、曲げ剛性 $27.5 \times 10^6 \text{kgf} \cdot \text{cm}^2$ ）、さらに高い杭C（幅10.2cm、曲げ剛性 $214.0 \times 10^6 \text{kgf} \cdot \text{cm}^2$ ）の3つを用いて逆解析を行った。これは、杭の剛性が高くなると、杭の動きは曲げよりも回転に近くなり、杭の下端部においても変位が生じるようになることに着目したためである。これらの杭は、文献2)の載荷実験に使われた模型杭から取り上げたものである。解析は、3.と同様の手順で行なったが、荷重については、降伏荷重を4等分し、それぞれの荷重について逆解析を行った。

紙面の都合上、順解析結果に±10%の誤差を含ませたCASE1の逆解析結果のみを表-3に示す。なお、誤差を含まない順解析結果を用いた場合は、杭の剛性や荷重によらず推定される地盤ばね定数は正解値であった。表-3からわかるように、誤差が含まれると、杭の剛性と荷重によって、推定される地盤ばね定数が異なっているが、杭Bによる逆解析結果が比較的良好であった。このことは、CASE2～CASE4でも同様であった。

荷重毎に推定される地盤ばね定数が異なるという現象は実験でも見られる^{1),2)}。そこで、荷重別に地盤ばね定数を推定せずに、各々の荷重から得られるたわみを一つの目的関数 E に取り込み、これを最小化することを試みた。この逆解析手法による推定結果を表-4に示す。この表から、複数の荷重下の変形を一度に考慮すれば、逆解析の精度が改善されることがわかる。また、それぞれの杭から推定された地盤ばね定数を比較すると、杭Bを用いれば、精度良く地盤ばね定数を推定できることがわかる。

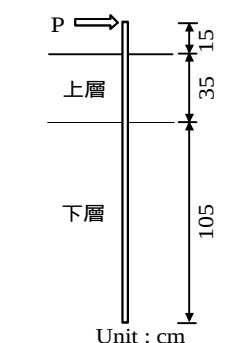


図-2 解析モデル

表-1 地盤ばね定数*と杭頭荷重

ケース	地層	地盤型	地盤ばね定数	杭頭荷重(kgf)
CASE1	上層	S	0.027	95.0
	下層	S	0.076	
CASE2	上層	C	6.0	180.0
	下層	C	2.5	
CASE3	上層	S	0.027	90.0
	下層	C	6.0	
CASE4	上層	C	6.0	185.0
	下層	S	0.027	

表-2 地盤ばね定数*の逆解析結果

ケース	誤差0%	誤差±10%
CASE1	0.027	0.030
	0.076	0.057
CASE2	6.0	6.1
	2.5	3.0
CASE3	0.027	0.031
	6.0	4.2
CASE4	6.0	6.1
	0.027	0.030

表-3 地盤ばね定数*の逆解析結果（CASE1）

	杭A				杭B				杭C			
	STEP1	STEP2	STEP3	STEP4	STEP1	STEP2	STEP3	STEP4	STEP1	STEP2	STEP3	STEP4
上層	0.029	0.030	0.030	0.030	0.027	0.025	0.023	0.022	0.017	0.017	0.016	0.013
下層	0.037	0.047	0.054	0.057	0.076	0.082	0.084	0.085	0.090	0.086	0.085	0.085

5. まとめ 本研究では、二層地盤の地盤ばね定数推定法を提示し、その有効性を、数値計算例より確認した。さらに、杭の剛性が逆解析の精度に影響すること、複数荷重下での杭の変形状態を一度に考慮すれば、逆解析の精度は改善されることを示した。

参考文献

- 1) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説、上巻、1989。
- 2) 久保浩一：短杭の横抵抗、港湾技術研究所報告 Vol.5, No13, 1966。

表-4 逆解析結果*（CASE1）

	杭A	杭B	杭C
上層	0.028	0.025	0.022
下層	0.065	0.080	0.080

*：地盤ばね定数の単位

S型地盤（ $\text{kgf}/\text{cm}^{3.5}$ ）

C型地盤（ $\text{kgf}/\text{cm}^{2.5}$ ）