

杭の水平地盤反力係数各種算定式の比較に関する一考察

伊藤 公二¹・坂井 公俊²・室野 剛隆³

¹正会員 修士（工学） （公財）鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御
（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

²正会員 博士（工学） （公財）鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御
（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

³正会員 博士（工学） （公財）鉄道総合技術研究所 研究開発推進部
（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

1. はじめに

鉄道構造物等設計標準・同解説(基礎構造物)¹⁾(以下、鉄道基礎標準)に記載された杭の水平地盤反力係数算定式は、ある程度の大きさの変位が生じる場合の地盤反力を適切に評価することを主眼において設定されている。そのため、この水平地盤反力係数を用いて構築した構造物解析モデルの固有振動数は、健全度評価等に用いる微動観測や衝撃振動試験などで計測される微小変位レベルにおける固有振動数とは一致しないことが知られている^{例えは2)}。よって実測の固有振動数と一致させるには通常、水平地盤反力係数を割増し調整する作業が必要となる^{例えは3)}。変位レベルによらず同一の杭-地盤相互作用ばねモデルを用いて精度よく応答評価をするには、現状のものでは不十分であり改良を必要とする。

そこで本検討は、構造解析に用いる杭-地盤相互作用ばねを、微小変位から大変位まで1つのモデルで適切に表現できるよう機能拡張するための基礎的な検討として、水平地盤反力係数の各種算定式を比較し、地盤を弾性とみなせる程度の微小ひずみレベルにおける実現現象を適切に表現でき実務上有用な水平地盤反力係数算定式の整理を行った。

2. 地盤反力係数算定式

本検討で扱う水平地盤反力係数算定式について以下に示す。

(1) 鉄道基礎標準の式¹⁾

鉄道基礎標準では、単杭の水平地盤反力係数 k_h (kN/m³)を次式で算定することとしている。

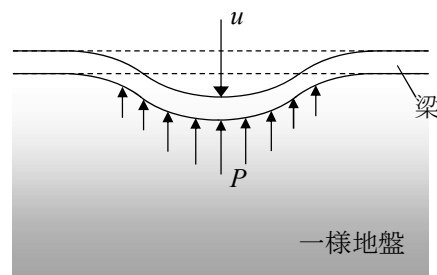


図-1 Vesicの式の概念図

$$k_h = 1.8 \rho_{gk} E_d D^{3/4} \quad (1)$$

ここに、 ρ_{gk} ：地盤反力係数に関する地盤修正係数（短期：1.0）、 E_d ：地盤の変形係数の設計用値(kN/m²)、 D ：杭径(m)である。

この算定式は多数の実杭水平載荷試験結果に基づき、杭頭変位10mm時における荷重－変位関係の割線剛性の平均値相当となるように設定されている。そのためこの算定式は一般に、微小ひずみレベルにおいて過小な値となる。

(2) Vesicの式⁴⁾

Vesicは図-1のように半無限一様弾性地盤上に無限長の梁が置かれている場合を想定し、梁の任意点に荷重を作用させたときの荷重－変位関係から得た地盤反力係数 k_{hv} (kN/m³)を次式のように表している。

$$k_{hv} = \frac{0.65 E_s}{(1-\nu^2) D} \left(\frac{E_s D^4}{E_p I_p} \right)^{1/12} \quad (2)$$

ここに、 E_s ：地盤の変形係数 (kN/m²)、 ν ：地盤のポアソン比、 E_p ：梁(杭)の変形係数 (kN/m²)、 I_p ：梁(杭)の断面二次モーメント(m⁴)である。

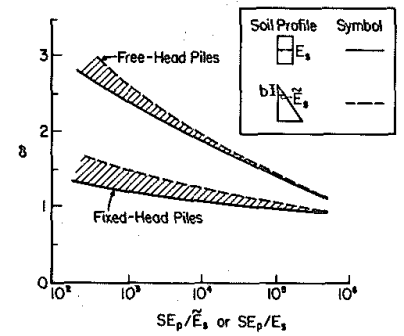


図-2 係数 δ と杭-地盤剛性比の関係図⁶⁾

表-1 杭断面形状係数 $S^6)$

Pile cross section (1)	Shape factor, S (2)
Circular (diameter: b)	1
Pipe (diameters: outside b , inside b_i)	$1 - (b_i/b)^4$
Concrete-Filled Steel Pipe Pile (diameters: outside b , inside b_i)	$1 - (b_i/b)^4 + E_{concr.}/E_{steel}(b_i/b)^4$
Rectangular (lateral width: $2B$, length: $2A$)	$1.7(A/B)^2$

(3) Francisの式⁵⁾

FrancisはVesicの式を拡張し、圧縮側地盤と引張側地盤の両側の抵抗を考慮し、地盤反力係数 k_{hf} (kN/m^3)を次式のように表している。

$$k_{hf} = \frac{1.3 E_s}{(1-\nu^2)D} \left(\frac{E_s D^4}{E_p I_p} \right)^{1/12} \quad (3)$$

(4) Gazetasの式⁶⁾

Gazetasらは、弾性地盤中の杭が杭頭水平荷を受ける場合の地盤反力係数 $k_h(z)$ (kN/m^3)を次式で表している。

$$k_h(z) = \delta E_s(z)/D \quad (4)$$

ここに、 z :深さ(m)、 $E_s(z)$:地盤の変形係数(kN/m^2)、 δ :釣合い係数であり、算定条件を様々に変化させて δ を算定した結果を図-2に示す。グラフの縦軸は係数 δ 、横軸は杭-地盤剛性比 SE_p/E_s である。ここに、 S :杭の断面形状係数(表-1参照)である。算定条件として、杭頭の回転変位を固定、または自由とした場合、変形係数 $E_s(z)$ の分布を深さ方向に均一、または線形変化とした場合についてそれぞれ示している。図-2より、杭頭回転変位が拘束されている場合の地盤反力係数算定式 k_{hg} を次式のように近似している。

$$k_{hg} \approx 1.2 E_s/D \quad (5)$$

3. 地盤反力係数の試算

(1) 算定条件

前章の地盤反力係数算定式について比較のため試算を行った。試算用パラメータは、一般的な物性値

表-2 試算用パラメータ

杭径 D	(m)	0.8~3.0
地盤のS波速度 V_s	(m/s)	100~500
杭の変形係数 E_p	(kN/mm^2)	22.4
地盤の単位体積重量 γ	(kN/m^3)	18.0
地盤のポアソン比 ν	-	0.5

をもつ単一層地盤と単杭を想定し表-2の値を用いる。このうち、杭径 D と地盤のS波速度 V_s は結果に与える影響を検討するため、表中の値の範囲で変化させることとした。

地盤の変形係数 E_s (kN/m^2)は、地盤のS波速度 V_s を基に、次式により算定することとする。

$$E_s = 2 \frac{\gamma \cdot V_s^2}{g} (1+\nu) \quad (6)$$

ここに、 g :重力加速度($=9.8\text{m/s}^2$)である。一方、地盤の変形係数の設計用値 E_d (kN/m^2)は鉄道基礎標準に従い、次式により算定する。

$$E_d = \frac{\rho_{gE} \cdot E_s}{\gamma_{gE}} \quad (7)$$

ここに、 ρ_{gE} :地盤修正係数、 γ_{gE} :地盤調査係数である。 E_s をS波速度で算定するため、地盤調査法をPS検層とした場合の値である $\rho_{gE}=0.1$ 、 $\gamma_{gE}=1.0$ を用いる。

(2) 算定結果

杭径を変化させた際の算定結果を表-3、図-3に、S波速度を変化させた際の算定結果を表-4、図-4に示す。いずれの算定式でも地盤反力係数は杭径が大きいかほど小さく、S波速度が大きいかほど大きくなった。また鉄道基礎標準の値はその他の算定式よりも常に小さくなった。このことは、鉄道基礎標準の算定式がある程度の変位が生じることを想定しているため、微小なひずみレベルにおいては過小な値となることと一致している。

4. 実測に基づく水平地盤反力係数との比較

徳永ら⁷⁾は多数の杭基礎形式RCラーメン鉄道高架橋に対し、常時微動観測結果に基づき固有振動数を同定している。さらにそれらの構造物の再現解析を実施し、鉄道基礎標準⁸⁾の水平地盤反力係数を基準として、固有振動数の解析値が測定値と一致する倍率を検討している。水平地盤反力係数の倍率を1~10倍させた際の倍率と固有振動数の比の関係図を図-5に示す。この図より、構造物によってばらつきはあるものの、常時微動下における水平地盤反力係

表-3 試算結果(杭径を変化)

杭径 D	水平地盤反力係数 k_h (kN/m ³)			
(m)	鉄道基礎標準	Vesic	Francis	Gazetas
0.8	46,901	208,856	417,712	330,612
1.0	39,673	167,085	334,170	264,490
1.2	34,603	139,237	278,475	220,408
1.5	29,271	111,390	222,780	176,327
1.8	25,530	92,825	185,650	146,939
2.0	23,590	83,542	167,085	132,245
2.3	21,242	72,646	145,291	114,996
2.5	19,955	66,834	133,668	105,796
2.8	18,329	59,673	119,346	94,461
3.0	17,404	55,695	111,390	88,163

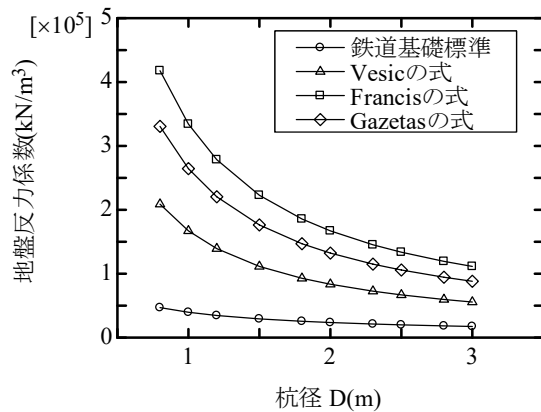


図-3 試算結果(杭径を変化)

表-4 試算結果(S波速度を変化)

S波速度	水平地盤反力係数 k_h (kN/m ³)			
V_s (m/s)	鉄道基礎標準	Vesic	Francis	Gazetas
100	11,725	46,520	93,039	82,653
150	26,382	111,984	223,967	185,969
200	46,901	208,856	417,712	330,612
250	73,283	338,698	677,396	516,582
300	105,527	502,767	1,005,533	743,878
350	143,635	702,123	1,404,247	1,012,500
400	187,604	937,689	1,875,378	1,322,449
450	237,437	1,210,280	2,420,560	1,673,724
500	293,132	1,520,632	3,041,263	2,066,327

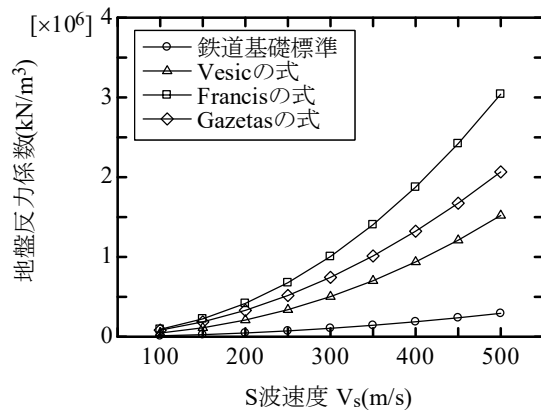


図-4 試算結果(S波速度を変化)

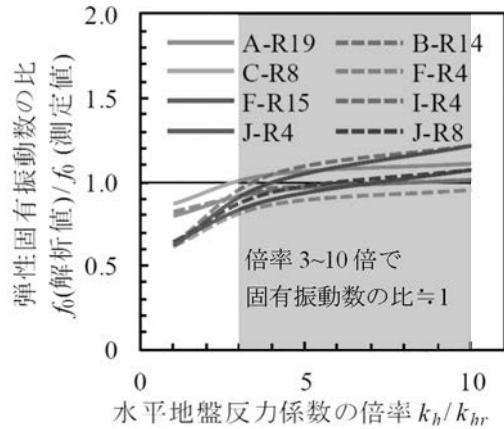


図-5 水平地盤反力係数の倍率⁷⁾

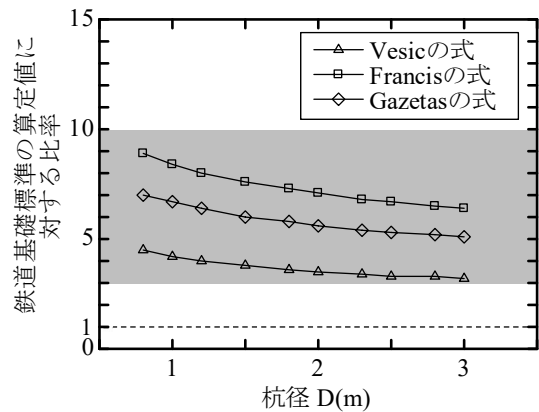


図-6 水平地盤反力係数の比率(杭径を変化)

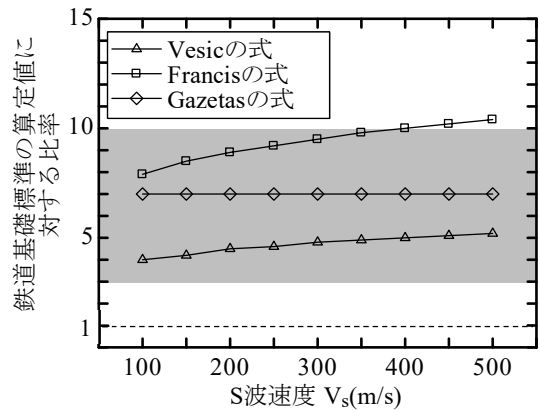


図-7 水平地盤反力係数の比率(S波速度を変化)

数は鉄道基礎標準の水平地盤反力係数の 3～10 倍程度であることを確認している。

以上を参考として、前章にて各式より算定された水平地盤反力係数の値と、鉄道基礎標準により算定された値との比率について算定した。その結果を図-6、図-7 に示す。なお、基準とする水平地盤反力係数を、本検討では鉄道基礎標準(平成 24 年版)¹⁾、徳永らは鉄道基礎標準(平成 9 年版)⁸⁾に基づき算定しているが、両者の算定値に大きな違いは無いことを確認している。

図中のハッチング部は既往研究における実測の地盤反力係数に相当する範囲を示している。これによると、各種算定式による地盤反力係数はこの領域内にほぼ収まっている。よって、本検討で扱った Vesic の式、Francis の式、Gazetas の式はいずれも一般的な地盤と杭において、微動レベルにおける実地盤の水平地盤反力係数を概ね適切に表現できることが分かった。その中でも、Gazetas の式は必要なパラメータが少なく簡便で扱いやすいことから、実務上有用性が高いと考えられる。

5. まとめと今後の課題

本検討は、構造解析に用いる杭-地盤相互作用ばねを、微小変位から大変位まで1つのモデルで適切に表現できるよう機能拡張するための基礎的な検討として、水平地盤反力係数の各種算定式を比較し、地盤を弾性とみなせる程度の微小ひずみレベルにおける実現象を適切に表現でき実務上有用な水平地盤反力係数算定式の整理を行った。

検討の結果、本検討で扱った Vesic の式、Francis の式、Gazetas の式はいずれも一般的な地盤と杭において、微動レベルにおける実地盤の水平地盤反力係数を概ね適切に表現できることが分かった。その中でも、Gazetas の式は必要なパラメータが少なく簡便で扱いやすいことから、実務上有用性が高いと考えられる。

以上の地盤反力係数算定式を用いることで微小ひずみレベルにおける挙動、固有振動数を適切に評価できると考えられる。今後の課題としてはより大きな地震動に対する精度向上を目指し、地盤ばねの非線形特性の適切なモデル化方法について検討を行う。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物，2012.
- 2) 丸山直樹，曾我部正道，原田和洋，谷村幸裕：常時微動測定による鉄道ラーメン高架橋の等価固有周期の推定，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.2，pp.919-924，2009.
- 3) 徳永宗正，丸山直樹，曾我部正道，谷村幸裕：常時微動測定による既設鉄道高架橋の等価固有周期推定，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.2，pp.1093-1098，2010.
- 4) Vesic, A. B. : Bending of Beams Resting on Isotropic Elastic Solid, J. Engrg. Mech. Div., ASCE, Vol.87, No.EM2, pp.35-53, 1961.
- 5) Francis, A. J. : Analysis of Pile Groups with Flexural

Resistance, J. Soil Mech. and Foundations Div., ASCE, Vol.90, No.Sm3, pp.1-32, 1964.

- 6) Gazetas, G., Dobry, R. : Horizontal response of piles in layered soils, J.Geotech. Engrg., ASCE, Vol.110, No.6, pp.937-956, 1984.
- 7) 徳永宗正，曾我部正道，谷村幸裕，小野潔：常時微動測定に基づく鉄道高架橋の等価固有周期の推定手法，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，vol.71，No.1，pp.72-86，2015.
- 8) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物，1997.