

遠心力模型実験による単杭モデルの地盤種類別 の動的水平地盤反力特性に関する研究

冨澤幸一1・西本 聡2・福島宏文3

 ¹北海道開発土木研究所
 土質基礎研究室
 研究員(〒062-8602 北海道札幌市平岸1条3丁目1-34)

 E-mail:ko-tomsw@ceri.go.jp

 ²北海道開発土木研究所
 土質基礎研究室
 研究室長(〒062-8602 北海道札幌市平岸1条3丁目1-34)

 E-mail:nishimoto@ceri.go.jp

 ³北海道開発土木研究所
 土質基礎研究室
 研究員(〒062-8602 北海道札幌市平岸1条3丁目1-34)

 E-mail:nishimoto@ceri.go.jp

 ³北海道開発土木研究所
 土質基礎研究室
 研究員(〒062-8602 北海道札幌市平岸1条3丁目1-34)

 E-mail:fukushima@ceri.go.jp

杭基礎の耐震設計では、杭-地盤系の動的相互作用の応答および地盤条件に応じた振動特性(固有周期)を 適切に評価する必要がある。本研究では、砂質土地盤・粘性土地盤・火山灰地盤を対象にした 50 G場の遠心力模型実験 における単杭モデルの静的水平載荷試験および動的加振実験から、杭の地盤パネ定数に着目した耐震性に関する基本的 な検証を行った。解析手法は、加振時の杭と地盤の相対変位に着目した P~ 法および杭の固有振動数から動的地盤反 力の算定を試みた固有値解析法である。この成果より、杭の動的水平地盤反力係数 *Khe* は、静的水平地盤反力係数 *Kh* との関係(*Kh*= *Khe*)やせん断弾性波などの地盤定数に従い簡便に決定するのみではなく、強度特性の違いなど地盤種 類別の耐震性能に応じた総合評価により適切に設定する必要性が認められた。

Key Words: Pile, Centrifuge model test, Dynamic interaction, Coefficient of subgrade reaction

1.はじめに

杭基礎耐震設計法^{1).2).3)}では、非線形性などの複 雑な要因を含んだ地震時の動的水平地盤反力特性を 地盤性状に応じ的確に予測する必要がある。地震時 の杭挙動解析として従来の震度法だけでなく、地震 時保有水平耐力法さらに動的解析法による照査が規 定されている。これらの耐震設計法は、地震作用力 に対し杭本体に一定の変形性能を確保させる主に構 造系の立場に立った点で共通していると考える。た だし、地盤の耐震性評価では、杭の耐震設計上、地 盤調査結果に基づく地盤強度別の大枠の区分はある ものの、動的地盤反力係数は土質試験の地盤定数と して算定される静的な地盤定数から一義的に決定さ れている。

本研究では、砂質土地盤を基本に、北海道に広く 分布する特殊土である泥炭を想定した粘性系地盤お よび火山灰地盤を対象として、遠心力載荷装置を用 い 50G 場において単杭モデルの静的水平載荷試験 および動的加振実験を実施した。その成果に基づ き、地盤種別の杭静的水平地盤反力係数 Kh に対す る動的水平地盤反力係数 Khe の特性に関する基礎的 な検証をおこなった。

2. 遠心力模型実験概要

遠心模型実験では、内寸長さ 700mm×幅 200mm× 高さ 350mm の鋼鉄製の模型容器を用い、その中に 実大の 1/50 縮尺の模型地盤および模型杭を設置し た。土中応力レベルの相似則を満足させるため、 50G の遠心加速度を作用させた単杭の静的水平載荷 実験および動的加振実験を行った(図-1)。

模型杭はスチール管を延伸し特殊加工して作成 し、その寸法は外径 10mm、肉厚 0.2mm、杭長 400mm である。これは遠心力載荷装置により 50G を発生させ実験を行うことから、相似率(表 - 2) を合わせ、一般的に使用される実大の鋼管杭 500mm,板厚 t=10mmを想定したものである。

模型杭設置の際、杭先端は3D相当分をソイルセ メントに埋め込み杭先端固定条件とした。模型杭に は、杭体に発生する応力測定のためひずみゲージを 設置し、加振時には杭体および地盤中に加速度セン サーを配置し計測した。また、加振実験時には、橋 梁下部工躯体を想定した800gのウエイト(実大で P=100ton=0.8kg×50³)を杭頭に設置した。動的加振実 験では、本試験に先立ち加振台と模型槽の固有振動 数を把握するため、ホワイトノイズによる性能試験



Fig-1 Test models

を実施した。ホワイトノイズROMは、位相差分スペ クトル法⁴⁾による仕様で作成した。

図 - 1には、モデル概念図も合わせて示したが、 解析に当たってはダッシュポット形式の離散バネを 想定した。模型地盤には、地盤種類別の地盤反力特 性を検証するため、砂質土である硅砂、泥炭性軟弱 地盤を想定したカオリン粘土、および火山灰の代表 例として支笏火山灰⁵⁾を用いた。各試料とも撹乱試 料としたが、地盤造成の際、カオリン粘土は平均層 厚 20mm の多層に敷き均して締め固め、硅砂と火山 灰については所定の高さのフローから落下させ均一 性を確保した。 表 - 2 に、各試料の土質物理試験 結果を示す。地盤種別の強度特性として、1G 場に おけるコーン貫入試験結果を示した。

			硅 砂	カオリン	火山灰
土粒子密度		g/cm ³	1.36	1.17	1.11
粒度組成	砂分	%	92.2	-	65.8
	シルト分	%	7.8	45.1	29.4
	粘土分	%	•	54.9	4.8
コーン指数oc		MN/m ²	15.5	1.6	11.7

Table-2 Model ground

3.静的水平載荷試験(50G)

杭の静的水平載荷試験は、模型杭の杭頭を水平載 荷装置により速度 0.25mm/分で載荷する多サイクル のひずみ制御法とした。杭変位量はレーザー変位 計、杭体応力はひずみゲージにより測定した。杭地 表 面 変 位 は 実 大 の 杭 許 容 変 位 量 か ら y=0.3mm(15mm/50G)を目安とし、荷重保持時間は地 盤工学会基準^のに準拠し処女荷重 15 分とした。

静的水平載荷試験により、杭頭水平荷重~地表面 変位~杭曲げモーメントの関係を得た。静的水平地 盤反力係数 Kh は、弾性理論に基づく Winkler のバ ネモデルとして逆算した。杭径の 1%つまり基準変 位量 0.1mm(50G 場)に相当する静的水平地盤反力係 数 kh は弾性域にあり、それぞれ表 - 3に示す硅砂 12000kN/m/m、カオリン粘土 8000kN/m/m、火山灰 7000kN/m/m を得た。

Table-1 similarity rule

		記号	単位	縮尺比	実験模型	実物
地盤	地盤厚	H _{q1}	m	1/	0.300	15.000
	支持地盤厚	H _{g2}	m	1/	0.040	2.000
	根入れ長	L	m	1/	0.320	16.000
	外径	D	m	1/	0.010	0.500
杭	板厚	t	m	1/	0.002	0.010
	弾性係数	Е	Tf/m^2	1	2.1 × 10 ⁷	2.1 × 10 ⁷
	断面二次		m 4	1/4	7 2052 10-11	4.6220 ×
	モーメント	I	m.	17	7.3952 × 10 **	10 ⁻¹¹
	断面積	Α	m²	1/ ²	6.1575 × 10 ⁻⁶	0.01539
構造	質量	Ms	Τf	1/ ³	0.4 × 10 ⁻³	50.0
物	高さ	Hs	m	1/	0.015	0.75
加振加速度			g		(1)	(0.020)

Table-3 Static coefficient of subgrade reaction Kh

		硅 砂	カオリン	火山灰
静的 Kh	kN/m ²	12000	8000	7000

4. 動的水平地盤反力

4 - 1 . P - 解析法

地盤と杭との間の相互作用による地盤反力係数を 算出する方法の一つとして、杭と地盤の間の相互作 用力 Pと相対変位 を算出し作用力を変位で除する (P/)ことで、動的地盤反力係数(*khe1*)として 評価する手法を用いた。加振レベルは、杭および地 盤の塑性化を考慮しない前提として微小変位での実 験で行った。

動的水平地盤反力係数の算出における相対変位および相互作用力は、振動数によって変化する。そのため、動的地盤反力係数の算出方法として、杭と地盤の相対変位が最も顕著に表れる杭基礎の固有振動数での解析を行い、動的水平地盤反力係数と静的水平地盤反力係数との比較を行った。正弦波による加振実験における杭基礎のフーリエ振幅と伝達関数カ ーブフィッティングさせた周波数の関係を図 - 2に示す。杭基礎の固有振動数を、それぞれ硅砂地盤で 52.50Hz、カオリン粘土地盤で45.0Hz、火山灰地盤で62.5Hzと判断した。

杭の変位算出は、杭のひずみ値から曲げモーメン ト分布を算出しカーブフィッティング処理を行う。 カーブフィッティングに使用した関数は計測点数が 4箇所あることから3次関数の多公式で近似してい る。これは、近似曲線関数の2回微分式を行うこと で地盤反力を求めることになるが、地盤反力の関数 が3次関数曲線にて近似できるものと判断した。多 項式の2回積分式により発生する不定定数は、境界 条件を杭の先端がソイルセメントで固定させている ことから杭先端において、たわみ角、変位を零 とした。地盤内の変位は直接地盤内の変位を計測す ることが実験装置的に困難だったことから、地盤の 加速度を2回フーリエ積分にて変位を算出した。こ の時、変位の軸ずれ補正を行う方法としてバンドパ



Fig-2 Sine wave convery function

ス処理を行い算出した。以上の算出方法により杭の 変位、地盤変位、地盤反力が算出され動的地盤反力 係数係数 *khe1* を導いた。

図 - 3に各地盤種別の杭と地盤の相対変位の関係 を示した。地盤反力係数の分布から近似曲線を設定 し平均値から動的地盤反力係数係数 *khe1*を推定 し、表 - 4に示す硅砂地盤で 33000kN/m/m、カオリ ン粘土地盤で 18500kN/m/m、火山灰地盤で 16000kN/m/mを導いた。その結果、動的水平地盤反 力係数 Khe1 は硅砂 > カオリン粘土 > 火山灰 = 2.8 : 2.4 : 2.3 の関係となり、静的 *Kh* の関係を上回る値 を示した。

Table 4 Dynamic coefficient Khe1

		硅 砂	カオリン	火山灰
動的 Khe1	kN/m ²	33000	18500	16000
Khe Kh		2.8	2.4	2.3

4-2.固有值解析法

杭と地盤との動的相互作用に着目した実験や解析 が数多くなされている研究の多くは2次元および3 次元 FEM 解析、Penzien モデル等を用いて検証を行 っている。そこで本研究では、動的地盤反力係数を 静的地盤反力係数の解析に用いた解析モデルを流用 した固有値解析(自由振動におけるモード解析)に



Fig-3 Ground-Pile relative displacement



より評価した。杭の固有振動数での動的水平地盤反 力係数(*khe2*)を算定し検証したものである。その結 果、固有値解析法による動的地盤反力係数*khe2*は、 表 - 5に示す硅砂地盤で55500kN/m/m、カオリン粘 土地盤で13700kN/m/m、火山灰地盤で18000kN/m/m が導かれた。そのため、動的*Khe2*は硅砂 > カオリ ン粘土 < 火山灰 = 4.1 : 1 : 1.3の関係となった。図 -4に解析図を示す。

Table-5 Dynamic coefficient *Khe2*

		硅 砂	カオリン	火山灰
動的 <i>Khe2</i>	kN/m ²	55500	13700	18000
比率	ζ	4.1	1	1.3

5.まとめ

本実験条件下において、杭耐震挙動における動的 水平地盤反力特性に関し以下の基礎資料を得た。

- (1)遠心力載荷装置を用いた正弦波加振実験により、地盤種類別の地盤と杭の基本的な動的特性が概ね明らかとなった。
- (2) P- 法により算定される動的水平地盤反力係数 Khe1は、硅砂地盤で 33000kN/m²・カオリン粘土地盤で 18500kN/m²・火山灰地盤で 16000kN/m²となり、静的水平地盤反力係数 Khとの比率 Khe1/Kh は、それぞれ 2.8、2.4、2.3と異なった結果が得られた。これらは、地盤の強度特性に起因していると想定された。
- (3)動的水平地盤反力係数は、ひずみ及び周波数に 依存性を有しており、固有値解析法で算定され る動的水平地盤反力係数 *Khe2* は地盤の振動モー ドと杭の振動数(固有値)の地盤種別により異 なった関係を示す。

ー連の動的遠心模型実験の解析より、砂質土・粘性 土・火山灰の地盤種類別の周波数の違いが明らかと なり、地盤特性は杭-地盤系の動的相互作用に応じ 種々異なった関係を示した。そのため、動的水平地 盤反力特性の評価のためには、杭-地盤の応答に応 じた設計時の考慮^{7,8)}が必要と考えられる。 6.おわりに

本成果は地盤の動的反力特性に関する知見を得る ための基礎的研究によるものである。そのため、動 的地盤反力特性の今後の検証の必要性を示すため、 動的地盤反力を2つの手法で試算し同一変形レベル での静的地盤反力と対比したものである。ただし、 これらの地盤反力は非線形性は考慮されておらず、 微少変形の杭頭基準変位量を対象としたものであ る。今後、これらの基礎資料を実設計法として反映 していくためには、コーン強度値のみでなく動的地 盤反力との強度特性との詳細な関係やひずみ速度の 依存性など、少なからざる検証および更なる的確な 研究アプローチが必要と考える。

参考文献

1) 道路橋示方書・同解説 耐震設計編:日本道路協会 pp.210-221,2002.3 2)鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計:鉄道総合 技術研究所 平成 11 年 10 月 3)小川篤生・緒方辰男:動的解析による耐震性の照査, 基礎工, vol.25, No.3, 1997 4)大崎順彦:新地震動のスペクトル解析入門 pp.73-79, 1994.5 5) 北海道火山灰土の性質と利用:火山灰土の工学的分類 委員会,地盤工学会北海道支部,1997.10 6) 杭の水平載荷試験方法・同解説:地盤工学会 1983.10 7)王 海波・室野剛隆・西村昭彦:大型セン断土層を用 いた杭基礎と地盤の動的相互作用に関する実験的検討, 土木学会論文集 2000.10 8) 冨澤 幸一・西川純一・齊藤泰弘:動的遠心模型実験 による杭の動的水平地盤反力, 土木学会第 56 回年次学 術講演会論文集, 2001.10

(2003. . 受付)

A Study on the Characteristics of Dynamic Horizontal Subgrade Reaction for Different Types of Ground by Centrifuge Model Experiments Using Single Pile Models

Kouichi TOMISAWA, Satoshi NISHIMOTO, Hirofumi FUKUSHIMA

In this study, static horizontal loading and dynamic vibration tests of single pile models were conducted using centrifuge model tests in a 50 G field for sandy soil ground, as well as for clayey soil ground and volcanic ash ground, which is widely distributed in Hokkaido. Accordingly, basic earthquake-proof evaluation was conducted focusing on the pile ground spring constant. The p- δ method, which focuses on relative displacement of piles and ground during earthquakes, and the eigenvalue analysis method for calculation of the dynamic ground spring constant from the natural period of piles were used as analysis methods. These results showed that the dynamic coefficient *Khe* of horizontal subgrade reaction of piles (a main factor in pile foundation aseismic design methods) must be determined by comprehensive evaluation based on earthquake-proofness for each ground type, rather than by determining *Khe* from the relationship with the static coefficient *Kh* of horizontal subgrade reaction (*Kh* = *Khe*), or from shear elastic waves and other foundation strength constants.