

杭基礎の動的地盤反力に関する 遠心模型装置を用いた実験的研究

富澤 幸一¹・西川 純一²

¹正会員 北海道開発土木研究所 土質基礎研究室 (〒062-8602北海道札幌市豊平区平岸一条三丁目1-34)

²正会員 理博 北海道開発土木研究所 土質基礎研究室 (〒062-8602北海道札幌市豊平区平岸一条三丁目1-34)

本研究では、遠心力載荷装置を用い粘性土地盤および火山灰地盤を対象とした動的加振実験を実施し、杭基礎の地震時挙動検証のための地盤種類別の動的地盤反力の性状について検討した。その結果、動的水平地盤反力係数 K_{he} はひずみおよびひずみ速度に依存しており、共振周波数からの推定が可能であることが分かった。

この関係から求められる K_{he} は、粘性土地盤では地震時水平保有耐力法で算定される値とほぼ同様であり静的水平地盤反力係数 K_h の約3倍であった。しかし、火山灰地盤では地震時水平保有耐力法の設定値と異なり静的地盤反力係数 K_h と同等値であることが明らかとなった。そのため、耐震設計法における杭基礎の適切な耐震評価のためには、地盤性状および杭と地盤の応答特性に応じた地盤反力の設定が必要と考えられた。

Key Words : centrifugal model, ground reaction coefficient, earthquake response, dynamic interaction

1. はじめに

道路橋示方書・同解説IV下部構造編¹⁾(以下 道示)で代表される現行橋梁耐震設計法は、構造部材の強度を向上させると同時に変形性能を高め、橋全体として地震に耐える構造系を目指している。このため、平成7年に発生した兵庫県南部地震を契機に、震度法だけでなく、地震時保有水平耐力法²⁾(以下 保耐法)による照査を義務づけている。さらに、地震時における橋梁構造物の挙動を動力的に解析する手法として動的解析法も提案されている^{1),3)}。

これらの耐震設計法の共通点は、地震作用力に対し一定の剛性を確保するという主に構造系の立場に立ったものであり、道示では地盤の耐震評価としては、算定する際のI種・II種・III種の地盤強度別の区分はあるものの、動的水平地盤反力については、地盤調査結果から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。

つまり、杭基礎設計において、震度法の地震時(動的)水平地盤反力係数 K_{he} はに常時(静的)水平地盤反力係数 K_h の2倍の $K_{he}=2K_h$ としている⁴⁾。

また、保耐法および動的解析法では、杭基礎の水平耐力照査で、震度法の K_{he} をさらに1.5倍して算定される躯体慣性力 $1.5K_{he} \cdot W$ (W :等価重量)が、基礎が支持する終局水平耐力 P_u を越えないように規定している¹⁾。これらの関係は、地盤性状に関係なく一定としている。

しかしながら、地盤はその種類別特性によって地

震時応答特性が異なることから、基礎杭の地震時挙動は上部構造と比べて非常に複雑であり、地震作用力を設計地盤面に一括して静的荷重として作用させる現行の耐震設計法では必ずしも全てが説明されたとはいえない。そのため、地震時の杭基礎挙動解析のためには、杭~地盤系の動的相互作用に関する応答特性の解明が不可欠であり、複雑な要因を含んだ地震時の地盤変形を的確に予測する必要があるといえる。

本研究では、軟弱地盤を想定した粘性土地盤および北海道に多い火山灰地盤を対象として、遠心力載荷装置を用い単杭の静的水平載荷実験および動的加振実験を実施し、基礎のパネ定数に着目した杭基礎の耐震性評価を実施した。この成果から、特に現行耐震設計法における静的水平地盤反力係数 K_h と対比した地盤種別の動的水平地盤反力係数 K_{he} について検証した。

2. 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作成した。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て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

3. 静的遠心水平载荷試験

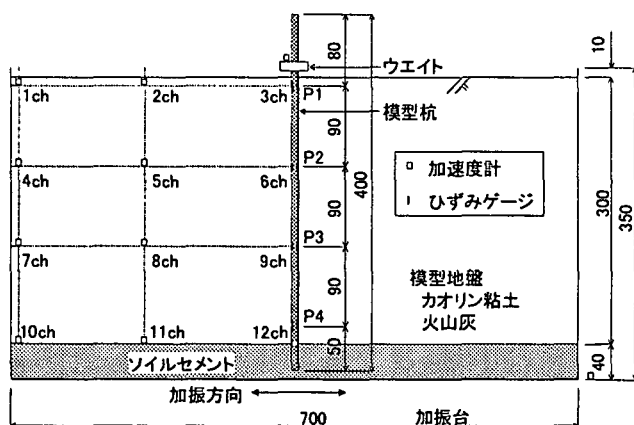


図-1 実験に使用した模型の断面形状

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、杭体が発生する応力測定のためひずみゲージを設置し、さらに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400gのウエイト(実大でP=50ton=0.4kg×50G³⁾を杭頭に設置した。

模型地盤には、軟弱地盤を想定したカオリン粘土および火山灰地盤の代表例として支笏火山灰を用いた。カオリン粘土、火山灰とも攪乱試料としたが、地盤造成の際、カオリン粘土は平均20mmの多層に敷きならし締め固め、火山灰は高さ50cmのフローから落下させ均一性を確保させた。

表-1に、土質物理試験結果および1G場における動的特性を示す。今回実験に用いた火山灰は、支笏軽石流堆積物であるが、工学的特性として砂分の含有が多く不均等粒度傾向にあり、土粒子密度は自然含水比が高くなるに従い若干低下する傾向にあるとされている⁵⁾。

表-1 模型地盤に使用した材料の土質性状

			カオリン粘土	火山灰
土粒子密度	ρ	g/cm ³	1.01	1.05
粒	砂	%	—	68.5
	シルト	%	57.0	23.4
度	粘土	%	43.0	8.1
コーン指数	qu	MN/m ²	0.9	4.4
P波速度	Vp	km/s	0.373	0.396
S波速度	Vs	km/s	0.212	0.076
動ポアソン比	ν	—	0.261	0.481
動せん断係数	Gd	kN/m ²	55000	6660
動弾性係数	Ed	kN/m ²	139000	19700

杭の静的水平载荷試験は、模型杭の杭頭を水平载荷装置により速度0.25mm/分で载荷するひずみ制御法とし、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15mmから $y=0.3\text{mm}$ (15mm/50G)を目安とし、荷重保持時間は地盤工学会基準⁶⁾に準拠し処女荷重15分程度とした。

静的水平载荷試験により、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、実測された荷重、変位および曲げ応力の関係より、弾性床上の梁の理論に基づくWinkler⁷⁾の離散バネとして逆算した。

その際、杭地表面変位yの算定は以下の基本式によった。

$$y = (C1 + C3) / (2 \cdot E \cdot I \cdot \beta^3)$$

$$\beta = 4 \sqrt{Kh \cdot D / 4 \cdot E \cdot I}$$

$$C1 = -H \cdot ((1 + \sin 2\beta \cdot L) \cdot e^{-2\beta L} + e^{-4\beta L}) / \Delta$$

$$- \beta \cdot M \cdot ((\cos 2\beta \cdot L + \sin 2\beta \cdot L) e^{-2\beta L} - e^{-4\beta L}) / \Delta$$

$$C3 = -H \cdot (1 + (1 - \sin 2\beta \cdot L) \cdot e^{-2\beta L}) / \Delta$$

$$+ \beta \cdot M \cdot (1 - (\cos 2\beta \cdot L - \sin 2\beta \cdot L) e^{-2\beta L}) / \Delta$$

$$\Delta = 1 + 2(2 + \cos 2\beta \cdot L) \cdot e^{-2\beta L} + e^{-4\beta L}$$

H: 杭軸直角方向力(kN)
M: 杭頭曲げモーメント(kN・m)
D: 杭径(m)
E: 杭弾性係数(kN/m²)
I: 杭断面2次モーメント(kN/m²)
L: 地中部杭長(m)
C1、C3: 積分定数

静的水平地盤反力係数Kh(逆算K値)の算定のためには、繰り返し計算を必要とするが、試算の結果、杭径の1%つまり基準変位量0.1mm(50G場)に換算した静的水平地盤反力係数Khはカオリン粘土地盤でKh=1240kN/m²、火山灰地盤でカオリン粘土の約3倍のバネ強度を持つKh=3670kN/m²が得られた。

4. 動的遠心载荷試験

(1). 動的波形

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(周波数のランダムな波)による性能試験を実施した。ホワイトノイズROMは、位相差分スペクトル法⁸⁾により以下の仕様で作成した。

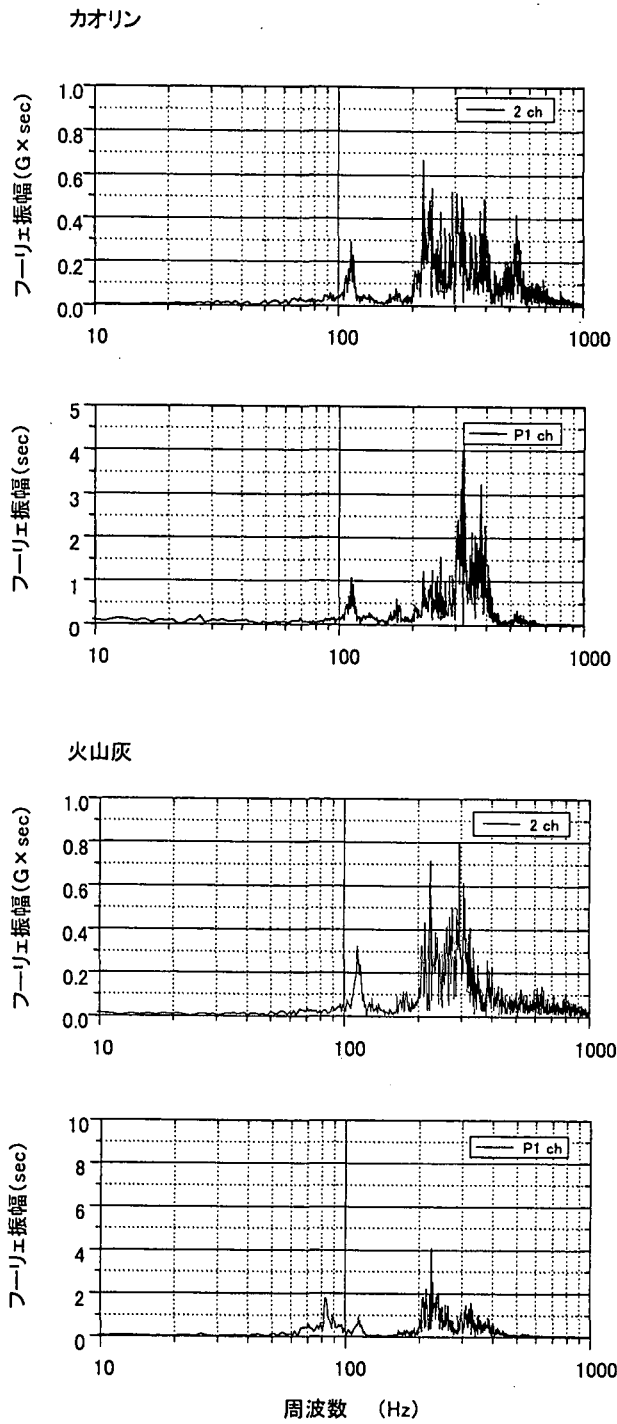


図-2 ホワイトノイズ加振によって得られた波形

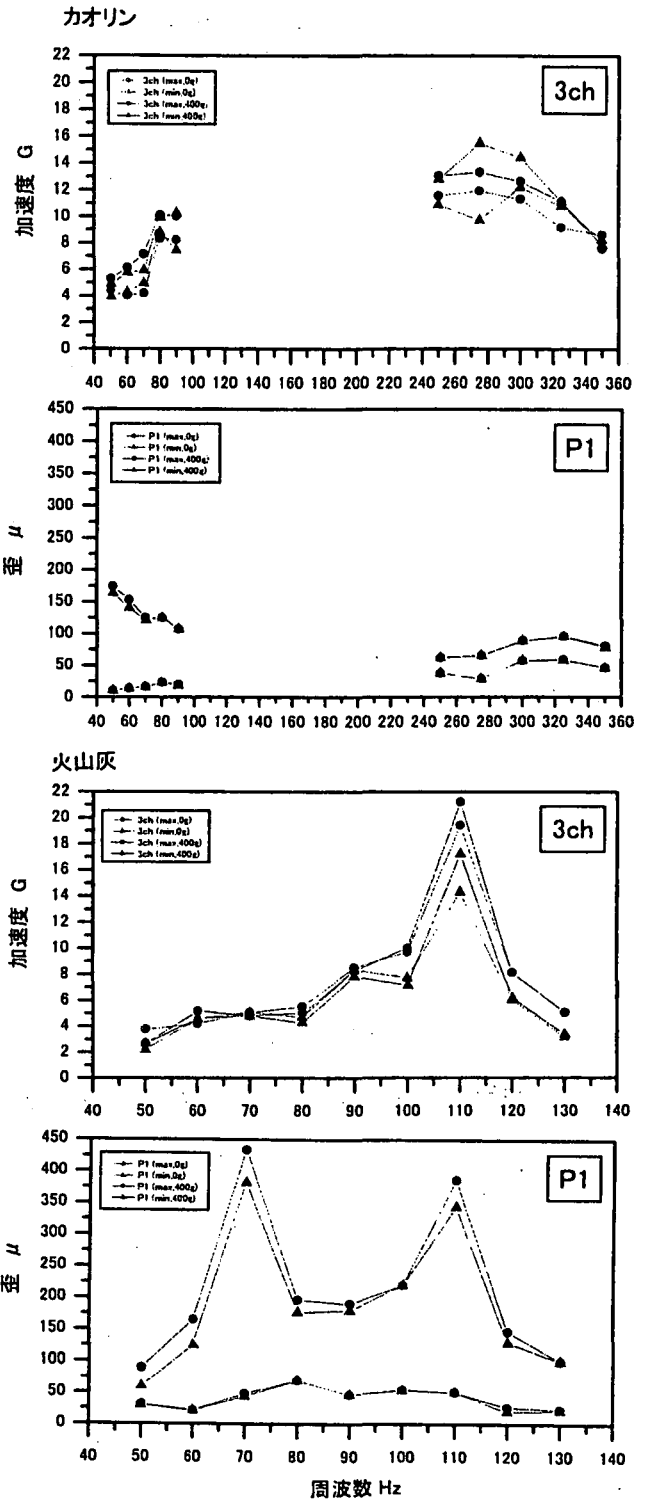


図-3 正弦波加振実験で得られた波形

- ① データ数 4096個
- ② 時間間隔 $\Delta t=0.01$ 秒 (1G場)
- ③ 継続時間 (1G場) $4096 \times 0.01=40.96$ 秒
- ④ 最大振幅 198.5gal

なお、これより先の動的加振実験結果は50G場での考察とする。

ホワイトノイズ加振時における、カオリン粘土および火山灰地盤の地盤地表位置 (2ch) の加速度計と杭上部(P1ch)のひずみ計から得られた周波数のフーリエ振幅の関係を図-2に示す。

地盤の応答特性は、地表に向かい増幅するため周波数は地表部位置で卓越すると考えられるが、50G場においてカオリン粘土では地盤の固有周期はフーリエ振幅スペクトルから111Hz、222~400Hz、520Hzが認められ、杭上部では112Hz、320Hz、381Hzが確認された。同様に、火山灰では固有周期は地盤で113Hz、226Hz付近、300Hz付近、杭で83Hz、114Hz、226Hzが得られた。卓越振動数が複数生じるのは、地盤自体によるものと模型層との連成振動によるものが生じているためと考えられる。

動的加振実験は、静的水平地盤反力と対比した地盤種別の動的水平地盤反力を検証する目的から、地盤と杭基礎の卓越振動数の関係を明らかにするため、正弦波を基本とし、加振台制御ダイナミックアンプ値 (加振加速度) は0.1~2.0レンジに設定し、加振周波数を50Hzから加振装置能力の最大値である350Hzまで変化させた実験とした。この周波数は、50G場の値であり、1G場では比較的長周期の地震波である1~7Hzに相当する。

ホワイトノイズ加振実験後、カオリン粘土および火山灰地盤について、地盤と杭の卓越周波数と想定される周波数区間で、正弦波による加振実験を実施した。その際加振実験は、杭頭に支点の無いケースと下部工を想定した $W=400g$ のウェイトを支点荷重としたケースで実施した (図-3)。その際、特にカオリン粘土地盤では、ホワイトノイズ加振で地盤周波数が卓越した50~100Hzと250~350Hzでの正弦波加振実験とした。

その結果、カオリン粘土地盤における卓越振動数 (固有周期) は地盤で250~300Hz、杭で50Hz以下、同様に、火山灰地盤における卓越振動数は地盤で110Hz、杭で70Hzと考えられた。

そのため、カオリン粘土および火山灰地盤の地盤種別の地盤および杭の加振時のそれぞれの固有周期の違いが確認され、杭基礎耐震設計における地盤種別の動的特性評価の必要性が検証された。

(2). 動的水平地盤反力係数 k_{he}

A. 固有値解析法

動的水平地盤反力係数 k_{he} の推定にあたっては、動的加振実験の結果より地盤と基礎杭の総合的な卓越振動数を把握することが条件となる。

ホワイトノイズ加振および正弦波加振実験の結果得られた、カオリン粘土および火山灰地盤中の杭の卓越振動数はそれぞれ50Hz以下、70Hzであった。これに対応する静的水平地盤反力係数 k_h をパラメータとした固有値解析により動的水平地盤反力係数 k_{he} の算定を試みた (図-4)。

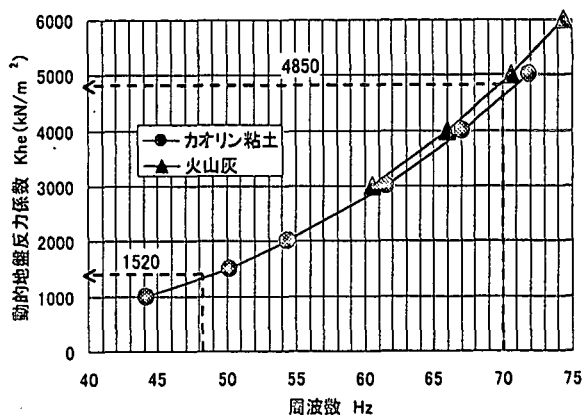


図-4 固有値解析による動的水平地盤反力係数

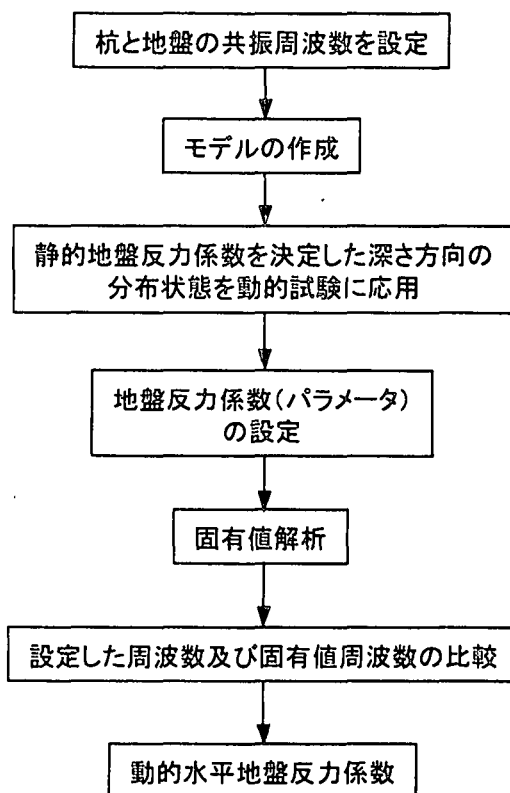


図-5 固有値解析の検討フロー

本算定手法の固有値解析フローを図-5に示す。

試算の結果、動的水平地盤反力係数 K_{he} は、カオリン粘土地盤で $K_{he}=1520\text{kN/m}^2$ 、火山灰地盤で $K_{he}=4850\text{kN/m}^2$ となった。これらは、静的水平地盤反力係数 K_h に対しそれぞれ約1.3倍に相当する。

B. 相対変位法

正確な動的水平地盤反力係数 K_{he} を得るためには、静的水平地盤反力係数 K_h と同一の杭変位レベルにおいて検証する必要がある。

そのため、動的水平地盤反力係数 K_{he} を静的水平地盤反力係数 K_h の算定に準じ、杭と地盤の相対変位・杭の曲げ応力から求められる水平地盤反力 P ～変位 y の関係をを用いて算定した。本手法は、図-6に示したフローに従い、加速度及びひずみのフーリエ変換、3次元関数によるカーブフィッティング、フィルター操作などの数値処理により、地盤と杭変位の関係、さらに動的水平地盤反力係数 K_{he} を算定するものである。

検証の結果、基準変位量 $y=0.1\text{mm}$ (杭径 $10\text{mm}\times 1\%$)に相当する動的水平地盤反力係数 K_{he} は、カオリン粘土地盤で静的水平地盤反力係数 K_h の約3倍の $K_{he}=4170\text{kN/m}^2$ 、火山灰地盤では静的水平地盤反力係数 K_h と同等値の $K_{he}=3870\text{kN/m}^2$ が得られた。

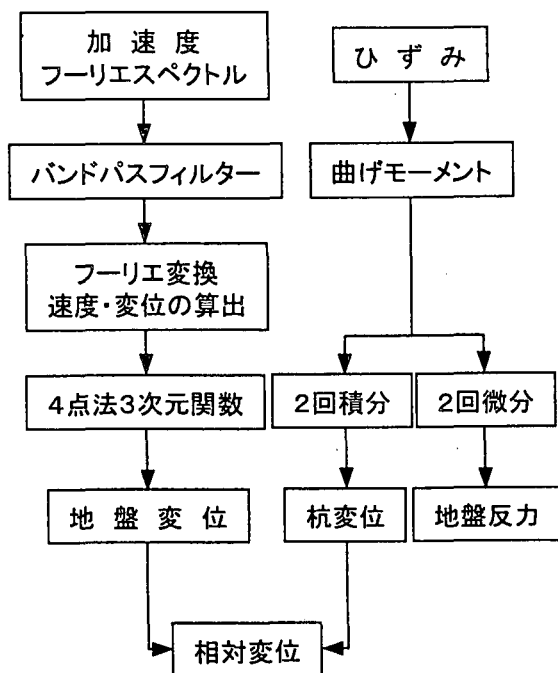


図-6 相対変位法による算定フロー

5. 結論

今回実施した動的遠心模型実験により、本実験条件下において、杭基礎耐震設計における静的地盤反力と対比した動的水平地盤反力特性に関し、概ね以下の事項が明らかとなった。

- ①正弦波加振実験により、固有周期などの地盤種別の地盤と杭の動的特性が明らかとなった。
- ②動的水平地盤反力係数 K_{he} は、ひずみ及びひずみ速度（周波数）に依存性を有しており、共振周波数からの推定が可能である。
- ③動的水平地盤反力係数 K_{he} は、カオリン粘土地盤で地震時保有水平耐力法と同様の静的水平地盤反力係数 K_h の約3倍の値が得られたが、火山灰地盤では静的水平地盤反力係数 K_h と同等値となった。

今後、杭基礎耐震設計における地盤の動的水平地盤反力係数 K_{he} の適切な評価のためには、地盤の種類別性状および杭～地盤の応答特性に応じた検討が必要と考える。

6. おわりに

一般論として、杭基礎は周囲を地盤で取り囲まれているため、それ自体の応答振動がほとんどないといわれている。しかしながら、杭基礎は地震作用力に応じて挙動すると同時に周辺地盤も応答変位する。つまり、杭基礎の地震時の動きは、地震動を地盤から受け取り、さらに上部工へ伝達し、今度は逆に上部構造の応答を慣性力として地盤へ伝達するという経路をたどる。しかもそれらは、異なった波動の形態ごとに複雑な形となる。

そのため、橋梁杭基礎耐震設計では、対象とする地震動のメカニズムとその特性を十分に見極める必要があり、今後の耐震設計技術の開発と向上が望まれるところである。

今回の遠心模型実験による一連の検討により、杭基礎の耐震評価として地盤バネ特性^{9),10),11)}に注目することにより、地震時杭挙動に関する一定の知見を得たと考えている。

今後、杭基礎の被災予測、合理的耐震補強工を含めた耐震設計法を確立していくためには、本研究の事例のように構造系以外にも地盤系からの更なる的確な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V耐震設計編：日本道路協会1997.12
- 2)「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係わる仕様」の準用に関する参考資料(案)日本道路協会 1996.6
- 3)動的解析による耐震性の照査：小川篤生・緒方辰男 基礎工 1997 vol.25 No.3
- 4)道路橋示方書・同解説IV下部構造編 日本道路協会 1997.12
- 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)Die Lehre von der Elastizität und Festigkeit Winkler, E.1867
- 8)新地震動のスペクトル解析入門：大崎順彦
- 9)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 王海波・室野剛隆・西村昭彦 土木学会論文集 2000.10
- 10)Shaking Table Scale Model Tests of Nonlinear Soil-Pile-Superstructure Interaction In Soft Clay Philip James Meymand 1998
- 11)動的遠心模型実験による杭基礎の耐震評価に関する検討 富澤幸一・西川純一・齊藤泰弘 北海道開発土木研究所月報 NO.579 2001.8

Experimental study on dynamic subgrade reaction of pile foundation using centrifuge model test

Kouichi TOMISAWA Jun'ichi NISHIKAWA

In this study, a dynamic excitation test was conducted for clayey ground and volcanic ash ground, using a centrifuge, and characteristics of dynamic ground reaction were examined by type of ground to verify the seismic behavior of pile foundations. As a result, it was found that the dynamic horizontal ground reaction coefficient (K_{he}) was dependent on the strain and strain rate, and could be estimated from resonance frequency.

In clayey ground, the value of K_{he} found from this relationship was the same as the value estimated by the seismic horizontal strength method and three times as large as the static horizontal ground reaction coefficient (K_h). In volcanic ash ground, however, the value was similar to K_h and different from the preset value of the seismic horizontal strength method. It was therefore assumed that setting of ground reaction in accordance with the ground properties as well as response characteristics between piles and the ground was necessary for appropriate earthquake-proof evaluations in seismic design methods for pile foundations in the future.