



Title	液状化した火山灰質地盤における杭の水平地盤反力係数の評価
Author(s)	江川, 拓也; 磯部, 公一; 畠山, 乃
Citation	土木学会論文集C (地圏工学), 76(2), 191-203 https://doi.org/10.2208/jscejge.76.2_191
Issue Date	2020
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/79841
Rights	© 2020 公益社団法人 土木学会
Type	journal article
File Information	76_191.pdf



液状化した火山灰質地盤における 杭の水平地盤反力係数の評価

江川 拓也¹・磯部 公一²・畠山 乃³

¹ 正会員 国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3-1-34)

E-mail: egawa@ceri.go.jp

² 正会員 北海道大学大学院准教授 工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

E-mail: kisobe@eng.hokudai.ac.jp

³ 正会員 国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3-1-34)

E-mail: hatakeyama-o82ac@ceri.go.jp

火山灰質地盤における杭基礎では、常時の周面抵抗特性や水平抵抗特性が砂質土地盤とは異なることが確認されており、地震時における地盤～杭基礎系の相互作用も砂質土とは異なることが考えられる。

本検討では、火山灰質地盤の液状化に伴う杭の水平地盤反力係数の低減について、地盤の液状化強度比を指標とした火山灰質地盤と砂地盤における杭の遠心力模型実験結果から定量的な評価を試みた。地盤の液状化に伴う杭の水平地盤反力係数の低減度を表す関係式を提案し、低減係数を評価した結果、地盤の液状化強度比との相関が確認されるとともに、火山灰質地盤では砂地盤よりも約 2 倍大きく評価された。このことから、火山灰質地盤の液状化に伴う杭の水平地盤反力係数の低減は、砂地盤の 1/2 程度と考察された。

Key Words : volcanic ash soil, liquefaction, pile foundation, coefficient of horizontal subgrade reaction, centrifuge model test

1. はじめに

日本の高度経済成長期に構築された道路構造物基礎には、耐震設計の概念が希薄であった時期に施工されたことから、現行の耐震設計法との不整合や地震履歴による損傷や変状が認められているものもある。今後、既設道路構造物基礎の長寿命化を図るためには、適正な耐震性能評価法や的確な維持管理手法を確立する必要がある。そのためには、道路構造物基礎周辺地盤の地震時の性状も含めた適切な評価が重要である。

火山国である日本には、第四紀以降の活発な火山活動によって火山噴出物が広域に堆積しており、その種類や性質は多様である^{例えば 1)~3)}。その中でも北海道には粗粒な火山灰質土が広範囲に堆積しており、この粗粒な火山灰質土は、一般的な砂質土とは異なる物理・力学特性を示すことが明らかとなっている^{4)~7)}。しかし、火山灰質粗粒土地盤における道路橋杭基礎の設計は、一般に砂質土に準じて設計されており、過去の検討において、北海道の火山灰質粗粒土地盤における道路橋杭基礎では、常時の杭の周面摩擦力の実測値が砂質土に準じた設計値よ

りも小さい⁸⁾ことや、杭の水平抵抗特性が砂質土地盤とは異なる⁹⁾ことを確認している。これらのことから、地震時における地盤～杭基礎系の相互作用も砂質土とは異なることが考えられる。

地震時における地盤～杭基礎系の相互作用を検討する上では、液状化時の杭の水平地盤反力～変位関係を明らかにすることが重要である。これまでに、火山灰質地盤の液状化時における道路橋杭基礎の水平地盤反力～変位関係の砂地盤との違いを明らかにすることを目的に、地盤の相対密度ならびに液状化強度比を指標とした杭の遠心力模型実験を行っている^{10), 11)}。その結果、火山灰質地盤、砂地盤ともに杭の水平変位は加振初期に大きな値の振幅を示すが、液状化の進展に伴い杭の水平地盤反力ならびに水平地盤反力係数が低減し、杭の水平変位の振幅が減少する傾向が確認された。さらに、火山灰質地盤、砂地盤ともに液状化に伴う杭の水平地盤反力係数の低減に、液状化強度比が影響を与える可能性や、火山灰質地盤ではその低減が砂地盤よりも小さい可能性が窺われた。このことは、液状化強度比に応じた火山灰質地盤独自の低減設定が必要であることを示唆している。

そこで本検討では、液状化強度比を指標とした火山灰質地盤と砂地盤における杭の遠心力模型実験結果の整理から、液状化に伴う杭の水平地盤反力係数の低減に関する定量的な評価を試みた。具体的には、動的加振実験ならびに静的水平載荷実験の結果からそれぞれ杭の水平地盤反力係数～変位関係を求め、両者の関係から液状化に伴う杭の水平地盤反力係数の低減度を表す関係式を提案し、液状化強度比に応じた火山灰質地盤と砂地盤の液状化時の杭の水平地盤反力係数の低減係数の違いについて考察した。

2. 遠心力模型実験の概要

実験には、寒地土木研究所が所有する有効半径 2.5m、最大搭載容量 50g-ton のビーム型の遠心力装置を用いた。実験土槽は、鋼製 (SS400) の剛土槽である。

遠心力模型実験は、図-1 に示す 1/50 縮尺模型に、50g の遠心加速度を作用させ、表-1 に示す実験条件で動的加振実験と動的加振実験前に静的水平載荷実験を行った。

動的加振実験における入力地震動は、本検討では地盤の液状化に伴う杭の水平地盤反力係数の低減傾向について基礎的な知見を得ることを目的とすることから正弦波 20 波とした。また、別途実施した予備実験において、模型地盤全体に液状化が確実に生じることが確認された、周波数 1.5Hz、最大加速度 400cm/s² 程度の実物換算値が基盤の加速度計で得られるように設定した。参考として、道路橋示方書¹²⁾に基づき算出した入力加速度に対する模型地盤中央深度での液状化抵抗率 F_L を表-1 に示す。 F_L 算出時の地震時せん断応力比 L に用いる設計水平震度 k_{eq} は、入力加速度 400cm/s² を重力加速度 980cm/s² で除した値としており、動的せん断応力比 R は、後述する各模型地盤の液状化強度比 R_{L20} としている。加振回数、各ケースともに 1 回のみである。動的加振実験前の静的水平載荷実験は、各ケースにおいて杭地表面変位が杭径の 1% 以上得られ、かつ、杭および周辺地盤への応力や変位が残留しない範囲で実施している。

模型杭には、表-2 に示す諸元で作製した鋼製 (SS400) のパイプを用いた。模型杭の曲げ剛性 EI は、模型杭作製直後に実施した杭の曲げ試験から得た値である。杭配列は、図-1 に示すように 2 本×2 列の組杭とし、杭中心間隔は 30mm=3D (D : 杭径) とした。杭先端は固定とし、杭頭はプレート状の錘により連結した。対象とする地盤への根入れ長は 300mm (実物換算値 15m) である。4 本組杭のうち 1 本には、ゲージ長 1mm の小型薄型のひずみゲージを 6 深度各 2 点杭の外側に接着剤で貼り付けており、各深度 2 アクティブゲージ法によるブリッジ回路を構成することにより軸ひずみ成分を除去し、実験によ

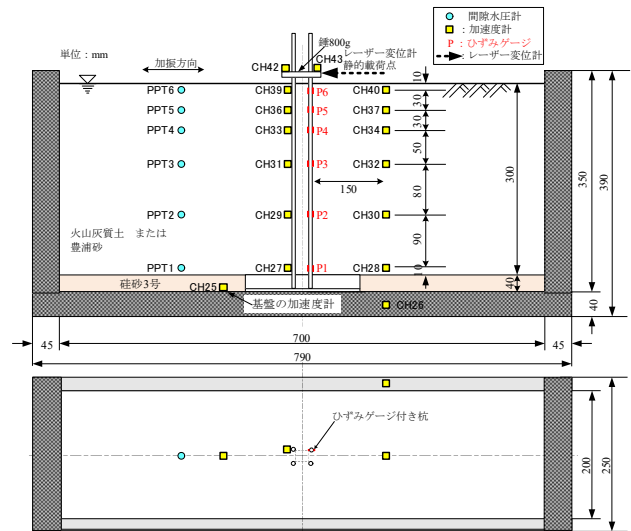


図-1 実験模型概要

表-1 実験ケース

	模型地盤	基盤への 入力地震動	模型地盤中央深度 での液状化抵抗率 F_L
1	火山灰質土 $D_r=85\%$, $\rho_d=1.097\text{g/cm}^3$ $k=2.08\text{E-}06\text{m/s}$, $R_{L20}=0.183$	正弦波20波 周波数1.5Hz 最大400cm/s ² 程度 単発加振 ※実物換算値	0.20
2	火山灰質土 $D_r=81\%$, $\rho_d=1.082\text{g/cm}^3$ $k=2.63\text{E-}06\text{m/s}$, $R_{L20}=0.149$		0.16
3	豊浦砂 $D_r=55\%$, $\rho_d=1.493\text{g/cm}^3$ $k=2.35\text{E-}04\text{m/s}$, $R_{L20}=0.183$		0.24
4	豊浦砂 $D_r=40\%$, $\rho_d=1.449\text{g/cm}^3$ $k=2.64\text{E-}04\text{m/s}$, $R_{L20}=0.149$		0.19

り杭に生じる曲げひずみを計測している。なお、杭の曲げ応答に影響が生じないようにひずみゲージからのリード線に緩みを持たせる等、配線に配慮している。また、各模型地盤の間隙流体には後述するシリコンオイルを用いていることから、ひずみゲージには特段の防水処理は施していない。

火山灰質地盤模型には、北海道の代表的な火山灰質粗粒土である支笏軽石流堆積物 Spfl (採取地: 北海道北広島市) の 0.85mm ふるい通過分を用いた。この火山灰質土は、平成 15 年十勝沖地震、平成 30 年北海道胆振東部地震において札幌市内で大規模な液状化^{13), 14)}が生じた Spfl と起源を同じとするものであり、土粒子密度 ρ_s が小さく、細粒分含有率 FC が大きく、かつ、非塑性であることが特徴である。砂地盤模型には、試験や実験の際に標準的な砂として一般に使用される豊浦砂を用いた。各模型地盤材料の物理特性を表-3 に、粒径加積曲線を図-2 に示す。火山灰質土の FC が豊浦砂に比べ大きいものの、各模型地盤材料ともに液状化の判定を行う必要がある砂質土層 ($FC \leq 35\%$, $D_{50} \leq 10\text{mm}$ かつ $D_{10} \leq 1\text{mm}$)¹²⁾ に分類される。

表-2 模型杭の諸元

模型杭	
材質	SS400
杭径 D (mm)	10 (500)
肉厚 t (mm)	0.2 (10)
長さ L (mm)	400 (20,000)
曲げ剛性 EI ($\text{kN} \cdot \text{m}^2$)	1.728E-02 (1.080E+05)

()内は実物換算値.

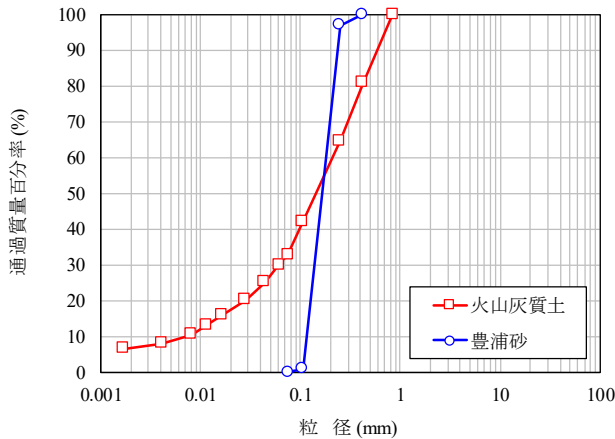


図-2 模型地盤材料の粒径加積曲線

表-3 模型地盤材料の物理特性

模型地盤材料	火山灰質土	豊浦砂
砂分(%)	67.1	99.8
シルト分(%)	24.2	0.1
粘土分(%)	8.7	0.1
細粒分含有率 FC (%)	32.9	0.1
最大粒径 $D_{\max}$ (mm)	0.85	0.43
50%粒度 D_{50} (mm)	0.143	0.164
10%粒度 D_{10} (mm)	0.007	0.115
均等係数 U_c	29.90	1.60
曲率係数 U_c'	2.60	0.91
土粒子の密度 ρ_s (g/cm^3)	2.434	2.634

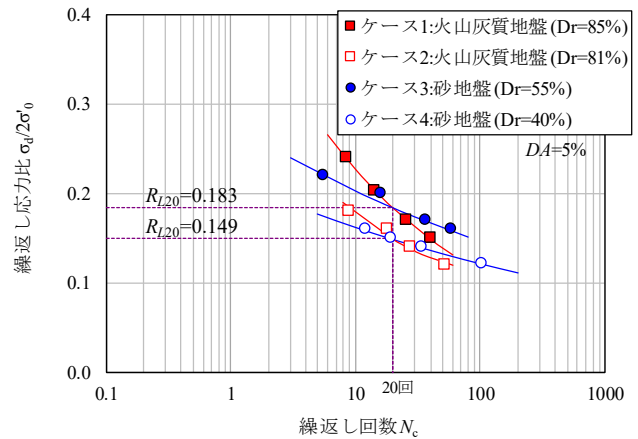


図-3 模型地盤の液状化強度曲線

模型地盤の作製は、表-1に示すとおりケース1とケース3ならびにケース2とケース4の火山灰質地盤と砂地盤の液状化強度比 R_{f20} がそれぞれ同等となる相対密度 D_r を事前に検討し作製した。ここで、 R_{f20} は各ケースの地盤中央深度の実物換算有効拘束圧で実施した土の繰返し非排水三軸試験 (JGS0541-2009) における、両振幅軸ひずみ $DA=5\%$ 、繰返し回数 $N_c=20$ 回に対応する繰返し応力振幅比としている。図-3に各模型地盤の繰返し非排水三軸試験による液状化強度曲線ならびに R_{f20} の値を示す。 R_{f20} がそれぞれ同等となる D_r の大きさは、両地盤材料で異なった。模型地盤内には、遠心力模型実験で多くの実績を有する超小型軽量の防水型加速度計と間隙水圧計を図-1に示す箇所に設置している。

各模型地盤の間隙流体には、透水現象 (過剰間隙水圧の蓄積・消散) の相似則を満足させるため、水の50倍の動粘度 (50cSt) を持つシリコンオイルを脱気して用いている。模型地盤の飽和は、作製した模型地盤を土槽ごと脱気槽内に設置し、模型地盤を脱気後、模型地盤とシリコンオイルに同じ負圧を作用させた状態で土槽底面からシリコンオイルをゆっくりと浸透させている。

各種計測値のサンプリング間隔は、実物換算値で、静的水平載荷実験では 1.0sec、動的加振実験では 0.01sec である。

3. 実験結果と考察

前章の条件で実施した遠心力模型実験から得られた計測データを整理し考察を行った。以降に示す計測値等の数値は実物換算値として整理している。

(1) 静的水平載荷実験による載荷点の荷重～変位関係

図-4に、静的水平載荷実験により得られた各ケースの杭頭載荷点における水平荷重～水平変位関係を R_{f20} 別に示す。いずれの R_{f20} においても、砂地盤よりも D_r が大きい火山灰質地盤の水平荷重～水平変位関係の傾きが小さく、杭の静的水平地盤反力は、 R_{f20} が同等の砂地盤に比べて火山灰質地盤では小さいことが窺われる。また、火山灰質地盤、砂地盤ともに若干の差ではあるが R_{f20} の小さいケースで傾きが小さい。

図-5に、後述する3次スプライン関数により補間した静的水平載荷実験による各ケースの杭の曲げモーメントの深度分布を示す。各ケースともに、杭頭載荷点における水平荷重～水平変位の増加に伴い杭の曲げモーメントがマイナス方向に増加し、GL-3.5mまでの範囲で大きな値を示した。火山灰質地盤では杭の曲げモーメントの最大値が生じる深度が砂地盤に比べて深く、このことから R_{f20} が同等の砂地盤に比べて火山灰質地盤の杭の静的

水平地盤反力が小さいことが窺われる。

なお、静的水平載荷実験における杭の水平変位量は、杭周辺の地盤抵抗の塑性化が抑制され、基礎の応答の可

逆性が確保される杭の水平変位の制限値（最小 15mm）以下¹⁹⁾であり、以降の動的加振実験への地盤の乱れの影響はないものと判断される。

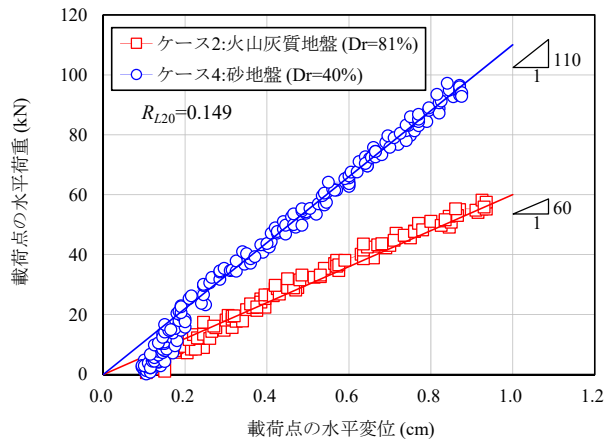
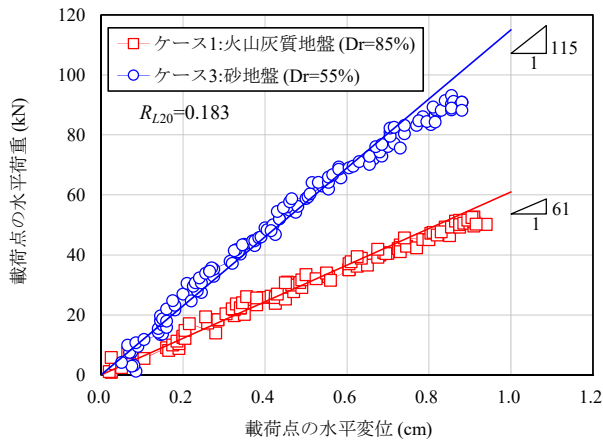


図4 静的水平載荷実験の杭頭載荷点における水平荷重～水平変位関係

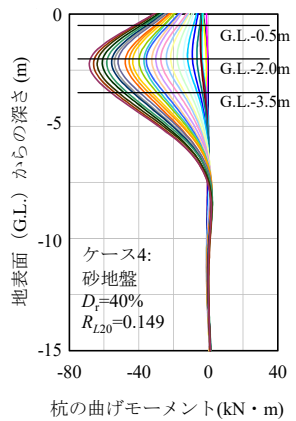
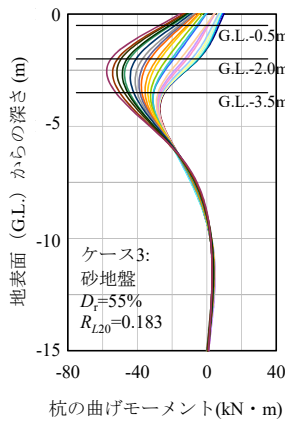
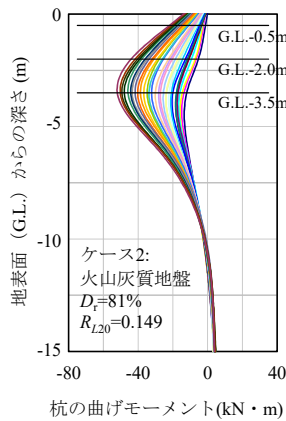
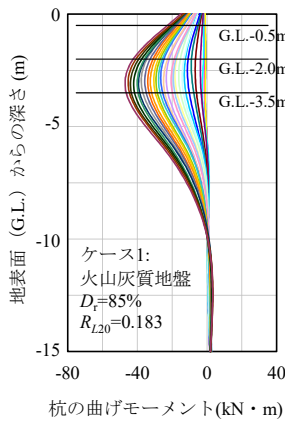


図5 静的水平載荷実験による杭の曲げモーメントの深度分布

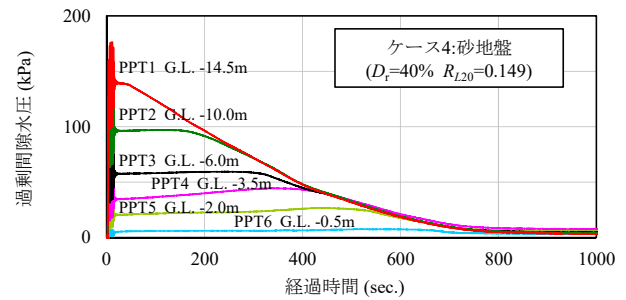
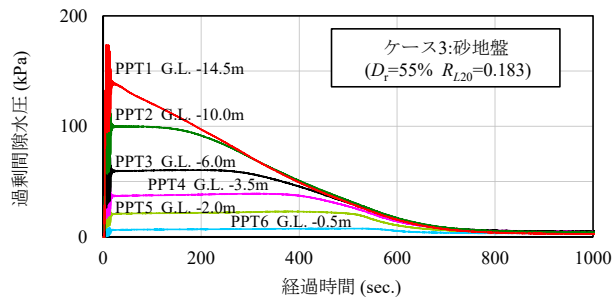
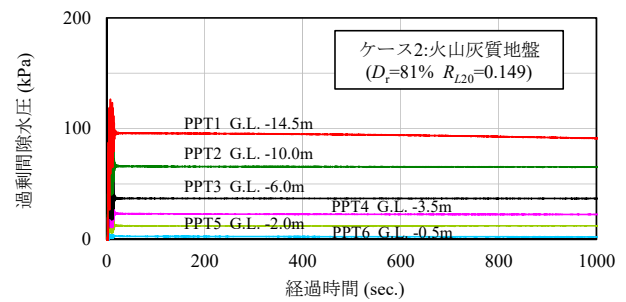
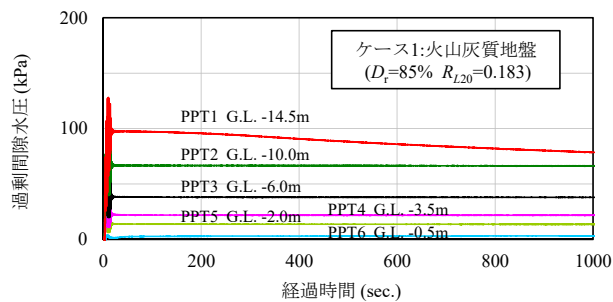


図6 動的加振実験により地盤内に発生した過剰間隙水圧の時刻歴 (0～1000sec.)

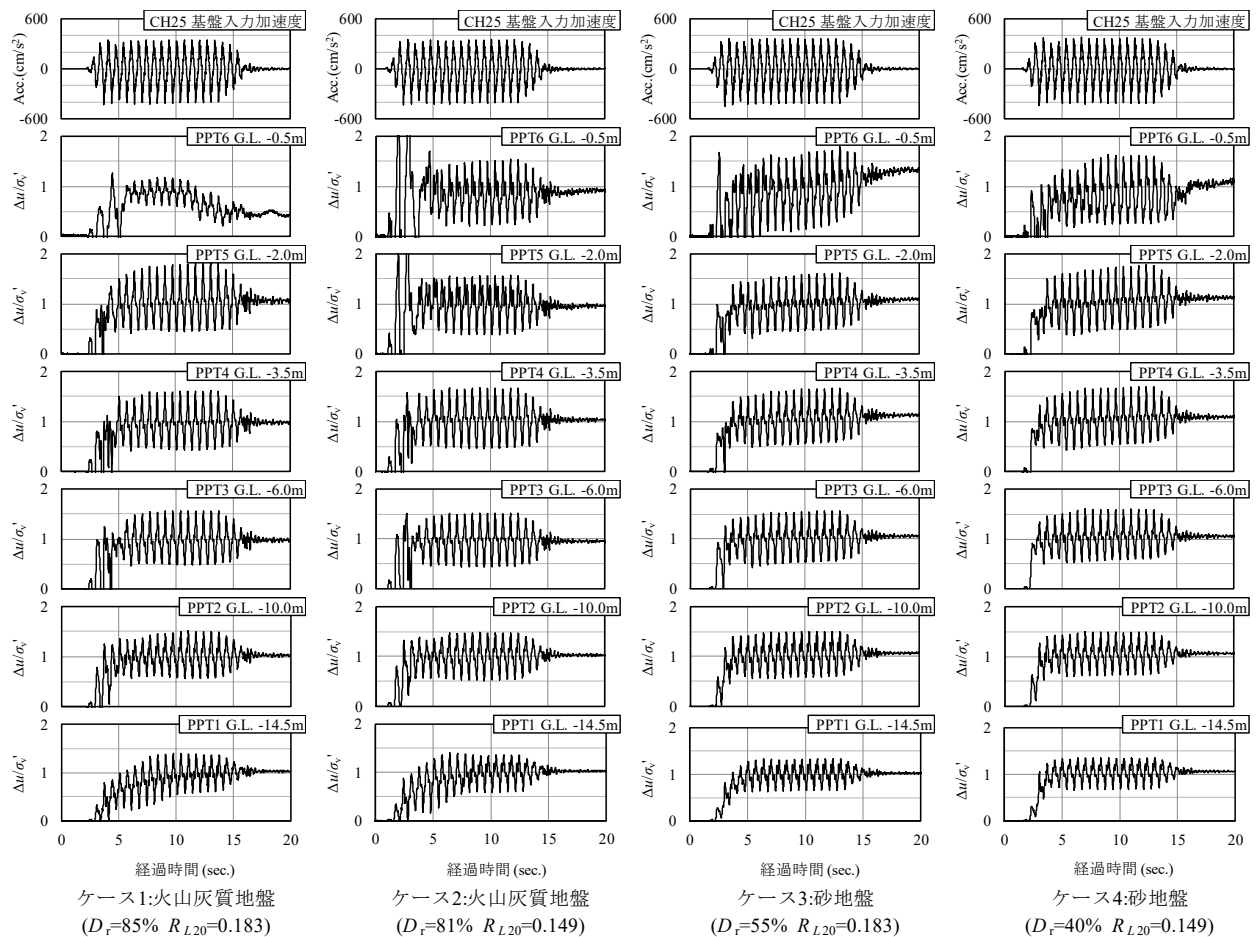


図-7 動的加振実験により地盤内に発生した過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_v$ の時刻歴 (0~20sec.)

(2) 動的加振実験による地盤内過剰間隙水圧の挙動

図-6に、動的加振実験により各ケースの地盤内に発生した過剰間隙水圧 Δu とその消散過程の時刻歴を示す。砂地盤（ケース 3, 4）では、発生した Δu が時間の経過に伴い早く消散する様子が確認される。一方、火山灰質地盤（ケース 1, 2）では、その程度が遅く、砂地盤に比べ細粒分が多く透水係数 k （表-1）が小さいことに起因すると考えられる。両地盤ともに、 R_{L20} が異なることによる Δu の消散過程に大きな違いは認められない。

図-7は、図-6の0~20secにおける各深度の Δu を各深度の有効土被り圧 σ'_v で除し、過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_v$ の時刻歴として整理したものである。なお、図には基盤への入力加速度の時刻歴を併せて示した。間隙水圧の計測データには振動による動水圧も含まれているが、波形データ中心で評価すると各ケースともに地盤深部においても $\Delta u/\sigma'_v$ が 1.0 に達しており、地盤全体に液状化が生じていることがわかる。G.L.-2.0m までの浅部では波形の乱れにより定かではないが、G.L.-3.5m 以深においては砂地盤に比べ火山灰質地盤では $\Delta u/\sigma'_v$ が 1.0 に達するまでの過程が緩やかに見受けられる。火山灰質地盤では σ'_v が小さいことから砂地盤よりも早期に $\Delta u/\sigma'_v$ が 1.0 に達すると考えられるが、 k が小さいことの影響が考えられ細粒分の多い

火山灰質地盤における液状化の特徴の一つと考えられる。

(3) 液状化に伴う杭の水平地盤反力係数の低減の評価

ここでは、静的水平載荷実験ならびに動的加振実験の結果から、それぞれの杭の水平地盤反力係数~水平変位関係を求め、両者の関係から液状化に伴う杭の水平地盤反力係数の低減度を表す関係式を整理する。さらに、関係する係数から火山灰質地盤と砂地盤の液状化時の杭の水平地盤反力係数の低減の違いについて検討する。

a) 実験結果からの杭の水平地盤反力係数の算定方法

道路橋杭基礎の現場水平載荷試験からの杭の水平地盤反力係数の評価は、一般に杭地表面変位が基準変位時（杭径の 1% に相当する変位時）における変位量から、杭の弾性地盤反力法の基本方程式に基づき、杭の水平抵抗領域である杭の特性長 $1/\beta$ の深さまでの平均的な値として行われる¹⁵⁾。しかし、動的加振実験を含む本検討では、加振により杭に繰り返し生じる変位に応じた水平地盤反力係数の変化を評価する必要があるため、実験により各深度で計測される杭の曲げひずみから曲げモーメントを求め、これを深度方向に二階微分または二階積分することで杭の水平地盤反力と杭の水平変位を算定する時松ら¹⁶⁾の整理方法を参考とした。このため、静的水平載

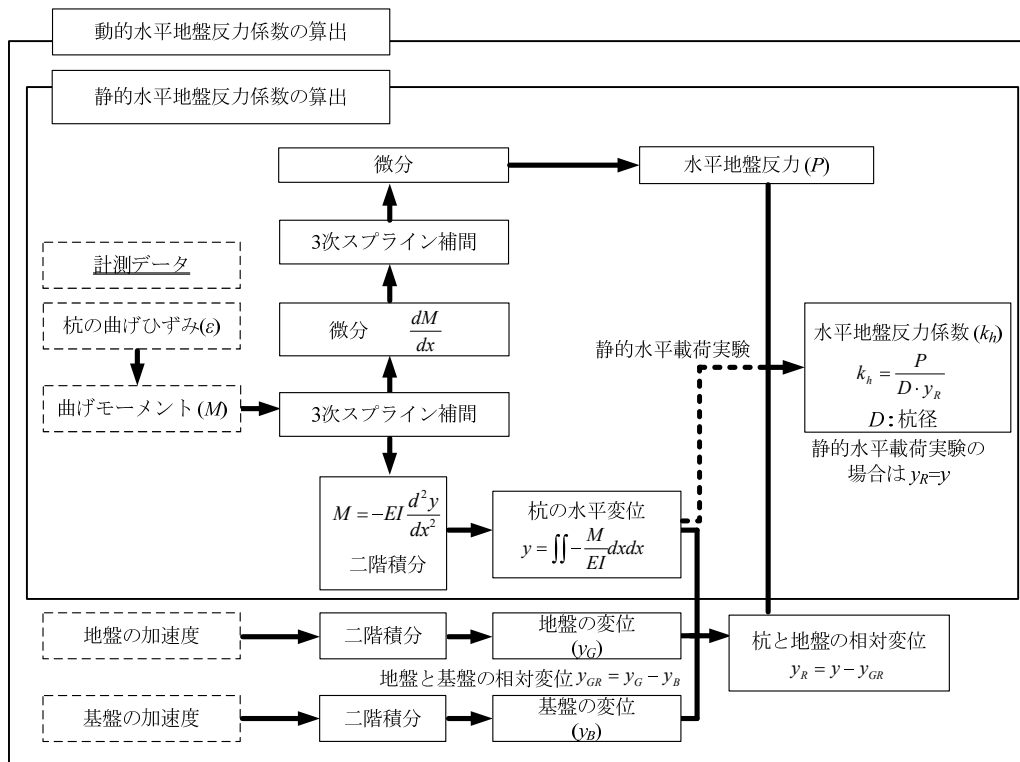


図8 動的加振実験ならびに静的水平載荷実験の計測データに基づく杭の水平地盤反力係数の算定方法

荷実験結果の評価へも同様の手法を用いた。

実験等により得られた杭の曲げモーメントの点の分布から杭の水平地盤反力を評価するにあたり、多項式近似（一般に5次～8次）により曲げモーメントの分布関数を求めることは良く行われる。しかし、この方法では、杭の全深度を同じ精度で近似することが困難であることや、その関数を微分した時の近似精度の低下、特に地盤反力のように二階微分が必要な時にはさらにその精度が低下する問題がある。これまでの検討^{10,11)}では、実験で得られる杭の曲げモーメントの点の分布を、全深度ほぼ同じ精度で近似できる3次スプライン関数により近似し、曲げモーメントの分布関数を求めている。スプライン関数は、与えられたデータ点を滑らかな曲線で結ぶ補間曲線の一つである。一つの節点間には一つの多項式が与えられ、前後の節点間の多項式との結び目である節点では滑らかな性質を持った関数であり、多項式の集まりであることから微分・積分が容易である利点がある。

しかしながら、その関数を二階微分して求める杭の水平地盤反力の深度分布が滑らかな曲線とはならず、杭の水平変位との関係から求める杭の水平地盤反力係数が連続したデータとはならない問題があった。液状化中の杭の水平地盤反力係数の低減度を定量的に評価するにあたり、実験結果から精度良く杭の水平地盤反力係数を評価する必要がある。

このような問題に対し菊池¹⁷⁾は、比較的精度良く杭の静的水平地盤反力分布が推定できる整理方法として、3

次スプライン関数で補間した杭の曲げモーメント分布を一度微分した後に、もう一度3次スプライン関数で補間し直し、2回目の微分を行うことを提案している。そこで、本検討では、動的加振実験を含む本実験結果に同様の整理方法を適用し、精度の良い静的ならびに液状化中の杭の水平地盤反力係数の評価を試みた。

図8に、菊池¹⁷⁾の提案する整理方法を考慮した杭の水平地盤反力係数の算定方法を示す。水平地盤反力係数 (k_h) は、水平地盤反力 (P) と杭と地盤の相対変位 (y_R) より求める。ここで、杭と地盤の相対変位 (y_R) は、杭の水平変位 (y) から地盤と基礎の相対変位 (y_{GR}) を引いたものであり、地盤と基礎の相対変位 (y_{GR}) は、地盤の変位 (y_G) から基礎の変位 (y_B) を引いたものである。地盤の変位 (y_G) と基礎の変位 (y_B) は、応答加速度記録を二階積分することで求める。加速度記録の波形処理では、0.5～10Hzのバンドパスフィルターをかけている。水平地盤反力 (P) は、杭の曲げモーメント (M) を深さ (x) で二階微分することで求める。なお、水平地盤反力 (P) の深度方向の分布曲線を滑らかにするために、先述のとおり3次スプライン関数で補間した曲げモーメント (M) を一度微分した後に、再び3次スプライン関数で補間し直し、それをもう一度微分することを行っている。積分側ではこのような問題が無ことから杭の水平変位 (y) は、杭の曲げモーメント (M) を深さ (x) で二階積分することで求めている。杭の曲げモーメント (M) は、測定された杭の曲げひずみ (ϵ)

より求める。

ここで、杭の水平変位は杭各深度に加速度計を貼り付ければその応答加速度記録を時間で積分しても求められる。そこで、加振ならびに液状化による地盤変位の影響を排除し、杭の曲げひずみと杭の応答加速度から算出される杭の水平変位の精度を比較する目的で、図-1に示す実験模型に対し模型地盤を作製せず、杭周辺をシリコンオイルのみとした動的加振実験を別途行った。なお、杭に貼り付けた防水型加速度計は0.3gと超小型軽量であり、この加速度計による慣性力の影響はほぼないものと解釈している。また、加振方向へ貼り付けることにより、シリコンオイルならびに周辺地盤の抵抗が増加しないように配慮している。

図-9に、両算定方法から算出した加振中の杭の水平変位を比較して示す。G.L.-0.5m（ひずみゲージP6）では、両者の算定値に差異が認められるが、その他の深度では両者はほぼ同じ値を示しており位相にもずれが見られていない。このことから、どちらの算定方法を用いてもほぼ同じ値の杭の水平変位が得られることがわかる。しかし、杭周辺に地盤が存在する場合、加振中の地盤変位の影響により杭に曲げや傾きが生じるためか応答加速度に乱れが生じ、杭に貼り付けた加速度計からでは正確に水平加速度を計測できないことが確認された。一方、ひずみゲージでは、杭に曲げや傾きが生じてでも応答曲げひずみが安定して得られていた。このため、本検討では、計測された杭の曲げひずみより曲げモーメントを求め、杭の水平変位を算定している。

b) 実験結果からの杭の水平地盤反力係数～変位関係

本検討では、液状化に伴う加振前の杭の水平地盤反力係数の変化を評価することを目的としていることから、加振前の静的水平載荷実験において杭の曲げモーメントすなわち静的水平地盤反力が明確に発現したG.L.-0.5m～G.L.-3.5m（P6～P4）の範囲を評価の対象とする。

図-10に、静的水平載荷実験の計測データから図-8の方法で算定した杭の静的水平地盤反力係数 k_{H0} ～水平変位 y_0 関係を示す。図には、1.0sec.間隔で得られたデータ

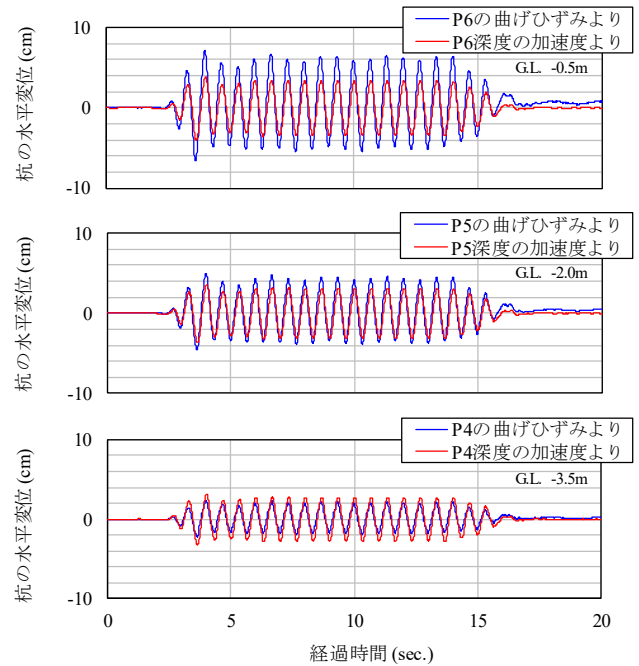


図-9 異なる計測データから算出した杭の水平変位の比較

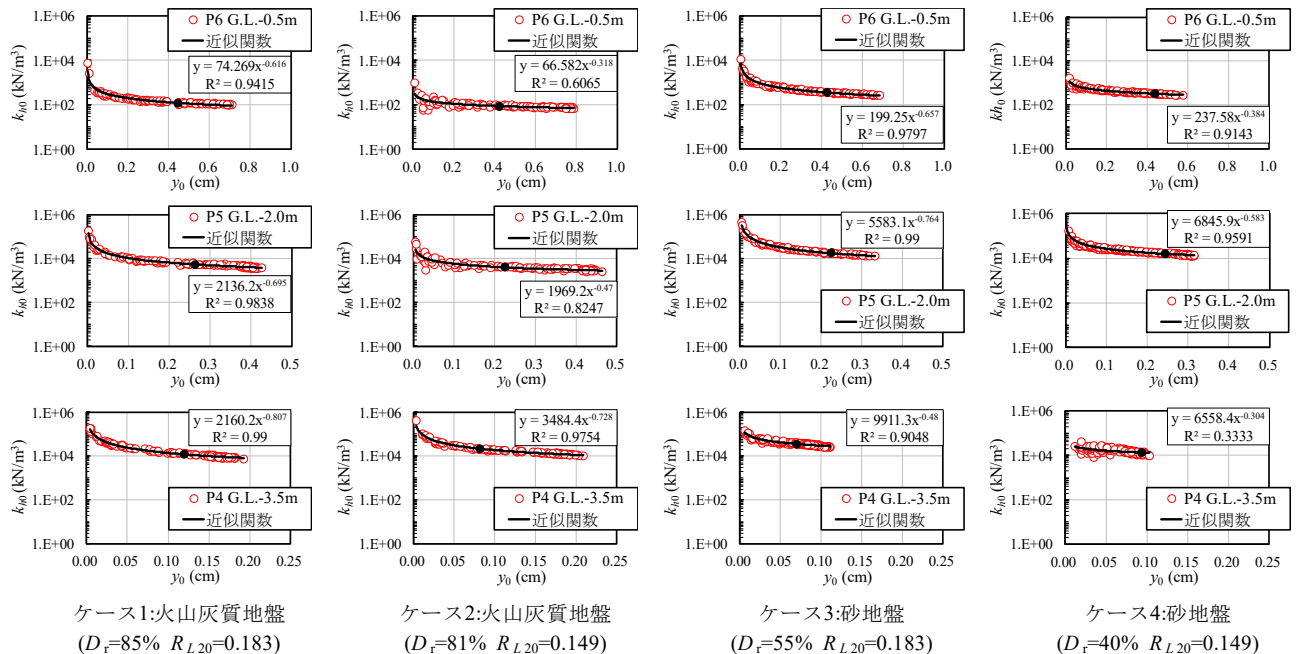


図-10 静的水平載荷実験により G.L.-0.5m～G.L.-3.5m（P6～P4）で得られた杭の静的水平地盤反力係数 k_{H0} ～水平変位 y_0 関係

の近似関数曲線を併せて示した。ケース2のG.L.-0.5m, ケース4のG.L.-3.5mでの相関係数が低いものの, 3次スプライン関数で補間した杭の曲げモーメント分布を一度微分した後にもう一度3次スプライン関数で補間し直し2回目の微分を行うことで連続した $k_{\theta} \sim y_{\theta}$ 関係が得られた。各ケース各深度において, y_{θ} の増加に伴い k_{θ} は減少する傾向を示し概ね収束した。同じ R_{L20} と比較するといずれの深度においても砂地盤に比べて火山灰質地盤での水平変位量が大きく, 収束した k_{θ} が小さい傾向が得られた。また, 図中の近似関数曲線上には, 各ケースにおいて杭地表面変位が杭径の1% (0.5cm) となった時点の当該深度での k_{θ} を黒丸プロットで示したが, $R_{L20} = 0.149$ (ケース2, ケース4) のG.L.-3.5mを除いて, 砂地盤に比べて火山灰質地盤の値が小さいことがわかる。

図-11から図-13に, 動的加振実験においてG.L.-0.5m~G.L.-3.5m (P6~P4) で得られた計測データから図-8の方法で求めた主要な算定値の時刻歴を, 基盤への入力加速度, 杭頭錘の応答加速度ならびに各深度の $\Delta u/\sigma_v'$ の時刻歴と併せて示す。

杭の曲げモーメント (M) ならびに杭の水平変位 (y) は, ケース別, 深度別でその程度に差はあるものの, 加振初期に大きな値の振幅を示し, 加振による過剰間隙水圧の上昇すなわち液状化の進展に伴い振幅が減少, ま

たは, 乱れる傾向が確認される。加振初期からの振幅の減少度合いは, R_{L20} の大小にかかわらず D_r が大きな火山灰質地盤で顕著であるが, 砂地盤の $D_r = 85\%$ とした過去の実験¹⁰⁾においても同様の傾向が確認されている。

地盤と基盤の応答加速度から求めた地盤と基盤の相対変位 (y_{GR}) すなわち杭周辺の地盤の変位についても, 加振初期に大きな値の振幅を示し液状化の進展に伴い振幅が減少, または, 乱れる傾向が確認される。その傾向は, 杭の曲げモーメントならびに杭の水平変位と同様に, R_{L20} の大小にかかわらず D_r が大きな火山灰質地盤および $D_r = 85\%$ とした砂地盤¹⁰⁾で顕著である。これは, 地盤の初期剛性が大きいほど加速度応答が大きく加振初期に大きく振幅するが, 液状化の進展に伴い地盤の初期剛性が低下し地盤が軟化することに起因するものと考えられる。

杭と地盤の相対変位 (y_R), 水平地盤反力 (P) についても, 加振初期に大きな値の振幅を示し液状化の進展に伴い振幅が減少, または, 乱れる傾向が確認される。

杭頭錘の応答加速度もこれらと同様の振幅挙動を示しており, これらのことから, 杭頭に橋梁下部工や上部工を設定していない本検討における動的加振実験条件では, 加振時における杭の挙動は杭周辺地盤から受ける動的水平力が支配的であり, 杭周辺地盤の剛性低下に伴い杭の振幅, 杭頭慣性力が低下し, 杭の曲げモーメントならび

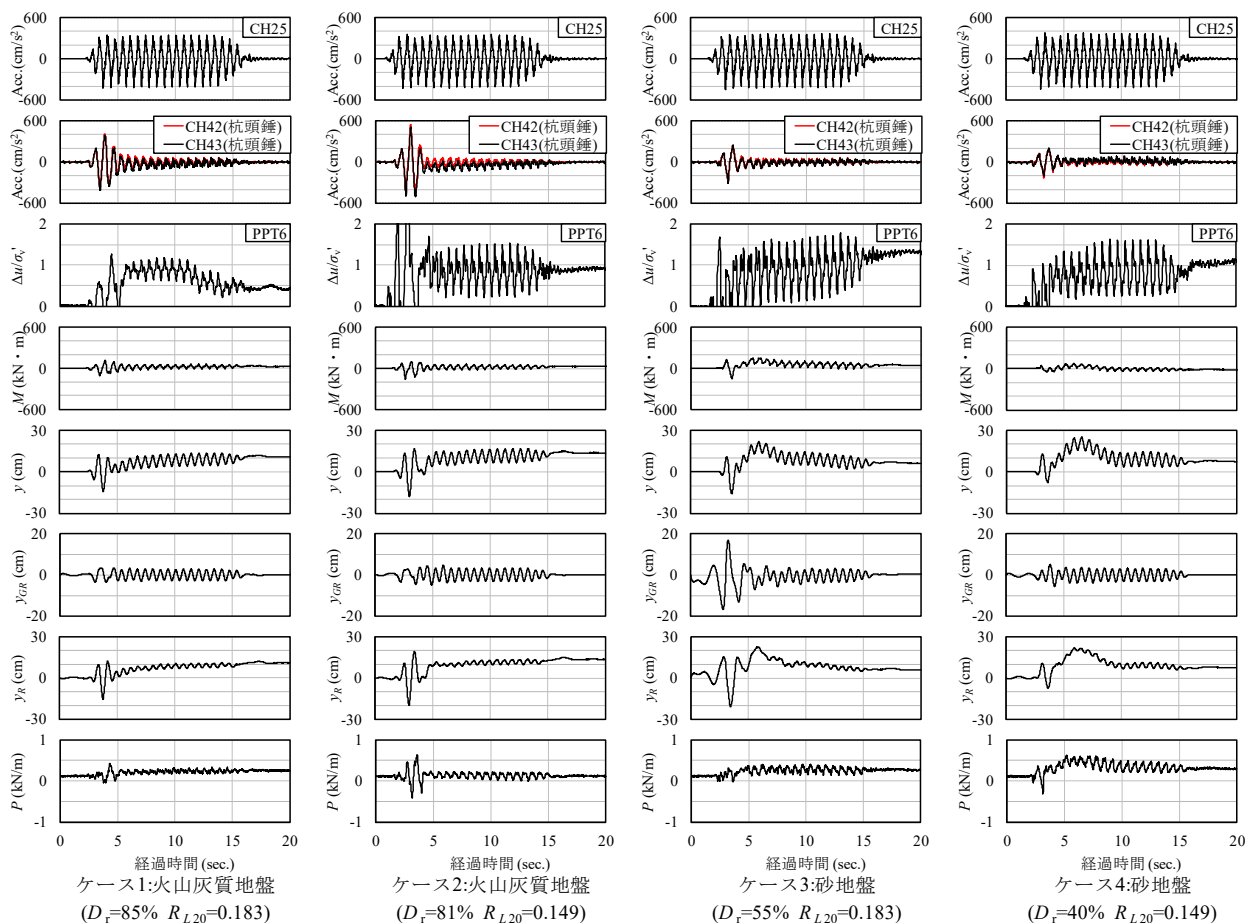


図-11 動的加振実験によるG.L.-0.5m (P6) の計測データから求めた主要な算定値の時刻歴

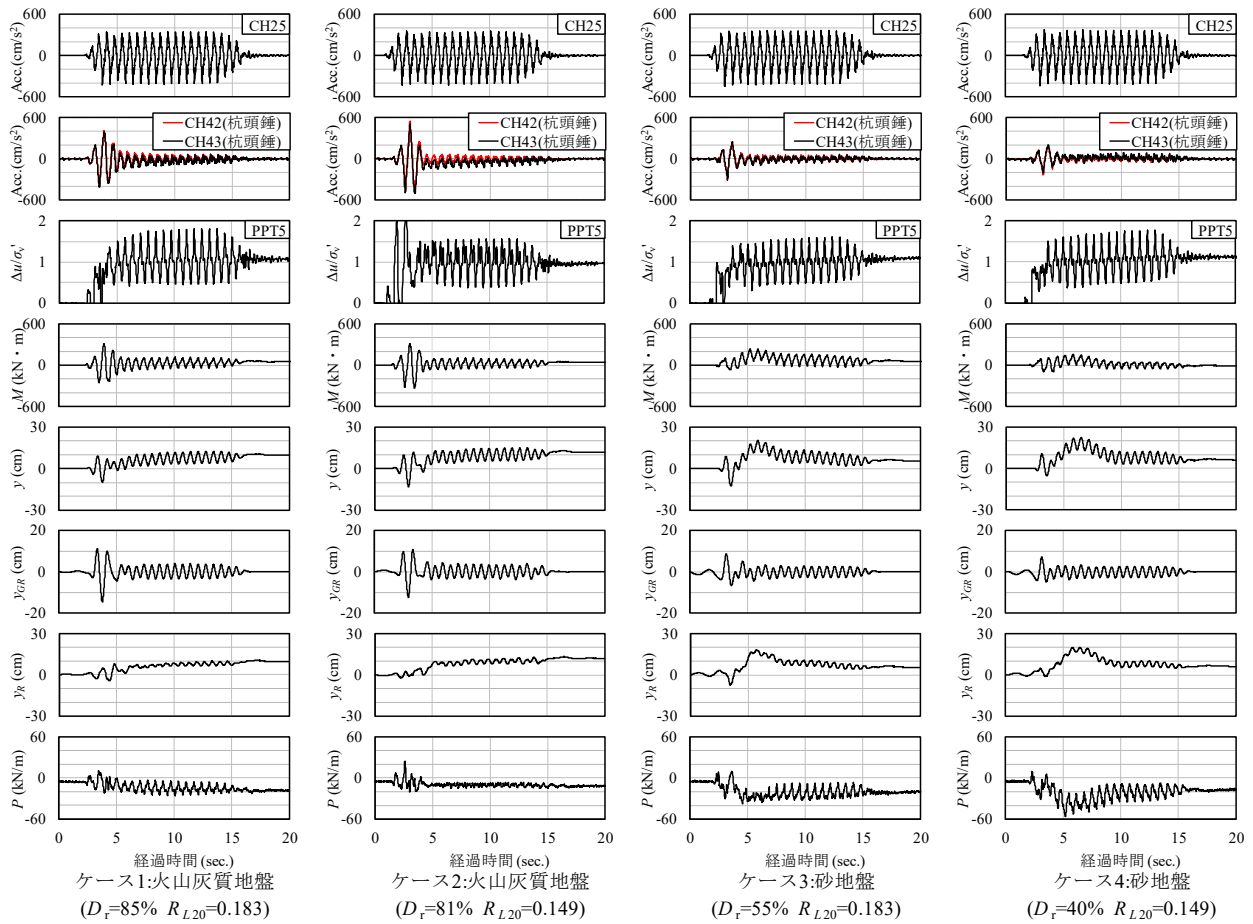


図-12 動的加振実験による GL-2.0m (P5) の計測データから求めた主要な算定値の時刻歴

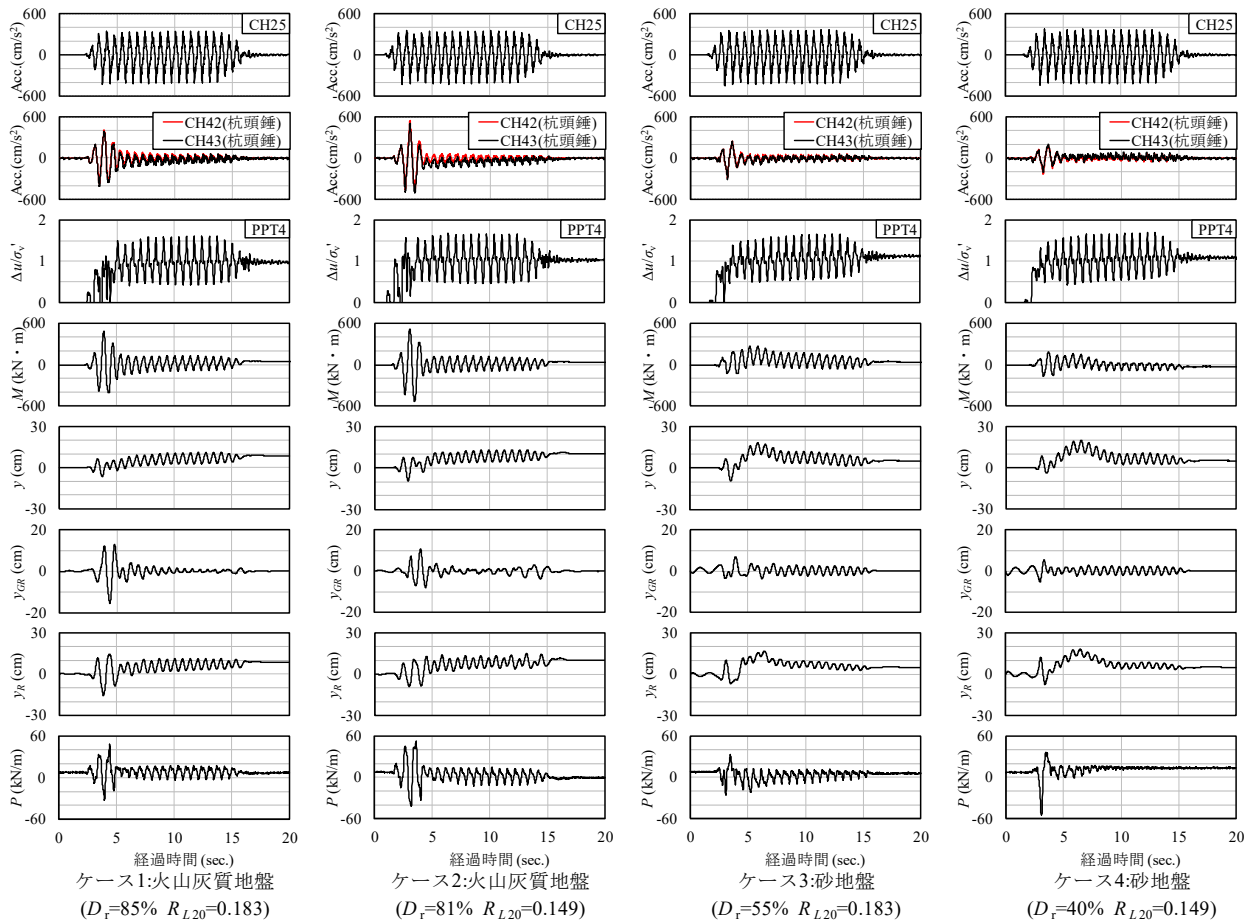


図-13 動的加振実験による GL-3.5m (P4) の計測データから求めた主要な算定値の時刻歴

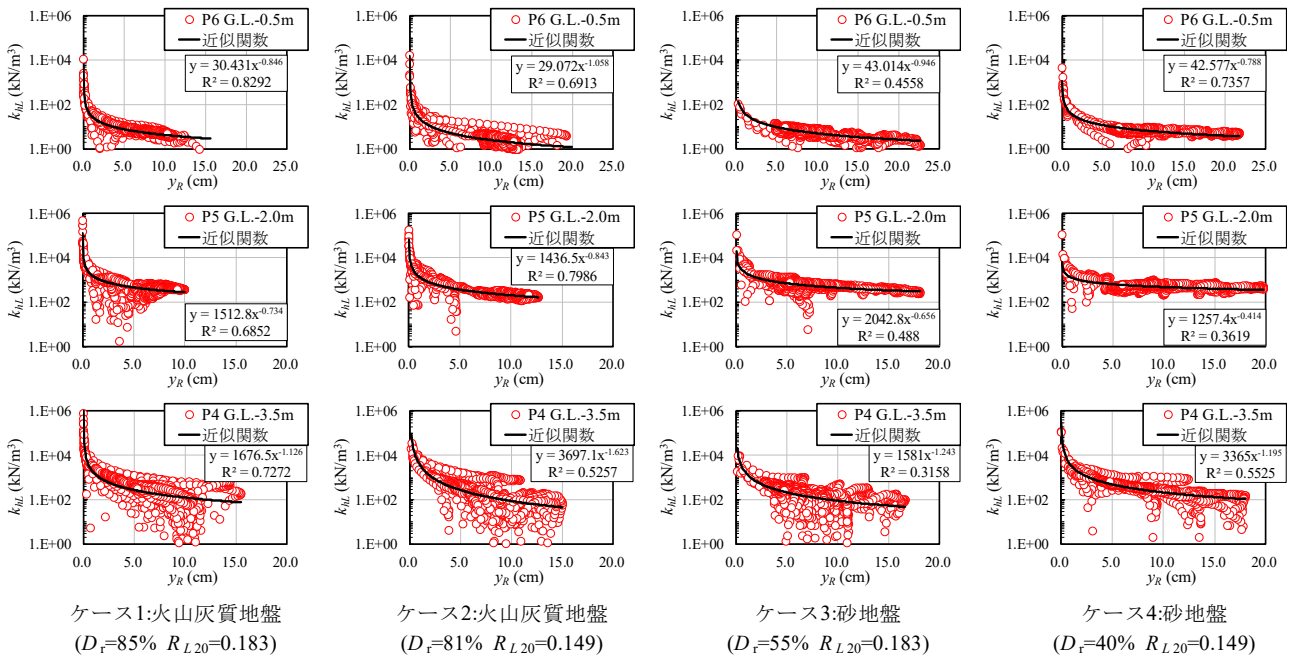


図-14 動的加振実験により G.L.-0.5m～G.L.-3.5m (P6～P4) で得られた杭の動的的水平地盤反力係数 k_{hL} ～杭と地盤の相対変位 y_R 関係

に杭の水平変位、杭と地盤の相対変位ならびに水平地盤反力が減少したものと考察される。

飛田ら¹⁸⁾の同様の研究においても、乾燥砂では杭の曲げモーメントや杭の水平変位の振幅が減少せずに継続するが、飽和砂では今回の結果と同様に加振初期に大きな値の振幅を示し液状化が進展するにつれて減少していくことが報告されており、その原因として、杭と地盤がほぼ一体となって動いている可能性や、振動に伴う地盤の非線形性による水平地盤反力係数の低下等が考えられている。これらのことから、今回の動的加振実験における液状化時の地盤～杭基礎系の相互作用の率直な評価が望ましいと判断されることから、以降の動的的水平地盤反力係数 k_{hL} の算定にあたり計測データ波形の乱れを補正する等の処理は行っていない。

図-14 に、これら結果から得られた液状化中の動的的水平地盤反力係数 k_{hL} ～杭と地盤の相対変位 y_R 関係を示す。図には、0.01sec.間隔で得られたデータの近似関数曲線を併せて示した。 k_{hL} 、 y_R はマイナス側の値も算定されるが、ここでは、絶対値として評価している。なお、液状化を伴う一連の地震時の地盤剛性変化に及ぼすせん断ひずみと間隙水圧の影響を分離して評価することは困難であり、本検討における Δu の上昇過程においても地盤の剛性低下は生じていると考えられ、実務への適用の観点からも本検討では液状化を伴う一連の地震動における杭の水平地盤反力係数の変遷過程を含めた評価を目的に、 $\Delta u/\sigma'$ の上昇過程と上昇後を分離することはせず、全ての加振時間を評価の対象としている。相関係数は低いものの y_R の増加に伴い k_{hL} が減少しており、 k_{h0} 同様、比較的連続した k_{hL} ～ y_R 関係が得られた。図-14 の y_R には、応答波形

の零あるいは極微小な変位も含まれており、極微小な y_R では火山灰質地盤の k_{hL} が大きい傾向が見受けられるが、各ケース各深度ともに y_R が変位軸と平行に近くなる範囲において k_{hL} は加振前の k_{h0} よりも低下しており、 R_{L20} の大小にかかわらず火山灰質地盤と砂地盤で同程度の値まで低減している。

動的加振実験による杭ならびに地盤の挙動から、液状化中の地盤における地盤～杭基礎系の相互作用として、地震動初期では地盤の振幅に追従して杭は大きな水平変位を示すが、液状化が進展した状況では地盤の剛性が低下し、水平地盤反力ならびに水平地盤反力係数の低下すなわち地盤が杭の反力体としての作用を損なうことが改めて確認された。

c) 液状化強度比に応じた杭の水平地盤反力係数の低減の評価

ここでは、図-10 ならびに図-14 に示した杭の水平地盤反力係数と水平変位の関係から、建築基礎の指針¹⁹⁾に示される液状化に伴う杭の水平地盤反力係数の低減に関する関係式を参考に、 k_{h0} と k_{hL} をそれぞれ以下の y_0 と y_R との関係式として整理した。

静的水平地盤反力係数

$$k_{h0} = B_0 \cdot y_0^{A_0} \quad (1)$$

ここに、 A_0 、 B_0 は、静的時の係数。

動的水平地盤反力係数

$$k_{hL} = B_L \cdot y_R^{A_L} \quad (2)$$

ここに、 A_L 、 B_L は、液状化時の係数。

式(1), 式(2)から, 液状化に伴う杭の水平地盤反力係数の低減度は式(3)で表される.

$$\frac{k_{hL}}{k_{h0}^*} = B \cdot y_R^A \quad (3)$$

ここに, $B = \frac{B_L}{k_{h0}^*}$, $A = A_L$ である.

なお, 式(3)における k_{h0}^* は, 各ケースの杭地表面変位が杭径の 1% (0.5cm) となる時点の当該深度での算出値 (図-10 の黒丸プロット) としている. k_{hL} は加振全 20 波における当該深度の y_R に応じた算出値としている.

図-15 に, 式(3)による液状化に伴う杭の水平地盤反力係数の低減度 k_{hL}/k_{h0}^* を y_R との関係として示す. ケース 4 の P4 (G.L.-3.5m) を除いて, 火山灰質地盤における k_{hL}/k_{h0}^* の値は砂地盤よりも大きく, いずれの深度, y_R , R_{L20} においても砂地盤よりも低減し難い値を示した. このことから, 式(3)より得られる各ケース各深度の低減

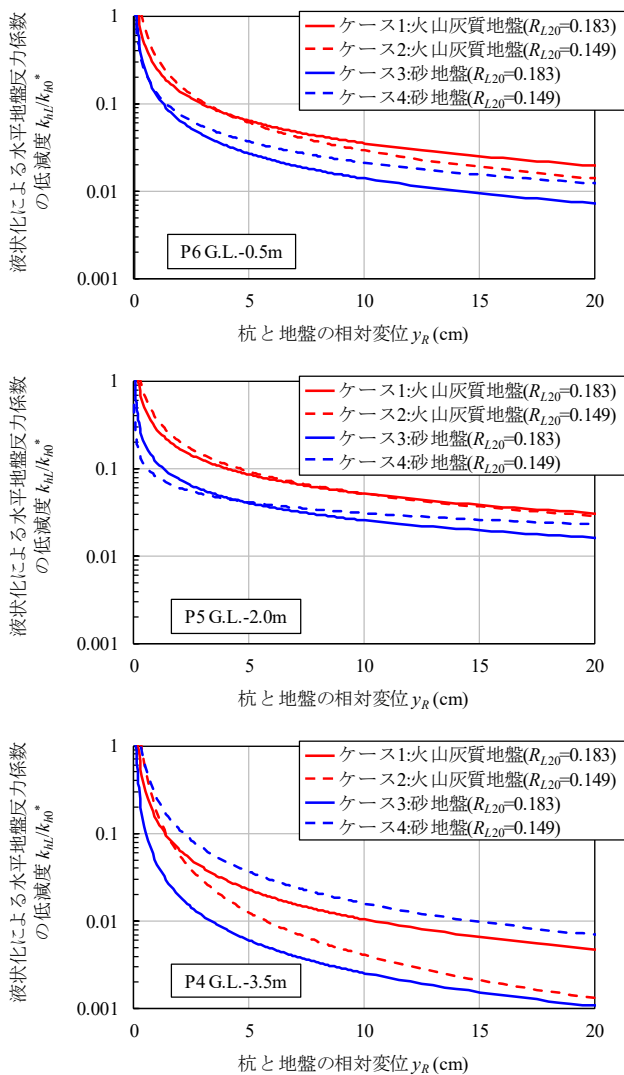


図-15 液状化に伴う杭の水平地盤反力係数の低減度 k_{hL}/k_{h0}^* と杭と地盤の相対変位 y_R の関係

度に関する係数 A ならびに係数 B を比較し, 火山灰質地盤と砂地盤の液状化に伴う杭の水平地盤反力係数の低減の違いを評価する.

図-16 に, 各ケース各深度で得られた係数 A と係数 B の深度分布を示す. y_R に応じた k_{hL}/k_{h0}^* 曲線の傾きを示す係数 A の値は, 火山灰質地盤で若干小さく見られ, 火山灰質地盤, 砂地盤ともに D_r や R_{L20} の異なりにかかわらず k_{hL}/k_{h0}^* 曲線の傾きが G.L.-2.0m で小さく, G.L.-3.5m で最も大きくなる同様の傾向を示した. 液状化に伴う杭の水平地盤反力係数の低減係数 B の値は, ケース 4 の G.L.-3.5m を除いて火山灰質地盤で大きく, 地盤種別毎かつ深度毎で概ね同程度の値を示した.

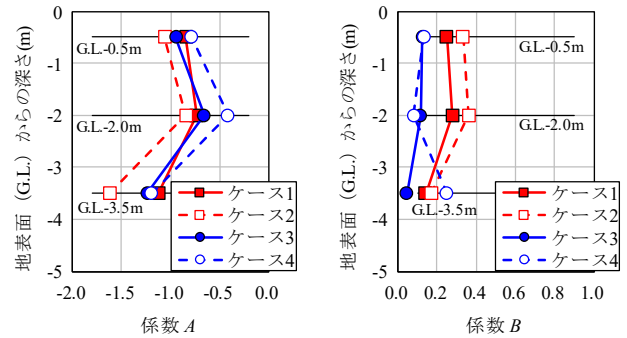


図-16 各ケース各深度の杭の水平地盤反力係数の低減度に関する式(3)の係数 A と係数 B の深度分布

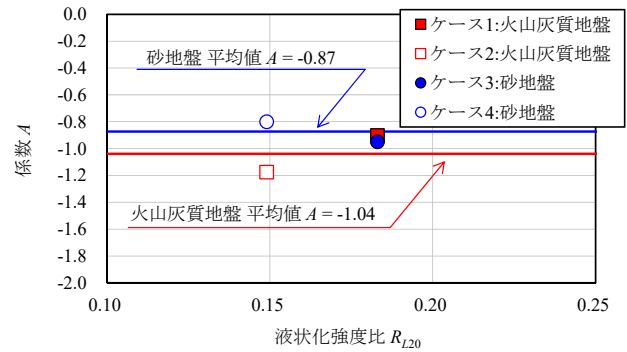


図-17 各ケース係数 A の 3 深度平均値と液状化強度比 R_{L20} の関係

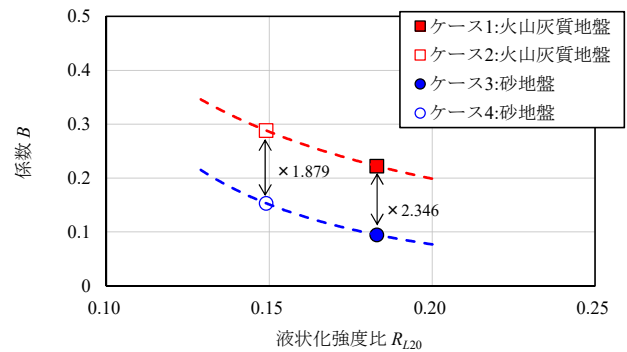


図-18 各ケース係数 B の 3 深度平均値と液状化強度比 R_{L20} の関係

道路橋杭基礎の設計では、一般に同様の物性を示す土層を単層として一様に取り扱うため、今回の検討において k_{d1}/k_{d0}^* が得られた各ケース 3 深度の係数 A 、係数 B の値を平均し、 R_{L20} との関係として図-17 と図-18 に示した。その結果、火山灰質地盤、砂地盤ともに係数 A の値に R_{L20} との明瞭な相関は見受けられないが、地盤種別毎の平均値は火山灰質地盤で若干ではあるが小さく、 y_R の増加に対する k_{d1}/k_{d0}^* 曲線の傾きが砂地盤に比べて大きいものと評価される。一方、液状化に伴う杭の水平地盤反力係数の低減係数 B の値は、火山灰質地盤、砂地盤ともに R_{L20} の増加に伴い低下する傾向が認められた。さらに、 R_{L20} の増加に対する係数 B の低下割合は両地盤で概ね同程度であるが、火山灰質地盤の係数 B の値は砂地盤に比べて約 2 倍（平均 2.1 倍）大きいことがわかる。このことから、液状化に伴う杭の水平地盤反力係数の低減には R_{L20} と相関があることが認められ、火山灰質地盤では R_{L20} が同程度の砂地盤に比べて低減し難く、その割合は砂地盤の 1/2 程度と評価される。

ただし、図-18 では、 R_{L20} の増加に伴い火山灰質地盤と砂地盤の係数 B の差が大きくなる傾向が窺われること、また、火山灰質地盤の液状化に伴う杭の水平地盤反力係数の低減が砂地盤に比べて小さい原因については、杭の挙動に及ぼす火山灰質粗粒土の静的および動的力学挙動との関係を明らかにすることが重要であり、機会を改めて議論したい。

4. まとめ

本検討では、液状化強度比を指標とした火山灰質地盤と砂地盤における杭の動的ならびに静的遠心力模型実験結果の整理から、液状化した火山灰質地盤における杭の水平地盤反力係数の低減に関する定量的な評価を砂地盤との比較から試みた。

得られた結論を以下にまとめる。

- 1) 実験結果から精度良く杭の動的ならびに静的水平地盤反力係数を評価するにあたり、3 次スプライン関数で補間した杭の曲げモーメント分布を一度微分した後にもう一度 3 次スプライン関数で補間し直し 2 回目の微分を行うことで連続した杭の水平地盤反力係数～変位関係が得られた。
- 2) 動的加振実験による杭ならびに地盤の挙動から、液状化時における地盤～杭基礎系の相互作用として、地震動初期では地盤の振幅に追従して杭は大きな振幅を示すが、液状化の進展に伴い地盤の初期剛性が低下し、水平地盤反力ならびに水平地盤反力係数の低下すなわち地盤が杭の反力体としての作用を損なうことが改めて確認された。

- 3) 液状化に伴う杭の水平地盤反力係数の低減度を表す関係式を整理し、火山灰質地盤と砂地盤の低減度に関する係数の違いを評価した。杭の水平変位に応じた水平地盤反力係数の低減度曲線の傾きを示す係数 A は、火山灰質地盤で若干小さく、水平変位の増加に対する低下が砂地盤に比べ大きいものと評価された。液状化に伴う杭の水平地盤反力係数の低減係数 B は、火山灰質地盤、砂地盤ともに液状化強度比との相関が認められた。係数 B の値は、火山灰質地盤で約 2 倍大きく、液状化に伴う杭の水平地盤反力係数の低減は砂地盤の 1/2 程度と評価された。

参考文献

- 1) 火山灰質土の工学的性質とその利用に関する研究委員会：火山灰質土の性質とその設計・施工に関するシンポジウム発表論文集，地盤工学会，1995。
- 2) 破碎性地盤の工学的諸問題に関する研究委員会：破碎性地盤の工学的諸問題に関する研究委員会報告書およびシンポジウム発表論文集，地盤工学会，1999。
- 3) 北海道の火山灰質土の性質と利用に関する研究委員会：実務家のための火山灰質土～特徴と設計・施工、被災事例～，地盤工学会北海道支部，2010。
- 4) 三浦清一，八木一善，川村志麻：北海道火山性粗粒土の静的および動的力学挙動と粒子破碎，土木学会論文集，No.547/III-36，pp.159-170，1996。
- 5) 三浦清一，八木一善，川村志麻：破碎性粗粒火山灰土の繰返し非排水変形—強度特性に及ぼす応力履歴の影響，土木学会論文集，No.547/III-36，pp.221-229，1996。
- 6) 三浦清一，八木一善：火山灰質粒状体の圧密・せん断による粒子破碎とその評価，土木学会論文集，No.561/III-38，pp.257-269，1997。
- 7) 阿曾沼剛，三浦清一，八木一善，田中洋行：火山性粗粒土の動的変形特性とその評価法，土木学会論文集，No.708/III-59，pp.161-173，2002。
- 8) 富澤幸一，三浦清一：火山灰地盤における杭基礎の支持力特性に関する検討，土木学会論文集 C，Vol.63，No.1，pp.125-139，2007。
- 9) 江川拓也，西本聡，富澤幸一：火山灰質地盤に施工された杭基礎の水平抵抗特性，寒地土木研究所月報，No.699，pp.29-35，2011。
- 10) 江川拓也，富澤幸一，山梨高裕：火山灰質地盤における杭の地震時水平地盤反力の評価に関する遠心模型実験，第 58 回地盤工学シンポジウム，平成 25 年度論文集，pp.73-80，2013。
- 11) 江川拓也，山梨高裕，福島宏文，富澤幸一：火山灰質地盤の液状化時における杭の水平地盤反力に関する研究，寒地土木研究所月報，No.738，pp.2-13，2014。
- 12) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，pp.161-170，2017。
- 13) 八木一善，三浦清一，志比川清史：2003 年十勝沖地震によって被災した火山灰地盤の工学的特徴，地盤工学会北海道支部技術報告集，第 44 号，pp.207-216，2004。
- 14) 山下聡，小川かける，川尻俊三，川口貴之，渡邊達

也：北海道胆振東部地震で被災した火山灰造成宅地の液状化特性—2003 年十勝沖地震で被災した火山灰造成農地との比較—, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 第 59 号, pp.145-152, 2019.

- 15) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編, pp.226-316, 2017.
- 16) 時松孝次, 鈴木比呂子, 鈴木康嗣, 藤井俊二：大型振動台実験に基づく液状化過程における杭の水平地盤反力の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 553 号, pp.57-64, 2002.
- 17) 菊池喜昭：軟弱粘性土地盤着底式くし形構造物の横

抵抗特性に関する研究, 港湾空港技術研究所資料, No.1039, pp.15-25, 2003.

- 18) 飛田哲男, 井合進, 原哲郎：遠心力場における群杭の振動実験—静的水平載荷実験との比較および液状化地盤中の挙動—, 第 38 回地盤工学研究発表会, 平成 15 年度発表講演集, pp.1443-1444, 2003.
- 19) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針, pp.61-72, 2001.

(Received June 13, 2019)

(Accepted March 25, 2020)

EVALUATION OF COEFFICIENT OF HORIZONTAL SUBGRADE REACTION OF PILES IN LIQUEFIED VOLCANIC ASH GROUND

Takuya EGAWA, Koichi ISOBE and Osamu HATAKEYAMA

In this study, the decrease in the horizontal subgrade reaction coefficient of piles in liquefied volcanic ash ground was quantitatively evaluated by using a centrifugal model test with a liquefaction strength ratio of ground as a parameter. A relational equation which describes the decrease in the horizontal subgrade reaction coefficient of piles in liquefied ground was proposed and the related coefficients were evaluated. As a result, it was confirmed that the coefficient which presents the decrease level was correlated with the liquefaction strength ratio of ground, and the coefficient for volcanic ash ground was evaluated nearly twice as large as that for sandy ground. The above examination revealed that it would be generally sufficient to regard the decrease in the horizontal subgrade reaction coefficient of piles in liquefied volcanic ash ground as being about half that in sandy ground.