

凍結した表層地盤が群杭と地盤の相互作用の 回転剛性に与える影響の評価手法

佐藤 京¹・小長井一男²・池田隆明³・畠山 乃⁴

¹正会員 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)
E-mail: taka4@ceri.go.jp

²フェロー会員 東京大学名誉教授 国際斜面災害研究機構
(〒606-8226 京都府京都市左京区田中飛鳥井町138-1)
E-mail: konagai@iclhq.org

³正会員 長岡技術科学大学 教授 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)
E-mail: ikeda@vos.nagaokaut.ac.jp

⁴正会員 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)
E-mail: hatakeyama-o82ac@ceri.go.jp

新設や既設構造物の耐震性を評価し、構造物の地震被害を予測するには、構造物の地震時応答を適切に評価することが重要である。しかし、寒冷地域では、冬期に表層地盤が凍結する可能性が高く、表層地盤の密度と剛性が凍結によって変化し、地盤と杭の動的相互作用が変わることが想定される。

本論文では、表層地盤の凍結が群杭の回転挙動に及ぼす影響を定量的に検討した。その結果、凍結地盤内の群杭の挙動は、群杭全体の曲げ剛性と周辺地盤の剛性の比の四乗根である特性長と凍結深さの比で概ね一律に表現できることが確認された。

Key Words: frozen ground, Soil-pile interaction, Thin Layer Element Method

1. はじめに

既設や新設の構造物の耐震性能を評価するには、想定地震に対する応答を適切に評価することが重要である。著者らは、凍結した表層地盤が群杭頭部の並進の剛性に与える影響について検討を実施し、凍結深さと、地盤と群杭の剛性比によって決定される杭長の特性の比によって地盤剛性の変化が一律に表現できることを示した¹⁾。

本論文では、杭頭回転剛性に地盤の凍結深さが及ぼす影響について考察する。

2. 凍結地盤の影響検討手法

本研究では、フーチングにより剛結された群杭が工学的基盤に先端支持される水平成層地盤を対象とする。地盤の凍結深度が杭頭剛性やキネマティック相互作用に与える影響を評価する上で、対象とする群杭の周辺地盤は、均一なせん断剛性を有するシンプルな地盤とし、冬期においては、凍結した表層地盤のせん断剛性のみが変化する

設定とした。非凍結時および凍結時の地盤特性については、筆者らが十勝支庁管内の帯広市から池田町間を結ぶ一般国道242号の十勝川に架かる国道橋の近傍で実施した現地調査結果²⁾を踏まえて凍結土のせん断波速度 V_{sf} を700(m/s)、非凍結土のせん断波速度 V_s を100(m/s)に設定した。また、湿潤密度は、 $1.9(\text{g}/\text{cm}^3)$ とした。地盤モデル図と合わせて、凍結、非凍結における地盤特性を図-1に示す。

地盤と群杭の動的相互作用を厳密に解析するため、Tajimi and Shimomuraが開発したThin-Layered Method³⁾を基とし、半解析的アプローチに基づくKonagaiの数値プログラムTLEM(1.2)を用いた。TLEM(1.2)では地盤を水平方向に無限に広がる成層地盤とする一方、群杭基礎をまとめて一本の等価直立梁とし、この梁のスライス端面での並進と回転を周波数領域で解析する(Konagai et al.⁴⁾)。この直立梁の剛性マトリクスには並進を支配する曲げ剛性 EI_{sway} と回転を支配する曲げ剛性 EI_{rock} が含まれる。 EI_{sway} は、等価梁全体がベルヌーイ・オイラーの平面保持の仮定に従わず、群杭を構成する個々の杭が杭間の距離を保ちながら個別に曲げ変形を行うとする仮定に基

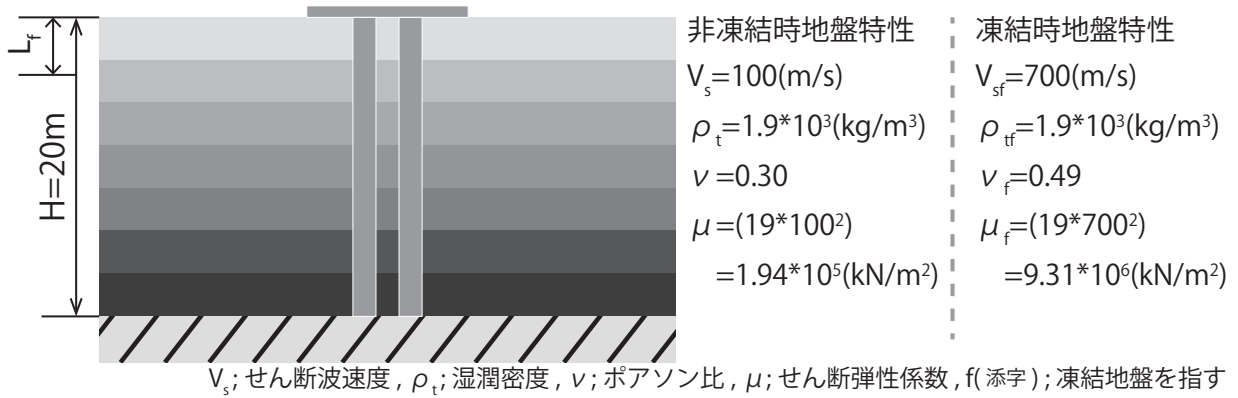


図-1 地盤モデルと地盤特性 (非凍結時, 凍結時)

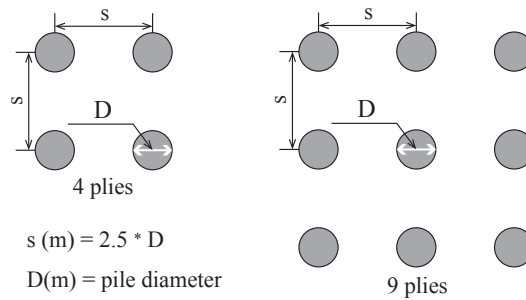


図-2 杭配置

表-1 解析ケースと鋼管杭の諸元

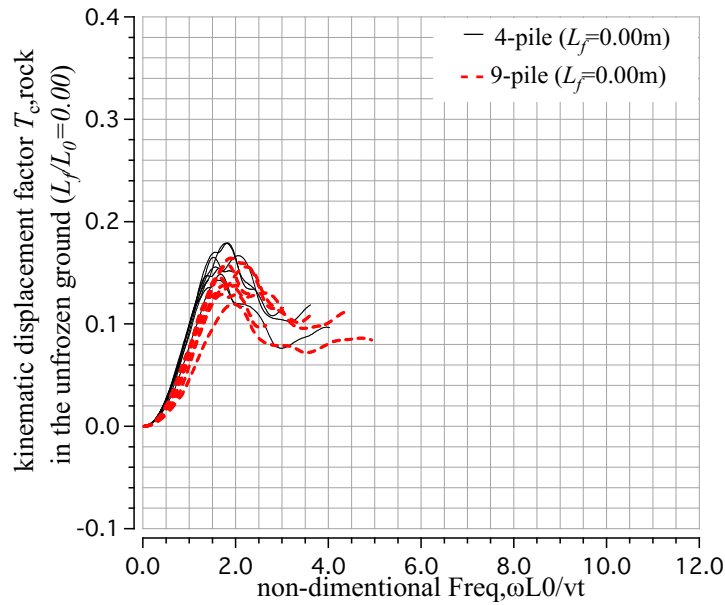
解析ケース	$E(\text{kN/m}^2)$	直径(m)	板厚(m)	単位質量(kg/m)	断面二次モーメント $I(\text{m}^4)$
type01	2.08E+08	0.20	0.009	86.8	2.114E-04
type02	2.08E+08	0.25	0.009	109	4.185E-04
type03	2.08E+08	0.30	0.009	131	7.297E-04
type04	2.08E+08	0.30	0.015	216	1.180E-03
type05	2.08E+08	0.40	0.009	176	1.749E-03
type06	2.08E+08	0.50	0.012	292	4.545E-03
type07	2.08E+08	0.60	0.014	409	9.173E-03
type08	2.08E+08	0.60	0.022	639	1.413E-02

づいて求められる。一方 EI_{rock} は等価梁全体がベルヌーイ・オイラーの平面保持の仮定に従うとして求められる。なお、詳細は文献5)を参照のこと。

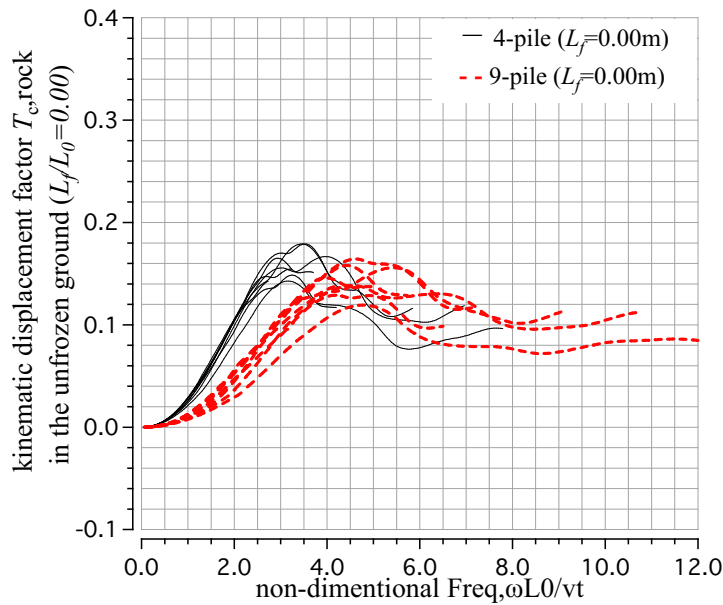
本検討で扱う群杭は、図-2 に示すように、4本と9本の鋼管杭を一定の間隔 ($s = 2.5D$ (D : 杭の直径)) で正方配置し、表-1 に示す異なるパラメータを有する8種類の杭を対象とした。地盤の凍結厚さ(凍結深さ)は、 $L_f = 0.25\text{m}, 0.50\text{m}, 0.75\text{m}, 1.00\text{m}$ および 2.00m と設定した。地盤の分割については、計算する凍結深さを考慮して、浅い深さ 3.0m までを 0.25m 間隔とし、 10m まで 0.5m 、 20m まで 1.0m 間隔となる36分割とした。

3. 解析結果

TLEM(1.2)において、キネマティック相互作用は、周波数領域における自由地盤変位の杭基礎への伝達率として示される。杭は、一般的に、水平方向に変形しやすく、周辺地盤の動きに容易に追従するため、伝達される変位は並進方向に卓越する。しかし、地盤と剛性の異なる群杭が存在することで杭頭部では水平動ばかりでなく回転(群杭頭部回転応答角に等価梁半径を乗じた杭頭端の上下変位)が、現れるようになる。この回転に伴う群杭全体の端部での鉛直変位を自由地盤の水平変位で除した値を変位伝達率 $T_{e,rock}$ とする。この $T_{e,rock}$ は周波数によ



(a) EI_{sway} による特性長 L_0 を用いた結果



(b) EI_{rock} による特性長 L_0 を用いた結果

図-3 非凍結地盤における群杭の相互作用 (回転挙動)

て変化していくが、周波数を群杭（等価直立梁）の特性長と自由地盤内部に励起されるせん断波の波長の比で表現することが合理的である。しかし前述のように等価梁の剛性マトリックスには2種類の曲げ剛性 EI_{sway} と EI_{rock} が含まれているので、いずれの曲げ剛性を用いて特性長を出すのが妥当か検討する必要がある。特性長 L_0 は曲げ剛性 EI と周辺地盤のせん断弾性係数 μ を用いて以下の式によって定義される。

$$L_0 = \sqrt[4]{\frac{EI}{\mu}} \quad (1)$$

図-3(a)では、式(1)の EI を EI_{sway} に置き換え、図-3(b)では、式(1)の EI を EI_{rock} に置き換えて算出した特性長 L_0 と自由地盤内のせん断波長の比を表す無次元化周波数 $\omega L_0/v_s$ を横軸にとって、変位伝達率 $T_{e,rock}$ を示した。ここで、 $\omega (= 2\pi f)$ は、円周波数であり、 v_s は、凍結地盤の下層で伝達されるせん断波速度である。無次元化周波数は、 L_0 とせん断波長(v_s/f)との比を 2π で割ったものである。

図-3(a)と図-3(b)を比較すると、 EI_{sway} により特性長 $L_{0,sway}$ を求めた図-3(a)の方が、杭本数にかかわらず、さらに L_0 の長さによらず、 $T_{e,rock}$ を無次元化周波数の関

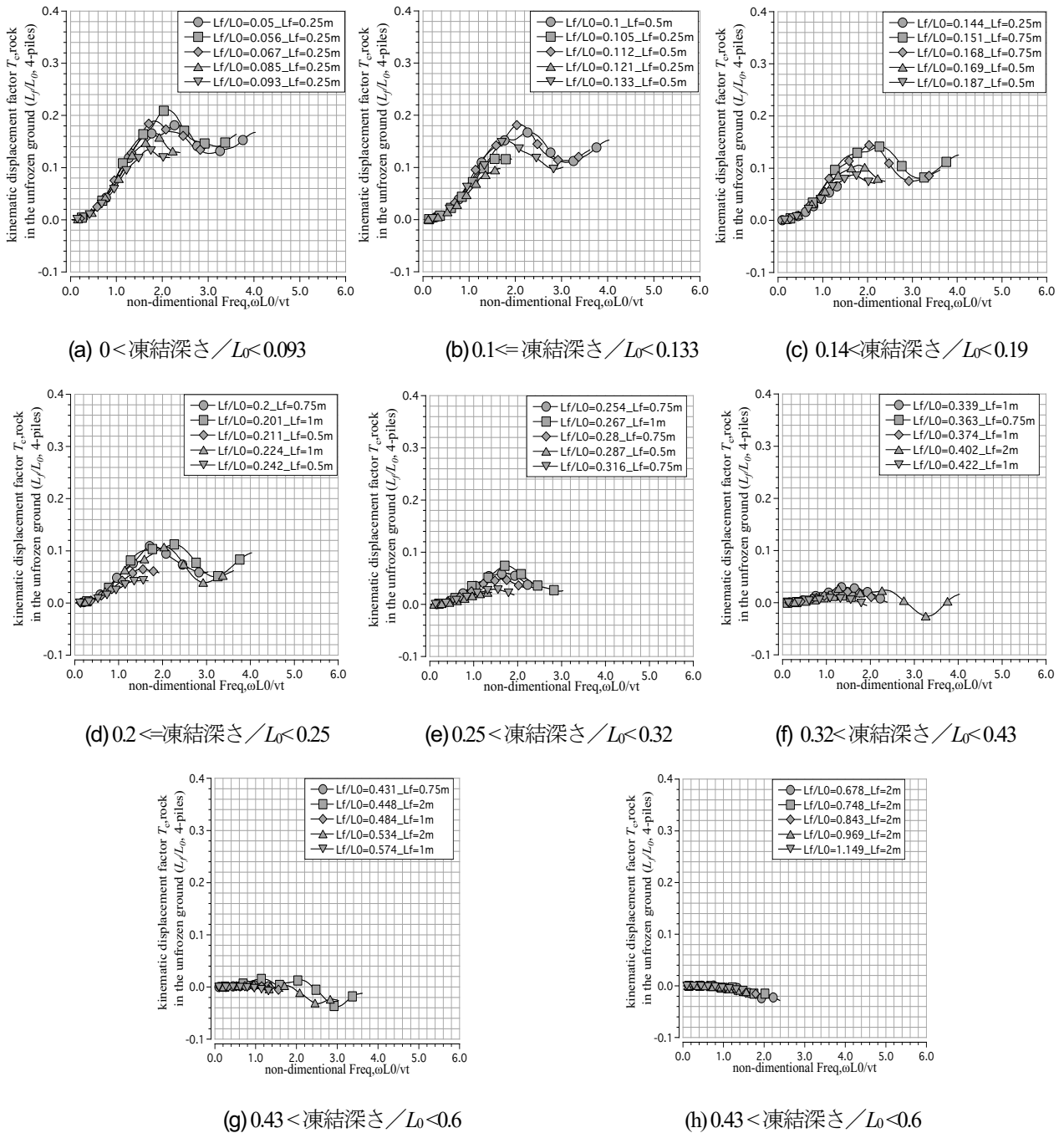


図-4 凍結深さ別による群杭の相互作用 (回転挙動)

数として一律に表現できるものである。このことは、杭頭剛体基礎の変形の拘束のない状態で自由地盤の揺れに追従して群杭全体の並進が励起された時に、並進ばかりでなく杭頭の回転も最も顕著になることを示している。

この結果を得て、凍結深さが変化した場合のキネマティック相互作用効果 (変位伝達率 $T_{e,rock}$) を EI_{sway} による無次元化周波数の関数として図-4に整理した。

一連の図では、凍結深さ L_f を $L_{0,sway}$ で除した比を昇順に並べた5ケースが示されている。

$L_f/L_{0,sway}$ が大きなるにつれ、変位伝達率 $T_{e,rock}$ が低

下していることは、凍結した地盤の厚さ L_f が増すにつれ杭頭部の回転挙動が拘束されていることを示している。

図-5(a)-(f)は、本検討で対象とした群杭頭部の回転挙動について、非凍結地盤および凍結地盤の回転剛性 K_{zz} を周波数の関数として示したものである。先に述べたように、ここでは表層が凍結した場合の回転剛性に与える影響を論ずることから、式(1)の EI を EI_{rock} と置き換え、算出した特性長 $L_{0,rock}$ を示して整理している。全てのケースを同図で示すと判読しづらくなるため、特性長の傾向が確認できるケースとして、最も特性長が長い、杭を

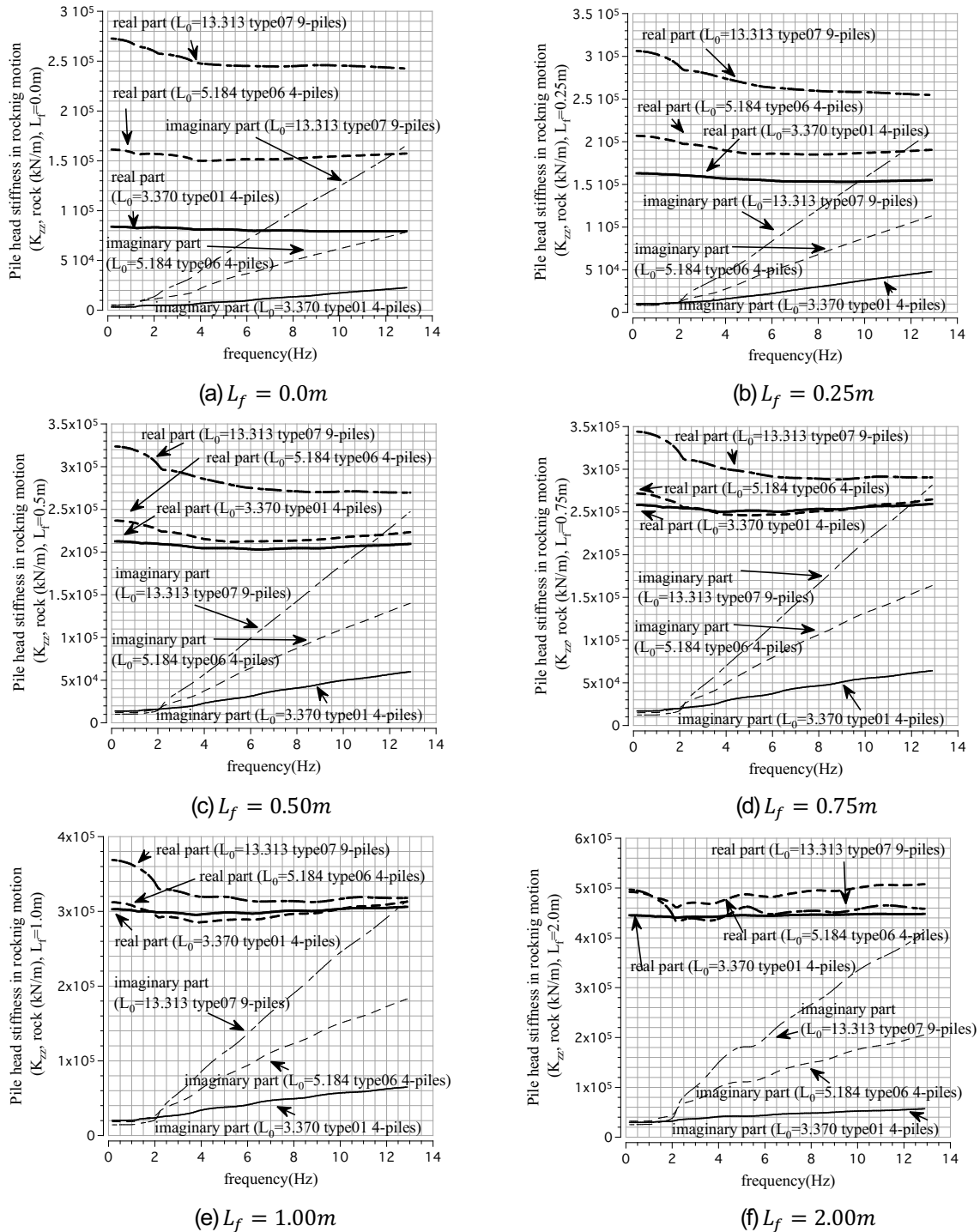


図-5 群杭頭部の回転剛性 K_{zz} (type07_9-piles, type06_4-piles, type01_4-piles) (図中の L_0 は, $L_{0,rock}$ を示す)

9本配置した type07 の $L_0 = 13.313\text{m}$ と杭を4本配置した type06 の $L_0 = 5.184\text{m}$, さらに type01 の $L_0 = 3.370\text{m}$ の3つを凍結深さ毎に示す。

全体的に, 群杭剛性の実部は, 広い周波数範囲にわたって, 概ね一定であるのに対し, 地盤-群杭構造の減衰効果を示す虚部は, 周波数が増加するに従い減衰効果も増加する一般的な傾向を示す。

次に, 構造物の応答に影響を与える主要な周波数範囲 $0.1 \sim 5.0\text{Hz}$ 区間の回転剛性 K_{zz} の平均を全てのケースにつ

いて算定し, 各ケースの代表値とする。同様に求めた非凍結時の回転剛性の代表値で, 各ケースの代表値を除すことにより, 凍結時の回転剛性の比 (以下, 回転剛性比) を求め, 凍結深さが慣性力相互作用に与える影響として, 回転剛性比と特性長との関係について, 図-6のように整理する。ただし, L_0 は, 杭と地盤の剛性比であり, 各ケースにより凍結深さの影響が異なることから, 横軸は L_0 に対する凍結深さ L_f の比 (L_f/L_0) としている。なお, 慣性力相互作用について論じるため L_0 は式(1)の EI を

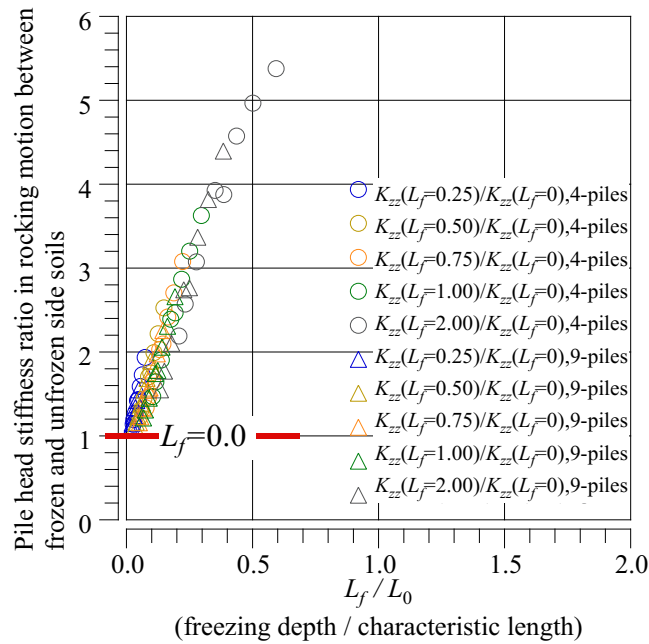


図-6 回転剛性比と特性長を考慮した凍結深さの関係

EI_{rock} と置き換えて求めた値 ($L_{0,rock}$) を用いている。

図-6に示すように、検討した全てのケースは、右斜めに上昇する概ね一本の曲線に回帰することから、凍結地盤内の群杭の挙動は、群杭全体の曲げ剛性と周辺地盤の剛性の比の四乗根である特性長と凍結深さの比で概ね一律に表現できることが確認された。

4. まとめ

フーチングにより結合された群杭基礎が、工学的基盤上に配置され半無限成層の均一な地盤内にあるとの仮定において、表層地盤の凍結が地盤と群杭の動的相互作用に及ぼす影響を定量的に検討した。

その結果、表層地盤が凍結した地盤内の群杭は、特性長 L_0 が深い場合、表層地盤の凍結の厚さ L_f に影響を受け難いが、 L_0 の深さが浅い場合、凍結深さが浅くても影響を受けることが確認された。これらのことから L_0 が、回転運動における杭頭剛性 K_{zz} に対する深さ L_f の凍結層の影響を一意的に記述するための重要なパラメータであることを示唆した。凍結地盤と群杭の周波数領域における動的相互作用は、無次元化周波数 $\omega L_0/v_s$ を用いて一意的に記述されることも分かった。

REFERENCES

- 1) 佐藤京, 小長井一男, 池田隆明, 西弘明: 凍結した表層地盤が杭と地盤の相互作用に与える影響の評価手法, 第 38 回地震工学研究発表会講演論文集, I386, 2018. [SATO, T., KONAGAI, K., IKEDA, T. and NISHI, H.: EFFECT OF SURFACE LAYER FREEZE TO SOIL-PILE INTERACTION, Proceedings of The 38th JSCE Earthquake Engineering Symposium, I386, 2018.]
- 2) 佐藤京, 小長井一男, 池田隆明, 西弘明: 表層地盤の凍結が地盤と杭の相互作用に与える影響, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 73, No. 4 (地震工学論文集第 36 巻), pp. I_672-I_678, 2017. [SATO, T., KONAGAI, K., IKEDA, T. and NISHI, H.: EFFECT OF SURFACE LAYER FREEZE TO SOIL-PILE INTERACTION, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE)), Vol. 73, No. 4, pp. I_672-I_678, 2017.]
- 3) Tajimi, H. and Shimomura, Y.: Dynamic analysis of soil-structure interaction by the thin layered element method, *Trans. Arch. Inst. Japan*, Vol. 243, pp. 41-51, 1976.
- 4) Konagai, K., Yin, Y. and Muroho, Y.: Single beam analogy for describing soil-pile group interaction, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 23, Issue 3, pp. 213-221, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(02\)00212-9](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(02)00212-9)
- 5) 小長井一男: 地盤と構造物の地震工学, 東京大学出版, 2002. [KONAGAI, K.: Behaviors of Soils and Structures in Earthquakes, University of Tokyo Press, 2002.]

EFFECT OF SURFACE LAYER FREEZE TO SOIL-PILE INTERACTION IN ROCKING MOTION

Takashi SATO, Kazuo KONAGAI, Takaaki IKEDA and Osamu HATAKEYAMA

To assess earthquake resistance of new or existing structures and predict earthquake damage to structures, it is important to properly evaluate the response of the structure at the time of the earthquake. In cold regions however, where the ground can freeze in winter, the dynamic soil-foundation interaction can change with the change in the density and stiffness of the frozen side soil. This paper examines in a quantitative manner, the influence of ground freezing on the dynamic soil grouped piles interaction in rocking motion. It is shown herein that thicker the frozen soil is, the less significant is the rocking component of the kinematic interaction. It is also shown that the pile cap stiffness in rocking motion is uniquely described in terms of the ratio between freezing depth L_f and characteristic length of the grouped piles $L_0 = \sqrt[4]{EI_{rock}/\mu}$, where μ is the shear modulus of side soil, and the bending stiffness of the grouped piles EI_{rock} is evaluated following the same procedure as that used for the evaluation of bending stiffness of a reinforced concrete beam. Namely, EI_{rock} is assumed to be equal to the sum of the Young's-modulus-weighted products of all the elementary areas of piles times their squared distances from the centroid of the cross-section.