

# 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

佐藤 京<sup>1</sup>・小長井一男<sup>2</sup>・池田隆明<sup>3</sup>・西 弘明<sup>4</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>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町138-1）

E-mail:konagai@ynu.ac.jp

<sup>3</sup>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

<sup>4</sup>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:h-nishi@ceri.go.jp

ゆ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、凍結地盤内の群杭は、広い周波数範囲にわたって地盤の動きに従う傾向があることが示された。さらに、凍結深さが地盤と群杭の剛性比によって決定される杭の特徴的な長さよりもはるかに浅い場合でも、凍結時の杭の剛性は著しく大きくなることが示され、表層地盤の凍結が地盤と杭の相互作用に大きく影響す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。

Wotherspoonらは、凍結状況下の構造物応答が、夏期における非凍結状況下の応答と異なる可能性があり、表層地盤の凍結が構造物の応答に重大な影響を及ぼす可能性があることを示した。<sup>1)-8)</sup>

キネマティックと慣性の両方の地盤と基礎の動的相互作用は、多くの研究者によって数十年にわたって集中的に研究されてきた。しかし、凍結した表層地盤が地盤と基礎の相互作用に与える影響に着目した論文はない。土岐ら<sup>9)</sup>は、半無限成層の粘性地盤とその地盤の表層を砂質土で覆ったわずかに異なる地盤に埋め込まれた杭基礎の耐震性能を比較し、表面を覆った砂質土が杭頭の横方向および揺動インピーダンスを著しく増加させることを示した。彼らの結果は、凍った表層地盤においても同様に杭基礎剛性の変化が生じることを示唆している。

本論文では、主に上部構造の性能に影響を及ぼす可能

性に着目し、地盤凍結がキネマティックと慣性の双方の地盤-杭の相互作用に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

対象とした地盤モデルは、フーチングにより剛結された群杭が工学的基盤に定着した半無限の水平成層地盤である。（図-1）

凍結地盤の影響を評価するため、群杭の周辺地盤は、夏期では一様な特性を有する地盤とし、冬期においては、表層地盤のみが凍結したことを想定した特性を有する設定とした。地盤と群杭の相互作用を厳密に解析するために、半解析的アプローチに基づくKonagai K.の数値プログラムTLEM(1.2)を用いた。TLEM(1.2)は、Tajimi H.が開発したThin-Layered Method<sup>10)</sup>を基としている。TLEM (1.2)の特徴は、地中の基礎の挙動として、並進と回転の揺れ動作において、Bernoulli-Euler梁もTimoshenko梁も群杭基礎と同様の性能を実現することはできない群杭を同等の性能を示す直立梁に置き換えられていることにある。

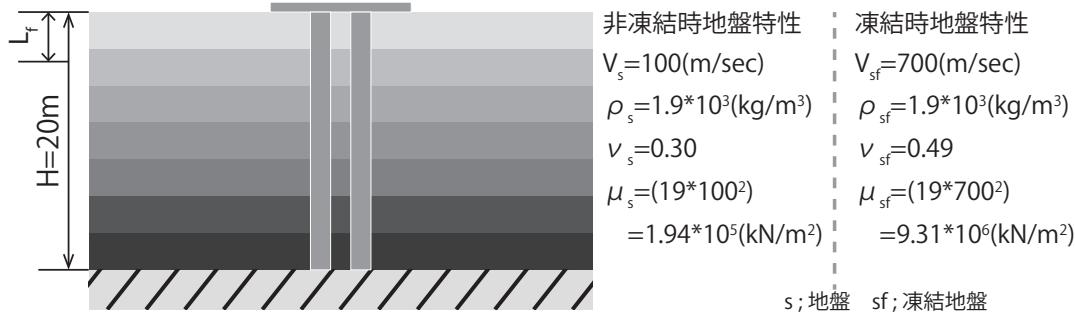


図-1 地盤モデルと地盤特性（非凍結時、凍結時）

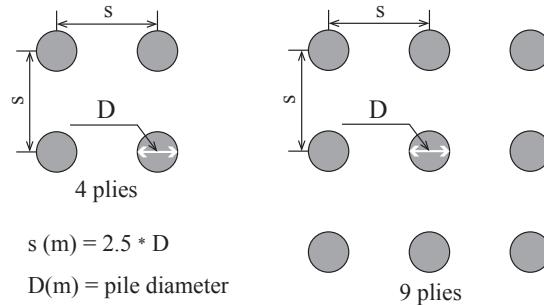


図-2 杭配置

表-1 解析ケースと鋼管杭の諸元

解析ケース	E(kN/m <sup>2</sup> )	直径(m)	板厚(m)	単位質量(kg/m)	断面二次モーメント I(m <sup>4</sup> )
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

(Konagai K. et al.<sup>11)</sup> )

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、 $L_f=0.25\text{m}, 0.50\text{m}, 0.75\text{m}$ および $1.00\text{m}$ と設定した。なお、計算する凍結深さを考慮して、浅い深さ $3.0\text{m}$ までを $0.25\text{m}$ 間隔とし、 $10\text{m}$ まで $0.5\text{m}$ 、 $20\text{m}$ まで $1.0\text{m}$ 間隔となる36分割とした。

### 3. 解析結果

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挙動の杭基礎への伝達特性として示される。多くの場合、杭は、搖れの動きに非常に柔軟性があり、周辺地盤の動きに容易に追従するため、伝達される挙動は並進

運動が卓越する。

しかし、地盤を垂直方向に伝達するせん断波長が短くなると、杭は地盤の挙動に追従しづらくなる。柔軟な群杭基礎がフーチングに横荷重を受けると、特定の深さ $L_a$ よりも上方のみの群杭が変形する。この $L_a$ は特性長と呼び、次の値 $L_0$ に比例する。

$$L_0 = \sqrt[4]{EI/G} \quad (1)$$

ここで、 $EI$ は群杭の曲げ剛性(同等の直立梁)である。検討したすべてのケースにおける水平変位伝達率は、無次元化周波数 $\omega L_0 / \nu_s$ の関数として図-3に示した。ここで、 $\omega (= 2\pi f)$ は、円周波数であり、 $\nu_s$ 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( $\nu_s/f$ )との比を $2\pi$ で割ったものである。

図-3 (a)～(e)の非凍結および表層が凍結した状態で

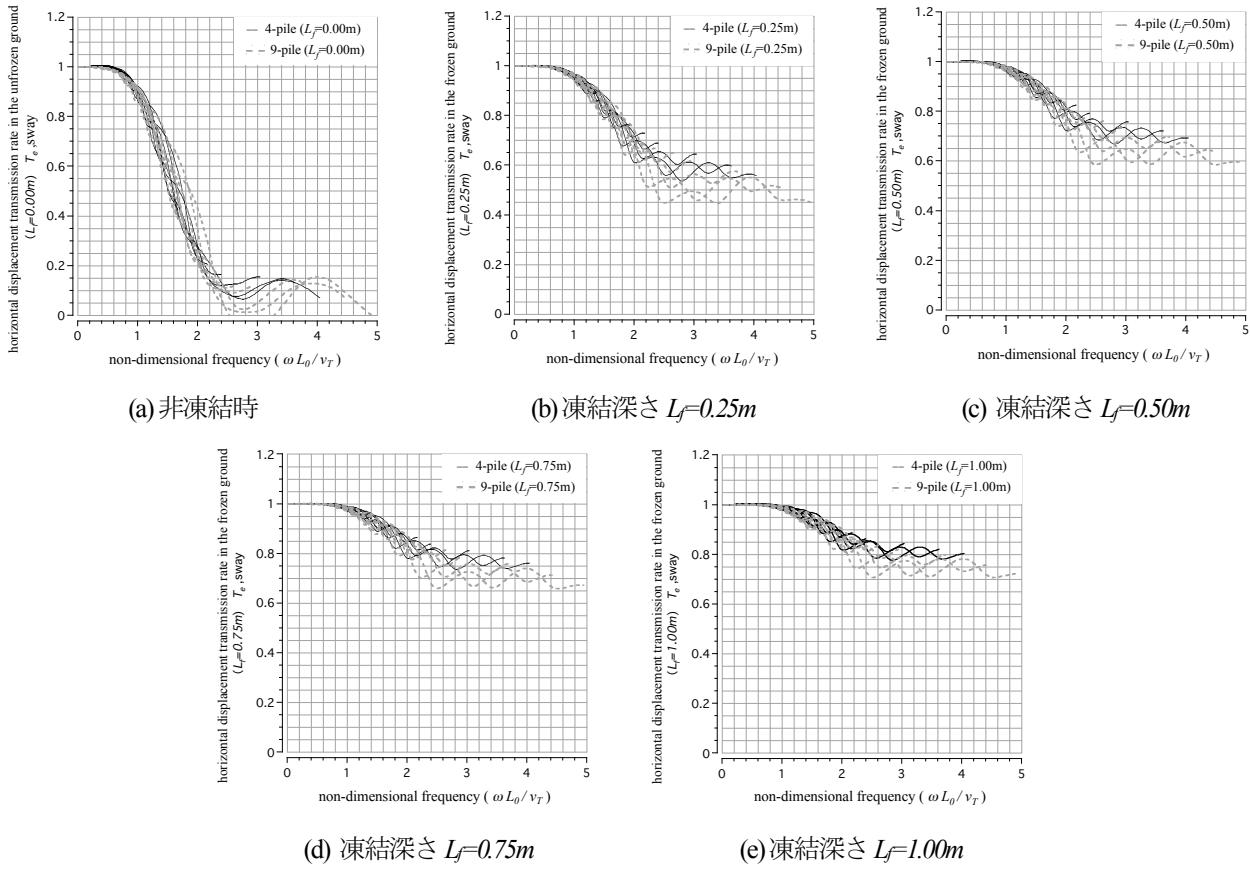


図-3 凍結深さ別による群杭の相互作用

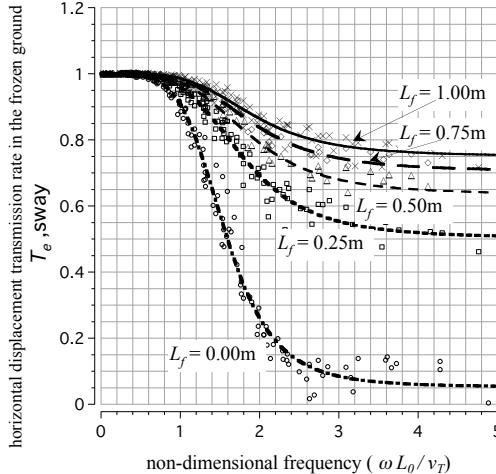


図-4 地盤と群杭の相互作用（水平変位伝達率）

の伝達関数は、杭のタイプや本数が異なっていても、凍結深さで区分すると無次元化周波数( $\omega L_0/v_T$ )では概ね互いに重なる曲線を示す。これは、 $L_0$ に比例する特性長 $L_a$ が、地盤と杭の動的相互作用を支配する重要なパラメータであることを明確に示している。表層地盤の凍結深さが深くなるにつれ(図-3(b)～(e))、自然地盤挙動のフーチング水平挙動への伝達性が、無次元化周波数( $\omega L_0/v_T$ )の広い範囲にわたって徐々に1に収束している。図-4は、図-3(a)～(e)に示した曲線を取りまとめて示し

たものである。これらを比較すると表層地盤の凍結の影響が非常に明確である。

図-5は、表-1のtype4の2×2および3×3に配置した鋼管杭の並進挙動について、夏期(図-5(a))および冬期(図-5(b))の群杭フーチング部の水平剛性 $k_{xx}$ を周波数の関数として示す。 $k_{xx}$ の実数部と虚数部でプロットされた下向きの落ち込みは、垂直方向のせん断波伝播のための各地盤層の共鳴周波数で生じる。しかし、全体としては、群杭剛性の実部は、耐震工学上、重要な周波数範囲にわ

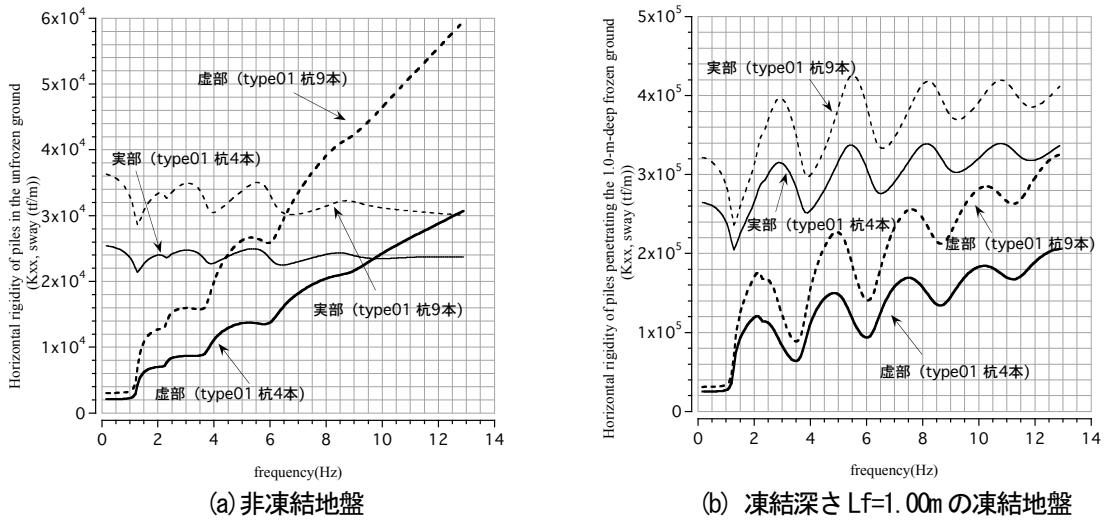


図-5 群杭頭部の剛性 $k_{xx}$  (type04)

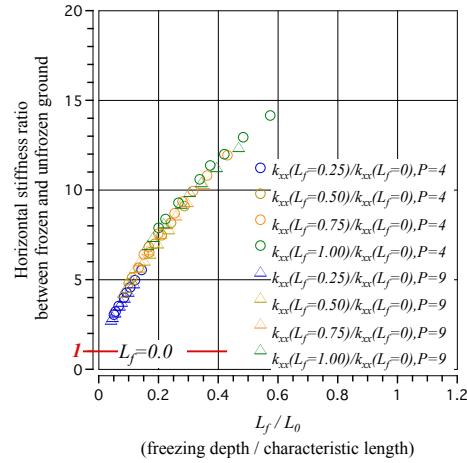


図-6 水平剛性比と特性長を考慮した凍結深さの関係

たってほぼ一定であるのに対し、地盤-群杭構造の波放射減衰効果を示す虚部は、一般的な右上昇傾向を示す。これらの曲線の特徴は、並進運動における群杭剛性 $k_{xx}$ が、ばね $K_0$ とダンパー $C_0$ との並列接続によって近似できることを示し、その円周波数 $\omega$ の領域における動的剛性は、(2)式によって与えられる。

$$k_{xx} \cong K_0 + i\omega C_0 \quad (2)$$

0.1~5.0Hzの周波数範囲で $K_0$ の平均値を求め、夏期から冬期までの群杭剛性的変化率を式(1)により求められる凍結深さ $L_f$ と $L_0$ の比の関数として示した。検討した全てのケースは、図-6に示すように右斜めに上昇する一本の曲線に回帰することが明確化され、凍結した表層地盤が地盤と群杭の相互作用に影響を与える重要な要素であることがわかった。

## 5. まとめ

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。本検討では、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仮定している。

本研究では、表層地盤が凍結した地盤内の群杭が、より広い周波数範囲にわたって、地面の動きに追従する傾向があることを示された。また、凍結深さ $L_f$ が浅い場合であっても、凍結時のフーチング剛性が顕著に大きくなることが示された。これらのことから $L_0$  ( $= \sqrt[4]{EI}$ )に比例する特性長 $L_a$ が、並進運動における杭頭剛性 $k_{xx}$ に対する厚さ $L_f$ の表面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。

回転挙動におけるフーチング剛性の表層地盤の凍結影響については、さらに研究が必要であり、今後、報告する予定である。

## 参考文献

- Vaziri H & Han YC.: Full-scale field studies of the

- dynamic response of piles embedded in partially frozen soils, Canadian Geotechnical Jnl. 1991; 28 (5): 708-718, 1991.
- 2) Suleiman MT, Sritharan S & White DJ.: Cyclic lateral load response of bridge column-foundation-soil systems in freezing conditions, ASCE Jnl. of Structural Engineering 2006; 132 (11): 1745-1754, 2006.
  - 3) Sritharan S, Suleiman MT & White DJ.: Effects of seasonal freezing on bridge column-foundation-soil interaction and their implications, Earthquake Spectra 2007; 23 (1): 199-222, 2007.
  - 4) Yang Z, Dutta U & Zhu D.: Seasonal frost effects on the soil-foundation-structure interaction system, ASCE Jnl. of Cold Regions Engineering 2007; 21 (4): 108-120, 2007.
  - 5) Xiong F & Yang Z. Effects of seasonally frozen soil on the seismic behavior of bridges, Cold Regions Science and Technology 2008; 54 (1): 44-53, 2008
  - 6) Wotherspoon LM, Sritharan S & Pender MJ. An Investigation on the impact of seasonally frozen soil on seismic response of bridge columns, ASCE Jnl. of Bridge Engineering 2010; 15 (5): 473-481, 2010.
  - 7) Wotherspoon LM, Sritharan S & Pender MJ. Modeling the response of cyclically loaded bridge columns embedded in seasonally frozen soil, Engineering Structures 2010; 32: 933-943, 2010.
  - 8) Wotherspoon LM, Sritharan S & Pender MJ.: Modeling the effects of seasonal freezing on the seismic response of bridges, Proceedings of 10<sup>th</sup> U.S. National Conference on Earthquake Engineering, 2014.
  - 9) 土岐憲三, 清野純史, 小野祐輔, 古川愛子: 杭基礎・地盤系における非弾性挙動を考慮した相互作用ばねのモデル化について, 土木学会論文集 No.710/I-60, pp.235-245, 2002.
  - 10) Tajimi, H., Shimomura, Y.: Dynamic Analysis of Soil-Structure Interaction by the Thin Layered Element Method, Trans. Arch. Inst. Japan, pp.41-51, Vol.243, 1976.
  - 11) Konagai, K., Yin, Y. and MURONO, Y.: Single beam analogy for describing soil-pile group interaction, Soil Dynamics and earthquake Engineering, \*23(3)\*, 213-221, 2003, [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(02\)00212-9](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(02)00212-9).

## EFFECT OF SURFACE LAYER FREEZE TO SOIL-PILE INTERACTION

Takashi SATO, Kazuo KONAGAI, Takaaki IKEDA and Hiroaki NISHI

To assess earthquake resistance of new or existing structures and predict earthquake damage of 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 freezing of ground on the dynamic soil grouped piles interaction., It is shown herein that the grouped piles in the frozen ground tend to follow the motion of the ground over a wider range of frequency. Furthermore, it is shown that even when the freezing depth is much thinner than the characteristic length of piles determined by the stiffness ratio of the ground and the group pile, the pile cap stiffness at the time of freezing becomes noticeably large. It is confirmed that the freezing of the ground can greatly affect the interaction between the ground and the piles.