

表層地盤の凍結が入力地震動に与える影響

佐藤 京¹・小長井一男²・池田隆明³・西 弘明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 横浜国立大学 教授 (〒240-8501 神奈川県横浜市保土ケ谷区常盤台79-1)

E-mail: konagai@ynu.ac.jp

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: h-nishi@ceri.go.jp

地震被害想定や事業継続マネジメント等の検討では、その地域に想定される地震動を適切に予測することが重要である。特に広域的な範囲を対象とした場合には、基盤距離減衰式より基盤地震動を推定し、サイト特性を反映させた増幅度を用いて地表面地震動を設定することが一般的である。増幅度は検討対象地点の地盤構造を含む地盤特性により規定され、気象環境等により大きく変化しないことが前提とされている。一方、冬季に地盤が凍結する可能性がある寒冷地域では、地盤特性が変化する可能性が否定できないと考えられる。そこで、凍結した地盤と杭の相互作用について検討を行った。

その結果、凍結地盤中の群杭は、広帯域で地盤の挙動に追随する傾向にあることが示された。さらに、地盤と群杭の剛性比で示される特性長に対する凍結深さの割合が小さくても、凍結時の剛性が非常に大きくなることが示され、地盤と杭の相互作用に大きな影響を与えることが確認された。

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

1. はじめに

地震被害想定や事業継続マネジメントの評価では広域的な地震動予測が行われる。これらの検討においては、距離減衰式などの方法により工学的基盤（せん断波速度が400m/s以上の基盤）の地震動を評価し、検討対象地点の地盤特性を反映したサイト特性を乗じて、地表の地震動（外力）を評価する。一般的には鉛直下方から入射したS波の増幅特性、いわゆる工学的基盤（せん断波速度が400m/s以上の基盤）から地表までの表層地盤のS波の増幅特性を示す場合が多い。S波の増幅特性は、気象環境等により地盤構造を含む地盤特性の変化を考慮せずに水平成層を仮定した一次元地盤構造でモデル化され、せん断剛性と減衰特性および非線形特性によって拘束される。

地盤が凍結するような地域では、地盤の凍結により地盤の密度とせん断波速度のどちらか一方、もしくは両方が影響を受け、せん断剛性が変化することが考えられる。また、表層部の凍結により二次元的に地表が拘束され、増幅特性が変化することが想定されることから、筆者らは観測記録から特性分析を実施している¹⁾。その結果、

構造物の1次固有振動数よりも高い振動数での差が確認されたものの、構造物への地震時応答に与える影響は小さいとの考察を得た。

しかしながら、凍結地盤と構造物応答の影響について文献2)–9)と検討報告は少ないものの、Worherspoonらは、2014年に行った報告⁸⁾において凍結環境における構造物応答は夏期の応答と異なり、凍結が重大な影響を与えることを実験的、解析的に明らかにし、架橋地点における温度影響について設計時に検討することが重要であると報告している。

本稿では、広域的な地震動予測を対象として地盤凍結が入力地震動に与える影響を簡易に評価するための基本検討として、凍結深さと杭の水平剛性の関係について解析的検討を行うとともに、非凍結時の地盤特性から凍結時影響を推定するための考察を行った。

2. 凍結地盤が地震動に与える影響検討手法

構造物の地震応答は、基礎と周辺地盤との動的な相互作用により影響を受ける。動的相互作用の内、慣性力相互作用は地盤の複素剛性で評価することが可能である。

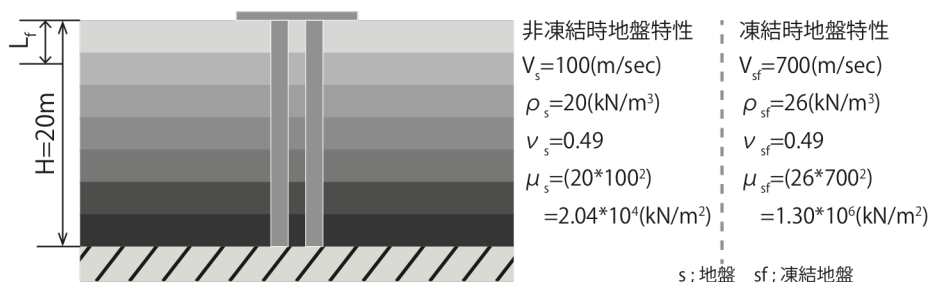


図-1 地盤モデルと地盤特性

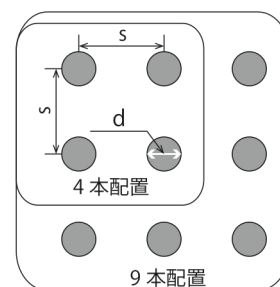


図-2 杭配置

表-1 解析ケース呼称と鋼管杭の諸元

呼称	E(kN/m ²)	杭半径(m)	板厚(m)	単位質量(kg/m)	単位体積重量 $r_o(\text{t/m}^3)$	断面二次モーメント $I(\text{m}^4)$
type01	2.08E+08	0.20	0.009	86.8	7.848	2.114E-04
type02	2.08E+08	0.25	0.009	109	7.853	4.185E-04
type03	2.08E+08	0.30	0.009	131	7.840	7.297E-04
type04	2.08E+08	0.30	0.015	216	7.835	1.180E-03
type05	2.08E+08	0.40	0.009	176	7.871	1.749E-03
type06	2.08E+08	0.50	0.012	292	7.839	4.545E-03
type07	2.08E+08	0.60	0.014	409	7.841	9.173E-03
type08	2.08E+08	0.60	0.022	639	7.848	1.413E-02

水平成層地盤における複素剛性は、小長井により開発された数値解析プログラムTLEM[®]等を用いて精度よく評価することができる。これを活用して群杭のある基礎地盤において、表層地盤の凍結が群杭の動的相互作用にどのような影響を与えるのか検討する。

具体的には、TLEMにより設定したモデルに対して凍結深さの異なる表層地盤における相互作用解析を行い、鋼管杭における水平挙動やせん断剛性への影響を非凍結時と比較検討を行う。

3. 地盤モデル

対象とする地盤モデルは、非凍結時には単一特性を有する成層地盤である。非凍結時および凍結時の地盤特性は、地盤モデル図と合わせて図-1に示す。

図-1に示した非凍結時地盤特性が比較基本モデルである。表層厚さ（凍結深さ） $L_f=0.50\text{m}$ 、 0.75m および 1.00m を水平方向に一樣な凍結時地盤として設定した3モデルを比較対象とした。なお、凍結時地盤特性は、厳冬期の北海道で実施したボーリング調査を参考に概略数を定義している。

4. 杭モデル

図-2に示すように4本および9本の鋼管杭を間隔 $s=2.5d(\text{m})$ として正方配置し、解析を実施した。様々な条件における解析結果を出すために多くの種類の杭を対象として解析を行った。表-2に解析ケースの呼称と用いた鋼管杭の諸元を示す。

5. 解析条件

本検討で行う解析は、振動数領域での定式である事から弾性領域のみを取り扱う。また、挙動の解析では等価梁法における仮定条件⁹⁾に従っている。

なお、地盤の分割数による計算値の収束について、40分割（ 0.50m 間隔）で良好な結果が得られることを確認したが、凍結深さを考慮して80分割（ 0.25m 間隔）とした。

6. 解析結果

振動数に対する群杭の相互作用として算出された水平変位伝達率を無次元化周波数との関係により示す。無次元化は、群杭基礎に入射する波長（ $\lambda=2\pi \cdot v_t/\omega$ ）に対する群杭の特性長（ $L_0=\sqrt[4]{nEI/\mu}$ ）の比として表される値である。

非凍結地盤の結果を図-3に、凍結地盤の結果を図-4に、

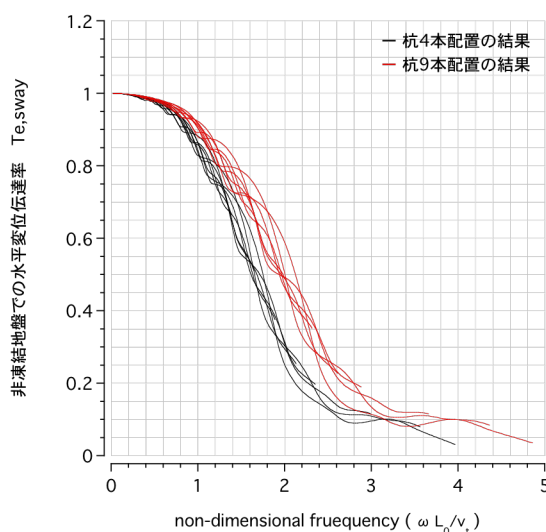


図-3 群杭の相互作用（非凍結地盤）

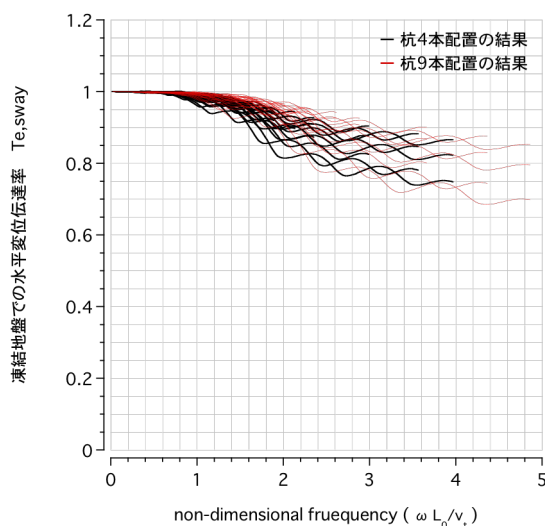
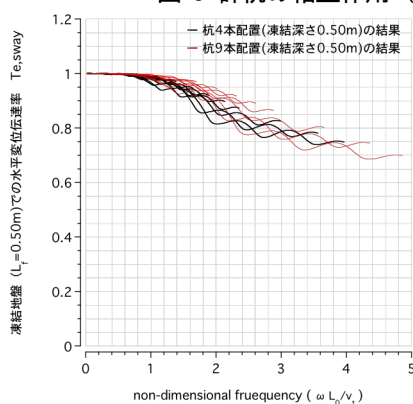
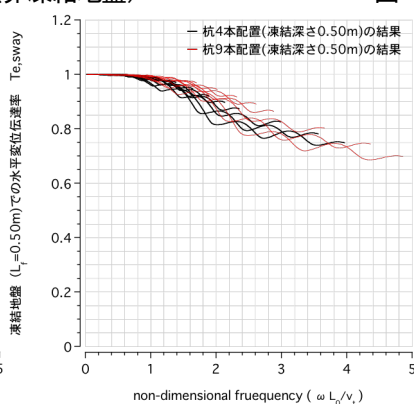


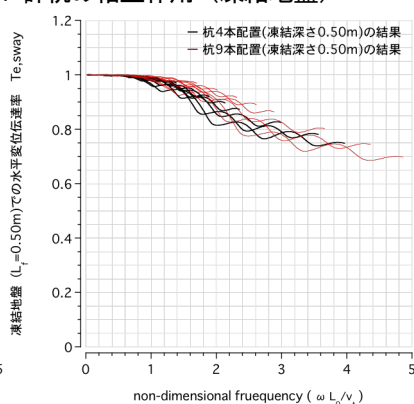
図-4 群杭の相互作用（凍結地盤）



(a) 凍結深さ 0.50m



(b) 凍結深さ 0.75m



(c) 凍結深さ 1.00m

図-5 凍結深さ別による群杭の相互作用

凍結地盤の深さ別を図-5に示す。黒実線は杭4本配置、赤実線が杭9本配置の結果を示している。

非凍結地盤では、無次元化周波数が小さければ、群杭杭頭と周辺地盤が同等の動きをしていること表現しているが、無次元化周波数が1を超えると伝達率は大幅に減少し、地盤の応答に追従しなくなる様子を表現している。図-4に示した全凍結深さに対する結果を確認すると、無次元化周波数の1から2程度まで、群杭杭頭と周辺地盤が同等の動きをしていることを表現していることは、非凍結地盤の結果と同様である。しかし、無次元化周波数が大きくなっても水平変位伝達率は大幅に減少せず、比較的に地盤の応答に追従している様子を表現している。なお、図-5に凍結深さ別で水平変位伝達率を整理している。これは、水平変位伝達率に対して凍結深さの影響は大きくないといえる結果であり、本検討の凍結深さの範囲では図-4のようにまとめることの合理性を示している。

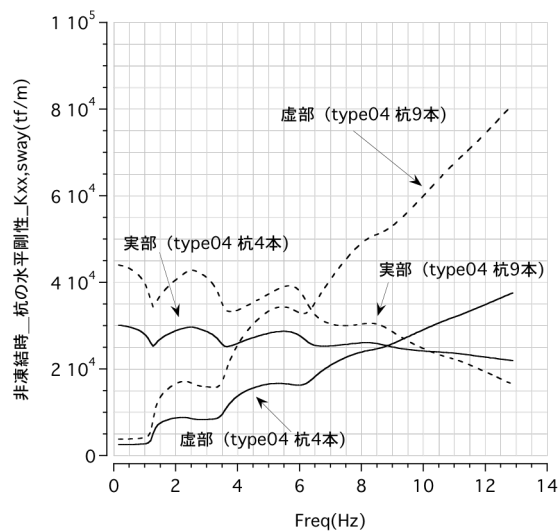
次に群杭頭部の水平剛性 K_{xx} の結果をtype04（杭4本、杭9本）のケースを例として図-6に示す。

図-6(a)に示した非凍結地盤においては、水平剛性 K_{xx} の実部は概ね上に凸の右肩下りの傾向が示され、虚部

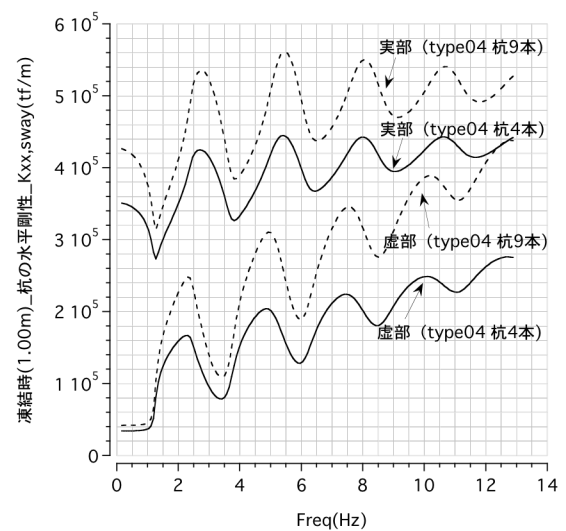
では右肩上がりの傾向が確認できる。これに対して、図-6(b)に示した凍結深さ1.0mの結果では、非凍結地盤と比べて水平剛性 K_{xx} は非常に大きくなり、周波数に対する剛性の現れ方は、実部、虚部ともに周波数が増加するのに従って概ね平行か右肩上がりの傾向が確認できる。同一杭本数における水平剛性 K_{xx} を比較すると非凍結時に比べ、凍結時は高くなる傾向にある。さらに、杭本数が異なる結果を比較すると杭の剛性が高くなると剛性も高くなる傾向にあることが確認できる。なお、他の計算結果でも同様の傾向であった。

7. 相互作用に与える凍結深さの影響

図-6に示したように非凍結地盤に対して凍結地盤の水平剛性は、凍結深さが深くなる場合や群杭剛性が高くなる場合に大きくなる傾向が示された。そこで、構造物に影響を与える0.1～5.0Hzの周波数帯における水平剛性の平均値を各計算ケースの代表値として、非凍結時の水平剛性に対する凍結時の水平剛性の比（以下、水平剛性比）を求め相互作用に与える凍結深さの影響を整理する。整



(a) 非凍結地盤



(b) 凍結深さ 1.0m の凍結地盤

図-6 群杭頭部の剛性 Kxx (type04 での例)

理するにあたり，群杭の挙動に大きく影響を与える特性長 L_0 を説明変数としている．ただし，特性長 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と想定されることから，特性長 L_0 に対する凍結深さ L_f の比とすることによって，無次元化し各計算ケースに対する尺度を統一した．

その結果を図-7に示す．凍結深さ $L_f = 0.0m$ ，水平剛性比1を基点として右上りに水平剛性比が増加する傾向が確認できる．特性長の一分割から六割に当たる凍結深さにおいて，水平剛性比は5倍から15倍と大きくなっていることから表層の地盤凍結は，地盤と杭の相互作用に対して大きな影響を与える結果が示された．

さらには， L_f/L_0 を説明変数とする関数によって，水平剛性比(凍結時水平剛性/非凍結時水平剛性)を推定可能であろう結果である．

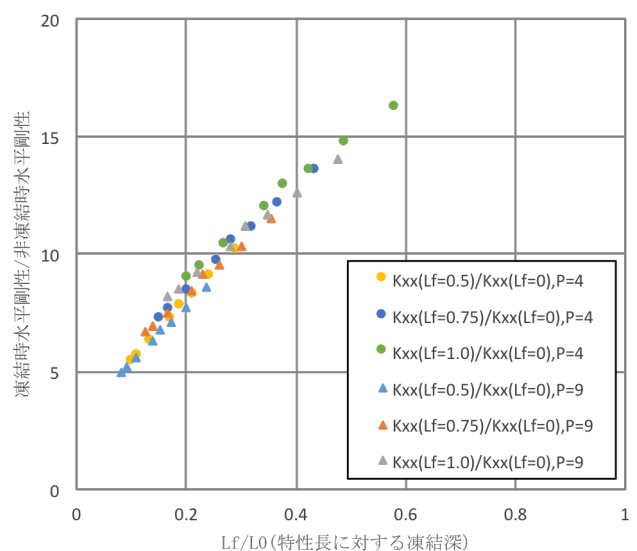


図-7 水平剛性比と特性長を考慮した凍結深さの関係

7. まとめ

広域的に地震動を評価する場合を想定し，地盤凍結が入力地震動に与える影響を簡易的に評価するための検討を行った．その結果，表層地盤が凍結すると，群杭の水平変位伝達率は，広帯域で減少することなく群杭周辺地盤に追随する傾向にあることが示された．

また，地盤と群杭の剛性比である特性長に対する凍結深さの割合が少ない状況においても非凍結地盤における水平剛性に大きな影響を与えることが示唆された．

このことから，表層地盤が凍結する地域においては，上部構造に与える影響度を照査することが重要であると考えられることから，さらに検討を行い表層地盤の特性変化に対する相互作用への影響評価について精度を向上させる予定である．

参考文献

- 1) 佐藤京, 池田隆明, 高瀬裕也, 西弘明, 小長井一男: 地盤凍結が地表面地震動に与える影響, 第34回地震工学研究発表会公演論文集, 2014.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
 - 6) 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
 - 7) 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.
 - 8) 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.
 - 9) Wotherspoon LM, Sritharan S & Pender MJ.: Modeling the effects of seasonal freezing on the seismic response of bridges, *Proceedings of 10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, 2014.
 - 10) Konagai, K. : Guide to "TLEM", program manual No.5, Konagai Lab., IIS, Univ. Of Tokyo, June, 1998.
 - 11) Konagai, K., Ahsan, R. & Murayama, D. : Simple Expression of the Dynamic Stiffness of Grouped Piles in Sway Motion, *Journal of Earthquake Engineering* 4(3), pp.355-376, 2000.

EFFECT OF SURFACE LAYER FREEZE TO STRONG GROUND MOTION

Takashi SATOH, Kazuo KONAGAI, Takaaki IKEDA and Hiroaki NISHII

It is important in considering the business continuity management and earthquake damage estimation is that it is to properly predict the ground motion to be expected in the area. In ground motion prediction that target wide area, to estimate the ground motion of the foundation by using the attenuation characteristic which is proportional to the epicentral distance. And can be calculated using the amplification characteristics that are transmitted from the ground based on the seismic ground surface is common. Amplification characteristic is one that has been defined from the ground characteristics and ground structure, and are an average of not considering the change in the characteristics temporary affected by weather. On the other hand, the possibility that the ground is frozen in a cold region is high and if the situation continued, it can not be denied the possibility of soil characteristics change. So, We examined the interaction of the frozen ground and the piles.

As a result, Pile group of frozen in the ground has been shown to tend to follow the behavior of the ground in a wide band. In addition, even if the ratio of the active pile length and freezing depth is small, is shown that the horizontal stiffness becomes very large, it can have a significant impact on the interaction of the ground and the pile has been confirmed.