

基于动力 BNWF 法的冻土-桩相互作用模型研究^①

李永波¹, 张鸿儒²

(1.天津市市政工程设计研究院,天津 300050; 2.北京交通大学土木建筑工程学院,北京 100044)

摘要:基于水平循环荷载作用下不同负温冻土环境中单桩动力特性模型试验结果,在已有分析桩-土-结构相互作用的动力 BNWF 模型的基础上,提出改进的冻土-桩基动力相互作用非线性反应分析模型。在该模型中,利用改进的双向无拉力多段屈服弹簧考虑桩侧冻土的水平非线性力学特性,同时兼顾桩侧与冻土间的竖向非线性摩擦效应、桩尖土的挤压与分离作用以及远场土体阻尼对桩基动力特性的影响。其中桩侧水平多段屈服弹簧参数根据冻土非线性 $p-y$ 关系获得,该关系曲线以三次函数曲线段及常值函数段共同模拟,并由室内冻土压缩试验结果确定。最后基于改进的动力 BNWF 模型,提取动位移荷载作用下该桩顶力-位移滞回曲线及桩身不同埋深处的弯矩动响应数值分析结果,并与相应的模型试验结果对比,二者具有较好的拟合度,表明本文所提出的改进模型在分析冻土-桩动力相互作用时有较好的适用性。

关键词:冻土-桩相互作用; 模型试验; 地基非线性; 动力 BNWF 模型; 双向无拉力多段屈服弹簧

中图分类号: P642.14; TU473

文献标志码:A

文章编号: 1000-0844(2015)02-0453-007

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2015.02.0453

Study on Frozen Soil Pile Interaction Model Based on Dynamic Beam on Nonlinear Winkler Foundation Method

LI Yong-bo¹, ZHANG Hong-ru²

(1.Tianjin Municipal Engineering Design & Research Institute, Tianjin 300050, China;

2.School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Permafrost is distributed widely in our country. Although pile foundation is the main foundation form for large bridges in frozen zones, few studies have been conducted regarding the dynamic characteristics of pile foundation construction in permafrost. An improved nonlinear analytical model for frozen soil-pile dynamic interaction was developed on the basis of model test results of the dynamic characteristics of pile foundations in various subzero temperature soils under lateral dynamic loads and an analytical model of pile-soil-structure interaction with the dynamic beam on nonlinear Winkler foundation model. This improved analytical model simulates the nonlinear lateral pressure effect of the frozen soil around the pile with an improved bidirectional compression-only multi-yield spring. Vertical friction effects between the frozen soil and pile, extrusion and separation effects of frozen soil under pile tips, and damping effects of the far-field soil on the dynamic characteristics of pile foundations are also considered in this analytical model. The parameters of the bidirectional tensionless multi-section yield spring are determined by the nonlinear $p-y$ relationship of frozen soil. The $p-y$ relationship whose parameters were

① 收稿日期:2014-08-20

基金项目:国家自然科学基金(90715013)

作者简介:李永波(1985—),男,山东东明人,博士,主要从事冻土-桩动力相互作用、长大桥梁及地下空间结构抗震等方面的研究工作.

E-mail: liyb2011@foxmail.com

based on the results of the indoor frozen soil compression test was simulated by the combination of a cubic function and a constant function. Displacement-force response of the pile head and pile shaft responses to bending moments at different depths under dynamic forces were very similar to the model test results. Results indicate that the improved analytical model is potentially helpful during the analysis of frozen soil-pile dynamic interactions.

Key words: frozen soil pile interaction; model test; foundation nonlinearity; dynamic beam on nonlinear Winkler foundation (BNWF) model; bidirectional tensionless multi-section yield spring

0 引言

多年冻土在我国分布广泛,约占 21.5% 的国土总面积,且主要位于强震高发区。对于冻土区建筑和穿越不稳定冻土带的桥梁结构等重要工程来说,桩基础以其良好的场地适应性及强大的抵抗复杂荷载能力成为该类工程的主要基础形式。冻土力学特性受温度、含水量等因素影响强烈,强动载作用下冻土中桩基的损伤情况远比一般土体复杂。为研究不同冻土环境中桩基的动力响应特性,国内外学者开展了一些探索试验:Suleiman 等^[1-2]研究了季节冻土中大比例模型柱-桩结构在循环拟静力作用下反应情况,Wotherspoon 等^[3]对该试验进行了数值模拟与分析;Vaziri 和 Han^[4-5]研究了季节冻土中足尺混凝土桩基在不同激振情况下动力响应情况,并将试验结果验证其边界域理论的正确性;吴志坚等^[6]主要对高温多年冻土区桩基础在地震荷载作用下桩侧冻土温度变化进行了研究;李永波等^[7]通过模型试验研究了冻土冻融作用对桩基的水平动力响应的影响情况。以上研究均表明桩基础的动力特性受冻土负温及冻融作用影响显著,在强水平动载作用下桩基础与周围土体容易进入强非线性状态,桩基与土体之间会产生挤密与分离效应,因此在对冻土区桩基础设计时要重视土-结相互作用的影响,并考虑地基土的非线性作用。

近年来,围绕桩-土-结构相互作用问题的研究不断深入。刘晓强等^[8]基于室内动三轴试验对振动前后桩周土体的强度弱化情况进行了研究,并提出一个较简单且符合试验规律的天津地区桩周土的强度弱化公式;El Naggar 等^[9]分析海岸工程桩基在非线性地震动输入下的动力响应时,提出了一种以简单非线性弹簧、黏壶及接触单元考虑了桩-土界面处分离效应的简化动力 BNWF 模型;Allotey 和 El Naggar^[10]提出了一种分析浅埋及深埋基础地震响应的动力 BNWF 模型,该模型考虑了桩周土体的加-卸载准则、变形区累积发展过程以及强度的周期

衰减和辐射阻尼;Allotey 等^[11]考虑桩-土的 $p-y$ 和 $t-z$ 耦合效应,研究了无黏性土中单桩在竖向和水平向地震动作用下动力响应。

本文针对冻土环境中桩基在水平动载作用下的非线性响应特性进行研究,结合模型试验结果,给出冻土-桩之间连接弹簧的非线性 $p-y$ 关系的确定方法,并基于动力 BNWF 模型理论,提出双向无拉力多段屈服弹簧模型和改进的桩基础结构非线性地震反应分析模型,并进行模型试验验证。利用改进的分析模型有助于对冻土环境中桩基结构的地震反应及变形规律进行研究。

1 冻土-桩动力相互作用模型试验

为分析多年冻土环境中桩基在水平动载作用下的动力响应特性,对该类场地桩基桥梁结构在地震作用下的损害情况进行预测,开展冻融条件下模型桩基水平动力试验研究^[7]。

1.1 试验简介

基于北京交通大学岩土工程中心自主研制的冻土桩动力相互作用模型试验系统,以外径 32 mm、壁厚 3 mm、长 650 mm(其中埋置于土体中长度约为 600 mm)的 Q235 无缝钢管作用动力试验模型桩,对均温分别为 -5 °C、-3 °C 及浅表层解冻冻土环境中模型桩的水平动力响应特性进行试验研究。试验时动载频率为 2 Hz,每级荷载持续约 30 s。

1.2 试验结果

以 -3 °C 均温冻土中模型桩响应结果为例,在幅值设定值 1.5、2.5、3.5 kN 3 级正弦动载作用下实测桩头的位移-荷载关系及桩身弯矩(图 1)。

主要试验结果如下:

(1) 桩基前后冻土因受压流变产生塑性变形,桩与冻土接触面间出现较大间隙;土温越低,相同动载作用下的间隙越小。

(2) 由于桩-土间的分离效应,桩基在动载牵引下经过位移零值时荷载曲线上会出现平缓变化段,

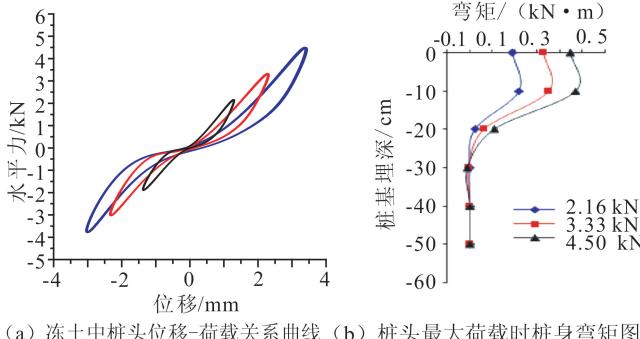
图 1 -3°C 冻土中模型桩动力响应图

Fig.1 Dynamic responses of model pile embedded in frozen soils at -3°C

表现在位移-荷载曲线呈现反 S 型。

(3) 桩基水平刚度随桩头承受动载的幅值增大逐渐减小。

(4) 同一冻土中模型桩基在不同动载幅值作用下桩身弯矩分布规律基本相同。随着土体温度升高, 桩身最大弯矩点埋深逐渐增大, 且最大弯矩呈现出增大趋势。

2 桩-土-结构相互作用分析模型

2.1 分析模型

为描述桩基结构在水平向地震动作用下的响应特性, 针对桩周土体的力学状态及其对桩基动力阻抗行为的影响, 学者提出了多种力学模型。较常见的有 Penzien 模型及改进 Penzien 模型^[12] (图 2)、桥梁桩基平面杆系结构模型, 以及大量简化的动力 BNWF 模型, 如 Kagawa 模型^[13]、El Naggar 和 Novak 模型^[14]与 Boulanger 模型^[15] (图 3) 等。

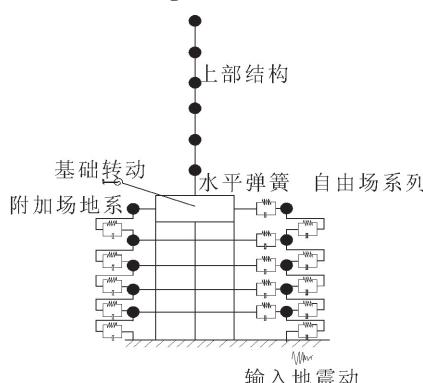


图 2 改进的 Penzien 模型

Fig.2 Improved Penzien model

以上各分析模型均有其优缺点及适用范围, 其中改进的 Penzien 模型能够考虑轴力变化的影响, 同时直接考虑多排桩, 避免了设置基础转动弹簧, 并

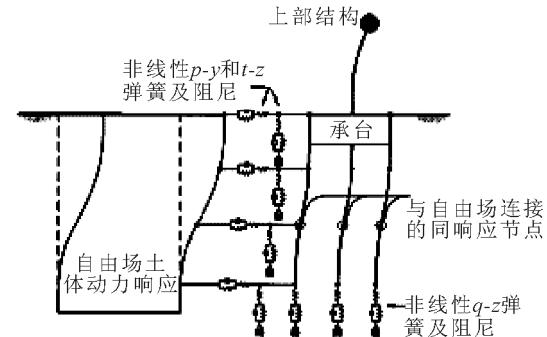


图 3 Boulanger 分析模型

Fig.3 Boulanger analytical model

把相应估计范围内等效自由场地的质量以质点的形式模拟。Boulanger 模型考虑的因素较为全面: 以拖拉和分离弹簧考虑桩-土间的分离闭合效应, 以塑性弹簧考虑土体的屈服效应, 以弹簧-阻尼并联单元模拟远场土体。

2.2 本文采用的动力 BNWF 模型

基于 Boulanger 模型的思想, 结合前述试验结果, 本文提出一种可以考虑动载作用下桩基与其周围冻土分离及摩擦效应的桩-土相互作用计算模型, 如图 4 所示。

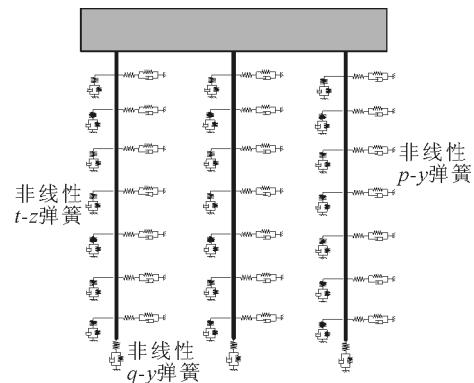


图 4 本文桩-土动力相互作用计算模型

Fig.4 The calculation model for frozen soil-pile dynamic interaction proposed in this study

该模型具有以下特点:

- (1) 考虑桩-土水平向接触作用以及桩、土材料非线性特性; 冻土水平弹簧为双向无拉力多段屈服弹簧单元, 可以考虑桩-土间的分离与挤压;
- (2) 考虑桩基与周围土体的竖向摩擦作用, 按照双线性屈服准则的竖向摩擦非线性弹簧单元进行模拟;
- (3) 考虑桩底与土体的挤压作用, 并以无拉力弹簧模拟;
- (4) 考虑远场土体阻尼对桩基动力特性的影响。

3 桩-土弹簧参数的确定

3.1 冻土非线性 $p-y$ 曲线

桩基受水平动载作用时, 土体的非线性 $p-y$ 关系是桩-土相互作用研究中最受关注的部分。土体冻结时的刚度约为其非冻结时的两个数量级倍, 当有足够的冰晶充填于土颗粒间空隙时, 冻土的力学特性与弱岩相似。因此, 本文基于模型试验数据, 采用修正的弱岩 $p-y$ 曲线建立文中冻土的非线性 $p-y$ 关系。

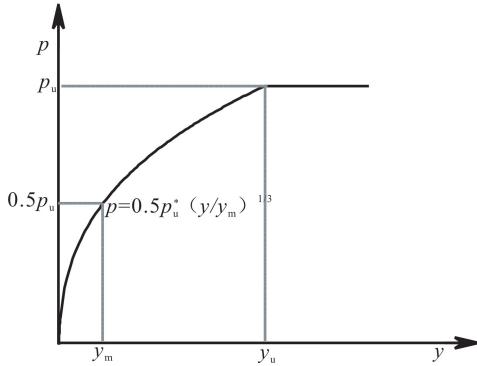


图 5 冻土 $p-y$ 曲线示意图

Fig.5 Sketch of the $p-y$ curve for frozen soil used in this study

如图 5 所示, 本文所采用的冻土非线性 $p-y$ 关系曲线由两部分线段组成: 第一部分为三次函数曲线段, 另一部分则为常值函数段。两条线段的函数方程表达式为

$$\begin{cases} p = \frac{p_u}{2} \left(\frac{y}{y_m} \right)^{\frac{3}{2}} & \text{当 } y \leqslant y_u \\ p = p_u & \text{当 } y > y_u \end{cases} \quad (1)$$

式中: p_u 为冻土的极限抗阻力; y_m 为冻土体所受荷载压力为 p_u 值一半时的桩身变形, 二者可由式(2)及式(3)求解获得。

$$y_m = k_m B \quad (2)$$

$$\begin{cases} p_u = q_u d \left(1.5 + 0.25 \frac{x_{fs}}{d} \right) & \text{当 } 0 \leqslant x_{fs} \leqslant 12d \\ p_u = 4.5 q_u d & \text{当 } x_{fs} > 12d \end{cases} \quad (3)$$

式中: q_u 为冻土的压缩强度, 可根据文献[16]中冻土压缩试验结果获得, 如式(4)所示; d 为桩基直径或宽度; x_{fs} 为地表以下冻土深度; k_m 为冻土极限强度 50% 时相应的应变, 本文中取 $k_m = 1/25$ 。

$$q_u = 10 \times (0.441T + 0.245T^2 + 0.019T^3) \quad (4)$$

式中: T 为冻土负温。

根据冻土材料的非线性 $p-y$ 关系, 在本文所提

出的冻土-桩动力相互作用计算模型中, 冻土水平弹簧设为双向无拉力三段屈服弹簧单元。该弹簧模型卸载斜率与初始加载斜率相同; 循环动力加载过程中, 弹簧受力与变形过程如图 6 所示。

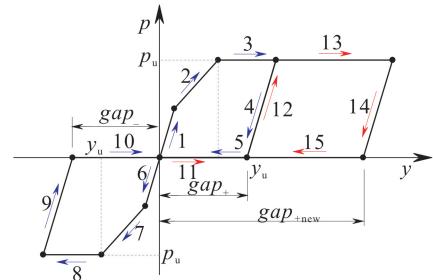


图 6 双向无拉力多段屈服弹簧模型

Fig.6 Model of the bidirectional tensionless multi-section yield spring

双向无拉力多段屈服非线性弹簧可以考虑土体分层的影响, 在桩基的不同深度处根据土介情况施加如上所述的不同刚度、屈服力的无拉力多段屈服弹簧即可。

3.2 远场弹簧刚度与阻尼

连接远场土体与桩周土体的水平簧刚度 K_{Hi} 可以根据 Mindlin 介质中位移应力分层计算归结到各层界面上得到^[17], 计算公式为:

$$K_{Hi} = \frac{8\pi E_i}{3} \left\{ \operatorname{arsinh} \frac{h_i - z_i}{B} + \operatorname{arsinh} \frac{h_i + z_i}{B} + \frac{2}{3B^2} \left[\frac{B^2 h_i - 2B^2 z_i + h_i z_i^2 + z_i^3}{[B^2 + (h_i + z_i)^2]^{\frac{1}{2}}} - \frac{z_i^3 - 2B^2 z_i}{(B^2 + z_i^2)^{\frac{1}{2}}} \right] + \frac{2}{3} \left[\frac{z_i - h_i}{[B^2 + (h_i - z_i)^2]^{\frac{1}{2}}} - \frac{z_i}{(B^2 + z_i^2)^{\frac{1}{2}}} \right] + \frac{4}{3} \left[\frac{B^2 z_i + h_i z_i^2 + z_i^3}{[B^2 + (h_i - z_i)^2]^{\frac{1}{2}}} - \frac{B^2 z_i + z_i^3}{(B^2 + z_i^2)^{\frac{1}{2}}} \right] \right\}^{-1} \quad (5)$$

式中: E_i 为第 i 层土的弹性模量; h_i 为第 i 层土的厚度; z_i 为第 i 层土的中心深度; B 为桩半径。

远场土体水平阻尼系数 C_H 的确定可根据 Lysmer 等^[17]提出的用黏性阻尼器模拟波动能量逸散的方法, 计算公式为:

$$\begin{cases} C_{H1} = 2Bh_1\rho_1(c_{p1} + c_{s1}) \\ C_{Hi} = 2B[h_i\rho_i(c_{p1} + c_{s1}) + h_{i+1}\rho_{i+1}(c_{p(i+1)} + c_{s(i+1)})] \end{cases} \quad (6)$$

式中: B 为桩半径; h_i 为第 i 层土的厚度; c_p, c_s 分别为场地土体纵波波速及剪切波波速, 可由式(7)及式(8)求解; ρ 为土体密度; $i=2, 3, \dots$ 。

$$\lambda = \frac{\mu E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \quad (7)$$

$$c_p = \sqrt{(\lambda + 2G)/\rho}; c_s = \sqrt{G/\rho} \quad (8)$$

式中: λ 为拉梅常数; G 为土体剪切模量。

3.3 桩周及桩底非线性弹簧

桩基受载过程中,若桩尖的竖直地基抗力达到桩尖支承力、桩周的竖向地基抗力达到计算范围内的最大桩周摩阻力,两者接触土体均进入塑性。其中桩尖竖直弹簧只承压而无拉力特性。地基土弹簧的抗力与位移关系的骨架曲线如图7所示,其值求解公式及方法参见文献[18]。

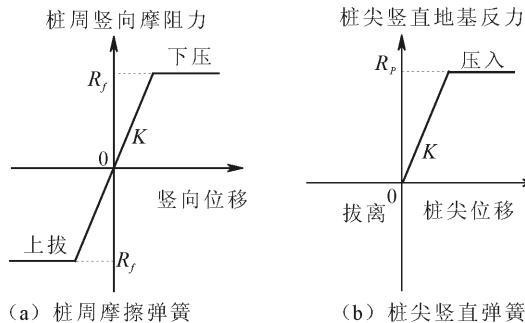


图7 桩周及桩底弹簧骨架曲线

Fig.7 Skelton curve of soil springs in pile bottom and around the pile

4 数值算例

根据本文提出的冻土-桩动力相互作用计算模型,结合文献[16]冻土动力特性试验获得的-3℃时冻土的弹性模量等,可确定桩侧水平地基土双向无接力多段屈服非线性弹簧、桩周土竖直非线性弹簧、桩底弹簧以及远场弹簧及阻尼等参数。考虑到模型试验中桩头受载主要由近似按正弦循环动位移控制,因此在数值模型分析时,亦在模型桩头施加一按正弦规律变化的动位移,动载频率同模型试验,为2 Hz。

对照模型试验钢管桩各参数,数值分析中桩长650 mm、桩径32 mm、壁厚3 mm,其中埋置于土体中的长度为600 mm。钢管桩按随动双线性屈服材料模拟,屈服前弹性模量为206 GPa,屈服应力为235 MPa;屈服后切线模量为20.6 GPa。

4.1 桩头位移-荷载关系

提取幅值分别为2 mm、3 mm及4 mm的动位移作用下模型桩桩头位移-荷载关系曲线,如图8所示。

从图8中可以看出,在不同等级的荷载作用下,数值分析所得到桩头的位移-荷载滞回曲线与模型试验所得形状极为近似,且数值大小相近,较好地模拟了试验结果,证明本章所提出的基于动力BNWF

法的桩-土动力相互作用分析模型是可行的。

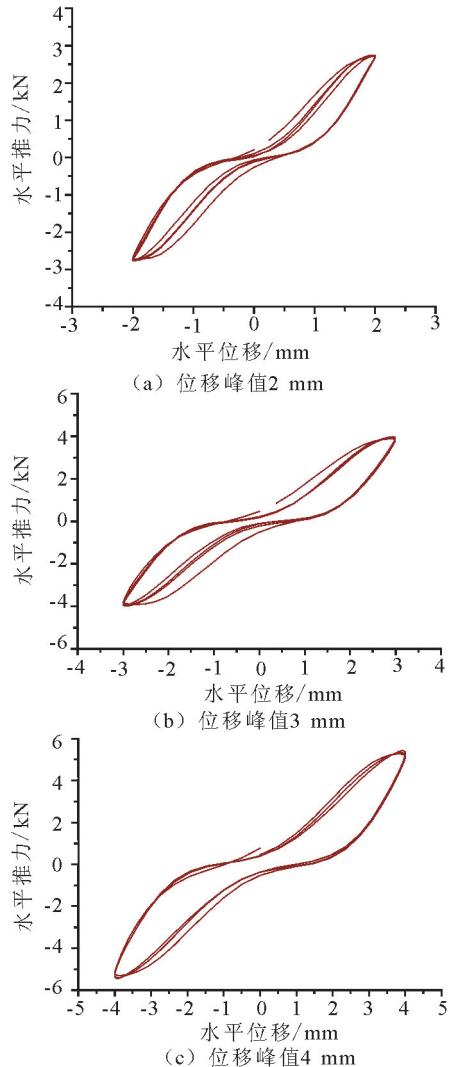


图8 不同动载下桩头滞回曲线

Fig.8 Displacement-force responses of the pile head under different dynamic loadings

数值模拟与模型试验所得桩头滞回曲线形状均呈反S形,即曲线在位移零点左右明显收缩,而在相对较大位移处渐变为丰满,间接说明了在位移零点处桩土分离后,由钢管桩承担较多动荷载。随着动荷载增大,曲线在位移零点的饱满度增大,表明此时钢管桩已发生一定程度的屈服。

图8中不同峰值动位移作用下桩头滞回曲线与试验所得曲线的差异表现在:在荷载作用下桩头的位移及荷载大小基本上呈对称分布,而试验所得为模型桩受推一侧的荷载明显较受拉侧大,这是由试验条件局限导致的。

4.2 桩身动力响应分析

水平动载作用下桩身各点的位移、弯矩响应情况是桩-土动力相互作用研究中比较关心的问题。

提取峰值为3 mm的正弦动载作用2 s时间内数值,分析模型中桩身距土表不同深度处的位移和弯矩时程,如图9所示。从图中可以看出:

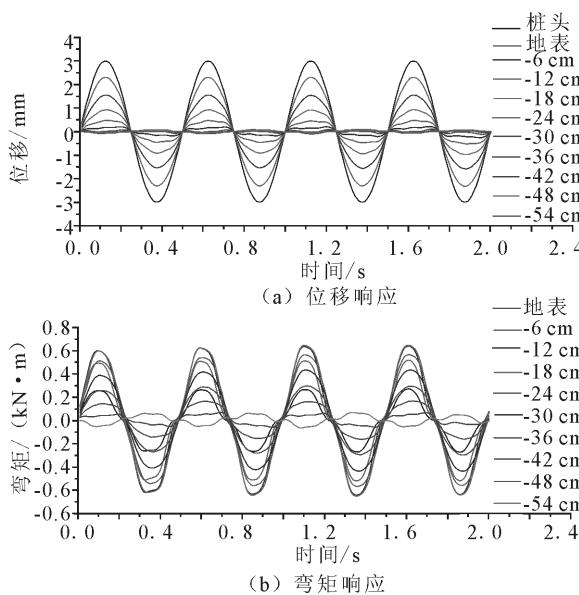


图9 动载作用下桩身位移和弯矩响应情况图

Fig.9 Responses of displacement and bending moment of pile shaft under dynamic loadings

(1) 桩基在正弦动载作用下,其不同埋深点的位移、弯矩时程响应也近似按正弦规律变化,但相对于桩头,其响应值有不同程度的滞后性。

(2) 动载作用下桩身的振动响应是一个复杂的过程,总体上随着桩身埋置深度的加大,位移响应值不断减小,而桩身弯矩值则随埋深先增大后减小。从桩身位移响应来看,埋深18 cm以上桩身有明显的位移响应,之下的部分位移很小,这与桩基震害调查发现桩基破坏位移主要集中于桩的上段位置相一致。

5 结语

本文针对冻土环境中桩基础在水平动载作用下的响应特性进行试验及理论分析模型研究,所得主要结论如下:

(1) 基于研究桩-土-结构相互作用的动力BN-WF模型,提出改进的冻土地基中桩基础动力分析模型。该模型可综合考虑桩侧冻土的水平非线性作用、桩侧与土体间的非线性摩擦作用、桩尖土的非线性挤压与提离作用以及远场土体阻尼对桩基动力特性的影响。

(2) 提出模拟桩侧冻土水平非线性作用的双向无拉力三段屈服弹簧单元及其参数的确定方法,可

较好地分析桩-土接触分离及冻土材料的非线性对桩基动力特性的影响。

(3) 与水平动载作用下模型桩基试验结果对比,表明本文提出的冻土-桩计算模型能有效地考虑桩-土间的挤压与提离效应时桩基的动力特性,具有较好的适用性。

参考文献(References)

- [1] Suleiman M T, Sritharan S, White D J. Cyclic Lateral Load Response of Bridge Column-foundation-soil Systems in Freezing Conditions[J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(11): 1745-1754.
- [2] Sritharan S, Suleiman M T, White D J. Effects of Seasonal Freezing on Bridge Column-foundation-soil Interaction and Their Implications[J]. Earthquake Spectra, 2007, 23(1): 199-222.
- [3] Wotherspoon L M, Sritharan S, Pender M J. Modelling the Response of Cyclically Loaded Bridge Columns Embedded in Warm and Seasonally Frozen Soils[J]. Engineering Structures, 2010, 32(4): 933-943.
- [4] Vaziri H, Han Y C. Full-scale Field Studies of the Dynamic Response of Piles Embedded in Partially Frozen Soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1991, 28(5): 708-718.
- [5] Han Y C, Vaziri H H, Hubble D. Dynamic Response of Pile Foundations in Frozen Soils[C]//Canadian Geo-technical Conference. 1991, 40: 1-7.
- [6] 吴志坚,王平,霍元坤,等.多年冻土区桥梁桩基础地震响应的模型振动试验研究[J].西北地震学报,2009,31(4):319-326.
WU Zhi-jian, WANG Ping, HUO Yuan-kun, et al. Study on Shaking Table Test for Seismic Response of Pile Foundation of Bridges at the Permafrost Regions[J]. Northwest Seismological Journal, 2009, 31(4): 319-326. (in Chinese)
- [7] 李永波,张鸿儒,全克江,等.冻融条件下模型桩基水平动力试验研究[J].岩土力学,2012,33(2):433-438.
LI Yong-bo, ZHANG Hong-ru, QUAN Ke-jiang, et al. Experimental Study of Model Pile Foundations Under Lateral Dynamic Load in Frozen and Thawed Soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 433-438. (in Chinese)
- [8] 刘晓强,赵楠,夏开文,等.循环荷载作用下桩周土体强度弱化特性试验研究[J].地震工程学报,2014, 36(4): 987-990.
LIU Xiao-qiang, ZHAO Nan, XIA Kai-wen, et al. Test and Study on Strength Weakening Behavior of Soil Around a Pile Under Cyclic Loading[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(4): 987-990. (in Chinese)
- [9] El Naggar M H, Shayanfar M A, Kimiae M, et al. Simplified BNWF Model for Nonlinear Seismic Response Analysis of Offshore Piles With Nonlinear Input Ground Motion Analysis[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(2): 365-380.
- [10] Allotey N, El Naggar M H. Generalized Dynamic Winkler Model for Nonlinear Soil-structure Interaction Analysis[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, 45(4): 560-573.

- [11] Allotery N, Foschi R. Coupled $p-y$ $t-z$ Analysis of Single Piles in Cohesionless Soil Under Vertical and /or Horizontal Ground Motion[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2005, 9(6): 755-775.
- [12] 孙利民, 张晨南, 范立础. 桥梁桩土相互作用的集中质量模型及参数确定[J]. 同济大学学报, 2002, 30(4): 409-415.
SUN Li-min, ZHANG Chen-nan, PAN Long, et al. Lumped-mass Model and Its Parameters for Dynamic Analysis of Bridge Pier-pile-soil System[J]. Journal of Tongji University, 2002, 30(4): 409-415. (in Chinese)
- [13] Kagawa T, Kraft J, Leland M. Seismic $p-y$ Responses of Flexible Piles[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1980, 106(8): 899-918.
- [14] El Naggar M, Novak M. Effect of Foundation Nonlinearity on Modal Properties of Offshore Towers[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 121(9): 660-668.
- [15] Boulanger R W, Curras C J, Kutter B L, et al. Seismic Soil-pile-structure Interaction Experiments and Analyses[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(9): 750-759.
- [16] 李永波. 考虑冻土-桩动力相互作用的长大桥梁地震响应分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
LI Yong-bo. Seismic Response Analysis of Grand Bridge Including Dynamic Frozen Soil-pile Interaction[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013. (in Chinese)
- [17] 伍小平. 砂土-桩-结构相互作用振动台试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2002.
WU Xiao-ping. Shaking Table Test of Sand-pile-structure Interaction System[D]. Shanghai: Tongji University, 2002. (in Chinese)
- [18] 日本铁道综合技术研究所. 铁道构造物等设计标准及解说 V 抗震设计[S]. 2000.
Japan Railway Technical Research Institute. Seismic Design standards and Explanations for Railway Structures[S]. 2000. (in Chinese)

(上接 452 页)

- [19] 刘裕华, 陈征宙, 彭志军, 等. 应用圆孔柱扩张理论对预制管桩的挤土效应分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2167-2172.
LIU Yu-hua, CHEN Zheng-zhou, PENG Zhi-jun, et al. Analysis of Pile Driving Effect of Precast Tubular Pile Using Cylindrical Cavity Expansion Theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(10): 2167-2172. (in Chinese)
- [20] 王育兴, 孙钧. 打桩施工对周围土性及孔隙水压力的影响. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(1): 153-158.
WANG Yu-xing, SUN Jun. Mechanism Influence of Pile Driving on Properties of Soil Around Pile and Pore Water Pressure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(1): 153-158. (in Chinese)