

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2024.05.024

引用格式:唐先武,尹平保,杨朝晖,等.橡胶-砂胶结材料与季节性冻土桩基的水平作用机制分析[J].公路与汽运,2024,40(5):134-140+146.

Citation: TANG Xianwu, YIN Pingbao, YANG Zhaozhui, et al. Analysis of horizontal interaction mechanism between rubber-sand bonding material and seasonally frozen soil foundation pile[J]. Highways & Automotive Applications, 2024, 40(5): 134-140+146.

橡胶-砂胶结材料与季节性冻土桩基的水平作用机制分析^{*}

唐先武¹, 尹平保¹, 杨朝晖², 罗佩婷¹, 申奉歧¹

(1.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.阿拉斯加大学, 美国 阿拉斯加 安克雷奇 99508)

摘要: 在季节性冻土区,气候因素引起的土体季节性冻融对桩基础的水平承载影响显著,在地震等水平荷载作用下桩基础极易发生断桩等脆性破坏。为消除或减弱季节性冻融对桩基的影响,文中采用抗冻融且高阻尼的橡胶-砂胶结材料置换桩周表层土体,改善桩基的水平承载特性;结合美国阿拉斯加地区某实际工程桩,对季节性冻土区进行温度场模拟,建立桩-土相互作用有限元模型,对比分析置换前后桩基础的受力与变形,并对置换范围进行优化,得到最佳置换宽度和置换深度分别为 $1.0d$ 、 $6.0d$ (d 为桩基直径)。

关键词: 桥梁;桩基础;季节性冻土;橡胶-砂;水平荷载;温度场

中图分类号:U445.7

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2024)05-0134-07

季节性冻土广泛分布于中国长江以北地区。受气候因素影响,季节性冻土区冬季土体冻结,土体刚度显著增大,严重限制了桩基的水平位移能力,导致桩基在水平荷载作用下极易发生断桩等脆性破坏;而夏季土体融化,刚度急剧减小,导致桩基发生侧移^[1-3]。土体季节性冻融对桩基的水平承载性能影响较大。

目前,国内外对桩基础水平承载特性的研究主要集中在非冻土地区,对季节性冻土区及多年冻土区桥梁桩基础的研究较少。于生生、Zhang X. Y.等通过拟静力试验和有限元模拟,发现土体季节性冻融对桥梁桩基水平承载特性的影响不容忽视^[4-5]。Wotherspoon L. M.、Xiong F.等分析季节性冻融对桩基础的影响,结果表明土体冻结会严重限制桩基础的侧向变形,导致塑性区减小^[6-7]。张嘉文等通过室内模型试验对比分析冻土、融土及室温条件下土体刚度、桩身内力和变形,结果表明土体冻结后其刚度显著增大,易导致断桩等脆性破坏^[8]。Vaziri H.、Sato T.等研究发现即使土层冻结深度较小,也会对

桩基动力响应产生较大影响^[9-10]。桩周土体季节性冻融改变了桩-土相互作用,对桩基础的水平承载特性会产生显著影响。但现有研究并未对季节性冻土区桥梁桩基础侧向位移能力及水平承载特性的改善进行深入研究。鉴于此,本文采用抗冻融且高阻尼的橡胶-砂胶结材料置换桩周表层土体,改善季节性冻土区桩基础的水平承载特性,进而提高桩基的稳定性;以美国阿拉斯加地区某实际工程桩为例,通过ABAQUS有限元软件对季节性冻土区进行温度场模拟,建立桩-土相互作用有限元模型,以现场实测数据验证季节性冻土区温度场及有限元模型的合理性,分析置换深度和置换宽度对桩基受力及变形的影响,研究桩周土体的最优置换宽度和深度,为季节性冻土区桩基础水平承载特性改善提供参考。

1 模型建立

1.1 桩周土体本构模型

采用摩尔-库仑模型反映桩周土体的力学特性,其屈服面函数表达式为:

^{*} 基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878069);长沙理工大学南方地区桥梁长期性能提升技术国家地方工程实验室开放基金资助项目(18KE01)

$$F=R_{mc}q-p\tan\varphi-c$$

(1)

式中: R_{mc} 控制屈服面在 π 平面的形状,按式(2)、式(3)计算; q 为广义剪应力; p 为平均正应力; φ 为内摩擦角,是 $p-q$ 应力面上摩尔-库伦屈服面的倾斜角; c 为黏聚力。

$$R_m=\frac{1}{\sqrt{3}\cos\varphi}\sin\left(\Theta+\frac{\pi}{3}\right)+\frac{1}{3}\cos\left(\Theta+\frac{\pi}{3}\right)\tan\varphi$$

(2)

$$\cos(3\Theta)=\frac{r^3}{q^3}$$

(3)

式中: Θ 为极偏角; r 为第三偏应力不变量。
摩尔-库伦屈服面在子午面和 π 面上的形状见图 1。

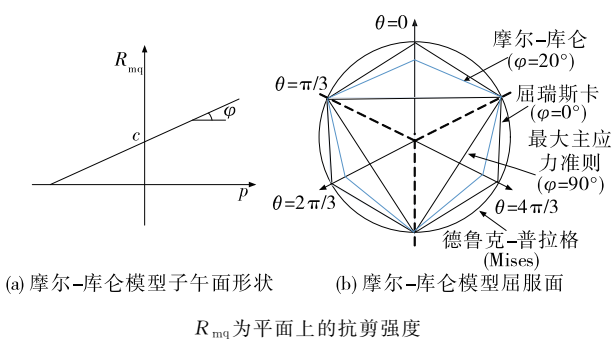


图 1 摩尔-库伦模型中的屈服面示意图

冻结粉土的弹性模量 E 采用 Yang Z. J. 等对天然冻结粉土开展的无侧限压缩试验得到的弹性模量 E 与温度 T 的关系式[见式(4)]^[11]计算,泊松比 ν 按式(5)计算,计算得 ν 为 0.3~0.4。通过直剪试验测得粉土的力学参数(见表 1)。

$$E=-411.81T+2\,417$$

(4)

$$\nu=\frac{E}{2G}-1$$

(5)

式中: G 为剪切模量。

表 1 粉土的摩尔-库伦模型参数

温度/℃	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	温度/℃	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$
-9	798.41	30.49	2	15.57	19.52
-5	355.95	24.76			

尹平保等对橡胶-砂胶结材料开展三轴试验,得到其应力-应变曲线(见图 2),发现橡胶-砂胶结材料类似弹性体,可采用线弹性模型模拟其力学特性^[12-13]。其弹性模量 E 与温度 T 的表达式见式(6),泊松比为 0.49。

$$E=10.71-0.055T$$

(6)

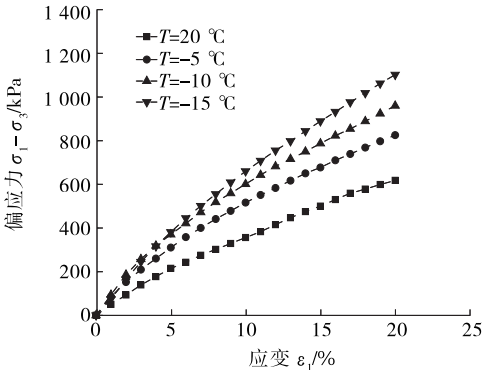


图 2 不同温度下橡胶-砂胶结材料的应力-应变曲线

1.2 工程概况

Horazdovsky J. E.、Hulsey J. L. 等在美国阿拉斯加地区开展季节性冻土区桩基横向承载特性现场试验。该地区土层为含水量较高的粉土,试验桩为实心钢管混凝土桩,桩长为 7.30 m,桩径为 0.41 m,钢管壁厚为 9.50 mm,入土深度为 6.10 m,钢筋率为 1.90%。桩身材料参数见表 2,桩基截面见图 3。他们进行了三组足尺试验,试验工况分别为上层土体融化(2009 年 9 月)、冻结深度为最大冻结深度的 50%(2010 年 1 月)、达到最大冻结深度(2010 年 3 月)。图 4 为现场桩基布置^[14-15]。

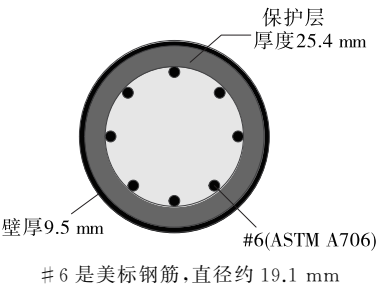


图 3 桩基截面图

表 2 模型桩材料参数

材料	弹性模量/GPa	泊松比	材料	弹性模量/GPa	泊松比
钢管	200	0.300	钢筋	221	0.300
混凝土	28	0.167			

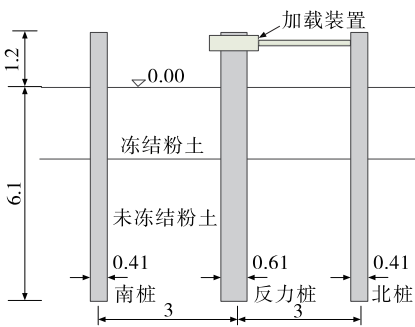


图 4 现场桩基布置示意图(单位:m)

1.3 模型的建立

模型土体长×宽×高为 10 m×10 m×11 m, 根据水平荷载作用下桩-土相互作用的对称性, 选择半个物理模型尺寸的桩-土体系进行建模。此外, 模型尺寸大于桩径的 20 倍, 且桩端距离底部约 10 倍桩径, 通过大尺寸来模拟半无限空间体, 忽略边界效应的影响^[16]。图 5 为三维有限元模型。

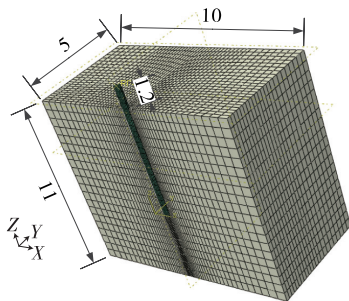


图 5 三维有限元模型(单位:m)

2 材料热力学参数的确定

通过 KD2 Pro 热特性分析仪测试橡胶-砂胶结材料的导热系数 λ 和比热容 C , 不同温度下热力学参数见表 3。

表 3 橡胶-砂胶结材料的热力学参数

$T/^{\circ}\text{C}$	导热系数 $\lambda/$ [$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$]	比热容 $C/$ [$\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$]
20	0.321	974
-5	0.313	963
-10	0.329	968
-15	0.341	964

根据现场实测结果及 JGJ 118—2011《冻土地地区地基基础设计规范》^[17], 确定粉土及钢筋混凝土的热力学参数(见表 4)。

表 4 材料的热力学参数

材料类型	密度 $\rho/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	导热系数 $\lambda/$ [$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$]	比热容 $C/$ [$\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$]
冻结粉土	1 700	1.28	1 907
未冻结粉土	1 700	0.79	2 509
混凝土	2 400	1.74	960
钢管	7 850	58.20	480

3 温度场的模拟

在季节性冻土区, 造成桥梁桩基破坏的原因主

要是温度变化引起的土体季节性冻融, 冬季表层土体冻结, 导致其模量及强度显著增加, 夏季土体融化, 其强度减小^[18-19]。因此, 在研究季节性冻土区桩基水平承载特性时, 除考虑常规桩-土体系相互作用外, 还要关注土体温度的变化。

在冻融环境中, 低温土体介质的热传导方程为^[20]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{\rho_c} \quad (7)$$

式中: t 为时间; q_v 为单位体积; x, y, z 为直角坐标系。

3.1 热边界条件的确定

模型上部采用第一类边界条件, 空气的对流换热系数采用 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; 四周采用第二类边界条件, 即不考虑侧面的热传导; 底部采用第一类边界条件。

3.2 温度场模拟

通过 ABAQUS 有限元软件对温度场进行模拟, 采用温度单元 C3D4T, 在温度-位移耦合分析步中将时间步长设置为一个月, 观察土体温度变化, 提取 3 月和 9 月最后一天桩周土体沿深度方向的温度场分布(见图 6), 并与实测数据进行对比(见图 7)。

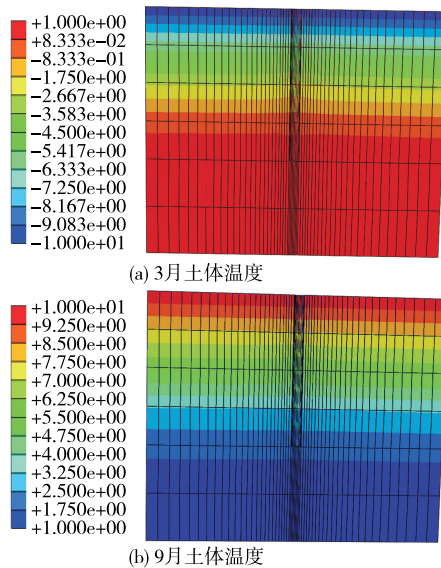


图 6 有限元模拟土体温度沿深度的分布(单位: $^{\circ}\text{C}$)

由图 7 可知: 有限元计算结果与实测值吻合良好。3 月地表温度实测值和有限元计算结果基本一致, 均在 -10°C 左右; 实测最大冻结深度为 2.38 m, 有限元计算的最大冻结深度为 2.50 m。9 月实测地表温度在深度 0.64 m 以上恒定在 10°C 左右, 然后

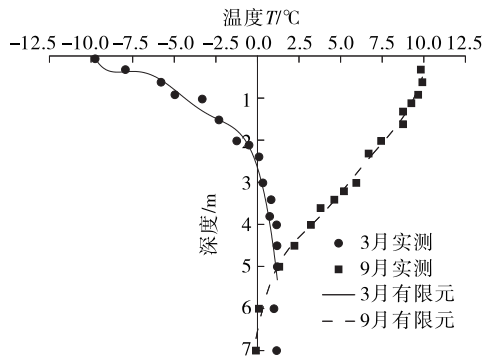


图 7 土体温度沿深度的变化

基本呈线性关系减小,最大冻结深度为 6.10 m;有限元计算结果显示地表温度在深度 0.60 m 后线性减小,最大冻结深度为 6.71 m。

为分析橡胶-砂胶结材料置换桩周土体后温度场,提取置换宽度 $1.0d$ (d 为桩基直径)、置换深度为 3.0 m 时的温度场,并与置换前温度场进行对比。3 月置换前后温度沿深度的变化见图 8。

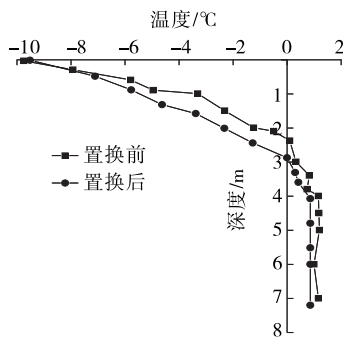


图 8 置换前后的温度场

由图 8 可知:温度随深度增大先呈线性减小后趋于平缓,置换前最大冻结深度为 2.38 m,置换后最大冻结深度为 2.90 m。

3.3 模型验证

为验证有限元模型的适用性,对 3 月现场试验进行有限元模拟,桩-土模型见图 9。有限元计算结果与实测值对比见图 10。

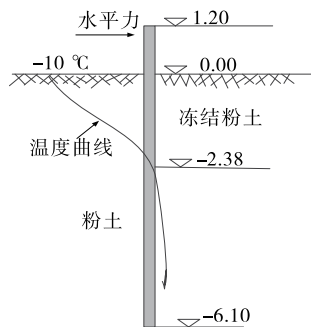
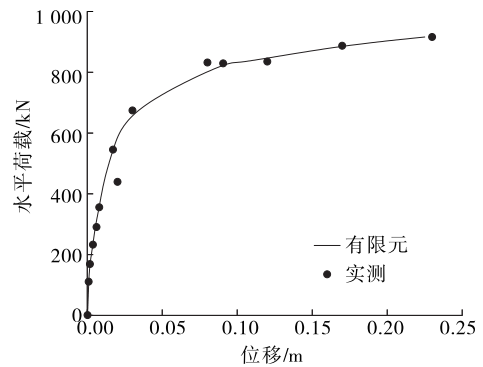
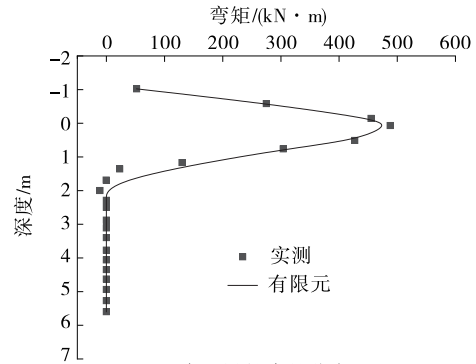


图 9 桩-土模型示意图(单位:m)



(a) 桩顶水平荷载-位移曲线



(b) 弯矩沿桩身的分布

图 10 有限元计算结果与实测值对比

由图 10 可知:水平位移相同时,实测水平荷载与有限元计算结果相近,水平位移为 0.10 m 时,实测水平荷载为 821 kN,有限元计算结果为 811 kN;水平荷载为 436 kN 时,实测桩身最大弯矩为 491 kN·m,有限元计算桩身最大弯矩为 476 kN·m,两者较接近,且桩身最大弯矩位置相同,均在桩-土交界面附近。有限元计算结果与现场实测结果吻合较好,该有限元模型能准确模拟水平荷载作用下桩基础的力学行为。

4 桩基水平承载特性分析

橡胶-砂胶结材料的整体性好、渗透系数小,雨水冲刷后不易发生冻融破坏,为将其应用于季节性冻土区提供了基础;橡胶-砂胶结材料具有抗冻融、高阻尼等特性,将其置换季节性冻土区桩周表层土体可改善土体的力学特性,从而消除或减弱季节性冻融对桩基承载性能的影响。为研究置换范围对桩基水平承载特性的影响,根据工程实例,以当地季节性冻土层最大厚度 3.0 m 作为最大置换深度,选取不同水平置换宽度 D ($D=0.5d, 1.0d, 2.0d$) 和竖向置换深度 Z ($Z=2.0d, 4.0d, 6.0d, 3.0$ m) 的冻土桩基进行有限元模拟,不同模型的基本参数见表 5。

表 5 中,模型 1 为未置换的冻土桩基;模型 2~4 主要考虑置换宽度的影响,置换宽度分别为 $0.5d$ 、 $1.0d$ 、 $2.0d$;模型 5~7 主要考虑置换深度的影响,置换深度分别为 $2.0d$ 、 $4.0d$ 、 $6.0d$ 。图 11 为橡胶-砂胶结材料置换桩周土体示意图,图 12 为 $1.0d$ 置换宽度的桩-土模型。

表 5 模型的基本参数

模型编号	置换宽度 D/m	置换深度 Z/m	桩顶水平 荷载/ kN
1	0.0	0.0	220/436/667
2	$0.5d$	3.0	220/436/667
3	$1.0d$	3.0	220/436/667
4	$2.0d$	3.0	220/436/667
5	$1.0d$	$2.0d$	220/436/667
6	$1.0d$	$4.0d$	220/436/667
7	$1.0d$	$6.0d$	220/436/667

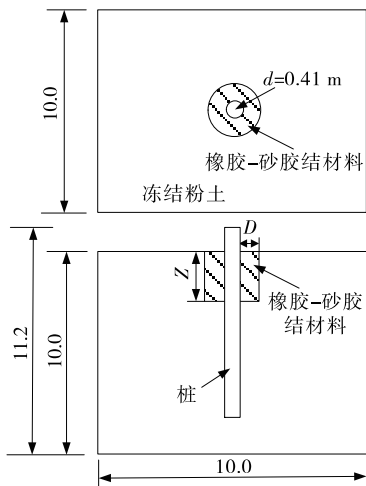


图 11 橡胶-砂胶结材料置换桩周土体示意图(单位:m)

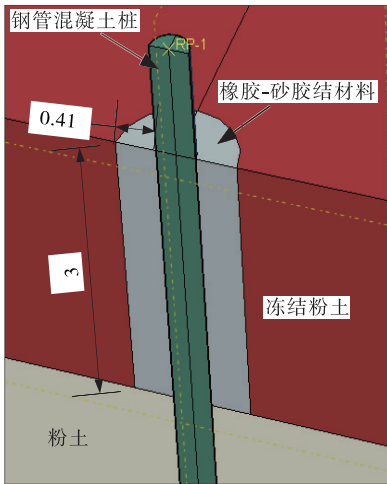


图 12 $1.0d$ 置换宽度的桩-土模型(单位:m)

图 13 为置换前后桩基应力云图。未置换时,桩-土交界面处出现明显的应力集中现象,桩基极易发生断裂等脆性破坏;采用橡胶-砂胶结材料置换桩周冻结土体后,桩身最大应力明显下移,桩身应力向下传递。

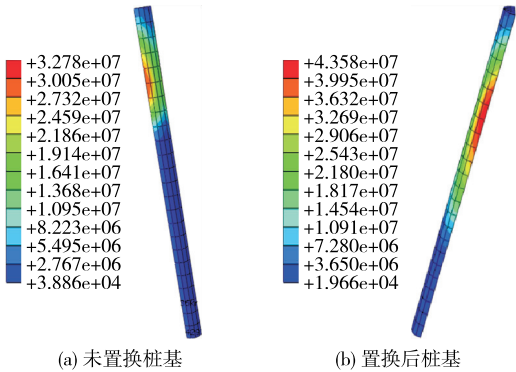


图 13 橡胶-砂胶结材料置换前后桩基应力云图(单位:Pa)

4.1 置换宽度的影响

取置换宽度 $D=0.5d$ 、 $1.0d$ 、 $2.0d$,置换深度 $Z=1.0d$,分析置换宽度 D 对桩基水平承载特性的影响。桩顶水平荷载 $P_t=436\text{ kN}$ 工况下不同置换宽度时桩身弯矩和位移见图 14。

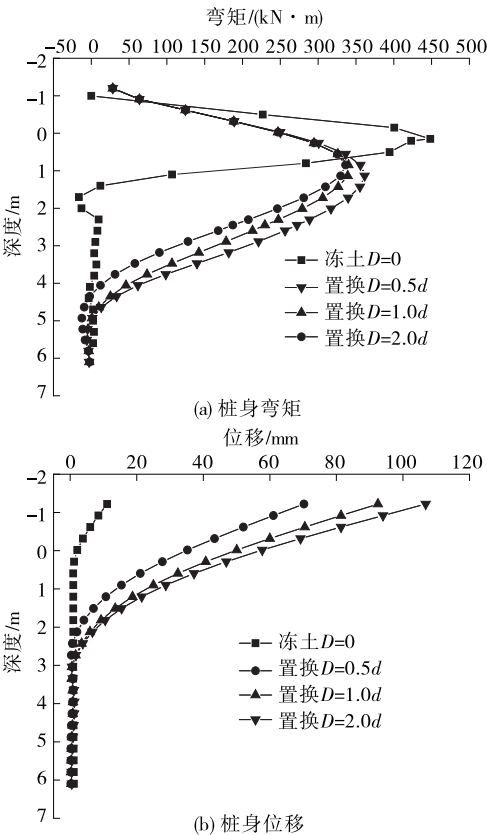


图 14 不同置换宽度下桩身的受力和变形

由图 14 可知:冻土桩基($D=0$)最大弯矩出现在桩-土交界面附近;置换后,桩基最大弯矩位置下移 $3d$ 左右,置换宽度 $D=0, 0.5d, 1.0d, 2.0d$ 对应的桩身最大弯矩分别为 $449 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 、 $362 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 、 $340 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 、 $336 \text{ kN} \cdot \text{m}$,与冻土桩基相比,最大弯矩分别减小 19.4% 、 24.3% 、 25.2% 。置换宽度 $D=0, 0.5d, 1.0d, 2.0d$ 对应的桩顶水平位移分别为 11.1 mm 、 70.3 mm 、 92.5 mm 、 106.9 mm ,置换后桩顶水平位移增大幅度均在 5 倍以上。这是因为橡胶-砂胶结材料在低温下模量低、自动复位能力强、阻尼特性良好,大大提高了桩基侧向位移能力,使荷载沿桩身向下传递,减少了桩基应力集中,桩基最大弯矩位置下移。

4.2 置换深度的影响

选取置换深度 $Z=2.0d, 4.0d, 6.0d, 3.0 \text{ m}$, 置换宽度 $D=1.0d$, 分析置换深度 Z 对桩基水平承载特性的影响。桩顶水平荷载 $P_t=436 \text{ kN}$ 工况下不同置换深度时桩身弯矩和位移见图 15。

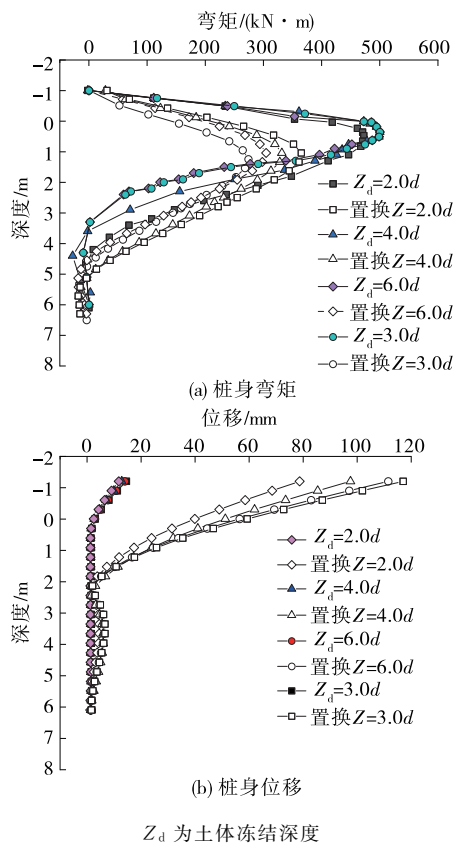


图 15 不同置换深度下桩身的内力和变形

由图 15 可知:置换前桩身弯矩显著大于置换后弯矩,且弯矩剖面形状变窄,表明冻结状态下桩基的塑性变形能力较弱;冻结深度 $Z_d=2.0d, 4.0d$ 、

$6.0d, 3.0 \text{ m}$ 时,桩基最大弯矩分别为 $470.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 、 $492.3 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 、 $495.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 、 $498.2 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。采用橡胶-砂胶结材料置换桩周土体后,置换深度 $Z=2.0d, 4.0d, 6.0d, 3.0 \text{ m}$ 时,桩身最大弯矩分别为 $363.3 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 、 $330.3 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 、 $303.4 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 、 $273.1 \text{ kN} \cdot \text{m}$,与置换前相比,桩身最大弯矩分别减少 22.8% 、 32.9% 、 38.8% 、 45.2% 。与未置换时相比,置换后桩基侧向位移增大 7 倍以上,侧向位移能力显著提高。

4.3 置换宽度和深度的优化

为避免资源浪费,确定合理的置换范围十分必要。不同置换宽度下桩身最大弯矩和桩顶位移见图 16。由图 16 可知:置换后桩身最大弯矩显著减小,桩顶位移显著增大;在相同水平荷载下,桩身最大弯矩随置换宽度增大先减小后趋于平缓,桩顶位移随置换宽度增加先增大后趋于平缓,置换宽度为 $1.0d \sim 2.0d$ 时桩身最大弯矩和桩顶位移都趋于稳定。综合桩身内力、变形和材料的经济性, $1.0d$ 为最佳置换宽度。

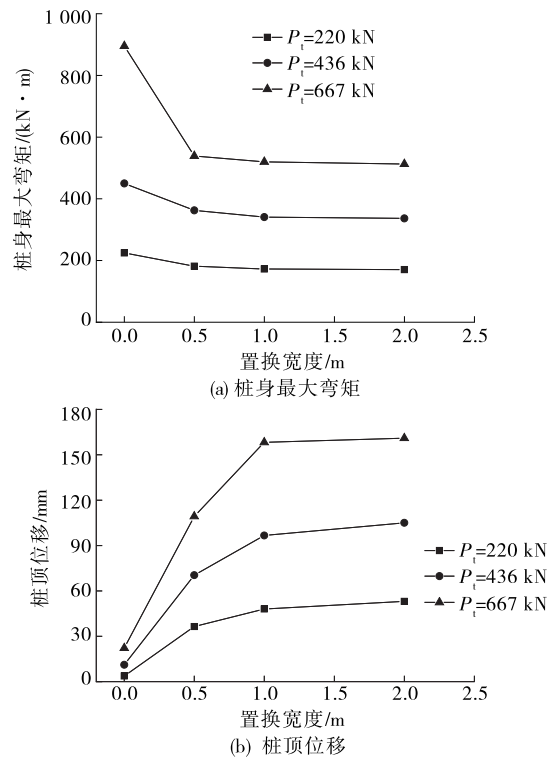


图 16 不同置换宽度和水平荷载下桩身的受力和变形

不同置换深度下桩身最大弯矩和桩顶位移见图 17。由图 17 可知:桩身最大弯矩随置换深度增加先减小后趋于平缓,桩顶位移随置换深度增加逐渐增大,桩基的变形能力增强;不同水平荷载下,置

换深度达到 $6.0d$ 时,桩身最大弯矩和桩顶位移都趋于稳定。考虑材料的经济性,最佳置换深度为 $6.0d$ 。

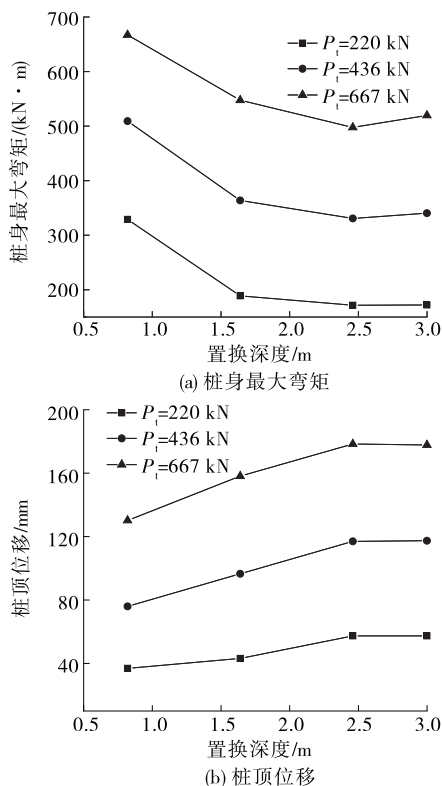


图 17 不同置换深度和水平荷载下桩基的受力和变形

5 结论

本文采用橡胶-砂胶结材料置换桩周表层土体,改善季节性冻土区桥梁桩基水平承载特性;结合美国阿拉斯加地区某实际工程桩,对季节性冻土区开展温度场模拟,建立桩-土相互作用有限元模型,对比分析置换前后桩身内力及变形,优化置换范围。结论如下:

(1) 模拟的温度场与实测土体温度吻合良好,能有效反映季节性冻土区土体温度的变化,建立的桩-土相互作用有限元模型能准确反映水平荷载作用下季节性冻土区桥梁桩基的力学行为。

(2) 置换前,桩身最大弯矩位置接近地面,并出现明显的应力集中现象;与置换前相比,置换后塑性区增大,最大弯矩位置明显下移,且桩基水平位移增大 5 倍以上。

(3) 置换宽度为 $1.0d$ 、置换深度为 $6.0d$ 时,随着置换范围的持续增大,桩基水平承载特性提高并不显著,考虑材料经济性,确定最佳置换宽度为 $1.0d$ 、最佳置换深度为 $6.0d$ 。

参考文献:

- [1] 《中国公路学报》编辑部.中国桥梁工程学术研究综述·2021[J].中国公路学报,2021,34(2):1-97.
- [2] 杨润林,杨朝晖,乔春明,等.地震激励下冻土-液化土-单桩共同作用试验研究[J].岩土工程学报,2014,36(4):612-617.
- [3] 王常峰,陈兴冲,丁明波.季节性冻土区桩基础桥梁地震反应研究[J].桥梁建设,2016,46(2):48-53.
- [4] 于生生,张熙胤,王万平,等.考虑土体季节性冻融效应的铁路桥梁桩基础抗震性能及影响因素分析[J].铁道学报,2022,44(5):141-148.
- [5] ZHANG X Y, YANG Z J, CHEN X C, et al. Experimental study of frozen soil effect on seismic behavior of bridge pile foundations in cold regions[J]. Structures, 2021, 32: 1752-1762.
- [6] 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.
- [7] XIONG F, YANG Z J. Effects of seasonally frozen soil on the seismic behavior of bridges[J]. Cold Regions Science and Technology, 2008, 54(1): 44-53.
- [8] 张嘉文,张鸿儒,宋佳鹏,等.冻、融土中桩的水平受力特性模型对比试验研究[J].工业建筑,2013,43(10): 66-70.
- [9] 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.
- [10] SATO T, KONAGAI K, IKEDA T, et al. Effect of surface layer freeze to soil-pile interaction [J]. MATEC Web of Conferences, 2019, 265(11): 05001.
- [11] YANG Z J, STILL B, GE X X. Mechanical properties of seasonally frozen and permafrost soils at high strain rate[J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, 113: 12-19.
- [12] 尹平保,罗佩婷,杨朝晖,等.冻融循环下橡胶-砂胶结材料的力学特性试验研究[J].中国公路学报,2023,36(1):70-79.
- [13] 尹平保,余伟,杨朝晖,等.橡胶-砂-聚氨酯复合材料冻融循环后强度特性及本构模型[J].复合材料学报,2022,39(7):3415-3427.
- [14] HORAZDOVSKY J E. Seasonal effects of frozen soil on the stiffness of bridge piles[D]. Fairbanks: University of Alaska Fairbanks, 2010.

(下转第 146 页)