文章编号:1673-9469(2016)01-0011-05 doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2016.01.003

动载下冻土区温度变化对桩基受力影响数值分析

周云东,刘云波,杨 德
(河海大学 岩土工程科学研究所,江苏 南京 210098)

摘要:为了研究温度变化对冻土区桩基础在地震荷载下特性的影响本文运用MIDAS/GTS有限元数值分析软件讨论了地震作用下不同温度对单桩基础受力性能的影响,并通过数值计算得出不同模型状况下的特征值、相对位移和弯矩曲线,并与实际值进行对比分析。结果表明,地震下温度升高会使桩基础反应变大,桩基础更容易失稳破坏。

关键词:冻土区;地震荷载;温度变化;桩基础受力响应分析;MIDAS/GTS数值模拟
中图分类号:TU475 **文献标识码**:A

Numerical simulation analysis of influence of temperature variations on the pile force in permafrost zone under dynamic loads

ZHOU Yun-dong, LIU Yun-bo, YANG De
(Geotechnical Research Institute, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the influence of the temperature change on load characteristics of pile foundation in permafrost region, this paper analyze the effects of different temperatures on the mechanical behavior of pile foundation under earthquake by using MIDAS / GTS finite element analysis software. The characteristic values, the relative displacement and bending moment curve under the condition of different models were obtained through numerical calculations. Combining with the actual value of comparative analysis, the results showed that increase of temperature has great effect on pile foundation during earthquake, pile foundation is easy to be broken.

Key words: permafrost zone; seismic loads; temperature changes; analysis of pile foundation response force; numerical simulation of MIDAS / GTS

冻土对温度极为敏感,尤其是对于温度在低于冰水相变温度1-2℃范围内的冻土,温度的变化会对冻土内冰晶的胶结强度以及未冻水含量产生显著的影响,进而影响其物理力学性质。齐吉琳、马巍[1]指出冻土动力特性主要针对温度对动力参数的影响,并分析了多年冻土的物理力学特性。王建州[2]等研究了在冻土上限变化条件下旱桥桩基的承载力特性。杜晓燕[3]等针对季节性冻土区高速铁路路基冻胀的最大变形量应小于5 mm的严格要求,开展了季节性冻土区高速铁路路基冻深的研究,证明有限元仿真分析方法和改进的Berggren法均为确定路基冻深的有效手段。汪海年、窦明健[4]根据青藏公路沿线近30年的气象资料,对青藏公路五道梁地区路基温度场进行有限元分析,经验证,计算结果与路基温度场实测资料基本一致。吴志坚[5]等考虑天然状态和地震荷载作用下地温升高两种条件,运用动力有限元方法,对青藏铁路清水河特大桥桩基础进行了地震响应分析。青藏高原五道梁地区处于多地震区,地震和温度双重作用下的桩基承载力状态将受到严重影响,而如今五道梁地区气候恶劣,工程试验进展相对缓慢,很多地区的工程性质复杂,大部分很难通过公式求出精确解[6]。对于此种境况主要有两种方法,一是通过经验公式求解,将实际情况简化,化复杂为简单边界求解。二是通过数值模拟求解,运用数值模拟技术求解数值解[7]。本文总结利用五道梁地区的工程地质勘查情况[8],得出不同温度下的土的工程性质,并运用MIDAS/GTS

收稿日期:2015-11-12
基金项目:国家自然科学基金资助项目(50808067)
作者简介:刘云波(1989-),男,山东聊城市人,硕士,从事桩基础、地基处理研究工作。

有限元数值模拟分析,模拟分析了五道梁地区冻土中桩基在地震荷载作用下(桩周土升温 0.5℃)和气候变化(50 a 升温 2.6℃)的情况下[9],桩基础受力性能的影响,并进行地震和温度双重作用受力变化对比分析。

1 工程概况

本文所选工程位于青海省曲麻莱县五道梁地区,北纬 35.2°。五道梁地区年平均气温 -5.2℃,最热月 7 月平均气温为 5.5℃,根据文献资料 50 a 后气温升高约 2.2 ~ 2.6℃[10]。该地区土层分布大体为季节活动层、融化夹层、多年冻土层。根据文献资料本文取土层厚度为 20 m,0 ~ 2 m 为碎石亚粘层,2 ~ 10 m 为粉质亚粘层,10 ~ 20 m 为弱风化岩。桩基础深 12 m,其中露出地面 1 m,地下 11 m,桩径 1 m,采用 C30 混凝土,土层划分见图 1。在五种温度条件(-10、-5、-2℃、-1.5、-1、0℃)及地震荷载作用下对桩土温度影响进行 MIDAS/GTS 有限元数值模拟分析,土层在不同温度下的力学参数见表 1。

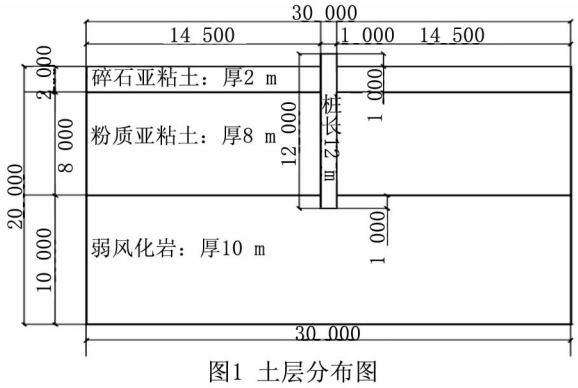

图1 土层分布图

Fig.1 Soil profile

表 1 温度变化对冻土的物理力学特性的影响

Tab.1 Effect of temperature on the physical and mechanical properties of permafrost

土层	参数	-10℃	-5℃	-2℃	-1.5℃	-1℃	0℃
碎石亚粘土	ρ/kg/m^3	1 920	1 920	1 920	1 920	1 920	1 920
	E/MPa	61.3	50.8	45	43	40	34
	υ	0.13	0.13	0.14	0.14	0.19	0.45
	c/MPa	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.05
	φ/°	34	34	34	33	33	30
粉质亚粘土	ρ/ kg /m^3	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800
	E/MPa	169.6	89.8	42	33	26	10
	υ	0.15	0.18	0.2	0.2	0.22	0.47
	c/MPa	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.05
	φ/°	23	23	23	23	23	19
弱风化岩	ρ/kg/m^3	2 500	2 500	2 500	2 500	2 500	2 500
	E/MPa	233	153.2	105.3	101.1	89.4	73.4
	υ	0.18	0.18	0.18	0.18	0.2	0.22
	c/MPa	0.25	0.25	0.25	0.25	0.24	0.1
	φ/°	38	38	38	37	36	33
C30 混凝土	ρ/kg/m^3	2 900	2 900	2 900	2 900	2 900	2 900
	E/MPa	15 450	15 000	14 500	15 000	15 000	15 000
	υ	0.19	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

2 MIDAS/GTS 冻土区温度和地震作用下的有限元模拟

有限元法不仅可以模拟桩基础受力变化全过程,还可以计算温度变化下与动力作用下桩基础弯矩、轴力以及土体的应力和位移。根据实际情况 MIDAS/GTS 有如下假设[11]:(1)不考虑土体的流变影响;(2)数值计算中不考虑水分迁移,把温度场作为荷载边界条件加到模型边界上;(3)土体性质为各向均质同性,土体本构模型采用 Mohr – Coulomb 理想弹塑性模型;(4)桩均匀连续各向同性体,本构模型采用线弹性模型;(5)桩土接触采用无厚度接触面单元 Goodman 单元。

2.1 模型建立

(1)计算区域及边界条件

计算区域为一长方体区域 30 m×20 m×20 m,桩基采用单桩基础,位于计算区域中间。各层土层的弹性模量等参数根据文献资料获得,并根据规范公式计算得出温度改变下的各土层力学参数。地震荷载作用时先进行特征值分析,利用弹性边界来定义边界条件,利用数值模拟软件中的曲面弹簧来定义土层中的各单元边界条件,模拟动力分析时用吸收边界代替弹簧边界,在 x,y,z 方向输入相应的阻尼系数,阻尼公式如下:

$$\text{P 波: } C_p=\rho\cdot A\cdot\sqrt{\frac{\lambda+2G}{\rho}}=\omega\cdot A\cdot\sqrt{\frac{\lambda+2G}{9.81\omega}}=c_p\cdot A$$

$$\text{S 波: } C_s=\rho\cdot A\cdot\sqrt{\frac{G}{\rho}}=\omega\cdot A\cdot\sqrt{\frac{2G}{9.81\omega}}=c_p\cdot A$$

表 2 各温度下土层单位面积阻尼系数/kN·sec·m^{-3}

Tab. 2 The soil per unit area damping under each temperature (unit: kN·sec·m^{-3})

土层	参数	–10℃	–5℃	–2℃	–1.5℃	–1℃	0℃
碎石亚粘土	$Cx=Cy=Cp$	109.5	100.7	95.1	90.1	91.8	157.3
	$Cz=Cs$	72.1	65.6	61.5	59.7	56.8	47.4
粉质亚粘土	$Cx=Cy=Cp$	179.5	132.4	91.5	82.7	132.4	104
	$Cz=Cs$	115.2	82.7	56.2	49.5	82.7	24.7
弱风化岩	$Cx=Cy=Cp$	251.4	203.9	169.7	160.2	157.5	144.4
	$Cz=Cs$	157.1	127.3	105.6	101.2	96.5	86.7

表 3 模型各方向截面面积及边界弹簧系数

Tab. 3 Cross – sectional area and the spring rate of border in each direction of Models

土层	参数	–10℃	–5℃	–2℃	–1.5℃	–1℃	0℃
碎石亚粘土	Ax/m^2	40	40	40	40	40	40
	Ay/m^2	60	60	60	60	60	60
	Az/m^2	—	—	—	—	—	—
	Kx/kN·m^2	19 442	16 112	14 272	13 787	12 686	10 793
	Ky/kN·m^2	16 699	13 839	12 259	11 258	10 897	9 262
	Kz/kN·m^2	—	—	—	—	—	—
粉质亚粘土	Ax/m^2	160	160	160	160	160	160
	Ay/m^2	240	240	240	240	240	240
	Az/m^2	—	—	—	—	—	—
	Kx/kN·m^2	31 984	16 935	7 920	5 977	4 903	1 885
	Ky/kN·m^2	27 473	14 546	6 803	5 604	4 211	1 619
	Kz/kN·m^2	—	—	—	—	—	—
弱风化岩	Ax/m^2	200	200	200	200	200	200
	Ay/m^2	300	300	300	300	300	300
	Az/m^2	600	600	600	600	600	600
	Kx/kN·m^2	40 413	26 572	18 264	16 607	15 506	12 731
	Ky/kN·m^2	34 713	22 824	15 688	14 575	13 319	10 935
	Kz/kN·m^2	26 767	17 599	12 097	11 077	10 281	8 432

式中：$\lambda \frac{\upsilon E}{(1+\upsilon)(1-2\upsilon)}$；$G=\frac{0.5E}{1+\upsilon}$；$\lambda$ 为体积弹性系数；G 为剪切弹性系数；E 为弹性模量；υ 为泊松比；A 为截面积。（参数参见表1）

经过公式计算得出各温度下的边界阻尼系数，结果见表2。

弹性边界来定义支座的边界条件，弹簧系数根据道路设计规范的地基反力系数计算，公式如下：

竖直地基反力系数：$K_v=K_{v0}\cdot(\frac{B_v}{30})^{-\frac{3}{4}}$

水平地基反力系数：$K_h=K_{h0}\cdot(\frac{B_h}{30})^{-\frac{3}{4}}$

再此，$K_{v0}=\alpha E_0/30=K_{h0}$，$B_v=(Av)^{1/2}$，$B_h=(Ah)^{1/2}$

其中 A_v 和 A_h 分别为计算模型的竖直方向和水平方向面的截面积，E_0 为地基的弹性系数，α 一般取值为1。（计算参数参见表1）

经过公式计算得出各温度下的弹簧边界系数结果如下表3。

（2）单元划分

在有限元模型中，土层和桩基础采用3D实体单元模拟，土层模型类型指定为莫尔—库伦，桩基础类型为梁/非线性梁，并指定为线性直线桩，单元尺寸为0.5。一共96 000个单元，桩与土体之间采用桩接触单元，计算模型参见图2。

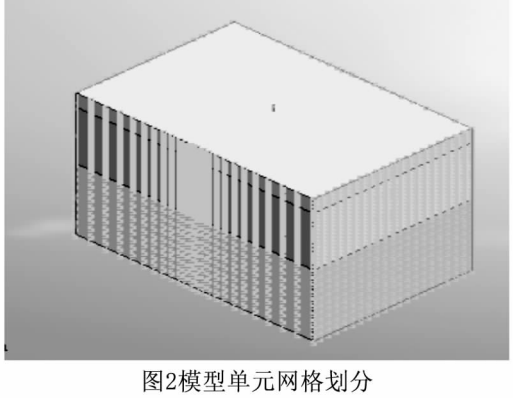

图2模型单元网格划分

Fig. 2 Model element mesh

（3）不同温度土层参数

根据文献资料中的地质勘查报告以及公式推导得出不同温度下的土层参数，计算中将土层简化，划分为3层，综合考虑地质资料后，土层参数见表1。

（4）初始荷载及边界条件的施加

在MIDAS/GTS有限元分析软件中输入模型自重，并在桩顶添加集中荷载。在模型单元中建立曲面弹簧，选择单元线，在基床系数中依次输入 K_x、K_y、K_z。分别求出 -10、-5、-2、-1.5、-1、0℃温度下的特征值，每个温度下的特征值见表4，每个温度下选择前两个振型周期。

然后继续添加边界荷载，在建立曲面弹簧中选择单位面积阻尼系数，分别输入 -10、-5、-2、-1.5、-1、0℃温度下的阻尼系数。最后添加时程函数，选择有限元自带的青藏地震波作为数值模拟的时程地震荷载。得出不同温度下的桩基础的受力变化。

表4 不同温度下计算模型特征值

Tab. 4 The eigenvalues of calculation model at different temperatures

温度/℃	-10	-5	-2	-1.5	-1	0
	1.25	1.00	0.80	0.73	0.70	0.54
	1.30	1.03	0.81	0.75	0.72	0.61
	1.49	1.18	0.91	0.86	0.79	0.61
	1.52	1.19	0.94	0.91	0.81	0.64
特征值/Hz	1.69	1.34	1.03	0.94	0.88	0.66
	1.74	1.35	1.04	0.94	0.89	0.71
	1.83	1.44	1.12	0.91	0.95	0.71
	2.19	1.69	1.27	1.17	1.06	0.72
	2.19	1.71	1.30	1.11	1.08	0.77
	2.26	1.74	1.31	1.21	1.12	0.79

图3为不同温度下的模型特征值曲线，可以看出，温度越高土体特征值频率越小。

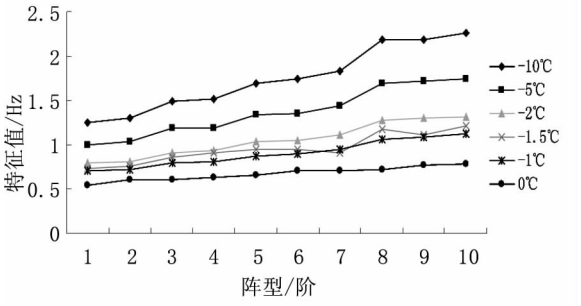

图3 不同温度下模型特征值

Fig. 3 Model eigenvalues at different temperatures

（5）有限元过程模拟

利用MIDAS/GTS自身具有的“生死单元”进行自动运行与停止。地震周期为30 s，每个0.2 s输出一个数据，并提取数据。

首先，激活单元，选择碎石亚粘土、粉质亚粘土、弱风化岩、桩基础移动到激活单元中。其次，激活边界，把定义的边界弹簧系数和阻尼比进行激活；再次，激活荷载，激活重力荷载、地震荷载和接触单元；最后，分析工况运行，得出动载下不同温度的桩受力情况的数据，提取数据绘制成表格，

进行对比分析,得出结论。

2.2 数值模拟的结果分析

(1)静载下不同温度桩沉降量变化分析

通过输出表格分析对比可以看出冻土区温度升高造成桩的沉降量变大(见图 4),0 点以上桩的沉降量大约是以下 -10℃的 3 倍。桩在弱风化岩区沉降量比桩在粉质亚粘土区沉降量小,桩在粉质亚粘土和碎石亚粘土区沉降量大,图形对比见图 5、图 6。

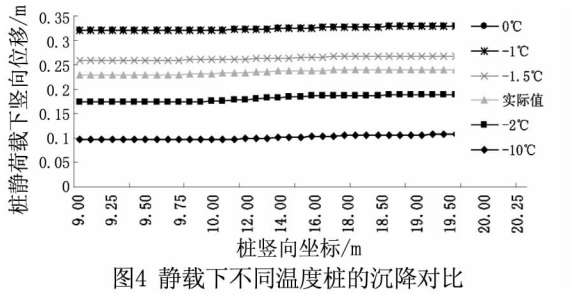

图4 静载下不同温度桩的沉降对比

Fig.4 Settlement contrast of static pile load at different temperatures

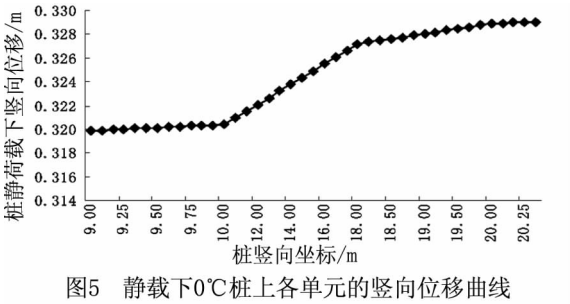

图5 静载下0℃桩上各单元的竖向位移曲线

Fig.5 Vertical displacement curve of each unit of pile under static load at 0 ℃

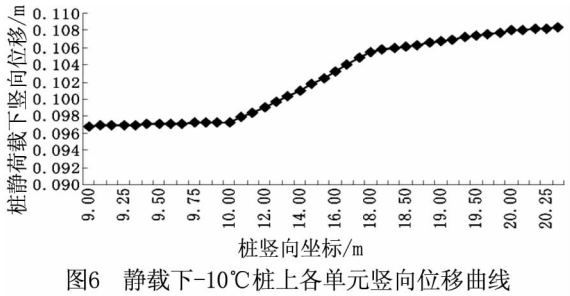

图6 静载下-10℃桩上各单元竖向位移曲线

Fig.6 Vertical displacement curve of each unit of pile under static load at 10 ℃

(2)动载作用下桩周土升温 - 桩土响应分析

动荷载下桩土之间的位移受温度的影响比较显著,按照地震作用使土层温度升高 0.5℃,选取 -2、-1.5、-1、0℃模型对比分析,结果表明,在零点附近位移变化比较明显,桩土之间位移加剧。桩在动荷载作用下,桩周土温度升高 0.5℃,促使桩竖直向弯曲加大,弯矩图对比见图 7,桩弯矩最大值发生在第一层土和第二层土层之间,地震作用使桩周土温度升高,温度越高,桩弯矩越大,危险面集中在土层分界处。地震下桩周土升温 0.5℃,桩土之间的相对位移也产生一定的波动,温度越高波动越大,在 -2、-1.5、-1℃的温度梯度下桩土之间相对位移逐渐变大,且温度越低增长越缓慢,这说明地震作用下使桩周土升温 0.5℃会对桩受力产生明显影响,相对位移图见图 8。

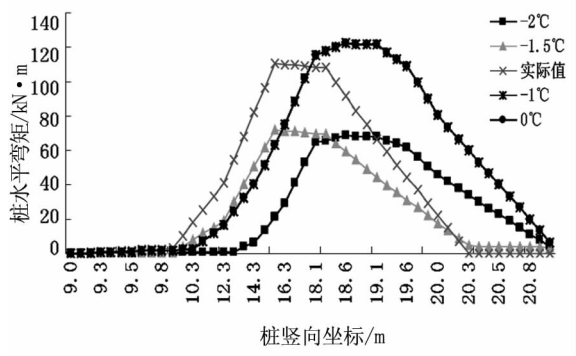

图7 动荷载引起的温度变化-桩竖向弯矩与实际值对比分析

Fig.7 Dynamic load caused by temperature changes - the comparison between pile vertical bending moment and the actual value

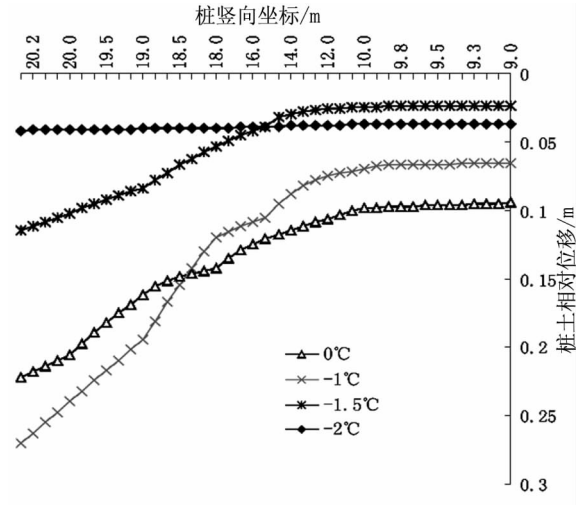

图8动荷载引起的同温度变化-桩土之间相对位移对比分析

Fig.8 With temperature changes caused by the dynamic load - the relative displacement comparison between pile and soil

3 结论

1)随着温度的增加,冻土的弹性模量降低,粘聚力和内摩擦角也随之下降。

2)桩基承载力和桩周土的性质有着很大的联系,桩周土的性质随气候温度变化引起桩承载力变化。

3)地震作用下冻土区桩周土升温 0.5℃会加剧桩土之间的位移,桩的弯矩增大,桩更容易失稳破坏。

(下转第 23 页)

被橡胶沥青裹覆均匀,这正是因为矿粉与沥青会发生体积增强作用和物化反应。随着粉胶比的增加,沥青与矿粉生成的“结构沥青”数量增多,形成的相体结构更加稳定,粘附作用更强,从而使橡胶沥青胶浆的高温性能更好。

参考文献:

[1]凌天清,肖 川,夏 玮. 高温下橡胶沥青胶浆特性及矿料级配优化分析[J]. 土木建筑与环境工程,2010,32(5):47 – 52.

[2]刘 丽. 沥青胶浆技术性能及评价方法研究[D]. 西安:长安大学,2004.

[3]杨跃焕,吴英彪,乔建刚. 泡沫沥青温拌再生混合料试验研究[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2014,31(1):32 – 35.

[4]黄卫东,王 伟,黄 岩,等. 橡胶沥青混合料高温稳定性影响因素试验[J]. 同济大学学报:自然科学版,2010,38(7):1023 – 1028.

[5]徐欧明,韩 森,于静涛. 露石混凝土改善桥面铺装结构稳定性研究[J]. 武汉理工大学学报,2010,32(1):22 – 24.

[6]刘日鑫. 胶粉改性沥青材料[D]. 昆明:昆明理工大学,2002.

[7]YU XIN,WANG YUHONG,LUO YILIN. Impacts of types and application rates of warm mix additives on CRMA[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013,7(25):939 – 945.

[8]李智慧. 沥青胶浆高低温性能评价研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2005.

[9]方伽俐,黄卫东. 沥青结合料零剪切粘度简介[J]. 中外公路,2003,23(6):83 – 86.

[10]SHEN J,AMIRKHANIAN S. The influence of crumb rubber modifier (CRM) microstructures on the high temperature properties of CRM binders[J]. The International Journal of Pavement Engineering,2005,6(4):265 – 271.

[11]APEAGYEI A K,GRENFELL J R A,AIREY G D. Application of Fickian and non – Fickian diffusion models to study moisture diffusion in asphalt mastics[J]. Materials and Structures,2015,48(5):1461 – 1474.

[12]吴慧彦,同 鑫. 沥青高温性能评价新指标[J]. 中外公路,2011,31(3):263 – 266.

[13]罗怡琳,于 新,孙文浩. 橡胶沥青零剪切粘度确定方法的研究[J]. 公路工程,2012,37(5):218 – 221.

[14]DESMAZES C,LECOMTE M,LESUEUR D,et al. A protocol for reliable measurement of zero – shear – viscosity in order to evaluate the anti – rutting performance of binders[C]// Proceedings of the papers submitted for review at 2nd eurasphalt and eurobitume congress,Barcelona,Spain. 2000: 20 – 22.

[15]张肖宁. 沥青与沥青混合料的粘弹力学原理及应用[M]. 北京: 人民交通出版社,2006.

(责任编辑　王利君)

(上接第 15 页)

参考文献:

[1]齐吉琳,马巍. 冻土的力学性质及研究现状[J]. 岩土力学,2010,01:133 – 143.

[2]吴志坚,车爱兰,陈 拓,等. 青藏铁路多年冻土区桥梁桩基础地震响应的试验研究与数值分析[J]. 岩土力学,2010, 11: 3516 – 3524.

[3]汪海年,窦明健. 青藏高原多年冻土区路基温度场数值模拟[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2006(4):11 – 15.

[4]王建州,李生生,周国庆,等. 冻土上限下移条件下高温冻土桩基承载力分析[J]. 岩石力学与工程学报,2006,S2:4226 – 4232.

[5]杜晓燕,叶阳升,张千里,等. 季节性冻土区高速铁路路基冻深研究[J]. 中国铁道科学,2015(2):11 – 17.

[6]汪海年,窦明健. 青藏高原多年冻土地区路基热稳定性影响因素分析[J]. 公路,2005(5):1 – 5.

[7]高捷,滕念管. 温差对磁浮双跨轨道梁变形的影响[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2015,32(2):24 – 27.

[8]李韧,杨文,季国良,等. 40 年来藏北高原五道梁地区地表加热场的变化特征[J]. 太阳能学报,2005(6):868 – 873.

[9]王伟,孙斌祥,杨丽君,等. 基于数学特征方程的冻土应力 – 应变模型分析[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版,2008(3):398 – 401.

[10]白刚刚,吴英波. 青海省曲麻莱县融冻泥流地质灾害浅析[J]. 青海环境,2013(2):90 – 91,108.

[11]卢廷浩. 岩土数值分析[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2008.

(责任编辑　李　军)