

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2016.09.005

季冻区路基土静动模量关系研究

王 静, 吕 翔, 张云龙, 袁 野

(吉林建筑大学 交通科学与工程学院, 吉林 长春 130118)

摘要: 为了分析路基土动弹性模量和静弹性模量的相关性, 针对3种不同塑性指数的季冻区路基土, 在最佳含水量状态下制成压实度大于95%的试件, 在不同围压条件下进行了静、动三轴试验, 得出了经历不同冻融循环次数的路基土静、动弹性模量, 分析了围压、冻融循环次数对静、动弹性模量的影响规律; 基于统计方法, 建立了采用静弹性模量推导其动弹性模量的数学表达式。结果表明: 随着围压和塑性指数的增大, 试件的静、动弹性模量逐渐增大, 随着冻融循环次数的增加, 其静、动弹性模量逐渐下降最后基本趋于稳定; 季冻区路基土静弹性模量与动弹性模量之间具有良好的相关性。研究结果说明了季冻区路基土的静、动弹性模量并没有本质区别, 只是在不同加载条件下的力学性质表现。

关键词: 道路工程; 季冻区路基土; 冻融循环; 静弹性模量; 动弹性模量

中图分类号: U416.03

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2016)09-0025-06

Study on Relationship Static and Dynamic Moduli of Subgrade Soil in Seasonal Frozen Area

WANG Jing, LÜ Xiang, ZHANG Yun-long, YUAN Ye

(School of Transport Science & Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun Jilin 130118, China)

Abstract: In order to analyze the correlation between subgrade soil dynamic elastic modulus and static elastic modulus, three different plasticity indexed subgrade soils in seasonally frozen area are compacted under optimum moisture content to specimens with compactness greater than 95%. The static triaxial and dynamic triaxial tests are carried out under different confining pressures, and the static and dynamic elastic moduli of subgrade soil experienced different freeze-thaw cycles are obtained. The variation of static and dynamic elastic moduli with confining pressure and freeze-thaw cycles is obtained. Based on statistical methods, the mathematical expressions of deriving dynamic elastic modulus using static elasticity modulus is established. The results show that (1) the static and dynamic elastic moduli of specimens increased gradually with the increase the confining pressure and plasticity index, the static and dynamic elastic moduli decreased and last basically stabilized with the increase of freeze-thaw cycles; (2) the static elastic modulus and dynamic elastic modulus of subgrade soil in seasonally frozen area have a good correlation. The study shows that static elastic modulus and dynamic elastic modulus of subgrade soil in seasonally frozen area are of no essential difference, it is only the different performances in mechanical properties under different loading conditions.

Key words: road engineering; subgrade soil in seasonal frozen area; freeze-thaw cycle; static elastic modulus; dynamic elastic modulus

收稿日期: 2015-12-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308256)

作者简介: 王静(1980-), 女, 吉林柳河人, 博士, 副教授. (wangjing0062@sina.com)

0 引言

在进行道路工程路基的设计计算过程中，与其他岩土工程类似，应该首先明确路基土的基本物理力学性质^[1]。对于季节性冻土区，研究路基土经历多次冻融循环后的静动力特性变化规律对道路设计是至关重要的，因此，国内外有很多学者在路基土的静力特性和动力特性方面做了大量的研究。Daehyeon Kim^[2]对压实后的路基土进行了重复三轴试验，并与无侧限抗压强度结果进行比较分析，研究了土的弹性行为。D. V. Okur 等人^[3]通过动三轴试验，研究了在大应变条件下不同种类天然细粒土的动力性能。2009 年，毛雪松等人^[4]采用承载板法试验，研究了不同冻融循环条件下，含水量与压实路基土回弹模量的关系。王天亮^[5]在静、动三轴试验的基础上，研究了水泥和石灰改良土对应不同冻融循环次数、冷却温度和不同围压的静、动力变化特性。方亮^[6]采用直剪试验和静三轴试验对重载铁路路基低液限粉土静力学特性进行了研究，得出了静强度参数 c 、 φ 值及其随含水率与压实系数变化的规律，通过三轴持续振动试验，对重载铁路列车荷载反复作用下低液限粉土的变形特性进行了研究。程培峰等^[7-8]对季冻区路基土的回弹模量及冻胀性进行了试验研究，得出了二者的影响因素及影响范围。孔祥辉^[9]对高速铁路红层泥岩路基动态响应及动力变形特性进行了综合研究。

当前岩土工程领域的研究热点是寻求土体在静力特性和动力特性上的共性^[10-11]。贾革续^[12]认为土的静、动力特性只是土体在不同加载条件下的表现形式，二者没有本质的区别。目前，土的静力试验仪器普遍，试验过程及数据处理均较容易，应用较广泛。但由于造价等原因，国内土的动力试验仪器较少，且土的动力试验仪器操作复杂，数据处理难度较大，国内只有少数科研单位能够完成。本文将致力于研究季节性冻土区路基土在不同冻融循环次数后，静动力特性的变化规律及建立静动参数之间的关系，以便能用经济简捷的静力试验所得静力参数推导出同条件下路基土的动力参数，为路基设计及施工提供有效的数据支持及参考，省去土动力试验所需的人力经济等条件。

1 试样及试验方案

1.1 试样准备

为使试验结果更具代表性，本文选取 3 种不同

类型的路基填土，塑性指数范围基本涵盖能直接应用于季冻区路基建设（无需改良）的典型路基土，为方便表达，N1 号土表示塑性指数为 10.7 的路基土，N2 号土的塑性指数为 15.98，N3 号土的塑性指数为 21.93。按照《公路土工试验规程》（JTG E40—2007）规定的试验方法进行了 3 种土样的基本物性指标试验，分别做了土样颗粒分析试验，具体见表 1；测定了土样天然含水量、密度、液限及塑限，见表 2。采用击实试验测定了各土样的最佳含水量，并制成最佳含水量条件下的压实度大于 95% 的试件。根据文献 [13-14] 的研究结论，路基土物理参数在经过 6~7 次冻融循环后趋于稳定，本文采用可控温型冰柜，将温度设置为 -20~20℃，为了保持试验过程中试件的含水量不变，对上述 3 种土样试件用保鲜膜密封之后进行了 0~7 次冻融循环试验。对经历不同次数冻融循环后的试件，在常温下进行静三轴及动三轴试验。

表 1 试验土样颗粒分析结果

试样	各粒径（mm）的含量/%				
	<0.075	0.075~0.25	0.25~0.5	0.5~1.0	1.0~2.0
N1	38.2	19.9	7.7	20.8	13.4
N2	31.2	22.2	12.5	24.9	9.1
N3	30.4	19.4	12.4	26.8	11.0

表 2 试验土样基本物性指标

试样	天然含水量	密度 ρ	液限	塑限	塑性指数
	$w/\%$	$(g \cdot cm^{-3})$	$w_L/\%$	$w_P/\%$	I_P
N1	25.4	1.42	33.3	22.6	10.7
N2	24.2	1.62	35.48	19.5	15.98
N3	20.6	1.52	41.71	19.78	21.93

1.2 试验方案

1.2.1 静三轴试验

本文采用 TSZ-2 全自动三轴仪进行土的三轴压缩试验，对每种土、每次冻融循环后的试件进行不固结不排水静三轴试验（简称 UU 试验）。围压分别取为 $\sigma_3 = 100$ kPa， $\sigma_3 = 200$ kPa， $\sigma_3 = 300$ kPa，试验得到不同围压下的主应力差（ $\sigma_1 - \sigma_3$ ）与应变 ε_1 关系曲线。

1.2.2 动三轴试验

采用 DYNITS 电机控制动三轴测试系统进行动三轴试验。在与静三轴试验的围压相同的前提下，对经历不同冻融循环的每种土进行动三轴试验。在

每次动三轴试验过程中围压保持不变。采用频率为 1 Hz 的半波正弦荷载对试件施加轴向力, 每 0.1 s 进行一次采样, 每次采样读取循环荷载周数、轴向应变、剪应变、轴向应力和剪应力。图 1 给出了围压与荷载的关系^[15]。

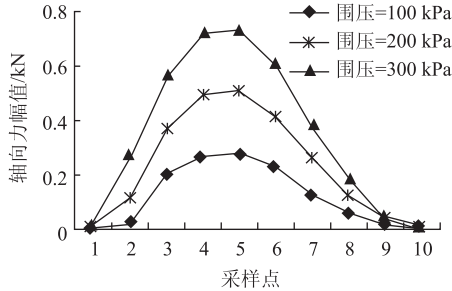


图 1 轴向力幅值

Fig. 1 Amplitude of axial force

2 试验结果分析

2.1 静弹性模量

土样的静弹性模量 (Static elastic modulus, E_s), 可以选择对静三轴试验所得的偏应力-应变关系曲

线上的直线段数据进行直线拟合, 拟合后的直线斜率即为静弹性模量^[16], 见图 2。

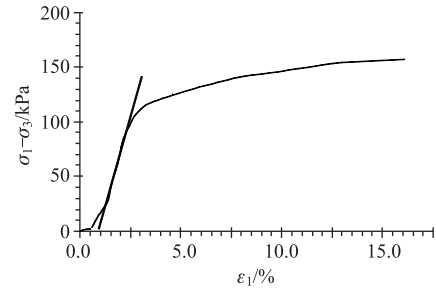


图 2 弹性模量取值示意图

Fig. 2 Schematic diagram of elastic modulus values

由此可得到 N1, N2, N3 等 3 种土样在经历不同冻融循环次数后, 围压与静弹性模量之间的关系。在试验过程中发现随着冻融循环次数的增加, 土的静弹性模量逐渐下降, 而且前几次冻融循环后测得的静弹性模量下降明显, 但经过 6 次冻融循环之后, 3 种土样的静弹性模量基本趋于稳定。因此作者给出了未冻融、1 次冻融和 7 次冻融循环后的围压、塑性指数与土的静弹性模量之间的关系, 见图 3。

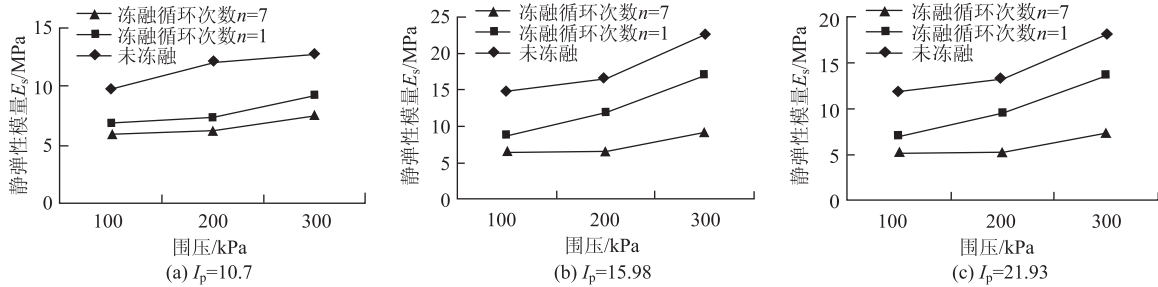


图 3 不同塑性指数路基土静弹性模量随围压及冻融循环次数变化规律

Fig. 3 Static elastic moduli of different plasticity indexed subgrade soil varying with confining pressure and freeze-thaw cycles

从图 3 中可以看出: 土静弹性模量随围压增加而增大, 随着冻融循环次数的增加呈下降趋势; 在冻融循环次数相同、围压相同的条件下, 其随着土样塑性指数的增加, 其静弹性模量逐渐增大。

2.2 动弹性模量

土的动弹性模量 (Dynamic elastic modulus, E_d) 根据动三轴试验所得的试验结果, 每次加载循环数据对应的动弹性模量可按如下所述计算方法进行计算。

动弹性模量为:

$$E_d = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_d}, \quad (1)$$

式中, $\sigma_d = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2$ 为循环动应力; $\varepsilon_d = (\varepsilon_{\max} -$

$\varepsilon_{\min})/2$ 为动应变。

根据式 (1) 和动三轴试验所得的应力应变数据可得到试验土样的动弹性模量值, 如图 4 所示。从图 4 (a) 中可以看出, 在加载初期, 动弹性模量的变化较为明显, 大约经历 100 次循环加载之后, 动弹性模量渐趋稳定。为了分析循环加载初期动弹性模量的变化特性, 作者绘制了 0 ~ 200 次荷载循环的动弹性模量与循环加载次数之间的关系曲线, 如图 4 (b) 所示。从图 4 (b) 中可以看出, 在循环加载初期 (0 ~ 100 次循环), 随着荷载循环次数的增加, 动弹性模量值呈波浪式下降的规律, 之后经历小幅波动, 逐渐趋于稳定, 当围压越小, 趋于稳定的时间越早, 例如当围压为 100 kPa 时只需要循环加

载30次左右,动弹性模量值即可趋于稳定。

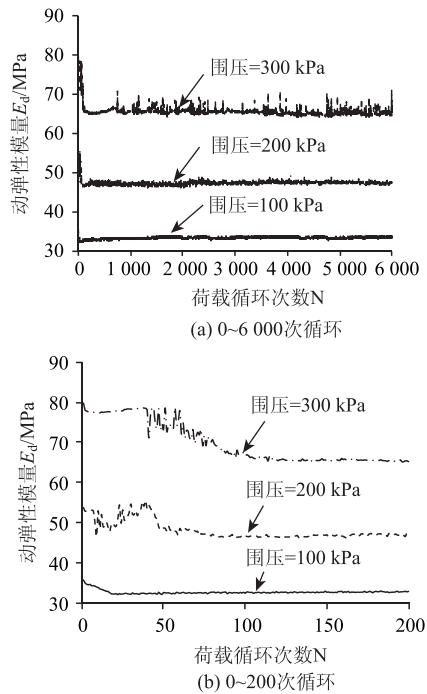


图4 动弹性模量与循环加载次数的关系

Fig. 4 Dynamic elastic modulus varying with number of loads

为了研究土的动弹性模量随荷载循环次数的变化规律,作者绘制了循环加载5 000~6 000次所得动弹性模量结果的平均值与围压之间的关系曲线,见图5。从图5中可以看出,随着围压的增加,土动弹性模量逐渐增大;在冻融循环次数相同、围压相同的条件下,随着塑性指数的提高,土动弹性模量逐渐增大,二者呈现出一定程度的正比例关系。

2.3 静动参数关系

通过对以上试验结果的研究可以得出如下结论:一是季冻区压实路基土的静弹性模量及动弹性模量随冻融循环次数、围压和塑性指数的变化规律基本是一致的,即静弹性模量及动弹性模量均随围压的

增加而增大,静、动弹性模量与塑性指数均呈现出近似正比的关系;二是当经历6~7次冻融过程后,土体形成新的动态稳定平衡,其静、动弹性模量趋于稳定。

2.3.1 静动参数关系本质原因

在路基土中的任一点都承受周围土体的围压,当对该点进行受力分析时,周围土体对其产生的围压即为该点的边界条件,所以增大围压也就意味着增强边界条件。当路基土受到上覆路面结构层和汽车荷载作用时,由于围压的存在,土体处于三向受力状态,导致径向变形减小,土体的轴向刚度和轴向强度均得到提高。

在冻融循环过程中,土体冰冻时,土中的水在形成冰晶过程中产生的楔形力使土体内部产生应力累积现象,当应力超过黏结力时,土颗粒相互脱离并重新排列,导致土体强度和刚度的下降。

塑性指数是反映黏性土特征的重要参数,土颗粒越细、亲水矿物含量越高的黏性土塑性指数越大,颗粒间的黏结力越强。因此塑性指数大的土体,其刚度和强度都比较大。

综上所述,土静、动弹性模量随围压和塑性指数的增加而增大,随着冻融循环次数的增多而下降,并逐渐趋于稳定,两种弹性模量随着围压、塑性指数和冻融循环次数的变化规律一致。这说明动弹性模量和静弹性模量有着较为稳定的相互关系,可以建立动、静参数的转换规律,能够通过常规试验获得的静弹性模量和静动参数转换理论,得到土的动弹性模量,从而代替动三轴试验的工作,避免购置费用昂贵的动三轴试验仪器,达到快速确定道路工程设计所需要的动力参数的目的。

2.3.2 静动模量关系式的确定

动弹性模量 E_d 和 E_s , I_p , σ_3 及冻融循环次数 n

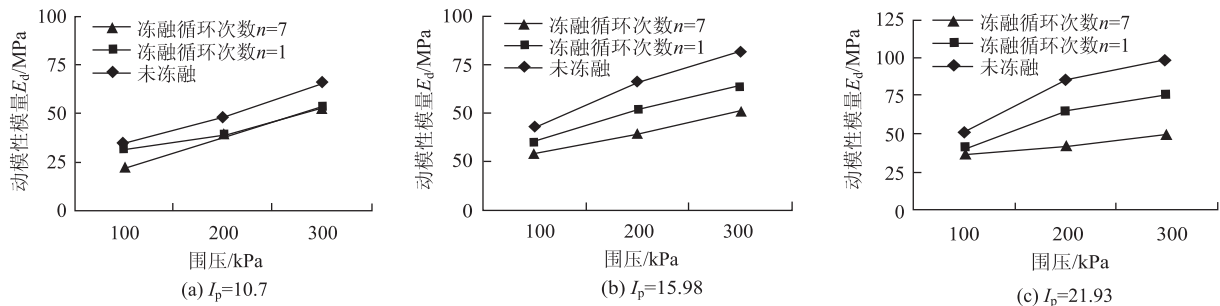


图5 不同塑性指数路基土动弹性模量随围压及冻融循环次数变化规律

Fig. 5 Dynamic elastic moduli of different plasticity indexed subgrade soil varying with confining pressure and freeze-thaw cycles

的关系可以通过多元非线性拟合的方式进行构造, 从而得到动弹性模量 E_d 相对于变量 E_s , I_p , σ_3 及 n 的函数表达式, 即:

$$E_d = f(E_s, \sigma_3, I_p, n)。(2)$$

由于式(2)属于经验公式, 作者分别采用了多项式、指数函数、对数函数和三角函数等基本函数对试验数据进行拟合, 通过对比结果分析发现采用多项式与指数函数联合使用的拟合公式得到的计算值与试验数据吻合得最好, 具体函数表达式为:

$$E_d = p_1 \times E_s + p_2 \times e^{p_3 \sigma_3} \cdot$$

$$[(p_4 + p_5 I_p + p_6 n)(1 + p_7 I_p + p_8 n)]。(3)$$

当 σ_3 , I_p , n , E_s 已知时, 便可以根据式(3)求得动弹性模量 E_d 的大小。式(3)中的 $p_1 \sim p_8$ 个参数可以采用全局优化法进行优化计算, 得到式(3)中的8个系数: $p_1 = 0.6769$, $p_2 = 20.3798$, $p_3 = 0.003052$, $p_4 = 0.2583$, $p_5 = 0.06351$, $p_6 = 0.1277$, $p_7 = -2.807 \times 10^{-4}$, $p_8 = 0.2011$ 。

则式(3)可写成:

$$E_d = 0.6769 E_s + 20.3798 e^{0.003052 \sigma_3} \cdot$$

$$[(0.2583 + 0.06351 I_p + 0.1277 n) \cdot$$

$$(1 - 2.807 \times 10^{-4} I_p + 0.2011 n)]。(4)$$

作者将式(4)得到的拟合值与试验得到的静弹性模量与动弹性模量的关系列于图6中, 从图6中可以看出试验曲线与拟合曲线较为接近, 二者的相关系数为 $r \approx 0.919$, 拟合效果较理想。由于 $I_p < 10$ 时为粉土, 性质与粉质黏土和黏土差别较大, 而 $I_p > 22$ 时, 已不适用于填筑公路路基, 故本公式的适用范围为塑性指数 $I_p = 10.0 \sim 22.0$ 之间的压实路基土。本文试验数据每个点均取3次重复独立试验的平均值, 有一定的可靠性, 且从图6中可以看出不同塑性指数的路基土试验值和拟合值吻合较好, 由此可知, 拟合公式能够应用于压实路基土动弹性模量的获取, 但其推广应用还有待于实际工程的验证。

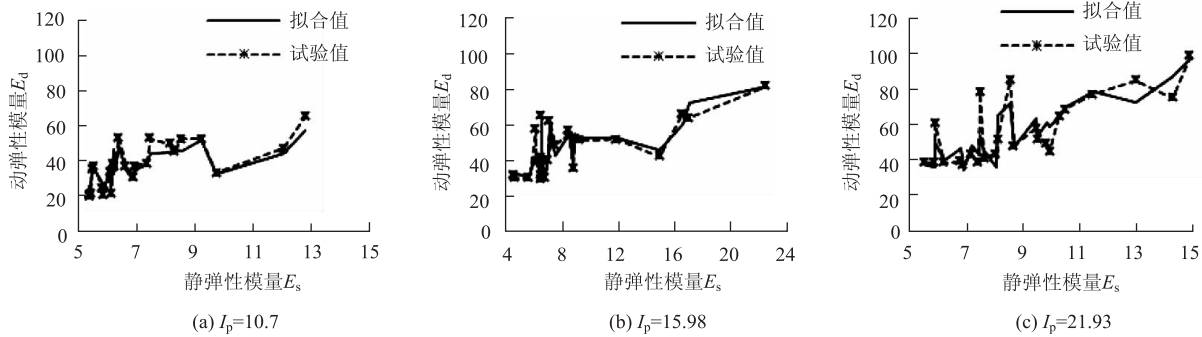


图6 静、动弹性模量试验值与拟合值对比 (单位: MPa)

Fig. 6 Comparison of static and dynamic elastic moduli between test values and fitted values (unit: MPa)

综上所述, 利用式(4)给出的经验公式, 实现静动参数转换, 可以根据静弹性模量方便地推导出动弹性模量, 从而获得在路基设计过程中所需要的动力性能参数。

3 结论

进行了3种塑性指数的路基土在经历0~7次冻融循环后的静、动三轴试验, 得到了不同塑性指数的路基土的静弹性模量和动弹性模量与围压和冻融次数的关系。对试验结果进行了整理分析, 得出了如下几点规律:

(1) 随着围压的增大和塑性指数的增加, 季冻区压实路基土的静弹性模量逐渐增大。

(2) 路基土在经历0~5次冻融循环过程中, 静弹性模量随着冻融循环次数的增加而减小, 在经历6次冻融循环后, 静弹性模量测试值趋于稳定值。

(3) 季冻区压实路基土的动弹性模量受围压、塑性指数、冻融循环次数影响的变化规律与静弹性模量的变化规律基本一致, 说明季冻区路基土的静、动弹性模量并没有本质区别, 只是在不同加载条件下的力学性质表现。

(4) 通过对静、动弹性模量试验结果的分析 and 整理, 建立了动弹性模量随塑性指数、围压、冻融循环次数和静弹性模量变化的经验公式, 完成静动参数的转换计算, 避免了因获得动弹性模量而购置价格昂贵的动三轴试验仪, 为道路设计提供一种快速准确的动弹性模量获取方法。

参考文献:

References:

- [1] WILLIAM N B. Deformation Characteristics of Compacted Subgrade Soils and Their Influence in Flexible Pavement

- Structures [D]. College Station: Texas A&M University, 1982.
- [2] KIM D, KIM J R. Resilient Behavior of Compacted Subgrade Soils under the Repeated Triaxial Test [J]. Construction and Building Materials, 2007, 21 (7): 1470 – 1479.
- [3] OKURA D V, ANSALB A. Stiffness Degradation of Natural Fine Grained Soils During Cyclic Loading [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27 (9): 843 – 854.
- [4] 毛雪松, 侯仲杰, 王威娜. 基于含水量和冻融循环的重塑土回弹 模量试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (增 2): 3585 – 3590.
MAO Xue-song, HOU Zhong-jie, WANG Wei-na. Experimental Research on Resilient Modulus of Remolded Soil Based on Water Content and Freeze-thaw Cycles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (S2): 3585 – 3590.
- [5] 王天亮. 冻融条件下水泥及石灰路基改良土的动静力特性研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
WANG Tian-liang. Study on Dynamic and Static Properties of Cement and Lime-modified Fillings Subjected to Freezing and Thawing [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [6] 方亮. 重载铁路路基低液限粉土静动力学特性研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2014.
FANG Liang. Research on Static and Dynamic Characteristics of the Low Liquid-limit Silt in the Subgrade of the Heavy Haul Railway [D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [7] 程培峰, 陈景龙, 韩春鹏, 等. 季冻区路基土回弹模量影响因素分析 [J]. 公路, 2013 (10): 174 – 178.
CHENG Pei-feng, CHEN Jing-long, HAN Chun-peng, et al. Influencing Factor Analysis of Subgrade Resilience in the Seasonal Freezing Region [J]. Highway, 2013 (10): 174 – 178.
- [8] 程培峰, 尹传军. 季冻区路基粘土冻胀性分类研究 [J]. 中外公路, 2014, 34 (5): 23 – 28.
CHENG Pei-feng, YIN Chuan-jun. Frost Heaving Classification of Subgrade Clay in Seasonally Frozen Area [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2014, 34 (5): 23 – 28.
- [9] 孔祥辉. 高速铁路红层泥岩路基动态响应及动力变形特性的综合研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
KONG Xiang-hui. Research on Dynamic Response and Dynamic Deformation Characteristics of Red Mudstone Subgrade in High-speed Railway [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [10] ZIENKIEWICZ O C. Basic Formulation of Static and Dynamic Behaviours of Soil and other Porous Media [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 1982, 3 (4): 457 – 468.
- [11] MEROI E A, SCHREFLER B A, ZIENKIEWICZ O C. Large Strain Static and Dynamic Semisaturated Soil Behaviour [J]. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, 1995, 19 (2): 81 – 106.
- [12] 贾革续. 粗粒土工程特性的试验研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2003.
JIA Ge-xu. Experimental Study on Engineering Properties of Coarse-grained Soils [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003.
- [13] 何岩. 聚丙烯纤维改良粉煤灰土动、静力学参数研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2010.
HE Yan. Study on Dynamic and Static Mechanical Properties of Polypropylene Fiber Improving Fly Ash Soil [D]. Changchun: Jilin University, 2010.
- [14] 王大雁, 马巍, 常小晓, 等. 冻融循环作用对青藏粘土物理力学性质的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (33): 4314 – 4319.
WANG Da-yan, MA Wei, CHANG Xiao-xiao, et al. Physico-mechanical Properties Changes of Qinghai-Tibet Clay due to Cyclic Freezing and Thawing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (33): 4314 – 4319.
- [15] 王静, 刘寒冰, 吴春利, 等. 冻融循环对不同塑性指数路基土动力特性影响 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36 (4): 633 – 639.
WANG Jing, LIU Han-bing, WU Chun-li, et al. Influence of Freeze-thaw Cycles on Dynamic Characteristics of Subgrade Soils with Different Plasticity Indices [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36 (4): 633 – 639.
- [16] 王静, 刘寒冰, 吴春利. 冻融循环对不同塑性指数路基土弹性模量的影响研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33 (12): 3665 – 3668.
WANG Jing, LIU Han-bing, WU Chun-li. Influence of Freeze-thaw Cycles on Elastic Modulus of Subgrade Soil with Different Plasticity Indices [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33 (12): 3665 – 3668.