

DOI: 10.11779/CJGE201809020

# 冻结饱和标准砂压缩性试验研究

孙晓宇<sup>1</sup>, 齐吉琳<sup>\*1</sup>, 尹振宇<sup>2</sup>

(1. 北京建筑大学土木与交通工程学院, 北京 100044; 2. 南特中央理工大学, 南特 法国 44300)

**摘要:** 在寒区进行高速公路和高速铁路等对变形要求严格的工程时, 必须考虑冻土的压缩性。以冻结饱和标准砂为研究对象, 利用自主研发的冻土侧限压缩仪开展不同温度下的分级加载试验。试验采用-0.5, -1.0, -2.0, -3.0 和-5.0°C 五级温度, 压力分为1, 2, 3, 5 和10 MPa 五级。根据试验结果得到  $e - \sigma_z$  和  $e - \lg\sigma_z$  曲线, 求得压缩系数和压缩指数, 比较分析室温下的融土试样与不同温度下冻土试样的压缩系数和压缩指数随温度的变化, 得到从正温到负温完整温度序列的试验规律。根据前人的模量公式得出相关参数, 从而建立公式中参数与温度之间的关系。试验表明: 饱和冻结标准砂压缩曲线与常温土相似; 在高温条件下冻土的压缩性比较可观; 冻土的压缩性受温度的影响十分显著, 即压缩系数随温度的升高而增大, 呈现指数函数的形式; 模量公式中的参数与温度之间可建立一定的定量关系。

**关键词:** 冻土; 标准砂; 压缩性; 恒温变载; 模量

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)09-1723-06

作者简介: 孙晓宇(1994-), 女, 浙江义乌人, 主要从事寒区岩土工程和特殊土力学等方面的学习和研究。E-mail: 136527826@qq.com。

## Experimental study on compressibility of frozen saturated ISO standard sand

SUN Xiao-yu<sup>1</sup>, QI Ji-lin<sup>1</sup>, YIN Zhen-yu<sup>2</sup>

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;

2. Ecole Centrale de Nantes, Nantes 44300, France)

**Abstract:** The compressibility of frozen soil must be taken into consideration when the deformation of highway and high-speed railway is strictly controlled in permafrost regions. The frozen saturated ISO standard sand is taken as the study object, and step load tests under different temperatures are carried out using a self-developed confined compression apparatus for frozen soils. The tests are conducted at the loads of 1, 2, 3, 5, 10 MPa and under temperatures of -0.5, -1.0, -2.0, -3.0, -5.0°C. The coefficient of compressibility and the compressibility index are obtained according to the  $e - \sigma_z$  and  $e - \lg\sigma_z$  curves for both unfrozen and frozen samples at different temperatures. The experimental results of the complete temperature series from room temperature to negative temperature are then obtained. The correlation parameters are obtained according to the former modulus formulas, and the relationship between the parameters and the temperatures in the formulas is established. The test results indicate that the compression curve of frozen saturated ISO standard sand is similar to that of the samples under room temperature. For the warm frozen samples, the compressibility is considerable. The compressibility of frozen soil is closely related to temperature, i.e., the coefficient of compressibility increases with the increase of temperature in the form of exponential function. A certain quantitative relationship can be established between the parameters and the temperatures in the modulus formulas.

**Key words:** frozen soil; ISO standard sand; compressibility; constant temperature step load; modulus

## 0 引言

土的压缩性是岩土工程中的一个经典课题。对于冻土而言, 在温度相对较低时, 冻土的模量很高, 在工业与民用建筑工程中一般不会有明显的压缩性, 通常不予考虑。但随着温度升高, 冻土模量降低, 高温冻土的力学特性与融土接近<sup>[1]</sup>, 其压缩性就必须考虑。近几十年来中国的寒区建设广泛开展, 青藏高速公路

已进入国家高速公路网规划。随着全球气候变暖, 多年冻土地区的冻土层温度升高, 而修建路基之后其温

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41572268); 北京市自然科学基金委-市教委联合重点项目(KZ201810016020); 北京市属高等学校高层次人才引进与培养计划项目(CIT&TCD20150101)

收稿日期: 2017-12-04

\*通讯作者(E-mail:jilinqi@bucea.edu.cn)

度会进一步升高,进而形成一个深厚的高温冻土层<sup>[2]</sup>(图1);另一方面,这种高等级公路或铁路对变形要求更为严格:铁路规范要求时速达到300 km/h的铁路沉降小于50 mm<sup>[3]</sup>;高速公路中一般长路段允许20 a内沉降为300 mm<sup>[4]</sup>。因此研究高温冻土的压缩变形就非常有必要。

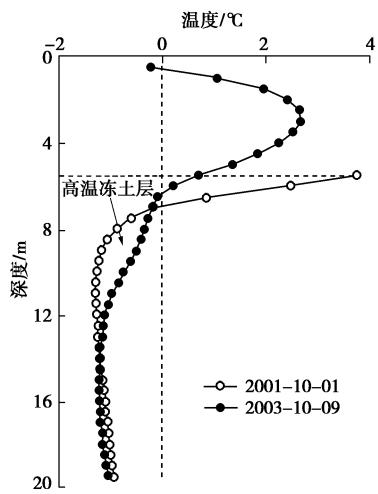


图 1 青藏铁路路基下的高温冻土层

Fig. 1 Warm frozen zone formed in layers underneath embankment of Qinghai-Tibet railway

通常认为,多年冻土地区路基的沉降变形是由活动层冻融循环引起的变形、多年冻土融沉变形以及高温冻土发生压缩变形这3个主要部分组成,而冻土融沉是导致路基发生较大变形的主要因素<sup>[5-7]</sup>。然而,对冻土地区路基沉降变形的现场监测表明,由于路基填土和行车荷载的作用,即使路基下多年冻土不融化,多年冻土层也会因为荷载作用产生较大的变形量<sup>[8-9]</sup>,这种变形包括温度升高模量降低引起的压缩变形。

对于寒区工程来说,土体的温度变化是工程设计、施工以及运营的必须考虑的因素。早在1956年,前苏联学者崔托维奇通过室内试验发现,高温冻土(依然是负温,接近相变温度)在荷载的作用下产生的压缩变形十分可观<sup>[10]</sup>,然而,此后对于冻土压缩性的研究长期未受到应有的重视。直到1982年,朱元林等<sup>[11]</sup>采用冻结砂土及冻结黏土试样进行了侧限压缩研究,分析了两种不同类型的土在不同温度和含水率条件下压缩系数的变化规律。近年来,冻土工程国家重点实验室张建明团队研究了高温-高含冰量冻土的压缩变形特性,如郑波等针对青藏铁路沿线的重塑黏土,在不同温度下进行侧限压缩试验<sup>[12]</sup>,分析了近相变温度区冻土的压缩系数与温度之间的规律性,即压缩系数随温度升高呈现指数函数形式增长;苏凯等<sup>[13]</sup>、阮国峰等<sup>[14]</sup>开展了类似的研究,并根据压缩系数将冻土分为高、中、低压缩性。齐吉琳等分析了恒压变温侧限

压缩试验结果<sup>[2]</sup>,发现温度从-1.5℃升高到-0.3℃,应变最大可达到7%;同时发现,变形曲线的形态与融土的分级压缩曲线相似。

从上述文献分析可以看出,对于冻土压缩性的研究,目前还没有广为接受的结论,其中一个重要的原因是不同的研究者采用的研究对象不同。为了使同行的研究结果便于对比,有必要从统一的材料入手,比如中国标准砂。另一方面,目前还没有对不同温度下分级加载的压缩特性进行系统的研究。

本文拟采用冻结饱和 ISO 标准砂为研究对象,研究冻土在温度及荷载变化下的压缩特性,通过试验测定在温度及荷载这两个变量下冻土试样的压缩量,分析随温度与荷载变化下冻土压缩变形的规律。研究冻土在温度变化和荷载变化的条件下冻土的压缩特性以及由此可能引发的一系列的不利现象,这对于冻土地区建筑物的安全与稳定性具有十分积极的现实意义。

## 1 冻土的侧限压缩试验

### 1.1 试验设备

试验所用的仪器是自主研发的 DCYY-100 型冻土侧限压缩仪。该设备主要由温控系统、加载系统和数据采集系统3部分组成(如图2)。低温冷源由恒温低温箱5201-R50HG 提供,可控温度范围为-50℃~90℃,试样控温精度可达±0.1℃,采用外循环闭环控制方式控温。加载主机为高性能的负荷框架结构,具有刚度高、重量轻,并且能在大载荷下平稳运行等优点。计算机自动采集数据,使用的计算机测控单元为 EDC 全数字伺服测控器,它具有多个测量通道,可以对其中的任何一个通道采取闭环控制的方式,并且能够在试验过程中对各个控制通道进行无冲击转换。

### 1.2 试验材料及试样制备

本试验采用中国 ISO 标准砂(厦门艾斯欧标准砂有限公司生产)为研究对象,材料的粒径组成及基本参数见表 1。为了获得颗粒较为均匀的土样,使用砂雨法<sup>[15]</sup>将计算所得一定量标准砂装入模具,并采用抽气饱水的方法使土样饱和。将饱和土样连同模具放入制冷冰箱,冻结 12 h 后脱模,制成底面积 30 cm<sup>2</sup>,高 8 cm,干重度为 18.4 kN/m<sup>3</sup>的冻结饱和砂土试样,置于由冷浴调节控制的特定温度下,恒温 6 h 后进行试验。

### 1.3 试验方法

本试验采用恒温变载的方法,在-0.5, -1.0, -2.0, -3.0, -5.0℃温度下分别进行加载,每一温度下荷载分为 1, 2, 3, 5, 10 MPa 五级。整个试验加载过程中,计算机自动记录试样的轴向应力和变形。依据

表1 试验材料基本参数

Table 1 Basic indexes of test materials

粗砂	粒径组成/%					干重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	
	0.01~0.25 mm	0.25~0.5 mm	0.5~1 mm	1~2 mm	>2 mm	$\gamma_{d,max}$	$\gamma_{d,min}$
粒径分布	30.8	4.5	38.2	21.7	4.8	19.6	16.8

GB/T50123—1999《土工实验方法标准》<sup>[16]</sup>, 应将施加每级荷载24 h后的试样变形速率小于0.01 mm/h作为稳定标准, 若变形速率不小于0.01 mm/h, 则需延长加载时间直至其稳定。这一标准尽管广为采用, 但是毫无疑问, 这24 h绝大多数时间里试样发生的变形都是蠕变。由于此稳定标准耗时长, 加之本研究着重探讨不同温度下分级加载过程中的瞬时变形, 应尽可能减少蠕变所占比例, 因此本试验中采用在各级荷重下压缩1 h后即施加下一级压力。



(a) 加载系统



(b) 温控系统



(c) 数据采集系统

图2 冻土侧限压缩仪

Fig. 2 Confined compression apparatus

## 2 试验结果分析

### 2.1 不同温度下应变随时间的变化曲线分析

由于本试验采用1 h稳定标准, 不同于规范, 本研究首先对竖向应变 $\varepsilon_z$ 随时间的变化进行分析。图3为 $\varepsilon_z$ 在每级压力下随时间的变化曲线, 由图中可以看出, 无论是室温下还是冻结条件下, 试样在每级荷载加压时, 其瞬时产生的 $\varepsilon_z$ 较大, 之后一小时变形缓慢。温度相对较低时瞬间变形相对较小, 但仍可看出瞬间

变形几乎决定了每级荷载的变形量。如在较高温度-0.5℃下加载1 MPa瞬间应变达到3%, 而恒定加载1 h后 $\varepsilon_z$ 仅增加了0.07%; 在较低温度-5.0℃下加载1 MPa瞬间变形为1%, 稳定1 h后 $\varepsilon_z$ 为1.3%。可见, 采用1 h加压稳定标准可以反映试样的瞬时变形特征。

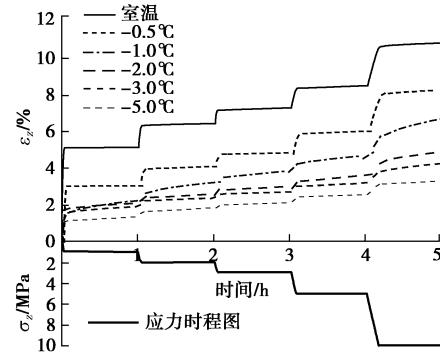
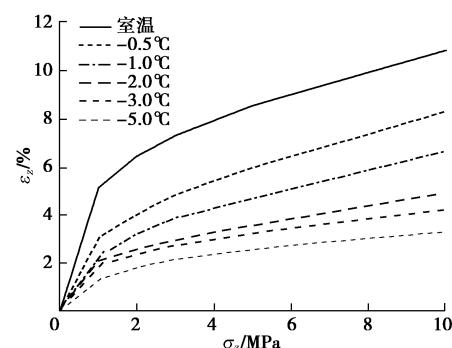


图3 试样的压缩变形曲线

Fig. 3 Compression curves

### 2.2 不同温度下 $\varepsilon_z$ 随 $\sigma_z$ 变化曲线分析

图4为不同温度下试样在每级荷载作用下的应变发展曲线。从图中首先可以看出, 试样在室温状态下最大 $\varepsilon_z$ 约为11%, 而冻结试样的 $\varepsilon_z$ 则明显减小, 但高温冻土的应变幅度依然较为可观。分析 $\varepsilon_z$ - $\sigma_z$ 曲线可以看出, 土样压缩量随着负温降低而减小, -0.5℃时冻结标准砂土样的 $\varepsilon_z$ 超过8%, -1℃, -2.0℃和-3.0℃时的 $\varepsilon_z$ 大约分别为7%, 5%和4.2%, 而在温度较低的-5.0℃,  $\varepsilon_z$ 不到3.5%。上述现象表明土样压缩性对温度变化的敏感性: 即在温度较高时, 压缩量较明显, 温度较低时温度的变化对于土样的压缩性影响较小。此外, 每级温度下, 经前两级荷载的作用, 试样的 $\varepsilon_z$ 就已经超过了总应变量的60%, 表明试样在前两级荷载作用下已发生大部分的变形。

图4 不同温度下试样的 $\varepsilon_z$ - $\sigma_z$ 曲线Fig. 4  $\varepsilon_z$ - $\sigma_z$  curves for samples under different temperatures

### 2.3 分级压缩曲线和压缩性分析

融土压缩特性判断的方法一般为, 根据沉降量计算得到土样的压缩曲线, 绘制  $e - \sigma_z$  和  $e - \lg \sigma_z$  曲线或者  $e - \ln \sigma_z$  曲线得到压缩系数、压缩指数等指标。工程中经常关心单位压力增量作用下土孔隙比的减小值, 即压缩系数  $a$ , 它定义为  $e - \sigma_z$  曲线中某段切线的斜率<sup>[17]</sup>, 根据图 5 (a) 中的  $e - \sigma_z$  曲线按下式计算得出各级压力下的压缩系数:

$$a = \frac{-\Delta e}{\Delta \sigma_z} , \quad (1)$$

式中,  $\Delta e$  为孔隙比的减小量,  $\Delta \sigma_z$  为应力的增量。压缩系数随温度变化曲线如图 5 (b) 所示。从图 5 (b) 中可看出, 土样在 0~1 MPa 压力范围的压缩系数明显大于随后几级荷载作用, 而 3~5 及 5~10 MPa 荷载下的压缩系数已比较接近, 尤其温度较低时。但无论是哪一级压力, 其压缩系数均随温度近似以指数函数的形式降低。

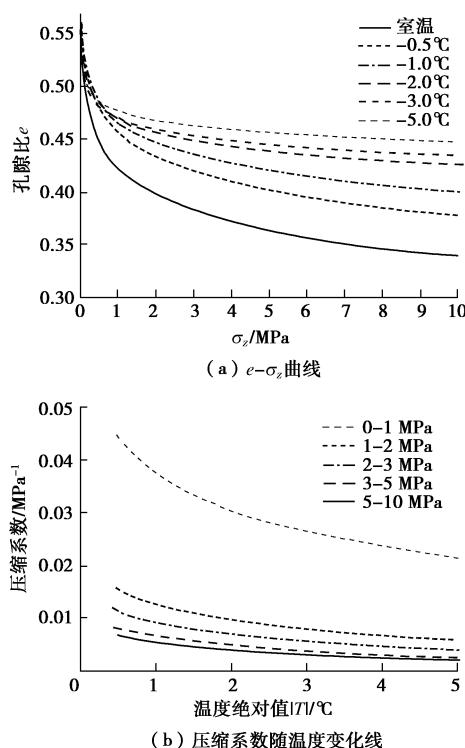


图 5 不同温度下试样的  $e - \sigma_z$  曲线及压缩系数

Fig. 5  $e - \sigma_z$  curves and coefficient of compressibility for samples under different temperatures

土在较大应力范围内压缩性的强弱可以用压缩指数  $C_c$  来反映, 它定义为  $e - \lg \sigma_z$  曲线中直线段的斜率, 在较高的压力范围内为一常量<sup>[17]</sup>。根据图 6 (a) 中的  $e - \lg \sigma_z$  曲线, 利用下式计算各个温度下的压缩指数:

$$C_c = \frac{-\Delta e}{\Delta \lg \sigma_z} , \quad (2)$$

各温度下土的压缩指数如图 6 (b) 所示, 室温下土样压缩指数明显大于冻土, 而温度从  $-0.5^{\circ}\text{C}$  ~  $-5.0^{\circ}\text{C}$ , 压缩指数降低近三倍。另外冻结砂土的  $e - \sigma_z$  与  $e - \lg \sigma_z$  曲线图与融土的曲线形状及趋势相似, 随着荷载的增加冻结砂土试样的孔隙比逐渐减小, 且孔隙比减小速率总体随着温度降低逐渐降低。此结果也充分说明了温度对冻土压缩性的影响较大, 在实际工程中必须给予足够重视。

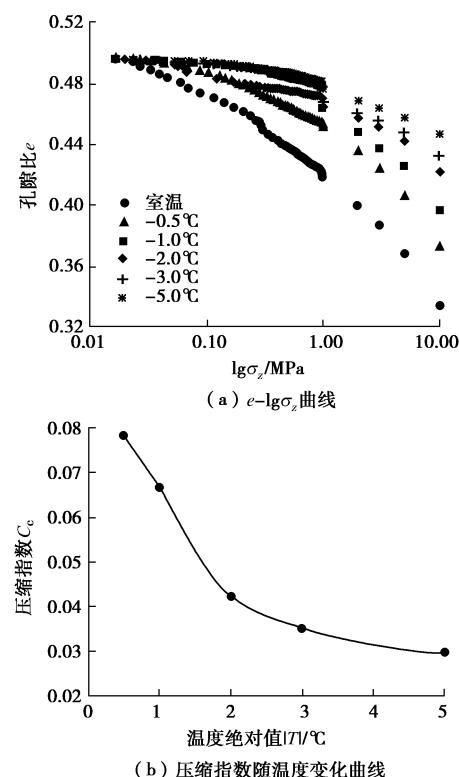


图 6 不同温度下试样的  $e - \lg \sigma_z$  曲线及压缩指数

Fig. 6  $e - \lg \sigma_z$  curves and compressibility index for samples under different temperatures

### 2.4 非线性压缩特性分析

在整个试验过程中冻土的压缩变形呈现出非线性, 这里分别采用 Richart<sup>[18]</sup>及 Pestana 等<sup>[19]</sup>体积模量公式, 并考虑小应变刚度特性<sup>[20]</sup>, 通过小应变累加的方法来拟合  $e - \lg \sigma_z$  曲线, 并建立温度与公式参数之间的关系。

Richart 体积模量公式为

$$E = E_0 \frac{(2.97 - e)^2}{(1 + e)} \left( \frac{\sigma_z}{p_{at}} \right)^n . \quad (3)$$

Pestana 体积模量公式为

$$E = E_0 \frac{1 + e}{e} \left( \frac{\sigma_z}{p_{at}} \right)^{2/3} . \quad (4)$$

式中  $E_0$  为初始值参数;  $n$  为某条件下对非线性应力的影响参数;  $p_{at}$  为标准大气压, 取 101.325 kPa。通

过拟合得到曲线与试验点的对比, 如图 7。表 2 列出了相应的参数  $E_0$  和  $n$ , 将参数与温度进行拟合得到如图 8 曲线。

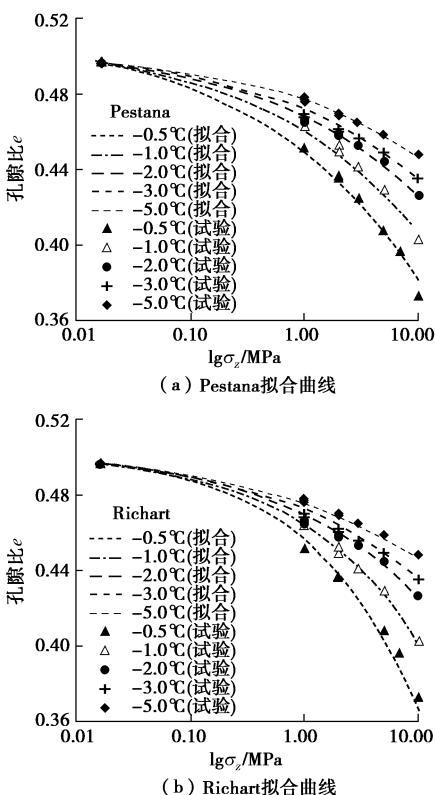


图 7 不同温度下试样的  $e - \lg \sigma_z$  曲线拟合

Fig. 7  $e - \lg \sigma_z$  fitting curves for samples under different temperatures

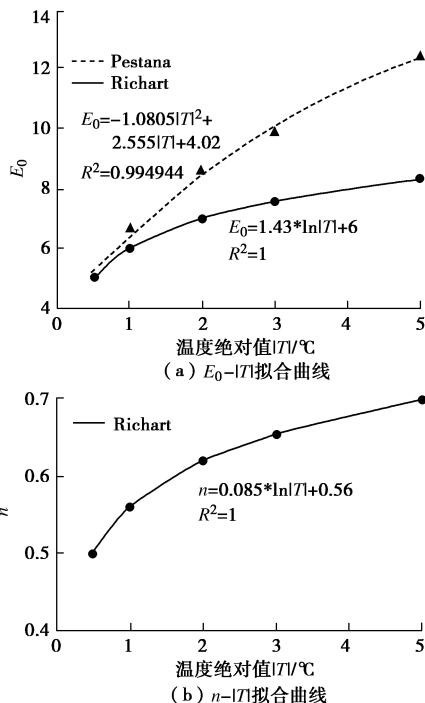


图 8  $E_0 - |T|$ ,  $n - |T|$  拟合曲线

Fig. 8 Fitting curves for  $E_0 - |T|$  and  $n - |T|$

表 2 所采用两个公式的参数

Table 2 Parameters in two formulas

温度 $T$	Richart		Pestana
	$E_0/\text{MPa}$	$n$	$E_0/\text{MPa}$
-0.5°C	5.0088	0.5011	5.0500
-1.0°C	6.0000	0.5600	6.6295
-2.0°C	6.9912	0.6189	8.5400
-3.0°C	7.5710	0.6534	9.8476
-5.0°C	8.3015	0.6968	12.3306

### 3 结 论

本文以冻结饱和和标准砂试样为研究对象, 采用冻土侧限压缩仪进行不同温度下的分级加载压缩试验, 采用 1 h 变形稳定标准, 通过对试验规律的分析得到如下结论:

(1) 冻结试样在压缩过程中其  $e - \sigma_z$  曲线与  $e - \lg \sigma_z$  曲线的趋势与室温下试样压缩时的曲线较为相似, 孔隙比均随着荷载的增加逐渐减小, 且曲线逐渐趋于平缓。

(2) 室温下和温度相对较高的情况下, 总应变量较为可观; 在试验所采用的压力范围内, 前两级压力下试样的变形量较大, 占总变形量的 60%以上。

(3) 温度对冻结标准砂试样的压缩性影响较大。当温度较高时冻土对温度的敏感性较强, 微小的温度变化也会导致试样压缩性的显著变化; 然而在温度较低时, 温度的变化对于冻结标准砂压缩性的影响相对较小。

(4) Richart 模量式中的  $E_0$ ,  $n$  均可与温度建立对数函数方程, Pestana 模量式中的  $E_0$  可与温度建立多项式方程。

### 参考文献:

- [1] LADANYI B. Creep behavior of frozen and unfrozen soils: a comparison[C]// Proceedings of the 10th International Conference on Cold Regions Engineering: Putting Research into Practice. Lincoln, 1999: 173 – 186.
- [2] QI Ji-lin, ZHANG Jian-ming. Definition of warm permafrost based on mechanical properties of frozen soil[C]// Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference of Permafrost. Alaska, 2008: 1457 – 1461.
- [3] TB 10001—2016 铁路路基设计规范[S]. 2016. (TB 10001—2016 Code for design of railway earth structure[S]. 2016. (in Chinese))
- [4] 交通部第一公路勘察设计院. 公路软土地基路堤设计与施工技术规范[M]. 北京: 人民交通出版社, 1997. (The First Survey and Design Institute of the Ministry of Communications. Code for embankment design and

- construction technology[M]. Beijing: China Communications Press, 1997. (in Chinese))
- [5] 马巍, 刘端, 吴青柏. 青藏铁路冻土路基变形监测与分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 571–579. (MA Wei, LU Duan, WU Qing-bai. Monitoring and analysis of embankment deformation in permafrost regions of Qinghai-Tibet railway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(3): 571–579. (in Chinese))
- [6] 吴紫汪, 程国栋, 朱林楠, 等. 冻土路基工程[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1999. (WU Zi-wang, CHENG Guo-dong, ZHU Lin-nan et al. The frozen ground roadbed engineering[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1999. (in Chinese))
- [7] 齐吉琳, 马巍. 冻土力学性质研究现状[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 133–143. (QI Ji-lin, MA Wei. State-of-art of research on mechanical properties of frozen soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 133–143. (in Chinese))
- [8] 喻文学, 宴启鹏. 青藏公路多年冻土地区路基冻融变形的初步分析[J]. 西安公路交通学院学报, 1986, 6(2): 49–70. (YU Wen-xue, YAN Qi-peng. Primary analysis of the roadbed deformation of Qinghai-Tibet highway in the permafrost regions[J]. Journal of Xi'an Highway University, 1986, 6(2): 49–70. (in Chinese))
- [9] YU F, QI J L, YAO X L, et al. In-situ monitoring of settlement at different layers under embankments in permafrost regions on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Engineering Geology, 2013, 160(13): 44–53.
- [10] H A 崔托维奇. 冻土力学[M]. 张长庆, 朱元林, 译. 北京: 科学出版社, 1985: 11–13. (TSYTOVICH H A. Mechanics of frozen soil[M]. ZHANG Chang-qing, ZHU Yuan-lin, trans. Beijing: Science Press, 1985: 11–13. (in Chinese))
- [11] 朱元林, 张家懿. 冻土的弹性变形及压缩变形[J]. 冰川冻土, 1982, 4(3): 29–39. (ZHU Yuan-lin, ZHANG Jia-yi. Elastic and compressive deformation of frozen soils[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1982, 4(3): 29–39. (in Chinese))
- [12] 郑波, 张建明, 马小杰, 等. 高温–高含冰量冻土压缩变形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 1): 3064–3069. (ZHENG Bo, ZHANG Jian-ming, MA Xiao-jie, et al. Study on compression deformation of warm and ice-rich frozen soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S1): 3064–3069. (in Chinese))
- [13] 苏凯, 张建明, 刘世伟, 等. 高温–高含冰量冻土压缩变形特性研究[J]. 冰川冻土, 2013, 35(2): 369–375. (SU Kai, ZHANG Jian-ming, LIU Shi-wei, et al. Compressibility of warm and ice-rich frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(2): 369–375. (in Chinese))
- [14] 阮国锋, 张建明, 刘世伟, 等. 青藏高原高温高含冰量冻土压缩试验研究[J]. 水文工程地质, 2014, 41(2): 50–56. (RUAN Guo-feng, ZHANG Jian-ming, LIU Shi-wei, et al. Compression experimental research on warm and ice-rich permafrost on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(2): 50–56. (in Chinese))
- [15] MA L, QI J L, YU F, et al. Experimental study on variability in mechanical properties of a frozen sand as determined in triaxial compression tests[J]. Acta Geotechnica, 2016, 11(1): 61–70.
- [16] GB/T50123—1999 土工试验方法标准[S]. 1999. (GB/T50123—1999 Standard for soil test method[S]. 1999. (in Chinese))
- [17] 陈希哲, 叶菁. 土力学地基基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013. (CHEN Xi-zhe, YE Jing. Soil mechanics and foundation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese))
- [18] RICHART F E Jr, HALL J R, WOORS R D. Vibration of soils and foundations[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1970.
- [19] PESTANA J M, WHITTLE A J. Compression model for cohesionless soils[J]. Géotechnique, 1995, 45(45): 611–631.
- [20] 尹振宇, 顾晓强, 金银富. 土的小应变刚度特性[M]. 上海: 同济大学出版社, 2017. (YIN Zhen-yu, GU Xiao-qiang, JIN Yin-fu. Stiffness characteristics of soil at small strain[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2017. (in Chinese))