

DOI: 10.11779/CJGE201701010

季冻区典型土类动剪切模量阻尼比计算方法

孙 锐¹, 于啸波¹, 袁晓铭^{*1}, 孟上九^{1, 2}, 陈卓识¹, 王 森¹

(1. 中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 哈尔滨理工大学, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 采用专门设计的低温共振柱仪进行试验研究, 研究典型土类动剪切模量阻尼比随负温的变化规律及计算方法。提出温度影响系数的概念, 并以较为符合实际的固结压力和冻结过程, 完成了黏土、粉土与砂土在常温及不同负温下的动力试验, 给出了这3种典型土类不同负温下初始剪切模量、剪切模量比和阻尼比的计算公式。结果表明: 无论何种土类, 负温对其初始剪切模量、剪切模量比和阻尼比都有重要影响, 相应的温度修正系数按Boltzmann与指数函数变化, 均在0℃到-6.0℃快速变化之后趋于平缓, 但变化程度和修正公式中的参数均与土类有关; 随温度降低, 3种土类初始剪切模量增长十分显著, 完全冻结黏土、粉土和砂土分别为常温土初始模量的50倍、25倍和13倍; 随温度降低, 3种土类参考剪应变降低十分显著, 但完全冻结后3种土的动剪切模量降低程度接近; 随温度下降, 3种土类最大阻尼比均显著减小, 完全冻结后的黏土最大阻尼比降幅最大, 砂土降幅最小, 粉土居中。3种典型土类负温下动剪切模量阻尼比修正公式, 其反映的现象和规律与国际上近期成果定性相符。

关键词: 典型土类; 季冻土; 动剪切模量; 阻尼比; 低温共振柱仪; 温度修正系数

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)01-0116-13

作者简介: 孙 锐(1972-), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事岩土工程和地震工程研究。E-mail: iemsr@163.com。

Method for dynamic shear moduli and damping ratio of typical soils in seasonal frozen region

SUN Rui¹, YU Xiao-bo¹, YUAN Xiao-ming¹, MENG Shang-jiu^{1, 2}, CHEN Zhuo-shi¹, WANG Miao¹

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake

Administration, Harbin 150080, China; 2. Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Using specially designed low-temperature resonant column apparatus, change rules of dynamic shear moduli and damping ratio with negative temperature and their computational methods for three soils are investigated. Concepts of temperature correction coefficient are proposed, and dynamic tests on clayey, silty and sandy soils under room and negative temperatures are conducted based on actual consolidation pressure and freezing process. The formulae under different negative temperatures for the initial shear modulus, shear modulus and damping ratio of the soils are also proposed. The results indicate that, for each type of soil, the negative temperature has significant impact on the initial shear modulus, shear modulus and damping ratio, while the corresponding temperature correction coefficient changes according to the combinatorial functions of Boltzmann and exponent. The change becomes gentle after rapid change from 0℃ to -6℃, and the degree of change and parameters fitting the functions are related to soil type. With the decrease in temperature, the initial moduli of three soil types increase very significantly. The completely frozen samples of clayey, silty and sandy soils gain 50, 25 and 13 times the initial shear modulus at room temperature respectively. The reference shear strain remarkably falls with the decreasing temperature, and all these soil dynamic shear moduli have simultaneous attenuation after completely frozen. The maximum damping ratio of the 3 soil types decreases distinctly at the lowering temperature, and to the magnitude of decreasing, the sand is the minimum, the clay is the maximum, and the silt is the intermediate. The proposed correction formulae for dynamic shear moduli and damping ratio of 3 typical soils are qualitatively consistent with recent achievements in the world on the physical laws and phenomena.

Key words: typical soil; seasonal frozen ground; dynamic shear modulus; damping ratio; low temperature resonant column apparatus; temperature correction coefficient

0 引言

中国国土面积的一半属于季节性冻土区^[1]。相比

基金项目: 中央级公益性研究所基本科研业务费专项项目(2016A02);
国家自然科学基金项目(51378164); 地震行业专项项目
(201408020-03)

收稿日期: 2015-11-03

*通讯作者 (E-mail: yxmiem@163.com)

常温土, 季冻土的动力学性能有很大不同。动剪切模量与阻尼比是土的动力学性能的首要参数^[2], 也是场地地震反应分析必备参数^[3]。中国季节冻土区中交通工程建设迅猛发展, 季冻土路基在交通荷载下的动力响应是亟需研究的问题, 而季冻土的动剪切模量与阻尼比是分析中的重要参数。同时, 震害调查表明, 同样的工程结构, 在土体冻结条件下的破坏程度和方式与常温情况相比会有显著差异, 与季节有很大关联^[4-5]。中国是地震多发国家, 很多季节冻土地区未来地震形势严峻, 研究季冻土的动力学性能及对地震动的影响就成为重要课题。

对于常温土体动剪切模量与阻尼比, 已有学者进行了研究, 并取得较多成果^[6-8]。相比之下, 冻土动剪切模量与阻尼比研究所取得的成果则十分有限。这些成果所采用的试验手段主要分动三轴试验和共振柱试验两类, 其中绝大多数来自于动三轴试验。在动三轴试验方面, 徐学燕等通过大量试验给出了冻结黏土动压缩模量随应变变化曲线及负温、荷载频率对该曲线的影响^[4, 9]; 齐吉琳等获得了当地粉质土冻结条件下剪切模量比和阻尼比曲线^[10]; 朱占元研究了冻结青藏线北麓河黏土在温度等多因素作用下的动力非线性曲线^[11]; 张峰获取了路基冻结砂土在不同温度、含水率等因素作用下的动力非线性曲线^[12]。这些成果在不同程度上揭示了各个因素对冻土模量和阻尼的影响, 但存在若干不足: ①动三轴仪的应变范围为 $10^{-4} \sim 10^{-2}$, 地震作用下的冻土层通常达不到这样的范围; ②季冻土的埋深大多不超过 10 m^[13], 季冻土试验的围压应在 100 kPa 左右, 而大部分现有低温三轴试验中所采用的围压过大, 均大于 0.3 MPa, 因而季冻土实际应力状态在这样的固结应力下无法得到客观反映; ③试验土样降温冻结过程多采用恒温箱快速降温方式让试样温度降低到一定值, 再回升到设定值, 而且恒温箱这种方式是无围压冻结, 这些都与实际降温过程不符。另外, 现有每项成果仅针对单一土类且没有提供常温下的动剪切模量阻尼比试验结果, 无法深刻理解负温下的响应, 也无法得知不同土类负温下动力特性的区别和联系。

相比动三轴仪而言, 共振柱试验原理可靠, 分析方法简单, 是获取中小应变 ($10^{-6} \sim 10^{-4}$) 下动剪切模量和阻尼比理想的仪器。对于土层地震反应计算, 所获得的实验结果可直接应用, 而且地震荷载下冻土剪应变比常规土类小许多, 采用共振柱进行动剪切模量和阻尼比试验拥有更大的优势, 但以往冻土动剪切模量和阻尼比共振柱试验成果很少。Al-Hunaidi 等^[14]对加拿大原状冻结黏土试样进行了共振柱试验(围压 14 kPa, 试验温度-9℃), 获得了原状冻结土的动剪切模量与阻尼比结果。但这一试验中, 因受限于线圈激振

力与数据采集设备滤噪能力, 冻土测试仅能得到 $1 \times 10^{-7} \sim 5 \times 10^{-6}$ 剪应变范围的动剪切模量与阻尼比, 而且仅是一种负温下的结果, 无法得到负温对动剪切模量阻尼比影响的规律。

由于冻土试验较常温土试验复杂, 以往冻土试验设备功能和试验技术水平都远落后于常规土试验, 使得研究基本为定性结果。本文以中国引进的首台低温共振柱仪为依托, 对冻结黏土、粉土和砂土进行了一系列低温共振柱试验, 以较为符合实际的固结压力和冻结过程, 研究不同负温对不同土类的动剪切模量阻尼比的变化规律, 力求给出不同负温下典型土类动剪切模量阻尼比的计算方法, 为冻土工程动力响应和抗震设计提供直接的支持。

1 试验设备

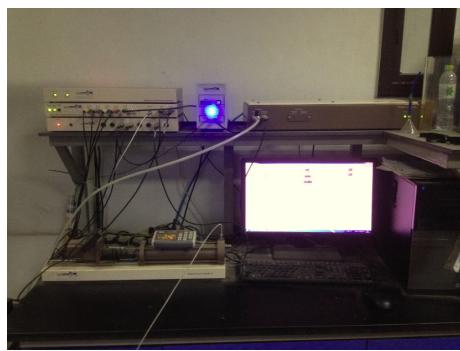
对于常温土体, 共振柱仪已经是一种较为成熟的设备, 但对于低温土体, 共振柱仪试验设备需要专门设计制造。2012 年, 根据中国地震局工程力学研究所提出的指标和要求, 英国 GDS 公司专门进行了研制, 为国内装备了首台低温共振柱仪, 如图 1。该设备可以对围压、反压、反压体积、孔隙水压、线圈激励电压等数据通过配套的 GDSLAD 与 GDSRCA 软件进行测量与控制, 在常温仪器的基础上增加了温度控制模块, 能进行低温共振柱试验。相关参数为: 试样尺寸为 $\Phi 50 \times 100$ mm; 围压可控范围是 0~1 MPa, 控制精度<1 kPa; 扫频范围 10~1000 Hz; 冻土测试中应变范围 $10^{-7} \sim 10^{-4}$; 围压室温度可控范围 -25 ± 1 ℃。温控系统采用 Thermo Fisher 公司的水浴循环器, 冷浴最低温度可达-40℃, 温度控制精度 0.01℃。自制冷却管与循环器连接, 冷却管置于土样周围, 达到冷冻土样的效果。围压室设有保温罩, 可以保证大部分冷能用于土样制冷, 保持冻结状态。围压室内置热电偶温度传感器, 通过 GDSLAD 软件进行实时采集、记录, 实现对自然围压状态下试样冻结过程的模拟。试样顶端的位移用线性可变差动变压器 (LVDT) 进行实时采集、记录, 对试样的固结沉降、冻胀变形等直接进行监测。



(a) 冷水浴温控器



(b) 共振柱仪



(c) 控制系统

图 1 中国地震局工程力学研究所低温共振柱仪

Fig. 1 Low-temperature resonant column apparatus in IEM

2 试样制备与试验操作

本文所用黏土和粉土, 取自哈尔滨景观大道路基施工现场地下约 3 m 处, 砂土为福建标准砂, 级配曲线见图 2。重塑土样的物性参数见表 1。

表 1 黏土、粉土和砂土的物性指数

Table 1 Physical properties of clay, silt and sand

土类	密度 /(g·cm ⁻³)	含水率 /%	干密度 /(g·cm ⁻³)	塑限 /%	液限 /%
黏土	1.85	28.0	1.45	17.0	51.0
粉土	2.07	26.5	1.64	21.2	30.5
砂土	1.86	20.0	1.55	—	—

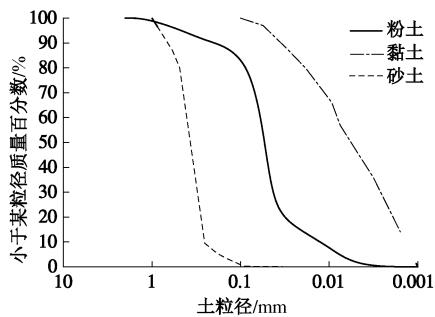


图 2 试验用土颗粒级配曲线

Fig. 2 Grading curves of test specimens

试验使用的黏土和粉土, 均分层击实制成 $\Phi 50 \times$

100 mm 试样, 并真空抽气浸泡充分吸水 48 h^[15]; 吸水完成后拆模安装到共振柱仪上开始固结, 围压为 100 kPa; 根据试样的轴向变形及排水体积稳定时间来确定固结时间, 当体积变形速率低于 0.1 cm³/h, 或轴向变形速率小于 0.05 mm/h 时, 认为固结完成, 操作中使用的固结时间为 8 h; 完成固结后在围压室内降温至设定温度, 试验前的冷冻降温时间为 24 h, 之后保持负温冻结状态直至试验结束。

试验使用的砂土, 直接在共振柱仪上分层击实制成 $\Phi 50 \times 100$ mm 试样。按照规范^[15], 首先将一定量干砂置于搪瓷盘里, 接着按照给定的含水率喷入一定量的蒸馏水, 充分搅拌, 保鲜膜封口 8 h, 之后在共振柱仪上按照预定的干密度制样。完成制样后, 安装共振柱仪其他部件, 进行 100 kPa 围压固结。由于砂土渗透性好, 固结时长缩短为 1 h。固结结束后冻结和共振试验操作与黏土和粉土试验一致。

3 黏土试验结果和温度修正系数

对黏土试样进行了室温及多个负温下的试验, 每一温度下进行了 3 组平行试验。文中给出 -3.9°C、-9°C、-14°C、-18°C 和室温 (15°C~25°C) 的试验结果, 见图 3~7。

图 3~7 中结果表明, 冻结黏土试验中存在一定的误差, 但 3 次平行试验误差在可接受范围以内, 因此试验结果可靠。

使用双曲线公式对试验数据进行拟合:

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + \gamma / \gamma_r}, \quad (1)$$

$$\lambda = \lambda_{\max} \left(1 - \frac{G}{G_{\max}}\right)^n, \quad (2)$$

式中, G 为剪切模量, G_{\max} 为初始剪切模量, γ 为剪应变, γ_r 为参考剪应变, λ 为阻尼比, λ_{\max} 为最大阻尼比, n 为系数。对图 3~7 的数据进行拟合, 得到图 8, 拟合结果见表 2。

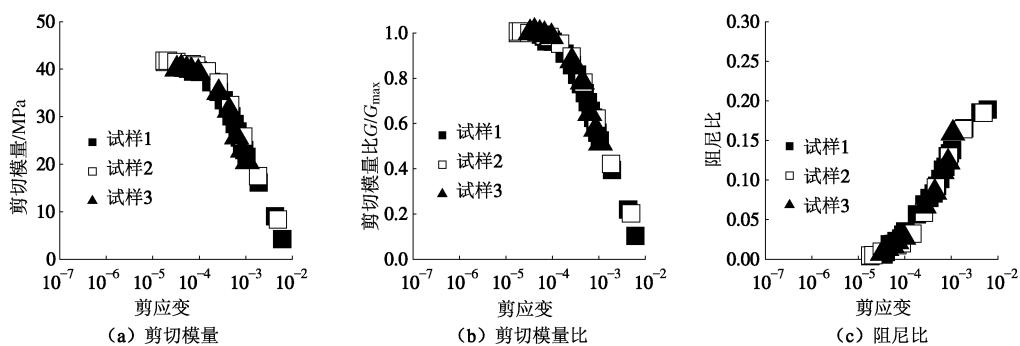


图 3 室温结果 (黏土)

Fig. 3 Test results at room temperature (clay)

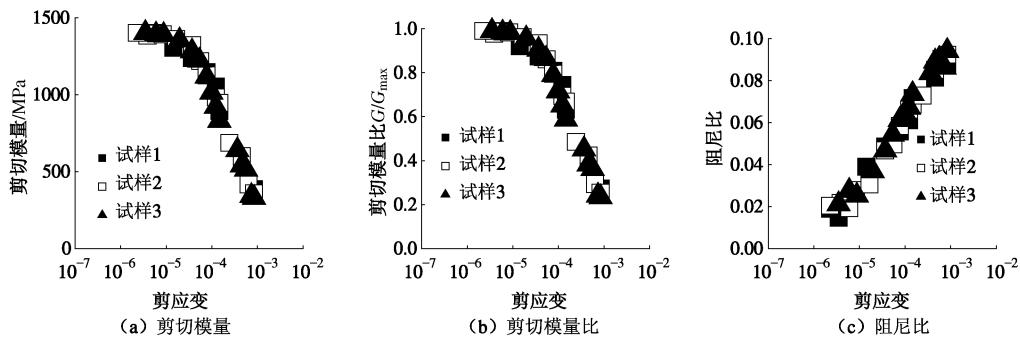


图 4 -3.9°C 结果 (黏土)

Fig. 4 Test results at -3.9°C (clay)

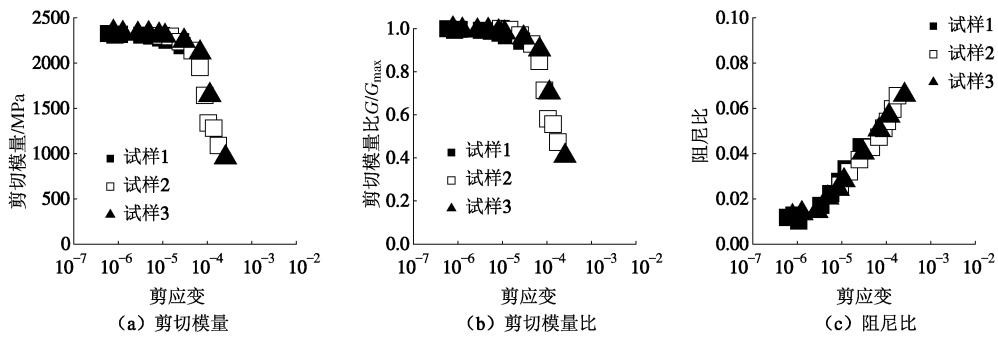


图 5 -9°C 结果 (黏土)

Fig. 5 Test results at -9°C (clay)

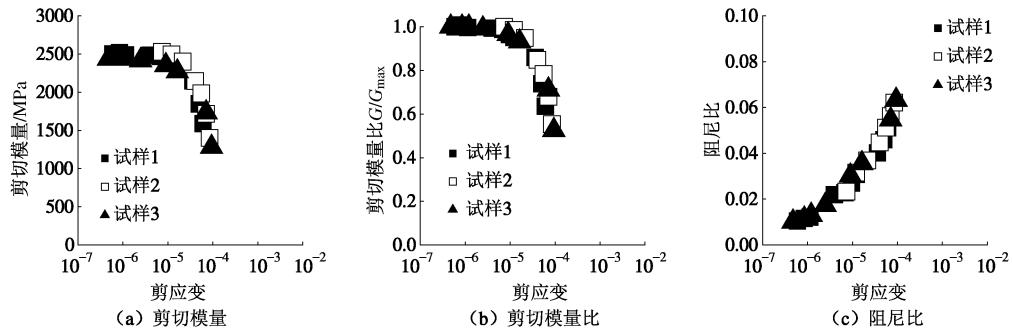


图 6 -14°C 结果 (黏土)

Fig. 6 Test results at -14°C (clay)

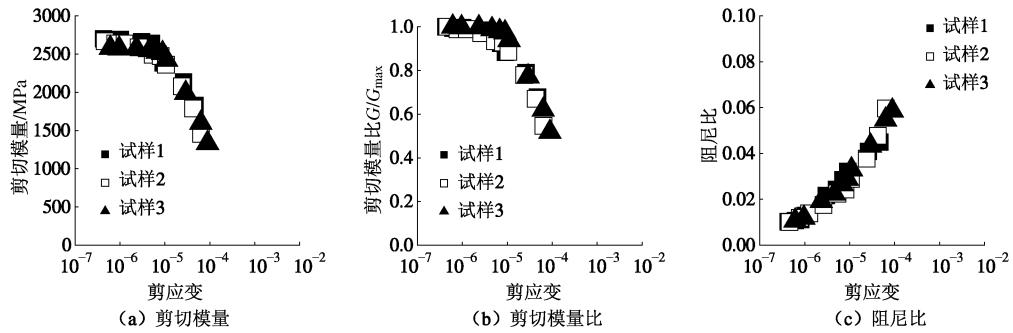


图 7 -18°C 结果 (黏土)

Fig. 7 Test results at -18°C (clay)

从图 8 可见, 未冻结试样的剪切模量比曲线整体高于冻结试样的曲线; 随着温度降低, 模量比曲线下降; 下降速率开始随着温度降低剧烈变化, 当负温到达一定值后, 下降速率的变化变得缓慢, 趋于稳定; 最大阻尼比随着温度的降低而降低, 但从整条阻尼比

曲线来看, 从常温曲线变化到负温曲线并不是简单的曲线下移, 而是在某个应变之前, 常温曲线在负温曲线之下, 超过这个应变后, 常温曲线超过负温曲线并继续增长, 这个现象的原因可能与土的结合水膜厚度变化有关。负温黏土试样中, 结合水膜厚度减小, 大

部分自由水转变为冰晶, 土颗粒间胶结变强, 要达到与常温土相同的动应变幅值, 需要耗费更多的能量, 这就使得负温下的阻尼比曲线高于常温情况。常温黏土试样中, 当动应变幅值较小时, 土颗粒间接触主要是结合水膜, 土颗粒本身的摩擦变形并不剧烈, 结合水膜变形的耗能是阻尼的主要组成部分, 但是结合水膜耗能的能力弱于土颗粒变形造成的耗能。当应变幅值较大时, 更剧烈的土颗粒摩擦和变形方式参与耗能后, 阻尼比上升明显, 超过冻土的阻尼比。

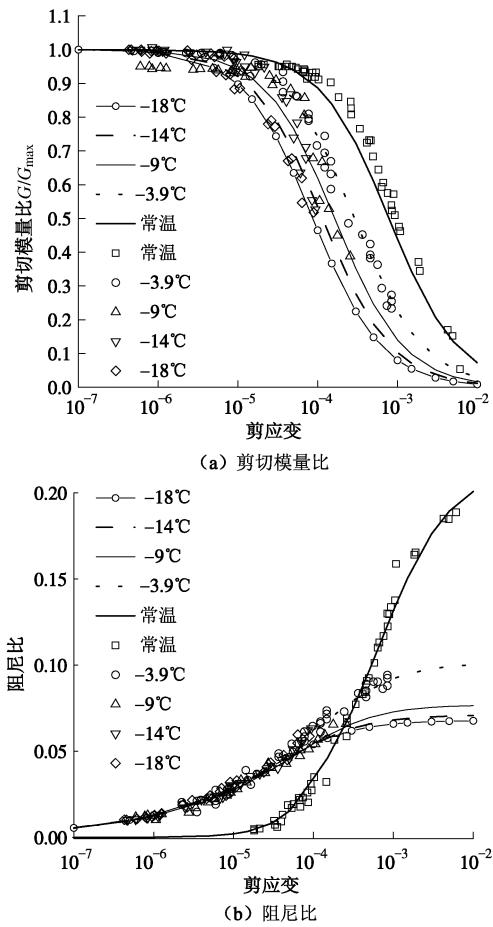


图 8 不同温度下黏土模量比与阻尼比非线性曲线

Fig. 8 Nonlinear curves of modulus ratio and damping ratio of clay under different temperatures

为便于观察图 8 中曲线的变化规律, 图 9 (a) 选取 4 个剪应变下 ($\gamma = 10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}$) 的 G/G_{\max} 值, 绘制它们随负温变化的曲线, 可见 -5°C 以前 G/G_{\max} 下降较快, 而随温度下降至低于 -5°C 后, G/G_{\max} 下降变缓, 这在 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 之间较明显。图 9 (b) 亦选取相同 4 个剪应变下的阻尼比值, 绘制其随温度变化的曲线, 可见当应变小于 10^{-4} 时, 从常温降到负温, 阻尼比先上升再略微下降, 之后保持平稳; 当应变超过 10^{-4} 时, 阻尼比则先下降, 之后保持平稳。

为获得负温下剪切模量和阻尼比的计算公式, 本文定义温度修正系数:

$$G'_{\max} = \alpha_G \times G_{\max}, \quad (3)$$

$$\gamma'_r = \alpha_{\gamma} \times \gamma_r, \quad (4)$$

$$\lambda'_{\max} = \alpha_{\lambda} \times \lambda_{\max}. \quad (5)$$

式中 α_G , α_{γ} 和 α_{λ} 分别为初始剪切模量、参考剪应变和最大阻尼比的温度修正系数; G'_{\max} , γ'_r 和 λ'_{\max} 分别为负温下的初始剪切模量、参考剪应变和最大阻尼比; G_{\max} , γ_r 和 λ_{\max} 分别为室温下初始剪切模量、参考剪应变和最大阻尼比。参考剪应变的物理含义是剪切模量下降到初始值的 $1/2$ 时对应的剪应变^[16], 它反映了曲线变化速率的快慢。

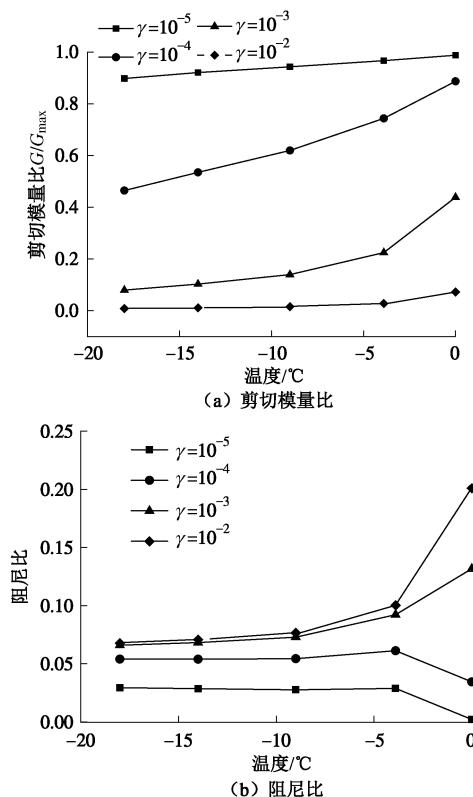


图 9 黏土不同剪应变幅值下 G/G_{\max} 与阻尼比随负温变化情况

Fig. 9 Variation of G/G_{\max} and damping ratio of clay with negative temperature under different shear strain amplitudes

表 2 不同温度下黏土模量比与阻尼比曲线参数

Table 2 Parameters of modulus ratio and damping ratio curves of clay under different temperatures

温度 / $^{\circ}\text{C}$	G_{\max} /MPa	γ_r	λ_{\max}	n
-18	2690.34	0.000086	0.068	0.37
-14	2607.56	0.000114	0.071	0.36
-9	2466.69	0.000162	0.077	0.36
-3.9	1415.70	0.000290	0.101	0.37
室温 (15°C~25°C)	47.87	0.000781	0.210	0.94

将式 (3) ~ (5) 代入式 (1)、(2) 中, 即可得到经过不同负温下土的剪切模量和阻尼比非线性曲

线。

根据表2数据, 对温度修正系数采用如下公式进行拟合:

$$\alpha = a_1 \left(\frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(T - T_0)/r_1}} + A_2 \right) + a_2 (y_0 + A_0 e^{-T/r_2}), \quad (6)$$

$$\alpha_\lambda = y_0 + A_0 e^{-T/r}, \quad (7)$$

式(6)为 α_G , α_γ 拟合公式, 式(7)为 α_λ 拟合式。两式中, T 为温度($^{\circ}\text{C}$), a_1 为Boltzmann函数分项系数, a_2 为指数函数分项系数。 A_1, A_2, T_0, r_1 为Boltzmann函数的参数, y_0, A_0, r_2 为指数函数的参数。

对式(6)拟合分为3步: ①使用Boltzmann函数对数据点进行最小二乘法拟合, 确定该函数分项的参数; ②使用指数函数对数据点进行最小二乘法拟合, 确定函数分项参数; ③将前两步获得的两个函数乘上系数 a_1, a_2 后相加, 组成新的函数, 使用最小二乘法进行拟合, 确定 a_1, a_2 。

以此得到负温下黏土初始剪切模量、参考剪应变

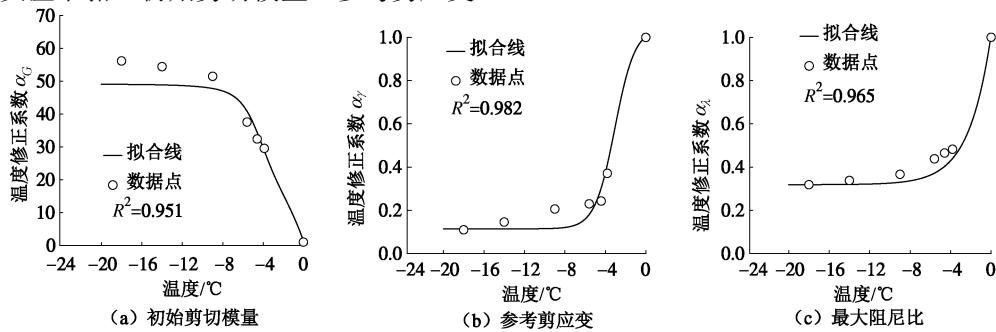


图10 修正系数随温度变化曲线(黏土)

Fig. 10 Correction coefficients vs temperature curves (clay)

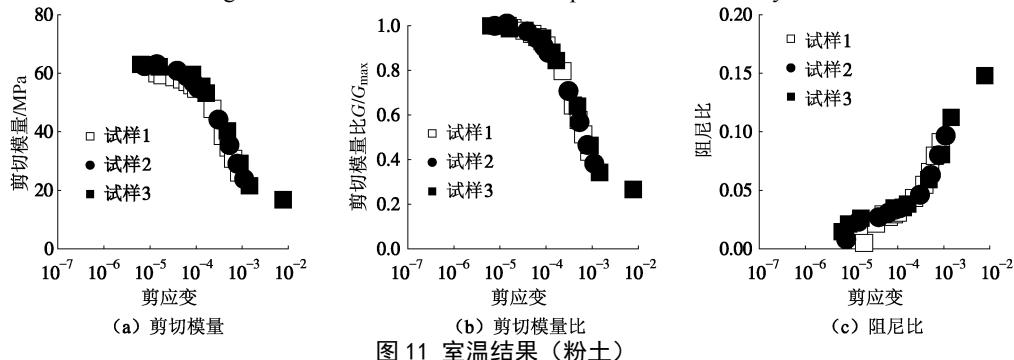


图11 室温结果(粉土)

Fig. 11 Test results at room temperature (silt)

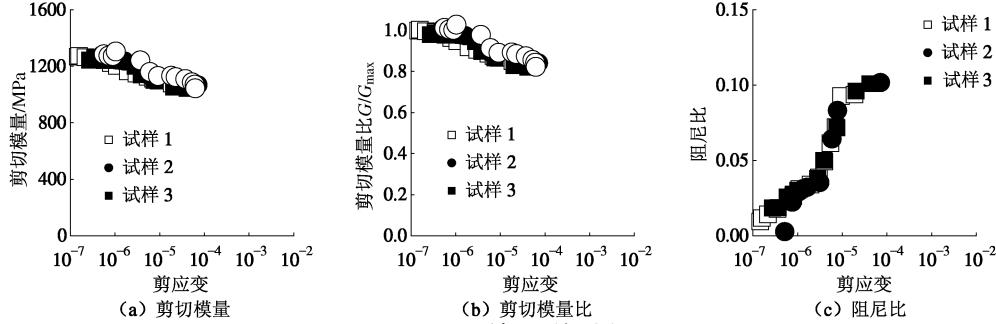


图12 -3°C结果(粉土)

Fig. 12 Test results at -3°C (silt)

和最大阻尼比的修正系数分别为

$$\alpha_G = 0.42 \left(\frac{52.6 - 1.0}{1 + e^{(T + 4.25)/0.96}} + 1.0 \right) + 0.58(43.98 - 43.39 e^{T/2.9}) \quad (T < 0), \quad (8)$$

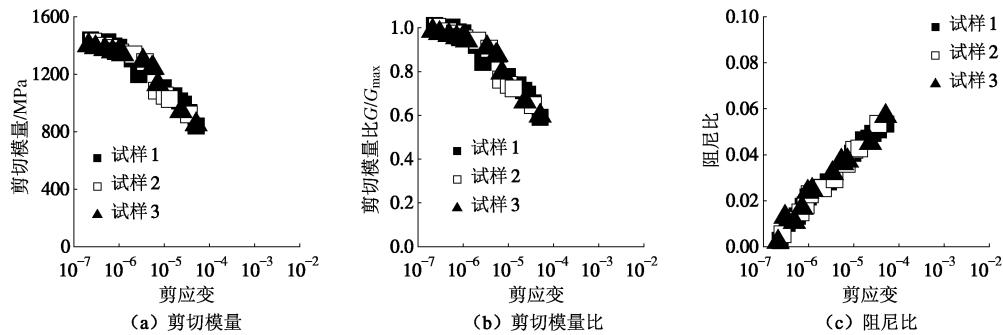
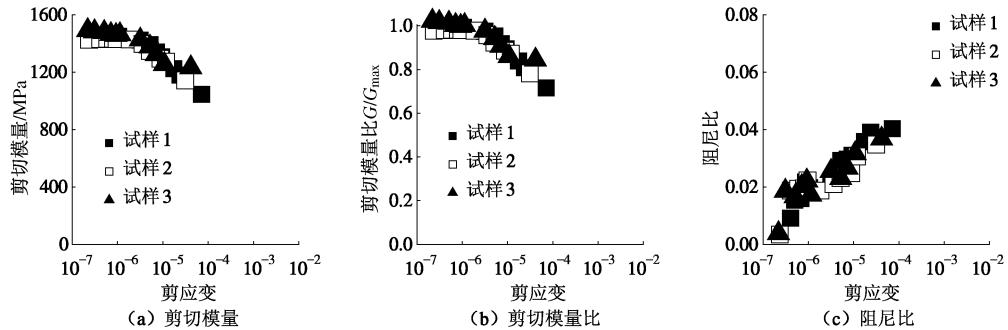
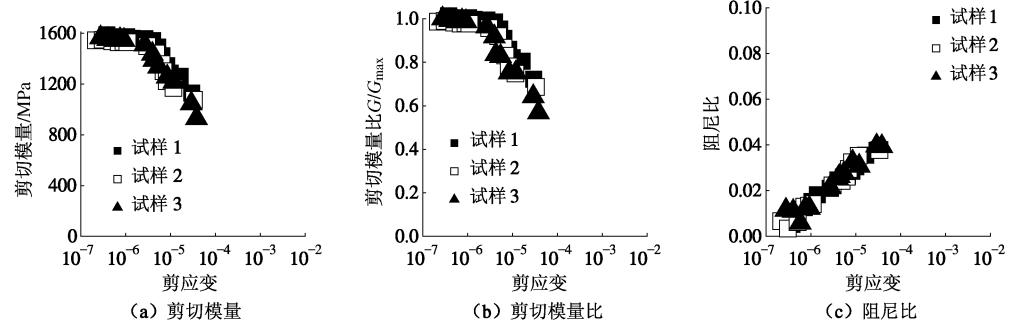
$$\alpha_\gamma = 0.94 \left(\frac{0.11 - 1.0}{1 + e^{(T + 3.07)/0.986}} + 1.0 \right) + 0.1(0.213 + 0.79 e^{T/1.93}) \quad (T < 0), \quad (9)$$

$$\alpha_\lambda = 0.32 + 0.69 e^{T/2.18} \quad (T < 0). \quad (10)$$

式(8)~(10)的曲线形式如图10。由图10可见, 3个修正系数随温度降低首先是快速变化, 之后趋于平缓。快速变化与平缓变化的转折点温度约为-6°C。

4 粉土试验结果和温度修正系数

对粉土进行了室温及多个负温下的共振柱试验, 每一温度下进行了3组平行试验。图11~15给出了-3°C, -5°C, -10°C, -15°C和室温($15^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$)的试验结果。

图 13 -5°C 结果 (粉土)Fig. 13 Test results at -5°C (silt)图 14 -10°C 结果 (粉土)Fig. 14 Test results at -10°C (silt)图 15 -15°C 结果 (粉土)Fig. 15 Test results at -15°C (silt)

采用与黏土同样的拟合方式, 得到不同温度下冻结粉土模量比与阻尼比曲线如图 16, 图中曲线参数见表 3。从图 16 可见, 粉土与黏土不同温度下冻结粉土模量比与阻尼比曲线表现相似。

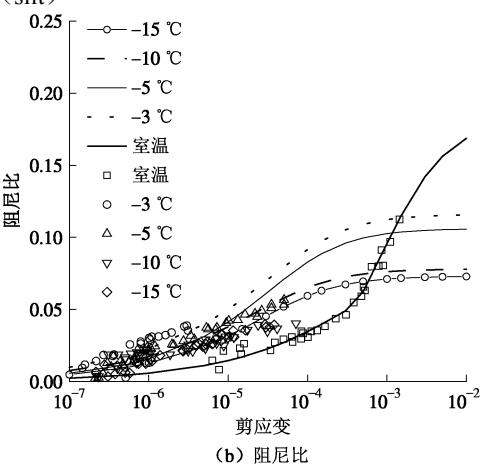
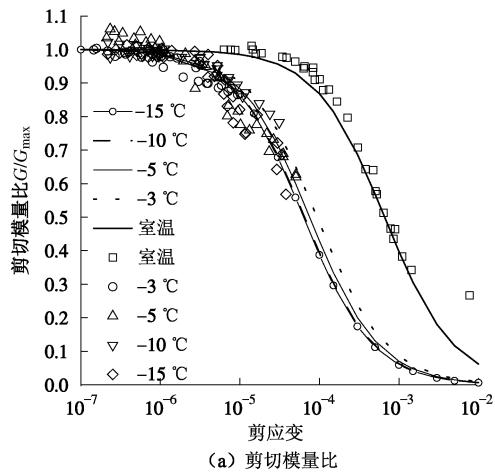


图 16 不同温度下粉土模量比与阻尼比非线性曲线

Fig. 16 Nonlinear curves of modulus ratio and damping ratio of silt under different temperatures

根据图 16 中 4 个剪应变 ($\gamma = 10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}$) 处的剪切模量比与阻尼比, 绘制图 17。图 17(a)

表明, 随温度下降, 在 $-5^{\circ}\text{C} \sim 0^{\circ}\text{C}$ 之间, G/G_{\max} 下降剧烈, 低于一定温度后变化变缓, 这在 $10^{-5} \sim 10^{-3}$ 之间较明显; 图 17 (b) 中从常温进入负温时, 阻尼比先上升, 随后可见阻尼比随温度降低而降低的情况。

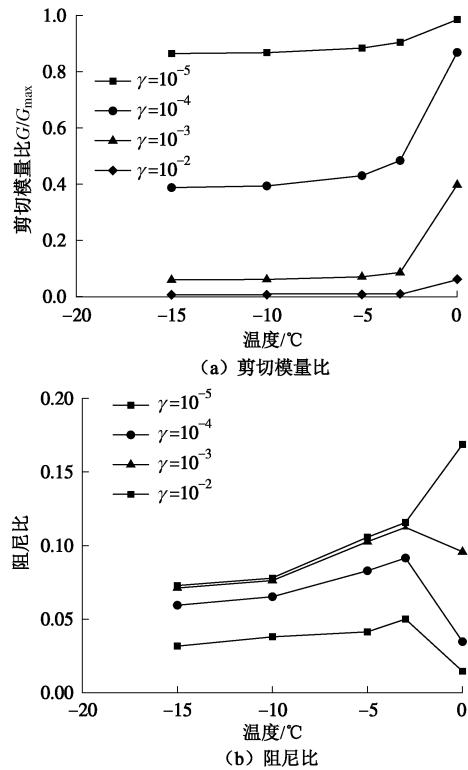


图 17 粉土不同剪应变幅值下 G/G_{\max} 与阻尼比随负温变化情况
Fig. 17 Variation of G/G_{\max} and damping ratio of silt with negative temperature under different shear strain amplitudes

表 3 不同温度下冻结粉土模量比与阻尼比曲线参数

Table 3 Parameters of modulus ratio and damping ratio curves of frozen silt under different temperatures

温度/°C	G_{\max}/MPa	γ_r	λ_{\max}	n
-15	1539.2	0.0000631	0.073	0.42
-10	1467.4	0.0000667	0.078	0.36
-5	1341.8	0.0000752	0.106	0.44
-3	1238.4	0.0000935	0.116	0.36
室温 (15°C ~ 25°C)	64.2	0.0006600	0.183	0.60

使用式 (6)、(7) 对表 3 的数据进行拟合, 得到负温下粉土初始剪切模量、参考剪应变和最大阻尼比

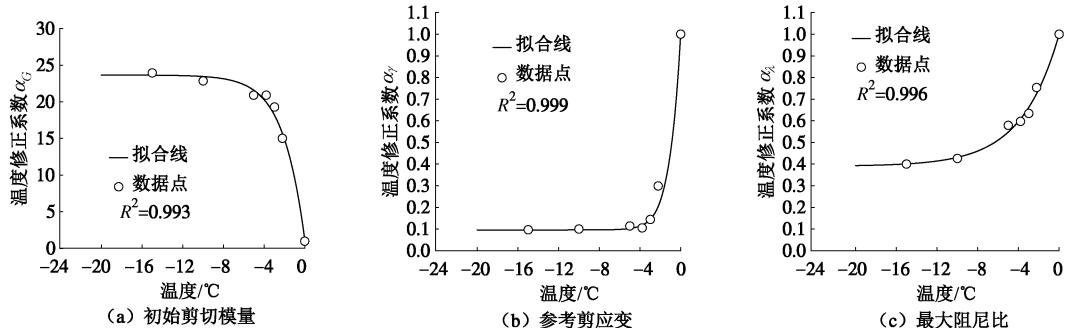


图 18 修正系数随温度变化曲线 (粉土)
Fig. 18 Correction coefficients vs. temperature curves (silt)

的修正系数分别为

$$\alpha_G = 0.017 \cdot \left(\frac{23.981 - 1.0}{1 + e^{(T+1.784)/0.843}} + 1.0 \right) + 0.97 \cdot (23.975 - 22.975e^{T/2.111}) \quad (T < 0), \quad (11)$$

$$\alpha_\gamma = 0.04 \cdot \left(\frac{0.096 - 1.0}{1 + e^{(T+1.58)/0.422}} + 1.0 \right) + 0.962 \cdot (0.096 - 0.904e^{T/1.03}) \quad (T < 0), \quad (12)$$

$$\alpha_\lambda = 0.39 + 0.61e^{T/3.7} \quad (T < 0). \quad (13)$$

式 (11) ~ (13) 的曲线形式如图 18。冻结粉土修正系数曲线与冻结黏土的相似, 仅在数值上有不同, 快速变化与平缓变化转折点约为 -4°C 。

5 砂土试验结果和温度修正系数

本文对砂土进行了室温及 -11°C , -15°C 和 -18°C 等多个温度的共振柱试验, 每个温度进行了 3 组平行试验。文中列出 -1.3°C , -11°C , -15°C , -18°C 和室温 ($15^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$) 的结果, 见图 19~23。

采用与黏土同样的拟合方式, 得到结果见图 24 与表 4, 其中表 4 是图 24 中的曲线参数。由图 24 可见, 负温与常温曲线的差异与冻结黏土规律相似。

与黏土和粉土相似, 根据图 24 绘制图 25。图 25 (a) 可见随温度下降, G/G_{\max} 先是剧烈下降, 之后变化趋缓, 这在剪应变 $\gamma = 10^{-5}$ 到 $\gamma = 10^{-3}$ 之间较明显; 图 25 (b) 中从常温降到负温时, 阻尼比先上升, 之后随着负温的降低, 阻尼比下降, 但超过 10^{-3} 大应变幅值时的阻尼比则是一直随温度降低而下降。

根据表 4, 使用式 (6)、(7) 对砂土温度修正系数进行拟合, 得到负温下砂土初始剪切模量、参考剪应变和最大阻尼比的修正系数分别为

$$\alpha_G = 0.25 \cdot \left(\frac{15.72 - 1.0}{1 + e^{(T+2.116)/1.136}} + 1.0 \right) + 0.74 \cdot (12.24 - 11.83e^{T/1.47}) \quad (T < 0), \quad (14)$$

$$\alpha_\gamma = 0.8 \cdot \left(\frac{0.047 - 1.0}{1 + e^{(T+0.46)/0.18}} + 1.0 \right) + 0.3 \cdot (0.022 + 0.813e^{T/0.608}) \quad (T < 0), \quad (15)$$

$$\alpha_\lambda = 0.588 + 0.412e^{T/4.233} \quad (T < 0). \quad (16)$$

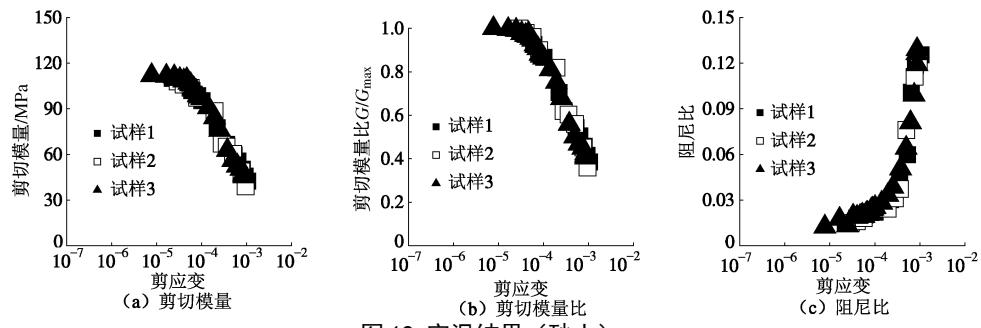
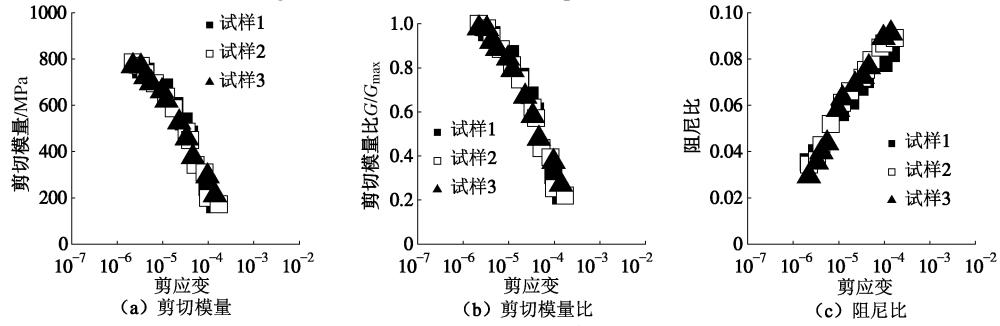
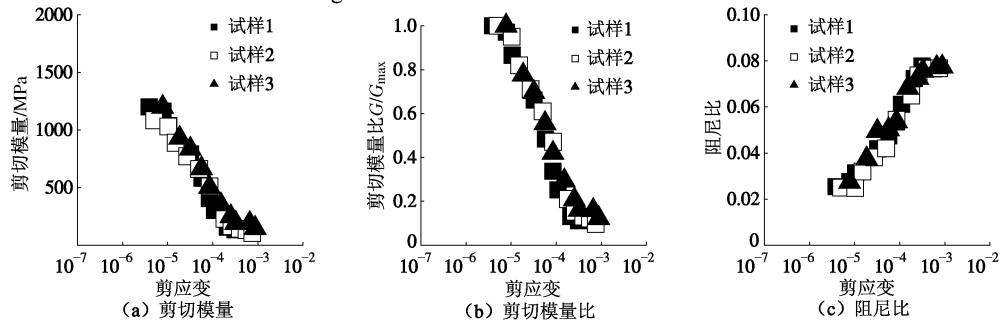
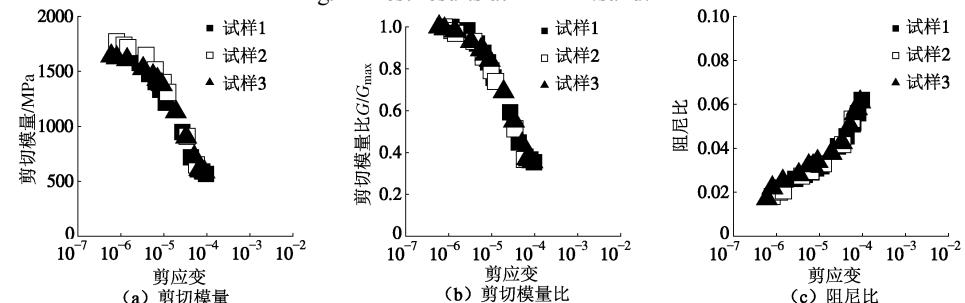
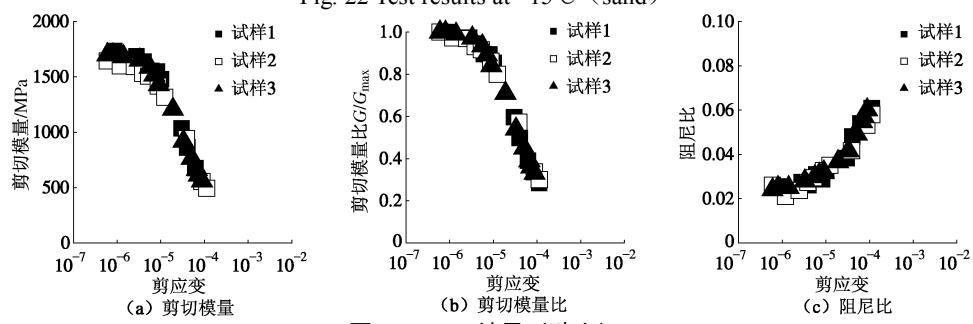


图 19 室温结果 (砂土)

Fig. 19 Test results at room temperature (sand)

图 20 -1.3°C 结果 (砂土)Fig. 20 Test results at -1.3°C (sand)图 21 -11°C 结果 (砂土)Fig. 21 Test results at -11°C (sand)图 22 -15°C 结果 (砂土)Fig. 22 Test results at -15°C (sand)图 23 -18°C 结果 (砂土)Fig. 23 Test results at -18°C (sand)

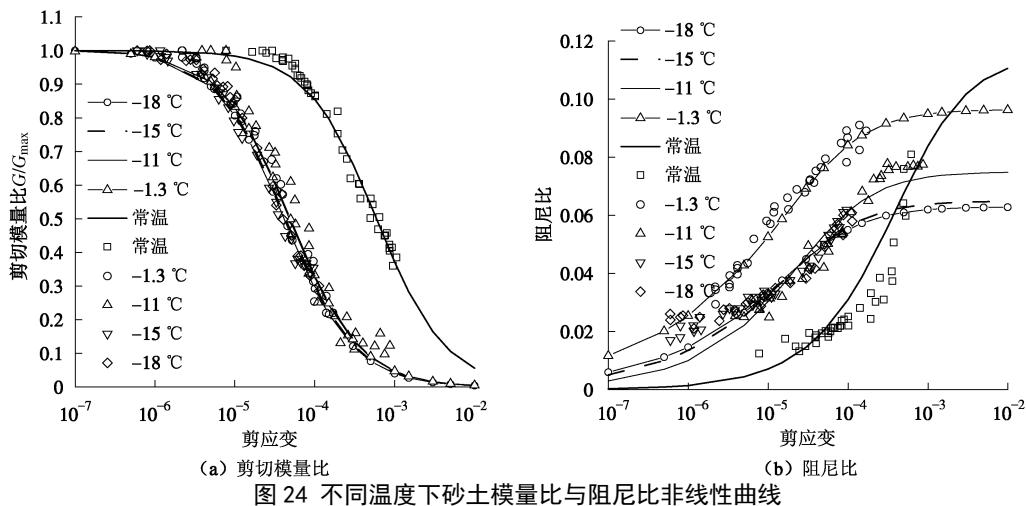


图 24 不同温度下砂土模量比与阻尼比非线性曲线

Fig. 24 Nonlinear curves of modulus ratio and damping ratio of sand under different temperature

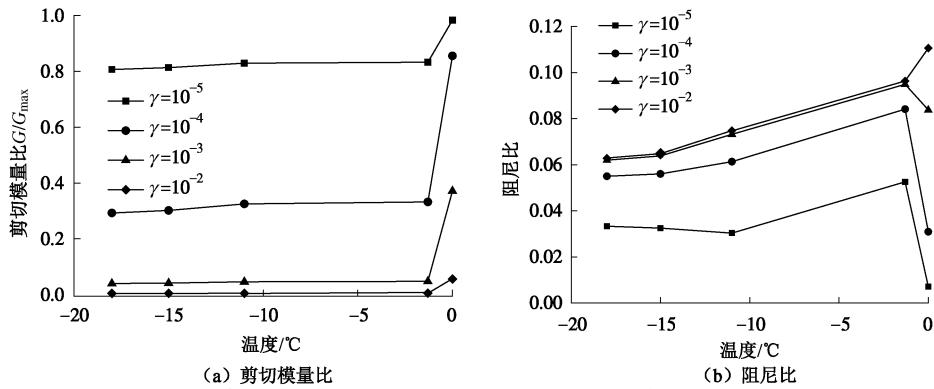
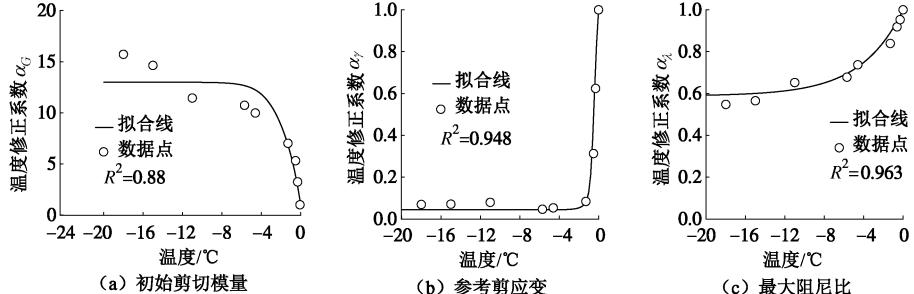
图 25 砂土不同剪应变幅值下 G/G_{\max} 与阻尼比随负温变化情况Fig. 25 Variation of G/G_{\max} and damping ratio of sand with negative temperature under different shear strain amplitudes

图 26 修正系数随温度变化曲线 (砂土)

Fig. 26 Correction coefficients vs. temperature curves (sand)

表 4 不同温度下砂土模量比与阻尼比曲线参数

Table 4 Parameters of modulus ratio and damping ratio curves of frozen sand under different temperatures

温度/°C	G_{\max} /MPa	γ_r	λ_{\max}	n
-18	1760.25	0.000041	0.063	0.39
-15	1638.54	0.000042	0.065	0.42
-11	1281.56	0.000047	0.075	0.52
-1.3	785.77	0.000049	0.096	0.32
室温 (15°C~25°C)	112.00	0.000590	0.115	0.68

式(14)~(16)的曲线形式如图26。冻结砂土修正系数曲线形式与冻结黏土和粉土相似, 仅在数值上有不同, 其中图26变化迅速与变化平稳的转折点约为-2°C。

6 3种典型土类温度修正系数的对比

将黏土、粉土和砂土温度修正系数曲线统一绘于图27。图27可见, 3种土类的初始剪切模量、参考剪应变和最大阻尼比修正系数都首先随温度降低(在0°C~~-6°C之间)快速变化, 之后趋于平缓, 但变化的大小和最后高低次序则与土类和参数类型有关。

图27(a)表明, 3种土类初始剪切模量修正系数都随温度降低而有很大增加, 但增大幅度有很大不同, 由大到小顺序为黏土、粉土和砂土, 分别为常温初始模量的50倍、25倍和13倍。图27(b)表明, 3种土类参考剪应变修正系数随温度降低而下降, 快速下降段降低速率由快至慢次序为砂土、粉土和黏土, 但

3 种土类最终修正系数大小趋于一致, 说明完全冻结后, 3 种土的动剪切模量衰减速率接近。图 27 (c) 表明, 阻尼比修正系数随温度下降而减小, 快速下降段降低速率大小次序为黏土、粉土和砂土, 最终降低量大小次序也为黏土、粉土和砂土, 即负温下黏土最大阻尼比降幅最大, 砂土降幅最小, 粉土居中。本文认为, 无黏性土的阻尼产生机制主要是土颗粒之间的咬合摩擦, 冻结下砂颗粒间毛细水模量增大不显著, 阻尼比降低也不显著; 黏土中有黏粒, 结合水较多, 结合水膜间的咬合摩擦接触是阻尼机制之一, 冻结下模量增大显著, 阻尼比降低也显著。

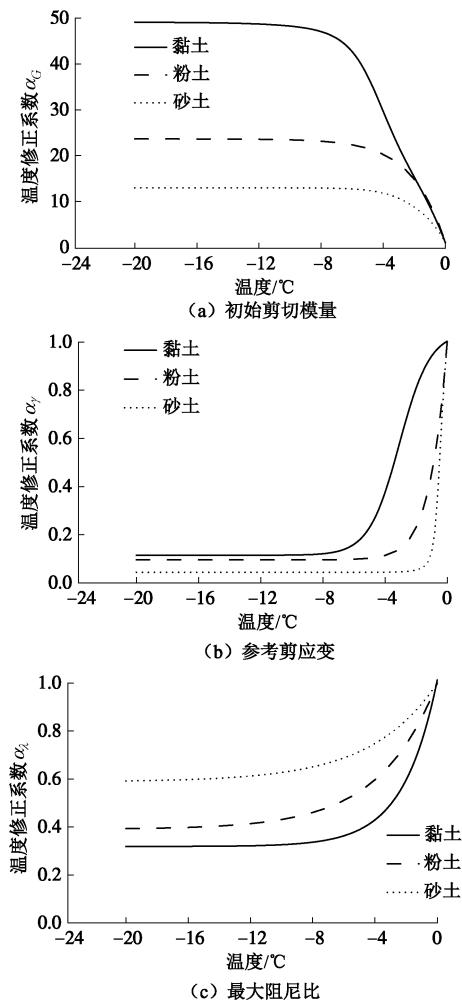


图 27 3 种典型土类温度修正系数曲线对比

Fig. 27 Comparison of temperature correction coefficients curves of three typical soils

7 与他人成果比较

本文总结国内^[4, 9, 11-12, 17-19]冻土动三轴仪模量试验成果, 将各文献提供的数据整理如图 28, 需注意的是, 因为各文献中没有提供常温下的结果, 所以无法如本文一样讨论常温与负温结果的对比问题。图 28 中, 对于风火山黏土、中砂和青藏黏土, 不同负温下并没有明确的变化规律; 黄土和北麓河黏土则呈现温

度下降曲线往大应变方向移动规律; 粉土则几乎没有变化。可以看出, 本文得到的“参考剪应变随着温度降低而减小(随温度降低模量比曲线往小应变方向移动)”这一规律在图 28 中并没有体现。本文认为, 以往没有得到统一规律的原因主要是仪器问题。采用动三轴仪进行模量试验, 即使对于常温土保证精度尚且不易, 更何况是冻土, 冻土试验技术远没有常温土成熟。

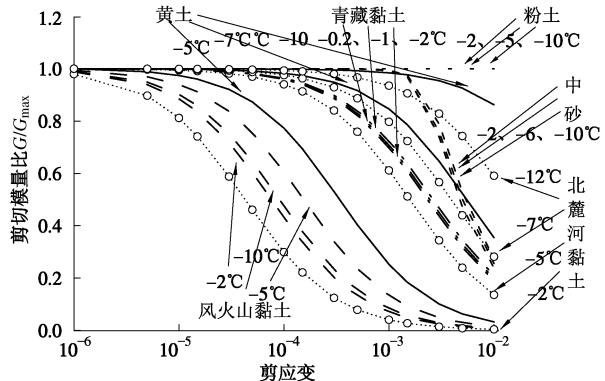


图 28 国内现有动三轴仪不同负温下动剪切模量非线性曲线结果汇总

Fig. 28 Summary of nonlinear curves of dynamic shear moduli conducted by existing dynamic triaxial apparatus under varying negative temperatures in China

Al-Hunaidi 等对蒙特利尔原状冻结黏土试样进行了低温共振柱试验^[14], 试验仪器为置于低温条件下(-9 °C)的共振柱仪。Al-Hunaidi 等在相邻钻孔钻取了两个原状试样(试样编号分别为 BH21 与 BH31), 根据试样的埋深, 试验围压使用 14 kPa, 首先在-9 °C 环境下完成冻土共振柱试验, 然后将试样在 22 °C 环境中放置 4 d 充分融化, 再对融化后的试样进行共振柱试验。本文将其融化条件作为常温结果, 用双曲线对其数据进行拟合, 得到剪切模量比与阻尼比曲线, 见图 29, 图中离散点为原文数据, 实线与虚线为本文拟合结果。从图 29 可见, 与常温相比, 未冻结试样的模量比曲线高于冻结情况, 未冻结试样的阻尼比曲线在 10^{-4} 应变之前低于冻结试样的阻尼比曲线, 然后逐渐增长超过冻结试样的阻尼比曲线, 这些与本文结果定性相符。但 Al-Hunaidi 的试验数据仅有 3 个, 且分布在 $10^{-7} \sim 5 \times 10^{-5}$ 范围内, 而本文共振柱试验数据应变范围为 $10^{-7} \sim 10^{-4}$, 因而给出的结果更为可靠。另外, 本文进行了 3 种土类的试验, 而 Al-Hunaidi 的成果仅针对黏土, 无法得知不同土类负温下动力特性的区别和联系。

Simonsen 等在不同温度下采用大三轴仪对新罕布什尔州路基土弹性模量进行了研究^[20], 本文将其试验数据进行整理, 示于图 30。同本文图 27 (a) 结果类似, Simonsen 等得到的冻结土的模量远高于常温情况, 冻结黏土模量放大倍数高于无黏性土, 其中黏土为 116 倍, 砾石土为 11 倍。同时, Simonsen 等得到土的弹性模量随负温增加快速增大的表现也与本文类

似, 只是其试验负温仅到-10°C, 黏土还未有十分显著的渐进状态, 而本文的试验到-20°C, 因此本文黏土结果渐进状态表现得更为清晰。不同之处在于, Simonsen 等得到的冻结黏土的模量是常温下的 116 倍 (25 MPa 上升到 2900 MPa), 远高于本文的 50 倍 (47 MPa 上升到 2350 MPa)。笔者分析认为, Simonsen 试验用的黏土较为特殊, 其密度为 1988 kg/m³, 弹性模量为 25 MPa, 相当于剪切波速 69 m/s (泊松比取 0.3), 此波速的黏土过软, 不具一般性。

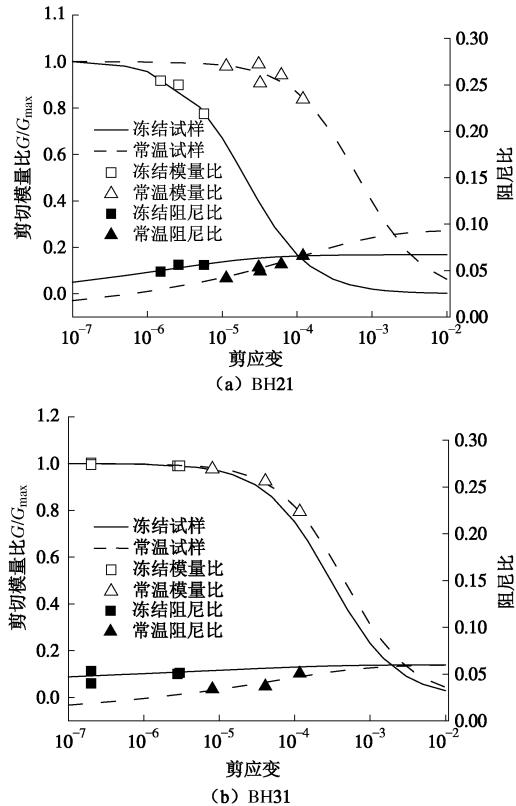


图 29 Al-Hunaidi 等给出的原状冻土与常温土动剪切模量比和阻尼比非线性曲线对比

Fig. 29 Nonlinear curves of dynamic shear modulus ratio and damping ratio of undisturbed frozen and normal temperature soils (by Al-Hunaidi, et al)

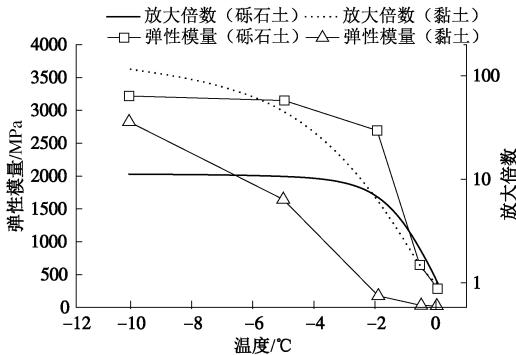


图 30 Simonsen 等给出的两种土类负温下弹性模量和放大倍数

Fig. 30 Elastic moduli and magnification of two soils under negative temperature (by Simonsen, et al)

关于不同土类负温下阻尼比变化规律的成果目前尚少, 本文是第一次给出。

8 结 论

(1) 无论是黏土、粉土或砂土, 负温对其初始剪切模量、剪切模量比和最大阻尼比都有重要影响。3 种土类的初始剪切模量、参考剪应变和最大阻尼比都首先随温度降低而快速变化, 0°C~ -6.0°C 为敏感段, 之后趋于平缓; 3 种土类的初始剪切模量、参考剪应变和最大阻尼比修正系数按 Boltzmann 函数和指数函数组合变化, 但变化程度则与土类有关。

(2) 3 种土类初始剪切模量随温度降低都有十分显著的增大, 但增大幅度有很大不同, 相对常温情况, 完全冻结黏土、粉土和砂土初始剪切模量分别为常温的 50 倍、25 倍和 13 倍。在 0°C~ -6.0°C 的快速上升段内, 上升速率大小和上升程度由高到低依次为黏土、粉土和砂土。

(3) 3 种土类参考剪应变随温度降低都有十分显著的下降, 意味着 3 种土类冻结情况的剪切模量比曲线较常温情况下都有显著降低。在 0°C~ -6.0°C 的快速下降段内, 降低速率大小次序为砂土、粉土和黏土, 但 3 种土类最终降低程度相差不大, 说明完全冻结后 3 种土的动剪切模量衰减程度接近。

(4) 3 种土类最大阻尼比随温度下降都有显著减小, 在 0°C~ -6.0°C 快速下降段, 降低速率和下降程度大小次序为黏土、粉土和砂土, 即完全地冻结后黏土最大阻尼比降幅最大, 砂土降幅最小, 粉土居中。

(5) 本文提出的 3 种典型土类负温下动剪切模量阻尼比修正公式, 虽然缺乏可与之直接对比的已有成果, 但其反映的物理规律和现象与国际上近期成果定性相符。

本文针对的是饱和度较高的黏土、粉土和砂土, 而含水量对冻土动力学性能的影响可能会很大, 对本文公式的改进需要更多试验研究。

参考文献:

- [1] 马 巍, 王大雁. 中国冻土力学研究 50 a 回顾与展望[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(4): 625~640. (MA Wei, WANG Da-yan. Studies on frozen soil mechanics in China in past 50 years and their prospect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(4): 625~640. (in Chinese))
- [2] 陈龙伟, 袁晓铭, 孙 锐. 2011 年新西兰 Mw6.3 地震液化及岩土震害评述[J]. 世界地震工程, 2013, 29(3): 1~9. (CHEN Long-wei, YUAN Xiao-ming, SUN Rui. Review of liquefaction phenomena and geotechnical damage in the 2011 New Zealand Mw6.3 earthquake[J]. World Earthquake Engineering, 2013, 29(3): 1~9. (in Chinese))
- [3] 陈卓识, 孟上九, 袁晓铭. 中等强度地震下季冻区场地响

- 应影响研究[J]. 土木工程学报, 2013, **46**(增刊 1): 166 - 171. (CHEN Zhuo-shi, MENG Shang-jiu, YUAN Xiao-ming. The impact of parameters in seasonal frozen area response under moderate intensity earthquake[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, **46**(S1): 166 - 171. (in Chinese))
- [4] 徐学燕, 仲丛利, 陈亚明, 等. 冻土的动力特性研究及其参数确定[J]. 岩土工程学报, 1998, **20**(5): 77 - 81. (XU Xue-yan, ZHONG Cong-li, CHEN Ya-ming, et al. Research on dynamic characters of frozen soil and determination of its parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, **20**(5): 77 - 81. (in Chinese))
- [5] XIONG Feng, YANG Zhao-hui, XU Gang. Seasonally frozen soil effects on the dynamic behavior of building structures[C]// 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing, 2008.
- [6] 袁晓铭, 孙 锐, 孙 静, 等. 常规土类动剪切模量比和阻尼比试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2000, **20**(4): 133 - 139. (YUAN Xiao-ming, SUN Rui, SUN Jing, et al. Laboratory experimental study on dynamic shear modulus ratio and damping ratio of soils[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, **20**(4): 133 - 139. (in Chinese))
- [7] 陈国兴, 谢君斐, 张克绪. 土的动模量和阻尼比的经验估计[J]. 地震工程与工程振动, 1995, **15**(1): 73 - 83. (CHEN Guo-xing, XIE Jun-fei, ZHANG Ke-xu. The empirical evaluation of soil moduli and damping ratio for dynamic analysis[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1995, **15**(1): 73 - 83. (in Chinese))
- [8] 孙 静, 袁晓铭. 土的动模量和阻尼比研究述评[J]. 世界地震工程, 2003, **19**(1): 88 - 95. (SUN Jing, YUAN Xiao-ming. A state of art of research on dynamic modulus and damping ratio of soils[J]. World Earthquake Engineering, 2003, **19**(1): 88 - 95. (in Chinese))
- [9] 徐学燕, 仲丛利. 冻土动弹模、动泊桑比的确定[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1997, **30**(4): 23 - 28. (XU Xue-yan, ZHONG Cong-li. The determination of dynamic elastic modulus and dynamic poisson's ratio of frozen soil[J]. Journal of Harbin University of CE & Architecture, 1997, **30**(4): 23 - 28. (in Chinese))
- [10] 齐吉琳, 马 巍, 孙崇绍, 等. 张掖地区季节冻土场地上地震动效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(12): 2082 - 2088. (QI Ji-ling, MA Wei, SUN Chong-shao, et al. Seismic response analysis of seasonally frozen ground of Zhangye area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(12): 2082 - 2088. (in Chinese))
- [11] 朱占元. 青藏铁路列车行驶多年冻土地基振动反应与振陷预测[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009: 26 - 40. (ZHU Zhan-yuan. Train-induced vibration response and subsidence prediction of permafrost subgrade along Qinghai-Tibet railway[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009: 26 - 40. (in Chinese))
- [12] 张 锋. 深季节冻土区重载汽车荷载下路基动力响应与永久变形[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012: 31 - 58. (ZHANG Feng. Dynamic response and permanent of subgrade influenced by heavy truck load in deep seasonally frozen region[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012: 31 - 58. (in Chinese))
- [13] SHAN Wei, JIANG Hua, HU Zhao-guang, et al. Island permafrost degrading process and deformation characteristics of expressway widen subgrade foundation[J]. Disaster Advances, 2012, **5**(4): 1291 - 1296.
- [14] AL-HUNAIDI M O, CHEN P A, RAINER J H, et al. Shear moduli and damping in frozen and unfrozen clay by resonant column test[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, **33**: 510 - 514.
- [15] GB/T50123—1999 土工试验方法标准[S]. 1999. (GB/T50123—1999 Standard of soil test method[S]. 1999. (in Chinese))
- [16] 迟世春, 陈崇茂, 贾宇峰. 心墙土料的动力参考剪应变[J]. 水力发电学报, 2013, **32**(2): 223 - 227. (CHI Shi-chun, CHEN Chong-mao, JIA Yu-feng. Dynamic reference shear strain for core wall materials in earth dams[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, **32**(2): 223 - 227. (in Chinese))
- [17] 何 平, 朱元林, 张家懿, 等. 饱和冻结粉土的动弹模与动强度[J]. 冰川冻土, 1993, **15**(1): 170 - 174. (HE Ping, ZHU Yuan-lin, ZHANG Jia-yi, et al. Dynamic elastic modulus and dynamic strength of saturated frozen silt[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1993, **15**(1): 170 - 174. (in Chinese))
- [18] 罗 飞, 赵淑萍, 马 巍, 等. 分级加载下冻土动弹性模量的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(5): 849 - 855. (LUO Fei, ZHAO Shu-ping, MA Wei, et al. Experimental study on dynamic elastic modulus of frozen soils under stepped axial cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(5): 849 - 855. (in Chinese))
- [19] 吴志坚, 王兰民, 马 巍. 地震荷载作用下冻土的动力学参数试验研究[J]. 西北地震学报, 2003, **25**(3): 210 - 214. (WU Zhi-jian, WANG Lan-ming, MA Wei. Laboratory study on dynamics parameters of frozen soil under seismic dynamic loading[J]. Northwestern Seismological Journal, 2003, **25**(3): 210 - 214. (in Chinese))
- [20] SIMONSEN E, JANOO V, ISACSSON U. Resilient Properties of Unbound Road Materials during Seasonal Frost Conditions[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2002, **16**(1): 28 - 50.