

# 土质路堑边坡冻融失稳及植被护坡机理研究

刘红军<sup>1</sup>, 郭颖<sup>2</sup>, 单炜<sup>2\*</sup>, 陶夏新<sup>3</sup>, 孙玉英<sup>4</sup>

(1. 五邑大学, 广东 江门 529020; 2. 东北林业大学, 黑龙江 哈尔滨 150040; 3. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150090;  
4. 黑龙江工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150050)

**摘要:** 依托同三高速公路扩建工程方正—哈尔滨段路基加宽一侧粉砂质黏土路堑边坡, 采用室内三轴实验、现场监测、原位测试等方法, 开展了路堑边坡冻融失稳及植被护坡实验研究。三轴实验结果表明: 在土体含水率小于最佳含水率时, 土体黏聚力随含水率的增加而增大, 超过最佳含水率时, 黏聚力随含水率增加而减小, 在最佳含水率附近达到峰值; 土体内摩擦角随含水率的增加而减小。土体黏聚力随冻融循环次数的增加而降低。现场监测结果表明: 边坡土体冻结的过程中, 水分向冻结锋面迁移; 木本护坡植物要比草皮有明显的吸水作用, 紫穗槐表现的更加明显。现场直剪实验得出: 木本植物根系复合土的抗剪强度比素土的抗剪强度明显增大, 在同一坡面相近位置, 采用紫穗槐和胡枝子护坡时, 其根系复合土的抗剪强度比素土的抗剪强度大 2 倍左右。理论分析表明: 有效地减小坡面荷载, 可增加边坡稳定安全系数。

**关键词:** 路堑边坡; 粉砂质黏土; 冻融; 植物护坡; 根系复合土

中图分类号: U416.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)08-1197-07

**作者简介:** 刘红军(1970-), 男, 黑龙江富锦人, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程与道路工程方面的研究。E-mail: liuhongjun\_0821@163.com。

## Instability of soil cutting slopes caused by freeze-thaw and reinforcement mechanism by vegetation

LIU Hong-jun<sup>1</sup>, GUO Ying<sup>2</sup>, SHAN Wei<sup>2</sup>, TAO Xia-xin<sup>3</sup>, SUN Yu-ying<sup>4</sup>

(1. Wuyi University, Jiangmen 529020, Guangdong; 2. Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 3. Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 4. Heilongjiang Institute of Technology, Harbin 150050, China)

**Abstract:** Based on the silty clay slope in the expansion project from Fangzheng to Harbin along Tongjiang-Sanya Highway, using triaxial shear tests, field monitoring and in-situ test method, the mechanism of slope instability caused by freeze-thaw and the reinforcement by vegetation are studied. Triaxial test results show that when the soil water content is less than the optimum water content, the soil cohesion increases with the increase of moisture. The soil cohesion decreases with the increase of moisture when the soil water content is larger than the optimum water content. The peak value is near the optimum water content. The internal friction angle of soil decreases with the increases of moisture. Soil cohesion decreases with the increase of times of freeze-thaw cycles. Field monitoring results indicate that during the process of soil freezing, moisture migrates to the frozen zone. The effect of absorbing water of woody plants is more obvious than that of turf, especially for *Amorpha*. In-situ direct shear tests show that the shear strength of the soil with woody root is larger than that of the soil without root. In the similar location of the same slope, where *Amorpha fruticosa* and *Lespedeza* are planted, the shear strength of the soil with woody root is three times that of the soil without root. Theoretical analysis shows that it can effectively reduce the slope loading so as to strengthen the safety factor of slope stability.

**Key words:** cutting slope; silty clay; freeze-thaw; slope reinforcement by vegetation; soil with woody root

## 0 引言

在中国东北季节性冻土地区, 公路土质路堑边坡坡面经常发生浅层失稳滑坡现象<sup>[1-2]</sup>。其原因大多为在冻结的过程中边坡土体水分向冻结锋面迁移, 坡面浅层局部土体含水率增加, 在负温作用下, 发生坡面浅

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(50538030); 交通部科技项目(2002 353 323 10); 黑龙江省科技攻关项目(GZ07C401); 国际滑坡研究计划项目(IPL-132)

**收稿日期:** 2010-06-29

\*通讯作者

层土体冻胀。土体的冻胀改变了土体颗粒间的结构联结、排列方式,从而改变土的力学性质<sup>[3]</sup>。在春融期,受大气降水和气温升高等综合因素的影响,冻结在边坡坡面和坡体浅层的冻结层融化,冻土融化水分在向下渗透的过程中,受到未融化冻结层的阻碍,融化层与冻结层结合面含水率迅速增高,土体达到饱和或过饱和状态,坡体内部有效应力降低,在重力作用下,坡体浅层局部或整体沿着融化层与冻结层结合面下滑<sup>[4]</sup>。

对冻土斜坡的稳定性研究较早<sup>[5-7]</sup>,但研究成果主要在高原多年冻土区<sup>[8-10]</sup>。季节性冻土与多年冻土边坡失稳机理存在差异,表现为温差变化较大和反复的冻融循环影响,具有明显的季节性特征。目前,采用室内实验模拟<sup>[11]</sup>、建立植物根系的吸水模型<sup>[12]</sup>、植物根系—土体的相互作用力学模型<sup>[13]</sup>等多种手段,对植被护坡机理进行了研究,但均没有考虑边坡土体冻融这一因素的影响。依托同三高速公路扩建工程方正至哈尔滨段,在路基加宽一侧 K560+000—K565+690 路段,确立研究区。在研究区范围内,地势起伏变化较大,路堑边坡土质多为分砂质黏土,天然密度为 1.8~2.1 g/cm<sup>3</sup> 之间,路线通过段路堑边坡坡高在 5~15 m、设计边坡坡率为 1.5~1.75。图 1 为同三公路 K560+450 段路堑边坡滑塌前后照片。



图 1 同三公路 K560+450 段路堑边坡滑塌前后照片

Fig. 1 Photos of cutting slope of Tongzhi-Sanya Highway K560+450 before and after collapsing

通过现场调查、边坡浅层含水率和地温变化监测、土体物理力学指标室内实验、护坡植物根系复合土现场直剪实验,研究边坡土体物理力学指标随含水率和冻融次数变化关系,探索护坡植物对冻融过程中土体含水率变化的影响规律,以及护坡植物根系复合土对坡面浅层加固作用的力学机理。

## 1 冻融对边坡土体抗剪强度指标影响的实验研究

现场调查和实测证实,边坡土体冻融失稳的主要原因是冻结过程中水分通过毛细作用向边坡浅层冻结锋面积聚,融化过程中造成边坡土体局部含水率增大,引起坡面土体抗剪强度指标的变化所致。

为了研究冻融循环次数、含水率及压实度对边坡土体抗剪强度的影响,取边坡粉质黏土,设计 5 种不同含水率和两种压实度,进行了不同冻融循环次数的室内三轴实验,实验研究结果见图 2~5。

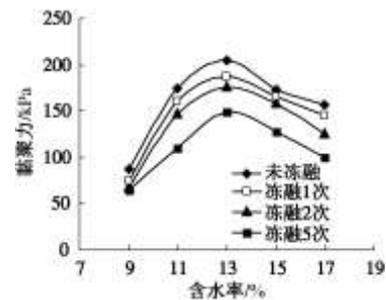


图 2 95%压实度土体冻融前后黏聚力与含水率关系曲线

Fig. 2 Relationship curves between soil cohesion and moisture content before and after freeze-thaw with soil compaction of 95%

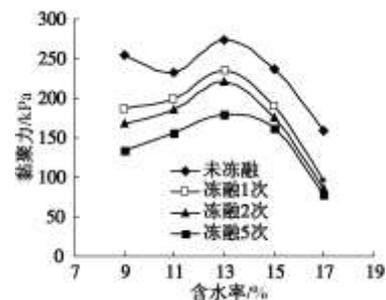


图 3 97%压实度土体冻融前后黏聚力与含水率关系曲线

Fig. 3 Relationship curves between soil cohesion and moisture content before and after freeze-thaw with soil compaction of 97%

### 1.1 冻融和含水率变化对土体黏聚力影响的实验研究

图 2, 3 分别为压实度 95%、97% 的粉砂质黏土重塑土样在不同的冻融循环次数下含水率与土的黏聚力之间的关系曲线。由图 2, 3 可见,土体含水率接近最佳含水率时(标准重型击实实验确定该粉质黏土最大干密度 1.90 g/cm<sup>3</sup>、最佳含水率 13.0%),黏聚力出现峰值。土体的黏聚力随冻融循环次数的增加而逐渐减小,土体的压实度越大,黏聚力减小的越明显。压实度为 95% 时,当含水率在最佳含水率时,土体经过 1, 2, 5 次冻融循环后,与没有经过冻融循环相比较,黏聚力分别减少了 18 kPa, 30 kPa 和 56 kPa; 压实度为 97% 时,当含水率在最佳含水率时,土体经过 1, 2, 5 次冻融循环后,与没有经过冻融循环相比较,黏聚力分别减少了 39 kPa, 54 kPa 和 95 kPa。

### 1.2 冻融和含水率变化对土体内摩擦角影响的实验研究

图 4, 5 是压实度分别为 95%, 97% 时粉砂质黏土

重塑土样在不同的冻融循环次数下含水率与内摩擦角之间的关系曲线。由图 4, 5 可见, 土的内摩擦角总体上均随含水率的增加而减小。压实度为 95% 时, 含水率由 9% 增大到 17%, 未冻融、冻融 1 次、冻融 2 次及冻融 5 次, 各自的内摩擦角比含水率为 9% 时, 分别减小了 64%, 47%, 46%, 57%; 压实度为 97% 时, 含水率由 9% 增大到 17%, 未冻融、冻融 1 次、冻融 2 次及冻融 5 次, 各自的内摩擦角比含水率为 9% 时, 分别减小了 84%, 73%, 79%, 86%。

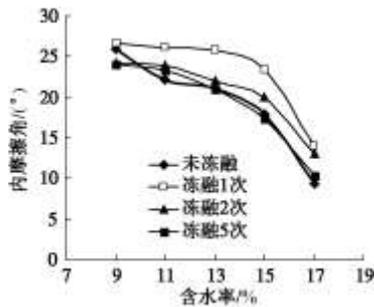


图 4 95% 压实度土体冻融前后内摩擦角与含水率关系曲线

Fig. 4 Relationship curves between soil internal friction and moisture content before and after freeze-thaw with soil compaction of 95%

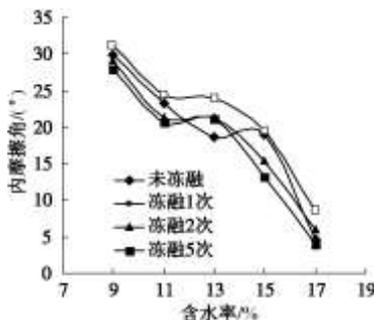


图 5 97% 压实度土体冻融前后内摩擦角与含水率关系曲线

Fig. 5 Relationship curves between soil internal friction and moisture content before and after freeze-thaw with soil compaction of 97%

土体越密实, 随着含水率的增加, 内摩擦角的损失率就越多。土体经过第一次冻融循环后内摩擦角有所增加, 以后随着冻融循环次数的增加在减小, 但经过第二次冻融循环后随着冻融循环次数的增加, 内摩擦角变化的幅值在逐渐减小。

## 2 边坡冻融失稳力学机理分析

现场实测结果表明, 春融期坡面浅层含水率过高是季节性冻土地区土质路堑边坡失稳的主要原因。边坡土体是沿着冻融接触面向下滑移的。在滑坡分类中属于浅层滑坡。其潜在滑动面平行斜坡面, 属于平面滑动面类型, 斜坡滑动面的埋深与长度之比很小, 一般属于无限斜坡类型。

采用有效应力法推导, 得到土质路堑边坡稳定安全系数的表达式为<sup>[9]</sup>

$$F = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{c' + [(1-n)\gamma + n\gamma']h \cos^2 \alpha \tan \phi'}{[(1-n)\gamma + n\gamma_{sat}]h \sin \alpha \cos \alpha} \quad (1)$$

式中,  $n$  为融化层中饱和层厚度与融化层厚度的比值,  $\alpha$  为边坡的坡角,  $c'$ ,  $\phi'$  为土体有效黏聚力和有效内摩擦角,  $h$  为融化层厚度。

根据式 (1) 来进一步讨论计算参数对稳定安全系数大小的影响。

### (1) 黏聚力和内摩擦角的影响

由式 (1) 可知, 边坡的稳定安全系数是随着黏聚力和内摩擦角的增加而增大的。

在春融期, 冻结在边坡内部的含冰土体随气温升高和大气降水而迅速融化, 边坡浅层土体局部可达到饱和或超饱和状态, 孔隙水压力随之增大, 黏聚力和内摩擦角也会随边坡土体内部含水率的变化而变化, 结合室内实验研究结果, 内摩擦角随着含水率的增加而减小, 当含水率超过最佳含水率后, 黏聚力也随着含水率的增加而减小。现场实测结果证实, 土体在没有冻结前含水率处于最佳含水率附近, 融化的土层含水率均大于最佳含水率, 必然使边坡土体稳定安全系数降低, 此时边坡浅层局部处于不稳定状态。

### (2) 融化层厚度 $h$ 的影响

为探讨融化层厚度对季冻区路堑边坡冻融稳定性的影响, 将式 (1) 分子与分母同时除以  $h$ , 则式 (1) 可变换为

$$F = \frac{\frac{c'}{h} + [(1-n)\gamma + \gamma'n] \cos^2 \alpha \tan \phi'}{[(1-n)\gamma + n\gamma_{sat}] \sin \alpha \cos \alpha} \quad (2)$$

在其它参数一定的情况下, 边坡融化层越厚, 越易产生融化层的滑移。

### (3) 融化层中饱和层厚度的影响

将式 (1) 拆分后得

$$F = \frac{c'}{[(1-n)\gamma + n\gamma_{sat}]h \sin \alpha \cos \alpha} + \frac{[(1-n)\gamma + \gamma'n]h \cos \alpha \tan \phi'}{[(1-n)\gamma + n\gamma_{sat}]h \sin \alpha} \quad (3)$$

将  $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$  代入式 (3) 得

$$F = \frac{c'}{[(1-n)\gamma + n\gamma_{sat}]h \sin \alpha \cos \alpha} + \frac{[(1-n)\gamma + (\gamma_{sat} - \gamma_w)n] \cos \alpha \tan \phi'}{[(1-n)\gamma + n\gamma_{sat}] \sin \alpha} \quad (4)$$

变换式 (4) 得

$$F = \frac{c'}{[(1-n)\gamma + n\gamma_{sat}]h \sin \alpha \cos \alpha} + c \tan \alpha \tan \phi' -$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{n\gamma_w}{[(1-n)\gamma + n\gamma_{\text{sat}}]} c \tan \alpha \tan \phi' \\
 &= \frac{c'}{[(1-n)\gamma + n\gamma_{\text{sat}}] h \sin \alpha \cos \alpha} + c \tan \alpha \tan \phi' - \\
 & \frac{n\gamma_w}{[\gamma + n(\gamma_{\text{sat}} - \gamma)]} c \tan \alpha \tan \phi'. \quad (5)
 \end{aligned}$$

将式(5)等号右侧第三项分子和分母同时除以  $n$  得

$$\begin{aligned}
 F &= \frac{c'}{[(1-n)\gamma + n\gamma_{\text{sat}}] h \sin \alpha \cos \alpha} + c \tan \alpha \tan \phi' - \\
 & \frac{\gamma_w}{\left[ \frac{\gamma}{n} + (\gamma_{\text{sat}} - \gamma) \right]} c \tan \alpha \tan \phi', \quad (6)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F &= \frac{c'}{[\gamma + (\gamma_{\text{sat}} - \gamma)n] h \sin \alpha \cos \alpha} + c \tan \alpha \tan \phi' - \\
 & \frac{\gamma_w}{\left[ \frac{\gamma}{n} + (\gamma_{\text{sat}} - \gamma) \right]} c \tan \alpha \tan \phi'. \quad (7)
 \end{aligned}$$

由式(7)可知:当  $n$  逐渐增大时,等式右侧第一项在逐渐减小,等式右侧第三式在增大,因此,斜坡的稳定安全系数随着  $n$  的增大(融化层中饱和层厚度的增大)在减小。

#### (4) 边坡坡度的影响

由(1)式可知,随着  $\alpha$  的增加,分子在减小,分母在增大,即边坡的坡度越大,土坡的稳定安全系数就越小。

#### (5) 边坡融化层土体重度的影响

为了探讨边坡土体重度的变化对季冻区边坡冻融失稳的影响,将式(1)中的浮重度利用饱和重度代替,虽然增大了边坡的稳定安全系数,但对讨论土体重度的变化对边坡稳定性的影响会更加直接一些。

式(1)可简化为

$$F = \frac{c'}{[(1-n)\gamma + n\gamma_{\text{sat}}] h \sin \alpha \cos \alpha} + c \tan \alpha \tan \phi'. \quad (8)$$

由于  $n$  小于 1,则  $1-n > 0$ ,因此,随着土体重度的增大,边坡稳定安全系数在减小。

利用土力学原理推导得到的稳定安全系数的计算公式,可以进一步解释采用满铺混凝土空心预制块较种植草皮护坡失稳严重的主要原因,由于在边坡表面铺砌成混凝土网格,实际是增大了边坡坡面荷载,即增加边坡浅层土体的重度,由式(8)可知,这对冻融边坡的稳定是不利的。因此,在季节冻土地区,混凝土、块石等加重坡面荷载的护坡形式应谨慎采用。

## 3 季节冻土地区植被护坡机理研究

### 3.1 植被防护边坡土体含水率变化规律研究

为了研究季节变化、植物种类对边坡土体含水率变化的影响,在研究区选择了典型路堑边坡进行实验研究,边坡护坡植物分别为胡枝子和紫穗槐。

#### (1) 边坡土体含水率随季节气温变化规律的研究

据哈尔滨市气象资料,一般每年 11 月初地表以下 20 cm 范围内开始出现负温,翌年 3 月末地表以下 20 cm 范围内开始出现正温。

图 6,7 分别为胡枝子和紫穗槐护坡边坡土体在一个冻结-融化期内的含水率-深度变化曲线。由图中曲线展布特征可知,在边坡土体冻结的过程中,水分会向冻结锋面迁移,造成局部的含水率增大。随着冻结深度的增加,含水率的增加也会向深处发展,但之前已冻结了的边坡土体含水率随着温度的降低未发生大的变化。采用胡枝子护坡的边坡土体在冻结的过程中含水率增加最大可达到 5% 左右,采用紫穗槐护坡,边坡土体含水率增加的最大值达 2% 左右。在冻结期,边坡土体含水率基本上随深度的增加而逐渐增大。如图 6 所示,4 月 13 日观测到距地表 0~80 cm 范围内的融化层,含水率-深度变化曲线有一个增加的过程,主要是前一日的降雨入渗造成的;在 4 月 26 日融化层的含水率-深度变化曲线又有一个明显减小的过程,特别是坡体表面处,主要是由于边坡土体水分的蒸发和护坡植物根系的吸水作用所造成的<sup>[15]</sup>。

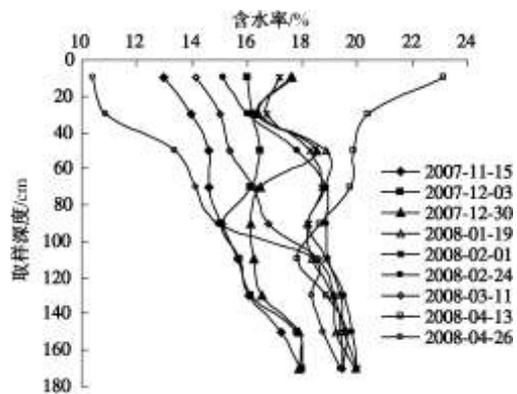


图 6 冻结期胡枝子护坡土体含水率-深度-时间变化实测曲线  
Fig. 6 Measured curves of soil moisture-slope depth-time for slope with Lespedeza during frozen period

#### (2) 边坡植物根系对边坡土体含水率影响的研究

为了研究植物根系对边坡土体的吸水作用,在春融期,对不同的植物种类护坡的边坡土体进行含水率调查,调查结果见图 8, 9。其中图 8 为草皮护坡与胡枝子护坡含水率变化对比曲线,图 9 为草皮护坡与紫穗槐护坡含水率变化对比曲线。从图中可明显看出,木本植物要比草皮有明显的吸水作用,紫穗槐表现的更加明显。由于胡枝子和紫穗槐根系长度均在 1.0~1.5 m 左右,而草皮根系长度在 0.4 m 左右,所以在距坡面 0~0.4 m 范围内,胡枝子要比草皮吸水率大 2% 左右,紫穗槐比草皮吸水率大 12% 左右,而深度在

0.4~1.0 m, 由于草皮根系对土体含水率影响极小, 胡枝子和紫穗槐根系的吸水效果更加明显。

土体强度触探仪现场测定边坡土体温度和强度, 其测试结果见图 10~12。

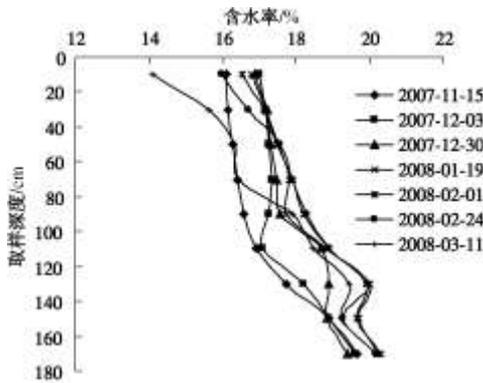


图 7 冻结期紫穗槐护坡土体含水率-深度-时间变化实测曲线  
Fig. 7 Measured curves of soil moisture-slope depth-time for slope with Amorpha during frozen period

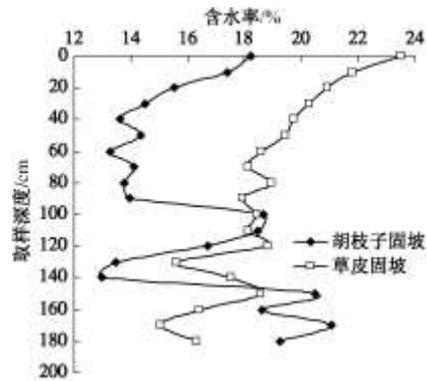


图 10 边坡土体含水率-深度变化实测曲线  
Fig. 10 Measured curves of soil moisture-slope depth

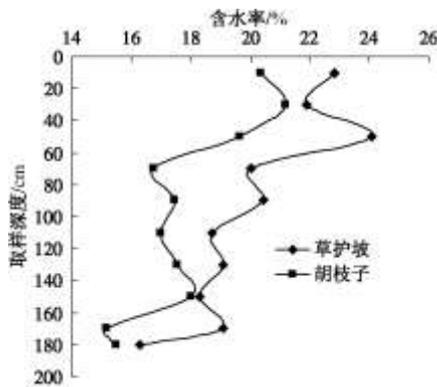


图 8 草皮护坡与胡枝子护坡边坡土体含水率-深度实测曲线  
Fig. 8 Measured curves of soil moisture-slope depth for slopes with turf and Lespedeza during frozen period

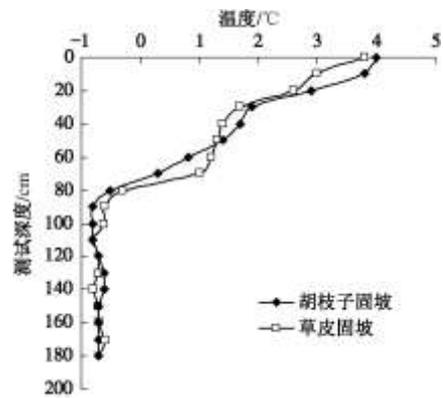


图 11 边坡土体温度-深度变化实测曲线  
Fig. 11 Measured curves of temperature-slope depth

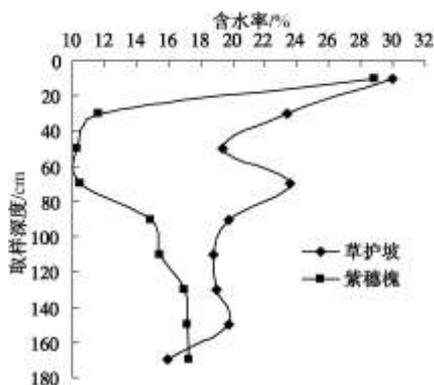


图 9 草皮护坡与紫穗槐护坡边坡土体含水率-深度实测曲线  
Fig. 9 Measured curves of soil moisture-slope depth for slopes with turf and Amorpha during frozen period

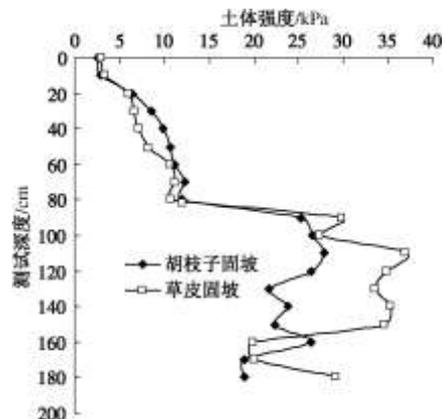


图 12 边坡土体强度-深度变化实测曲线  
Fig. 12 Measured curves of soil strength-slope depth

(3) 边坡土体含水率、地温与土体强度关系研究  
为了研究含水率和土体温度的变化对边坡土体强度的影响, 2008 年 4 月 26 日分别在胡枝子和草皮护坡的实验段, 采用挖试坑方法, 在坑壁上不同深度处取样量测含水率, 同时在相应深度处用电子温度计和

从图中可见, 边坡土体的强度均受含水率和土体温度变化的影响, 边坡土体温度在 0℃以上时, 土体强度的变化主要受含水率变化的影响, 随着含水率的减小边坡土体强度在增大, 采用胡枝子护坡时, 当含水率由 18.2%减小到 13.7%, 土体强度由 2.5 kPa 增大到 12.0 kPa; 采用草皮护坡时, 当含水率由 23.5%减小到 19.0%, 土体强度由 3.0 kPa 增大到 10.8 kPa, 当土体温度在 0℃以下时, 强度的变化主要受温度的

变化影响,当深度在 80 cm 左右达到负温区时,土体强度急剧增加,采用胡枝子护坡时土体强度由 12.0 kPa 增大到 25.3 kPa,采用草皮护坡时土体强度由 10.8 kPa 增大到 29.9 kPa。边坡土体在负温状态,土体强度虽然受含水率的影响,但影响规律不明显。

### 3.2 根系复合土及素土的现场直剪实验

为了评价植被根系对边坡土体的锚固作用,设计了现场直剪仪,对胡枝子和紫穗槐两种根系的复合土进行现场直剪实验,并与素土的现场直剪实验结果进行对比,以评价植物根系护坡效果。实验装置见图 13。



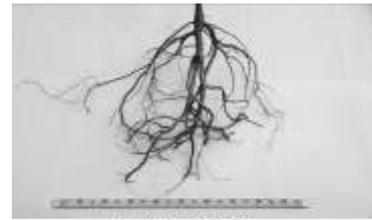
图 13 护坡植物根系复合土现场直剪实验

Fig. 13 In-situ direct shear tests on soil with roots

在同三公路 K562+760、K563+860 处分别进行紫穗槐、胡枝子护坡根系复合土现场直剪实验,紫穗槐、胡枝子根系形态分别见图 14。紫穗槐主根较发育,主、侧根分化明显。与紫穗槐相比,胡枝子主、侧根分化不明显,但根系长直,须根密集。

图 15 为素土、胡枝子和紫穗槐根系与土复合体剪应力与剪切位移之间的关系曲线,由图中曲线展布形态特征可知,紫穗槐根系复合土最大剪应力为 17.4 kPa;胡枝子根系复合土最大剪应力为 15.88 kPa。胡枝子和紫穗槐根系复合土最大剪应力均发生在剪切位移 14 mm 左右。图 15 紫穗槐和胡枝子两种植物根系复合土剪应力-剪切位移曲线形状不同,由此判断,紫穗槐和胡枝子根系土的破坏过程不同。

随着剪切力的增长,紫穗槐根系复合土最大剪应力值为 17.4 kPa,剪应力次值 13.2 kPa,剪切位移分别为 14 mm 和 299 mm,出现 2 次峰值,这主要是紫穗槐根系形态决定的。紫穗槐主根在第一次峰值时被剪断,由于其侧根较发育,且形态弯曲,随着剪切位移的增加,侧根根系复合土继续抗剪,侧根由弯曲被拉直、拉断,曲线出现了第二峰值点。



(a) 紫穗槐根系



(b) 胡枝子根系

图 14 根系形态照片

Fig. 14 Root morphology

胡枝子根系复合土在剪切位移 14 mm 左右剪应力首次达到峰值之后,随着剪切位移的增长,其剪应力逐渐减小,在剪切位移 290 mm 时发生破坏,这是由于胡枝子根系复合土在剪切位移首次达到峰值 16.0 kPa 后,其主根被剪断,侧根根系复合土同样发挥作用而继续抗剪,但是由于其侧根长直,与土颗粒结合紧密程度相对较低,致使抗剪力相对较小,所以其剪应力-剪切位移曲线没有出现第二次峰值。由图 16 可知,素土的最大剪应力为 9.6 kPa,相应的剪切位移为 17 mm,即土体在剪切位移为 17 mm 时便开始发生剪切破坏,素土的抗剪强度要比根系复合土的抗剪强度低,特别是相对紫穗槐加固的边坡土体,抗剪强度降低了 7.8 kPa,达到 43.8%。

通过对比可知,护坡植物根系复合土的抗剪强度比素土的抗剪强度明显增大,在本实验中,其抗剪强度和剪切位移均为素土 2 倍左右,根系锚固作用明显。

## 4 结 论

(1) 边坡土体的黏聚力首先随着含水率的增加而增大,但含水率达到最佳含水率以后,边坡土体的黏聚力随含水率的增大而减小,同一含水率的情况下,黏聚力随着干密度的增加而增大。边坡土体的内摩擦

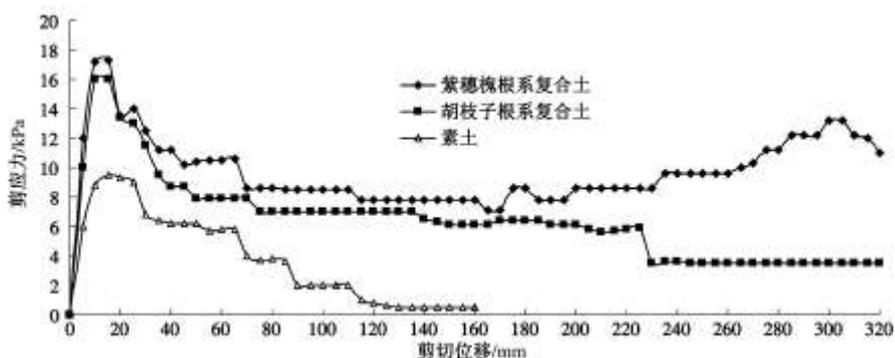


图 15 紫穗槐、胡枝子根系复合土及素土剪应力 - 剪切位移曲线

Fig. 15 Curves of shear stress - shear displacement of soil with *Amorpha* root, *Lespedeza* root and without any root

角基本上是随着含水率的增大而减小。

(2) 边坡土体冻结的过程中, 水分会向冻结锋面迁移, 造成局部的含水率增大。随着冻结深度的增加, 含水率的增加也会向深处发展, 通过对比可知, 采用胡枝子护坡, 边坡土体在冻结的过程中含水率增加最大可达到 5% 左右, 采用紫穗槐护坡, 边坡土体含水率增加的最大值达 2% 左右。

(3) 木本植物要比草皮有明显的吸水作用, 紫穗槐表现的更加明显。胡枝子要比草皮吸水率大 2% 左右, 紫穗槐比草皮吸水率大 12% 左右, 而深度在 0.4~1.0 m, 由于草皮根系对土体含水率影响极小, 胡枝子和紫穗槐根系的吸水效果更加明显。

(4) 冻融过程中, 边坡土体的强度受含水率和土体温度变化的影响, 边坡土体温度在 0°C 以上时, 土体强度的变化主要受含水率变化的影响, 当土体温度在 0°C 以下时, 土体强度的变化主要受温度的变化影响, 边坡土体在负温状态, 土体强度受含水率变化影响不大。

(5) 根系复合土的抗剪强度比素土的抗剪强度明显增大, 实验结果表明, 紫穗槐和胡枝子根系复合土抗剪强度和剪切位移均为素土 2 倍左右, 护坡植物根系锚固作用明显

(6) 理论分析结果表明, 有效地减小坡面荷载, 可增加边坡稳定安全系数。采用木本植物护坡, 可降低边坡土体的含水率和坡面荷载, 增加边坡土体的抗剪强度, 更加有利于减小季冻区土质路堑边坡冻融失稳现象。

#### 参考文献:

- [1] 武鹤, 高伟, 王国峰, 等. 寒区公路土质路堑边坡滑塌原因及其防治[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(3): 66 - 70. (WU He, GAO Wei, WANG Guofeng, et al. Cause and control of soil-cutting's sliding collapse in frigid zone[J]. Journal of natural disasters, 2006, 15(3): 66 - 70. (in Chinese))
- [2] 刘红军, 王丕祥. 公路土质边坡冻融失稳稳定性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(5): 764 - 766. (LIU Hong-jun, WANG Pi-xiang. Stability analysis of loss of stability caused by freeze and melt of earthen side slopes of highways[J]. Journal of Harbin institute of technology, 2006, 38(5): 764 - 766. (in Chinese))
- [3] SHAN Wei, GUO Ying, LIU Hong-jun. Effect of freeze-thaw on strength and microstructure of silty clay[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 16(S1): 207 - 211.
- [4] 牛富俊, 程国栋, 赖远明, 等. 青藏高原多年冻土区热融滑塌型斜坡失稳研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3): 402 - 406. (NIU Fu-jun, CHENG Guo-dong, LAI Yuan-ming, et al. Instability study on thaw slumping in permafrost regions of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(3): 402 - 406. (in Chinese))
- [5] TARR R S. Rapidity of weathering and stream erosion in the arctic latitudes[J]. American Geologist, 1897, 19: 131 - 136.
- [6] MCROBERTS E C, MORGENSTERN N R. The stability of thawing slopes[J]. Can Geotech J, 1974, 11: 447 - 469.
- [7] CLARK M J. Advance in periglacial geomorphology[M]. New York: John Wiley & Sons Ltd, 1988: 325 - 359.
- [8] 周幼吾, 郭东信. 我国多年冻土的主要特征[J]. 冰川冻土, 1982, 4(1): 1 - 19. (ZHOU You-wu, GUO Dong-xin. Principal characteristics of permafrost in China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1982, 4(1): 1 - 19. (in Chinese))
- [9] 靳德武. 青藏高原多年冻土区斜坡稳定性研究[D]. 西安: 长安大学, 2004. (JIN De-wu. Slope stability study on permafrost area of Qinghai-Tibet Plateau[D]. Xi'an: Chang'an University, 2004. (in Chinese))
- [10] 李永春, 赵康年. 青藏公路 K2023 反季滑坡实例[J]. 地质灾害与环境保护, 2002, 13(4): 33 - 35. (LI Yong-chun, ZHAO Kang-nian. The analysis of landslide in k2023 of QING-Zang highway[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2002, 13(4): 33 - 35. (in Chinese))
- [11] 邓卫东, 周群华, 严秋荣. 植物根系护坡作用的实验与计算[J]. 中国公路学报, 2007, 20(5): 7 - 12. (DENG Wei-dong, ZHOU Qun-hua, YAN Qiu-rong. Test and calculation of effect of plant root on slope consolidation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(5): 7 - 12. (in Chinese))
- [12] 吉喜斌, 康尔泗, 陈仁升, 等. 植物根系吸水模型研究进展[J]. 西北植物学报, 2006, 26(5): 1079 - 1086. (JI Xi-bin, KANG Er-si, CHEN Ren-sheng, et al. Research advances about water-uptake models by plant roots[J]. Acta Bot Boreo-Occident Sin, 2006, 26(5): 1079 - 1086. (in Chinese))
- [13] 程洪, 谢涛, 唐春, 等. 植物根系力学与固土作用机理研究综述[J]. 水土保持通报, 2006, 26(1): 97 - 102. (CHENG Hong, XIE Tao, TANG Chun, et al. Overview of mechanism of plant roots improving soil reinforcement and slope stabilization[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2006, 26(1): 97 - 102. (in Chinese))