

Evaluation of Frost Heaving Property of Typical Soil Samples along Qinghai-Tibet Highway

Yupu Hu^{1,2}, Yanjun Ji^{1,2}, Xuelin Zhang^{1,2}, Liang Chen^{1,2}

¹College of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

²Shaanxi Key Laboratory of Safety and Durability of Concrete Structures, Xijing University, Xi'an Shaanxi
Email: 1152672932@qq.com

Received: Dec. 2nd, 2019; accepted: Dec. 31st, 2019; published: Jan. 8th, 2020

Abstract

Permafrost along the Qinghai-Tibet Highway has an important impact on engineering construction and late operation and maintenance. Based on the geological survey data of 167 boreholes along the Qinghai-Tibet Highway, the relationship between frost heaving force and natural density and water content of soil samples was analyzed and evaluated according to frost heaving force. The results show that the natural density along the line is concentrated from $1.9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ to $2.2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. And the frost heaving force decreases with the increase of the natural density. Frost heaving force is affected by natural density in three stages. First of all, the natural density of soil ranges from $1.8 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ to $1.9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. The frost heaving force decreases sharply with the increase of natural density. Second, the natural density ranges between $1.9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ and $2.2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. The large pores in particles decrease and the frost heaving force shows a slow decline trend. Third, the natural density ranges from 2.2 to $2.6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Due to the relatively high soil compactness, there are only a few micro-pores and cracks in particles. Frost heaving force thus remains essentially constant. At the same time, the frost heaving force increases with the increase of natural water content, which can be divided into three stages. First, the natural water content ranges from 10% to 25%, the frost heaving force increases rapidly with the increase of water content. Second, the natural water content ranges from 25% to 40%. Frost heaving force increases slowly with the increase of water content. When the water content reaches 40%, it enters the third stage, when the ice molecules become the main part of the soil. Frost heaving tends to ice. In the section of Xidatan broken line valley-Erlongba valley, the groundwater level is deep, the shallow layer is little frozen soil, the water content is low, and the frost heaving force is small. In the high plain section of Chumar river, the surface water system is developed and the water content in the shallow layer is relatively large, which makes the frost heaving force reach 37 kPa. That is the maximum along the line.

Keywords

Qinghai-Tibet Highway, Frost Heaving Force, Frost Heave Evaluation

青藏公路沿线典型土样冻胀性评价研究

胡玉璞^{1,2}, 吉延峻^{1,2}, 张学林^{1,2}, 陈亮^{1,2}

¹西京学院土木工程学院, 陕西 西安

²西京学院陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室, 陕西 西安

Email: 1152672932@qq.com

收稿日期: 2019年12月2日; 录用日期: 2019年12月31日; 发布日期: 2020年1月8日

摘要

青藏公路沿线冻土对工程建设和后期运营维护具有重要影响, 历来是研究重点。基于青藏公路沿线167个钻孔地质调查数据, 对土样冻胀力与天然密度和含水量的关系进行分析, 依据冻胀力进行评价。结果表明: 沿线天然密度集中于1.9~2.2 g·cm⁻³之间; 冻胀力受天然密度的影响可分为三个阶段, I: 土体天然密度在1.8~1.9 g·cm⁻³时, 冻胀力随着天然密度的增加而急剧减小; II: 在1.9~2.2 g·cm⁻³时, 冻胀力呈现缓慢下降的趋势; III: 在2.2~2.6 g·cm⁻³时, 此时由于土体密实度较大, 颗粒间只存下少量微孔隙和裂隙, 冻胀力因而基本保持不变; 同时冻胀力随天然含水量的增加而增加, 其增加趋势亦可以分为三个阶段, I: 天然含水量为10%~25%时, 冻胀力随含水量的增大而快速增大; II: 25%~40%时, 冻胀力随含水量的增加而缓慢增加; 当含水量达到40%后, 进入阶段III, 此时冰分子成为土体的主要部分, 冻胀力趋于冰的冻胀力。西大滩断线谷地-阿青岗尔陇巴河谷区段, 地下水水位较深, 浅层为少冰冻土, 含水量较低, 冻胀力较小; 在楚玛尔河高平原段, 地表水系发育, 浅层含水量较大, 使其冻胀力达到37 kPa, 为沿线最大值。

关键词

青藏公路, 冻胀力, 冻胀性评价

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

青藏高原是我国乃至世界高海拔冻土主要分布区域, 青藏公路穿越多年冻土区 760 多公里, 其中多年冻土连续分布区 550 km [1]。伴随着青藏公路、铁路的建成通车, 西藏自治区迎来了新一轮经济发展, 高速公路、输变电路、输油气管道工程等大型工程的建设方兴未艾。新建工程聚集于青藏公路沿线 10 km 的范围内, 对于承载工程的土环境, 特别是冻土环境来说, 高密度的工程对其干扰强度显著。

在这狭长的青藏公路走廊, 受已建工程相互影响, 沿线冻土退化较为明显。退化的冻土一方面严重影响了已建工程的稳定性, 同时增加了拟建工程的危险性; 另一方面对生态环境造成极大的破坏, 引发各种热融灾害, 如桥梁冻胀破坏(图 1), 热融滑塌引起的斜坡失稳[2] [3], 数量逐渐增多面积逐渐变大的热融湖(塘) [4]、公路路基的沉陷变形与翻浆[5]、铁路路桥过渡段的沉降变形[6]等。



Figure 1. Bridge frost heave damage

图 1. 桥梁冻胀破坏

目前, 学者对青藏公路沿线(走廊)进行多方面研究。鲁嘉濠[7]等对走廊冻土的分布模型及其变化趋势进行了研究; 马巍[8]等对青藏高原的重大冻土工程及其相互作用进行了基础的研究、牛富俊[9]、林战举[10]等研究了冻土对青藏铁路沿线的部分工程影响以及热融灾害对青藏走廊沿线的影响。但截止目前还未有关于沿线土体冻胀性的公开报道。

本文通过对青藏公路(西大滩断线谷地 - 扎加藏布 - 安多盆地)沿线典型土样进行室内试验, 分析了沿线土体冻胀力(下文所述冻胀力皆为切向冻胀力)分别与含水量及天然密度的关系; 通过大量数据的分析, 归纳总结了沿线冻土工程地质情况, 并进行了冻胀性评价。研究结果可对青藏公路沿线拟建工程以及其他具有类似环境的地区提供基本的数据支撑。

2. 研究区域概况

研究区域以青藏公路为基线, 北起西大滩断线谷地, 南至扎加藏布 - 安多盆地, 向两侧延伸 5 km, 对应的公路桩号为 K2867~K3400。本次试验共选取 167 个钻孔数据, 其中高山区 61 个, 平原区 59 个、谷地区 47 个, 从北向南贯穿了该区域的多年冻土区, 因此这些样本点具备了较好的代表性[11], 体现该区域土体特征。

根据地层详勘资料, 研究区域南北平均标高约 4500 m 左右, 地层以层状构造和网状构造为主。在纵向上: 地表至地下 3 m 主要为角砾、细砂、粉质黏土, 3 m 以下的土层主要为粉质黏土和全风化泥岩; 在横向上: 高山区主要为粉土, 平原区主要为细砂和粉质黏土, 谷地主要为圆砾。

3. 试验概况

本次试验采用了室外取样和室内土工试验相结合的方法, 室外钻孔 167 个, 桩孔深度为 15 m, 采取扰动样共计 167 件。野外土样经过分段、分类、密封等处理后送入室内土工实验室。室内土工实验室选用典型土体 - 粉质黏土, 测定土样的物理、力学参数。天然密度、天然含水量以及冻胀力的测定所取得土样深度为 1.5~2.0 m。

采用环刀法测定土样的天然密度, 一个钻孔取平行两组试样, 整平其两端。采用 $\Phi 61.8 \times 20$ mm 环刀内壁涂一层凡士林, 称取环刀的质量, 将环刀刀口垂直向下压, 至土样伸出环刀为止, 将两端的余土削平, 取剩余的土样进行天然含水量的测定。将环刀外壁擦拭干净, 称出环刀和土的质量。则土体的天然密度为(式(1)):

$$\rho = (m_1 - m_2) \times v^{-1} \quad (1)$$

式中: m_1 为环刀和土的质量;

m_2 为环刀的质量;

v 为土的体积。

采用烘干法测定土样的天然含水量。取试样 30 g 放入称量盒内, 盖好。称取湿土加盒的质量, 打开试样的盒盖, 将其放入温度为 100℃~105℃的烘箱烘干 24 h。将烘干的试样取出, 冷却, 称出盒加干土的质量。则土样的天然含水量(式(2)):

$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100\% \quad (2)$$

式中: m_w 为土样所失去的质量, 即水的质量;

m_s 为烘干后的质量, 即为土粒的质量。

冻土在形成过程中, 当土体的温度降低到其冻结温度以下时, 水分向正在冻结的土体中迁移并发生相态变化, 体积增大 9%; 当此温度持续或继续降低时, 土体中的液态水大部分转变为固态水, 相态变化逐渐缓慢直至消失。在这个过程中, 土体中的液态水凝固并以冰的形式填充到土颗粒间隙中, 当土体中水相态变化的体积膨胀足以引起土颗粒之间的相对位移时就引起了土体的冻胀[12]。

对于冻胀力的测定, 刘红岩等发明了一种反复冻融损伤后寒区隧道围岩冻胀力测算方法[13], 陈伟志等研究了一种低盐盐渍土盐 - 冻胀力确定方法[14]。以上方法主要通过模拟计算得出冻胀力, 理论性较强, 过程复杂。本人通过总结以上方法结合郭超[15]、杨英姿[16]等测定冻胀力的方法和土工试验方法标准[17]提出如下方法:

1) 试验原理: 通过电子测力计均匀接触膨胀冻土, 使膨胀冻土保持原始高度的测力计读数即为冻胀力。

2) 试验过程: 将钻取所得的 1.5~2.0 m 的原状冻土土样放入试样环中, 待土样融化后切除高于试样环的土样, 使土样与试样环高度相同, 在试样环上表面盖上与试样环上面积相同的铁片。将制作好的试样放入与试样所取地年平均温度相同的恒温盒内; 然后, 在铁片上表面安装电子测力计, 使电子测力计受力均匀。当电子测力计数值稳定时所显示的力即为土样的冻胀力。

3) 试验注意事项: ① 钻样时保持试样的层面与原状土一致, 不能上下倒置; 以免由于原土样上下土层的差异导致试验不能正确测出该地冻胀力。② 冻土土样必须与试样环内壁紧密接触, 以免由于土样与试样环之间的空隙导致测出的冻胀力偏小。③ 土样高度高于试样环, 由于放入试样环的土样为原始冻土, 融化后体积变小, 不能完全填满试样环, 导致测出的冻胀力偏小。

4. 试验结果分析

4.1. 物理数据分析

将试验所得的天然密度, 天然含水量及冻胀力数据通过 origin 软件进行分析, 试验结果见图 2, 图 3。

图 2 为冻胀力与天然密度的关系曲线。土体冻胀力的产生主要与其天然密度有关, 总体上, 天然密度与冻胀力成反比例关系, 天然密度越大时, 水分子冻结而引起的体积变化使冻胀力快速减小。从图中可以看出冻胀力受天然密度的影响主要分为三个阶段: I: 天然密度在 1.6~2.1 g·cm⁻³ 时, 冻胀力随着天然密度的增加而急剧减小。这主要是由于天然密度在此区间时, 颗粒间大孔隙剧烈减小, 因而毛细水运移通道显著减小, 使得土体的冻胀力减小速率较高; II: 天然密度在 2.1~2.35 g·cm⁻³ 之间时, 颗粒间大孔隙减少趋缓, 冻胀力呈现缓慢下降的趋势; III: 天然密度为 2.35~2.6 g·cm⁻³ 时, 此时由于土体密度较大, 颗粒间只存在少量微孔隙和裂隙, 冻胀力因而基本保持不变。整体而言, 土体的冻胀力随天然密度的增加而逐渐减小, 天然密度主要集中在 1.9~2.2 g·cm⁻³。

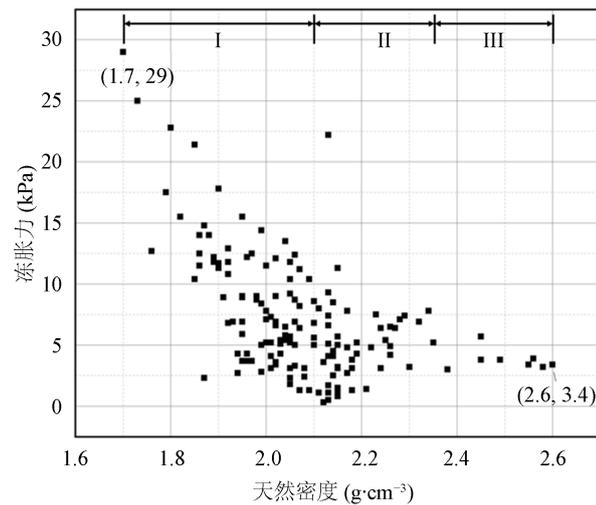


Figure 2. Relation curve between frost heaving force and natural density

图 2. 冻胀力与天然密度关系曲线

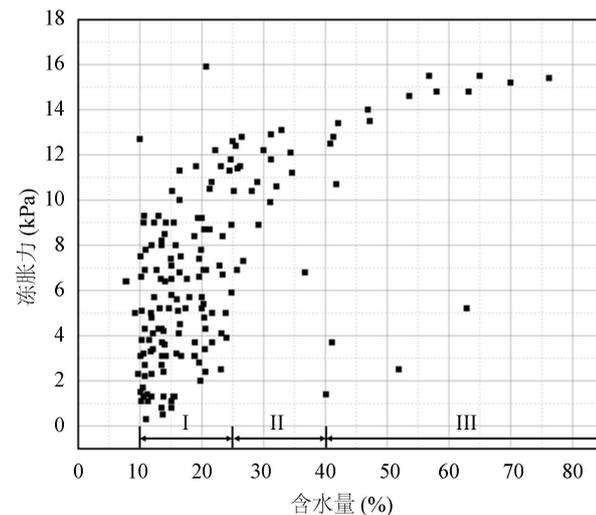


Figure 3. Frost heaving force and water content relation curve

图 3. 冻胀力与含水量关系曲线

图 3 为冻胀力与天然含水量的关系曲线。土体冻结后，土体中的水分子向冻结锋面位置迁移，水由液相到固相体积增大 9%，从而使土体体积增大，土颗粒之间发生相对位移的变化。水分子越多时，体积增大的越多，土颗粒间的位移变化增大，膨胀力随之增加。从图中可以看出冻胀力受天然含水量的影响可分为三个阶段：I：天然含水量为 10%~25%时，此时，随着天然含水量的增加，冻胀力呈现快速上升的趋势，这主要是因为土颗粒间的由于能够储存冰分子的大孔隙较多所致；II：天然含水量为 25%~40%时，冻胀力随含水量的增加而缓慢增加，此时土体含水量逐渐趋向活跃含水量；当含水量达到 40%后，进入阶段 III，此时冰分子成为土体的主要部分，土体则分散于冰分子之中，最终土体的冻胀力趋于冰的冻胀力。整体而言，冻胀力随着含水量的增加而增加，在含水量达到 40%时，冻胀力与含水量的关系减小。该研究区域的天然含水量主要集中在 10%~30%之间。

4.2. 沿线冻胀性评价和工程措施

对沿线 167 个钻孔土样进行处理得到下表 1 (表中使用以下简称: S——少冰冻土; D——多冰冻土; F——富冰冻土; B——饱冰冻土; H——含土冰层; R——融区) [18]。

Table 1. Frozen soil evaluation and engineering measures
表 1. 冻土评价及工程措施

区段	钻孔号	地貌单元	主要土类	不良地质现象	$T_{cp}/^{\circ}\text{C}$	地下水埋深/m	冻土类型	冻胀力/kPa
西大滩断线谷地	218~269	山地	全风化泥岩	热融滑塌		22~25	S, B	15~21
昆仑山北坡峡谷区	270~297	山地	粉质黏土	—	-1.3	—	S, F	
昆仑山垭口区	298~321	山地	全风化泥岩	热融湖		2~10	S-F	4~8
阿青岗尔陇巴河谷区	322~351	山地	粉质黏土	热融滑塌		1.5~16	S-D	10~15
楚玛尔河高平原	352~414	构造平原	粉质黏土	风沙, 热融湖	-0.5	1.3~4	D-B	26~37
可可西里 - 五道梁低高山	415~476	山地	粉质黏土	风沙, 热融湖	-1.2	14	S-F(H)	
北麓河盆地	477~494	山间凹地	粉质黏土	热融滑塌	-1.1	4~8	S-D	5~10
风火山低高山	495~588	山地	全风化泥岩	冻土沼泽	-7	10~20	S-F(H)	
乌丽盆地	589~668	山间凹地	粉砂	热融湖(塘)	-1.9	9~13	S, F	16~23
沱沱河盆地	669~710	山间凹地	细砂	热融滑塌	-0.6	7~9	S-D	
开心岭低高山	711~736	山地	粉质黏土	冻土沼泽	-1.2	2~10	S-H	4~10
通天河盆地	737~796	山间凹地	细砂	热融湖(塘)	-1.6		S-D	
布曲谷地	797~946	山地	圆砾	热融滑塌	-1	0.5~1.5	F-H	15~18
温泉断陷盆地	947~1011	山间凹地	细砂	热融湖(塘)			(D) F-B	15
唐古拉山中高山区	1012~1074	山地	细砂	冻土沼泽	-1.6	18~25	S-D	13~17
唐古拉山间盆地	1075~1121	山间凹地	粉质黏土	热融滑塌	-1.4	7~13	S, F	15~19
扎加藏布 - 安多盆地	1122~1143	山间凹地	细砂	热融湖(塘)	-1	6~9	S-D	10~14

表 1 中, 青藏公路沿线主要为弱冻胀性土, 且冻胀力受地形的影响较大。

西大滩断线谷地 - 阿青岗尔陇巴河谷区段, 地貌单元以山地为主, 全风化泥岩为主, 上层覆盖粉质黏土, 地下水水位较深, 浅层为少冰冻土, 含水量较低, 致使其冻胀力较小; 在楚玛尔河高平原段, 受其地势的影响, 地下水埋藏较浅, 地表水系发育, 浅层含水量较大, 冻土类型为浅层多为富冰冻土, 使其冻胀力达到 37 kPa, 为沿线最大值。

北麓河盆地 - 扎加藏布 - 安多盆地段, 沿线跨越高山区及盆地地区, 跨度大, 环境复杂。对于其中的盆地地区, 地下水位位于高山区和平原区中间, 浅层含水率一般, 浅层主要以为冰冻土, 主要土类为细砂, 使其冻胀力介于高山区和平原之间。

此外, 由于冻土区环境脆弱, 易受外界影响遭到破坏, 极易发生热融滑塌、热融湖(塘)、冻土沼泽等不良地质现象。施工时应尽量减少对原地面植被和泥炭层的破坏, 在热融湖(塘)周围区域采用片石挡墙、草袋护坡等防护工程; 在热融滑塌的流通区和堆积区植草, 利用发达的植物根系控制坍塌物的下滑等。并在施工结束后尽量恢复施工带的地表原貌, 尽量不改变冻土沼泽的水文地质条件。

5. 结论

青藏公路通车已十余年, 冻土工程地质灾害时有发生, 因此青藏公路走廊沿线的地质情况却越来越受到人们的重视。本文通过试验分析, 得到以下结论:

1) 沿线浅层土体以粉质黏土为主, 天然密度集中于 $1.9\sim 2.2\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 天然含水量在 $10\%\sim 30\%$ 间, 冻胀力为 $5\text{ kPa}\sim 15\text{ kPa}$; 在楚玛尔河高平原段达最大, 近 40 kPa 。

2) 天然密度对冻胀力的影响分为三个阶段: I: 天然密度在 $1.8\sim 1.9\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 增大时, 受颗粒间大孔隙和毛细水运移通道显著减小, 冻胀力绝对值较大, 但是其下降速率较快; II: 天然密度在 $1.9\sim 2.2\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 由于土体较密实, 颗粒间大孔隙减少速率减慢, 冻胀力的下降趋势趋缓; 天然密度达到 $2.2\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 时进入阶段 III, 由于土体进入密实阶段, 冻胀力基本不受土体天然密度影响。

3) 含水量对冻胀力的影响也分为三个阶段: I: 含水量为 $10\%\sim 25\%$ 时, 由于可供冻结水分子增多, 冻胀力随含水量增加而急剧增大; II: 天然含水量为 $25\%\sim 40\%$ 时, 土体含水量逐渐趋向活跃含水量, 冻胀力随含水量的增加而缓慢增加; III: 含水量达到 40% 时, 土体含水量达到活跃含水量, 冰分子成为土体的主要部分, 冻胀力趋近于冰分子的冻胀力。

4) 沿线可分为高山区、平原区、谷地区等三个典型区域。高山区: 地下水较深, 主要为高温冻土, 易出现冻土沼泽, 冻胀力较小; 平原区: 地下水较浅, 年平均温度低, 多数为饱冰冻土, 冻胀力较大, 自然平衡极易被破坏, 容易出现热融湖; 山间谷地性质介于二者之间。施工时应积极采取措施, 减少冻土环境破坏, 避免大范围改变水文地质条件。

基金项目

国家自然科学基金: 51879207; 西京学院高层次人才专项基金: XJ17B05。

参考文献

- [1] 马巍, 牛富俊, 穆彦虎. 青藏高原重大冻土工程的基础研究[J]. 地球科学进展, 2012, 27(11): 1185-1191.
- [2] Niu, F.J., Cheng, G.D., Ni, W.K., et al. (2005) Engineering-Related Slope Failure in Permafrost Regions of the Qinghai-Tibet Plateau. *Cold Regions Science and Technology*, 42, 215-225. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2005.02.002>
- [3] 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.
- [4] 林战举, 牛富俊, 徐志英, 等. 青藏铁路沿线热融沟发展特征及其对路基热稳定性的影响[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(4): 566-573.
- [5] 吴青柏, 施斌, 刘永智. 青藏公路沿线多年冻土与公路相互作用研究[J]. 中国科学: D 辑, 2002, 46(2): 97-105.
- [6] 牛富俊, 林战举, 鲁嘉滚, 等. 青藏铁路路桥过渡段沉降变形影响因素分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 372-377.
- [7] 鲁嘉滚, 程花, 牛富俊, 林战举, 刘华. 青藏铁路沿线热喀斯特湖易发程度的区划评价[J]. 灾害学, 2012, 27(4): 60-64.
- [8] 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(3): 571-579.
- [9] 牛富俊, 马巍, 吴青柏. 青藏铁路主要冻土路基工程热稳定性及主要冻融灾害[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(2): 196-206.
- [10] 林战举, 牛富俊, 罗京, 刘明浩, 尹国安. 青藏工程走廊热融湖湖底热状态[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2015, 40(1): 179-188.
- [11] 鲁嘉滚, 牛富俊, 程花, 林战举, 刘华, 罗京. 青藏高原工程走廊冻土分布模型及其变化趋势[J]. 山地学报, 2013, 31(2): 226-233.
- [12] 耿珂. 冻融循环对寒区隧道结构冻胀力的影响[J]. 冰川冻土, 2013, 35(4): 913-919.
- [13] 刘红岩, 祝凤金, 赵雨霞, 葛紫微, 戴华龙, 谢天铨, 周月智. 反复冻融损伤后寒区隧道围岩冻胀力的测算方法

- [P]. 中国. CN109283215A, 2019-01-29.
- [14] 陈伟志, 李安洪, 吴沛沛, 谢毅, 胡会星, 刘刚, 张林, 张莎莎, 李楚根, 周成, 曾永红, 唐第甲, 张敏, 杨祥容, 付铭川, 李伯根, 魏炜. 一种低盐盐渍土盐-冻胀力确定方法[P]. 中国. CN109653184A, 2019-04-19.
- [15] 郭超, 陆征然, 王凤池, 于红梅. 一种土体冻胀力测量装置[P]. 中国. CN207689404U, 2018-08-03.
- [16] 杨英姿, 徐定杰, 徐扬. 一种冻胀应力检测装置及其检测方法[P]. 中国. CN109868803A, 2019-06-11.
- [17] 中华人民共和国建设部. GB/T 50123-2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [18] 吉延峻, 金会军, 王国尚, 张建民. 中俄原油管道(漠河-大庆段)地基土融沉稳定性评价研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(2): 241.