

季冻区公路路基粗粒土的冻胀敏感性及其分类研究

张以晨¹, 李欣¹, 张喜发¹, 张冬青²

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 吉林省高等级公路建设局, 吉林 长春 130021)

摘要: 对5种粗粒土13种不同含泥量土料在不同含水率、饱和度和密实度状态下进行了一系列封闭系统下的冻胀模拟试验。研究了各种粗粒土的 $\eta-w$ 关系, 并对其进行线性分析, 揭示了粗粒土的冻胀规律。根据所建立的各种不同粗粒土的 $\eta-w$ 经验关系式得出各种土料以及粗粒土的相应于不同冻胀等级和类别的界限含水率值, 并与现有的规范进行对比, 指出规范值得商榷的问题。

关键词: 粗粒土; 冻胀率; 含泥量; 含水率

中图分类号: TU44

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)10-1522-05

作者简介: 张以晨(1982-), 男, 山东单县人, 硕士研究生, 主要从事地质灾害评估、设计及路基冻害研究。E-mail: weifenfangcheng@tom.com。

Research on frost heave susceptibility and classification of coarse grained soil of highway subgrade in seasonally frozen ground region

ZHANG Yi-chen¹, LI Xin¹, ZHANG Xi-fa¹, ZHANG Dong-qing²

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130061, China; 2. Bureau of High-grade Highway Construction of Jilin Province, Changchun 130021, China)

Abstract: According to the test results of closed simulated frost heave susceptibility experiments with five kinds of different coarse grained soils and thirteen kinds of fine grained content soils, the influence of different water contents, degree of saturations and degree of compaction on frost heaving susceptibility was discussed. and the $\eta-w$ curves and the frost heave law were analyzed. Moreover, linearity for coarse grained soil regression equations of $\eta-w$ relation and the boundary water content corresponding to different frost heave grades was summarized.

Key words: coarse grained soil; frost heave ratio; fine grained soil content; water content

0 引言

季冻区路基冻害一直是困扰我国北方地区道路建设的一个重要问题, 而土的冻胀则是造成工程冻害的主要原因。砂、砾等粗粒土是道路建设中常用的材料, 可见于公路路基天然基底, 也普遍用作路面防冻垫层或防冻回填层。因此研究季冻区路基粗粒土的冻胀敏感性对我国北方地区公路建设具有实际意义。

为了配合《季冻区公路设计施工规范》的编制, 对5种不同粗粒土的13种土料在不同含水率、饱和度和密实度状态下进行了一系列闭式冻胀模拟试验, 集中揭示粗粒土的冻胀率与含水率和含泥量关系, 并进行分类研究和与现有规范的对比研究, 以期能在工程实践中对路基的勘察、设计、施工和维护有所帮助。

1 试验概况

1.1 试验设备

试验设备主要包括: ①恒温箱, 提供恒温条件;

②DC-3030型低温恒温槽, 精度为0.1℃, 控制试样温度; ③测温系统, 由热电偶配PZ158直流数字电压表和热敏电阻配Fluck186数字万用电表组成; ④试样盒, 由有机玻璃筒和铜制顶盖底座组成; ⑤百分表, 测定土样冻胀变形。

1.2 试验土料

试验砂料取自吉林省陶赖昭松花江岸边, 为典型河流冲积物。掺配黏土料取自长春绿园区地院新村伊通河二级阶地。物理指标试验按公路部门标准进行^[1], 结果如表1。从表1可以看出, 各种砂土的最大干密度均随细粒成分(简称含泥量)增加而增加。

1.3 试验方法

按土的体积-重量关系制备不同含泥量、含水率、饱和度、干密度及其压实度的试样, 按有关规范标准要求闭式冻胀试验^[2-3]。试样直径10cm, 高5cm。

表 1 土料基本物理力学指标
Table1 Physical and mechanical indexes of the soil

土料 编号	γ_{dmax} /(g·cm ⁻³)	粒度成分/%										土料 名称
		20~10 /mm	10~5 /mm	5~2 /mm	2~0.5 /mm	0.5~0.25 /mm	0.25~0.075 /mm	0.075~0.05 /mm	0.05~0.01 /mm	0.01~0.005 /mm	<0.005 /mm	
#5	2.03				0.98	27.87	39.19	15.66	13.97	1.85	0.48	粉砂
#6	1.89			0.14	5.92	41.74	38.65	5.42	7.18	0.81	0.14	多泥 细砂
#11	1.80			0.14	5.92	41.74	45.2	2.80	3.71	0.42	0.07	少泥 细砂
8-E	2.02		1.53	4.88	14.43	50.11	9.14	(20)				中砂
8-B	1.99		1.63	5.17	15.32	53.18	9.70	(15)				
8-C	1.89		1.72	5.48	16.22	56.31	10.27	(10)				
8-D	1.82		1.82	5.78	17.13	59.43	10.84	(5)				
12-A	1.88		1.16	10.82	50.85	21.85	5.32	(10)				
12-B	1.94		1.10	10.22	48.03	20.64	5.01	(15)				粗砂
12-C	2.00		1.02	9.62	45.20	19.42	4.72	(20)				
14-A	2.05	0.61	23.10	29.25	16.93	8.32	1.79	(20)				
14-B	1.99	0.65	24.55	31.02	17.98	8.84	1.90	(15)				细砾
14-C	1.94	0.69	26.00	32.91	19.04	9.36	2.00	(10)				

注：括号内的数字为<0.075 mm 细粒含量。

表 2 冻胀试验基本指标范围
Table 2 Physical indexes of the samples for frost heave test

土料编号	含水率 $w\%$	饱和度 $S_r\%$	干密度 γ_{dmax} /(g·cm ⁻³)	压实度 $K=(\frac{\gamma_d}{\gamma_{\text{dmax}}})\%$	试验数量
#5	12.0~22.0	70~100	1.630~1.989	80.30~97.98	20
#6	8~18.5	50~100	1.707~1.870	90.32~98.95	22
#11	7~18	40~100	1.703~1.865	94.61~103.61	21
8-E	7~17	50~100	1.767~2.055	87.48~101.73	22
8-B	6.5~15	50~100	1.786~2.010	89.75~101.00	19
8-C	6~13.5	40~80	1.734~1.857	91.75~98.25	9
8-D	5~8.5	30~50	1.696~1.813	93.19~98.85	5
12-A	7.5~16	50~100	1.757~1.857	93.46~98.78	8
12-B	7~16.5	50~100	1.786~1.913	92.27~98.61	13
12-C	8.5~16.5	60~100	1.787~1.928	89.35~95.70	12
14-A	6~13	50~100	1.824~2.009	87.56~96.68	14
14-B	6.5~14.5	50~100	1.76~1.947	88.44~97.84	13
14-C	7~13	50~90	1.770~1.914	91.24~98.66	10

1.4 试验样品基本指标范围

本研究共完成 188 个有效冻胀试验，试验样品的基本物理指标涵盖了较广的范围，如表 2 所示。

2 冻胀率与含水率的关系

影响土的冻胀性的因素很多，如土的颗粒组成、矿物成分、含水率、土体密度等。其中水是影响冻胀的主要因素，其多寡又是决定冻胀强弱的重要条件^[4]。

2.1 各种粗粒土的 $\eta-w$ 关系

对表 1 列举的 13 种土料进行了一系列的冻胀试验。按试验数据绘制冻胀率（ η ）—含水率（ w ）关系曲线。结果各曲线都具有共同特征，即开始显线性，

过后曲线变得很平缓。为了便于分析和比较，本文取线性段进行研究 $\eta-w$ 关系，结果如图 1~5 和表 3 所示。

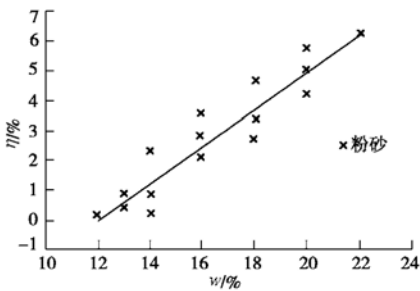
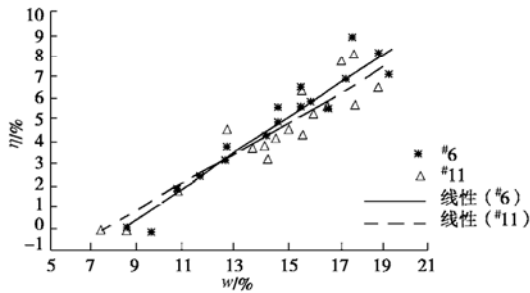
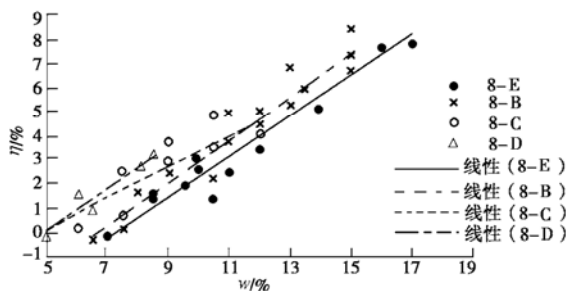
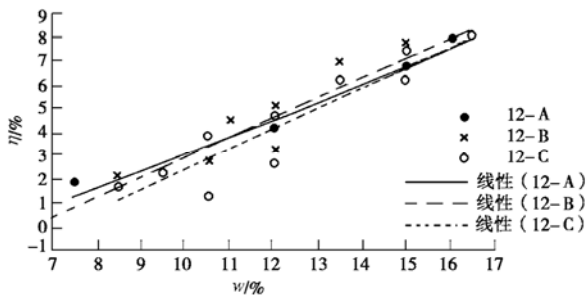
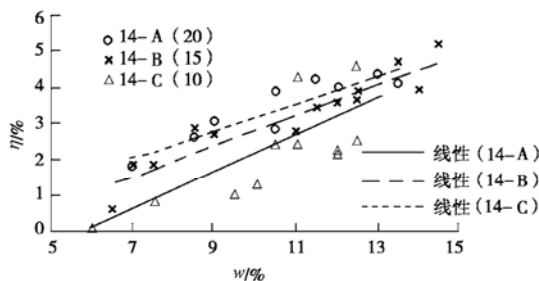


图 1 粉砂各饱和度下 $\eta-w$ 关系

Fig. 1 The relationship of $\eta-w$ of the silt with different saturations

图2 细砂各饱和度下 $\eta-w$ 关系Fig. 2 The relationship of $\eta-w$ of the fine sand with different saturations图3 不同含泥量中砂 $\eta-w$ 关系Fig. 3 The relationship of $\eta-w$ of medium sand with different fine grained soil contents图4 不同含泥量粗砂 $\eta-w$ 关系Fig. 4 The relationship of $\eta-w$ of coarse sand with different fine grained soil contents图5 不同含泥量细砾 $\eta-w$ 关系Fig. 5 The relationship of $\eta-w$ of fine gravel with different fine grained soil contents

由图1~5和表3可知:粗粒土各种土料冻胀性均随含水率增加而增加,但因含泥量不同而有所差异。总体看,随含泥量增加, $\eta-w$ 回归线向右偏移,说明土的粒度成分对冻胀有一定影响。

2.2 回归方程差异显著性检验

细砂、中砂、粗砂以及细砾都包括两种以上的土料样品,下面以细砂为例用斜率差与其标准差的比值来检验同一种粗粒土不同含泥量土料回归曲线之间的差异性。利用 t 法检验两回归系数差异显著性^[5],计算公式为: $t = \frac{|b_1 - b_2|}{S_{b_1 - b_2}}$,

$$\text{其中: } S_{b_1 - b_2} = \sqrt{\frac{Q_1 + Q_2}{N_1 + N_2 - 4} \left[\frac{1}{l_{x_1 x_1}} + \frac{1}{l_{x_2 x_2}} \right]},$$

$$U_1 = b_1 l_{x_1 y_1}, \quad Q_1 = l_{x_1 y_1} - U_1,$$

$$U_2 = b_2 l_{x_2 y_2}, \quad Q_2 = l_{x_2 y_2} - U_2.$$

对多泥细砂和少泥细砂两种土料回归曲线差异性检验结果如表4。由于 $t=1.187 < t_{39}^{0.01}=2.709$, 两条回归曲线无显著性差异。可以用一条回归直线表示 $\eta-w$ 的关系。同理可以检验中砂、粗砂以及细砾的不同土料的回归曲线之间也无显著性差异。因此,细砂、中砂、粗砂以及细砾都可以用一条回归曲线表示 $\eta-w$ 关系。各种粗粒土综合 $\eta-w$ 关系如表5所示。

3 粗粒土的分类研究

根据上面建立的各种不同土料 $\eta-w$ 经验关系式,确定各种土相应于不同冻胀等级和类别的含水率界限值,并与国内现行规范进行对比^[6-10]。

3.1 各种不同含泥量粗粒土料冻胀等级界限含水率

根据上述试验数据的统计分析,将冻胀率界限 $\eta=1, 3.5, 6$ 分别代入表5和表3的回归方程,可得到相应于各种土的冻胀等级界限含水率如表6、7所示。

将以上两表与文献[6~10]进行对比可得出以下几点:

(1) 粉砂的界限值比规范稍小,但很接近,可以认为二者基本一致。

(2) #6多泥细砂界限值比规范小,且差别较大,说明若按规范进行工程设计则不安全;#11少泥细砂仍可产生可观冻胀,非规范所言不考虑;多泥细砂和少泥细砂界限值十分接近,说明在研究 $\eta-w$ 关系时,没有必要按规范要求加以区分。

(3) 中砂的含水率界限随含泥量减少而变小;含泥量 $C \geq 15\%$ 中砂的含水率界限值比规范值小得多;含泥量 $C \leq 15\%$ 中砂仍可产生可观冻胀,非规范所言可不考虑 ($\eta \leq 1$); 8-C中砂 ($C=10\%$) 和 8-D中砂 ($C=5\%$) 的试验最大冻胀率比 8-E中砂 ($C=20\%$) 和 8-B中砂 ($C=15\%$) 要小,特别是 8-D中砂,其试验最大冻胀率仅为 $\eta=3.2\%$,说明当含泥量小到一定程度时,最大冻胀率将减小。

表 3 各种土料的 $\eta-w$ 线性回归方程

Table 3 The equation of linear $\eta-w$ regression of different soils

土的种类	线性回归方程	<i>n</i>	<i>R</i>	<i>F</i>	显著性	<i>w</i> ₀
#5 粉砂	$\eta=0.6216w-7.447$	20	0.9470	$F=156.419>F_{0.01}(1,18)=8.28$	非常显著	12%
#6 多泥细砂	$\eta=0.7775w-6.06$	22	0.9594	$F=231.256>F_{0.01}(1,20)=8.10$	非常显著	7.8%
#11 少泥细砂	$\eta=0.6805w-4.9097$	21	0.9241	$F=111.048>F_{0.01}(1,19)=8.180$	非常显著	7.2%
8-E (<i>C</i> =20%)	$\eta=0.8223w-5.9744$	22	0.9779	$F=437.666>F_{0.01}(1,20)=8.10$	非常显著	7.3%
8-B (<i>C</i> =15%)	$\eta=0.9034w-6.0901$	19	0.9830	$F=485.958>F_{0.01}(1,17)=8.40$	非常显著	6.7%
8-C (<i>C</i> =10%)	$\eta=0.6534w-3.1320$	9	0.8565	$F=24.784>F_{0.01}(1,7)=12.25$	显著	4.8%
8-D (<i>C</i> =5%)	$\eta=0.8799w-4.2852$	5	0.9501	$F=27.832>F_{0.01}(1,3)=10.100$	显著	4.9%
12-A (<i>C</i> =10%)	$\eta=0.7240w-4.1025$	8	0.9817	$F=159.289>F_{0.01}(1,6)=13.740$	非常显著	5.7%
12-B (<i>C</i> =15%)	$\eta=0.8355w-5.3458$	13	0.9449	$F=91.71>F_{0.01}(1,11)=9.650$	显著	6.4%
12-C (<i>C</i> =20%)	$\eta=0.8508w-6.0463$	12	0.9250	$F=59.25>F_{0.01}(1,10)=10.000$	显著	7.1%
14-A (<i>C</i> =20%)	$\eta=0.5151w-2.9553$	14	0.7758	$F=18.14>F_{0.01}(1,12)=9.33$	显著	5.7%
14-B (<i>C</i> =15%)	$\eta=0.426w-1.427$	13	0.9390	$F=82.06>F_{0.01}(1,11)=9.65$	显著	3.3%
14-C (<i>C</i> =10%)	$\eta=0.3754w-0.5436$	10	0.9129	$F=39.99>F_{0.01}(1,8)=11.26$	显著	1.4%

表 4 多泥细砂和少泥细砂回归曲线差异性比较

Table 4 The diversity of regression curves of the fine sand with different contents of fine grained soil

土料名称	<i>l</i> _{xx}	<i>l</i> _{yy}	<i>l</i> _{xy}	$ b_1-b_2 $	<i>S</i> _{<i>b</i>₁-<i>b</i>₂}	<i>t</i>	<i>t</i> ₃₉ ^{0.1}
多泥细砂	190.823	125.329	148.368	0.097	0.082	1.187	2.709
少泥细砂	173.143	93.89	117.889				

表 5 粗粒土的 $\eta-w$ 线性回归方程

Table 5 The equation of linear regression for coarse grained soil

土的种类	线性回归方程	<i>n</i>	<i>R</i>	<i>F</i>	显著性
粉砂	$\eta=0.6216w-7.447$	20	0.9470	$F=156.419>F_{0.01}(1,18)=8.28$	非常显著
细砂	$\eta=0.7327w-5.5296$	43	0.9415	$F=319.915>F_{0.01}(1,41)=7.295$	非常显著
中砂	$\eta=0.7358w-4.317$	55	0.9358	$F=361.710>F_{0.01}(1,53)=7.121$	非常显著
粗砂	$\eta=0.8079w-5.2279$	33	0.9376	$F=225.410>F_{0.01}(1,31)=7.542$	非常显著
细砾	$\eta=0.46w-1.9256$	37	0.8193	$F=71.45>F_{0.01}(1,35)=7.44$	非常显著

表 6 粗粒土的冻胀等级界限含水率

表 7 各种土料的冻胀等级界限含水率

Table 6 Boundary water content of coarse grained soil with different degrees of frost heave

等级冻胀率界限	$\eta=1$	$\eta=3.5$	$\eta=6$
粉砂	13.6	17.6	21.6
细砂	8.9	12.3	15.7
中砂	7.2	10.6	14.0
粗砂	7.7	10.8	13.9
中粗砂 (回归方程略)	7.28	10.6	14.0
细砾	6.4	11.7	

Table 7 Boundary water content of different soils under frost heave

等级冻胀率界限	$\eta=1$	$\eta=3.5$	$\eta=6$
#5 粉砂	13.6	17.6	21.6
#6 多泥细砂 (<i>C</i> =13.55%)	9.1	12.3	15.5
#11 少泥细砂 (<i>C</i> =7%)	8.7	12.3	16.0
8-E (<i>C</i> =20%)	8.4	11.4	14.4
8-B (<i>C</i> =15%)	7.8	10.6	13.4
8-C (<i>C</i> =10%)	6.3	10.1	(14.0)
8-D (<i>C</i> =5%)	6.0	8.8	
12-A (<i>C</i> =10%)	8.3	11.2	14.2
12-B (<i>C</i> =15%)	7.6	10.6	13.6
12-C (<i>C</i> =20%)	7.0	10.5	14.0
14-A (<i>C</i> =20%)	7.7	12.5	
14-B (<i>C</i> =15%)	6.0	11.6	
14-C (<i>C</i> =10%)	4.1	10.8	

(4) 粗砂的含水率界限值随含泥量减少而变小; 含泥量 $C \geq 15$ 粗砂的含水率界限值比规范值小得多; 对含泥量 $C \leq 15$ 粗砂仍可产生可观冻胀, 非规范所言可不考虑 ($\eta \leq 1$)。

(5) 粗砂和中砂相同含泥量时的含水率界限值非常接近, 说明在研究含水率对冻胀性影响时, 中粗砂可合在一起进行统计分析。

(6) 细砾的含水率界限值亦随含泥量减少而变小; 含泥量 $C \geq 15$ 细砾的含水率界限值比规范值小得多; 含泥量 $C \leq 15$ 细砾 (14-B 和 14-C) 仍可产生可

观冻胀, 非规范所言可不考虑 ($\eta \leq 1$); 从试验数据表 (略) 看, 细砾的冻胀率普遍较小, 最大冻胀率仅为 $\eta = 5.2\%$, 没有超过 $\eta = 6\%$ 的, 说明粗粒土骨架粒径大到一定程度时, 其冻胀性将减弱。

3.2 粗粒土 $\eta-w$ 关系综合分析

将粗粒土所有土样的 $\eta-w$ 数据在同一张图上描绘出来如图 6。由图可见, 粉砂与其他粗粒土偏离较远。分别建立除粉砂外粗粒土的 $\eta-w$ 综合线性回归方程(略), 并且将其与粉砂 $\eta-w$ 线性回归方程进行差异性检验, 检验结果说明粉砂和其他粗粒土综合回归方程有显著性差异, 说明在研究 $\eta-w$ 关系并进行冻胀等级界限含水率划分时, 将粉砂与其他粗粒土分开是合理的, 正如文献[6~10]所载那样。

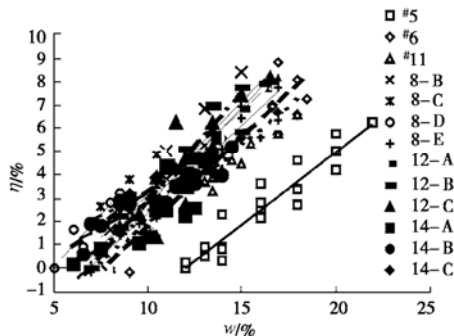


图 6 粗粒土的 $\eta-w$ 关系

Fig. 6 The relationship of $\eta-w$ of coarse grained soil

3.3 少泥粗粒土 $\eta-w$ 关系

将#11、8-B、8-C、8-D、12-B、12-C、14-B 和 14-C 试验数据进行 $\eta-w$ 综合线性回归分析(方程略), 可得相应 $\eta=1$ 、 $\eta=3.5$ 和 $\eta=6$ 的含水率界限值分别为 $w=6.64\%$ 、 $w=10.78\%$ 和 $w=14.92\%$ 。

试验和统计结果说明, 对于少泥粗粒土含水率达一定程度时, 仍可产生相当可观冻胀。而非规范所言, 可不考虑含水率多少, $\eta \leq 1$, 不冻胀。

3.4 多泥粗粒土 $\eta-w$ 关系

将#6、8-E、8-B、12-C、12-B、14-A 和 14-B 试验数据进行 $\eta-w$ 综合线性回归分析(方程略), 可得相应 $\eta=1$ 、 $\eta=3.5$ 和 $\eta=6$ 的含水率界限值分别为 $w=7.75\%$ 、 $w=11.24\%$ 和 $w=14.72\%$ 。

试验和统计结果说明, 对于多泥粗粒土, 其含水率界限值比规范值小得多。

4 结 论

通过对粗粒土冻胀敏感性分类的研究, 可得出以下几点结论:

(1) 土中的含水率是使其产生冻胀最主要的因素, 而含泥量的影响有限。从粉砂到粗砂, 冻胀率随含水率的增长而显著增长。文中所给的各种粗粒土的 $\eta-w$ 经验关系式可供工程实践参考。

(2) 通过与规范对比研究, 可得出规范规定的含泥量界限值是不合适的, 含泥量低于规定的界限值在

一定含水率的情况下是存在冻胀的, 甚至可达到强冻胀。

(3) 规范中规定的各冻胀等级除粉砂总的来看大致相同外其他粗粒土的含水率界限值普遍偏大, 这对工程设计不利, 可能会带来安全隐患。

(4) 总之, 规范在除粉砂外的粗粒土冻胀性分类方面, 无论是在土类划分和含泥量界限上, 还是在冻胀率与含水率关系及界限值规定上, 都存在许多问题, 明显偏于不安全方面, 值得商榷。

参考文献:

- [1] JTJ051-93 公路土工试验规程[S]. (JTJ051-93 Test methods of soil for highway engineering[S]. (in Chinese))
- [2] GB/T50123-1999 土工试验方法标准[S]. (GB/T50123-1999 Standard for soil test method[S]. (in Chinese))
- [3] SL237-1999 土工试验规程[S]. (Specification of soil test[S]. (in Chinese))
- [4] 吴紫汪, 张家懿, 王雅卿, 等. 土的冻胀性实验研究[C]//中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊(第二号). 北京: 科学出版社, 1981: 82-96. (WU Zi-wang, ZHANG Jia-yi, WANG Ya-qing, et al. Laboratorial study of frost heave of soil[C]//Memoirs of Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, CAS, No. 2. Beijing: Science Press, 1981: 82-96. (in Chinese))
- [5] 中国科学院数学研究所数理统计组编. 回归分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1974: 36-47. (Mathematical Statistics Team of Institute of Mathematics of Chinese Academy of Sciences. Regression analysis[M]. Beijing: Science Press, 1974: 36-47. (in Chinese))
- [6] GB50324-2001 冻土工程地质勘察规范[S]. (GB50324-2001 Code for engineering geological investigation of frozen ground[S]. (in Chinese))
- [7] JGJ118-98 冻土地区建筑地基基础设计规范[S]. (JGJ118-98 Code for design of soil and foundation of building in frozen soil region[S]. (in Chinese))
- [8] GB50007-2002 建筑地基基础设计规范[S]. (GB50007-2002 Code for design of soil and foundation of building[S]. (in Chinese))
- [9] TB10035-2002、J 158-2002 铁路特殊路基设计规范[S]. (TB10035-2002、J 158-2002 Code for design on special subgrade of railway[S]. (in Chinese))
- [10] JTJ024-85 公路桥涵地基与基础设计规范[S]. (JTJ024-85 Specifications for design of ground base and foundation of highway bridges and culverts[S]. (in Chinese))