

季冻区高速公路路基冻害调查及试验观测

李雨浓¹, 张喜发², 冷毅飞², 张冬青³

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092, liyunong-ren@163.com;

2. 吉林大学 建设工程学院, 长春 130026; 3. 吉林省高等级公路建设局, 长春 130021)

摘 要: 在对吉林省几条高速公路进行的野外冻害调查、现场观测和室内冻胀、水分迁移模拟试验的基础上, 依据取得的野外资料和室内试验数据, 对季冻区高速公路路基冻害的原因和影响因素进行分析和探讨; 对冻害与水分关系、路基冻害水分来源、水分迁移特征以及由于路面底基层二灰土性能恶化失效导致的道路翻浆等问题进行了深入研究. 同时利用本项目综合研究的特点, 将竖管法毛细水沿高度分布的研究资料与由冻胀试验揭示的各种冻胀率——含水量变化规律有机结合起来进行分析, 从而得到了毛细水冻害有效高度, 试验结果表明: 规范值相对试验值在一些情况下偏低, 有的低很多, 对路基防冻抗冻设计不利. 研究成果对公路路堤最小高度设计和挖方段防冻处理深度设计等防冻措施的采用有实际意义.

关键词: 路基冻害; 冻胀敏感性; 水分迁移; 毛细水冻害有效高度

中图分类号: TU445

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)04-0617-07

Investigation on freeway subgrade frost damage in seasonally frozen ground

LI Yu-nong¹, ZHANG Xi-fa², LENG Yi-fei², ZHANG Dong-qing³

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China, liyunong-ren@163.com; 2. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China;

3. Bureau of Highgrade Highway Construction of Jilin Province, Changchun 130021, China)

Abstract: According to the filed frost damage investigation, frost heaving test and moisture migration simulation test, this paper describes results from filed and experimental data that investigated the reason and factors affecting freeway subgrade frost damage in seasonally frozen ground region. The results of field observation and the test series are compared to discuss the relationship of frost damage and water content, the origin of water on frost damage, the characteristic of water translocation and the road frost boiling caused by the lime-ash-soil deterioration of the subbase. Furthermore, by virtue of comprehensive study of this project, the distribution data of capillary water along the height by standpipe method are combined with the change law of frost heaving ratio and water content, then the effective frost damage height can be obtained. Experimental results show that the values in specification are lower than those in test in some cases, which is unfavorable for the design of the subgrade prevention frostbite and anti-freeze. These results are significant for the design of the least height of road embankment and the depth of prevention frostbite at the site of excavation.

Key words: frost damage of highway subgrade; frost heaving sensitivity; moisture migration; effective frost damage capillary height

我国中深度季节冻土(>1 m)分布面积约占

国土面积的1/3^[1], 主要分布于东北三省、内蒙古、甘肃、宁夏、新疆北部、青海和川西等地. 这些地区, 今后若干年内, 在国家西部开发战略和振兴东北等老工业基地方针指引下, 交通部门必将建设大量的、等级更高的公路工程, 以满足国民经济发展的需要.

收稿日期: 2008-12-08.

基金项目: 吉林省交通厅合作资助项目(2002108).

作者简介: 李雨浓(1981—), 女, 博士研究生.

然而,季冻区路基冻害长期以来一直是困扰我国北方和西部道路建设的一个重要问题.随着高等级公路建设越来越多和道路交通负荷增大,对行车安全和舒适性要求越来越高,冻害对工程寿命和维护费用的影响也越来越大.工程上迫切需要采取专门有效的设计、施工措施,防治路基冻害.可是,现有工程经验(包括技术标准)在很多方面已不能满足这方面的要求.

本文在野外冻害钻探调查、野外冻害现场观测以及室内冻胀模拟试验、水分迁移模拟试验资料的基础上,对高速公路路面冻害变形破坏特征、路基土冻胀敏感性、路基水分迁移聚集、毛细水冻害有效高度以及路面底基层二灰土性能恶化失效等问题进行阐述,以期能在工程实践中对路基勘察、设计、施工和维护有所裨益.

1 冻害引起的路面变形破坏特征

经调查,高速公路路面冻害变形破坏现象有多种类型,但冻胀形成的横向挠曲变形及纵长裂缝和道路翻浆导致的沉陷及隆胀变形最为典型,对路面使用寿命和行车安全影响也最大.

1.1 路面横向挠曲变形和纵裂破坏

这是对道路危害最大的常见变形破坏类型.其主要特征是总变形量比较大,并且横向表现很不均匀,常伴随有纵向裂缝.图 1 为吉林省长余高速公路 2000~2001 年度观测的 4[#]点(K75+945)处路面的三维冻胀挠曲图.

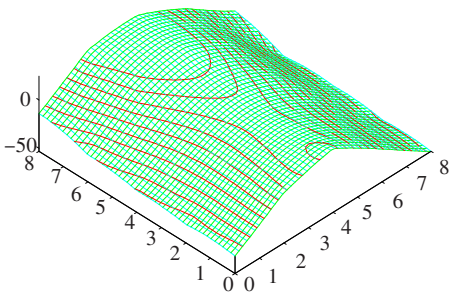


图 1 三维冻胀挠曲示意图

1.2 沉陷与隆胀

翻浆是道路特有的融冻病害作用和现象,是路基水、土、温度和行车荷载综合作用的结果.翻浆导致的沉陷、鼓胀和车辙等道路变形破坏严重影响了道路使用寿命和行车舒适安全.

2 路基水分的竖向迁移及冻胀反应

在路基土冻结过程中,由于土温的降低,原来的土水势平衡被打破,土中水分将从土水势高的下部向土水势低的冻结锋面方向迁移,产生重新分布^[2-4].长余高速公路 2001~2002 年观测的 11

号和 12 号点相距不过 1.7 km,都处于挖方地带,前者最大冻深 197.6 cm,后者 201.2 cm,相差不大.6 m 内均未见地下水(估计在 30~50 m 以下).二者冻前冻后含水量变化曲线见图 2、3.可以看出:冻后 12 号点含水量比冻前有了明显的增加,而 11 号点则不明显.

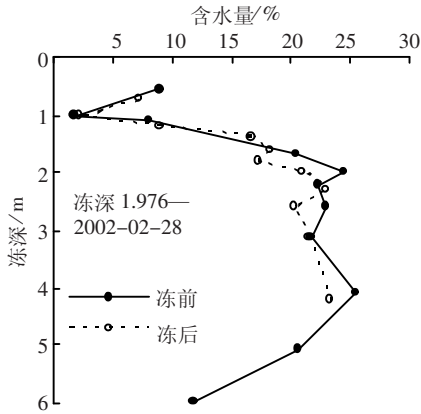


图 2 11 号点冻前冻后含水量变化曲线

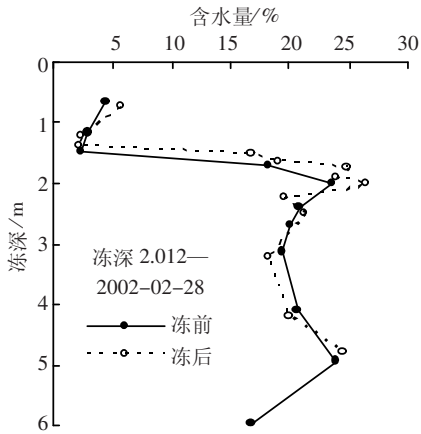


图 3 12 号点冻前冻后含水量变化曲线

路面冻胀反应与上述一致.12 号路段平均最大冻胀量达 56.7 mm,而 11 号点最大冻胀仅为 2.56 mm.两个测段的冻胀过程曲线如图 4 所示.

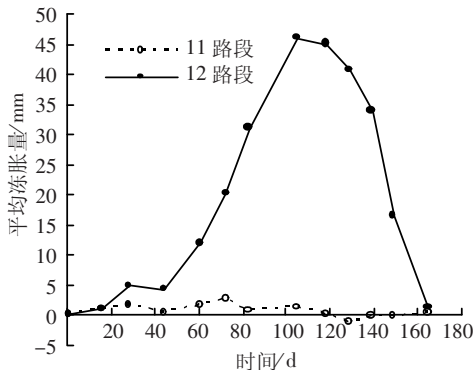


图 4 11 号和 12 号点冻胀曲线对比

经冻害调查和现场观测发现,路堑段路基水分在冻结期间的竖向迁移是造成季冻区路面变形破坏的重要原因,因此应将其作为道路抗冻设防的重点地段.

3 水分的它向迁移

通过调查发现,水分不单发生自下而上的竖向迁移,它向迁移补给(包括路肩坡面、失效排水沟、路面裂缝和中央隔离带等)也是致使道路冻害的重要因素.水分的它向迁移证据从一些路堤类路基调查资料中看得尤其清楚.

在 2001 年春季专门冻害调查工作时, ZK10 孔(长营线 K47+150~200 左幅)堤高 10.2 m, 这一带线路几处都有纵向裂缝, 钻孔所在部位裂缝蜿蜒达 80 多米. 1.40~1.80 m 范围内两个冻土样的融沉系数相当大, 为 1.0%~1.4%. 1999 年春季也曾在此钻孔附近做过冻害调查, 不妨将两个春天钻孔含水量剖面做以比较, 如图 5 所示. 显然从 1999 年春季至 2001 年春季含水量变化的趋

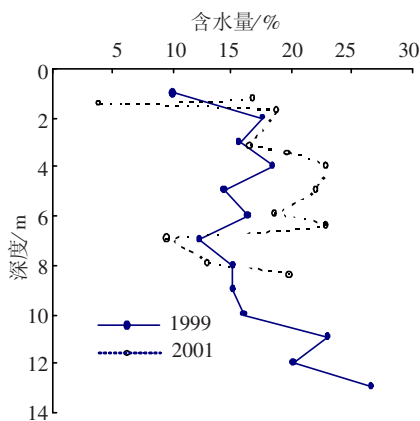


图 5 剖面含水量变化图

势是增加了. 由于路堤很高, 远超过地下水影响范围, 因此只认为增加的那部分含水量主要来自于它向迁移.

上述例子说明,对路堤类路基来说,水分的它向迁移是产生道路冻害不可忽视的影响因素.

4 路基土中的水分聚积状况

春季调查发现,现在许多处于零填挖、低填方和土质路堑中的破坏路段的路床材料——天然基底粘性土都处于过湿状态,有的甚至极湿。调查时的路基湿度状态与当初设计状态(中湿~湿)相比,已严重恶化,致使道路产生冻害。典型路段情况见表1。

表中干湿类型的评定参考文献[5],其中极湿状态是笔者赋予的术语,意指 W_e 值为负。显然是水分在路床上部(和砂砾防冻层底部交界一带)聚集成层状冰的结果。例如,2000 年春季调查的 ZK10 孔,在路床顶部 1.10 ~ 1.17 m 处见到厚达 7 cm 的纯冰层。

表1中有的路段潜水位比较高,但有的也不尽然。例如2001年调查的ZK7孔,防冻砂砾底面1.40 m深,1.40~3.80 m为低液限粘土,其下为高液限粘土,5.50 m深未见地下水位。该孔基底土含水量剖面见图6,可明显看出水分向上聚积。图中上部如此大的超塑含水量($W-W_p$)足以使土产生显著膨胀。

表 1 路床天然基土干湿状态

调查 年份	路段 编号	位置(里程)	挖填情况	路面破损状况	土质名称	稠度指标 W_c		干湿类型	
						0 ~ 0.3 m	0.3 ~ 0.8 m	0 ~ 0.3 m	0.3 ~ 0.8 m
2000 年 春季	ZK1	长平线, K103 + 250 左幅	基本零挖填	纵长裂缝延伸约 1 km, 沟状车辙	低液限粘土	-0.53	0.930	极湿	潮湿
	ZK3	长营线, K37 + 425 右幅	堑深 2.1 m	纵长裂缝断续延伸约 700 m	有机质高液 限粘土	0.48	0.539	过湿	过湿
	ZK6	长平线, K6 + 600 右幅	堑深 7 m	翻浆面致深宽槽状沉陷, 多次修复(最近为 1999 年)	全风化 砂岩	平均含水量 $W = 27.5\%$			
	ZK7	长平至长吉高速公路 匝道口处	堑深 4 m	沉陷, 断续纵向裂缝	低液限粘土	0.74	0.863	过湿	潮湿
	ZK8	长吉线, K64 + 700 右幅	深挖方	沉陷和鼓包, 无裂缝	低液限粘土	-0.38	0.518	极湿	过湿
	ZK10	长平线, K109 + 500 左幅	深挖方	鼓包、沉陷及纵向裂缝, 1999 年曾翻修过	低液限粘土	-3.25	-0.148	极湿	极湿
2001 年 春季	ZK1	长余线, K98 + 554 右幅	堑深 4.4 m	纵裂	低液限粘土	0.56	0.83	过湿	潮湿
	ZK3	长余线, K135 + 750 左幅	堑深 4.6 m	纵裂	低液限粘土	0.78	0.80	过湿	潮湿
	ZK4	长余线, K4 + 426(13 标) 左幅	堑深 5.1 m	纵裂和翻浆	低液限粘土	0.50	0.82	过湿	潮湿
	ZK7	长平线, K84 + 900 右幅	堑深 1 m	纵向裂缝延伸 350 ~ 400 m, 车辙	低液限粘土	0.57	0.67	过湿	过湿
	ZK12	长吉线, K15 + 850 右幅	堑深 6.5 m	纵向裂缝, 长约 30 m	低液限粘土	-1.14	0.95	极湿	潮湿

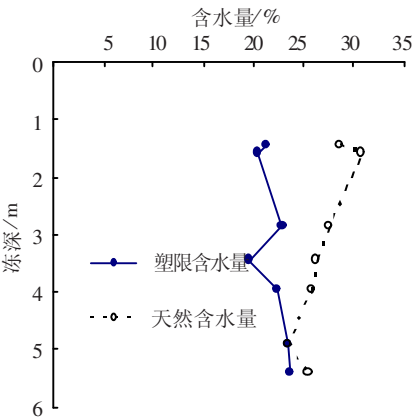


图 6 ZK7 孔含水量剖面

5 路基土冻胀敏感性试验

5.1 室内冻胀试验概况

试验所用土料取自吉林省陶赖昭镇松花江一级阶地前缘和漫滩以及长春市伊通河二级阶地上,为典型的河流冲积物或冲洪积物.所取土料经过风干——粉碎——必要调制或配制等工序后,形成试验所用土料.试验土料颗粒组成、塑性和重型击实等基本物理力学指标均按公路部门有关要求^[6]进行试验,结果见表 2 和表 3.

表 2 细粒土土料基本物理力学指标

土料 编号	最大干 密度 $\gamma_{dmax}/$ ($g \cdot cm^{-3}$)	塑限 $w_p/\%$	液限 $w_L/\%$	塑性 指数 I_p	粒度成分/%								土料 名称
					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~ 0.002 mm	<0.002 mm	
2 [#]	1.87	22.2	40.3	18.1	0.28	0.41	0.62	18.75	47.38	13.82	13.82	4.92	低液限 粘土
3 [#]	1.83	26.3	52.7	26.4	0.21	0.34	0.64	11.86	44.46	17.78	16.8	7.91	高液限 粘土
7 [#]	1.91	33.5	20.7	12.8	1.85	9.04	14.41	18.75	42.38	9.00	4.87(<0.005)	—	低液限 粘土
4 [#]	1.95	18.8	28.1	9.24	0	9.05	24.5	27.24	34.82	3.06	1.33(<0.005)	—	低液限 粉土

表 3 粗粒土土料基本物理力学指标

土料 编号	$\gamma_{dmax}/$ ($g \cdot cm^{-3}$)	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	0	0	0.98	27.87	39.19	15.66	13.97	1.85	0.48	粉砂
6 [#]	1.89	0	0	0.14	5.92	41.74	38.65	5.42	7.18	0.81	0.14	多泥细砂
11 [#]	1.80	0	0	0.14	5.92	41.74	45.20	2.80	3.71	0.42	0.07	少泥细砂
8-E	2.02	0	1.53	4.88	14.43	50.11	9.14	(20)	—	—	—	中砂
8-B	1.99	0	1.63	5.17	15.32	53.18	9.70	(15)	—	—	—	
8-C	1.89	0	1.72	5.48	16.22	56.31	10.27	(10)	—	—	—	
8-D	1.82	0	1.82	5.78	17.13	59.43	10.84	(5)	—	—	—	
12-A	1.88	0	1.16	10.82	50.85	21.85	5.32	(10)	—	—	—	粗砂
12-B	1.94	0	1.10	10.22	48.03	20.64	5.01	(15)	—	—	—	
12-C	2.00	0	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)	—	—	—	细砾
14-B	1.99	0.65	24.55	31.02	17.98	8.84	1.90	(15)	—	—	—	
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.

冻胀率试验按文献[7-8]要求进行,采用闭式试验.闭式试验的好处是容易建立峰值冻胀率

和土的各种物性指标间的关系,不牵涉时间因子,因此适合研究土的冻胀敏感性.先后完成有效冻胀模拟试验 270 个,其中 4 种细粒土冻胀试验 82 个,13 种粗粒土冻胀试验 188 个.

5.2 细粒土试验结果及分析

对表 2 所列 4 种细粒土进行了一系列的冻胀试验.按试验数据绘制冻胀率(η)—含水量(w)曲线.结果各曲线都具有共同特征,即开始呈线性,过后曲线变的很平缓.为了便于比较分析,取线性段进行研究,结果如图 7 所示.

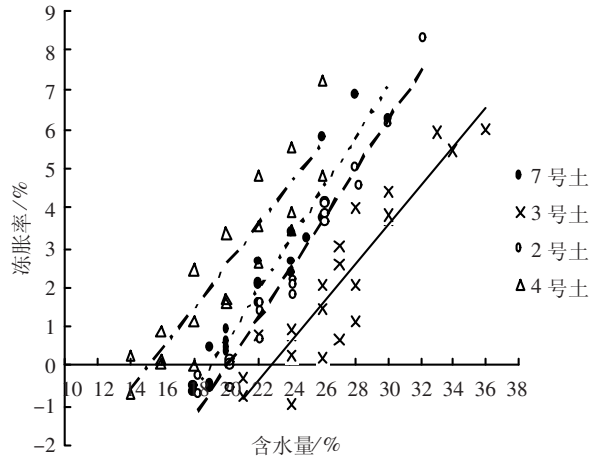


图7 细粒土 $\eta - w$ 关系

由图可见,在相同含水量时,土的冻胀性随着颗粒变细而减弱.对一般细粒土而言,粒度成分影响主要表现在塑性指标大小上.为了综合考虑细粒土的含水量和塑性大小对冻胀性的影响,可用与含水量具有相同量纲的超塑含水量($w - w_p$)因子建立和冻胀率间的关系^[9].

经数理统计分析,4 种细粒土 $\eta - (w - w_p)$ 线性方程间无显著差异,可统一用下式表达:

$$\eta = 0.5558(w - w_p) + 1.5325, \quad (1)$$
$$R^2 = 0.8728, \quad n = 82,$$
$$F = 548.931 > F_{0.01}(1,80) = 7.00, \text{ 高度显著.}$$

5.3 粗粒土试验结果及分析

表 3 中 13 种粗粒土料试验所得 $\eta - w$ 关系见图 8. 由图显示,以及通过数理统计分析和与文献[10-13]比较,得出如下几点^[14]: (1) 粉砂线性回归方程和其它粗粒土综合回归方程间有显著差异,说明研究 $\eta - w$ 关系并进行冻胀等级界限含水量划分时,将粉砂与其它粗粒土分开是合理的,文献[10-13]中有关粉砂土冻胀等级的界限含水量的划分与试验结果基本一致; (2) 文献中提出的粗粒土各冻胀等级含水量界限值除粉砂外普遍偏大,这对工程设计不利; (3) 文献中规定的粗粒土含泥量($<0.075 \text{ mm}$)界限值不够合适,含水量低于规定的界限值在一定含水量的情况下存在

冻胀,甚至可达到强冻胀.

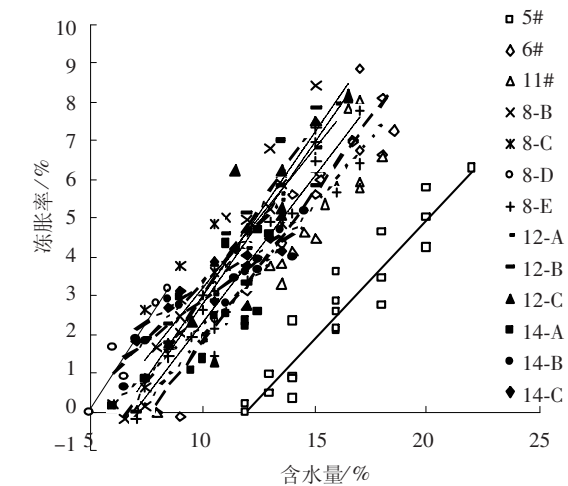


图8 粗粒土的 $\eta - w$ 关系

粗粒土土质条件对冻胀敏感性的影响主要在于粒度成分.从图 8 可看出不同颗粒组成土料的起始冻胀含水量 w_0 是有区别的.引入($w - w_0$)因子,经 t 法显著性检验和 Q 型聚类分析,都说明粉砂、细砂、中砂、粗砂等粗粒土的 $\eta - (w - w_0)$ 关系可综合起来进行分析,线性回归方程式为

$$\eta = 0.7361(w - w_0) + 0.152, \quad (2)$$

式中: w_0 可按下式确定:

$$w_0 = 0.0309c/d_{50} + 5.3669, \quad (3)$$
$$\text{或 } w_0 = 85.616s + 1.5708. \quad (4)$$

式中: c 为粗粒土中细粒($c < 0.075 \text{ mm}$)含量,简称含泥量; d_{50} 为平均粒径; s 为粗粒土比表面积.

6 毛细水冻害有效高度试验

先后在室内对 10 种土料进行了一系列的毛细水分迁移的竖管法模拟试验和土的冻胀率模拟试验,得到含水量沿高度的分布曲线和冻胀率随含水量变化曲线及回归方程.通常认为 $\eta \leq 1.0$ 时的含水量为不冻胀界限含水量或安全临界冻胀含水量^[10-13].用各种土料的不冻胀界限含水量值在相应的毛细水含水量沿高度分布曲线上找出相应的高度,该高度即为毛细水冻害有效高度.现以 4# 粉土为例进行说明.4# 粉土在不同密度下毛细含水量与高度关系见图 9.4# 粉土 $\eta - w$ 的回归方程为: $\eta = 0.5189w - 7.9119$.按 $\eta \leq 1$ 求得冻胀界限含水量为 17.17%.取压实度为 0.9,结合竖管试验结果,可由图 10 求得有害的毛细上升高度 $h_s = 2.25 \text{ m}$.

按照上述方法将求得的其他土的有害毛细高度与文献[10-13]进行对比,见表 4.可见,除个别外,规范值普遍比试验结果要小,有的低很多.按规范设计显然偏于不安全方面.

上述冻害有效高度仅是室内常温下的试验研究结果. 如果考虑冷端温度效应, 相信实际冻害有效高度可能要比表 4 所列试验结果还要大一些.

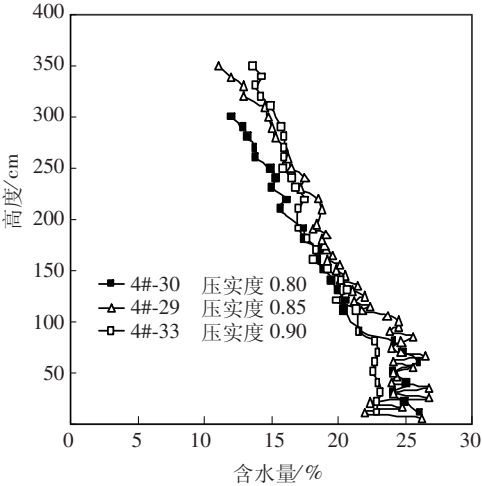


图 9 4# 粉土不同密实度含水量分布对比图

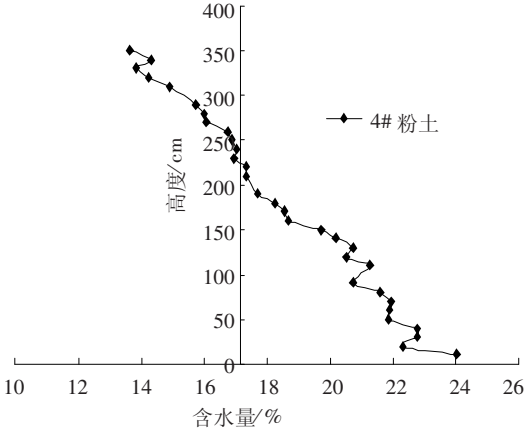


图 10 4# 粉土有害毛细上升高度

7 路面底基层二灰土的性能恶化

调查发现,许多路段的底基层性能恶化,含水量高,呈软塑或散粒状态. 例如 2001 年调查的 ZK5

孔二灰土 $w = 27.06\%$, 处于饱和状态, ZK6 孔二灰土 $w = 22.5\%$ 等. 当初结构层材料的含水量肯定不会如此之高, 这显然是水分迁移引起的. 这种水分迁移不一定是竖向的, 地面水也可以通过路肩边坡、排水沟、中央隔向的, 地面水也可以通过路肩边坡、排水沟、中央隔离带和路面侵袭到路基中来, 从而使结构层材料性能恶化.

最突出的例子当属 2004 年春季长余高速公路 K131 + 17 ~ K131 + 259 左幅填方路段靠近中央隔离带附近产生严重道路翻浆变形破坏 (图 11), 致使道路封闭、被迫翻修. 该段底基层二灰土钻进容易, 感觉十分松软. 含水量 $w = 19.66\% \sim 28.98\%$, 平均 24.38% , 并且所钻 4 个钻孔均呈现出含水量上大下小特点. 天然稠度 $w_c = 0.56 \sim 0.99$, 平均 0.81 , 如果按土质砂考虑的话, 该二灰土总体上呈现过湿状态 (调查时间稍晚, 相信翻浆形成期间的情况会更糟). 二灰土单轴抗压强度很低, $q_u = 33.1 \sim 141.12 \text{ kPa}$, 平均 84.65 kPa , 仅为文献 [15] 要求的 7 d 浸水抗压强度 $\geq 600 \text{ kPa}$ 的 $1/7$, 最小的甚至仅 $1/18$. 造成该处路面破坏的最直接和重要的原因是二灰土底基层受水和冰侵袭并在车辆荷载作用下失效. 而致使二灰土受侵袭失效的水和冰不可能是由路基自下而上垂直迁移过来的, 因为经过钻探试验证实该路段底基层之下至少 3 m 厚范围的路基土都是干燥坚硬的. 从调查看, 侵袭此处二灰土的水分主要来自中央隔离带附近. 外高内低的扇形路面有利于雨水和雪水向中央部位汇集. 这些水分通过隔离带底面、排水沟底和防渗性差的面层向下渗透. 二灰土层本身透水性又强, 地下排水设施失效致使二灰土底基层内容纳了大量水和冰.

表 4 试验分析资料与规范对比

土名称	规范		室内试验		平均	
	冻前含水量	冻结期间地下水位距	不冻胀的界限	冻害有效	冻胀率	冻胀类别
	$w/\%$	冻结面的最小距离 h_s/m	含水量 $w/\%$	高度 h_s/m	$\eta/\%$	
粗砂 (粒径 $< 0.074 \text{ mm}$ 的颗粒含量 $\leq 15\%$)	不考虑	不考虑	$w = 7.05$	0.40		
中砂 (粒径 $< 0.074 \text{ mm}$ 的颗粒含量 $\leq 15\%$)	不考虑	不考虑	$w = 6.32$	0.80		
中砂 (粒径 $< 0.074 \text{ mm}$ 的颗粒含量 $> 15\%$)	$w \leq 12$	> 1.0	$w = 5.51$	1.95		
细砂 (粒径 $< 0.074 \text{ mm}$ 的颗粒含量 $> 10\%$)	$w \leq 12$	> 1.0	$w = 9.08$	0.40		
粉砂	$w \leq 14$	> 1.0	$w = 13.59$	1.25	$\eta \leq 1$	不冻胀
粉土	$w \leq 19$	> 1.5	$w = 17.17$	2.25		
1# 粘性土 (低液限)	$w \leq w_p + 2$	> 2.0	$w = 21.30$	2.00		
2# 粘性土 (低液限)	$w \leq w_p + 2$	> 2.0	$w = 21.90$	2.45		
7# 粘性土 (低液限)	$w \leq w_p + 2$	> 2.0	$w = 20.40$	2.40		
3# 粘性土 (高液限)	$w \leq w_p + 2$	> 2.0	$w = 24.61$	1.70		

由于底基层含水量高,失去了辅助承载能力,在融冻和车辆荷载作用下产生翻浆,致使这些地段路面普遍伴随有比较严重的沉陷、鼓胀和车辙现象。

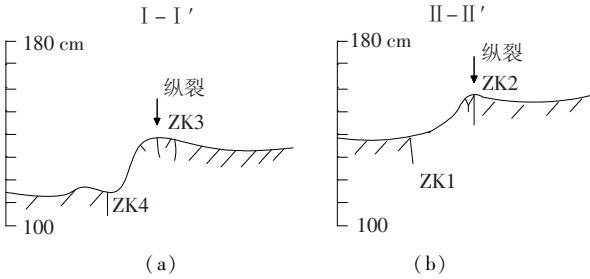


图 11 路面变形横剖面

8 结 论

1)路基冻害破坏形式,主要以冻胀形成的横向挠曲变形及纵长裂缝和道路翻浆导致的沉陷及隆胀变形最为典型。

2)水分迁移致使路基含水量和湿度发生变化,对路基冻害的产生有着实质性的影响。水分不单发生自下而上的竖向迁移,它向迁移也是致使道路发生冻害的一个重要原因。路堑段应该作为防止冻结期间发生水分竖向迁移的重点防设地段,而对于具有合理高度的路堤段来说,如何防止水分它向迁移应作为设计考虑的重要内容。

3)对细粒土来说,可建立统一的超塑含水量($w - w_p$) - 冻胀率 η 间关系,以综合考虑含水量和土质条件对冻胀性的影响。

4)对粗粒土,通过试验资料统计分析和比较,看出文献[6 - 9]在对某些土质的冻胀性评估以及冻胀等级界限含水量的确定方面存在一些值得商榷的地方。粗粒土亦可建立起综合考虑含水量和土质条件对冻胀性的统一的 $\eta - (w - w_0)$ 间数学表达式,式中 w_0 可用土的有关物性指标加以确定。

5)通过毛细水冻害有效高度试验研究,发现规范值在一些情况下偏低,有的低很多,对路基防冻抗冻设计不利。

6)路面底基层二灰土的性能恶化可加重路基的冻害。足够强度和刚度且抗冻性能良好的基层和底基层对减轻冻害有着至关重要的作用。

参考文献:

- [1] 周幼吾,郭东信,邱国庆,等. 中国冻土[M]. 北京:科学出版社,2000:157 - 170.
- [2] 徐学祖,王家澄,张兰新. 冻土物理学[M]. 北京:科学出版社,2001:125 - 145.
- [3] 何平,程国栋,朱元林. 土体冻结过程中热质迁移研究进展[J]. 冰川冻土,2001,23(1):92 - 98.
- [4] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 第二版. 北京:中国水利水电出版社,2000:18 - 21.
- [5] 中交公路规划设计院. JTG D50——2006 公路沥青路面设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2006:14 - 15.
- [6] 交通部公路科学研究所. JTJ051 - 93 公路土工试验规程[S]. 北京:人民交通出版社,1993:31 - 135.
- [7] 中华人民共和国水利部. GB/T50123 - 1999 土工试验方法标准[S]. 北京:中国计划出版社,1999:140 - 142.
- [8] 南京水利科学研究院. SL237 - 1999 土工试验规程[S]. 北京:中国水利水电出版社,1999:404 - 407.
- [9] 冷毅飞,张喜发,张冬青. 季冻区公路路基细粒土冻胀敏感性研究[J]. 冰川冻土,2006,28(2):211 - 216.
- [10] 国家林业局. GB50324 - 2001 冻土工程地质勘察规范[S]. 北京:中国计划出版社,2001:5 - 9.
- [11] 黑龙江省寒地建筑科学研究院. JGJ118 - 98 冻土地地区建筑地基基础设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1998:8 - 10.
- [12] 中华人民共和国建设部. GB5007 - 2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002:105 - 107.
- [13] 铁道第一勘察设计院. TB10035 - 2002, J158 - 2002 铁路特殊路基设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社,2002:67 - 69.
- [14] 张以晨,李欣,张喜发,等. 季冻区公路路基粗粒土的冻胀敏感性及其分类研究[J]. 岩土工程学报,2007,29(10):1522 - 1526.
- [15] 交通部公路科学研究所. JTJ034 - 2000 公路路面基层施工技术规范[S]. 北京:人民交通出版社,2000:40 - 54.

(编辑 赵丽莹)