

文章编号:1671-8879(2006)05-0013-04

## 多年冻土地区湿度对水泥 稳定砂砾强度的影响

马 翥, 王秉纲

(长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

**摘 要:**多年冻土地区路面水泥稳定砂砾基层应用中,普遍存在基层上下松散、中部板结的“夹层”现象。在定性分析的基础上,通过模拟多年冻土地区基层下垫层的可能湿度状况养生的强度试验,定量分析了湿度对水泥稳定砂砾强度形成的影响,探讨了“夹层”现象产生的原因。研究得出,垫层含水量小于基层混合料最佳含水量时,对基层混合料强度形成有明显影响,抗压强度随垫层含水量的减小而降低;模拟湿度养生混合料的强度形成过程与标准养生基本相近,但 14 d 后强度增长显著减缓;混合料形成骨架结构时,可以减轻水分损失对混合料后期强度形成的影响。结果表明:多年冻土地区特殊的湿度条件是水泥稳定砂砾基层出现“夹层”现象的主要原因,在基层施工中针对特殊湿度条件采取有效工程技术措施,可以避免“夹层”现象的出现。

**关键词:**道路工程;多年冻土地区;路面基层;水泥稳定砂砾;湿度条件;强度形成;夹层

中图分类号:U416.212

文献标识码:A

## Influence of humidity on strength of cement-stabilized-gravel in permafrost area

MA Biao, WANG Bing-gang

(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education,  
Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** The interlayers that characterized as harden in middle and incompact in top and below widely occurred in the cement-stabilized-gravel when contrustring the base course of pavement in permafrost area. The influence of humidity condition on the strength forming of the base mixture were quantitatively analyzed by the strength test simulating the possible humidity condition of the underlay below the base in permafrost area, and the cause of this phenomena was discussed. It was pointed that the water content of the underlay evidently affects the strength forming of the base mixture while it is less than the optimal water content of the base mixture. With the water content of the underlay reducing, the compact strength of the base mix decreases. The strength forming process of the base mixture on the status simulating the humidity condition is basically near with that on the standard status, but evidently slows after fourteen days. The framework structure formed in the mixture can decrease the influence of the water loss to later strength forming. The results indicated that the special humidity condition of the permafrost area is the

收稿日期:2005-06-16

基金项目:国家西部交通建设科技项目(200231881205)

作者简介:马 翥(1972-),男,甘肃会宁人,副教授,博士。

primary cause of the phenomena, and taking some effective engineering technical measures during the base course construction can avoid those interlayers. 2 tabs, 4 figs, 6 refs.

**Key words:** road engineering; permafrost area; pavement base course; cement-stabilized-gravel; humidity condition; strength forming; interlayer

0 引言

多年冻土地区特殊的自然和地质条件,使多年冻土地区道路修筑一直被视为世界性难题。中国多年冻土地区路面以半刚性基层沥青路面居多,如青藏公路、214 国道等,路面基层以水泥稳定砂砾为主。在多次青藏公路现场钻芯调查中发现,路面水泥稳定砂砾基层取芯试样存在上下松散中部板结的“夹层”现象,即靠近面层的上部和与砂砾垫层接触的下部松散,而中间部分形成板体。在对多年冻土地区公路施工和管理人员咨询中证实此现象普遍存在。这种“夹层”导致半刚性基层有效厚度减薄,降低了路面结构的整体强度和承载能力,极易引起路面松散、龟裂等病害<sup>[1~2]</sup>。为此,本文从水泥稳定砂砾强度形成机理进行定性分析,成型试件模拟湿度养生,进行强度试验,定量分析湿度对混合料强度形成的影响,探讨“夹层”现象产生的原因,为解决这一问题提供依据<sup>[3~4]</sup>。

1 “夹层”现象定性分析

水泥稳定砂砾基层的这种“夹层”现象在一般非多年冻土地区少见,而原材料质量、混合料级配组成、施工离析控制不满足要求等仅可能形成上下分层或整体不足,不致出现明显夹层。这种“夹层”现象产生的原因可能与多年冻土地区的特殊条件有关。多年冻土地区的特殊条件中,对水泥稳定砂砾混合料强度形成有影响的因素主要是温度和湿度。模拟试验分析表明,低温和负温会延缓强度的形成,致使最终强度较低,但出现“夹层”的概率很低。因此,湿度可能是引起“夹层”现象的主要原因。

多年冻土地区一般多风且风速大、日照时间长且强度大、气候干燥、蒸发率高,水泥稳定砂砾基层在已成型的砂砾垫层上铺筑、碾压成型后,在大风、强辐射等影响下,表面混合料水分散失很快,若覆盖养生不及时,表面水分蒸发损失更严重,使上部混合料中参与强度形成的自由水减少;同时,基层与垫层施工并非连续,往往在垫层施工结束后间隔一段时间再施工基层,已成型的垫层将在蒸发作用下表面含水量较低,新铺筑的基层混合料与垫层接触面之

间形成含水量差,产生湿度梯度,再加上基层混合料中自由水的重力作用,水分将在湿度梯度和重力共同作用下向下迁移渗透,使基层下部混合料中参与强度形成的自由水减少。而水泥稳定砂砾的强度主要来源于水泥的水化物,若无足够的水分满足水泥水化的需要,会影响水化物的生成速度和生成量,最终影响强度的形成。因此,这两方面水分的减少,将导致基层上部和下部混合料粘结力减小,可能出现松散。由此可知,多年冻土地区水泥稳定砂砾基层出现“分层”现象的主要原因是特殊的湿度条件。

2 模拟湿度条件的混合料强度试验

2.1 试验原材料

(1)水泥。32.5 级普通硅酸盐水泥,各项物理力学性质满足要求。

(2)砂砾。青藏公路现场天然砂砾,其压碎值为 16.8%,扁平细长颗粒含量为 10.6%。

2.2 试验混合料

试验混合料砂砾级配如表 1 所示。通过混合料重型击实试验和 7 d 无侧限抗压强度试验,得出符合强度要求(3.0 MPa)的混合料试验配合比。级配 1:水泥用量 4.9%,最佳含水量 5.61%,最大干密度 2.24 g/cm<sup>3</sup>;级配 2:水泥用量 5.1%,最佳含水量 6.10%,最大干密度 2.27 g/cm<sup>3</sup><sup>[5]</sup>。

表 1 室内试验砂砾级配组成

筛孔尺寸/ mm	30.00	20.00	9.50	4.75	2.36	1.18	0.60	0.30	0.15	0.075
级配 1 通过率/%	100	95.0	68.8	48.2	28.4	18.6	11.6	5.5	1.3	0.2
级配 2 通过率/%	100	95.0	68.2	35.0	20.0	12.9	8.0	3.8	1.0	0.2

2.3 模拟试验方法与结果

模拟试验初期,根据定性分析结果,计划同时模拟表面水分蒸发和下部水分渗透两种情况,但尝试试验发现表面蒸发量与温度、风速等有关,且实际蒸发量变化范围较大,室内模拟效果较差;同时考虑只要在施工中加强养生,基层成型后及时保湿养生,可以减少表面蒸发量。因此,简化模拟试验条件,只模拟下部水分迁移渗透情况。

根据实际施工中基层下垫层的可能湿度状况,确定养生下垫层的含水量,模拟基层与垫层之间的湿度梯度。调查得到青藏公路沿线天然砂砾风干含水量为 3%~5%,故取 4%模拟风干状态;沿线满足级配要求的砂砾垫层最佳含水量在 10%左右,故取 10%模拟垫层处于最佳含水量状态;取 20%模拟基层施工前对垫层表面充分洒水湿润状态。

在模拟试验中,将试样制作成型后马上放置在具有含水量 4%、10%和 20%的土层上,用塑料薄膜覆盖,在恒温室(恒温 20℃)中养生,使混合料水分向下渗透迁移。试验中观察发现,试样下垫层逐渐湿润,验证了水分损失的存在,说明采用控制养生垫层含水量可以模拟基层下部水分的损失,模拟试验方法可行。混合料抗压强度结果见表 2。

表 2 混合料强度试验结果 MPa

级配种类		级配 1				级配 2			
龄期/d		3	7	14	28	3	7	14	28
模拟湿度养生	4%	1.09	2.69	3.63	3.70	0.80	2.16	3.74	4.37
	10%	1.08	2.74	3.78	3.85	0.95	2.66	3.94	4.73
	20%	1.11	2.82	4.13	5.06	0.93	3.03	4.35	5.84
标准养生		1.95	3.00	4.26	5.00	1.84	3.00	4.56	5.95

3 试验结果分析

3.1 垫层含水量影响分析

由图 1、图 2 可知,混合料抗压强度随垫层含水量的减小而降低,降低幅度与龄期、混合料级配组成有关。龄期越长,垫层含水量影响越明显。垫层含水量从 4%增大到 10%,再进一步增大到 20%,两个阶段对混合料强度的影响有所不同。垫层含水量小于压实后基层混合料含水量属于不利情况,会导致基层混合料自由水的减少,影响强度形成。

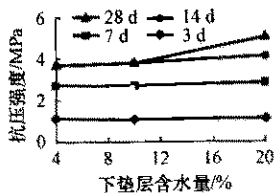


图 1 垫层含水量对混合料强度的影响(级配 1)

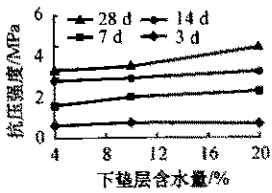


图 2 垫层含水量对混合料强度的影响(级配 2)

垫层含水量对基层混合料强度形成的影响,可以从基层混合料自由水的迁移渗透损失及其对强度形成的影响加以分析解释。压实基层混合料与垫层之间含水量存在差异而形成湿度梯度作用,当垫层含水量小于基层混合料含水量时,垫层混合料对自由水的吸附作用强于基层混合料,将与基层混合料

“争水”,在垫层顶面与基层底面之间形成湿度梯度,垫层含水量越小,湿度梯度越大。基层混合料中的自由水在湿度梯度和重力综合作用下,向下迁移渗透而被垫层吸附,导致自由水减少。随着垫层含水量的增大,湿度梯度减小,基层混合料中的自由水被垫层吸附的量减少,即自由水损失量减少,对混合料强度形成的影响降低。

在强度形成初期,自由水迁移渗透时间短、迁移量少,对混合料强度形成的水泥水化、水解等反应影响较小。因此,不同垫层含水量时混合料强度差异不大。但应注意的是,试验模拟方法与实际条件存在一定差异,模拟试验是将已压实成型的试样置放于下垫层上,而实际施工过程中基层混合料直接在垫层上摊铺、碾压与成型,要经历由松散状态到密实状态的过程,两种条件下的水分渗透明显不同,实际条件下的水分渗透比模拟试验更快,水分损失量也更大。因此,实际条件下水分迁移渗透损失仍会对混合料早期强度形成产生影响。随着养生龄期的延长,基层混合料自由水中向下迁移渗透的量不断增加,对强度形成的影响越大,致使不同垫层含水量时基层混合料强度的差异明显。

3.2 龄期影响分析

由图 3、图 4 可知,模拟湿度养生混合料强度形成过程与标准养生的相近,抗压强度随养生龄期的延长而呈曲线增长,初期强度形成速度较快,后期逐渐减缓,模拟养生混合料强度表现地更加明显。

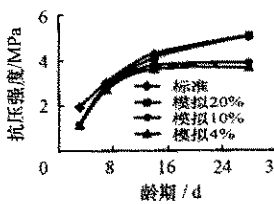


图 3 混合料强度随龄期的变化(级配 1)

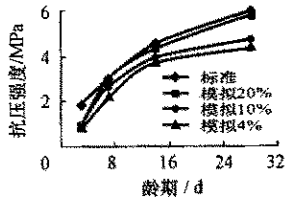


图 4 混合料强度随龄期的变化(级配 2)

模拟养生 3 d 时,水分损失量较小,不同垫层含水量条件的水分损失差异不大,抗压强度比较接近,但明显低于标准养生同龄期强度,其原因主要在于标准养生中有外界水分的不断补充,水化反应速度更快,水化物生成量更大。随着养生时间的延长,水分损失量逐渐累积增多,不同垫层含水量下的湿度梯度不同,使水分损失累积量差异逐渐明显,同龄期强度出现差异。模拟湿度养生在 14 d 前强度形成速度快于标准养生,而 14 d 后明显减缓。

3.3 混合料级配组成影响分析

垫层含水量为 4%和 10%时,两种混合料模拟

湿度养生下后期强度形成速度比标准养生缓慢,后期强度明显减小,且级配 1 混合料比级配 2 混合料更明显,即级配 1 混合料后期强度形成受湿度影响更大。对于垫层含水量为 20%,与前述分析类似,即影响很小<sup>[6]</sup>。

两种混合料级配组成中 9.50 mm 以上颗粒和 0.075 mm 以下颗粒含量均相同,差异主要在:级配 1 混合料的级配曲线基本属于连续密实平顺曲线,而级配 2 混合料减小了 4.75 mm 以下颗粒含量,级配曲线呈“S”形,属骨架结构。同时,级配 1 混合料的最佳含水量为 5.61%,而级配 2 混合料为 6.1%,在垫层含水量相同时,级配 1 混合料湿度梯度大于级配 2 混合料。从骨架作用和含水量两方面可以解释级配组成对后期强度形成的影响。

级配 1 混合料与级配 2 混合料相比,细料含量较多,密实状态下自由水迁移通道直径较小,湿度梯度和重力作用下自由水迁移渗透速度加快,相同时间的水分损失增多,对水化物和附加胶结物生成的影响加大,导致后期强度形成更为缓慢;同时,级配 2 混合料中粗颗粒形成的骨架不受水分损失影响,骨架对混合料强度的贡献不会改变,再加上水分损失较少,因而对后期强度增长速度影响较小。另一方面,在相同模拟养生过程中,级配 1 混合料受到的湿度梯度作用比级配 2 混合料略大,自由水分损失速度也略快,使长时间水分损失累积量增大,导致后期强度形成缓慢。由此可得,水泥稳定粒料混合料配合比设计中,调整粗细粒料比例,形成骨架密实结构,可以降低水分损失对混合料后期强度形成的影响。

## 4 结 语

(1)垫层含水量对混合料抗压强度有显著影响,影响幅度与龄期、混合料级配组成有关。龄期越长,垫层含水量影响越明显。调整粗细粒料比例、混合料形成骨架密实结构,可以减小影响。模拟湿度养生混合料强度形成过程与标准养生相近。

(2)模拟试验的基层混合料自由水分向下迁移渗透可以间接反映基层混合料表面蒸发水分损失对混合料强度形成的影响。在基层强度形成过程中,水分表面蒸发和向下迁移渗透的共同作用,使基层混合料中靠近上部和下部的自由水损失,导致基层

混合料强度的不均匀性,上下部强度低而中部强度高,从而出现多年冻土地区特殊湿度条件下水泥稳定砂砾基层的“夹层”现象。

(3)在多年冻土地区水泥稳定砂砾基层施工中,应采取基层施工前对垫层表面充分洒水湿润,基层成型后及时覆盖保湿养生及面层与基层连续施工等技术措施,可减轻基层混合料自由水分表面蒸发和向下迁移渗透损失,避免“夹层”现象的出现。

## 参考文献:

### References:

- [1] 马 龠. 多年冻土地区沥青路面材料组成与结构设计研究[D]. 西安:长安大学,2005.  
MA Biao. Study on asphalt pavement material composing and structure design for the permafrost area[D]. Xi'an: Chang'an University, 2005.
- [2] 沙庆林. 高等级公路半刚性基层沥青路面[M]. 北京:人民交通出版社,1998.  
SHA Qing-lin. Asphalt pavement on semi-rigid road-base for high-class highways[M]. Beijing: China Communications Press, 1998.
- [3] 张嘎吱,沙爱民. 悬浮骨架密实结构配合比设计[J]. 长安大学学报:自然科学版,2004,24(1):1-4.  
ZHANG Ga-zhi, SHA Ai-min. Mix design of suspended framework dense structure[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(1): 1-4.
- [4] 王铁行. 多年冻土地区路基冻胀变形分析[J]. 中国公路学报,2005,18(2):1-5.  
WANG Tie-hang. Analysis of frost heave on subgrade in permafrost regions[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(2): 1-5.
- [5] 王宏畅,黄晓明,傅 智. 半刚性基层表面裂缝影响因素[J]. 交通运输工程学报,2005,5(2):38-41.  
WANG Hong-chang, HUANG Xiao-ming, FU Zhi. Influence factors on surface crack of semi-rigid base course[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(2): 38-41.
- [6] 李炜光,申爱琴,张玉斌. 二灰碎石抗裂级配与应用[J]. 长安大学学报:自然科学版,2004,24(6):7-10.  
LI Wei-guang, SHEN Ai-qin, ZHANG Yu-bin. Anti-cracking capability of lime-fly-ash stone[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(6): 7-10.