

DOI: 10.11779/CJGE201904024

硫酸盐侵蚀水泥改良路基段上拱研究

尧俊凯¹, 叶阳升¹, 王鹏程², 陈 锋², 蔡德钧²

(1. 中国铁道科学研究院, 北京 100081; 2. 中国铁道科学研究院铁道建筑研究所, 北京 100081)

摘 要: 首先对某高速铁路无砟轨道路基上拱问题进行了资料调研, 通过现场变形监测、填料取样试验、矿物成分分析等手段, 明确了硫酸盐侵蚀水泥改良填料膨胀是引起路基上拱主要原因, 然后结合化学反应机理和室内模拟试验, 对发生此类膨胀变形的反应条件、膨胀变形特征进行了分析。研究结果表明, 膨胀变形主要发生在路基水泥改良填料层位, 该土层具有大量硫酸盐侵蚀水泥产物钙矾石和硅灰石膏发育的特征, 路基上拱与硫酸盐侵蚀水泥改良土形成钙矾石和硅灰石膏晶体相关; 水泥改良填料中相对潮湿的高 PH 值碱性环境和石膏等硫酸盐矿物的存在是发生此类膨胀变形的必要条件; 硫酸盐侵蚀水泥改良填料将发生持续性膨胀变形, 上拱持续时间可达数年, 破坏性强。本文研究成果可供类似环境下路基工程的建设及相关研究借鉴。

关键词: 路基上拱; 水泥改良土; 硫酸盐侵蚀膨胀; X 射线衍射分析; 钙矾石; 硅灰石膏

中图分类号: U213.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2019)04-0782-07

作者简介: 尧俊凯(1992-), 男, 博士研究生, 主要从事膨胀性岩土方面研究的工作。E-mail: yao_junkai@163.com。

Subgrade heave of sulfate attacking on cement-stabilized filler

YAO Jun-kai¹, YE Yang-sheng¹, WANG Peng-cheng², CHEN Feng², CAI De-gou²

(1. China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China; 2. Railway Building Research Institute of China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: A high-speed railway subgrade which experiences a continuous and severe heave after construction is investigated through the delamination deformation monitoring, expansive tests and XRD tests. Sulfate attacking on cement-stabilized filler is the main reason of subgrade heave, and the reaction conditions and the development process of sulfate attacking expansion are analyzed based on the mechanism of crystal growth and chemical reaction. The results show that the cement-stabilized filler where the ettringite and thaumasite are identified has obvious swelling deformation, and the subgrade heave relates to the crystal formation of ettringite and thaumasite caused by sulfate attacking on cement-stabilized filler. The relatively humid alkaline environment and existence of sulfate minerals in cement stabilized filler are the necessary condition for such sulfate attacking expansion. The sulfate attacking on cement-stabilized filler exhibits a long-term persistent heave characteristic, and typical expansion of this type may develop for several years to create a critical and dangerous situation.

Key words: subgrade heave; cement-stabilized filler; sulfate attacking expansion; X-ray diffraction analysis; ettringite; thaumasite

0 引 言

水泥改良填料广泛应用于路基基床、过渡段填筑以保证质量控制差异沉降, 确保线路平顺性。硫酸盐环境中水泥改良填料易被侵蚀, 形成钙矾石类晶体, 产生体积膨胀。高速铁路无砟轨道变形调整能力有限, 尤其是可供向下调节的变形量极小, 对基础膨胀变形非常敏感, 由硫酸盐侵蚀膨胀导致的路基上拱问题对部分线路带来了严重的危害。

硫酸盐侵蚀硅酸盐水泥潜在的影响研究始于 20 世纪 60 年代, 美国华盛顿地区对水泥受硫酸盐侵蚀的相关研究^[1]。1986 年, Mitchell 教授在太沙基讲座上

提出了硫酸盐影响波特兰水泥(普通硅酸盐水泥)材料的问题, 使其引起了广泛关注^[2]。从 20 世纪 90 年代开始, 一些学者注意到硫酸盐侵蚀水泥改良土生成钙矾石膨胀, 引起公路、铁路等工程产生病害, 各国学者陆续开展相关研究。Michael 等在英国 Oxford、Lias 等区域发现了不同成分的钙基添加剂(水泥、石灰)被硫酸盐侵蚀膨胀的现象^[3]。西班牙马德里和巴

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778624); 中国铁路总公司科技研究开发计划课题(J2016G005); 中国铁道科学研究院科研项目重大课题(2016YJ025)

收稿日期: 2018-05-02

塞罗那之间高速铁路 Pallaresos 桥两侧桥台发生了严重破坏和偏移, Alonso 等开展研究认为是硫酸盐侵蚀掺水泥级配碎石影响导致^[4]。美国德克萨斯州 82 号公路、美国奥克拉荷马、达拉斯地区的 67 和 I-635 号公路、美国科罗拉多州奥罗拉的公路均发现水泥改良土被硫酸盐侵蚀膨胀引起路面开裂的类似问题^[5-7]。国内在硫酸盐侵蚀水泥方面也开展了相关研究, 但主要集中在硫酸盐侵蚀混凝土领域, 针对硫酸盐侵蚀水泥改良填料膨胀研究较少。1988 年, 薛君珩在中国硅酸盐学会水泥专业委员会举办的钙矾石学术座谈会上发言, 在国内首次系统描述了混凝土中钙矾石相的形成过程以及形貌特征^[8]。席耀中等对二次钙矾石 (SEF), 延迟钙矾石 (DEF) 和硫酸盐侵蚀 (SA) 的含义作了明确的阐述。其中, SEF 和 DEF 的 SO_4^{2-} 来源于混凝土内部, SA 是由于外部硫酸盐侵蚀造成^[9]。韩宇栋等针对实际工程中混凝土自身材料组成和硫酸盐侵蚀环境各不相同的情况, 总结硫酸盐侵蚀水泥产物主要有钙矾石 (Aft)、石膏、硅灰石膏 (TSA) 几类^[10]。目前, 硫酸盐侵蚀水泥引起土体膨胀问题已经引起了国内外学者关注, 这也是水泥改良土使用面临的一个重要问题。

本文针对某高速铁路典型上拱工点, 在调研地质环境及历史变形特征基础上, 通过变形监测与取样矿物成分分析, 明确了路基上拱产生的原因, 并针对硫酸盐侵蚀水泥改良填料反应条件以及膨胀特性进行了研究。

1 上拱路基概况

某高速铁路箱型涵的路涵过渡段发生持续上拱, 上拱段位于山前地带冲洪积平原, 周围地势较为平坦, 地表为第四系上更新统洪积细圆砾土, 厚度为 5~9 m, 部分区域石膏土分布不均, 地下水位深度为 6.8~9.5 m。路基过渡段部分浇筑 C30 混凝土, 混凝土厚度

从箱型涵向两端设台阶依次减薄, 最薄处 1.0 m 厚。填筑混凝土部分以外, 基床表层填筑掺 5% 水泥级配碎石, 基床表层以下填筑掺 3% 水泥级配碎石。涵洞及过渡段地基处理措施均为强夯, 强夯完成后铺设 0.5 m 厚掺水泥卵砾石垫层。如图 1 所示, 该工点由于路基过渡段持续上拱, 导致无砟轨道扣件已调整至极限, 已限速运行。路基上拱变形同时造成过渡段轨道板错台、支承层开裂、电缆槽与封闭层离缝, 坡脚护坡开裂、涵洞鼓胀与裂纹等问题。



图 1 上拱工点三维无人机扫描图

Fig. 1 Unmanned aerial vehicle 3D terrain scanning of heave site

2 上拱变形特征

2.1 线路纵向上拱变形分布

根据自线路开通以来的轨道几何状态测量的变形数据, 上拱累积变形量沿线纵向分布曲线如图 2 所示。上拱变形集中在路涵过渡段及两侧路基, 最大上拱位置位于涵洞小里程范围距离涵洞边缘 4 m 处, 涵洞小里程上拱变形范围为 40 m, 涵洞大里程上拱变形范围为 36 m, 上拱区段变形量随远离涵洞呈减小的趋势。图 2 所示为轨道纵向上拱变形状态, 上拱工点涵洞为 3 m 箱型涵, 单块轨道板长度为 20 m, 过渡段范围内轨道板伸缩缝位于小里程距涵洞边缘 4 m 处即

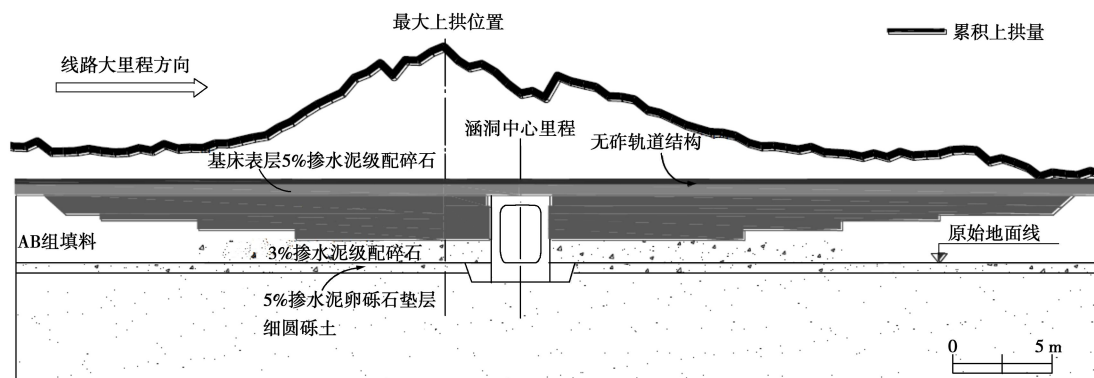


图 2 上拱变形沿线纵向分布曲线示意图

Fig. 2 Curves of longitudinal distribution characteristics of heave cumulative deformation

最大上拱位置,同时该位置发生明显的轨道板错台。涵洞周围土体变形导致涵洞顶部轨道和轨道板发生翘曲,导致涵洞顶部轨道发生上拱变形,而涵洞整体并未上抬。

2.2 历史变形

图 3 所示为上拱工点最大上拱位置自 2015 年 6 月 18 号至以来累积上拱变形量随时间变化曲线。每年 4 月至 9 月期间土体温度逐步升高,但膨胀变形无明显冻胀、硫酸钠盐胀的季节性回落特征。上拱工点最大上拱位置处历史累计变形量与正指数曲线拟合关系良好,在线路开通运营的 3 a 时间内,变形速率呈现加速的趋势,上拱变形具有长期持续发展的特点。

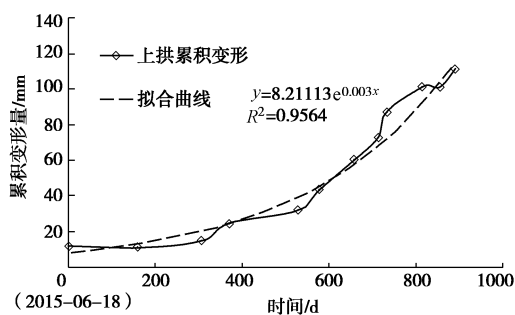


图 3 累积上拱变形随时间变化图

Fig. 3 Curves of cumulative heave deformation

2.3 分层变形监测分析

在涵洞过渡段小里程上拱较大区段布设分层监测断面,分层变形监测横断面布置如图 4 所示。在监测断面线间以及路肩钻孔埋入位移计,监测深度分别为路基面以下 1.5 m(LD-1)、4.0 m(LD-2)、7.0 m(LD-3),不同深度层位位移计监测变形值作差得相应土层变形。

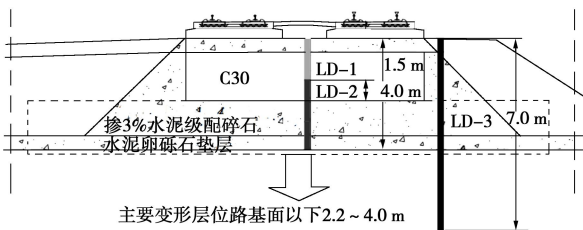


图 4 变形监测横断面布置图

Fig. 4 Layout of stratified deformation monitoring

自 2017 年 12 月 14 日至 2018 年 8 月 20 日,监测断面持续发生上拱变形,分层变形量随时间变化曲线如图 5 所示。监测数据显示 LD-1 孔、LD-2 孔、LD-3 孔单点位移计膨胀变形量分别为 0.6、32.9、31.7 mm,相邻位移计变形值作差得相应土层变形,分层膨胀变形主要发生在路基面以下 1.5~4.0 m。分层变形监测断面路基面以下 0.4~2.2 m 填筑 C30 混凝土,不考虑混凝土发生变形,路基膨胀变形主要发生在路基面以

下 2.2~4.0 m 位置土层。分层变形监测断面填高约为 3.5 m,路基面以下 2.2~4.0 m 位置土层为混凝土下部掺水泥级配碎石填料和掺水泥卵砾石垫层两种类型的水泥改良填料。

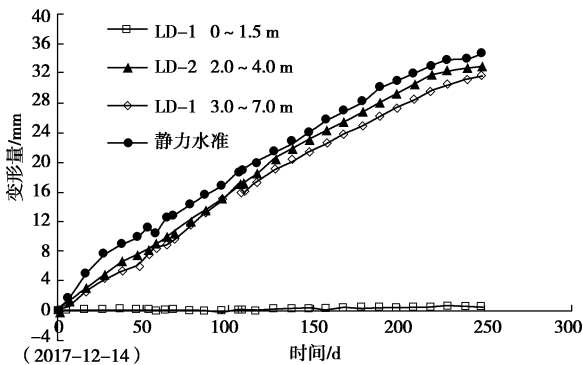


图 5 分层变形随时间变化曲线

Fig. 5 Curves of stratified deformation

相同位置静力水准测量上拱变形量(总变形量)为 34.6 mm,路基面以下 2.2~4.0 m 位置水泥改良填料层位膨胀变形约占断面总上拱变形量 91%,上拱工点轨道结构上拱变形主要由水泥改良填料膨胀引起。

3 矿物成分分析

3.1 取样位置

在最大上拱位置处路肩以下不同深度路基填料以及地基土样进行取样试验,共 6 组试样,取样位置及含水率、PH 值如图 6 所示。路基坡脚处开挖取得地基土样试样⑤和试样⑥,其含水率分别为 2.90%和 2.69%,低于路基填料以及垫层土样含水率(5.51%~7.71%),路基填料相对于地基土更为潮湿。垫层土样试样④和试样⑤取样检测 PH 值分别为 9.20 和 9.67 呈碱性,其它试样 PH 值为中性(7.20~7.77)。

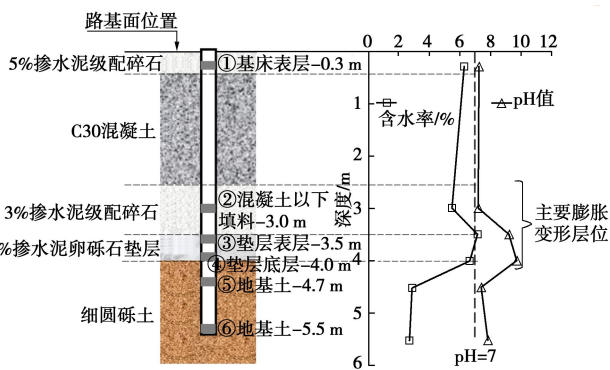


图 6 不同深度取样位置以及含水率、PH 值试验结果

Fig. 6 Different depths of sampling position, water contents, pH values of test results

3.2 蒙脱石类膨胀性黏土矿物分析

将试样过 0.5 mm 筛,用小于 0.5 mm 粒径的过筛

土进行自由膨胀率、阳离子交换量、蒙脱石含量 3 类膨胀性试验, 分析上拱工点中蒙脱石类黏土矿物的影响, 试验结果如表 1 所示。

表 1 膨胀性试验结果

试样 编号	Table 1 Expansion test results				
	0.5 mm 过筛 土占总质量 百分数/%	蒙脱石占 mm 过筛土质 量百分数/%	0.5 蒙脱石占土 样总质量百 分数/%	自由 膨胀 率/%	阳离子 交换量 (mmol·kg ⁻¹)
①	22.4	3.2	0.72	16.0	20.7
②	13.7	2.7	0.37	32.5	12.7
③	10.8	3.7	0.40	31.5	16.2
④	23.7	0.9	0.21	27.5	0.3
⑤	21.9	1.0	0.22	30.0	1.1
⑥	18.9	2.4	0.45	30.0	22.7

蒙脱石类膨胀性黏土矿物粒径极细, 不考虑粒径大于 0.5 mm 土体中含有蒙脱石, 蒙脱石黏土矿物只占取样土体总质量百分数的 0.21%~0.72%; 所有层位土样测、得自由膨胀率均不超过 40%; 阳离子交换量试验最大值为 23.72 mmol/kg; 3 项膨胀性指标均低于现有规范中膨胀土潜势分类的下限标准。上拱工点蒙脱石类膨胀性黏土类矿物含量极低, 其吸水膨胀对于路基粗粒土填料及地基细圆砾土的变形影响有限, 不是引起路基上拱的主要因素。

3.3 X 衍射矿物成分分析

通过 X 射线衍射分析 (XRD) 对现场取样试样 ①~⑥进行矿物成分分析, 识别土样中的主要矿物晶体成分及其含量, 矿物成分定量分析如表 2 所示。试样矿物成分主要包括石英、斜长石、微斜长石、闪石; 以及碳酸盐类方解石、白云石 (9%~28%); 硫酸盐类石膏 (3%~10%); 黏土类矿物绿泥石、云母 (8%~11%); 同时在试样①基床表层 5%掺水泥级配碎石中检测出可由钙矾石转化生成的水化硫铝酸钙 8% (hydrated calcium aluminate sulfate); 在掺水泥卵砾

石垫层中发现大量钙矾石 8%~10% (ettringite) 和硅灰石膏 13%~22% (thaumasite)。

试样③掺水泥卵砾石垫层表层 XRD 衍射图如图 7 所示。钙矾石化学式为 3CaO·Al₂O₃·3CaSO₄·32H₂O, 基本结构单元为 {Ca₃[Al(OH)₆]·H₂O}³⁺, 呈柱状结构, 钙矾石 XRD 特征角度为 9.09°, 15.78°, 22.94°, 32.26°, 35.02°, 40.87°。与钙矾石晶体类似, 硅灰石膏 (Ca₆[Si(OH)₆]₂(CO₃)₂(SO₄)₂) 具有相似柱状晶体结构, 不同之处在于钙矾石中铝被硅替代形成硅氧八面体基本结构单位 {Ca₃[Si(OH)₆]·H₂O}⁴⁺, 硅灰石膏 XRD 特征角度为 9.25°, 16.06°, 26.11°, 32.96°, 35.89°, 41.8°。钙矾石和硅灰石膏晶体形态相似, 在研究初期硅灰石膏经常被误测为钙矾石, 但还是可以通过 2θ 为 22.94° 和 26.11° 两个衍射峰加以识别^[11-12]。

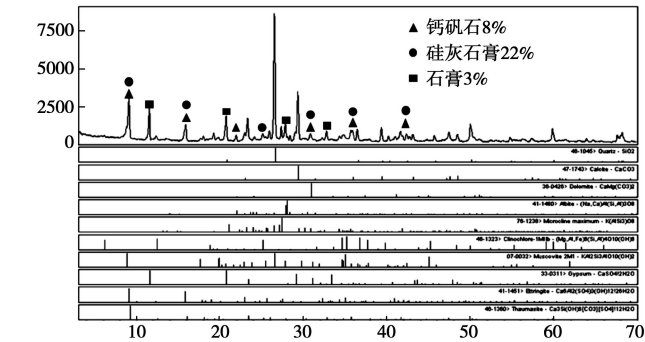


图 7 试样③掺水泥卵砾石垫层表层 XRD 衍射图

Fig. 7 XRD diffraction of sample No. 3

随着技术的发展, X 衍射分析 (XRD) 方法普遍应用于岩土材料的矿物组成和微观晶体结构研究。国内外学者多采用 X 衍射的方式, 从矿物和化学成分上进行识别和判断, 查证膨胀后的材料中是否存在钙矾石、硅灰石膏晶体, 从而对膨胀的原因进行鉴别^[3-4, 6-7]。由于不熟悉这种类型的引起的膨胀变形, 又缺乏识别的手段, 原因经常会被简单地解释为膨胀土吸水引起的膨胀。

表 2 XRD 矿物成分分析

Table 2 XRD mineral composition analysis													
试样 编号	取样位置 -深度	(%)											
		石英	斜长石	微斜 长石	闪石	方解石	白云石	石膏	绿泥石	云母	钙矾石	硅灰 石膏	水化硫 铝酸钙
①	基床表层-0.3 m	22	32	8	9	6	3	4	5	3	—	—	8
②	混凝土以下填料-3 m	41	17	5	—	21	5	—	6	5	—	—	—
③	垫层表层-3.5 m	28	9	3	—	15	3	3	5	4	8	22	—
④	垫层底层-4 m	27	10	6	—	16	3	5	6	4	10	13	—
⑤	地基土-4.7 m	43	10	8	3	13	4	10	6	4	—	—	—
⑥	地基土-5.5 m	35	13	5	—	16	12	10	5	4	—	—	—

注: —表示未检出。

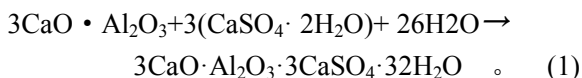
通过对现场工点试样进行试验成分分析,蒙脱石和硫酸钠膨胀性成分含量极低,不足以引起现场工点路基持续性的上拱变形;同时发现主要膨胀变形范围内掺水泥垫层具有大量钙矾石和硅灰石膏发育特征。路基上拱变形与硫酸盐侵蚀水泥改良填料形成钙矾石和硅灰石膏的过程中产生的膨胀相关。

4 晶体生长和膨胀特性

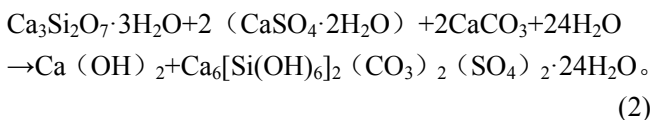
4.1 化学反应机理

钙矾石、硅灰石膏等晶体形成属于化学反应,其形成过程会发生剧烈的体积膨胀。当钙矾石形成时,一个钙矾石晶体分子要结合和吸附 32 个水分子,使钙矾石的固相体积剧烈增大 225%;类似于钙矾石晶体形成,硅灰石膏形成时固相体积膨胀增大 105%^[13]。

在水泥改良土中,普通硅酸盐水泥材料中硫酸三钙(C₃A)能够为晶体生长提供 Ca 和 Al;同时水泥水化过程形成高 PH 值的碱性环境,溶解石膏等硫酸盐矿物提供 Ca²⁺和 SO₄²⁻离子,并且使得改良土中的黏土矿物释放 Al,形成钙矾石的基本结构 {Ca₃[Al(OH)₆]·H₂O}³⁺,与环境中的硫酸盐和水分子结合,生成钙矾石晶体,反应式如下:



硅灰石膏晶体的形成意味着钙矾石基本结构单元 {Ca₃[Al(OH)₆]·H₂O}³⁺中的 Al 离子被 Si 替换,形成硅灰石膏的基本单元结构 {Ca₃[Si(OH)₆]·H₂O}⁴⁺^[14-15]。也有研究表明,在较高 PH 值环境和低于 15℃ 的环境下,水泥水化产物中的 C-S-H 在硫酸盐,碳酸盐环境下也会被逐步侵蚀转变为硅灰石膏^[16]。反应式如下:



4.2 反应条件分析

现场取样水泥改良填料试样②和试样③进行无荷膨胀率试验。将试样过 5 mm 筛,击实至环刀(高 20 mm)中,干密度为 1.95~2.07 g/cm³。将环刀放入 WZ-2 型膨胀仪中进行自由膨胀试验,对比浸于蒸馏水和碱性硫酸盐溶液(Na(OH)₂、Na₂SO₄饱和溶液)两种环境条件下膨胀特性,膨胀量随时间变化曲线如图 8 所示。

试验结果显示,现场水泥改良土试样在蒸馏水环境下无变形。试样③掺水泥卵砾石垫层浸润在碱性硫酸盐溶液中发生持续性膨胀变形,膨胀变形在 15000 min 后基本稳定,最大膨胀量达到 0.55 mm,膨胀率达到 2.75%。试样②换填混凝土底部掺 3%水泥级配碎

石填料在碱性硫酸盐溶液中也有一定的膨胀变形。现场填料在历时 3 a 的反应变形后,还具备较强的矿物膨胀活性;其膨胀潜势在高碱性和硫酸盐环境下被激活,晶体继续形成,发生长达 14 d 膨胀变形。

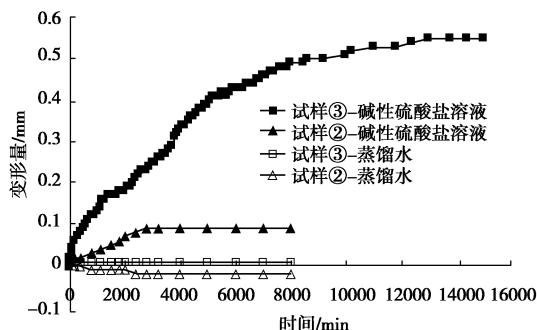


图 8 取样填料在不同环境下变形曲线

Fig. 8 Curves of sampling filler deformation under different environmental conditions

上拱工点环境中石膏等硫酸盐含量较高,同时检测出方解石和白云石可提供硅灰石膏形成的碳酸盐,具备钙矾石、硅灰石膏晶体形成发育的物质基础。研究表明,硫酸盐含量超过 0.5%~1%导致晶体的形成和土体膨胀^[17]。然而,较低的硫酸盐反应阈值(2000~3000 ppm)也被部分学者确定^[13, 18]。当水泥改良土中含有一定比例的硫酸盐,或土体所处区域环境中含有硫酸盐时,具备硫酸盐侵蚀膨胀的物质基础。

钙矾石和硅灰石膏晶体形成需要高 pH 值的碱性环境和水。如图 6 所示,垫层试样在取出后放置一段时间后进行测试,其 pH 值大于 9 呈碱性,而在水泥水化初期, pH 值可达 12.4^[11]。水泥改良土中高 pH 值碱性环境有利于钙矾石、硅灰石膏的形成。现场工点地下水位位于地基面 10 m 以下,2011 年至 2017 年期间历史统计数据显示年均降雨量仅为 235.2 mm,降雨量小。水虽然是钙矾石、硅灰石膏晶体形成的必须反应物之一,但是大量水分不利于矿物盐分聚积和高 PH 值环境的形成。上拱工点填料压实度高,且设置了封闭层,水分进入有限,但是路基内部填料水分也不易蒸发,可以维持相对潮湿的碱性环境。

4.3 硫酸盐侵蚀膨胀特性

良好的混凝土结构致密,由外界硫酸盐侵蚀引起结构破坏之前,硫酸盐不会侵入混凝土内部导致严重的破坏^[19]。水泥改良填料多孔隙的特性使得硫酸盐随水分易在水泥改良土孔隙中扩散、吸附^[20-21];同时改良土中的细颗粒骨料也会提供钙矾石形成所需要硅、铝矿物元素^[7]。与硫酸盐侵蚀混凝土导致的表层剥落、破坏不同,硫酸盐侵蚀水泥改良土更易在土体内部形成钙矾石、硅灰石膏晶体,填充土体孔隙并挤胀土骨

架,硫酸盐侵蚀水泥改良土宏观表现为土层整体的膨胀变形。

硫酸盐侵蚀膨胀最大特征是其长达数年的持续膨胀变形,国内外案例表明,类似原因引起的膨胀变形发生在建设完成后3个月后,变形持续2~10 a^[21]。硫酸盐侵蚀水泥改良土的上拱时间持续长的主要原因有3点:①满足晶体生长反应条件下,晶体将不断形成。钙矾石、硅灰石膏晶体形成反应条件特殊,需要在适合的碱性、水温环境下,多种矿物相互作用。在适宜条件下,改良土内反应物质消耗完全前,膨胀性晶体将不断生成。②盐类不断补充,反应持续进行。盐类可随土中水分迁移,外界硫酸盐、碳酸盐随着水分持续侵入。③膨胀变形具有不可逆性。钙矾石、硅灰石膏晶体形成的化学反应具有不可逆性,在形成过程中发生膨胀,一旦完全反应就不再膨胀,但在自然环境下晶体也难以分解,土体体积无法减小。硫酸盐侵蚀水泥膨胀的长期膨胀特性也与本文分析的现场上拱工点持续长达3 a的持续上拱特征相吻合。

目前美国、欧洲学者主要研究硫酸盐对公路水泥稳定层侵蚀,相对于硫酸盐侵蚀公路路基中的薄层水泥改良土导致路面开裂,铁路过渡段水泥改良填料填筑整个路基范围,膨胀变形层位厚、变形量大,不仅导致轨道结构上拱变形严重,而且使得涵洞、边坡、电缆槽等发生结构性破坏。一旦水泥改良土填筑的路基被硫酸盐侵蚀发生膨胀变形,造成路基长达数年持续性上拱,破坏性极强。目前针对因硫酸盐侵蚀导致已发生上拱变形工点,只能采取挖除换填的方式进行整治,国内外研究并未找到经济、科学的方法能够有效控制其膨胀变形发展趋势。因此,在硫酸盐富集地区需意识到硫酸盐侵蚀水泥改良土的危害,合理设计改良土种类以及路基结构,施工中严格控制改良土填料中硫酸盐含量,避免类似问题发生。

5 结 论

(1)某高速铁路路基持续上拱,主要膨胀变形层位集中在水泥改良填料层位。现场取样填料蒙脱石膨胀土含量极低,XRD检测显示变形范围内填料具有大量钙矾石、硅灰石膏晶体发育特征,硫酸盐侵蚀水泥改良填料膨胀变形是路基上拱的主要成因。因不熟悉这种特殊类型岩土引起的的膨胀,加之缺乏识别的手段,由硫酸盐侵蚀引起的膨胀变形经常会被简单地解释为膨胀土吸水引起。

(2)钙矾石和硅灰石膏吸水结晶过程中发生剧烈体积膨胀,当填筑的水泥改良土环境中存在可溶性硫酸盐或石膏时,具备硫酸盐侵蚀膨胀矿物基础。高pH

值的碱性和相对潮湿的水环境是此类岩土发生膨胀必要的环境条件。

(3)与硫酸盐侵蚀混凝土导致的表层剥落、破坏不同,硫酸盐随水分易在水泥改良土孔隙中扩散、吸附,生成钙矾石、硅灰石膏类晶体挤胀土骨架,硫酸盐侵蚀水泥改良土宏观表现为土层整体的膨胀变形。

(4)硫酸盐侵蚀水泥改良填料为化学结晶反应,具有不可逆性。随着盐类持续侵入,水泥改良填料持续发生膨胀变形,上拱持续时间可达数年,破坏性强。

参考文献:

- [1] SHERWOOD P T. Effect of sulfates on cement and lime treated soils[J]. Hwy Res Board Bull, 1962, 353.
- [2] ROLLINGS M P, ROLLINGS R S. Geotechnical materials in construction[M]. New York: McGraw-Hill, 1996.
- [3] MICHAEL J M, LASZLO J C, ANISHA S. Fly ash influences on sulfate heave in lime-stabilized soils[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 2012, 165: 147 - 157.
- [4] ALONSO PÉREZ DE, EDUARDO R T A. Massive sulfate attack to cement-treated railway embankments[J]. Géotechnique, 2013, 63(10): 857 - 870.
- [5] CHEN D H, HARRIS P, SCULLION T. Forensic investigation of a sulfate-heaved project in texas[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2005, 19(4): 324 - 330.
- [6] DURAN D R. Case study: heave potential associated with ettringite formation in lime treated materials for an aurora, Colorado, roadway[C]// Biennial Geotechnical Seminar. Denver, 2010.
- [7] ADAMS A G, DUKES O M, TABET W, et al. Sulfate induced heave in oklahoma soils due to lime stabilization[J]. Geocongress: Characterization, Monitoring, and, Modeling of Geosystems, 2008, 179: 444 - 451.
- [8] 薛君环. 钙矾石相的形成、稳定和膨胀——记钙矾石学术讨论会[J]. 硅酸盐学报, 1983(6): 247 - 251. (XUE Jun-gan. Ettringite formation, stability and expansion — ettringite Symposium[J]. Journal of The Chinese Ceramic Society, 1983(6): 247 - 251. (in Chinese))
- [9] 席耀忠. 二次钙矾石形成和膨胀混凝土的耐久性[J]. 混凝土的水泥制品, 2003(2): 5 - 9. (XI Yao-zhong. The formation of SEF and expansive concrete durability[J]. China Concrete And Cement Products, 2003(2): 5 - 9. (in Chinese))
- [10] 韩宇栋, 张 君, 高 原. 混凝土抗硫酸盐侵蚀研究评述[J]. 混凝土, 2011(1): 52 - 61. (HAN Yu-dong, ZHANG Jun,

- GAO Yuan. Review of sulfate attack on concrete[J]. Concrete, 2011(1): 52 - 61. (in Chinese))
- [11] 孟庆业. 水泥基胶凝材料中碳硫硅钙石的形成研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014. (MENG Qing-ye. Investigation on thaumasite formation in cementitious materials[D]. Changsha: Central South University, 2014. (in Chinese))
- [12] BARNETT S J, MACPHEE D E, LACHOWSKI E E. XRD, EDX and IR analysis of solid solutions between thaumasite and ettringite[J]. Cement and Concrete Research, 2002, **32**(5): 719 - 730.
- [13] LITTLE D N, NAIR S, HERBERT B. Addressing sulfate-induced heave in lime treated soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, **136**(1): 110 - 118.
- [14] HUNTER D. Lime-induced heave in sulphate-bearing clay soils[J]. Geotech Engng, ASCE 1988, **114**: 150 - 167.
- [15] MOHAMED A M O. The role of clay minerals in marly soils on its stability[J]. Engng Geol, 2000, **57**: 193 - 203.
- [16] BENSTED J. Thaumasite: direct, woodfordite and other possible formation routes[J]. Cem Concr Compos, 2003, **25**(8): 873 - 877.
- [17] TALLURI N, PUPPALA A J, CHITTOORI B C S. Calcium-based stabiliser treatment of sulfate-bearing soils[J]. Proceedings of the ICE-Ground Improvement, 2014, **167**(3): 162 - 172.
- [18] MITCHELL J K, DERMATAS D. Clay soil heave caused by lime-sulfate reactions[J]. Innovations & Uses for Lime Astm Stp, 1992(1135): 24.
- [19] 邓德华, 刘赞群, GEERT DE S, 等. 关于“混凝土硫酸盐结晶破坏”理论的研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2012, **40**(2): 175 - 185. (DENG De-hua, LIU Zan-qun, GEERT DE S, et al. Research progress on theory of “sulfate salt weathering on concrete”[J]. Journal of The Chinese Ceramic Society, 2012, **40**(2): 175 - 185. (in Chinese))
- [20] LITTLE D N, NAIR S. Sensitivity of selected Colorado soils to form ettringite/thaumasite when treated with calcium-based stabilizer sand when soluble sulfates are available[J]. Transportation-Research, 2007, **193**(6): 51 - 59.
- [21] PUPPALA A J, INTHARASOMBAT N, VEMPATI R K. Experimental studies on ettringite-induced heaving in soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, **131**(3): 325 - 337.