

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2019.02.004

# 现役高速公路轻质土侧向置换路基方法研究

刘汉龙<sup>1,2,3</sup>, 尹锋<sup>1,2</sup>, 陈永辉<sup>3</sup>, 肖杨<sup>1,2</sup>, 楚剑<sup>1,4</sup>

(1. 重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045;  
3. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 4. 南洋理工大学 土木与环境工程学院, 639798 新加坡)

**摘要:** 考虑到现役高速公路运营情况, 提出了在不影响正常通车的条件下, 采用侧向引孔注入气泡混合轻质土置换路基的卸载处治方案。以浙江申嘉湖杭高速公路为例, 通过吸失水试验确定了轻质土设计容重的修正系数, 结合现场监测数据对不同处理路段的沉降进行了分析。提出了采用置换体积比和有效容重比来修正平均固结度和利用置换前的沉降资料估算轻质土的置换量的简便计算方法。采用有限元方法模拟了轻质土置换后的沉降并与实测结果进行对比。研究表明, 轻质土试样长期受水浸泡, 材料设计容重将有明显增加, 需要根据不同施工环境对其进行修正, 建议修正系数取值在 1.05~1.25 之间; 采用轻质土置换的路段, 通过监测资料得到的沉降速率比值与该桩号有效固结度的计算数值大致相等, 最大误差只有 15.4%, 提出的简便计算方法作为控制标准是可行的; 横向引孔施工结束后, EK0+320-EK0+325 沉降速率从最大 65.3 mm/月减小到 5 mm/月。通过数值模拟发现, 施工完成后一个月换填与不换填的沉降差为 5 mm。在保证路基土稳定的条件下, 可增加引孔数量加大卸载量, 或者采取跳孔方式拉大成孔间距, 减少群孔对成孔质量的影响, 成孔后分批次及时浇注轻质土, 避免塌孔影响置换效果。综上所述, 横向引孔换填轻质土能有效控制现役高速公路沉降。

**关键词:** 道路工程; 侧向引孔; 现场试验; 气泡混合轻质土; 地基沉降

中图分类号: TU437; U416.1<sup>+</sup>11

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2019) 02-0019-09

## Study on Method of Laterally Replacing Subgrade of Existing Expressway by Light Soil

LIU Han-long<sup>1,2,3</sup>, YIN Feng<sup>1,2</sup>, CHEN Yong-hui<sup>3</sup>, XIAO Yang<sup>1,2,3</sup>, CHU Jian<sup>1,4</sup>

(1. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;  
3. School of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing Jiangsu 210098, China;  
4. School of Civil and Environmental engineering, Nanyang Technology University, 639798, Singapore)

**Abstract:** A loading treatment scheme by drilling lateral holes and replacing subgrade with FCB without road closure is proposed considering the operation of existing expressway. Based on a case of Shanghai - Jiuxing - Huzhou - Hangzhou Expressway, the correction factor of the designed unit weight of FCB is determined by immersion test, and the settlements of different treated road sections are analyzed according to field monitoring data. The simple methods for correcting average consolidation degree by volume replacement ratio and effective unit weight ratio and estimating the replacement amount of FCB according to the measured data before replacement are proposed. Finally, settlement after replacement is simulated by FEM, and the result is compared with the measured data. The result shows that (1) due to long-term immersion of FCB sample, the designed unit weight will increase significantly, which is necessary to be corrected according to different construction conditions, and the suggested correction factor is in the range from 1.05 to 1.25; (2) for the road section replaced with FCB, the settlement velocity ratio obtained by measured data has a well agreement

收稿日期: 2017-07-15

基金项目: 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(51420105013); 国家自然科学基金青年项目(51708063)

作者简介: 刘汉龙(1964-), 男, 江苏高邮人, 博士, 教授. (hliuhhu@163.com)

with the calculated effective consolidation degree of the pile there, whose maximum error is 15.4%, showing that the proposed simplified method is suitable as the control criterion; (3) the settlement velocity in the area of  $EK0 + 320 - EK0 + 325$  decreased from the maximum 65.3 mm/month to 5 mm/month after the construction of horizontal holes. It is found from numerical simulation that the differential settlement between replacing and non-replacing 1 month after construction is 5 mm. It is available by increasing the numbers of hole or enlarging the spacing between holes to reduce the influence of group holes on the quality of holes, and grouting timely after construction of the holes to avoid the hole collapse. In conclusion, the construction of horizontal holes and replacing with FCB can effectively control the settlement of existing expressway.

**Key words:** road engineering; horizontal hole; field test; foamed cement banking (FCB); subgrade settlement

## 0 引言

高速公路对地基要求甚高,建成后必须达到“快速、安全、经济、舒适”这样的服务目的。由于我国高速公路施工期较短,地基没有经过有效预压,或者没有达到相应的固结度,导致竣工后的沉降不能满足要求。沿海地区许多高速公路建成并投入运营以来,桥头沉降问题始终是困扰着高速公路营运和养护的一个主要问题。如处于软土地基上的某高速公路每年由于软土地基的沉降引起不同程度的桥头跳车,虽然这些高速公路已完工5~10 a,但是软基的沉降还在继续,每年达到数厘米之多,导致不断地加铺,最大加铺厚度已达2 m以上,造成养护费用居高不下,同时也给安全和舒适行车带来不利的影 响。每年的加铺对路基来说由于增加了新的重量,又会带来新的路基加速沉降,使桥头沉降处于一种恶性循环的状态。对此,高速公路的营运养护单位尚无良好的对策,只能被动进行加铺和修补工作。软土地基的沉降主要包括瞬时沉降、超孔压消散引起的主固结沉降和土骨架蠕动变形引起的次固结沉降<sup>[1-3]</sup>。对于已通车高速公路,有学者采用高压旋喷桩技术<sup>[4]</sup>、后注浆技术<sup>[5]</sup>,或者开挖路面换填轻质材料<sup>[6]</sup>来控制工后沉降。但是这些方法必须对道路进行封闭,影响高速公路的运营。结合本工程的实际情况,对各种可行的处理方法进行技术经济比较,提出了采用侧向引孔换填轻质土的处治方案<sup>[7]</sup>,从而减少路基本身的自重和降低路基对软土层的附加应力,达到控制沉降的目的,具有不影响交通、施工期短、处治效果明显的优点。

气泡混合轻质土(Foamed Cement Banking, 简写FCB)是由水泥、水、发泡剂以及其他材料(如粉煤灰)按照一定比例配置而成的轻质路堤填筑材料,其容重一般在5.0~12.0 kN/m<sup>3</sup>之间。气泡轻质

土最早可以追溯到19世纪20年代,起初进行小规模生产。一直到20世纪70年代末,荷兰将其应用于地基处理,并且进行了一系列材料性能试验促进推广,气泡混合轻质土才得到广泛的认可<sup>[8]</sup>。英国最先将气泡轻质土用于沟渠的修复,试验的成功促进了这种材料在其他方面的应用<sup>[9]</sup>。中国也有学者对气泡混合轻质土进行了研究,将其应用于工程<sup>[10-16]</sup>。为此,本研究以浙江申嘉湖杭高速公路为工程实例,介绍该工程在通车后采用FCB侧向引孔换填路基的方法解决沉降速率偏大的问题;着重研究引孔置换FCB换填量的确定方法,并对沉降监测数据进行了分析;通过室内吸失水试验确定容重修正系数,在陈永辉<sup>[6]</sup>等人的研究基础上,引入有效固结度的概念,将沉降速率预测法推广到侧向引孔换填路基中;并且采用有限元模拟了轻质土置换后的沉降,对结果进行了分析。

## 1 工程地质条件

浙江申嘉湖杭高速公路EK0+300—EK0+335路段地处冲积软土层上,具有含水量高、承载力低、易压缩等特点。原路基高3.5 m,路面厚0.6 m,路面宽度14.5 m,放坡比例为1:1.5。

地层情况如下:(1)人工填土:灰黄色,可塑,密度稍大,中等湿度~较干,厚度2.1~2.8 m;(2)淤泥质黏土:灰黑色,软塑,湿度较大,层厚9.2~15.6 m;(3)黏土:灰黄色,硬塑,部分含有机杂物或少量细砂,层厚11.2~18.6 m;(4)细砂夹层:部分存在,灰黄色,密度稍密,层厚0~0.4 m;(5)粉质黏土:青灰色,硬塑,含黄色颗粒。地下水位距地表深度为2.1 m。

路段自通车开始至2010年8月30日,桥头路段沉降量最大达129 mm,影响了该路段的行车速度和行车安全。2010年9月已采用了路面补铺沥青混凝

土方式处理, 补铺路面后, 观测路基近几个月仍以较大的沉降速率下沉, 至 2011 年 3 月 25 日沉降量最大达 219 mm。

## 2 重度影响试验研究

### 2.1 原材料及设计强度

置换路基采用的 FCB 设计强度为: 换填顶面 80 cm 以内, 采用 28 d 无侧限抗压强度不小于 0.8 MPa, 设计湿容重为 6.0 kN/m<sup>3</sup>; 换填面 80 cm 以下, 采用 28 d 无侧限抗压强度不小于 0.6 MPa, 设计湿容重为 5.5 kN/m<sup>3</sup>; 水泥采用 P. O42.5, 发泡剂采用 F60B, 水采用自来水, 具体配合比如表 1 所示。

表 1 气泡混合轻质土配合比  
Tab.1 Mix proportion of FCB

设计湿容重/ (kN · m <sup>-3</sup> )	设计流动 度/mm	每立方米材料用量			设计值/MPa
		水泥/kg	水/kg	气泡群/L	
5.5	180	320	195	701.8	28 d 强度 ≥ 0.6
6.0	180	320	210	677.1	28 d 强度 ≥ 0.8

### 2.2 试样制作

在施工现场出料口取样, 经检验合格后方可取料制备试样。采用三轴试验制样用的三开模 6 套, 三开模直径为 61.8 mm, 高度为 125 mm。为了防止材料表面干缩, 将 FCB 气泡混合轻质土浇注高于模口, 待终凝后再用刀片刮平; 同时为避免 FCB 试样水分蒸发引起试样干缩现象, 将试样放置在塑料袋中自然养护大约 30 h 后开始拆模, 拆模后再次放入塑料袋中养护 28 d, 开始作为试验样品。

### 2.3 吸失水试验

选取容重为 5.5 kN/m<sup>3</sup> 和 6.0 kN/m<sup>3</sup> 同批次、同龄期的圆柱状试样各一组 (每组 3 个试样), 用精度为 0.1 g 的电子秤称量各试样的初始质量, 之后将该试样全部静置于 0.2 m 深的水池中浸泡 (为避免试样上浮, 在试样上部采用重铁板将试样压入水池中), 记录不同时刻试样吸水后的质量。称重时, 将试样快速取出, 将表面的水擦干后立即称重, 然后放入水中继续浸泡。待吸水稳定后 (一天内吸水率小于 0.5%), 将试样从水中取出, 放置于室温下使其自然失水。绘制吸水时间和吸水率的曲线, 如图 1 所示。

设计容重为 5.5 kN/m<sup>3</sup> 的气泡混合轻质土试样浸泡在水中一周, 容重最大增加达 25.2%, 容重有明显增加, 且容重增加主要集中在浸泡 24 h 内, 试样

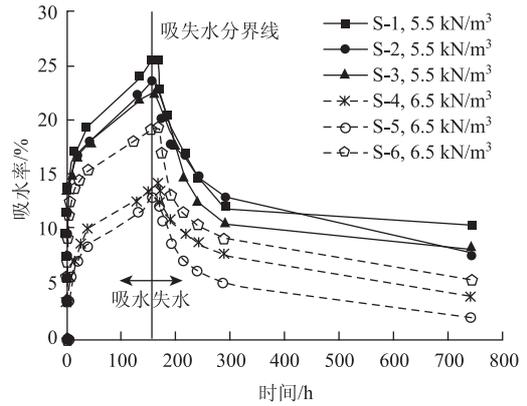


图 1 吸水变化曲线

Fig.1 Curves of water absorption

吸水容重相对稳定后进行自然失水试验, 试验结果表明, 试样失水后容重不能完全恢复到初始容重, 与原容重相比仍有 9.5% 的增加; 设计容重为 6.0 kN/m<sup>3</sup> 的气泡混合轻质土试样浸泡在水中一周, 得到同容重为 5.5 kN/m<sup>3</sup> 相类似的试验结果, 即容重最大增加达 19.3%, 自然失水后容重仍比原容重高 5.4%。试验说明 FCB 体内有部分孔隙没有完全闭合, 有相互连通部分, 若 FCB 长期受水浸泡, 材料设计容重将有明显增加, 需要根据不同 FCB 置换路基施工环境对设计容重进行修正。根据图 1, 建议修正系数取值在 1.05 ~ 1.25 之间。

## 3 轻质土换填设计方案

### 3.1 设计方案

采用钻井成孔技术在路基两侧边坡处向路基中心方向进行路堤横向成小直径孔, 成孔向下倾斜 5° ~ 10°, 以便于气泡混凝土的灌入, 在孔内注入气泡混凝土, 气泡混凝土在孔中凝固形成轻质土路堤, 以减轻路堤荷载, 从而减少路堤工后沉降。为了降低施工成本, 便于施工机械行走, 将连彼岸边坡开挖出上下两级台阶, 在横向引孔施工结束后, 对上级台阶直接用气泡混凝土按 1:1.2 边坡回填, 对下级台阶, 按每级台阶高 50 cm, 宽 60 cm 以气泡混凝土浇注成台阶状, 然后在外面按 1:1.5 边坡回填宕渣护坡。EK0 + 320 - EK0 + 330 桥头处理段, 成孔水平向、垂直向孔净间距均为 100 mm, 按照梅花形布置, 路堤单横断面引孔数 14 个 (上台阶 6 个, 下台阶 8 个); EK0 + 315 - EK0 + 320 桥头过渡段, 成孔水平向孔净间距为 200 mm, 垂直向孔净间距为 100 mm。引孔直径均为 150 mm, 路堤单横断面引孔数 7 个 (上台阶 3 个, 下台阶 4 个)。

### 3.2 平均固结度

Hart<sup>[17]</sup>等建议计算整个受压土层的平均固结度时采用以下近似方式,即

$$\bar{U} = P \cdot \bar{U}_z + (1 - P) \bar{U}'_z, \quad (1)$$

式中,  $\bar{U}$  为整个受压土层的平均固结度;  $P$  为砂井打入深度与整个饱和受压土层厚度的比值;  $\bar{U}_z$  为砂井深度范围内土层的固结度;  $\bar{U}'_z$  为砂井以下土层的固结度。  $t$  时刻的沉降与最终沉降的关系为:

$$S = S_\infty (1 - e^{-\beta t}), \quad (2)$$

式中,  $S$  为  $t$  时刻的沉降;  $S_\infty$  为稳定沉降;  $\beta$  为待定常数。曾国熙等考虑侧向变形引起的沉降<sup>[18]</sup>, 结合式 (2), 提出受压土层平均固结度为:

$$\bar{U} = 1 - \alpha e^{-\beta t}, \quad (3)$$

式中,  $\alpha$ ,  $\beta$  均为待定常数。根据固结度的定义, 式 (3) 变换为:

$$\frac{S - S_d}{S_\infty - S_d} = 1 - \alpha e^{-\beta t}. \quad (4)$$

式中,  $S_d$  为侧向变形引起的沉降。

在图 2 中选取时间间隔相等的 3 点 ( $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ) 代入式 (4), 求得有关参数, 即可得到平均固结度。

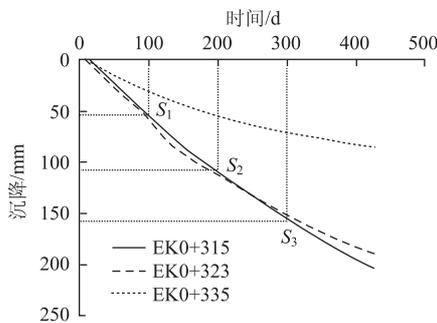


图 2 沉降曲线

Fig. 2 Settlement curves

### 3.3 卸载量计算

陈永辉<sup>[6]</sup>等利用卸载前的沉降速率估算 FCB 置换量, 提出了有效超载比的概念, 并计算换填厚度为:

$$H = \frac{P_h - P_\Delta}{\gamma_s - \gamma_e}, \quad (5)$$

式中,  $P_h$  为卸载量;  $P_\Delta$  为荷载差值;  $\gamma_s$  为原路堤填土容重;  $\gamma_e$  为轻质土容重。在施工过程中, 经常通过改变引孔尺寸、引孔长度、轻质土容重等手段来达到不同的置换效果。为了更有效、直观地反映影响固结的因素, 根据有效超载比的概念<sup>[6]</sup>, 提出:

$$OLR_e = \frac{V\gamma_s}{(V - n\pi r^2 l)\gamma_s + n\pi r^2 l\gamma_e} \bar{U}_t, \quad (6)$$

式中,  $V$  为处理路段路堤体积;  $r$  为引孔半径;  $l$  为引孔长度;  $n$  为引孔数量。

令  $V_e = n\pi r^2 l$ , 本研究提出置换体积比和有效容重比的概念, 即轻质土与原路堤的体积比和轻质土与原路堤填土的容重比, 分别记为  $V_R$  和  $\gamma_R$ 。则式 (6) 变为:

$$OLR_e = (1 - V_R + V_R \cdot \gamma_R)^{-1} \cdot \bar{U}_t, \quad (7)$$

式中,  $V_R = V_e/V$ ,  $V_e$  为轻质土的体积;  $\gamma_R = \gamma_e/\gamma_s$ ;  $U_t$  为  $t$  时刻地基的平均固结度。公路工程一般认为路基连续两个月观测沉降速率不超过 5 mm/月时为沉降稳定, 可进行卸载。这里的 5 mm/月的速率是相对于等载条件下提出的, 在超载时需要进行修正。陈永辉<sup>[6]</sup>等采用有效超载比作为修正系数, 而本研究做了适当的变换为:

$$V_{P+\Delta P} = (1 - V_R + V_R \cdot \gamma_R)^{-1} \cdot \bar{U}_t \cdot V_P, \quad (8)$$

式中,  $V_{P+\Delta P}$  为卸载后沉降速率控制标准;  $V_P$  为卸载前的沉降速率。这样把监测数据、施工参数、控制标准结合起来, 在施工前能够对置换后的效果进行估计:

记  $(1 - V_R + V_R \cdot \gamma_R)^{-1} = R$ , 则式 (8) 变为

$$V_{P+\Delta P} = R \cdot \bar{U}_t \cdot V_P, \quad (9)$$

式中  $R$  为系数。置换轻质土后, 路堤土性质发生变化,  $R$  相当于一个修正系数, 对固结度进行修正, 本研究也把  $R \cdot \bar{U}$  称为有效固结度, 即卸载前后沉降速率的比值, 与置换体积、轻质土容重、卸载前的固结度有关。

为了验证式 (9) 的卸载标准, 选取 EK0 + 315, EK0 + 323, EK0 + 335 共 3 个桩号进行了卸载前后的参数对比, 见图 3。EK0 + 315 为桥头过渡段, 引孔数 7 个。EK0 + 323 为桥头处理段, 引孔数 14 个。EK0 + 335 为未处理地段。监测资料结果表明, 采用轻质土置换的路段, 其沉降速率比值与该桩号有效固结度  $R \cdot \bar{U}_t$  的计算数值大致相等, 最大误差只有 15.4%。这说明通过有效固结度  $R \cdot \bar{U}_t$  可以把处理路段卸载前后的沉降速率联系起来。调整换填量和轻质土的容重可以改变系数  $R$ , 从而达到控制换填后的沉降速率。因此采用式 (9) 作为控制标准是可行的。

## 4 路基沉降

### 4.1 测控点布置

横向引孔过程中, 因成孔至 FCB 灌注有一段的

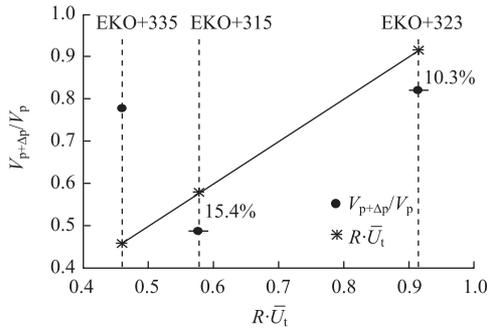


图 3 参数误差分析

Fig. 3 Parameter error analysis

时间间隔, 加之 FCB 自身需要一定的时间进行凝固以使得其自身强度满足设计强度, 此间由于上覆路堤及路面结构层和车辆载荷的影响, 路基自身的压缩也是客观存在。为研究路基自身压缩量与路面沉降量之间的关系, 以及其影响程度和影响因素的分析, 在开挖平台靠近路面结构层处, 埋设沉降管, 观测路基表面的沉降。为了进一步研究不同断面的路面差异沉降, 在施工路段两侧布置路面测点, 具体测控点布置见表 2。因受现场施工条件的影响, 在匝道两侧布置沉降管, 如图 4 所示。

表 2 测控点布置

Tab. 2 Layout of monitoring points

桩号	EKO + 303	EKO + 313	EKO + 315	EKO + 319	EKO + 323	EKO + 328	EKO + 331	EKO + 333	EKO + 335
沉降测控点									
右	▽	▽	▼	▼	▼	▼	▽	▽	▽
左	▽	▽	▼	▼	▼	▼	▼	▽	▽
施工段落	—	—	I				II		—

注: ▽为仅布置路面测点, ▼为布置路面测点和路基沉降管, I为桥头过渡段, II为桥头处理段。

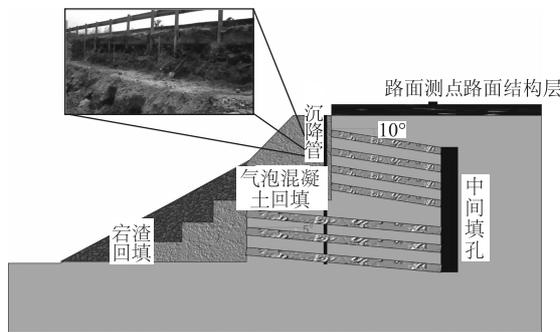


图 4 路基横断面

Fig. 4 Cross-section of embankment

横向引孔桥头处理段。此断面路面沉降在施工期间沉降达 65.3 mm/月和 40.1 mm/月, 见图 6 (b), 远大于正常情况下降降速率, 路基沉降也略偏大达 11 mm/月左右。本断面为全试验段路面沉降速率最大断面, 可能是因为该断面位于处理段落中央位置, 在整个处理段落路堤都发生压缩后, 越靠近中央位置路面沉降自然越大。EKO + 320 ~ EKO + 325 段落是整个处理段引孔密度最大段落, 路堤受施工影响较大, 附近路面沉降也相对较大。横向引孔施工结束后, 本断面路面沉降速率迅速减小, 到 7 月减至 5 mm/月左右。EKO + 335 断面位于桥头搭板处, 沉降速率相对较小, 施工处理前月沉降速率就一直保持在 5 mm/月左右, 如图 6 (c) 所示。横向引孔施工对其也造成了一定影响, 由于施工机械对路堤的震动, 本断面施工期间路面沉降偏大, 施工结束后, 断面月沉降速率变化恢复正常。

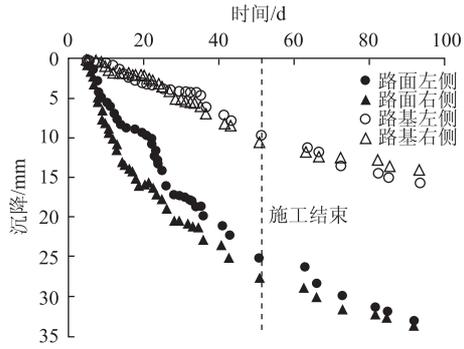
### 4.2 沉降分析

3 月 29 日正式开始施工, 中间由于高速公路检查而在 4 月 19 日至 4 月 26 日停工, 至 5 月 11 日工程施工结束, 历时 54 d。图 5 为 EKO + 315、EKO + 323、EKO + 335 从 2011 年 4 月到 2011 年 7 月的沉降图。EKO + 315 断面位于横向引孔处理段远离桥头侧边缘。在该断面开挖平台靠近路面结构层处, 埋设有沉降管以监测路基沉降情况。EKO + 315 路面沉降在施工期间沉降达 18.8 mm/月和 21.6 mm/月, 如图 6 (a) 所示, 远大于正常情况下降降速率。施工结束后, 路面沉降速率迅速减小, 到 7 月减至 5 mm/月左右, 与路基沉降速率接近。EKO + 323 断面位于

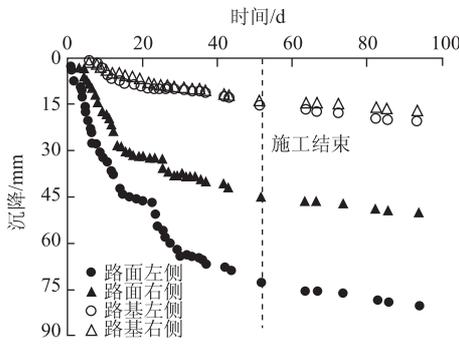
### 5 数值分析

#### 5.1 几何模型的建立

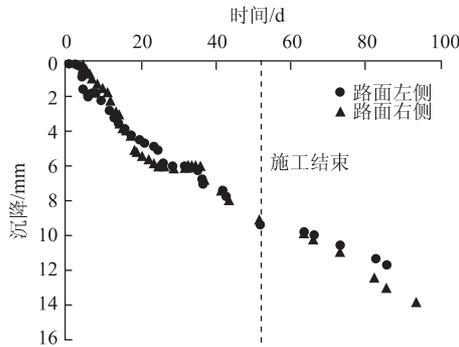
分析实取 EKO + 315 断面, 假设地下水位以下的土体处于饱和状态, 液体流动符合达西定律。 $z$  方向: 地基土深度 33.2 m, 路基高 3.5 m, 路面结构层为 0.6 m, 用 0.9 m 的土柱模拟交通荷载;  $x$  方



(a) EK0+315



(b) EK0+323

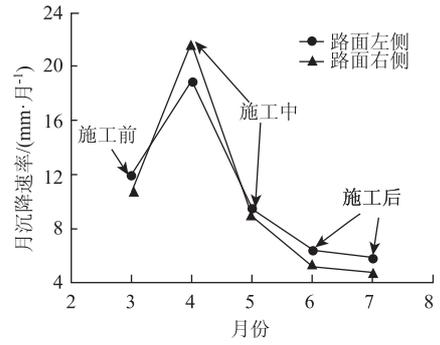


(c) EK0+335

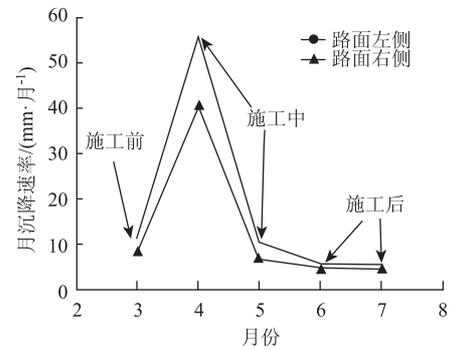
图5 断面沉降监测值

Fig. 5 Monitored settlement at section

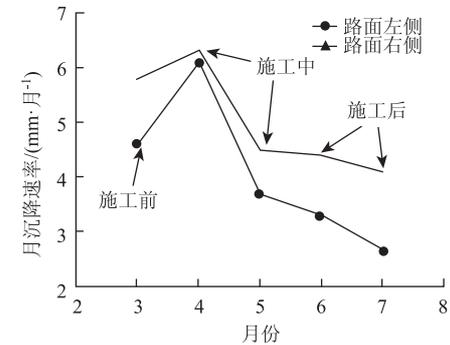
向: 路面宽度 15 m, 路基上部放坡比例为 1:1.2, 下部为 1:1.5, 地基土宽 80 m;  $y$  方向: 模型厚度 0.9 m。参数取值见表 3。模型采用 Comsol 多物理场有限元分析软件求解水土完全耦合的饱和多孔弹性介质中固体骨架变形和地下水流动的控制方程。表层填土和路基土采用线弹性材料, 由于实际工程中存在地下水的影响, 轻质土的容重需要乘以一个修正系数。根据图 1, 修正系数取为 1.1。路基内有 7 个引孔, 通过改变引孔内材料的密度, 来模拟轻质土的置换过程, 其参数变化曲线见图 7。采用四面体单元划分网格, 共 35 571 个域单元, 26 434 个节点, 254 372 个自由度, 如图 8 所示。对模型施加如下边



(a) EK0+315



(b) EK0+323



(c) EK0+335

图6 断面沉降速率监测值

Fig. 6 Monitored settlement rates at section

界条件:

(1)  $x = 80$ ,  $y = 0$  以及  $y = 0.9$  共 3 个面约束法向位移,  $x = 0$  面为对称边界,  $z = 0$  面固定。

(2)  $x = 80$ ,  $y = 0$ ,  $y = 0.9$  以及  $z = 0$  共 4 个面不透水,  $x = 0$  面为对称边界, 上表面为透水边界。

## 5.2 结果分析

图 9 为 EK0 + 315 路面沉降监测值和有限元模拟值的对比。通过轻质土换填, 路基荷载减小。从有限元分析结果看, 施工完成后 1 个月换填与不换填的沉降差为 5 mm, 这接近于 1 个月的沉降量。这说明轻质土对减少地基土的沉降有一定效果。由于从引孔完成到灌浆之间有一定的时间间隔, 在交通荷载

表3 EK0+315 断面土层参数及上部荷载取值  
Tab. 3 Parameters of soil layers and upper loads at section EK0+315

土层名称	厚度/m	天然密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	初始孔隙比	压缩模量/ MPa	渗透系数/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )		压缩系数/ $\text{MPa}^{-1}$
					垂直	水平	
交通荷载	0.9	2 050	—	—	—	—	—
路面	0.6	2 050	—	—	—	—	—
路基	3.5	2 050	—	—	—	—	—
表层土	2.1	2 050	—	—	—	—	—
淤泥质黏土	15	1 700	1.4	2.91	$6.24 \times 10^{-8}$	$8.26 \times 10^{-8}$	0.83
黏土	11.8	1 900	0.86	5.89	$2.91 \times 10^{-8}$	$1.46 \times 10^{-8}$	0.32
细砂夹层	0.4	1 980	0.70	16.81	$1.65 \times 10^{-6}$	$3.07 \times 10^{-6}$	0.1
粉质黏土	3.9	1 990	0.68	10.93	$3.18 \times 10^{-7}$	$3.12 \times 10^{-7}$	0.15

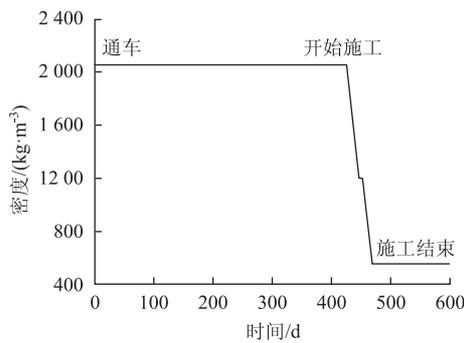


图7 密度变化  
Fig. 7 Density variation

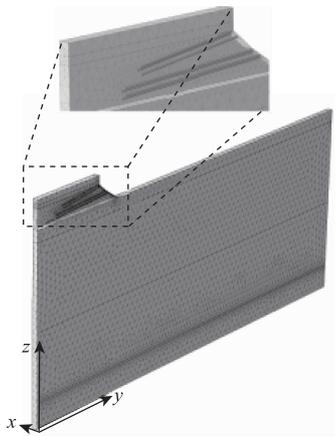


图8 有限元网格  
Fig. 8 Finite element mesh

作用下, 引孔会有一些塌陷。从图 10 可以看出, 沉降明显变大, 施工期的速率大于施工前。施工期 (4 月) 的实测速率高达 21.6 mm, 与有限元结果差距较大。这是因为, 在计算过程中, 置换过程是通过材料密度的变化来模拟的, 没有考虑灌注轻质土前引孔塌陷造成的影响。从 6 月份开始, 两者的结果吻合。模拟结果表明, 侧向引孔轻质土

置换路基能有效控制沉降速率。在保证路基土稳定的条件下, 可增加引孔数量加大卸载量, 或者采取跳孔方式拉大成孔间距, 减少群孔对成孔质量的影响, 成孔后分批次及时浇注轻质土, 避免塌孔影响置换效果。

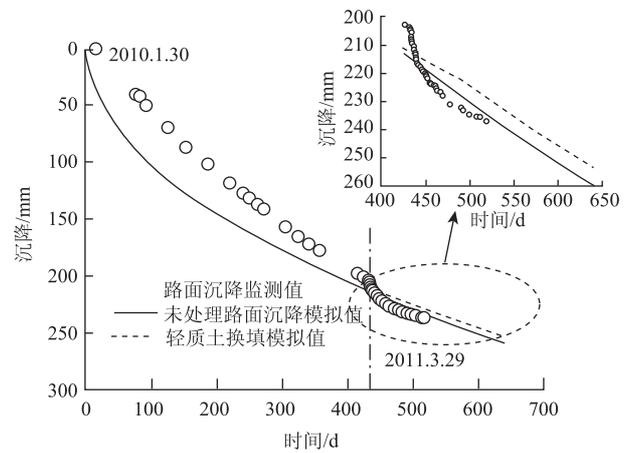


图9 沉降对比  
Fig. 9 Comparison of settlements

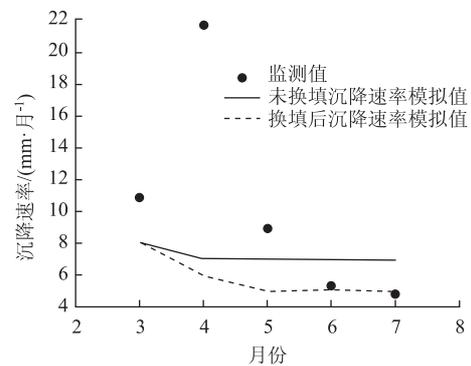


图10 沉降速率对比  
Fig. 10 Comparison of settlement rates

## 6 结论

以实际工程为依托,对通车条件下的轻质土置换路基控制沉降的处理方法进行了研究,针对现场实测值和有限元结果进行了分析,主要结论如下:

(1) 针对申嘉湖高速公路桥头过渡段和桥头处理段,采用不同的卸载量进行轻质土置换。经实测资料表明,该方法处理效果明显,并且不影响正常通车。

(2) 确定了置换体积和轻质土容重与置换后沉降速率的关系,提出了有效固结度的概念。将理论计算与实测资料进行对比,表明这种方法是合理、可靠的。通过施工参数预测置换效果,对工后沉降速率的控制具有针对性和准确性,并且能较好地控制施工预算。

(3) 采用 Comsol 多物理场有限元软件的流固耦合控制方程,分析地基的沉降,结果表明侧向引孔换填轻质土能有效控制沉降。

由于从成孔到浆液凝固有一定的时间间隔,在交通荷载作用下,引孔会有一定塌陷。可以采用跳孔方式拉大成孔间距并且及时浇注轻质土,避免塌孔影响施工效果。

### 参考文献:

### References:

- [1] 曾玲玲,洪振舜,刘松玉,等.天然沉积结构性土的次固结变形预测方法[J].岩土力学,2011,32(10):3136-3142.  
ZENG Ling-ling, HONG Zhen-shun, LIU Song-yu, et al. A Method for Predicting Deformation Caused by Secondary Consolidation for Naturally Sedimentary Structural Clays [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32 (10): 3136 - 3142.
- [2] 冯志刚,朱俊高,冯豪杰.常规次固结沉降计算方法的改进研究[J].岩土力学,2010,31(5):1475-1480.  
FENG Zhi-gang, ZHU Jun-gao, FENG Hao-jie. Study of Improvement of Secondary Consolidation Settlement Calculation Method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31 (5): 1475 - 1480.
- [3] 胡亚元,杨平,余启致.超固结土次固结系数的时间效应[J].中国公路学报,2016,29(9):29-37.  
HU Ya-yuan, YANG Ping, YU Qi-zhi. Time Effect of Secondary Consolidation Coefficient of Over-consolidated Soil [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29 (9): 29 - 37.

- [4] 吕若冰,孔纲强,沈扬,等.既有高速公路高压旋喷桩施工现场监测与数值模拟分析[J].防灾减灾工程学报,2015,35(6):752-757.  
LÜ Ruo-bing, KONG Gang-qiang, SHEN Yang, et al. Construction Monitoring and Numerical Simulation of Existing Expressway Soft Foundation Treatment by High Pressure Jet Grouted Pile Technique [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35 (6): 752 - 757.
- [5] 黄丽娟,高兰芳.不同地质后注浆钻孔灌注桩承载力试验研究[J].公路交通科技,2017,34(10):74-82.  
HUANG Li-juan, GAO Lan-fang. Experimental Study on Bearing Capacity of Post-grouted Bored Piles under Different Geological Conditions [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34 (10): 74 - 82.
- [6] 陈永辉,石刚传,曹德洪,等.气泡混合轻质土置换路基控制工后沉降研究[J].岩土工程学报,2011,33(12):1854-1862.  
CHEN Yong-hui, SHI Gang-chuan, CAO De-hong, et al. Control of Post-construction Settlement by Replacing Subgrade with Foamed Cement Banking [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33 (12): 1854 - 1862.
- [7] 河海大学.正常通车情况下路堤横向钻孔轻质置换控制沉降的方法:中国,ZL201010518332.0[P].2012-07-04.  
Hohai University. Control of Settlement by Laterally Drilling Holes and Replacing Subgrade with Foamed Cement Banking under Normal Traffic without Road Closure: China, ZL201010518332.0 [P]. 2012 - 07 - 04.
- [8] SALLAL A K. Use Foam Concrete in Construction Works [J]. International Journal of Research in Advanced Engineering and Technology, 2018, 4 (2): 15 - 20.
- [9] AMRAN Y H M, FARZADNIA N, ALI A A A. Properties and Applications of Foamed Concrete: A Review [J]. Construction and Building Materials, 2015, 101: 990 - 1005.
- [10] TAYLOR R. Foamed Concrete for Improved Trench Reinstatements [M]. London: British Cement Association, 1991.
- [11] 朱俊杰,刘鑫,洪宝宁,等.气泡混合轻质土路堤最佳浇筑厚度的确定方法[J].岩土力学,2016,37(12):3642-3649.  
ZHU Jun-jie, LIU Xin, HONG Bao-ning, et al. A Method for Determining Optimum Casting Thickness of Foamed

- Mixture Lightweight Soil Embankment [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37 (12): 3642-3649.
- [12] 刘楷, 李仁民, 杜延军, 等. 气泡混合轻质土干湿循环和硫酸钠耐久性试验研究 [J]. *岩土力学*, 2015 (增1): 362-366.  
LIU Kai, LI Ren-min, DU Yan-jun, et al. A Durability Experimental Study of Lightweight Soil Subjected to Wetting-drying Cycles and Sodium Sulfate Soaking [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016 (S1): 362-366.
- [13] 高洪梅, 陈瑞, 童飞, 等. 复杂应力条件下EPS颗粒轻质混合土的动模量和阻尼比特性 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2015 (2): 166-172.  
GAO Hong-mei, CHEN Rui, TONG Fei, et al. Dynamic Modulus and Damping Ratio of EPS Bead Composite Soil under Complex Stress Conditions [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2015 (2): 166-172.
- [14] 何国杰, 丁振洲, 郑颖人. 气泡混合轻质土的研制及其性能 [J]. *地下空间与工程学报*, 2009, 5 (1): 18-22.  
HE Guo-jie, DING Zhen-zhou, ZHENG Ying-ren. Preparation of Bubble Mixed Light Soil and Its Properties [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2009, 5 (1): 18-22.
- [15] 周晔, 郑荣跃, 刘干斌, 等. EPS轻质土强度试验及在软土路基沉降控制中的应用 [J]. *公路交通科技*, 2010, 27 (8): 34-39.  
ZHOU Ye, ZHENG Rong-yue, LIU Gan-bin, et al. Strength Test of EPS Light Soil and Its Application in Controlling of Soft Subgrade Settlement [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2010, 27 (8): 34-39.
- [16] 孙筠, 项贻强, 唐国斌, 等. 软土地基台后回填EPS轻质混凝土沉降分析 [J]. *公路交通科技*, 2010, 27 (7): 46-51.  
SUN Yun, XIANG Yi-qiang, TANG Guo-bin, et al. Numerical Analysis on Settlement of EPS Concrete Backfill Adjacent to Abutment on Soft Foundation [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2010, 27 (7): 46-51.
- [17] HART E G, KONDRER R L, BOYER W C. Analysis for Partially Penetrating Sand Drains [J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1958, 84 (4): 1-15.
- [18] 刘忠玉, 焦阳. 基于 Hansbo 渗流的理想砂井地基固结分析 [J]. *岩土工程学报*, 2015, 37 (5): 792-801.  
LIU Zhong-yu, JIAO Yang. Consolidation of Ground with Ideal Sand Drains Based on Hansbo's Flow [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37 (5): 792-801.
- [19] 贺亚飞. 掺聚乙烯醇 (PVA) 纤维水泥稳定碎石的力学及抗裂性能研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.  
HE Ya-fei. Study on Mechanical and Crack Resistance of Polyvinyl Alcohol (PVA) Fiber Cement Stabilized Crushed Stone [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.
- [20] 封基良. 纤维沥青混合料增强机理及其性能研究 [D]. 南京: 东南大学, 2006.  
FENG Ji-liang. Research on Strengthening Mechanism and Properties of Fiber Asphalt Mixture [D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
- [21] 王永波. PVA 纤维增强水泥基复合材料的性能研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2005.  
WANG Yong-bo. Study on Properties of PVA Fiber Reinforced Cement-based Composites [D]. Chongqing: Chongqing University, 2005.
- [22] 任长喜. 拌和机搅拌时间对混凝土均匀性的影响 [J]. *四川水泥*, 2015 (6): 299.  
REN Chang-xi. Effect of Mixing Machine Mixing Time on Concrete Uniformity [J]. *Sichuan Cement*, 2015 (6): 299.
- [23] 李炳奇, 周月霞. 纤维复合材料加固混凝土结构的研究进展 [J]. *水利与建筑工程学报*, 2016, 14 (1): 85-90.  
LI Bing-qi, ZHOU Yue-xia. Research Process of the Concrete Structure Strengthened with Fiber Composite Polymer [J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2016, 14 (1): 85-90.
- [24] 康爱忠. 聚丙烯纤维掺量对混凝土路用性能影响研究 [J]. *交通世界*, 2012 (8): 114-115.  
KANG Ai-zhong. Research on Influence of Polypropylene Fiber Content on Concrete Pavement Performance [J]. *Transpo World*, 2012 (8): 114-115.
- [25] 曾梦澜, 楠丁, 吴超凡, 等. PVA-ECC 稳定碎石混合料自愈合性能研究 [J]. *公路交通科技*, 2015, 10 (12): 42-45.  
ZENG Meng-lan, NAN Ding, WU Chao-fan, et al. Research on Self-healing Performance of PVA-ECC Stabilized Crushed-stone Mixture [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2015, 10 (12): 42-45.
- [26] 曹源文, 王棋, 孙志永, 等. PVA 纤维水泥稳定碎石拌和均匀性评价 [J]. *筑路机械与施工机械化*, 2017, 34 (3): 63-66, 71.  
CAO Yuan-wen, WANG Qi, SUN Zhi-yong, et al. Evaluation of Mixing Uniformity of Cement Stabilized Macadam and PVA Fiber [J]. *Road Machinery & Construction Mechanization*, 2017, 34 (3): 63-66, 71.

(上接第13页)