

# 山区粗粒土路堤流变特性及沉降预测方法研究

黄凯<sup>1</sup>, 闫明吉<sup>1</sup>, 孙洪军<sup>2</sup>

(1.湖南省交通规划勘察设计院, 湖南 长沙 410008;

2.长沙市望城区城市建设投资集团有限公司, 湖南 长沙 410200)

**摘要:**粗粒土常被用作山区高填路堤填料,但其流变变形持续时间长,长期荷载作用下可能引发路基工后沉降超限。文中分析认为粗粒土工程性质受粒径组成影响较大,并基于粗粒土三轴试验开展粗粒土流变特性研究,得出了应力水平和围压大小对粗粒土流变性质影响明显、粗粒土土体表现为非线性粘塑性变形特征的结论;基于 Merchant 模型建立了粗粒土路堤本体流变估算公式,计算得到了邵怀(邵阳—怀化)高速公路红砂岩粗粒土路基的总沉降量,该公式计算结果与规范方法相比更保守、更安全。

**关键词:**公路;粗粒土路堤;流变特性;三轴试验;沉降预测

**中图分类号:**U416.1

**文献标志码:**A

**文章编号:**1671-2668(2017)05-0082-03

路堤作为路面结构支承物,用以承担车辆荷载,其稳定和变形直接影响公路使用寿命。研究表明路堤变形会引起路面结构破坏,能否控制路堤长期变形直接影响公路服务质量。在湖南西部山区修筑高速公路,受地形限制,高填深挖现象较普遍,粗粒土是常见公路路堤填料,故山区多为高填粗粒土路堤。

郭庆国采用直剪仪对粗粒土抗剪强度特性进行研究,提出了抗剪强度参数;陈希哲通过三轴试验与现场试验对粗粒土咬合力进行了分析;张嘎等通过粗粒土直剪试验分析了干密度与粗料含量对抗剪强度参数的影响;李振等研究了爆破碎石粗粒土及河床砂卵石抗剪强度的影响因素与抗剪强度参数变化规律。一般认为粗粒土路堤密实度大、渗透性好,施工期间可完成大部分沉降。但山区高速公路高填方路堤由于填筑高度很大,施工完成后的工后沉降应引起足够重视。粗粒土路堤的工后沉降主要由颗粒本身不断发生流变与颗粒间不断挤压所致,这种流变变形的形成非常缓慢,一般要数年甚至几十年才能趋于稳定,现阶段对粗粒土路堤长期流变变形的研究也相对较少。此外,至今还没有一套成熟、简便的计算方法获取路堤自身压密沉降及流变沉降。针对粗粒土流变引发的山区高填路堤变形问题,该文基于三轴试验开展粗粒土流变特性分析,在此基础上研究粗粒土路堤沉降预测方法。

## 1 粗粒土的工程特性

粗粒土主要由砂土、碎石土、砾石土、砂卵石等

粗颗粒组成,颗粒组成分散、大小不一,渗透系数悬殊,不均匀系数大,工程性质十分复杂。虽然粗粒土成因、粒径组成、矿物成分、风化程度不同,但也有共性,如较大的密度、较高的强度、承载力大、在荷载作用下变形较小。

粗粒土的工程性质与粗粒含量关系较大。当粗料含量大于 70% 时,粗粒土透水性较强,排水固结速度较快,这是细粒土所不具有的特点。粗粒土的缺点是颗粒之间结合不够紧密,在一定应力状态下可能发生颗粒破碎、重分布等现象,即流变变形,采用粗粒土填筑路堤需控制其沉降变形。

## 2 粗粒土的流变特性

### 2.1 试验内容

采用三轴仪进行粗粒土室内流变试验,分析其流变特性。三轴仪可控制排水条件、测定孔隙压力、限制试样侧向变形,通过三轴试验可获取粗粒土应力应变关系及围压、应力水平、压实度等因素对粗粒土强度的影响。

湖南广泛分布红砂岩,邵怀(邵阳—怀化)高速公路部分路段采用红砂岩粗粒土路堤,在其中两处工点采集路基粗粒土试样,试样的级配情况见表 1。

### 2.2 试验方案

试验考虑围压、应力水平和压实度的影响,围压  $\sigma_3$  分别取 100、200、300 kPa,应力水平取 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0,压实度取 90%、93%。试验方案设计见表 2。

表 1 粗粒土试样的级配

试样 编号	不同粒径(mm)的含量/%							
	300~150	150~80	80~60	60~40	40~20	20~10	10~5	5~0.1
1 <sup>#</sup>	100	93.8	84.4	75.6	64.9	40.5	27.4	19.4
2 <sup>#</sup>	100	92.4	83.1	72.3	59.8	39.6	27.1	15.7

表 2 试验方案设计

组号	围压 $\sigma_3$ /kPa	应力水平	压实度/%
A1	100	0.2、0.4、0.6、0.8、1.0	90
A2	200	0.2、0.4、0.6、0.8、1.0	
A3	300	0.2、0.4、0.6、0.8、1.0	
B1	100	0.2、0.4、0.6、0.8、1.0	93
B2	200	0.2、0.4、0.6、0.8、1.0	
B3	300	0.2、0.4、0.6、0.8、1.0	

2.3 试验结果分析

依据上述试验方案进行粗粒土三轴流变试验,图 1、图 2 分别为不同围压下压实度为 90%和 93%时粗粒土的应力应变曲线。从图 1、图 2 可以看出:1) 在曲线起始段,随着应变  $\epsilon_1$  的增加应力快速增长,达到峰值后慢慢减小。2) 同一土样,围压越高,产生的峰值应力越高,应变值较大情况下会产生破坏;围压为 100 kPa 时破坏应变小于 5%,围压为 200 kPa 时破坏应变为 4%~8%,围压为 300 kPa 时破坏应变为 6~10%。3) 侧压力的增加可较明显地提高粗粒土破坏强度。4) 围压越低,应变软化的

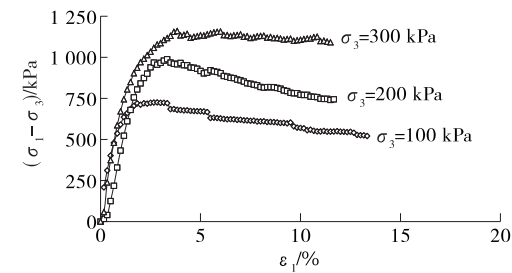


图 1 压实度为 90%时 A 组粗粒土的应力应变曲线

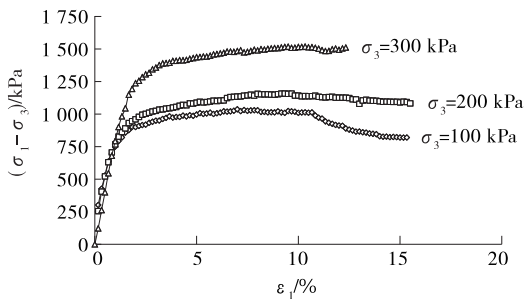


图 2 压实度为 93%时 B 组粗粒土的应力应变曲线

特点越明显。

图 3、图 4 为不同应力水平下压实度为 90%时粗粒土的流变曲线。从图 3、图 4 可看出:前期流变发展较迅速,后期流变速度逐步变缓,最终趋向平缓;应力水平为 1.0 时,流变曲线比较低应力水平时更早出现加速,土体开始破坏。93%压实度时的流变曲线呈现与之类似的变化规律。

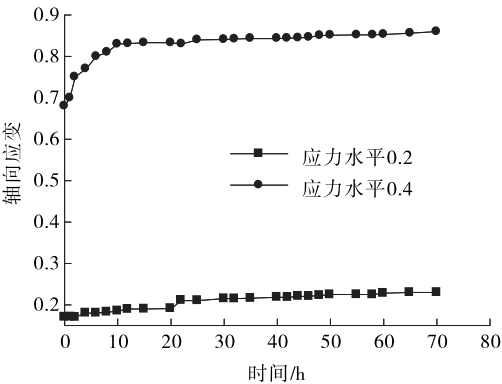


图 3 粗粒土流变曲线  
(压实度 90%,围压 200 kPa,应力水平 0.2、0.4)

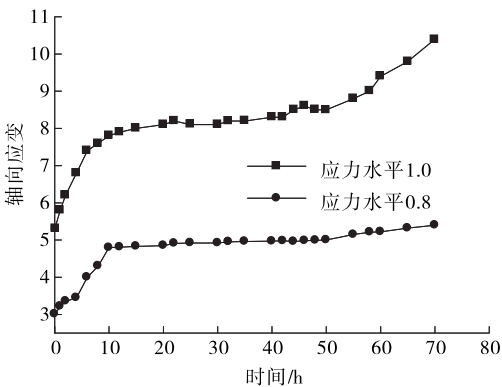


图 4 粗粒土流变曲线  
(压实度 90%,围压 200 kPa,应力水平 0.8、1.0)

试验试样经过了夯实,能达到 90%以上的压实度,试样土样密实;围压为 100~300 kPa,模拟了高速公路路基侧向应力。通过试验分析可知:影响粗粒土路堤流变性质的主要因素是围压与应力水平;粗粒土土体表现为非线性粘塑性变形特征,出现衰减、稳态、加速破坏 3 个流变阶段。

### 3 粗粒土路基沉降预测

#### 3.1 粗粒土路基沉降组成

路基沉降包括路基压密变形与地基沉降,压密变形在施工期间已基本完成,地基沉降由加载后地基立即发生的瞬时沉降、地基土在排水过程中由于体积压缩而产生的固结沉降、上部荷载作用下长时间次固结沉降组成。粗粒土路基除路基本体压密变形外,路堤本体还存在粗粒土流变变形,流变变形可能会经历长达数年时间才能达到基本稳定。对于工后沉降要求较高的高速公路,流变变形不容忽视。

#### 3.2 粗粒土路基沉降预测方法

路基沉降预测包含沉降推算和沉降估算。沉降推算根据沉降测试曲线,利用数学模型进行工后沉降预测;沉降估算根据室内外土木试验获取土体参数,基于经验公式对路基沉降进行预测。沉降估算常采用分层总和法,所采用的经验公式不能充分反映粗粒土路基的流变性质,考虑到粗粒土的粘弹性特征,路堤沉降估算中采用粘弹性理论加以分析。Merchant 模型考虑了瞬时弹性性质和蠕变规律,能较好地分析粗粒土路堤自身沉降,其表达式为:

$$\frac{d\sigma}{dt} + \frac{E_0 + E_1}{\eta_1} \sigma = E_0 \frac{d\epsilon}{dt} + \frac{E_0 + E_1}{\eta_1} \epsilon \quad (1)$$

根据线粘弹性应变叠加原理,通过 Laplace 变换得到:

$$\epsilon = \sigma_0 \left[ \frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_1} \exp\left(-\frac{E_1}{\eta_1} t\right) \right] \quad (2)$$

式中: $\epsilon$  为总应变; $\sigma_0$  为应力(MPa); $E_0$ 、 $E_1$  为模型弹性模量(MPa); $\eta_1$  为模型粘滞系数(MPa·d); $t$  为时间(d)。

将式(2)右项合并、转化,得:

$$\epsilon = \frac{\sigma_0}{E_0} + \frac{\sigma_0}{E_1} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{E_1}{\eta_1} t\right) \right] \quad (3)$$

式(3)中等号右侧第一项为瞬时弹性应变  $\epsilon_e$ , 第二项为流变应变  $\epsilon_c$ , 即:

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_c \quad (4)$$

$$\epsilon_e = \frac{\sigma_0}{E_0} \quad (5)$$

$$\epsilon_c = \frac{\sigma_0}{E_1} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{E_1}{\eta_1} t\right) \right] \quad (6)$$

通过式(5)和式(6)可计算出路堤自身沉降。其中:自重产生的沉降通过式(5)计算;流变产生的沉降通过现场实测数据或试验获得相关数值,再结合

式(6)计算得出。由式(6),采用分层总和法,得出路堤流变沉降为:

$$S_R = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{0i}}{E_1} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{E_1}{\eta_1} t\right) \right] \Delta z_i \quad (7)$$

式中: $S_R$  为路堤流变变形量; $\sigma_{0i}$  为路堤各分层自重应力平均值; $\Delta z_i$  为路堤分层厚度。

### 4 工程实例验证

运用上述考虑粗粒土流变特性的路基沉降估算方法,根据实测沉降曲线采用双曲线模型对邵怀高速公路路基总沉降量进行预测,得到最终沉降量为 412 mm(见图 5)。

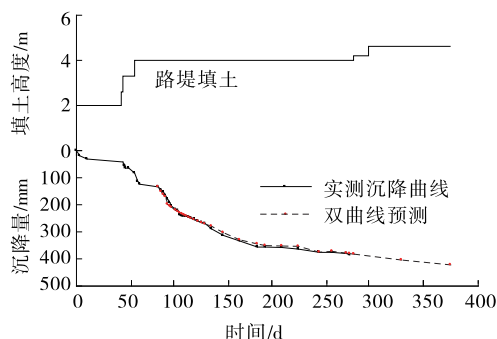


图 5 路基沉降实测曲线双曲线预测

采用《公路路基设计规范》中的经验公式估算得到其最终沉降量为 357 mm。根据文中路堤流变计算公式,得到路堤流变变形量为 31 mm,即估算最终沉降量应增加 8.6%,为 388 mm。其中公式所需各土工参数来源于室内试验,考虑实测沉降还将继续发生,包含流变沉降量的估算量值更接近实测数据。文中方法虽然更精确,但其计算参数主要源于三轴试验,获取较为繁琐,还需进一步精简以利于工程推广应用。

### 5 结论

(1) 粗粒土路基沉降完成快,是较好的路堤填料,但粗粒土工程性质受粒径组成影响较大,在长期荷载作用下可能发生颗粒重分布,即产生流变变形,可能造成路基工后沉降超限。

(2) 应力状态对山区粗粒土路堤流变性质的影响明显。

(3) 与规范建议的经验法相比,考虑粗粒土路堤本体流变的粗粒土路基沉降估算方法更保守、安全,但其计算参数的获取依赖于室内试验,有待工程

(下转第 89 页)

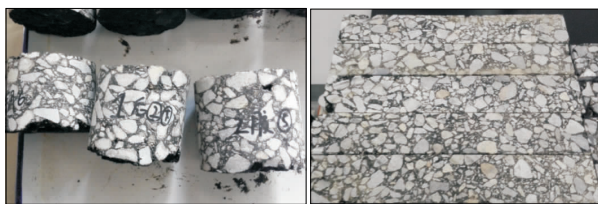


图 1 增韧复合改性沥青 GATB-25 形成的骨架

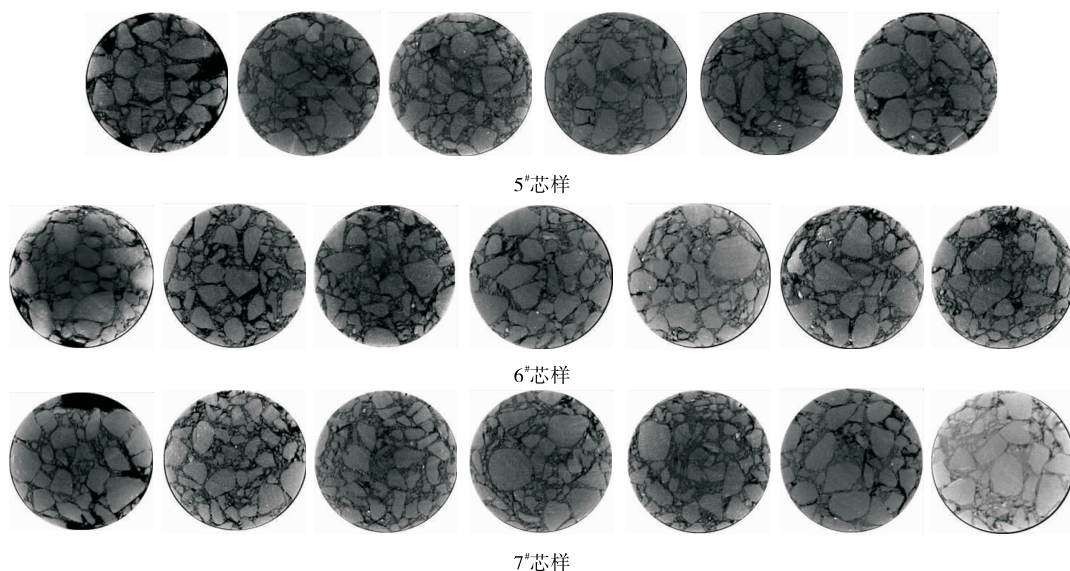


图 2 增韧复合改性沥青 GATB-25 芯样的内部结构

### 3 结语

该文进行了增韧复合改性沥青 GATB-25 配合比设计,并对其基本力学性能和路用性能进行试验,结果表明用该混合料设计的结构层具有良好的使用性能,适用于沥青中间层,能兼顾粘结、防水和抗滑动,具有很强的抗反射裂缝能力,且增韧复合改性沥青 GATB-25 的疲劳性能优于 GATB-25 SBS 改性沥青混合料。

### 参考文献:

- [1] JTG F40—2004,公路沥青路面施工技术规范[S].
- [2] JTG D50—2006,公路沥青路面设计规范[S].
- [3] 魏建国,李云龙,南秋彩,等.下面层不同离析下沥青混合料路用寿命评[J].公路与汽运,2015(2).
- [4] 姚新宇,彭华,周胜波.旧沥青路面新建半刚性路面结构合理性分析[J].公路与汽运,2016(6).

收稿日期:2017-05-31

(上接第 84 页)

实践的进一步验证。

### 参考文献:

- [1] 邓卫东,张兴强,陈波,等.路基不均匀沉降对沥青路面受力变形影响的有限元分析[J].中国公路学报,2004,17(1).
- [2] 郭庆国.关于粗粒土抗剪强度特性的试验研究[J].水利学报,1987,18(5).
- [3] 陈希哲.粗粒土的强度与咬合力的试验研究[J].工程力

学,1994,11(4).

- [4] 张嘎,张建民.粗颗粒土的应力应变特性及其数学描述研究[J].岩土力学,2004,25(10).
- [5] 李振,李鹏.粗粒土直接剪切试验抗剪强度指标变化规律[J].防渗技术,2002,8(1).
- [6] 聂志红,刘群,宋晓东,等.高速铁路砂质板岩粗粒土填料蠕变特性试验研究[J].铁道科学与工程学报,2013,10(3).

收稿日期:2017-04-05