

老化前后高密度聚乙烯土工格栅蠕变特性及本构模型研究^{*}

周志刚, 苏行, 廖伟, 张鹏

(长沙理工大学 道路结构与材料交通行业重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为确定紫外线老化对土工格栅蠕变特性的影响,对老化前后土工格栅进行 1 440 h 室内蠕变试验,比较分析不同张力水平下土工格栅的蠕变规律;对典型土工格栅蠕变模型参数进行回归拟合,评价其适用性及合理性,在此基础上提出一种土工格栅时间硬化准则蠕变模型,并通过回归分析得到模型参数值。结果表明,老化初期由于抗老化剂的影响,格栅拉伸强度下降较慢,随着老化时间的增长,土工格栅的伸长率与拉伸强度均呈下降趋势;紫外线老化作用使土工格栅的蠕变速率加快,随着张力水平的增大这种趋势更明显,但因材料中添加了抗老化剂,老化对土工格栅蠕变特性的影响程度相对有限;3 种经验型蠕变模型中幂函数模型模拟蠕变试验结果的精度最高,但在老化作用后 3 种经验型蠕变模型的适用性均有所降低;时间硬化准则蠕变模型可反映不同张力水平对土工格栅蠕变的影响。

关键词: 公路;高密度聚乙烯土工格栅;紫外线老化;蠕变;本构模型;拉伸强度

中图分类号:U418.7

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2019)03-0086-05

土工格栅作为加筋土挡墙中的重要部件,具有热流变特性,在一定温度下会表现出较明显的蠕变特性,这种蠕变可能导致加筋土结构内部各部分发生不同程度的变形及强度变化,影响加筋土挡墙的安全与稳定性。因此,加筋土结构设计中通常需考虑土工格栅之类土工加筋材料的蠕变折减系数以确定其设计强度。

薛超等通过单、双向土工格栅蠕变试验,得出双向土工格栅各部分蠕变并不均匀,且蠕变速率比单向土工格栅更缓慢;赵鹤晖等对比 4 种荷载作用下土工格栅的收缩应变,发现极限拉伸强度和断裂伸长率随着蠕变时所受应力水平的增加而降低;丁金华等在不同环境因素条件下对土工格栅进行蠕变试验,发现蠕变速率与温度及应力大小成正相关,而上覆荷载和填土约束作用可降低土工格栅的蠕变量。为研究土工格栅的长期蠕变特性,学者们提出了许多蠕变本构模型,如线性、双曲线和多项式等关系曲线。栾茂田等针对不同温度和荷载组合对土工格栅进行室内蠕变试验,确定了环境温度为 20 ℃ 时土工格栅粘弹性本构模型参数;周志刚等通过分析不同荷载条件下土工格栅的蠕变规律,提出了土工格栅粘弹塑性模型。上述关于土工格栅蠕变特性的研究

并未涉及高密度聚乙烯土工格栅,特别是未研究老化对土工格栅蠕变性能的影响。赵鹤晖对 3 种不同光氧老化程度格栅进行蠕变试验,发现相同荷载条件下格栅所受光氧老化时间越长其应变速率越快,但其研究中格栅所受最长光氧老化时间仅 500 h,且没有提出老化后土工格栅的蠕变本构模型。由于施工和反包土工格栅之类加筋土结构中土工格栅难免暴露在空气中,会受到不同程度太阳紫外线辐射的影响,有必要开展老化前后土工格栅蠕变性能及本构模型研究,为土工格栅长期拉伸强度和相关结构理论分析提供依据。该文在对高密度聚乙烯单向拉伸土工格栅进行紫外线加速老化处理的基础上进行蠕变试验,分析老化前后土工格栅的蠕变性能,并采用已有土工合成材料蠕变本构模型对蠕变试验结果进行拟合,比较不同蠕变模型的有效性,同时采用时间硬化蠕变模型对高密度聚乙烯土工格栅的蠕变规律进行分析,建立包括时间、张力水平的老化前后高密度聚乙烯土工格栅蠕变本构模型。

1 高密度聚乙烯土工格栅加速老化试验

1.1 高密度聚乙烯土工格栅的基本性能

根据 JTG E50—2006《公路工程土工合成材料

^{*} 基金项目:江西省交通科技计划项目(2015C0006)

试验规程》对高密度聚乙烯单向拉伸土工格栅进行老化和蠕变试验,格栅的物理性质、力学参数分别见表1和表2。

表1 土工格栅的基本物理特性

物理性能	试验值
颜色	黑色,色泽均匀
外观	无损失、无破裂,网孔大小、形状均匀
纵向每延米肋条数/条	50
肋条长度/cm	36
肋条宽度/mm	5
肋条厚度/mm	3
节点长度/cm	2
节点宽度/mm	15

表2 土工格栅的力学参数

力学参数	试验值
拉伸强度/(kN·m)	90.5
延伸率/%	11.07
2%伸长率的荷载/(kN·m)	28.5
5%伸长率的荷载/(kN·m)	52.4

1.2 加速老化试验方法

土工合成材料的老化试验一般分为自然老化试验和加速老化试验。由于自然老化试验受外界因素干扰过多,试验结果不具有重复性,对老化后蠕变本构模型分析造成影响。因此,试验采用人工加速老化的方法对土工格栅进行老化。

参照 GB/T 16422.3—1997《塑料试验室光源暴露试验方法第3部分:荧光紫外灯》进行试验,采用非连续光照,循环步骤为(20±3)℃温度下光照10h后经无辐射环境静置2h,即单日辐射时长为20h,在该试验循环进行1个月后进行第一次取样,循环2个月后进行第二次取样,共进行11次取样。在加速老化过程中由于试件尺寸较大,数量较多,为使每个土工格栅试件能接受同等强度的紫外线辐射,将土工格栅均匀放置于老化试验箱托盘内,各试件摆放位置相互无重叠、无遮挡。试验期间及时更换灯管确保紫外线辐射强度随时间保持一致。

1.3 试验结果分析

取不同老化时间的加速老化试件进行拉伸强度试验,得到拉伸强度保持率与老化天数的关系曲线(见图1)。

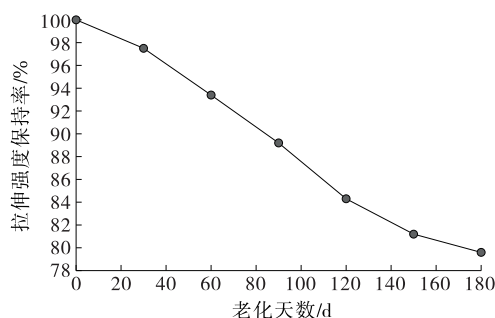


图1 拉伸强度保持率与老化天数的关系曲线

由图1可知:随着土工格栅对紫外线辐射能量的吸收,其拉伸强度与伸长率逐渐降低。在老化初期阶段格栅强度下降较慢,主要是由于材料中抗老化剂的影响;随着时间的推移,抗老化剂逐渐丧失效力,其拉伸强度的下降与老化天数(紫外线能量)几乎成线性关系;后期随着老化程度的加深,材料变脆,土工格栅的拉伸强度趋于稳定。

2 高密度聚乙烯土工格栅蠕变试验

2.1 高密度聚乙烯土工格栅的蠕变机理

高密度聚乙烯土工格栅是一种聚烯烃类聚合物,其玻璃化温度较低,正常使用状态下表现为高弹形态,易表现出软而韧的力学特征。近年来对聚乙烯材料蠕变机理的研究成果众多,针对高密度聚乙烯材料蠕变过程提出了由两个活化过程组成的蠕变模型。该模型将材料的蠕变过程分化为可恢复线性粘弹变形过程和不可恢复塑性变形过程,这两种变形分别由两个平行热活化过程所导致。其中:可恢复线性粘弹变形过程具有较小的活化体积,且活化体积受应力比影响严重,其变形过程仅表现为聚合物晶区的内部松弛、界面滑移、折叠片晶松弛等,而与材料内部聚合物分子量、共聚物组织结构形态无关;不可恢复塑性变形过程具有较大的活化体积,其活化体积与分子量、共聚—交联的聚合物结构密切相关,而与材料结构、化学组成关系不大。

2.2 高密度聚乙烯土工格栅拉伸蠕变试验

取加速老化6个月的土工格栅按 JTG E50—2006《公路土工合成材料试验规程》的要求进行蠕变拉伸试验。试验期间实测环境温度约22℃,湿度为55%~60%,土工格栅的初始夹持长度为100cm,蠕变试验总时间约1440h。加载未老化的土工格栅时选择3个张力水平,分别为极限抗拉强度的30%、40%、50%。由于紫外线老化作用的影响,土工格栅拉伸强度下降,为了使老化前后蠕变试验具

有可比性,选择相同大小的张力。以老化前的加载条件为参照,老化后对应张力水平分别为 37%、49%、62%。每个张力水平下分别进行 2 组平行试验,每个试件采用单肋拉伸蠕变形式,以 P_1 、 P_2 、 P_3 代表由低到高所对应的张力大小。

2.3 蠕变试验结果分析

分别记录老化作用前后土工格栅样条在不同张力水平、不同时刻的变形量,得到各组格栅的应变值,其均值见图 2。

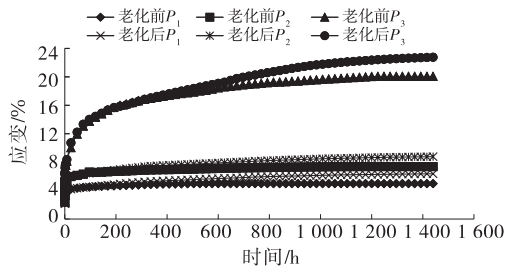


图 2 高密度聚乙烯土工格栅的蠕变应变-时间曲线

由图 2 可知:1) 在 P_1 和 P_2 张力水平作用下,试验初期蠕变量迅速增大,之后趋于稳定,且在较低张力水平下土工格栅试件能较快达到稳定的应变值,该值在 10% 以下。在 P_3 张力水平作用下,试验初期土工格栅应变增大趋势更明显,在较短时间内即达到 10% 应变值,该应变值超出规范允许值,之

后随着时间的推移逐渐趋于平缓。因此,应使土工格栅承受的张力水平荷载不超过 50%。2) 3 种张力作用下,土工格栅的应变曲线在测试时间内呈现两阶段变形特征,第 I 阶段的变形主要以弹性变形为主,在较短时间内变形剧烈,其后随着时间的推移逐渐产生粘性变形,并进入第 II 阶段即稳定变形阶段,土工格栅的变形趋于平缓。3) 比较老化前后土工格栅的蠕变曲线,在同一张力水平下老化后土工格栅试件的最终蠕变量大于老化前土工格栅试件。对比最终蠕变量,随着张力水平的提高,紫外线辐射老化作用对材料蠕变性能的影响更显著。这一现象的产生可归结于紫外线老化作用使土工格栅微观结构发生变化,并使材料抗变形能力下降,从而使土工格栅的蠕变行为加剧。因此,进行土工格栅蠕变强度折减计算时应考虑材料的紫外线老化影响。

3 高密度聚乙烯土工格栅蠕变模型

3.1 典型的经验型蠕变模型

蠕变模型是反映材料蠕变特性的基本假设,通过该假设可判断材料受外力作用后的形变历程。本构关系是用来描述材料因遵循内部属性而产生力学响应的规律方程。表 3 为几种典型的基于热流变理论的考虑时间效应的蠕变本构模型。

表 3 典型的土工格栅蠕变模型

蠕变模型	表达式	参数说明
幂函数型	$\epsilon(t) = a + bt^n$	a 、 b 和 n 为材料相关参数; ϵ 为应变; t 为时间
对数函数型	$\epsilon(t) = \epsilon(t_0) + m \lg t$	$\epsilon(t_0)$ 为 $t = 1$ h 时的蠕变; m 为蠕变曲线斜率
双曲线函数型	$\epsilon(t) = \epsilon_i + \frac{t}{a + bt}$	ϵ_i 为加载瞬时的变形; a 和 b 为材料参数
蠕变速率型	$\dot{\epsilon}(t) = c_1 \epsilon^{c_2 T} (t_1/t)^m$	c_1 、 c_2 、 m 为与材料相关的参数; t_1 为时间因子; T 为应力水平
其他经验型	$\epsilon(t) = \epsilon_0 + \frac{A}{1-m} e^{aL} (t^{1-m} - 1)$	ϵ_0 为 $t = 1$ h 时的应变; L 为应力水平; m 、 A 和 a 为材料参数,且 $m \neq 1$

对于蠕变速率型模型,将等式两边分别积分,得:

$$\frac{\epsilon^{1-c_2 T}}{1-c_2 T} = \frac{c_1 t_1 t^{1-m}}{1-m} + C_3 \quad (1)$$

式(1)为 ϵ 关于 t 的幂函数形式,表 3 中其他经验型模型实质上也是如此。因此,典型的经验型蠕变模型可归纳为幂函数型、对数函数型和双曲线函数型 3 种。

3.2 不同经验型蠕变模型的拟合分析

采用 3 类典型的经验型蠕变模型对老化前后土

工格栅蠕变试验数据进行回归拟合,得出土工格栅老化前后经验型蠕变模型参数(见表 4)。

由表 4 可知:1) 幂函数、双曲线函数、对数函数三类模型对土工格栅蠕变试验结果拟合的相关系数平均值分别为 0.986 7、0.954 5、0.954 1,幂函数模型的模拟精度最高。2) 土工格栅老化前,随着张力水平的增大,模拟拟合精度呈下降趋势。3) 对数函数中 m 值代表蠕变速率。老化后土工格栅的 m 值普遍大于未老化土工格栅,说明紫外线老化作用使土

表4 典型的经验型蠕变模型参量回归结果

格栅老 化状态	张力水 平/%	幂函数模型 参数值			幂函数模型 相关系数	双曲线模 型参数值			双曲线模型 相关系数	对数函数模 型参数值		对数函数模 型相关系数
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>n</i>		$\epsilon_i/\%$	<i>a</i>	<i>b</i>		$\epsilon(t_0)$	<i>m</i>	
老化前	30	0.42	3.140	0.056	0.992 2	2.99	2.499	0.516	0.965 5	3.60	0.473	0.993 8
	40	1.20	3.421	0.085	0.991 2	3.89	4.303	0.299	0.964 9	4.72	0.863	0.991 3
	50	2.15	5.076	0.179	0.990 3	5.70	6.630	0.068	0.964 2	8.33	3.571	0.971 5
老化后	37	2.35	0.849	0.215	0.958 5	3.16	57.178	0.282	0.927 6	3.49	0.813	0.898 1
	49	1.83	2.595	0.135	0.990 2	4.22	28.038	0.211	0.931 2	4.75	1.165	0.962 6
	62	3.57	3.271	0.246	0.997 9	6.54	11.179	0.056	0.973 8	8.40	4.022	0.907 2

工格栅的蠕变速率加快。4) 紫外线老化作用后土工格栅蠕变模型的相关系数均小于老化前,即老化后模型模拟精度普遍低于老化前,说明随着老化程度的加深,经验型蠕变模型的适用性逐渐降低。

3.3 时间硬化准则蠕变模型

3.3.1 模型构建

上述经验型蠕变模型并未反映张力水平对蠕变的影响,可考虑采用时间硬化准则、应变硬化准则和Singh-Mitchell准则的蠕变模型。在应力不变的条件下,采用时间硬化准则蠕变模型较合理,其幂函数形式为:

$$\dot{\bar{\epsilon}}^{cr} = A (\bar{\sigma}^{cr})^n t^m \tag{2}$$

式中: $\dot{\bar{\epsilon}}^{cr}$ 为等效蠕变应变率; $\bar{\sigma}^{cr}$ 为等效蠕变应力; t 为时间; A 、 m 、 n 为与材料相关的参数。

在应变不变的条件下,采用应变硬化准则蠕变模型较合理,其幂函数形式为:

$$\dot{\bar{\epsilon}}^{cr} = \{A (\bar{\sigma}^{cr})^n [(m+1)\bar{\epsilon}^{cr}]^m\}^{1/(m+1)} \tag{3}$$

式中: $\bar{\epsilon}^{cr}$ 为等效蠕变应变。

如果应力和应变率之间存在指数关系,则可采用Singh-Mitchell准则蠕变模型:

$$\dot{\bar{\epsilon}}^{cr} = A e^{(\bar{\sigma}^{cr})} \left(\frac{t_1}{t}\right)^m \tag{4}$$

高密度聚乙烯土工格栅室内耐久性试验通过控制应力的方式进行,宜采用幂函数形式的时间硬化准则蠕变模型。对式(2)两边同时对时间 t 进行积分,得:

$$\bar{\epsilon}^{cr} = \frac{A}{m+1} (\bar{\sigma}^{cr})^n t^{m+1} \tag{5}$$

式中: $\bar{\epsilon}^{cr}$ 为试样任一时刻的等效应变;参数 A 控制试样蠕变速率的数量级;参数 n 表征偏应力对蠕变的影响程度;参数 m 控制蠕变随时间增长而减小的

速度。

式(5)即为高密度聚乙烯土工格栅时间硬化准则蠕变本构模型。

3.3.2 时间硬化准则蠕变模型参数值

根据老化后土工格栅在不同张力水平下的蠕变应变-时间关系曲线求解蠕变模型的相关参数。

(1) 参数 m 。根据式(5),应力不变时, ϵ 与 t 成指数关系,对不同张力下的 $\epsilon-t$ 关系曲线进行拟合,可得到不同张力水平下的 m 值(见图3和表5)。

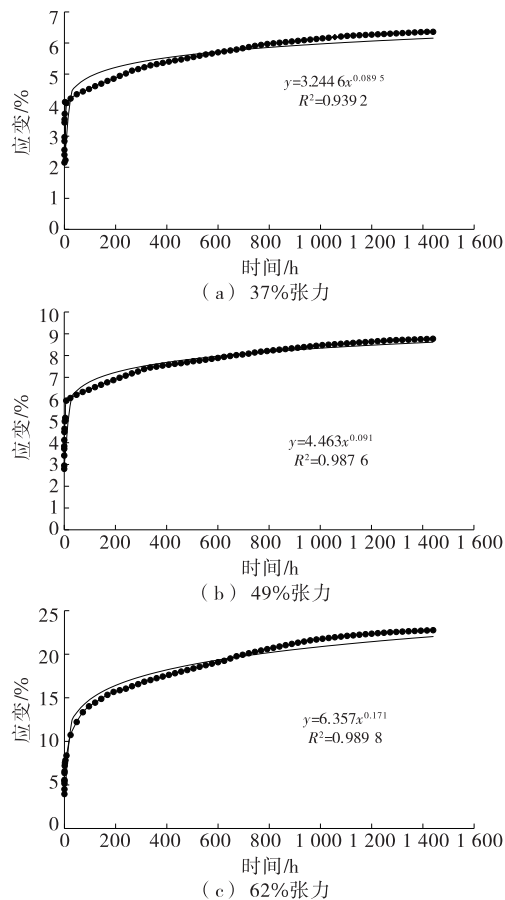


图3 老化后土工格栅试件在不同张力下的 $\epsilon-t$ 关系曲线

表5 老化后土工格栅试件在不同张力下的 m 值

张力水平/%	m 值	张力水平/%	m 值
37	-0.911	62	-0.829
37	-0.911	平均值	-0.883

(2) 参数 n 。根据式(5),时间不变时, ϵ 与 $\bar{\sigma}$ 成幂指数关系。对 t 为 1、8、24、48、240、480、1 200、1 440 h 时的应力应变数据进行拟合,可得到不同时刻下的 n 值(见表6和表7),其中 a 为拟合公式 $y = ax^b$ 中的参数 a 值, b 代表时间硬化准则蠕变模型中的参数 n 。

表6 不同时刻土工格栅应变的拟合回归结果

t/h	模型参数值		相关系数
	a	b	
1	1.133×10^{-6}	1.394	0.908 3
8	1.113×10^{-6}	1.411	0.998 8
24	1.358×10^{-6}	1.396	0.953 3
48	8.234×10^{-11}	2.290	0.932 8
240	8.311×10^{-13}	2.724	0.915 3
480	2.218×10^{-13}	2.853	0.909 3
1 200	9.243×10^{-15}	3.154	0.903 4
1 440	8.276×10^{-15}	3.166	0.903 7

表7 老化后土工格栅试件在不同时刻的 n 值

时间/h	n 值	时间/h	n 值
1	1.394	480	2.853
8	1.411	1 200	3.154
24	1.396	1 440	3.166
48	2.290	平均值	2.299
240	2.724		

(3) 参数 A 。将参数 m 和 n 的值代入式(5),根据 $\epsilon - t$ 关系曲线可拟合得到土工格栅试样在相应荷载水平下的 A 值(见表8)。

表8 老化后土工格栅试件在不同张力下的 A 值

张力水平/%	A 值	张力水平/%	A 值
37	1.100×10^{-7}	62	1.983×10^{-7}
49	9.413×10^{-8}	平均值	1.341×10^{-7}

对上述数据汇总,可得到老化后高密度聚乙烯土工格栅蠕变模型参数值(见表9)。由表9可知:

老化后高密度聚乙烯土工格栅蠕变模型的系数有所降低,应力项的幂指数有所减小,而时间的幂指数有所增大。即在相同张力作用下,老化后土工格栅蠕变的变形有所降低,但随时间的变化速率有所增加;张力对老化前后土工格栅蠕变的影响规律相似。需指出的是,由于所研究的加筋材料为高密度聚乙烯土工格栅,其中添加了抗老化剂,老化对土工格栅蠕变特性的影响程度相对有限。

表9 老化前后土工格栅试件蠕变本构模型即式(5)的参数值

格栅老化状态	A	m	n
老化前	1.150×10^{-7}	-0.906	2.526
老化后	1.341×10^{-7}	-0.883	2.299

4 结论

该文开展高密度聚乙烯土工格栅的紫外线加速老化和蠕变试验,并采用不同蠕变模型拟合试验数据,对比分析老化前后土工格栅蠕变试验结果和不同蠕变模型的拟合精度,主要得到以下结论:

(1) 老化初期由于抗老化剂的影响,格栅拉伸强度下降较慢。随着抗老化剂失去效力,格栅拉伸强度的下降与老化时间成线性关系。老化后期材料变脆,土工格栅拉伸强度趋于稳定。

(2) 同等荷载条件下,老化后土工格栅的蠕变变形与速率均增大,紫外线老化作用使土工格栅的蠕变速率加快。随着张力水平的增大,这种趋势更明显。但由于格栅材料中添加了抗老化剂,老化对土工格栅蠕变特性的影响程度相对有限。

(3) 对于经验型蠕变模型,幂函数模型模拟蠕变试验结果的精度最高。经验型蠕变模型模拟老化后土工格栅蠕变的精度普遍低于老化前土工格栅。老化作用后,土工格栅3种典型蠕变模型的适用性有所降低。

(4) 采用时间硬化准则蠕变模型拟合老化前后土工格栅的蠕变试验结果,可反映不同张力水平对土工格栅蠕变的影响。

参考文献:

- [1] 周志刚,郑健龙.公路土工合成材料设计原理及工程应用[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [2] 邹维列,王钊,林晓玲.土工合成材料的蠕变折减系数

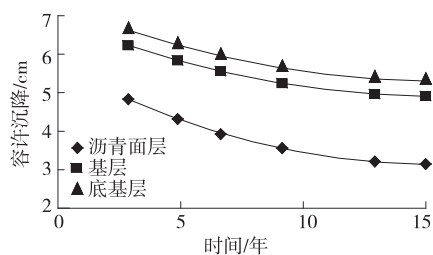


图3 各结构层容许沉降与公路服役时间的关系

由图3可知:路面各结构层中,沥青面层容许差异沉降最小,为控制路面出现病害,应以沥青面层的容许差异沉降值为控制标准。依据式(12)求得公路服役5、10、15年时沥青面层的容许差异沉降值分别为4.30、3.47、3.14 cm。

3 结论

该文基于某高速公路典型路段分析新老路基差异沉降与路面应力的关系,并考虑沥青材料疲劳特性的影响,分析高速公路改扩建工程加宽路基与旧路基之间的容许差异沉降控制标准,结论如下:

(1) 高速公路改扩建工程加宽路基与旧路基之间的容许差异沉降以沥青路面面层容许沉降值为控制标准。

(2) 因高速公路服役一段时间后会进行大修,若将最小的容许差异沉降值作为控制标准,施工成本及难度将大幅增加;若容许差异沉降标准取值太大,则路面易出现裂缝,工程质量得不到保证。以拓宽公路10年内不进行大修为目标,以沥青面层容许沉降4.30 cm为标准,按路基半幅宽度17.25 m计算得出路面面层横坡2‰,该高速公路改扩建工程新老路基容许差异沉降以半幅横坡改变量2‰为控

制标准。

参考文献:

- [1] 黄凯,闫明吉,孙洪军.山区粗粒土路堤流变特性及沉降预测方法研究[J].公路与汽运,2017(5).
- [2] 付秀艳,薛皓辰.基于有限元模拟的抛石挤淤沉降控制对比研究[J].公路与汽运,2018(2).
- [3] 魏建国,李洋,王晶,等.驻信高速改扩建工程土石混填路基施工技术[J].公路与汽运,2016(5).
- [4] 胡其志,黄希程,周红,等.半幅填方路基差异沉降影响因素研究[J].湖南交通科技,2015,41(4).
- [5] 端木瑾,陈锐,戴卓志.水官高速扩建工程边坡设计的综合分析[J].公路工程,2014,39(2).
- [6] 张希然,谢锴,康晓茜.浅谈吉怀高速公路上边坡生态防护[J].公路工程,2011,36(3).
- [7] 叶永城,李思清,马鹏真.佛开高速公路单侧拓宽工程差异沉降控制标准研究[J].中外公路,2013,33(5).
- [8] 宋辞,何平.高速公路拓宽路基差异沉降有限元模拟及控制指标分析[J].中外公路,2012,32(2).
- [9] 杨涛,李磊,李国维.公路双侧拓宽差异沉降控制标准研究[J].公路交通科技,2014,31(5).
- [10] 祁艺彬.基于目标的山区高速公路差异沉降主动控制方法[J].交通世界,2018(26).
- [11] 李红涛,杨彦昌,李良.G240 二级公路扩建工程拼接路基差异沉降分析[J].公路与汽运,2018(6).
- [12] 杜艳军.高等级公路路堤加宽理论分析[D].哈尔滨:东北林业大学,2005.
- [13] 徐强.高速公路改扩建工程技术与实践[M].北京:人民交通出版社,2010.
- [14] 陈星光.高速公路扩建工程差异沉降控制技术研究[D].西安:长安大学,2006.

收稿日期:2018-12-18

(上接第90页)

- [J].岩土力学,2004,25(12).
- [3] Yeo S S, Hsuan Y G. Evaluation of creep behavior of high density polyethylene and polyethylene-terephthalate geogrids [J]. Geotextiles & Geomembranes, 2010,28(5).
- [4] 张震,魏红卫.确定蠕变折减系数的侧限时温叠加蠕变试验研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(增刊1).
- [5] 薛超,袁慧,刘双英,等.双向土工格栅的蠕变与收缩特性研究[J].太原理工大学学报,2015,46(6).
- [6] 赵鹤晖,袁慧,刘双英,等.土工格栅蠕变后拉伸性能试验研究[J].中外公路,2017,37(1).
- [7] 丁金华,童军,张静,等.环境因素对土工格栅蠕变特性

- 的影响[J].岩土力学,2012,33(7).
- [8] 栾茂田,肖成志,杨庆,等.土工格栅蠕变特性的试验研究及粘弹性本构模型[J].岩土力学,2005,26(2).
- [9] 周志刚,李雨舟.土工格栅蠕变特性及其黏弹塑性损伤本构模型研究[J].岩土工程学报,2011,33(12).
- [10] 赵鹤晖.考虑老化作用下土工格栅拉伸、蠕变、筋土界面特性的试验研究[D].太原:太原理工大学,2017.
- [11] 蒋秀亭,杨旭东,童军.高密度聚乙烯土工格栅光氧化研究进展[J].合成材料老化与应用,2015(1).
- [12] 李雨舟.土工格栅蠕变特性及加筋土本构模型研究[D].长沙:长沙理工大学,2009.

收稿日期:2018-10-19