

文章编号: 1000-7598-(2012)07-2048-07

环境因素对土工格栅蠕变特性的影响

丁金华^{1,2}, 童军^{2,3}, 张静², 周武华²

(1. 浙江大学 建筑工程学院, 杭州 310027; 2. 长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 武汉 430010;
3. 九州大学 工学部地盤工学研究室, 日本 福岡 8190395)

摘要: 针对高密度聚乙烯单向拉伸土工格栅进行了一系列不同环境因素条件下的蠕变试验, 研究了应力水平、温度、化学作用、施工损伤以及砂土侧限约束等对格栅蠕变性能的影响。结果表明, 温度或应力水平越高, 格栅蠕变量越大, 蠕变速率也越快; 常规条件下单向拉伸土工格栅的蠕变临界应力水平不宜大于 40%; 化学作用可导致格栅蠕变量增大 10%, 施工损伤对蠕变的影响非常显著; 另一方面, 砂土侧限约束下的蠕变特性与格栅的受力状态有关, 填料约束以及上覆荷载作用可大幅降低格栅的蠕变量。

关键词: 土工格栅; 蠕变; 应力水平; 环境因素; 侧限约束; 施工损伤

中图分类号: TU 472.3

文献标识码: A

Study of influence of environmental factors on geogrid creep property

DING Jin-hua^{1,2}, TONG Jun^{2,3}, ZHANG Jing², ZHOU Wu-hua²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics & Engineering of Ministry of Water Resources,

Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 3. Department of Civil Engineering, Kyushu University, Fukuoka 8190395, Japan)

Abstract: A series of creep tests of high-density polyethylene uniaxial geogrids are performed under different environmental conditions, including the stress level, temperature, chemical reaction, installation damage and confined constraint in sand. The results show that: with the higher temperature or stress level, the creep of geogrid is bigger and the creep rate is faster; the creep critical stress level of uniaxial geogrid is unsuitable to exceed 40% under common conditions; chemical reaction can lead the creep deformation to increase about 10%; the influence of installation damage is obvious; the creep property under confined constraint in sand is related with the stress state of geogrid; the filling material and loading can reduce the creep deformation of geogrid greatly.

Key words: geogrid; creep; stress level; environmental factor; confined constraint; installation damage

1 引言

土工格栅由于其独特的网孔构造、高强度、施工方便、耐腐蚀等特点, 目前已成为加筋土结构中应用最为广泛的加筋材料之一。作为高分子聚合物产品, 蠕变是其黏弹特性的一种突出表现形式, 尤其是格栅在实际工程中长期处于拉伸状态, 有可能出现下列情况: ①土工格栅应变超过规定值而不能发挥其应有的加筋增强作用, 使土工结构变形过大; ②随蠕变的进行, 土工格栅因其拉伸屈服强度下降而断裂, 引起土工结构的破坏。我国一些土工合成

材料加筋土挡墙出现墙面板鼓肚现象, 有的建成几年便倒塌, 分析原因均与材料的蠕变现象有关。因此, 格栅的蠕变强度成为决定加筋土结构长期稳定性的一个关键指标^[1], 我国“塑料土工格栅蠕变试验和评价方法”^[2]中规定以设计年限 10^6 h 时失效应变 10% 来确定长期蠕变强度。设计中为了避免出现因长期强度不足而导致的安全隐患, 往往采取两种方法: ①对塑料拉伸型土工格栅一般取其应力-应变曲线上对应于 5% 延伸率时的拉力作为设计值; ②将蠕变折减系数取大值。这两种强度取值方法都具有很大的随意性和不合理性, 但由于目前缺乏对加

收稿日期: 2012-04-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 50808024)。

第一作者简介: 丁金华, 女, 1973 年生, 高级工程师, 主要从事土工合成材料工程应用、水利工程渗流控制、膨胀土工程特性及处理等方面的研究工作。E-mail: jhding1973@hotmail.com

筋材料蠕变的基础研究资料,对筋材长期蠕变特性缺乏全面地了解和掌握,因此,工程界也只能沿用至今。鉴于此,研究土工格栅的蠕变特性并预测其长期蠕变对于结构的安全性和经济性至关重要,对工程设计、施工和应用都具有非常重要的指导作用。

近年来,国内外越来越多机构和研究人员开始对土工合成材料蠕变特性的研究给予更多关注和重视,相继开展了有关的室内试验和理论研究,取得了一定成果^[3-10]。多数研究成果都是在室内标准温、湿度条件下进行的,这也是目前国内外蠕变测试规程规范(土工布及相关产品拉伸蠕变和蠕变断裂的测定^[11]、土工合成材料无约束拉伸蠕变特性测试及评价标准^[12]、土工布及其有关产品拉伸蠕变和拉伸蠕变断裂性能的测定^[13]等)所建议的研究方法。但实际上,格栅作为加筋材料应用于实际工程时,其蠕变特性会受到应力水平、温度、侧限约束、施工损伤、化学作用等不同环境因素的影响,导致其蠕变强度指标与室内标准条件下得到的结果有较大差异,特别是当其埋置于土中时不可避免地要受到周围土体的侧限约束作用,会更明显地改变材料的蠕变特性^[14-15]。但受限于相关试验设备和研究手段的欠缺,有关各种环境因素对土工格栅蠕变影响的综合性研究还非常少。

本文通过对不同应力水平、温度、化学作用、施工损伤以及砂土侧限约束等条件的模拟,对高密度聚乙烯(HDPE)单向拉伸土工格栅的蠕变性能进行了室内试验,获得了各种环境因素变化下格栅的蠕变特性。

2 HDPE 土工格栅的蠕变试验

本文的蠕变试验从约束条件可以划分为两类:空气中进行的常规无约束蠕变试验以及有砂土侧限约束的蠕变试验。前者包括各种温度、应力水平、化学作用和施工损伤条件下的试验,利用微机控制电子式蠕变持久试验机进行;后者是指将土工合成材料埋设于土体中,在填料约束和一定上覆荷载作用下,对格栅施加一恒定水平拉力而进行的蠕变试验,所需试验仪器可利用常规的土-土工合成材料直剪拉拔试验仪经适当改造而成。

2.1 蠕变试验方法

无约束蠕变试验参照水利部行业标准土工合成材料测试规程^[16]以及轻工行业标准塑料土工格栅蠕变试验和评价方法^[2]进行。首先将蠕变试验机环境箱的温度调整到指定值(20℃、40℃或60℃),将样品放置其中24 h后再进行对夹持,施加预拉

荷载使试样伸直,以此时试样长度作为初始长度 l_0 ,以此时刻作为记录伸长量的起始时刻 t_0 。蠕变试验以50 N/s的加载速率将荷载快速施加到指定值后稳压,加载期以及蠕变试验进行期每隔一定时间间隔自动记录试样伸长量 Δl 。以下式计算蠕变应变:

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: ε_t 为 t 时刻格栅蠕变应变(%); Δl 为 t 时刻格栅试样的伸长量(mm); l_0 为格栅试样施加预荷载后的初始长度(mm)。

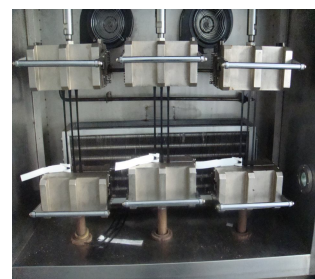
目前国内外侧限约束蠕变试验均无规程、规范可循,从原理上来说,该试验与土-土工合成材料界面直剪或拉拔试验有相近之处,试验流程可参照拉拔试验来进行。先将格栅铺设于上、下剪切盒之间,两端均通过特制夹具进行夹持固定,待上盒土样制备好后,即施加一定的垂直压力,然后在拉伸端施加水平荷载,达到指定值后稳压,记录格栅伸长量,并计算相应的蠕变应变。

2.2 蠕变试验设备

无约束蠕变试验在长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室的RDW20030型微机控制电子式蠕变持久试验机上进行。该机由3个独立的加载机构、测量控制系统以及1个共用的环境箱附件组成(见图1)。环境箱长×高×宽尺寸为1.0 m×0.8 m×0.32 m,温度调节范围-30~100℃(±1℃),湿度调节范围40%~80%(±10%)。



(a) 整机示意图



(b) 环境箱内格栅试样

图1 微机控制电子式蠕变持久试验机

Fig.1 Electronic creep testing machine

侧限约束蠕变试验采用长江科学院自行研制加工的土-土工合成材料直剪仪进行,主要包括垂直和水平荷载加载系统、剪切盒、以及位移采集系统等。其中垂直荷载通过杠杆施加,水平荷载直接通过砝码施加;剪切盒长×宽为 430 mm×300 mm。

2.3 土工格栅性质及试样制备

选用国内某公司生产的两种 HDPE 单向拉伸土工格栅,首先对其进行室内无约束拉伸试验,得到基本力学性质如表 1 所示,典型应力-应变曲线如图 2 所示。

表 1 两种土工格栅的基本力学性质表

Table 1 Basic mechanical properties of two geogrids

格栅型号	极限抗拉强度 /(kN/m)	峰值应变 /%	拉伸强度/(kN/m)	
			2%延伸率	5%延伸率
格栅 A	53.35	13.29	16.21	30.94
格栅 B	100.42	11.13	35.56	62.50

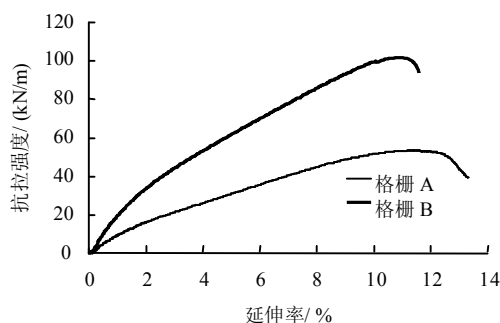


图 2 土工格栅的应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curves of geogrids

由于 RDW2300 型试验机环境箱空间的限制,无约束蠕变试验中格栅试样在纵向上均取 3 根筋条,横向只取 1 个网格间距(见图 1(b))。

侧限约束蠕变试验中,为保证格栅在拉伸过程中始终处于水平状态,下剪切盒内放置硬质木块,上盒填入标准砂,土工格栅位于上、下盒之间。格栅试样包括 2 根纵向筋条及 1 根横向筋条,在横向筋条上固定 2 根不可伸长的钢弦,分别引伸到剪切盒外连接位移传感器,设定采集时间间隔对土工格栅的蠕变变形量进行自动采集。

3 土工格栅蠕变特性的影响因素

3.1 应力水平的影响

以格栅 B 为例进行了 20 °C 时不同应力水平 20%、40%、60% 条件下的蠕变试验,试验持续近 400 h,其蠕变应变的历时曲线见图 3(a),同时整理绘制了蠕变速率发展曲线见图 3(b)。应力水平 20%

表示蠕变试验中所施加的拉伸荷载为无约束拉伸试验得到的该型号格栅平均极限抗拉强度的 20%。

当应力水平为 20% 时,格栅的蠕变量较小,变形速率缓慢且很快趋于稳定,应变与时间基本呈对数关系,可拟合蠕变方程如下:

$$\varepsilon = 0.65 \lg t + 3.93, \text{ 相关系数 } R^2 = 0.97 \quad (2)$$

可以预测得到,当应力水平为 20% 时,格栅在 10^6 h 的应变只有 7.8%,未超过失效应变 10%。如以 10^6 h 为格栅的使用期限来计算,可知加载 1 h 内格栅的变形即占总应变的 52%,100 h 时占 67%,说明格栅的大部分蠕变量都发生在加载初期。

当应力水平为 40% 时,虽然蠕变曲线未表现出突然破坏的趋势,仍可用对数曲线进行拟合,但蠕变应变速率较大,趋于稳定所需的时间也比较长,从蠕变量来看,10 h 时应变已超过了失效应变 10%,同样可以预测得到 10^6 h 时应变将达到 15%,其中总应变的 60% 都发生在加载后 1 h 内。

当应力水平继续增大到 60% 时,格栅的蠕变变形特性与低应力水平时完全不同,应变随时间的发展很快,应变速率很大,加载结束应变即超过 10%,蠕变方程已不能用对数关系来拟合。

整理绘制蠕变试验的应力水平-应变等时曲线(见图 3(c)),当应力水平大于某一值时,该曲线发生拐点,表明在低于该荷载水平下,格栅的蠕变变形呈稳定发展态势,但大于该荷载值后,蠕变应变就急剧增大。可以定义此拐点对应的应力水平为蠕变临界应力水平。从图 3(c)可初步确定,对于加筋土工程设计,格栅在常温条件下的临界应力水平不宜大于极限抗拉强度的 40%。

3.2 温度的影响

对格栅 A 进行了高温(40、60 °C)条件下的蠕变试验,图 4(a)、4(b)分别绘出 40 °C 和 60 °C 时不同应力水平对应的应变-时间曲线。结合表 2 给出的加载稳定后 1 h 和 10 h 对应的各种温度下蠕变应变,可以看出,在低荷载水平时(20%),温度的升高仅引起蠕变变形的增大,但对蠕变历时曲线没有太大影响,即蠕变方程仍可用对数形式来模拟。但当荷载水平升高至 40% 时,环境温度升高不仅会导致格栅蠕变量急剧增大,且蠕变特性也发生明显改变(见图 4(b)),60 °C 时的蠕变曲线呈现显著的非线性变化。荷载水平继续增大到 50% 时,温度的影响愈加显著,格栅蠕变量很大,很快达到破坏状态。

绘制不同温度下的应力水平-蠕变应变等时曲线(见图 4(c)、4(d))可以更清晰地看出温度对格

栅蠕变的影响。不同环境温度对应的荷载临界值不同,低于 40℃时对应的临界荷载应力水平可初步认为不大于 40%, 60℃时进一步降低至约 30%。

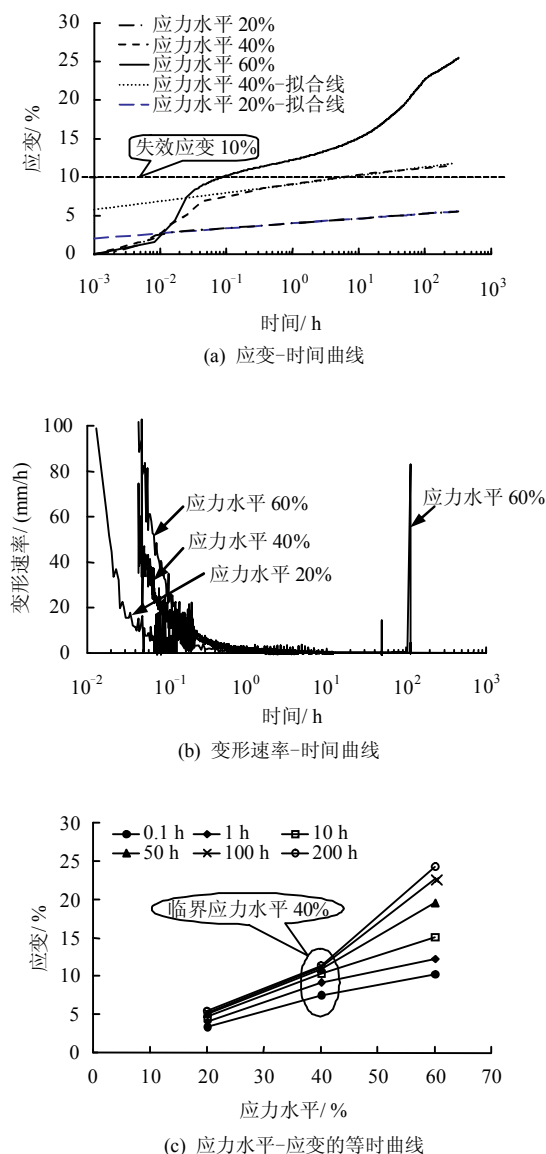


图3 应力水平对 HDPE 土工格栅蠕变性质的影响 (格栅 B, 温度 20℃)

Fig.3 Influences of different stress levels on HDPE geogrid creep behavior (geogrid B, 20℃)

表2 不同温度不同应力水平条件下格栅蠕变应变(单位: %)

Table 2 Creep strains of geogrids under different stress levels and different temperatures (unit: %)

时间 /h	温度 /℃	不同应力水平 (%) 下的蠕变应变			
		20	30	40	50
1	20*	4.06		9.13	
	40	4.63	7.12	9.78	17.80
	60	5.53	7.63	17.51	30.57
10	20	4.67		10.32	
	40	5.10	7.70	10.77	33.68
	60	6.62	9.21	28.23	

注: 20℃时为格栅 B 的试验成果, 其他为格栅 A。

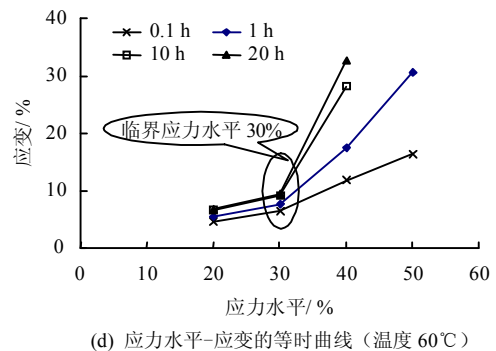
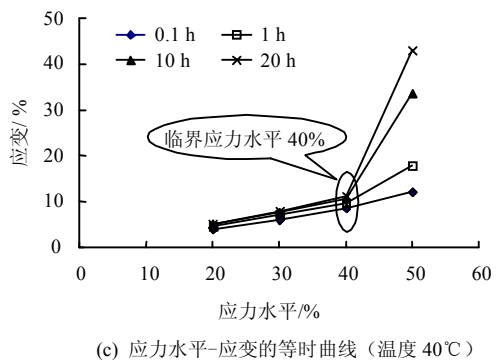
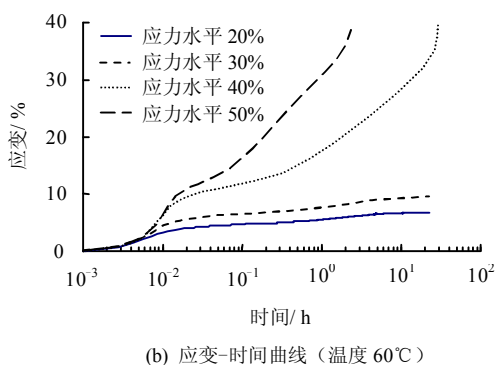
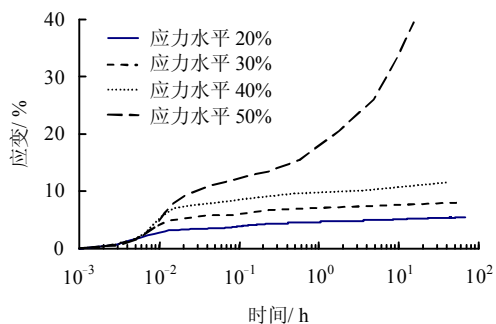


图4 温度对 HDPE 格栅蠕变特性的影响

Fig.4 Effects of temperature on creep property of HDPE geogrid

3.3 化学作用的影响

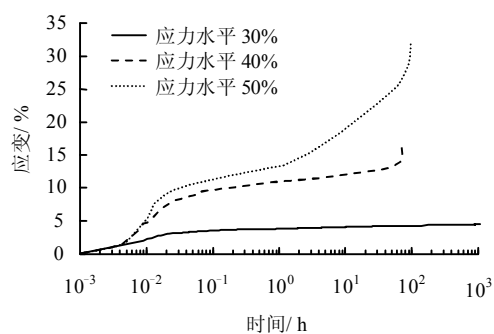
以武汉二妃山垃圾填埋场渗滤液原样模拟格栅受到的化学作用, 经水质检测 (见表 3), 该渗滤液呈弱碱性。

表3 二妃山垃圾填埋场渗滤液化学成分表
Table 3 The leachate chemical ingredients
of Erfei hill landfill

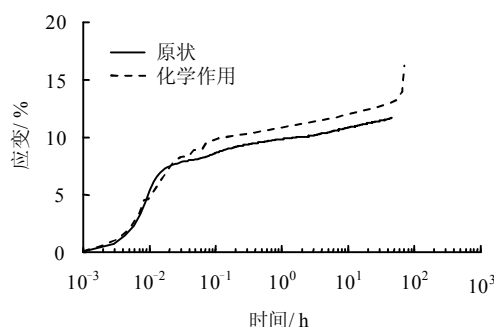
参数	pH 值	化学成分含量/(mg/L)						
		悬浮物 SS	总氮 N	氨氮 NH ₃ -N	总硬度	化学需氧量 BOD ₅	5 日生化需氧量 K ₂ Cr ₂ O ₇	总有机碳 TOC
检测值	8.2	91	2 595	1 718	545	2 550	192.5	728

将格栅 A 浸泡其中 1 a 后取出进行拉伸试验以及蠕变试验。无约束拉伸试验结果表明, 经过浸泡后格栅极限抗拉强度有所降低, 延伸率略增大。由于人们已习惯使用由标准条件下进行无约束拉伸试验得到的格栅极限抗拉强度作为表征材料特性的参数, 因此, 为了方便理解和对比, 尽管材料在受到化学作用后的抗拉强度已发生变化, 但蠕变试验的应力水平仍以标准条件下的材料极限抗拉强度为基准进行计算。同样地, 后文中施工损伤条件及侧限约束条件下的蠕变应力水平也如此计算。

化学作用后的格栅蠕变试验温度为 40 ℃, 应力水平分别为 30%、40%和 50%, 得到的蠕变曲线见图 5(a), 同时, 图 5(b)绘出 40%应力水平条件下原状土工格栅和渗滤液浸泡后格栅的蠕变对比曲线。可见, 由于渗滤液浸泡的作用, 格栅的蠕变变形比原状时有所增大。



(a) 化学作用下蠕变试验的应变-时间曲线
(温度 40℃)



(b) 化学作用与原状条件下蠕变特性的对比
(应力水平 40%)

图5 化学作用对 HDPE 格栅蠕变特性的影响
Fig.5 Chemical effects on creep property of geogrid

定义浸泡后格栅蠕变延伸率 ε_{ch} 与同样应力水平下原状格栅蠕变延伸率 ε_p 之比为蠕变化学影响因子 R_{ch} , 即 $R_{ch} = \varepsilon_{ch} / \varepsilon_p$ 。计算得到在应力水平 40% 时, 蠕变初期 10 h 内蠕变化学影响因子达 1.10, 随着时间的延续该因子略有增大, 50 h 时为 1.12, 说明渗滤液的化学作用对格栅长期蠕变的影响程度随时间发展会更为明显。

3.4 施工损伤的影响

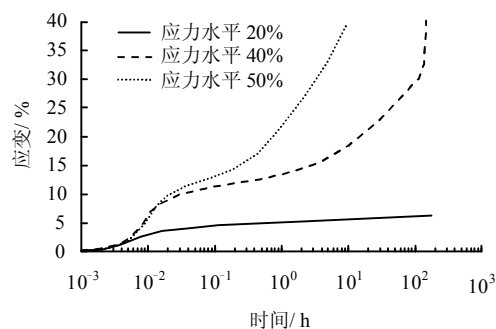
土工格栅在运输、铺设等过程中不可避免地会受到一定的人为或机械损伤, 另外粗颗粒填料在压实时也会对格栅造成挤压、摩擦甚至刺穿等, 引起格栅力学性能的下降, 设计中需要考虑铺设损伤对材料性质的影响。英国加强/增强土壤和其他填充料的实用规程^[17]中制定了现场破坏试验方法草案, 用拉伸土工格栅和真实的施工填料, 使格栅样本在不同填料中和一系列压实条件下引起损伤, 然后挖出格栅样本做表面损伤评价和强度测试, 最后确定适用于不同系列拉伸土工格栅产品在不同填料下的铺设损伤因子。

限于实施条件的限制, 本文试验未采用文献^[17]中的方法, 而是将格栅 A 样品人为弯折数次后进行拉伸试验和蠕变试验。蠕变试验温度为 40 ℃, 应力水平分别为 20%、40%和 50%, 得到的蠕变历时曲线见图 6(a), 图 6(b)绘出应力水平 40%条件下原状土工格栅和折损后格栅的蠕变对比曲线。

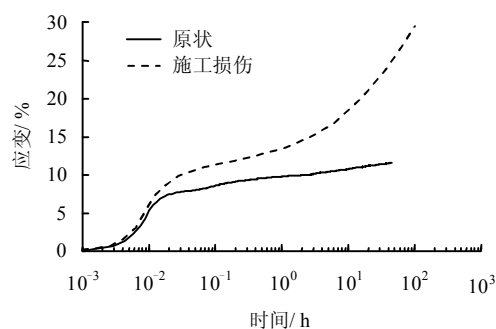
同样地, 定义折损后格栅蠕变延伸率 ε_d 与相同应力水平下原状格栅蠕变应变 ε_p 之比为蠕变施工损伤影响因子 R_d , 即 $R_d = \varepsilon_d / \varepsilon_p$ 。由试验结果可知, 随应力水平的增大, 损伤对格栅特性的影响越明显。图 7 以 40%应力水平为例绘制出不同时间对应的蠕变施工损伤影响因子变化。可见, 在蠕变试验初期, 蠕变施工损伤影响因子已近 1.4, 并且随着时间的发展, 影响因子迅速增大, 说明施工损伤对格栅长期蠕变的影响程度越来越显著, 50 h 时, 受损后格栅的蠕变量已达原状条件时的约 2 倍。与蠕变化学影响因子 R_{ch} 比较, R_d 远远大于 R_{ch} 。

3.5 侧限约束的影响

以 0.25~0.5 mm 标准砂为填料, 相对密度为 0.65, 干密度为 1.65 g/cm³, 在室温条件下 (12~18 ℃) 进行了 4 组格栅 A 的侧限约束蠕变试验。垂直荷载为 15 kPa, 应力水平分别为无约束极限抗拉强度的 40%、50%、58%和 66%。侧限约束蠕变试验采用应力式加载方法, 蠕变荷载的实际加载时间为 5 min。



(a) 施工损伤条件下蠕变试验的应变-时间曲线
(温度 40℃)



(b) 施工损伤与原状条件下格栅蠕变的对比
(应力水平 40%)

图6 施工损伤对格栅蠕变特性的影响
Fig 6 Influences of installation damage on creep property of geogrid

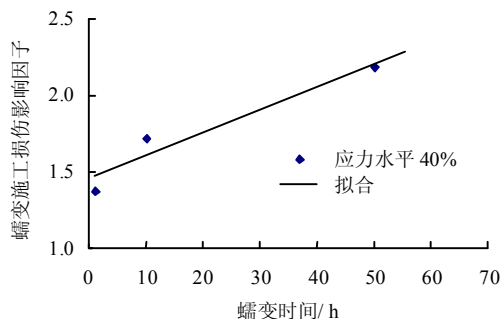


图7 蠕变施工影响因子变化曲线
Fig 7 Curve of creep reduction factor for installation damage against time

图8为不同应力水平条件下的蠕变应变历时曲线。试验结果表明,在有侧向约束作用时,格栅的蠕变变形较之无约束条件下大大降低,与相近温度和应力水平条件下的无约束蠕变试验结果对比,侧限约束下的蠕变量仅有后者的16%~22%,说明土体约束及围压作用对格栅蠕变的影响是非常显著的。当垂直荷载为15kPa,应力水平40%时,100h对应的侧限约束蠕变量仅约为2.4%,随着应力水平的增大;应变也随之增大,应力水平提高到58%时,100h时的应变增大到约3.8%,应变呈稳定发展趋势。但在66%应力水平条件下,仅经过约1.5h,靠

近夹具处的格栅即发生断裂破坏。试验结束后拆样发现,埋设于砂土内的格栅并未发生断裂。

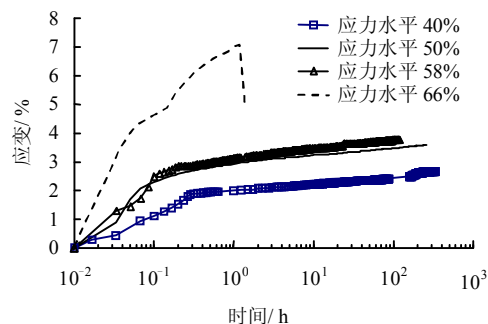


图8 砂土侧限约束对HDPE格栅蠕变特性的影响
Fig.8 Creep property of geogrid in sand under confining

4 结 论

对HDPE土工格栅在不同温度、不同应力水平、化学作用、施工损伤和侧限约束等条件下进行了系统的室内蠕变试验,得到以下结论:

(1) 高密度聚乙烯单向拉伸土工格栅的蠕变特性与所受荷载大小、环境温度等因素密切相关。温度越高或应力水平越大,格栅蠕变量就越大,且蠕变速率越快。而且,温度与荷载水平对格栅蠕变的影响是相互联系的,温度越高,格栅的临界应力水平越低,20~40℃时临界应力水平不大于40%,但温度升高到60℃后,临界值会进一步降低,可能不大于30%。因此,在实际工程应用中,应注意根据当地的实际气候条件确定格栅的蠕变强度。比如在垃圾填埋场衬垫系统中,渗滤液温度可能会达60℃以上,对材料的长期蠕变性质和参数的影响就不能忽略。

(2) 如以10%作为蠕变失效应变,则常规条件下临界应力水平不宜大于40%,否则格栅在加载初期即会发生较大变形,很快达到蠕变破坏阶段,因此,对于永久性加筋土工程,应参考蠕变临界应力水平确定合理的格栅允许设计强度。

(3) 渗滤液浸泡作用1a后,与原状格栅相比,无约束极限抗拉强度有所降低,蠕变变形量有所增大,其蠕变化学影响因子可达1.1。

(4) 施工损伤对格栅蠕变性的影响比化学作用更明显,施工损伤影响因子一般达1.2~1.4左右,且应力水平越大,影响越显著,甚至可达原状时的2倍。因此,在格栅运输施工过程中必须注意对格栅的保护,避免其受到磨损或发生断裂。

(5) 侧限约束条件可以大大减小格栅的蠕变量,在相同的应力水平条件下,无约束蠕变变形量

和砂土中的约束蠕变变量可相差 70%以上, 因此, 采用无约束蠕变试验确定格栅蠕变性质的合理性还有待商榷。应加深对侧限约束条件下格栅蠕变性质的研究, 才能为工程设计提供更为合理经济有效的依据。

参考文献

- [1] FINDLEY W N. 26-year creep and recovery of poly (vinyl chloride) and polyethylene[J]. **Polymer Engineering and Science**, 1987, 27(8): 582—585
- [2] 青岛颐中格栅股份有限公司, 坦萨土工合成材料(武汉)有限公司, 等. QB/T2854—2007 塑料土工格栅蠕变试验和评价方法[S]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007.
- [3] NAKAMURA T, MITACHI T. In-soil creep deformation behavior of geogrid and new design method of geogrid reinforced soil structures[C]//GeoAsia2004 Proceedings of the 3rd Asian Regional Conference on Geosynthetics. Seoul: [s. n.], 2004: 576—583.
- [4] BUENO B S. Long-term performance of geosynthetics[C]//The 9th International Conference on Geosynthetics. Guarujá: [s. n.], 2010: 439—453.
- [5] TONG J, GONG B, LIU J. Experimental study and prediction on the long-term creep properties for geogrids at different temperatures[C]//The 9th International Conference on Geosynthetics. Guarujá: [s. n.], 2010: 873—876.
- [6] 栾茂田, 肖成志, 杨庆, 等. 土工格栅蠕变特性的试验研究及黏弹性本构模型[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 187—192.
- LUAN Mao-tian, XIAO Cheng-zhi, YANG Qing, et al. Experimental study of creep properties and viscoelasticity constitutive relationship for geogrids[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(2): 187—192.
- [7] 邹维列, 王钊, 林晓玲. 土工合成材料的蠕变折减系数[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 1961—1968.
- ZOU Wei-lie, WANG Zhao, LIN Xiao-ling. Creep reduction factor of geosynthetics[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(12): 1961—1968.
- [8] 李丽华, 王钊. 加速土工合成材料蠕变试验的时温叠加法简介[J]. 长江科学院院报, 2004, 21(1): 29—32.
- LI Li-hua, WANG Zhao. Introduction to time-temperature superposition (TTS) method for accelerating creep testing procedure of geosynthetics[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2004, 21(1): 29—32.
- [9] 郑鸿. 拉伸土工格栅的性能研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2005.
- [10] 杨果林, 王永和. 加筋土筋材工程特性试验研究[J]. 中国公路学报, 2001, 14(3): 11—16.
- YANG Guo-lin, WANG Yong-he. Study of engineering characteristic of material used reinforced earth[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2001, 14(3): 11—16.
- [11] International Organization for Standardization. ISO13431-1999 Geotextiles and geotextile-related products — determination of tensile creep and creep rupture behaviour[S]. Geneva: [s. n.], 1999
- [12] American Society for Testing and Materials. ASTM D5262-07 Standard test method for evaluating the unconfined tension creep and creep rupture behavior of geosynthetics[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2007.
- [13] 中国纺织总会标准化研究所. GB/T17637—1998 土工布及其有关产品拉伸蠕变和拉伸蠕变断裂性能的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- [14] 王钊. 土工合成材料的蠕变试验[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(6): 96—102.
- WANG Zhao. The creep tests of geosynthetics[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1994, 16(6): 96—102.
- [15] DING Jin-hua, TONG Jun, ZHOU Wu-hua. Test study of the confined creep features of H geogrid in sand[C]//Proceedings of the 4th European Geosynthetics Conference. Edinburgh: [s. n.], 2008.
- [16] 南京水利科学研究所, 中国土工合成材料工程协会. SL/T235—1999 土工合成材料测试规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [17] The British Standards Institution. BS8006-1995 Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills[S]. London: [s. n.], 1995.