

# 塑料土工格栅施工损伤足尺试验及损伤机理研究

王孟娜<sup>1,2</sup>, 李双喜<sup>1\*</sup>, 刘杰<sup>2</sup>, 李洪凯<sup>3</sup>

(1. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆维吾尔自治区交通规划勘察设计研究院;  
3. 青岛旭域土工材料股份有限公司)

**摘要:**对单向塑料土工格栅分别开展了砂类土、圆砾土和角砾土3种填料和标准压实、双倍压实和双层压实3种不同压实工艺进行现场损伤试验,对受损后的土工格栅进行外观损伤评价和强度测试,分析了土工格栅强度损伤机理。发现土工格栅表面普遍存在着轻微磨损、钝伤和劈裂,压实方式对格栅施工损伤影响程度为双倍压实>双层压实>标准压实,得到了适用于工程设计的 $D_{50}$ 与施工损伤折减系数之间的关系,并发现增大压实土层厚度、减小压实次数能够有效减小施工损伤。

**关键词:**塑料土工格栅; 强度保留率损失; 施工损伤; 折减系数

塑料土工格栅是一种采用聚丙烯或高密度聚乙烯板材冲孔、定向拉伸制作成的一种土工合成材料。土工合成材料的长期强度损失及模量的降低会降低路堤的长期稳定性,土工格栅的位置和长度均能影响路堤的沉降和侧向变形,因此需要重视有效强度的合理取值。而土工格栅在铺设时会受到机械碾压和填料颗粒

的挤压作用,引起格栅强度的降低,现行的国家标准采用施工损伤折减系数来衡量施工过程带来的损伤对土工格栅的影响,但其取值的范围较宽,因此,在工程实践中需要重视相关实测数据的积累和分析,为合理地确定土工格栅折减系数提供实证数据。

关于土工格栅施工损伤折减系数和损伤机理有许

(3) 对 MMA 彩色抗滑薄层混合料进行了详尽的分析、设计及试验论证,给出了推广应用性较好的混合料组成,但因彩色路面是在已有路面上加铺一薄层,故其与已有路面的黏结以及自身表面的涂敷亦很重要,因而,完整的 MMA 彩色抗滑薄层应与已有路面形成一个铺装体系,还应进一步研究底涂层和面涂层的机理再选用。

## 参考文献:

- [1] 王良艳,韩道均,陈仕周,等. 彩色路面铺装技术及发展概述[J]. 石油沥青,2009(1).
- [2] 张生林,赵安平,汤爱平,等. 彩色防滑路面的发展及现状[J]. 筑路机械与施工机械化,2013(2).
- [3] 郝培文,袁永长. 彩色结合料的开发与技术性能研究[J]. 公路,2000(1).
- [4] 邢磊. 彩色路面胶结料制备技术及其路用性能研究[D].

- 长安大学硕士学位论文,2012.
- [5] 张恺. 色彩耐久型彩色沥青路面的研究及应用[D]. 武汉理工大学硕士学位论文,2016.
- [6] 张恺,罗蓉,徐文. 抗轮胎痕迹彩色微表处应用技术研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2016(3).
- [7] 李强,王永维,李桂琴,等. 彩色树脂抗滑薄层罩面技术在青海省道 S103 的应用研究[J]. 中外公路,2018(3).
- [8] Korchmarek, A S, Nikityuk, A I, Pidruchnyi, G I, et al. Influence of the Initiating System on the Strength of Polymer Composites Based on Methyl methacrylate[J]. International Polymer Science and Technology, 2008, 35(10).
- [9] 刘晓文,张肖宁. 彩色沥青混凝土与彩色微表处之应用技术[J]. 石油沥青,2008(5).
- [10] 王广伟,贾胜强. 陶瓷在超薄磨耗层中的应用研究[J]. 公路工程,2011(4).
- [11] 重庆交通大学,交通部公路科学研究院. 半柔性路面应用技术指南[M]. 北京:人民交通出版社,2009.

收稿日期:2019-07-09

基金项目:新疆维吾尔自治区交通运输科技项目(编号:2012-05)

作者简介:王孟娜,女,硕士研究生. E-mail:1374199545@qq.com

\* 通信作者:李双喜,男,硕士,副教授. E-mail:xjlsx123@126.com

多学者进行了试验研究。Jeon 等通过对 5 种不同类型的土工格栅进行损伤试验研究,发现不同种类的土工格栅折减系数差别较大,其中经编格栅施工损伤最大;Koerner 对实体工程中采集的土工格栅拉伸强度进行统计分析,用于垫层的施工损伤折减系数为 1.1~1.25,用于边坡加固和路面工程为 1.1~1.5,用于堤、墙、地基加固及无铺砌路为 1.1~2.0,用于铁路工程为 1.1~3.0;胡汉兵等通过对型号不同的聚酯纤维土工格栅进行上设中粗砂保护层、上下均设保护层和无保护层 3 种方式进行施工损伤现场试验,结果表明:当土工格栅开展上设保护层和上下均设保护层时,其施工损伤折减系数比较接近且都为 1.06~1.09,表明土工格栅施工损伤主要来自上层填料的影响,影响格栅施工损伤程度的最主要因素是填料粒径大小;蒋文凯等对 4 种不同的土工格栅在 5 种路堤填料下的铺设损伤模拟试验,发现土工格栅表观损伤主要为磨损和压伤,填料的类型和颗粒硬度对土工格栅施工损伤影响较大;郑鸿等对 EGR 系列塑料土工格栅进行了现场破坏试验及表观评价和测试,确定了损伤因子,研究表明:影响土工格栅折减系数的主要因素是填料粒径大小。综观上述研究成果,土工格栅施工损伤都是针对某一影响因素进行试验研究,未见多种影响因素耦合下进行系统的试验研究。砾类土是良好的加筋路堤填料,但是施工过程中容易对土工格栅损伤,引起土工格栅的强度和耐久性显著降低。该文主要研究采用单向塑料土工格栅在不同砾类土填料、不同压实方式下模拟施工过程,对多种影响因素耦合下砾类土—土工格栅施工损伤机理及折减系数合理取值进行系统研究。

1 试验方法

试验按照英国规范推荐的方法,采用两种单向塑料土工格栅和 3 种砾类土在 3 种压实工艺下,利用正交试验方法确定试验方案和组次。

1.1 试验材料

- (1) 土工格栅
- 试验采用两种不同规格的单向塑料土工格栅,其性能指标均符合国家标准,格栅技术规格见表 1。
- (2) 路基填料
- 采用采自河道的颗粒棱角比较圆润的圆砾土和采自山体风化的颗粒棱角比较分明的角砾土以及天然砂类土,经筛分得到的各类填料的  $D_{50}$  (通过率为 50%的

颗粒粒径)值见表 2。

表 1 土工格栅的技术规格

格栅代号	规格	拉伸强度/ (kN·m <sup>-1</sup> )	标称伸 长率 %
1	TGDG130HDPE	133.6	10.4
2	TGDG90HDPE	92.3	8.1

表 2 填料的  $D_{50}$  近似值

		mm
砂类土	圆砾土	角砾土
1.52(A <sub>1</sub> )	2.28(L <sub>1</sub> )	3.03(S <sub>1</sub> )
	3.79(L <sub>2</sub> )	4.54(S <sub>2</sub> )
	5.30(L <sub>3</sub> )	6.05(S <sub>3</sub> )
	6.73(L <sub>4</sub> )	7.71(S <sub>4</sub> )
	8.68(L <sub>5</sub> )	9.66(S <sub>5</sub> )
	10.63(L <sub>6</sub> )	11.61(S <sub>6</sub> )
	12.58(L <sub>7</sub> )	13.2(S <sub>7</sub> )

1.2 场地布置与试验方案

试验采用的场地大小为 10.5 m×17.5 m,首先对场地进行整理和整平,整平后场地平整度在 ±5 mm/m<sup>2</sup> 范围内。

为了分析填料(平均粒径、颗粒形状)和施工工艺(压实次数、分层压实厚度)等因素对土工格栅施工损伤的影响,按照正交试验法确定试验方案和组次,选取填料类型、平均粒径和压实方式为主要因素,每个因素取 3 个水平进行试验,如表 3 所示。根据正交试验方案绘制出土工格栅施工损伤试验方案布置图,如图 1 所示。

表 3 试验因素和水平

水平	因素		
	填料类别	压实方式	填料级配
1	砂类土	标准压实	细
2	圆砾土	双倍压实	中
3	角砾土	双层压实	粗

1.3 试验过程

按照图 1 中虚线分割区域采用白灰在地面划分试验区,并将各试验区虚铺不同级配的路基填料作为试验基床,填料交界处用土工布分隔,用推土机将填料摊开、平整,局部地区用铁锹补平。根据压实机械和压实标准将试验基床碾压至压实度不小于 95%,碾压完毕的试验基床平整度控制为 ±5 mm/m<sup>2</sup>。

根据铺设方案图中分割格栅位置图,人工铺设贴好标签的样品,将土工格栅平整地铺设在试验基床上,

为了防止压实过程褶皱,在其边缘采用 U 形钉将格栅等间距固定。试验过程如图 2 所示。

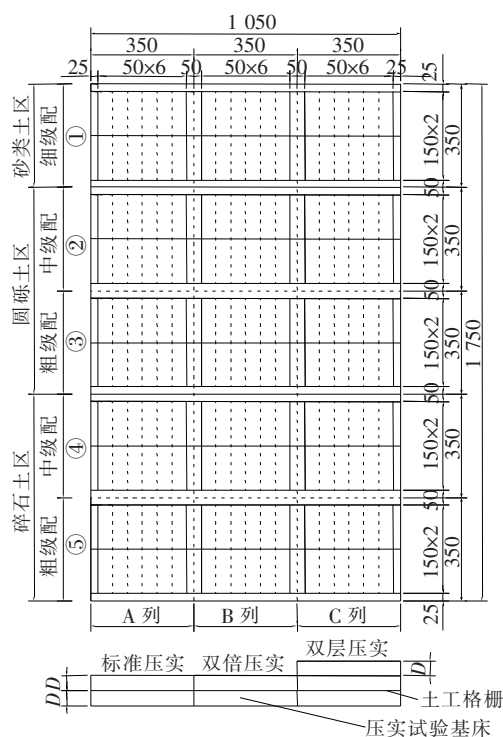


图 1 试验方案布置图(单位:cm)



图 2 试验过程

模拟施工过程时分别沿 A 列、B 列、C 列进行碾压,A 列标准碾压与加筋路基施工压实方式完全相同,采用自重 25 t、激振力 40 t 的光面钢轮压路机,先轻后重,低频慢速,先静压 1 遍,再轻振碾压 1~2 遍,然后再加大激振力碾压的方式作为标准压实方式,采用与路基压实度相同的 95% 作为控制压实度。B 列采用双倍标准压实进行碾压,即先静压 2 遍,再轻振碾压 2~4 遍,然后再加大激振力进行双倍碾压。C 列采用双层压实,第 1 层填料按照标准压实的方式碾压后,继续摊铺相同厚度的第 2 层填料,再按照标准压实方式进行碾压。

碾压完成后,采用轻型机械对上层填料进行挖除,靠近土工格栅时采用人工清除,尽量避免开挖过程中

对土工格栅造成人为损坏,并对取出的样品进行标识,挖出过程中对土工格栅造成的损坏进行人工标记。

2 试验结果及分析

2.1 土工格栅表观损伤

对土工格栅试验样品的表观损伤主要是轻微磨损和钝伤,少量的劈裂,未见有切断情况,如图 3 所示。

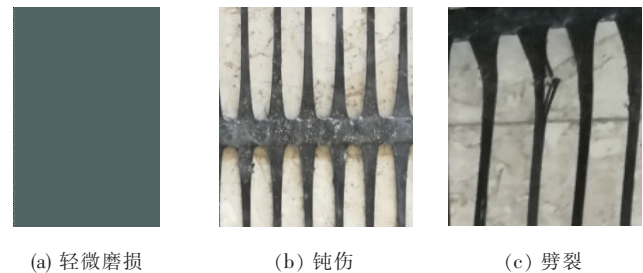


图 3 土工格栅表观施工损伤

统计 3 种填料在不同的压实方式下土工格栅的表观损伤,结果如表 4 所示。

表 4 塑料土工格栅的表观评价

填料	标准压实	双倍压实	双层压实
砂类土	G 1B	G 3B	G 3B
圆砾土	G 6B	G 9B 3S	G 7B 1S
角砾土	G 8B 2S	G 10B 4S	G 8B 5S

注:G 表示磨损;x B 表示钝伤的数目;x S 表示劈裂的数目。

由表 4 可得出:所有现场施工损伤的格栅样片表面都存在不同程度的磨损、横肋钝伤和纵肋劈裂,未见纵肋切断。在相同填料类型下,压实方式对格栅施工损伤的影响程度依次为:双倍压实>双层压实>标准压实。主要是由于双倍压实相比于双层压实,压实面距离格栅距离较近,直接作用于土工格栅的压实功大于双层压实,因此,在加筋结构施工过程中应注意避免过度碾压。

在相同压实方式下,不同的填料对格栅的损伤程度依次为:角砾土>圆砾土>砂类土。当采用角砾土时由于其颗粒棱角较为尖锐,劈裂损伤的数量明显大于其他填料,因此当采用角砾土作为填料时,应选用厚度较大的土工格栅作为加筋材料,避免在施工过程中对土工格栅产生较大的损伤。

2.2 土工格栅强度损伤机理

对取出的格栅按照拉伸试验取样方法裁剪试样,检测强度、峰值应变等指标。土工格栅强度损伤程度



采用强度保留率表示,即损伤后和损伤前拉伸强度之比。为了分析压实方式对施工损伤的影响,给出了圆砾土与角砾土在标准压实的强度保留率与 $D_{50}$ 之间的关系,如图4所示,圆砾土与角砾土在标准压实方式下,土工格栅强度保留率随着填料 $D_{50}$ 的增大呈下降趋势。

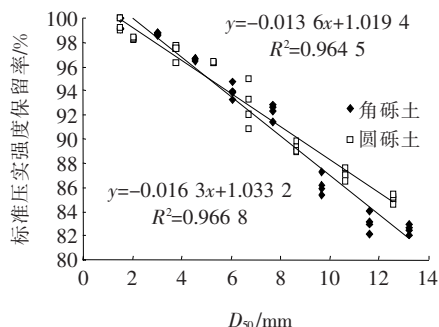


图4 圆砾土与角砾土 $D_{50}$ 与强度保留率关系

圆砾土和角砾土的标准压实和双倍压实及双层压实强度保留率之差与 $D_{50}$ 之间的关系,如图5、6所示。

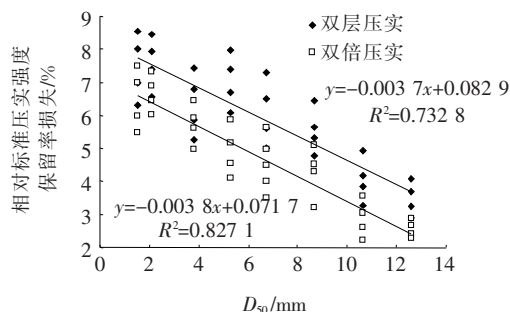


图5 圆砾土 $D_{50}$ 与相对强度保留率关系

由图5可以看出:双倍压实施工损伤大于双层压实,双倍压实和双层压实下土工格栅的强度保留率损失随着圆砾土平均粒径的增大呈下降趋势。圆砾土颗粒主要以亚圆形为主,表面较为光滑,在碾压过程中土颗粒之间咬合效果较差,相对移动较为容易,土颗粒之间及土颗粒与土工格栅之间的摩擦系数均较小,主要以相对滑动为主,在碾压法向力和相对滑动作用下产生土工格栅的磨损、钝伤以及轻微劈裂,导致土工格栅的强度降低。

由图6可以看出:随着角砾土 $D_{50}$ 的逐渐增大,土工格栅的强度保留率损失越大,此规律与圆砾土相反,主要是由于角砾土颗粒为不规则棱角状,且棱角尖锐,颗粒间咬合效果明显,颗粒间相对移动较小,且主要以错动为主,在碾压过程中颗粒棱角刺入格栅的表层,造成土工格栅钝伤和肋条劈裂,导致格栅的铺设损伤,使得强度保留率降低。随着填料 $D_{50}$ 值增大,单个颗粒

与土工格栅的接触面积也在增大,角砾土表面粗糙,糙面在法向力的作用下容易对土工格栅造成磨损及钝伤,圆砾土表面较为平滑,土颗粒与土工格栅之间的接触面积较大,所以对土工格栅的施工损伤反而较小。

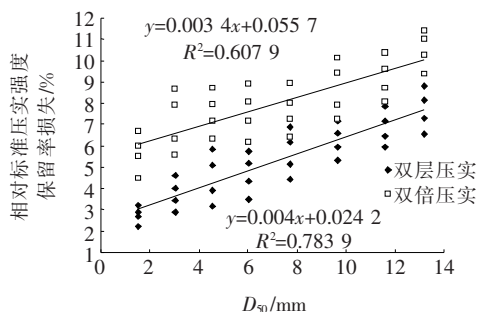


图6 角砾土 $D_{50}$ 与相对强度保留率关系

双倍压实和双层压实压实遍数完全相同,对路基作的功相同,二者强度损失率趋势基本一致。双层压实相对于双倍压实,在格栅上部增加了一个保护层,起到了应力扩散作用,因此双层压实较双倍压实强度损失率减小约2%,说明在施工过程中在保证压实度的前提下尽量增大单次压实土层的厚度,可有效减小土工格栅的施工损伤。

### 3 施工损伤折减系数合理取值

在加筋结构施工过程中土工格栅层间距一般为0.3~0.8 m,而砾类土填筑时最大压实层厚度不宜超过0.4 m。当土工格栅的层间距大于0.4 m时,一般都采取分2层碾压的方式,对土工格栅的损伤程度相当于双层压实。当填料因级配不良或者含水率较低时填料难以压实,一般采取增加压实遍数的方式使填料达到设计要求,对土工格栅的损伤程度相当于试验中的双倍压实。此外,在加筋结构施工时应力扩散会对压实面下部几层土工格栅存在一定的影响,因此,在加筋土结构设计中应该综合考虑双倍压实、过量压实等因素对土工格栅强度的影响。

现行规范中给出了土工格栅在细粒土、砂类土、粗粒土中的施工损伤折减系数,但是未考虑不同类型的砾类土,且范围过于宽泛,不便于工程技术人员对施工损伤折减系数进行合理取值。试验所采用的土工格栅均满足规范要求,但是试验结果较为离散,规律性差。将极限抗拉强度与过量压实和双倍压实后的抗拉强度低值二者之比定义为土工格栅施工损伤折减系数。将角砾土和圆砾土的施工损伤试验结果进行线性回归,得出3种不同压实方式下强度保留率的最小值曲线,

反推出施工损伤后的最小抗拉强度,进而得出施工损伤折减系数。平均粒径  $D_{50}$  与施工损伤折减系数之间的关系如图 7 所示。

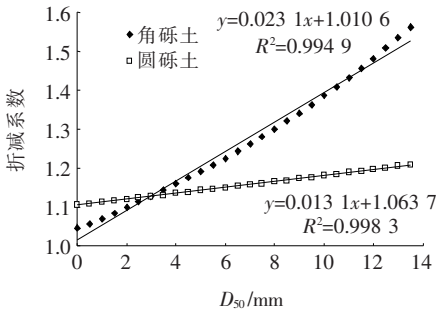


图 7  $D_{50}$  与施工损伤折减系数关系

由图 7 可知:随着填料粒径  $D_{50}$  的增大,土工格栅施工损伤折减系数逐渐增大,当  $D_{50} < 3\text{ mm}$  时,圆砾土对土工格栅的施工损伤大于角砾土,此时粗颗粒含量较少,对土工格栅上下范围内的损伤主要以颗粒对格栅的磨损为主,圆砾土相对于角砾土更易于产生颗粒旋转与移动,因此圆砾土损伤大于角砾土;当  $D_{50} > 3\text{ mm}$  时,角砾土对土工格栅施工损伤折减系数大于圆砾土,由于粗颗粒含量越多,土工格栅—土接触面上的角砾土颗粒对土工格栅接触面上磕碰、刺伤相比圆砾土更为严重。

土工格栅施工损伤折减系数在角砾土中取值范围为 1.02~1.34,在圆砾土中取值范围为 1.06~1.25,在砂类土中取值范围为 1.07~1.09,试验结果说明规范取值略微偏于保守。根据线性回归结果,建议土工格栅施工损伤折减系数取值如表 5 所示。

表 5 土工格栅施工损伤折减系数建议取值

填料	折减系数
砂类土	$0.001D_{50} + 1.07$
圆砾土	$0.01D_{50} + 1.06$
角砾土	$0.02D_{50} + 1.02$

4 结 论

通过现场损伤试验和室内拉伸试验,对土工格栅施工损伤折减系数进行定性和定量研究,得出以下结论:

(1) 单向塑料土工格栅在砾类土中施工损伤主要以表面磨损为主,其次为钝伤和劈裂,双倍碾压和棱角比较尖锐的角砾土颗粒是影响单向塑料土工格栅施工损伤的主要因素。

(2) 通过回归分析给出了土工格栅适用于工程设计的  $D_{50}$  与施工损伤折减系数之间的关系。

(3) 施工过程中,在保证压实度的前提下尽量增大单次压实土层的厚度、减小压实次数,可有效减小土工格栅的施工损伤。

参考文献:

[1] 杨广庆,徐超,张梦喜.土工合成材料加筋土结构应用技术指南[M].北京:人民交通出版社,2016.

[2] 张功新,莫海鸿,曾庆军,等.土工合成材料对路堤长期稳定性及工后沉降的负面影响分析[J].岩土工程学报,2005(6).

[3] 胡卫国,何桥敏.土工格栅在填方路堤中的加筋作用试验研究[J].中外公路,2018(1).

[4] Jeon H Y, Kim S H, Lyoo W S, et al. Evaluation of the Long - Term Performance of Geosynthetic Reinforcements from their Reduction Factors[J]. Polymer Testing, 2006(5):289-295.

[5] Koerner R M. Designing with Geosynthetics [M]. Pearson Prentice Hall, 1986.

[6] 胡汉兵,姜志全,蔡汉利.土工格栅施工损伤现场足尺试验研究[J].岩土工程学报,2012(5).

[7] 蒋文凯,阮志新,邓卫东,等.土工格栅强度损伤特性的试验研究[J].武汉理工大学学报,2006(3).

[8] 郑鸿,刘伟,裴建军.塑料土工格栅的现场破坏实验[J].工程塑料应用,2005(6).

[9] BS 8006-1995 Code of Practice for Strengthened Reinforced Soils and other Fills[S].

[10] Cazzuffi D. Laboratory and Field Tests for the Evaluation of Installation Damage of Geosynthetics Inreinforced Earth Structures [C]. Istanbul: 15 ICSMGE, 2001:15-65.

[11] JT/T 974-2015 公路工程土工合成材料机械损伤试验方法[S].

[12] JTG/T D32-2012 公路土工合成材料应用技术规范 [S].