

DOI: 10.11779/CJGE202109013

土工格室不同结点连接方式失效机制试验研究

左 政^{1,2}, 杨广庆^{*2, 3}, 刘 英⁴, 杜天玲⁴, 王志杰^{2,3}, 于 凡¹

(1. 石家庄铁道大学交通运输学院, 河北 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 河北 石家庄 050043; 3. 石家庄铁道大学土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 4. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

摘要: 结点连接方式对土工格室的性能至关重要。结点在加筋结构中往往受到不同方向的作用力, 然而对结点在不同受力状态下的失效机制缺乏系统的研究。通过对焊接、插接、铆接 3 种结点连接方式的土工格室进行单轴拉伸试验, 研究了结点连接方式对土工格室条带性能的影响, 比较了在不同受力状态下结点的失效模式及抗拉强度。此外, 通过引入“条带强度保持率”、“条带变形保持率”、“结点强度发挥率”评价了不同结点连接方式的性能。结果表明: 焊接结点对 HDPE 土工格室条带拉伸性能的协调发挥影响较低, 为 4.82%; 而铆接结点对 PET 土工格室条带影响较高, 为 22.2%。焊接、铆接、插接结点主要受剥离强度的控制, 但焊接结点的剥离结点强度发挥率可达 28.3%, 分别是插接、铆接结点强度发挥率的 11.32 倍、6.58 倍, 体现了焊接结点的性能优势。插接结点在 3 种受力状态下结点强度相差很大, 需采取注塑等措施来改善结点在剪切、剥离作用下的强度, 从而均衡发挥插接结点的性能。试验结果可为土工格室的合理选用以及加筋机理的研究提供参考。

关键词: 土工格室; 焊接; 插接; 铆接; 失效机制; 剥离

中图分类号: TU472 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)09-1682-09

作者简介:左 政(1993—), 男, 博士研究生, 主要从事土工合成材料性能与加筋土技术研究。E-mail: geozz@stdu.edu.cn。

Experimental investigations on failure mechanism of different junction connections of geocells

ZUO Zheng^{1,2}, YANG Guang-qing^{2,3}, LIU Ying⁴, DU Tian-ling⁴, WANG Zhi-jie^{2,3}, YU Fan¹

(1. School of Traffic and Transportation, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 3. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 4. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: The connection mode of junctions is crucial to the performance of geocells. The junction will be generally subjected to different directions of loading in the reinforced structure. However, there is a lack of detailed researches on the failure mechanism of the junctions under different loading models. Through the uniaxial tensile tests on the geocells with three junctions of welding, latching and riveting, the effects of connection modes on the performance of geocell strips are studied, and the failure modes and tensile strength of the junctions under different loading models are compared. The performance of different junction connections is evaluated by the indexes like "strip strength retention rate", "strip deformation retention rate", and "junction strength utilization rate". The results show that the welding junctions have the lower impact on coordination of tensile properties of HDPE geocell strips, which is 4.82%, while the riveting junctions have the higher impact on the coordination of PET geocell strips, which is 22.2%. The welding, riveting and latching junctions are mainly controlled by the peeling strength. However, the strength utilization rate of the welding junctions under peeling can reach 28.3%, which is 11.32 times and 6.58 times that of the latching and riveting ones, respectively, reflecting the performance advantages of the welding junctions. The strength of the latching junctions varies greatly under three loading models, and the measures like injection connection need to be taken to improve the strength of the junctions under shearing and peeling to balance the performance of the latching junctions. The test results can provide references for the reasonable selection of geocells and the study on reinforcement mechanism.

Key words: geocell; welding; latching; riveting; failure mechanism; peeling

基金项目: 国家自然科学基金项目(52079078); 河北省高等学校科学技术研究项目(BJ2020045); 河北省博士研究生创新项目(CXZZBS2020145)

收稿日期: 2020-11-20

*通信作者(E-mail: yangqq@stdu.edu.cn)

0 引言

土工格室作为一种新型三维蜂窝状加筋材料广泛应用于地基处理^[1]、路堤^[2-3]、挡土墙^[4-5]、边坡防护^[6]等岩土工程建设中。与土工织物、土工格栅等平面加筋材料相比^[7]，土工格室通过结点连接形成三维蜂窝状结构可以对粗砂、砾石等填料提供更有效的环向约束，从而显著提高结构的强度和承载力并减小沉降，这种约束也称为“箍效应”。

侯娟等^[8]通过室内试验、数值模拟验证了结点“箍效应”对提高结构强度所发挥的重要作用。Hegde 等^[9]通过压缩试验得出结点是土工格室发挥“箍效应”的关键因素。Liu 等^[10]认为结点是土工格室承受并传递荷载的重要因素，若结点出现损坏，可能会产生不平衡的荷载传递，进而导致结构内部出现局部不稳定，甚至可能会导致土工格室加筋结构的整体破坏。同时，Han 等^[11]和 Leshchinsky 等^[12]也分别通过室内试验和数值模拟强调了结点对土工格室性能发挥的重要性。因此，有必要围绕土工格室的关键组成—结点进行详细研究，以确保加筋结构的安全与稳定。

Song 等^[13]通过离心模型试验研究了焊接结点土工格室加筋土挡墙的破坏模式，试验结束后观察到土工格室在结点处出现连接破坏。同时，Yang 等^[14]进行路面加速试验后也观察到结点失效的现象。高昂等^[15]研究了静动荷载作用下焊接结点土工格室加筋路堤的力学性能。许淋颖^[16]、Adem 等^[17]分别对焊接结点土工格室进行了室内直剪和拉拔试验，结果表明土工格室的强度主要取决于焊接结点的剥离强度。

上述研究主要针对结点连接方式为焊接的土工格室，以及在工程应用、加筋机理好和界面力学特性等方面进行了广泛研究，但对结点的失效机制鲜有报道。此外，结点失效^[13-14]的现象虽然在一些研究中均有所出现，但考虑到试验过程中结构内部受力比较复杂，故可能导致结点失效的原因有很多。因此，目前的研究结果不能充分解释结点的失效机制，而且既有研究对象多为焊接结点，而对于其他结点连接方式如插接、铆接连接的报道较少，特别是对土工格室不同结点连接方式性能的评价以及失效机制缺乏详细的研究。由于结点性能的不确定性和不可预见的失效模式阻碍了不同结点连接方式所对应土工格室在公路、铁路等工程领域中的推广及应用。因此，研究不同结点连接方式土工格室在不同受力状态下的失效模式、失效机制及对应的强度是十分有必要的。

目前国外对土工格室性能的测试仅限于焊接接缝的强度测试^[10]。然而土工格室结点在加筋结构中会受

到来自不同方向土体的作用力。为了模拟结点的不同受力状态，Liu 等^[10]总结了土工格室焊接结点破坏可能出现的3种形式，分别为剪切破坏，剥离破坏和对拉破坏。

此外，考虑到对结点研究过程中需要借助于土工格室条带，即拉伸设备夹住中间带有结点的土工格室条带试样，然后施加轴向力，至试样破坏，同时，土工格室所提供的环向约束是由土工格室条带和结点搭配而提供的，所以对结点失效模式、机制的研究尚需要考虑结点所对应土工格室条带的材质。

基于以上分析，开展一系列室内试验，首先对不含结点的土工格室条带，含有焊接、插接、铆接3种结点的土工格室条带分别进行拉伸试验。一方面为结点进一步地研究建立参考，另一方面通过引入“条带强度保持率”、“条带变形保持率”评价不同结点连接方式对土工格室条带性能的影响。然后对土工格室3种结点连接方式进行一系列由剪切、剥离和对拉组成的拉伸试验，通过观察试样的失效模式，对比不同结点连接方式的剪切、剥离和对拉强度，分析总结土工格室结点在不同受力状态下的失效机制。最后通过引入“结点强度发挥率”评价不同结点连接方式的性能。试验结果可为在不同工程中土工格室的选用及加筋加固机理的研究提供参考。

1 试验设备及材料

1.1 拉伸试验设备

室内拉伸试验采用土工合成材料拉伸试验仪，如图1所示。在平板式压缩夹具内放置PVC条带，以增加试样与夹具间的摩擦，避免试样在试验过程中出现滑动或在钳口处断裂破坏。



图1 土工合成材料拉伸试验仪

Fig. 1 Tensile test apparatus for geosynthetics

1.2 土工格室材料

分别选用焊接、插接、铆接3种结点连接制成的土工格室进行室内试验。3种结点对应的土工格室条带材质分别为高密度聚乙烯 (high-density polyethylene, HDPE)，聚丙烯 (polypropylene, PP)，聚酯 (polyester, PET)。试验用土工格室的参数如表1所示。

表1 试验用土工格室参数

Table 1 Parameters of geocells used in tests

结点连接方式	条带材质	条带高度 <i>H/mm</i>	结点距离 <i>A/mm</i>
焊接	HDPE	50	400
插接	PP	50	400
铆接	PET	50	400

1.3 试验方案

图2(a)为试验用土工格室的示意图。为清晰描述土工格室结点的试验方案,用字母A~F表示对应的受力示意图,并对各项试验定义了命名方式:“作用主体-受力状态”,分别如图2(b)~(f)所示。

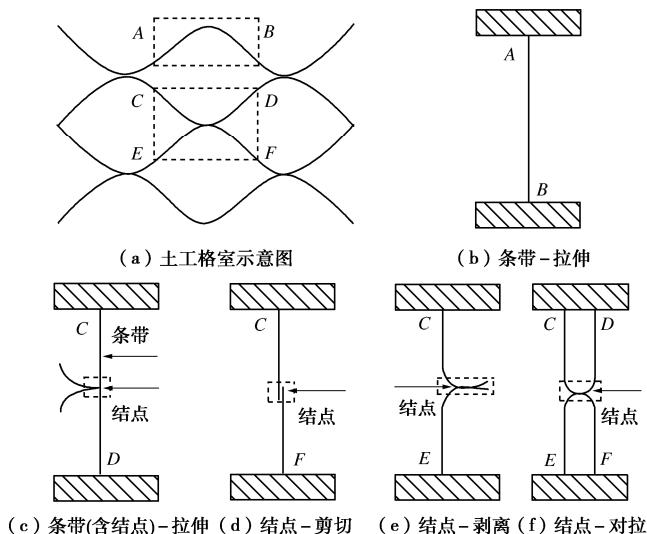


图2 土工格室示意图和试验方案

Fig. 2 Schematic of geocell and experimental programs

首先对不含结点的土工格室条带进行拉伸试验,命名为“条带-拉伸”,如图2(b)所示。此试验旨在建立一个参考,用以评价结点对条带拉伸性能的影响。考虑到论文研究所选用的土工格室条带高度均为50 mm,与《公路工程土工合成材料试验规程》(JTG E50—2006)中窄条拉伸试验对试样宽度(50 mm)的规定保持一致,故按上述规范对土工格室条带进行拉伸试验。试验时,土工格室条带试样数量不少于5个,拉伸速率为50 mm/min。

然后对含有结点的土工格室条带进行拉伸试验,试验按照《土工合成材料 塑料土工格室》(GBT 19274—2003)和中国铁路总公司企业标准《铁路工程土工合成材料 第1部分 土工格室》(Q/CR 549.1—2016)规定:在土工格室条带上沿长度方向切取试样,数量应不少于5个。试样的长度为220 mm,结点连接处在试样中间,试样宽度为土工格室条带的宽度(即格室高度),拉伸速率为50 mm/min。含结点的土工格室拉伸试验分别如图2(c)~(f)所示。需要注意的是图2(c)中是对含结点的同一根土工格室条带母材

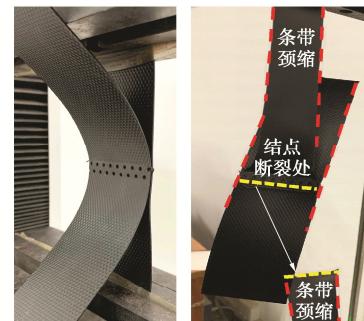
进行试验,即作用主体仍是条带,故命名为“条带(含结点)-拉伸”,而图2(d)~(f)中试验的作用主体为结点,故分别命名为“结点-剪切,结点-剥离和结点-对拉”。此外,为便于分析,土工格室条带和结点的试验结果均按上述试验规范要求,以N/cm表示。

通过对比图2(b),(c)不含结点与含结点土工格室条带试样的抗拉强度、伸长率,对比研究不同结点连接方式(焊接、插接、铆接)对土工格室条带拉伸性能的影响。通过对比图2(d)~(f)结点试样的失效模式及抗拉强度,研究结点在不同受力状态下的失效机制。

2 结果和讨论

2.1 3种结点连接方式对各自条带性能的影响

含焊接、插接、铆接3种结点连接方式的土工格室条带拉伸试样、拉伸失效模式以及拉伸强度与伸长率的关系曲线分别如图3,4,6所示。



(a) HDPE土工格室条带(含焊接结点)拉伸试样及拉伸失效模式

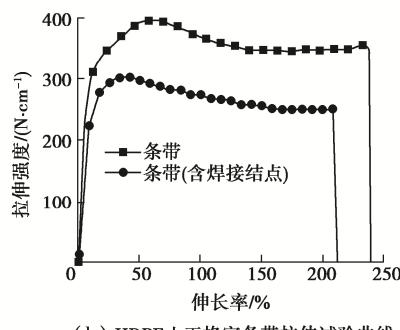


图3 HDPE土工格室条带-焊接结点拉伸结果

Fig. 3 Tensile results of HDPE strips with welding junction

观察图3(a)可知土工格室条带(含焊接结点)试样受到轴向拉伸作用时,HDPE土工格室条带逐渐伸长,然后呈现出明显的颈缩变形,最后在焊接结点处发生断裂失效。分析原因主要是在焊接过程中会对结点附近的土工格室条带产生损伤,从而形成薄弱点,故失效发生在焊接结点处附近。观察图3(b)可知HDPE土工格室条带(含焊接结点)拉伸试验曲线趋势与不含结点的HDPE土工格室条带几乎保持一致,

均表现出明显的屈服, 然后逐渐趋于平稳直至断裂。

观察图 4 (a) 可知 PP 土工格室条带 (含插接结点) 试样受到轴向拉伸作用时, 发挥作用的主体是位于同一根母材上的 PP 条带, 而 PP 条带存在显著的应力敏感性, 即拉伸过程中, 其表面某点一旦应力集中, 随即在条带内产生微裂纹, 进而快速发生断裂。此外由图 4 (a) 还观察到 PP 条带 (含插接结点) 试样拉伸破坏后, 条带表面由光滑变为微纤细丝状。

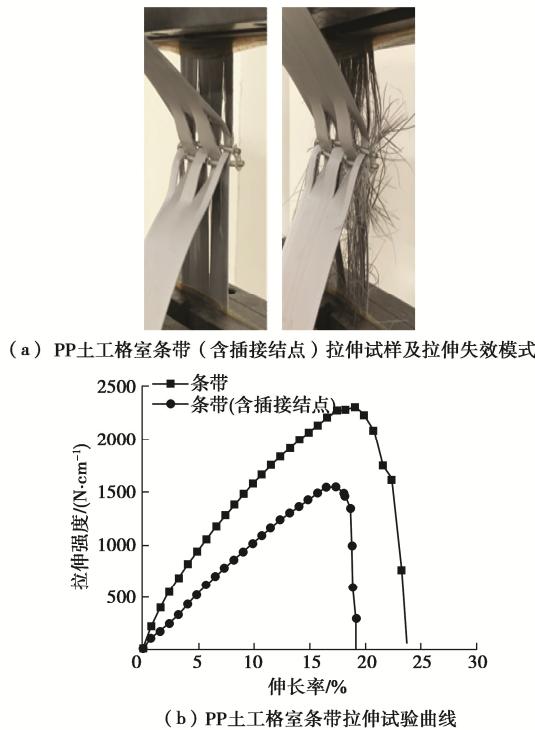


图 4 PP 土工格室条带-插接结点拉伸结果

Fig. 4 Tensile results of PP geocell strips with injection junction

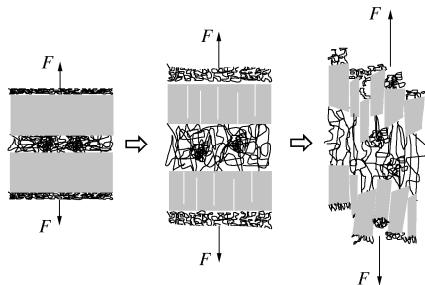


图 5 密堆积结构的解折叠过程

Fig. 5 Unfolding process of closed-packed structure

分析原因主要是与 PP 材质有关, PP 材料轴向拉伸时其内部经取向形成特殊的密堆积, 能有效阻止微原纤中的晶块产生塑性变形。在轴向拉力增加时, 微纤中的晶块解折叠, 同时微纤之间的微裂纹开始扩展, 此时材料表面出现纤维化现象。随着微纤束之间依次分离, 分子链中主价键受到平行于分子链的拉力后开始断裂, 直至大部分微纤断裂, 材料发生脆性破坏^[18], 如图 5 所示。观察图 4 (b) 可知 PP 条带 (含插接结

点) 拉伸试验曲线趋势与不含结点的 PP 条带几乎一致, 均表现为拉伸强度与伸长率基本呈线性增加关系, 达到峰值后迅速降低, 试验时未出现明显的屈服点。

观察图 6 (a), PET 土工格室条带 (含铆接结点) 受到轴向拉伸作用时, 其在结点处发生断裂破坏, 且断口处呈条状撕裂破坏。分析原因主要是铆接需通过铆钉固定, 即需要对 PET 土工格室条带进行打孔, 而打孔处易产生应力集中, 故受轴向作用时 PET 条带会出现撕裂破坏。观察图 6 (b) 可知 PET 条带 (含铆接结点) 拉伸试验曲线趋势与不含结点的 PET 条带几乎一致, 拉伸强度与伸长率基本呈线性增加关系, 当伸长率达到某值时, 拉伸强度迅速降为 0, 这与图 6 (a) 中土工格室条带未出现颈缩变形即发生断裂失效这一试验现象保持一致。

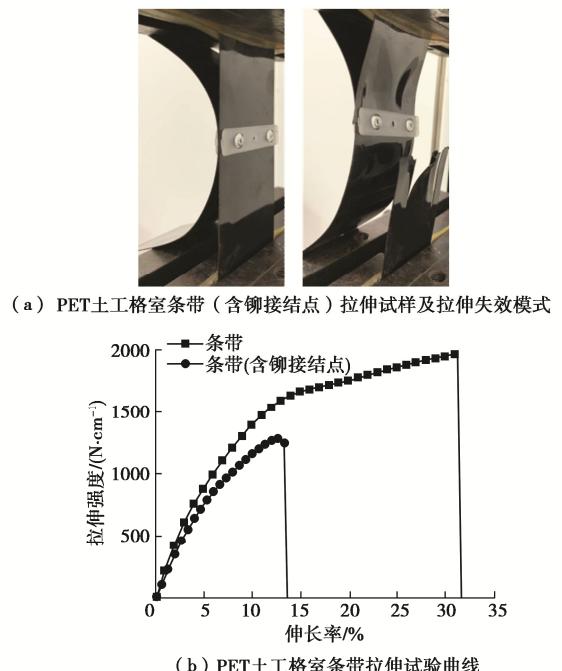


图 6 PET 土工格室条带-铆接结点拉伸结果

Fig. 6 Tensile results of PET geocell strips with riveting junction

由图 3 (b), 4 (b), 6 (b) 土工格室条带拉伸试验曲线可知 3 种结点连接方式对各自土工格室条带的拉伸性能 (抗拉强度、伸长率) 均有影响, 表现为降低的趋势, 同时也表现出较好的属性继承特性。为了定量对比分析 3 种结点连接方式 (焊接、插接、铆接) 对各自土工格室条带性能的影响, 提出“条带强度保持率”与“条带变形保持率”, 如式 (1), (2) 所示。条带强度保持率即土工格室条带 (含结点) 的抗拉强度与不含结点的土工格室条带抗拉强度的比值, 单位为%。条带变形保持率即土工格室条带 (含结点) 伸长率与不含结点的土工格室条带伸长率的比值, 单位为%。计算结果分别如表 2、图 7 所示。

条带强度保持率

$$S_{\sigma} = \frac{\sigma_{*}}{\sigma_{\text{条带}}} \quad , \quad (1)$$

式中, σ_{*} 、 $\sigma_{\text{条带}}$ 分别为拉伸试验所测条带(含结点)、不含结点条带的抗拉强度(N/cm)。

条带变形保持率

$$S_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{*}}{\varepsilon_{\text{条带}}} \quad , \quad (2)$$

式中, ε_{*} 、 $\varepsilon_{\text{条带}}$ 分别为拉伸试验所测条带(含结点)、不含结点条带的伸长率(N/cm)。

表 2 结点连接方式对土工格室条带性能影响的计算结果

Table 2 Results of effect of junction connections on properties of geocell strips

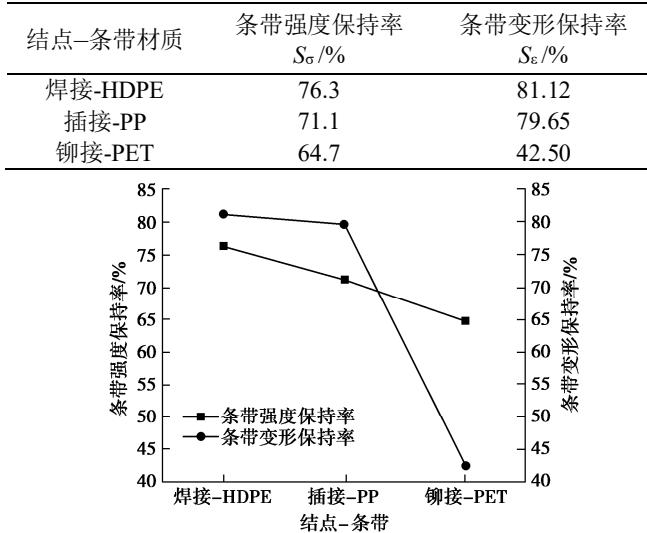


图 7 结点连接方式对土工格室条带性能的影响

Fig. 7 Effects of junction connections on performance of strips

由表 2、图 7 可知 3 种结点连接方式对各自土工格室条带的强度、变形保持率各不相同。其中铆接结点对 PET 土工格室的条带强度保持率最低, 为 64.7%, 而焊接结点对 HDPE 土工格室的条带强度保持率最高, 为 76.3%, 是铆接结点的 1.18 倍; 同时铆接结点对 PET 土工格室的条带变形保持率也最低, 为 42.5%, 而焊接结点对 HDPE 土工格室的条带变形保持率仍最高, 为 81.12%, 是铆接结点的 1.91 倍。插接结点对 PP 土工格室的条带强度保持率、条带变形保持率分别为 71.1%, 79.65%, 其性能与焊接结点的各项保持率较为接近, 性能表现良好。

通过对 3 种结点连接方式对各自土工格室条带强度和变形保持率的差值发现, 焊接结点对 HDPE 土工格室条带强度、变形二者性能的协调发挥影响较低, 为 4.82%; 插接结点对 PP 土工格室条带强度、变形二者性能的协调发挥影响居中, 为 8.55%; 而铆接结点对 PET 土工格室条带强度、变形二者性能的协调发挥差值较高, 为 22.2%。

结合条带强度保持率、条带变形保持率以及性能的协调发挥 3 方面分析可知焊接结点对 HDPE 条带性能的保持最优, 插接结点对 PP 条带性能的保持略低于焊接结点, 而铆接结点对 PET 条带性能的保持较差, 尤其是对条带变形性能的保持。

2.2 不同受力状态下焊接结点的失效机制研究

焊接结点在不同受力状态下的失效模式以及对应的抗拉强度分别如图 8, 9 所示。



图 8 不同受力状态下焊接结点试样的失效模式

Fig. 8 Failure modes of welding junctions under different loading modes

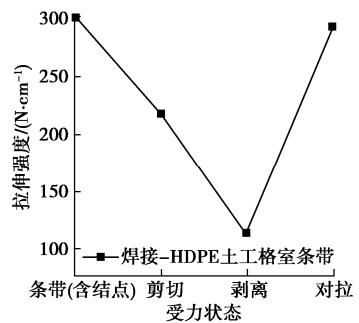


图 9 不同受力状态下焊接结点的抗拉强度对比

Fig. 9 Comparison of strength of welding junctions under different loading modes

观察图 8 (a) 可知, 焊接结点受到剪切作用时, HDPE 条带有明显的颈缩变形, 并在焊接结点处断开, 这与图 3 (a) HDPE 条带(含焊接结点)的拉伸失效模式一致。但由图 9 可知条带(含结点)的抗拉强度明显大于结点的剪切强度。上述两种受力状态虽对应试验现象较为相似, 但试验结果却相差较大。

分析原因: 首先条带(含结点)在受到拉伸作用时, 发挥作用的主体是位于同一根母材上的条带, 即土工格室条带(含焊接结点)拉伸属于轴向拉伸, 只

是由于焊接过程中对结点附近的土工格室条带造成损伤而成为薄弱点, 故失效发生在焊接结点附近; 而焊接结点受剪切作用时, 发挥作用的主体是结点本身, 且此时是通过相邻两根不同母材上的土工格室条带进行拉伸从而完成剪切, 故在试验时会处于偏心受力状态, 依据“平行移轴定理^[19]”可知剪切试样中结点不仅会受到轴向力而且还会受到偏心力而产生的附加弯矩, 且此附加弯矩与轴力有关, 如图 10 (a) 所示。综上所述可知条带(含焊接结点)的拉伸试验评价的依然为条带轴向拉伸的性能, 而剪切试验评价的则是结点的受剪性能, 二者评价的对象不同。

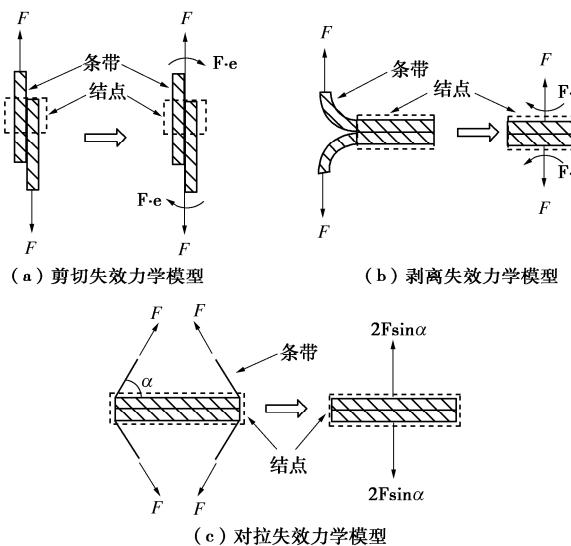


图 10 不同受力状态下结点的力学模型

Fig. 10 Mechanical models for junctions under different loading modes

由图 8 (b) 剥离试样及失效模式可知, 焊接结点受到剥离作用时, 在焊接结点处发生失效, 且结点断开时 HDPE 条带无明显屈服变形。分析原因: 焊接结点受到剥离作用时, 其力学模型如图 10 (b) 所示, 进行受力等效后, 结点除受轴向力外还受到偏心轴力产生的附加弯矩的影响, 从而使得焊接结点在拉伸试验开始后很快就发生失效。

由图 8 (c) ~ (e) 可知, 焊接结点受到对拉作用时出现两种失效模式, 一种为在焊接结点处完全断开而失效, 且焊接结点失效前土工格室条带无明显伸长变形, 断裂较为突然, 呈脆性破坏; 另外一种为在焊接结点处由土工格室条带的拉伸断裂而失效, 该种模式失效前土工格室条带先是逐渐伸长表现出明显的塑性变形, 然后在结点附近处断开, 呈延性破坏。此外, 结合图 10 (c) 以及依据上述分析中提及土工格室条带在结点附近存在薄弱点的解释, 可知对拉破坏中延性破坏应属于正常试验现象, 而脆性破坏的现象说明该结点试样在焊接结点处存在焊接质量的问题。

由图 9 可知, 焊接结点在不同受力状态下抗拉强度从大到小为: 对拉强度、剪切强度、剥离强度。可知焊接结点的强度主要受剥离强度控制, 这与一些学者所得结果^[13, 17]保持一致。此外, 焊接结点的对拉强度与条带(含结点)的抗拉强度较为一致, 分别为 294, 302 N/cm, 故可知焊接土工格室在铺设时应充分发挥其对拉强度, 避免焊接结点受到剪切或剥离作用, 因此在边坡铺设时建议从路肩沿坡面进行铺设。

综合上述分析可知焊接结点在不同受力状态时, 其破坏形式取决于焊接结点附近土工格室条带抗拉强度与焊接结点强度相互抗衡的结果, 此外根据图 10 中结点失效的力学模型分析可知, 对土工格室条带焊接时需要评价焊接区域与偏心受力的影响, 这样才更有助于焊接结点性能的发挥。

2.3 不同受力状态下插接结点的失效机制研究

插接连接是在两条聚丙烯 PP 土工格室条带连接处, 采用特制 U 型钢钉交叉穿入条带预切的缝隙中并固定, 使两根条带紧紧连接在一起的结点连接方式。插接结点在不同受力状态下的失效模式、对应的抗拉强度分别如图 11, 12 所示。

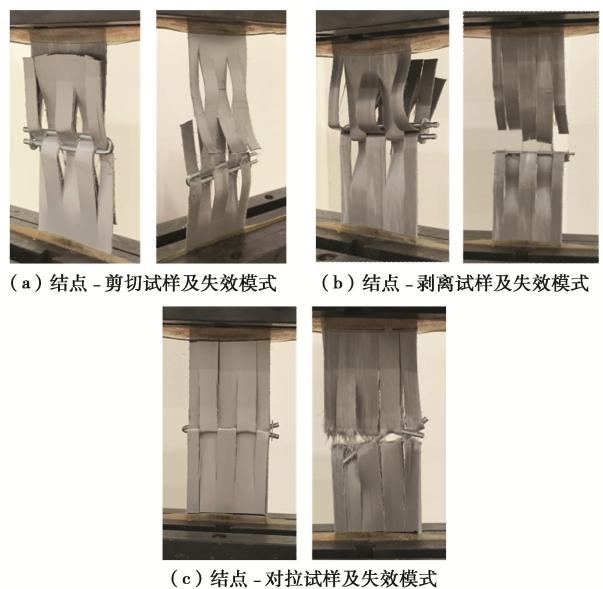


图 11 不同受力状态下插接结点试样的失效模式

Fig. 11 Failure modes of latching junctions under different loading modes

由图 11 (a), (b) 可知, 当插接结点受到剪切和剥离作用时, 试样均在结点处发生断裂, 断裂时 U 型钉无明显变形, 且由图 12 可知剪切和剥离强度远小于土工格室条带(带插接结点)的抗拉强度。分析原因是因为在制作插接结点时, 需将条带进行切割、成缝, 因 PP 材料具有较强应力敏感性、各向异性, 因此在进行剪切和剥离试验时, 材料会沿着切割的裂缝发生

撕裂破坏, 从而使其承载能力较低甚至不具有承载能力, 因此插接结点受到剪切和剥离作用时强度很低。

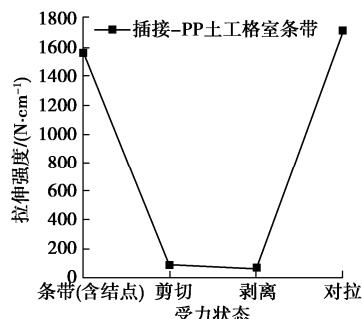


图 12 不同受力状态下插接结点的抗拉强度对比

Fig. 12 Comparison of strength of latching junctions under different loading modes

由图 11 (c) 对拉试样的失效模式可知, 对拉试验过程中, 两根土工格室条带在结点处受到拉力, U型钉承受拉力以及两根土工格室条带的剪切作用, 且在拉伸过程中可以明显看到U型钉由于受到剪切作用而发生变形, 但没有发生破坏。插接结点的破坏主要是 PP 土工格室条带的断裂, 说明插接结点在受到对拉作用时 PP 土工格室条带抵抗破坏的能力较 U型钉弱, 因此当 PP 条带到达断裂强度后, 结点处的条带就会发生断裂, 试验结束。

由图 12 可知, 插接结点在不同受力状态下的抗拉强度从大到小为: 对拉强度、剪切强度、剥离强度, 其中剪切和剥离强度二者基本一致, 分别 78, 54 N/cm, 且远小于对拉强度, 为 1552 N/cm。可知插接结点的强度主要受剥离强度控制, 但也还受剪切强度的控制。因此, PP 插接土工格室在实际工程应用时, 应采取注塑等措施保证插接结点附近受力均匀, 以避免出现结点撕裂破坏, 从而更好发挥插接结点的作用。

2.4 不同受力状态下铆接结点的失效机制研究

铆钉连接是在结点处采用铆钉和垫片经铆接而成的一种连接形式。铆接结点在不同受力状态下的失效模式及对应的抗拉强度分别如图 13, 14 所示。由图 13 (a) 可知, 当铆接结点受到剪切力时, 试样在结点处发生撕裂破坏, 破坏时铆钉仅有轻微变形, 但未发生破坏。结合图 14 可知, 铆接结点的剪切强度 141 N/cm 远远小于 PET 条带 (含铆接结点) 的抗拉强度 1286 N/cm。分析原因是因为铆接连接需要在条带连接处打孔, 再通过铆钉固定。因 PET 材料具有应力敏感性, 这使得在剪切试验时 PET 条带在打孔处产生应力集中, 出现撕裂后, 强度急剧降低, 进而在铆接结点处迅速撕裂破坏。分析可知在试验过程中 PET 土工格室条带的强度并未充分发挥, 相反是在结点处的应力集中使 PET 土工格室条带迅速发生撕裂破坏。

由图 13 (b), (c) 可知, 铆接结点在试验过程中受到剥离和对拉作用时, 一旦铆钉失效, 结点随即发生分离失效, 破坏无明显征兆, 说明剥离和对拉强度主要受结点处的铆接质量控制。此外, 由图 14 可知, 铆接结点的对拉强度大于剥离强度。分析原因是因为铆接结点在受到对拉作用时, 铆接结点受力平行于铆钉, 铆钉受到拉伸方向的拉力, 故铆钉强度可以充分发挥。而铆接结点受到剥离作用时, 根据图 10 (b) 剥离失效的力学模型可知结点处于偏心拉伸状态即除受轴向力外, 还受附加弯矩的作用, 附加弯矩使得垫片一侧受拉, 一侧受压, 故铆接结点很快就发生断裂。

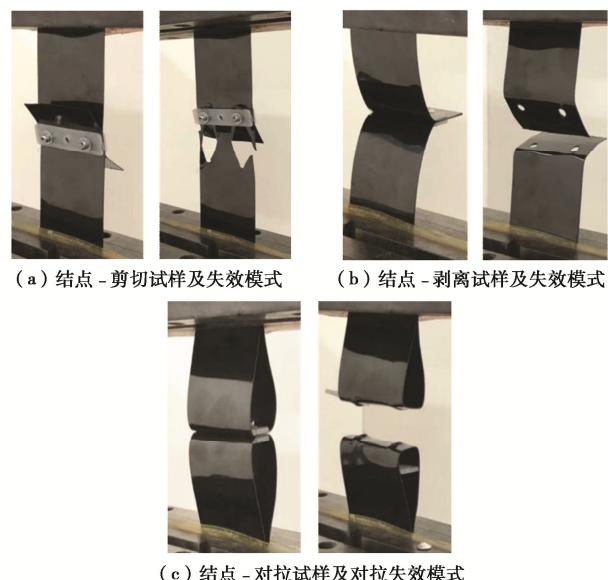


图 13 不同受力状态下铆接结点试样的失效模式

Fig. 13 Failure modes of riveting junctions under different loading modes

由图 14 可知, 铆接结点在不同受力状态下的抗拉强度从大到小为: 对拉强度、剪切强度、剥离强度, 可知除焊接结点外, 铆接结点的强度也主要受剥离强度的控制。此外, 结合上述铆接结点在不同受力状态下的失效模式可知铆接结点的强度指标与铆钉的个数与分布以及铆接的质量均存在密切关系。

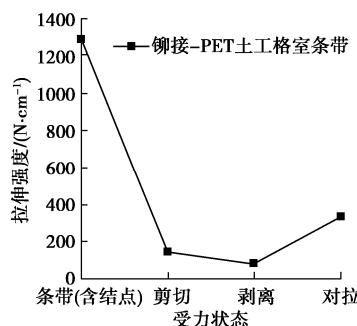


图 14 不同受力状态下铆接结点的抗拉强度对比

Fig. 14 Comparison of strength of riveting junctions under different loading modes

2.5 焊接、插接、铆接3种结点连接方式的性能对比

由于结点在不同受力状态下失效均发生在结点处, 故为了定量对比分析结点在不同受力状态下失效时, 焊接、插接、铆接3种结点连接方式依托各自对应土工格室条带强度的发挥情况, 提出“结点强度发挥率”, 以评价不同结点连接方式与对应土工格室条带性能的协调搭配情况, 如式(3)所示。结点强度发挥率即结点受剪切(J)、剥离(B)和对拉作用(D)时所得的抗拉强度与对应土工格室条带抗拉强度的比值, 单位为%, 试验结果如表3所示。

结点强度发挥率

$$J_{\sigma_{\text{条带}}} = \frac{\sigma_{\text{J*}}}{\sigma_{\text{条带}}} \quad (3)$$

式中, $\sigma_{\text{J*}}$ 为结点受剪切(J)、剥离(B)和对拉作用(D)时所得抗拉强度(N/cm)。

表3 不同结点连接方式在不同受力状态下的试验结果

Table 3 Test results of different junction connections under different loading models

结点连接方式	剪切(J)		剥离(B)		对拉(D)	
	$\sigma_{\text{J,J}} / (\text{N} \cdot \text{cm}^{-1})$	$J_{\sigma_{\text{J}}} / \%$	$\sigma_{\text{J,B}} / (\text{N} \cdot \text{cm}^{-1})$	$J_{\sigma_{\text{B}}} / \%$	$\sigma_{\text{J-D}} / (\text{N} \cdot \text{cm}^{-1})$	$J_{\sigma_{\text{D}}} / \%$
焊接	218	55.1	112	28.3	294	74.2
插接	78	3.6	54	2.5	1704	78.1
铆接	141	7.1	86	4.3	336	16.9

对比表3在不同受力状态下3种结点连接方式的强度指标, 3种结点连接方式受到剪切作用时, 所测得焊接结点的抗拉强度最大, 插接结点最小, 其中焊接结点的抗拉强度约是插接结点的2.79倍, 是铆接结点的1.55倍; 此外焊接结点在剪切作用下的结点强度发挥率最高, 插接结点最低, 焊接结点的剪切结点强度发挥率分别是插接、铆接的15.31, 7.76倍。3种结点连接方式受到剥离作用时, 所测结果依然是焊接结点的抗拉强度最大, 插接结点最小, 且焊接结点的抗拉强度约是插接结点的2.07倍, 是铆接结点的1.30倍; 此外3种结点连接方式在均受剥离强度控制的情况下, 焊接结点的剥离结点强度发挥率高达28.3%, 分别是插接、铆接结点的11.32倍、6.58倍。3种结点连接方式受到对拉作用时, 插接结点的抗拉强度最大, 约是焊接结点的5.80倍, 但是结点强度发挥率却仅为1.05倍。此外铆接结点在对拉作用下的结点强度发挥率最低, 为16.9%, 其中焊接、插接结点的结点强度发挥率分别是其4.39倍、4.62倍。

综合分析可知焊接结点依托于HDPE条带在受到剪切、剥离、对拉3种受力状态下所发挥的性能均较好, 尤其是焊接、插接以及铆接3种结点连接方式均受剥离强度控制的前提下, 依然可以保持28.3%的结

点强度发挥率, 说明焊接结点与HDPE条带二者较为匹配。插接结点虽对拉结点强度保持率很高, 但剪切、剥离结点强度保持率却很低, 即3种受力状态下结点强度发挥率相差很大, 其中对拉是剥离结点强度发挥率的31.24倍, 说明插接结点与PP条带需要采取注塑等措施, 来提升结点在剪切、剥离作用下的抗拉强度, 以充分发挥PP条带的强度优势。铆接结点在剪切、剥离、对拉3种受力状态下所发挥的性能均较差, 使得PET条带的强度优势未发挥, 因此建议针对铆接连接需要重新调整铆钉的个数与位置分布以充分发挥PET土工格室条带的强度优势。

3 结 论

论文通过一系列单轴拉伸试验, 研究了含焊接、插接、铆接3种结点条带的拉伸性能, 分析了结点在不同受力状态的失效模式, 并通过采用“条带强度保持率”、“条带变形保持率”以及“结点强度发挥率”评价了3种结点连接方式对各自条带性能的影响以及在剪切、剥离与对拉作用下结点性能的发挥。对结点性能的研究有助于提高土工格室加筋加固结构的安全。

(1)不同结点连接方式对结点的失效模式有显著影响, 且对各自条带的拉伸性能均表现为降低趋势, 但也表现出较好的属性继承。其中焊接结点对HDPE条带的拉伸性能保持最优, 而铆接结点对PET条带拉伸性能的保持较差, 尤其是条带的变形性能。此外, 焊接结点对HDPE条带拉伸性能的协调发挥影响较低, 为4.82%; 而铆接结点对PET条带性能的协调发挥影响较高, 为22.2%。

(2)焊接结点在剥离作用下, 除受轴向力外还受偏心弯矩的影响, 因此焊接时需评价焊接区域与偏心受力的影响; 插接结点在剪切和剥离作用下, PP条带会沿着结点处切割的裂缝发生撕裂破坏, 断裂时U型钉无明显变形; 铆接结点在剥离和对拉作用下, 主要受结点处的铆接质量控制, 且破坏时无明显征兆, 试验过程中PET条带的强度并未充分发挥。

(3)焊接、插接、铆接结点在不同受力状态下抗拉强度从大到小均为: 对拉强度、剪切强度、剥离强度, 故3种结点的强度均主要受剥离强度的控制。在此基础上, 焊接结点可保持28.3%的剥离结点强度发挥率, 分别是插接、铆接结点的11.32倍、6.58倍, 体现了焊接结点显著的性能优势。

(4)插接结点在3种受力状态下结点强度发挥率相差很大, 其中对拉结点强度发挥率是剥离的31.24倍, 因此需采取注塑等措施来改善结点在剪切、剥离

作用下的强度, 以充分发挥 PP 条带的强度优势。铆接结点在 3 种受力状态下所发挥的性能均较差, 建议铆接连接重新调整铆钉的个数与位置分布以充分发挥 PET 条带的强度。

参考文献:

- [1] HEGDE A. Geocell reinforced foundation beds-past findings, present trends and future prospects: a state-of-the-art review[J]. Construction and Building Materials, 2017, **154**: 658 – 674.
- [2] 赵明华, 陈大兴, 刘 猛, 等. 考虑土拱效应影响的路堤荷载下土工格室加筋体变形分析[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(4): 601 – 609. (ZHAO Ming-hua, CHEN Da-xing, LIU Meng, et al. Deformation analysis of geocell-reinforced body under embankment load considering soil arch effect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(4): 601 – 609. (in Chinese))
- [3] 李丽华, 崔飞龙, 肖衡林, 等. 轮胎与格室加筋路堤性能及承载力研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(1): 81 – 88. (LI Li-hua, CUI Fei-long, XIAO Heng-lin, et al. Performance and bearing capacity of embankments reinforced with waste tires and geocells[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(1): 81 – 88. (in Chinese))
- [4] SONG F, LIU H, MA L, et al. Numerical analysis of geocell-reinforced retaining wall failure modes[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2018, **46**(3): 284 – 296.
- [5] KURIHASHI Y, OYAMA R, KOMURO M, et al. Experimental study on buffering system for concrete retaining walls using geocell filled with single-grain crushed stone[J]. International Journal of Civil Engineering, 2020, **18**(10): 1097 – 1111.
- [6] HALDER K, CHAKRABORTY D. Influence of soil spatial variability on the response of strip footing on geocell-reinforced slope[J]. Computers and Geotechnics, 2020, **122**: 1 – 13.
- [7] BIABANI M M, INDRARATNA B, NIMBALKAR S. Behaviour of geocell reinforced sub-ballast under cyclic loading[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, **141**(1): 109 – 119.
- [8] 侯 娟, 张孟喜, 韩 晓, 等. 单个高强土工格室作用机理的有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(增刊 1): 26 – 30. (HOU Juan, ZHANG Meng-xi, HAN Xiao, et al. Mechanism of a high-strength geocell using FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(S1): 31 – 35. (in Chinese))
- [9] HEGDE A, SITHARAM T G. Joint strength and wall deformation characteristics of a single-cell geocell subjected to uniaxial compression[J]. International Journal of Geomechanics, 2014, **15**(5): 04014080.
- [10] LIU Y, DENG A, JAKSA M. Failure mechanisms of geocell walls and junctions[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2019, **47**(2): 104 – 120.
- [11] HAN J, YANG X, LESHCHINSKY D, et al. Behavior of geocell-reinforced sand under a vertical load[J]. Transportation Research Record, 2008, **2045**(1): 1 – 14.
- [12] LESHCHINSKY B, LING H. Effects of geocell confinement on strength and deformation behavior of gravel[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, **139**(2): 340 – 352.
- [13] SONG F, LIU H, HU H, et al. Centrifuge tests of geocell-reinforced retaining walls at limit equilibrium[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2018, **144**(3): 5 – 13.
- [14] YANG X, HAN J, POKHAREL S K. Accelerated pavement testing of unpaved roads with geocell-reinforced sand bases[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2012, **32**: 95 – 103.
- [15] 高 昂, 张孟喜, 刘 芳, 等. 分级循环荷载下土工格室加筋路堤模型试验研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(8): 2213 – 2221. (GAO Ang, ZHANG Meng-xi, LIU Fang, et al. Model experimental study of embankment reinforced with geocells under stepped cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(8): 2213 – 2221. (in Chinese))
- [16] 许淋颖. 土工格室加筋土挡墙试验研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2019. (XU Lin-ying. Experimental Study on Geocell Reinforced Soil Retaining Wall[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2019. (in Chinese))
- [17] ADEM I, AYHAN G. Pullout behavior of geocell reinforcement in cohesionless soils[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2020, **48**(1): 71 – 81.
- [18] 刘 杰. 塑料土工格栅拉伸性能及工艺研究[D]. 济南: 山东大学, 2015. (LIU Jie. The Tensile Property and Technology Research of Plastic Geogrid[D]. Jinan: Shandong University, 2015. (in Chinese))
- [19] 孙训方, 方孝淑, 关来泰. 材料力学. 第 5 版[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009. (SUN Xun-fang, FANG Xiao-shu, GUAN Lai-tai. Mechanics of Materials[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009. (in Chinese))