

文章编号:1674-2974(2016)07-0132-07

## 格宾网筋材的绞边强度特性试验研究<sup>\*</sup>

杨果林<sup>†</sup>, 段君义, 张 雨

(中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

**摘 要:**为研究不同绞边方式及不同网孔尺寸下格宾网的绞边拉伸特性,参考欧洲标准(EN10223-3:1997),采用自行设计的绞边试验装置,对网孔型号为60 mm×80 mm和80 mm×100 mm的A与B两类绞边方式的格宾网片进行绞边拉伸试验,分析比较各自的力学特性,并讨论绞边拉伸破坏的典型破坏模式。研究表明:与B类绞边方式相比,A类绞边方式的格宾网片绞边拉伸强度较大;根据格宾网的破坏形态,绞边拉伸破坏可分为3种典型破坏模式,即绞边钢丝被拉出破坏、网丝的拉断破坏以及绞边钢丝部分被拉出后网丝被拉断破坏;绞边质量与绞合在端丝上的钢丝缠绕圈数、紧密程度有关;网孔尺寸、钢丝直径及绞边质量均是影响格宾网的绞边拉伸力学特性的重要因素。研究结果可为加筋格宾结构物的设计、施工提供参考。

**关键词:**双绞合六边形钢丝网;筋材;强度特性;拉伸试验;绞边质量;破坏模式

**中图分类号:**TV41

**文献标识码:**A

## Experimental Study on Selvage Strength Characteristics of Gabion Mesh

YANG Guo-lin<sup>†</sup>, DUAN Jun-yi, ZHANG Yu

(School of Civil Engineering, Central South Univ, Changsha, Hunan 410075, China)

**Abstract:** In order to study the tensile mechanical behaviors of selvages in gabion meshes with different mesh sizes and selvage ways, a selvage stretching device was designed according to European Standard (EN10223-3:1997). Selvage tensile tests were carried out on the gabion meshes of 60 mm×80 mm and 80 mm×100 mm with type-A and type-B selvage ways. The mechanical behaviors of gabion meshes were analyzed, and the typical failure mode of the selvage tension was discussed. The test results showed that the selvage tensile strength of the gabion mesh with type-A selvage way was greater than that of type-B. According to the damage mode of gabion mesh, selvage tensile failure was classified into three failure modes: pull-out failure of the wire wound on the edge wire, tensile failure of mesh wire and tensile failure of mesh wire after pulling out of some enwinding wires. It is also found that selvage quality was dependent on the winding turns and compact degree of the wire wound on the edge wire. Selvage tensile mechanical characteristics of the gabion mesh were significantly affected by the mesh size, wire size, and selvage quality. This study is expected to provide some useful references for the design and construction of reinforced gabi-

<sup>\*</sup> 收稿日期:2015-08-30

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51478484), National Natural Science Foundation of China(51478484);交通运输部联合攻关项目(2010-353-343-290);湖南省交通科技项目(200908);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2016ZZTS401)

**作者简介:**杨果林(1963-),男,湖南桃江人,中南大学教授,博士生导师

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: yangguolin6301@163.com

on structures.

**Key words:** double twisted hexagonal wire mesh; reinforcements; strength characteristic; tensile test; selvage quality; failure mode

岩土体材料具有较强的抗压和抗剪强度,但其抗拉强度较小,在岩土体中铺设抗拉材料,可有效改善岩土体的抗拉特性,这就是“加筋”的概念,而起抗拉作用的材料就是筋材。加筋土筋材以其优良的适用性和显著的经济性得到了世界各国工程及学术界的重视,现已广泛应用于铁路、公路、市政以及水利等工程领域<sup>[1-6]</sup>。加筋材料也从天然植物发展为高模量的钢条、钢丝网以及各类土工合成材料等。加筋土筋材的拉伸力学特性是工程设计中最基本的力学指标,国内外的一些学者和单位针对加筋土筋材的拉伸力学特性展开了大量研究,如:Perkins<sup>[7]</sup>对各类土工合成材料进行了一系列的拉伸试验研究,得出了土工合成材料的拉伸应力-应变关系具有热、黏、弹塑性等特性;Parsons 等<sup>[8]</sup>认为土工合成材料在拉伸过程中具有应变率相关性;李作攀等<sup>[9]</sup>研究了试样的宽度与长度对拉伸断裂强度的影响,认为试样尺寸改变会引起拉伸过程中颈缩率的变化,试样的长宽比越小,颈缩率越小,断裂拉伸强度越高;李俊伟等<sup>[10]</sup>对土工格室 HDPE 片材的拉伸力学特性进行了试验研究,试验结果表明拉伸速率对其应力-应变关系有着较大影响,并提出了一种描述较小应变下的应力-应变数学模型;杨广庆等<sup>[11]</sup>选取 3 种不同类型的 HDPE 土工格栅,对其在不同拉伸速率下的拉伸性能进行了研究;杨果林等<sup>[12]</sup>对在循环荷载作用下的土工合成材料应力-应变特性进行了研究,并推导了约束条件下的变形方程。此外,很多学者对土工合成材料的蠕变特性<sup>[13-15]</sup>也进行了研究。以上主要是关于土工合成材料等方面的研究。格宾网筋材作为一种新型的加筋材料,具有良好的工程特性和价格优势<sup>[16]</sup>。目前关于格宾网的研究主要集中在拉伸特性<sup>[16-17]</sup>、拉拔特性<sup>[18-19]</sup>方面,均未涉及到格宾网的绞边强度特性。欧洲标准(EN10223-3:1997)指出格宾网必须采用比网面钢丝直径稍大的钢丝作为边端钢丝进行绞边,但欧洲标准中并没有对绞边的具体制作要求和绞边强度的测试方法进行说明。格宾网在制作过程中是裁剪成片的,在施工现场铺设时需要将格宾网片拼接起来,而格宾网片边缘的钢丝绞合缠绕在边端钢丝上,这就使得网片末端与边端钢丝(即端丝)的连接位置成

了整个格宾网的薄弱部位。可见,格宾网的绞边强度特性尚需进行系统性研究。为此,本文以湖南省安化至邵阳高速公路加筋格宾路堤为背景,选取不同绞边方式、不同网孔型号的格宾网片进行绞边拉伸试验,研究格宾网的绞边拉伸特性及破坏形式。研究成果对于加筋格宾路堤工程的修建具有重要的指导作用,也对加筋格宾结构的深入研究具有参考意义。

## 1 试验概况

### 1.1 试验装置

绞边强度是格宾网片绞合段的末端钢丝缠绕在端丝上的抗拔强度值(图 1 所示为格宾网片的绞边示意图)。格宾网片的绞边拉伸试验装置不同于格宾网片的拉伸试验装置。格宾网片拉伸试验是通过螺栓将网片节点与夹具连接起来,而绞边强度试验是为了测量网片的绞边强度,应充分考虑网片绞边部分与夹具连接的特殊性。为此,参考欧洲标准(EN10223-3:1997)中格宾网制作要求,考虑到避免格宾网拉伸过程中的颈缩现象(横向变形),保证拉伸过程中绞边部位与拉伸方向垂直和试验可操作性,采用光滑扣环扣住绞边部位的端丝进行绞边拉伸。并考虑到对格宾网不同网孔单元试件的可测试性,合理布置夹具上孔槽,研制了专门的绞边强度拉伸装置。该绞边测试方法合理,具有简便、可操作性强的特点,在未来实际应用中具有可行性。(对应的试验装置专利号:201420386094.6)

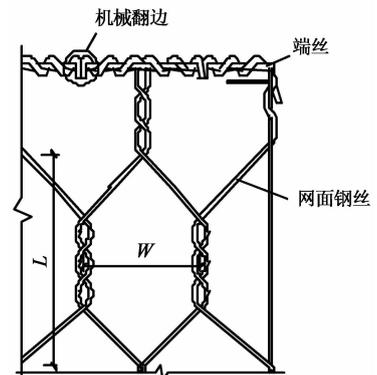


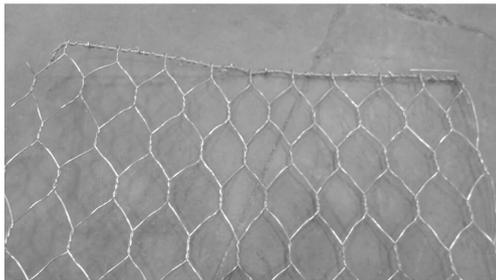
图 1 格宾网片绞边示意图

Fig. 1 Selvage of gabion meshes

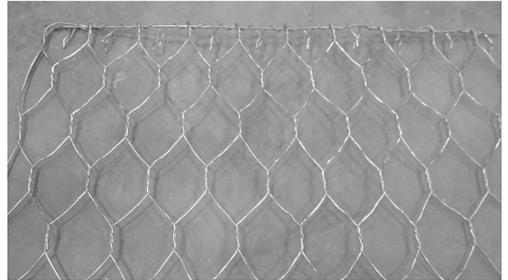
试验在常温下进行,所采用的拉伸机为SHT4106-G微机控制电液伺服万能试验机,拉伸速率控制为5 mm/min(即格宾网片拉伸方向的长度的20%)。如图2所示。



图2 绞边拉伸试验  
Fig. 2 Selvage stretching tests



(a) A类绞边方式



(b) B类绞边方式

图3 不同绞边方式的格宾网片  
Fig. 3 Different selvage ways of gabion meshes

为了保证试验数据的可统计性,对上述每种组合类型的网片均取6片进行平行试验。网孔型号为60 mm×80 mm的网片长度和宽度分别截取4个单元尺寸长度和10个单元尺寸宽度;网孔型号为80 mm×100 mm的网片长度和宽度分别截取4个单元尺寸长度和8个单元尺寸宽度,同时保证网片的一端必须为缠绕有网面钢丝的端丝。

## 2 试验结果与分析

对不同类型格宾网片试验结果进行统计分析,

表1 格宾网绞边拉伸的主要力学性能指标试验结果

Tab. 1 Main mechanical indexes of gabion meshes based on selvage stretching test

格宾网类型	试件长度/mm	试件宽度/mm	2%伸长率 拉伸力 /(kN·m <sup>-1</sup> )	5%伸长率 拉伸力 /(kN·m <sup>-1</sup> )	10%伸长率 拉伸力 /(kN·m <sup>-1</sup> )	绞边拉 伸强度 /(kN·m <sup>-1</sup> )	最大负荷下 伸长率/%
A类绞边(60 mm×80 mm)	377	660	3.84	6.34	13.55	21.21	16.70
B类绞边(60 mm×80 mm)	370	570	—	—	—	12.26	10.20
A类绞边(80 mm×100 mm)	384	675	5.46	7.79	15.35	36.86	17.14
B类绞边(80 mm×100 mm)	400	590	—	—	—	20.12	15.23

### 1.2 试验材料及试验过程

为了得到不同网孔单元尺寸和不同绞边质量对绞边强度特性的影响,特选取了某公司生产的2种不同绞边质量的格宾网(双绞合六边形钢丝网)片进行绞边试验,其中,每种绞边方式的钢丝网又分2种网孔型号,分别为60 mm×80 mm(对应网面钢丝直径为2.0 mm,端丝直径为2.7 mm)和80 mm×100 mm(对应网面钢丝直径为2.7 mm,端丝直径为3.4 mm)的2种网孔,共4种组合类型网片。为方便区分,本文规定绞边质量较好的为A类绞边方式(如图3(a),由专业的翻边机器将网面钢丝缠绕在边端钢丝上),绞边质量较差的为B类绞边方式(如图3(b),采用手工绞边,缠绕圈数为2圈)。可以很明显地发现两者的绞合段缠绕在端丝上的缠绕圈数有较大差异,A类绞边方式的缠绕圈数明显多于B类。

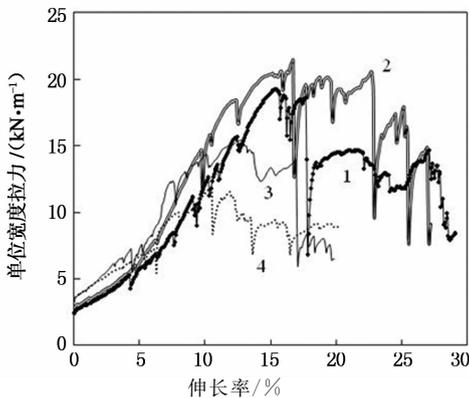
每类格宾网试验结果的平均值见表1。

### 2.1 不同绞边方式对格宾网片绞边拉伸特性的影响

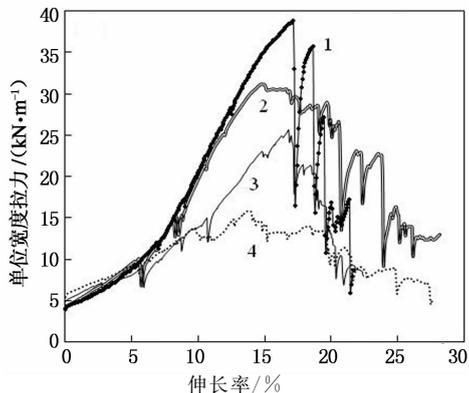
为了探讨不同绞边方式对格宾网片绞边强度特性的影响,对于不同绞边方式的格宾网片,均选取2组典型绞边拉伸破坏试验数据,试验结果如图4所示。其中,曲线1和曲线2分别对应平行试验中A类绞边方式的格宾网片绞边拉伸的2种典型破坏形态;曲线3和曲线4分别对应平行试验中B类绞边方式的格宾网片绞边拉伸的2组典型曲线。

图4(a)所示为不同绞边方式的格宾网片(网孔型号60 mm×80 mm)的典型绞边拉伸曲线。由图可知:

1) 对于A类绞边方式的网片绞边拉伸曲线,在两者达到最大拉伸应力前的绞边拉伸曲线变化规律相差不大。在初始阶段,拉力随格宾网应变增长较为缓慢,格宾网尚处于调整过程;随着应变的继续增加,拉力增长速度加快且呈线弹性;在达到最大拉伸应力前,拉伸曲线多处出现锯齿形,说明在拉伸过程中格宾网片内钢丝在不断地进行应力调整;两者的最大负荷下伸长率相差不大,约为16%,曲线1对应的最大拉伸应力小于曲线2的最大拉伸应力,原因是曲线1对应的格宾网片发生了绞边破坏,缠绕在端丝上的钢丝被拉出,而曲线2对应的格宾网片为网片内的斜向钢丝被拉断破坏。此外,曲线2对应的拉伸应力达到最大值之后并没有迅速减小,反而能够继续保持较大的拉伸应力,这是因为网片内钢丝发生断裂后,网片内发生了拉力重分配,且网片内存在应力集中现象,部分钢丝没有达到最大拉伸强度,能够继续承受一定的拉力,故网片能够在伸长率增加的情况下继续维持较高的拉伸应力。



(a)网孔型号60 mm×80 mm



(b)网孔型号80 mm×100 mm

图4 格宾网绞边拉伸试验典型曲线

Fig. 4 Typical selvage tensile curves of gabion meshes

2) 对于B类绞边方式的网片绞边拉伸曲线,两者的绞边拉伸曲线差异较大。由于B类绞边质量较差,缠绕不够紧密,均发生了绞边破坏,即绞边钢丝被拉出,而绞边质量存在随机性,导致拉伸曲线存在差异性,进而导致最大拉伸力不同。

3) A类绞边方式的格宾网片绞边拉伸强度大于B类绞边方式的格宾网片绞边拉伸强度,这是由于A类绞边方式的格宾网片钢丝在端丝上的缠绕圈数和紧密程度都高于B类绞边方式的格宾网。与B类绞边方式相比,A类绞边方式的最大负荷下伸长率较大。说明绞边质量较好的格宾网用于加筋构筑物中,在维持荷载的同时,具有承受较大变形的能力。

4) 为保证格宾网片的平整性及网片与夹具紧密接触,对格宾网片施加了一定的预拉力,故伸长率为0时,格宾网拉力并不为0;在应变较小的范围内,2种绞边方式的格宾网拉伸曲线的斜率大致相等,即割线模量在拉伸的初始阶段可认为相同;但当应变进一步增大时,不同绞边方式的格宾网片拉伸曲线差异较大。可见,格宾网的拉伸力学性能与绞边质量关系密切。

图4(b)所示为不同绞边方式的格宾网片(网孔型号80 mm×100 mm)的典型绞边拉伸曲线。由图可知:

1) 对于A类绞边方式的网片绞边拉伸曲线,在两者达到最大拉伸应力前的绞边拉伸曲线变化规律也具有的一致性。在初始阶段,拉伸曲线变化与网孔型号60 mm×80 mm的格宾网片拉伸曲线变化情况相同,在伸长率达到7%之后呈线弹性;曲线1的最大拉伸应力是曲线2的最大拉伸应力的1.3倍,曲线1对应的格宾网片表现为很明显的网片内多根斜向钢丝连续拉断破坏,曲线2对应的格宾网片发生的是缠绕在端丝上的绞边钢丝逐根被拉出破坏,表现出位移破坏特征。

2) 对于B类绞边方式的网片绞边拉伸曲线,格宾网片均表现为绞边钢丝的拉出破坏,但由于绞边质量的随机性,两者的绞边拉伸曲线差异也较大,曲线3对应的最大拉伸应力约为曲线4对应的最大拉伸应力的2倍,进一步说明绞边强度与绞合在端丝部分的网丝缠绕圈数、紧密程度相关。并且随着绞边质量的提高,格宾网片绞边拉伸过程中的绞边拉伸曲线会逐渐向网片的拉伸曲线转变。

3) 与B类绞边方式相比,A类绞边方式的格宾网片绞边拉伸强度较大;两者的最大负荷下伸长率均较大,约为15%。

## 2.2 绞边拉伸的3种典型破坏模式

通过对试验中得到的24片格宾网绞边拉伸破

坏结果进行归纳发现, B类绞边方式的格宾网片均出现绞边钢丝被拉出破坏, 但 A类绞边方式的格宾网片出现了不同的破坏形态, 其不同网孔型号的格宾网片破坏形态均可归纳为以下 3 种典型破坏模式. 可见, 机械绞边存在加工差异, 为了改进优化、合理设计绞边方式, 并为合理制定格宾网绞边强度设计值提供依据, 以网孔型号为  $60\text{ mm}\times 80\text{ mm}$  的格宾网片绞边拉伸结果为例, 图 5 所示为 A类绞边方式的格宾网片(网孔型号为  $60\text{ mm}\times 80\text{ mm}$ ) 的 3 种典型破坏模式曲线, 各破坏模式对应的网片破坏形态如图 6 所示.

1) 第一种破坏模式: 缠绕在端丝上的钢丝陆续被拉出破坏, 而网片内的网丝没有出现断裂. 对应的拉伸曲线见图 5 中曲线 1, 网片破坏形态见图 6(a). 由曲线 1 可知, 最大拉伸力为  $20.63\text{ kN/m}$ , 对应的最大负荷下伸长率为  $16.75\%$ , 此时缠绕在端丝上的部分钢丝被拉出, 网片内的拉力重新分配到其余缠绕在端丝上的绞边钢丝上, 故在达到最大拉伸力之后还能继续维持较高拉力, 直到大部分绞边钢丝被拉出而不能继续承受荷载为止.

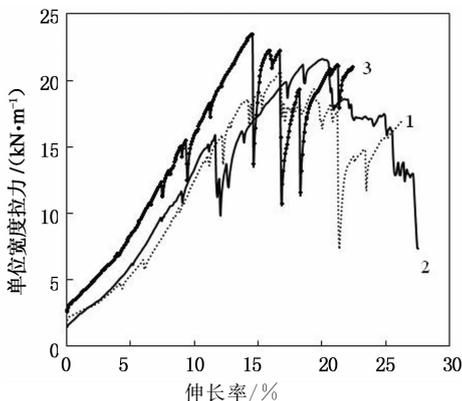


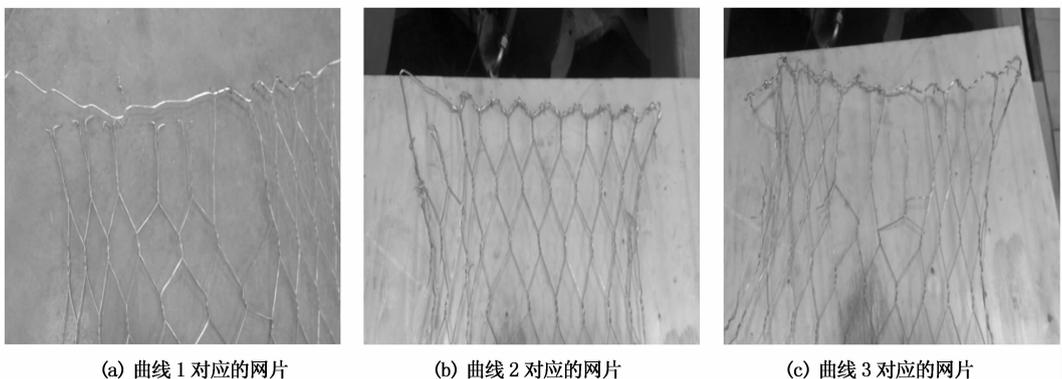
图 5 A类绞边方式的格宾网拉伸破坏的典型曲线  
Fig. 5 Typical selvage tensile failure curves of gabion meshes with type-A selvage way

2) 第二种破坏模式: 格宾网片端部的某根或几根绞边钢丝被拉出, 接着在其他位置发生网片内网丝被拉断而破坏. 对应的拉伸曲线见图 5 中曲线 2, 网片破坏形态见图 6(b). 由曲线 2 可知, 在伸长率达到  $11.95\%$  时, 拉伸力出现突然下降, 原因是网片端部绞边质量较差的钢丝被拔出, 导致拉伸力下降, 但其他位置的绞边质量较好, 网片能及时进行拉力重分配, 使得网片强度迅速恢复增长; 最大拉伸力为  $21.59\text{ kN/m}$ , 对应的最大负荷下伸长率为  $20.05\%$ , 此时网片内斜向钢丝发生断裂, 随后网片能够承受的荷载随断裂钢丝的增加而逐渐降低.

3) 第三种破坏模式: 网片内网丝被拉断而发生破坏, 缠绕在端丝上的钢丝没被拉出. 对应的拉伸曲线见图 5 中曲线 3, 网片破坏形态见图 6(c). 由曲线 3 可知, 最大拉伸力为  $23.44\text{ kN/m}$ , 对应的最大负荷下伸长率为  $14.57\%$ , 此时网片内的斜向钢丝被拉断, 绞边钢丝始终没有被拉出. 在拉伸荷载下网片内重复拉力重分配及钢丝断裂的过程直到网片失去承载能力. 此外, 由曲线 3 的拉伸力的 3 次明显落差可知网片内钢丝发生了 3 次断裂, 这与对应的网片破坏形态是一致的(如图 6(c)所示).

比较 3 种破坏模式的网片绞边拉伸曲线可知: 第三种破坏模式的最大拉伸力最大, 第二种破坏模式次之, 第一种破坏模式最小; 第二种破坏模式的最大负荷下伸长率最大, 第一种破坏模式次之, 第三种破坏模式最小.

由此可见, 绞边质量对绞边拉伸特性影响较大, 当绞合在端丝上的钢丝圈数够多、缠绕够紧密时, 在拉伸荷载作用下不会发生第一、二种破坏模式, 而是表现出第三种破坏模式, 即格宾网内网丝拉断破坏, 也可有效地避免在较小拉伸荷载作用下由于绞边破坏而使得网片强度不能充分发挥的情况.



(a) 曲线 1 对应的网片

(b) 曲线 2 对应的网片

(c) 曲线 3 对应的网片

图 6 格宾网的破坏形态  
Fig. 6 Failure modes of gabion meshes

### 2.3 不同网孔单元对格宾网片绞边拉伸特性的影响

为了比较不同网孔单元对格宾网片的绞边强度特性的影响,现将网孔型号为  $60\text{ mm}\times 80\text{ mm}$  和  $80\text{ mm}\times 100\text{ mm}$  的格宾网片发生相同破坏模式的绞边拉伸曲线进行对比,以第一、三种破坏模式为例,结果如图7所示。

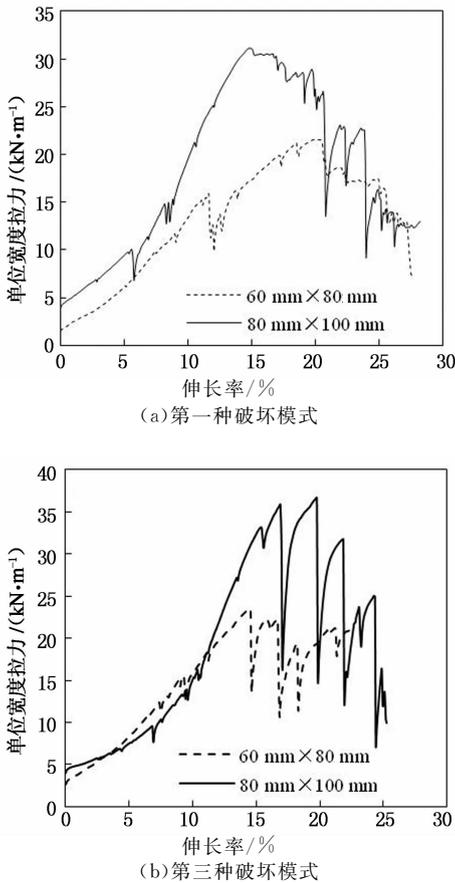


图7 不同网孔尺寸格宾网绞边拉伸试验曲线  
Fig. 7 Typical selvage tensile curves of gabion meshes with different mesh size

根据图7,经换算成单位宽度内拉伸应力可知,2种破坏模式下网孔型号  $80\text{ mm}\times 100\text{ mm}$  的网片最大拉伸应力与网孔型号  $60\text{ mm}\times 80\text{ mm}$  的网片差别不大(分别为0.991倍和1.049倍)。但由于换算所得单位宽度内受拉面积不同(网孔型号  $80\text{ mm}\times 100\text{ mm}$  的网片单位宽度内受拉面积较大),故不论是第一种破坏模式还是第三种破坏模式,网孔型号  $80\text{ mm}\times 100\text{ mm}$  的网片最大拉伸力均明显大于网孔型号  $60\text{ mm}\times 80\text{ mm}$  的网片(分别为1.44倍和1.53倍),由于2种网片的绞边质量相同,因此,相同破坏模式下2种网片绞边拉伸特性存在差异性,是网片钢丝直径和网孔尺寸不同的共同作用结果。而B类绞边方式的网片由于绞边质量较差,2种网

孔的网片均表现出第一种破坏模式,且最大绞边拉伸力均明显小于A类绞边方式网片的最大绞边拉伸力。可见,网片钢丝直径、网孔尺寸及绞边质量均是影响格宾网绞边拉伸力学特性的重要因素。

### 3 结论

1) 自行设计的绞边拉伸装置合理,具有简便性、可行性及实用性,能够用于加筋格宾网的绞边拉伸试验,测试格宾网的绞边强度特性。

2) 绞边质量主要与绞合在端丝上的网丝缠绕圈数、紧密程度有关,随着绞边质量的提高,格宾网的绞边拉伸特性会向网片拉伸特性转变,有利于格宾网强度的充分发挥。

3) 与A类绞边方式相比,B类绞边方式的格宾网片绞边拉伸强度明显偏小。A类绞边方式的格宾网绞边拉伸表现出3种典型破坏模式,B类绞边方式的格宾网绞边拉伸均表现出第一种破坏模式。

4) 格宾网具有拉力重分配特点,能够在较大伸长率情况下保持较高强度;绞边质量较好的格宾网用于加筋构筑物中,对变形具有良好的适应能力。

5) 钢丝直径、网孔尺寸及绞边质量均是影响格宾网绞边拉伸力学特性的重要因素。

### 参考文献

- [1] VISWANADHAM B V S, KÖNIG D. Centrifuge modeling of geotextile-reinforced slopes subjected to differential settlements[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2009, 27(2):77-88.
- [2] BOISSE P, GASSER A, HIVET G. Analyses of fabric tensile behaviour: determination of the biaxial tension-strain surfaces and their use in forming simulations[J]. *Composites Part A*, 2001, 32(10):1395-1414.
- [3] 杨广庆,周亦涛,周乔勇,等. 土工格栅加筋土挡墙试验研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(1):206-210.  
YANG Guang-qing, ZHOU Yi-tao, ZHOU Qiao-yong, et al. Experimental research on geogrid reinforced earth retaining wall[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(1):206-210. (In Chinese)
- [4] ROWE R K, HO S K. Determination of geotextiles stress-strain characteristics using a wide strip test[C]//Proceedings of Third International Conference on Geotextiles. Vienna: [s. n.], 1986:855-890.
- [5] 黄向京,许桂林,陈润夏. 有限元强度折减法在加筋格宾陡坡支挡结构中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(S2):3916-3922.  
HUANG Xiang-jing, XU Gui-lin, CHEN Run-xia. Applica-

- tion of strength reduction FEM to reinforce gabion retaining structure in steep slope[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(S2): 3916—3922. (In Chinese)
- [6] 杜勇立,高礼,杨果林. 不同掺土量加筋煤矸石的界面摩擦试验研究[J]. *湖南大学学报:自然科学版*, 2014, 41(4): 54—60. DU Yong-li, GAO Li, YANG Guo-lin. Experimental study of the interface friction characteristics between coal gangue and reinforcement with different qualities of soil[J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2014, 41(4): 54—60. (In Chinese)
- [7] PERKINS S W. Constitutive modeling of geosynthetics [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2000, 18(5): 273—292.
- [8] PARSONS M, STEPANOV E V, HILTNER A, *et al.* Effect of strain rate on stepwise fatigue and creep slow crack growth in high density polyethylene[J]. *Journal of Materials Science*, 2000, 35(8): 1857—1866.
- [9] 李作攀,储才元. 非织造布力学性能的模拟及其应用探讨[J]. *中国纺织大学学报*, 1998, 24(2): 1—4. LI Zuo-pan, CHU Cai-yuan. Investigation of mechanical properties simulation and its application for nonwoven fabrics[J]. *Journal of China Textile University*, 1998, 24(2): 1—4. (In Chinese)
- [10] 李俊伟,黄宏伟. 土工格室 HDPE 片材拉伸应变率相关特性[J]. *建筑材料学报*, 2008, 11(2): 47—51. LI Jun-wei, HUANG Hong-wei. Strain rate dependent tensile behavior of HDPE geocell strip[J]. *Journal of Building Materials*, 2008, 11(2): 47—51. (In Chinese)
- [11] 杨广庆,庞巍,吕鹏,等. 塑料土工格栅拉伸特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2008, 29(9): 2387—2391. YANG Guang-qing, PANG Wei, LV Peng, *et al.* Experimental study of tensile properties of geogrids[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(9): 2387—2391. (In Chinese)
- [12] 杨果林,王永和. 土工合成材料在加卸循环荷载作用下的应力应变特性研究[J]. *铁道学报*, 2002, 24(3): 74—77. YANG Guo-lin, WANG Yong-he. Study on stress-strain relationship of geosynthetics under cyclic loaded-unloaded [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2002, 24(3): 74—77. (In Chinese)
- [13] 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 on creep properties and viscoelasticity constitutive relationship for geogrids[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(2): 187—192. (In Chinese)
- [14] 匡希龙,王桂尧,徐晓宇. 长期荷载作用下土工合成材料蠕变特性的试验研究及计算模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(22): 3866—3870. KUANG Xi-long, WANG Gui-yao, XU Xiao-yu. Testing study on creep characteristics and calculation model of geosynthetics under long-term load[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(22): 3866—3870. (In Chinese)
- [15] SAWICKI A, KAZIMIEROWICZ F K. Creep behavior of geosynthetics[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 1998, 16(6): 365—382.
- [16] 林宇亮,杨果林,李 昀,等. 加筋土筋材在拉伸荷载作用下的力学特性[J]. *中国铁道科学*, 2009, 30(5): 9—14. LIN Yu-liang, YANG Guo-lin, LI Yun, *et al.* The mechanical characteristics of the reinforcements under tensile load [J]. *China Railway Science*, 2009, 30(5): 9—14. (In Chinese)
- [17] 林宇亮,杨果林,刘冬. 加筋土筋材拉伸力学特性与模型分析[J]. *中南大学学报:自然科学版*, 2011, 42(7): 2138—2146. LIN Yu-liang, YANG Guo-lin, LIU Dong. Tensile mechanical behaviors of reinforcements and model analysis[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2011, 42(7): 2138—2146. (In Chinese)
- [18] 黄向京,方薇,林宇亮,等. 格宾材料在红砂岩填料中的拉拔试验研究[J]. *公路交通科技*, 2009, 26(9): 27—31. HUANG Xiang-jing, FANG Wei, LIN Yu-liang, *et al.* Study on pull-out test of gabion reinforcement filled with red sandstone[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2009, 26(9): 27—31. (In Chinese)
- [19] BERGADO D T, VOOTTPRUEX P, SRIKONGSRI A, *et al.* Analytical model of interaction between hexagonal wire mesh and silty sand backfill[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2001, 38(4): 782—795.