

藏式石砌体受压应力-应变全曲线特征研究

滕东宇^{1,2}, 杨 娜¹

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 中科建(北京)工程技术研究院有限公司, 北京 100000)

摘 要: 为了研究藏式石砌体轴心受压下的变形特征和损伤机理, 对2组共8个三石叠放的棱柱体试件进行了轴心受压试验。2组试件分别反映普通毛石砌筑风格和藏式风格。得到了试件的开裂及破坏形态、变形特征和受压全过程应力-应变曲线。试验结果表明, 藏式石砌体具有阶段性变形和损伤特征, 应力-应变曲线与其他类型砌体存在差异。根据试验现象和试验数据提出了藏式石砌体轴心受压的开裂前应力-应变曲线本构关系表达式, 采用两段式二次多项式来表达。该表达式与实验结果吻合度较好。对试验的适用性进行了探讨, 提出了对后续试验的建议。

关键词: 石砌体; 抗压试验; 破坏模式; 本构关系; 棱柱体; 应力-应变曲线

中图分类号: TU363; TU317.3 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2017.08.0647

RESEARCH ON THE FEATURES OF COMPLETE STRESS-STRAIN CURVES OF TIBETAN-STYLE STONE MASONRY UNDER COMPRESSIVE LOAD

TENG Dong-yu^{1,2}, YANG Na¹

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. China Science Construction (Beijing) Institute of Engineering Technology Co., Ltd, Beijing 100000, China)

Abstract: To find out the deformation characteristics and damage mechanism of compressed Tibetan-style stone masonry, an experimental research was carried out on 2 groups (8 specimens in all) stacked prisms under axial compression. One group simulates normal rubble stone masonry and the other simulates the Tibetan-style stone masonry. The crack and deformation characteristics, the failure modes, and the complete stress-strain curves were obtained. The research results show that the Tibetan-style stone masonry have staged deformation and damage characteristics, and the complete stress-strain curve is different from other types of masonry. Based on the experimental phenomena and the experimental data, the compressive constitutive relationship before cracking of the Tibetan-style stone masonry is proposed. The equations can be expressed by a two-segment curve with quadratic polynomials. The constitutive relationship is close to the experimental results. The applicability of prism testing was discussed. Suggestions for follow-up tests were proposed.

Key words: stone masonry; compressive test; failure mode; constitutive relationship; prism; stress-strain curve

石砌建筑是藏式建筑中的一种主要结构形式。藏式石砌体不仅涵盖了布达拉宫、大小昭寺等著名文物建筑, 而且其工艺得以延续, 至今仍被许多西藏民用建筑建造时所采用。藏式石砌体中最常见的

一种类型, 为方石叠压片石的结构, 各层石材基本保持水平, 具有一定的分布规律性和周期性, 同时又兼具毛石砌体中块材形状大小随机的特征。此外, 藏式石砌体往往更为厚重, 且外墙面向上内收,

收稿日期: 2017-08-24; 修改日期: 2018-02-05

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51778045); 北京自然科学基金重点项目(8151003); 国家自然科学基金优秀青年基金项目(51422801)

通讯作者: 杨 娜(1974—), 女, 辽宁人, 教授, 工学博士, 博导, 主要从事钢结构和古建筑研究工作(E-mail: nyang@bjtu.edu.cn).

作者简介: 滕东宇(1986—), 男, 吉林人, 工程师, 博士生, 主要从事古建筑和装配式建筑研究工作(E-mail: tengdongyu@foxmail.com).

这使砌筑高大石墙成为了可能。这些都与常见乱毛石砌体有明显的区别。藏式石砌体中的粘结材料一般采用黄土加水拌合而成的泥浆,泥浆层厚度较厚但强度偏低,压缩性强。典型的藏式石砌墙体如图1所示,墙体局部照片及平面内分布简化示意图如图2所示。国内外目前关于藏式建筑的结构性能的研究成果较少,石砌体的损伤衍生和演化机理不甚明确。本构关系作为砌体结构有限元分析的基础,一直是各类砌体结构研究的热点,试验设备和方法的新进展为获得砌体受压状态下的应力-应变全曲线提供了可能。对藏式石砌体的结构性能进行研究,在文物保护和民用建筑安全性评估方面都有重要的意义和迫切的需求。



图1 典型的藏式石砌墙体

Fig.1 Typical Tibetan-style stone masonry



图2 藏式石砌墙体细部照片及平面内分布简化示意图

Fig.2 Detail photo of Tibetan-style stone masonry and simplified in-plane distribution

由于砌体材料和砌筑方法存在多样性,目前对于砌体材料力学性能研究的试验方法和试件尺寸尚无统一的结论。为高效获取砌体在不同受力状况下的本构关系,一些国家的相关规范标准^[1]推荐采用棱柱体作为标准试件进行试验研究,部分学者通过三层堆叠棱柱体试件对灌孔砌块砌体进行了抗压性能试验研究^[2]。虽然小尺寸试件在体现砌体分布特征方面有一定的局限性,但仍可反映出块材和粘结材料的相互作用机理,对于研究砌体的力学性能和损伤机理有一定的参考价值^[3],在获得本构关系方面也更具优势。在毛石砌体的研究中有学者采用三石叠放的棱柱体进行试验^[4-7],研究成果应用于力学性能参数与承载力评估、数值模拟等多个领

域。目前毛石历史建筑的抗压性能研究仍以整片墙体试件或短柱试件的单轴试验为主^[8-10],对于获得细观损伤现象和本构关系模型有一定的局限性。

本文的研究中设计了两种三石叠放的棱柱体试件,试件形式考虑了藏式石砌体的结构特征。通过轴心受压试验获得了试件的受压全过程应力-应变曲线,结合对试验现象的观察,分析了藏式石砌体的阶段性损伤演化机理,获得了初次开裂前的受压本构关系表达式。

1 试验概述

1.1 试件设计

本文的研究中,共设计制作了2组试件,每组4个试件,第一组为三块形状接近的方石堆叠,与其他学者的试件相似^[4-6],以下简称常规棱柱体,即后文P组(prism组)试件;第二组为两块方石夹一块片石,以下简称特种棱柱体,即后文SP组(special-prism组)试件。其中特种棱柱体试件(SP组)更接近藏式石砌体的方石层与片石层交替叠放的特征。石材为采自西藏拉萨的花岗闪长岩,用石工锤加工成表面粗糙的六面体,泥浆采用西藏拉萨的黄土加水拌制。

为了保证与试验机加载平台的均匀接触,将预备置于顶部和底部的石块的一个平面用钢锯锯平。试件叠放时不断调整水平灰缝的局部厚度并用水平尺测量,使试件成型时即达到上下表面平行。棱柱体试件尺寸示意图和照片见图3,各试件的细部尺寸见表1。成型后的各试件总高度在230 mm~335 mm,高宽比为2.09~3.35,该值的选择参考了部分学者的研究^[11]和ASTM C469^[12]、GB/T 50129^[13]的相关规定,同时为了可以适配加载设备。混凝土领域的研究同样表明^[14],高宽比大于2.0时,边界效应的影响已不大。

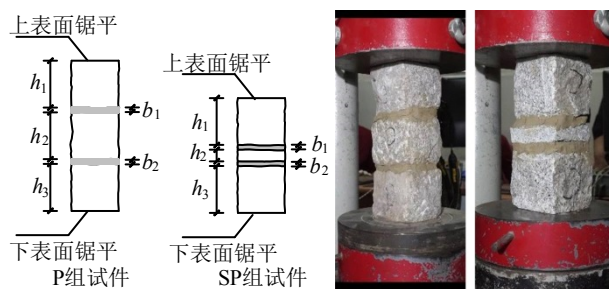


图3 棱柱体试件尺寸示意图和照片

Fig.3 Geometry and photos of specimens

表 1 棱柱体试件细部尺寸
Tabal 1 Detailed dimensional parameters of specimens

试件类型	试件编号	块材高度/mm			泥浆层厚度/mm		总高度/mm	截面尺寸/mm	高宽比
		h_1	h_2	h_3	b_1	b_2			
常规 棱柱体	P1	100	100	100	10	10	320	100×100	3.20
	P2	105	105	105	10	10	335	100×100	3.35
	P3	100	100	90	10	10	310	100×110	3.10
	P4	95	90	90	10	10	295	100×110	2.95
特种 棱柱体	SP1	100	30	115	10	10	265	100×100	2.65
	SP2	90	25	95	10	10	230	110×110	2.09
	SP3	100	25	100	10	10	245	110×110	2.23
	SP4	100	20	100	10	10	250	100×110	2.50

1.2 加载和采集机制

为了采集试件应力-应变全曲线的下降段，一般有两种方法^[14-16]：采用电液伺服阀控制的刚性试验机进行试件等应变速度加载，或在普通试验机上附加刚性元件。本次试验选用的试验机有较大的刚度，并选用等应变速度加载，加载速度较慢，除 P1 试件采用了 0.2 mm/min 的加载速度外，其余 7 个试件均采用 0.3 mm/min 的加载速度。

将棱柱体置于压力机的上、下加载平台中间，加载开始后，上平台保持不动，下平台向上运行，加载系统内置压力传感系统，自动采集试件承受的压力，以及下平台的位移值，该位移值即可视为棱柱体的垂向变形量。

2 试验现象

试验表明，各试件的开裂现象和破坏过程较为类似，P 组常规棱柱体与 SP 组特种棱柱体并没有本质区别。结合试验现象和应力-应变曲线，可发现试件受压全过程可分为 4 个阶段，典型的试件(P3)受压全过程曲线及对应各受力阶段示意图如图 4 所示，图中的应力值为压力除以横截面面积得到，应变为试件的垂向压缩量除以初始高度得到。其余试件包括 SP 组试件的各阶段现象与之类似。

试件受压过程的四个阶段如下所述。

阶段 I，灰缝压缩阶段。各试件均包含两层较厚的、具备较强压缩性质的固化泥浆，随着荷载的增大，泥浆层产生肉眼可见的厚度减小现象，边缘的泥浆被挤出、破碎并掉落。同时石块没有任何的变化和现象。阶段 I 的应力-应变曲线形状接近于上凸的二次抛物线，与常见的砂浆类材料的试验现象类似。该阶段历时较短，当应力-应变曲线出现反弯点后，可认为进入第二阶段。

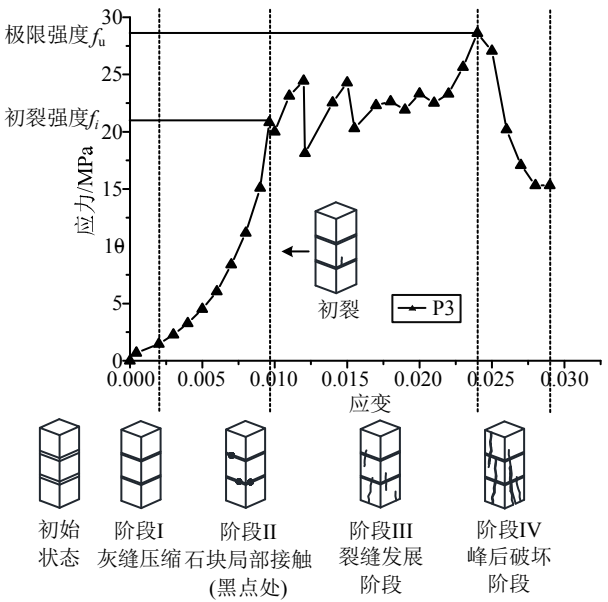


图 4 P3 试件的全过程曲线及各阶段损伤特征
Fig.4 Stress-strain curve of P3 and damage characteristics in every single stage

阶段 II，石块与泥浆共同压缩阶段。试件开始有石块受挤压所造成的响声，表明由于泥浆被压缩至极限，石块已经开始受力。泥浆是一种极易变形的材料，压缩的同时产生水平向扩张，水平向扩张会受到石块的约束。泥浆的受力最终达到一种极限状态，表现为泥浆层被压缩至很薄，除了已被挤出的部分，其余泥浆由于受石块约束不再横向扩张，且表现出“硬化”的状态，将荷载传递到石块。该状态可在试验过程中被观察到，且试验后的泥浆层状态也验证了上述分析。泥浆达到极限后，石块承压逐渐增大，同时在上、下表面承受反作用力带来的拉力。由于石块的上、下表面(除去与加载平台接触的试件顶面和底面)都是粗糙不平的，各点的合力方向各异，石块表面处于复杂受力状态并伴有应力集中，于是在远低于石材本身的抗压强度(石材强度

约为 100 MPa, 试件初次开裂时的应力为 13.5 MPa~34.1 MPa)时就发生了开裂, 初次开裂的位置发生于水平灰缝附近的石块上表面或下表面。从应力-应变曲线来看, 该阶段曲线的斜率随荷载增大而增大, 曲线上扬, 即试件的刚度有所提高。初次开裂的瞬间能量被释放掉一部分, 曲线上表现为应力值骤降。初裂发生后进入第三阶段。

阶段Ⅲ, 裂缝产生及扩展阶段。第一条裂缝沿着纵向发展且宽度增大, 同时有新裂缝产生, 新裂缝均在灰缝附近随机出现。部分裂缝会持续上下延伸且宽度增大, 甚至贯穿多个石块, 该类不稳定的裂缝成为试件的主裂缝。每次新裂缝的出现在应力-应变曲线上表现为应力值骤降, 随后继续爬升, 因此本阶段的应力-应变曲线的走势为多次的震荡, 有数个应力极值, 其中最大值即为试件的极限抗压强度, 该值不一定是最后一个极值。该阶段曲线的骤降现象反映出岩石材料的脆性特征, 与加载设备和加载方式也有一定的关系, 试验设备具有较大的刚度且采用了缓慢的等应变匀速加载方式, 保证了试件不至于被积蓄的巨大变形能瞬间破坏, 但由于未设置辅助的压力缓冲设备, 依然无法避免能量瞬间释放的影响。这种受持续增大的荷载造成瞬间开裂的工况与真实工况是较为类似的, 具有一定的参考价值。

阶段Ⅳ, 峰后阶段。石块分裂成多个短柱, 部分短柱明显倾斜, 有失稳迹象。应力-应变曲线中的表现为出现平直段或下降段, 表明试件持荷反力不再增大, 此时试件随时有离析塌落可能, 为防止损伤试验设备各试件均在完全破坏以前中止了加载。

典型的试验过程照片如图 5、图 6 所示。常规棱柱体试验后, 三块方石块基本都裂成多块。特种棱柱体试验后, 上下两块方石块基本裂成多块, 中间的片石则呈粉碎状态。两组试件中的水平灰缝在试验结束后均存有残余的泥浆薄片, 大小不一, 厚度不均, 厚度多在 5 mm~8 mm。

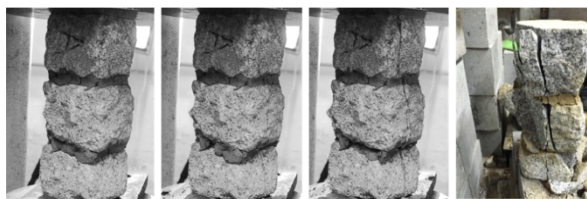


图 5 普通棱柱体典型试验过程照片

Fig.5 Typical photos of normal prism in compressive procedure



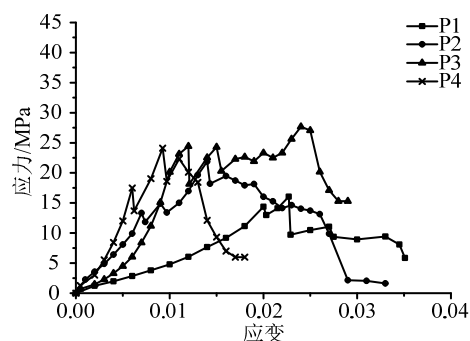
图 6 特种棱柱体典型试验过程照片

Fig.6 Typical photos of special prism in compressive procedure

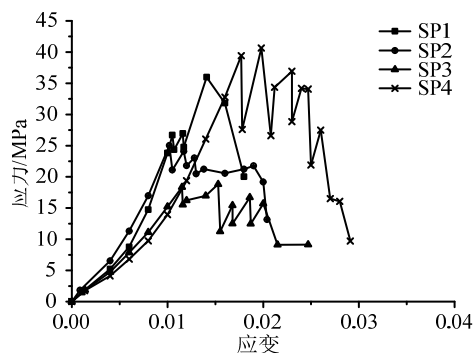
3 试验结果及分析

3.1 实测应力-应变全曲线

试验得到的两组试件的全过程应力-应变曲线如图 7 所示, 如前所述, 图中应力值和应变值实际分别为平均应力值和平均应变值。



(a) 常规棱柱体



(b) 特种棱柱体

图 7 应力-应变曲线

Fig.7 Stress-strain curve

各试件的应力-应变曲线形状各异, 但均有一个值得注意的特征: 在曲线较为平滑的初期阶段, 曲线的切线斜率先减小后增大, 且减小的区段明显小于增大的区段, 这种现象说明试件在受压过程中刚度先有短时间的下降, 随后有较长时间的增长, 试件被“压实”。随后进入不稳定的震荡阶段, 每次震荡对应于裂缝的出现。

初次开裂对应的初裂强度和代表最大承载能力的极限强度, 以及各自对应的应变值都有较大差异。部分原因为, 图中所示的均为整体尺度, 泥浆

厚度等局部尺度的影响无法在图中显示。另外,各试件中石块粗糙面的随机性带来了不同的复杂应力状态的随机性,也导致了初裂强度和极限强度的差异。局部尺度的影响和局部接触的差异性可通过归一化的方式削减。因此,如若分清楚各个受力阶段及其特性,对数据进行适当的归一化处理后,在试件开裂前的应力-应变曲线形状较为接近,有明显的规律性。

3.2 理想化本构关系

从各试件的实测受压应力-应变全曲线可以看出,阶段Ⅰ、Ⅱ的应力随应变单调上升;阶段Ⅲ表现为上升-骤降-再次上升-骤降的反复过程,阶段Ⅳ为平直段或下降段。后两阶段中砌体裂缝处于不稳定发展状态,并有一定的随机性。实际工程中墙体所受的压力荷载很少能达到后两阶段的应力水平,其应用性研究价值较小。本节分析了石块开裂前的藏式石砌体两阶段本构关系。

1) 阶段Ⅰ(灰缝压缩)的本构关系表达式。

首先对泥浆进行轴心受压试验,分析其本构关系表达式。参考《建筑砂浆基本性能试验方法》(JGJ70)^[17]建议的试验方法制作纯泥浆棱柱体试件,所用泥浆与石砌棱柱体中泥浆为相同的材料。结果表明泥浆在达到极限状态前的应力-应变曲线形状接近于上凸的二次抛物线。对应力和应变进行无量纲化处理后,采用如下二次多项式形式对泥浆上升段本构关系进行拟合:

$$y = Ax^2 + Bx \tag{1}$$

式中, $y = \sigma / \sigma_{m0}$, $x = \varepsilon / \varepsilon_{m0}$, σ 由压力除以横截面积得到, ε 由压缩量除以初始高度得到。 σ_{m0} 、 ε_{m0} 为泥浆试件的极限压应力和极限压缩应变。采用二次多项式拟合的效果较好,相关系数 R^2 值为 0.9575。

然后,假定石砌棱柱体试件在本阶段的全部变形由泥浆提供。同样进行无量纲化处理,并利用

式(1)进行曲线拟合,需要注意的是此时自变量 $x = \varepsilon_n / \varepsilon_{m0}$, ε_n 为砌体试件的压缩量除以泥浆层总厚度, ε_{m0} 由纯泥浆棱柱体试验获得。因变量仍为 $y = \sigma / \sigma_{m0}$ 。将同组构件的结果进行曲线拟合,可发现二次多项式拟合效果较好,相关系数 R^2 值分别为 0.9529 和 0.9476。如图 8 所示。

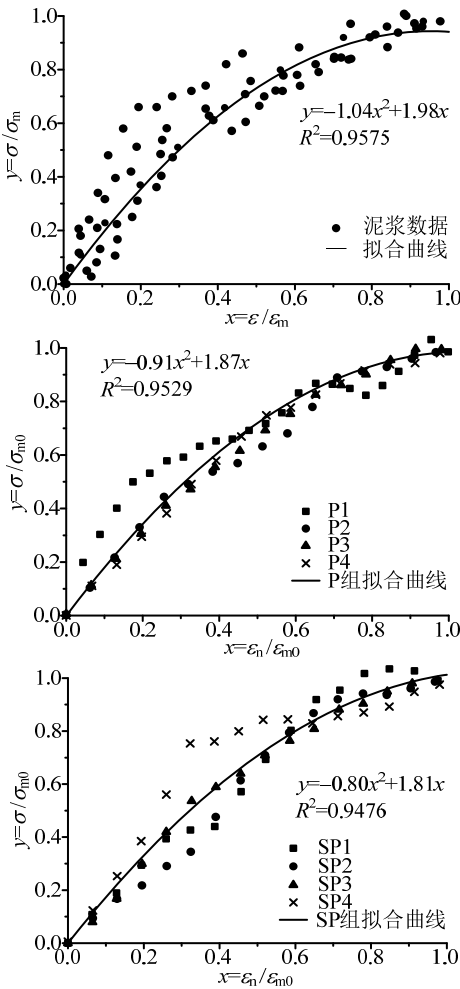


图 8 泥浆达到极限前纯泥浆、常规棱柱体和特种棱柱体归一化应力-应变曲线

Fig.8 Normalized stress-stain curve of earthen mortar prisms, normal prisms and speical prisms before earthen mortar's ultimate

表 2 其他研究者提出的本构关系公式及对比

Tabal 2 Constitutive relations proposed by others and comparison

参考文献	试件类型	上升段应力应变曲线形状	公式表达式	A	B
本文试验	纯泥浆	上凸曲线	$y = Ax^2 + Bx$	-1.04	1.98
	普通棱柱体	上凸曲线		-0.91	1.87
	特种棱柱体	上凸曲线		-0.80	1.81
[18]	粘土砂浆	上凸曲线	-	-	-
[19]	水泥砂浆	上凸曲线	$y = Ax^2 + Bx$	-0.93	1.91
[4]	石砌棱柱体(水泥砂浆)	直线(刚度随荷载增大略降低)	-	-	-
[20]	砖砌体(水泥砂浆)	上凸曲线	$y = Ax^2 + Bx$	-1	2
[21]	砖砌体(水泥砂浆)	上凸曲线	$y = \frac{x}{0.3x^2 + 0.4x + 0.3}$	-	-

纯泥浆棱柱体、普通石砌棱柱体和特种石砌棱柱体在泥浆达到极限压缩应变之前的应力-应变曲线形状类似,用二次多项式拟合的曲线表达式也较为接近。在泥浆到达极限应变时,石砌棱柱体试件与纯泥浆试验的压应力值也较为接近。因此前述假定可以得到验证,即在试件的初始受力阶段,全部压缩变形由泥浆提供。

许多学者曾对不同种类的砂浆或砌体进行了本构关系的研究,本试验的结果与其他研究结果的对比见表2。对比可发现,藏式石砌体在初始阶段的应力应变曲线与其他类型砌体是类似的。

基于前述假定,本阶段可以将泥浆变形(局部尺度)与棱柱体变形(整体尺度)建立联系:

$$\Delta d = \varepsilon_n \times d_n = \varepsilon \times d \quad (2)$$

式中: Δd 为试件压缩量; ε_n 和 ε 分别为泥浆和试件的平均压缩应变; d_n 和 d 分别为泥浆层总高度和试件总高度。通过对式(2)进行变形,即可获得用藏式石砌棱柱体整体压缩平均应变表示的本构关系表达式:

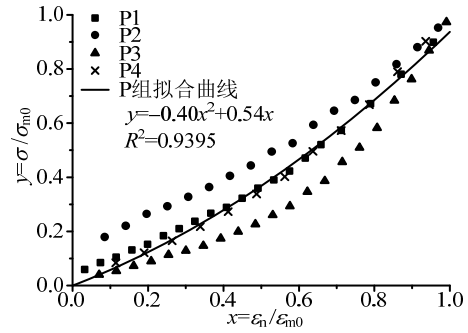
$$\frac{\sigma}{\sigma_{m0}} = A \cdot \left(\frac{d}{d_n} \right)^2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{m0}} \right)^2 + B \cdot \left(\frac{d}{d_n} \right) \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{m0}} \quad (3)$$

A 、 B 可以取值为-1、2或-0.8、1.8。 ε_{m0} 与 σ_{m0} 为泥浆的固有参数,可用泥浆试验获得的结果作为常值代入。

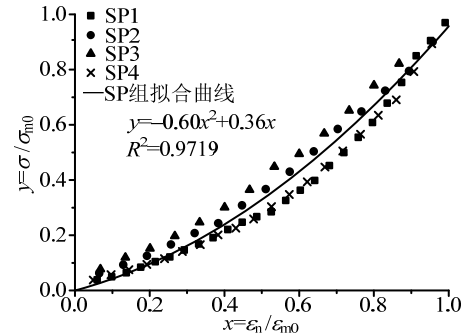
2) 阶段 II (石块与泥浆共同受力) 的本构关系表达式。

对试件从泥浆达到极限应变开始、直到第一道裂缝出现的应力-应变数据进行归一化处理,自变量变为 $\varepsilon/\varepsilon_m$, 因变量变为 σ/σ_m 。 ε 为试件的应变,由试件的压缩量除以试件高度得到, ε_m 为试件初裂时的应变。 σ 为试件承受的平均压应力, σ_m 为试件初裂时的平均压应力,其数值等于初裂强度值 f_i 。分别对普通棱柱体和特种棱柱体两组数据进行归一化处理,不同试件的曲线形状类似,接近下凸的二次抛物线,采用 $y=Ax^2+Bx$ 类型的二次多项式依然可以获得较好的拟合结果,相关系数 R^2 值分别为 0.9395 和 0.9719。如图9所示。

由无量纲化处理的基本原理可知,本阶段的上扬曲线在理想状态下应有 $y(0)=0$, $y(1)=1$, 即 $A+B=1$, A 、 $B \in (0,1)$ 。常规棱柱体组拟合获得的 A 、 B 值为 0.40 和 0.54,特种棱柱体组则为 0.60 和 0.36。 $A+B \approx 1$, 主要由试验数据拟合的系统误差造成。 A 、 B 值对曲线类型的显著影响表现为, A/B 值越小,



(a) 第二阶段常规棱柱体



(b) 特种棱柱体

图9 归一化应力-应变曲线

Fig.9 Normalized stress-strain curve

则曲线越接近于直线。实际上本文试验中获得的两组参数,其应力-应变曲线非常接近。由于阶段 I 历经的时间较短,真实的藏式石砌体在砌筑过程中通常由于墙体的自重作用已完成了泥浆的压缩过程,因此在数值计算中建议以式(4)作为藏式石砌体的初裂前本构关系表达式:

$$\frac{\sigma}{\sigma_m} = 0.60 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_m} \right)^2 + 0.36 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_m} \quad (4)$$

本阶段的试验现象和拟合结果可通过与其他学者的研究成果对比获得验证。葡萄牙学者 Vasconcelos 制作了多个三石叠放棱柱体试件进行轴心受压试验^[4],其中最接近本文的试件(图10中 PR_SS 曲线)组成为3块锯切方形花岗岩夹两道水平粘土灰缝,在试验中同样获得了显著上扬形状的应力-应变曲线上升段,与之对应的是其他试件的上升段曲线都非常接近于直线。本文试验和 Vasconcelos 的试验均表明,在块材与粘结材料的刚度相差巨大、粘结材料具有较强压缩性的条件下,块材和粘结材料在抵抗压力方面协同受力且伴随着粘接材料的不断压实,应力-应变曲线和本构关系表达式会与其他类型砌体(如最典型的砖砌体)存在明显差异。藏式石砌体的构成恰恰符合上述特征,再次体现了对藏式石砌体进行单独、系统研究的必需性和

迫切性。

3.3 弹性模量和极限强度

砌体弹性模量的取值有如下几种方法：国内一般取 0.4 倍极限强度对应的应力-应变点和原点的割线正切^[19,21]；国外常利用应力-应变曲线中 0.6 倍极限强度和 0.3 倍极限强度所对应的两点做割线的方法^[4,11]。将上述两种方法计算得到的结果一并列出。抗压强度与弹性模量的结果汇总见表 2。各试件的初裂强度与极限强度比值 f_i/f_u 基本大于 0.6，即表明试件压应力达到 0.6 倍极限强度时基本未出现开裂，这样的结果避免了割线取值区域包含曲线震荡阶段的应力突变而造成数值计算偏差。

试验结果表明，各试件的强度和弹性模量存在

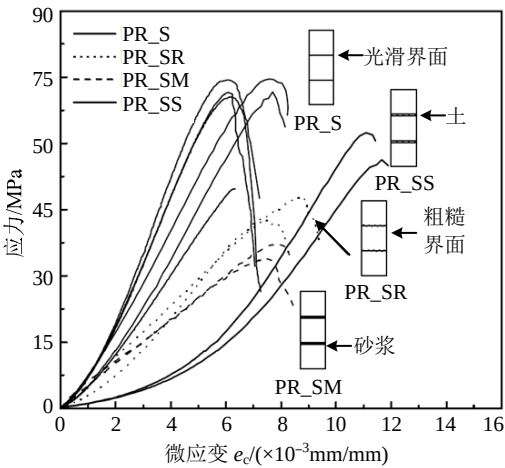


图 10 参考文献[4]中各种石砌棱柱体的应力-应变曲线
Fig.10 Stress-stain diagrams of various stone masonry prisms in reference [4]

表 2 石砌棱柱体试件的强度和弹性模量试验结果

Tabal 2 Compressive strength and elastic modulus of specimens

试件类型	试件编号	初裂强度 f_i /MPa	极限强度 f_u /MPa	f_i/f_u	弹性模量 $E_{0.0.4}$ /MPa	弹性模量 $E_{0.3.0.6}$ /MPa
常规 棱柱体	P1	14.3	16.2	0.88	546	731
	P2	13.5	23.6	0.57	1764	2131
	P3	20.8	28.6	0.73	1491	3647
	P4	17.9	24.3	0.74	2537	4084
	平均值(标准差)	16.6(3.38)	23.2(5.15)	0.73(0.13)	1584(822.04)	2648(1527.98)
特种 棱柱体	SP1	26.3	36.2	0.73	1868	3966
	SP2	25.0	25.2	0.99	1781	2445
	SP3	18.3	19.2	0.95	1297	1707
	SP4	34.1	41.2	0.83	1513	2754
	平均值(标准差)	25.9(6.48)	30.9(10.05)	0.87(0.12)	1615 (260.48)	2718 (940.71)

较明显的随机性，即使各组试件中的块材和泥浆强度基本一致。造成该现象的原因为，藏式石砌体中石块的表面粗糙不平，石材的开裂主要由于水平面的复杂应力状态和应力集中，石材和泥浆强度不再是最主要的影响因素。

两种方法计算得到的弹性模量结果中， $E_{0.3,0.6}$ 明显高于 $E_{0.0.4}$ 。不难分析其中原因：在试件受力的初期，主要是泥浆发生压缩变形， $E_{0.0.4}$ 包含了该阶段的影响； $E_{0.3,0.6}$ 所处的阶段石块和泥浆共同受力，曲线斜率在增大。真实砌体在砌筑完成后很可能已完成了泥浆压缩过程，因此 $E_{0.3,0.6}$ 更适合表征藏式石砌体的弹性模量，参考区间为 731 MPa~ 4084 MPa。

需要特别指出的是，藏式石砌体的弹性模量与各材料层厚度和相对比例密切相关。显然棱柱体试件的泥浆分布、石材与泥浆的体积比例与真实墙体有较大的差异。因此本文试验中对弹性模量的探讨主要是一种定性的规律性研究，该值能否适用于藏式石砌体的计算与评估尚待进一步的研究，并需要

大尺寸试件抗压试验予以必要的补充。

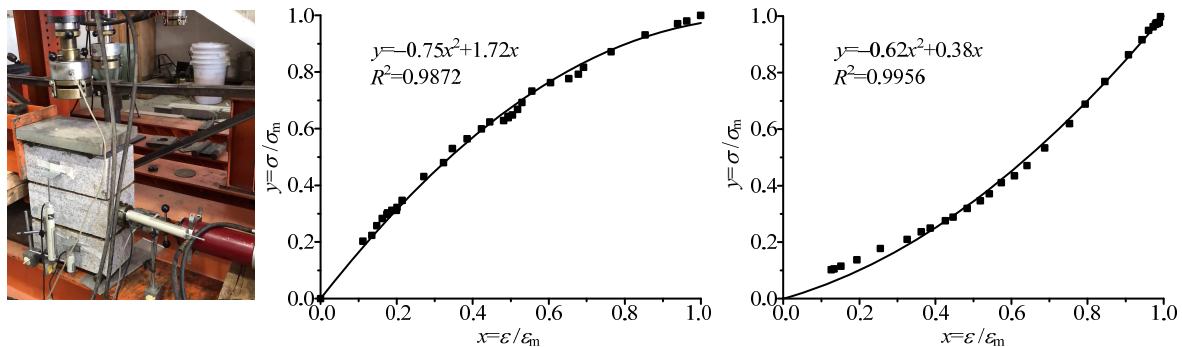
特种棱柱体的初裂强度、极限强度大体上高于常规棱柱体，试验结束后中间片石基本呈粉碎状态。由此推断，藏式石砌体的方石叠压片石的分布特征可以使岩石破裂的能量释放方向更趋近于片石，片石的形状特征和厚泥浆层的存在又对试件的稳定性有利，因此藏式石砌体特有的方石叠压片石的分布特征对整体受力有利。

4 叠放棱柱体试验适用性探讨

为了研究试件的沿通缝抗剪能力，进行了双剪试验。双剪试验在对试件施加水平荷载前先施加压力荷载，此过程中同样可见上述两段式应力-应变曲线。该双剪试验采用了三块尺寸为 400 mm×200 mm×150 mm 的六面体花岗岩叠放的试件，水平灰缝的厚度约为 15 mm，石块和泥浆层厚度与真实墙体接近，可视为足尺棱柱体试件。泥浆同样使用西藏黄土材料。采用了同样的归一化处理和数据拟

合方法,得到的两阶段中的 A 、 B 值分别为 -0.75 、 1.72 和 0.62 、 0.38 , 相关系数 R^2 值分别为 0.9872 和 0.9956 。足尺棱柱体试验数据的结果与前述棱柱

体相当接近,一定程度上验证了棱柱体试验结果的可靠性。双剪试验布置图和受压两阶段归一化应力-应变曲线拟合结果如图 11 所示。



(a) 双剪试验布置图 (b) 受压两阶段归一化应力-应变曲线拟合结果 (c) 受压两阶段归一化应力-应变曲线拟合结果

图 11 双剪试验布置图及受压两阶段归一化应力-应变曲线拟合结果

Fig. 11 Setup of triplet shear test and normalized stress-stain curves obtained by triplet shear test (in compressing process)

真实砌体的受压性能表现受多种因素影响,主要包括:块材与胶凝材料的尺寸、材料分布、材料强度、砌筑水平等。藏式石砌体由于其砌筑时就地取材,随取随用,采用手工调整,造成了石材形状和灰缝尺寸具有较大的随机性,并由于泥浆材料的特殊性,使得藏式石砌体受压性能具有较强的不确定性。在这样的背景下,设计一种完全体现多因素影响的代表试件有一定的难度,即使采用足尺试件,也势必需要较大的试验数量以减小各不确定性因素的影响。

本文试验所采用的试件与真实墙体仍有较大差异,主要体现在石材与水平灰缝的高度比例、截面厚度方向的尺寸差异,以及未能体现竖向灰缝影响等方面。但三石叠放的棱柱体试件的优势在于,可以从细观角度观察石砌体的受压性能表现和损伤机理,根据试验现象结合应力-应变曲线判断棱柱体开裂的原因以及所处的状态。不同尺寸的棱柱体拟合结果与试验数据相符较好,表明归一化的两段式二次多项式本构模型具有应用价值。

需要说明的是,本次试验是对藏式石砌体受压性能的探索性研究。在试件数量较少的情况下观察到了不同阶段中藏式石砌体的不同变形和损伤特征,并获得了拟合效果良好的两阶段应力-应变曲线本构关系表达式。因此叠放棱柱体试验具有一定的适用性,可作为研究石砌体抗压性能的重要手段。

如前所述,由于多种不确定影响因素的存在,后续需要增加试验的样本数量以获得更为准确可靠的本构关系模型,更好的发挥棱柱体试验便捷高

效的优势。同时改进试验方法,增加对照组,考虑不同石材厚度、不同砌筑方式的影响。为了减小加载板的边界约束影响,可采用 5 块以上的叠放棱柱体。后续应进行足尺墙体受压试验予以验证。

5 结论

虽然石砌棱柱体尺寸较小,在反映真实石墙的受压的分崩离析效果、石块错缝排布方面有一定的局限性,但其本质上仍是石材和粘结材料的组合体,可作为研究石砌体的变形和损伤机理、本构关系的重要参考,本文通过两种试件的棱柱体试验获得了以下结论:

(1) 通过对棱柱体试件进行受压全过程试验,揭示了藏式石砌体在受压状态下的损伤衍生和演化机理,可分为 4 个阶段: I、泥浆压缩变形; II、石块与泥浆协同受力直到石块初裂; III、裂缝发展和新裂缝产生; IV、石块裂成多个短柱,短柱失稳后砌体失去承载能力。

(2) 藏式石砌体的受压应力-应变全曲线具有不同于其他砌体的特征。在较短的初期受力阶段,应力-应变曲线与其他常见类型砌体类似,呈上凸抛物线形状。随后在一个较长的阶段中,应力-应变曲线切线斜率增大,与其他类型砌体不同。

(3) 藏式石砌体初裂前采用两段式二次多项式 $y = Ax^2 + Bx$ 类型的方程作为本构关系表达式,与试验结果有较好的拟合效果。 y 和 x 为归一化的压应力和压缩应变。模拟藏式砌筑风格的棱柱体试验结果表明,两段曲线中 A 、 B 可分别取值为 -0.8 、 1.8

和 0.6、0.4, 曲线的分界点为泥浆的极限应变点。

(4) 为体现藏式石砌体特征而设计的特种棱柱体组试件的初裂和极限强度平均值高于常规棱柱体组, 结合试验后石块的状态, 推断出藏式石砌体的方石叠压片石的分布特征可以使岩石破裂的能量释放方向更趋近于片石, 片石的形状特征和泥浆层的存在又对试件的稳定性有利, 因此藏式石砌体特有的方石叠压片石的分布特征对整体受力有利。

(5) 叠放棱柱体试验可作为研究石砌体抗压性能的重要手段, 同时需要足尺试验予以补充和验证。

参考文献:

- [1] 施楚贤. 砌体结构理论与设计[M]. 第三版. 北京: 中国建筑工业出版社. 2014: 50—53.
Shi Chuxian. The theory and design of masonry structure [M]. 3rd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014: 50—53. (In Chinese)
- [2] 黄靓, 王辉, 陈胜云. 低强度砂浆灌孔砌块砌体抗压性能试验研究[J]. 工程力学, 2012, 29(10): 157—161.
Huang Liang, Wang Hui, Chen Shengyun. Experimental research on compressive behavior of grouted block masonry with low-strength mortar [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(10): 157—161. (in Chinese).
- [3] Page A W, Shrive N G. A critical assessment of compression tests for hollow block masonry [J]. Masonry International, 1988, 5(2): 64—70.
- [4] Vasconcelos. Experimental investigations on the mechanics of stone masonry: Characterization of granites and behavior of ancient masonry shear walls [D]. Braga, Portugal: University of Minho. 2005.
- [5] Vasconcelos G, Lourenço P B. Experimental characterization of stone masonry in shear and compression [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23 (11): 3337—3345.
- [6] VenuMadhava Rao K, Reddy B V V, Jagadish K S. Strength characteristics of stone masonry [J]. Materials and Structures, 1997, 30(4): 233—237.
- [7] Nart M Naghoj, The effect of height-to-width ratio on the strength of concrete-backed stone masonry prisms [J]. Contemporary Engineering Sciences, 2013, 6: 261—271.
- [8] Pinho F F S, Lúcio V J G, Baião M F C. Experimental analysis of rubble stone masonry walls strengthened by transverse confinement under compression and compression-shear loadings [J]. International Journal of Architectural Heritage, 2018, 12 (1): 91—113.
- [9] Almeida C, Guedes J P, Arêde A, et al. Physical characterization and compression tests of one leaf stone masonry walls [J]. Construction and Building Materials, 2012, 30 (3340): 188—197.
- [10] 彭斌, 刘卫东, 杨伟波. 在役历史建筑砌体承重墙抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2009, 26(12): 112—126.
Peng Bin, Liu Weidong, Yang Weibo. Experimental investigation on seismic behaviors of load-bearing masonry walls in in-service historical architecture [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(12): 112—126. (in Chinese)
- [11] Aguilar R, Montesinos M, RamírezMechanical E, et al. Testing in adobe bricks and earthen mortar from the archaeological complex of Huaca de la Luna in Perú [C]. Proceedings of the 16th International Brick and Block Masonry Conference, Padova, Italy, 26—30 June 2016.
- [12] ASTM C469/C469M-14, Standard test method for static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete in compression [S]. ASTM International, West Conshohocken, 2014.
- [13] GB/T 50129-2011, 砌体基本力学性能试验方法标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
GB/T 50129-2011, Standard of experiment method for mechanical properties of masonry [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [14] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 19.
Guo Zhenhai, Shi Xudong. Reinforced concrete theory and analyse [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 19. (in Chinese)
- [15] 秦士洪, 倪校军, 曹桓铭, 等. 蒸压粉煤灰砖砌体应力-应变全曲线研究 [J]. 建筑结构学报, 2010, 31(8): 94—100.
Qin Shihong, Ni Xiaojun, Cao Hengming, et al. Research on stress-strain in full curves of autoclaved fly ash brick masonry [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(8): 94—100. (in Chinese).
- [16] 阿肯江·托呼提, 沙吾列提·拜开依, 曹耿. 土坯砌体单轴受压本构模型研究 [J]. 工程力学, 2012, 29(12): 295—301.
Akenjiang TUOHUTI, Sawulet BEKEY, CAO Geng. Study on uniaxial compression constitutive models of adobe masonry [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(12): 295—301. (in Chinese)
- [17] JGJ 70-2009, 建筑砂浆基本性能试验方法 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 10—37.
JGJ 70-2009, Standard for test method of basic properties of construction mortar [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009: 10—37. (in Chinese)
- [18] 江近仁, 谢君斐. 中国科学院土木建筑研究所报告第 2 号. 砖石结构研究[M]. 北京: 科学出版社, 1956: 8—11.
Jiang Jinren, Xie Junfei. The report of civil engineering institute of Chinese Academy of Science No. 2. The study of masonry structure [M]. Beijing: Science Press, 1956: 8—11. (in Chinese)
- [19] 梁建国, 洪丽, 肖逸夫, 等. 砖和砂浆的本构关系试验研究 [C]. 全国砌体结构领域基本理论与工程应用学术会议, 2012: 155—164.
Liang Jianguo, Hong Li, Xiao Yifu, et al. Experimental research of stress-strain relationship on brick and mortar [C]. Basic theory and engineering application of masonry structure. Hangzhou: Zhejiang University Press. 2012: 155—164. (in Chinese)
- [20] Naraine K, Sinha S. Model for cyclic compressive behavior of brick masonry [J]. Aci Structural Journal, 1991, 88(5): 592—602.
- [21] 朱伯龙. 砌体结构设计原理 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1991: 13—28.
Zhu Bolong. Design principles of masonry structure [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1991: 13—28. (in Chinese)