文章编号:1007-9629(2022)10-1040-07

基于DIC的花岗岩-混凝土梁抗弯性能研究

陈徐东^{1,*}, 石振祥¹, 郭玉柱¹, 栾金津¹, 白 银²

(1.河海大学土木与交通学院,江苏南京 210098;

2. 南京水利科学研究院 材料结构研究所,江苏南京 210024)

摘要:为研究岩体缺陷对花岗岩-混凝土复合体抗弯性能的影响,选用2种花岗岩(黄金麻、芝麻灰) 制备了不同缝高比(0、0.1、0.5)的花岗岩-混凝土试件,并进行了四点弯曲试验,采用三维数字图像 相关(3D-DIC)技术对试件的裂缝开展过程进行了实时监测.结果表明:花岗岩弹性模量越大,试件 承受荷载的能力就越强;当裂缝开展至胶结面时,由于花岗岩强度较高,试件荷载-应变曲线会再次 上升,直至花岗岩开裂;预制裂缝的缝高比越大,同阶段试件的损伤程度越大,加载结束时裂缝宽度 也越大,并且花岗岩弹性模量越大,试件损伤程度特征越明显;当花岗岩内部存在缺陷时,裂缝开展 方向会向缺陷靠拢,导致试件进一步失稳破坏.

关键词:混凝土;花岗岩;损伤;数字图像相关;裂缝 中图分类号:TU528.31 **文献标志码**:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.10.007

Flexural Performance of Granite-Concrete Beams Based on DIC Technology

CHEN Xudong^{1,*}, SHI Zhenxiang¹, GUO Yuzhu¹, LUAN Jinjin¹, BAI Yin²

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Materials & Structural Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: In order to study the influence of rock mass defects on the flexural properties of granite-concrete complex, two kinds of granite(gold flax and sesame ash) were selected to prepare specimens with different joint-height ratios (0, 0.1 and 0.5) for four-point bending tests. 3D digital image correlation(3D-DIC) was used to monitor the fracture propagation process of the complex. The results show that the larger the modulus of elasticity of granite is, the stronger the composite can withstand the load. When the crack develops to the cemented surface, the load curve will rise again due to the high strength of granite until the granite cracks. With the increase of the crack height ratio of prefabricated cracks, the damage degree of specimens at the same stage increases, and the crack width also increases at the end of loading. And with the increase of elastic modulus of granite, the characteristics of damage degree of specimen are more obvious. When there is a defect inside the granite, the crack development will be close to the granite defects, the specimen will further destabilize damage.

Key words: concrete; granite; damage; digital image correlation; fracture

中国领土广阔,具有各种各样的地貌特征,仅仅 通过修建桥梁和环山公路来解决山区的交通问题是 远远不够的,因此隧道工程也是中国重点发展方 向^[1-2].在隧道施工过程中,岩体中往往会存在一些影 响其稳定性的因素,如隧道变形、支护结构失稳及岩 体脱落等,除此以外,花岗岩-混凝土的工作性能还 与花岗岩的状态有关,花岗岩表面及内部存在的褶 皱和微裂缝等缺陷,会导致混凝土裂缝与花岗岩贯 通,使整体结构更容易产生破坏^[3].

当前已有大量学者对影响岩石-混凝土结构稳

收稿日期:2021-09-01;修订日期:2021-10-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51979090,51739008);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(B200202076) 第一作者(通讯作者):陈徐东(1985—),男,江苏如东人,河海大学教授,博士生导师,博士.E-mail:cxdong1985@163.com

定性的因素进行了研究:Liu^[4]证明了不同温度状态 下,高岩温隧道混凝土早期强度更高,但后期强度略 有降低;荣华等55对不同界面粗糙度的岩石-混凝土 复合梁进行三点弯曲试验,得出了界面的起裂断裂 韧度和断裂能;Dong等^[6]对花岗岩-混凝土胶结面粗 糙程度与抗剪强度之间的关系进行了探究.数字图 像相关(DIC)技术是一种新型光学检测技术,通过采 集试件表面的灰度数字图像,对比分析计算灰度数 字图像在不同时间的变化,从而监测试件表面变形 与位移.三维数字图像相关(3D-DIC)技术多用于金 属、复合材料以及岩石等材料的性能研究,3D-DIC 能够实时记录试件的应力应变情况,在探究花岗岩-混凝土的力学特性方面具有较好的应用价值.李二 强等[7]揭示了试件尖端起裂的裂纹和层理面交汇后 裂纹开展及断裂演化的过程.佘吉等^[8-9]通过数字图 像采集及相关计算,获得了疲劳荷载对于断裂过程 区的演化影响,并对岩石-混凝土界面断裂过程区长 度变化进行了讨论.马永尚等^[10]的研究表明,岩石材 料破坏过程中应变场的演化能较好地反映其内部裂 纹的产生和开展规律.王娜[11]通过数字图像相关方 法,对岩石-混凝土三点弯曲梁试件进行了测量,研 究了裂缝内张开位移与滑开位移的关系.杨立云 等[12-13]利用数字图像相关技术,研究了玄武岩纤维对 混凝土裂缝开展和损伤破坏形式的影响.目前对于 岩石-混凝土的性能研究尚处在发展阶段,对于接触 面各种因素影响的研究较多,但是很少研究岩石内 部缺陷对花岗岩-混凝土性能的影响.

为研究岩体缺陷对花岗岩-混凝土复合体抗弯 性能的影响,本文采用室内试验,结合 3D-DIC 技术, 研究花岗岩-混凝土试件在不同受力状态下的裂缝 开展规律,以及岩石内部缺陷对裂缝开展的影响,观 察花岗岩-混凝土试件在加载过程中的受力状态和 裂缝开展情况.本文得出了花岗岩-混凝土复合体中 花岗岩弹性模量与裂缝开展规律的关系,对理解花 岗岩-混凝土复合体的弯曲损伤和裂缝开展特性具 有参考价值.

1 试验

1.1 试件制备

花岗岩是隧道围岩最常见的岩石种类之一.本 文选用黄金麻(Y1)和芝麻灰(Y2)这2种花岗岩来制 备花岗岩-混凝土试件(分别记作Y1-C和Y2-C),并 进行四点弯曲试验.花岗岩及混凝土材料的力学性 能见表1.其中弹性模量与泊松比的测量采用半桥接 法,通过在试件表面粘贴应变片的方式,测得其横向 和轴向应变,然后计算得出试件的弹性模量和泊松 比.混凝土抗压强度和劈拉强度使用立方体试块试 验测得.

表 1 花岗岩及混凝土材料力学性能 Table 1 Mechanical properties of granite and concrete materials

Material	Elastic modulus/GPa	Compression strength/MPa	Split tensile strength/MPa	Poisson's ratio
Y1	48.8	100.0	15.4	0.28
Y2	52.3	132.5	16.8	0.28
Concrete	36.0	51.5	2.6	0.20

花岗岩-混凝土试件尺寸为100 mm×100 mm×400 mm,沿试件中轴线分为上下两层,上层为花岗岩,下层为混凝土,花岗岩与混凝土厚度均为50 mm, 两者接触面设有缝高比(w)为0、0.1、0.5 的预制裂缝,分别表示花岗岩-混凝土"无缺陷、结构内部存在 微小缺陷、内部缺陷较大"3种状态.

试件具体制作过程如下:(1)将预制的塑料模 具刷油后,将带有预制裂缝的花岗岩石板放置在模 具底部;(2)将混凝土搅拌完成后倒入模具中,用工 具沿模具侧壁进行插捣,并将表面整平;(3)将模具 放置在振动台进行振捣,用抹刀将表面刮平,然后在 试件表面贴一层塑料膜,以防止其内部水分蒸发,静 置 24 h后拆模;(4)将拆模后的试件在标准养护条 件下养护至 28 d,待测.

1.2 四点弯曲试验

四点弯曲试验采用 MTS810 试验机,上加载装 置跨度为100 mm,支座跨度为300 mm.试验前在试 件底部100 mm 纯弯段两端粘贴夹持裂缝开口位移 (COD)的夹具,用来测量试件底部100 mm 纯弯段的 应变.加载速率为10⁻⁵ s⁻¹,采用试件底部纯弯段 100 mm标距范围的应变进行控制.试件加载示意图 如图1所示.为消除试验误差,本试验每组工况采用3 组试件进行加载,并取其平均值作为试验结果.

1.3 三维数字图像相关技术

3D-DIC数据采集系统采用德国GOM公司生产的Aramis Professional系统,数字图像由2台型号为Aramis Adjustable Base的12 MP高速摄像机获取.将2台高速摄像机放置在不同的位置,从2个角度捕



获被测物体表面图像,得到物体的三维变化特征.通 过比较施加荷载过程中不同时刻测量区域内各点的 三维特征变化,得到试件的整体位移变化.这种方法 与其他方法所得结果具有一致性,且操作方式简 单^[14].DIC装置位于加载装置前方,用白漆喷涂DIC 装置照射一侧的混凝土试件跨中区域,使其为纯白 色,然后在白漆表面喷涂黑色散斑,使用2台高速摄 像机实时捕捉加载过程中混凝土梁跨中区域的灰度 图像.

2 结果与分析

2.1 荷载-应变曲线

根据花岗岩-混凝土试件加载过程中荷载及位 移变化,可以计算获得试件加载过程中的荷载-应变 (*P*-ε)曲线.

图2为不同缝高比条件下花岗岩-混凝土试件的 P-ε曲线.通过对比图2中缝高比为0的2种花岗岩-混凝土试件P-ε曲线可以看出,花岗岩-混凝土试件 在加载过程中经历了弹性变形、塑性变形和失稳破 坏3个阶段:弹性变形阶段试件表面不产生裂缝;塑 性变形阶段,试件表面开始产生微裂缝,并且会产生 1条主裂缝,随着加载时间的延长,当裂缝开展至混 凝土与花岗岩的胶结面时,由于花岗岩强度高于混

凝土,其能够承受的荷载更大,因此荷载-应变曲线 有所上升;当达到失稳破坏阶段时,花岗岩表面开始 产生裂缝,荷载再次下降.由表1可知,芝麻灰花岗岩 Y2弹性模量较大,因此其硬度较大、塑性较差,而弹 性模量较小的黄金麻花岗岩Y1硬度较小,塑性较好. 因此当裂缝开展至胶结面时,试件Y2-C荷载上升幅 度较大,当荷载达到峰值时,试件Y2-C表面突然产 生裂缝并迅速开展,荷载-应变曲线急速下降,形成1 个较为陡峭的第2峰值:对于试件Y1-C,由于其花岗 岩硬度较低、塑性较好,因此荷载-应变曲线的上升 和下降均比较缓慢,第2峰值较为平坦.在同种加载 条件下,试件Y2-C的峰值荷载较试件Y1-C更高,并 且在弹性阶段 P-ε曲线斜率更大,当裂缝开展达到胶 结面时,2种试件的P-ε曲线均有所提升,但试件Y2-C 提升幅度更大.综上,花岗岩-混凝土的强度与花岗岩 的种类有关,花岗岩弹性模量越大,试件能够承受的 荷载就越大,裂缝产生得越突然,破坏时间越短.

由图2可知:不同缝高比条件下,不同种类花岗 岩-混凝土试件的P-ε曲线特征基本相同;但当裂缝 开展至胶结面时,缝高比为0的试件荷载值最高;另 外,随着缝高比的增大,花岗岩承受荷载的能力逐渐 下降,裂缝加载至花岗岩材料时荷载增加幅度逐渐 减小,第2峰值逐渐降低,当缝高比为0.5时,2种试件 均不产生第2峰值.上述结论表明,花岗岩预制裂缝 的缝高比越大,试件所能承受的荷载值就越低,并且 随着内部缺陷的增大,试件结构强度会进一步降低.

2.2 损伤定量分析

损伤变量(D)是用来表示某种材料内部缺陷状态的物理量,根据损伤力学理论,基于各向同性假设的前提,损伤变量可表示为0(内部无损伤)~1(结构完全破坏)的标量.损伤变量的使用有助于对结构损伤程度的演化过程产生更加明确的分析,从而



图 2 不同缝高比条件下花岗岩-混凝土试件的 *P*-ε曲线 Fig. 2 *P*-ε curves of granite-concrete composite layers with different crack height ratios

Ω

(1)

得到结构破坏特征.在加载过程中,花岗岩-混凝土 试件内部不断产生微小应变,最终发展成为宏观裂 缝.因此,本文以试件的应变为主要参数,对结构损 伤进程进行定量表征,损伤变量D的计算式如下^[15]: 式中: ε₀为加载结束时试件发生的应变; ε'为某一时 刻试件发生的应变; P为应变发生时刻的荷载, kN.

在本次试验过程中,应变达到0.02时视试件为 失效破坏.将各个时刻P-ε曲线所围成的面积与试件 加载结束时P-ε曲线围合面积之比作为损伤变量,结 果如图3所示.





由图3可知:随着应变的增大,内部无预制裂缝 的花岗岩-混凝土试件损伤变量基本呈线性变化,而 内部存在预制裂缝的试件损伤变量增加速度呈现逐 渐减小的趋势;预制裂缝的存在导致相同应变条件 下试件的损伤变量增加,并且预制裂缝越大,相同应 变条件下试件的损伤变量也越大;对于试件Y2-C,当 其内部存在预制裂缝时,在相同应变条件下其损伤 变量与无预制裂缝试件的损伤变量相差较大,而试 件Y1-C在有无预制裂缝条件下的损伤变量相对差 异较小.对比2种花岗岩-混凝土试件的D-ε曲线可 以看出,花岗岩内部缺陷对于花岗岩-混凝土试件损 伤程度具有较大影响,并且花岗岩强度越高,其内部 缺陷对试件整体稳定性的影响程度越大.

2.3 DIC分析

2.3.1 应变云图分析

在加载过程中,试件内部会累积微应变和微损 伤,并逐渐发展成为宏观裂缝.为了探究花岗岩-混 凝土试件在受到应力时其内部裂缝的开展规律,通 过DIC分析试件Y2-C在荷载达到胶结面后的裂缝 开展情况,结果如图4所示.图4中横线表示胶结面, 上半部分为花岗岩,下半部分为混凝土.图像所处的 3个阶段分别为荷载第2峰值阶段(S1)、荷载峰值到 加载结束的应变中间值阶段(S2)和加载结束阶 段(S3).

由图4可知:当荷载达到第2峰值时,混凝土中

的裂缝达到胶结面,并且胶结面存在应力,该应力由 裂缝开展处向两侧逐渐减小;随着荷载的增加,花岗 岩表面开始产生裂缝,且裂缝继续向上开展.上述现 象证明,当荷载第1次达到峰值时,混凝土开始产生 裂缝,而当裂缝开展至胶结面时,由于花岗岩弹性模 量较高,能够承受较大的应力,因此荷载-应变曲线 继续上升,直至出现第2峰值,此时花岗岩表面产生 裂缝,而后随着荷载继续增加,裂缝向上开展,直至 加载结束.

试件断裂后的宏观裂缝开展形态可以反映其裂 缝开展关系.不同缝高比条件下试件Y2-C在加载结 束后的裂缝开展形态如图5所示.

由图5可知:在加载过程中,预制裂缝周围会产 生应力集中现象,当预制裂缝的缝高比为0时,应力 集中区域不存在,其裂缝开展的位置无法确定,在加 载区域内部均可产生主裂缝;当缝高比为0.1时,裂 缝发展受应力集中区域影响,裂缝开展位置靠近预 制裂缝,并且当裂缝接近胶结面时,开展方向会向预 制裂缝方向偏移,经过预制裂缝后,裂缝的开展方向 则不再受预制裂缝的影响,其开展方向重新具有随 机性;当缝高比为0.5时,由于应力集中区域影响较 大,裂缝的开展方向会直接偏向预制裂缝,当裂缝开 展至胶结面时,裂缝会经过预制裂缝,并在穿过预制 裂缝后继续沿着之前的方向开展.以上结果表明,当 花岗岩内部存在缺陷时,在加载过程中试件会沿着



图 4 试件 Y2-C 在荷载达到胶结面后的裂缝开展情况 Fig. 4 Crack development of specimen Y2-C after the load reaches the cementing surface



图 5 不同缝高比条件下试件 Y2-C 在加载结束后的裂缝开展形态 Fig. 5 Crack development patterns of specimen Y2-C with different crack height ratios after loading

缺陷的位置开裂,并引导着裂缝的开展,且当内部缺 陷较大时,裂缝在穿过预制裂缝后依然沿着原来方 向开展.

2.3.2 胶结面裂缝开展分析

基于应变云图情况,对不同缝高比条件下试件Y2-C胶结面处裂缝宽度进行了分析,结果如图6所示.图6中曲线突变处表示试件产生裂缝,纵轴坐标差表示裂缝宽度.由图6可知:当试件应变值达到0.2%时,3种缝高比条件下试件均在胶结

面处产生裂缝,并且随着荷载的增加,裂缝持续开展,水平位移差进一步增大.对比不同应变条件下 各试件的位移差可以发现,当应变范围处于0%~ 0.2%时,具有预制裂缝的试件位移差小于无预制 裂缝的试件,而当应变值达到1.4%后,缝高比越 大,相同应变条件下其位移差越大,说明预制裂缝 的存在会对试件承受荷载情况下的变形产生不利 影响,并且预制裂缝缝高比越大,产生的影响越 明显.





Fig. 6 Crack width on the cementing surface of specimen Y2-C with different crack height ratios

3 结论

(1)花岗岩-混凝土试件强度与花岗岩的种类有 关,花岗岩弹性模量越大,试件承受荷载的能力就越 强,结构的变形就越小;当裂缝开展至胶结面时,由 于花岗岩强度高于混凝土强度,试件荷载-应变曲线 会重新上升,直至花岗岩开裂.

(2)花岗岩内部存在缺陷时,会对结构的整体强 度和稳定性产生较大影响,并且随着内部缺陷的增 大,结构强度会逐渐降低;花岗岩内部缺陷会加快试 件在加载过程中的损伤程度,并且花岗岩强度越高, 其内部缺陷对于试件整体稳定性的影响程度越大, 相同应变条件下试件的损伤程度就越大.

(3)花岗岩内部缺陷会对试件承受荷载情况下 的变形产生不利影响,并且预制裂缝的缝高比越大, 产生的影响越明显;在裂缝开展过程中,其开展方向 会受到花岗岩内部缺陷位置的影响,从而导致试件 的破坏程度更加严重.

参考文献:

[1] 李凯.浅埋偏压小净距隧道开挖方式及非对称支护研究[D]. 邯郸:河北工程大学,2021.

LI Kai. Research on the excavation method and asymmetric support for shallow buried biased small clear distance tunnel[D]. Handan:Hebei Engineering University, 2021. (in Chinese)

[2] 任杰.我国城市地铁建设现状与发展战略分析[J].企业科技与发展,2019(1):278-279.

REN Jie. Analysis of the current situation and development strategy of urban metro construction in China [J]. Enterprise Science and Technology and Development, 2019(1):278-279. (in Chinese)

[3] VERMA H K, SAMADHIYA N K, SINGH M, et al. Blast induced rock mass damage around tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018,71:149-158.

- LIU G C. Numerical simulation and analysis of the temperature effect on the fission of concrete[J]. Thermal Science, 2019,23 (5):2713-2720.
- [5] 荣华,王玉珏,赵馨怡,等.不同粗糙度岩石-混凝土界面断裂 特性研究[J].工程力学,2019,36(10):96-103,163.
 RONG Hua, WANG Yujue, ZHAO Xinyi, et al. Research on fracture characteristics of rock-concrete interface with different roughness[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(10):96-103, 163. (in Chinese)
- [6] DONG W, WU Z M, ZHOU X M. Fracture mechanisms of rock-concrete interface: Experimental and numerical[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2016,142(7):04016040.
- [7] 李二强,冯吉利,朱天宇,等.基于数字图像相关方法的层状 板岩 I 型断裂特性研究[J].采矿与安全工程学报,2021,38(5): 979-987.

LI Erqiang, FENG Jili, ZHU Tianyu, et al. Examining type I fracture characteristics in layered slates with digital image correlation[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2021, 38(5):979-987. (in Chinese)

- [8] 佘吉.岩石-混凝土界面剪切本构关系研究与工程应用[D].大连:大连理工大学,2018.
 SHE Ji. Research on shear principal structure relationship at rock-concrete interface and engineering application[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [9] 王一鸣,岩石-混凝土界面疲劳断裂特性试验研究[D].大连: 大连理工大学,2020.
 WANG Yiming. Experimental study on fatigue fracture characteristics of rock-concrete interface [D]. Dalian; Dalian University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [10] 马永尚,陈卫忠,杨典森,等.基于三维数字图像相关技术的 脆性岩石破坏试验研究[J].岩土力学,2017,38(1):117-123.
 MA Yongshang, CHEN Weizhong, YANG Diansen, et al. Experimental study of brittle rock failure based on three-dimensional digital image correlation technique[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(1):117-123. (in Chinese)
- [11] 王娜.采用DIC研究岩石-混凝土界面裂缝扩展过程[D].大连: 大连理工大学,2016.
 WANG Na. Study of crack extension process at rock-concrete interface using DIC[D]. Dalian; Dalian University of Technology,

2016. (in Chinese)

- [12] 杨立云,林长宇,张飞,等.玄武岩纤维对活性粉末混凝土受 压破坏的影响[J].建筑材料学报,2022,25(5):483-489.
 YANG Liyun, LIN Changyu, ZHANG Fei, et al. Effect of basalt fiber on failure of reactive powder concrete under uniaxial compression[J]. Journal of Building Materials, 2022,25(5): 483-489. (in Chinese)
- [13] 赵燕茹,宋博,王磊,等. 冻融循环作用后玄武岩纤维混凝土 的断裂性能[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(4):575-583.
 ZHAO Yanru, SONG Bo, WANG Lei, et al. Fracture properties of basalt fiber reinforced concrete after freeze-thaw cycles[J].

Journal of Building Materials, 2019, 22(4):575-583. (in Chinese)

- [14] DINH B L, SON D T, DAO V T N, et al. Deformation capturing of concrete structures at elevated temperatures [J]. Procedia Engineering, 2017,210:613-621.
- [15] 何浩祥,陈奎,范少勇.基于弹塑性耗能差率的地震损伤 评估模型及分析方法[J].振动工程学报,2018,31(3): 382-390.

HE Haoxiang, CHEN Kui, FAN Shaoyong. Seismic damage model based on differential ratio of elastic plastic dissipated energy and application [J]. Journal of Vibration Engineering, 2018, 31 (3):382-390. (in Chinese)