

岩石-混凝土界面抗剪强度劣化研究进展

岳娟,盛金昌,王惠民,刘星星

(河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:综述了影响岩石-混凝土界面抗剪强度劣化主要因素,包括化学侵蚀、温度效应和荷载作用,归纳了现有的岩石-混凝土界面抗剪强度宏观和细微观试验方法,并总结了考虑岩石与混凝土力学性能、界面粗糙特征、界面初始黏聚力、外加正应力的界面抗剪强度劣化模型。针对水利工程中的岩石-混凝土界面在高水力梯度作用下易发生溶蚀劣化的现象,提出了渗透溶蚀作用下的岩石-混凝土界面抗剪强度劣化机理、劣化模型和溶蚀劣化的岩石-混凝土界面损伤开裂-裂缝扩展等有待进一步研究的问题。

关键词:渗透溶蚀;岩石-混凝土界面;抗剪强度;劣化模型

中图分类号:TU501 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)05-0015-07

Research progress on shear strength deterioration of rock-concrete interface//YUE Juan, SHENG Jinchang, WANG Huimin, LIU Xingxing(*College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: The main factors of rock-concrete interface shear strength deterioration were reviewed, including chemical erosion, temperature effect and load impact. The existing macro and micro test methods of rock-concrete interface were summarized. The degradation models of interface shear strength considering the mechanical properties of rock and concrete, the characteristics of interface roughness, the initial cohesion of interface, and normal external stress were summarized. Given the rock-concrete interface in hydraulic engineering is prone to corrosion degradation under high hydraulic gradients, problems including the shear strength degradation mechanism, shear strength degradation model, and interface crack propagation are proposed to be further studied.

Key words: permeable corrosion; rock-concrete interface; shear strength; deterioration model

混凝土作为一种造价低廉、性能优异的建筑材料,已被广泛使用在重力坝、隧道、防渗帷幕、桥基等工程中。当混凝土被直接浇筑到基岩表面时,两者因力学性能的差异会形成明显的材料分界面^[1]。与完整的基岩以及混凝土工程体相比,岩石与混凝土间的界面过渡区(ITZ)具有孔隙度高、致密性差、氢氧化钙(CH)富集、渗透性大、抗剪强度低等特点,对整体结构普遍存在负面影响,因此,对过渡区的特性研究一直是工程领域讨论的热点^[2-4]。现阶段一些学者逐渐认识到,岩石-混凝土结构工程的使用寿命和耐久性很大程度上取决于水与腐蚀性离子渗透到材料的可能性^[5]。岩石-混凝土界面(以下简称“界面”)作为整个结构的薄弱环节,被认为是侵蚀溶液进入工程体的主要路径之一,其力学特性的劣化对整个工程的稳定性有显著影响。在长期的运行

过程中,岩石、混凝土内部结构会发生损伤,界面作为天然薄弱面,更容易受到外界环境的影响,从而导致预估外的损伤。对于高岩温的隧洞工程,例如新疆齐热哈塔尔水电站引水隧洞,高岩温与低水温的工作环境使得衬砌混凝土产生较大的温差以致混凝土内部及界面处产生较大的拉应力,严重影响工程体的耐久性;而对于冻土地区工程,长期的冻融循环不仅会对混凝土防护工程产生影响,孔隙内的水-冰相变膨胀、融化也会导致界面产生裂缝,从而导致混凝土支护的脱落;对于混凝土坝体结构工程,在渗透水压长期侵蚀、冲刷作用下,岩基、坝体强度不断降低,甚至被掏空,在外加荷载共同作用下,会导致滑动面的生成,最终影响坝体的整体稳定性。据国际大坝委员会对重力坝溃坝原因的统计分析,引起混凝土大坝溃坝的主要原因是坝基或坝肩的滑移破坏(占47.4%)以

及持续漫顶引起的整体坝体失稳(占23.7%)。

岩石-混凝土结构工程的使用寿命和耐久性很大程度上取决于弱结构面力学性能的退化程度。目前针对界面裂缝扩展、断裂特性、抗拉强度、剪切特性等方面的研究成果很多,而针对在复杂环境作用下界面抗剪强度的劣化过程研究较少,且大多是基于单一环境因素下的试验现象。水利工程中的岩石-混凝土结构工程,不仅长期承受各种荷载作用(静水压力、自重荷载、扬压力等),还会持续受到恶劣环境(高压渗流、溶蚀、冲刷)的有害作用。坝基、坝体以及防渗结构的力学指标、渗透性能和稳定性能随着运行时间的增加,逐渐衰退老化,最终引起大坝的抗滑稳定问题。针对这一问题,本文围绕界面抗剪强度劣化影响因素、抗剪强度劣化试验以及抗剪强度劣化模型3个方面对界面抗剪强度劣化过程进行综述,并对该领域需要研究解决的问题进行了展望。

1 界面抗剪强度劣化影响因素

1.1 界面初始结构特征

界面初始结构,包括岩基表面原始粗糙度、界面过渡区孔隙结构,不仅决定了岩石-混凝土结构工程的初始抗剪强度、渗流特性,还能反映界面的抗侵蚀能力。

岩基表面的原始粗糙度可直接反映界面的抗剪强度大小,国内外学者就规则与不规则的粗糙度对抗剪强度的影响进行了大量的研究,并建立了相关抗剪强度模型^[6-8]。多位学者就强碱、强酸、冻融、高温、酸雨与干湿循环等恶劣环境下界面黏聚力的劣化进行了研究,认为粗糙度越大,界面抗剪强度越高,其抗劣化能力也越强;但是,Shen等^[9]对光滑、微粗糙、极粗糙3种花岗岩-混凝土二元体试件进行了冻融循环试验,结果表明粗糙度对界面的抗劣化能力并不是单纯的递增效果,认为光滑界面的试件更加容易受到冻融损伤,而微粗糙界面抗冻性能最好。

界面过渡区孔隙结构可认为是在界面处的未黏结区域,由于孔隙度很小,它对黏聚力的影响较小,可忽略不计,而对界面过渡区的渗流特性、储水特性影响较大,从而间接影响界面抗剪强度的抗劣化性能。现阶段一些学者就界面过渡区孔隙结构特征以及界面过渡区的渗透性能进行了大量的试验及数值模拟研究,如Halamickova等^[10]指出在集料-浆液界面形成的多孔过渡区会影响整体材料的孔隙特性,并采用压汞法得到了不同体积分数下砂浆的孔隙结构,评估了孔隙结构变化对离子扩散系数、渗透率等传输特性的影响,建立了渗透系数与临界孔径之间的关系,认为界面区的渗透系数较两侧基质大。

综上所述,岩基表面原始粗糙度在一定程度上会提高界面的抗劣化性能,但有关岩石-混凝土二元体结构的劣化试验条件大多为单一的环境因素,对复杂环境因素耦合作用下基岩粗糙度对界面抗劣化能力的定量分析仍有待进一步研究。而关于界面孔隙结构对其力学性能劣化的研究鲜有报道,尤其是岩石-混凝土二元体结构在复杂的环境因素下,界面的孔隙结构特性变化对渗流特性、二元体结构力学性能劣化影响的研究更少。

1.2 界面抗剪强度劣化影响因素

1.2.1 化学侵蚀

化学侵蚀是一个长期而缓慢的过程,岩石与混凝土水化学溶蚀的损伤机理取决于水化学溶液的pH值与化学成分以及岩石的矿物组成、孔隙等结构之间的耦合作用。大多数地下水中含有的主要阳离子有 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 等,主要阴离子有 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 等,pH值在5~8之间。

SO_4^{2-} 通过介质进入高孔隙度的界面,与混凝土中的水泥浆水化产物反应,生成膨胀性产物钙矾石与石膏,短时间内会填充界面的孔隙界面,增大界面处的密实度,但随着侵蚀时间的增长,当界面处膨胀应力大于其黏结强度时,就会在界面处产生裂缝,引起结构破坏^[11-12]。不同于硫酸盐的侵蚀,氯盐渗透到界面处,会与界面处富集的水化铝酸钙发生反应生成Friedel盐($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$),然后与CH继续反应生成具有扩散溶出性的络合物 CaCl_2 ,使得界面处水泥浆发生软化,密实度与强度降低^[13-14]。 CO_2 遇盐水就会形成弱酸 H_2CO_3 ,极易分解形成 H^+ 与 HCO_3^- ,渗透到界面区域时,与富集在岩石表面的CH反应生成 CaCO_3 与水, CaCO_3 紧密堆积,填充界面区的孔隙结构,但是反应过程中产生的水蒸发后会留下细小的孔洞,导致界面裂缝的产生^[13]。

1.2.2 温度效应

温度效应包括高温变温与冻融循环两种情况,大多针对处于特殊地质环境下的隧道工程。高温变温一方面会加速水泥的水化过程,提高早期强度;另一方面,加速的水化过程会导致水泥浆水化反应不充分,使混凝土内部以及界面区结构疏松多孔,强度降低。冻融循环作用下,孔隙内水-冰相变膨胀会导致界面产生不同尺寸的微孔破裂,而当孔隙的冰相变为水时,流体从破裂的微孔中流出,进一步加速材料的破坏。

目前关于岩体-支护二元体结构在高温变温以及冻融循环作用下的变形规律及其相互作用机制方面研究成果较多。例如:Hu等^[15-17]就岩石-喷射混凝土二元体结构在高温养护环境下的破坏模式、力

学特性的劣化过程 and 支护结构的应力场变化进行了研究,结果表明,高温对喷射混凝土水化产物的数量与分布有显著的影响,会引起微裂缝的形成与增加,降低界面抗剪强度;项伟等^[18-21]研究了岩体混凝土二元体在冻融循环作用下的变形特征、力学性能劣化模型以及微观脱黏机制,认为冻融循环作用下岩石-混凝土二元体结构冻融损伤扩展主要是由于界面两侧介质内温度分布不均匀,产生内部应力,加上水-冰相变产生的膨胀压力使得基质内部与黏结区域遭受破坏所致;亦有学者通过对界面两侧基质、界面区黏聚力的劣化损伤定量分析,构建了界面抗剪强度冻融劣化模型^[22]。

1.2.3 荷载作用

荷载作用指岩石-混凝土二元体结构在运行过程中所承受的应力,例如持续性的荷载或周期性的荷载。持续性的应力状态会引起孔隙和裂纹的闭合、扩展和连接,对界面的刚度、强度等性质有很大的影响;另外界面的应力状态还会影响界面孔隙的形态以及界面的黏结性能,压应力使孔隙闭合,界面变得更加密实,从而抑制 CH 溶解的速率,提高整体结构的抗侵蚀性;拉应力会使界面微裂缝张开,增大孔隙通道的连接性,减小界面黏结面积,加快侵蚀速度。周期性荷载,例如桥梁工程受到的车载、水工结构工程受到的水压力和风载等周期性的荷载,会导致界面裂纹萌生并且扩展,并随着循环的次数逐年累加,导致界面力学性能劣化。

金浏^[23]基于孔隙率与体应变之间的关系,得到了多孔混凝土的本构模型,通过对加载过程中孔隙率变化的数值计算结果表明:材料受到拉应力时,考虑孔隙率变化比不考虑孔隙率变化获得的拉伸强度降低约 10%;材料受到压应力时,考虑孔隙率变化比不考虑孔隙率变化获得的压缩强度提高约 7%。王一鸣^[24]针对混凝土长期承受水压力循环荷载,对岩石-混凝土复合梁进行了一系列不同应力水平的三点弯曲疲劳试验,研究了低应力循环荷载对界面断裂参数的影响以及界面断裂演化过程,认为循环荷载作用下,岩石-混凝土复合梁脆性特征更加明显,抵抗裂缝失稳的能力降低。

综上所述,化学侵蚀、温度效应以及荷载作用是岩石-混凝土二元体结构在运行过程中常见的环境因素,对界面抗剪强度劣化有重要影响。现阶段,针对温度效应与荷载作用下岩石-混凝土二元体结构力学性能的劣化研究均有开展,而有关岩石-混凝土二元体结构在化学侵蚀中的劣化过程大都是基于混凝土内部物相与化学溶液的反应过程来描述的。化学溶蚀是水工结构工程体在运行过程中不可忽略的

环境因素,尤其是高水压作用下的渗透溶蚀,界面过渡区作为整个结构的薄弱层,其力学性能的劣化不可忽视,因此关于渗透溶蚀对岩石-混凝土二元体结构力学性能的研究还有待进一步深入。

2 界面抗剪强度劣化试验研究

2.1 界面宏观抗剪强度试验方法

混凝土大坝、桥梁等建筑物的稳定性通常是由基岩软弱层或界面的抗剪强度决定的。因此,界面的抗剪强度试验是工程设计中不可缺少的部分。Bost 等^[25]对 1 m×1.25 m×1.5 m 的大尺度岩石-混凝土试件进行了室内试验,根据混凝土大坝的坝高特性,将正应力取值为 0.2 ~ 1 MPa (100 m 坝高范围内混凝土坝),得到了不同正应力下界面的损伤形态、荷载位移曲线,为评价重力坝的破坏机制提供了依据。剪切试验常用的方法有直剪法、斜剪法和单剪法。直剪法简单,易于操作,但不利于研究材料的剪切疲劳特性;斜剪法与单剪法不便研究竖向应力对界面抗剪特性的影响。在界面抗剪试验研究中,可根据实际情况选择不同的试验方法。

2.2 界面微观试验技术

微观尺度上界面被看作是岩石、砂浆、界面过渡区组成的复杂结构体,由于在岩石表面会形成水膜,导致岩石表面的水灰比要高于远离岩体的部位,因此在岩石表面的结晶产物为较大的晶体,形成的多孔结构孔隙率更大^[26-27]。Ollivier 等^[28]从界面的孔隙度变化、界面水化特性以及界面水化产物的形态出发,综述了界面过渡区的形成机理与微观结构,认为在岩石表面会有一个孔隙度梯度,越靠近集料表面孔隙度越大。由于集料表面的泌水作用以及水泥颗粒堆积产生的边壁效应 (wall effect),集料附近 CH 含量相对于浆体内部高、水化硅酸钙 (CSH) 含量相对于浆体内部低。理论上,界面过渡区的高孔隙度有利于侵蚀介质入侵并发生化学反应,而高含量的 CH 也会加速侵蚀,两者结合进一步劣化了界面过渡区的抗侵蚀性能。

材料的宏观性能是由其化学组成与微观结构决定的,因此要揭示界面区的渗透溶蚀机理,需要通过微观试验来定量分析界面区形貌、孔隙结构、Ca²⁺、Si²⁺ 含量以及物相的变化规律。微观试验技术按功能的不同可以大致分为以下 4 种类型:①表面微观结构的表征技术,如电子扫描镜 (SEM)、环境扫描电镜 (ESEM)、背散射电子图像模式 (BEI)、原子力显微镜 (AFM) 等;②表征孔隙结构特征的试验技术,如压汞仪 (MIP)、CT 断层扫描技术 (XCT)、核磁共振技术 (NMR) 等;③表征物相分布的试验技术,

如 X 射线衍射 (XRD)、电子探针 (EPMA)、能谱仪 (EDS)、差热分析仪 (DTA)、热重分析仪 (TG);④表征界面力学性能的试验技术,如纳米压痕技术与显微硬度技术。以上微观试验技术测试内容及不足汇总于表 1。

现有很多界面过渡区微观结构识别技术,但不同技术都有一定的应用范围以及适用条件,在实际研究中,通常会将以上几种技术配合使用。针对复杂环境因素下界面力学性能的劣化过程,可以通过以下 3 种技术的配合使用来获得:①SEM 和 EDS 结合使用定性分析界面过渡区的微观结构变化以及定量分析元素含量变化 (Ca/Si);②采用 DAT-TG 技术获得不同渗透溶蚀时间下界面区物相的变化以及反应过程 (CSH、CH);③通过纳米压痕技术获得界面初始及渗透溶蚀后的微观硬度。

3 界面抗剪强度劣化模型研究

界面的抗剪强度是判断水工结构基础稳定的关键因素,一般认为影响界面抗剪强度的因素主要包括岩石与混凝土力学性能、界面粗糙特征、界面的初始黏聚力和外加正应力^[43]。基于摩尔库伦准则,国内外学者提出了数十种可用于计算界面剪切强度的公式^[22,44-48]。在渗流-应力-化学-温度耦合作用下,一方面,岩石与混凝土本体材料的矿物组成与微观结构会发生变化,造成材料密度、弹性模量、孔隙率和 CT 数等发生变化,最终引起岩石和混凝土强度

的损伤^[49];另一方面,界面过渡区钙离子的溶解与扩散导致界面几何形态发生变化(孔隙度增加),胶凝骨架的体积分数降低,界面区微观硬度与强度降低,直接影响界面的黏结强度。

3.1 界面钙离子的传输模型

对于界面两侧基质,可以通过材料密度、弹性模量、声波、孔隙度的损伤变量来建立溶蚀过程中岩石、混凝土力学性能随时间的劣化模型。对于界面过渡区,渗透溶蚀作用下界面区固相钙会逐渐溶解并向四周扩散,常用的钙离子传输模型有以下 3 种:

a. Gérard 模型^[50-51]。该模型是以孔隙溶液中的钙离子浓度为变量,结合 Fick 第二定律以及钙离子质量守恒定律建立的。假设溶液中钙离子不发生化学反应生成任何新的化合物,仅在孔隙内外浓度差影响下向外扩散,而孔隙内钙离子的扩散打破了材料内部钙离子的平衡关系,最终引起固相钙的溶解。

b. Kuhl 钙溶蚀模型^[52]。该模型是基于材料初始孔隙率(包括应力引起的孔隙率)、骨架溶解引起的孔隙增量以及固相钙溶解分解速率之间的相关关系建立的。除水泥水化产物的溶解外,考虑了外部应力导致胶凝骨架中微裂纹的张开和扩展引起的孔隙增量。但是该模型假设扩散系数不随钙离子浓度而发生变化,忽略了钙离子溶蚀引起的扩散系数的改变。而对于高水压的化学侵蚀,钙离子的转移与对流运动是相关的,因此,此模型忽略了对流性的传递,更加适用于不考虑水流以及水压力状态的化学侵蚀。

表 1 微观试验技术测试内容及不足^[22,29-42]

分类	试验技术	测试内容	不足
表面 微观 结构	SEM	界面过渡区微观结构	SEM 技术要求样品要足够平整,不然电子束容易受到影响,而且扫描区域较小,对于整个界面结构缺乏代表性
	ESEM	实时观测样品在水化过程中的形貌变化	样品中的气体分子会对 ESEM 成像产生副作用,对图像的分辨率产生影响
	BEI	不同物相的分布状态	放大倍数有限,只能观测到微米级别的尺度,而且只可得到二维形貌
	AFM	样品的三维表面轮廓	面积过小,对界面整体形貌缺乏代表性;较 SEM 扫描速度慢;对界面粗糙度有要求,不能测量陡峭的凹槽
孔隙 结构 特征	MIP	微观孔隙结构	假设孔隙均为圆柱形,所测孔隙体积不能代表结构的真正孔隙体积;有损检测
	XCT	材料内部的组分、混凝土水泥水化过程、微观孔隙结构	定量分析结果需要对材料灰度的阈值进行严格的划分
	NMR	无损实时得到材料微观孔隙结构、胶凝物质 CSH 微观结构变化特征	对孔隙的几何尺寸、形状很敏感,而且 Fe 元素含量过多时会扰乱核磁场的分布
物相 分布	XRD	试样的物相(衍射强度反映各物相的含量)	对样品要求比较高,取样过程影响测试结果
	EPMA	试样中微小区域的形貌与元素成分	对样品要求比较高,微区面积过小,对界面整体形貌缺乏代表性
	EDS	对材料表面元素进行定性以及定量分析	微区面积过小,对界面整体形貌缺乏代表性
	DTA	确定材料物相种类	只能得到热量的变化
	TG	材料质量随温度的变化关系	只能得到质量的变化
力学 性能	纳米压痕技术	试样微观压痕硬度以及微观压痕模量	对样品表面粗糙度要求高,而且测试区域通常很小,对整体结构的力学特性缺乏代表性
	显微硬度技术	样品的显微硬度	对样品表面粗糙度要求高,而且测试区域通常很小,对整体结构的力学特性缺乏代表性,只能得到显微硬度一个力学参数,试验结果单一

c. Gawin 模型^[53-54]。Gawin 等^[53-54]以固相钙溶解速率为变量,采用多相多孔介质力学方法建立了水泥浆材料在等温条件下水化产物的溶解扩散模型。该模型是基于去离子水环境中的钙溶蚀过程提出的一种新型钙溶蚀模型,建立于物理理论与体积均化的基础上,综合考虑了热、渗流、力学耦合作用下的钙离子扩散系数,是研究复杂环境因素作用下混凝土钙溶蚀最常用的模型。

综上所述,Gérard 模型考虑了渗透水压对钙离子传输的影响,忽略了应力作用对钙离子扩散性能的影响;Kuhl 模型考虑了应力状态对钙溶蚀速率的影响,没有考虑孔隙内对流作用的影响以及温度效应;Gawin 模型基于 Kuhl 模型进一步改进,除了可考虑渗流-应力-化学耦合作用的影响外,还考虑了由于固液不平衡导致扩散动力增大的影响以及侵蚀溶液在孔隙内的对流作用,但是 Gawin 模型是基于某一恒定温度条件建立的,不能考虑温度变化对钙溶蚀过程的影响。

3.2 界面过渡区孔隙率演变模型

界面过渡区钙离子的溶蚀与扩散会导致界面过渡区孔隙率发生变化。从水泥基材料中 CH 与 CSH 的溶出角度出发,认为孔隙率的演变通常是钙离子溶蚀引起的,通常认为 CH 的溶解产生毛细孔,CSH 的脱钙生成胶凝孔。目前对于孔隙率的演变模型基本分为两种,一种是只考虑 CH 的溶蚀,认为胶凝孔对结构渗透性无害^[51,55]。该模型认为孔隙增量是通过溶蚀过程中的固相钙浓度差乘以 CH 摩尔体积获得的,不考虑 CSH 的溶蚀引起的孔隙增量。由于胶凝物质 CSH 的溶解会直接引起材料力学性能的劣化,更加适用于混凝土由于孔隙增量引起的渗透性的变化。另一种将毛细孔以及胶凝孔的增加均考虑在内^[50,53,56],认为孔隙增量可以通过溶蚀掉的钙离子总摩尔数乘以 CH 与 CSH 的平均摩尔体积获得。该模型简化了钙溶蚀中 CH 与 CSH 溶蚀过程,对两种物相的钙离子溶蚀结果进行均值化处理,可以简单、高效准确地获得多孔介质的孔隙度变化率,综合考虑了 CH 与 CSH 的溶蚀,更加适用于描述材料力学性能的劣化过程。

3.3 界面抗剪强度劣化模型

孔隙的体积分数和胶凝物质含量可以控制材料的宏观特性(刚度、强度等),因此,溶蚀过程中界面弹性模量的损伤模型可以通过孔隙率的变化和胶凝物质含量的变化来表征^[57]。对于孔隙率的变化需要对不同侵蚀时间下的界面过渡区结构进行宏观试验来获得,目前很难直接获得界面的孔隙结构参数^[23],通过孔隙体积分数计算界面刚度的损伤还有

待进一步研究;对于胶凝物质含量的变化,Stora 等^[26,58]通过建立砂浆及水泥基材料多尺度均质化模型,预测了砂浆的弹性及扩散特性,认为界面水泥基材料的钙侵蚀过程可以分为钙硅比大于 0.8 以及小于 0.8 两个阶段。该均质化模型将混凝土的物相组成及化学反应过程与力学性能建立了联系,尽管有学者就该模型与现有的试验结果进行了对比,但还处于理论模型阶段,需进一步通过试验进行验证。

综上所述,现阶段就渗流、化学、应力、温度对多孔介质几何微观结构和孔隙率的影响已经可以进行定量描述,为建立界面抗剪强度模型打下了坚实的基础。但是如何通过试验得到界面在渗流-应力-化学-温度耦合作用下宏观剪切参数以及微观结构参数的变化规律,并且量化界面过渡区的厚度及其相应的孔隙结构微观参数(孔隙度、孔径分布、弯曲度等)和微观力学参数(弹性模量、硬度等),以及建立界面抗剪强度劣化模型还有待进一步研究。

4 研究展望

尽管岩石与混凝土在复杂环境因素作用下的劣化是一个缓慢的过程,但这种缓慢的劣化效应会从材料的表面结构以及初始缺陷位置(界面过渡区)深入到物体内部,使界面两侧基质矿物成分、微观结构以及力学性能发生不可逆的变化,最终引起不良的工程效应。岩石-混凝土二元体结构在高温变温、冻融循环以及荷载作用下引起的材料劣化研究已经取得了较多成果,但渗透溶蚀作用下的混凝土-岩石抗剪强度劣化问题仍需进一步开展研究:

- a. 渗透溶蚀作用下界面抗剪强度劣化机理。开发界面渗透溶蚀技术,采用宏观和细微观方法,研究界面物相、渗透溶蚀速率和细微观结构演变规律,揭示界面的渗透溶蚀劣化机理。
- b. 界面抗剪强度劣化模型。基于界面渗透溶蚀宏观和细微观试验结果,提出界面孔隙率、传递特性和抗剪强度演化模型,并开发相应分析程序。
- c. 溶蚀劣化的界面损伤开裂-裂缝扩展研究。开展不同渗透溶蚀程度的岩石-混凝土试件直剪试验,研究渗透溶蚀过程中界面损伤阈值和裂缝尖端强度因子演变规律,并提出相应判断准则。

参考文献:

[1] IGARASHI S, BENTUR A, MINDESS S. Microhardness testing of cementitious materials[J]. Advanced Cement Based Materials, 1996, 4(2): 48-57.
[2] LIZARAZO M, HIGUERA C, CLAISSE P. Measuring the effect of the ITZ on the transport related properties of mortar using electrochemical impedance[J]. Construction

- and Building Materials,2014,52:9-16.
- [3] ZHANG S,ZHANG C, LIAO L, et al. Numerical study of the effect of ITZ on the failure behaviour of concrete by using particle element modelling [J]. Construction and Building Materials,2018,170:776-789.
- [4] ZHU Z, PROVIS J, CHEN H. Quantification of the influences of aggregate shape and sampling method on the overestimation of ITZ thickness in cementitious materials [J]. Powder Technology,2018,326:168-180.
- [5] PATEL R A, PHUNG Q T, SEETHARAM S C, et al. Diffusivity of saturated ordinary portland cement-based materials;a critical review of experimental and analytical modelling approaches [J]. Cement and Concrete Research,2016,90:52-72.
- [6] JOHNSTON I W, LAM T S K. Shear behavior of regular triangular concrete rock joints-analysis [J]. Journal of Geotechnical Engineering,1989,115(5):711-727.
- [7] KODIKARA J K, JOHNSTON I W. Shear behaviour of irregular triangular rock-concrete joints [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts,1995,32(4):313-322.
- [8] 殷雨时. 恶劣环境下粗糙度对 CFRP-混凝土界面黏结性能影响研究[D]. 大连:大连海事大学,2020.
- [9] SHEN Y J, YANG H W, XI J, et al. A novel shearing fracture morphology method to assess the influence of freeze-thaw actions on concrete-granite interface[J]. Cold Regions Science and Technology,2020,169:0165-232X.
- [10] HALAMICKOVA P, DETWILER R J, BENTZ D P, et al. Water permeability and chloride ion diffusion in Portland cement mortars; relationship to sand content and critical pore diameter[J]. Cement and Concrete Research,1995, 25(4):790-802.
- [11] CHEN Y, LIU P, YU Z. Study on degradation of macro performances and micro structure of concrete attacked by sulfate under artificial simulated environment [J]. Construction and Building Materials,2020,260:119951.
- [12] LIU P, CHEN Y, WANG W, et al. Effect of physical and chemical sulfate attack on performance degradation of concrete under different conditions[J]. Chemical Physics Letters,2020,745:137254.
- [13] DAUNGWILAILUK T, KITAGAWA T, BUI P T, et al. Penetration of moisture, CO₂, and Cl ions in concrete after exposure to high temperature [J]. Journal of Advanced Concrete Technology,2019,17(1):1-15.
- [14] ARYA C, XU Y. Effect of cement type on chloride binding and corrosion of steel in concrete [J]. Cement and Concrete Research,1995,25(4):893-902.
- [15] HU Y, WANG M, WANG Z, et al. Mechanical behavior and constitutive model of shotcrete-rock interface subjected to heat damage and variable temperature curing conditions[J]. Construction & Building Materials,2020, 263:120171.
- [16] 王明年,胡云鹏,童建军,等. 高温变温环境下喷射混凝土-岩石界面剪切特性及温度损伤模型研究[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(1):63-75. (WANG Mingnian, HU Yunpeng, TONG Jianjun, et al. Experimental study on shear mechanical properties and thermal damage model of shotcrete-rock interfaces under variable high temperatures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2019,38(1):63-75. (in Chinese))
- [17] 唐兴华,王明年,童建军,等. 高岩温隧道初期支护应力场及安全性研究[J]. 西南交通大学学报,2019,54(1):32-38. (TANG Xinghua, WANG Mingnian, TONG Jianjun, et al. Study on stress field and security of primary support in high rock temperature tunnel [J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2019,54(1):32-38. (in Chinese))
- [18] 项伟,王琰,贾海梁,等. 冻融循环条件下岩体-喷层结构模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(9):1819-1826. (XIANG Wei, WANG Yan, JIA Hailiang, et al. Model test study of rock-shotcrete layer structure under freezing-thawing cycles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2011,30(9):1819-1826. (in Chinese))
- [19] PAN J, SHEN Y, YANG G, et al. Debonding behaviors and micro-mechanism of the interface transition zone in sandstone-concrete interface in response to freeze-thaw conditions [J]. Cold Regions Science and Technology,2021,191:0165-232X.
- [20] SHEN Y, ZHANG H, ZHANG J, et al. Sandstone-concrete interface transition zone (ITZ) damage and debonding micromechanisms under freeze-thaw[J]. Sciences in Cold and Arid Regions,2021,13(2):133-149.
- [21] 张伟丽,项伟,贾海梁. 冻融循环对砂浆岩石锚杆锚固力影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(3):558-566. (ZHANG Weili, XIANG Wei, JIA Hailiang. Experimental study of mechanical properties of grouted rock under freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2014,33(3):558-566. (in Chinese))
- [22] 申艳军,魏欣,杨更社,等. 岩石-混凝土界面黏结强度冻融劣化模型及试验分析[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(3):480-490. (SHEN Yanjun, WEI Xin, YANG Gengshe, et al. Freeze-thaw degradation model and experimental analysis of rock-concrete interface bond strength [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2020,39(3):480-490. (in Chinese))
- [23] 金浏. 细观混凝土分析模型与方法研究[D]. 北京:北京工业大学,2014.
- [24] 王一鸣. 岩石-混凝土界面疲劳断裂特性试验研究 [D]. 大连:大连海事大学,2020.
- [25] BOST M, MOUZANNAR H, ROJAT F, et al. Metric scale study of the bonded concrete-rock interface shear behaviour[J]. KSCE Journal of Civil Engineering,2020, 24(2):390-403.

- [26] STORA E, BARY B, HE Q C, et al. Modelling and simulations of the chemo-mechanical behaviour of leached cement-based materials: interactions between damage and leaching[J]. Cement and Concrete Research, 2010, 40 (8): 1226-1236.
- [27] 王海龙,郭崇波,邹道勤,等. 侵蚀性水作用下混凝土的钙溶蚀模型[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(3): 26-31. (WANG Hailong, GUO Chongbo, ZOU Daoqin, et al. Modelling of calcium leaching of concrete subjected to aggressive water[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(3): 26-31. (in Chinese))
- [28] OLLIVIER J P, MASO J C, BOURDETTE B. Interfacial transition zone in concrete[J]. Advanced Cement Based Materials, 1995, 2(1): 30-38.
- [29] BERNARDO G, TELESKA A, VALENTI G L. A porosimetric study of calcium sulfoaluminate cement pastes cured at early ages[J]. Cement and Concrete Research, 2007, 36(6): 1042-1047.
- [30] CHEN Y J, GAO J M, SHEN D M. Microstructure evolution from X-CT measurements for concrete/mortar under multi-actions of composite salts dry-wet cycles and loading [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, 81(1): 1307-1315.
- [31] DE ROOIJ M R. Syneresis in cement paste systems[D]. Delf, Holland; Delft University of Technology, 2000.
- [32] WILSON W, RIVERA-TORRES J M, SORELLI L, et al. The micromechanical signature of high-volume natural pozzolan concrete by combined statistical nanoindentation and SEM-EDS analyses [J]. Cement and Concrete Research, 2017, 91: 1-12.
- [33] ISMAIL K N, HUI T L. Microstructural study of the interfacial transition zone in concrete using optical microscopy[J]. Matec Web of Conferences, 2017, 97: 01043.
- [34] MARTÍN-SEDEÑO M C, CUBEROS A J M, DE LA TORRE Á G, et al. Aluminum-rich belite sulfoaluminate cements: clinkering and early age hydration[J]. Cement and Concrete Research, 2010, 40(3): 359-369.
- [35] PANG B, ZHOU Z, CHENG X, et al. ITZ properties of concrete with carbonated steel slag aggregate in salty freeze-thaw environment [J]. Construction and Building Materials, 2016, 114: 162-171.
- [36] SIDOROVA A, VAZQUEZ E, BARRA M, et al. Study of the recycled aggregates nature's influence on the aggregate-cement paste interface and ITZ[J]. Construction and Building Materials, 2014, 68: 677-684.
- [37] TRTIK P, DIAZ A, GUIZAR-SICAÍROS M, et al. Density mapping of hardened cement paste using ptychographic X-ray computed tomography [J]. Cement and Concrete Composites, 2013, 36(1): 71-77.
- [38] VARGAS P, RESTREPO O, TOBO'N J I. Microstructural analysis of interfacial transition zone (ITZ) and its impact on the compressive strength of lightweight concretes[J]. Construction and Building Materials, 2017, 137: 381-389.
- [39] WINSLOW D, LIU D. The pore structure of paste in concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1990, 20 (2): 227-235.
- [40] 李杰林. 基于核磁共振技术的寒区岩石冻融损伤机理试验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [41] 陆银龙, 贺梦奇, 李文帅, 等. 岩石结构面注浆加固微观力学机制与浆-岩黏结界面结构优化[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(9): 1808-1818. (LU Yinlong, HE Mengqi, LI Wenshuai, et al. Micromechanical mechanisms of grouting reinforcement in rock joints and microstructure optimization of grout-rock bonding interfaces[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39 (9): 1808-1818. (in Chinese))
- [42] 水中和, 万惠文. 老混凝土中骨料-水泥界面过渡区 (ITZ) (I): 元素与化合物在 ITZ 的富集现象[J]. 武汉理工大学学报, 2002, 24(4): 21-23. (SHUI Zhonghe, WAN Huiwen. Aggregate-cement interfacial transition zone (ITZ) in old concrete (I): concentrations of elements and compounds to the ITZ [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2002, 24 (4): 21-23. (in Chinese))
- [43] MOUZANNAR H, BOST M, LEROUX M, et al. Experimental study of the shear strength of bonded concrete-rock interfaces: surface morphology and scale effect[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(10): 2601-2625.
- [44] 张雅慧, 汪丁建, 唐辉明, 等. 基于 PFC^{2D} 数值试验的异性结构面剪切强度特性研究[J]. 岩土力学, 2016, 37 (4): 1031-1041. (ZHANG Yahui, WANG Dingjian, TANG Huiming, et al. Study of shear strength characteristics of heterogeneous discontinuities using PFC^{2D} simulation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37 (4): 1031-1041. (in Chinese))
- [45] BARTON N, CHOUBEY V. The shear strength of rock joints in theory and practice [J]. Rock Mechanics Felsmechanik Mécanique des Roches, 1978, 10 (1/2): 1-54.
- [46] GEERTSEMA A J. The shear strength of planar joints in mudstone [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(8): 1045-1049.
- [47] 杜时贵, 胡晓飞, 郭霄, 等. JRC-JCS 模型与直剪试验对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊1): 2747-2753. (DU Shigui, HU Xiaofei, GUO Xiao, et al. Comparison study of JRC-JCS model and direct shear test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Sup1): 2747-2753. (in Chinese))
- [48] 杜时贵, 胡晓飞, 罗战友, 等. 节理抗剪强度综合评价的试验研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(1): 89-97. (DU Shigui, HU Xiaofei, LUO Zhanyou, et al. A comprehensive experimental evaluation of rock joint shear strength[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(1): 89-97. (in Chinese))

(下转第 70 页)

- (2): 28-35. (ZHANG Guijin, LUO Gexuanzi, ZHU Boyuan, et al. Dam-break risk and emergency plan of a rockfill dam under extreme conditions [J]. Progress in Science and Technology of Water Resources and Hydropower, 2021, 41(2): 28-35. (in Chinese))
- [11] 赵天龙, 陈生水, 钟启明. 尾矿坝溃决机理与溃坝过程研究进展[J]. 水利水运工程学报, 2015(1): 105-111. (ZHAO Tianlong, CHEN Shengshui, ZHONG Qiming. Advances in studies of tailing dam break mechanism and process [J]. Journal of Water Resources and Water Transportation Engineering, 2015(1): 105-111. (in Chinese))
- [12] 姜清辉, 胡利民, 林海. 尾矿库溃坝研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(4): 77-86. (JIANG Qinghui, HU Limin, LIN Hai. Advances in research of tailings dam failures [J]. Progress in Science and Technology of Water Resources and Hydropower, 2017, 37(4): 77-86. (in Chinese))
- (上接第 21 页)
- [49] 李鹏, 刘建, 李国和, 等. 水化学作用对砂岩抗剪强度特性影响效应研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 380-386. (LI Peng, LIU Jian, LI Guohe, et al. Experimental study for shear strength characteristics of sandstone under water-rock interaction effects [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 380-386. (in Chinese))
- [50] GÉRARD B. Simplified modeling of calcium leaching of concrete in various environments [J]. Materials and Structures, 2002, 35: 632-640.
- [51] NAKARAI K, ISHIDA T, MAEKAWA K. Modeling of calcium leaching from cement hydrates coupled with micro-pore formation [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2006, 4(3): 395-407.
- [52] KUHL D, BANGERT F, MESCHKE G. Coupled chemo-mechanical deterioration of cementitious materials (part I): modeling [J]. International Journal of Solids and Structures, 2004, 41(1): 15-40.
- [53] GAWIN D, PESAVENTO F, SCHREFLER B A. Modeling of cementitious materials exposed to isothermal calcium leaching, considering process kinetics and advective water flow (part 1): theoretical model [J]. International Journal of Solids and Structures, 2009, 45(25/26): 6221-6240.
- [54] GAWIN D, PESAVENTO F, SCHREFLER B A. Modeling of cementitious materials exposed to isothermal calcium leaching, considering process kinetics and advective water flow (part 2): numerical solution [J]. International Journal of Solids and Structures, 2009, 45(25/26): 6241-6268.
- [55] WAN K, LI Y, SUN W. Experimental and modelling research of the accelerated calcium leaching of cement paste in ammonium nitrate solution [J]. Construction and Building Materials, 2013, 40: 832-846. (in Chinese))
- [13] 邓墾, 陈生水, 钟启明. 尾矿库漫顶溃坝数学模型研究与应用[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(5): 1-7. (DENG Zhao, CHEN Shengshui, ZHONG Qiming. Mathematical model for breach of tailings dam due to overtopping and its application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(5): 1-7. (in Chinese))
- [14] 钱宁, 万兆慧. 泥沙运动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [15] 李相南, 陈祖煜. 两种溃坝模型在唐山山堰塞湖溃决模拟中的对比[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(2): 20-26. (LI Xiangnan, CHEN Zuyu. Comparison of two models for back analysis of dam breach of Tangjiashan Barrier Lake [J]. Progress in Science and Technology of Water Resources and Hydropower, 2017, 37(2): 20-26. (in Chinese))
- (收稿日期: 2022-04-12 编辑: 施业)
- [56] 张开来, 沈振中, 徐力群, 等. 考虑渗透溶蚀作用的防渗帷幕耐久性控制指标[J]. 水利学报, 2020, 51(2): 169-179. (ZHANG Kailai, SHEN Zhenzhong, XU Liqun, et al. Durability control index of anti-seepage curtain considering the effect of advection-diffusion-driven leaching [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(2): 169-179. (in Chinese))
- [57] 高润东. 复杂环境下混凝土硫酸盐侵蚀微-宏观劣化规律研究 [D]. 北京: 清华大学, 2010.
- [58] STORA E, BARY B, HE Q C, et al. Modelling and simulations of the chemomechanical behaviour of leached cement-based materials: leaching process and induced loss of stiffness [J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(9): 763-772. (收稿日期: 2021-07-28 编辑: 熊水斌)

