

溶蚀作用下混凝土层面劈裂抗拉强度试验研究

王少伟,徐应莉,朱平华,刘惠,吕奇峰

(常州大学环境与安全工程学院,江苏 常州 213164)

摘要:采用浓度为 0.5 mol/L 的硝酸溶液对含浇筑层面的混凝土试件进行加速溶蚀试验,研究了层面劈裂抗拉强度、溶蚀深度和钙离子累计相对溶蚀量等 3 种评价指标的时变规律,以及层间间歇时间和凿毛处理对抗溶蚀性的影响,据此建立了层面劈裂抗拉强度的两种预测模型。结果表明:层面劈裂抗拉强度随溶蚀时间平方根和钙离子累计相对溶蚀量的增大而线性减小,间歇时间和凿毛处理对所拟合曲线的斜率影响较小;层面溶蚀程度随间歇时间的延长而增大,间歇 24 h 时层面溶蚀深度增加 15%;间歇时间越长,凿毛处理对抗溶蚀性的提升效果越弱,以 6 h 之内为最优;间歇时间 12 h 以内,层面劈裂抗拉强度下降速度较快,12 h 时降幅为 14.6%,由此将导致浇筑层面的耐溶蚀年限缩减 61%。

关键词:溶蚀作用;混凝土层面;劈裂抗拉强度

中图分类号:TU528 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)01-0027-06

Experimental study on splitting tensile strength of concrete layer interface under dissolution effects//WANG Shaowei, XU Yingli, ZHU Pinghua, LIU Hui, LYU Qifeng (School of Environmental and Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: Accelerated dissolution tests were conducted for concrete specimens with pouring layer interface using nitric acid solution with the concentration of 0.5 mol/L. The evolution laws of three leaching evaluation indexes, which were the splitting tensile strength, leaching depth and cumulative relative leached calcium, and the effects of interval time and layer roughening on the leaching process were studied. Two prediction models were then established for the splitting tensile strength of the layer interface. The research results show that the splitting tensile strength has linear relationships with the square root of leaching duration and the cumulative relative leached calcium. The interval time and layer roughening mainly affect the initial value of strength and have little effect on the linear slopes. The leaching degree of layer interface increases with the interval time, in which the leaching depth of layer interface increases by 15% when the interval time comes up to 24 h. The reinforcement effect of layer roughening on leaching resistance decreases with the interval time, and 6 h is the optimum interval time. When the interval time is less than 12 h, the splitting tensile strength of layer interface decreases fast, and the decrease rate is 14.6% within 12 h, which can reduce the leaching resistance service life of the concrete layer interface by 61%.

Key words: dissolution effects; concrete layer interface; splitting tensile strength

混凝土结构的施工浇筑层面以及裂缝等薄弱区直接影响其抗溶蚀耐久性,尤其是触水混凝土结构,在浓度梯度差作用下,混凝土层、缝面两侧钙离子不断向渗透水流中扩散,致使混凝土层、缝面处溶蚀速度明显快于其他部位。部分混凝土坝层面结合质量较差,形成“千层饼”状渗水通道,坝体廊道和下游面“流白浆”现象也屡见不鲜^[1]。

混凝土浇筑层面的结合质量直接影响层面的抗渗性和黏结性能,而研究表明层间间歇时间以及层面处理方式是控制混凝土浇筑层面质量的重要因

素^[2],如钱鹏等^[3]发现层面渗透系数随层间间歇时间的延长而增大,间歇 15 h(终凝后)试件的渗透系数约为无层面试件的 370 多倍;覃茜等^[4]研究发现初凝前层间间歇时间对层面黏结性能的影响不大,超过初凝时间后,黏结性能随层间间歇时间的增大而明显减弱;丁祖德等^[5-6]研究发现随着结合面粗糙度的增大,结合面渗透系数减小,抗剪强度和劈拉强度增大。因此,间歇时间将引起混凝土浇筑层面黏结性能的衰退,对于高水压力运行环境下的混凝土结构,其面临的水力劈裂问题将进一步加剧^[7]。在

混凝土溶蚀方面,目前主要是通过加速溶蚀试验来研究溶蚀过程中混凝土的物理力学性能演变规律^[8-10],总体表现为:随着溶蚀时间的延长,水泥基材料的力学性能和微观结构均趋于变差,劈裂抗拉强度对溶蚀最为敏感,其次是弹性模量和抗压强度,然而由于试验条件、方法等方面的差异,目前尚无较为统一的衰减模型。对于遭受溶蚀作用的带缝混凝土,孔祥芝等^[11]研究发现溶蚀沿缝面的法向逐渐向两侧混凝土的内部延伸,缝两侧混凝土的孔隙率增大,缝面摩擦因数、黏聚力及抗剪强度均下降;方永浩等^[12]对裂缝宽度为0.1~0.4 mm的圆柱体混凝土试件进行了高压渗透试验,结果发现渗透速率随裂缝宽度的增大而增大,由此表明溶蚀作用下缝面对混凝土的微观结构、渗透性和力学性能均有重大影响。

综上可知,现有研究成果多是针对混凝土浇筑层面的渗透性和黏结性能,以及无层面混凝土在溶蚀作用下的性能退化,而对浇筑层面的抗溶蚀性及其影响因素的试验研究较少。为此,本文采用浓度为0.5 mol/L的稀硝酸溶液,对不同浇筑层间间歇时间和有无凿毛处理的含层面混凝土试件进行加速溶蚀试验,研究层面溶蚀评价指标的时变规律,并建立层面劈裂抗拉强度的预测模型,以期用于现场环境下混凝土结构的服役性能评估。

1 试验材料与试验方法

1.1 试验材料

采用强度等级为42.5的普通硅酸盐水泥,化学组分见表1。混凝土配合比中,水灰比为0.50,水、水泥、砂子、石子的用量分别为230 kg/m³、460 kg/m³、605 kg/m³、1 075 kg/m³,其中粗骨料为花岗岩碎石,最大粒径为10 mm,级配良好;细骨料为天然河砂,细度模数为2.46,属于中砂;拌和水为普通自来水。

表1 水泥的化学组分

组分	质量分数/%	组分	质量分数/%	组分	质量分数/%
CaO	61.01	MgO	1.26	SO ₃	2.07
SiO ₂	20.41	MnO	0.15	Na ₂ O	0.26
Al ₂ O ₃	7.42	K ₂ O	0.75	其他	2.65
Fe ₂ O ₃	3.74	TiO ₂	0.28		

混凝土浸泡加速溶蚀试验中,浓度梯度会随溶蚀深度的增大而减小,后期溶蚀进程非常缓慢,而当溶蚀深度较浅时,可获取的试验数据点较少。为此,本文选用边长为50 mm的立方体非标准试件,以期最终溶蚀面积比超过50%。先浇筑试件底部1/2,达到设计层间间歇时间后再浇筑上部1/2。本文中混凝土的初凝时间为4.2 h,终凝时间为10.2 h,层间间歇时间分别设置为0 h、3 h、6 h、9 h、12 h、24 h,并

对6 h、12 h和24 h的浇筑层面进行有无凿毛处理的对比试验(凿毛方法为用硬毛刷扫毛和铁刷打磨,并控制层面粗糙度基本一致),试件编号分别为C0、C3、C6、CP6、C9、C12、CP12、C24、CP24,其中CP6、CP12、CP24为进行凿毛处理的对比试件。待试件成型24 h后脱模,再标准养护60 d。为确保溶蚀仅发生在试件四周,取出试件阴干后,在平行于层面的试件上下表面涂抹乙烯基树脂涂层,继续阴干不少于24 h,之后进行溶蚀试验。

1.2 试验方法

溶蚀介质选用浓度为0.5 mol/L的稀硝酸溶液,浸泡溶液按固、液体积比1:6设计。溶液的初始pH值为0.3,试验过程中定期测试浸泡液的pH值,并及时补充硝酸,以确保浓度固定。劈裂抗拉强度按照GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》,由YNS300型电液伺服万能试验机沿层面进行测量。溶蚀深度分层面和本体两种,平行于层面方向分别沿层面和1/4高度处切开试件后,在切开面喷涂质量分数为0.5%的酚酞指示剂,未溶蚀区颜色变红后,测量试件边缘到变色分界线的距离。利用EDTA络合滴定法测试浸泡溶液中的钙离子浓度,结合浸泡溶液体积和试件初始钙离子浓度,计算钙离子累计相对溶蚀量。

2 试验结果与分析

水泥基材料在接触溶蚀过程中,钙离子的扩散现象满足Fick第二定律,因此溶蚀评价指标与溶蚀时间平方根之间存在如下线性关系^[9]:

$$d = d_0 + a\sqrt{t} \tag{1}$$

式中: d 、 d_0 分别为溶蚀评价指标的当前值和初始值; t 为溶蚀时间; a 为溶蚀程度发展系数。

2.1 层面劈裂抗拉强度

图1为层面未凿毛混凝土试件的劈裂抗拉强度的发展规律。从图1(a)可以看出,随着溶蚀龄期的延长,层面劈裂抗拉强度呈现出逐渐降低的趋势,初期下降速度较快,其中0~9 d内的平均下降速率为0.13 MPa/d,远大于9~60 d内的平均下降速率0.05 MPa/d,表明劈裂抗拉强度对溶蚀具有一定的敏感性;溶蚀60 d时,间歇时间0 h、3 h、6 h、9 h、12 h和24 h情况下,层面劈裂抗拉强度降幅分别为69.6%、70.6%、73.9%、74.6%、78.9%和78.8%。图1(b)表明,不同溶蚀龄期下,层间间歇时间对劈裂抗拉强度的影响规律基本一致,均是随层间间歇时间的增大而减小,且12 h以内的强度衰减速率较快,而大于12 h后劈裂抗拉强度的变化相对较小,其中未溶蚀试件的强度初值在12 h内由5.27 MPa降至

4.50 MPa,降幅为 14.6%,可用拟合方程表示为

$$f_{st0} = 0.0019\tau^2 - 0.0898\tau + 5.3035 \quad (R^2 = 0.990) \quad (2)$$

$$f_{st} = f_{st0} - 0.45t^{0.5} \quad (R^2 = 0.949) \quad (3)$$

式中: f_{st0} f_{st} 分别为溶蚀前和一定溶蚀程度后的层面劈裂抗拉强度; τ 为层面间歇时间; R^2 为拟合复相关系数。

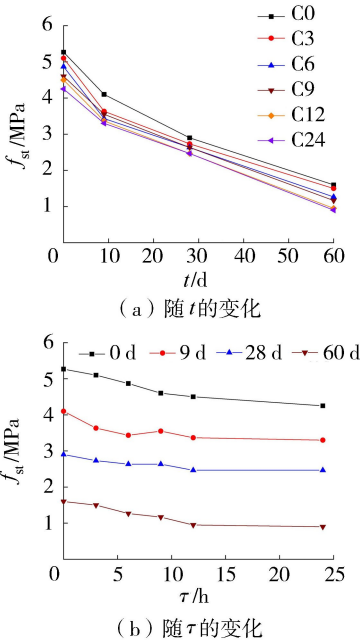


图1 层面劈裂抗拉强度的变化规律

整体而言,层面劈裂抗拉强度与溶蚀时间平方根之间具有较好的线性关系,可忽略层间间歇时间对强度下降速率的影响。

2.2 溶蚀深度

图2(a)为层面溶蚀深度与本体溶蚀深度的差值。层面的溶蚀深度均大于本体溶蚀深度,后者与层间间歇时间无关,溶蚀9 d、28 d和60 d后,本体溶蚀深度分别为3.5 mm、6.9 mm和9.0 mm。从图2(a)可以看出:相同溶蚀时间下,层面与本体之间的溶蚀深度差随着层间间歇时间的延长而增大,而凿毛处理能在一定程度上减小溶蚀深度差;溶蚀时间越长,相同层间间歇时间下的溶蚀深度差越大,如间歇24 h、溶蚀60 d时层面相对本体的溶蚀深度增幅为20.4%。原因主要是层间间歇时间越长,层面黏结质量越差,层面附近的微裂缝越多、宽度越大,且微裂缝的优势方向逐渐趋于顺浇筑层面方向,进而导致浸泡溶液和钙离子的扩散速率越快;随着溶蚀时间的延长,层面的劣化程度将明显严重于远离层面处的本体混凝土。从图2(b)可以看出,层面溶蚀深度均随溶蚀时间呈上升趋势,与溶蚀时间的平方根呈线性正比关系;随着层间间歇时间的延长,层面溶蚀深度逐渐增大,溶蚀9 d、28 d和60 d时,层

间间歇时间增至24 h将导致层面溶蚀深度分别增加15.0%、13.1%和14.0%。

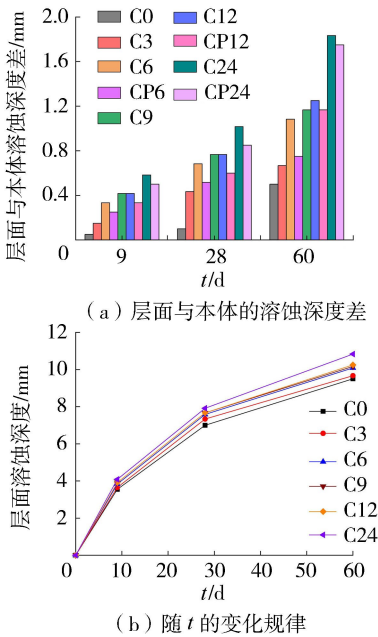


图2 不同试件不同溶蚀时间的层面溶蚀深度

2.3 钙离子累计相对溶蚀量

图3为混凝土试件钙离子累计相对溶蚀量 $\Delta_{Ca^{2+}}$ 的变化规律。从图3(a)可看出:钙离子累计相对溶蚀量随溶蚀时间的延长而增大,溶蚀初期增长速率最快,之后趋于缓慢,其与溶蚀时间平方根之间具有良好的线性关系,可表示为: $\Delta_{Ca^{2+}} = 0.0529t^{0.5}$ ($R^2 = 0.992$),此结果与钙离子溶蚀扩散过程满足Fick第二定律的通用试验结果一致,也验证了本次试验过程的合理性。图3(b)表明层间间歇时间对钙离子累计相对溶蚀量略有影响,层间间歇时间越长,相同溶蚀龄期下的钙离子累计溶蚀量越大,溶蚀

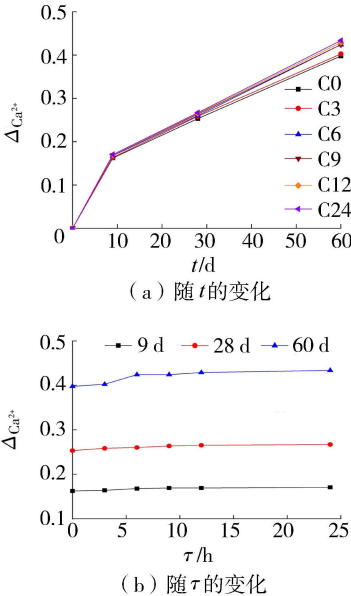
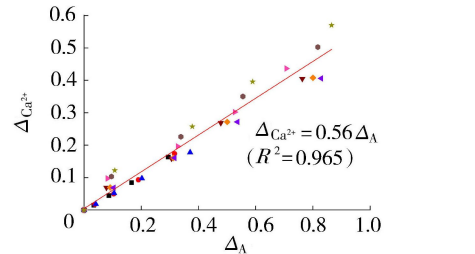


图3 钙离子累计相对溶蚀量的变化规律

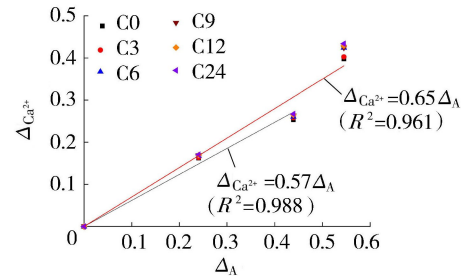
龄期分别为 9 d、28 d 和 60 d 时,层间间歇时间由 0 h 增至 24 h 所引起的钙离子累计相对溶蚀量增幅分别为 4.9%、5.4% 和 9.1%,表明溶蚀 60 d 时的增幅明显增大,原因是浇筑层面为混凝土抗溶蚀的薄弱部位,溶蚀龄期较长时,浇筑层面将发展为溶蚀通道,大量钙离子将由此扩散。

图 4 为溶蚀过程中钙离子累计相对溶蚀量 $\Delta_{Ca^{2+}}$ 与溶蚀面积比 Δ_A 之间的关系,试件配合比见文献[13]。无层面净浆、砂浆和混凝土试件所用材料与有层面混凝土试件完全相同,试件均为边长 50 mm 的立方体。从图 4 可以看出:无层面情况下, $\Delta_{Ca^{2+}}$ 与 Δ_A 之间均具有良好的线性关系,并且与水泥基材料种类和水灰比基本无关,拟合曲线斜率为 0.56,表明溶蚀区钙离子的平均溶蚀程度为 56%;有层面混凝土试件在溶蚀龄期 28 d 之前, $\Delta_{Ca^{2+}}$ 与 Δ_A 之间也呈线性关系,斜率为 0.57,而溶蚀龄期 60 d 时的 $\Delta_{Ca^{2+}}$ 与 Δ_A 拟合曲线斜率为 0.65,明显超过此线性关系对应值,表明此时应有大量的钙离子沿浇筑层面扩散出来。对比分析结果表明:随着溶蚀龄期的延长,层面的抗溶蚀薄弱程度进一步加剧,与本体溶蚀程度的差异性将更加明显,因此在进行溶蚀作用下混凝土结构的服役性能评价时,应更多地关注施工层面及裂缝等局部区域。

- P (水灰比 0.3) ● P (水灰比 0.4) ▲ P (水灰比 0.5)
- ◆ C (水灰比 0.5) ● C (水灰比 0.55) ● C (水灰比 0.6)
- ◆ M (水灰比 0.3) ◆ M (水灰比 0.4) ◆ M (水灰比 0.5)



(a) 无层面净浆(P)、砂浆(M)和混凝土试件(C)



(b) 有层面混凝土试件

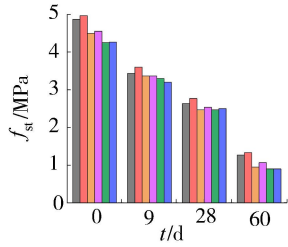
图 4 钙离子累计相对溶蚀量与溶蚀面积比之间的关系

2.4 凿毛处理对层面抗溶蚀性能的影响

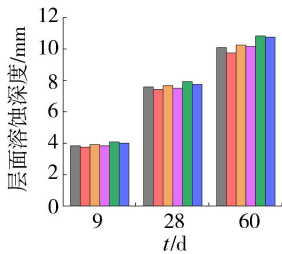
图 5 为层面有无凿毛处理情况下溶蚀评价指标随溶蚀时间的变化规律,图 6 为层面凿毛处理后溶蚀评价指标的变化百分比。总体上看,相同层间间

歇时间下,凿毛处理后的层面劈裂抗拉强度略微提升,溶蚀深度和钙离子累计相对溶蚀量减小,表明凿毛处理能在一定程度上提高浇筑层面的力学性能和抗溶蚀性;层间间歇时间越长,凿毛处理所能达到的提升效果越弱,层间间歇时间在 6 h 以内时,层面凿毛处理所能达到的效果最好。此外,层面是否凿毛处理对溶蚀过程中劈裂抗拉强度衰减速度的影响较小,凿毛处理试件的层面劈裂抗拉强度与溶蚀时间平方根之间的关系为 $f_{st} = f_{st0} - 0.44t^{0.5}$ ($R^2 = 0.962$)。

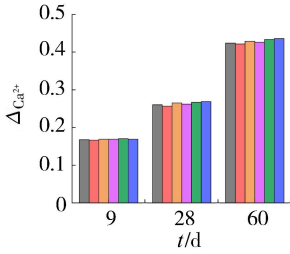
- C6 ■ CP6 ■ C12 ■ CP12 ■ C24 ■ CP24



(a) f_{st}

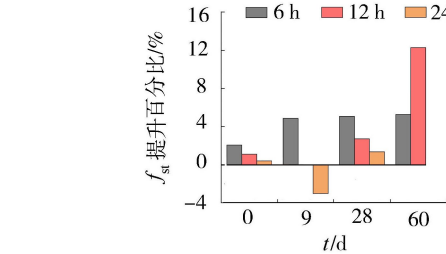


(b) 层面溶蚀深度

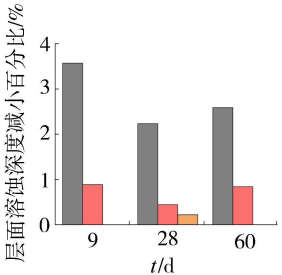


(c) $\Delta_{Ca^{2+}}$

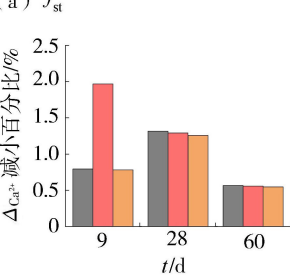
图 5 层面有无凿毛处理下的评价指标



(a) f_{st}



(b) 层面溶蚀深度



(c) $\Delta_{Ca^{2+}}$

图 6 凿毛处理后溶蚀评价指标的变化百分比

层间间歇时间和凿毛处理对混凝土浇筑层面力学性能和渗透性的影响主要由层面黏结质量决定^[2-3]。对比各试件劈裂面可发现:由于浇筑层面的存在,劈裂面粗糙度相对较小,两侧几乎没有石子相互嵌入;未凿毛处理情况下,试件完全沿层面劈裂

开,劈裂面平滑、多孔且有大量浮浆,进而导致黏结性能较差,由表及里溶蚀过程中形成的溶蚀锋较为平顺,完全不受骨料的影响;凿毛处理后层面附近的劈裂面凹凸不平,溶蚀锋受骨料影响较明显,呈不规则状态,表明凿毛处理能提升浇筑层面的黏结质量。

3 混凝土浇筑层面劈裂抗拉强度预测模型

钙含量的变化能有效地反映水泥基材料的物理力学性能演变^[8-10]。图7为层面相对劈裂抗拉强度 f_{rst} (溶蚀后强度值与未溶蚀时强度值之比)与溶蚀时间平方根和钙离子累计相对溶蚀量之间的关系。可以看出,层面劈裂抗拉强度随溶蚀时间平方根和钙离子累计相对溶蚀量的增大而线性下降,层间间歇时间以及凿毛处理主要影响的是强度初值,而对下降速率的影响较小。

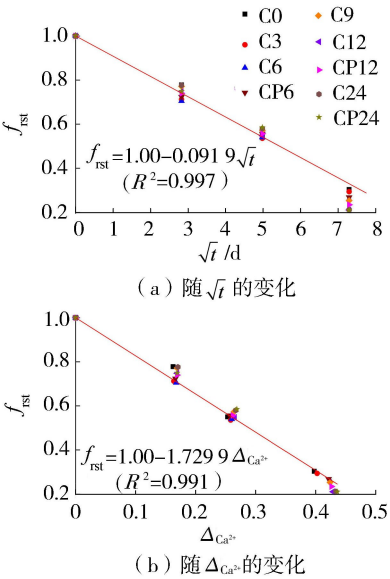


图7 层面相对劈裂抗拉强度的变化规律

溶蚀深度在实际工程中不易测量,且仅出现在接触溶蚀中,不适用于渗透溶蚀,而钙离子溶蚀量可根据监测得到的渗流量及渗透水中的钙离子浓度进行计算。对此,本文以溶蚀时间和钙离子累计相对溶蚀量作为自变量,建立基于溶蚀时间和基于钙离子累计相对溶蚀量的预测模型分别如下:

$$f_{st} = f_{st0}(1 - 0.0919\sqrt{t}) \tag{4}$$

$$f_{st} = f_{st0}(1 - 1.7299\Delta_{Ca^{2+}}) \tag{5}$$

计算结果表明,基于溶蚀时间和钙离子累计相对溶蚀量所建预测模型的复相关系数分别为0.9799和0.9771,除个别数据外相对误差均在5%以内,满足工程精度分析要求。

由于去离子水溶蚀环境最接近工程实际环境,根据文献[11]中混凝土试件的配合比以及钙离子溶蚀质量,计算得到去离子水溶蚀环境下钙离子累

计相对溶蚀量与溶蚀时间平方根之间的系数为 3.75×10^{-4} ,而第2.3节中该系数为0.0529,则浓度为0.5 mol/L硝酸溶液中的加速溶蚀倍率为

$$\beta = \left(\frac{a_{HNO_3}}{a_{H_2O}} \right)^2 = \left(\frac{0.0529}{3.75 \times 10^{-4}} \right)^2 = 1.99 \times 10^4 \tag{6}$$

式中: a_{HNO_3} 、 a_{H_2O} 分别为浸泡在浓度为0.5 mol/L硝酸溶液和去离子水溶液中试件的钙离子累计相对溶蚀量与溶蚀时间平方根之间的线性斜率值; β 为加速溶蚀倍率。

式(6)计算结果表明:浓度为0.5 mol/L硝酸溶液环境下混凝土溶蚀的加速倍率约为2万倍。混凝土抗溶蚀耐久性尚无统一标准,参照GB/T 50476—2019《混凝土结构耐久性设计标准》中设计使用年限100 a时寒冷地区混凝土抗冻耐久性指数不低于60%的规定,层间间歇时间为0 h情况下,基于劈裂抗拉强度确定的浇筑层面耐溶蚀年限为1212 a(根据式(3)计算强度衰减至层面无间歇试件强度初值的60%时所需的加速试验时间,然后按照式(6)中的加速溶蚀倍率进行转换);如果层间间歇时间增至12 h,此时耐溶蚀年限将缩减至467 a,缩幅达61%,表明浇筑层面的存在将严重制约触水混凝土的耐溶蚀年限。上述耐溶蚀年限是根据混凝土的接触溶蚀环境推算的,相比渗透溶蚀,接触溶蚀发展过程非常缓慢,因此得到的耐溶蚀年限较长。如国内某溶蚀较严重的碾压混凝土坝,1993年下闸蓄水,根据2003年监测的总渗流量和溶蚀区总含钙量,估算得到该坝运行10 a后的平均钙溶蚀程度为4.3%^[14],而根据2.3节计算规律,可得接触溶蚀情况下达到此溶蚀程度则需要49 a,按此转换规律和该坝当前渗漏溶蚀状况,浇筑层面的存在将导致其耐溶蚀年限由247 a缩减至95 a。实际上,混凝土坝渗透溶蚀劣化具有非常强的空间变异性,主要溶蚀区是坝体上游侧^[15],因此上游面附近坝体混凝土的溶蚀程度应远大于4.3%,实际耐溶蚀年限会更短。

4 结 论

a. 混凝土层面劈裂抗拉强度与溶蚀时间平方根和钙离子累计相对溶蚀量之间具有良好的线性反比关系,层间间歇时间和凿毛处理主要影响强度初值,而对溶蚀过程中层面劈裂抗拉强度下降速率的影响较小。

b. 层面劈裂抗拉强度随浇筑层间间歇时间的延长而减小,间歇12 h以内呈线性下降趋势,12 h的强度降幅为14.6%,由此将导致混凝土浇筑层面的耐溶蚀年限缩减61%;溶蚀60 d,层间间歇时间由

0h增至12h,层面劈裂抗拉强度降幅由69.6%增至78.9%;凿毛处理能在一定程度上提升层面的力学性能和抗溶蚀性,以6h内的凿毛处理效果最佳。

c. 间歇时间越长,层面溶蚀程度越大,间歇24h时,层面溶蚀深度增加15%;层面溶蚀程度明显大于本体,且溶蚀时间越长,相差越大,间歇24h、溶蚀60d后,层面相对本体的溶蚀深度增幅为20.4%,因此在进行溶蚀作用下混凝土结构的服役性能评估时,应更多地关注施工层面及裂缝等局部区域。

d. 浓度为0.5mol/L硝酸溶液环境下混凝土溶蚀的加速倍率约为2万倍;此溶蚀环境下,无层面净浆、砂浆和混凝土的溶蚀区钙离子平均溶蚀程度均为56%。

参考文献:

[1] 胡江,马福恒,李子阳,等. 渗漏溶蚀混凝土坝力学性能的空间变异性研究综述[J]. 水利水电科技进展,2017,37(4):87-94. (HU Jiang, MA Fuheng, LI Ziyang, et al. Review of spatial variability of mechanical properties of concrete dams impacted by leakage dissolution [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017,37(4):87-94. (in Chinese))

[2] 钟登华,鄢玉玲,崔博,等. 考虑压实质量影响的碾压混凝土坝层间结合质量动态评价研究[J]. 水利学报,2017,48(10):1135-1146. (ZHONG Denghua, YAN Yuling, CUI Bo, et al. Dynamic evaluation of RCC dam interlayer bonding quality considering the influence of compaction quality[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017,48(10):1135-1146. (in Chinese))

[3] 钱鹏,李曙光,徐千军. 混凝土浇筑层面的渗透特性与微裂纹结构特征[J]. 水利学报,2018,49(8):1007-1016. (QIAN Peng, LI Shuguang, XU Qianjun. Permeability and micro-cracks of concrete layer interfaces [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018,49(8):1007-1016. (in Chinese))

[4] 覃茜,徐千军. 成层混凝土的剪切强度和Ⅱ型断裂韧度[J]. 工程力学,2019,36(9):188-196. (QIN Xi, XU Qianjun. The shear strength and mode II fracture toughness of layered concrete[J]. Engineering Mechanics, 2019,36(9):188-196. (in Chinese))

[5] 丁祖德,文锦诚,李晓琴,等. PVA-ECC与既有混凝土黏结面抗渗及劈裂抗拉试验[J]. 建筑材料学报,2019,22(3):356-362. (DING Zude, WEN Jincheng, LI Xiaoqin, et al. Impermeability and splitting tensile tests of PVA-ECC and existing concrete bonding interface[J]. Journal of Building Materials, 2019,22(3):356-362. (in Chinese))

[6] 崔涛,何浩祥,闫维明,等. ECC与既有混凝土结合面的

抗剪性能[J]. 建筑材料学报,2020,23(5):1030-1037. (CUI Tao, HE Haoxiang, YAN Weiming, et al. Experimental research on shear resistance of ECC-xxisted concrete interface [J]. Journal of Building Materials, 2020,23(5):1030-1037. (in Chinese))

[7] 甘磊,沈心哲,王瑞,等. 单裂缝混凝土结构水力劈裂试验[J]. 水利水电科技进展,2017,37(4):30-35. (GAN Lei, SHEN Xinzhe, WANG Rui, et al. Hydraulic fracturing test of concrete structures with single crack[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017,37(4):30-35. (in Chinese))

[8] LIN W, CHENG A, HUANG R, et al. Effect of calcium leaching on the properties of cement-based composites [J]. Journal Wuhan University of Technology (Materials Science Edition), 2011,26(5):990-997.

[9] ROZIÈRE E, LOUKILI A. Performance-based assessment of concrete resistance to leaching [J]. Cement and Concrete Composites, 2011,33(4):451-456.

[10] 孔祥芝,纪国晋,刘艳霞,等. 水工混凝土渗透溶蚀试验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2012,10(1):63-68. (KONG Xiangzhi, JI Guojin, LIU Yanxia, et al. Research on leakage dissolution of hydraulic concrete [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2012,10(1):63-68. (in Chinese))

[11] 孔祥芝,陈改新,李曙光,等. 渗漏溶蚀作用下碾压混凝土层(缝)面抗剪强度衰减规律试验研究[J]. 水利学报,2017,48(9):1082-1088. (KONG Xiangzhi, CHEN Gaixin, LI Shuguang, et al. Studies on the decreasing rule of the anti-shearing strength along RCC joints (cracks) subjected to leaching [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017,48(9):1082-1088. (in Chinese))

[12] 方永浩,安普斌,赵伟,等. 含裂缝水泥基材料的渗透溶蚀及其自愈[J]. 硅酸盐学报,2008(4):451-456. (FANG Yonghao, AN Pubin, ZHAO Wei, et al. Permeating leaching and autogenous healing of cracks of cementitious materials[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2008(4):451-456. (in Chinese))

[13] 徐应莉. 浸水环境下混凝土力学性能退化的试验与数值模拟研究[D]. 常州:常州大学,2021.

[14] 王少伟,包腾飞. 渗透溶蚀对高混凝土坝长期变形影响的数值分析[J]. 长江科学院院报,2020,37(6):62-69. (WANG Shaowei, BAO Tengfei. Numerical analysis on influence of leakage dissolution on long-term deformation of high concrete dam [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020,37(6):62-69. (in Chinese))

[15] HUO J X, MA F H, JI X L. Porosity and permeability variations of a dam curtain during dissolution[J]. Water Science and Engineering, 2019,12(2):155-161.

(收稿日期:2020-12-01 编辑:骆超)