



氯离子侵蚀下混合纤维增强 钢筋混凝土损伤规律

郭 丹¹, 沈才华², 吕世明¹, 谢 飞², 魏思琦², 唐 凯¹

(1. 保利长大海外工程有限公司, 广东 广州 510623;

2. 河海大学, 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 混合纤维增韧混凝土具有很好的耐久性。针对 PVA 和 UPE 混合纤维混凝土, 采用高浓度氯离子溶液进行 120 d 侵蚀试验, 并结合三维数值模拟技术, 预测分析氯离子侵蚀前后钢筋混凝土梁的承载力和损伤变化规律。结果表明, 无纤维混凝土和纤维体积含量为 0.2%(其中 0.1%PVA 和 0.1%UPE)的混凝土受海水侵蚀后脆性增加, 峰值应力和对应的应变减小; 但掺加纤维能降低混凝土梁遭受氯离子侵蚀的抗弯曲承载能力的损失率和峰值应力对应的应变损失率, 同时增加梁的韧性; 加载位移为 20 mm 时, 海水侵蚀后有纤维的梁最终拉伸损伤比无纤维的梁最终拉伸损伤减小 4.9%, 最终压缩损伤比无纤维的梁最终压缩损伤减小 16.2%。

关键词: 纤维混凝土; UPE 纤维; 耐久性; 氯离子侵蚀

中图分类号: TU 528; U 654

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)02-0030-07

Damage law of mixed fiber reinforced concrete under chloride ion erosion

GUO Dan¹, SHEN Cai-hua², LYU Shi-ming¹, XIE Fei², WEI Si-qi², TANG Kai¹

(1. Poly Changda Overseas Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510623, China;

2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Mixed fiber concrete has good durability. Aiming at the PVA and UPE mixed fiber concrete, we carry out the 120 d corrosion test by high concentration chloride solution, predict and analyze the bearing capacity and damage change law of reinforced concrete beams before and after chloride ion corrosion combined with the three-dimensional numerical simulation technology. The results show that the brittleness of non-fiber concrete and concrete with 0.2% fiber (0.1% PVA and 0.1% UPE) volume content increases after being eroded by sea water, peak stress and corresponding strain decrease. However, the addition of fiber can reduce the loss rate of the flexural bearing capacity and the strain loss rate corresponding to peak stress of the concrete beam subjected to chloride ion erosion, and increase the toughness of the beam. When the loading displacement is 20mm, the final tensile damage of the beam with fibers after seawater erosion is 4.9% less than the final tensile damage of the fiber-free beam. And the final compression damage of the beam with fibers is 16.2% less than the final compression damage of the fiber-free beam.

Keywords: fiber reinforced concrete; UPE fiber; durability; chloride ion erosion

世界各地的结构建筑物因混凝土耐久性不足已造成了巨大的经济损失。美国侵蚀工程师协会

和几个国际组织联合调查表明, 1999—2001 年间, 美国每年花费约 2 760 亿美元用于侵蚀治理,

收稿日期: 2021-04-12

作者简介: 郭丹(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为水工构筑物。

其中混凝土结构侵蚀是重要组成部分。随着高性能混凝土的发展, 纤维增韧混凝土^[1-4]开始广泛使用, 纤维混凝土的耐久性问题^[5-8]也成为研究热点。姜锦磊等^[9]采用干湿交替的侵蚀模拟海水环境, 对 PVA (polyvinyl alcohol, 聚乙烯醇)-钢混合纤维混凝土的弯曲韧性进行试验, 结果表明侵蚀后的初裂荷载、峰值荷载和弯曲强度均有所下降。周美容等^[10]针对聚丙烯纤维和碳纤维增强混凝土, 采用 NEL 扩散试验测出氯离子扩散系数 (NEL 法是清华大学路新瀛在离子扩散和电迁移基础上提出的饱盐混凝土电导率试验方法, 将测得的电导值通过 Nernst-Einste 方程计算出氯离子的渗透性), 认为混合纤维增强混凝土材料的抗弯性能、劈裂抗拉强度和耐久性能均优于单掺聚丙烯纤维、碳纤维增强混凝土, 纤维的增韧效应减小微裂纹的扩展, 提高氯离子渗透侵蚀的耐久性。王振山等^[11-12]针对玄武岩纤维混凝土, 研究置于质量分数为 5% 的氯化钠溶液和硫酸钠溶液下的材料耐侵蚀性及力学性能的退化, 结果表明玄武岩纤维可有效抑制侵蚀裂缝的产生和发展, 降低离子迁移速率, 当纤维体积掺量为 0.1% 时, 最为有利, 当掺量超过 0.2% 后, 性能反而降低。陶喆^[13]研究混凝土面板在水环境中盐溶液侵蚀和冻结侵蚀作用下的损伤, 发现混合纤维面板混凝土比单掺纤维面板混凝土更有利于抗盐冻侵蚀, 聚丙烯-聚丙烯腈混合纤维面板混凝土的抗盐冻侵蚀性能不如含钢纤维的混合纤维面板混凝土。周兴宇^[14]针对聚丙烯纤维混凝土进行了混凝土抗渗、抗冻及抗硫酸盐干湿循环试验, 认为纤维的掺入能减少混凝土内部有害孔隙的含量, 单掺聚丙烯细纤维对混凝土耐

久性能的改善作用优于单掺聚丙烯粗纤维。

由于纤维对混凝土基质的影响非常复杂, 而且与施工工艺等人为因素有关^[15], 因此加大了研究的难度。混合纤维可以发挥不同纤维力学特征的过渡效应, 让强度远高于混凝土的纤维发挥更好的作用, 因此具有重要实用价值。本文针对 PVA 和 UPE (ultra-high molecular weight polyethylene, 超高分子聚乙烯) 两种纤维的混合纤维混凝土氯离子侵蚀前后的力学性能开展试验研究, 并结合数值模拟技术, 预测混凝土氯离子侵蚀前后钢筋混凝土梁的弯曲承载力变化规律, 为海洋环境下纤维混凝土梁结构的优化设计提供参考。

1 纤维混凝土氯离子侵蚀前后室内试验分析

1.1 试验方法和原材料

为了对比分析纤维混凝土码头梁在海洋侵蚀环境下的力学性能变化规律, 通过室内增加氯离子浓度加速侵蚀的方法, 侵蚀 120 d, 此时梁的钢筋已锈蚀, 分析材料的耐侵蚀力学特性。考虑现场石子的来源太广, 区别较大, 因此采用现场实际拌合料, 配合比见表 1。其中原材料包括: 海螺牌 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥; 细度模数 2.0 的标准砂; 5~20 mm 的连续级配石子 (含泥量 2.4%); 常州天怡工程纤维公司生产的 PVA 纤维; 湖南中泰特种装备有限责任公司生产的 UPE; 南京地区自来水; HPWR 高性能减水剂 (减水率 26%, 泌水率 45%, 含气量 2.5%)。增强侵蚀海水采用美国材料试验协会 ASTM 标准的基础上增加浓度的方法, 具体各化学成分含量见表 2。

表 1 纤维混凝土配合比

组名	纤维类型	纤维掺量/%	水泥/kg	砂/kg	碎石/kg	水/kg	减水剂/kg	水灰比	砂率
H0	无	0	500	600	1 110	195	5	0.39	0.35
H2	PVA+UPE	0.2 (1.3 kg+0.97 kg)	500	600	1 110	195	5	0.39	0.35

表 2 试验海水的各化学成分含量

化学成分	含量/(g·L ⁻¹)	占比/%
NaCl	68.4	68.4
MgCl ₂	14.5	14.5
Na ₂ SO ₄	11.4	11.4
CaCl ₂	3.2	3.2
KCl	1.9	1.9
NaHCO ₃	0.6	0.6

1.2 试样的力学参数试验结果分析

高浓度海水浸泡 120 d 后的标准化无侧限三轴压缩曲线及拟合曲线见图 1，海水侵蚀前的应力应变拟合方程见表 3。拟合曲线根据《混凝土结构设计规范》^[6] 建议的无量纲化方法：上升段采用多项式，下降段采用有理分式。

表 3 混凝土浸泡前应力-应变无量纲化曲线方程

混凝土类型	浸泡前上升段曲线方程	相关性系数 R^2	浸泡前下降段曲线方程	相关性系数 R^2
H0	$y_{11} = 1.68x - 0.005x^2 - 0.677x^3$	0.998 0	$y_{12} = \frac{x}{1.73(x-1)^2+x}$	0.993
H2	$y_{21} = 1.93x - 1.09x^2 + 0.15x^3$	0.999 5	$y_{22} = \frac{x}{0.893(x-1)^2+x}$	0.998

注： $x = \varepsilon/\varepsilon_{cr}$ ，即应变与峰值应变比值； $y = \sigma/f_{cr}$ ，即应力与峰值应力比值。

表 4 混凝土试块浸泡海水前后弹性模量

试验组别	σ_a /MPa	σ_0 /MPa	ε_a /‰	ε_0 /‰	E_c /GPa
H0	11.550	0.50	0.375	0.020	31.13
H2	11.424	0.50	0.391	0.018	29.37
海水浸泡后 H0	11.167	0.50	0.339	0.011	32.52
海水浸泡后 H2	12.733	0.50	0.397	0.015	32.02

注： σ_a 、 ε_a 为 a 点的应力、应变； σ_0 、 ε_0 为初始应力、应变； E_c 为弹性模量。

在海水中浸泡的混凝土试块的峰值压应变减小，H0 和 H2 混凝土的峰值压应变分别从 1.852‰、1.962‰减小到 1.241‰、1.802‰。峰值压应变减少率分别为 33.0%、8.2%，掺加纤维能降低氯离子侵蚀混凝土的峰值应变损失率，纤维能在混凝土发生大变形时提供抗拉拔力，抵消一部分荷载，因此纤维混凝土处于极限状态时比素混凝土允许产生更大的变形。

浸泡海水后，H0、H2 混凝土的峰值应力分别从 34.7、38.2 MPa 变化到 33.5、34.3 MPa，变化幅值分别为-3.5%、-10.2%，纤维混凝土的强度折减增大。

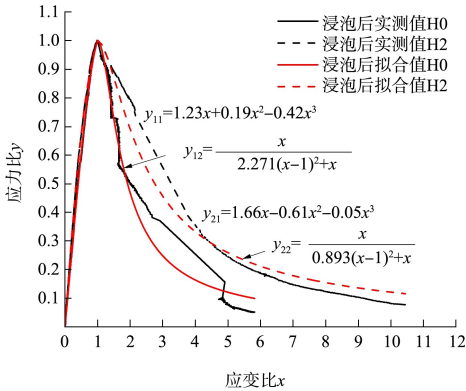


图 1 混凝土试块浸泡海水后应力-应变无量纲化曲线

在高浓度海水浸泡 120 d 后，H0 和 H2 混凝土力学参数试验分析值见表 4。H0、H2 混凝土的弹性模量分别从 31.13、29.37 GPa 增加到 32.52、32.02 GPa。

2 数值模型的构建

2.1 几何模型的构建

2.1.1 模型的尺寸

模型尺寸和部件位置见图 2，建立模型的效果见图 3。

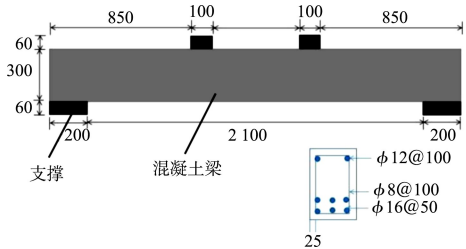


图 2 混凝土梁尺寸（单位：mm）

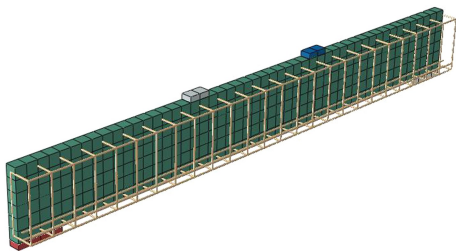


图 3 混凝土梁 abaqus 模型效果

2.1.2 材料属性

混凝土的密度 2.4 t/m^3 ，泊松比为 0.2 ，抗压损伤本构关系根据实测曲线拟合确定，抗拉损伤本构参考规范根据抗压强度等比例缩减后确定(折减系数 $1/12$)。钢筋采用理想的弹塑性模型，钢筋的密度为 7.8 t/m^3 ，弹性模量 190 GPa ，泊松比 0.3 ，屈服强度 210 MPa 。加载方式为两点位移加载。

2.1.3 网格划分

对混凝土梁和上下钢垫板均采用实体单元 C3D8R 划分，网格边长为 50 mm 。选用完全的线性积分单元取消减缩积分单元。钢筋网采用嵌入式建模，采用桁架单元 T3D2 划分，网格边长为 50 mm 。

2.2 混凝土材料本构模型的选择

Abaqus 软件为混凝土定义了基于塑性的连续损伤模型，并假定了混凝土的主要破坏机制：拉伸断裂、压缩碎裂。等效压缩塑性应变 $\tilde{\epsilon}_c^{pl}$ 和等效拉伸塑性应变 $\tilde{\epsilon}_t^{pl}$ 决定着混凝土的屈服面和破坏面演化过程。软件中采用的简化应力-应变关系见图 4，其中： σ_c 、 σ_t 分别为受压、受拉非弹性应力； σ_{cu} 为极限压应力； σ_{e0} 为屈服应力； ϵ_{cl} 、 σ_{cl} 为压缩总应变及其对应的应力； d_c 、 d_t 分别为受压、受拉损伤因子； E_0 为初始弹性模量； $\tilde{\epsilon}_c^{in}$ 、 $\tilde{\epsilon}_t^{ck}$ 分别为非弹性压缩应变、受拉开裂应变； $\tilde{\epsilon}_c^{pl}$ 、 $\tilde{\epsilon}_t^{pl}$ 分别为压缩、拉伸等效塑性应变； ϵ_{0c}^{el} 、 ϵ_{0t}^{el} 分别为压缩、拉伸等效弹性应变； ϵ_c^{el} 、 σ_t^{el} 分别为可恢复的压缩、拉伸弹性应变； σ_{t0} 为失效应力； ϵ_{tl} 、 σ_{tl} 为拉伸总应变及其对应的应力。

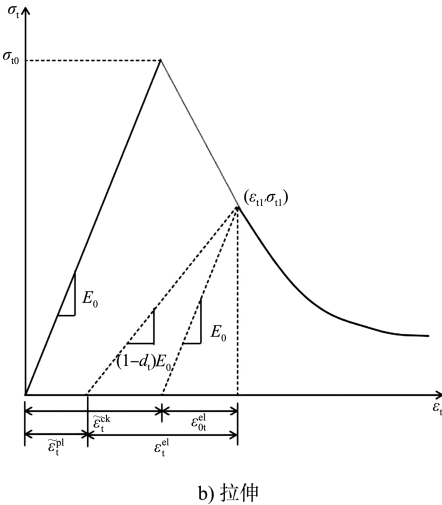
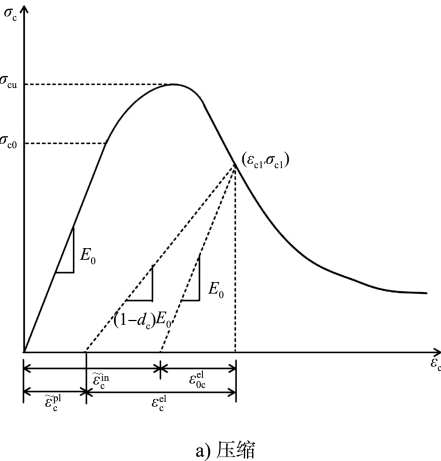


图 4 混凝土压缩和拉伸的应力-应变曲线

当混凝土在应力-应变曲线上任意一点处卸载时，卸载响应体现为弹性刚度降低，在图中体现为斜率下降。刚度降低的特征变量分别为压缩损伤因子 d_c 和拉伸损伤因子 d_t 。本文采用 Sidoroff 根据能量等价原理推导求解(应用最广泛)的公式：

$$d = 1 - \sqrt{\frac{\sigma}{E_0 \epsilon}} \tag{1}$$

式中： d 为损伤因子，包括压缩损伤因子 d_c 和拉伸损伤因子 d_t ； σ 为真实应力； ϵ 为真实应变； E_0 为初始无损弹性模量。由于本试验未做轴拉应力-应变曲线，因此受拉极限强度假设为实测受压极限强度的 $1/12$ ，其他参数参考规范取值方法等比例获取。

3 氯离子侵蚀前后钢筋混凝土梁的损伤发展规律预测分析

3.1 钢筋混凝土梁的荷载挠度曲线规律分析

根据模拟结果，当施加位移小于最大弹性变形量时，支座反力(或施加荷载)与位移呈线性变化。当施加位移量为混凝土最大弹性变形量时，例如图 5 中 A 点，即混凝土塑性变形的起始点，位移超过 A 点后，混凝土梁进入塑性变形阶段，外观表现为混凝土部分区域出现开裂，伴随着压缩损伤与拉伸损伤的出现。随着位移增加，荷载-位移的曲线斜率降低，呈现明显的非线性变形的特点。当位移增加至混凝土的极限承载位移时，例如图 5 中 B 点，

施加的荷载最大，混凝土梁达到极限承载能力。随后荷载-位移曲线进入下降段，如果是未添加钢筋的素混凝土，荷载会迅速下降。由于建立的模型中含有钢筋，能与混凝土共同发挥作用承担残余承载能力。因此荷载降低程度不明显。

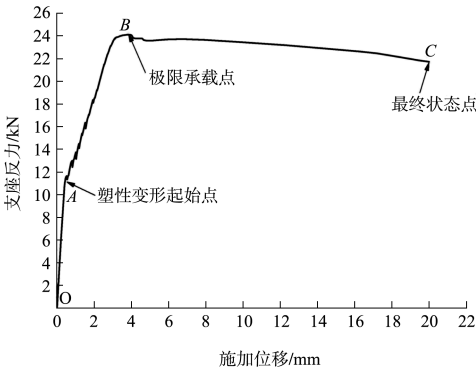


图 5 混凝土梁荷载-挠度曲线特征点

钢筋混凝土梁荷载-挠度曲线见图 6。可以看出，H0 和 H2 混凝土梁海水侵蚀前后极限承载力均有所降低，分别从 24.12、24.28 kN 降低至 23.82、23.06 kN。加载位移 20 mm 时 H0 和 H2 梁破坏最终状态的承载力分别从 21.73、22.77 kN 降低至 18.98、21.19 kN。H0 和 H2 梁被海水侵蚀 120 d 后梁的残余承载力损失率分别为 12.7% 和 6.9%，掺加纤维能有效降低混凝土梁遭受氯离子侵蚀的抗弯曲能力的劣化程度。

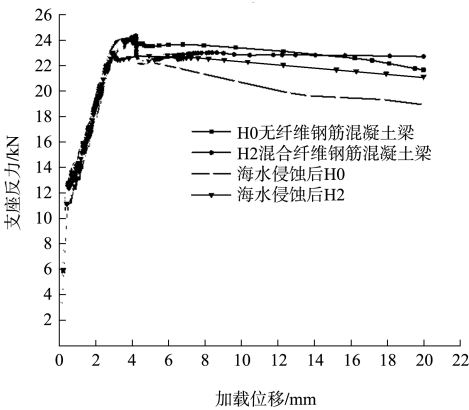


图 6 钢筋混凝土梁荷载-挠度曲线

3.2 海水侵蚀后钢筋混凝土梁的损伤分布预测对比分析

3.2.1 相同位移荷载下梁的等效应力

高浓度海水侵蚀前后梁的 Mises 应力云图见图

7。可以看出，高浓度海水侵蚀 120 d 对 H0 梁的应力分布影响很小，最大 mises 应力仅从 16.8 MPa 变化到 17.19 MPa。对 H2 梁应力分布影响较大，最大 mises 应力从 29.65 MPa 变化到 22.63 MPa。这与混凝土梁破坏最终状态的荷载大小相一致。

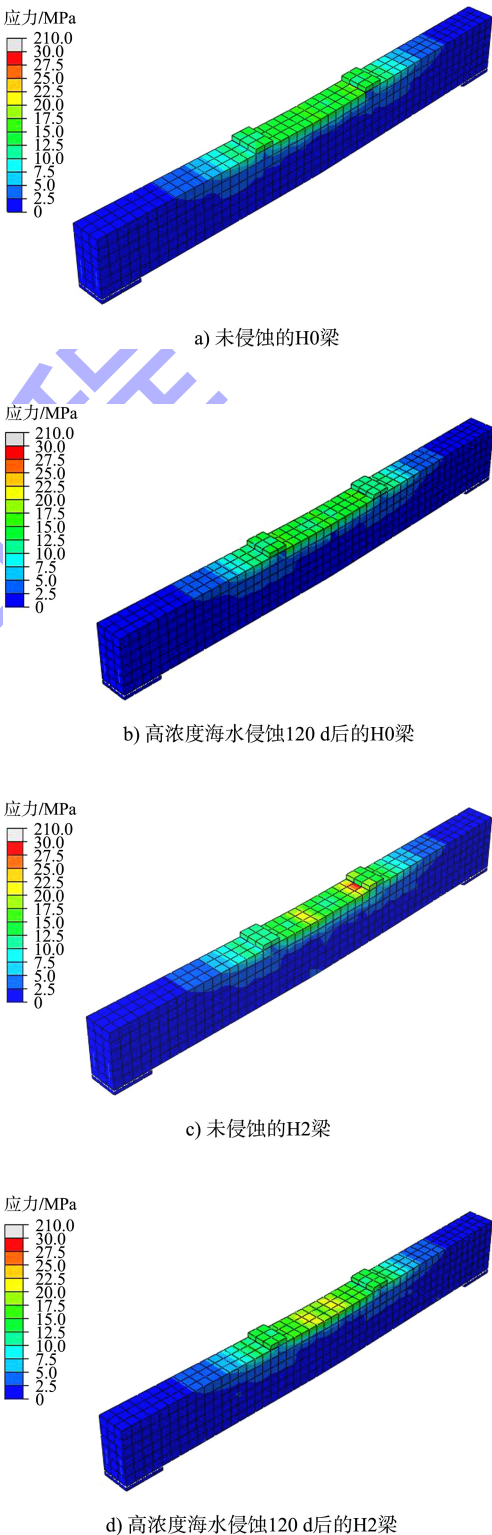


图 7 高浓度海水侵蚀前后梁的 Mises 应力云图

3.2.2 相同位移荷载下梁的损伤

高浓度海水侵蚀前后混凝土梁损伤因子云图见图 8。可以看出, 经高浓度海水侵蚀 120 d 后的混凝土梁在承受 20 mm 加载位移时的损伤范围更大。浸泡后 H2 梁高损伤区域分散不连续。由图 9a) 可看出, 经高浓度海水侵蚀 120 d 后的 H0 梁和 H2 混凝土梁损伤变化规律趋于一致, 加载位移为 0~0.95 mm 时最大拉伸损伤因子迅速增加至峰值, 加载位移为 0.95~20 mm 时拉伸损伤因子变化不大, 加载位移 20 mm 以后无纤维钢筋混凝土梁海水侵蚀前后最大拉伸损伤分别为 0.843、0.881, 增加了 4.5%, 混合纤维钢筋混凝土梁在高浓度海水侵蚀 120 d 前后最大拉伸损伤分别为 0.831 和 0.840, 增加了 1.1%。海水侵蚀后有纤维的梁最终拉伸损伤 0.840 比无纤维的梁最终拉伸损伤 0.881 减小 4.9%, 纤维对控制最大拉伸损伤有一定效果。由图 9b) 可看出, 高浓度海水侵蚀 120 d 后有纤维的梁最终压缩损伤 0.746 比无纤维的梁最终压缩损伤 0.867 减小 16.2%, 纤维对控制最大压缩损伤效果更明显。从发展规律看, 无纤维的混凝土梁在 20 mm 位移荷载下损伤已达峰值, 但混合纤维混凝土梁还未达峰值损伤, 说明纤维仍有增韧阻裂的能力。

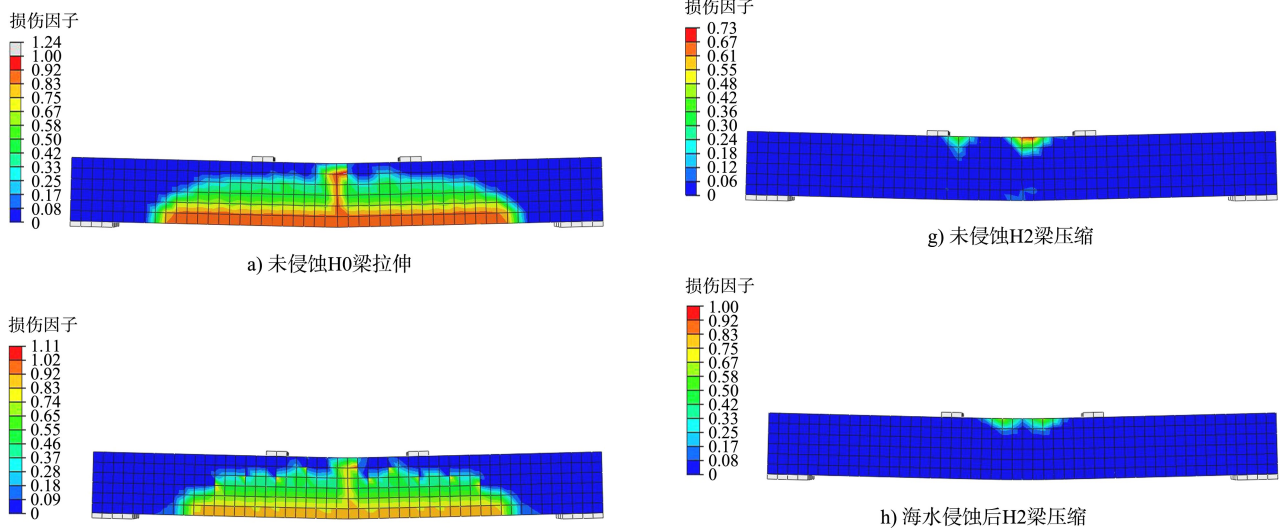


图 8 高浓度海水侵蚀前后混凝土梁损伤因子云图

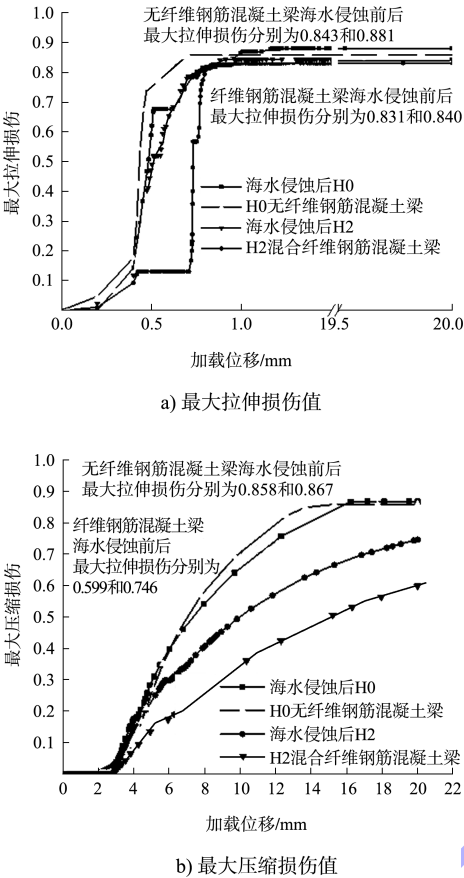


图9 高浓度海水侵蚀前后混凝土梁最大损伤值

4 结论

1)在高浓度海水浸泡 120 d 后,无纤维混凝土和体积含量 0.2% (其中 0.1% PVA 和 0.1% UPE)混合纤维混凝土的弹性模量分别从 31.17、29.29 GPa 增加到 32.53、31.96 GPa,说明高浓度海水侵蚀 120 d 后混凝土脆性增加;峰值压应变分别从 1.852‰、1.962‰减小到 1.241‰、1.802‰,减少率分别为 33.0%和 8.2%,说明掺加纤维能降低氯离子侵蚀混凝土的峰值应变损失率;峰值应力分别从 34.7、38.2 MPa 变化到 33.5、34.3 MPa,变化幅值分别为-3.5%和-10.2%,纤维混凝土的强度折减大,分析认为纤维的掺入增加了初始空隙缺陷使得混凝土侵蚀相对严重,但由于纤维的增强效果,总体强度仍大于无纤维试样。

2)无纤维 H0 和体积含量 0.2% (其中 0.1% PVA 和 0.1% UPE)混合纤维 H2 钢筋混凝土梁被高浓度海水侵蚀 120 d 后极限承载力均有所降低,分别从 24.12、24.28 kN 降低至 23.82、23.06 kN。加

载位移 20 mm 时 H0 和 H2 梁破坏最终状态的承载力分别从 21.73、22.77 kN 降低至 18.98、21.19 kN;对应的峰值强度分别降低 9.9%、3.6%;H0 梁和 H2 梁被海水侵蚀 120 d 后梁的残余承载力损失率分别为 12.7%和 6.9%,说明纤维能很好提高梁的韧性,能有效降低混凝土梁遭受氯离子侵蚀的抗弯曲能力的劣化程度。

3)经高浓度海水侵蚀 120 d 后的 H0 梁和 H2 混凝土梁损伤变化规律趋于一致,加载位移为 0~0.95 mm时最大拉伸损伤因子迅速增加至峰值,0.95~20 mm 拉伸损伤因子变化不大。加载位移 20 mm,高浓度海水侵蚀 120 d 后有纤维的梁最终拉伸损伤 0.840 比无纤维的梁最终拉伸损伤 0.881 减小 4.9%,最终压缩损伤 0.746 比无纤维的梁最终压缩损伤 0.867 减小 16.2%,说明纤维对最大压缩损伤的控制效果更明显。

参考文献:

[1] 邵旭东,樊伟,黄政宇.超高性能混凝土在结构中的应用[J].土木工程学报,2021,54(1):1-13.

[2] 刘波,张绪涛,尹瑞杰,等.聚丙烯纤维混凝土研究综述[J].四川水泥,2021(1):5-6.

[3] 程智清,李双祥,刘宇,等.自修复混凝土的研究进展[J].公路交通科技(应用技术版),2020,16(11):84-87.

[4] 史玉良,陈新明,焦华喆,等.纤维-聚合物混凝土性能研究现状及在巷道中的应用展望[J].混凝土与水泥制品,2020(2):51-54,70.

[5] 辛明,王学志,佟欢.纤维混凝土耐久性能研究综述[J].辽宁工业大学学报(自然科学版),2020,40(1):35-39.

[6] 金伟良,薛文,陈驹.海岸及近海混凝土材料耐久性设计指标的影响参数分析[J].建筑结构学报,2011,32(12):86-97.

[7] 郝晓丽.氯腐蚀环境混凝土结构耐久性与寿命预测[D].西安:西安建筑科技大学,2004.

[8] JAMES A,BAZARCHI E.Rebar corrosion detection, protection, and rehabilitation of reinforced concrete structures in coastal environments: a review [J]. Construction and building materials, 2019, 224: 1026-1039.