

水工混凝土裂缝高强环氧砂浆修复的力学性能评价分析

张俊涛¹, 闵巧玲², 李明超², 张梦溪², 冯达²

(1. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 郑州 河南 450003; 2. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350)

摘要: 裂缝广泛存在于水工混凝土结构中,降低了结构的整体性与安全性,需采取有效措施对裂缝进行修补加固。以含预制裂缝的混凝土三点弯曲梁为研究对象,采用数值模拟方法开展高强环氧砂浆修复前、后的力学性能与破坏模式研究,通过混凝土三点弯曲梁室内力学试验验证本文材料参数及模型设置的正确性,以0厚度粘结单元模拟裂缝与环氧砂浆界面的粘结作用。结果表明:采用高强环氧砂浆修复后的混凝土梁承载力可超过无裂缝时的混凝土梁,混凝土梁的极限承载力随环氧砂浆填充缝高比的增大先增大,后达到稳定状态,修复后的混凝土梁达到极限承载力后强度迅速降低。最后提出不同缝高比下修复后的混凝土梁极限承载力增大倍数量化计算公式,为混凝土结构的修复提供技术参考。

关键词: 水工混凝土; 高强环氧砂浆; 裂缝; 修复加固; 三点弯曲试验; 力学性能

中图分类号:TV33

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2022)01-0152-07

Evaluation and analysis of mechanical properties of high-strength epoxy mortar for repairing cracks in hydraulic concrete

ZHANG Juntao¹, MIN Qiaoling², LI Mingchao², ZHANG Mengxi², FENG Da²

(1. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: Hydraulic concrete constructions are prone to cracking, which compromises the structure's integrity and safety. To repair the cracks and reinforce the structure, effective measures must be implemented. A three-point bending concrete beam with precast cracks was taken as the research object to investigate the mechanical property and failure mode of the beam before and after it was repaired by high-strength epoxy mortar. Meanwhile a laboratory mechanical experiment was conducted to verify the accuracy of the material parameters and model settings. The bonding effect between the crack and the epoxy mortar interface was simulated using zero-thickness cohesive elements. The findings reveal that the bearing capacity of the concrete beam restored with high-strength epoxy mortar performed even better than that of the concrete beam without cracks. With the increase of the crack height ratio of the epoxy mortar, the ultimate bearing capacity of the concrete beam increased first and then stabilized. After achieving its final ultimate bearing capacity, the repaired concrete beam's strength rapidly deteriorated. Finally, a calculation formula for quantifying the increment of the ultimate bearing capacity of concrete beams after repair with various crack height ratios was proposed, which can be used to provide technical assistance for the repair of concrete structures.

Key words: hydraulic concrete; high-strength epoxy mortar; crack; repair and reinforcement; three-point bending experiment; mechanical property

收稿日期:2021-11-25; 修回日期:2021-12-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51879185、52179139)

作者简介:张俊涛(1987-),男,河南郑州人,工程师,主要从事水工材料与结构设计研究。

通讯作者:闵巧玲(1994-),女,湖北随州人,博士研究生,主要从事水工混凝土结构设计研究。

1 研究背景

大体积混凝土结构由于内外温差、干缩、钢筋锈蚀等原因易出现裂缝,裂缝对结构的整体性与安全性具有极大的不利影响,美国的 Dworshark、瑞士的 Zeuzier、Zervreila、前苏联的 Sayan - Shushensk、奥地利的 Zillergrundl、Kolnbrein 等混凝土大坝在建设或运行期都出现了严重的裂缝,其中, Kolnbrein 特高拱坝的坝踵开裂尤为突出。坝体裂缝修复耗时长、费用高,后期修复费用甚至超过新建费用^[1]。随着坝体服役年限的增长,我国多个坝体工程面临严重的裂缝问题^[2-5],造成安全事故及巨大的经济损失,因此混凝土裂缝修复问题一直是工程领域研究的热点之一^[6]。混凝土裂缝可通过灌浆法进行修复,环氧砂浆具有高抗拉、低收缩、快速硬化^[7]等特点,是目前使用较多的灌浆材料,常用于地基加固、道路维护和大坝修复^[8-12]。

国内外学者进行了环氧砂浆材料改性能研究,制备出了适用于不同工程领域的裂缝修复材料。李秀君等^[13]通过在乳化沥青中掺入水性环氧树脂进行改性处理,发现水性环氧树脂可有效改善材料的致密性与粘聚力。张健^[14]通过调整单体和乳化剂等材料的掺入比例,制备出一种适用于高寒区混凝土裂缝修复的改性树脂乳液砂浆。廖婉蓉等^[15]研发了一种适合水下混凝土修复的新型环氧砂浆,具有抗压强度高、水下粘结强度大、抗冲磨效果好等特点。Wang 等^[16]开展了环氧树脂在水泥基灌浆料中改性的研究,发现适量环氧树脂有助于水泥发生水化反应,但过量的环氧树脂会在水泥颗粒表面形成薄膜,进而限制水化反应。Wang 等^[17]通过将两种稀释剂组合研制了一种超低黏度的环氧灌浆料,可用于修补建筑结构中的微裂纹。部分学者针对环氧砂浆对混凝土的修复性能开展了室内试验,陆洲导等^[18]采用环氧树脂对劈裂后的混凝土试件进行了修复,通过楔入劈拉试验分析修复后试件的断裂性能,提出以起裂韧度作为试件注胶修复效果的评价指标。Kan 等^[7]对比了不同细砂含量的环氧砂浆修复混凝土断裂的力学性能,结果表明纯环氧树脂修复时,试件加载时沿修复界面断裂破坏,而细砂含量增大时,试件加载时沿混凝土区域断裂。Issa 等^[19]、于腾^[20]采用环氧树脂对含裂缝混凝土立方体进行了修复并开展了室内性能对比试验,结果表明修复后混凝土立方体可明显恢复其抗压强度。Xu 等^[21]通过室内试验测试了不同温度下环氧混合

料的固化时间及强度特性,结果表明高温条件会加速环氧混合料的固化强度。Modesti 等^[22]通过制备不同强度的 45°混凝土圆柱试件,采用环氧树脂粘结上下混凝土试件,测试其破坏模式,发现上下混凝土强度相同时,会发生粘结层破坏的问题。崔懂文等^[23]通过室内试验发现研发的环氧界面剂修复后的混凝土试件粘结强度随结合面湿度的增大而逐渐降低。在数值模拟方面, Ji 等^[24]建立了三点弯曲加载后裂缝修复数值模型,发现环氧树脂修复后的钢筋混凝土梁承载力相比最初的钢筋混凝土梁提高了 30% ~ 40%。Yaphary 等^[25]通过分子动力学评估了氯化钠溶液对环氧树脂与 SiO₂ 界面处的离子粘结性能,表明盐溶液可显著削弱环氧树脂与混凝土界面处的粘接作用。郭鹏成等^[26]通过半圆弯曲断裂试验测试了环氧树脂混合料的断裂性能,并采用双线性内聚力模型模拟了该过程,二者吻合较好。考虑断裂损伤的内聚力模型适合模拟界面处存在粘结作用的结构体^[27],适用于环氧砂浆对混凝土裂缝的修复性能分析。

综合以上分析,由于环氧砂浆性能的不同使得修复的效果有所差异,对于非线性复合材料的混凝土而言,高强环氧砂浆对其进行修复的力学性能的评价研究仍存在不足。为进行含预制裂缝混凝土修复性能评价分析,以混凝土三点弯曲梁为对象,通过数值模拟开展高强环氧砂浆修复前、后不同缝高比下混凝土三点弯曲梁失效模式研究,提出不同缝高比下修复后的混凝土三点弯曲梁极限承载力增大倍数量化计算公式,为工程中水工混凝土结构修复加固提供支持。本文研究方法框架如图 1 所示。

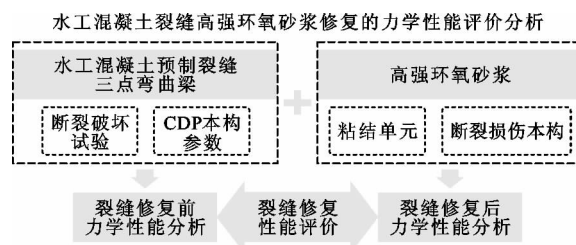


图1 本文研究方法框架

2 本构模型

环氧砂浆通过界面粘结作用对混凝土裂缝进行修复,因此修复后混凝土包括两种材料属性:混凝土材料与环氧砂浆填充材料。数值模拟中不同材料根据其特性适用于不同的本构模型,混凝土采用混凝土塑性损伤本构模型 (concrete damaged plasticity,

CDP)本构,环氧砂浆胶结层采用断裂损伤本构模型。

2.1 塑性损伤本构模型

CDP 本构模型通过损伤因子的计算来模拟混凝土在多种荷载作用下的受压破碎及受拉开裂现象^[28-30]。《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[31]中的混凝土单轴受压及受拉时的应力-应变曲线如图 2 所示,相应的应力-应变关系表达式如下:

$$\sigma_c = (1 - d_c) E_0 (\varepsilon_c - \varepsilon_c^p) = (1 - d_c) E_0 \varepsilon_c^e \quad (1)$$

$$\sigma_t = (1 - d_t) E_0 (\varepsilon_t - \varepsilon_t^p) = (1 - d_t) E_0 \varepsilon_t^e \quad (2)$$

式中: σ_c 、 σ_t 分别为混凝土在受压与受拉作用下的

应力,MPa; d_c 、 d_t 分别为混凝土受压损伤因子与受拉损伤因子; E_0 为混凝土初始弹性模量,MPa; ε_c 、 ε_t 分别为受压与受拉时的应变; ε_c^p 、 ε_t^p 分别为卸载后的有效受压塑性应变与有效受拉塑性应变, ε_c^e 、 ε_t^e 分别为弹性受压应变与弹性受拉应变。

2.2 断裂损伤本构模型

断裂损伤本构模型适用于 COH3D8 粘结单元,通过断裂准则判断单元的损伤状态,可用于模拟混凝土的脆性断裂过程。粘结单元在法向和切向的应力-位移曲线如图 3 所示。

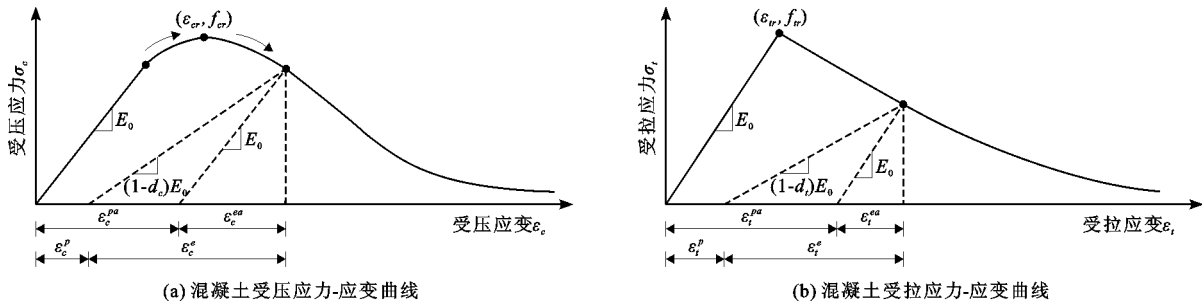


图 2 CDP 混凝土塑性损伤本构模型

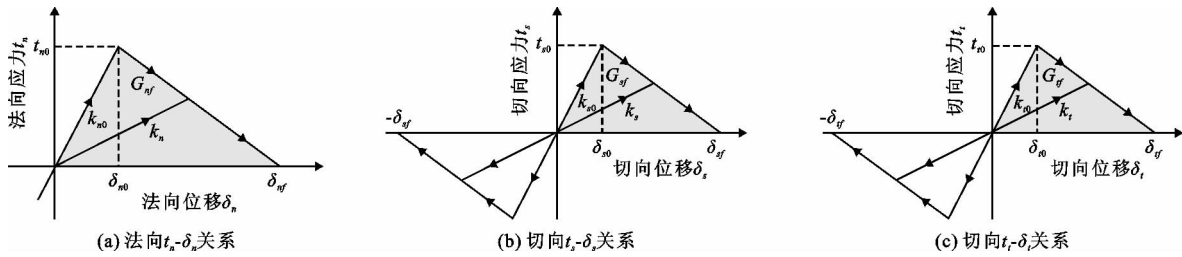


图 3 混凝土粘结单元损伤本构模型

图 3 中 t_{n0} 和 t_{s0} 、 t_{t0} 分别为粘结单元的峰值法向应力和峰值切向应力,MPa; δ_{n0} 和 δ_{s0} 、 δ_{t0} 分别为峰值处对应的法向位移和切向位移,mm; δ_{nf} 和 δ_{sf} 、 δ_{tf} 分别为粘结单元完全损伤时的法向位移和切向位移,mm; G_{nf} 和 G_{sf} 、 G_{tf} 分别为单元完全损伤时法向和切向释放的断裂能,N/mm。当粘结单元法向位移和切向位移小于 δ_{n0} 和 δ_{s0} 、 δ_{t0} 时,单元处于弹性状态;当粘结单元法向位移和切向位移达到 δ_{n0} 和 δ_{s0} 、 δ_{t0} 时,单元开始发生损伤,可由损伤因子 d 表征单元的刚度退化。

粘结单元的法向和切向应力-位移关系分别如公式(3)~(5)所示:

$$t_n = \begin{cases} (1-d)k_{n0}\delta_n & (\delta_n \geq \delta_{n0}) \\ k_{n0}\delta_n & (\delta_n < \delta_{n0}) \end{cases} \quad (3)$$

$$t_s = \begin{cases} (1-d)k_{s0}\delta_s, & |\delta_s| \geq \delta_{s0} \\ k_{s0}\delta_s, & |\delta_s| < \delta_{s0} \end{cases} \quad (4)$$

$$t_t = \begin{cases} (1-d)k_{t0}\delta_t, & |\delta_t| \geq \delta_{t0} \\ k_{t0}\delta_t, & |\delta_t| < \delta_{t0} \end{cases} \quad (5)$$

法向和切向的断裂能计算分别如公式(6)~(8)所示:

$$G_{nf} = \frac{1}{2}t_{n0}\delta_{nf} \quad (6)$$

$$G_{sf} = \frac{1}{2}t_{s0}\delta_{sf} \quad (7)$$

$$G_{tf} = \frac{1}{2}t_{t0}\delta_{tf} \quad (8)$$

采用名义应力平方准则作为粘结单元的起裂准则^[32]:

$$\left(\frac{t_n}{t_{n0}}\right)^2 + \left(\frac{t_s}{t_{s0}}\right)^2 + \left(\frac{t_t}{t_{t0}}\right)^2 = 1 \quad (9)$$

式中: t_n 和 t_s 、 t_t 分别为粘结单元法向和切向应力,MPa; k_{n0} 和 k_{s0} 、 k_{t0} 分别为粘结单元法向和切向界面硬化系数,MPa/mm。

3 材料参数选取

3.1 混凝土材料参数

范向前等^[33-34]、胡少伟等^[35]通过室内试验与数值模拟开展了含预制裂缝的 C35 混凝土三点弯曲断裂性能研究,研究中采用了断裂损伤本构模型模拟混凝土的断裂性能。本文通过面积等效原理将

该断裂损伤本构模型转换为 CDP 受拉损伤本构模型,C35 混凝土材料计算参数见表 1。在缝高比 $h = 0.4$ 条件下,模拟计算裂缝宽度与顶部支座反力 (F) 的关系,并将本文数值模拟结果与文献[33]室内试验及文献[35]中基于扩展有限元(extended finite element method, XFEM)法在不同缝高比下的数值模拟结果进行对比,如图 4 所示。

表 1 C35 混凝土材料计算参数

本构模型	弹性模量/GPa	泊松比	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	抗拉强度/MPa	断裂能/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	极限拉应变
断裂损伤本构 ^[34]	31.5	0.167	2400	1.65	102.8	
CDP 本构	31.5	0.167	2400	1.65		0.0062

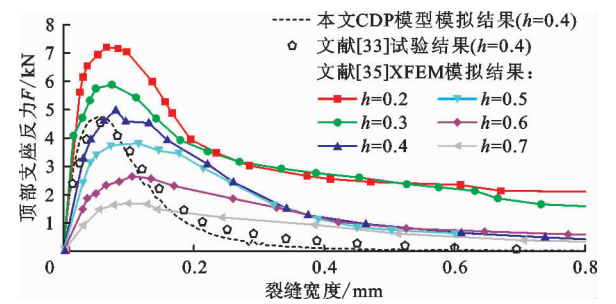


图 4 裂缝宽度 - 顶部支座反力关系曲线本文数值模拟结果与相关文献结果对比

由图 4 可见,文献[35]采用 XFEM 法计算的峰值承载力处对应的裂缝宽度大于本文计算结果,混凝土采用 CDP 本构模型相比于断裂损伤本构模型更接近室内试验曲线的变化趋势,表明本文混凝土材料参数选取及模型设置的正确性;通过三点弯曲梁的 XFEM 计算^[35]可以看出,混凝土的极限承载力随着缝高比的增大而逐渐减小,峰值后的承载力减小程度逐渐减缓。

3.2 环氧砂浆材料参数

环氧砂浆为南京理工大学郭鹏成等^[26]研发的高弹环氧树脂掺入一定级配的石料与矿粉组成,材料参数见表 2。该材料具有粘结性能好、强度高的特点,弹性模量接近混凝土材料,修复后混凝土协调变形性能好,适用于含裂缝混凝土的修复。

表 2 环氧砂浆材料参数^[26]

弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa	断裂能/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)
21.25	0.25	30	279.6

4 裂缝修复前后力学性能分析

4.1 数值模型

混凝土三点弯曲梁模拟试件长 1 000 mm,高

200 mm,宽 120 mm,混凝土设计强度等级为 C35,中部设置了不同缝高比 h 的预制裂缝,裂缝宽度为 3 mm,用上述环氧砂浆对裂缝进行填充修复。采用 Abaqus 数值分析软件开展混凝土三点弯曲梁结构性能分析,其中混凝土弯曲梁底部设置两个对称固定支座,顶部中心处设置 1 个支座,在该支座处缓慢施加竖向位移,使结构发生破坏,支座与混凝土的摩擦系数取 0.35,数值模型如图 5 所示,其中混凝土与环氧砂浆均为 C3D8R 实体单元。由于环氧砂浆与混凝土裂缝通过界面粘结进行加固修复,因此该粘结层采用 0 厚度的 COH3D8R 单元形式进行二者接触形式的模拟,即该区域应力超过环氧砂浆抗拉强度时混凝土与填充的环氧砂浆层脱离,以此评价环氧砂浆的修复性能。根据上节不同材料的本构模型参数建立计算模型,并提取修复前、后混凝土三点弯曲梁顶部支座处的位移 - 反力曲线。

4.2 力学性能分析

4.2.1 修复前力学性能 修复前不同缝高比下的混凝土三点弯曲梁的破坏模式如图 6 所示。由图 6 可以看出,不同缝高比下,混凝土三点弯曲梁从中部开始发生损伤,损伤不断发展,逐渐贯穿混凝土试件,是标准的 I 型断裂。

图 7 为修复前不同缝高比混凝土梁顶部支座位移 - 反力曲线。由图 7 可以看出,无裂缝时混凝土梁达到极限承载力后,随着顶部支座位移的增大,反力迅速下降,原因是混凝土梁底部出现损伤时,内部拉应力处于较大水平,损伤一旦发生即快速发展;裂缝的存在大大降低了混凝土梁的极限承载力,并且随着裂缝缝高比的增大,混凝土梁的极限承载力逐渐减小,峰值后的承载力下降程度也逐渐减缓;已有的混凝土三点弯曲梁室内试验在缝高比 $h = 0.4$ 时极限承载力为 4.55 kN^[33],与本文计算的极限承载力 4.75

kN 相对误差为4.40%,误差较小,验证了本文数值模拟计算的正确性。



图5 混凝土三点弯曲梁数值模型(单位:mm)

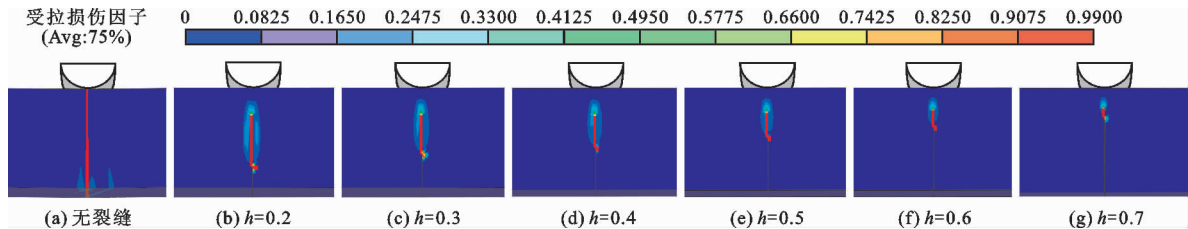


图6 修复前不同缝高比混凝土梁破坏模式

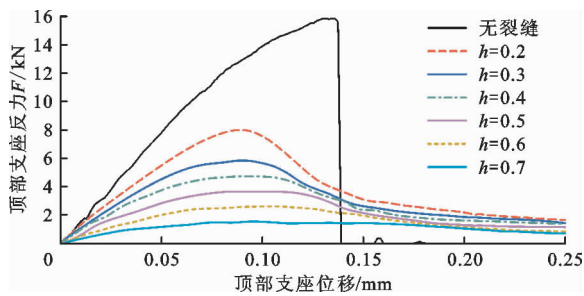


图7 修复前不同缝高比混凝土梁顶部支座位移-反力曲线

4.2.2 修复后力学性能 采用环氧砂浆对不同缝高比的混凝土进行修复,对其力学性能进行分析。修复后不同缝高比混凝土梁的破坏模式如图8所示,由图8可以看出,缝高比无预制裂缝时,混凝土三点弯曲梁从中部逐渐向上发生损伤破坏;修复缝高比 $h < 0.4$ 时,混凝土三点弯曲梁损伤由平行于宽度方向逐渐向上倾斜至环氧砂浆填充的裂缝顶部

处,损伤在该部位竖直向上发展,最终使混凝土三点弯曲梁发生破坏;修复缝高比 $h \geq 0.4$ 时,混凝土三点弯曲梁由底部斜向损伤逐渐向上倾斜,局部损伤沿环氧砂浆临近混凝土竖直向上发展,表现在混凝土梁断裂后可观测到环氧砂浆填充界面,当损伤发展至环氧砂浆填充的裂缝顶部时,损伤在该部位竖直向上发展,最终使混凝土三点弯曲梁发生破坏。

因此不同缝高比修复后的混凝土三点弯曲梁破坏模式具有较大的差异,缝高比小时,损伤沿混凝土内部开始发展,缝高比大时,局部损伤会沿着临近环氧砂浆界面处的混凝土发展,但最终均会发展至裂缝顶部处并沿该处继续竖直向上延伸。由于环氧砂浆抗拉强度高于混凝土,因此修复后的三点弯曲梁的损伤均在混凝土材料内部产生,环氧砂浆内部与粘结层均未出现损伤,表明所采用的环氧砂浆对混凝土梁的修复效果良好。

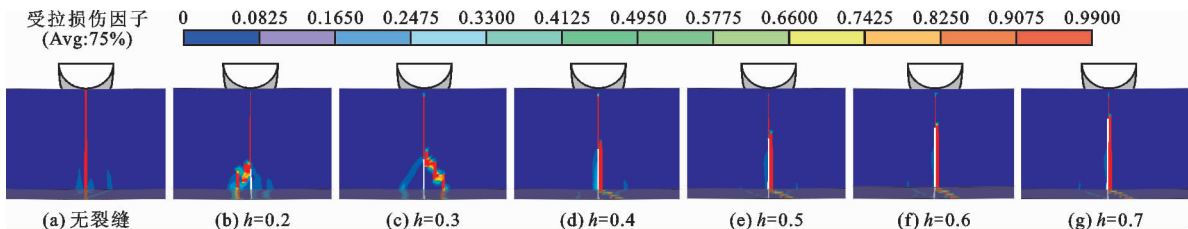


图8 环氧砂浆修复后不同缝高比混凝土梁破坏模式

图9为环氧砂浆修复后不同缝高比混凝土梁顶部支座位移-反力曲线。由图9可看出,混凝土梁破坏前,不同缝高比混凝土梁的位移-反力曲线基本重合,荷载达到峰值后,混凝土梁迅速发生损伤,反力迅速下降,反映了修复后混凝土梁断裂的脆性。

修复裂缝的缝高比 $h < 0.4$ 时,混凝土梁的极限承载力随缝高比增大逐渐增大,而当修复裂缝的缝高比 $h \geq 0.4$ 时,混凝土梁的承载力基本一致,表明环氧砂浆修复后的混凝土梁的极限承载力随缝高比增大逐渐趋于稳定。

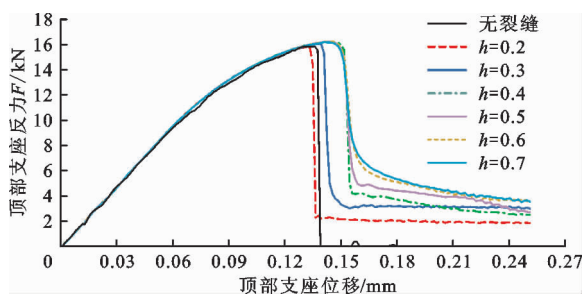


图9 环氧砂浆修复后不同缝高比混凝土梁顶部支座位移-反力曲线

4.3 混凝土梁修复性能评价

不同缝高比混凝土梁裂缝采用环氧砂浆修复前后的承载力对比如图10所示,由图10可看出,裂缝的存在使混凝土梁的承载力大幅降低,环氧砂浆修复后的混凝土梁极限承载力增大的效果明显,缝高比 $h = 0.7$ 时,相比于未修复前的极限承载力可增加9.48倍,这也说明了混凝土结构高拉应力区中裂缝修复的必要性及环氧砂浆对混凝土修复的适用性。根据计算结果拟合修复后的混凝土承载力增大系数(环氧砂浆修复裂缝后比修复前的极限承载力增大倍数)与环氧砂浆填充缝高比之间的关系见式(10),该拟合式的拟合优度达到0.989,拟合精度较高。由关系式(10)可见,混凝土承载力增大系数 m 与环氧砂浆缝高比 h 呈正相关。

$$m = 0.276e^{\frac{h}{0.2}} + 0.13 \quad (10)$$

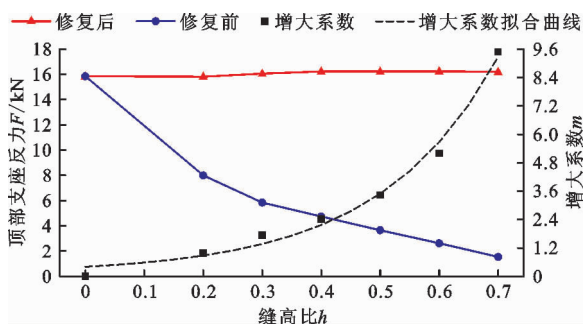


图10 不同缝高比混凝土梁裂缝修复前后的承载力对比

5 结论

本文开展了环氧砂浆修复前后不同缝高比下混凝土三点弯曲梁力学性能及失效模式的数值模拟,通过混凝土三点弯曲梁室内力学试验验证了材料参数设置的正确性。采用高强环氧砂浆对三点弯曲梁预制裂缝进行了修复,通过对比修复前后混凝土梁的承载力,提出了不同缝高比下混凝土极限承载力增大倍数量化计算公式,得出以下结论:

(1)混凝土三点弯曲梁中由于预制裂缝的存在,承载力大幅降低,随着缝高比的增大,混凝土梁

的极限承载力逐渐减小,峰值后的承载力下降程度逐渐减缓,含预制裂缝的混凝土梁的损伤沿梁中部开始发展直至贯穿高度方向。

(2)采用高强环氧树脂修复的混凝土三点弯曲梁的承载力可超过无裂缝时的混凝土梁,随着环氧砂浆填充缝高比的增大,混凝土梁的极限承载力先增大后达到稳定状态,修复后的混凝土梁损伤均沿混凝土材料内部发展,表现在达到极限承载力后混凝土梁强度迅速降低。

(3)修复后混凝土梁的破坏模式随着缝高比的增大表现出较大的差异,修复缝高比小于0.4时,损伤由平行于混凝土梁宽度处倾斜发展至裂缝顶部后竖向延伸,修复缝高比超过0.4时,损伤由底部斜向逐渐向上倾斜,局部损伤沿环氧砂浆临近混凝土竖直向上发展,发展至裂缝顶部后竖向延伸。

(4)环氧砂浆修复后的混凝土梁极限承载力增大效果明显,缝高比为0.7时,相比于未修复前的极限承载力可增加9.48倍。

值得注意的是,本文针对素混凝土三点弯曲梁开展了环氧砂浆修复前后力学性能对比研究,修复后的混凝土梁加载过程中具有明显的脆性,为降低脆性后期可针对钢筋混凝土梁开展环氧砂浆修复前后力学性能的对比研究。

参考文献:

- [1] 刘毅,杜雷功,钱文勋,等.高寒区高混凝土坝关键技术难题与解决途径[J].水利水电技术,2020,51(3):45-52.
- [2] 苏怀智,李金友.重力坝工程病险除控实施效能评估研究述评[J].水力发电学报,2018,37(4):12-25.
- [3] 韩小妹,邵剑南,杨春宝.高寒区混凝土坝低温防裂温控措施的探讨[J].水利规划与设计,2021(1):115-119.
- [4] 徐波,夏辉.混凝土坝裂缝性态及其危害性分析方法研究综述[J].水资源与水工程学报,2016,27(6):162-168.
- [5] 张晓飞,王晓平,黄宇,等.寒潮条件下碾压混凝土拱坝温度应力仿真研究[J].水资源与水工程学报,2018,29(1):192-197.
- [6] 高浩.弹性环氧砂浆在加纳Akosombo大坝结构缝修补中的应用[J].大坝与安全,2020(5):55-58.
- [7] KAN Y C, LEE M G, LEE H W. Experimental investigation of mode-I fracture toughness of real-cracked concrete repaired by epoxy[J]. Construction and Building Materials, 2021, 293: 123490.
- [8] XIANG Qian, XIAO Feipeng. Applications of epoxy materials in pavement engineering[J]. Construction and Building Materials, 2020, 235(C): 117529.
- [9] CHEN Leilei, ZHANG Xiangfei, MA Wenqi, et al. Development and evaluation of a pothole patching material for

- steel bridge deck pavement[J]. Construction and Building Materials, 2021, 313: 125393.
- [10] WANG Zhi, QIN Wenjing, LI Long, et al. Experimental research on variable-amplitude fatigue behavior of cracked mortar after epoxy grouting[J]. Construction and Building Materials, 2021, 304: 124600.
- [11] 熊小斌. 寒冷地区环氧砂浆-混凝土界面性能演化规律试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- [12] 谢开仲, 何俊泓. 高性能桥梁混凝土裂缝修复胶的制备及性能研究[J]. 中国胶粘剂, 2021, 30(2): 14-19+34.
- [13] 李秀君, 惠致富, 严慧忠, 等. 水性环氧树脂改性乳化沥青黏结性能试验分析[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(1): 160-166.
- [14] 张健. 高寒区渠道衬砌混凝土裂缝快速修复技术研究[J]. 水利科学与寒区工程, 2021, 4(1): 59-65.
- [15] 廖婉蓉, 张贵金, 肖通, 等. 一种适合混凝土水下修复的新型环氧砂浆[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(2): 127-131+138.
- [16] WANG Yuxuan, LIU Quansheng. Investigation on fundamental properties and chemical characterization of water-soluble epoxy resin modified cement grout[J]. Construction and Building Materials, 2021, 299: 123877.
- [17] WANG Wenzhao, ZHAO Weiquan, ZHANG Jinjie, et al. Epoxy-based grouting materials with super-low viscosities and improved toughness[J]. Construction and Building Materials, 2020, 267(1): 121104.
- [18] 陆洲导, 孙慧, 余江滔, 等. 环氧树脂修复混凝土裂缝的断裂试验研究[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(6): 1049-1052+1062.
- [19] ISSA C A, DEBS P. Experimental study of epoxy repairing of cracks in concrete[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(1): 157-163.
- [20] 于腾. 环氧树脂灌浆修补混凝土裂缝试验研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2016.
- [21] XU Jiayun, MA Biao, MAO Weijie, et al. Strength characteristics and prediction of epoxy resin pavement mixture[J]. Construction and Building Materials, 2021, 283: 122682.
- [22] MODESTI L A, VARGAS A S, SCHNEIDER E L. Repairing concrete with epoxy adhesives[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2020, 101: 102645.
- [23] 崔懂文, 张贵金, 范明, 等. 水利工程渠道混凝土结构修复材料及应用[J]. 水力发电学报, 2021, 40(1): 24-31.
- [24] JI K, GAO N, WANG P, et al. Finite element model of concrete repaired by high molecular weight methacrylate (HMWM)[J]. Engineering Structures, 2021, 233(5): 111860.
- [25] YAPHARY Y L, YU Zechuan, LAM R H W, et al. Molecular dynamics simulations on adhesion of epoxy-silica interface in salt environment[J]. Composites Part B Engineering, 2017, 131: 165-172.
- [26] 郭鹏成, 姚波, 李木子. 环氧树脂混合料断裂特性与数值模拟[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(5): 1160-1166+1176.
- [27] XIONG Xueyu, XIAO Qisheng. Meso-scale simulation of bond behaviour between retarded-bonded tendons and concrete[J]. Engineering Structures, 2020, 228: 111410.
- [28] 黄宇劫. 基于 XCT 图像和比例边界有限元法的混凝土细观断裂模拟[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [29] 任青文, 殷亚娟, 沈雷. 混凝土骨料随机分布的分形研究及其对破坏特性的影响[J]. 水利学报, 2020, 51(10): 1267-1277+1288.
- [30] 李明超, 闵巧玲, 张梦溪, 等. 新型碾压式导电混凝土功能材料力学性能试验与精细仿真分析[J/OL]. 中国科学: 技术科学, 1-14[2021-11-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5844.TH.20210730.1547.006.html>.
- [31] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [32] 孔宪京, 屈永倩, 邹德高, 等. 强震作用下面板堆石坝跨尺度面板开裂演化分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(6): 989-996.
- [33] 范向前, 胡少伟, 朱海堂, 等. 非标准钢筋混凝土三点弯曲梁双 K 断裂特性[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(5): 733-736+762.
- [34] 范向前, 胡少伟, 陆俊. 非标准混凝土三点弯曲梁双 K 断裂韧性试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(10): 152-157.
- [35] 胡少伟, 米正祥. 基于扩展有限元法的混凝土裂缝扩展过程数值模拟[J]. 水利学报, 2014, 45(S1): 51-56.

(上接第 151 页)

- [14] 速宝玉, 沈振中, 赵坚. 用变分不等式理论求解渗流问题的截止负压法[J]. 水利学报, 1996, 27(3): 22-29+35.
- [15] 沈振中, 毛春梅. 稳定渗流场流网的计算与自动化绘制[J]. 河海大学学报, 1994, 22(5): 75-77.
- [16] REN Jie, SHEN Zhenzhong, YANG Jie, et al. Back analysis of the 3D seepage problem and its engineering applications[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(2): 113.
- [17] 朱岳明, 龚道勇. 三维饱和-非饱和渗流场求解及其逸出面边界条件处理[J]. 水科学进展, 2003, 14(1): 67-71.
- [18] 李险峰. 三峡库区蔡坡堆积体库水位联合降雨工况下的渗流特性及边坡稳定性研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(6): 194-200.
- [19] 丁家平. 有限单元法的渗流量求解及渗流图像的自动化绘制[J]. 水利水运工程学报, 1987(2): 81-89.
- [20] 王东, 沈振中, 陶小虎. 尾矿坝渗流场三维有限元分析与安全评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(3): 307-312.