

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2022.03.010

钢纤维掺量对超高性能混凝土力学性能影响研究

王雄锋, 陈波, 张丰, 何畅, 徐霁云

(南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 为研究钢纤维体积掺量对超高性能混凝土(UHPC)力学性能的影响,设计并制备了钢纤维体积掺量分别为1.0%、1.5%、2.0%的三组UHPC试件,开展了坍落度、扩展度、抗压强度和四点弯曲试验。结果表明:随着钢纤维体积掺量从0%~2%,坍落度从265 mm降到了240 mm,扩展度从540 mm降到了425 mm,抗压强度从103.9 MPa提高到了123.7 MPa。当钢纤维掺量分别为1.0%、1.5%和2.0%时,抗弯强度分别为16.7 MPa、23.1 MPa和23.8 MPa,弯曲韧性分别为87.6 N·m、116.0 N·m和122.8 N·m。随着钢纤维掺量的增加,UHPC流动性降低;UHPC抗压、抗弯强度和弯曲韧性呈增长趋势,但是增长趋势减缓。由于钢纤维主要承受拉应力和桥接基体,所以在抗压强度、抗弯强度和弯曲韧性指标中,抗弯强度和弯曲韧性指标增长幅度更大。

关键词: 超高性能混凝土;钢纤维体积掺量;弯曲韧性;抗压强度;抗弯强度

中图分类号: TU528

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2022)03-0061-06

Influence of Steel Fiber Content on Mechanical Properties of Ultra-High Performance Concrete

WANG Xiongfeng, CHEN Bo, ZHANG Feng, HE Yang, XU Jiyun

(State Key Laboratory of Hydrology-water Resources and Hydraulic Engineering,
Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210029, China)

Abstract: In order to analyze the effects of steel fiber volume content on the mechanical properties of Ultra-High Performance Concrete (UHPC), three groups of steel fiber UHPC specimens with volume content of 1.0%, 1.5% and 2.0% were designed and prepared. Slump, expansion, compressive strength and four-point bending tests were carried out. The results show that with the volume content of steel fiber from 0% to 2%, the slump decreases from 265 mm to 240 mm, the expansion decreases from 540 mm to 425 mm, and the compressive strength increases from 103.9 MPa to 123.7 MPa. When the steel fiber content is 1.0%, 1.5% and 2.0%, respectively, the flexural strength is 16.7 MPa, 23.1 MPa and 23.8 MPa, and the bending toughness is 87.6 N·m, 116.0 N·m and 122.8 N·m, respectively. With the increase of steel fiber content, the fluidity of UHPC decreases. The compressive strength, flexural strength and flexural toughness of UHPC showed an increasing trend, but the increasing trend slowed down. Because steel fiber mainly bears tensile stress and bridging matrix, the indexes of flexural strength and flexural toughness increase more in the indexes of compressive strength, flexural strength and flexural toughness.

Keywords: Ultra-High Performance Concrete; steel fiber volume content; bending toughness; compressive strength; flexural strength

收稿日期:2022-01-29

修稿日期:2022-02-23

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51739008);江苏省自然科学基金资助项目(BK20201125)

作者简介:王雄锋(1998—),男,硕士研究生,研究方向为超高性能混凝土。E-mail:1738502517@qq.com

通讯作者:陈波(1978—),男,博士,正高级工程师,主要从事高性能与超高性能纤维增强水泥复合材料基本理论与应用技术研究。E-mail:bchen@nhri.cn

随着超高层建筑、大跨度桥梁等基础设施建设的发展,土木工程材料对轻量化、高强度、绿色化和耐久性的要求越来越高,超高强度和高耐久性的超高性能混凝土得到了广泛的应用^[1]。超高性能混凝土(Ultra High Performance Concrete, UHPC)的概念由 Richard 等^[2]在 1994 年首次提出,早期也称为活性粉末混凝土(RPC)。1979 年, Bache 采用细料致密法(Densified with Small Particles, DSP),通过加入硅灰与高性能减水剂,来减小孔隙率,制备出抗压强度为 150 MPa~200 MPa 的混凝土,制品以 DENSIT 作为商标出现在市场中^[3-4]。此后,在建筑领域得到越来越广泛的应用。

1996 年, Oliver 等^[5]研究证明掺加钢纤维后 RPC 的抗弯强度和能量吸收能力得到了显著提升。陈从春等^[6]发现,将 2.5% 体积掺量的钢纤维掺入 UHPC 中,相比较 UHPC 基体,立方体抗压强度提高 25%,劈裂抗拉强度提高 1.7 倍,抗弯强度提高 83%,当掺入 3% 的钢纤维时,抗压强度可达到 150 MPa 甚至更高。鞠彦忠等^[7]研究单掺钢纤维对 RPC 试件的抗弯强度、劈裂抗拉强度以及抗压强度的影响,随着钢纤维的增加,当体积掺量在 1.0% 到 2.0% 范围内时,钢纤维对 RPC 的强度影响不大;当体积掺量超过 2.0% 后, RPC 试件的强度提高显著;当钢纤维体积掺量大于 3.5% 后,仅抗弯强度继续提升。Yoo 等^[8]分析了体积掺量分别为 1%、2%、3%、4% 和长径比为 65 的钢纤维对 UHPC 力学性能的影响,抗压强度的最佳掺量为 3%,抗弯强度的最佳掺量为 4%。黄雪林等^[9]研究了纤维种类和掺量对混凝土强度的影响,认为纤维的增加对混凝土的强度增加作用是有限的。程鹏等^[10]研究了不同钢纤维掺量和粗骨料掺量对 UHPC 弯曲性能的影响。梁兴文等^[11]、郭志强^[12]研究了异型钢纤维掺量对抗弯强度的影响,都得出当钢纤维掺量为 5% 时抗弯强度最大。但是钢纤维体积掺量对超高性能混凝土增强增韧评价结论不一致,所以有必要进一步试验研究。因此试验选用水胶比为 0.19,研究钢纤维分别以 1.0%、1.5%、2.0% 的体积掺量加入基准组(S0)中对超高性能混凝土(UHPC)流动性和力学性能的影响。试验过程先进行 UHPC 流动性测试;然后进行抗压强度、抗弯强度和弯曲韧性试验。

1 试验材料与方法

1.1 原材料

试验采用海螺牌 P O42.5 普通硅酸盐水泥;宣

城双乐 F 类 I 级粉煤灰;细度模数为 2.8 的河砂;正源益清新材料技术有限公司生产的 SiO₂ 含量 92.54%、28 d 活性指数为 142.5% 的硅灰;苏州兴邦化学建材有限公司生产的聚羧酸减水剂,减水率为 28%;贝卡尔特的微细镀铜圆直钢纤维,性能见表 1。

表 1 钢纤维参数

类型	长度/mm	直径/mm	长径比	抗拉强度/MPa
圆直形	13 ± 1	0.2 ± 0.02	65	2750

1.2 配合比设计

UHPC 水胶比为 0.19,砂胶比为 1.4,钢纤维为分别以 1.0%、1.5%、2.0% 的体积掺量加入基准组(S0)中,配合比见表 2。

表 2 配合比

编号	不同材料用量/(kg · m ⁻³)						
	水泥	硅灰	粉煤灰	中砂	水	减水剂	钢纤维
S0	451	226	226	1264	172	4.5	0
S10	447	224	224	1253	170	4.4	76
S15	445	222	222	1245	169	4.4	113
S20	443	221	221	1240	168	4.4	150

1.3 试件制备

试件的成型按照以下顺序:(1)依据配合比准备好材料。将胶凝材料、砂和减水剂投入搅拌机中干拌 1 min;(2)将水缓慢倒入工作中的搅拌机并持续搅拌 5 min~6 min;(3)采用人工均匀投入方式将钢纤维在两分钟内撒入浆体中,搅拌 5 min。(4)搅拌完成,进行 UHPC 坍落度和扩展度测试;(5)坍落度和扩展度测试完毕后立即进行混凝土浇筑,浇筑完毕后振动 15 s~25 s 至密实状态。试件成型完毕后,在 20℃ ± 2℃ 静置 2 d 后拆模,将其置于 20℃ ± 2℃、相对湿度 95% 以上的标准养护室内养护 3 d,取出试件并将其放入 60℃ 热水养护池中养护 7 d,最后冷却至室温即养护完毕。养护完毕的试件即可进行力学性能测试与分析。

1.4 试验方法

1.4.1 工作性能

根据《超高性能混凝土试验方法标准》^[13](T/CECS 864—2021)对掺钢纤维的 UHPC 进行扩展度测试,如图 1 所示。将新鲜的 UHPC 砂浆倒入模具直至填满,将多余砂浆刮去后,将模具快速向上提。当新鲜砂浆稳定后,在没有任何震动的情况下

测量相互垂直的2个直径并记录,扩展度为数据平均值^[14]。

1.4.2 力学性能

根据《超高性能混凝土试验方法标准》^[13](T/CECS 864—2021)对UHPC的抗压强度和抗弯强度进行测试。制备6个100 mm×100 mm×100 mm的试件为一组进行抗压强度测试;制备3个100 mm×100 mm×400 mm的试件为一组进行抗弯全曲线测试,如图2所示。



图1 扩展度测试

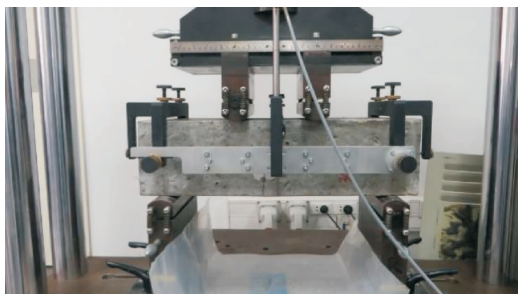


图2 四点弯曲试验

2 结果与讨论

2.1 钢纤维体积掺量对UHPC工作性能影响

钢纤维对UHPC坍落度和扩展度的影响如图3所示。从图中可以看出,不掺钢纤维的UHPC(基准组)坍落度和扩展度分别为265 mm、540 mm,流动性最好,钢纤维的掺入对坍落度和扩展度有一定影响。当钢纤维掺量分别为1.0%、1.5%和2.0%时,坍落度分别为260 mm、255 mm和240 mm,较基准组分别下降了1.9%、3.8%和9.4%;扩展度分别为510 mm、490 mm和425 mm,较基准组分别下降了5.6%、9.3%和21.3%。这是由于钢纤维与基体之间产生黏结和摩擦,阻碍了UHPC的流动性^[15]。此外,钢纤维与基体之间形成的网架结构进一步阻碍了UHPC的流动。由数据可知,随着钢纤维掺量增加,UHPC流动性呈下降趋势。

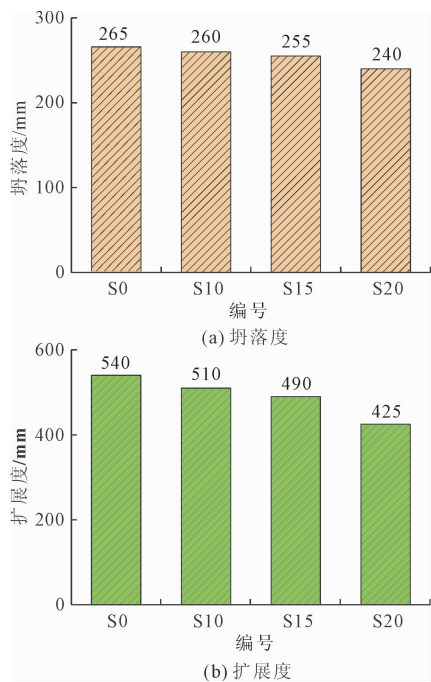


图3 钢纤维掺量对UHPC坍落度和扩展度的影响

2.2 钢纤维体积掺量对UHPC力学性能影响

2.2.1 钢纤维体积掺量对UHPC抗压强度影响

不同钢纤维体积掺量UHPC的立方体抗压强度见图4。不掺钢纤维的UHPC立方体抗压强度为103.9 MPa,强度最低,当钢纤维掺量分别为1.0%、1.5%和2.0%时,抗压强度为116.7 MPa、120.2 MPa和123.7 MPa,分别提升了12.3%、15.5%和19.1%。钢纤维的掺入对UHPC立方体抗压强度有较大的提升,但随着钢纤维体积掺量从1.0%~2.0%,抗压强度变化不大。

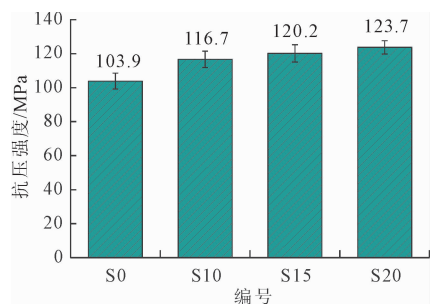


图4 钢纤维体积掺量对UHPC抗压强度的影响

未掺入钢纤维时,试件内部存在较多孔隙和其他缺陷,受压过程中为压剪破坏,如图5所示。未掺入钢纤维的UHPC试件在受压过程中,试件端面与压板之间由于试件横向膨胀受到约束而在接触面上产生摩擦阻力,所以试件破坏时留下一个未被破坏的棱锥体且发生爆裂情况。当有纤维加入试件中时,其乱向分布构成三维骨架与UHPC共同承受外力,

一方面钢纤维能够约束变形,产生“环箍效应”,另一方面抗拉强度高的钢纤维能够抑制微裂纹的发展^[15-16]。在此过程中,钢纤维与基体不断发生黏结滑移,钢纤维与基体间良好的黏结力使其消耗了大量能量,因此试件抗压能力提高。

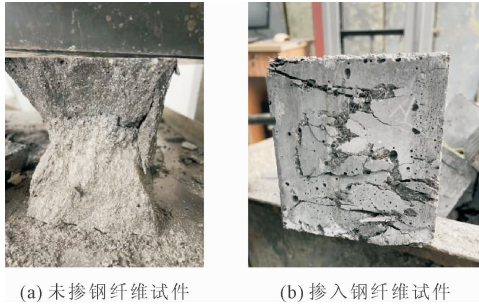


图 5 UHPC 受压破坏形态

2.2.2 钢纤维体积掺量对 UHPC 抗弯强度和弯曲韧性影响

UHPC 破坏后的形态如图 6 所示。UHPC 试件受弯破坏时大多是单裂缝破坏并未出现明显的多裂缝形态,这与曹明莉等^[17]、张文华等^[18]研究发现一致。由于使用的是表面光滑的短细圆钢纤维,与混

凝土基体没有足够的黏结,因此没有形成多裂缝开裂形态。但是仔细观察可以发现,随着钢纤维掺量的增加,主裂缝周边的次生裂缝增加,在一定程度上提高了 UHPC 的抗弯能力。



图 6 不同纤维掺量的 UHPC 纯弯段裂缝形态

不同钢纤维掺量 UHPC 荷载 - 挠度曲线如图 7 所示,参照规范^[19]和规范^[13]对图 7 试验结果进行分析,如表 3 所示。

表 3 不同钢纤维体积掺量 UHPC 荷载 - 挠度曲线的特征参数

编号	P_p /kN	f_p /MPa	δ_p /mm	f_e /MPa	$P_{\delta_{0.5}}$ /kN	$f_{\delta_{0.5}}$ /MPa	$P_{\delta_{2.0}}$ /kN	$f_{\delta_{2.0}}$ /MPa	$T_{\delta_{2.0}}$ /(N·m)
S10	55.8	16.7	0.693	13.1	51.2	15.4	37.6	11.3	87.6
S15	76.9	23.1	0.766	17.4	66.8	20.0	51.5	15.5	116.0
S20	79.2	23.8	0.889	18.4	69.6	20.9	54.2	16.2	122.8

注: P_p 、 f_p 和 δ_p 分别表示峰值荷载、抗弯强度和峰值荷载对应的挠度; f_e 表示跨中为 2 mm 时的等效弯曲强度; $\delta_{0.5}$ 、 $\delta_{2.0}$ 分别表示挠度为 $\frac{L}{600}$ 和 $\frac{L}{150}$, L 为试件跨距, mm; $P_{\delta_{0.5}}$ 、 $f_{\delta_{0.5}}$ 分别代表挠度为 0.5 mm 对应的荷载和强度; $P_{\delta_{2.0}}$ 、 $f_{\delta_{2.0}}$ 分别代表挠度为 2 mm 对应的荷载和强度; $T_{\delta_{2.0}}$ 表示跨中挠度从 0 ~ 2 mm 的荷载 - 挠度曲线下的面积。

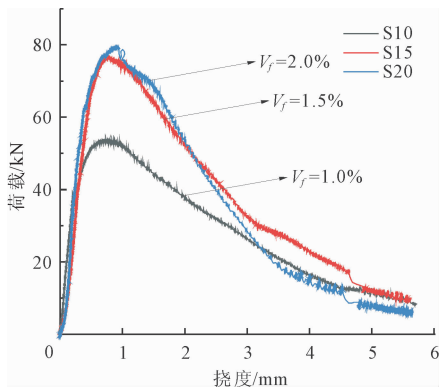


图 7 不同钢纤维体积掺量 UHPC 荷载 - 挠度曲线

含钢纤维的 UHPC 受弯过程中在初裂后依然可以承受更高的荷载,这表明钢纤维对 UHPC 有较好

的增强增韧效果。钢纤维对 UHPC 峰值强度和挠度的影响如图 8 所示。由图 8 可知 f_p 和 δ_p 受纤维掺量影响较大,当钢纤维掺量为 1.0% 时, f_p 和 δ_p 分别为 16.7 MPa 和 0.693 mm。当钢纤维掺量分别为 1.5% 和 2.0% 时, f_p 为 23.1 MPa 和 23.8 MPa, 分别提高了 38.3% 和 42.5%, δ_p 为 0.766 mm 和 0.889 mm, 分别上升了 10.5% 和 28.3%。因此纤维掺量能显著提高 UHPC 开裂后的性能,试件初裂后,外荷载主要作用在钢纤维与基体黏结部分,随着纤维掺量的增加,一方面纤维平均间距减小,更多纤维参与承受荷载并抑制微裂缝开展,另一方面黏结滑移特性进一步加强从而消耗更多能量,使得 UHPC 抗弯强度与其对应的挠度得到了提高。

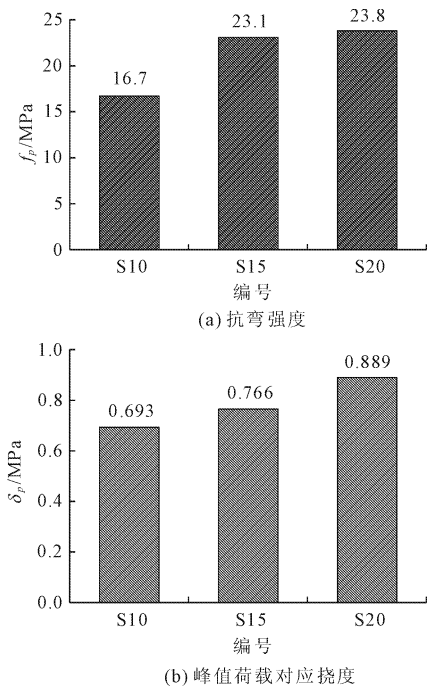


图 8 钢纤维掺量对 UHPC 抗弯强度和其对应挠度的影响

混凝土韧性指标衡量方法有很多,各有优缺点,但主要包括能量法和强度法及特征点法^[20]。参考规范^[19],对挠度为 $\frac{L}{600}$ 和 $\frac{L}{150}$ 进行描述,分析了 $\delta = 0.5 \text{ mm}$ 和 $\delta = 2 \text{ mm}$ 两点的荷载,如图 9 所示,韧性实测值如图 10 所示。由图 9 可知,随着钢纤维掺量的增加 $\delta = 0.5 \text{ mm}$ 和 $\delta = 2 \text{ mm}$ 处的荷载值变大,但是增幅变小。在 $\delta = 2 \text{ mm}$ 处,当掺入 1% 钢纤维时,弯曲韧性为 $87.6 \text{ N} \cdot \text{m}$,当钢纤维掺量分别为 1.5% 和 2.0% 时,弯曲韧性分别为 $116.0 \text{ N} \cdot \text{m}$ 和 $122.8 \text{ N} \cdot \text{m}$,分别提高了 32.4% 和 40.2%。参考规范^[13],对等效弯曲强度进行分析,结果如图 11 所示,当掺入 1% 钢纤维时,等效弯曲强度为 13.1 MPa ,当钢纤维掺量分别为 1.5% 和 2.0% 时,等效弯曲强度分别为 17.4 MPa 和 18.4 MPa 。由此可见钢纤维掺量的增加能大幅提高 UHPC 的弯韧性。

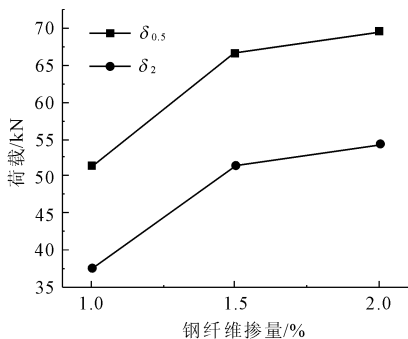


图 9 $\delta_{0.5}$ 、 $\delta_{2.0}$ 处钢纤维掺量对荷载的影响

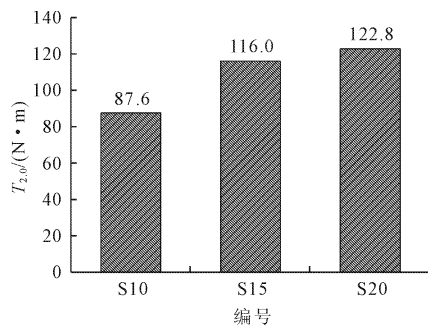


图 10 钢纤维掺量对韧性的影响

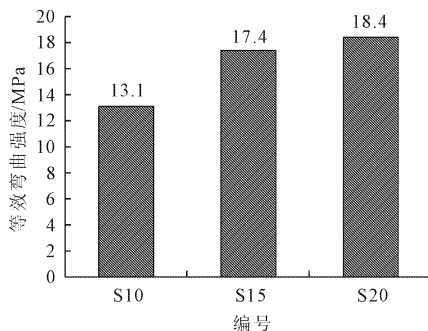


图 11 钢纤维掺量对等效弯曲强度的影响

3 结 论

- (1) 随着钢纤维体积掺量的增加,UHPC 的流动性呈下降趋势,抗压强度、抗弯强度和弯曲韧性逐渐增大。
- (2) 掺钢纤维的 UHPC 较基体的抗压强度有显著的提升。钢纤维体积掺量从 1.0% 增加到 2.0%,UHPC 抗压强度提高了 12.3% ~ 19.1%。
- (3) 随着钢纤维体积掺量的增加,抗弯强度和弯曲韧性的增长幅度减缓。从荷载 - 挠度曲线可知,钢纤维体积掺量大于 1.5% 时对韧性变化影响不大。

参考文献:

- [1] Tang M C. High performance concrete past present and future [C]//ASTM, 2004:3-9.
- [2] Richard P, Cheyrez M H. Composition of reactive powder concretes[J]. Cement & Concrete Research, 1995, 25:1501-1511.
- [3] Aitcin P C. High-performance concrete [M]. London: E&F Spon, 2004.
- [4] Bache H H. Densified ultra-fine particle based materials [C]// ICSC, 1981:1-35.
- [5] Oliver B, Claude P, Jerome D. Reactive powder concrete: from theory to practice [J]. Concrete International, 1996, 18(4):47-49.

- [6] 陈从春,冯毅,陈晓冬. 钢纤维体积掺量对超高性能混凝土力学性能的影响[J]. 新型建筑材料, 2016,43(5):54-56.
- [7] 鞠彦忠,王德弘,康孟新. 不同钢纤维掺量活性粉末混凝土力学性能的试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2013,21(2):299-306.
- [8] Yoo D, Lee J H, Yoon Y S, et al. Effect of fiber content on mechanical and fracture properties of ultra-high performance fiber reinforced cementitious composites [J]. Composite Structures, 2013,106:742-753.
- [9] 黄雪林,罗东志,徐习宝,等. 不同纤维及掺量对混凝土的强度影响规律分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2021,19(2):166-171.
- [10] 程鹏,吴方红,曾彦钦,等. 含粗骨料的超高性能混凝土受弯试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2019,17(2):41-45.
- [11] 梁兴文,胡翱翔,于婧,等. 钢纤维对超高性能混凝土抗弯力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2018,35(3):722-731.
- [12] 郭志强. 不同钢纤维含量对超高性能混凝土结构的抗弯性能影响研究[J]. 四川建筑科学研究, 2020,46(2):95-102.
- [13] 超高性能混凝土试验方法标准: T/CECS 864—2021 [S]. 北京:中国建材工业出版社, 2021.
- [14] 余睿,范定强,孙美娟,等. 钢纤维掺量及其 3D 空间结构对超高性能混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2021,49(11):2313-2321.
- [15] Yu R, Spiesz P, Brouwers H J H. Static properties and impact resistance of a green Ultra-High Performance Hybrid Fibre Reinforced Concrete (UHPHFRC): Experiments and modeling[J]. Construction & Building Materials, 2014,68(15):158-171.
- [16] Wu Z, Shi C, He W, et al. Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra-high performance concrete[J]. Construction & Building Materials, 2016,103:8-14.
- [17] 曹明莉,李黎,李志文,等. 晶须对钢-聚乙烯醇混杂纤维增强水泥基复合材料板弯曲性能的影响[J]. 复合材料学报, 2017,34(11):10.
- [18] 张文华,张仔祥,刘鹏宇,等. 多尺度纤维增强超高性能混凝土的轴心抗拉和抗压行为[J]. 硅酸盐学报, 2020,48(8):1155-1167.
- [19] Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete: ASTM C 1609 [S]. USA. 2012.
- [20] 丁一宁,董香军,王岳华. 钢纤维混凝土弯曲韧性测试方法与评价标准[J]. 建筑材料学报, 2005,43(5):54-56.

(上接第 20 页)

- [2] Mark Foster, Robin Fell, Matt Spannagle. A method for assessing the relative likelihood of failure of embankment dams by piping [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000,37(5):1025-1061.
- [3] Robert Lanzafame. Reliability analysis of the influence of seepage on levee stability [J]. Environmental Geotechnics, 2018,6(5):284-293.
- [4] 姚秋玲,丁留谦,孙东亚,等. 单层和双层堤基管涌砂槽模型试验研究[J]. 水利水电技术, 2007(2):13-18.
- [5] 丁留谦,姚秋玲,孙东亚,等. 三层堤基管涌砂槽模型试验研究[J]. 水利水电技术, 2007(2):19-22.
- [6] 丁留谦,姚秋玲,孙东亚,等. 双层堤基中悬挂式防渗墙控渗效果的试验研究[J]. 水利水电技术, 2007(2):23-26.
- [7] 丁留谦,姚秋玲,孙东亚,等. 关于盖重宽度和管涌抢险范围的讨论[J]. 水利水电技术, 2007(2):27-29.
- [8] 陈建生,袁克龙,王霜,等. 细砂层埋深对堤基管涌影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2015,36(3):653-659.
- [9] 张家发,吴昌瑜,朱国胜. 堤基渗透变形扩展过程及悬挂式防渗墙控制作用的试验模拟[J]. 水利学报, 2002(9):108-111, 116.
- [10] 李广信,周晓洁. 堤基管涌发生发展过程的试验模拟[J]. 水利水电科技进展, 2005,25(6):21-24.
- [11] 李广信,司富安,白晓明. 中国堤防工程地质[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2005.
- [12] 刘杰,谢定松,崔亦昊,等. 江河大堤双层地基渗透破坏机理模型试验研究[J]. 水利学报, 2008,11(39):1211-1220.
- [13] 张家发,吴昌瑜,朱国胜. 堤基渗透变形扩展过程及悬挂式防渗墙控制作用的试验模拟[J]. 水利学报, 2002,30(9):108-111.
- [14] 张家发,王满星,丁金华. 典型条件下堤身堤基渗流规律分析[J]. 长江科学院院报, 2000,24(5):23-27.
- [15] 陈建生,张超,王霜,等. 悬挂式防渗墙对不同细料含量堤基管涌的影响[J]. 人民黄河, 2017,39(1):41-46, 50.
- [16] 刘洪辰,吴庆华,苏怀智,等. 覆盖层及其与砂层接触面特性对堤基管涌影响试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2020,18(4):165-170.