

HPT-x 防裂抗渗剂对混凝土性能改善试验研究^{*}

Experimental Study on the Improvement of Concrete Performance by HPT-x Crack-proofing and Impermeability Agent

闫玉蓉¹, 李琳², 胡明凯², 朱维³, 王康², 朱炳喜²

- (1. 扬州市职业大学土木工程学院, 江苏 扬州 225000;
2. 江苏省水利科学研究院, 江苏 扬州 225000;
3. 江苏省水利建设工程有限公司, 江苏 扬州 225000)

摘要: 系统性研究 HPT-x 防裂抗渗剂对混凝土力学性能和耐久性能的影响。试验结果表明, HPT-x 防裂抗渗剂对混凝土强度和抗冻性能基本没有影响, 可提高混凝土早期抗裂能力, 减少混凝土早期收缩, 显著提高混凝土抗渗性能; 骨料的含泥量不利于 HPT-x 防裂抗渗剂抗裂效能的发挥。

关键词: HPT-x 防裂抗渗剂; 混凝土; 力学性能; 抗渗性能

中图分类号: TU 528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2023) 04-0042-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.04.007

YAN Yurong¹, LI Lin², HU Mingkai², ZHU Wei³, WANG Kang², ZHU Bingxi²

- (1. College of Civil Engineering, Yangzhou Vocational University, Yangzhou 225000, China;
2. Jiangsu Hydraulic Engineering Institute, Yangzhou 225000, China;
3. Jiangsu Hydraulic Engineering Construction Co., Ltd., Yangzhou 225000, China)

Abstract: Adding HPT-x, which belongs a kind of crack-proofing and impermeability composite materials, the influence of HPT-x on the mechanical performance and durability of concrete was systematically studied. The results show that HPT-x has no effect on the strength and the frost resistance of concrete. HPT-x can improve the early crack resistance, and reduce the early shrinkage of concrete. Concrete with HPT-x has excellent impermeability. The mud content of aggregate is not conducive to the play of HPT-x.

Keywords: HPT-x crack-proofing and impermeability agent; concrete; mechanical performance; impermeability

^{*} 基金项目: 江苏省科技厅创新能力建设计划——省属公益类科研院所自主科研经费项目 (BM2018028), 扬州市建设科技计划项目 (202103), 扬州市建筑产业现代化专项引导资金资助项目 (2019-11、2019-13)。

作者简介: 闫玉蓉 (1989—), 女, 硕士, 助教. 主要从事高性能水泥基材料应用研究。

通信作者: 李琳 (1972—), 女, 工程师. 主要从事水工混凝土材料性能提升研究与试验工作。

收稿日期: 2022-04-08

0 引言

混凝土作为各类建筑结构中用量最大的建筑材料, 其研究与应用已取得巨大进展。然而, 我国的建设工程需要解决的问题还有很多, 比如混凝土裂渗问题。混凝土是多种材料组成的脆性材料, 在环境、变形和荷载等作用下, 都有出现裂缝的可能^[1]。混凝土早期裂缝得不到有效控制, 在使用过程中, 侵蚀性介质更易通过裂缝进入混

凝土内部；若混凝土抗渗性能、密实性能较差，外界气体、液体等侵蚀性介质更易于向混凝土内部渗入。为满足混凝土的防裂抗渗性能要求，防裂抗渗型外加剂的研究与应用得到国内外材料研究者的广泛关注，已取得一定的研究成果，主要采用的外加剂组成成分有膨胀剂、减缩剂、纤维、矿物掺合料等。不同种类的单组份外加剂各有优缺点，进行复合应用，取长补短，既可提高综合应用效果，同时还具备着可观的成本优势^[2]。目前复合型防裂抗渗剂的类型和品种逐渐增多，部分产品防裂抗渗效果已得到有效验证，在重大基础设施工程中得到应用与推广。

本文研究 HPT-x 防裂抗渗剂对混凝土强度、早期开裂性能、早期收缩性能、抗碳化性能、抗冻性能、抗渗性能、抗氯离子渗透性能的影响规律，为有防裂抗渗要求的混凝土技术推广和应用提供相应的技术支撑。

1 试 验

1.1 试验原料

水泥：为 P·O 42.5 级水泥，密度为 3.06 g/cm³，比表面积为 311 m²/kg，标准稠度用水量为 27.2%，3 d 抗压强度 31.1 MPa，28 d 抗压强度 50.6 MPa。粉煤灰：为 F 类Ⅱ级粉煤灰，表观密度为 2.0 g/cm³，需水量比为 104%，烧失量为 2.6%。砂：为天然河砂，含泥量 2.7%，细度模数 2.6，符合Ⅱ区级配，属中砂。粗骨料：规格为 5~15 mm、16~31.5 mm 二种，按 1：2.33 的质量比例混合，所得粗骨料颗粒级配见表 1 所示，颗粒级配符合 5~31.5 mm 的连续粒级级配的要求。16~31.5 mm 粗骨料的含泥量 0.6%，无泥块含量；5~15 mm 粗骨料的含泥量为 5.6%，含泥量较高。室内试验过程中，部分试验将 5~15 mm 的骨料用水冲洗干净晾干后使用。减水剂：为高效减水剂，棕红色液体，减水率 15.8%。HPT-x 防裂抗渗剂：由纤维和粉剂两部分组成，纤维长度 12 mm，直径 20 μm，密度 1.36 g/cm³，抗拉强度大于 600 MPa，

断裂伸长率 30%~45%；粉剂密度 1.025 g/cm³~1.05 g/cm³；粉剂掺量为 0.4 kg/m³，纤维掺量为 0.6 kg/m³，合计为 1 kg/m³。

表 1 粗骨料颗粒级配

Table 1 Coarse aggregate particle grading /%

31.5mm	26.5mm	19.0mm	16.0 mm	9.5 mm	4.75 mm
3	24	41	80	86	93

1.2 试验方法

(1) 早期抗裂试验：采用 GB/T 50082-2009《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法》中的刀口抗裂法，计算单位开裂面积，作为早期抗开裂总体评价指标。

(2) 强度试验：制作标准养护试件，养护至相应的龄期，分别测试 7 d、28 d 抗压强度及劈裂抗拉强度。

(3) 混凝土早龄期收缩试验：依据 GB/T 50082-2009《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法》中非接触法测试混凝土早龄期收缩率方法进行，采用中国建筑科学研究院研制生产的非接触式混凝土收缩变形测定仪测试。

(4) 碳化试验：将试件养护 28 d 后放入 CCB—70A 型混凝土碳化试验箱中进行快速碳化试验，设定温度 20 ℃、相对湿度 70%、CO₂ 浓度 20%，在持续碳化时长为 28 d 时取出测量碳化深度。

(5) 抗冻试验和抗渗试验：依据 SL 352-2020《水工混凝土试验规程》进行。

(6) 抗氯离子渗透试验：参照 GB/T 50082-2009《普通混凝土长期性能和耐久性性能试验方法标准》标准对试件进行电通量法和 RCM 法试验。

1.3 试验配合比

混凝土设计强度为 C40，配合比如表 2 所示，制备了 X2、X6、X10 三组不同配合比的掺 HPT-x 防裂抗渗剂的混凝土试件，未掺加 HPT-x 防裂抗渗剂的标准对照试件分别为 X3、X7、X10。小石为 5~15 mm 的粗骨料，X2、X3 配合比的小石未经冲洗处理。

材料科学

表 2 混凝土配合比
Table 2 Mix proportion of concrete / (kg/m³)

试验编号	水泥	粉煤灰	砂	小石	大石	HPT-x	水	减水剂	水胶比	备注
X2	390	61	650	324	756	1	210	8.36	0.46	5~15 mm 粗骨料 未冲洗
X3	390	62	650	324	756	0	210	8.36	0.46	
X6	369	59	674	330	770	1	187	10	0.43	5~15 mm 粗骨料 冲洗晾干
X7	369	60	674	330	770	0	187	10	0.43	
X10	277	118	696	341	795	1	166	6.67	0.42	
X11	277	119	696	341	795	0	166	6.67	0.42	

2 结果与讨论

2.1 强度试验

混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度试验结果见表 3。比较 X2 与 X3、X6 与 X7，发现掺入 HPT-x 防裂抗渗剂后，7d 和 28d 抗压强度较未掺 HPT-x 防裂抗渗剂的均略有降低，主要是由于复合粉剂包裹在部分水泥颗粒表面，延缓其水化反应进程。比较 X10、X11，发现增大粉煤灰用量、减少混凝土用水量和降低水胶比后，掺入 HPT-x 防裂抗渗剂的混凝土抗压强度略高于未掺。比较 X2 与 X3、X6 与 X7、X10 与 X11，发现掺入 HPT-x 防裂抗渗剂对混凝土 7 d 和 28 d 劈裂抗拉强度基本无影响。

表 3 混凝土强度试验结果
Table 3 Results of Strength of concrete /MPa

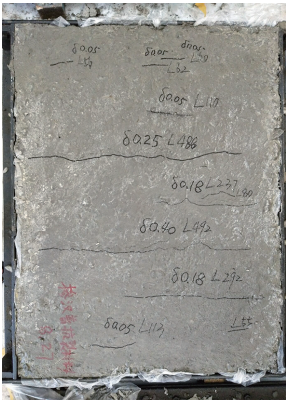
No.	抗压强度		劈裂抗拉强度	
	7 d	28 d	7 d	28 d
X2	30.6	40.1	1.39	2.18
X3	31.5	42.2	1.43	2.22
X6	36.3	49.4	2.09	3.18
X7	38.8	53.9	2.17	3.16
X10	32.1	42.7	1.82	2.82
X11	31.9	42.3	1.89	2.60

2.2 早期抗裂

混凝土早期抗裂试验结果如表 4 及图 1 所示。表 4 和图 1 中 X6、X7 的结果表明掺入 HPT-x 防裂抗渗剂后裂缝数目、开裂面积、裂缝宽度降低，说明掺入 HPT-x 防裂抗渗剂对混凝土的早龄期收缩裂缝均有一定的抑制效果。这是由于 HPT-x 防裂抗渗剂中的纤维组分经拌合后均匀的分散在拌合物中，在混凝土硬化过程中，乱向分布的纤维承担了一部分硬化阶段收缩产生的拉应力，提高了混凝土的韧性变形能力，使得裂缝尺寸和数量相应减小，同时有效阻止裂缝延伸。掺入 HPT-x 防裂抗渗剂中的复合粉剂含有高分子材

料，可增强颗粒间的连接强度，从而降低试件表面的开裂风险。

使用冲洗干净的粗骨料，适当增加减水剂的用量，明显降低了混凝土的用水量，混凝土裂缝降低系数也得到显著提高，说明骨料的含泥量不利于 HPT-x 防裂抗渗剂防裂效能作用的发挥。这主要由于泥包裹在骨料表面，降低了水泥浆体与骨料间的黏结强度；分散的部分泥会延缓水泥浆体的硬化，降低水泥石本身的强度^[3]；泥土颗粒成为混凝土中的软弱区域，增加了早期开裂的产生^[4]。



(a) X6 掺 HPT-x 防裂抗渗剂



(b) X7 未掺 HPT-x 防裂抗渗剂

图 1 早期抗裂试验结果
Fig. 1 Early crack resistance test results

表 4 混凝土早期抗裂试验结果
Table 4 Early crack resistance test results of concrete

试验编号	每条裂缝平均开裂面积/ (mm ² /条)	单位面积裂缝数目 /(条/m ²)	裂缝宽度/mm		单位面积上总开裂面积/ (mm ² /m ²)	相比基准混凝土的 裂缝降低系数
			最大	最小		
X2	50	15.6	0.68	0.05	787	67%
X3	58	40.6	1.10	0.05	2375	
X6	23	11.9	0.68	0.05	274	83%
X7	108	14.6	1.10	0.05	1582	

2.3 混凝土早龄期收缩率

混凝土早龄期收缩率试验结果见表 5。掺入 HPT-x 防裂抗渗剂的 X2 较未掺的 X3，72 h 收缩降低率为 22.5%；掺入 HPT-x 防裂抗渗剂的 X6 较未掺的 X7，72 h 收缩降低率为 30.5%。由此可见，掺入 HPT-x 防裂抗渗剂有利于降低混凝土早期收缩率；将粗骨料冲洗干净后的混凝土收缩率较未冲洗的低，说明掺入 HPT-x 防裂抗渗剂、降低粗骨料的含泥量有利于降低混凝土的早期收缩

表 5 混凝土早龄期收缩试验结果
Table 5 Early age shrinkage of concrete

试件编号	早期收缩率/(×10 ⁻⁶)								72 h 收缩率 降低值/%
	1 h	6 h	11 h	16 h	24 h	46 h	62 h	72 h	
X2	107.1	281.8	331.9	392.9	424.3	526.4	593.1	638.8	22.5
X3	99.2	382.9	416.5	508.1	549.9	693.6	775.3	824.3	—
X6	89.0	239.2	252.5	273.6	314.4	420.7	474.6	514.0	30.5
X7	82.4	360.6	479.8	477.9	534.1	644.0	701.1	739.1	—

2.4 抗渗性能

抗渗性能试验结果见表 6，由表 6 可知掺加 HPT-x 防裂抗渗剂能明显提高混凝土的抗渗性能。

表 6 混凝土抗渗性能试验结果
Table 6 Impermeability test of concrete

试件编号	水压力 /MPa	平均渗水 高度/cm	相对渗透系数 /(×10 ⁻⁶ cm/h)
X6	1.2	1.57	0.13
X7	1.2	4.02	0.82

比较 X6 和 X7 可见，掺加 HPT-X 防裂抗渗剂的混凝土平均渗水高度为未掺加的 39%，渗水高度降低了 61%，相对渗透系数为未掺加的 15.9%。HPT-x 防裂抗渗剂均匀掺入混凝土内，乱向分布的纤维阻止骨料下沉；纤维的抗裂作用，减少了裂缝的开展宽度，分散了裂缝的分布，减少了水分扩散的通道。HPT-x 防裂抗渗剂中的复合粉剂可通过界面效应提高胶凝物与骨料界面胶合能力，可以填充混凝土孔隙，降低微裂纹产生，使混凝土内部结构更加匀质密实。纤维和复合粉剂两种

率，从而提高混凝土抗裂能力。这是由于 HPT-x 防裂抗渗剂中的纤维对骨料起支撑作用，使得骨料分散更均匀，减少表面水分散失；HPT-x 防裂抗渗剂的抗裂作用可以减少混凝土内部水分向外扩散，减少水分散失，进而减少混凝土早期收缩；降低粗骨料含泥量时，泥土颗粒吸附的水会减少，混凝土单位用水量和水胶比降低，因此减少混凝土早期收缩^[5]。

组分各自发挥作用，最终协同提高了混凝土的抗渗性能。

2.5 碳化深度

混凝土碳化试验结果见表 7，6 组试件的 28 d 碳化深度均小于 20 mm，均满足一般混凝土结构 50 年使用年限的要求^[6]。

表 7 混凝土 28 d 碳化深度试验结果
Table 7 Carbonization depth of 28 d concrete

试件编号	碳化深度	
	平均值/mm	相对于不掺 HPT-x 的基准混凝土/%
X2	14.4	99.3
X3	14.5	
X6	7.6	91.6
X7	8.3	
X10	12.1	93.8
X11	12.9	

掺入 HPT-x 防裂抗渗剂后混凝土抗碳化能力有所提高，这是由于 HPT-x 防裂抗渗剂改善了混凝土的密实性、提高了混凝土体积稳定性的缘故，进而降低了碳化深度。X6、X7、X10、X11 试验组

材料科学

将粗骨料进行冲洗处理降低含泥量，并减少了用水量和胶凝比，配制的混凝土密实性更高，抗碳化能力提高。

2.6 抗冻性能

混凝土抗冻性试验结果见表 8，对设计强度 C40 的 X6、X7、X10、X11 混凝土，经 50 次冻融循环后，混凝土抗冻性能均达到 F50 的要求，但掺入 HPT-x 防裂抗渗剂后对混凝土抗冻能力影响不明显。

表 8 混凝土抗冻性能试验结果
Table 8 Freezing resistance of concrete

试件编号	冻融循环次数/次	动弹性模量/GPa	相对动弹性模量/%
X6	0	42.96	100
	25	38.05	88.6
	50	33.4	77.8
X7	0	37.91	100
	25	33.82	89.3
	50	29.71	78.4
X10	0	42.8	100
	25	37.44	87.4
	50	32.04	74.8
X11	0	40.29	100
	25	34.48	85.7
	50	28.63	71.1

2.7 抗氯离子渗透性能

混凝土电通量和氯离子扩散系数试验结果见表 9，表 9 试验结果表明，X2 与 X3 相比混凝土电通量降低 29.1%，氯离子扩散系数降低 17.6%；X6 与 X7 相比混凝土电通量降低 8.5%，氯离子扩散系数降低 4.2%；X10 与 X11 相比混凝土电通量降低 2.3%，氯离子扩散系数降低 3.1%。

表 9 混凝土电通量和氯离子扩散系数试验结果
Table 9 The test results of electric flux and chloride diffusion coefficient of concrete

No.	电通量		氯离子扩散系数	
	养护龄期 /d	测试值 /C	养护龄期 /d	测试值 / (×10 ⁻¹² m ² /s)
X2	56	1792	84	5.812
X3	56	2314	84	6.836
X6	56	1425	84	5.653
X7	56	1546	84	5.891
X10	56	1370	84	5.304
X11	56	1402	84	5.471

结果表明混凝土中掺入 HPT-x 防裂抗渗剂有利于降低电通量和氯离子扩散系数。掺入 HPT-x 防裂抗渗剂提高了混凝土密实度，提高了混凝土的抗氯离子渗透性能。

3 结论

(1) 掺入 HPT-x 防裂抗渗剂的混凝土抗压强度较未掺入的略有降低，对混凝土劈裂抗拉强度没有影响。可通过增大粉煤灰用量、减少用水量降低抗渗剂对强度的影响。

(2) 掺入 HPT-x 防裂抗渗剂能够提高混凝土早期抗裂能力，降低混凝土的早期收缩率，因而能降低开裂风险。

(3) 掺入 HPT-x 防裂抗渗剂后混凝土抗碳化能力有所提高，混凝土抗渗性能有明显提高，混凝土抗冻性能基本没有影响，混凝土电通量和氯离子扩散系数降低，能够提高混凝土的抗氯离子渗透能力。

(4) 骨料的含泥量不利于 HPT-x 防裂抗渗剂抗裂效能作用的发挥。

参 考 文 献

[1] 游宝坤, 周建启, 侯维红, 等. 关于混凝土抗裂材料应用的讨论 [J]. 混凝土, 2005 (10): 13-16.

[2] 张家伟, 陈晓柳, 罗玉萍, 等. 新型防裂抗渗复合材料在混凝土中应用研究 [J]. 建筑科学, 2018, 34 (1): 116-121.

[3] 隋宝龙, 袁杰, 张广田, 等. 含泥量对混凝土性能的影响及解决方法 [J]. 粉煤灰综合利用, 2016 (4): 61-64.

[4] 封孝信, 刘刚. 泥土对混凝土性能的影响综述 [J]. 华北理工大学学报 (自然科学版), 2017, 39 (2): 46-65.

[5] DAMMO N, DEBORAH J M, AGHIDI J, et al. Effect of Ngala Clay on the Compressive Strength of Concrete [J]. International Journal of Engineering Science Invention, 2014, 3 (7): 7-10.

[6] 江苏省地方标准. 水利工程混凝土耐久性技术规范 (DB32/T 2333—2013) [S]. 南京: 江苏人民出版社, 2013.