

冻融循环下的废玻璃粉混凝土黏结性能研究

何文博^{1,2} 孙玉周^{1,2} 欧阳凯² 殷晓三¹

1 中原工学院

2 河南城建学院

DOI:10.32629/etd.v7i6.21027

[摘要] 针对废玻璃粉在混凝土中的资源化利用及冻融环境下钢筋混凝土黏结性能退化问题,本文研究了废玻璃粉取代率和冻融循环次数对玻璃粉混凝土最大黏结应力和黏结性能的影响。试验结果表明:质量损失率随冻融循环次数增加而显著增大;极限黏结强度随冻融次数增加单调递减,随取代率增加呈“先升后降”趋势。

[关键词] 废玻璃粉混凝土; 冻融循环; 中心拉拔试验; 黏结性能; 取代率
中图分类号: TV331 **文献标识码:** A

Study on the bonding performance of waste glass powder concrete under freeze-thaw cycles

Wenbo He^{1,2} Yuzhou Sun^{1,2} Kai Ouyang² Xiaosan Yin¹

1 Zhongyuan University of Technology

2 Henan University of Urban Construction

[Abstract] Addressing the resource utilization of waste glass powder in concrete and the degradation of bond performance in reinforced concrete under freeze-thaw cycles, this study investigated the effects of the substitution rate of waste glass powder and the number of freeze-thaw cycles on the maximum bond stress and bond performance of glass powder concrete. Experimental results demonstrated that the mass loss rate increased significantly with rising freeze-thaw cycles; the ultimate bond strength decreased monotonically with increasing freeze-thaw cycles, while exhibiting a "first increase, then decrease" trend with higher substitution rates.

[Key words] waste glass powder concrete; freeze-thaw cycle; central tensile test; bonding performance; substitution rate

引言

我国西北地区大温差引起的冻融循环使建筑物常年遭受冻融作用,导致许多钢筋混凝土结构在未达到服役年限就出现劣化现象^[1]。用再生骨料取代混凝土中的骨料可以延长钢筋混凝土结构在恶劣环境下的使用寿命^[2]。

柯国军等^[3]发现废玻璃颗粒的特性使其能够有效地提升复合材料的耐久性,特别是在面对低温影响时表现出色;魏关龙等^[4]认为将废玻璃粉掺入混凝土中能够使内部孔隙增多,增强整体的抗冻能力。

但废玻璃粉混凝土与钢筋冻融循环后的黏结性能研究较少。因此,研究冻融循环下废玻璃粉混凝土与钢筋的黏结性能对于工程应用来说具有重要意义。

1 试验概况

1.1 对照组设计

以0%、10%、20%、30%、40%和50%的取代率用废玻璃粉等质量取代水泥;冻融循环次数设定为0、30、60、90和120次。试

件均设计为边长100mm钢筋混凝土构件。

1.2 原材料

水泥按照标准GB175-2023^[5]采用强度等级为42.5普通硅酸盐水泥;粗骨料采用连续级配石灰石碎石;细骨料采用级配良好的天然河砂;钢筋采用直径为16 mm的HRB400(热轧螺纹)钢筋;拌合水采用实验室自来水;减水剂采用聚醚型聚羧酸减水剂;废玻璃粉为废弃青岛啤酒瓶经人工清洗、鄂式破碎机破碎,最后用水泥实验小磨机球磨40min所得。

1.3 配合比

混凝土配制强度等级C40,基准组制备比例见表1。

表1 混凝土的制备比例

kg/m³

水	水泥	砂	碎石	废玻璃粉	减水剂
150	380	805	1050	0	3.8

1.4 冻融及加载试验

(1) 冻融试验。将试块放入KDR-V9混凝土快速冻融试验机冻

融。每次冻融中，将试样的温度从 $5\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下降到 $-18\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，然后在4小时内回升到 $5\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(2)加载试验。由静态应变测试仪连续采集数据。试验时，WAW-600D微机控制电液伺服万能试验机采集荷载，位移计同步测量荷载产生的滑移量，采用等位移加载，加载速度 0.3 mm/min 。

2 试验结果

在冻融循环完成后，对试件进行称重，并记录其质量损失。中心拉拔试验结束后，记录试件的拔出力、极限黏结强度及滑移量，见表2。

表2 试件的试验特征值

试样	质量损失/%	拔出力/kN	极限黏结强度/Mpa	滑移量/mm
WGPC0-0	0	28.5	3.52	1.2
WGPC0-30	0.3	25.8	3.18	1.8
WGPC0-60	0.8	22.3	2.75	2.5
WGPC0-90	1.5	18.6	2.30	3.8
WGPC0-120	2.3	15.2	1.88	5.5
WGPC10-0	0	29.2	3.60	1.1
WGPC10-30	0.2	26.5	3.27	1.7
WGPC10-60	0.6	23.1	2.85	2.3
WGPC10-90	1.2	19.5	2.40	3.5
WGPC10-120	2.0	16.0	1.97	5.2
WGPC20-0	0	27.8	3.44	1.3
WGPC20-30	0.3	25.0	3.09	1.9
WGPC20-60	0.9	21.5	2.65	2.7
WGPC20-90	1.6	17.8	2.20	4.0
WGPC20-120	2.5	14.5	1.80	5.8
WGPC30-0	0	25.5	3.15	1.5
WGPC30-30	0.5	22.0	2.72	2.2
WGPC30-60	1.2	18.0	2.23	3.2
WGPC30-90	2.0	14.5	1.80	4.5
WGPC30-120	3.0	11.0	1.36	6.5
WGPC40-0	0	23.0	2.85	1.8
WGPC40-30	0.7	19.5	2.41	2.5
WGPC40-60	1.5	15.5	1.92	3.8
WGPC40-90	2.5	12.0	1.48	5.0
WGPC40-120	3.8	8.5	1.05	7.2
WGPC50-0	0	20.0	2.47	2.2
WGPC50-30	0.9	16.0	1.98	3.0
WGPC50-60	1.8	12.0	1.48	4.5
WGPC50-90	3.0	9.0	1.11	6.0
WGPC50-120	4.5	6.0	0.74	8.5

3 黏结强度分析

0~30次冻融：黏结强度降幅较小。冻融导致的微裂缝尚未贯通，化学胶结力仅发生局部衰退。

30~60次冻融：黏结强度降幅显著增大。冻胀压力使水泥石与骨料界面脱黏，化学胶结力大面积失效，摩擦力因表层剥落导致接触面积减少而下降。

60~120次冻融：黏结强度进入急剧下降期，此时混凝土内部孔隙率增至初始值的2~3倍，钢筋周围的混凝土被冻融损伤弱化，机械咬合力因“肋-混凝土”接触失效而大幅衰减。

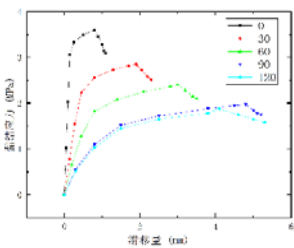
120次冻融后，50%取代率组机械咬合力仅为初始值的30%，导致黏结强度降至 0.74 MPa ，不足基准组同期值的40%。

10%取代率的优化效应：此掺量下，废玻璃粉的颗粒填充作用改善了混凝土的密实度，使试件整体性增强。同时，适量玻璃粉与水泥水化产物的协同作用提升了混凝土表层强度，增强了钢筋肋与混凝土之间的机械咬合能力。

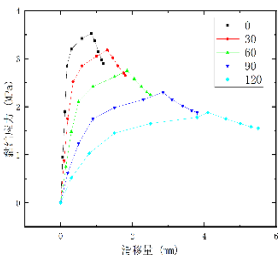
4 黏结滑移曲线及分析

4.1黏结滑移曲线

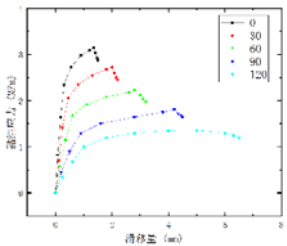
通过处理试验数据得到不同取代率下钢筋与废玻璃粉混凝土黏结滑移曲线，如图1所示。



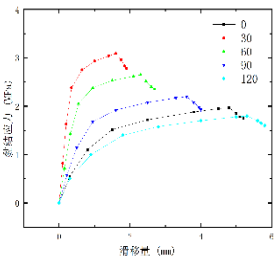
a取代率0%组



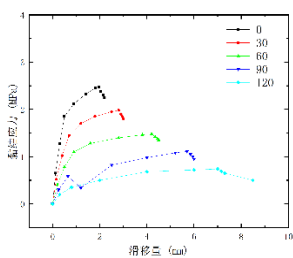
b取代率10%组



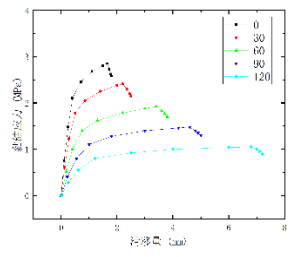
c取代率20%组



d取代率30%组



e 取代率40%组



f 取代率50%组

图1 黏结滑移曲线

4. 2黏结滑移曲线分析

耦合劣化的曲线差异：相同冻融次数下，高掺量组（40%~50%）曲线的弹性段斜率、峰值应力均低于低掺量组（0%~20%），而滑移量显著高于低掺量组；相同掺量下，冻融次数超60次后，曲线劣化幅度呈指数级扩大，体现“高掺量加剧冻融损伤敏感性，长冻融放大高掺量劣化效应”的耦合规律。

5 结论

(1) 10%取代率可通过优化密实度延缓黏结强度下降，保持率提高5%~8%；高取代率组（≥30%）因“结构疏松-冻胀加剧”的正反馈循环，始终处于劣化最严重水平，120次冻融后其强度损失率较单一变量叠加值高11.5%。

(2) 废玻璃粉掺量存在最优区间（10%左右），此区间曲线呈现“强黏结、小滑移”的理想特征；掺量超20%或冻融次数超60次后，曲线开始显著劣化；当掺量≥40%且冻融次数≥90次时，曲线形态彻底劣化，黏结性能丧失工程使用价值。

【参考文献】

[1]Liu k,Yan J,Meng X,et al.Bond behavior between deformed steel bars and recycled aggregate concrete after freeze-thaw cycles[J].Construction and Building Materials,2020(232):117236-117236.

[2]洪乃丰.钢筋混凝土基础设施腐蚀与耐久性[C].混凝土结构耐久性及耐久性设计会议,北京,清华大学,2002.

[3]柯国军,邹品玉,甘元初,等.废玻璃粉活性特征和活性机理研究[J].中国粉体技术,2015,21(05):87-92.

[4]魏关龙.玻璃粉掺量变化对水工混凝土抗冻性的影响研究[J].黑龙江水利科技,2024,52(08):15-17+26.

[5]GB175-2023,通用硅酸盐水泥[S].

作者简介：

何文博(2000--),男,汉族,河南周口人,土木水利硕士,主要从事钢筋混凝土黏结性能研究。