

含预制裂缝混凝土试件修复后力学性能试验

李幸孺 薛圣泽 蒋雪雅 花梦磊 钱枫

西安欧亚学院人居环境学院, 陕西省西安市, 710065;

摘要: 为深化对城市地下空间工程混凝土渗透破坏发展机理的认识, 实现混凝土渗透破坏过程的室内模拟, 分析混凝土裂缝的渗透特征及其发生发展规律。试验通过丙烯酸盐、聚氨酯及环氧树脂三种材料对混凝土试块裂缝进行修复, 探讨了不同修复材料防水堵漏的性能状况; 通过对修复后含预制裂缝混凝土试件进行力学性能试验, 对比分析了裂缝修复后混凝土力学性能的变化及破坏特征。试验结果表明: 在防水堵漏方面, 丙烯酸盐注浆液优于聚氨酯注浆液, 环氧树脂注浆液效果最差; 不同材料修复后的试件强度均高于未修复的对照组, 在修复后材料的力学性能方面, 丙烯酸盐注浆液修复效果优于聚氨酯注浆液, 环氧树脂注浆液效果最差。

关键词: 渗透破坏; 室内模拟; 裂缝修复

DOI: 10.69979/3029-2727.26.03.028

引言

工程常用丙烯酸盐、聚氨酯、环氧树脂三类有机注浆材料, 因性能差异呈现不同防水堵漏与力学修复能力, 各有适用场景^[1]。现有研究多聚焦单一材料性能优化或特定裂缝修复工艺改进, 针对三类材料修复预制裂缝混凝土后的力学与防水性能系统性对比研究不足, 且缺乏对修复试件破坏特征、应力-应变规律及本构关系的深入分析, 同时室内试验的裂缝制备、修复工艺与工程实际贴合度低, 缺乏适配地下混凝土墙体结构的试验体系, 难以提供全面理论支撑^[2-7]。

本文以城市地下空间工程混凝土裂缝修复为背景, 设计箱式试验装置制备预制裂缝混凝土试件, 采用三类注浆材料开展修复试验, 通过棱柱体轴心抗压试验, 系统分析不同材料对试件防水、力学强度、破坏特征及应力-应变关系的影响, 建立修复试件应力-应变本构模型并筛选综合修复效果最优材料。研究成果旨在深化混凝土裂缝渗透破坏与修复机制认知, 为地下工程混凝土裂缝修复的材料选型、工艺优化及效果评估提供试验依据与理论参考。

1 试验装置与试件制备

1.1 试验装置制作

由于地下空间混凝土墙体基本为长方体结构, 为贴合工程实际, 混凝土裂缝模拟试验装置相应设计为箱式结构。箱体材料为木模具, 壁厚 10 mm, 内部尺寸为 300mm×100 mm×100 mm, 在距离箱体底部 48mm 处开设长度为 150mm, 宽 5mm 的裂缝口。

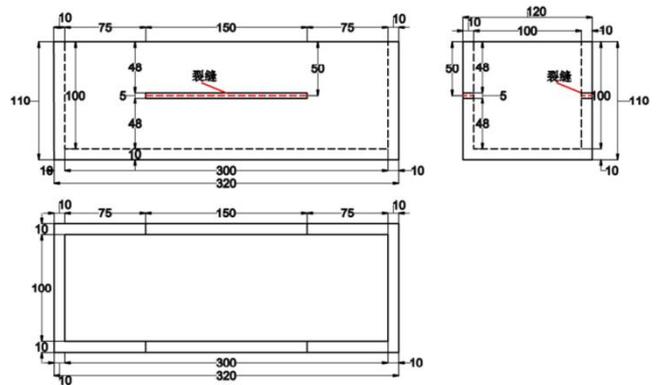


图 1 实验装置三视图/mm

Fig. 1 Experimental device three views / mm

1.2 试验用料

试验用纸采用市面上常见的工图绘图纸, 单张厚度为 0.1mm, 装入 10 张以模拟 1mm 裂缝。本试验采用细石混凝土, 水泥采用普通硅酸盐水泥 42.5; 细骨料采用细砂; 小石子采用 3~5mm 的小石子; 拌合水的水质符合《混凝土用水标准》(JGJ63-2006) 的规范要求。配合比如表 1 所示, 试验材料如图 2 所示。

表 1 混凝土基体配合比

Table 1 Mix ratio of concrete matrix

材料组成	水泥	砂	小石子	水
质量 kg/m ³	330	619	1315	286

1.3 试件制备与养护

1.3.1 试件制备

含预制裂缝混凝土试件制备时, 首先检查每个模具的密封性, 使用宽胶带将模具的接缝处黏贴好, 然后给模具内测均匀地刷上一层脱模剂。之后将搅拌用盆用水

浸润，按照设计的混凝土配合比称取各材料，将各干料混合搅拌均匀后，分批次加入自来水，直至浆料质地均匀即可停止搅拌。最后将拌合好的混凝土浆料立即装入准备好的模具中，在装填过程中需要注意模具中固定的试验纸条，将混凝土浆料避开纸条倒入模具中。装一些浆料就需要摇匀，或敲击或人工插捣一下，以便让混凝土浆料均匀地充满模具的各个角落，保证制备的试块各处物料分布均匀，从而保证含预制裂缝混凝土试块的质量。保持这样“一填一振”的操作节奏，直到将模具填满，开始进行最终振捣。

1.3.2 试件脱模与养护

含预制裂缝混凝土试件制作好之后至少静置24h或48h后进行脱模，以保证试件的表面完整度。含预制裂缝混凝土试件养护时需要定期给混凝土试件均匀地淋上水，并用吸满水的毛毡覆盖，以减少水分的蒸发，按最后一批完成制作试件的时间养护28d，部分试件脱模后模拟裂缝展示如图3所示，可见没有裂缝的试件表面均完整。



图2 模拟裂缝试件制备完成

Fig. 2 The preparation of simulated crack specimen is completed

2 试件裂缝修复

2.1 实验材料及分组

含预制裂缝混凝土试件修复采用NS-688 丙烯酸盐注浆材料；RUTH IP-12 油性注浆液；NS-03 高渗透改性环氧树脂。将未经修复的含预制裂缝混凝土试件称为对照组，按照修复材料类别的不同，又将混凝土试件进行区分编号，具体编号如表2：

表2 预制裂缝试件编号

Table 2 Prefabricated crack specimen number

裂缝宽度/mm	1.0
对照组	C-1.0
丙烯酸盐	C-AS-1.0
聚氨酯	C-PU-1.0
环氧树脂	C-ER-1.0

2.2 修复机具及施工流程

修复机具采用丙烯酸盐水固化新型双液注浆机、NS-999 高压灌注机钻机、磨角机、注浆嘴等。试件的修复流程图见图3。

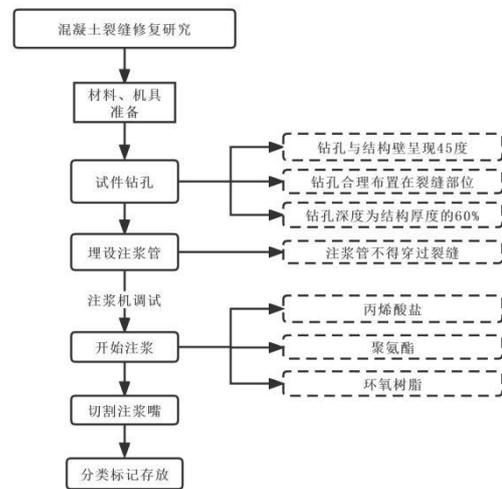


图3 裂缝修复技术路线图

Fig. 3 Crack repair technology roadmap

3 力学性能试验

3.1 试验概况

参考《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T50081-2019)含预制裂缝混凝土试件进行棱柱体轴心抗压试验研究。采用电液伺服压力试验机(YNS-Y2000)进行加载，将试件直立放置在试验机的下压板或钢垫板上，并使试件轴心与下压板中心对准。开启试验机，试件表面与上下承压板或钢垫板应均匀接触。在试验期间，应连续、均匀地加载，开始加载速率为0.3MPa/s~1.0MPa/s，在棱柱体混凝土试件的轴向压缩强度低于30MPa时，将加载速率调整为0.3~0.5MPa/s。

3.2 试验现象

对照组试件经过轴心抗压试验后，在试件的四周立面产生了许多竖向裂缝，裂缝方向与受荷方向保持大致相同。随着均布荷载作用在试件上表面，裂缝最先出现在试件腰部的预制裂缝处，其特点多为短裂缝成簇分布在预制裂缝的一侧，在极短的时间内，腰部的短簇裂缝继续发展，与试件侧面的裂缝连接。与此同时，试件上表面的四角处出现细密的裂缝群，随着持续的试压，四角处的裂缝发展成长裂缝，与试件腰部的裂缝连接，成为较长的贯通裂缝，并伴随着混凝土碎渣的脱落，最终导致试件失去承载能力。

AS组、PU组及ER组试件棱柱体轴心抗压强度试验的破坏过程与对照组相似，首先在试件立面的边角处出现较短的竖向裂缝，随后裂缝迅速发展，最终形成中部破坏最严重的破坏形态。但是相对于对照组，修复后

的三组试件裂缝出现时对应荷载更大，裂缝演变延缓，试件在破坏时掉渣较少，表现出更好的整体性。破坏后裂缝对比展示如图4所示。

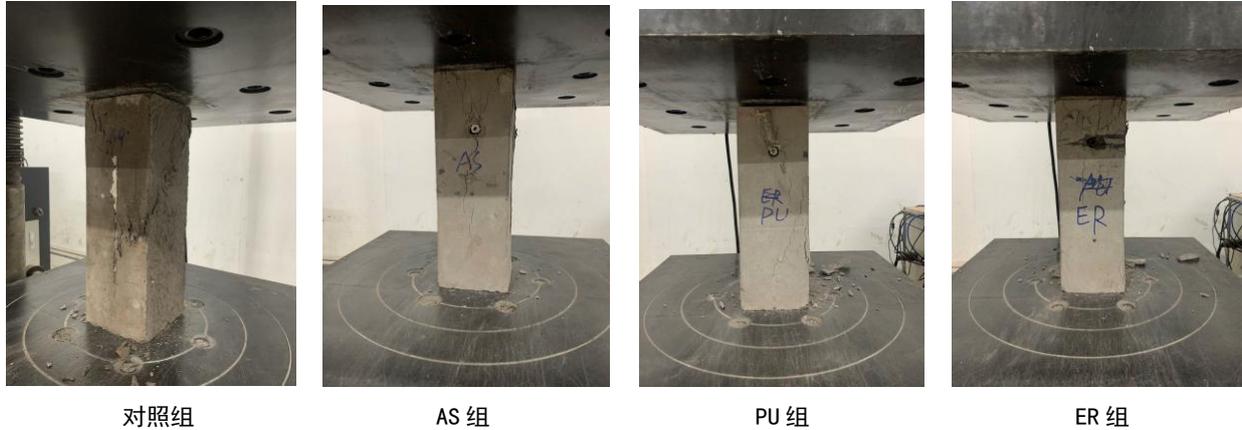


图4 试件破坏形式对比

Fig. 4 Comparison of failure modes of specimens

3.3 试验结果

立方体抗压强度应按式(1)计算：

$$f = K \frac{F}{A} \quad (1)$$

式中： f —轴心抗压强度(MPa)，精确到0.1MPa； K —尺寸换算系数，取0.95； F —试件破坏荷载(N)； A —试件承压面积(mm²)。

根据棱柱体轴心抗压的结果，使用函数绘图软件Origin分别绘制各组试件的应力-应变曲线，如图5所示。试验开始加载，各组试件应力应变曲线变化趋势比较平缓，随着荷载的增加，各组试件的应力应变曲线呈现相同的趋势，应力出现缓慢少量的增加，到达2MPa，并平稳保持了较短的一段时间后，各组试件的应力陡然增加，其变化规律大致与线性变化接近，直至达到最大应力后，试件开始迅速出现裂缝、碎渣脱落等破坏现象，试件应力迅速下降，直至试件失效。

通过应力-应变曲线可以看出，各组试件在受压过程中产生的应力应变关系变化趋势大致相同，其中，在应力上升段，对照组的斜率小于其他三组试件，而各组试件几乎在同时达到各自的峰值应力，且在达到峰值应力之后都较快出现下降阶段。同样的是，在应力下降段，对照组的斜率也小于其他三组修复过的试件。

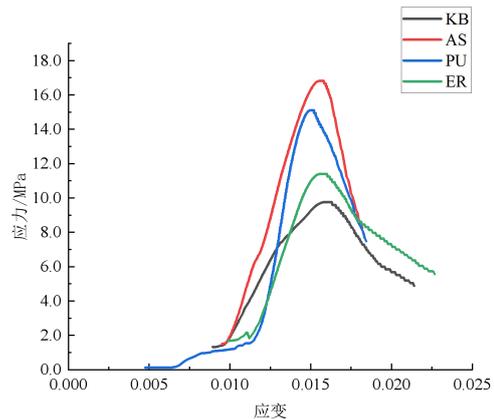


图5 应力应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curve

为比较筛选出力学性能修复效果最好的材料，实验测得未修复(对照组)的试件抗压强度为9.754MPa；修复后的试件中，AS-1.0组的抗压强度最高，为16.822MPa；PU-1.0组的抗压强度次之，为15.108MPa；ER-1.0组的抗压强度最小，为11.403MPa。

4 结论

(1) 三种有机注浆材料的防水堵漏性能存在显著差异，综合表现为丙烯酸盐注浆液最优，聚氨酯注浆液次之，环氧树脂注浆液最差，可满足地下空间工程混凝土裂缝不同防水等级的初步选型需求。

(2) 丙烯酸盐、聚氨酯、环氧树脂三种材料修复后的含预制裂缝混凝土试件，其轴心抗压强度均高于未修复的对照组(对照组9.754MPa)，其中丙烯酸盐修

复试件强度最高(16.822MPa),聚氨酯修复试件次之(15.108MPa),环氧树脂修复试件最低(11.403MPa),验证了三类材料均能有效提升裂缝混凝土的承载能力。

(3) 修复材料可显著改善含预制裂缝混凝土试件的破坏特征:对照组试件破坏时裂缝贯通迅速、碎渣脱落明显,整体性较差;而修复后各组试件裂缝出现时对应的荷载更大,裂缝演变速度延缓,破坏时掉渣量少,整体性显著提升,其中丙烯酸盐修复试件的整体性改善效果最为突出。

(4) 综合防水堵漏性能与力学修复效果,丙烯酸盐注浆液是本次试验中适配地下空间工程预制裂缝混凝土修复的最优材料,研究成果可为地下工程混凝土裂缝修复的材料选型、工艺优化及修复效果评估提供可靠的试验依据与理论参考,同时完善了预制裂缝混凝土修复的室内试验体系。

参考文献

- [1] 张立卿,边明强,王云洋,等.自修复混凝土修复性能评估中的若干关键技术与方法研究综述[J].材料导报,2024,38(09):82-104.
- [2] 谢剑,陈玉洁,孙雅丹.UHPC与普通混凝土试件界面

黏结抗冻性能试验研究[J].硅酸盐通报,2021,40(12):3945-3955.

[3] 竹乃杰.环氧树脂材料粘接混凝土构件缺损的试验研究[J].混凝土世界,2019,(09):75-78.

[4] 江沈阳,李静,郑钰洁,等.掺入硅酸钠修复剂的自修复混凝土修复后寿命预测以及最优修复剂掺量的研究[J].混凝土,2018,(02):75-79.

[5] 王丽,白英.高性能修复剂对混凝土抗渗性和抗盐冻性能影响的研究[J].结构工程师,2017,33(01):144-148.

[6] 王桂明,余剑英.YJH材料性能及其对混凝土微观结构的影响[J].材料科学与工艺,2006,(03):272-274+278.

[7] 廖志明.掺吸水树脂与偏硅酸钠混凝土的自修复效果与力学性能研究[D].重庆交通大学,2025.

作者简介:李幸孺(1997—),男,陕西西安人,讲师,硕士。

基金资助:西安欧亚学院校级科研基金项目(2025QYXQ10)