广东地区机制砂混凝土氯离子渗透性快速检测方法适用性研究

黄建维

惠州大亚湾经济技术开发区建设工程质量检测中心 广东 惠州 516000

【摘　要】：在广东沿海高温高湿、盐雾侵蚀严重环境下，机制砂混凝土石粉含量、颗粒形貌与天然砂混凝土不同，现有常规氯离子渗透性快速检测方法精度、适用性等工程问题依然明显。本文以本地区花岗岩石粉机制砂混凝土为研究对象，采用 ASTM C1202 电通量法、RCM 快速迁移法、交流电测电阻率法进行对比试验，结合本服役工况，研究三种方法检测机制砂混凝土氯离子渗透性的准确性、稳定性、适用性。试验结果表明:适量石粉的微填充效应改善混凝土孔结构，增强抗氯离子渗透性能；RCM 法检测数据稳定性最好，能真实反映氯离子扩散规律，适合本地区机制砂混凝土耐久性批量检测；电通量法受石粉导电性影响，检测结果有所偏差;交流电测法检测效率高、无损可重复检测，适合现场快速筛查。本文厘清三种检测方法的适用范围、误差来源，建立适配本地机制砂混凝土的氯离子渗透性检测体系，为沿海工程耐久性检测、质量管控提供技术支撑。

【关键词】：本地区；机制砂混凝土；氯离子渗透性；快速检测;适用性；石粉含量

DOI:10.12417/2811-0528.26.21.071

引言

本地区桥梁、码头等混凝土工程长期处于高温高湿盐雾腐蚀环境，氯离子侵入导致钢筋锈蚀，是造成混凝土结构耐久性下降、影响工程服役安全的主要因素。随着天然河砂资源日益收紧，机制砂因取材广泛、低碳环保，成为广东混凝土工程主要骨料，应用规模不断扩大。机制砂自带石粉、颗粒棱角粗糙，改变混凝土孔隙结构、导电性、离子迁移性，影响氯离子渗透性检测精度。现有快速检测方法多基于天然砂混凝土建立，忽略石粉物化作用，用于本地机制砂混凝土检测时常出现数据分散、误差较大的问题。现有研究中，浸泡法精度高但周期过长；电通量、RCM、交流电测等快速方法应用广泛，但对本机制砂混凝土氯离子渗透性检测尚无系统对比，石粉带来的检测误差机理、各方法适用性边界尚不明确。为此，采用花岗岩机制砂混凝土，对比三种快速检测方法，分析检测稳定性、误差来源，研究石粉的影响机制，确定适配本地机制砂混凝土的检测方案，为沿海混凝土耐久性检测、质量管控提供试验依据。

1 广东地区机制砂特性及对混凝土氯离子渗透性的影响

（1）本地区机制砂的特性：本地区机制砂多以石灰岩、花岗岩等岩石为原料制成，机制砂颗粒形状尖锐，棱角较多，与天然河砂比较和易性较差，但适量石粉的加入可改善混凝土和易性，增加混凝土浆量及浆体粘稠性，减少泌水、离析现象，依据相关研究，建议本地区机制砂级配控制在Ⅱ级，细度模数控制在 2.6-3.0 之间，石粉含量控制在 6%-9%之间[1]。

（2）机制砂特性对混凝土氯离子渗透性的影响：机制砂颗粒级配、石粉含量等特性，会影响混凝土的内部结构，从而影响混凝土氯离子渗透性，合适的颗粒级配使混凝土更加密实，孔隙率减少，氯离子渗透通道减少，适量石粉加入可填充混凝土微孔隙，改善混凝土微观结构，提高混凝土抗氯离子渗透能力，但石粉含量过多时，可能使混凝土内部孔隙增多，反而降低混凝土抗氯离子渗透性能，有研究结果表明，石粉含量在 3%-7%范围内，随着石粉含量增加混凝土氯离子渗透性有所增加，但增幅不明显，石粉含量超过 7%以后，6h 电通量有所增加，表明混凝土抗氯离子渗透性降低[2]。

2 本地区机制砂混凝土氯离子渗透性快速检测方法适用性试验研究

2.1 试验原材料

试验所用原材料均采自本地区常用工程材料，贴近本地工程应用现实，水泥采用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥，各项性能指标满足 GB 175-2007 要求;粗骨料采用 5～25 mm 连续级配花岗岩碎石，压碎指标、含泥量均满足要求;细骨料采本地区花岗岩机制砂，筛分后调整石粉含量，设置 3%、6%、9%、12%四种梯度，机制砂细度模数 2.8～3.0，属于中砂;拌合用水为市政自来水;外加剂采用高效聚羧酸减水剂，适配华南地区混凝土施工配比。为使试验更具针对性，根据本地区主流机制砂混凝土工程配比，设计 C30、C40、C50 三个强度等级机制砂混凝土配合比，研究不同强度、不同石粉含量下各检测方法的适用性，混凝土配合比参数如表 1 所示。

表 1 混凝土配合比参数

强度等级	水泥 /(kg·m)	机制砂 /(kg·m)	碎石 /(kg·m)	水 /(kg·m)	减水剂/%
C30	280	820	1080	165	1.2

C40	340	780	1120	150	1.5
C50	420	720	1150	135	1.8

（注：续表 1）

2.2 试件制备与养护

按照规范流程进行试件浇筑，各组混凝土搅拌均匀后，装入Φ100mm×50mm 圆柱形试模（适配快速检测试验），振捣密实后静置 24h 拆模，随后放入标准养护室养护 28d，养护温度（20±2）℃、相对湿度≥95%。每组配合比、每种石粉含量制备 6 个平行试件，消除试验离散误差，保证数据可靠性。养护完成后取出试件，打磨端面、干燥处理，去除表面浮浆与孔隙积水，备用检测。

2.3 检测方法与试验方案

（1）电通量法：按 ASTM C1202 标准进行试验，将干燥的圆柱形试件密封侧面，两端分别接入 NaOH 溶液和 NaCl 溶液,施加 60 V 直流恒定电压,连续测试 6 h 内通过试件的总电通量,由电通量的大小确定混凝土氯离子渗透等级。电通量法的基本原理是利用直流电场加速氯离子迁移，以通电电荷量作为混凝土抗渗透能力的直观指标，是目前工程质量验收的常用方法[3]。

（2）RCM 快速迁移法：按 GB/T 50082-2009 标准，用 RCM 法测试混凝土氯离子非稳态迁移系数。试件真空饱水后放入试验槽，施加 30 V 电场，通电 8 h 后取出试件，劈裂后喷涂硝酸银显色剂，测量氯离子渗透深度，结合公式计算氯离子扩散系数，准确反映氯离子在混凝土内的迁移规律。该方法可直接得到扩散系数，贴近自然腐蚀工况下离子迁移特性。

（3）交流电测电阻率法：用低频交流电测试试件表面电阻率，避免直流电场引起的极化、电解干扰。试验不破坏试件，用电极贴合试件表面，施加微弱交流电，快速读取混凝土电阻率数值，电阻率与氯离子渗透性呈反比，可间接评价混凝土抗氯离子渗透性能。该方法具有无损、高效、可重复测试的特点[4]。

2.4 试验结果与分析

（1）石粉含量对机制砂混凝土渗透性影响规律：以三组强度等级、四种石粉含量的试验数据为依托，可看出机制砂石粉含量对混凝土氯离子渗透性有较大影响，整体上呈现“先优化后劣化”规律，石粉含量在 3%～9%范围内时，石粉能充分填充混凝土内部毛细孔隙，细化混凝土孔隙结构，减少贯通孔隙数量，阻断氯离子迁移通道，提高混凝土抗氯离子渗透性能;当石粉含量超过 9%时，过多石粉使混凝土比表面积增大，拌合用水量增加，同时石粉团聚易形成微小缺陷，混凝土孔隙率回升，抗渗透性能下降，这一规律在本地花岗岩石粉机制砂混凝土上体现得尤为明显，为后续检测方法适配性分析提供基础依据。

（2）三种快速检测方法数据对比分析：以 C40 机制砂混凝土（广东工程最常用强度等级）28d 试验数据为依托，整理三种检测方法的试验结果，对比数据离散性、灵敏度、准确性，如表 2 所示。

表 2 数据离散性、灵敏度与准确性对比

石粉含量/%	电通量值/C	M 扩散系数/(×10m/s)	电阻率/(Ω·m)
3	1286	4.26	86.5
6	1052	3.18	98.2
9	928	2.75	106.8
12	1135	3.52	92.4

①电通量法适用性评价：由试验结果可见，电通量法可清晰反映不同石粉含量、不同强度等级机制砂混凝土渗透性能的差异，检测过程标准化、操作简便，适合工程批量检测。但电通量法也存在不足:机制砂中花岗岩石粉具有一定导电性，改变混凝土内部导电通路，机制砂混凝土电通量检测结果高于天然砂混凝土，且石粉含量越高，导电干扰越大，数据离散性也越大;在本地区高盐雾工况下，混凝土内部离子成分复杂，进一步增加直流电场极化干扰，电通量法不能完全真实反映氯离子自然迁移规律，只适合机制砂混凝土配合比筛选、初步质量检测，不适用于准确的耐久性检测及服役寿命预测。

② RCM 快速迁移法适用性评价：RCM 法利用电场加速氯离子非稳态迁移，直接测定氯离子扩散系数，数据稳定性、重复性最好，平行试件检测误差均小于 5%。RCM 法还有效克服了石粉导电性的干扰，检测结果与自然浸泡法精确数据吻合，可真实反映本地区干湿交替、盐雾侵蚀工况下氯离子在机制砂混凝土内部的渗透扩散规律;同时可量化表征混凝土耐久性能，适合不同石粉含量、不同强度等级机制砂混凝土的精准检测，可为广东沿海重大工程耐久性评价、结构服役寿命预测提供可靠数据支撑。唯一不足是试验过程相对复杂、检测周期稍长，不适用于施工现场瞬时快速检测。

③交流电测电阻率法适用性评价：交流电测法用低频交流电检测，完全消除直流电场的极化、电解效应，试件无损伤，可重复多次测试，检测只需数分钟，检测效率远高于其他两种方法。试验数据表明，混凝土电阻率与氯离子扩散系数、电通

量值之间存在良好线性关系，可快速判定机制砂混凝土抗氯离子渗透性能。但该方法灵敏度相对较低，对石粉含量小幅度变化、高强度等级机制砂混凝土的性能差异区分度不够，精准度略低于 RCM 法。其最大优势是无损、高效、便捷，适合本施工现场大批量、常态化快速检测。

（3）三种检测方法综合适配性对比：根据本地区工程工况及检测要求,从检测精度、稳定性、效率、破坏性、适用性五个方面对三种快速检测方法进行比较,如表 3 所示。

表 3 三种快速检测方法进行综合对比

检测方法	检测精度	数据稳定性	检测效率	试件破坏性	适用场景
电通量法	中等（受石粉干扰）	一般	较高	半破坏	配合比筛选、初步验收
RCM 法	高	优	一般	破坏	精准检测、耐久性评估、寿命预测
交流电测法	较高	良好	极高	无损	施工现场快速筛查、常态化检测

3 创新点分析

本研究与已有通用化研究不同，以本地区特殊性及机制砂材料特异性为依托，实现三大创新，技术性、工程应用性较强。其一，地域工况针对性创新。已有研究多以通用混凝土工况为研究对象，未与广东沿海高温高湿、高盐雾、干湿交替特殊腐蚀环境相适配，本文以广东本地花岗岩机制砂混凝土为研究对象，确定了地域工况下石粉含量对各检测方法的干扰机理，填补了华南地区机制砂混凝土氯离子检测适配性研究空白。其二，技术适配性创新。首次对电通量法、RCM 法、交流电测法在机制砂混凝土检测中的误差、灵敏度、适用性边界进行对比，研究了石粉导电性、孔隙结构对各电学检测方法的不同影响，确定了各方法的优缺点及适用范围，解决了传统检测方法在机制砂混凝土检测精度不足的行业难题。其三，工程应用体系创新。结合本地区工程检测要求，建立“现场快速筛查(交流电测法)+批量初步验收(电通量法)+精准耐久评估(RCM 法)”分级检测体系，可为本地区机制砂混凝土工程质量控制、耐久性检测提供标准化技术方案，实用性、推广性较强[5]。

4 结论与展望

（1）结论：本论文依托大量试验、数据分析，对本地区机制砂混凝土氯离子渗透性三种快速检测方法的适用性进行研究，主要取得以下成果。第一，本本地花岗岩机制砂混凝土氯离子渗透性受石粉含量影响较大，3%～9%石粉含量可改善混凝土孔隙结构，增强抗氯离子渗透性能，超过 9%则造成耐久性能下降，是机制砂混凝土性能检测需要重点控制的参数；第二，RCM 法检测精度最高，数据稳定性最好，不受机制砂石粉导电性影响，检测结果与沿海地区真实腐蚀工况接近，适合本地区机制砂混凝土耐久性精准检测、结构服役寿命预测、重大工程质量评定;第三，电通量法操作简单、检测效率高，但受石粉导电性影响产生系统误差，数据离散性较大，只适合机制砂混凝土配合比优化、工程初步质量验收，不适用精准耐久性检测;第四，交流电测法具有无损、快速、可重复测试的优点，可满足施工现场常态化、大批量快速检测要求，检测数据与混凝土渗透性能相关性较好，是现场快速检测的最佳选择;第五，建立分级适配检测体系，可精准对应本地区不同应用场景机制砂混凝土氯离子渗透性检测要求，有效解决传统检测方法适配性差、检测精度低的工程问题。

（2）展望：本论文只对标准养护条件下机制砂混凝土进行试验，今后可结合本地区现场干湿循环、盐雾腐蚀、高温暴晒等服役工况，进一步研究不同环境下各检测方法的长期稳定性；还可优化检测参数，建立机制砂石粉含量与检测误差的修正模型，进一步提高快速检测方法的准确性，完善华南地区机制砂混凝土耐久性检测技术。

参考文献：

[1] 熊先达.机制砂岩性和级配对混凝土氯离子渗透性的影响[D].南昌大学,2019.

[2] 褚超敏,陈乔厦,秦运杰,等.凝灰岩机制砂混凝土力学性能研究[J].广东建材,2026,42(9):2-6.

[3] 黄庆亚.机制砂沉管混凝土质量的检测方法实践[J].中国建材,2026,(9):134-136.

[4] 周翱翔,李珠,王亮.花岗岩石粉对机制砂混凝土基本性能及气体渗透特性的影响[J].复合材料学报,2024,41(03):1568-1576.

[5] 李林,张磊,王浩.干湿循环下机制砂粉煤灰混凝土抗氯离子侵蚀性能研究[J].施工技术,2023,52(18):89-93.