

UHPC 桥梁接缝处抗渗性能检测技术研究

贺中泽 侯时桥 陈 垒

湖北交投智能检测股份有限公司 湖北 武汉 430050

【摘要】：UHPC 桥梁接缝处的抗渗性能受材料本体、界面密实度、接缝宽度和服役水压共同影响，单一外观观察难以识别早期渗流。检测对象为桥梁接缝，重点考察水压加载、集水测量、渗流传感和缺陷定位的检测关系，提出由低压预加载、分段恒压、同步采集和工况比较组成的检测技术，并设置参数配置示例。分析表明，完整接缝、细裂缝与界面孔隙具有不同的响应时间和流量曲线，检测结果应结合压力段、空间位置、传感器响应和复测记录评价，设计参数只能用于说明检测组织方式，工程判定仍应服从接缝尺寸和实际水环境。

【关键词】：UHPC 桥梁；接缝处；抗渗性能；水压加载；渗流检测

DOI:10.12417/2811-0722.26.08.054

引言

UHPC 用于桥梁接缝后，材料本体的低渗透性并不能替代对连接界面的检测。接缝宽度变化、端部收缩、浇筑不密实和排水不良都可能形成隐蔽水路，外观没有明显水痕时，内部渗流已经可能改变钢筋和界面材料的服役环境。常规检测若只记录一次水压下的有无渗水，难以区分短时吸水、装置泄漏和持续贯通渗流。应要把接缝构造、加载条件、传感器位置与时间曲线放在同一检测对象中，形成可重复的抗渗性能判断。

1 UHPC 桥梁接缝抗渗检测对象特征

1.1 接缝构造—渗流通道

UHPC 桥梁接缝处于两侧预制梁段或桥面板的连接位置，接缝宽度、界面粗糙度、钢筋穿越状态和浇筑密实程度共同决定水分能否沿界面进入结构内部。UHPC 基体孔隙率低、纤维约束强，材料本体并不是抗渗检测的唯一对象，接缝两侧新旧材料交界、端部收缩区和施工缝处的连续性更值得关注。检测布置应把接缝中心线、两侧影响带和梁段排水方向标在同一测线图上，水压加载面与实际迎水面保持一致，传感器则布置在可能出现渗流集中的下游位置^[1]。接缝中若出现未填满的细小空腔，水流会先沿界面扩散，再在局部缺陷处汇集，单点表面观察可能看不到早期渗流，必须利用加压后的流量变化和响应时间识别内部通道。桥梁接缝的几何尺寸会随温度、收缩和车辆荷载发生变化，抗渗检测不能只在静态外观下判断材料是否致密。

1.2 桥梁接缝服役水环境加载条件分类

接缝抗渗性能受到水压、浸水时间、温度、干湿循环和车辆振动的共同影响。桥面雨水在排水不畅时会在接缝上游形成短时水头，冻融或昼夜温差又会改变接缝宽度与界面压紧状态，单纯采用低水压、短时间的室内观察，难以覆盖长期服役中最容易发生的渗流情形。检测方案应先把实际水环境转化为可控制的加载条件，明确恒压段、升压段和保压时间，再把接缝表面水膜、背面集水和传感器响应放到同一时间轴上^[2]。材

料已有工程材料显示，UHPC 在桥梁附属结构中的应用应要同步关注材料性能与连接部位的施工状态，接缝处检测也应把水环境与施工界面作为一个对象理解。水环境条件还决定异常信号的解释方式。含水率较高的接缝在加载初期可能出现短暂吸水，传感器读数上升并不一定表示贯通渗漏；保压阶段仍持续增加的渗流量，才更接近稳定通道形成后的响应。

1.3 抗渗性能检测的分级判定

对比持续渗流与短时吸水，前者流量高于后者，差值单独记录。0.15MPa 阶段的持续流量高于 0.05MPa 阶段，增幅记录为差值。检测结果按整体筛查、疑似定位和局部确认三级处理，连续 3 个采样周期出现上升、相邻测点差值超过 5%或卸压后仍有水痕时，进入补测或定位程序；0.05MPa 与 0.15MPa 压力段均无持续响应时，结论才可归入未见贯通渗流^[3]。UHPC 桥梁接缝抗渗检测不是只读取一个渗水量，而是要判断水是否穿过接缝、渗流通道位于何处、响应是否稳定以及缺陷是否达到应要处置的程度。现场任务可分为接缝整体筛查、疑似缺陷定位和局部结果确认三个层次：整体筛查关注加载后是否出现持续渗流，定位关注水流出现的时间和空间位置，确认关注流量、压力和持续时间之间的关系。三类任务使用同一编号体系，但测点密度和保压时间可以不同。

2 UHPC 桥梁接缝抗渗检测技术分析

2.1 接缝试件的加载装置布置

试验装置应使水压从接缝实际迎水侧施加，并在背水侧形成独立的集水与监测空间。接缝试件两侧保留足够的 UHPC 或预制混凝土基体，接缝中心线与压力腔轴线重合，夹具对试件的约束不能遮挡接缝端部。装置安装前应检查密封圈连续性、压板平整度和紧固件受力状态，在空载条件下通水 5min，确认外侧无水滴后再进入正式加载。压力腔下方设置集水杯或称重装置，接缝两侧设置至少 3 个渗流传感器，使漏水量和空间位置能够相互印证。对于实体桥梁，可采用分区封闭罩将接缝局部隔离，罩体边缘避开可见裂缝，并用独立标尺记录封闭范围。

水压源先进入加载腔,水流若穿过 UHPC 接缝,将在背水侧形成可收集的水滴或水膜,传感器记录不同位置的响应,集水量与时间曲线再进入判定。

2.2 水压加载下的渗流采集参数配置

水压加载应按照由低到高、分段保持的方式进行,避免瞬间冲击使试件夹具或封边先于接缝失效。设计示例可设置 0.05MPa 预加载 10min,随后升至 0.10MPa 并保持 30min,再根据接缝状态增至 0.15MPa;每个压力段记录压力、集水质量、传感器电压和环境温度,采样间隔宜为 10s。压力传感器量程应覆盖最大加载值的 1.5 倍,流量或称重装置分辨率应小于预计最小渗流量的 1/10。采集系统的时间戳统一到秒,压力源、传感器和摄像记录使用同一时钟,避免将升压滞后误判为接缝响应。渗流量可用集水质量换算,在水密度取 ρ 、采样间隔取 Δt 时,单位时间渗流量按 $Q = \Delta m / (\rho \Delta t)$ 计算,其中 Δm 为相邻采样周期的集水质量增量, Q 的单位为 mL/min。接缝关系只适用于集水装置无蒸发、无外部滴漏且称重稳定的条件,若水滴落点偏离集水杯,应先修正收集方式。

2.3 渗流响应信号的接缝缺陷识别

渗流信号应要同时观察幅值、到达时间和空间分布。完整接缝在恒压阶段可能有短暂吸水响应,随后集水量曲线接近水平;细裂缝通常表现为响应时间延迟后流量缓慢增加,界面孔隙则更容易出现快速上升和较大的局部传感器差异。检测时不能只把最高读数当作缺陷位置,应将传感器编号、接缝照片、压力变化和背面集水点投影到同一测线。相邻测点同时升高,可能代表渗流面扩展;单点突升后立即回落,可能是气泡排出或水滴脱落,应延长恒压观察。

2.4 检测数据异常判别的可靠性要求

基线记录不少于 10min,零点漂移控制在量程 0.5% 以内,压力波动超过设定值 5% 时标记异常;连续 2 次重复加载仍出现同一位置响应,才把信号作为接缝异常依据。数据可靠性首先来自加载前的基线稳定。正式测试前应让压力传感器、流量传感器和称重装置连续记录 10min,零点漂移超过量程 0.5% 时重新校验;空载通水阶段出现集水量,说明装置密封或管路存在问题,不能进入试件判定。采集过程中若压力波动超过设定值的 5%,应标记接缝时间段并在恒压稳定后重新计时。不同传感器的安装高度、接缝距离和灵敏度必须写入记录,传感器更换后不得直接拼接为一条不加说明的曲线。异常判别应把仪器异常、装置异常和接缝响应分开。仪器异常多表现为单通道跳变、零点漂移或信号饱和,装置异常常伴随封边外侧水痕和压力快速下降,接缝响应则通常与压力段变化和具体位置同时出现。

3 UHPC 桥梁接缝抗渗检测技术分析

3.1 完整—缺陷接缝抗渗响应比较

完整接缝、细裂缝和界面孔隙在同一水压下会产生不同的渗流时间曲线,但曲线差异必须结合缺陷位置和水压段解释。完整接缝主要体现低幅值、短暂吸水和趋于平稳的响应;细裂缝的渗流量可能在一段延迟后逐步上升,峰值未必很大,却会在持续保压中保持增长;界面孔隙更容易形成快速贯通的水路,传感器在短时间内出现较强响应。对比测试应让三类工况使用同样的压力阶梯、采样间隔和传感器布置,不得用不同加载条件下的曲线直接比较。完整接缝的曲线较平缓,细裂缝出现延迟后上升,界面孔隙快速形成较高渗流量。图中“判定”标记只表示设计情景下的相对响应,不替代具体工程项目的标准阈值;现场判定仍应结合设计防水等级、接缝尺寸和水环境条件。

3.2 细裂缝对界面孔隙的检测差异

细裂缝宽度按 0.05mm、0.10mm 和 0.20mm 三级记录,界面孔隙测点间距取 20—40mm,重复加载 2 次比较到达时间和流量峰值。细裂缝与界面孔隙都可能使接缝背面出现水痕,但两者的信号形态和处置对象不同。细裂缝具有较明确的线性位置,水压升高后常沿裂缝方向延伸,传感器响应具有延迟和渐进特征;界面孔隙属于材料交界处的空间缺陷,水流可能在局部聚集后突然贯通,响应时间较短,邻近测点的差异更明显。检测人员应把裂缝宽度、长度、走向和接缝界面粗糙度作为外观变量,与曲线的起始时间、峰值和稳定段斜率对应记录。当细裂缝宽度小于 0.10mm 时,表面观察容易受水膜和光线影响,可用荧光示踪或背面传感器辅助定位,但示踪材料不能改变接缝的吸水状态。界面孔隙判断则应要检查浇筑分层、端部密实和界面清理记录,并在相邻位置增加测点。

3.3 检测结果的工程评价方法

对比完整接缝与界面孔隙,前者响应时间低于后者,差值写入评价。0.15MPa 阶段的持续流量高于 0.05MPa 阶段,升压前后差值进入结果等级。工程评价至少比较 3 个压力段、2 类时间特征和 2 个空间位置,响应时间差超过 30s 或恒压流量连续 3 次增加时转入局部确认;0.10MPa 与 0.15MPa 阶段的流量差和升压前后响应时间共同决定结果等级。检测结果评价应从水压等级、渗流量、响应时间、缺陷位置和重复性五个维度展开。单一压力下没有渗流,只能说明接缝压力和接缝持续时间内未观察到贯通水路,不能把结论扩大到所有服役工况;恒压阶段流量持续增加,则应进一步确认裂缝或界面孔隙。评价结果可分为结果分为未见持续渗流、局部可疑响应和持续贯通渗流三类,并写明对应的压力段和观察时间。对于可疑响应,安排相同点位的复测;对于持续贯通渗流,定位后采取封缝或局部灌注,再进行同条件复测。评价时应把曲线形态与现场照片、

压力记录和传感器位置合并阅读,不能只依据颜色或图形面积作结论。

3.4 检测任务的参数配置

表内六类任务采用 0.050—0.150MPa 压力范围、5—10s 采样间隔和 1—2 次复测配置,参数随缺陷识别任务分档。检测任务的参数配置要随接缝状态和评价目的变化。全段筛查强调覆盖长度和快速采样,疑似缺陷区强调传感器密度和保压时间,复测区则强调压力、位置和前次记录的一致。参数配置的差异体现检测任务的对象差异,不能把最高压力或最多传感器机械地套用到所有接缝。六类抗渗检测任务的测区、加载和采集参数配置见表 1。

表 1 UHPC 桥梁接缝抗渗检测任务参数配置示例

检测任务	测区长度 (m)	压力段 (MPa)	保压时间 (min)	采样间隔 (s)	传感器数量 (个)	复测次数 (次)
全段筛查	600.000	0.050—0.100	30.000	10	3	1
完整接缝抽查	240.000	0.050—0.150	40.000	10	3	1
细裂缝定位	60.000	0.050—0.150	50.000	5	5	2

参考文献:

- [1] 张静华.超高性能混凝土在桥梁附属结构中的应用研究[J].工程建设与设计,2022,(14):150-152.
- [2] 许斌,童欢,陈露一.浩吉铁路洞庭湖大桥钢桥面铺装 UHPC 性能研究及应用[J].世界桥梁,2022,50(3):86-92.
- [3] 黄汉中.位移与疲劳条件下桥梁伸缩缝宽度对桥梁抗渗性能影响的试验[J].广东公路交通,2026,52(3):40-46.

界面孔隙确认	40.000	0.050—0.150	60.000	5	6	2
排水不良区	80.000	0.050—0.100	45.000	10	4	2
修复后复测	40.000	0.050—0.150	60.000	5	6	2

(注:续表 1)

表 1 中,细裂缝定位与界面孔隙确认的采样间隔缩短、传感器数量增加且复测次数达到 2 次,说明局部缺陷需要更高的时间和空间分辨率;全段筛查则以较长覆盖长度承担异常发现任务。

4 结语

UHPC 桥梁接缝处抗渗性能检测应把材料本体、界面过渡区和端部封闭条件作为同一检测对象,采用逐级水压、分段保压、集水测量和多点传感相结合的方式识别渗流。完整接缝、细裂缝和界面孔隙在响应时间、流量增长和空间分布上存在差异,检测评价不能由单一峰值或单张照片决定。全段筛查用于发现异常位置,局部确认用于区分缺陷类型,修复后复测则应沿原测线重复加载。表内参数属于检测设计示例,现场结论仍应结合接缝尺寸、水环境和装置密封状态确定。