

Finite Element Analysis of Water Impermeability Test for polymer-Modified Cement Compounds for Waterproofing Membrane

Yiding Guo Miaomiao Wang Xiang Li* Bolin Wang Juncheng Xin

School of Civil Engineering, Dalian University for Nationalities, Dalian, Liaoning, 116650, China

Abstract

To investigate the effects of disc structure and test parameters on the evaluation results in the impermeability detection of polymer-cement waterproof coatings, this study was carried out in accordance with standards including GB/T 23445-2009 and GB/T 16777-2008. The ABAQUS finite element analysis software was used to establish two detection models of a 7-hole disc and a 19-hole disc, so as to simulate the impermeability test processes under a pressure of 0.3 MPa for 30 minutes (for the 7-hole disc) and 60 minutes (for the 19-hole disc) respectively. By analyzing the stress distribution, strain characteristics and mechanical response laws of the coating film samples, the rationality of the two detection methods was compared. The results show that the ABAQUS finite element simulation can accurately reproduce the mechanical behavior of the impermeability test of polymer-cement waterproof coatings, clearly reveal the influence mechanism of test parameters on the test results, and verify that the test scheme of the 19-hole disc combined with a 60-minute load holding time is more reasonable, which provides theoretical and data support for the optimization and improvement of the impermeability test standards for such waterproof coatings.

Keywords

Polymer-cement waterproof coating; Impermeability; Finite element analysis; ABAQUS; Disc structure

聚合物水泥防水涂料不透水性试验的有限元分析

郭亿丁 王苗苗 李想* 王柏霖 辛俊城

大连民族大学土木工程学院, 中国·辽宁 大连 116650

摘要

为探究聚合物水泥防水涂料不透水性检测中圆盘结构与试验参数对评价结果的影响,以GB/T 23445-2009^[1]、GB/T 6777-2008^[2]等标准为依据,采用ABAQUS有限元分析软件,建立7孔圆盘与19孔圆盘两种检测模型,分别模拟0.3MPa压力下30min(7孔)与60min(19孔)的不透水试验过程。通过分析涂膜试样的应力分布、应变特征及力学响应规律,对比两种检测方法的合理性。结果表明:借助ABAQUS有限元模拟可精准还原聚合物水泥防水涂料不透水性试验的力学行为,揭示了检测参数对试验结果的影响机制,验证了19孔圆盘搭配60min持荷时间的检测方案更具合理性,为该防水涂料不透水性检测标准的优化完善提供了理论与数据支撑。

关键词

聚合物水泥防水涂料; 不透水性; 有限元分析; ABAQUS; 圆盘结构

1 引言

聚合物水泥防水涂料把丙烯酸酯、乙烯-乙酸乙烯酯这类聚合物乳液以及水泥当作核心原材料^[3],它同时具备聚

合物所具有的弹性以及水泥所有的刚性,是无毒、无害、无污染的环保型防水涂料^[4],在建筑的屋面、地下室、厨卫间等开展的防水工程当中有着广泛的运用,自2013年起聚合物水泥防水涂料使用量达50万吨,占防水涂料总量50%以上^[5]。耐水性能作为评估材料耐久性及服役寿命的核心参数^[6],能够直接对工程的防水质量以及使用寿命起到决定性的作用。

现行的GB/T 23445-2009^[7]标准规定,聚合物水泥防水涂料的不透水性试验要参照GB/T 16777-2008^[8]第15章来执行,要用7孔圆盘加压装置,试验时的压力是0.3MPa,持续时间为30min。不过在实际检测的时候发现,这种方法因为存在局部应力集中的情况,所以会出现评价偏差的问题。

【基金项目】大连民族大学创新创业训练计划(项目编号:202512026154)。

【作者简介】郭亿丁(2004—),男,中国河北张家口人,在读本科,从事土木工程道路桥梁相关研究。

【通讯作者】李想(1989—),男,中国黑龙江双鸭山人,博士,讲师,从事力学仿真模拟以及新型防水涂料研究。

新的标准打算把检测装置改成 19 孔圆盘，同时把持荷时间延长到 60min，但是缺少理论依据来证明这种变更的合理性。

有限元数值模拟技术能够精准地再现材料在受力过程中所呈现出来的力学行为，这无疑为检测方法的优化给予了极为高效的手段。ABAQUS 软件^[9]有着颇为强大的非线性分析能力，并且还拥有丰富的材料本构模型，所以在土木工程材料性能模拟方面的应用已经相当成熟了。本文选取聚合物水泥防水涂料当作研究对象，基于 ABAQUS 建立有限元模型，模拟处在不同试验条件之下的力学响应情况，进而揭示出圆盘结构以及持荷时间对于不透水性评价结果所产生的影响机制，从而为检测标准的进一步完善给予数据层面的有力支撑。

2 试验基础与数值模型建立

2.1 试验参数与材料性能

依据 GB/T 16777-2008 标准规定，试件尺寸是 150mm × 150mm，涂膜厚度按照工程常用值来取，也就是

表 1 两种圆盘模型试件结构参数

| 装置类型 | 孔径 (mm) | 孔数 (个) | 圆盘外径 (mm) | 加压面半径 (mm) | 圆盘厚度 (mm) |
|--------|---------|--------|------------------|------------|-----------|
| 7 孔圆盘 | φ25 | 7 | φ92 | 46 | 5 |
| 19 孔圆盘 | φ18 | 19 | φ135 (R67.5 × 2) | 67.5 | 5 |

2.3 数值模型构建

2.3.1 几何建模与装配

在 CAD 中建立起 7 孔 /19 孔圆盘、聚合物水泥防水涂料试件的三维实体模型以及金属网的二维平面模型这三个部分。为了能够让计算得以简化，ABAQUS 中就把金属网和试件之间、圆盘和试件之间的那些微小间隙给忽略了，同时用二维模型赋予不同半径属性的方法代替三维金属网的不同工况，进而采用绑定约束 (Tie) 的方式来对三者之间那种紧密接触的关系加以模拟。在进行模型装配的时候，要让金属网紧紧地贴附在试件的迎水面上，并且把圆盘安置在金属网的上方，以此来保证压力能够均匀地传达到试件的表面。

2.3.2 边界条件与加载方式

边界条件方面，需将固定圆盘外边缘的所有自由度都予以固定，这主要是为了模拟试验装置所实施的夹紧固定操作。要对试件四周的水平位移加以限制，其目的在于防止在试验开展的过程中出现试件滑动的情况。还要求金属网和试件之间、以及金属网和圆盘之间均不能存在相对滑动的现象。

加载方式是静力恒载，把压力施加到 0.3MPa 保持不变，直到规定的持荷时间结束，最后再把压力卸载到 0MPa。这里所说的持荷时间，对于 7 孔模型来说是 30 分钟，而对于 19 孔模型则是 60 分钟。压力是施加在圆盘下表面的，而且是通过均布面荷载的方式施加的，之后再经过金属网传递给

1.5mm。金属网选用的是孔径为 0.2mm、丝径为 0.125mm 的平纹编织网，其力学性能参数是根据 GB/T 5330-2003 标准来确定的。

聚合物水泥防水涂料的力学性能指标是经试验来确定的，其拉伸强度达到了 1.80MPa，断裂伸长率为 30%，弹性模量是依据应力 - 应变曲线经过计算得出的，结果为 5.4MPa，泊松比采用的是 0.3 这个数值。在不透水试验中，所设定的压力为 0.3MPa，对于 7 孔圆盘模型而言，其持荷时间为 30 分钟，而 19 孔圆盘模型的持荷时间则为 60 分钟。

2.2 圆盘结构参数

两种圆盘皆是选用钢材来制作的，其厚度达到了 10mm，外径则是 92mm。7 孔圆盘依照 GB/T328.10-2007 这一标准来进行设计。而 19 孔圆盘属于拟变更的结构，它的孔分布是以圆心作为中心点，按照同心圆的方式进行排列，且所有的孔都处在水压加压面的范围之内，各个孔的孔径统一设定为 φ20mm，如此便能确保总加压面积和 7 孔圆盘大致相近。关于圆盘结构的具体尺寸情况，可参照表 1 了解。

试件的迎水面。

3 有限元模拟结果与分析

3.1 应力分布特征对比

在标准工况下 (金属丝直径为 0.125mm 的金属网) 7 孔圆盘模型以及 19 孔圆盘模型在持荷末期的试件等效应力分布情况分别呈现于图 4 和图 5 当中，详细实验数据见表 3

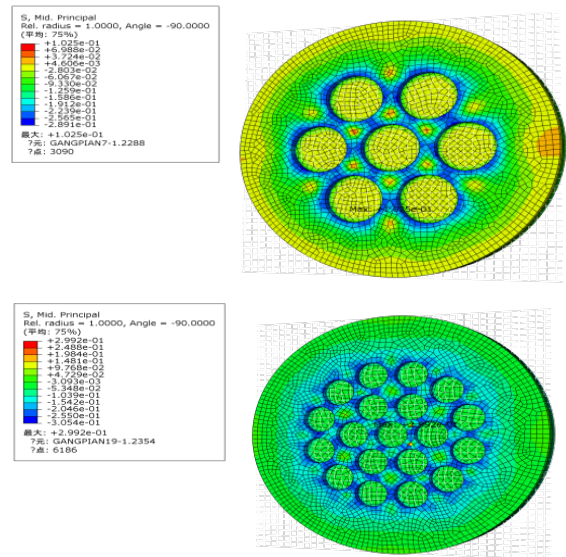


图 4 7 孔与 19 孔圆盘模型试件等效应力分布云图 (单位: MPa)

表 3 两种圆盘模型试件应力统计结果

| 圆盘类型 | 最大应力 (kPa) | 平均应力 (kPa) | 最大主应变 |
|--------|------------|------------|-------|
| 7 孔圆盘 | 339.84 | 160 | 0.036 |
| 19 孔圆盘 | 339.58 | 164 | 0.039 |

3.2 应变分布与不透水性评价

7 孔圆盘模型中, 防水涂料试件的应变呈现强局部集中特征, 最大等效应变数值达 7.2%, 该极值点仅出现在 7 个孔的边缘小范围区域, 试件其余绝大部分区域的应变值集中在 0.5%~2.0% 区间, 整体变形程度极低。水压荷载通过 7 孔圆盘传递时, 作用力仅集中在少数孔边缘位置, 易导致试验中仅局部区域产生变形响应, 出现不透水性评价结果偏于保守的偏差。

19 孔圆盘模型下, 防水涂料试件的应变分布均匀性显著提升, 无明显的局部集中现象, 最大等效应变达到 22.5%, 虽仍未超过材料的断裂伸长率, 未造成涂料破坏, 但该极值已接近涂料塑性破坏临界值, 且试件有效加压面内的应变值普遍处于 5.0%~18.0% 区间, 整体变形程度远高于 7 孔圆盘模型。19 孔圆盘凭借孔数更多、孔径更小且呈同心圆均匀分布的结构特点, 使水压通过金属网传递至涂料表面时, 荷载作用点大幅分散, 有效避免了局部应力集中引发的非均匀变形, 让涂料的变形响应更贴合实际工程中防水涂料大面积、整体受水压的变形特征。

3.3 不同工况的金属网的应力传递特征分析

在标准 GB/T5330-2003^[10] 中, 对工业用金属丝编织方孔网进行了网孔基本尺寸、网孔算术平均尺寸偏差、大网孔尺寸偏差范围和金属丝直径的搭配的说明。孔径为 0.2mm 时, 金属丝直径可分为 6 种工况, 我们通过 ABAQUS 模拟不同金属丝直径工况, 得出不同工况对不透水性实验结果的影响见表 4。

表 4 防水涂料在不同工况下应力统计结果 (kPa)

| 金属铁丝网直径 (mm) | 7 孔圆盘下总应力 | 19 孔圆盘下总应力 |
|--------------|-----------|------------|
| 0.080 | 344.22 | 343.95 |
| 0.090 | 343.74 | 342.20 |
| 0.100 | 342.55 | 342.13 |
| 0.112 | 341.41 | 340.92 |
| 0.140 | 338.82 | 338.43 |

在 0.3MPa 试验压力下, 无论是 7 孔圆盘还是 19 孔圆盘试验体系, 防水涂料所受总应力均随金属网丝径的增大呈逐步降低趋势。当金属丝直径从 0.080mm 增至 0.140mm 时, 金属网的整体受力面积与约束作用随之减小, 应力传递效

率逐步下降。同时, 相同金属网丝径工况下, 7 孔圆盘与 19 孔圆盘体系中防水涂料所受总应力数值相近, 说明金属网丝径是影响试验应力传递的关键因素, 其影响程度显著高于圆盘结构的差异。

4 结语

(1) 在 0.3MPa 试验压力作用下 7 孔圆盘模型的防水涂料试件出现明显的局部应力、应变集中问题, 其最大等效应力高于 19 孔圆盘模型, 而 19 孔圆盘模型的试件应力与应变分布表现出更好的均匀性。

(2) 19 孔圆盘的结构设计能够实现荷载的分散传递, 使试件有效加压面整体产生变形, 更贴合工程实际中防水涂料的受力状态; 7 孔圆盘因局部受力特征易导致对防水涂料防水性能的评价结果偏于保守。

(3) 在不同金属网工况实验中, 随着金属铁丝网丝径从 0.080mm 增大至 0.140mm, 铁丝网整体受力面积和约束作用变小, 防水涂料在 7 孔圆盘、19 孔圆盘试验体系下所受的总应力均呈逐步降低趋势, 丝径越小, 防水涂料传递获得的总应力值越高, 丝径越大则应力传递后的数值越小。

参考文献

- [1] GB/T 23445-2009. 聚合物水泥防水涂料[S]. 中国标准出版社, 2009.
- [2] GB/T 16777-2008. 建筑防水涂料试验方法[S]. 中国标准出版社, 2008.
- [3] 熊爽, 杨文凯, 陆建兵. 聚合物水泥防水涂料抗渗性试验方法研究[J]. 中国建筑防水, 2025, (12): 51-53.
- [4] 沈春林编. 聚合物水泥防水涂料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003, 15-16.
- [5] 赵守佳, 田翠. 聚合物水泥防水涂料发展现状与展望[J]. 中国建筑防水, 2014, 12: 7-13
- [6] 王雨禾, 邹伟, 等. 聚合物水泥防水涂料的制备及其性能研究[J]. 新型建筑材料, 2025, 52(09): 29-32+42.
- [7] GB/T 23445-2009. 聚合物水泥防水涂料[S]. 中国标准出版社, 2009.
- [8] GB/T 16777-2008. 建筑防水涂料试验方法[S]. 中国标准出版社, 2008.
- [9] 蔡亚玲, 赵磊, 张颖. 基于 ABAQUS 分析新建部位沉降对拼宽桥梁局部受力的影响[J]. 价值工程, 2026, 45(09): 135-138.
- [10] GB/T 5330-2003. 工业用金属丝编织方孔筛网[S]. 中国标准出版社, 2003.