

新型反应性丁基橡胶防水材料防水性能试验和数值模拟研究

刘 宽

上海隧道工程有限公司, 上海

收稿日期: 2022年7月22日; 录用日期: 2022年8月2日; 发布日期: 2022年8月15日

摘 要

本文通过对内置不同防水材料的混凝土试样进行注水试验和数值模拟分析, 研究新型反应性丁基橡胶防水材料的防水性能, 并和传统钢板止水带性能进行对比。通过试验发现, 含有传统钢板止水带的试样在角部出现渗漏水, 而使用新型反应性丁基橡胶钢板止水带的试样没有渗水发生; 弯折30°的W型部材在试样一边的中点出现明显渗漏, 与理论分析规律相一致。数值模拟分析从力学角度分析了不同防水材料和混凝土之间的应力变化特征, 进一步验证了试验结果的正确性和不同防水材料的力学性能。根据试验和模拟结果指出, 应保证防水钢板在90°接缝位置的焊缝质量, 同时对于新型防水材料, 应避免安装过程中出现弯折而影响防水质量。

关键词

反应性丁基橡胶, 防水材料, 裂缝, 试验, 数值模拟

The Experimental and Numerical Study on Waterproof Performance of New Reactive Butyl Rubber Waterproofing Materials

Kuan Liu

Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai

Received: Jul. 22nd, 2022; accepted: Aug. 2nd, 2022; published: Aug. 15th, 2022

Abstract

This paper investigated the waterproof performance of the new reactive butyl rubber waterproof

material by the laboratory test and numerical simulation on the concrete specimen containing different waterproof materials. The comparison with traditional steel plates was also included. The results showed that the obvious water leakage happened to the traditional steel plate, while the new reactive butyl rubber steel plate performed good waterproof performance under normal working conditions. The specimen containing new reactive butyl rubber waterproofing material with a W-section under a bending angle of 30° showed obvious leakage at the midpoint on one side of the specimen, following the rules of the theoretical analysis. The numerical simulation further confirmed the results of laboratory tests by analyzing the stress distribution between the concrete and different waterproof material. It noted that a good welding performance of the waterproof steel plate at the 90° corner should be ensured, and for the new reactive butyl rubber waterproof material, bending during the installation process should be avoided to guarantee the waterproof quality.

Keywords

New Reactive Butyl Rubber, Waterproofing Materials, Cracks, Experimental Study, Numerical Simulation

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

混凝土结构在其施工和长期服役过程中，会不断随着时间的增长而产生劣化效应，导致其力学性能和承载特性逐渐下降。在地下工程结构服役期间，结构劣化导致的裂缝产生和渗漏水问题的影响尤为严重，防水性能下降导致渗漏水情况的出现，长期下去容易造成结构的整体失稳和破坏。因此，在地下结构设计和施工中，应尤其注意结构的防水措施[1]。

当前地下工程常见混凝土结构防水设计有主动防水和被动防水两种思路。被动防水的主体防水包括混凝土结构自防水和附加防水[2]。结构自防水可以通过增强混凝土抗渗性能来实现；附加防水按照工程防水等级选取，多以柔性外防水为主[1]。此外，节点防水可视具体情况在变形缝和施工缝等结构敏感部位设置细部节点防水措施[3] [4]。被动防水方式只能在出现裂缝和渗漏之后采取措施，不能主动控制结构裂缝产生。主动防水在设计 and 施工时，将某一区域内的材料和结构强度弱化，使裂缝优先产生在弱化区域。设置诱导缝是弱化结构强度的一种有效途径，将结构裂缝的产生和开展限制在指定范围内，并采取有效的防水措施防止渗漏水[5]。

中埋式止水钢板和外贴止水材料是常见的防水方法。然而，因为防水材料胶结性能不够，会导致其与结构粘贴摩擦作用不强，在外部复杂作用影响下，防水层和结构本身变形程度不同，会互相脱离造成渗漏水现象出现。混凝土浇筑完成后产生收缩，止水钢板和混凝土之间咬合程度弱造成滑移和微裂缝出现，进而形成渗水通道[6]。随着材料科技的进步，越来越多的新材料被用于地下结构防水措施当中。其中，反应性丁基橡胶钢板止水带能够有效阻隔渗漏水通道。丁基橡胶胶结性能好，与各种建筑材料都能很好的粘结结合[6]，和结构物形成较为完整的防水层[7]，防止二者之间发生滑移错动与渗水[8]。有研究发现，产自日本早川株式会社的新型反应性丁基橡胶抗渗性与耐久性良好[8] [9] [10]，与诱导缝共同施工协同作用，可以起到良好的防水效果，其上海轨道交通 17 号线青浦站工程得到了成功应用，有效缓解

了裂缝渗水问题[11]。

截至目前,关于地下工程结构的防水材料和应用技术,已经开展过一些试验研究[12][13],然而,鲜有新型反应性丁基橡胶钢板止水带与诱导缝方法联合防水方面的试验和模拟研究。基于此,为提高地下工程防水性能和整体稳定性,全面掌握新型反应性丁基橡胶钢板止水带防水性能,本文开展不同防水部材以及新型防水部材在不同工作状态下的室内防水试验和数值模拟研究,以全面了解其防水性能,并与传统钢板止水带工作性能进行对比分析,根据试验结果给出防水材料的施工建议。

2. 室内试验

2.1. 试验材料

本次试验所采用的新型反应性丁基橡胶防水材料主要是日本早川橡胶株式会社出产的 crack inducer 防水材料的 A 部材、BL 部材和 W 型部材,各种材料如图 1 所示。

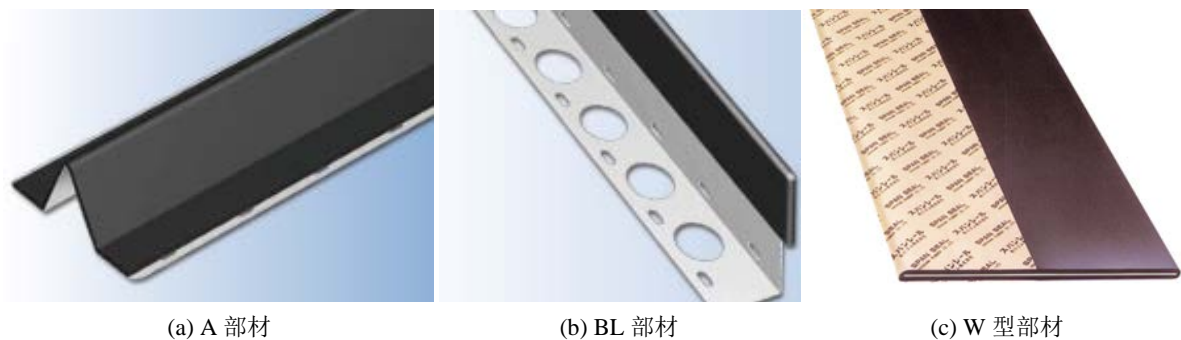


Figure 1. The adopted experimental materials

图 1. 试验材料

2.2. 试验设计

为匹配工程中常用的方法,试验设计考虑诱导缝防水采用 A、BL 型部材组合防水形式,水平施工缝防水采用 W 型部材,拟针对上述两种防水方式的防水效果展开研究。

1) 水平施工缝防水

采用的 W 型部材型号为 W-0420-PP,其厚度 $t = 4 \text{ mm}$,宽度 $H = 200 \text{ mm}$,并研究不同部材初始安装倾斜角度(0° 、 15° 和 30°)对水平施工缝防水效果的影响。

2) 诱导缝防水

在室内试件中难以准确呈现出诱导缝处裂缝开展的现象,因此,为了能够同时达到结构渗水和材料防水的试验和实际效果,试验主要针对最不利工况,也就是裂缝已经形成的状态。通过分层、错时浇筑,在混凝土中预先形成裂缝,在裂缝上下部位的混凝土中预先置入不同防水材料,对比不同材料的防水效果。

2.3. 试验设备与加载

试验过程中所用到的试样和试验设备主要包括:试样 6 块,其中传统止水钢板试样 1 块、反应性新型丁基橡胶 W 型部材试样 3 块及 A 型和 A、BL 型部材诱导缝试样 2 块;水压泵,用于向试样提供并维持水压力;压力计用于测量试验过程中的水压力。采用 GPJ-3900M 型三向加载盾构隧道管片接缝耐水压试验系统进行加载,试验试样加载如图 2 所示。

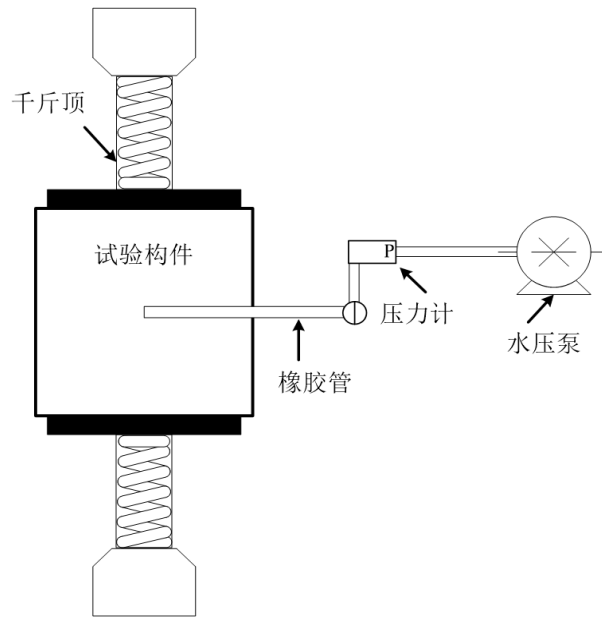


Figure 2. Loading diagram of the tested component
图 2. 试样加载示意图

2.4. 试样制备

试验过程中所采用的混凝土试样尺寸为 $600 \times 600 \times 600$ mm, 针对不同类型的防水材料设计了几种不同类型的混凝土试样, 其制备方法也有所不同。

对于 W 型部材, 其试验目的之一是研究施工偏差造成的防水性能差异。试样制备过程中, 先将部材环绕成圆形, 两端搭接长度为 100 mm, 吊置于试样中心指定位置上, 然后浇筑第一层混凝土, 在浇筑第二层混凝土时要预留注水口位置。为了考虑实际施工中垂直度偏差对于防水效果的影响, 人为地将 W 型部材弯折成一定角度(15° 和 30°), 以便分析施工偏差对于防水性能的差异化影响。

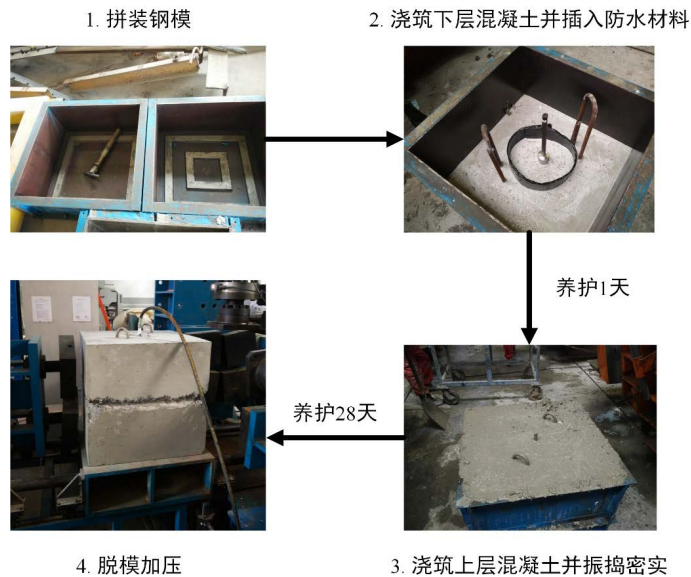


Figure 3. The complete process of component fabrication
图 3. 试样制作步骤

对于传统止水钢板、A型部材和BL型部材的试样制作方法与W型部材试样制作方法类似，首先将相应部材吊置于试样内部指定位置，然后分两层浇筑混凝土。

试件制作过程中的难点是创造接缝，减小混凝土的自防水能力对于防水部材测试结果的影响。由于混凝土自身有较好的抗渗性能，因此在试验过程中可能出现6块试件都不发生渗漏的情况，这样就无法对比各种防水部材的防水性能的优劣。为了避免这种情况的发生，在浇筑完下层混凝土后先养护1天，保证表面已接近结硬光滑，然后再浇筑上层混凝土，确保上层和下层混凝土中间能够形成明显的接缝，留出水的渗流路径。试件的完整制作流程如图3所示。

2.5. 试验步骤

试样制作完成并养护至指定标准之后，对试样进行脱模，并在试样顶部进行注水加压。采用逐级增大水压的方式，先加压1.0 Mpa半个小时，然后增大水压至2.0 Mpa维持半小时，最后加压至3.0 Mpa维持1.5~2个小时。采用水压泵输水加压的总时间长度控制在大约2~3个小时，期间观察各试样在不同时间段的渗水情况，并严格做好记录。

3. 试验结果

将各个试验试样在加压过程中的渗漏水情况、所达到的最大水压以及加压时间进行汇总分析，如表1所示。

Table 1. The test results

表 1. 试验结果

编号	防水材料	是否漏水	最大水压	加压时间
1	传统止水钢板	是	2.20	1.5
2	A型	否	3.00	3.0
3	A、BL型	否	3.00	3.0
4	W型0°	否	3.00	3.0
5	W型15°	否	3.00	3.0
6	W型30°	是	2.96	2.6

按照表1中的试验结果，以及在试验过程中实际观察到的现象，在试验所采用的6个不同试样中，传统止水钢板试样最先出现明显渗漏水，弯折30°的W型部材试样同样出现了渗漏水现象。但是其余的试样都未出现渗漏水现象，这表明新型反应性丁基橡胶防水材料的防水性能很好，相比其他传统材料而言，能够有效阻隔渗水作用。其中，埋设传统钢板的试件在2.2 MPa水压条件下持续加载1.5小时后，在试样角部钢板接缝处出现了渗水，如图4所示。弯折30°的W部材在2.96 MPa水压条件下加载2.6小时也发生明显渗漏水，如图5所示。对于传统止水钢板，红圈范围即埋设传统钢板试件的渗水位置，位于试件的角部。凿开试件边缘后，判断水是从两块钢板的接缝位置渗出的。理论上，对于传统钢板试件，最易发生渗水的位置是在钢板接缝处和试件各边中点，前者是因为在钢板接缝位置由于焊接误差导致钢板可能没有紧密贴合，为渗水提供了通道；后者则是因为从注水位置到试件的四边中点是最短的渗流路径。从试验结果来看，试样角部的钢板接缝处更加容易发生渗漏水。

影响混凝土裂隙渗流的因素有很多，譬如裂隙宽度、所受应力、裂隙粗糙度、连通性及接触面积等[14]。对于混凝土渗流的理论研究，包括了管道-渗流耦合模型、应力-渗流耦合模型、损伤-渗流耦合模型等，其中渗流还可分为稳定及非稳定状态[15][16]。介质的类型也会明显影响内部水流的形态和渗水

方式的形成, 理论研究中一般将介质划分为等效连续介质和离散介质两种模型类型。渗流介质本身的形态和结构会明显受到外界温度及应力等因素的影响, 进而影响内部裂隙渗流作用[15]。



Figure 4. The water seepage of component with traditional steel plate
图 4. 传统止水钢板试样接缝渗水



Figure 5. The water seepage of component with W type waterproof product of bending angle 30°
图 5. 弯折 30°的 W 型部材试样渗水

对于 W 型部材, 根据经典渗流理论达西定律, 渗水流量与通过截面积成正比, 与总水头差成正比, 与渗流路径成反比。可以得到以下解释, 假设混凝土新旧界面各向均匀, 而注水位置到试件四边中点的距离是最小距离, 即最短渗流路径, 那么水流最有可能从试件某边的中点渗出, 这与试验当中所观察到的结果是一致的, 因此试验结果和理论分析可以相互印证。

4. 数值模拟对比分析

试验结果仅从宏观现象上观察到了不同防水材料的防水性能差异和渗漏水特征, 为了从结构内部特性和力学角度比较不同防水部材的差异, 探究导致不同防水部材防水效果差异的机理, 以室内试验的试件为对象, 使用 ABAQUS 建立有限元模型进行数值模拟。模型的选取以室内试验试件尺寸为准, 混凝土由两个 $300 \times 600 \times 600$ mm 的块体组成, 如图 6 所示。防水材料均采用壳单元来模拟, W 型部材为半径 125 mm、高 200 mm 的圆环。为了与 W 型部材比较, 传统止水钢板的几何尺寸在原试件尺寸的基础上进行调整, 使之与 W 型部材的圆环横截面周长相同, 建立四边长为 200 mm、高 200 mm 的钢板, 各材料

模型如图 7 所示。W 型部材同样考虑弯折 15° 和 30°。所有防水部材厚度均取 2 mm。为模拟新型反应性丁基橡胶和传统钢板的区别，将新型反应性丁基橡胶防水材料用 Embedded 方法嵌入混凝土，传统钢板则使用非线性弹簧单元与混凝土连接。

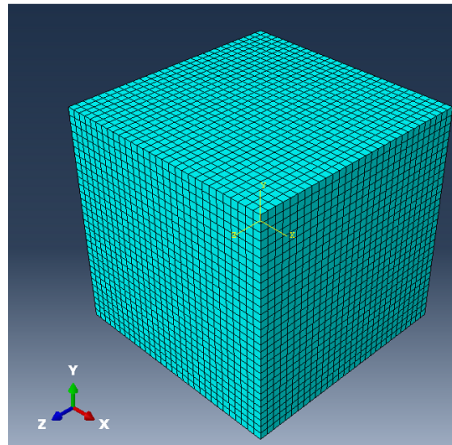
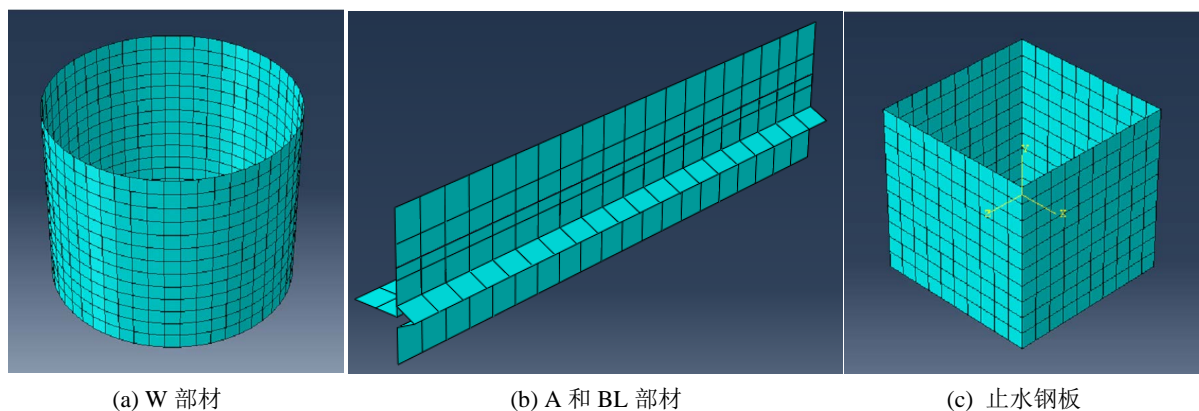


Figure 6. Finite element model
图 6. 有限单元模型



(a) W 部材

(b) A 和 BL 部材

(c) 止水钢板

Figure 7. Model of different waterproof materials
图 7. 不同防水材料模型

为了模拟上下混凝土中间的诱导缝和施工缝的张开效果，模型的边界条件设置为在上部混凝土上表面施加 0.3 mm 的沿竖直向上的位移，下部混凝土下表面施加 0.3 mm 的沿竖直向下的位移。

通过应力分布(图 8)的比较，可以看出由于新型防水材料 with 混凝土的胶结作用更强，使得其应力比传统钢板要大，因此更不容易被拉开，这也印证了新型反应性丁基橡胶防水材料的良好防水作用。最大应力出现在混凝土与防水材料接触的位置，沿远离该部位的方向减小。W 型部材的最大应力在防水部材埋置深度方向上分布较为均匀。W 型部材弯折 30° 与弯折 15° 得到的结果类似，均在防水部材的中部先达到应力的聚集状态。A 和 BL 型部材最大应力也集中在防水部材与混凝土接触的位置。而止水钢板的最大应力集中在靠近施工缝的位置。之所以会出现这样的差别，是因为接触类型的不同。止水钢板与混凝土的接触是用非线性弹簧连接钢板和混凝土的重合节点实现的，沿钢板埋深方向所用的弹簧是相同的。而 W 型部材和混凝土是嵌入接触的，即认为 W 型部材与混凝土的接触面上始终保持变形协调。相较之下，W 型部材在接缝处的变形量远大于止水钢板在接缝处的变形量，而止水钢板沿埋深方向的应变更加均匀。这也解释了为什么图 9 中 W 型部材监测单元应力会远大于止水钢板单元相应的应力，止水钢板的应力沿

埋深方向过渡平滑，而 W 型部材的应力存在明显变化。

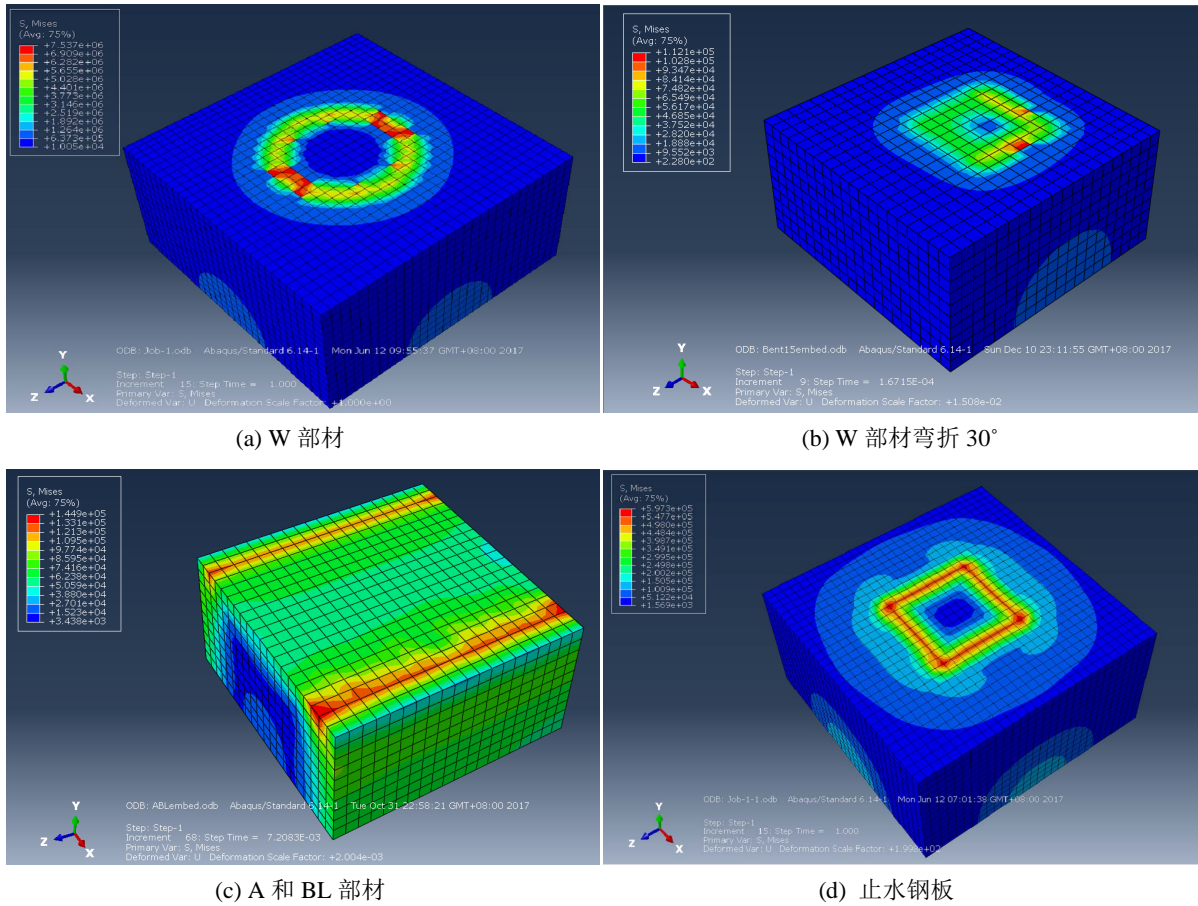


Figure 8. Stress distribution of the lower model for different waterproof materials

图 8. 不同防水材料下层混凝土应力云图

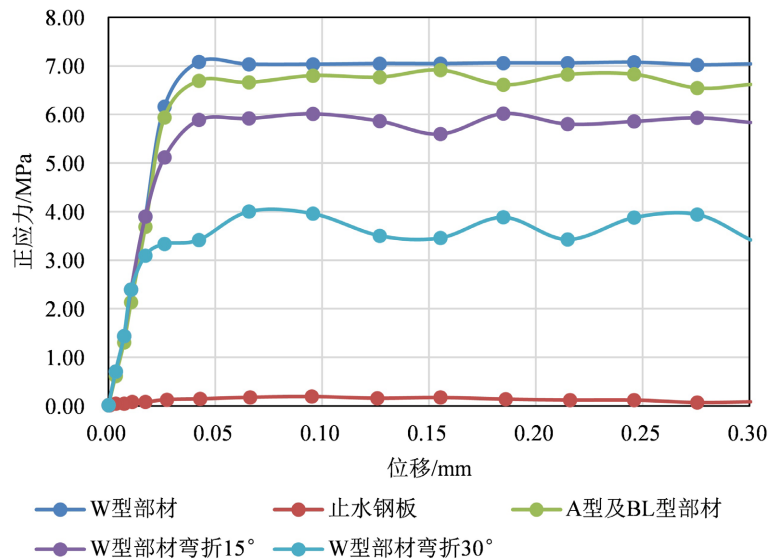


Figure 9. Normal stress for different waterproof materials

图 9. 不同防水材料正应力变化曲线

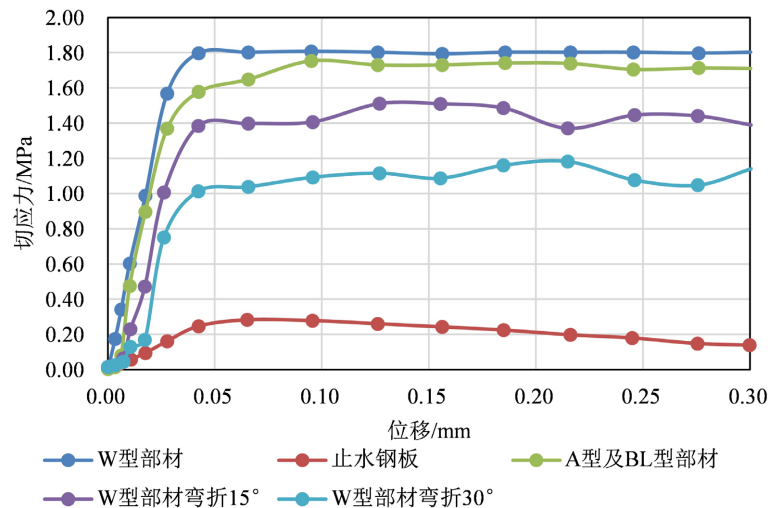


Figure 10. Shear stress for different waterproof materials
图 10. 不同防水材料切应力变化曲线

对图 9 与图 10 所示的数据进行计算分析可知, 在线弹性范围内, 新型反应性丁基橡胶防水材料模型应力曲线的斜率约为止水钢板模型应力曲线斜率的 13 倍, 即新型反应性丁基橡胶与混凝土之间的抗剪刚度是止水钢板与混凝土之间抗剪刚度的 13 倍。这意味着在受到同等外力作用的条件下, W 型部材与混凝土之间的相对滑移更小, 有更好的防水效果。综合来看, 数值模拟结果与试验结果较为吻合。

5. 结论

本文主要通过室内试验方法, 研究新型反应性丁基橡胶钢板止水带的防水性能。首先制作内置有不同类型和形态防水材料的含裂缝混凝土试样, 然后通过注水孔注水加压, 实现对不同防水材料防水性能的观察试验, 主要结论如下:

- 1) 一般情况下, 没有发生弯折的新型反应性丁基橡胶钢板止水带的防水性能良好, 不会出现渗漏水现象, 验证了这种新材料的优良防水性能。
- 2) 对于使用传统钢板止水带的施工缝, 试样角部出现了明显的渗水现象, 因此在施工过程中, 必须保证钢板在 90° 接缝位置的焊缝质量, 避免因为焊缝不严密而为渗流提供通道。
- 3) W 型部材的弯折角度越大, 越容易出现渗漏水现象, 其渗漏水位置与理论分析结果相一致。在施工现场, 不规范操作可能导致 W 型部材发生弯折, 应该严格操作, 确保新型反应性丁基橡胶止水带与施工缝的垂直度, 避免因为弯折过大而发生渗水。
- 4) 数值模拟结果表明, 相比传统止水钢板, 新型反应性丁基橡胶防水材料和混凝土间的粘结具有更强的抗拉伸和抗剪切能力, 因此在外力作用下产生的裂缝宽度更小, 也具有更好的防水能力。施工不当造成 W 型部材的弯折会导致 W 型部材与混凝土间咬合力的降低, 从而导致其防水能力的下降。

参考文献

- [1] 孟瑞斌, 徐勇. 地下工程防水设计分析[J]. 科技信息(学术版), 2008(28): 273.
- [2] 邓小丽. 地下室的防水设计[J]. 民营科技, 2012(8): 273.
- [3] 石伟国, 乐雨, 吴航. 自粘型高聚物卷材和聚氨酯防水涂膜在某地下室工程中的应用[J]. 新型建筑材料, 2012, 39(8): 77-82+92.
- [4] 彭桐益. 地下室的防水措施、方法及应用[J]. 西部探矿工程, 2004, 31(12): 130-132.
- [5] Hiroyasu, K., Yasuhiro, F. and Takashi, H. (2012) Prevention of Water Leakage in Concrete by Crack-Inducing Joint

Applied Superabsorbent Polymer. *Cement Science and Concrete Technology*, **66**, 592-599.

<https://doi.org/10.14250/cement.66.592>

- [6] 胡骏, 洪晓苗, 邵林. 地下工程混凝土裂缝预控与防水优化设计[J]. 中国建筑防水, 2013(16): 1-6.
- [7] 隋涛, 杨林德, 马险峰. 地铁车站结构诱导缝应用研究现状与展望[J]. 路基工程, 2012(5): 60-63.
- [8] 王荔平, 王宝来, 邹存伟. 中埋反应性丁基橡胶腻子(钢片式)止水带的技术性能分析[J]. 地下工程与隧道, 2010(1): 9-11.
- [9] 张子新, 刘瞳葳, 黄昕, 等. 诱导缝防水体系在水化热作用下的数值模拟研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(z1): 404-412.
- [10] 张子新, 肖时辉, 刘瞳葳, 等. 新型盾构隧道防水体系工程试验及数值分析[J]. 上海交通大学学报, 2019, 53(6): 688-695.
- [11] 刘沛. 新型诱导缝止水材料在轨道交通地下车站防渗漏中的应用研究[J]. 地下工程与隧道, 2016(1): 30-32+55.
- [12] 吴炜枫, 丁文其, 魏立新, 等. 深层排水盾构隧道接缝防水密封垫形式试验研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(6): 190-195.
- [13] 吴建明, 孙建民, 巴云雷. EPB 反应性丁基橡胶自粘防水卷材及其在地下防水工程中的应用[J]. 中国建筑防水, 2014(4): 33-36.
- [14] Yuan, Y. and Wan, Z.L. (2002) Prediction of Cracking within Early-Age Concrete Due to Thermal, Drying and Creep Behavior. *Cement and Concrete Research*, **32**, 1053-1059. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00743-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00743-3)
- [15] 李顺才, 陈占清, 缪协兴. 破碎岩体渗流的试验及理论研究综述[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2008, 27(3): 37-43.
- [16] 赵吉坤, 张子明, 祁顺彬. 混凝土破裂过程细观损伤与渗流耦合模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2008, 36(1): 71-75.