

国内外地下工程防水技术新进展

璩继立, 杨欢, 李陈财, 刘宝石
(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 地下工程在施工和使用过程中, 时刻都受到地下水的危害。杜绝水对地下工程的危害, 是地下工程设计和施工的重要课题。本文介绍了国内外地下工程防水技术的发展状况和存在的问题。概述了围岩防水、结构自防水、附加防水层以及排水系统等防水技术, 总结了地下工程细部构造和外墙施工缝、后浇带以及变形缝细部构造处理及施工方法。并从结构自防水、自防与附加层防水相结合、新防水材料的应用以及施工工艺几个方面对地下工程防水技术作了进一步展望。

关键词: 地下工程; 防水技术; 结构自防水; 附加防水层; 外加剂

中图分类号: TV441 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-643X(2012)06-0111-05

Recent development of waterproof technique on underground engineering at home and abroad

QU Jili, YANG Huan, LI Chencai, LIU Baoshi

(School of Environment and Architecture, Shanghai University for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Underground engineering is constantly threatened by groundwater during its construction and in use. It is a key topic to completely eradicate the danger of water to underground engineering in design, construction and use. The paper presents the recent development and existing problems of waterproof techniques on underground engineering in China and foreign countries from a viewpoint of design, construction, application of new materials and maintenance. It sketches out such waterproof techniques as waterproof of surrounding rock, self-waterproof of structure, additional waterproof layer and drainage system, summarizes the design principle on details of underground engineering and structure treatment and construction method of outer wall joint, post-pouring concrete strips and details of deformation joint. Finally, it looks into the prospect on waterproof techniques in the future in such aspects as self-waterproof, association of self-waterproof with additional waterproof layer, application of new waterproof materials and construction technology.

Key words: underground engineering; waterproof technique; self-waterproof of structure; additional waterproof layer; admixture

1 概述

地下工程是指深入地面以下为开发利用地下空间资源所建造的地下土木工程。由于地下水的存在, 地下工程在施工和使用过程中, 时刻都受到地下水的危害。因此, 避免水对地下工程的危害, 是地下工程设计和施工的重要课题^[1]。隧道与地下工程防水应紧密结合工程地质和水文地质条件确定防水原则^[2]。目前地下工程防水存在许多问题, 包括: 防水体系不完善^[3], 接缝防水处理不当^[4], 混凝土自防水不达标^[5], 结构外防水失效^[6], 地下连续墙渗漏^[7], 底板与顶板沿桩柱渗漏^[8], 盾构衬砌及拱

梁柱接头部位漏水^[9], 基础底板下防水垫层与基础粘结不牢产生漏水^[10]及外墙立面外贴防水层失效^[11]等。地下工程根据建造方式与用途大致可分为隧道工程如铁路、公路隧道; 地下构筑物如人防工程, 城市共用沟, 水工构筑物等以及地下建筑物如: 建筑物(多用途)地下室, 地下厂房、仓库、车库, 地铁车站, 城市地道、商业街等^[12]。正在修订中的国家标准《地下工程防水技术规范》根据设防要求将地下工程防水等级分为4级^[13]。设计单位应根据工程的重要性和使用中对防水的要求, 按工程类别选定防水等级, 以便进行定性、定量检查, 保证防水工程的质量和可靠性^[14]。

收稿日期: 2012-06-18; 修回日期: 2012-07-19

作者简介: 璩继立(1964-), 男, 河南孟州人, 副教授, 主要从事岩土工程、水文地质、工程地质方面的研究工作。

2 结构自防水技术

2.1 自防水材料

结构自防水即混凝土结构本体防水,它是人为的从材料和施工等方面采取措施抑制或减少混凝土内部空隙生成,提高混凝土密实性,从而达到防水目的。结构自防水的主要材料是普通硅酸盐水泥,矿渣水泥,粉煤灰水泥等,这些材料的抗渗性和耐久性都比较好,但由于防水混凝土的抗拉强度低,变形小,易于收缩,往往会破坏结构的整体性能,此外普通防水混凝土内部空隙也容易形成渗水通道^[15]。结构自防水的关键是减少结构裂缝,这与混凝土材料、结构设计方案、施工工艺、结构使用环境等因素有关,混凝土的抗裂性和结构裂缝的处理是结构自防水的两个重要方面^[16]。

2.2 混凝土结构自防水技术

我国目前研制开发了 UEA、ZY 等系列混凝土膨胀剂。通过水泥的化学反应,使混凝土产生适量膨胀,在钢筋和邻位结构限制下,在钢筋混凝土中建立 0.2~1.0 MPa 的预压应力,可大致抵消混凝土收缩时产生的拉应力,防止混凝土开裂。同时,水化反应生成的钙矾石晶体属针状、棒状晶体,填充、切断、堵塞混凝土的毛细孔,切断渗水通道,使混凝土的密实度和抗渗能力大大提高,抗渗能力比普通混凝土提高 2~3 倍,使混凝土不裂不渗,从而达到混凝土结构自防水之目的。其次,是控制水灰比,若因水量过多、水灰比过大,则多余水分会在混凝土硬化过程中逐渐蒸发出来,使混凝土内部形成孔隙和毛细管通路,降低混凝土的抗渗性;若用水过少,水灰比过小,则混凝土施工和易性差,这样会因拌合及浇捣不良而影响混凝土质量,使混凝土内部出现空隙,同样降低混凝土抗渗性。而且水灰比也影响着混凝土的耐久性,所以适宜的水灰比才能使防水混凝土获得良好的和易性、抗渗性和耐久性^[17]。外加剂的加入使防水混凝土防水性能有了明显改善,它对降低水泥用量、减少水泥水化热、防止混凝土裂缝的产生及提高抗渗性起到至关重要的作用。

3 防水技术新进展

3.1 结构缝

3.1.1 后浇带 有效设置后浇带的设计思路是“以放为主”,利用混凝土早期收缩量大的特性,释放早期混凝土收缩应力,减小以收缩为主的变形。规范^[18]对于后浇带的间距、宽度、钢筋处理、浇筑时间

等都有较明确要求。后浇带在两侧混凝土浇筑时会淤积低强度的水泥浆,长时间放置还会有垃圾、油污等掉入,混凝土接触面胶结污泥等。后浇带的设计要点包括^[19]: ① 间距:无约束的地下工程其间距可大于地面工程,有围护结构等已施工的结构约束的应小于地面工程;② 位置:平面上可曲折通过,避免截断太多的梁。③ 宽度:应能满足钢筋错开搭接的要求,其宽度,一般在 1m 以上;④ 钢筋:对后浇带内梁纵筋的处理有 2 种做法:a. 梁板钢筋均断开后搭接;b. 板筋断开但梁筋直通不断;⑤ 浇筑时间:由于混凝土早期收缩量大,故一般应保证 2 个月浇筑。⑥ 施工细节:a. 后浇带两侧设置模板,防止主体混凝土流入;b. 后浇带内的杂物要清理干净,混凝土浇筑前应清理凿毛;c. 后浇带两侧支撑保证稳定可靠,后浇带混凝土达到设计强度时方可拆除。

3.1.2 补偿收缩混凝土结构自防水新技术 补偿收缩混凝土的设计原则是“以抗为主”,利用膨胀剂补偿收缩混凝土硬化过程产生的膨胀作用,在结构中产生少量预压应力用来补偿混凝土硬化过程中产生的温度和收缩拉应力,从而防止收缩裂缝或把裂缝控制在无害范围内^[20]。中国研制的 U 型混凝土膨胀剂(U-Type Expansive Agent,简称 UEA)的市场占有量达 80% 以上,UEA 是用特制硫铝酸盐熟料或硫酸铝熟料与明矾石、石膏等粉磨而成的,并且形成了比较完整的理论体系和施工技术,这是其它品种的膨胀剂所无法比拟的^[21]。在水泥中掺入 10%~12% 的 UEA,可拌制成 UEA 补偿收缩混凝土。所有楼板均掺入 10%~12% UEA(膨胀率 2×10^{-4} ~ 3×10^{-4}),每隔 50m 设置 1 条 2 m 宽的膨胀加强带,带内混凝土掺入 14%~15% UEA(膨胀率 4×10^{-4} ~ 6×10^{-4}),两侧设密孔钢丝网,防止混凝土流入加强带^[22]。在 UEA 水化过程中形成钙矾石($C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$)膨胀源。该膨胀源是稳定的水化物,填充于毛细孔缝中,使大孔变小孔,总孔隙率减少增加了混凝土的密实性。UEA 的抗渗标号可以高达 S_{30} 以上,与同强度的等级的普通混凝土相比提高 1~3 倍。

UEA 在养护补偿期间,可产生 2×10^{-4} ~ 4×10^{-4} 的限制膨胀率。在钢筋以及邻位的限制下,钢筋混凝土中产生 0.2~1.0 MPa 的预压应力,抵消钢筋混凝土结构在收缩过程中产生的全部或大部分拉应力,从而使结构不裂或不产生有害裂缝^[23]。普通防水混凝土和外加剂防水混凝土不具有膨胀性能因而不能防止混凝土产生收缩裂缝。即使抗渗性很高,混凝土收缩开裂后仍失去整体防水功能,采用补偿收缩混凝土做结构自防水,迎水面可不作柔性防水。其施工简便、工期

短、与柔性防水材料相比,耐久性好、与结构物同寿命、不污染环境。这一防水技术已列入《补偿收缩混凝土应用技术规程》JGJ/T178-2009^[24]。

3.2 UEA 混凝土无缝设计施工新技术

规范规定每30~40 m设置一道后浇缝,60天后再用膨胀混凝土填缝。若以UEA膨胀加强带取代后浇缝(沉降缝除外),可实现混凝土连续浇筑超长结构的设计施工。其原理是在结构收缩应力最大处给予较大的膨胀应力。具体做法是:加强带一般设在后浇缝处。带宽2 m,带的两侧分别布设密孔铁丝网,以防止不同配比的混凝土流入加强带内。施工时,先浇带外小膨胀混凝土(掺入10%~12% UEA),浇到加强带时,改用大膨胀(掺入14%~15% UEA),该处混凝土的强度等级比两侧混凝土高5 MPa,如此连续浇筑下去,实现无缝施工^[25]。

3.3 结构外防水技术

3.3.1 附加层防水材料 地下工程通常在迎水面作一层附加防水层。附加防水材料种类繁多,防水技术日臻完善。传统的地下防水技术或为单一的结构混凝土自防水,或为混凝土自防水附加防水砂浆防水,或混凝土自防水附加石油沥青卷材防水。目前,地下工程防水在不断提高结构自防水性能的同时,逐步重视了以防为主的思想^[26]。在国外,采用三元乙丙等高分子卷材在防水砂外铺贴完整的防水层,形成柔性防水衬套。这种附加防水层的可靠性和长期效果都好^[27]。在国内,附加防水层,一般是采用卷材(油毡、改性沥青卷材、或防水涂料)。

(1) 卷材防水层。①卷材防水层分为高聚物改性沥青防水卷材和合成高分子防水卷材。有弹性体SBS改性沥青防水卷材、塑性体APP改性沥青防水卷材、沥青复合胎柔性防水卷材、自粘橡胶沥青防水卷材、改性沥青聚乙烯胎防水卷材、三元乙丙橡胶防水卷材、氯化聚乙烯橡胶共混防水卷材等,上述材料皆用粘贴法密贴于结构基层上^[28]。德国生产的自粘沥青卷材VE-DATHENE DUO,具有极佳的抗渗透作用,能在极高的压力下保持0.4 MPa、24 h不透水,它采用高密度聚乙烯胎基,具有良好的应力分散性能。另外,自粘防水卷材施工简便,并且搭接边100%粘结^[29]。

②变形缝、施工缝、桩头、柱头及穿墙管防水卷材处理。变形缝、施工缝位置由于混凝土的不连续浇筑,在混凝土结构自防水层面上成为薄弱层。为提高防水效果,施工缝及变形缝位置增设50 cm防水卷材加强层。在底板外防水施工时,当铺设完防水卷材层后,应在卷材层上准确标出变形缝位置,

铺设卷材加强层时,应注意对中,保证变形缝左右两侧预留加强层宽约为250 mm。侧墙及顶板防水卷材加强层可在结构施工完毕,防水层施工前先行铺设^[30]。桩头、柱头及穿墙管位置,由于有预留钢筋或预留钢管存在,使得大块卷材难以铺设,施工前应按照预留处形状,对卷材进行一定的剪裁,使得卷材尽量吻合预留形状,同时方便卷材铺设。此外,上述位置为保证防水效果,在桩头、柱头及穿墙管周边增加防水密封材料,且保证防水卷材与防水密封材料的有效搭接^[31]。

(2) 涂膜防水层:涂膜防水层包括无机防水涂层和有机防水涂层,传统材料多用焦油聚氨酯涂膜胶及有机硅橡胶涂料等,施工时一般要求防水基层干燥,对于潮湿的防水基层,涂膜胶防水层作业困难,且防水效果差。但近年来,多为常温下呈无固定形状的黏稠状液态、合成高分子材料,它们具有高强度、高伸长率和高粘结力,遇水不发泡,可用于潮湿防水基层,并具有水下固化的特点,可以与混凝土浇注同步施工,从而既保证防水效果,又施工简便。有851聚氨脂防水涂料、911非焦油聚氨脂防水涂料、丙烯酸防水涂料、SBS水乳型改性沥青防水涂料、水泥基渗透结晶型防水涂料等^[32]。涂料类防水材料用作外防水层时对基面的要求较高。近年来国内还引进应用了一种水泥基渗透结晶型防水涂料,这种涂料以灰浆的形式涂刷到混凝土结构表面,在催化剂的作用下,与混凝土中的碱性成分反应生成不溶性的针状结晶物质,堵塞混凝土的孔隙和毛细渗水通道,起到密实与抗渗作用。水泥基渗透结晶型防水涂料的引进与应用,较好地解决了涂料防水层与基面粘接不良的问题^[33]。

(3) 聚合物水泥砂浆防水层:近几年,市场上已出现了多种聚合物水泥砂浆防水材料,常用的聚合物防水掺料有:丙烯酸酯共聚乳液,乙烯-醋酸乙烯乳液,阴离子氯丁胶乳等。聚合物水泥砂浆防水层是把具有长链状的高分子聚合物掺入水泥砂浆中,一经混合,聚合物颗粒即分散在胶凝材料(水泥)的连续相内,随着水泥和水产生水化反应而形成水泥硬化体,在水泥硬化过程中水泥逐渐吸收聚合物分散体中的水份使水泥充分水化形成硬化水泥石结构。聚合物微粒还可填充水泥砂浆的孔隙,增强胶凝材料与砂界面的粘结,降低胶凝材料水泥砂浆的孔隙率,从而大大提高了聚合物水泥砂浆的抗裂性、抗渗性、耐冻融性、耐酸碱腐蚀性、耐磨性和耐冲击性等技术性能。因而聚合物水泥砂浆防水层既

可应用于迎水面作防水层,也可应用于背水面作防水层,其效果明显^[34]。聚合物水泥砂浆防水层的施工工序是:a.基层处理,b.配料,c.涂抹施工,d.保护层抹面施工,e.养护^[35]。

3.3.2 防水作法 地下工程防水作法是指钢筋混凝土结构等防水薄弱环节的细部处理方法,以及结构变形缝(沉降缝、伸缩缝、后浇带、施工缝)和穿墙套管等处的防水治理。对于变形缝,除按规范要求合理设置外,为保证防水可靠,还应本着多道设防的原则处理,除在混凝土预留变形缝中间设置橡胶止水带(或遇水膨胀止水条,或钢板止水带),以及提高施工缝混凝土抗渗防水的等级外,还应在变形缝结构的外面附加防水层,这样在变形缝形成了三道防线,其防水效果是可靠的^[36]。穿墙管防水处理则根据地下工程设计及使用要求,可先设置金属止水环的套管,在套管内外管端用双组份聚硫橡胶嵌缝,其防水可靠性较高。

3.4 构造节点设计

变形缝、施工缝和其它(例如穿墙孔、阴角等)构造节点的设计在地下工程防水设计中应尽量不设或少设。①长期以来就有“十缝九漏”的说法,解决这一问题,除了解决变形缝的防水问题外,减少变形缝的设置,变单一式的防水设计为复合式防水设计也是有效选择。目前,应用最广的复合式防水设计有中埋式止水带与外贴防水层复合使用;中埋式止水带与遇水膨胀橡胶条、嵌缝材料复合使用;中埋式止水带与可卸式止水带复合使用等^[37]。②关于施工缝的防水设计,传统的凹缝、凸缝、阶梯缝、钢板(橡胶)止水带,其原理都是延长渗水线路,等于加大了混凝土的厚度。建议采用外贴式止水带与中埋钢板(橡胶)复合使用,其中以遇水膨胀橡胶条或腻子条与中埋钢板(橡胶)复合使用最佳,但在防护结构中宜采用钢板,以确保工程的防护效果^[38]。③穿墙管、线、螺栓宜采用止水环与遇水膨胀腻子条复合使用,且应采取防止转动的措施,如将止水环平面外形改为非圆形。总之,构造节点的防水设计应避免单一式,尽量采用复合式防水设计,并且尽量减少变形缝、施工缝的设置^[39]。

4 地下工程防水技术问题及展望

4.1 结构自防水

由于混凝土自身品质、水分蒸发或温差等原因,其内部产生裂缝、孔、洞等会不可避免地成为日后的渗水通道。处理此类渗水可采取下列措施:①提高混凝土结构自防水性能,如所用防水混凝土的抗渗

等级不得低于P8等;②对于因混凝土内水分散失引起的由外向内发展的干缩裂缝,可采用补偿收缩混凝土产生微膨胀,防止干缩和增加混凝土密实性达到防渗抗裂。同时采取保湿养护,最好蓄水法,既防止失水,还向内部补给水分,这对水灰比低于0.4的高性能混凝土更重要;③对于冷缩裂缝,即混凝土结构各部分热量散失引起的收缩裂缝,需要尽量降低混凝土硬化前的温度,并适当增加混凝土限制膨胀率,在补偿干缩之外,有一定的补偿冷缩能力。另外,掺加缓凝减水剂,使混凝土初凝时间大于10h,可延缓水化放热速度,采用膨胀剂和粉煤灰双掺亦可降低水化热,这样可缓解因水化热造成的温差;④早期混凝土收缩仅限于表层。在初凝前因表面蒸发快,内部水分补充不上,表层因干缩易出现网状细裂缝,及时抹压或盖薄膜防止过快蒸发,可以防治;⑤水泥水化前后绝对体积约减少8%,这是混凝土自收缩的来源。掺加膨胀剂并延长潮湿养护可以防止自收缩引起的开裂。即采用高抗渗等级混凝土、混凝土膨胀剂以及外加剂以提高混凝土结构自防水能力是地下结构防水技术的根本。

4.2 自防与附加防水层相结合

防止渗漏的关键还在于采取综合措施,重点处理好工程的施工缝、变形缝、构造节点、出入口、穿墙管件、预埋件等部位的防水。为补偿增强结构自防水能力,进一步提高抗渗效果,降低渗漏概率,地下工程通常在迎水面作一层附加防水层形成柔性防水衬套。然而附加防水层的材料选择却是一个十分重要的问题。近年来国内研制与引进的高分子聚合物新材料、新产品越来越多,如高分子防水卷材、防水涂料等。这些新材料能够大幅度提高地下工程防水效果,降低成本。然而选择新型材料应谨慎,须满足若干性能要求,如基层适应性,新材料与防水基层密切粘合;温度适应性,新材料在工作温度下不会老化、变形、变脆、脱落等;耐久性要求,在耐用年限内能抵御自然因素的老化和损害;施工性要求,工艺可靠和施工环境适应;互补相容性要求,刚柔弹塑互补相容;环保性要求,对环境人身无害。

4.3 工艺技术与施工细节

大量地下防水工程的实践证明,即使采用了新的设计理念,使用了优质防水材料,如果施工工艺落后,同样达不到防水效果。如聚氨酯防水涂料保证质量的关键是:配合比正确,搅拌充分,根据气候条件随拌随用;薄涂多刷,确保厚度,涂刷均匀,养护充分。再如防水层与基层粘结时应保证:①清洁;②

干燥:要求基层含水率不大于6%~9%(能在湿基面上固化的防水涂料除外),地下工程在施工时,必须将地下水位降到防水基面标高以下200~300mm;保证混凝土垫层干燥,不承受地下水压力;③防水施工时间:考虑到混凝土在硬化初期材料收缩较大,且对防水材料有约束影响等因素,防水材料的施工时间应与混凝土基面相隔10~40d为宜。精细施工则是地下工程防水技术实现的根本保障。

参考文献:

- [1] 闫贵根. 地下防水工程综合治理的施工实践[J]. 山西建筑,2010,6(3):29-31.
- [2] 中华人民共和国建设部. GB 50108-2001. 地下工程防水技术规范[S].
- [3] 薛少祖. 地下工程防水技术问答[J]. 地下工程与隧道,2010,4(2):44-46.
- [4] 冀文政,郑志辉. 我国近年防水技术的发展和存在的问题[J]. 中国建筑防水,2004(11):6-8+12.
- [5] 段飞. 地下工程防水技术的发展和存在的问题[J]. 山西建筑,2011,37(17):88-89.
- [6] 郑志辉. 近年国内地下防水工程常见问题[J]. 建筑综述与论坛,2004,9(6):103-131.
- [7] 胡学飞. 地下工程防水技术的发展[J]. 隧道与地下工程,2010,28(8):179-180.
- [8] 叶林标. 防水工程禁忌[J]. 中国建筑工业,2002,30(9):309-311.
- [9] 鞠建英. 地下隧道工程技术探讨[J]. 施工技术,2009,37(9):22-26.
- [10] 刘绪光,游宝坤,赵顺增. 我国刚性防水技术的发展[J]. 中国建筑防水,2009(12):9-12.
- [11] 牛光全. 当前我国防水材料行业发展中存在的几个问题[J]. 中国建筑防水,2004(9):3-6.
- [12] 李呈刚. 我国地下工程防水技术发展技术述评[J]. 建筑技术,2010,37(4):225-230.
- [13] 中华人民共和国建设部. GB 50108-2008. 地下工程防水技术规范[S].
- [14] 王振东. 地下工程防水技术分析[J]. 广东土木与建筑,2008,8(8):40-51.
- [15] Lee K W. Waterproof technology for engineering[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2009,70(8):66-70.
- [16] 肖石. 选择地下防水系统的考虑因素[J]. 中国建筑防水,2008(11):43-44.
- [17] 陈利萍. 民用地下工程防水技术[J]. 施工技术,2010,9(7):66-72.
- [18] 中华人民共和国建设部. JGJ 3-2002 钢筋混凝土高层建筑结构设计与施工规程[S].
- [19] 牛连涛,李彦民,吴亚飞. 地下防水技术要求及防水材料[J]. 辽宁建材,2008,6(4):29-30.
- [20] Naidu A S K, Soh C K. The materials of waterproof for engineering[J]. Geotechnical Engineering,2010,9(12):106-119.
- [21] 江依明. 地下工程防水技术与应用[J]. 施工技术 2009,5(6):44-46.
- [22] 游宝坤,李光明,王栋民. 超长钢筋混凝土结构UEA无缝设计施工[J]. 建筑结构,2008,7(10):101-114.
- [23] 王栋民. 工程结构裂缝控制[J]. 新疆有色金属,2009,40(9):33-49.
- [24] 韩立林,侯维红. 关于地下工程的综合防水技术[J]. 膨胀剂与膨胀混凝土,2010,3(1):1-4.
- [25] 陈鹏声,林元清. UEA混凝土与自防水技术[J]. 福建建设科技,2011,20(2):26-30.
- [26] 贺少辉,项彦勇. 地下工程防水技术的发展以及常见问题[J]. 建筑与工程技术,2010,20(3):23-26.
- [27] Aktan A E, Catbas F N, Grimmelsman K A, et al. Issues in infrastructure health monitoring for management[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2010,41(6):711-724.
- [28] 陈殿森. 地下工程防水中的附加防水层[J]. 西部探矿工程,2010,72(5):131-132.
- [29] 冯刚. 建筑防水材料在地下室防水补漏工程中的应用[J]. 国外建材科技,2004,9(1):11-16.
- [30] 叶志彬. 浅谈地下建筑防水工程施工[J]. 广东科技,2008,9(8):100-107.
- [31] 张海. 地下工程结构自防水的设计探讨[J]. 山西建筑,2009,35(3):104-105.
- [32] 林芬. 地下工程中防水设计及施工质量控制[J]. 福建建材,2006,7(2):32-36.
- [33] 张皓莹,杨燕,徐飞. PCM现浇空心楼板在工程中的应用[J]. 江苏建材,2010,12(1):14-19.
- [34] 李锦锋,丁红梅. 自粘卷材在北京银泰中心地下防水工程中的应用[J]. 中国建筑防水,2006(1):60-62.
- [35] 林军征. 自防水混凝土细部结构的施工质量控制[J]. 中国建筑防水,2006(2):26-28.
- [36] Storoy H, Saether J, Johannessen K. Fiber optic condition monitoring during a full scale destructive bridge test[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2007,5(5):33-36.
- [37] 张旭东. 浅析地下工程结构自防水的设计[J]. 安徽建筑,2008,15(5):138-140.
- [38] Chaudhry Z, Rogers C A, Majmundar M. Application of fibre Bragg grating based sensors for civil infrastructure health monitoring. [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010,40(3):93-96.
- [39] Tseng K K H, Bhalla S, Gupta A. Results of rock cavern monitoring and assessment of cavern stability. [J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2009,33(5):53-55.