

文章编号:1003-1995(2018)11-0020-06

铁路混凝土耐久性理论与提升方法

穆松¹,李化建^{2,3},王育江¹,周莹¹

(1.高性能土木工程材料国家重点实验室,江苏南京 210008;2.中国铁道科学研究院集团有限公司 铁道建筑研究所,北京 100081;3.高速铁路轨道技术国家重点实验室,北京 100081)

摘要 面对铁路工程发展的新特点和新需求,迫切需要开展混凝土理论与耐久性提升方法的研究以保证铁路混凝土的长服役寿命。文章介绍了铁路混凝土的发展历程与混凝土耐久性新需求,阐述了铁路混凝土裂缝的表现形式与危害、开裂机理、收缩模型和混凝土抗裂主要措施,总结了铁路建设所面临的混凝土冻融与硫酸盐腐蚀破坏机制及耐久性提升方法。最后指出铁路混凝土结构耐久性评估应考虑疲劳和环境耦合影响,同时应加强现浇铁路结构混凝土开裂机理的探索。

关键词 工程材料;耐久性;理论分析;铁路混凝土;冻融;腐蚀破坏

中图分类号 TU528 文献标识码 A DOI:10.3969/j.issn.1003-1995.2018.11.04

1 铁路混凝土耐久性新需求

混凝土是铁路建设的关键材料。混凝土广泛应用于铁路轨道、隧道、桥梁等主要结构,承受列车高速运行产生的荷载与外部服役环境的综合作用。我国最早从1953年开始铁路混凝土的应用,其发展历程经历了3个阶段^[1]。第1阶段:1953年前,绝大多数桥梁使用钢桥,轨枕、电杆、桩等结构使用木材或钢材,仅东北地区有少量最小跨钢筋混凝土桥梁使用C28混凝土。第2阶段:1953—2000年,干硬性C50钢筋混凝土替代木材与钢材成为轨枕材料,我国铁路混凝土进入了低塑性高强度混凝土阶段。第3阶段:2000年至今,低温早强耐腐蚀高性能混凝土被应用于青藏铁路结构中,我国铁路从此开始了高性能混凝土的广泛应用。近年来,在高速铁路与客运专线中大规模应用无砟轨道结构,使得混凝土在铁路工程中的应用范围大大拓展。高性能混凝土的应用始于青藏铁路工程,推广于高速铁路工程,已经形成了以TB 10005—2010《铁路混凝土结构耐久性设计规范》、TB/T 3275—2011《铁路混凝土》等为代表的,涵盖设计、材料、施工、验收的标准和规范。铁路工程结构的条带状分布、露天服役环境、承受疲劳荷载等特征,决定了铁路工程结构耐久性的特殊性与复杂性。

铁路混凝土的耐久性是决定铁路结构混凝土寿命的关键因素。现有规范中新建高速铁路线路的最高设计速度为350 km/h,结构混凝土的最高设计使用年限为100年。然而,值得注意的是,中国铁路总公司已经在京沪、郑徐高速铁路上开展了累计行车里程2.7万km、行车速度400 km/h的运行综合试验,同时在京张高速铁路建设中已明确提出高速铁路混凝土结构设计使用年限≥150年的需求,超过当前港珠澳大桥与深中通道的120年设计使用年限。考虑到服役工况的特殊性,为适应更高要求,需解决如下2方面关键问题:
①满足现有规范的混凝土能否在相应服役条件下长期保持状态稳定;②如何建立适用于更高运营速度和更长设计使用年限的混凝土设计理论与方法。因此,发展面向更严酷复杂环境、更高运营速度和更长服役寿命的铁路混凝土耐久性理论与提升方法具有重要的实用价值。

铁路混凝土实现长寿命的首要前提在于根据服役环境、设计寿命及结构形式、施工工艺等进行混凝土的抗裂性、耐久性设计,提升其性能。其中,抗裂性设计是有效保障混凝土长寿命的基础,能最大程度避免或降低混凝土开裂风险。通过抗裂性与耐久性提升将显著地降低侵蚀性离子和水分在混凝土内部的传输速率,从而有效延长铁路混凝土的实际使用寿命。

2 混凝土裂缝形成与控制

混凝土是有生命的,施工期混凝土非常脆弱,最为常见的表现形式是开裂。施工期混凝土的裂缝将加剧腐蚀介质对硬化混凝土结构的损害,降低混凝土结构

收稿日期:2018-08-30;修回日期:2018-09-23

基金项目:国家自然科学基金(51742811)

第一作者:穆松(1982—),男,高级工程师,博士。

E-mail:394792156@qq.com

的耐久性,影响其正常服役年限。铁路现浇结构大体可分为大体积结构(墩身、承台、梁体等)、长线浇筑平面结构(无砟轨道)、曲面结构(山体隧道)。部分结构如无砟轨道、山体隧道等的开裂问题已成为共性问题。

裂缝是铁路工程中最为常见的病害,在铁路隧道、无砟轨道等结构中该问题十分突出。我国铁路隧道衬砌典型裂缝包括纵向裂缝、斜向裂缝、环向裂缝、月牙形裂缝、十字形裂缝等。裂缝引起渗漏水进而引起冻融破坏,加剧了盐类腐蚀。对我国运营的5 000 座普速铁路隧道调研结果表明,有水害的隧道约占 70%,水害严重导致状态失格的隧道占 30%以上^[2]。

渗漏水发生在施工过程中的施工缝、沉降缝、伸缩缝、衬砌质量不良处以及发生裂损的薄弱部位。裂缝附近衬砌的刚度退化,影响承载力和行车安全性。由于隧道衬砌受地层压力、地下水压力、围岩膨胀性或冻胀性压力、腐蚀性介质和温度的作用以及施工不良因素的影响,致使隧道衬砌在运营中产生裂损变形、开裂、掉块等病害。日本和我国均出现过拱部衬砌剥落而导致的行车事故。

随着无砟轨道技术的推广应用,无砟轨道结构混凝土材料的开裂现象已经显现,并以长线浇筑的混凝土开裂为主。道床板混凝土的开裂形式主要有 2 种:
①出现在轨枕的 4 个角上,道床板混凝土与轨枕角的交接处形成八字形裂缝。这种裂缝极为普遍,在水平对应的 2 个轨枕,相对着的 2 个角上的八字形裂缝相接,形成横跨整个道床板的裂缝。
②道床板中间的横向或斜向裂缝,有的在伸缩缝附近。横向裂缝沿着道床板的铺设方向,以一定间隔产生。道床板裂缝多发生在混凝土初凝后 2~3 d,随着时间的推移裂缝的宽度有所发展。各国对无砟轨道结构混凝土的裂缝宽度提出了限值。以日本技术为代表的板式轨道结构对轨道板的保养补修提出了严格的要求。德国工程实践表明,在双块式轨枕周围易出现宽度大于 0.5 mm 的环绕裂纹,尤其是 Rheda 型无砟轨道结构。因此,德国 AKFF 规定,混凝土允许裂纹宽度为 0.5 mm,在钢轨扣件范围内不允许出现裂纹。由于我国双块式无砟轨道道床板设计与德国不同(采用双层配筋形式),混凝土允许裂缝宽度定为 0.2 mm。

在开裂机理方面国内外的研究很多,但多集中在对裂缝形成机理的研究,且偏重于从材料角度出发定性地进行分析,而对于定量的开裂预测却不多。Springenschmid 指出“避免混凝土早龄期裂缝是当前混凝土技术的主要问题之一,应采用现代的概念预测混凝土早龄期的应力及其影响,来代替单纯依据现场经验的方法”^[3]。针对混凝土材料收缩开裂的共性问

题,将混凝土材料和工程相结合也成为国内外共同努力的方向。在测试技术上,由单一的收缩测试不断向抗裂性综合评价方向发展,如在 Springenschmid 提出的开裂试验架装置基础上发展出的温度应力试验机,可以综合评价混凝土温度、收缩、徐变、力学性能对开裂的影响。

在收缩机理模型方面,考虑材料-环境-结构尺寸多因素耦合的本质成为最新的发展趋势。从 20 世纪 90 年代最初的“水化-温度”的耦合,到目前综合考虑“水化-温度-湿度-约束”多因素耦合^[4-7],并用于预测混凝土水化、收缩、应力等性能。在抗裂性评价方面,应力准则是裂缝控制的重要依据。在计算过程中,针对材料性能、环境作用存在的随机性,目前通过概率方法分析影响混凝土早龄期开裂的安全系数^[8-9]。

合理选择原材料、优化配合比并使用功能性抗裂材料,从源头上减小混凝土的温降收缩、自收缩和干燥收缩,提升混凝土的韧性,是目前提升结构混凝土抗裂性能的主要措施。具体措施包括:采用纤维增韧提高混凝土的抗裂性,如曹擎宇等^[10]研究了纤维素纤维对隧道二衬抗裂性的提升效果;采取补偿收缩措施减少混凝土收缩,如赵政等^[11]研究了新型镁质膨胀材料对衬砌混凝土开裂的影响;采取温控措施降低衬砌混凝土的水化温升,如吴家冠等^[12]通过通水冷却措施提升水电站导流洞边墙衬砌混凝土抗裂性能。

3 严酷环境下混凝土耐久性提升

对于严酷环境中的工程建筑物,环境中的水、硫酸根离子由于扩散、渗透等作用会逐渐迁移至具有多孔特性的混凝土结构内部。水分进入混凝土内部,在北方低温环境中将发生冰晶膨胀,引起冻融破坏。硫酸根离子与水泥水化产物发生反应生成膨胀性产物或自身过饱和形成结晶产物,引起膨胀性破坏。因此,铁路工程结构混凝土耐久性所面临的冻融与硫酸盐腐蚀破坏存在共性的结晶破坏机制。严酷环境中侵蚀性介质结晶破坏问题已成为制约铁路工程安全与发展的关键瓶颈。

3.1 隧道衬砌硫酸盐结晶破坏

西部地区铁路工程中隧道衬砌受硫酸盐腐蚀破坏十分严重。西部地区铁路隧道绝大部分为山体隧道,服役环境复杂多变,混凝土结构存在腐蚀破坏风险,维修难度和费用巨大。修建于 20 世纪 60,70 年代的成昆铁路,沿线大部分的隧道都出现了硫酸盐侵蚀性病害,部分隧道病害非常严重^[13],如碧鸡关隧道、法拉隧道等,需要每年进行维修加固才能保证正常运营。这不仅耗费了大量的人力物力,对线路的正常运营也造

成了一定的干扰。因此,从铁路隧道结构混凝土的特点出发,分析其施工期和服役过程劣化机制,进而采取有效的技术提升耐久性,是保证铁路山体隧道百年安全服役寿命的关键。

盐溶液作用下混凝土材料的物理结晶是造成铁路工程破坏的主要机制。隧道是埋置于岩土层中的工程建筑物,岩土层中的水及其中的硫酸根离子由于扩散、渗透等作用会逐渐迁移至具有多孔特性的混凝土结构中,由于蒸发作用,特别是在运营过程中,列车通过隧道时列车风作用使得蒸发作用加快,硫酸盐类介质在隧道临空面表层很容易产生物理结晶作用。硫酸盐结晶体产生膨胀力导致了混凝土表层剥落。

硫酸盐侵蚀破坏是一个复杂的物理化学过程,在 1892 年就被发现,此后国内外学者对其侵蚀机理进行了大量的研究^[14]。硫酸盐侵蚀破坏作用是由于环境中的硫酸盐或 SO_4^{2-} 侵入混凝土内部形成盐晶体,或者与水泥石的一些固相组分发生化学反应生成一些难溶的盐类,而形成的盐类结晶体或难溶的盐类吸收大量水分产生体积膨胀,形成膨胀内应力,当膨胀内应力超过混凝土的抗拉强度时,就会导致混凝土的破坏。另外,发生的化学反应也可使硬化水泥中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 C-S-H 等组分溶出或分解,导致混凝土强度和黏结性能的损失。

物理结晶的破坏机制包括硫酸钠结晶、石膏结晶与钙矾石结晶 3 类。当混凝土经历干湿循环的水分蒸发后硫酸盐溶液的浓度升高,导致硫酸钠溶液在混凝土孔隙中结晶且体积增大产生膨胀应力,导致混凝土破坏。石膏侵蚀破坏是由于溶液中硫酸盐与水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生化学反应生成难溶性盐 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 并沉积于混凝土孔隙中。由于它的体积是参加反应的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的 2 倍,导致混凝土膨胀破坏,表现为没有粗大裂纹但遍体酥散。钙矾石结晶是水泥水化产物水化铝酸钙及水化单硫型铝酸钙与石膏化学反应的产物。由于钙矾石是溶解度极小的盐类矿物且结合了大量的结晶水,在浓度很低的石灰溶液中其也能稳定存在,故使得混凝土的固相体积显著增大,表现为混凝土试件表面出现少数较粗大的裂缝。此外,除上述物理结晶破坏之外,碳硫钙硅石侵蚀破坏是近几十年来被发现的混凝土硫酸盐腐蚀新形式。在湿冷的环境下(环境温度低于 15 ℃),如果硫酸根和碳酸根离子都存在,C-S-H 凝胶会劣化生成膨胀性产物碳硫钙硅石。虽然生成碳硫钙硅石的侵蚀过程非常缓慢,但其直接将水泥石中的主要胶结材料 C-S-H 相转变为无胶结能力的泥状物,因而其破坏性更强。

通过优化胶凝材料体系以提升混凝土基体致密性

来提高混凝土抗硫酸盐结晶侵蚀的传统思路具有负面影响。已有研究表明,降低水泥中的 C_3A 和 C_3S 含量是提升混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的关键。资料显示:3% 浓度 Na_2SO_4 浸泡条件下,熟料矿物组成为 10% C_3A 和 50% C_3S 的硅酸盐水泥砂浆在浸泡 3 个月即出现膨胀破坏,而熟料矿物组成为 3% C_3A 和 60% C_3S 的抗硫酸盐水泥砂浆在浸泡 3 个月线膨胀率仅为 0.18%。但是,抗硫酸盐水泥在具备良好的抵抗硫酸钠溶液静态浸泡腐蚀的同时也存在弊端。

Arya 等^[15] 将普通硅酸盐水泥(OPC)与抗硫酸盐水泥(SRPC)试件浸入 20 g/L NaCl 溶液中,发现 SRPC 由于 C_3A 含量较低导致氯离子结合能力低。因此,对于用 C_3A 含量较低的抗硫酸盐水泥制备的混凝土而言,其内部钢筋锈蚀的风险将增大,尤其在干湿交变环境中,硫酸盐结晶以及碳化将加速混凝土与内部钢筋的劣化失效。Karatasios 等^[16] 认为粗骨料含量较高的混凝土具有较好的抵抗盐结晶侵蚀的性能,而朱冬生等^[17] 则认为在混凝土中掺入适量的粉煤灰与硅灰可以提高其抵抗硫酸钠溶液物理结晶侵蚀的性能。综上所述,关于矿物掺合料在混凝土抗硫酸盐中的作用,大部分的研究结果表明矿物掺合料能显著提高混凝土抗硫酸盐性能。尽管如此,近年来已有研究表明使用矿物掺合料对混凝土抗硫酸盐侵蚀产生不利影响。Nehdi 等^[18] 认为不能忽视矿物掺合料对硫酸盐物理侵蚀的影响,并分析了矿物掺合料对部分浸入硫酸盐溶液中并暴露于循环温度和相对湿度下的混凝土抗硫酸盐性能的影响。结果表明:尽管用矿物掺合料部分替代水泥降低了孔隙体积,但由于小直径孔隙比例的增加以及毛细吸力和蒸发表面积的增长,表面剥落增加。Suleiman, Zhutovsky 等^[19-20] 也得出了相同的结论,并建议在有助于物理硫酸盐侵蚀的环境中应该谨慎使用矿物掺合料。鉴于上述单独使用矿物掺合料抗硫酸盐侵蚀结果的差异性,姜骞等^[21] 建议从混凝土原材料组成优选、配合比设计、施工养护、表层防护等多方面来提高隧道衬砌混凝土抗硫酸盐侵蚀破坏能力。

3.2 平面结构冰晶冻融破坏

哈大、哈齐等高速铁路的修建与运营,标志着我国已初步形成严寒地区高速铁路混凝土整套技术。但实践表明:严寒地区无砟道床混凝土极易出现冻融破坏现象,现浇结构混凝土尤为突出。混凝土是无砟轨道结构的重要组成部分,其受冻后的破坏必然对轨道结构的耐久性和安全性有重大负面影响。作为我国高速铁路“走出去”战略的成果之一,我国向俄罗斯出口高速铁路技术已基本确定,为其修建的莫斯科—喀山高速铁路处在超低温的严寒地区。俄罗斯高速铁路的服

役温度要比我国严寒地区哈大高速铁路服役温度还要低,对无砟道床混凝土抗冻性要求更高。

混凝土的冻融破坏是比较复杂的物理变化过程。为了获得浇筑混凝土所必需的和易性,拌和水总量多于水泥水化所需的水量,多余的水就滞留在混凝土中,形成占有一定体积的连通毛细孔。于是常温下硬化混凝土就是由水泥水化产物、未水化的水泥、水、集料和空气共同组成的气-液-固三相平衡体系。当混凝土处于负温时,其内部孔隙中的水分将从液相转变为固相,因此那些连通的毛细孔就是导致混凝土遭受冻害的主要因素。目前,学术界提出的混凝土冻融破坏理论大致有 6 种:水的离析层理论、膨胀压理论、渗透压理论、充水系数理论、临界饱水值理论和孔结构理论。

对于海洋环境中混凝土盐冻破坏的耐久性设计亟需开展针对性研究。目前,国内外针对耐久性设计指标开展了大量研究,分析水灰比、矿物掺合料、含气量等因素对混凝土抗盐冻性的影响,以评价混凝土耐久性。

1) 水灰比。作为混凝土性能设计的重要参数,水灰比不仅影响混凝土强度,而且能较大幅度地改变混凝土内部结构的密实程度,影响混凝土材料抗盐冻性。杨全兵等^[22]研究表明我国北方道桥混凝土的水灰比不大于 0.45,含气量不低于 4%。熊剑平等^[23]认为不同的降低水灰比方法均可以改善道路混凝土的抗盐冻性。陈迅捷等^[24]提出为满足混凝土在海洋环境中的抗冻性要求,混凝土气泡间隔应低于 300 μm,并且混凝土水胶比不宜大于 0.40。

2) 含气量。混凝土抗盐冻性能与内部孔隙特征有关,减少连通孔隙,保证适度的气泡间距与含气量对增强抗盐冻性能均有利。江苏省建筑科学研究院等科研院所对粉煤灰高性能混凝土抗冻耐久性的研究表明^[25]:水胶比在一定范围内,不掺引气剂,混凝土抗冻耐久性随粉煤灰掺量的增加而增加;掺引气剂后,混凝土抗冻耐久性呈先升后降的趋势。江苏省建筑科学研究院及东南大学研究了掺入硅灰、超细粉煤灰及两者的复合物对抗冻耐久性的影响以及钢纤维的阻裂效应对混凝土抗冻耐久性的作用^[26]。结果表明:当超细粉煤灰与硅灰相掺时,提高抗冻耐久性的效果尤为显著,若再掺入钢纤维则更有利于提高混凝土抗冻耐久性。

Valenza 等^[27]的研究表明,当气泡间距为 250~300 μm 时,各类型混凝土均具有良好的抗盐冻性能;当气泡间距大于临界值时,冻融损伤与气泡间距成比例。Triolo 等^[28]研究认为气泡间隔为 250~300 μm 时混凝土有良好的抗盐冻性能,并建议将气泡间隔 200~250 μm 作为混凝土抗盐冻性能的安全设计值。余红发等^[29]

研究表明:盐冻环境下具有较高抗冻性能的混凝土临界含气量为 4.5%~5.0%,具有较高抗盐冻性能混凝土的含气量应提高至 5.0% 以上;对于掺矿物掺合料的混凝土,具有良好抗盐冻性能所要求的气泡间距与强度等级有关,当强度等级低于 C50 时,平均气泡间距必须小于 250 μm,当强度等级提高到 C60 以上时,平均气泡间距可以增大到 700 μm。

3) 矿物掺合料。矿物掺合料的使用由来已久,主要包括粉煤灰、磨细矿渣、硅灰等。粉煤灰的掺入将会降低混凝土的抗盐冻性能,为了保证混凝土的耐久性,粉煤灰掺量应限制在 20% 左右。周茗如等^[30]研究表明:粉煤灰掺入对混凝土抗盐冻性有利,随粉煤灰掺量增大,混凝土抗盐冻耐久性有上升趋势,未引气时掺量 25% 粉煤灰混凝土有较好的抗盐冻性能。胡蝶等^[31]认为粉煤灰掺量为 20% 的 C50 粉煤灰引气混凝土试件及其构件,具有比硅灰引气混凝土更好的抗盐冻性能,因为硅灰混凝土自收缩较大导致了微裂缝的存在,进而加快了盐冻破坏。

4 展望

4.1 铁路混凝土结构耐久性评估考虑疲劳和环境耦合影响

高速铁路无砟轨道结构的露天服役环境、承受周期高频动荷载和层状相互约束的结构形式,决定了其混凝土结构耐久性评估与寿命预测的复杂性和不确定性。无砟轨道混凝土结构的服役耐久性评估与寿命预测技术能在一定程度上借鉴已有的混凝土材料与结构耐久性研究成果,但是尚需针对无砟轨道结构的自身特点进行深入研究。尽管如此,无砟轨道结构高耐久性的研究目前多集中在混凝土材料自身的耐久性研究,很少考虑荷载与环境的综合作用,尤其是疲劳荷载与环境的综合作用。具体而言,有 3 个方面的问题尚待研究:①无砟轨道在服役期内长期承受疲劳荷载作用,如何界定长期疲劳荷载的影响是耐久性研究的一个新课题;②无砟轨道结构是预应力结构,对预应力钢筋在混凝土中高应力状态下的耐久性目前仍然缺乏系统的研究;③露天服役无砟轨道的环境与无砟轨道层状结构相互约束的综合作用问题,它使得无砟轨道结构应力极为复杂。

4.2 现浇铁路结构混凝土开裂机理

现有国内外研究高速铁路现浇混凝土结构裂缝成因的定量分析较少。虽然国内外针对混凝土材料收缩开裂的共性问题(不针对高速铁路具体工程),目前已开始考虑混凝土材料、环境、结构特征交互作用,多因素、多尺度混凝土收缩开裂机理研究成为热点及发展

趋势,但已有的研究主要局限在理论或实验室层面。与此同时,上述开裂机理研究存在诸多问题,即虽然温度的影响及温度变形机理相对较为明确,但和湿度相关的耦合机制尚不清楚,变形预测理论研究结果和实测结果尚存在较大差异。以高强混凝土早期自收缩为例,基于目前应用最广的经典毛细管张力理论预测的收缩结果与实测值可相差数倍。高速铁路现浇混凝土材料、服役环境、结构形式方面有其自身特点,特别是随着“一带一路”倡议、高速铁路“走出去”战略的实施,面临新的理论及应用研究方面的需求:①原材料复杂,“一带一路”沿线国家原材料差异极大,优质材料特别是矿物掺合料等资源匮乏,材料变化导致的裂缝控制方面的需求凸显。②服役环境严酷,高速铁路沿线处于低湿、干燥、大温差等严酷服役环境,而低湿条件下混凝土收缩机理和普通环境存在显著不同,同时,大温差下的温度疲劳等作用引起的开裂问题同样不容忽视。③约束条件复杂,现浇无砟轨道的道床不仅在下部受到约束,同时受到轨枕约束;山体隧道二次衬砌收缩受底板和仰拱约束,还受到初衬约束,这些约束和隧道所处的围岩压力密切相关,而外荷载的引入导致开裂问题复杂性显著增加。

参 考 文 献

- [1] 李化建,谢永江.我国铁路混凝土结构耐久性研究的进展及发展趋势[J].铁道建筑,2016,56(2):1-8.
- [2] 祝和权,李海燕.铁路隧道防水技术现状及趋势[J].铁道建筑,2003,43(10):36-38.
- [3] SPRINGENSCHMID R. Prevention of Thermal Cracking in Concrete at Early Ages[M].London:E & FN Spon,1998.
- [4] ULM F J, COUSSY O. Modeling of Thermo-chemo-mechanical Couplings of Concrete at Early Ages[J]. Journal of Engineering Mechanics (ASCE), 1995, 121(7):785-794.
- [5] GAWIN D, PESAVENTO F, SCHREFLER B A. Hygro-thermo-chemo-mechanical Modelling of Concrete at Early Ages and Beyond. Part II: Shrinkage and Creep of Concrete[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2006, 67(3):332-363.
- [6] LUZIO G D, CUSATIS G. Solidification-microprestress-microplane (SMM) Theory for Concrete at Early Age: Theory, Validation and Application[J]. International Journal of Solids & Structures, 2013, 50(6):957-975.
- [7] LI H, LIU J P, WANG Y J, et al. Deformation and Cracking Modeling for Early-age Sidewall Concrete Based on the Multi-field Coupling Mechanism [J]. Construction and Building Materials, 2015, 88:84-93.
- [8] CZERNY F, KOENDERS E, VAN BREUGEL K. On the Reliability of Crack Predictions for Hardening Concrete Structures [C]//Proceedings of 6th International Global Construction Conference.UK, 2005.
- [9] 王甲春,阎培渝,余红发.混凝土结构早龄期开裂的分析与预测[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2007,23(1):85-87.
- [10] 曹擎宇,孙伟,赵勇,等.纤维素纤维混凝土性能及在二次衬砌中的应用[J].铁道学报,2012,34(7):103-107.
- [11] 赵政,高培伟,王华侨,等.衬砌混凝土早期抗裂性能研究[J].水力发电,2015(3):88-91.
- [12] 吴家冠,段亚辉.溪洛渡水电站导流洞边墙衬砌混凝土通水冷却温控研究[J].中国农村水利水电,2007(9):96-99.
- [13] 陶运星.昆明至安宁高速公路碧鸡关隧道结构渗漏水的治理[D].北京:中国地质大学,2010.
- [14] 王冲,周莹,黄谦.土壤环境中电场与硫酸盐对水泥基材料性能的影响及机理[J].硅酸盐通报,2017,36(9):3057-3063.
- [15] ARYA C, SA'LD-SHAWQI Q, VASSIE P R W. Factors Influencing Electrochemical Removal of Chloride from Concrete [J]. Cement & Concrete Research, 1996, 26(6):851-860.
- [16] KARATASIOS I, KILIKOGLU V, THEOULAKIS P, et al. Sulphate Resistance of Lime-based Barium Mortars [J]. Cement & Concrete Composites, 2008, 30(9):815-821.
- [17] 朱冬生,唐旭光,李术林.低水胶比混凝土的抗硫酸盐侵蚀试验研究[J].中外建筑,2006(4):180-182.
- [18] NEHDI M L, SULEIMAN A R, SOLIMAN A M. Investigation of Concrete Exposed to Dual Sulfate Attack [J]. Cement & Concrete Research, 2014, 64:42-53.
- [19] SULEIMAN A R, SOLIMAN A M, NEHDI M L. Effect of Surface Treatment on Durability of Concrete Exposed to Physical Sulfate Attack [J]. Construction & Building Materials, 2014, 73:674-681.
- [20] ZHUTOVSKY S, HOOTON D R, et al. Accelerated Testing of Cementitious Materials for Resistance to Physical Sulfate Attack [J]. Construction & Building Materials, 2017, 145(3):98-106.
- [21] 姜骞,石亮,刘建忠,等.西南某隧道衬砌混凝土中的硫酸盐腐蚀破坏分析及对策[J].隧道建设,2016,36(8):918-923.
- [22] 杨全兵,吴学礼,黄士元.混凝土抗盐冻剥蚀性的影响因素[J].上海建材学院学报,1993,6(2):93-98.
- [23] 熊剑平,申爱琴,潘载业.道路水泥混凝土抗盐冻性试验研究[J].公路,2010(2):152-159.
- [24] 陈迅捷,欧阳幼玲.海洋环境中混凝土抗冻融循环试验研究[J].水利水运工程学报,2009,40(2):68-71.
- [25] 游有鲲,缪昌文.粉煤灰高性能混凝土抗冻性研究[J].混凝土与水泥制品,2000(5):14-15.
- [26] 刘建忠,孙伟,缪昌文,等.大掺量粉煤灰超高性能钢纤维混凝土的静动态力学行为[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2012,33(6):21-28.
- [27] VALENZA J J, SCHERER G W. Mechanism for Salt Scaling of a Cementitious Surface [J]. Materials & Structures, 2007, 40(3):259-268.
- [28] TRIOLI J M, SOMMER S G, PEDERSEN L. Influence of Freezing/thawing and Drying/milling on Biochemical Methane

- Potential [J]. Environmental Engineering and Management Journal, 2016, 15(7): 1533-1536.
- [29] 余红发, 孙伟, 鄢良慧, 等. 引气混凝土在中国盐湖环境中抗冻性的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2004, 26(3): 15-18.
- [30] 周茗如, 高扬, 孙云飚, 等. 粉煤灰混凝土抗盐冻性能的研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2009(4): 6-9.
- [31] 胡蝶, 麻海燕, 余红发, 等. 矿物掺合料对混凝土氯离子结合能力的影响[J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(1): 129-134.

Durability Theory and Improvement Method of Concrete in Railway Engineering

MU Song¹, LI Huajian^{2,3}, WANG Yujiang¹, ZHOU Ying¹

(1.State Key Laboratory of High Performance Civil Engineering Materials, Nanjing Jiangsu 210008, China;
2.Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences Group Co. Ltd., Beijing 100081, China;
3.State Key Laboratory for Track Technology of High Speed Railway, Beijing 100081, China)

Abstract Facing the new characteristics and demands of railway engineering development, it is urgent to carry out research on concrete theory and durability improvement methods to ensure the long service life of concrete in railway engineering. The development history of concrete in railway engineering and the new requirement of concrete durability were introduced in this paper. The manifestation and hazard of concrete cracks in railway engineering, cracking mechanism, shrinkage model and main measures of concrete crack resistance were expounded. The mechanism of concrete freeze-thaw and sulfate corrosion damage and the methods of durability improvement faced by railway construction were summarized. Finally, it was pointed out that fatigue and environmental coupling should be considered in the durability evaluation of concrete structures in railway engineering, and the cracking mechanism of cast-in-place concrete structures in railway engineering should be explored.

Key words Engineering material; Durability; Theoretical analysis; Concrete in railway engineering; Freeze-thaw; Corrosion damage

(责任编辑 李付军)

(上接第 12 页)

Cutting-edge Theory and Scientific Problems of High Speed Railway Maintenance Engineering: Track System and Operation & Maintenance Mechanism

WANG Shuguo, WANG Pu, ZHAO Lei, XU Yang

(Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences Group Co. Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract With the continuous development and construction of high speed railway, significant progress has been achieved in researches on basic theory and application technology of railway. In this paper, the research work and achievements made in recent years on ballast track, ballastless track, track service state monitoring and health management were summarized systematically. Considering the emerging problems during the actual operation of high speed railway, the shortages and problems of researches on track system and operation & maintenance mechanism of high speed railway were pointed out. Finally, some suggestions were given for the research works to be carried out in the future and the main scientific problems included.

Key words High speed railway; Track system; Operation & maintenance; Research progress; Scientific problem

(责任编辑 李付军)