

文章编号: 1006- 2106(2010) 06- 0065- 05

盐湖区桥涵设计建造的主要技术难题及对策^{*}

雷晓峰^{**}

(中铁第一勘察设计院集团有限公司, 西安 710043)

摘要: 研究目的: 我国的盐湖分布广泛, 随着大规模的铁路建设, 越来越多的铁路需要穿越盐湖地区。根据察尔汗盐湖区的工程环境特点, 分析盐湖地区桥涵修建的主要技术难题, 研究提出盐湖地区桥涵的主要设置原则、综合防腐措施及施工方法。

研究结论: 在总结西宁至格尔木铁路相关设计、研究及施工经验的基础上, 对盐湖区桥涵设计建造提出了较为系统的对策措施: 选择受力明确、施工简便、耐久性好的桥涵结构形式及基础类型, 进行恰当的构造处理, 采用耐久混凝土, 设置合理的钢筋保护层厚度; 合理运用环氧涂层钢筋、钢筋阻锈剂、纤维混凝土、硅烷浸渍、防腐涂层、渗透性模板等混凝土结构耐久性附加措施。

关键词: 岩盐; 桥涵; 防腐; 设计

中图分类号: U447 文献标识码: A

Technical Problems and Solutions to Design and Construction of Bridge and Culvert in Salt-lake Area

LEI Xiaofeng

(China Railway First Survey and Design Institute Group Ltd., Xi'an, Shanxi 710043, China)

Abstract Research purposes With construction of railway on a large scale in China, more and more railways need to pass through the salt-lake areas that are widely distributed in China. According to the engineering environment and characteristics in the Chaerhan salt-lake area, the major technical problems in construction of bridge and culvert in salt-lake are analyzed, and the primary setting principles, comprehensive anti-corrosion measures and construction methods for construction of bridge and culvert in salt-lake are presented in this paper.

Research conclusions Based on learning the experiences in the design, research and construction of Xining-Golmud Railway, some systematic solutions to design and construction of bridges and culverts in the salt-lake area are presented. The solutions include selecting the structural type and foundation style with clear load condition, convenient construction and good durability; conducting appropriate structure treatment; using durable concrete; determining the reasonable thickness of the protecting cover for reinforcement; and taking additional measures for improving the concrete structure durability, such as reasonable using epoxy-coated steel bars, rust inhibitor, fiber concrete, silane soakage technique, anti-corrosion coating and permeable concrete formworks.

Key words rock salt; bridge and culvert; corrosion prevention; design

由于其特殊的工程环境条件, 在盐湖地区修建桥涵面临诸多难题。1984年通车的西宁至格尔木铁路

有 32 km 位于察尔汗盐湖区, 当时虽然对盐湖区桥涵设计建造的相关技术进行过一些试验研究, 但由于条

* 收稿日期: 2010- 04- 11

** 作者简介: 雷晓峰, 男, 1972 年出生, 高级工程师。

件所限,最终在盐湖区未设桥梁工点。随着铁路建设步伐的加快,已开工或待开工的一些铁路项目如新疆的哈密至罗布泊铁路、运城至三门峡铁路等也穿越了盐湖,因此在盐湖区修建桥涵不可避免,但现有规范对盐湖区桥涵的设计缺少相关规定。2005年开工建设的西格线二线工程,在察尔汗盐湖区增设了部分桥涵工点。本文主要是在总结西格线盐湖区铁路相关设计、研究及施工经验的基础上,结合近年来在察尔汗盐湖区设计建造的其它跨线桥和管线桥,分析确定盐湖区桥涵修建的主要技术难题,系统地研究并提出盐湖区桥涵的主要设置原则、综合防腐措施及施工方法,给类似工程提供参考。

1 盐湖区的自然条件

我国的盐湖主要分布于西北内陆地区,其中位于青海西部柴达木盆地的察尔汗盐湖,是世界上最大的盐湖。察尔汗盐湖是一个内陆湖,东西长 150 km,南北宽 30~40 km,面积约 5 000 km²;高程 2 670~2 680 m,地形平坦,四周高山相围,湿空气难以侵入。该地区历年最高气温 35.5℃,最低气温 -28.4℃,最大日温差达 28.8℃;年平均相对湿度仅有 28%,年均降水量 25 mm,蒸发量高达 3 561 mm,是我国最为干旱少雨的地区之一。

察尔汗盐湖为内陆封闭型高浓度近代盐盆,由于干燥少雨、多风、温差大,湖面受强烈蒸发作用结晶成鳞状起伏的干硬盐壳,厚 0.2~0.6 m。盐壳以下为结晶盐粒,部分化学弱胶结,岩芯呈松散~短柱状,局部具明显盐溶现象,夹有粉质黏土及粉土薄层,具盐晶砾质结构。盐晶孔隙之间全部充满卤水,水位距地表 0.2~0.8 m,矿化度一般为 310~410 g/L,最大达 440 g/L(饱和状态),相对密度 1.2~1.3。铁路通过地段的最大盐层厚度为 17.7 m,岩盐中 NaCl 的平均含量在 70%以上,其它为 MgCl₂ 和 KCl 等。岩盐强度随盐晶固结程度、孔隙率和含泥率的不同而变化很大,不受溶蚀影响的天然岩盐强度远大于一般土体。岩盐底部地层以湖积的粉质黏土、淤泥质粉质黏土、粉土及细、中砂为主,这些土层组成第一层承压水层,一般厚 5~8 m,地下潜水矿化度 50~294 g/L。

2 盐湖区修建结构物的主要技术难题

2.1 严酷的侵蚀环境

含盐地层的腐蚀可以分为物理腐蚀、化学腐蚀及电化学腐蚀。物理腐蚀是指盐溶液渗入混凝土等多孔材料内部,在温度、湿度变化条件下,盐类结晶膨胀而导致材料破坏。化学腐蚀则主要是卤水中的硫酸盐等

与水泥制品中的 Ca(OH)₂ 产生化学反应,导致混凝土体积膨大而开裂剥落。物理腐蚀和化学腐蚀相互依附、互相促进。从整个腐蚀破坏过程来说,往往首先从化学腐蚀开始。氯盐的腐蚀属于电化学腐蚀,Cl⁻ 的破坏主要表现为从混凝土表面逐渐扩散渗入混凝土内部,使钢筋严重锈蚀破坏。

察尔汗盐湖区因盐类结晶的膨胀作用而引起的物理破坏相当严重,特别是混凝土结构地面以上干湿交替变化区的破坏速度和破坏程度很剧烈。除了几乎达到饱和状态的 NaCl 盐湖晶间卤水还含有大量的化学侵蚀介质 SO₄⁻²、Mg⁺²。

2.2 盐溶

盐溶按其形态可分为溶塘、溶沟与溶洞 3 种,溶洞是盐溶的主要形态。盐溶的形成主要是由于低矿化度承压水渗入岩盐层底部发生溶蚀的结果,当溶蚀贯通整个岩盐层、洞口裸露于地表时,形成明洞。当溶蚀未贯通整个岩盐层时,溶洞埋藏于盐层内,形成盐溶暗洞。由于盐溶暗洞埋藏在盐层内部,常规检查难以发现,而且岩盐未经地质成岩作用,晶体之间联结较弱,若不采取有效的防治措施,随着低矿化度承压水的渗入溶洞将不断发展,洞顶盐层厚度逐渐减小,当洞顶盐层减小到一定厚度时将不足以支持上部结构自重和活载而发生坍塌,直接危及结构物的安全。

2.3 地表水溶蚀

1986—1989年期间发生在盐湖地区的特大洪水,使达布逊湖水水域面积迅速扩大,湖水矿化度降低,约 20 km 岩盐路基遭受洪水危害,路基基底被溶蚀出许多大小不等的空洞,路基下沉,严重危及行车安全。因此,为了防止桥址区地基土被地表水溶蚀,必须研究结构物地基土防水溶蚀的技术措施,探求经济可行的防水、隔水方式,防止洪水对整个桥址特别是基础区土层的溶蚀,确保结构物的稳定。

3 盐湖区桥涵的主要设置原则

盐湖地区降雨量极小,几乎不会形成大的地表径流,所以一般情况下不需要设置用于排洪的桥涵。桥梁主要是公路跨越铁路的跨线立交桥,涵洞主要是为一些穿越铁路的管线而设的护涵,少量涵洞用来平衡铁路路基两侧的水位。

3.1 桥梁

盐湖地区上部岩盐的承载力较高,下部淤泥质粉质粘土层的承载力较低,所以桥梁结构本身应该适应这种地层条件。一般宜选用小跨简支结构或单孔箱型桥,以适应可能产生的较大的基础沉降量。为了减小对地基的附加荷载,应尽可能减轻结构自重,如采用空

心板梁等。梁部宜采用预应力结构, 首选预应力先张梁。为了保证施工质量、减少施工期对岩盐环境的破坏, 应尽可能减少现场混凝土的浇筑量, 可以采用预制拼装结构。基础、墩台均应设防裂钢筋, 以减少混凝土表面的裂缝。所有桥涵结构应正交设置。

3.2 涵洞

涵洞首选以不锈钢制作的金属波纹管涵。有立交需要且地下水位低的地方, 可以少量采用一些建筑高度低、预制拼装的钢筋混凝土矩形涵洞。涵洞洞身延伸至路基坡脚以外不少于 2 m, 取消出入口端翼墙; 对涵洞出入口附近的路基边坡进行防护; 钢筋混凝土涵洞涵节之间采用橡胶止水带。

3.3 结构构造处理

不当的构造处理会催生和加剧结构的腐蚀。设计时应尽量选用在同样承载能力条件下暴露的表面积小的结构构件, 并适当增加构件的厚度。比如梁部不宜采用 T 梁, 而宜采用板梁、箱梁; 桥墩不宜采用薄壁墩、双柱或多柱式排架墩, 宜采用独柱墩; 桥台宜采用矩形空心桥台, 避免采用肋板式桥台或柱式桥台。构件的棱角部位在侵蚀作用下最容易受损, 所以最好采用圆形或圆端形截面的构件, 对于截面尖角部位应倒圆角处理。

钢结构除了采用不锈钢、耐候钢及防腐涂装以外, 还应具备比常规地区厚的钢板厚度, 留出一定的安全腐蚀余量。为此, 对于腐蚀环境相对较轻的泥下区域预留 2 mm 腐蚀余量, 对于高矿化度卤水区及水位变动区预留 4 mm 腐蚀余量。

3.4 地基与基础

位于盐湖中部岩盐较厚地层上的桥涵, 由于地下水的矿化度很高, 加之岩盐下存在承压水, 所以不宜采用钻孔桩等深基础, 主要以明挖扩大基础为主。如果岩盐层及其以下的流塑状土层较薄, 可以将其全部挖除换填。如果岩盐层较厚, 为了防止盐溶暗洞, 提高地基承载能力, 可采用挤密碎石桩加固地基。对于岩盐内的溶洞, 采用就地取材的地下饱和卤水拌合的泥浆灌注密实。

为防止淡水侵蚀基础附近地层, 可在基础四周 15 m 范围内用粘性土填筑防护平台, 外围边坡顶至坡面铺砌基底用土工合成材料作为封闭层, 封闭层上用预制混凝土板铺砌, 筑成抵挡淡水的屏障, 御淡水于桥梁结构基础之外。

4 盐湖区桥涵结构的防腐措施

盐湖地区混凝土结构和钢结构的腐蚀十分严重, 因此必须全面研究结构的防腐问题, 采取多种手段延

长桥涵混凝土和钢结构的使用寿命。

4.1 采用耐久混凝土

盐湖区的桥涵混凝土结构应根据环境作用等级采用耐久混凝土, 耐久混凝土配制的基本原则包括: 选用低水化热和较低含碱量的水泥; 选用高效减水剂, 取用偏低的水胶比; 限制混凝土中胶凝材料的用量, 并尽可能降低胶凝材料中硅酸盐水泥的用量; 大比例掺加粉煤灰、硅粉、磨细高炉矿渣粉等矿物掺和料; 在强腐蚀区的混凝土中掺入适量的钢筋阻锈剂; 适当采用引气剂提高混凝土的耐久性, 并严格控制原材料引入的氯离子总量。

桥梁梁部采用 C55 耐久混凝土, 最大水胶比 0.33, 最小胶凝材料用量 450 kg/m^3 , 混凝土 12 周龄期氯离子扩散系数不大于 $1.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$; 桥墩及基础采用 C50 耐久混凝土; 钢筋混凝土涵洞洞身采用 C50 耐久混凝土, 最大水胶比 0.36, 最小胶凝材料用量 400 kg/m^3 , 混凝土 12 周龄期氯离子扩散系数不大于 $1.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$; 附属工程采用 C45 耐久混凝土, 最大水胶比 0.40, 最小胶凝材料用量 360 kg/m^3 , 混凝土 12 周龄期 Cl^- 扩散系数不大于 $2.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

4.2 设置合理的钢筋保护层厚度

理论上结构的保护层越厚, 氯离子扩散到钢筋表面的时间就越长, 结构的使用年限也越长。但是, 保护层过厚不利于结构裂缝控制, 同样会造成结构的耐久性降低。因此, 只有根据环境和结构合理确定钢筋保护层厚度, 才能有效地对钢筋提供保护, 增强结构的耐久性。梁部混凝土结构钢筋净保护层最小厚度取 50 mm, 桥墩台、涵洞洞身钢筋净保护层最小厚度取 65 mm, 承台及明挖基础钢筋净保护层最小厚度取 90 mm, 钻孔桩钢筋净保护层最小厚度取 100 mm。

4.3 混凝土结构防腐的附加措施

4.3.1 钢筋阻锈剂

钢筋阻锈剂是一种能抑制或延缓钢筋电化学腐蚀的化学外加剂, 混凝土中只要能够保持必要浓度的阻锈剂, 钢筋就可以长期不锈。盐湖区的桥涵可以在全部梁部混凝土及基底(墩身截面范围内)至地面以上 2.0 m 高度范围内的墩台身混凝土内掺加钢筋阻锈剂。

4.3.2 环氧喷涂钢绞线及环氧涂层钢筋

盐湖区桥涵的墩台身、涵身及基础护面钢筋均采用了环氧涂层钢筋, 梁部预应力钢筋采用环氧喷涂钢绞线。由于环氧钢筋的环氧涂层损伤极易导致钢筋的点腐蚀, 加速结构破坏, 因此, 保证膜层的完整性成为环氧涂层钢筋有效性的关键。另外, 环氧涂层钢筋在混凝土中的握裹力因为涂层的存在而降低, 设计时应

按规范增加其锚固长度及搭接长度。

4.3.3 混凝土表面防腐涂装

涂层型表面防护措施也称涂层防腐蚀措施,其最大特点是隔绝 Cl^- 、酸性气体等有害介质在混凝土内的渗透和扩散,尤其适合于盐雾环境下混凝土的保护。同时防腐涂装还能遮挡紫外线,延缓混凝土表面在紫外线照射下的老化。盐湖区的桥梁墩台及梁部外露表面均设防腐涂层。先在混凝土表面涂刷渗透结晶型混凝土防水防护剂或进行硅烷浸渍处理,再进行混凝土保护涂装的施工,涂装层由3层组成,底层喷涂环氧树脂封闭漆;中间层先刮涂环氧腻子,再喷涂 $300\ \mu\text{m}$ 厚的环氧树脂漆;面层喷涂 $100\ \mu\text{m}$ 厚的聚氨酯磁漆;涂层总干膜平均厚度为 $400\ \mu\text{m}$ 。

4.3.4 透水模板衬里

透水模板衬里又称为渗透性模板衬里,多采用聚丙烯纤维熔粘成具有大量微孔的透水毡片面层,中间夹有蓄水性颗粒经共同压制而成。浇筑混凝土时采用带透水衬里的模板,可消除混凝土表面的气泡、砂线,减少表面裂缝,明显改善混凝土保护层的施工质量,并使混凝土表层密实。桥涵梁部、墩台身、基础侧面、涵洞洞身等均采用透水模板衬里施工。

4.3.5 纤维混凝土

在混凝土中掺加聚丙烯纤维,能有效控制混凝土塑性收缩、干缩、温度变化等因素引起的裂纹,改善混凝土的防裂抗渗性能及抗冲击性能,从而提高混凝土的使用寿命。桥涵墩台身、基础、涵身、桥面铺装等部位的混凝土中均掺加聚丙烯纤维,纤维细度 $18\sim 20\ \mu\text{m}$,掺加量为 $0.9\sim 1.2\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。

4.3.6 硅烷浸渍

试验结果表明,硅烷浸渍剂对高性能混凝土有着非常好的防护效果,能使吸水率下降 50% ,氯化物吸收量降低值大于 91% ,渗透深度达到 $4\ \text{mm}$ 以上,具有良好的抗冻融循环和耐酸性。盐湖区桥涵的基础顶面及侧面,桥墩台入土部分及地面上 $2\ \text{m}$ 范围内的结构混凝土表面,钢筋混凝土涵洞洞身内外均采用硅烷浸渍处理。预制拼装构件的湿接缝一般为薄弱部位,对其表面进行硅烷浸渍处理。

4.4 选用适合的桥面铺装层

盐湖区的跨线立交桥,一般都大量通行运盐车辆,桥面不可避免会受到洒落的原料盐的腐蚀。一旦桥面铺装层腐蚀损坏,将危及梁体的安全,所以需选择合适的桥面铺装层构造及材料。可采用 $8\ \text{cm}$ 厚 C50 纤维钢筋混凝土垫层 + $8\ \text{cm}$ 厚 C50 纤维钢筋混凝土面层的双层结构形式;两层之间涂 $1.5\ \text{mm}$ 厚的环氧树脂防水涂层;面层钢筋混凝土表面采用硅烷浸渍处理;每

层均设置直径 $12\ \text{mm}$ 、间距 $10\ \text{cm}$ 的环氧涂层钢筋网。

4.5 混凝土结构的裂缝限制措施

采取措施严格控制混凝土结构的裂缝。比如承台施工时弃用钢筋混凝土套箱而改用钢套箱,墩台身及承台混凝土由多次灌注改为一次灌注。冬季浇筑混凝土时,混凝土入模温度不低于 $5\ ^\circ\text{C}$;夏季混凝土入模温度不宜高于气温且不超过 $30\ ^\circ\text{C}$;当周围大气温度与养护中的混凝土表面温度之差超过 $20\ ^\circ\text{C}$ 时,混凝土必须覆盖保温。为了减少混凝土表面的裂缝,在主钢筋保护层内距混凝土表面 $32\ \text{mm}$ 处设置不锈钢防裂网片。

5 盐湖区桥涵基础施工实例

桥涵基础大部分需要现浇施工,在岩盐地层中如何保证其施工质量至关重要。图1为西格二线某跨线立交桥的基础施工方案图,基础为明挖扩大基础,地基采用挤密碎石桩加固。为防止施工期间卤水对未凝固的混凝土造成破坏,碎石桩及垫层施工完成以后,将基坑内的卤水抽干,在基底铺设碾压 $30\ \text{cm}$ 厚的沥青混凝土隔离层;基础周围用 30° 石油沥青浸渍普通砖砌筑一圈厚 $50\ \text{cm}$ 、高出地面 $0.5\ \text{m}$ 的护壁;护壁内侧及基底用一毡两油作为第一道防水层,然后在其上喷涂 $2\ \text{mm}$ 厚的 STAN02 防腐抗渗防护膜;最后浇筑基础混凝土。基础施工完且其防腐保护层及防腐涂装施工好以后,再以 C45 纤维混凝土回填沥青砖护壁与基础、台身之间的空隙。地面上 $2\ \text{m}$ 至基顶范围内的台身在混凝土表面防腐涂装层施工完以后再以 $30\ \text{cm}$ 厚的 C45 纤维混凝土包裹。

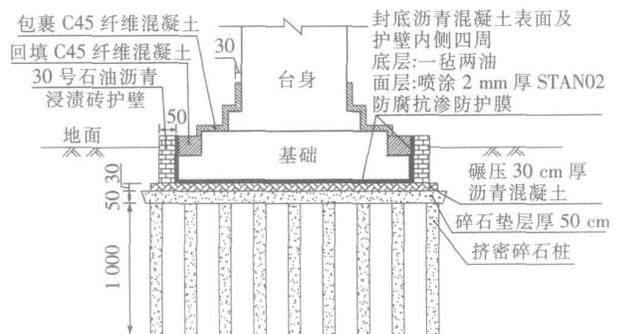


图 1 桥台基础施工方案图(单位: cm)

6 结论

(1) 盐湖区的桥涵首先要选择受力明确、施工简便、耐久性好、自重轻的桥涵结构形式,比如桥梁宜采用简支板梁桥或箱型桥,涵洞采用金属波纹管涵;其次结构构造处理要恰当;岩盐地层上的桥涵基础以明挖基础为主,可采用挤密碎石桩加固地基。

(2) 桥涵混凝土结构防腐的基本措施是采用耐久混凝土, 通过低水胶比和大比例掺加的优质矿物掺合料, 使混凝土更加密实, 从而使其具备高抗 Cl^- 扩散能力、高抗裂性能、高工作性能; 设置合理的钢筋保护层厚度; 设计及施工均严格控制混凝土结构的裂缝。

(3) 对处于特别严酷腐蚀环境中的构件和特殊部位, 合理运用钢筋阻锈剂、环氧喷涂钢绞线 (钢筋)、混凝土表面防腐涂层、硅烷浸渍、透水模板衬里、纤维混凝土、外加电流阴极保护等附加防腐措施。在适宜的情况下, 钢结构可采用不锈钢等耐腐蚀金属材料。

为了保证现场浇筑混凝土的质量, 施工时需有效隔离卤水。

参考文献:

- [1] 龙锦永. 我国第一条盐湖铁路 [J]. 铁道工程学报, 1996 (2): 272-278
Long Jinyong The First Saline Lake Railway in China [J]. Journal of Railway Engineering Society, 1996(2): 272-278
- [2] 钱征宇. 我国盐湖铁路的主要技术问题及工程措施 [J]. 中国铁路, 2004(4): 43-46
Qian Zhengyu Main Technical Problems and Engineering Measures on Railway Construction in the Salt Lake Region in China [J]. Chinese Railways, 2004 (4): 43-46
- [3] 李志贤. 青藏铁路盐渍土路基工程的设计与施工 [J]. 铁道工程学报, 1994(1): 43-47
Li Zhixian The Design and Construction of the Roadbed on Salty Soil of Qinghai-Tibet Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 1994(1): 43-47
- [4] 王绳祖. 盐湖岩盐变形破坏的试验研究与数学模拟 [J]. 岩土工程学报, 1982(4): 17-28
Wang Shengzu Experimental Investigation and Mathematical Simulation of Deformation and Failure of Salt-lake Rocksalt [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1982(4): 17-28
- [5] 杨海容, 蒋富强, 王翔, 等. 青藏铁路察尔汗盐湖盐岩和盐溶工程地质特性及路基修筑技术 [J]. 铁道工程学报, 2005(S1): 373-378
Yang Hairong Jiang Fuqiang Wang Xiang, etc Characteristics of Salt Rock and Salt-dissolution Engineering Geology and Subgrade Construction in Chaerhan Salt Lake Along Qinghai-Tibet Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2005 (Supplement 1): 373-378
- [6] 王鹰, 谢强, 赵小兵. 含盐地层工程性能及其对铁路工程施工的影响 [J]. 矿物岩石, 2000(4): 81-85
Wang Ying Xie Qiang Zhao Xiaobing Engineering Properties of Salt-bearing Strata and Its Effects on Construction of Railway [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2000(4): 81-85
- [7] 王青, 徐港. 氯盐环境下混凝土结构的防护设计措施 [J]. 混凝土, 2007(7): 96-100
Wang Qing Xu Gang Protective Measures for Durability of Concrete Structures in Chloride Environment [J]. Concrete, 2007(7): 96-100
- [8] 张国学, 吴苗苗. 不锈钢钢筋混凝土的应用及发展 [J]. 佛山科学技术学院学报 (自然科学版), 2006(6): 10-13
Zhang Guoxue Wu Miaomiao Application and Development of Stainless Steel Rebars for Reinforced Concrete Structures [J]. Journal of Foshan University (Natural Science Edition), 2006(6): 10-13
- [9] 王雨, 丁高升, 张桂媛. 渗透型混凝土保护剂的应用 [J]. 新型建筑材料, 2008(3): 69-72
Wang Yu Ding Gaosheng Zhang Guiyuan Application of Protective Agent for Permeable Concrete [J]. New Building Materials, 2008(3): 69-72
- [10] 徐华兴, 周双喜, 徐春红. 混凝土早期裂缝成因分析及控制措施 [J]. 交通科技, 2008(1): 68-71
Xu Huaxing Zhou Shuangxi Xu Chunhong Reason Analysis and Preventive Measures of Early Cracks of Concrete [J]. Transportation Science & Technology, 2008(1): 68-71
- [11] 朱淮军. 硅烷浸渍技术在高性能混凝土中的防腐保护效果 [J]. 混凝土, 2009(10): 126-128
Zhu Huaijun Effects of Silane Impregnant in Protecting High Performance Concrete from Corrosion [J]. Concrete, 2009(10): 126-128
- [12] 田正宏, 郑小伟, 宋健大, 等. 透水模板改善混凝土性能试验 [J]. 建筑材料学报, 2008(2): 172-178
Tian Zhenghong Zheng Xiaowei Song Jianda, etc Performance Tests of Concrete Poured with Controlled Permeability Formwork [J]. Journal of Building Materials, 2008(2): 172-178

(编辑 吕洁)