

高寒地区混凝土箱梁施工关键技术研究

赵帮轩

(中铁十八局集团第五工程有限公司,天津 300459)

摘要: 在高海拔寒冷地区恶劣的自然环境,为了提高混凝土箱梁的强度和抗冻耐久性,需要对混凝土箱梁施工关键技术进行研究。首先,分别掺加减水剂和引气剂,通过试验研究了不同外加剂对高寒区混凝土各项性能的影响,并确定了高海拔寒冷地区混凝土箱梁的最优配合比。然后,根据规范并结合工程所处高海拔地区情况,提出了混凝土原材料入仓温度、箱梁浇筑过程保温及温度控制、预制箱梁制作和蒸养措施等施工关键技术。最后,通过回弹法现场测试箱梁强度,验证了优化方案的有效性。本文的研究成果可为类似工程提供参考和指导。

关键词: 高海拔寒冷地区;混凝土箱梁;优化配合比;温度控制;蒸汽养护

中图分类号: TU528; U455.47

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2022)06-0163-06

Key Construction Technologies of Concrete Box Girder in Alpine Region

ZHAO Bangxuan

(China Railway 18th Bureau Group Fifth Engineering Co., Ltd., Tianjin 300459, China)

Abstract: In the harsh natural environment of high altitude and cold regions, in order to improve the strength and frost resistance durability of concrete box girder, it is necessary to propose key technologies of concrete box girder construction. Firstly, water reducing agent and air entraining agent are added respectively. The effects of different admixtures on the properties of alpine-cold concrete are analyzed through experiments, and the optimal mix proportion of concrete box girder in high altitude and cold area is determined. Then, according to the specifications and combined with the situation of the high-altitude area where the project is located, the construction key technologies such as the temperature of concrete raw materials entering the warehouse, the heat preservation and temperature control of the box girder pouring process, the fabrication of prefabricated box girder and steam curing measures are proposed. Finally, the box girder strength was tested on site by the rebound method, and the effectiveness of the optimization scheme was verified. The research results of this paper can provide reference and guidance for similar projects.

Keywords: high altitude cold region; concrete box girder; optimize the mix; temperature control; steam curing

随着西部地区基础设施建设不断推进,大量的铁路、公路工程在高海拔寒冷地区修建^[1-2]。高海拔地区具有气压和气温低、昼夜温差大、日照时间长、紫外线大等特点,这种高寒的环境条件对混凝土结构的各项性能和施工关键技术提出了更高的要求^[3],而高海拔寒冷地区混凝土箱梁的配合比设计^[4-5]、温度控制、养护措施等研究明显滞后于工程需求^[6-7]。这也成为中国公路桥梁工程设计和施工

中的一个重大技术问题。

基于工程实践需要,一些学者和工程师对高海拔寒冷地区混凝土配合比进行了研究^[8-9]。如陶友海^[10]通过掺加少量粉煤灰,提高纤维素纤维混凝土在寒冷环境下养护期的强度增长率和孔隙结构稳定性。王龙志等^[11]使用复合型高效外加剂,控制冬季施工含气量在4%~6%,并通过掺入10%的膨胀剂,缓解混凝土内部的温度应力。惠洪义等^[12]添加

收稿日期:2022-07-15

修稿日期:2022-08-09

基金项目:陕西省重点研发计划(2018SF-391);陕西省住房和城乡建设厅科技计划(2017-K55);西安市科技局高校人才服务企业项目(2019217214GXRC008CG009-GXYD8.2)

作者简介:赵帮轩(1977—),男,高级工程师,主要从事土木工程施工技术方面的工作。E-mail:136386162@qq.com

高效减水剂、10% 的粉煤灰和降低水胶比,来提高混凝土强度和抗冻耐久性。同时需要在混凝土箱梁施工过程中,通过施工技术控制,减少混凝土强度的损失。孙广滨等^[13]使用热水预加热混凝土原材料并控制运输和浇筑时的温度。向敏等^[14]根据高强混凝土水化放热规律,提出预制混凝土箱形梁生产过程中蒸汽养护的温度控制参数,有效控制了降温期出现的较大温度梯度而产生的温度拉应力。Li 等^[15]针对箱梁养护时内部温度过高和冷却速度慢的问题,提出了钻道循环水冷却方法,减小了混凝土箱梁结构内外的温差。赵文斌等^[16]通过对低温、大温差地区不同养护方法下混凝土试验箱梁的温度和各龄期强度的比较,证实了 45℃ 恒温蒸汽养护混凝土的抗压强度高。

在高海拔寒冷地区,建筑材料、施工环境、养护条件等因素对混凝土箱梁结构的强度和耐久性有很大影响。为了满足高海拔寒冷地区对混凝土结构的高要求,有必要对混凝土结构的关键施工技术进行系统研究。基于此,本文以 S10 凤县(陕西)至合作(甘肃)高速公路卓尼至合作段 ZH09 标段桥梁工程为依托,对高海拔寒冷地区混凝土配合比优化设计、原材料入仓温度、箱梁浇筑过程保温及温度控制、预制箱梁蒸汽养护措施等进行研究,形成一套高海拔寒冷地区预制箱梁施工技术,为更多的工程提供技术支持和参考。

1 工程概况

1.1 项目介绍

S10 凤县(陕西)至合作(甘肃)高速公路卓尼至合作段 ZH09 标段桥梁工程,全长 9.050 km,沿线共设置 13 座桥,其中主线大桥 1 座共 186 m,中桥 5 座共 222.8 m,小桥 5 座共 102.5 m,匝道中桥 2 座共 88.12 m。预制的混凝土箱梁结构长度为 30 m 和 40 m,共 804 片。

1.2 自然条件

工程项目所在地区海拔在 2 500 m~3 600 m 之间,具有气压和气温低、日照时间长、昼夜温差大等特点。冬季漫长、干燥、寒冷,最冷月份 1 月的平均温度为 -8.6℃,最低温度为 -27℃;全年盛行风向 NE,年平均风速 2.1 m/s,最大风速 17 m/s。这种高海拔寒冷环境对混凝土结构的性能提出了更高的要求,为满足工程环境要求,需要对箱梁的混凝土配合比进行优化设计。同时,为了保证试验结果的可信度,本文中的所有试验均在施工现场进行。

2 高海拔寒冷地区混凝土箱梁配合比确定

2.1 原材料选用

本工程箱梁采用 C50 混凝土,所用原材料就地取材,水泥采用永登祁连山 P. II52.5 硅酸盐水泥,未出现受潮结块现象,水泥的物理力学指标见表 1;粗骨料取自当地采石场,选用质地坚硬、表面粗糙的石灰岩砾石,粒径 5 mm~20 mm,级配良好,含泥量 0.6%,泥块含量为 0.2%;细骨料是当地砂厂的河砂,选取细度模数为 2.98 的中砂,其主要技术指标如表 2 所列;外加剂有 2 种,采用苏博特公司生产的混凝土高效引气剂和含少量缓凝成份的混凝土高效减水剂。

表 1 水泥的基本物理力学性能

项目	细度/%	凝结时间/h		安定性
		初凝≥	终凝≤	
标准要求	≤10.0	1.5	10.0	—
试验数据	4.2	7.0	9.0	合格

表 2 细骨料主要技术指标

技术指标	试验值	技术要求
细度模数	2.98	2.0~3.7
含泥量/%	2.3	≤3.0
表观密度/(kg·m ⁻³)	2734	≥2500
空隙率/%	43.1	≤47
松散堆积密度/(kg·m ⁻³)	1557	≥1350

2.2 试验配合比

根据《普通混凝土配合比设计规程》^[17](JGJ55—2011)规定及原材料检测结果,使用混凝土配合比质量法,计算得到高海拔寒冷地区普通混凝土配合比,通过分别掺入减水剂和引气剂、调整其他原材料用量,经过反复调试,进一步确定了如表 3 所示的高海拔寒冷地区减水混凝土和引气混凝土配合比,并制定基本性能试验方案,用来确定箱梁混凝土配合比。

2.3 基本性能试验

在制备混凝土试件时,使用仪器对 3 种高寒混凝土的坍落度和含气量进行测定;试件成型后放入标准养护室内养护,将立方体试样每 3 块分为 1 组,共计 3 组,分别对应标准养护龄期 7 d、14 d 和 28 d,测试试件抗压强度,取平均值;长方体试样 3 块为 1 组,测试试件标准养护 28 d 的抗折强度,试验结果见表 4。

表 3 高海拔寒冷地区混凝土试验配合比

配合比	水泥 /(kg·m ⁻³)	碎石 /(kg·m ⁻³)	砂子 /(kg·m ⁻³)	水 /(kg·m ⁻³)	外加剂		砂率	水胶比
					引气剂 /(kg·m ⁻³)	减水剂 /(kg·m ⁻³)		
高寒普通混凝土	453	1051	643	163	0.00	0.00	0.38	0.36
高寒减水混凝土	453	1051	643	163	0.00	4.58	0.38	0.36
高寒引气混凝土	481	1036	634	159	0.05	0.00	0.38	0.33

表 4 混凝土基本性能试验结果

混凝土	坍落度 /mm	含气量 /%	7 d 抗压强度 /MPa	14 d 抗压强度 /MPa	28 d 抗压强度 /MPa	28 d 抗折强度 /MPa
高寒普通混凝土	20	0.8	43.9	48.2	53.7	8.66
高寒减水混凝土	40	1.2	47.6	50.8	55.4	10.44
高寒引气混凝土	35	2.5	42.4	47.8	51.9	8.18

从试验过程来看,掺加减水剂和引气剂可以提高高寒混凝土的坍落度和含气量。与高寒普通混凝土相比,掺入减水剂的高寒减水混凝土的坍落度和含气量分别提高了 100% 和 50%,掺入引气剂的高寒引气混凝土的坍落度和含气量分别提高了 75% 和 213%,使混凝土的和易性得到改善。从表 4 的试验结果看,在标准养护条件下养护 7 d 后,高寒普通混凝土、高寒减水混凝土和高寒引气混凝土的立方体抗压强度平均值分为 43.9 MPa、47.6 MPa、42.4 MPa,与高寒普通混凝土相比,高寒减水混凝土的立方体抗压强度增加了 8.43%,而高寒引气混凝土的立方体抗压强度却减小了 3.42%,表明掺入减水剂的高寒减水混凝土早期强度增长较快。

从试验结果看,在标准养护条件下,混凝土试块养护 28 d 后,3 种配合比高寒混凝土的抗压和抗折强度均能达到设计强度值。高寒普通混凝土、高寒减水混凝土和高寒引气混凝土的立方体抗压强度平均值分为 53.7 MPa、55.4 MPa、51.9 MPa,3 种高寒混凝土的抗折强度平均值分别为 8.66 MPa、10.44 MPa、8.18 MPa。与高寒普通混凝土相比,高寒减水混凝土的立方体抗压强度和抗折强度分别增加了 2.40% 和 20.55%,而高寒引气混凝土的立方体抗压强度和抗折强度分别降低了 4.07% 和 5.54%。上述结果表明,在本次试验中掺入减水剂可使混凝土强度增大,掺入引气剂虽然可改善混凝土和易性,但一定程度会降低混凝土强度。根据施工场地的自然环境条件和混凝土基本力学性能试验结果,本项目选取掺入减水剂的高寒减水混凝土配合比作为箱梁配合比。

3 混凝土浇筑温度控制及箱梁制作工艺

3.1 混凝土浇筑温度控制

在高海拔寒冷地区冬季施工时,外部环境温度过低。混凝土拌合前,需对原材料进行预加热处理,采取直接加热水的方法,当无法达到搅拌温度时,骨料应预热,加热后的原材料温度不应大于 60℃;确保混凝土拌合料的出料温度控制在 20℃ 左右,以避免混凝土坍落度损失过大或混凝土进入模具的温度过低;运输过程中采取在混凝土罐车上加保温隔热层的措施,同时避免长时间静停,确保入模混凝土温度大于 15℃;对箱梁模板进行预热,控制混凝土入模后梁体上下温差小于 5℃。

3.2 混凝土箱梁的制作工艺

箱梁底模采用 8 mm 厚钢板作为底板,与支座焊接。侧模、内模、端模采用定型钢模板。考虑到地理位置和环境的特殊性,侧模采用彩钢板封闭,内模采用棉篷布包裹保温。沿内模纵梁、侧模两侧和顶板对称布置蒸汽管道和散热器,采用高压锅炉蒸汽加热养护。梁的钢骨架采用定型钢结构工作台均匀安装在模板外,并用吊具整体吊入模板内,以保证钢骨架在运输过程中稳定不变形。

混凝土拌合时,需对骨料与水进行加热,运输过程中要采取有效的保温措施,浇筑采用 10 t 龙门吊配 1.5 m³ 料斗,混凝土入模前不得发生离析。预制箱梁混凝土浇筑可采取连续浇筑,当浇筑至距另一端 4 m~5 m 时,反方向再由另一端开始浇筑,以避免砂浆全部堆积在梁端预应力锚具位置影响张拉。考虑到高海拔寒冷地区特殊的气候环境,有必要改善低温引起的预应力损失。锚具、钢绞线应放在供热的库房里,每天按时开始张拉,同一应力区的钢绞线要在同一天完成张拉,尽量选在白天气温高的时间进行,保证张拉时环境温度不低于 -15℃。孔道压浆应在张拉后 1 d 内完成,管道灌浆必须密实,水泥浆等级不低于 M50。封端钢模采用钢管、木楔等材料支撑加固,确保在施工过程中不跑模,且便

于拆卸。预制箱梁施工工艺流程如图 1 所示。

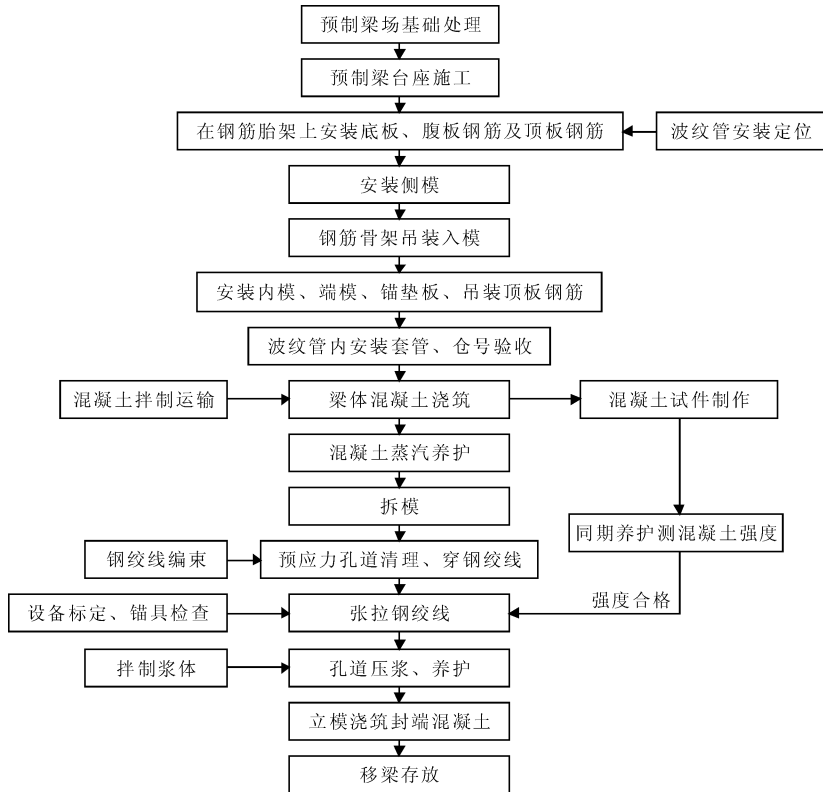


图 1 预制箱梁施工工艺流程图

4 高海拔寒冷地区混凝土箱梁养护技术

4.1 箱梁的蒸汽养护系统结构组成

高海拔寒冷地区混凝土箱梁智能蒸汽养护系统主要由动力、控制、供汽管道、养护罩等系统组成。

(1) 动力系统使用型号为 4 t/h 的蒸汽锅炉。根据蒸汽锅炉罐体内的压力,使用水泵自动对锅炉注水。

(2) 智能控制系统是计算机程序根据接收到的智能温度仪数据,控制每个支水管上的电磁阀,实现智能控制蒸汽养护,减少梁体各部位的温差。

(3) 箱梁蒸汽养护管道布置,主蒸汽管内径为 150 mm,支蒸汽管内径为 80 mm。制梁台座里布置 1 根蒸汽管内径为 50 mm,模型两侧、内腔及顶板对称布置 8 根蒸汽管道直径为 50 mm。

(4) 养护罩系统由养护基座和养护罩组成。

4.2 高海拔寒冷地区箱梁的蒸汽养护方案

在蒸汽养护初期,蒸汽锅炉传递出高温水蒸气对混凝土箱梁进行供热升温,蒸汽在混凝土构件上凝结放热,将蒸汽热传给混凝土。预制混凝土箱梁长度为 30 m 和 40 m,在蒸养过程中,智能温度计布置在箱梁内箱和侧模上,内箱上的温度仪器布置在

跨中和梁端 4 m 处,侧模上均匀布置 4 个温度仪器,蒸汽养护升、降温阶段每隔 0.5 h 自动测温一次,恒温养护阶段每 1 h 自动测温一次。根据实测温度的变化情况,采取调节蒸汽放入量来控制升降温速度,进而保证蒸汽到达梁体各处的温差较小,使混凝土内部空隙较少产生。养护中的箱梁如图 2 所示。

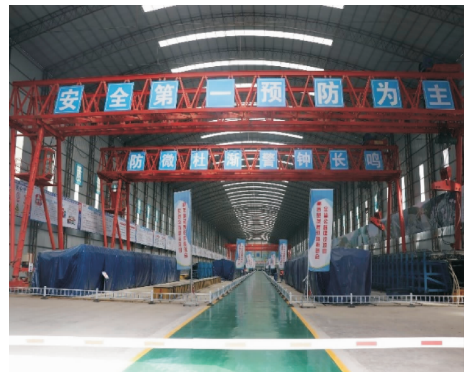


图 2 养护中的混凝土箱梁

智能管理器根据预先设定的程序控制梁体混凝土静停、升温、恒温、降温四阶段,并与智能温度仪相结合,使蒸汽养护自动化,有效控制梁体裂纹产生及强度损失。当蒸汽均匀到达梁体各处时,由程序自

动静停,在静停期间,智能温度仪保证棚温不低于 5°C 。混凝土浇筑完 $4\text{ h}\sim 6\text{ h}$ 后,自动再次送入蒸汽,进入升温阶段。智能管理器通过控制小型散热扇保证升温速率不超过 $10^{\circ}\text{C}/\text{h}$,混凝土芯部温度最高不得超过 65°C 。进入恒温阶段时,温度不得超过 45°C ,并使蒸汽罩内各部位的温差不大于 10°C ,这有助于箱梁快速达到强度要求。降温时保温棚与智能温度仪共同工作,必要时使用通风扇调节通风,降温期的降温速度根据预制混凝土箱梁的尺寸大小,选择降温速度不超过 $10^{\circ}\text{C}/\text{h}$,防止降温速度过快,造成混凝土预制构件产生收缩裂缝和温度拉应力裂缝;梁体温度与外部环境相接近时,撤除养护罩,如图3。



图3 养护后的混凝土箱梁

5 混凝土箱梁强度现场测试

5.1 测试方案

随机抽取20块浇筑满28d的高寒减水混凝土箱梁,使用混凝土数显回弹仪HD-225D对混凝土箱梁的强度进行验证。在箱梁两侧各选取5个测区,测区应避免钢筋密集区和预埋件,并在每个测区画出 4×4 的网格测点,现场检测如图4。箱梁表面擦拭干净后进行回弹测试,回弹仪和被测面垂直,同一点不可弹击两次,每一测区弹击16次,将每一测区所测回弹值去掉3个最大值与3个最小值之后取平均值得到该测区的回弹值,取各测区回弹平均值作为该箱梁的回弹值。

5.2 测试结果对比分析

将箱梁回弹测试结果,根据《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》^[18](JGJ/T 23—2001),查表得出混凝土箱梁的抗压强度。按照每个箱梁为一组进行列表整理,如表5。

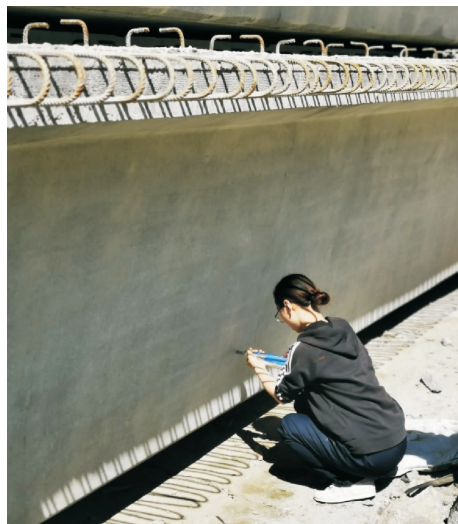


图4 混凝土箱梁回弹测试

表5 混凝土箱梁回弹测试结果

箱梁编号	回弹平均值	混凝土强度/MPa
1	45.9	54.8
2	45.6	54.1
3	47.9	59.7
4	46.0	55.0
5	47.8	59.5
6	46.4	56.0
7	44.7	52.0
8	46.1	55.2
9	47.1	57.7
10	48.2	60.0
11	46.5	56.5
12	46.2	55.5
13	47.6	59.0
14	46.2	55.5
15	50.9	60.0
16	46.9	57.2
17	45.9	54.8
18	46.6	56.5
19	50.2	60.0
20	46.5	56.2

从表5可见,本次试验的高海拔寒冷地区混凝土箱梁回弹值在 $44.7\sim 50.9$ 范围,折算后的混凝土抗压强度在 $52.0\text{ MPa}\sim 60.0\text{ MPa}$,平均强度为 56.8 MPa ,远高于混凝土设计规范规定的C50混凝土强度标准值 52.5 MPa 。因此,本次测试的28d后龄期混凝土箱梁的抗压强度完全达到设计要求。

从S10凤县(陕西)至合作(甘肃)高速公路卓尼至合作段ZH09标段桥梁工程混凝土箱梁施工过程和测试结果来看,首先通过室内试验优化了高寒

减水混凝土配合比,在浇筑过程中进行温度控制,并采用蒸汽养护措施进行养护以及其他施工措施,生成的混凝土箱梁能够满足高海拔寒冷环境条件下混凝土结构的强度和稳定性要求。

6 结 论

(1) 对比不掺外加剂和掺入不同外加剂得到的3种高寒混凝土配合比,掺入减水剂或引气剂均可改善混凝土的施工性能。从结果看,高寒减水混凝土后期的立方体抗压强度和抗折强度高于高寒普通混凝土和高寒引气混凝土,且高寒减水混凝土早期立方体抗压强度值比高寒普通混凝土和高寒引气混凝土分别大8.43%和12.26%。本工程根据试验结果选用高寒减水混凝土作为施工配合比,有助于提高高海拔寒冷地区混凝土箱梁的早期抗裂性、保证结构安全和可靠性。

(2) 混凝土搅拌前,对骨料和水进行加热,将混凝土混合料的出料温度控制在20℃左右,运输过程中在混凝土罐车上包裹保温隔热层,降低热量流失,避免混凝土坍落度损失过大或混凝土进入模内温度过低。

(3) 采用智能管理器和智能温度仪协同工作,通过严格控制蒸养管道各处的温度,使梁体内部受热均匀,有效减少了混凝土凝固时裂隙的产生,保证了箱梁梁体达到强度设计要求,并通过现场回弹测试得到验证。

参考文献:

- [1] 房笑. 高速公路小箱梁预制施工技术[J]. 施工技术, 2015, 44(S2): 171-174.
- [2] 杨先凤. 客运专线预应力混凝土箱梁浇筑施工技术[J]. 铁道标准设计, 2008(6): 39-41.
- [3] 刘丹, 孙西欢, 李永业, 等. 高寒地区筑坝碾压混凝土配合比优化设计方法研究[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(3): 137-140.
- [4] 米永刚, 刘云贺. 高寒地区高性能混凝土配合比设计与耐久性研究[J]. 混凝土, 2020(7): 92-95.
- [5] 王维. 高寒地区特大桥混凝土盐冻性能配合比优化研究[J]. 混凝土, 2021(5): 119-122.
- [6] 袁昶, 谢小明. 悬臂现浇箱梁混凝土冬季施工智能温度控制技术[J]. 人民长江, 2021, 52(S2): 153-156.
- [7] 乔明. 某特大桥承台大体积混凝土施工温控关键技术研究及应用[J]. 公路工程, 2019, 44(5): 135-141.
- [8] 温树林, 周建庭, 宋军, 等. 提高高寒地区桥梁混凝土结构耐久性的施工与养护技术[J]. 公路, 2013, 58(11): 105-109.
- [9] 姜浩, 董军, 刘昊苏, 等. 京石客运专线预制箱梁梁体混凝土测温与养护关键技术[J]. 施工技术, 2012, 41(4): 55-57, 91.
- [10] 陶友海. 纤维素纤维混凝土抗冻耐久性劣化规律[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(2): 715-720.
- [11] 王龙志, 王桂玲, 张会冰. 西部高原地区普通强度等级混凝土高性能化技术研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2013(2): 1-5.
- [12] 惠洪义, 邹通, 王超. 高寒地区超宽箱梁C50高性能混凝土配合比设计与应用[J]. 公路, 2017, 62(2): 188-191.
- [13] 孙广滨, 尉洪利. 高海拔高温差地区冬季施工混凝土的质量控制[J]. 公路, 2013, 58(10): 275-279.
- [14] 向敏, 杨从娟. 混凝土箱形梁蒸汽养护温度控制研究[J]. 铁道建筑, 2009(2): 15-17.
- [15] Li X M, Zhu E Y, Zhou Y Z, et al. The fast cooling measures and effect analysis of precast box girders in passenger dedicated lines[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 105-107: 1127-1133.
- [16] 赵文斌, 赵永鹏, 刘建勋. 低温、大温差地区预制混凝土箱梁养护制度研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(8): 38-42.
- [17] 普通混凝土配合比设计规程: JGJ 55—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [18] 回弹法检测混凝土抗压强度技术规程: JGJ/T 23—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.