

文章编号:1671-8879(2019)04-0001-08

# 基于抗裂性能的高寒地区桥面板 混凝土配合比优化设计

郭寅川, 陈志晖, 申爱琴, 李 鹏

(长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

**摘 要:**为解决高寒地区桥面板混凝土早期收缩抗裂性不足的问题,在室内模拟高寒地区桥面板工作环境并通过干缩和塑性收缩试验,研究水灰比、水泥用量和减水剂掺量对高寒环境下桥面板混凝土早期收缩阻裂性能的影响规律;采用扫描电子显微镜(SEM)测试技术对混凝土收缩裂缝的产生和演化过程进行微观剖析,从而提出基于抗裂性能的高寒地区桥面板混凝土配合比设计建议值。研究表明:水灰比是影响高寒地区桥面板混凝土早期收缩性能的重要因素,高水灰比有利于提高 C40 桥面板混凝土早期收缩抗裂性能,也利于早龄期养护水的渗入,但水灰比高于 0.49 时混凝土塑性抗裂性能会呈现劣化趋势;水泥用量增加会显著增大桥面板混凝土 7 d 内的收缩值,加速塑性裂缝的贯通,且水泥用量每增加  $80\text{ kg/m}^3$ ,塑性开裂时间将提前 20 min,贯通开裂时间将缩短 32 min,因此水泥用量应控制在  $260\sim 300\text{ kg/m}^3$  之间为宜;高效缓凝减水剂的掺入会细化混凝土内部初始裂缝,使其在收缩时呈现多向劣化趋势且贯通裂缝宽度也会显著增大,对有工作性能要求的桥面板混凝土,减水剂掺量应控制在  $0.5\%\sim 0.8\%$  之间为宜;桥面板混凝土前 5 d 的收缩值占 7 d 总收缩值的 80% 以上,且在第 5 d 达到峰值,所以应尽可能延长养护时间至第 5 d,以减少早期水化带来的收缩裂缝。

**关键词:**道路工程;配合比建议值;收缩试验;抗裂性能;高寒地区;微观机理

**中图分类号:**U416.216 **文献标志码:**A **DOI:**10.19721/j.cnki.1671-8879.2019.04.001

## Optimization mix design of bridge deck concrete based on crack resistance in alpine regions

GUO Yin-chuan, CHEN Zhi-hui, SHEN Ai-qin, LI Peng

(Key Laboratory of Highway Engineering in Special Region of Ministry of Education,  
Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to solve the early shrinkage cracking problem of bridge deck concrete in alpine regions, the concrete working environment of the alpine regions were simulated, the dry shrinkage and plastic shrinkage tests of water cement ratio were conducted, and the effects of the cement and superplasticizer on the cracking performance of the bridge deck concrete were determined. By using SEM electron microscopy, concrete shrinkage cracks and the evolution process of the micro analysis were clearly identified, and the design proposal for the alpine region

收稿日期:2019-03-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51608047)

作者简介:郭寅川(1983-),男,江西九江人,副教授,工学博士,E-mail:silver007007@163.com。

based on the crack resistance of concrete bridge deck was presented. The results show that the water cement ratio is an important factor affecting the early shrinkage and crack resistance of the concrete bridge panel in the alpine area. The high water cement ratio was helpful in improving the early shrinkage and crack resistance of the concrete deck C40 bridge and it was conducive to the early age curing the infiltration of water. However, a water cement ratio higher than 0.49 would appear inferior when the crack resistance of concrete mixed plastic and the trend increase, the dosage of cement increased significantly in the 7 d panel concrete shrinkage crack, accelerated through shaping, and increased further to  $80 \text{ kg/m}^3$ , shaping the cracking time would advance 20 min, the though time would be shortened 32 min, so based on the dry shrinkage and plastic shrinkage test results, the best mixing amount should be controlled within  $260 \sim 300 \text{ kg/m}^3$ . The superplasticizer was added to refine the initial crack concrete, which made it appear more deterioration trend and its meso crack width was in contraction increased for bridge deck concrete work requirements, the content should be controlled between  $0.5\% \sim 0.8\%$ ; 5 d before the bridge deck concrete shrinkage value accounted for more than 7 d total shrinkage of  $80\%$ , and reached the peak at fifth days, it should be as far as possible to extend the curing time to fifth days to reduce early the hydration shrinkage crack. 1 tab, 13 figs, 23 refs.

**Key words:** road engineering; recommended value of mix proportion; shrinkage test; anti cracking performance; alpine region; microscopic mechanism

## 0 引言

新疆地区地理位置特殊,全疆大部分属于典型的高寒区域,大温差、干湿交替频繁、高寒等对混凝土抗裂性能提出了较高的要求<sup>[1-2]</sup>,冻胀破坏、温度应力、氯离子侵蚀等问题已经严重影响了桥梁的抗裂性能。桥梁运营过程中会出现不同形式的开裂。新浇筑的桥面板断面较厚且导热性差,水泥水化产生的热量较多,绝热升温较大,硬化中的水化热聚集在内部难以散发,加之新疆地区昼夜温差变化较大且迅速,白天的曝晒与夜晚的寒冻使得桥面板内部因温度非线性梯度分布与水分蒸发产生的温度应力与湿度应力快速增长;且桥面板为薄壁型结构,中心最高温度处距表面最低温度处的距离较小,受外界气温以及湿度影响更为明显,一旦外界应力超过面板自身的弯拉强度便会出现裂缝、裂纹、裂隙等各种开裂现象,从而对桥梁造成不可逆转的破坏。裂缝的出现不仅影响桥梁的外观,而且对桥梁整体结构稳定性以及服役寿命也会造成影响。

在桥梁工程建设过程中,对桥面板大体积混凝土采取的温控防裂措施主要包括:在混凝土浇筑时加冰,掺粉煤灰,加减水剂、缓凝剂、膨胀剂以及布设冷凝管冷却等,但这些措施存在减缩不彻底,不及时弊病。因此,只有从混凝土基础材料方面入手,减少高寒地区桥面板混凝土的绝热升温,才能达到避

免非荷载裂缝的目的。为此,国内外学者开展了大量的理论与试验研究。Wright 等研究发现,干缩的根源在于早期水化引起的耗水速率大于外界水的迁移速率,从而导致了绝对体积的减缩,仅通过早期养生的外部补水很难达到及时的补水减缩作用,只有通过减少早期的水化放热,从源头控制体积收缩<sup>[3-4]</sup>。Aitcin 等从物理力学与热力学角度,揭示出高强混凝土水灰比对塑性收缩的影响在于内部结构的密实度,密实度越高,混凝土弹性模量与弯拉强度越高,从而可抵抗更高的湿度以及温度梯度变化所产生的内应力<sup>[5]</sup>。张武满等研究了粗骨料特性对混凝土干缩性能的影响,指出骨料弹性模量、粒径以及自身的干缩系数对混凝土收缩性有重要影响<sup>[6-7]</sup>。韩宇栋等对不同粗骨料体积分数下的高强混凝土的抗弯强度、早期自收缩及干收缩等性能进行研究,结果表明在  $0\% \sim 50\%$  范围内,随着粗骨料体积分数的增大,其力学性能呈现改善趋势,同时早期收缩明显降低,早期抗裂性能均得到良好调控<sup>[8]</sup>。张哲对减水剂掺量(质量分数,下同)为  $0\% \sim 1\%$  的道路混凝土自收缩进行研究,结果表明减水剂掺量为  $1\%$  的混凝土自收缩为基准混凝土的 2 倍多,并且自收缩的发展主要开始于测试后的  $4 \sim 6 \text{ h}$ ,后期则较为缓慢,且认为对掺加较多减水剂的混凝土适当延长其早期养护时间极为必要<sup>[9]</sup>。杨进等在高水胶比的混凝土中掺加不同类型的减缩剂(内养护 SAP、膨

胀剂、有机减缩剂),对比分析其减缩效果,研究表明SAP适用于密封条件下养护,膨胀剂适用于干燥的养护条件,收缩抑制的主要机理是其可降低混凝土溶液表面张力与内部水分蒸发速率<sup>[10]</sup>。金南国等研究发现,一定量聚丙烯纤维的掺入可有效降低2%~20%的混凝土干燥收缩应变,延缓混凝土的开裂并减小裂缝宽度<sup>[11]</sup>。叶成杰等认为,大体积混凝土拆模后微裂纹的产生原因是残留水分引起的冻胀力超过自身的弯拉强度造成塑性开裂<sup>[12-13]</sup>。国内外许多重大工程也都考虑了混凝土结构物的收缩裂缝问题,并积极采取温控防裂措施以减少裂缝的产生<sup>[14]</sup>。综上,以往研究主要集中在普通环境下混凝土组成材料参数的影响与温控防裂措施优化方面,但对大温差、干燥、高寒地区早期桥面板混凝土抗裂性研究较少。在这种环境下无论是蒸养、温控还是其他养护方式都难以控制混凝土开裂<sup>[1]</sup>,而温湿度不确定性的变化必然引起应力变化加剧,从而导致混凝土收缩更加剧烈。

新疆高寒地区日照时间较其他地区更长,紫外线强度较高,混凝土内部水分损失较慢,但表层水分损失较快,这种内外水分散失速率不同导致内外收缩不同步,从而使得内部混凝土对表面收缩约束时易产生塑性收缩开裂;桥梁混凝土在凝结硬化过程中,一部分化学结合水用于水化反应形成水泥骨架,另一部分水分则逐步蒸发,形成干燥收缩,这2种收缩占混凝土早期收缩的比例较大。为此,本文在室内模拟高寒地区的桥面板工作环境,选用干缩与塑性收缩试验研究水灰比、水泥用量和减水剂掺量对桥面板混凝土抗裂性能的影响规律,并提出基于抗裂性能的配合比设计建议值;同时采用扫描电子显微镜(SEM)测试手段,分析高效缓凝减水剂对高寒地区桥面板混凝土收缩阻裂性能的影响机理。该研究成果可为高寒地区桥梁混凝土耐久性设计提供一定参考。

## 1 试验原材料及方案设计

### 1.1 试验原材料

水泥为普通硅酸盐水泥(42.5R),比表面积为413 m<sup>2</sup>/kg;粗集料为4.75~9.5 mm天然碎石,9.5~26.5 mm卵石;砂为IOS砂;粉煤灰为I级粉煤灰,细度为2.7%;外加剂为FDN-15高效缓凝减水剂,掺量取胶凝材料质量的0.5%~1.0%。

### 1.2 试验影响因素设计

桥面板混凝土设计强度为C40,结合高寒地区

桥面板混凝土抗裂性要求及试验特点,认为:水灰比大小决定了胶凝材料水化速率、胶结浆体初始孔隙含水量和孔径分布,从而对寒区桥面板混凝土水分蒸发速率产生影响;水泥用量决定水化放热速率与水化进程,进而影响混凝土早期硬化及干燥收缩值;高效缓凝减水剂的掺入不仅可使混凝土浇筑成型后在其内部形成大量连通孔道,从而减轻由于湿度变化引起的应力集中现象,还可显著提高桥面板混凝土的工作性能<sup>[15]</sup>。故本文选取不同的水灰比、水泥用量与高效缓凝减水剂掺量作单因素分析,并综合混凝土干缩与塑性收缩的影响效果,提出高寒地区桥面板混凝土的配合比设计建议值。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 干燥收缩试验方法

混凝土早期干燥收缩试验参照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009),试验装置和试件如图1所示。新疆地区冰冻期较长,平均气温在0℃以下,大部分地区平均气温为-22℃~-10℃<sup>[16]</sup>。将混凝土试件放入模拟高寒地区的温湿循环室内养护,并架设千分表进行测试,设定温差为12℃(模拟温度范围为-22℃~-10℃)、湿度为20%~40%;前3 d每隔2 h对千分表进行读数并测定混凝土试件的质量变化;3 d后每隔4 h进行一次测量,每组混凝土试件设置3组平行试验,数据取平均值且变异性在15%以内。

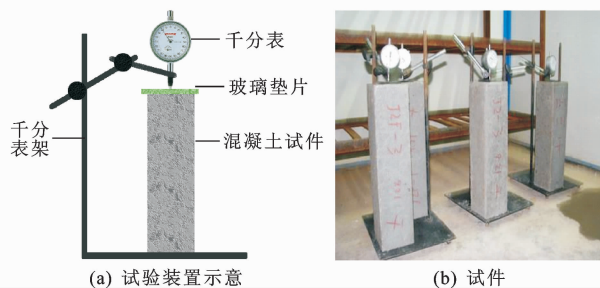


图1 混凝土干缩值测试装置及试件

Fig. 1 Concrete drying shrinkage testing device and sample

#### 1.3.2 塑性收缩试验方法

塑性收缩装置采用中国西部交通建设项目《道路混凝土组成设计研究》试验装置<sup>[16]</sup>,如图2所示。试件尺寸为500 mm(长)×360 mm(宽)×70 mm(高),试件底部设置3根弯曲钢板对混凝土约束限制。试件抹面后应立即覆盖保鲜膜,2 h后去除保鲜膜,将试件放置于环境试验箱中,控制环境箱温差为12℃(-10℃~-22℃)、湿度为20%~40%、风速为8 m/s;5 h后拍摄试件照片观察其开裂情况。塑性收缩试验24 h后结束,测量试件裂缝宽度

及长度,每组混凝土试件设置 3 组平行试验,数据取平均值且变异性在 10% 以内。

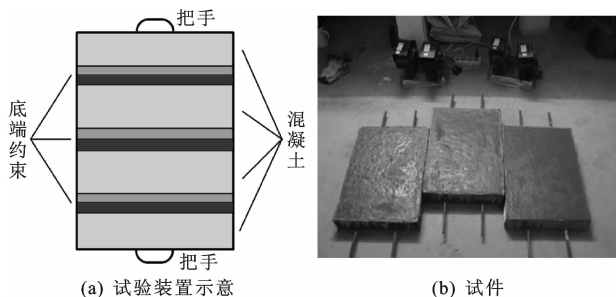


图 2 混凝土塑性收缩试验装置及试件

Fig. 2 Concrete plastic shrinkage test device and sample

## 2 试验结果与分析

### 2.1 各因素对干燥收缩的影响规律及机理分析

#### 2.1.1 水灰比对干缩性的影响

参考文献[16]研究成果,本节着重考察水灰比为 0.39~0.49 内的桥面板混凝土(水泥用量  $306 \text{ kg/m}^3$ ),测定混凝土 7 d 龄期内的早期干缩值和水分蒸发量,结果如图 3、图 4 所示。

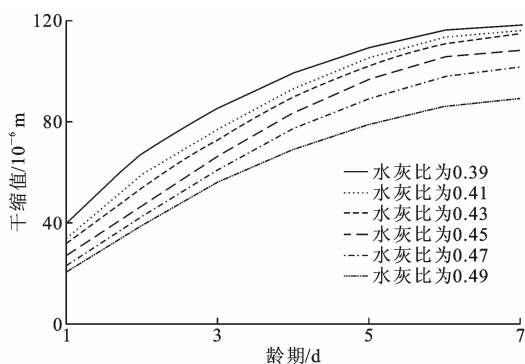


图 3 不同水灰比下的早期干缩值随龄期的变化

Fig. 3 Early drying shrinkage changes with age under different water binder ratios

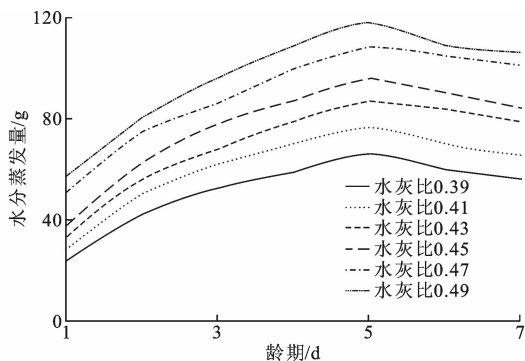


图 4 不同水灰比下的水分蒸发量随龄期的变化

Fig. 4 Water evaporation changes with age under different water binder ratios

分析图 3、图 4 可知:5 d 之前,6 组混凝土试件的早期干缩值与水分蒸发量发展迅速,5 d 后均趋于平缓;当水灰比增大时,早期干缩值也显著减少,水灰比 0.49 的 7 d 干缩值仅为水灰比 0.39 干缩值的 75%;水分蒸发量的变化规律与早期干缩值相反,相同龄期内,水分蒸发量随水灰比的增大而增加。基于材料学分析,笔者认为初始失水主要为自由水,且水灰比越大,自由水含量越多,随着龄期的增长其失水量也越多;由于混凝土试件主要为大孔,故在失水收缩时其早期干缩值也较细孔低,宏观表现为水灰比低的混凝土,早期收缩值较大,水分蒸发量较小。同时,分析比较前 5 d 的早期干缩值也可发现,其占到 7 d 总干缩值的 80%。由于新疆高寒地区气候寒冷干燥,桥梁混凝土的干缩开裂多发生在早期,所以应尽可能延长高寒地区混凝土的养生期至第 5 d,以利于对桥面板混凝土的早期干缩进行控制<sup>[17]</sup>。

#### 2.1.2 水泥用量对干缩性的影响

保持水灰比 0.45 不变,根据《混凝土耐久性设计规范》(GB/T 50746—2008)确定水泥用量范围,通过测定桥面板混凝土的早期干缩值及水分蒸发量,得出其影响规律如图 5、图 6 所示。

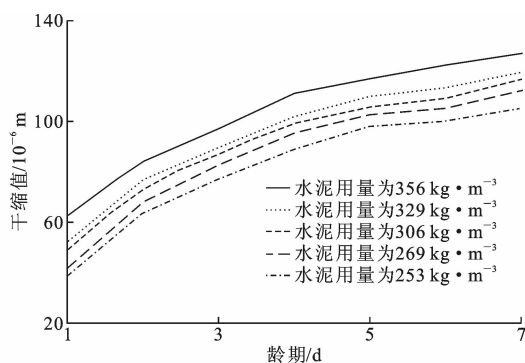


图 5 不同水泥用量下的早期干缩值随龄期的变化

Fig. 5 Early drying shrinkage changes with age under different cement contents

分析图 5、图 6 可知:随着桥面板混凝土水泥用量的增加,其早期干缩值不断增大,水泥用量为  $253 \text{ kg/m}^3$  的混凝土 7 d 干缩值为  $1.05 \times 10^{-4} \text{ m}$ ,而水泥用量为  $356 \text{ kg/m}^3$  的混凝土 7 d 干缩值可达到  $1.27 \times 10^{-4} \text{ m}$ ;水泥用量由 306 减至  $269 \text{ kg/m}^3$  时,水分蒸发量也有明显降低。这是由于水泥用量增加会减小骨料体积,而水泥石的孔隙率一般比骨料大,这可为自由水的蒸发提供更多的通道<sup>[18]</sup>,从而加快了混凝土的水分蒸发与干燥收缩。所以,基于混凝土干缩性,高寒地区桥面板混凝土的水泥用量应控制在

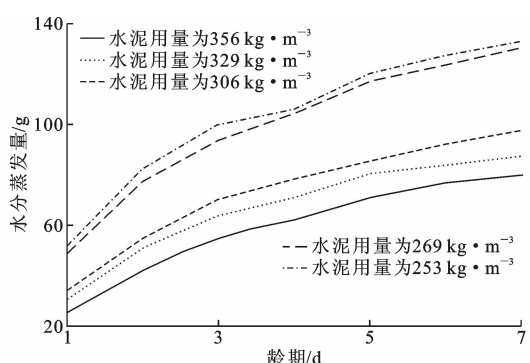


图 6 不同水泥用量下的水分蒸发量随龄期的变化

Fig. 6 Water evaporation changes with age under different cement contents

300 kg 以内。

### 2.1.3 减水剂掺量对干缩性的影响

桥面板由于钢筋密布,设计坍落度一般为 100~120 mm,故选取减水剂掺量为 0.5%~1.0%的混凝土,测定其早期干缩值及水分蒸发量,并与基准混凝土(未加减水剂)进行对比,试验结果如图 7、图 8 所示。

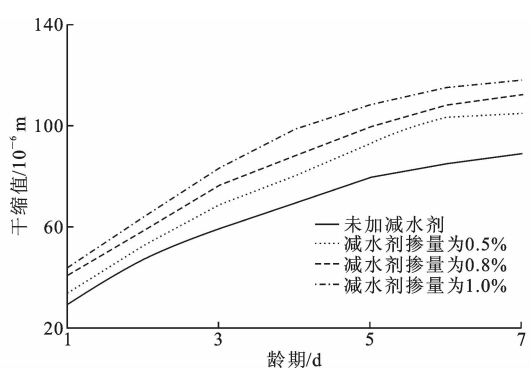


图 7 不同减水剂掺量下的早期干缩值随龄期的变化

Fig. 7 Early drying shrinkage changes with age under different water reducing agents

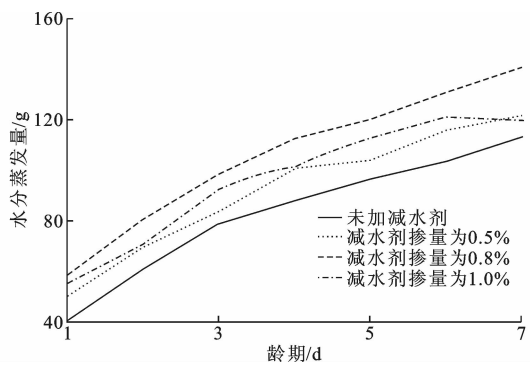


图 8 不同减水剂掺量下的水分蒸发量随龄期的变化

Fig. 8 Water evaporation amount changes with age under different water reducing agents

分析图 7 可知:加入高效缓凝减水剂增加了混

凝土的早期干缩值,其掺量不同,混凝土干缩值的变化也不同;当减水剂掺量为 0.8%时,混凝土干缩值仅为掺量为 0.5%、1.0%时干缩值的 89.0%和 92.9%。由图 8 可知:水分蒸发量也随减水剂掺量的增加呈现先增大后减小的趋势,原因是高效减水剂的加入降低了水的表面张力,有减少收缩的作用;另一方面,也会使水泥孔隙分布细化,进而有增大混凝土干缩值的趋势<sup>[19]</sup>。依据桥面板混凝土对工作性能的要求,并结合试验结果,减水剂掺量应控制在 0.5%~0.8%之间,可使混凝土的早期干缩性能较佳。

## 2.2 各因素对塑性收缩的影响规律及机理分析

### 2.2.1 水灰比对塑性收缩性能的影响

由于干缩试验可知,水灰比对早期干缩性能影响显著。为进一步优化抗裂性能最佳的水灰比范围,取同样水平的水灰比进行塑性收缩试验,测定其初始开裂与贯通开裂时间,如图 9 所示。

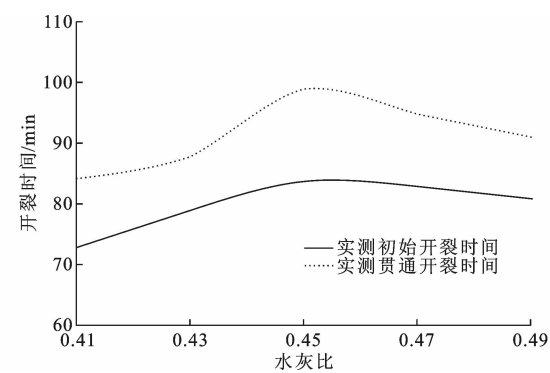


图 9 开裂时间与水灰比的关系

Fig. 9 Relationships between cracking time and water binder ratios

分析图 9 可知,保持桥面板混凝土工作性不变,水灰比由 0.41 增至 0.49 过程中,混凝土初始开裂时间与贯通开裂时间均呈现先增大后减小的趋势,且均在水灰比为 0.45 时达到峰值,此时裂缝从产生至贯通的持续时间最长,表明该条件下混凝土对裂缝扩展的抑制效果最佳。结合理论分析可知,混凝土产生塑性收缩的关键在于凝结前渗水速率和失水速率是否协调。水灰比较低的混凝土内部密实度较高,其收缩应力会由于粒子间距离的减小而显著增大,混凝土一旦开裂很快便达到临界压力造成自身开裂;但水灰比较高时,混凝土因为塑性沉降不均而导致开裂,且裂缝一般位于骨料与砂浆的薄弱界面区,进而也会因应力分布不平衡而导致裂缝的快速贯通<sup>[19]</sup>。由此可见,为抑制桥面板混凝土的开裂与裂缝扩展,高寒地区桥面板混凝土水灰比宜在 0.45~0.49 之间。

### 2.2.2 水泥用量对塑性收缩性能的影响

选取与干缩试验相同的对比方案进行试验,不同水泥用量的桥面板混凝土塑性收缩试验结果如图 10 所示。

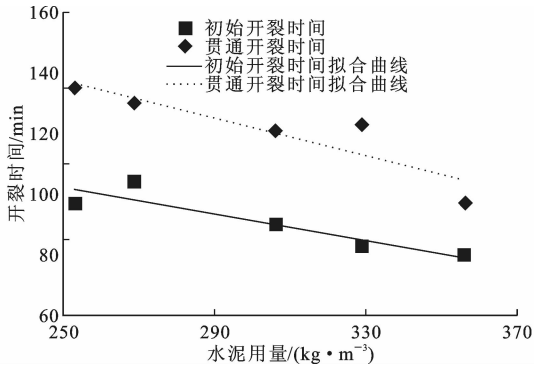


图 10 开裂时间与水泥用量的关系

Fig. 10 Relationships between cement contents and cracking time

分析图 10 可知:水泥用量由 253 增至 356 kg/m<sup>3</sup> 时,初始开裂时间与贯通开裂时间均呈线性减小趋势,且贯通开裂时间下降更为迅速,表明试验范围内随着水泥用量的增加,桥面板混凝土更容易产生裂缝,这是因水泥用量多则水化需水量也越多;另外水泥用量的增多也会导致骨料体积含量减少,刚性较大的骨料对混凝土收缩的抑制效果也会减弱,混凝土处于干燥、高寒环境中,水分散失更为迅速且湿度应力增长也越快,一旦超过混凝土自身强度便会产生开裂<sup>[20]</sup>。水泥用量 253 kg/m<sup>3</sup> 时的贯通开裂时间比 356 kg/m<sup>3</sup> 时显著延长了 32 min,进一步印证了干缩试验得出的结论。综上可得,高寒地区桥面板混凝土水泥用量应控制在 260~300 kg/m<sup>3</sup> 之间为宜。

### 2.2.3 减水剂对塑性收缩性能的影响

由于高效缓凝减水剂对桥面板混凝土的早期干缩性能有劣化趋势,故在上节试验基础上细化出 5 个减水剂掺量测定其初始开裂与贯通开裂时间,并结合干缩试验结果优化出最佳减水剂掺量范围,试验结果如图 11 所示。

分析图 11 可知,与基准混凝土相比,适量加入高效缓凝减水剂有利于延后混凝土的初始开裂时间,但掺量超过 0.6% 时,随着掺量的增加,不仅开裂时间会大幅提前,而且裂缝的扩展速度也会显著加快。

为进一步了解减水剂对混凝土微观裂缝演化的影响,采用 SEM 技术对不同收缩时期的裂缝进行分析,扫描结果如图 12、图 13 所示。

由图 12、图 13 可知:观测时间为 60 min 时,基准混凝土(未加减水剂)的裂缝分布较为集中且条数较少,掺入 1.0% 减水剂后,裂缝分布更加细化,条

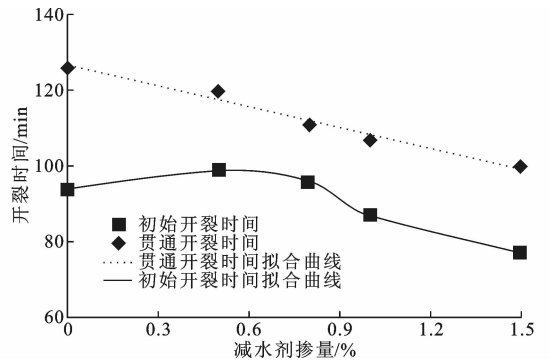
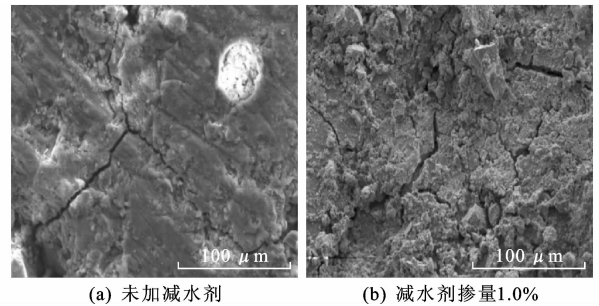


图 11 开裂时间与减水剂掺量的关系

Fig. 11 Relationships between cracking time and water reducing agents

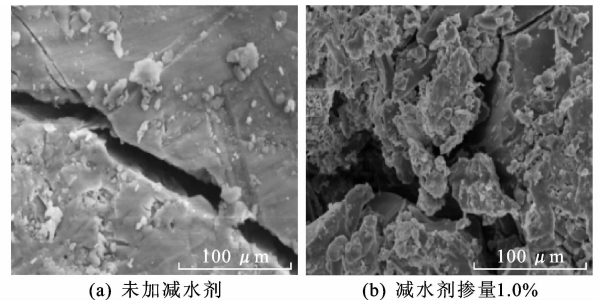


(a) 未加减水剂

(b) 减水剂掺量1.0%

图 12 混凝土塑性收缩 60 min 时的 SEM 图像

Fig. 12 SEM images of concrete shaping shrinkage at 60 min



(a) 未加减水剂

(b) 减水剂掺量1.0%

图 13 混凝土塑性收缩 120 min 时的 SEM 图像

Fig. 13 SEM images of concrete shaping shrinkage at 120 min

数也显著增多,但裂缝宽度没有发生明显变化;对比混凝土在塑性收缩 120 min 后,桥面板混凝土已经产生了贯通裂缝,且大多顺着初始裂缝继续扩展,掺入 1.0% 减水剂的桥面板混凝土裂缝演化方向更加多样,且裂缝宽度也比基准混凝土明显增大。其原因为:掺加减水剂增大了混凝土的流动性,使得骨料在水泥石中的纵向沉降更加无序,从而扰乱了水泥自身的絮凝状态,导致凝结过程中孔隙增多<sup>[21]</sup>;另一方面,由于孔隙数目增多加快了自由水蒸发,也导致裂缝的扩展更加迅速。因此,在满足桥面板混凝土工作性能条件下,应尽可能减少减水剂的掺量,以

抑制裂缝的产生与扩展。

3 基于抗裂性能的桥面板混凝土配合比建议值

综合干燥收缩与塑性收缩试验结果可知:水灰比大于0.45时,混凝土早期干缩值较小且塑性收缩贯通裂缝时间较长,但当其超过 0.49 时,贯通开裂时间会呈现下降趋势又不利于抗冻性能的提升<sup>[22]</sup>;高寒地区大体积桥面板混凝土的水泥用量不宜超过 300 kg/m<sup>3</sup>,否则会导致早期水化热过高而产生贯通开裂,同时用水量也应控制在 138 kg/m<sup>3</sup> 为宜;适量掺入高效缓凝减水剂可显著提高混凝土的工作性能和初始开裂时间,但掺量应控制在较低范围内<sup>[23]</sup>。综上,本文给出基于抗裂性能的高寒地区桥面板混凝土配合比参数建议值,如表 1 所示,其中含气量数据引用了笔者课题组关于高寒地区抗盐冻性能试验结果。

表 1 高寒地区桥面板混凝土配合比设计建议值

Tab.1 Design recommended values of bridge deck concrete anti crack in alpine regions

参数	水灰比	用水量/ (kg·m <sup>-3</sup> )	水泥用量/ (kg·m <sup>-3</sup> )	减水剂 掺量/%	含气量/ %
建议值	0.45~0.49	<138	260~300	0.5~0.8	4.5~6.0

4 结 语

(1)基于室内模拟下的收缩试验与理论分析,提出了基于抗裂性能的高寒地区桥面板混凝土配合比设计建议值,适用于新疆、西藏等冰冻期长且平均气温在-10℃以下的大体积混凝土的设计。

(2)水灰比对寒区混凝土抗裂性能影响显著,且水灰比为 0.45 时,C40 桥面板混凝土早期干缩与塑性收缩性能最佳,水泥用量的增加会显著加快桥面板混凝土的塑性开裂,水泥用量每增加 80 kg/m<sup>3</sup>,塑性贯通开裂时间会加快 30%。

(3)高效缓凝减水剂的加入会细化 C40 桥面板混凝土的初始孔隙分布,掺入比例过大会导致裂缝的扩展且更加无序,演化速度显著加快,对工作性要求为 100~120 mm 的泵送混凝土,减水剂最佳掺量为 0.5%~0.8%。

(4)桥面板混凝土前 5 d 的干缩值占 7 d 总收缩值的 80%以上,所以高寒地区应尽可能延长养护时间至第 5 d,以减少早期水化带来的收缩裂缝。

(5)本文未考虑粉煤灰或其他矿物掺合料掺量

对高寒地区桥面板混凝土抗裂性能的影响,且平板法只能简单描述混凝土起裂与终裂时间,缺乏对于混凝土内部应力状态的直观表征,下一步,将在塑性收缩试验中采用用圆环法配合应力应变采集装置替代现有平板试验以获得更好的试验效果。

参考文献:

References:

[1] 赵文斌,刘建勋,张戎令,等.强风、干寒、大温差地区混凝土箱梁早期抗裂性分析[J].硅酸盐通报,2016,35(10):3253-3257.  
ZHAO Wen-bin, LIU Jian-xun, ZHANG Rong-ling, et al. Strongly windy and dry cold large temperature difference analysis on early cracking of concrete box girder[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016,35(10):3253-3257.

[2] 王复生,孙瑞莲,秦晓娟.察尔汗盐湖条件下水泥混凝土耐久性调查研究[J].硅酸盐通报,2002,21(4):16-22.  
WANG Fu-sheng, SUN Rui-lian, QIN Xiao-juan. The investigation of concrete durability under natural condition of Ca Er Han Salt Lake[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2002,21(4):16-22.

[3] WRIGHT J R, RAJABIPOUR F, LAMAN J A, et al. Causes of early age cracking on concrete bridge deck expansion joint repair sections[J]. Advances in Civil Engineering, 2014,2014(7):1-10.

[4] TAZAWA E I, MIYAZAWA S. Experimental study on mechanism of autogenous shrinkage of concrete [J]. Cement & Concrete Research, 1995, 25 (8): 1633-1638.

[5] AITCIN P C, NEVILLE A M, ACKER P. Integrated view of shrinkage deformation[J]. Concrete International, 1997,19(9):35-41.

[6] 张武满,孙伟.粗骨料对高性能混凝土早期自收缩的影响[J].硅酸盐学报,2009,37(4):631-636.  
ZHANG Wu-man, SUN Wei. Influence of coarse aggregate on early autogenous shrinkage of high-performance concrete[J]. Journal of the Ceramic Society, 2009,37(4):631-636.

[7] ZHANG W, ZAKARIA M, HAMA Y. Influence of aggregate materials characteristics on the drying shrinkage properties of mortar and concrete[J]. Construction and Building Materials, 2013,49:500-510.

[8] 韩宇栋,张君,王家赫,等.基于粗骨料含量的混凝土早龄期收缩调控[J].混凝土,2017(1):56-62.  
HAN Yu-dong, ZHANG Jun, WANG Jia-he, et al. Control on early-age shrinkage of concrete from



- coarse aggregate content aspect[J]. Concrete, 2017(1):56-62.
- [9] 张 哲. 道路混凝土早期收缩及开裂性能研究[D]. 西安:长安大学, 2008.  
ZHANG Zhe. Study on early age shrinkage and cracking performance of road concrete[D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.
- [10] 杨 进, 王发洲, 黄 劲, 等. 不同类型减缩剂减缩效果比较分析[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(1):53-58.  
YANG Jin, WANG Fa-zhou, HUANG Jin, et al. Comparative analysis of reduction effects of different shrinkage reducing agents in concrete[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(1):53-58.
- [11] 金南国, 金贤玉, 田 野. 受约束早龄期混凝土收缩开裂的理论预测和试验研究[J]. 浙江大学学报:工学版, 2007, 41(9):1499-1502, 1507.  
JIN Nan-guo, JIN Xian-yu, TIAN Ye. Theoretical prediction and experimental study on shrinkage cracking of restrained early age concrete[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2007, 41(9):1499-1502, 1507.
- [12] 叶成杰, 赵 建, 邢世海. 高寒地区高性能混凝土干缩性能研究[J]. 煤炭技术, 2008, 27(12):104-105.  
YE Cheng-jie, ZHAO Jian, XING Shi-hai. Study on dry shrinkage performance of high-performance concrete in high cold region[J]. Coal Technology, 2008, 27(12):104-105.
- [13] 黄明琦, 王渭明, 岳 强. 高寒地区大体积混凝土拆模后表面产生微裂纹的原因及防治措施[J]. 建井技术, 2006, 12:22-25.  
HUANG Ming-qi, WANG Wei-ming, YUE Qiang. Cause and prevention measures of fissure occurred on large volume concrete after moulds removed in high cold area[J]. Mine Construction Technology, 2006, 12:22-25.
- [14] 李树彬. 青藏高原多年冻土区桥梁混凝土抗裂施工技术[J]. 铁道建筑, 2007(9):23-24.  
LI Shu-bin. Construction technology of bridge concrete crack in permafrost region of Qinghai Tibet Plateau[J]. Railway Construction, 2007(9):23-24.
- [15] 刘娟红, 李 康, 宋少民, 等. 石膏对石灰石粉水泥基材料水化及硬化性能的影响[J]. 材料导报, 2017, 31(4):105-110.  
LIU Juan-hong, LI Kang, SONG Shao-min, et al. Effect of gypsum on hydration and hardening properties of limestone powder cement-based materials[J]. Materials Review, 2017, 31(4):105-110.
- [16] 刮 俊. 新疆高寒地区桥梁混凝土耐久性研究[D]. 西安:长安大学, 2010.  
GUA Jun. Study on the durability of concrete bridges in high-cold region of Xinjiang[D]. Xi'an: Shaanxi: Chang'an University, 2010.
- [17] 谢 丽, 吴胜兴. 水灰比对混凝土早期收缩影响的研究[J]. 建筑科学, 2007, 23(1):54-57.  
XIE Li, WU Sheng-xing. Research on influence of water-cement ratio on early-age shrinkage of concrete[J]. Building Science, 2007, 23(1):54-57.
- [18] 刘建敏. 引气剂在高寒地区水泥混凝土路面施工中的应用[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版, 2007, 30(2):120-123.  
LIU Jian-min. The application of air-entraining agent in cement concrete pavement construction in high cold area[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University: Natural Science Edition, 2007, 30(2):120-123.
- [19] 王善民, 衣书正, 杨 琴, 等. 水泥用量及水灰比对路用水泥混凝土塑性收缩的影响[J]. 交通科技, 2008(6):57-59.  
WANG Shan-min, YI Shu-zheng, YANG Qin, et al. Effects of cement content and  $w/c$  on plastic shrinkage of cement concrete pavement[J]. Traffic Science and Technology, 2008(6):57-59.
- [20] 周胜波, 申爱琴, 田 丰, 等. 基于多元线性回归理论的道路混凝土干缩预测模型[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2014, 34(3):28-34.  
ZHOU Sheng-bo, SHEN Ai-qin, TIAN Feng, et al. Drying shrinkage prediction model for pavement concrete based on multivariate linear regression theory[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2014, 34(3):28-34.
- [21] 范树景, 王培铭. 聚丙烯纤维增强玻化微珠保温砂浆的干缩开裂性能[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(1):118-123.  
FAN Shu-jing, WANG Pei-ming. Drying shrinkage and cracking performance of polypropylene fiber reinforced glazed hollow beads thermal insulation mortar[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(1):118-123.
- [22] 郭寅川, 申爱琴, 王 剑, 等. 高寒地区桥梁混凝土抗氯离子渗透性能研究[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(3):425-429.  
GUO Yin-chuan, SHEN Ai-qin, WANG Jian, et al. Resistance to chloride ion permeation to concrete bridges in alpine regions[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(3):425-429.
- [23] 刘斯凤, 万亭亭, 王培铭. EVA 改性砂浆早龄期收缩应力/应变规律[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(5):791-796.  
LIU Si-feng, WAN Ting-ting, WANG Pei-ming. Shrinkage stress-strain evolution of mortars modified by EVA polymer at early age[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(5):791-796.