

高速公路高性能混凝土试验检测分析

皇舟龙

(云南交通土木工程检测有限公司, 云南 昆明 650500)

摘 要 随着我国高速公路建设规模的持续扩大, 工程结构对混凝土材料的强度、耐久性与稳定性提出了愈发严格的要求。高性能混凝土凭借其优异的力学性能与抗侵蚀能力, 在道路工程领域的应用日益广泛。为确保高性能混凝土的材料性能完全匹配工程建设标准, 需通过系统规范的试验检测流程对其质量进行全面评价。本文结合高速公路工程实践, 系统总结高性能混凝土试验检测的核心内容与关键技术要点, 以期提升检测工作的精准性与可靠性提供参考, 最终实现增强高速公路结构耐久性能、延长工程使用寿命的目标。

关键词 高速公路; 高性能混凝土; 试验检测

中图分类号: U416.216

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.015

0 引言

在高速公路工程建设中, 混凝土结构承担着桥梁、涵洞及附属构件等重要功能, 其材料性能直接影响工程质量与结构安全。随着交通荷载不断增加, 再加上服役环境日趋复杂, 传统混凝土在强度和耐久性方面已难以完全满足工程需求, 高性能混凝土因此得到广泛应用。然而, 高性能混凝土的材料组成复杂, 其性能受水泥、骨料、矿物掺和料及外加剂等多种因素共同影响, 需通过科学的试验检测手段对其性能进行系统评估, 为优化配合比设计并提升施工质量提供可靠依据。

1 高速公路高性能混凝土试验检测内容

1.1 抗压强度检测

抗压强度检测是高速公路高性能混凝土试验检测中的基础项目, 也是评价混凝土承载能力最直接的指标^[1]。通过抗压强度试验, 可以判断混凝土是否满足结构设计要求, 并为后续施工质量控制提供重要依据。高速公路工程中常用的高性能混凝土强度等级包括 C30、C40、C50 等, 不同等级混凝土的抗压能力直接关系到桥梁、涵洞以及附属结构的安全稳定, 必须采取规范化试验手段进行检测。试验通常采用标准立方体或圆柱体试件进行, 其中立方体试件尺寸一般为 150 mm×150 mm×150 mm, 圆柱体试件尺寸为 Φ150 mm×300 mm。试件按照设计配合比进行制作, 在标准养护条件下进行养护, 养护环境温度保持在 20±2 ℃, 相对湿度控制在 95% 以上, 养护时间通常为 28 d。达到规定龄期后, 将试件放入压缩试验机中进行加载测试。试验机需要

具备足够的承载能力, 并应满足现行标准对量程、精度等级及加载控制的要求, 以确保试验过程稳定可靠。试验过程中应均匀施加压力, 使试件在受压状态下逐渐产生裂缝并最终破坏, 同时记录试件破坏时的最大荷载值。根据试件受压面积和破坏荷载, 可以计算出混凝土的抗压强度值, 计算公式为:

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

式(1)中, f_c 为抗压强度 (MPa), P 为破坏荷载 (N), A 为试件受压面积 (mm^2)。检测过程中通常采用多组试件进行试验, 检测过程中每组试件通常取 3 个, 具体取样组数和代表值判定应结合检测批次及现行检验评定标准确定, 以减少个别试件偏差带来的影响。在高速公路工程质量控制中, 抗压强度检测不仅用于验证混凝土是否达到设计等级, 还能反映原材料质量、配合比设计和施工养护等多方面因素的综合效果。高性能混凝土的抗压强度评定应结合设计强度等级及现行检验评定标准进行, 以保证结构具有良好的承载性能和使用安全性^[2]。

1.2 力学性能检测

在高速公路高性能混凝土检测体系中, 除抗压强度外, 还需通过多项力学性能试验对材料的受力行为进行全面评价。高速公路在长期服役过程中不仅承受竖向荷载, 还会受到弯曲、振动以及温度变化等多种作用, 因此必须通过力学性能检测掌握混凝土在不同受力状态下的表现。常见检测项目包括弹性模量、抗折强度等指标, 反映混凝土在荷载作用下的变形能力及抵抗裂缝产生的能力^[3]。弹性模量是描述混凝土在弹性变

作者简介: 皇舟龙 (1990-), 男, 本科, 研究方向: 公路工程。

形阶段抵抗应变能力的重要参数,其大小直接影响结构刚度和变形控制水平。试验过程中应依据现行标准选用规定尺寸的试件。公路工程中抗压弹性模量试件常采用150 mm×150 mm×300 mm棱柱体,也可采用高径比为2:1的圆柱体试件,如Φ150 mm×300 mm,通过试验机施加荷载,同时记录应力与应变变化情况,根据应力—应变关系计算弹性模量,计算公式为:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad (2)$$

式(2)中, E 为弹性模量(GPa), $\Delta\sigma$ 为应力变化量(MPa), $\Delta\epsilon$ 为应变变化量。在高速公路工程中,不同强度等级混凝土的弹性模量存在差异,通常处于较高水平,能够反映混凝土在受力状态下保持结构稳定的能力。如果弹性模量偏低,结构在车辆荷载作用下会产生较大变形,从而影响桥梁及路面结构的使用性能。抗折强度试验则主要用于评价混凝土抵抗弯曲破坏的能力。试验通常采用100 mm×100 mm×400 mm矩形梁试件,在三点弯曲试验装置上进行加载,当试件产生裂缝或发生断裂时记录破坏荷载,并根据试验参数计算抗折强度,其计算公式为:

$$F_f = \frac{PL}{bd^2} \quad (3)$$

式(3)中, F_f 为抗折强度(MPa), P 为破坏荷载(N), L 为支座跨度(mm), b 与 d 分别为试件宽度和高度(mm)。抗折强度与混凝土抗裂性能密切相关,在桥面结构及路面构件中尤为重要。一般情况下,C30混凝土的抗折强度约为4 MPa~5 MPa,而C50混凝土可达到6 MPa~7 MPa。随着混凝土强度等级提高,其抗弯能力、抗裂能力也随之增强。通过弹性模量与抗折强度等指标的检测,可以更加全面地评价高性能混凝土在受力过程中的综合性能,使试验检测结果更符合高速公路工程实际使用需求。

1.3 耐久性能检测

1. 氯离子渗透性检测。氯离子渗透性是评价混凝土抵抗腐蚀介质侵入能力的重要指标^[4]。氯离子进入混凝土内部后容易引起钢筋锈蚀,从而影响结构安全,因此需要通过规范试验检测其渗透能力。公路工程中常用的抗氯离子渗透试件尺寸为Φ100 mm×50 mm,试验结果通常以氯离子迁移系数等指标表示。氯离子迁移系数越低,说明混凝土内部结构越致密,越能够有效阻止腐蚀性介质进入材料内部,从而延长结构使用寿命。

2. 抗冻融循环检测。在寒冷地区,高速公路混凝土会反复经历冻结与融化的环境变化,如果材料抗冻性能不足,容易产生表面剥落、内部裂缝,需要通过冻融循环试验进行检测。耐久性能试验现行国家标准已更新为《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2024),公路工程还可结合《公路工程水泥及

水泥混凝土试验规程》(JTG 3420—2020)开展检测。结合公路工程常用试验方法,快冻法通常采用100 mm×100 mm×400 mm棱柱体试件,每组3根。试件在达到规定龄期前4 d应置于20±2℃水中浸泡,且水面至少高出试件20 mm,随后开展冻融循环试验。检测过程中一般结合试件质量变化、相对动弹性模量变化及外观损伤情况,对混凝土抗冻性能进行综合评价。

3. 抗渗与耐磨检测。抗渗性能是衡量混凝土抵抗水分渗透能力的重要指标。检测时应依据现行标准采用规定试件型式进行试验,公路工程中常用的抗渗试件包括上口直径175 mm、下口直径185 mm、高150 mm的锥台试件,或直径与高度均为150 mm的圆柱体试件。试验过程中按规定加压程序进行检测,并结合试件渗水情况或抗渗等级评价混凝土抵抗水分渗透的能力。

4. 高温性能检测。在隧道或火灾环境中,高温会对混凝土结构产生影响,因此需要对其高温性能进行检测。试验时可结合研究目的和现行相关试验方法,将混凝土试件置于高温炉中进行升温处理,随后冷却并开展抗压强度、弹性模量及表面裂纹检测^[5]。高温作用后,应结合混凝土残余抗压强度、弹性模量变化及表面损伤状况,对其高温后性能进行综合评价。不同强度等级混凝土在高温环境下的性能衰减程度存在差异,因此需要结合试验结果具体分析其耐高温能力。

1.4 微观性能检测

在高速公路高性能混凝土试验检测中,微观结构分析能够进一步揭示材料内部结构特征,从而解释其宏观力学性能和耐久性能形成的原因^[6]。通过微观检测,可以观察混凝土内部孔隙结构、界面结合状态以及水化产物分布情况,为配合比优化、材料改进提供依据。扫描电子显微镜(SEM)是常用的微观检测技术之一,该技术利用电子束扫描样品表面,可以获得高分辨率图像,从而观察水泥浆体结构、骨料与浆体界面及微裂纹分布情况。基于SEM图像能够识别混凝土内部孔隙大小及分布状态,并评价其致密程度。高性能混凝土在加入硅灰、粉煤灰等矿物掺合料后,内部微孔数量会明显减少,材料结构更加致密。经过28 d标准养护后,微观结构分析表明混凝土内部孔隙结构能够得到明显优化,从而提升混凝土的抗渗能力。X射线衍射技术(XRD)主要用于分析混凝土中的矿物组成及水化产物变化,通过对衍射图谱进行分析,可以判断水泥水化反应的进行程度及C-S-H凝胶等主要产物的生成情况。随着矿物掺合料的加入,水泥体系中生成的C-S-H凝胶数量增加,使混凝土内部结构更加稳定,其强度水平也随之提高。在部分情况下,掺加硅灰后混凝土中C-S-H凝胶生成更加充分,有助于提升材料内部结构的

稳定性。此外,还可以利用电子探针分析技术(EPMA)对混凝土进行微区元素分析,该方法能够显示 Si、Al、Ca 等元素在水泥基体中的分布情况。元素分布越均匀,说明水化反应越充分,材料结构稳定性越高。基于 SEM、XRD 及 EPMA 等多种微观检测手段的综合分析,可以全面掌握高性能混凝土内部结构特征,从而解释其高强度、高致密性及良好耐久性能的形成机制,为高速公路工程混凝土材料优化提供可靠依据。

2 高速公路高性能混凝土试验检测要点

2.1 科学选择胶结材料

试验人员在材料选择阶段应对水泥及矿物掺合料进行检测,确保其强度等级满足工程要求。一般应优先选用强度等级不低于 P·O 42.5 的硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥,以满足高性能混凝土的使用要求。由于高强度水泥在水化过程中容易产生较大的水化热,因此在保证混凝土强度的前提下,应合理控制水泥用量,以减少结构开裂风险^[7]。为了进一步优化胶结体系,可在混凝土中适量掺入粉煤灰或矿渣粉。I 级粉煤灰的掺量一般控制在 15%~25%,若使用 II 级粉煤灰,其掺量通常控制在 10%~15%。需要注意的是,当粉煤灰掺量超过 30% 时,混凝土碳化速度会加快,因此需通过试验调整水灰比进行控制。若采用高炉矿渣粉作为矿物掺合料,其掺量一般控制在 20%~25%,并需进行 28 d 抗压强度检测,以确认其满足工程使用要求。

2.2 优化骨料选择

在选择细骨料时,应优先选用颗粒级配合理、质地坚硬且洁净的天然中粗河砂,其细度模数通常控制在 2.6~3.2 范围内,以保证混凝土具有良好的密实性。如果需要使用机制砂,应选择颗粒形态较好、级配合理的中砂,以提升混凝土结构稳定性。在骨料来源方面,一般不建议使用山砂或海砂,避免其成分差异对混凝土性能产生影响。同时,还需要对细骨料中的有害物质含量进行检测。当混凝土强度等级<C30 时,含泥量应≤3.0%;当强度等级为 C30~C45 时,含泥量应≤2.5%;当强度等级≥C50 时,含泥量应控制在≤2.0%。此外,泥块含量、云母含量以及轻物质含量均应≤0.5%,氯离子含量应<0.02%,硫化物和硫酸盐含量(按 SO₃ 质量计)应≤0.5%。

2.3 合理选用减水剂

高速公路工程中通常采用聚羧酸系高性能减水剂,该类减水剂能在减少拌合用水量的同时保持混凝土良好的流动性。试验人员在使用减水剂之前,应对其减水率、凝结时间及对混凝土强度发展的影响进行检测,

并对其与水泥及矿物掺合料之间的适应性进行试验^[8]。在工程应用中,减水剂掺量一般控制在 0.8%~1.2% 范围内,通过调控掺量可将水胶比降低至 0.35~0.40,从而提高混凝土的抗压强度及抗渗性能。同时,减水剂还能改善混凝土拌合物的施工性能,使其在浇筑、振捣和抹面过程中更加顺畅。

2.4 配合比与性能控制

试验人员需要结合工程施工条件,对材料比例进行多次试验调整,以获得性能稳定的配合比方案。以 C50 高性能混凝土为例,其配合比设计应结合原材料性能、施工条件及目标强度等级进行优化确定,并通过试拌和性能检测不断调整水胶比、砂率及外加剂掺量。在试验检测过程中,需要通过抗压强度和耐久性能试验对该配合比进行验证。同时,通过优化骨料级配将砂率控制在 38%~42% 范围内,以提高混凝土界面结合强度和整体稳定性。在施工阶段还应加强振捣密实度控制,并适当延长养护时间,一般养护周期可控制在 14 d 以上,以促进矿物掺合料的二次水化反应,使混凝土后期强度持续增长。

3 结束语

通过对高速公路高性能混凝土试验检测工作的分析可以看出,只有在试验检测阶段对各类材料进行严格控制,并结合检测数据不断优化配合比方案,才能确保混凝土具有良好的耐久性能。随着检测技术不断发展,高性能混凝土试验检测将更加科学化、精细化,为高速公路工程结构长期稳定运行提供更加可靠的技术保障。

参考文献:

- [1] 何家杰.高速公路高性能混凝土试验检测研究[J].运输经理世界,2025(26):22-24.
- [2] 陈方友.高速公路工程高性能混凝土试验检测研究[J].汽车周刊,2025(07):210-212.
- [3] 袁天锋.基于科技创新驱动的高速公路高性能混凝土试验检测体系构建[J].张江科技评论,2025(02):90-92.
- [4] 李建娇.高速公路工程高性能混凝土试验检测研究[J].工程技术研究,2024,09(20):120-122.
- [5] 陈平.高速公路高性能混凝土力学性能及耐久性试验检测研究[J].交通科技与管理,2024,05(12):100-102.
- [6] 秦彩秋.高速公路隧道高性能混凝土耐久性试验检测研究[J].运输经理世界,2024(15):156-158.
- [7] 陈东浩.高速公路高性能混凝土强度试验分析[J].工程机械与维修,2023(01):90-92.
- [8] 高盼.高速公路高性能混凝土试验检测[J].交通世界,2022(13):143-144.