

无机结合料稳定材料配合比设计与试验检测研究

胡志成

新疆北新科技创新咨询有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000

[摘要]无机结合料稳定类材料为公路工程基层、底基层中最常用的半刚性材料种类之一,在混合料配制比例及试样的检验质量对路基结构的耐久性和承重有较大影响。文中针对无机结合料稳定材料配比设计以及试件制作等两个关键的问题进行深入的研究。介绍了无机结合料稳定材料的相关技术指标,对原材料的选择、配比的设计原则及水泥剂量的设计原则,含水量的设计以及级配的选择进行了详细的论述。并就原材料力学性能测试、击实试验、无侧限抗压强度试验、含水率测定以及压实度测定等相关试验检测手段进行了系统的介绍,在此基础上还提出了一整套覆盖整个施工过程的质量控制体系。希望可以更好的为基层工程的实际施工过程提供一些借鉴作用。

[关键词]无机结合料稳定材料; 配合比设计; 试验检测; 质量控制

DOI: 10.33142/ec.v9i8.20236

中图分类号: TQ172.1

文献标识码: A

Research on the Design and Experimental Testing of the Mix Proportion of Inorganic Binder Stabilized Materials

HU Zhicheng

Xinjiang Beixin Science and Technology Innovation Consulting Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

Abstract: Inorganic binder stabilized materials are one of the most commonly used semi-rigid materials in the base and subbase of highway engineering. The mix proportion and sample inspection quality have a significant impact on the durability and load-bearing capacity of the roadbed structure. The article conducts in-depth research on two key issues: the design of stable material ratios for inorganic binders and the production of specimens. The relevant technical indicators of inorganic binder stabilized materials were introduced, and detailed discussions were made on the selection of raw materials, the design principles of proportioning, the design principles of cement dosage, the design of moisture content, and the selection of gradation. And a systematic introduction was made on the testing methods of mechanical properties of raw materials, compaction tests, unconfined compressive strength tests, moisture content determination, and compaction degree determination. Based on this, a complete quality control system covering the entire construction process was also proposed, so as to provide some reference for the actual construction process of grassroots projects.

Keywords: inorganic binder stabilized material; mix proportion design; experimental testing; quality control

引言

在公路工程项目的建设,基层是承受道路车辆荷载并将之传给路基的中间层次,基层的质量问题影响着整个路段的服务期以及行驶的安全系数,在此情况下无机结合料稳定材料具有良好的强度高、整体性佳,抗水损能力强等特点,成为了我国高等级公路基层、底基层的主要材料种类,《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG 3441-2024)从2024年5月1日开始实施,新修订版增加了无机结合料稳定材料密度测定方法(真空压实法)、动态弯拉回弹模量试验方法、拉伸试验方法、单轴压缩模量试验方法和疲劳试验方法五种新型的试验项目。新规定的

发布施行使无机结合料稳定材料混合设计的技术要求及试验检测的准确性有了新的提升,更有利于加强公路基层工程的质量监管。

1 无机结合料稳定材料的特点

无机结合料稳定材料是在粉碎成粉末或者自然松散状态下的土质、石子、碎石、矿粉以及工业废渣中,加入一定量的无机结合材料(包括水泥、石灰、矿粉和工业废渣等)并加水拌合而成的混合物,经过碾压、养护后达到一定的抗压强度的混合料,根据不同的无机结合材料分为水泥稳定类、石灰稳定类及石灰工业废渣稳定类(二灰稳定材料)三种。无机结合料稳定材料板结性好,强度高,

水稳性和抗冻性比石灰稳定材料要强,强度在初期较高并且随着时间增长强度也在增大。石灰稳定土的水稳性、抗冻性和早期强度都不如水泥稳定土,温度低于 5℃ 的时候强度几乎不再增长,干湿收缩和温差收缩很明显,会造成裂纹,坚决不能用其作为高级路面的基层材料,只能做为底基层材料。无机结合料稳定材料是典型的半刚性材料,由于干湿收缩、温差收缩双重原因易出现收缩裂纹,所有无机结合料都存在严重的干湿收缩和温差收缩现象。该类材料力学性质介于柔性路面材料与刚性路面材料之间,具有一定抗拉能力,在经过一定养护龄期之后,材料强度、韧性都会相应提高。因此,在配合比设计以及施工中要充分考虑各种稳定材料之间的性能差异和技术特点,有针对性地开展相应的质量管理工作。

2 无机结合料稳定材料配合比设计

2.1 原材料选择

原材料质量控制是无机结合料稳定材料配合比设计的前提步骤之一。水泥宜采用初凝时间大于 3h、终凝时间大于 6h 及安定性合格的普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥,强度等级以采用 32.5 级和 42.5 级为宜。石灰应满足有关规定中的 III 级以上消石灰或生石灰标准,应对石灰进行检测,检测其中有效钙和氧化镁含量。粉煤灰用作工业废渣型结合料时, SiO_2 、 Al_2O_3 与 Fe_2O_3 之和应大于 70%,烧失量小于等于 20%,比表面积大于 $2500\text{cm}^2/\text{g}$ 。稳定材料的级配组成和骨料质量一样重要,集料的压碎值、含泥量、颗粒级配必须符合设计图纸及有关规程的规定^[1]。各级公路基层和底基层使用的集料,针片状颗粒含量、粉尘含量、软石含量等指标要求有所提升。

2.2 配合比设计原则

无机结合稳定材料配合比的设计,应坚持“性能满足、经济合理、施工可行”的原则,《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20-2015)对无机结合稳定材料的强度进行了调整并增加了目标配合比、生产配合比的设计内容以及相关的设计要求,同时还提高了基层和底基层的压实度标准。水泥稳定材料、石灰粉煤灰稳定材料等无机结合稳定材料的组成设计应包括原材料检测、混合料的目标配合比设计、混合料的生产配合比设计及施工参数等方面工作。目标配合比设计阶段应对结合料品种及掺量、混合料的最大干密度及最佳含水量进行试验,以判定强度等性能是否达标。在生产配合比阶段对目标配合比进行校验调节并制定拌合设备的操作参数;而在施工参数阶段要经过试验段施工来最终确定施工配合比、松铺系数、碾压方法和养生

措施等。

2.3 水泥剂量设计

水泥含量是影响水泥稳定材料强度以及耐久性的重要因素。水泥稳定土中的水泥用量通常占混合料质量的 3%~7%,7 天的无侧限抗压强度可以达到 1.5%~4.0MPa 之间,水泥含量的选定一般是根据混合料的 7 天无侧限抗压强度为主,还要结合一定的经济效益及干缩和温缩等性质。水泥含量需要通过配合比试验来选定,但是设计水泥含量可以比配合比试验选择的含量提高 0.5%~1%,如果是集中厂拌法可以选择提高 0.5%,而路拌法则提高 1%。若用水泥稳定中、粗粒土作基层,则要控制在不大于 6%。配合比设计时,应该根据不同的水泥用量单独制备试块,在进行无侧限抗压试验的基础上得到能够达到设计强度要求所需的最小水泥量,在此基础上适当提高施工配合比的水泥用量。

2.4 含水量与级配设计

含水量控制以及集料级配设计是无机结合料稳定材料配合比设计的两大主要内容,由击实试验来求得混合料的最大干密度以及最佳含水率是最基本的过程,在不同类型的稳定材料当中结合料水化作用所需要的水量大小也是不一样的,水泥稳定材料的最佳含水量通常情况下会接近于基础土的含水量,石灰稳定土的最佳含水量有可能会达到比基础土的含水量高出 1%~3% 的程度。所以在实际工程当中,拌合场出厂时材料的含水量应该比最佳含水量增加 1%~2%,以便抵消运输、摊铺还有碾压时的水分流失量。JTG/T F20-2015 在配合比设计上对混合料推荐级配作了详细的规定,水泥稳定类、石灰稳定类、石灰粉煤灰稳定类等不同类型的级配区间,并增加了对级配碎石的材料与施工技术上的设计。

3 无机结合料稳定材料试验检测

3.1 原材料性能检测

原材料性能检验是保证无机结合料稳定材料试验检测正确性的基础。水泥检验包括细度、标准稠度用水量、凝结时间和安定性以及胶砂强度等几项内容,初凝时间不得先于 3h,终凝时间不得超过 10h。石灰检验主要针对有效氧化钙和氧化镁含量作为技术指标的同时还应测试石灰的细度及未消化残渣含量。粉煤灰检验包括细度、烧失量、化学成分等,粉煤灰的比表面积宜大于 $2500\text{cm}^2/\text{g}$,烧失量不大于 20%。集料检验主要包括颗粒级配,含泥量、泥块含量、针片状颗粒含量及压碎值等内容。粗集料压碎值是反映集料抵抗压碎能力的重要参数,在高速公路以及一级公路的基层中,其要求较高^[2]。新版规程对无机

结合料稳定材料中的粗、中、细粒土等术语名称作了改变,同时对术语涉及的相关试验方法也进行了改动,更加严谨规范了原材料性能测试的术语表述及操作要求。各种原材料的主要检测项目和技术指标如表一所示。

表 1 无机结合料稳定材料主要原材料检测要求

原材料	检测项目	技术要求	试验方法
水泥	初凝时间	$\geq 3\text{h}$	T 0505
水泥	终凝时间	$\geq 6\text{h}$ 且 $\leq 10\text{h}$	T 0505
水泥	安定性(煮沸法)	合格	T 0506
水泥	胶砂强度(3d/28d)	满足强度等级要求	T 0507
石灰	有效钙镁含量(I级)	$\geq 80\%$	T 0811
石灰	有效钙镁含量(II级)	$\geq 70\%$	T 0811
石灰	有效钙镁含量(III级)	$\geq 60\%$	T 0811
粉煤灰	比表面积	$\geq 2500\text{cm}^2/\text{g}$	T 0820
粉煤灰	烧失量	$\leq 20\%$	T 0817
粗集料	压碎值(高速公路基层)	$\leq 22\%$	T 0316
粗集料	针片状颗粒含量	$\leq 18\%$	T 0312

3.2 击实试验

击实试验是对无机结合剂稳定材料的最佳含水量和最大干密度的基本测试方法。此试验用来研究在一定的击实能之下,无机结合剂(水泥、石灰、粉煤灰等)稳定土的干密度与含水量的关系,进而得出其最大干密度、最佳含水量值。实验过程中,把几个不同的含水量(一般从 5~6 个含水量,一次变动 1%~2%)的混合物分为三部分放在击实筒内,按要求击数进行击打,由湿密度及含水量求出干密度,画出含水量与干密度的关系图,最高点即为最佳含水率、最大干密度^[3]。击实试验通常采用 T0804-1994 试验方法来进行,依据土类及颗粒大小分为轻型击实法和重型击实法,公路工程中的基层与底基层通常使用重型击实法来进行。对同一土样的两次重复试验所得到的最大干密度之差不超过 $0.0200\text{g}/\text{cm}^3$ (稳定细粒土)、 $0.0400\text{g}/\text{cm}^3$ (稳定中、粗粒土);对同一土样的两次重复试验所得到的最佳含水率之差不超过 0.50% (最佳含水量小于 10%) 或 1.00% (最佳含水量 $\geq 10\%$)。通过击实试验可以得到相关指标值能够作为现场施工时进行密实度检验以及评定质量的一项参照标准。

3.3 无侧限抗压强度试验

无侧限抗压强度试验是评定无机结合料稳定材料力学性质的重要参数之一,在该过程中采用规定的规格尺寸(一般是外径 100mm 或者 150mm、高径比是 1:1 大小)的圆柱形试样,在无侧向限制的状态下施加轴向压力,得到试样破坏瞬间的极限压力值,通过计算得到无侧限抗剪强度的结果。试件成型需要依据击实试验得出的最佳含水

量以及最大干密度来静压成型。水泥稳定层等材料的 7d 无侧限抗压强度一般需达到 $3.0\text{MPa}\sim 4.0\text{MPa}$ 以上,不同等级的交通荷载对应的结构层次有不同的要求。养护条件是影响试验结果的重要因素之一,石灰或者二灰稳定类材料的养护一般采用标准养护条件(恒温 $20^\circ\text{C}\pm 2^\circ\text{C}$ 下相对湿度大于等于 95%)、最后一天应将试件在水中浸泡 24h 后再做加载试验。新规程对无机结合料稳定材料无侧限抗压强度试验方法(T0805)的规定也更加明确具体,规定了试件尺寸大小、加载速度以及计算公式等使得测得的结果更加准确可靠。

3.4 含水量检测

含水量是影响无机结合料稳定材料压实质量和强度形成的主要因素之一。新规范把“含水量”的名词统一规定名为“含水率”,同时对相应的试验方法名称也进行了更新,含水率测定常用的方法有烘干法、酒精燃烧法以及微波加热法等。烘干法作为标准仲裁方法,在试验时把试样放到烘箱里以 $105^\circ\text{C}\sim 110^\circ\text{C}$ 的温度烘到恒定状态,让试件中的水分全部蒸发掉,根据烘干前后质量的变化来计算含水率,在试验中对于稳定细粒土的要求是取样不少于 50g,对于稳定的中粒土不少于 500g,对于稳定粗粒土不少于 2000g。酒精燃烧法适合工程现场试验使用,把样品和酒精混匀燃烧掉水,操作简单、耗时少,只适合于不含有机物的细粒土^[4]。微波加热法用微波加热效应使试样中的水分迅速地蒸发掉,可以在很短的时间完成对含水量的测量。

3.5 压实度检测

压实度是衡量施工现场压实效果的重要参数,指施工现场实测的干密度与其室内击实试验得到的最大干密度之比值,常用压实度测试手段有灌砂法、环刀法及核子密度湿度仪法等多种方式。灌砂法适用于各种类型的土基表面,准确性较强,是最常使用的压实度测试方法之一,在被测现场挖掘一定体积试槽,测量从试槽中挖出的土样质量,再将标准砂填入试槽,以此来求得试槽容积,从而得出该处的干密度及其压实度百分比。采用大灌砂筒检测无机结合料稳定材料时,应将取出的所有材料进行烘干处理并保证不少于 2000g,避免因含水率不同导致计算结果偏差过大。《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)增加了基层及底基层碾压的密度指标,不同等级的公路对压实度的要求也相对较高。对压实度进行检测的时间间隔要结合项目的大小和复杂程度来定,在每个 2000m^2 左右的地方至少要有 1 处取样。

4 无机结合料稳定材料质量控制措施

无机结合料稳定材料的质量管理应该从三个方面进行全面把控,分别是材料进厂,现场施工及完工检查。对于材料进厂来说首先要严格把好原材料验收入库关,水泥,石灰,粉煤灰以及粗细集料都要核对其出厂合格证同时委托具有相应资质的专业检测单位抽样复试,不合格产品不得使用;对于拌和过程来说主要把握拌和设备的准确度和均匀度,做到各种材料配比符合设计要求。EDTA 滴定法是水泥或石灰稳定材料中结合料剂量测定标准的现场试验检测方法,利用了 EDTA 与钙离子之间的络合作用,有操作简单、快捷、不受含水量的影响等特点,施工时要按规定的频次进行取样测得,做到随时发现问题,随时进行纠正。拌合好的混合料应进行覆盖保护工作以避免水分散失以及出现离析的情况。摊铺时尽量选择连续均匀的速度,碾压工作也要严格按照试验段确定好的碾压组合及遍数来进行碾压,养生期也是无机结合料稳定材料强度增长的重要时期,要在碾压结束后尽快使用保湿养生材料进行覆盖。在成品检查阶段,要严格按照要求对无侧限抗压强度、压实度、厚度以及弯沉值等质量控制指标进行检验评定,在整个活动中形成进场检验、过程抽查、成品核查的质量保证机制,从本质上保证无机结合料稳定材料基层和底基层的质量。

5 结语

本文以无机结合料稳定材料配合比的设计及试验检测两个主要的问题展开全面的研究,在此基础上对原材料的选择原则,配合比的设计原则,水泥剂量的设计以及各

项施工参数的设计方法进行了详细的说明,指出了这类材料的技术性质和技术特性。研究证明了严格把控原材料的质量关卡、优化配合比例设计以及准确的进行各项主要技术指标的试验都是无机结合料稳定材料工程质量控制的重要保证措施。工程实际应用中要重点做好击实实验、无侧限抗压强度实验、含水量测量以及压实度测量等一系列的基础实验工作,严格执行《JTGE51-2024》新规程的相关技术规定和质量要求。唯有将配合比的设计及实验检测深度融入整个施工过程中的质量管控体系中去,才能够保证无机结合料稳定材料的基层工程在其承受各种复杂荷载、环境的作用下仍具有长久稳定的使用效果,从而为公路建设事业的可持续进步提供有力的支持。

[参考文献]

- [1]宾武,欧阳标.基于击实方法差异对无机结合料稳定材料密度和级配影响的思考[J].建材发展导向,2024,22(5):1-3.
- [2]刘艳沙.无机结合料稳定材料目标配合比的组成设计[J].城市建设理论研究(电子版),2018(15):74.
- [3]刘西玲.无机结合料稳定材料无侧限抗压试验[J].城市建设理论研究(电子版),2018(29):135-136.
- [4]刘锋,宿启鹏,孔令,等.无机结合料稳定材料弹性模量侧面法试验全自动化试验系统的研制[J].公路,2025,70(8):301-308.

作者简介:胡志成(1993—),毕业于中国石油大学(华东)土木工程专业,中级工程师,现就职于新疆北新科技创新咨询有限公司。