

doi:10.11835/j.issn.1005-2909.2022.04.022

欢迎按以下格式引用:王龙,解晓光.水泥稳定碎石基层材料设计试验教学改革[J].高等建筑教育,2022,31(4):167-176.

# 水泥稳定碎石基层材料 设计试验教学改革

王 龙,解晓光

(哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院,黑龙江 哈尔滨 150090)

**摘要:**为实现室内试验与生产实际相协调的水泥稳定碎石基层材料配合比设计试验,发挥室内试验结果对现场施工的指导作用,在分析传统半刚性基层配合比设计试验存在的问题基础上,基于生产实际与室内试验相协调的原则,调整课程目标,开发了振动拌合、振动成型和抗冲刷设备,提出标准试验参数,并对抗冲刷试验进行数值模拟,明确了被冲刷试件冲刷应力分布,作为学生抗冲刷试验分析基础。通过物理指标的分析,明确了最佳含水量的物理意义和三种方法对最大干密度的影响;通过力学指标的分析,明确了不同试验方法对强度的影响和产生这种影响的机理;通过抗冲刷试验与分析,明确了设计水泥剂量指标和数值模拟作用。基于新目标的半刚性基层配合比设计试验课程,使学生理解了配合比设计的本质,在技术要求层面,不但能满足强度要求,还要兼顾功能性指标,在试验设计方面,不但要遵从规范,还要有创新精神。

**关键词:**试验教学;水泥稳定碎石;配合比设计;课程目标

**中图分类号:**G642.423;TU5 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2909(2022)04-0167-10

半刚性基层配合比设计试验是路面工程的一门辅助课程,是道路与轨道工程专业本科生必修的一门专业实验课,学时为2周。该课程要求学生参照相关规范的技术要求,通过试验完成一定设计强度要求的水泥稳定碎石基层材料的配合比设计,根据教师提供的基础资料,在遵从规范要求的前提下进行相关试验、分析试验数据、得出结论、编写配合比设计说明书。通过该课程,使学生掌握道路半刚性基层材料的配合比设计方法、技术要求和主导设备的使用方法。相对生产实际,规范具有一定的滞后性,需要在“遵从”规范方法的基础上,结合实际生产技术的采用状况开展实验教学工作,化解学生心中室内试验与施工现场生产实际不一致的矛盾,培养具有“遵从规范”精神和“创新生产”精神的学生<sup>[1-2]</sup>。

修回日期:2021-03-02

基金项目:2019—2021年哈尔滨工业大学教改项目

作者简介:王龙(1968—),男,哈尔滨工业大学交通科学与工程学院副教授,博士,主要从事路面结构与材料研究,(E-mail)289214921@qq.com。

## 一、传统课程试验内容

传统的试验安排主要包括4项内容,分别为原材料检测与评价、级配设计、压实标准的确定和无侧限抗压强度试验。

### (一) 原材料检测与评价

参照《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005)规定的试验方法进行,其主要试验目的是对水泥稳定碎石基层所用集料性能进行评价,判断其是否满足工程技术要求,并给出明确的结论,包括集料筛分、密度、压碎值和针片状等10项内容。

### (二) 级配设计

该项目主要根据各档集料的筛分试验结果和《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)中高速公路水泥稳定碎石基层的级配C-B-1要求,确定各档集料的用量,组合成满足技术要求的级配。

### (三) 压实标准的确定

根据级配设计的结果,添加不同水泥剂量(一般3~5种),采用重型击实法确定不同水泥剂量下水泥稳定碎石材料的最大干密度 $\rho_{\max}$ 和最佳含水量 $w_{\text{opt}}$ 。该内容涉及《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)中的2个试验,分别为无机结合料稳定材料击实试验方法(T 0804—1994)和含水量试验方法(烘干法)(T 0801—2009)。

### (四) 无侧限抗压强度试验

该试验采用已确定的压实标准( $\rho_{\max}$ 和 $w_{\text{opt}}$ ),在要求的压实度下( $K=98\%$ )成型无侧限抗压强度试件,养生7d后,进行抗压强度试验,根据强度判断原则和经济原则,确定最佳水泥剂量。该内容涉及试件制作、试件养生和抗压强度3个试验。

## 二、存在的问题与课程目标调整

半刚性基层配合比设计试验课程设置的目的是让学生不但掌握水泥稳定碎石基层材料试验方法,还要有结合实际情况分析解决问题的能力。

### (一) 传统试验课安排存在的问题

#### 1. 重试验操作,轻结合实际情况的分析

道路工程材料特别是水泥稳定碎石基层材料,具有环境敏感性和荷载敏感性<sup>[3]</sup>,在应用过程中必须结合二者进行系统分析、应用。

道路工程的服务对象是车辆荷载,现行《公路沥青路面设计规范》把交通荷载分成5个等级,并根据道路基层材料对荷载的敏感性和扩散荷载的能力,推荐了不同基层类型的使用条件和材料设计指标范围,结合具体道路的荷载等级,选用技术可行、经济合理的设计指标。道路工程材料的耐久性受道路所在地区的地形、地质、温度和降雨条件影响,因此,道路工程界结合影响公路工程使用性能的自然因素,提出公路自然区划,共3个一级区划和52个二级区划,针对不同的区划,水泥稳定碎石基层材料的耐久性设计指标不同。

因此,道路基层材料配合比的设计,不仅是试验方法、试验操作的掌握和简单给出材料的配合

比例,更是指标的分析、数据的分析及其选用标准的掌握,更应包括耐久性分析、评价与预测。

## 2. 试验方法与工程实际脱节

在半刚性材料大规模使用过程中,其试验方法、设计方法、设计指标和设计标准仍存在诸多不足,包括室内试验方法与实际生产方式不同,设计指标单一,设计方法不完善等。其中,最佳含水率和最大干密度的确定经历了轻型击实到重型击实的发展过程,在一定程度上可以模拟静载压路机对基层材料的压实作用,但无法模拟实际基层铺装过程中振动压路机碾压的实际工况<sup>[4]</sup>,因此,需要对试验课程中的压实标准试验进行改革,突破规范的限制,采用振动压成型设备,确定最佳压实参数,实现室内外压实方式的协调统一。

《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)规定,水泥稳定碎石基层材料的水泥用量(质量比)一般为3%~6%,最多不宜超过7%,也就是说集料用量为93%~97%,如此少的水泥用量如何均匀裹覆在集料上是拌合工艺需要解决的问题。为解决水泥均匀分布问题,振动拌合方式已大规模应用于工程实践,取得了很好的效果,但由于室内小型拌合设备的缺失,配合比设计中水泥稳定碎石混合料的拌合方式仍采用手工拌合,很难保证水泥在集料中均匀分布,导致强度变异系数增加、设计水泥剂量偏高等问题,室内试验结果无法科学指导现场施工。

## 3. 功能性评价试验缺失

水泥稳定碎石基层设计的强度或弹性模量仅体现了交通荷载对道路材料力学性能的要求,但设计寿命为15~20年的高等级公路,长期处于自然环境中,除交通荷载的作用,温度、湿度的周期性变化对材料功能性指标的影响巨大,水泥稳定碎石功能指标一般情况下包括抗收缩性能、抗冻性能和抗冲刷性能,分别体现了材料的温度敏感性和湿度(水)敏感性,但在传统配合比设计中,只体现了强度指标,没有功能性指标的验证试验和技术要求<sup>[5]</sup>。

## (二) 课程目标调整

材料设计不仅是力学指标的要求,更是功能性指标的体现,为调整传统试验课程存在的问题,实现室内试验方法与现场生产工艺相协调,提高学生分析问题和解决问题的能力,对课程目标进行调整。

### 1. 传统的课程目标

课程教学目标为:通过相关试验,使学生掌握规范对半刚性基层原材料和设计强度的要求,能组织技术人员开展半刚性基层配合比设计工作,了解试验组织和工作程序,熟练掌握半刚性基层配合比试验主导设备的使用方法,熟练掌握试验数据处理、判别的方法和半刚性基层配合报告的撰写。

### 2. 调整的课程目标

传统的课程目标是“了解”和“掌握”,调整后的课程目标主要是提高学生分析问题和解决问题的能力,因此,传统的目标依然保留,新增以下课程目标:

1) 新增文献调研与分析目标,调研水泥稳定碎石配合比设计发展动态和水泥稳定碎石实际施工工艺发展状况,并撰写文献分析报告。

2) 应用振动成型和振动拌合设备,使学生按组完成传统模式和振动模式下的配合比设计,并对比分析其差别及产生的原因。

3) 增设功能性指标试验项目,对配合比试验结果进行功能性验证。

### 三、基于新课程目标的试验设备研发

基于新的课程目标,需要自行开发的试验设备包括振动拌合设备、振动压实设备和抗冲刷试验设备,并通过试验确定试验参数。

#### (一) 振动拌合设备开发与最佳振动拌合参数

开发的水泥稳定碎石基层材料室内振动拌合设备,在拌合锅体内部安装4台振动电机,电机带动上方叶片搅拌的同时,振动电机带动整个锅体振动对混合料振动搅拌,使物料颗粒具有一定振动频率下的振幅后处于颤振状态,从而破坏混合料间的黏性连接,便于物料中的水泥颗粒从结团状态变为均匀分布状态,使粗细集料、水和水泥分布均匀<sup>[6-8]</sup>。

最佳参数试验选取了5组频率作为仪器的可变参数,分别为40 Hz、50 Hz、60 Hz、70 Hz和80 Hz,振动时间选取1 min、3 min和5 min,水泥稳定碎石材料级配的级配类型选取《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)中推荐的C-B-1级配。基于拌合工艺对密度和强度的影响,确定振动拌合频率为70 Hz,拌合时间为3 min。

#### (二) 振动成型设备开发与最佳振动成型参数

无机结合料振动成型因其对集料的作用模式与施工现场振动碾压具有一致性,虽没有被列入配合比设计的强制条款,但在实际的公路建设中仍被广泛应用,其主要研究成果为对比分析水泥稳定砾石材料振动压实与重型击实之间的关系,并阐述了振动成型的优越性<sup>[9]</sup>。产生振动的原理是转动电机通过皮带的作用带动两个偏心块转动,两个偏心块在转动过程中,水平力相互抵消,竖直方向上的力带动下方的振动质和压头上下运动,从而实现对压头下材料的振动压实效果。

频率、振幅和振动力是影响振动效果的重要因素<sup>[10]</sup>,通过对振动压路机振动力的调研,并通过大量室内振动压实与击实成型得到的物理指标和力学指标的对比,得出振动最佳参数如表1所示。

表1 标准振动压实参数

频率/Hz	振幅/mm	激振力/N	振动时间/s
30	0.97	6 018	180

#### (三) 抗冲刷试验设备开发与最佳试验参数

研制的半刚性基层抗冲刷试验仪器,在直径1 m、高0.5 m的冲刷桶内,放入6个标准无侧限抗压强度试件,注入固定高度的清水,通过电机带动叶片旋转,旋转叶片带动水流产生冲刷力,模拟流动水对基层材料的冲刷作用,以冲刷前后6个质量损失率的平均值为抗冲刷性能的评价指标,如式(1)所示。

$$p = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \quad (1)$$

式中: $p$ 为质量损失率,%; $m_0$ 为试件冲刷前表干重,g; $m_1$ 为试件冲刷后表干重,g。

影响冲刷效果的参数有3个,分别为冲刷频率 $f$ 、浸水高度 $h$ 和冲刷时间 $t$ ,采用规范要求的级配,通过不同参数组合,以质量损失率为指标,确定最佳冲刷试验参数,如表2所示。

表 2 冲刷设备的最佳试验参数

冲刷频率 $f/\text{Hz}$	浸水高度 $h/\text{cm}$	冲刷时间 $t/\text{min}$	冲刷次数/次
30	5	10	72 000

应用 Fluent 有限元软件,采用滑动网格方法模拟试件在 10 Hz、20 Hz 和 30 Hz 冲刷频率作用下,试件表面受动水冲刷力的大小(图 1)。从图中可以看出,试件表面在动水冲刷作用下压力和拉力同时存在,当冲刷频率  $f$  为 30 Hz 时,冲刷应力为 50 kPa 左右。在车辆荷载下对沥青路面进行孔隙水压力模拟<sup>[11]</sup>,在标准轴载以不同速度行驶时基层顶面孔隙水压力约为 50 kPa,该设备适合模拟车辆荷载作用下动水压力对基层材料的冲刷作用。

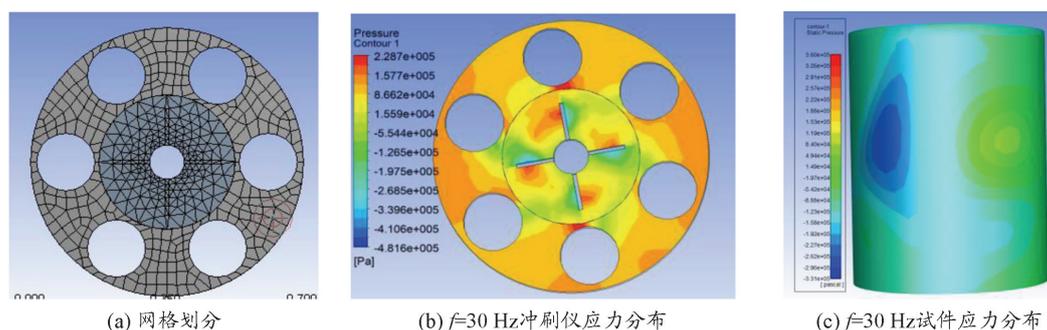


图 1 数值模拟网格划分与冲刷受力图

#### 四、基于新课程目标的配合比设计试验

水泥稳定碎石配合比试验根据学生人数分为 A、B、C 3 组, A 组为振动拌合+振动压实标准+振动成型模式, B 组为振动拌合+重型击实标准+静压成型模式, C 组为人工拌合+重型击实标准+静压成型模式。A 组的试验模式完全与工地实际生产相符, C 组为规范规定的试验模式, B 组代表工地试验室的试验模式, 每组按水泥剂量的不同又分为 3 个小组, 每个小组的水泥剂量分别为 3.5%、4.5% 和 5.5%, 每小组成型 9 个试件, 压实度要求为 98%, 水泥稳定碎石基层设计强度为 4.0 MPa, 表 3 为试验分组结果汇总。

每组独立完成试验并撰写配合比试验与设计报告, 3 组数据共享, 综合分析试验数据, 绘制物理指标、力学指标和功能性指标对比图, 阐述数据差别的原因, 提高学生分析问题的能力。

表 3 基于新课程目标的各组试验结果汇总

组别	拌合方法	物理指标确定方法	试件成型方法	水泥剂量/ %	$w_{\text{opt}}/\%$	$\rho_{\text{max}}/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	抗压强度 均值/ MPa	变异 系数/ %	抗压强度 代表值/ MPa
A	振动	振动压实	振动成型	3.5	4.8	2.262	5.66	12.0	4.79
				4.5	5.0	2.314	7.72	9.5	6.78
				5.5	5.2	2.339	9.54	8.7	8.48
B	振动	重型击实	静压成型	3.5	6.0	2.238	3.20	20.1	2.38
				4.5	6.2	2.300	5.85	15.2	4.71
				5.5	6.2	2.312	6.78	12.0	5.74
C	人工	重型击实	静压成型	3.5	6.1	2.232	2.61	20.9	1.91
				4.5	6.3	2.302	5.06	18.0	3.89
				5.5	6.4	2.322	5.96	13.0	4.97

### (一) 不同试验组物理指标的对比与分析

指导学生对比分析3组的物理指标,绘制水泥剂量与最佳含水量 $w_{opt}$ 和最大干密度 $\rho_{max}$ 的关系曲线图,如图2所示。

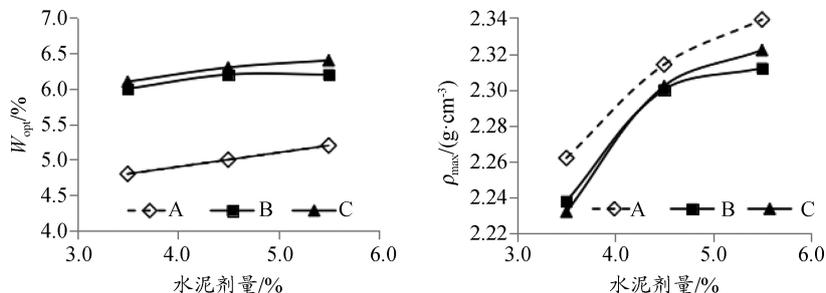


图2 3种配合比设计方法物理指标与水泥剂量关系曲线的对比

在指导学生分析物理指标的差别前,先引导学生理解“最佳含水量”的物理意义:一是被压实土体,只有在最佳含水量下才能被压得密实;二是只有在最佳含水量下被压实的土体,其水稳定性才最好,即土体饱水后,其强度下降幅度最小;三是针对同一种被压实材料(本次试验),最佳含水量越小,其压实功越大。通过对最佳含水量物理意义的理解,学生分析出3条规律:

1) A组的最佳含水量最小,说明A组的压实功最大,B和C的最佳含水量相近,说明B、C组的压实功基本相当(都是击实法),即振动压实工艺的压实能力优于重型击实法。

2) A组的最大干密度最大,B、C组基本相当,验证了A组采用的压实方法的压实功强。

3) 采用A组方法确定的最大干密度控制施工,压实度大,基层施工质量提高,但修筑相同几何尺寸的基层,所用的材料要增加,因为A组的密度比其他组平均提高 $0.02 g/cm^3$ 。

启发引导学生提炼概括性的结论:

振动拌合不影响水泥稳定碎石的物理指标,振动成型对其物理指标的影响较大。

通过以上分析,学生可了解室内试验数据的差异对实际施工产生的影响,认识到室内试验的重要性。

### (二) 不同试验组力学指标的对比与分析

学生根据抗压强度数据,绘制各组抗压强度均值、抗压强度代表值与水泥剂量的关系如图3所示,可以看出,相同的材料由于工艺不同,其抗压强度有很大的区别,采用振动拌合的B组比对照组C组抗压强度平均提高 $0.8 MPa$ ,而比采用振动拌合+振动成型的A组,则平均提高 $2 MPa$ 。试验设计强度为 $4.0 MPa$ ,结合抗压强度代表值与水泥剂量的关系,可以得出A、B、C组满足强度要求的水泥剂量分别为 $3.2\%$ 、 $4.0\%$ 和 $4.5\%$ 。

通过查阅文献和指导教师的启发,层层引申:

1) 对于主要由碎石材料组成的水泥稳定碎石基层,采用A组以振动为主导工艺的材料设计方法能提高材料的性能,发挥材料的潜在特性,材料和工艺具有匹配性。

2) A组满足强度要求的水泥剂量为 $3.2\%$ ,而传统方法的C组为 $4.5\%$ ,说明采用振动为主的材料设计方法可以节约 $1.3\%$ 的水泥剂量,可节约成本。

3) 采用工艺措施是提高材料潜在性能最有效和最经济的方法。

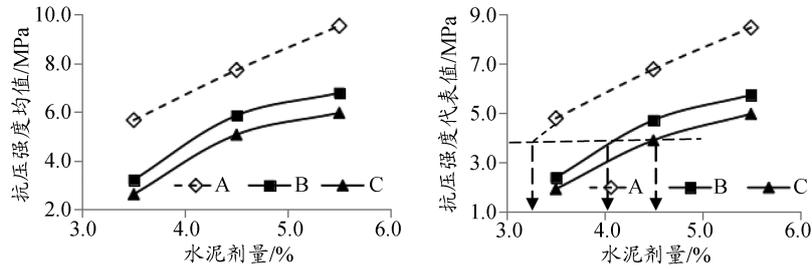


图3 3种配合比设计方法力学指标与水泥剂量关系曲线的对比

在引导学生分析的基础上,对试验数据进一步深挖,解释采用振动设计方法的A组为什么能大幅度降低水泥剂量。水泥稳定碎石基层的抗压强度代表值 $R_d^0$ 的计算公式及其强度判别标准如式(2)所示。

$$R_d^0 = \bar{R}(1 - Z_a \times C_v) \geq R_d \quad (2)$$

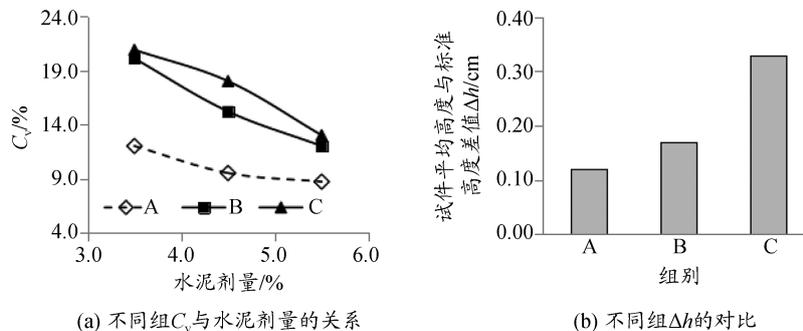
式中: $R_d^0$ 为抗压强度代表值,MPa; $R_d$ 为抗压强度设计值,MPa; $\bar{R}$ 为抗压强度平均值,MPa; $Z_a$ 为保证系数,取1.282; $C_v$ 为强度偏差系数,%。

从式(2)可以看出,只有 $R_d^0 \geq R_d$ 设计出的材料配合比才合格,但代表值 $R_d^0$ 不仅和强度均值 $\bar{R}$ 有关,还与强度偏差系数 $C_v$ 有关,因此,进一步引导学生分析A、B、C组强度的偏差系数 $C_v$ ,图4(a)为不同组别的 $C_v$ 值比较,可以看出B和C组的 $C_v$ 值差别不大,原因在于二者的工艺差别不大,但A组的 $C_v$ 则明显小于B、C组,因此,采用式(2)计算 $R_d^0$ 时,结果大于其他各组。什么原因导致3组试验强度偏差系数 $C_v$ 的差异?为解释这个问题,在制件过程中让学生量测每个试件的高度,对径4次,并计算与标准高度15 cm差值的平均值 $\Delta h$ ,计算公式如式(3)所示。

$$\Delta h = (h_i - 15) / 4 \quad (3)$$

式中: $\Delta h$ 为试件平均高度与标准高度的差值,cm; $h_i$ 为试件单次量测高度,cm。

图4(b)为不同组别的 $\Delta h$ 对比,A组最小,为0.12 cm,B组为0.17 cm,而C组最大,为0.33 cm,C组为A组的2.8倍。 $\Delta h$ 越大,试件与标准尺寸差别越大,试件越不标准,其强度不仅愈小,而且变异性也会增加。这说明A组的试件成型方法能控制试件高度,最终导致强度偏差系数 $C_v$ 较小,而传统静压成型的C组,对于试件高度的控制较差(静压成型试件时,试件会反弹,高度会增加),导致 $C_v$ 偏大,进而强度代表值降低<sup>[12]</sup>。



(a) 不同组 $C_v$ 与水泥剂量的关系

(b) 不同组 $\Delta h$ 的对比

图4 3种配合比设计方法均匀性指标与水泥剂量关系曲线的对比

通过以上分析,学生不仅明确了不同试验方法强度绝对值大小和变异系数不同的根本原因,而且认识到工艺的重要性、配合比设计的本质和在试验过程中必须特别关注的细节,更重要的是培养了学生基于试验数据的逻辑推理能力<sup>[13]</sup>。

### (三) 不同试验组功能性指标的对比与分析

课程目标调整后,学生的分析问题能力有所提高,但学生对基层材料的功能性还缺乏了解,对功能性指标理解的缺失直接影响半刚性基层材料结合气候特征的正确选型。在完成配合比试验后,组织学生应用自行开发的抗冲刷设备,采用C组工艺,选用成型水泥剂量分别为3.5%、4.5%和5.5%的试件,养生7d,在教师的指导下进行抗冲刷试验,表4为试验结果。

表4 C组工艺下水泥稳定碎石材料抗冲刷试验结果

水泥剂量/%	无侧限抗压强度/MPa	质量损失率/%	质量损失/g	强度损失率/%
3.5	2.2	1.35	79.8	33.2
4.5	5.1	0.96	56.7	21
5.5	5.5	0.53	31.3	2.3

分别绘制水泥剂量与冲刷质量损失  $M_1$  和强度损失  $S_1$  的关系曲线,如图5所示。可以看出,随水泥剂量的增加,冲刷质量损失和强度损失均下降,其原因在于水泥剂量提高,水泥稳定碎石基层的抗压强度在提高,高强度的试件具有较低的水敏感性,抗冲刷能力增强。结合室内试验结果提出高等公路水泥稳定碎石基层的抗冲刷质量损失不超过1%的要求<sup>[14]</sup>。根据此要求,采用C组材料设计方法满足抗冲刷时的最低水泥剂量不小于4.5%的要求,通过抗压强度代表值确定C组满足强度要求的水泥剂量为4.5%,如图5(a)所示,因此,基于力学指标和抗冲刷指标,C组设计4.5%是合理的。

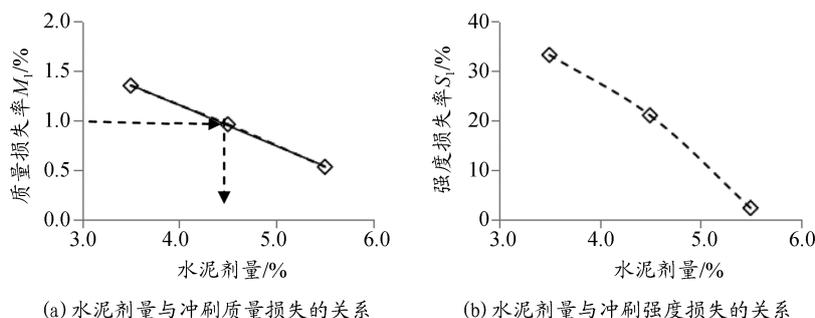


图5 水泥剂量与冲刷质量损失和强度损失的关系曲线(C组)

学生拍摄了3种水泥剂量试件完成冲刷试验后的表面状态照片,如图6所示。可以看出,随水泥剂量的提高,试件的冲刷破坏面逐渐减小,“脱粒”现象也逐步减轻。通过试件冲刷破坏的表面形态与图1有限元分析中试件所受冲刷力的位置对比,说明理论分析结论与实际试验结果具有一致性。冲刷试验的开展,使学生明确以下两点:

- 1) 配合比设计不仅要满足强度需求,同时要兼顾功能需要;
- 2) 数值模拟的结果可以通过试验进行验证。

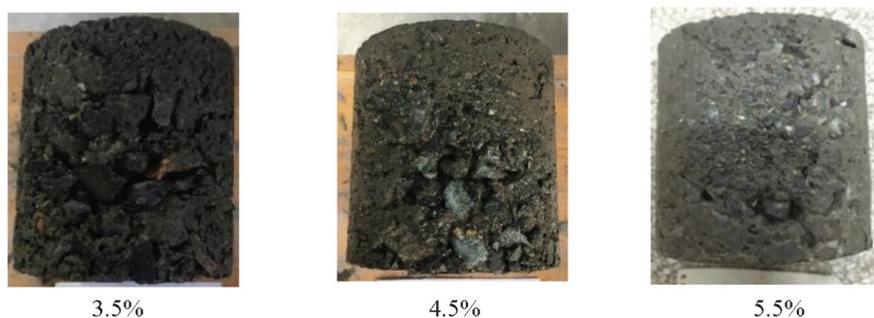


图 6 不同水泥剂量下试件冲刷破坏情况

## 五、结语

(1)分析了传统半刚性基层配合比设计试验存在的问题,基于生产实际与室内试验相协调的原则,调整课程目标,并增加了功能性指标试验。

(2)根据课程的新目标,开发了振动拌合、振动成型和抗冲刷设备,提出了标准试验参数,为开展半刚性基层配合比试验课程教学提供设备基础。

(3)引导学生对3组不同试验方法数据深入分析,使学生理解室内试验数据对施工的指导作用,提高对室内试验准确性的认知,学会概括性总结。

(4)基于新目标的半刚性基层配合比设计试验课程,不但培养了学生的动手能力,还提高了学生挖掘试验结果逻辑关系和解释试验数据现象的能力。

### 参考文献:

- [1]张武满,张迎晨.基于设计性试验提升本科生自主创新能力——以土木工程材料实验课程教学改革为视角[J].高等建筑教育,2019,28(1):106-109.
- [2]覃荷璘,邢心魁.突出工程能力和创新能力培养的土木工程专业实践教学体系[J].高等建筑教育,2017,26(3):86-90.
- [3]沙爱民.半刚性基层的材料特性[J].中国公路学报,2008,21(1):1-5.
- [4]肖海生,光明,董庆伟.振动击实法在半刚性基层施工中的应用[J].中外公路,2012,32(S1):67-70.
- [5]胡力群.半刚性基层材料结构类型与组成设计研究[D].西安:长安大学,2004.
- [6]Ferraris C F. Concrete mixing methods and concrete mixers: State of the art[J]. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology,2001,106(2):391-399.
- [7]冯建生,冯忠绪,王博.振动搅拌对不同配合比混凝土性能的影响[J].广西大学学报(自然科学版),2015,40(3):636-642.
- [8]施洲辉,甘先永,罗增杰.振动搅拌技术对水泥稳定碎石强度性能的影响[J].公路与汽运,2016(3):109-112.
- [9]王龙,解晓光.振动压实能力与道路基层材料可压实性评价[J].同济大学学报(自然科学版),2013,41(2):203-207.
- [10]袁斌,吕云青.采用振动击实法开展水泥稳定碎石基层标准试验的相关影响因素研究[J].公路工程,2013,38(3):104-107.
- [11]殷惠卿.基于离散元方法的半刚性基层冲刷破坏数值模拟研究[D].西安:长安大学,2016.
- [12]王龙,解晓光,于立泽.成型方法对半刚性基层材料配合比设计的影响[J].公路交通科技,2013,30(2):32-37.

[13] 吕恒林,周淑春,吴元周. 土木工程材料课程实验教学改革探讨与实践[J]. 高等建筑教育,2006,15(4):90-92.

[14] 何小兵,杨庆国,易志坚. 水泥稳定碎石基层材料抗冲刷试验评价方法研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2009,28(3):555-558.

## Teaching reform of cement treat aggregate base material design experiment

WANG Long, XIE Xiaoguang

(*School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, P. R. China*)

**Abstract:** In order to achieve the coordination of cement treat aggregate base (CTAB) material mix proportion design between indoor experiment laboratory test and production practice, play the role of guidance to field construction, base on the analysis of the traditional course mix proportion design of semi-rigid base test, the course objectives were adjusted on the basis of the principle of production practice in harmony with indoor test. According to the new objective of the course, the equipment of vibration mixing, vibration molding and anti-scour was developed, standard test parameters were proposed, and numerical simulation of anti-scour test was carried out. The scour stress distribution of the scour specimen was clarified, which was used as the basis of analysis of anti-scour test for students. Through the analysis of physical index data, the students have made clear the physical significance of the optimum water content and the influence of three methods on the maximum dry density. Through the analysis of the mechanical index data, the students have made clear the influence of different test methods on the strength and the mechanism of producing this influence. Through the anti-scour test, the students are made clear that the functional indexes should be considered when determining the design cement dosage, and the numerical simulation can explain the test phenomenon well. Based on the new objectives of semi-rigid base mix design experiment, students understand the nature of mix design, in the level of technical requirements, it is not only to meet the intensity requirements, but also take into account the functional indicators, in the aspect of test design, not only to comply with the norms, but also have the spirit of innovation.

**Key words:** experimental teaching; cement treat aggregate; mix-true design; course objectives

(责任编辑 周沫)