

水稳配合比设计时不同确定最大干密度指标方法对确定水泥剂量的影响

张 赛

中国水利水电第五工程局有限公司 四川 成都 610000

摘要: 本文以南阳市长江路工程为依托, 通过对比试验研究重型击实法与振动压实法对水泥稳定碎石最大干密度及7天无侧限抗压强度的影响。结果表明, 振动压实法能提升密实度、优化骨架结构, 在保证强度前提下将水泥剂量由5.5%降至5.0%, 节约材料成本约12.5%; 现场验证显示, 增加碾压遍数可满足压实要求且不致集料破碎, 为配合比设计提供了新思路。

关键词: 水泥稳定碎石; 重型击实法; 最大干密度; 无侧限抗压强度; 水泥剂量优化; 压实机理; 成本效益分析

引言: 水泥稳定碎石基层作为半刚性路面的关键承重层, 其性能直接影响路面寿命与质量。传统配合比设计存在水泥用量高、易开裂、成本高等问题, 其中最大干密度和最优含水率的确定尤为关键。现行规范多采用重型击实法, 但其加载方式与现场振动碾压工艺差异显著; 而更贴近实际的振动压实法在配合比设计中尚未系统应用^[1]。本文通过对比两种方法, 探讨其在优化水泥剂量方面的可行性与效益。

1 工程概况与试验设计

1.1 工程背景

本研究依托南阳市长江路市政主干道工程, 该道路设计使用年限15年, 日均交通量25,000辆(含18%重型车), 采用典型半刚性基层沥青路面结构。水稳基层总厚48 cm, 分三层铺设, 为配合比优化提供了典型应用场景。

1.2 试验设计思路

本研究采用控制变量法, 保持原材料、级配组成等条件不变, 系统改变压实方法(重型击实法 vs. 振动压实法)和水泥剂量(3.5%, 4.0%, 4.5%, 5.0%, 5.5%), 研究两者对最大干密度、最优含水率、7天无侧限抗压强度等关键指标的影响规律。试验方案设计如下:

(1) 原材料性能测试: 对粗集料、细集料、水泥进行全面的物理力学性能检测;

(2) 级配设计: 基于骨架密实理论确定最优级配^[2];

(3) 压实特性试验: 分别采用重型击实法和振动压实法确定不同水泥剂量下的最大干密度和最优含水率;

(4) 强度性能试验: 制备标准试件, 测试7天无侧限抗压强度, 分析发展规律;

(5) 现场验证: 选取试验段, 验证低剂量高密度方案的施工可行性。

1.3 原材料技术指标

1.3.1 集料性能

试验选用杏花山石灰岩碎石, 材料包括四档不同粒径: 10-30 mm碎石、10-20 mm碎石、5-10 mm碎石以及石屑。依据相关规范, 对石料进行了压碎值、表观相对密度、针片状含量和岩饱和抗压强度等指标的检测, 结果均符合规范要求。

1.3.2 水泥性能

试验所用南阳市天泰水泥有限公司生产的火山灰质硅酸盐水泥P.P32.5符合JT/T994-2015规范要求, 其相关检测指标均满足标准要求。

1.4 级配设计与压实特性研究

1.4.1 级配设计

经过试验检测, 得到各档料的级配结果。经过试配, 当粗集料(10-30): 粗集料(10-20): 粗集料(5-10): 石屑 = 6:4:5:5时混合料级配范围符合设计规范要求。

经实际掺配得到的混合料筛分结果如表1所示:

表1: 混合料筛分

筛孔尺寸	31.5	26.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
通过率	100.0	94.5	81.0	56.9	33.5	23.1	10.1	2.0

1.4.2 压实特性对比分析

本项目要求基层七天无侧限强度需不小于4.0Mpa, 根据JTG/TF20-2015中给出的建议掺配量, 此次试验将采

用3.5%、4%、4.5%、5%、5.5%五种不同的剂量进行试配, 同时将使用重型击实法及振动压实法两种试验方法确定最大干密度。为了保证使用的材料的一致性, 两种

方法同时进行试验，针对一份试样使用分料器分成两份，一份进行重型击实，一份进行振动压实。

1.4.3 击实结果统计

对于五种不同的水泥剂量，通过重型击实法和振动压实法确定出不同的最大干密度。试验结果如表2所示：

表2：重型击实法和振动压实法

击实方法	水泥剂量 (%)	最优含水率 (%)	最大干密度 (g/cm ³)
重型击实法	3.5	5.7	2.331
振动压实法		5.2	2.366
重型击实法	4	5.2	2.348
振动压实法		4.8	2.357
重型击实法	4.5	5.1	2.353
振动压实法		5.0	2.367
重型击实法	5	5.6	2.341
振动压实法		4.9	2.373
重型击实法	5.5	5.6	2.337
振动压实法		5.1	2.355

通过试验数据可以看出相同材料下，振动压实法得到的最大干密度更大，最优含水率相对较小。

本工程七天无侧限设计强度要求 $\geq 4.0\text{MPa}$ ，按照 JTG 3441-2024规范要求，进行无侧限抗压强度试验^[3]。（如表3所示）

1.5 力学性能与机理分析

1.5.1 无侧限抗压强度试验

表3：无侧限抗压强度试验

击实方法	水泥剂量 (%)	平均强度Rc (Mpa)	强度标准差 (Mpa)	强度代表值R _d ⁰
重型击实法	3.5	2.5	0.34	2.1
振动压实法		3.7	0.33	3.3
重型击实法	4	3.1	0.39	2.6
振动压实法		4.2	0.29	3.8
重型击实法	4.5	4.3	0.35	3.9
振动压实法		4.7	0.3	4.3
重型击实法	5	4.9	0.32	4.5
振动压实法		5.4	0.4	4.9
重型击实法	5.5	5.4	0.41	4.9
振动压实法		6	0.41	5.5

试验数据表明，振动压实法在4.5%水泥剂量下即可达到4.3MPa的强度代表值，满足设计规范 $\geq 4.0\text{MPa}$ 的要求，而重型击实法则需要5.0%水泥剂量才能达到4.5MPa。这意味着采用振动压实法进行配合比设计，可在保证强度前提下降低水泥剂量0.5个百分点，降幅达9.1%。

1.5.2 微观机理分析

两种压实方法导致强度差异的根本原因在于其不同的微观结构形成机制：

(1) 颗粒排列与接触状态：重型击实法的冲击荷载使表层颗粒强制位移，但容易形成“拱效应”，内部颗粒难以充分重排；振动压实法的持续振动使颗粒体系处于“类流体”状态，颗粒在重力与振动力作用下自发寻找稳定位置，形成更紧密的骨架结构^[4]。

(2) 界面过渡区(ITZ)特性：振动压实使水泥浆体更均匀地包裹集料表面，减少薄弱界面区的厚度和缺陷^[5]。

(3) 内部应力状态：重型击实形成的冲击波在材料内部产生不均匀应力分布，易形成微裂纹；振动压实则通过持续动态荷载使应力均匀释放，减少内部损伤。

1.5.3 延迟时间对性能的影响

模拟施工现场可能出现的延迟碾压情况，研究了不

同延迟时间(0h, 2h, 4h, 6h)对混合料性能的影响。结果显示,随着延迟时间增加,两种方法的强度均呈下降趋势,但变化规律有所不同:

采用重型击实法、水泥剂量5.0%时,0 h、2 h、4 h、6 h的强度代表值分别为4.6 MPa、4.4 MPa、4.1 MPa、3.5 MPa,6 h强度损失率为23.9%;

采用振动压实法、水泥剂量4.5%时,对应强度代表值分别为4.4 MPa、4.3 MPa、3.9 MPa、2.9 MPa,6 h强度损失率为34.1%。

结果表明,低剂量(4.5%)振动压实混合料的延迟敏感性高于高剂量(5.0%)重型击实混合料。这主要因为较低的水泥剂量意味着较少的水泥浆体,对混合料工作性的保持能力较弱,水分蒸发和水泥水化损失的影响更为显著。因此,采用低剂量高密度方案时,需严格控制从拌和到碾压完成的时间,一般不应超过2小时。

2 现场验证与经济性分析

2.1 现场施工验证

在长江路进行试验路铺筑,左右幅分别采用传统方法(5.5%水泥剂量)和优化方法(5.0%水泥剂量)施工。碾压工艺为:初压1遍(静压)+复压4-6遍(振动)+终压1遍(静压)。现场检测不同碾压遍数下的压实度变化,结果如下:

碾压4遍时,5.5%灰剂量压实度平均值为97.4%,5.0%灰剂量为96.8%,均未达到98%的设计要求;

碾压6遍时,5.5%灰剂量压实度为98.9%,5.0%灰剂量为97.9%;

碾压8遍时,5.5%灰剂量压实度为99.6%,5.0%灰剂量为98.9%,满足设计要求。

现场试验表明,采用振动压实法设计的低剂量(5.0%)方案,需要增加2遍碾压(从6遍增至8遍)才能达到98%的压实度要求。这验证了"以碾压功换水泥"的技术思路在现场施工中的可行性。同时,增加碾压遍数并未导致集料破碎现象,破碎率增加仅0.3%,在允许范围内。

2.2 经济性分析

基于长江路工程实际数据,对传统方案(水泥剂量5.5%)与优化方案(5.0%)进行全寿命周期成本对比。结果表明,优化方案每公里可减少水泥用量180吨,节约材料成本9.0万元;虽因增加2遍碾压导致施工费用增加约1.8万元,但综合直接成本仍降低7.2万元。同时,低水泥剂量有助于减少收缩裂缝,预计15年内维修费用可减少1.4万元^[6]。整体综合节约率达7.8%。

3 结论与展望

研究表明,振动压实法比重型击实法更能提升混合料密实度与强度,在满足设计强度(≥ 4.0 MPa)前提下,可将水泥剂量由5.5%降至5.0%,降幅9.1%。现场验证表明,通过增加2遍碾压即可达到压实要求,且不引起集料破碎,但需控制施工延迟时间不超过2小时。该方案每公里可节约综合成本7.8%,具有良好的工程应用前景与推广价值。

参考文献

- [1]刘志强,王磊,李明.振动压实法在水泥稳定碎石基层配合比设计中的应用研究[J].公路交通科技,2022,39(5):45-52.
- [2]黄晓明,陈渊,马涛.基于骨架密实理论的水泥稳定碎石级配优化方法[J].建筑材料学报,2021,24(3):401-408.
- [3]中华人民共和国交通运输部.JTG3441-2024公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2024.
- [4]王磊,张军,李伟.水泥稳定碎石振动压实机理及参数优化研究[J].公路交通科技,2020,37(6):1-8.
- [5]陈华,刘晓明,赵永利.基于界面过渡区理论的半刚性基层材料强度形成机制[J].建筑材料学报,2021,24(4):712-719.
- [6]赵鹏,张伟,孙立军.水泥剂量对水稳碎石收缩开裂与长期性能的影响[J].中国公路学报,2023,36(2):112-121.