

振动搅拌技术在公路工程中的试验研究与应用

陈 华

中国一冶集团有限公司 湖北 武汉 430000

【摘 要】：近年来，随着我国建筑业的迅速发展，公路工程作为城市建设中的纽带，担负着经济大动脉的责任，道路工程质量的好坏，使用周期的长短严重影响着现代化建设的发展。在各等级的公路路基工程中，使用最多的是水泥稳定碎石基层，水泥稳定碎石基层以其抗折强度高和良好的稳定性，延长了道路的使用寿命，大大减轻了道路面层的龟裂、坑槽和冻害。然而，水泥稳定碎石基层早期裂缝及由此诱发的沥青路面反射裂缝问题一直困扰着道路工程领域，影响着路面的耐久性。水泥稳定碎石基层耐久性直接影响到公路工程项目全寿命周期的运营成本，水稳基层质量的提升在很大程度上可以降低公路运营期的养护费用。

目前国内外水泥稳定碎石基层料普遍采用的自落式与强制式搅拌技术，以上两种方式实际上均是一种静力搅拌技术。当前国内拌制稳定土的搅拌机械主要是以应强制搅拌技术为主的连续式强制搅拌机，而研究与实践证明连续式强制搅拌机存在以下不足：1.搅拌时间太短，稳定土微观匀质性差；2.搅拌线速度较低，搅拌强度不够，搅拌效率低，当搅拌超过临界转速时由于离心力的存在，物料将会附着在搅拌筒壁上随着筒壁一起转动；并且当搅拌速率过快时，混合料斗中各成分会由于不同的惯性以不同速度抛离搅拌叶片，造成物料离析，使混合料的均匀度大幅下降。3.在搅拌过程中，存在速度梯度和搅拌低效边区域。混合料搅拌过程中，近中心的部分运动速度低，靠近拌筒壁处的速度高，存在速度梯度现象，更容易产生搅拌不均匀现象。针对传统搅拌技术存在的缺陷，采用振动搅拌水泥稳定碎石层技术可以彻底解决问题。振动搅拌采用振动搅拌主机，振动搅拌将混合料中的水泥团、灰团震碎，使其均匀分布在混合料中，有效防止混合料离析发生。

本论文以公司承接的“松滋淪水旅游快速通道工程”水泥稳定碎石层为载体，主要阐述了振动搅拌技术彻底解决水泥稳定碎石混合料中细集料“团粒”现象，有效提高水稳层无侧限抗压强度和压实度，为增强路面耐久性提供了重要保证。同时，混合料在振动搅拌作用下真正实现微观均匀，大幅减少道路半刚性基层裂缝发生。在满足设计技术指标要求的前提下，科学减少水泥用量，经济效益及社会效益显著。

【关键词】：振动搅拌；水稳层；无侧限抗压强度

1 水泥稳定碎石层配合比设计

1.1 原材料的选择要求

(1) 原材料的选择标准

根据相关规范及设计文件要求，确认水泥、水、粗集料、细集料及相关级配粒径要求，具体如下：

①水泥

水泥的强度等级为 32.5 或 42.5，优先选用硅酸盐或普通硅酸盐水泥，初凝时间应大于 3h，终凝时间应大于 6h 且小于 10h。

②拌和用水

符合现行《混凝土用水标准》（JGJ 63）中对素混凝土的用水要求，可直接作为基层底基层材料拌和与养生用水，非饮用水的水质检验，技术要求应符合下表规定：

表 1.1.1 非饮用水技术要求

项次	项目	技术要求	试验方法
1	pH 值	≥4.5	JGJ 63
2	Cl ⁻ 含量 (mg/L)	≤3500	
3	SO ₄ ²⁻ 含量 (mg/L)	≤2700	
4	碱含量 (mg/L)	≤1500	
5	可溶物含量 (mg/L)	≤10000	
6	不溶物含量 (mg/L)	≤5000	
7	其他杂质	不应有漂浮的油脂和泡沫及明显的颜色和异味	

注：1.以上表格中的数据引用于《混凝土用水标准》（JGJ 63）第 3 页，中国建筑工业出版社。2.碱含量采用非碱活性骨料时，可不检验碱含量。

③粗集料

用做被稳定材料的粗集料宜采用各种硬质岩石或砾石加工成的碎石，也可直接采用天然砾石，根据设计要求及本工程特性，粗集料应符合下列技术要求：

表 1.1.2 粗集料技术要求

项目	技术要求	试验方法
粗集料压碎值	≤30%	JTGE42 T 0316
针片状颗粒含量	≤20%	JTGE42 T 0312
0.075mm以下粉尘含量	≤2%	JTGE42 T 0310

注：以上表格中的数据引用于公路路面基层施工技术细则（JTG/T F20-2015）第7页，人民交通出版社。

④细集料

细集料应洁净、干燥、无风化、无杂质，并有适当的颗粒级配，细集料应符合下列技术要求：

表 1.1.3 细集料技术要求

项目	技术要求	试验方法
颗粒分析	满足级配要求	JTGE42 T 0302/0303/0327
有机质含量	<2%	JTGE42 T 0313/0336
硫酸盐含量	≤0.25%	JTGE42 T 0341

注：以上表格中的数据引用于公路路面基层施工技术细则（JTG/T F20-2015）第8页，人民交通出版社。

表 1.1.4 细集料规格要求

粒径 (mm)	通过下列筛孔 (mm) 的质量百分率 (%)								公称粒径 (mm)
	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
3-5	100	90-100	0-15	0-5	--	--	--	--	2.36-4.75
0-3	--	100	90-100	--	--	--	--	0-15	0-2.36
0-5	100	90-100	--	--	--	--	--	0-20	0-4.75

注：1.对 0-3mm 和 0-5mm 的细集料应分别严格控制大于 2.36mm 和 4.75mm 的颗粒含量。对 3-5mm 的细集料应严格控制小于 2.36mm 的颗粒含量。2.以上表格中的数据引用于公路路面基层施工技术细则（JTG/T F20-2015）第9页，人民交通出版社。

⑤混合料要求

本次试验研究选取骨架密实型水泥稳定类集料级配，详见下表：

表 1.1.5 骨架密实型水泥稳定类集料级配

筛孔尺寸 (mm)	37.5	31.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
通过百分率%	--	100	68-86	38-58	22-32	16-28	8-15	0-3

(2) 原材料的选取与检验

①水泥的选取与试验

根据规范要求，结合当地实际情况，选用葛洲坝松滋水泥有限公司 P·O 42.5 水泥，并对其凝结时间、安定性、强度等各项指标进行检验。

实验结果表明，初凝时间 363min，终凝时间 465min，能够满足初凝时间应大于 3h，终凝时间应大于 6h 且小于 10h 的要求，其他各项指标均合格，具体试验结果见下表：

表 1.1.6 水泥试验结果

试 验 项 目		国家标准	试验结果	判定结果	
细 度	负压筛法（%）	—	—	—	
	勃氏法（m ² /kg）	≥300	380	合格	
标 准 稠 度 （%）		—	26.5	—	
凝结时间(min)	初 凝	≥180	363	合格	
	终 凝	>360，<600	465	合格	
安定性	试 饼 法	—	—	—	
	雷 氏 法	≤5	0.5	合格	
1：3 胶 砂 强 度 (MPa)	用 水 量（ml）		—	225	—
	抗 折	3 天	≥3.5	4.4	合格
		28 天	≥6.5	6.8	合格
	抗 压	3 天	≥17	26.9	合格
		28 天	≥42.5	45.6	合格

②拌和用水

选用当地自来水。

③粗、细集料的选取与试验

按照原材料的选取要求，组织相关部门、水稳站、实验室等相关人员对当地多家石料厂进行了实地考察，对生产规模和外观质量符合要求的石料厂进行了取样，并带回实验室进行了初步的检验。

结合检验结果、运距、价格、生产规模等因素综合考虑，选择了合适的石料生产厂家，并对粗细集料进行了各项试验，均符合要求，检验结果详见下表：

表 1.1.7 粗集料试验结果

筛 分					
筛孔尺寸 (mm)	通过百分率 (%)	规范范围(%)	筛孔尺寸 (mm)	通过百分率 (%)	规范范围(%)
37.5	100.0	---	4.75	26.7	22~32
31.5	100.0	100	2.36	18.5	16~28
19.0	74.2	68~86	0.6	10.2	8~15
9.5	49.5	38~58	0.075	1.4	0~3
压 碎 值		19.3%	针片状含量		6.6%
粗集料<0.075 含量		0.5%	泥块含量		---
备注：石屑 0-5-碎石 5-10: 碎石 10-20: 碎石 20-30=29:18:31:22					

1.2 水泥稳定碎石层材料配合比设计及对比实验

采用振动搅拌技术能够彻底解决混合料中细集料“团粒”现象，让细集料充分弥散，让水泥充分水化。振动搅拌水泥稳定碎石混合料，由于细集料充分弥散，均匀粘附于骨料表面，均匀分布在混合料中，骨料间位移摩阻力大幅减小，容易形成嵌挤架构，有效防止混合料离析发生。压实度的提高，减少了结构层上部骨料过度受压破碎，提升了结构层整体刚度强度性能，经过压实后下半部及底部成型依然均匀密实，大大提升了抗弯拉性能。有效提高了路基层压实度，为增强路面耐久性提供了重要保证。

在确定原材料的条件下，根据设计要求及水泥稳定碎石层生产配制相关技术参数要求，并依据相关国家标准及行业规范，分别对水泥剂量分别为3.5%、4%、4.5%、5%的水泥稳定碎石基层材料进行配合比设计。

(1) 混合料级配的选择

根据粗细集料试验结果，按照1.2.1中对水泥稳定碎石层混合料的要求，对不同的水泥剂量进行配合比组合设计，选用0-5mm、5-10mm、10-20mm、20-30mm共四组粗细集料进行配制，配制比例为29:18:31:22，详见下表：

表 1.2.1 混合料筛分合成级配

集料规格 (mm)	比 (%)	通过下列筛孔 (mm) 的百分率%						
		31.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
20-30	22	100	2.5	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2
10-20	31	100	86.1	8.6	0.8	0.2	0.2	0.2
5-10	18	100	100	98.4	7.4	3.8	0.7	0.7
0-5	29	100	100	100	86.3	61.1	35.1	4.5
合成级配	--	100	74.2	49.5	26.7	18.5	10.2	1.4
要求通过百分率%	--	100	68-86	38-58	22-32	16-28	8-15	0-3

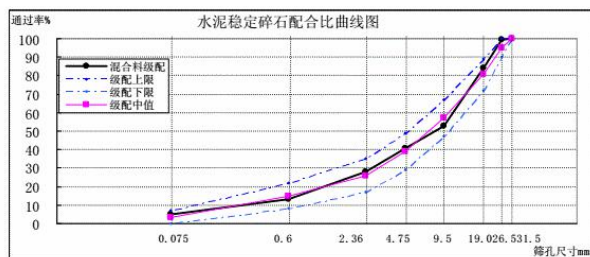


图 1.2.1-1 合成后的筛分级配曲线图

(2) 不同拌和方式混合料的击实试验

根据配合比设计思路，试验室与水稳站分工协作，互相配合，采用传统搅拌与振动搅拌两种拌和方式对水泥剂量分别为3.5%、4.0%、4.5%、5.0%的混合料进行了拌和，依据标

准要求，最大干密度试验采用重型击实试验方法进行，分三层，每层击实98击。具体试验结果详见表1.2.2：

表 1.2.2 不同拌和方式配制的结合料最大干密度和最佳含水率实验结果

水泥剂量 (%)	不同拌和方式结合料的最大干密度 (g/m³) 和最佳含水率 (%)			
	传统搅拌		振动搅拌	
	最大干密度	最佳含水率	最大干密度	最佳含水率
3.5	2.341	4.6	2.324	4.4
4.0	2.348	4.6	2.344	4.6
4.5	2.349	4.7	2.351	4.6
5.0	2.352	4.8	2.359	4.7

(3) 不同拌和方式混合料无侧限试件的成型及强度试验

根据击实试验结果，测出的最大干密度和最佳含水量，试验室与水稳站采用同一水泥剂量、同一配合比集中厂拌的方式进行取样，成型方式采用静压法成型，选用直径*高=∅150mm*150mm的试模，用98%的压实度计算混合料的用量。成型后的试件前6天将试件放入密封的塑料袋中，并放入标准养护室中养护，第7天将试件取出，浸泡在20℃±2℃的水中，使水面高出试件表面约2.5cm，在标准养护下浸水时间保持24h。将已浸水的试件从水中取出，用软布吸取试件表面的水分，将试件放在压力试验机上，保持加载速率为1mm/min。记录试件破坏的最大荷载，并计算试件的7d无侧限抗压强度。

表 1.2.3 传统拌和方式 7d 无侧限抗压强度值

结合料水泥剂量 (%)	强度平均值 (MPa)	强度标准偏差 (MPa)	变异系数 (%)	强度代表值 (MPa)
3.5	4.1	0.17	4.2	3.8
4.0	4.5	0.14	3.1	4.3
4.5	4.5	0.24	4.9	4.5
5.0	5.4	0.21	3.9	5.1

表 1.2.4 振动拌和方式 7d 无侧限抗压强度值

结合料水泥剂量 (%)	强度平均值 (MPa)	强度标准偏差 (MPa)	变异系数 (%)	强度代表值 (MPa)
3.5	4.7	0.19	4.0	4.4
4.0	5.2	0.20	3.9	4.9
4.5	6.0	0.29	4.8	5.5
5.0	6.4	0.23	3.6	6.0

表 1.2.5 相同水泥剂量振动拌和与传统拌和无机结合料 7d 无侧限强度值对比表

结合料水泥 剂量(%)	强度平均值 (MPa)		强度 增值	强度增 长率%	强度代表值 (MPa)		强度 增值	强度增 长率%
	普通	振动			普通	振动		
3.5	4.1	4.7	+0.6	14.6	3.8	4.4	+0.6	15.8
4.0	4.5	5.2	+0.7	15.6	4.3	4.9	+0.6	14.0
4.5	4.5	6.0	+1.5	33.3	4.5	5.5	+1.0	22.2
5.0	5.4	6.4	+1.0	18.5	5.1	6.0	+0.9	17.6

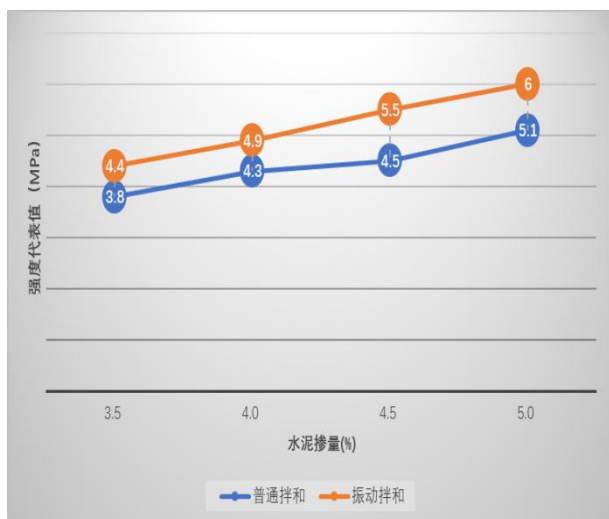


图 1.2.5-1 不同拌和方式不同水泥剂量无机结合料对应的 7d 无侧限强度值曲线图

从上图表中可以看出,两种搅拌方式对水泥剂量为 3.5%、4.0%、4.5%、5.0%的混合料进行了相同的水泥剂量、同一配对比试验,振动搅拌下水泥稳定碎石无侧限抗压强度值普遍较高。无机结合料振动搅拌 7 天无侧限抗压强度平均值和比普通搅拌分别提高 0.6MPa 到 1.0MPa,强度增长率从占 14.6%到 33.3%,可见,振动搅拌能明显提高水泥稳定碎石的无侧限抗压强度。

不同水泥剂量传统搅拌方式下无机结合料配合比检测报告:

普通拌合无机结合料配合比设计试验检测报告

试验室名称: 武汉中和工程技术有限公司
报告编号: S098-BG-YF-WPB-0001

施工单位: 中国一冶集团有限公司
任务编号: RW-2019-YF-WPB-0001

工程名称: 松滋市港水旅游快速通道工程
样品编号: YP-2019-YF-WPB-0001

工程部位/用途: 基层
样品名称: 水泥稳定碎石

试验依据: JTG E51-2009
判定依据: JTG/T F20-2015

样品描述: 无臭味, 无杂质

主要仪器设备及编号: TG-01 电动重型击实仪, BX-12 脱式滴定管, TG-13 电子天平

材料名称	规格型号	生产厂家/产地	样品编号	比例用量 (%)
碎石	20-30mm	湖北佳恒丰金属材料有限公司	----	22.0
碎石	10-20mm	湖北佳恒丰金属材料有限公司	----	31.0
碎石	5-10mm	湖北佳恒丰金属材料有限公司	----	18.0
石屑	0-5mm	湖北佳恒丰金属材料有限公司	----	29.0
水泥	P·C 32.5	葛洲坝松滋水泥有限公司	----	3.5

筛孔尺寸 (mm)	37.5	31.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
筛上质量百分率 (%)	100.0	100.0	74.2	49.5	26.7	18.5	10.2	1.4
目标值	上	100	86	58	32	28	15	3
配范围	下	100	68	38	22	16	8	0

标准曲线的确定

结合料剂量 (%)	EDTA 耗量 (mL)
2.0	9.0
3.0	11.4
4.0	13.8
5.0	16.0
6.0	18.1

标准曲线公式: $y = 2.28x + 4.56$

配合比确定

结合料剂量 (%)	最大干密度 (g/cm³)	最佳含水率 (%)	要求压实度 (%)	强度平均值 (MPa)	强度标准差 (MPa)	变异系数 (%)	强度代表值 (MPa)
3.5	2.341	4.8	98.0	4.1	0.17	4.2	3.8

结合料剂量 (%) 3.5 最大干密度 (g/cm³) 2.341 要求压实度 (%) 98.0

结论: 合格

备注: 试验: 孙明 审核: 李 签发: 陈明 日期: 2019 年 05 月 14 日 (专用章)

普通拌合无机结合料配合比设计试验检测报告

试验室名称: 武汉中和工程技术有限公司
报告编号: S098-BG-YF-WPB-0002

施工单位: 中国一冶集团有限公司
任务编号: RW-2019-YF-WPB-0002

工程名称: 松滋市港水旅游快速通道工程
样品编号: YP-2019-YF-WPB-0002

工程部位/用途: 基层
样品名称: 水泥稳定碎石

试验依据: JTG E51-2009
判定依据: JTG/T F20-2015

样品描述: 无臭味, 无杂质

主要仪器设备及编号: TG-01 电动重型击实仪, BX-12 脱式滴定管, TG-13 电子天平

材料名称	规格型号	生产厂家/产地	样品编号	比例用量 (%)
碎石	20-30mm	湖北佳恒丰金属材料有限公司	----	22.0
碎石	10-20mm	湖北佳恒丰金属材料有限公司	----	31.0
碎石	5-10mm	湖北佳恒丰金属材料有限公司	----	18.0
石屑	0-5mm	湖北佳恒丰金属材料有限公司	----	29.0
水泥	P·C 32.5	葛洲坝松滋水泥有限公司	----	4.0

筛孔尺寸 (mm)	37.5	31.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
筛上质量百分率 (%)	100.0	100.0	74.2	49.5	26.7	18.5	10.2	1.4
目标值	上	100	86	58	32	28	15	3
配范围	下	100	68	38	22	16	8	0

标准曲线的确定

结合料剂量 (%)	EDTA 耗量 (mL)
2.0	9.0
3.0	11.4
4.0	13.8
5.0	16.0
6.0	18.1

标准曲线公式: $y = 2.28x + 4.56$

配合比确定

结合料剂量 (%)	最大干密度 (g/cm³)	最佳含水率 (%)	要求压实度 (%)	强度平均值 (MPa)	强度标准差 (MPa)	变异系数 (%)	强度代表值 (MPa)
4.0	2.348	4.8	98.0	4.5	0.14	3.1	4.3

结合料剂量 (%) 4.0 最大干密度 (g/cm³) 2.348 要求压实度 (%) 98.0

结论: 合格

备注: 试验: 孙明 审核: 李 签发: 陈明 日期: 2019 年 05 月 14 日 (专用章)

不同水泥剂量振动搅拌方式下无机结合料配合比检测报告

普通拌合无机结合料配合比设计试验检测报告

试验室名称: 武汉中和工程技术有限公司

松滋市沮水旅游快速通道工程工地试验室

报告编号: S098-BG-YF-WPB-0003

施工单位	中国一冶集团有限公司		任务编号	RW-2019-YF-WPB-0003																	
工程名称	松滋市沮水旅游快速通道工程		样品编号	YP-2019-YF-WPB-0003																	
工程部位/用途	基层		样品名称	水泥稳定碎石																	
试验依据	JTG E51-2009		判定依据	JTG/T F20-2015																	
样品描述	无臭味, 无杂质																				
主要仪器设备	TG-01 电动重型压实仪, HX-12 酸式滴定管, TG-13 电子天平																				
材料名称	规格型号	生产厂家/产地	样品编号	比例用量 (%)																	
碎石	20-30mm	湖北佳恒丰金属材料有限公司	----	22.0																	
碎石	10-20mm	湖北佳恒丰金属材料有限公司	----	31.0																	
碎石	5-10mm	湖北佳恒丰金属材料有限公司	----	18.0																	
石屑	0-5mm	湖北佳恒丰金属材料有限公司	----	29.0																	
水泥	P·C 32.5	葛洲坝松滋水泥有限公司	----	4.5																	
筛孔尺寸 (mm)	37.5	31.5	19	9.5	4.75																
通过质量百分率 (%)	100.0	100.0	74.2	49.5	26.7																
目标级配	上限	100	86	58	32																
配范围	下限	100	68	38	22																
标准曲线图																					
配合比确定	<table border="1"> <tr> <th>结合料剂量 (%)</th> <th>最大干密度 (g/cm³)</th> <th>最佳含水量 (%)</th> <th>要求压实力 (kPa)</th> <th>强度平均值 (MPa)</th> <th>强度标准差 (MPa)</th> <th>变异系数 (%)</th> <th>强度代表值 (MPa)</th> </tr> <tr> <td>4.5</td> <td>2.349</td> <td>4.8</td> <td>98.0</td> <td>4.9</td> <td>0.24</td> <td>4.9</td> <td>4.5</td> </tr> </table>					结合料剂量 (%)	最大干密度 (g/cm³)	最佳含水量 (%)	要求压实力 (kPa)	强度平均值 (MPa)	强度标准差 (MPa)	变异系数 (%)	强度代表值 (MPa)	4.5	2.349	4.8	98.0	4.9	0.24	4.9	4.5
结合料剂量 (%)	最大干密度 (g/cm³)	最佳含水量 (%)	要求压实力 (kPa)	强度平均值 (MPa)	强度标准差 (MPa)	变异系数 (%)	强度代表值 (MPa)														
4.5	2.349	4.8	98.0	4.9	0.24	4.9	4.5														
结合料剂量 (%)	4.5																				
最大干密度 (g/cm³)	2.349																				
要求压实力 (kPa)	98.0																				
结论:	合格																				
备注:																					

试验: 阳阳 审核: 李 签发: 陈静 日期: 2019 年 05 月 16 日 (专用章)

振动拌合无机结合料配合比设计试验检测报告

试验室名称: 武汉中和工程技术有限公司

松滋市沮水旅游快速通道工程工地试验室

报告编号: S098-BG-YF-WPB-0005

施工单位	中国一冶集团有限公司		任务编号	RW-2019-YF-WPB-0005																	
工程名称	松滋市沮水旅游快速通道工程		样品编号	YP-2019-YF-WPB-0005																	
工程部位/用途	基层		样品名称	水泥稳定碎石																	
试验依据	JTG E51-2009		判定依据	JTG/T F20-2015																	
样品描述	无臭味, 无杂质																				
主要仪器设备	TG-01 电动重型压实仪, HX-12 酸式滴定管, TG-13 电子天平																				
材料名称	规格型号	生产厂家/产地	样品编号	比例用量 (%)																	
碎石	20-30mm	湖北佳恒丰金属材料有限公司	----	22.0																	
碎石	10-20mm	湖北佳恒丰金属材料有限公司	----	31.0																	
碎石	5-10mm	湖北佳恒丰金属材料有限公司	----	18.0																	
石屑	0-5mm	湖北佳恒丰金属材料有限公司	----	29.0																	
水泥	P·C 32.5	葛洲坝松滋水泥有限公司	----	3.5																	
筛孔尺寸 (mm)	37.5	31.5	19	9.5	4.75																
通过质量百分率 (%)	100.0	100.0	74.2	49.5	26.7																
目标级配	上限	100	86	58	32																
配范围	下限	100	68	38	22																
标准曲线图																					
配合比确定	<table border="1"> <tr> <th>结合料剂量 (%)</th> <th>最大干密度 (g/cm³)</th> <th>最佳含水量 (%)</th> <th>要求压实力 (kPa)</th> <th>强度平均值 (MPa)</th> <th>强度标准差 (MPa)</th> <th>变异系数 (%)</th> <th>强度代表值 (MPa)</th> </tr> <tr> <td>3.5</td> <td>2.324</td> <td>4.4</td> <td>98.0</td> <td>4.7</td> <td>0.19</td> <td>4.0</td> <td>4.4</td> </tr> </table>					结合料剂量 (%)	最大干密度 (g/cm³)	最佳含水量 (%)	要求压实力 (kPa)	强度平均值 (MPa)	强度标准差 (MPa)	变异系数 (%)	强度代表值 (MPa)	3.5	2.324	4.4	98.0	4.7	0.19	4.0	4.4
结合料剂量 (%)	最大干密度 (g/cm³)	最佳含水量 (%)	要求压实力 (kPa)	强度平均值 (MPa)	强度标准差 (MPa)	变异系数 (%)	强度代表值 (MPa)														
3.5	2.324	4.4	98.0	4.7	0.19	4.0	4.4														
结合料剂量 (%)	3.5																				
最大干密度 (g/cm³)	2.324																				
要求压实力 (kPa)	98.0																				
结论:	合格																				
备注:																					

试验: 阳阳 审核: 李 签发: 陈静 日期: 2019 年 05 月 20 日 (专用章)

普通拌合无机结合料配合比设计试验检测报告

试验室名称: 武汉中和工程技术有限公司

松滋市沮水旅游快速通道工程工地试验室

报告编号: S098-BG-YF-WPB-0004

施工单位	中国一冶集团有限公司		任务编号	RW-2019-YF-WPB-0004																	
工程名称	松滋市沮水旅游快速通道工程		样品编号	YP-2019-YF-WPB-0004																	
工程部位/用途	基层		样品名称	水泥稳定碎石																	
试验依据	JTG E51-2009		判定依据	JTG/T F20-2015																	
样品描述	无臭味, 无杂质																				
主要仪器设备	TG-01 电动重型压实仪, HX-12 酸式滴定管, TG-13 电子天平																				
材料名称	规格型号	生产厂家/产地	样品编号	比例用量 (%)																	
碎石	20-30mm	湖北佳恒丰金属材料有限公司	----	22.0																	
碎石	10-20mm	湖北佳恒丰金属材料有限公司	----	31.0																	
碎石	5-10mm	湖北佳恒丰金属材料有限公司	----	18.0																	
石屑	0-5mm	湖北佳恒丰金属材料有限公司	----	29.0																	
水泥	P·C 32.5	葛洲坝松滋水泥有限公司	----	5.0																	
筛孔尺寸 (mm)	37.5	31.5	19	9.5	4.75																
通过质量百分率 (%)	100.0	100.0	74.2	49.5	26.7																
目标级配	上限	100	86	58	32																
配范围	下限	100	68	38	22																
标准曲线图																					
配合比确定	<table border="1"> <tr> <th>结合料剂量 (%)</th> <th>最大干密度 (g/cm³)</th> <th>最佳含水量 (%)</th> <th>要求压实力 (kPa)</th> <th>强度平均值 (MPa)</th> <th>强度标准差 (MPa)</th> <th>变异系数 (%)</th> <th>强度代表值 (MPa)</th> </tr> <tr> <td>5.0</td> <td>2.352</td> <td>4.8</td> <td>98.0</td> <td>5.4</td> <td>0.21</td> <td>3.9</td> <td>5.1</td> </tr> </table>					结合料剂量 (%)	最大干密度 (g/cm³)	最佳含水量 (%)	要求压实力 (kPa)	强度平均值 (MPa)	强度标准差 (MPa)	变异系数 (%)	强度代表值 (MPa)	5.0	2.352	4.8	98.0	5.4	0.21	3.9	5.1
结合料剂量 (%)	最大干密度 (g/cm³)	最佳含水量 (%)	要求压实力 (kPa)	强度平均值 (MPa)	强度标准差 (MPa)	变异系数 (%)	强度代表值 (MPa)														
5.0	2.352	4.8	98.0	5.4	0.21	3.9	5.1														
结合料剂量 (%)	5.0																				
最大干密度 (g/cm³)	2.352																				
要求压实力 (kPa)	98.0																				
结论:	合格																				
备注:																					

试验: 阳阳 审核: 李 签发: 陈静 日期: 2019 年 05 月 18 日 (专用章)

无振动拌合无机结合料配合比设计试验检测报告

试验室名称: 武汉中和工程技术有限公司

松滋市沮水旅游快速通道工程工地试验室

报告编号: S098-BG-YF-WPB-0007

施工单位	中国一冶集团有限公司		任务编号	RW-2019-YF-WPB-0007																	
工程名称	松滋市沮水旅游快速通道工程		样品编号	YP-2019-YF-WPB-0007																	
工程部位/用途	基层		样品名称	水泥稳定碎石																	
试验依据	JTG E51-2009		判定依据	JTG/T F20-2015																	
样品描述	无臭味, 无杂质																				
主要仪器设备	TG-01 电动重型压实仪, HX-12 酸式滴定管, TG-13 电子天平																				
材料名称	规格型号	生产厂家/产地	样品编号	比例用量 (%)																	
碎石	20-30mm	湖北佳恒丰金属材料有限公司	----	22.0																	
碎石	10-20mm	湖北佳恒丰金属材料有限公司	----	31.0																	
碎石	5-10mm	湖北佳恒丰金属材料有限公司	----	18.0																	
石屑	0-5mm	湖北佳恒丰金属材料有限公司	----	29.0																	
水泥	P·C 32.5	葛洲坝松滋水泥有限公司	----	4.0																	
筛孔尺寸 (mm)	37.5	31.5	19	9.5	4.75																
通过质量百分率 (%)	100.0	100.0	74.2	49.5	26.7																
目标级配	上限	100	86	58	32																
配范围	下限	100	68	38	22																
标准曲线图																					
配合比确定	<table border="1"> <tr> <th>结合料剂量 (%)</th> <th>最大干密度 (g/cm³)</th> <th>最佳含水量 (%)</th> <th>要求压实力 (kPa)</th> <th>强度平均值 (MPa)</th> <th>强度标准差 (MPa)</th> <th>变异系数 (%)</th> <th>强度代表值 (MPa)</th> </tr> <tr> <td>4.0</td> <td>2.344</td> <td>4.6</td> <td>98.0</td> <td>5.2</td> <td>0.20</td> <td>3.9</td> <td>4.9</td> </tr> </table>					结合料剂量 (%)	最大干密度 (g/cm³)	最佳含水量 (%)	要求压实力 (kPa)	强度平均值 (MPa)	强度标准差 (MPa)	变异系数 (%)	强度代表值 (MPa)	4.0	2.344	4.6	98.0	5.2	0.20	3.9	4.9
结合料剂量 (%)	最大干密度 (g/cm³)	最佳含水量 (%)	要求压实力 (kPa)	强度平均值 (MPa)	强度标准差 (MPa)	变异系数 (%)	强度代表值 (MPa)														
4.0	2.344	4.6	98.0	5.2	0.20	3.9	4.9														
结合料剂量 (%)	4.0																				
最大干密度 (g/cm³)	2.344																				
要求压实力 (kPa)	98.0																				
结论:	合格																				
备注:																					

试验: 阳阳 审核: 李 签发: 陈静 日期: 2019 年 05 月 24 日 (专用章)

振动拌合无机结合料配合比设计试验检测报告

试验室名称：武汉中和工程技术有限公司

松滋市港水旅游快速通道工程工地试验室

报告编号：S098-BG-YF-WPB-0006

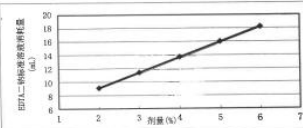
施工单位		中国一冶集团有限公司		任务编号		鄂-2019-YF-WPB-0006			
工程名称		松滋市港水旅游快速通道工程		样品编号		YP-2019-YF-WPB-0006			
工程部位/用途		基层		样品名称		水泥稳定碎石			
试验依据		JTG E51-2009		判定依据		JTG/T F20-2015			
样品描述		无臭味，无杂质							
主要仪器设备及编号		TG-01 电动重型击实仪、BX-12 脱式滴定管、TG-13 电子天平							
原材料	材料名称	规格型号	生产厂家/产地		样品编号		比例用量 (%)		
	碎石	20-30mm	湖北佳恒丰金属材料有限公司		----		22.0		
	碎石	10-20mm	湖北佳恒丰金属材料有限公司		----		31.0		
	碎石	5-10mm	湖北佳恒丰金属材料有限公司		----		18.0		
	石屑	0-5mm	湖北佳恒丰金属材料有限公司		----		29.0		
矿料级配	水泥	P·C 32.5	葛洲坝水泥有限公司		----		4.5		
	筛孔尺寸 (mm)	37.5	31.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
	通过质量百分率 (%)	100.0	100.0	74.2	49.5	26.7	18.5	10.2	1.4
	目标级配	上限	100	86	58	32	28	15	3
	配范围	下限	100	68	38	22	16	8	0

标准曲线图

标准曲线的确定

EDTA二钠标准溶液消耗量 (mL)

标准曲线的确定



标准曲线公式

配合比确定

结合料剂量 (%)	最大干密度 (g/cm³)	最佳含水率 (%)	要求压实度 (%)	强度平均值 (MPa)	强度标准差 (MPa)	变异系数 (%)	强度代表值 (MPa)
4.5	2.351	4.6	98.0	6.0	0.29	4.8	6.0
结合料剂量 (%)	最大干密度 (g/cm³)	要求压实度 (%)	要求强度 (MPa)				
4.5	2.351	98.0	6.0				

结论：试验：陈伟 审核：程 签发：陈伟 日期：2019年05月22日 (专用章)

(4) 标准曲线的滴定结果

由试验结果(表 1.2.6)得出 EDTA 标准曲线公式(图 1.2.6-1 所示)，根据 EDTA 标准曲线公式，对施工生长中拌制的水稳料的水泥剂量做抽检验证。

表 1.2.6 EDTA 标准曲线滴定结果

结合料剂量 (%)	EDTA 耗量 (mL)		
	1	2	平均
2.0	9.0	9.2	9.1
3.0	11.4	11.4	11.4
4.0	13.8	13.6	13.7
5.0	16.0	15.9	16.0
6.0	18.1	18.3	18.2

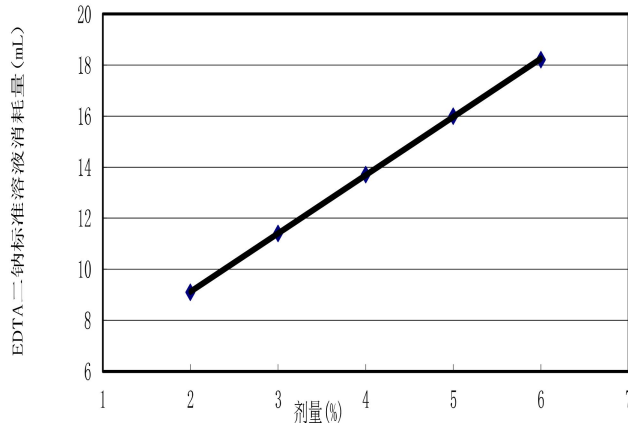


图 1.2.6-1 EDTA 标准曲线滴定结果

由试验结果得出 EDTA 标准曲线公式为 $y = 2.28x + 4.56$ ，验证合格。

(5) 同一配比，不同拌和方式微观结构对比试验

为了进一步分析验证振动搅拌能够提高水泥稳定碎石结合料的搅拌均匀性，从而提高内部结构的密实性，将同一配合比 5% 的水泥剂量水泥稳定碎石混合料，采用振动搅拌方式与传统搅拌方式进行配制样品，通过电镜扫描观察两种搅拌方式下拌合料的微观结构，如图 1.2.7-1 所示传统搅拌水泥稳定碎石微观结构。其上面有明显的裂缝并且有较大的孔隙出现，材料聚集不均匀，有明显“挤包”出现，这说明在骨料表面有未充分反应的水泥颗粒存在，在水泥颗粒周围生成水化反应物，将未反应的水泥包裹，这样就降低水泥的胶凝效果。在图 1.2.7-2 振动搅拌水稳碎石微观结构中，显示表明没有明显的裂纹，且孔隙较小，结构致密，水泥颗粒分布微观均匀，能很好地包裹骨料。

综上所述，印证了微观结构与宏观性能的对对应关系，这

振动拌合无机结合料配合比设计试验检测报告

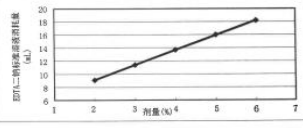
试验室名称：武汉中和工程技术有限公司

松滋市港水旅游快速通道工程工地试验室

报告编号：S098-BG-YF-WPB-0008

施工单位	中国一冶集团有限公司	任务编号	鄂-2019-YF-WPB-0008						
工程名称	松滋市沮水旅游快速通道工程	样品编号	YP-2019-YF-WPB-0008						
工程部位/用途	基层	样品名称	水泥稳定碎石						
试验依据	JTG E51-2009	判定依据	JTG/T F20-2015						
样品描述	无臭味、无杂质								
主要仪器设备及编号	TG-01 电动重型击实仪、BX-12 脱式滴定管、TG-13 电子天平								
原材料	材料名称	规格型号	生产厂家/产地		样品编号	比例用量 (%)			
	碎石	20-30mm	湖北佳恒丰金属材料有限公司		----	22.0			
	碎石	10-20mm	湖北佳恒丰金属材料有限公司		----	31.0			
	碎石	5-10mm	湖北佳恒丰金属材料有限公司		----	18.0			
	石屑	0-5mm	湖北佳恒丰金属材料有限公司		----	29.0			
	水泥	P·C 32.5	葛洲坝松滋水泥有限公司		----	5.0			
矿料级配	筛孔尺寸 (mm)	37.5	31.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
	通过质量百分率 (%)	100.0	100.0	74.2	49.5	26.7	18.5	10.2	1.4
	目标级配	上限	100	86	58	32	28	15	3
	配范围	下限	100	68	38	22	16	8	0
标准曲线图的确定									
结合料		EDTA 耗量 (mL)							
剂量 (%)	1	2	平均						
2.0	9.0	9.2	9.1						
3.0	11.4	11.4	11.4						
4.0	13.8	13.6	13.7						
5.0	16.0	15.9	16.0						
6.0	18.1	18.3	18.2						
标准曲线公式				$y = 2.28x + 4.56$					
配合比确定									
结合料剂量 (%)	最大干密度 (g/cm³)	最佳含水率 (%)	要求压实度 (%)	强度平均值 (MPa)	强度标准差 (MPa)	变异系数 (%)	强度代表值 (MPa)		
5.0	2.359	4.7	98.0	6.4	0.23	3.6	6.0		
结合料剂量 (%)	5.0	最大干密度 (g/cm³)	2.359	要求压实度 (%)	98.0				
结论									
备注:									
试验:	审核:	签发:	日期:	2019年05月26日 (专用章)					

标准曲线的确定



标准曲线公式

配合比确定

结合料剂量 (%)	最大干密度 (g/cm³)	最佳含水率 (%)	要求压实度 (%)	强度平均值 (MPa)	强度标准差 (MPa)	变异系数 (%)	强度代表值 (MPa)
5.0	2.359	4.7	98.0	6.4	0.23	5.8	6.0
结合料剂量 (%)	最大干密度 (g/cm³)	要求压实度 (%)	要求强度 (MPa)				
5.0	2.359	98.0	6.0				

结论：试验：陈伟 审核：程 签发：陈伟 日期：2019年05月26日 (专用章)

也是振动搅拌作用机理的体现，即由于在水泥稳定碎石混合料搅拌时加入了振动作用，使得其在搅拌时产生震颤。这种震颤作用使混合料各组成成分分布均匀，水泥水化反应更加充分，颗粒排列结构也更加致密，并形成嵌挤架构，提升了结构层整体刚度强度性能，符合提高水泥稳定碎石层无侧限抗压强度和压实度的原理。

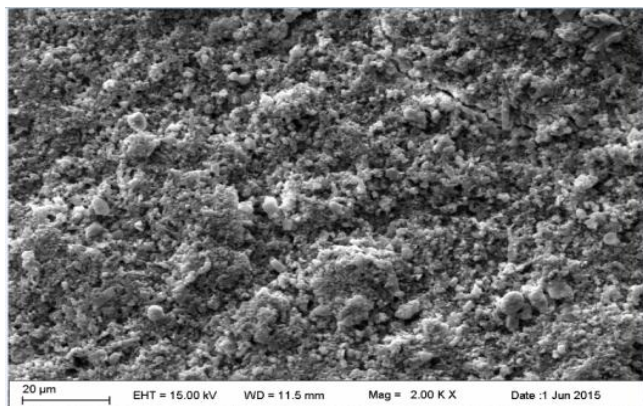


图 1.2.7-1 传统搅拌配制试样微观结构

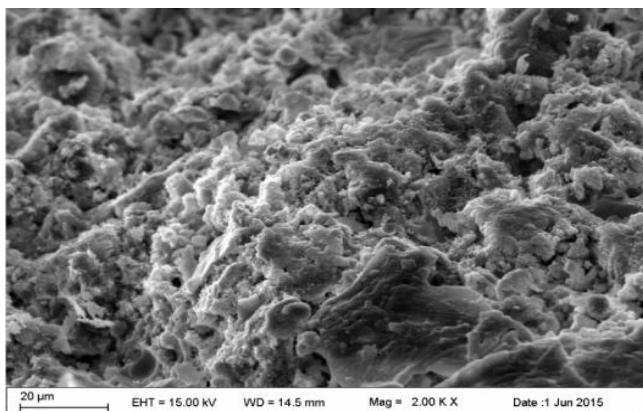


图 1.2.7-2 振动搅拌配制试样微观结构

2 实际施工应用情况

综合上述水泥稳定碎石层结合料的试验结果及微观原理的印证，根据现场进度安排，对同一配合比 3.5% 与 5% 水泥基层料，分别采用传统搅拌和振动搅拌两种拌和方式，在不同的标段及部位进行了实际应用。水泥稳定碎石层结材料按照《公路路面基层施工技术细则》（JTG/T F20-2015）中的规定进行摊铺施工。

由图 2.1.1、图 2.1.2、图 2.1.3 中，可以看出采用传统搅拌方式搅拌的水泥含量 3.5% 的水泥稳定碎石料，水泥稳定碎石基层施工应用，其现场钻芯取样 7d 无侧限抗压强度试验检测报告结果为 3.7MPa，而采用振动拌合方式搅拌的同配比的水泥稳定碎石料，在太平桥路水稳底基层进行施工应

用，其现场钻芯取样 7d 无侧限抗压强度试验检测报告结果为 4.1MPa、4.3MPa。对比显示，采用振动搅拌方式拌合的水泥剂量 3.5% 的水泥稳定碎石料，比普通拌合方式的同配比水稳碎石料 7d 无侧限抗压强度高约 0.4~0.6MPa，7d 无侧限抗压强度提高约为 10%~16%。

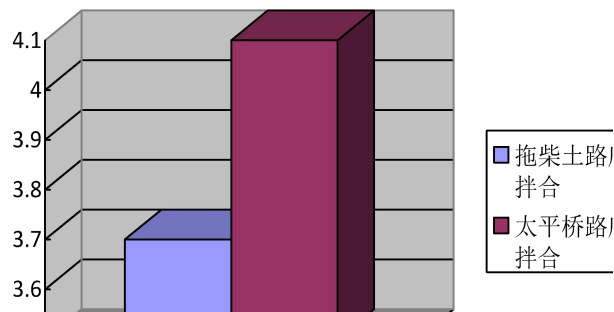


图 2.1.1 拖柴土路、太平桥路底基层（水泥含量 3.5%）同配比不同拌和施工对比

注：《公路路面基层施工技术细则》（JTG/T F20-2015），人民交通出版社。

第 1 页，共 1 页

JBC10704

无机结合料钻芯取样抗压强度试验检测报告

试验室名称: 武汉中和工程技术有限公司		报告编号: S145-BG-TF-XCJH-0001	
工程部位/用途: 拖柴土路X0+000~X0+691.784底基层		任务编号: RW-2019-YF-XCJH-0001	
试验依据: JTG E60-2008		样品编号: YP-2019-YF-XCJH-0001	
样品描述: 试件完好, 无缺损		样品名称: 水泥稳定碎石芯样	
实验条件: /		试验日期: 2019.10.06	
主要仪器设备: JJC-06取芯机, LX-08游标卡尺, LX-07钢直尺等			
结合料剂量: 3.5 (%)		成型方法: 钻芯取样	
最大干密度: 2.341 (g/cm³)	最佳含水量: 4.8 (%)	要求压实度: 98 (%)	
材料名称	规格型号	生产厂家/产地	样品编号
碎石	20-30mm	湖北佳恒非金属材料有限公司	-----
碎石	10-20mm	湖北佳恒非金属材料有限公司	-----
碎石	5-10mm	湖北佳恒非金属材料有限公司	-----
石屑	0-5mm	湖北佳恒非金属材料有限公司	-----
水泥	P·C 32.5	葛洲坝松滋水泥有限公司	-----
试件编号	1	2	3
芯样抗压强度 (MPa)	4.0	4.2	4.3
平均强度 (MPa)	4	标准差	0.2
试件个数	13	强度max (MPa)	4.3
设计强度 (MPa)	2.5	Za	1.645
检测结论: 所检部位水泥稳定碎石芯样7天无侧限抗压强度满足设计要求。		偏差系数 (%)	
		5	
		强度min (MPa)	
		3.7	
		R _{0.95}	
		3.7	
备注:			

图 2.1.2 拖柴土路水稳底基层（水泥含量 3.5%）传统拌和方式施工检测结果

第1页, 共1页

JB010704

无机结合料钻芯取样抗压强度试验检测报告

试验室名称: 武汉中和工程技术有限公司 报告编号: S145-BG-YF-3CJH-0004
松滋市港水旅游快速通道工程工地试验室

工程部位/用途	太平桥路K0+000~K0+900底基层	任务编号	2019-YF-3CJH-0004
试验依据	JTG E60-2008	样品编号	YP-2019-YF-3CJH-0004
样品描述	试件完好, 无缺损	样品名称	水泥稳定碎石芯样
实验条件	/	试验日期	2019.10.31
主要仪器设备及编号	JC-06取芯机, LX-06游标卡尺, LX-07钢直尺等		
结合料剂量	3.5 (%)	成型方法	钻芯取样
最大干密度	2.324 (g/cm³)	最佳含水量	4.4 (%)
		要求压实度	98 (%)
材料名称	规格型号	生产厂家/产地	样品编号
碎石	20-30mm	湖北佳恒非金属材料有限公司	---
碎石	10-20mm	湖北佳恒非金属材料有限公司	---
碎石	5-10mm	湖北佳恒非金属材料有限公司	---
石屑	0-5mm	湖北佳恒非金属材料有限公司	---
水泥	P·C 32.5	葛州坝松滋水泥有限公司	---
试件编号	1	2	3
芯样抗压强度 (MPa)	4.7	4.5	4.3
平均强度 (MPa)	4.6	标准差	0.17
试件个数	13	强度max (MPa)	4.9
设计强度 (MPa)	2.5	Za	1.645
		R _{0.95}	4.3

检测结论: 所检部位水泥稳定碎石芯样7天无侧限抗压强度满足设计要求。

备注:

试验: 阳伟 审核: 李立 签发: 陈利军 日期: 2019年11月01日 (专用章)

第1页, 共1页

JB010704

无机结合料钻芯取样抗压强度试验检测报告

试验室名称: 武汉中和工程技术有限公司 报告编号: S145-BG-YF-3CJH-0007
松滋市港水旅游快速通道工程工地试验室

工程部位/用途	太平桥路K0+900~K1+825底基层	任务编号	2019-YF-3CJH-0007
试验依据	JTG E60-2008	样品编号	YP-2019-YF-3CJH-0007
样品描述	试件完好, 无缺损	样品名称	水泥稳定碎石芯样
实验条件	/	试验日期	2019.11.24
主要仪器设备及编号	JC-06取芯机, LX-08游标卡尺, LX-07钢直尺等		
结合料剂量	3.5 (%)	成型方法	钻芯取样
最大干密度	2.324 (g/cm³)	最佳含水量	4.4 (%)
		要求压实度	98 (%)
材料名称	规格型号	生产厂家/产地	样品编号
碎石	20-30mm	湖北佳恒非金属材料有限公司	---
碎石	10-20mm	湖北佳恒非金属材料有限公司	---
碎石	5-10mm	湖北佳恒非金属材料有限公司	---
石屑	0-5mm	湖北佳恒非金属材料有限公司	---
水泥	P·C 32.5	葛州坝松滋水泥有限公司	---
试件编号	1	2	3
芯样抗压强度 (MPa)	4.3	4.5	4.4
平均强度 (MPa)	4.4	标准差	0.21
试件个数	13	强度max (MPa)	4.8
设计强度 (MPa)	5.0	Za	1.645
		R _{0.95}	4.3

检测结论: 所检部位水泥稳定碎石芯样7天无侧限抗压强度满足设计要求。

备注:

试验: 阳伟 审核: 李立 签发: 陈利军 日期: 2019年11月25日 (专用章)

图 2.1.3 太平桥路水稳底基层 (水泥含量 3.5%) 振动拌和方式施工检测结果

由图 2.1.4、图 2.1.5、图 2.1.6 中, 可以看出采用传统拌合方式搅拌的水泥含量 5% 的水泥稳定碎石料, 在拖柴土路下基层施工应用中, 其现场钻芯取样 7d 无侧限抗压强度试验检测报告结果为 5.3MPa。而采用振动拌合的同样配比的水泥稳定碎石料, 在拖柴土路上基层进行施工应用中, 其现场钻芯取样 7d 无侧限抗压强度试验检测报告结果为 6.2MPa。对比显示, 采用振动方式拌合的水泥含量 5% 的水泥稳定碎石料, 比传统拌合方式的同配比水稳碎石料 7d 无侧限抗压强度高约 0.9MPa, 7d 无侧限抗压强度提高约为 17%。

通过以上采用两种不同的拌合方式在不同路段进行施工应用对比, 其他施工工艺完全相同的情况下, 说明采用振动拌合生产的水泥稳定碎石料的现场取样检测强度结果, 均高于普通拌合生产的水泥稳定碎石料。

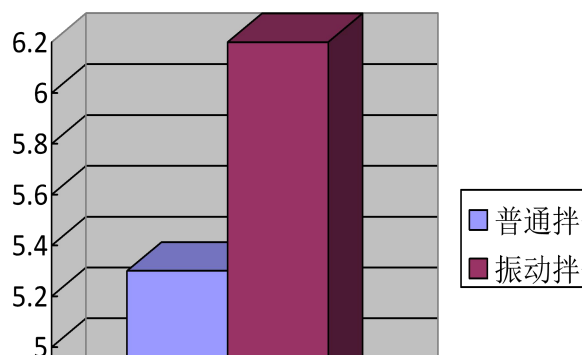


图 2.1.4 拖柴土路下、上基层 (5%) 同配比传统拌和与振动拌合施工对比

第1页, 共1页

JB010704

无机结合料钻芯取样抗压强度试验检测报告

试验室名称: 武汉中和工程技术有限公司 报告编号: S145-BG-YF-3CJH-0003
拖柴土路K0+000~K0+694.794上基层

工程部位/用途	拖柴土路K0+000~K0+694.794上基层	任务编号	2019-YF-3CJH-0003
试验依据	JTG E60-2008	样品编号	YP-2019-YF-3CJH-0003
样品描述	试件完好, 无缺损	样品名称	水泥稳定碎石芯样
实验条件	/	试验日期	2019.10.22
主要仪器设备及编号	JC-06取芯机, LX-08游标卡尺, LX-07钢直尺等		
结合料剂量	5.0 (%)	成型方法	钻芯取样
最大干密度	2.359 (g/cm³)	最佳含水量	4.7 (%)
		要求压实度	98 (%)
材料名称	规格型号	生产厂家/产地	样品编号
碎石	20-30mm	湖北佳恒非金属材料有限公司	---
碎石	10-20mm	湖北佳恒非金属材料有限公司	---
碎石	5-10mm	湖北佳恒非金属材料有限公司	---
石屑	0-5mm	湖北佳恒非金属材料有限公司	---
水泥	P·C 32.5	葛州坝松滋水泥有限公司	---
试件编号	1	2	3
芯样抗压强度 (MPa)	6.6	6.8	6.3
平均强度 (MPa)	6.6	标准差	0.22
试件个数	13	强度max (MPa)	6.9
设计强度 (MPa)	5	Za	1.645
		R _{0.95}	6.2

检测结论: 所检部位水泥稳定碎石芯样7天无侧限抗压强度满足设计要求。

备注:

试验: 阳伟 审核: 李立 签发: 陈利军 日期: 2019年10月23日 (专用章)

图 2.1.5 拖柴土路水稳上基层（水泥含量 5%）振动拌和施工检测结果

第 1 页, 共 1 页

无机结合料钻芯取样抗压强度试验检测报告

试验室名称: 武汉中和工程技术有限公司 报告编号: S145-BG-YF-XCJH-0002

工程部位/用途: 拖柴土路K0+000-K0+091.784下基层 任务编号: XW-2019-YF-XCJH-0002

试验依据: JTG E60-2008 样品编号: YF-2019-YF-XCJH-0002

样品描述: 试件完好, 无缺损 样品名称: 水泥稳定碎石芯样

实验条件: / 试验日期: 2019.10.14

主要仪器设备及编号: JC-06取芯机, LX-08游标卡尺, LX-07钢直尺等

结合料剂量: 5.0 (%) 成型方法: 钻芯取样

最大干密度: 2.352 (g/cm³) 最佳含水量: 4.8 (%) 要求压实度: 98 (%)

材料名称	规格型号	生产厂家/产地	样品编号
碎石	20-30mm	湖北佳恒丰金属材料有限公司	-----
碎石	10-20mm	湖北佳恒丰金属材料有限公司	-----
碎石	5-10mm	湖北佳恒丰金属材料有限公司	-----
石屑	0-5mm	湖北佳恒丰金属材料有限公司	-----
水泥	P·C 32.5	葛洲坝松滋水泥有限公司	-----

试件编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
芯样抗压强度 (MPa)	5.5	5.4	5.6	6.2	5.6	5.5	5.4	5.7	5.6	5.4	5.7	5.6	5.5	/	/
平均强度 (MPa)	5.6		标准差		0.21		离散系数 (%)		3.8						
试件个数	13		强度max (MPa)		6.2		强度min (MPa)		5.4						
设计强度 (MPa)	5		Za		1.645		R ₉₈ (%)		5.3						

检测结论: 检测结论: 所检部位水泥稳定碎石芯样7天无侧限抗压强度满足设计要求。

备 注:

试验: 日期: 2019 年 10 月 15 日 (专用章)

图 2.1.6 拖柴土路水稳下基层（水泥含量 5%）传统拌和施工检测结果

根据配合比设计时无限抗压强度实际情况, 选择太平桥路下基层 (K0+000 至 K0+900), 在施工图设计配比基础上, 将设计为 5%水泥含量的水稳稳定碎石基层料中的水泥含量降低至 4.5%, 采用振动拌和方式生产水稳基层料, 进行摊铺碾压施工。

由图 2.1.7、图 2.1.8、图 2.1.9 中, 可以看出采用振动拌合方式搅拌的水泥含量 5%的水泥稳定碎石料, 在拖柴土路水泥稳定碎石上基层施工应用, 其现场钻芯取样 7 天无侧限抗压强度试验检测报告结果为 6.2MPa, 而采用振动拌合方式搅拌水泥含量 4.5%的水泥稳定碎石料, 在太平桥路下、上基层均进行施工应用, 其现场钻芯取样抗压强度试验检测报告结果为 5.5MPa、5.8MPa, 依然能够满足设计 7 天无侧限抗压强度不小于 5MPa 指标要求。对比分析表明, 在满足设计 7 天无侧限抗压强度指标要求的前提下, 采用振动方式拌合生产的水稳料, 可在设计要求的水泥含量的基础上, 降低 0.5%水泥用量, 即在减少 10%水泥用量的前提下, 使用振动搅拌技术拌和方式, 其生产的水稳材料依然可以满足设计要求。

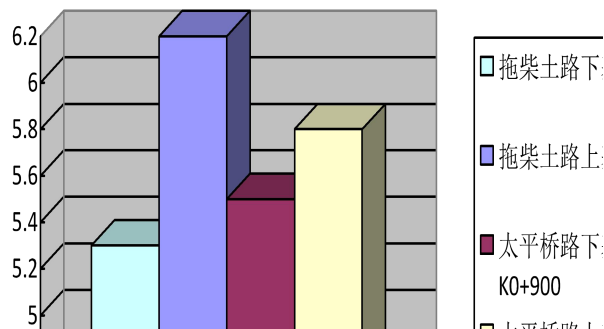


图 2.1.7 拖柴土路下、上基层 (5%) 与太平桥路下基层 (4.5%) 不同配比振动搅拌施工对比

第 1 页, 共 2 页

无机结合料钻芯取样抗压强度试验检测报告

试验室名称: 武汉中和工程技术有限公司 报告编号: S145-BG-YF-XCJH-0008

工程部位/用途: 太平桥路K0+960-K1+825下基层 任务编号: XW-2019-YF-XCJH-0008

试验依据: JTG E60-2008 样品编号: YF-2019-YF-XCJH-0008

样品描述: 试件完好, 无缺损 样品名称: 水泥稳定碎石芯样

实验条件: / 试验日期: 2019.12.02

主要仪器设备及编号: JC-06取芯机, LX-08游标卡尺, LX-07钢直尺等

结合料剂量: 4.5 (%) 成型方法: 钻芯取样

最大干密度: 2.351 (g/cm³) 最佳含水量: 4.6 (%) 要求压实度: 98 (%)

材料名称	规格型号	生产厂家/产地	样品编号
碎石	20-30mm	湖北佳恒丰金属材料有限公司	-----
碎石	10-20mm	湖北佳恒丰金属材料有限公司	-----
碎石	5-10mm	湖北佳恒丰金属材料有限公司	-----
石屑	0-5mm	湖北佳恒丰金属材料有限公司	-----
水泥	P·C 32.5	葛洲坝松滋水泥有限公司	-----

试件编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
芯样抗压强度 (MPa)	5.5	6.0	5.9	6.0	6.1	5.9	5.6	5.9	6.1	6.2	5.7	6.1	5.5	/	/
平均强度 (MPa)	5.9		标准差		0.24		离散系数 (%)		4.1						
试件个数	13		强度max (MPa)		6.2		强度min (MPa)		5.5						
设计强度 (MPa)	5.0		Za		1.645		R ₉₈ (%)		5.5						

检测结论: 所检部位水泥稳定碎石芯样7天无侧限抗压强度满足设计要求。

备 注:

试验: 日期: 2019 年 12 月 02 日 (专用章)

第1页,共1页

JB010704

无机结合料钻芯取样抗压强度试验检测报告

试验室名称: 武汉中和工程技术有限公司		报告编号: S145-BG-YF-3CJH-0006	
工程部位/用途: 太平桥路K0+000-K0+900上基层		任务编号: BX-2019-YF-3CJH-0006	
试验依据: JTG E60-2008		样品编号: YP-2019-YF-3CJH-0006	
样品描述: 试件完好, 无缺损		样品名称: 水泥稳定碎石芯样	
实验条件: /		试验日期: 2019.11.16	
主要仪器设备及编号: JC-06取芯机, LX-08游标卡尺, LX-07钢直尺等			
结合料剂量: 4.5 (%)		成型方法: 钻芯取样	
最大干密度: 2.351 (g/cm³)		最佳含水量: 4.6 (%)	
要求压实力度: 98 (%)			
原材料	材料名称	规格型号	生产厂家/产地
	碎石	20-30mm	湖北佳恒非金属材料有限公司
	碎石	10-20mm	湖北佳恒非金属材料有限公司
	碎石	5-10mm	湖北佳恒非金属材料有限公司
	石屑	0-5mm	湖北佳恒非金属材料有限公司
水泥		P·C 32.5 葛洲坝松滋水泥有限公司	
试件编号: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15			
芯样抗压强度 (MPa): 6.5 6.2 6.1 5.8 6.4 6.2 6.6 6.1 6.5 6.2 6.4 5.9 6.0 / /			
平均强度 (MPa): 6.2 标准差: 0.25 偏差系数 (%): 4.0			
试件个数: 13 强度max (MPa): 6.6 强度min (MPa): 5.8			
设计强度 (MPa): 5.0 Za: 1.645 R _{0.95} : 5.8			
检测结论: 所检部位水泥稳定碎石芯样7天无侧限抗压强度满足设计要求。			
备注:			

试验: 柳叶 审核: 李立 签发: 陈伟 日期: 2019年11月16日 (专用章)

第2页,共2页

JB010704

无机结合料钻芯取样抗压强度试验检测报告

试验室名称: 武汉中和工程技术有限公司		报告编号: S145-BG-YF-3CJH-0008	
工程部位/用途: 太平桥路K0+960-K1+825上基层		任务编号: BX-2019-YF-3CJH-0008	
试验依据: JTG E60-2008		样品编号: YP-2019-YF-3CJH-0008	
样品描述: 试件完好, 无缺损		样品名称: 水泥稳定碎石芯样	
实验条件: /		试验日期: 2019.12.02	
主要仪器设备及编号: JC-06取芯机, LX-08游标卡尺, LX-07钢直尺等			
结合料剂量: 4.5 (%)		成型方法: 钻芯取样	
最大干密度: 2.351 (g/cm³)		最佳含水量: 4.6 (%)	
要求压实力度: 98 (%)			
原材料	材料名称	规格型号	生产厂家/产地
	碎石	20-30mm	湖北佳恒非金属材料有限公司
	碎石	10-20mm	湖北佳恒非金属材料有限公司
	碎石	5-10mm	湖北佳恒非金属材料有限公司
	石屑	0-5mm	湖北佳恒非金属材料有限公司
水泥		P·C 32.5 葛洲坝松滋水泥有限公司	
试件编号: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15			
芯样抗压强度 (MPa): 6.2 5.6 5.7 5.9 6.0 5.8 5.9 6.0 5.6 6.1 5.9 6.1 5.5 / /			
平均强度 (MPa): 5.9 标准差: 0.22 偏差系数 (%): 3.7			
试件个数: 13 强度max (MPa): 6.2 强度min (MPa): 5.5			
设计强度 (MPa): 5.0 Za: 1.645 R _{0.95} : 5.5			
检测结论: 所检部位水泥稳定碎石芯样7天无侧限抗压强度满足设计要求。			
备注:			

试验: 柳叶 审核: 李立 签发: 陈伟 日期: 2019年12月2日 (专用章)

图 2.1.8 太平桥路 K0+000 至 K0+900 (4.5%水泥含量) 水稳上、下基层钻芯抗压强度检测

图 2.1.9 太平桥路 K0+960 至 K1+825 水稳上、下基层 4.5%水泥含量水稳层钻芯强度检测

第1页,共2页

JB010704

无机结合料钻芯取样抗压强度试验检测报告

试验室名称: 武汉中和工程技术有限公司		报告编号: S145-BG-YF-3CJH-0008	
工程部位/用途: 太平桥路K0+960-K1+825下基层		任务编号: BX-2019-YF-3CJH-0008	
试验依据: JTG E60-2008		样品编号: YP-2019-YF-3CJH-0008	
样品描述: 试件完好, 无缺损		样品名称: 水泥稳定碎石芯样	
实验条件: /		试验日期: 2019.12.02	
主要仪器设备及编号: JC-06取芯机, LX-08游标卡尺, LX-07钢直尺等			
结合料剂量: 4.5 (%)		成型方法: 钻芯取样	
最大干密度: 2.351 (g/cm³)		最佳含水量: 4.6 (%)	
要求压实力度: 98 (%)			
原材料	材料名称	规格型号	生产厂家/产地
	碎石	20-30mm	湖北佳恒非金属材料有限公司
	碎石	10-20mm	湖北佳恒非金属材料有限公司
	碎石	5-10mm	湖北佳恒非金属材料有限公司
	石屑	0-5mm	湖北佳恒非金属材料有限公司
水泥		P·C 32.5 葛洲坝松滋水泥有限公司	
试件编号: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15			
芯样抗压强度 (MPa): 5.5 6.0 5.9 6.0 6.1 5.9 5.6 5.9 6.1 6.2 5.7 6.1 5.5 / /			
平均强度 (MPa): 5.9 标准差: 0.24 偏差系数 (%): 4.1			
试件个数: 13 强度max (MPa): 6.2 强度min (MPa): 5.5			
设计强度 (MPa): 5.0 Za: 1.645 R _{0.95} : 5.5			
检测结论: 所检部位水泥稳定碎石芯样7天无侧限抗压强度满足设计要求。			
备注:			

试验: 柳叶 审核: 李立 签发: 陈伟 日期: 2019年12月2日 (专用章)

3 经济效益与社会效益

3.1 经济效益

振动搅拌技术水泥稳定碎石拌和方式,在保证路面强度的前提下,应用振动搅拌技术可以将水泥用量至少节约水泥10%,其直接经济效益显著。振动搅拌技术可以提升工程质量,路基耐久性提高,延长公路工程使用寿命,使用寿命的延长将推迟原本大中修期来临时间,我国的半刚性基层路面的裂缝问题往往造成路面后期使用过程中养护成本较高。从工程全寿命周期角度来看,带来的间接经济效益也十分显著。

3.2 社会效益

振动搅拌技术水泥稳定碎石混合料微观均匀程度革命性的提升,大幅减少了7d无侧限取芯不成造成工程返工的风险;由于振动搅拌真正实现微观均匀,水泥用量能够安全地采用下限和底限,既实现了国家交通公路事业节能、低碳、可持续健康发展的要求,又大幅减少了半刚性路基层各种结构自身原因造成的裂缝,提升了结构层整体刚度强度性能,大大提升了路基抗折性能,为国家耐久型、长寿命路面建设提供了重要技术支撑。

由振动搅拌技术带来的水泥剂量的减少,不仅可以减少烧制水泥所需要原料的能源,也能减少因为燃煤和分解石灰石释放出来的大量的 CO_2 ,还减少了燃烧和分解带来的其它有害气体。由此可见,由于水泥用量的减少可以达到节能减排的效果,这对于保护环境具有长远意义,也符合国家建筑工程结构绿色、节能、生态、环保,可持续健康发展的战略方针。

4 结语

振动搅拌技术水泥稳定碎石的配比设计技术,引入宏观和微观结构对比分析手段,验证了同一配合比的水稳材料,采用振动搅拌技术拌合方式与传统拌合方式生产的水稳材料相比,搅拌更均匀、充分,水泥浆体均匀粘附于集料表面,真正实现微观均匀,提高路基压实度,提升了结构层整体刚度强度性能。

振动搅拌技术能够彻底解决水泥稳定碎石混合料中细集料“团粒”现象,让水泥充分水化,细集料充分弥散,并形成嵌挤架构,减少了结构层上部骨料过度受压破碎,提高了水泥稳定碎石层的无侧限抗压强度,为增强路面耐久性提供了重要保证。

在满足设计要求的前提下,应用振动搅拌技术可以节约水泥用量至少10%,经济效益显著。

振动搅拌技术提高了路基耐久性,延长公路工程使用寿命,推迟原本大中修期来临时间,有效降低了后期使用过程中的养护成本。

参考文献:

- [1] 交通部公路科学研究所.公路工程集料试验规程:JTG E42-2005[M].北京:人民交通出版社,2005.
- [2] 中交第一公路工程局有限公司.公路桥涵施工技术规范:JTG/T F50-2011[M].北京:人民交通出版社,2011.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部.城市道路工程设计规范[M].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [4] 交通部公路科学研究院.公路工程无机结合料稳定材料试验规程:JTG E51-2009[M].北京:人民交通出版社,2009.
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会.通用硅酸盐水泥:GB 175-2007[M].北京:中国标准出版社,2007.
- [6] 交通运输部.公路路面基层施工技术细则[M].北京:人民交通出版社,2015.
- [7] 中华人民共和国建设部.混凝土用水标准[M].北京:中国建筑工业出版社,2006.

5 推广应用与前景分析

由中国一冶集团有限公司荆州分公司承建的松滋市涪水旅游快速通道工程项目城区段包括拖柴土路新建工程(江城大道-太平桥路)、太平桥路新建工程(拖柴土路-白云路)、白云路新建工程(江城大道-楚城大道)和白云边大道新建工程(泰发路-金松大道)等四条道路。城区段四条道路水泥稳定碎石基层均已采用了振动搅拌水泥稳定碎石新技术,极大地减少了水泥稳定碎石基层料的离析,有效地避免了水稳基层裂缝的产生,基层整体性能良好,外观及内部质量满足设计及相关规范要求,收到业主的好评。

在保持满足设计强度的前提下,应用振动搅拌技术可以将水泥剂量降低10%~20%,松滋市涪水旅游快速通道工程项目路线全长35.871km,水泥稳定碎石混合料(5%水泥剂量)约25.1万 m^3 。经测算,每方混合料可以节约水泥11.80kg,按水泥当前市场价480元/t,每方混合料可节约人民币约5.6元,在各种条件符合的前提下,水泥稳定碎石混合料一共可以降低材料成本140万元,经济效益显而易见。

振动搅拌水泥稳定碎石技术研究在国内处于研发推广阶段,目前只有河南、河北、浙江、广东、江西、广西、山东、重庆和海南9个省份开始建立地方性标准或者工法,在该项目上我公司属首次应用,而且在湖北省也尚属首例。以公司承接的“松滋涪水旅游快速通道工程”项目为载体,积极进行尝试和探索,彻底解决水泥稳定碎石中细集料“团粒”现象,有效提高路基基层压实度,为增强路面耐久性提供了重要保证,有效降低了后期运营过程中养护成本。并进行总结、归纳与推广应用,为公司以后在公路工程项目上使用振动搅拌水泥稳定碎石材料提供技术与经验。