

水泥稳定碎石配合比设计试验方法及检测分析

龚俊玮*

(四川杰安创检测技术服务有限公司, 成都 610052)

摘要: 目的 通过检测原材料的质量、分析水泥稳定碎石配合比设计方法和验证水泥稳定碎石的性能等工作, 为公路路面水稳基层施工提供指导, 保障工程质量和延长使用寿命。**方法** 本研究从原材料、集料掺配比例、水泥剂量、无侧限抗压强度和容许延迟时间等方面进行了试验检测分析。**结果** 集料掺配比例为 19~31.5 mm 碎石: 9.5~19 mm 碎石: 4.75~9.5 mm 碎石: 0~4.75 mm 细集料 = 32 : 22 : 20 : 26 (质量比), 水泥掺量为 4.0%, 最大干密度为 2.3717 g/cm³, 最佳含水率为 4.92%, 无侧限抗压强度代表值为 4.35 MPa, EDTA 标准曲线公式为 $y=2.205x+0.26$ (x 为水泥剂量; y 为 EDTA 二钠标准溶液消耗量), 容许延迟时间为 3.16 h。**结论** 水泥稳定碎石配合比满足技术要求, EDTA 标准曲线能够指导路面基层施工中的水泥剂量试验检测, 容许延迟时间能够较好地满足实际工程项目施工情况。

关键词: 水泥稳定碎石; 最大干密度; 最佳含水率; 无侧限抗压强度; 容许延迟时间

0 引言

公路路面基层是路面结构的重要承重层, 承担着由面层传来的竖向力, 并将力传递到下面的垫层与土基中。基层的受力情况要求水泥稳定碎石必须具备足够的承载能力, 所以水泥稳定碎石的配合比设计是决定水稳基层质量的重要因素。本文以一级公路重交通水泥稳定碎石基层为例, 通过对原材料检测、集料掺配比例设计、不同水泥剂量击实试验、无侧限抗压强度测定、EDTA 标准曲线的测定及容许延迟时间分析, 探讨水泥稳定碎石配合设计中的关键试验要点和施工质量控制, 为配合比设计提供参考依据, 保障工程质量。

1 材料与方法

1.1 水泥

水泥是一种人造水硬性胶凝材料, 从组成上可分为硅酸盐类水泥、铝酸盐类水泥和无熟料(少熟料)水泥等。普通硅酸盐水泥具有优良的强度发展性能和耐久性^[1], 掺入一定的剂量, 能够很好地保证水泥稳定碎石混合料的质量。水泥与水发生水化反应后形成水泥石, 将粗细集料胶结在一起, 达到设计强度, 形成水泥稳定碎石材料^[2]。水泥稳定碎石是一种半刚性材料, 广泛用于道路路面基层和底基层。水泥稳定碎石具有刚度大、抗压强度高, 便于就地取材且成本低廉, 能够有效地提高

沥青路面的抗疲劳破坏能力和沥青路面的稳定性^[3]。所以水泥的各项性能指标及掺量将影响水泥稳定碎石的强度和性能。结合《公路路面基层施工技术规范》^[4]的技术要求, 本次选用的水泥为 P·O42.5 的普通硅酸盐水泥。

1.2 粗集料

用作被稳定材料的粗集料宜采用各种硬质岩石或砾石加工而成的碎石。粗集料的形状应接近立方体, 从而能更好地发挥集料在混合料中的骨架和嵌挤作用。当针片状颗粒含量较高时, 会使集料堆积在一起的空隙率增加, 不仅影响到集料与水泥组成的混合料承受荷载的能力, 还会有损于混合料在施工时的和易性。

1.3 细集料

细集料应当干燥洁净、无杂质、无风化, 并有适当的颗粒级配。细集料应严格控制大于 4.75 mm 的颗粒含量, 超尺寸的颗粒含量超过规定要求时, 应当筛除。本次使用的细集料为机制砂。

1.4 集料筛分(水洗法)

水泥稳定碎石是以水泥为结合料, 通过加水与级配碎石共同拌合形成的混合料。水泥稳定碎石材料的性能直接影响着水泥稳定碎石的使用寿命, 对材料的分析有助于提高配合比设计的合理性和实用性^[5], 良好的原材料和合理的配合比是水泥稳定碎石混合料满足工程要求的重要保障。通过使用震击式标准

* 通信作者: 龚俊玮, 中级工程师, 研究方向为工程试验检测。E-mail: 820658201@qq.com

振筛机(绍兴市上虞鼎鑫测试仪器厂)、国家新标准方孔砂石筛(绍兴市上虞华丰五金仪器有限公司)、国家新标准方孔石子筛(绍兴市上虞华丰五金仪器有限公司)、电子天平(上海浦春计量仪器有限公司)、电热鼓风恒温干燥箱(沪南电炉烘箱厂)等设备对粗集料、细集料进行筛分(水洗法)试验,分析各集料的级配。

1.5 集料配合比

合成级配碎石对水泥稳定碎石的性能起着重要作用,良好的级配碎石,能够提升水泥稳定碎石混合料的强度,因为集料之间存在较大的内摩阻力、黏聚力,铺设成型后水泥稳定碎石基层强度更高、板体性更好^[6]。根据各集料的筛分(水洗法)试验结果,进行集料配合比设计。通过将各集料在对应筛孔的通过百分率与对应所掺集料的比例相乘后求和,初步得到该筛孔的合成级配通过率,调整各集料的掺配比例使合成集料的级配在要求的上下限中并尽可能接近要求的上下限中值,按照初步得到的各集料的掺配比例进行集料合成并进行筛分试验(水洗法)进行验证,当结果不满足要求的上下限时,应将集料掺配比例进行微调,最终得到符合要求的级配曲线。通过式(1)初步得到该筛孔的合成级配通过率,再经筛分(水洗法)试验调整各集料的掺配比例,得到最终的掺配比例。根据合成集料的筛分(水洗法)试验结果、要求的上下限以及泰勒曲线的横坐标进行绘制集料合成级配曲线。

集料合成级配各筛孔的通过百分率(P_n)

$$P_n = \frac{(P_{i1} \times m_1 + P_{i2} \times m_2 + P_{i3} \times m_3 + P_{i4} \times m_4)}{100} \quad (1)$$

式中: P_{i1} ——粗集料(19~31.5 mm)在各号筛的通过率,%; P_{i2} ——粗集料(9.5~19 mm)在各号筛的通过率,%; P_{i3} ——粗集料(4.75~9.5 mm)在各号筛的通过率,%; P_{i4} ——细集料(0~4.75 mm)在各号筛的通过率,%; m_1 ——粗集料(19~31.5 mm)在合成集料中的质量比,%; m_2 ——粗集料(9.5~19 mm)在合成集料中的质量比,%; m_3 ——粗集料(4.75~9.5 mm)在合成集料中的质量比,%; m_4 ——细集料(0~4.75 mm)在合成集料中的质量比。

1.6 击实试验和无侧限抗压试验

在施工过程中,应严格控制水泥稳定碎石混合料的含水率。含水率过大或者过小都将影响水泥稳定碎石混合料的质量,可能会降低强度和出现干缩裂缝^[7],为后续面层施工留下质量隐患,最佳含水率的确定对水泥稳定碎石的质量起着重要作用,所以通过水泥稳定碎石的击实试验所得到数据的准确性是路面基层质量的重要保障。根据得到的集料掺配比例,选择5个水泥剂量通过多功能电动击实仪(北京通力试验仪器公司)、电子天平(上海浦春计量仪器有限公司)、电热鼓风恒温干燥箱(沪南电炉烘箱厂)、电动液压脱模器(北京通力试验仪器

公司)等设备采用丙法进行击实试验。水泥应在试样击实前逐个加入,按照预加入的水泥剂量(3.0%、3.5%、4.0%、4.5%、5.0%)分别掺入,然后将试样进行拌合均匀,并在1 h内完成击实试验,得出试样的最大干密度和最佳含水率。根据试验确定的最大干密度、最佳含水率以及要求的压实度,通过微机控制电液伺服压力试验机(浙江义宇仪器设备有限公司)、电子计重秤(上海浦春计量仪器有限公司)等设备成型无侧限抗压强度标准试件(直径150 mm、高150 mm)。将成型好的无侧限抗压强度试件脱模,然后进行7 d标准养生(标准养护室:(20±2)℃、≥95%RH,养护6 d后;(20±2)℃水槽中泡水1 d),将养生完成后的试件进行检查,将符合要求的无侧限抗压强度标准试件通过路面材料强度综合测定仪(北京天畅通达仪器有限公司)、电子数显卡尺(桂林广陆数字测控有限公司)等设备进行无侧限抗压强度试验,得出各试件的无侧限抗压强度值,进而得出平均值,再通过式(2)得到各水泥剂量的无侧限抗压强度代表值。

强度代表值(R_q^0)

$$R_q^0 = \bar{R} \times (1 - Z_\alpha C_v) \quad (2)$$

式中: \bar{R} ——强度平均值,MPa; Z_α ——标准正态分布表中随保证率或置信度 α 而变的系数,高速公路和一级公路应取保证率95%,即 $Z_\alpha=1.645$; C_v ——强度变异系数, %。

1.7 EDTA 标准曲线

水泥作为胶凝材料掺入水泥稳定碎石混合料中,对材料的性能具有至关重要的影响,必须严格控制水泥稳定碎石混合料中的水泥剂量^[8],所以EDTA标准曲线的准确性对现场施工质量检测结果有着重要的影响。通过酸式滴定管(天津天科玻璃制品有限公司)、量筒(天津天科玻璃制品有限公司)、电子天平(上海浦春计量仪器有限公司)等设备和EDTA二钠、10%氯化铵、1.8%氢氧化钠等化学溶液进行水泥稳定碎石混合料中的水泥剂量试验,分别测定水泥剂量为0%、2%、4%、6%、8%水泥稳定碎石混合料在水泥剂量试验中EDTA二钠标准溶液的消耗量。根据各水泥剂量对应的EDTA二钠标准溶液消耗量,绘制EDTA标准曲线。

1.8 容许延迟时间

在确定水泥稳定碎石混合料的容许延迟时间时,用混合料击实试验成型无侧限抗压强度试件,得出的容许延迟时间是不合理的,存在一定的偏差^[9],本次采用静力压实法成型试件。根据选定的集料配合比、水泥剂量、要求的压实度、最大干密度和最佳含水率确定好各材料的质量,搅拌均匀。通过使用微机控制电液伺服压力试验机(浙江义宇仪器设备有限公司)、电子计重秤(上海浦春计量仪器有限公司)等设备分别按立刻压实、闷料1 h再压实、闷料2 h再压实、闷料3 h再压实、闷料4 h再压实、闷料5 h再压实的方式,成型直径150 mm、高

150 mm 的无侧限抗压强度标准试件。经过标准养生后测定混合料的 7 d 无侧限抗压强度。从而得到不同延迟时间条件下的水泥稳定碎石混合料强度代表值的变化曲线。根据这条曲线，得到水泥稳定碎石混合料满足要求强度的容许延迟时间，从而指导水泥稳定碎石混合料在施工中的运输及铺筑时间，保障施工质量。

2 结果与分析

2.1 原材料试验

经检测，该水泥的各项试验检测结果符合《通用硅酸盐水泥》^[10]和《公路路面基层施工技术规范》^[4]中的技术要求，试验检测数据(见表 1)；该粗集料的各项试验检测结果符合《公路路面基层施工技术规范》^[4]的技术要求，碎石 1(19~31.5 mm)、碎石 2(9.5~19 mm)、碎石 3(4.75~9.5 mm)的试验检测数据(见表 2)；该细集料的各项试验检测结果符合《公路路面基层施工技术规范》^[4]的技术要求，试验检测数据(见表 3)；各集料筛分(水洗法)试验检测结果(见表 4)。

2.2 集料掺配比例

各集料的掺配比例为 19~31.5 mm 碎石：9.5~19 mm 碎石：4.75~9.5 mm 碎石：0~4.75 mm 细集料 = 32 : 22 : 20 : 26(质量比)，合成级配曲线尽可能地接近了上下限要求的中值。所得到

表 4 各集料筛分(水洗法)试验结果

集料规格	通过下列各筛孔(mm)通过百分率(%)						
	31.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
19~31.5 mm	100.0	32.7	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
9.5~19 mm	100.0	100.0	18.8	0.4	0.4	0.4	0.4
4.75~9.5 mm	100.0	100.0	94.2	5.5	1.0	0.6	0.6
0~4.75 mm	100.0	100.0	100.0	100.0	82.6	43.5	4.5

2.3 水泥稳定碎石配合比设计

水泥稳定碎石的水泥剂量为 4.0%，最大干密度为 2.3717 g/cm³，最佳含水率为 4.92%，无侧限抗压强度代表值为 4.35 MPa，所得到的成果见表 6 和图 2。

2.4 EDTA 标准曲线

EDTA 标准曲线公式为 $y=2.205x+0.26$ (x 为水泥剂量； y 为 EDTA 二钠标准溶液消耗量)，水泥稳定碎石基层的水泥剂量检测时，将现场取样的水泥稳定碎石混合料所消耗的 EDTA 二钠标准溶液用量代入 EDTA 标准曲线，即可确定现场施工所用水泥稳定碎石中的水泥剂量，能够很好地指导施工过程中水泥剂量的试验检测工作，所得到的结果见图 3。

2.5 容许延迟时间

水泥稳定碎石的容许延迟时间为 3.16 h，能够较好地满足实际工程项目施工情况，在容许时间内施工能够很好地保证水泥稳定碎石基层的质量，所得到的结果见图 4。

的成果(见表 5 和图 1)。

表 1 水泥的技术指标及检测结果

检测项目	技术指标	检测结果
初凝时间(min)	> 180	203
终凝时间(min)	> 360 且 < 600	306
安定性(沸煮法)(mm)	≤ 5	1.0
3 d 抗折强度(MPa)	≥ 4.0	5.6
3 d 抗压强度(MPa)	≥ 17.0	22.3
28 d 抗折强度(MPa)	≥ 6.5	8.2
28 d 抗压强度(MPa)	≥ 42.5	45.1

表 2 粗集料的技术指标及检测结果

检测项目	技术指标	检测结果		
		碎石 1	碎石 2	碎石 3
压碎值(%)	≤ 26	/	7.3	/
针片状颗粒含量(%)	≤ 22	3.6	2.5	1.8
0.075 mm 以下粉尘含量(%)	≤ 2	0.5	0.4	0.6
软石含量(%)	≤ 5	1.1	0.8	0.9

表 3 细集料的技术指标及检测结果

检测项目	技术指标	检测结果
塑性指数	≤ 17	4.6
0.075 mm 以下的颗粒含量(%)	≤ 15	4.5

表 5 集料级配曲线技术指标及检测结果

名称	按集料配合比合成的级配通过下列各筛孔(mm)						
	通过百分率(%)						
	31.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
合成级配	100.0	78.5	49.1	27.3	21.9	11.7	1.5
中值	100	77	48	27	22	11.5	1.5
上限要求	100	86	58	32	28	15	3
下限要求	100	68	38	22	16	8	0

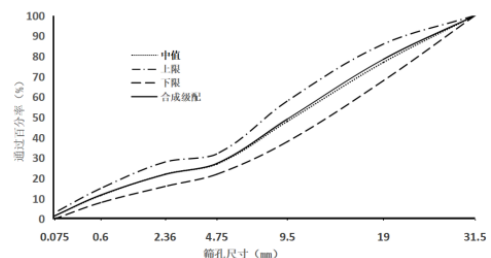


图 1 集料合成级配曲线

表 6 试样击实试验和无侧限抗压强度技术指标及检测结果

水泥剂量(%)	最大干密度 (g/cm ³)	最佳含水率 (%)	要求压实度 (%)	要求强度 (MPa)	强度平均值 (MPa)	强度标准差 (MPa)	变异系数 (%)	强度代表值 (MPa)	是否满足
3.0	2.3646	4.72	≥ 97	≥ 4.0	4.16	0.40	9.62	3.50	否
3.5	2.3682	4.90	≥ 97	≥ 4.0	4.65	0.45	9.68	3.91	否
4.0	2.3717	4.92	≥ 97	≥ 4.0	5.32	0.59	11.09	4.35	是
4.5	2.3742	5.10	≥ 97	≥ 4.0	5.68	0.61	10.74	4.68	是
5.0	2.3790	5.20	≥ 97	≥ 4.0	6.16	0.72	11.69	4.98	是

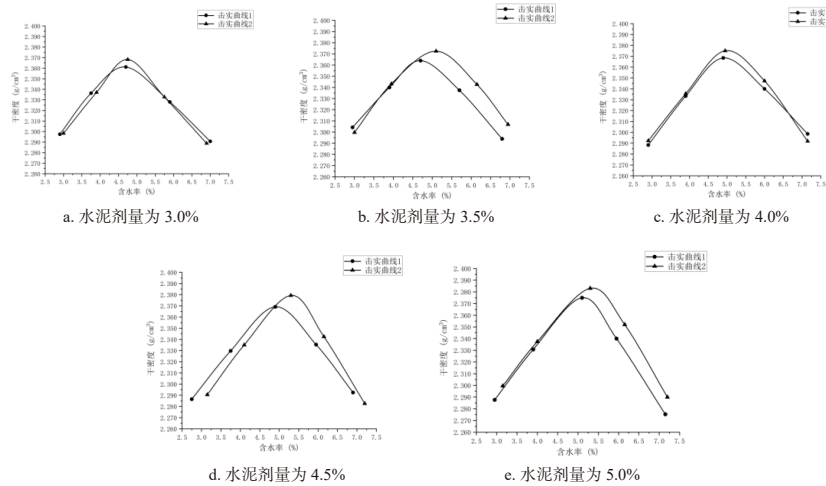
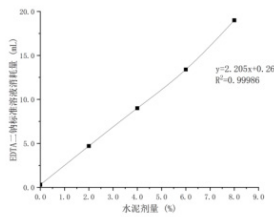


图 2 水泥剂量的击实曲线

能够为施工现场的水泥稳定碎石运输和铺筑提供参考。

参考文献

- [1] 杨泽锋.普通硅酸盐水泥与硫铝酸盐水泥复合材料性能研究[J].山西建筑,2024,50(22):107-109,148.
- [2] 戴建华.水泥稳定碎石基层材料配合比设计优化探讨[J].公路交通科技(应用技术版),2020,16(10):139-141.
- [3] 黄伟.水泥稳定碎石配合比设计及影响因素[J].石材,2023,(12):66-68.
- [4] 中华人民共和国交通运输部.公路路面基层施工技术细则:JTG/T F 20—2015[S].北京:人民交通出版社,2015.
- [5] 张文霞.水泥稳定碎石基层配合比设计分析[J].山西建筑,2019,45(13):88-90.
- [6] 黄钢.水泥稳定碎石基层配合比设计及质量控制研究[J].江西建材,2023,(05):303-305.
- [7] 朱锦辉.市政道路水泥稳定碎石基层施工质量控制[J].四川水泥,2021,(11):237-238.
- [8] 杨晓辉.某高速公路水泥稳定材料试验检测研究[J].中国高新科技,2024,(20):158-160.
- [9] 孔凡子.水泥稳定碎石延迟时间试验方法探讨[J].山西建筑,2019,45(10):101-103.
- [10] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.通用硅酸盐水泥:GB 175—2023[S].北京:中国标准出版社,2023.



注：图中，x 为水泥剂量；y 为 EDTA 二钠标准溶液消耗量

图 3 EDTA 标准曲线

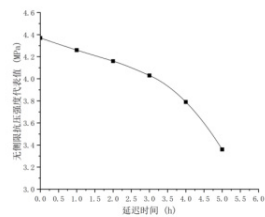


图 4 容许延迟时间曲线

3 讨论与结论

水泥稳定碎石作为水稳层施工的主要材料，具有施工方便、稳定性好、强度高优势，在公路路面基层中得到广泛的应用。本文通过对水泥、砂石原材料的检测，以及混合料的最大干密度、最佳含水率、水泥剂量和无侧限抗压强度等试验检测，确定了水泥稳定碎石的配合比和各项性能指标，所确定的水泥稳定碎石的配合比和各项性能指标满足技术要求；容许延迟时间的确定