

文章编号: 1002-0268 (2006) 06-0022-05

骨架孔隙结构水泥稳定碎石配比设计及其路用性能

胡力群, 沙爱民, 翁优灵

(长安大学 教育部特殊地区公路工程重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要: 给出了骨架孔隙水泥稳定碎石基层材料粗、细集料级配范围、混合料各组成部分配比计算方法以及计算中所需相关参数测试方法。据此设计了骨架孔隙水泥稳定碎石混合料, 并利用振动法成型了水泥含量分别为 6%、8%、10% 的试件进行相应性能测试, 试验中还与水泥含量为 6% 的悬浮密实结构水泥稳定碎石进行了对比。研究表明: 骨架孔隙结构水泥稳定碎石在保证一定孔隙率的前提下能够满足目前规范对基层材料要求。

关键词: 骨架孔隙结构; 水泥稳定碎石; 配比设计; 振动压实; 路用性能

中图分类号: U416.1

文献标识码: A

Mixture Component Design of Skeleton-pore Cement Stabilized Aggregate Material and Its Performance Research

HULI-qun, SHA Ai-min, WENG You-ling

(Key Laboratory of Special Area Highway Engineering of Ministry of Education,

Chang'an University, Shaanxi Xi'an 710064, China)

Abstract: The article presents gradation band of coarse and fine aggregate, ingredient proportion calculation method and formula parameters testing method, which used in skeleton-pore cement stabilized aggregate material design. On the basis of the test study, skeleton-pore cement stabilized aggregate were designed and the samples using 6%, 8%, 10% cement were prepared through vibrating equipment in the lab, then several performances were tested, including unconfined compressive strength, split strength, flexural strength, compressive resilience modulus, flexural resilience modulus, thermal contraction performance, dry shrinkage performance and anti-scour performance. Skeleton-pore cement stabilized aggregate could satisfy the demands of current specification with a certain porosity.

Key words: skeleton-pore structure; cement stabilized aggregate; mixture component design; vibrating compaction; performance test

0 前言

根据粗集料在混合料中的分布状态, 水泥稳定碎石可被划分为 3 种结构类型, 悬浮密实结构、骨架密实结构和骨架孔隙结构。划分以上 3 种结构类型的主要标准是粗集料经压实后, 粗颗粒间空隙体积与压实后起填充作用的细料体积之间的关系。悬浮密实型混

合料中细料的压实体积应大于粗集料形成的空隙体积; 骨架密实型混合料中细料的压实体积应临界于粗集料形成的空隙体积; 骨架孔隙型混合料中细料的压实体积则小于粗集料形成的空隙体积, 压实后混合料中存有一定的孔隙。

目前, 骨架孔隙结构水泥稳定碎石材料主要被用作排水基层。资料表明, 排水基层在国外有应用, 且

收稿日期: 2005-02-22

基金项目: 交通部公路工程建设行业标准编制(修订)研究项目(199907)

作者简介: 胡力群(1971-), 男, 陕西西安人, 博士, 主要研究方向为路面材料。(hlq@gl.chd.edu.cn)

使用效果较好。但这种材料在我国的实际应用很少, 主要原因之一是目前规范中没有提供相应的集料级配范围和相应的组成设计方法, 相关路用性能研究少。

1 骨架孔隙结构水泥稳定碎石混合料组成设计方法

骨架密实结构水泥稳定碎石集料级配的确定有别于常用的悬浮密实结构水泥稳定碎石。在骨架孔隙结构水泥稳定碎石混合料中集料可以分成粗集料和细集料两部分, 粗集料用来形成骨架结构, 细集料和水泥水化后的生成物用来填充部分粗集料骨架孔隙。集料设计的重点在于合理地确定粗细集料的比例。这种比例关系会随着石料种类、石料的颗粒形状而变化。

1.1 粗、细集料级配范围

目前, 从强度、变形以及稳定性方面来看, 多数研究认为: 以筛孔尺寸为 4.75 mm 作为粗细集料的分界尺寸比较合理。

粗集料在形成骨架结构时, 4.75~26.5 mm 之间的各档石料有多种组成方式, 按照级配形式, 可以有连续级配、多级嵌挤级配和单一粒径级配。通过对不同级配的粗集料进行振动压实后的测试中发现: 连续级配的粗集料空隙率最小, 但空隙率仍然在 30% 以上, 从空隙率要求角度是完全可以满足要求的; 连续级配的粗集料, 力学性能及抗破碎能力也较好, 因此宜采用连续级配。细集料填充主要起填充作用, 为容易达到密实状态也应该选择连续级配。经综合考虑后确定的粗、细集料级配范围见表 1、表 2。

表 1 骨架孔隙结构水泥稳定碎石粗集料级配范围

Tab 1 Coarse aggregate gradation band of skeleton-pore cement stabilized aggregate

筛孔尺寸/mm	31.5	26.5	19.0	16.0	13.2	9.5	4.75
上限	100	91	70	61	50	33	3
下限	100	82	56	45	34	19	0

表 2 骨架孔隙结构水泥稳定碎石细集料级配范围

Tab 2 Fine aggregate gradation band of skeleton-pore cement stabilized aggregate

筛孔尺寸/mm	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
上限	100	100	100	100	84	40	5	2
下限	100	90	85	75	60	15	0	0

1.2 混合料组成设计方法

骨架孔隙结构水泥稳定碎石混合料组成计算可采用体积法, 计算时有两个约束条件:

(1) 水泥剂量

按照已有资料和相关试验结果, 对于水泥碎石骨

架孔隙结构水泥剂量应在 6%~12% 之间。

(2) 混合料孔隙率

排水基层在满足强度的前提下, 应保证一定的孔隙率满足排水要求。孔隙率越高, 排水性能越好, 但孔隙率太大, 材料在行车荷载作用下的强度、耐久性、稳定性均受影响。根据排水性能要求和国内外的经验, 骨架孔隙类水泥稳定碎石的孔隙率应该在 15%~25% 之间^[5]。进行水泥稳定碎石骨架孔隙结构设计时, 需要通过试验确定出几个参数, 具体作法如下:

- 1) 用容量瓶或网法测定粗集料的表现密度。
- 2) 按照粗集料级配要求选择 4 500 g 左右粗集料并称量。
- 3) 计算粗集料实体所占体积。
- 4) 将粗集料表面用水喷湿, 将喷湿后的粗集料倒入直径为 15 cm 的钢模中, 采用振动压实设备振动压实 (振动参数: 频率 28~30 Hz, 静面压力 104 MPa, 偏心块夹角 90°)。

5) 用钢尺仔细量取振实后石料表面距筒边缘的高度, 测量时按径向测 4 次, 取其平均值, 并计算出粗骨料所占体积。

6) 根据重量一定的粗集料压实后骨架所占体积及其实体所占体积, 可以计算出粗颗粒骨架内部空隙体积。

7) 测定水泥细集料浆的密度 (包括水分)。取一金属容器, 并秤质量计为 W_1 。将水泥、细集料和水拌和后倒入金属容器中, 并在坚实的地面上轻磕数下, 使其表面基本水平, 测定并计算水泥细集料浆的体积。秤量水泥细集料浆和金属容器的总质量, 计为 W_2 , $W_2 - W_1$ 为水泥细集料浆质量。取出部分水泥细集料浆, 放入烘箱, 测定其含水量。计算水泥细集料浆的干密度。

将相关的试验结果带入下面的方程组中

$$\begin{cases} \frac{x}{y + W_{\text{粗料}}} = A \\ \frac{x + y}{\frac{\rho_{\text{水泥细集料}}}{B}} = C \end{cases}$$

式中, x 为混合料中的水泥用量, g; y 为混合料中细料的用量, g; $W_{\text{粗料}}$ 为粗料的质量, g; $\rho_{\text{水泥细集料}}$ 为水泥细集料干密度, g/cm³; A 为混合料中预定水泥剂量, %; B 为通过试验确定出的粗集料空隙体积, cm³; C 为混合料预定空隙率, cm³。

通过以上方程组, 可以计算出满足水泥剂量、混

合料空隙率等条件下水泥和细集料的用量比例。根据计算出的混合料干料质量和试验中得出的混合料总体积,还可以计算出混合料的理论最大干密度。为了与实际情况更加吻合,骨架孔隙结构水泥碎石材料组成计算完后,应该通过振动法确定最大干密度和最佳含水量。

在实际应用中,选择不同水泥用量、粗、细级配,通过计算得到的相应条件下骨架孔隙结构水泥稳定碎石的组成配比后,分别进行相关路用性能的测试,综合考虑后,其中较好的可用于工程实践。

2 路用性能试验

为对骨架孔隙结构水泥稳定碎石的性能进行测试,选择了一种石料,利用以上方法确定了混合料中各组成部分的配比并进行了相关的路用性能测试,并与水泥用量相同时悬浮密实结构水泥稳定碎石进行了对比。

2.1 原材料性能试验

2.1.1 石料

石料采用陕西临潼莲花寺石料厂的石灰岩。按照《公路工程集料试验规程》中的试验方法,经测定,石料压碎值 $< 30\%$,满足《公路路面基层施工技术规

范》中石料强度的要求。因为在计算骨架密实、骨架孔隙结构类型中需要计算粗骨料空隙的体积,按照《公路工程集料试验规程》中的试验方法测定了不同粒径石料的密度,结果见表 3。

表 3 不同粒径石料的密度结果

石料粒径/mm	26.5	19.0	16.0	13.2	9.5	4.75
密度/ $g \cdot cm^{-3}$	2.781	2.831	2.833	2.730	2.730	2.736

2.1.2 水泥

水泥采用陕西耀县水泥厂生产的秦岭牌水泥,标号为 425#, 各项指标见表 4。

表 4 水泥性质试验结果

品种	细度 (80 μ m 方孔筛筛余量)	初凝时间/h	终凝时间/h	3d 强度/MPa	
				抗压	抗折
425# 普通硅酸盐水泥	7.2	2.54	3.30	26.8	5.3

2.2 合成级配的确定

根据以上方法按照 6%、8% 和 10% 的水泥用量和 18% 的剩余孔隙率控制,可以计算出混合料中粗、细集料比例,然后可将其换算成通常的集料级配形式,具体见表 5。

表 5 集料级配表

Tab 5 Particle size distribution of aggregate

筛控孔径/mm	31.5	26.5	19.0	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过百分率/%	100	86	63	53	41	26	11	7.0	6.0	4.0	3.0	1.0	0.0

2.3 压实标准的确定及试件成型

试件成型时的振动压实设备为自行研制的上振式振动压实机,振动参数为静压力 104 kPa, 振动频率 28 Hz, 活动偏心块与固定偏心块夹角 60° , 试验过程中以回弹跳起为控制停机状态,混合料装模方式为一次装填,并要求振实后的混合料厚度应在 15~16 cm 之间,否则作废。最大干密度、最佳含水量结果见表 6。

表 6 振动法确定压实标准试验结果

Tab 6 Optimum moisture content and maximum dry density of mixtures

材料种类	水泥用量/%	最佳含水量/%	最大干密度/ $g \cdot cm^{-3}$
骨架孔隙	6	3.80	2.205
骨架孔隙	8	4.00	2.212
骨架孔隙	10	4.50	2.231
密实悬浮	6	5.00	2.435

3 试验结果

3.1 强度

强度试验中包括无侧限抗压强度、劈裂强度和抗

折强度。其中抗压强度和劈裂强度采用 $\phi 15 \text{ cm} \times h 15 \text{ cm}$ 的圆柱体试件,抗折强度采用 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ 的梁式试件。

表 7 无侧限抗压强度试验结果

Tab 7 Test results of unconfined compressive strength

材料种类	抗压强度/MPa			劈裂强度/MPa		抗折强度/MPa	
	7 d	28 d	90 d	28 d	90 d	28 d	90 d
骨架孔隙 (6%)	4.32	7.54	7.29	0.69	0.88	1.24	1.4
骨架孔隙 (8%)	6.00	8.63	9.32	0.80	1.19	1.44	1.61
骨架孔隙 (10%)	6.65	10.00	10.71	0.88	1.29	1.58	1.72
密实悬浮 (6%)	6.87	9.20	10.25	0.93	1.22	1.68	1.90

3.2 模量

不同材料组成水泥稳定碎石抗压、抗折回弹模量试验结果见表 8。

3.3 收缩性能

无机结合料稳定粒料土收缩试验包括温缩系数的测定和干缩系数的测定,收缩系数测定采用 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ 的梁式试件。

表 8 模量试验结果

Tab 8 Test results of resilience modulus

材料种类	抗压回弹模量/MPa		抗折回弹模量/MPa	
	28 d	90 d	28 d	90 d
骨架孔隙 (6%)	1034	1230	3740	6650
骨架孔隙 (8%)	1182	1330	3940	7570
骨架孔隙 (10%)	1320	1720	4240	8460
密实悬浮 (6%)	1260	1560	4560	9200

表 9 温缩应变试验结果

Tab 9 Results of thermal contraction test

材料种类	试验项目	55 °C	45 °C	35 °C	25 °C	15 °C	5 °C	- 5 °C	- 15 °C	平均温缩系数
骨架孔隙 (6%)	温缩应变/ $\mu\epsilon$	4	85	138	202	267	331	408	469	6.70
	温缩系数/ $\mu\epsilon \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$		8.1	5.3	6.4	6.5	6.4	7.7	6.1	
骨架孔隙 (8%)	温缩应变/ $\mu\epsilon$	0	119	186	260	334	411	496	557	7.96
	温缩系数/ $\mu\epsilon \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$		11.9	6.7	7.4	7.4	7.7	8.5	6.1	
骨架孔隙 (10%)	温缩应变/ $\mu\epsilon$	0	149	228	314	395	471	546	596	8.51
	温缩系数/ $\mu\epsilon \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$		14.9	7.9	8.6	8.1	7.6	7.5	5	
密实悬浮 (6%)	温缩应变/ $\mu\epsilon$	2	146	233	309	380	454	530	591	8.44
	温缩系数/ $\mu\epsilon \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$		14.4	8.7	7.6	7.1	7.4	7.6	6.1	

3.3.2 干燥收缩

用于干缩试验的试件养生龄期为 7 d, 养生结束后在试件上粘贴电阻应变片, 利用电测法测定干缩系数。试验中环境箱的温度设定范围为+ 40 °C, 读取

3.3.1 温度收缩

用于温缩试验的试件养生龄期为 28 d, 养生完毕后将试件放入 100~ 105 °C 烘箱内烘干 12 h 左右, 然后贴上电阻应变片, 利用电测法测定不同温度的应变值。试验中环境箱的温度设定范围为+ 55~ - 15 °C, 每个温度恒温 2 h, 每隔 10 °C 读取一次应变值, 温缩试验结果见表 9。

应变值的时间分别为 0、2、4、8、12、24、48 h。在读取应变值的同时, 通过称量同处在环境箱中配比相同未贴片试件的质量测定试件含水量的变化情况。干缩试验结果见表 10。

表 10 干缩应变试验结果

Tab 10 Results of dry shrinkage test

材料种类	试验项目	0 h	2 h	4 h	8 h	12 h	24 h	48 h	平均干缩系数
骨架孔隙 (6%)	含水量/%	4.3	3.3	3	2.7	2.2	1.8	1	73.4
	干缩应变/ $\mu\epsilon$	0	46	62	102	157	190	238	
	失水率		1	1.3	1.6	2.1	2.5	3.3	
	干缩系数/ $\mu\epsilon \cdot \%^{-1}$		46	53	133	110	83	60	
骨架孔隙 (8%)	含水量/%	4.7	3.5	3.2	2.9	2.4	2	1.2	76.7
	干缩应变/ $\mu\epsilon$	0	52	70	115	193	231	275	
	失水率		1.2	1.5	1.8	2.3	2.7	3.5	
	干缩系数/ $\mu\epsilon \cdot \%^{-1}$		43	60	150	156	95	55	
骨架孔隙 (10%)	含水量/%	4.4	3.7	3.1	2.9	2.5	2	1	95.5
	干缩应变/ $\mu\epsilon$	0	37	120	155	216	268	325	
	失水率		0.7	1.3	1.5	1.9	2.4	3.4	
	干缩系数/ $\mu\epsilon \cdot \%^{-1}$		53	138	175	153	104	57	
密实悬浮 (6%)	含水量/%	4.9	4.3	4	3.7	3.3	2.9	1.9	111.6
	干缩应变/ $\mu\epsilon$	0	73	126	194	278	305	335	
	失水率		0.60	0.90	1.20	1.60	2.00	3.00	
	干缩系数/ $\mu\epsilon \cdot \%^{-1}$		122	177	227	210	68	30	

表 11 冲刷试验结果

Tab 11 Results of anti-scour performance test

材料种类	30 min 冲刷量/g
骨架孔隙 (6%)	13.20
骨架孔隙 (8%)	7.00
骨架孔隙 (10%)	4.00
密实悬浮 (6%)	56.0

4 抗冲刷性能

用于抗冲刷试验的试件为 $\phi 15 \text{ cm} \times h 15 \text{ cm}$ 的圆柱体试件, 对于水泥稳定碎石材料养生龄期为 28 d。试件养生结束后利用冲刷试验机进行冲刷试验。冲刷试验结果见表 11。

5 试验结果分析

水泥用量是影响水泥稳定碎石材料性能的主要因素,因此水泥用量的提高可以明显的提高强度和抗冲刷能力,但由于混合料中水化生成物的增加,同时也会增加材料的收缩系数。

水泥稳定碎石类的结构类型是影响材料各种性能的另一主要因素,在骨架孔隙结构水泥碎石中,粗集料含量很大,骨架作用明显,但骨架作用能否充分地发挥,要看粗集料骨架受到的约束力有多大。由于需要一定的剩余空隙,细集料含量少,在压实过程中水泥、细集料的混合物不可能达到密实程度,因此骨架孔隙水泥碎石中水泥、细集料硬化后的不如悬浮密实、骨架密实结构水泥碎石中水泥、细集料的强度高。从而使得相同水泥用量时悬浮密实结构水泥稳定碎石的抗压、劈裂、抗折强度更高。从试验结果和相关资料来看为使混合料的抗压强度满足现行规范中的要求,骨架孔隙水泥碎石混合料中水泥剂量至少需要达到 6%。

骨架孔隙结构水泥碎石的抗压回弹模量更多地依赖粗集料骨架的模量,但由于骨架孔隙结构中存在大量的孔隙,为混合料的变形提供了空间。因此在水泥剂量、养生龄期相同的条件下,骨架孔隙结构水泥碎石的抗压回弹模量小于悬浮密实结构水泥碎石的抗压回弹模量。

混合料中集料含量、级配对混合料的收缩性质也有重要影响,由于混合料中石料的温缩变形大于胶结物的温缩变形,所以在其他条件相同的条件下,集料含量多的混合料整体收缩较小,相应温缩系数也小。当粗集料含量达到一定比例时,粗集料可以在混合料中形成骨架结构,大颗粒石料骨架能够有效地对约束混合料中胶结物引起的收缩,从而减少混合料的整体温缩程度,故骨架孔隙结构材料的收缩系数小于悬浮密实结构材料的收缩系数。此外,由于骨架孔隙结构水泥稳定碎石混合料中粗集料含量较多,细集料含量相应减少,所以最佳含水量也较少,因此其干缩系数也小于相同水泥用量的悬浮密实结构水泥稳定碎石。

为了满足排水要求,骨架孔隙水泥碎石材料的空

隙率都较大,细料成分较少。较多的贯通孔隙能够有效减少动水压力,而细集料含量较少使得可冲刷物总量很少。通过试验发现,由于混合料中细料少,这种透水性材料在试验开始过程中基本无冲刷物。

6 结论

(1) 骨架孔隙结构水泥稳定碎石集料级配确定时,宜应体积法确定各组成部分用量比。文中给出的粗细集料级配和相应计算公式有助于更好地确定骨架孔隙结构水泥稳定碎石各组成部分比例。

(2) 在保证一定剩余孔隙率的情况下,当水泥用量达到 6% 以上时,骨架孔隙结构水泥稳定碎石强度能够满足目前规范中的相应要求。

(3) 随着水泥用量增加,骨架孔隙结构水泥稳定碎石各龄期的强度呈增加趋势;在水泥用量相同的条件下,悬浮密实结构水泥稳定碎石具有更高的强度和模量。

(4) 增加水泥用量,骨架孔隙结构水泥稳定碎石的温缩、干缩系数也随之增大;骨架孔隙水泥稳定碎石的温缩和干缩系数小于相同水泥用量的悬浮密实结构水泥稳定碎石。

(5) 由于混合料中细料比例较少,且剩余孔隙有助于消除动水压力,骨架孔隙结构水泥稳定碎石的抗冲刷能力好于悬浮密实结构水泥稳定碎石。

(6) 应进一步研究骨架孔隙结构水泥稳定碎石的疲劳特性。

参考文献:

- [1] JTJ058-2000. 公路工程集料试验规程 [S].
- [2] JTJ 034-2000. 公路路面基层施工技术规范 [S].
- [3] 李美江. 道路材料振动压实特性研究 [D]. 西安: 长安大学, 2002.
- [4] 张南鹭. 道路建筑材料 [M]. 同济大学出版社, 1992.
- [5] 沙爱民. 半刚性路面材料结构与性能 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
- [6] 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, 2002.
- [7] 沙爱民, 胡力群. 半刚性材料抗冲刷性能试验方法研究 [J]. 中国公路学报, 2002 (5).
- [8] 沙庆林. 高等级道路半刚性路面 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993.