

DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201912039



骨架密实型水泥稳定碎石级配设计方法

刘树堂¹, 刘时俊¹, 刘天林², 代金国³, 曹卫东¹

(1. 山东大学 齐鲁交通学院, 山东 济南 250002;
2. 潍坊顺达公路工程有限公司, 山东 潍坊 261000;
3. 山东宏昌路桥集团有限公司, 山东 潍坊 261000)

摘要: 为研究水泥稳定碎石的级配优化设计问题,针对未加水泥的级配矿料,构建矿料间隙率的物理模型,给出骨架密实型级配矿料粗细分界筛孔通过率的计算公式,建立骨架密实型级配设计理论.在考虑细料对粗料排列的干涉作用后,通过试验获得实际意义上的骨架密实型水泥稳定碎石,形成该类材料的级配优化设计方法.结果表明:未加水泥的级配矿料击实试验所得的最大干密度或间隙率可作为判断水泥稳定碎石骨架密实性的简便指标;通过建立的理论模型与优化设计方法,可成功地设计出水泥剂量较低、强度较高的骨架密实型水泥稳定碎石.

关键词: 水泥稳定碎石; 骨架密实型级配; 矿料间隙率; 最大干密度; 无侧限抗压强度

中图分类号: U 411 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2020)05-0582-07

Design Method for Gradation of Skeleton-Density Cement Stabilized Macadam

LIU Shutang¹, LIU Shijun¹, LIU Tianlin²,
DAI Jinguo³, CAO Weidong¹

(1. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250002, China;
2. Weifang Shunda Highway Engineering Limited Company, Weifang 261000, China;
3. Shandong Hongchang Road Bridge Limited Company, Weifang 261000, China)

Abstract: In order to investigate the gradation optimization design of cement stabilized macadam, a physical model about voids in the mineral graded aggregate without cement was established. The formula which calculates the passing rate of the particle size between coarse and fine aggregates for the skeleton-density aggregate was presented, and the graded design theory of skeleton density was set up. Considering the interference effect of fine aggregate to coarse aggregate arrangement, the actual skeleton-density graded cement stabilized macadam structure was obtained, and the method of gradation optimization design of this material was formed. The results show that the maximum dry density obtained by heavy compaction test or voids in the mineral graded aggregate without cement can be used as a simple index to determine the skeleton compactness of the cement stabilized macadam. Using the established theoretical model and gradation optimization design method, the skeleton-density cement stabilized macadam with low cement dosage and high strength can be design successfully.

Keywords: cement stabilized macadam; gradation of skeleton-density; voids in mineral aggregate; maximum dry density; unconfined compressive strength

水泥稳定碎石(简称水稳碎石)是我国路面结构经常采用的一种典型半刚性基层材料,作为主要的承重层,其性能直接关系着整体路面结构的功能.已有研究表明,矿料级配的变化对半刚性材料的强度、收缩及疲劳等诸多性能具有显著的影响^[1-3].我国早期公路的水泥稳定碎石基层是连续级配,形成悬浮密实结构.这类结构虽然材料强度可满足要求,但其细集料偏多、水泥用量较多、收缩性较大、易产生裂缝,且细集料在动水作用下易流失,产生冲刷破坏.随着研究的深入,人们已形成共识,在悬浮密实、骨架空隙和骨架密实 3 种级配类型的水泥稳定碎石中,骨架密实型级配既能有效发挥粗集料骨架的嵌挤作用,又能使骨架空隙间填入的细集料及水泥胶结的水化产物发挥填充密实作用,形成密实度高、粘聚力大的一种实体结构,具有较好的抗疲劳性能^[4-5].众多工程实践也表明,骨架密实型矿料级配不仅具有较好的强度特性,还可减少水泥用量,降低开裂程度^[6-7].因此,骨架密实型级配成为工程优先选择的类型,其级配设计成为关键的理论和技术.

关于骨架密实型级配的设计理论和设计方法,学者们先后进行了诸多探索.王峰等^[8-9]采用贝雷法,通过水泥砂浆填充粗集料骨架空隙计算细集料与水泥用量,获得骨架密实型结构的水稳碎石.李涛等^[10]研究贝雷法的 3 个参数对无侧限抗压强度的影响.彭波等^[11]提出筛控级配算法和分形级配算法,以关键筛孔及其通过率作为级配算法的基本依据,给出两种算法的计算公式,并采用正交试验进行级配方案的优化.罗迪^[12]基于规范推荐的悬浮密实型级配和骨架密实型级配的范围,比较两种级配水稳碎石的强度、刚度及收缩性等方面的性能差异,发现骨架密实型级配在满足强度、刚度性能的情况下,使用更少的水泥剂量,从而提高抗裂性能.冯德成等^[13]采用体积设计法,以空隙率为控制指标进行试验筛选,研究矿料配合比的优化问题.何昌轩^[14]着重以 4.75 mm 的筛孔通过率为变量因素,探讨水稳碎石的优化设计方法,结果表明,当通过率为 30% 时,最大干密度最大、强度最佳且温缩影变最小.然而,这些研究有的试验工作量较大、配比设计耗时较多,在实体工程中不易推广应用,有的仍有待进一步深入.目前,工程上规范层面的设计方法是基于 JTG/T F20—2015《公路路面基层施工技术细则》^[15]的级配范围,拟定级配曲线,然后,通过试验进行水泥剂量的设计,但对骨架密实型级配的具体设计缺乏更为细致的指导.基于此,本文提出一种骨架密实型水稳碎石的级配优化设计方法.

1 未加水泥级配矿料的间隙率物理模型构建

1.1 矿料的体积组成

文献^[16]对沥青混合料级配进行优化设计,针对未加沥青的矿料,建立矿料间隙率的物理模型.参考其部分思想,就水稳碎石矿料的级配优化设计问题进行理论与试验探讨,提出水稳碎石矿料的骨架密实型级配设计理论,并做以下 4 点假设.

1) 对路面常用的含集料的半刚性基层材料,选取 4.75 mm 作为粗、细集料的分界粒径.粒径小于 4.75 mm 的集料为细集料,细集料连同矿粉简称为细料;粒径大于 4.75 mm 的集料为粗集料;为便于表达与阐述,将不同档粗集料的混合物简称为粗料.

2) 粗料是由不同粒径的多档粗集料依据某种法则(如最大密度)设计而成的具有一定松装间隙率与骨架结构特征的级配混合料,不包括各档粗集料含有的 4.75 mm 以下的细集料与矿粉.细料是由细集料按类似法则或工程经验确定级配组成的,可包括各档粗集料中少量含有的细集料.

3) 整体矿料看作由一定比例的粗料和细料合成所得,当粗、细料合成比例发生变化时,粗、细料各自的内部组成不变,间隙率不变.

4) 粗料颗粒嵌挤形成的骨架间隙在被细料填充的过程中,忽略细料的干涉作用.

当细料质量分数较小时,粗料颗粒间隙被细料部分填充,混合料处于骨架空隙状态;当细料质量分数增加到一定程度(粗料质量分数相应地减少)时,粗料颗粒间隙刚好被细料完全填充,此时,混合料就处于骨架密实状态;若细料质量分数继续增加,粗料质量分数继续减少,则粗料会悬浮在细料中,形成悬浮密实型结构.

考虑到水泥胶结料可以进入集料表面的孔隙,因此,粗、细料体积和密度的计算均采用表观体积和表观密度.合成集料的体积组成,如图 1 所示.图 1 中: V 为全部矿料包括颗粒间隙在内的总体积; V_c 为各档粗集料筛除 4.75 mm 以下颗粒后合成粗料的表观体积; V_{fa} 为细料表观体积; V_a 为粗料间隙被细料填充后剩余的空隙体积.

1.2 模型构建

若粗料石-石接触,则通常意义下粗料的松装间隙率为 V_{CA} ,即

$$V_{CA} = \left(1 - \frac{V_c}{V}\right) \times 100\%.$$
 (1)

假设合成矿料中细料的质量分数为 P (即 4.75 mm 筛孔通过率),则粗料质量分数为 $1 - P$.由图 1 及式(1)可得未加水泥时的矿料间隙率 VMA_A 为

$$VMA_A = V_{CA} - (1 - V_{CA}) \cdot \frac{P\gamma_{ca}}{(1 - P)\gamma_{fa}}.$$
 (2)

式(2)中: γ_{ca} 为合成粗料的表观相对密度,无量纲; γ_{fa} 为合成细料的表观相对密度,无量纲.

当合成矿料为骨架空隙型或骨架密实型级配时,根据假设,认为粗料的松装间隙率 V_{CA} 为常数,与细料的质量分数 P 无关;当合成矿料为悬浮密实型级配时,粗料颗粒之间不再是石-石结构,粗料颗粒被细料撑开,这种情况下的粗料间隙率也不再是通常意义下的松装间隙率 V_{CA} ,此时,不可通过式(2)计算矿料间隙率.

当粗料刚好达到骨架密实型级配时, $VMA_A = VMA_0$, VMA_0 为骨架密实级配时的矿料间隙率,可得 VMA_0 为

$$VMA_0 = V_{CA} \cdot v_{fa}.$$
 (3)

式(2)中: v_{fa} 为细料间隙率.

由式(3)可知:在上述假设存在的前提下,当粗、细料各自级配组成确定, V_{CA} , v_{fa} 均为定值时,理论上存在一个矿料间隙率为 VMA_0 的骨架密实型结构.

1.3 骨架密实型结构粗、细料合成比例的确定

假设骨架密实型结构粗、细分界筛孔 4.75 mm 的通过率(即细料的质量分数)为 P_0 ,将式(3)代入式(2),可得

$$\left. \begin{aligned} v_{fa} \cdot V_{CA} &= V_{CA} - (1 - V_{CA}) \cdot \frac{\gamma_{ca}}{\gamma_{fa}} \cdot \frac{P_0}{1 - P_0}, \\ P_0 &= \frac{1}{1 + \frac{\gamma_{ca}}{\gamma_{fa}} \cdot \frac{1 - V_{CA}}{1 - v_{fa}} \cdot \frac{1}{V_{ca}}} \times 100\%. \end{aligned} \right\}$$
 (4)

由式(4)可知:骨架密实型结构的细料质量分数 P_0 可通过粗、细料的两个间隙率参数 V_{CA} , v_{fa} , 以及两个密度参数 γ_{ca} , γ_{fa} 计算得到,据此可计算得到骨架密实级配曲线.

2 骨架密实型水泥稳定碎石矿料级配设计

2.1 原材料

采用山东省某石料场出产的石灰岩碎石及石屑,集料粒径分为 4 档,分别为 20~30, 10~20, 5~10, 0~5 mm. 依照 JTG E42—2005《公路工程集料试验规程》^[17],对 4 档集料进行筛分与密度试验.4 档集料的筛分试验结果,如表 1 所示.表 1 中: η 为筛孔的通过率; l 为集料粒径; L 为筛孔孔径.4 档集料的密度试验结果,如表 2 所示.表 2 中: ρ_a 为表观密度; ρ_b 为毛体积密度.

其他指标均符合要求,不再赘述.水泥胶结料选用山东省某公司生产的 PO42.5 型普通硅酸盐水泥,其性能指标,如表 3 所示.表 3 中: S_A 为比表面积; t 为凝结时间; R_c 为抗压强度; R_s 为抗折强度.

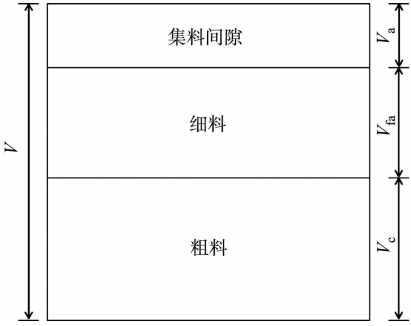


图 1 合成集料的体积组成
Fig. 1 Volume components
of composite aggregate

表 1 4 档集料的筛分试验结果
Tab.1 Screening test results of aggregate of four grades

l/mm	$\eta/\%$						
	$L=31.5\text{ mm}$	$L=26.5\text{ mm}$	$L=19\text{ mm}$	$L=16\text{ mm}$	$L=13.2\text{ mm}$	$L=9.5\text{ mm}$	$L=4.75\text{ mm}$
20~30	99.2	58.1	1.4	0.3	0	0	0
10~20	100.0	100.0	86.9	77.7	60.1	27.8	3.8
5~10	100.0	100.0	100.0	100.0	99.9	97.4	36.7
0~5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.9

l/mm	$\eta/\%$					
	$L=2.36\text{ mm}$	$L=1.18\text{ mm}$	$L=0.6\text{ mm}$	$L=0.3\text{ mm}$	$L=0.15\text{ mm}$	$L=0.075\text{ mm}$
20~30	0	0	0	0	0	0
10~20	0	0	0	0	0	0
5~10	2.0	0.4	0.2	0.1	0.1	0
0~5	74.0	53.3	38.0	22.7	15.6	12.8

表 2 4 档集料的密度试验结果
Tab.2 Density test results of aggregate of four grades

参数	l/mm			
	20~30	10~20	5~10	0~5
$\rho_a/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	2.709	2.716	2.720	2.719
$\rho_b/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	2.687	2.642	2.627	—

表 3 水泥性能指标
Tab.3 Performance indexes of cement

$S_A/\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$	t/min		R_c/MPa			R_s/MPa		
	初凝	终凝	3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
35.8	215	270	28.1	31.9	50.7	6.5	7.8	9.6

2.2 设计过程

2.2.1 初拟级配曲线 参考 JTG/T F20—2015《公路路面基层施工技术细则》^[15] 对水泥稳定碎石建议的 C-B-3 级配曲线范围,首先,以级配范围的中值为目标,通过规划求解方法确定一条初拟级配曲线(级配 1),如图 2 所示.据此确定 4 档集料由粗到细质量比为 16.60:50.67:9.30:23.43,即粗料、细料(主要为石屑)之间的质量比为 76.57:23.43.然后,将 3 档粗集料按上述确定的比例进行混合,筛除 4.75 mm 以下颗粒后进行振实试验,获得的振实密度为 1.501 kg·m⁻³,经过计算可得粗料的合成表观密度为 2.715 kg·m⁻³,粗料松装间隙率 V_{CA} 为 44.7%.最后,将 3 档粗集料中 4.75 mm 以下的细料与石屑混合得到细料,并进行松装密度试验,得到的松装密度为 1.799 kg·m⁻³,基于已知的细料表观密度(近似认为是混合细料的表观密度),经计算可得细料的松装间隙率 v_{fa} 为 33.8%.

2.2.2 理论骨架密实型级配 基于初拟级配曲线的试验与计算参数,由式(4)可得骨架密实型级配的细料质量分数 $P_0=34.9\%$,这是由各档集料中 4.75 mm 筛孔通过率合成得到的.保持各档粗料之间比例不变(即粗料组成不变),可得石屑的用量比例 α 为

$$\alpha=(P_{4.75}-P_{c4.75})/(P_{f4.75}-P_{c4.75}). \tag{5}$$

式(5)中: $P_{4.75}$ 为合成级配 4.75 mm 筛孔的通过率,%; $P_{c4.75}$ 为按确定配比混合的粗料在 4.75 mm 筛孔的通过率,%; $P_{f4.75}$ 为 0~5 mm 的石屑在 4.75 mm 筛孔的通过率,%.

3 档粗集料合成级配的 $P_{c4.75}=6.97\%$, $P_{f4.75}=99.9\%$,骨架密实级配时, $P_{4.75}=P_0=34.9\%$,则由

式(5)解得 $\alpha=0.300\ 6$,进而得到 4 档集料由粗到细的质量比为 15.16 : 46.28 : 8.50 : 30.06,这是理论上骨架密实级配的配比,其各筛孔的通过率(级配 2),如表 4 所示.

2.2.3 实际骨架密实型级配 式(2)~(4)是基于细料对粗料排列不产生干涉作用的假设建立的,计算的 $P_0=34.9\%$ 为理想的骨架密实级配,在实际中必然存在着一定程度的细料干涉,故 $P_0=34.9\%$ 的级配未必是实际的骨架密实型级配,但其值与实际骨架密实型级配相近.因此,以 $P_0=34.9\%$ 为中心,以 $\pm 3.0\%$ 为变动幅度,得到 4.75 mm 筛孔的通过率分别为 37.9%(级配 3),31.9%(级配 4),如表 4 所示.由此通过试验进一步分析级配 2~4 的骨架特性与级配类型,找到真实的骨架密实型级配.需指出,级配 2,3 在 4.75 mm 筛孔的通过率超过 JTG/T F20—2015《公路路面基层施工技术细则》^[15] 中的 C-B-3 级配范围上限(32.0%),而 0.075 mm 筛孔的通过率则在 C-B-1 级配范围内.

表 4 各级配筛孔通过率与规范级配范围

级配	$\eta/\%$						
	$L=31.5\text{ mm}$	$L=26.5\text{ mm}$	$L=19\text{ mm}$	$L=16\text{ mm}$	$L=13.2\text{ mm}$	$L=9.5\text{ mm}$	$L=4.75\text{ mm}$
级配 2	100.0	93.6	79.0	74.6	66.4	51.2	34.9
级配 3	100.0	93.9	80.0	75.7	67.9	53.5	37.9
级配 4	100.0	93.3	78.0	73.4	64.8	49.0	31.9
C-B-3 上限	100.0	100.0	86.0	100.0	100.0	58.0	32.0
C-B-3 下限	100.0	100.0	68.0	100.0	100.0	38.0	22.0
C-B-1 上限	100.0	100.0	86.0	79.0	72.0	62.0	45.0
C-B-1 下限	100.0	100.0	82.0	73.0	65.0	53.0	35.0

级配	$\eta/\%$					
	$L=2.36\text{ mm}$	$L=1.18\text{ mm}$	$L=0.6\text{ mm}$	$L=0.3\text{ mm}$	$L=0.15\text{ mm}$	$L=0.075\text{ mm}$
级配 2	22.4	16.1	11.4	6.8	4.7	3.8
级配 3	24.8	17.8	12.7	7.6	5.2	4.3
级配 4	20.8	14.3	10.2	6.1	4.2	3.4
C-B-3 上限	28.0	21.0	15.0	100.0	100.0	3.0
C-B-3 下限	17.0	12.0	8.0	100.0	100.0	0
C-B-1 上限	31.0	22.0	15.0	10.0	7.0	5.0
C-B-1 下限	22.0	13.0	8.0	5.0	3.0	2.0

2.3 级配骨架密实性初级判别

基于初拟级配曲线推理的实际骨架密实级配应在级配 2~4 的级配曲线覆盖范围内,但需要试验加以判定.为使判断简便易行,作为一种初级判别方法,拟在未添加水泥的情况下,通过级配矿料的重型击实试验获得击实参数,以最大干密度 γ_s 或间隙率为技术指标,判定 3 个级配的骨架密实性.击实试验获得的矿料间隙率 VMA_A 为

$$VMA_A=\left(1-\frac{\gamma_s}{\rho_w\cdot\gamma_{sa}}\right)\times100\%.$$

(6)

式(6)中: γ_{sa} 为级配矿料的表观相对密度,无量纲; ρ_w 为水(4 ℃)的密度,取 $1.000\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

级配 2~4 的参数,如表 5 所示.表 5 中: $\rho_{b,c}$ 为计算合成毛体积密度; $\rho_{s,c}$ 为计算合成表观密度; w_o 为最优含水率.最大干密度较大或矿料间隙率较小表明矿料具有较好的密实性,且较小的矿料间隙率可使用较少的水泥剂量形成骨架密实型水稳碎石.由表 5 可知:级配 3 的最大干密度最大,矿料间隙率最小,故级配 3 即为实际的骨架密实型级配.按照文中理念,

级配 4 应属于骨架空隙型级配,级配 2 则为骨架空隙型与骨架密实型之间的一种密实状态,在理论上应属于骨架空隙型,相较于级配 4,级配 2 具有更好的密实性.

表 5 各级配的参数

Tab.5 Parameters of each gradation

参数	级配 2	级配 3	级配 4
$\rho_{b,c}/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	2.670	2.672	2.668
$\rho_{s,c}/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	2.716	2.716	2.716
$\gamma_s/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	2.236	2.268	2.213
$w_o/\%$	3.7	4.0	3.3
$VMA_A/\%$	16.26	15.14	17.06

3 水泥稳定碎石的强度特性

3.1 水泥稳定碎石击实试验及骨架密实性的进一步检验

严格而言,未加水泥的级配矿料的骨架密实性与添加水泥形成水稳碎石的骨架密实性有所差异.因此,需对初级判别方法结论的有效性进行检验.为进一步验证级配 3 的骨架密实性是否为最好,选取级配 4 作为对比,再进行水稳碎石的击实试验.由于最大干密度是可压实材料的一个基本参数,可以简便、有效地衡量材料的压实性能^[18],故仍以最大干密度为判断指标,比较级配 3、4 的水稳碎石在同样击实功时的密实状态.根据工程经验,水泥剂量 δ (干燥水泥质量占干燥矿料质量的百分比)拟定为 2%~5%,试验选取 2.5%、3.5%与 4.5%这 3 个水平进行击实试验.最优含水率和最大干密度随水泥剂量的变化规律,如图 3 所示.

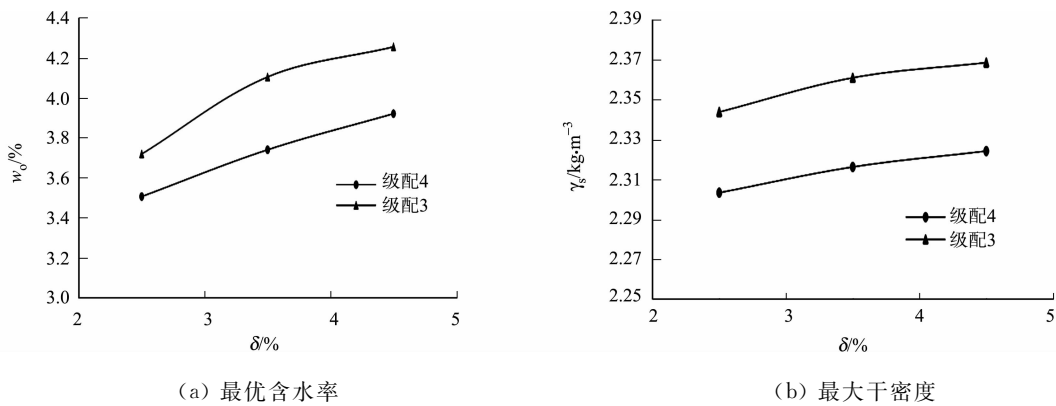


图 3 最优含水率和最大干密度随水泥剂量的变化规律

Fig. 3 Variation of optimal moisture content and maximum dry density with cement dosage

由图 3(a)可知:随着水泥剂量的增加,级配 3、4 水稳碎石的最优含水率均增大,这与实际情况相符.由图 3(b)可知:无论水泥剂量多大,级配 3 的最大干密度总大于级配 4,说明级配 3 的骨架密实性更好,验证了击实试验初级判别方法的有效性,表明通过对未加水泥的矿料进行击实试验判断级配的密实性或级配类型的方法是可行的.

3.2 水泥稳定碎石无侧限抗压强度试验

依据 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》^[19],对级配 3、4 进行制件,获得水泥稳定碎石 7 d 无侧限抗压强度试验结果,如表 6 所示.表 6 中: \bar{R}_c 为抗压强度平均值; R_d^0 为抗压强度代表值; C_v 为变异系数.

由表 6 可知:两组级配的强度变异性均较小,表明强度结果具有稳定性.首先,在选用的水泥剂量范围内,随着水泥剂量的增加,级配 3、4 的抗压强度平均值基本以接近的增长速率线性增大;在各个水泥剂量上,级配 3 的平均无侧限抗压强度比级配 4 高约 1 MPa,特别地,当水泥剂量为 3.5%时,级配 3 比级配 4 的强度高 1.54 MPa,即高出 18.4%,表明级配 3 是较好的骨架密实型级配,强度指标也表明了级配 3 是骨架密实型级配.其次,两个级配即使在水泥剂量较小(2.5%)时,强度也较高,级配 4 的抗压强度代表值大于抗压强度标准值(5.0 MPa);当水泥剂量为 4.5%时,抗压强度代表值接近 10 MPa,远高于抗压强度标准,表明级配 4 也满足要求,但级配 3 具有明显的优势;在达到相同强度时,级配 3 的水泥剂量可以少用 0.7%~1.0%.显然,较少的水泥剂量对减少横向裂缝及其导致的反射裂缝具有积极作用,而减少反射裂缝是半刚性基层沥青路面,特别是长寿命沥青路面需要重点考虑的一项内容^[20].

表 6 级配 3、4 的 7 d 无侧限抗压强度试验结果

Tab. 6 Unconfined compressive strength test results of grade 3, 4 at 7 days

级配	参数	$\delta=2.5\%$	$\delta=3.5\%$	$\delta=4.5\%$
级配 3	\bar{R}_c/MPa	7.08	9.93	11.03
	R_d^0/MPa	6.72	8.48	10.07
	$C_v/\%$	3.05	8.90	5.33
级配 4	\bar{R}_c/MPa	6.00	8.39	10.22
	R_d^0/MPa	5.42	7.61	9.68
	$C_v/\%$	5.89	3.75	3.22

4 结 论

1) 以矿料间隙率为考核指标,建立水稳碎石骨架密实型级配的物理模型,为水稳碎石的级配优化设计提供一种可行、有效的理论.在考虑细料对粗料排列的干涉作用后,建立骨架密实型水稳碎石的级配设计方法.

2) 水稳碎石的击实试验及 7 d 无侧限抗压强度试验表明,通过对未加水泥的级配矿料进行击实试验,以最大干密度或矿料间隙率为简便依据判断级配矿料骨架密实性的方法是可行的.

3) 按照建立的设计理论与方法,成功地设计出水泥剂量较低(如 3.5%)、强度较高的骨架密实型水稳碎石结构,既满足强度要求,又显著地降低了水稳碎石层横向裂缝及其导致的反射裂缝的发生.

4) 以最大干密度及无侧限抗压强度判断水稳碎石的骨架密实性是有效的,但仍需通过新的测试技术(如 CT 观测的图像)对骨架密实性做进一步微细观分析,今后的工作将对此进行深入研究.

参考文献:

[1] 胡力群,沙爱民. 骨架密实结构水稳碎石粗集料抗破碎性能研究[J]. 公路,2005(6):153-157. DOI:10.3969/j.issn.0451-0712.2005.06.034.

[2] LYU Songtao, YUAN Jiang, LIU Chaochao, *et al.* Investigation of the fatigue modulus decay in cement stabilized base material by considering the difference between compressive and tensile modulus[J]. Construction and Building Materials, 2019, 223:491-502.

[3] DENG Changqing, JIANG Yingjun, LIN Hongwei, *et al.* Mechanical-strength-growth law and predictive model for cement-stabilized macadam[J]. Construction and Building Materials, 2019, 215:582-594.

[4] 周浩,沙爱民,胡力群. 半刚性基层材料疲劳试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2012, 32(3):6-10. DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2012.03.002.

[5] LYU Songtao, XIA Chengdong, YOU Lingyun, *et al.* Unified fatigue characteristics model for cement-stabilized macadam under various loading modes[J]. Construction and Building Materials, 2019, 223:775-783.

[6] YU Haichen, SUN Lijun. Trial study on strength and its influence factors of low dosage cement stabilized aggregates [C]//International Conference on Electric Technology and Civil Engineering. Lushan:IEEE Press, 2011:12068687. DOI:10.1109/ICETCE.2011.5776142.

[7] WANG Xuancang, FANG Naren, YE Hongyu, *et al.* Fatigue damage analysis of cement-stabilized base under construction loading[J]. Applied Sciences-Basel, 2018(11):8-11.

[8] 王峰. 骨架密实结构水稳碎石级配设计及路用性能研究[D]. 武汉:武汉工程大学, 2017.

[9] 王峰,熊永松,冯珀楠,等. 骨架密实型水稳碎石集料级配设计方法综述[J]. 建材技术与应用, 2016(6):1-3.

[10] 李涛,邹静蓉,汤显平. 贝雷法在半刚性基层中的应用[J]. 公路, 2018(12):19-23.

[11] 彭波,尹光凯,李海宁,等. 骨架密实型水泥稳定碎石级配设计与分形评价[J]. 中外公路, 2016, 36(3):284-288.

[12] 罗迪. 不同类型水稳碎石半刚性路面基层材料性能研究[D]. 长沙:湖南大学, 2013.

[13] 冯德成,于飞,巩春伟. 基于体积法的水泥稳定级配碎石配合比设计方法[J]. 公路交通科技, 2012, 29(10):22-27. DOI:10.3969/j.issn.1002-0268.2012.10.005.

[14] 何昌轩. 骨架密实型水泥稳定碎石合理级配范围优化研究[J]. 公路, 2012(6):228-232. DOI:10.3969/j.issn.0451-0712.2012.06.048.

[15] 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 F20-2015[S]. 北京:人民交通出版社, 2015.

[16] 刘树堂,曹卫东,李英勇,等. 未加沥青矿料(VMA_a)物理模型构建与应用[J]. 中国公路学报, 2016, 29(8):1-11.

[17] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程集料试验规程: JTG E42-2005[S]. 北京:人民交通出版社, 2005.

[18] 王选仓,乔志,尹燕,等. 半刚性路面材料大压实功压实规律研究[J]. 中国公路学报, 2016, 29(6):280-286.

[19] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程无机结合料稳定材料试验规程: JTG E51-2009[S]. 北京:人民交通出版社, 2009.

[20] 薛忠军,王春明,张伟,等. 半刚性基层长寿命路面结构和材料设计研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(10):37-42. DOI:10.3969/j.issn.1002-0268.2015.10.007.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)