

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2022.05.029

基于振动旋转压实制样方式骨架密实型 大粒径级配碎石性能研究

谭波^{1,2}, 杨涛¹

(1. 桂林理工大学 土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 广西建筑新能源与节能重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要:为研究大粒径级配碎石的抗压和抗变形等路用性能,应用逐级填充方法和*i*法形成集料骨架密实级配,结合振动旋转压实成型方式对大粒径级配碎石混合料压实成型。对成型试件进行CBR和抗压回弹模量测试,并将其测试数据与常规粒径碎石试件进行对比分析。试验结果表明:大粒径碎石混合料经逐级填充法设计粗集料、*i*法设计细集料形成的试件可达到较高的压实密度;在合理级配条件下,大粒径级配碎石试件其力学性能和骨架性能优于常规粒径碎石规范中值级配试件,大粒径碎石试件其 R_{CBR} (加州承载比)值可达324%,抗压回弹模量可达358.1 MPa;经振动旋转压实成型的试件较其他几种成型方式成型的试件具有更优的压实密度和力学性能。

关键词:大粒径级配碎石; 振动旋转压实; 骨架密实; 级配设计

中图分类号: U414 **文献标志码:** A

级配碎石作为一种散体材料,在中国通常被应用于建筑底基层、混凝土拌和料或者沥青混合料中。目前,工程中通常使用的是常规粒径的级配碎石,大粒径级配碎石使用较少,因此关于大粒径级配碎石应用于道路底基层的研究也较少。中国规范明确指出级配碎石的最大粒径宜为37.5 mm,一般认为大粒径尺寸为26.5~63 mm,而此次研究使用的最大粒径碎石尺寸为53 mm。

以往关于大粒径级配碎石的很多研究认为大粒径级配碎石在力学性能上要优于常规粒径级配碎石,主要体现在局部抗承载能力和抗压变形上^[1]。赵荐等^[2]认为大粒径级配碎石在应用于柔性基层时,其弯沉值和回弹模量与大粒径沥青稳定碎石柔性基层相当。并且大粒径级配碎石柔性基层不需要使用沥青,可使基层具有更好的排水性和耐久性;付其林^[3-5]在大粒径碎石应用于沥青混合料的研究中,发现采用大粒径碎石的沥青混合料具有更优的抗裂能力、抗水损坏能力和更长的使用寿命。一些研究^[6-7]表明碎石混合料形成骨架密实型结构时具有较高的压实密度和较强的抗承载能力。将大粒径碎石优秀的力学性能和骨架密实型结构相结合,即大粒径级配碎石混合料具有骨架密实型结构特征时,其抗承载能力会得到提升。

级配碎石混合料成型方式一般有静压式、旋转压实、振动成型和重型击实。文献^[8-10]认为:采用重

型击实成型的碎石混合料试件一般具有强度高、稳定性好、承载能力强等优点,但也具有反射裂缝无法避免、刚度大、抗疲劳能力差、耐久性差等缺点。一些研究^[11-13]指出:振动成型的碎石混合料相较于静压成型的碎石混合料,具有更高的回弹模量、抗压强度以及动稳定性;并且随着振动频率的增加,混合料上层的压实度也会增高^[14]。付其林等^[15]认为重型击实、旋转压实和静压法成型都会造成碎石混合料的破碎。因此,改良和优化碎石混合料成型方式,可有效减少大粒径碎石在成型过程中的破碎情况并提高其压实密度。

该文根据逐级填充方法^[16-17]设计集料粗骨料级配,再使用*i*法^[18]设计碎石混合料的细集料组成级配以填充粗骨料之间的空隙。采用振动旋转压实成型方式对大粒径级配碎石压实成型。针对成型试件进行CBR和抗压回弹模量测试,并和常规粒径规范中值级配碎石试件进行对比分析。探讨大粒径级配碎石混合料在振动旋转压实成型方式下形成骨架密实型结构特征时的力学性能。

1 原材料及制样方法

1.1 原材料

(1) 细骨料:细骨料采用路用粒径4.75 mm以下

收稿日期:2020-10-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51768015)

作者简介:谭波,男,博士,副教授。E-mail: bbsz2004@163.com

的花岗岩碎石颗粒。

围 4.75~53 mm。碎石材料性质如表 1 所示。

(2) 粗骨料:粗骨料采用路用花岗岩碎石,粒径范

(3) 水:日常饮用水。

表 1 集料技术指标

集料/ mm	压碎值/ %	表观密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	表干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	毛体积相 对密度	吸水率/ %	针片状 含量/%
19~53	21.57	2.729	2.672	2.646	1.24	7.30
9.5~19	14.08	2.753	2.691	2.662	1.32	6.58
4.75~9.5		2.735	2.702	2.684	0.70	6.89
0~4.75		2.720	2.705	2.694	0.92	
规范要求	≤ 28	实测数据	实测数据	实测数据	实测数据	≤ 15

1.2 制样方法

1.2.1 制样仪器

自制道路材料振动旋转压实仪如图 1 所示。该仪器拥有振动、旋转和压实功能,可实现多种不同道路材料成型方式。该仪器通过电脑网线连接后控制,试验过程参数可在电脑控制软件中获取。该仪器的具体性能参数如下:振动频率:3 000 次/min;振幅:0.6 mm;旋转速率:5 r/min;施加压力:100~700 kPa(可自由控制)。



图 1 道路材料振动旋转压实仪

1.2.2 成型方式与压实时间

通过对级配碎石分别进行旋转压实、振动压实和旋转振动压实成型,得到 3 种成型方式下的碎石混合料的压实位移变化曲线,见图 2。从图 2 可看出:碎石混合料在压实过程中,前 5 圈(1 min)压实位移变化剧烈,压实 20 圈(4 min)时趋于稳定;且经振动旋转压实成型的碎石试件密度明显高于其他两种成型方式。根据以上分析,级配碎石试件成型方式拟采用振动旋转压实成型,压实时间为 20 圈(4 min)。

1.2.3 撒粉碾压

结合广西某高速公路施工经验,为提高碎石混合料试件密实度,对压实后的试件顶层再撒粉压实能有效提高整个试件密实度。通过对碎石混合料分别进行

不预留撒粉压实、预留 100 g 撒粉压实、预留 200 g 撒粉压实、预留 300 g 撒粉压实、预留 500 g 撒粉压实试验。其中撒粉压实时间为 4 min,压实荷载为 200 kPa。具体试验结果见表 2。

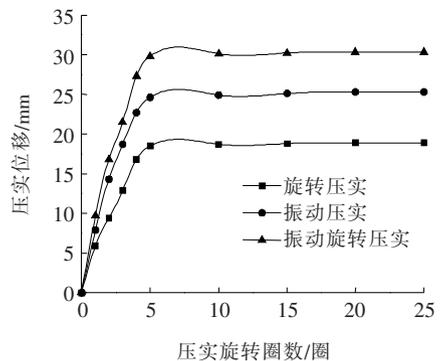


图 2 不同成型方式压实位移变化

表 2 撒粉压实试验结果

测试项目	压实密度/($g \cdot cm^{-3}$)
不撒粉压实	2.28
预留 100 g 撒粉压实	2.34
预留 200 g 撒粉压实	2.39
预留 300 g 撒粉压实	2.37
预留 500 g 撒粉压实	2.32

从表 2 可看出:碎石混合料通过预留细集料在顶层撒粉压实后提高了试件的压实密度。且预留 200 g 细集料用于撒粉压实时,试件密度达到最大值。通过以上分析,研究采用预留 200 g 细集料用于撒粉压实。

1.2.4 压实荷载

碎石混合料经过不同压实荷载压实成型,其密实度不一致,压实荷载太大会造成粒径较大的碎石出现破碎,荷载太小则会导致碎石混合料密实度不够。通

通过对碎石混合料使用不同压实荷载压实成型并测定其密度,试验结果见表3。

表3 不同荷载碎石混合料压实密度

施加荷载/ kPa	压实密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	施加荷载/ kPa	压实密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
160	2.31	220	2.42
180	2.35	240	2.44
200	2.39		

由表3可得:压实荷载越大,碎石混合料压实密度越高;但当压实荷载大于200 kPa时,粒径较大的碎石开始出现破碎情况,综合考虑碎石混合料试件压实荷载宜采用200 kPa。

1.2.5 制样方式

研究结合广西某高速公路现场实测数据,工程现场压实密度实测数据为 2.40 g/cm^3 。不难发现当压实荷载为200 kPa,预留200 g细集料撒粉压实时,试件压实密度与实测数据十分相近。在施工过程中,道路基层一般采用振动碾压,因此振动旋转压实成型方式的作用机理更能模拟施工现场碾压机制。

经过以上分析,总结出以下具体制样试验步骤:①按级配称取5 kg碎石混合料,压实前预留200 g细集

料作撒粉用;②将4 800 g碎石混合料按最佳含水率加水,搅拌均匀后使用保鲜膜密封养护12 h;③将养护好的碎石混合料分为两份分两层压实,每层压实4 min;④将预留的200 g细料均匀撒在碎石混合料表层,并喷最佳含水率的水,压实4 min;⑤将压实完成的碎石混合料静置24 h,进行各项力学性能测试。

2 级配设计

2.1 填充试验设计

以各粒径碎石用量尽量填充前一级粒径碎石间的空隙而对其骨架不构成干涉为原则,通过逐级填充法确定粗骨料级配。

(1)主骨料A0(粒径19~53 mm碎石),将其装入试样筒进行振动密实,确定振实密度。A0的次一级粒径碎石确定为A1(粒径9.5~19 mm碎石)。A0和A1两级粗集料按比例100:20、100:30、100:35、100:40、100:45、100:50、100:60放入试样筒进行振动密实并测定其密度,建立填充数量与振实密度关系,选取振实密度较大的几组A1用量,作为A1用量。

(2)以此类推,进行下一级粒径(A2)填充试验分别得到各级最佳填充比例,该比例即为试验用粗集料多级嵌挤级配。A0、A1和A2具体筛分通过率见表4。

表4 粗骨料筛分通过率

粗骨料 级号	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%											
	53	37.5	31.5	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	1.18	0.6	0.075
A0	100	98.58	79.62	30.45	0.75	0.36	0.29	0.24	0.23	0.21	0.20	0.18
A1	100	100	100	86.82	15.44	4.03	1.25	0.47	0.27	0.26	0.25	0.24
A2	100	100	100	100	100	100	99.63	93.13	21.77	3.74	1.74	1.74

2.2 逐级填充试验

2.2.1 I级填充试验

根据逐级填充方法,A0用量取2 kg,A1用量按设定的比例称取。将两级碎石粗骨料混合后装入试样筒进行振动击实,测定其振实密度,绘制填充比例与振实密度曲线图。见图3。

由图3可得:碎石混合料密度随A1用量的增加而增大,当A0和A1用量比例达到100:50时,混合料振实密度趋于平稳。

2.2.2 II级填充试验

取A0:A1的用量比为100:30、100:35、100:40、100:45、100:50、100:60,粒径A2(粒径4.75~

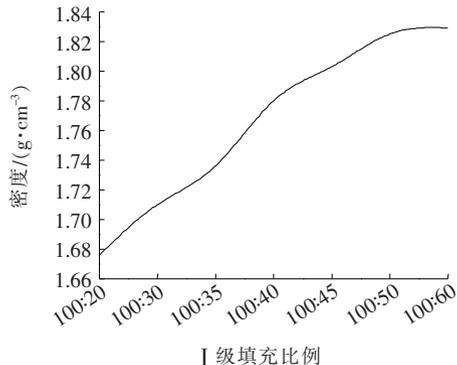


图3 I级填充试验结果

9.5 mm碎石)碎石用量取上一级填充试验比例重量的30%、35%、40%、45%、50%、60%、70%,混合3档

碎石,测定其振实密度,具体试验结果见图 4。

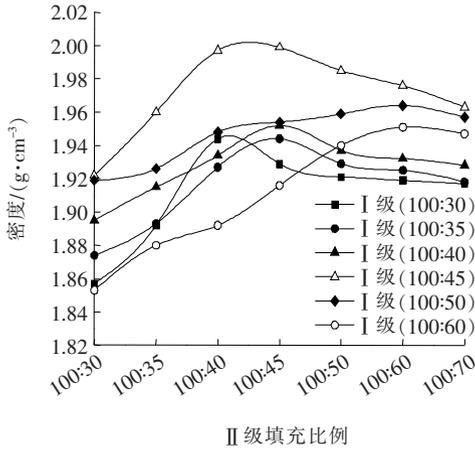


图 4 II 级填充试验结果

从图 4 可看出,当 I 级填充比例为 100 : 45, A2 用量为上一级填充比例重量的 40%~45% 时,碎石混合料密度达到最大。

2.3 细集料级配

通过 *i* 法对细集料碎石进行级配设计。计算公式如下:

$$P_k = P_0 I^k \tag{1}$$

$$k = 3.32 \cdot \lg\left(\frac{D}{d}\right) \tag{2}$$

式中: P_k 为所需计算的某级集料的通过率; P_0 为最大粒径 D 处的通过率,以 90%~100% 控制; k 为级数; I 为通过率递减系数; d 为粒径。

由 *i* 法公式计算细集料级配组成,具体计算结果见表 5。

表 5 *i* 法计算细集料通过率

<i>i</i> 值	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%						
	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
0.60	16.92	10.11	6.07	3.69	2.21	1.33	0.80
0.65	22.35	14.48	9.41	6.18	4.02	2.61	1.70
0.70	28.92	20.18	14.13	9.98	6.99	4.89	3.43
0.75	36.77	27.51	20.63	15.59	11.69	8.77	6.58
0.80	46.02	36.75	29.40	23.65	18.92	15.14	12.11
0.85	56.82	48.23	41.00	34.99	29.75	25.29	21.50

2.4 基于逐级填充法和 *i* 法获取集料级配

根据逐级填充试验结果,粗集料 A0、A1 和 A2 比例选用 100 : 45 : 58、100 : 45 : 65.25、100 : 50 : 60、

100 : 50 : 67.5; 细集料级配选取 *i* 值为 0.65、0.70、0.75 时的碎石混合料,再将粗细集料两两结合,最后获得 12 组级配,具体筛分通过率见表 6。

表 6 合成级配

编号	粗骨料比例	细集料 <i>i</i> 值	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%									
			53	37.5	31.5	26.5	19	9.5	4.75	1.18	0.6	0.075
1	100 : 45 : 58	0.65	100	96.78	92.21	71.13	47.48	43.19	22.35	9.41	6.18	1.70
2	100 : 45 : 58	0.70	100	97.05	92.87	73.57	51.93	48.00	28.92	14.13	9.98	3.43
3	100 : 45 : 58	0.75	100	97.38	93.65	76.49	57.23	53.73	36.77	20.63	15.59	6.58
4	100 : 45 : 65.25	0.65	100	96.89	92.47	72.12	49.29	44.96	22.35	9.41	6.18	1.70
5	100 : 45 : 65.25	0.70	100	97.15	93.11	74.48	53.58	49.62	28.92	14.13	9.98	3.43
6	100 : 45 : 65.25	0.75	100	97.47	93.87	77.30	58.71	55.19	36.77	20.63	15.59	6.58
7	100 : 50 : 60	0.65	100	96.89	92.46	71.84	47.66	43.18	22.35	9.41	6.18	1.70
8	100 : 50 : 60	0.70	100	97.15	93.10	74.23	52.09	47.98	28.92	14.13	9.98	3.43
9	100 : 50 : 60	0.75	100	97.47	93.86	77.07	57.38	53.73	36.77	20.63	15.59	6.58
10	100 : 50 : 67.5	0.65	100	97.00	92.73	72.82	49.47	44.96	22.35	9.41	6.18	1.70
11	100 : 50 : 67.5	0.70	100	97.25	93.34	75.12	53.75	49.62	28.92	14.13	9.98	3.43
12	100 : 50 : 67.5	0.75	100	97.55	94.08	77.87	58.85	55.18	36.77	20.63	15.59	6.58

为验证大粒径级配碎石相对于常规粒径级配碎石具有更好的力学性能,增加3组根据规范中推荐

级配做调整后的常规粒径碎石验证级配,具体级配见表7。

表7 规范中值调整级配

常规粒径 验证级配	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%							
	31.5	26.5	19	9.5	4.75	1.18	0.6	0.075
规范中值+	100	97.50	86.25	60.00	45.00	27.75	20.00	6.00
规范中值	100	95.00	82.50	55.00	38.00	22.50	16.00	5.00
规范中值-	100	92.50	78.75	50.00	31.00	17.25	12.00	4.00

3 力学性能分析

3.1 CBR 试验

以合成级配为研究对象,混合料含水量采用最佳含水率,经道路材料振动旋转压实仪振动旋转压实成型并测定其密度,然后参照JTG E40—2007《公路土工试验规程》进行CBR试验。具体试验结果见表8。

表8 CBR 测试结果

级配 编号	粗骨料比例	<i>i</i> 值	最佳含 水率/%	压实密度/ $R_{CBR}/$ ($g \cdot cm^{-3}$)	%
1		0.65		2.351	306
2	100 : 45 : 58	0.70		2.362	312
3		0.75		2.367	310
4		0.65		2.376	317
5	100 : 45 : 65.25	0.70		2.391	324
6		0.75		2.389	321
7		0.65	4.1	2.324	284
8	100 : 50 : 60	0.70		2.341	293
9		0.75		2.357	309
10		0.65		2.337	285
11	100 : 50 : 67.5	0.70		2.346	298
12		0.75		2.353	307
13	规范中值+			2.371	247
14	规范中值		4.7	2.383	251
15	规范中值-			2.387	256

由表8可看出:随着*i*值增加,其碎石混合料试件压实密度先增加,达到一定压实密度后趋于平缓或降低。粗骨料比例为100 : 45 : 65.25,*i*值为0.70时,试件压实密度和 R_{CBR} (加州承载比)值达到最大。主要原因是当粗骨料间空隙刚好被细集料完全填充时,此时试件形成骨架密实型结构,其压实密度达到最大,骨架性能较好,抗承载能力较强;细集料用量超过粗骨料的空隙时,会形成悬浮密实型结构,这不仅导致混

合料试件骨架性能变差,还会造成试件压实密度降低^[19]。

3.2 抗压回弹模量

以合成级配为研究对象,混合料含水量采用最佳含水率,经道路材料振动旋转压实仪振动旋转压实成型并测定其密度。参照JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》推荐的试验方法操作,使用自制新型道路材料压实成型仪器测试成型碎石试件的抗压回弹模量。

抗压回弹模量 E_c 。计算公式如下:

$$E_c = \frac{ph}{l} \quad (3)$$

式中: p 为单位压力(MPa); h 为试件高度(mm); l 为试件回弹变形(mm)。

抗压回弹模量试验测试结果见表9。由表9可得,碎石混合料试件的级配类型为粗骨料比例100 : 45 : 65.25,*i*值为0.70~0.75时,压实密度和抗压回弹模量达到最高。当粗骨料比例为100 : 45 : 58和100 : 50 : 60时,即A2用量减少,压实密度和抗压回弹模量出现下降的趋势。表明前者粗骨料比例类型的级配形成的试件更加具有骨架密实型结构的特征,其抗变形能力明显高于其他几组级配类型的试件。

通过对比规范中值和大粒径级配碎石试件,发现大粒径碎石级配类型为粗骨料比例100 : 45 : 65.25,*i*值为0.70~0.75时,其抗压回弹模量更高。原因是经过逐级填充试验设计出的级配为断级配,该级配类型试件具有较高的密实度和较优的骨架特性,因此抗压回弹模量值也更高,这也证明了大粒径碎石混合料具有更好的骨架结构。

3.3 不同方式成型试件性能分析

针对碎石混合料应用同一级配,然后使用静力压实、旋转压实、振动压实和振动旋转压实对其成型,再对成型试件进行CBR和抗压回弹模量测试,具体试验结果见表10。

表 9 抗压回弹模量测试结果

级配 编号	粗骨料比例	i 值	最佳 含水 率/%	压实密 度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	抗压回 弹模 量/MPa
1		0.65		2.351	326.4
2	100 : 45 : 58	0.70		2.362	334.1
3		0.75		2.367	333.8
4		0.65		2.376	345.5
5	100 : 45 : 65.25	0.70		2.391	357.4
6		0.75	4.1	2.389	358.1
7		0.65		2.324	304.6
8	100 : 50 : 60	0.70		2.341	315.7
9		0.75		2.357	326.9
10		0.65		2.337	309.3
11	100 : 50 : 67.5	0.70		2.346	313.7
12		0.75		2.353	324.2
13	规范中值+			2.371	327.4
14	规范中值		4.7	2.383	334.9
15	规范中值-			2.387	338.6

表 10 不同成型方式试件力学试验结果

成型方式	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	回弹模量(测试 压强 500 kPa)/MPa	$R_{\text{CBR}}/$ %
静力压实	2.16	124.7	253
旋转压实	2.19	157.7	261
振动压实	2.23	246.4	275
振动旋转压实	2.39	358.1	324

表 10 表明:经振动旋转压实成型的碎石混合料试件力学性能优于其他 3 种方式成型的试件。其中,经振动旋转压实成型的碎石混合料试件其抗压回弹模量分别为静力压实、旋转压实和振动压实成型试件的 2.87 倍、2.27 倍、1.45 倍, R_{CBR} 值分别为 1.28 倍、1.24 倍、1.18 倍。主要原因是振动旋转压实成型方式具有更好的碾压作用机制,使得碎石混合料试件具有更好的骨架结构并更加密实,骨架性能和密实度越好的试件其抗压和抗变形性能越强,因此经振动旋转压实成型的碎石混合料试件其力学性能更优。

4 结论

(1) 采用逐级填充法确定粗骨料比例使其形成多级嵌挤骨架结构, i 法计算细集料用量将其填充于集料骨架空隙中,使组合后的碎石混合料能够形成骨架

密实型结构。混合料经振动旋转压实成型后,试件压实密度随着级配 i 值的增加而提高;其 R_{CBR} 值和抗压回弹模量与压实密度具有较强的相关性, R_{CBR} 值和抗压回弹模量随着压实密度的增加而升高;试件级配为粗骨料比例 100 : 45 : 65.25, i 值范围在 0.70~0.75 时, R_{CBR} 值、抗压回弹模量和压实密度达到最高。

(2) 大粒径碎石相较于常规粒径碎石具有更好骨架结构性能,压实密度相当,大粒径级配碎石压实密度可达 2.391 g/cm^3 ;其抗压和抗变形能力更强,大粒径碎石试件 R_{CBR} 值可达 324%,抗压回弹模量可达 358.1 MPa,常规粒径碎石试件 R_{CBR} 值最高为 256%,抗压回弹模量最高为 338.6 MPa。因此将其经过合理的级配设计后应用于工程中是可行的。

(3) 不同制样方式成型的试件,其力学性能测试结果差异较大。经振动旋转压实成型的试件其 R_{CBR} 值和抗压回弹模量明显高于其余几种成型方式,其抗压回弹模量分别为静力压实、旋转压实和振动压实成型试件的 2.87 倍、2.27 倍、1.45 倍, R_{CBR} 值分别为 1.28 倍、1.24 倍、1.18 倍,压实密度分别为 1.11 倍、1.09 倍、1.07 倍。这表明振动旋转压实成型方式可使碎石混合料试件具有更好的骨架性能和密实性。

参考文献:

- [1] 谭波,郭志国,倪秋奕. 花岗岩大粒径级配碎石力学性能研究[J]. 中外公路, 2020, 40(1): 229-234.
- [2] 赵荐,王江平,祝建华. 大粒径级配碎石柔性基层之应用研究[C]. 中国公路学会 2007 年学术年会论文集(下), 2007.
- [3] 付其林,魏建国,周兴壮. 开级配大粒径级配碎石低温性能评价[J]. 建筑材料学报, 2019, 23(4): 896-903.
- [4] 付其林,刘朝晖,魏建国,等. 粉胶比对开级配大粒径沥青碎石路用性能的影响[J]. 中外公路, 2017, 37(1): 267-270.
- [5] 付其林,陈拴发,陈华鑫. 开级配大粒径沥青碎石混合料的高温稳定性[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2010, 30(2): 20-23.
- [6] 蒋应军,陈忠达,戴经梁,等. 骨架密实型水泥稳定碎石抗裂性能研究[C]. 第四届国际道路和机场路面技术大会论文集, 2002.
- [7] 彭波,魏翻,黄祯敏. 骨架密实型水泥稳定碎石级配算法研究[J]. 中外公路, 2017, 37(3): 52-56.
- [8] MEININGER, RICHARD C. Pavement Design Basis in the Base[J]. Rock Products, 2004, 107(12): 12.
- [9] VISCHER William. Low-Volume Road Flexible Pavement Design with Geogrid Reinforced Base[J]. Transportation Research Record, 2003, 1 819(1): 247-254.