

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2020.01.046

花岗岩大粒径级配碎石力学性能研究

谭波, 郭志国, 倪秋奕

(桂林理工大学, 广西 桂林 541004)

摘要:花岗岩大粒径级配碎石力学性能优于常规级配碎石,在实际工程中得到应用,但中国规范没有规定大粒径级配碎石的级配范围,工程中采用的级配多为经验级配,存在部分路面性能不稳定的缺点。因此,该文采用泰波法与*i*法相结合,设计其级配组成,采用重型击实成型方法,由无侧限抗压强度试验、CBR试验、回弹模量试验,探索最大公称粒径为53 mm的花岗岩级配碎石的力学性能。试验结果表明:基于泰波法与*i*法相结合的级配设计方法要优于单独的泰波法设计方法,初拟级配中 $n=0.55$ 、 $i=0.70$ 对应级配的力学性能最佳;8组初拟级配对应力学性能无论最大值或最小值都远远大于规范对普通级配碎石的要求,体现了花岗岩大粒径级配碎石良好的力学性能和应用前景;提升干密度与增大击实功可有效改善花岗岩大粒径级配碎石的力学性能。

关键词:级配组成;初拟级配;大粒径级配碎石;力学性能

中国规范指出级配碎石的最大公称粒径宜为37.5 mm,该文大粒径级配碎石指以花岗岩为原材料,最大公称粒径为53 mm的级配碎石混合物。级配碎石作为柔性散体材料,具备较高的承载力、非线性特性、良好的排水性能和吸收应力的能力,可以用来改善路面性能。改革开放以来,中国便展开了对级配碎石的研究与应用,并取得了相应的研究成果。以长安大学等众多学者为代表,在级配碎石的成型方法、级配设计及力学性能方面做出了系统的研究;同时,哈尔滨工业大学自主研发了上置式振动仪,用于级配碎石的成型研究。但由于中国现行规范并没有明确大粒径级配碎石的级配范围,众多实际工程中采用的都是经验级配,一些路面的力学性能不稳定。例如,在广西路网重修工

程中发现,部分地方干线公路采用的花岗岩大粒径级配碎石的级配组成中细集料含量较高,导致路面承载力低、透水性差、变形严重。

因此,该文通过泰波法与*i*法相结合设计花岗岩大粒径级配碎石的级配组成,由室内无侧限抗压强度试验、CBR试验和回弹模量试验,探索花岗岩大粒径级配碎石的力学性能。

1 原材料测试

所选集料为广西产花岗岩大粒径集料,花岗岩原材料性质如表1所示。

表1 花岗岩集料技术指标

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/ %	塑性指数	针片状 含量/%
31.5~53		2.702	2.689	2.681	0.3		14
19~31.5		2.680	2.661	2.649	0.5		10
13.2~19	24.59	2.669	2.643	2.625	0.6		9
4.75~13.2		2.66	2.633	2.616	0.8		
0~4.75		2.632	2.618	2.607	0.9	5.7	
规范要求	≤ 28	实测数据	实测数据	实测数据	实测数据	≤ 9	≤ 15

收稿日期:2019-06-13

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:1653366133@qq.com

由表 1 可知:花岗岩各项技术指标均符合规范要求(无特殊说明,下文所选用材料均为上述材料)。

2 基于泰波法与 i 法的级配设计

泰波法是最大密度曲线理论的一种计算方法,富勒提出的最大密度曲线理论认为:不同粒径的固体颗粒通过粗细搭配,合理的组合排列,可以获得最佳的受力骨架和最大的混合料密度。林绣贤研究认为,通过 i 法计算级配碎石细集料组成,混合料具有较强黏聚力,有利于混合料达到最佳嵌挤效果。基于大粒径级配碎石骨架—密实型的结构组成,提出泰波法与 i 法相结合的级配设计方法。

以 4.75 mm 为界限粒径将花岗岩大粒径级配碎石集料划分为粗集料、细集料,分别采用泰波法、 i 法计算粗、细集料的筛孔通过率。

2.1 泰波法

泰波法计算公式:

$$p_x = 100 \times \left(\frac{d}{D}\right)^n \quad (1)$$

式中: d 为所需计算的某级集料粒径(mm); p_x 为所需计算的某级集料的通过率(%); D 为混合料的最大粒径(mm); n 为递减系数(中国研究认为 $n=0.3\sim 0.6$ 所得密度最大)。

由泰波计算公式可以确定花岗岩大粒径级配碎石粗集料的筛孔通过率如表 2 所示。

表 2 泰波法计算粗集料通过率

泰波 指数	n 值	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
A	0.30	100	90.1	85.5	81.2	73.5	69.8	65.9	59.7
B	0.35	100	88.6	83.4	78.5	69.8	65.8	61.5	54.8
C	0.40	100	87.1	81.2	75.8	66.3	61.9	57.3	50.3
D	0.45	100	85.6	79.1	73.2	63.0	58.3	53.5	46.1
E	0.50	100	84.1	77.1	70.7	59.9	54.9	49.9	42.3
F	0.55	100	82.7	75.1	68.3	56.9	51.8	46.6	38.9
G	0.60	100	81.3	73.2	66.0	54.0	48.7	43.4	35.7

2.2 i 法

i 法计算公式:

$$p_k = 100 \times (i)^x \quad (2)$$

$$x = 3.32 \times (D/d)$$

式中: i 为通过率的递减系数(通常 $i=0.65\sim 0.85$); x 为料粒颗粒所在档,其他系数与泰波计算方法相同。

由 i 计算公式可以确定花岗岩大粒径级配碎石细集料的筛孔通过率如表 3 所示。

表 3 i 法计算细集料通过率

泰波 指数	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	
a	0.60	22.4	14.5	9.4	6.2	4.0	2.6	1.7	
b	0.70	28.9	20.2	14.1	10.0	7.0	4.9	3.4	
c	0.75	36.8	27.5	20.6	15.6	11.7	8.8	6.6	
d	0.80	46.0	36.7	29.4	23.7	18.9	15.1	12.1	
e	0.85	56.8	48.2	41.0	35.0	29.7	25.3	21.5	

2.3 基于泰波法和 i 法的设计方法获取初拟级配

通过表 2、3 可以获得多组不同级配组成,如 A-a、A-b、A-c、B-a、B-b、B-c 等如表 4 所示。

除以上级配组成外,还存在例如级配 F-d、G-e 等不满足筛孔通过率原则的级配组成,除不满足要求

的级配外,共可获取 24 组级配组成,由于级配组成数目较多,不一一列举。

基于以上 24 组级配组成进行最大干密度、最佳含水率试验,结果不一一列举,仅列出其中 6 组试验结果如表 5 所示。

表 4 不同级配组成

计算指数	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
$n=0.30, i=0.60$	100	90.1	85.5	81.2	73.5	59.7	22.4	9.4	6.2	1.7
$n=0.30, i=0.65$	100	90.1	85.5	81.2	73.5	59.7	28.9	14.1	10.0	3.4
$n=0.30, i=0.70$	100	90.1	85.5	81.2	73.5	59.7	36.8	20.6	15.6	6.6
$n=0.35, i=0.60$	100	88.6	83.4	78.5	69.8	54.8	22.4	9.4	6.2	1.7
$n=0.35, i=0.65$	100	88.6	83.4	78.5	69.8	54.8	28.9	14.1	10.0	3.4
$n=0.35, i=0.70$	100	88.6	83.4	78.5	69.8	54.8	36.8	20.6	15.6	6.6

表 5 最佳含水率、最大干密度

级配类型: $n=0.30, i=0.65$		级配类型: $n=0.30, i=0.70$		级配类型: $n=0.30, i=0.75$	
含水率/%	干密度/($g \cdot cm^{-3}$)	含水率/%	干密度/($g \cdot cm^{-3}$)	含水率/%	干密度/($g \cdot cm^{-3}$)
4.2	2.108	4.4	2.118	5.0	2.215
4.4	2.131	4.6	2.279	5.2	2.237
4.6	2.153	4.8	2.318	5.4	2.250
4.8	2.143	5.0	2.246	5.6	2.228
5.0	2.116	5.2	2.219	5.6	2.216
级配类型: $n=0.35, i=0.65$		级配类型: $n=0.35, i=0.70$		级配类型: $n=0.35, i=0.75$	
含水率/%	干密度/($g \cdot cm^{-3}$)	含水率/%	干密度/($g \cdot cm^{-3}$)	含水率/%	干密度/($g \cdot cm^{-3}$)
4.2	2.135	4.4	2.127	4.8	2.206
4.4	2.180	4.6	2.312	5.0	2.227
4.6	2.198	4.8	2.325	5.2	2.259
4.8	2.173	5.0	2.301	5.4	2.234
5.0	2.125	5.2	2.265	5.6	2.000

由试验结果可知:在 A-a、A-b、A-c、A-d、A-e 5 组级配中,级配 A-b 在含水率 4.8% 时对应的干密度 $2.318 g/cm^3$, 在 5 组级配对应的最大干密度最大,取级配 A-b 为初拟级配。同理可得 B、C、D、E、F、G 6 组级配类型对应的初拟级配,整理如表 6 所示。

3 力学性能研究

3.1 无侧限抗压强度

以初拟级配为研究对象,含水率取相应的最佳含

表 6 初拟级配组成

计算指数	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
$n=0.30, i=0.70$	100	90.1	85.5	81.2	73.5	59.7	28.9	14.1	10.0	3.4
$n=0.35, i=0.70$	100	88.6	83.4	78.5	69.8	54.8	28.9	14.1	10.0	3.4
$n=0.40, i=0.70$	100	87.1	81.2	75.8	66.3	50.3	28.9	14.1	10.0	3.4
$n=0.45, i=0.70$	100	85.6	79.1	73.2	63.0	46.1	28.9	14.1	10.0	3.4
$n=0.50, i=0.70$	100	84.1	77.1	70.7	59.9	42.3	28.9	14.1	10.0	3.4
$n=0.55, i=0.70$	100	82.7	75.1	68.3	56.9	38.9	28.9	14.1	10.0	3.4
$n=0.60, i=0.70$	100	81.3	73.2	66.0	54.0	35.7	28.9	20.2	10.0	3.4
泰波法 $n=0.50$	100	84.1	77.1	70.7	59.9	42.3	30.0	14.9	10.6	3.8

注:泰波指数 $n=0.50$ 计算所得级配为采用泰波法单独设计级配组成时对应混合料干密度最大。

水率,混合料添加 4%水泥,按照 JTJ 057—94《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》进行相关试验。研究花岗岩大粒径级配碎石试件养护时间均为 28 d,饱

水条件下,相应击实次数分别为 30、60、98 次时,无侧限抗压强度的变化情况。试验结果见表 7。

由表 7 可知:①当 $n=0.55, i=0.70$ 时级配组成

表 7 不同击实次数时花岗岩大粒径级配碎石试件无侧限抗压强度

级配类型	不同击实次数(次)下的抗压强度 R/MPa			$\frac{R(60)}{R(30)}$	$\frac{R(98)}{R(60)}$	$\frac{R(98)}{R(30)}$
	30	60	98			
$n=0.30, i=0.70$	0.36	0.53	0.97	1.47	1.83	2.69
$n=0.35, i=0.70$	0.40	0.66	1.23	1.65	1.86	3.08
$n=0.40, i=0.70$	0.45	0.83	1.36	1.84	1.64	3.02
$n=0.45, i=0.70$	0.48	0.80	1.43	1.67	1.79	2.98
$n=0.50, i=0.70$	0.54	0.89	1.57	1.65	1.76	2.91
$n=0.55, i=0.70$	0.58	0.95	1.68	1.64	1.77	2.89
$n=0.60, i=0.70$	0.52	0.87	1.58	1.67	1.82	3.03
泰波法 $n=0.5$	0.46	0.82	1.39	1.78	1.69	3.02
平均值	0.47	0.79	1.40	1.67	1.77	2.98

对应无侧限抗压强度值最佳;②对于初拟级配,击实次数越大,抗压强度越高;③在花岗岩大粒径级配碎石的工程施工过程中,一定的碾压功率,是施工质量的保证。

3.2 CBR 值

以初拟级配为研究对象,改变混合料含水率,计算干密度,按照 JTG E40—2007《公路土工试验规程》进行相关试验操作获得试件的 CBR 值,试件击实次数为 98 次时,试验结果如表 8 所示。

研究击实次数对 CBR 值的影响关系,以初拟级配为研究对象,含水率取最佳含水率,改变试件成型击实次数,获得对应的 CBR 值,试验结果如表 9 所示。

由表 8、9 可知:①中国规范要求,被用作基层的级配碎石材料,采用击实成型对应试件的 CBR 值应不小于 180%。在研究干密度对 CBR 的影响试验中,

初拟级配试件 CBR 值最小 253%,最大 576%;击实试验中击实次数为 98 次时最小 CBR 值为 369%,都满足规范要求;②级配 $n=0.55, i=0.70$ 对应试件 CBR 值最大,且明显优于泰波法单独设计级配混合料试件对应的 CBR 值;③混合料干密度越大,对应试件 CBR 值越大;击实次数对试件 CBR 值影响显著;③花岗岩大粒径级配碎石的工程施工过程中,必须保证一定的碾压功率,否则会对修建道路质量造成一定的影响。

3.3 回弹模量

以初拟级配最佳含水率试件为对象,参照 JTJ 057—94《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,试验过程中试件可采用电动脱膜仪成功脱膜,进而采用路面材料强度仪测试花岗岩大粒径级配碎石的无侧限抗压回弹模量(E_w)与有侧限抗压回弹模量(E_y),计算公式如下:

表 8 不同干密度对应的 CBR 值

级配类型: $n=0.30, i=0.70$			级配类型: $n=0.35, i=0.70$			级配类型: $n=0.40, i=0.70$			级配类型: $n=0.45, i=0.70$		
含水率/%	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	CBR 值/%	含水率/%	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	CBR 值/%	含水率/%	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	CBR 值/%	含水率/%	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	CBR 值/%
4.4	2.118	253	4.4	2.127	305	4.2	2.269	346	4.2	2.232	307
4.6	2.279	325	4.6	2.312	398	4.4	2.315	401	4.4	2.331	432
4.8	2.318	369	4.8	2.329	405	4.6	2.350	453	4.6	2.359	476
5.0	2.246	321	5.0	2.301	372	4.8	2.308	387	4.8	2.330	427
5.2	2.219	272	5.2	2.265	339	5.0	2.253	325	5.0	2.316	408

续表 8

级配类型: $n=0.50, i=0.70$			级配类型: $n=0.55, i=0.70$			级配类型: $n=0.60, i=0.70$			泰波法 $n=0.5$		
含水率/%	干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	CBR 值/%	含水率/%	干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	CBR 值/%	含水率/%	干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	CBR 值/%	含水率/%	干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	CBR 值/%
4.0	2.336	437	3.8	2.304	375	3.8	2.345	449	3.6	2.271	338
4.2	2.351	459	4.0	2.346	440	4.0	2.350	457	3.8	2.318	405
4.4	2.368	513	4.2	2.385	576	4.2	2.361	506	4.0	2.356	453
4.6	2.343	436	4.4	2.372	520	4.4	2.351	450	4.2	2.297	350
4.8	2.332	425	4.6	2.290	343	4.6	2.337	428	4.4	2.254	320

表 9 不同击实次数对应的 CBR 值

级配类型	不同击实次数(次)下的 CBR 值/%			$\frac{CBR(60)}{CBR(30)}$	$\frac{CBR(98)}{CBR(60)}$	$\frac{CBR(98)}{CBR(30)}$
	30	60	98			
$n=0.30, i=0.70$	92	193	369	2.10	1.91	4.01
$n=0.35, i=0.70$	98	232	405	2.52	1.75	4.13
$n=0.40, i=0.70$	109	241	453	2.21	1.88	4.16
$n=0.45, i=0.70$	113	244	476	2.24	1.95	4.21
$n=0.50, i=0.70$	128	280	513	2.19	1.83	4.01
$n=0.55, i=0.70$	144	295	576	2.05	1.95	4.00
$n=0.60, i=0.70$	155	263	506	1.70	1.92	3.26
泰波法 $n=0.5$	115	252	453	2.20	1.79	3.94

$$E = \frac{PH}{l} \quad (3)$$

式中: E 为回弹模量(MPa); P 为单位压力(MPa); H 为试件高度(mm); l 为回弹变形量(mm), l = 加载读数 - 卸载读数。

试验结果如表 10 所示。

表 10 抗压回弹模量

级配类型	E_w /MPa	E_y /MPa	E_y/E_w
$n=0.30, i=0.70$	286	329	1.15
$n=0.35, i=0.70$	338	372	1.10
$n=0.40, i=0.70$	411	436	1.06
$n=0.45, i=0.70$	385	454	1.18
$n=0.50, i=0.70$	410	492	1.20
$n=0.55, i=0.70$	452	529	1.17
$n=0.60, i=0.70$	438	473	1.08
泰波法 $n=0.50$	408	461	1.13

由表 10 可知:① JTG D50-2017《公路沥青路面设计规范》中指出,无黏结材料碎石基层的模量为 180~250 MPa,试验所得无侧限回弹模量最小值为 286 MPa,最大值为 452 MPa;有侧限回弹模量最小为 329

MPa,最大值为 529 MPa,均满足规范要求;② 级配 $n=0.55, i=0.70$ 对应试件回弹模量值最佳,优于泰波法单独设计级配混合料试件对应的回弹模量;③ E_y/E_w 平均值为 1.13,路面设计宜设置路边限制,提高路用性能。

4 结论

(1) 泰波法与 i 法设计花岗岩大粒径级配碎石级配组成,具有骨架-密实型结构特征,明显优于泰波法单独设计级配组成;通过无侧限抗压强度试验、CBR 试验、回弹模量试验,发现级配 $n=0.55, i=0.70$ 对应力学性能最佳,其无侧限抗压强度为 1.68 MPa,泰波法为 1.39 MPa;CBR 值为 576%,泰波法为 453%;回弹模量最大值为 529 MPa,泰波法为 461 MPa。

(2) 花岗岩大粒径级配碎石对应的 8 组初拟级配,当击实次数为 98 次时:无侧限抗压强度最小值为 0.97 MPa,最大值可达 1.68 MPa;CBR 值最小值 253%,最大值 576%,其最大值为规范要求的 3.2 倍;有侧限回弹模量最小值 329 MPa,最大值 529 MPa,平均为无侧限回弹模量的 1.13 倍,回弹模量最大值可达

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2020.01.047

基于正交试验的掺碎石红土粒料强度性能影响研究

古小明¹, 赵连志², 姚浩明², 梁欢²

(1.同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海市 201804; 2.中国路桥工程有限责任公司)

摘要: 结合非洲道路工程需求,研究了掺碎石红土粒料强度特征,分析了掺碎石比例、压实度、碎石级配和含水率4个因素对粒料 CBR 值的影响,并对比了碎石材料性能。通过正交试验设计,采用材料试验系统(MTS)对试件进行 CBR 试验。在对正交试验结果进行方差和极差分析的基础上,明确试样 CBR 多水平多因素影响程度的显著性。试验表明:在诸多因素中,压实度影响最为显著,而后依次是含水率、级配和掺碎石比例;压实度越大,颗粒之间的接触更加紧密,抵抗变形能力越强;掺碎石后的红土粒料强度提升明显,能满足底基层及低等级道路基层 CBR 值的要求。

关键词: 掺碎石红土粒料; 正交试验; 加州承载比(CBR); 影响因素

1 引言

红土粒料是天然母岩在非洲特殊的湿、旱二季循环作用下,经历淋溶、分解、胶结过程,形成的铁质硅铝结核,在非洲等地区广泛分布,是一种常见筑路材料。世界各大洲的红土粒料区域很多既有公路,把未经处治的低强度红土粒料直接用于路面基层的填料,而在

交通量不断增加及雨水冲刷的双重影响之下,这一部分公路早期损坏严重。Tockol 等指出红土粒料材料化学成分构成复杂,性能变异性大,随着时间的推移,在环境等因素的作用下,材料还会继续发生变异(即继续发育),由此而导致基层整体性能有所变化;Namutebi 等在进行室内压实试验时发现,取自西非维多利亚湖附近的红土粒料,往往会在标准压实功作用下发生比较严重的破碎;Nzabakurikiza指出红土粒料由

规范要求的 1.8~3.0 倍,其力学性能都远远大于中国规范对普通级配碎石力学性能的要求,说明花岗岩大粒径级配碎石具有良好的力学性能与应用前景。

(3) 由花岗岩大粒径级配碎石无侧限抗压强度 $R(98)/R(60)=1.77$, $R(98)/R(30)=2.98$, CBR 值 $CBR(98)/CBR(60)=1.79$, $CBR(98)/CBR(30)=3.94$ 及试件干密度越大对应 CBR 值越大,可知提升干密度、增大击实功可以有效改善花岗岩大粒径级配碎石的力学性能,工程施工应保证一定的碾压功率,提高压实度,保证施工质量。

参考文献:

- [1] 李嶙.基于振动法的级配碎石设计标准与设计方法研究[D].长安大学硕士学位论文,2010.
- [2] 马磊,莫石秀,王秉纲.级配碎石抗剪性能试验研究[J].公路交通科技,2005(12).

- [3] 莫石秀,马磊,王秉纲.级配碎石基于 CBR 的关键筛孔合理范围确定[J].广东公路交通,2006(1).
- [4] 马磊,王秉纲.基于抗变形能力的级配碎石组成设计方法[J].长安大学学报(自然科学版),2007(5).
- [5] 鲁华征.级配碎石设计方法研究[D].长安大学硕士学位论文,2006.
- [6] 王龙,解晓光,冯德成.级配碎石材料强度及塑性变形特性[J].哈尔滨工业大学学报,2007(6).
- [7] 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.
- [8] 师晖军.大粒径级配碎石在旧水泥路面改建中的应用技术研究[J].中外公路,2009(5).
- [9] 丁明强.大粒径碎石路基填料室内振动压实原理及试验结果分析[J].北方交通,2017(8).
- [10] 赵国卫.大粒径碎石路基压实质量控制方法研究[J].黑龙江交通科技,2015(1).

收稿日期:2019-01-03

作者简介:古小明,男,硕士研究生,E-mail:1358693953@qq.com