

文章编号: 1002-0268 (2005) 05-0014-03

连续级配的级配碎石材料试验研究

曹建新¹, 王哲人²

(1, 广州市市政工程设计研究院, 广东 广州 510060;

2 哈尔滨工业大学交通科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要: 传统概念认为, $n=0.4\sim0.5$ 的连续级配具有最大的密实度。本文对连续级配的级配碎石细集料和级配碎石混合料进行系统的室内试验研究, 并相应地对试件进行击实成型与振动成型的比较研究, 论证了当前现场碾压设备由清一色的光轮压路机发展为以振动压路机为主以后, 以最大密实度为理论基础制定规范级配的最佳 n 值, 并非固定为 $0.4\sim0.5$ 。而一系列的测定数据表明: 级配碎石基层材料的路用性能可以提高, 它是材料与压实工艺相互作用的结果。

关键词: 连续级配; 级配碎石; 试验研究

中图分类号: U414.1

文献标识码: A

Experimental Research of Continuous Grading Macadam Materials

CAO Jian-xin¹, WANG Zhe-ren²

(1 Guangzhou Municipal Engineering Design and Research Institute, Guangdong Guangzhou 510060, China;

2 School of Communication Science and Engineering, Harbin University of Technology, Heilongjiang Harbin 150090, China)

Abstract: Traditionally it is considered that continuous grading mixture has the maximum compactness. This paper presents a systematic indoor experiments to study continuous grading macadam materials, including fine materials and mixture materials, combined with comparison between heavy compaction samples and vibration compaction samples. The experiments show that the best value n to constitute standard grading based on the theory of maximum compactness is not fixed over $0.4\sim0.5$ when rolling equipments have developed from flat wheel roller to the vibration roller. A series of experimental data show that the road performance of grading macadam base materials can be improved, it is the result of the combination of the improvement of the materials and the compact.

Key words: Continuous grading; Grading macadam; Experimental research

0 前言

顾名思义, 影响级配碎石基层材料强度最重要的因素是级配组成, 为了达到最大的密实度, 历史经验普遍采用连续级配。对于连续级配的计算方法早年有 W. B. 富勒 (Fuller) 根据实验提出的理想级配, 认为颗粒级配越接近抛物线, 则密度越大, 表达式为

$$P_x = 100 \sqrt{\frac{d}{D}} (\%)$$

A. N. 泰波 (Tabol) 将富勒公式改变成以下通式

$$P_x = 100 \left(\frac{d}{D} \right)^n (\%)$$

式中, P_x 为某粒径 d 集料的通过百分率, %; D 为集料的最大粒径, mm; n 为泰波公式系数。

根据泰波的理论分析和试验认为 $n=0.3\sim0.5$ 之间, 都具有较好的密实度。以后各国的连续级配计算方法都是由泰波公式演变而来, 比如苏联方法也是以颗粒直径的 $1/2$ 为递减标准; 日本认为 $n=0.35\sim$

0.45 与实际最为接近^[1]。

考虑到现场施工碾压的装备, 已经由 50 年代清一色的光轮压路机发展为以振动压路机为主的现实, 为使试件成型反映现代机械装备与工艺水平, 笔者相应地对试件进行了击实成型与振动成型的比较研究。击实试验根据规范规程进行; 振动成型试验由自行设计的频率、振幅与激振力等振动碾压三要素可调的上置式振动压实设备实现。

本文选择级配碎石细集料 $d_{\max}=4.75\text{mm}$ 和级配碎石混合料 $d_{\max}=19\text{mm}$ 进行试验研究, 并且从不同的角度对试件进行评价。

1 级配碎石细集料

泰波指数 n 分别取: $n=0.3$ 、 0.35 、 0.40 、 0.45 、 0.50 、 0.55 、 0.6 、 0.7 、 0.8 、 0.9 。具体级配如表 1 所示。

表 1 细集料级配的通过率									%
粒径/mm	泰波指数 n								
	0.3	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.7	0.8	0.9
4.75	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2.36	81	78	76	73	70	68	61	57	53
1.18	66	61	57	53	50	46	38	33	29
0.60	54	48	44	39	36	32	24	19	16
0.30	44	38	33	29	25	22	14.5	11	8
0.15	35	30	25	21	18	15	8.9	6	4
0.075	29	23	19	15	12	10	5.5	4	2

振动成型的参数选择参考多石类碎石土(含石量 70%~100%)的经验, 采用名义振幅 $A=0.423\text{mm}$ (8片配重), 频率 $f=45\text{Hz}$, 离心力 $F=6\text{kN}$, 振动历时 3min, 以有利于压实能的传递, 压实深度大^[3]。振动成型分为两次成型和一次成型, 试验结果见表 2 和表 3, 重型击实试验结果如表 4 所示。

(1) 从现象上可得到如下认识: ①重型击实的试验结果再一次验证了历史的经验。由表 4, 当 $n=0.5$ 时干密度最大, CBR 值也最大; 因此, 既符合最大密实度理论又符合 n 最佳值 $0.3\sim0.5$ 的经验; ②振动压实成型试验证明了历史经验的条件性。当一次振动成型时, 最大干密度 $n=0.55$, 而最大 CBR 值在 $n=0.8$ 当两次振动成型时, 最大干密度是在 $n=0.7$, 而最大 CBR 值在 $n=0.8$ 。

(2) 透过现象, 分析如下: ①由于两次振动成型的能量大于一次振动成型, 不难得出最大干密度原则下的最佳 n 值相对于成型力的类型与能量的变化, 振动压实成型时最佳 n 值随能量而增大, 由 0.55 到 0.7。击实成型时, 最佳 n 值随击实功而增大, 由

0.3 到 0.5 (轻型标准到重型标准)。 n 的增大意味着起填充作用的细集料部分相对减少, 需要足够的能量才能使集料紧密。②当 $n\geq 0.7$ 时, 即使两次振动与重型击实的干密度相同, 但 CBR 差值约达 1 倍。一方面说明了级配碎石的强度并不单纯取决于密实, 另一方面说明振动有助于集料颗粒的排列组合形成良好的嵌挤骨架结构。③大约以 $n=0.5$ 为界, 在 3 种压实成型方式下, $CBR-n$ 规律的不同, 反映了材料与压实工艺相互影响的复杂性, 并没有被完全认识, 但是正确认识历史经验的条件性却是不断有所创新的良好开端^[3]。

表 2 细集料试验结果 (一次成型)

n	湿密度 $/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	干密度 $/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	CBR /%	空隙率 /%	理论密度 $/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
0.30	2.023	1.927	26	30.21	2.758
0.40	2.065	1.967	60	28.84	2.764
0.45	2.065	1.967	44	28.19	2.739
0.50	2.098	1.988	76	28.90	2.796
0.55	2.145	2.043	79	26.23	2.769
0.80	2.058	1.960	97	28.49	2.741
0.90	2.042	1.945	86	29.81	2.771

表 3 细集料试验结果 (二次成型)

n	湿密度 $/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	干密度 $/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	CBR /%	空隙率 /%	理论密度 $/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
0.30	2.133	2.031	18.3	26.36	2.758
0.40	2.150	2.048	36	25.90	2.764
0.45	2.147	2.045	24	25.34	2.739
0.50	2.182	2.093	42	25.14	2.796
0.55	2.198	2.078	73	24.95	2.769
0.70	2.259	2.152	111	22.48	2.766
0.80	2.219	2.113	122	22.91	2.741
0.90	2.196	2.091	101	24.54	2.771

表 4 重型击实试验结果

n	干密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	空隙率 /%	CBR /%
0.30	2.145	21.80	26
0.40	2.163	21.40	30
0.50	2.202	20.96	54
0.70	2.165	22.01	49
0.80	2.190	23.06	51
0.90	2.090	24.58	52

2 级配碎石混合料

在工艺 45Hz, 97.21kPa, 0.417mm, 6kN 下, 对 7 种连续级配的混合料在不同含水量下进行试验, 连续级配混合料的级配如表 5 所示, 试验结果图 1 和图 2。从图 1 和图 2 可以看出。

(1) 当 $n\leq 0.5$, 随着含水量的增大, 振动过程中细集料挤出量有不同程度的增大, 由于粗集料相对

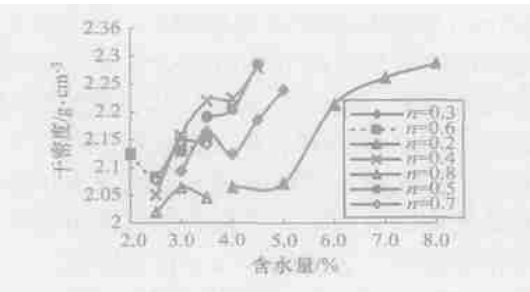


图 1 含水量与干密度关系图

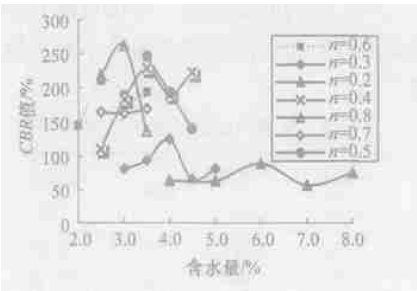


图 2 含水量与 CBR 关系图

增多，因此干密度增大显著，CBR 值并不因此增大反而有所下降，由此表明并未达到形成紧密骨架的程度。虽然结构很密实，但是因为细料较多，所以水稳定性较差，当 n 值较大时，则出现相反的情况。

(2) 当 $n \geq 0.6$ ，随含水量的增大，振动过程细集料很少或者没有挤出，因此干密度-含水量与 CBR-含水量关系曲线都出现峰值，即出现相应的最佳含水量。

(3) 当荷载外力与内力平衡时结构不再发生变化，试验数据显示在 $n = 0.6$ 左右时，结构在振动过程中几乎不再发生变化，激振力与骨架嵌挤力处于平衡状态。此时，CBR 值与干密度值成正比并且表现出较大的 CBR 值。而当 n 值小于 0.6 时结构显然不稳定，虽然具有较高的密实度，但是力学性质却很差。由此可见，骨架的嵌挤作用对力学性质的影响较大。

(4) 上述现象一方面说明振动碾压过程级配碎石混合料的组成结构会有不同程度的变化，另一方面说明当粗集料含量达到一定数量形成紧排骨架结构时组

成不再发生变化，而结构随外力的作用有所变化，趋向密实稳定。由于振动减少了集料之间的摩阻力，在一定的外力与能量作用下，较之单纯增大外力不仅可以减少集料的压碎，还能使集料的排列组合更趋合理。所以利用振动压实工艺与被压材料相互影响的作用，适当增大粗集料的用量，使混合料形成紧密嵌挤骨架-密实的组成结构（简称紧排骨架-密实组成结构）是提高混合料使用性能的一个有效的技术途径^[4]。

表 5 各种级配混合料通过筛孔的百分率 %

筛孔/mm	泰波指数 n						
	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
31.5	100	100	100	100	100	100	100
26.5	97	95	93	92	90	89	87
19	90	86	82	78	74	70	67
16	87	82	76	71	67	62	58
13.2	84	77	71	65	59	54	50
9.5	79	70	62	55	49	43	38
4.75	68	57	47	39	32	27	22
2.36	60	46	35	27	21	16	13
1.18	52	37	27	19	14	10	7
0.6	45	30	21	14	9	6	4
0.3	39	25	16	10	6	4	2
0.15	34	20	12	7	4	2	1
0.074	30	16	9	5	3	1	1

3 动力试验

对泰波指数 $n = 0.45$ 、 0.55 、 0.65 、 0.80 四种级配 ($D_{max} = 19\text{mm}$) 在振动工艺下成型之后，在 MTS 仪上进行重复加载的压入试验，测定干密度、永久变形与回弹模量，试验结果如图 3、图 4 和图 5 所示。

(1) 由图 3 可见，干密度值在 $n = 0.65$ 处取得最大值，即对于连续级配的混合料来说，在振动成型时，依据干密度指标， n 最佳值为 0.65。

(2) 根据动力变形特性的试验研究，动应力在 5 ~ 20MPa 时，级配 $n = 0.45$ 、 0.55 的永久变形均大于级配 $n = 0.65$ 的永久变形。在动应力为 20MPa 时，级配 $n = 0.65$ 的永久变形仅为 3.78mm，低于其它 3 种。动应力在 5 ~ 20MPa 时， $n = 0.65$ 的动弹模量较高，可达 721MPa，虽并非最高，但永久变形却是最小。

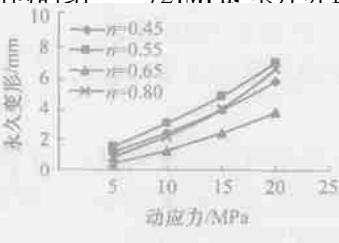
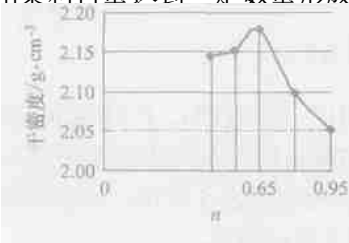


图 3 不同 n 值时级配碎石混合料干密度变化图 图 4 动应力与永久变形关系图 图 5 动应力与回弹模量关系图

E 与常规试验的某一个指标很难建立独立相关关系, 因为凭借单一常规技术指标是很难评价沥青的低温性能的。

表 2 常规、SHRP 试验结果一览表

试验项目	实验条件 及要求	沥青常规技术指标试验结果					
		沥青 1	沥青 2	沥青 3	沥青 4	沥青 5	沥青 6
PI		-0.85	-0.57	-0.62	-0.45	0.11	0.95
$T_{1.2}/^{\circ}\text{C}$		-20.7	-22.9	-22.2	-10.0	-24.3	-27.4
弹性恢复	恢复率 /%	95	25	32	35	35	36
	质量损失 /%	0.049	0.48	0.23	0.39	0.43	0.55
薄膜加热 试验	针入度比 (25 $^{\circ}\text{C}$) /%	75	55	60	64	67	48
	延度(15 $^{\circ}\text{C}$) (163 $^{\circ}\text{C}$, 5h) /cm	>200	>200	>200	164	112	118.5
PAV(压力老化)后残留沥青的 BBR 试验结果							
劲度 $S(-24^{\circ}\text{C})/\text{MPa}$	$S < 300$	423.0	282.0	209.5	238.7	214.3	210.4
蠕变速率 $m(60\text{s})$	$m > 0.3^{[4]}$	0.319	0.275	0.263	0.248	0.262	0.254
劲度 $S(-18^{\circ}\text{C})/\text{MPa}$		156.0	119.0	89.4	118.5	104.5	110.5
蠕变速率 $m(60\text{s})$		0.401	0.320	0.297	0.286	0.288	0.281
劲度 $S(12^{\circ}\text{C})/\text{MPa}$		—	—	45.9	45.5	58.6	45.0
蠕变速率 $m(60\text{s})$		—	—	0.312	0.323	0.310	0.310

再对比 BBR 试验结果发现, R_{VE} 、 E 与反映沥青低温蠕变性能的蠕变曲线斜率 m 值相关性较好, 由此对 6 种 SBR 改性沥青进行低温性能优劣排序: 沥青 1 沥青> 沥青 2> 沥青 3> 沥青 6> 沥青 5> 沥青 4。

(上接第 16 页)

(3) $n=0.65$ 的级配碎石混合料, 无论从干密度还是从弹塑性变形的角度, 都要优于 $n=0.45$ 和 0.8, 而不是传统的泰波指数 n 在 0.4~0.5 之间为最佳级配。这进一步证明了由细集料试验得出最佳 n 值相对性的结论。

4 结束语

(1) 经典的级配理论以密实度最大、空隙率最小为出发点, 此时强度最大、变形最小。对于细粒土、细集料以及击实工艺成型无疑是正确的。但对于粗集料含量多到一定程度特别当采用振动压实工艺后, 应用粗集料形成不同排列组合的结构, 最大密实度原则就不一定适用了。

(2) 重载交通对材料组成结构提出了新的要求, 必然引起工艺及材料级配组成的一系列的变化。不同 n 值的连续级配在振动荷载作用下组成结构变化的试

5 结论

(1) 采用不同指标的评价结果差异较大, 分析可知, 测力延度试验评价改性沥青的低温性能是可行的, 运用粘弹比 R_{VE} 、应变能 E 作为评价指标是正确的。沥青的 R_{VE} 越大, 其 E 越小, 低温性能也就越好, 经过与 m 值相关性的分析, 建议在高寒地区选择沥青材料时, 要保证其 R_{VE} 值至少不小于 4.5。

(2) 尽管用不同试验方法、不同的评价指标对沥青低温性能的优劣排序基本一致, 但因所用沥青试样均为高标号改性沥青, 从 BBR 数据可知, 采用 2% 剂量进行改性并不理想。

(3) 采用 R_{VE} 作为评价指标虽然比较合理, 但其计算的方法还有待于进一步简化, 使其更加直观。

参考文献:

[1] 邹桂莲. 旧 PCC 路面加铺沥青面层的材料组成设计、方法研究及应用 [D]. 哈尔滨建筑工业大学, 博士论文, 2001: 93-94

[2] 沈金安. 沥青及沥青混合料路用性能 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.

[3] 束德林. 工程材料力学性能 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.

[4] SHRP-A-379, Test Methods and Practices [S].

验研究, 得出结论也说明嵌挤骨架的形成对力学性能和结构稳定性的重要性, 在 n 值处于 0.4 左右时密实程度高, 但是结构稳定性和力学性能却不好。对于中轻交通来说, 松排骨架-密实结构可以胜任, 但在重交通下, 松排骨架-密实结构发生较大的压密变形, 并且存在重交通下由于回弹模量低引起路面疲劳裂缝, 密实级配类型也存在这类问题。

参考文献:

[1] 林绣贤. 柔性路面结构设计方法 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1988.

[2] 王龙. 全含量土石混合料振动压实特性的研究 [D]. 哈尔滨建筑大学硕士论文, 1999.

[3] 孙耀东. 碎石基层级配混合料组成设计的研究 [D]. 哈尔滨工业大学硕士论文, 2001.

[4] 曹建新. 重载交通下级配碎石基层材料组成结构与动力特性的研究 [D]. 哈尔滨工业大学硕士论文, 2001.