

文章编号: 1002-0268 (2004) 03-0009-05

沥青路面级配碎石基层的设计与施工工艺

严二虎¹, 沈金安², 李福普²

(1. 东南大学, 江苏 南京 210096; 2 交通部公路科学研究所, 北京 100088)

摘要: 级配碎石在级配良好并得到充分压实的情况下, 利用其嵌挤作用, 具有相当好的承载能力, 有一定的排水功能, 因而常用作路面的基层。半刚性基层沥青路面作为过渡层时, 可以有效改善半刚性基层收缩裂缝的反射裂缝的发生。本文介绍级配碎石基层的材料和配合比设计、施工工艺, 以及在实际应用中应注意的事项。

关键词: 沥青路面; 级配碎石基层; 组成设计; 施工工艺

中图分类号: U416 217

文献标识码: A

Material Composition Design and Construction Process of Unbound Graded Aggregate Base of Asphalt Pavement

YAN Er-hu¹, SHEN Jin-an², LI Fu-pu²

(1. Southeast University, Jiangsu Nanjing 210096, China; 2 Research Institute of Highway, Beijing 100088, China)

Abstract: Well-graded and well-compacted unbound aggregate mixture, which form stone-on-stone skeleton, make a significant structural contribution, and show a good drainage performance, so it is used widely in various countries. Unbound aggregate base can efficiently retard the reflexion of cracks to asphalt pavement surface, which is aroused by the shrinkage crack of semi-rigid base in the inverted structure. Material composition design, construction process and attentive matter in construction of unbound graded aggregate base are introduced in this paper.

Key words: Asphalt pavement; Unbound graded aggregate base; Composition design; Construction process

半刚性材料由于具有较高的强度、刚度和板体性, 有很高的路面承载能力, 我国普遍用作各个等级的沥青路面与水泥混凝土路面的基层。但是半刚性基层也存在一系列不可避免的技术问题, 如由于半刚性基层材料收缩特性而导致沥青路面早期开裂、半刚性基层材料在水的综合作用下而出现唧浆现象, 有时甚至成为半刚性基层沥青路面早期破坏的重要原因之一。近几年公路专家开始重视对柔性基层进行研究, 以丰富我国沥青路面结构形式, 许多省已经铺筑了柔性基层沥青路面的试验路。

级配碎石材料的强度、模量较各种有机、无机结合料稳定的基层差, 因此对级配碎石基层的研究和应用, 需要特别注意它的适用性。通常在级配碎石基层

上的沥青层必须有足够的厚度, 同时致力于提高级配碎石的强度和稳定性, 以降低行车作用下的变形和永久变形。国内外成功经验表明, 严格材料技术要求、选择合理的级配以及严格施工工艺控制是提高级配碎石强度和稳定性的关键。

我们通过大量的室内外实验, 并在青海省马平高速公路、四川省南广高速公路等工程上铺筑试验段, 进行级配碎石材料组成设计及施工工艺的研究。由于级配碎石基层在国际上应用十分广泛, 且有丰富经验, 我们的各项工作参考了国外的经验和规范。

1 材料组成设计

1.1 原材料技术要求

收稿日期: 2003-09-01

作者简介: 严二虎 (1975-), 男, 安徽安庆人, 东南大学博士研究生, 研究方向为道路沥青路面工程。

原材料的技术性能对级配碎石强度、稳定性能影响较大。参考国内外规范，我们提出了级配碎石基层材料技术要求如表 1 所示。长期以来影响级配碎石在我国应用的最主要原因之一是材料质量较差。成渝高速公路铺筑了 140km 级配碎石基层沥青路面，现在大部分已经破坏，开挖发现基层中有数量不少的泥土和风化页岩，严重影响其嵌挤作用而丧失承载能力。在水的作用下集料颗粒容易发生相对位移，路面出现车辙、网裂。但有相当长的段落至今使用十分良好，开挖可见材料十分干净、致密，有很高的嵌挤强度。国外通常采用塑性指数对材料质量进行限制。凡是塑性指数超过规定值的路段，沥青路面明显降低抗塑性变形能力而产生车辙，发生结构性破坏。同时塑性指数较高的细料，遇水易膨胀，影响材料的透水性和水稳定性，有较高的冰冻敏感性。许多国家对于级配碎石基层要求液限不大于 25%，塑性指数不大于 4%，甚至无塑性要求。

与现行基层规范相比，表 1 增加了砂当量、洛杉矶磨耗值、安定性等三个指标。砂当量指标也是控制细集料中有害物质含量的，如有机物、粘土等对级配碎石性能的影响，要求砂当量不小于 45%。安定性指标反映集料的耐久性，主要考虑寒冷地区集料颗粒抵抗冻融的性能。

我们对两省试验路采用的石灰岩级配碎石进行试验，各项指标均符合此技术要求。

试验路材料技术要求及试验结果 表 1

技术要求	液限 <25%	塑性 指数 <4%	砂当量 >45%	压碎值 <26%	磨耗值 <35%	安定性 试验 <12%	针片状 指数 <20%
马平路 实测值	20.3%	2.8%	55.1%	17%	12.5- 13.9%	5.5%	8.9%
南广路 实测值	18.5- 20%	1.4- 2.1%	50.9%	18.5- 19.1%	20.5%	6.4%	7.4- 8.4%

1.2 级配碎石配合比设计

集料级配是影响级配集料的强度、稳定性最为重要的因素之一。一般来说较密实的连续级配由于容易获得较高的密实度，因而具有较高的 CBR 值和抗永久变形能力。综合国际上的研究成果，影响集料级配的主要因素为公称最大粒径、4.75mm 及 0.075mm 的通过率。

公称最大粒径越大，集料中粗集料就越多，因此容易形成稳定的骨架作用，具有更高的 CBR 值；但粒径太大又容易离析、不均匀，会使混合料强度、密实度下降。我们对四川和北京的材料进行试验的结果如图 1，混合料 CBR、干密度以 D_{max} 37.5 为最大。综

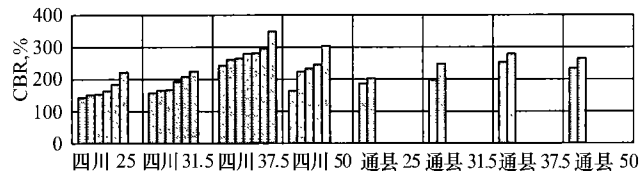


图 1 混合料最大粒径对级配碎石 CBR 的影响

合考虑材料来源、生产成本、使用性能和施工工艺，从目前情况看，级配碎石的公称最大粒径不宜大于 37.5mm，也不宜小于 26.5mm，推荐采用公称最大粒径 31.5mm 的混合料，它抗离析效果和强度都较好。

4.75mm 以下颗粒含量与干密度、CBR、三轴抗剪切强度之间的关系是驼峰关系。随着 4.75mm 含量的增加，干密度逐渐增加，再继续增加超过顶峰后则反而下降。我们的实验表明，4.75mm 通过率在 38% 左右各指标达到最大值。

级配碎石的干密度、CBR、三轴抗剪切强度随 0.075mm 以下颗粒含量增加而增加，室内试验表明，0.075mm 通过率为 5% 左右，抗剪强度达到最大值，在 6.8% 左右干密度、CBR 达到最大值，当 0.075mm 以下颗粒继续增加，粉料将粗集料形成的空隙填满，继续增加的粉料会撑开粗集料，从而导致干密度、CBR、三轴抗剪切强度迅速降低。但是对于同一料源的材料，0.075mm 通过率越大，级配碎石基层的冻胀值也越大、且水稳定性也越差，尤其是 0.075mm 通过率过大，将严重影响渗水性。因此为了提高路面的强度，需适当增加 0.075mm 颗粒含量，以获得最大的干密度、CBR、三轴抗剪切强度，而太密实又不利于级配碎石材料的渗水功能。实践中需要平衡两者的关系，一般在多雨潮湿地区、冰冻地区应该充分考虑材料的抗冰冻性能及渗水性能，适当降低材料 0.075mm 的通过率，取低值；而在干旱地区，则重点考虑提高结构强度，0.075mm 的通过率可取高值。实际上，0.075mm 通过率往往为原材料所限制，如果不外加矿粉，级配混合料中 0.075mm 水筛通过率一般并不会太大。从成本和施工拌和的角度出发，为增加 0.075mm 的通过率而掺加矿粉是没有必要的。实际配合比设计时，宜将 0.075mm 通过率控制在 5% 以下为好。

在参考众多国家的规范级配曲线的基础上，经过大量的室内试验，我们提出建议级配范围如表 2，它与现行基层规范级配碎石的级配范围大体上相同，只对个别筛孔作了调整。在试验路工程中对各档料经过水洗筛分进行配合比设计，表 2 为两条试验路配比，由重型击实试验得出最大干密度和最佳含水量，在最佳含水量条件下进行 CBR 试验。参考各国级配碎石

基层强度指标，提出重型击实 4 天饱水 CBR 指标为 80%。表 4 的结果都能满足这个要求。对于相同材料，两个工程中的级配类型 A 的干密度、CBR 均最大，具有较好的力学性能。

建议的级配碎石级配范围 表 2

级配类型	通过下列筛孔 (mm) 的质量百分率 (%)													
	37.5	31.5	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
建议 30	100	90-100	79-95	60-85	53-80	48-74	40-65	25-50	18-40	13-32	9-25	6-20	3-13	0-7
规范 30	100	90-100	—	73-88	—	—	49-69	29-54	17-37	—	8-20	—	—	0-7

试验路实际采用的级配碎石级配 表 3

工程		通过下列筛孔 (mm) 的质量百分率 (%)													
		37.5	31.5	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
马平试验路	A	100	98.0	92.7	71.4	65.1	61.2	58.4	40.0	27.2	23.7	19.2	15.1	10.8	3.4
	B	100	98.3	93.6	70.4	62.2	57.1	52.8	27.2	17.2	14.9	12.0	9.4	6.8	2.2
	C	100	97.3	90.3	61.1	50.0	42.5	39.2	29.3	20.3	17.7	14.4	11.3	8.1	2.6
南广试验路	A	100	99.1	92.4	77.0	65.1	57.2	49.7	39.9	25.0	18.9	13.2	8.9	6.1	3.4
	D	100	99.1	92.7	79.4	68.9	62.4	56.4	48.3	31.1	23.7	16.6	11.2	7.6	4.3
	C	100	98.2	86.3	69.4	54.6	48.3	43.3	37.3	24.1	18.4	12.9	8.7	5.9	3.4

注：A、D 分别按照建议 30、规范 30 级配中值；B 连续级配、C 间断级配为其它单位提供级配曲线。

试验路级配碎石重型击实、CBR 试验结果 表 4

类型	马平试验路					南广试验路				
	最佳含水量 (%)	最大干密度 (g/cm³)	CBR (%)	固体体积率 (%)	空隙率 (%)	最佳含水量 (%)	最大干密度 (g/cm³)	CBR (%)	固体体积率 (%)	空隙率 (%)
A	5	2.38	231.9	87.8	12.2	5.3	2.344	311.4	86.8	13.2
B	4.5	2.34	138.1	86.0	14.0	5.1	2.31	187.6	85.5	14.5
C	3.75	2.31	164.3	85.1	14.9	5.0	2.32	245.7	85.9	14.1

2 级配碎石基层施工工艺的研究

近年来施工机械的发展很快，振动压路机应用已十分普遍，大吨位胶轮压路机也已经得到普遍应用。为了保证级配碎石基层的质量，施工工艺需进一步改善，包括拌和楼混合料的生产控制、选择合理的摊铺及碾压工艺是级配碎石施工中主要的三个环节。

2.1 级配碎石混合料的拌和

在国外，级配碎石基层有路拌和厂拌两种方法，高速公路一般要求采用集中厂拌。由于我国已经习惯于生产厂拌的水泥稳定碎石混合料，普遍具有厂拌的条件，青海马平试验路和四川南广试验路均采用拌和机集中厂拌。与路拌法相比，集中厂拌的混合料级配更容易控制，拌和更加均匀，因此级配碎石生产质量容易得到保证，同时生产率也大大提高。严格拌和楼混合料生产质量控制是保证级配碎石成功应用的关键之一。

级配碎石在运输、摊铺、碾压过程中含水量会有损失，为了使现场级配碎石能够在接近最佳含水量下碾压，在拌和过程中的加水量宜高于最佳含水量。根

据天气情况，气温低、潮湿天气宜高 0.5%~1%，气温高、干燥天气可高 1%~2%。为了提高粗集料的持水量，我们采取在拌和生产前一天晚上向粗集料浇洒适量水预先吸水饱和的办法，效果较好。但是对石屑这类细集料，则宜保持干燥。

2.2 级配碎石混合料的摊铺

国外摊铺级配碎石混合料有摊铺机摊铺及平地机摊铺两种方法。我国在 20 世纪 70~80 年代对级配碎石的摊铺都采用平地机，集料的公称最大粒径较小，也能取得良好效果。粒径大了摊铺过程中的离析就很难避免。当前我国对水泥稳定碎石基层已经普遍采用摊铺机摊铺，级配碎石采用摊铺机摊铺也完全能够实现。由于级配碎石层一般较厚，采用两台摊铺机梯队形作业，全幅同时摊铺的方式效果更好。如果采用平地机摊铺，操作手必须有熟练的技术水平，以满足平整度、坡度、高程及横断面要求，且尽可能减小离析。

青海试验路级配碎石基层采用两台摊铺机梯队形作业，每小时摊铺能力为 500t 左右，基本与拌和楼生产能力匹配。四川南广路级配碎石同时采用摊铺

机、平地机两种方法摊铺,从试验路实际效果看,两种方法摊铺都能满足要求。平地机摊铺机械设备台班费较低,因此具有一定的经济性。但是平地机摊铺效率低,厚度、平整度控制不如摊铺机摊铺。通常需在平地机摊铺基本刮平并用压路机静压一次后再用平地机整平 1~2 次才能达到平整效果,此时平地机将有可能使已经得到一定压实的级配碎石刮松并造成集料破碎。对一些局部低凹不平的部位,平地机找平容易造成碾压后的路面材料上下分层,即新补料与已压实的底层形成隔层,由此可能造成整个结构压实状态的不均匀。在摊铺和碾压过程中,平地机刮的遍数太多,将使级配碎石离析、破碎,影响使用功能。与平地机摊铺相比,摊铺机摊铺生产率高,厚度、平整度易控制,碾压工艺也易控制,因此整个结构更加均匀。

经摊铺可以明显地看出不同级配碎石混合料的施工性能,几种连续级配类只要拌和楼严格质量控制,基本不会产生离析,而对间断级配施工很容易产生局部离析,主要表现为粗集料“窝”和粗集料“带”。即使在南广高速公路采用平地机摊铺时,经过反复不停的多次拌和、整平,间断级配依然不能消除离析。因此就施工性能而言,连续级配的级配碎石明显优于间断级配的级配碎石,如果施工工艺不能确保不致有明显的离析,即使室内试验可能得到较高的强度,我们仍然认为不宜采用间断级配的混合料。从目前的使用效果看,更适宜于采用连续级配的混合料。

2 3 级配碎石基层的碾压

级配碎石结构层的强度主要通过碾压而获得粗颗粒的嵌挤、锁结以及细集料的填充形成联结强度。因此,提高碾压工作的质量,确保级配碎石基层的压实度是提高级配碎石结构强度的重要手段。

(1) 含水量的控制

级配碎石只有在不小于最佳含水量条件下才能达

到最佳压实效果,因此现场碾压应严格控制含水量。级配碎石摊铺后应紧跟着及时碾压,拖延压实时间会使级配碎石水分蒸发、材料干硬、固结,不利于进一步碾压。如果含水量偏低,尤其是夏季高温季节施工,应根据情况以喷雾式洒水车适当洒水后再碾压;如果含水量过高,应立即停止碾压,并用平地机翻晒,待其接近最佳含水量时,再进行碾压。

(2) 适宜的碾压厚度, 选择合理的碾压设备和碾压工艺

级配碎石基层可采用重型三轮压路机、振动压路机、轮胎压路机碾压,每层的压实厚度一般不宜超过 20cm。

通过试验路对级配碎石基层碾压工艺的研究表明,采用振动压路机和胶轮压路机联合碾压可以达到较好的碾压效果。国内外的实践证明,弱振一般有利于结构层中间到表面这部分的密实,强振一般最有利于结构层中间到层底这部分的密实,而胶轮可以使面层混合料颗粒发生搓揉,重新就位。因此将胶轮碾压、振动压路机的弱振、强振的这些特性有效的结合起来才能够到达级配碎石最有效的碾压效果。对于级配碎石材料,开始宜先静压,使其大体稳定并具有一定的密实度;接着宜用弱振、强振,使结构层内部密实,减少空隙率;最后采用胶轮碾压,使结构层从内部到表观更加密实。振动碾压次数应该根据摊铺厚度、级配碎石压实性能以及施工单位压路机具的压实特性通过试碾压确定,以保证达到最佳压实效果,同时避免产生过压。

对马平试验路和南广试验路的级配碎石提出了表 5 的碾压工艺试验方案。马平实验路配备了 2 台 YZ20 振动压路机,1 台 YL16 胶轮压路机,另加砂袋配重 20t,总重量接近 18t。南广试验路配备了 1 台振动压路机 BW219,胶轮压路机为 XP26。

碾压遍数及相应的压实度 (碾压厚度 20cm) 表 5

工程和压实工艺	碾压遍数及相应压实度 (%)							试铺段压实度 平均值 (%)
	1	2	3	4	5	6	7	
马平 试验路 选用方案	静压	弱振 1 遍	强振 1 遍	强振 1 遍	静压 1 遍	胶轮 1 遍		102.7
	86	92.3	98.1	101.2	101.8	102.1		
	静压	胶轮 2 遍	弱振 1 遍	强振 1 遍	静压 2 遍	胶轮 1 遍		101.0
	85.8	87.1	93.4	98.6	99.8	99.6		
	静压	胶轮 1 遍	弱振 1 遍	强振 1 遍	强振 1 遍	静压 1 遍	胶轮 1 遍	104.0
	86.3	87.9	93.6	98.9	102.1	102.6	102.4	
南广试验路 选用方案	静压	弱振 1 遍	弱振 1 遍	强振 1 遍	弱振 1 遍	静压 1 遍	胶轮 1 遍	99.3
	85.6	91.2	96.8	99.9	100.2	100.5	—	

试验表明, 马平试验路方案 1 振动压路机只须弱振 1 遍, 强振 2 遍即可; 而工艺 2 从碾压曲线看只须弱振 1 遍, 强振 1 遍压实度即可达到 98% 以上。从压实度的增长可以看出, 开始阶段的胶轮压路机碾压 1 遍即可达到要求, 因此在工艺 2 的基础上进行了调整, 作为整个试验路的碾压工艺, 实践效果较好。

南广试验路刚开始由于胶轮压路机需要维修, 数量不足, 只要求在终压后用胶轮压路机最后压一遍。根据马平试验路初拟振动压路机振碾次数为: 弱振 2 遍, 强振 2 遍。但在试碾压时发现强振 1 遍后, 再强振 1 遍时粗集料振碎严重, 同时将粗集料振到表面, 似乎有过压现象。因此立即调整为先弱振 2 遍后再强振 1 遍, 随后再弱振 1 遍, 效果明显较好。

在南广试验路对间断级配的级配碎石的碾压过程中发现, 只要振动压路机一开振, 级配碎石就会出现推挤, 产生细裂纹, 反而使级配显得特别细, 细料含量多, 并未形成设想的嵌锁结构, 结构很不稳定, 在振动压路机碾压下容易失稳。因此, 在试铺后建议不再采用此级配类型。

3 级配碎石基层的施工质量管理

级配碎石基层的施工质量管理, 国内外的规范主要在于材料、压实度控制。其中重点是以下几个指标: 碎石混合料的级配, 特别是 4.75mm 及 0.075mm 通过率; 材料质量, 主要是材料的塑性指数及砂当量指标; 压实度, 可以采用灌砂法检验。

关于压实度的标准, 我国现行《公路路面基层施工技术规范》中要求级配碎石作中间层即过渡层时压实度要求达到 100% 以上, 而对于一般的基层压实度不小于 98%, 底基层要求不小于 96%。从青海的试验路看, 级配碎石过渡层较薄, 只有 12cm, 其压实度很难达到 100%, 平均值只有 99%。相反对一般的基层路段却都达到 100% 以上, 明显这与碾压厚度有关。按照法国、德国、南非的做法, 级配碎石过渡层合理厚度通常为 10~15cm, 因此 100% 的压实度要求也许会有困难。建议要求压实度为不小于 98%。

4 关于级配碎石渗水性能的探讨

级配碎石与半刚性稳定材料相比其优越性在于具有一定渗水性能, 这种性能是保持其沥青路面耐久性的必要条件之一。资料表明级配碎石的渗水系数一般为 $10^{-2} \sim 10^{-3}$, 一般认为渗水系数 $10^{-7} \sim 10^{-2}$ 为微渗水, 大于 10^{-2} 为强渗水, 因此级配碎石属于微渗水。

正是由于级配碎石具有微渗水性能, 一方面能够在一定时间内将下渗的水不断地排出, 不致于积聚在结构层的交界面上, 保持级配碎石与沥青层之间的完好连接条件; 另一方面级配碎石也不会强渗水, 因此不会导致大量的水很快下渗到路基, 使路基土很快达到过饱水软化而迅速降低承载能力。根据 1993 年 AASHTO 结构设计方法中以 1 周内水能够从结构中排出属于一般, 作为路面排水的基准。

大量的试验数据表明, 级配碎石的渗水性与级配及孔隙率(相当于沥青混合料的集料间隙率)密切相关。级配碎石的 CBR 强度与干密度具有较好的一致性, 干密度越大, CBR 越大。但是干密度越大, 固体体积率(实积率)也越大, 可能使混合料的孔隙率相对降低。实践证明, 级配良好的材料, 充分碾压后的实积率可达到 85%~90% 以上, 其对应孔隙率为 10%~15%; 而对于级配不佳的材料, 其固体体积率很难达到 85%, 级配愈差, 压实后的实积率愈低。南非规定, 对于重交通的 G1 级配碎石基层的实积率应大于 86%~88%, 而对于中交通 G2 级配碎石实积率应大于 85%。在表 4 中, 几种级配碎石的实积率为 85%~88%, 孔隙率为 12%~15%, 与国外的要求比较吻合。所以作为配合比设计的一种检验, 要求其固体体积率 85%~88% 是适宜的。显而易见, 对级配碎石基层, 两侧留有足够的排水通道十分重要。

为了解试验路级配碎石的渗水性能, 在青海试验路上利用沥青路面渗水仪在级配碎石上进行渗水试验时发现其基本不渗水, 但是留在表面的水过一段时间就全渗了, 这说明通过充分碾压的级配碎石只能是微渗水。在四川南广高速公路试验路上, 级配碎石上铺筑沥青稳定碎石基层后进行钻样, 留在基层钻孔中的冷却水并非马上渗掉, 到第二天去看, 级配碎石坑洞中的水已经全部渗掉。在级配碎石施工后第二天下了一天雨, 当时在低洼处有积水, 到第二天, 级配碎石表面都没有积水, 挖开基层查看, 在路基顶面也没有积水, 而且级配碎石的含水量也没有明显增大, 又恢复到接近最佳含水量状态。

参考文献:

- [1] 公路路面基层施工技术规范 [S]. 人民交通出版社, 2000.
- [2] 何兆益, 等. 无粘结碎石材料级配研究 [J]. 重庆交通学院学报, 1996, 9.
- [3] 南非城市与乡村道路柔性路面结构设计规范简介 [S]. 北京建工大学译, 1996.