

文章编号:1671-8879(2016)06-0017-09

# 旋转与静压成型对水泥稳定碎石性能的影响

李立寒<sup>1</sup>, 黄 璞<sup>1</sup>, 刘 栋<sup>2</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 江西省交通科学研究院, 江西 南昌 330200)

**摘 要:**为探讨采用旋转成型法(gyratory compaction, GCM)进行水泥稳定碎石组成设计的可行性, 分析旋转与静压成型方法(static compaction method, SCM)对水泥稳定碎石(cement stabilized macadam mixtures, CSMM)性能的影响, 采用旋转压实、静压方法成型 3 种不同结构类型的水泥稳定碎石混合料试件, 测试、比较不同成型方法所得混合料试件的物理力学指标, 并与振动成型、现场取芯所得结果进行比较。研究结果表明:成型方法是影响水泥稳定碎石混合料性能的关键因素, 采用旋转成型法能够得到混合料的干密度-含水率单峰曲线, 从而确定最佳含水率和最大干密度;与重型击实相比, 旋转成型试件的最佳含水率平均低 6.7%, 最大干密度平均高 2.0%;与静压成型相比, 旋转成型试件的 7 d 无侧限抗压强度、28 d 劈裂强度平均高出 117%、106%;旋转成型试件粗集料形成的骨架结构具有更高的抗荷载能力, 且破碎程度低, 粗细集料在成型过程中能够达到更好的嵌挤状态;旋转成型骨架密实结构水泥稳定碎石与其他结构类型相比具有最佳的物理力学性能;旋转成型试件的物理力学指标与静压成型试件存在线性关系。室内旋转成型混合料试件的 7 d 无侧限抗压强度、集料分布破碎情况与振动成型和试验路更为接近;采用旋转成型法进行水泥稳定碎石混合料组成设计是合理可行的。

**关键词:**道路工程;水泥稳定碎石;旋转压实成型;性能

**中图分类号:**U416.214

**文献标志码:**A

## Impact on performance of cement stabilized macadam mixtures between gyratory compaction and static compaction methods

LI Li-han<sup>1</sup>, HUANG Pu<sup>1</sup>, LIU Dong<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Jiangxi Transportation Institute, Nanchang 330200, Jiangxi, China)

**Abstract:** In order to explore the feasibility of using gyratory compaction method (GCM) to design the cement stabilized macadam mixtures (CSMM), the influence of performance between GCM and static compaction method (SCM) was analyzed, and three different kinds of CSMM specimens were prepared by GCM and SCM. Physical and mechanical indexes of specimens were measured to analyze the performance of different methods. Besides they were also compared with vibration compaction and test road results. The results show that the compaction method is the key factor affecting the performance of CSMM. Dry density-moisture curve of CSMM can be obtained by GCM, so that the optimum moisture content and maximum dry density can be

收稿日期:2016-07-08

基金项目:浙江省住房和城乡建设厅及杭州市城乡建设委员会科学技术研究项目(2014Z079)

作者简介:李立寒(1957-),女,湖南涟源人,教授,博士研究生导师,E-mail:lhli@tongji.edu.cn.

determined. Compared with heavy compaction, optimum moisture content of GCM decreases by 6.7% on average, and maximum dry density increases by 2.0% on average. Compared with SCM, unconfined compressive strength at 7th day of GCM increases by 117% and splitting strength at 28th day increases by 106% on average. Framework structure has better anti-load capacity and lower fragmentation degree. The coarse and fine aggregates can achieve a better embedding state in compaction process and specimens of dense-skeleton structure prepared by GCM have best performance. Physical and mechanical indexes of CSMM between GCM and SCM have linear relationship. 7 d unconfined compressive strength of GCM, distribution and fragmentation of aggregates are closer to the vibration compaction method and test road. Using GCM to design the cement stabilized macadam mixtures is reasonable and feasible. 6 tabs, 10 figs, 22 refs.

**Key words:** road engineering; cement stabilized macadam mixtures; gyratory compaction method; performance

0 引 言

水泥稳定碎石是道路常用基层材料,其组成设计一般采用击实(静压)法或振动成型法<sup>[1]</sup>。室内击实(静压)法确定水泥稳定碎石的最大干密度及强度比施工现场结果均偏低,这是因为道路基层材料施工普遍采用振动压路机进行碾压,室内静压成型与振动压路机压实机理及效果均存在显著差异,而采用室内振动成型方法设计水泥稳定碎石是比较合理的<sup>[2-8]</sup>。除振动成型方法外,SHRP 计划中采用的旋转压实也是一种与实际情况关联性较好的室内成型方法。

旋转压实方法主要用于沥青混合料设计及压实性能评价<sup>[9-10]</sup>。采用 Superpave 方法设计沥青混合料的路用性能比马歇尔设计法更符合实际道路要求。旋转压实得到的沥青混合料密实曲线可用于预测其施工压实特性和抵抗交通荷载变形能力<sup>[11]</sup>。旋转压实方法在道路其他材料的设计与性能研究方面也得到了一定程度的应用。Kevern 等利用旋转压实方法设计了透水混凝土<sup>[12]</sup>;Amer 等研究表明采用旋转压实成型碾压混凝土较常规振动成型方法,试件的无侧限抗压强度和劈裂强度与现场一致性较好<sup>[13-14]</sup>;郝广晋等采用旋转压实仪通过逐级填充方法对半刚性基层级配设计进行了优化<sup>[15]</sup>;邹维列等采用旋转压实方法确定了路基粒状填土的最大干密度,认为旋转压实方法能有效模拟粒状土的现场压实特征<sup>[16]</sup>。旋转

成型方法用于水泥稳定碎石的研究较少。

在室内设计和现场施工中对于水泥稳定碎石混合料强度水平评价多以静压成型作为标准。为保证材料强度水平评价的一致性,本文采用旋转压实成型试件并与静压成型进行对比,研究了旋转与静压成型对水泥稳定碎石物理力学性能的影响,建立了旋转与静压成型水泥稳定碎石的物理力学指标关系,验证了旋转压实室内成型水泥稳定碎石混合料的可行性。首先采用旋转压实、击实(静压)方法成型水泥稳定碎石混合料试件,对比分析了 2 种方法得到的水泥稳定碎石的最大干密度、最佳含水率、无侧限抗压强度、劈裂强度的差异;然后研究了旋转成型对水泥稳定碎石粗集料骨架结构抗荷载能力的影响;最后对比旋转与振动成型及试验路结果,验证了采用旋转成型方法进行水泥稳定碎石组成设计的合理性。

1 试验材料与试验设计

**1.1 试验材料**

试验用原材料采用石灰岩集料,其主要技术性能指标见表 1。水泥采用江苏太仓产海螺牌 32.5 级复合硅酸盐水泥。

试验水泥稳定碎石混合料采用 3 种典型结构类型:悬浮密实型、骨架密实型及骨架空隙型。根据《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2006)确定水泥稳定碎石的设计级配,见下页表 2。

表 1 集料主要技术指标  
Tab. 1 Major technical indicators of aggregates

集料规格/mm	0~2.36	2.36~4.75	4.75~9.5	9.5~13.2	13.2~16	16~19	19~26.5	26.5~31.5
表观密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.401	2.654	2.667	2.725	2.719	2.710	2.715	2.715
吸水率/%		0.650	0.650	0.650	0.540	0.490	0.480	0.310

表 2 不同结构混合料级配

Tab. 2 Mixture gradations of different structures

混合料结构类型	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%								
	31.5	26.5	19	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.075
悬浮密实型	100	96.8	93.5	67.0	39.0	26.0	20.5	15.0	3.5
骨架密实型	100	90.4	73.6	46.0	26.8	25.8	18.0	9.1	0.5
骨架空隙型	100	86.3	62.8	26.3	11.2	5.0	3.0	2.0	0.0

1.2 试件成型方法

重型击实试验和静压成型试验按照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)(以下简称《规程》)进行<sup>[17]</sup>。

旋转成型采用旋转压实仪为意大利产 Controls ICT250,可得到压实过程中混合料实时高度及密度。旋转成型方法用于确定混合料最佳含水率、最大干密度及成型试件。混合料经过旋转压实后,得到不同旋转次数下的干密度-含水率关系曲线,如图 1 所示。由图 1 可见,混合料干密度-含水率曲线呈单峰抛物线状,存在最佳含水率使混合料达到最佳的致密程度,从而可确定混合料的最大干密度和最佳含水率。

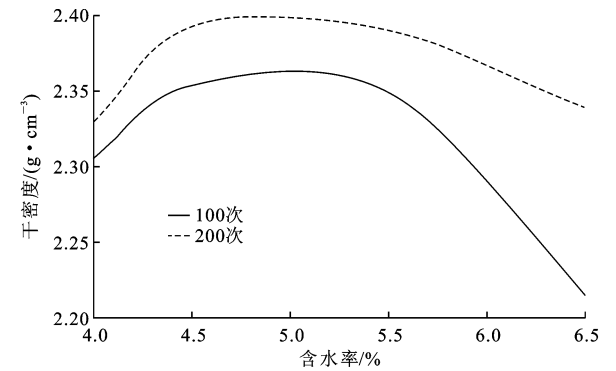


图 1 干密度-含水率曲线

Fig. 1 Curves of dry density and water content

SHRP 推荐采用竖向压力 600 kPa,旋转角 1.16°,旋转速度 30 r/min 设计沥青稳定碎石柔性基层,此时室内设计材料与实际情况接近<sup>[18]</sup>。Cerni 等认为采用竖向压力 600 kPa 确定粒料基层材料的最佳含水率与实际更接近<sup>[19]</sup>。本文结合旋转压实曲线特征和已有研究结论,水泥稳定碎石旋转成型采用的竖向压力为 600 kPa,旋转压实次数为 200 次,旋转角为 1.16°,旋转速度为 30 r/min。试件脱模后移至养生室,养生条件与静压成型试件相同。

1.3 物理力学指标试验

无侧限抗压强度试验、劈裂强度试验均按照《规程》进行。采用贯入试验测试旋转和静压成型粗集料混合料结构的抗荷载能力。试验前在均匀摊开的

粗集料表面充分洒水,将润湿的粗集料放入直径为 15.2 cm,高度为 12 cm 的金属筒中压实,然后采用 MTS 试验机系统以 1.0 mm/min 的贯入速度控制压入变形,并根据试验结果绘制应力-变形曲线。试验采用的金属压头直径为 50 mm。

2 试验结果与分析

2.1 最大干密度与最佳含水率

表 3 给出了 3 组混合料分别在旋转压实成型、重型击实条件下所确定的最佳含水率、最大干密度。分析表 3 数据可见,在相同水泥用量的条件下,相比于重型击实,旋转压实混合料最大干密度平均提高 2.0%、最佳含水率平均降低 6.7%。

表 3 最大干密度和最佳含水率

Tab. 3 Maximum dry densities and optimum moisture contents					
水泥 用量/%	混合料 结构类型	最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )		最佳含水率/%	
		重型击实	旋转压实	重型击实	旋转压实
4.5	悬浮密实型	2.350	2.393	5.5	5.3
	骨架密实型	2.393	2.394	5.4	5.1
	骨架空隙型	2.089	2.212	5.0	4.4
6.0	悬浮密实型	2.380	2.395	5.9	5.5
	骨架密实型	2.398	2.405	5.5	5.3
	骨架空隙型	2.092	2.167	5.1	4.5

对于悬浮密实型,旋转压实最大干密度与重型击实相比平均提高 1.3%,最佳含水率平均降低 5.7%;对于骨架密实型,旋转压实最大干密度提高幅度不大,最佳含水率平均降低 4.7%;对于骨架空隙型,旋转压实最大干密度与重型击实相比平均提高 4.8%,最佳含水率平均降低 9.6%。水泥用量的增加,主要提高了混合料的最佳含水率,对于最大干密度影响甚微,与成型方法也无明显关系。

旋转压实仪在压实集料的过程中,压头旋转所提供的横向剪切力使得粗集料之间能够达到最佳的嵌挤状态,粗细集料分布更加均匀。达到最佳的密实程度时,需要的浸润条件低,因此旋转压实所确定的最佳含水率小于重型击实,最大干密度大于重型击实。

下页图 2 给出了重型击实与旋转压实试验结果

的关系曲线。由图 2 可见,两者之间存在较好的线性关系。

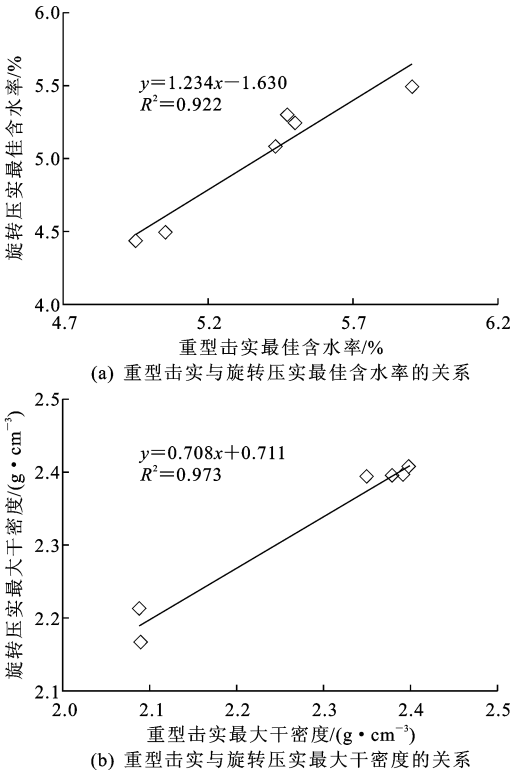


图 2 重型击实与旋转压实的压实特征参数关系  
Fig. 2 Relationship of compaction parameters between gyratory compaction and heavy compaction

2.2 无侧限抗压强度

旋转成型与静压成型水泥用量为 4.5%, 压实度分别为 96%、98% 和 100% 的混合料试件; 压实度 98%, 水泥用量分别为 3.0%、4.5% 和 6.0% 的混合料试件。图 3 给出了不同压实度、不同水泥用量试件的 7 d 无侧限抗压强度  $R_{c7}$  试验结果。

由图 3(a) 可见, 当水泥用量相同时, 旋转成型试件  $R_{c7}$  约为静压成型试件的 2.0 倍; 随着压实度增加, 混合料试件  $R_{c7}$  呈增大趋势, 与静压成型试件相比, 旋转成型试件抗压强度增加幅度较小。

由图 3(b) 可见, 当压实度相同时, 旋转成型试件  $R_{c7}$  约为静压成型试件的 2.3 倍; 随着水泥用量增加, 混合料试件  $R_{c7}$  呈增大趋势。旋转成型水泥用量 3.0% 试件  $R_{c7}$  与静压成型水泥用量 6.0% 试件相当, 在达到相同抗压强度条件下, 平均可以节约水泥用量 3.0%。

总体来看, 旋转成型试件的  $R_{c7}$  比静压成型高出 2.8~4.1 MPa, 平均提高 117%。与静压成型相比, 旋转成型试件的粗集料能形成更好的嵌挤状态, 抵抗竖向压力的能力更好。对于骨架密实结构混合

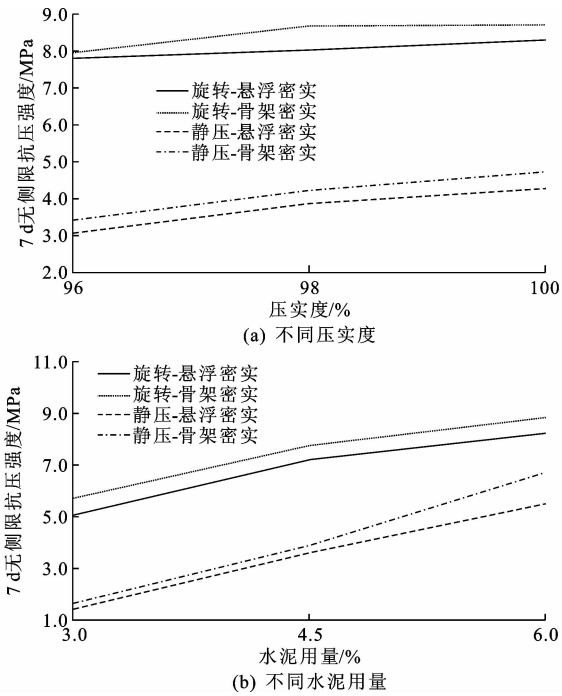


图 3 压实度和水泥用量对无侧限抗压强度的影响  
Fig. 3 Influence of compaction degree and cement content on unconfined compressive strength

料, 旋转压实过程中细集料能充分填充到粗集料形成的骨架空隙中, 粗、细集料分布更加均匀, 在压实度 96% 的条件下就已经能够达到最佳分布状态, 试件具有更高的强度。随着压实度的增加, 旋转成型试件粗集料分布状态不再明显改变, 其无侧限抗压强度增加幅度较小。可见, 成型方法是影响水泥稳定碎石抗压强度的关键因素, 旋转压实法的优越性并不完全在于提高密实程度, 而是能够使同一种结构类型混合料中的粗细集料颗粒嵌挤状态更优, 发挥出比静压成型更好的级配效应。

图 4 给出了静压与旋转成型试件  $R_{c7}$  的关系曲线。由图 4 可见, 两者之间存在较好的线性关系。

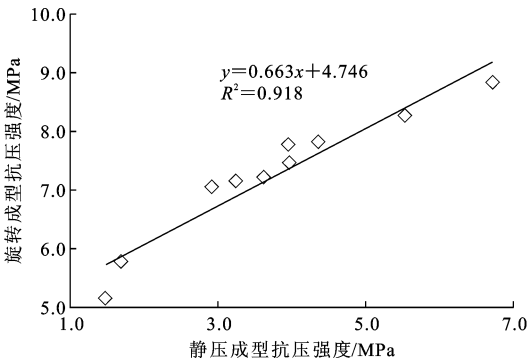


图 4 静压与旋转成型试件抗压强度关系  
Fig. 4 Relationship of compressive strength between SCM and GCM

2.3 劈裂强度

采用与无侧限抗压强度试验相同的材料和条件成型试件。图 5 分别给出了不同压实度、不同水泥用量试件的 28 d 劈裂强度  $R_{i28}$  试验结果。

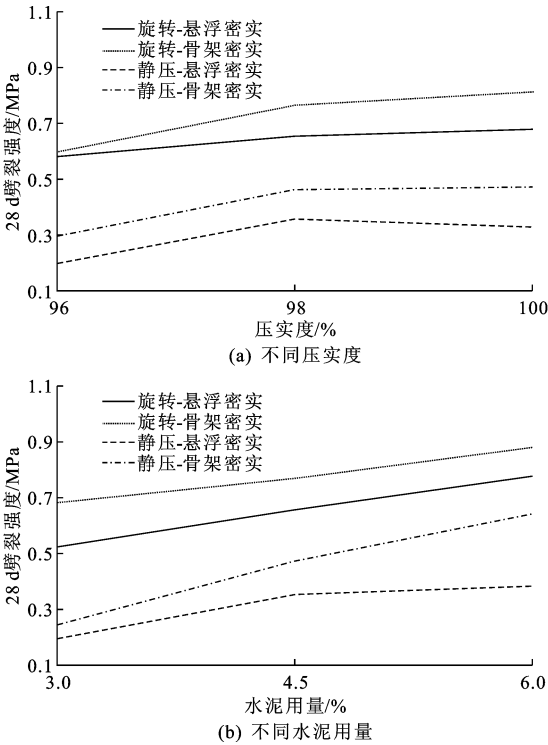


图 5 压实度和水泥用量对劈裂强度的影响  
Fig. 5 Influence of compaction degree and cement content on splitting strength

由图 5(a)可见,当水泥用量相同时,旋转成型试件的  $R_{i28}$  约为静压成型试件的 2.1 倍。随着压实度增加,旋转压实试件的  $R_{i28}$  不再明显增加。当压实度大于 98% 时,对于静压成型试件,由于试件中的粗集料发生明显破碎,级配发生变化,导致在压实度过高的时候,整体结构的劈裂强度降低。

由图 5(b)可见,当压实度相同时,旋转成型试件的  $R_{i28}$  约为静压成型试件的 2.0 倍。随着水泥用量的增加,旋转成型和静压成型试件的劈裂强度增加。与静压成型相比,水泥用量对旋转成型试件的  $R_{i28}$  提高影响较小。

总体来看,旋转成型试件的  $R_{i28}$  比静压成型提高 0.3 MPa 左右,平均提高 106%。与静压成型相比,在相同压实度和水泥用量的条件下,旋转成型混合料的集料嵌锁作用更为明显,抗拉伸能力更强。

图 6 给出了静压与旋转成型试件  $R_{i28}$  的关系曲线。由图可见,两者之间存在较好的线性关系。

2.4 粗骨料抗荷载能力

粗集料的贯入试验结果见图 7。由图 7 可见,

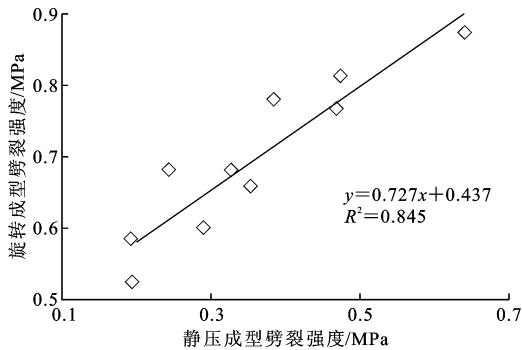


图 6 静压与旋转成型试件的劈裂强度关系  
Fig. 6 Relationship of splitting strength between SCM and GCM

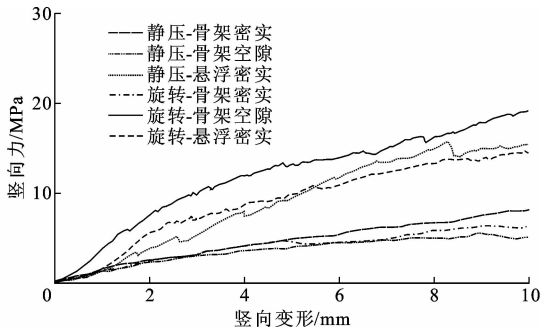


图 7 应力-变形曲线  
Fig. 7 Curves of stress and deformation

随着竖向变形增加,竖向力增大。相同变形时,旋转成型试件所需应力大于静压成型试件。可见,旋转压实粗骨料混合料的抗荷载能力较大,这表明旋转成型水泥稳定碎石中集料嵌挤状态优于静压成型。

以贯入深度 5 mm 处的应力表征粗集料骨架在 2 种成型方法下的局部抗剪能力,结果见表 4。由表 4 可知,对于悬浮密实、骨架密实和骨架空隙结构,旋转成型试件需要的竖向应力分别是静压成型的 2.4、2.8、2.1 倍,平均为 2.4 倍。旋转成型骨架密实结构所需的应力最大,承载能力最强,静压成型的骨架空隙结构抗变形能力最弱。混合料试件的强度一方面来自于结合料的粘结作用,另一方面来自于集料之间形成的内摩阻力,其大小可以通过试件的局部抗剪能力反映。与静压成型相比,旋转成型试件强度的提高,得益于成型方法能够为粗集料形成更好的骨架嵌挤结构和更高的抗荷载能力。

表 4 贯入 5 mm 时的竖向压力

Tab. 4 Vertical pressure of penetration test at 5 mm

成型方法	应力/MPa		
	悬浮密实型	骨架密实型	骨架空隙型
旋转成型	9.7	13.2	9.4
静压成型	4.1	4.8	4.5

2.5 集料破碎程度

为分析成型方法对集料破碎程度的影响,在采用击实、旋转和静压方法成型试件后,立即脱模,并轻轻敲打试件使其松散。将松散试样置于 2.36 mm 筛上用水进行冲洗,烘干筛上部分并进行筛分试验,得到粒径 2.36 mm 以上各档集料的通过率。不同类型混合料成型前后的级配曲线见图 8。由图 8 可见,成型后的混合料在各粒径筛孔的通过率增大,表明集料发生破碎。

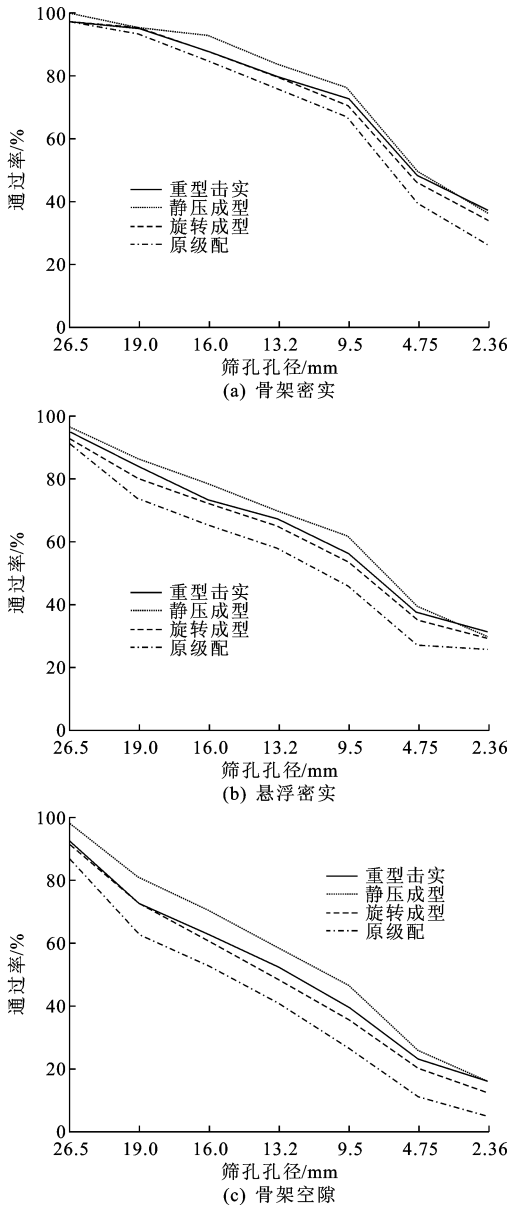


图 8 级配变化  
Fig. 8 Changes of gradation

以成型后混合料级配与原级配的各档筛孔的通过量差值分析级配的变化,对于同一种结构类型的混合料,静压成型与旋转成型级配变化分别为 8.4%~14.7%、2.7%~8.0%。对于同一种成型方法,级配

变化由大到小的排序为:骨架空隙、悬浮密实、骨架密实。旋转成型下不同结构类型试件的级配变化范围为 0.6%~10.1%,而静压成型的级配变化范围为 1.3%~20.0%。

评价集料破碎程度的累计级配变化率  $\sum \Delta p$  为

$$\sum \Delta p = p_1 - p_2 \tag{1}$$

式中:  $p_1$  为成型后混合料试样中各档集料的通过率(%);  $p_2$  为原混合料中各档集料的通过率(%)。

各筛孔变化累加值  $\sum \Delta p$  结果见图 9。由图 9 可见,各成型方法混合料集料破碎严重情况由大到小的排序为:静压成型、重型击实、旋转成型。与静压成型相比,旋转压实级配变化减小幅度为 40.0%~60.8%。由此可见,与击实(静压)法相比,旋转成型试件不仅能形成较好的嵌挤状态,而且成型后试件的级配与设计级配接近,粗集料不易破碎,细集料能够充分填充于粗集料形成的空隙之中。这也是旋转成型试件物理力学性能更好的原因。

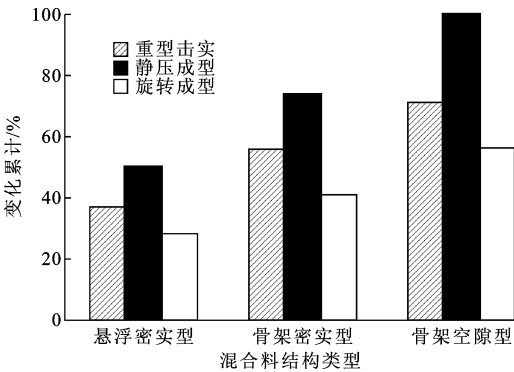


图 9 集料破碎程度  
Fig. 9 Degree of aggregates fragmentation

3 与其他成型方法的比较

3.1 与振动成型结果的对比

长安大学和哈尔滨工业大学对水泥稳定碎石振动成型法进行了研究,并初步建立了振动成型与击实(静压)法之间的物理力学性能指标关系<sup>[18-20]</sup>。下页表 5 给出了部分文献不同条件下的试验结果<sup>[20-22]</sup>。由表 5 可见,与击实(静压)法相比,本文采用旋转成型确定的最大干密度、最佳含水率变化幅度与振动成型基本一致。振动成型与旋转成型试件的无侧限抗压强度提高幅度相当,旋转成型试件劈裂强度的提高幅度约为振动成型的 1.7 倍,2 种方法对级配的影响均较小。振动成型模拟了振动压路机的工作机理,通过激振作用,减少了集料之间的摩擦力,促使粗细集料充分填充。与振动成型相比,旋

表 5 不同成型方法的物理力学性能提高对比

对比指标	不同文献中振动成型较静压成型各项指标提高幅度/%					本文结论/%
	文献[2]	文献[4]	文献[13]	文献[14]	平均	
级配变化	-57.7~-101.0	<-80.0	-10.0~-40.2		-57.8	-40.0~-60.8
最大干密度	1.7~ 3.1	1.4~4.5	2.8~3.7	0.5~2.2	2.5	2.0
最佳含水率	-12.0~-17.0	-12.2~-18.4	-10.2	-4.0~-7.0	-11.5	-6.7
7 d 无侧限抗压强度	108.0	130.0	86.0	79.3	100.8	114.0
28 d 劈裂强度			81.0	41.9*	61.5	106.0

注:“—”表示与静压成型相比减小幅度;“\*”表示 90 d 劈裂强度。

转压实成型在压实过程中充分考虑到横向剪切力的作用,使集料在竖向力、横向剪切力的共同作用下能够达到最佳的嵌挤状态。

3.2 与试验路芯样的对比

铺筑水泥稳定碎石道路基层试验路。现场压实工艺为:1 遍静压,3 遍振动压实。养生 7 d 后钻芯取样。室内采用相同材料经旋转与静压成型试件。试件 7 d 无侧限抗压强度试验结果见表 6。由表 6 可见,旋转成型试件与钻芯试件的抗压强度接近,而静压成型试件抗压强度低于钻芯试件。图 10 给出了试件横断面。由图 10 可见,钻芯试件与旋转成型试件中粗细集料颗粒均匀分布,几乎没有集料颗粒破碎,而静压成型试件中部分粗集料颗粒出现较明显裂纹。可见,与静压法相比,旋转成型水泥稳定碎石的压实情况与实际更接近。

表 6 无侧限抗压强度试验结果

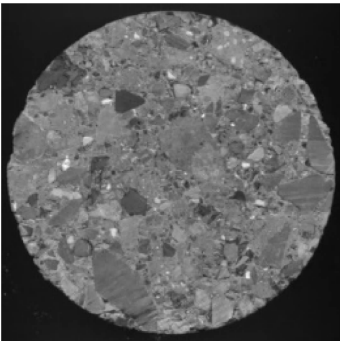
Tab. 6 Test results of unconfined compressive strength								
试件种类		抗压强度/MPa				平均值/ MPa	变异系 数/%	代表值/ MPa
试验路取芯		3.4	3.7	3.9	3.6	3.7	5.6	3.4
室内 成型	静压成型	3.2	3.1	3.6	3.5	3.4	7.0	3.0
	旋转成型	3.4	3.9	3.7	4.0	3.8	7.0	3.4

4 结 语

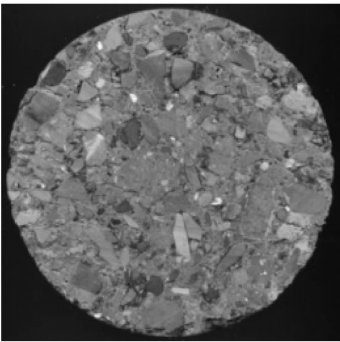
(1)采用旋转成型水泥稳定碎石可得到呈单峰状的含水率-干密度曲线,从而可确定混合料的最大干密度和最佳含水率,且与重型击实法存在线性关系。与重型击实试验相比,旋转成型混合料的最大干密度平均高 2.0%,最佳含水率平均低 6.7%。

(2)旋转成型试件的 7 d 无侧限抗压强度、28 d 劈裂强度与静压成型试件之间呈线性关系,且较静压成型试件分别高出 117%、106%。与静压成型相比,旋转成型试件的强度较高;对于不同结构类型混合料,骨架密实型混合料的力学强度较高。

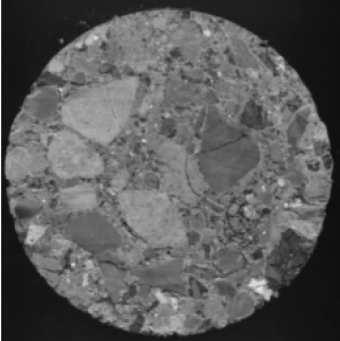
(3)旋转成型试件的粗集料能形成更好的嵌挤



(a) 试验路钻芯试件



(b) 旋转成型试件



(c) 静压成型试件

图 10 水泥稳定碎石试件的横断面

Fig. 10 Cross section of CSMM

状态,其局部抗荷载能力是静压成型试件的 2.4 倍。旋转成型方法对级配变化的影响较小,与静压成型相比,旋转成型混合料的集料破碎程度低 40.0%~60.8%。

(4)旋转成型水泥稳定碎石的室内压实情况与

振动成型法相当,与试验路接近。室内采用旋转压实设计水泥稳定碎石基层材料是合理的。水泥稳定碎石室内旋转压实成型参数(如竖向压实力、旋转次数、旋转角等)还需进一步探讨。

## 参考文献:

## References:

- [1] JTG/T F20—2015,公路路面基层施工技术细则[S]. JTG/T F20—2015, Technical guidelines for construction of highway roadbases[S]. (in Chinese)
- [2] 苟静波. 基于振动法的水泥稳定碎石级配设计及路用性能研究[D]. 西安:长安大学,2013.  
GOU Jing-bo. Study on grading design and road performance of cement stabilized gravel based on vibrating test method [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese)
- [3] JIANG Y J, FAN L F. An investigation of mechanical behavior of cement-stabilized crushed rock material using different compaction methods[J]. Construction and Building Materials, 2013, 48: 508-515.
- [4] 李海宁. 基于振动成型水泥稳定碎石基层材料设计研究[D]. 西安:长安大学,2014.  
LI Hai-ning. Study on cement stabilized gravel materials design based on vibrating molding [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014. (in Chinese)
- [5] 李明杰. 水泥稳定碎石振动试验方法研究及应用[D]. 西安:长安大学,2010.  
LI Ming-jie. Study on vibrating test methods for cement stabilization of crushen aggregate [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010. (in Chinese)
- [6] 周浩. 水泥稳定碎石材料振动压实效应研究[D]. 西安:长安大学,2013.  
ZHOU Hao. Research on the vibratory compaction effect of cement stabilized aggregate [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese)
- [7] 储修华. 振动成型法在水泥稳定碎石基层施工中的应用[J]. 筑路机械与施工机械化, 2011, 28(8): 58-60.  
CHU Xiu-hua. Application of vibratory shaping method in construction of cement stabilized macadam base course[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2011, 28(8): 58-60. (in Chinese)
- [8] 张涛, 朱天猛. 振动法在水泥稳定碎石基层配合比设计中的应用[J]. 筑路机械与施工机械化, 2010, 27(5): 43-45.  
ZHANG Tao, ZHU Tian-meng. Application of vibration method in mix proportion design for cement stabilized crushed stone [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2010, 27(5): 43-45. (in Chinese)
- [9] 蒋玮, 沙爱民, 裴建中, 等. 多孔沥青混合料旋转压实特性[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(5): 11-16.  
JIANG Wei, SHA Ai-min, PEI Jian-zhong, et al. Gy-ratory compaction characteristics of porous asphalt concrete[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(5): 11-16. (in Chinese)
- [10] 张久鹏, 裴建中, 徐丽, 等. 温拌 SBS 沥青混合料旋转压实特性[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(1): 1-6.  
ZHANG Jiu-peng, PEI Jian-zhong, XU Li, et al. Gy-ratory compaction characteristic of SBS warm mixed asphalt mixture[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(1): 1-6. (in Chinese)
- [11] 张争奇, 袁迎捷, 王秉纲. 沥青混合料旋转压实密实曲线信息及其应用[J]. 中国公路学报, 2005, 18(3): 1-6.  
ZHANG Zheng-qi, YUAN Yin-jie, WANG Bing-gang. Information of gyratory compaction densification curve of asphalt mixture and its application[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(3): 1-6. (in Chinese)
- [12] KEVERN J T, SCHAEFER V R, WANG K. Evaluation of pervious concrete workability using gyratory compaction[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2009, 21(12): 764-770.
- [13] AMER N, DELATTE N, STOREY C. Using gyratory compaction to investigate density and mechanical properties of roller-compacted concrete[J]. Transportation Research Record; Journal of the Transportation Research Board, 2003(1834): 77-84.
- [14] AMER N, STOREY C, DELATTE N. Roller-compacted concrete mix design procedure with gyratory compactor[J]. Transportation Research Record; Journal of the Transportation Research Board, 2004(1893): 46-52.
- [15] 郝广晋, 丁明科, 任瑞波. 应用旋转压实仪与嵌挤分析改良逐级填充法[J]. 山东建筑大学学报, 2008, 23(1): 6-10.  
HAO Guang-jin, DING Ming-ke, REN Rui-bo. Study on the SCG and inter-lock analysis in improvement of stage filling[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2008, 23(1): 6-10. (in Chinese)
- [16] 邹维列, 王钊, 杨志强. 路基粒状填土的旋转压实试验[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1775-1778.  
ZOU Wei-lie, WANG Zhao, YANG Zhi-qiang. Gy-ratory compaction test for field compaction simulation



- of granular subgrade soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11): 1775-1778. (in Chinese)
- [17] JTG E51—2009, 公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].  
JTG E51—2009, Test methods of materials stabilized with inorganic binders for highway engineering[S]. (in Chinese)
- [18] 袁宏伟. 沥青稳定碎石基层旋转压实成型参数的试验研究[J]. 公路, 2009(4): 248-252.  
YUAN Hong-wei, Experiment and study on gyratory compacting parameters of asphalt treated base[J]. Highway, 2009(4): 248-252. (in Chinese)
- [19] CERNI G, CAMILLI S. Comparative analysis of gyratory and proctor compaction processes of unbound granular materials[J]. Road Materials and Pavement Design, 2011, 12(2): 397-421.
- [20] 王 龙, 解晓光. 水泥稳定碎石振动与静压成型物理力学指标关系[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(10): 70-74.  
WANG Long, XIE Xiao-guang. Relationship on index of physics and mechanics cement-stabilized aggregates between vibrating and static compacting methods[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(10): 70-74. (in Chinese)
- [21] 章建龙. 水泥稳定碎石振动成型试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.  
ZHANG Jian-long. Study on the test of vibrating compaction for cement stabilized gravel[D]. Xi'an: Chang'an University, 2008. (in Chinese)
- [22] 孟昆鹏. 道路基层材料振动压实标准的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.  
MENG Kun-peng. Research on standard of vibration compaction for road base course material[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)
- ~~~~~
- (上接第 16 页)
- [16] JTG E40—2007, 公路土工试验规程[S].  
JTG E40—2007, Test methods of soils for highway engineering[S]. (in Chinese)
- [17] 詹姆斯·杰卡德, 罗伯特·图里西. 多元回归中的交互作用 [M]. 第 2 版. 蒋 勤, 译. 上海: 格致出版社, 上海人民出版社, 2012.  
JACCARD J, TURRISI R. Interaction effects in multiple regression[M]. 2nd ed. Translated by JIANG Qin. Shanghai: Truth & Wisdom Press, Shanghai People's Publishing House, 2012. (in Chinese)
- [18] 威廉·D·贝里. 理解回归假设 [M]. 余珊珊, 译. 上海: 格致出版社, 上海人民出版社, 2012.  
BERRY W D. Understanding regression assumptions [M]. Translated by YU Shan-shan. Shanghai: Truth & Wisdom Press, Shanghai People's Publishing House, 2012. (in Chinese)
- [19] 张莎莎, 王永威, 杨晓华, 等. 砾类亚硫酸盐渍土盐胀率的简化预测模型[J]. 中国公路学报, 2015, 28(11): 1-7.  
ZHANG Sha-sha, WANG Yong-wei, YANG Xiao-hua, et al. Simplified prediction model of salt expansion rate for gravel sulfite saline soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(11): 1-7. (in Chinese)
- [20] KORRES W, KOYAMA C N, FIENER P, et al. Analysis of surface soil moisture patterns in agricultural landscapes using empirical orthogonal functions [J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2010, 14: 751-764. (in Chinese)
- [21] 冯瑞玲, 王鹏程, 吴立坚. 硫酸盐渍土路基盐冻胀变形量计算方法探讨[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 238-242.  
FENG Rui-ling, WANG Peng-cheng, WU Li-jian. Discussion on calculation method of salt dilating and frost-heave deformation occurred in sulphate saline soil subgrade[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(1): 238-242. (in Chinese)
- [22] BAO S C, WANG Q, BAO X H, et al. Characters of saline-alkali soil in Western Jilin and biological treatment[J]. Journal of Pure and Applied Microbiology, 2013, 7: 809-812.
- [23] 万旭升, 赖远明. 硫酸钠溶液和硫酸钠盐渍土的冻结温度及盐晶析出试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(11): 2090-2096.  
WAN Xu-sheng, LAI Yuan-ming. Experimental study on freezing temperature and salt crystal precipitation of sodium sulphate solution and sodium sulphate saline soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(11): 2090-2096. (in Chinese)