

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202007042



振动旋转压实级配碎石制样方法 及力学性能试验

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. 桂林理工大学 广西建筑新能源与节能重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 为解决级配碎石物理指标和力学指标室内测试结果与工程实际存在差异的问题,利用自主研发的道路材料振动旋转压实仪,通过振动旋压的施力方式模拟压路机实际碾压作用机制,开展级配碎石试件室内制样方法研究.试验结果表明:振动旋转压实试件的密实程度最好,压实密度最高可达 $2.39 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$;试件压实密度随着旋压压力的增加和压实时间的增长而提高,最终趋于稳定;振动旋转压实试件的弹性模量与加州承载比值(R_{CB})最高,抗压回弹模量为 354.716 MPa , R_{CB} 为 328% ;振动旋转压实试件的物理、力学指标与工程实测数据接近,说明该制样方法能较好地模拟工程实际.

关键词: 级配碎石; 振动旋转压实; 加州承载比; 抗压回弹模量

中图分类号: U 414 文献标志码: A 文章编号: 1000-5013(2021)03-0322-07

Sample Preparation Methods and Mechanical Property Tests of Graded Crushed Stone Under Gyratory and Vibration Compaction

TAN Bo^{1,2}, YANG Tao¹

(1. College of Civil and Architectural Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;

2. Key Laboratory of New Energy and Energy Conservation for Construction in Guangxi,
Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to solve the result differences between laboratory and in-situ tests of physical and mechanical properties, adopting the self-developed road material vibration rotary compaction device, the engineering compaction mechanism was simulated by the vibration-rotation and compaction methods, the laboratory study on the specimens preparation methods of graded crushed stone was conducted. Test results show that the specimen density produced by the vibration-rotation and compaction methods is the best, the highest compaction density could be $2.39 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; as the vibration-rotation and compaction load level and compaction time increase, the compaction density of specimens increases, then becomes stable; the compressive resilient modulus and California bearing ratio (R_{CB}) values of vibration-rotation and compaction specimens are the highest, the value of compressive resilient modulus is 354.716 MPa , and the R_{CB} is 328% ; the physical and mechanical properties of vibration-rotation and compaction specimens is close to the in-situ test results, which shows this

preparation methods could properly simulate the actual engineering.

Keywords: graded crushed stone; gyratory and vibration compaction; California bearing ratio; compressive resilient modulus

级配碎石是一种散体材料,作为柔性基层时,拥有良好的应力分散能力,能有效缓解路面裂缝的产生.我国对级配碎石的应用相对较少,主要原因是室内成型方式与施工实际碾压机理存在差异,使试验结果不能较好地反映工程实际.以往对级配碎石的研究中,采用静压压实法制作试件,然后,测定其强度、抗裂能力、抗疲劳能力等路用性能^[1];采用重型击实法确定最大干密度及最佳含水率.研究表明,静压压实法并不能有效地模拟公路路面实际碾压工况^[2-3].

针对以上问题,学者对振动成型法和碎石混合料级配进行了研究.常艳婷等^[4]在利用振动成型法和静压法对级配碎石抗变形性能的研究中发现,振动压实成型的级配碎石的回弹模量是静压法的 1.56~1.77 倍,抗塑性变形能力是静压法的 1.52~1.56 倍.王龙等^[5]发现级配碎石振动和击实成型方法的物理指标及力学指标具有线性关系,振动成型试件的最佳含水量比击实成型试件平均高 1.0%.洪亮等^[6]对水泥稳定砾石骨料进行振动与击实成型对比试验,指出在相同水泥剂量下,振动成型试件的 7 d 无侧限抗压强度比静压法成型试件高 1.2~1.4 倍. Huang 等^[7]研究发现在沥青混合料振动压实的过程中,振动频率的增加将有效增加沥青混合料中上层的压实度.刘栋等^[8]通过研究水泥稳定类材料旋转压实成型,发现旋转压实成型的试件比击实和静压成型试件的压实含水率和矿料级配衰变降低,试件的密度和强度有所提高.以往对振动压实、旋转压实、静压和振动成型的研究都有较深入的分析,但是将振动、旋转和压实结合起来对碎石混合料成型的研究还比较缺乏.

因此,本文利用自主研发的道路材料旋转振动压实仪,对级配碎石混合料分别进行静压、振动、振动压实、旋转压实和振动旋转压实成型,分析不同成型方式下碎石混合料试件的性能,研究振动旋转压实方式的成型机理,探索一种能有效反映工程实际的级配碎石成型方式.

1 原材料及试验仪器

1.1 原材料

细骨料采用广西贵港高速公路路用粒径为 4.75 mm 以下的花岗岩碎石颗粒;粗骨料采用广西贵港高速公路路用花岗岩碎石,粒径范围在 4.75~53.00 mm 之间;水为日常饮用水.

试验用级配碎石筛分曲线图,如图 1 所示.图 1 中: D 为筛孔直径; η 为碎石筛分通过率.最大理论密度曲线是根据最大理论密度公式计算得出^[9],即 $S=(d/d_{\max})^{0.5}\times 100\%$,其中, d 为颗粒粒径; d_{\max} 为最大颗粒粒径; S 为粒径 d 碎石的最大理论密度通过率.

1.2 道路材料振动旋转压实仪

道路材料振动旋转压实仪为新型道路材料压实成型仪器,如图 2 所示.该仪器能同时实现振动、旋转、压实 3 种功能,可使用电脑全程控制,并能将各种试验参数通过仪器传输给电脑.该仪器可将碎石混合料进行多种不同方式压实成型,且能实时输出压实位移变化数据.

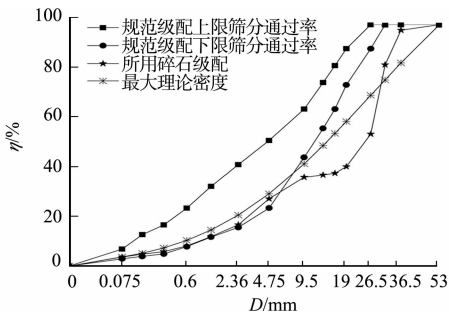


图 1 试验用级配碎石筛分曲线图
Fig. 1 Screening curve of graded crushed stone for test



图 2 道路材料振动旋转压实仪
Fig. 2 Road material vibration rotary compaction device

仪器的主要工作性能参数:振动频率为 $3\,000\text{次}\cdot\text{min}^{-1}$;振幅为 0.6 mm ;旋转速率为 $5\text{ 圈}\cdot\text{min}^{-1}$;施加压力为 $100\sim700\text{ kPa}$ (可自由控制)。

1.3 道路材料弹性模量、剪切强度测试仪

道路材料弹性模量、剪切强度测试仪为新型道路材料力学性能测试仪器,如图 3 所示. 该仪器的主要功能是测试成型试件的抗压回弹模量和剪切强度。

该仪器的主要工作性能参数:竖向压力为 $0\sim100\text{ kN}$;竖向位移为 40 mm ;加载速率为 $1,2,4\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$;水平推力为 $0\sim20\text{ kN}$;剪切速率为 $0.80,0.02\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。



图 3 道路材料弹性模量、剪切强度测试仪
Fig. 3 Resilient modulus and shear strength test device of road material

2 试验方法

试件模型直径为 150 mm 、高为 230 mm ,采用自研的道路材料旋转振动压实仪,进行级配碎石混合料振动旋转压实成型试验。

2.1 最佳含水率

振动旋转压实成型方式与传统压实试验有较大差别,其含水率对级配碎石试件的力学性能影响显著^[10-11]. 因此,在测试碎石混合料的最佳含水率时,应先进行试验方法设计和验证. 使用规范要求的中值级配,设计试验方法如下:1) 将碎石混合料烘干至恒质量,冷却至常温;2) 往常温碎石中加入定量自来水,自来水掺入率分别为 $3.0\%,3.5\%,4.0\%,4.5\%,5.0\%$;3) 将拌匀的碎石混合料分两层压实,每层压实 4 min ;4) 计算压实后碎石混合料的压实密度,绘制压实密度(ρ_c)-含水率(δ)曲线,如图 4 所示。

由图 4 可知:当含水率为 4.1% 时,碎石混合料的压实密度最大,为 $2.273\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. 因此,碎石混合料均采用 4.1% 的含水率。

2.2 成型方式设计与验证

不同成型方式的压实位移变化曲线,如图 5 所示. 图 5 中: Δ 为压实位移; n 为压实现转圈数. 由图 5 可知:级配碎石混合料在振动旋转压实成型方式下的压实位移最大,表明振动旋转压实成型试件具有更好的压实度和更高的压实密度。

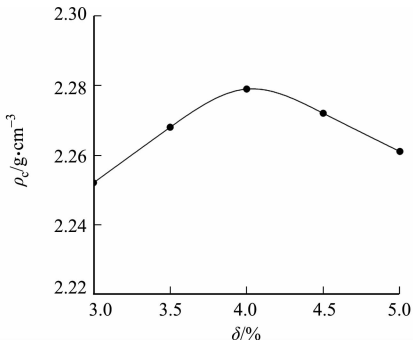


图 4 压实密度-含水率曲线
Fig. 4 Compacted density- water content curves

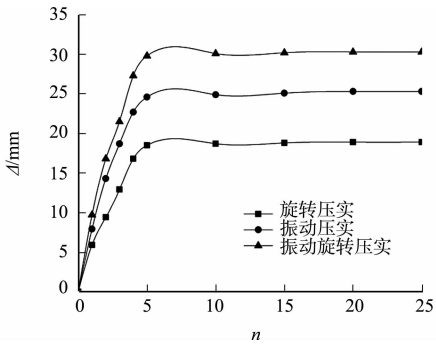


图 5 不同成型方式的压实位移变化曲线
Fig. 5 Curves of compaction displacement under different forming methods

对各成型方式下的级配碎石混合料试件进行密度测试. 将级配碎石混合料均分为两层成型,每层均采用 200 kPa 的竖向荷载压力压实 4 min 或振动 4 min . 各成型方式下级配碎石混合料的物理参数,如表 1 所示. 表 1 中: m , V , ρ 分别为混合料的质量、体积和密度。

由表 1 可知:在 5 种成型方式下,振动成型试件的密度最低,而振动旋转压实成型试件的

表 1 各成型方式下级配碎石混合料的物理参数
Tab. 1 Physical parameters of graded crushed stone mixtures under different compaction methods

成型方式	m/g	V/cm^3	$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
振动	2 497.9	1 419	1.76
静压	4 993.5	2 312	2.16
旋转压实	4 989.1	2 278	2.19
振动压实	4 991.3	2 238	2.23
振动旋转压实	4 994.7	2 191	2.28

密度最高. 相较于振动成型、静压成型、旋转压实成型和振动压实成型试件, 振动旋转压实成型试件的密度分别提高了 29.5%, 5.6%, 4.1%, 2.2%. 广西某高速公路施工时使用相同级配和相同材料的路面基层, 其实测密度为 $2.40\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 可以看出振动旋转压实成型试件的密度更接近施工实测数据. 因此, 建议级配碎石混合料采用振动旋转压实成型方式.

2.3 撒粉碾压

为避免级配碎石混合料在振动旋转压实成型过程中出现细集料离析, 造成混合料试件上部出现只有大粒径碎石而缺少细集料的情况, 提出预留一部分细集料洒在级配碎石混合料表层的方法. 为证明该方法的合理性, 对级配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. 撒粉压实试验结果, 如表 2 所示.

试验结果表明: 进行撒粉压实后, 级配碎石混合料成型试件的密度得到了提高, 最多可提高 5%; 级配碎石混合料成型试件在经过预留撒粉压实后, 集料离析情况也得到了改善. 综上, 建议采用预留 200 g 细集料进行表层洒粉压实的方法.

表 2 撒粉压实试验结果
Tab. 2 Results of dusting compaction tests

测试项目	$\rho_c/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
不预留撒粉压实	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

2.4 压实时间

对试验仪器的性能研究发现, 随着级配碎石混合料压实时间的增加, 级配碎石混合料的压实程度也增加, 级配碎石混合料密度随之增大, 但压实时间过长会使级配碎石混合料粒径较大、碎石破碎程度增加. 因此, 要选择合适的压实时间.

压实时间主要是根据级配碎石混合料在压实过程中所受压实荷载及压实位移的变化来确定. 采用振动旋转压实成型方式, 由道路材料旋转振动压实仪系统反馈的级配碎石混合料的压实荷载、压实位移的变化曲线, 如图 6, 7 所示. 图 6 中: σ 为压实荷载. 由图 6, 7 可知: 在压实过程中, 当级配碎石混合料试件旋转 6 圈时, 其所受压实荷载趋于稳定, 稳定在初始设置的 200 kPa 左右; 而压实位移在级配碎石混合料试件旋转 0~5 圈(0~1 min)时变化很大, 当旋转到 20 圈(4 min)时, 压实位移趋于稳定. 因此, 设定压实时间为级配碎石混合料试件旋转到 20 圈时, 即 4 min.

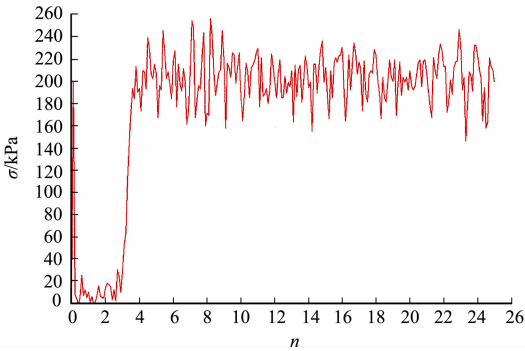


图 6 压实荷载-旋转圈数变化曲线
Fig. 6 Curves of compaction load and rotation number

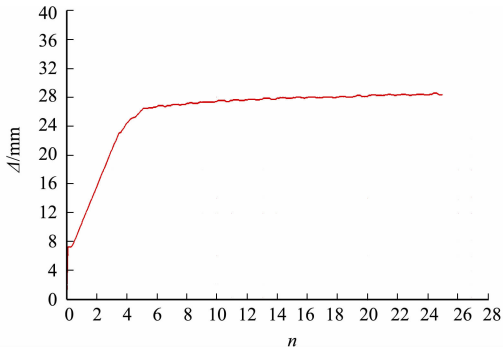


图 7 压实位移-旋转圈数变化曲线
Fig. 7 Curves of compaction displacement and rotation numbers

2.5 压实荷载

不同压实荷载下, 级配碎石混合料成型试件的密度各不相同, 为了更好地模拟公路路面实际碾压工况, 级配碎石混合料应达到路面施工的压实度, 且还需要保证级配碎石混合料骨架结构不被破坏^[12-14]. 压实荷载太大会使一些粒径大的碎石被破坏, 从而导致骨架破损; 压实荷载太小则不能有效地模拟路面实际碾压工况. 对级配碎石混合料进行不同荷载压实, 并预留 200 g 细集料在表层撒粉, 得到不同压实荷载下的压实位移变化曲线, 如图 8 所示. 当施加压实荷载分别为 160, 180, 200, 220, 240 kPa 时, 测得混合料的压实密度分别为 $2.31, 2.35, 2.39, 2.42, 2.44\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

试验结果表明, 当 $\sigma < 200\text{ kPa}$ 时, 级配碎石混合料的压实度比较小, 密度也比较低; 当压实荷载为

220,240 kPa 时,级配碎石混合料的压实度很高,但其顶层粒径较大的碎石易出现碎裂的情况,引起级配碎石混合料的级配发生衰变.结合施工实测数据,发现压实荷载为 200 kPa 时,压实密度更接近施工现场的实测数据.综合以上分析,选择压实荷载为 200 kPa.

2.6 制样方式

结合试验方案和结果,提出一种较好的振动旋转压实制样方式,该制样方式适用于花岗岩大粒径级配碎石混合料.级配碎石混合料使用自研道路材料旋转振动压实仪进行压实,具体步骤为:1) 按级配称取 5 kg 级配碎石混合料,并预留 200 g 细集料作撒粉用;2) 将 4 800 g 级配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) 将养护好的级配碎石混合料分为 2 份,分两层压实,每层压实 20 圈(4 min);4) 将预留的 200 g 细料均匀洒在级配碎石混合料表层,并按最佳含水率喷水,压实 4 min.

3 抗压回弹模量与加州承载比(CBR)试验

对不同成型方式的级配碎石混合料试件进行抗压回弹模量和 CBR 测试.由于振动成型试件的密实度太低,不适宜做抗压回弹模量和 CBR 试验,故只针对静压压实、旋转压实、振动压实和振动旋转压实的级配碎石混合料试件进行试验.

3.1 抗压回弹模量试验

参照 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》^[15]进行级配碎石混合料抗压回弹模量试验.级配碎石混合料使用自研道路材料旋转振动压实仪并结合节 2.6 的制样方式制作级配碎石混合料试件,使用道路材料弹性模量、剪切强度测试仪对级配碎石混合料进行抗压回弹模量测试.压实成型后的级配碎石混合料,如图 9 所示.级配碎石混合料的抗压回弹模量试验仪器,如图 10 所示.



图 9 压实成型后的级配碎石混合料
Fig.9 Graded crushed stone mixture after compaction



图 10 级配碎石混合料的抗压回弹模量试验仪器
Fig.10 Test instrument for compressive resilient modulus of graded crushed stone mixture

抗压回弹模量 E_c 的计算式为 $E_c = ph/l$. 其中, p 为单位压力,MPa; h 为试件高度,mm; l 为试件回弹变形,mm. 计算不同成型方式下压实级配碎石混合料的抗压回弹模量,结果如表 3 所示. 采用的测试压实荷载为 500 kPa.

由表 3 可知:不同成型方式下的级配碎石混合料试件的压实密度和抗压回弹模量存在较大差异;振动旋转压实成型的级配碎石混合料试件的压实密度和抗压回弹模量最高,静压压实成型的级配碎石混合料试件的压实密度和抗压回弹模量最低;振动旋转压实成型的级配碎石混合料试件的抗压回弹模量分别是静压压实、旋转压实和振动压实成型试件的 2.84、2.25、1.44 倍.

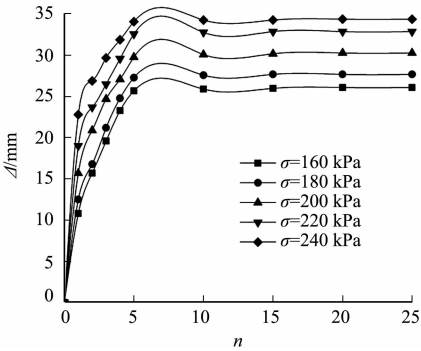


图 8 不同压实荷载下的压实位移变化曲线
Fig.8 Curves of compaction displacement under different compaction loads

表 3 抗压回弹模量试验结果 Tab.3 Test results of compressive resilient modulus		
成型方式	$\rho_c / g \cdot cm^{-3}$	E_c / MPa
静压压实	2.16	124.739
旋转压实	2.19	157.725
振动压实	2.23	246.428
振动旋转压实	2.39	354.716

不难看出,级配碎石混合料试件的压实密度和抗压回弹模量存在较高的相关性.原因是不同成型方式下的级配碎石混合料试件的骨架性能不同,骨架性能越好,其抗压回弹模量越高^[16].广西某高速公路施工现场实测回弹模量值为 400 MPa,可以发现振动旋转压实成型的级配碎石混合料试件的抗压回弹模量更加接近施工现场.

3.2 加州承载比试验

级配碎石混合料的加州承载比值越高,其骨架性能越好^[14].对级配碎石进行振动旋转压实成型后,开展 CBR 试验,以研究其成型级配碎石混合料的骨架性能.参照 JTG E40—2007《公路土工试验规程》^[17]对级配碎石混合料试件进行 CBR 试验.试验采用的压头截面积为 0.002 8 m².级配碎石混合料的 CBR 试验仪器,如图 11 所示.

当贯入量为 2.5 mm 时, CBR 的计算式为 $R_{CB} = \frac{p}{7\ 000} \times 100\%$; 当贯入量为 5.0 mm 时, CBR 计算式为 $R_{CB} = \frac{p}{10\ 500} \times 100\%$.

一般情况下, CBR 试验中贯入量为 5.0 mm 的抗压回弹模量小于贯入量为 2.5 mm 的抗压回弹模量, 因此, 在研究中基本采用贯入量为 2.5 mm 的抗压回弹模量. 若贯入量为 5.0 mm 时的承载比大于贯入量 2.5 mm 时的承载比, 则试验应重做; 若重做的结果仍然如此, 则采用贯入量为 5.0 mm 时的承载比. CBR 试验结果, 如表 4 所示.

由表 4 可知: 振动旋转压实成型的级配碎石混合料试件的 R_{CB} 均高于其他几种成型方式, 其 R_{CB} 分别为静压压实、旋转压实和振动压实试件的 1.30、1.26、1.19 倍. 主要原因是振动旋转压实成型试件的骨架性能相较其他几种成型试件更好, 试件的抗承载能力也更好.

结合广西某高速公路施工时的实测数据, 发现振动旋转压实成型的级配碎石混合料试件的 R_{CB} 值与实测值较为相近, 表明该成型方式可以较好地模拟道路施工的实际碾压工况. 根据其他学者的研究经验^[18], 高等级公路级配碎石混合料基层的 R_{CB} 值一般在 300% 以上, 因此, 振动旋转压实成型方式可较好地反映道路工程实际.



图 11 级配碎石混合料的 CBR 试验仪器

Fig. 11 CBR test instrument of graded crushed stone mixture

表 4 CBR 试验结果

Tab. 4 Results of CBR test

成型方式	$R_{CB}/\%$	
	贯入量 2.5 mm	贯入量 5.0 mm
静压压实	253	194
旋转压实	261	218
振动压实	275	239
振动旋转压实	328	285

4 结论

1) 相较于振动成型、静压成型、旋转压实成型和振动压实成型试件, 振动旋转压实成型的级配碎石混合料试件的压实密度最高, 分别提高了 29.5%、5.6%、4.1%、2.2%; 结合工程实测数据, 发现该成型方式的试件更接近工程实际, 且相较于重型击实成型试件的大粒径碎石更不容易被破坏.

2) 振动旋转压实成型试件的压实密度随着压实时间和压实荷载的提高而增加, 最后趋于稳定. 试件压实密度在压实时间 1 min 内变化剧烈, 压实 4 min 后, 压实密度趋于稳定, 因此, 建议采用压实时间为 4 min. 当压实荷载为 200 kPa 时, 压实密度已较接近工程实际, 当压实荷载达到 220 kPa 时, 级配碎石混合料试件会出现较大粒径碎石被破坏的情况; 并且随着荷载的继续增大破碎情况会加重, 使级配碎石混合料发生严重的级配衰变. 因此, 压实荷载建议采用 200 kPa.

3) 对于级配碎石混合料试件, 建议采用振动旋转压实成型方式制样, 再添加最佳含水率的水密封养护 12 h; 试验采用压实荷载为 200 kPa, 其中, 级配碎石混合料分 2 层压实, 每层压实 4 min, 并预留 200 g 细集料, 用于试件表层撒粉, 再压实 4 min.

4) 相较于静压压实、旋转压实和振动压实试件, 振动旋转压实成型的级配碎石混合料试件的 R_{CB} 和抗压回弹模量最高, 分别为 328%、354.716 MPa. 结合施工现场的实测数据, 发现振动旋转压实成型试件的力学性能更接近工程实际.

5) 根据振动旋转压实成型试件的压实密度、加州承载比和抗压回弹模量试验结果与工程实测数据对比发现,振动旋转压实成型方式能较好地模拟公路施工的实际碾压工况,可作为今后替代传统级配碎石试件制样方法的一种尝试.

参考文献:

[1] 莫石秀. 多年冻土地区级配碎石路用性能及设计方法研究[D]. 西安:长安大学,2004.

[2] VISCHER W. Low-volume road flexible pavement design with geogrid-reinforced base[J]. Transportation Research Record,2003,1819:247-254. DOI:10. 3141/1819a-36.

[3] 魏宏云,周卫峰,李源渊. 不同成型方式的水泥碎石性能对比[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2014,33(6):63-67. DOI:10. 3969/j. issn. 1000-565X. 2014. 08. 014.

[4] 常艳婷,陈忠达,张震,等. 不同成型方法级配碎石的抗变形性能[J]. 武汉大学学报(工学版),2017,50(2):251-256. DOI:10. 14188/j. 1671-8844. 2017-02-015.

[5] 王龙,解晓光,李长江. 级配碎石性能的振动与击实成型对比试验[J]. 中国公路学报,2007,20(6):19-24. DOI:10. 3321/j. issn:1001-7372. 2007. 06. 004.

[6] 洪亮,刘涛,杨三强. 水泥稳定砾石骨料振动与击实成型对比试验[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2014,33(6):63-67. DOI:10. 3969/j. issn. 1674-0696. 2014. 06. 14.

[7] HUANG Jianyou, PEI Jianzhong, LI Yang, *et al.* Investigation on aggregate particles migration characteristics of porous asphalt concrete (PAC) during vibration compaction process[J]. Construction and Building Materials,2020, 243:1-8. DOI:10. 1016/j. constrbuildmat. 2020. 118153.

[8] 刘栋,李立寒. 旋转压实成型水泥稳定类基层材料试验[J]. 中国公路学报,2019,32(11):118-128. DOI:10. 19721/j. cnki. 1001-7372. 2019. 11. 011.

[9] 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. DOI:10. 14048/j. issn. 1671-2579. 2020. 01. 046.

[10] 刘宝,苏谦,PHAM D P,等. 不同含水状态级配碎石临界动应力及变形规律研究[J]. 铁道学报,2016,38(6):100-107. DOI:10. 3969/j. issn. 1001-8360. 2016. 06. 015.

[11] 刘宝,PHAM D P,苏谦. 不同含水状态下基床级配碎石填料变形特性研究[J]. 岩土力学,2016,37(5):1366-1372. DOI:10. 16285/j. rsm. 2016. 05. 019.

[12] 黄云涌,敖清文,刘曙光. AC-13 粗集料骨架 CBR 试验研究[J]. 公路工程,2009,34(1):62-66. DOI:10. 3969/j. issn. 1674-0610. 2009. 01. 016.

[13] 蒋应军,张邹羿,陈浙江,等. SRX 稳定碎石骨架密实级配及路用性能[J]. 建筑材料学报(自然科学版),2017,20(2):215-221. DOI:10. 3969/j. issn. 1007-9629. 2017. 02. 010.

[14] 车法,陈拴发,朱金凤,等. 骨架密实型二灰稳定碎石配合比设计方法研究[J]. 河北工业大学学报,2010,39(2):96-99. DOI:10. 3969/j. issn. 1007-2373. 2010. 02. 023.

[15] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程无机结合料稳定材料试验规程: JTG E51—2009[S]. 北京:人民交通出版社,2009.

[16] 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. DOI:10. 14048/j. issn. 1671-2579. 2017. 03. 012.

[17] 中华人民共和国交通运输部. 公路土工试验规程: JTG E40—2007[S]. 北京:人民交通出版社,2007.

[18] 刘江,张荣堂,严东方. 高液限粘土压实性能的试验[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2007,28(3):316-319. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-5013. 2007. 03. 024.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)