

基于振动法的水泥稳定破碎砾石级配 分形评价及力学性能

张宜洛¹, 陈阳阳¹, 王涛², 郭创¹

(1.长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2.上海市市政工程设计研究总院(集团)第六设计院有限公司)

摘要: 为了提高水泥稳定破碎砾石的性能,通过振动法与传统试验方法的对比研究,水泥稳定破碎砾石振动击实的最大干密度为重型击实的1.02倍,振动击实后的最佳含水量为重型击实后的0.79倍,振动成型试件的抗压强度与劈裂强度均优于静压成型。采用分形评价方法对振动法水泥稳定破碎砾石的级配进行分析,得出各级配类型的分形维数值域范围,分形维数值越大,级配越细,分形维数值越小,级配越粗。根据不同级配的振动法水泥稳定破碎砾石抗压强度和劈裂强度试验结果,得出合理级配的分形维数值域范围为[2.374 0, 2.491 4]。

关键词: 道路工程; 水泥稳定破碎砾石; 振动法; 分形评价; 分形维数值

砾石是岩石经过水流长期搬运冲刷形成的无明显棱角的天然粒料,主要存在于长期经水流冲刷的河滩处,在道路工程中有着广泛的应用。经过破碎后的砾石多用于高等级公路底基层或低等级公路基层和底基层,但是与碎石相比,破碎砾石的破碎面少、表面光滑、棱角性差,应用在基层中的水泥稳定破碎砾石强度相对较低,在工程实践中为提高其强度,往往会增加水泥剂量和采用较细的级配,导致水泥稳定破碎砾石基层产生严重的收缩开裂,从而诱发其他病害缩短路面使用寿命。因此,采用合理的水泥剂量以及合理的级配控制水泥稳定破碎砾石基层质量的关键。

分形理论是描述几何形体复杂程度的一种重要理论工具,混合料中的集料颗粒分布在一定尺度范围内存在一定的随机性和统计自相似性,呈现出一定的分形分布。该文利用基于水泥稳定碎石的振动法试验方法,研究其对于水泥稳定破碎砾石的适用性,并利用分形理论对振动法水泥稳定破碎砾石的级配进行比较评价,根据对不同级配水泥稳定破碎砾石的力学性能试验,优选出最适宜的级配范围。

1 振动法水泥稳定破碎砾石验证

1.1 原材料及技术指标

破碎砾石来自自贡至隆昌高速公路,其技术性能

见表1;水泥为陕西产42.5级普通硅酸盐水泥。

表1 粗、细集料的技术指标

集料规格/ mm	表观密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	针片状含 量/%	压碎值/ %
19~31.5	2.746	3.6	—
9.5~19	2.748	7.6	11.2
4.75~9.5	2.805	3.5	—
0~4.75	2.714	—	—
技术要求	≥ 2.6	≤ 15	≤ 30

1.2 振动法验证

为了适应现代交通的发展,在道路施工过程中,原先的静压压路机逐渐被振动压路机所替代,室内所采用的传统试验方法已不能满足现场施工的实际需求,为模拟施工现场的振动压实情况,采用振动压实仪进行室内试验研究。振动压实仪由转速相等、方向相反的偏心块组成的激振器产生离心力,从而使振动锤振动,对材料施加激振力。与传统击实成型的试验方法相比,材料受压时的状态由静压状态转换为运动状态,受压材料在激振力的作用下,材料颗粒之间产生相对运动,振动频率与被压材料的自振频率相近,材料在压实过程中处于一种共振状态,从而产生最佳的压实效果。根据规范中水泥稳定基层的级配范围,选用骨架

密实型(GM)级配和悬浮密实型(XM)级配进行验证 试验,水泥剂量选用 4.0%,具体的级配见表 2。

表 2 破碎砾石级配

项目	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%						
	31.5	19.0	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
GM	规范要求	100	68~86	38~58	22~32	16~28	8~15
	设计级配	100	79.1	46.7	29.3	19.8	11.4
XM	规范要求	100	90~100	60~80	29~49	15~32	6~20
	设计级配	100	94.1	67.5	38.0	25.6	14.8

通过振动击实法和重型击实法对水泥稳定破碎砾石的最大干密度与最佳含水率进行测试,通过静压法和振动法成型试件对相关力学指标测试,验证振动法对于水泥稳定破碎砾石的适用性,试验结果见表 3、4。

由表 3 可知:振动击实的最大干密度为重型击实的 1.02 倍,振动击实后的最佳含水量为重型击实后的

表 3 最大干密度和最佳含水量试验结果

级配 类型	重型击实		振动击实	
	$\rho_1/(g \cdot cm^{-3})$	$w_1/\%$	$\rho_2/(g \cdot cm^{-3})$	$w_2/\%$
GM	2.380	5.4	2.427	4.3
XM	2.379	5.6	2.419	4.4

表 4 力学特性试验结果

成型方式	级配 类型	无侧限抗压强度/MPa			劈裂强度/MPa		
		7 d	60 d	90 d	7 d	60 d	90 d
振动成型	GM	7.19	11.85	12.96	0.71	1.26	1.37
	XM	7.10	11.05	12.07	0.66	1.16	1.29
静压成型	GM	3.46	5.36	5.75	0.34	0.67	0.69
	XM	3.50	5.08	5.45	0.27	0.64	0.69

0.79 倍。振动击实对击实材料施加的是激振力,集料在激振力的作用下产生相对运动从而相互填充密实,在振动击实中水的润滑作用不显著,所以干密度提高,最佳含水率较小。重型击实试验过程中,集料之间相互挤压,粗集料容易被压碎,而细集料和水容易通过空隙流失,试件整体的密实性差,这样导致重型击实确定的最佳含水量偏大,最大干密度偏小。

从表 4 可以看出:振动成型法水泥稳定破碎砾石的无侧限抗压强度和劈裂强度均比静压成型法高,而且两种成型方式的强度差距随龄期的增加而变大。主要是因为振动成型方式提高了密实度,且颗粒排列方式更为紧密,进而提高了试件强度。以上试验结果表明振动法对水泥稳定破碎砾石有很好的适用性,且与现有方法相比能显著提高水泥稳定破碎砾石的性能。

2 级配分形评价

2.1 集料级配分形简介

对于某一个几何对象,其分形特征常采用自相似

分形的幂律定义:

$$F(\epsilon) = F_0 \left(\frac{\delta}{\delta_{\max}} \right)^{-(D-d)} \quad (1)$$

式中: $F(\epsilon)$ 为某一几何图形的长度、面积或体积; F_0 为图形为整形($D=1$)时 F 的值; δ 为长度尺码; D 为分形维数; d 为分形的拓扑维数,对于分形曲线, $d=1$,对于分形曲面, $d=2$,对于三维分形体, $d=3$ 。

对于集料而言,集料的拓扑维数 $d=3$,则其毛体积的分形表达式为:

$$V(r) = V_0 \left(\frac{r}{r_{\max}} \right)^{3-D} \quad (2)$$

式中: $V(r)$ 为粒径不大于 r 的集料的毛体积; V_0 为所有集料的毛体积。

定义粒径小于 r 的集料的质量:

$$M(r) = \int_{r_{\min}}^r \rho dV(r) \quad (3)$$

集料的通过率:

$$P_r = \frac{M(r)}{M_0} \quad (4)$$

式中: M_0 为集料的总质量, $M_0 = \rho V_0$ 。

根据以上公式可得到:

$$P(r)=\frac{r^{3-D}-r_{min}^{3-D}}{r_{max}^{3-D}-r_{min}^{3-D}} \tag{5}$$

在实际工程应用中,最小粒径一般都很小,因此上式中 $r_{min}^{3-D} \approx 0$ 可以忽略不计,可重新得到:

$$P(r)=(\frac{r}{r_{max}})^{3-D} \tag{6}$$

即为以通过率表示的集料级配分形表达式。

根据级配分形理论,对上式等号两边取对数,采用最小二乘法对 $\lg P$ 和 $\lg(\frac{r}{r_{max}})$ 进行线性拟合,最佳拟合直线的斜率为 K ,分形维数 $D=3-K$,级配组成不

同其分形维数也不相同,将水泥稳定破碎砾石的级配组成用一定量值评价,结果更明确直观。

2.2 集料级配分形分析

选用 3 种级配进行分析,其中 2 种级配为表 2 所示的骨架密实型级配和悬浮密实型级配,另一种级配为通过试验确定的强嵌挤级配(QM),通过逐级填充法确定粗集料各档的比例,其中(31.5~19.0 mm):(19.0~9.5 mm):(9.5~4.75 mm)=50:30:20,细集料通过 I 法确定其 I 值取 0.65,根据振动法水泥稳定破碎砾石力学特性试验结果,得出粗、细集料的比例为 65:35。结合室内试验中得出的粗、细集料的筛分结果,最终得出强嵌挤级配,见表 5。

表 5 破碎砾石强嵌挤级配

级配类型	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%						
	31.5	19.0	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
QM	级配范围	100	65~75	35~45	25~35	15~25	8~12
	设计级配	100	70.4	40.0	26.4	17.9	10.3

根据级配分形理论,分别求出 3 种级配范围中级配上限、级配下限以及设计级配对应的分形维数,级配

对数线性拟合图见图 1,线性回归分析结果见表 6。由表 6 可知:

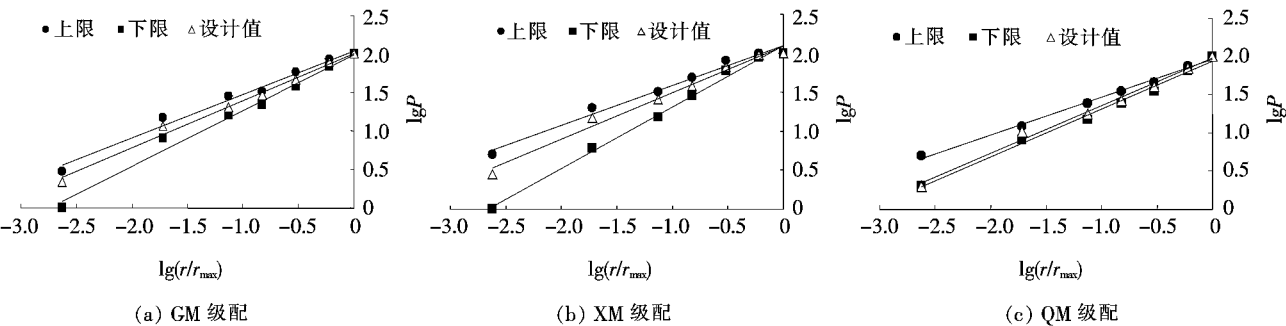


图 1 级配对数线性拟合图

表 6 各级配回归分析结果

级配类型	斜率 K	相关系数 R^2	分形维数 D
GM	上限	0.568 7	0.983 6
	下限	0.727 3	0.985 9
	设计值	0.616 6	0.991 3
XM	上限	0.508 6	0.980 8
	下限	0.788 0	0.992 9
	设计值	0.595 4	0.984 3
QM	上限	0.494 4	0.993 9
	下限	0.626 0	0.992 2
	设计值	0.621 1	0.990 4

(1) 水泥稳定破碎砾石骨架密实型级配的分形维数值域范围为[2.272 7,2.431 3],悬浮密实型级配的值域范围为[2.222 0,2.491 4],根据逐级填充试验和 I 法确定的强嵌挤级配的分形维数值域范围为[2.374 0,2.505 6]。对于同一种级配而言,级配上限的分形维数大于级配下限的分形维数,级配设计值的分形维数在值域范围内,因此以分形维数评价集料的级配组成是合理的,且分形维数 D 值越大,级配越细, D 值越小,级配越粗。

(2) 分析水泥稳定破碎砾石 3 种级配组成与其对应的分形维数,可以看出分形维数可以反映混合料内部集料的密实程度。从 3 种级配各筛孔上下限通过率

及其对应的分形维数来看, QM 级配上限和下限对应的 D 值最大, QM 级配细集料完全填充粗集料形成的骨架又没有发生干涉现象使得粗集料不能形成骨架结构, 混合料内部密实所以其 D 值最大。

(3) GM 上限级配 D 值小于 XM 上限级配 D 值, 下限级配 D 值大于 XM 下限级配 D 值。从这两种级配上下限筛孔通过率中可以看出: XM 级配各筛孔的上限通过率大于 GM 级配上限通过率, XM 级配中细集料较多, 级配较细, 整体较密实因此其分形维数大于 GM 级配; 两种级配的下限通过率中, GM 级配的粗集料通过率较小, 但 4.75 mm 以下的细集料通过率较大, 细集料对粗集料形成的骨架之间的空隙填充较好, 集料密实度高, 其分形维数值比 XM 级配大。

(4) 根据以上分析, 级配的分形维数 D 值能够更

直观地反映水泥稳定破碎砾石内部集料的密实程度, 级配中细集料的含量对 D 值的影响显著, 因此在级配设计中应选择合适的粗细集料的比例。

3 振动法水泥稳定破碎砾石力学性能

对振动法水泥稳定破碎砾石的相关力学性能进行试验, 建立力学性能与级配分形维数之间的关系, 根据振动法水泥稳定破碎砾石的力学性质提出合理的级配分形维数值域范围, 为振动水泥稳定破碎砾石的级配验证提供参考。

3.1 无侧限抗压强度

振动法水泥稳定破碎砾石通过不同龄期的养生得到的无侧限抗压强度的代表值见表 7。

表 7 振动法水泥稳定破碎砾石无侧限抗压强度代表值

级配类型	水泥剂量/%	不同龄期(d)抗压强度 $R_{c0.95}$ /MPa						
		0	3	7	14	28	60	90
GM	3.0	2.43	4.26	5.26	6.70	8.31	10.03	10.70
	4.0	2.51	5.25	7.19	8.18	9.76	11.85	12.96
	5.0	2.52	7.18	8.44	10.00	11.35	13.27	14.14
XM	3.0	2.01	4.20	5.21	6.49	7.88	9.67	10.25
	4.0	2.09	5.11	7.10	8.08	9.04	11.05	12.07
	5.0	2.12	7.04	8.41	9.52	10.86	12.27	13.09
QM	3.0	2.54	5.02	6.12	7.56	9.61	10.82	11.23
	4.0	2.63	6.10	7.97	8.71	10.24	12.69	13.44
	5.0	3.10	7.50	9.03	10.94	12.02	13.86	14.93

由表 7 可知, 当水泥剂量为 3%~5% 时, QM 级配的无侧限抗压强度最大, GM 级配次之, XM 级配最小。振动法水泥稳定破碎砾石的无侧限抗压强度随着龄期呈现非线性增长, 0~28 d 时的无侧限抗压强度增长速率较快, 28 d 后增长速率相对趋于平缓, 其强度主要是在前 28 d 的养生龄期内形成的, 所以水泥稳定破碎砾石基层或底基层施工碾压成型后, 前 28 d 的养生条件尤为关键。

振动法水泥稳定破碎砾石 GM 级配与 XM 级配之间的无侧限抗压强度差距较小, 这主要是因为破碎砾石自身特性的影响, 与水泥稳定碎石相比, 破碎砾石存在 1~3 个光滑面, 粗集料在形成骨架产生嵌挤力的情况下, 由于光滑面的存在, 其产生的嵌挤力比碎石要小很多。从而导致了振动法水泥稳定破碎砾石当采用 JTG D50—2006《沥青路面设计规范》中碎石的 GM 结

构时, 并不能完全形成 GM 骨架结构, 所以两种类型级配的无侧限抗压强度差异较小。对于 QM 级配而言, QM 级配中粗细集料的比例适中, 在提供足够嵌挤力的前提下保证有较大的密实度, 因此其强度最大。

3.2 劈裂强度

振动法水泥稳定破碎砾石通过不同龄期的养生得到的劈裂强度的代表值见表 8。

由表 8 可以看出: ① 无论是级配类型还是水泥剂量发生变化, 振动法水泥稳定破碎砾石的劈裂强度都是随着龄期的增加而持续增长, 在成型初期劈裂强度增长较快, 28 d 后增长速率趋于平缓。劈裂强度主要反映材料的抗剪切能力, 其主要受集料之间的嵌挤力和黏结力的影响。水泥剂量增加, 其产生的水化产物增多, 集料之间的孔隙被充分填充, 水化产物与矿料的连接越紧密, 所以其劈裂强度增加; ② GM、XM、QM

表 8 振动法水泥稳定破碎砾石劈裂强度代表值

级配类型	水泥剂 量/%	不同龄期(d)劈裂强度 $R_{p0.95}$ /MPa					
		3	7	14	28	60	90
GM	3.0	0.29	0.56	0.65	0.82	1.01	1.11
	4.0	0.37	0.71	0.84	1.03	1.26	1.37
	5.0	0.47	0.92	1.08	1.30	1.56	1.71
XM	3.0	0.26	0.52	0.64	0.75	0.92	1.07
	4.0	0.35	0.66	0.78	0.91	1.16	1.29
	5.0	0.44	0.83	1.01	1.17	1.45	1.58
QM	3.0	0.35	0.63	0.71	0.94	1.12	1.21
	4.0	0.42	0.74	0.95	1.14	1.34	1.46
	5.0	0.53	1.10	1.21	1.43	1.67	1.89

这 3 种级配同一水泥剂量下的劈裂强度值差异并不是很明显,因为水泥稳定破碎砾石混合料中间接拉伸能力主要受集料与水泥水化产物间黏结力的影响,水泥剂量的变化对混合料劈裂强度的影响更明显,级配类型的影响被弱化,劈裂强度受级配类型变化的影响较小。

结合各类型级配的分形维数以及力学性能试验结果,试验采用的 3 种级配设计值的分形维数中 $XM > GM > QM$,力学试验结果中,QM 级配最优,GM 级配次之,XM 级配的力学性能最差,分形维数 D 值可以反映集料的密实程度,XM 级配中细集料含量较多,密实程度较好,但其粗集料形成的骨架提供的嵌挤力不如另外两种级配,导致其无侧限抗压强度和劈裂强度较低。因此对于分形维数评价水泥稳定破碎砾石的级配,并不是分形维数值越大,其性能越好,分形维数值应有一个合理的范围。在水泥稳定破碎砾石的级配设计中,若级配分形维数值过小,则其粗集料含量高,集料整体密实度不足,若分形维数值过大,则细集料含量高,虽整体相对密实但集料形成的骨架提供的嵌挤力不足,可通过控制分形维数值,确保级配中粗细集料的比例适中。根据对 3 种级配的水泥稳定破碎砾石的分形维数及力学性能研究,在级配设计过程中,既能保证水泥稳定破碎砾石有良好的力学性能,且又能使得级配范围适中,有良好的操作性,其合理的级配分形维数值域范围为[2.374 0,2.491 4]。

4 结论

(1) 通过与传统试验方法对比发现,水泥稳定破碎砾石通过振动击实的最大干密度为重型击实的 1.02 倍,振动击实后的最佳含水量为重型击实后的 0.79

倍,振动成型法水泥稳定破碎砾石的无侧限抗压强度和劈裂强度均比静压成型法高,振动法对于水泥稳定破碎砾石也有良好的效果。

(2) 通过对集料级配的分形评价方法进行研究,确定水泥稳定破碎砾石 GM 级配的分形维数值域范围为[2.272 7,2.431 3],XM 级配的值域范围为[2.222 0,2.491 4],根据逐级填充试验和 I 法确定的强嵌挤 QM 级配的分形维数值域范围为[2.374 0,2.505 6]。

(3) 对分形维数与各级配的筛孔通过率进行研究,分形维数 D 值越大,级配越细, D 值越小,级配越粗。分形维数可以反映集料的密实程度, D 值越大,内部的密实程度越好。

(4) 对振动法水泥稳定破碎砾石的力学性能进行研究,力学性能试验结果中 QM 级配最优,GM 级配次之,XM 级配的力学性能相对较差,结合各级配的分形维数值域范围,得出如果级配中细集料含量较多,分形维数值过大,粗集料形成的骨架提供的嵌挤力不足,其力学性能降低。对于振动法水泥稳定破碎砾石的级配分形评价,分形维数值应控制在一定的范围内,合理的级配分形维数值域范围为[2.374 0,2.491 4]。

参考文献:

[1] 李立伟.基于 VTM 水泥稳定碎石设计方法研究[D].长安大学硕士学位论文,2011.
[2] 孙兆辉,王铁斌,许志鸿,等.水泥稳定碎石强度影响因素的试验研究[J].建筑材料学报,2006(3).
[3] 蒋应军,王富玉,刘斌.水泥稳定碎石强度特性的试验研究[J].武汉理工大学学报,2009(15).
[4] 朱云升,杨柳,王开凤,等.用分形几何理论评价旧路面沥青混合料级配变异性[J].公路交通科技,2017(7).

新型玻璃纤维增强复合材料

——轻木夹心桥面板概念、设计及试验验证

李春生¹, 周兴党¹, 高雁波¹, 颜美² 编译

(1.云南省交通规划设计研究院有限公司, 云南 昆明 650041; 2.云南省城乡规划设计研究院)

摘要:描述了位于瑞士贝克斯(Bex)的阿旺松(Avançon)桥梁的概念、设计和试验验证。通过采用轻质玻璃纤维增强复合材料(GFRP)夹心桥面板与钢主梁进行胶黏结的方式,因施工造成的交通中断时间比传统混凝土现浇方式缩短了近40 d(节省约80%的时间),且实现了双车道的扩展。通过半整体式的设计方案,可实现沥青层从桥台至桥面板的连续铺装,从而避免了伸缩缝的使用及简化了维护工作。带有轻木夹心的桥面板在结构性能上满足所有设计准则的要求,包括使用和承载能力极限状态和疲劳性能,然而桥面板尺寸很大程度上取决于选取和采用的设计准则。对于阿旺松桥,德国和英国准则提供了最保守的材料系数,而荷兰准则最不保守;欧洲准则介于两者之间。计算刚度时的材料系数选取会影响桥面板的组成和材料用量。

关键词:桥面板;组合桥梁;夹心桥面板;夹心结构;纤维增强塑料;纤维增强复合材料

玻璃纤维增强复合材料(Glass Fiber-Reinforced Polymer, GFRP)在桥面板中具有良好的应用前景。玻璃复材桥面板有耐腐蚀及轻质等优点,且可快速安装和替换现有的重混凝土桥面板从而实现桥面加宽或升级。玻璃复材桥面板有两种基本形式:①由拉挤型材胶结组成的正交异性桥面板;②夹心桥面板。与前者相比,夹心桥面板具有优越的几何协调性,能适应较大跨度或斜交的桥面结构。夹心桥面板通常由上下表层和中间的蜂窝或泡沫夹心组成。使用泡沫夹心时,一般需要设置额外的玻璃复材腹板来提高夹心层的抗剪承载力。然而,不管是蜂窝还是泡沫夹心,腹板对上表层提供的支撑刚度都不均匀,从而容易造成高频轮载下上表层与夹心层间的剥离。

为同时达到足够的抗剪承载力和均匀的上表层支撑,Keller设计了一种使用轻型混凝土夹心的玻璃复

材—混凝土组合桥面板。另外一种能满足抗剪要求的可选夹心材料则是轻木;其中,木材纤维方向与上表层主向相垂直。

基于轻木优越的力学性能,该文提出一种玻璃复材—轻木夹心桥面板结构,并应用于一座位于瑞士贝克斯横跨阿旺松河流的桥梁。该文介绍这种新型桥面板的概念、设计和试验验证。

1 阿旺松桥的设计和施工

1.1 背景和桥梁尺寸

建于1900年横跨瑞士贝克斯阿旺松河流的一座混凝土老桥因严重的腐蚀问题亟需更新替换。替换后,11.45 m跨桥梁的桥宽由原来的5.3 m增加到7.5 m,从而实现单车道至双车道的扩展。根据瑞士SIA

[5] 彭波,尹光凯,李海宁,等.骨架密实型水泥稳定碎石级配设计与分形评价[J].中外公路,2016(3).

[6] 李立伟,李国峰,蒋应军.基于VTM水泥稳定碎石疲劳强度特性[J].公路工程,2012(4).

[7] 张洪伟,高志伟,常明丰,等.橡胶颗粒沥青混合料矿料级配的分形评价[J].武汉理工大学学报,2011(1).

[8] 王立久,刘慧.基于分形理论嵌挤结构级配设计的研究[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2009(5).

[9] 张飞,于江,李林萍,等.嵌挤密实型沥青混合料级配分形评价[J].中外公路,2013(6).

[10] 李淑明,许志鸿.水泥稳定碎石基层的最低疲劳强度和抗压强度[J].建筑材料学报,2007(2).