

建筑垃圾材料在北京公路工程中的试验研究

李万举, 丛铖东, 王文宏

(北京市道路工程质量监督站 公路监督科, 北京市 100076)

摘要: 建筑垃圾主要分为砖混类、水泥混凝土类, 循环利用可减少道路建设过程中新集料开采。该文以2017年北京市某大修工程为背景, 对水泥稳定砖混类再生材料、水泥稳定水泥混凝土类再生材料路用性能进行试验研究, 通过有限元软件 Ansys 模拟建筑垃圾再生基层路面结构, 进行力学分析, 认为砖混类建筑垃圾再生集料压碎值等关键性指标较弱, 可用于二级以下公路底基层; 水泥混凝土类建筑垃圾再生集料各项指标基本满足规范对于高等级公路基层指标要求, 可替代普通粗、细集料, 但由于破碎、除杂等技术问题, 材料性能可控性较差, 大规模应用存在一定难度; 水泥稳定砖混类再生材料7d无侧限抗压强度满足规范二级及以下公路底基层抗压强度指标要求, 具有良好的工作性能; 水泥稳定水泥混凝土类再生材料7d无侧限抗压强度满足规范高等级公路极重、特重交通基层抗压强度指标要求, 抗压强度稳步增长, 抗冻性能、抗弯拉性能优良, 具有良好的工作性能。

关键词: 公路; 路面结构; 建筑垃圾材料; 试验研究

建筑垃圾材料主要分为砖混类、水泥混凝土类, 循环利用可减少道路建设过程中新集料开采, 符合公路交通行业节能减排和建设资源节约型、环境友好型交通行业要求, 是可持续发展的有效措施。新设计规范 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》已颁布实施, 与原设计标准变动较大, 主要在材料验证和结构验算方面, 该文以新设计规范为基础, 对水泥稳定类建筑垃圾再生材料进行验算, 并结合实际工程进行验证。

1 水泥稳定建筑垃圾再生材料试验研究

砖混类建筑垃圾再生集料多为砖瓦、砌筑砂浆、混凝土等混合物, 是砖混结构物经破碎、除杂、筛分形成的建筑垃圾。由于砖瓦类物质中黏土的存在及其多孔结构, 导致砖混类建筑垃圾含水率变化较大, 同时由于黏土在高温作用下具有较强黏性, 水泥稳定砖混类再生材料拌和、养生过程中, 水泥水化反应产生胶结能力, 释放热量, 使黏土具备一定黏性, 在水泥与黏土的共同作用下, 水泥稳定砖混类再生材料形成一定强度, 但由于砖混类建筑垃圾本身性质(含水率变化大、坚固性等)原因, 水泥稳定砖混类再生材料形成强度过程更为复杂, 拌和、铺筑、养生等过程要求更高。

水泥混凝土类建筑垃圾再生集料多为水泥混凝土等混合物, 经破碎、除杂、筛分形成的建筑垃圾。由于水泥混凝土类建筑垃圾中水泥成分失效, 再生的粗细集料性能类似于普通新集料, 拌和形成的水泥稳定水泥混凝土类再生材料强度形成机理与普通水泥稳定材料类似, 水泥水化反应形成主要强度。

1.1 建筑垃圾再生集料性能

该文选用的砖混类及水泥混凝土类建筑垃圾再生集料均分为3档, 0~5、5~25及25~31.5 mm, 对再生集料主要进行筛分、含泥量、细集料塑性指数、压碎值、软石含量及针片状含量试验研究, 试验结果见表1。

由表1可知, 砖混类建筑垃圾再生集料压碎值偏高, 无法满足 JTG/T F20—2015《公路路面基层施工技术细则》对于高等级公路基层及底基层指标要求, 同时由于砖混类建筑垃圾中砖类的力学特性, 软石含量、0.075 mm以下粉尘含量均超过指标要求, 砖混类建筑垃圾再生集料无法应用在高等级公路基层及底基层; 砖混类建筑垃圾再生集料相关性能满足二级以下公路底基层集料相关指标要求。水泥混凝土类建筑垃圾再生集料各项指标基本满足 JTG/T F20—2015《公路路面基层施工技术细则》对于高等级公路基层指标要求。

1.2 水泥稳定建筑垃圾再生材料性能

砖混类混凝土再生骨料目标应用道路底基层, 压

表 1 建筑垃圾再生集料试验结果

		评价标准(JTG/T F20—2015)								
检验项目	单位	试验结果		层位	高速/一级				二级及以下	
					极/特重交通		其他交通			
		砖混类	水泥混凝土类		I 类	Ⅱ 类	I 类	Ⅱ 类	I 类	Ⅱ 类
压碎值	%	35	25	基层	≤22	≤22	≤26	≤26	≤35	≤30
				底基层	≤30	≤26	≤30	≤26	≤40	≤35
针片状含量	%	11.2	11.6	基层	≤18	≤18	≤22	≤18	—	≤20
				底基层	—	≤20	—	≤20	—	≤20
软石含量	%	5.4	4.1	基层	≤3	≤3	≤5	≤5	—	—
				底基层	—	—	—	—	—	—
0.075 mm 以下粉尘含量	%	2.4	0.9	基层	≤1.2	≤1.2	≤2	≤1.2	—	—
		(25~31.5 mm)	(25~31.5 mm)							
		3.8	0.5	底基层	—	—	—	—	—	—
		(5~25 mm)	(5~25 mm)							
塑性指数		7.3	6.1	—			≤17		—	—
0.075 mm 以下颗粒含量	%	12.5	7.3	—			≤15			≤20
		(0~5 mm)	(0~5 mm)							

实度 97%；水泥混凝土类再生骨料目标应用道路基层,压实度 98%，配合比见表 2。

表 2 水泥稳定建筑垃圾再生骨料混合料配合比

类别	最佳含水率/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)	水泥掺量/%	不同粒径(mm)的配合比/%		
				0~5	5~25	25~31.5
砖混类再生材料	8.30	2.129	5	30	65	5
水泥混凝土类再生材料	11.88	1.914	4	35	60	5

注：水泥掺量为集料质量的百分比。

根据表 2 分别静压成型 φ150 mm×150 mm 圆柱形试件及 150 mm×150 mm×550 mm 短形梁试件,分别进行 7、15、28、90 d 无侧限抗压强度试验,28 d 冻融循环试验、90 d 抗压回弹模量试验、90 d 弯拉强度及弹性模量试验,试验结果见表 3。

由表 3 可知,水泥稳定砖混类再生材料 7 d 无侧限抗压强度完全满足 JTG/T F20—2015《公路路面基层施工技术细则》中二级及以下公路底基层抗压强度指标要求,随着养生天数增加,抗压强度随之增加,抗冻性能、抗弯拉性能优良,具有良好的工作性能。工程所用的水泥稳定砖混类再生材料 90 d 抗压回弹模量与普通水泥稳定碎石相当。综合砖混类建筑垃圾再生集料性质,水泥稳定砖混类再生材料可以应用到二级及以下公路底基层。

水泥稳定水泥混凝土类再生材料 7 d 无侧限抗压强度完全满足 JTG/T F20—2015《公路路面基层施工

表 3 水泥稳定建筑垃圾再生材料试验结果

检验项目	单位	水泥稳定	水泥稳定水
		砖混类再生材料	泥混凝土类再生材料
7 d 抗压强度	MPa	4.2	6.1
15 d 抗压强度	MPa	5.4	7.4
28 d 抗压强度	MPa	6.3	9.8
28 d 5 次冻融循环后抗压强度	MPa	5.3	8.7
冻融试验 抗压强度损失	%	84.2	88.7
90 d 抗压强度	MPa	6.9	10.2
90 d 抗压回弹模量	MPa	1 893.0	2 267.0
90 d 弯拉强度	MPa	1.4	1.7
90 d 弯拉弹性模量	MPa	15 532.0	19 422.0

技术细则》中高等级公路极重、特重交通基层抗压强度指标要求,随着养生天数增加,抗压强度随之增加,抗冻性能、抗弯拉性能优良,具有良好的工作性能。工程所用的水泥稳定水泥混凝土类再生材料 90 d 抗压回弹模量与普通水泥稳定碎石相当。综合水泥混凝土类建筑垃圾再生集料性质,水泥稳定水泥混凝土类再生材料可以应用到高等级公路基层。

2 水泥稳定建筑垃圾再生材料结构组合验算

JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》,2017年9月1日正式施行,较旧版 JTG D50—2006《公路沥青路面设计规范》结构设计验算方面改变较大。该文以新规范为标准,以 2017 年北京市某路大修工程结构为原型(此路设计依据 2006 年版规范),探讨水泥稳定建筑垃圾再生材料路面结构设计及验算。

2.1 旧路调查与研究

通过 FWD 落锤式弯沉仪对铣刨完的旧路进行检测。铣刨清理后的旧路面弯沉值变化较大,主要集中在 0.7~1.2 mm,取代表弯沉值 2.02 mm 进行旧路当量回弹模量计算,采用 FWD 弯沉仪,50 kN 冲击荷载,承载板直径 0.3 m。

根据规范 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》中公式 7.4.4 计算。

$$E_d = \frac{176pr}{l_0} \quad (1)$$

式中: E_d 为路面顶面当量回弹模量(MPa); p 为弯沉仪承载板施加荷载, $p = \frac{50 \times 10^3}{\pi \times (0.3/2)^2} \times 10^{-6} = 0.708$ MPa; r 为承载板半径,取 150 mm; l_0 为承载板中心点弯沉值,取 202(0.01 mm)。

计算得: $E_d = 92.5$ MPa,旧路强度良好。

2.2 加铺层材料检验

2017 年版规范进行结构验算前,要求对加铺层材料相关性能进行试验检验,并确定相关指标参数。背景工程为二级公路,设计年限 8 年,标准轴载累计作用次数 $N_{es} = 3.265 \times 10^6$ 次/车道,加铺层路面结构为上面层 4 cm AC—13,下面层 6 cm AC—20,上基层 18 cm 水泥稳定水泥混凝土类再生材料,下基层 18 cm 水泥稳定水泥混凝土类再生材料,底基层 16 cm 水泥稳定砖混类再生材料。

无机结合料稳定类材料规范要求的指标只有 7 d

无侧限抗压强度及残留抗压强度比,上文对水泥稳定建筑垃圾再生材料两项指标都进行了试验,满足二级公路基层及底基层相关性能要求。

沥青混合料材料性能较 2006 年版规范增加了沥青混合料贯入强度性能验证,参照规范 JTG D50—2017 附录 F 制作了相应规格的压头,分别对加铺层沥青混合料 AC—13 及 AC—20 进行贯入强度试验,旋转压实成型高度 100 mm 试件,60 °C 加载速率 1 mm/min,测得 AC—13 贯入强度 0.84 MPa,AC—20 贯入强度 0.87 MPa。

(1) 根据 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》公式 5.5.8—3 计算路面结构综合贯入强度 R_{cs} :

$$R_{cs} = \sum_{i=1}^n \omega_{is} R_{ci} \quad (2)$$

式中: n 为沥青混合料层数,背景工程为 2 层; ω_{is} 为第 i 层沥青混合料权重,沥青混合料层为 2 层时,自上而下, ω_1 可取 0.44, ω_2 可取 0.56; R_{ci} 为第 i 层沥青混合料贯入强度,第一层为 AC—13, R_{c1} 试验值为 0.84 MPa;第二层为 AC—20, R_{c2} 试验值为 0.87 MPa。

代入式(2),计算得 $R_{cs} = 0.86$ MPa。

(2) 根据 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》公式 5.5.8—2 计算路面结构系数 ϕ_s :

$$\phi_s = (0.52 h_a^{-0.003} - 317.59 h_b^{-1.32}) E_b^{0.1} \quad (3)$$

式中: h_a 为沥青混凝土层厚度,背景工程为 100 mm; h_b 为无机结合料稳定层厚度,背景工程为 520 mm; E_b 为无机结合料稳定层模量,由于规范没有明确多层结构模量如何取值,该文根据两种不同材料 90 d 弯拉弹性模量试验值取平均值取整后确定为 18 000 MPa。

代入式(3),计算得 $\phi_s = 1.146$ 。

(3) 根据 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》公式 5.5.8—1 进行贯入强度验算 R_{cs} :

$$R_{cs} \geq \left(\frac{0.31 \lg N_{es} - 0.68}{\lg [R_a] - 13.1 \lg T_d - \lg \phi_s + 2.50} \right)^{1.86} \quad (4)$$

式中: T_d 为设计温度,北京地区月平均气温大于 0 °C,各月份气温平均值,17 °C; $[R_a]$ 为沥青混合料层容许永久变形量,根据公路等级查表(JTG D50—2017 表 3.0.6—1)确定为 20 mm; N_{es} 为标准轴载累计作用次数,为 3.265×10^6 次/车道。

代入式(4),计算得 $R_{cs} = 0.86 \geq 0.02$ 。

可见使用水泥稳定建筑垃圾再生材料沥青路面结构满足二级公路贯入强度验算要求。

2.3 路面结构验算

该文主要对水泥稳定建筑垃圾再生材料进行研

究,由于应用层位为大修道路基层,需要对无机结合料稳定层疲劳开裂进行验算,设计指标、力学响应及竖向位置如表 4 所示,路面结构材料相关指标如表 5 所示。

AC-13、AC-20采用20℃、10 Hz条件下动态

表 4 设计指标力学响应及竖向位置

设计指标	力学响应	竖向位置
无机结合料稳定	沿行车方向的	无机结合料
层层底拉应力	水平拉应力	稳定层层底

表 5 路面结构材料指标

结构层	厚度/mm	模量/MPa	调整后模量/MPa	泊松比
AC-13	40	9 000.0	—	0.25
AC-20	60	10 000.0	—	0.25
水泥稳定水泥混凝土类再生材料	180	19 000.0	9 500	0.25
水泥稳定水泥混凝土类再生材料	180	19 000.0	9 500	0.25
水泥稳定砖混类再生材料	160	16 000.0	8 000	0.25
铣刨后旧路	—	92.5	—	0.25

压缩模量试验值,水泥稳定建筑垃圾再生材料采用 90 d 弯拉弹性模量试验值,旧路模量为落锤式弯沉仪测量确定,泊松比参照规范 JTG D50-2017 表 5.6.1 确定。

力学响应计算点位置如图 1 所示,选取 4 点位置计算最大力学响应值。

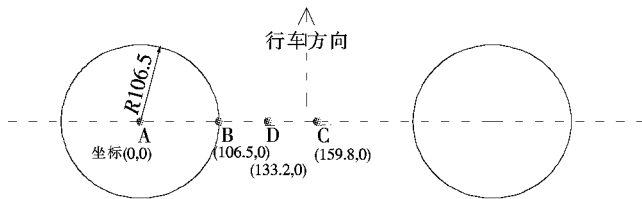


图 1 力学响应计算点位置图(单位:mm)

采用 Ansys 软件,计算荷载采用标准荷载 BZZ-100,轮胎接地压强为 0.7 MPa,当量圆半径为 10.65 cm,两轮中心距为 3 倍当量圆半径,A 点设置为当量圆原点 0 mm,B 点为 106.5 mm,C 点为 159.8 mm,D 点为 133.2 mm。

计算结果如表 6 所示。

表 6 Ansys 软件力学响应值计算结果

计算点 位置	层底拉应力/MPa		
	上基层	下基层	底基层
A	0.005 768	0.070 77	0.127 1
B	0.005 509	0.069 44	0.124 6
C	0.004 912	0.067 79	0.121 5
D	0.005 278	0.068 69	0.123 2

选取位置 A 层底拉应力 σ_t 作为计算值,根据规范 JTG D50-2017 中公式 B.2.1-2 计算现场综合修正系数 $k_c=c_1 e^{c_2(h_a+h_b)}+c_3$,按照规范 JTG D50-2017 表 B.2.1-2 取值, $c_1=18.5$ 、 $c_2=-0.01$ 、 $c_3=-1.32$,

h_a 为沥青混合料层厚度取 10 mm, h_b 为计算点以上无机结合料稳定层厚度,上基层层底取 180 mm,下基层层底取 360 mm,底基层层底取 520 mm。

计算得: $k_{c-上基层}=1.447$, $k_{c-下基层}=-0.863$, $k_{c-底基层}=-1.228$ 。

根据规范 JTG D50-2017 中公式 B.2.1-1 计算各无机结合料稳定层的疲劳开裂寿命 N_{f2} 。

$$N_{f2}=k_a k_{T2}^{-1} \times 10^{a-b \frac{\sigma_t}{k_a} + k_c - 0.57 \beta}$$

式中: k_a 为季节性冻土地区调整系数,取 0.8; k_{T2} 为温度调整系数,取 1.23; a 、 b 为疲劳试验回归参数,根据 JTG D50-2017 表 B.2.1-1 确定, $a=13.24$ 、 $b=12.52$; β 为目标可靠指标,二级公路取 1.04。

计算得: $N_{f2-上基层}=6.56 \times 10^{13}$ 次/车道, $N_{f2-下基层}=3.09 \times 10^{10}$ 次/车道, $N_{f2-底基层}=1.75 \times 10^9$ 次/车道。

三层水泥稳定建筑垃圾再生材料疲劳开裂寿命远远大于标准轴载累计作用次数 3.265×10^6 次/车道,满足无机结合料稳定层疲劳开裂验算要求。

3 结论

(1) 砖混类建筑垃圾再生集料压碎值等关键性指标较弱,建议用于二级以下公路底基层;水泥混凝土类建筑垃圾再生集料各项指标基本满足高等级公路基层指标要求,可替代普通粗、细集料,但由于破碎、除杂等技术问题,使用前需要对各项关键指标进行试验检验,加大抽检频率。

(2) 水泥稳定砖混类再生材料 7 d 无侧限抗压强度满足二级及以下公路底基层抗压强度指标要求,抗

测试方法对沥青混合料动态模量取值的影响

刘胜^{1,2}, 刘靖宇¹

(1.长沙理工大学, 湖南 长沙 410114; 2.湖南省交通科学研究院有限公司)

摘要: 单轴压缩动态模量是沥青路面的重要设计参数,为明确不同测试方法对模量取值的影响,通过试验研究发现: Haversine 波比半正弦波和三角波测得的动态模量高 20%~50%, $\phi 100\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 圆柱体试件测得动态模量比 $\phi 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 高 20%~60%; 10 Hz 频率下连续加载方式测得的动态模量比间歇加载高 20%; 对试件端部进行处治能有效削弱端部效应的影响,采用外接传感器进行回弹变形采集精度更高。并建立了两种不同尺寸试件回弹模量之间的线性关系。

关键词: 道路工程; 动态回弹模量; 单轴压缩; 加载波形; 试件尺寸; 变形采集

单轴压缩状态的回弹模量是国内外沥青道路的主要设计参数,美国从 20 世纪 70 年代就致力于动态模量的研究,并于 2004 年的 NCHRP 子报告 1-37A 中完成了 Simple Performance Tester(SPT)及其试验方法的研发。采用两点弯曲模式对 T 形梁试件进行动态加载,其试验体系广泛应用于欧洲。与国外相反,中国 1986 版设计规范、1997 版设计规范、2006 版设计规范一直沿用静态回弹模量,到 2017 版设计规范实现了从静到动的转变,并确定以 2011 版试验规程中的单轴压缩试验(T0738)作为动态模量的测试方法。

然而,由于长年静态模量经验累积的主观认知存在差异,加之工地试验仪器达不到要求,在实用中测定动态模量的方法不统一,主要体现在:① 荷载状态,现行规范规定了两种加载波形,但并没有明确不同加载波形带来的差异;② 试件尺寸,规范要求的 $\phi 100\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 圆柱体试件成型难度较高,需先 SGC 成型 $\phi 150\text{ mm} \times 170\text{ mm}$ 试件,通过切割、钻芯等一系列操作,方可进行测试,相对而言 $\phi 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 尺寸试件因其成型简便、用料节约而更受青睐;③ 变形采集方式,过去采集的静态模量数据往往采用千分表等

压强度稳步增长,抗冻性能、抗弯拉性能优良,具有良好的工作性能。

(3) 水泥稳定水泥混凝土类再生材料 7 d 无侧限抗压强度满足高等级公路极重、特重交通基层抗压强度指标要求,抗压强度稳步增长,抗冻性能、抗弯拉性能优良,具有良好的工作性能。

(4) JTG D50-2017《公路沥青路面设计规范》对于沥青路面结构验算变化较大,水泥稳定建筑垃圾再生材料完全满足沥青混合料贯入强度性能验证及疲劳开裂验算要求,建议设计院所及检测公司根据设计规范要求配备相关设备,通过试验确定原材料性能。

参考文献:

- [1] JTJ F41-2008 公路沥青路面再生技术规范[S].
- [2] JTG D50-2017 公路沥青路面设计规范[S].

- [3] JTG D50-2006 公路沥青路面设计规范[S].
- [4] JTG/T F20-2015 公路路面基层施工技术细则[S].
- [5] 孙丽蕊,田明阳,梁勇,等.水泥稳定再生骨料无机混合料在道路基层中的应用[J].市政技术,2016(6).
- [6] 张志清,丛铖东,隰文博,等.泡沫沥青冷再生混合料在道路大修工程中的应用研究[J].北京工业大学学报,2014(8).
- [7] 李晓静.建筑垃圾作为基层材料的轻交通量公路路面结构研究[D].西南科技大学硕士学位论文,2013.
- [8] 鲁攀,王明,祝学涛,等.水泥稳定废砖再生集料的路用性能研究[J].中外公路,2016(2).
- [9] TaraLani Cavalline. Recycled Brick Masonry Aggregate Concrete: Use of Recycled Aggregates from Demolished Brick Masonry Construction in Structural and Pavement Grade Portland Cement Concrete[D]. Ph.D Thesis of the University of North Carolina, 2012.

收稿日期:2018-11-30

作者简介:刘胜,男,硕士,E-mail: 491201230@qq.com