

掺加 RAP 的骨架密实型级配碎石性能

苗英豪, 郭利彦, 刘 聪, 郑晓恒

(北京工业大学交通工程北京市重点实验室, 北京 100124)

摘要:为了解决沥青路面回收料(reclaimed asphalt pavement, RAP)在级配碎石中应用的问题,研究了RAP对骨架密实型级配碎石性能的影响.在室温(22℃)条件下,采用UTM-100对纯碎石及掺加RAP的骨架密实型级配碎石进行了动态模量、抗剪强度和永久变形对比试验.依据试验结果,分析了RAP对级配碎石性能的影响.研究表明,掺加RAP后,骨架密实型级配碎石动态回弹模量显著增大,平均增幅9.3%,模量增幅受围压和偏压围压比不同程度的影响,其中偏压围压比的影响较围压更为显著.抗剪强度有所减小,且应力软化阶段应力下降速率较慢.在发生剪切破坏时,与不掺加RAP的级配碎石具有相似的剪胀特征.轴向永久变形随RAP的加入显著增大,表明抵抗永久变形能力有所下降.

关键词: 沥青路面回收料(RAP); 级配碎石; 回弹模量; 抗剪强度; 永久变形

中图分类号: U 416.2

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2017)10-1497-05

doi: 10.11936/bjutxb2017010013

Performance of Coarse Graded Unbound Granular Materials Containing RAP

MIAO Yinghao, GUO Liyan, LIU Cong, ZHENG Xiaoheng

(Beijing Key Laboratory of Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In order to solve the problem of the application of reclaimed asphalt pavement (RAP) in unbound granular materials, an investigation into the effect of RAP on the performance of coarse graded unbound granular materials was conducted. A series of laboratory tests used UTM-100 including the repeated load triaxial test, the quick shear test and the permanent deformation test were performed on coarse graded UGMs containing RAP as well as UGMs of neat virgin aggregates at room temperature (22℃). The effect of RAP on the performance of unbound granular materials was analyzed in accordance with the experimental results. The test results show that after adding RAP, the dynamic resilient modulus of coarse graded unbound granular materials increase obviously, and the average growing rate is 9.3%. The growing rate is affected by confining pressure and the ratio of bias to confining pressure. And the ratio of bias to confining pressure has more significant influence. The shear strength decrease and the decreasing rapid is slower in stress softening stage. When shear failure occurs, coarse graded unbound granular materials have similar dilatancy effect. Axial permanent deformation increases distinctly, which shows material's resistance to permanent deformation declined.

Key words: reclaimed asphalt pavement (RAP); graded unbound granular material; resilient modulus; shear strength; permanent deformation

收稿日期: 2017-01-09

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2014BAC07B00)

作者简介: 苗英豪(1975—),男,副教授,主要从事道路工程方面的研究, E-mail: miaoyinghao@bjut.edu.cn

沥青路面是我国公路的主要路面类型,随着公路养护与改建里程的不断增加,产生了越来越多的沥青路面回收料(reclaimed asphalt pavement, RAP). 通常在多种形式的再生沥青混合料中对RAP加以利用^[1-3]. 但由于RAP数量较大,再生沥青混合料中RAP的掺量也受到一定制约,通过再生沥青混合料的方式难以全部消纳. 一些学者围绕RAP在级配碎石中的应用取得了一些研究成果^[4-6]. 但由于RAP的来源、级配、沥青质量分数等构成比较复杂,对级配碎石性能的影响仍需深入研究. 本文以骨架密实型级配碎石为背景,在室温(22℃)条件下,利用动态模量、抗剪强度和永久变形试验,通过与纯碎石级配碎石的比较,探究RAP对级配碎石性能的影响,为RAP在级配碎石柔性基层中的应用提供参考.

1 材料和试验

1.1 材料

本文试验中所用集料为石灰岩碎石,RAP有2种级配,分别记为RAP-1和RAP-2. RAP-1和RAP-2的级配见表1,RAP-1和RAP-2的沥青质量分数分别为5.300%和6.940%,掺加RAP级配碎石的总沥青质量分数为1.167%. 为研究RAP的加入对骨架密实型级配碎石性能的影响,根据《公路沥青路面设计规范》中建议的骨架密实型级配范围^[7],分别设计了完全采用碎石的级配碎石材料和掺加RAP的级配碎石材料,为了叙述方便,分别记为VA-UGM和RAP-UGM. 为了排除级配差异的影响,设计中保持VA-UGM和RAP-UGM的级配基本一致,在RAP-UGM中,RAP-1质量分数为5.000%,RAP-2质量分数为13.000%,设计结果见表2,图1给出了VA-UGM和RAP-UGM的级配曲线.

表1 RAP筛孔通过百分率

Table 1 RAP each sieve through rate and specification limits

类型	筛孔尺寸/mm									%
	13.200	9.500	4.750	2.360	1.180	0.600	0.300	0.150	0.075	
RAP-1	100.00	95.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
RAP-2	100.00	100.00	100.00	39.99	14.12	5.50	1.46	0.93	0.66	

表2 级配各筛孔通过百分率

Table 2 Gradation each sieve through rate and specification limits

类型	筛孔尺寸/mm													%
	31.500	26.500	19.000	16.000	13.200	9.500	4.750	2.360	1.180	0.600	0.300	0.150	0.075	
VA-UGM	100.00	90.40	72.90	49.40	41.90	36.80	31.00	23.20	15.70	10.30	6.87	5.00	3.70	
RAP-UGM	100.00	90.40	73.50	48.30	42.40	38.20	32.30	24.50	15.50	10.50	6.79	4.74	3.72	

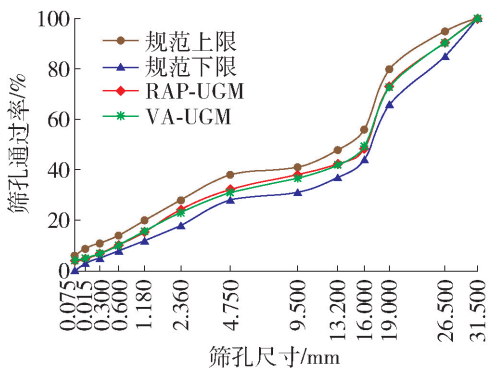


图1 级配曲线

Fig. 1 Gradation curves

1.2 试验方案

首先针对VA-UGM和RAP-UGM,根据《公路土

工试验规程(JTG E40—2007)》^[8]进行击实试验,确定VA-UGM的最佳含水量为4.0%,最大干密度为2.53 g/cm³,RAP-UGM的最佳含水量为4.0%,最大干密度为2.56 g/cm³. 之后分别进行回弹模量、快剪及永久变形试验.

回弹模量和快剪试验参照AASHTOTP307—99方法^[9],利用IPC公司生产的伺服液压多功能材料试验系统(UTM-100)进行试验. 试件为直径150 mm高300 mm的圆柱形,试件成型采用人工手动重型击实法,分5层击实,分层填料要均匀,控制压实高度,最后一层要注意试件的击实压平. 为保证试验结果可靠度,每组平行试验至少有2个有效试件,文中呈现的所有测试数据均为有效测试试件的平均值. 回弹模量试验为周期循环加载,加载周期为1 s,

荷载作用时间 0.1 s, 间歇时间 0.9 s, 加载波形为半正矢波. 试验中考虑多个应力组合的加载序列, 包括 1 个预荷载序列和 15 个正式荷载序列, 荷载序列见表 3.

表 3 回弹模量试验荷载序列
Table 3 Stress loading cycle sequence

循环序列	围压/ kPa	最大轴 向应力/ kPa	循环 应力/ kPa	恒应 力/ kPa	加载 次数
0	103.4	103.4	93.1	10.3	1 000
1	20.7	20.7	18.6	2.1	100
2	20.7	41.4	37.3	4.1	100
3	20.7	62.1	55.9	6.2	100
4	34.5	34.5	31.0	3.5	100
5	34.5	68.9	62.0	6.9	100
6	34.5	103.4	93.1	10.3	100
7	68.9	68.9	62.0	6.9	100
8	68.9	137.9	124.1	13.8	100
9	68.9	206.8	186.1	20.7	100
10	103.4	68.9	62.0	6.9	100
11	103.4	103.4	93.1	10.3	100
12	103.4	206.8	186.1	20.7	100
13	137.9	103.4	93.1	10.3	100
14	137.9	137.9	124.1	13.8	100
15	137.9	275.8	248.2	27.6	100

快剪试验在动态回弹模量测试完成之后连续进行(与动态模量试验为同一试件). 级配碎石材料的强度具有应力依赖性, 发生剪切破坏时, 剪切并非都在同一平面上, 试件的上部、下部完好, 而中间部位向四周膨胀, 从而失去强度, 具有明显剪胀性特征, 基于空间结构的八面体剪切模型充分考虑了测试应力组合状态, 能够更好地模拟实际情况. 快剪试验采用竖向加载模式, 以 1 mm/min 的加载速度, 在 34.5 kPa 围压下进行, 当试件破坏或应变超过 5% 时试验结束. AASHTO TP307-99 的快剪试验并不是一个严格意义上的抗剪强度试验, 本文以八面体剪应力(τ_0)峰值作为抗剪强度进行分析.

$$\tau_0 = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}$$

式中 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 为主应力, 在本次试验中, σ_2 、 σ_3 同为围压值 34.5 kPa.

级配碎石永久变形特性受应力水平、应力状态的影响较大. 重复加载三轴试验是测定级配碎石永久变形普遍采用的方法, 试验分单一应力状态和多应力状态两种基本方式. 目前关于围压和偏应力与永久变形之间的关系仍有待深入研究. 本文采用单一应力状态重复加载三轴试验, 加载周期为 1 s, 荷载作用时间 0.1 s, 间歇时间 0.9 s, 加载波形为半正矢波. 在 103.4 kPa 围压下, 以 103.4 kPa 偏压作用 500 次, 作为预加载. 之后进入正式加载, 在 68.9 kPa 围压下, 以 206.8 kPa 偏压作用 10 000 次, 分析荷载作用次数与变形之间的关系. 试件为直径 150 mm 高 150 mm 的圆柱形, 成型方法仍然采用人工手动重型击实法, 分 3 层击实, 每层控制高度.

2 动态模量分析

图 2 给出了不同荷载序列 VA-UGM 和 RAP-UGM 动态模量的对比图. 由图 2 可以直观看出 RAP 的掺加一定程度上提高了级配碎石的回弹模量, 平均增幅 9.3%. 以 VA-UGM 动态模量为基准, 可以得到各荷载序列不同围压及偏压作用下动态模量的变化百分数, 动态模量相对变化百分数见表 4.

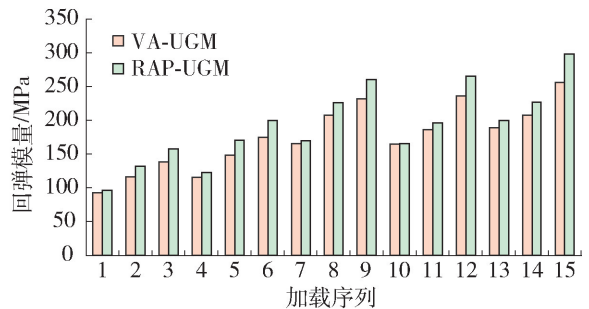


图 2 掺加 RAP 前后骨架密实型级配动态回弹模量

Fig. 2 Mr of the UGMs at all load sequences

表 4 动态模量相对变化百分数

Table 4 Relative change percent of Mr

围压/ kPa	偏压围压比			
	0.67	0.75	1.00	2.00
20.7			4.36	12.4
34.5			5.47	14.53
68.9			2.65	8.76
103.4	0.69		5.37	12.39
137.9		6.13	9.57	16.71

从表 4 可以看出, 当围压为 137.9 kPa, 偏压围压比为 2.00 时, 动态模量相对变化最大. 取表 4 中

围压 20.7 ~ 68.9 kPa (因素 A), 偏压围压比 1.00 ~ 3.00 (因素 B) 范围内的数据进行双因素方差分析得 $F_A = 8.162, F_B = 66.438$, 由于 $F_{0.05}(2, 4) = 6.94 < F_A < F_{0.01}(2, 4) = 18, F_{0.01}(2, 4) = 18 < F_B$, 所以可以认为围压对动态模量相对变化值有显著影响, 偏压围压比对动态模量相对变化值有极显著影响。

参照力学经验法路面设计指南 (MEPDG) 回弹模量预估模型^[10]对试验值进行非线性回归, 模型表达式为

$$M_r = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_o}{p_a} + 1 \right)^{k_3}$$

式中: M_r 为弹性模量; θ 为体积应力; τ_o 为八面体剪应力; p_a 为大气压力 (101.4 kPa); k_1, k_2, k_3 为模型回归系数。最终得到 VA-UGM 拟合结果为: $k_1 = 968.2, k_2 = 0.1471, k_3 = 1.0139, R^2 = 0.9476$; RAP-UGM 拟合结果为: $k_1 = 1029.9, k_2 = 0.1316, k_3 = 1.1710, R^2 = 0.9616$ 。由拟合结果可以发现回归方程 R^2 值较大, 说明回归效果显著, 且 RAP-UGM 的动态回弹模量拟合效果较好, 表明 MEPDG 预估模型对于拟合 RAP-UGM 的动态模量 M_r 是足够可靠和有效的。

3 抗剪强度分析

图 3 给出了 VA-UGM 和 RAP-UGM 快剪试验的典型应力-应变曲线。由图 3 可知, 相对于 VA-UGM, RAP-UGM 的应力峰值较小, 且应力软化阶段应力下降速率较慢。掺加 RAP 也影响了骨架密实型级配碎石材料的八面体抗剪强度, VA-UGM 的八面体抗剪强度为 231.930 kPa, RAP-UGM 则下降为 208.504 kPa, RAP 的掺加导致级配碎石的抗剪强度

有所减小。级配碎石在发生剪切破坏后试件具有剪胀性特征, 一定程度上表明八面体抗剪强度模型能够反映级配碎石剪切破坏的实际情况。

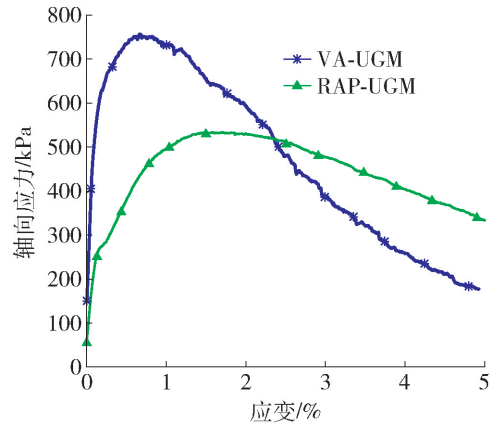


图 3 快剪试验应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain relationship of the quick shear test

4 永久变形分析

在永久变形试验过程中 VA-UGM 及 RAP-UGM 的轴向变形曲线如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 试件的轴向总变形和永久变形量在试验初期有显著变化, 随着荷载重复作用次数的增加, 增加趋势有所减缓, 直至最后趋于稳定; RAP-UGM 的轴向总变形和永久变形量相比 VA-UGM 有明显程度的增加, 抗变形能力减小。为了更加直观地反映在室温及同应力水平下掺加沥青旧料对骨架密实型级配碎石永久变形的影响, 对试验数据进行进一步处理, 绘制了 VA-UGM 和 RAP-UGM 永久变形对比图, 如图 5 所示。

从图 5 可以得出: VA-UGM 永久变形在 0.35 mm

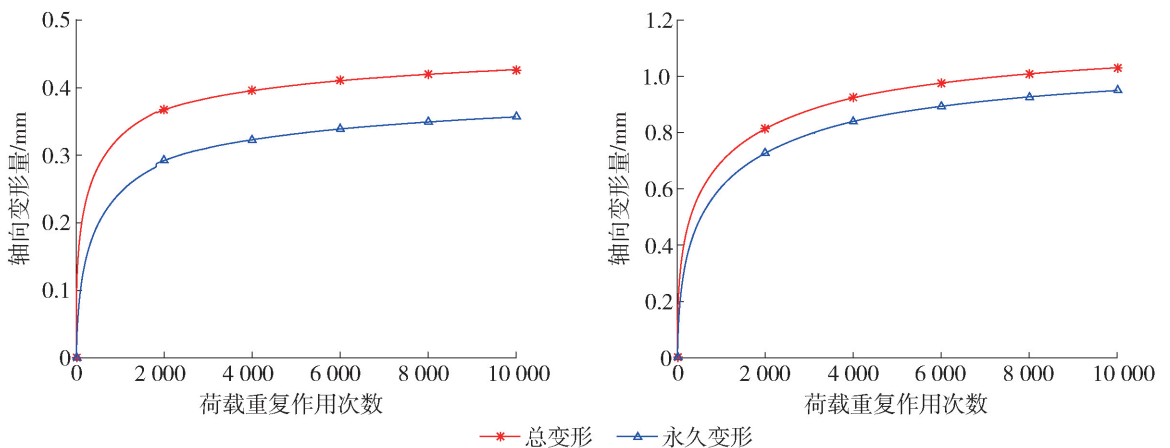


图 4 轴向变形曲线

Fig. 4 Axial deformation curves

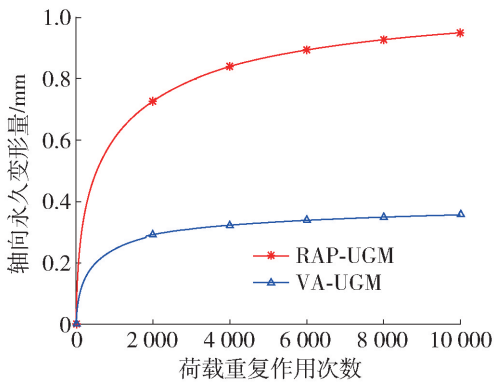


图5 掺加RAP前后试件轴向永久变形量

Fig.5 Axial permanent deformation curve of UGMs

左右,RAP-UGM的永久变形量在0.95 mm左右,永久变形量明显变大,试件的抗永久变形能力有所减小.VA-UGM和RAP-UGM的轴向永久变形量具有相同的变化趋势,即在试验初期有显著变化,VA-UGM的大部分永久变形量在重复荷载作用前2000次会基本完成,RAP-UGM的大部分永久变形量在重复荷载作用前6000次也基本完成.随着荷载作用次数的增加,增加趋势明显减缓,单次加载产生的变形量越来越小,曲线在荷载作用次数为10000处的斜率皆为 2×10^{-5} ,表明试件轴向永久变形最后趋于稳定.

5 结论

1) 掺加沥青旧料后,骨架密实型级配碎石的回弹模量增大,围压对动态模量相对变化值有显著影响,偏压围压比对动态模量相对变化值有极显著影响;MEPDG模型对于拟合RAP-UGM的动态模量 M_r 是足够可靠和有效的.

2) 掺加沥青旧料后,骨架密实型级配碎石材料的八面体抗剪强度值有所减小,相对于VA-UGM,RAP-UGM的应力峰值较小,且应力软化阶段应力下降速率较慢,此外,级配碎石在发生剪切破坏时具有剪胀性特征.

3) 掺加沥青旧料后,骨架密实型级配碎石的轴向总变形量、永久变形量及回弹变形量都有一定程度的变大,VA-UGM大部分的永久变形量在重复荷载作用前2000次会基本完成,RAP-UGM大部分的永久变形量在重复荷载作用前6000次也基本完成.RAP的加入使得级配碎石抵抗永久变形的能力有所减小.随着荷载作用次数的增加,级配碎石试

件会产生回弹变形和永久变形,且试件的永久变形逐渐增大.

参考文献:

- [1] 汤文,盛晓军,谢旭飞,等.回收料掺量对温拌再生沥青混合料性能的影响[J].建筑材料学报,2016,19(1):204-208.
TANG W, SHENG X J, XIE X F, et al. Performance of warm mixture containing different RAP contents [J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(1): 204-208. (in Chinese)
- [2] 薛彦卿,黄晓明.厂拌热再生沥青混合料力学性能试验研究[J].建筑材料学报,2011,14(4):507-511.
XUE Y Q, HUANG X M. Experimental research on mechanical property of asphalt mixture from central plant hot recycling[J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(4): 507-511. (in Chinese)
- [3] ALQADI I L, ELSEIFI M, CARPENTER S H. Reclaimed asphalt pavement—a literature review [R]. Chicago: Illinois Center for Transportation, 2007.
- [4] MONTEPARA A, TEBALDI G, MARRADI A, et al. Effect on pavement performance of a subbase layer composed by natural aggregate and RAP [J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2012, 53(53): 980-989.
- [5] QIAO D, HUANG B. Laboratory evaluation on resilient modulus and rate dependencies of RAP used as unbound base material [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 26(2): 379-383.
- [6] ARULRAJA H, PIRATHEEPAN J, DISFANI M M. Reclaimed asphalt pavement and recycled concrete aggregate blends in pavement subbases: laboratory and field evaluation [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 26(2): 349-357.
- [7] 中交公路规划设计院.公路沥青路面设计规范:JTG D50—2004[S].北京:人民交通出版社,2006.
- [8] 交通部公路科学研究所.公路土工试验规程:JTG E40—2007[S].北京:人民交通出版社,2007.
- [9] AASHTO. Standard method of test for determining the resilient modulus of soils and aggregate materials twentieth edition: TP307-99 [S]. Washington D C: American Association of State Highway and Transportation Officials, 1999.
- [10] AASHTO. Mechanistic-empirical pavement design guide [S]. Washington D C: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008.

(责任编辑 郑筱梅)