

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2022.01.041

建筑固体废物再生粒料基层混合料的永久变形特性研究

黎小华¹, 肖杰^{2,3}, 吴超凡^{3,4}, 杨敏^{2,5}, 张继森^{3,4}

(1. 资兴市农村公路建设管理站, 湖南 资兴 423400; 2. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114;
3. 湖南省建筑固体废物资源化利用工程技术研究中心, 湖南 长沙 410021; 4. 湖南云中再生科技股份有限公司, 湖南 长沙 410021;
5. 江西省交通设计研究院有限责任公司, 江西 南昌 330052)

摘要:为研究建筑固体废物再生粒料混合料的永久变形特性,采用天然集料(NA)、再生混凝土集料(RCA)、再生砖渣与混凝土集料(RBCA)3种粒料混合料,开展不同围压、含水率及主应力比对变形的影响研究,确定混合料的永久变形拟合模型。结果表明:围压越大,3种粒料混合料的变形均显著减小,其在抵抗变形中起着十分重要的作用;相同围压下,变形量与变形速率随主应力比的增大而增大;永久变形在加载初期增加较大,然后逐渐变小;小围压、低主应力比时,永久变形为NA最大,RBCA次之,RCA最小,但大围压、高主应力比时,NA的永久变形最小,RBCA与RCA的相差不大。

关键词: 道路工程; 建筑固体废弃物; 粒料基层; 永久变形

随着中国基础建设及城市化的快速发展,每年产生的建筑固体废物数量巨大。以往,采用常规简单粗放的集中堆放或填埋方式进行处理,导致社会与环保问题日益严峻^[1-2]。建筑废物的主要成分是废弃混凝土、砖、砂浆及少量铁、玻璃、木屑与塑料等杂质。通过一系列分拣、破碎等方式将建筑固体废物变为可利用的再生集料,作为粒料材料用作路面基层是其再生利用的一种有效途径。

关于再生集料用作路面粒料基层已有大量学者^[3-9]进行过物理力学性能研究,但根据路面粒料基层的实际受力状态,考虑围压、应力比与含水率等因素对建筑固体废物再生集料变形性能的影响研究还很少。该文基于路面粒料基层的受力特性,通过逐级加载三

轴试验研究围压、应力比、含水率对再生混凝土(RCA)、再生砖与混凝土(RBCA)和天然集料(NA)混合料变形的影响,开展不同应力比的3种混合料动三轴试验,研究各混合料的永久变形特性。

1 试验用原材料

原材料共3种,分别为NA、RCA以及RBCA。NA为天然石灰岩。RCA为废旧混凝土块。RBCA含RCA、砖渣及少量陶渣和玻璃渣等,其中砖渣约占30%(质量百分比,下同),陶渣、玻璃渣等含量不足0.5%。3种粗集料物理力学性质见表1。NA、RCA和RBCA细集料的表观密度分别为2.501、2.250和

表1 粗集料性质

| 粒料混合料 | 各档集料(mm)表观密度/(kg·m ⁻³) | | | | 各档集料(mm)吸水率/% | | | | 各档集料(mm)针片状含量/% | | | 压碎值/% |
|-------|------------------------------------|-------|-------|-------|---------------|------|-------|-------|-----------------|------|-------|-------|
| | 19~ | 9.5~ | 4.75~ | 2.36~ | 19~ | 9.5~ | 4.75~ | 2.36~ | 19~ | 9.5~ | 4.75~ | |
| | 26.5 | 19 | 9.5 | 4.75 | 26.5 | 19 | 9.5 | 4.75 | 31.5 | 19 | 9.5 | |
| NA | 2.446 | 2.498 | 2.521 | 2.548 | 0.36 | 0.50 | 0.64 | 2.00 | 3.6 | 9.1 | 8.2 | 21.2 |
| RCA | 2.211 | 2.231 | 2.256 | 2.300 | 6.40 | 7.13 | 7.70 | 9.01 | 3.1 | 6.9 | 7.6 | 32.1 |
| RBCA | 1.811 | 1.877 | 1.923 | 1.946 | 6.55 | 7.43 | 8.21 | 9.47 | 3.6 | 7.9 | 7.5 | 34.5 |

收稿日期:2021-03-20(修改稿)

基金项目:湖南省科技支撑计划项目(编号:2015SK2063);长沙市科技计划项目(编号:kc1804053)

作者简介:黎小华,男,工程师,E-mail:2209899458@qq.com

* 通信作者:肖杰,男,博士,副教授,E-mail:xiaojie324@csust.edu.cn

1.874 kg/m³, 吸水率分别为 3.50%、8.99% 和 10.21%, 塑性指数分别为 7.6、7.9 和 7.3。

NA、RCA 和 RBCA 3 种粒料混合料级配均采用 JTG/T F20—2015 中表 4.5.8 推荐的 G—A—3 级配范围的中值。为使混合料集料的级配一致, 将 3 种集料分别过 26.5、19.0、9.5、4.75、2.36、0.6 和 0.075 mm 筛, 分成 7 档料备用。

采用重型击实法确定粒料混合料的最大干密度与最佳含水率 (OMC), NA 混合料为 2.28 g/cm³ 和 5.7%、RCA 混合料为 2.01 g/cm³ 和 11.16%、RBCA 混合料为 1.84 g/cm³ 和 12.7%。

2 永久变形试验方案设计

2.1 永久变形影响因素试验

已有研究表明^[9], 粒料基层内的典型应力水平 σ_1 和 σ_3 分别为 100~250 kPa 和 0~100 kPa, 主应力比 σ_1/σ_3 为 1.2~7.9, 主要分布在 1.4~5.1。根据粒料基层所处的应力状态, 该文选用 30、50 和 70 kPa 3 个较典型的围压作为试验围压。试样尺寸为直径 100 mm、高 200 mm, 采用动三轴试验仪进行循环加载, 加载波形为间断半正弦偏应力波, 频率 1 Hz, 持续加载 0.1 s, 间隔 0.9 s。在最佳含水率和 98% 压实度条件下制备 3 种粒料混合料的三轴试样。

试样采用静压法成型, 尺寸为 $\phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 。先按预定含水率加水, 将集料搅拌均匀后焖料 2 h; 在对开圆形钢模的内壁套一层厚乳胶薄膜, 将混合料均分 5 次分别装入压实, 再静压 3 h; 拆开模具, 取试件立即试验。

围压、含水率与主应力比对变形影响因素试验采用逐级加载序列, 即动应力由小到大依次加载, 加载等级设置为 12 级, 如表 2 所示。每种 σ_3 作用下循环加载 200 次。

2.2 永久变形试验

试验设备、加载形式与制样条件同 2.1 节。7 种围压 (kPa)/应力比分别为 30/2.0、30/3.0、50/4.0、50/5.0、50/5.5、70/6.0 和 70/6.5。NA、RCA 和 RBCA 混合料试件在确定的围压/应力比下加载 10 000 次。

3 试验结果与分析

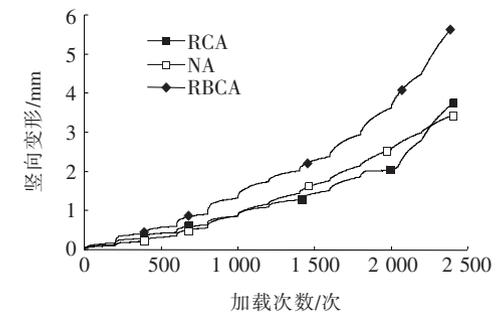
3.1 变形影响因素

3.1.1 围压对变形的影响

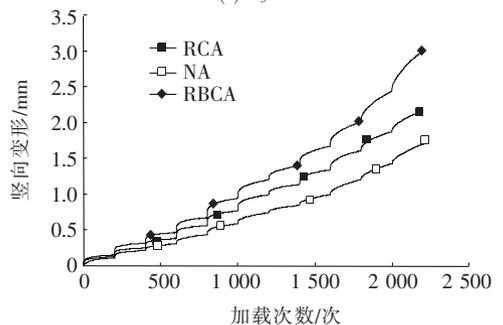
图 1 为 98% 压实度与 OMC 条件, 不同围压 3 种

表 2 混合料逐级加载序列

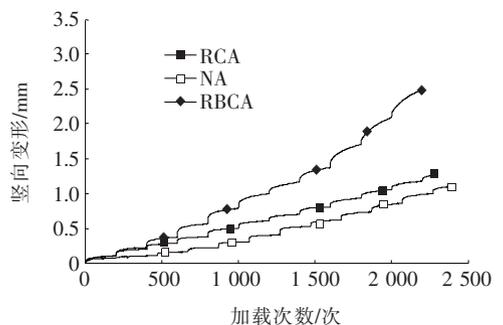
| 序号 | 偏应力/ kPa | 不同围压(kPa)下主应力比 σ_1/σ_3 | | |
|----|-------------|------------------------------------|-----|-----|
| | | 30 | 50 | 70 |
| 1 | 30.0 | 2.0 | 1.6 | 1.4 |
| 2 | 50.0 | 2.7 | 2.0 | 1.7 |
| 3 | 70.0 | 3.3 | 2.4 | 2.0 |
| 4 | 100.0 | 4.3 | 3.0 | 2.4 |
| 5 | 140.0 | 5.7 | 3.8 | 3.0 |
| 6 | 180.0 | 7.0 | 4.6 | 3.6 |
| 7 | 210.0 | 8.0 | 5.2 | 4.0 |
| 8 | 250.0 | 9.3 | 6.0 | 4.6 |
| 9 | 300.0 | 11.0 | 7.0 | 5.3 |
| 10 | 350.0 | 12.7 | 8.0 | 6.0 |
| 11 | 400.0 | 14.3 | 9.0 | 6.7 |
| 12 | 450.0 | 16.0 | — | — |



(a) $\sigma_3=30 \text{ kPa}$



(b) $\sigma_3=50 \text{ kPa}$



(c) $\sigma_3=70 \text{ kPa}$

图 1 竖向变形与逐级加载作用次数的关系图

粒料混合料竖向变形与加载次数的关系图。

由图1可知: σ_3 越大,3种粒料混合料的竖向变形均显著减小,说明 σ_3 在抵抗变形中起着十分重要的作用,其值越大限制作用越强; σ_3 相同,主应力比最大时,RBCA的竖向变形最大、RCA的次之、NA的最小,这可能是试样的初始密度越大,其抵抗变形的能力越强,竖向变形越小;随应力比的增大,连续加载后期RBCA的变形速率增速最快、RCA次之、NA最慢,这可能是因高应力比条件下,砖渣表面棱角最易破坏、旧混凝土次之、新集料最强,导致集料间嵌挤作用依次增强。

3.1.2 含水率对变形的影响

图2为98%压实度、含水率($OMC \pm 2\%$)及 $\sigma_3 = 50$ kPa下,3种粒料混合料竖向变形与逐级加载次数的关系图。最佳含水率混合料的竖向变形与加载次数的变化关系见图1(b)。

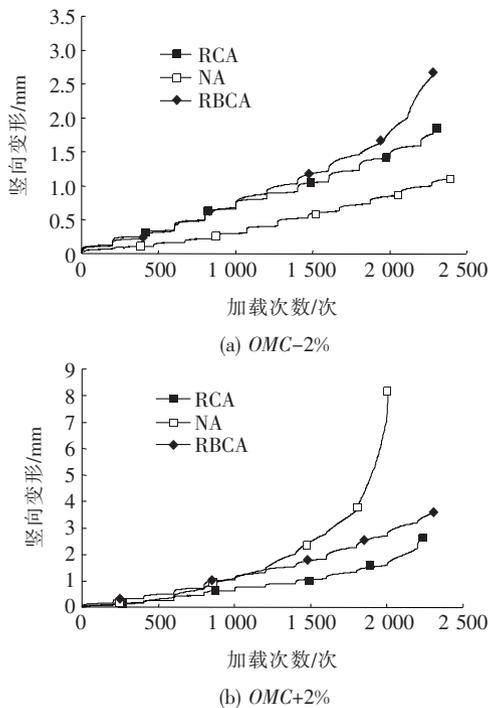


图2 不同含水率下竖向变形与逐级加载次数的关系图

由图2与图1(b)可知:含水率为 OMC 与 $OMC - 2\%$ 时,试验结束时3种粒料混合料竖向变形均为RBCA最大、RCA次之、NA的最小;含水率为 $OMC + 2\%$ 时,前期3种粒料混合料竖向变形相差不大,后期(6级加载后)NA的竖向变形显著增大,远比RBCA与RCA的大,说明3种粒料混合料竖向变形随含水率的增加而增大,降低了混合料的抗变形能力; $OMC + 2\%$ 含水率时,NA竖向变形比RBCA与RCA的变化

更明显,究其原因是:含水率增大,混合料颗粒间更易滑动,永久变形量增大,但与NA相比,RCA中有旧混凝土及砂浆块,另RBCA中还含砖块,这些集料表面更粗糙且孔隙多,吸水能力更强,当含水率大于 OMC 后,再增加2%,NA中自由水远大于RCA与RBCA粒料混合料,导致动水压力增大,颗粒间较易滑动,导致抗剪强度衰减明显,竖向变形增大显著。这由RCA与RBCA粒料混合料的 OMC 分别为11.16%和12.7%远大于NA混合料的5.7%也可间接地获得。

3.1.3 主应力比对变形的影响

图3为98%压实度与最佳含水率条件下,围压为50 kPa时不同应力比的竖向变形与加载次数的关系图。

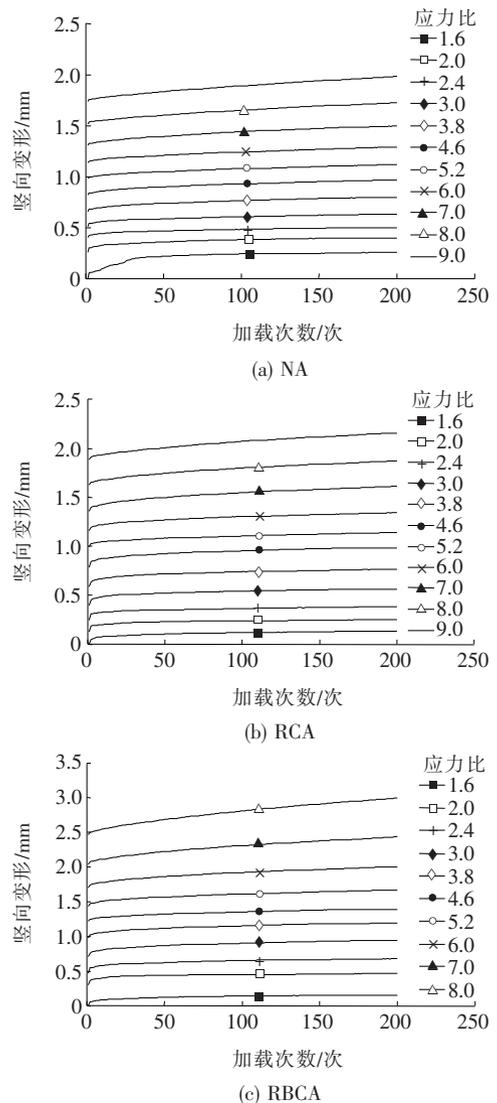


图3 围压50 kPa下不同应力比竖向变形与加载次数的关系图

由图 3 可知:同一围压下,不同混合料竖向变形均随主应力比的增大而增大,且应力比越大,竖向变形速率越显著;主应力比小时,竖向变形由大到小依次为 RCA、NA 和 RBCA,随主应力的增加,该次序变为 RCA、RCA 和 NA,其原因是主应力比小时,集料间嵌挤作用为 RCA 最强、NA 次之,RBCA 最小,随主应力比的增大,RCA 集料表面棱角破坏,抵抗力减弱或消失,而 RBCA 集料因含低强度的砖渣,易于压碎,该作用衰减更显著,此时 NA 的竖向变形量最小。

3.2 永久变形特性

3.2.1 10 000 次重复加载试验

图 4 为重复加载 10 000 次不同混合料各围压/应力比下的竖向变形与加载次数的关系图。

从图 4 可知:加载 10 000 次,3 种粒料混合料的竖向变形均小于 1.70 mm;加载初期,变形量变化大,随加载次数的增加,变形速率逐渐减小;小围压、低主应力比时,竖向变形为 NA 最大、RBCA 次之、RCA 最小,这可能是因小围压、低应力比条件下,RCA 集料表面粗糙,集料间嵌挤能力强,RBCA 中砖渣棱角性稍差,而 NA 集料表面光滑易发生相对滑动;但大围压、高主应力比时,NA 的竖向位移最小,RBCA 与 RCA 相差不大,这可能是因高应力比作用下,RCA 与 RBCA 中旧混凝土或砖渣集料表面棱角已破坏且自身强度比 NA 集料差导致的。因此,实际应用中,应根据使用层位及交通荷载大小合理确定建筑固体废物再生集料混合料中旧混凝土或砖的掺量。

3.2.2 永久变形拟合模型

由于试验的最大加载次数只有 10 000 次,远比路面结构层承受的荷载作用次数小。为此,采用数学统计回归法将试验曲线外延,探讨不同应力条件下的永久变形发展趋势。该文采用 Paute 等^[10]提出的粒料材料的永久应变随荷载作用次数的变化模型,公式如下:

$$\epsilon_p = AN^B + C \quad (1)$$

表 3 围压/主应力比下混合料的曲线拟合结果

| 混合料 | $\sigma_1/(\sigma_1/\sigma_3)$ | 回归参数 | | | R^2 |
|-----|--------------------------------|----------|----------|------------------------|-------|
| | | A | B | C | |
| RCA | 30/2.0 | 0.016 33 | 0.196 34 | -0.014 04 | 0.95 |
| | 30/3.0 | 0.015 62 | 0.239 41 | -0.018 96 | 0.97 |
| | 50/4.0 | 0.102 23 | 0.080 61 | -5.52×10^{-5} | 0.99 |
| | 50/5.0 | 0.161 34 | 0.104 64 | -5.97×10^{-5} | 0.99 |
| | 50/5.5 | 0.043 43 | 0.154 81 | -0.048 93 | 0.97 |
| | 70/6.0 | 0.186 59 | 0.166 16 | -0.070 23 | 0.97 |
| | 70/6.5 | 0.262 79 | 0.148 99 | -0.095 61 | 0.94 |

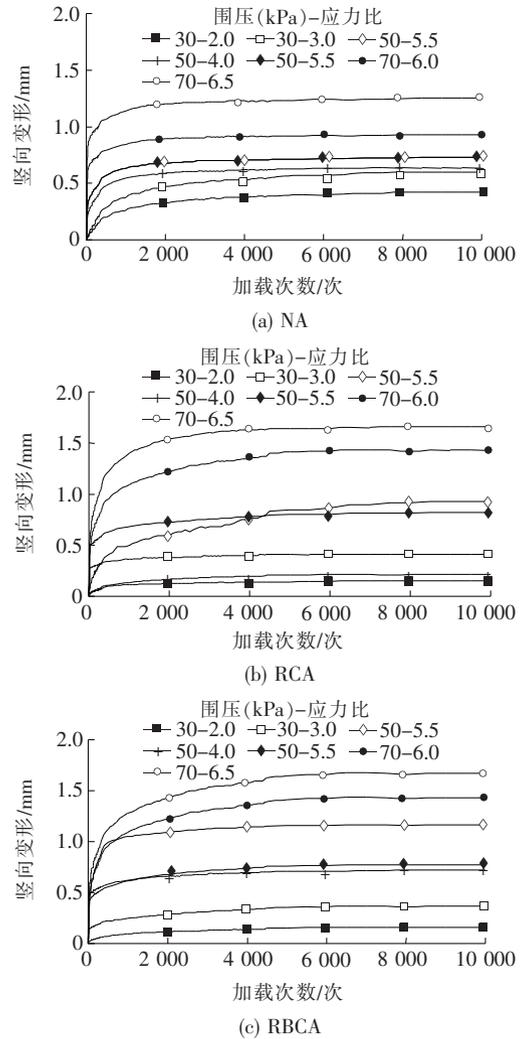


图 4 竖向变形与加载次数的关系图

式中: N 为荷载作用次数; ϵ_p 为应变; A 、 B 、 C 为与应力比和材料性质有关的参数。

将图 4 变形量除以试样高度换算成应变,再根据式(1),利用 Origin 软件分别对结果进行拟合(表 3)。由表 3 可知:曲线的拟合相关性较高,最小为 0.90,表明 RCA、RBCA 与 NA 粒料混合料的永久应变均符合指数模型,可用该模型对变形结果进行拟合。

续表 3

| 混合料 | $\sigma_1/(\sigma_1/\sigma_3)$ | 回归参数 | | | R^2 |
|------|--------------------------------|----------|----------|------------------------|-------|
| | | A | B | C | |
| NA | 30/2.0 | 0.033 63 | 0.238 09 | -0.057 29 | 0.95 |
| | 30/3.0 | 0.047 91 | 0.238 70 | -0.082 92 | 0.95 |
| | 50/4.0 | 0.099 78 | 0.152 20 | -0.044 45 | 0.93 |
| | 50/5.0 | 0.128 06 | 0.134 64 | -0.036 89 | 0.93 |
| | 50/5.5 | 0.123 88 | 0.166 21 | -0.076 84 | 0.92 |
| | 70/6.0 | 0.233 76 | 0.085 44 | -0.017 15 | 0.90 |
| | 70/6.5 | 0.316 04 | 0.085 38 | -0.023 12 | 0.90 |
| RBCA | 30/2.0 | 0.008 89 | 0.262 41 | -0.011 22 | 0.98 |
| | 30/3.0 | 0.033 95 | 0.188 86 | -8.79×10^{-4} | 0.99 |
| | 50/4.0 | 0.176 92 | 0.080 68 | -7.82×10^{-5} | 0.99 |
| | 50/5.0 | 0.263 48 | 0.126 09 | -0.020 32 | 0.95 |
| | 50/5.5 | 0.226 28 | 0.125 64 | -0.066 59 | 0.90 |
| | 70/6.0 | 0.186 61 | 0.166 15 | -0.070 22 | 0.97 |
| | 70/6.5 | 0.217 76 | 0.166 15 | -0.081 95 | 0.97 |

4 结论

(1) 围压越大,限制抵抗变形的作用越强;围压一致时,各粒料混合料的变形量及变形速率随主应力比的增大而增大,且竖向变形随含水率的增大而变大。

(2) 加载初期,变形量变化大,随加载次数的增加,变形速率逐渐减小;小围压、低主应力比时,永久变形为 NA 最大、RBCA 次之、RCA 最小;但大围压、高主应力比时,NA 的永久变形最小,RBCA 与 RCA 相差不大。

(3) RCA、RBCA 与 NA 粒料混合料的永久变形均符合指数模型。

(4) 实际应用中,应根据使用层位及交通荷载大小合理确定建筑固体废物再生集料混合料中旧混凝土或砖的掺量。

参考文献:

- [1] 杨敏. 再生建筑集料用于路面粒料层的工程特性试验研究[D]. 长沙理工大学硕士学位论文,2017.
- [2] 肖杰,马海峰,吴超凡,等. 建筑固体废物再生粒料基层混合料的性能研究[J]. 建筑材料学报,2018,21(3):511-515,522.
- [3] POON C S, CHAN D. Feasible Use of Recycled Concrete Aggregates and Crushed Clay Brick as Unbound Road Sub - Base[J]. Construction and Building Materials, 2006,20(8):578-585.
- [4] GABR A G, CAMERON, D. A. Properties of Recycled Concrete Aggregate for Unbound Pavement Construction [J]. Journal of Material Civil Engineering, 2012, 24(6): 754-764.
- [5] LEEK C, SIRIPUN K. Specification and Performance of Recycled Materials in Road Pavements[C]. Contract Rep. No. 001119 - Curtin Univ., ARRB Group, Supported by the Western Australian Landfill Levy Fund and the Waste Authority, Western Australia, 2010.
- [6] KOLAY P K, AKENTUNA M. Characterization and Utilization of Recycled Concrete Aggregate from Illinois as a Construction Material[C]. ASCE Geo - Congress, Atlanta, 2014:3 561-3 570.
- [7] LEITE F D C, MOTTA R D S, VASCONCELOS K L, et al. Laboratory Evaluation of Recycled Construction and Demolition Waste for Pavements[J]. Construction & Building Materials, 2011, 25(6): 2 972-2 979.
- [8] ARULRAJAH A, PIRATHEEPAN J, BO M W, et al. Geotechnical Characteristics of Recycled Crushed Brick Blends for Pavement Sub - Base Applications[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, 49(7): 796-811.
- [9] 马士杰,黄晓明,高启聚. 粒料基层永久变形设计指标与控制模型[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2014, 34(5): 29-36.
- [10] PAUTE J L, JOUVE P, MARTINEZ J, RAGNEAU E. Modèle De Calcul Pour le Dimensionnement Des chaussées souples[J]. Bull Liasion Laboratoires Ponts Chaussées, 1988, 156: 21-36.