

文章编号: 1001-7372(2003)01-0022-05

级配碎石混合料的动力变形特性

王哲人, 曹建新, 王 龙, 董泽蛟

(哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘 要: 采用在古典 C. B. R 法的基础上, 施加动荷载的简化试验方法, 分析级配碎石混合料的动力变形特性, 可用永久变形、弹性模量双指标指导混合料的组成设计, 而合理的级配碎石基层材料组成, 应考虑到材料与振动碾压工艺的相互作用。

关键词: 道路工程; 级配碎石; 振动碾压; 永久变形; 弹性模量; 临界应力

中图分类号: U416.214 **文献标识码:** A

Dynamic deformation characteristic of grading macadam mixture

WANG Zhe-ren, CAO Jian-xin, WANG Long, DONG Ze-jiao

(School of Traffic Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: On the base of classical C. B. R method, adopting the predigested test method of bringing to bear dynamic load, and then analyzing the dynamic deformation characteristic of grading macadam mixture, we can use it to guide the design of mixture by permanent deformation and modulus of elasticity. To design an effectually mixture, the interaction between mixture and vibration rolling must be considered.

Key words: road engineering; grading macadam; vibration rolling; permanent deformation; modulus of elasticity; critical stress

0 引言

具有良好强度、刚度和稳定性的半刚性基层沥青路面结构, 在广泛应用于中国高速公路建设的同时, 也存在着反射裂缝、水损害等一些不足。虽然正定试验路等级配碎石基层的反射裂缝少、结构层排水性能好, 但是未见国内高速公路工程建设应用。“八五”攻关报告提出“级配碎石基层适合累计轴次小于 500 万次以下”, 否则需要较厚的沥青面层。柔性基层在国外应用普遍, 但永久变形、疲劳裂缝方面也有不足, 因此沥青层往往较厚。根据“发扬优势、约束缺点, 实现半刚性基层与柔性基层以现代技术水平为基础的优化结合, 而不是简单地组合”的理念, 选择级配碎石混合料(以下简称级配碎石)的动力变形特性为切入点进行探索性的研究。这不仅因为级

配碎石是具有弹塑性变形特性的柔性基层材料的典型, 而且有利于对级配这个路面工程材料的基本要素的深入研究。

1 研究方法

1.1 评价指标与方法

C. B. R 是道路界评价级配碎石混合料力学性质的古典方法; 1989 AASHTO 在“T-274”规定了测定粒状材料回弹模量三轴压缩试验的重复加载图式, 并采用了根据应力不变量计算回弹模量的方式。

T-274 是有缺点的, 所以不难查阅到国外对上述方法深入研究的文献^[1,2], 但笔者的目标不在于完善求算回弹模量的方法, 而在更广泛的范围内分析级配碎石的变形特性, 因为这是问题的关键。国外按直接法确定车辙时, 以各层荷载作用下的竖向应力

收稿日期: 2002-02-22

作者简介: 王哲人(1935-), 男, 上海市人, 哈尔滨工业大学教授, 工学硕士。

为偏应力,径向应力为侧压力进行 10 万次重复加载三轴压力试验;VESYS 法则假设永久应变与回弹应变成正比以计算车辙深度。由于直接法太复杂,而 VESYS 法有局限性,笔者采用了动态压入的受力图式,即在道路界所认可的 C. B. R 这一古典方法的基础上,改为利用 MTS 试验机施加半正弦波的动荷载,加载频率仍为 0.1 Hz,通过量测一定作用次数下的总变形与回弹变形,从而实现弹、塑性变形的分离。参照 C. B. R 法以 7 kN 为碎石材料的标准,每级荷载以 5 kN 递增;参照 AASHTO T-274,各级荷载重复次数为 200 次。

1.2 成型工艺

柔性路面结构是由低粘结力的松散材料经碾压构成强度,对级配碎石而言,级配与碾压工艺是决定

其路用性能的主要因素。土动力学研究表明,初始应力对永久变形有较大的影响。对于高速公路建设来说,首先要发挥碾压工艺的作用。为使试件成型反映现代机械装备与工艺水平,笔者采用了振动成型工艺,由自行设计的频率、振幅与激振力等振动碾压三要素可调的上置式振动压实设备实现。经过最佳工艺的试验研究^[3],采用的振动参数为高频(45 Hz)、低幅(0.423 mm)、激振力 6 kN,持续 2 min。受篇幅所限有关研究成果将另文发表。

2 材 料

2.1 原材料

试验研究采用的石灰岩集料,其压碎值为 8.4%,视密度如表 1 所示。

表 1 矿料密度

矿料粒径/mm	19.0	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
视密度/g·cm ⁻³	2.726	2.728	2.730	2.731	2.732	2.700	2.696	2.704	2.705	2.712	2.690

2.2 级配混合料

经典的按逐级填充原则构成的连续级配广泛地应用于路面工程,理想的连续级配曲线接近抛物线,经验表明,泰波指数 $n=0.4\sim 0.5$ 时连续级配的密实度最大。后来陆续出现了一些新的级配原则,先是间断级配,近年出现的有 SMA、多碎石、V 型、Superpave 等多种。出现新的形式是发展的必然,因为路用性能要求在变,施工机械与工艺在变。如果采用 0.45 次方的级配图,那么后 4 种的共同特点都是偏离在最大密实度线(即 $n=0.45$ 的级配曲线)的下方(图 1),从图形上看只不过偏离的部位有所不同而已,从内容来看,只不过是粒径分布重点有所差异而已,一个共同的原则是通过提高某一粒级的含量来加强混合料的骨架结构。

为了探明不同级配混合料的动力变形特性,按如下三个层次设计了混合料(图 2、表 3):第一层次包括连续级配经典型与加强骨架型两类。第二层次,为探讨骨架与填充两部分的作用,设计有细料含量为零的混合料。其中连续级配包括 $n=0.45$ 与 $n=0.55$ 两种,加强骨架型设计有四种(表 2)。第三层次,对连续级配混合料设计有不同的泰波指数($n=0.45\sim 0.8$);对 4 种骨架加强型,每一种又按体积法设计有不同的填隙系数的混合料(按 4.75 mm 为粗细料的分界,以细集料的体积占粗集料空隙体积的比值为填隙系数)。

按照填隙系数法设计级配碎石混合料,细集料

与粗集料的百分含量计算公式为

$$\left. \begin{aligned} q_x + q_c &= 100 \\ \frac{q_x}{(1 - V_x)\rho_x} &= K \frac{q_c[V_c - \omega(1 - V_c)\rho_c]}{(1 - V_c)\rho_c} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: q_x 为细集料重量百分数; q_c 为粗集料重量百分数; V_x 为细集料空隙率; V_c 为粗集料空隙率; ρ_x 为细集料表观密度; ρ_c 为粗集料表观密度; K 为填隙系数; ω 为粗集料最佳含水量。

表 2 主骨架的级配与空隙率

主骨架 编号	不同粒径的通过率/%					空隙率/%
	19.0	16.0	13.2	9.5	4.75	
1	100	33	16	6	0	45.6
2	100	53	30	15	0	42.2
3	100	85	62	15	0	42.0
4	100	85	70	47	0	41.4
$n=0.45$	100	85	62	40	0	45.5
$n=0.55$	100	83	66	40	0	44.8

注:表中粒径单位为 mm。

暂按松装情况下量测的骨架空隙率(表 2)进行填充。填充细集料根据图 5(a),采用 $n=0.55$ 的级配,振动参数根据经验选择为低频高振幅的 30 Hz, 108.01 kPa, 0.848 mm, 6 kN。

由式(1)可以计算出粗集料与细集料的百分含量,和按照不同填隙系数得到的混合料的级配,见表 3。体积设计法所采用的参数不尽合理,是合理的标准方法未形成前的权宜之计,由于组成结构状态有

表 3 混合料级配组成

级配编号	不同孔径的累计通过率/%										
	19.0	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
1,0.5	100	50	40	32	27	19	15	9	6	4	3
1,0.7	100	54	42	35	31	21	14	10	7	5	3
1,1.0	100	60	51	45	41	28	19	13	9	6	3
1,1.3	100	64	54	49	46	31	21	15	10	7	5
2,0.7	100	67	51	40	29	19	13	9	6	4	3
2,0.9	100	69	54	44	34	23	15	10	7	5	3
2,1.2	100	72	59	50	41	28	19	13	9	6	4
3,0.7	100	89	73	40	29	20	14	9	6	4	3
3,0.9	100	90	75	44	34	23	15	10	7	5	3
3,1.2	100	91	77	50	41	28	19	13	9	6	4
4,0.7	100	89	78	62	28	19	13	9	6	4	3
4,0.9	100	90	80	65	34	23	16	11	8	6	3
4,1.2	100	91	82	68	40	27	18	12	8	5	3

注:级配编号前为主骨架编号,后为填充系数;孔径单位为 mm。

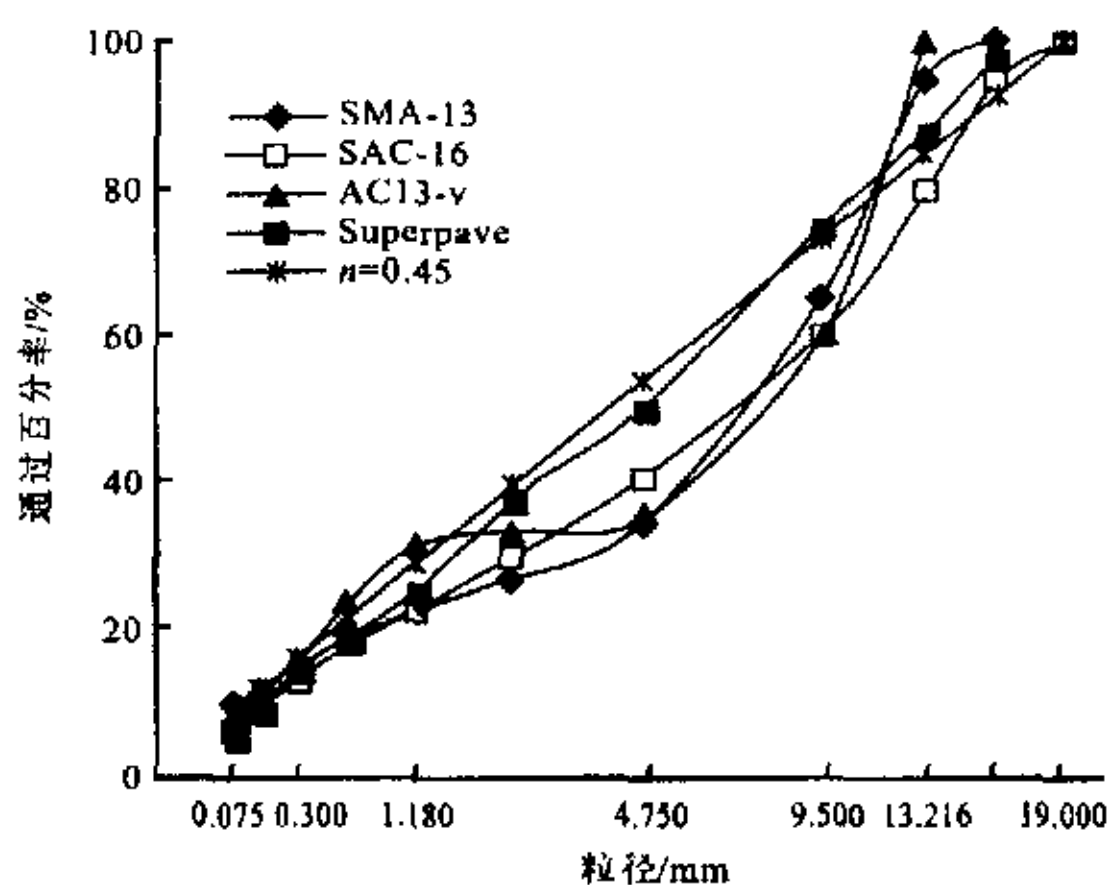


图 1 比较 4 种沥青上面层的级配中值曲线

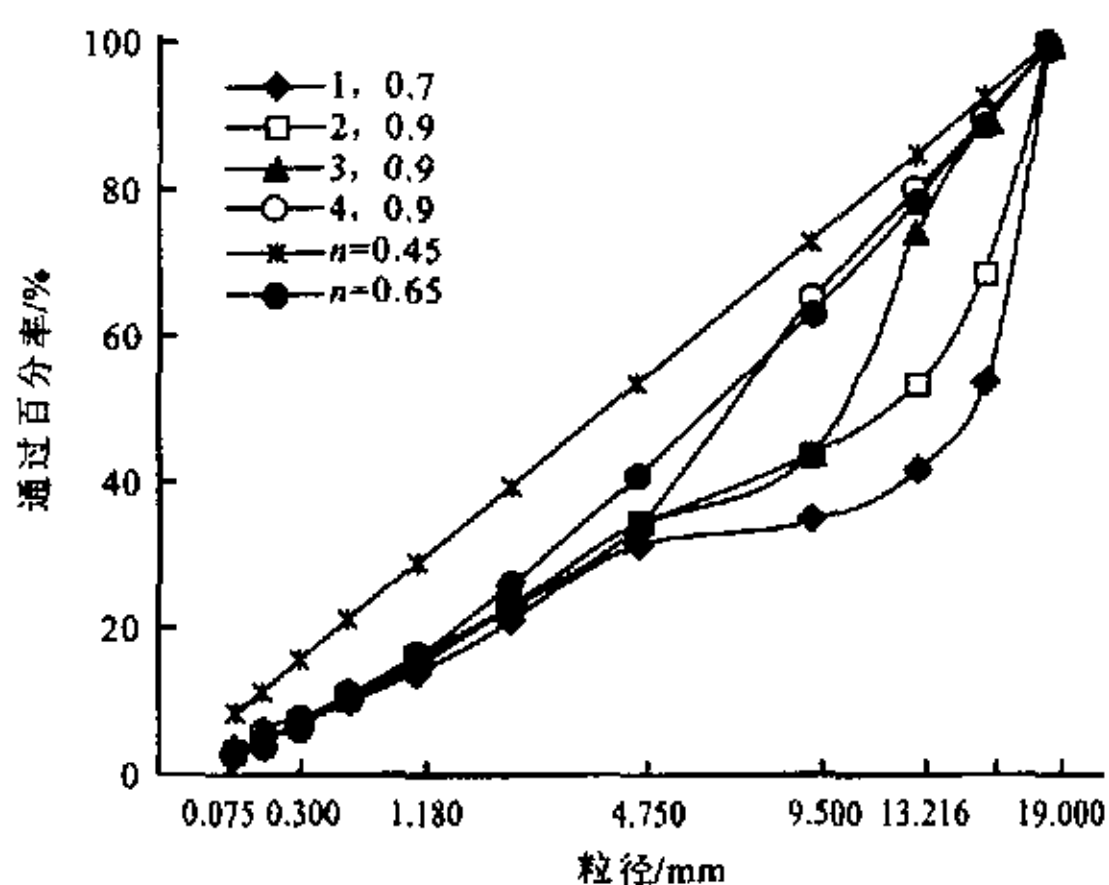


图 2 设计混合料级配曲线

所量化,它提供了文中不同级配类型的可比性。不同填隙系数的组成结构状态,因篇幅有限不另分析。

3 动力变形特性

3.1 动弹模量

不同级配碎石从动应力—动弹模量图上(图 3、4)不难发现基本上存在一个动应力的临界值(简称临界应力),此时动弹模量值最大。也就是说随着动应力的增大弹性变形增长速度减缓,当动应力超过临界值时,弹性变形增长速度加快,因此出现了动弹模量最大值。

3.2 永久变形

由图 3、4 可以看到动应力作用下级配碎石的永久变形呈指数增长。当动应力小于临界应力时,永久变形随动应力增长的速度较小,接近线性变化,临界应力时永久变形不超过 1%~2%;但当动应力超过临界应力时,永久变形急剧增大,试验测定有的大于 5%(约 8 mm)。

3.3 临界应力

永久变形较小、动弹模量最大的临界应力具有实用价值。不仅可用以指导路面结构设计、使设计应力小于临界应力;而且可以用于指导级配设计,选择级配时不应该只考虑临界应力状态时较高的动弹模量,还宜增加一个指标,即较小的永久变形。据此,2001 年 8 月所修建的试验路对连续级配选用 $n=0.65$,临界应力时动弹模量为 721 MPa,永久变形为 1.58%,而不是传统的 $n=0.45$ (动弹模量为 738 MPa,永久变形为 2.56%)。

综上所述,虽然动态 C.B.R 试验具有一定的经

验性,应力与应变值与路面结构实际发生值尚有一定差异,但它相对地揭示了级配碎石基层的永久变形是一个要害问题。对此除了在振动压实标准与碾压工艺采取对策外,下面将就级配因素作进一步的分析。

4 级配

4.1 骨架与填料的作用

图3、4中以粗线条绘出的、不同级配的骨架(4.75 mm的通过率为零)动弹模量大都波动在600~700 MPa;由细集料(<4.75 mm)以不同填隙系数配置的混合料,动弹模量以600~700 MPa为中值,上下波动±10%~30%(450~850 MPa)。但是骨架以及填隙系数较小的混合料,特别当动应力 \geq 临界应力时,永久变形显著增大。本次试验空隙率测定数值波动范围混合料为16.9%~22.8%,骨架为30.7%~32.9%。这表明,动弹模量主要影响因素是骨架,而填充对控制永久变形有较大的影响,当然在级配设计时还要考虑到两者的相互影响,但骨架与密实的作用必须兼顾,因此,发展紧排骨架—密实原则是适宜的。

mm级集料的数量,而SMA等强调了第一级粗集料(最大标称尺寸)的数量。强调哪一级粗集料的数量以形成骨架并不是一个简单的问题,因为它影响到使用性能、工艺以及经济等多方面。由图2可知,设计有4种不同骨架加强型级配,加上连续级配共有5种骨架类型。对于级配这样一个多变量的函数,虽然有限的数量、有限的指标不可能解决问题,不失为有意义的探索。这不是一个谁比谁好的问题,而是应该了解各有哪些不同的特点,是一个什么条件下最为适用的问题。联系表3与图3、4,级配1第一级粗集料含量最多,动弹模量也最高,而4.75~9.5 mm含量较多的级配4,动弹模量最低。就动弹模量而言,以偏粗为好。

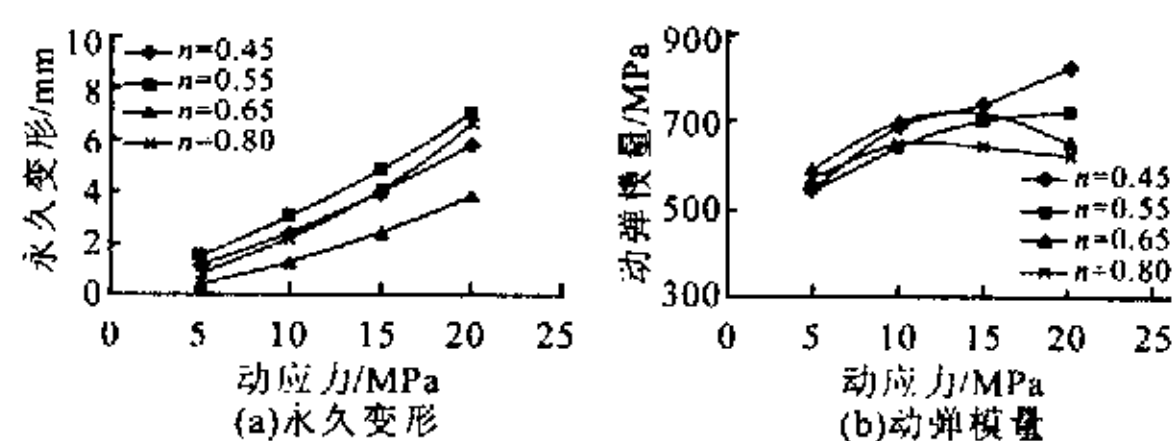


图4 动应力对永久变形与动弹模量的影响

永久变形的问题较为复杂,就绝对值而言,相同的动应力时级配4的永久变形最大(由图3、4可知,当动应力为15 MPa时,变形率先达到6 mm),但当动应力不大于临界应力时级配4的永久变形并不是最大的,只是当超过临界应力时级配4的永久变形增长较快。

为什么最粗的级配1,空隙率反而在这4种骨架加强型中最小(16.9%~20.1%)?与级配2(18.5%~20.6%)比较说明这在于充分发挥了粗集料逐级填充作用(表3)。级配4的骨架,由于4.75~9.5 mm部分的比例增大,在四种级配小于4.75 mm含量接近的条件下,空隙率反而最大(19.6%~22.6%);这对级配碎石而言不一定有利,但对沥青混合料而言,却为提高沥青胶浆的含量创造了条件。

从试验路现场施工来看,骨架加强型不仅要求增加碾压遍数与吨位,而且讲究振动参数的合理选择,以及组织轮胎与振动碾压的交叉作业。级配4离析最小,但也并非级配1离析最显著。

4.3 最佳级配

如何认识 $n=0.4\sim0.5$ 的连续级配是最大密实度级配这一传统概念?根据动力变形特性试验研究(图4), $n=0.65$ 连续级配的弹塑性变形的综合特性要优于 $n=0.45$ 的。动应力由5~20 MPa, $n=0.65$ 时动弹模量可达721 MPa,虽并非最高,但永久变形

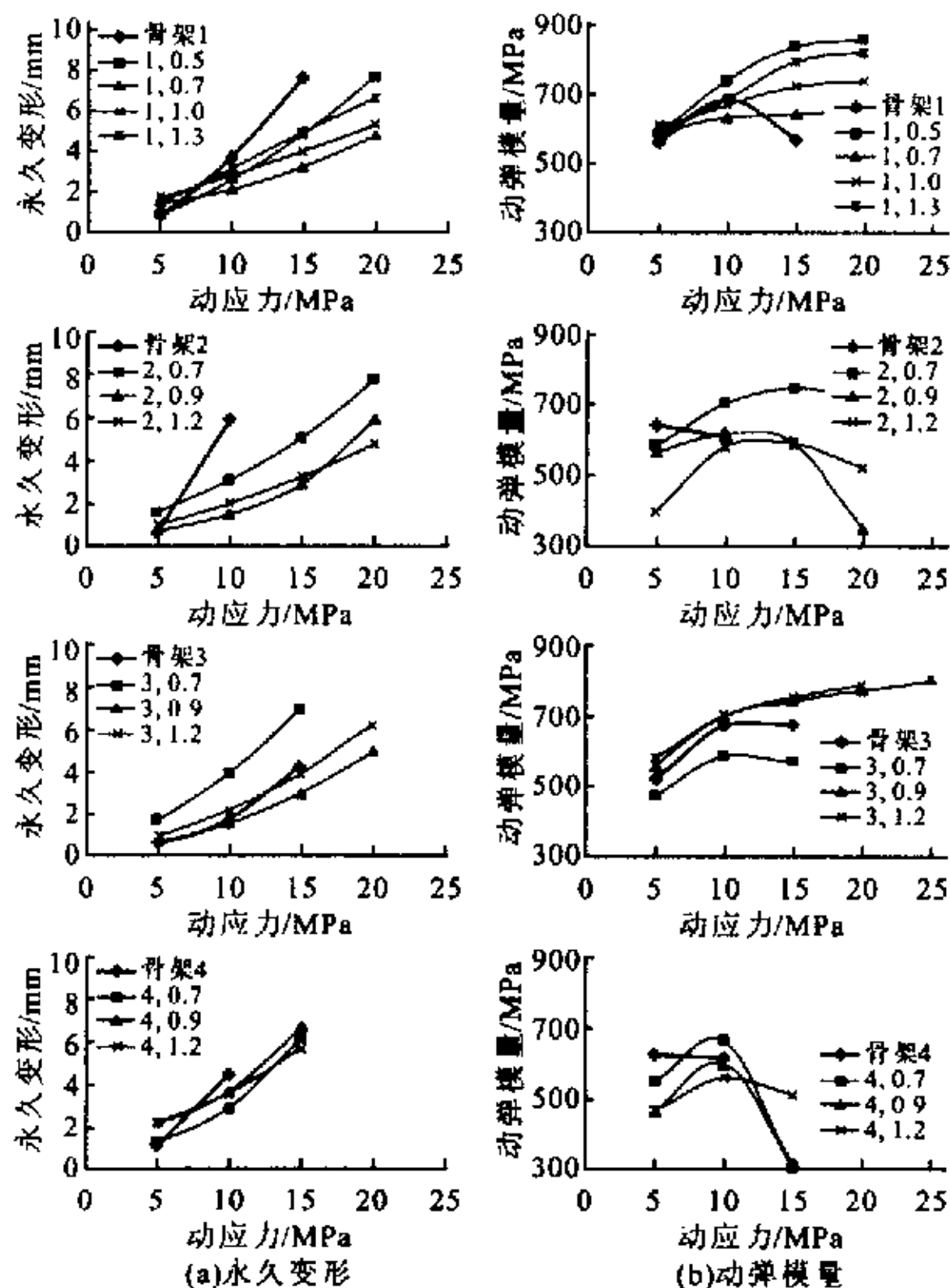


图3 动应力对永久变形与动弹模量的影响

4.2 骨架类型

相对连续级配而言,Superpave强调4.75~9.5

在图 4(a)中最小。为了验证这一与传统发生矛盾的认识,以 4.75 mm 为 D_{\max} 组织了 n 由 0.3~0.9 的试验验证。

重型击实与振动击实的对比试验(图 5)表明,级配最佳是相对于一定的工艺,对于击实而言, $n=0.45$ 密实度最大,相对于振动工艺最大密实度的 n 值就不再是 0.45,其实最佳 n 值还与材料的形状、表面构造等性质有关。C. B. R 试验(图 5)进一步表明,即使是细集料也并非 $n=0.45$ 最佳,力学性质不仅与密实度有关,而且集料排列组合的影响更为显著,也就是说要考虑材料与振动压实工艺的相互作用。

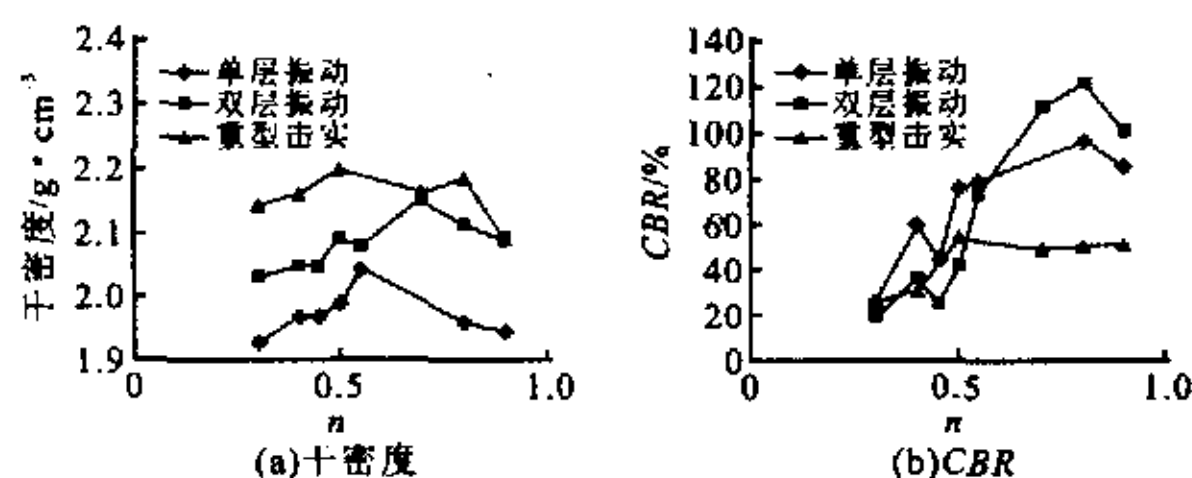


图 5 细集料三种工艺性质对比

根据动力变形特性的试验研究,在吉林省通化一级公路修建的试验路采用了具有较小永久变形、较高弹性模量的级配碎石基层混合料,一是 $n=0.65$ 的连续级配,二是加强骨架型的级配 3、并取填隙系数 0.9,具体级配组成见表 3。对层厚为 20 cm 与 15 cm 的级配碎石试验路段, D_{\max} 选用 31.5 mm,所进行的承载板测定表明回弹模量可达 550~900 MPa。层厚 20 cm 的分两层铺筑和碾压。试验路段实践还显示了级配碎石基层在多雨地区施工的优越性,有关试验路的结果将另文发表。

5 结 语

(1) 针对级配碎石基层永久变形较大、弹性模量较低的问题,以经典的 C. B. R 试验为基础,改进为动载的试验,方法简便,能反映出不同类型级配碎石混合料的变形特性,从而设计出永久变形较小、弹性模量较大的混合料组成。

(2) 基于动力变形特性分析所得到的临界应力,既是级配碎石混合料由应变硬化转向应变软化的特征点,也是级配碎石基层由压密变形向剪切损坏的转折点,对于路面结构设计与材料组成设计具有指导意义,需要深入研究(包括采用动三轴试验)。

(3) 碾压工艺是实现级配碎石基层较小永久变形、较高弹性模量的关键工艺措施,文中试件就成型采用的振动压实法与现场正确选择振动参数、组织振动与轮胎碾压的交叉作业是有效的。

(4) 体积设计计算的标准与方法有待进一步完善。

参考文献:

- [1] NATAATMADJA A. Measuring resilient modulus of granular materials in flexible pavements[A]. TRB 80th Annual Meeting[C]. Washington: TRB, 2001. 1—6.
- [2] MUSHARRAB ZAMAN. Stress Path testing for a proper characterization of unbound aggregate base behavior [A]. TRB 80th Annual Meeting [C]. Washington: TRB, 2001. 5—7.
- [3] 王 龙. 全含量土石混合料振动压实特性的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨建筑大学, 1999.

中国公路网

<http://www.highway-china.com>

《中国公路学报》编辑部为了更好地传播公路交通科技,延伸纸质期刊的传播功能,方便编辑部与作者、读者的交流,开通了《中国公路学报》网上杂志——中国公路网。《中国公路学报》征稿简则、稿件编排规范、学报动态、交通行业信息等将在网上发布,请《中国公路学报》的作者、读者以及其他公路交通科技工作者注意访问中国公路网。

《中国公路学报》编辑部