

文章编号 1002- 0268(2006)08- 0022- 06

级配碎石基层的设计参数研究

王 龙¹，孟书涛²，徐全亮²

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院，黑龙江 哈尔滨 150090；2. 交通部公路科学研究院，北京 100088)

摘要：在我国沥青路面设计规范中提供了级配碎石的设计参数，由于该参数是低等级道路和生产工艺的总结，取值较低，制约了我国路面结构的多样化发展。通过对典型路面结构的应力分析，总结了含级配碎石基层沥青路面的特点；采用三轴试验、循环加载试验和 4 个省区的试验路对处于各个层位的级配碎石的弹性模量进行了大量研究，通过对大量数据的分析总结，推荐出了与石料的生产和施工工艺相匹配的各层位的设计参数取值范围，并于国外的方法进行的对比。

关键词：基层；级配碎石；设计参数；弹性模量

中图分类号：U416.214 文献标识码：A

Study on the Design Parameter of Graded Macadam Base

WANG Long¹, MENG Shu-tao², XU Quan-liang²

(1. School of Science and Engineering on Communication, Harbin Institute of Technology, Heilongjiang Harbin 150090, China;
2. Research Institute of Highway, MOC, Beijing 100088, China)

Abstract Bitumen pavement design specification provides the design parameters of aggregate macadam, because the parameters are based on low-grade roads, the values are relatively lower, which restrict the development of pavement structures in China. Stress characteristics of typical bitumen pavement structures with graded macadam base are analyzed, through triaxial tests, cyclicload tests and observation of the test roads in four provinces, resilient modulus of macadam in every layer is calculated. The design parameters of grade macadam base are recommended and compared with other countries.

Key words : base ; grading macadam ; design parameter ; modulus of elasticity

0 引言

在我国《公路沥青路面设计规范》中各层材料抗压回弹模量为路面计算的主要设计参数，其中对级配碎石的规定是级配碎石可作为任何等级公路的基层，并给出参数取值(表 1)。

级配碎石作为沥青路面的上基层时，推荐抗压模量为 300~350 MPa，若沥青层的模量取 1 200 MPa，模量比为 4~3.4，这无疑使沥青层底拉应力加大，要想使级配碎石基层得以利用，就必须加大沥青层的厚度，增加造价。图 1 是采用 BISAR 3.0 对

典型试验路结构进行的应力分析，参数取值见表 2。

表 1 规范规定的模量

Tab.1 The modulus of the graded aggregate base in the criterion

基层种类	级配要求	抗压模量/MPa
上基层		300~350
基层	符合规范级配要求	250~300
底基层		200~250

从图 1 中可以看出，级配碎石层的模量对沥青层底的拉应力有着巨大的影响，若规范推荐的基层模量值 250~350 MPa，沥青层底将遭受 0.4~0.25 MPa 的拉应力；当级配碎石的模量提高到 750 MPa 时，

收稿日期：2004- 08- 16

基金项目：交通部优秀青年专业技术人才专项经费资助项目 (95050510)

作者简介：王龙 (1968-)，男，黑龙江哈尔滨人，副教授，研究方向为路面结构及材料。(Hitlongwang@sina.com)

表 2 典型结构型式及计算参数

Tab.2 Model structure and calculating parameters

结构层	厚度/m	模量/MPa	泊松比
沥青层	0.1	1 200	0.25
级配碎石	0.2	100-1 000	0.25
半刚性层	0.25	1 500	0.25
砂砾垫层	0.25	180	0.25
土基		30	0.35

沥青层底拉应力为 0 MPa, 此模量为拉压临界值; 级配碎石的结构厚度对沥青层底的拉应力影响不大, 只是随着厚度的增加, 拉应力略有增大; 半刚性基层层底拉应力与级配碎石的模量关系不大, 随厚度的增加略有减少, 拉应力在 0.1~0.2 MPa 之间。级配碎石层所受到的压应力在 0.2~0.4 MPa 之间。

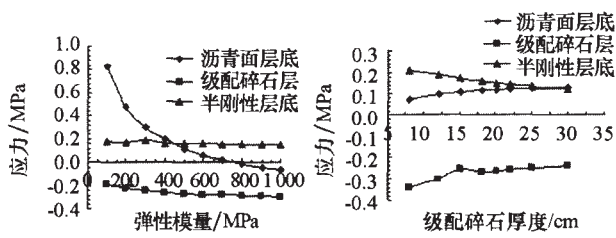


图 1 级配碎石模量与厚度对整体性材料层底拉应力的影响

Fig.1 The influence of modulus and thickness of graded aggregate base for bottom stress

图 2 是沥青层厚度对沥青层底拉应力和弯沉的影响。当级配碎石模量较低时 (≤ 400 MPa), 沥青层底拉应力随沥青层厚度的增加大幅度地减少, 即当级配碎石层模量较低时, 必须大幅度增加沥青面层的厚度为代价以减小拉应力; 当级配碎石模量较高时 (≥ 500 MPa) 沥青层底的拉应力随厚度的变化较平缓, 即沥青层厚度对其层底的拉应力影响不大, 可以不必在通过增加面层厚度来减小层底拉应力; 级配碎石的模量为 600 MPa, 面层厚度为 15 cm 时沥青层层底拉应力与级配碎石的模量为 400 MPa, 面层厚度为 30 cm 时沥青层层底拉应力相当, 下层模量增

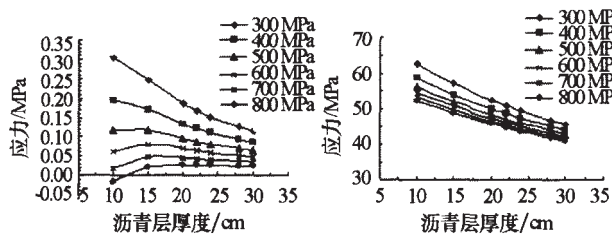


图 2 沥青面层厚度对沥青层底拉应力的影响

Fig.2 The influence of thickness of bitumen layer for bitumen layer bottom stress

加 100 MPa, 面层厚度可减薄一半, 可见提高级配碎石模量的重要性; 沥青层的厚度对弯沉影响与其对拉应力的影响相类似, 弯沉随面层的厚度增加在减小, 级配碎石的弹性模量较低时, 模量值对弯沉的影响较大, 当模量大于 500 MPa 时, 模量的变化对弯沉的影响减少。

通过以上的分析可知, 减小沥青层层底的拉应力可以采取两种途径, 第一是增加沥青面层的厚度, 第二是提高级配碎石层的弹性模量。当级配碎石的模量较低时 (小于 400 MPa), 增加其模量与沥青层厚度同时有效; 当级配碎石模量较高时, 提高其模量比增加沥青层厚更具有效性。因此为了延长沥青路面的使用寿命, 减少疲劳破坏, 必须尽可能地提高级配碎石的强度, 减小与沥青层的模量比, 同时适当地增加沥青层的厚度。但规范级配碎石模量的推荐值是我国早期级配碎石使用经验的总结, 量值偏低 (若 $E=300\sim350$ MPa, 沥青层底拉应力为 0.33~0.28 MPa), 没能反映现有原材料生产、级配设计、施工技术的水平, 因此有必要对级配碎石层材料设计参数进行研究, 提出合理建议。

1 国外级配碎石参数研究

回弹模量是表征级配碎石强度的指标及设计参数, 从 1960 年开始, 国内外对粒状材料的回弹特性进行了研究, 粒状材料在交通荷载作用下表现出非线性和依赖于时间的弹塑性特性, 通常可表达如下

$$E=K_1 \theta^{K_2}, \quad (1)$$

式中, E 为回弹模量; θ 为第一应力不变量 ($\theta=\sigma_1+2\sigma_2$); K_1 K_2 为与材料有关的系数。

式(1)很好地反映碎石材料的非线性, 且用于路面结构分析较方便, 因而受到广泛采用。各种路面设计中粒料弹性模量取值的方法也大多在此基础上加以改进。

AI 法在 DAMA 设计程序中, 将土基和所有沥青稳定层作为线弹性, 将未经处治的粒料基层作为非线性弹性。粒料基层的模量根据多变量回归的预测方程计算,

$$E_2=10.44h_1^{-0.471}h_2^{-0.041}E_1^{0.139}E_3^{0.287}K_1^{0.868}, \quad (2)$$

式中, E_1 、 E_2 、 E_3 分别为沥青层、粒料基层和土基的模量; h_1 、 h_2 分别为沥青层和粒料基层的厚度。

比利时推算粒料材料模量的方法为: 按共振法使 40 种不同粒料材料承受各向同性的应力 σ_0 , 由式(3)计算得动态模量 E 。

$$E=(\sigma_0/\sigma_{01})^m \times E_1, \tag{3}$$

式中， σ_{01} 为标准压力，等于 0.1 MPa； E_1 为 σ_{01} 时的模量， $E_1=620e^{(-0.023\ 6v)}$ ，MPa； m 为指数，对于粒料， $m=0.1\sim0.3$ ； v 为粒料材料的空隙率，%。

Shell 设计方法中对直接铺在土基上的级配碎石底基层给出了确定其模量 (E_2) 经验公式，模量值的大小与土基模量和级配碎石厚度有关，公式如下式：

$$E_2=E_3 \cdot K, \quad K=0.2h_2^{0.45}, \text{ 且 } 2<K<4.$$

式中， E_3 为土基模量，MPa； h_2 为无机结合料基层的总厚度，mm。

2 级配碎石设计参数试验方法

目前，松散粒料的室内弹性模量的测定方法主要是三轴试验，室内重复加载试验等。由于动三轴试验能同时模拟级配碎石三向受压这一复杂应力状态及反复动荷作用，因而室内重复动三轴试验是研究级配碎石基层回弹模量最为有效的途径。但目前试件的成型方法为捣实，即不同于重型击实成型也不同于振动成型，因此，试件的物理状态与实际有很大区别。室内静态回弹模量测定法是采用击实或振动成型的试件在刚性的模具内进行，特点是粒料的物理状态与实际相符，但应力状态有差别。为弥补二者的缺陷室外承载板法也常常采用，即通过测定粒料层下层的综合模量和粒料层不同应力下的弹性变形，反算出该层的弹性模量值。为了解级配碎石的强度变化规律，除了进行室内三轴试验对级配碎石的模量进行研究外，还增加了现场承载板和室内 MTS 重复加载试验，对级配碎石的回弹模量进行了研究。

2.1 室内动三轴试验

动三轴试验模拟级配碎石材料三向受压及承受动载后的响应。试验共设定 5 种围压，分别为 138、104、69、35、6.9 kPa。

考虑到偏载(重复荷载)应尽可能模拟实际道路车轮荷载的冲击作用，故试验施加的偏应力波形采用间断半正弦波形，即：0.1 s 半正弦波，0.9 s 间歇时间。偏压加载的频率为 1 Hz，即 1 次/ s_0 。

试验共设定 4 种偏压，平均偏应力峰值分别为 10.6、27.7、42.5、62.7 kPa。

试验级配有两种结构：骨架填充结构 (A01~A06) 和连续级配结构 (A07~A10)，20 个加载系列，通过人工捣实成型试件。对于不同试件，按设计的

试验方法，应力施加序列，并按式 (4) 计算不同应力状态下回弹模量：

$$E_r=\frac{\sigma_d}{\epsilon}, \tag{4}$$

式中 E_r 为材料的回弹模量； σ_d 为试件的偏应力 ($\sigma_1-\sigma_2$)； ϵ 为试件的回弹应变。

回弹模量由大到小排列如表 3 所示，试验结果表明不同级配形式对材料回弹模量有一定影响。可见对级配碎石材料而言，合理的级配对形成结构强度是重要的。

表 3 回弹模量与材料级配的关系
Tab.3 The relation of modulus and aggregate grade

	试件编号	最大回弹模量/MPa	回弹模量排序	空隙率/%	压实系数
骨架填充结构	A04	505.0	1	20.2	1.00
	A01	377.6	2	23.2	0.96
	A06	283.7	3	21.4	1.00
	A03	231.1	4	21.4	0.96
	A05	160.3	5	20.2	0.96
连续级配结构	A07	503.5	1	17.8	0.96
	A08	420.4	2	17.8	1.00
	A09	313.9	3	20.1	0.96
	A10	241.4	4	20.1	1.00

从表 3 中可以看出，两种级配的模量值整体较小，最大值为 500 MPa，其原因如下：

- (1) 级配碎石的最大粒径小， $D=19.0\text{ mm}$ ，影响强度。
- (2) 试验过程中的偏压和围压较小，偏压最大值为 62.7 kPa，围压最大值为 138 kPa，经应力分析可知级配碎石过渡层的压应力可达 200~400 kPa。
- (3) 由于受试验条件限制，试件的成型方法为捣实法，与击实法和振动法有本质区别。

根据以上试验，并参照东南大学的试验结果，若克服以上 3 因素的影响，级配碎石材料回弹模量可以达到 450~500 MPa。

2.2 MTS 重复加载试验

重复加载法在国外是用来测定回弹模量及永久变形普遍采用的方法。重复加载的试验方法通过在试件顶端重复施加具有一定波形和频率的动态荷载，然后通过传感器测定试件产生的变形(或应变)，通过对试验数据的整理，得到反映材料力学特性的各种指标，如：弹性变形、塑性变形、总变形、累积塑性变形等。

重复加载试验所用试样直径为 15.2 cm，高 17.0

cm, 应力分别为 5、10、15 MPa, 应力施加方式为应力控制, 动应力波形为半正弦波, 振动频率 0.1Hz, 回弹模量的计算是采用每级荷载重复作用 200 次时的弹性变形, 用承载板公式计算弹性模量。

图 3 为级配碎石在 3 种应力状态下模量的变化, 表 4 为实测值的统计结果, 从图 3 中可知, 应力状态影响较大, 3 种应力下模量的平均值分别为 553、592、651 MPa 平均模量变化范围在 550~650 MPa 之间, 代表值在 500~600 MPa 之间。

表 4 实测模量统计

Tab.4 The static of modulus of the graded aggregate

统计参数	3 种应力 (MPa) 状态下的弹性模量/MPa		
	5	7	10
平均值	553.43	592.39	650.83
标准差	58.51	48.59	47.53
变异系数	0.11	0.08	0.07
$\alpha=95\%$ 单边代表值	532.5	575.0	633.8

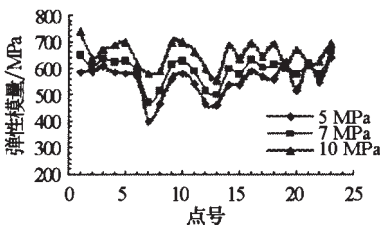


图 3 MTS 重复加载法弹性模量测试结果
Fig.3 The results of modulus of MTS repeat loaded test

2.3 承载板法

为了研究级配碎石材料的回弹模量, 分别在吉林省通化、四川南广、青海马平和山西平遥试验段上对级配碎石层及其底层采用承载板法进行了模量的测定。

(1) 四川南广试验路

试验路有 3 种结构型式, 结构 B 中级配碎石层厚 12 cm, 下层为 38 cm 的水稳基层, 其功能为过渡层, 结构 B1 中级配碎石为 32 cm, 下层为 18 cm 的水稳基层, 功能为基层, 结构 C 为纯柔性结构, 级

表 5 四川南广试验路反算结果 /MPa

Tab.5 The modulus anti-calculate results of Nanguang test road in Sichuan

结构类型	B	B1	C
底层类型	水泥稳定	水泥稳定	路基
底层综合模量	2820	573	74
级配碎石层综合模量	519	439	157
级配碎石反算模量	415	406	261
样本数	103	118	53
层位	过渡层	基层	底基层

配碎石分 2 层, 每层 20 cm, 功能为底基层。表 5 为试验路级配碎石层及其下层模量测定及反算结果, B 和 B1 结构均为半刚性底基层, 反算模量较高, 分别为 415 MPa 和 406 MPa。C 结构为纯柔性结构, 级配碎石层直接作用在土基上, 反算模量为 250 MPa 左右。

(2) 青海马平试验路

青海马平高速公路试验路有 4 种结构, A、B、C 结构基本一致, 都是纯柔性结构, 区别是 A 的基层为 20 cm 的级配砾石, B 的基层为 20 cm 的级配碎石, C 的基层为 30 cm 的级配碎石, 三者的级配碎(砾)石下层都为天然砂砾, 厚度分别为 25、25、17 cm; D 结构为 12 cm 级配碎石过渡层, 下层为 38 cm 水泥稳定基层。表 6 为回弹模量测定和反算结果。从表 6 中可以看到, 在天然砂砾底基层上分别加铺 20~30 cm 的级配碎石和级配砾石后, 结构层顶面的回弹模量变化不大, 基本在 300 MPa 左右, 而水泥稳定砂砾上级配碎石结构层顶面的回弹模量却达到了 1 079 MPa, 对于基层位置, 3 种结构的级配碎石反算结果为 500~650 MPa, 均值为 590 MPa, 级配砾石与级配碎石的差别不大; 过渡层为 900 MPa, 比四川南广试验路相同结构高出近一倍, 其原因在于青海的路基填料为砂砾土, 强度很高。

表 6 青海马平试验路反算结果 /MPa

Tab.6 The modulus anti-calculate results of Mapping test road in Qinghai

结构类型	A	B	C	D
底层类型	天然砂砾	天然砂砾	天然砂砾	水泥稳定
底层综合模量	274	274	276	1544
级配碎石层综合模量	293	280	295	1079
反算模量	598	670	503	914
样本数	49	42	28	61
层位	基层		过渡层	

(3) 山西平遥试验段

在山西平遥加速加载试验段共修建了 9 种级配碎石结构, 底基层包括 3 种不同类型的材料, 分别为水泥稳定碎石、石灰稳定土和素土, 以便于研究级配碎石在不同底基层强度条件下的回弹模量参数。

表 7 为试验段回弹模量测定和反算结果汇总, 对于水泥稳定碎石底基层上的段落 D 和 F, 其级配碎石基层顶面的综合模量在 450~600 MPa; 对于石灰土底基层上的段落 E、G 和 H, 其级配碎石基层顶面的综合模量介于 300~550 MPa 之间; 而素土段以在试验路的边缘, 施工质量较差, 底基层上的级配碎石顶面模量在 100~250 MPa; 按功能层划分, 反算

的结果为：过渡层的平均反算模量为 596 MPa，级配碎石基层的模量为 594 MPa，级配碎石底基层的模量为 210 MPa。

表 7 山西平遥试验路模量反算结果 /MPa

Tab.7 The modulus anti-calculate results of Pingyao test road in Shanxi

结构类型	D	F	E	G	H	I	J	K	L
底层类型	水泥	水泥	石灰土	石灰土	石灰土	石灰土	路基	路基	路基
底层综合模量	793	957							
级配碎石层综合模量	449.9	582.3	562.6	451.8	411.3	326	241	78.9	77.4
反算模量	596	439	953	730	670	642	390	132	110
样本数	20	20	20	20	20	20	20	20	20
层位	过渡层		基层				底基层		

(4) 吉林通化试验路

吉林通化试验路修建于 2001 年 8 月，采用两种结构型式，一种以二灰土为底基层，15 cm 的级配碎石基层，另一种为二灰碎石基层，20 cm 的级配碎石过渡层，在施工过程中和通车 1 年后分别对级配碎石基层和级配碎石层进行了承载板测定，并反算了级配碎石层的弹性模量。结果如表 8（黑体为 1 年后的结果）、表 9 和图 4 所示。

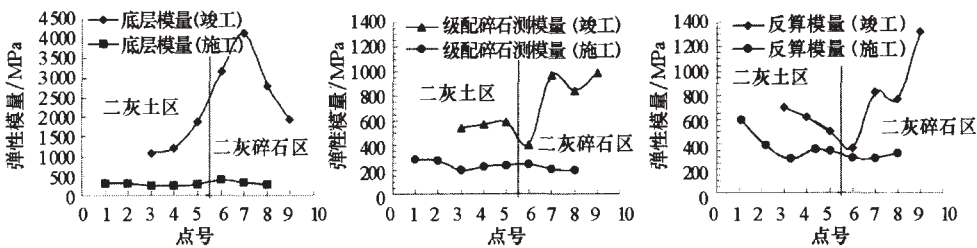


图 4 施工中和竣工 1 年后各层模量对比

Fig.4 The compare of graded aggregate base modulus in construction and after construction one year

碎石层。竣工 1 年后级配碎石的实测模量和反算模量均有大幅度提高，分别为施工期间的 2.3~3.7 倍和 1.5~2.7 倍，其原因不仅仅是半刚性基层模量的大幅度提高，更主要的是沥青面层的约束作用增加了级配碎石层的稳定性，而且此时所测得的模量更接近级配碎石层在路面结构中和实际荷载下的受力状态，是其强度特性的真实反映。

3 级配碎石弹性模量建议值

3.1 模量汇总与推荐

根据前述各试验路的反算结果，按级配碎石所

表 8 吉林通化试验路模量反算结果 /MPa

Tab.8 The modulus anti-calculate results of Tonghua test road in Jilin

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
底层类型	二灰土	二灰土	二灰土	二灰土	二灰土	二灰碎石	二灰碎石	二灰碎石	二灰碎石
底层模量	322.9	322.4	240.2	252.1	280.3	398.4	328	267.4	1 949
级配碎石	279.9	270.1	197.2	228.1	239.6	248.2	204.1	199	990
层综合模量	536	572	586	610	420	330	390	350	290
反算模量	700	620	500	700	620	500	360	830	770
层位	基层					过渡层			

表 9 施工竣工平均汇总 /MPa

Tab.9 The collection of the graded aggregate base modulus in different period

	施工中	竣工 1 年
二灰土实测	284	1 385
级配碎石实测	243	565
反算结果	420	607
二灰碎石实测	330	3 018
级配碎石实测	217	801
反算结果	303	820

由图 4 可以看出，施工过程中所反算的结果较低，是因为级配碎石基层的模量低，为赶工期，半刚性下层没有达到规定的养生时间就开始摊铺级配

在的层位进行汇总如表 10。

表 10 级配碎石弹性模量汇总 /MPa

Tab.10 The collection of the graded aggregate base modulus

结构层	试验路				统计	
	吉林通化	四川南广	青海马平	山西平遥	范围	均值
过渡层	820	415	914	596	400-900	686
基层	607	406	590	594	400-600	549
底基层		261		210	200-250	236

级配碎石为过渡层和基层时，其下层一般为水泥稳定或二灰碎石，强度较高，级配碎石所受的三向应力较大，表现出的强度较高，但过渡层厚度多

为 12 cm 左右，施工过程易离析和压实困难，进而强度波动范围较大 400~900 MPa；级配碎石底基层厚度在 20~40 cm，下层多为二灰土或沙砾、土基，反算模量低，但强度波动较小。

综合各种试验结果：室内试验的推荐模量为 500~600 MPa，动三轴试验为 450~500 MPa，试验路的大量反算结果，并考虑了可行性，给出级配碎石在路面结构中的模量建议值如表 11。

表 11 级配碎石设计参数推荐值
Tab.11 The recommended modulus of the graded aggregate base

基层种类	级配要求	抗压模量/MPa
过渡层	密实 - 悬浮级配取低	450 ~550
基层		
底基层	骨架 - 密实级配取高	200 ~300

3.2 模量验证

通过分析可知，级配碎石过渡层在标准荷载的作用下所受的压应力为 0.3~0.4 MPa，基层为 0.1~0.2 MPa，根据比利时给出粒料基层的模量公式，计算结果为：过渡层级配碎石模量的变化范围是 482~510 MPa，基层变化的范围是 387~445 MPa，与推荐的结果一致。

Shell 设计方法中对直接铺在土基上的级配碎石底基层给出了确定其模量经验公式，模量值的大小与土基模量和级配碎石厚度有关，采用 Shell 公式对四川和山西试验路级配碎石底基层进行了模量计算，结果见图 5。两处试验路的级配碎石底基层的回弹模量多数处于 200~300 MPa 之间，均值分别为 250 MPa 和 231 MPa，与级配碎石底基层设计参数的推荐值 200~300 MPa 相当。

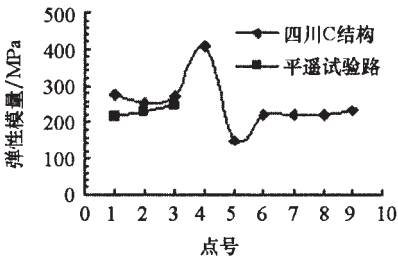


图 5 级配碎石回弹模量的验证
Fig.5 The validation of graded aggregate base modulus

采用国外比较成熟的级配碎石模量的确定方法，对推荐的设计参数进行验证，吻合较好，说明根据室内试验和试验路反算结果推荐的级配碎石各层模量比较合理，按层位推荐也反映了级配碎石强度的非线性特点。

参考文献：

[1] JTJ014-97, 公路沥青路面设计规范[S] .
[2] JTJ059-95, 公路路基路面检测规范[S] .
[3] A NATATMADJA. 循环加载下粒料的回弹模量 [A] . 第七届国际沥青路面结构会议论文集[C] . 北京: 人民交通出版社, 1992.
[4] 张守全 . 粒料路面承载板试验 [A] . 中国道路学会 1985 年年会论文集[C] . 北京: 人民交通出版社, 1985.
[5] 王树森 . 级配碎石基层材料组成设计与工艺控制的研究 [J] . 公路, 2001, (2): 24- 32.
[6] 交通部 . 高等级公路沥青路面柔性基层的研究 [R]. 北京: 交通部科教司, 2002.
[7] 曹建新 . 重载交通下级配碎石基层材料组成结构与动力特性的研究[D] . 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2001.
[8] 王哲人, 等 . 级配碎石混合料的动力变形特性 [J] . 中国公路学报, 2003, (1): 21- 26.