

文章编号:1671-8879(2007)06-0029-05

级配碎石回弹变形特性

袁 峻¹, 黄晓明²

(1. 扬州大学 建筑科学与工程学院, 江苏 扬州 225009; 2. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096)

摘 要:级配碎石具有非线性的应力-应变特性,回弹模量是有效描述这一特性的参数,通过室内动三轴试验能够得到较好的模拟级配碎石回弹模量的模型。分析了影响级配碎石回弹变形特性的各种因素,并进行了试验验证。通过数据拟合发现,Uzan 模型能更好地反映级配碎石的非线性回弹变形特性,且模型中的回归参数与级配中小于 0.075mm 筛孔的质量分数有一定的关联性。并针对影响级配碎石回弹模量的两个重要参数:级配中小于 0.075mm 筛孔的质量分数和含水质量分数,提出相应的取值范围建议。

关键词:道路工程;级配碎石;动三轴试验;回弹模量模型;影响因素;回归参数

中图分类号:U416.214 **文献标志码:**A

Resilient deformation behavior of unbound stone aggregates

YUAN Jun¹, HUANG Xiao-ming²

(1. School of Architecture and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, Jiangsu, China;
2. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

Abstract: The unbound stone aggregates have a nonlinear stress-strain behavior, the resilient modulus can describe this character effectively, the resilient modulus model can be attained through dynamic load triaxial test. The affecting factors of the resilient deformation behavior of unbound stone aggregates are analyzed with dynamic load triaxial test. The result shows that the Uzan model can display nonlinear resilient deformation behavior of unbound stone aggregates accurately, and the regression coefficient has relationship with 0.075 mm passing percent. The suggested scope of two important design parameters, 0.075 mm passing percent and water content, is given. 5 tabs, 7 figs, 9 refs.

Key words: road engineering; unbound stone aggregates; dynamic load triaxial; resilient modulus model; affecting factor; regression parameter

0 引 言

级配碎石为松散性材料,具有不传递拉应力、拉应变的特性。因此,将级配碎石作为沥青面层与半刚性基层之间的夹层,用来吸收下卧层裂缝释放的应变能,从而阻止半刚性底基层的反射裂缝。对于

这种道路结构的设计,选择能反映级配碎石力学特性的参数十分重要。回弹模量可以有效地描述级配碎石应力-应变的非线性关系,最为接近地模拟了材料在实际交通荷载作用下的变形特性。通过室内动三轴试验得到的数据可以较好地拟合非线性回弹模量模型。级配碎石的回弹模量随应力而变化,受到

收稿日期:2006-05-25

作者简介:袁 峻(1979-),女,江苏扬州人,讲师,博士,E-mail:tjyuanjun@163.com。

应力水平、材料级配和含水质量分数等因素的影响。在不同状态下得到的材料模型参数可引入相应的计算程序中,进行道路结构设计。有关研究人员采用 CBR 法^[1],或在其基础上,采用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^[2-4];何兆益^[5]采用动三轴试验对级配碎石的模量进行了初步的探讨。本文主要就拟合级配碎石回弹模量模型的试验方法、回弹模量的影响因素以及模型回归参数的选取做了进一步的研究。

1 试验方案设计

1.1 试验的影响因素

在进行三轴试验中,试样端部的约束,导致靠近试样端部土体的径向应变和轴向应变均偏小,高估了三轴试验土体的剪切强度;在三轴试样变形测量中,三轴试样的端部接触效应使得轴向变形被高估;试样端部存在影响排水量的“藏水区”,导致试样体积变化的测量误差。因此,在设计试验方案时,必须考虑这些不利因素的影响^[6]。

1.1.1 端部约束

三轴试样在受力变形的过程中,试件与试样帽(底座)之间存在摩擦,导致试件端部的约束,这使得试件内部应力和变形分布不均匀。试样剪切过程中,沿着试件的高度方向,径向应变中间大,两边小,变形后的试样一般呈鼓形。通常采用增加试件高度与直径的比例,以及采用各种减小试件与试样帽(底座)接触面摩擦力的方法。

假设土壤试件破坏平面角度 φ 为 40° ,这就要求三轴试件高度 l 与直径 d 之间的比例(l/d)应至少为 $\tan(45^\circ + \varphi/2) = 2.1$ 。有关研究的试验数据和

研究结果表明:在进行常规的三轴剪切强度试验时,试件的高度与直径的比例应为 $2.0 \sim 2.5$;增加 l/d 的比例,不能减少试件内应力分布不均匀的区域,只能增加试件内应力均匀分布的区域^[7]。因此,在试验中还应采用接触面比较光滑的端部约束物,以减小不利因素。

1.1.2 端部接触

三轴试样的端部接触问题,是指试验开始时和试验过程中,加载杆与试样帽之间以及试样两端的试样帽和土样之间的接触面会产生接触间隙。因此,在进行测量之前,需要先有一定的周围应力下,偏应力循环一定次数,使得试样帽和试件之间接触紧密;之后,再施加不同的应力,测得试件变形量。

1.1.3 藏水区

三轴试样端部接触部位有一个特殊的区域,称之为“藏水区”。它存在于端部橡皮膜与试样和试样帽(底座)周边形成的接触缝中。当压力室内围压或土样所受轴向荷载发生变化时,“藏水区”的水量也会发生变化,这也会导致试样体积变形测量的不准确。因此,在试验时,应将试件外面的橡胶膜绑紧在试样帽(底座)上,以防止透水。

1.2 材料

级配碎石的材料通常有石灰岩、玄武岩等,其中,石灰岩易轧制成立方体,细颗粒中碳酸盐质量分数较高,与拌和水一起对粗集料能够起到较好的胶结作用^[8-9]。因此,本研究采用优质轧制石灰岩作为试验材料。考虑模具的直径对最大粒径的影响,最大粒径不应超过模具直径的 $1/4$ 。因此采用级配的最大粒径为 26.5 mm ,级配组成见表 1。

表 1 三轴试验级配

级配类型	级配通过下列筛孔(方孔筛,mm)的质量分数/%											
	26.50	19.00	16.00	13.20	9.50	4.75	2.36	1.18	0.60	0.30	0.15	0.075
A(26.5 细)	100	90	84	78	70	55	43	32	24	18	13	10
B(26.5 中)	100	90	83	78	69	47	32	23	17	12	9	6
C(26.5 粗)	100	90	79	69	57	35	22	14	9	6	4	2

级配按小于 0.075 mm 质量分数的多少分为粗级配(10%)、中间级配(6%)和细级配(2%)。细级配和中间级配分别按击实成型的最佳含水质量分数、稍干的含水质量分数和稍湿的含水质量分数进行配置。由于粗级配的细集料少,难以形成整体,因此只在最佳含水质量分数下成型(表 2)。

表 2 不同级配和不同含水质量分数下的干密度

试件号	1	2	3	4	5	6	7
级配类型	A	A	A	B	B	B	C
含水质量分数/%	4.3 (偏干)	5.3 (最佳)	6.3 (偏湿)	4.0 (偏干)	5.0 (最佳)	6.0 (偏湿)	4.3 (最佳)
干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	2.397	2.435	2.417	2.368	2.384	2.372	2.201

1.3 试验仪器

将道路材料试样在十分接近实际现场的模拟环境下进行测试。在荷载作用下,道路材料承受的荷载应力包括竖直和水平的冲击应力及剪切应力。同时,道路材料单元体受到的主应力随车轮荷载的靠近和离开而改变。因此,试验仪器应该能通过施加荷载模拟交通状况,操作简单,并可重复使用。

动三轴试验能同时模拟级配碎石三向受压的复杂应力状态及反复动载作用,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有效的方法。

本研究采用的是澳大利亚 IPC (Industrial Process Controls Limited) 公司生产的综合测试仪器 (UTM Universal Testing Machine)。它是由计算机控制的水力加载的重复荷载动三轴仪器。研究人员可以使用计算机、控制和数据采集系统以及相关的软件进行试验。动三轴仪器压力室的试样尺寸为 100 mm×200 mm,轴向荷载气压动态输出,压力为 0~20 kN。侧向压力采用水压,压力为 0~600 kPa。数据采集通过连接于应力应变传感器上的电子采集系统获得,控制和数据采集系统将获得的数据通过软件实时显示。

1.4 应力波形、脉冲时间和频率

汽车对路面作用的荷载波形近似一个正弦波(负向力很小,可忽略不计)。考虑实际路面上的荷载作用,采用动三轴应力波形为:半正弦矢波脉冲动偏应力。应力持续时间 0.1 s,间歇时间 0.9 s,即频率为 1 Hz(60 次/min)。

1.5 应力施加顺序

动三轴试验中应力施加反映了碎石基层在路面中的实际受力状况。本试验采用的是 AASHTO DESIGNATION T 307-99(基层与底基层材料)试验方法。先在相同的围压 σ_3 下采用不同偏应力 σ_d 进行试验,然后再改变围压进行下一轮试验。应力组合见表 3。试件先在初始应力状态下进行预压,等达到一定的接触压力后,再在每个应力状态下竖向动态应力重复 100 次,待稳定后取平均值作为最终的试验数据。

1.6 试件制备

试样成型的好坏将严重影响试验结果,本文所用试样标准尺寸为 $\Phi 100\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 。为防止成型过程中试样受到扰动,使级配碎石结构受到损伤,采用相应尺寸的对开圆形铜试模,内套一较厚乳胶薄膜,然后将加水拌匀的料均匀分 5 次倒入试模击实。待击实完成后,卸除对开模,在装入压力室前,

表 3 动三轴试验应力施加顺序

加荷顺序	σ_3/kPa	σ_d/kPa	σ_d 施加次数/次
0	103.4	103.4	1 000
1	20.7	20.7	100
2	20.7	41.4	100
3	20.7	62.1	100
4	34.5	34.5	100
5	34.5	68.9	100
6	34.5	137.9	100
7	68.9	68.9	100
8	68.9	137.9	100
9	68.9	206.8	100
10	103.4	68.9	100
11	103.4	103.4	100
12	103.4	206.8	100
13	137.9	103.4	100
14	137.9	137.9	100
15	137.9	275.8	100

再在其外套上一层较薄乳胶膜,并用橡胶条将试样上下两端扎紧在底座和顶面压力块上,严防漏水、漏气。

2 试验结果分析

2.1 回弹模量数据回归

模拟级配碎石回弹模量的模型通常有:

(1) $k\text{-}\theta$ 模型。该模型中回弹模量依赖于主应力之和,即

$$M_R = k_1 \theta^{k_2}$$

(1)

式中: M_R 为回弹模量; θ 为主应力之和或第一应力不变量($\sigma_1 + 2\sigma_3$); σ_1 为主应力或轴向应力; k_1 、 k_2 为回归系数。

(2) Uzan 模型。Uzan 对 $k\text{-}\theta$ 模型进行了修改,通过增加偏应力来说明其剪切性能,即

$$M_R = k_3 \theta^{k_4} \sigma_d^{k_5}$$

(2)

式中: σ_d 为偏应力($\sigma_1 - \sigma_3$); k_3 、 k_4 、 k_5 为回归系数。

Uzan 模型能够说明剪切和膨胀的影响,并且比 $k\text{-}\theta$ 模型能更好地拟合数据。

对各级配在不同的含水质量分数和密度下进行动态重复荷载三轴试验,按照上述试验方法得到的模量与应力状态数据,分别对 $k\text{-}\theta$ 模型和 Uzan 模型进行拟合。回归得到的试件模型参数见表 4。

根据表 4 的数据,分别计算试验的材料在低应力(围压 40 kPa,偏应力 30 kPa)、中间应力(围压 100 kPa,偏应力 70 kPa)以及高应力(围压 120 kPa,偏应力 130 kPa)下,应用 $k\text{-}\theta$ 模型得到回弹模量值(表 5)。

表 4 级配碎石模量应力依赖模型的参数

试件号	$k-\theta$ 模型			Uzan 模型			
	k_1	k_2	R^2	k_3	k_4	k_5	R^2
1	354.54	0.686	0.932	389.27	0.602	0.080	0.938
2	336.99	0.705	0.934	363.44	0.636	0.066	0.938
3	304.22	0.717	0.933	346.05	0.599	0.112	0.943
4	460.26	0.587	0.946	497.15	0.618	0.066	0.950
5	406.69	0.689	0.898	502.22	0.494	0.184	0.928
6	383.78	0.705	0.893	454.89	0.551	0.147	0.911
7	346.27	0.633	0.921	408.44	0.486	0.143	0.940

表 5 不同应力状态下材料的计算回弹模量 MPa

应力状态	试件号						
	1	2	3	4	5	6	7
低应力	96	88	78	151	110	101	104
中应力	179	167	149	257	205	190	185
高应力	217	204	182	303	249	232	220

2.2 级配对回弹模量的影响

国外的研究表明,级配对材料的回弹模量有一定的影响,其中小于 0.075 mm 矿粉的质量分数对回弹模量较为敏感。选取粗级配、中间级配和细级配在最佳含水质量分数下得到的回弹模量进行比较,在不同的应力状态下,回弹模量均呈现驼峰曲线状。在小于 0.075 mm 矿粉的质量分数为 6% 时回弹模量最大。当矿粉质量分数大于或小于 6% 时,回弹模量均减小。具体分析比较如图 1 所示。

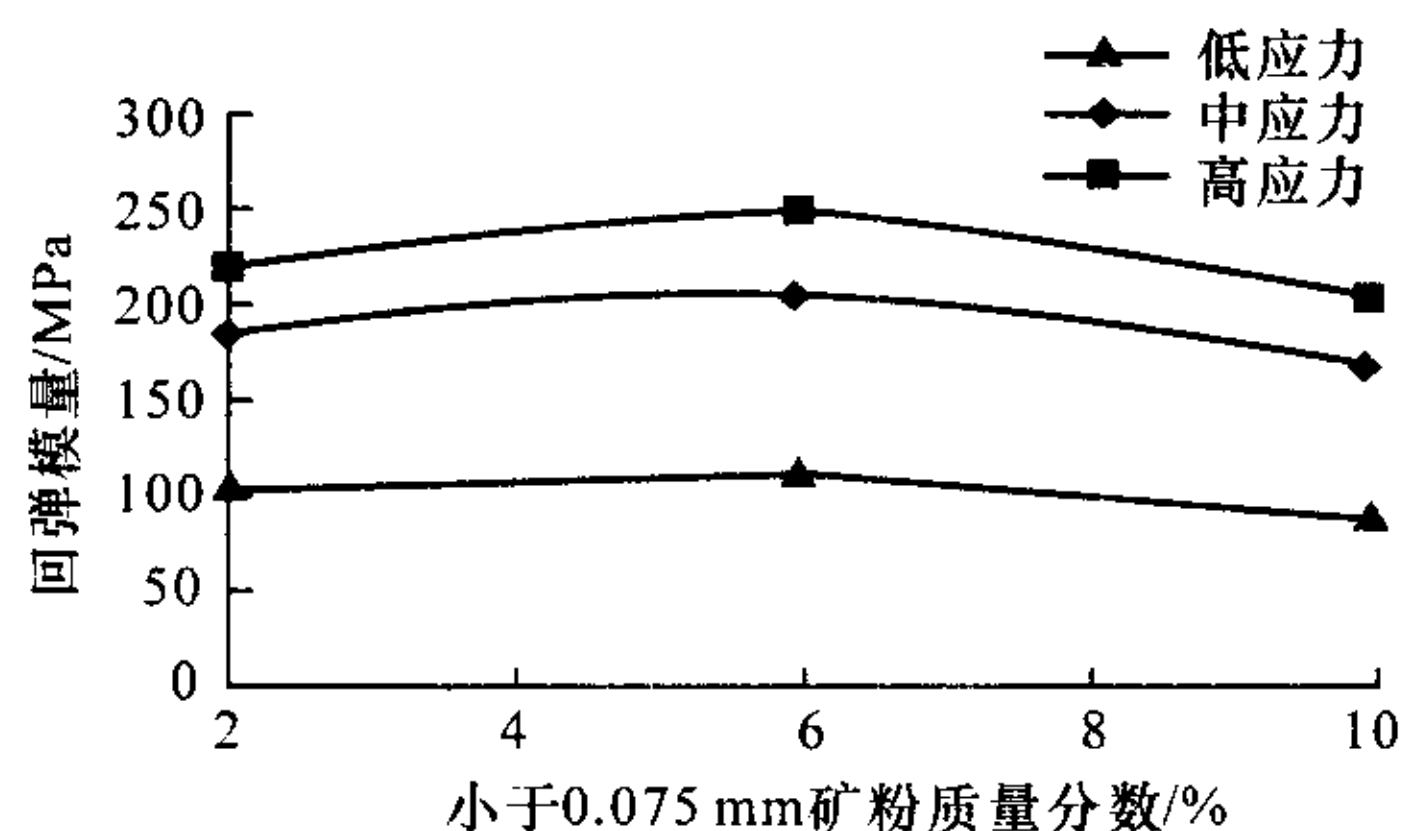


图 1 小于 0.075 mm 矿粉的质量分数对回弹模量的影响

2.3 含水质量分数对回弹模量的影响

选取中间级配进行研究,分别在最佳含水质量分数、小于 1% 最佳含水质量分数以及大于 1% 最佳含水质量分数下得到不同应力状态下的回弹模量。从图 2 可以看出,随着含水质量分数的减少,回弹模量值增大。当回弹模量的最大值并不出现在最佳含水质量分数时,含水质量分数减小反而回弹模量增大。这可能是,由于含水质量分数增加,导致骨料间相互作用减弱、孔隙水压力增加和有效应力增加,因而回弹模量减小。如果材料含水质量分数过低,材料松散,无法发挥其嵌挤的能力,则试件无法成型。

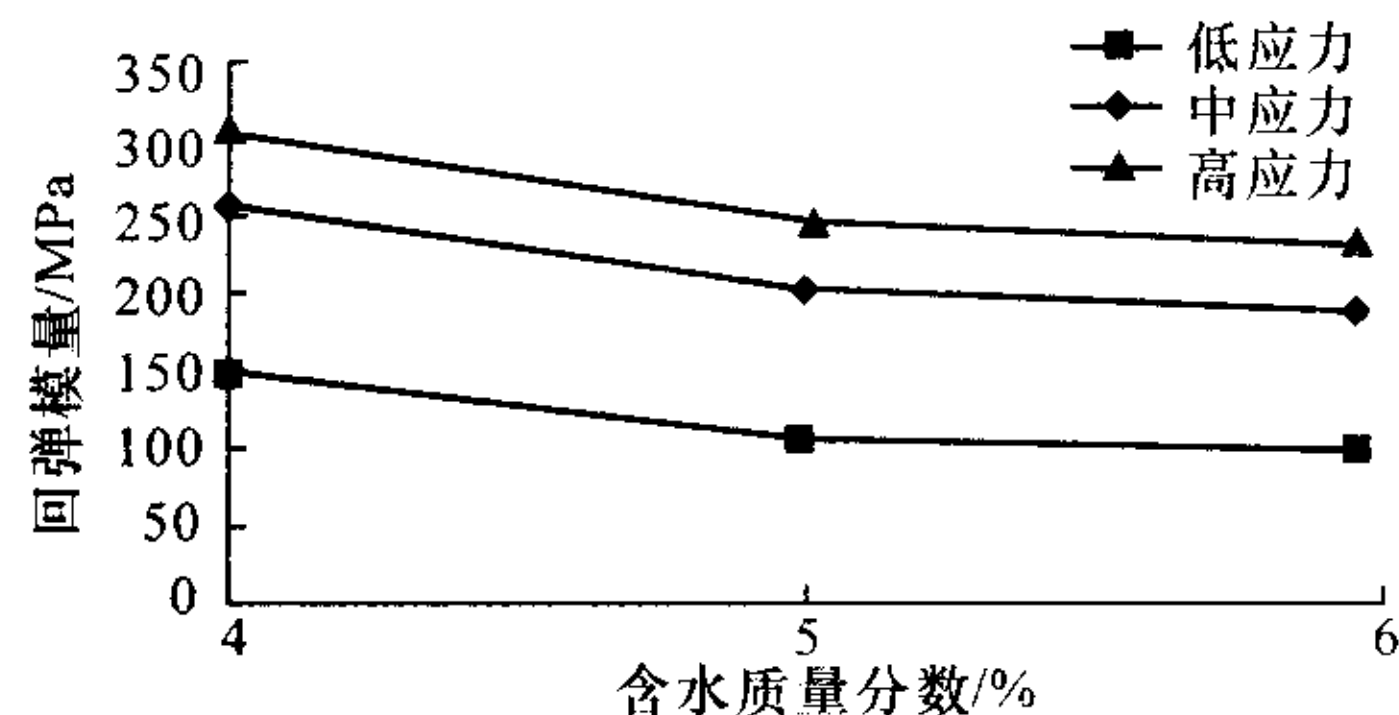
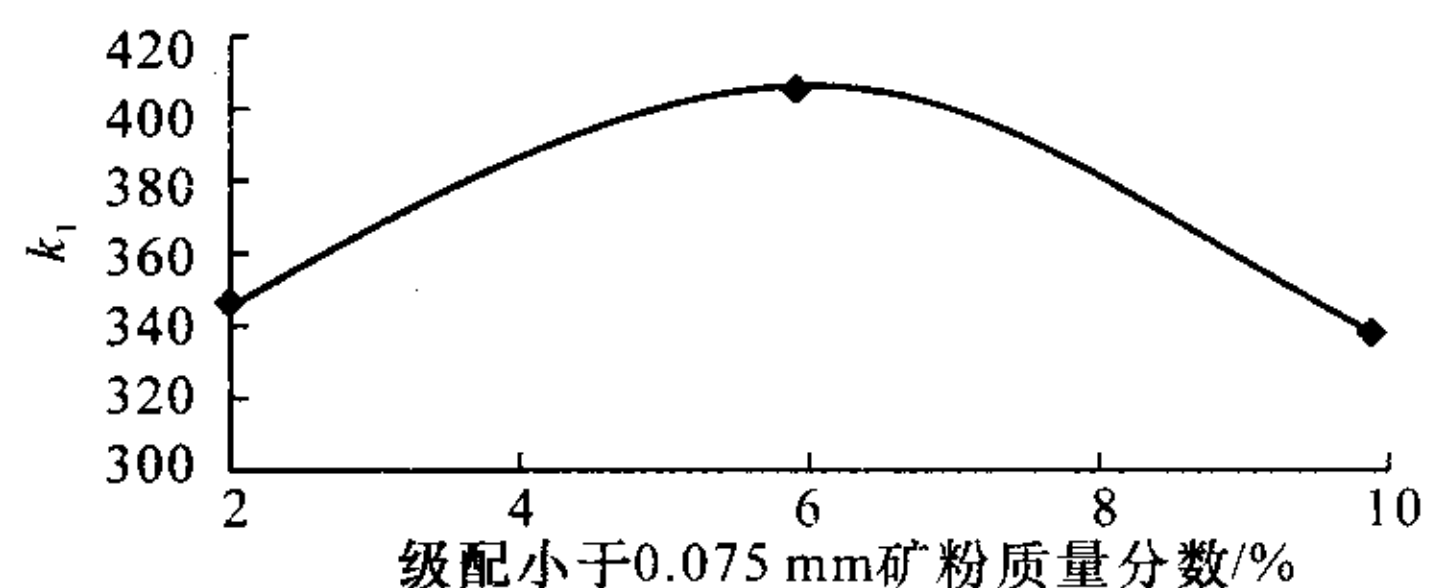
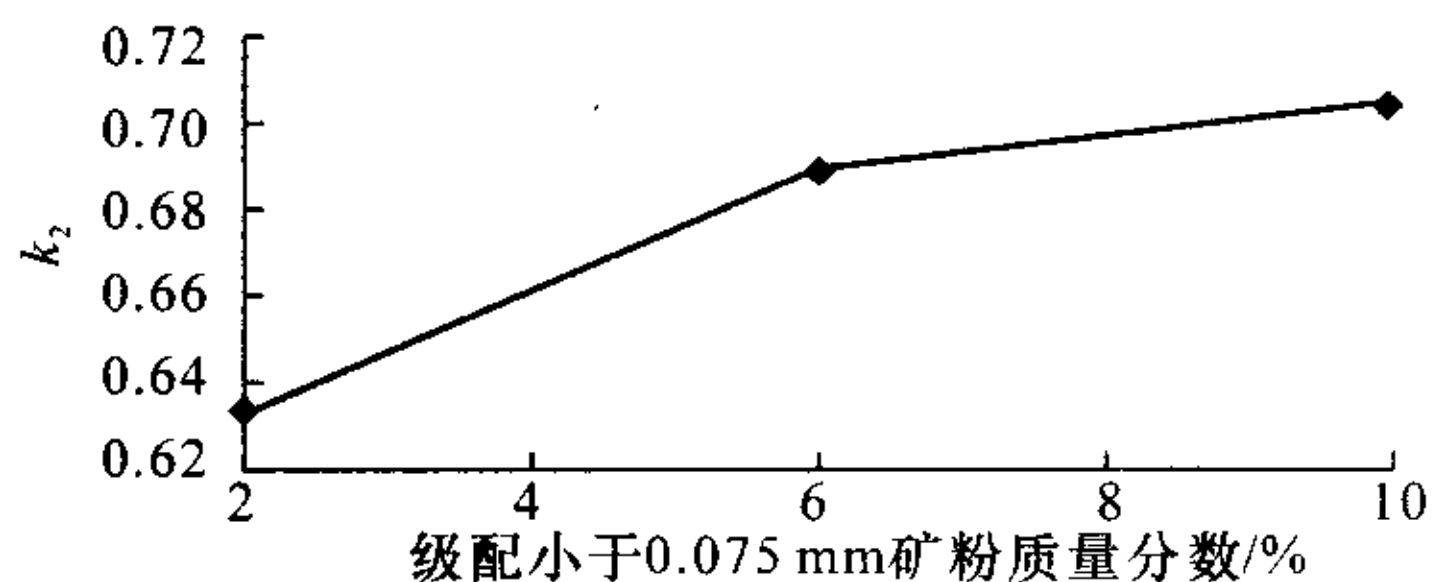
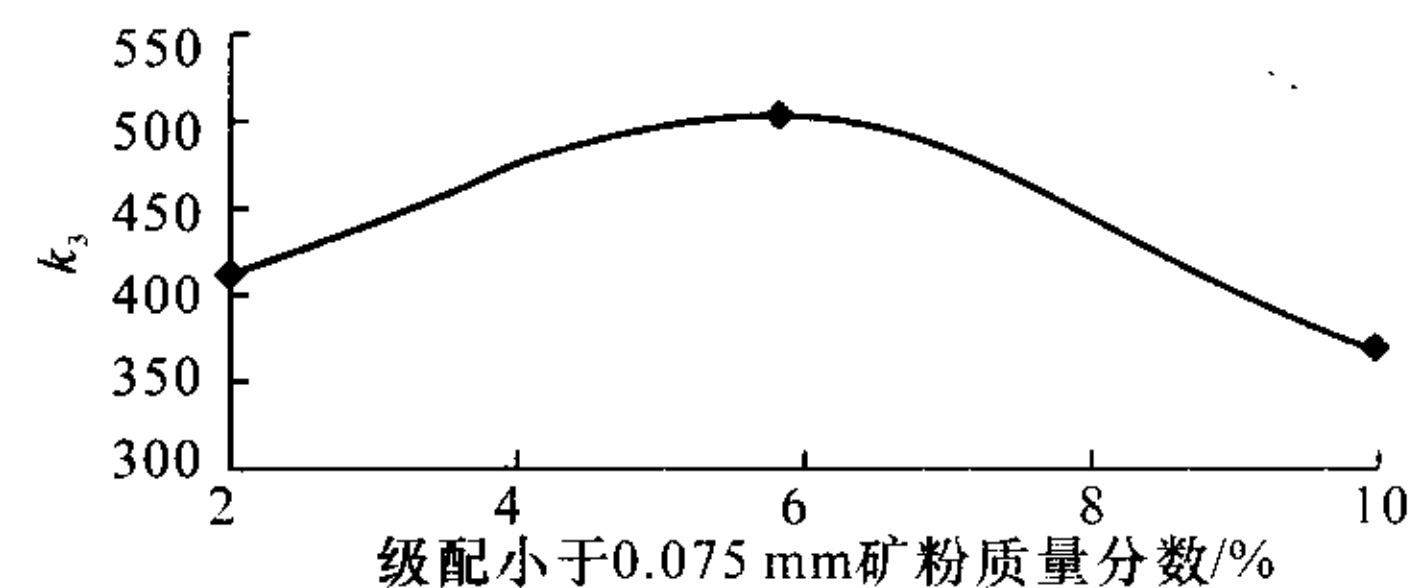
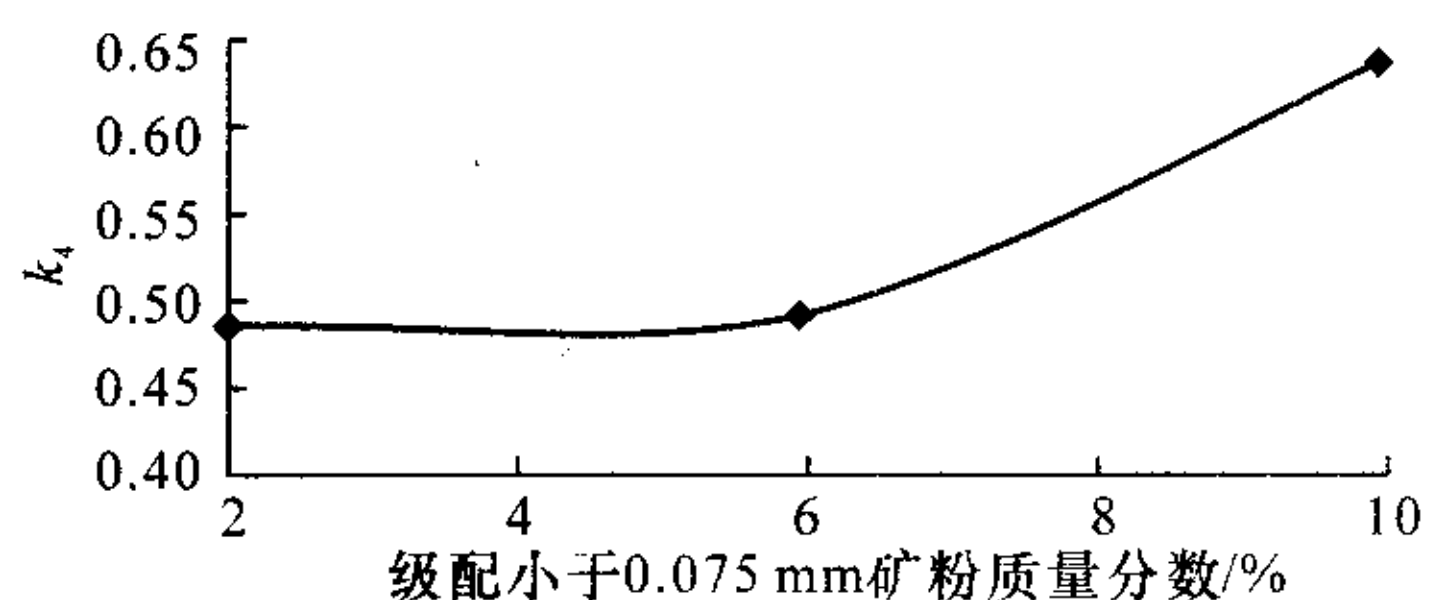
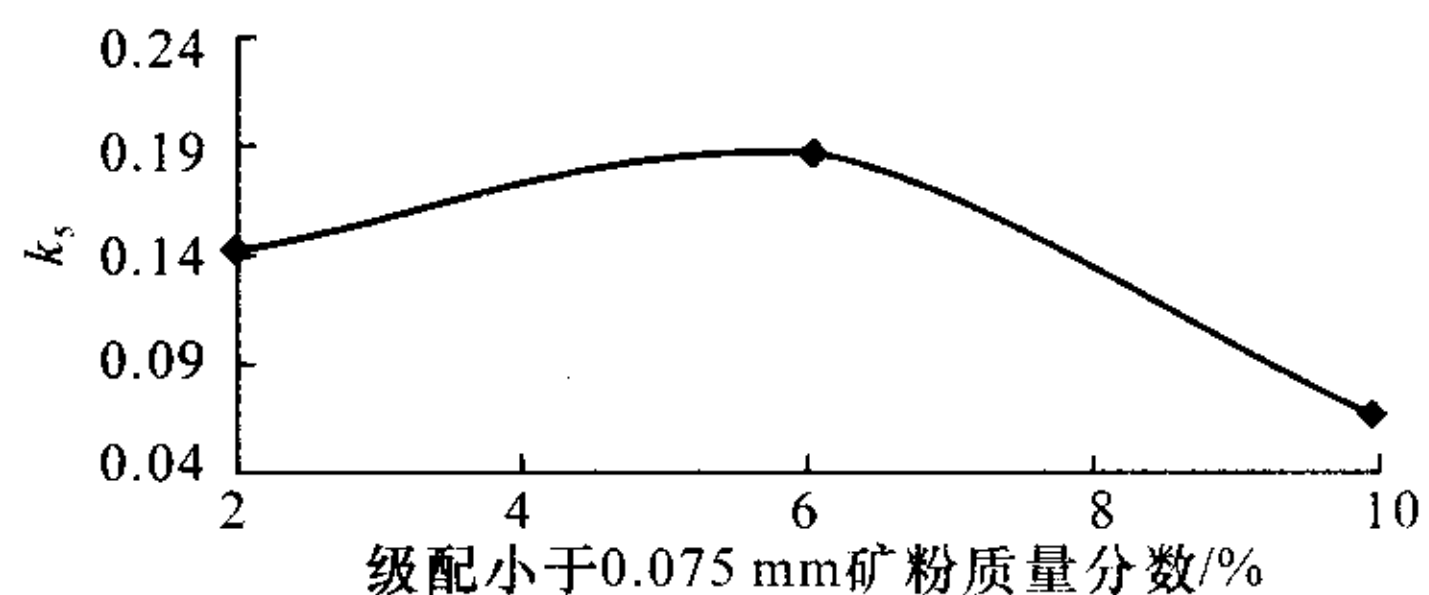


图 2 含水质量分数对回弹模量的影响

2.4 回弹模量模型分析

从表 4 可见, $k-\theta$ 模型和 Uzan 模型能够较好地拟合动三轴试验数据。使用 Uzan 模型拟合数据,回归系数的相关性更好一些。

试验所用材料的级配: $k-\theta$ 模型的 k_1 为 304.22~460.26, k_2 为 0.587~0.717; Uzan 模型的 k_3 为 346.05~502.22, k_4 为 0.486~0.636, k_5 为 0.066~0.184。以最佳含水质量分数下的材料为例,取试件号 2、5、7 进行比较,随着级配中 0.075 mm 矿粉质量分数的变化, $k_1 \sim k_5$ 的变化如图 3~图 7 所示。

图 3 k_1 随级配小于 0.075 mm 矿粉质量分数的变化图 4 k_2 随级配小于 0.075 mm 矿粉质量分数的变化图 5 k_3 随级配小于 0.075 mm 矿粉质量分数的变化图 6 k_4 随级配小于 0.075 mm 矿粉质量分数的变化图 7 k_5 随级配小于 0.075 mm 矿粉质量分数的变化

从图3~图7可以看出,随着小于0.075 mm矿粉质量分数的变化, k_1 、 k_3 和 k_5 的值均呈驼峰曲线变化,在级配小于0.075 mm矿粉质量分数为6%时达到最大; k_2 和 k_4 的值随着级配小于0.075 mm矿粉质量分数的增加而增加。

当不考虑级配碎石材料非线性的应力应变特性时,计算中级配碎石层中通常会出现水平张拉应力。由于级配碎石为粒状材料,可通过集料之间的嵌锁,扩散荷载应力;荷载通过颗粒之间的压力和剪切力传递,张力不能在颗粒之间传递。通过引用级配碎石非线性回弹变形的特性,可以有效地减小线性状态下预测的张拉应力区域。

将材料的非线性模型代入弹性层状体系中,采用迭代技术,即确定初始模量,并用层状理论分析计算应力,然后在当前应力状态下,使用非线性模型重新确定下次迭代的新模量,直到前后两次迭代的模量相近为止。将级配碎石非线性模型引入有限元中,能更精确地模拟道路结构的非线性应力-应变变化,更好地进行道路结构设计。

3 结 语

(1) 级配碎石模量应采用室内重复荷载三轴试验进行拟合。 $k-\theta$ 和Uzan模型能较好地拟合级配碎石依赖应力而变化的回弹模量,其中Uzan模型能够更好地反映材料的非线性回弹变形特性。使用级配碎石的非线性模型,能够更合理地预测道路结构中的应力分布状况。

(2) 良好的材料性质以及级配能提高材料的回弹模量,因此应该注意限制材料的塑性。对回弹模量影响较大的级配小于0.075 mm矿粉的质量分数宜控制在5%~7%。

(3) 含水质量分数是影响材料回弹模量的又一大因素。随含水质量分数的增加,材料回弹模量减小。为了使材料能够较好的成型,形成材料骨架之间的嵌挤,材料不松散,应控制施工含水质量分数,保证其在最佳含水质量分数下施工。同时,在进行道路结构设计时,应注重级配碎石层的排水。

(4) 应用动三轴试验得到 $k-\theta$ 模型和Uzan模型中回归参数的取值范围,并发现回归参数与材料中小于0.075 mm矿粉质量分数有一定的关系,这有待于今后更多的试验数据进行验证。将非线性模型代入弹性层状体系或有限元中,可以更好地模拟道路结构受力特性,进行道路结构设计。

参考文献:

References:

- [1] 王东耀,刘丽萍,叶万军. 山渣料路用性能试验[J]. 长安大学学报:自然科学版,2007,27(1):15-18.
WANG Dong-yao, LIU Li-ping, YE Wan-jun. Road performance experiment of rock slag mixture [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007,27(1):15-18.
- [2] 王哲人,曹建新,王 龙,等. 级配碎石混合料的动力变形特性[J]. 中国公路学报,2003,16(1):22-26.
WANG Zhe-ren, CAO Jian-xin, WANG Long, et al. Dynamic deformation characteristic of grading macadam mixture[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003,16(1):22-26.
- [3] 王 龙,冯德成. 提高级配碎石基层使用性能的方法[J]. 中国公路学报,2006,19(4):40-45.
WANG Long, FENG De-cheng. Methods for improving using performance of graded broken stone base[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006,19(4):40-45.
- [4] 马 磊,莫石秀,王秉纲. 基于剪切性能的级配碎石关键筛孔合理范围确定[J]. 交通运输工程学报,2005,5(4):27-31.
MA Biao, MO Shi-xiu, WANG Bing-gang. Rational range determination of key sieve pores for graded crushed stone based on shear performance [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005,5(4):27-31.
- [5] 何兆益. 碎石基层防止半刚性路面裂缝及其路用性能研究[D]. 南京:东南大学,1997.
- [6] 王助贫,邵龙潭. 三轴试验土样的端部影响问题研究[J]. 岩土力学,2003,24(3):363-368.
WANG Zhu-pin, SHAO Long-tan. Research on influence of end effect of soil specimens in triaxial tests [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003,24(3):363-368.
- [7] Umit S. Characterization of anisotropic granular layer behavior in flexible pavements [D]. Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2001.
- [8] 杨红辉,郝培文,戴经梁. 掺膨胀剂水泥稳定碎石路用性能[J]. 交通运输工程学报,2006,6(1):48-51.
YANG Hong-hui, HAO Pei-wen, DAI Jing-liang. Road performance of cement-stabilized aggregate mixture with expansion agent[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006,6(1):48-51.
- [9] 蒋应军,戴经梁,陈忠达. 不同等效原则的基层顶面当量回弹模量算法[J]. 长安大学学报:自然科学版,2005,25(3):1-6.
JIANG Ying-jun, DAI Jing-liang, CHEN Zhong-da. Calculation method of equivalent modulus of elasticity of foundation under principles of different equivalence [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005,25(3):1-6.