

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.20220807002

文章编号:1672-9331(2023)01-0016-08

引用格式:吴水辉,蒋晨煜,许慧,等.级配碎石横观各向同性动态回弹模量预估研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2023,20(1):16-23.

Citation: WU Shuihui, JIANG Chenyu, XU Hui, et al. Prediction of cross-anisotropic resilient modulus for unbound aggregates[J]. J. Changsha Univ. Sci. Tech (Nat. Sci.), 2023, 20(1): 16-23.

级配碎石横观各向同性动态回弹模量预估研究

吴水辉¹, 蒋晨煜², 许慧¹, 顾凡²

(1. 江苏新越高新技术股份有限公司, 江苏 镇江 212001; 2. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:【目的】建立一种快速且高效预估级配碎石横观各向同性动态回弹模量的方法。【方法】首先,选取四种碎石材料,通过级配试验、击实试验、亚甲蓝试验、细骨料含量试验和集料成像系统试验表征级配碎石材料特性。接着,提出可以表征应力水平和湿度状态对回弹模量影响的级配碎石横观各向同性动态回弹模量本构模型。然后,通过开展室内快速动三轴试验并采用系统识别方法得到四种碎石材料在不同级配组合、应力水平和湿度状态下的竖向、横向和剪切模量。最后,利用相关性系数评估模型的拟合精度,采用JMP统计软件并基于多元线性逐步回归方法建立级配碎石材料特性与横观各向同性回弹模量模型参数之间的回归关系。【结果】级配碎石横向模量与竖向模量比为0.3~0.6,剪切模量与竖向模量比为0.2~0.4;中级配碎石横观各向同性回弹模量普遍高于粗级配或细级配碎石的回弹模量;在不同的应力水平条件下,级配碎石的横向、竖向和剪切模量均随含水率的增加而减小。【结论】新的横观各向同性动态回弹模量模型通过引入基质吸力和汉克儿应力因子,能够精确拟合快速动三轴试验得到的级配碎石试件在不同应力水平和湿度状态下的横观各向同性回弹模量,平均拟合相关系数高达0.98;级配碎石的干密度、含水率、亚甲蓝值、细骨料含量、级配、棱角性和形状等材料特性均显著影响横观各向同性回弹模量模型参数。

关键词:级配碎石;回弹模量;横观各向同性;应力相关;湿度敏感;快速动三轴试验

中图分类号:U416.214

文献标志码:A

0 引言

级配碎石常用作道路基层材料,主要起承载和分散荷载应力的作用,准确表征级配碎石的回弹特性对路面结构设计和长期性能预估极为重要。已有大量研究表明,级配碎石是一种非线性横观各向同性和竖向与横向异性材料,具体而言,级配碎石的回弹模量具有应力相关性、湿度敏感性和水平方向模量低于竖直方向模量等特点。张军辉等^[1]根据室内动三轴试验结果建立了级配碎石应力相关回弹模量模型,准确揭示了粗颗粒碎石材料在不同应力状态下的回弹特性演化规律。

张文力等^[2]通过循环荷载试验建立了频率、幅值与级配碎石回弹模量之间的关系,发现级配碎石回弹模量与累积变形之间的正相关关系不受频率和幅值的影响。蒋应军等^[3]通过离散元方法模拟室内动三轴试验,分析了含水率、级配和压实度等因素对级配碎石回弹模量的影响。诸多研究表明,回弹模量受应力状态、含水率、压实度和级配等因素综合影响。吕松涛等^[4]通过动三轴试验研究了压实度、含水率和应力状态等因素对级配碎石回弹模量的影响,并建立了基于实际应力状态变化的级配碎石动态回弹模量预估公式。肖源杰等^[5]结合60组室内重复加载三轴试验数据,对比分析了14种回弹模量预估模型的预测效果,提出

收稿日期:2022-08-07;修回日期:2022-12-05;接受日期:2022-12-16

基金项目:国家自然科学基金项目(52108400)

通信作者:顾凡(1987—)(ORCID:0000-0002-3992-3545),男,教授,主要从事路基工程方面的研究。

E-mail: fan.gu@csust.edu.cn

投稿网址: <http://csjgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

了可同时考虑级配和应力状态影响的回弹模量预估模型,发现该模型的准确性较高,对级配碎石作为基层填料时的回弹模量的预测精度更高。ADU-OSEI 等^[6]、TUTUMLUER 等^[7]通过室内动三轴试验和系统识别算法获得了级配碎石的横观各向同性回弹模量。TUTUMLUER 等^[8]提出了级配碎石的横观各向同性回弹模量模型,并发现在柔性路面结构分析中引入级配碎石基层横观各向同性模型可显著减小或消除三维各向同性模型计算得到的基层拉应力。OH 等^[9]、WANG 等^[10]指出将级配碎石看作横观各向同性材料时,模型所预测的路面应力应变响应比将其看作各向同性材料时的高,且横观各向同性模型预测的路面响应结果与路面实测结果更为接近。因此,在路面设计与结构分析时,需要将级配碎石基层材料考虑为非线性横观各向同性材料。

然而,现有的级配碎石横观各向同性试验研究均仅考虑最佳含水率状态,未考虑含水率变化对级配碎石回弹模量的影响。LEKARP 等^[11]、SALOUR 等^[12]发现级配碎石回弹模量随其饱和度的增加而减小,并建议进行路面结构分析时考虑

级配碎石回弹模量的湿度敏感性。AASHTO^[13]通过引入环境参数经验性地量化了湿度变化对级配碎石回弹模量的影响。GU 等^[14]发现 AASHTO 模型无法准确预估级配碎石在不同湿度状态和应力水平下的回弹模量,并提出引入基质吸力概念来表征湿度水平,并研究其对级配碎石回弹模量的影响。

基于以上问题,本研究旨在建立级配碎石横观各向同性回弹模量的本构模型,并考虑湿度敏感性和应力相关性对级配碎石回弹模量的影响,通过级配碎石的基本材料参数预测其回弹模量在不同湿度状态和应力水平下的变化规律。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

本研究选用石灰岩、两种不同来源的砾石(砾石-1,砾石-2)和花岗岩四种碎石集料。细、中、粗三种级配碎石的级配组合以及采用威布尔(Weibull)函数对不同级配数据的量化分析结果见表 1。

表 1 级配碎石级配分布
Table 1 Gradation distribution of unbound aggregates

级配类别	通过下列筛孔(mm)的质量分数/%											Weibull 分布	
	25	19	12.5	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	形状参数 a_c	比例参数 λ_c
细级配	100	86	73	70	65	62	50	42	32	28	20	0.76	8.80
中级配	100	86	74	67	54	43	29	23	18	13	10	0.87	12.07
粗级配	100	86	71	61	40	24	18	13	10	8	6	0.98	14.70

本研究通过集料成像系统(aggregate imaging system, AIMS) 试验表征不同类型集料的棱角性、形状和纹理特征,并采用威布尔(Weibull) 函数对不同类型集料的 AIMS 试验数据进行量化分析,分析结果见表 2。

此外,本研究通过击实试验得到不同集料类型和级配组合下级配碎石的最大干密度和最佳含水率(optimum moisture content, OMC), 并采用激光粒度分析仪和亚甲蓝试验测量集料中细骨料的含量和活性,各级配碎石的基本材料特征参数见表 3。

表 2 级配碎石几何特征的 Weibull 分布参数

Table 2 Weibull distribution parameters of geometric characteristics of unbound aggregates

集料类型	棱角性		形状		纹理	
	形状参数	比例参数	形状参数	比例参数	形状参数	比例参数
	a_A	λ_A	a_S	λ_S	a_T	λ_T
石灰岩	3.37	3 310.31	4.72	6.91	3.06	236.40
砾石-1	4.82	3 212.25	4.96	7.73	2.71	170.19
砾石-2	3.36	2 918.71	4.21	7.31	2.00	108.82
花岗岩	5.56	3 231.94	4.45	8.80	3.76	391.17

表3 级配碎石的基本材料特征参数

Table 3 Basic material properties of unbound aggregates

集料 类型	水分 状态	级配	干密度 γ_d ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	含水率 $w/\%$	亚甲蓝值 V_{MBV}	细骨料 占比/%
石灰岩	最佳	粗	2 144	2.8	9.2	7
	干燥	中	2 260	3.5	9.2	10
	最佳	中	2 350	4.1	9.2	10
	潮湿	中	2 315	4.9	9.2	10
	干燥	细	2 251	4.7	9.2	20
	最佳	细	2 302	5.4	9.2	20
	潮湿	细	2 234	5.9	9.2	20
砾石-1	最佳	粗	2 020	5.5	4.3	7
	干燥	中	2 062	5.5	4.3	10
	最佳	中	2 240	7.7	4.3	10
	干燥	细	2 075	5.4	4.3	20
	最佳	细	2 210	7.5	4.3	20
砾石-2	干燥	中	2 139	4.5	8.7	10
	最佳	中	2 167	6.2	8.7	10
	潮湿	中	2 240	7.7	8.7	10
	干燥	细	2 159	4.7	8.7	20
	最佳	细	2 296	7.6	8.7	20
花岗岩	干燥	中	2 179	3.5	7.9	10
	最佳	中	2 218	4.0	7.9	10
	潮湿	中	2 192	4.6	7.9	10
	干燥	细	2 177	4.1	7.9	20
	最佳	细	2 215	4.6	7.9	20
	潮湿	细	2 278	5.9	7.9	20

1.2 试验方法

本试验采用冲击击实法制备尺寸为 150 mm (直径)×150 mm(高度)的级配碎石试件,并考虑了粗、中、细三种级配组合,以及三种不同的含水率状态(干燥状态、最佳含水率状态和潮湿状态)。本研究通过开展万能试验机(universal testing machine, UTM)试验,利用快速三轴(rapid triaxial test, RaTT)控制箱测试级配碎石试件在不同围压和偏应力组合下的横观各向同性回弹模量。在 UTM 试验过程中,向下移动 RaTT 控制箱以包裹试件,然后通过液压控制体系向 RaTT 控制箱施加围压,同时,UTM 通过竖向加载框架

对试件施加轴向载荷,UTM 系统轴向载荷和围压的动态加载序列见表 4。试验期间,通过位移传感器(linear variable differential transformers, LVDT)测量试件的垂直和水平变形,用以计算其在不同应力水平下的横观各向同性回弹模量和泊松比。计算方法采用 ADU-OSEI 等^[6,15]通过快速三轴试验结果计算横向、竖向和剪切模量的方法。

表4 快速动三轴试验应力加载序列

Table 4 Loading sequences of rapid triaxial test

加载 序列	静应力/ kPa		动应力/kPa					
			压模式		剪切模式		拉模式	
	σ_y	σ_x	σ_{cy}	σ_{cx}	σ_{sy}	σ_{sx}	σ_{ey}	σ_{ex}
1	40	25	5	0	10	-5	-5	5
2	50	25	10	0	10	-5	-10	5
3	70	40	10	0	10	-5	-10	10
4	130	60	20	0	20	-10	-10	10
5	150	70	20	0	20	-10	-10	10
6	170	100	20	0	20	-10	-20	20
7	220	120	30	0	30	-15	-20	20
8	250	140	30	0	30	-15	-20	20
9	250	120	30	0	30	-15	-20	20
10	250	105	30	0	30	-15	-20	20

2 横观各向同性回弹模量本构模型

级配碎石横观各向同性回弹模量的各水平方向的模量相同,而竖直方向与水平方向的模量不同。根据广义胡克定律,级配碎石横观各向同性本构模型如式(1)所示。

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{xy}}{E_y} & -\frac{\nu_{xx}}{E_x} & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & -\frac{\nu_{yx}}{E_x} & 0 \\ -\frac{\nu_{xx}}{E_x} & -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & \frac{1}{E_x} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_x \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_x \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: E_x 为水平模量; E_y 为竖向模量; G_{xy} 为剪切模量; ν_{xy} 为 x - y 平面的泊松比; ν_{xx} 为 x - x 平面的泊松

比; σ_x 为水平方向正应力; σ_y 为竖直方向正应力; ε_x 为水平方向应变; ε_y 为竖直方向应变; γ_{xy} 为 x - y 平面剪切应变。

考虑到级配碎石回弹模量具有应力相关性和湿度敏感性,本研究提出了新的回弹模量模型,如式(2)~(4)所示:

$$E_y = k_1 P_a \left[\frac{I_1 - 3\theta f \left(h_m + \beta \frac{I_1}{3} + \alpha \tau_{\text{oct}} \right)}{P_a} \right]^{k_2} \left(\frac{\tau_{\text{oct}}}{P_a} \right)^{k_3} \quad (2)$$

$$E_x = k_4 P_a \left[\frac{I_1 - 3\theta f \left(h_m + \beta \frac{I_1}{3} + \alpha \tau_{\text{oct}} \right)}{P_a} \right]^{k_5} \left(\frac{\tau_{\text{oct}}}{P_a} \right)^{k_6} \quad (3)$$

$$G_{xy} = k_7 P_a \left[\frac{I_1 - 3\theta f \left(h_m + \beta \frac{I_1}{3} + \alpha \tau_{\text{oct}} \right)}{P_a} \right]^{k_8} \left(\frac{\tau_{\text{oct}}}{P_a} \right)^{k_9} \quad (4)$$

式中:第一应力张量不变量 $I_1 = 2\sigma_x + \sigma_y$; P_a 为大气压强; θ 为体积含水率; h_m 为级配碎石的初始基质吸力; f 为饱和因子($1 \leq f \leq \theta^{-1}$);八面体剪应力 $\tau_{\text{oct}} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2}$; $k_1 \sim k_9$ 为模型参数,取决于级配碎石材料特性,包括干密度、含水率、亚甲蓝值、级配、集料棱角性、形状和纹理等。

本研究提出的回弹模量模型引入了基质吸力因子,以反映湿度变化对级配碎石回弹模量的影响,同时在基质吸力因子中加入汉克儿应力因子^[16],以反映应力水平变化对级配碎石孔隙水压力的影响。

3 结果与讨论

3.1 级配和含水率对横观各向同性回弹模量的影响

本研究结合快速三轴试验结果,采用系统识别方法得到级配碎石横观各向同性回弹模量。在粗、中、细三种级配条件下,石灰岩级配碎石材料的横观各向同性回弹模量结果见表5。由表5可

知,级配碎石回弹模量受应力水平(加载序列)影响显著,高应力水平(加载序列8~10)对应的回弹模量远高于低应力水平(加载序列1~3)对应的回弹模量。在不同应力水平和级配组合下,级配碎石的竖向模量均远高于其横向模量和剪切模量。通常,材料的横竖向异性可用横向模量与竖向模量的比值 n 和剪切模量与竖向模量的比值 m 共同表征。对于石灰岩级配碎石而言,横竖向异性模量比 n 与应力水平无明显关系,基本在0.3~0.6范围内波动;横竖向异性模量比 m 与应力水平亦无明显关系,基本在0.2~0.4范围内波动。对于同一应力水平而言,中级配的石灰岩级配碎石的横向、竖向和剪切模量均比粗或细级配的高,其主要原因是石灰岩集料在中级配状态下处于最理想密实状态,骨架嵌挤效果最优。

表5 级配对石灰岩级配碎石横观各向同性回弹模量的影响

Table 5 Influence of gradation on cross-anisotropic resilient moduli of limestone aggregates MPa

加载 序列	粗级配			中级配			细级配		
	E_y	E_x	G_{xy}	E_y	E_x	G_{xy}	E_y	E_x	G_{xy}
1	119	68	68	153	70	43	124	34	25
2	151	70	70	176	70	50	156	45	37
3	208	118	117	241	116	79	203	73	57
4	351	150	150	391	154	106	360	102	79
5	394	181	181	448	185	125	404	131	97
6	407	245	245	462	249	156	408	179	124
7	526	281	281	544	285	178	504	205	141
8	544	327	327	616	352	210	550	256	168
9	548	284	284	602	288	188	571	210	151
10	570	263	263	632	250	171	511	232	142

含水率对石灰岩级配碎石横观各向同性回弹模量的影响见表6。其中,干燥状态的含水率为0.9倍的OMC,潮湿状态的含水率为1.1倍的OMC。由表6可知,级配碎石回弹模量具有一定的湿度敏感性,在不同应力水平条件下,级配碎石的横向、竖向和剪切模量均随含水率的增加而减小。

表6 含水率对石灰岩级配碎石横观各向同性回弹模量的影响

Table 6 Influence of water content on cross-anisotropic resilient moduli of limestone aggregates MPa

加载 序列	干燥状态			最佳含水率状态			潮湿状态		
	E_y	E_x	G_{xy}	E_y	E_x	G_{xy}	E_y	E_x	G_{xy}
1	164	78	48	153	70	43	144	63	39
2	197	82	58	176	70	50	170	69	49
3	257	138	90	241	116	79	227	110	74
4	413	170	115	391	154	106	375	145	102
5	468	211	138	448	185	125	427	183	125
6	480	286	172	462	249	156	435	241	146
7	563	321	191	544	285	178	512	267	168
8	612	387	223	616	352	210	575	322	195
9	624	339	208	602	288	188	568	262	172
10	645	306	194	632	250	171	595	250	165

3.2 横观各向同性回弹模量本构模型预估效果评价

为表征级配碎石横观各向同性回弹模量的应力相关性和湿度敏感性,本研究采用式(2)~(4)进行回弹模量预估。在建模过程中,首先根据干密度和含水率计算 θ 和 f 。然后使用Excel软件中的规划求解功能,求得 h_m 、 α 、 β 和 k 值,同时最小化拟合误差。图1所示为新横观各向同性回弹模量模型预估石灰岩级配碎石在最佳含水率和中级配状态下的横向、竖向和剪切模量。由图1可知,新模型能够准确预估不同应力状态下级配碎石的横观各向同性回弹模量,且模型拟合相关性系数高达0.99。

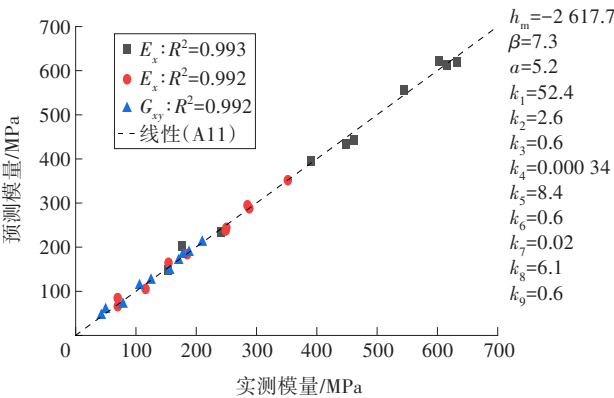


图1 新横观各向同性回弹模量模型预估石灰岩级配碎石回弹模量

Fig. 1 Prediction of resilient moduli of limestone aggregates using the proposed cross-anisotropic resilient moduli model

在不同级配和湿度条件下,采用新横观各向同性回弹模量模型对四种碎石的回弹模量进行预估,预估效果见表7。由表7可知,新模型的预估精度极高,平均相关性系数达0.98以上,这表明本研究提出的模型可以准确预估级配碎石横观各向同性回弹模量在不同应力水平和湿度条件下的变化情况。

表7 新横观各向同性回弹模量模型预估效果

Table 7 Prediction performance of the proposed cross-anisotropic resilient moduli model

集料 类型	水分 状态	级配	相关性系数 R^2		
			竖向 模量	水平 模量	剪切 模量
石灰岩	最佳	粗	0.99	0.98	0.99
	干燥	中	0.99	0.98	0.98
	最佳	中	0.99	0.99	0.99
	潮湿	中	0.99	0.98	0.99
	干燥	细	1.00	0.99	0.99
	最佳	细	0.87	0.93	0.96
砾石-1	潮湿	细	0.99	0.98	0.98
	最佳	粗	0.99	0.97	0.97
	干燥	中	0.98	0.98	0.98
	最佳	中	0.99	0.98	0.98
	干燥	细	0.98	0.94	0.95
砾石-2	最佳	细	0.99	0.88	0.93
	干燥	中	0.99	0.98	0.98
	最佳	中	0.99	0.99	0.98
	潮湿	中	0.99	0.96	0.98
	干燥	细	0.99	0.98	0.98
花岗岩	最佳	细	1.00	0.91	0.93
	干燥	中	0.99	0.98	0.98
	最佳	中	0.99	0.98	0.98
	潮湿	中	0.99	0.98	0.98
	干燥	细	0.99	0.99	0.98

3.3 横观各向同性回弹模量本构模型参数预估

本研究利用JMP(John's macintosh program)统计软件基于多元线性逐步回归法,建立新的横观各向同性回弹模量模型参数与级配碎石材料基本参数之间的关系,级配碎石材料基本参数包括:干密度 γ_d 、含水率 w 、亚甲蓝值 V_{MBV} 、细骨料含量 C_{plc} ,以及威布尔函数拟合的集料级配、棱角性、形状和表面纹理等。已有研究成果表明,本研究选择的材料基本参数更能直接反映路面性能,且测试方法简单准确。

通过多元线性逐步回归法进行统计学 t 检验,并根据 p 值大小判别材料基本参数中影响级配碎石横观各向同性回弹模量的关键变量,统计分析结果见表8。其中,“√”表示在95%的置信度下,材料基本参数与回弹模量模型 k 值具有统计意义上的显著相关性。由表8可知,材料特性均显示出与 k 值的统计相关性。因此,本研究建立了回弹模量模型参数预估公式,如式(5)~(13)所示。本研究仅开展了23组不同工况下的横观各向同性回弹模量试验,后续研究仍需进行大量试验以验证相关结论。

表8 级配碎石材料特性与回弹模量模型 k 值的相关性

Table 8 Significant variables of unbound aggregates affecting k -values in the cross-anisotropic resilient moduli model

材料特性		k 值								
		k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8	k_9
干密度 γ_d			√	√						√
含水率 w		√				√	√	√	√	√
亚甲蓝值 V_{MBV}				√			√			√
细骨料含量 C_{pfc}									√	
级配	形状参数 a_G	√			√	√				
	比例参数 λ_G									
棱角性	形状参数 a_A					√				
	比例参数 λ_A			√						√
形状	形状参数 a_S						√			
	比例参数 λ_S		√					√		
纹理	形状参数 a_T		√					√	√	
	比例参数 λ_T		√							

$$k_1 = -111.3 - 12.53w + 255.2a_G \quad (5)$$

$$k_2 = 33.56 - 0.00841\gamma_d - 1.672\lambda_S - 1.666a_S + 0.01946\lambda_T \quad (6)$$

$$k_3 = -1.289 - 0.000764\gamma_d - 0.1052w + 0.1018V_{MBV} + 0.000715\lambda_A \quad (7)$$

$$k_4 = -2.520 + 0.01334V_{MBV} + 0.02780C_{pfc} + 2.452a_G \quad (8)$$

$$k_5 = 15.89 - 1.271w + 0.607a_A \quad (9)$$

$$k_6 = -4.80 + 0.1309w + 0.2036V_{MBV} + 0.667a_S \quad (10)$$

$$k_7 = 3.05 - 0.544\lambda_S + 0.464a_T \quad (11)$$

$$k_8 = 13.80 - 1.033w - 0.984a_T \quad (12)$$

$$k_9 = -2.80 - 0.001293\gamma_d + 0.1736w + 0.1681V_{MBV} + 0.001265\lambda_A \quad (13)$$

4 结论

本研究提出了一种快速且高效的级配碎石横观各向同性回弹模量预估方法,主要结论如下:

1) 新的级配碎石横观各向同性模型考虑了应力相关性和湿度敏感性,引入了基质吸力参数和汉克儿应力因子,可以准确表征不同应力水平下孔隙水压力对级配碎石回弹模量的影响。

2) 级配碎石竖向模量远高于横向模量和剪切模量,横向模量与竖向模量比 n 在0.3~0.6范围内波动,剪切模量与竖向模量比 m 在0.2~0.4范围内波动, n 、 m 值与测试的应力水平无显著关系。

3) 新的级配碎石横观各向同性模型能够精确拟合快速三轴试验得到的级配碎石试件在不同应力水平和湿度状态下的横观各向同性回弹模量,平均拟合相关系数高达0.98。

4) 通过JMP统计方法得出,级配碎石的干密度、含水率、亚甲蓝值、细骨料含量、级配、棱角性和形状等材料特性均显著影响横观各向同性回弹模量模型参数,并建立了多元线性回归公式快速预估横观各向同性回弹模量模型参数。

〔参考文献〕

- [1] 张军辉,彭俊辉,郑健龙.路基土动态回弹模量预估进展与展望[J].中国公路学报,2020,33(1):1-13.DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.01.001.
ZHANG Junhui, PENG Junhui, ZHENG Jianlong. Progress and prospect of the prediction model of the resilient modulus of subgrade soils[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(1): 1-13. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.01.001.
- [2] 张文力,冯梅梅,吴疆宇.循环载荷作用下级配碎石力学特性试验研究[J].实验力学,2020,35(4):629-638. DOI:10.7520/1001-4888-18-210.
ZHANG Wenli, FENG Meimei, WU Jiangyu. Experimental study on mechanical properties of graded aggregate under cyclic loading[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(4): 629-638. DOI: 10.7520/1001-4888-18-210.
- [3] 蒋应军,任蛟龙,徐寅善,等.级配碎石力学性能的颗粒流数值模拟方法[J].同济大学学报(自然科学版),2011,39(5):699-704. DOI: 10.3969/j.issn.0253-374x.2011.05.013.
JIANG Yingjun, REN Jiaolong, XU Yinshan, et al.

- Simulation method of mechanical properties of graded broken stone based on particle flow code[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(5): 699–704. DOI:10.3969/j.issn.0253-374x.2011.05.013.
- [4] 吕松涛,李江珑,刘超超.级配碎石刚度过渡层回弹模量的非线性特性[J].内蒙古公路与运输,2017(5):1–7, 63.DOI:10.19332/j.cnki.1005-0574.2017.05.001.
LYU Songtao, LI Jianglong, LIU Chaochao. Nonlinear characteristics of resilient modulus for graded macadam as rigidity transition layer[J]. Highways & Transportation in Inner Mongolia, 2017(5): 1–7, 63. DOI: 10.19332/j.cnki.1005-0574.2017.05.001.
- [5] 肖源杰,王萌,于群丁,等.级配碎石基层填料回弹模量特性及预估模型研究[J/OL].中南大学学报(自然科学版): 1–15[2023-01-29]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1426.N.20220506.1709.003.html>.
XIAO Yuanjie, WANG Meng, YU Qunding, et al. Study of resilient modulus behavior and prediction models of unbound permeable aggregate base materials[J/OL]. Journal of Central South University (Science and Technology): 1–15[2023-01-29]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1426.N.20220506.1709.003.html>.
- [6] ADU-OSEI A, LITTLE D N, LYTTON R L. Cross-anisotropic characterization of unbound granular materials[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2001, 1757(1): 82–91. DOI:10.3141/1757-10.
- [7] TUTUMLUER E, THOMPSON M R. Anisotropic modeling of granular bases in flexible pavements[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1997, 1577(1): 18–26. DOI:10.3141/1577-03.
- [8] TUTUMLUER E, SEYHAN U. Laboratory determination of anisotropic aggregate resilient moduli using an innovative test device[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1999, 1687(1): 13–21. DOI:10.3141/1687-02.
- [9] OH J H, LYTTON R L, FEMANDO E G. Modeling of pavement response using nonlinear cross-anisotropic approach[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2005, 9(4): 329–334. DOI: 10.1007/BF02829046.
- [10] WANG H, AL-QADI I L. Importance of nonlinear anisotropic modeling of granular base for predicting maximum viscoelastic pavement responses under moving vehicular loading[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2013, 139(1): 29–38. DOI: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000465.
- [11] LEKARP F, ISACSSON U, DAWSON A. State of the art. I: Resilient response of unbound aggregates[J]. Journal of Transportation Engineering, 2000, 126(1): 66–75. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2000)126:1(66).
- [12] SALOUR F, ERLINGSSON S. Investigation of a pavement structural behaviour during spring thaw using falling weight deflectometer[J]. Road Materials and Pavement Design, 2013, 14(1): 141–158. DOI: 10.1080/14680629.2012.754600.
- [13] AASHTO. Mechanistic-empirical pavement design guide: a manual of practice[M]. 2nd ed. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2015.
- [14] GU F, SAHIN H, LUO X, et al. Estimation of resilient modulus of unbound aggregates using performance-related base course properties[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 27(6): 04014188. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001147.
- [15] 张锐,滕煜晟,刘闯.路基回弹弯沉控制方法及试验验证[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2019,16(2):8–14. DOI:CNKI:SUN:HNQG.0.2019-02-002.
ZHANG Rui, TENG Yusheng, LIU Chuang. Control method and experimental verification of roadbed rebound deflection[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2019, 16(2): 8–14. DOI:CNKI:SUN:HNQG.0.2019-02-002.
- [16] SEBESTA S, GU F, LUO R, et al. Developing a mixture-based specification for flexible base[R]. Austin: Texas Department of Transportation, 2012.

Prediction of cross-anisotropic resilient modulus for unbound aggregates

WU Shuihui¹, JIANG Chenyu², XU Hui¹, GU Fan²

(1.Jiangsu Sinyue High Tech Co., Ltd., Zhenjiang 212001, China; 2.School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: This Study aims to develop an accurate and efficient methodology to predict the cross-anisotropic resilient modulus for unbound aggregates. **[Methods]** First, four unbound aggregates were collected and analyzed by the gradation test, compaction-density test, methylene blue test, percent fines content test, and aggregate imaging system test. Next, a new cross-anisotropic resilient modulus model was developed to characterize the stress-dependency and moisture-sensitivity of unbound aggregates. Subsequently, the laboratory rapid triaxial test was performed to determine the vertical, horizontal, and shear moduli of unbound aggregates with different gradations, stress levels, and moisture conditions. Finally, the R-squared values were used to evaluate the model's fitting accuracy. The JMP statistical software and multiple linear stepwise regression method were used to establish the correlation between unbound aggregate material properties and their cross-anisotropic resilient modulus model coefficients. **[Findings]** The unbound aggregates had a horizontal/vertical modulus ratio ranging from 0.3 to 0.6 and a shear/vertical modulus ratio ranging from 0.2 to 0.4. The intermediate-graded unbound aggregates had higher vertical, horizontal, and shear moduli than those of coarse- or fine-graded unbound aggregates. At different stress levels, the vertical, horizontal, and shear moduli of unbound aggregates decreased with the increased moisture content. **[Conclusions]** This study concluded that the new cross-anisotropic resilient modulus model accurately captured the influences of stress level and moisture conditions via the incorporation of matric suction and Henkerl stress terms, and the correlation of fitting coefficient was above 0.98. The multiple regression analysis indicated that the dry density, moisture content, methylene blue value, percent fines content, aggregate gradation, angularity, and shape are statistically significant variables affecting the cross-anisotropic resilient modulus model coefficients.

Key words: unbound aggregate; resilient modulus; cross-anisotropy; stress-dependency; moisture-sensitivity; rapid triaxial test

Manuscript received: 2022-08-07; **revised:** 2022-12-05; **accepted:** 2022-12-16

Foundation item: Project (52108400) supported by the National Natural Science Foundation of China

Corresponding author: GU Fan (1987—) (ORCID: 0000-0002-3992-3545), male, professor, research interest: subgrade engineering. E-mail: fan.gu@csust.edu.cn

(责任编辑:刘平;校对:石月珍;英文编辑:田湘)