

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.02.003



初始干密度对天然砂砾改良红粘土回弹模量的影响及预估模型

杨俊, 刘世宜, 张国栋

(三峡大学 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心; 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要:以掺天然砂砾改良的红粘土为研究对象, 采用室内承载板法测定回弹模量, 通过不同初始干密度下的回弹模量试验, 深入研究了天然砂砾改良红粘土的回弹模量随初始干密度的变化规律, 建立了不同初始干密度下回弹模量的预估模型。试验结果表明: 在同一天然砂砾掺量下, 随着初始干密度的提高, 红粘土的回弹模量逐渐增大。当初始干密度由低向最大干密度增大时, 回弹模量增长速度较快, 当初始干密度超过最大干密度继续增大时, 回弹模量增长速度变缓; 在同一初始干密度下, 当天然砂砾掺量从 0 增至 30% 时, 回弹模量的增长幅度较小, 当天然砂砾掺量超过 30% 而继续增长时, 回弹模量增长幅度较大; 初始干密度由 $1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 增长至 $2.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时, 回弹模量增长值随天然砂砾掺量的增加而逐渐增大。分别建立了回弹模量随初始干密度及天然砂砾掺量变化的预估模型, 通过补充试验, 验证了预估模型的准确性。

关键词:红粘土; 天然砂砾; 初始干密度; 回弹模量; 预估模型

中图分类号: TU411.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2016)03-0021-07

Impact and prediction model of initial dry density on resilient modulus of gravel soil red clay

Yang Jun, Liu Shiyi, Zhang Guodong

(Collaborative Innovation Center of Geological Hazards and Ecological Environment in Three Gorges Area in Hubei Province; Civil and Architectural Institute, Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, P. R. China)

Abstract: The gravel soil red clay was used to in resilient modulus test under the condition of different initial dry density and the the resilient modulus variation was studied. The prediction model of resilient modulus was established. The test results show that: (1) With the same gravel soil content, when the initial dry density increases, the resilient modulus of red clay increases. When the initial dry density increases from low to maximum dry density, resilient modulus grow faster and when the initial dry density increased after exceeding the maximum dry density, resilient modulus grow slower; (2) With the same initial dry density,

收稿日期: 2015-10-15

基金项目: 湖北省公路管理局 2013 年自然科学研究项目 (D2013003)

作者简介: 杨俊 (1976-), 男, 博士, 副教授, 主要从事道路特殊土路基处理、道路新材料开发与利用、建筑垃圾及工业垃圾的路用性能研究, (E-mail) Wangjing750301@163.com

Received: 2015-10-15

Foundation item: Natural Science Foundation Supported by Highway Administration of Hubei Province in 2013 (No. D2013003)

Author brief: Yang Jun (1976-), assistant professor, main interests: road special roadbed treatment, development and utilization of new road materials, construction waste and industrial waste road performance, (E-mail) Wangjing750301@163.com.

when the gravel content increases from 0 to 30%, the growth rate of resilient modulus is lower and when the gravel content continues to grow, the growth rate of resilient modulus is greater; (3) When the initial dry density increases from $1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ to $2.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, resilient modulus growth values gradually increases with increasing content of gravel soil; (4) The prediction model of resilient modulus was established and the accuracy of the prediction model was verified.

Keywords: red clay; gravel soil; initial dry density; resilient modulus; prediction model

红粘土主要由碳酸盐类岩石经红土化作用而形成,在中国贵州、广西、湖北等亚热带地区广泛分布^[1],是一种具有高液限、高天然含水率、多裂隙性、低压缩性的特殊粘土,由于其路用性能较差,作为路基填料时,须进行必要的改良处理^[2]。

对红粘土的改良处理,目前有 3 类方法:物理方法、化学方法、物理-化学综合方法。物理方法主要是通过掺加碎石、砂砾等材料改善红粘土的级配,增加粗骨料的含量。莫百金等^[3]在红粘土中掺入砂砾,进行了物理力学指标测试,得出了最佳砂砾掺量。赵雄等^[4]、崔德山^[5]提出采用土壤改性剂,使水膜减薄,强度增大,稳定性增强。Media 等^[6]采用磷酸对红粘土进行了处理;Katz 等^[7]采用液体离子稳定剂,取得了良好的效果。

路基的回弹模量指路基填料在荷载作用下应力与回弹应变的比值,是表征路基承载能力的参数之一,路基回弹模量的取值对路面结构层厚度的计算有较大的影响;初始干密度(压实度)是衡量路基土压实质量的关键指标之一,大量工程实例表明:初始干密度是影响路基回弹模量大小的重要因素,不同的初始干密度下,路基的回弹模量往往会呈现较大的波动,而在路基实际碾压时,路基压实后的干密度往往不等于最大干密度,因而研究不同初始干密度下路基回弹模量的大小,对于路基承载能力的确定以及路面的结构层的设计具有十分重要的意义。

目前,专家学者对于不同初始干密度下红粘土回弹模量的变化规律进行了大量的研究;段丹军^[8]对影响山西红粘土回弹模量的因素进行了试验研究,发现回弹模量随着初始干密度的增大而呈幂函数的形式逐渐增长;刘燕燕等^[9]发现红粘土的回弹模量与初始干密度间符合良好的二次函数关系;武明等^[10]对云南非饱和红粘土进行了一系列的研究后发现,随着初始干密度的增加,回弹模量逐渐增大,但当初始干密度超过最大干密度而继续增加时,

回弹模量的增长幅度逐渐减小。以上研究大多仅是针对未经改良的红粘土而言的,对改良后红粘土的回弹模量随初始干密度的变化规律研究得相对较少。

鉴于以上问题,本文结合湖北宜昌三峡机场路改造工程中所遇到的高液限红粘土路基问题,采用当地广泛分布的天然砂砾对红粘土进行改良。根据前期的研究发现:掺天然砂砾在能有效降低红粘土的液限、塑性指数及各项胀缩指标的同时,还能显著提高强度指标,改良后红粘土的各项指标均能达到路用标准。在此研究基础之上,通过改变试验时的初始干密度,深入分析了天然砂砾改良红粘土的回弹模量随初始干密度的变化规律,建立了回弹模量随初始干密度及天然砂砾掺量变化的预估模型,为天然砂砾改良红粘土路基施工提供技术参考。

1 试验材料

1.1 红粘土

试验用土取自湖北宜昌三峡机场路改造工程 K2+420 段,呈棕红色,天然含水率较高,干燥时裂隙发育,土样的基本物理性质指标见表 1。

表 1 红粘土的基本物理性质指标

Table 1 The basic physical property indexes of red clay

粒组含量/%		天然含 液限/ 塑限/ 塑性指				
>0.075 mm	0.075~ 0.002 mm	<0.002 mm	水率/%	%	%	数/%
13.30	76.40	10.30	21.90	52.36	21.08	31.28

从上表可以看出该红粘土的液限及塑性指数均大于规范规定值,不能直接用作路基填料。

1.2 天然砂砾

试验所用天然砂砾取自湖北宜昌三峡机场路改造工程 K0+150 附近的土丘,中间夹杂较多的卵石,其基本物理性质指标见表 2 及图 1。

表 2 天然砂砾基本性质试验结果

Table 2 Natural gravel basic properties test results

天然含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数	天然干密度/ (g·cm ⁻³)	级配指标	
					不均匀系数	曲率系数
5.50	28.10	12.40	15.70	1.16	67.7	0.13

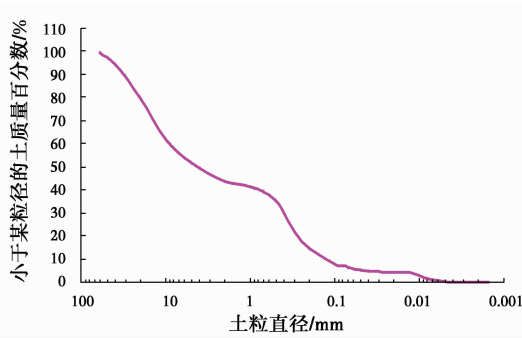


图 1 天然砂砾颗粒级配曲线

Fig. 1 Natural gravel grading curve

2 试验方案

2.1 不同初始干密度及不同天然砂砾掺量下的回弹模量试验

天然砂砾掺量(所掺天然砂砾质量占总质量的百分比)分别为:0、10%、20%、30%、40%、50%,参照重型击实的试验结果(见表 3),不同天然砂砾掺量下的初始干密度分别控制为:1.6、1.7、1.8、1.9、2.0 g·cm⁻³。依据《公路土工试验规程》(JTGE40—2007)规定的相关试验步骤进行试验^[6],回弹模量采用南土公司生产的 HW—1 型回弹模量测定仪进行测定(见图 2),试样采用万能试验机静压成型,试验时采用 5 级加载,单位压应力分别为 25、50、100、150、200 kPa。每组制备 3 个平行试验,初始干密度误差控制在±0.5%以内,每个平行试验结果与均值回弹模量相差控制在±5%以内。

表 3 不同天然砂砾掺量下的重型击实指标

Table 3 Heavy compaction indexes under the condition of different natural gravel content

击实指标	天然砂砾掺量/%					
	0	10	20	30	40	50
最大干密度/ (g·cm ⁻³)	1.725	1.758	1.784	1.808	1.828	1.845
最佳含水率/%	19.1	17.2	15.6	14.2	12.9	12.2

2.2 预估模型验证性试验

为验证所建立预估模型的准确性,将天然砂砾掺量分别调整为:5%、10%、15%、25%、35%、45%,每种掺量下的初始干密度依旧控制在:1.6、1.7、1.8、1.9、2.0 g·cm⁻³,参照 2.1 中的试验方案进行补充试验。



图 2 承载板法测回弹模量

Fig. 2 The bearing plate method of modulus of resilience

3 试验结果及分析

不同初始干密度下天然砂砾改良红粘土的回弹模量试验结果见表 4。

表 4 不同初始干密度下的回弹模量试验结果

Table 4 The results of modulus of resilience under different initial dry density

掺量/ %	初始干密度/(g·cm ⁻³)				
	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
0	43.21	58.76	72.31	83.24	88.76
10	52.61	66.83	77.92	85.44	91.58
20	56.34	70.25	78.64	89.91	96.36
30	64.16	74.33	87.55	98.11	104.29
40	72.84	85.18	98.27	109.73	116.84
50	89.67	103.72	119.74	134.93	144.38

3.1 初始干密度对回弹模量的影响

根据表 4 中的数据,绘制在同一天然砂砾掺量下,回弹模量随初始干密度的变化曲线,见图 3。

从以上图表中可以看出:

1)初始干密度对天然砂砾改良红粘土的回弹模量具有较大的影响,在同一天然砂砾掺量下,随着初始干密度的增加,红粘土的回弹模量也在逐渐增大,当初始干密度从 1.6 g·cm⁻³ 增长至 2.0 g·cm⁻³ 时,回弹模量的增长幅度均超过了 60%。

2)当初始干密度由 1.6 g·cm⁻³ 向最大干密度

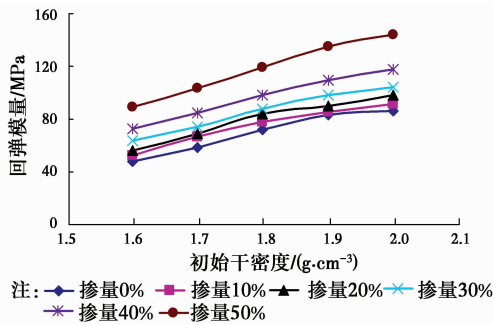


图 3 回弹模量随初始干密度的变化曲线

Fig. 3 The curves between initial dry density and modulus of resilience

逐渐增长时,回弹模量增长幅度逐渐增大,但当初始干密度超过最大干密度后,回弹模量的增长幅度逐渐减小。以 30% 的天然砂砾掺量(最大干密度 $1.808 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) 为例,在初始干密度由 $1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 增长至 $2.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的过程中,初始干密度每增长 $0.1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,回弹模量分别增长了 10.17 MPa、13.22 MPa、10.56 MPa、6.18 MPa。产生上述现象的原因是:随着初始干密度的逐渐增大,天然砂砾与红粘土颗粒间的间距逐渐减小,颗粒间的相互摩擦及嵌挤作用逐渐增强^[9],因此,回弹模量逐渐增大;当初始干密度过大时,天然砂砾中的部分颗粒在高压作用下发生破碎,土体内部颗粒的定向排列发生改变^[11],导致天然砂砾所起到的支撑作用逐渐减小,因此,回弹模量的增长幅度逐渐放缓。这一现象表明:在路基土碾压过程中,欠压往往达不到设计回弹模量值,而过压虽可以提高路基的回弹模量,但应结合经济、工期等因素进行综合考虑^[12]。

3.2 天然砂砾掺量对回弹模量的影响

为分析回弹模量随天然砂砾掺量的变化规律,根据表 4 中的数据,绘制在同一初始干密度下,回弹模量随天然砂砾掺量的变化曲线,见图 4。

1) 掺天然砂砾改良对提高红粘土的回弹模量效果较好,在同一初始干密度下,随着天然砂砾掺量的增加,红粘土的回弹模量逐渐增大,当天然砂砾掺量由 0 增长至 50% 时,回弹模量的增长幅度均超过了 60%。

2) 当天然砂砾掺量从 0 增大至 30% 时,回弹模量增长幅度较小,当天然砂砾掺量超过 30% 而继续增大时,回弹模量增长较为迅速,如在 $1.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的初始干密度下,天然砂砾掺量从 30% 增至 50% 时,回弹模量的增长幅度占到了总增长幅度的 68%。产生上述现象是的原因:一方面天然砂砾颗

粒的强度较大,掺入后在土体中形成骨架,增强了土体恢复变形的能力;另一方面,由于天然砂砾颗粒自身的摩擦力较大,两种土颗粒相互混和后,可大幅度提高颗粒间的咬合力,抑制土体的变形,因此,掺入天然砂砾后,回弹模量的提高较为显著,当掺入天然砂砾较少时,土体中的支撑骨架还未完全成型,颗粒间的摩擦较小,回弹模量增长速度较缓,而当天然砂砾掺量达到 30% 时,支撑骨架已初步成型,此时再继续提高掺量,可大幅增加颗粒间的摩擦力,因此,回弹模量增长速度较快^[13]。

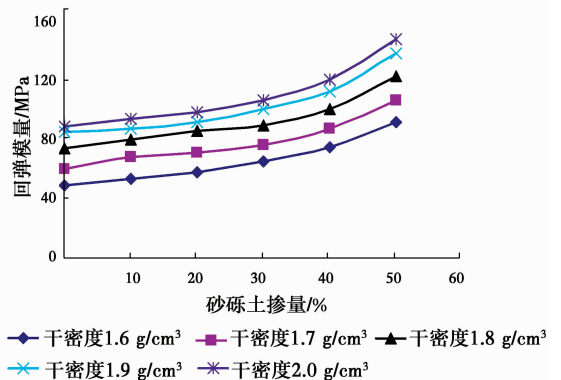


图 4 回弹模量随天然砂砾掺量的变化曲线

Fig. 4 The curves between gravel content and modulus of resilience

3.3 天然砂砾掺量对回弹模量增长值的影响

为分析不同掺砂量下初始干密度变化时回弹模量的变化幅度(图 5),定义回弹模量增长值为初始干密度 $2.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时所对应的回弹模量与初始干密度 $1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时所对应的回弹模量之差,即: $E_{\text{增}} = E_{2.0} - E_{1.6}$ 。

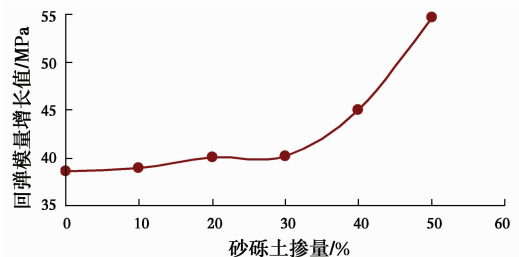


图 5 回弹模量增长值与天然砂砾掺量间的关系

Fig. 5 The curves between gravel content and growth value of modulus of resilience

当初始干密度由 $1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 增长至 $2.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时,改良土的回弹模量增长值随天然砂砾掺量的增加而逐渐增大,其中,天然砂砾掺量由 0 增长值 30% 时,回弹模量增长值的增长幅度较慢,

当天然砂砾掺量超过 30%后,回弹模量增长值快速增长。这是因为天然砂砾掺量越大时,土体中形成的支撑骨架越完整,此时再增加土体的初始干密度,会迅速激发骨架的支撑作用,同时也会使得颗粒间的摩阻力迅速增强,当掺入天然砂砾较少时,土体中的支撑骨架还未完全成型,回弹模量的增长大多是依赖于摩阻力的增大,当掺量超过 30%后,支撑骨架基本成型,此时增大初始干密度,回弹模量的增长量开始显著增长^[14]。

4 预估模型的建立

4.1 回弹模量随初始干密度变化的预估模型

在同一天然砂砾掺量下,对回弹模量 E 和初始干密度 ρ 二者进行拟合分析,其结果见图 6。

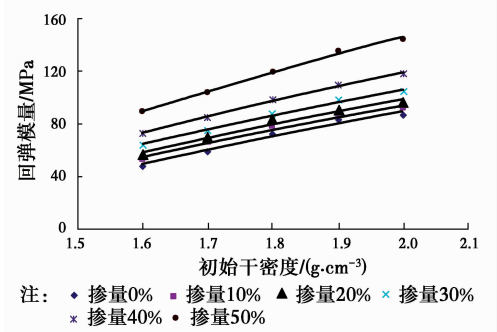


图 6 回弹模量与初始干密度间的拟合曲线

Fig. 6 The fitting curves between modulus of resilience and initial dry density

可以看出,回弹模量 E 与初始干密度 ρ 之间可以用对数函数进行较好的拟合。故同一天然砂砾掺量下,回弹模量的预估模型 1 可暂定为

$$E = a \ln(\rho) - b \quad (1)$$

式中: a 、 b 为与天然砂砾掺量有关的拟合参数, a 、 b 的具体取值及拟合的相关系数见表 5。

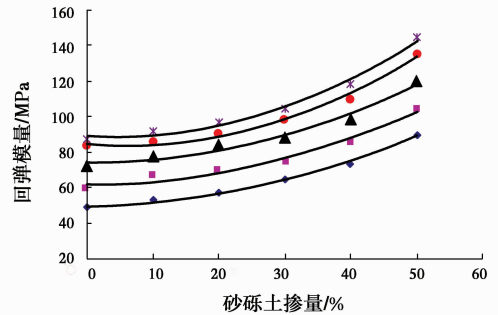
表 5 不同天然砂砾掺量下的拟合参数

Table 5 The fitting parameters under different gravel content

掺量/%	拟合参数		相关系数 R^2
	a	b	
0	182.81	37.03	0.97
10	173.98	26.85	0.98
20	181.51	26.95	0.97
30	186.93	23.61	0.99
40	205.74	23.52	0.97
50	252.45	29.12	0.99

4.2 回弹模量随天然砂砾掺量变化的预估模型

在同一初始干密度下,对回弹模量 E 与天然砂砾掺量 λ 二者进行拟合分析,其结果见图 7。



注: ● 干密度1.6 g/cm³ ■ 干密度1.7 g/cm³ ▲ 干密度1.8 g/cm³
● 干密度1.9 g/cm³ × 干密度2.0 g/cm³

图 7 回弹模量与天然砂砾掺量间的拟合曲线

Fig. 7 The fitting curves between modulus of resilience and natural gravel content

通过图 7 可以看出,回弹模量 E 与天然砂砾掺量 λ 之间满足较好的二次函数关系。故同一初始干密度下,回弹模量的预估模型 2 可暂定为

$$E = A\lambda^2 + B\lambda + C \quad (2)$$

式中: A 、 B 、 C 为与初始干密度有关的拟合参数, A 、 B 、 C 的具体取值及拟合的相关系数见表 6。

表 6 不同初始干密度下的拟合参数

Table 6 The fitting parameters under different initial dry density

初始干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	A	B	C	相关系数 R^2
1.6	0.014 6	0.056 3	49.149	0.99
1.7	0.015 4	0.045 6	61.116	0.97
1.8	0.017 4	-0.010 3	74.236	0.97
1.9	0.025 6	-0.312 1	84.523	0.98
2.0	0.024 2	-0.146 3	88.649	0.98

5 预估模型的验证

5.1 回弹模量预估模型 1 的验证

为验证所建立预估模型的准确性,按照试验方案 2.3 的要求对天然砂砾掺量 λ 进行插值,补充插值条件下的回弹模量试验,其结果见表 7。

表 7 不同初始干密度下的回弹模量补充试验结果

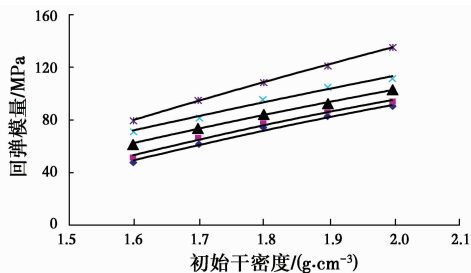
Table 7 The additional test results of modulus of resilience under different initial dry density

掺量/ %	初始干密度/(g·cm ⁻³)				
	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
5	47.83	61.45	74.01	82.19	89.74
15	51.34	65.32	77.00	85.98	93.24
25	61.24	73.21	84.15	92.45	102.32
35	70.73	81.02	95.22	104.27	110.87
45	79.01	94.05	108.05	121.08	134.52

结合表 7 中的数据,在同一天然砂砾掺量下,将回弹模量 E_1 与初始干密度 ρ_1 进行拟合(图 8),发现二者同样是符合指数函数关系,即:

$$E_1 = a_1 \ln(\rho_1) - b_1$$

式中: a_1 、 b_1 为与天然砂砾掺量有关的拟合参数, a_1 、 b_1 的具体取值及拟合的相关系数见表 8。



注: ◆ 掺量5% ■ 掺量15% ▲ 掺量25% × 掺量35% * 掺量45%

图 8 回弹模量与初始干密度的拟合

Fig. 8 the fitting curves between modulus of resilience and initial dry density

表 8 拟合参数

Table 8 The fitting parameters

掺量/%	a_1	b_1	相关系数 R^2
5	188.17	38.98	0.97
15	187.97	35.33	0.98
25	182.03	23.76	0.97
35	186.11	16.39	0.97
45	247.56	37.40	0.98

可见,在同一天然砂砾掺量下,补充的验证性试验依旧可用对数函数进行拟合,相关性较高,且该对数函数在形式上与模型 1 保持一致,因此,模型 1 具有较强的代表性,可用来对不同初始干密度下的回弹模量进行预估。

5.2 回弹模量预估模型 2 的验证

$$\text{规定相对误差 } \delta = \frac{|\text{模型 2 I 算值} - \text{II 算值}|}{\text{模型 I 算值}}$$

则不同初始干密度及不同天然砂砾掺量下的相对误差 δ 的取值见表 9。

表 9 预估模型相对误差表

Table 9 The forecast model of relative error table

掺量/ %	初始干密度/(g·cm ⁻³)				
	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
5	3.95	0.45	0.82	1.69	1.38
15	3.64	0.08	1.28	0.44	1.46
25	2.61	1.85	0.83	0.29	2.20
35	2.50	0.68	0.03	0.66	2.04
45	2.75	0.32	0.88	1.01	2.63

可以看出:所建立预估模型的计算值与试验值的相对误差较小,均控制在 4% 以内,因此,该模型具有较高的精确性。当初始干密度较小或是较大时,相对误差较大,而当初始干密度接近最大干密度时,相对误差较小。这是因为当初始干密度较小时,在制样过程中土样内部未完全压实,孔隙分布不均匀,当初始干密度过大时,会导致天然砂砾颗粒在高压作用下发生破裂,颗粒间的定向排列被打乱^[15],因此初始干密度过小或过大均会导致试验结果离散性的增大,最终造成相对误差较大。故在天然砂砾改良红粘土路基碾压时,应将干密度控制在最大干密度附近,即要保证碾压时的压实度。

6 案例分析

湖北省宜昌市三峡机场路,在施工过程中发现从 K1+880~K2+420 段存在大量的红粘土,采用天然砂砾来改良了红粘土。

依据室内试验得出的参数,考虑经济性指标,掺砂量取 30%,初始干密度取 1.80 g·cm⁻³,按这些参数进行拌和、摊铺、碾压成型,在竣工后 7 天,进行现场的回弹模量检测。采用工地现场承载板法检测施工后的路基回弹模量。取一块刚性承载板,厚度大约 20 mm,直径大约 30 cm,采用千斤顶逐级施加荷载。每隔 40 m 为一个检测桩号,检测结果如表 10 所示。

表 10 掺砂 30%,初始干密度 $1.80 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 下的
回弹模量试验结果

Table 10 the results of modulus of resilience under the
initial dry density $1.80 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ and the sand content 30%

桩号	回弹模量/kPa	桩号	回弹模量/kPa	桩号	回弹模量/kPa
K1+880	87.52	K2+080	87.67	K2+280	86.84
K1+920	87.50	K2+120	87.86	K2+320	88.03
K1+960	87.57	K2+160	87.94	K2+360	88.21
K2+000	86.99	K2+200	87.71	K2+400	88.13
K2+040	86.93	K2+240	87.45	K2+420	86.46

表 10 的检测结果显示,当掺砂比例为 30%,初始干密度为 $1.80 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时,现场实测回弹模量值基本与室内试验得到的结果 87.55 kPa 相吻合。其中,现场所测最大值为 88.21 kPa,与室内试验的相对误差为 $(88.21 - 87.55) / 87.55 = 0.75\%$;现场实测最小值为 86.45 kPa,与室内试验的相对误差为 $(87.55 - 86.45) / 87.55 = 1.26\%$ 。

7 结 论

1) 在相同天然砂砾掺量下,红粘土的回弹模量随着初始干密度的增加而逐渐增大,但当初始干密度超过最大干密度而继续增长时,回弹模量的增长幅度逐渐减小。

2) 在同一初始干密度下,随着天然砂砾掺量的增加,红粘土的回弹模量逐渐增大,当天然砂砾掺量从 0 增长至 30% 时,回弹模量增长幅度较小,当天然砂砾掺量超过 30% 而继续增长时,回弹模量增长幅度较大。

3) 回弹模量增长值随着天然砂砾掺量的增加而逐渐增大,其中,当天然砂砾掺量超过 30% 后,回弹模量增长值快速增长。

4) 建立了回弹模量随初始干密度变化的预估模型,该模型具有较强的代表性;建立了回弹模量随天然砂砾掺量变化的预估模型,该模型精确性较高,相对误差均能控制在 4% 以内,初始干密度过小或过大均会造成该模型相对误差的增大。

参考文献:

[1] 周远忠,刘新荣,张梁,等. 红粘土微观结构模型及其工程力学效应分析[J]. 地下空间与工程学报,2012,8(4): 726-731.
ZHOU Y Z, LIU X R, ZHANG L, et al. Study of

micro-structure model of red clay and its engineering mechanical effect[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(4): 726-731. (in Chinese)

- [2] 方薇,刘晓红. 红粘土路堑高边坡加固效果的数值模拟[J]. 公路交通科技,2012,29(3):22-28.
FANG W, LIU X H. Numerical simulation of reinforcement effect of high red clay cutting slope [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012,29(3):22-28. (in Chinese)
- [3] 莫白金,李跃军. 砂砾改良高液限红粘土的试验研究[J]. 公路,2009(8):226-229.
MO B J, LI Y J. Experimental research of gravel improved high liquid red clay[J]. Highway, 2009(8): 226-229. (in Chinese)
- [4] 赵雄. 化学溶蚀作用下红粘土微细结构的变化规律[J]. 交通科学与工程,2015,31(3):33-38.
ZHAO X. The variation of the fine structure of red clay under chemical corrosion[J]. Transportation Science & Engineering, 2015,31(3):33-38. (in Chinese)
- [5] 崔德山,项伟,陈琼等. 真空冷冻干燥和烘干对滑带土孔隙特征的影响试验[J]. 地球科学——中国地质大学学报,2014,39(10):1531-1537.
CUI D S, XIANG W, CHENG Q, et al. Pore characteristics of sliding zone soils of huangtupo landslide by vacuum freeze-dried and dried methods[J]. Journal of China University of Geosciences, 2014, 39(10):1531-1537. (in Chinese)
- [6] MEDINA J, GUIDA H N. Stabilization of lateritic soils with phosphoric acid [J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2014,32(4):199-216.
- [7] KATZ L E, RAUCH A F, LILJESTRAND H M, et al. Mechanism of soil stabilization with liquid ionic stabilizer[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2013,145(1): 50-57.
- [8] 段丹军. 山西省黄土回弹模量影响因素的试验分析[J]. 公路,2014(3):139-144.
DUAN D J. Test and analysis of influence factors for resilient modulus of loss in Shanxi Province [J]. Highway, 2014(3):139-144. (in Chinese)
- [9] 刘燕燕,李建军,黄中文. 不同压实度条件下高液限红粘土工程性质研究[J]. 中外公路,2011,31(6):73-76.
LIU Y Y, LI J J, HUANG Z W. The engineering characteristic research on high liquid clay under the condition of different compaction degree [J]. China & Foreign Highway, 2011,31(6):73-76. (in Chinese)