

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.04.063

橡胶红黏土路用性能研究

杨德忠¹, 陈开圣^{2*}

(1. 黔南州交通建设养护发展中心, 贵州 都匀 558000; 2. 贵州大学 土木工程学院)

摘要:为了探究废旧轮胎橡胶颗粒与红黏土混合土作为路基填料的可行性,选择不同粒径(10目、20目、60目)不同含量的橡胶粉(0%、2%、4%、6%、8%和10%)掺入红黏土中,通过室内试验研究混合土的液塑限、击实特性、膨胀率和CBR值变化关系,探讨橡胶红黏土的路用性能和机理。结果表明:混合土液限和塑性指数随橡胶粉掺量的增大而降低,但仍大于50%和26,不能直接用作路基填料。最优含水率和最大干密度随橡胶粉掺量的增大而减小,呈一元二次函数关系,且三者间呈二元二次函数关系。膨胀率随橡胶粉掺量的增大而减小,橡胶目数越大,土体膨胀量越小。橡胶红黏土CBR随橡胶粉掺量的增大总体上减小,基本呈一元三次函数关系。红黏土中掺入橡胶粉,改良效果不佳,但可抑制土体的膨胀量。

关键词: 橡胶红黏土; 液塑限; 击实性能; 膨胀率; CBR值

随着汽车工业持续高速发展,日益增多的汽车废弃轮胎成为一个十分棘手的问题。目前对废旧轮胎的处理方法主要有翻新、囤积、焚烧和填埋,囤积会造成各种寄生虫和蚊虫的滋生,焚烧则会释放有毒烟雾,而填埋会污染地下水。为了节约资源和保护环境,寻找废旧轮胎橡胶再利用的新方法是摆在广大科研工作者面前的一个重要课题。橡胶颗粒改变土体性质的研究主要集中在橡胶颗粒与砂、膨胀土和粉土等方面。以膨胀土为例,孙树林提出随着橡胶粉掺量的增加,橡胶膨胀土的抗剪强度增大,其中黏聚力较内摩擦角变化显著;邹维列指出橡胶膨胀土的黏聚力和抗剪强度随橡胶粉掺量的增大而降低;杜静认为改性膨胀土抗剪强度和内摩擦角较素膨胀土显著增大,黏聚力值略有下降;颜椿钊通过橡胶红黏土的三轴试验表明,橡胶红黏土的抗剪强度随橡胶粉掺量的增大而增加,其中内摩擦角增大是使得橡胶红黏土抗剪强度增大的主要原因,并提出了橡胶红黏土的有效掺量为2%~4%。

上述研究表明:橡胶颗粒改良土体工程性能尚不明确,研究结论不尽相同。该文通过室内试验研究不同粒径和掺量下橡胶对混合土的液塑限、击实特性、CBR值、膨胀率的影响,探讨橡胶红黏土的路用性能。

1 基本物理指标

试验所用的土样取自某路路基基坑,为褐色可塑红黏土,级配良好,结构致密,土料基本物理指标见表1。橡胶采用废旧轮胎经机械破碎并磨细的橡胶粉,分别选取10目、20目和60目三组粒径,橡胶颗粒技术指标见表2。

2 试验方法

定义橡胶粉掺量为橡胶粉质量与橡胶红黏土混合土质量的比值,计算公式为式(1)。在完成击实试验得

表1 红黏土基本物理指标

不同粒径含量/%			最优含水	最大干密度/	塑限/	液限/	不均匀	曲率
>0.075 mm	0.074~0.002 mm	<0.002 mm	率/%	(g·cm ⁻³)	%	%	系数	系数
17.70	65.12	17.18	24.9	1.60	30.1	59.7	17.21	2.51

收稿日期:2020-07-28(修改稿)
基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51368010,51668011);贵州省科技支撑计划项目(编号:黔科合支撑[2016]2005);贵州省科技厅-贵州大学联合基金资助项目(编号:黔科合LH字[2014]7663)
作者简介:杨德忠,男,高级工程师。E-mail:1640384788@qq.com
* 通信作者:陈开圣,男,博士,教授。E-mail:32084046@qq.com

表 2 橡胶粉技术指标

胶粉 目数	表观密度/ (g·cm ⁻³)	弹性模 量/kPa	筛孔/ mm	标准粒径 含量/%	吸水率/ %
10	1.05	7.83	0.425	90	2.1
20	0.89	5.42	0.300	90	3.3
60	0.76	3.21	0.250	95	4.7

到最大干密度后,当需要配置不同压实度、不同含水率的试样时,根据试模体积,按式(2)计算各种压实度下试样所需土样质量。按照橡胶掺量为 0%~10% 分别配置土样,充分搅拌均匀后,置于保湿缸中静置 24 h,试样配置见表 3。根据 JTG E40—2007《公路土工试验规程》对不同掺量的混合土进行液塑限试验、击实试验和 CBR 试验。

$$\chi=\frac{m_i}{m}$$

(1)

$$m_s=K\rho_{d\max}(1+w)V$$

(2)

式中: χ 为橡胶粉掺量(%); m_i 为橡胶粉质量(g); m

为橡胶粉质量+干土质量(g); m_s 为混合土试样质量(g); K 为目标压实度(%); $\rho_{d\max}$ 为不同掺量下的最大干密度(g/cm³); w 为目标含水率; V 为试模体积。

表 3 试样配置表

压实度/%	含水率/%	橡胶粉目数/目	橡胶粉掺量/%
85	20.0	10	0
			2
90	24.9	20	4
			6
96	30.0	60	8
			10

3 试验结果

3.1 橡胶掺量对液塑限的影响

橡胶掺量对液塑限的影响见图 1。

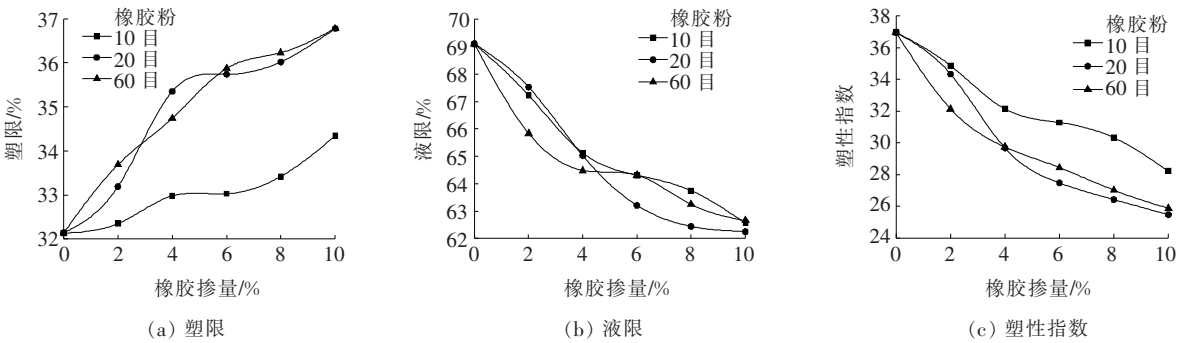


图 1 橡胶红黏土液塑限

由图 1 可知:随着橡胶粉掺量的增加,混合土的液限和塑性指数降低,而塑限增大。在胶粉掺量小于 10% 的条件下,混合土液限、塑性指数分别大于 50% 和 26,仍不能满足 JTG D30—2015《公路路基设计规范》第 3.3.1.4 条规定:液限大于 50%、塑性指数大于 26 的细粒土,不能直接作为路堤填料来使用。究其原因,橡胶粉颗粒属于憎水性高分子材料,本身不具有吸水性,但橡胶颗粒的比表面积大、形状不规则,水分可以依附在其表面,使得红黏土颗粒之间自由水减少,因此塑性指数降低。同时由于塑性指数随橡胶粉掺量增加而降低,意味着掺橡胶粉可以适当降低红黏土的胀缩性和亲水性。

3.2 橡胶红黏土击实试验

橡胶红黏土击实曲线见图 2。胶粉掺量与最大干密度、最优含水率之间关系试验结果见图 3、4。橡胶

红黏土击实过程中橡胶颗粒对土颗粒的附加作用示意图见图 5。

从图 2~5 可以看出:随着橡胶粉掺量的增加,击实曲线下降,曲线峰值往左侧移动,即最优含水率和最大干密度随橡胶粉掺量的增大而减小。究其原因:①橡胶颗粒的比表面积大于土颗粒,且橡胶属于弹性材料,土粒为塑性材料。击实过程中橡胶颗粒对土粒具有附加击实功的作用,在击实锤下落击实阶段,橡胶颗粒由于上下方向被挤压而向四周膨胀,进而对土粒施加一定的附加作用力,使四周土粒被进一步挤密[图 5(b)];在击实锤抬升卸荷阶段,橡胶颗粒上下方向回弹而对上下部位土体施加一定的附加荷载,土粒被挤密[图 5(c)];②掺入橡胶后,橡胶颗粒占据了部分土颗粒的体积,使得土粒含量减少,且橡胶颗粒吸水率小,因此混合土达到最密实状态时所需的水分减少。

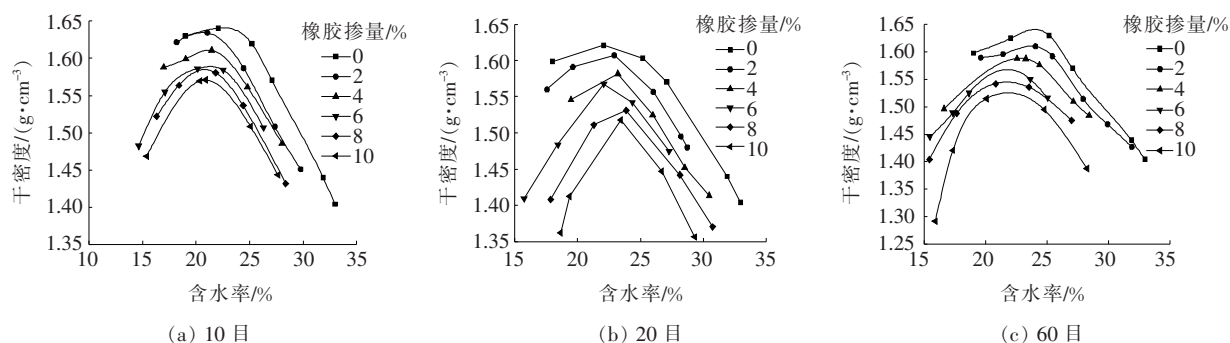


图2 橡胶红黏土击实曲线

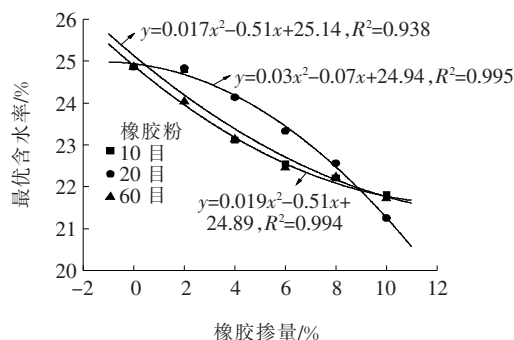


图3 最优含水率与橡胶粉掺量的关系

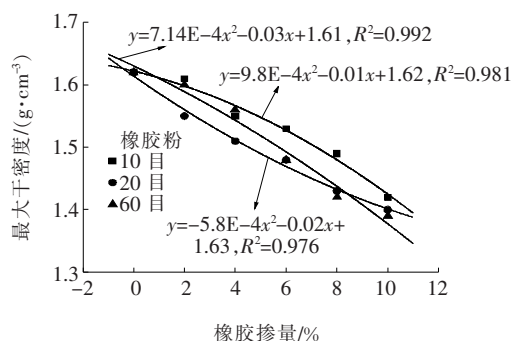


图4 最大干密度与橡胶粉掺量的关系

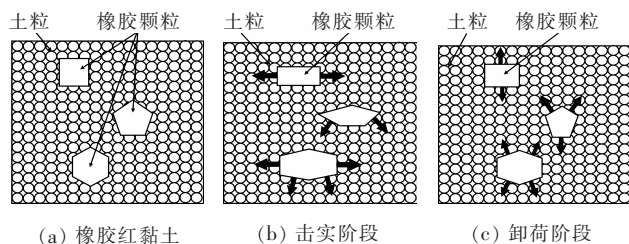


图5 橡胶红黏土击实过程中橡胶颗粒对土颗粒的附加作用示意图

由于上述两种作用,使得击实曲线左移。干密度减小的原因是:橡胶颗粒密度小于土颗粒密度。掺入橡胶后橡胶颗粒占据部分土颗粒的体积,因此橡胶红黏土的干密度降低。由图2还可看出:随着橡胶粉掺量的增加,曲线变陡变窄,表现出无黏性土的性质。由图

3、4可知:橡胶红黏土的最优含水率和最大干密度均与橡胶粉掺量呈一元二次函数关系;最优含水率、最大干密度和橡胶粉掺量三者具有较好的二元二次函数关系。即:

$$\rho_{d\max} = A_1 \chi^2 + B_1 \chi + C_1 \quad (3)$$

$$w_{opt} = A_2 \chi^2 + B_2 \chi + C_2 \quad (4)$$

$$\chi = A_3 w_{opt}^2 + B_3 w_{opt} + C_3 \rho_{\max}^2 + D_3 \rho_{\max} \quad (5)$$

式中: A_1 、 B_1 、 C_1 、 A_2 、 B_2 、 C_2 、 A_3 、 B_3 、 C_3 、 D_3 均为试验参数。

3.3 橡胶红黏土 CBR 试验结果

3.3.1 膨胀率

根据式(6)计算橡胶红黏土浸水4h后的膨胀率。

$$\delta = \frac{h_i - h_0}{h_0} \times 100\% \quad (6)$$

式中: h_0 为试样初始高度,此试验为120mm; h_i 为试样浸泡4昼夜后的高度。

图6为橡胶红黏土膨胀率与各因素间的关系。

由图6可知:膨胀率随橡胶粉掺量的增大而减小,即掺入橡胶粉能有效降低土体的膨胀量。分析原因如下:①橡胶粉掺量的增加,相同体积和相同击实功下,试筒内的土体含量减小,而橡胶粉几乎不吸水膨胀,仅由土体吸水膨胀,因此橡胶掺量越大,膨胀率越小;②橡胶颗粒表面为不规则形状且表面粗糙,颗粒间的摩阻力增大,在土体膨胀过程中,土体与橡胶颗粒、橡胶颗粒与橡胶颗粒间相互摩擦,一部分膨胀力在这过程中被抵消;③橡胶粉表面具有憎水性,会对土粒起包围作用,阻碍红黏土中亲水矿物与水分的作用与结合。橡胶红黏土膨胀率受压实度和含水率影响明显,压实度越大,膨胀率越大;含水率越小,膨胀率越大。橡胶目数越大即橡胶粒径越小,比表面积越大,阻碍红黏土中亲水矿物与水分结合作用越强,所以橡胶粉粒径越小,混合土膨胀率越小。

为了更好反映橡胶红黏土膨胀率随橡胶粉掺量的

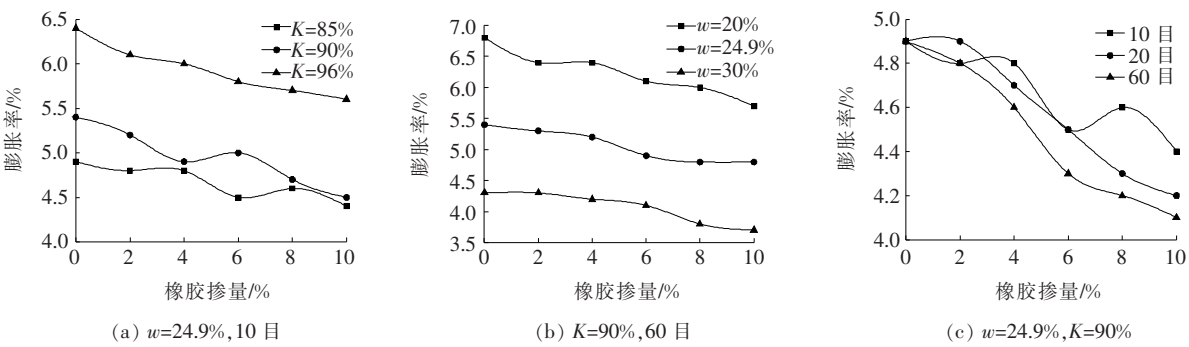


图 6 橡胶红黏土的膨胀量与各因素间的关系

衰减规律,定义膨胀率绝对衰减值 Δ :

$$\Delta = \frac{\delta_0 - \delta_i}{\delta_0} \times 100\% \tag{7}$$

式中: δ_0 为橡胶粉掺量为 0(纯土)时的膨胀率; δ_i 为各种掺量下混合土的膨胀率。

图 7 为橡胶红黏土的膨胀率绝对衰减值与橡胶粉掺量的关系。

由图 7 可知:膨胀率绝对衰减值随着橡胶粉掺量的增大而先增大后趋于稳定。究其原因,橡胶粉掺量较低时,土体的膨胀力大于颗粒间的摩擦力,试样表现为膨胀;随着掺量的增大,颗粒间的摩擦力增大,混合土膨胀率减小,膨胀率绝对衰减值逐渐趋于平缓。利用 Origin 软件拟合,用函数 $\Delta = \frac{A_4}{\sqrt{\chi}} + B_4$ 拟合效果较好,绝大部分数据 R^2 为 0.95 以上,模型参数见表 4。

因此可用该函数表示橡胶红黏土的膨胀率绝对衰减值与橡胶粉掺量的关系。

3.3.2 CBR 值

将浸泡 4 d 的不同掺量橡胶红黏土 CBR 试样置于 CBR 试验仪上进行试验,试验贯入速率为 1 mm/min,得到 CBR 值与橡胶粉掺量的关系如图 8 所示。

由图 8 可知:除了压实度为 96% 时 10 目、20 目在橡胶掺量小于 4% 时, CBR 值随橡胶粉掺量增加而略为增加外,整体上 CBR 随橡胶粉掺量的增大而波动减小。究其原因:当橡胶掺量较小时,此时压实度起决定作用,压实度大的试样,由于橡胶粉表面粗糙,掺入土体后与土体颗粒相互嵌挤,对土体抗剪强度有一定的增强作用;同时由于掺入橡胶后,土体膨胀量降低,浸泡过程中由于膨胀而使土体松散的效果也减小,土粒间黏结效果较好,因此土体 CBR 略增大。橡胶红黏土 CBR 值降低机理可由图 9 解释:① 在贯入杆侧面即剪切面上的橡胶粉与贯入杆发生剪切的过程中,由于橡胶粉没有黏聚力,仅靠橡胶粉表面与贯入杆摩

表 4 膨胀率绝对衰减值与橡胶粉掺量拟合模型参数

含水率/%	胶粉目数/目	压实度/%	A_4	B_4	R^2
20	10	85	6.174	-6.163	0.967
		90	5.030	-5.161	0.880
		96	4.624	-7.230	0.740
	20	85	6.550	-2.987	0.970
		90	6.259	-6.015	0.903
		96	7.116	-7.805	0.859
	60	85	8.114	-6.694	0.961
		90	5.904	-3.997	0.877
		96	6.060	-4.500	0.736
24.9	10	85	4.650	-5.309	0.768
		90	6.717	-5.925	0.854
		96	4.661	-2.302	0.980
	20	85	8.464	-12.312	0.994
		90	5.162	-5.202	0.994
		96	5.104	-4.287	0.919
	60	85	8.549	-10.064	0.978
		90	6.049	-6.933	0.919
		96	5.893	-8.033	0.936
30	10	85	3.794	-4.606	0.674
		90	8.471	-13.107	0.967
		96	5.942	-8.311	0.788
	20	85	3.960	-3.046	0.960
		90	7.190	-10.536	0.794
		96	4.042	-2.029	0.871
	60	85	6.900	-6.603	0.948
		90	8.374	-13.343	0.917
		96	3.308	-1.621	0.617

擦产生微小的摩擦力提供剪切力;② 在贯入杆底面,由于橡胶粉是弹性材料,土体是塑性材料,因此橡胶粉更

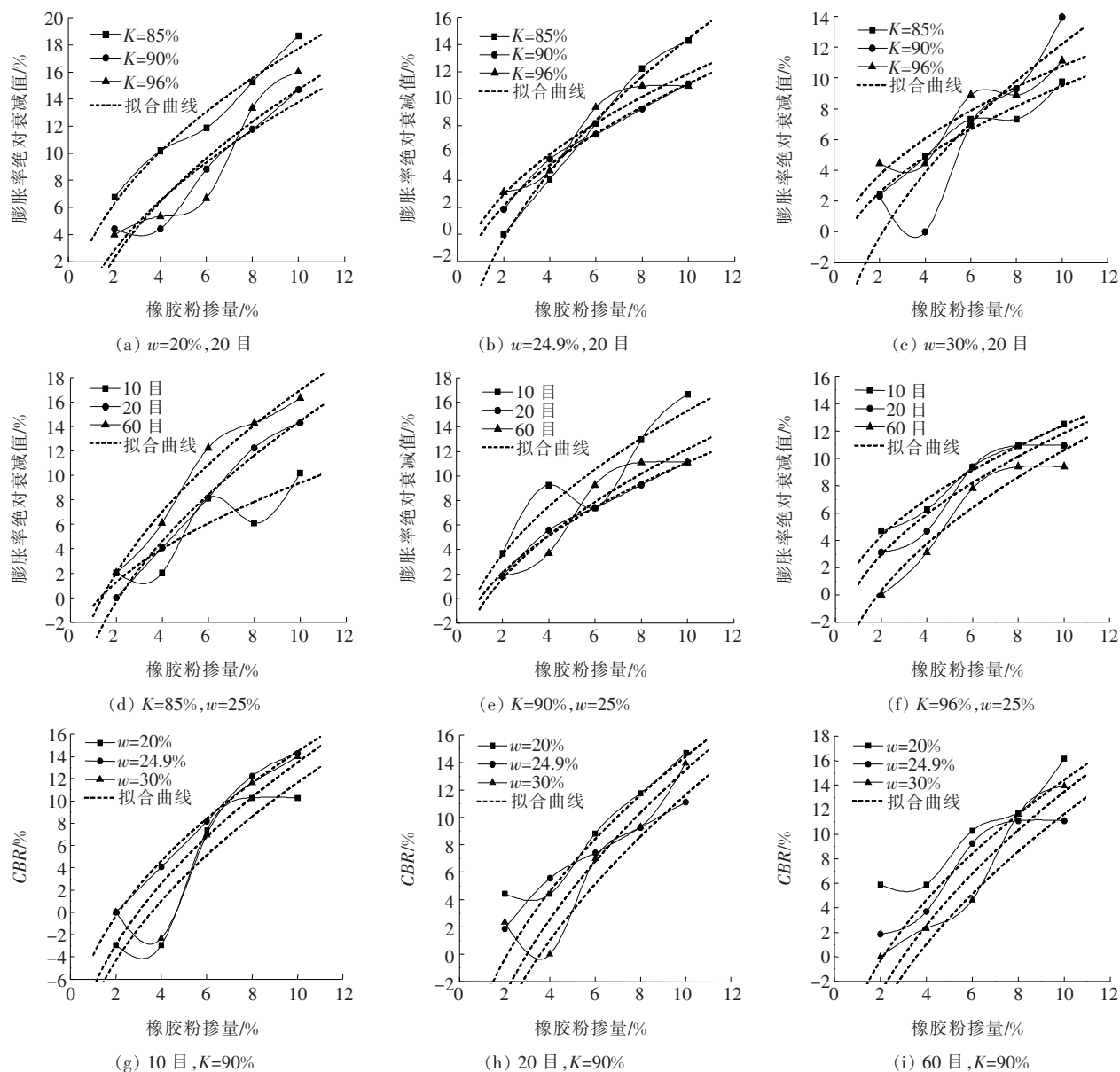


图7 膨胀率绝对衰减与橡胶粉掺量的关系

容易压缩变形,而 CBR 试验仅贯入 2.5 mm 或 5 mm。这两方面的效果造成了高掺量的橡胶红黏土 CBR 值降低。高掺量的橡胶红黏土随胶粉掺量越高,改良效果越不佳。

结合 CBR 与橡胶掺量的图像,利用 Origin 软件拟合发现函数 $CBR = A_5\chi^3 + B_5\chi^2 + C_5\chi + D_5$ 拟合效果较好,绝大部分 R^2 在 0.95 以上,模型参数见表 5。因此可用该函数表示橡胶红黏土的 CBR 与橡胶粉掺量的关系。

4 结论

(1) 随着橡胶粉掺量的增加,混合土的液限和塑

性指数降低,但仍分别大于 50% 和 26,不满足 JTG D30—2015《公路路基设计规范》要求,不能直接用作路堤填料。

(2) 随着胶粉掺量的增加,击实曲线下降,曲线峰值往左侧移动,最优含水率和最大干密度减小,且最优含水率和最大干密度与橡胶粉掺量呈一元二次函数关系,三者间具有二元二次函数关系。即 $\rho_{dmax} = A_1\chi^2 + B_1\chi + C_1$ 、 $w_{opt} = A_2\chi^2 + B_2\chi + C_2$ 和 $\chi = A_3w_{opt}^2 + B_3w_{opt} + C_3\rho_{max}^2 + D_3\rho_{max}$ 。

(3) 膨胀率随橡胶粉掺量的增大而减小,掺入橡胶粉能有效降低土体的膨胀量。橡胶目数越大,土体膨胀量越小。膨胀率绝对衰减随着橡胶粉掺量的增

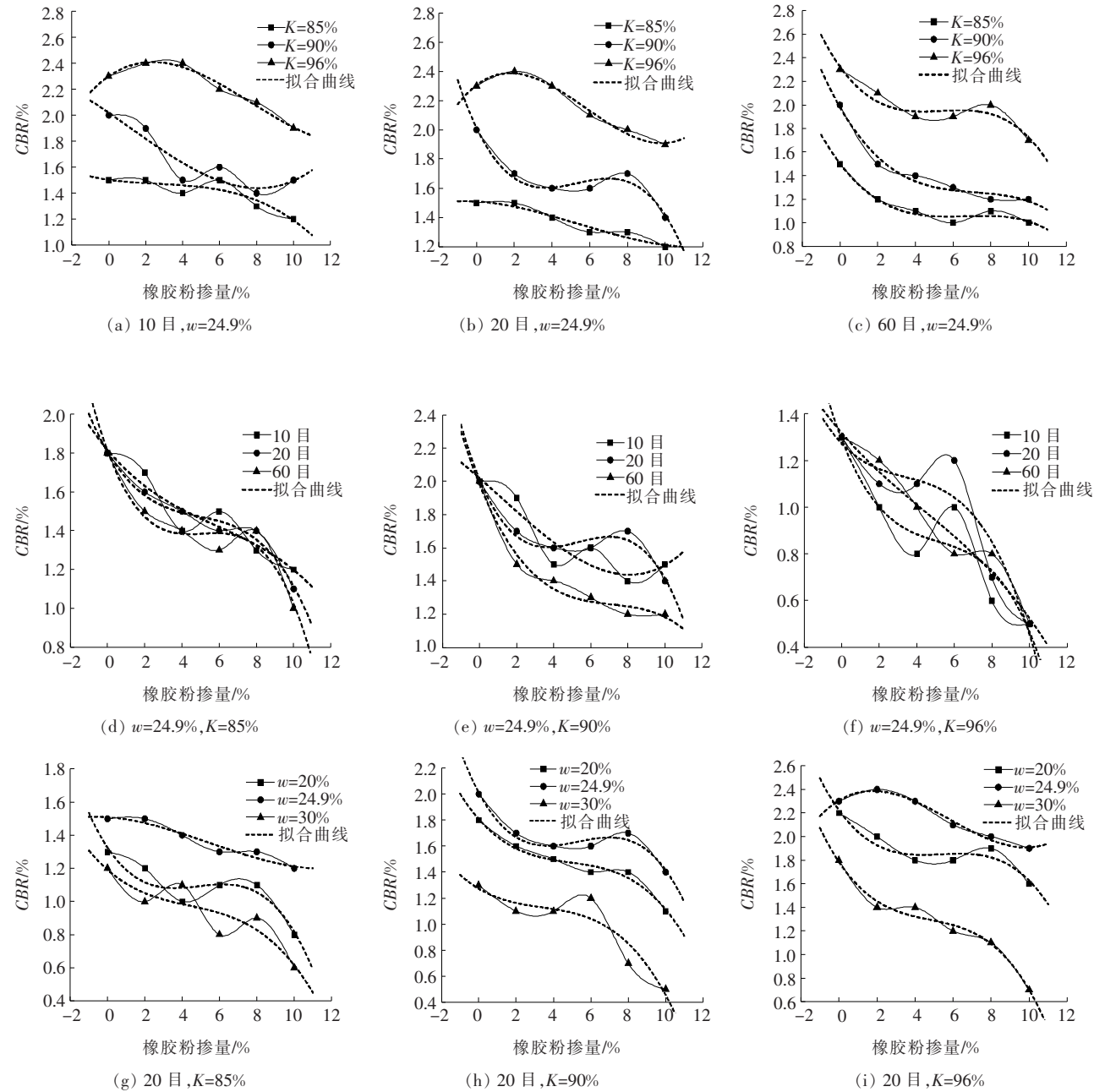


图 8 CBR 与橡胶粉掺量的关系

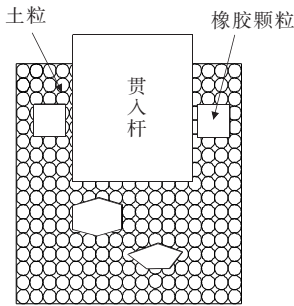


图 9 CBR 试验示意图

大而先增大后趋于稳定,数学模型满足 $\Delta = \frac{A_4}{\sqrt{\chi}} + B_4$ 。

(4) 橡胶红黏土 CBR 值随橡胶粉掺量的增大而波动减小。CBR 值与橡胶粉掺量的数学模型满足 $CBR = A_5\chi^3 + B_5\chi^2 + C_5\chi + D_5$ 。

(5) 单一的橡胶粉改良红黏土效果不佳,原因是轮胎橡胶粉或颗粒与红黏土之间无化学反应或离子键反应,只能作为充填料。建议掺加固化剂(水泥、石灰等)使混合土发生化学反应增强土体强度。

表 5 CBR 与橡胶粉掺量拟合模型参数

含水率/%	胶粉目数/目	压实度/%	A_5	B_5	C_5	D_5	R^2
20	10	85	1.157×10^{-4}	-0.002	-0.031	1.315	0.938
		90	-6.944×10^{-4}	0.012	-0.114	1.817	0.909
		96	-1.157×10^{-4}	0.001	-0.053	2.221	0.869
	20	85	-0.002 55	0.037	-0.169	1.325	0.887
		90	-0.001 97	0.029	-0.163	1.808	0.981
		96	-0.002 66	0.043	-0.224	2.225	0.916
	60	85	5.784×10^{-17}	-8.8×10^{-16}	-0.050	1.300	1.000
		90	-0.003 36	0.517	-0.260	1.812	0.954
		96	-0.003 24	0.047	-0.244	2.228	0.951
	10	85	-5.787×10^{-4}	0.005	-0.020	1.503	0.852
		90	6.944×10^{-4}	-0.002	-0.098	2.019	0.874
		96	0.001 04	-0.024	0.098	2.300	0.981
24.9	20	85	3.472×10^{-4}	-0.006	-0.008	1.510	0.951
		90	-0.003 47	0.056	-0.269	2.012	0.963
		96	0.001 85	-0.032	0.098	2.036	0.989
	60	85	-0.001 62	0.032	-0.211	1.503	0.969
		90	-0.001 74	0.037	-0.278	1.981	0.980
		96	-0.002 66	0.043	-0.224	2.325	0.916
	10	85	-3.472×10^{-4}	2.98×10^{-4}	-0.038	1.219	0.974
		90	-0.002 31	0.036	-0.207	1.291	0.877
		96	0.002 20	-0.026	-0.055	1.779	0.969
	30	85	-0.001 27	0.017	-0.099	1.191	0.835
		90	-0.001 85	0.019	-0.085	1.273	0.888
		96	-0.003 01	0.043	-0.241	1.787	0.983
	60	85	9.259×10^{-4}	-0.010	-0.038	1.206	0.905
		90	-4.630×10^{-4}	0.006	-0.094	1.318	0.964
		96	-0.001 04	0.020	-0.210	1.793	0.969

参考文献:

[1] 李延明,于庆波.废旧轮胎回收利用技术[C].第七届全国能源与热工学术年会论文集,2013.

[2] Tiwari B,Ajmera B,Moubayed S, et al. Soil Modification with Shredded Rubber Tires[C]. GeoCongress 2012 @ State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering. ASCE,2012: 3 701-3 708.

[3] Adalier. K. &A. Pamuk. On the Important Mechanical Properties of Rubber-Sand[J]. Advanced Materials Research,2013(8):8-14.

[4] 孙树林,魏永耀,张鑫.废弃轮胎胶粉改良膨胀土的抗剪强度研究[J].岩石力学与工程学报,2009(S1).

[5] 邹维列,谢鹏,马其天,等.废弃轮胎橡胶颗粒改性膨胀土

的试验研究[J].四川大学学报(工程科学版),2011(3).

[6] 杜静,徐丽丽,阳利君.废弃轮胎橡胶粉改良膨胀土的室内试验研[J].西部交通科技,2015(9).

[7] 颜椿钊,张雁,郭利勇.废弃轮胎橡胶颗粒改良红黏土强度试验研究[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2015(4).

[8] JTG E40—2007 公路土工试验规程[S].

[9] 李朝晖,张虎元.废轮胎颗粒与黄土混合物压实性能研究[J].岩土力学,2010(12).

[10] Tatlisoz N,Benson C H,Edil T B. Effect of Fines on Mechanical Properties of Soil-Tire Chip Mixtures[J]. ASTM Specal Technical Publication,1997,1 275:93- 124.

[11] 何俊,李勇,阮晓晨,等.废旧轮胎胶粉-黏土混合土的击实性能[J].工程地质学报,2015(5).