

文章编号: 1000-7598 (2010) 12-3715-07

废轮胎颗粒与黄土混合物压实性能研究

李朝晖^{1,2}, 张虎元¹

(1. 兰州大学 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 兰州 730000; 2. 甘肃省建筑设计研究院, 兰州 730030)

摘要: 选择废轮胎颗粒以 0~50% 的掺量与黄土混合, 研究了混合土的压实特性, 并采用专门设计的环刀击实设备, 对环刀击实和标准击实进行了对比分析。试验结果表明, 掺量小于 20% 时混合土的压实特性类似黄土, 掺量大于 40% 时的压实特性类似无黏性土; 不同掺量的混合土最大干密度与最优含水率存在幂函数关系, 击实能对 10%~30% 掺量的混合物有效最大干密度影响较小; 不同击实能下掺量与最优含水率存在函数关系; 混合土存在最佳压实掺量, 轻、重型击实能下分别为 30% 和 40% 左右。根据室内试验结果, 给出了不同掺量混合土击实指标建议值供设计参考。

关键词: 废轮胎; 废轮胎颗粒; 压实性能; 黄土

中图分类号: TU 599

文献标识码: A

Compaction properties of granulated rubber and loess mixtures

LI Zhao-hui^{1,2}, ZHANG Hu-yuan¹

(1. Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China, Education Ministry, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. Gansu Architecture Design and Research Institute, Lanzhou 730030, China)

Abstract: To prompt the usage of scrap tires in civil engineering in China, the compaction properties of granulated tires and loess mixtures, with a granulated rubber content of 0%-50% by weight, were studied by standard and modified Proctor compactor and a cutting ring compactor specially designed by the authors for comparison. Test results show that the compaction properties of the mixtures are similar to that of loess soil when the granulated rubber content is less than 20%, but similar to that of a cohesionless soil when the content is more than 40%. A power function relationship was found between the maximum dry density and the optimum water content for mixtures with various compaction efforts. Compaction effort shows less effect on the maximum effective dry density of mixtures with granulated rubber content of 10%-30%. A power function relationship is existed between optimum water content and granulated rubber content. Test data show that 30% and 40% of granulated rubber is an optimum addition content for granulated rubber and loess mixtures. Compaction parameters of mixtures have been proposed for design based on laboratory test results.

Key words: scrap tires; granulated rubber; compaction properties; loess

1 引言

废轮胎作为汽车产业的副产品呈逐年上升趋势。这种固体废弃物除传统的处理方法外已开始作为新型建筑材料用于土木工程中, 比如: 路堤回填、挡墙后轻质回填、公路防冻胀层、音障等等^[1-4]。美国于 2004 年批准实施了废轮胎在土木工程中的应用标准规程 (ASTM D 6270-98)^[5], 这是近 20

多年诸多学者开辟废轮胎利用新途径的重要成就。土木工程中应用的废轮胎常常是指将废轮胎从轮辋上取下后破碎成不同大小的条块状, 其分类及工程特性可参阅本文作者关于轮胎条加筋土工程特性的综述文章^[6]。在已有研究报道中, 大多文献集中于废轮胎条与砂土形成混合物的工程特性研究^[7-11], 研究结果表明, 轮胎条砂土混合物具有特别的岩土工程应用价值。例如, 可以作为公路路堤、软弱地

收稿日期: 2009-12-01

基金项目: 甘肃省交通厅资助项目 (No. 甘交工 (科研) 2009 第 001 号)。

第一作者简介: 李朝晖, 女, 1968 年生, 博士研究生, 高工, 主要从事岩土工程勘察、设计及固体废弃物应用研究。E-mail: li_chhui07@lzu.cn

通讯作者: 张虎元, 男, 1963 年生, 博士, 教授、博士生导师, 主要从事环境岩土工程、文物保护等科研教学工作。E-mail: zhanghuyuan@lzu.edu.cn

基以及挡墙后的轻质回填材料。较少文献研究细颗粒土与废轮胎碎片混合后的工程特性,其中文献[12]研究了废轮胎颗粒与黏性土混合物的工程特性,并认为掺量 20%~30%轮胎颗粒与黏土混合可应用于路堤回填、桥台回填、挡墙后回填等土木工程中。为了进一步开发利用轮胎条混合土优良性质,本文采用我国西北地区广泛分布的黄土与废轮胎颗粒混合,形成轮胎颗粒/黄土混合土(以下简称混合土,其中黄土称为基质土,废轮胎颗粒称为橡胶颗粒),研究了混合土的压实特性,具体考察了橡胶颗粒掺量、击实能、含水率对压实参数的影响。混合土中橡胶颗粒增加了混合土的不均匀性,压实后再切取环刀试样常常发生试样破损,对试样扰动很大。笔者专门设计了环刀击实设备,对比了环刀击实与标准击实试验在试样压实特性上的差异,为今后压缩

试验和剪切试验制样寻找便捷途径。

2 压实试验

2.1 试验材料

试验采用兰州范家坪黄土及皮卡车废轮胎。黄土的基本性质见表 1,废轮胎经人工切割剪碎成粒径 2~7 mm 大小(不含钢丝)的颗粒。颗粒分析试验表明,2~5 mm 粒径占 45%,5~7 mm 占 55%。按照美国 ASTM D6270-98 定名属橡胶颗粒,采用 GB/T50123-1999^[13]虹吸筒法测其相对密度范围值为 1.07~1.38,平均值为 1.17,与文献研究结果^[14-19]吻合。按照美国 ASTM D6270-98 进行了橡胶颗粒的吸水率试验,浸泡 24 h 后吸水率为 1.07%~1.08%,浸泡 18 d 后吸水率为 3.0%~3.8%,与文献报道的 24 h~5 d 吸水率范围为 2.0%~4.3%^[18-19]可以进行对比。

表 1 试验用黄土物理性质
Table 1 Physical properties of loess used in test

指标	含水率 w / %	密度 ρ / (g/cm ³)	干密度 ρ_d / (g/cm ³)	相对密度 G_s	孔隙比 e	液限 W_L / %	塑限 W_p / %	塑性指数 I_p
平均值	11.9	1.53	1.37	2.70	0.981	26.4	18.0	8.5
范围值	6.9~18.7	1.34~1.74	1.21~1.51		0.786~1.237	25.1~27.9	16.9~19.4	7.4~10.0

2.2 试验方法

定义风干橡胶颗粒重量占含水混合土总重的百分比为掺量。按照掺量 0%、10%、20%、30%、40%、50%称取风干橡胶颗粒,按式(1)~(3)计算称取所需的预定含水率和基质土量,充分拌和均匀后置于密闭容器 24 h 备用。按照 GB/T50123-1999 击实试验方法对不同掺量的混合土进行了轻型击实试验及重型击实试验,专门设计了环刀击实设备(图 1),在环刀内对混合土进行了击实试验,与标准击实试验进行对比。击实试验相关参数如表 2 所示。

不同含水率、不同掺量的混合土配制公式为

$$m_t = 0.01xm \tag{1}$$

$$m_{\text{sw0}} = m(1 + 0.01w_0) \left(\frac{1}{1 + 0.01w} - 0.01x \right) \tag{2}$$

$$\Delta m_w = \frac{0.01(w - w_0)m}{(1 + 0.01w) + mw_0x \times 10^{-4}} \tag{3}$$

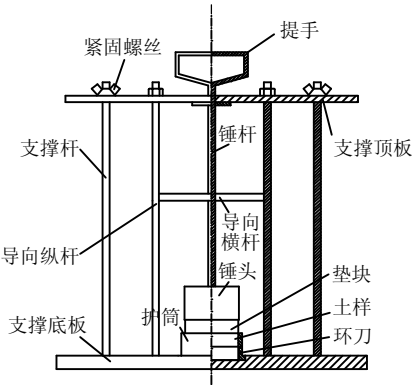


图 1 环刀击实设备示意图
Fig.1 Compactor of cutting ring

表 2 击实设备及试验方法参数
Table 2 Factors for compaction tests and equipments

试验方法	锤底直径 / mm	锤质量 / kg	落高 / mm	击实筒/环刀			单位体积击实功 / (kJ/m ³)	填土层数	每层击数	总击数
				内径 / mm	高度 / mm	容积 / cm ³				
标准轻型	51	2.5	305	102.0	116	947.4	592.2	3	25	75
标准重型	51	4.5	457	152.0	116	2 103.9	2 684.9	3	95	285
环刀轻型	78	2.5	173	79.8	20	100.0	592.2	1	14	14
环刀重型	78	2.5	173	79.8	20	100.0	2 684.9	1	64	64

式中： m_l 为风干橡胶颗粒重量； m 为欲配制混合土总重量； w_0 为黄土的初始含水率； m_{sw0} 为初始含水率等于 w_0 的黄土重量； w 为欲配混合土含水率； x 为掺量，即风干橡胶颗粒占混合土总重的百分比； Δm_w 为需添加的水量。

3 试验结果及分析

3.1 废轮胎颗粒掺量对压实效果的影响

图 2、3 分别为按照 GB/T50123—1999 标准击实试验获得的轻型、重型击实曲线，图 4 为掺量与最大干密度的关系，表 3 给出不同模具、不同击实能、不同掺量下混合土的平均相对密度、干土掺量、体积掺量、最优含水率、试验最大干密度、理论最大干密度及有效最大干密度。

混合土压实过程中因橡胶颗粒掺量的不同，基质土的压实效果不同。为了考察橡胶颗粒孔隙之间黄土基质的压实状态引入有效最大干密度 ρ_{bmax} 概念，计算式如下：

$$\rho_{bmax} = \rho_{dmax} \frac{100 - x'}{100 - \rho_{dmax} \frac{x'}{G_{ss}}} \quad (4)$$

式中： ρ_{dmax} 为试验最大干密度； G_{ss} 为黄土相对密度； G_{st} 为橡胶颗粒相对密度； x' 为干土掺量，是风干橡胶颗粒占混合土（含水）重量的百分比；理论最大干密度 ρ'_{dmax} 为击实作用下孔隙中的空气完全排除时的干密度。

图 2、3 表明，黄土最优含水率接近塑限含水率，低掺量混合土类似于纯黄土。对于混合土而言，随着掺量的增加，混合土的最优含水率降低，同时最大干密度也降低。高掺量混合土表现出无黏性土特征，例如 50% 掺量曲线右侧延伸短而陡，压实范围略窄。表 3 列出了击实试验结果及相关参数，可以看出，轻型击实试验中 30% 掺量下，重型击实试验中 40% 掺量下试验最大干密度与理论最大干密度最接近，两者相差分别为 3% 和 4%，表明压实效果好。

3.2 击实能对压实效果的影响

图 4 为理论最大干密度与实测最大干密度及有效最大干密度对比图。由图 4 及图 2、3 可以发现，随击实能增大，混合土干密度增大，含水率减小；另外，因掺入的橡胶颗粒原因，击实能对有效干密度影响很小，重型比轻型有效最大干密度仅提高 1%~3%；不同击实能下存在最佳压实掺量，即轻型击实能下最优压实掺量为 30%，重型击实能下最优压实掺量为 40%。

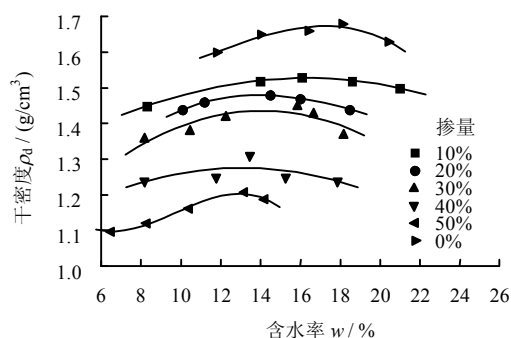


图 2 轻型击实试验不同掺量混合土含水率与干密度关系
Fig.2 Dry density vs. water content at different granulated rubber contents for standard proctor test

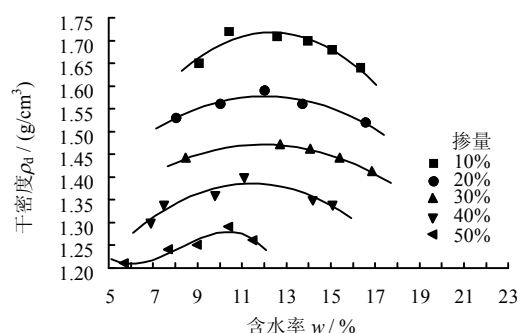


图 3 重型击实试验不同掺量混合土含水率与干密度关系
Fig.3 Relations of dry density vs. water content at different granulated rubber contents for modified proctor test

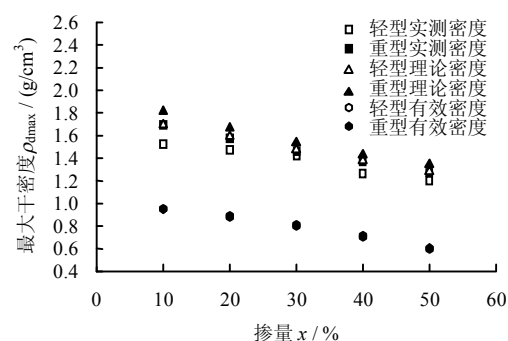


图 4 最大干密度与掺量关系
Fig.4 Relations of maximum dry density vs. granulated rubber content

3.3 含水率对压实效果的影响

混合土最优含水率与掺量密切相关，式 (5) ~ (8) 由图 5、6 分别回归出的不同击实能下混合土最大干密度、最优含水率及最优含水率与掺量间的函数关系。

轻型击实能下，有：

$$\rho_{dmax} = 6.57 - 1.10w_{opt} + 0.057w_{opt}^2 \quad (5)$$

$$w_{opt} = 12.66 - 0.016x - 5.71x^2 \times 10^{-4} \quad (6)$$

表 3 击实试验成果汇总表
Table 3 Compaction test results

试验方法	击实能 /(kJ/m ³)	试样 编号	平均相对密度 <i>G_{sm}</i>	干土掺量 <i>x</i> ' /%	掺量 <i>x</i> /%	体积 掺量 <i>a_v</i> /%	最优含水率 <i>w_{opt}</i> /%	试验最大干 密度 <i>ρ_{dmax}</i> /(g/cm ³)	理论最大干 密度 <i>ρ'_{dmax}</i> /(g/cm ³)	有效最大干 密度 <i>ρ_{hmax}</i> /(g/cm ³)
标准轻型	592.2	BQ0	2.70	0.00	0	0.00	17.6	1.68	1.83	1.68
标准轻型	592.2	BQ1	2.34	11.60	10	23.26	16.1	1.53	1.70	0.95
标准轻型	592.2	BQ2	2.08	22.90	20	40.67	14.5	1.48	1.60	0.88
标准轻型	592.2	BQ3	1.87	34.20	30	54.53	14.0	1.43	1.48	0.80
标准轻型	592.2	BQ4	1.69	45.36	40	65.70	13.4	1.27	1.38	0.69
标准轻型	592.2	BQ5	1.55	56.60	50	75.06	13.2	1.21	1.29	0.58
标准重型	2 684.9	BZ1	2.35	11.25	10	22.63	12.5	1.70	1.82	0.96
标准重型	2 684.9	BZ2	2.09	22.40	20	39.98	12.0	1.58	1.67	0.89
标准重型	2 684.9	BZ3	1.88	33.51	30	53.77	11.7	1.47	1.54	0.81
标准重型	2 684.9	BZ4	1.71	44.48	40	64.90	11.2	1.38	1.43	0.72
标准重型	2 684.9	BZ5	1.57	55.20	50	73.98	10.4	1.28	1.35	0.61
环刀轻型	592.2	HQ0	2.70	0.00	0	0.00	19.0	1.64	1.78	1.64
环刀轻型	592.2	HQ4	1.70	45.10	40	65.47	12.8	1.32	1.40	0.70
环刀重型	2 684.9	HZ0	2.70	0.00	0	0.00	16.2	1.72	1.88	1.72
环刀重型	2 684.9	HZ1	2.35	11.55	10	23.16	15.5	1.63	1.72	0.95

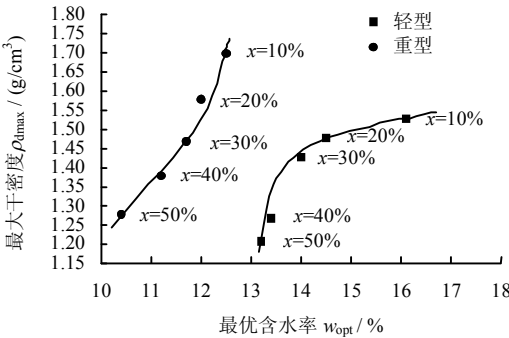


图 5 不同击实能及不同掺量下最大干密度与最优含水率的关系

Fig.5 Relations of maximum dry density vs. optimum water content of mixtures at various granulated rubber contents and compaction efforts

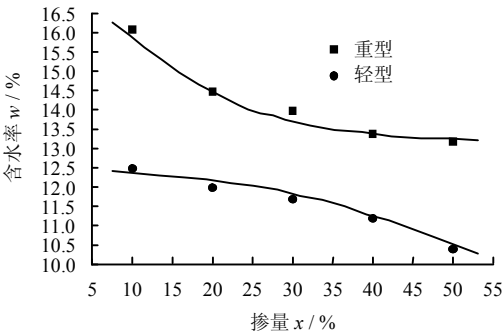


图 6 不同击实能下掺量与含水率关系

Fig.6 Relations of water content vs. granulated rubber content under different compaction energies

重型击实能下，有：

$$\rho_{dmax} = -14.40 + 2.06w_{opt} - 0.067w_{opt}^2 \quad (7)$$

$$w_{opt} = 17.66 - 0.185x + 1.93x^2 \times 10^{-4} \quad (8)$$

由式 (5) ~ (8) 可知，在一定的击实能下，可根据所需混合土最大干密度逆向计算出所需含水率和橡胶颗粒掺量。

表 3 的数据表明，相同掺量的混合土在高击实能下最优含水率减小，轻、重两种击实能下均表现出随掺量增加最优含水率减小。具体而言，轻型击实能下掺量由 10% 升高至 50% 时混合土最优含水率由 16.1% 降至 13.2%；重型击实能下，在相同掺量范围内混合土最优含水率由 12.5% 降至 10.4%。

3.4 不同模具对压实效果的影响

图 7 为环刀中击实试验曲线。试验统计结果列入表 3。

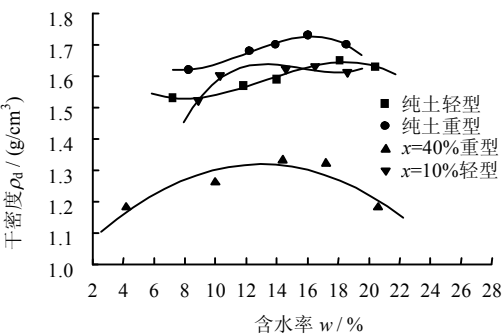


图 7 环刀内击实含水率与干密度关系

Fig.7 Relations of dry density vs. water content in cutting ring compaction

由图 7 及表 3 数据可以看到，环刀内击实法可取得较好的干密度与含水率关系，总体上环刀内击实法取得的最大干密度与标准法接近，误差小于 5%，环刀击实制样可以获得可控的含水率和干密

度,制好的试样可直接用于固结及剪切试验,避免了传统击实制样后切削对式样的较大扰动,这为轮胎颗粒混合土力学试验奠定了制样基础。其中最优含水率在大掺量下误差较大的原因,与填土分层方法、落锤作用轨迹、侧壁摩阻力及测试取样位置有关。建议首先进行标准击实试验,为现场施工碾压提供设计参数,据此进行环刀击实制样,取得相近状态指标的式样后再进行力学试验。

3.5 废轮胎颗粒与黄土混合土压实指标

表 4 列出了掺量 20% 和 30% 的废轮胎颗粒与黄土混合土击实指标,可供工程设计参考。压实试验结果表明,橡胶颗粒与黄土混合物可以在掺量小于 40% 范围内有效压实。混合土的重度低于基质土,另外,橡胶颗粒的掺入使混合土具有可控的压缩模量。因此,黄土中添加适当掺量的橡胶颗粒后可用于回填工程中,如解决涵洞填方减载、改善桥头差异沉降等等。

表 4 压实指标参考值

Table 4 Compaction parameters of mixtures

轻型			重型		
掺量 x /%	最优含水率 w_{opt} /%	最大干密度 ρ_{dmax} /(g/cm ³)	掺量 x /%	最优含水率 w_{opt} /%	最大干密度 ρ_{dmax} /(g/cm ³)
20	14.5	1.48	20	12.0	1.58
30	14.0	1.43	30	11.7	1.47

注:其他掺量击实指标可参照式(5)、(7)计算求出。

3.6 混合土压实机制分析

(1) 混合土结构的“滚元宵”效应及压缩效应

“滚元宵”效应是借用方形元宵芯与湿糯米粉充分混合形成大于原体积的似球体,来类比方形橡胶颗粒与湿土混合形成球状团聚体微观结构。不同击实能作用于混合土其本质是在改变基质土颗粒与橡胶土球颗粒的接触状态,因掺量的不同,大小颗粒表现出不同的骨架接触与填充状态(图 8)。把大小颗粒理想化为不可压缩球体,且当大颗粒粒径远大于小颗粒粒径时($D_{max}/D_{min} > 100$),可近似计算出大颗粒以松散骨架接触时的大颗粒体积掺量为 52%,以紧密骨架接触时的大颗粒体积掺量为 81%,这就是理想状态条件下的两种最佳压实掺量(大颗粒体积含量)。轻型击实中掺量 30% 达到最佳压实效果,对应的体积掺量为 50%,与理想松散骨架状态掺量较接近但数值略低,这是滚元宵效应使大颗粒体积增大的原故造成的。重型击实试验中掺量 40% 达到最佳压实效果,对应的体积掺量为 65%,其数值低于理想紧密骨架状态掺量的原因不仅与滚

元宵效应有关,还与橡胶颗粒的压缩效应有关。传统土颗粒不可压缩,但橡胶颗粒是弹性体,在外力作用下可产生较大变形,因而在低于计算土体积掺量下就出现了紧密接触,同样由于橡胶颗粒的压缩效应变形的橡胶颗粒在外力消失时产生弹性变形的恢复,使原本紧密的结构体系产生趋于松散的位移,部分抵消了击实能增加引起的压密效果,使得增加击实能对有效最大干密度的影响并不明显。

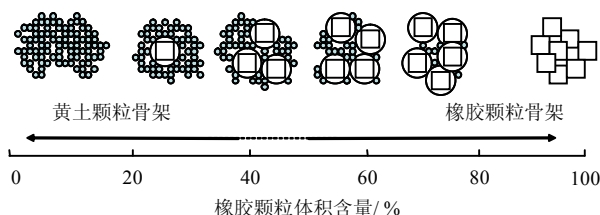


图 8 不同掺量下橡胶颗粒与黄土颗粒接触关系示意图

Fig.8 The relationships of skeleton between granulated rubber and loess particle under different granulated tire volume contents

(2) 废轮胎颗粒的憎水效应

天然土颗粒具有明显的亲水性,但橡胶颗粒浸泡 24 h 后的吸水率为 1.07%~1.08%,风干含水率 0.4% 具有憎水性,这种憎水效应使得混合土中的水份大部分由基质土吸收。引入有效吸水率概念 w_s :

$$w_s = (w - w_t) \frac{x + 0.01xw}{100 - x - 0.01wx} + wx \quad (9)$$

式中: w_s 为有效吸水率即黄土中含水率; w 为混合土总含水率; w_t 为橡胶含水率(按 1.1% 吸水率计算); x 为掺量,按式(9)计算的混合土中有效含水率列入表 5。

表 5 各种掺量下最优含水率与有效含水率对比

Table5 Optimum water contents and loess water contents in mixture with different granulated tires

轻型			重型		
掺量 x /%	最优含水率 w_{opt} /%	有效含水率 w_s /%	掺量 x /%	最优含水率 w_{opt} /%	有效含水率 w_s /%
10	16.1	18.1	10	12.5	13.9
20	14.5	18.5	20	12.0	15.1
30	14.0	20.7	30	11.7	17.0
40	13.4	23.5	40	11.2	19.2
50	13.2	28.8	50	10.4	21.7

表 5 数据表明,同一掺量下有效含水率总量高于最优含水率,随掺量增加有效含水率与最优含水率之间差值增大。例如,50% 高掺量轻型击实能下,最优含水率仅为 13.2%,而有效含水率高达 28.8%。

此含水率已超过基质土的塑限, 掺量若继续提高, 尽管最优含水率还会降低, 但基质土颗粒实际已经进入流塑状态, 丧失黏结性, 导致不能制成块状试样。正是由于橡胶颗粒憎水效应, 混合土击实曲线在高掺量时击实范围较窄, 且曲线右侧延伸短而陡。

4 结 论

通过对废轮胎颗粒/黄土混合物进行标准模具内轻型、重型击实试验及环刀内击实试验, 本文研究了废轮胎颗粒掺量、击实能、含水率及环刀内击实方法对混合物压实参数的影响, 分析了压实机制, 得出以下三点结论:

(1) 随废轮胎颗粒掺量增加, 混合物压实曲线变化由近似于素黄土向近似于“无黏性土”变化, 不同的击实功、不同的试验方法在试验掺量范围内都可以得到稳定的最大干密度和最优含水率指标。

(2) 标准击实试验中, 随掺量增加混合物最优含水率降低, 最大干密度降低。在相同掺量下, 击实能增加, 混合土的干密度增大, 最优含水率降低, 但击实能对 10%~30% 掺量的混合物有效最大干密度影响较小。轻型击实能下 30% 掺量及重型击实能下 40% 掺量状态细颗粒充分填充孔隙, 混合土压实效果显著, 它们是最佳压实掺量。

(3) 环刀中采用相同单位轻型击实能及重型击实能制样可以得出与标准模具近似的击实曲线, 环刀制样可以得到含水率及干密度可控的试样, 为下一步的压缩、剪切试验提供了可行的制样方法。

参 考 文 献

- [1] LEE J H, SALGADO R, BERNAL A, et al. Shredded tires and rubber sand as lightweight backfill[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1999, 125(2): 132—141.
- [2] HUMPHREY D N, WHETTEN N, WEAVER J, et al. Tire shreds as lightweight fill for embankments and retaining walls[C]//*Recycled Materials in Geotechnical Applications*. Virginia: ASCE Geotechnical Special Publication No. 79, 1998: 51—65.
- [3] DORE G, KONRAD J M, ROY M, et al. Use of alternative materials in pavement frost protection: Material characteristics and performance modeling[R]. Washington D C: Transportation Research Board, 1995.
- [4] WU J T H, HELWANY M B, BARRETT R K. Use of shredded tire as backfill for a new geosynthetic reinforced retaining wall system[C]//*Proceedings of the 5th International Conference on Geotextiles*. Singapore: Geomembranes and Related Products, 1994: 269—272.
- [5] ASTM. D6270—98 Standard practice for use of scrap tires in civil engineering applications[S]. West Conshohocken: ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, 2004.
- [6] 李朝晖, 张虎元, 赵彦旭. 轮胎条加筋土工程特性[J]. *岩土工程勘察*, 2009, 37(6): 19—23.
LI Zhao-hui, ZHANG Hu-yuan, ZHAO Yan-xu. Engineering properties of tire shreds reinforced soils[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2009, 37(6): 19—23.
- [7] AHMED I, LOVELL C W. Rubber soil as lightweight geomaterial[R]. Washington: National Research Council, 1993.
- [8] EDIL T B, BOSSCHER P J. Engineering properties of tire chips and soil mixtures[J]. *Geotechnical Testing Journal, ASTM*, 1994, 17(4): 453—464.
- [9] FOOSE G J, BENSON C H, BOSSCHER P J. Sand reinforced with shredded waste tires[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, 122(9): 760—767.
- [10] MASAD E, TAHA R, HO C, PAPAGIONNAKIS T. Engineering properties of tire/soil mixtures as a lightweight fill material[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1996, 19(3): 297—304.
- [11] WU W Y, BENDA C C, CAULEY R F. Triaxial determination of shear strength of tire chips[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997, 123(5): 479—482.
- [12] CETIN H, FENER MAND, CUNAYDIN O. Geotechnical properties of tire-cohesive clayey soil mixtures as a fill material[J]. *Engineering Geology*, 2006, 88(1—2): 110—120.
- [13] 中华人民共和国水利部. GB/T50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [14] BRESSETTE T. Used tire material as an alternative permeable aggregate[R]. Sacramento: California Department of Transportation, 1984.
- [15] HUMPHREY D N, SANDFORD T C. Tire chips as lightweight subgrade fill and retaining wall backfill[C]//*Proceedings of the Symposium on Recovery and Effective Reuse of Discarded Materials and By Products for Construction of Highway Facilities*. Denver: Federal Highway Administration, 1993.

-
- [16] MANION W P, HUMPHREY D N. Use of tire chips as lightweight and conventional embankment fill[R]. Augusta: Maine Department of Transportation, 1992.
- [17] BOSSCHER P J, EDIL T B, KURAOKA S. Design of highway embankments using tire chips[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1997, 123(4): 295—304.
- [18] HUMPHREY D N, WHETTEN N, WEAVER J, et al. Tire shreds as lightweight fill for embankments and retaining walls[C]//Proceedings of the Conference on Recycled Materials in Geotechnical Applications. [S. l.]: ASCE, 1997.
- [19] ZORNBERG J G, CABRAL A, VIRATJANDR C. Behaviour of tire shred-soil mixtures[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2004, 41(2): 227—241.
- [20] HUMPHREY D N, SANDFORD T C, CRIBBS M M, et al. Tire chips as lightweight backfill for retaining walls-Phase I, a study for the new England transportation consortium[D]. Maine: Department of Civil Engineering, University of Maine, 1992.
- [21] ASTM. C127—07 standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate[S]. West Conshohocken: ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, 2007.