

废旧轮胎颗粒掺量对黏性土压缩特性的影响

李珊珊¹, 李大勇¹, 张雨坤²

(1. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590; 2. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要:通过压缩试验研究了废旧轮胎橡胶颗粒与黏性土混合土的压缩特性, 及竖向压力、橡胶颗粒掺量对混合土各参数的影响。研究表明: 混合土的压缩性介于黏性土与纯橡胶颗粒之间, 在低掺量下呈现出中压缩性, 而在高掺量下呈现出高压缩性; 随竖向压力增大, 混合土的孔隙比与压缩系数减小、压缩模量增大; 随橡胶颗粒掺量增加, 混合土的孔隙比与压缩系数均先减小后增大, 且以 30% 掺量混合土的孔隙比与压缩系数最小, 而混合土的压缩模量先增大后减小, 当掺量为 30% 时, 其值最大; 掺入轮胎橡胶颗粒可使黏性土的固结速率提高 400%, 当橡胶颗粒掺量为 30%~40% 时, 混合土的压实效果最好。

关键词:废旧轮胎橡胶颗粒; 橡胶颗粒掺量; 压缩性指标; 黏性土

中图分类号: TU435

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2016)05-0055-08

Effects of Scrap Tire Crumbs on Compression Behavior of Clay

LI Shanshan¹, LI Dayong¹, ZHANG Yukun²

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: A series of compression tests was carried out to study the compression behaviors of the scrap tire crumb-clay mixture and the effect of the scrap tire crumb content and vertical pressure on the parameters of the mixture. The results show that the compressibility of the mixture fall between clay and pure scrap tire crumbs. The mixture exhibits medium compressibility under low tire crumb contents and high compressibility under high tire crumb contents. With the increase of the vertical pressure, the void ratio and compression coefficient of the mixture decrease while its compression modulus increases. With the increase of scrap tire crumb content, the void ratio and compression coefficient of the mixture first increase and then decrease while the compression modulus of the mixture first decreases and then increases. The mixture with 30% tire crumb content has the minimum void ratio and compression coefficient and the maximum compression modulus value. The addition of scrap tire crumbs to clay can increase the consolidation time of clay by 400%, and the mixture has the best compaction effect with 30%-40% scrap tire crumb content.

Key words: scrap tire crumb; tire crumb content; compression index; clay

黏土在我国分布广泛, 具有初始含水率高、压缩性大、渗透性低、抗剪强度及承载力低等特点。研究表明, 向黏性土中掺入颗粒或片状的废旧轮胎橡胶、粉煤灰等材料, 能显著提高其强度, 同时能改善其渗透性和

收稿日期: 2015-12-04

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51639002); 国家自然科学基金项目(51379118); 山东科技大学科研创新团队资助项目(2015KYTD104)

作者简介: 李珊珊(1989—), 女, 山东泰安人, 博士研究生, 主要从事岩土工程理论与应用研究。

李大勇(1971—), 男, 山东泰安人, 教授, 博士, 从事岩土工程方面的研究, 本文通信作者。E-mail: ldy@sdu.edu.cn

变形能力,可用于填土工程。对于填土材料而言,压缩变形特性是影响其工程应用的主要因素之一。此外,与砂性类填土比较而言,黏性填土的变形特性更易受内部与外界因素的影响^[1-4]。目前,国内外主要通过压缩试验来研究土体的压缩变形特性,并绘制压缩曲线获得用于评价土体压缩性质和反映土体力学性能的压缩性指标,进而将压缩性指标应用于工程实际中^[5-7]。国内外学者对黏性土的压缩特性进行了一系列试验研究,如:陈波等^[8]对江苏地区海相软黏土的原状样和重塑样进行了单向和等向压缩,比较了原状样与重塑样的归一化压缩曲线的差异;张力霆等^[9]研究了淤填黏土固结过程中孔隙比的变化规律,建立了以孔隙比为控制变量的固结微分方程;Murakami^[10]认为黏性土体的次固结不仅在孔隙水压力完全消散后出现,而是在土体受荷后便已产生;吴宏伟^[11]、高彦斌^[12]等对上海地区原状以及重塑黏土的压缩特性进行了研究,发现当固结压力小于或接近前期固结压力时,土体的次压缩系数基本不变,反之,次压缩系数随时间急剧减小。

橡胶混合土是一种新型岩土工程材料,轮胎橡胶颗粒与砂土以及黏性土混合可用作挡墙、路面基层材料与路基填料等工程,具有轻质、耐用、弹性好、渗透性好等优点,还可减少“黑色污染”,起到保护资源和环境的作用。Edil^[13]和 Lee 等^[14]对不同掺量橡胶颗粒与砂土混合物进行了压缩试验,得出橡胶颗粒掺量越高压缩性越大,特别当掺量大于 30% 后,压缩明显增加;Mohamed 等^[15]对轮胎碎片及多种轮胎碎片混合土进行了压缩试验,发现轮胎碎片与砂土、粉土、黏性土混合土的压缩曲线相似;当基质土为粘性土时,混合土的压缩性最高;随轮胎碎片含量增大,混合土的压缩模量降低,但在高含量时压缩模量降低趋势减弱;Wartman 等^[16]研究了轮胎混合土的压缩及长期压缩特性,得出瞬时压缩特性受轮胎颗粒粒径、掺量及压力影响明显,而轮胎颗粒粒径和掺量对长期压缩的影响不明显。

通过开展废旧轮胎颗粒-黏性土混合土的压缩试验,研究轮胎颗粒掺量对黏性土压缩特性的影响,可为改良后的黏性土用作填土材料、建造土工构筑物等提供压缩性指标参考。

1 试验用土及橡胶颗粒

试验用土为青岛地区黏性土,土质较均匀、纯净,通过室内试验测得天然含水率 47.95%、液限 37.2、塑限 17.1、天然孔隙比 1.13、天然密度 $1.86 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、比重 2.72。所用橡胶颗粒为废旧轮胎除去钢束带后切割而成的等锥度颗粒(如图 1),其中,颗粒粒径在 2~5 mm 的占总质量的 85.7%,橡胶颗粒级配曲线如图 2 所示,属级配不良;测得橡胶颗粒比重为 1.15,吸水率低于 2%,试验中忽略了橡胶颗粒自身吸水率。

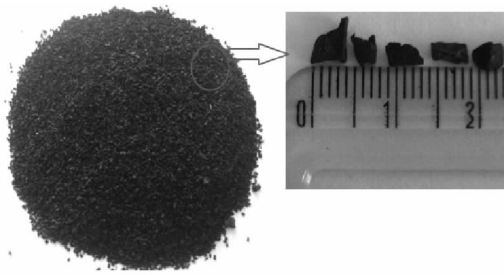


图 1 废旧轮胎橡胶颗粒
Fig. 1 Scrap tire crumbs used

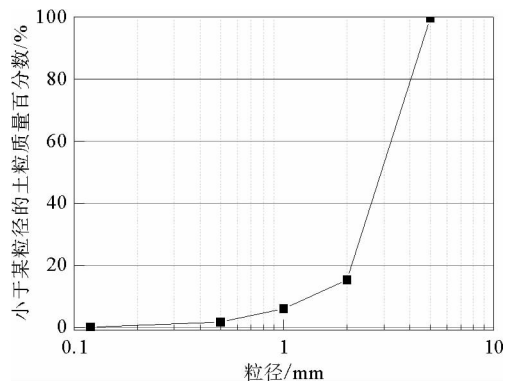


图 2 橡胶颗粒级配曲线
Fig. 2 Particle size distribution curve of tire crumbs

混合土的基本力学特性(直接剪切试验、无侧限抗压强度试验)及压实特性分析结果汇总于表 1、表 2。可见:在黏性土中掺入废旧轮胎颗粒可明显提高其抗剪强度,相应的最优掺量为 30%~40%(竖向压力 $\leq 300 \text{ kPa}$);抗剪强度指标 c (粘聚力)随掺量增加先增大后减小,而掺入轮胎颗粒虽使黏性土的 φ (内摩擦角)增大,但数值变化不大;掺入橡胶颗粒后,黏性土的抗压强度降低;混合土的最大干密度与最优含水率均随着

掺量增加而逐渐减小,其中,当掺量大于 15%后,其降低趋势明显减弱。因此,将废弃轮胎颗粒掺入黏性土中可显著提高其抗剪切能力,然而为综合考虑废旧轮胎颗粒与黏性土混合土的工程特性,需进一步对其压缩特性开展研究。

表 1 力学指标及压实指标

Tab. 1 Mechanical and compaction indexes

掺量/%	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$	抗压强度/kPa	最优含水率/%	最大干密度/($g \cdot cm^{-3}$)
0	40.82	0	111.2	18.30	1.78
10	29.83	22.88	106.5	17.88	1.62
20	38.12	23.79	94.2	17.34	1.55
30	40.83	24.03	89.6	17.16	1.53
40	43.37	24.58	79.7	17.11	1.52
50	37.56	24.87	75.6	17.04	1.52

表 2 混合土抗剪强度

Tab. 2 Shear strength of mixtures kPa

竖压/kPa	掺量/%					
	0	10	20	30	40	50
50	53.9	39.2	56.4	56.6	60.2	56.9
100	65.5	64.2	63.7	78.6	94.4	75.8
200	116.0	104.0	119.0	116.0	139.0	124.0
300	159.0	146.0	161.0	170.0	177.0	160.0

2 试验方案

2.1 试验设备

采用美国 Geocomp 公司生产的 Shear Trac-II 型固结-剪切仪,该设备可自动完成标准直剪、残余剪切试验,亦可进行一维压缩试验。与传统试验仪器相比具有稳定性好、操作方便、可实时显示当前的试验状态和试验曲线,并可在试验的任何阶段改变试验过程和试验条件等优势。

2.2 试样制备

将黏性土样烘干、碾碎、过 0.1 mm 孔径筛;称取过筛土,按击实试验测得的最优含水率调配土样,分层洒水并充分搅拌,并用保鲜膜密封保存 3 h,使土样内水分均匀分布,复测其含水率;将调配好的土样在试筒内分 3 层压实,每层击 25 次,用推土器将试筒内土推出,用涂有凡士林的标准环刀切取试样,试样直径为 63.5 mm,高度为 20 mm;将试样放入饱和器内,在真空缸中抽气饱和 6 h 后,并在水中静置 12 h,使试样充分饱和。

2.3 试验方法

参照土工试验标准方法^[17]进行一维压缩试验。采用逐级加载法,荷载为 50、100、200、300 kPa,每级荷载下试样变形稳定标准为每小时变形小于 0.001 mm;橡胶颗粒掺量为 0%、10%、20%、30%、40%、50%和 100%。本文将掺量定义为橡胶颗粒质量占干燥状态下混合土质量的百分比,则混合土的平均重度、初始孔隙比可通过下述公式进行计算:

$$G_s = \frac{1}{\frac{x}{G_t} + \frac{1-x}{G_s}}; \quad (1)$$

$$e_0 = \frac{(1+0.01\omega)G_s\rho_w}{\rho_0} - 1. \quad (2)$$

式中: G_s 为混合土的平均重度; G_s 为黏性土的比重; G_t 为橡胶颗粒的比重; x 为橡胶颗粒的掺量,%; ρ_w 为水的密度, $g \cdot cm^{-3}$; ρ_0 为试样的初始密度, $g \cdot cm^{-3}$; ω 为试样初始含水率。

3 试验结果及分析

混合土试样的初始物理参量汇总于表 3 中;表 4 为各级荷载压缩稳定时,混合土试样的孔隙比、压缩系数及压缩模量,可体现混合土压缩特性及压缩规律。

表 3 试样的初始物理参量值

Tab. 3 Initial values of physical parameters of samples

橡胶颗粒掺量/%	初始含水率 ω_0 /%	初始密度 $\rho_0/(g \cdot cm^{-3})$	平均重度 G_s	初始孔隙比 e_0
0	17.40	1.928	2.720	0.656
10	17.64	1.785	2.393	0.577
20	17.29	1.662	2.136	0.507
30	17.00	1.450	1.802	0.454
40	16.74	1.379	1.759	0.489
50	16.23	1.230	1.616	0.521
100	0.70	0.599	1.150	1.053

表 4 各掺量下的压缩指标

Tab. 4 Compression indexes of samples under various contents

参数	竖压/kPa	0%	10%	20%	30%	40%	50%	100%
孔隙比 e_i	50	0.618	0.539	0.482	0.430	0.436	0.469	0.887
	100	0.587	0.511	0.464	0.407	0.392	0.427	0.749
	200	0.568	0.477	0.429	0.381	0.343	0.371	0.651
	300	0.556	0.450	0.408	0.363	0.319	0.333	0.600
压缩系数 a_v/MPa^{-1}	50	0.770	0.760	0.500	0.480	1.020	1.460	3.320
	100	0.500	0.560	0.360	0.460	0.920	0.840	2.760
	200	0.190	0.340	0.350	0.260	0.500	0.560	0.980
	300	0.140	0.270	0.210	0.180	0.240	0.380	0.510
压缩模量 E_s/MPa	50	2.180	2.080	3.020	3.030	1.460	1.460	0.620
	100	3.310	3.150	4.190	3.160	1.620	1.810	0.740
	200	8.740	4.640	4.310	5.590	3.040	2.720	2.090
	300	11.800	5.850	7.180	8.080	6.210	4.000	4.030

3.1 孔隙比的变化规律

图 3 为孔隙比-竖向压力关系曲线($e-p$ 曲线),分析知:各掺量试样的孔隙比均随竖向压力增大而减小,其中,当压力低于 100 kPa 时,曲线相对较陡,说明孔隙比减小幅度明显,而当压力大于 100 kPa 后,曲线变缓,孔隙比的减小趋势亦减弱,表明在低压力下混合土的压缩性较高,但压缩性随竖向压力增大而降低。此外, $e-\lg p$ 曲线如图 4 所示:黏性土与 10%~20%掺量混合土的 $e-\lg p$ 曲线均近似于线性,即具有线性回归特点,且直线斜率非常接近,而纯橡胶颗粒及 30%~50%掺量混合土的 $e-\lg p$ 曲线均呈非线性特征,即不具备线性回归特征。

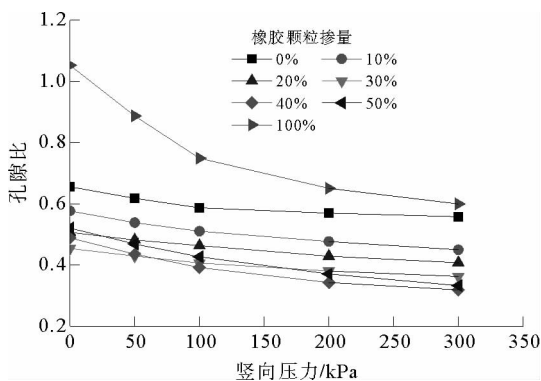


图 3 $e-p$ 曲线

Fig. 3 Void ratios vs. vertical pressures

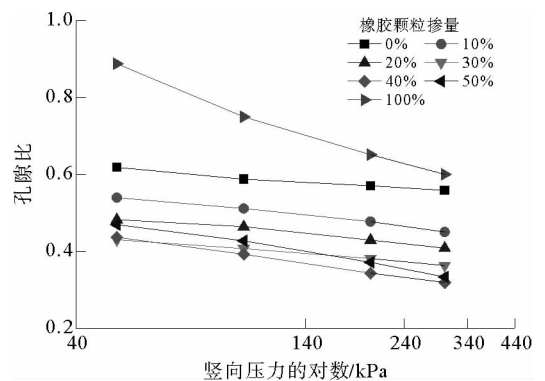


图 4 $e-\lg p$ 曲线

Fig. 4 Void ratios vs. logarithmic pressures

图 5 显示了掺入橡胶颗粒对黏土孔隙比的影响,可见试样的孔隙比随掺量增加先减小后增大。其中,当压力小于 100 kPa 时,最小孔隙比出现在 30% 掺量处,说明混合土的应变最小,即压实效果最好;而压力大于 100 kPa,以 40% 掺量混合土的应变最小,压实效果最好。

3.2 压缩系数的变化规律

图 6 显示了试样的压缩系数-竖向压力关系曲线,由图可知:试样的压缩系数随竖向压力增大而减小。一般来说,选用 100 kPa 和 200 kPa 压力对应的压缩系数(用 a_{1-2} 表示)来评价土的压缩性^[17],试验得出纯压实黏性土、10%~50% 掺量混合土及纯橡胶颗粒的 a_{1-2} 值分别为:0.19、0.34、0.35、0.28、0.50、0.56 和 0.98 MPa^{-1} 。则纯压实黏性土及 10%~30% 掺量混合土均呈现出中压缩性 ($0.5 \text{ MPa}^{-1} > a_{1-2} \geq 0.1 \text{ MPa}^{-1}$),而 40%~50% 掺量混合土与废旧轮胎橡胶颗粒表现为高压缩性 ($a_{1-2} \geq 0.5 \text{ MPa}^{-1}$)。

试样的压缩系数随橡胶颗粒掺量变化的关系曲线可参照图 7。可见,试样的压缩系数随橡胶颗粒掺量增大呈现出先减小后增大的变化规律。其中,当掺量为 30% 时,试样的压缩系数最小,此时混合土的压实效果最好。出现上述现象的原因为:竖向压力越低,混合土的压缩系数相对越高,即在低压力下试样的压缩性较高。

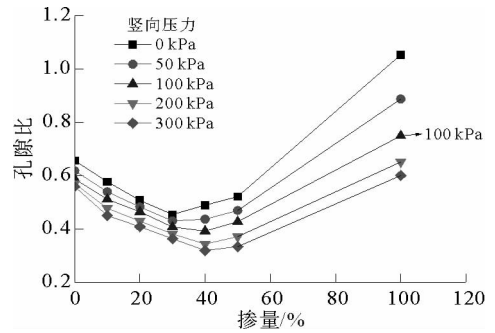


图 5 孔隙比-橡胶颗粒掺量关系

Fig. 5 Void ratio of mixtures vs. tire crumb contents

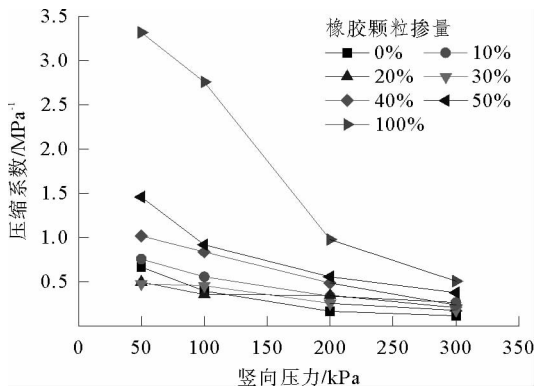


图 6 压缩系数-压力关系曲线

Fig. 6 Compression coefficients vs. pressure

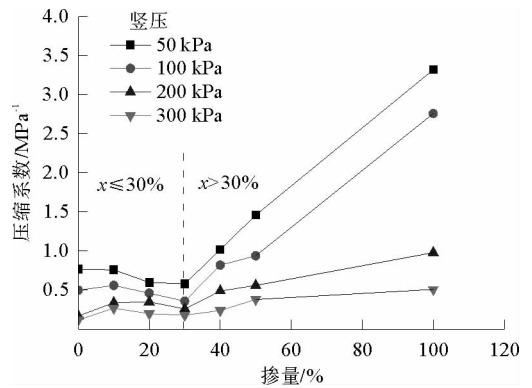


图 7 压缩系数-橡胶颗粒掺量关系曲线

Fig. 7 Compression coefficient vs. rubber crumb content

3.3 压缩模量的变化规律

图 8 为试验试样的压缩模量与压力关系曲线,发现:各掺量混合土试样的压缩模量随竖向压力增加呈逐渐增大趋势,且混合土的压缩模量介于黏性土与纯废旧轮胎颗粒之间;当竖向压力低于 100 kPa 时,黏性土压缩模量与混合土压缩模量差别不大,而当竖向压力高于 100 kPa 时,黏性土的压缩模量明显高于混合土。

试样的压缩模量随橡胶颗粒掺量变化的关系曲线见图 9。表现出:试样的压缩模量随橡胶颗粒掺量增加呈现出先增大后减小的变化规律。其中,当橡胶颗粒掺量为 30% 时,混合土的压缩模量最大,即以 30% 橡胶颗粒掺量混合土的承载力最高、压缩性最低、压实效果最好。

3.4 用沉降速率法推算混合土的固结系数

沉降速率法^[18]克服了时间平方根法和时间对数法中数据选取受初始压缩和次压缩影响较大的缺点如图 10 所示: s_t' 为沉降速率, $s_t' = \frac{s_t + \Delta t - s_t}{\Delta t}$, s_t 为某一时刻的沉降, c_v 为固结系数 $c_v = \frac{4H^2\beta}{\pi^2}$, H 为排水距离(双

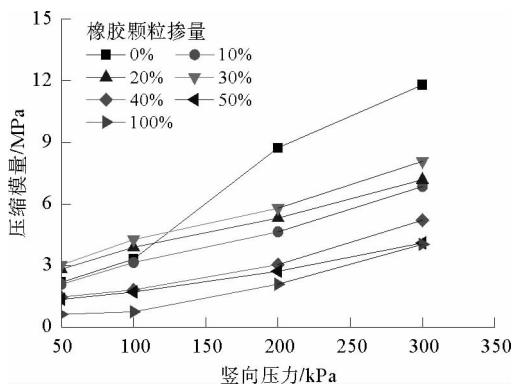


图 8 压缩模量-竖向压力关系曲线

Fig. 8 Compression modulus vs. vertical pressures

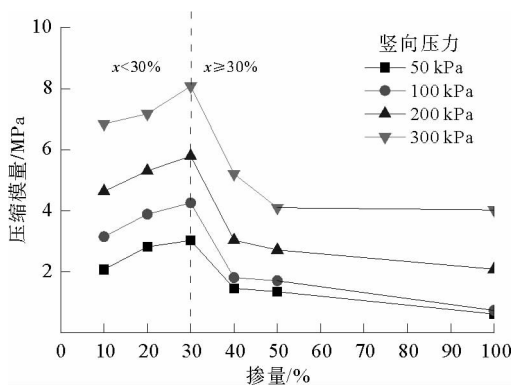


图 9 压缩模量-掺量关系曲线

Fig. 9 Compression modulus vs. contents

面排水), β 为直线斜率的负数。图 10 中, 直线的斜率为 $-\beta$, oa 段为主固结沉降和初始压缩量之和, ab 段为次固结沉降。

以初级荷载为例, 采用沉降速率法推算试样的固结系数, 施加荷载后按下列时间进行数据筛选: 6 s、15 s、1 min、2 min、15 s、4 min、6 min、15 s、9 min、12 min、15 s、16 min、20 min、15 s、25 min、30 min、15 s、36 min、15 s、42 min、15 s、49 min、64 min、100 min、200 min、400 min、23 h、24 h, 至稳定为止^[17]。得出 0~50% 橡胶颗粒掺量混合土试样的沉降速率-沉降关系曲线(图 11)。

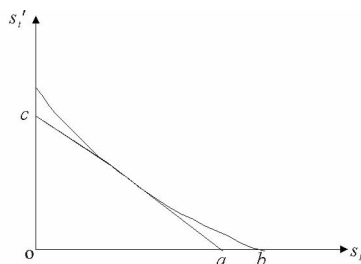


图 10 沉降速率-沉降关系曲线

Fig. 10 Settlement rate vs. the settlement of mixtures

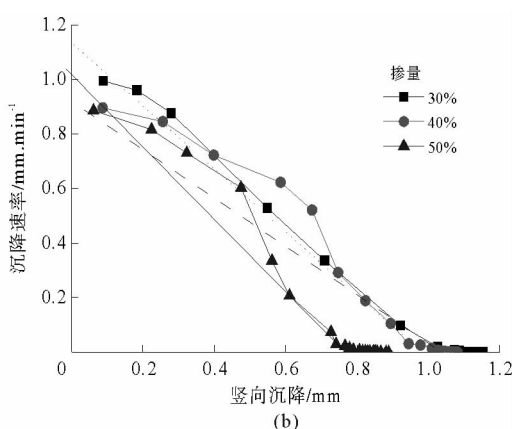
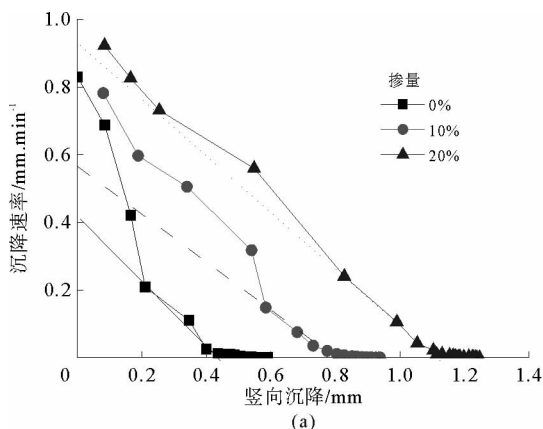


图 11 沉降速率-沉降关系曲线

Fig. 11 Settlement rate vs. the settlement

将图 11 得出的各工况下试样的固结系数汇总于表 5, 可知: 混合土的固结系数较黏性土增大, 其固结速率亦显著提高, 提高幅度约为 400%, 且试样的固结系数随掺量增加先增大再减小, 这是因为掺入橡胶颗粒后增大了黏性土的渗透性, 加速了土体固结; 另外, 橡胶颗粒本身具有弹性, 当掺量增大到 30% 后, 其弹性减弱了压力对固结沉降的作用, 试样固结系数减小, 致使固结速率降低。由表 5 还可得出, 0%~50% 掺量混合

土的次固结沉降量占总沉降量的比例分别为 19.6%、24.3%、15.4%、7.9%、8.7% 和 11.8%。其中,以 30% 和 40% 掺量混合土的次压缩量所占比例值最小,即当橡胶颗粒掺量为 30% 和 40% 时,混合土的压实效果较好,与前文所得结果一致。

表 5 固结系数计算结果表
Tab. 5 Consolidation coefficient calculation results

掺量/%	直线斜率 β	次固结沉降量(ab)/mm	总沉降量/mm	排水距离 H /cm	固结系数($c_v \times 10^{-3}$)/($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
0	0.668	0.116	0.590	0.969	1.215
10	0.673	0.229	0.939	0.971	3.013
20	0.688	0.192	1.247	0.961	4.026
30	0.710	0.092	1.153	0.963	4.449
40	0.640	0.095	1.082	0.965	4.291
50	0.655	0.105	0.887	0.972	4.293

4 结论

通过室内一维固结试验研究了废旧轮胎橡胶颗粒与黏性土混合后的压缩特性,得出结论:

1) 随竖向压力增大,试样的孔隙比减小、压缩系数降低、压缩模量增大。孔隙比随橡胶颗粒掺量增加先减小后增大,其中,当压力低于 100 kPa 时,以 30% 掺量时试样的应变最小,压实效果最好;当压力大于 100 kPa 后,在 40% 掺量下压实效果最好;压缩系数随掺量增加逐渐减小,当掺量为 30% 时,压缩系数最小;压缩模量随掺量增加呈先增大后减小,且当掺量为 30% 时,试样的压缩模量最大、可压缩性最低,即混合土的承载力最高。

2) 纯压实黏性土、10%~30% 掺量试样均呈现出中压缩性,而 40%~50% 掺量混合土与 100% 橡胶颗粒则呈现出高压缩性。

3) 采用沉降速率法推算了混合土的固结系数,发现在黏性土中掺入橡胶颗粒可使固结系数增大,固结速率可提高 400%,且当掺量为 30%~40% 时,混合土的次固结沉降量占总沉降量比例最小。

参考文献:

[1]DAY,ROBERT W. Limitations of conventional analysis of consolidation settlement[J]. Leadership and Management in Engineering,1995,121(6):513-518.

[2]VALLEJO L E,MAWBY R. Porosity influence on the shear strength of granular material-clay mixtures[J]. Engineering Geology,2000,58(2):125-136.

[3]MYINT W B,VICTOR C,KAI W,et al. Laboratory validation of ultra-soft soil deformation model[J]. Geotechnical and Geological Engineering,2011,29(1):65-74.

[4]COKCA E,EROL O,ARMANGIL F. Effects of compaction moisture content on the shear strength of an unsaturated clay [J]. Geotechnical and Geological Engineering,2004,22(3):285-297.

[5]MORIWAKI T,UMEHARA K. Method for determining the coefficient of permeability of clays[J]. Geotechnical Testing Journal,2003,26(1):47-56.

[6]PIERCE C E,BLACKWELL M C. Potential of scrap of scrap tire rubber as lightweight aggregate in flow able fill[J]. Waste Management,2003,23(3):197-208.

[7]ZATLISOZ N. Using tire chips in earthen structures[D]. Madison:University of Wisconsin,1996:68.

[8]陈波,孙德安,吕海波. 海相软土压缩特性的试验研究[J]. 岩土力学,2013,34(2):381-388.
CHEN Bo,SUN Dean,LÜ Haibo. Experimental study of compression behavior of marine soft clays[J]. Rock and Soil Mechanics,2013,34(2):381-388.

[9]张力霆,齐清兰,魏静,等. 淤填黏土固结过程中孔隙比的变化规律[J]. 岩土力学,2009,30(10):2935-2939.
ZHANG Liting,QI Qinglan,WEI Jing,et al. Variation of void ratio in course of consolidation of warping clay[J]. Rock and

Soil Mechanics, 2009, 30(10): 2935-2939.

- [10] MURAKAMI Y. Secondary compression in the state of primary consolidation[J]. Soils and Foundations, 1988, 28(3): 169-174.
- [11] 吴宏伟, 李青, 刘国彬. 上海黏土一维压缩特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(4): 630-636.
WU Hongwei, LI Qing, LIU Guobin. Characteristics of one-dimensional compressibility of shanghai clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(4): 630-636.
- [12] 高彦斌, 朱合华, 叶观宝, 等. 饱和黏土一维次固结压缩系数 C_a 值的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 459-463.
GAO Yanbin, ZHU Hehua, YE Guanbao, et al. The investigation of the coefficient of secondary compression C_a in odometer tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4): 459-463.
- [13] EDIL T B, BOSSCHER PT, ELDI N, et al. Development of engineering of civil and environment[R]. Madison: University of Wisconsin-Madison, 1990.
- [14] LEE J S, DODDS J, SANTAMARIN A. Behavior of rigid-soft particle mixtures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 2007, 2(2): 179-184.
- [15] MOHAMED A, SHAHIN, YASSER M. Utilization of shredded rubber tires for cement-stabilized soft clays[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2009, 27(1): 105-113.
- [16] WARTMAN J, NATALE M. F, STRENK. Immediate and time-dependent compression of tire derived aggregate[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering, 2007, 133(3): 245-256.
- [17] 中华人民共和国国家标准. GB/T50123-1999, 土工试验方法标准[S].
- [18] 张仪萍, 俞亚南, 张土乔, 等. 室内固结系数的一种推算方法[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 616-618.
ZHANG Yiping, YU Yanan, ZHANG Tuqiao, et al. A method for evaluating coefficient of consolidation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5): 616-618.

(责任编辑: 吕海亮)

(上接第 41 页)

- [7] MALLET J L. Discrete smooth interpolation in geometric modeling[J]. Computer Aided Design, 1992, 24(4): 178-190.
- [8] DE KEMP E A. Visualization of complex geological structures using 3D Bezier construction tools[J]. Computer & Geosciences, 1999, 25(5): 581-597.
- [9] BRANDEL S, SCHNEIDER S, PERRIN M, et al. Automatic building of structured geological models[J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2005, 5(2): 138-148.
- [10] 武强, 徐华. 三维地质建模与可视化方法研究[J]. 中国科学 D 辑, 2004, 34(2): 54-60.
WU Qiang, XU Hua. 3D geological modeling and visualization method[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2004, 34(2): 54-60.
- [11] 李爱军, 侯定贵, 张晓航, 等. 基于 GOCAD 的边坡三维地质体模型的构建与应用[J]. 露天采矿技术, 2014(6): 18-21.
LI Aijun, HOU Dinggui, ZHANG Xiaohang, et al. Construction and application of 3D geological slope model based on GOCAD[J]. Opencast Mining Technology, 2014(6): 18-21.
- [12] 肖凯, 肖传桃. 基于 3Dmine 的小柳沟钨矿区三维可视化研究[J]. 化工矿物与加工, 2014, 43(8): 33-35.
XIAO Kai, XIAO Chuantao. Research on 3D visual modeling technology in Xiaoliugou tungsten orefield based on 3D mine [J]. Industrial minerals and processing, 2014, 43(8): 33-35.
- [13] 孙豁然, 许德明. 建立矿体三维实体模型的研究[J]. 矿业研究与开发, 1999, 19(5): 1-3.
SUN Huoran, XU Deming. Research on the creation of three dimensional body model of orebody[J]. Mining Research and Development, 1999, 19(5): 1-3.
- [14] 韩丽娜. 使用多段 Bezier 曲线模型的地质等值线光滑算法[J]. 计算机工程与科学, 2010, 32(11): 63-65.
HAN Lina. A smoothed contours generating algorithm for the multi-segment Bezier curve[J]. Computer Engineering and Science, 2010, 32(11): 63-65.
- [15] 朱心雄. 自由曲线曲面造型技术[M]. 北京: 科学出版社, 2000.

(责任编辑: 吕海亮)