

doi: 10.3969/j.issn.1007-2861.2011.06.019

含建筑垃圾土的物理力学特性

杨德生¹, 张孟喜¹, 崔振清², 赵岗飞^{1,2}, 费君¹

(1. 上海大学 土木工程系, 上海 200072; 2. 山西潞安矿业集团, 山西 长治 046000)

摘要: 含建筑垃圾土是一种包含有建筑垃圾的地基土体,其主要成分为土、碎石、碎砖、玻璃以及少量塑料,这些建筑垃圾成分使得该土体具有新的物理力学性质. 经过一系列的物理力学试验研究,发现含建筑垃圾土属于非均质级配良好土,具有较高的抗剪强度指标,这主要是由其中的碎石等大颗粒在荷载作用下的咬合力所起到的抗剪作用;另一方面,由于沉积年代较短,浅层含建筑垃圾土结构松散,固结试验结果表明,该土体具有较高的压缩性.

关键词: 含建筑垃圾土;物理力学特性;高压缩性

中图分类号: O 319.56

文献标志码: A

文章编号: 1007-2861(2011)06-0792-07

Physical and Mechanical Behavior of Soil with Construction Waste

YANG De-sheng¹, ZHANG Meng-xi¹, CUI Zhen-qing², ZHAO Gang-fei^{1,2}, FEI Jun¹

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. Shanxi Lu'an Group, Changzhi 046000, Shanxi, China)

Abstract: The physical and mechanical behavior of soil with construction waste is different from those of ordinary soils. Experimental studies on these properties have been carried out. Apart from soil, soil with construction waste contains gravel, cracked bricks, glass, plastic, etc. Based on the experiments, soil with construction waste is defined as a kind of loose and incoherent soil with high bearing capacity and shear strength. The shear strength parameters c and φ are heightened compared to the ordinary soil. Consolidation test results show that this kind of soil has high compressibility.

Key words: soil with construction waste; physical and mechanical behavior; high compressibility

改革开放以来,我国城市发展的速度空前加快,城市中随处可见在建项目. 随之而来,产生了大量的建筑垃圾,并且在城市的郊区形成了大量的建筑垃圾堆场,其中主要包含渣土、废混凝土、碎砖、竹木材、金属、沥青、玻璃、废纸、塑料等,除少量有机物成分,建筑垃圾基本上是由无机物构成的^[1]. 随着城市用地日趋紧张,对这些场地进行开发利用已显示出巨大的经济价值,因此,对含建筑垃圾土的工程性质

进行研究很有必要.

目前,对垃圾土的研究主要包括垃圾土的沉降特性、抗剪强度、渗透性 3 个方面^[2]. 骆行文等^[3]对武汉市金口垃圾填埋场的陈垃圾土进行了试验研究,认为陈垃圾土在荷载作用下,沉降量较大,而且不均匀沉降量也很大. 由于土中垃圾的存在使得土体呈现出类似于加筋土的性质,承载力提高,但单位变形下的承载力较低. 杨明亮等^[4]在对金口垃圾填

理场的压缩特性及承载特性进行了现场以及室内试验研究后,提出了大直径钻孔灌注桩的地基处理方式. 李晓红等^[5]通过直剪仪及三轴仪对重庆垃圾填埋场的强度特性进行了试验研究,发现垃圾土表现出了类似于加筋土的性状. 刘荣等^[6]通过对实验室配制的垃圾土进行三轴固结排水及不排水试验,得出了有机质含量对垃圾土强度参数 c 和 φ 的影响. 周健等^[7]利用循环三轴试验对重塑垃圾土的动力学特性进行了研究. Siegel 等^[8]对南加利福尼亚的一个垃圾填埋场进行了研究,并记录了垃圾填埋场在强震下的反应数据. 通过引用这些数据, Anderson 等^[9]和 Ling 等^[10]也对垃圾堆场在地震作用下的反应进行了研究. Matasović 等^[11]通过室内试验、现场检测以及反分析等手段,对垃圾土在强震下的动力特性进行了研究. 冒俊^[12]对水泥改良垃圾土的方法进行了试验研究. 王颖星^[13]提出了通过柱锤冲灰土扩挤密桩法对含建筑垃圾杂填土进行地基加固的方法,其中涉及对桩周土体的挤密作用、灰土置换作用以及灰土的胶凝作用. Amorim 等^[14]研究了采用建筑垃圾拌制灰浆的可行性,结果表明该应用具有巨大的潜力. Elagroudy 等^[15]研究了垃圾的组成以及上部荷载对固体垃圾降解速度的影响.

上述研究对象多以含生活垃圾土为主,而对于含建筑垃圾土的研究则相对较少. 本研究以山西省长治市区西部颐龙湾住宅小区建设项目为研究对象,小区总平面图如图 1 所示. 该小区所在地区多年前为自然形成的沟壑地带,随着城市的快速发展,沟壑被倾倒的建筑垃圾逐渐填平,经过多年固结后已经基本稳定,现在拟在此处建设大面积居民生活小区. 该场地内的建筑垃圾主要由砖块、灰渣、玻璃以及碎石等组成,深度较大,最深处为 10.9 m,地质剖面图如图 2 所示.

本工作通过对含建筑垃圾土的物理力学性质的研究,揭示含建筑垃圾土的物理力学特性规律,判断其作为结构基础持力层的可行性,为含建筑垃圾土的综合利用开辟一条新思路. 将建筑垃圾这种废弃物作为地基基础的再生资源,响应了我国政府提出的建设节约型社会、走循环经济之路的号召.

本研究对现场取样的原状含建筑垃圾土及不含建筑垃圾土的粉质黏土进行了密度、比重以及含水量等物理特性指标试验;采用筛分法测定了土样的级配;通过直剪试验和固结试验测定了土样的抗剪性能和压缩特性. 在总结试验结果,并对不同深度含

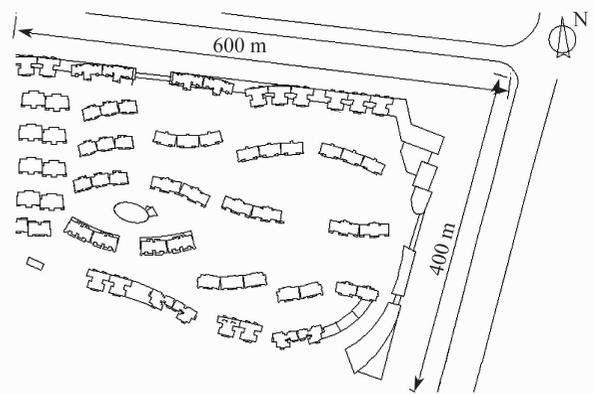


图 1 颐龙湾小区总平面图

Fig. 1 General layout of the Yilongwan site

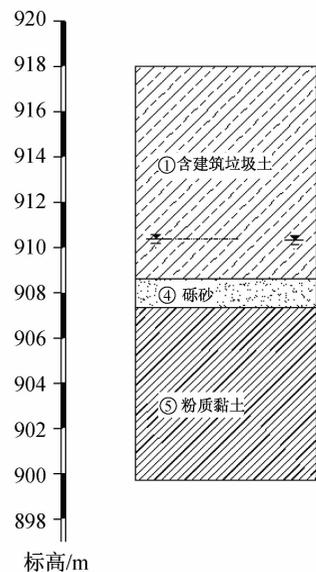


图 2 颐龙湾小区地质剖面图

Fig. 2 Geologic profile of the Yilongwan site

建筑垃圾土及粉质黏土试验指标进行对比分析的基础上,探讨了含建筑垃圾土的抗剪特性、压缩特性的规律及其形成机理.

1 研究方案

1.1 土样采集

本试验取样采用勘察钻机现场取样,取样形状为圆柱体,直径为 12 cm,取样地层深度分别为 3.5、5.0、9.0 和 11.0 m. 取样后采用保鲜膜包裹并蜡封,标明取样位置及深度,然后将土样放入大型密封盒保存,土样间的空隙采用柔性材料填塞.

取样过程中我们发现,3.5、5.0 以及 9.0 m 深度处的土样均含有大量建筑垃圾;而 11.0 m 深度处

的土样则不含建筑垃圾,而是含水量很高的粉质黏土.将较完整的土样用于直剪和压缩试验,其他不完整土样用于室内物理特性试验^[16].

1.2 试验内容和方法

土样中所含建筑垃圾为碎颗粒建筑垃圾,因此,可以采用室内常规试验器材进行试验.

1.2.1 物理特性指标

物理特性指标测定项目包括颗粒级配、含水量、比重、天然密度.

颗粒级配试验采用筛分法,含水量试验采用烘干法,比重试验采用比重瓶法,天然密度试验采用环刀法.

1.2.2 抗剪强度

抗剪强度测定采用应变控制式直剪仪,用削土刀将现场取样的圆柱体原状土切入环刀中,取土时注意沿土样圆柱体垂直方向取土,并保证土样的完整性,防止扰动破坏,然后将取好的土样放入直剪仪内.

直剪试验采用快剪法,竖向加载分为4级,即50,100,200,400 kPa,然后,根据试验结果求取土样的粘聚力 c 和内摩擦角 φ .

1.2.3 压缩特性

固结试验采用固结仪,环刀取样,取25,50,100,200,400,800,1 600 kPa共7个加载级别,每次加载24 h后记录百分表读数,并施加下一级荷载.

2 试验结果与分析

2.1 含建筑垃圾土的外观特性

与11.0 m深度处的粉质黏土相比,含建筑垃圾土结构松散,其中含有大量碎砖、碎石、石灰块等建筑垃圾,结构性较差,轻微触动即发生破碎.随着取样深度不同,土样颜色有所改变,其中3.5 m处土样呈红褐色,5.0及9.0 m处土样呈黑色.

土样经烘干或掺入酒精燃烧后,土体中的有机质燃烧殆尽,黏土砖碎粒也化为土样粉末,土体变为土黄色(见图3).

2.2 含建筑垃圾土的成分分析

将土样风干后,手工剥离,对其进行土样分析.结果表明,其主要成分包括粉质黏土颗粒、碎石与卵石、碎砖、陶瓷、玻璃、炉渣颗粒以及少量塑料.深层垃圾土中的碎砖已经腐蚀并成为土样颗粒.具体各成分的质量分数如表1所示.



(a) 原状垃圾土



(b) 烘干后散状垃圾土

图3 含建筑垃圾土照片

Fig. 3 Photo of soil with construction waste

表1 含建筑垃圾土成分的质量分数

Table 1 Contents of soil with construction waste %

取土深度/m	粉质黏土	碎石与卵石	碎混凝土	炉渣	碎玻璃	塑料
3.5	59.4	33.2	2.7	1.3	1.3	2.1
5.0	69.4	24.0	3.1	1.6	1.8	0
9.0	51.9	43.9	2.3	0	1.0	1.9
11.0	100.0	0	0	0	0	0

2.3 含建筑垃圾土的颗粒级配

对含建筑垃圾土进行筛分试验,结果如表2所示.可见,在3.5,5.0以及9.0 m深度的含建筑垃圾土样中,由于存在散落其中的大小各异的碎石及碎砖等建筑垃圾,因此,土样的级配特性得到了较大改善.

表2 含建筑垃圾土的颗粒级配

Table 2 Grain size distribution of soil with construction waste

取土深度/m	>20 mm/%	10~20 mm/%	5~10 mm/%	2~5 mm/%	1~2 mm/%	<1 mm/%
3.5	4.1	12.2	6.0	5.2	4.2	68.3
5.0	0	18.7	3.3	4.9	5.6	67.5
9.0	0	18.4	9.0	8.3	6.4	57.9
11.0	0	0	0	0	0	100.0

计算结果显示,3.5,5.0 以及 9.0 m 深度土样的不均匀系数 C_u 均大于 10,分别为 10.53,10.40 和 14.67;而曲率系数 C_c 值在 1~3 之间,分别为 1.49, 1.29 和 1.67. 根据《土的工程分类标准》GB/T 50145—2007^[17]判定,土样属于级配良好非均质土,其颗粒级配曲线如图 4 所示.

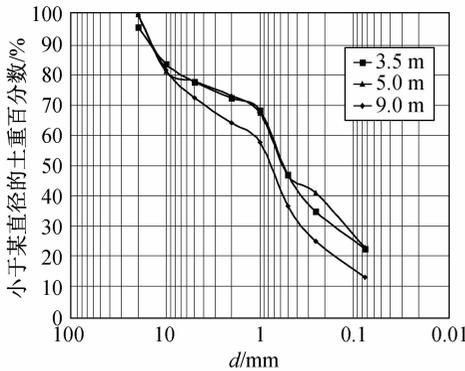


图 4 含建筑垃圾土的颗粒级配曲线

Fig. 4 Grain size distribution curves of soil with construction waste

2.4 含建筑垃圾土的物理性质指标

对 3.5,5.0,9.0 m 深度含建筑垃圾土样以及 11.0 m 深度不含建筑垃圾土样分别进行密度、含水量以及比重等物理性质指标试验,并根据所得数据推算孔隙比,结果如表 3 所示.

表 3 含建筑垃圾土的物理性质指标

Table 3 Physical behavior of the soil with construction waste

取土深度/m	密度 ρ / ($g \cdot cm^{-3}$)	含水量 w /%	比重 G_s	孔隙比 e
3.5	1.65	18.7	2.266	0.630
5.0	1.75	21.9	2.359	0.643
9.0	1.94	18.8	2.398	0.468
11.0	2.05	53.4	2.679	0.855

由表 3 可知,相对于原状土,含建筑垃圾土的天然密度较低,这主要是由于含建筑垃圾土的沉积时间较短,较为松散,而且含建筑垃圾土中类似碎砖块以及煤渣等颗粒的自身密度较小,也降低了土体的密度. 从表中可以明显看到,随着深度增加,天然密度逐渐增大,下层含建筑垃圾土由于受到较大的固结压力,加上由于分层回填导致下层垃圾土沉积时间较长,从而表现出了更高的天然密度.

表 3 中含建筑垃圾土的密度试验结果明显高于含生活垃圾土的密度(0.85~1.41 g/cm^3 ^[18]),并且

含建筑垃圾土的比重低于粉质黏土.

2.5 含建筑垃圾土的抗剪强度

直剪试验采用 50,100,200,400 kPa 4 个等级竖向荷载,并采用 Mathematic 软件对所得数据进行线性拟合,得到各层土样的黏聚力 c 和内摩擦角 φ ,结果如表 4 所示. 表中可见,3.5,5.0 以及 9.0 m 处含建筑垃圾的土样的抗剪切强度比 11.0 m 处不含建筑垃圾的粉质黏土土样有了明显的提高.

表 4 含建筑垃圾土直剪试验结果

Table 4 Result from direct shear test of soil with construction waste

取土深度/m	c /kPa	φ /($^\circ$)
3.5	42.9	34.6
5.0	40.3	28.5
9.0	43.4	28.1
11.0	19.6	18.8

试验过程中发现,当含建筑垃圾土体达到剪切力峰值时,普遍发生较大变形;个别试样在达到直剪仪所能允许的最大错动位移时,剪切力读数还在升高,表现出应变硬化现象;而 11.0 m 处粉质黏土则在发生一定错动位移后,随着实际破坏面的增大,剪切力在达到峰值后,迅速下降,呈现应变软化.

含建筑垃圾土抗剪强度的提高是由于大颗粒建筑垃圾在土中起到了骨架咬合作用,在竖向压力与横向剪切力的作用下,松散的碎石、砖块、碎混凝土块与玻璃等建筑垃圾与土颗粒之间相互挤压密实. 大颗粒建筑垃圾之间形成相互咬合的骨架,由于大颗粒建筑垃圾具有相对较高的承载力,从而使得土体剪切面无法平直穿越土体,而是沿着大颗粒缝隙的曲线贯穿土体(见图 5),这就大大削弱了剪应力的强度,从而使土体抗剪强度大大提高. 而含建筑垃圾土呈现较为松散的状态,在达到咬合前的挤密过程中沿剪切面变形较大. 因此,对含建筑垃圾土进行挤密,可使内部大颗粒建筑垃圾形成相互咬合的骨架,这样就可以在不改变土体抗剪承载力的基础上减小剪切位移.

与粉质黏土相比,含建筑垃圾土抗剪性能的提高与其中所含建筑垃圾颗粒的大小及垃圾种类有关. 大颗粒建筑垃圾有利于加大剪切面的曲线化程度,而垃圾本身的强度越高,越有利于保持其大颗粒不会因剪力增大而发生垃圾块体破碎.

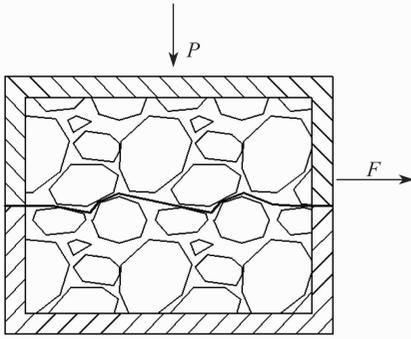


图5 含建筑垃圾土的剪切面

Fig.5 Shear surface of soil with construction waste

如图6所示,9.0 m深度含建筑垃圾土的抗剪强度最高,3.5 m深度其次.而参考表1与表2中土样的垃圾成分的质量分数及颗粒级配可知,9.0 m处土样中的5 mm以上大颗粒所占比重较大,为27.4%,并且其所含垃圾中碎石及卵石这样的高强度成分所占比重较大,为总质量的43.9%;虽然5.0 m处土样中的5 mm以上大颗粒所占比重略大于3.5 m处土样,分别为22.0%和18.2%,但是5.0 m处土样成分中的碎石及卵石成分较3.5 m处土样少很多,分别为24.0%和33.2%,因此,5.0 m处土样的抗剪强度小于3.5 m处土样.

2.6 含建筑垃圾土的压缩特性

对3.5,5.0,9.0 m深度含建筑垃圾土以及11.0 m深度不含垃圾原状土土样分别进行室内固结试验,结果如表5所示.

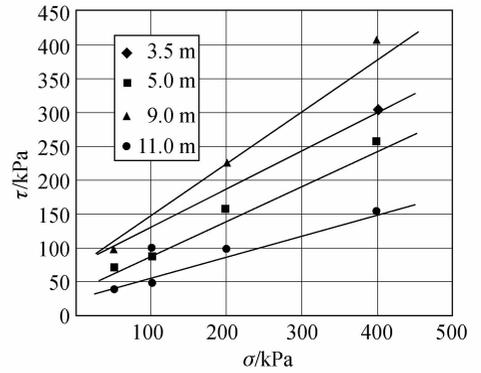


图6 含建筑垃圾土直剪结果

Fig.6 Results from direct shear test of soil with construction waste

根据试验结果,含建筑垃圾土样在100~200 kPa固结荷载作用下,3.5与5.0 m处含建筑垃圾土以及11.0 m处粉质黏土的 a_{v1-2} 值(即100~200 kPa荷载下的压缩系数)均大于 0.5 MPa^{-1} ,分别为0.614,0.550和0.535.根据《建筑地基基础设计规范》GB 50007—2002^[19],可判定土样为高压缩性土.9.0 m处含建筑垃圾土由于沉积时间较长,先期固结压力较大,其 a_{v1-2} 值为 0.340 MPa^{-1} ,属于中压缩性土,表现出比粉质黏土更好的抗压缩性(见图7).

含建筑垃圾土的室内压缩试验 $e-p$ 与 $e-\log p$ 曲线如图8所示.深层垃圾土由于受到长时间和较大的固结应力,初始孔隙比较小,压缩曲线较平缓,而浅层垃圾土则发生了较大的固结沉降.

表5 含建筑垃圾土的固结试验结果

Table 5 Results from consolidation test of soil with construction waste

法向荷载/kPa	3.5 m 深度			5.0 m 深度			9.0 m 深度			11.0 m 深度		
	压缩系数 a_v/MPa^{-1}	侧限压 缩模量 E_s/MPa	体积压 缩系数 m_v/MPa^{-1}	压缩 系数 a_v/MPa^{-1}	侧限压 缩模量 E_s/MPa	体积压 缩系数 m_v/MPa^{-1}	压缩 系数 a_v/MPa^{-1}	侧限压 缩模量 E_s/MPa	体积压 缩系数 m_v/MPa^{-1}	压缩 系数 a_v/MPa^{-1}	侧限压 缩模量 E_s/MPa	体积压 缩系数 m_v/MPa^{-1}
25	1.890	0.861	1.161	2.189	0.750	1.333	0.809	1.814	0.551	1.126	1.724	0.580
50	1.524	1.070	0.935	2.822	0.582	1.718	0.850	1.727	0.579	0.711	2.732	0.366
100	1.031	1.581	0.632	0.611	2.690	0.372	0.442	3.321	0.301	0.870	2.232	0.448
200	0.614	2.656	0.377	0.550	2.988	0.335	0.340	4.318	0.232	0.535	3.630	0.276
400	0.268	6.090	0.164	0.271	6.069	0.165	0.133	11.036	0.091	0.297	6.536	0.153
800	0.166	9.823	0.102	0.192	8.555	0.117	0.067	21.793	0.046	0.155	12.520	0.080
1 600	0.071	23.166	0.043	0.081	20.309	0.049	0.041	35.427	0.028	0.077	25.197	0.040

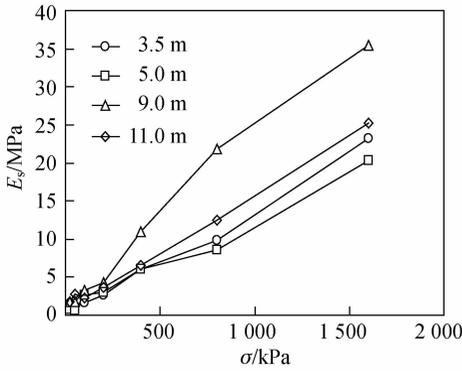
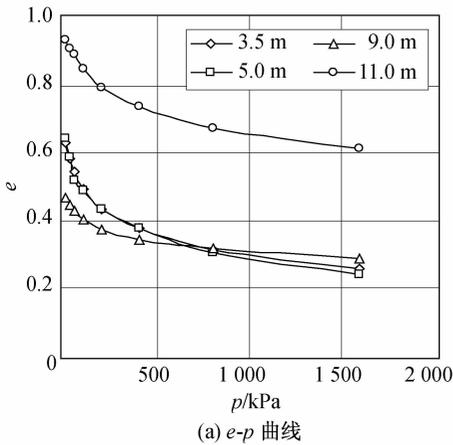
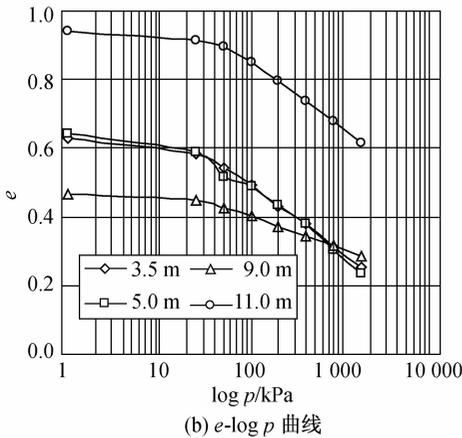


图7 含建筑垃圾土的固结试验 $E_s-\sigma$ 曲线

Fig.7 $E_s-\sigma$ curves of soil with construction waste of consolidation test



(a) $e-p$ 曲线



(b) $e-\log p$ 曲线

图8 含建筑垃圾土的压缩试验 $e-p$ 及 $e-\log p$ 曲线

Fig.8 $e-p$ and $e-\log p$ curves of soil with construction waste of compression test

在荷载从 20 kPa 增大到 100 kPa 的过程中,浅层垃圾土的压缩试验 $e-\log p$ 曲线出现了一个转折,这与深层垃圾土和原状土的曲线有所区别.在施加

荷载后,垃圾土中的细颗粒土向碎石、碎砖以及碎玻璃等大颗粒形成的空隙中移动,所以在宏观上表现为压缩变形较大.此后,大颗粒限制了土体的变形,使得沉降趋势放缓.而深层垃圾土由于已经经历了这一挤密作用,所以没有出现该现象.

在含建筑垃圾土压缩试验过程中,当荷载加大到 200 kPa 以上时的瞬间,土样发出持续的脆性破裂声,而深层原状土样则没有这一现象.原因是由于含建筑垃圾土体在承受上部压力的作用下,被挤压密实,其中的大颗粒成分(碎石、碎砖、玻璃等)由相互分离散落于土体中逐渐变成直接互相接触,最终形成抵抗上部荷载的骨架.一些强度较低的颗粒,如碎砖则随着竖向荷载的增大发生破碎.所以含建筑垃圾土的固结表现出既有土体之间的挤压密实,也有大颗粒破碎引起的土体重排.当压力较小时,固结过程主要表现为挤密,而随着压力增大,大颗粒破碎引发颗粒重排,由此产生的空隙成为固结的主要原因.

含建筑垃圾土最终达到的孔隙比远远小于粉质黏土,这充分体现了由于其良好的级配,使得土体达到了非常密实的程度.而含生活垃圾土由于级配较差,在 1 500 kPa 的固结压力下,依然具有较大的孔隙比^[18],难以达到非常密实的状态.

3 结 论

含建筑垃圾土由于建筑垃圾成分、颗粒级配以及沉积时间长短的不同,其物理力学性质与含生活垃圾土相比具有很大的差异性,因而,在实际工程设计及施工中应该区别对待.在总结大量试验结果的基础上,可得到以下结论.

(1) 浅层含建筑垃圾土沉积时间较短,先期固结压力小,天然密度较小,结构较松散,因此,在竖向荷载作用下,会发生较大沉降,压缩性大.在 100 ~ 200 kPa 固结荷载作用下,浅层含建筑垃圾土的 a_{v1-2} 值大于 0.5 MPa^{-1} ,属于高压缩性土;深层含建筑垃圾土则由于沉积时间较长,先期固结压力较大,其 a_{v1-2} 值为 0.340 MPa^{-1} ,较 11.0 m 深度处原状粉质黏土的抗压缩性优良,属于中压缩性土.

(2) 含建筑垃圾土属于颗粒级配良好的非均质土,不均匀系数 C_u 均大于 10,曲率系数 C_c 介于 1 ~ 3 之间;而含生活垃圾土为级配不良粗粒土,因此,二者的孔隙比差别很大,以至于压缩特性的表现也相去甚远.

(3) 由于含建筑垃圾土的土体比较松散,在剪切过程中,土中大颗粒建筑垃圾形成的咬合骨架改变了剪切面的形状,这是含建筑垃圾土粘聚力 c 和内摩擦角 φ 提高的主要原因.但土体需要在挤压作用下发生一定位移,才能形成相互咬合的骨架,所以在剪切过程中土体将发生较大变形.在实际工程中,通过对含建筑垃圾土进行挤密,可使内部大颗粒建筑垃圾形成相互咬合的骨架,从而大大提高土体的抗剪性能,而含生活垃圾土则表现出类似加筋土的特性.二者受力机理也有所不同,含建筑垃圾土抗剪强度的提高与其中建筑垃圾颗粒的大小及垃圾成分的自身强度有关,所含建筑垃圾颗粒越大且强度越高,则含建筑垃圾土的抗剪强度就越高.

(4) 与普通土相比,在固结过程中含建筑垃圾土在荷载作用下首先挤密,大颗粒建筑垃圾移动靠拢、相互接触并形成骨架,起到了限制土体沉降变形的作用.而随着上部荷载的增大,强度较低的建筑垃圾破碎,引发土体重排列而发生沉降,接着土体再次挤密并形成新的骨架,如此循环最终挤压密实.因此,含建筑垃圾土的抗压缩性能与其前期固结情况以及其组成成分密切相关.深层含建筑垃圾土的抗压缩性要高于浅层含建筑垃圾土,而所含建筑垃圾成分本身强度较高的含建筑垃圾土具有较强的抗压缩性.

参考文献:

- [1] 谢平荣.我国建筑垃圾的现状及其综合利用[J].山西建筑,2006,32(11):339-340.
- [2] 谢强,张永兴,张建华.陈垃圾土的压缩性试验研究[J].重庆建筑大学学报,2003,25(4):18-22.
- [3] 骆行文,杨明亮,姚海林,等.陈垃圾土的工程力学特性试验研究[J].岩土工程学报,2006,28(5):622-625.
- [4] 杨明亮,骆行文,喻晓,等.金口垃圾填埋场内大型建筑物地基基础及安全性研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(4):628-637.
- [5] 李晓红,梁峰,卢义玉,等.重庆市某垃圾填埋场填埋体的强度特性试验[J].重庆大学学报,2006,29(8):6-9.
- [6] 刘荣,施建勇,彭功勋.垃圾土力学性质的室内试验研

究[J].岩土力学,2005,26(1):108-112.

- [7] 周健,池毓蔚.垃圾土室内动力试验研究[J].岩土力学,1999,20(4):1-4.
- [8] SIEGEL R A, ROBERTSON R J, ANDERSON D G. Slope stability investigations at a landfill in Southern California [M] // LANDVA A, KNOWLES D. Geotechnics of waste fill—theory and practice. Philadelphia: ASTM, 1990:259-284.
- [9] ANDERSON D G, HUSHMAND B, MARTIN G R. Seismic response of landfill slopes [C] // Proc ASCE Specialty Conference on Stability and Performance of Slopes and Embankments. 1992:973-989.
- [10] LING H I, LESHCHINSKY D. Seismic stability and permanent displacement of landfill cover system [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(2):113-122.
- [11] MATASOVIĆ N, KAVAZANJIAN E, Jr. Cyclic characterization of OII landfill solid waste [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(3):197-210.
- [12] 冒俊.人工改良垃圾土强度特性研究[D].南京:河海大学,2007.
- [13] 王颖星.柱锤冲灰土挤密桩法在处理杂填土地基中的应用[D].北京:中国地质大学,2008.
- [14] AMORIM L V, LIRA H L, FERREIRA H C. Use of residential construction waste and residues from red ceramic industry in alternative mortars [J]. Journal of Environmental Engineering, 2003, 129(10):916-920.
- [15] ELAGROUDY S A. Effect of waste composition and load Application on the biodegradation of municipal solid waste in bioreactor landfills [J]. Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management, 2009, 13(3):165-173.
- [16] 张振营,吴世明,陈云敏.城市生活垃圾土性参数的室内试验研究[J].岩土工程学报,2000,22(1):35-39.
- [17] 中华人民共和国建设部. GB/T 50145—2007 土的工程分类标准[S].北京:中国计划出版社,2008.
- [18] 孟云伟,汪洋.垃圾土的工程性质研究现状[J].重庆交通大学学报,2006,25:150-153.
- [19] 中华人民共和国建设部. GB 50007—2002 建筑地基基础设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.

(编辑:赵宇)