

掺合钢渣的新型混合土工填料压缩变形与强度特性研究

王丽艳^{1,2}, 高 鹏¹, 陈国兴², 符仁建¹

(1. 江苏科技大学土建学院, 江苏 镇江 212003; 2. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210009)

摘 要: 掺合废弃钢渣的混合轻质土是笔者提出的一种新型填土材料 (LSBS), 在侧限压缩试验基础上研究了 LSBS 混合轻质土的应力应变特性, 钢渣掺入比以及龄期对应力应变特性的影响规律, 以及压缩模量随钢渣掺入比及龄期的变化规律, 分析了沉降变形与时间的关系; 在直剪试验的基础上研究了抗剪强度随钢渣掺入比及龄期的变化规律, 分析了抗剪强度与竖向压应力的关系, 得出了 LSBS 应力应变之间呈现弹塑性特性, 压缩模量与抗剪强度随钢渣掺入比以及龄期变化的规律, 随着龄期的增长而升高, 养护龄期较长时钢渣才能表现水化作用, 呈现水泥特性, 抗剪强度与竖向压应力的关系符合莫尔-库仑准则, 得出了抗剪强度指标, 可为工程利用提供参考。

关键词: 钢渣; 混合土; 掺入比; 龄期; 压缩模量; 压缩变形; 抗剪强度

中图分类号: TU47 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2013)S2-0126-07

作者简介: 王丽艳(1980-), 女, 江苏盐城人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土动力学与地震工程等方面的研究与教学工作。E-mail: wly_yzu@163.com。

Experimental study on deformation behavior and shear strength of mixed soil blended with steel slag

WANG Li-yan^{1,2}, GAO Peng¹, CHEN Guo-xing², FU Ren-jian¹

(1. School of Civil engineering and architecture, Jiangsu University of science and technology, Zhenjiang 212003, China ; 2. Institute of Geotechnical Engineering Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China.)

Abstract: The mixed light-weight soil blended with steel slag is a new filling materials (LSBS) provided by the author, and uniaxial consolidation compression tests are conducted to study the stress-strain characteristics of LSBS and influence behaviors by mixed steel slag ratio and different ages. Furthermore, the effects of mixed steel slag ratio and different ages on the deformation modulus are observed, and the relation between settlement deformation and age is also investigated. Direct shear tests are conducted to study the influence behaviors on shear strength by mixed steel slag ratio and different ages, and the relation between shear strength and vertical stress is also analyzed. Some conclusions are drawn that the stress-strain exhibits elastic-plastic properties, the shear strength and deformation module basically change, and they become higher with the growth of the age. With the increase of the age, the steel slag cement shows water action and presents cement characteristics. The curves of shear strength and vertical stress agree with the Mohr-Coulomb theory. Indexes of shear strength are offered, and this study may provide reference for engineering application.

Key words: steel slag; mixed soil; mixed ratio; age; deformation modulus; compressive deformation; shear strength

0 引 言

路基沉降容易造成路面开裂和桥头跳车问题, 是交通工程的重要难题。轻质土具有密度小、压缩模量大的特点, 既能减小地基沉降, 也能减小路基自身沉降, 为该问题的解决提供了新的途径。随着路基的工后沉降、环保等要求越来越严格, 轻质土等新型路堤填料近 20 年来得到了很大的关注, 成为众多学者研究的热门方向之一。常见的轻质土有泡沫塑料板、泡沫塑料混合轻质土、废旧轮胎混合轻质土和气泡混合轻

质土。泡沫塑料混合轻质土制作和施工简单, 密度大小适宜, 经济性也较好, 是目前轻质土研究的热点^[1-4]。

钢渣是在钢铁生产过程中由造渣材料、冶炼反应物、侵蚀脱落的炉体和补炉材料、金属炉料带入的杂质和为调整钢渣性质而特意加入的造渣材料所组成的固体渣体, 是生产钢铁过程的副产品^[5]。钢渣若不综合利用, 会占用越来越多的土地, 污染环境, 造成资

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (51109099); 国家博士后基金项目 (2011M500906); 住房和城乡建设部研究开发项目 (2013-K1-53)
收稿日期: 2013-06-06

源的浪费。在近几十年来研究发现钢渣具有和水泥相似的矿物组分, 可以作为二次资源再加以利用, 不仅具有巨大的社会效益, 同时还具有广泛的经济效益^[6-7]。张家港沙钢是目前国内最大的电炉钢和优特钢生产基地。

因此, 将废弃钢渣掺合泡沫塑料做成混合轻质土作为填土材料, 可以减少水泥的用量, 具有经济环保等多方面的优点。笔者将通过一定比例的 EPS 颗粒、钢渣、水泥、粉质黏土、水充分搅拌混合, 做成掺合钢渣的混合轻质土 (light-weight silty soil blended with steel slag 简称 LSBS) 作为新型填土材料, 为了研究废弃钢渣掺入泡沫塑料混合轻质土变形及强度特性, 本论文采取固结仪做侧限压缩试验以及直剪试验研究新型混合轻质土的压缩变形及抗剪强度特性。

1 试验制备与方法

1.1 原料和特点

试验中所用原料土取自张家港市大学城区的弃土, 土质为粉质黏土, 其基本参数如表1所示, 采用的发泡聚苯乙烯颗粒 (EPS), 为圆球状, 粒径1~2 mm, 堆积密度0.01664 g/cm³, 所用钢渣为张家港沙钢集团生产过程中产生的普通钢渣, 其密度为2.582 g/cm³, 水泥为标号为32.5的普通硅酸盐水泥, 水用普通自来水。

表 1 原料土物理力学特性

Table 2 Physical and mechanical properties of soils							
含水率	密度	液限 /%	塑限 /%	塑性指数	液性指数	孔隙比	压缩系数 /MPa ⁻¹
23.86	1.9292	34.5	20.5	14	0.28	0.43	0.4

1.2 试验方法

通过压缩试验研究钢渣掺入比的变化以及龄期对 LSBS 新型轻质材料的变形特性影响, 所以试验以烘干土1000 g为标准, 设为基准100%, 选定水泥与钢渣的掺入比总和占干土质量为一定值15%, 掺入比百分数的基数是干土质量, 钢渣掺入比S (%) 用15%减去水泥的掺入比C (%) 即得, 目的是为了研究钢渣的最优替代比, 试样原材料的配比构成见表2所示, 总质量记为烘干土的165%, 即1650 g。

首先量取干土、EPS 颗粒, 加入钢渣、水泥后进行初步拌和, 再加入水拌和至均匀。将拌和物采用分层击实成型的方法装入底面积为30 cm², 高为2 cm 的环刀中。将制备的试样置入标准养护箱中 (温度20±2℃, 湿度>90%) 养护, 分别养护至7, 14和28 d 龄期抽气饱和后进行密度、含水率和侧限压缩试验。试验都是参照国家《土工试验方法标准》, 养护28 d

的密度与含水率测试值如下表3所示。固结及直剪试验操作参照文献[8]。试验中每组3个试样, 进行平行试验, 试样剖面如图1所示。

表 2 试样的原材料构成

Table 2 Factors and levels of LSBS						
试样编号	砂 /%	水泥 /%	钢渣 S/%	水 /%	EPS /%	养护天数/d
1	100	15	0	50	4	7
2	100	10	5	50	4	7
3	100	5	10	50	4	7
4	100	0	15	50	4	7
5	100	15	0	50	4	14
6	100	10	5	50	4	14
7	100	5	10	50	4	14
8	100	0	15	50	4	14
9	100	15	0	50	4	28
10	100	12	3	50	4	28
11	100	10	5	50	4	28
12	100	8	7	50	4	28
13	100	5	10	50	4	28
14	100	3	12	50	4	28
15	100	0	15	50	4	28

表 3 试样的密度与含水率

Table 3 Densities and moisture contents of LSBS			
编号	钢渣掺入比 S/%	密度/(g·cm ⁻³)	含水率/%
1	0	0.73	27.6
2	3	0.75	29.6
3	5	0.78	32.9
4	7	0.80	38.2
5	10	0.83	39.7
6	12	0.86	44.6
7	15	0.88	42.3

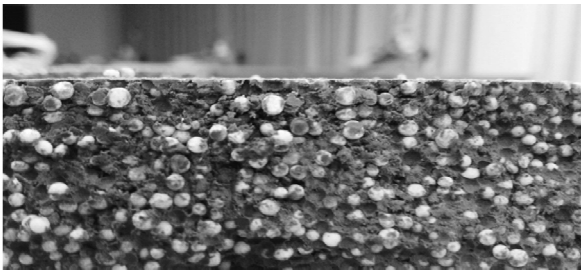


图 1 试样剖面图

Fig. 1 Section of sample

2 应力应变关系

2.1 钢渣掺入比影响

钢渣掺入比不同, 试样的内部结构就会不同, 在微观上表现为试样内部生成的水化物结晶程度不同, 宏观上则表现为试样的应力应变特性不同, 不同钢渣掺入比在不同龄期下所测应力应变关系如图 2 (a)、(b) 和 (c) 所示。

由图 2 可以看出钢渣掺入比对压缩变形量的影响比较明显, 不论在何种龄期下, 随着钢渣替代水泥比

例的增加,相同荷载作用下变形量就越大。从图中还可以看出,应力应变关系曲线可以分为3个阶段,首先当荷载小于试样屈服应力时,应变随着应力而增加的幅度较小,应力应变接近线性关系,此时试样处于弹性状态,而当荷载继续增加时,试样由弹性状态转为弹塑性状态,轻质混合土抵抗变形的能力减弱,此时应变随着荷载的增加而快速增加,在应力应变曲线的最后阶段可以看到不同的现象:当钢渣替代水泥比小时,应变随应力增加速度依然很快,而钢渣替代水泥比大时,应变随应力增加幅度又开始减小。原因归结为:由于掺合钢渣混合轻质土的变形主要为EPS颗粒的压缩,所以在完全侧限条件下,当EPS颗粒的压缩量达到一定量时,其变形量将会减少,而当钢渣替代水泥比很低时,由于水泥的固化性能要好于钢渣,因此试样的强度较高,变形相对较慢,其还没有达到稳定的状态,所以应变的增加幅度仍很快。

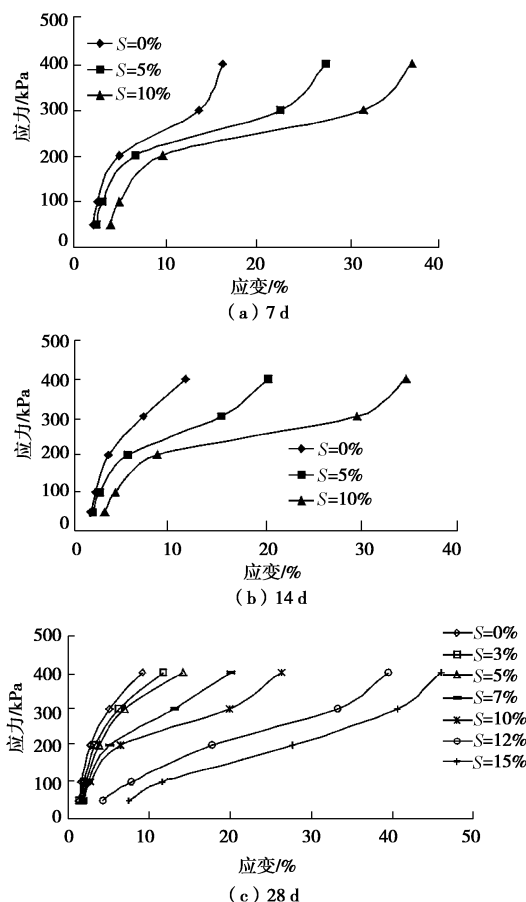


图2 不同钢渣掺入比的应力应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of LSBS with different mixed steel slag ratios

2.2 龄期影响

钢渣及水泥的水化反应程度均是随着龄期的增长而增加,因此龄期的不同必然会导致试样的内部结构不同,应力应变曲线也必然受其影响,不同龄期在钢

渣掺入比不同时所测应力应变曲线如图3(a)、(b)和(c)所示。由图3可知,在不同钢渣掺入比的情况下,随着龄期的增加,应变随应力增加的幅度减小,应力应变曲线的前期也更为陡峭,因为:随着龄期的增加,钢渣与水泥的水化作用都更加充分,试样的强度也相应增加,因此其抵抗变形的能力也较强。

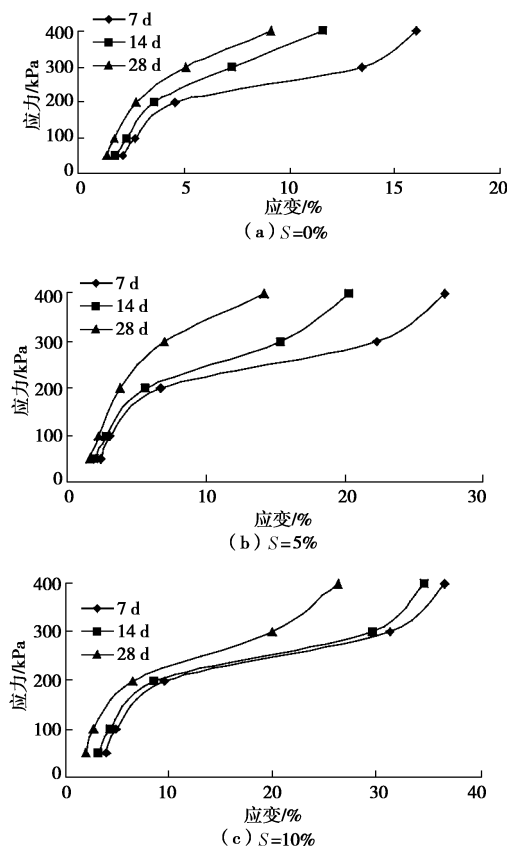


图3 不同龄期的应力应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of LSBS with different ages

从图3中还可以看出钢渣掺入比为零时在同一荷载作用下,随着龄期的增加,应变减小,而且前期的减小幅度较大,后期减小幅度较小,这主要是由于水泥的水化反应较快,在短时间即完成大部分所致,而钢渣掺入比为10%时,应变前期减小幅度较小,后期减小幅度较大,这主要由于钢渣的水化作用较慢,在后期钢渣的水化作用开始显现所致。

3 压缩变形特性

3.1 钢渣掺入比影响

掺合钢渣的混合轻质土材料较为特殊,其初始孔隙比难以准确确定,采用压缩系数表示它的压缩变形特性不能把EPS颗粒的变形包括在内,而采用压缩模量则可以考虑这部分变形,因此把压缩模量作为掺合钢渣混合轻质土变形特性的一个重要指标。钢渣掺入比的不同必然导致试样内部结构不同,因此首先研究

钢渣掺入比对压缩模量的影响,图4为不同钢渣掺入比情况下压缩模量随龄期的变化曲线。

由图4可知,不论何种龄期压缩模量均随着钢渣掺入比的增加(水泥含量减小)而降低,因为钢渣虽然具有水化作用可以代替部分水泥,但其固化作用毕竟不及水泥,因此随着钢渣掺入比的增加(水泥含量减小)轻质土的强度降低,抵抗变形的能力减弱,压缩模量降低。由28 d龄期的曲线可以看出在钢渣掺入比不大于5%时,该新型轻质土的压缩模量较高。

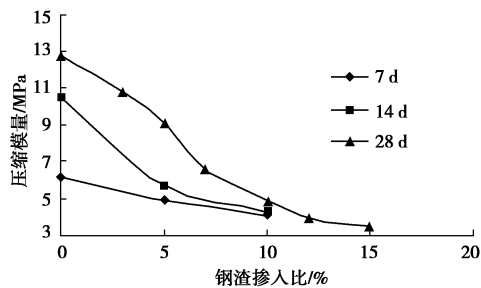


图 4 压缩模量与钢渣掺入比的关系

Fig. 4 Relation between deformation modulus and steel slag

从图4还可以看出,龄期会对压缩模量随钢渣掺入比的变化产生影响,龄期7 d与龄期14 d情况下的压缩模量随钢渣掺入比变化的曲线类似,接近于指数关系,而28 d龄期时的曲线则明显不太满足指数关系,为此笔者将不同龄期下的压缩模量与钢渣掺入比关系曲线进行了拟合,拟合公式如下:

$$E_s = a \times e^{bs}$$
 (1)

式中, E_s 为压缩模量 (MPa), s 为钢渣掺入比 (%), a, b 均为试验参数, e 为数学常数,拟合曲线及拟合结果如图5及表4所示。

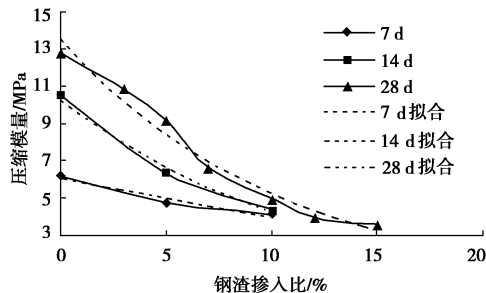


图 5 压缩模量与钢渣掺入比关系的指数曲线拟合

Fig. 5 Fitting exponential curves of deformation modulus and steel slag-dosage

表 4 指数曲线拟合参数

Table 4 Fitting parameters of exponential curves

序号	龄期/d	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²
1	7	6.0536	-0.0408	0.9715
2	14	10.302	-0.0892	0.9935
3	28	13.461	-0.095	0.9959

由图5及表4可以看出,龄期7 d与龄期14 d情况下拟合效果很好,相关指数均在0.99以上,可见在龄期7 d与14 d时,压缩模量与钢渣掺入比的关系满足指数曲线关系。而利用指数曲线拟合龄期28 d的曲线时,其拟合效果则不是很好,分析其原因为,由于钢渣水化作用较慢,在龄期较短时,可以认为充当固化剂只有水泥,此时压缩模量随着钢渣掺入比的增加(水泥含量的降低)呈指数曲线降低。然而当龄期达到28 d时,轻质土中钢渣的水化反应开始显现出来,由于钢渣水化反应的显现,轻质土的强度在后期进一步提高,相应压缩模量也会进一步提高,因此压缩模量与钢渣掺入比的关系不再满足指数曲线。

3.2 龄期影响

研究了不同钢渣掺入比的情况下,压缩模量与龄期的关系,绘得不同钢渣掺入比情况下,压缩模量随龄期的变化曲线如图6所示。

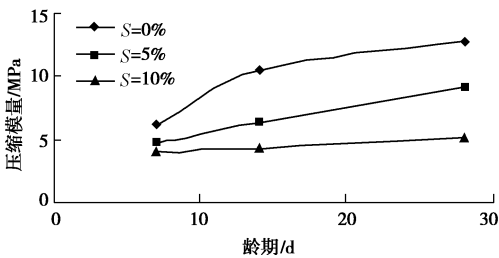


图 6 压缩模量与龄期的关系

Fig. 6 Relation between deformation modulus and age

由图6可以看出不论何种钢渣掺入比的情况,压缩模量均随着龄期的增加而增加,随着龄期的增加,钢渣与水泥的水化反应更为充分,固化效果越好,轻质土的强度越高,其抵抗变形的能力也相应提高,压缩模量亦越大。

从图6还可以看出钢渣掺入比会对压缩模量与龄期的关系曲线产生影响,钢渣掺入比为5%或10%时,随着龄期的增加,压缩模量的增加幅度为前期较慢而后期较快,钢渣掺入比为0%时,随着龄期的增加,压缩模量增加的幅度先期较快,而后期则相对较慢。产生此现象的原因也与钢渣的后期水化反应有关,钢渣掺入比为0%时,轻质土中充当固化剂的只有水泥,而水泥的水化反应在前期较快,相应轻质土的压缩模量在前期增长亦较快,而当钢渣掺入比为5%或10%时,此时虽然水泥的水化反应亦是前期较快,但水泥的含量此时小很多,而钢渣在前期几乎没有水化反应,而在后期钢渣的水化反应会显现出来,因此当钢渣掺入比为5%或10%时,随着龄期的增加,压缩模量的增加幅度为先期较小,后期增加幅度相对较大。

4 沉降与时间关系

为了预估轻质土沉降随时间的变化关系,通过室内固结试验研究了不同钢渣掺入比时混合轻质土的沉降变形与时间的关系,本试验选取荷载为100 kPa,取龄期28 d,得到沉降变形与时间的关系曲线如图7所示。

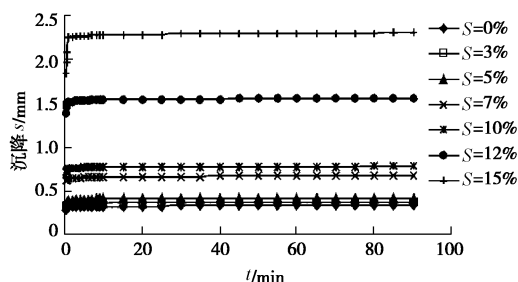


图7 沉降 s 与时间 t 关系曲线

Fig. 7 s - t curves under different steel slag-mixed ratios

由图7可以看出,不论何种钢渣掺入比的混合轻质土,其变形量在很短的时间内就可以完成,超过一分钟其变形即趋于稳定,其最终变形量可分为瞬时沉降与固结沉降两部分,主要变形为瞬时沉降,固结沉降只占很小一部分。固结变形量很小,此部分变形相对于EPS颗粒的压缩变形可以忽略不计,综上:掺合钢渣混合轻质土的固结曲线与一般土体有很大区别,它的压缩变形量由两部分组成,就是EPS颗粒本身的变形和超静孔隙水压力的消散,其中主要为EPS颗粒压缩的变形,且在很短的时间内基本完成,而超静孔隙水压力的消散较慢,但其变形相对于EPS颗粒压缩的变形可以忽略。

5 抗剪强度特性

5.1 钢渣掺入比对抗剪强度的影响

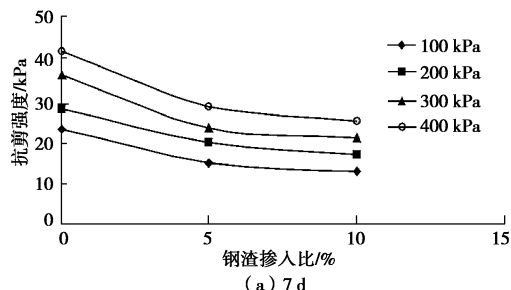
钢渣与水泥同时作为该轻质土的固结物,它们掺入比的多少肯定会对破坏应变产生重要影响,不同龄期下试样破坏应变与钢渣掺入比的关系如图8所示。

由图8可以看出不论何种龄期下抗剪强度均随着钢渣掺入比的增加而降低,由于钢渣与水泥总量为一定值,随着钢渣掺入比的增加,相应水泥的含量就会降低,钢渣虽然水化反应起到代替水泥的作用,但钢渣的固结能力弱于水泥,因此随着钢渣掺入比的增加(水泥掺入比降低)抗剪强度降低。由图6还可以看出龄期7 d与龄期14 d的曲线近似于指数关系曲线,即抗剪强度随着钢渣掺入比的增加而指数降低,而龄期28 d的关系曲线则明显不满足指数关系曲线,抗剪强度随钢渣掺入比增加而降低的幅度要低很多,这主

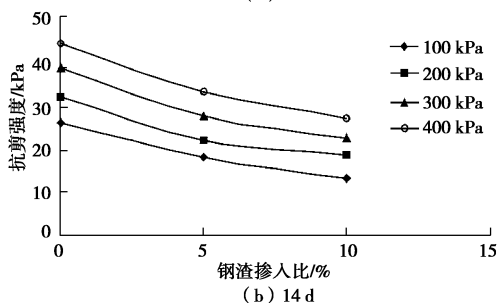
要是由于钢渣在后期开始显现出水化固结作用所致。

5.2 龄期对抗剪强度的影响

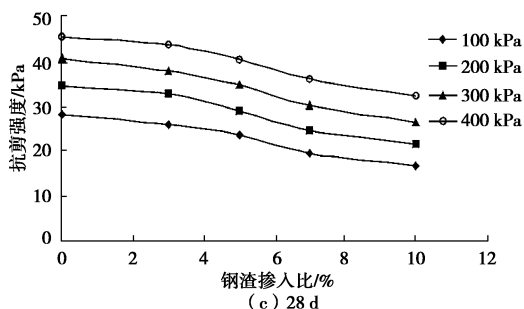
龄期不同,掺合钢渣混合轻质土中固化剂的固化程度不同,必然会影响到抗剪强度的大小,为了研究龄期对抗剪强度的影响,现将不同钢渣掺入比时,抗剪强度与龄期的关系归纳于图9所示。



(a) 7 d



(b) 14 d



(c) 28 d

图8 抗剪强度与钢渣掺入比关系

Fig. 8 Curves of shear strength and steel slag ratio

由图9可以看出抗剪强度随着龄期的增长而增加,但钢渣掺入比会对其产生影响,钢渣掺入比为0%时,随着龄期的增长,抗剪强度先期增加幅度较快,后期增长幅度较小;钢渣掺入比为5%或10%时,随着龄期的增长抗剪强度的前后期增加幅度基本相当,有的甚至后期增加幅度超过前期,这主要由于水泥的水化反应在短时间内即可完成大部分,因此当试样中只有水泥充当固化剂时,试样抗剪强度在前期增加较快,钢渣则与之相反,钢渣的水化反应只有在龄期较长时才可以较快进行,因此当轻质土中掺入钢渣时,抗剪强度在后期的增长幅度会有所增加。

5.3 竖向压应力对抗剪强度的影响

竖向压应力会增加掺合钢渣混合轻质土的密实度,而密实度对抗剪强度产生很大影响,因此竖向压应力必然对抗剪强度产生影响,不同钢渣掺入比、不同龄期下抗剪强度与竖向压应力的关系如图10所

示。

由图10可以看出, 抗剪强度随竖向压应力的增加而增加, 因为随着竖向压应力增加, 掺合钢渣混合轻质土被压的越密实, 黏结强度亦越大, 因此抗剪强度随着竖向压应力的增加而增大, 通过对抗剪强度与竖向压应力的关系进行线性拟合, 发现拟合相关性很高, 因此可以确定抗剪强度与竖向压应力符合线性关系。所以其符合莫尔 - 库仑准则, 利用拟合直线的结果可以求出抗剪强度指标, 拟合直线的倾角即为摩擦角, 拟合直线在纵坐标上的截距即为黏聚力。现将不同钢渣掺入比、不同龄期下的抗剪强度指标列于表5所示。

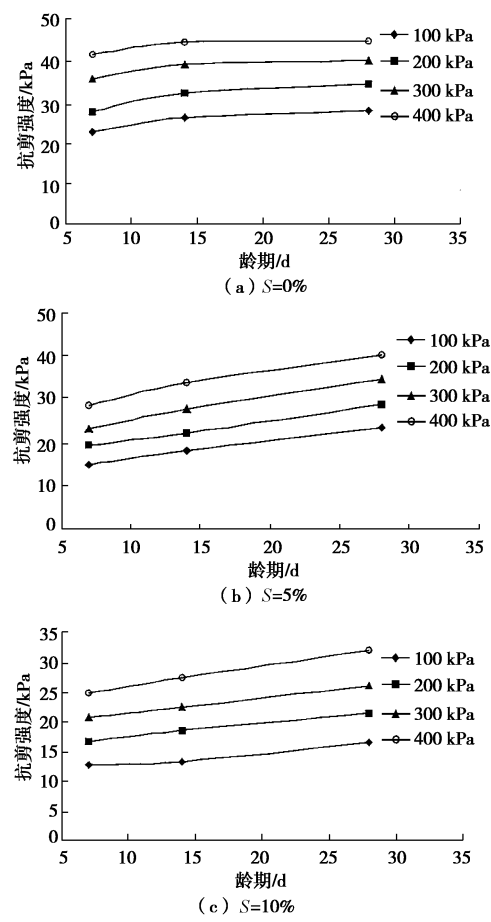


图 9 抗剪强度与龄期关系

Fig. 9 Curves of shear strength and age

表 5 LSBS 的抗剪强度指标

Table 5 Indexes of shear strength of LSBS

编号	s/%	t/d	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	R^2
1	0	7	15.81	3.74	0.991
2	5	7	10.46	2.55	0.994
3	10	7	8.76	2.33	0.999
4	0	14	20.0	3.61	0.998
5	5	14	13.58	2.88	0.993
6	10	14	8.46	2.72	0.999
7	0	28	22.72	3.30	0.996
8	3	28	20.57	3.31	0.997
9	5	28	16.96	3.19	0.999
10	7	28	12.75	3.17	0.998
11	10	28	11.38	2.93	0.997

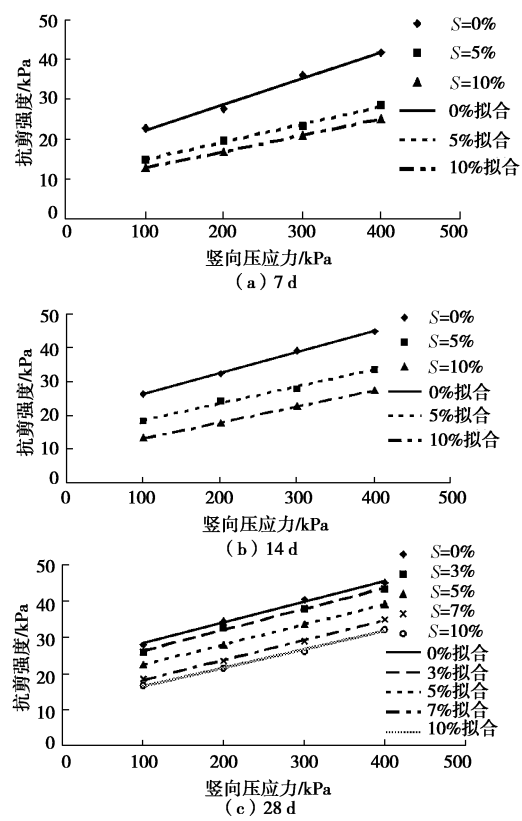


图 10 抗剪强度与竖向压应力关系

Fig. 10 Curves of shear strength and vertical stress

6 结 论

通过压缩固结试验及直剪试验对LSBS新型混合轻质土的变形及强度特性进行了详细研究, 通过分析得出了如下结论:

(1) 通过压缩固结试验得到的应力应变关系曲线, 呈现弹塑性特性, 随着龄期的增长, 应力应变曲线前期的弹性模量随之增大, 钢渣在龄期较长时, 显现出水化固结作用, 可以起到代替部分水泥的作用。

(2) 压缩模量随着钢渣掺入比的增加而降低, 龄期较短时, 二者近似为指数关系, 龄期较长时钢渣的水化固结作用开始显现, 二者不再满足指数关系。

(3) 压缩模量随着龄期的增长而增加, 在龄期较长时, 由于钢渣的水化固结作用, 其压缩模量会在后期得到一定程度的提高。

(4) LSBS轻质土的压缩变形由EPS颗粒本身的压缩变形与超静孔隙水压力消散引起的变形两部分组成, 其中主要为EPS颗粒的压缩变形, 且变形在很短的时间基本完成, 超静孔隙水压力消散较慢, 但其变形很小, 相对于EPS颗粒的压缩变形可以忽略。

(5) 抗剪强度随着钢渣掺入比的增加而降低, 随着龄期的增长而增加, 钢渣在龄期较长时, 显现出水化固结作用, 使得LSBS新型轻质土的抗剪强度在龄期

较长时亦会得到一定程度的提高,起到代替部分水泥的作用。

(6) 抗剪强度随着竖向压力的增加而线性增加,符合莫尔-库仑准则,并得到了不同钢渣掺入比、不同龄期时LSBS新型填料的抗剪强度指标。

参考文献:

- [1] 王爱华. 钢渣的综合利用研究[J]. 中国资源综合利用, 2009, 27(12): 8 - 9. (WANG Ai-hua. The study on comprehensive utilization in steel slag[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2009, 27(12): 8 - 9. (in Chinese))
- [2] 程绪想, 杨全兵. 钢渣的综合利用[J]. 粉煤灰综合利用, 2010(5): 45 - 49. (CHENG Xu-xiang, YANG Quan-bing. Comprehensive utilization in steel slag[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2010(5): 45 - 49. (in Chinese))
- [3] 马盛国. 钢渣桩在软基处理中的应用[J]. 攀枝花科技与信息, 2010, 35(1): 65 - 67. (MA Sheng-guo. Comprehensive utilization of steel slag pile in soft foundation[J]. Technology and Information of Panzhihua, 2010, 35(1): 65 - 67. (in Chinese))
- [4] MIHI Hiroshi. Cost reduction effect due to lightweight embankment[C]// Proceeding of the International Workshop on Lightweight Geo-Materials (IW-LGM2002). Tokyo, 2002: 1 - 16.
- [5] 規矩大義, 吳智深, 林泰弘, 等. 輕量地盤材料の物性と評價法[C]// 輕量地盤材料の開発と適用に関するシンポジウム発表論文集. 東京, 2002: 55 - 78. (KIKU Hiroyoshi, WU Zhi-shen, HAYASHI Yasuhiro, et al. Evaluation of the characteristics of lightweight geo-materials [C]// Proceeding of the International Workshop on Lightweight Geo-Materials (IW-LGM2002). Tokyo, 2002: 55 - 78. (in Japanese))
- [6] 刘汉龙, 董金梅, 周云东, 等. 聚苯乙烯轻质混合土应力-应变特性分析[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(5): 579 - 583. (LIU Han-long, DONG Jin-mei, ZHOU Yun-dong, et al. Study on the stress-strain characteristic of light heterogeneous soil mixed with expanded polystyrene[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(5): 579 - 583. (in Chinese))
- [7] 朱伟, 李明东, 张春雷, 等. 砂土 EPS 颗粒混合轻质土的最优击实含水率[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(1): 21 - 25. (ZHU Wei, LI Ming-dong, ZHANG Chun-lei, et al. The optimum moisture content of sand EPS beads mixed lightweight soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(1): 21 - 25. (in Chinese))
- [8] GB/T50123—1999 土工试验方法标准[S]. 1999. (GB/T50123—1999 Standards of test method on soil[S]. 1999. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)