

## 矿渣-水泥-膨润土剪切模量龄期效应 及其影响因素的试验研究

李育超<sup>1,2†</sup>, 杨佳林<sup>1,2</sup>, 兰吉武<sup>1,2</sup>, 黄根清<sup>1,2</sup>

(1. 浙江大学 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058;

2. 浙江大学 岩土工程研究所, 浙江 杭州 310058)

**摘要:**采用压电陶瓷弯曲元测试矿渣-水泥-膨润土(S-CB)试样剪切波速的方法,研究了复合胶凝材料含量、矿渣替代率、龄期对S-CB的剪切波速( $V_s$ )与剪切模量( $G_0$ )的影响规律。试验结果表明,S-CB的 $V_s$ 随龄期的增长、矿渣替代率的减小、复合胶凝材料含量的增大而增大;试验中,S-CB的 $V_s$ 明显低于同龄期水泥土的 $V_s$ ,这主要归因于S-CB含水量显著高于水泥土;发现S-CB的硬化发展规律与矿渣替代率紧密相关,与复合胶凝材料含量相关性不明显,基于试验结果提出了矿渣-水泥-膨润土的剪切模量随龄期的预测公式,若测试获得某一复合胶凝材料含量的矿渣-水泥-膨润土的归一公式,可推测相同矿渣替代率的其他复合胶凝材料含量的矿渣-水泥-膨润土的剪切模量。

**关键词:**矿渣-水泥-膨润土;剪切波速;剪切模量;龄期效应;弯曲元

**中图分类号:**TU47;X50

**文献标识码:**A

## Experimental Study on Age Effect and Influence Factors of Slag-cement-bentonite's Shear Modulus

LI Yuchao<sup>1,2†</sup>, YANG Jialin<sup>1,2</sup>, LAN Jiwu<sup>1,2</sup>, HUANG Genqing<sup>1,2</sup>

(1. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** The shear wave velocity of slag-cement-bentonite (S-CB) samples by piezoelectric bending element was tested to study the influence of cementitious material content, slag substitution rate and age on shear wave velocity ( $V_s$ ) and shear modulus ( $G_0$ ). The test results showed that, with the increase of age, decrease of slag substitution rate and increase of content of cementitious material, shear wave velocity ( $V_s$ ) of S-CB increased. In the tests,  $V_s$  of S-CB is significantly lower than that of cemented clay at the same age. This is mainly due to the higher water content of S-CB than cemented clay. It is observed that the development tendency of S-CB is closely related to the slag substitution rate of cementitious material, and it is not obviously correlated with the content of cementitious material. Based on the test results, the prediction formula for shear modulus of cement-bentonite with age was proposed. If the normalized formula of S-CB with one kind of cementitious material content is obtained by test, the shear modulus of S-CB with other composite cementitious materials content and the same slag replacement rate can be speculated.

**Key words:** slag-cement-bentonite; shear wave velocity; shear modulus; age effect; bender element

\* 收稿日期:2018-11-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41672284), National Natural Science Foundation of China(41672284)

作者简介:李育超(1978—),男,浙江嘉兴人,浙江大学教授、博士生导师

† 通讯联系人, E-mail:21512021@zju.edu.cn

我国城市地下水土污染严重,威胁居民健康和生态环境,制约城市土地再利用,亟需有效控制和治理.竖向防污隔离墙采用防渗防污性能良好的土质或人工材料及结构将污染场地或潜在地下污染源与周边未污染的区域阻隔,实现防止污染物地下扩散的目的<sup>[1]</sup>.该技术是污染场地和固体废弃物填埋场地下污染防控和修复治理的重要途径.

土-膨润土和水泥-膨润土是两种应用最广泛的竖向防污隔离墙墙体材料.膨润土具有良好的遇水膨胀性,可降低材料的渗透系数.美国由于怀俄明等地的天然钠基膨润土性能好,主要采用土-膨润土作为隔离墙墙体材料<sup>[2]</sup>,该材料渗透系数小(小于 $1 \times 10^{-7}$  cm/s),但抗剪强度较低、破坏应变较大(大于20%);英国等欧洲国家天然膨润土多为钙基膨润土<sup>[3]</sup>,工程性能不如钠基膨润土,因此将水泥等掺入膨润土泥浆,形成低渗透性、破坏应变较小(一般小于2%)、具有一定抗剪强度的水泥-膨润土隔离墙材料<sup>[4]</sup>.

英国的防污隔离墙工程常用磨细高炉矿渣或粉煤灰替代部分水泥作为复合胶凝材料,既可以降低材料造价,又可以充分利用工业废渣,有较好的经济与环境效益.在水泥-膨润土中采用磨细高炉矿渣替代部分水泥可以减少矿渣-水泥-膨润土材料的渗透系数、泌水性,并增加材料的强度<sup>[3,5]</sup>.

与土-膨润土相比,水泥-膨润土具有较高的抗剪强度,一般达140~350 kPa.当隔离墙顶部需承受上覆荷载时,宜采用水泥-膨润土墙<sup>[6]</sup>.水泥-膨润土的抗剪强度特性一般通过无侧限抗压强度试验确定.然而,水泥-膨润土的抗剪强度随复合胶凝材料水化逐渐增长,即存在龄期效应.采用无侧限抗压强度试验测试时,水泥-膨润结构遭到破坏,无法对同一个试样进行随龄期的持续测试,配合比试验往往考虑到龄期、配比等影响因素需要制备大量试样,测试结果通常离散性较大.

剪切波在土中传播时质点振动方向垂直于传播方向,孔隙水一般被认为无法传递剪切波,因此剪切波速主要反映土骨架的工程性状<sup>[7]</sup>.将压电陶瓷弯曲元(下文简称“弯曲元”)测试表征土体刚度的剪切模量的这种无损测试方法用于矿渣-水泥-膨润土,可解决上述无侧限抗压试验存在的问题.自DYVIK和MADSHUS将弯曲元应用在三轴仪上测试土体剪切模量以来<sup>[8]</sup>,该方法得到了广泛的应用.目前国内外关于采用弯曲元测试土体剪切模量进

行了大量研究,包括土体结构性与剪切模量的关系<sup>[9-11]</sup>、砂土液化评价<sup>[12-13]</sup>、场地动力响应分析<sup>[14]</sup>、地基改良土测试<sup>[15]</sup>等. Joshi<sup>[2]</sup>采用弯曲元测试了矿渣-水泥-膨润土的小变形剪切波速和剪切模量,测试结果表明矿渣-水泥-膨润土的力学性能取决于龄期和围压,该研究对比了室内试样与现场取样的测试结果差异,未研究配比对矿渣-水泥-膨润土剪切波速的影响;并且该研究的主要目的是了解材料的长期工程性能,测试的试样龄期比较分散,未对矿渣-水泥-膨润土的硬化速率进行分析.

本文试验将矿渣替代部分水泥的混合物作为复合胶凝材料,配制了5种矿渣替代率 $S_s$ (矿渣质量占复合胶凝材料质量的比值)、3种复合胶凝材料含量 $S_c$ (水泥与矿渣质量之和与膨润土泥浆质量的比值)的矿渣-水泥-膨润土材料.采用弯曲元连续测试上述不同配合比的矿渣-水泥-膨润土材料剪切波速随龄期的变化,研究矿渣-水泥-膨润土剪切模量随复合胶凝材料含量、矿渣替代率、龄期的变化规律,基于测试结果提出矿渣-水泥-膨润土剪切模量随龄期增长的预测公式.

## 1 试样制备

本试验的矿渣-水泥-膨润土试样由山东潍坊膨润土、强度等级为42.5的普通硅酸盐水泥(钱潮牌)、高炉矿渣细粉(巩义市元亨净水材料厂)和去离子水配制而成,其中膨润土、水泥和矿渣均烘干后使用(水泥烘干温度为40℃).膨润土的矿物组成质量占比为10.8%石英、37.4%长石、2.8%方解石、48.9%蒙脱石,颗粒比重为2.60,液限和塑限分别为135.2%和38.4%,塑性指数为96.8,比表面积为30.97 m<sup>2</sup>/g,膨胀指数为17.1 mL/2g,阳离子交换量见表1.矿渣的化学组成见表2,主要成分为(质量分数)SiO<sub>2</sub>(58.1%)和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(29.9%),颗粒比重为2.22,包含77.3%粒径小于0.074 mm的颗粒、22.7%粒径大于0.074 mm的颗粒.

表1 膨润土的阳离子交换量

Tab.1 Cation exchange capacity of bentonite

阳离子交换量 /(cmol·kg <sup>-1</sup> )	可交换阳离子量/(cmol·kg <sup>-1</sup> )				可交换阳 离子总量 /(cmol·kg <sup>-1</sup> )
	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>+</sup>	Mg <sup>+</sup>	
71.37	0.71	40.06	15.81	4.41	60.99

表 2 矿渣的化学组成

Tab.2 Chemical composition of slag

化学成分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	CaO
质量分数/%	58.1	29.9	4.3	3.2	2.8	1.5

本试验的泥浆由 5%质量的膨润土与 95%质量的去离子水制成,比重为 1.02,苏式漏斗粘度为 19 s,含沙量为 0.5%,制备了 3 组复合胶凝材料含量的矿渣-水泥-膨润土,SC 分别为 15%、20%和 25%,对应的含水量分别为 475.0%、380.0%和 316.7%。每组复合胶凝材料含量的矿渣-水泥-膨润土中,矿渣对水泥的质量替代率  $S_s$  分别为 0%、40%、60%、70%和 80%。上述组成共 15 种配比,详见表 3。

表 3 矿渣-水泥-膨润土材料配比

Tab.3 Mix ratio of slag-cement-bentonite material

复合胶凝材料质量分数 $S_c$ /%	矿渣替代率 $S_s$ /%
15	0
	40
	60
	70
	80
20	0
	40
	60
	70
	80
25	0
	40
	60
	70
	80

矿渣-水泥-膨润土材料中,水泥和矿渣的混合物作为复合胶凝材料,其水化时,水泥首先与水反应生成水化硅酸钙、水化铝酸钙、水化硅铝酸钙和氢氧化钙。其中氢氧化钙作为矿渣的碱性激发剂,与矿渣中的活性氧化硅、氧化铝反应生成水化硅酸钙、水化铝酸钙<sup>[16]</sup>。前期主要由水泥水化提供材料强度,后期矿渣活性被激发参与水化反应,提高矿渣-水泥-膨润土的强度<sup>[17]</sup>。

矿渣-水泥-膨润土试样的制备方法:采用自动搅拌器将膨润土与去离子水搅拌 10 min 制成泥浆,泥浆水化 24 h 后按所定的比例加入复合胶凝材料并采用自动搅拌器搅拌 10 min,将上述搅拌后的混合物装入试样模具。为避免试样内形成大空隙,在装入材料过程中轻微震动模具以排出气泡。模具为 PVC 材质,内直径为 70 mm,高度为 140 mm(符合 ASTM/D 2166—06<sup>[18]</sup>),内壁涂有凡士林,顶部、底部用有机玻璃盖密封。将密封好的试样放入一般水槽中进行养护,水槽放置在室温为(20±3)℃的养护室中。

## 2 试验方法

采用弯曲元测试按相应配比制备的矿渣-水泥-膨润土不同龄期的剪切波速  $V_s$ 。试验装置原理示意图见图 1,采用的弯曲元件型号为 T215-A4-303YB、T215-A4-303XB (Piezo Systems, Inc),弯曲元凸出长度为 10 mm。试验时,弯曲元凸出部分插入试样两端,分别作为激发端和接收端。当发射端的弯曲元在信号发生器和功率放大器产生的激发波产生弯曲运动时,周围的土体被迫水平向运动,这种运动以剪切波的形式通过土体传播,到达接收端时接收端的弯曲元由于周围土体运动而产生弯曲变形,压电材料将动能转变为电能,电信号被电荷放大器接收并放大,激发和接收这两种信号都用数字示波器记录<sup>[19]</sup>。

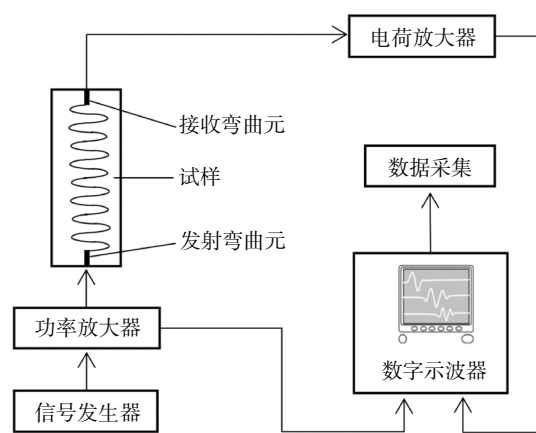


图 1 弯曲元测试流程图

Fig.1 Flow chart of bender element test

剪切波在试样中的波速  $V_s$  可用式(1)计算:

$$V_s = L/t \tag{1}$$

式中: $L$  为剪切波传播行程,等于试样高度减去两端

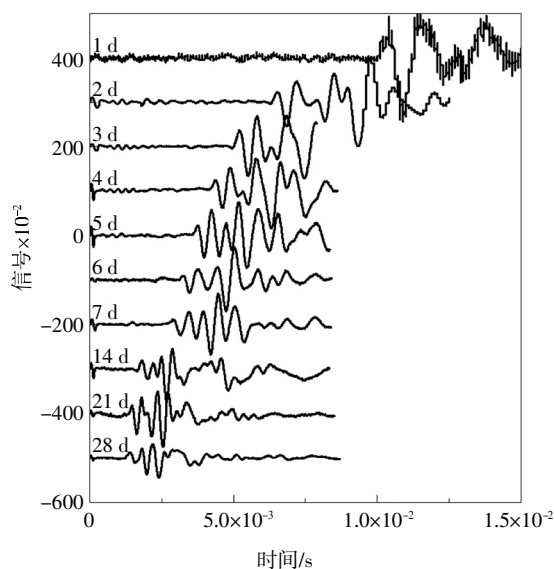
弯曲元插入土样深度; $t$ 为剪切波在土体中的传播时间,即激发和接收信号的时间差,由输出信号的第一个到达波确定<sup>[18,20]</sup>.

矿渣-水泥-膨润土试样制成并养护24 h后,进行无围压条件下的剪切波速测试,龄期1 d至28 d间每天测试1次;龄期28 d至90 d间每2~3天测试1次;龄期90 d后每15~20 d测试1次.由于激发波的频率会显著影响接收波的波形,因此试验前在试样的不同水化时间进行多次尝试,以产生受近场效应影响小的接收波.根据测试发现,高频激发波可降低近场效应的影响,产生清晰的接收波.本试验在龄期7 d前采用约5 kHz激发波,随着试样水化逐渐提高频率,龄期90 d后增至10 kHz.

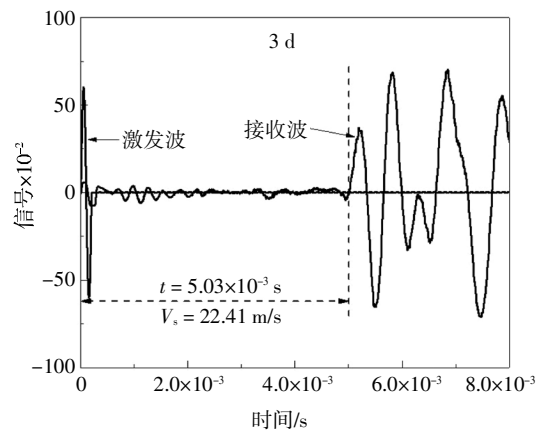
### 3 试验结果及分析

#### 3.1 剪切波速

对于制备的15种配比的矿渣-水泥-膨润土试样进行为期1 a的剪切波速增长连续测试.图2(a)为前28 d复合胶凝材料为20%、矿渣替代率为40%的部分剪切波接收记录.试样高度为132.7 mm.以龄期为3 d的试样(见图2(b))为例,激发到接收端接收到第一个到达波的时间为 $t = 5.03 \times 10^{-3}$  s.因此可计算该试样此时剪切波速 $V_s = (132.7 - 20) \text{ mm} / 5.03 \times 10^{-3} \text{ s} = 22.41 \text{ m/s}$ .



(a)  $S_c = 20\%$ ,  $S_s = 40\%$ 的试样前28天测试剪切波接收记录



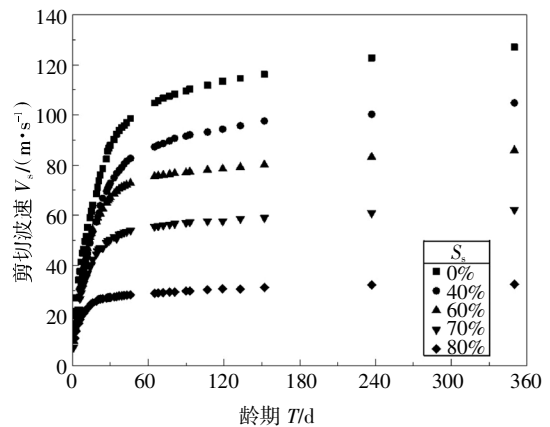
(b) 剪切波速计算示例

图2 剪切波测试及剪切波速计算示例

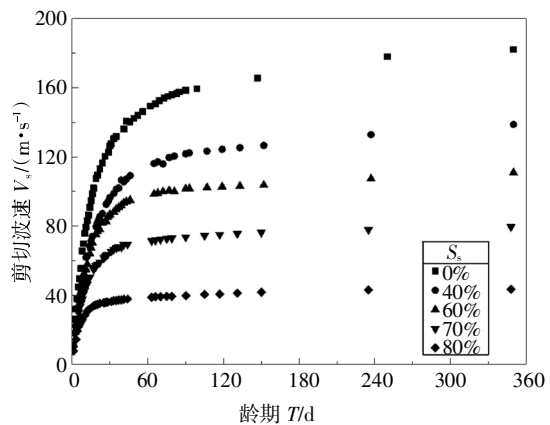
Fig.2 Example of shear wave test and shear wave velocity calculation

测试了3种复合胶凝材料含量、5种矿渣替代率,共15种配比的矿渣-水泥-膨润土试样的剪切波速随龄期的变化,如图3所示.

剪切波速均随龄期的增长而增长,且增长速度随龄期的增长而减缓.例如, $S_c$ 为20%、 $S_s$ 为40%的材料7 d、14 d、60 d、90 d、120 d、350 d的剪切波速分别是28 d剪切波速的0.44、0.73、1.20、1.30、1.33、



(a)  $S_c = 15\%$



(b)  $S_c = 20\%$

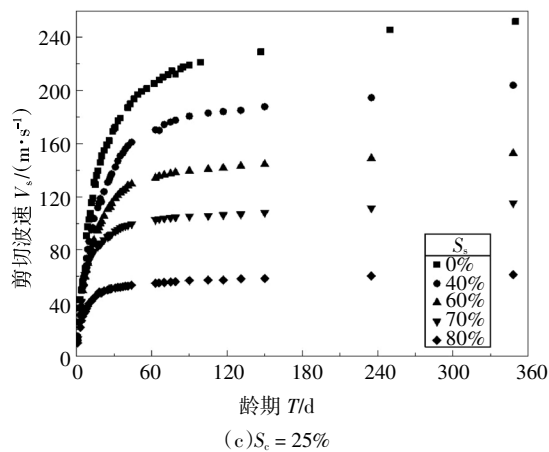


图3 不同复合胶凝材料含量剪切波速随龄期变化测试结果

Fig.3 The test results of developments of shear wave velocity with age of different cementitious material content

1.48倍.各种配比的试样在前28d剪切波速增长较快,特别是前14d增长迅速,28d后剪切波速增长逐渐变缓.剪切波速均随龄期的变化与复合胶凝材料水化进程有关.矿渣-水泥-膨润土固结体的骨架主要是由复合胶凝材料水化产物构成,膨润土形成的凝胶和胶凝材料生成的水化硅酸钙凝胶(CSH凝胶)连接着膨润土颗粒和复合胶凝材料颗粒,形成一定的强度<sup>[16]</sup>.随着复合胶凝材料水化,颗粒间的粘结增强,材料强度增加,这体现了材料的结构性.

同一龄期,对于相同矿渣替代率 $S_s$ 的材料,复合胶凝材料含量 $S_c$ 越大,剪切波速越大.例如, $S_c$ 分别为15%、20%、25%的 $S_s$ 为40%的材料90d左右的剪切波速可分别达到90 m/s、120 m/s和180 m/s,其余矿渣替代率材料可做类似对比.对于相同复合胶凝材料含量 $S_c$ 的材料,矿渣替代率 $S_s$ 越大,剪切波速越小,剪切波速增长速度也越来越小.例如, $S_c$ 为15%的材料, $S_s$ 为0%、40%、60%、70%、80%对应的90d左右的剪切波速分别达到110、90、75、55和30 m/s.

相同矿渣替代率、复合胶凝材料含量越大或者相同复合胶凝材料含量、矿渣替代率越大所导致的剪切波速不同,均是由于复合胶凝材料水化程度不同造成的.矿渣-水泥-膨润土材料中的矿渣是具有潜在胶凝性的材料,水泥水化时产生的碱性环境可较好地激发矿渣的活性<sup>[17]</sup>.随着水泥-矿渣复合胶凝材料体系中矿渣替代率的增大或复合胶凝材料含量的减小,即体系中水泥质量分数减小,水泥水化产物含量减少,同时水泥水化产生的碱激发效果降低,矿渣反应程度随之降低<sup>[17]</sup>,水泥与矿渣这二者的

原因导致材料强度降低、剪切波速减小.

除了上述数值大小差异,对于相同矿渣替代率的材料,虽然复合胶凝材料含量不同,但是剪切波速随龄期的变化趋势大致相同.由此可见,剪切波速随龄期的变化趋势与矿渣替代率相关.

目前国内工程中常用的是水泥土,矿渣-水泥-膨润土的反应过程类似于水泥土,但两者目的不同,水泥土主要是通过水泥“固化”软弱土来增强地基的承载力和减小沉降,而矿渣-水泥-膨润土主要是用于防渗<sup>[16]</sup>.为了比较本文矿渣-水泥-膨润土材料与水泥土的差别,图4总结了文献中不同水泥含量、标号、不同含水量水泥土材料的剪切波速随龄期的变化,文献材料配比详细信息见表4.由图4可见,本文测试所得的矿渣-水泥-膨润土的剪切波速显著小于水泥土.由图4可见,相同龄期的材料,含水量越高,剪切波速越小,即材料的强度越小.而矿渣-水泥-膨润土的含水率远高于水泥土正是这两种材料最明显的差别.矿渣-水泥-膨润土的含水率一般为122%~590%<sup>[2]</sup>,而水泥土的含水率一般为48%~85%(按规范<sup>[21]</sup>算得).

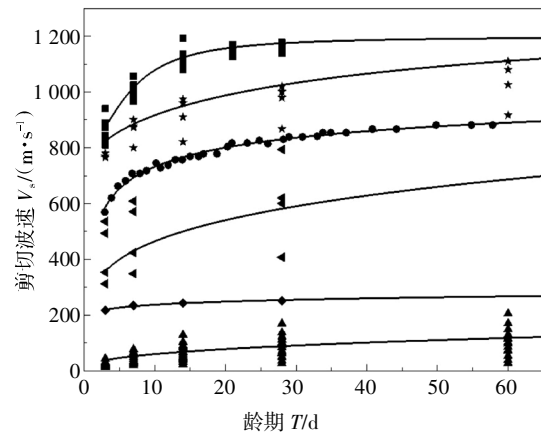


图4 文献中不同配比材料剪切波速随龄期变化的对比  
Fig.4 Comparison of developments of shear wave velocity with curing time in articles

表4 图4中文献材料配比详细信息

Tab.4 Material mix proportions of articles in Fig.4

图4 标记	文献来源	水泥掺比/%	含水率/%	水泥标号
■	SILVA 等 <sup>[22]</sup>	水泥:砂=7	9	
★	梁爱华等 <sup>[23]</sup>	水泥:土=8	48~85	325
●	FLORES 等 <sup>[9]</sup>	水泥:土=20	230	525
◀	KANG 等 <sup>[24]</sup>	水泥:土=11~25	161.4, 215.2	
◆	周健等 <sup>[7]</sup>	水泥:土=7	48~85	525, 325
▲	本文	水泥:矿渣=25~∞	317~475	425

在矿渣-水泥-膨润土和水泥土材料中,复合胶凝材料含量、尤其是复合胶凝材料中的水泥含量是决定强度的最主要因素,因为矿渣需要在一定水泥掺比范围内才能被激发活性.随着水泥含量的增加,材料强度也就越高,表现出剪切波速越大.而矿渣-水泥-膨润土材料中水的含量要远远高于水泥土,同时起控制强度主要作用的水泥含量又较少,因此强度较低,表现出矿渣-水泥-膨润土材料剪切波速明显低于水泥土.

### 3.2 小应变剪切模量

由试样的剪切波速  $V_s$  可计算得小应变剪切模量  $G_0^{[20]}$ :

$$G_0 = \rho V_s^2 \quad (2)$$

式中: $\rho$  为试样的密度(由于试样密度随龄期变化较小,对各配比试样龄期 28 d 的密度均进行了试验测定); $V_s$  为试样的剪切波速.小应变剪切模量  $G_0$  由应力历史、应力水平、孔隙比、土体结构和土骨架的刚度等因素决定,是一个能综合反映土体性质的非常有价值的参数<sup>[9]</sup>.

剪切模量与剪切波速相关性很强,二者的变化趋势也非常相似,如 3.1 节所述,相同矿渣替代率的材料剪切波速随龄期的变化趋势大致相同,不受复合胶凝材料含量影响,那么剪切模量也同样遵循此结果.矿渣-水泥-膨润土材料的剪切模量随龄期的增加而增加,28 d 龄期后增长减缓;并且添加水泥的土样通常选取 28 d 的强度作为指标,因此选取龄期为 28 d 的剪切模量  $G_{0(28)}$  作为归一化参数,对这 3 种复合胶凝材料含量、5 种矿渣替代率共 15 种配比的材料的剪切模量进行归一化 ( $G_0/G_{0(28)}$ ),即对剪切模量的变化情况数值化,见图 5.  $G_{0(28)}$  的结果如图 5 所示.

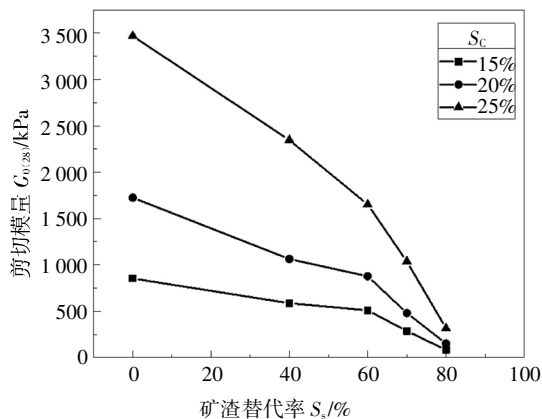


图 5 矿渣-水泥-膨润土试样 28 d 剪切模量  $G_{0(28)}$

Fig.5 Shear modulus of slag-cement-bentonite samples at 28 days

图 6 中的 5 条曲线是分别对矿渣替代率为 0%、40%、60%、70%、80% 的材料  $G_0/G_{0(28)}$  随龄期的发展趋势(材料的硬化发展趋势)进行拟合的曲线.由图 6 可见,对于相同矿渣替代率的矿渣-水泥-膨润土材料,虽然复合胶凝材料含量不同,但是材料的硬化发展趋势相同.由此推测,矿渣-水泥-膨润土材料的硬化发展趋势与复合胶凝材料的矿渣替代率紧密相关.基于测试结果本文提出了预测公式(3).

$$G_0/G_{0(28)} = aT/(b+T) \quad (3)$$

式中: $T$  为龄期,d; $a$ 、 $b$  为拟合参数,不同矿渣替代率的材料的拟合参数见表 5.

表 5 剪切模量归一化增长趋势拟合参数

Tab.5 Fitting parameters of the normalized shear modulus ( $G_0/G_{0(28)}$ ) development trend

矿渣替代率 $S_s$ /%	$a$	$b$
0	2.55	45.35
40	2.47	43.85
60	1.82	26.33
70	1.66	21.36
80	1.46	14.05

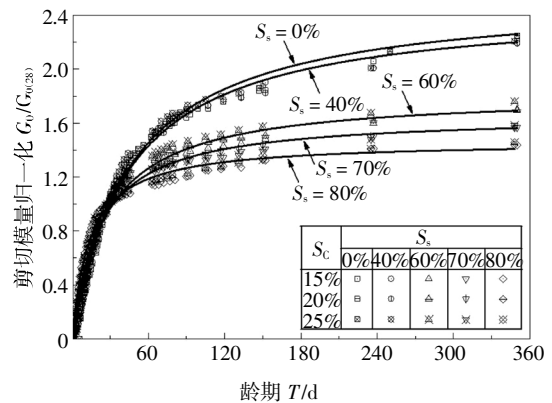


图 6 剪切模量归一化 ( $G_0/G_{0(28)}$ ) 随龄期的增长趋势拟合

Fig.6 The fit of the trend of the normalized shear modulus ( $G_0/G_{0(28)}$ ) development with age

因此,若得知某一矿渣替代率的其中一种复合胶凝材料含量的矿渣-水泥-膨润土的归一公式,可推测该矿渣替代率条件下其他复合胶凝材料含量的矿渣-水泥-膨润土的剪切模量,省去对于不同复合胶凝材料含量的矿渣-水泥-膨润土的试验.例如,已知  $S_s = 60%$ 、 $S_c = 20%$  的材料的归一公式  $G_0/$

$G_{0(28)} = 1.82T/(26.33 + T)$ ,那么  $S_s = 60\%$ 时,  $S_c = 15\%$  的材料的归一化公式与之相同;进一步,若得知  $S_s = 60\%$ 、 $S_c = 15\%$  的材料的 28 d 剪切模量  $G_{0(28)} = 510.11$  kPa,那么该配比材料剪切模量随龄期变化的公式为  $G_0 = 510.11 \times [1.82T/(26.33 + T)]$ ,可算得不同龄期的剪切模量。

由图 6 可见,对于相同复合胶凝材料含量的材料,矿渣替代率越大,  $G_0/G_{0(28)}$  早期增长越快、后期增长越慢。相同复合胶凝材料含量即含水量相同,矿渣替代率越大即水泥含量越小,相对来说前期水泥与水接触反应越充分、反应所需时间越短,水泥早期水化程度越高、后期增长空间变小,所以  $G_0/G_{0(28)}$  早期增长快、后期增长慢。

同时,矿渣替代率越大,  $G_0/G_{0(28)}$  趋于平缓的时间越靠前,趋于平缓的拐点值越小。  $S_s$  分别为 0%、40%、60%、70%、80% 对应的  $G_0/G_{0(28)}$  趋于平缓的时间分别为 80 d、70 d、50 d、40 d、25 d。  $S_s$  为 0% 和 40% 的材料剪切模量增长趋势比较接近。考虑原因为,矿渣替代率为 40% 时水泥水化能提供较充分的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (碱性) 供矿渣反应,因此后期增长速率接近纯水泥。而随着水泥-矿渣复合胶凝材料体系中矿渣替代率继续增大、水泥质量分数减小,碱性降低,矿渣反应程度随之降低。本文材料中矿渣替代率大于 40% 时,水泥含量较小、水泥水化的产物不足以提供充分的碱性环境供矿渣水化,因此,水泥水化产物较少且矿渣反应不如矿渣替代率较小时充分,这两个因素导致  $S_s$  分别 60%、70%、80% 的增长能力明显小于  $S_s$  为 0%、40% 的材料。

## 4 结论

本文针对水泥、矿渣的不同配比,基于龄期连续测试材料的剪切波速变化,采用弯曲元测试剪切波速的方法,研究了复合胶凝材料含量、矿渣替代率、水化时间对矿渣-水泥-膨润土材料的力学性能方面的影响。得到以下结论:

1) 矿渣-水泥-膨润土随着胶凝材料水化,颗粒间的粘结增强,剪切波速随龄期增长而增大,但 28 d 后剪切波速的增长速率随龄期增长而减小。

2) 矿渣-水泥-膨润土的剪切波速随矿渣替代率的减小、复合胶凝材料含量的增大而增大。

3) 本文试验中,矿渣-水泥-膨润土 28 d 的剪切波速的范围为 27~170 m/s,明显低于同龄期水泥土的剪切波速,这主要与矿渣-水泥-膨润土含水量显著高于水泥土有关。

4) 发现矿渣-水泥-膨润土的硬化发展趋势与复合胶凝材料的矿渣替代率紧密相关,与复合胶凝材料含量无关,基于试验结果提出了矿渣-水泥-膨润土小应变剪切模量随龄期的预测公式。

## 参考文献

- [1] 陈云敏. 环境土工基本理论与工程应用 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 1-46.  
CHEN Y M. A fundamental theory of environmental geotechnics and its application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(1): 1-46. (In Chinese)
- [2] JOSHI K D. Long-term engineering performance and in-situ assessment of cement-bentonite cut-off walls [D]. London: St. Edmund's College, University of Cambridge, 2009: 11-22.
- [3] JEFFERIS S. Cement-bentonite slurry systems [C]//International Conference on Grouting and Deep Mixing. Reston, Virginia: ASCE, 2012: 1-24.
- [4] OPDYKE S M, EVANS J C. Slag-cement-bentonite slurry walls [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(6): 673-681.
- [5] 彭小芹, 刘朝, 李三, 等. 碱激发钢渣-矿渣胶凝材料凝结硬化性能研究 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(6): 47-52.  
PENG X Q, LIU C, LI S, et al. Research on the setting and hardening performance of Alkali activated steel slag-slag based cementitious materials [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(6): 47-52. (In Chinese)
- [6] CJJ 176—2012 生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 104-105.  
CJJ 176—2012 Technical code for geotechnical engineering of municipal solid waste sanitary landfill [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012: 104-105. (In Chinese)
- [7] 周健, 赵飞阳, 白彦峰, 等. 弹性波速与水泥土强度关系的试验研究 [J]. 岩土工程界, 2009, 12(10): 71-73.  
ZHOU J, ZHAO F Y, BAI Y F, et al. Experimental study on the relationship between elastic wave velocity and cemented clay strength [J]. Geotechnical Engineering World, 2009, 12(10): 71-73. (In Chinese)
- [8] DYVIK R, MADSHUS C. Lab measurements of  $G_{max}$  using bender elements [C]//Advances in the Art of Testing Soils under Cyclic Conditions. New York: ASCE, 1985: 186-196.

- [9] FLORES R D, DI EMIDIO G, VAN IMPE W F. Small-strain shear modulus and strength increase of cement-treated clay [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2010, 33(1):62—71.
- [10] 汪云龙, 曹振中, 袁晓铭, 等. 基于弯曲元技术的无黏性土剪切波速与相对密度联合测试方法 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2016; 35(S1): 3419—3423.  
WANG Y L, CAO Z Z, YUAN X M, *et al.* A testing method for shear-wave velocity and relative density of cohesionless soil using bending-element technique [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016: 35 (S1): 3419—3423. (In Chinese)
- [11] 吴宏伟, 李青, 刘国彬. 利用弯曲元测量上海原状软黏土各向异性剪切模量的试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(1): 150—156.  
WU H W, LI Q, LIU G B. Measurements of small-strain inherent stiffness anisotropy of intact Shanghai soft clay using bender elements [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(1): 150—156. (In Chinese)
- [12] 曹振中, 袁晓铭. 砂砾土液化的剪切波速判别方法 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(5): 943—951.  
CAO Z Z, YUAN X M. Shear wave velocity-based approach for evaluating gravel soils liquefaction [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(5): 943—951. (In Chinese)
- [13] 梁甜. 含粘粒砂土抗液化性能的剪切波速表征研究 [D]. 杭州: 浙江大学建筑工程学院, 2013: 8—10.  
LIANG T. Characterizing liquefaction resistance of clayey sand by shear wave velocity [D]. Hangzhou: College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, 2013: 8—10. (In Chinese)
- [14] 黄博, 李玲, 梁甜, 等. 考虑  $G_{max}$  附加衰减的场地地震响应离心机试验数值模拟 [J]. *岩土力学*, 2014, 35(7): 2057—2063.  
HUANG B, LI L, LIANG T, *et al.* Numerical simulation for site seismic response of centrifuge model test considering effect of additional attenuation of  $G_{max}$  [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(7): 2057—2063. (In Chinese)
- [15] 周健, 李晓博, 贾敏才, 等. 利用弯曲元测试水泥土强度方法的研究 [J]. *岩土工程界*, 2007, 10(12): 78—80.  
ZHOU J, LI X B, JIA M C, *et al.* Study on the method of testing bentonite strength by bending element [J]. *Geotechnical Engineering World*, 2007, 10(12): 78—80. (In Chinese)
- [16] 黄亮. 矿渣-水泥-膨润土泥浆垂直防渗墙室内配合比试验研究 [D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2008: 7—19.  
HUANG L. Laboratory researches on mixing proportion of cement-bentonite slurry cutoff wall [D]. Shanghai: College of Civil Engineering, Tongji University, 2008: 7—19. (In Chinese)
- [17] 王露, 宋军伟, 刘数华. 大掺量矿渣石膏水泥基复合材料的水化特性 [J]. *硅酸盐通报*, 2017, 37(7): 2197—2202.  
WANG L, SONG J W, LIU S H. Hydration characteristics of cement-based material containing high-volume slag and gypsum [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2017, 37(7): 2197—2202. (In Chinese)
- [18] ASTM/D 2166—06 Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil [S]. West Conshohocken: ASTM, 2006: 2.
- [19] 姬美秀, 陈云敏, 黄博. 弯曲元试验高精度确定土样剪切波速的方法 [J]. *岩土工程学报*, 2003, 25(6): 732—736.  
JI M X, CHEN Y M, HUANG B. Method for precisely determining shear wave velocity of soil from bender element tests [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2003, 25(6): 732—736. (In Chinese)
- [20] LEE C, LEE J S, LEE W, *et al.* Experiment setup for shear wave and electrical resistance measurements in an oedometer [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2008, 31(2): 149—156.
- [21] JG/T 233—2011 水泥土配合比设计规程 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 6.  
JG/T 233—2011 Specification for mix proportion design of cement soil [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011: 6. (In Chinese)
- [22] SILVA J, AZENHA M, CORREIA A G, *et al.* Continuous stiffness assessment of cement-stabilised soils from early age [J]. *Geotechnique*, 2013, 63(16): 1419—1432.
- [23] 梁爱华, 王建华, 赵明龙. 水泥改良土剪切波速与压缩强度关系的试验研究 [J]. *铁道建筑技术*, 2005(1): 41—44.  
LIANG A H, WANG J H, ZHAO M L. Experimental study on the relationship between shear wave velocity and compressive strength of the soil improved by cement [J]. *Railway Construction Technology*, 2005(1): 41—44. (In Chinese)
- [24] KANG G, TSUCHIDA T, KIM Y. Strength and stiffness of cement-treated marine dredged clay at various curing stages [J]. *Construction and Building Materials*, 2017(132): 71—84.