

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220930001

# 考虑时间效应的钢渣填料动力特性与微观结构研究\*

蒋飞, 王丽艳, 刘涛, 余曜宏, 王炳辉, 农珍珍

(江苏科技大学土木工程与建筑学院, 江苏 镇江 212003)

**摘要:** 钢渣是冶金行业的第二大废弃物, 充分利用废弃钢渣代替部分砂石料作为新型的土工填料, 符合“绿色经济”与“可持续发展”战略。因钢渣材料有别于砂石料, 化学成分复杂, 而力学特征具有时效特性, 采用共振柱试验研究考虑水化期影响的钢渣动力特性, 分析动剪切模量和阻尼比等动力特性变化规律; 基于Hardin-Drnevich双曲线模型描述考虑时间效应的钢渣动力特性, 采用Boltzman函数描述最大动剪切模量随水化期变化的关系, 给出最大阻尼比范围; 并与传统砂土的动力特性对比, 得出水化前钢渣动剪切模量略高于传统细砂, 水化90 d后可达到标准砂的最大动剪切模量, 工程中可以用钢渣作为一种填料代替砂土。最后, 通过微观电子显微镜方法分析不同水化期下的钢渣微观结构, 发现水化产物Aft相较于其他水化产物生成时间较晚, Aft和C-S-H所组成的胶凝结构是影响钢渣动力特性时效特征的主要因素。

**关键词:** 钢渣; 水化期; 共振柱试验; 动剪切模量; 阻尼比; 微观结构

**中图分类号:** TU411 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)04-0940-12

## Study on Dynamic Characteristics and Microstructure of Steel Slag Filler Considering Time Effects

JIANG Fei, WANG Liyan, LIU Tao, YU Yaohong, WANG Binghui, NONG Zhenzhen  
(School of Architecture and Civil Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

**Abstract:** Steel slag is the second largest waste product in metallurgical industry. Making full use of waste steel slag to partially replace sand and gravel as a new type of geotechnical filler aligns with the strategies of "green economy" and "sustainable development". Steel slag differs from sand and gravel due to its complex chemical composition and aging mechanical properties. Resonant column tests were used to study the dynamic characteristics of steel slag considering the influence of hydration period. It analyzed the variation patterns of dynamic shear modulus and damping ratio. The dynamic characteristics of steel slag considering time effects were described by using the Hardin-Drnevich hyperbolic model, and the Boltzman function was employed to describe the relationship between the maximum dynamic shear modulus and the hydration period, providing the range of maximum damping ratio. Com-

\* 收稿日期:2022-09-30;修回日期:2023-02-13

基金项目:江苏省自然科学基金面上项目(BK20201454)、国家自然科学基金面上项目(52278355)、镇江市重点研发计划社会发展面上项目(SH2021011)、国家自然科学基金面上项目(51978317)资助

作者简介:蒋飞(1998—),男,硕士研究生。主要从事土动力学与岩土地震工程方面的研究。E-mail:1294463528@qq.com

通信作者:王丽艳(1980—),女,教授,博士。主要从事土动力学与地震工程方面的研究。E-mail:wly\_yzu@163.com

paring these dynamic characteristics with traditional sand, the dynamic shear modulus of steel slag before hydration was slightly higher than that of traditional fine sand, and the maximum dynamic shear modulus of standard sand could be reached after 90 days of hydration. This indicates that steel slag can be used as a filler to replace sand in engineering applications. Finally, the microstructure of steel slag at different hydration periods was analyzed by scanning electron microscope, revealing that the formation of hydration product Aft occurred in later stages compared to other hydration products. The gel structure composed of Aft and C-S-H was the main factor affecting the aging characteristics of steel slag dynamic properties.

**Keywords:** steel slag; hydration period; resonant column test; dynamic shear modulus; damping ratio; microstructure

## 0 引言

砂石料是国内消费量最大的矿产资源,在环保政策收紧、自然砂石资源干涸的状态下,面对每年200亿吨砂石骨料的需求量,寻求新型的土工填料代替部分砂石料的作用是十分必要的。废弃钢渣(steel slag)是冶金行业的第二大废弃物,且中国钢渣综合利用率很低,多年来维持在10%左右<sup>[1]</sup>,若得不到有效利用就会造成大量堆弃,浪费资源<sup>[2]</sup>。

实践研究表明,钢渣可替代砂石用在地基中<sup>[3]</sup>,作为道路垫层、基层材料,其耐磨和抗压性优于常规石料<sup>[4]</sup>。与传统砂石料不同,钢渣化学成分复杂,钢渣中80%以上是氧化钙、氧化铁、氧化镁、氧化硅和氧化铝等矿物质,在外部水环境下将发生一系列水化反应,与水泥熟料类似<sup>[5]</sup>,同时钢渣的水化活性和胶凝结构会随着时间而发生变化<sup>[6]</sup>。钢渣作为土工回填料,常年处于潮湿状态,或者水位线以下,这使得对钢渣的水化反应不断进行。目前,国内外已经对钢渣的材料特性进行了研究<sup>[7-10]</sup>,但还未有研究钢渣动力特性的时效特征。

常规土的动力特性研究中,动剪切模量比与阻尼比是土力学中土动力本构模型的重要参数<sup>[11]</sup>,也是重大工程场地地震效应分析不可缺少的基础性资料<sup>[12]</sup>,是土层地震反应分析结果是否合理可信的前提条件。常规土类的动力特性研究不仅有动力参数的宏观测量,还有对土的微观结构对动力特性影响的相关研究<sup>[13-15]</sup>。钢渣作为路基填料时承受车辆动荷载的反复作用,作为深基坑墙体回填料,回填料的动力特性对于地下墙体结构的抗震性能影响很大。因此,本文将通过共振柱试验的方法研究钢渣动力特性的时效特征,并结合微观电镜扫描方

法进一步研究钢渣微观结构的时效变化特性。

## 1 试验设备与试验材料

### 1.1 试验设备

试验使用江苏永昌科教仪器制造有限公司生产的GZZ-50型共振柱仪,该设备通过扭剪振动的方法,测量计算试样的动剪切应变以及阻尼比的值,在扭剪试验中,磁铁与线圈产生的力是水平的,通过磁场产生剪切运动。该共振柱是一个一端固定另一端自由的杆件体系,通过剪切运动产生的振动激振,通过调整电压频率和幅值,可以找到试样的共振频率。通过安置在压盘上的加速度扫描仪可以检测到试样的振动频率,再切断动力,测记出振动衰减曲线。幅值的峰值点对应的激振频率即为试样的共振频率,从而由共振频率换算为剪切波速和剪切模量。同时,采用COXEM(库塞姆)公司生产的EM-30PLUS超高分辨率台式扫描电镜,EM-30PLUS超高分辨率台式扫描电镜是一台将分辨率优化到5nm水平的扫描电镜,配置了二次电子检测器以及背散射电子检测器,具有完备的表面形貌及元素衬度的观测分析功能。

### 1.2 试验材料

采用的废弃钢渣取自江苏永钢集团产生的陈化8个月以上的废弃钢渣,如图1所示。在试验前期制样时发现粒径较大的钢渣颗粒较多的时候,试样极不容易成形,导致试样无法成功脱模和试验,根据后续分析发现是由于粒径偏大的钢渣水化反应反而慢于粒径小的钢渣颗粒。因此,本试验采用的粒径小于2mm的钢渣,级配曲线如图2所示。

选用钢渣原料的堆积密度大约是 $2.05\text{ g/cm}^3$ ,



图1 钢渣  
Fig.1 Steel slag

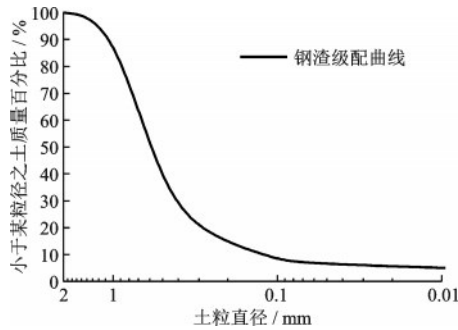


图2 钢渣级配曲线  
Fig.2 Steel slag grading curve

$d_{10}=0.12$  mm、 $d_{30}=0.41$  mm、 $d_{50}=0.58$  mm、 $d_{60}=0.67$  mm,不均匀系数  $C_u$ 和曲率系数  $C_c$ 分别为 5.451 和 2.062。平均粒径  $d_{50}$ 大于 0.5 mm,根据传统粗砂的工程分类标准,该钢渣可定义为粗钢渣。根据土的级配分类标准,试验钢渣级配为良好。钢渣 CBR 强度为 51.13%<sup>[16]</sup>,满足《公路路基设计规范》<sup>[17]</sup>中对填料 CBR 强度的要求。试验钢渣的化学组成成分见表 1。钢渣在不同时期所含的成分不完全相同,但主要含有的矿物成分是硅酸二钙  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ,硅酸三钙  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ,硅酸四钙  $4\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ,RO 相(Mg,Fe 氧化物总称),橄榄石  $\text{CaO}\cdot\text{RO}\cdot\text{SiO}_2$ ,蔷薇辉石( $\text{CaO}\cdot\text{RO}\cdot 2\text{SiO}_2$ ),各种铁铝酸矿物盐,游离石灰 f-CaO 等。

表 1 钢渣的化学组成

Table 1 Chemical composition of steel slag

成分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	f-CaO
含量/%	11.28	11.38	48.00	4.86	5.24	3.00
成分	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	碱含量	SO <sub>3</sub>	烧失量	
含量/%	0.06	0.08	0.11	0.98	7.80	

## 2 试验工况

试验所用钢渣的最大干密度和最小干密度分别为 2.47 g/cm<sup>3</sup>和 1.67 g/cm<sup>3</sup>。研究中取相对密实

度  $D_r$ 为 0.5,制样过程中,控制试样总质量为 450 g,装样密度为 2.29 g/cm<sup>3</sup>。本文主要研究钢渣的动强度特性在时间效应下的变化,将制作好的钢渣试样放在水中水化,水化期分别为 0、7、15、30、45、60、75、90 d。养护过后,共振柱试验过程前,试样含水率控制为 15%。因钢渣有时用于深基坑回填,本文考虑钢渣在较大回填深度时的力学性能,选用 100、200、300 kPa 三种围压开展研究。具体试验工况见表 2,其中编号方式为:钢渣(GZ)-相对密实度-水化期-围压。

表 2 试验方案

Table 2 Experimental schemes

试样编号	水化期/d	围压/kPa
GZ-0.5-0-100	0	100
GZ-0.5-0-200	0	200
GZ-0.5-0-300	0	300
GZ-0.5-7-100	7	100
GZ-0.5-7-200	7	200
GZ-0.5-7-300	7	300
GZ-0.5-15-100	15	100
GZ-0.5-15-200	15	200
GZ-0.5-15-300	15	300
GZ-0.5-30-100	30	100
GZ-0.5-30-200	30	200
GZ-0.5-30-300	30	300
GZ-0.5-45-100	45	100
GZ-0.5-45-200	45	200
GZ-0.5-45-300	45	300
GZ-0.5-60-100	60	100
GZ-0.5-60-200	60	200
GZ-0.5-60-300	60	300
GZ-0.5-75-100	75	100
GZ-0.5-75-200	75	200
GZ-0.5-75-300	75	300
GZ-0.5-90-100	90	100
GZ-0.5-90-200	90	200
GZ-0.5-90-300	90	300

## 3 结果与分析

### 3.1 动剪切模量分析

动剪切模量的分析分为相同和不同水化期下动剪切模量分析。8个水化期的钢渣试样动剪切模

量  $G$  与剪应变  $\gamma$  之间的关系如图 3 所示。

根据图 3 可以看出, 总体趋势下, 不同水化期的不同围压  $\sigma$  均符合动剪切模量  $G$  随着剪应变  $\gamma$  的增大而减小, 动剪切模量  $G$  随着围压  $\sigma$  的增大而增大。这是由于围压  $\sigma$  的增大, 使得钢渣试样更加密实, 颗粒与颗粒之间的咬合力越来越大, 使得结构的稳定性变大, 抗剪能力上升。相同水化期下, 不同围压的钢渣都满足: 当剪应变  $\gamma$  较小时, 动剪切模量  $G$  变化幅度较小, 当剪应变  $\gamma$  较大时, 动剪切模量  $G$  的变化速率变大。在剪应变  $\gamma$  较小时, 钢渣内变形较小, 钢渣应力应变关系表现为线性关系, 而当剪应变  $\gamma$  变大时, 钢渣应力应变关系则表现为非线性关系。

当水化期不同时, 相同围压  $\sigma$  下不同养护时间的钢渣的动剪切模量  $G$  和剪应变  $\gamma$  的变化趋势依然基本一致, 动剪切模量  $G$  随着剪应变  $\gamma$  的增大而减

小, 减小幅度随着剪应变  $\gamma$  的增大而增大, 在剪应变为  $10^{-5}$  至  $10^{-4}$  左右时变化明显; 当剪应变  $\gamma$  较小时, 动剪切模量  $G$  近似于线性变化, 当剪应变  $\gamma$  较大时, 动剪切模量  $G$  的变化速率变大, 不在近似于线性变化, 但在动剪切模量  $G$  为  $10^{-4}$  后, 又近似于线性变化。三个不同围压  $\sigma$  下的动剪切模量  $G$  在养护后变大, 其中前 30 d 的动剪切模量  $G$  变化不大, 有的点几乎没有发生变化, 而在 45 d 后发生明显变大的趋势, 在 60 至 75 d 变化很明显, 而在 75 d 水化期至 90 d 水化期时, 变化速度变缓。这间接说明钢渣试样在 30 d 水化期以前, 水化反应不剧烈, 这个和大多数学者研究<sup>[18-20]</sup>得出的结论是符合的, 而在 30 d 水化期之后, 钢渣试样水化反应逐渐加快, 胶凝物质逐渐增多, 从而引起的一系列颗粒特性的改变, 继而颗粒与颗粒之间连接方式改变, 继而孔隙空间结构的改变等等, 最后导致钢渣试样的动剪切模量  $G$  发生了改变。值得注意的是, 在相同围压下, 75 d 水化期至 90 d 水化期的变化速度明显小于前面养护期的变化, 试样水化环境一直未变化, 这说明钢渣试样水化环境在未经影响且与试验的条件相同时, 其动剪切模量并不是无限增加的, 这也映衬了其水化反应速率也不是一直增大的推测, 应具有先增大后减小的特点, 即水化反应和动剪切模量  $G$  变化速率应符合“慢-快-慢”的模式。

### 3.2 阻尼比变化规律

在土的动力特性研究中, 阻尼比反应了土内部阻力抵消动荷载作用, 而产生能量损耗的性质。在钢渣的动剪切特性研究中, 阻尼比是一个非常重要的性质, 本节在相同水化期和不同水化期下研究阻尼比的变化规律。在相同围压  $\sigma$  下, 不同时间阻尼比  $\lambda$  与剪应变  $\gamma$  的规律以及不同围压下剪应变与阻尼比的关系如下图 4 所示, 由图 4 可以看出: 相同水化期下, 不同围压的钢渣, 当剪应变  $\gamma$  较小时的时候, 阻尼比  $\lambda$  变化较慢, 当剪应变  $\gamma$  较大的时候, 阻尼比  $\lambda$  的变化较快, 其原因是在钢渣试样变形较小的时候, 其变化可以被近似的看成弹性变化, 应力波在钢渣颗粒中传播能量损耗较小, 故其阻尼比  $\lambda$  的值比较小且变化近似于线性变化, 而当变形逐渐增大的时候, 钢渣颗粒在应力波的影响下, 发生了更多的剪切变形, 其颗粒与颗粒之间的相对滑动更大, 其咬合方式也随之发生改变, 故应力波的传播更加困难, 能量消耗变多, 故阻尼比的数值较大且变快。

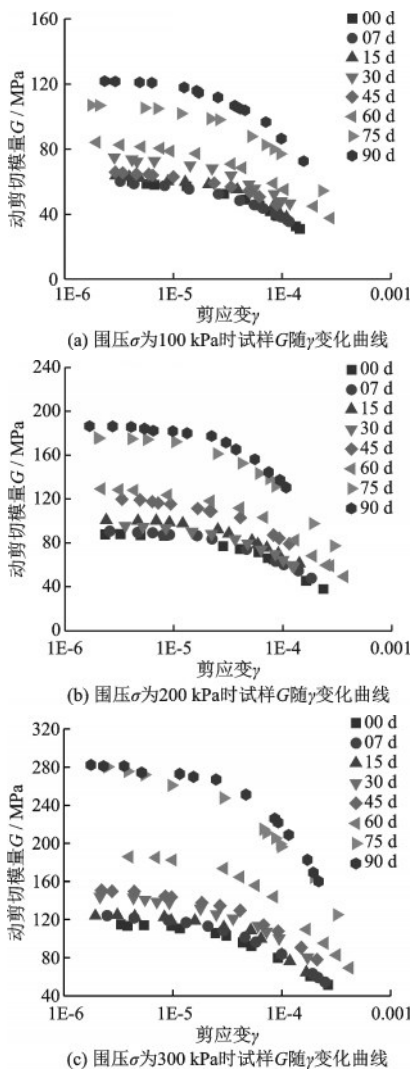


图 3 相同围压下动剪切模量  $G$  随剪应变  $\gamma$  变化曲线

Fig.3 Variation curves of dynamic shear modulus  $G$  with shear strain  $\gamma$  under same confining pressure

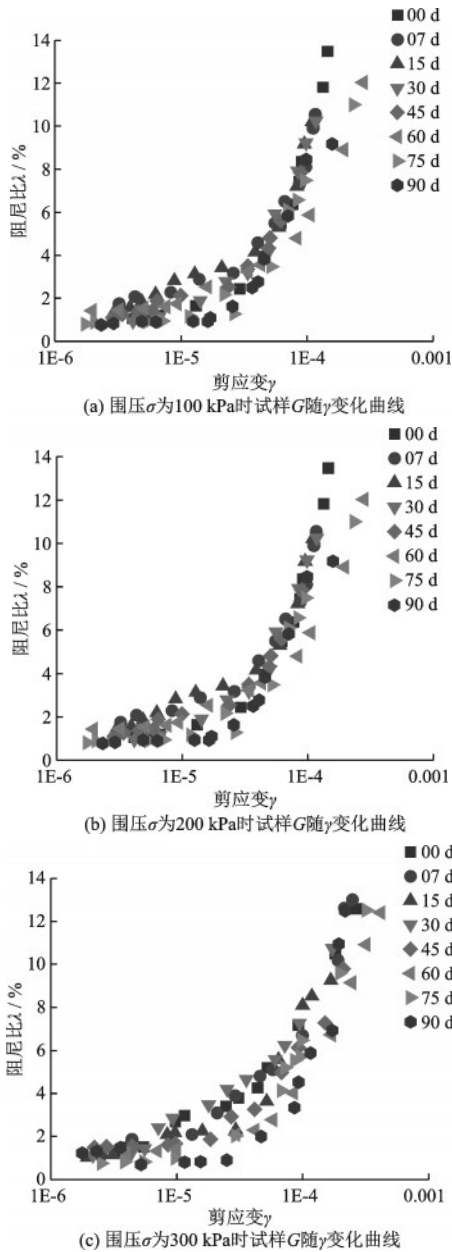


图4 相同围压下试样的 $\lambda$ 随 $\gamma$ 变化曲线

Fig.4 Variation curves of sample  $\lambda$  with  $\gamma$  under same confining pressure

在不同水化期下,随着钢渣试样水化期的增长,阻尼比是呈一个减小的趋势的,这说明水化反应所产生的胶凝结构有着减小钢渣阻尼比的作用。而剪应变 $\gamma$ 较大时,此现象并不明显。特别指出,剪应变 $\gamma$ 较小时候,水化期较短的图像阻尼比 $\lambda$ 变化速率明显要比水化期较长的图像变化要快,特别是水化期为90 d的钢渣试样,在剪应变 $\gamma$ 较小时,阻尼比 $\lambda$ 变大的趋势很低,说明在养护后,钢渣水化反应所产生的胶凝结构,能有效增加钢渣试样颗粒之间的咬合力,使应力波消耗变低,这使得钢渣试样前

期阻尼比降低,近似于弹性阶段的范围增大。

### 3.3 最大动剪切模量研究

对于不同土体的动应力应变关系,有着不同的动力模型,因为钢渣作为新型填料组成方式较为简单,而Hardin-Drnevich双曲线模型普适性较大,所以本文假定钢渣新型填料关系满足Hardin-Drnevich表达式。

由Hardin-Drnevich双曲线模型描述可知, $1/G \sim \gamma$ 的关系呈现近似线性关系,在动荷载作用下的动剪切应力与剪应变 $\gamma$ 的关系可以由公式推出当剪应变 $\gamma$ 趋向于0时,最大动剪切模量 $G_{\max}$ 为 $1/b$ ,故令图像横坐标为剪应变 $\gamma$ ,纵坐标为动剪切模量 $G$ 的倒数,公式如下:

$$G_{\max} = \frac{1}{b + k\gamma} \quad \gamma \rightarrow 0 \quad (1)$$

$$G_{\max} = \frac{1}{b} \quad (2)$$

式中, $G_{\max}$ 为最大动剪切模量(MPa); $k$ 、 $b$ 为试验参数。

以此通过进行线性拟合,得到截距 $b$ 的拟合数据,将 $1/b$ 认为是得到的最大动剪切模量 $G/G_{\max}$ 。

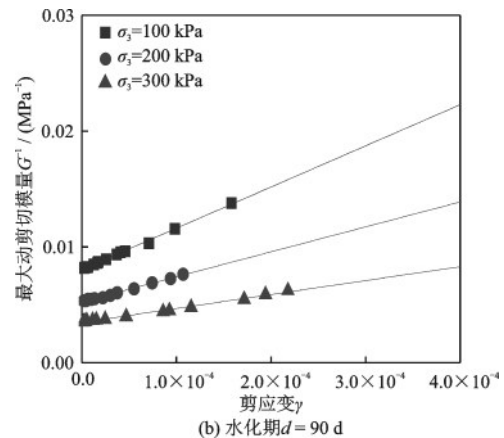
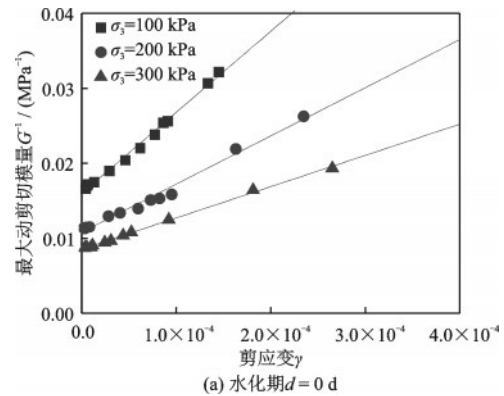


图5 不同水化期d试样的 $G^{-1}$ 随 $\gamma$ 拟合曲线

Fig.5 Fitting curves of  $G^{-1}$  of sample with  $\gamma$  at different hydration periods

选取 0 d 和 90 d 两个水化期的试样进行拟合,拟合图像和试验拟合数据如图 5 所示。

在相同养护时间下,围压  $\sigma$  越大,钢渣的最大动剪切模量也越大,随着钢渣试样养护时间的增加,其最大剪切模量也有着显著的提高,其中,相比于没有养护的钢渣试样,90 d 水化期的钢渣试样最大动剪切模量在 100、200、300 kPa 近似达到 0 d 水化期的 1.98、2.04、2.45 倍。这说明钢渣水化反应后产生的胶凝物质组成的胶凝结构使其最大动剪切模量  $G_{\max}$  明显提升。在相同工况下,其拟合图像基本符合围压  $\sigma$  越大,斜率  $k$  越小,截距  $b$  越小的规律,明显看出最大剪切模量也随着时间符合“慢-快-慢”的增长模式,且在 90 d 后达到较高水平。

### 3.4 动力分析与动力模型建立

本文所采用的拟合方法为 Hardin-Drnevich 双曲线模型,具体如下:

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}} \quad (3)$$

$$\frac{\lambda}{\lambda_{\max}} = \frac{\frac{\gamma}{\gamma_r}}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}} \quad (4)$$

式中,  $\gamma$  为动剪应变;  $G_{\max}$  为拟合得到的最大剪切模量 (MPa);  $\gamma_r$  为参考剪应变;  $\lambda_{\max}$  为拟合得到的最大阻尼比。

通过共振柱试验测得的不同相对密度下钢渣动剪切模量,阻尼比与参考剪应变之间的关系,利用式 (3) 和 (4) 对归一化动剪切模量比和阻尼比进行回归分析,选取 0 d 和 90 d 的试样进行拟合,并将最终拟合结果列出如图 6 所示。以此来研究钢渣的动剪切特性在时间效应下的变化。

归一化拟合数据见表 3。钢渣在水化期为 90 d 时的参考剪应变为 2.22、2.31、2.50,分别为水化期为 0 d 的 1.36、1.45、1.22 倍,这说明钢渣试样在养护 90 d 后,钢渣试样的最大动剪切模量明显上升,且参考剪应变  $\gamma$  的变大也说明了其承受动荷载的能力变大;随着围压  $\sigma$  的增大,最大动剪切模量的增幅倍速升高,参考剪应变  $\gamma$  的增幅倍速降低,且均不是线性变化,故在建立最大动剪切模量和参考剪应变的经验公式时,应考虑到围压  $\sigma$  变化。以养护天数  $d$  为横坐标,最大动剪切模量  $G_{\max}$  为纵坐标,绘制出图像如图 7 所示。

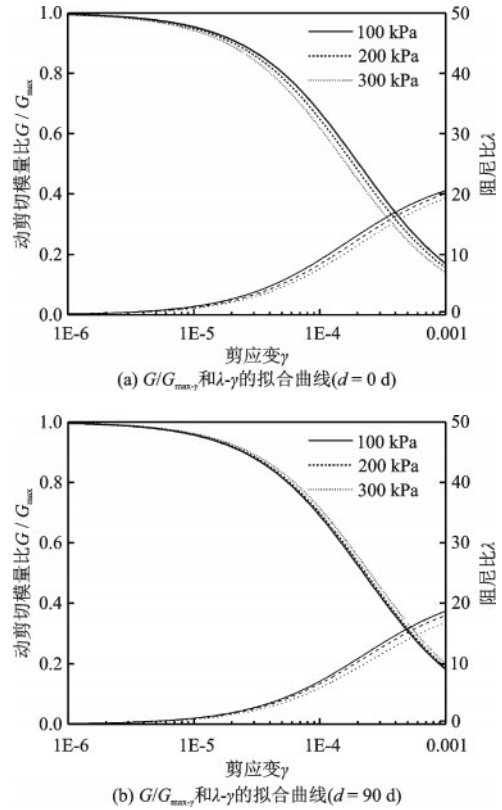


图 6 不同围压下试样  $G_{\max}$ - $d$  变化曲线

Fig.6 Variations of  $G_{\max}$ - $d$  under different confining pressures

本文根据钢渣最大动剪切模量  $G_{\max}$  和水化期之间的关系和物理意义,将 Boltzmann 函数改写为以下形式:

$$G_{\max} = M + \frac{(m - M)}{1 + e^{\frac{d - d_m}{K}}} \quad (5)$$

式中,  $G_{\max}$  为最大动剪切模量 (MPa);  $d$  为水化期 (d);  $d_m$  为养护天数中值 (d);  $M$  为拟合出的最大动剪切模量上限 (MPa);  $m$  为拟合出的最大动剪切模量下限 (MPa);  $K$  为强度变化斜率。

由式 (5) 对最大动剪切模量  $G_{\max}$  和水化期进行归一化处理拟合数据见表 4。

通过表 4 拟合决定系数  $R^2$  可以看出最大动剪切模量和水化期拟合效果较为良好。通过和公式可反应出钢渣动力特性在时间效应下变化速度是符合一个“慢-快-慢”的模式,可以合理预测出钢渣动力特性在相同围压  $\sigma$  下有上下限。以水化期  $d$  为横坐标,参考剪应变  $\gamma_r$  为纵坐标绘制出图像如图 8 所示,将其进行线性回归分析后拟合数据见表 5。

通过表 4 拟合数据的决定系数可以看出拟合效果较为良好,故将周围压  $\sigma$  力考虑进入参考剪应变  $\gamma$

表3  $G_{max}$ 归一化拟合结果

Table 3 Normalized fitting results of  $G_{max}$

试样编号	水化期 $d$ / d	围压 $\sigma$ / kPa	$G_{max}$ / MPa	$\lambda_{max}$	$\gamma_r$ / $10^{-4}$	$R^2/\%$
GZ-0.5-0-100	0	100	62.54	23.90	1.63	99.29
GZ-0.5-0-200	0	200	92.68	23.81	1.85	98.49
GZ-0.5-0-300	0	300	117.10	23.32	2.05	99.75
GZ-0.5-7-100	7	100	60.64	23.29	1.62	99.67
GZ-0.5-7-200	7	200	91.99	23.76	1.86	99.46
GZ-0.5-7-300	7	300	125.47	23.63	2.08	99.68
GZ-0.5-15-100	15	100	64.85	24.52	1.68	98.44
GZ-0.5-15-200	15	200	102.67	23.02	1.88	99.26
GZ-0.5-15-300	15	300	129.70	22.54	2.07	96.86
GZ-0.5-30-100	30	100	75.08	25.12	1.83	99.11
GZ-0.5-30-200	30	200	98.43	24.85	1.97	99.59
GZ-0.5-30-300	30	300	143.47	25.55	2.12	99.42
GZ-0.5-45-100	45	100	66.31	24.35	1.97	99.48
GZ-0.5-45-200	45	200	120.77	22.61	2.11	99.66
GZ-0.5-45-300	45	300	151.06	22.23	2.23	99.73
GZ-0.5-60-100	60	100	82.30	19.81	2.12	99.56
GZ-0.5-60-200	60	200	130.55	19.09	2.26	99.74
GZ-0.5-60-300	60	300	191.94	18.20	2.36	99.74
GZ-0.5-75-100	75	100	107.64	22.09	2.16	98.95
GZ-0.5-75-200	75	200	180.18	21.78	2.28	99.67
GZ-0.5-75-300	75	300	273.22	21.45	2.41	98.87
GZ-0.5-90-100	90	100	123.92	22.83	2.22	99.55
GZ-0.5-90-200	90	200	189.39	22.15	2.31	98.23
GZ-0.5-90-300	90	300	286.53	21.01	2.50	93.66

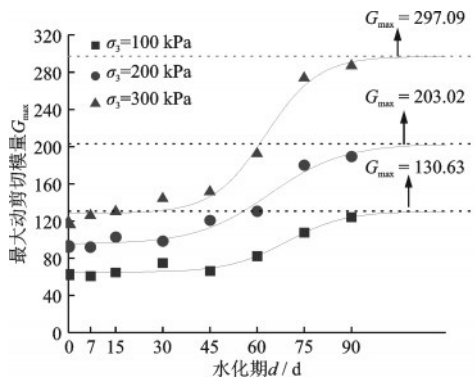


图7 不同围压下试样  $G_{max}$  随水化期  $d$  变化

Fig.7 Variations of  $G_{max}$ - $d$  with hydration periods under different confining pressures

变化,建立以下经验公式:

$$\gamma_r = 0.00593d + 1.6053\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^A \quad (6)$$

表4  $G_{max}$ - $d$ 归一化拟合结果

Table 4 Normalized fitting results of  $G_{max}$ - $d$

拟合材料	围压 $\sigma$ / kPa	$m$ / MPa	$M$ / MPa	$d_m/d$	$K$	$R^2/\%$
GZ	100	64.76	130.63	69.42	9.33	94.54
GZ	200	95.07	203.02	64.00	9.71	95.37
GZ	300	128.19	297.09	62.73	8.37	97.63

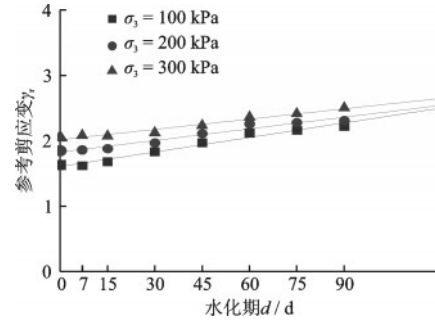


图8 不同围压下试样  $\gamma_r$  随水化期  $d$  变化拟合曲线

Fig.8 Variation fitting curves of  $\gamma_r$  of sample with hydration period under different confining pressures

表5  $\gamma_r$ - $d$ 归一化拟合结果

Table 5 Normalized fitting results of  $\gamma_r$ - $d$

试样材料	围压 $\sigma$ /kPa	$k$	$b$	$R^2$
GZ	100	0.00741	1.6053	97.21
GZ	200	0.00593	1.8264	95.69
GZ	300	0.00524	2.0165	96.81

式中,  $\gamma_r$  为参考剪应变;  $d$  为水化期(天);  $\sigma$  为围压(kPa);  $\sigma_0$  为为标准大气压(kPa);  $A$  为修正系数。

再以水化期  $d$  为横坐标,最大阻尼比  $\lambda_{max}$  为纵坐标如图9所示。

由图9可以观察到,相同水化期下,围压  $\sigma$  较大,其对应的最大阻尼比  $\lambda_{max}$  越小。而在不同周期下,最大阻尼比  $\lambda_{max}$  的变化并没有明显规律,但数值集中在23左右,将每个围压的在8个水化期的上下限标志出来,给出每个围压  $\sigma$  下的范围见表6。

根据不同水化期对钢渣动力-应变关系的影响,对相同周期内的双曲线模型经行并置拟合,如图10所示,利用最小二乘法回归分析,拟合出的参考剪应变见表7。

#### 4 与传统砂土的动力特性比较

分析研究了钢渣的动力特性在时间效应下的变化情况,发现钢渣的最大剪切模量随着时间的增

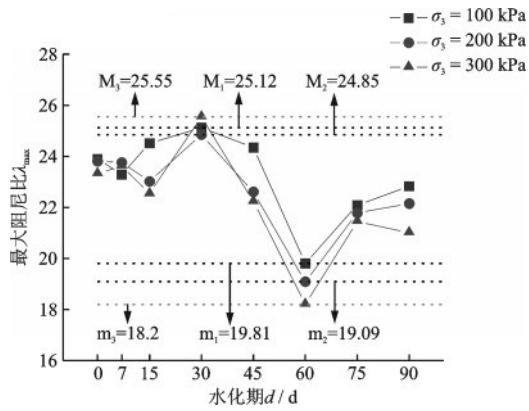


图9 不同围压下最大阻尼比 $\lambda_{\max}$ 随水化期 $d$ 的变化  
Fig.9 Variations of maximum damping ratio  $\lambda_{\max}$  with hydration period  $d$  under different confining pressures

表6  $G_{\max}$ - $d$ 归一化拟合结果

Table 6 Normalized fitting results of  $G_{\max}$ - $d$

试样材料	围压 $\sigma/kPa$	最大阻尼比 $\lambda_{\max}$ 下限/%	最大阻尼比 $\lambda_{\max}$ 上限/%
GZ	100	19.81	25.12
GZ	200	19.09	24.85
GZ	300	18.02	25.55

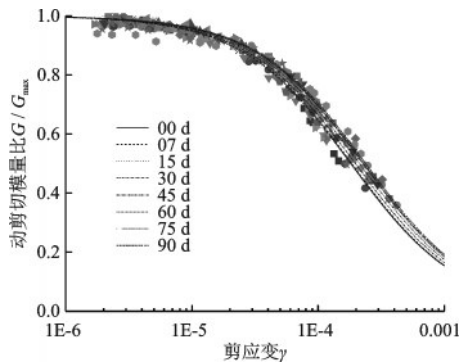


图10  $G/G_{\max}$ - $\gamma$ 拟合曲线  
Fig.10 Fitting curves of  $G/G_{\max}$ - $\gamma$

表7 参考剪应变 $\gamma_r$ 拟合结果

Table 7 Fitting results of reference shear strain  $\gamma_r$

水化期/d	参考剪应变 $\gamma_r/10^{-4}$
0	1.82
7	1.84
15	1.80
30	1.97
45	2.12
60	2.26
75	2.30
90	2.37

长而变大,阻尼比随着时间的效应而减小。所以分析水化反应后的钢渣的在动荷载下的动力表现,将

钢渣养护时最大动剪切模量 $G_{\max}$ 变化范围与南京细砂、福建标准砂及哈尔滨中砂的最大动剪切模量 $G_{\max}$ 对比,见表8。绘制图像如图11所示。

由表8可以看出:钢渣在养护后的最大动剪切模量 $G_{\max}$ 在养护后,相比于细砂而言数值较大,相比于中砂而言,数值稍微较小,在围压 $\sigma$ 较大时候,水化期较长时相差不大,与标准砂相比,数值较小,仍有一段差距。

因此,刚渣可以直接作为工程中的回填料,具有较大的动剪切模量 $G$ ,在水位线以下的回填区域,要考虑到刚渣的水化反应,其动剪切模量 $G$ 会逐渐增大,故可以作为一种填料代替砂土。

表8 钢渣与细砂、标准砂的 $G_{\max}$ 对比

Table 8  $G_{\max}$  comparison of steel slag with fine sand and standard sand

编号	填料名称	围压 $\sigma/kPa$	变化范围/MPa
1	南京细砂 <sup>[21]</sup>	100	46.50~53.80
2	福建标准砂 <sup>[22]</sup>	100	125.90~197.20
3	哈尔滨中砂 <sup>[22]</sup>	100	
4	钢渣(不同水化期)	100	60.60~123.90
5	南京细砂 <sup>[21]</sup>	200	66.00~74.20
6	福建标准砂 <sup>[22]</sup>	200	174.20~271.70
7	哈尔滨中砂 <sup>[22]</sup>	200	131.40~234.20
8	钢渣(不同水化期)	200	92.70~189.40
9	南京细砂 <sup>[21]</sup>	300	
10	福建标准砂 <sup>[22]</sup>	300	211.00~322.60
11	哈尔滨中砂 <sup>[22]</sup>	300	169.20~286.50
12	钢渣(不同水化期)	300	117.10~286.50

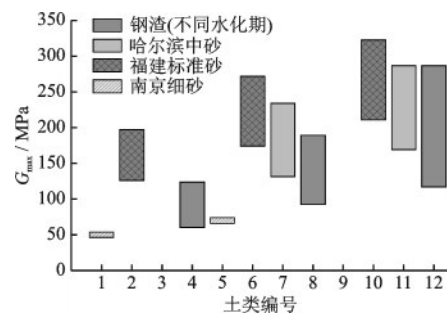


图11  $G_{\max}$ 对比

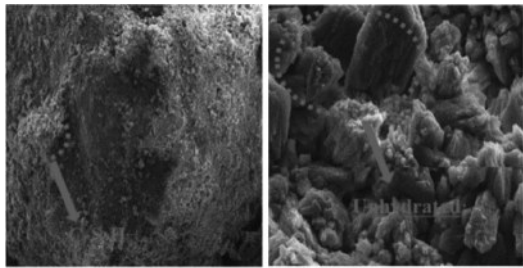
Fig.11 Comparison diagram of  $G_{\max}$

注:1~4围压为100 kPa;5~8围压为200 kPa;9~12围压为300 kPa

## 5 钢渣时间效应下的微观结构特性

### 5.1 钢渣颗粒的水化潜伏阶段

图12为钢渣颗粒养护7 d的微观图像。此时钢



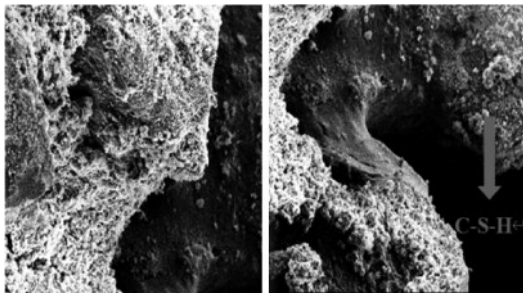
(a) 钢渣水化表面, 100倍 (b) 钢渣水化表面, 5 000倍

图 12 SEM 微观图像(水化期 7 d)

Fig.12 SEM microscopic images (at 7 days of hydration period)

渣表面多孔隙且不平整,孔隙多而细小,并没有与颗粒之间相互连接的空间结构,这说明颗粒与颗粒之间确实只在围压 $\sigma$ 下相互错动时产生咬合力。

图 13 为钢渣颗粒养护 15 d 后的微观图像。此时钢渣表面依旧多孔隙,部分区域逐渐隆起,且产生了小部分 C-S-H 胶结产物,而 CaO 水解为 CH 依旧在持续不断的进行中。



(a) 钢渣颗粒表面, 500倍 (b) 表面水化产物, 500倍

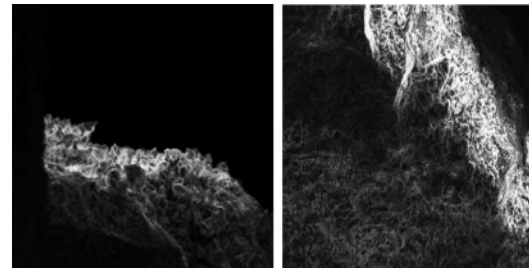
图 13 SEM 微观图像(水化期 15 d)

Fig.13 SEM microscopic images (at 15 days of hydration period)

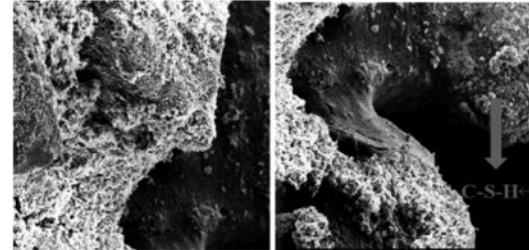
## 5.2 钢渣颗粒的水化诱导阶段

钢渣颗粒在进行了近 15 d 的水化潜伏阶段后,此时钢渣颗粒表面的 RO 相氧化物和硅酸盐大部分水解产物为 CH,并逐渐覆盖至钢渣表面,此时的 C-S-H 胶凝结构数量并不多,尺寸不大,结构为团状。在此之后,钢渣颗粒便进入了水化诱导阶段,此阶段 C-S-H 胶凝结构数量开始明显增多,但大小已经没有发生太大变化。

图 14 为水化期 30 d 的微观图像,可以观测到表面小颗粒变密集,这是水化产物附着在钢渣表面。可以看出,该颗粒团状凝胶已经开始缠绕在一起产生絮状凝胶。钢渣颗粒表面的形态发生了改变,其实为水化产物包裹在原钢渣颗粒表面。原本



(a) 钢渣水化表面, 200倍 (b) 钢渣水化表面, 500倍



(c) 钢渣颗粒表面, 500倍 (d) 表面水化产物, 500倍

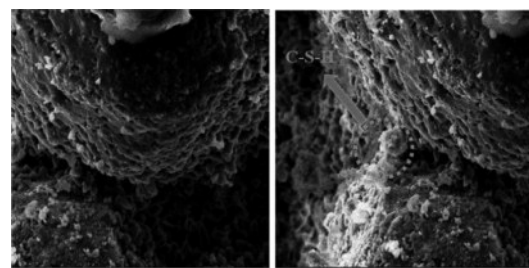
图 14 SEM 微观图像(水化期 30 d)

Fig.14 SEM microscopic images (at 30 days of hydration period)

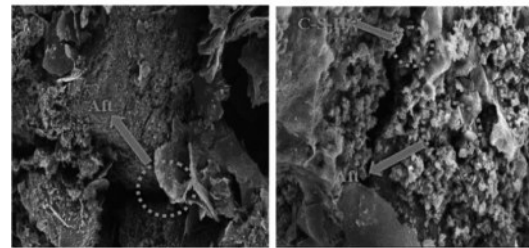
直接接触的钢渣颗粒中间夹杂着一层胶结凝胶,此时胶结凝胶太薄,所以将其看做为钢渣颗粒的一部分,这样颗粒之间的连接方式仍未发生明显变化,但总体上钢渣试样的体积会膨胀,这也是钢渣膨胀致密作用的机理。故在钢渣动力分析时,水化期在 15 d 到 30 d 的试样,其动力特性发生了较小改变。

## 5.3 钢渣颗粒的水化加速阶段

图 15 为养护 45 d 后的微观图像。可以看出在



(a) 钢渣水化表面, 2 000倍 (b) 钢渣颗粒连接处, 2 000倍



(c) 钢渣颗粒连接处, 5 000倍 (d) 表面水化产物, 5 000倍

图 15 SEM 微观图像(水化期 45 d)

Fig.15 SEM microscopic images (at 45 days of hydration period)

颗粒与颗粒连接处,絮状胶凝产物由裂缝较小的地方朝着两颗粒分离较大的方向发展,而在部分地方,水化产物 Aft 则伸出胶凝结构,挤在两颗粒中间。故推测在钢渣试样颗粒与颗粒水化反应时,水化产物片状 Aft 迟于水化产物 CH 和 C-S-H 出现,且明显 Aft 为片状,占用空间较大,但是内部镂空,容易被压缩。

图 16 也是 45 d 后的微观图像,可以发现其胶凝结构再不断完善,而颗粒之间的间距也逐渐被覆盖。图 17 为养护 60 d 和 75 d 的微观图片。此时颗粒与颗粒之间较大的缝隙被胶凝结构所填充,无数片状水化产物组成了蜂巢状的胶凝结构。这也就解释了在围压  $\sigma$  下,颗粒与颗粒之间的错动变得更大的原因,随之最大动剪切模量  $G_{max}$  也变大,对动荷载的承受能力也有一定的增强。

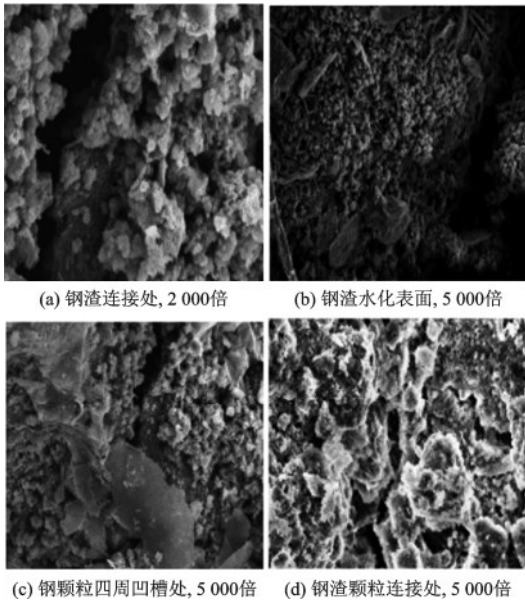


图 16 SEM 微观图像(水化期 45 d)

Fig.16 SEM microscopic images (at 45 days of hydration period)

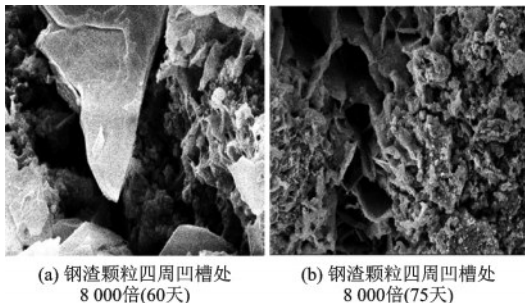


图 17 SEM 微观图像(水化期 60 d 和 75 d)

Fig.17 SEM microscopic images (at 60 and 75 days of hydration periods)

#### 5.4 钢渣颗粒水化放缓阶段

图 18 为水化期 90 d 后的微观图像,明显发现此时钢渣表面的微观结构已经和第一阶段的不一样。有胶凝结构也更加的密实,其中片状组成的蜂巢结构中单个 Aft 的结构片数增多,所产生的 C-H-C 凝胶不仅附着在钢渣表明,也在蜂巢结构的内部和上部出现。此阶段在 75 d 后结构形式并没有本质的改变,更多的变化是数量与覆盖面积的增大,这便解释了钢渣动力分析水化后期时,动力特性的数值虽然依旧在增加,但是速度却降低了。由于水化放缓阶段结构形式未发生改变,且如果养护环境和养护试样本身未发生变化,其水化数量不太可能一直增加下去,故推测钢渣试样的水化反应应该随着时间的增长,速度会更慢,至于是否随着时间有新的物质和结构变化,需进一步的研究才能说明。

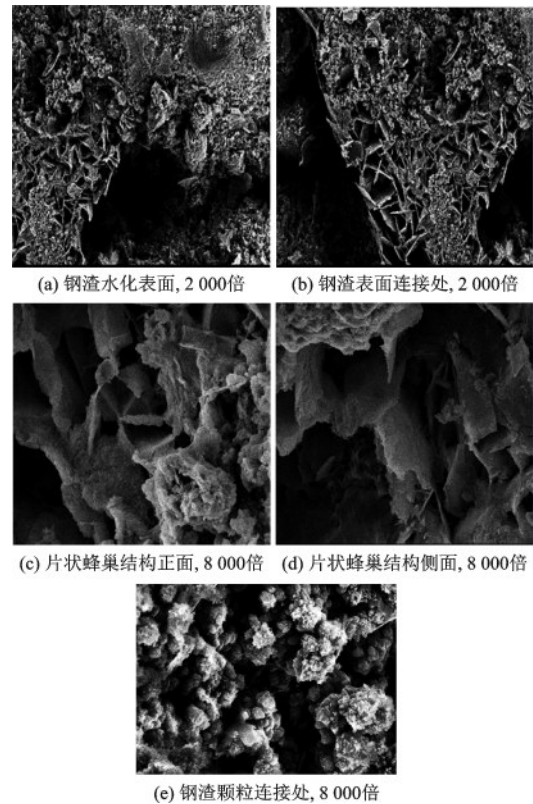


图 18 SEM 微观图像(水化期 90 d)

Fig.18 SEM microscopic images (at 90 days of hydration period)

## 6 结论

本文采用共振柱试验研究不同水化期下的钢

渣动力特性,并对钢渣微观结构的时效变化特征进行研究,所得结论如下:

(1)相同水化期下,钢渣动剪切模量在不同围压下变化显著,围压越大,动剪切模量越大;水化期30 d后,不同围压下的动剪切模量开始有幅度地增加。

(2)不同水化期下的钢渣最大动剪切模量随水化期的变化符合S型曲线,水化期超过30 d后,钢渣最大动剪切模量增长加快,水化期75 d后又增长较慢,过了90 d后,趋于平缓。

(3)Hardin-Drnevich双曲线模型可用来描述考虑时间效应的钢渣动力特性本构模型,Boltzmann函数可描述最大动剪切模量随水化期变化的关系,参考剪应变随着水化期变化呈线性经验公式,最大阻尼比范围为18.02~25.55。

(4)水化前的钢渣动剪切模量略高于传统细砂,水化90 d后的动剪切模量可达到标准砂的最大动剪切模量,工程中可以用钢渣作为一种填料代替砂土。

(5)钢渣颗粒的水化反应可依次分为水化潜伏阶段、水化诱导阶段、水化加速阶段与水化放缓阶段。水化产物Aft相较于其它水化产物生成时间较晚,Aft和C-S-H所组成的胶凝结构是钢渣颗粒水化产生的主要空间结构,是钢渣动力特性随着水化期的增加而提高的主要因素。

## 参考文献:

- [1] 邓永锋,吴子龙,朱向阳,等.掺入钢渣与偏高岭土水泥改性土的性能与微观机制[J].中国公路学报,2017,30(9):18-26.  
Deng Y F, Wu Z L, Zhu X Y, et al. Properties and microscopic mechanisms of cement modified soil incorporated into steel slag and kaolin[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(9): 18-26. (in Chinese)
- [2] 李冰,唐彪,王星磊.浅谈钢渣的综合利用[J].粉煤灰综合利用,2018(12):120-121.  
Li B, Tang B, Wang X L. Comprehensive utilization of steel slag[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2018(12): 120-121. (in Chinese)
- [3] 李乾南,张莉.钢渣在地基处理中的应用[J].土工基础,2017,31(2):247-248.  
Li Q N, Zhang L. Application of steel slag in foundation treatment[J]. Fundamentals of Geotechnical Engineering, 2017, 31(2): 247-248. (in Chinese)
- [4] 刘玉民,王兰,王玉.钢渣混合料用作道路基层材料工程应用研究[J].中外公路,2018,38(5):209-212.  
Liu Y M, Wang L, Wang Y. Research on the application of steel slag mixture as a road base material [J]. Sino-foreign Highway, 2018, 38(5): 209-212. (in Chinese)
- [5] 余中华,叶正茂,程新.少熟料钢渣复合胶凝材料水化产物的特性[J].济南大学学报(自然科学版),2013,27(2):111-117.  
Yu Z H, Ye Z M, Cheng X. Characteristics of hydration products of composite cementitious materials of less clinker steel slag[J]. Journal of University of Jinan (Natural Science Edition), 2013, 27(2): 111-117. (in Chinese)
- [6] 邹浩娜,冯勇.钢渣浸水陈化处理时间分析研究[J].粉煤灰综合利用,2016,(1):24-26.  
Zou H N, Feng Y. Analysis and study on the time of immersion aging treatment of steel slag [J]. Comprehensive Utilization of Fly Ash, 2016, (1): 24-26. (in Chinese)
- [7] Yu J Q, Buddhima I, Ana H. Behavior of steel furnace slag, coal wash, and rubber crumb mixtures with special relevance to stress-dilatancy relation[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 1: 30(11): 04018276.
- [8] Yeong N S, Huang L J, Wang H Y, et al. Experimental study and strength formulation of soil-based controlled low-strength material containing stainless steel reducing slag[J]. Construction and Building Materials, 2014, 54: 1-9.
- [9] Wang L Y, Xiao X, Ji W W, et al. Dynamic properties of the mucky clay improved with the steel slag and the rubber particles [J]. Construction and Building Materials, 2021, 294: 123489.
- [10] Hou J W, Liu Q, Liu J X, et al. Material properties of steel slag-cement binding materials prepared by pre-carbonated steel slag[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30(9): 04018208.
- [11] 李宏儒,强春鹏,朱皓轩.陕北砒砂岩与砂复配路基土动模量与阻尼比研究[J].岩土工程学报,2021,43(增1):105-110.  
Li H R, Qiang C P, Zhu H X. Study on dynamic modulus and damping ratio of arsenic sandstone and sand compound subgrade in northern Shaanxi [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(Sup1): 105-110. (in Chinese)
- [12] 梁珂,陈国兴,杭天柱,等.砂类土最大动剪切模量的新预测模型[J].岩土力学,2020,41(6):1963-1970,1982.  
Liang K, Cheng G X, Hang T Z, et al. A new prediction model for maximum dynamic shear modulus of sandy

- soils [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41 (6) : 1963-1970,1982.(in Chinese)
- [13] 李瑞宽,吴志坚,梁庆国,等.考虑微结构特征的黄土动力特性影响因素研究[J].*工程地质学报*,2018,26(4): 905-914.  
Li R K, Wu Z J, Liang Q G, et al. Study on the influencing factors of loess dynamic characteristics considering microstructure characteristics [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(4): 905-914. (in Chinese)
- [14] 冷冠军.基于微观结构特征的咸阳黄土动力特性分析[D].长春:吉林大学,2017.  
Leng G J. Analysis of dynamic characteristics of Loess in Xianyang based on microstructure characteristics [D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)
- [15] 吕筱.细粒含量对粉土动力特性及微观结构影响的试验研究[D].杭州:浙江工业大学,2016.  
Lyu X. Experimental study on the influence of fine grain content on dynamic characteristics and microstructure of silt [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [16] 姚宝宽,余曜宏,王丽艳,等.钢渣和轮胎颗粒改良海相淤泥的承载特性研究[J].*路基工程*, 2021, (3): 90-95.  
Yao B K, Yu Y H, Wang L Y, et al. Study on bearing characteristics of improved marine silt by steel slag and tire particles [J]. *Subgrade Engineering*, 2021, (3) : 90-95. (in Chinese)
- [17] 公路路基设计规范 JTGD30—2015[S].北京:人民交通出版社, 2015.
- [18] Li M, Wang Q, Yang J D, et al. Strength and mechanism of carbonated solidified clay with steel slag curing agent [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2020, 25 (3): 1-17.
- [19] J W, Jiang J P, Ding S, et al. Hydration and microstructure of steel slag as cementitious material and fine aggregate in mortar [J]. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 2020, 25 (19): 4456.
- [20] Sun J W, Zhang Z Q, Zhuang S Y, et al. Hydration properties and microstructure characteristics of alkali-activated steel slag [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 241: 118141.
- [21] 王炳辉,陈国兴,胡庆兴.南京细砂动剪切模量和阻尼比的试验研究[J].*世界地震工程*,2010,26(3):7-15.  
Wang B H, Chen G X, Hu Q X. Experimental study on shear modulus and damping ratio of fine sand in Nanjing [J]. *World Earthquake Engineering*, 2010, 26(3) : 7-15. (in Chinese)
- [22] 王绍鹏.土体动弹性模量与动剪切模量关系对比研究[D].大连:大连理工大学,2009.  
Wang S P. Comparative study on the relationship between dynamic elastic modulus and dynamic shear modulus of soil bodies [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese)

(本文编辑:周小潭)



(上接第 939 页)

- [16] 周志军,吕大伟,宋伟,等.基于含水率和温度变化的冻融黄土性能试验[J].*中国公路学报*, 2013, 26(3) : 44-49.  
Zhou Z J, Lyu D W, Song W, et al. Experiment on loess characteristics after freeze-thaw circle based on changes of moisture content and temperature [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2013, 26 (3) : 44-49. (in Chinese)
- [17] 徐筱,蔡国庆,李舰,等.低应力及拉应力条件下非饱和土强度及剪胀特性[J].*岩石力学与工程学报*,2018,37(8): 1933-1942.  
Xu X, Cai G Q, Li J, et al. The strength and dilatancy characteristics of unsaturated soil at low and tensile stress [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(8): 1933-1942. (in Chinese)