

钢渣改良粉质黏土小应变动力特性试验研究

李 伟¹, 王 泽¹, 李福栋², 王挥云³

(1. 沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168;

2. 东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;

3. 中铁十九局矿业投资有限公司, 北京 100161)

摘 要: 结合废钢渣的理化性质及其作用效果, 采用废钢渣代替传统的水泥进行粉质黏土地基的动力特性改良。利用共振柱试验, 探讨钢渣粉质黏土混合料的动剪模量 G 和阻尼比 D 在固定围压 σ_0 和养护龄期条件下, 随不同配合比下的变化特点。利用 Kondner 模型经验公式, 将动剪模量归一化 $G/G_{\max}$, 并和阻尼比分别与动剪应变进行拟合。分析钢渣含量与最大动剪模量 $G_{\max}$ 和最大阻尼比 $D_{\max}$ 的变化规律, 并与水泥粉质黏土混合料进行分析对比。试验研究表明, 配合比对两种混合土体的动剪模量和阻尼比的影响最为显著; 随着掺料含量的增大, 动剪模量和阻尼比均呈现出先增大后减小的变化趋势; 结果显示, 30% 的钢渣掺量可代替 15% 及以下掺量的水泥用于粉质黏土地基加固。试验成果明确了钢渣应用于粉质黏土地基处理的可行性, 具有实际的工程意义。

关键词: 共振柱试验; 水泥粉质黏土混合料; 钢渣粉质黏土混合料; 阻尼比

中图分类号: TU753

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2021)06—0018—09

Experimental Study on Small Strain Dynamic Characteristics of Silty Clay Mixed With Steel Slag

LI Wei¹, WANG Ze¹, LI Fudong², WANG Huiyun³

(1. College of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, Liaoning 110168, China;

2. Key Laboratory of Deep Metal Mining Safety, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China;

3. China Railway 19th Bureau Mining Investment Co., Ltd., Beijing 100161, China)

Abstract: In order to use scrap steel slag instead of traditional cement to improve the dynamic characteristics of silty clay foundation. With the different mixing ratios, this paper discussed the characteristics of the dynamic shear modulus and damping ratio of the steel slag silty clay mixture under certain confining pressure and certain curing age conditions by resonant column test. Test results of steel slag silty clay mixture is compared with the cement silty clay mixture. Using the empirical formula of the Kondner model, the dynamic shear modulus is normalized to $G/G_{\max}$. With different mix ratios conditions, the results show that 30% steel slag content can be used to replace 15% or less cement to reinforce the silty clay foundation. The test results clarified the feasibility of applying steel slag to the treatment of silty clay foundation, which has practical engineering significance.

Keywords: resonant column test; cement silty clay mixture; steel slag silty clay mixture; damping ratio

粉质黏土软弱层在我国东部沿海地区及内陆江湖沿线区域均有大面积分布, 随着我国城市化建设的稳步推进和市政公用工程的逐步完善, 大量公用

与民用建筑物和基础设施的规划已无法避开粉质黏土地基。而粉质黏土地基较差的整体稳定性决定了其在面临长时间循环往复、强度远小于土体抗剪强

度的特殊荷载时,往往伴有过大的沉降。由于地基土体在处于微小的应变幅值阶段,需格外关注其线弹性小变形下的动剪模量和阻尼比。这两个参数涉及到工程的安全性和经济性,因而在对粉质黏土地基进行加固处理时,深入研究其动剪模量和阻尼比,具有很强的实际意义。

近十年来,国内外学者关于钢渣的资源化综合利用的研究取得了一定突破。Abu - Eishaha 等^[1]将经处理的钢渣掺入混凝土材料并分析了其力学特性。结果表明,钢渣不仅有利于提高混凝土的力学性能,还能够大大减少水泥用量,避免过量水泥造成的水化热。Baciocchia 等^[2]解决了钢渣中因含 f - CaO 和 f - MgO 引起的不稳定问题,并进一步使两者与空气中的二氧化碳充分反应,制造出可应用于实际工程的钢渣砖。Palankar 等^[3]采用钢渣作为粗集料,可形成钢渣团聚体,大大提高了混凝土的耐久性能。Kriskova 等^[4]研究发现,钢渣经机械研磨后所形成的小粒径钢渣粉可迅速水化,从而提高活性。Ashango 等^[5]分析了钢渣粉用于膨胀土的稳定性,并进行了大量的静、动力特性试验。结果表明,钢渣混合土的无侧限抗压强度增长至原先的 2 倍,动弹模量比原先增长了 58% ~ 78%。李伟等^[6]将钢渣按一定比例掺入砂土中进行了常规三轴压缩试验,结果表明,经搅拌和压实后的混合土体具有较小的压缩性,不仅改善了抗剪强度,还有效提高了地基承载能力。在土动力学领域,Airey 等^[7]就水泥砂土混合料进行了动力学试验,探索出动剪模量与围压的关系,并给出了在不同水泥掺量下的动强度参考值。针对水泥黏土混合料,张鹏等^[8]分别在黏土中加入一定比例的矿渣水泥、普通水泥和水玻璃,进行了共

振柱试验。然而,虽然目前关于钢渣可应用性的研究较为深入,但以钢渣作为粉质黏土地基处理材料却极少见到。并且对于混合土体的研究多集中于大应变条件下的动三轴试验,而对于钢渣粉质黏土混合料的小应变动力特性研究很少涉及。

因此,本文将钢渣掺入到粉质黏土中,进一步分析钢渣粉质黏土混合料在小应变下的动剪模量和阻尼比变化规律,为钢渣替代传统水泥用于地基加固提供一定的数据参考。

1 试验介绍

1.1 钢渣的矿物组成及理化性质

试验所选用的钢渣与普通硅酸盐水泥具有相类似的水化机理,其所含的硅酸二钙、硅酸三钙决定了钢渣具有胶凝活性,如与土体中的孔隙水发生充分水化反应,可生成具有胶凝特性的水化硅酸钙凝胶和氢氧化钙,使土骨架大大充实,提高地基承载力。

表 1 为钢渣物理力学性能指标,钢渣经长期陈化后,粉化率显著降低,其强度、压碎值和磨耗率均符合规范值,钢渣具有良好的物理力学性质,有利于提高钢渣的稳定性。根据相关研究结论^[11],游离氧化钙的含量在很大程度上对钢渣稳定性有着重要影响,游离氧化钙含量越多,稳定性越差。经过一定时间陈化的钢渣,在不减弱其活性的前提下,不仅能提高稳定性,还可改善其初始的胶凝特性。在陈化过程中,f-CaO、C₂S、及 C₃S 与空气中的水反应生成的 Ca(OH)₂,继续与空气中的 CO₂ 结合形成 CaCO₃ 沉淀,并伴有硅酸盐矿物的水化生成大量具有胶凝特性的水化硅酸钙凝胶(C-S-H)等。陈化过程的示意如图 1 所示。

表 1 钢渣性能指标^[9-10]

陈化时间	表观密度/(t·m ⁻³)			磨耗率/%	压碎值/%	粉化率/%	吸水率/%	无侧限抗压强度/MPa
	粗(>10mm)	细(<10mm)	天然钢渣					
初期	3.30	3.25	3.29	22.65	21.40	4.74	2.3	216
1 月	3.29	2.30	3.29	19.25	21.56	3.84	2.1	220
3 月	3.35	3.15	3.29	21.58	16.54	1.41	2.0	201
一年	3.28	3.05	3.21	18.34	15.23	0.88	1.8	185

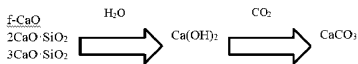


图 1 硅酸盐矿物和 f-CaO 的转化过程

1.2 试样制备及试验方案

本试验钢渣来自抚顺新抚钢公司,经长期陈化、研磨,稳定性较好,莫氏硬度为 6.5,密度为 3.40 g/cm³。其级配曲线如图 2,计算可得 C_u = 5.76, C_c = 0.85,表明钢渣颗粒级配均匀,有助于活性的发

挥并减少不均匀效应对试验结果的误差。粉质黏土为重塑土样,试验所用土样取自沈阳市南郊 7 m ~ 8 m 的粉质黏土层,该粉质黏土的天然密度为 1.91 g/cm^3 ,塑性指数 I_p 为 14.9。水泥采用普通硅酸盐水泥 P. O. 42.5。

为直观显示钢渣的改良效果,并与水泥的改良效果对比,依据相关研究结论^[6,12-13],分别将两种材料按照不同的配合比掺入粉质黏土,均匀喷洒无气水至试验土料,充分搅拌均匀并经过密封湿润 24 h,使含水率稳定。按照规范采用击实法制样,试件尺寸为 $\varphi 50 \times 100$ 。对其进行 1 d、3 d 和 7 d 的养护,并施加 50 kPa、100 kPa、150 kPa 三种围压。配合比 Gs20、Gs30、Gs40、Gs50 分别表示钢渣在混合土体中占比为 20%、30%、40% 和 50%。配合比 Gc8、Gc12、Gc15 分别表示水泥在混合土体中占比为 8%、12% 和 15%。

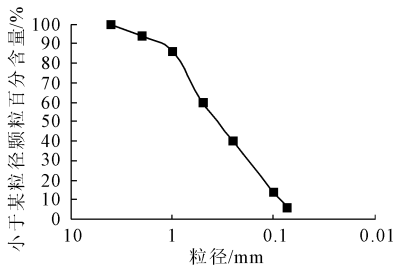


图 2 钢渣粒径分布曲线

1.3 试验仪器与试验方法

本试验使用英国 GDS 公司研发的固定—自由端型 GDS-RCA 共振柱仪。试验前,为使试样完全饱和,利用真空饱和法使试样预先达到一定的饱和度,时间保证在 10 h 以上。按照规范进行试验,具体如下:(1) 将重塑土试件套上橡胶模固定在底座上,依次安装电磁驱动装置和压力室;(2) 施加较低的围压使橡胶模紧贴试件,并维持固定的压差下反压饱和,整个过程维持在 8 h 以上;(3) 等向固结压力下,使试件排水固结;(4) 逐级调节驱动频率,给试件施加扭转激振,测量试件发生共振时的频率;(5) 按照式(1)计算剪切波速,进而按照式(2)计算出动剪模量。依据阻尼的衰减曲线,由式(3)计算出阻尼比。

$$V_s = \frac{2\pi fH}{\beta} \quad (1)$$

式中: $\beta \tan(\beta) = \frac{I}{I_0}$, β 由试件的转动惯量和仪器已标定的转动惯量确定,无量纲; H 为试件的实际高度, m; f 为试件测得的共振频率, Hz。

$$G = \rho \cdot V_s^2 \quad (2)$$

式中: ρ 为试件的密度, g/cm^3

阻尼比的计算式为

$$D = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{N} \ln\left(\frac{A_1}{A_{n+1}}\right) \quad (3)$$

式中: N 为振动次数; A_1 、 A_{n+1} 分别为断开激振后第 1 周、第 $n+1$ 周的振动振幅。

2 结果分析与讨论

2.1 动剪模量

图 3、图 4、图 5 为各围压和养护龄期下动剪模量随动剪应变的变化曲线。

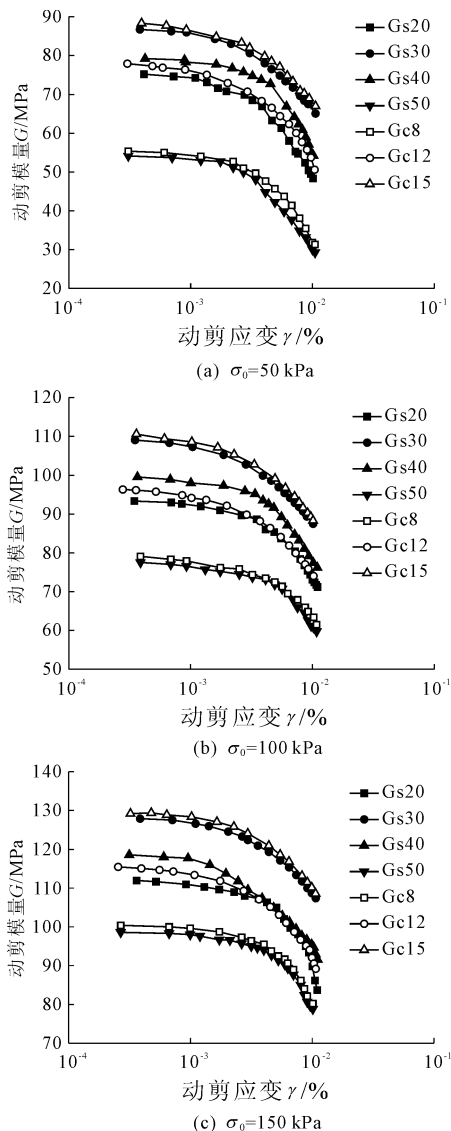


图 3 养护 1 d 的 $G-\gamma$ 变化曲线

由图可知,当围压和养护龄期相同时,钢渣混合土的动剪模量未随着钢渣含量的增加而连续增加。明显观察到,当配合比从 20% 增加至 30% 时,该混合土的动剪模量显著增加。当配合比从 30% 增加

到40%时,动剪模量反而会减弱。当配合比增加到50%时,动剪模量仍然相应降低。对于水泥混合土,在围压和养护龄期保持不变时,水泥混合土的动剪模量在掺料含量8%至15%区间内,呈现出增加趋势。其中,水泥掺量比例为15%的情况下,动剪模量达到最大。

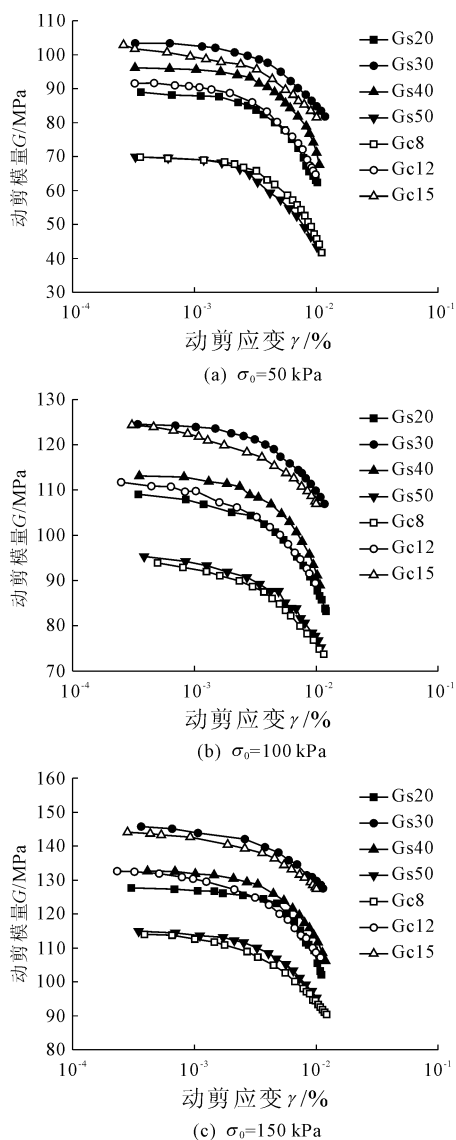


图4 养护3 d的 $G-\gamma$ 变化曲线

试验结果分析表明,在较短的养护龄期下(1 d),钢渣含量占比30%时的动剪模量略低于水泥含量占比15%时的结果值。而在较长的养护龄期下(3 d、7 d),钢渣含量占比30%时的动剪模量则显然高于水泥含量占比15%时的结果值;钢渣含量占比为20%、40%时的动剪模量接近于水泥含量占比为12%时的动剪模量,其中钢渣含量占比为20%条件下的动剪模量在养护龄期达到7 d后会明显超过水泥含量为20%对应的动剪模量;随着钢渣含量占比

的提高,动剪模量在掺量为50%的条件下大致靠近水泥含量占比8%的结果值,且在养护龄期达到7 d时,其动剪模量会出现反超水泥含量占比为8%的情况。由此项试验数据对比可知,将钢渣用作粉质黏土地基处理材料时会出现早期强度低于水泥的现象,但在得到充分养护后,后期强度会超过水泥,能够较好地土颗粒进行胶结加固。

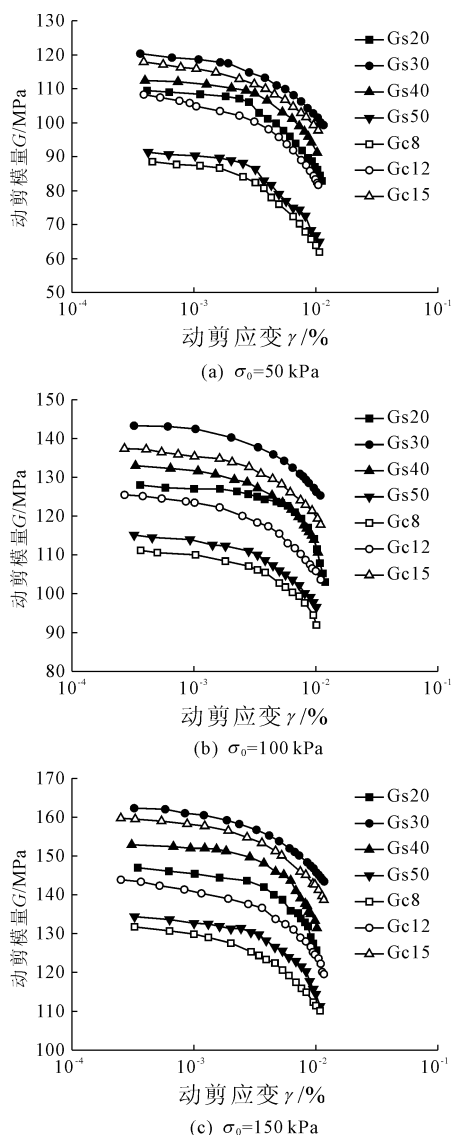


图5 养护7 d的 $G-\gamma$ 变化曲线

2.2 阻尼比

图6、图7、图8为各围压和养护龄期下阻尼比随动剪应变的变化曲线。由图可知,钢渣混合土的阻尼比并非随着钢渣含量占比的提高而持续增长,而是整体呈先大后小的现象,并在钢渣含量占比30%时达到最大值。其中,钢渣含量占比在20%~30%区间段内,阻尼比呈现增长趋势,而在30%~40%、40%~50%区间段内,阻尼比则随钢渣含量占

比的提高呈现减小趋势。对于水泥粉质黏土混合料而言,水泥含量的增加使得水泥粉质黏土混合料的阻尼比随之增大,即当水泥含量为 15% 时,水泥粉质黏土混合料的阻尼比达到最大值。水泥混合土的阻尼比随水泥含量占比在 8% ~ 15% 区间段内整体呈持续增长的现象,并在水泥含量占比为 15% 时出现最大。上述试验结果表明,掺料配合比是两种混合土体阻尼比变化特点的关键影响因素。

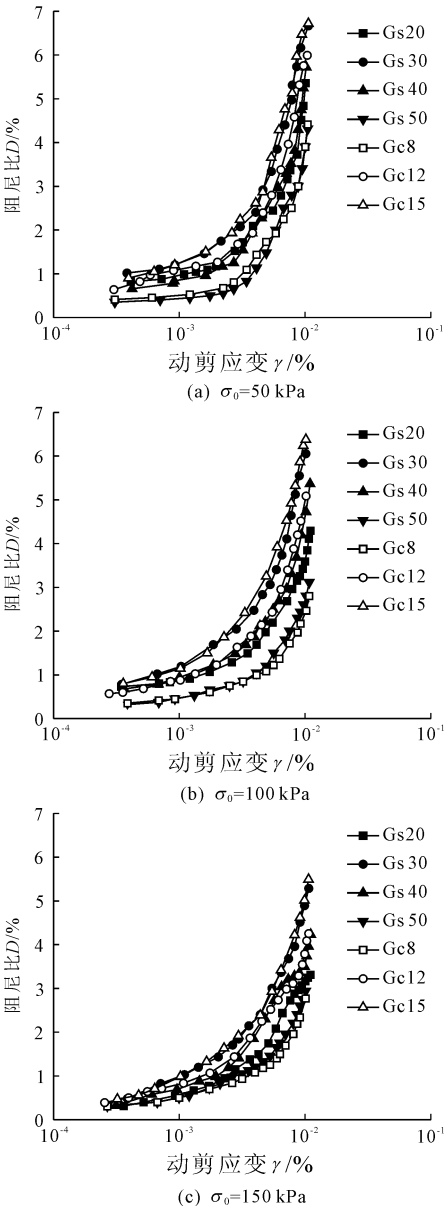


图 6 养护 1 d 的 $D-\gamma$ 变化曲线

通过进一步对比分析,钢渣含量占比为 30% 时的阻尼比最接近于水泥含量占比为 15% 时的试验结果值。钢渣含量占比为 50% 时的阻尼比最接近于水泥含量占比为 8% 时的试验结果值,甚至略大于后者。结合前文的分析可知,钢渣粉质黏土混合

料与水泥粉质黏土混合料随掺料配合比的阻尼比变化特点与其动剪模量一致,钢渣粉质黏土混合料的动剪模量和阻尼比均随钢渣掺量占比的提高先增后减;水泥粉质黏土混合料的动剪模量和阻尼比均随水泥掺量占比持续增长。

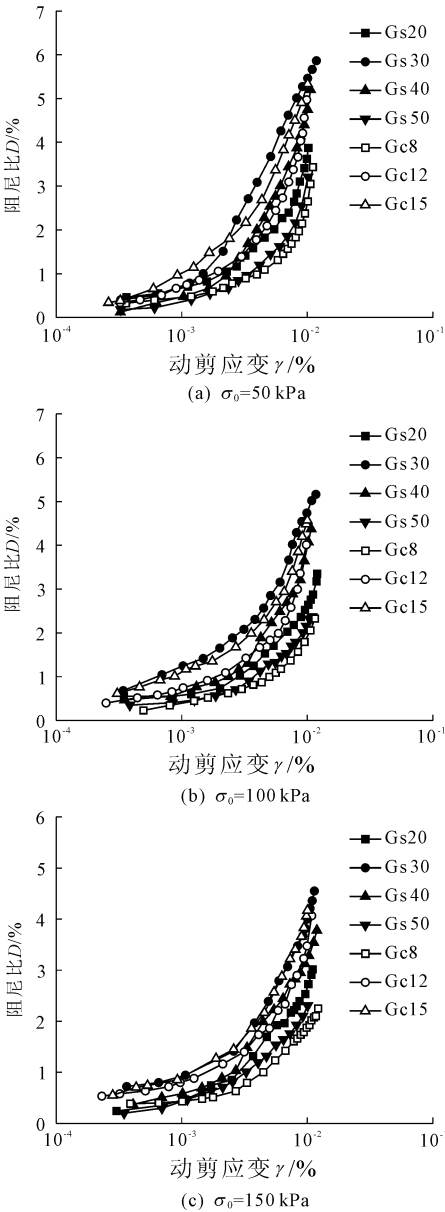


图 7 养护 3 d 的 $D-\gamma$ 变化曲线

2.3 动力变形曲线的拟合

谢定义^[14]已利用大量试验结果证明,归一化动剪模量随动剪应变变化关系曲线可以较为准确的描述动剪模量的衰减规律,已成为研究土动力学参数的重要工具。本文采用 Kondner 经验公式(式(4))和胡文尧修正阻尼曲线关系式(式(5))对试验数据进行归一化 $G/G_{\max}$ 处理并和阻尼比 D 与动剪应变 γ 拟合,得到不同配合比条件下的 $G/G_{\max}-\gamma$ 曲线和 $D-\gamma$ 曲线。

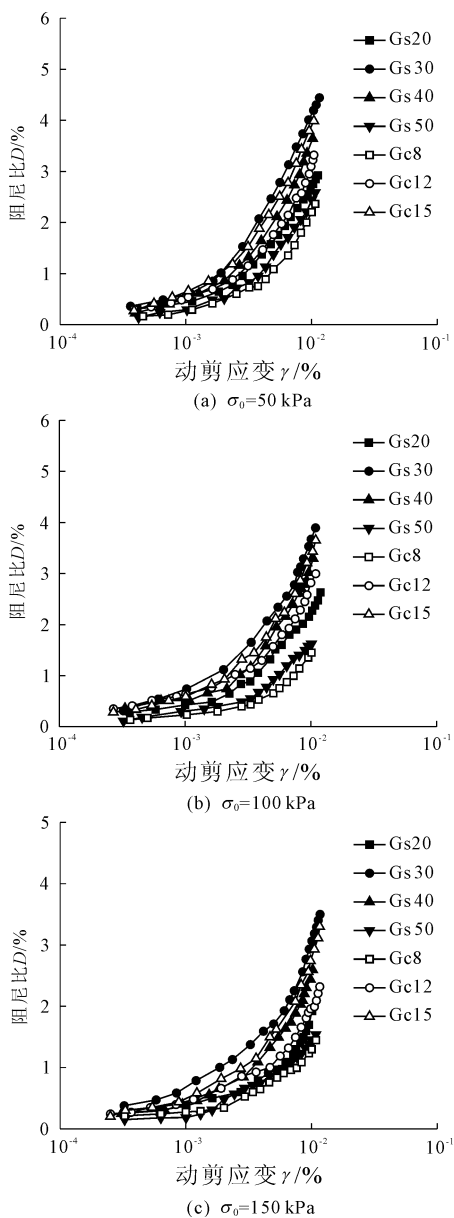


图 8 养护 7 d 的 $D-\gamma$ 变化曲线

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}} \tag{4}$$

$$\frac{D}{D_{\max}} = \left(\frac{\gamma}{\gamma_r} \right)^m \tag{5}$$

式中: $G_{\max}$ 为最大动剪模量; γ 为动剪应变; γ_r 为参考剪应变,对应于 $0.5G_{\max}$ 时的动剪应变值。 γ_r 越大,表示动剪模量和阻尼比变化速率越快。 $D_{\max}$ 为最大阻尼比; m 为试验参数。

为了得到具有普遍性的试验结果,从而更好地分析动剪模量和阻尼比受配合比的影响程度,图 9 给出了养护 7 d 时,不同配合比下动剪模量比和阻

尼比拟合曲线。

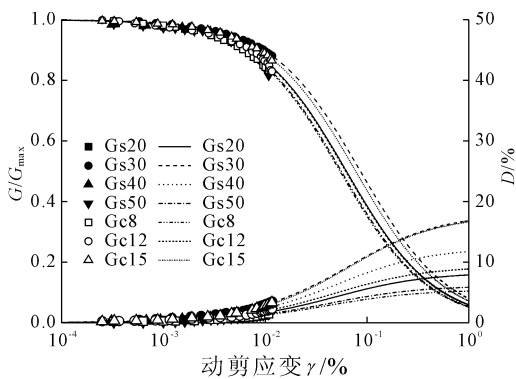


图 9 不同配合比下动剪模量比和阻尼比拟合曲线

由图 9 可知,钢渣混合土和水泥混合土在不同配合比条件下所得的 $G/G_{\max}-\gamma$ 和 $D-\gamma$ 两种曲线试验点取得了较好的拟合结果,其离散性小且均集中于一个小范围内。动剪模量整体上随动剪应变的增加而减小,阻尼比随动剪应变的增加而提高。在小应变范围内,动剪模量比在 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 之间较为稳定,其值接近于 1。在 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ 之间,动剪模量比开始出现缓慢衰减的现象。阻尼比在 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 之间增速较小,在 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ 之间开始出现增长趋势。但随着应变增长至 10^{-4} 之后,动剪模量比随动剪应变的增长呈快速衰减趋势,在应变过大时接近于 0。阻尼比在应变为 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 之间显著提高,并在达到 10^{-3} 后逐渐趋于稳定,趋于最大值。在同等的应变水平下,钢渣混合土体的动剪模量和阻尼比有相同的变化趋势,均在掺料含量在 20% 至 50% 区段内先增后减,并在掺料占比为 30% 达到最大,接近于水泥混合土在掺料占比为 15% 时所对应的动剪模量和阻尼比。

2.4 最大动剪模量

图 10 为钢渣混合土最大动剪模量随钢渣含量的变化曲线。可见在给定相同围压和养护龄期条件下,配合比是钢渣混合土最大动剪模量的主要影响因素,本文将对此开展详细的论述分析。

由图 10 可知,在给定相同围压和养护龄期条件下,最大动剪模量会在钢渣配比含量为 30% 时出现最大值,在钢渣配比为 50% 时出现最小值。钢渣配比含量为 40% 的最大动剪模量略大于配比含量为 20% 时所对应的结果值,但数值几近相等。从总体变化特点分析可知,最大动剪模量增减趋势相同,并伴随钢渣掺量提高,呈现先增后减的现象。其机理的关键在于 30% 的钢渣含量是使其水化反应最充分的配比值,进而最大动剪模量在此处达到最大;20% 的钢渣含量则会导致水化反应不完全,因而试

验结果值未产生出现最大值的情况;若钢渣配比含量过大时(40%、50%),过多的掺料不能与土体中的孔隙水发生水化反应,致使最大动剪模量大大降低。综上所述,30%的钢渣掺量可作为改善粉质黏土地基小应变动力特性的最佳配合比。

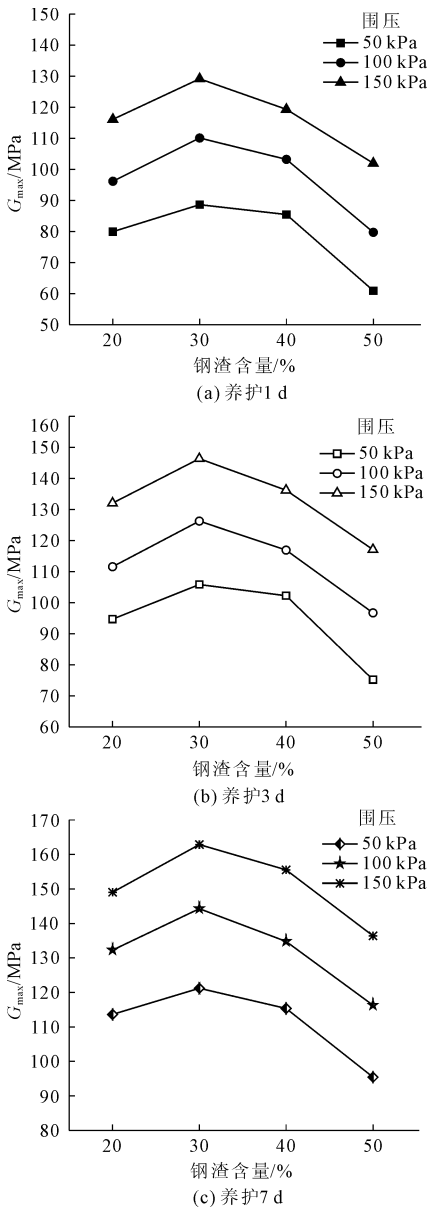


图 10 钢渣含量与最大动剪模量的关系曲线

图 11 为水泥混凝土最大动剪模量随水泥含量的变化曲线。由图 11 可知,在相同围压和养护龄期下,最大动剪模量会在水泥配比含量为 15% 时出现最大值,在水泥配比为 8% 时出现最小值。在水泥含量占比区间为 8% ~ 15% 时,水泥粉质黏土混合料的最大动剪模量随水泥掺量的提高,呈现出单调递增的趋势。当围压较低时,最大动剪模量随水泥配比变化的增长速度均大体一致。而当围压较高

时,其增长速度则存在明显差异。其中,在水泥含量占比为 8% ~ 12% 区间段内的增长速度均小于 12% ~ 15% 区间段内。这种现象的主要原因在于水泥的掺加填充了土骨架中的孔隙,并与孔隙水充分反应,使混合土体结构更为紧密,外在表现为抗剪强度得到大幅提高,部分抵消了围压效应带来的影响。

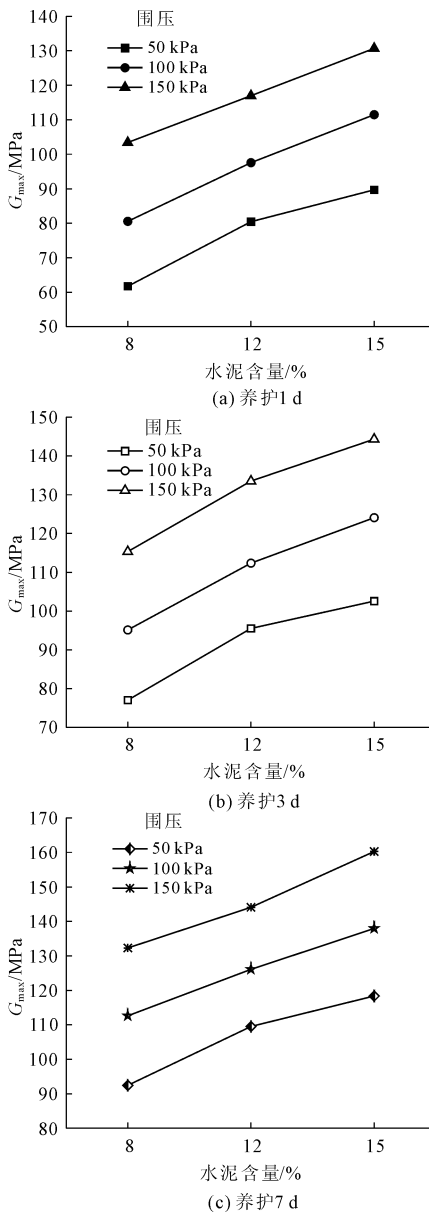


图 11 水泥含量与最大动剪模量的关系曲线

结合图 10、图 11 可以更加直观的对比两种混合土体动力参数受掺料配合比的影响。钢渣含量配比为 30% 时所对应的最大动剪模量与水泥掺量为 15% 时所对应的试验结果尽相吻合,甚至略微大于后者。钢渣含量配比为 20% 时所对应的最大动剪模量接近于水泥掺量为 12% 的情况。钢渣含量配比为 50% 时所对应的最大动剪模量接近于水泥掺

量为 8% 的情况。

2.5 最大阻尼比

图 12、图 13 为两种混合土体的最大阻尼比随配合比变化曲线。如图所示,在围压和养护龄期固定的条件下,钢渣混合土的最大阻尼比在钢渣含量占比为 20% ~ 50% 区间段内呈先增后减的现象,并在掺料配比为 30% 时出现最大值。同等条件下,水泥混合土的最大阻尼比在水泥含量占比在 8% 至 15% 区间段内呈单调递增的现象,并在掺料配比为 15% 时出现最大值。

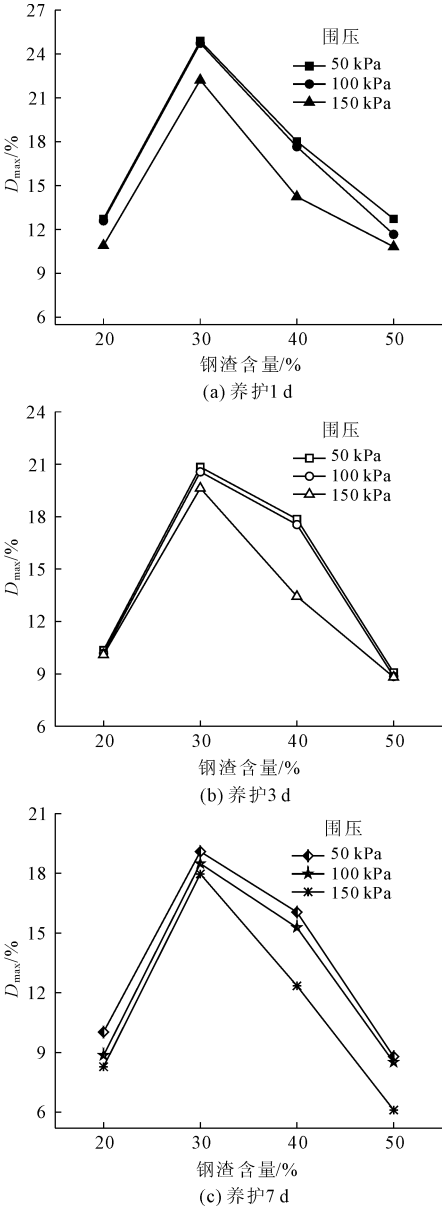


图 12 钢渣含量与最大阻尼比的关系曲线

结合图 12、图 13 可以更加直观的对比两种混合土体动力参数受掺料配合比的影响。钢渣含量配比为 30% 时所对应的最大阻尼比与水泥掺量为

15% 时所对应的试验结果相接近。钢渣含量配比为 50% 时所对应的最大阻尼比接近于水泥掺量为 8% 的情况。在养护龄期较短(1 d、3 d)时,水泥含量配比为 12% 时所对应的最大阻尼比接近于钢渣掺量为 40% 的情况。在养护龄期较长(7 d)时,水泥含量配比为 12% 时所对应的最大阻尼比接近于钢渣掺量为 20% 的情况。

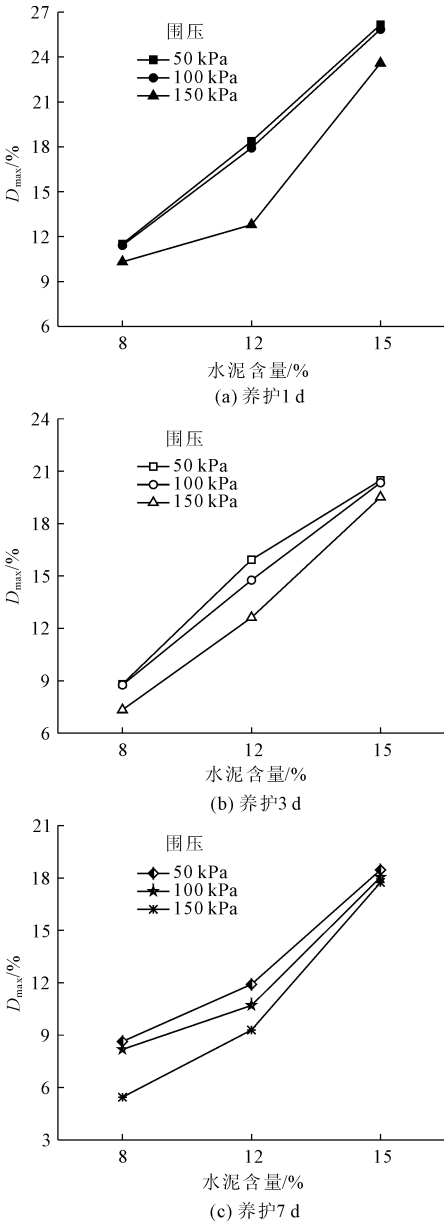


图 13 水泥含量与最大阻尼比的关系曲线

2.6 机理分析

钢渣加固粉质黏土的关键,是由于其中的矿物成分能与土体中的孔隙水发生水化反应,产生大量胶凝性物质。小应变下的动力参数变化就是由胶凝材料的含量和结构决定的。在钢渣含量为 20% 时,少量钢渣与土体中孔隙水生成的胶凝物质含量低,土颗粒

黏聚力差,钢渣仅仅起到填充土骨架的作用,因而动剪模量会较低。根据相关研究^[15-16],此时混合土在微观上呈团聚堆叠结构,少量的水化硅酸钙凝胶以针状呈现,两种材料颗粒之间不能紧密贴合,在激振力的作用下发生剧烈摩擦,而较硬的钢渣颗粒变形能力小,无法消耗较多的能量,进而导致阻尼比较低。

伴随钢渣的继续掺入,含量达到 30% 时,钢渣中的硅酸二钙、硅酸三钙分别与孔隙水发生充分的水化反应,产生足量的氢氧化钙和水化硅酸盐凝胶。其中的氢氧化钙构建了碱性环境,提高了钢渣活性,加速了水化反应,二次生成水化硅酸钙凝胶。加之钢渣本身的填充作用,颗粒之间趋于致密,有足够的抵抗剪切变形,进而土体的动剪模量得到大大改善。此时混合土团聚体结构变大,水化硅酸钙凝胶已由针状结构生长为片状网格结构,并有效嵌固在土颗粒之间,整体趋于稳定。由于两种材料颗粒紧密嵌套,在小应变作用下发生弹性变形时,抵消了大部分能量,提高了阻尼比。

但钢渣含量不断提高,达到 40%、50% 时,尽管水化产生的胶凝物质进一步增加,但由于土颗粒占比的降低,使土体的孔隙比变大。此时片状网络结构会相应增多,颗粒之间几乎全部被胶凝物质隔开,导致土体过于软弱,在受到扭转激振时,出现阻尼比偏大的现象,极易发生剪切破坏。

3 结 论

(1) 钢渣粉质黏土混合土的动剪模量和最大动剪模量在配合比为 20% ~ 50% 区间段内呈先增后减的变化规律,且均在掺料占比为 30% 时达到最大。水泥粉质黏土混合土的动剪模量和最大动剪模量在配合比为 8% ~ 15% 区间段呈单调递增的变化规律,且皆在掺料占比为 15% 时达到最大。钢渣占比 30% 时所对应的动剪模量和最大动剪模量接近于水泥占比 15% 时的试验结果值。

(2) 钢渣粉质黏土混合土的阻尼比和最大阻尼比在配合比为 20% ~ 50% 区间段内呈先增后减的变化规律,且均在掺料占比为 30% 时达到最大。水泥粉质黏土混合土的阻尼比和最大阻尼比在配合比为 8% ~ 15% 区间段呈单调递增的变化规律,且皆在掺料占比为 15% 时达到最大。钢渣占比 30% 时所对应的阻尼比和最大阻尼比接近于水泥占比 15% 时的试验结果值。

(3) 掺料配合比对钢渣粉质黏土混合土的小应变动力参数影响显著,其不同钢渣占比下的动剪模量和阻尼比试验结果差异明显。试验研究可知,钢渣含量占比 30% 的混合土体动剪模量优于水泥

含量占比 15% 的混合土体,并具有较大的阻尼比。既能有效的抵抗剪切变形,又具有良好的减震性。表明钢渣能够改善粉质黏土地基的动力特性,钢渣含量为 30% 时,可代替 15% 及以下含量的水泥用于粉质黏土地基加固。

参考文献:

- [1] Abu-Eishaha A S, El-Diebb M S B. Performance of concrete mixtures made with electric arc furnace (EAF) steel slag aggregate produced in the arabian gulf region [J]. Construction and Building Materials, 2012, 34: 246.
- [2] Baciocchia R, Costaa G, Polettinib A, et al. Influence of particle size on the carbonation of stainless steel slag for CO₂ storage [J]. Energy Procedia, 2009, 1: 4858.
- [3] Nitendra Palankar, A. U. Ravi Shankar, B. M. Mithun. Durability studies on eco-friendly concrete mixes incorporating steel slag as coarse aggregates [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 129: 437-448.
- [4] Kriskova L, Pontikes Y, Cizero, et al. Effect of mechanical activation on the hydraulic properties of stainless steel slags [J]. Cement and Concrete Research, 2012, 42(6): 778-788.
- [5] Ashango A A, Patra N R. Behavior of expansive soil treated with steel slag, rice husk ash, and lime [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(7): 06016008.
- [6] 李 伟,王海龙,李 峰,等. 废钢渣与砂土的混合土材料力学特性试验 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2008, 24(5): 794-799.
- [7] Airey D W, Fahey M. Cyclic response of calcareous soil from the North-West shelf of australia [J]. Geotechnique, 1991, 41(1): 101-121.
- [8] 张 鹏,朱珍德,王 军,等. 不同掺剂对水泥土动力特性的影响 [J]. 长江科学院院报, 2014, 31(5): 62-67.
- [9] Yamanaka R, Tohyama S, Yoshikawa Y. Utilization history of blast furnace slag and steel-making slag [J]. Kobe Steel Engineering Reports, 1997, 47(3): 26-30.
- [10] Li W, Lang L, Li F D, et al. Investigation on the dynamic shear modulus and damping ratio of steel slag sand mixtures [J]. Construction and Building Materials, 2018, 162: 170-180.
- [11] 杨景玲,朱桂林,郝以党,等. 钢渣处理及综合利用 [M]. 北京: 中国环境出版社, 2015.
- [12] 梁 燕. 含水量对钢渣粘土混合料的力学特性影响试验研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2011.
- [13] 姚 旺. 高炉矿渣、粉煤灰和易土的混合土材料力学参数试验研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2012.
- [14] 谢定义. 土动力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [15] 涂 昆,刘家祥,邓 侃. 钢渣粉和钢渣水泥的活性及水化机理研究 [J]. 北京化工大学学报, 2015(7): 62-68.
- [16] 许 莹,张孜孜,王 变,等. 高活性钢渣水化活性及其机理研究 [J]. 混凝土, 2018(5): 76-79.