

钢渣-稻草纤维联合改良粉质黏土地基动力特性研究

李伟 徐子涵

沈阳建筑大学

DOI:10.12238/btr.v8i1.4617

[摘要] 土体的动剪切模量与阻尼比等动力学参数是进行土-结构动力相互作用分析和工程场地地震安全评价必不可少的内容,本文提出利用稻草纤维和钢渣联合改良粉质黏土地基。探究钢渣掺量不变时稻草纤维改良土体的最优掺量。研究发现加入稻草纤维可显著提高土体的动剪模量,而对阻尼比影响较小,纤维掺量为0.3%时加筋效果最好。

[关键词] 粉质黏土; 动剪切模量; 阻尼比; 稻草纤维

中图分类号: TU531.6 文献标识码: A

Study on dynamic characteristics of steel slag straw fiber combined improvement of silty clay foundation

Wei Li Zihan Xu

Shenyang Jianzhu University

[Abstract] The dynamic parameters such as dynamic shear modulus and damping ratio of soil are essential for the analysis of soil structure dynamic interaction and seismic safety evaluation of engineering sites. This paper proposes the use of straw fibers and steel slag in combination to improve silty clay foundations. Explore the optimal dosage of rice straw fiber for improving soil with constant steel slag content. Research has found that adding straw fibers can significantly increase the dynamic shear modulus of soil, while having little effect on the damping ratio. The best reinforcement effect is achieved when the fiber content is 0.3%.

[Key words] Silty clay; Dynamic shear modulus; Damping ratio; straw fiber

引言

粉质黏土在我国东部沿海地区分布广泛,其地基强度较低,整体稳定性差,一般可作低层建筑的天然地基,若作高层建筑物(7层以上)的地基则需进行地基处理。传统地基处理是向地基中掺入水泥,此做法可有效改良软弱土地基强度,但水泥属于非环保材料,为了践行可持续发展战略,考虑使用固体废弃物改良粉质黏土地基,这样一来可以显著降低工程成本,减少对自然资源的依赖,减少对环境的破坏,另一方面提高软弱土地基强度。近年来有学者发现钢渣的化学成分与水泥近似,于是将其用于地基加固领域^[1-3],将钢渣掺入土体中改良其力学特性。但钢渣改良后土体脆性强易开裂,因此学者提出将纤维与胶凝物质同时掺入土体^[4],提高土体强度的同时改善其韧性。稻草纤维是指将稻草秸秆放入秸秆破碎机中破碎后得到的细长纤维素物质,是一种天然的可再生资源,具有轻质、高强、无毒无害等优点^[5],钢渣是钢铁冶炼过程中的一种副产品,自1996年以来,我国钢渣产量持续位居世界第一,仅2023年我国钢渣产量约1.5亿吨,但目前我国钢渣的利用率仅为30%左右^[6],本文选取钢渣和稻草纤维联合改良粉质黏土地基,在钢渣掺量为30%下,通过共振柱试

验探究稻草纤维加筋土在动荷载作用下动力特性基本参数动剪切模量G和阻尼比D变化规律。

1 钢渣-稻草纤维粉质黏土共振柱试验

1.1 稻草纤维与钢渣的理化性质

稻草纤维主要由韧皮纤维和木质纤维组成,韧皮纤维占稻草纤维质量的70%以上,含有丰富的纤维素和半纤维素,木质纤维主要由木质素和纤维素构成。稻草纤维中各化学成分^[7]如表1所示,纤维素含量占比较高,表明其力学性能出色,半纤维素和木质素提供了纤维的韧性和化学稳定性。稻草纤维间有许多空隙,有利于纤维内水分和气体交换。

表1 稻草纤维化学成分含量(%)

材料	半纤维素	纤维素	木质素	脂蜡质	水溶物	果胶
稻草纤维	20.93	40.4	20.73	8.98	8.56	0.4

钢渣是炼钢过程中的副产品,转炉和电炉是其主要产生容器,转炉炼钢方式生成占比约70%。钢渣的矿物成分为硅酸二

钙(C₂S)、硅酸三钙(C₃S)、钙镁橄榄石、钙镁蔷薇辉石、铁酸钙(C₂F)以及RO相(硅、镁、铁、锰、磷的氧化物形成的固熔体)。钢渣的产量及成分由冶炼工艺、硅含量和白云石等决定^[8]。钢渣的化学成分主要包括氧化钙(CaO)、二氧化硅(SiO₂)、三氧化二铁(Fe₂O₃)、氧化镁(MgO)、氧化锰(MnO)和游离态氧化钙(f-CaO)等。

1.2 试验方案

为了研究不同纤维掺量、不同养护龄期和不同围压下钢渣-稻草纤维粉质黏土混合料的动剪切模量和阻尼比等的动力学参数的变化规律,采用如下方案:稻草纤维的掺量占固体物质总质量的比重分别为0%、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%,钢渣占固体物质总质量的30%,每组试样均按照最优含水率18.5%配置,养护龄期为7d,施加围压100kpa。每种配比进行三组平行试验,提高试验数据的可靠性。具体方案如表2所示。

表2 共振柱试验方案

纤维掺量/%	养护龄期7d		
	平行组1	平行组2	平行组3
0			
0.1	√	√	√
0.2	√	√	√
0.3	√	√	√
0.4	√	√	√

1.3 试样制备

制备试样时,按照比例称取相应质量的钢渣、稻草纤维、粉质黏土和纯净水,放入同一容器内并搅拌均匀。随后将纯净水逐次少量喷洒在混合料上,边喷边搅拌,使混合料形成18.5%含水率下的土膏,盖上保鲜膜静置24小时使水分均化。按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019)^[9]制备直径50mm、高100mm的试样,采用击实法分4次击实,每层厚度均匀,每层击实25次,击实前在模具内壁涂抹凡士林,防止粘附,为避免分层,每层击实完毕后需要进行刮毛处理,击实完成后,用削土刀修平土样两端,确保与三瓣模端面齐平,随后缓慢脱模(避免振动扰动),检查土样完整性。

1.4 试验步骤

首先对养护好的试件进行饱和处理,然后将饱和好的试件安装在共振柱底座上,安装好驱动装置同时装好玻璃罩,对试样施加5kpa的围压,使试样与乳胶膜紧密贴合,然后通过计算机控制反压器,对安装好的试样进行反压饱和,3h后关闭进水阀门,检查孔隙水压力系数B值,若B值大于0.95则说明试件已完全饱和。按照试验方案分别施加100kpa的围压,打开排水阀门对要测试的试件进行排水固结,直至孔隙水压力完全消散,1h内固结排水量不大于0.1cm³,说明固结完成,关闭排水阀门。打开共振柱试验系统,通过粗扫和细扫相结合找到并记录此应变时对应的

共振频率,随后进行该应变时的阻尼比测定,继续增大电压,记录不同电压对应的共振频率、动剪切应变和阻尼比,直至动剪切应变为0.01%时结束。

2 试验结果与分析

2.1 纤维掺量对试件动剪切模量的影响

通过公式(1)计算钢渣-稻草纤维粉质黏土混合料的动剪切模量G,

$$G = \left(\frac{2\pi fh}{\beta}\right)^2 \rho \tag{1}$$

式中:β为无量纲频率因数,由试件的转动惯量和仪器标定的转动惯量确定;h为试件实际高度,cm;f为实测的共振频率,Hz;ρ为试件密度g/cm³。

为探究稻草纤维的掺量对钢渣-稻草纤维粉质黏土混合料动剪切模量的影响,在7d养护龄期下,分别测量不同纤维掺量时试件的动剪切模量大小。图1为试件在不同纤维掺量、不同围压下动剪模量随其动剪应变的变化规律曲线。

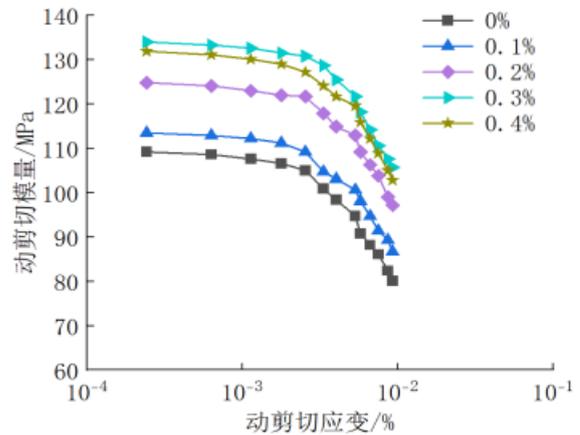


图1 不同纤维掺量下加筋土G-γ变化曲线

从图中可以看出,纤维加筋土的动剪切模量曲线总体均在未加筋土之上。随着稻草纤维掺量的增加,动剪切模量也随之增加,但0.4%纤维掺量曲线在0.3%纤维掺量曲线之下,表明纤维掺量超过一定值后,继续增加其掺量无法提高加筋土的动剪切模量,反而会使其降低;纤维掺量过多时难以搅拌均匀,会产生纤维团聚体,同时影响了钢渣的均匀分布,土颗粒间的胶凝作用变差,试件内部存在薄弱结构面,在小应变下测得的动剪模量会降低;且0.4%纤维掺量下对应的动剪切模量值高于0.3%纤维掺量时对应的值,表明稻草纤维改良土体动剪切模量的最优掺量为0.3%-0.4%。

在稻草纤维掺量相同的情况下,钢渣-稻草纤维粉质黏土混合料在10⁻⁴-10⁻²%区间内整体随动剪切应变的增大而减小,这说明混合料具有软黏土随应变增大而软化的特性。此外,在动剪应变为10⁻⁴-10⁻³%区间内,动剪切模量曲线变化较为平缓;而在动剪应变为10⁻³-10⁻²%区间内,动剪切模量曲线降幅较大;这说明混合土体在较小应变范围内处于弹性变形阶段,而随着应变的增大才出现应变软化现象。

2.2 纤维掺量对最大动剪切模量的影响

图2为钢渣-稻草纤维粉质黏土混合物在7d养护龄期、100kpa围压下最大动剪切模量与纤维掺量的关系曲线。

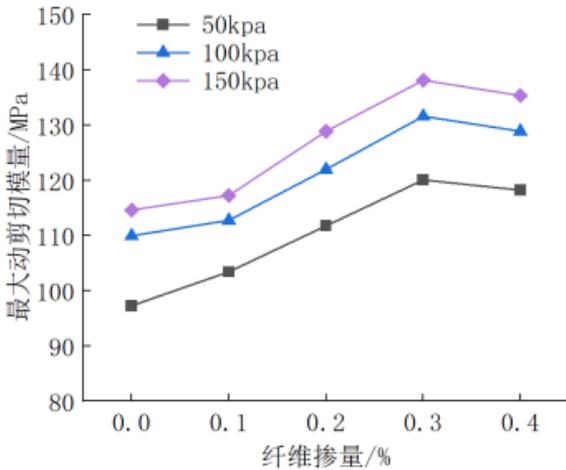


图2 混合物最大动剪切模量

从图2可以看出钢渣-稻草纤维粉质黏土混合物的最大动剪切模量随纤维掺量的增大呈现出先增大后减小的趋势。在纤维掺量为0.3%时出现最大值,此时钢渣水化反应所生成的大量胶凝物质附着在稻草纤维上,使稻草纤维和土颗粒间的摩擦力增强,提高了混合土体的整体性;纤维掺量为0.4%时对应的最大动剪切模量值大于纤维掺量为0.2%时的对应值,这说明稻草纤维改良粉质黏土小应变动力特性的最优掺量在0.3%-0.4%之间。

2.3 纤维掺量对阻尼比的影响

阻尼比是体现土体能量衰减、消耗特征的重要指标。钢渣-稻草纤维粉质黏土混合物的阻尼比是通过自由振动衰减法得到的,在共振状态下突然停止激励,记录土样自由振动的衰减波形,测量相邻振幅峰值 A_1 和 A_{n+1} ,代入公式(2)即可。

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

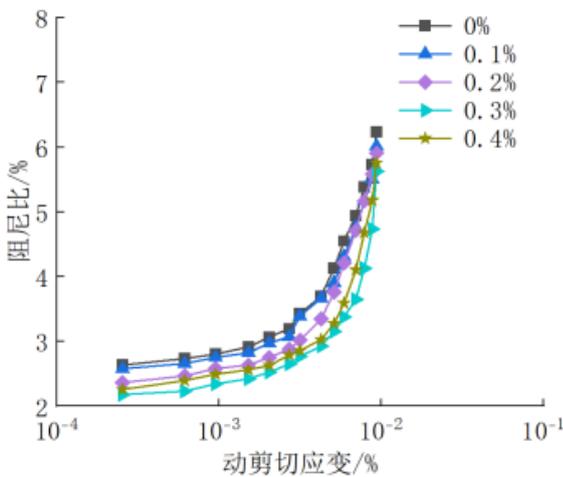


图3 不同纤维掺量下加筋土D-γ变化曲线

式中: N为计算所取得振动次数, A_1 、 A_{n+1} 分别为停止激励后第1周和第N+1周的振动振幅, mm。

图3为钢渣-稻草纤维粉质黏土混合物的阻尼比在7d养护龄期、100kpa围压、不同纤维掺量下随动剪切应变的变化规律曲线。

从图中可以看出当养护龄期和围压相同时,纤维掺量的变化对混合物的阻尼比有一定影响,具体表现为,混合物的阻尼比随纤维掺量的增大呈现出先减小后增大的趋势,当纤维掺量从0%增大至0.3%,混合物的阻尼比随稻草纤维掺量的增大而减小,当纤维掺量从0.3%增大至0.4%,混合物的阻尼比随稻草纤维掺量的增大而增大,但整体变化幅度不大。

3 结论

(1) 钢渣和稻草纤维联合改良粉质黏土地基时,加筋土的动剪切模量随着纤维掺量的增加呈现出先增大后减小的趋势,在纤维掺量为0.3%时达到最大值,且纤维掺量为0.4%时的动剪切模量值大于0.2%纤维掺量时的对应值,因此纤维改良粉质黏土地基的最优掺量为0.3%-0.4%之间;加筋土的最大动剪切模量随纤维掺量的增大变化趋势与动剪切模量相同。

(2) 钢渣和稻草纤维联合改良粉质黏土地基时,加筋土的阻尼比随纤维掺量的增大呈现出先减小后增大的趋势,但整体变化较小。

[参考文献]

[1]张亚军.钢渣固化土的性能研究及其固化机理的解耦分析[J].功能材料,2022,53(10):10167-10179.
 [2]王剑锋,常磊,王艳,等.钢渣胶凝活性与体积稳定性优化研究现状[J].材料导报,2023,37(11):119-127.
 [3]吴跃东,彭犇,吴龙,等.国内外钢渣处理与资源化利用技术发展现状综述[J].环境工程,2021,39(01):161-165.
 [4]郑俊杰.微生物固化纤维加筋砂土抗剪强度试验研究[J].土木与环境工程学报(中英文),2019,41(01):15-21.
 [5]刘洪凤,俞镇慌.秸秆纤维性能[J].东华大学学报(自然科学版),2002,(02):123-128.
 [6]马永富.阐述钢渣高效利用技术发展研究[J].冶金与材料,2022,42(2):31-32.
 [7]李传友,郝东生,杨立国.水稻小麦秸秆成分近红外光谱快速分析研究[J].中国农学通报,2014,30(20):133-140.
 [8]DasB,Prakash S, Reddy P S R, et al. An overview of utilization of slag and sludge from steel industries[J]. Resources, conservation and recycling,2007,50(1):40-57.
 [9]中华人民共和国建设部.土工试验方法标准:GB/T50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2019.

作者简介:

李伟(1968--),男,蒙古族,辽宁朝阳人,三级教授,博士,主要从事地基处理、岩土数值分析等方面研究。