

# 碱含量影响钢渣黏土的力学特性试验研究

李伟 冯一凡

沈阳建筑大学土木工程学院

DOI:10.12238/btr.v7i2.4268

**[摘要]** 目的: 研究碱含量变化对钢渣黏土混合土样力学性能变化的影响,探讨钢渣代替水泥在工程中用于软弱土加固的可行性。方法: 设计正交实验,将不同配合比的碱加入钢渣黏性土混合料中,养护规定龄期后,进行无侧限抗压试验,对比不同水平下试验结果R值并和水泥固化土对比。结果: 一定配合比下的碱激发剂可以使钢渣的水化速度加快,使混合土样的无侧限抗压强度在早期快速增长,在后期相较于单一激发剂作用强度损失少。结论: 通过与10%水泥黏土混合料的试验结果比较,一定配合比下的碱激发钢渣黏土混合料的无侧限抗压强度与其相似,在相同养护龄期时,碱激发钢渣可以代替一定掺量的水泥用于地基处理。

**[关键词]** 钢渣; 黏土; 无侧限抗压; 正交实验

中图分类号: TQ442.32 文献标识码: A

## Experimental study on small strain dynamic characteristics of steel slag-fly ash stabilized silty clay

Wei Li Yifan Feng

School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University

**[Abstract]** The work aims to study the effect of alkali content on the mechanical properties of steel slag clay mixed soil samples, and to explore the feasibility of steel slag instead of cement for soft soil reinforcement in engineering. Orthogonal experiment was designed to add alkali with different mix proportions to steel slag cohesive soil mixture. After curing the specified age, unconfined compression test was carried out to compare the changes of R value and range of test results at different levels. The results show that the alkali activator under a certain mix ratio can accelerate the hydration rate of steel slag, make the unconfined compressive strength of mixed soil samples increase rapidly in the early stage, and reduce the strength loss in the later stage compared with the single alkali activator. By comparing with the test results of 10 % cement clay mixture, the unconfined compressive strength of alkali-activated steel slag clay mixture under a certain mix ratio is similar to that of 10 % cement clay mixture. At the same curing age, alkali-activated steel slag can replace a certain amount of cement for foundation treatment.

**[Key words]** Steel slag; Clay; Unconfined compression; Orthogonal experiment

### 引言

钢渣本身作为炼钢中的主要工业副产品,在钢铁生产中大量产生,其作为一种固体废弃物,如何将其再利用起来也一直是一大难题。截至2022年,全球钢铁年产量约为19亿吨,中国钢产量约占全球总产量的55%,产生的钢渣长期堆放不仅占用场地并可能使钢渣中的金属离子渗入土壤,造成环境污染(修改为“钢渣”的数据)。但钢渣利用率却一直不高,每年约只有20%~30%左右的钢渣被回收利用;美国的钢渣利用率达到98%,其中高炉再利用和筑路用钢渣总量约占总钢渣利用量的65%以上,说明钢渣可以被广泛的用在铁路路基、道路路基的铺设中。在日本,钢渣主要作为路基材料,水泥熟料等方面,再利用率接近100%。

高效利用钢渣可减少资源浪费,促进资源的循环利用。“十

三五”以来,工业与信息化部接连颁布《工业绿色发展规划(2016-2020年)》、《“十四五”工业绿色发展规划》等文件,鼓励对钢渣等固体废弃物实现综合化规模化利用,拓宽钢渣综合利用的途径和规模。钢渣中含有的铁等有价值物质如果得不到有效回收,将会导致这些宝贵资源的损失。因此在处理钢渣中实现技术创新,提高资源回收效率,有助于环境保护和提高经济效益。提升钢渣利用率将推动钢铁行业的可持续发展,促进产业升级和经济发展,有利于实现环境友好型的可持续发展目标。

Argaw Asha Ashanggo<sup>[1]</sup>等研究钢渣固化膨胀土的力学特性,经过钢渣固化的膨胀土,无侧限抗压强度提高2倍,动力特性提高58%。钢渣能够有效地固化膨胀土。

Hardin<sup>[2]</sup>等探究了阻尼比和动剪切模量的关系,他们发现

了至今仍在使用的双曲线模型。Jian-Shiuh Chen<sup>[3]</sup>制备了以碱性氧化炉 (BOF) 钢渣为粗集料的沥青混合料, 并进行了室内试验, 确定了钢渣混凝土的工程特性。结果表明, 钢渣掺入沥青混合料中对永久变形的水分损伤有较高的抗性。

Marco Pasetto<sup>[4]</sup>等通过回转压实试验, 永久变形试验, 疲劳试验和间接拉伸强度试验得出钢渣沥青混合料性能良好, 钢渣与碎石相比, 具有与道路结构层相关的更好的性能指标, Wojciech Sas<sup>[5]</sup>等指出钢渣可用于高速公路和中等交通负荷道路的道路结构基础。

李伟<sup>[6]</sup>等将钢渣按一定比例分别掺入黏性土和砂土中, 发现处理后的土体的抗压能力得到提升, 抗剪强度增大, 最大阻尼比没有显著下降, 发现钢渣掺入比为30%, 含水率为18%时, 固化后黏性土的抗压强度和动力特性改良效果最好。

吴燕开等<sup>[7-8]</sup>、张浩等<sup>[9]</sup>研究发现, NaOH、NaSO<sub>4</sub>等碱作为常见的化学激发剂, 在水泥土中存在明显的激发作用, 可以提高固化土的强度, 随着养护龄期的增长, 水化产物Aft含生成量增加。但当加入的氢氧化钠含量过高时, 会抑制钢渣-水泥固化土的延性, 使固化土的90d强度下降。

丁铸等<sup>[10]</sup>研究发现, 石膏和碳酸钠对钢渣都有较好的激发作用, 其中水淬钢渣在碱激发后的水化活性表现更好。

### 1 试验介绍

表1 钢渣-水泥组成成分百分比对照表

原料	CaO (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MgO (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	FeO (%)	f-CaO (%)
钢渣	40.02	19.43	13.20	3.08	10.52	1.64	7.20	—
水泥	51.17	23.56	2.00	6.56	1.72	0.05	—	—

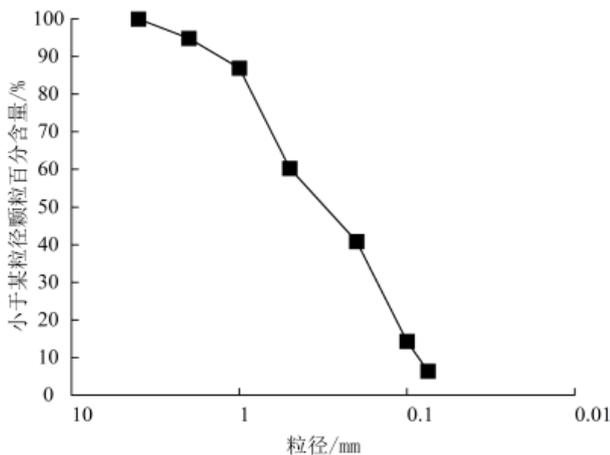


图1 钢渣粒径分布曲线

1.1 试验材料。本实验所使用的钢渣取自抚顺新抚钢公司, 钢渣中成分具体含量如表1所示, 主要成分均为CaO, SiO<sub>2</sub>, FeO及一些金属氧化物, 其中钢渣中的有效活性成分CaO, SiO<sub>2</sub>低于水泥中的含量, 同时RO相 (金属氧化物含量更高), RO相不参与水化反应, 这也是钢渣早期水化强度低于水泥的原因。钢渣的级配特

征曲线如图1所示。Cu值为5.76, Cc值为0.85, 颗粒分布曲线呈现偏平的形状, 表示颗粒分布较为均匀。其莫氏硬度为6.5, 密度为3.40g/cm<sup>3</sup>, 钢渣经过陈化后粉化率显著降低, 小于5%, 压碎值小于25%。以上钢渣物理力学性能均符合规范<sup>[11]</sup>。黏性土为重塑土样, 天然密度为1.7g/cm<sup>3</sup>, 塑性指数Ip为18.3%。NaOH、NaSO<sub>4</sub>、Ca(OH)<sub>2</sub>均为分析纯 (国药化学试剂有限公司), 有效成分含量均大于96%。实验用水为去离子水, 不含有导电性离子。

1.2 试样制备与试验方法。笔者所在团队利用钢渣水化混合料加固黏土在室温环境下, 在含水率为18%, 钢渣含量占总固体质量的30%时, 其力学性能与水泥占比为15%时最为接近, 钢渣含量占总固体质量的40%时, 其力学性能降低。并将不同量的NaOH、Ca(OH)<sub>2</sub>、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>和120g水按照一定的比例混合, 在室温下搅拌30分钟, 等到发热结束, 得到1~9不同比例的碱激发剂, 如表2所示。

表2 碱激发剂分类

试样序号	NaOH (g)	Ca(OH) <sub>2</sub> (g)	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (g)
1	1.8	2.7	6
2	1.8	5.4	12
3	1.8	8.1	9
4	3.6	2.7	12
5	3.6	5.4	9
6	3.6	8.1	6
7	5.4	2.7	9
8	5.4	5.4	6
9	5.4	8.1	12

将混合后的碱激发剂与180g钢渣搅拌混合, 在常温下静置30 min后加入420g黏性土中, 按照《土工试验规范》(GB/T)<sup>[12]</sup>制样方式将混合土制成φ39.1×80的土样, 将拌合物分5层装入三轴饱和器内, 使用击实工具每层振捣20次进行压实, 24h后脱模并用保鲜膜包裹。之后, 在温度为20.5℃, 相对湿度为95%的标准养护箱内养护3d、7d、28d、60d、90d, 每个组别每个龄期配置三个平行试样。之后分别对其进行无侧限抗压强度测试, 加载速率为1mm/min, 当测力计读数出现峰值时, 继续进行3%~5%的应变后停止试验, 当读数无峰值时, 试验进行到应变达20%为止, 记录应力读数。

### 2 试验结果分析

2.1 正交实验中的R值。对整体强度变化进行极差分析, 计算不同龄期下三种激发剂的R值如表3所示, R值越大表明该因素变化对整体强度的影响越大。在养护龄期为3d、7d、28d时, 固化土的强度主要受NaOH含量的影响。养护龄期为60d时, 固化土的强度主要受Ca(OH)<sub>2</sub>含量的影响。养护龄期为90d时, 整体强度主要受NaSO<sub>4</sub>含量影响, 但NaSO<sub>4</sub>掺量仍不宜过高, 体系中钠盐含量过高可能会导致试件表面泛碱。

表3 不同养护龄期各因素抗压强度R值

养护龄期	R 值		
	NaOH	Ca(OH) <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
3d	0.276	0.108	0.126
7d	0.270	0.126	0.150
28d	0.222	0.198	0.156
60d	0.276	0.486	0.186
90d	0.270	0.378	0.390

工程上一般以固化土的28 d强度为检测值,以90 d的强度为设计值,因此对28 d各组强度进行对比。组6配合比的碱钢渣固化土的无侧限抗压强度最大,为1.25 MPa,且在60 d后仍有强度增长。综合R值的分布情况,激发剂的最佳配合比为氢氧化钠0.6%,氢氧化钙1.35%,硫酸钠1%,和组6的配合比相同,因此认为组6的碱激发剂为最优配合比。

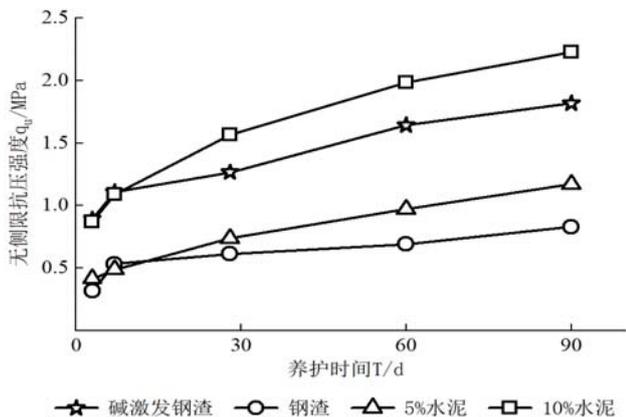


图2 不同混合土样抗压强度值

2.2对照试验。相较于钢渣固化土,碱激发钢渣固化土的28 d的无侧限抗压强度增长了106.45%,90 d强度增长了118.79%。纯钢渣水化速度慢,抗压强度增长缓慢,强度增长基本呈线性;在所有养护龄期中,碱激发钢渣固化土的无侧限抗压强度高于5%水泥固化土的强度;且碱激发钢渣固化土在7d前的强度与10%水泥固化土的强度相近,7d后略低于10%水泥固化土;28d时10%水泥固化土高于碱激发钢渣固化土 23.58%,90d时高于碱激发钢渣固化土 22.6%。总体来说,碱激发钢渣固化土的强度介于CS5和CS10固化土之间,同时碱钢渣固化土有更好的长期强度,在60d后仍存在一定的强度增长。同时由于所用钢渣粒径较粗,不如水泥填充土体孔隙的效果好,如采用机械研磨的方式可以进一步提高水化速度,因此若采用进一步陈化的钢渣,CAS可以达到采用10%水泥固化土的效果。

3 结论

本文在使用钢渣作为黏土固化材料的基础上,选择几种碱性试剂作为激发剂,通过设计正交实验的方式,选择激发剂的合理浓度,探究其不同龄期时碱激发剂对钢渣力学性能影响的变化,并得出以下结论:

(1)向钢渣中加入所特定配合比的碱激发剂,能提高钢渣固化土各龄期的抗压强度,混合碱激发剂让钢渣固化土的早期强度增长速度加快,90d强度下降幅度变小。(2)各碱激发剂中,氢氧化钙的含量变化在60d时对固化土整体强度影响最大,硫酸钠的含量变化在90d时对固化土整体强度影响最大。同时增高环境的碱度,可以加快钢渣的早期水化速度,因此氢氧化钠作为强碱,含量变化在28d前对固化土强度影响最大。(3)10%水泥和碱激发钢渣在黏土中固化效果相近,两者无侧限抗压强度随着养护龄期的增加而增大,龄期28d时,碱钢渣固化黏土的强度可以达到10%水泥强度的80%。同时碱激发钢渣黏土混合物有更好的长期强度,在90d时强度介于5%水泥和10%水泥固化土之间,说明碱激发钢渣在处理路基填土中的运用潜力。

[参考文献]

[1]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.

[2]Hardin B O, Drnevich V P. Shear modulus and damping in soils: design equations and curves[J].Journal of the Soil mechanics and Foundations Division,1972,98(7):667-692.

[3]Chen J S,Wei S H.Engineering properties and performance of asphalt mixtures incorporating steel slag[J]. Construction and Building Materials,2016,128:148-153.

[4]Pasetto M, Baldo N. Mix design and performance analysis of asphalt concretes with electric arc furnace slag[J]. Construction and Building Materials,2011,25(8):3458-3468.

[5]Sas W, Giuchowski A, Radziemska M, et al. Environmental and geotechnical assessment of the steel slags as a material for road structure[J].Materials,2015,8(8):4857-4875.

[6]Li W, Lang L, Wang 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.

[7]吴燕开,胡晓士,胡锐,等.烧碱激发钢渣粉在淤泥质土中的试验研究[J].岩土工程学报,2017,39(12):2187-2194.

[8]胡锐.钢渣粉外掺激发剂改良水泥土力学特性试验研究[D].山东:山东科技大学,2017.

[9]张浩,王林,龙红明.碱激发剂对钢渣胶凝材料抗压强度的影响[J].过程工程学报,2018,18(2):382-386.

[10]丁铸,王淑平,张鸣,等.钢渣水硬活性的激发研究[J].山东建材,2008,(4):47-51.

[11]GB/T20491-2017,用于水泥和混凝土中的钢渣粉[S].

[12]GB/T50123-2019,土工试验方法标准[S].