

赤泥磷石膏复合改良粉土抗压强度试验研究

Experimental Study on the Compressive Strength of Clay Improved by Red Mud and Phosphogypsum Composite

陈伟明

(中铁十二局集团市政工程有限公司, 广州 510000)

摘要: 为了解决赤泥磷石膏大量堆存所导致的一系列社会问题, 实现对赤泥磷石膏改良粉土的大规模资源化利用, 研究了不同赤泥磷石膏总掺量与不同赤泥磷石膏比例对赤泥磷石膏改良粉土的抗压强度和变形模量的影响, 并研究了赤泥磷石膏改良粉土的无侧限抗压强度与变形模量之间的关系。结果表明: 赤泥磷石膏的无侧限抗压强度与变形模量随着赤泥磷石膏掺量的增多而逐渐增大, 在赤泥磷石膏总掺量保持为 60% 时, 赤泥磷石膏的比例对其性能影响较大, 其中以赤泥: 磷石膏为 2:1 时的强度表现最为优异, 推荐作为最优掺量。

关键词: 强度特性; 无侧限抗压强度试验; 改良粉土; 赤泥; 磷石膏

中图分类号: TU449 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2025) 05-0043-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.05.009

CHEN Weiming

(China Railway 12th Bureau Group Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract: To address the series of social issues caused by the large-scale stockpiling of red mud and phosphogypsum, and to achieve large-scale resource utilization of red mud and phosphogypsum improved silt, the effects of different total dosages of red mud and phosphogypsum and different proportions of red mud and phosphogypsum on the compressive strength and deformation modulus of red mud and phosphogypsum improved silt were studied. Additionally, the relationship between the unconfined compressive strength and deformation modulus of red mud and phosphogypsum improved silt was investigated. The results show that the unconfined compressive strength and deformation modulus of red mud and phosphogypsum improved silt gradually increase with the increase of the dosage of red mud and phosphogypsum. When the total dosage of red mud and phosphogypsum is maintained at 60%, the proportion of red mud and phosphogypsum has a significant impact on its performance. Among them, the strength performance is the best when the ratio of red mud to phosphogypsum is 2:1, which is recommended as the optimal dosage.

Key words: strength characteristics; unconfined compressive strength test; improved silt; red mud; phosphogypsum

0 引言

赤泥与磷石膏分别是工业制取氧化铝和湿法制取磷酸时的工业副产品, 这两种固体工业废渣均存在产出量大、环境污染严重、难以利用等问题^[1-2]。

近些年来, 部分学者尝试利用赤泥与磷石膏对工程地质条件不良的土壤进行改性, 使其可以投入到生产建设中去, 以达到“以废治废”的效果。Chen 等^[3]利用赤泥对黄土进行改性, 结果表明赤泥的加入可以有效提高黄土的无侧限抗压强度, 并使得其抵抗动应力的性能也得到显著提高; Wang 等^[4]的研究表明火山灰中掺入 15% 的赤泥可以有效改良火山灰的机械强度; Zeng 等^[5]利用磷石膏改良水泥稳定疏浚土, 发现加入磷石膏所产生的钙矾石可以使得土体结构更为致密, 有效提高土体强度; Zhang

作者简介: 陈伟明 (1983—), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 工程技术研发与项目施工管理。

收稿日期: 2024-12-28

材料科学

等^[6]利用利用磷石膏改良红黏土,发现低磷石膏含量的改良土的强度与动剪切模量均高于高磷石膏含量组;Aswathy 等^[7]研究表明用赤泥改善黏土时仅加入 2% 的石灰,就能获得显著的无侧限抗压强度与 CBR;Devipriya 等^[8]研究表明在膨胀土中加入磷石膏可以降低土体的液限和塑限,增大其最大干密度,降低其最优含水率,同时磷石膏的加入也提高了其无侧限抗压强度,降低了膨胀率;陈瑞峰等^[9]研究发现在水泥含量固定时,赤泥含量的提高可以有效改善土体强度;丁建文等^[10]利用磷石膏代替部分水泥对土体进行改良,研究表明磷石膏的加入可以减少水泥的使用量。

以上学者的研究均是从一种工业废渣入手进行土体改良,部分学者认为赤泥的高碱性和赤泥本身所含的活性组分可以促进钙矾石的生成于是尝试联合使用赤泥与磷石膏对不良土体进行改良。Bandopadhyay 等^[11]的研究表明 20% 的赤泥与 30% 的磷石膏不仅可以有效提高膨胀土的土体强度,废弃物中的阳离子还可以进行离子交换降低膨胀土的膨胀压力;Wang 等^[12]利用赤泥、磷石膏、水泥组成混合粘结剂对粉砂进行改良,研究结果表明复合粘结剂对粉砂的改良效果要优于水泥稳定粉砂;Do 等^[13]利用赤泥、磷石膏、石灰、粉煤灰组成一种新型的无水泥粘合剂用于海洋疏浚土的稳定,研究结果表明该粘合剂可以有效提高疏浚土的强度,这主要来自于粘合剂的火山灰反应和钙矾石的生成;谷雷雷等^[14]等在利用赤泥与磷石膏两种工业废渣替代部分水泥,结果表明水泥:赤泥:磷石膏的最佳掺量约为 16:7:1。

同时在以往的研究中,诸多学者发现改良土的变形模量 E_{50} 与其无侧限抗压强度往往呈现出正相关的关系。沈君等^[15]的研究表明废渣地聚物稳定粉黏土的变形模量与其无侧限抗压强度大致呈现线性关系,即 $E_{50} = 74.1 \sim 162.5 q_u$;张亭亭等^[16]研究了磷酸镁水泥固化铅污染土变形模量与其无侧限抗压强度的关系大致为 $E_{50} = 50.4 q_u + 1.0$ 。

为了探究赤泥与磷石膏改良粉土的抗压强度特性,将对工业废渣改良粉土进行无侧限抗压强度试验,分析其应力应变规律及其随工业废渣掺量和养护龄期的变化趋势。

1 试验概况

1.1 试验材料

粉土取自某建筑工地,按照 JTG3040—2020《公路土工试验规程》^[17]中的试验方法进行基本物理测试,其颗粒级配曲线如图 1 所示,具体物理指标见表 1。

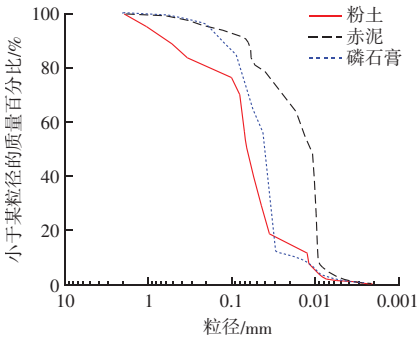


图 1 颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle gradation curve

试验所用赤泥(RM)来自于山东烟台某赤泥堆积场,属于拜耳法赤泥。磷石膏(PG)取自于河南郑州市某污水处理厂。

表 1 粉土的基本物理指标

Table 1 Basic physical indicators of silty soil

最优含水率 /%	最大干密度 /(g/cm ³)	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数
14.01	1.76	27.10	13.12	13.86

1.2 试验设计

将试验所用粉土、赤泥、磷石膏分别碾碎、烘干后过 2 mm 筛,按照所需比例混合均匀,加入适量水分之后闷料 24 h,在制样前加入占混合料干重 2% 的石灰,具体试验配比设计见表 2,含水率为 14%。试样采用静压成型的方式进行制样,按照 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》^[18]中的相关规定,选用试样尺寸 100 mm×100 mm 的圆柱形试样进行无侧限抗压强度测试。制样完成后将

表 2 改良粉土混合料的配合比

Table 2 Proportions of improved silty soil mixtures /%

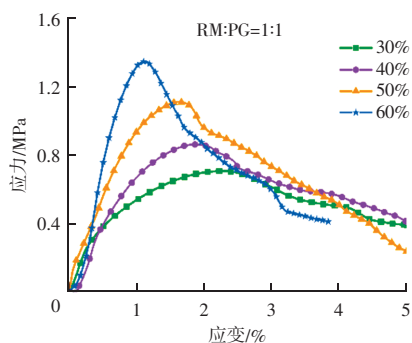
编号	赤泥 (RM)	磷石膏 (PG)	粉土	石灰
1	15	15	68	2
2	20	20	58	2
3	25	25	48	2
4	30	30	38	2
5	15	45	38	2
6	20	40	38	2
7	45	15	38	2
8	40	20	38	2

试样用保鲜膜密封后放入标准恒温恒湿养护室内养护至不同龄期后进行试验。

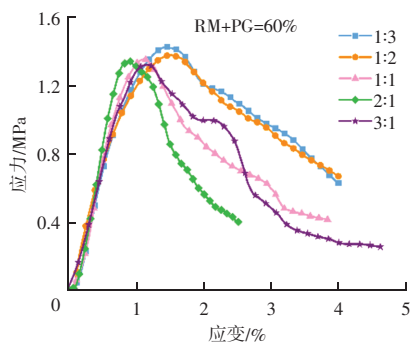
2 试验结果与分析

2.1 应力-应变曲线

由图 2 可知, 在养护龄期为 7 d 时, 保持赤泥与磷石膏的比例为 1:1 时总的工业废渣掺量的增加会使得改良粉土的峰值应力提高, 峰值应力所对应的应变随着其工业废渣掺量的增大而逐渐降低。此外, 可以看到, 随着工业废渣掺量的增加, 曲线上升段的速率和下降段的速率都有所增加, 这说明曲线脆性破坏的趋势更为明显。当试样的总掺量固定为 60% 时, 可以看到不同比例下的试样其峰值应力和峰值应变差别不大。



(a) 不同工业废渣掺量



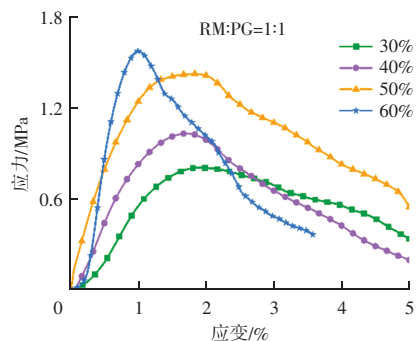
(b) 不同赤泥、磷石膏比例

图 2 7 d 养护龄期时的应力-应变曲线

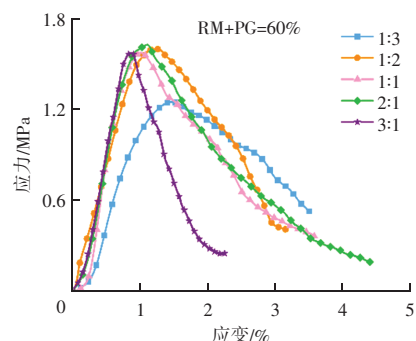
Fig. 2 Stress-strain curve at 7 days curing age

由图 3 可知, 养护龄期为 28 d 时的应力应变曲线的变化规律与 7 d 时各配比下的变化规律大致相同。但值得注意的是, 在养护龄期为 28 d 时部分试验配比下峰值应力所对应的应变较 7 d 时有所降低。7 d 时, 所有比例下的赤泥与磷石膏其峰值应力相差不大, 28 d 时部分试样的峰值应变有所下降但

多数比例下的峰值应力均差别不大, 但其应变变量略有差异。



(a) 不同工业废渣掺量



(b) 不同赤泥、磷石膏比例

图 3 28 d 养护龄期时的应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curve at 28 days of curing age

结合图 2 和图 3, 所有改良粉土其应力应变曲线的变化规律基本保持一致, 首先在荷载作用下被压实, 然后逐步进入弹性变形阶段, 此时改良粉土的应力应变曲线近似为一条直线, 试样进入弹性变形阶段。随着荷载的进一步增大, 应力达到峰值应力, 此时试样抵抗荷载的能力已经达到极限, 在后续的加载过程中, 试样的应力迅速下降, 应变持续增大, 这表明试样已经完全破坏, 无法承受更多荷载。同时, 所有的试样均表现出明显的脆性破坏的特征, 随着养护龄期的增加, 这一特征愈发明显。

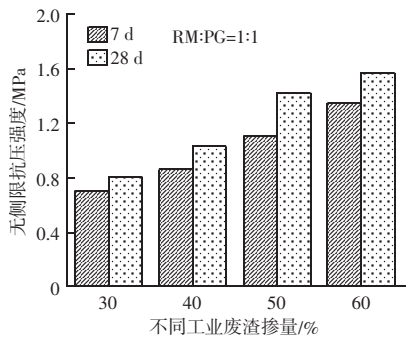
2.2 无侧限抗压强度

从图 4 (a) 中可以看出, 在赤泥:磷石膏为 1:1, 7 d 养护龄期时, 30% 工业废渣掺量的改良粉土其抗压强度仅为 0.71 MPa, 其余各组随着工业废渣掺量的增加其抗压强度也相应的提高, 60% 掺量的试样其强度达到了 1.35 MPa, 强度相较于 30% 工业废渣掺量下的改良粉土提高接近一倍。在 28 d 时, 60% 工业废渣掺量的改良粉土强度达到了 1.57 MPa, 而

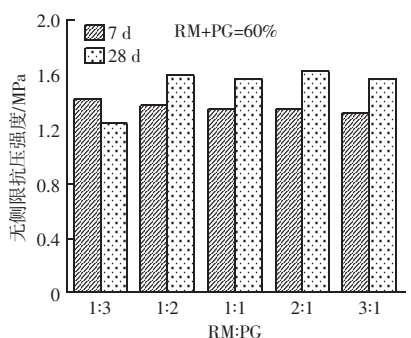
材料科学

此时 30% 工业废渣掺量的改良粉土其强度也仅有 0.80 MPa。这说明在同一养护龄期下,工业废渣的掺量与改良粉土的抗压强度呈现出正相关的趋势。同时,高掺量的工业废渣不仅可以提供较高的前期强度,其后期强度也同样远高于掺量较低的组。

由图 4 (b) 高工业废渣掺量下,改变赤泥与磷石膏的比例所带来的强度影响不大。在 7 d 时,赤泥:磷石膏为 1:3 组强度较高达到了 1.42 MPa 外,其余各组强度基本保持在 1.34 MPa 上下浮动。28 d 时,除赤泥:磷石膏为 1:3 组强度降低外,其余各组强度均有所提高,但整体来看,其强度相差不大,均保持在同一水平线上。



(a) 不同工业废渣掺量

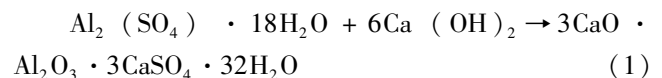


(b) 不同赤泥:磷石膏

图 4 改良粉土的无侧限抗压强度

Fig. 4 Unconfined compressive strength of improved silt

赤泥与磷石膏改良粉土强度提高的主要原因是钙矾石的生成^[19],其化学反应式如下:



通过该化学反应式可以看出,提高工业废渣的含量可以有效的提高钙矾石的生成,从而使得土体强度进一步的提高。然而从图 4 (b) 中可以看到磷石膏含量过高时,在养护后期可能出现强度下降的情况,这可能是由于过量的钙矾石引起了土体膨胀,

破坏了试样内部原有的胶结结构。此外,根据其化学反应方程式可以看出,高碱性的环境可能更有利于钙矾石的生成使得磷石膏中的有效组分充分反应。因此,在图 4 (b) 中的各组,虽然减少了混合物中的磷石膏含量,但是增大了赤泥的含量,使得整体环境处于碱性,有效激发了磷石膏的活性,使得更多的磷石膏可以参与到反应中去,使其后期强度大致保持相同。改良粉土的强度除了与土的初始状态有关外,与所加入工业废渣的含量、化学组分、活性、酸碱度等均可能存在一定的关系。

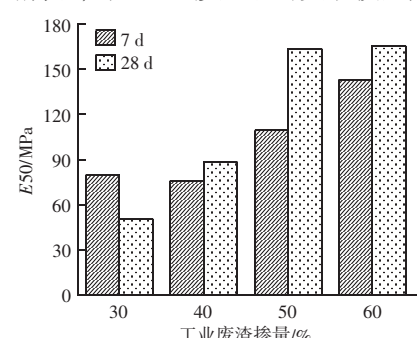
2.3 变形模量

E_{50} 是土体应力应变曲线上 50% 峰值应力对应的割线模量^[20],按照下式计算:

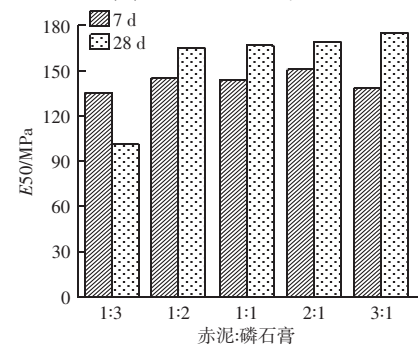
$$E_{50} = \frac{\sigma_{50}}{\varepsilon_{50}} \quad (2)$$

式中: E_{50} 为变形模量, MPa; σ_{50} 为 50% 峰值应力, MPa; ε_{50} 为 50% 峰值应力点对应的应变。

根据试样应力应变曲线的结果,计算其变形模量 E_{50} 绘制与图 5。在赤泥磷石膏比例保持不变时,其变形模量随着其工业废渣掺量的增大而增大,在 7 d 养护龄期下,从 30% 掺量下的变形模量为 80 MPa,



(a) 不同工业废渣掺量



(b) 不同赤泥:磷石膏

图 5 改良粉土的变形模量

Fig. 5 Deformation modulus of improved silty soil

而当掺量继续增大至 60 MPa 时, 试样的变形模量为 143 MPa。在 28 d 时, 除 30% 工业废渣掺量下的改良粉土变形模量降低为 51 MPa, 其余各个试样的变形模量均有所提高。对于工业废渣总掺量为 60%, 不同赤泥与磷石膏比例下的试样, 其 7 d 养护龄期下的变形模量相差不大, 而在 28 d 养护龄期下, 赤泥: 磷石膏为 1:3 组的变形模量相对于其 7 d 时的变形模量有所降低。

2.4 变形模量 E_{50} 与无侧限抗压强度的关系

由图 6 可知, 试样的变形模量与无侧限抗压强度基本呈现出线性相关的趋势, 大致分布范围为 $E_{50} = 74.13 \sim 112.76 q_u$ 的范围内, 平均值为 $E_{50} = 96 q_u$ 。值得注意的是, 虽然试样的无侧限抗压强度与其变形模量存在一定的线性关系, 但是其误差范围较大, 同时受到土样类型、固化剂种类、试样方法等因素的影响, 只能作为简单的预测。

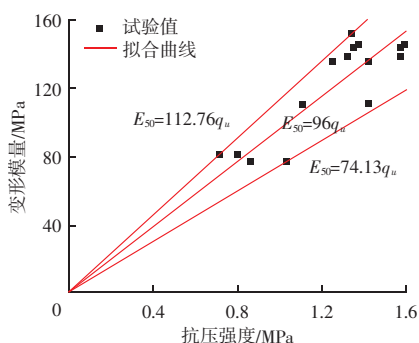


图 6 改良粉土的变形模量与无侧限抗压强度的关系

Fig. 6 Relationship between the deformation modulus of improved silty soil and unconfined compressive strength

3 结论

针对不同配比下的工业废渣改良粉土开展无侧限抗压强度试验研究其强度变化规律与能量特征, 主要结论如下:

(1) 试验范围内的改良粉土应力应变曲线均表现出类似的变化规律, 在达到峰值荷载后强度迅速下降, 表现出明显的脆性破坏特征; 在赤泥: 磷石膏保持 1:1 不变时, 其峰值应力与其所对应的应变表现出随工业废渣总掺量增大而增大的趋势。

(2) 在赤泥磷石膏的比例保持在 1:1 时, 改良粉土的抗压强度随着工业废渣的总掺量的提高表现出明显的增长趋势, 60% 掺量的改良粉土 7 d 时抗压

强度达到了 1.35 MPa 远高于其余各组; 在工业废渣掺量为保持 60% 时, 磷石膏含量最高的一组在 28 d 时出现强度劣化, 强度下降约 11.7%, 赤泥: 磷石膏 2:1 组强度表现最为优异, 28 d 抗压强度高达 1.62 MPa, 略高于其余各组。

(3) 试样的变形模量 E_{50} 与其无侧限抗压强度之间近似线性相关, 其大小大致为 $E_{50} = (74.13 \sim 112.76) q_u$ 。

参 考 文 献

- [1] WANG S, JIN H, DENG Y, et al. Comprehensive utilization status of red mud in China: A critical review [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 289 (11): 125136.
- [2] MESKINI S, MECHNOU I, BENMANSOUR M, et al. Environmental investigation on the use of a phosphogypsum - based road material: Radiological and leaching assessment [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 345: 118597.
- [3] CHEN R, CAI G, DONG X, et al. Mechanical properties and micro - mechanism of loess roadbed filling using by - product red mud as a partial alternative [J]. Construction and Building Materials, 2019, 216 (AUG. 20): 188 - 201.
- [4] WANG C, LIU H, WU D, et al. Engineering and environmental evaluation of red mud amended volcanic ash as a sustainable subgrade material [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 393: 136353.
- [5] ZENG L L, BIAN X, ZHAO L, et al. Effect of phosphogypsum on physiochemical and mechanical behaviour of cement stabilized dredged soil from Fuzhou, China [J]. Geomechanics for Energy and the Environment, 2020: 100195.
- [6] ZHANG B, CHEN K, ZHANG K, et al. Mechanical properties and modification mechanism of phosphogypsum stabilized soil [J]. SN Applied Sciences, 2022, 4 (8): 241.
- [7] ASWATHY M, SALINI U, GAYATHRI V G. Utility of Lime and Red Mud in Clay Soil Stabilization; IGC 2016 Volume 1 [M]. 2019.
- [8] DEVIPRIYA V P, CHANDRAKARAN S. Effect of Phosphogypsum as a Stabilizing Agent for Swelling Clays [C] //National Conference on Recent Advancements In Geotechnical Engineering. 2017.
- [9] 陈瑞锋, 闫炜炀, 刘晓凤, 等. 不同含水率下赤泥改良土的动弹模及阻尼比研究 [J]. 硅酸盐通报, 2017, 36 (8): 2810 - 2815.
- [10] 丁建文, 张帅, 洪振舜, 等. 水泥 - 磷石膏双掺固化处理高含水率疏浚淤泥试验研究 [J]. 岩土力学, 2010, 31 (9): 2817 - 2822.

材料科学

[11] BANDOPADHYAY A, GIRI D. Improvement of expansive soils mixed with red mud and phosphogypsum [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2023, 16 (5): 322.

[12] WANG S, CHEN Z, JIANG H, et al. Strength performance and enhancement mechanism of silty sands stabilized with cement, red mud, and phosphogypsum [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 73: 106762.

[13] DO T M, KANG G, VU N, et al. Development of a new cementless binder for marine dredged soil stabilization; Strength behavior, hydraulic resistance capacity, microstructural analysis, and environmental iMPact [J]. Construction and Building Materials, 2018, 186 (OCT. 20): 263–275.

[14] 谷雷雷, 王盛年, 张梅, 等. 水泥赤泥磷石膏复合固化粉砂土力学特性研究 [J]. 人民长江, 2024, 55 (增刊 2): 232–238.

[15] 沈君, 程寅, 金小平, 等. 废渣基地聚物稳定粉黏土性能试验研究 [J]. 岩土力, 2024, 45 (增刊 1): 147–156.

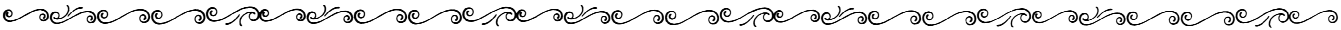
[16] 张亭亭, 李江山, 王平, 等. 磷酸镁水泥固化铅污染土的应力–应变特性研究 [J]. 岩土力学, 2016, 37 (增刊 1): 215–225.

[17] 公路土工试验规程: JTG3430—2020 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.

[18] 公路工程无机结合料稳定材料试验规程: JTG E51—2009 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.

[19] WAN X, DING J, WANG J, et al. Evolution in macro–micro properties of cement–treated clay with changing ratio of red mud to phosphogypsum [J]. Construction and Building Materials, 2023, 392: 131972.

[20] 王伟, 罗霄, 陈超, 等. 层状岩石不排气三轴压缩力学特性试验研究 [J/OL]. 岩土力学, 2024, 45 (5): 1334–1342.



(上接第 23 页)

[13] NIS A, EREN N A, CEVIK A. Effects of recycled tyre rubber and steel fibre on the impact resistance of slag–based self–compacting alkali–activated concrete [J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2023, 27 (1/3): 519–537.

[14] SHERWANI A F H, YOUNIS K H, ARNDT R W, et al. Influence of slag and recycled concrete aggregates contents on the performance of fly ash based self compacted geopolymer concrete [J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2024, 9 (8): 331.

[15] 柴明明, 李世佳, 杨飞雄, 等. 粉煤灰和聚丙烯纤维对喷射混凝土性能影响研究 [J]. 公路交通科技, 2022, 39 (增刊 2): 119–124.