

工业废渣协同水泥改良膨胀土试验研究

Experimental Study on Improving Expansive Soil with Industrial Waste Residue and Cement

穆佳启

(云南省设计院集团勘察院有限公司, 云南 昆明 650228)

摘要: 为推广水泥改良膨胀土在寒冷地区的应用, 探索工业废渣资源化利用的新路径, 本次研究提出采用工业废渣增强水泥改良膨胀土的抗冻性。得出主要结论如下: (1) 工业废渣协同水泥改良膨胀土的最佳配合比为 14% 水泥+10% 粉煤灰+2% 脱硫石膏; (2) ESC 试件与 ESC-FG 试件的三轴应力应变曲线形态相似, 但 ESC-FG 试件的应力应变曲线下降段比 ESC 试件平缓; 冻融循环下, ESC-FG 试件比 ESC 试件的外观更完整、质量损失更小、强度更高, 冻融循环 20 次后, ESC-FG 试件的强度较 ESC 试件高 89%; (3) 通过 SEM 电镜观察发现, 与 ESC 试件相比, ESC-FG 试件的水化产物数量更多、结构更密, 并形成以柱状钙矾石晶体和纤维状硅酸钙凝胶为结构骨架、硅酸钙凝胶为包裹的致密结构, 从而使其强度和抗冻性获得显著提升。

关键词: 膨胀土; 工业废渣; 水泥; 强度

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2023) 03-0005-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.03.005

MU Jiaqi

(Yunnan Design Institute Group Survey Institute Co., Ltd., Kunming China, 650228)

Abstract: In order to promote the application of cement-modified expansive soil in cold regions and explore a new path for the resource utilization of industrial waste residues, industrial waste residues were used in this study to enhance the frost resistance of cement-modified expansive soils. The main conclusions are as follows: (1) The optimal mix ratio of industrial waste and cement to improve expansive soil is 14% cement + 10% fly ash + 2% desulfurized gypsum; (2) The shape of the triaxial stress-strain curve of the ESC specimen is similar to that of the ESC-FG specimen, but the stress-strain curve of the ESC-FG specimen is gentler than that of the ESC specimen; under freeze-thaw cycles, compared with the ESC specimen, the appearance of the ESC-FG specimen is more complete, the mass loss is smaller, and the strength is higher. After 20 freeze-thaw cycles, the strength of the ESC-FG specimen is 89% higher than that of the ESC specimen; (3) SEM observation showed that the hydration products of ESC-FG specimens were more numerous and denser than ESC specimens, and form a dense structure with columnar ettringite crystals and fibrous calcium silicate gel as the structural framework and calcium silicate gel as the package, so its strength and frost resistance are significantly improved.

Keywords: expansive soil; industrial waste residue; cement; strength

0 引言

膨胀土在我国境内分布广泛, 其物理力学指标随含水率的变化而变化, 对上覆建筑物的结构稳定与安全产生不利影响, 因而在工程建设中必须采取措施对膨胀土进行改良^[1-2]。为此, 学者们开展了大量研究并取得了丰富的研究成果, 如采

作者简介: 穆佳启 (1982—), 男, 高级工程师, 本科, 研究方向: 岩土工程地质勘察。

收稿日期: 2022-05-17

岩土力学

用掺加粉煤灰、水泥、石灰等外加剂的方式改良膨胀土，在工程实践中获得了广泛应用^[3]。

粉煤灰改良膨胀土方面的研究成果指出，粉煤灰能够抑制其膨胀性，改善其水稳定性，增强其可击实性^[4-5]。石灰改良膨胀土方面的研究成果显示，石灰可以有效降低其膨胀率、抑制其内部裂缝发展、增强其强度及水稳定性，且最佳石灰掺量与膨胀土土质相关^[6-7]。水泥改良膨胀土方面的研究成果表明，水泥可以降低膨胀土的塑限指数和自由膨胀率，且水泥的强度增强效果较石灰与粉煤灰更佳^[8-9]。

然而，工程实践中发现水泥改性膨胀土的抗冻性较差，其强度在冻融循环下衰减严重，限制了水泥改性膨胀土在冻土地区的应用^[10]。增强水泥改性膨胀土强度稳定性的有效措施之一，是掺加外加剂以提高其的密实度^[11]。因此学者们针对复合水泥改性膨胀土开展了大量研究，以期提高水泥改良膨胀土在冻融循环下的强度稳定性。

燃煤电厂的运行过程中产生了大量如粉煤灰、脱硫石膏等工业废渣，其综合利用率仅 70% 左右，带来了储存成本高、扬尘污染大等问题^[12]。随着绿色经济发展模式的提出与落实，亟需探索资源化利用工业废渣的途径。研究表明，工业废渣可用于增强混凝土的强度及耐久性^[13]。为探索工业废渣协同水泥改良膨胀土的技术可行性，推广水泥改良膨胀土在寒冷地区的应用，研究了工业废渣协同水泥改良膨胀土的配比及其在冻融循环下的强度，并进一步通过 SEM 电镜观察分析其改良机理。

1 试验方案设计

1.1 试验原材料及试样制备

本次研究所用膨胀土取自河北某轨道工程项目现场，土样呈黄褐色，土体疏松、土质均匀。取样深度为地表以下 20 cm，取回土样待自然风干后碾碎，过 2 mm 筛备用。开展室内试验测定其基本物理性质，膨胀率 46.7%，为低膨胀土，其他物理性质指标详见表 1。

表 1 土样基本物理性质指标 Table 1 Basic physical properties of soil samples				
重度 / (kN/m ³)	液限 /%	塑限 /%	最优含水率 /%	自由膨胀率 /%
19.3	34.7	17.3	18.6	46.7

试验所用水泥为 P · O42.5 普通硅酸盐水泥，主要成分为 60% 的 CaO 与 22% 的 SiO₂，以及少量的 Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO。粉煤灰与脱硫石膏均为石家庄热电厂生产，其中粉煤灰为主要化学成分为 51% 的 SiO₂ 与 28% 的 Al₂O₃；脱硫石膏在 50 ℃ 下烘干后碾磨成粉，主要成分为 Ca₂SO₄ · 2H₂O 与 CaCO₃。

根据试验方案计算各材料用量，将各项原材料搅拌均匀后密封静置 8 h，采用静压法制备成 Φ40×H80 的圆柱体试样，养护 28 d 后开始试验。其中含水率按 21% 控制（最优含水率上浮 2% ~ 3%）。

1.2 试验方案

通过开展无侧限抗压强度试验确定工业废渣协同水泥改良膨胀土的最优配比：首先确定取回土样的水泥最佳掺量，艾志伟建议水泥掺量 7% ~ 20%^[14]，因此设计的水泥掺量为 9%、14%、19%；然后在最佳水泥掺量的基础上，分别掺加粉煤灰与脱硫石膏，确定这二者的最佳掺量，张伟锋建议粉煤灰掺量为 5% ~ 15%^[15]，因此设计的粉煤灰掺量为 5%、10%、15%；谢慧东指出复合砂浆中脱硫石膏最佳掺量为 6%^[16]，因此设计的脱硫石膏掺量为 2%、4%、6%；最后以这三者的最佳掺量为最优配比。在最优配比的基础上开展冻融循环试验，探究工业废渣协同水泥改良膨胀土的抗冻性。并进一步开展 SEM 电镜试验，分析工业废渣协同水泥改良膨胀土的固化机理。具体试件编号及外加剂掺量详见表 2。

表 2 试验方案设计表 Table 2 Experimental design table				
试验类型	试件编号	水泥	粉煤灰	脱硫石膏
无侧限抗压 强度试验	ES-C1	9%	0%	0%
	ES-C2	14%	0%	0%
	ES-C3	19%	0%	0%
	ESC-F1	14%	5%	0%
	ESC-F2	14%	10%	0%
	ESC-F3	14%	15%	0%
	ESC-G1	14%	0%	2%
	ESC-G2	14%	0%	4%
	ESC-G3	14%	0%	6%
冻融循环试验	ESC	14%	0%	0%
与 SEM 电镜试验	ESCG	14%	10%	2%

2 试验结果分析

2.1 最佳配合比确定

外加剂掺量与试件无侧限抗压强度关系曲线见图 1。可以看出, 水泥掺量 9%、14%、19% 下, 试件的无侧限抗压强度分别为 2.60 MPa、3.99 MPa、4.99 MPa, 说明试样的强度与水泥掺量表现为明显的正相关。综合考虑水泥改良膨胀土的技术性与经济性, 当水泥掺量不低于 14% 时改良土的强度已满足工程需求, 故将水泥最佳掺量确定为 14%。

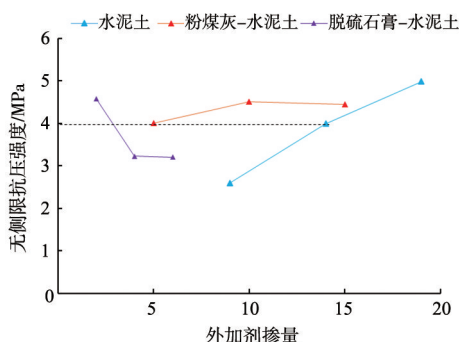


图 1 外加剂掺量与试件无侧限抗压强度关系曲线
Fig. 1 The relationship between the amount of admixture and the unconfined compressive strength of the specimen

在水泥掺量 14% 的基础上, 分别添加粉煤灰与脱硫石膏。获得粉煤灰-水泥土试件的无侧限抗压强度随粉煤灰掺量的变化曲线 (见图 1), 可以看出: 粉煤灰掺量 5%、10%、15% 下, 粉煤灰-水泥土试件的无侧限抗压强度分别为 4.00 MPa、4.50 MPa、4.44 MPa, 较水泥土的无侧限抗压强度分别增加了 0.23%、12.83%、11.28%; 说明粉煤灰掺量较低时, 对强度的贡献不大, 且随着掺量的增加, 粉煤灰-水泥改良膨胀土试件的强度先增后减, 因此确定粉煤灰的最佳掺量为 10%。

获得脱硫石膏-水泥土试件的无侧限抗压强度随脱硫石膏掺量的变化曲线 (见图 1), 可以看出: 脱硫石膏掺量 4%、6%、8% 下, 脱硫石膏-水泥土试件的无侧限抗压强度分别为 4.58 MPa、3.23 MPa、3.20 MPa, 较水泥土的无侧限抗压强度分别增强了 14.81%、-19.15%、-19.70%; 说明脱硫石膏掺量越高、强度越低, 因此确定脱硫石膏的最佳掺量为 2%。

综上所述, 确定工业废渣协同水泥改良膨胀土的最佳配合比为 14% 水泥+10% 粉煤灰+2% 脱硫石膏。

2.2 应力应变曲线

在前述最优配比的基础上开展三轴强度试验, 从应力应变曲线角度分析工业废渣协同水泥改良膨胀土的力学性能, 试件的应力应变曲线见图 2。可以看出, 两个试件的应力应变曲线形态相似, 上升段近似直线, 二者接近平行; 下降段曲线陡降后趋于稳定, 但 ESC-FG 试件的应力应变曲线下降段比 ESC 试件平缓, 说明工业废渣的加入增强了土样的塑性。

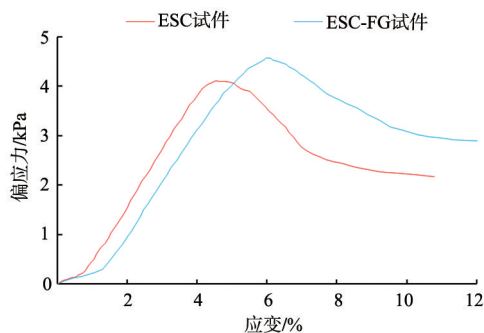


图 2 200 kPa 围压下试件的应力应变曲线
Fig. 2 Stress-strain curve of the specimen under 200 kPa confining pressure

2.3 冻融循环试验

在前述最优配比的基础上验证工业废渣协同水泥改良膨胀土的抗冻性能, 为此, 本次研究制备了水泥改良膨胀土与工业废渣协同水泥改良膨胀土试件, 开展了冻融循环实验。

2.3.1 试件形貌特征

冻融循环 20 次后试件表面破损情况见图 3。可以看出, 冻融循环 20 次后, ESC 试件破损非常严重, 试件表面坑洼不平, 试件底部出现了较大的缺角; 相比之下, ESC-FG 试件更为完整, 试件表面出现裂纹但整体较为光滑, 试件底部也出现了缺角但范围较小。

2.3.2 试件强度变化特征

试件强度随冻融循环次数的变化曲线见图 4。可以看出, 冻融循环下两个试件的强度均逐渐降低, 但 ESC-FG 试件的强度更高, 且降低趋势更平稳, 在冻融循环 15 次时 ESC 试件的强度陡降,

岩土力学



(a) ESC 试件 (b) ESC-FG 试件

图 3 冻融循环 20 次后的试件形貌

Fig. 3 Morphology of the specimen after 20 freeze-thaw cycles

这时试件出现大缺角；冻融 20 次后，ESC 试件的强度由 3.99 MPa 降低到 2.66 MPa，降幅 66%，ESC - FG 试件的强度由 4.57 MPa 降低到 3.58 MPa，降幅 43%，ESC - FG 试件的强度较 ESC 试件高 89%；说明添加粉煤灰与脱硫石膏后，水泥改良膨胀土在冻融循环下的耐久性获得了显著提升。

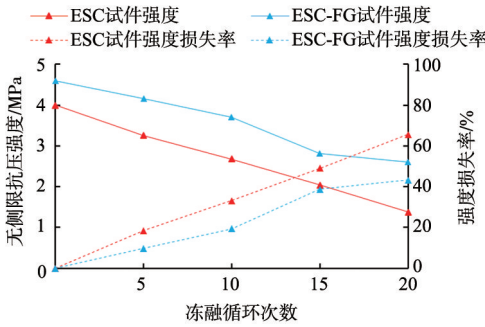


图 4 冻融循环下试件强度变化曲线

Fig. 4 The strength change curve of the specimen under freeze-thaw cycles

2.3.3 试件质量变化特征

试件质量随冻融循环次数的变化曲线见图 5。可以看出，冻融循环下两个试件的质量均表现为逐渐降低，其中 ESC 试件质量在冻融循环 15 次时急剧下降，原因为试件此时出现了较大的缺角，ESC-FG 试件质量变化曲线较为平稳；冻融循环 20 次后，ESC - FG 试件的质量由 214 g 降低到 208 g，降幅 3.0%，

ESC-FG 试件的质量较 ESC 试件高 3.5%；说明添加粉煤灰与脱硫石膏后，水泥改良膨胀土的抗冻性能更佳。

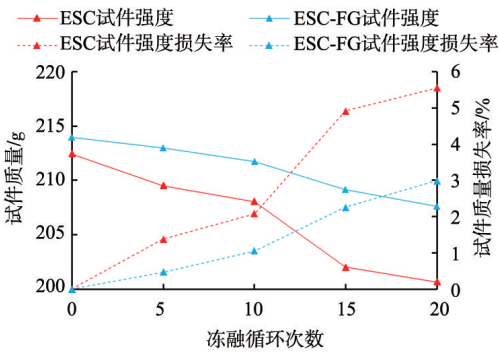
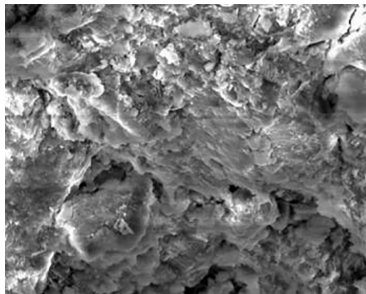


图 5 冻融循环下试件质量变化曲线

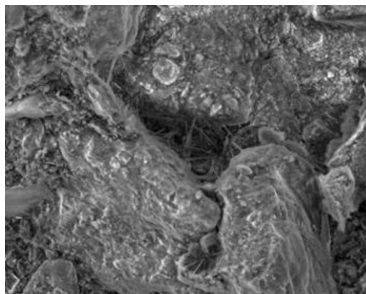
Fig. 5 Mass change curve of specimen under freeze-thaw cycle

3 工业废渣作用机理分析

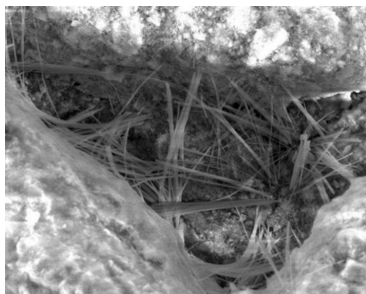
为进一步探讨粉煤灰与脱硫石膏增强水泥改良膨胀土耐久性的机理，对 28 d 龄期的 ESC 试件与 ESC-FG 试件进行了微观电镜 SEM 扫描试验，见图 6。从图 6 (a) 与图 6 (b) 可以观察到，放大 3000 倍时两个试样的土颗粒为团聚状的密实结构，土颗粒间孔隙较小，说明水泥、粉煤灰、脱硫石膏等外加剂已发生水化产生大量水化物，使土颗粒胶结成片；从图 6 (c) 与图 6 (d) 可以观察到，放大 10000 倍时两个试样土颗粒间有清晰的柱状钙矾石晶体与雪花状的水化硅酸钙；对比 ESC 试件与 ESC-FG 试件的 SEM 电镜图可以发现，ESC-FG 试件的水化产物数量更多、结构更密，ESC 试件的钙矾石晶体为细长的针状，ESC-FG 试件的钙矾石晶体为短粗的柱状。分析原因为，ESC-FG 试件中，一方面粉煤灰中的活性物质与水泥水化产物反应生成胶凝物质，填充细化了土颗粒间的孔隙；另一方面脱硫石膏激发了粉煤灰的活性而使这一反应更充分；最终形成以柱状钙矾石晶体和纤维状硅酸钙凝胶为结构骨架、硅酸钙凝胶为包裹的致密结构，从而使工业废渣协同水泥改良膨胀土的强度和抗冻性较水泥改良膨胀土显著提升。



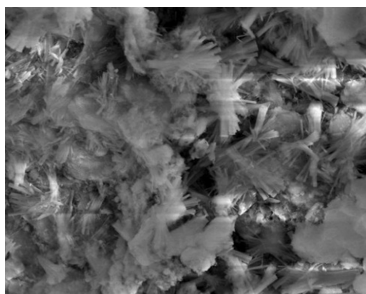
(a) ESC 试件放大 3000 倍



(b) ESC-FG 试件放大 3000 倍



(c) ESC 试件放大 10000 倍



(d) ESC-FG 试件放大 10000 倍

图 6 试件 SEM 电镜图
Fig. 6 SEM image of the specimen

4 结论

为克服水泥土抗冻性较差的不足,探索工业废渣资源化利用的新路径,推广水泥改良膨胀土

在寒冷地区的应用,本次研究采用了工业废渣协同水泥改良膨胀土,通过开展无侧限抗压强度试验确定工业废渣协同水泥改良膨胀土的最优配比,并在最优配比的基础上开展冻融循环试验,探究工业废渣协同水泥改良膨胀土在抗冻性,通过 SEM 电镜试验分析工业废渣协同水泥改良膨胀土的固化机理。得出主要结论如下:

(1) 随着粉煤灰掺量的增加,试件的强度先增后减,且掺量较低时对强度的贡献不大;脱硫石膏掺量超过 2%后会削弱试件强度,最终确定工业废渣协同水泥改良膨胀土的最佳配合比为 14% 水泥+10%粉煤灰+2%脱硫石膏;

(2) ESC 试件与 ESC-FG 试件的应力应变曲线形态相似,上升段为接近平行;下降段曲线陡降后趋于稳定,但 ESC-FG 试件的应力应变曲线下降段比 ESC 试件平缓;

(3) 冻融循环下,与 ESC 试件相比,ESC-FG 试件的外观更完整、质量损失更小、强度更高,冻融循环 20 次后,ESC-FG 试件的强度较 ESC 试件高 89%,ESC-FG 试件的质量较 ESC 试件高 3.5%;

(4) 通过 SEM 电镜观察发现,ESC-FG 试件的水化产物较 ESC 试件数量更多、结构更密,并形成以柱状钙矾石晶体和纤维状硅酸钙凝胶为结构骨架、硅酸钙凝胶为包裹的致密结构,从而使其强度和抗冻性获得显著提升。

参 考 文 献

- [1] 姚林芝,张鑫.关于膨胀土地基的处理及实例分析[J].工程建设,2021,53(11):38-42.
- [2] 鲍捷,申春妮,方祥位,等.膨胀土地基改良方法研究进展[J].粉煤灰综合利用,2019(5):98-104.
- [3] 徐永福.膨胀土地基的处理方法[J].河海大学学报,1998(6):29-33.
- [4] 王和鱼,章君飞,黄志成,等.石屑粉煤灰改良膨胀土的胀缩和强度特性[J].化学工程师,2021,35(7):76-81.
- [5] 冯美果,陈善雄,余颂,等.粉煤灰改性膨胀土水稳定性试验研究[J].岩土力学,2007(9):1889-1893.
- [6] 边加敏.石灰改良膨胀土的水稳定性研究[J].长江科学院院报,2016,33(1):77-82.

岩土力学

- [7] 韩晶, 王乐华, 马莉, 等. 水泥及石灰掺量对改良膨胀土抗剪强度的影响 [J]. 人民黄河, 2015, 37 (4): 137-139+144.
- [8] 王佩, 宋新江, 徐海波, 等. 水泥改性膨胀土基本特性试验 [J]. 水利水电科技进展, 2021, 41 (3): 56-60.
- [9] 徐海波, 宋新江, 王佩, 等. 水泥改性膨胀土强度与变形特性试验研究 [J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17 (4): 172-177.
- [10] 宁宝宽, 陈四利, 刘斌. 冻融循环对水泥土力学性质影响的研究 [J]. 低温建筑技术, 2004 (5): 10-12.
- [11] 姜伟昌. 基于 MICP 改良填筑膨胀土试验研究 [D]. 中南林业科技大学, 2020.
- [12] 陈晓龙, 梁川, 宋大勇. 燃煤发电企业固体废弃物的资源化利用研究综述 [J]. 东北电力技术, 2020, 41 (7): 27-30+59.
- [13] 陈瑜, 高英力, 王盛铭. 脱硫石膏-粉煤灰高性能化混凝土研究与应用 [J]. 公路交通科技, 2011, 28 (5): 33-38+97.
- [14] 艾志伟, 邓通发. 水泥土强度的影响因素研究进展 [J]. 公路, 2014, 59 (1): 195-199.
- [15] 张伟锋, 黄润秋, 裴向军, 等. 水泥土环境中粉煤灰水化与活性激发研究 [J]. 长春工程学院学报 (自然科学版), 2007 (1): 42-45.
- [16] 谢慧东, 张云飞, 栾佳春, 等. 脱硫石膏在水泥-粉煤灰-矿渣粉复合胶凝体系普通干混砂浆中的应用研究 [J]. 硅酸盐通报, 2011, 30 (3): 645-651.

(上接第 15 页)

- [2] 张新, 韩硕, 周广昊, 等. 连续悬挑混凝土结构支撑平台力学性能研究与应用 [J]. 施工技术 (中英文), 2022, 51 (12): 106-113.
- [3] 肖志, 陈立, 方伟明, 等. 扁长平面超限高层框筒结构设计 [J]. 建筑结构, 2021, 51 (21): 19-24+18.
- [4] 谭坚, 区彤, 张连飞, 等. 深圳机场卫星厅工程结构关键技术研究 [J]. 建筑结构, 2022, 52 (14): 41-49, 102.
- [5] 建筑抗震设计规范 (GB50011-2016) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [6] 李玉学, 冯励睿, 李海云, 等. 考虑风振响应特性的多目标等效静力风荷载实用分析方法 [J]. 振动工程学报, 2022, 35 (1): 140-147.
- [7] 高层建筑混凝土结构技术规程: JGJ 3—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [8] 王启文, 吴风利, 周斌, 等. 超限高层建筑大悬挑楼层结构设计 [J]. 建筑结构, 2016, 46 (22): 12-18.
- [9] 邢辉, 刘加俊, 汪安乐, 等. 大跨度钢筋桁架楼承板在钢结构住宅工程中的应用 [J]. 建筑技术, 2022, 53 (6): 720-722.
- [10] 冯方涛, 孙留洋, 王鹏, 等. 既有简支 C 型钢檩条连续化加固后性能影响因素分析 [J]. 工程抗震与加固改造, 2021, 43 (5): 129-137.
- [11] 李七雄, 韩少龙, 梁恒越, 等. 砖砌女儿墙根部水平裂缝的处理措施 [J]. 建筑技术, 2022, 53 (10): 1363-1365.
- [12] 钟永, 武国芳, 陈勇平, 等. 结构用木竹材料弹性模量标准值确定方法 [J]. 建筑结构学报, 2021, 42 (2): 142-150, 177.
- [13] 韩小雷, 王雨, 张一璐, 等. RC 剪力墙结构小震与中震设计对比及其抗震性能研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41 (1): 9-15.
- [14] 王建, 朱忠义, 周忠发, 等. 高位大跨度连体结构隔震减振多性能目标设计 [J]. 建筑结构学报, 2023, 44 (4): 54-62, 86.
- [15] 康谨之, 欧进萍. 消能减震结构抗超大震性能分析与设计 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2021, 44 (6): 794-800.
- [16] 刘晓蓬, 冯竟竟, 刘仲秋, 等. 3D 打印混凝土空腹重力坝的静力学数值模拟探讨 [J]. 硅酸盐通报, 2021, 40 (6): 1905-1910.

度以后的应力应变曲线的研究, 以及不仅在单轴压缩应力下, 在三轴压缩应力和拉伸应力下的研究, 都需要研究水饱和度对岩石力学行为的影响。

参 考 文 献

- [1] 秦虎, 黄滚, 王维忠. 不同含水饱和度煤岩受压变形破坏全过程声发射特征试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31 (6): 1115-1120.
- [2] TATONE B S A, ABDELAZIZ A, GRASSELLI G. Novel mechanical classification method of rock base on the uniaxial compressive strength and brazilian disc strength [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55 (4): 2503-2507.
- [3] 苏承东, 李怀珍, 张盛等. 应变速率对大理岩力学特性影响的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32 (5): 943-950.
- [4] 宋义敏, 邢同振, 邓琳琳等. 不同加载速率下岩石变形场演化试验研究 [J]. 岩土力学, 2017, 38 (10): 2773-2779+2788.
- [5] 李杰林, 洪流, 周科平等. 不同加卸载方式下饱和岩石力学特征的试验研究 [J]. 矿冶工程, 2021, 41 (2): 15-19+32.
- [6] 甘德清, 田晓曦, 高峰等. 循环冲击条件下磁铁矿石损伤特征研究 [J]. 金属矿山, 2020, No. 525 (3): 79-84.
- [7] PERERA M S A, RANJITH P G, PETER M. Effects of saturation medium and pressure on strength parameters valley brown coal: carbon dioxide, water and nitrogen saturations [J]. Energy, 2011, 36 (12): 6 941 - 6 947.
- [8] 刘忠锋, 康天合, 鲁伟等. 煤层注水对煤体力学特性影响的试验 [J]. 煤炭科学技术, 2010, 38 (1): 17-19.
- [9] 郑文红, 施天威, 潘一山等. 含水饱和度对岩石电荷感应信号影响规律研究 [J]. 岩土力学, 2022, 43 (3): 659-668.
- [10] 孟召平, 潘结南, 刘亮亮等. 含水量对沉积岩力学性质及其冲击倾向性的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (S1): 2637-2643.
- (上接第 41 页)
- [6] 李召峰, 李术才, 刘人太, 等. 富水破碎岩体注浆加固材料试验研究与应用 [J]. 岩土力学, 2016, 37 (7): 1937-1946.
- [7] 李召峰, 李术才, 张庆松, 等. 富水破碎岩体注浆加固模拟试验及应用研究 [J]. 岩土工程学报, 2016, 38 (12): 2246-2253.
- [8] 张伟杰, 李术才, 魏久传, 等. 富水破碎岩体帷幕注浆模型试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37 (9): 1627-1634.
- [9] 邓尤东, 周凯. 深孔注浆技术在岩溶富水隧道施工中的应用 [J]. 建筑施工, 2012, 34 (1): 36-37.
- [10] 李天斌, 孟陆波, 朱劲, 李永林, 牟力. 隧道超前地质预报综合分析方法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (12): 2429-2436.
- [11] 毛筱霏, 张艳艳, 胡富利, 等. 糯米浆改性烧料礞石灌浆材料力学性能试验研究 [J]. 应用力学学报, 2022, 39 (5): 965-973.
- [12] 朱永建, 任恒, 王平, 等. 含单一贯通破裂面岩石注浆试验及加固机理分析. 岩土力学, 2022 (12): 1-10.
- [13] 周梅, 白金婷, 郭凌志, 等. 基于响应曲面法的煤矸石地聚物注浆材料配比优化 [J]. 材料导报, 2023 (20): 1-14.
- [14] 胡瑶瑶, 王凯, 马川义, 等. 海底隧道注浆水泥-水玻璃浆液黏度时变特性 [J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2022, 4 (2): 90-97.
- [15] 迟凤霞, 韩博, 孙艺涵, 等. 矿物掺合料对水泥-水玻璃注浆材料性能的影响 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (2): 773-780.
- [16] 夏冲, 李传贵, 冯啸, 等. 水泥粉煤灰-改性水玻璃注浆材料试验研究与应用 [J]. 山东大学学报 (工学版), 2022, 52 (1): 66-73+84.