

改性流态固化土抗压性能试验研究

Experimental Study on Compressive Performance of Modified Fluidized Bed Solidified Soil

张会丽¹, 霍光²

- 石家庄市鹿泉区建筑业服务中心, 石家庄 050200;
- 河北建研科技有限公司, 石家庄 050227)

摘要: 固化土具有良好的抗压、抗冻、隔水及耐干湿循环性能, 广泛应用于水利、交通、港口等基础设施的建设领域。为改善其抗压性能, 选用河北省常见砂土、粉土、黏土作为研究对象, 通过不同配合比抗压性能试验研究, 分析了水泥、萘磺酸甲醛缩合物、无水硫酸钠、二氧化硅、粉煤灰、氯化钠对材料抗压强度的影响, 进一步建立改性流态固化粉土抗压强度与组分配合比的函数关系。研究表明: 加入萘磺酸甲醛缩合物、无水硫酸钠可提高固化粉体抗压强度; 增加粉煤灰、二氧化硅掺量时, 固化粉体抗压强度先增大后保持不变, 而氯化钠掺量增加可导致固化粉体抗压强度先增大后减小。研究结果可为固化土应用提供参考。

关键词: 固化土; 粉土; 抗压性能; 萘磺酸甲醛缩合物; 无水硫酸钠

中图分类号: TU44 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2025) 01-0089-06

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.01.017

ZHANG Huili¹, HUO Guang²

- Shijiazhuang Luquan District Construction Industry Service Center., Shijiazhuang 050200, China;
- Hebei Jianyan Technology Co., Ltd., Shijiazhuang 050227, China)

Abstract: Stabilized soil has good compressive, frost resistant, water-resistant, and dry wet cycle resistance properties, and is widely used in the construction of infrastructure such as water conservancy, transportation, and ports. To improve its compressive performance, common sandy soil, loess, and clay in Hebei Province were selected as research objects. Through different mix ratios of compressive performance tests, the effects of cement, naphthalene sulfonic acid formaldehyde condensate, anhydrous sodium sulfate, silica, fly ash, and sodium chloride on the compressive strength of the materials were analyzed. Furthermore, a functional relationship between the compressive strength of modified fluidized bed solidified loess and the composition ratio was established. Research has shown that the addition of naphthalene sulfonic acid formaldehyde condensate and anhydrous sodium sulfate can improve the compressive strength of cured powders; When increasing the dosage of fly ash and silica, the compressive strength of the solidified powder first increases and then remains unchanged, while increasing the dosage of sodium chloride can lead to an increase and then a decrease in the compressive strength of the solidified powder. The research results can provide reference for the application of solidified soil.

Key words: solidified soil; silt; compressive performance; naphthalene sulfonic acid formaldehyde condensate; anhydrous sodium sulfate

作者简介: 张会丽 (1974—), 女, 本科, 高级工程师, 研究方向: 建筑检测与质量监督。

通信作者: 霍光 (1991—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 绿色建筑建材、结构优化。

收稿日期: 2024-12-13

岩土力学

0 引言

固化土由于施工便利、成本低,在基坑回填及地基处理项目中得到了大范围应用^[1-2]。现有市场中固化剂往往仅对单一类型土有效,且目前流态固化土材料以水泥为主,增加了施工成本和环境污染^[3-4]。为满足坍落度要求,其拌合往往需要大幅提高水灰比,进而降低了材料强度,难以满足实际回填工程需要。为解决该问题,国内外对土壤固化剂配合比及影响展开深入研究,并取得许多研究成果以供实际应用。

早期的固化土材料主要为水泥固化剂,部分学者通过水泥砂浆固化土试验及工程项目研究,分析了水泥基固化剂对软土的影响^[5-6]。随着材料科学的发展及固废技术的推广,部分学者对矿渣、粉煤灰、钢渣等材料固化土技术开展研究^[7-8]。郭少华等^[9]将钙基膨润土、二氧化硅、氧化铝等作为无机固化剂,研究了纯水泥固化渣土中水泥、固化剂的最优配比;Xie 等^[10]利用工业废料开发了一种脱硫石膏、钢渣和矿渣固化剂(GSC),并对比了土-GSC和土-水泥混合料的无侧限抗压强度,结果表明GSC强度受钢渣掺量影响较大;李悦等^[11]对硫铝酸盐水泥和二水石膏预拌流态固化土固化剂材料进行研究,提出了硫铝酸盐水泥与二水石膏最优配比,采用该固化剂制备固化土试样28 d抗压强度可达1.3 MPa;陈瑞敏等^[12]以水泥、矿渣、粉煤灰、石膏组成CSFG固化剂,通过无侧限抗压试验对不同固化剂掺量、纤维长度、纤维掺料进行研究,分析了淤泥土固化机理,并提出最佳纤维掺量0.4%,最佳纤维长度12 mm;张鑫等^[13]采用水泥、膨胀土、泵送剂作为液态填充材料,进行固化土抗压性能试验,结果表明水泥、黄土掺量、膨胀土掺量、强风化岩粗骨料掺量、强风化岩细骨料掺量、泵送剂掺量对固化土抗压性能影响逐渐减小,且强度受硅元素损伤影响较大;宾伟等^[14]通过分析水泥固化再生骨料(RCA)对改性盐渍土抗压性能的影响,指出固化土随RCA掺量的增加呈现先增后减的变化趋势;田威等^[15]对矿渣基地聚物固化黄土抗压强度进行研究,提出采用矿渣单掺和水泥固化均可提高素黄土抗压强度,而矿渣粉单掺固化土抗压强度与矿渣粉掺量成反比,水泥固

化土的抗压强度与水泥掺量成正比,矿渣粉、水泥与黄土最优质量配合比分别为0.25:1和1:7。

现有研究大多集中于黄土、淤泥类固化土,固化剂大多为水泥、骨料、纤维掺料等,对萘磺酸甲醛缩合物、无水硫酸钠、二氧化硅、粉煤灰类固化剂材料研究较少。基于不同萘磺酸甲醛缩合物、无水硫酸钠、二氧化硅、粉煤灰等固化剂配合比下固化土抗压试验结果对比分析,研究了各材料对固化土性能的影响,采用回归分析方法建立了配合比与改性固化粉土抗压强度的函数关系,研究结果可为河北地区砂石、粉土、黏土固化技术提供参考。

1 改性流态固化土试验概述

1.1 试验材料

试验用水均为自来水,符合JGJ 63—2006《混凝土用水标准》相关要求。试验用土为河北地区砂土、粉土、黏土。土的基本性质见表1,颗粒级配分布如图1所示。水泥采用P·S·A 32.5水泥,基本参数见表2。

表1 土基本参数
Table 1 Basic soil parameters

土类别	天然密度/ (g/cm ³)	液限/%	塑限/%	塑性指数	孔隙比	压缩系数
黏土	1.71	45.7	22.7	23.0	0.79	0.24
粉土	1.78	26.8	18.4	8.4	0.55	0.21
砂土	1.85	18.3	13.6	4.7	0.53	0.19

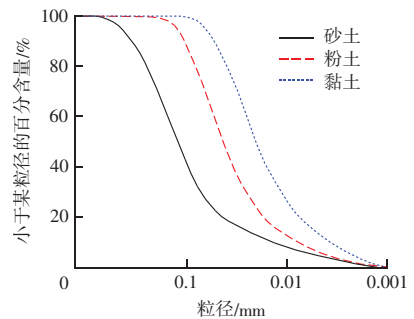


图1 颗粒级配分布曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve

表2 水泥基本参数

Table 2 Basic parameters of cement

密度/ (g/cm ³)	比表面积/ (m ² /kg)	凝结时间/ min		抗压强度/ MPa		抗折强度/ MPa	
		初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
2.94	346	151	245	24	43	3	8

1.2 试件参数

为研究固化剂掺量对改性流态固化土抗压性能

的影响，将水泥、萘磺酸甲醛缩合物、无水硫酸钠、件，各试件参数见表 3。
二氧化硅、粉煤灰掺量作为控制变量，分别制备试

表 3 改性流态试件配合比参数
Table 3 Modified flow state specimen mix ratio parameters

土种类	试验编号	水泥/kg	土/kg	萘磺酸甲醛缩合物/g	无水硫酸钠/g	二氧化硅/g	粉煤灰/g	氯化钠/g	水/kg	水固比
砂土	A1		10						4.85	0.485
砂土	A2	0.9	10						5.05	0.463
砂土	A3	0.9	10	29.4	39.2	9.8			4.75	0.433
粉土	B1		10						5.00	0.500
粉土	B2	0.9	10						5.25	0.482
粉土	B3	0.9	10	9.8	29.4				5.25	0.480
粉土	B4	0.9	10	19.6	29.4				4.95	0.452
粉土	B5	0.9	10	29.4	29.4				4.75	0.433
粉土	B6	0.9	10	39.2	29.4				4.65	0.424
粉土	B7	0.9	10	49.0	29.4				4.60	0.419
粉土	B8	0.9	10	58.8	29.4				4.60	0.419
粉土	B9	0.9	10	29.4	9.8				4.75	0.434
粉土	B10	0.9	10	29.4	19.6				4.75	0.434
粉土	B11	0.9	10	29.4	29.4				4.75	0.433
粉土	B12	0.9	10	29.4	39.2				4.75	0.433
粉土	B13	0.9	10	29.4	49.0				4.75	0.433
粉土	B14	0.9	10	29.4	58.8				4.75	0.432
粉土	B15	0.9	10	29.4	39.2		9.8		4.75	0.433
粉土	B16	0.9	10	29.4	39.2		19.6		4.75	0.432
粉土	B17	0.9	10	29.4	39.2		29.4		4.75	0.432
粉土	B18	0.9	10	29.4	39.2		39.2		4.75	0.432
粉土	B19	0.9	10	29.4	39.2		49.0		4.75	0.431
粉土	B20	0.9	10	29.4	39.2		19.6		4.75	0.432
粉土	B21	0.9	10	29.4	39.2	9.8	19.6		4.75	0.432
粉土	B22	0.9	10	29.4	39.2	19.6	19.6		4.75	0.432
粉土	B23	0.9	10	29.4	39.2	29.4	19.6		4.75	0.431
粉土	B24	0.9	10	29.4	39.2	39.2	19.6		4.75	0.431
粉土	B25	0.9	10	29.4	39.2	49.0	19.6		4.75	0.430
粉土	B26	0.9	10	29.4	39.2	9.8	19.6		4.75	0.432
粉土	B27	0.9	10	29.4	39.2	9.8	19.6	9.8	4.75	0.432
粉土	B28	0.9	10	29.4	39.2	9.8	19.6	19.6	4.75	0.432
粉土	B29	0.9	10	29.4	39.2	9.8	19.6	29.4	4.75	0.431
粉土	B30	0.9	10	29.4	39.2	9.8	19.6	39.2	4.75	0.431
粉土	B31	0.9	10	29.4	39.2	9.8	19.6	49.0	4.75	0.430
黏土	C1		10						5.10	0.510
黏土	C2	0.9	10						5.32	0.488
黏土	C3	0.9	10	29.4	39.2	9.8			4.75	0.433

2 试验结果分析

试验得到改性流态固化土配合比对抗压强度的影响关系曲线，如图 2 所示。

由图 2 (a) 可知，依次增加水泥、萘磺酸甲醛缩合物 - 无水硫酸钠 - 二氧化硅可以使砂土、黏土固化土抗压强度得到较大增长。28 d 下强度增长分别为 325%、470%，固化后抗压能力提高效果明显。由图 2 (b) 可知，当萘磺酸甲醛缩合物掺量较小时，不同龄期改性流态固化粉土抗压强度与萘磺酸甲

缩合物掺量正相关，增大萘磺酸甲醛缩合物掺量使改性流态固化粉土抗压强度快速增长，当掺量达到 29.4 g 时，继续增加萘磺酸甲醛缩合物掺量对抗压强度影响较小，固化粉体抗压强度近乎不变。由图 2 (c) 可知，随无水硫酸钠掺量增加，试件抗压强度先快速增长后逐渐趋于平稳，整体呈正相关，且当无水硫酸钠掺量为 58.8 g 时固化粉体抗压强度达到最大值 2.41 MPa。由图 2 (d) 可知，7、14 d 龄期下粉煤灰对改性流态固化粉土抗压强度基本无影响，而 28 d 龄期下粉煤灰对改性流态固化粉土抗压强度

岩土力学

的提高有积极作用,少量增加粉煤灰可提高固化土的抗压性能,但整体影响相对较小。由图 2 (e) 可知,少量掺加二氧化硅可提高固化土 14、28 d 抗压强度,但随着二氧化硅掺量逐渐变大,其对土体强度影响趋于平稳。由图 2 (f) 可知,少量增加氯化钠掺量

时,可略微提高固化土强度;但随氯化钠掺量增大,固化土强度呈下降趋势。

上述分析讨论了固化剂各组分掺量对抗压强度的影响,为便于固化剂更好的应用于工程实际,进一步对材料配合比开展研究。

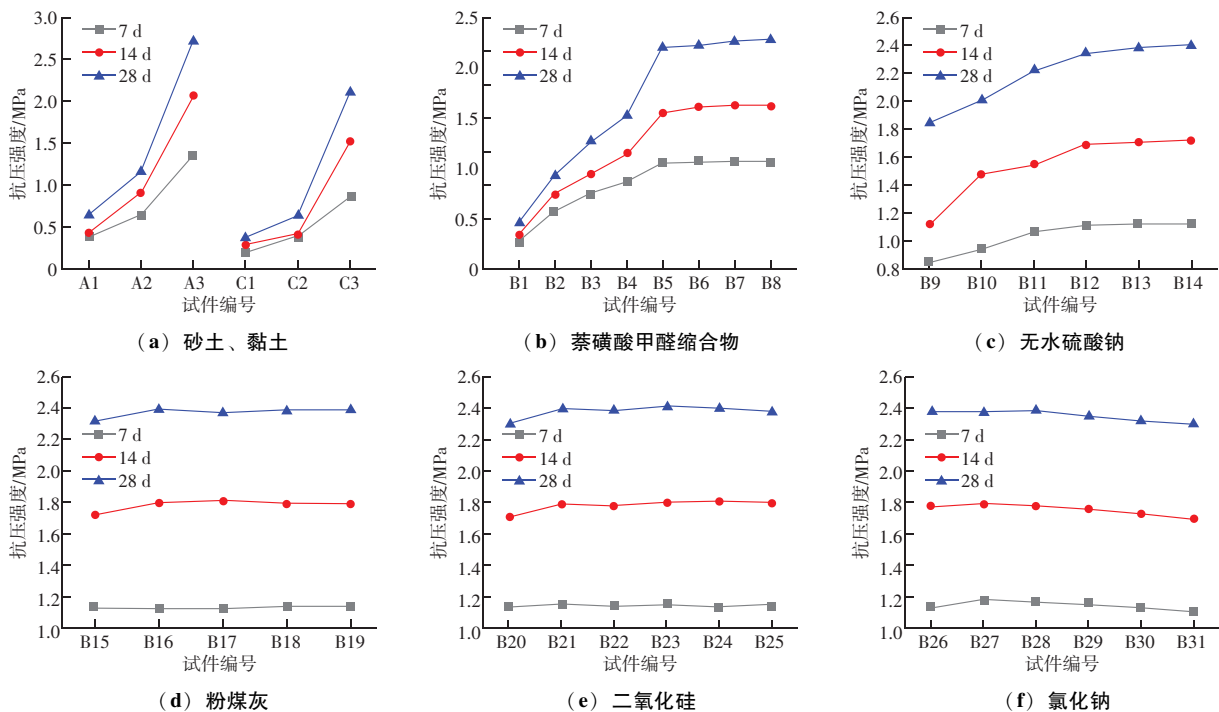


图 2 各掺量对抗压强度影响曲线

Fig. 2 Influence curve of each dosage on compressive strength

3 配合比设计

3.1 养护龄期与抗压强度的关系

已有研究表明,固化土抗压强度与龄期呈对数增长^[16],而各龄期下,由于萘磺酸甲醛缩合物、无水硫酸钠、二氧化硅、粉煤灰、氯化钠掺量不同,导致固化粉土强度出现了较大差异,结合试验结果对各组分掺量与强度进行数值模拟,以建立准确的配合比函数模型。假定配合比与固化粉体强度满足下式:

$$g(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = a_1 \ln[f(x_1) + f(x_2) + f(x_3) + f(x_4) + f(x_5)] + a_2 \quad (1)$$

式中: $g(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$ 表示固化剂配合比与强度的函数关系; $f(x_1)$ 、 $f(x_2)$ 、 $f(x_3)$ 、 $f(x_4)$ 、 $f(x_5)$ 分别表示萘磺酸甲醛缩合物、无水硫酸钠、二氧化硅、粉煤灰、氯化钠掺量对固化粉体强度的

影响; a_1 、 a_2 为拟合参数。通过 MATLAB 工具箱数值拟合可得到 7、14 d 龄期下 a_1 分别取 0.556 2、0.970 4; a_2 分别取 0.642 0、0.879 6, R^2 分别为 0.959 2、0.914 6, 均大于 0.9, 说明拟合度较好。

3.2 配合比与抗压强度的关系

由图 2 (b)、(c) 可知,萘磺酸甲醛缩合物、无水硫酸钠与强度关系近似呈现对数或指数关系,可分别拟合以得到最优拟合。由图 2 (d)、(e) 可知,随着粉煤灰、二氧化硅增加,抗压强度先增大后保持不变,两者近似呈指数关系,由图 2 (f) 可知,增加氯化钠使得抗压强度先增大后减小,两者近似呈幂指数关系。

根据上述分析可近似得到参数影响拟合公式。对各参数分别采用幂指数、对数、高斯拟合,选取相关系数最大的函数模型作为固废土配合比与强度的函数模型,所得固废土配合比与强度可采用公式

(2) 表征。函数 $f(x_1)$ 、 $f(x_2)$ 、 $f(x_3)$ 、 $f(x_4)$ 、 $f(x_5)$ 相关系数 R^2 依次为 0.965 8、0.993 8、0.991

2、0.997 4、0.936 3，均大于 0.90，说明拟合程度较高。

$$\begin{cases} g_7(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = 0.5562 \ln g_{28}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) + 0.642 \\ g_{14}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = 0.9704 \ln g_{28}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) + 0.8796 \\ g_{28}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = f(x_1) + f(x_2) + f(x_3) + f(x_4) + f(x_5) - 0.9044 \\ f(x_1) = 2.346e^{-[(x_1-48.65)/49.89]^2} \\ f(x_2) = 2.413e^{-[(x_2-55.03)/86.46]^2} \\ f(x_3) = 2.39e^{-[(x_3-55.83)/255.9]^2} \\ f(x_4) = 2.408e^{-[(x_4-32.32)/150.9]^2} \\ f(x_5) = 2.384e^{-[(x_5-6.102)/218.3]^2} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $g_7(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$ 、 $g_{14}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$ 、 $g_{28}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$ 分别表示 7、14、28 d 固化粉体强度。

试验值与计算值如图 3 所示，说明吻合度较高，公式 (2) 可较好的反映萘磺酸甲醛缩合物、无水硫酸钠、二氧化硅、粉煤灰、氯化钠掺量对固化粉体强度的影响。

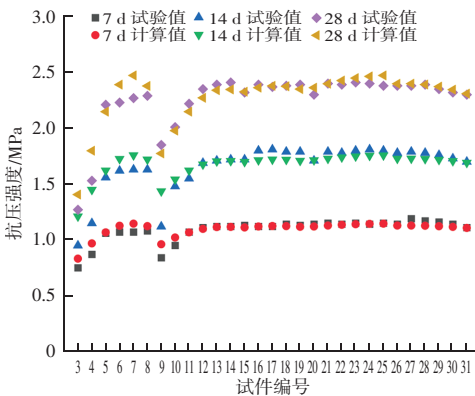


图 3 试验值与计算值对比

Fig. 3 Comparison of experimental and calculated values

4 结论

为粉土固化剂配合比对固化粉体抗压强度的影响，基于不同固化剂配合比掺量下固化粉体抗压试验结果分析，分析了萘磺酸甲醛缩合物、无水硫酸钠、二氧化硅、粉煤灰、氯化钠对固化粉体强度影响规律，并得出如下结论：

(1) 萘磺酸甲醛缩合物、无水硫酸钠掺量增加可使改性流态固化粉土抗压强度快速增涨，而粉煤灰、二氧化硅掺量增加时，固化粉体抗压强度先增

大后保持不变，氯化钠掺量增加可导致固化粉体抗压强度先增大后减小。

(2) 采用对数函数、幂指数函数及高斯函数分别对固化剂配合比掺量进行拟合，高斯函数拟合相似度最高， R^2 均达到 0.93 以上，拟合程度较好。

(3) 改性固化粉土与养护龄期呈对数函数关系，基于此结合配合比各参数影响可分别建立 7、14、28 d 养护龄期下强度计算公式，通过试验值与计算值对比，说明所建公式可较好反映配合比对抗压强度影响，研究成果可为改性固化粉土技术应用提供支撑。

参 考 文 献

- [1] 朱霖, 何磊, 王章明, 等. 软土地基就地固化工艺的试验研究与工程应用 [J]. 公路, 2023, 68 (3): 75-80.
- [2] 郝国栋, 王晨, 杨振, 等. 基于层次分析法的重金属污染土固化效果评价 [J/OL]. 太原理工大学学报, 1-10 [2025-01-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/14.1220.N.20241224.0842.002.html>.
- [3] 林文逸, 方祥位, 雷运涛, 等. 流态固化淤泥复合胶凝材料配比优化及其固化机理 [J/OL]. 土木与环境工程学报 (中英文), 1-11 [2025-01-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20241101.1140.002.html>.
- [4] 石成恩, 缪锋, 许华聪, 等. 激发剂对高掺量碱渣流态固化土基本性能的影响研究 [J]. 新型建筑材料, 2024, 51 (9): 48-52.
- [5] 张顶飞, 刘涛, 郝琪, 等. 固废地质聚合物固化沿海软土的力学机理与劣化性能研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2024, 32 (6): 1582-1596.
- [6] AMULYA S, SNANKAR A U R, PRAVEEN M. Stabilisation of lithomargic clay using alkali activated (下转第 112 页)

建筑结构

(2) 随着振型阶数的升高, 初始位移、预应力的增强以及矢跨比的增加, 结构的振动频率相应提高。同时, 膜材具有各向异性, 其各向弹性模量存在差异, 且在振型阶数 $m=1$ 、 $n=3$ 与 $m=3$ 、 $n=1$ 时所对应的频率并不相同, 这充分表明膜材的正交异性对其力学性能具有不可忽视的影响。

在实际工程领域中, 可通过合理调节预应力水平、优化矢跨比等手段, 对结构的动力特性进行有效调控, 从而满足工程设计的特定要求, 确保结构在使用过程中的稳定性与可靠性。

参 考 文 献

- [1] LIU C J, ZHENG Z L, HE X T, et al. L-P perturbation solution of nonlinear free vibration of prestressed orthotropic membrane in large amplitude [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2010 (3): 242-256.
- [2] LIU C J, ZHENG Z L, YANG X Y, et al. Geometric nonlinear vibration analysis for pretensioned rectangular orthotropic membrane [J]. *International Applied Mechanics*, 2018, 54 (1): 104-119.
- [3] 何泽青, 张冬辉, 宋林, 等. 正交异性薄膜非线性振动分析 [J]. *振动与冲击*, 2018, 37 (12): 252-259.
- [4] 李英民, 宋维举, 王肖巍. 固支薄膜结构强非线性振动解析方法研究 [J]. *振动与冲击*, 2019, 38 (17): 144-148, 177.
- [5] 田志莹, 宋维举, 王欣欣. 改进多尺度法在膜屋盖静风稳定分析中的应用 [J]. *建筑科学*, 2020, 36 (3): 10-16.
- [6] SONG W J, XU J, WANG X W, et al. Effect of geometric nonlinearity on membrane roof stability in air flow [J]. *Shock and Vibration*, 2020 (1): 1-13.
- [7] SONG W J, DU L L, ZHANG Y F, et al. Strongly nonlinear damped vibration of orthotropic membrane under initial displacement: theory and experiment [J]. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 2021, 9 (6): 1359-1372.
- [8] ZHANG Y F, SONG W J, YIN H M, et al. Improved homotopy perturbation solution for nonlinear transverse vibration of orthotropic membrane [J]. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 2022, 10 (3).
- [9] XU Y P, ZHENG Z L, LIU C J, et al. Aerodynamic stability analysis of geometrically nonlinear orthotropic membrane structure with hyperbolic paraboloid [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2011, 137 (11): 759-768.
- [10] LIU C J, DENG X W, ZHENG Z L. Nonlinear wind-induced aero-dynamic stability of orthotropic saddle membrane structures [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2017, 164: 119-127.
- [11] 孙芳锦, 徐中豪, 张敏. 风与柔性结构流固耦合作用的预处理方法研究 [J]. *应用力学学报*, 2020, 37 (2): 846-850.
- [12] 张安琪, 杨新峰, 刘平. 考虑流固耦合作用的气膜建筑力学性能分析 [J]. *科学技术与工程*, 2023, 23 (20): 8753-8762.
- [13] 刘章军, 陈建兵, 彭勇波. 结构动力学 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
- [14] LIU C J, ZHENG Z L, JUN L, et al. Dynamic analysis for nonlinear vibration of prestressed orthotropic membrane with viscous damping [J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2013, 13 (2): 1350018.
- [15] 徐云平. 正交异性张拉膜结构非线性气动稳定性分析 [D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [1] LIU C J, ZHENG Z L, HE X T, et al. L-P perturbation solution of nonlinear free vibration of prestressed orthotropic membrane in large amplitude [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2010 (3): 242-256.
- [2] LIU C J, ZHENG Z L, YANG X Y, et al. Geometric nonlinear vibration analysis for pretensioned rectangular orthotropic membrane [J]. *International Applied Mechanics*, 2018, 54 (1): 104-119.
- [3] 何泽青, 张冬辉, 宋林, 等. 正交异性薄膜非线性振动分析 [J]. *振动与冲击*, 2018, 37 (12): 252-259.
- [4] 李英民, 宋维举, 王肖巍. 固支薄膜结构强非线性振动解析方法研究 [J]. *振动与冲击*, 2019, 38 (17): 144-148, 177.
- [5] 田志莹, 宋维举, 王欣欣. 改进多尺度法在膜屋盖静风稳定分析中的应用 [J]. *建筑科学*, 2020, 36 (3): 10-16.
- [6] SONG W J, XU J, WANG X W, et al. Effect of geometric nonlinearity on membrane roof stability in air flow [J]. *Shock and Vibration*, 2020 (1): 1-13.
- [7] SONG W J, DU L L, ZHANG Y F, et al. Strongly nonlinear damped vibration of orthotropic membrane under initial displacement: theory and experiment [J]. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 2021, 9 (6): 1359-1372.
- [8] ZHANG Y F, SONG W J, YIN H M, et al. Improved homotopy perturbation solution for nonlinear transverse vibration of orthotropic membrane [J]. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 2022, 10 (3).
- [9] XU Y P, ZHENG Z L, LIU C J, et al. Aerodynamic stability analysis of geometrically nonlinear orthotropic membrane structure with hyperbolic paraboloid [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2011, 137 (11): 759-768.
- [10] LIU C J, DENG X W, ZHENG Z L. Nonlinear wind-induced aero-dynamic stability of orthotropic saddle membrane structures [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2017, 164: 119-127.
- [11] 孙芳锦, 徐中豪, 张敏. 风与柔性结构流固耦合作用的预处理方法研究 [J]. *应用力学学报*, 2020, 37 (2): 846-850.
- [12] 张安琪, 杨新峰, 刘平. 考虑流固耦合作用的气膜建筑力学性能分析 [J]. *科学技术与工程*, 2023, 23 (20): 8753-8762.
- [13] 刘章军, 陈建兵, 彭勇波. 结构动力学 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
- [14] LIU C J, ZHENG Z L, JUN L, et al. Dynamic analysis for nonlinear vibration of prestressed orthotropic membrane with viscous damping [J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2013, 13 (2): 1350018.
- [15] 徐云平. 正交异性张拉膜结构非线性气动稳定性分析 [D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [11] 李悦, 齐帜颺, 林辉, 等. 硫铝酸盐水泥基预拌流态固化土固化剂性能的研究 [J]. *新型建筑材料*, 2023, 50 (3): 42-45.
- [12] 陈瑞敏, 简文彬, 张小芳, 等. CSFG-FR 协同作用改良淤泥固化土性能试验研究 [J]. *岩土力学*, 2022 (4): 1020-1030.
- [13] 张鑫, 吉海峰, 金生莲, 等. 强风化岩流态固化土抗压强度试验研究 [J]. *水利与建筑工程学报*, 2024, 22 (4): 85-91.
- [14] 宾伟, 黄靓, 曾令宏, 等. 水泥固化再生骨料改性盐渍土的路用性能研究 [J]. *公路*, 2024, 69 (8): 94-100.
- [15] 田威, 云伟, 贺文昊, 等. 矿渣基地聚物固化黄土抗压强度及固化机制研究 [J]. *土木工程学报*, 2024 (7): 1-14.
- [16] 杜建彪, 罗强, 蒋良淮, 等. 膨胀土流态固化改性试验与配合比研究 [J]. *浙江大学学报 (工学版)*, 2024, 58 (10): 2137-2148.

(上接第 93 页)

fly ash and ground granulated blast furnace slag [J]. *International Journal of Pavement Engineering*. 2020, 21 (9): 1114-1121.

- [7] COUDERT E, DENELE D, RUSSO G, et al. Microstructural evolution and mechanical behaviour of alkali activated fly ash binder treated clay [J]. *Construction and Building Materials*. 2021 (285): 1-16.
- [8] GENG K, CHAI J, QIN Y, et al. Damage evolution, brittleness and solidification mechanism of cement soil and alkali-activated slag soil [J]. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023 (25): 6039-6060.
- [9] 郭少华, 詹世佐, 康天蓓, 等. 固化建筑渣土力学和路用性能试验研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2024, 43 (11): 4261-4269.
- [10] XIE J L, SUN J Y. A novel soft soil curing agent using waste residue [J]. *Advances in Cement Research*, 2015, 27 (1): 22-27.