

考虑地质影响的深基坑复合土钉墙最优支护参数选择技术*

Selection of Optimal Supporting Parameters of Composite Soil Nailing Wall for Deep Foundation Pit Considering Geological Influence

任睿祺, 张旭辉, 李振杰, 陈世盛, 王建磐

(山西冶金岩土工程勘察有限公司, 山西 太原 030002)

摘要: 通过勘察一区域综合办公写字楼主楼获取土层详细指标, 利用土钉抗力参数计算选取最佳土钉墙材料, 并设计深基坑复合土钉墙支护方案与施工流程。将设计好的施工方案输入到 FLAC3D 软件中模拟深基坑支护结构, 模拟不同地质影响下的侧压力系数。经试验验证: 当土钉参数为 5 排、钢管嵌固深度参数为 2 m 时, 支护结构可以最大程度降低深基坑的水平位移与沉降; 在侧压力系数较大情况下, 可以保持较低的竖直位移与深基坑坑底隆起值, 具有较好的支护效果。

关键词: 地质影响; 深基坑; 复合土钉墙; 支护参数; 水平位移; 侧压力系数

中图分类号: TU753.62 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 01-0082-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.01.015

REN Ruiqi, ZHANG Xuhui, LI Zhenjie, CHEN Shisheng, WANG Jianpan

(Shanxi Metallurgical Geotechnical Engineering Investigation Co., Ltd, Taiyuan 030002 China)

Abstract: By surveying the main building of a comprehensive office building in a certain area to obtain detailed soil layer indicators, using soil nail resistance parameters to calculate and select the optimal soil nail wall material, and designing a deep foundation pit composite soil nail wall support scheme and construction process. Input the designed construction plan into FLAC3D software to simulate the deep foundation pit support structure and the lateral pressure coefficient under different geological influences. Experimental verification: When the soil nail parameters are 5 rows and the steel pipe embedding depth parameter is 2 meters, the support structure can minimize the horizontal displacement and settlement of the deep foundation pit to the greatest extent; When the lateral pressure coefficient is large, it can maintain a lower vertical displacement and deep foundation pit bottom uplift value, which has a good support effect.

Keywords: geological influence; deep foundation pit; composite soil nailing wall; supporting parameters; horizontal displacement; lateral pressure coefficient

0 引言

复合土钉墙作为一种经济、高效的基坑支护方式, 可以有效地改善深基坑的稳定性^[1-2], 减少深基

坑的损坏程度^[3-4]。然而, 在实际工程中, 由于地质条件的复杂性^[5], 深基坑复合土钉墙支护技术的参数选择是一个复杂的问题。不同的地质条件对复合土钉墙的支护效果具有显著影响, 因此, 如何充分

* 基金项目: 山西省煤基重点科技攻关项目 (MJ2021-08)。

作者简介: 任睿祺 (1991—), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向: 岩土工程勘察及应用技术。

通信作者: 李振杰 (1988—), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向: 地基处理、建筑工程检测。

收稿日期: 2023-03-27

考虑地质因素，以选择最优的支护参数，是目前较多学者的研究方向^[6-7]。

有较多学者对支护方案进行研究，例如陈才贤等^[8]研究大断面巷道支护设计及参数优选方法，该方法针对高海拔工程施工进行支护方案设计。但该方法的支护结构仅适用于巷道支护，不适用于基坑支护。闫腾飞等^[9]研究深基坑地连墙支护体系动态调整方法，该方法不仅构建了完善的支护结构体系，还可以通过动态方式不断调整支护参数。但该支护结构仅能够防止水平位移问题，无法避免下沉量较大等问题。

地质条件包括土层的物理力学性质、地下水情况、地下障碍物等。这些因素的差异会导致土钉墙支护结构的受力状态和变形特性发生变化。为此，本文研究考虑地质影响的深基坑复合土钉墙最优支护参数选择技术，通过构建合理的支护参数，保障深基坑建设更加安全、稳定。

1 深基坑复合土钉墙最优支护参数选择

1.1 工程概况

一综合办公写字楼建筑面积 54800 m²，主楼高 101.4 m，共 28 层（其中，地下室两层），采用混凝土框—筒结构。主楼基坑深 9.15 m，基坑支护面积为 43.05 m×41 m。基坑周围大多为高层建筑，基坑南侧距离办公楼体 6.1 m，基坑西侧距离马路 10.2 m。对该工程进行实地勘察，获取土层详细指标，具体见表 1。

表 1 施工区域主要土层性能指标

Table 1 Main soil layer performance indicators in the construction area

土层序号	土层名称	层厚/m	孔隙比	含水量/%	极限锚固力/kPa
1	杂填土	1.53	—	—	30
2	粉土	1.21	0.81	28.25	50
3	粉质黏土	0.94	0.89	33.21	50
4	粉土	0.82	0.78	23.31	50
5	粉质黏土	2.54	0.74	25.53	44
6	细砂	2.66	0.61	21.82	50
7	粉质黏土	1.64	0.94	33.52	44
8	粉土	3.25	0.75	23.24	50
9	粉质黏土	1.45	0.91	32.31	44

1.2 深基坑复合土钉墙土钉抗力参数计算

在选择深基坑支护复合土钉时，较多方法会假设土钉的承受能力，忽视土钉的抗弯强度，导致支护参数选择时的土钉抗力不足^[10-12]，对支护工程造成影响，为此，本文结合《复合土钉墙基坑支护技术规范》（GB50739-2011），针对不同地质影响情况下的土钉抗力值进行计算。计算过程中，确保土钉

的长度与基坑深度之比的比值在 0.5 到 1.0 之间，以保证土钉能够有效地抵抗基坑侧壁的土压力。同时，土钉间距与支护面积之比控制在 15 到 0.2 的范围内，以确保土钉之间的间距合理，能够形成有效的支护体系。最后，土钉直径与支护面积的比值在（0.1~0.25）×10⁴ 的范围内，这有助于确定土钉的直径，以满足支护结构的强度和刚度要求。并通过拉力的大小描述地质影响程度，具体如下：

（1）在普通拉力作用的地质环境影响下，土钉会出现损伤现象，土钉抗力为：

$$T_1 = \frac{\pi d^2}{4} f \quad (1)$$

式中： d 为土钉钢筋直径； f 为屈服强度标准值。

（2）在较大拉力作用的地质环境影响下，土钉自土层破坏面外侧拔出，此时土钉抗力为：

$$T_2 = \pi D L \tau \quad (2)$$

式中： D 为土钉孔径； L 为土钉伸入稳定土体的长度； τ 为土钉剪力。

（3）在特别大拉力作用的地质环境影响下，土钉自土层破坏面内侧拔出，此时，土钉的抗力为：

$$T_3 = \pi D (L - L_\alpha) \tau + R \quad (3)$$

式中： R 为支护面层赋予土钉端部的拉力； L_α 为水平倾角为 α 的土钉伸入稳定土体长度。

根据式（2）与式（3）的计算，可得出土钉在较大拉力影响下的抗力值。对比不同土钉材料的抗力值，计算得到注浆钉在任何地质作用下均可保持较高的抗力，为此，该工程支护结构中选择注浆钉。

1.3 深基坑复合土钉墙支护方案选择

结合工程施工情况，深基坑支护采用造价低廉的复合土钉墙支护结构。

深基坑支护结构采用直立开挖方式，在支护过程中，钻孔微型桩桩长为 10.50 m，内置 12 号工字钢钉，桩身灌注 32.5 R 水泥浆，桩径为 200 mm，间距为 1 m。使用土钉为注浆钉，抗拉强度为 500 MPa，弹性模量为 200 GPa，共设置 5 排，普通抗力约为 452 kN，抗力最大值为 904 kN。具体土钉设计参数如表 2 所示，内部灌注水泥砂浆。

支护结构面层钢筋网通过绑扎连接，且喷射 C20 混凝土，喷射厚度为 100 mm，并在基坑顶部装置 1 m 长的摩擦钉。

岩土力学

表 2 土钉参数设计

Table 2 Design of soil nail parameters

土钉序号	长度 /mm	水平间距 /mm	竖向间距 /mm	钻孔直径 /mm	水平倾角 /°
1	6000	1400	1500	120	15
2	9000	1400	1500	120	15
3	12000	1400	1500	120	15
4	9000	1400	1500	120	15
5	6000	1400	1500	120	15

1.4 施工方案

在深基坑复合土钉墙支护过程中，主要分为两个阶段，分别为钢管桩施工与土钉墙施工，具体施工步骤如下。

1.4.1 钢管桩施工

钢管桩施工主要分为三个步骤，分别为成孔、钢管制作与安装以及钢管桩注浆，每一步骤在施工时需保障施工安全与稳定，具体施工内容如图 1 所示。

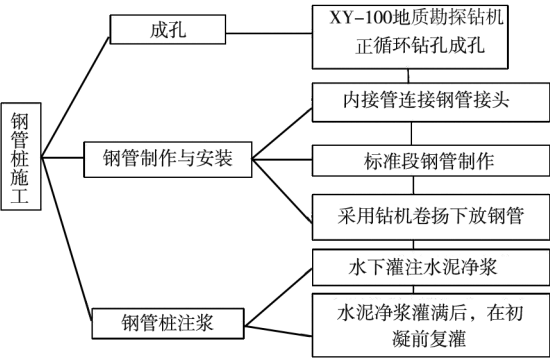


图 1 钢管桩施工步骤
Fig. 1 Construction steps for steel pipe piles

在图 1 的钢管桩施工过程中，钢管桩嵌固深度为 2 m，若钻孔发生斜孔或塌陷，应立即停止施工重新调整位置；而钢管与内接管通过焊接实现连接^[13-15]；水泥净浆水灰比为 0.45，注浆管距离孔低 10~20 cm。

1.4.2 土钉墙施工

深基坑复合土钉墙支护过程中，土钉墙施工的步骤较为复杂，具体步骤如图 2 所示。该施工步骤可以有效节约人力、物力资源，且能够合理增强土钉墙的性能。

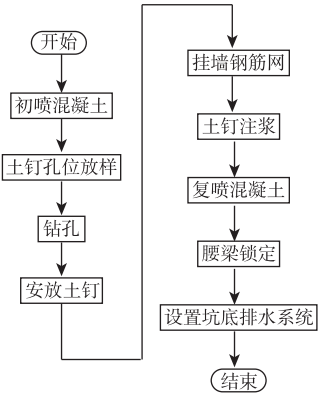


图 2 土钉墙施工步骤
Fig. 2 Construction steps of soil nail wall

1.5 三维数值模拟分析模型

利用 FLAC3D 软件搭建深基坑与支护结构模型，同时对该模型施加侧压力，以模拟恶劣地质带来的影响。在模型构建过程中，利用软件的索结构设计功能，模拟了锚索与土钉的布置与性能；同时，通过壳结构设计，模拟了喷射混凝土的加固效果。在模拟深基坑土体的力学行为时，采用 Drucker-Prager 本构模型充分反映岩土材料在剪切过程中的体积膨胀特性，更准确地模拟实际工程中的地质条件。

在模拟支护结构侧压力即地质影响时，分别对模型前、后以及底面采用固定约束，而在模型侧面对 y 方向施加约束，防止土体向 y 方向位移，模型侧压力边界条件如图 3 所示。同时，结合侧压力边界条件，并以式 (1) ~ (3) 为 FLAC 3D 软件的输入，生成支护结构模型，具体如图 4 所示。

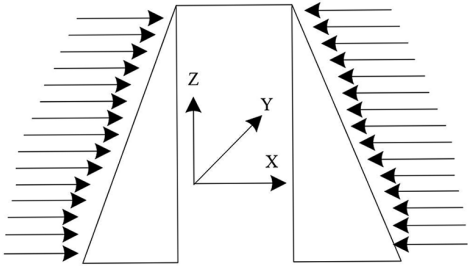
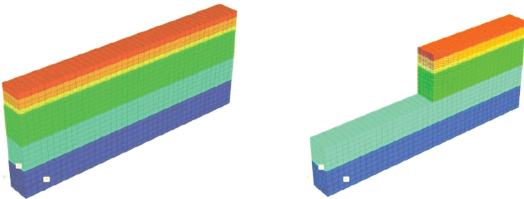


图 3 侧压力边界条件
Fig. 3 Lateral pressure boundary conditions



(a) 深基坑开挖前模拟图 (b) 深基坑开挖后模拟图

图 4 深基坑支护结构模型
Fig. 4 Model of deep excavation support structure

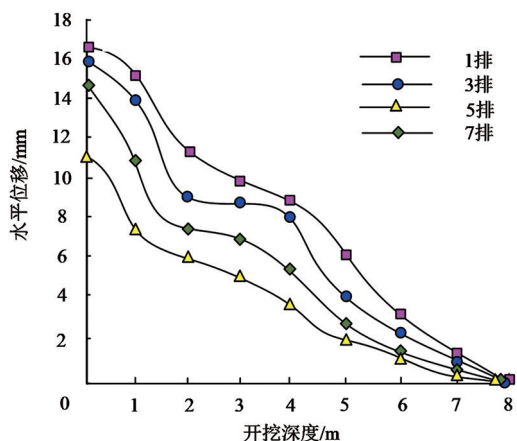
2 试验结果分析

2.1 深基坑复合土钉墙最优支护参数选择情况分析

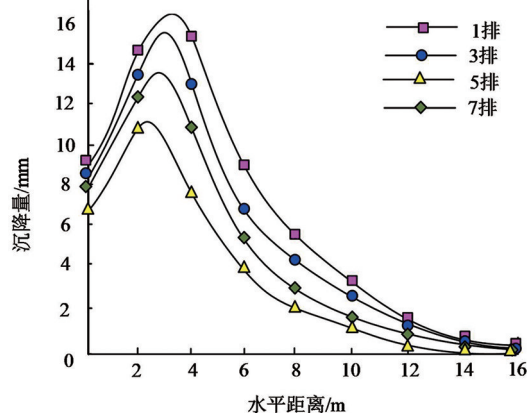
分析不同支护参数对深基坑带来的影响，在分析阶段，均采用相同的侧压力系数 1，在同一侧压力状态下，实现支护参数选择。

(1) 不同土钉排数对深基坑的位移影响

分析支护不同排数土钉对水平位移与沉降的影响，分析结果如图 5 所示。由图 5 可知，当采用一排



(a) 不同土钉支护参数对水平位移影响



(b) 不同土钉支护参数对沉降影响

图5 不同土钉支护参数对深基坑的影响

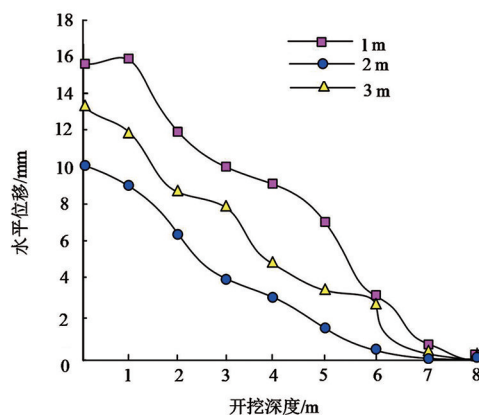
Fig. 5 The influence of different soil nail support parameters on deep foundation pits

土钉进行支护时，深基坑的水平位移与沉降量均处于较大水平，对基坑的影响较大；采用3排土钉进行支护时，水平位移与沉降量虽然有所减小，但依然要大于部分支护参数；在采用5排土钉进行支护时，可以使水平位移与沉降保持在最小水平，同时，继续增大土钉排数并未继续降低深基坑位移与沉降，因此，采用5排土钉构建土钉墙进行支护，可以保持最小的水平位移与沉降量。

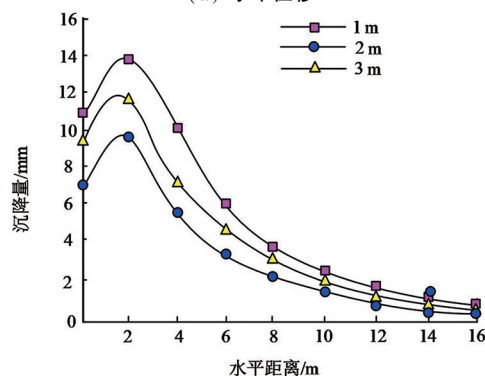
(2) 钢管桩嵌固深度参数对深基坑的影响

分析不同钢管桩嵌固深度参数对深基坑水平位移与沉降带来的影响，结果如图6所示。由图6可知，钢管桩嵌固深度在1 m时，深基坑的水平位移与沉降量相对较大，而当嵌固深度达到2 m时，则深基坑水平位移与沉降量均属于较低水平，同时，继续加大嵌固深度，发现深基坑的水平位移与沉降又呈现放大趋势，

因此，在钢管桩嵌固深度为2 m时，可以有效保障深基坑处于较为稳定状态。



(a) 水平位移



(b) 沉降

图6 钢管桩嵌固深度对深基坑的影响

Fig. 6 The influence of the depth of steel pipe pile embedding on deep foundation pits

(3) 深基坑开挖完成后水平位移分析

通过FLAC软件模拟深基坑开挖完成后，基坑土体的水平位移情况，以此验证本文选取支护参数的支护方案的可靠性，分析结果如图7所示。

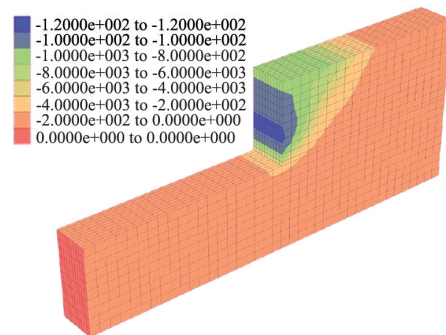


图7 基坑开挖完成后的水平位移分析

Fig. 7 Horizontal displacement analysis after excavation of foundation pit

岩土力学

由图 7 可以明显看出,深基坑开挖完成后在侧压力下的整体水平位移情况。由模拟结果可知,在靠近基坑边缘的位置,由于缺少了原土体的支撑,水平位移较大。而在靠近支护结构的位置,由于锚索、土钉以及喷射混凝土的共同作用,水平位移随着距离基坑边缘的增加而逐渐减小,得到了有效的控制。通过对比不同位置的水平位移大小,可知深基坑整体水平位移相对较小,支护结构具有较高的安全性,可以保障深基坑挖掘过程中的稳定性。

2.2 不同侧压力系数对深基坑的影响

模拟不同侧压力系数下的支护结构,分析在不同侧压力系数下,深基坑的位移变化情况,侧压力系数分别为 1、2、3,具体分析如下。

(1) 不同侧压力系数对深基坑竖直位移的影响

分析不同侧压力系数下,深基坑开挖完成后的竖直位移情况,分析结果如图 8 所示。

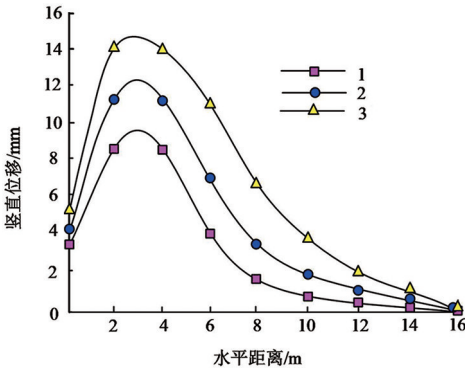


图 8 深基坑竖直位移情况分析

Fig. 8 Analysis of vertical displacement of deep foundation pit

根据图 8 可知,当侧压力系数越大,深基坑开挖完成后的竖直位移就越大,其中,当侧压力系数为 3 时,深基坑开挖后所产生的竖直位移最大达到 14 mm 左右;而在侧压力系数为 1 时,竖直位移均保持在 10 mm 以下。由此可以看出,侧压力较大的地质环境会导致深基坑的竖直位移变大,但在本文支护方案下,最大竖直位移仍处于较小水平,未超过 15 mm,因此本文支护方案具有较高的应用价值。

(2) 不同侧压力系数对深基坑坑底隆起量的影响

分析本文构建的支护方案在不同侧压力系数下所产生的深基坑坑底隆起量变化,分析结果如图 9 所示。

由图 9 可知,当距离中轴面越远,深基坑坑底的

隆起量就越小,而随着侧压力系数的逐渐增大,会导致坑底隆起量增高。但是,当侧压力系数为 3 时,坑底隆起量最高值未超过 4 mm,说明在本文支护方案下,可以有效防止坑底出现大幅度隆起。

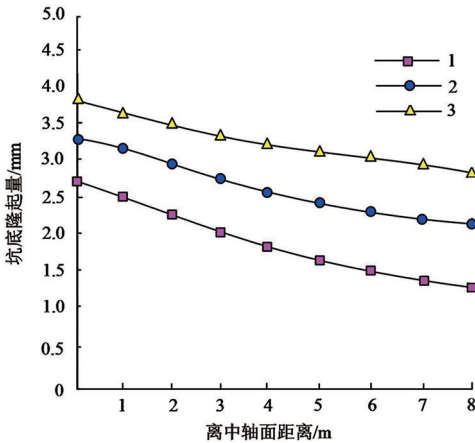


图 9 不同侧压力系数对深基坑坑底隆起量的影响

Fig. 9 Effect of different lateral pressure coefficients on the uplift of the bottom of deep foundation pits

3 结论

本文研究考虑地质影响的深基坑复合土钉墙最优支护参数选择技术,充分考虑地质条件的影响,以选择最优的深基坑复合土钉墙支护参数。通过试验得到以下结论:

(1) 在土钉排数的选择方面,采用 5 排土钉进行支护能够最有效地控制水平位移与沉降;

(2) 当钢管桩嵌固深度为 2 m 时,能够有效保障深基坑的稳定性,为实际工程中钢管桩的设计提供了优化依据。

(3) 本文提出的支护方案在控制竖直位移方面表现出色,最大竖直位移未超过 15 mm,显示出该方案的高应用价值。

(4) 在侧压力影响下,当侧压力系数达到 3 时,坑底隆起量最高值仍能控制在 4 mm 以内,证明该支护方案能有效防止坑底大幅度隆起,确保基坑稳定。

综上表明,通过合理的支护参数设计,可以防止深基坑出现较大事故。在未来研究阶段,可以以此研究的支护结构参数为基础,继续优化设计更完善的支护结构,使该支护方案可以应用至其他深基坑施工项目中。

参 考 文 献

- [1] 刘军, 宋晔, 张建全, 等. 装配式柔性面层土钉墙支护结构体系研究 [J]. 建筑技术, 2022, 53 (5): 565-568.
- [2] 赵志伟. 废弃矿山地质环境影响评估与恢复治理研究 [J]. 世界有色金属, 2022 (8): 223-225.
- [3] 张宗领. 基于整体三维有限元模型的粉质黏土深基坑土钉支护参数分析 [J]. 信阳师范学院学报 (自然科学版), 2021, 34 (4): 686-691.
- [4] 付宪章, 武登辉, 赵庆亮, 等. 紧邻既有住宅建筑的深基坑支护及降水设计施工实例 [J]. 建筑技术, 2022, 53 (2): 177-180.
- [5] 赵志伟. 废弃矿山地质环境影响评估与恢复治理研究 [J]. 世界有色金属, 2022 (08): 223-225.
- [6] 胡敏云, 欧阳维杰, 陈乾浩, 等. 复合土钉墙工作特性的细观数值模拟研究 [J]. 浙江工业大学学报, 2021, 49 (4): 442-448.
- [7] 林君伟, 阮永芬. 土钉支护结构设计参数研究 [J]. 建筑技术, 2022, 53 (2): 170-172.
- [8] 陈才贤, 陈磊, 黄智强. 高海拔软破大断面巷道支护设计及参数优选研究 [J]. 矿业研究与开发, 2022, 42 (10):

88-94.

- [9] 闫腾飞, 陈保国, 张磊, 等. 深基坑地连墙支护体系动态调整方法及应用 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2022, 56 (2): 356-367.
- [10] 曹成威, 石钰锋, 詹涛, 等. 考虑动态施工超长管棚预支护力学特性及参数影响分析 [J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18 (6): 98-104.
- [11] 曹成威, 石钰锋, 詹涛, 等. 考虑动态施工超长管棚预支护力学特性及参数影响分析 [J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18 (6): 98-104.
- [12] 刘啸, 华心祝, 杨朋, 等. 深井切顶留巷顶板错动判据与支护参数量化研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38 (6): 1122-1133.
- [13] 杜帅, 康天合, 张智敏. 复合顶板中锚固力扩散模型及其支护参数优化研究 [J]. 矿业研究与开发, 2021, 41 (11): 112-117.
- [14] 姜早龙, 张杰, 张志军, 等. 基于 BIM 和遗传算法的填海地区深基坑支护结构优化研究 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2021, 37 (2): 210-217.
- [15] 盛晓杰, 陆汉光. 基于 FLAC3D 的岩土预应力锚固支护数值模拟 [J]. 计算机仿真, 2021, 38 (2): 206-209, 295.

(上接第 81 页)

孔隙结构的改变也是强度衰减的重要原因。

(3) 玄武岩纤维混凝土的孔隙率随着温度的升高不断增大, 是由于玄武岩纤维混凝土内部的自由水和结合水的蒸发, 导致玄武岩纤维混凝土胶凝物质逐渐脱水分解, 进而导致玄武岩纤维混凝土内部孔隙结构发生改变, 玄武岩纤维混凝土在高温作用下细观结构的改变是玄武岩纤维混凝土宏观力学强度衰减的重要原因, 这也是玄武岩纤维混凝土高温后力学性能劣化的损伤机理。

参 考 文 献

- [1] 刘鑫, 杨鼎宜, 骆静静, 等. 高温中钢纤维混凝土抗压强度试验研究 [J]. 混凝土, 2018 (1): 31-34, 41.
- [2] 常传鹏, 田波, 黄世武, 等. 高温下聚丙烯纤维混凝土抗压强度试验研究 [J]. 公路工程, 2014, 39 (5): 324-327, 336.
- [3] 董玉洁, 刘华新, 李庆文, 等. 混杂纤维混凝土高温后力学性能研究 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2019 (5): 62-65, 70.
- [4] 杨智硕, 陈明霞, 叶梅新. 超高强玄武岩纤维混凝土防火性能 [J]. 混凝土, 2020 (3): 89-91, 96.
- [5] 赵燕茹, 刘道宽, 王磊, 等. 玄武岩纤维混凝土高温后力学性能试验研究 [J]. 混凝土, 2019 (10): 72-75.

- [6] 李长安. 玄武岩纤维混凝土耐高温性能分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34 (2): 96-100.
- [7] 戎虎仁, 王海龙, 褚少辉, 等. 高温作用下不同掺量玄武岩纤维混凝土力学性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34 (1): 56-60.
- [8] 陈炜, 何耀, 林可心, 等. 高温后玄武岩纤维高强混凝土的力学特性 [J]. 硅酸盐通报, 2014, 33 (5): 1246-1250.
- [9] 薛维培, 高聪, 申磊, 等. 围压对高温后玄武岩纤维混凝土渗透率及孔隙结构的影响 [J]. 建筑材料学报, 2021, 24 (4): 742-748.
- [10] 元成方, 高丹盈. 聚丙烯纤维混凝土高温后的孔隙结构特征研究 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2014, 42 (4): 122-126.
- [11] 曹郭俊. 多尺度聚丙烯纤维混凝土高温后力学性能研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- [12] 申嘉荣, 徐千军. 高温对混凝土孔隙结构改变和抗压强度降低作用的规律研究 [J]. 材料导报, 2020, 34 (2): 2046-2051.
- [13] 陈晓婷, 赵人达. 高温对混凝土孔隙率及渗透性影响的试验研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2007 (2): 11-14.
- [14] 戎虎仁, 顾静宇, 曹海云, 等. 高温后混凝土强度与孔隙结构变化规律试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2019, 38 (5): 1573-1578.