

基于有限元仿真钢筋混凝土电阻率预估模型

贾刘建¹,胡杰¹,卞雷祥^{1*},徐展¹,史皓天¹,王冲¹,刘海龙²

(1.南京理工大学安全科学与工程学院(应急管理学院),江苏南京210094;2.南京理工大学机械工程学院,江苏南京210094)

摘要:为从瞬变电磁信号中准确分析地下人工构筑物信息,提高反演成像准确性,需明确设定地下人工介质电阻率初值,以提取其响应。基于有限元分析研究四电极法所得钢筋混凝土电阻率规律,揭示钢筋混凝土厚度与钢筋间距对电阻率的影响;分析电极间距对测试结果的影响,提出电极优化布置方法及预估函数模型;制备不同工况钢筋混凝土进行试验,对比试验数据与预测值并分析均方误差,验证了模型优势。

关键词:钢筋混凝土;四电极法;有限元分析;混凝土电阻率;钢筋间距;混凝土厚度

中图分类号:TU375.3;P631.3+22 **文献标志码:**A

引用格式:贾刘建,胡杰,卞雷祥,等.基于有限元仿真钢筋混凝土电阻率预估模型[J].山东大学学报(工学版),2026,56(2):76-81.

JIA Liujian, HU Jie, BIAN Leixiang, et al. Prediction model of reinforced concrete resistivity based on finite element simulation[J].

Journal of Shandong University (Engineering Science), 2026, 56(2):76-81.

Prediction model of reinforced concrete resistivity based on finite element simulation

JIA Liujian¹, HU Jie¹, BIAN Leixiang^{1*}, XU Zhan¹, SHI Haotian¹, WANG Chong¹, LIU Hailong²

(1. School of Safety Science and Engineering (School of Emergency Management), Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China; 2. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China)

Abstract: In order to accurately analyze the information of underground artificial structures from transient electromagnetic signals and improve the accuracy of inversion imaging, it was necessary to clearly set the initial value of underground artificial medium resistivity to extract its response. Based on the finite element analysis, the resistivity law of reinforced concrete obtained by the four-electrode method was studied, and the influence of reinforced concrete thickness and steel bar spacing on resistivity was revealed. The influence of electrode spacing on the test results was analyzed, and the optimal electrode arrangement method and prediction function model were proposed. The reinforced concrete under different working conditions was prepared and tested. The experimental data were compared with the predicted values and the mean square error was analyzed to verify the advantages of the model.

Keywords: reinforced concrete; four-electrode method; finite element analysis; concrete resistivity; bar spacing; concrete thickness

0 引言

当前社会高速发展,城市地表空间日益短缺,开始转向开发地下空间。如今城市地下遍布隧道、

地铁站等人工构筑物^[1-3],地下空间结构极为复杂,发展城市浅层地下空间探测技术、提升对地下人工结构的精细成像能力十分重要。电磁法可探测地表以下数百米深度,其反演成像精确性与介质电阻率密切相关,分析电阻率变化可判断地下结构的空

收稿日期:2024-11-07

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(52209133)

第一作者简介:贾刘建(1999—),男,江苏宿迁人,硕士研究生,主要研究方向为钢筋砼物性参数。E-mail:492787100@qq.com

*通信作者简介:卞雷祥(1985—),男,江苏泗阳人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向为地下目标无人化探测与识别。

E-mail:lxbian@163.com

间布局^[4]。

地下人工结构多由钢筋混凝土构成^[5-6],其电阻率常用四电极法与双电极法测量^[7]。双电极法使用同一对电极同时施加电流和测电位差,电极与混凝土接触面间压降会导致测量误差^[8-9];四电极法采用四个等间距电极,其中外侧两个电流电极施加电流,内部两个电压电极测量电势差,避免电极极化引起压降误差。在工程实践中,四电极法被广泛用于测量钢筋混凝土电阻率^[10-14]。

文献[15]用直流四电极法研究碳纤维混凝土在老化效应和各种环境因素影响下的电阻率稳定性及与应力关系;文献[16]运用四电极法测量混凝土电阻率,考察试件类型、潮湿状态、探头间距等因素对电阻率影响;文献[17]用四电极法测量3D打印混凝土电阻率,揭示非粘结层电阻率与深度呈线性相关;文献[18]用四电极法判断智能混凝土损伤响应,分析多种材料在混凝土中对损伤响应影响。当前国内外对混凝土电阻率研究多集中于不同材料特性,而对钢筋混凝土结构参数的探讨较少。掌握结构参数对电阻率影响规律,可提升电阻率初值设定精度。

有限元仿真能有效处理复杂几何形状和多物理场耦合问题,提供高精度结果,节省试验成本和时间^[19]。本研究基于有限元分析,用四电极法确定电极间距,揭示钢筋排布及混凝土保护层厚度对电阻率影响规律;基于非线性分析拟合预估函数,进行试验验证预估函数准确性,为预估地下人工结构电阻率提供依据。

1 材料与方法

1.1 钢筋混凝土材料与建模

依据文献[20]和文献[21],地下环境中钢筋混凝土与土壤直接接触,属潮湿环境,此时最大水胶比为0.55,混凝土强度需达C30。水泥用普通硅酸盐水泥,粗骨料选最大公称直径为20 mm的碎石,砂率为38.5%,坍落度为90%,混凝土配制强度35 MPa,水胶比为0.5,具体参数如表1所示。钢筋选HRB400普通热轧钢筋,屈服强度可达400 MPa。

表1 混凝土配合比
Table 1 Proportioning of concrete

组分	普通硅酸盐水泥	水	细骨料	粗骨料	减水剂
质量/kg	206.4	172	1 189.4	744.6	5.16

纯混凝土建模尺寸为400 mm×400 mm×200 mm,如图1所示,其中 a 为电极间距。通过仿真探究四电极法中电极间距对混凝土电阻率测试的影响。钢筋混凝土试块建模如图2所示,其尺寸为700 mm×700 mm× d ,钢筋双层间距200 mm,单根钢筋长600 mm、直径18 mm,其中 h 为主筋间距, d 为钢筋混凝土试块厚度。

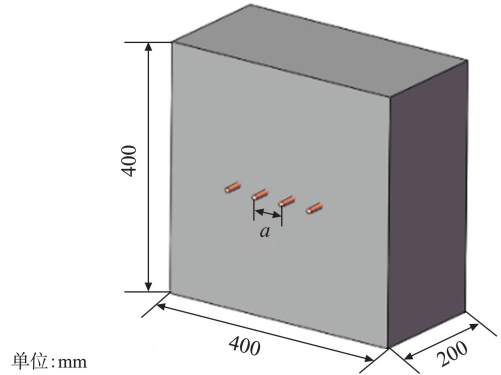


图1 纯混凝土试块模型
Fig.1 Concrete test block model

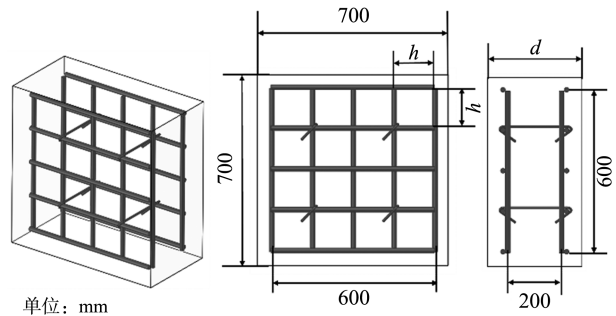


图2 钢筋混凝土试块模型
Fig.2 Model of reinforced concrete test block

1.2 钢筋混凝土试块制备与试验仪器

按表1配合比制备钢筋混凝土试块,混凝土工况如表2所示。试块1~4号厚350 mm,改变钢筋间距;试块1、5、6号钢筋间距150 mm,改变混凝土厚度。试块制备28天后置于潮湿环境,30天后测其电阻率。试验用HC-X6混凝土电阻率检测仪,如图3所示,测量范围为0~6 000 kΩ·cm,精度为±0.1 kΩ·cm。



图3 混凝土电阻率检测仪
Fig.3 Concrete resistivity detector

表2 钢筋混凝土试块工况
Table 2 Working condition of reinforced concrete test block

标号	混凝土块尺寸/ (mm×mm×mm)	横钢筋数/个	纵钢筋数/个	主筋间距/mm	钢筋长度/mm	钢筋双层间距/mm
1	700×700×350	10	10	150	600	200
2	700×700×350	10	10	125	600	200
3	700×700×350	10	10	100	600	200
4	700×700×350	10	10	75	600	200
5	700×700×400	10	10	150	600	200
6	700×700×500	10	10	150	600	200

1.3 试验原理

四电极法用4个等间距线性排列的电极测试混凝土表面电流,如图4所示,外部电极给混凝土进行供电,内部电极测电势,混凝土电阻率^[22] ρ 计算公式为

$$\rho = 2\pi a \frac{\Delta V}{I}, \quad (1)$$

式中, a 为电极间距, ΔV 为电势差, I 为供电电流。

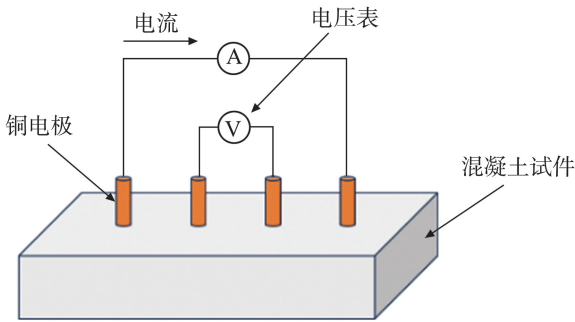


图4 四电极法原理

Fig.4 Principle of four-electrode method

1.4 有限元仿真

COMSOL Multiphysics 是能建立复杂物理模型并进行多物理场耦合仿真的有限元分析软件,涵盖电磁学、热力学、流体力学等物理场。AC/DC 模块可处理交直流及磁场仿真,能准确模拟分析混凝土物理现象^[23]。混凝土、紫铜电极材料仿真参数设置分别如表3、4所示。电流物理场的计算过程基于麦克斯韦方程组推导的假设方程,假设方程表达式为:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \mathbf{Q}_{j,v}, \quad (2)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + j\omega \mathbf{D} + \mathbf{J}_e, \quad (3)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla V, \quad (4)$$

式中, ∇ 为矢量微分算子, \mathbf{J} 为电流密度矢量, $\mathbf{Q}_{j,v}$ 为体积电流源密度, σ 为电导率, \mathbf{E} 为电场矢量, ω 为频率, \mathbf{D} 为电位移矢量, \mathbf{J}_e 为源电流密度, V 为电压。

1.4.1 电极参数配置仿真

纯混凝土试块仿真建模如图1所示,设电极间距为 a ,将其从1 cm到12 cm以1 cm为步长仿真,设定混凝土电阻率为 $50 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ 。

表3 混凝土参数

Table 3 Parameters of concrete model

电导率/ ($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$)	相对介电 常数	热膨胀系数/ ($1/\text{K}^{-1}$)	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	热导率/ [$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$]	恒压热容/ [$\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$]	杨氏模量/ GPa	泊松比
0.002	9	10^{-5}	2 300	1.8	880	25	0.2

表4 紫铜材料参数

Table 4 Parameters of copper

相对磁导率	电导率/ ($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$)	相对介电 常数	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	热导率/ [$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$]	恒压热容/ [$\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$]	杨氏模量/ GPa	泊松比
1	5.998×10^7	1	8 940	400	385	126	0.34

1.4.2 钢筋混凝土结构参数置仿真

钢筋混凝土建模如图2所示,设 h 为钢筋间距, d 为混凝土厚度。混凝土电阻率设为 $21 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$,钢筋电导率设为 $34\,600 \text{ S/m}$ 。仿真分两部分:一是固定混凝土厚度 d 为 350 mm ,钢筋间距从 60 mm 到 350 mm 以 10 mm 为步长仿真;二是固定钢筋间距 h 为 150 mm ,混凝土厚度 d 从 270 mm 到 450 mm 以 20 mm 为步长仿真。

2 仿真结果讨论

2.1 纯四电极法参数优化

混凝土试块仿真结果如图5所示。 $0 \sim 250 \text{ kHz}$ 频率下,电阻率基本保持稳定,无明显变化; 250 kHz 后,电阻率随频率增加而降低,表明混凝土产生寄生电容,降低了混凝土阻抗。

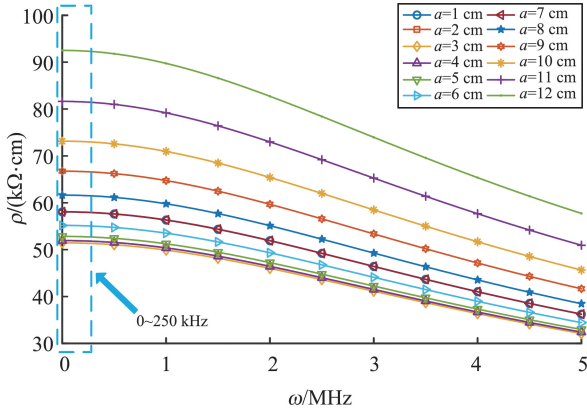


图5 不同间距测得的电阻率

Fig.5 The resistivity measured at different spacings

100 Hz 时不同电极间距下的纯混凝土试块电阻率如图6所示。间距1~3 cm时,电阻率随电极间距增加而减小;间距2~5 cm时,四电极法计算的电阻率最接近仿真设定值;大于5 cm时,电阻率随电极间距增加而增长。后续钢筋混凝土仿真电极间距设为5 cm。

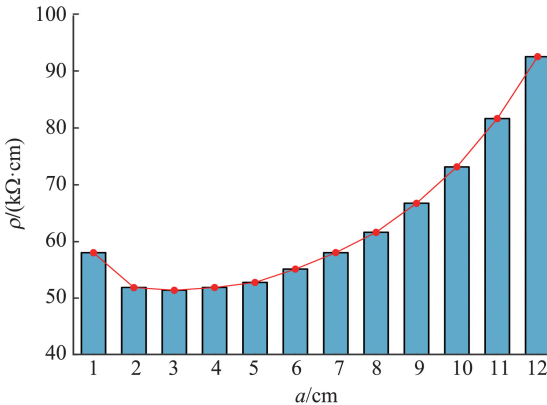


图6 100 Hz 频率下不同电极间距的电阻率

Fig.6 Resistivity of different spacing at 100 Hz frequency

2.2 四电极法钢筋混凝土电阻率仿真结果

不同钢筋间距、混凝土厚度下的钢筋混凝土四电极法仿真结果分别如图7、8所示,其电阻率受频率影响较小。100 Hz 频率下钢筋混凝土电阻率随钢筋间距、混凝土厚度的变化分别如图9、10所示。钢筋间距及混凝土厚度较大时,电阻率基本不变,所获电阻率可认为混凝土电阻率;钢筋间距减小时,电阻率随之减小,间距减小到一定程度时,电阻率变化趋势变缓。

对图9和图10中钢筋混凝土电阻率与钢筋间距、混凝土厚度的数据用3次函数拟合,拟合结果为式(5)、(6)所示,其中,式(5)拟合优度为0.986 641,式(6)拟合优度为0.998 122,拟合效果较好。

$$\rho = -5.406 6 \times 10^{-7} h^3 + 3.444 6 \times 10^{-4} h^2 -$$

$$0.047 3h + 17.682 1, \tag{5}$$

$$\rho = 3.968 4 \times 10^{-6} d^3 - 4.8 \times 10^{-3} d^2 + 1.984d - 252.179 7. \tag{6}$$

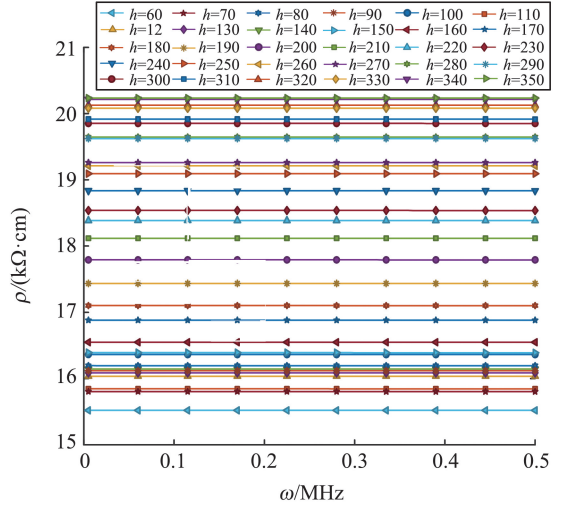


图7 不同钢筋间距的试块电阻率

Fig.7 The resistivity of test blocks with different steel bar spacings

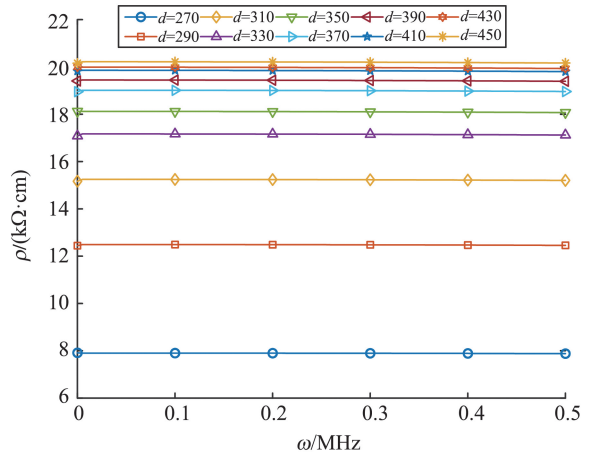


图8 不同混凝土厚度的试块电阻率

Fig.8 Resistivity of test blocks with different concrete thickness

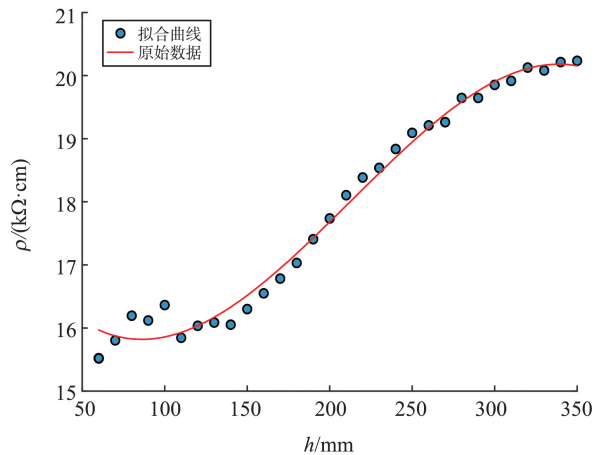


图9 钢筋间距和钢筋混凝土电阻率曲线拟合

Fig.9 Steel bar spacing and reinforced concrete resistivity curve fitting

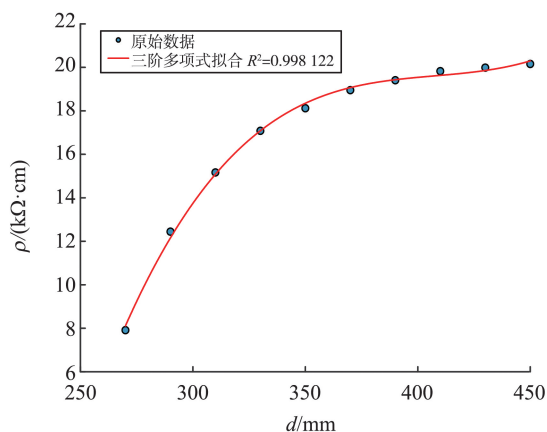


图10 混凝土厚度和钢筋混凝土电阻率曲线拟合
Fig.10 Concrete thickness and reinforced concrete resistivity curve fitting

3 试验结果

测量前清理钢筋混凝土试块表面,连接测试电极与主机,将海绵浸湿后塞入电极。开机后,用电阻率标准尺进行四电极法测量校准,将电极牢固按在混凝土试块表面,观察约20 s获取结果。

用预估模型(5),以钢筋间距为变量,对表2中1~4号试块进行混凝土电阻率预测,并与试验值对比,结果如图11所示。

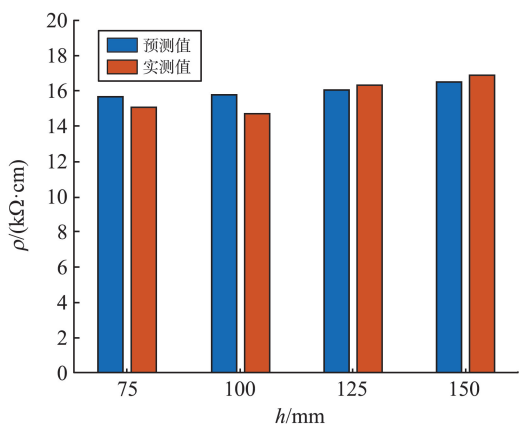


图11 不同钢筋间距的钢筋混凝土电阻率实测值与预测值
Fig.11 The measured and predicted values of resistivity of reinforced concrete with different reinforcement spacing

用预估模型(6),以混凝土厚度为变量,对表2中1、5、6号试块进行电阻率预测,并与试验值对比,结果如图12所示。

由图12可见,预测值与实测值差距不大。通过计算均方误差 E_{MS} 判断预测精度, E_{MS} 越小,模型拟合越精确。

$$E_{MS} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (7)$$

式中, n 为样本总数, y_i 为真实值, \hat{y}_i 为预测值。

不同钢筋间距的钢筋混凝土电阻率 E_{MS} 为

0.4528,不同混凝土厚度的钢筋混凝土电阻率 E_{MS} 为1.0881,两种情形 E_{MS} 均较小,说明预测较精确。

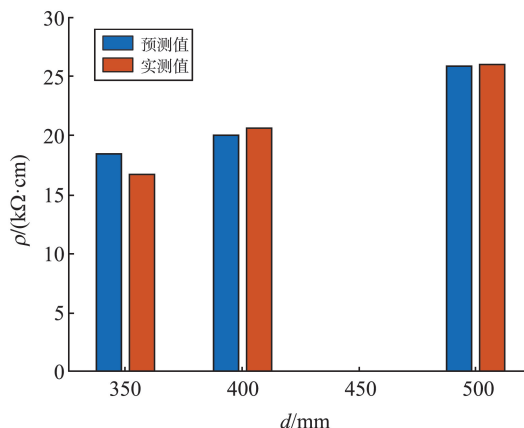


图12 不同混凝土厚度的钢筋混凝土电阻率实测值与预测值

Fig.12 The measured and predicted values of resistivity of reinforced concrete with different concrete thickness

4 结论

本研究借助 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件,探究了钢筋排布、混凝土厚度对钢筋混凝土电阻率的影响,构建相应预测模型并通过试验验证。具体结论如下:

(1) 四电极法测电阻率会因电极间距和埋深不同而有所差异,电极间距在2~5 cm时测量效果最佳;

(2) 钢筋混凝土电阻率基本随钢筋间距和混凝土厚度增加而增大,拟合函数优度分别为0.986641和0.998122,拟合效果良好;

(3) 制备试块测电阻率并与模型预测值对比,结果显示 E_{MS} 较小,预测值与实际值接近,该模型能有效用于预测地下人工结构中钢筋混凝土电阻率。

参考文献:

- [1] 鱼志鸿,杨大勇,章定文,等.深圳地铁13号线盾构渣土绿色循环利用技术[J].隧道与地下工程灾害防治,2022,4(4):100-106.
YU Zhihong, YANG Dayong, ZHANG Dingwen, et al. Application of green treatment and reuse technology of shield muck for Shenzhen Metro Line 13 [J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2022, 4(4): 100-106.
- [2] CUI J Q, BROERE W, LIN D. Underground space utilisation for urban renewal [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 108: 103726.

- [3] 马洪岭, 梁孝鹏, 赵凯, 等. 山东泰安盐穴储气库地质可行性分析[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2022, 4(2): 19-27.
MA Hongling, LIANG Xiaopeng, ZHAO Kai, et al. Geological feasibility analysis of Tai'an salt cavern gas storage in Shandong Province [J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2022, 4(2): 19-27.
- [4] QIAO P Y, LIU Z B, LI Y P, et al. Research and application of comprehensive detection methods for geological structural planes in drill and blast tunnels[J]. Journal of Applied Geophysics, 2024, 228: 105449.
- [5] 杨立, 夏增选, 娄文杰, 等. 山区深埋公路隧道穿越断层破碎带施工稳定性[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2024, 6(3): 32-42.
YANG Li, XIA Zengxuan, LOU Wenjie, et al. Construction stability of deeply buried highway tunnel through fault fracture zones in mountainous areas [J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2024, 6(3): 32-42.
- [6] 周雨竹, 彭子茂, 全珈颖, 等. 装配式隧道接头冲击动力响应特性[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2024, 6(3): 82-91.
ZHOU Yuzhu, PENG Zimao, QUAN Jiaying, et al. Impact dynamic response characteristics of assembled tunnel joints [J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2024, 6(3): 82-91.
- [7] BANG J S, YIM H J. Segregation evaluation of concrete pavements under excessive vibration using electrical resistivity measurement[J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 19: e02300.
- [8] MINAGAWA H, MIYAMOTO S, KURASHIGE I, et al. Appropriate geometrical factors for four-probe method to evaluate electrical resistivity of concrete specimens [J]. Construction and Building Materials, 2023, 374: 130784.
- [9] 徐国力, 朱珊, 谢向田. 钢纤维混凝土的损伤自感知试验研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(增刊2): 1366-1370.
XU Guoli, ZHU Shan, XIE Xiangtian. Experimental study on damage self-perception of steel fiber reinforced concrete [J]. Building Structure, 2023, 53 (Suppl. 2): 1366-1370.
- [10] 徐宗南. 混凝土电阻率监测和基于电阻率的混凝土性能表征[D]. 深圳: 深圳大学, 2018: 9-12.
XU Zongnan. Concrete resistivity monitoring and concrete performance characterization based on resistivity [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2018: 9-12.
- [11] 赵卓, 曾力, 王东炜. 混凝土电阻率与氯离子扩散系数间的相关性试验[J]. 郑州大学学报(工学版), 2013, 34(6): 76-79.
ZHAO Zhuo, ZENG Li, WANG Dongyi. Correlation test between concrete resistivity and chloride ion diffusion coefficient [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2013, 34(6): 76-79.
- [12] ROBLES K P V, GUCUNSKI N, KEE S H. Evaluation of steel corrosion-induced concrete damage using electrical resistivity measurements [J]. Construction and Building Materials, 2024, 411: 134512.
- [13] DU F Y, JIN Z Q, XIONG C S, et al. Nanoindentation analysis of corrosion products and induced expansion stress in reinforced concrete exposed to marine environments [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 78: 107753.
- [14] 晏楚. 结构型纤维对智能混凝土裂缝自监测性能的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022: 54-73.
YAN Chu. Study on the self-monitoring performance of structural fibers on intelligent concrete cracks [D]. Dalian University of Technology, 2022: 54-73.
- [15] TIAN X R, HU S W, XU Y Q, et al. Self-sensing study of stress in low-doped carbon fiber reinforced hydraulic concrete [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 76: 107249.
- [16] 张贺, 杨辉, 俞海勇. 对四电极法测试混凝土表面电阻率影响因素的研究[J]. 新型建筑材料, 2017, 44(1): 9-12.
ZHANG He, YANG Hui, YU Haiyong. Research of influencing factors on concrete surface resistivity with Wenner four-probe measurement [J]. New Building Materials, 2017, 44(1): 9-12.
- [17] BANG J S, YIM H J. Unbonded interlayer evaluation in freshly 3D printed concrete using electrical resistivity measurements [J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 21: e03913.
- [18] 马衍轩, 于霞, 徐亚茜, 等. 智能纤维混凝土的力场损伤响应、监测与修复研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(19): 19081-19090.
MA Yanxuan, YU Xia, XU Yaqian, et al. Research progress on the force field damage response, monitoring and repair of intelligent fiber reinforced concrete [J]. Materials Reports, 2021, 35(19): 19081-19090.
- [19] 谷文伟, 谢智能, 张瑞琦, 等. 基于COMSOL的低温截止阀安全性仿真研究[J]. 液压气动与密封, 2024, 44(9): 73-77.
GU Wenwei, XIE Zhineng, ZHANG Ruiqi, et al. Simulation study on safety of low temperature shut-off valve based on COMSOL [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2024, 44(9): 73-77.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土配合比设计规程: JSJ 55—2011 [S]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2011.