

陆志锋, 徐步新, 路新成. 基于光纤位移传感技术的住宅建筑岩土工程勘察地基承载力分析[J]. 华南地震, 2026, 46(4): 96–102. [LU Zhifeng, XU Buxin, LU Xincheng. Analysis of Foundation Bearing Capacity in Geotechnical Investigation of Residential Buildings Based on Optical Fiber Displacement Sensing Technology [J]. South China journal of seismology, 2026, 46(4): 96–102]

基于光纤位移传感技术的住宅建筑 岩土工程勘察地基承载力分析

陆志锋, 徐步新, 路新成

(江苏省地质调查研究院, 南京 210018)

摘要: 为适应建筑工程的发展, 提升工程地基承载力测量精确度, 提出一种基于光纤位移传感技术的住宅建筑岩土工程勘察地基承载力分析方法。分析光纤位移传感器结构, 通过将光纤光栅应变值转换为曲率, 建立地基基桩的纯弯曲数学模型; 基于纯弯曲数学模型将基桩承载力的计算方法, 简化为厚壁圆柱体的平面轴对称问题; 根据上述光纤光栅、纯弯曲、平面轴对称相关数学模型, 获取住宅建筑岩土工程勘察地基承载力分析结果。实验结果表明, 该方法可以准确测量出地基中基桩的承载力, 且在运行过程中几乎不受温度变化的影响, 当弹簧圈数设置在30圈时, 设备测量精度既准确又节能, 具有参考价值。

关键词: 建筑地基; 光纤位移传感器; 悬臂梁; 温度补偿; 弯曲模型; 承载力分析

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2026)04-0096-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2026.04.12

Analysis of Foundation Bearing Capacity in Geotechnical Investigation of Residential Buildings Based on Optical Fiber Displacement Sensing Technology

LU Zhifeng, XU Buxin, LU Xincheng

(Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210018, China)

Abstract: To meet the demands of construction engineering development and improve the measurement accuracy of foundation bearing capacity, this study proposes a foundation bearing capacity analysis method for geotechnical investigation of residential buildings based on fiber-optic displacement sensing technology. By analyzing the structure of the fiber-optic displacement sensor, the strain values from fiber Bragg gratings are converted into curvature to establish a pure bending mathematical model for foundation piles. Base on the pile bending mathematical model, the calculation method of foundation pile bearing capacity is simplified to a plane axisymmetric problem of thick-walled cylinders. Utilizing the aforementioned mathematical models—incorporating fiber Bragg grating, pure bending, and plane axisymmetry—the analysis results of foundation bearing capacity are obtained. Experimental results demonstrate that this method can accurately measure the bearing capacity of foundation piles while remaining virtually unaffected by temperature variations during operation. When the number

收稿日期: 2024-12-03

基金项目: 江苏省自然资源科技计划项目“支撑地表基质调查的检测技术方法研究”(2022056)

作者简介: 陆志锋(1979-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为岩石、土和非金属矿等实验测试。

E-mail: bajiao01797389@163.com

of spring coils is set to 30, the equipment has both accurate measurement and energy saving performance, which has good reference value.

Keywords: Building foundation; Fiber-optic displacement Sensor; Cantilever beam; Temperature compensation; Bending model; Bearing capacity analysis

0 引言

岩土工程地基是建筑工程中的核心承力层,其稳定性直接决定上部结构的安全^[1]。对于住宅建筑而言,本身地基强度较低,建筑结构也相对复杂,需要岩土工程地基具有持续稳定性。岩土工程地基的整体质量与工程的安全性、造价等有着紧密的关联^[2]。然而,地基中基桩在长时间的使用或受恶劣环境影响后,住宅建筑的岩土工程地基基桩可能会产生位移或形变,导致楼体稳定性受到影响^[3]。为了及时发现地基问题并采取相应的措施,需要使用适宜的方法对基桩进行承载力分析,监测因承载力不足导致的结构的位移和形变,及时发现基桩的问题,并采取相应的修复措施,以确保住宅建筑的长期稳定性和安全性^[4]。

针对住宅建筑地基承载力分析问题,杨继强等^[5]提出一种基于有限元数值模拟方法,利用有限元分析方法,建立基于有限元分析的有限元模型,通过有限元分析,建立有限元分析模型,通过数值模拟,分析有限元结果,给出有限元分析法的应用范围,再基于 MATLAB 的数值模拟,给出有限元分析结果,建立有限元基桩极限承载力分析模型。刘栓奇等^[6]人基于极限平衡原理,分别确定加筋基础的被动区、过渡区,并以此为基础,研究加筋基础的变形规律。计算出每一段的荷载,并计算出相应的基桩基础承载力,从而得出基础的最小承载力。但两种方法均存在一定缺陷,前者在距离被测对象较远时会存在一定程度上的测量偏差;而后的测量方法会受温度变化的影响造成测量结果的不稳定。

光纤位移检测技术是一种新型的光纤检测技术,与常规检测技术比较,其优势在于光路可弯曲、灵敏度高、抗腐蚀,具有很强的耐电磁辐射性能,因而受到了越来越多的关注,被广泛应用于工程建设,地质勘察等领域^[7]。

本文研究基于光纤位移传感技术用于分析勘察住宅建筑地基中基桩的承载力分析方法,掌握地基的变化动向及时发现存在隐患,用于确保住宅建筑的稳定与安全。

1 住宅建筑地基承载力分析的光纤位移传感方法

1.1 光纤位移传感器结构

光纤光栅是一种纤维纤芯的折射率在轴向上呈现周期改变的衍射光栅,它属于一种窄带光学反射元件^[8-9]。一束光入射到光纤光栅后,因为受到多光束干涉的影响,只能对某个特定波长的光进行反射^[10]。光纤光栅位移传感装置主要由以下部分构成:一根等强度的悬臂梁及其上、下两个表面分别粘附有光纤光栅的传感元件、基座、套管和盖板等,具体如图 1 所示^[11-13]。

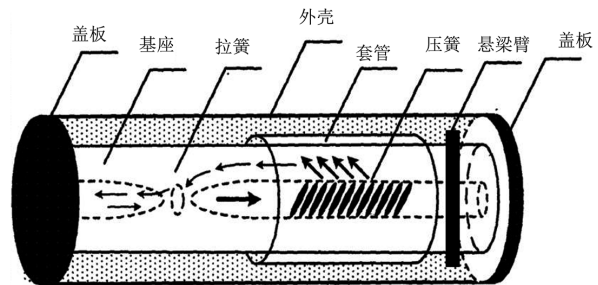


图1 光纤位移传感器结构示意图

Fig.1 Schematic structure of optical fiber displacement sensor

由图 1 所示,由于位移传输杆件受外载荷的影响而发生了滑移,因此传送弹簧被拉伸,从而使其本身所受的张紧力以一种集中力的形式施加于悬臂梁的自由端部^[14-15]。所述悬臂的一端被固定于与所述弹性防护管连接为一整体的所述柱状刚性防护管的内壁,所述内壁的上壁和下壁上各附着有所述敏感光栅^[16]。由于悬臂梁下端受到挤压而引起的负形变形和上端受到拉伸而引起的正形变形,使得悬臂梁上端受到拉力而引起的两个敏感光栅的中心波长发生相对的偏移,它的差异可以用来表示由位移传递杆引起的位移量。

1.2 光线位移传感器数学模型及温度补偿

其光纤位移传感器数学模型为,假设传感器在使用过程中将传感器中的位移传输杆拉开,使得所述位移传输杆的位移为 R ,则所述传输弹性管

本身的张力为 Δe ，所述拉伸力 G 集中在悬臂的自由端上，从而导致悬臂弯曲^[17]。设自由端的弯曲为 ω ，则可得出：

$$R = \Delta e + \omega \quad (1)$$

在传输弹簧本身被拉伸时，与之对应的拉伸力为 G ：

$$G = P_e \Delta e \quad (2)$$

式(2)中， $P_e = \frac{Ue'^4}{8AE^3}$ 是变速器弹簧的刚性，其中 U 是弹簧材质的剪切变形模数^[18]， e' 是直径， E 是弹簧的内径， A 是弹簧圈数。

假设该悬臂具有 a 的长度， b_0 为等腰三角形的底部宽度， h 为厚度， E' 为弹性模数^[19]。当悬臂梁受拉力为 U' 时，所引起的挠度可表示为：

$$W = \frac{U' 6a^3}{E' b_0 h^3} \quad (3)$$

将式(1)至式(3)相结合，得到了在悬臂梁自由端上施加的集中力 L 和传感器的位移 R' 的关系式^[20-23]：

$$L = \frac{2R'E'P_e}{2E' + a^3P_e} \quad (4)$$

在实际使用中，外部环境(如承载力、温度等)的改变会导致芯层等效折射率、光栅常数等参数发生改变^[24]。由于光纤光栅的中心波长对承载力和温度都很敏感，因此在使用过程中，需要将温度对光纤位移传感器的影响消除掉，为方便修正受温度的影响本文给出光纤位移传感器启动时弹簧与悬梁臂间形变示意图，具体如图2所示。

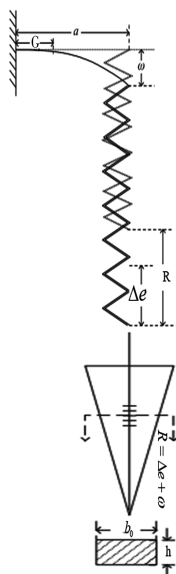


图2 弹簧与悬梁臂间形变示意图

Fig.2 Schematic diagram of deformation between spring and cantilever beam

从物质力学的角度出发，在一个等腰三角悬臂梁的自由端，设悬臂梁自由端到加载点的距离为 a' ，在受到集中荷载 Z 的影响时，其表面每个点的应变值表示为^[25]：

$$\eta = \frac{6a'Z}{E'b_0h^2} \quad (5)$$

根据耦合原理，在等腰三角悬臂结构上，承载力在任何情况下都是一致的，且不受空间位置的影响。入射到符合光栅处的光都会被反射，光栅的反射中心波长 δ_B 为：

$$\delta_B = 2n_{\text{eff}}\Gamma \quad (6)$$

式(6)中， n_{eff} 是各模在芯层中的等效折射率^[26]， Γ 表示该光栅在时间上的间隔。在外部环境如温度、应变的影响下， n_{eff} 和 Γ 会发生改变，并且应变和温度可以互相独立地导致光纤光栅中心波长的偏移。这样，在承载力与温度共同影响下，为消除温度影响需要将两者相加值表示其在光栅上的反射波长位移量：

$$\frac{\Delta\delta_B}{\delta_B} = (1-q)\eta + j\Delta W' + \tau\Delta W' \quad (7)$$

式(7)中， $\Delta\delta_B$ 为反射波长在外部温度的影响下发生的变化量^[27]， q 是光纤的有效弹性系数， j 是光纤的导热系数， τ 是该光纤的热光学系数， $\Delta W'$ 是外部环境温度的变化。

因为两只光纤光栅处在相同的环境中，所以在温度的改变情况下，随机两个光栅的波长 δ_{B1} 和 δ_{B2} 的偏移应当是相同的，而在悬臂梁上、下表面的光栅所感受到的波长是不同的，分别是正负应变。但其幅度是相同的，按照双光栅的对称性设计，两光纤光栅在承载力的影响下，其中心反射波长 δ_{B1} 和 δ_{B2} 与短波的偏移 $\Delta\delta_{B1}$ 和 $\Delta\delta_{B2}$ 的差异可以通过以下公式表达出来：

$$\frac{\Delta\delta_{B1}}{\delta_{B1}} - \frac{\Delta\delta_{B2}}{\delta_{B2}} = 2\eta - q\eta \quad (8)$$

由式(8)可看出，波长间距没有受温度影响，所以该方法能有效地消除温度效应对位移测量结果的影响。

修正光纤位移传感器后，在使用传感器过程需要将基桩转换成纯弯曲数学模型，方便传感器后续测量与计算。

1.3 住宅建筑岩土工程勘察基桩曲率测量的纯弯曲数学模型

住宅房屋地基工程施工和使用期间，基桩既有安装后的非线性膨胀变形，又有长期服役引起

的承载力松弛,再加上外力作用和压缩效应,都会引起周边构件表面的切向拉伸和径向膨胀等承载力变化,使整体上呈现出外部曲率的改变。本文建立一个纯粹的弯曲模型,把埋入其中的光纤光栅的应变值 η 转换成曲率。在纯力矩的情况下,杆身上部为压力,下部为拉力,且在剖面高度上呈顺应性。从下表面延伸到上表面收缩,总会有一个恒定的纤维层,这就是所谓的中间层。在模型被弯曲后,离中间层距 x 的纤维 c 的长度为:

$$f_c = r' \beta + x \beta \quad (9)$$

式(9)中, r' 是中性层曲率半径, β 表示该基桩的弯折角。原始的纤维 c 的长 f_c 等于弯曲后原始的纤维 O_1O_2 的长,那么:

$$f_c = f_{O_1O_2} = r' \beta \quad (10)$$

假定在 c' 层上设置了光纤光栅 A' ,那么该层的正承载力 η_+ 可以表达为:

$$\eta_+ = \frac{f_c' - f_c}{f_c} = \frac{x \beta}{r' \beta} = \frac{x}{r'} \quad (11)$$

可以得到基桩纯弯曲数学模型:

$$\Delta \lambda = \frac{\eta_+}{r'} = \alpha_v v \quad (12)$$

式(12)中, α_v 表示曲率测量灵敏度系数,在位移传感器研制完成并校准了光纤曲率之后,所得到的灵敏度系数是一个恒量。 v 是中性层曲率,在以后的计算中,为了简单起见,中性层距最里面的一层的距离比附属物的直径要小得多。在此基础上,可以把中间层曲率看作是最外面的基桩的曲率。

1.4 光纤位移传感器对基桩承载力分析方法

构建出基桩的纯弯曲数学模型后,基于弹性力学原理,可将完工状态下的基桩形态简化成一个厚壁柱,其位移承载力在柱体上的分布是一个中心轴对称的形式。本文将基桩承载力的计算方法,尽量简化为厚壁圆柱体的平面轴对称问题。而在平面轴对称问题中的未知量主要包括了径向、切向承载力,径向、切向应变和径向位移量,通常被表示为 s_r 、 s_θ 、 η_r 、 η_θ 、 u ,其满足基础方程式和对应的边界条件的平衡方程式为:

$$\frac{s_r}{r} + \frac{\xi_r - s_\theta}{r} = 0 \quad (13)$$

式(13)中, r 是厚壁圆柱体的当前径向坐标。

将其转换为几何表达式为:

$$\eta_r = \frac{du}{dr}, \eta_\theta = \frac{u}{r} \quad (14)$$

本构方程可表示成:

$$\begin{cases} \eta_r = \frac{(1-v^2)}{K} \left(s_r \frac{v s_\theta}{1-v} \right) \\ \eta_\theta = \frac{1-v^2}{K} \left(s_\theta - \frac{v s_r}{1-v} \right) \end{cases} \quad (15)$$

式(15)中, v 是圆柱的Poisson系数,通常是0.49, K 表示圆柱的弹性系数。由式(15)可知变形协调表达式可表示成:

$$\frac{\eta_\theta}{r} + \frac{\eta_\theta - \eta_r}{r} = 0 \quad (16)$$

将式(15)与式(16)相结合,就可得出用承载力分量表达的协调表达式:

$$\frac{s_\theta}{r} - \frac{v s_r}{(1-v)r} = \frac{s_r - s_\theta}{(1-v)r} \quad (17)$$

由式(13)可得到:

$$s_\theta = s_r + \frac{s_r}{r} \quad (18)$$

对以上的方程进行整理,就能获得只包括 s_r 的微分方程。假定厚壁圆柱体的外侧和内侧分别承受压力 z_1 和 z_2 , n 为基桩位移之前的内径, m 为基桩位移之前的外部直径。在承载力分量中引入边界条件,得到位移分量:

$$u = \frac{1+v}{K} \times \left[-\frac{n^2 m^2 (z_2 - z_1)}{m^2 - n^2} \frac{1}{r} + (1-2v) \frac{n^2 z_1 r - m^2 z_2 r}{m^2 - n^2} \right] \quad (19)$$

假设将没有发生过位移变形的地基基桩的外部曲率定义为 v_1 ,将发生过位移变形的地基基桩的外部曲率定义为 v_2 。通过对式(19)的变形,可以得出基桩界面承载力 z_1 与 v 被测曲率(包括 v_1 和 v_2)的关系如下所示:

$$z_1 = \frac{(1-n^2 v_1^2)(v_1 - v_2)K}{2(1-v^2)n^2 v_1^2 v_2} \quad (20)$$

根据上述光纤光栅、纯弯曲、厚壁圆筒平面轴对称相关数学模型,总结得到基于光纤位移传感技术的住宅建筑岩土工程勘察地基承载力分析方法,具体如下:

- 1)已知参量:住宅建筑岩土工程勘察地基基桩的曲率半径 r 。
- 2)被测参量:参数 K 可以从建筑物的参数中获得,也可以自行测得。
- 3)测定曲率:测定基桩外壁在变形之前和之

后的曲率。

4)承载力分析:将测定的曲率和各个已知参数,用公式(20)计算,求出基桩承载力值。

2 实验分析

某地产公司为对公司旗下某楼盘中某栋完工楼更新各方面数据,拟运用某种方法对该楼的地基承载力进行勘察分析,已知该栋楼地基呈长方形,占地约943 m²,地基深度约6 m,四向各分部一个基桩。

设置本文方法中的光纤位移传感器总的长度是16 mm,悬臂梁的长度是9 mm,等腰三角形的底部的宽度是3.4 mm,用来固定悬臂梁的固定孔的直径是2.68 mm,用来悬挂弹簧管钩的牵引孔的直径是0.64 mm。

以该公司某楼盘地基中四个基础柱为研究对象,运用本文方法对基桩承载力进行测量,并与文献[5]方法、文献[6]方法进行对比,分析三种方法在测量承载力方面的性能,具体方法如表1所示。

表1 测量地基基桩承载力

Table 1 Bearing capacity measurement of foundation piles

方法	地基基桩承载力/MPa				测量偏差/(%)
	柱1	柱2	柱3	柱4	
文献[5]方法	0.29856	0.31241	0.35699	0.41261	4.63
文献[6]方法	0.30467	0.22954	0.34082	0.32467	3.95
本文方法	0.23464	0.24682	0.24011	0.23689	2.36

由表1可看出,文献[5]方法测量四个基桩之间各自的承载力差值较大,理论上说四个基桩之间分布的承载力应较为平均,且文献[5]方法在三种方法中测量偏差最大,这可能是基桩距离仪器远近各不相同导致柱体间测量出的承载力有偏差;文献[6]方法测量四个基桩之间各自的承载力相差不明显,但测量出的实际承载力具有一定偏差;而运用本文方法测出的承载力与实际值偏差在三种方法中是最小的,且测量四个基桩之间各自的承载力差值最小,数值较为平均,说明本文方法可以准确测量出地基

中基桩的承载力。

实验采用XYZ系列程控温箱对基桩试件进行温度控制。通过PID算法以5℃/min速率从25℃升温至80℃,每个温度台阶保持20 min。温箱内置传感器与试件表面红外热像仪同步监测温度分布,确保梯度<2℃。三种测量系统在升温过程中连续采集承载力数据,采样频率10 Hz,测试三种方法在运行过程中受温度影响情况,具体实验结果如图3所示。

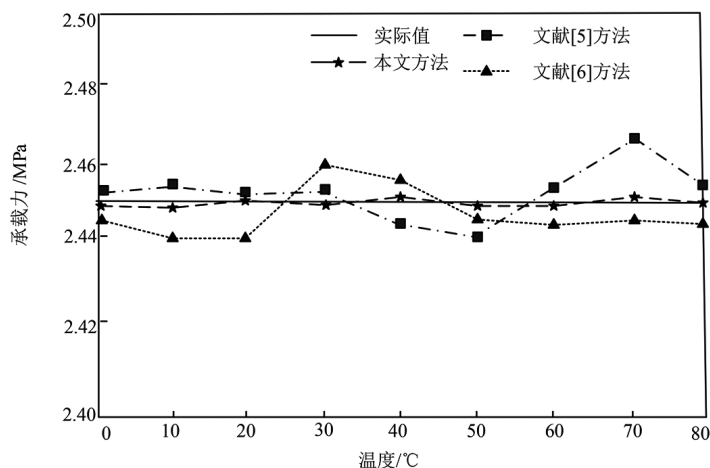


图3 三种方法受温度影响情况

Fig.3 Influence of temperature on three methods

由图3可看出,文献[5]方法测量的承载力与实际承载力相比,文献[5]方法的测量误差随温度升高而显著增大,表明其仅适用于低温工况,持续的高温会对方法测量的准确度造成影响;文献[6]方法测量的承载力与实际承载力相比,文献[6]方法在温度越低的情况下测出的承载力值与实际值之间的偏差越大,说明该方法较适用于低温环境作业;而本文方法随着温度的不断升高测量出的承载力值与实际值整体偏差不大,说明本文方法在运行过程中几乎不受温度变化的影响。

实验以波长偏差作为衡量标准,测试本文方法装置中弹簧圈数在多少的情况下,装置的波长偏差最小整体运行状态最佳,分别设置弹簧圈数为10、20、30和40圈,测量时长为1 min,具体实验结果如图4所示。

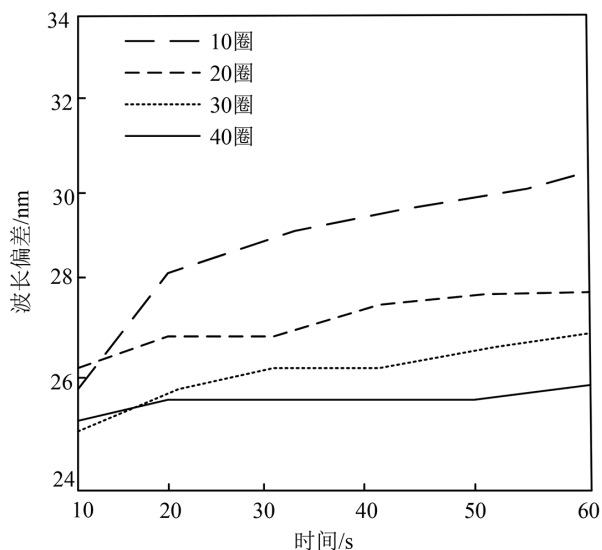


图4 不同弹簧圈数下的波长偏差

Fig.4 Wavelength deviation with different spring coil turns

由图4可看出,本文方法在运行状态下,随着时间的不断增加,总体波长偏差也在不断增加,但是弹簧圈数为10和20圈时,波长偏差上升趋势较为明显;而弹簧圈数为30和40圈时波长偏差的上升趋势较为平缓,总体保持在26 nm以内,说明本文方法中弹簧圈数设置在30和40圈时测量精度最为准确。通常情况下,弹簧圈数越多,电阻越大,耗能就越大,所以处于节能考虑,本文方法弹簧圈数设置在30圈时,设备测量精度既准确又节能。

3 结论

为提升工程地基承载力测量精确度,提出基于

光纤位移传感技术的住宅建筑岩土工程勘察地基承载力分析方法。利用光纤位移传感器,构建地基桩纯弯曲数学模型,并将模型简化为厚壁圆柱体的平面轴对称问题,获取住宅建筑岩土工程勘察地基承载力分析结果,并在此基础上对传感器受温度影响的问题作出了修正,实现光纤位移传感器精准稳定测量。实验得出,本文方法可以准确测量出地基中基桩的承载力,运行过程中几乎不受温度变化的影响,弹簧圈数为30圈时,设备测量精度既准确又节能。

但本文方法仍存在不足之处,即未考虑复杂地质条件下基桩与土体的相互作用对测量结果的影响,且实时监测能力有限,难以动态捕捉瞬时荷载下的承载力变化。可通过耦合分布式光纤传感网络提升空间分辨率,并引入机器学习算法修正土体-结构相互作用误差。未来需重点突破复杂地质条件下的实时监测技术,拓展传感器适用场景。

参考文献

- [1] 周昊,陈国良,何翔,等. 岩土工程建筑信息模型集成与仿真关键技术研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(S02): 443-453.
- [2] 邹文龙,李星,张惠超. 基于极限平衡理论的临坡地基承载力计算[J]. 铁道建筑, 2021, 61(06): 89-93.
- [3] 晏青,赵均海,张常光. 基于统一强度理论的临坡加筋地基极限承载力新解[J]. 岩土力学, 2021, 42(06): 1587-1600.
- [4] 海大鹏,吕政,王小强,等. 深厚卵石覆盖层地基的钢栈桥施工技术[J]. 建筑结构, 2022, 52(S01): 3165-3169.
- [5] 杨继强,孙昕,崔向东. 基于双剪统一强度理论的地基承载力计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(09): 1923-1932.
- [6] 刘拴奇,张昌军,张文娟,等. 基于Terzaghi极限承载力理论的加筋地基承载力研究[J]. 工业建筑, 2021, 51(04): 148-153.
- [7] 马金钰,陈欣,丁国清,等. 基于激光位移传感器圆径测量的角度安装误差研究[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(05): 194-200.
- [8] 孙丽,孙欣欣,李闯,等. 基于光纤光栅的高精度压杆式位移传感器[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(05): 779-786.
- [9] 邓永乐,王荣彪,唐健,等. 基于脉冲磁化的阵列磁桥式位移传感器[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(05): 110-120.
- [10] 陈宁,江超,刘昌宁,等. F-P干涉仪构成的光纤位移传感器[J]. 压电与声光, 2021, 43(02): 178-182.
- [11] 张征,虞筱琛,孙敏,等. 基于可伸展变形的双稳态圆柱壳计算模型[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(02): 518-525.

- [12] 盛启明,郑刚,张雄星,等. 调频连续波光纤位移传感器快速信号处理方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(21):141-149.
- [13] 朱栋梁,林伟宁,程贵海,等. 基于光纤传感技术的桩体位移监测方法研究[J]. 人民长江, 2022, 53(5):168-175.
- [14] 彭海游,陈渝,任秀文,等. 工程勘察设计BIM技术在滑坡治理工程中的应用[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版, 2022, 41(6):113-118, 139.
- [15] 刘海军,王新,刘兴国,等. 重庆地区超高层建筑软岩地基承载力取值研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(17):145-148.
- [16] 陈飞宇,董利飞,王苗,等. 基于灰色马尔科夫模型的地基承载力预测[J]. 地质科技通报, 2022, 41(3):222-227.
- [17] 彭状. 载荷试验在确定地基承载力与桩端阻力中的应用及误区浅析[J]. 矿冶工程, 2022, 42(4):39-42.
- [18] 陈则连,马元,李志华. 波速确定地基承载力方法研究[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(4):17-19.
- [19] 彭文哲,陈玖颖,赵明华. 基于双侧破坏模式的临坡地基承载力简化分析方法[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2022, 49(7):123-129.
- [20] 宋二祥,付浩,李贤杰. 地基承载力机理及新计算方法[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(1):37-44.
- [21] 宋二祥,陈星屹,林世杰. 关于偏心荷载下地基承载力的验算方法[J]. 岩土力学, 2022, 43(7):1925-1932.
- [22] 杨光华,周沛栋. 复杂地层刚性桩复合地基桩间土承载力确定方法的探讨[J]. 建筑结构, 2022, 52(S1):2442-2449.
- [23] 武玉萍,付红安,王佳佳,等. 黄土地基微型桩水平承载力及群桩效应研究[J]. 应用力学学报, 2022, 39(3):543-553.
- [24] 徐瑞麟,秦卫星,胡惠仁,等. 雨水入渗条件下地基瞬态极限承载力解析解及其应用[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2022, 53(10):4048-4056.
- [25] 程力,牛富俊,周密,等. 平板锚基础在砂土地基中抗拔承载力[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(8):126-134.
- [26] 张亚妹,张立,秦明光,等. 泥岩地基打入式预制桩承载力时效性分析[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2022, 53(11):4504-4513.
- [27] 张爱军,付红安,王佳佳,等. 黄土地基微型群桩抗拔承载力及群桩效应研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(24):120-125.