工程材料与结构
Engineering Materials and Structures
2025 年第 04 卷第 02 期
Vol. 04, No. 02, 2025

研究性论文 http://www.scifootprint.com/EMS/index.html

基于磁感应链的钢筋混凝土应力状态检测方法研究

张志建，张奔牛*

（重庆交通大学 土木工程学院，重庆 400074）

摘要：钢筋混凝土结构的应力状态是评估其安全性能与健康状况的核心指标。传统应力检测方法存在局限性，如仅能测量相对应力、难以深入材料内部探测，或在役结构预应力无法直接测量。针对现有技术的不足，本文提出了一种基于磁感应链的新型钢筋混凝土应力状态检测方法。该方法通过在混凝土表面布置外加磁场装置与霍尔传感器，利用磁场渗透磁化内部钢筋并形成磁感应链，结合远程磁场测量技术监测磁场变化，实现对钢筋应力状态的实时、非破坏性检测。通过建立力磁耦合关系的数学模型，解析磁感应强度变化与应力之间的关联，从而量化评估结构应力状态。进一步地，通过实验结构与待测结构的磁感应强度对比标定法，可间接推导在役结构中的预应力水平。研究结果表明，该方法具有灵敏度高、可靠性强、易于数字化输出等优势，能够有效克服传统方法的材料分散性问题，直观展示钢筋在不同应力状态下的变化，为实时、准确的结构检测提供了新途径。

关键词：磁感应链；钢筋混凝土；应力状态检测；预应力；力磁耦合；非破坏性检测

DOI：10.48014/ems.20250513001

引用格式：张志建，张奔牛．基于磁感应链的钢筋混凝土应力状态检测方法研究[J]．工程材料与结构，2025，4(2)：47-53.

1 引言

混凝土的应力状态是评估结构健康状况和安全性能的核心指标。它不仅直接关系到结构的稳定性，还对预防潜在的损坏具有不可忽视的作用。传统的应力监测方法主要依赖于应变传感器的间接测量，这种方法往往受限于材料的本构关系，难以实现精确的应力推断[1]。在现有的结构监测手段中，如何提高监测传感技术的适用性、降低成本，并实现大规模布置，已成为当前研究和工程实践中的重要挑战[2]。

目前，混凝土应力检测方法多种多样，主要依赖于对应变值的直接测量，并通过相应换算获取应力值。常用的传感器技术包括微波传感器、纳米材料传感器、电阻应变计以及光纤光栅应变计等。然而，这些方法在实际应用中均存在一定局限性。例如电阻应变计主要适用于混凝土表面应变的测量，难以深入材料内部进行探测。光纤光栅应变计作为一种新型传感技术，具有高灵敏度、宽测量频带和强动态响应性等优点，然而它对施工环境的要求较高，需要在混凝土结构内预埋或粘贴光纤光栅[3-6]。更为关键的是，现有的混凝土应力传感技术和监测方法在进行量测前均需进行数据归零操作，且主要测量的是混凝土的相对应力变化，而非绝对应力值。这使得准确判断混凝土结构自身的真实受力情况变得异常困难。因此，混凝土应力监测领域急需一种新型的、能够克服上述问题的监测技术和方法[7-9]。

本研究提出了一种基于磁感应链的钢筋混凝

* 通讯作者 Corresponding author：张奔牛，benniuzhang@cqjtu.edu.cn
收稿日期：2025-05-13； 录用日期：2025-06-03； 发表日期：2025-06-28

土应力状态监测技术。该技术核心在于利用外加磁场通过混凝土加载至钢筋上，形成磁感应链，并在外部混凝土表面测量磁场变化，以检测钢筋混凝土结构的应力状态。当钢筋受到外部荷载作用产生应力变化或损伤时，其内部的磁畴结构会相应调整，导致周围磁场分布的变化[10,11]。通过在结构外部布置精密的磁感应元件，能够捕捉到这些细微的磁场波动，并将其转化为可量化的电信号。结合先进的信号处理技术与数据分析算法，即可实现对结构应力状态的精准识别与量化评估。更重要的是，磁感应链测量技术不仅能测到相对应力状态还能测到绝对应力状态。将参考结构在施加外力过程中的磁感应强度变化数据与待测结构中已经存在的预应力状态下的磁感应强度数据进行对比，利用两者间磁感应强度差异量的计算，可以推导出待测结构中的预应力水平[12,13]。

2 磁感应链传导原理

在钢筋材料内部，当受到外加磁场的作用时，材料内部的原子磁矩会重新排列，形成所谓的磁化效应，如图 1 所示。这种磁化效应通过感应作用在材料内部逐级传递，形成链式传导。具体来说，外加磁场使得材料内部的原子磁矩（即每个原子的微小磁场）趋向于与外磁场方向一致，从而在原子间形成链式排列的磁矩链，即磁链。这种磁链的形成是材料整体磁化过程的基础，也是材料表现出宏观磁性的原因[14]。

对于钢筋混凝土结构，混凝土的应力状态通常与钢筋的受力情况密切相关。钢筋作为铁磁性材料，其受力状态（如拉伸、压缩、弯曲等）会影响其内部的磁畴结构和磁链传导，进而改变表面磁强幅。这种变化可以通过霍尔传感器来检测，从而间接反映钢筋的受力状态和结合力变化。当钢筋混凝土结构受到外加应力时，钢筋作为主要的承载部件会首先响应，如图 2 所示。外加应力会改变钢筋内部的应力分布和应变状态，进而影响其磁畴结构和磁链传导。具体来说，应力集中或应变较大的区域会导致磁畴的重新排列和磁链的局部变化，从而改变钢筋的表面磁强幅[15,16]。

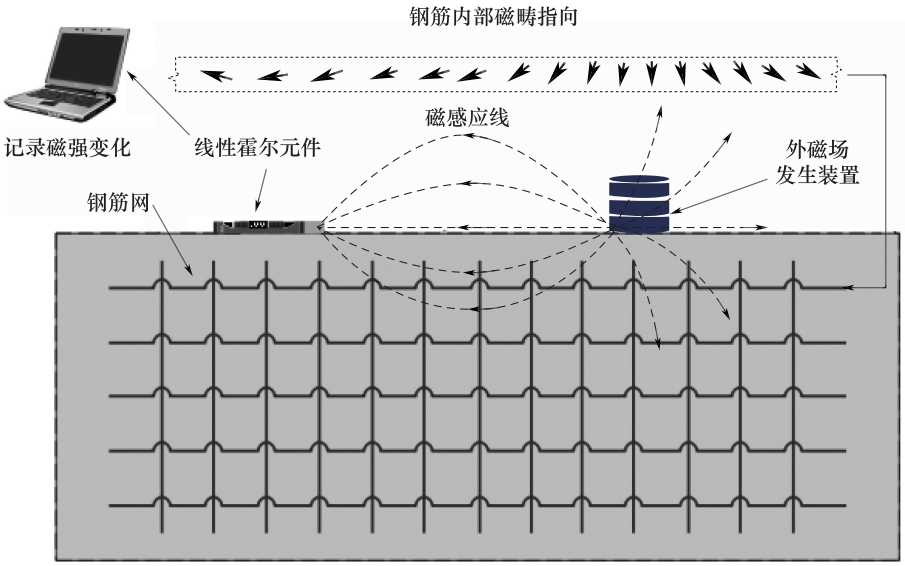

图 1　无荷载状态图

Fig. 1　Unloaded state diagram

3 钢筋混凝土磁链传导与磁化过程

由于应力会改变钢筋内部的磁畴结构和磁链传导，我们可以假设存在一个应力相关的系数 $m(\sigma)$，它表示应力 σ 对磁化强度 M 的影响。因此，磁化强度可以表示为：

$$M = \chi B_0 + m(\sigma) \tag{1}$$

式中，χ 是材料磁化率，B_0 是外加磁场强度，为了

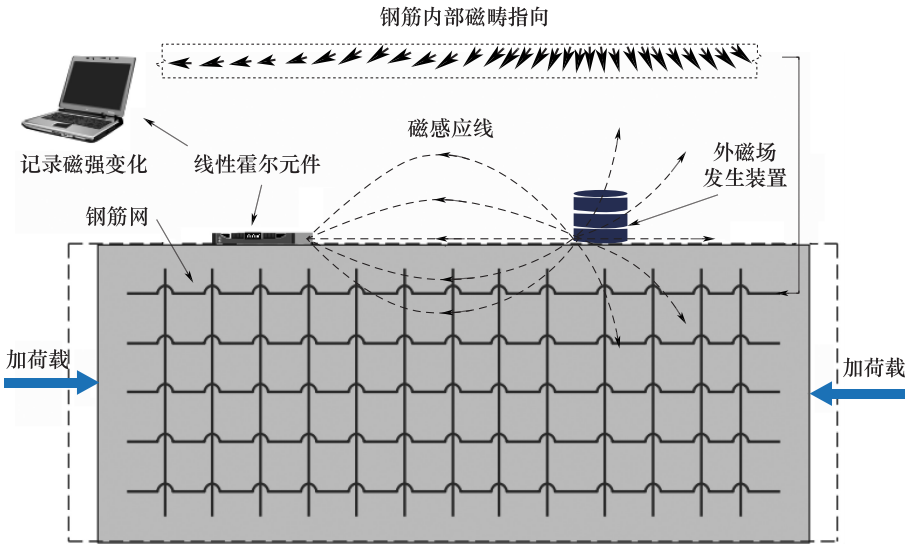

图 2 加荷载状态图

Fig. 2 Load state diagram

简化,我们假设 $m(\sigma)$ 与应力 σ 成线性关系(这在实际中可能是一个近似):

$$m(\sigma)=k'\sigma \tag{2}$$

式中,k' 是一个常数,表示应力对磁化强度的影响程度。

将 $m(\sigma)$ 代入 M 的表达式,得到:

$$M=\chi B_0+k'\sigma \tag{3}$$

再代入 $B_I=\mu_0(H+M)$,H 是测出的磁场强度,得到:

$$\begin{aligned}B_I&=\mu_0(\mu_0 B_0+\chi B_0+k'\sigma)\\&=(1+\chi\mu_0)B_0+\mu_0 k'\sigma\end{aligned} \tag{4}$$

令 $k=1+\chi\mu_0$ 和 $b=\mu_0 k'$,则:

$$B_I=kB_0+b\sigma \tag{5}$$

或者,如果我们想将 B_I 表示为 B_0 的函数,并考虑应力的影响,可以写为:

$$\begin{aligned}B_I&=\left(k+\frac{b\sigma}{B_0}\right)B_0\\&=(k_m+b_m(\sigma))B_0\end{aligned} \tag{6}$$

式中,$k_m=k$ 是与材料本身性质相关的常数,而 $b_m(\sigma)=\dfrac{b\sigma}{B_0}$ 是与应力相关的系数。

4 在役钢筋混凝土结构预应力检测方法

本研究提出的磁感应链传导原理还能应用到在役钢筋混凝土结构预应力的检测,其核心思路是通过建立磁感应强度与钢筋应力状态的耦合关系,实现对预应力水平的非破坏性定量评估。具体检测流程包含以下四个关键步骤:

首先针对待测钢筋混凝土结构的几何参数(如钢筋直径、间距、保护层厚度)、材料属性(混凝土强度等级、钢筋材质)及设计参数,制作与原结构完全一致或等比例的参考试件。在无应力状态下,利用高性能钕磁铁构建的外加磁场发生装置,在试件表面布置霍尔传感器阵列,对钢筋位置进行网格化磁感应强度测量,记录各测点的初始磁感应强度分布作为基准值。此步骤通过消除结构差异导致的磁特性偏差,为后续应力分析提供统一的参考基准。

采用分级加载方式对参考试件施加轴向拉力,模拟预应力加载过程。加载设备需具备位移-力双控功能,确保外力以 0.1kN 级差均匀递增。在每级荷载下,同步采集霍尔传感器阵列的磁感应强度数据,建立荷载-磁感应强度变化量(ΔB)的映射关系。此过程重点观测钢筋屈服前弹性阶段的磁特性响应规律,获取磁导率随应力变化的敏感区间。

将参考结构在施加外力过程中的磁感应强度变化数据与待测结构中已经存在的预应力状态下的磁感应强度数据进行对比。找到一个特定的外加应力值,使得在这个应力水平下,参考结构的磁感应强度与待测结构的预应力状态下的磁感应强度相匹配。

当找到匹配点后，记录此时的外加应力值。由于参考结构与待测结构在钢筋布置和材料属性上相同，且磁感应强度的变化与钢筋内部的应力状态密切相关，因此可以认为这个外加应力值就是待测结构中预应力的大小。通过以上步骤，我们可以利用磁强的大小来标定预应力的大小，实现对待测结构中预应力水平的测量。

5 实验研究

5.1 实验过程

现场试验装置布置如图 3 所示，主要包含以下核心组件：外磁场发生装置（采用 N35 磁铁，剩磁：约 1170～1220mT）、线性霍尔传感器（灵敏度达 0.1mT）、压力传感器（量程 0～500kN）、液压千斤顶、磁强采集仪及多功能静态应变测试系统。试验选用尺寸为 150mm×150mm×300mm 的 C40 钢筋混凝土长方体试块，钢筋配置为双层双向 Φ12@150mm，保护层厚度 25mm。

试验前处理阶段，采用高精度打磨机对试块表面进行平整化处理，确保粗糙度 Ra≤3.2μm。在混凝土表面布置应变花阵列，并通过环氧树脂胶层进行粘结固定。为消除加载过程中仪器位移引起的测量误差，霍尔传感器采用非接触式安装方式，通过高精度定位支架保持与混凝土表面 5±0.5mm 的恒定间隙，利用激光测距仪实时监测安装误差。数据采集系统采用同步触发模式，确保力、应变、磁感应强度三组数据的采集时间偏差≤1μs。

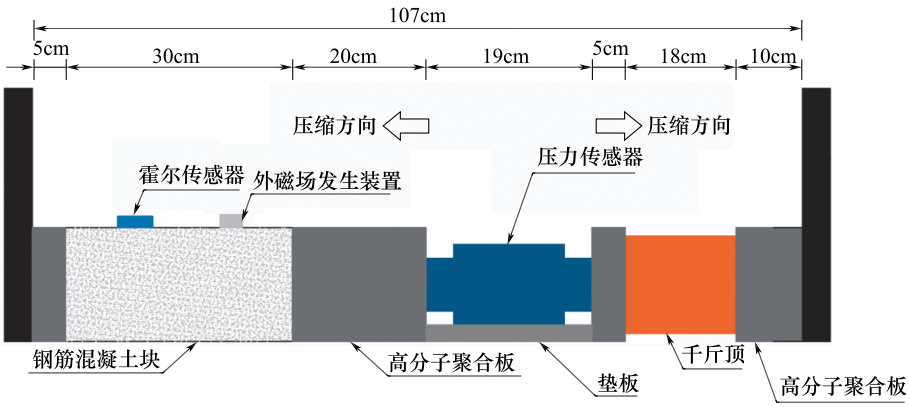

图 3 实验布置图

Fig. 3 Experimental layout diagram

加载制度设计为分级循环加载，以 20kN 为加载刻度，在 0～100kN 范围内进行五次往复加载循环。具体步骤为：0→20kN→40kN→60kN→80kN→100kN→0kN，加载速率控制在 2kN/s，保持加载时间 30s。加载过程中，液压千斤顶通过力-位移双闭环控制系统实现精确加载，压力传感器实时反馈荷载值，应变测试系统同步记录试块表面应变分布，磁强采集仪以 1kHz 采样率记录霍尔传感器阵列的磁感应强度数据。所有数据通过采集仪进行实时显示与存储。

为验证磁感应链的独立性，设置对照试验组：采用相同尺寸的 C40 素混凝土试块（无钢筋配置），在相同加载条件下（20kN 刻度，五次循环）进行对比测试。试验结果表明：素混凝土试块在加载过程中，各测点的磁感应强度波动范围≤±0.3mT，远小于钢筋混凝土试块的磁响应幅值（≥50mT），且五次循环的磁感应强度标准差≤0.1mT。该结果证实：

① 磁感应链对混凝土试块无显著响应特性；

② 钢筋的存在是磁感应强度变化的主导因素；

③ 非接触式霍尔传感器安装方式可有效隔离混凝土变形对磁测的干扰。

5.2 实验数据分析

由图 4 所示的实验数据，验证了钢筋混凝土结构的力学特性与其磁特性之间存在着紧密且强烈的关联性。这一发现证实了理论假设。在实验过程中，外加磁场装置成功地渗透至混凝土内部，有

效磁化了钢筋并形成了清晰的磁感应链。随着对钢筋混凝土试块施加不同等级的荷载,我们观察到磁感应链的磁通量数据发生了显著的变化,这些变化与钢筋混凝土内部的应力状态呈现出高度的一致性。

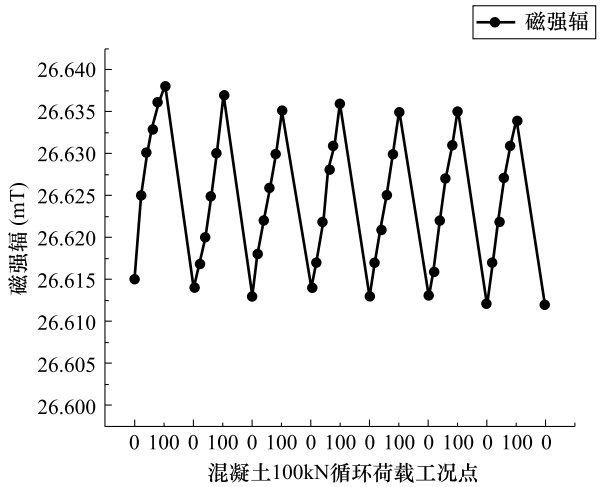

图 4 钢筋混凝土循环加载实验数据

Fig. 4 Experimental data on cyclic loading of reinforced concrete

由图 5 所示的实验数据,所展现出的力磁耦合关系尤为明显,它揭示了钢筋应力变化与磁感应强度变化之间的内在联系。具体而言,随着钢筋所受应力的增加,其周围的磁感应强度也随之发生相应的变化,这种变化呈现出一种线性的趋势。通过对磁通量数据与钢筋混凝土应力进行、分析,发现两者之间存在着显著的线性关系,这一发现进一步增强了我们对力磁耦合效应的理解,并为后续的数学建模和数据分析提供了有力的支持。

研究所采用的基于磁感应链的检测方法不仅具有高度的灵敏性和准确性,而且实现了对钢筋混凝土结构应力状态的非破坏性检测。通过在外部混凝土表面测量磁场变化,能够有效地捕捉到钢筋内部应力状态的变化,从而实现对钢筋混凝土结构应力和预应力的精准测量。

6 结论

本研究建立了基于磁感应链的钢筋混凝土预应力检测理论框架,通过多尺度力-磁耦合分析实现了应力状态的定量表征。主要结论及成果如下:

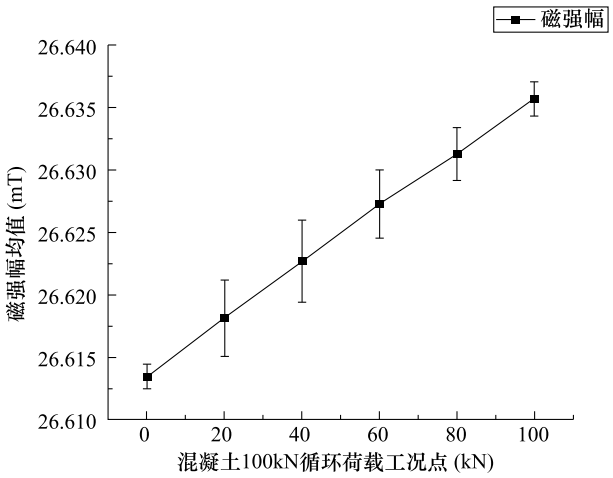

图 5 钢筋混凝土循环加载误差分析

Fig. 5 Error analysis of cyclic loading of reinforced concrete

(1)研究铁磁性材料(如钢筋)在受到外加磁场作用时,其内部磁畴结构和磁链传导的变化机理。分析外加磁场对材料内部原子磁矩的排列影响,以及磁链效应的形成和传播过程。

(2)基于磁畴理论和磁相互作用原理,推导磁链效应的数学模型。分析磁链在材料内部逐层传递的特性,以及层间磁相互作用对磁感应强度变化的影响。

(3)研究钢筋混凝土结构中应力状态与磁感应强度之间的定量关系。通过实验测量不同应力状态下的磁感应强度变化,建立应力与磁感应强度的对应关系。基于磁链效应理论和应力与磁感应强度的关系,构建力磁耦合关系的数学模型。

(4)将参考结构在施加外力过程中的磁感应强度变化数据与待测结构中已经存在的预应力状态下的磁感应强度数据进行对比,利用两者间磁感应强度差异量的计算,可以推导出待测结构中的预应力水平。

综上所述,本文研究的基于磁感应链的钢筋混凝土应力状态(预应力)检测方法,具有灵敏度高、可靠性强、易于数字化输出、能解决材料分散性问题等优点。该方法为桥梁锚固区等关键部位的预应力监测提供了新的技术方法。后续研究将重点解决复杂电磁环境下的信号降噪问题,进一步完善工程实用化检测体系。

利益冲突:作者声明无利益冲突。

参考文献(References)

[1] 庄晨旭,张劲泉,蒋含莞.混凝土应力检测技术研究综述[J].公路交通科技,2016,3(3):43-49.
https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-0268.2016.03.008

[2] 马惠香,周建庭,赵瑞强,等.基于金属磁记忆技术的钢筋应力无损检测试验[J].江苏大学学报(自然科学版),2018(3):1-6.
https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-7775.2018.03.017

[3] 王柏生,沈旭凯,林湘祁.开槽法测试混凝土工作应力的试验研究[J].浙江大学学报(工学版),2010(9):1-6.

[4] 朱鸿鹄,殷建华,靳伟,等.基于光纤光栅传感技术的地基基础健康监测研究[J].土木工程学报,2010,43(6):109-115.

[5] 张旭苹,周廣南,王浩然,等.基于分布式光纤声场传感的预应力钢筒混凝土管断丝监测研究进展[J].Acta Optica Sinica,2024,44(1):0106006-0106006-12.
https://doi.org/10.3788/AOS231405

[6] 马宝龙,朱新民,张石磊.基于 YOLOX 的分布式 PCCP 断丝自动监测方法研究[J].China Rural Water & Hydropower,2024(3):190-197.
https://doi.org/10.12396/znsd.231016

[7] 周建庭,张森华,张洪.磁测法在桥梁隐蔽病害检测中的研究进展[J].土木工程学报,2021(11):1-10.

[8] Zhang Y,Zhang H,Tong K,et al. A Key Contribution for Concrete Durability: Harnessing Force-Magnetic Coupling for Stress State Detection in Reinforced Concrete Beams[J]. Structural Control and Health Monitoring,2024,2024(1):6162571.

[9] Frankowski P K,Majzner P,M??? 健 ka M,et al. Magnetic Non-Destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures—Methodology, System, and Identification Results[J]. Applied Sciences,2024,14(24):11695.
https://doi.org/10.3390/app142411695

[10] Frankowski P K,Chady T. Impact of magnetization on the evaluation of reinforced concrete structures using DC magnetic methods[J]. Materials,2022,15(3):857.

[11] Zhang J,Liu C,Sun M,et al. An innovative corrosion evaluation technique for reinforced concrete structures using magnetic sensors[J]. Construction and Building Materials,2017,135:68-75.
https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.157

[12] Davis A M,Mirsayar M M,Hartl D J. A novel structural health monitoring approach in concrete structures using embedded magnetic shape memory alloy components[J]. Construction and Building Materials,2021,311:125212.

[13] Gaydecki P,Fernandes B,Quek S,et al. Inductive and magnetic field inspection systems for rebar visualization and corrosion estimation in reinforced and prestressed concrete[J]. Nondestructive Testing and Evaluation,2007,22(4):255-298.
https://doi.org/10.1080/10589750701362616

[14] Zhang H,Wang Y,Chen Q,et al. Distributed stress measurement in steel plates based on remnant magnetization and magnetoelastic effect[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2023,72:1-10.

[15] Thiruvengadam V,Singh B B,Kojima T,et al. Magnetization reversal,damping properties and magnetic anisotropy of l1-ordered feni thin films[J]. Applied Physics Letters,2019,115(20):202402.
https://doi.org/10.1063/1.5126324

[16] Ghanepour M,Amini M M,Rezaifar O. Numerical investigation on the impact of alternating magnetic fields on the mechanical properties of concrete with various silica sand and ferrosilicon compositions[J]. Results in Engineering,2024,24:103631.

Research on Stress State Detection Method of Reinforced Concrete Based on Magnetic Induction Chain

ZHANG Zhijian, ZHANG Benniu*

(School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The stress state of reinforced concrete structures is a core indicator for evaluating their safety performance and health status. Traditional stress detection methods have limitations, such as being able to measure only relative stress, being difficult to detect deep inside materials, or being unable to directly measure the prestress of in-service structures. In view of the deficiencies of the existing technology, this paper proposes a new method for detecting the stress state of reinforced concrete based on magnetic induction chain. This method uses an external magnetic field device and Hall sensors on the concrete surface to penetrate and magnetize the internal steel bars using magnetic fields, forming a magnetic induction chain. Combined with remote magnetic field measurement technology, it monitors magnetic field changes to achieve real-time, non-destructive detection of the stress state of the steel bars. By establishing a mathematical model of the force-magnetic coupling relationship, the correlation between changes in magnetic induction intensity and stress is analyzed, allowing for quantitative assessment of the structural stress state. Furthermore, the prestress level in the in-service structure can be indirectly deduced by comparing the magnetic induction intensity between the experimental structure and the structure to be tested using a calibration method. The research results show that this method has the advantages of high sensitivity, strong reliability, and easy digital output, and can effectively overcome the material dispersion problem of traditional methods, visually display the changes of steel bars under different stress states, and provide a new approach for real-time and accurate structural detection.

Keywords: Magnetic induction chain; reinforced concrete; stress state detection; prestress; force magnetic coupling; non-destructive testing

DOI: 10.48014/ems.20250513001

Citation: ZHANG Zhijian, ZHANG Benniu. Research on stress state detection method of reinforced concrete based on magnetic induction chain[J]. Engineering Materials and Structures 2025, 4(2): 47-53.

Copyright © 2025 by author(s) and Science Footprint Press Co., Limited. This article is open accessed under the CC-BY License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).