

基于有限元法的土木工程结构加固设计

李其廉¹ 杨元策¹ 敦彦茹²

1. 河北科技大学建筑工程学院 河北 石家庄 050018

2. 河北省建筑科学研究院有限公司 河北 石家庄 050227

摘要: 本文探讨了基于有限元法的土木工程结构加固设计。有限元法作为一种强大的数值分析方法,在土木工程领域具有广泛应用。文章介绍了有限元法的基本原理及其在土木工程中的应用范围,也阐述了土木工程结构加固设计的理论与方法。重点讨论了利用有限元法进行加固前的结构分析与评估、加固方案设计与模拟分析以及加固设计的优化过程。通过有限元法,设计人员能够准确评估结构状态,制定并优化加固方案,提升结构的安全性和耐久性。

关键词: 有限元法; 土木工程; 结构加固; 设计

引言: 土木工程结构在使用过程中常面临各种挑战,如自然灾害、荷载增加和结构老化等,这些问题对结构的安全性和稳定性构成严重威胁。因此,结构加固设计成为土木工程领域的重要任务。有限元法作为一种高效的数值分析方法,为土木工程结构的加固设计提供了有力工具。本文旨在探讨如何利用有限元法进行土木工程结构的加固设计,通过全面分析和评估结构状态,制定科学合理的加固方案,确保结构的安全可靠。

1 有限元法的基本原理与应用

1.1 有限元法的基本概念

有限元法(Finite Element Method, FEM)是一种强大的数值分析方法,专门用于求解偏微分方程(PDEs)和积分方程等复杂数学问题。这一方法的基本思想是将连续的求解域划分为有限数量的、相互连接的子区域,这些子区域被称为“有限元”。在每个有限元内,通过构造插值函数来近似表示未知场变量,从而将原问题转化为一组相对简单的代数方程组进行求解。有限元法的数学基础广泛涉及线性代数、微积分、变分原理等多个数学分支。通过变分方法或加权余量法,使得误差函数达到最小值并产生稳定解。这一过程类似于用多段微小直线逼近圆的思想,有限元法通过连接众多小区域上的简单方程,来估计更大区域上的复杂方程。有限元法的求解步骤通常包括问题定义、几何建模、选择元素类型、形函数和插值、建立刚度矩阵、应用边界条件、求解线性方程组以及后处理等关键环节。尽管这一过程看似复杂,但随着计算机技术的飞速发展,有限元法已经实现了高效、准确的自动化求解;有限元法的优势在于其强大的通用性和灵活性,能够处理复杂的几何形状、边界条件以及非线性问题。通过调整有限元的数量和自由度的精度,可以改变求解的近似程度,从而分析结构

的局部细节问题。这种方法不仅在工程领域得到了广泛应用,还在数学、物理等多个学科中发挥着重要作用^[1]。

1.2 有限元法在土木工程中的应用范围

有限元法在土木工程中的应用极为广泛,涵盖了结构分析、地基处理、地震工程、桥梁工程等多个方面。在结构分析中,有限元法可以用于分析钢筋混凝土结构、钢结构、混凝土结构等各类结构的受力情况,确定最优的结构设计方案。通过模拟结构在荷载作用下的响应,有限元法能够准确预测结构的应力和应变、挠度、弯矩等关键参数,为工程师提供可靠的设计依据。在地基工程中,有限元法通过分析地基在荷载作用下的响应,可以判断地基的稳定性,预测地基的变形情况。这对于确保建筑物的安全稳定具有重要意义。在地震工程中,有限元法被用于分析地震作用下结构的响应,确定结构的抗震性能。通过模拟地震波的传播和结构的动态响应,有限元法能够为抗震设计提供科学依据。另外,有限元法在桥梁工程中也有着广泛应用。无论是悬索桥、拱桥还是梁桥,有限元法都能够对其进行精确的分析和设计,确保桥梁的安全性和稳定性。通过有限元分析,工程师可以优化桥梁的结构设计,提高桥梁的承载能力和耐久性。

2 有限元法基础及其在土木工程中的应用

2.1 有限元法的基本原理

有限元法(Finite Element Method, 简称FEM)是一种数值分析方法,它通过将复杂的连续体划分为一系列相互连接的简单单元,来近似求解复杂的物理问题。这些单元,即“有限元”,是构成整个求解区域的基本构件。每个单元内部,未知的物理量(如位移、应力、温度等)通过简单的函数(形函数)进行近似表示。通过集合所有单元的局部方程,形成整体的代数方程组,进

而求解得到整个连续体的物理场分布；有限元法的基本原理基于变分原理或加权余量法，其中变分原理通过最小化能量泛函来寻找问题的解，而加权余量法则通过使方程的余量加权积分为零来近似满足方程。有限元法的核心步骤包括：将求解区域离散化为有限元网格；为每个单元选择合适的形函数；根据物理定律建立单元的局部方程；将局部方程组装成全局方程；应用边界条件；求解全局方程得到未知量的近似解；有限元法的优点在于其强大的适应性和灵活性。它能够处理各种复杂的几何形状和边界条件，适用于线性问题和高度非线性问题。此外，有限元法还可以方便地进行多场耦合分析，如结构-热-流体耦合等。

2.2 有限元软件在土木工程中的应用

有限元软件是有限元法的计算机实现，它将有限元法的原理和方法封装在易于使用的界面中，使得工程师和科研人员能够方便地进行复杂问题的数值分析。在土木工程中，有限元软件被广泛应用于结构分析、地基处理、桥梁工程、隧道工程、岩土工程等多个领域。在结构分析中，有限元软件能够模拟和分析各种结构在静力、动力荷载作用下的响应，包括应力、应变、位移、振动等。这有助于工程师评估结构的承载能力、稳定性和安全性，优化设计方案。例如，在高层建筑、大跨度桥梁、地下空间开发等项目中，有限元软件被用来进行结构的整体分析和局部细节分析。在地基处理和岩土工程方面，有限元软件能够模拟地基土的变形和强度特性，分析地基处理方案的效果^[2]。通过模拟地基在荷载作用下的沉降、固结等过程，工程师可以评估地基的稳定性，预测地基的变形趋势，为地基处理设计提供科学依据。

3 土木工程结构加固设计的理论与方法

3.1 结构加固设计的原则与流程

土木工程结构加固设计是一项复杂且至关重要的工程任务，它旨在提升现有结构的承载能力和抗震性能，以应对自然灾害、使用荷载增加或结构老化等问题。在进行结构加固设计时，需遵循一系列基本原则，以确保加固方案的有效性和安全性。第一，安全性原则是结构加固设计的基石。加固设计应确保结构在加固后能够承受所有可能的荷载，包括正常使用荷载、偶然荷载和地震荷载等，保证结构在极端条件下的稳定性和安全性。这要求设计者在加固前对结构进行全面的评估，准确识别结构的薄弱环节，并依据评估结果制定针对性的加固措施。第二，经济性原则也是不可忽视的。在满足安全要求的前提下，应选择经济合理的加固方案，避免过度加固造成资源浪费。设计人员需综合考虑加固成本、施

工周期、材料选择等因素，制定性价比最高的加固方案。同时，加固方案还应便于施工和维护，以减少对结构正常使用的影响。

结构加固设计的流程通常包括现场勘察、结构分析、方案设计、方案优化、施工图设计和施工与监督等环节。现场勘察阶段，设计者需对建筑物的结构现状、使用功能、荷载条件等进行详细调查，收集必要的数据和信息。结构分析阶段，根据现场勘察数据，进行结构分析和荷载计算，确定加固部位和加固方法。方案设计阶段，制定多个加固方案，并进行技术经济比较。方案优化阶段，通过计算机模拟和试验研究，优化加固方案，确保方案的可行性和经济性。施工图设计阶段，根据优化后的方案，绘制详细的施工图，包括加固部位的构造图、材料规格、施工要求等。最后，在施工与监督阶段，设计人员应现场指导和监督，确保施工质量符合设计要求。

3.2 常见的加固方法与技术

在土木工程结构加固设计中，有多种加固方法和技术可供选择，以满足不同结构类型和加固需求。（1）增大截面加固法：这是一种传统的加固方法，通过增加结构构件的截面面积来提高承载能力。虽然施工周期较长，但效果显著，适用于梁、板、柱等构件的加固。增大截面加固法能够显著提高结构的刚度和承载能力，但可能会对结构的外观和使用空间造成一定影响。（2）粘贴钢板加固法：利用高性能粘接剂，将钢板牢牢粘结在混凝土结构上，形成坚固整体，提升结构的承载与刚度。这种方法施工简便、加固效果显著，且对结构外观影响较小。粘贴钢板加固法特别适用于需要快速提高结构承载能力的场合^[3]。（3）碳纤维加固法：通过环氧树脂粘贴碳纤维布或板，增强结构的抗裂、抗剪能力。碳纤维材料具有高强度、轻质、耐腐蚀等优点，且施工简便、经济环保。碳纤维加固法广泛应用于桥梁、建筑等土木工程的加固改造中。（4）外包型钢加固法：在钢筋混凝土结构外包裹型钢构架，通过约束作用达到共同受力，增加结构的抗震能力。这种方法特别适用于需要大幅度提高承载能力的结构加固。（5）基础加固法：对于基础沉降不均匀或承载力不足的结构，可以通过增加桩基、扩大基础面积等方式进行加固。基础加固法能够显著提高结构的稳定性和承载能力，确保结构的安全使用。

4 基于有限元法的土木工程结构加固设计实践

4.1 加固前的结构分析与评估

在土木工程结构加固设计实践中，加固前的结构分析与评估是至关重要的一步。基于有限元法的结构分析

在此过程中发挥着核心作用；有限元法（FEM）是一种强大的数值分析方法，它通过将结构划分为有限数量的相互连接的单元，每个单元内假设为具有简单应力-应变关系的连续体，从而模拟整个结构的力学行为。在加固前的结构分析中，有限元模型能够精确模拟结构的几何形状、材料属性和边界条件，进而计算出结构在各种荷载作用下的应力、应变和位移等响应；评估阶段，设计人员需基于有限元分析结果，结合现场勘查数据、历史维修记录以及结构检测数据，对结构的整体性能和局部弱点进行综合分析。这包括识别结构中的裂缝、腐蚀、变形等损伤，以及评估这些损伤对结构安全性的影响。通过这一步骤，设计人员能够准确确定加固的重点区域和所需提升的性能指标，为后续加固方案设计提供科学依据。

4.2 加固方案设计与模拟分析

加固方案的设计需综合考虑结构的安全性、经济性、施工可行性和环境影响等多个方面。基于有限元法的模拟分析在这一阶段同样扮演着关键角色；在加固方案设计中，设计人员首先会提出多种可能的加固策略，如增大截面加固、粘贴钢板加固、碳纤维加固等。随后，利用有限元软件对每种加固方案进行模拟分析，预测其在不同荷载条件下的力学响应。这一步骤不仅能够帮助设计人员验证加固方案的有效性，还能够揭示潜在的设计缺陷或不足之处，以便及时进行修改和优化；模拟分析还能够提供关于加固后结构性能提升的量化数据，如承载能力、刚度增加量、位移减小量等。这些数据对于评估加固效果、确定加固后结构的可靠性以及指导施工过程中的质量控制具有重要意义。

4.3 加固设计的优化

加固设计的优化是基于有限元法模拟分析结果进行

的最后一步，在这一阶段，设计人员需对加固方案进行细致的调整和完善，以最大限度地提升结构性能，同时降低加固成本和施工难度；优化过程可能涉及多个方面的调整，如加固材料的选择、加固构件的尺寸和布局、加固方式的改进等。通过不断迭代和优化，设计人员能够找到一种既满足安全要求又经济合理的加固方案。另外，加固设计的优化还需考虑施工过程中的质量控制和安全管理^[4]。设计人员需与施工人员密切沟通，确保加固方案的实施符合设计要求，并能够有效控制施工过程中的风险和不确定性。通过这一步骤，设计人员能够确保加固后的结构在长期使用中保持良好的性能状态，为土木工程结构的安全和可持续发展提供有力保障。

结束语

综上所述，基于有限元法的土木工程结构加固设计是一种科学、高效的方法。通过有限元分析，设计人员能够准确评估结构的现有状态，识别潜在问题，并制定针对性的加固方案。加固设计的优化过程进一步提升了结构性能，降低了加固成本。未来，随着有限元技术的不断发展和完善，其在土木工程结构加固设计中的应用将更加广泛，为土木工程的安全和可持续发展提供有力支持。

参考文献

- [1]李雪峰.土木工程结构设计与地基加固技术[J].建材发展导向,2024,22(21):1-3.
- [2]封坤.探析土木工程建设中结构与地基加固技术的运用[J].陶瓷,2024,(08):221-223.
- [3]王英涛.饶德军.基于有限元分析的“结构检验”课程教学改革[J].教育教学论坛,2022,(34):69-72.
- [4]郭浩东.张淋皓.杨洋.等.并联式四足机器人设计与有限元分析[J].机械设计,2024,41(S1):51-57.