

加劲板对扣锚梁应力影响的有限元分析

肖贤明, 余钱华

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410000)

摘要: 扣锚梁在桥梁和建筑结构中广泛应用,但其局部应力集中问题严重影响结构的安全性和耐久性。国内桥梁施工常采用的扣锚梁:一种是普通扣锚梁,另一种是双侧添加加劲板加固的扣锚梁。文章采用有限元分析方法,研究了加劲板以及加劲板厚度对扣锚梁应力分布的影响。利用 MIDAS/FEA/NX 有限元软件建立扣锚梁的三维有限元模型,分析了有加劲板和无加劲板两种情况下扣锚梁的应力分布与空间变形特征,并同时研究加劲板厚度对扣锚梁应力分布的影响。研究结果表明:加劲板能显著降低扣锚梁的局部应力集中系数,改善应力分布均匀性,并提高结构的整体刚度和稳定性,减小变形。此外,加劲板的厚度对改善效果也具有一定影响,合理的布置可进一步优化应力分布。本研究可为扣锚梁的设计和优化提供一定理论依据和工程指导。

关键词: 加劲板; 加劲板厚度; 扣锚梁; 应力分布

中图分类号: U448

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)12-0058-05

doi: 10.13402/j.gcjs.2025.12.151

Finite element analysis of the effect of stiffeners on the stress of buckling anchor beams

XIAO Xianming, YU Qianhua

(Changsha University of Science and Technology, Changsha 410000, Hunan, China)

Abstract: Buckle-anchored beams are widely used in bridges and building structures, but their local stress concentration problem seriously affects the safety and durability of the structure. Buckle-anchored beams are often used in domestic bridge construction: One is ordinary buckle-anchored beams, and the other is buckle-anchored beams reinforced with stiffeners at both ends. In this paper, the finite element analysis method is used to study the influence of stiffener plate and stiffener plate thickness on the stress distribution of buckled anchor beam. MIDAS/FEA/NX finite element software is used to establish a three-dimensional finite element model of the buckled anchor beam, analyze the stress distribution and spatial deformation characteristics of the buckled anchor beam with and without stiffening plate, and study the effect of stiffener thickness on the stress distribution of the buckled anchor beam at the same time. The results show that the stiffened ribs can significantly reduce the local stress concentration coefficient of the buckled anchor beam, improve the uniformity of stress distribution, and improve the overall stiffness and stability of the structure and reduce the deformation. In addition, the thickness of the stiffener plate also has a certain influence on the improvement effect, and the reasonable arrangement can further optimize the stress distribution. This study provides an important theoretical basis and engineering guidance for the design and optimization of buckling anchor beams.

Key words: stiffener plate; stiffener plate thickness; buckling anchor beam; stress distribution

收稿日期: 2024-12-21

作者简介: 肖贤明(2001—),男,硕士研究生,从事桥梁与隧道施工监控与检测的研究。

通信作者: 余钱华(1969—),男,博士,教授,从事桥梁结构分析与工程控制研究。

近二十年来, 伴随着国民经济快速发展所带来的强烈需求, 我国交通事业蓬勃发展, 大跨度桥梁建设取得了举世瞩目的成就^[1]。其中, 钢管混凝土拱桥和以钢管混凝土为骨架的混凝土拱桥因具备受力性能独特、造型美观、施工快捷、经济效益好等优点, 在我国得到了广泛的应用, 其施工技术也不断进步^[2-4]。

目前, 钢管混凝土拱桥施工的方法主要为支架法、缆索吊装斜拉扣挂法、转体施工法等^[5], 其中缆索吊装斜拉扣挂法使用最多。拱肋扣索与锚索是拱桥拱肋悬臂拼装的关键受力构件, 锚索与扣索对应设置, 一端锚固于扣锚梁上, 另一端锚固于岩锚或桩基承台锚碇上, 并能通过扣索索力调整拱肋线形, 准确求解出合理施工索力^[6-7], 而拱桥的建设难度随着拱桥的跨径加大而逐渐增加, 拱肋拱段的长度以及重量也随之增加, 而扣锚梁是拱肋扣挂施工中承受扣索和背索拉力的主要构件, 所以扣锚梁的安全状态评定对拱桥施工的安全保障显得尤为重要。

扣锚梁在扣索张拉过程中局部区域容易出现局部应力集中, 导致扣锚梁产生局部破坏, 影响施工安全, 其次, 扣锚梁截面刚度较低或稳定性不够, 也会导致在施加荷载后产生较大的空间变形, 从而导致结构失稳, 引发施工安全事故, 而国内桥梁施工常采用的扣锚梁中有一种是普通扣锚梁, 另一种是两端采用加劲板加固扣锚梁。本文借助 Midas/fea/nx 有限元软件, 分析加劲肋对扣锚梁的局部应力集中系数、应力分布均匀性的影响, 同时也对加劲板对扣锚梁整体刚度以及稳定性的影响进行有限元分析, 以期可为扣锚梁的设计和优化提供重要的理论依据和工程指导, 同时为大跨度上承式钢管混凝土拱桥施工提供安全保障。

1 有限元模型的建立

本文通过有限元软件分析, 研究加劲板对扣锚梁的应力影响, 主要对比无加劲板和有加劲板两种扣锚梁在局部集中应力大小与应力分布方面的不同以及加劲板厚度对其应力分布的影响, 扣锚梁实图如图 1 所示。



图 1 扣锚梁实图

1.1 几何模型与材料参数

采用涂乍河大桥扣锚梁作为基准模型, 利用 MIDAS FEA NX 软件建立无加劲板扣锚梁空间实体模型(图 3)以及在两端装有 12、15、18 mm 厚加劲板的扣锚梁空间实体模型(图 4), 加劲板截面尺寸如图 2 所示, 与无加劲肋扣锚梁相比, 有加劲板扣锚梁只在两端多添加两块加劲板, 其他结构以及材料参数与普通扣锚梁均相同, 扣锚梁材料如表 1 所示。

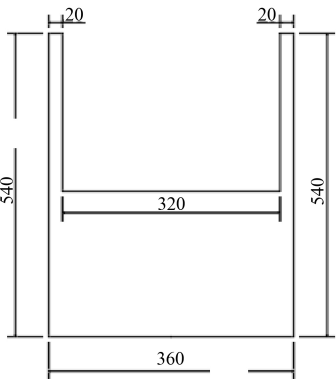


图 2 加劲板截面尺寸 mm

表 1 扣锚梁材料

名称	尺寸/mm	材料	弹性模量/(N·mm ⁻²)	泊松比
主梁顶底板	500 × 30 × 4 000	Q235	206 000	0.31
主梁腹板	560 × 20 × 4 000	Q235	206 000	0.31
锚板	390 × 30 × 350	Q235	206 000	0.31
垫板	850 × 350 × 30	Q235	206 000	0.31
锚座加劲板	360 × 40 × 16	Q235	206 000	0.31
加劲肋	560 × 86 × 16	Q235	206 000	0.31

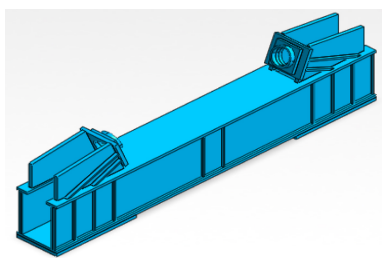


图 3 有加劲板加固的扣锚梁模型

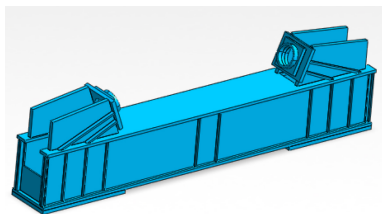


图 4 普通扣锚梁模型

1.2 边界条件与荷载

在拱肋斜拉扣挂施工中,扣锚梁通过两块垫板固定在扣塔上,扣索和锚索由扣锚梁的螺母固定,螺母将扣索和锚索产生的压力传至承压板,承压板再将力传至梁身。扣索与锚索产生压力视为均匀分布在螺母表面上,在实际施工过程中单根扣索所能承受的拉力的最大值 1 155 kN,通过计算可知,拉力对螺母表面产生的面荷载为 $P = 82 \text{ N/mm}^2$,而本节将讨论扣锚梁在此拉力值作用下扣锚梁梁体受力情况。

1.3 网格划分

在有限元分析中,网格划分是关键的一步,对于扣锚梁这类相对复杂的结构,合理布置网格尤为重要。Midas FEA NX 也提供了高效且灵活的网格划分工具,模型采用 3D 单元网格,网格形状采用四面体形式。模型主要采用自动生成的方式划分网格,网格尺寸 80,在一些局部的关键部位采用手动划分的方式对网格进行调整。例如,承压板和螺母,承压板与螺母为直接受力构件,分析精度要求较高,模型对承压板和螺母进行局部网格细化,手动设计网格尺寸,保证分析精度满足需要。

2 有限元结果分析

2.1 应力分析

2.1.1 普通扣锚梁应力分析

通过 MIDAS FEA NX 有限元软件进行分析,

得到了几种扣锚梁的在相同荷载作用下应力分布图(图 3、4)。普通扣锚梁应力较大的部位出现在梁体 4 个底角、承压板以及承压板侧支撑板-主梁交汇区域,扣锚索压力通过螺母直接传至承压板,因此,承压板的应力是较大的,此区域应力最大值达到 261.924 MPa,而承压板通过支撑板将压力传递至主梁。由于支撑板与承压板、主梁相互垂直连接,在承压板一侧支撑板与主梁的连接区域应力会相对集中,此区域应力最大值为 157.4 MPa,主梁左右两侧腹板两端向外的张力主要由左右腹板与底腹板连接位置处承担,梁体底端四角区域应力较大,且过于集中,此区域应力最大值为 334.51 MPa,而主梁中心部位应力相对较小,应力值在 0.326 MPa 之间,且越靠近上腹板应力越大。

2.1.2 加固后扣锚梁应力分析

在用加劲板加固之后,扣锚梁整体应力分布更为均匀,以双侧 12 mm 加劲板加固扣锚梁的应力云图为例进行分析,其他厚度加劲板扣锚梁模型应力分布图分布规律差别不大,由图 5(a)可知,在进行加固之后加劲板的应力在 8 ~ 122 MPa 之间,加劲板承受了主梁左右两侧腹板两端的横向张力,从而很好地降低了扣锚梁梁体底端四角区域的应力,此区域局部应力集中的问题得到较低改善,加固前扣锚梁四底角局部应力集中区域的应力明显减小,此区域应力最大值变为 84.7 MPa,其次,两侧承压板的应力也有所降低,但减小幅度不大,承压板应力最大值变为 254.17 MPa,加劲板的加固也降低承压板侧支撑板-主梁交汇区域的应力,此次区域最大应力值为 115.913 MPa。而更多的应力分布到了主梁中心区域,中心区域的应力有所增加,应力值在 0.9 ~ 29 MPa 之间,分布较为均匀。

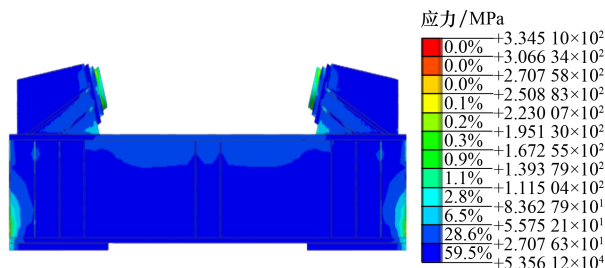


图 5 普通扣锚梁模型应力云图

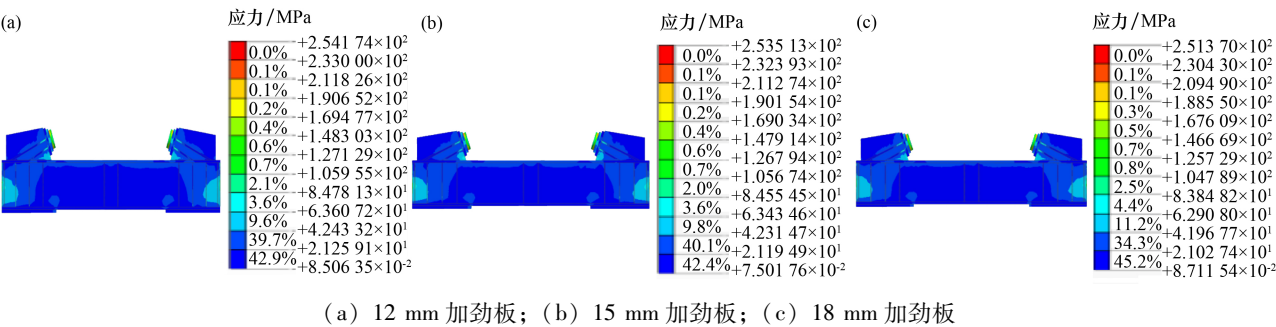


图 6 加固后扣锚梁模型应力云图

2.2 不同厚度加劲板加固的扣锚梁模型应力对比

为研究加劲板的厚度是否会对扣锚梁应力分布产生影响, 为其分别添加 12、15、18 mm 的加劲板, 并将得到的扣锚梁模型应力云图(图 5、6)进行对比。由图 6 可知, 随着板厚的增加, 加劲板承受更多两侧腹板产生的向外张力, 应力变大, 梁体 4 个底角区域所承受的张力相应减小, 应力也随之减小, 应力减小值为 3 ~ 4 MPa, 而承压板侧支撑板 - 主梁交汇区域、承压板应力变化不大, 这几个位置区域最大应力变化值由表 2 所示。

2.3 变形分析

2.3.1 普通扣锚梁的空间变形

经过有限元软件分析, 得到了未添加加劲板扣锚梁的空间变形云图(图 7), 研究几种不同扣锚梁的变形特征, 图中灰色线条勾勒的形状为原始形状和位置, 普通扣锚梁变形如图 7(a)所示, 在没有加劲板加固的情况下普通扣锚梁刚度较低, 两端螺母和承压板在荷载作用下均产生了下挠, 下挠最大值为 0.955 mm, 并引起连接的两块支撑板向外扩张, 而主梁两端除了底腹板外中间并未有钢板连接, 横向刚度较低, 梁体两端产生较大的向两侧的横向变形, 最大横向位移为 1.17 mm。此外, 纵桥向, 主梁在荷载作用下产生上挠, 各截面挠度不一, 由外向里逐渐增大, 上挠的最大值为 0.42 mm, 发生在跨中位置处。

2.3.2 加固后扣锚梁的空间变形

两端添加加劲板加固后, 扣锚梁整体刚度提升, 变形显著减小, 还是以添加 12 mm 加劲板加固扣锚梁的变形图为例, 由图 7(b)可知, 在进行加固后, 扣锚梁两端还是有一定的扩张, 但相较于普通扣锚梁变形明显减小, 加劲板的加固作用抑制了支撑板向外扩张, 减小梁体两端的横向变形, 最大值变为 0.55 mm, 同时螺母与承压板的下挠也有所降低, 最大挠度值为 0.61 mm。纵桥向, 加劲板加固之后主梁的纵向刚度有所提升, 主梁的纵向变形减小, 主梁上挠的最大值依旧发生在跨中位置处, 最大值为 0.13 mm。

2.3.3 不同厚度加劲板扣锚梁空间变形对比

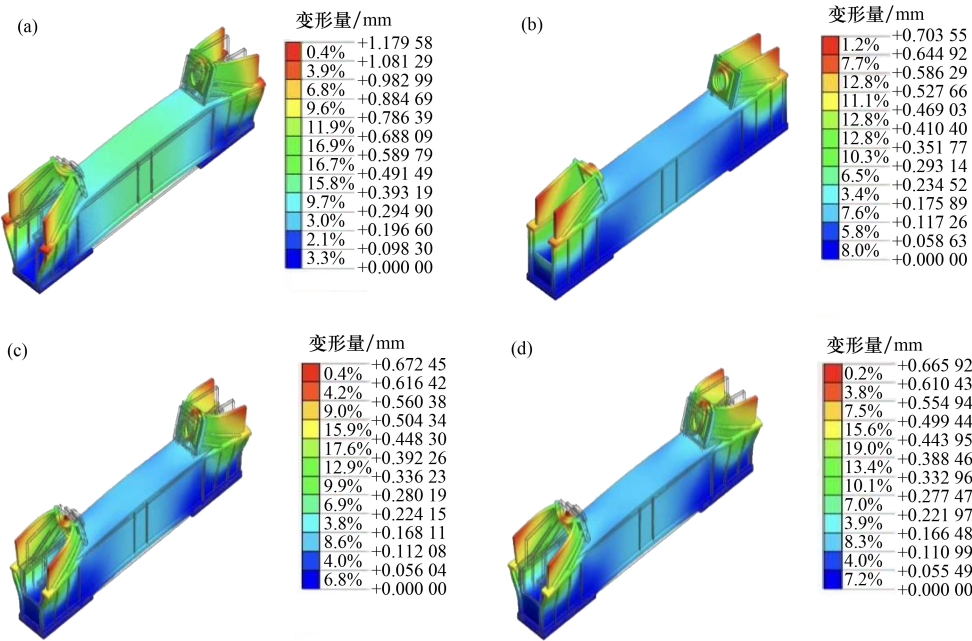
加劲板厚度的不同可能对扣锚梁的变形产生一定影响, 所以通过有限元软件分析, 也得到了 15、18 mm 的空间变形, 对比分别添加由 12、15、18 mm 加劲板扣锚梁空间变形的不同, 由图 7 对比可知, 加劲板越厚能够更好地抑制扣锚梁两端向外扩张, 减小扣锚梁两端横向变形, 但是对梁体的竖向变形影响并不明显, 承压板的下挠以及主梁的上挠变化不大, 各位移较大区域最大值变化如表 3 所示。

3 结 论

(1)加劲板可以改善扣锚梁局部应力集中现

表 2 各应力较大区域应力最大值变化

厚度位置/mm	梁体底端四角区域/MPa	承压板/MPa	承压板侧支撑板 - 主梁交汇区域/MPa	加劲板/MPa
0	334.51	261.924	157.4	0
12	111.70	254.700	115.9	122.10
15	108.60	254.100	114.7	153.39
18	105.00	253.510	113.5	175.30



(a) 无加劲板; (b) 12 mm 加劲板; (c) 15 mm 加劲板; (d) 18 mm 加劲板

图 7 普通扣锚梁与添加不同厚度加劲板加固后扣锚梁空间变形

表 3 不同厚度加劲板加固后扣锚梁
各位移较大处位移最大值变化

厚度/mm	承压板/mm	梁体两端/mm	主梁跨中/mm
12	0.61	0.55	0.13
15	0.60	0.52	0.11
18	0.58	0.50	0.11

象,使整体应力分布更加均匀,加固后加劲板承受了主梁两端向外的张力,显著降低了梁体四底角位置的应力,其次,加固后,承压板、承压板侧支撑板-主梁交汇区域等局部应力较大位置的应力也有所降低。

(2) 加劲板加固可以提升扣锚梁刚度,减小扣锚梁的空间变形。横桥向,加劲板加固抑制梁体两端向外扩张,减小梁体的横向变形;纵桥向,降低了承压板、固定螺母以及主梁的竖向变形,减小承压板、固定螺母的下挠以及主梁的上挠。

(3) 增加加劲板厚度,能对扣锚梁的应力分布以及空间变形产生一定影响,但影响幅度相对有限,随着加劲板板厚度的增加,加劲板应力稍许增大,梁体四个底角区域应力有所降低,其他

位置处应力变化不大;对扣锚梁空间变形来说,分别增厚 3cm,能更好的减小扣锚梁两端的横向变形,但对扣锚梁的竖向变形影响不大。

参考文献:

[1] 周弟松. 大跨度钢管混凝土拱桥合理预拱度设置研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2022.

[2] 李进. 钢管混凝土系杆拱桥整体吊装施工技术[J]. 交通科技与管理,2025,6(3):119-121.

[3] 李雷. 非对称钢管混凝土拱桥结构体系与构造优化研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2024.

[4] 刘志伟. 钢管脱空对钢管混凝土构件及拱桥静力性能影响研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2022.

[5] 王涛. 钢管混凝土拱桥施工技术的应用[J]. 四川建材,2021,47(12):78;80.

[6] 连延金,陈宁贤,赵健,等. 大跨度钢筋混凝土拱桥拱圈整体预制拼装施工关键技术[J]. 世界桥梁,2022,50(4):47-53.

[7] 赵美艳,高银亮. 基于斜拉扣挂法的拱桥施工技术控制分析[J]. 四川水泥,2025(2):183-185.