

三塔两跨悬索桥中央扣静力影响研究

谢雪峰¹, 罗喜恒²

(1.天津市市政工程设计研究总院有限公司,天津市 300392; 2.同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,上海市 200092)

摘要:中央扣常用于减少大跨悬索桥缆、梁之间的纵向相对位移。对于三塔两跨地锚悬索桥,中央扣对结构受力有更大影响。为了揭示中央扣对三塔两跨地锚悬索桥的静力影响、内在机理,以泰州长江公路大桥为基础,通过多个有限元模型的计算分析比较,研究了不同中央扣设置情形对中塔、主缆、加劲梁受力的影响。研究表明:三塔两跨地锚悬索桥的水平纵向索、双中央扣构造使得缆、梁、中塔间形成更直接的传力通道,减少了中塔上塔柱承担的活载剪力,对中塔内力位移、中塔处主缆抗滑安全、加劲梁弯矩均有较大改善。

关键词:悬索桥;中央扣;抗滑移安全;挠度;内力;三塔两跨

中图分类号: U441+.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)09-0103-03

0 引言

早期悬索桥设计只通过吊索与加劲梁连接,跨中部位吊索很短,需要采取措施保证加劲梁横向移动时短吊索的柔性。刚性中央扣是改善短吊索问题的方法之一,大带东桥等日本的许多悬索桥都采用这一措施。刚性中央扣能够降低短吊索的纵横向弯折、提高桥梁刚度^[1]。

学者 Niels^[2]通过研究单索的变形特点得出:在跨中采用中央扣把主缆和加劲梁连接在一起对于减小非对称荷载下的挠度具有显著的作用。文献[3]研究认为:中央扣会使活载挠度包络图由双峰形变成单峰形,并没有改变跨中挠度,只减小了1/4跨处挠度。文献[4]以西堠门大桥为背景,研究认为:中央扣对单跨悬吊体系整体刚度基本没有影响,对两跨或三跨悬吊体系的竖向刚度有较显著的影响。文献[5]认为三塔两跨悬索桥中央扣的作用与两塔悬索桥有本质区别,认为前者是主要受力构件。

本文通过实例分析,给出中塔、加劲梁间采用水平纵向索的三塔两跨悬索桥有无中央扣及不同中央扣形式的受力差别,然后比较单跨布载下有无中央扣的活载内力变化,并尝试解释其内在原因,旨在揭示中央扣的重要作用。

1 模型及分析思路

本文在无中央扣的三塔两跨悬索桥(泰州长江公路大桥模型)基础上分别计算了两主跨跨中各一对斜吊索、两对斜吊索、三对斜吊索形式的中央扣对结构刚度及内力的影响,并参照润扬长江大桥中央扣的截面形式,计算了刚性中央扣对结构的影响。泰州桥加劲梁为两跨连续梁,中塔处塔梁之间设水平纵向索,无竖向支撑^[5],梁端简支在边塔横梁上。模型中加劲梁边界与实桥一致。柔性中央扣吊索考虑预张拉,张拉力按照相应梁段自重与索的倾角反算得出,同时相应减少相邻竖向吊索索力。通过比较有无中央扣、斜吊索数量、柔性与刚性中央扣(以下简称“不同连接方式”)对结构整体刚度及内力的影响,以期得到有价值的结论。

图1至图3绘出了三种形式的柔性中央扣有限元模型,均为左主跨的中央扣,右主跨对称设置。

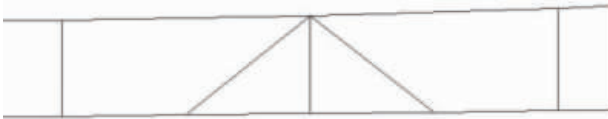


图1 中央扣示意图(一对斜吊索)



图2 中央扣示意图(两对斜吊索)



图3 中央扣示意图(三对斜吊索)

收稿日期: 2023-10-31

作者简介: 谢雪峰(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁设计研究工作。

2 计算结果

2.1 对桥塔的影响

表 1 为跨中主缆与加劲梁不同连接方式下,与中塔相关的计算结果。由此可知,跨中主缆与加劲梁间设置中央扣与否,对于中塔塔顶位移、中塔应力影响显著。中央扣形式不同,相互之间略有差别,从一对斜吊索到三对斜吊索再到刚性中央扣,中塔的塔顶最大位移及最大应力依次减小。

表 1 与中塔相关结果汇总

比较项目	跨中主缆与加劲梁连接形式				
	无中央扣	一对柔性中央扣(增量)	两对柔性中央扣(增量)	三对柔性中央扣(增量)	一对刚性中央扣(增量)
塔顶位移 /m	1.772	1.260(-29%)	1.196(-33%)	1.144(-35%)	1.088(-39%)
上塔柱最大应力 /MPa	-233.50	-175.62(-25%)	-169.16(-28%)	-165.29(-29%)	-161.96(-31%)
下塔柱最大应力 /MPa	-222.59	-175.41(-21%)	-169.31(-24%)	-164.43(-26%)	-158.30(-29%)

注:表中增量为(有中央扣计算值-无中央扣计算值)/无中央扣计算值。

表 2 与主缆相关结果汇总

比较项目	跨中主缆与加劲梁连接形式				
	无中央扣	一对柔性中央扣(增量)	两对柔性中央扣(增量)	三对柔性中央扣(增量)	一对刚性中央扣(增量)
主缆抗滑移安全系数 $\mu=0.15$	2.141	2.956(38%)	3.080(44%)	3.143(47%)	3.198(49%)
安全系数 $\mu=0.2$	2.854	3.941(38%)	4.107(44%)	4.191(47%)	4.264(49%)
主缆最大缆力值 /kN	418 626	420 181(0.4%)	421 246(0.6%)	422 362(0.9%)	422 939(1.0%)

注:表中增量为(有中央扣计算值-无中央扣计算值)/无中央扣计算值。

2.3 对加劲梁的影响

跨中主缆与加劲梁不同连接方式,对于加劲梁的位移及内力影响显著。主缆与加劲梁间采用刚性中央扣,加劲梁的活载挠度最小,柔性中央扣次之。采用中央扣,加劲梁的最大、最小弯矩,加劲梁上缘的最大、最小应力均显著减小。

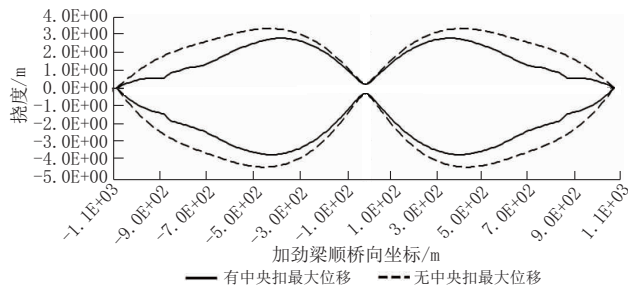


图 4 加劲梁活载挠度包络图

图 4 为加劲梁活载挠度包络图,对比的情况为三对斜短索形式中央扣模型与无中央扣的基准模型。从图中可见,中央扣对于提高三塔悬索桥的刚度较为显著:最大活载挠度下降了 15.90%。挠度包络

2.2 对主缆的影响

表 2 为跨中主缆与加劲梁不同连接方式下,与主缆相关的计算结果。由此可知,跨中主缆与加劲梁间设置中央扣与否,对于主缆与中主鞍槽间抗滑移安全系数影响显著。设置刚性中央扣,主缆与中主鞍槽间抗滑移安全系数最高,柔性中央扣次之。主缆缆力的最值则因采用中央扣而略有增大,表明中央扣的存在,以使主缆承受更大的活载效应。

图的形状也发生了改变:远离中塔的两个半跨活载挠度降低较多,靠近中塔的两个半跨活载挠度降低较少。

图 5 至图 7 为采用三对斜短索中央扣模型的加劲梁活载内力包络图与基准模型的对比。从图中可见,采用中央扣有助于减小中塔处的活载弯矩值,但中央扣位置的活载弯矩值、剪力值会显著增大,中央扣之间加劲梁的轴力值显著增大;整体来看,采用中央扣使得弯矩包络值的最值降低。

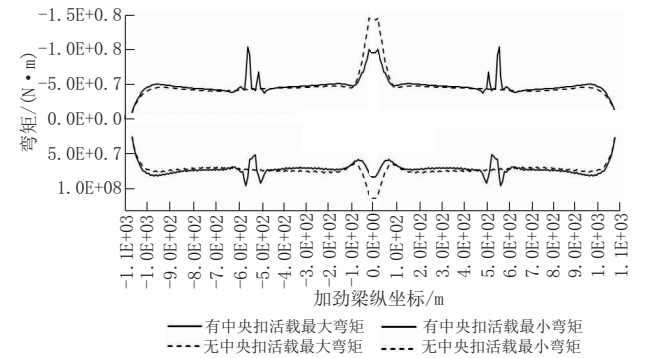


图 5 加劲梁活载弯矩包络图

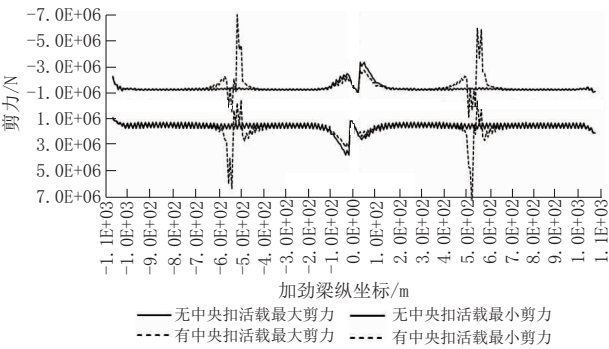


图 6 加劲梁活载剪力包络图

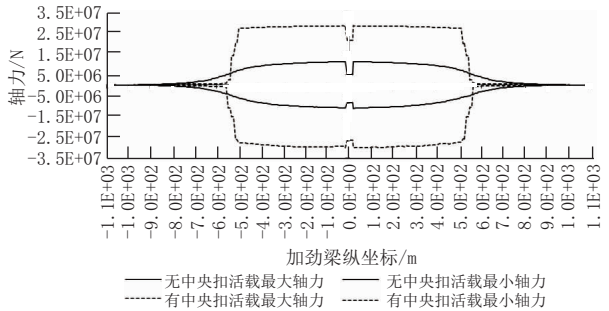


图 7 加劲梁活载轴力包络图

3 分析与推断

文献[4]、[6]给出结论,单跨悬吊体系中央扣对加劲梁跨中挠度、塔顶位移几乎没有影响。由上述计算结果可以看出,三塔悬索桥双中央扣较常规两塔悬索桥有所不同。

本文通过活载左跨单跨加载的典型受力模式,尝试分析有、无中央扣两种情形下的传力区别。有无中央扣,其恒载内力基本是相同的,缆梁活载内力一比较,因此只列出活载单项轴力(见图 8)。前者在左跨活载传递过程中,中央扣以及之间的主缆、加劲梁、桥塔、水平索形成一个刚度较大的三角形区域,一部分缆力通过加劲梁传递至中塔,塔顶位移由此减小,表现为刚度增大。这种刚度增大导致左边塔两侧主缆缆力加大。中塔左侧中央扣将一部分缆力传递至加劲梁,使得加劲梁受拉增大,相应位置上方缆力有所降低。无中央扣模型,左跨布载时右跨吊索力合计增加了 703 kN。有中央扣模型,左跨布载时右跨吊索力合计减少了 10 867 kN(不含中央扣斜索)。上述吊索力变化反映了有中央扣时活载缆力主要通过中央扣传递至加劲梁,而吊索反而是卸载的。这种荷载传递导致右边塔两侧缆力降低,中塔右侧缆力有所增加,又通过中央扣使得加劲梁受压,最终传递至中塔。通过中央扣、加劲梁、主缆、水平索和中塔形成“伞形传力通道”,缆力可以通过中央扣、加劲梁、水平索传递一部分至塔根,从而减少了中塔塔顶承担

的活载不平剪力,降低了活载对中塔的影响,进而提高了主缆在中塔处的抗滑移安全。双中央扣的存在也减少了加劲梁在中塔处支点的弯矩,反映了“伞形传力通道”减少了加劲梁的弯矩传力比例。

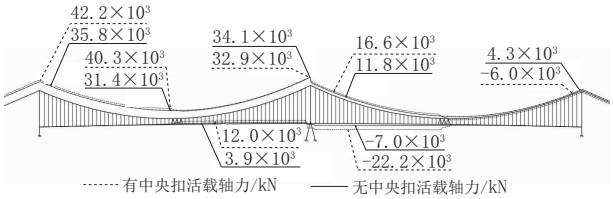


图 8 左跨布载活载单项轴力

进一步分析无水平索、有中央扣的模型,发现由于不能有效将荷载快速传递至中塔,其塔顶位移增大、主缆在中主鞍槽的抗滑安全降低。上述分析表明,水平纵向索在“伞形传力通道”中发挥至关重要作用。

对于双塔悬索桥的跨中单独中央扣,由于没有形成有效的“伞形传力通道”,与三塔悬索桥双中央扣机理有较大差异,对整体受力影响也较三塔悬索桥小。

4 结论

对于采用中塔水平纵向索约束的三塔两跨悬索桥,能够形成“伞形传力通道”。从上述分析可知:

- (1)显著降低中塔内力及位移。
- (2)显著提高主缆在中塔处抗滑安全,但缆力略有增大。
- (3)显著降低加劲梁活载挠度,虽然短斜索处加劲梁下缘活载压应力有所增大,但随着短斜吊索数量增多,加劲梁的活载内力、应力最值也比无中央扣形式有所降低。
- (4)除对加劲梁的内力影响以外,采用刚性或者柔性的中央扣差别不大。

参考文献:

[1] 林长川. 江阴长江公路大桥缆索系统设计反思[C]// 江阴长江公路大桥工程建设论文集. 北京: 人民交通出版社, 2000: 69-75.

[2] Gimsing, Niels J. Cable Supported Bridges[M]. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 1997.

[3] 郑凯峰, 胥润东, 栗怀广. 悬索桥中央扣对活载挠度影响的详细计算方法[J]. 世界桥梁, 2009(2): 51-53.

[4] 宋晖, 林恰, 唐茂林, 等. 中央扣对不同悬吊结构体系悬索桥的影响分析[J]. 中国工程科学, 2010, 12(7): 22-27.

[5] 王忠彬, 万田保. 泰州长江公路大桥三塔两跨悬索桥结构行为特征[J]. 桥梁建设, 2008(2): 38-41.

[6] 曾德礼. 柔性中央扣对单跨悬索桥的影响分析[J]. 铁道建筑, 2019, 59(11): 16-25.