

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.02.010

塔段连接对多塔悬索桥中间钢桥塔极限承载力的影响*

白伦华¹, 张兴标^{1,2}, 沈锐利¹, 彭丹³

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 西南科技大学土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010;
3. 成都市市政工程设计研究院, 四川 成都 610031)

摘要:以泰州长江公路大桥为工程背景,通过有限元法研究塔段连接对多塔悬索桥中间钢桥塔极限承载力的影响。考虑中间钢桥塔的几何、材料非线性及塔段连接的接触非线性影响,采用ANSYS建立该桥局部塔段为板壳单元的多尺度有限元模型,计算并对比在两种典型加载方式下该模型与杆系有限元模型的钢桥塔极限承载力结果。研究表明:两种加载方式下,桥塔的破坏模式基本一致,表现为材料不连续的上塔柱节段局部形成塑形铰而使桥塔成为机构;多尺度有限元模型与杆系模型获得的荷载位移曲线基本一致,而多尺度模型的极限承载力稍高,且差异在2%以内,可认为塔段连接不是桥塔结构的薄弱点,其对其极限承载力的影响可以忽略。

关键词:多塔悬索桥;塔段连接;多尺度模型;极限承载力;接触非线性

中图分类号: U448.25;U445.462 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)02-0214-08

Effect of Pylon Segment Connection on Ultimate Capacity of Intermediate Steel Pylon for Multi-span Suspension Bridge

BAI Lunhua¹, ZHANG Xingbiao^{1,2}, SHEN Ruili¹, PENG Dan³

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
2. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;3. Chengdu Municipal Engineering and Research Institute, Chengdu 610031, China)

Abstract: Taking the Taizhou Yangtze River Highway Bridge as an engineering background, the effect of the pylon segment connection on the ultimate capacity of the intermediate steel pylon for multi-span suspension bridge is studied by the finite element method. Considering the geometrical and material non-linearity of the middle steel bridge tower and the contact nonlinear influence of the pylon segment connection, a multi-scale finite element model including the local pylon segment modelled by the shell element is established in ANSYS, and the ultimate bearing capacity results of intermediate steel pylon under two typical loading modes are calculated and compared using the presented model and the line element model. Research shows that: the failure modes of the pylon under the two typical loading modes are basically the same. Local plastic hinge forms at discontinuous position of material of upper segment and the tower becomes mechanism; the load-displacement curves caculated by multi-scale and line fi-

* 收稿日期:2018-03-15;修回日期:2018-05-23

基金项目:国家自然科学基金项目(51178396/E080505)资助

作者简介:白伦华(1990-),男,博士研究生。主要从事桥梁钢结构稳定性能研究。Email:bailunhua@163.com

nite element models are similar. The ultimate bearing capacity by multi-scale model is slightly higher, and the difference is no more than 2%. It can be concluded that the pylon segment connection is not the weak point of the tower structure, and its effect on the ultimate bearing capacity of pylon can be ignored.

Keywords: multi-span suspension bridge; pylon segment connection; multi-scale model; ultimate capacity; contact nonlinearity

引言

传统悬索桥为独塔、双塔或岩锚无塔结构,桥梁跨越能力依赖于主跨跨径这一单一参数,持续增加主跨跨径在满足其使用需求时可能使经济效益无法兼顾。多塔悬索桥通过设置中间桥塔使跨径的增长方式转变为跨数的增加,在方案提出之初就受到桥梁工程界的关注。改革开放后,我国桥梁事业蓬勃发展,并于21世纪初,千米级多塔悬索桥的建设得以践行,已建与在建的工程有:马鞍山长江大桥(主跨1 080 m)、江苏泰州长江大桥(主跨1 080 m)、武汉鹦鹉洲长江大桥(主跨850 m)及温州瓯江北口大桥(主跨800 m)。

钢桥塔由于施工周期短、承载力高等优点而在多塔悬索桥中备受桥梁设计人员推崇,并在马鞍山长江大桥、江苏泰州长江大桥及武汉鹦鹉洲长江大桥中得到应用。其变形协调能力强,作为多塔悬索桥中间桥塔结构形式能够减小主缆两侧的不平衡张力,有效地降低了主缆与鞍槽的滑移风险。但作为支承结构,桥塔高且受压特征显著,使稳定性问题突出。一般地,为提高材料的利用率,一类稳定性问题在大跨径桥梁结构设计中得到了规避,将稳定性问题圈定为考虑材料与几何非线性影响的极限承载力^[1]。但是,就钢桥塔而言,由施工方式决定,即其往往在工厂中制造成独立塔段,并在现场通过浮吊大段架设、自立式吊机逐段安装等一种或多种架设(安装)方法而拼筑而成,塔段之间连接引起的接触非线性在极限承载力分析中也值得考虑。深入认识塔段连接这种接触非线性影响有利于提升钢桥塔设计的科学合理性。然而,以往关于多塔悬索桥的研究虽然积累了较多成果,但主要集中在主缆与索鞍间滑移问题^[2-5]、刚度特征^[6-7]、多塔悬索桥抗风^[8-9]与抗震^[10-11]及其实用简化计算方法^[12-14]等,对钢桥塔极限承载力的研究仍少有涉及,特别是塔段连接效应没有在计算模型中得到考虑,桥塔极限承载力的研究有待完善。

该文以泰州长江公路大桥(以下简称泰州桥)中间钢桥塔为工程背景,利用大型通用有限元软件

ANSYS,详细介绍考虑塔段间连接构造细节的精细化多尺度有限元建模方法,基于恒活载同比加载及活载独立加载两种加载方式对桥塔极限承载力进行分析,并建立全桥杆系模型进行对比,探讨多塔悬索桥中间桥塔的破坏模式及塔段连接的影响效应。

1 塔段连接方式

对于分段成形的钢桥塔,节段之间的荷载传递主要依赖于钢结构的连接方式及拼接断面的金属接触。通常钢结构的连接方式有焊接、铆接、普通螺栓连接及高强度螺栓连接^[15]。早期大跨径悬索桥的钢桥塔采用铆钉连接的方式,将钢板和角钢连接成多格室塔柱。在实桥应用中,目前尚无全部采用焊接或者全部采用端面金属接触率连接方式的钢桥塔。从世界范围来看,钢桥塔中塔段间水平接头的连接方式通常为焊缝连接、高强度螺栓连接及端面金属接触中的2种或全部的组合,主要有4种,如图1所示。

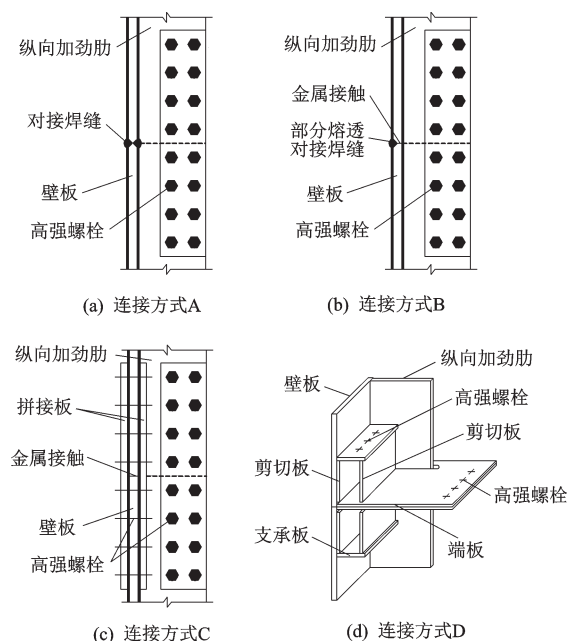


图1 钢桥塔塔段水平接头连接方式

Fig. 1 Horizontal joint connection modes of steel pylon segment

连接方式 A:外壁板采用对接焊缝,纵向加劲肋采用高强度螺栓结合拼接板。

连接方式 B:外壁板采用部分熔透对接焊缝结合金属接触,纵向加劲肋采用高强度螺栓结合拼接板。

连接方式 C:壁板和纵向加劲肋均为端面金属接触结合摩擦型高强度螺栓并用接头。

连接方式 D:端面金属接触结合张拉型高强度螺栓并用接头。

其中,连接方式 C 的压力传递由金属接触和摩擦型高强度螺栓共同承担,拉力全部由摩擦型高强度螺栓承担。拼接板在摩擦型高强度螺栓的预紧力作用下可以抑制塔柱钢板的面外变形。这种连接方式避免了大量的现场焊接作业,垂直精度易于保证。采用这种连接方式的国内外钢桥塔实例很多,如日本大鸣门桥、明石海峡大桥、多多罗大桥及国内泰州桥等。

2 工程概况

泰州桥为(390+2×1 080+390) m 的三塔两主跨悬索桥,中间桥塔为纵桥向人字形钢结构。塔柱高 192 m,下塔柱人字形结构叉开量在塔底为 35 m,斜腿段倾斜度为 1:4。塔柱纵向从上到下分为上端直线段、交点附近的圆曲线过渡段及下端斜腿段,桥塔横桥向为门式框架结构,并通过两道横梁连接。塔柱分为 D0~D20 共 21 个节段, J1~J20 为工地接缝,接缝所采用的连接方式为端面金属接触结合摩擦型高强度螺栓并用接头。钢桥塔主体结构所用钢材 D0~D12 节段为 Q420qD, D13~D20 节段及上下横梁为 Q370qD,桥塔总体布置如图 2 所示。

塔柱为单箱多室结构,断面由四周壁板及腹板构成,为减小塔柱截面风阻系数,改善涡振性能,在两塔柱截面的 4 个角点处分别切掉(0.6×0.6) m 的矩形,将截面钝化。塔柱横桥向尺寸从塔顶至塔底均为 5.0 m,纵桥向尺寸为直线段从塔顶的 6.6 变化到 10.6 m;曲线过渡段从 10.6 变到 15.54 m;斜腿段(垂直塔柱)距离为 6.0 m。塔柱壁板厚度为 50~60 mm,腹板厚度为 44~60 mm;均采用板式加劲肋,加劲肋板厚为 40 与 48 mm;横隔板的间距为 3 与 2.5 m 两种,横隔板厚一般为 16 mm,特殊受力部位为 20 或 24 mm。典型塔柱节段如图 3 所示。

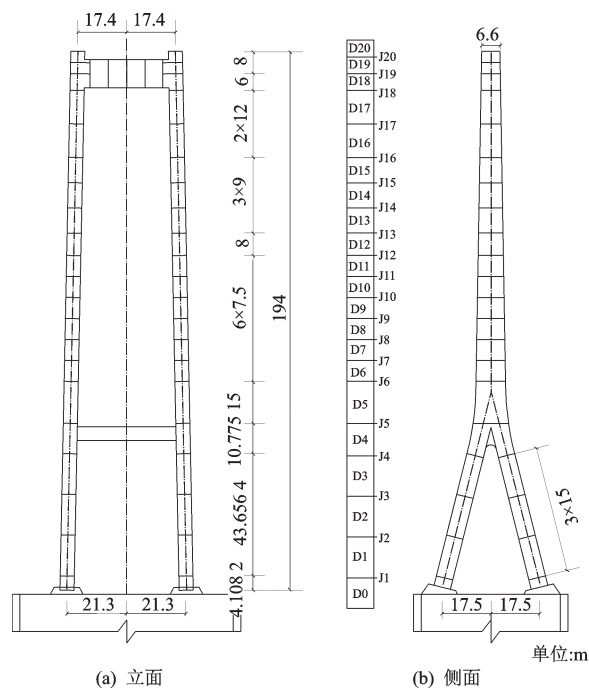


图 2 桥塔总体布置

Fig. 2 General layout of the pylon

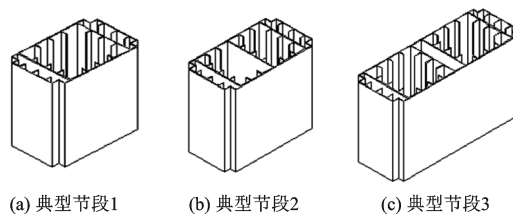


图 3 典型塔柱节段

Fig. 3 Typical pylon segments

3 多尺度建模方法

3.1 金属接触模拟的假设

在端面金属接触率方面,设计图纸的具体要求为壁板及腹板 $\geq 50\%$,加劲肋 $\geq 40\%$ 。由于缺少泰州桥金属接触率的实际检测资料,对早于泰州桥 7 年建成、并采用相同塔段连接方式的南京长江第三大桥南、北塔塔段金属接触率检测方法进行说明,并对检测结果整理和统计。

南京长江第三大桥金属接触率采用塞尺进行检测^[17],利用 0.04 mm 的塞尺垂直插入端面接触部分的水平接缝,当塞尺可插入深度不超过被检测板厚的 1/3 时,则认为此处两节段端面密贴,反之则认为不密贴,同时要求任何被检测部位 0.2 mm 的塞尺不得插入。最终的金属接触率由 0.04 mm 塞尺可插入深度小于被检测板厚 1/3 的检测点数量占检测点总

数的百分比来表示。具体测点布置如图4所示。

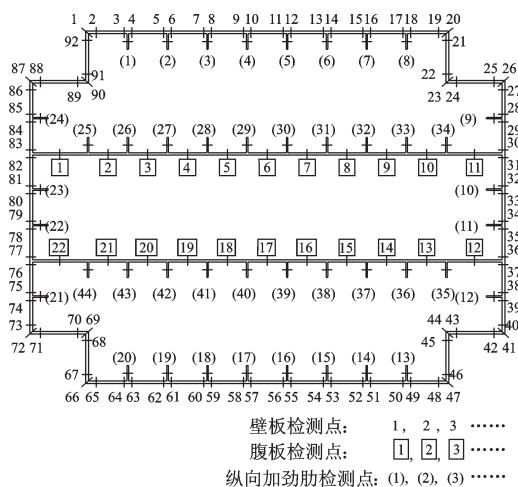


图4 塔段连接处金属接触率检测点示意

Fig. 4 Layout of measuring points for metal contact rate at the pylon segment connection

图5为南京长江第三大桥北塔段塔段间壁板金属接触率二维柱状图(部分测点)^[17]。腹板与加劲肋的接触率分布规律类似。由南京长江第三大桥金属接触率的检测结果可知,其钢桥塔塔段间金属接触率远高于设计金属接触率,统计结果为塔段间金属接触率在90.0%以上。并且考虑到金属接触率的检测是在所有塔段架设完成时检测的,在后续的架缆(悬索桥)或者安装斜拉索(斜拉桥)及梁段安装、桥面铺装直至活载作用时,未接触的金属接触间隙会由于节段间挤压力的持续增大而闭合,使得金属接触率提高。金属接触间隙的变化如图6所示。不妨假定塔段间相互挤压时为100%接触。因此,在建立有限元模型时,接缝两侧的壁板可通过壳单元进行模拟,而不必采用实体单元考虑壁板

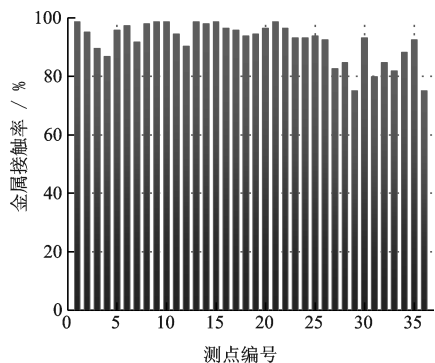


图5 钢桥塔塔段间金属接触率检测结果

Fig. 5 Inspection results of metal contact rate at the pylon segment connection

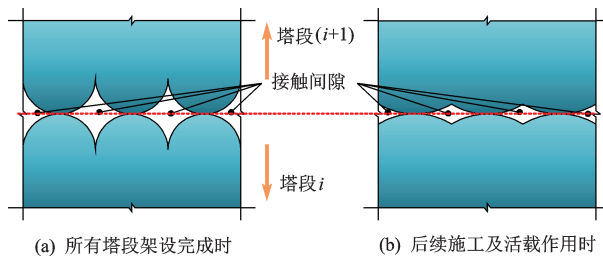


图6 塔段架设过程中金属接触率变化微观示意

Fig. 6 Microscopic change of metal contact rate during erection of pylon segments

板厚侧面的凹凸不平整情况。

3.2 建模方法

此处在进行桥梁极限承载力分析时,主要采用多尺度有限元模型与杆系模型。其中多尺度模型为在局部区域采用板壳或实体等组合形成的精细化模型,在其他区域可采用宏观尺度的梁杆单元模型,梁杆单元模型与精细化模型通过界面技术进行连接,该模型较传统杆系模型能方便观察局部受力特征与考虑传统杆系模型不能模拟的结构细节^[18]。

基于多尺度有限元建模方法建立的多塔悬索桥多尺度有限元模型,并取中塔典型节段2作为局部精细模型,同时考虑拼接板处的局部构造细节。建模主要步骤如下:

(1)建立全桥杆系有限元模型:主缆及吊索通过仅受拉杆单元LINK10模拟,主梁及边桥塔通过BEAM44模拟,中塔采用BEAM188单元模拟,并通过自定义截面充分考虑桥塔截面形式,以方便观察加载过程中截面的应力状态;锚固点及桥塔底部处理为固结方式,约束3个平动自由度及3个转动自由度。

(2)建立桥塔节段局部精细化有限元模型:建模前,根据设计图纸,并综合考虑研究目的、建模效率、计算成本及精度等,作出假设:①忽略变截面塔段局部刚度的变化,对选取的D6、D7节段以拼接缝位置对应的截面作节段建模的参考截面,以此通过几何拓扑关系建立15m的等截面模型;②主要考虑接缝处桥塔壁板的螺栓与拼接板的连接,忽略角隅及加劲肋上的连接,且保证有限元模型在接缝处、节段的母板及加劲肋的节点仅存在几何上的重合,不存在物理上的共同边界,内力通过拼接板、母板及螺栓三者的相互作用进行传递。其中,假设①虽然忽略变截面塔段局部刚度的变化,但考虑本模型的一个主要目标是与不考虑这种连接的梁单元模型

进行对比来考察其的影响情况,而ANSYS中能考虑弹塑性本构模型的梁单元只有BEAM188/189,相关研究表明即使通过变截面定义的方式以该单元建立了有限元模型,但在计算分析时可基于截面刚度等效的等截面梁段进行分析^[19]。因此,可通过在对比梁单元全桥模型中同一位置设置相同的梁单元截面来避开变截面塔段局部刚度变化的影响,符合研究目的的要求,并能在建模效率上发挥作用。假设②出于对建模效率、计算成本及精度的考虑。

其他技术要点包括:①拼接板与壁板按实际板的中心位置建模,并通过SHELL181单元划分网格;②拼接缝处的一块壁板应建立两个接触对,即外侧拼接板与壁板及内侧拼接板与壁板,通过CONTA174与TARGE170单元生成接触对,并通过实常数号进行区分,通过“MP,MU”命令设置其摩擦系数设置为0.45;③螺栓的模拟采用BEAM189单元,并设置弹塑性本构模型模拟螺栓可能出现塑性剪断;

④节段整体采用30 cm网格尺寸,拼接缝区域网格需进行加密,大概为10 cm,两者之间通过过渡网格划分形成连接;⑤采用双线性等向强化模型作为钢材的本构模型(BISO),除中间钢桥塔结构外,其余结构的材料本构关系按线弹性处理。

(3)基于装配体的建模思路,拼装得到的多尺度有限元模型:将(2)得到的节段模型进行平移、旋转等几何操作,使其在全桥模型中就位;删除全桥杆系模型中相应的节段的梁单元,基于平截面假定的位移协调条件,通过命令“CERIG”建立局部节段模型与预留梁端节点之间的刚域完成节段的拼装;多尺度有限元模型的边界条件仍参考全桥杆系有限元模型进行设置,保证基础边界条件的一致性。

根据以上建模思路,建成泰州桥全桥多尺度有限元模型如图7(a)所示,局部桥塔节段模型及构造细节如图7(b~i)所示。模型中,全桥梁杆单元共2 136个,壳单元模型共132 216个,节点共93 614个。

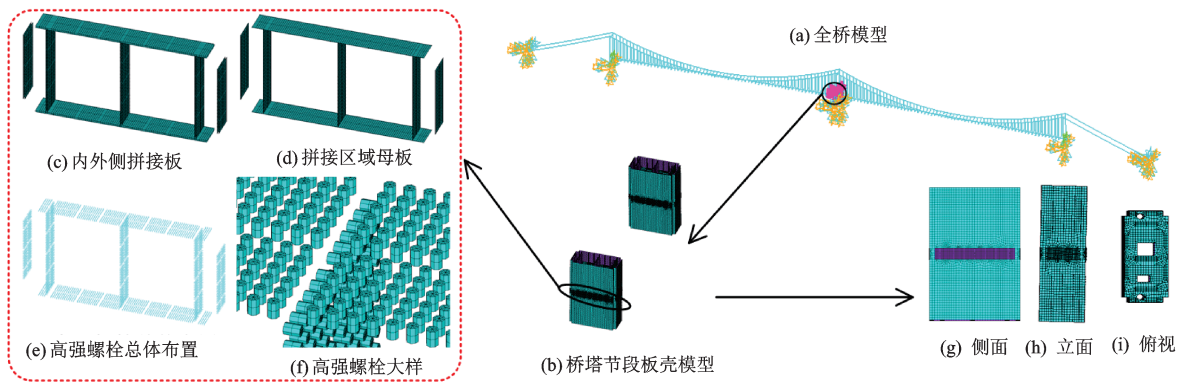


图7 用ANSYS建立的多尺度有限元模型

Fig. 7 The multi-scale FE model using ANSYS

3.3 计算荷载

该桥中间桥塔的不利工况考虑单主跨满布均布荷载+跨中作用集中荷载的非对称加载形式。车辆荷载按8车道公路-I级的车道荷载取用,其标准值根据桥涵设计通用规范^[20]取为均布荷载 $q_k=10.5$ kN/m,集中荷载 $P_k=360$ kN^[20]。根据车道数和桥梁跨长作横向和纵向折减,系数分别为0.50和0.93。根据规范及实际情况中主要存在的活载变异性,考虑按以下两种计算模式求解极限承载力的荷载系数 λ :

$$P_u = \lambda(P_d + P_l) \quad (1)$$

$$P_u = P_d + \lambda P_l \quad (2)$$

式中, P_u 为结构所能承受的极限荷载; P_d 为结构的恒载; P_l 为结构上施加的活载。式(1)中求得的荷载系数 λ 是按当前规范要求的计算结果,为恒载和活载同步加载模式;式(2)体现的是实际活载的承载能力,为恒载不变,活载不断加载至结构破坏。

4 结果与讨论

按既定的加载模式分别对全桥杆系模型及多尺度模型进行非线性求解分析,并就荷载位移曲线及应力状态进行对比分析,说明中间钢桥塔的极限破坏模式及塔段连接的影响效应。

图8、图9给出了桥塔塔顶纵桥及竖向位移随

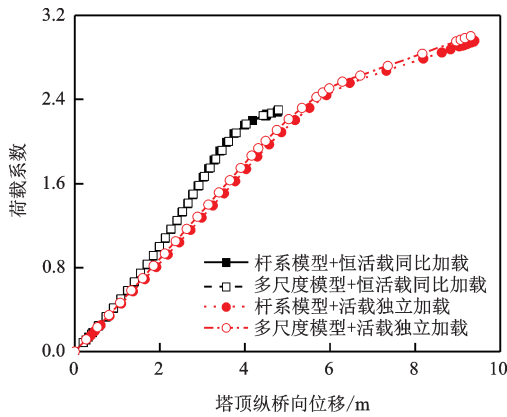


图8 塔顶纵桥向荷载位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curves at pylon top along longitudinal direction

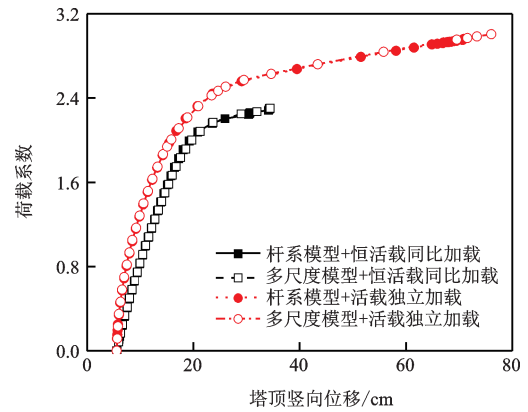


图9 塔顶竖向荷载位移曲线

Fig. 9 Load-displacement curves at pylon top along vertical direction

荷载系数的变化曲线。可知,在恒活载同比加载模式下,杆系模型及多尺度模型计算得到的最大荷载系数分别为2.262 0、2.302 2,相差1.75%,而活载独立加载时,最大荷载系数分别为2.959 6、3.006 1,相差1.55%;两种加载模式下,加载过程中经历了线性加载及刚度退化阶段,结构线性加载对应的最大荷载系数均在1.75以上,具有较高的安全储备;杆系模型与多尺度模型计算得到的荷载位移曲线总体趋势基本一致,且多尺度模型体现出略高的刚度,其原因是结构局部节段截面由于拼接板的存在导致局部抗

弯惯性矩的增大;荷载系数受加载方式的影响,活载独立加载系数明显高于恒活载同比加载系数,主要因为对于悬索桥这种非线性很强的缆索承重类桥梁来说,缆索对桥塔的约束刚度会随着缆索内力的增加而不断增大,当恒活载同步加载时,由于恒载的增加,使得缆索对桥塔的约束刚度也在增大。

活载独立加载时,杆系模型与多尺度模型分析得到的极限状态下变形与应力结果如图10所示。可知,中间钢桥塔结构的破坏是因为上塔柱中部材料不连续处附近形成了塑性铰,此时,使原本具有一

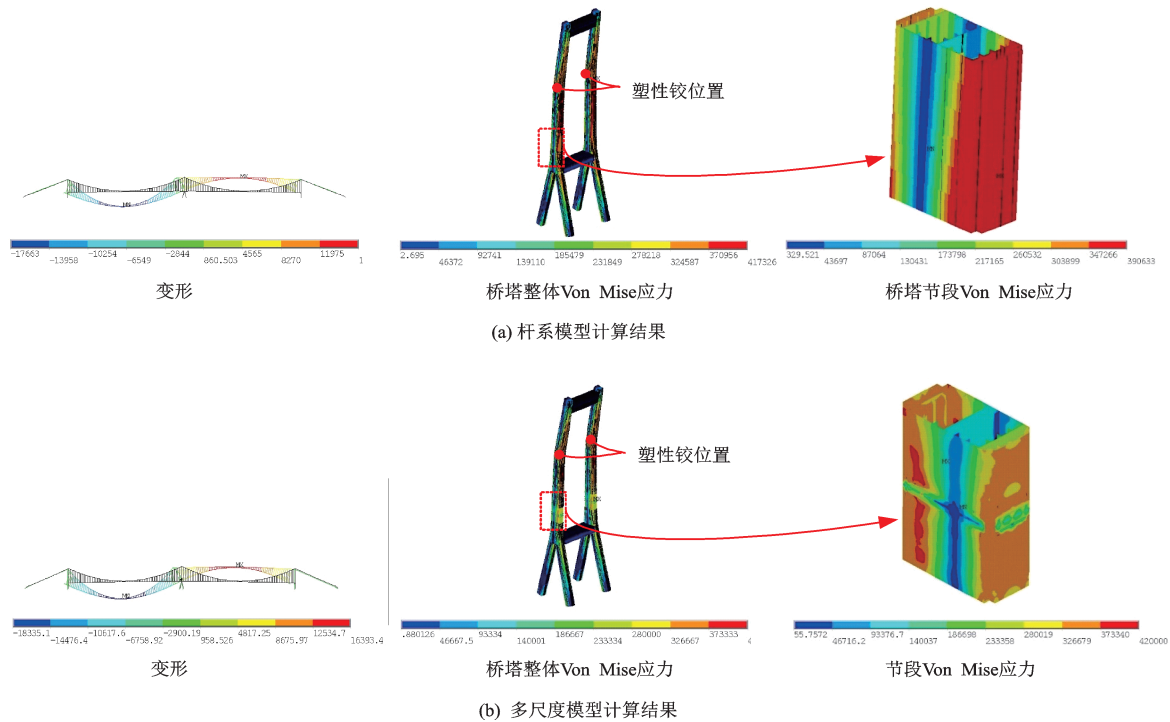


图10 桥塔极限状态变形及应力云图

Fig. 10 Deformation and stress contours of the pylon at ultimate limit state

个冗余自由度的桥塔结构变为静定结构,但由于塑形铰上下区域的塔柱都存在大量的塑形区域,继续加载过程中结构刚度持续退化,不足以抵抗持续增加的外荷载,结构破坏。通过应力状态的追踪,该塑性铰的具体位置为D14节段中部,钢材Q370qD和Q420qD分界线且偏向于Q370qD方向;两种计算模型得到桥塔整体应力分布情况基本一致,通过局部塔段的应力分布情况可以看出,多尺度模型中桥塔塔段连接区域附近应力分布比较复杂,且应力集中现象突出,虽受连接区域复杂应力场的影响,但弯矩两侧仍呈现出与梁单元计算结果类似的屈服应力分区现象。恒活比同比加载情况结果类似。

5 结 论

该文以泰州桥为工程背景,针对多塔悬索桥中间钢桥塔极限承载力展开了研究,考虑了塔段连接的影响,介绍了考虑一道工地接缝的全桥多尺度有限元建模方法,通过两种典型荷载加载方式下杆系模型及多尺度模型的非线性有限元分析,得出以下结论:

(1)考虑一道工地接缝与不考虑工地接缝影响的中间钢桥塔结构在材料处于弹性范围时基本一致,进入材料塑性范围后,考虑一道工地接缝影响的结构表现出稍高的承载力,但两种不同加载模式下相差仍在2%以内。从桥塔结构极限承载力的宏观力学层面讲,塔段连接的影响可以忽略,可简化为杆系模型进行计算。

(2)恒活载同比加载方式使主缆对桥塔的约束刚度增大,同时考虑恒载放大使空载主跨加载,不符合最不利工况分析时影响线加载的基本要求,认为此恒活载模式缺乏一定的科学性。多塔悬索桥中间钢桥塔的极限承载力宜采用活载独立加载模式,使结构对“外荷载”反应能够客观地反应。

(3)由多尺度有限元模型计算结果虽在一定程度上表现出梁单元计算结果的一致性,但发现塔段连接区域应力分布十分复杂,且应力集中现象突出。该区域的局部受力行为,包括栓钉、拼接板及壁板的受力特点及该区域传力机理量化模型的建立等还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Choi D H, Gwon S G, Yoo H, et al. Nonlinear static analysis of continuous multi-span suspension bridges [J]. International Journal of Steel Structures, 2013, 13(1):103-115.
- [2] 张清华, 李 乔. 悬索桥主缆与鞍座间摩擦特性试验研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(4):85-92.
Zhang Q H, Li Q. Study on cable-saddle frictional characteristics of long-span suspension bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(4):85-92. (in Chinese)
- [3] 沈锐利, 王 路, 王昌将, 等. 悬索桥主缆与索鞍间侧向力分布模式的模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(10):75-81.
Shen R L, Wang L, Wang Ch J, et al. Experimental study on distribution pattern of lateral force between main cable and cable saddle for suspension bridge [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(10):75-81. (in Chinese)
- [4] 柴生波, 肖汝诚, 王秀兰, 等. 多塔悬索桥主缆与鞍座抗滑解析计算方法[J]. 中国公路学报, 2016, 29(4):59-66.
Chai Sh B, Xiao R Ch, Wang X L, et al. Analytic method for calculating anti-slip safety factor between main cable and saddle in multi-tower suspension bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(4):59-66. (in Chinese)
- [5] 王秀兰, 徐 岳, 柴生波. 三塔悬索桥主缆与中塔鞍座抗滑简化计算方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(9):70-75.
Wang X L, Xu Y, Chai Sh B. Simplified calculation method of anti-slip stability between main cable and saddle of three-tower suspension bridges [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(9):70-75. (in Chinese)
- [6] 李万恒, 王元丰, 李鹏飞, 等. 三塔悬索桥桥塔适宜刚度体系研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(1):75-81.
Li W H, Wang Y F, Li P F, et al. Rational distribution principle for the pylon stiffness of three-ylon suspension bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(1):75-81. (in Chinese)
- [7] Yoshida O, Okuda M, Moriya T. Structural characteristics and applicability of four-span suspension bridge [J]. Journal of Bridge Engineering, 2004, 9(5):453-463.
- [8] 周 强, 周志勇, 葛耀君. 双主跨悬索桥静风失稳模

- 式及其机理分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(8):76-82.
- Zhou Q, Zhou Zh Y, Ge Y J. Mode and mechanism of aerostatic stability for suspension bridges with double main spans[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(8):76-82. (in Chinese)
- [9] 张新军, 郭 辉. 三塔悬索桥施工过程中抗风稳定性研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(12):58-63.
- Zhang X J, Guo H. Wind stability of three-tower suspension bridges under construction[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(12):58-63. (in Chinese)
- [10] 丁幼亮, 谢 辉, 耿方方, 等. 近断层地震动作用下多塔悬索桥的地震反应分析[J]. 工程力学, 2015, 32(7):38-46.
- Ding Y L, Xie H, Geng F F, et al. Seismic response analysis of a multi-tower suspension bridge subjected to near-fault ground motions[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(7):38-46. (in Chinese)
- [11] 邓育林, 彭天波, 李建中. 大跨多塔悬索桥纵向地震碰撞反应参数研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(4):205-210.
- Deng Y L, Peng T B, Li J Zh. Parametric study on longitudinal seismic pounding response for a long-span multi-tower suspension bridge[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(4):205-210. (in Chinese)
- [12] 沈锐利, 张兴标, 彭 丹. 多塔悬索桥结构变形的实用计算方法[J]. 中国公路学报, 2016, 29(6):207-213.
- Shen R L, Zhang X B, Peng D. Practical calculation method for structural deformation of multi-span suspension bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(6):207-213. (in Chinese)
- [13] 孙 斌, 胡志坚, 张力文, 等. 多塔悬索桥活载效应简化分析[J]. 中国公路学报, 2015, 28(11):60-66.
- Sun B, Hu Zh J, Zhang L W, et al. Simplified analysis of live load responses in multi-tower suspension bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(11):60-66. (in Chinese)
- [14] Choi D H, Gwon S G, Na H S. Simplified analysis for preliminary design of towers in suspension bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2014, 19(3):1-12.
- [15] 陈绍蕃, 顾 强. 钢结构基础. 第3版[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- Chen Sh F, Gu Q. Basic steel structure. The third edition [M]. Beijing: China Architecture & Building Industry Press, 2014. (in Chinese)
- [16] 戴永宁. 南京长江第三大桥钢索塔技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- Dai Y N. Steel tower technology of the third Nanjing Changjiang River Bridge [M]. Beijing: China Communications Press, 2005. (in Chinese)
- [17] 王 辉. 南京长江三桥钢塔节段制造及整体预拼的三维仿形分析[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2007.
- Wang H. Fabrication technique and 3d shape simulation for integral pre-assembly of steel tower segments in Nanjing 3rd Yangtze River Bridge [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2007. (in Chinese)
- [18] 邓 扬, 李爱群, 丁幼亮, 等. 基于结构多尺度分析的超大跨斜拉桥损伤定位方法研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2008, 28(3):268-273.
- Deng Y, Li A Q, Ding Y L, et al. Damage location identification for a super-long-span cable-stayed bridge based on structural multi-scale analysis [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2008, 28(3):268-273. (in Chinese)
- [19] 张 磊, 童根树. 薄壁构件整体稳定性的有限元模拟[J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, 45(3):531-538.
- Zhang L, Tong G Sh. Finite element modelling of thin-walled members in overall stability analysis [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2011, 45(3):531-538. (in Chinese)
- [20] 公路桥涵设计通用规范 JTG D60—2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- General specifications for design of highway bridges and culverts JTG D60—2004 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese)

(本文责编: 赵 霞)