

## 圆拱形斜拉桥桥塔超高支架稳定性分析

王树良

(中国铁建大桥工程局集团第三工程有限公司, 辽宁 沈阳 110043)

**摘要:**以斜拉桥桥塔合龙段施工超 80 m 钢管型钢支架为研究背景,介绍目前支架的研究和应用现状,明确该超高支架研究的必要性;对支架稳定性分析方法中的有限元法计算理论进行详细介绍,并采用有限元法分析风荷载、约束条件及初始缺陷对该钢管型钢支架稳定性的影响,基于该支架 1 阶屈曲模态的特点,提出 4 种可提高支架稳定性的参数优化方案并进行分析计算。结果表明:风荷载、约束条件及初始缺陷对超高支架稳定性均有影响,但不影响支架失稳的位置;越靠近支架顶部,约束条件的改变对支架稳定性的影响越小;初始缺陷越大,支架临界荷载系数越小,但初始缺陷对临界荷载系数的影响有限;4 种优化方案中采用增加失稳部位钢管立柱间剪刀撑尺寸的方案较其他 3 种方案更有效、更经济,支架的稳定性可提高 47.8% 左右。

**关键词:**独塔斜拉桥; 超高支架; 数值模拟; 初始缺陷; 稳定性; 参数优化

**中图分类号:** U448.27

**文献标志码:** A

支架因其搭设方便、材料可循环使用、经济性高等优点在桥梁施工中往往被优先考虑,随着桥梁跨度和高度的增加,支架的搭设也越来越高大,其稳定性问题成为目前研究的重点<sup>[1-2]</sup>。胡长明等<sup>[3-6]</sup>研究发现:边界条件对扣件式模板支架的稳定承载力影响显著,提出该支架接头形式的改变可大幅度提高其承载能力,且支架的各构造因素对架体稳定性也有一定影响;张春风等<sup>[7]</sup>提出剪刀撑、扫地杆高度和顶托高度、架体高度及杆件的初始缺陷等对满堂支架的稳定性有一定影响;LIU X 等<sup>[8-9]</sup>研究得到初始缺陷对扣件式模板支架稳定性影响较大。目前为止还没有一个合理地考虑各种缺陷的计算方法,刘谦等<sup>[10]</sup>提出在现有规范承载力验算公式中加入修正参数,或者基于二阶非线性分析方法计算<sup>[11]</sup>,还有采用 Monte Carlo 法<sup>[12]</sup>、经验公式法<sup>[13-14]</sup>等;姚旋等<sup>[15-16]</sup>提出初始缺陷的不同施加方法,如特征屈曲模态法、假想水平力法和直接缺陷法等。但上述研究都是针对高度在 50 m 以内的扣件式模板支架或钢管柱支架进行,对于 50 m 以上的超高钢管型钢支架施工经验较少。秦文学等<sup>[17-18]</sup>结合钢管型钢支架实际案例,对该支架的设计方案和施工流程做了详细的介绍,并提出该支架施工中需要注意的事项。综上所述,目前国内外学者针对高度在 50 m 以下支架的稳定性问题研究较多,而对 50 m 以上超高钢管型钢支架的研究主要是现场施工技术的介绍,

鲜有进行超高钢管型钢支架稳定性方面的研究。

该文以韶州大桥主桥桥塔合龙段施工搭设的超 80 m 钢管型钢超高钢支架为研究背景,分析平撑、风荷载、约束条件、初始缺陷对钢管型钢超高钢支架稳定性的影响,并基于该支架失稳模态进行参数优化,提高支架的稳定性。

## 1 支架稳定性分析方法

支架主要承担自上而下的压力荷载,超高钢管型钢支架属于细长结构,当杆件承受压力到达某一限值时可能突然发生屈曲破坏,即构件失稳。支架结构发生的失稳主要为平衡分叉失稳和极值点失稳两类<sup>[20-21]</sup>。

平衡分叉失稳又称为第一类失稳,适用于分析无缺陷的理想轴心受压构件的失稳破坏。但实际压弯构件材料为弹塑性体,构件的初始缺陷是不可避免的,即会发生极值点失稳也称为第二类失稳。第一类失稳为理想状态,实际工程中主要为第二类失稳。

目前计算结构稳定性问题的方法有解析法和近似法。其中解析法主要有静力平衡法、能量法和动力法;近似法主要有有限差分法、有限积分法及有限单元法等<sup>[19]</sup>。蒋越<sup>[20]</sup>采用解析法中的动力法和近似法中的有限单元法分别对支架稳定性进行计算,得到两种方



可沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  3 个方向平动和绕  $x$ 、 $y$ 、 $z$  3 个轴转动(图 2)。构件之间连接采用弹性连接,弹性连接是一种具有 6 个自由度,类似于梁单元的弹簧单元(图 3)。图中 N1 和 N2 表示构成单元的两节点,Ref 为参考节点, $P_x$ 、 $P_y$ 、 $P_z$  分别表示单元  $x$ 、 $y$ 、 $z$  3 个平动方向,①、②、③分别表示单元绕  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个轴的转动方向。

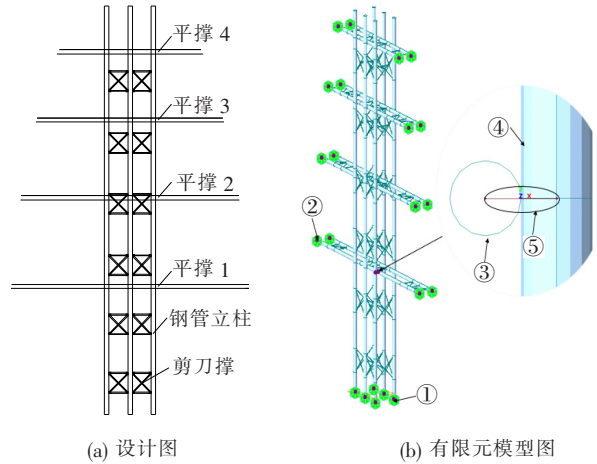


图 1 支架图

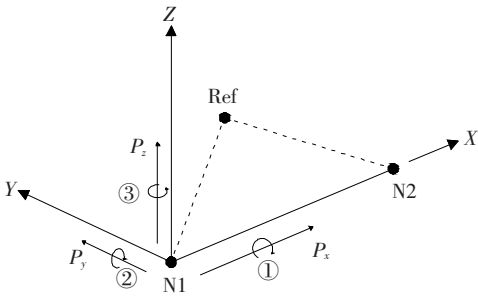


图 2 梁单元示意图

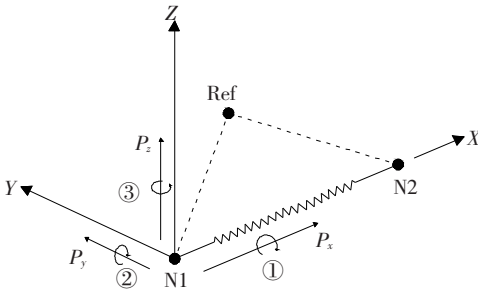


图 3 弹性连接示意图

钢管立柱底与桥塔横梁、平撑钢管与主塔预埋钢板现场均采用满焊连接形式(图 4),有限元模型中该节点处采用固结约束来模拟,6 个自由度均被限制。如图 1(b)中①、②所示,①表示钢管立柱底与桥塔横梁连接处节点固结约束,②表示平撑钢管与主塔预埋钢板连接处节点固结约束。平撑钢管布置在钢管立柱

内部,在现场平撑钢管与钢管立柱不仅在接触位置处进行焊接,还利用双槽[20 增大焊接面积(图 5),以此达到平撑钢管和钢管立柱之间的固结效果。有限元模型中将平撑钢管处节点和钢管立柱处节点采用弹性连接中的固结形式模拟,如图 1 中放大所示,③表示钢管立柱,④表示平撑钢管,⑤为有限元模型中两构件之间采用的弹性连接形式。

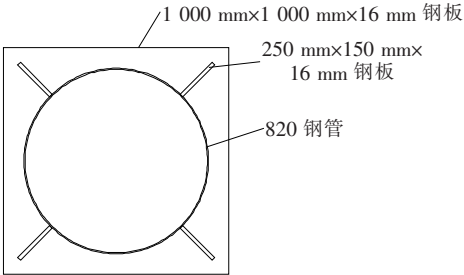


图 4 平撑钢管与桥塔预埋钢板现场连接图

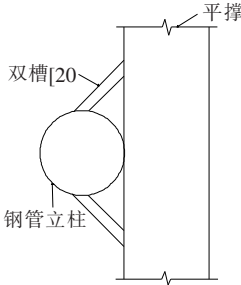


图 5 平撑钢管与钢管立柱现场连接图

立柱为直径  $D=820$  mm,壁厚  $t=10$  mm 的钢管,横桥向 3 排,间距均为 4.5 m;纵桥向 2 排,间距 4.8 m。连接桥塔和钢管立柱的平撑有 4 道,共 8 根,平撑横向间距 3.16 m,第一道平撑距钢管立柱底面 26 m,4 道平撑之间间距从下到上分别为 17、15 和 13 m。平撑材料特性与钢管立柱相同,均为 Q345,模型中钢材应力应变关系采用理想弹塑性模型来模拟,其本构关系如图 6 所示。剪刀撑设置 6 道,每道剪刀撑高 4.8 m,第一道剪刀撑距离钢管立柱底面 4 m,两剪刀撑间距均为 7.2 m。剪刀撑和平撑之间的连接系均采用[10 的槽钢,材料为 Q235,其本构关系如图 6 实线所示。材料的屈服遵循 Von-Mises 屈服准则及流动法则,泊松比均为 0.3。

钢管立柱顶部承受分配梁和贝雷梁自重、桥塔合龙段湿重及施工荷载,计算后以集中力的形式竖向施加在立柱顶部,顶部承受合力大小为 3 889.7 kN,各立柱承受的竖向力大小如图 7(a)所示。支架搭设高度较高,且位于空旷的河面上,超高支架可能会因风载的作用而失稳破坏。依据 GB 50009—2012《建筑结构

荷载规范》中的规定风荷载标准值：

$$w_k = \beta_z \mu_s \mu_z w_0 \tag{7}$$

式中： $w_k$  为风荷载标准值(kN/m<sup>2</sup>)； $\beta_z$  为高度  $z$  处的风振系数； $\mu_s$  为风荷载体型系数； $\mu_z$  为风压高度变化系数； $w_0$  为基本风压(kN/m<sup>2</sup>)。

由式(7)计算可得风荷载标准值  $w_k = 0.7 \times 1.2 \times 1.38 \times 0.8 = 0.927$  kN/m<sup>2</sup>，在横桥向桥塔对于支架有挡风作用，支架受横向风荷载影响较小，因此仅考虑纵向风荷载作用，模型中以梁单元荷载中的均布荷载形式模拟，荷载大小为  $q_k = w_k S = 0.927 \times 0.28 \approx 1.2$  kN/m，如图 7(b)所示。

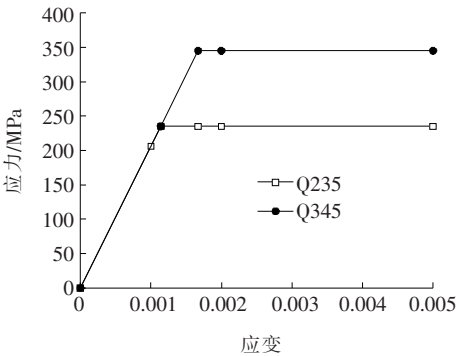


图 6 钢材本构关系

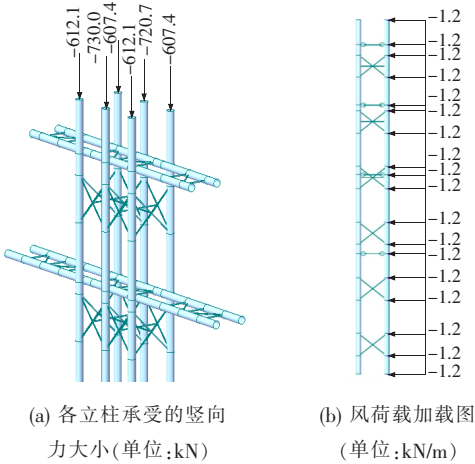


图 7 模型中荷载加载示意图

2.2 超高支架稳定性分析

支架底部和侧面均采用满焊形式与桥塔进行连接，施工过程中不能实时监测焊缝连接质量，焊缝可能在施工后期由于受力较大出现裂纹等导致约束条件由固结转换为铰接形式，有研究表明<sup>[19]</sup>约束条件的改变对超高支架的稳定性有较大影响，且不同位置约束条件的改变对其影响大小不同。风荷载和初始缺陷在超高支架中是不可避免的，超高支架由于其高度较高，风荷载对其影响较大，可能因风载原因发生失稳破坏；初

始缺陷具有很强的随机性，有研究表明：各种初始缺陷是导致架体坍塌的重要原因之一<sup>[22-23]</sup>，目前没有统一的支架初始缺陷计算方法，一般采用一致模态法进行分析，将理想状态下支架的 1 阶屈曲模态假定为初始缺陷的分布方式，在 1 阶屈曲模态变形的基础上乘以合理的修正系数，目前较多学者认为参照 GB 50017—2003《钢结构设计规范》考虑修正系数取结构高度的 1/400 是合理的<sup>[24-25]</sup>。

因此，为研究约束条件、风荷载和初始缺陷对超高钢管型支架稳定性的影响，考虑以下 4 种模型进行屈曲分析。模型 1：理想状态下支架模型，即荷载仅考虑施工荷载、自重和桥塔湿重，约束条件考虑为固结形式，假定无任何初始缺陷的支架模型；模型 2：在模型 1 的基础上考虑最不利情况下约束条件的改变，即支架与桥塔的连接形式全部由固结转化为铰接的支架模型；模型 3：在模型 1 的基础上考虑风荷载影响的支架模型；模型 4：在模型 1 的基础上考虑初始缺陷最大位移值取  $H/400 \approx 0.2$  m 的支架模型。通过有限元分析，4 种模型的 1 阶屈曲模态如图 8 所示。

由图 8 可知：各模型的屈曲模态分析结果与模型 1 分析结果对比可得风荷载、约束条件和初始缺陷的施加不改变支架失稳的部位，最有可能发生失稳的位置依然是支架底部局部失稳，其原因是支架底部到第一排平撑的位置较高，平撑对支架的约束范围有限。

与模型 1 相比，模型 2 考虑风荷载后，支架的临界荷载系数即上文中的特征值  $\lambda$  下降了 2.444，稳定承载力下降了 32.1%，风荷载对超高支架稳定性的影响较大。风荷载的计算与基本风压、体型系数、结构高度、地形地貌等有关，支架结构越高，所受风荷载越大。模型 1 中支架主要承受压力荷载，为受压构件；模型 2 中风荷载作为水平荷载施加在支架结构上，使支架结构产生弯矩，由受压构件转换为压弯构件，同等条件下，压弯构件较受压构件更容易发生失稳。因此，风荷载对超高支架的影响是不可忽略的，在设计时可采用偏保守的 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》考虑风荷载的影响<sup>[24]</sup>。

模型 3 中考虑支架底部和侧面约束条件改变后，支架的临界荷载系数下降了 2.449，稳定承载力下降了 32.2%。虽然约束条件的改变对支架整体稳定性影响较大，但模型 3 中考虑为最不利状态下支架底部和侧面所有约束条件由固结形式转变为铰接形式，实际工程中所有约束条件发生改变的概率较小，单个部位约束条件发生改变的概率较大，因此需要进一步研



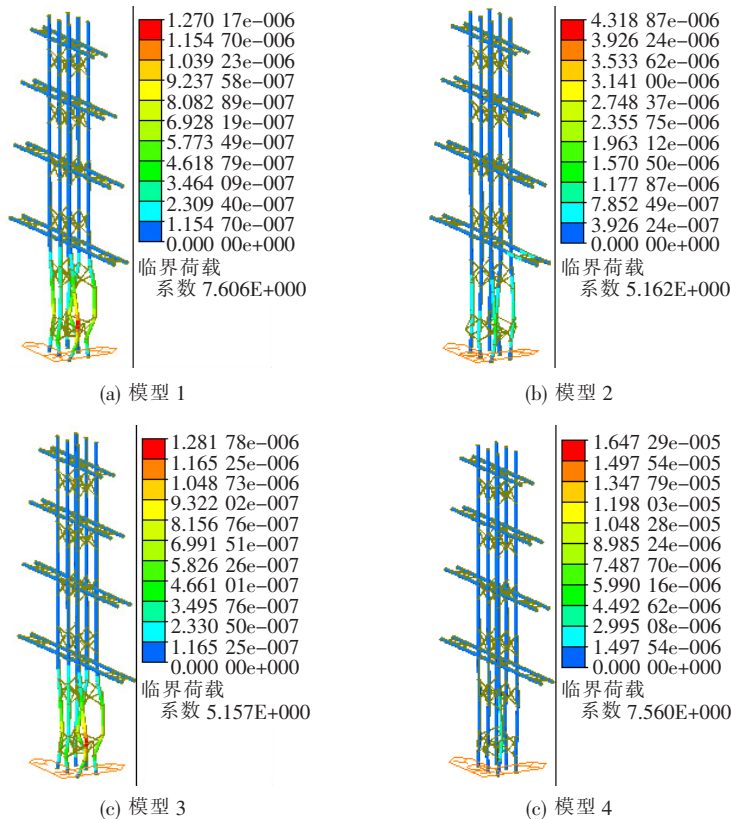


图 8 支架 1 阶屈曲模式

究各部位约束条件改变对支架稳定性的影响,单独改变支架各部位的约束条件,其分析结果如表 1 所示。

表 1 改变约束条件和位置后支架的临界荷载系数

约束位置	荷载系数		临界荷载系数下降值
	铰接	固结	
底部	6.373	7.606	1.233
平撑 1	7.397	7.606	0.209
平撑 2	7.398	7.606	0.208
平撑 3	7.493	7.606	0.113
平撑 4	7.526	7.606	0.080
全部平撑	7.113	7.606	0.493
底部+全部平撑	5.162	7.606	2.444

注:底部:支架底部与桥塔横梁连接处;平撑:平撑与桥塔连接处。

模型 4 中考虑最大值为 0.2 m 的初始缺陷后,支架的临界荷载系数仅下降了 0.004 6,相应稳定承载力下降 0.6%。初始缺陷最大值的取值主要由施工水平、工人技术、材料质量等因素决定,在实际施工中初始缺陷是不可避免的,具有很大的随机性且目前没有明确的规范规定超高钢管型钢支架的初始缺陷最大取值。因此仅考虑初始缺陷最大值为 0.2 m 的情况来

说明初始缺陷对超高支架稳定性的影响是不确切的,参考文献[19]取最大值 0.2~0.8 m 进一步分析初始缺陷对超高钢管型钢支架的影响规律,分析结果如图 9 所示。

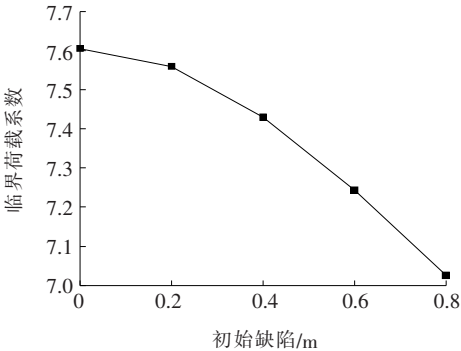


图 9 初始缺陷—临界荷载系数变化曲线

从表 1 可以看出:底部约束条件的改变对支架结构稳定性的影响很大,底部约束条件的改变较侧面约束条件改变对支架稳定性影响大;平撑位置越靠近支架顶部,约束条件改变后对支架稳定性的影响越小;其主要原因可能是侧面平撑受力较底部受力小,上部平撑受力较下部平撑受力小,该超高支架体系中受力越大的地方改变其约束条件,对结构的稳定性影响越大。因此,应加强支架底部和横梁接触位置的焊接质量,防

止后期约束条件转变为铰接。由图 9 可知：随着初始缺陷的不断增大，支架的临界荷载系数不断减小，且初始缺陷越大临界荷载系数减小速率越快。当初始缺陷最大值由 0 增加到 0.8 m 时，临界荷载系数下降 0.58，对应稳定承载力下降 7.6%，下降幅度很小。与之前学者研究的初始缺陷对脚手架的影响性不同，初始缺陷对钢管型钢支架的影响较脚手架小，其主要原因是该支架设置有平撑，平撑能有效减小钢管立柱的自由长度，对支架变形起到约束作用，该研究结果与同类钢管型钢支架的研究结果相似<sup>[19]</sup>。虽然初始缺陷对超高钢管型钢支架稳定性影响较小，但初始缺陷随机性很强，为了使桥塔合龙节段的施工更加安全，应当控制施工支架时由于各种原因产生的初始变形，严格

把控支架的安装质量。

3 支架参数优化分析

基于上述超高支架的屈曲分析，可以得知支架底部最容易发生局部失稳，可增加对支架底部的约束，提高超高支架稳定性。有研究表明<sup>[19]</sup>平撑的设置可增加超高支架的侧面约束，增强支架的稳定性，且增强效果明显，因此提出：① 支架底部加设一道平撑的优化方案；② 通过增加支架结构刚度来提高超高支架的稳定性，即加大钢管立柱之间剪刀撑的尺寸；③ 增加支架钢管立柱的直径；④ 增加支架钢管立柱的厚度。4 种优化方案下支架的稳定性分析结果如图 10、11 所示。

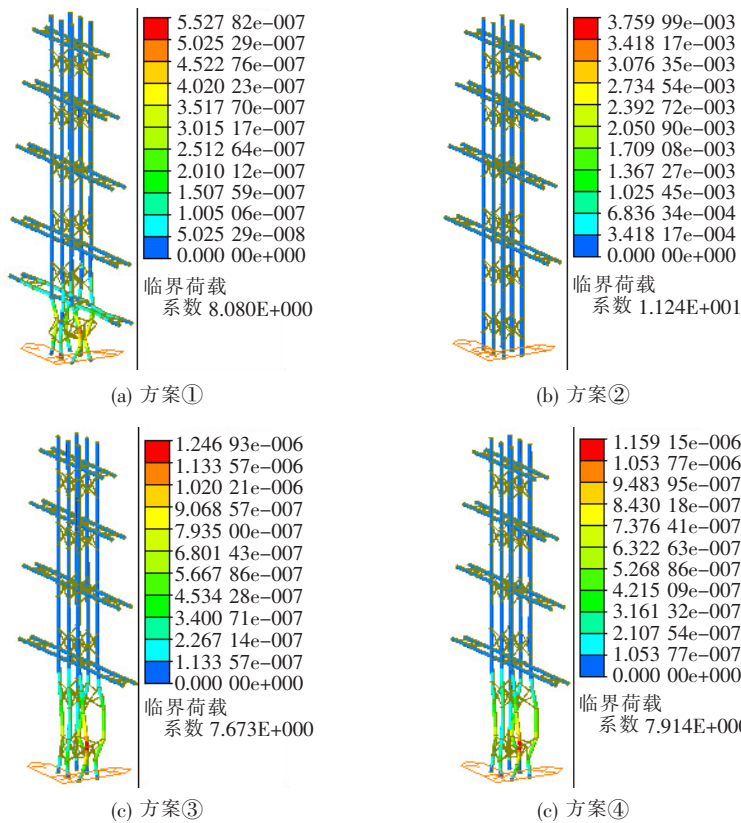
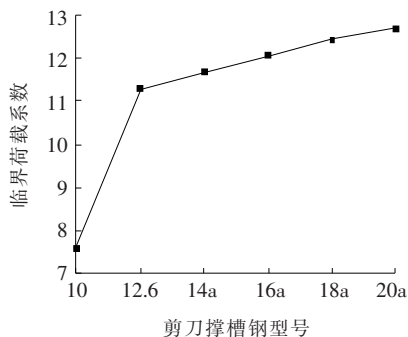


图 10 支架优化后的 1 阶屈曲模态

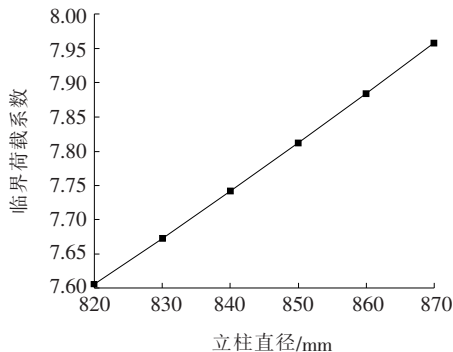
由图 10 可以看出：在支架底部加设平撑后，临界荷载系数为 8.08，支架稳定承载力提高了 0.474，增加的并不明显，发生局部失稳的位置向支架底部移动，加设平撑后对支架起到了约束作用，但约束的范围有限，仅对施加平撑区域有较小的约束。由图 11 可知：增大钢管立柱间的剪刀撑尺寸可以大幅度增加支架的临界荷载系数，将剪刀撑原槽钢厚度由 10 cm 增加为 12.6 cm，临界荷载系数变为 11.24，增加了 3.63，提升幅度

为 47.8%，12.6 cm 之后随着尺寸的增加，荷载临界系数增加幅度变缓；钢管立柱直径增加 10 mm，临界荷载系数增加约 0.067；钢管立柱厚度增加 2 mm，临界荷载系数增加约 0.308；随着钢管立柱直径和厚度的增加，支架的临界荷载系数均呈线性增加趋势，但增加幅度不大，立柱厚度的增加较立柱直径的增加对支架临界荷载系数影响大。

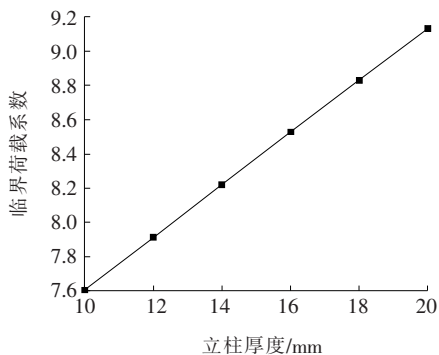
综上，通过对提出的 4 种支架参数优化方案进行



(a) 剪刀撑槽钢型号-临界荷载系数变化曲线



(b) 立柱直径-临界荷载系数变化曲线



(c) 立柱厚度-临界荷载系数变化曲线

图 11 临界荷载系数变化曲线

分析,增设平撑和增加钢管立柱尺寸对支架临界荷载系数的提高幅度较小,而增加失稳部位钢管立柱之间的剪刀撑尺寸对支架临界荷载系数的提高幅度最大,且剪刀撑尺寸的增加较其他两种方案更方便、有效、经济性更高。因此,可通过增加失稳部位钢管立柱之间剪刀撑的尺寸来有效提高支架的稳定性,现场施工中该超高支架就是通过增加剪刀撑尺寸来提高其稳定性。

## 4 结论

通过对超高钢管型钢支架稳定性的分析,得到以

下结论:

(1) 风荷载、约束条件和初始缺陷对超高支架的稳定性均有影响,但不影响支架局部失稳的位置。

(2) 底部约束条件的改变较侧面约束条件改变对支架的稳定性影响大,且越靠近支架顶部,约束条件的改变对支架稳定性影响越小。

(3) 初始缺陷对钢管型钢支架的影响较小,这与脚手架不同,主要原因是钢管型钢支架中间设有平撑,可有效约束支架的变形。

(4) 增加剪刀撑尺寸的方案比其他 3 种优化方案对支架临界荷载系数的提高更大,增加幅度近 47.8%,该支架施工中采用增加失稳部位钢管立柱间剪刀撑尺寸,有效地提高了支架稳定性。

## 参考文献:

- [1] 张柳煜. 桥梁碗扣式模板支撑架稳定性及监测新技术研究[D]. 西安:长安大学,2016.
- [2] 陈诚,杜磊,杜晶. 山区连续刚构桥边跨现浇段施工技术[J]. 中外公路,2021,41(3):151-155.
- [3] 胡长明,曾凡奎,沈勤,等. 构造因素对高支模稳定承载力的影响[J]. 华中科技大学学报(城市科学版),2008,25(4):57-60.
- [4] YU W K, CHUNG K F, CHAN S L. Structural Instability of Multi-Storey Door-Type Modular Steel Scaffolds[J]. Engineering Structures, 2004, 26(7): 867-881.
- [5] 胡长明,曾凡奎. 扣件式钢管模板支架的试验和数值模型研究[J]. 工程力学, 2010, 27(S2): 280-283, 293.
- [6] LIU H B, LI J, WEN S L, et al. Experimental and Theoretical Studies on the Stability of Steel Tube-Coupler Scaffolds with Different Connection Joints[J]. Engineering Structures, 2016, 38: 80-95.
- [7] 张春风,方诗圣,石程华,等. 碗扣式满堂支架整体稳定性分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2018, 41(5): 666-670.
- [8] LIU X, YANG J, WANG Y. Finite Element Analysis of the Stability Bearing Capacity of Frame Scaffolding with Steel Tubes[J]. Sichuan Building Science, 2014, 40(1): 90-93, 146.
- [9] CHEN D, DING K W, HE X P. Force Mechanism and Progressive Collapse of Steel Tube-Coupler Scaffold under Local Load[J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2018, 22(7): 2344-2353.
- [10] 刘谦,姚旋,刘纲. 扣件式模板支架初始缺陷分类及缺陷敏感度分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(s1): 63-66.