

波形钢腹板参数化性能研究

田少发¹ 彭楠楠²

1. 中交一公局海威工程建设有限公司 北京 100024

2. 中交一公局集团有限公司 北京 100024

摘要: 基于ABAQUS有限元软件建立波形钢腹板参数化分析模型, 结合背景工程中波形钢腹板的实际参数, 同时参考了其它桥梁的波腹板参数。根据屈曲模态云图和载荷位移曲线对比分析表明, 适当增大板厚、直线段长度和波高, 可明显提高波形钢腹板的稳定性; 腹板高度过大严重削弱了波形钢腹板的稳定性, 考虑到支座附近腹板高度大、剪力大, 可通过浇筑混凝土内衬或设置加劲肋来提高波形钢腹板的面外刚度。

关键词: 屈曲; 参数化; 有限元

引言

东南大学万水教授在中国首先开展波形钢腹板组合箱梁桥的研究, 负责设计了中国首座波形钢腹板组合梁桥, 并参与了多项波形钢腹板组合桥梁的设计、荷载试验等实际工程。吴文清(2002)和李宏江(2003)在国内最早以波形钢腹板箱梁为课题研究对象获得博士学位, 为波形钢腹板组合桥梁后期的科学研究起到了铺垫作用。迄今为止, 波形钢腹板组合桥梁的研究涵盖弯曲、剪力滞、剪切、屈曲、扭转、截面畸变、翘曲、疲劳、振动性能及抗剪连接件受力等诸多方面, 此外, 这类桥梁的工程设计与建造也取得了重大进展。

通常, 波形钢腹板的剪切屈曲可以视为或等效成单板进行微分方程推导并求解计算。具体而言, 波形板整体剪切屈曲波曲面覆盖波形板整个高度, 其整体剪切屈曲应力计算可以参照等效正交异性材料矩形板理论。波形板局部剪切屈曲发生在各个板段宽度范围内, 其剪切屈曲应力可以参照矩形板剪切屈曲的经典理论(Timoshenk and Gere 1961)。当波形板段宽度相等时, 其公式与矩形板等同, 剪切系数可以采用矩形板的剪切系数。以下公式为适用于波形钢腹板局部剪切屈曲的不同约束边界下的单板剪切屈曲系数一书中对其进行了汇总。

作者简介: 田少发(1988——)男, 汉族, 内蒙古呼和浩特人, 专科, 工程师, 研究方向: 高速公路水泥混凝土及沥青混合料。

一、工程概况

主桥上部结构为(75+130+75)m波形钢腹板悬浇变截面预应力混凝土连续梁, 单箱单室截面。箱梁底宽7.25m, 两侧翼缘板悬臂长2.75m, 全宽12.75m。箱梁横桥向底板保持水平, 顶面设2.0%的单向横坡, 由箱梁腹板高度不同形成。中支点处箱梁中心高度7.8m, 边支点及跨中箱梁中心高度3.5m, 梁高以1.8次抛物线变化。顶板厚0.3m, 悬臂板端部厚0.20m, 根部厚0.80m, 按折线变化; 波形钢腹板厚18mm~26mm, 按各悬浇阶段变化; 底板厚0.3m~0.95m, 按1.8次抛物线变化。端、中横隔梁分别设在边支点、中支点处, 厚度分别为2.7m、3.6m, 跨间横隔板尺寸详见图纸, 横梁及横隔梁均设置了人孔以便施工。

箱梁支架现浇0#块节段共长11.6m, 在主墩托架上浇筑。两侧各有14个悬浇节段, 节段长度为6×3.2m和8×4.8m。1#~14#梁段采用挂篮悬臂浇筑施工, 悬臂浇筑梁段最大节段重量为175.2t。主桥共有3个合拢段, 即1个中跨合拢段和2个边跨合拢段, 合拢段长均为3.2m, 在吊架上浇筑。边跨现浇段长8.28m, 在托架上浇筑。

箱梁为预应力结构, 分为纵向预应力束(体内和体外)、竖向预应力钢筋和横向预应力束。横向预应力仅在横梁及箱梁顶板处布设, 竖向预应力束仅在中支点横梁处设置。预应力管道均采用塑料波纹管。纵向预应力钢束共设置了体外束、顶板束、边跨底板束、边跨顶板束、中跨底板束、中跨顶板束等。中横梁竖向预应力钢筋采用40Si2MnMOV高强精轧螺纹粗钢筋JL32, 并采用配套锚固体系(YGM锚具)和设备, 抗拉强度标准值

为785MPa，锚下张拉控制应力为706.5MPa，管道采用D50mm塑料波纹管。

二、波腹板特征值屈曲分析

波形钢板作为波形钢腹板连续箱梁桥的重要构件，其厚度一般在10mm至20mm左右，仅为混凝土箱梁腹板厚度（300mm至800mm）的几十分之一，此时稳定问题就显得尤为突出。为了其更好的用于组合结构中，服务于桥梁工程，需对其结构参数进行优化分析。

采用Abaqus建立波形钢腹板有限元模型，分别改变板厚、波高、和直板段长度等尺寸参数，分析尺寸变化对波形钢腹板稳定性的影响规律，为此类桥梁的设计提供参考，波形钢腹板具体尺寸如图1所示。

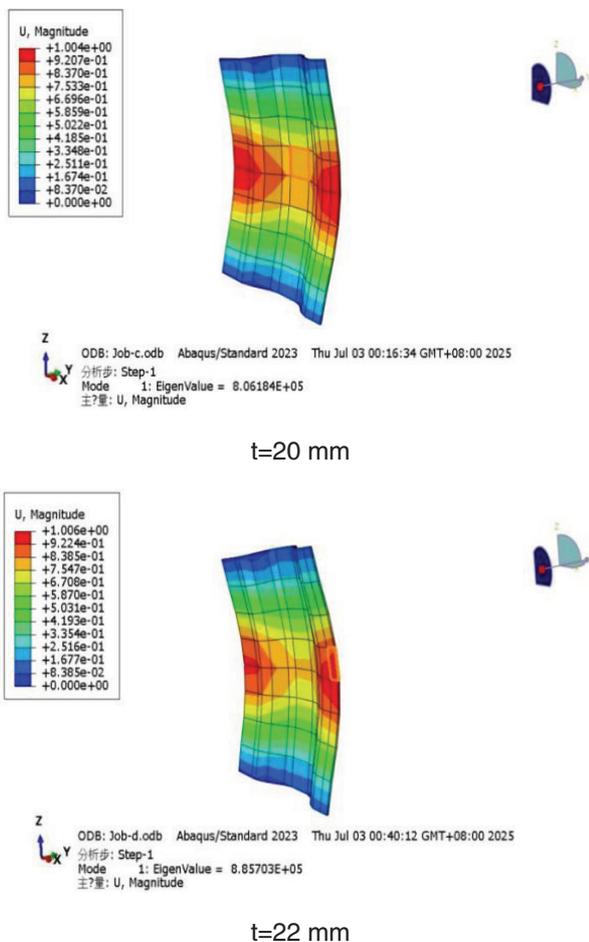


图1 仅改变板厚的波腹板一阶屈曲模态

三、不同板厚特征值屈曲

根据本文波形钢腹板连续箱梁桥腹板厚度尺寸，取7个波段进行计算，总长L=11.2m，波形钢腹板厚度t取16mm、18mm、20mm，波形钢腹板直板段a取430mm、斜板段b取360mm、波高h取220mm、倾角30.7°等参数一致。

图2列出了以上不同板厚模型的特征值屈曲分析结果，模型结果为未考虑初始几何缺陷、材料非线性及几何非线性的一阶屈曲模态。

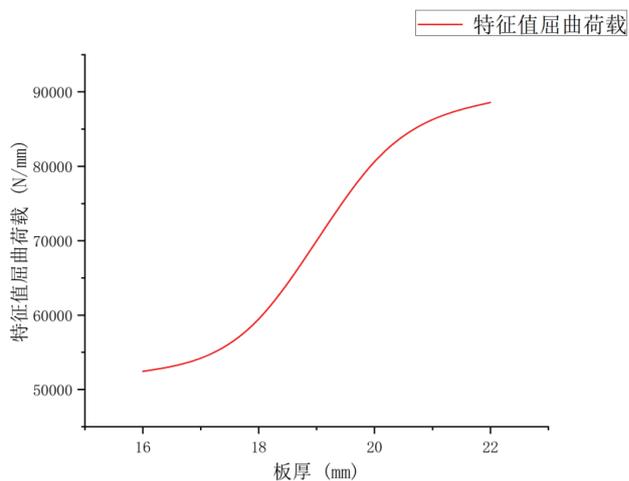


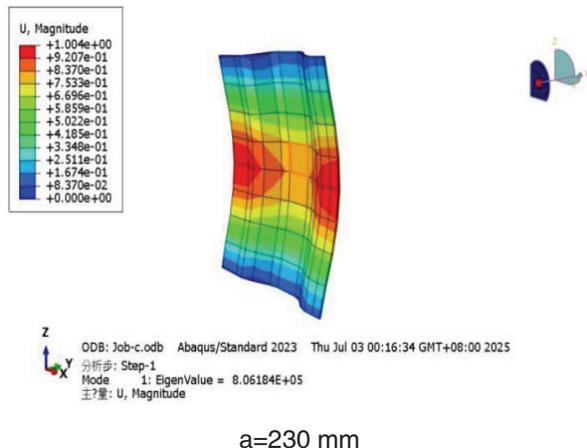
图2 特征值屈曲荷载随板厚变化

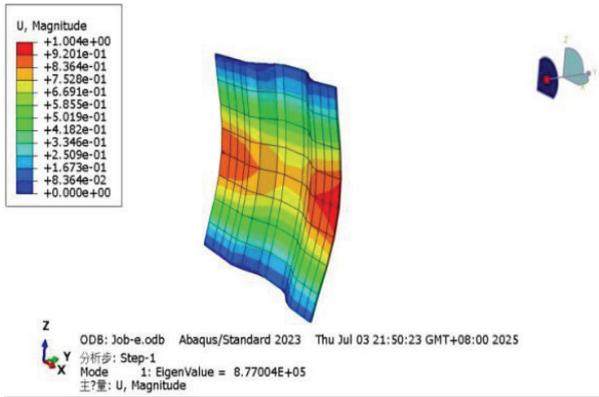
特征值屈曲分析结果，可以发现，随着波形钢腹板板厚的增加，其一阶屈曲模态由上下两侧屈曲发展为只有中部屈曲。当厚度小于18mm时，波形钢腹板在单个板条面外发生上下两侧屈曲；当厚度为18mm至22mm时，波形钢腹板在单个波段内发生板条的面外屈曲，且随着板厚的增加屈曲荷载变大。

四、不同直线段长度特征值屈曲分析

结合背景工程中的波腹板尺寸，并参考其它类似桥梁的波腹板，取直板段长a为230mm、330mm、430mm、530mm和630mm，斜板段b取360mm、波高h取220mm、板厚20mm等参数一致。

由图4的特征值屈曲分析结果可以发现，对于本模型结构，直板段长度a在230mm至330mm之间时，此时直板段宽厚比为11.5至16.5，波腹板的屈曲模态为贯穿





a=330 mm

图3 不同直线段长度特征值屈曲

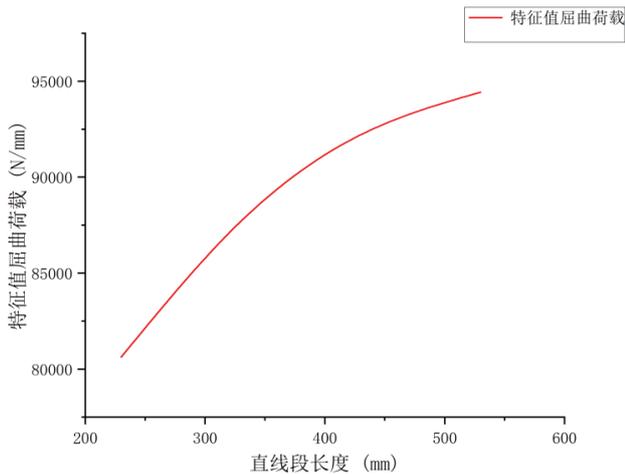


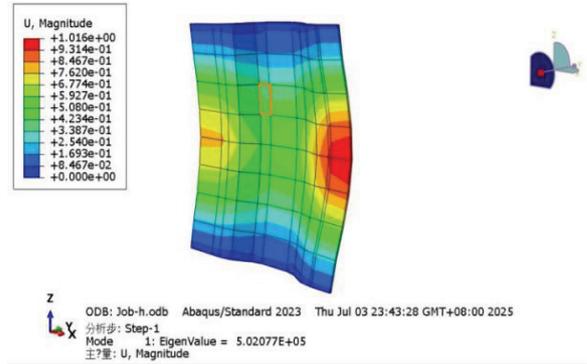
图4 特征值屈曲荷载随直线段长度变化

全部板件的整体屈曲，直板段长度a达到430 mm时，此时直板段宽厚比达到21.5，屈曲强度受直板段长度控制，表现为在直板段板条面外的局部屈曲。直板段长度a达到530 mm时，此时直板段宽厚比达到26.5，表现为在直板段板条面外的局部屈曲，且屈曲位置靠近直线段两侧。随着直线段长度的增加屈曲荷载变大。

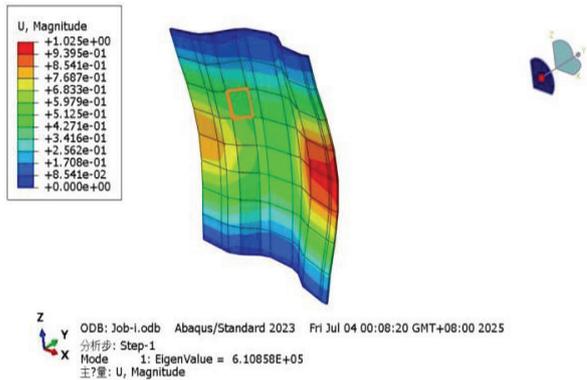
五、不同波高特征值屈曲

根据本文波形钢腹板连续箱梁桥腹板波高尺寸，并参考其它类似桥梁的波高，取波形钢腹板波高h为190 mm、220 mm、250 mm和280 mm，波形钢腹板直板段a取430 mm、斜板段b取303、337、371、404 mm、板厚取20 mm、等参数一致。

由图5可知的特征值屈曲分析结果可以发现，对于本模型结构，由于腹板高度较大，当波高小于220 mm时，其屈曲模态主要受腹板高度控制，斜板屈曲程度较小。随着波形钢腹板波高的增加，其斜板段板条的长度



h=190 mm



h=220 mm

图5 仅改变波高的波腹板一阶屈曲模态

也在增加，当波高大于220 mm时，即斜板段板条的宽厚比增大，其屈曲模态主要受斜板段板条长度控制，最先在斜板段板条平面外发生局部屈曲。而且随着直线段长度的增加屈曲荷载变大。

结论

(1) 对徒骇河特大桥零号块在最大悬臂状态、和最大剪力两种工况下进行建模计算，得到了零号块空间应力分布情况。两种工况下零号块空间应力状态相似，且应力分布情况同样比较相似。

(2) 受横向预应力钢束影响，零号块顶板翼缘出现应力集中现象，且沿纵向其应力大小呈上下交替变化；同时受其影响导致顶板中部比翼缘两侧的横向压应力小，且应力沿中线呈对称分布。受竖向和横向预应力钢束影响，顶板中部出现部分拉应力。

(3) 零号块在两种种最不利工况下，其横隔板部分存在拉应力，尤其人洞上下部分的横向应力以及零号块底板上部存在超出C55混凝土轴心抗拉强度标准值的现象，在设计时，可考虑提高零号块混凝土的标号，采用强度更高的混凝土，或者改变结构尺寸等措施来避免出

现混凝土破坏的现象。

(4) 零号块波形钢腹板下翼缘根部出现拉应力, 同时也出现较大压应力, 最大压应力为 94.6MPa, 但未超出规范要求; 由于波形钢腹板主要承受剪力, 而波形钢腹板剪应力在一个波段范围内呈正负交替变化, 但均远小于波形钢腹板的抗剪容许剪应力, 故波形钢腹板在最大剪力工况下的剪应力也均满足规范要求。

(5) 结合背景工程中波形钢腹板的实际参数, 同时参考了其它桥梁的波腹板参数。根据屈曲模态云图和载荷位移曲线对比分析表明, 适当增大板厚、直线段长度和波高, 可明显提高波形钢腹板的稳定性; 腹板高度过大严重削弱了波形钢腹板的稳定性, 考虑到支座附近腹

板高度大、剪力大, 可通过浇筑混凝土内衬或设置加劲肋来提高波形钢腹板的面外刚度。

参考文献

- [1] 王亚萍. 波形钢腹板组合梁弯扭作用机理研究 [D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2021.
- [2] 刘旭政, 程坤, 吴刚, 等. 大跨波形钢腹板连续箱梁桥有效分布宽度研究 [J]. 公路交通科技, 2022, 39 (2): 85-92.
- [3] 赵品, 荣学亮, 叶见曙. 波形钢腹板组合箱梁横向受力有效分布宽度研究 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2016, 43 (7): 105-110