

文章编号:1673-2049(2018)05-0078-08

波形钢腹板-钢管混凝土翼缘组合梁桥疲劳性能的多尺度有限元分析

王志宇^{1,2}, 张 涛¹, 姜瑞娟³, 董桔灿³, 李晓磊¹, 盖卫明³

(1. 四川大学 建筑与环境学院, 四川 成都 610065; 2. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 3. 深圳市市政设计研究院有限公司, 广东 深圳 518029)

摘要:对波形钢腹板-钢管混凝土翼缘组合梁进行了多点约束界面连接及多尺度有限元建模,通过计算分析和理论公式对比,验证了疲劳寿命预测精度和计算分析效率。采用多尺度模型对波形钢腹板-钢管翼缘连接部位应力特性进行了分析,比较了波形角以及波形转角曲率半径与波形高度比值对连接部位应力特性的影响。结果表明:采用多尺度模型可在不影响疲劳寿命预测精度的前提下,较为有效地提高波形钢腹板-钢管组合梁疲劳分析的计算效率,其计算分析时间比精细化模型可节约 28.9%,而寿命预测相对误差可控制在 2% 以内;对于梁结构建模,采用多尺度模型计算分析时间比精细化模型可节约 40.7%,而寿命预测相对误差可控制在 5% 以内;多尺度模型模拟连接部位主应力分布规律与精细化模型一致,最大主应力值相对误差在 5% 以内;该方法可较好地实现对波形钢腹板与钢管混凝土翼缘连接部位不利应力状态的模拟,可为波形钢腹板-钢管混凝土翼缘组合梁的相关疲劳损伤分析提供参考。

关键词:多尺度模型;波形钢腹板;钢管混凝土;组合梁桥;疲劳性能

中图分类号:TU973.2 **文献标志码:**A

Multi-scale Finite Element Analysis of Fatigue Property Composite Girder Bridges with Corrugated Steel Webs and Concrete Filled Steel Tubes

WANG Zhi-yu^{1,2}, ZHANG Tao¹, JIANG Rui-juan³, DONG Ju-can³, LI Xiao-lei¹, GAI Wei-ming³

(1. College of Architecture & Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China;
2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology,
Dalian 116024, Liaoning, China; 3. Shenzhen Municipal Design & Research
Institute Co., Ltd., Shenzhen 518029, Guangdong, China)

Abstract: The finite element models were developed for composite girders with corrugated steel webs and concrete filled steel tubes using multipoint constraint and multi-scale modeling. The prediction accuracy and calculation efficiency of adopted finite element models were verified through a comparison with theoretical formulas. Based on the multi-scale model, the stress characteristics of connecting parts joining the corrugated steel webs and the concrete filled steel tubes were analyzed. A comparison was made for the prediction results influenced by the corrugation angle and the ratio of corrugation bending radius to corrugation height. The results show that the use of multi-scale model can effectively promote the calculation efficiency without

收稿日期:2018-07-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51308363);海岸和近海工程国家重点实验室开放基金项目(LP1822)

作者简介:王志宇(1980-),男,四川成都人,四川大学副教授,工学博士,E-mail:zywang@scu.edu.cn。

affecting precision of fatigue life prediction as a precondition. 28.9% less calculation time and 2% prediction relative error can be achieved in multi-scale model with respect to refined model. For macro girder model, 40.7% less calculation time and 5% prediction relative error can be attained in multi-scale model. The adverse stress condition of connecting parts between the corrugated steel webs and the concrete filled steel tubes can be simulated accordingly. The resultant maximum principal stress relative error is within 5%, and the method can simulate adverse stress behavior of connecting part between corrugated webs and concrete filled steel tubes. Thus, the analytical results can be taken as a reference for damages of composite girder bridges with corrugated steel webs and concrete filled steel tubes.

Key words: multi-scale model; corrugated web; concrete filled steel tube; composite girder fatigue property

0 引言

波形钢腹板具有较好的抗剪强度和稳定性、低压缩刚度等特点,可实现减轻自重和提高预应力效率^[1]。中国自2005年引入这种结构以来,在波形钢腹板桥梁建设中得到了广泛应用^[2],桥梁跨径逐渐增加,其中最大跨径超过100 m的工程案例也越来越多涌现。在工程实践中,传统波形钢腹板组合箱梁的混凝土翼缘板在正弯矩作用下容易过早开裂^[3-4],从而降低了结构承载力、刚度及整体性,影响结构耐久性,也限制了波形钢腹板的优点进一步发挥。钢管混凝土充分发挥了钢与混凝土的力学性能优点,作为梁翼缘可在负弯矩区受力时避免侧扭失稳,亦可在正弯矩区受力时提高弯曲刚度,与波形钢腹板结合可更有效提高稳定性,避免混凝土翼缘板开裂,这种结构形式已应用于法国Maupre桥。

随着波形钢腹板-钢管混凝土翼缘组合梁桥跨度提高,交通量日渐增大,疲劳设计和疲劳寿命预测也成为了组合结构在桥梁设计和安全评估中的关键技术之一^[1]。调查表明结构局部细节部位的细观缺陷、损伤演化和积累是桥梁疲劳失效的主要原因。结构疲劳分析主要可通过有限元数值模拟和模型试验实现。有限元方法以线性疲劳累积损伤理论和线弹性断裂力学理论为基础,通常采用三维实体单元能较好预测结构的疲劳寿命和裂纹扩展,但较大结构模型分析往往存在计算量大、耗时长的问题。为更好优化分析,早期国内外学者主要对子模型法进行研究,探讨了边界条件及其精确度的实现^[5-8],随后多尺度有限元模型在桥梁损伤力学分析中被较多关注。这种方法将精细化尺度模型嵌入到大尺度模型中去,可在同一模型中实现整体结构分析和局部构件分析同步开展,一次计算获得多种分析结果,提

高了计算效率,达到计算精度,已成为目前研究热点问题。李兆霞等^[9]以香港青马大桥和江苏润扬长江大桥为依托,进行了结构健康监测和状态评估,实现了从局部损伤劣化、结构多尺度和时空多尺度方面的分析。还有相关研究将这种方法与损伤评价相结合以评定模拟大型结构健康监测和损伤^[10];采用Arlequin方法模拟桥钢桁加劲梁、节点板等局部与整体耦合区域,提高模拟效率等^[11-12]。

本文采用有限元软件对波形钢腹板-钢管混凝土翼缘组合梁进行多尺度建模,利用参照点来约束耦合面上的耦合以实现不同尺度模型之间的变形协调,并进而实现多尺度应力场分析,实现局部精细模型和整体结构模型相结合。通过对局部模型试验结果验证,对局部模型进行了修正。分析结果表明,采用多尺度有限元分析可较好地应用于这种结构的疲劳分析中,能提高计算效率和模拟精度。该方法有效地模拟局部精细单元的应力集中,并进而进行基于断裂力学的寿命分析,为波形钢腹板-钢管混凝土翼缘组合梁的抗疲劳设计提供依据。

1 工程背景

深圳马峦山公园1号桥(图1)地处深圳市大陂-矿山水库南侧水源保护区内,为设计车速80 km·h⁻¹、车辆荷载城-A级、设计基准期100年、安全等级一级的城市快速路配套工程。为了避免现浇混凝土施工期间对场地环境的不利影响,采用波形钢腹板-钢管组合梁新型结构,波形钢腹板-钢管组合梁新型结构由混凝土顶板、下弦钢管和波形钢腹板连接组成。该桥由深圳市市政设计研究院有限公司独立设计,分为左、右两幅,左幅为45 m简支梁,右幅为3×45 m连续梁。每幅箱梁均为双箱单室断面,单幅桥面宽度20 m=2 m(检修道及栏杆)+

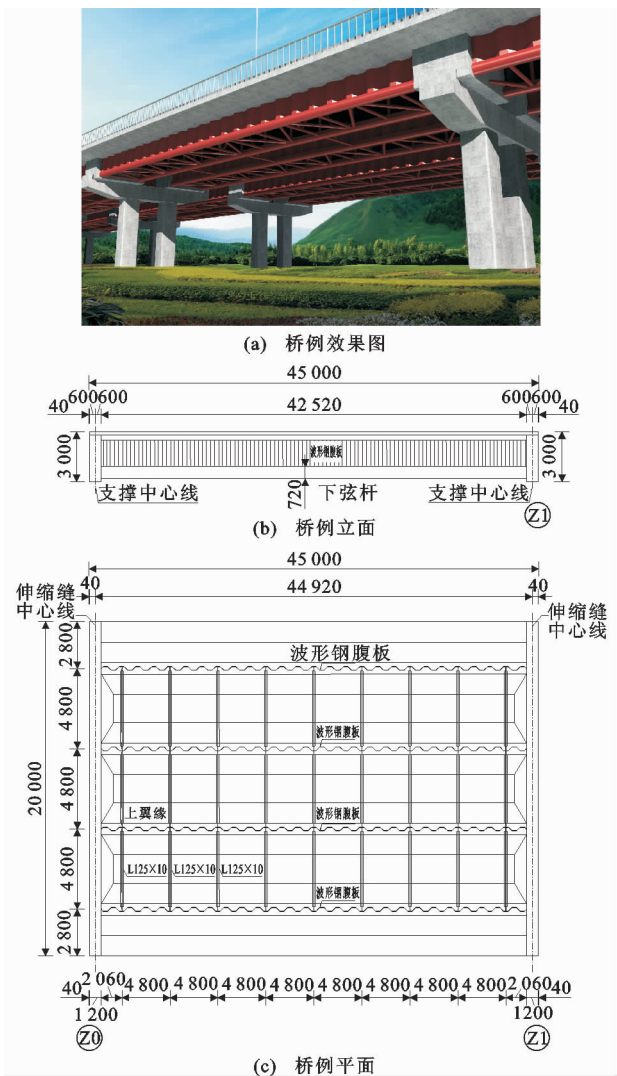


图 1 深圳马峦山公园 1 号桥(单位:mm)
Fig. 1 Shenzhen Maluan Mountain Park No. 1 Bridge (Unit:mm)

16 m(行车道)+2 m(检修道及栏杆),跨中处梁高 2.8 m,横梁处梁高 3 m;底缘采用 720×20 mm 钢管混凝土;腹板采用 1600 型波形钢腹板,钢材为 Q345qC;支点处设置混凝土横梁,梁宽 1.2 m。深圳马峦山公园 1 号桥均采用波形钢腹板,钢材采用 Q345qC,板厚为 12~24 mm。

2 结构多尺度模型构建

2.1 计算方法

结构多尺度分析计算的主要思路是合理选取一定代表性单元,通过不同尺度的界面连接,实现对实桥整体和局部结构同步分析。将该计算方法应用于依托工程的分析流程如图 2 所示。在计算分析时,根据对工程桥梁缩比试验和数值分析,按宏观尺度建立模型进行全桥线弹性分析,获取整体结构的基

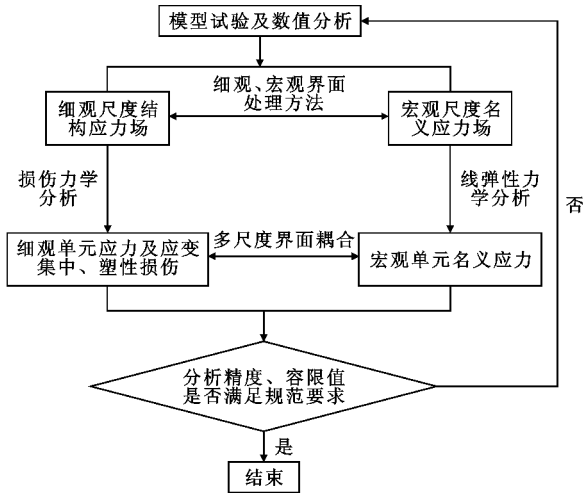


图 2 结构多尺度分析流程

Fig. 2 Flow of Structural Multi-scale Analysis

本受力行为,以及波形钢腹板、钢管混凝土翼缘及其连接部位的应力分布规律,提取对疲劳受力较为不利的组件及连接部位。针对这些可能存在塑性发展和损伤的部位进行细部分析,通过小尺度单元构建结构组件及细部有限元模型以反映疲劳裂纹和损伤的可能扩展路径、应力分布方式等。通过损伤力学分析,获得相关应力集中模式、塑性及损伤发展规律等。为实现不同尺度单元联系,建立协调条件或平衡方程,使不同自由度的单元之间能有跨尺度边界条件相连,包含一套细观、宏观界面处理方法,以及多尺度截面耦合方法,从而使有限元分析时既能获得整体模型在名义应力下的基本受力特征,还可以对易损部位进行精细化分析,考虑损伤演化对整体结构的影响,能对相关影响几何和构造参数进行充分考虑。

2.2 界面连接

多尺度模型构建中不同单元之间界面连接是分析的关键。要点在于宏观与细观界面处不同单元节点自由度能保持变形协调。本文分析中采用细观尺度模型离散为体单元,宏观尺度模型离散为壳单元,这 2 种约束之间采用多点约束,如图 3 所示。这种约束是一种节点自由度的耦合关系,即以节点的某几个自由度为标准值,然后令其他指定节点的某几个自由度与这个标准值建立某种关系。多点约束用于表征刚性连接,也可用于不相容单元间的荷载传递,是一项重要的有限元建模技术。

壳体与实体单元连接通过多点约束时,必须激活剩余约束,并假设界面连接处壳体节点位移等于实体厚度上所对应节点位移,壳体节点转动与实体沿厚度方向所对应的节点转动相协调。对于壳体节

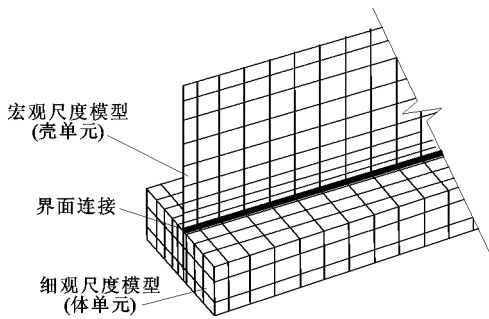


图3 多尺度模型界面连接

Fig. 3 Multi-scale Model Interface Connection

点位移约束,可表示为壳体节点位移 δ_s 等于实体内节点位移 δ_c 加权值,即

$$\delta_s = \sum_{i=1}^m w_i \delta_{ic} \quad (1)$$

式中: w_i 为与多点约束类型相关的权重值。

对于壳体节点的转动约束,可假设实体相交部位的节点在同一直线上, N, n 与 a 关系可表示为

$$e^a N = n \quad (2)$$

式中: \tilde{a} 为转动向量 a 的反对称矩阵; N 为线上节点不变形面的法向量; n 为变形面的法向量。

若以上约束方程还不能完全定义壳体节点转动,还可再增加一个沿实体边线的转动量,线性转动约束形式可表示为

$$nd\theta = dn \quad (3)$$

式中: $d\theta$ 为线性转动量。

若将与 n 垂直方向定义为纵向、横向分别为 s 和 t 的局部坐标系,则将式(3)投影到该局部坐标系上可表示为

$$\left. \begin{aligned} td\theta &= sdn \\ sd\theta &= -tdn \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

可得到法向方向上最大位移 δ_n 和最小位移 δ_1 差值满足

$$dn = \frac{1}{n(\delta_n - \delta_1)} (1 - nm) d(\delta_n - \delta_1) \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)可得

$$\left. \begin{aligned} td\theta &= \frac{1}{n(\delta_n - \delta_1)} sd(\delta_n - \delta_1) \\ sd\theta &= \frac{1}{n(\delta_n - \delta_1)} td(\delta_n - \delta_1) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

将局部三维向量 $d\theta$ 表达式进行转换,可得出针对总体向量 $d\theta$ 的约束方程为

$$\left. \begin{aligned} t_i d\theta_i + t_j d\theta_j + t_k d\theta_k &= \frac{1}{n(\delta_n - \delta_1)} sd(\delta_n - \delta_1) \\ s_i d\theta_i + s_j d\theta_j + s_k d\theta_k &= \frac{1}{n(\delta_n - \delta_1)} td(\delta_n - \delta_1) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中:下标 i, j, k 分别为线性转动量对应于局部坐标系 x, y, z 的3个分量。

若以 $d\theta_k$ 为变量求解方程式(7),可得

$$\left. \begin{aligned} d\theta_i &= \frac{n_i}{n_k} d\theta_k - \frac{1}{n(\delta_n - \delta_1) n_k} [s_j d(\delta_n - \delta_1) s + t_j d(\delta_n - \delta_1) t] \\ d\theta_j &= \frac{n_j}{n_k} d\theta_k + \frac{1}{n(\delta_n - \delta_1) n_k} [s_i d(\delta_n - \delta_1) s + t_i d(\delta_n - \delta_1) t] \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

通过以上方程式(8)可描述壳体与实体单元之间的变形协调,便于在几何线性分析中对线性方程进行定义。

3 有限元模拟

3.1 模型信息介绍

波形钢腹板及其连接焊缝在波形的平直段与倾斜段过渡段部位的应力集中往往成为波形钢腹板梁受弯下疲劳失效的主要因素,王志宇等^[13]提出以波形钢板焊接连接件拉伸疲劳试验的方法为评价波形钢腹板梁的疲劳寿命提供了关键参考。试验应力数据可分解为多个与波形特征相关的应力集中系数,建立几何效应与应力特征关系,通过断裂力学方法对结果进行处理,便可得到波形钢腹板梁的疲劳寿命及其影响参数。由此本文有限元模型研究主要针对波形的平直段与倾斜段过渡段部位建立宏观模型、精细化模型、多尺度模型。

采用本模型分析时按以下假设^[14]:波形钢腹板的抗弯能力可忽略;钢管与混凝土不存在相对滑移,可被视为共同工作。参考相关波形钢腹板设计规范^[15]和钢结构设计规范^[16],对依托工程主梁的中跨段进行缩比,纵向跨度取为 3.058 m,钢管截面尺寸为 150 mm × 100 mm × 5 mm,上、下翼缘均由波形钢腹板与钢管混凝土焊接而成。所选混凝土等级为 C50,从受力情况推估正弯矩下钢管内混凝土受拉对梁弯曲承载力贡献较小,但对翼缘刚度提高较为有利。波形钢腹板高度 h_w 取值为 400 mm。作为基准参数,波形角 $\theta_c = 37.5^\circ$,波形平直段长度 b_1 与倾斜段长度 b_t 均为 140 mm,可换算波形高度 $h_r = 104$ mm,腹板厚 $t_w = 3$ mm,波形钢板高厚比 h_w/t_w 取值为 133.33,单位波长波形水平投影长为 q ,如图4所示。波形转角曲率半径 R_t 取值为 $0.25h_r = 26.08$ mm, $0.75h_r = 78.26$ mm。试件钢材为 Q345,弹性模量取为 2.06×10^5 MPa,泊松比为 0.3。

采用有限元程序 ANSYS 建立波形钢腹板-钢

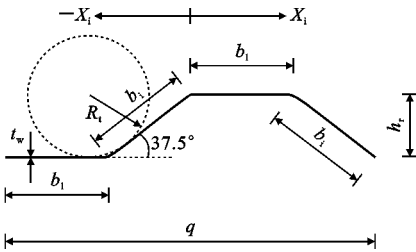


图 4 波形示意图

Fig. 4 Illustration of Corrugation

管组合梁的三维计算模型,如图 5 所示。针对宏观模型和精细化模型,钢管翼缘、波形钢板及连接角焊缝分别采用 Shell63 壳单元和 Solid95 实体单元模拟,填充混凝土采用 Solid65 实体单元模拟,在正弯矩最大区域的应力集中显著区域采用较细密度的网格,而较远区域采用相对较粗的网格密度以减小有限元运算量。

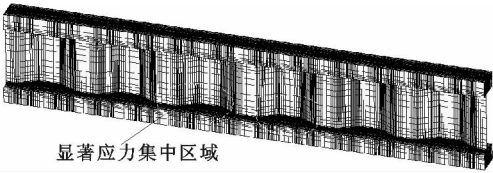


图 5 波形钢腹板梁结构整体建模及网格

Fig. 5 Overall Model and Mesh of Corrugated Steel Web Beams

对于波形钢腹板-钢管翼缘焊接连接细节模型,分别采用壳体和实体单元对 1/2 单位波长的波形钢板焊接连接件进行有限元建模及网格划分^[14],如图 6 所示。在模型分析中,考虑正弯矩作用在钢管翼缘上产生等效拉应力 q_t ,而不考虑混凝土抗拉贡献。

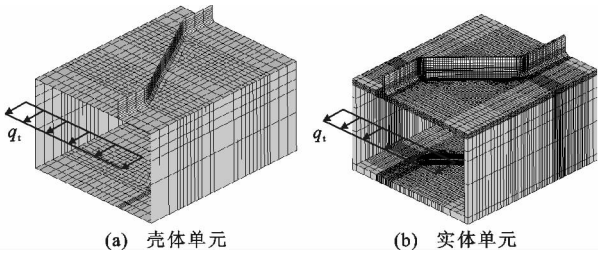


图 6 腹板-翼缘连接细节网格划分

Fig. 6 Mesh of Connecting Part of Corrugated Steel Web

对于组合梁的多尺度建模,首先通过宏观模型分析对应应力集中显著区域进行识别,然后对该区域建立精细化波形钢腹板-钢管翼缘焊接连接细节模型。为实现精细化模型与宏观模型之间截面有效连接,保持两者在连接界面上具有相同运动协调性,采用多点约束实现壳单元和实体单元界面可靠连接,如图 7,8 所示。实体单元边界上节点满足如下

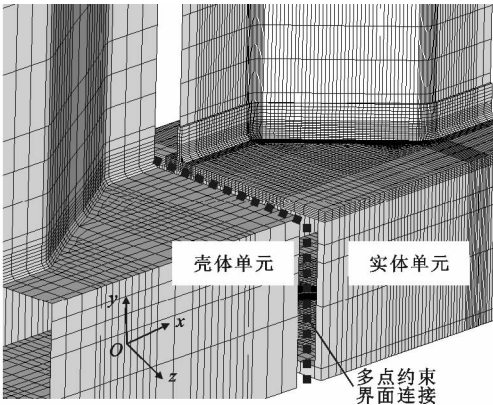


图 7 多尺度梁模型细节

Fig. 7 Details of Multi-scale Beam Model

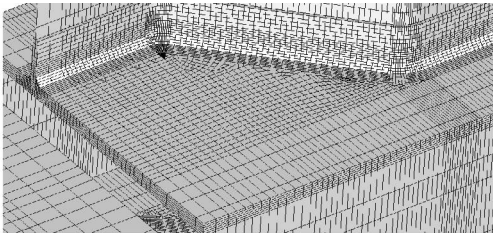


图 8 波形钢板连接部位网格

Fig. 8 Mesh of Connecting Part of Corrugated Steel Web 规律

$$\begin{aligned} [\delta_{xk,i}, \delta_{yk,i}, \delta_{zk,i}]' &= [\delta_{xt,i}, \delta_{yt,i}, \delta_{zt,i}]' \\ i &= 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} [\theta_{xk,i}, \theta_{yk,i}, \theta_{zk,i}]' &= [\theta_{xt,i}, \theta_{yt,i}, \theta_{zt,i}]' \\ i &= 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (10)$$

式中: $\delta_{xk,i}, \delta_{yk,i}, \delta_{zk,i}$ 分别为壳体在约束面上 x, y, z 方向的位移; $\theta_{xk,i}, \theta_{yk,i}, \theta_{zk,i}$ 分别为壳体在约束面上 x, y, z 方向的转动量; $\delta_{xt,i}, \delta_{yt,i}, \delta_{zt,i}$ 分别为体单元在约束面上 x, y, z 方向的位移; $\theta_{xt,i}, \theta_{yt,i}, \theta_{zt,i}$ 分别为体单元在约束面上 x, y, z 方向的转动量。

3.2 疲劳寿命分析

局部应力达到破坏水平则认为结构出现了疲劳破坏,其寿命为循环周次为 N_0 。疲劳寿命使用系数的定义为有限循环周次 N 与破坏周次的比值,即 N/N_0 。有限元计算步骤如下:根据静力应力云图的分布得出结构应力集中部位的最大(最不利)应力,列出危险部位相邻区域 20 个相关对象节点号,并分别对其节点应力数据进行提取;设置事件重复次数并与疲劳寿命使用次数项对应,通过循环判断是否达到结构疲劳寿命;对照所定义的应力-循环周次(S-N)曲线获得所有对象节点的疲劳寿命,比较得出最不利疲劳寿命使用系数,并换算得出该部位疲劳寿命。应力幅 ΔS 为 135 MPa 和 165 MPa 时

由壳体单元定义的宏观模型、由实体单元定义的细观模型和多尺度模型计算得出的疲劳寿命值见表 1。由文献已有的疲劳寿命数据,可通过回归方法得到 $S-N$ 关系式为: $\lg(N)=12.68-3\lg(\Delta S)^{[13]}$ 。按此经验公式换算得出应力幅为 135 MPa 和 165 MPa 所对应的寿命分别为 1 945 354,106 548 7。对于腹板-翼缘连接细节建模,采用壳体单元模型、实体单元模型和多尺度模型的有限元预测寿命与经验公式预测寿命比值分别为 1.23,0.94,0.96($\Delta S=135$ MPa),以及 1.23,0.94,0.96($\Delta S=165$ MPa)。对于梁结构建模,采用壳体单元模型、实体单元模型和多尺度模型的有限元预测寿命与经验公式预测寿命比值分别为 1.32、1.03 和 1.08($\Delta S=135$ MPa),以及 1.35,1.1,1.12($\Delta S=165$ MPa)。由此可见,采用壳体单元模型的预测值与理论疲劳寿命预测值差别最大,而采用实体单元模型和多尺度模型的疲劳寿命预测值较为接近。

表 1 不同模型计算寿命对比

模型类别	寿命周次			$\Delta S/\text{MPa}$
	宏观模型 (壳体单元)	细观模型 (实体单元)	多尺度 模型	
腹板-翼缘连接 细节建模	2 393 521	1 831 425	1 869 543	135
	1 332 132	970 542	980 542	165
梁结构建模	2 567 867	2 003 714	2 100 982	135
	1 438 407	1 172 035	1 204 000	165

表 2 为不同模型的计算分析时间对比,可见:对于波形钢腹板-翼缘连接细节建模,采用多尺度模型的平均计算分析时间比细观模型节约 28.9%;对于梁结构建模,采用多尺度模型的平均计算分析时间比细观模型节约 40.7%。因此,多尺度模型不仅能较准确对腹板-翼缘连接细节和梁结构疲劳寿命进行预测,还能兼顾计算分析的效率。

表 2 不同模型计算分析时间对比

模型类别	平均计算时间/s			节时比例/%
	宏观模型 (壳体单元)	细观模型 (实体单元)	多尺度 模型	
腹板-翼缘连接 细节建模	87	385	274	28.9
梁结构建模	723	3 892	2 311	40.7

4 波形钢腹板-钢管翼缘连接部位应力场特性分析

本文所参考常见的疲劳破坏模式发生于波形钢

腹板-钢管翼缘连接部位,裂纹萌生位于近波形钢腹板倾斜段终点部位的焊趾处,几乎与母材板面的拉应力方向垂直^[13],如图 9 所示。波形钢腹板梁在弯矩作用下钢管翼缘上疲劳裂纹垂直于等效受拉应力,经扩展、聚合、再扩展,逐渐由小裂纹发展为统一的断口。对单位波长波形范围内,沿波形板焊趾连接失效部位的主应力进行提取,对比分析波形角 $\theta_c=30^\circ,45^\circ$ 时局部应力集中特性,如图 10,11 所示。为方便对比,对连接部位处的钢管翼缘均施加 100 MPa 的名义应力,应力集中系数为路径分布最大应力值与名义应力 100 MPa 的比值。

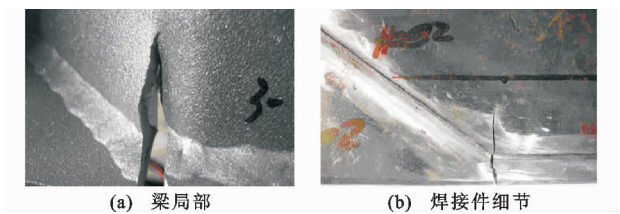


图 9 波形钢板连接部位典型疲劳破坏

Fig. 9 Typical Failure of Connecting Part of Corrugated Steel

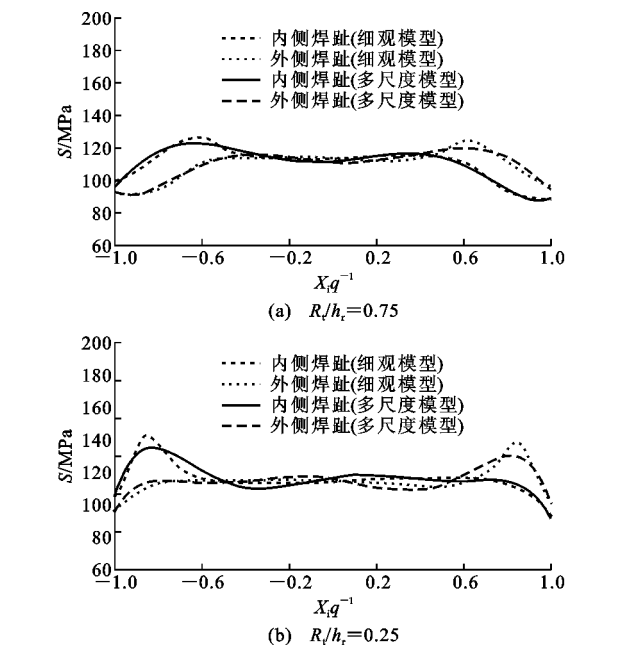


图 10 单位波长范围内梁翼缘主应力分布($\theta_c=30^\circ$)

Fig. 10 Principle Stress Distribution of Fatigue Failure Related Beam Flange Within Range of a Unit Wave Length ($\theta_c=30^\circ$)

从总的趋势看,主应力沿内侧焊趾和外侧焊趾的应力分布情况呈对称分布,最大值均出现在波形钢板倾斜段终点处,介于平直段与倾斜段的过渡段部位,与试验中所观察的疲劳破坏部位一致。对比图 10,11 中细观模拟结果可知:随着波形转角曲率

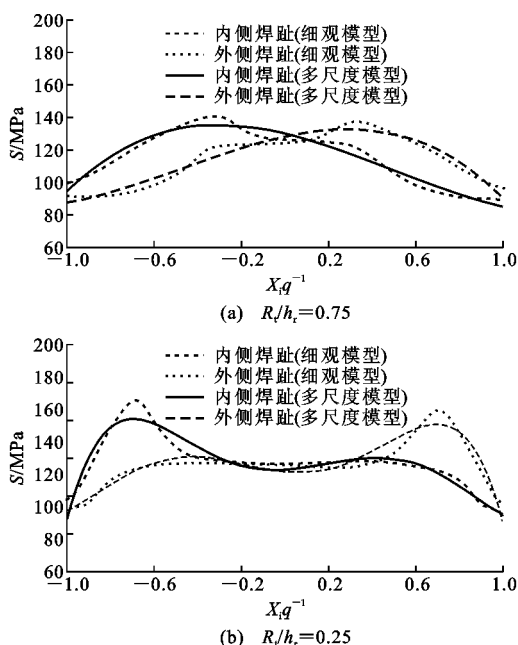


图 11 单位波长范围内翼梁缘主应力分布 ($\theta_c = 45^\circ$)

Fig. 11 Principle Stress Distribution of Fatigue Failure
Related Beam Flange Within Range of a Unit
Wave Length ($\theta_c = 45^\circ$)

半径与波形高度比值 R_t/h_r 由 0.75 降低至 0.25, 波形钢板焊接连接的应力集中系数提高到 1.13 倍左右, 分别由 1.27 提高到 1.44 ($\theta_c = 30^\circ$) 和 1.40 提高到 1.65 ($\theta_c = 45^\circ$); 随着 θ_c 由 30° 提高到 45° , 波形钢板焊接连接的应力集中系数增大幅度约为 4%, 分别由 1.27 提高到 1.40 ($R_t/h_r = 0.75$) 和 1.44 提高到 1.65 ($R_t/h_r = 0.25$)。从最大应力分布看: 多尺度模拟结果相比细观模拟结果稍微偏小, 当 $\theta_c = 30^\circ$ 时, 多尺度模拟应力结果低估约 2%; 当 $\theta_c = 45^\circ$ 时, 多尺度模拟应力结果低估约 5%。多尺度模拟主应力分布总趋势与细观模拟结果非常接近, 可较为准确地模拟最大(最不利)应力情况, 由此可为直观有效把握局部疲劳损伤演变和裂纹开展过程等提供有效参考。

5 结 语

(1) 通过对深圳马峦山公园 1 号桥波形钢腹板-钢管混凝土翼缘组合梁的疲劳性能分析, 分别针对波形钢腹板-翼缘连接细节和梁结构建立了细观和宏观分析模型, 对多点约束界面连接及多尺度模型构建过程进行了分析和探讨, 结合有限元分析对其疲劳寿命预测精度和计算分析效率进行了对比。结果表明: 对于波形钢腹板-翼缘连接细节建模, 采用多尺度模型计算分析时间比精细化模型可节约

28.9%, 而寿命预测相对误差可控制在 2% 以内; 对于梁结构建模, 采用多尺度模型计算分析时间比精细化模型可节约 40.7%, 而寿命预测相对误差可控制在 5% 以内。在不影响疲劳寿命预测精度的前提下, 采用多尺度有限元模型可较为有效地提高计算分析效率。

(2) 结合多尺度模型对波形钢腹板-钢管翼缘连接部位应力特性进行了研究, 对比了波形角以及波形转角曲率半径与波形高度比值对模拟结果的影响。结果表明, 随着波形转角曲率半径与波形高度比值由 0.75 降低至 0.25, 波形钢板焊接连接的应力集中系数提高到 1.13 倍左右; 随着波形角由 30° 提高到 45° , 波形钢板焊接连接的应力集中系数增大幅度约为 4%; 多尺度模型模拟连接部位主应力分布规律与精细化模型一致, 最大主应力值相对误差在 5% 以内, 因此多尺度模型可较为有效地为波形钢腹板-钢管混凝土翼缘组合梁的疲劳损伤分析提供参考。

参考文献:

References:

- [1] 王志宇, 王清远, 陈宜言, 等. 波形钢腹板梁疲劳特性的研究进展[J]. 公路交通科技, 2010, 27(6): 64-71.
WANG Zhi-yu, WANG Qing-yuan, CHEN Yi-yan, et al. Research Progress of Fatigue Behavior of Corrugated Web Girders [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(6): 64-71.
- [2] 陈宝春, 陈宜言, 林松. 波形钢腹板桥梁应用调查分析[J]. 中外公路, 2010, 30(1): 109-118.
CHEN Bao-chun, CHEN Yi-yan, LIN Song. Application Survey of Bridges with Corrugated Steel Webs [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2010, 30(1): 109-118.
- [3] 聂建国, 陶慕轩, 吴丽丽, 等. 钢-混凝土组合结构桥梁研究新进展[J]. 土木工程学报, 2012, 45(6): 110-122.
NIE Jian-guo, TAO Mu-xuan, WU Li-li, et al. Advances of Research on Steel-concrete Composite Bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(6): 110-122.
- [4] 李立峰, 任虹昌, 周聪, 等. 大跨变截面波形钢腹板箱梁横向受力分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(3): 112-118.
LI Li-feng, REN Hong-chang, ZHOU Cong, et al. Analysis on Transverse Force of Large Span Variable Cross-section Box Girder with Corrugated Steel Webs

- [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(3): 112-118.
- [5] 肖 祥,鄢 宇,何 佳,等. 大跨度斜拉桥多尺度有限元模型及其修正[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2017, 45(6): 120-127.
- XIAO Xiang, YAN Yu, HE Jia, et al. Multi-scale Finite Element Modeling and Model Updating of Long Span Cable-stayed Bridge[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2017, 45(6): 120-127.
- [6] 李兆霞. 大型土木结构多尺度损伤预后的现状、研究思路与前景[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2013, 43(5): 1111-1121.
- LI Zhao-xia. State of the Art in Multi-scale Damage Prognosis for Major Infrastructures[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2013, 43(5): 1111-1121.
- [7] 李爱群,王 浩. 子模型法在超大跨悬索桥钢箱梁应力分析中的应用[J]. 工程力学, 2007, 24(2): 80-84.
- LI Ai-qun, WANG Hao. Stress Analysis on Steel Box Girders of Super-long-span Suspension Bridges with Submodel Method[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(2): 80-84.
- [8] SUN B, WANG X, LI Z X. Meso-scale Image-based Modeling of Reinforced Concrete and Adaptive Multi-scale Analyses on Damage Evolution in Concrete Structures [J]. Computational Materials Science, 2015, 110: 39-53.
- [9] 李兆霞,李爱群,陈鸿天,等. 大跨桥梁结构以健康监测和状态评估为目标的有限元模拟[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2003, 33(5): 562-572.
- LI Zhao-xia, LI ai-qun, CHEN Hong-tian, et al. Finite Element Modeling for Health Monitoring and Condition Assessment of Long-span Bridges[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2003, 33(5): 562-572.
- [10] DUAN Y F, XU Y L, FEI Q G, et al. Advanced Finite Element Model of Tsing Ma Bridge for Structural Health Monitoring[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2011, 11(2): 313-344.
- [11] FORABOSCHI P. Predictive Multiscale Model of Delayed Debonding for Concrete Members with Adhesively Bonded External Reinforcement[J]. Composites Mechanics, 2012, 3(4): 307-329.
- [12] 王会利,殷洪建,秦泗凤. 基于多尺度有限元的钢桁架整体节点疲劳性能分析和试验研究[J]. 世界桥梁, 2016, 44(6): 46-49.
- WANG Hui-li, YIN Hong-jian, QIN Si-feng. Analysis of Fatigue Performance of Steel Truss Girder Integral Panel Points Based on Multi-scale Finite Element and Experimental Study[J]. World Bridges, 2016, 44(6): 46-49.
- [13] 王志宇,王清远. 波形钢板焊接连接件的疲劳试验研究及寿命评价[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(9): 133-142.
- WANG Zhi-yu, WANG Qing-yuan. Fatigue Experimental Research and Life Assessment on Welded Joints with Corrugated Steel Plates [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(9): 133-142.
- [14] WANG Z Y, WANG Q Y. Fatigue Assessment of Welds Joining Corrugated Steel Webs to Flange Plates [J]. Engineering Structures, 2014, 73: 1-12.
- [15] JT/T 784—2010, 组合结构桥梁用波形钢腹板[S]. JT/T 784—2010, Corrugated Steel Webs in Composite Structure Bridge[S].
- [16] BS EN 1993-1-9:2005, Eurocode 3: Design of Steel Structures — Part 1-9: Fatigue[S].