

文章编号:1671-1637(2026)05-0166-13

# 基于ICVGM模型的部分填充钢管混凝土桥墩的 超低周疲劳性能及分析方法

余倩倩,张睿杰,李博,徐艳\*

(同济大学土木工程防灾减灾全国重点实验室,上海 200092)

**摘要:**为建立部分填充钢管混凝土(PCFST)桥墩超低周疲劳开裂的计算方法并研究其超低周疲劳性能,基于改进后的循环空穴扩张模型(ICVGM),开发了经试验验证的预测超低周疲劳开裂的用户子程序;通过子程序针对9个PCFST桥墩展开了高精度实体单元模拟和计算分析,研究了水平往复荷载作用下钢管混凝土桥墩的关键设计参数如混凝土填充率、长细比、径厚比和轴压比等对超低周疲劳损伤指标的影响,并结合模型的滞回性能研究了PCFST桥墩的超低周疲劳破坏与局部失稳破坏之间的关系。研究表明:PCFST桥墩的超低周疲劳破坏普遍出现在局部失稳破坏之后,但由于不同设计参数会显著影响PCFST桥墩的延性,而局部屈曲变形会使变形位置产生更明显的应力集中,从而加快超低周疲劳破坏的出现;随着长细比、径厚比和轴压比的提高,桥墩模型在屈曲极限状态时的疲劳损伤指标降低,超低周疲劳问题不显著;随着混凝土填充率提高,桥墩模型在屈曲极限状态时的疲劳损伤指标升高,超低周疲劳问题更显著;径厚比和轴压比是影响超低周疲劳开裂的2个关键参数,且延性表现良好的PCFST桥墩更容易在局部失稳破坏发生前出现超低周疲劳破坏。所建立的有限元模型及ICVGM模型子程序可为PCFST桥墩提供超低周疲劳性能的定量评价方式。

**关键词:**桥梁工程;钢-混凝土组合桥梁;ICVGM;超低周疲劳性能;PCFST桥墩;滞回性能;局部失稳  
**中图分类号:**U443.22 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.096

## Ultra-low-cycle fatigue performance and its analysis method for partially concrete-filled steel tube pier based on ICVGM

YU Qian-qian, ZHANG Rui-jie, LI Bo, XU Yan\*

(State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** To establish a calculation method for ultra-low-cycle fatigue (ULCF) cracking of partially concrete-filled steel tube (PCFST) piers and study their ultra-low-cycle fatigue performance, an experimentally validated prediction subroutine was developed for ULCF cracking based on an improved cyclic void growth model (ICVGM). Using this subroutine, high-precision solid element simulations and computational analyses were conducted on nine PCFST piers. The influences of key

出版历程:2024-12-16 收稿,2025-09-24 修回,2025-11-27 录用

基金项目:国家重点研发计划(2022YFC3803000);国家优秀青年科学基金(52222803)

作者简介:余倩倩(1987-),女,浙江舟山人,教授,博士生导师,工学博士,E-mail:qianqian.yu@tongji.edu.cn。

\*通信作者:徐艳(1976-),女,浙江杭州人,教授,博士生导师,工学博士,E-mail:yanxu@tongji.edu.cn。

引用格式:余倩倩,张睿杰,李博,等.基于ICVGM模型的部分填充钢管混凝土桥墩的超低周疲劳性能及分析方法[J].交通运输工程学报,2026,26(5):166-178.

**Citation:** YU Qian-qian, ZHANG Rui-jie, LI Bo, et al. Ultra-low-cycle fatigue performance and its analysis method for partially concrete-filled steel tube pier based on ICVGM[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(5): 166-178.

design parameters, such as concrete filling ratio, slenderness ratio, diameter-to-thickness ratio, and axial compression ratio, on ULCF damage indicators under horizontal reciprocating loads were investigated. Additionally, the relationship between ULCF failure and local buckling failure in PCFST piers was examined in conjunction with the hysteretic behavior of the models. The research results indicate that ULCF failure in PCFST piers generally occurs after local buckling failure. However, different design parameters significantly influence the ductility of PCFST piers, and local buckling deformation leads to more pronounced stress concentrations at deformation locations, thereby accelerating the occurrence of ULCF failure. As the slenderness ratio, diameter-to-thickness ratio, and axial compression ratio increase, the fatigue damage indicators of the pier models at the buckling limit state decrease, and the ULCF problem is not significant. As the concrete filling ratio increases, the fatigue damage indicators of the pier models at the buckling limit state increase, which makes the ULCF problem more pronounced. The diameter-to-thickness ratio and axial compression ratio are two key parameters influencing ULCF cracking, and PCFST piers with good ductility are more likely to experience ULCF failure before local buckling failure occurs. The established finite element model and ICVGM-based subroutine provide a quantitative evaluation method for the ULCF performance of PCFST piers.

**Keywords:** bridge engineering; steel-concrete composite bridge; ICVGM; ultra-low-cycle fatigue performance; PCFST pier; hysteretic behavior; local buckling

**Publication history:** Received 2024-12-16; Received in revised form 2025-09-24; Accepted 2025-11-27

**Funding:** National Key R&D Program of China (2022YFC3803000); National Excellent Youth Science Fund (52222803)

\* **Corresponding author:** XU Yan, professor, PhD, E-mail: yanxu@tongji.edu.cn.

## 0 引言

部分填充钢管混凝土(Partially Concrete-filled Steel Tube, PCFST)桥墩是一种在空钢管桥墩内填充一部分混凝土的结构,能够有效避免钢管底部过早出现局部屈曲,提高构件整体的延性和抗震性能<sup>[1-5]</sup>。然而,在对包括1995年阪神地震在内的多次震害调查中发现,钢桥墩在强烈地震作用下除了常见的整体失稳、局部失稳和支座破坏以外,还存在超低周疲劳破坏的现象<sup>[6-7]</sup>。与一般的疲劳断裂所表现出的形态不同,超低周疲劳断裂的断口表现为韧窝形貌,与延性断裂接近,而非传统疲劳断裂所表现出的疲劳辉纹,这表明二者在微观机制上存在不同。因此,超低周疲劳寿命远低于常规的高周疲劳破坏和低周疲劳破坏,一般在100次循环以内,通常为几十次甚至十几次;此外,在地震作用下,钢桥墩的超低周疲劳破坏也很有可能先于局部失稳破坏发生,或伴随局部失稳破坏一起发生。在目前以充分发挥桥墩滞回耗能为主要设计思路的延性抗震设计思想下,地震作用中进入塑性的PCFST桥墩可能在延性尚未充分发挥前出现意外的超低周疲劳破坏,从而

达不到预期的抗震性能目标<sup>[6]</sup>。

国内外学者对钢材的超低周疲劳性能已进行了大量的试验和数值模拟研究,并提出了相应的疲劳寿命预测模型。Coffin等<sup>[8-9]</sup>提出的用于预测低周疲劳寿命的Coffin-Manson公式是最早被用来预测超低周疲劳寿命的,但试验研究<sup>[10-11]</sup>表明该模型的预测结果往往偏大,其根本原因是二者的微观断裂机理不同。Kanvinde等<sup>[12-13]</sup>基于空穴扩张聚合型断裂机制,提出了钢材单调拉伸时发生断裂的空穴扩张模型(Void Growth Model, VGM),并将其推广到循环拉压作用形成循环空穴扩张模型(Cyclic Void Growth Model, CVGM),较好地还原了超低周疲劳的微观本质,精度较高,目前已成为用于预测超低周疲劳寿命的最常见的模型。

近年来,围绕钢材超低周疲劳损伤机理及寿命预测方法的研究仍在持续推进。除基于CVGM/改进循环空穴扩张模型(Improved Cyclic Void Growth Model, ICVGM)<sup>[14]</sup>的预测方法外,研究者还从循环空穴演化与微观损伤耦合角度发展了新的预测模型。例如,Yin等<sup>[15]</sup>提出了适用于结构钢超低周疲劳分析的循环Gurson-Tvergaard-Needleman

(GTN)模型,并编制了相应的 VUMAT 子程序,为基于微观机制的超低周疲劳模拟提供了新的实现路径。与此同时,刘焕才等<sup>[16-18]</sup>分别针对不同钢材及焊接细部在非对称或大应变循环荷载下的超低周疲劳行为开展了试验与数值研究,进一步验证了相关模型在工程材料中的适用性。然而,上述研究均局限于材料层面。

针对 PCFST 桥墩,近年来已有不少学者围绕其超低周疲劳问题进行了研究。基于 Ge 等<sup>[19]</sup>的模型,孙泱等<sup>[20-21]</sup>对部分填充箱型截面钢桥墩的超低周疲劳寿命开展了参数化分析,发现翼缘宽厚比和正则化长细比对超低周疲劳寿命有着显著的影响。针对钢桥墩超低周疲劳的工程化评价,Yu 等<sup>[22]</sup>提出了基于纤维模型的简化评估方法,可兼顾分析精度与计算效率。然而,上述研究局限于方形截面的 PCFST 构件,且忽略了混凝土填充高度对疲劳寿命的影响。王臻<sup>[23]</sup>在对圆形截面 PCFST 桥墩开展振动台试验的过程中发现,桥墩试件底部均出现了超低周疲劳裂纹,这表明无焊接区域的圆形截面 PCFST 桥墩也可能出现超低周疲劳破坏,但并未对此作进一步研究。Zhuge 等<sup>[24]</sup>建立了平均应力三轴度下的钢材超低周疲劳断裂两阶段预测模型,并设计了适用于 ABAQUS 的子程序对 PCFST 构件展开了研究,但该子程序并未对其他预测模型作出推广。

实际上,目前钢材超低周疲劳的试验或数值模拟大多局限于形状较为简单的试件,对钢管混凝土构件的超低周疲劳问题的研究仍相当缺乏,也缺少将较为精确的 ICVGM 应用于钢构件超低周疲劳问题研究的方法。因此,本文基于 ICVGM,开发基于 ABAQUS 软件平台并经试验验证的预测超低周疲劳开裂的时刻和位置的用户子程序,将 ICVGM 的应用扩展到 PCFST 桥墩构件;利用子程序针对 9 个圆形截面 PCFST 桥墩展开实体单元模拟和超低周疲劳损伤的计算,确定 9 个模型到达屈曲极限状态时超低周疲劳的损伤指标  $I_D^{95}$ ,分析混凝土填充率、长细比、径厚比和轴压比 4 个参数对损伤指标  $I_D^{95}$  的影响,从而确定水平往复荷载作用下影响桥墩超低周疲劳性能的关键设计参数。

## 1 基于微观机制的超低周疲劳预测模型

### 1.1 超低周疲劳损伤指标的定义

CVGM 模型认为,当微观空穴扩张指数  $V_c$  达到

临界值时可判断为断裂,即

$$V_c \geq V_{cc} \quad (1)$$

$$V_{cc} = \eta e^{-\lambda D} \quad (2)$$

式中: $V_{cc}$ 为循环荷载作用下的临界空穴扩张指数; $\lambda$ 为材料相关参数; $\eta$ 为临界空穴增长指数,与材料特性相关,可由试验测得,参照文献[25]取为 2.55; $D$ 为最近一次拉伸变形前的累积等效塑性应变,反映了材料的累积损伤程度。

CVGM 模型中同时考虑了正、负应力三轴度导致的空穴扩张或收缩,故空穴扩张指数  $V_c$  定义为

$$V_c = \sum_{T>0} \int_{\epsilon_{\text{initial}}}^{\epsilon_{\text{final}}} \exp(|1.5T|) d\epsilon - \sum_{T<0} \int_{\epsilon_{\text{initial}}}^{\epsilon_{\text{final}}} \exp(|1.5T|) d\epsilon \quad (3)$$

式中: $\epsilon$ 为等效塑性应变; $\epsilon_{\text{initial}}$ 和  $\epsilon_{\text{final}}$ 分别为某一拉伸或压缩循环开始和结束时的塑性应变; $T$ 为应力三轴度。

然而, CVGM 模型假定了临界空穴尺寸的折减同时与受拉和受压循环中累积的等效塑性应变有关,导致非对称荷载下模型的精度降低。Myers 等<sup>[14]</sup>针对该问题提出了改进的 ICVGM 模型,在  $V_{cc}$  的折减计算中,不再考虑受拉循环中累积的等效塑性应变,提出了改进的 ICVGM 模型,即式(2)中累积等效塑性应变  $D$  等同于受压循环中的塑性应变积累

$$D = \epsilon_c = \sum_{i=1}^n \Delta \epsilon_{c,i} \quad (4)$$

式中: $n$ 为受压循环圈数; $\epsilon_c$ 为受压等效塑性应变; $\Delta \epsilon_{c,i}$ 为第  $i$  圈的受压等效塑性应变。

在对结构进行往复循环荷载作用下的超低周疲劳分析过程中,须提前给出超低周疲劳的损伤指标进行实时的判断。根据 ICVGM 模型并将式(1)略作变形,定义超低周疲劳损伤指标  $I_D$  为

$$I_D = \frac{V_c}{V_{cc}} \quad (5)$$

式(5)中,当  $I_D \geq 1$  时,可认为发生超低周疲劳断裂。等效塑性应变  $\epsilon$  为有限元计算过程中的输出变量,应力三轴度  $T$  可通过有限元输出的应变和 von Mises 应力进行计算

$$T = \frac{\sigma_m}{\sigma_e} \quad (6)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (7)$$

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}} \quad (8)$$

式中: $\sigma_m$ 为静水应力; $\sigma_e$ 为 von Mises 应力; $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  和  $\sigma_3$

分别为第一、第二和第三主应力。

### 1.2 ICVGM 模型的子程序实现及验证

为了对上述定义的超低周疲劳损伤指标  $I_D$  进行实时获取和判断,本文利用 ABAQUS 内置子程序接口 UVARM 编译子程序,获取 ABAQUS/Standard 计算结果中的默认输出变量,即包括各单元(节点)的基本应力和应变数据,由此计算应力三轴度  $T$ 、等效塑性应变  $\epsilon$  和受压等效塑性应变 3 个关键中间变量,最后利用式(5)计算超低周疲劳损伤指标  $I_D$ ,并允许用户自定义子程序的输出变量以可视化的方式显示,实现对超低周疲劳开裂时间和位置的预测。子程序结构如图 1 所示。

为验证本文开发的子程序对钢材断裂模拟的准确性,本节应用该子程序对 3 根缺口圆棒试样拉伸试验进行模拟。图 2 为试验所用的缺口圆棒及几何尺寸<sup>[21]</sup>,图 3 为建立的二维轴对称有限元模型及  $I_D$  云图。缺口圆棒拉伸试验在材料试验机上进行,图 4 为缺口圆棒试验情况。

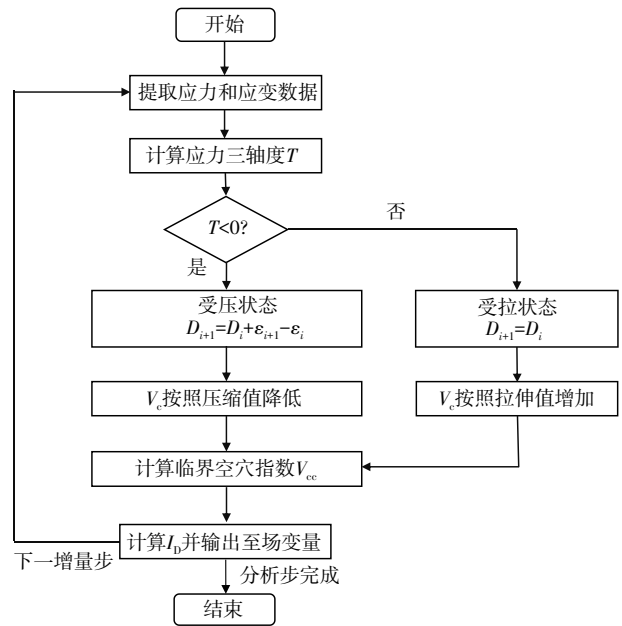


图 1 ICVGM 模型 ABAQUS 子程序流程  
Fig. 1 Flow of ICVGM-based ABAQUS subroutine

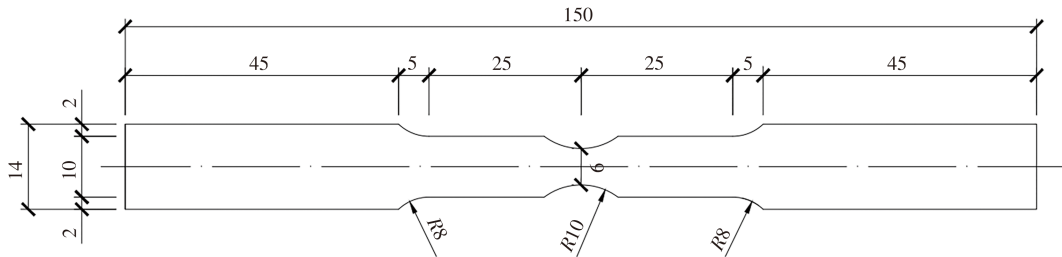


图 2 缺口圆棒试样(单位:mm)  
Fig. 2 Notched rod specimen (unit: mm)

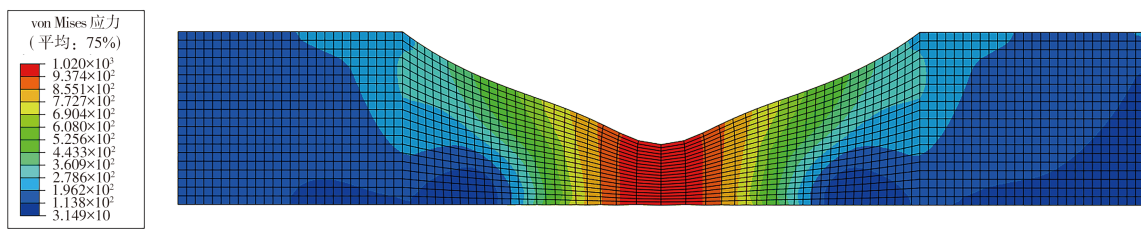


图 3 损伤指标  $I_D$  的有限元模拟结果云图  
Fig. 3 Contour plot of finite element simulation results for damage indicator  $I_D$

由图 3 可见,  $I_D$  在剖面中心处最大,表明模型最先在缺口截面的中心处发生断裂,与图 4 的试验现象一致。图 5 为试验与有限元的荷载-位移曲线,其中 QK-1~QK-3 为 3 根缺口圆棒试件, FEM 为有限元模型,模型计算至中心单元的  $I_D$  达到 1 时终止。由图 5 可知,模型对试验的荷载-位移曲线模拟较好,且断裂点预测准确,证明本文编译的子程序能准确预测钢材的断裂。

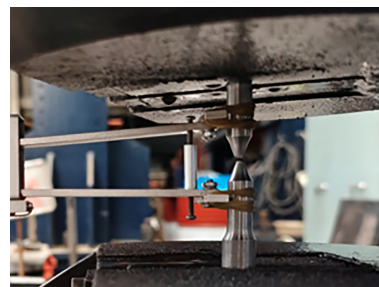


图 4 缺口圆棒试件断裂情况  
Fig. 4 Fracture of notched rod specimen

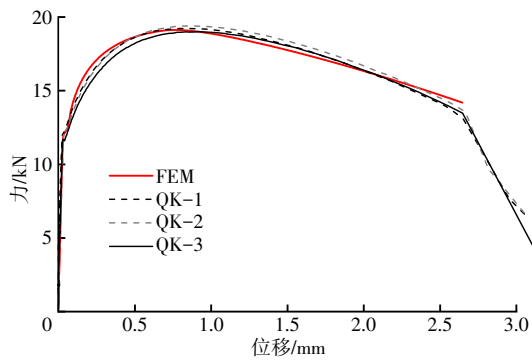


图5 试验与有限元模拟的荷载-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves of test and finite element simulation

## 2 PCFST桥墩的实体单元模拟及验证

### 2.1 模型概况

#### 2.1.1 基本设置

本文采用有限元分析软件ABAQUS建立圆形截面钢管混凝土桥墩的有限元计算模型。图6为模型结构,其中 $h$ 为模型总高, $h_c$ 为混凝土填充高度, $D_s$ 为钢管外径, $t$ 为钢管壁厚, $P$ 为轴应力, $\delta$ 为水平位移。单个模型由内填混凝土和外包钢管2个部件组成,如图7所示。混凝土为圆柱体实体部件,采用八节点六面体实体单元,在径向和高度方向均按30 mm尺寸划分网格。钢管为四节点壳单元部件,沿径向和高度方向每隔35 mm划分,在靠近底部的200 mm区间内沿高度方向每隔10 mm加密划分。

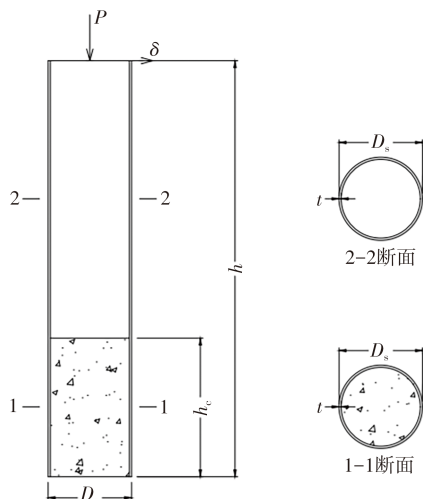
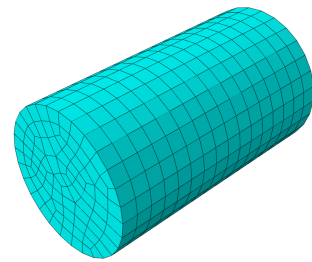


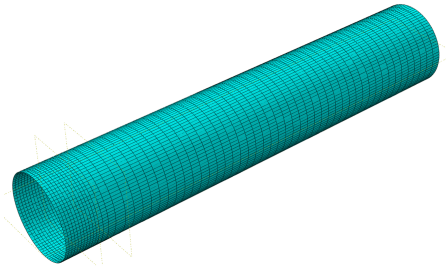
图6 PCFST模型结构构件

Fig. 6 Structural components of the PCFST model

在接触设置上,模型主要考虑混凝土与外钢管内壁之间的面接触,法向接触行为设置为硬接触,切向行为使用库仑摩擦模型进行模拟<sup>[26]</sup>,在表面间的剪应力达到某个规定限值 $\tau_{critic}$ 之前,切向相对运动



(a) 混凝土(实体单元)



(b) 外包钢管(壳单元)

图7 PCFST桥墩有限元模型

Fig. 7 Finite element model of PCFST pier

始终保持为0,随后可允许发生小量的相对运动。其中剪应力限值 $\tau_{critic} = \mu p$ , $\mu$ 为钢-混凝土界面摩擦因数,参照Johansson和Gylltoft的研究取 $\mu = 0.2$ <sup>[27]</sup>, $p$ 为界面间的压力。在边界条件设置上,假定桥墩试件为悬臂状态,将底部的钢管和混凝土面设置为“完全固定”,顶部为自由端。

#### 2.1.2 材料的本构关系

PCFST桥墩中钢材的本构模型选取Chaboche混合强化模型,如图7所示,该模型是目前有限元模拟中最常应用的循环塑性模型之一,同时考虑了循环荷载下材料屈服后的等向强化和非线性随动强化,可以对特定的钢材在循环荷载作用下的力学行为进行更精确的描述<sup>[28]</sup>。

Chaboche混合强化模型由如下若干参数控制:材料参数 $Q_\infty$ 和 $b$ 分别为屈服面的最大变化值和屈服面随累积塑性应变的变化率; $C_k$ 、 $y_k$ 分别控制了第 $k$ 个背应力的演化规律。如表1所示<sup>[29]</sup>,为保证验证模型与的目标试验材料一致,本文选取由石永久等<sup>[30]</sup>测定的Q235钢的Chaboche模型参数。

混凝土单元均假定为连续的理想各向同性材料,仅发生弹塑性变形,不发生开裂或压溃的破坏。

表1 Q235钢Chaboche模型参数

Table 1 Chaboche model parameters of Q235 steel

参数	$Q_\infty$	$b$	$C_1$	$y_1$	$C_2$	$y_2$	$C_3$	$y_3$
数值	21	1.2	6 013	173	5 024	120	3 026	32

本构关系采用塑性损伤模型,该模型基于变形损伤理论,能够反映混凝土在外力作用下的变形和损伤,更适合用于模拟往复加载和地震作用下的混凝土力学行为,并能带来较好的数值分析稳定性。混凝土的塑性损伤模型包括混凝土的塑性行为和损伤行为。其中塑性行为包括混凝土的受压和受拉本构关系,以及多轴受力下的破坏准则。受压行为采用适用于圆钢管约束混凝土的刘威-韩林海模型<sup>[31-32]</sup>,其中约束效应系数为 1.49。塑性损伤部分的相关参数按如下方式选取:除膨胀角外的参数根据 ABAQUS 推荐值取值为偏心率为 0.1、初始等效双轴抗压强度与初始单轴等效抗压强度的比值为 1.16、受拉与受压子午线比值为 0.6667、钢管约束效应系数黏性参数取 0.005;膨胀角根据文献[31]的建议取为 30°。受拉行为考虑收敛便捷性,采用能量准则模拟单元开裂的软化行为<sup>[32]</sup>。

2.1.3 加载方式

本文采取拟静力加载方式对模型施加往复循环荷载。轴向力  $P$  按照设计的轴压比施加于模型顶部,并在整个过程中保持不变,水平方向的荷载通过模型顶部的位移  $\delta$  控制,逐级加载,增量为  $\delta_y$ ,每一级循环 3 次,见图 8。其中,  $\delta_y$  为水平屈服位移,即底部钢管截面出现屈服时的顶部水平位移。

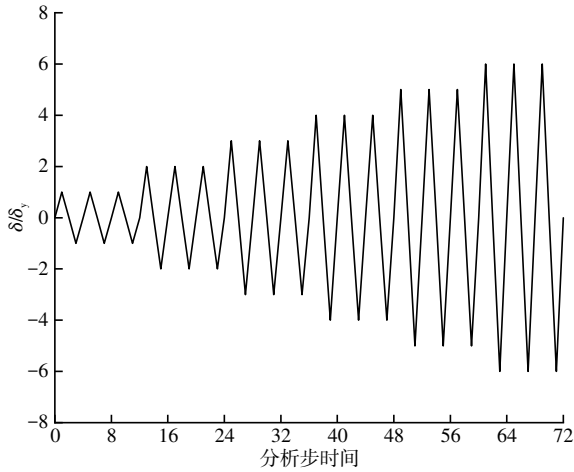


图 8 加载方式

Fig. 8 Loading pattern

2.2 有限元模型验证

缺口圆棒试验验证了子程序对超低周疲劳开裂模拟的准确性,本节需进一步对第 2.1 节所建 PCFST 实体有限元几何模型进行验证,并同时验证子程序应用在 PCFST 构件上的准确性,故对一已有试验进行有限元拟静力分析,并内嵌 ICVGM 模型子程序计算其超低周疲劳开裂情况。试验试

件的整体情况见图 9,具体结构参数见表 2。采用每级 3 次循环、位移递增的拟静力加载方式,每级递增 5 mm。



图 9 PCFST 桥墩拟静力试验试件

Fig. 9 Specimen of PCFST piers for quasi-static test

表 2 PCFST 桥墩试件的几何参数

Table 2 Geometric parameters of the PCFST pier specimens

高度/ mm	外径/ mm	壁厚/ mm	混凝土 填充率	长细比	径厚比	轴压比
1 150	325	14	0.25	0.290	0.036	0.10

试验结果的荷载-位移滞回曲线与有限元结果如图 10 所示。由结果可知:有限元模型对试验试件的刚度模拟准确;试验测得最大承载力为 561 kN,有限元分析结果为 579 kN,误差为 3.2%,峰值承载力接近,而承载力下降段的模拟结果小于试验值。图 11 为钢管底部区域的试验现象与有限元云图的比较,从图 9 整体情况和图 11(a)的局部区域可见,试件在加载过程中于钢管底部出现明显的向外鼓曲;图 11(a)也显示了超低周疲劳开裂出现在钢管底部区域,与图 11(b)有限元模拟的现象一致;试验加载至第 14 级第 1 圈时,鼓曲截面-水平方向发生首次开裂,而有限元模拟结果为第 13 级第 1 圈时,鼓曲界面-水平方向的疲劳损伤指数  $I_D$  首次达到 1,表明发生开裂,与试验结果接近。

综上,本文建立的有限元几何模型可以对 PCFST 构件的力学性能准确模拟,且具有模型简单、收敛性好等优点,同时满足了 PCFST 桥墩超低周疲劳性能研究所需的精度要求,为后续的参数研究提供了实用有效的分析方法。所开发的 ICVGM

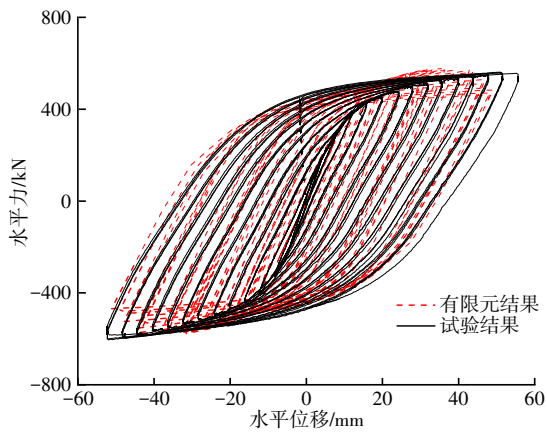


图 10 试验与有限元分析的滞回曲线对比

Fig. 10 Comparison of hysteretic curves between test and FEM analysis

子程序可对水平往复荷载作用下 PCFST 桥墩超低周疲劳的开裂做出准确预测。

### 2.3 模型研究参数的确定

由上文所述,混凝土填充率、长细比、轴压比与外钢管宽厚比等参数是影响 PCFST 桥墩抗震性能的重要因素,亦可能对其超低周疲劳性能产生影响,但尚且少有对圆形截面的试件进行涵盖如上参数的分析研究。因此,本文将圆形截面 PCFST 桥墩模型的混凝土填充率、长细比、轴压比和钢管径厚比确定为主要的研究参数,上述研究参数可由式(9)~(12)确定<sup>[25]</sup>

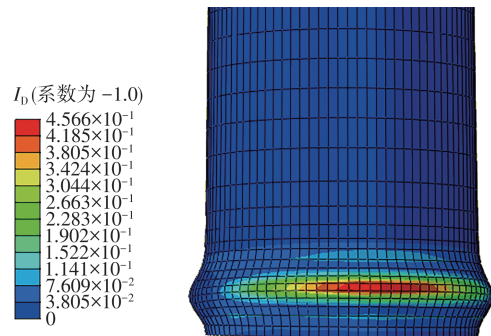
$$\beta = h_c/h \tag{9}$$

$$\alpha = \frac{P}{\sigma_y A_s} \tag{10}$$

$$\lambda = \frac{2h}{\pi r} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \tag{11}$$



(a) 试验试件



(b) 有限元模型

图 11 PCFST 试件底部区域试验现象与有限元分析结果

Fig. 11 Test phenomena and finite element analysis results in the bottom area of PCFST specimens

为进一步研究各设计参数对 PCFST 桥墩滞回性能的影响,对 9 个模型的滞回曲线取骨架曲线,按不同设计参数分为 4 组分别比较  $\beta$ 、 $\lambda$ 、 $R_f$  和  $\alpha$ ,如图 13

$$R_f = \frac{D_s \sigma_y}{2tE} \sqrt{3(1-\nu^2)} \tag{12}$$

式中: $\beta$ 为混凝土填充率; $\alpha$ 为轴压比; $\lambda$ 为长细比; $R_f$ 为径厚比; $\sigma_y$ 为钢材的屈服强度; $A_s$ 为外钢管的截面积; $r$ 为外钢管回转半径; $E$ 为钢材弹性模量; $\nu$ 为钢材的泊松比。

全部 9 个 PCFST 桥墩模型的参数列于表 3。

表 3 PCFST 桥墩模型参数

Table 3 Parameters of PCFST pier models

模型编号	$h/\text{mm}$	$D_s/\text{mm}$	$t/\text{mm}$	$\beta$	$\lambda$	$R_f$	$\alpha$
M1	1 500	300	8	0.33	0.375	0.051	0.10
M2	1 500	300	8	0.55	0.375	0.051	0.10
M3	1 500	300	8	0.00	0.375	0.051	0.10
M4	1 500	298	6	0.33	0.375	0.067	0.10
M5	2 000	300	8	0.33	0.500	0.051	0.10
M6	1 500	300	8	0.33	0.375	0.051	0.05
M7	1 500	302	10	0.33	0.375	0.041	0.10
M8	1 200	300	8	0.33	0.300	0.051	0.10
M9	1 500	300	8	0.33	0.375	0.051	0.20

## 3 PCFST 桥墩超低周疲劳性能及影响因素分析

### 3.1 滞回性能

应用第 2 节中的实体单元建模和计算分析,全部 9 个 PCFST 桥墩模型在承受图 8 所示的 6 级水平往复荷载后,水平承载力全部下降至峰值的 95% 以下,前 6 级加载过程中的水平力-位移滞回曲线如图 12 所示,所有模型的滞回环呈梭形,形状饱满,具有良好的耗能能力。

所示。

由图 13 骨架曲线和表 4 延性系数与各组参数的关系可知,4 个参数对 PCFST 模型的延性均有不同

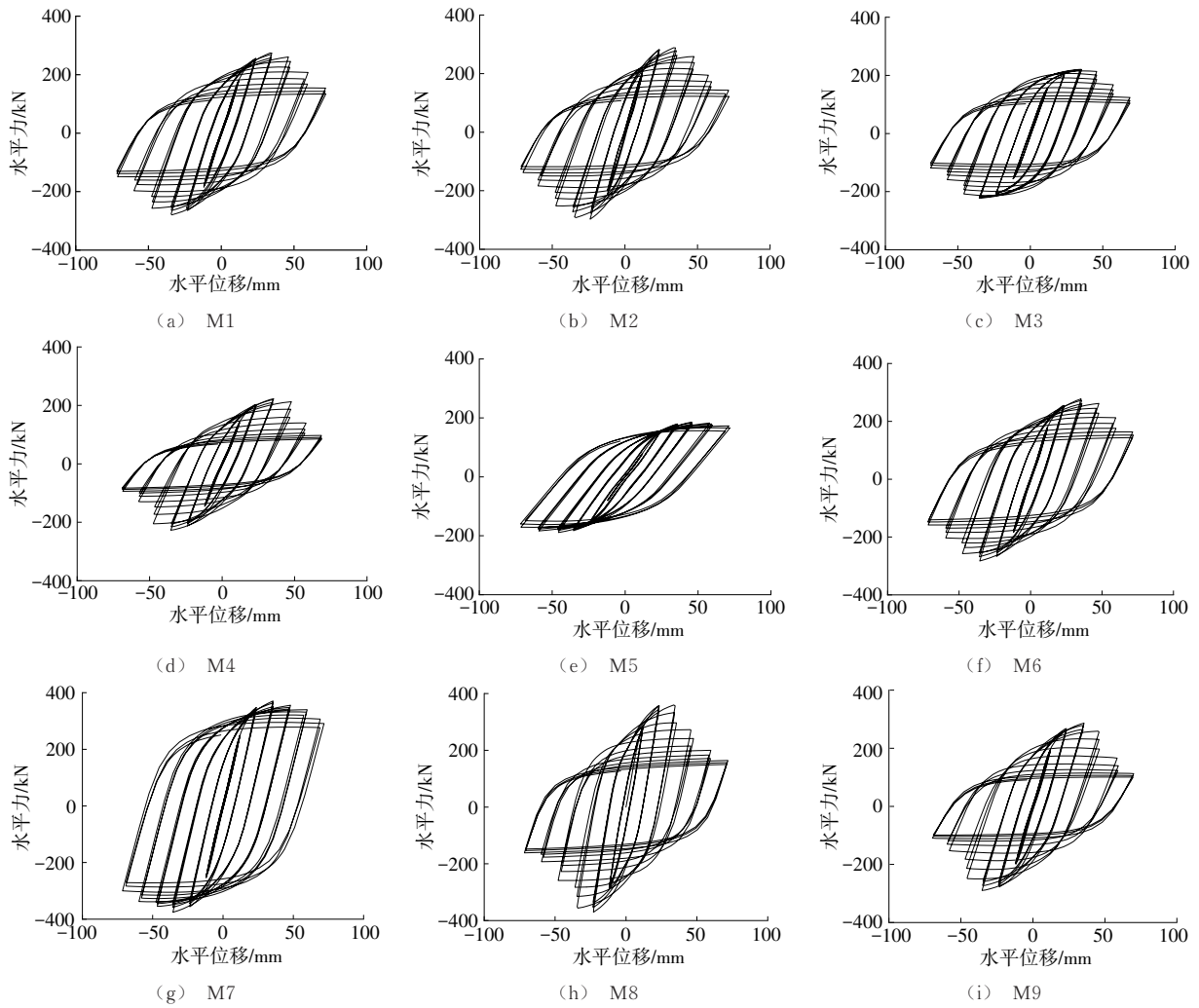


图 12 水平力-水平位移滞回曲线

Fig. 12 Horizontal force-horizontal displacement hysteretic curves

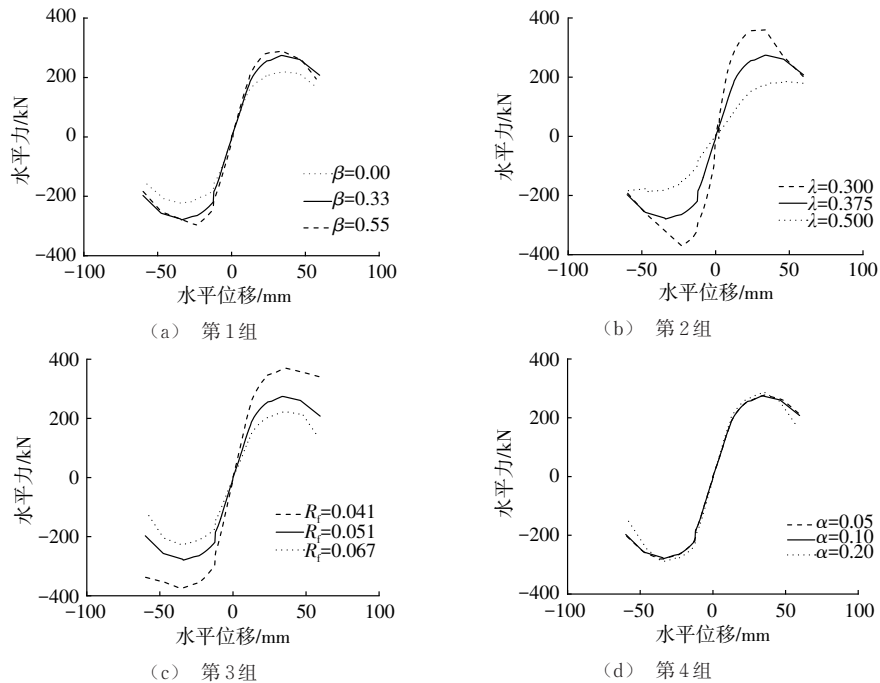


图 13 各组模型的水平力-水平位移骨架曲线

Fig. 13 Horizontal force-horizontal displacement skeleton curves of model groups

表4 各组模型的滞回性能对比

Table 4 Comparison of hysteretic behaviors of model groups

组别	编号	参数值	峰值承载力/kN	峰值承载力对应位移/mm	延性系数	
第1组	M3	$\beta$	0.00	234.1	45.2	3.77
	M1		0.33	292.3	55.1	4.58
	M2		0.55	309.5	56.0	4.67
第2组	M8	$\lambda$	0.300	376.1	52.5	5.47
	M1		0.375	292.3	55.1	4.58
	M5		0.500	204.6	60.0	3.75
第3组	M7	$R_f$	0.041	358.7	62.5	5.21
	M1		0.051	292.3	55.1	4.83
	M4		0.067	226.1	31.9	2.66
第4组	M6	$\alpha$	0.05	295.9	71.6	5.97
	M1		0.10	292.3	55.1	4.83
	M9		0.20	290.7	26.8	2.23

程度的影响。其中,  $\lambda$  对承载力和延性的影响较大, 这是由于  $\lambda$  增加时  $P-\Delta$  效应更加明显, 墩底截面的弯矩增大;  $\alpha$  的变化对延性的影响显著, 因轴压比增加时, 塑性铰区域的钢管更早出现局部失稳;  $R_f$  较高时延性系数降低, 原因为高径厚比的钢管壁厚相对

于构件直径变小, 钢管壁在与混凝土的相互作用下应力集中程度更大, 更容易发生局部失稳。

### 3.2 破坏形态

前6级加载后各模型的破坏形态及超低周疲劳损伤指标  $I_D$  的云图形式如图14所示, 其中“UVARM6”为用户自定义输出变量, 这里指超低周疲劳损伤指标  $I_D$ 。由图14可见, 9个模型均出现了墩底塑性铰区域的局部屈曲破坏, 但超低周疲劳损伤指标  $I_D$  均未达到1, 表明此时尚未出现疲劳开裂, 钢管的应力集中区出现明显的向外鼓曲变形, 发生局部失稳破坏, 而  $I_D$  值较高的区域恰好集中在钢管鼓曲处沿加载方向对称的两侧, 表明该位置在实际地震作用中出现超低周疲劳开裂的风险最高。这是由于在有限元模拟加载过程中, 局部屈曲的出现使应力在鼓曲变形区域高度集中, 塑性应变快速增长, 从而导致了损伤指标  $I_D$  的快速增加。由此可知, PCFST 的超低周疲劳破坏与局部失稳破坏密切相关。

将各模型继续加载直至  $I_D$  达到1出现超低周疲劳开裂, 模型M1开裂时的破坏形态及  $I_D$  云图如图15所示, 开裂时  $I_D$  分布与第6级加载结束时相似,

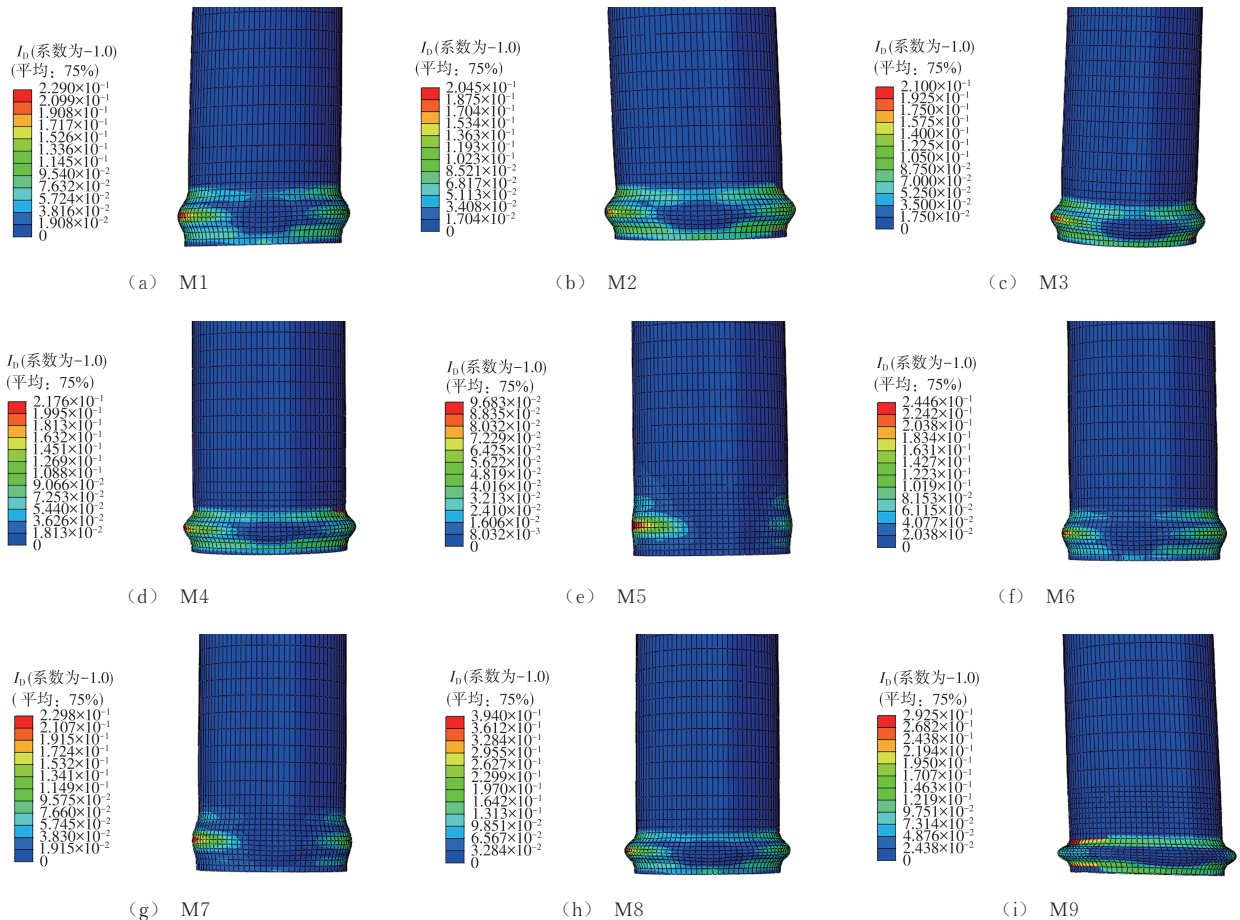


图14 超低周疲劳损伤指标  $I_D$  云图

Fig. 14 Contour plot of ULCF damage indicator  $I_D$

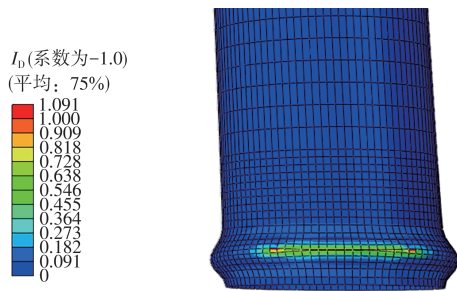


图 15 开裂时模型 M1 的  $I_D$  云图

Fig. 15  $I_D$  contour plot of model M1 at cracking

开裂位置在钢管的局部鼓曲处,其余 8 个模型的  $I_D$  分布特征均与此相似不再赘述。

### 3.3 超低周疲劳损伤指标

在确定衡量钢材超低周疲劳损伤程度的指标  $I_D$  后,需结合模型的滞回性能进一步量化超低周疲劳性能的评价标准。由于本文研究的是 PCFST 在塑性状态下的超低周疲劳破坏,以及桥墩在延性耗能过程中出现意外的疲劳开裂的风险,因此可以将构件到达屈曲极限状态时的损伤指标作为量化超低周疲劳性能的方式,一定程度上反映构件在到达屈曲极限状态前,尚未充分发挥延性的情况下,出现超低周疲劳开裂的风险。

以式(5)的定义为准,9个不同设计的 PCFST 桥墩模型均在局部屈曲后发生超低周疲劳破坏。Ge 等<sup>[19]</sup>通过试验研究认为,圆形 PCFST 构件承载力下降至峰值的 95% 时会发生失稳破坏。然而,钢桥墩的局部失稳是一个渐进过程,仅靠最终变形图难以准确判断初始失稳时刻。因此,本文通过监测钢管局部屈曲处的直径变化来定量确定失稳发生时间。

如图 16 所示,测点 1 和 2 的相对位移首次突增时即为局部失稳时刻。以 M1 模型为例(图 17),其失稳发生在第 3 级加载的第 1 圈(每 3 圈为 1 级)。表 5 显示,所有模型均在第 3 级加载结束前出现明显局

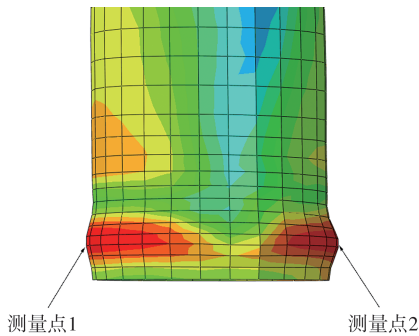


图 16 钢管局部鼓曲截面相对位移的测量点

Fig. 16 Measurement points of relative displacement on local buckling section of steel tube

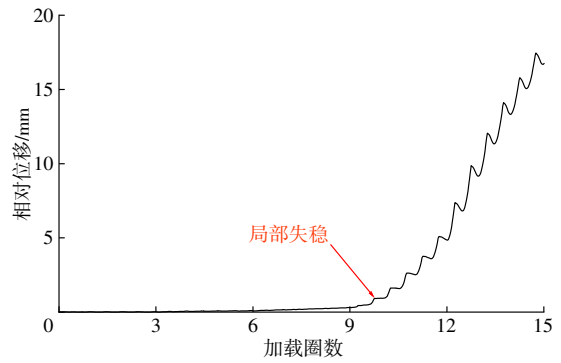


图 17 M1 钢管测量点间的相对位移

Fig. 17 Relative deformation between measurement points of steel tube in M1

部屈曲,而超低周疲劳开裂时间远晚于屈曲时刻。

需说明的是,ICVGM 模型将宏观裂纹宽度不小于 1 mm 作为开裂标准<sup>[15]</sup>,因此 9 个模型的超低周疲劳破坏均较晚出现。薛寒杨<sup>[33]</sup>发现,部分矩形 PCFST 构件在承载力降至 95% 前已出现裂纹。对钢结构而言,1 mm 裂纹已属较大范围,故损伤指标  $I_D$  未达 1 时仍可能存在微小裂纹。 $I$  可量化循环荷载下的疲劳损伤程度,间接预测裂纹萌生风险。

因此,基于现有研究和本文目标,采用构件承载力下降至峰值 95% 时最危险单元的损伤指标  $I_D$  作为 PCFST 超低周疲劳开裂判据,将其定义为  $I_D^{95}$ 。表 5 显示,该时刻均出现在局部屈曲后不久。

表 5 模型局部失稳发生时间与超低周疲劳开裂时间

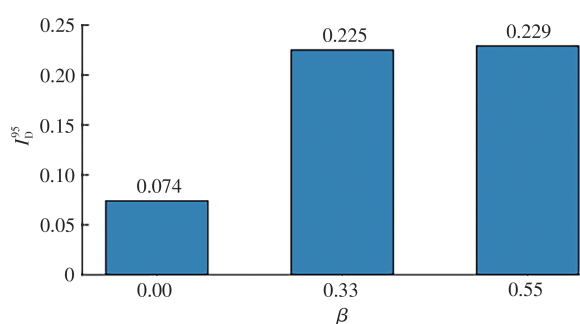
Table 5 Time of local buckling and ULCF cracking of the model

模型编号	局部失稳发生时刻	超低周疲劳开裂时刻	承载力下降至峰值的 95% 的时刻
M1	第 3 级第 1 圈	第 7 级第 1 圈	第 4 级第 2 圈
M2	第 3 级第 2 圈	第 7 级第 1 圈	第 4 级第 1 圈
M3	第 2 级第 1 圈	第 7 级第 2 圈	第 4 级第 2 圈
M4	第 2 级第 1 圈	第 7 级第 3 圈	第 4 级第 1 圈
M5	第 3 级第 1 圈	第 7 级第 2 圈	第 5 级第 1 圈
M6	第 3 级第 1 圈	第 7 级第 1 圈	第 4 级第 2 圈
M7	第 3 级第 1 圈	第 7 级第 2 圈	第 5 级第 1 圈
M8	第 2 级第 1 圈	第 6 级第 3 圈	第 4 级第 1 圈
M9	第 3 级第 1 圈	第 7 级第 1 圈	第 4 级第 2 圈

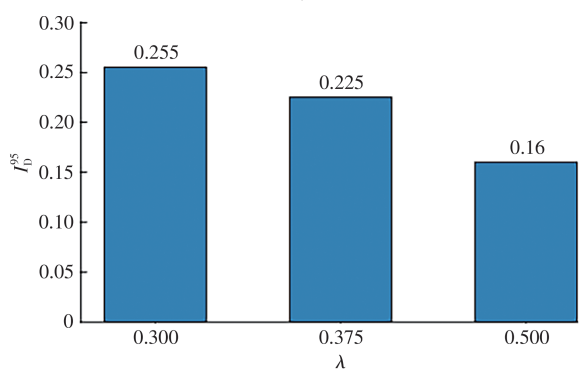
### 3.4 影响超低周疲劳开裂的主要设计参数

依照  $I_D^{95}$  的大小,研究 PCFST 桥墩在实际地震作用下,影响超低周疲劳开裂的主要设计参数,以及超低周疲劳破坏与局部失稳破坏之间的相关性。

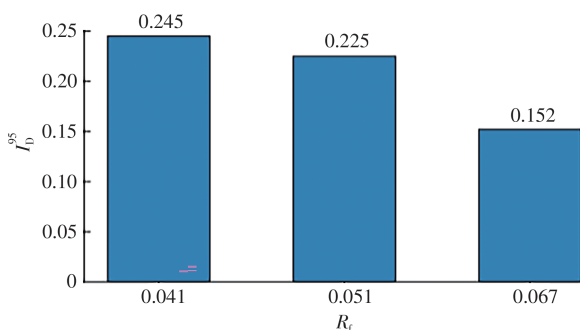
图 18 为各模型按照参数分组后的超低周疲劳损伤指标  $I_D^{95}$  分布。由图 18 可见,虽然各组变化显著,但总体数值较小,远不及 1 的断裂标准,这是由于圆形截面的钢管混凝土构件应力集中程度较其他形状(如矩形)小,且拟静力的加载过程中的位移幅



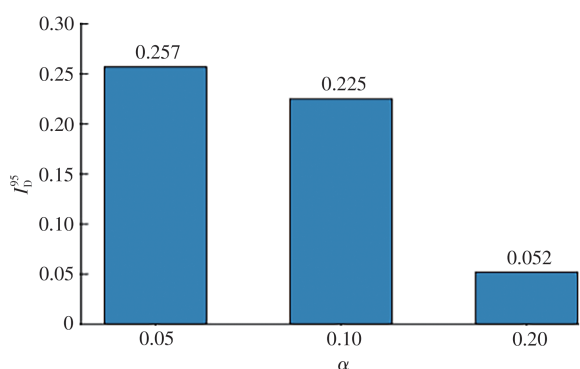
(a) 第1组



(b) 第2组



(c) 第3组



(d) 第4组

图18 各组模型的超低周疲劳损伤指标  $I_D^{95}$ Fig. 18 Ultra-low cycle fatigue indicator index  $I_D^{95}$  of model groups

度是逐渐增大的,等效塑性应变的累积较慢。另一方面,本文采取了逐级递增的拟静力加载方式计算,而实际地震波影响初期,结构的位移幅度就可能达到一个较大的值,因此实际的  $I_D^{95}$  应当更大。

第1组(M1、M2和M3)结果显示,混凝土填充率为0.33的模型对比空钢管模型,  $I_D^{95}$  从0.074增加到0.229,但继续增加填充率至0.55则  $I_D^{95}$  变化微弱。结合图13与表3,填充率为0.33的模型对比空钢管延性系数提高了21%,但填充率为0.55的模型仅进一步提高了2%的延性系数,与  $I_D^{95}$  的变化趋势相近。图12表明,填充率为0.33的基准模型M1比空钢管M3在到达屈曲极限状态前多经历了7个半周期的水平加载,因此积累了更多的疲劳损伤,从而导致  $I_D^{95}$  更大。填充率0.55的M2模型并不能进一步提高延性,极限状态前经历的加载圈数与M1相同,故积累的疲劳损伤变化区别较小。

第2组(M1、M5和M8)结果显示,长细比从0.300逐步提高到0.500时,延性系数降低了31%,  $I_D^{95}$  降低了37%。M8( $\lambda=0.300$ )、M1( $\lambda=0.375$ )和M5( $\lambda=0.500$ )分别在第33、31和23个半周期达到极限状态,三者累积的疲劳损伤递减,  $I_D^{95}$  也因此递减,故长细比较大时桥墩的局部失稳问题相比超低周疲劳问题更突出。

第3组(M1、M4和M7)结果显示,径厚比从0.041增加到0.067时,延性系数降低了49%,  $I_D^{95}$  降低了38%。M7( $R_f=0.041$ )、M1( $R_f=0.051$ )和M4( $R_f=0.067$ )分别在第34、31和16个半周期达到极限状态,  $I_D^{95}$  的大小与该组模型在极限状态前经历的加载圈数呈正相关。值得注意的是,当对比这3个模型的最危险单元的  $I_D$  随加载历程的变化时, M4的  $I_D$  增加幅度反而最快,原因是该模型为薄壁模型,加载中鼓曲截面的应力集中程度较大,等效塑性应变在局部屈曲后快速增加,使钢管快速累积大量损伤。但由于局部失稳破坏的发生相对较早,在此之前经历的加载圈数少,导致其  $I_D^{95}$  反而在这一组3个模型中最小。

对比第4组(M1、M6和M9)可知,轴压比从0.05增加到0.20时,延性系数降低了63%,  $I_D^{95}$  降低了80%。轴压比增加时,PCFST模型钢管壁的局部失稳问题更加突出,钢管底部的向外鼓出变形更加严重,局部屈曲破坏的发生提前,此时钢管壁还未累积足够多的疲劳损伤。另外,竖向轴压力较大时,构件还可能发生整体失稳破坏,该情况下超低周疲劳问题相对而言并不突出。

结合上文分析不难发现,部分填充钢管混凝土桥墩的设计参数对其超低周疲劳性能有显著的影响。部分设计参数,如径厚比,能直接影响模型局部的应力集中程度,使钢管根部更快发生屈服产生更

大的塑性应变,进而加快疲劳损伤的累积速度。然而,更多情况下模型的超低周疲劳损伤指标 $I_D^{95}$ 的大小受到延性的影响更为显著。当构件(模型)的设计参数有利于提高延性,推迟局部失稳破坏的发生时,模型在到达极限状态前能经历更多的循环荷载,积累更多的超低周疲劳损伤,从而更易出现超低周疲劳破坏。换言之,设计参数的改变通过影响PCFST桥墩的滞回性能,间接影响了其超低周疲劳性能。在所研究的设计参数中,径厚比和轴压比对模型延性的影响程度最大,间接放大对 $I_D^{95}$ 的影响。因此,在考虑超低周疲劳破坏的设计中,应侧重考虑能通过改变延性间接影响超低周疲劳性能的轴压比和径厚比参数,避免过度利用桥墩的延性能力而使桥墩出现意料之外的超低周疲劳开裂。基于现有的计算结果,建议径厚比应避免低于0.041,轴压比应避免低于0.05。

## 4 结 语

(1)本文基于改进的ICVGM,提出了超低周疲劳损伤指标 $I_D^{95}$ ,用以量化PCFST桥墩在水平往复荷载作用下的损伤程度。在此基础上,开发了预测超低周疲劳开裂的用户子程序,发展了超低周疲劳的有限元分析方法,用于评估PCFST桥墩的超低周疲劳性能。

(2)通过对9个PCFST桥墩模型的有限元计算分析,发现混凝土填充率、长细比、径厚比、轴压比四个关键参数主要是通过影响模型的延性间接地影响其超低周疲劳开裂性能。其中,径厚比与轴压比的影响最为显著,在抗超低周疲劳设计中应予以优先考量。研究表明,延性较高的墩柱,其超低周疲劳破坏可能先于局部屈曲发生。需特别指出,径厚比增大会直接加速疲劳损伤的累积,但同时也导致构件延性降低、局部屈曲提前发生,致使后者往往仍是主要的破坏模式。因此,建议在设计PCFST桥墩时,径厚比应避免低于0.041,轴压比应避免低于0.05。

(3)现有子程序和模型虽然能模拟PCFST桥墩超低周疲劳开裂的时刻和位置,但无法模拟开裂后对模型力学性能的影响,且仅适用于圆形截面的PCFST桥墩。后续将引入部分学者在材料层面的简单研究模型中采用的生死单元法,通过建模优化,实现在构件层面对更多截面形式的PCFST超低周疲劳问题作进一步的研究。

## 参考文献:

### Reference:

- [ 1 ] GE H B, USAMI T. Cyclic tests of concrete-filled steel box columns [J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(10): 1169-1177.
- [ 2 ] 王占飞,隋伟宁,李帼昌,等. 水平往复荷载作用下部分填充混凝土圆形钢桥墩柱的力学性能[J]. 中国公路学报, 2015, 28(1):62-70.  
WANG Zhan-fei, SUI Wei-ning, LI Guo-chang, et al. Mechanical behavior of partially concrete-filled steel circular bridge piers under cyclic lateral load [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(1): 62-70.
- [ 3 ] GAN D, ZHANG Y J, ZHOU X H, et al. Investigation of cyclic behavior of partially concrete-filled steel tubular columns [J]. Engineering Structures, 2024, 300: 117175.
- [ 4 ] WU Q X, ZHENG Q X, YANG M Q, et al. Research on seismic performance of prefabricated steel bridge piers with partially filled concrete[J]. Structures, 2025, 80: 109695.
- [ 5 ] 吴庆雄,郑其鑫,袁辉辉,等. 部分填充混凝土的端承式预制拼装钢桥墩抗震性能研究[J]. 交通运输工程学报, 2026, 26(5):179-192.  
WU Qing-xiong, ZHENG Qi-xin, YUAN Hui-hui, et al. Research on seismic performance of end-bearing prefabricated steel bridge piers with partially filled concrete [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(5) : 179-192.
- [ 6 ] KAWASHIMA K, UNJOH S. The damage of highway bridges in the 1995 Hyogo-Ken Nanbu earthquake and its impact on Japanese seismic design [J]. Journal of Earthquake Engineering, 1997, 1(3): 505-541.
- [ 7 ] 李 博,颜 海,张睿杰,等. 强震作用下圆钢管混凝土桥墩的超低周疲劳破坏[J/OL]. 交通运输工程学报, 2026, <https://doi.org/10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.267>.  
LI Bo, YAN Hai, ZHANG Rui-jie, et al. Ultra-low cycle fatigue failure of circular concrete filled steel tube piers under strong earthquake loading [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, <https://doi.org/10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.267>.
- [ 8 ] COFFIN L F. A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal [J]. Journal of Fluids Engineering, 1954, 76(6): 931-949.
- [ 9 ] MANSON S S. Behavior of materials under conditions of thermal stress[R]. Cleveland: National Advisory Commission on Aeronautics, 1954.
- [ 10 ] TATEISHI K, HANJI T, MINAMI K. A prediction model for extremely low cycle fatigue strength of structural steel [J]. International Journal of Fatigue, 2007, 29(5): 887-896.
- [ 11 ] XUE L. A unified expression for low cycle fatigue and extremely low cycle fatigue and its implication for monotonic loading [J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30(10/11): 1691-1698

- [12] KANVINDE A M, DEIERLEIN G G. Cyclic void growth model to assess ductile fracture initiation in structural steels due to ultra low cycle fatigue [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2007, 133(6): 701-712.
- [13] RICE J R, TRACEY D M. On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1969, 17(3): 201-217.
- [14] MYERS A T, KANVINDE A M, DEIERLEIN G G, et al. Probabilistic formulation of the cyclic void growth model to predict ultralow cycle fatigue in structural steel[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2014, 140(6): 04014028
- [15] YIN Y, QIN W, MA T, et al. A cyclic GTN model for ultra-low cycle fatigue analysis of structural steels[J]. *International Journal of Fatigue*, 2023, 177: 107946.
- [16] 刘焕才,刘亚平,杜君峰,等. 基于循环孔洞扩张模型的海工钢超低周疲劳断裂分析与预测[J]. *船舶力学*, 2024, 28(9): 1420-1429.  
LIU Huan-cai, LIU Ya-ping, DU Jun-feng, et al. Analysis and prediction of ultra-low cycle fatigue fracture of offshore steel based on cyclic void growth model[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2024, 28(9): 1420-1429.
- [17] 吴雨杭,李元齐. 基于钢框架梁柱焊接节点超低周疲劳性能的焊接孔构造优化研究[J]. *建筑结构学报*, 2024, 45(4): 206-215.  
WU Yu-hang, LI Yuan-qi. Research on configuration of access hole based on ultra-low cycle fatigue performance of steel beam-to-column connections [J]. *Journal of Building Structures*, 2024, 45(4): 206-215.
- [18] 邱晨,邢信慧,张丽,等. Q460 高强钢材及 T 形对接接头超低周疲劳特性[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(16): 166-174.  
QIU Chen, XING Ji-hui, ZHANG Li, et al. Ultra-low cycle fatigue properties of Q460 high strength T-shape butt weld joints [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(16): 166-174.
- [19] GE H B, KANG L. A damage index-based evaluation method for predicting the ductile crack initiation in steel structures[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2012, 16(5): 623-643.
- [20] 孙泱,高圣彬. 部分填充混凝土箱形截面钢桥墩的超低周疲劳裂纹萌生寿命预测[J]. *钢结构(中英文)*, 2019, 34(6): 29-35.  
SUN Yang, GAO Sheng-bin. Extremely low-cycle fatigue crack initiation life predication of partially concrete-filled steel box-section bridge piers [J]. *Steel Construction (Chinese & English)*, 2019, 34(6): 29-35.
- [21] 刘富平. 部分填充混凝土带肋箱形截面钢桥墩的超低周疲劳性能试验研究[D]. 上海:上海交通大学, 2020.  
LIU Fu-ping. Experimental research on extremely low-cycle fatigue behavior of partially concrete-filled stiffened steel box-section bridge piers [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.
- [22] YU M M, XIE X, CHENG C. Ultra-low cycle fatigue evaluation method for unstiffened steel piers using fiber model [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2024, 213: 108373.
- [23] 王臻. 部分填充圆形钢管混凝土桥墩抗震性能研究[D]. 上海:同济大学, 2019.  
WANG Zhen. Research on seismic performance of partially concrete-filled circular steel tube pier [D]. Shanghai: Tongji University, 2019.
- [24] ZHUGE H Q, DU R, LI S L, et al. Seismic analysis model of partially concrete-filled steel piers considering ultralow-cycle fatigue crack propagation [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2024, 28(7): 2027-2049.
- [25] LIAO F F, WANG W, CHEN Y Y. Parameter calibrations and application of micromechanical fracture models of structural steels [J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2012, 42(2): 153-174.
- [26] GOTO Y, EBISAWA T, LU X L. Local buckling restraining behavior of thin-walled circular CFT columns under seismic loads [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2014, 140(5): 04013105.
- [27] JOHANSSON M, GYLLTOFT K. Structural behavior of slender circular steel-concrete composite columns under various means of load application[J]. *Steel and Composite Structures*, 2001, 1(4): 393-410.
- [28] 贾良玖,葛汉彬. 强震下金属结构的超低周疲劳破坏[M]. 上海:同济大学出版社, 2019.  
JIA Liang-jiu, GE Han-bin. Ultra-low cycle fatigue failure of metal structures under strong earthquakes [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2019.
- [29] CHABOCHE J L. Time-independent constitutive theories for cyclic plasticity [J]. *International Journal of Plasticity*, 1986, 2(2): 149-188.
- [30] 石永久,王萌,王元清. 循环荷载作用下结构钢材本构关系试验研究[J]. *建筑材料学报*, 2012, 15(3): 293-300.  
SHI Yong-jiu, WANG Meng, WANG Yuan-qing. Experimental study of structural steel constitutive relationship under cyclic loading [J]. *Journal of Building Materials*, 2012, 15(3): 293-300.
- [31] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践[M]. 北京:科学出版社, 2016.  
HAN Lin-hai. Concrete filled steel tubular structures: Theory and practice [M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [32] 刘威. 钢管混凝土局部受压时的工作机理研究[D]. 福州:福州大学, 2005.  
LIU Wei. Research on mechanism of concrete-filled steel tubes subjected to local compression [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2005.
- [33] 薛寒杨. 循环荷载作用下薄壁钢桥墩的破坏界限及超低周疲劳损伤预测[D]. 扬州:扬州大学, 2020.  
XUE Han-yang. Prediction of failure modes and ultralow cycle fatigue damage of thin-walled steel bridge piers under cyclic loading [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2020.