

截面退化影响下人字形三角桁拱桥地震响应及安全性能分析

罗欣玲

西南林业大学土木工程学院, 云南 昆明

收稿日期: 2026年8月4日; 录用日期: 2026年8月25日; 发布日期: 2026年9月8日

摘 要

人字形三角桁拱桥具有独特的空间受力特点, 在长期服役过程中易受到环境侵蚀、疲劳作用以及材料性能退化等因素影响, 导致构件截面损失和结构刚度下降, 进而影响桥梁抗震性能。为研究截面退化对人字形三角桁拱桥地震响应及安全储备的影响, 本文以某人字形三角桁拱桥为研究对象, 基于Abaqus建立三维有限元模型, 采用B31空间梁单元模拟主要承载构件, 通过截面尺寸等效削弱方法建立未退化基准模型(A00)和截面退化模型(A10), 开展静力分析及非线性动力时程分析。结果表明: 截面退化会降低结构整体刚度, 使自重作用下A10模型最大位移由24.54 mm增加至29.02 mm, 较A00模型增加18.26%。在7组地震波输入条件下, A10模型平均最大位移达到46.78 mm, 相比A00模型增加77.73%, 表现出明显的动力响应放大效应。在0.10g地震输入水平下, A10模型最大Mises应力为80.01 MPa, 低于Q235钢材屈服强度235 MPa, 且未出现塑性应变累积, 结构仍保持弹性工作状态。研究结果表明, 截面退化会显著降低结构抗震性能储备, 但在轻度退化条件下结构仍具有一定安全裕度, 可为服役期人字形三角桁拱桥抗震性能评价提供参考。

关键词

人字形三角桁拱桥, 截面退化, 有限元分析, 地震响应, 安全储备

Seismic Response and Safety Performance of Herringbone Triangular Truss Arch Bridge under Section Degradation

Xinling Luo

College of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan

Received: August 4, 2026; accepted: August 25, 2026; published: September 8, 2026

Abstract

The herringbone triangular truss arch bridge exhibits unique spatial load-bearing characteristics. During long-term service, it is susceptible to environmental corrosion, fatigue effects, and material property degradation, which lead to sectional loss of members and reduction in structural stiffness, thereby impairing the seismic performance of the bridge. To investigate the influence of section degradation on the seismic response and safety margin of such bridges, this study takes a herringbone triangular truss arch bridge as the research object. A three-dimensional finite element model is established using Abaqus, with major load-bearing components simulated by B31 spatial beam elements. An equivalent section-size reduction method is adopted to create an undegraded baseline model (A00) and a section-degraded model (A10). Both static analysis and nonlinear dynamic time-history analysis are carried out. The results indicate that section degradation reduces the overall structural stiffness. Under self-weight, the maximum displacement of Model A10 increases from 24.54 mm to 29.02 mm, representing an 18.26% increase compared with Model A00. Under seven sets of earthquake ground motions, the average maximum displacement of Model A10 reaches 46.78 mm, which is 77.73% higher than that of Model A00, demonstrating a significant dynamic response amplification effect. At an input seismic acceleration of 0.10g, the maximum Mises stress in Model A10 is 80.01 MPa, which is below the yield strength (235 MPa) of Q235 steel, and no plastic strain accumulation is observed, indicating that the structure remains in the elastic state. The findings suggest that section degradation can substantially lower the seismic performance reserve, but the structure still retains a certain safety margin under mild degradation conditions. This study may provide a reference for the seismic performance evaluation of in-service herringbone triangular truss arch bridges.

Keywords

Herringbone Triangular Truss Arch Bridge, Section Degradation, Finite Element Analysis, Seismic Response, Safety Margin

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

人字形三角桁拱桥是一类具有复杂空间受力特征的桥梁结构形式，其主要依靠拱肋、腹杆以及桥面系之间的协同作用承担竖向荷载和水平荷载。由于该类结构杆件数量较多、节点连接关系复杂，在长期服役过程中容易受到环境侵蚀、疲劳作用以及材料性能退化等因素影响，导致构件产生腐蚀、磨损及截面损失等退化现象。对于钢结构桥梁而言，腐蚀损伤会造成构件有效截面面积减小，使结构刚度和承载能力逐渐降低，进而影响桥梁服役性能和安全储备。

桥梁结构服役性能退化会直接影响其承载能力和抗震安全水平。已有研究表明，钢结构构件发生截面损失后，其截面面积和惯性矩会随之降低，导致构件轴向刚度和抗弯刚度下降，同时改变结构内部荷载传递路径和受力状态。在地震作用过程中，结构动力响应不仅受到地震输入强度影响，还与结构刚度、质量分布以及动力特性密切相关。因此，截面退化可能进一步放大结构位移响应，提高关键构件受力水平，降低桥梁抗震性能[1][2]。

近年来，针对桥梁结构退化问题及抗震性能评价方法，国内外学者开展了大量研究。在桥梁抗震分

析方面,研究主要集中于结构动力响应规律、地震作用下损伤演化以及抗震设计方法等方面。范立础等[3]系统总结了桥梁抗震设计理论的发展过程,指出结构体系、刚度分布以及构造形式是影响桥梁地震响应的重要因素;李建中等[4]进一步指出,随着桥梁抗震设计理念的发展,基于性能的抗震评价方法能够更加全面地反映结构在不同地震水平下的安全状态。

在结构退化研究方面,部分学者通过材料性能折减、截面削弱以及刚度退化等方式模拟长期服役影响,并分析退化状态下结构性能变化。Zhang 等[1]通过试验与数值分析研究了腐蚀环境下钢结构的抗震性能,结果表明腐蚀作用会降低结构刚度,并导致地震响应增加。Domaneschi 等[2]针对腐蚀环境下桥梁结构抗震能力开展研究,发现环境退化会降低结构抗震性能储备。Tzortzinis 等[5]通过试验与有限元分析研究了自然腐蚀钢梁剩余承载能力变化规律,指出截面损失会明显影响构件受力性能。Arimura 等[6]进一步分析了腐蚀损伤对钢工字梁桥承载能力的影响,发现截面削弱会导致构件刚度降低以及局部应力集中。Wei 等[7]针对局部腐蚀钢构件开展力学性能研究,进一步验证了截面退化对结构承载性能的不利影响。

然而,现有研究对象多集中于常规梁桥、钢梁结构以及普通桥梁体系,对于具有人字形空间桁架特点的三角桁拱桥,截面退化对其整体受力性能及地震响应影响规律仍缺乏系统研究。与此同时,实际工程中的结构退化通常表现为构件截面局部损失,其影响不仅体现在静力承载能力降低,还会通过改变结构刚度分布影响地震作用下的响应模式。因此,建立考虑截面退化因素的有限元模型,研究不同退化程度下结构响应变化规律,对于评价服役期桥梁抗震性能具有重要意义。

近年来,随着有限元分析技术和桥梁健康监测技术的发展,基于数值模拟、结构响应监测以及损伤识别开展桥梁结构性能评价已成为重要研究手段。《中国桥梁工程学术研究综述 2021》[8]系统总结了桥梁检测、监测、评估与加固等方面的研究进展,为长期服役桥梁状态评价和性能评估提供了研究基础;王凌波等[9]系统总结了桥梁健康监测技术的发展现状,指出结构损伤监测、安全预警以及基于监测数据的服役性能评价是桥梁运营安全保障的重要研究方向;赵一男等[10]对结构损伤识别方法进行了系统综述,指出损伤识别与检测能够用于判断结构损伤位置和评估损伤程度,为结构性能评价、加固和修复提供依据。

基于此,本文以某人字形三角桁拱桥为研究对象,采用 Abaqus 建立空间有限元模型,通过截面尺寸折减方法模拟服役退化状态,研究截面退化对结构静力响应、地震响应以及安全性能的影响规律。主要研究内容包括:

- (1) 建立考虑截面退化影响的人字形三角桁拱桥有限元模型;
- (2) 采用截面尺寸折减方法模拟构件退化状态;
- (3) 开展静力分析和地震动力时程分析,研究截面退化对结构响应的影响;
- (4) 结合应力水平及塑性发展情况,评价退化状态下结构安全储备。

2. 有限元模型建立

2.1. 模型建立及参数设置

本文以某人字形三角桁拱桥为研究对象,基于 Abaqus 建立三维有限元模型。根据原桥设计资料确定主要几何参数,模型桥长为 64 m,桥宽为 4.2 m,结构竖向最大高度为 20 m。有限元模型整体结构形式如图 1 所示。

考虑本文主要研究截面退化对桥梁整体受力性能及地震响应的影响,采用梁单元对主要承载构件进行模拟。模型主要包括拱肋杆件、腹杆、桥面系杆件以及横向连接构件等。所有杆件均采用三维空间梁单元 B31 进行离散,以保证模型能够反映结构整体刚度特征,同时兼顾计算效率。

材料参数根据实际工程钢材性能确定,采用 Q235 钢材模拟桥梁主要构件,其弹性模量取 206 GPa,泊松比取 0.3,材料密度取 7850 kg/m³。模型中各杆件通过节点连接形成整体受力体系,节点间采用刚性

连接方式模拟实际结构连接关系。

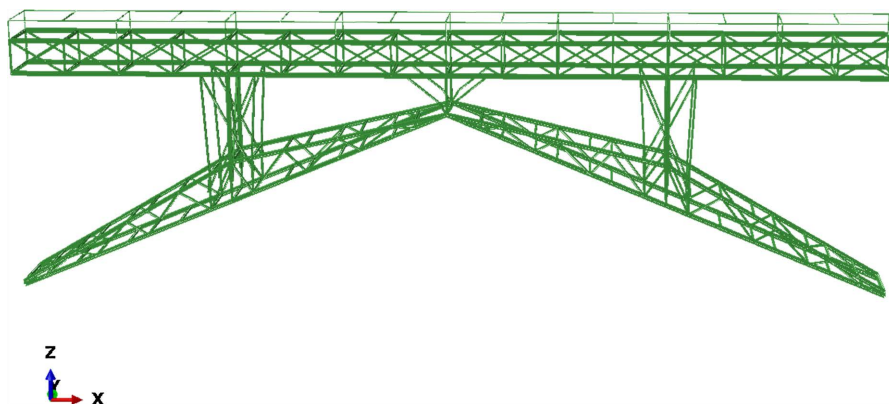


Figure 1. Three-dimensional finite element model of the herringbone triangular truss arch bridge
图 1. 人字形三角桁拱桥三维有限元模型

边界条件根据原桥实际受力特点进行设置，主要考虑拱脚约束、支座约束以及结构连接关系。其中，拱脚位置根据实际支承形式施加相应约束，支座位置限制对应方向自由度，以保证模型能够较真实地反映桥梁整体空间受力行为。

由于本文重点关注截面退化引起的结构整体性能变化，因此模型主要考虑杆件整体刚度变化对结构响应的影响，不进一步考虑局部板件屈曲及焊缝细节损伤等局部效应。

2.2. 截面退化模拟方法

桥梁长期服役过程中，环境侵蚀、疲劳作用以及材料老化等因素会导致钢构件产生腐蚀损失和截面削弱现象。构件截面退化不仅会降低有效受力面积，还会削弱截面惯性矩，从而降低结构整体刚度，影响桥梁服役性能。

为研究截面退化对人字形三角桁拱桥结构性能的影响，本文采用截面尺寸折减方法模拟构件退化状态。该方法通过降低杆件截面几何参数，等效反映长期服役过程中材料损失造成的刚度退化效应。截面退化模拟方式如图 2 所示。

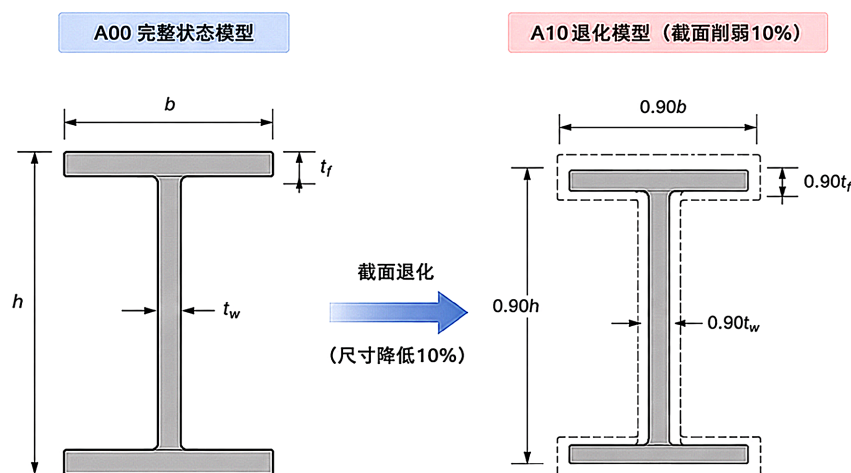


Figure 2. Schematic diagram of section degradation simulation for I-shaped steel section
图 2. 工字形钢截面退化模拟示意图

建立两种计算模型：

(1) 完整状态模型(A00)

保持原始截面尺寸参数不变，作为基准模型，用于评价结构正常服役状态下的受力性能。

(2) 截面退化模型(A10)

将主要承载构件工字形截面的几何尺寸整体折减 10%，保持截面形式及材料参数不变，以模拟均匀腐蚀导致的有效截面损失，模拟轻度服役退化状态。

通过对比 A00 模型与 A10 模型在相同荷载条件下的响应差异，分析截面退化对结构刚度、地震响应以及安全储备的影响。

3. 截面退化对结构响应影响

3.1. 静力响应分析

为验证所建立有限元模型的合理性，首先对结构整体静力响应进行校核分析。由于实际桥梁试验数据获取较为困难，本文采用理论受力规律对有限元模型进行间接验证。通过分析结构在自重作用下的整体变形特征，并与人字形三角桁拱桥类似结构的受力规律进行对比，验证模型在边界条件设置、杆件连接关系以及整体刚度模拟方面的合理性。

在此基础上，为初步分析截面退化对人字形三角桁拱桥整体受力性能的影响，首先对完整状态模型(A00)和截面退化模型(A10)开展自重静力分析。静力计算过程中考虑结构自身重力作用，通过对比两种状态模型的位移响应差异，评价截面削弱导致的结构刚度变化。

A00 模型和 A10 模型静力作用下位移响应分布分别如图 3 和图 4 所示。

由图 3 和图 4 可以看出，两种状态模型在自重作用下均保持稳定受力状态，整体变形规律基本一致。结构最大变形主要集中于跨中区域及拱肋变形较大的位置，符合人字形三角桁拱桥在竖向荷载作用下的空间受力特点。该变形分布规律与桁拱类桥梁受力特征一致，说明本文建立的有限元模型能够较合理地反映结构整体刚度及空间受力行为。

计算结果表明，完整状态模型(A00)的最大位移为 24.54 mm，而截面退化模型(A10)的最大位移达到 29.02 mm，相比完整状态增加约 18.26%。说明构件截面削弱后，结构在相同荷载作用下产生了更大的变形响应。

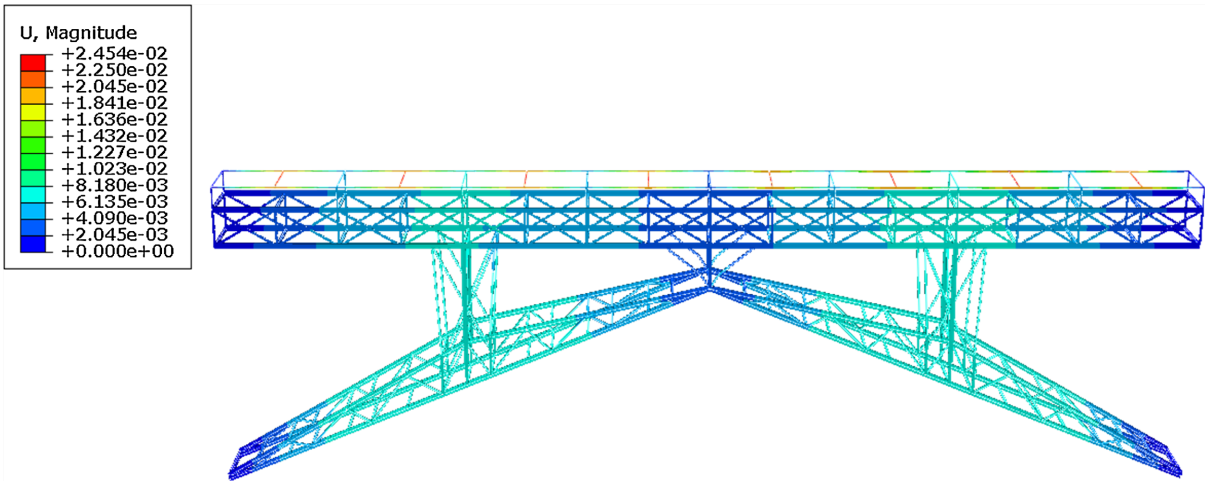


Figure 3. Displacement contour of the intact model (A00) under static loading
图 3. 完整状态模型(A00)静力作用下位移响应云图

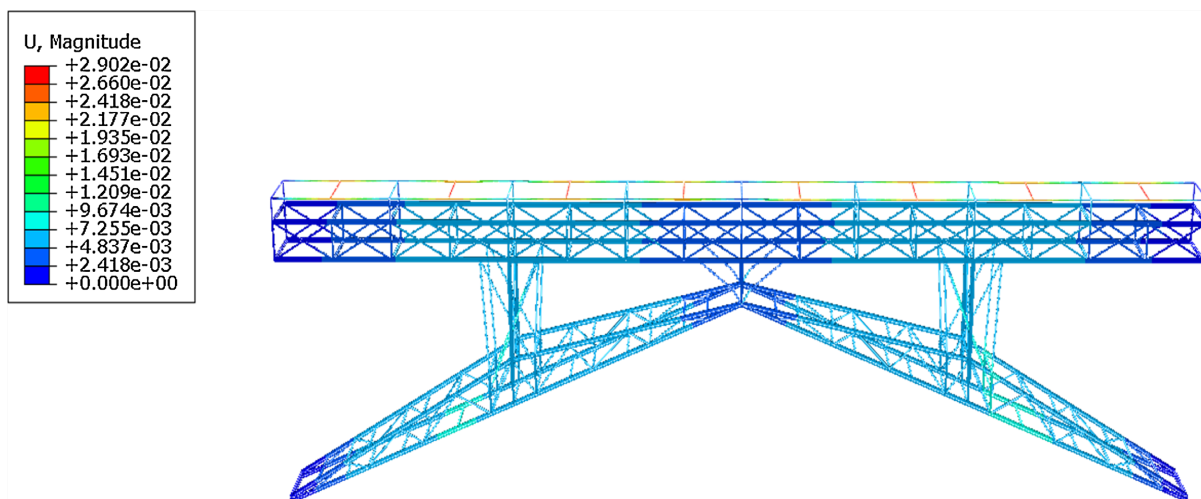


Figure 4. Displacement contour of the section-degraded model (A10) under static loading

图 4. 截面退化模型(A10)静力作用下位移响应云图

造成上述现象的主要原因在于，截面退化降低了杆件有效截面面积及惯性矩，使结构轴向刚度和抗弯刚度下降。对于人字形三角桁拱桥而言，整体刚度主要由拱肋、腹杆以及桥面系共同提供，当主要承载构件发生截面削弱后，各构件之间的协同受力能力降低，导致结构整体约束能力减弱，从而表现为静力变形增大。

进一步分析可知，虽然 A10 模型相较 A00 模型出现一定程度的位移增加，但结构整体受力体系未发生明显改变，说明 10% 的截面退化尚未造成结构承载体系失效。然而，静力响应的增加表明结构刚度储备已经受到影响，该影响可能在地震等动力荷载作用下进一步放大，因此有必要开展进一步的地震响应分析。

3.2. 地震响应分析

为研究截面退化对人字形三角桁拱桥抗震性能的影响，采用地震动力时程分析方法，对完整状态模型(A00)和截面退化模型(A10)开展动力响应计算。为充分考虑地震输入的不确定性及其不同地震动特征对人字形三角桁拱桥动力响应的影响，本文选取 7 组具有不同动力特征的代表性地震波作为输入地震动。本文将 E01~E07 定义为具有不同频谱特征的代表性参数化地震动，用于分析不同地震动特征对结构响应的影响，而非特定地震事件的实测记录。各组地震波均采用统一输入条件，地震加速度沿全局坐标系 +X 方向施加，峰值加速度统一调整为 0.10 g，输入时程持续时间为 20 s，时间间隔为 0.1 s。不同地震波在主频、主周期及持续时间等动力特征方面存在一定差异，能够反映不同类型地震动对结构动力响应的影响，七组输入地震波的主要动力参数见表 1。

由表 1 可知，7 组地震波在频谱特征及持续时间方面具有明显差异。其中，E01 主要用于分析长持续地震作用下结构累积响应特征；E02 考虑近场脉冲效应对结构响应的影响；E03 关注高频成分对局部杆件动力响应的作用；E04 和 E07 用于分析长周期地震动与结构低阶振型之间的耦合作用；E05 用于综合评价宽频地震输入条件下结构响应规律；E06 用于考察短时强脉冲作用下结构峰值响应变化。因此，所选 7 组地震波能够覆盖不同频率特征、持续时间及动力效应，具有一定代表性，可用于对不同服役状态下结构地震响应进行对比分析。

为直观比较两种状态模型的整体变形特征，选取第 5 组地震波作用结果作为典型工况，分别提取 A00 模型和 A10 模型最大位移响应云图，如图 5 和图 6 所示。

Table 1. Main dynamic parameters of the seven input ground motions
表 1. 七组输入地震波主要动力参数

地震波编号	地震动类型	PGA/g	主频/Hz	主周期/s	显著持时/s
E01	远场长持续型	0.10	0.647	1.546	15.65
E02	近场脉冲型	0.10	0.398	2.512	15.82
E03	高频型	0.10	1.045	0.957	15.70
E04	长周期型	0.10	0.299	3.350	15.07
E05	宽频型	0.10	0.697	1.436	15.60
E06	冲击脉冲型	0.10	0.498	2.010	15.30
E07	软土长周期型	0.10	0.199	5.025	14.16

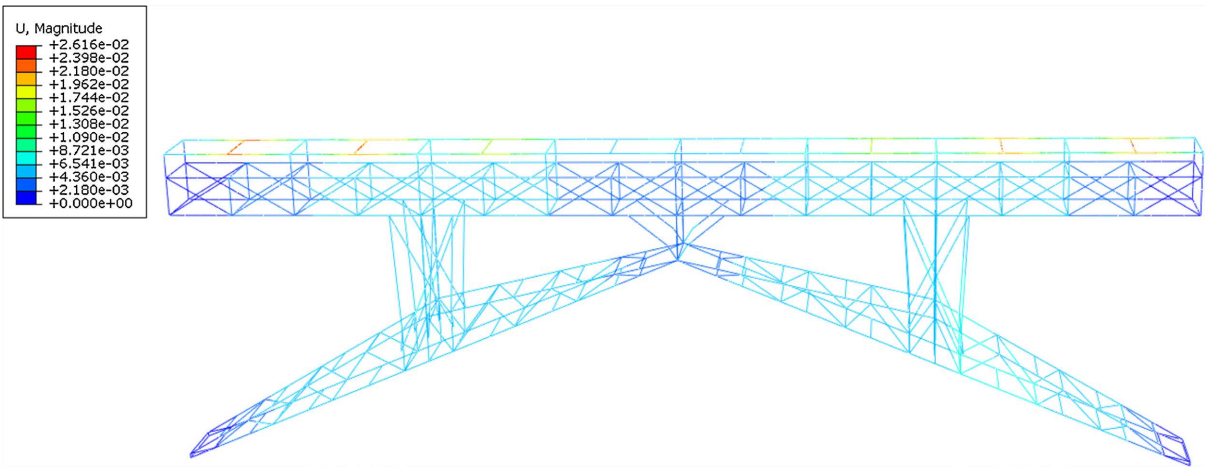


Figure 5. Displacement contour of the intact model (A00) under seismic ground motion No. 5
图 5. 完整状态模型(A00)第 5 组地震波作用下位移响应云图

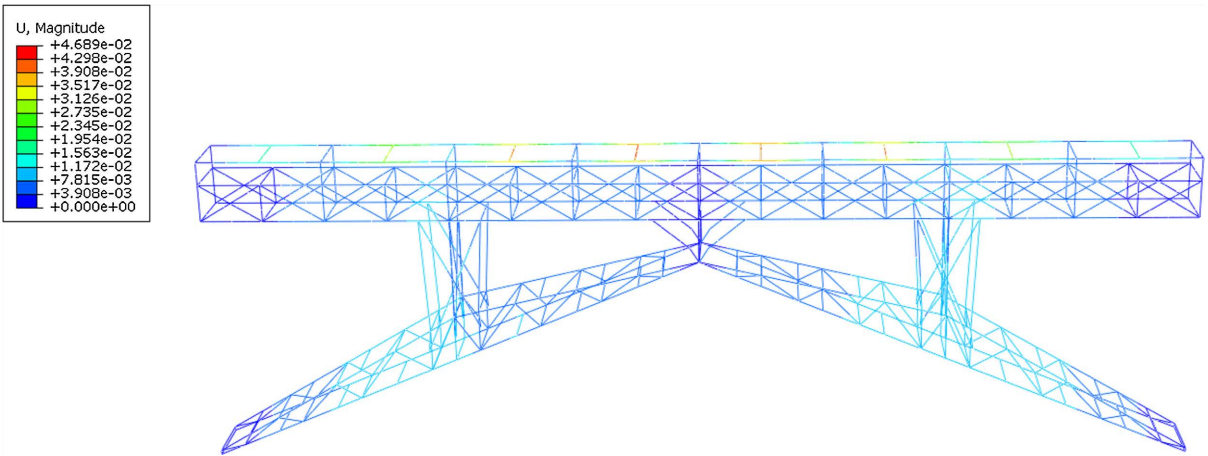


Figure 6. Displacement contour of the section-degraded model (A10) under seismic ground motion No. 5
图 6. 截面退化模型(A10)第 5 组地震波作用下位移响应云图

由图 5 和图 6 可知，在地震作用下，两种模型均保持较好的整体协同变形特征，未出现明显局部失稳现象。结构变形主要集中于桥面系及跨中区域，而拱肋及下部桁架体系整体响应相对较小，表明所建

立有限元模型能够较好反映人字形三角桁拱桥空间受力特点。

进一步统计 7 组地震波作用下结构最大位移响应, 结果如图 7 所示。

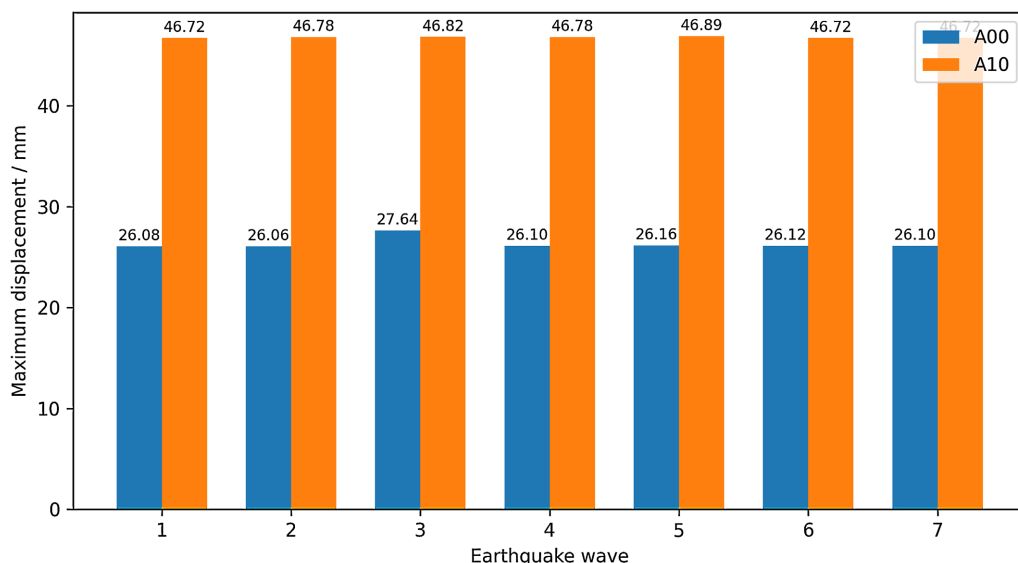


Figure 7. Comparison of maximum displacement responses between Model A00 and Model A10 under seven ground motions
图 7. 七组地震波作用下 A00 与 A10 模型最大位移响应对比

由图 7 可知, 不同地震波作用下, 两种模型最大位移变化趋势基本一致, 但截面退化模型响应水平明显高于完整状态模型。

A00 完整状态模型平均最大位移为 26.32 mm, 而 A10 退化模型平均最大位移达到 46.78 mm, 相比完整状态模型增加 77.73%。

结果表明, 截面退化会明显放大结构在地震作用下的动力变形, 使桥梁结构产生更大的位移需求。相比静力荷载作用, 地震作用下结构响应增幅更加明显, 说明动力荷载条件下截面削弱对结构性能的不利影响更加突出。

其主要原因在于, 截面退化降低了构件有效截面面积和惯性矩, 使结构整体刚度下降, 抗侧能力降低。同时, 刚度退化会改变结构内部荷载传递路径, 使部分构件承担更多动力荷载。此外, 地震作用具有明显动力放大效应, 结构响应不仅受到刚度变化影响, 还与地震输入特征及结构动力响应过程有关。

因此, 即使仅发生 10% 的截面削弱, 也可能导致结构地震位移需求明显增加。在服役桥梁抗震性能评价过程中, 应充分考虑构件截面退化对结构动力响应的不利影响。

4. 退化状态下结构安全性能评价

前文分析表明, 截面退化会降低人字形三角桁拱桥整体刚度, 并显著增加结构在地震作用下的位移响应。为进一步评价截面退化条件下结构的安全储备, 本文选取退化程度较大的 A10 模型作为评价对象, 对其在 0.10 g 地震作用下的应力水平及塑性发展情况进行分析。

采用 Mises 应力和等效塑性应变(PEEQ)作为结构安全性能评价指标, 通过分析退化状态下结构应力分布及塑性发展情况, 判断截面退化后桥梁是否出现强度破坏或不可恢复损伤。

4.1. Mises 应力分布分析

为分析截面退化条件下结构受力状态, 提取 A10 模型在第 5 组地震波作用下最大位移响应时刻的

Mises 应力分布结果，如图 8 所示。

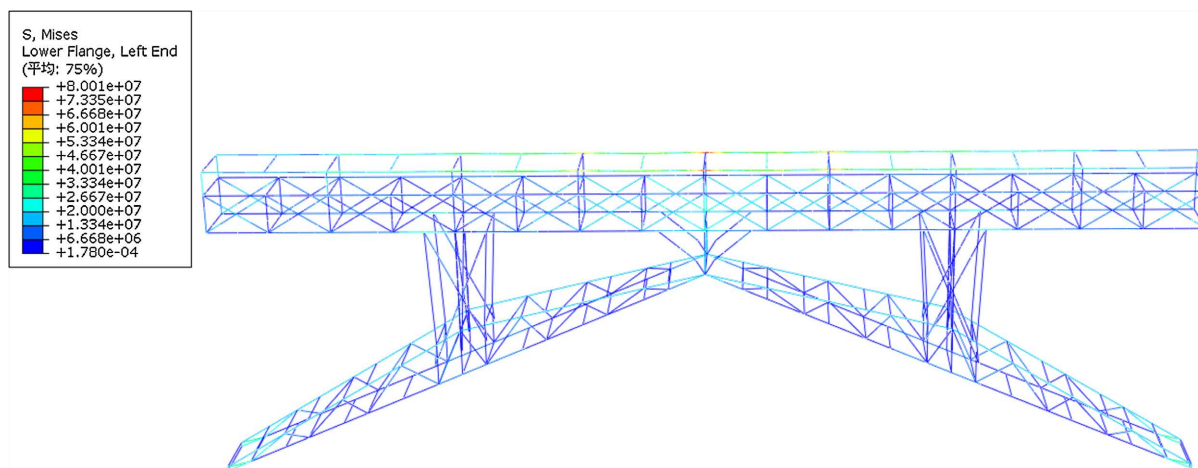


Figure 8. Mises stress contour of the section-degraded model (A10) at the moment of maximum response

图 8. 截面退化模型(A10)最大响应时刻 Mises 应力分布云图

由图 8 可以看出，地震作用过程中 A10 模型整体应力分布较为均匀，未出现大范围高应力区域。结构应力主要集中于杆件连接节点及局部刚度变化区域，该区域承担多方向荷载传递作用，容易产生一定程度的应力集中现象。

计算结果表明，截面退化模型最大 Mises 应力为 80.01 MPa，明显低于 Q235 钢材屈服强度 235 MPa，仅约占材料屈服强度的 34.0%。说明在 0.10 g 地震输入水平下，虽然截面削弱降低了结构整体刚度，并导致地震位移响应增加，但主要承载构件仍处于弹性受力阶段，未达到材料屈服状态。

由此可见，在 10%截面退化条件下，结构整体承载体系仍保持稳定，具有一定强度储备。

4.2. 塑性发展分析

为进一步判断截面退化后结构是否发生不可恢复损伤，采用等效塑性应变(PEEQ)指标对 A10 模型进行塑性发展分析。

计算结果显示，在 0.10 g 地震作用过程中，结构最大 PEEQ 为 0，未出现明显塑性应变区域，表明结构在该地震强度作用下未发生塑性累积，整体仍保持弹性工作状态。

结合前文地震响应分析结果可知，截面退化虽然导致结构动力位移明显增加，但由于退化程度较低，结构仍能够依靠整体空间受力体系进行荷载传递和内力调整，未产生明显局部损伤。

因此，在当前退化水平及地震输入条件下，结构主要表现为刚度退化引起的响应增加，而未出现强度控制型破坏。

4.3. 退化状态下抗震安全性能评价

综合位移响应、应力水平以及塑性发展结果可知，截面退化对人字形三角桁拱桥抗震性能具有明显不利影响。

10%的截面削弱降低了结构整体刚度，使结构在地震作用下产生更大的动力位移需求，A10 模型平均最大位移相比完整状态模型增加 77.73%，表明截面退化会削弱结构抗震性能储备。

然而，在 0.10 g 地震输入水平下，A10 模型最大 Mises 应力仅为 80.01 MPa，低于 Q235 钢材屈服强度，同时未出现塑性应变累积现象，说明结构仍具有一定安全储备。

因此,对于服役期人字形三角桁拱桥而言,截面退化虽然不会立即导致结构失效,但会降低结构刚度水平并放大地震响应。随着服役时间增加,若截面损失进一步发展,可能导致更明显的动力响应放大以及局部受力集中。因此,在实际桥梁抗震性能评价过程中,应充分考虑构件截面退化因素对结构整体性能的不利影响。

5. 结论

本文针对长期服役过程中截面退化对人字形三角桁拱桥抗震性能的影响问题,基于 Abaqus 建立三维有限元模型,采用截面尺寸折减方法模拟 10%截面退化状态,通过静力分析、地震动力时程分析方法以及安全性能评价,研究了截面退化对结构响应及安全储备的影响。主要结论如下:

(1) 采用截面尺寸折减方法能够有效模拟人字形三角桁拱桥服役退化状态,可用于分析构件截面损失对结构整体性能的影响。建立的三维梁单元模型能够较好反映结构空间受力特点。

(2) 截面退化会降低结构整体刚度,使自重作用下结构变形增加。完整状态模型(A00)最大位移为 24.54 mm,而截面退化模型(A10)最大位移达到 29.02 mm,相比完整状态增加约 18.26%。

(3) 截面退化对结构地震响应影响更加明显。在 7 组地震波作用下,A10 模型平均最大位移达到 46.78 mm,相比 A00 模型增加 77.73%,说明截面削弱会明显放大结构动力响应。

(4) 在 0.10 g 地震作用水平下,A10 模型最大 Mises 应力为 80.01 MPa,低于 Q235 钢材屈服强度 235 MPa,且最大 PEEQ 为 0,结构未发生明显塑性累积,仍具有一定安全储备。

(5) 截面退化主要通过降低结构整体刚度、增加动力变形需求以及改变构件受力状态影响桥梁抗震性能。对于长期服役的人字形三角桁拱桥,应在抗震性能评估过程中充分考虑构件退化因素,以提高结构安全评价的可靠性。

参考文献

- [1] Zhang, X., Zheng, S. and Zhao, X. (2020) Experimental and Numerical Study on Seismic Performance of Corroded Steel Frames in Chloride Environment. *Journal of Constructional Steel Research*, **171**, Article 106164. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106164>
- [2] Domaneschi, M., De Gaetano, A., Casas, J.R. and Cimellaro, G.P. (2020) Deteriorated Seismic Capacity Assessment of reinforced Concrete Bridge Piers in Corrosive Environment. *Structural Concrete*, **21**, 1823-1838. <https://doi.org/10.1002/suco.202000106>
- [3] 李建中, 管仲国. 桥梁抗震设计理论发展: 从结构抗震减震到震后可恢复设计[J]. 中国公路学报, 2017, 30(12): 1-9+59.
- [4] 李建中, 管仲国. 基于性能桥梁抗震设计理论发展[J]. 工程力学, 2011, 28(S2): 24-30+53.
- [5] Tzortzinis, G., Breña, S.F. and Gerasimidis, S. (2022) Experimental Testing, Computational Analysis and Analytical Formulation for the Remaining Capacity Assessment of Bridge Plate Girders with Naturally Corroded Ends. *Engineering Structures*, **252**, Article 113488. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113488>
- [6] Arimura, K., Oura, R. and Yamaguchi, T. (2021) Analytical Study on the Effect of Corrosion Damage on Load Carrying Capacity of Steel I Girder Bridges. *Journal of Structural Steel Construction*, **28**, 1-12.
- [7] Wei, Y., Wu, Z., Wang, X. and Jiang, S. (2021) Mechanical Behavior of Locally Corroded Circular Steel Tube under Compression. *Structures*, **33**, 776-791. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.04.063>
- [8] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2021 [J]. 中国公路学报, 2021, 34(2): 1-97.
- [9] 王凌波, 王秋玲, 朱钊, 等. 桥梁健康监测技术研究现状及展望[J]. 中国公路学报, 2021, 34(12): 25-45.
- [10] 赵一男, 公茂盛, 杨游. 结构损伤识别方法研究综述[J]. 世界地震工程, 2020, 36(2): 73-84.