

文章编号:1671-1637(2026)05-0193-12

## 基于耐震时程法的钢管混凝土墩-连续梁桥多向抗震性能评估

孙浩<sup>1</sup>, 李艳哲<sup>1</sup>, 买英东<sup>1</sup>, 吕飞<sup>2</sup>, 丁发兴<sup>\*2</sup>, 吴霞<sup>2</sup>, 杨秋宁<sup>1</sup>

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏银川 750021; 2. 中南大学土木工程学院, 湖南长沙 410075)

**摘要:**针对多跨连续梁桥在多向地震动作用下的强非线性响应,提出了一种基于耐震时程法的钢管混凝土桥墩抗震性能评估方法;采用高精度有限元软件 ABAQUS,基于混合强化-韧性损伤模型与约束混凝土三轴塑性-损伤模型,利用实体-壳单元构建了两跨连续梁桥的精细有限元模型,并通过双向振动台试验数据进行了验证,以确保模型的准确性;引入耐震时程法分析技术,利用人工合成的多维耐震时程曲线,模拟不同地震强度和方向下钢管混凝土桥墩的非线性动力响应与损伤演化过程,量化了桥墩在各工况下的位移响应及损伤程度,并评估了传统组合方法在多向地震输入下的适用性与准确性。研究表明:试验与有限元分析结果的一致性验证了模型的可靠性;以控制墩 P<sub>2</sub> 为例,多向地震作用下横桥向最大位移由约 26 mm 增大至 32~40 mm,对应位移角为 3.99%~5.02%,部分工况超过 4%的关键性能限值;此外,与耐震时程分析结果相比,传统的平方和开平方根与 100%/30%组合方法在典型双向工况下将 P<sub>2</sub> 墩轴向力由 316.69~320.39 kN 保守放大至 407.19~440.55 kN,高估幅度为 27%~39%,主要是由于地震动各方向存在相位差及结构的非线性响应,导致传统方法难以充分考虑多向耦合效应和真实动力特性,从而影响抗震性能的准确评估。在实际工程设计中,关键构件的抗震设计应结合时程分析,充分考虑地震动的相位差与耦合效应,综合运用多种评估方法,在安全性与经济性之间取得更优平衡。

**关键词:**桥梁工程;钢管混凝土墩;耐震时程法;多向地震作用;连续梁桥;有限元分析

**中图分类号:**U443.22 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.045

### Multidirectional seismic performance evaluation of concrete-filled steel tube pier-continuous beam bridges based on endurance time method

SUN Hao<sup>1</sup>, LI Yan-zhe<sup>1</sup>, MAI Ying-dong<sup>1</sup>, LYU Fei<sup>2</sup>, DING Fa-xing<sup>\*2</sup>, WU Xia<sup>2</sup>, YANG Qiu-ning<sup>1</sup>

(1. College of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China;

2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China)

**Abstract:** To address the strongly nonlinear response of multi-span continuous girder bridges under multi-directional seismic excitation, this paper proposes an endurance time method (ETM)-based approach for assessing the seismic performance of concrete-filled steel tube (CFST) bridge piers. A refined finite element model of a two-span continuous girder bridge is developed using

出版历程:2025-05-21 收稿,2025-09-05 修回,2025-09-26 录用

基金项目:宁夏自然科学基金项目(2025AAC050030);国家自然科学基金项目(51978664,52008400)

作者简介:孙浩(1993-),男,河北唐山人,讲师,工学博士,E-mail:flysunshine@126.com。

\*通信作者:丁发兴(1979-),男,浙江瑞安人,教授,博士生导师,工学博士,E-mail:dinfaxin@csu.edu.cn。

引用格式:孙浩,李艳哲,买英东,等.基于耐震时程法的钢管混凝土墩-连续梁桥多向抗震性能评估[J].交通运输工程学报,2026,26(5):193-204.

**Citation:** SUN Hao, LI Yan-zhe, MAI Ying-dong, et al. Multidirectional seismic performance evaluation of concrete-filled steel tube pier-continuous beam bridges based on endurance time method[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(5): 193-204.

the high-fidelity FE software ABAQUS with solid-shell elements, incorporating a combined hardening-ductile damage model and a triaxial plastic-damage model for confined concrete. The model is validated against bidirectional shaking-table test data to ensure its accuracy. Subsequently, the ETM analysis technique is introduced. Artificially generated multi-component endurance time acceleration functions are employed to simulate the nonlinear dynamic response and damage evolution of CFST piers under different seismic intensities and directions, to quantify the displacement response and damage level of the piers under various scenarios, and to evaluate the applicability and accuracy of conventional combination rules under multi-directional seismic inputs. The results show that the good agreement between the experimental and numerical responses confirms the reliability of the proposed model. Taking the controlling pier  $P_2$  as an example, under multi-directional seismic excitation, its maximum transverse displacement increases from approximately 26 mm to 32-40 mm, corresponding to drift ratios of 3.99%-5.02%, and in some cases exceeds the critical performance limit of 4%. Furthermore, compared with the ETM-based time-history analysis, the traditional square-root-of-sum-of-squares (SRSS) and 100%/30% combination rules conservatively amplify the axial force of pier  $P_2$  from 316.69-320.39 kN to 407.19-440.55 kN under typical bidirectional loading, resulting in an overestimation of approximately 27%-39%. This discrepancy mainly arises from the phase differences among ground-motion components and the nonlinear structural response, which make it difficult for the conventional rules to adequately capture multi-directional coupling effects and the actual dynamic characteristics, thereby compromising the accuracy of seismic performance evaluation. In practical bridge design, it is recommended that the seismic design of critical components be supplemented by time-history analysis that explicitly accounts for ground-motion phase differences and coupling effects. An integrated application of multiple assessment approaches should be adopted to achieve an improved balance between safety and economy.

**Keywords:** bridge engineering; concrete-filled steel tube pier; endurance time method; multidirectional seismic action; continuous beam bridge; finite element analysis

**Publication history:** Received 2025-05-21; Received in revised form 2025-09-05; Accepted 2025-09-26

**Funding:** Natural Science Foundation of Ningxia (2025AAC050030); National Natural Science Foundation of China (51978664, 52008400)

\* **Corresponding author:** DING Fa-xing, professor, PhD, E-mail: dinfaxin@csu.edu.cn.

## 0 引 言

近年来,钢管混凝土(Concrete-filled Steel Tube, CFST)桥墩凭借优异的承载力、延性、耗能能力以及施工便捷性,正逐渐成为高速铁路、高速公路及城市立交桥等多类型桥梁中备受关注的抗震构件<sup>[1-4]</sup>。与传统钢筋混凝土桥墩相比,CFST桥墩在截面约束效应、局部稳定性、延性储备与耗能能力方面均有显著提升,其良好的滞回性能与抗震潜力已在国际研究与工程实践中得到广泛验证<sup>[5-7]</sup>。通过构件层面的试验研究与有限元数值模拟,学者们已系统揭示了CFST桥墩的滞回特征、承载力退化规律及失效模式,并明确了截面尺寸、壁厚比以及

钢材与混凝土强度等参数对桥墩抗震性能的影响机理<sup>[8-10]</sup>。

然而,上述研究多聚焦于构件层面的抗震特性,对于CFST桥墩在复杂桥梁体系中的整体协同与耦合效应则关注不足。事实上,在连续梁桥等多跨复杂体系中,CFST桥墩不再是独立受力部件,而是与上部结构、相邻墩柱、支座、地基基础及减隔震装置共同组成强耦合、非线性的动力系统<sup>[11-12]</sup>。在此类体系中,多维地震动输入在各正交方向同时作用,传统基于单向地震响应的简化分析方法难以真实表征结构经历真实地震时的动力特性与潜在薄弱环节。多维耦合不仅加剧墩柱材料与截面的非线性响应,更易引发复杂的弯曲-剪切-扭转耦合和高阶振型参

与,还会造成截面在不同方向上的不均匀耗能与局部损伤累积<sup>[13-14]</sup>。此时,传统的多维地震效应组合法[如平方和开平方根(SRSS)与百分比组合法]在强震作用下与复杂体系条件下的适用性与精度备受质疑<sup>[15]</sup>。为解决这些问题,有必要借助精细化数值模型与高效计算平台,对多维耦合效应与非线性发展过程展开全面、细致的抗震分析。

目前,纤维单元法虽能有效描述桥梁构件的塑性分布与整体破坏模式<sup>[16-17]</sup>,但在模拟钢管-混凝土之间复杂耦合作用、局部屈曲以及大变形非线性行为方面仍存在局限<sup>[18]</sup>。为此,采用高精度有限元软件(如 ABAQUS)中的实体-壳单元联合建模策略可更加精确地体现材料非线性、几何非线性及局部效应<sup>[19]</sup>。然而,此类精细化模型在多维抗震时程分析中的计算成本极高,不利于工程快速决策。为在精度与效率之间取得平衡,将耐震时程法(Endurance Time Method, ETM)分析技术引入精细化模型成为必然选择。传统的精细化模型需选取并调幅上百条天然地震时程,逐条运行非线性分析,因而计算量和人为环节众多,效率极低,不利于工程快速决策。相比之下,ETM通过一次性合成递增强度的多维时程曲线,便可在单次模型运行中获取从微震到烈震各级别强度下的结构动态响应和损伤演化,大幅减少人力和计算资源消耗,并能迅速识别抗震临界状态与薄弱环节<sup>[20-21]</sup>。通过输入人工合成的多维耐震时程曲线,可精准追踪结构随时间推进的非线性动力响应与损伤演化过程,并快速识别体系的抗震极限状态、潜在破坏机制与关键薄弱部位。这不仅有助于深化对 CFST 桥墩在连续梁桥体系中耦合动力特性的理解,也可为工程设计、性能评估与决策优化提供扎实的技术支持,为复杂桥梁体系的抗震优化设计与性能提升奠定坚实基础。

基于上述认识与研究目标,本文开展以下研究工作:①在 ABAQUS 平台引入参数确定性混合强化-韧性损伤模型与约束混凝土三轴塑性-损伤模型,并结合水平主裂缝插入技术,构建两跨连续梁桥的精细化有限元模型,且以双向振动台试验数据对模型进行验证;②基于多维 ETM 分析方法,研究桥墩顶端位移响应,并以位移角为指标量化损伤程度;③对设计规范中常用的 SRSS 与 100%/30%组合法在多向地震输入下的适用性与精度进行评估,为规范的改进与完善提供参考。

## 1 耐震时程法的基本理论及耐震时程曲线的合成

### 1.1 耐震时程法的基本理论

ETM 的典型特征是地震动强度随着时间逐渐增大,且在某一时段内,目标加速度反应谱与该时段的持续时间  $t$  呈线性关系,见下式

$$S_{\text{tarAT}}(T, t) = \frac{t}{t_{\text{tar}}} S_{\text{preA}}(T) \quad (1)$$

式中:  $S_{\text{tarAT}}(T, t)$  为任意时间  $t$  的目标加速度反应谱,  $T$  为结构的自振周期;  $t_{\text{tar}}$  为目标时间点;  $S_{\text{preA}}(T)$  为预先指定的反应谱。

由式(1)可知,在给定  $t_{\text{tar}}$  和  $S_{\text{preA}}(T)$  的条件下,用 ETM 得到的加速度的时程中,从 0 至  $t$  的加速度反应谱值与  $t$  呈线性关系。鉴于位移反应与加速度反应之间的密切关联,ETM 中的目标位移反应谱如下

$$S_{\text{tarUT}}(T, t) = \frac{tT^2}{4\pi t_{\text{tar}}} S_{\text{preA}}(T) \quad (2)$$

式中:  $S_{\text{tarUT}}(T, t)$  为  $t$  的目标位移反应谱。

在特定  $t$ , 加速度时程可在给定精度范围内满足式(1)和式(2)的约束条件。ETM 的核心理念在于使得加速度时程的每个时间点尽可能地符合这两项约束。然而,考虑到精度的限制,完全满足这些条件在所有时刻是不可行的。因此,该问题可被转化为一个无约束优化问题,通过优化求解使加速度时程在有限精度下尽可能逼近所需的约束要求

$$\min F(\ddot{u}_g) = \int_0^{T_{\max}} \int_0^{t_{\max}} \{ [S_A(T, t) - S_{\text{tarAT}}(T, t)]^2 + \alpha [S_U(T, t) - S_{\text{tarUT}}(T, t)]^2 \} dt dT \quad (3)$$

式中:  $F(\cdot)$  为目标函数;  $\ddot{u}_g$  为需要生成的耐震时程曲线;  $S_A(T, t)$  和  $S_U(T, t)$  分别为  $\ddot{u}_g$  在时间  $t$  的加速度反应谱和位移反应谱;  $\alpha$  为位移谱的权重系数;  $T_{\max}$  为目标谱匹配所考虑的最大结构周期;  $t_{\max}$  为地震动时程最大持续时间。

在单自由度体系中,加速度响应与速度响应密切相关,因此可选取其中任意一个作为响应参数。本研究选取加速度反应谱作为目标谱,即设定  $\alpha = 0$ 。在此基础上,ETM 生成地震动时程的核心问题在于如何确定一条最优的地震动时程  $\ddot{u}_g$ , 使得该时程的反应谱与目标反应谱在任意时刻都能最大程度地吻合。

具体而言,预先指定的反应谱  $S_{\text{preA}}(T)$  可以是任意形状的反应谱,包括弹性反应谱和非弹性反应谱。通常情况下,目标反应谱可以选择规范反应谱

或是由实际地震动时程记录生成的反应谱。在耐震分析中,生成的地震动时程应当使得其反应谱尽可能与目标反应谱相匹配,从而为结构的抗震性能评估提供合适的地震动输入。

为了实现这一目标,本文采用 ETM 分析技术,通过优化算法生成满足目标反应谱要求的地震动时程。优化过程中,时程的调整会使得其反应谱与指定目标反应谱的差异最小化,从而确保结构在地震作用下的动态响应能够准确反映地震动的实际特征。

### 1.2 耐震时程曲线的合成

依据《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-

01—2020),某桥为 B 类桥梁,按 7 度设防,场地设计基本地震加速度取  $0.15g$ ,场地类别为 II 类,地震动反应谱特征周期  $T_g=0.45\text{ s}$ 。结合《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)所规定的目标反应谱,本文采用非线性最小二乘法对 ETM 的合成过程进行了研究<sup>[22]</sup>。结果表明,该方法生成的耐震时程曲线在加速度反应谱上与规范谱拟合精度较高。基于此,本文合成了 3 条持续时间为 30 s 的耐震时程曲线(图 1),其加速度反应谱与规范谱的对比(图 2)进一步验证了 3 条时程记录对目标规范谱的高度一致性。

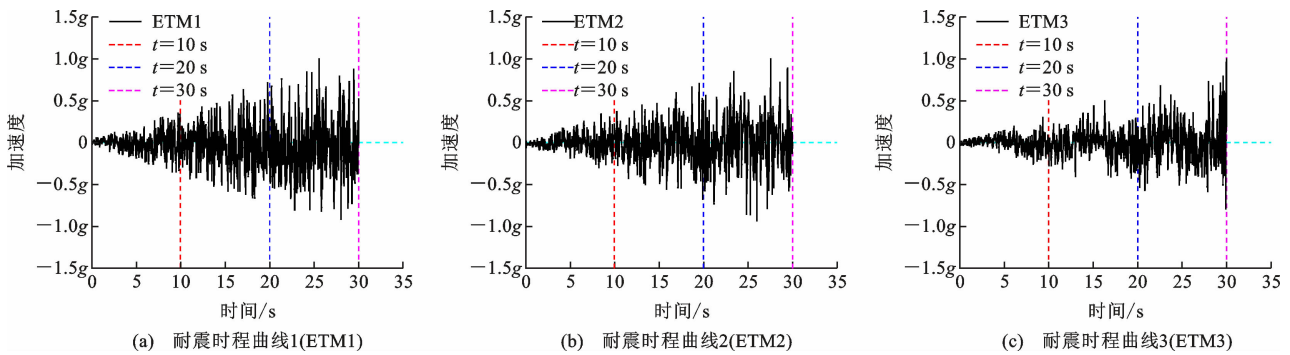


图 1 3 条耐震时程曲线  
Fig. 1 Three ETM curves

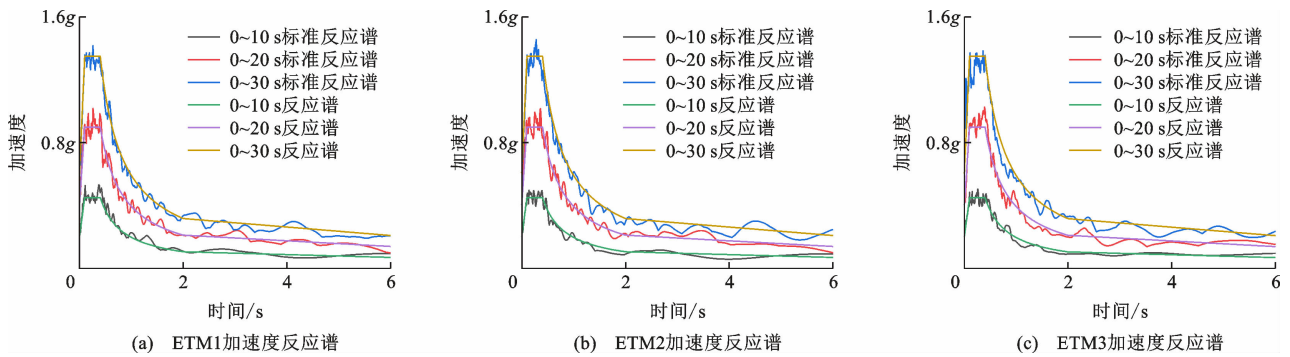


图 2 3 条耐震时程曲线的加速度反应谱  
Fig. 2 Acceleration response spectra of three ETM curves

## 2 两跨连续梁桥振动台有限元模型与验证

### 2.1 结构模型简介

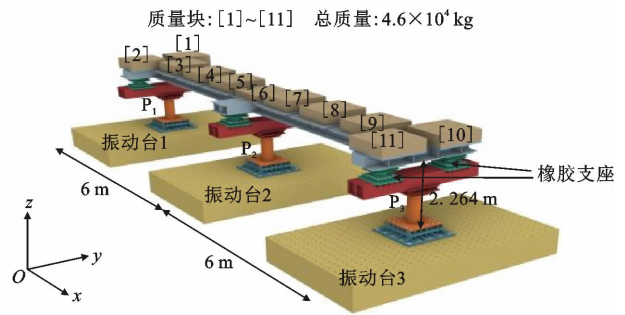
Goto 等<sup>[14]</sup>在同济大学振动台阵列上对 1/6.7 缩尺的双跨连续梁桥模型进行了双向地震动加载试验。本文选择该模型的原因在于试验模型与本文研究中的桥墩高度相似,且多维地震输入条件与本研究一致,能够有效验证模型在不同方向地震作用下的非线性响应和损伤演化。试验模型的桥墩设计采用了 2 种形式:一种为等截面薄壁空心钢管桥墩,另

一种为充填混凝土的钢管桥墩。上部结构由 2 根等效刚度的主梁和 3 根等距横梁组成,桥墩通过橡胶支座支承在上部结构上。为更接近实际桥梁的荷载分布,模型在桥墩顶部布置了 11 块质量块,总质量  $4.6 \times 10^4\text{ kg}$ 。通过这些质量块的布置,使得中心墩 ( $P_2$ ) 的轴压比为 0.12,而端部墩 ( $P_1$ 、 $P_3$ ) 的轴压比为 0.08,从而模拟实际桥梁中荷载分配的情况,如图 3 所示。

振动台阵列由 3 台独立的六自由度振动台组成,分别固定于  $P_1$ 、 $P_2$  和  $P_3$  墩基底,并在  $x$ (主桥向, LG)与  $y$ (横桥向, TR)方向上实现无相位差的



(a) 试验现场



(b) 试验示意

图 3 两跨连续梁桥振动台试验

Fig. 3 Shake table test of a two-span continuous beam bridge

同步激励。为验证装置及仪器布置的可靠性,首先对模型施加放大 10% 和 20% 的津轻地震波进行预试验;正式试验则分别以 270% (空心钢管模型) 和 400% (充填混凝土的钢管模型) 的放大等级输入 1983 年日本青森津轻桥地震的 LG/TR 分量。试验中观测到的输入加速度响应谱与设计目标谱的一致性误差均小于 11%,保证了激励的准确性。

为获取精确的响应数据,试验中在每个桥墩的横梁与上部结构连接处增设了刚接六轴测力传感器,用于记录反力。钢管混凝土墩柱的几何特性、材料属性、橡胶支座参数以及顶部质量块的质量和惯性矩见文献[14]。

### 2.2 有限元模型的建立

在精细有限元模型中,对全桥系统的建模与单元选型如下:由于地震作用下破坏主要集中在墩柱、上部结构损伤较轻,故主梁采用弹性梁单元,转换梁及模型中各质量单元则通过刚性梁单元与主梁相连;橡胶支座以弹簧单元模拟。墩柱混凝土部分选用八节点六面体三维实体单元(线性减缩积分),钢管则采用四节点四边形薄板壳单元(线性减缩积分),模型示意图 4。

材料本构关系方面,核心混凝土采用丁发兴等[23]提出的混凝土的单轴受压/拉应力-应变关系骨架曲线统一计算式,约束混凝土三轴塑性-损伤模型参数取值如下:膨胀角为 40°,压、拉子午线强度比值为 2/3,二轴等压、单轴抗压强度比值为 1.277,黏性系数为 0.005,泊松比为 0.2。损伤因子取值见文献[24]。同时混凝土单元引入主裂缝技术,具体步骤为:①首先构建不含裂缝的混凝土基准有限元模型;②对计算结果进行后处理,定位拉应力超过混凝土抗拉强度的区域;③在此基础上重新建模,将应力超限区划分为两相互独立的混凝土体,并在裂缝

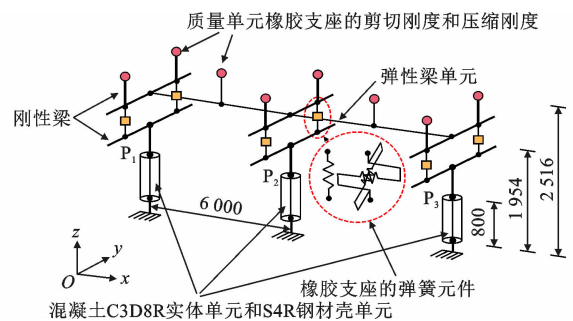


图 4 基于三维实体-壳单元的精细有限元模型在整体桥梁系统中的应用(单位:mm)

Fig. 4 Application of 3D solid-shell element-based refined finite element model in the overall bridge system (unit: mm)

面设置面-面接触,切向为刚性接触,法向采用罚函数算法,摩擦因数  $\mu=1$ 。在极强地震等极端荷载作用下,钢材会经历显著塑性变形并伴随强度与刚度逐步衰减。为更真实地描述这一劣化过程,本文在传统混合强化本构的框架上引入延性相关损伤项,提出了混合强化-韧性损伤模型。该模型能够精准刻画钢材在大塑性变形阶段的强度退化和刚度软化,进而揭示钢管混凝土桥墩的强震失效机制及多次地震后的性能演化[19],韧性损伤演化关系如下

$$\epsilon_t = 7.72 f_y^{-0.4} \quad (4)$$

$$D_s = 0.96 (\bar{\mu}^{pl} / \bar{\mu}_t)^{2.42} \quad (5)$$

式中: $\epsilon_t$  为钢材断裂应变; $f_y$  为钢材屈服强度; $D_s$  为钢材损伤因子; $\bar{\mu}^{pl}$  和  $\bar{\mu}_t$  分别为钢材拉伸时的塑性位移和极限位移。

钢管壳体与核心混凝土界面采用库仑摩擦接触模型,以同时考虑切向的黏结-滑移效应和法向的刚性接触。切向接触通过惩罚函数实现,摩擦因数取 0.2[19],并引入有限滑移算法以提升计算效率。界面使用面-面接触单元,其中刚度较高的钢管壳单元设为主表面,较柔性的混凝土实体单元设为从表面。

2.3 有限元模型的验证

图 5 为两跨连续梁桥振动台试验与有限元模型在  $P_1$ 、 $P_2$  和  $P_3$  桥墩的时程响应曲线对比,表 1、2 分别列出了两跨连续梁桥  $P_1$ 、 $P_2$  和  $P_3$  三座墩在  $x$ 、 $y$  两个方向峰值位移的有限元计算值、试验值及相对误差。结果表明: $x$  方向峰值位移的最大相对误差为  $P_2$  负向的 14.64%,最小相对误差为  $P_1$  负向的 2.12%,三墩平均误差约为 8.47%; $y$  方向峰值位移的最大相对误差为  $P_3$  负向的 11.78%,最小相对误差为  $P_2$  正向的 1.34%,平均误差约为 8.18%。所有误差均位于工程常用的  $\pm 15\%$  允许范围内。误差

产生的主要原因包括对橡胶支座和上部结构采用弹簧/梁单元简化处理、试验安装与测点布置过程中的微小差异,以及有限元节点与试验测点空间位置的不完全一致等。通过与试验结果的对比,有限元模拟的时程响应与实际试验数据高度吻合,表明基于三维实体-壳单元精细有限元模型能够准确地模拟两跨连续梁桥在地震作用下的动力行为和真实反映桥梁在地震作用下的响应特性,并可为桥梁的抗震设计与性能评估提供有力的数值依据。

图 6 为  $P_1$ 、 $P_2$  和  $P_3$  桥墩柱底屈曲形态的有限元分析与试验结果对比。结果表明,在地震的强烈

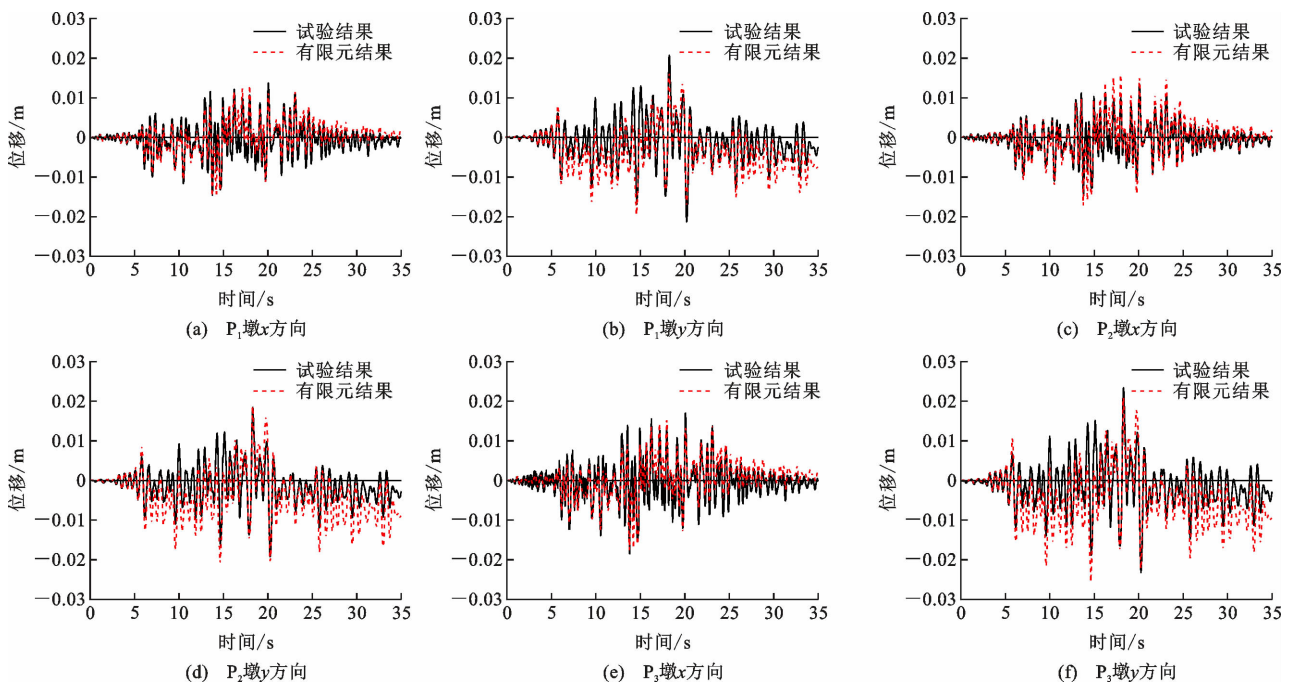


图 5 试验结果与有限元结果的时程曲线对比

Fig. 5 Comparison of time-history curves between experimental results and finite element results

表 1 两跨连续梁桥  $x$  方向峰值位移

Table 1 Peak displacement in  $x$ -direction of two span continuous beam bridge

桥墩	$P_1$		$P_2$		$P_3$	
	正向	负向	正向	负向	正向	负向
有限元结果/m	0.013 09	-0.014 87	0.015 89	-0.017 15	0.015 384	-0.017 52
试验结果/m	0.013 70	-0.014 56	0.013 42	-0.014 64	0.017 010	-0.018 49
误差/%	4.45	2.12	15.54	14.64	10.57	5.54

表 2 两跨连续梁桥  $y$  方向峰值位移

Table 2 Peak displacement in  $y$ -direction of two span continuous beam bridge

桥墩	$P_1$		$P_2$		$P_3$	
	正向	负向	正向	负向	正向	负向
有限元结果/m	0.018 24	-0.019 47	0.018 68	-0.020 83	0.020 917	-0.025 467
试验结果/m	0.020 71	-0.021 30	0.018 43	-0.019 21	0.023 380	-0.023 140
误差/%	11.92	8.59	1.34	7.78	11.78	9.14

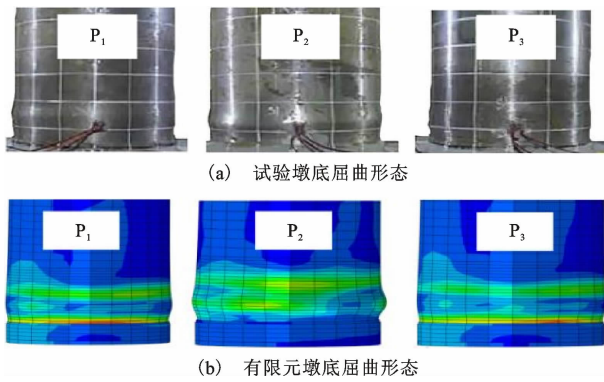


图 6 试验与有限元墩底屈曲形态对比

Fig. 6 Comparison of the pier base buckling modes between experimental and finite element results

作用下,桥墩钢管底部出现了局部屈曲现象,且这一屈曲行为在有限元模拟中得到了准确再现。通过对对比分析,有限元模拟结果与试验中的屈曲形态一致,表明三维有限元模型能够有效捕捉钢管墩柱的屈曲演化过程。局部屈曲现象的发生揭示了钢管墩柱在强震作用下的脆弱性,且模拟结果与试验数据的吻合程度验证了该有限元模型在模拟桥墩屈曲行为方面的准确性。这一结果为桥梁抗震设计中的屈曲分析提供了重要的理论支持。

### 3 不同地震强度下结构抗震性能评估

为全面评估桥梁在不同地震强度及多维地震输入作用下的抗震性能,本文开展了桥梁抗震响应的对比分析,重点考察最大墩顶位移、最大基底剪力及滞回耗能等关键性能指标。依据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010),三维空间模型在进行多向地震作用计算时,应将各方向加速度峰值按 1 : 0.85 : 0.65 的比例进行分配。具体加载工况及方向见表 3。

表 3 加载维度和方向

Table 3 Loading dimensions and directions

工况	维度	主方向	输入地震波
1	1	$x$	$gx$
2	1	$y$	$gy$
3	2	$x$	$gx+0.85gy$
4	2	$y$	$0.85gx+gy$
5	3	$x$	$gx+0.85gy+0.65z$
6	3	$y$	$0.85gx+gy+0.65z$
7	1	$z$	$gz$
8	2	$x$	$gx+0.85gz$
9	2	$y$	$gy+0.85gz$

### 3.1 耐震时程分析结果的表述

在耐震时程输入下,墩顶位移响应呈现出明显的往复滞回特征,表现为锯齿状波动。为了定量描述该响应特征,可以利用下式对 ETM 的分析结果进行确定

$$f(t) = \max(A(f(\lambda))) \quad \lambda \in [0, t] \quad (6)$$

式中: $f(t)$ 为时间  $t$  的工程需求参数; $f(\lambda)$ 为时间段  $[0, t]$  内的结构响应时程; $A(\cdot)$ 为绝对值函数。

不同工况  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  的  $x$  方向墩顶位移及累计最大位移见图 7,  $y$  方向的墩顶位移及累计最大位移见图 8。

如图 7、8 所示,  $P_2$  墩在各工况下的墩顶位移均大于  $P_1$  墩和  $P_3$  墩,故后续分析选取  $P_2$  墩的墩顶位移和轴向力作为代表,其最大值列于表 4。从表 4 可知,随着地震输入工况维度的增加(从单向到双向再到三向),桥墩的轴向力逐渐增大,特别是在三向耦合的工况下,轴向力的最大值超过单向输入下的 2 倍,表明耦合效应显著放大了结构的轴向响应。

表 4  $P_2$  墩最大位移及轴向力

Table 4 Maximum displacements and axial forces of pier  $P_2$

工况	输入地震波	$x$ -最大位移/mm	$y$ -最大位移/mm	$z$ -轴向力/kN
1	$gx$	13.64	0.00	301.66
2	$gy$	0.00	25.95	311.27
3	$gx+0.85gy$	16.06	32.41	316.69
4	$0.85gx+gy$	14.63	40.19	320.39
5	$gx+0.85gy+0.65z$	16.46	31.93	674.36
6	$0.85gx+gy+0.65z$	14.84	39.35	697.73
7	$gz$	0.00	0.00	988.90
8	$gx+0.85gz$	15.77	0.00	810.59
9	$gy+0.85gz$	0.00	25.48	849.49

如图 9 所示,钢管混凝土桥墩在最终破坏时的延性断裂临界值(DUCTCRT)主要由墩底等效塑性应变的持续累积所决定。单向地震加载工况(工况 1、2、7)对应的 DUCTCRT 值较低,表明单向作用下结构的延性断裂风险最低;而多向组合加载工况(工况 3~6、8、9)则显著提高了 DUCTCRT,最高达 0.650,反映出在多向耦合作用下结构处于更复杂的应力状态,断裂风险显著增大。图 9(g)云图无变化,表明钢材此时无损伤。由此可见,多向地震加载显著提升了桥墩的延性断裂临界值,提示在工程设计与抗震性能评估中,应充分考虑多向地震工况,以保证结构具有足够的安全裕度和韧性,从而有效降低地震诱发的断裂风险。

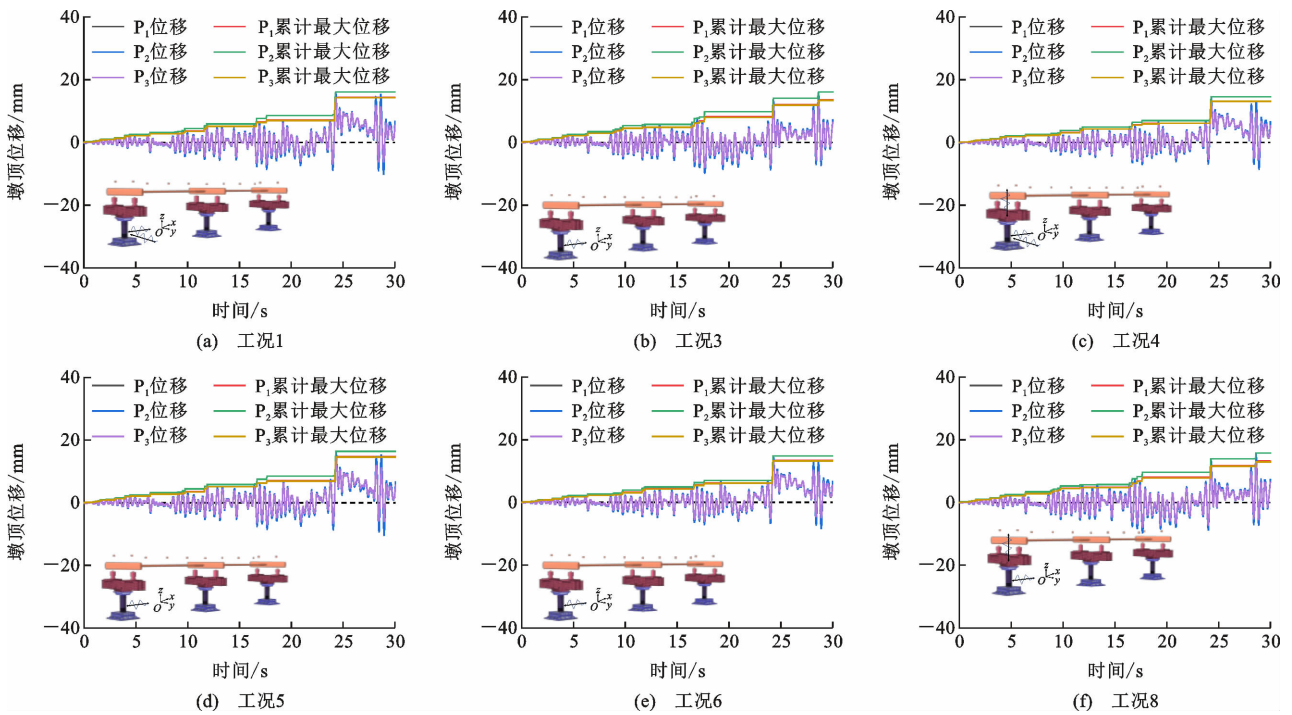


图7 x方向时程曲线及累计最大位移曲线

Fig. 7 Time history curves and cumulative maximum displacement curves in the x direction

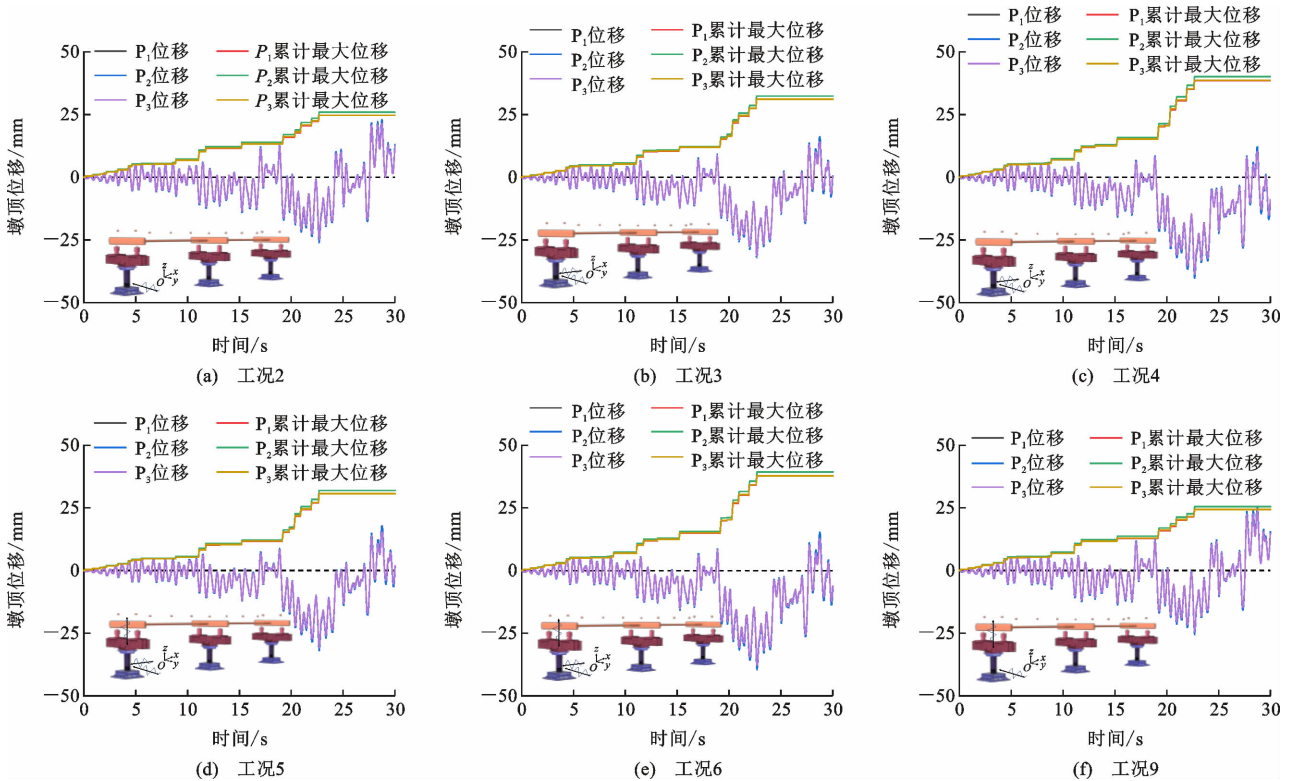


图8 y方向时程曲线及累计最大位移曲线

Fig. 8 Time history curves and cumulative maximum displacement curves in the y direction

### 3.2 连续梁桥墩性能水平及损伤指标

本研究将墩柱顶端位移角  $\theta$  作为抗震性能指标,根据美国 ASCE/SEI 7—2022 的等级划分规范,可将墩柱性能分为 3 个阶段:基本完好 (Immediate

Occupancy, IO)、生命安全 (Life Safety, LS) 和倒塌防护 (Collapse Prevention, CP)。IO、LS 和 CP 对应的位移角阈值见表 5。墩顶位移角计算公式如下

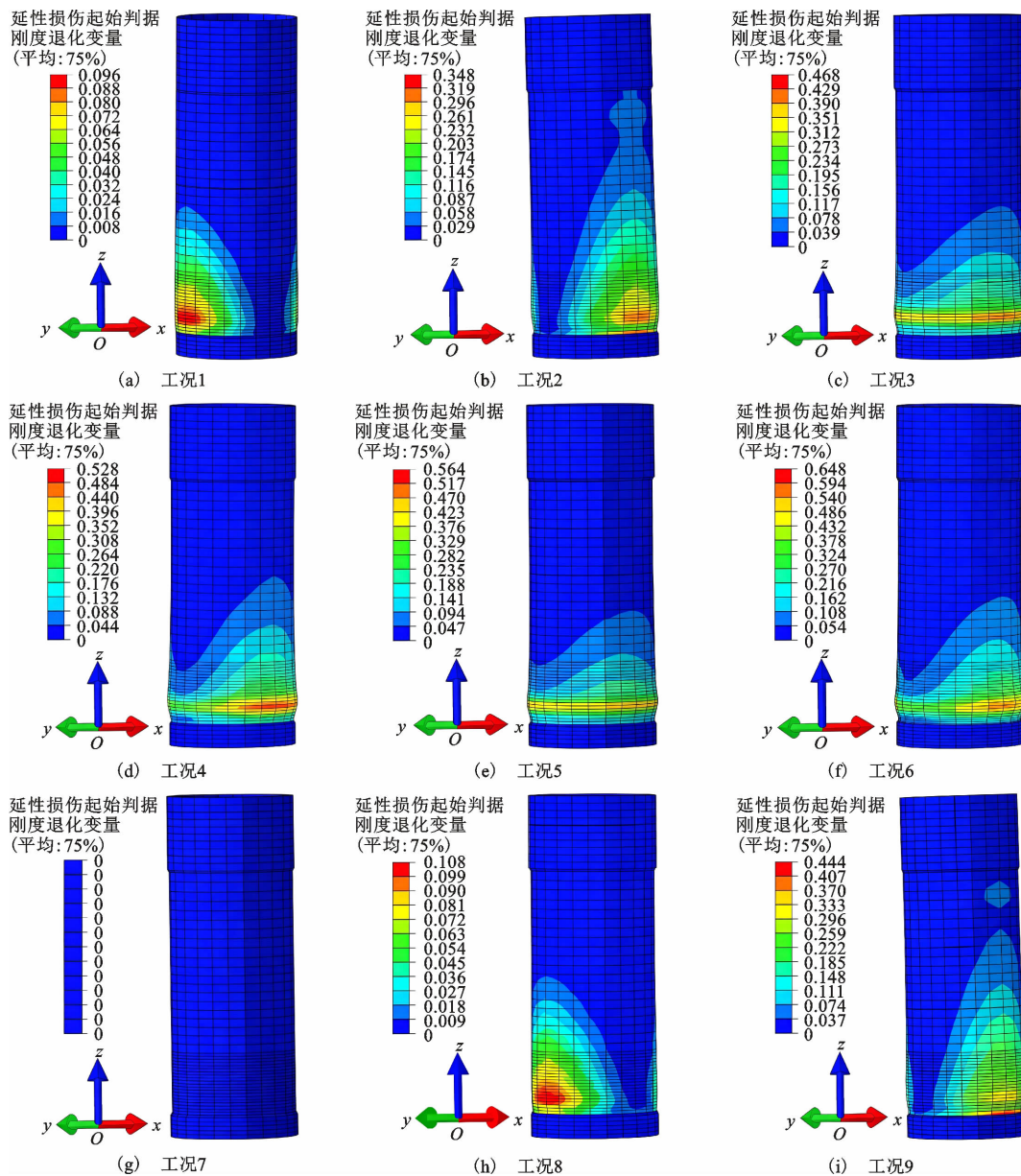


图 9 各工况下墩底损伤状态

Fig. 9 Damage states at the pier base under various conditions

表 5 IO,LS 以及 CP 对应的位移角

Table 5 Drift ratio corresponding to IO, LS, and CP

阶段	IO	LS	CP
位移角 $\theta/\%$	1	2	4

$$\theta = \left| \frac{\mu_{\max}}{H} \right| \quad (7)$$

式中:  $\mu_{\max}$  为墩顶最大位移;  $H$  为桥墩高度。

下文根据表 5 中各工况的最大位移数据计算墩顶位移角。若某工况仅提供  $x$  或  $y$  单方向位移,则仅计算该方向的位移角;若同时给出  $x$ 、 $y$  两向位移,则分别计算两者的位移角,并以较大值作为性能判定依据。各工况下  $x$ 、 $y$  两向最大位移及对应性

能等级见表 6,性能等级随加载阶段的时间演变曲线见图 10。

由表 6 看出,在工况 3 和工况 4 中,横桥向( $y$  方向)的位移显著高于顺桥向( $x$  方向),且均超过关键性能标准(CP,4%)。特别是在工况 4 中, $y$  方向位移达到 5.02%,表明在顺桥向与横桥向联合激励下,桥梁在横桥向的位移响应尤为显著。在工况 5 和工况 6 中,三维地震波的输入导致  $y$  方向位移均接近或超过 CP 标准,其中工况 5 的  $y$  方向位移为 3.99%,接近 CP 标准,工况 6 的  $y$  方向位移达到 4.91%,显著超过 CP 标准。这表明在三维地震波作用下,桥梁在横桥向的位移响应更为显著,尤其在

表6 各工况下x、y方向最大位移及性能水准判定

Table 6 Displacements in x and y directions and performance level assessment for each load case

工况	x 方向位移角	y 方向位移角	性能水准判定
1	13.64/801≈1.70%		介于 IO(1%)与 LS(2%)之间
2		25.95/801≈3.24%	介于 LS(2%)与 CP(4%)之间
3	16.06/801≈2.00%	32.41/801≈4.05%	y 方向已大于 4%，超 CP
4	14.63/801≈1.83%	40.19/801≈5.02%	y 方向大于 4%，超 CP
5	16.46/801≈2.06%	31.93/801≈3.99%	x 超 2%(达 LS), y 接近 4%(临近 CP)
6	14.84/801≈1.85%	39.35/801≈4.91%	y 方向大于 4%，超 CP
7	0	0	不涉及水平位移(纯竖向)
8	15.77/801≈1.97%		介于 IO(1%)与 LS(2%)之间
9	13.12/801≈1.64%		介于 IO(1%)与 LS(2%)之间
10		25.48/801≈3.18%	介于 LS(2%)与 CP(4%)之间
11		23.76/801≈2.96%	介于 LS(2%)与 CP(4%)之间

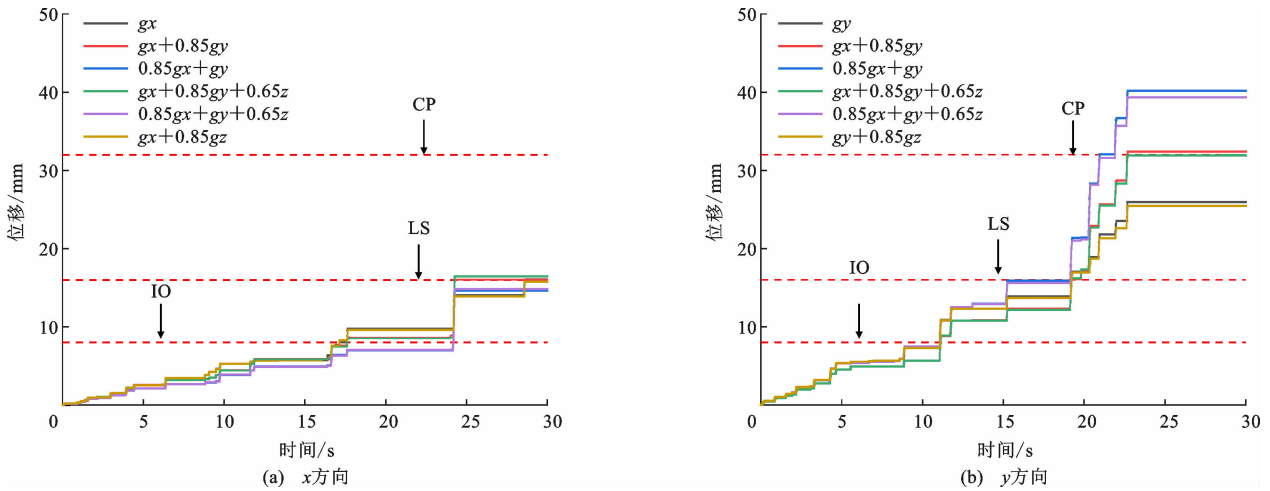


图10 性能水准判定随时间曲线

Fig. 10 Performance level determination as a function of time curves

工况6中,横桥向位移已超出设计极限。尽管三维地震波包含重力方向的地震输入,数据表明其对水平位移(x和y方向)的直接影响较小,主要的位移响应仍由顺桥向和横桥向地震波主导。综上,横桥向的位移响应在大多数工况下都比顺桥向更为显著,尤其是在三维地震波作用下,横桥向位移可能超出设计极限,导致桥梁进入限度或失效状态。因此,设计时应重点考虑横桥向的抗震性能,并在必要时采取加固措施,以确保桥梁在多维地震作用下的安全性。

由图10可以看出,横桥向激励下,桥墩在约11s内达到IO阶段,约19s内达到LS阶段,且在包含y方向激励的多维加载组合中,桥墩在21~23s内迅速达到CP阶段,体现出横桥向对结构破坏的高敏感性。这表明在抗震设计中需重点考虑多方向特别是横桥向的激励,以提升桥梁在复杂地震环境

下的安全性和稳定性,确保结构能够在短时间内有效应对多向地震冲击,防止发生严重破坏。

### 3.3 SRSS与100%/30%准则评估

为评估双向水平地震效应下简化组合方法在墩柱构件内力响应计算中的可靠性,本文对工况1和工况4分别采用SRSS法和100%/30%准则进行了评估。

SRSS方法假设各方向地震效应相互独立,组合后的效应为各方向效应平方和的平方根。对于双向组合,公式为

$$F_{SRSS} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (8)$$

100%/30%组合准则假设在任一时刻,一个主方向的地震效应取100%,其他正交方向取30%。对于双向组合,公式为

$$F_{100\%/30\%} = \max\{F_x + 30\%F_y, 30\%F_x + F_y\} \quad (9)$$

表7给出了SRSS与100%/30%准则组合方法

表7 SRSS与100%/30%准则组合方法的轴向力  
Table 7 Axial force based on the srss and 100%/30% combination method

工况	$F_z/\text{kN}$	$F_{\text{SRSS}}/\text{kN}$	$F_{100\%/30\%}/\text{kN}$	$(F_{\text{SRSS}} - F_z)/F_z/\%$	$(F_{100\%/30\%} - F_z)/F_z/\%$
1	301.66				
2	311.27				
3	316.69	440.55	407.19	39.11	28.58
4	320.39	440.55	407.19	37.50	27.09

的轴向力,从工况3和工况4的结果来看,实际轴向力显著低于SRSS和100%/30%方法的预测值。这主要归因于以下几点:首先,地震动在不同方向上可能存在明显的相位差,导致各方向峰值不在同一时刻发生,实际叠加效应因而被削弱;其次,结构在地震作用下的非线性行为(如材料屈服、损伤以及构件大变形等)会显著消耗地震输入能量,从而降低轴向力的实际峰值;此外,SRSS和100%/30%等组合方法均基于一定的简化假设,难以充分考虑多向地震动之间的耦合效应和结构真实的动力特性。与传统100%/30%组合法相比,ETM方法平均将轴向力预测值降低约28%,更真实反映了地震动相位差、结构非线性退化及耦合效应对桥墩轴向力的削弱,为桥梁抗震设计提供了更合理的安全裕度评估依据,这与王健泽等<sup>[15]</sup>得出的结论一致,可在组合系数中引入约0.8的相位校正因子以提高预测准确性。由此可见,这类简化组合方法在实际工程应用中通常会产生一定程度的保守偏差,既有利于保证安全,又可能导致设计偏于保守。因此,在中低震或结构处于基本弹性阶段时,两种组合规则仍能提供工程允许范围内的快速估算;在强震或显著非线性阶段,应辅以时程分析校核。

## 4 结 语

(1)基于钢材韧性损伤和约束混凝土塑性损伤本构关系,借助水平向主裂缝插入技术,建立的精细两跨连续梁桥有限元模型的计算结果与试验结果吻合良好,可将该模型应用于结构抗震设计,以评估钢管混凝土墩柱-连续梁桥的抗震性能。

(2)多维耐震时程分析结果表明,在二维地震输入条件下,尤其是涉及横桥向地震波组合的工况,桥梁的横桥向位移显著增加,部分工况超出关键性能标准,揭示了横桥向抗震性能的薄弱环节。尽管三维地震波包含竖向地震输入,但研究结果显示,竖向地震波对水平位移的直接影响较小,主要位移响应仍由顺桥向和横桥向地震波主导。同时,多方向地震加载显著提升了桥梁结构的延性断裂临界值,增

加了其在复杂地震环境下发生断裂的危险性。

(3)在研究所考虑的多向强震输入下,SRSS组合法对轴向力呈现高估现象;相比之下,100%/30%组合准则虽然存在一定的高估,但其预测结果在部分工况下更接近实际数据,可在组合系数中引入约0.8的相位校正因子以提高预测准确性。与传统方法相比,ETM方法将轴向力预测值平均降低约28%,更真实地反映了地震动相位差、结构非线性退化及耦合效应对桥墩轴向力的削弱,为桥梁抗震设计提供了更为合理的安全裕度评估依据。实际轴向力显著低于组合方法的预测值,这主要是由于地震动各方向存在相位差及结构的非线性响应,导致传统组合方法难以充分考虑多向耦合效应和真实动力特性。因此,建议在关键构件设计中并行采用时程分析与组合规则,以在安全与经济性之间取得更佳平衡。

## 参 考 文 献 :

### References :

- [1] 孙浩,吕飞,丁发兴,等.薄壁拉筋矩形钢管混凝土墩柱抗震性能研究[J].铁道科学与工程学报,2024,21(4):1495-1508.  
SUN Hao, LÜ Fei, DING Fa-xing, et al. Research on seismic performance of thin-walled stirrup-confined rectangular concrete filled steel tube piers[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(4): 1495-1508.
- [2] 孙浩,徐庆元,吕飞,等.动力荷载下钢管混凝土墩柱抗震性能极限分析[J].铁道学报,2023,45(3):97-108.  
SUN Hao, XU Qing-yuan, LÜ Fei, et al. Ultimate analysis of seismic performance of concrete-filled steel tube piers under dynamic load[J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(3): 97-108.
- [3] 付军,杨森,邱鸿安,等.全固废煤矸石集料LUHPC外包钢管推移试验与黏结性能[J].交通运输工程学报,2025,25(5):250-262.  
FU Jun, YANG Miao, QIU Hong-an, et al. Pushing test and bonding performance of LUHPC outsourcing steel tube with all-solid waste coal gangue aggregate[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2025, 25(5): 250-262.
- [4] 杨晓强,张远,朱利国,等.高性能钢管混凝土叠合构件抗侧向冲击性能[J].交通运输工程学报,2025,25(5):399-413.

- YANG Xiao-qiang, ZHANG Yuan, ZHU Li-guo, et al. Lateral impact behavior of high-performance concrete-filled steel tubular composite structural members[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2025, 25(5): 399-413.
- [5] ZHANG G D, SU S B, HAN Q, et al. Experimental and numerical investigation of seismic performance of prefabricated double-column piers used in accelerated bridge construction [J]. *Engineering Structures*, 2023, 293: 116688.
- [6] XIE P, HUANG Y H, HUANG Y S, et al. Seismic behavior of prefabricated hybrid FRP-concrete-steel double-skin tubular column-to-cap beam connections[J]. *Engineering Structures*, 2025, 322: 119131.
- [7] LI W, HU J. Analytical modelling and critical temperature of circular CFST column exposed to standard fire[J]. *Thin-Walled Structures*, 2024, 200: 111900.
- [8] SUN H, DING F X, WANG L P, et al. Experimental and analytical study of thin-walled stirrup-confined CFST piers under pseudo-static loading[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2023, 210: 108047.
- [9] DING F X, XU Q Y, SUN H, et al. Refined finite element modelling of circular CFST bridge piers subjected to the seismic load[J]. *Computers & Concrete*, 2024, 33(6): 643-658.
- [10] 刘君平, 杨倩, 刘华龙, 等. 钢管混凝土桁肋内栓钉 K 型节点应力集中特性[J]. *交通运输工程学报*, 2024, 24(6): 106-120. LIU Jun-ping, YANG Qian, LIU Hua-long, et al. Stress concentration characteristics of concrete-filled steel tubular truss-rib K-joint with inner studs[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2024, 24(6): 106-120.
- [11] 邵旭东, 熊满华, 怀臣子, 等. PC 与钢-UHPC 混合式连续梁桥结合段受力分析[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2024, 51(11): 126-137. SHAO Xu-dong, XIONG Man-hua, HUAI Chen-zi, et al. Mechanical analysis on joint section of PC and steel-UHPC hybrid continuous girder bridges [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2024, 51(11): 126-137.
- [12] 高超, 宗周红, 娄凡, 等. 预应力混凝土连续梁桥桥面爆炸荷载模型试验[J]. *中国公路学报*, 2022, 35(12): 106-114. GAO Chao, ZONG Zhou-hong, LOU Fan, et al. Load model experiment of prestressed concrete continuous girder bridge subjected to explosion above the deck[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(12): 106-114.
- [13] 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.
- [14] GOTO Y, EBISAWA T, OBATA M, et al. Ultimate behavior of steel and CFT piers in two-span continuous elevated-girder bridge models tested by shake-table excitations[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2017, 22(5): 04017001.
- [15] 王健泽, 戴靠山. 基于中美抗震设计规范的双向水平地震效应组合方法的有效性评估[J]. *世界地震工程*, 2022, 38(1): 1-10. WANG Jian-ze, DAI Kao-shan. Evaluation of combination rules account for orthogonal seismic effects based on Chinese and American seismic design codes [J]. *World Earthquake Engineering*, 2022, 38(1): 1-10.
- [16] 李军, 石岩, 张奋杰, 等. 基于耐震时程法的连续刚构桥地震损伤分析[J]. *工程科学学报*, 2022, 44(11): 1946-1955. LI Jun, SHI Yan, ZHANG Fen-jie, et al. Application of the endurance time method to the seismic analysis and damage evaluation of a continuous rigid-frame bridge [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2022, 44(11): 1946-1955.
- [17] 孙治国, 李翔平, 李宏男, 等. 长持时地震动下 RC 桥墩地震反应分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2023, 31(1): 154-169. SUN Zhi-guo, LI Xiang-ping, LI Hong-nan, et al. Analysis on the seismic response of RC bridge piers under long-duration earthquake ground motions [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2023, 31(1): 154-169.
- [18] LYU F, GOTO Y, KAWANISHI N, et al. Three-dimensional numerical model for seismic analysis of bridge systems with multiple thin-walled partially concrete-filled steel tubular columns[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2020, 146: 04019164.
- [19] 孙浩, 徐庆元, 丁发兴, 等. 循环荷载下钢管混凝土墩柱塑性大变形分析[J]. *铁道科学与工程学报*, 2023, 20(3): 973-985. SUN Hao, XU Qing-yuan, DING Fa-xing, et al. Analysis of large plastic deformation of concrete-filled steel tube pier under cyclic loading [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2023, 20(3): 973-985.
- [20] 周救, 王亮, 刘旭奇. 基于检测数据映射的在役桥梁有限元模型及抗震性能评价[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2025, 45(6): 1-16. ZHOU Mi, WANG Liang, LIU Xu-qi. Finite element models and seismic performance evaluation of in-service bridges based on measured data mapping [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2025, 45(6): 1-16.
- [21] CHEN Y, XIAO J C, LIU C, et al. Prestressed partial single-layer twisted reticulated shell seismic performance assessment using endurance time [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2024, 213: 108387.
- [22] 白久林, 杨乐, 欧进萍. 结构抗震分析的耐震时程方法[J]. *地震工程与工程振动*, 2014, 34(1): 8-18. BAI Jiu-lin, YANG Yue, OU Jin-ping. The endurance time method for seismic response analyses of building structures [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2014, 34(1): 8-18.
- [23] 丁发兴, 吴霞, 向平, 等. 多类混凝土和各向同性岩石损伤比强度准则[J]. *土木工程学报*, 2021, 54(2): 50-64, 73. DING Fa-xing, WU Xia, XIANG Ping, et al. Damage ratio strength criterion for various types of concrete and isotropic rock [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2021, 54(2): 50-64, 73.
- [24] 谷利雄, 丁发兴, 张鹏, 等. 钢-混凝土组合简支梁滞回性能非线性有限元分析[J]. *工程力学*, 2013, 30(1): 301-306. GU Li-xiong, DING Fa-xing, ZHANG Peng, et al. Nonlinear finite element analysis for hysteresis behaviors of simply supported steel-concrete composite beam [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(1): 301-306.