

不同地震动输入方向对大跨度连续刚构桥 易损性影响分析

赵 峰, 田石柱

(苏州科技大学土木工程学院, 江苏 苏州 215011)

摘要: 针对超高墩大跨度桥梁在地震作用下表现出的特殊响应特性,以某大跨度连续刚构桥为研究对象,建立三维有限元分析模型,采用增量动力分析法,系统研究了双向及三向地震作用下动力响应特性。研究表明:双向地震作用下,主墩在 $PGA=0.4g$ 时轻微损伤概率达 43%,引入竖向地震动后,主墩在 $PGA=0.2g$ 时即出现 22% 的轻微损伤概率,完全损伤状态的超越概率增加约 25%;支座系统方面,竖向地震动的引入使损伤发展速率显著提高,在 $PGA=0.4g$ 时轻微损伤概率即达 100%。

关键词: 增量动力分析; 大跨度连续刚构桥; 易损性; 地震

中图分类号: U448.23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)12-0023-07

“易损性”概念最初源于 20 世纪 70 年代核电站的地震概率风险评估研究,随后被广泛应用于军事、航空等领域,用以评估结构在外部作用下的损伤程度和破坏概率。随着工程领域研究的深入,易损性分析逐渐发展成为评估工程结构抗震性能的重要手段^[1]。目前,国内外学者对传统桥梁结构的易损性研究已经相对完善,基于增量动力分析(incremental dynamic analysis, IDA)方法的易损性分析已在实际工程中得到广泛应用。陈志伟等^[2]以西南地区高墩大跨连续刚构桥为对象,对一致激励和多点激励下桥墩结构进行 IDA 分析,结果表明,考虑行波效应会增加高墩和矮墩发生严重损伤的概率,尤其是高烈度地区应予以重视。董俊等^[3]以西部某典型铁路钢构-连续梁桥为研究对象,提出三维地震损伤指标函数,建立三维地震易损性分析方法并利用云图法验证了该方法的有效性,表明仅考虑纵、横向的易损性分析已无法满足桥梁实际抗震能力的评估需求。单德山等^[4]基于可靠度理论,将包含多个单一损伤指标的损伤状态方程作为三维地震的损伤状态方程,构建了墩柱和支座的损伤状态判别标准并进行量化,最终验证了方法可用于桥梁结构的易损性分析当中。赵志宏^[5]选用曲率和位移作为复合损伤指标对高墩桥进行易损性分析,结果表明,复合损伤指标作为高墩桥的损伤评估离散性

小,稳定性好。束景晓等^[6]以某高速铁路大跨度预应力刚构桥为背景,通过增量动力分析考虑桩土作用下不同方向的桥梁构件易损性,结果表明,桥梁顺桥向易损性大于横桥向,考虑桩土作用后易损性增大。

然而,随着桥梁结构向大跨度、超高墩方向发展^[7-8],传统的易损性分析方法在应对新型结构体系时面临诸多挑战。特别是对于超高墩大跨度桥梁,其在地震作用下表现出的响应特性与常规桥梁存在显著差异,需要建立更加精确的易损性评估体系。本文将在总结易损性分析基本理论的基础上,重点研究高墩大跨度桥梁在不同输入方向地震作用下的易损性特征。通过选取符合工程实际的地震波,采用 IDA 方法对桥梁关键构件进行分析,通过对比分析不同方向地震作用下的结构响应特性并绘制相应的易损性曲线,为高墩大跨度桥梁的抗震设计提供理论依据。

1 有限元模型及地震动选取

选取某大跨度连续刚构桥作为工程背景,通过 MIDAS 进行初步建模分析,获取结构几何尺寸及材料特性参数。该桥为变截面连续刚构桥,跨径布置为 125 m+220 m+125 m,全长为 470 m,采用超高墩设计,主墩高度达 102.57 m,属于典型的山区大跨度连续刚构桥结构体系。上部结构采用预应

收稿日期: 2025-01-04

作者简介: 赵峰(2000—),男,江苏南京人,硕士研究生,研究方向为地震工程;通信作者田石柱(1962—),男,河北沧州人,博士,教授,研究方向为地震工程。

力混凝土箱形截面,混凝土强度等级为 C60,以满足大跨度桥梁在正常使用状态和极限状态下的承载力及变形要求。下部结构中,主墩采用矩形薄壁空心截面,横桥向宽度为 13 m,纵桥向宽度为 12 m,混凝土强度等级为 C40。墩身结构优化设计采用变厚度薄壁构造,其中纵桥向壁厚为 1.2 m,横桥向壁厚为 0.9 m,体现了结构的力学性能与经济性的统一。为提高墩身抗扭刚度和整体性能,墩内设置一道竖向隔板(壁厚为 0.6 m),并自墩顶起每隔约 11 m 设置一道横向隔板(厚度为 0.5 m)。钢筋配置方面,采用 HRB400 级纵向受力钢筋(直径为 28 mm),纵向配筋率达 3%,满足规范对超高墩配筋构造的要求。基于 OpenSEES 平台构建精细化三维有限元分析模型。其中,主梁及墩柱采用基于力法的非线性梁柱单元进行模拟,支座系统采用双节点连接单元模拟。全桥模型包含 281 个节点、272 个单元,采用纤维截面法对构件进行离散化处理,可有效模拟材料非线性特性。具体的结构布置及纤维截面划分如图 1 所示。该模型充分考虑了几何非线性和材料非线性,能够准确反映结构在地震作用下的动力响应特性。

基于地震易损性评估理论,地震动输入的随机性和不确定性是影响结构地震响应的关键因素。虽然传统易损性分析通常需要大量地震动记录以体现其随机特性,但根据相关研究表明^[8],在增量动力分析框架下,采用 10 条合理选取的地震动记录即可获得具有统计显著性的结构响应特征。基于此,依据场地条件和工程特性,以规范设计反应谱为目标谱,从美国太平洋地震工程研究中心(PEER)强震数据库中筛选 10 条具有代表性的地震动记录。通过基线校正和幅值调整等震动优化处理,使地震

动的平均反应谱与目标谱实现良好匹配,其谱特性对比如图 2 所示。这种基于目标谱的地震动选取方法不仅确保了输入地震动的合理性,同时也满足了工程抗震设计的规范要求。

2 损伤指标

在大跨度连续刚构桥地震易损性分析研究中,损伤评估准则的选择至关重要。虽然国内外学者基于结构试验和数值模拟提出了多种钢筋混凝土结构破坏准则,包括强度破坏准则、变形破坏准则、能量破坏准则及变形能量双重破坏准则^[9],但考虑到大跨度连续刚构桥结构的特殊性,特别是高墩大跨结构中墩顶位移与控制截面曲率的非同步性及材料损伤与变形之间的非一一对应关系,传统的线性叠加型双重破坏准则难以准确反映不同加载历程下结构的实际损伤状态。

因此,选取墩底截面曲率和支座位移作为双重损伤指标,结合性能化抗震设计理念,将结构损伤

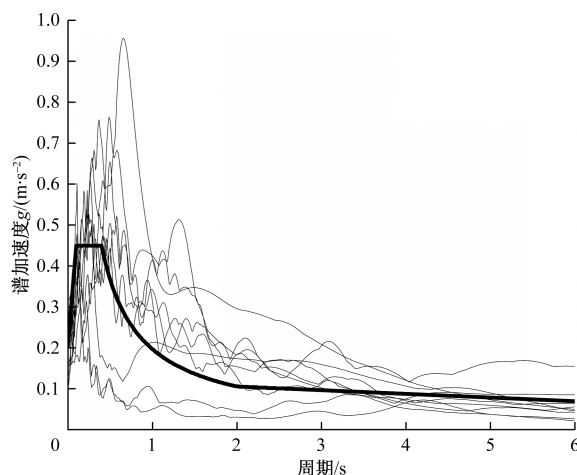


图 2 加速度反应谱

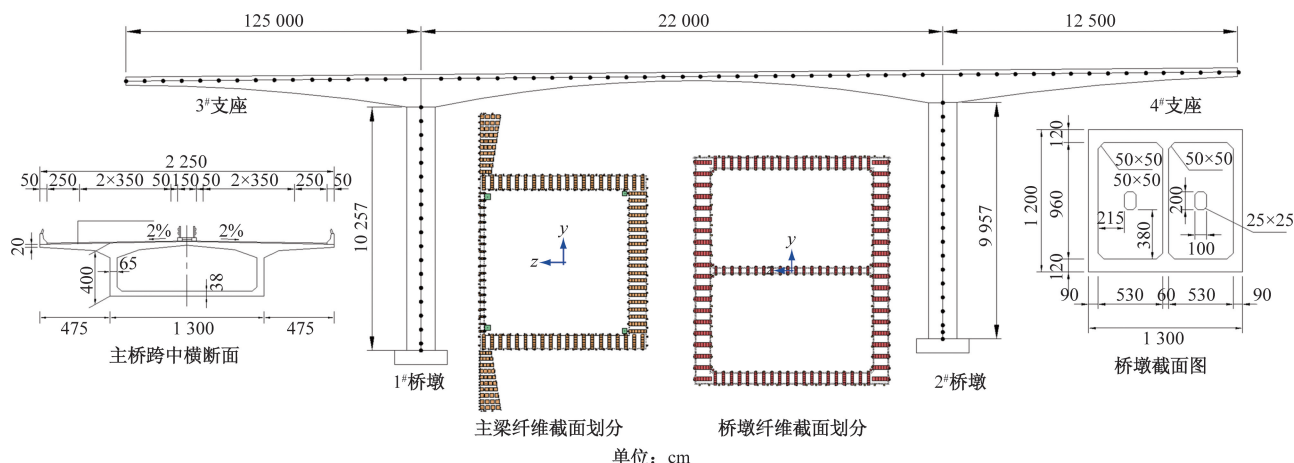


图 1 大跨度连续刚构桥有限元模型

状态划分为无损伤、轻微损伤、中等损伤、严重损伤和完全破坏五个等级,通过这两个关键指标的耦合效应更全面地评估结构损伤,以更准确地刻画大跨度连续刚构桥在地震作用下的易损性特征,为该类结构的抗震性能评估提供更可靠的理论基础。

2.1 桥墩损伤指标

在高墩大跨桥梁结构的地震响应特性研究中,墩顶位移与控制截面曲率的时程演化规律呈现明显的非同步性。基于结构动力特性的深入分析表明,对于超高墩大跨桥梁的地震易损性评估,以截面曲率作为损伤指标较位移延性比具有更优的力学机理和更广泛的适用性。这主要是由于截面曲率能够直接反映构件局部变形和材料损伤状态,更准确地刻画结构的非线性响应特征。将结构损伤状态进行精细化分级,各损伤等级对应的具体损伤特征如表 1 所示。

表 1 损伤状态及量化指标

损伤等级	损伤程度	损伤具体形式	指标范围
I 级	轻微损伤	最外侧钢筋发生屈服	$\varphi_y < \varphi_s \leq \varphi_{sh}$
II 级	中等损伤	最外侧纵筋拉应变小于 0.55 倍的钢筋极限拉应变	$\varphi_{sh} < \varphi_s \leq 0.55\varphi_{su}$
III 级	严重损伤	最外侧纵筋拉应变小于钢筋极限拉应变	$0.55\varphi_{su} < \varphi_s \leq \varphi_{su}$
IV 级	完全破坏	最外侧纵筋拉应变大于极限拉应变	$\varphi_s > \varphi_{su}$

注: φ_s 为最外侧钢筋拉应变; φ_y 为钢筋的屈服应变; φ_{cc} 为约束混凝土压应变; φ_{sh} 为钢筋初始的拉应变,一般取 0.015; φ_{su} 为钢筋受拉后发生断裂破坏时的拉应变,一般取 0.009。

通过 XTRACT 程序对主桥墩底部及墩顶关键截面进行数值分析,获取其弯矩-曲率关系曲线,并基于面积等效原则将其简化为双折线模型。在损伤评估体系中,以混凝土开裂点对应的曲率值作为无损伤与轻微损伤的临界值;以最外层受拉钢筋达到屈服应变时对应的曲率值定义为轻微损伤状态的上限;当关键截面达到等效屈服状态时的曲率值则作为中等损伤状态的上限边界;当混凝土应变达到极限应变时的对应曲率值被定义为严重损伤状态的上限阈值;最终,当混凝土压应变超过其极限应变值时,则判定关键截面达到完全损伤状态。关键截面损伤指标界限如表 2 所示。

2.2 支座损伤指标

针对有限元模型中的非隔震型普通盆式支座,

依据《公路桥梁盆式支座》(JT/T 391—2009)规范及相关文献^[10],选取支座相对位移作为损伤评估的关键指标。鉴于目前对非隔震型盆式支座损伤指标的量化研究尚显不足,且过大的纵向位移可能导致普通盆式支座的破坏,本文特别关注纵向位移的响应。基于所选用的非减震型普通盆式支座的设计位移值($\pm 200\text{ mm}$)及规范规定的 $\pm 50\text{ mm}$ 允许偏差,结合相关规范要求和已有研究成果,建立支座损伤分级体系。具体而言,将 50 mm 界定为轻微破坏的界限值, 100 mm 作为中等破坏的界限值, 150 mm 则为完全破坏的临界阈值,从而实现了支座损伤状态的定量化表征。

表 2 双向地震作用下桥墩关键截面曲率界限值

截面位置	曲率/($\text{rad}\cdot\text{m}^{-1}$)			
	完全损伤	轻微损伤	中等损伤	严重损伤
1 号墩墩底	1.16×10^{-4}	1.85×10^{-4}	2.76×10^{-4}	9.13×10^{-3}
2 号墩墩底	1.34×10^{-4}	1.89×10^{-4}	2.88×10^{-4}	9.63×10^{-3}

3 易损性分析

增量动力分析法(IDA)与动力推覆分析法相似,都是用于评价结构的抗震性能,以得到结构动力响应与不同地震动强度之间的关系,是一种以动力弹塑性时程分析为基础的参数分析方法。中国振动台试验一般取用特定的强震记录和场地人工波,通过调幅多遇地震,基本烈度地震以及罕遇地震之后,再进行模型试验,因此 IDA 方法的思想与振动台动力试验的思想保持一致。

为了能够较全面地评价结构的抗震能力,通常需要输入足够数量的地震动来进行模拟。基于 IDA 方法的地震易损性曲线建立过程如下。

(1)建立分析结构的数值模型。

(2)根据工程场地条件选择用于分析的地震动记录,然后对地震动进行调幅,按峰值加速度(PGA)从 $0.1g$ 到 $1g$,增量为 $0.1g$ (g 为重力加速度)。

(3)对结构进行非线性动力时程分析。确定结构的损伤指标,依据响应数据对损伤指标进行量化。绘制不同地震强度下的地震需求与和需求对应的地震强度的对数曲线。

(5)对得到的对数曲线进行线性回归分析,得到结构易损性的累积概率密度函数,依据易损性函数计算结构各损伤状态的超越概率,绘制各损伤状态对应的易损性曲线。

构件的损伤概率可以归纳为地震需求能力超过实际承载能力的概率。根据相关研究表明,结构

的地震需求能力与实际承载能力均服从对数正态分布,基于概率学原理,超越概率亦服从对数正态分布,故而该失效概率也可表示为

$$P_f = \Phi \left[\frac{\ln S_d / S_c}{\sqrt{\beta_c^2 + \beta_d^2}} \right] \quad (1)$$

式中: P_f 为结构某一损伤状态下的超越概率; S_d 为结构的地震需求能力; S_c 为结构的实际承载能力。 β_d 为结构地震需求能力的对数标准差; β_c 为结构实际承载能力的对数标准差; 地震动强度指标选为 PGA, $\sqrt{\beta_c^2 + \beta_d^2}$ 取 0.5; Φ 为标准正态分布函数。

3.1 双向地震动输入下易损性曲线

根据上文损伤指标及式(1),得出双向地震动输入下不同地震动峰值加速度支座及桥墩墩底曲率达到不同损伤状态的概率值,如图3所示。

在双向地震动输入下,1号墩和2号墩的损伤概率随PGA的增大逐步上升,对于轻微损伤,1号墩和2号墩均在PGA=0.5g时首次出现,概率分别为43%和30%;对于中度损伤,1号墩首次出现

的PGA=0.5g,概率为10%,而2号墩首次出现的PGA也为0.5g,但概率仅为5%;对于严重损伤,1号墩首次出现的PGA=0.6g,概率为3%,而2号墩首次出现的PGA也为0.6g,但概率仅为1%;对于完全损伤,1号墩首次出现的PGA=1.0g,概率为8%,而2号墩首次出现的PGA同样为1.0g,但概率仅为4%。从首次出现损伤的PGA水平来看,1号墩和2号墩的轻微损伤和中度损伤均在较低的PGA水平下出现,但1号墩的概率始终高于2号墩,且随着损伤程度的加剧,1号墩的损伤表现更加显著。

通过计算得到的双向地震动输入下支座易损性曲线如图4所示。

在双向地震动输入下,3号支座和4号支座的损伤概率随PGA的增大逐步上升,首次出现不同损伤状态的PGA水平存在一定差异。对于轻微损伤,3号支座在PGA=0.2g时首次出现,概率为22%,而4号支座在PGA=0.1g时首次出现,概率仅为1%;对于中度损伤,3号支座和4号支座均在

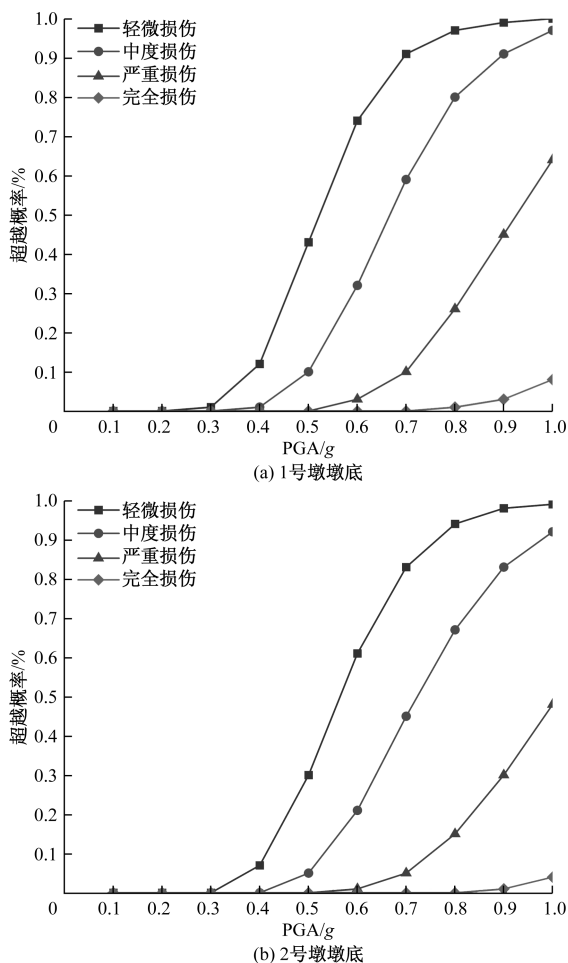


图3 双向输入下桥墩墩底截面曲率易损性曲线

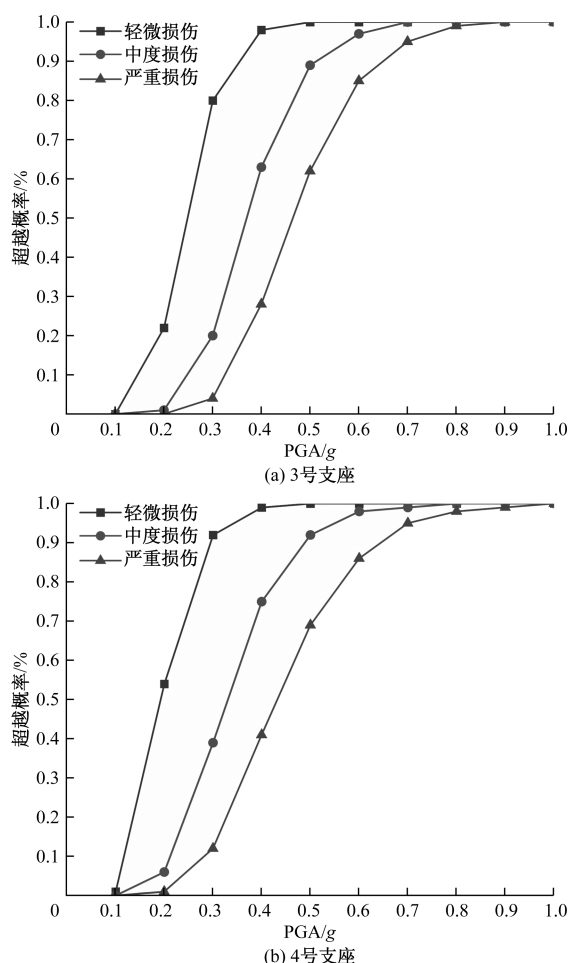


图4 双向输入下支座易损性曲线

PGA=0.3g 时首次出现,但概率分别为 20% 和 6%;对于严重损伤,3 号支座和 4 号支座均在 PGA=0.4g 时首次出现,概率分别为 28% 和 12%;对于完全损伤,3 号支座和 4 号支座均在 PGA=0.5g 时首次出现,但概率分别为 4% 和 1%。综合来看,3 号支座在轻微损伤、中度损伤和严重损伤的 PGA 水平下表现更高的损伤概率,且随着损伤程度的加剧,其损伤表现更加显著,表明 3 号支座的抗震性能相较于 4 号支座更为薄弱。

3.2 三向地震动输入下易损性曲线

为深入探究地震动空间分布特性对大跨度连续刚构桥结构响应的影响,在完成双向地震动输入下桥墩墩底曲率和支座损伤特性分析的基础上,进一步考虑竖向地震动的作用,开展三向地震动输入工况下的易损性分析。具体结果如图 5 所示。

通过对比分析三向地震动输入下两个桥墩墩底曲率的易损性发展规律可以发现:随着 PGA 的逐步增大,两个桥墩墩底曲率的损伤概率均呈现逐步上升的趋势,但在首次出现不同损伤状态时的

PGA 水平和对应概率上存在明显差异。具体表现为:在轻微损伤阶段,1 号墩底在 PGA=0.2g 时首次出现,概率达到 22%,而 2 号墩底则在更低的 PGA=0.1g 时就出现损伤,但概率仅为 1%;在中度损伤阶段,两个墩底均在 PGA=0.3g 时首次出现损伤,但 1 号墩底的损伤概率显著高于 2 号墩底;当进入严重损伤阶段时,两个墩底同样在 PGA=0.4g 时首次出现损伤,1 号墩底的损伤概率继续保持较高水平,而 2 号墩底的损伤概率相对较低;最终在完全损伤阶段,两个墩底均在 PGA=0.5g 时首次出现,1 号墩底的损伤概率为 4%,2 号墩底的损伤概率为 1%。这一系列数据表明,1 号墩底在各个损伤程度下普遍表现更高的损伤概率,且随着损伤程度的加剧,其损伤表现愈发显著,这充分说明 1 号墩底的抗震性能相较于 2 号墩底存在明显的不足。

通过计算得到的三向地震动输入下支座易损性曲线损伤曲线如图 6 所示。对比三向地震动输入下支座的易损性曲线和损伤概率数据可以发现:随

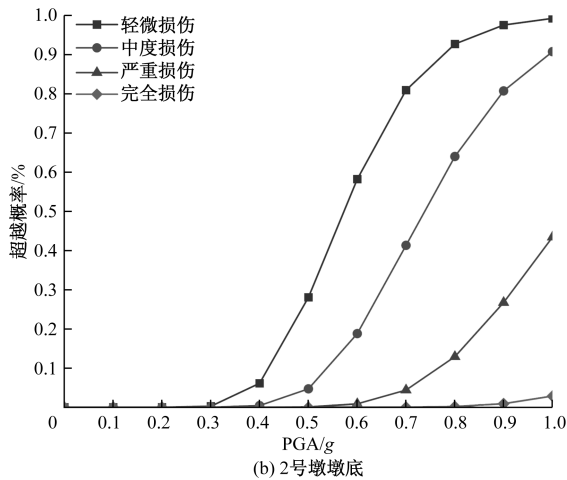
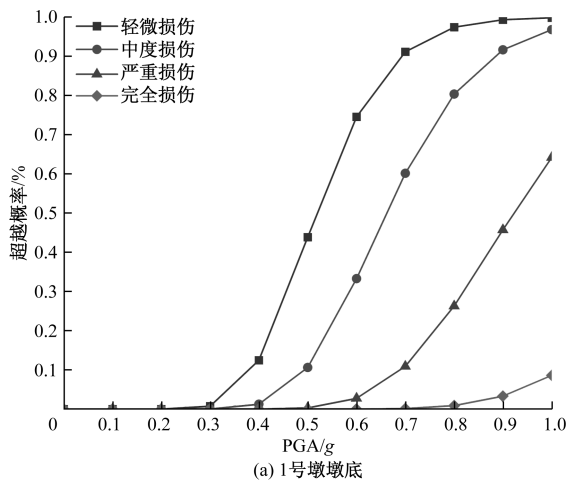


图5 三向输入下桥墩墩底截面曲率易损性曲线

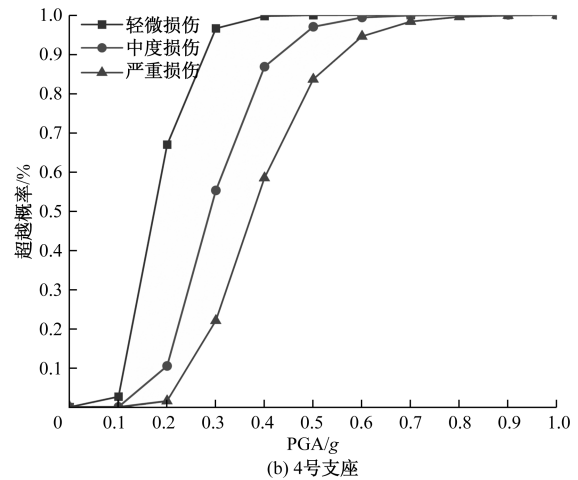
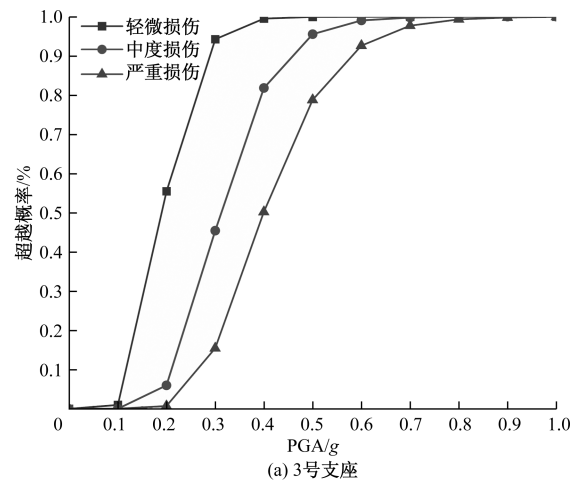


图6 三向输入下支座易损性曲线

着 PGA 的逐步增大, 支座在各损伤状态下均呈现出明显的损伤概率递增趋势。具体表现为: 在轻微损伤阶段, 支座在 $PGA=0.1g$ 时就出现了 1% 的初始损伤概率, 当 PGA 增加到 $0.2g$ 时, 损伤概率迅速上升至 55%, 在 $PGA=0.4g$ 时即达到 100% 的损伤概率。对于中度损伤状态, 支座在 $PGA=0.2g$ 时开始出现 6% 的损伤概率, 随后在 $PGA=0.3g$ 时显著增加至 45%, 在 $PGA=0.5g$ 时达到 96%, 最终在 $PGA=0.7g$ 时达到 100%。在完全损伤状态下, 支座从 $PGA=0.2g$ 时的 1% 初始损伤概率开始, 经过 $PGA=0.3g$ 时的 15%, 到 $PGA=0.4g$ 时上升至 50%, 在 $PGA=0.5g$ 时达到 79%, 并最终在 $PGA=0.9g$ 时达到 100%。整体来看, 在三向地震动输入工况下, 支座表现出较为明显的易损性发展规律, 轻微损伤在较低 PGA 水平下就能达到较高概率, 中度损伤需要中等 PGA 水平才能达到显著概率, 而完全损伤则需要较高的 PGA 水平才能实现, 这反映支座在三向地震作用下的损伤发展具有渐进性特征, 且不同损伤状态的易损性曲线之间存在明显的差异。

4 结论

本文以大跨度连续刚构桥为背景, 根据实例工程设计文件和报告的加速度反应谱为参照, 通过从 PEER 选取 10 条地震波, 采用增量动力分析法, 按照 $0.1g$ 增量进行调幅得到 100 条地震波, 按照水平双向和引入竖向地震波三向输入两种方式输入 OpenSEES 有限元模型当中, 对桥梁关键截面进行分析, 依据相关指标及结构动力特性分析, 将桥墩墩底曲率和支座位移作为损伤指标, 将 PGA 和损伤界限值取对数后利用 Matlab 通过正态分布函数得到不同损伤状态下的超越概率, 绘制相应易损性曲线, 总结得出的主要结论如下。

(1) 对于桥墩墩底截面曲率损伤方面, 双向地震动输入下 1 号主墩墩底截面在 $PGA=0.4g$ 时轻微损伤状态的超越概率达到 43%, 中度损伤状态的超越概率为 28%, 而 2 号墩在相同 PGA 水平下的轻微损伤和中度损伤状态超越概率分别仅为 30% 和 15%, 表明 1 号主墩是结构的薄弱环节。当引入竖向地震动后, 1 号主墩的损伤发展明显加快, 在 $PGA=0.2g$ 时即出现 22% 的轻微损伤概率, 且在完全损伤状态下的超越概率较双向地震动增加约 25%, 这主要是由于竖向地震动导致的轴力波动显

著影响了截面的弯矩承载能力。

(2) 对于支座系统响应特征, 在双向地震动工况下, 3 号支座在 $PGA=0.2g$ 时即出现轻微损伤, 损伤概率显著高于临界 $PGA=0.3g$ 的 4 号支座, 表现出明显的位置相关性。引入竖向地震动后, 支座系统的损伤发展速率显著提高, 在 $PGA=0.4g$ 时轻微损伤概率即达到 100%, 表明竖向地震动对支座系统的影响最为显著, 显著加剧了支座的位移响应。

(3) 竖向地震动的引入不仅加快了桥墩损伤的发展进程, 同时显著增加了支座系统的位移响应, 改变了结构的整体动力特性。表明在实际工程中重点关注竖向地震动与水平地震动的耦合效应, 优化结构构件的抗震性能, 确保桥梁结构的整体安全性。

参考文献

- [1] 金如意, 申彦利. 桩-土相互作用下的桥梁高墩地震易损性复合参数分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(5): 1016-1023.
- [2] 陈志伟, 蒲黔辉, 李晰, 等. 行波效应对大跨连续刚构桥易损性影响分析[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(1): 23-29.
- [3] 董俊, 曾永平, 单德山. 高墩大跨铁路桥梁构件三维地震易损性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(3): 141-149.
- [4] 单德山, 韩璐璐, 瞿发亮, 等. 地震动入射角对空心薄壁高墩桥梁地震易损性的影响[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(6): 90-103.
- [5] 赵志宏. 桥梁高墩地震易损性分析的适用损伤指标研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2021.
- [6] 束景晓, 梁岩, 童明娜, 等. 考虑桩土相互作用的近海刚构桥全寿命地震易损性分析[J]. 自然灾害学报, 2024, 33(5): 146-156.
- [7] 赵启阳. 长历时地震作用下大跨度连续刚构桥的地震易损性分析及减隔震研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2024.
- [8] 周成龙, 张文东, 马明虎, 等. 高墩大跨径连续刚构桥梁中跨合龙施工技术研究——以芦沟河特大桥为例[J]. 科技和产业, 2024, 24(5): 253-259.
- [9] 李喜梅, 杨天宇, 李明睿. 主余震序列作用下基于时间维度的连续梁桥易损性分析[J]. 地震工程学报, 2024, 46(6): 1291-1299.
- [10] 余洁歆, 吴淑婧, 丁传辉, 等. 大跨度斜拉桥地震易损性分析[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 843-849.

Vulnerability Analysis of Long-span Continuous Rigid Frame Bridge under Multi-directional Seismic Excitations

ZHAO Feng, TIAN Shizhu

(School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, Jiangsu, China)

Abstract: Regarding the special seismic response characteristics exhibited by super long-span bridge, a long-span continuous rigid-frame bridge was focused on as the research subject. A three-dimensional finite element model was established, and incremental dynamic analysis (IDA) was performed to systematically investigate the dynamic response characteristics under bi-directional and tri-directional seismic excitations. The results indicate that under bi-directional seismic excitation, the main pier exhibits a 43% probability of slight damage at $\text{PGA}=0.4g$. After incorporating vertical seismic excitation, the main pier shows a 22% probability of slight damage at $\text{PGA}=0.2g$, with the exceedance probability of complete damage state increasing by approximately 25%. Regarding the bearing system, the introduction of vertical seismic excitation significantly accelerates the damage progression rate, reaching a 100% probability of slight damage at $\text{PGA}=0.4g$.

Keywords: incremental dynamic analysis; long-span continuous rigid frame bridge; seismic vulnerability; earthquake