

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20231009005

# 基于ETM的震损RC框架抗震性能快速评估及FRP加固方案比选\*

马高<sup>1,2</sup>, 姜雪灿<sup>1</sup>, 贾立哲<sup>3</sup>

(1. 湖南大学土木工程学院, 湖南长沙 410082; 2. 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室(湖南大学), 湖南长沙 410082; 3. 东莞市建筑科学研究院有限公司, 广东东莞 523809)

**摘要:**近年来,地震造成大量建筑结构损伤事件时有发生,开展震损结构抗震性能评价与加固研究工作已成为地震灾区的紧迫需求。本研究旨在考虑地震动持时影响,运用耐震时程法,对震损结构、FRP加固震损框架结构的抗震性能进行评估,并快速确定最优FRP加固震损结构方案。首先,建立震损框架的OpenSees数值模型,随后生成多种不同持时的耐震加速度时程曲线(ETA),运用耐震时程法(ETM)和增量动力分析法(IDA)计算结构在地震作用下的响应。对比ETM与IDA法得到的易损性曲线,可验证耐震时程法分析震损结构抗震性能的有效性。在此基础上,对不同类型的FRP加固震损框架结构进行抗震性能评估,综合考虑经济性、效率性等因素,选出最优加固方案。研究表明,ETM能够高效分析和评估结构抗震性能,显著降低IDA法的计算成本,可为震损结构的抗震性能评估与加固设计提供重要支撑。

**关键词:**耐震时程法;震损结构;持时;易损性;抗震性能;FRP加固

**中图分类号:** TU375 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)03-0602-09

## Rapid Seismic Performance Assessment and Comparative Selection of FRP Reinforcement Schemes for Earthquake-damaged RC Frames Based on ETM

MA Gao<sup>1,2</sup>, JIANG Xuecan<sup>1</sup>, JIA Lizhe<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Hunan Provincial Key Laboratory for Damage Diagnosis of Engineering Structures, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. Dongguan Institute of Building Research Co., Ltd., Dongguan 523809, China)

**Abstract:** In recent years, seismic events causing significant damage to building structures have been frequently reported. Consequently, research on the seismic performance assessment and reinforcement of earthquake-damaged structures has become an urgent need in earthquake-affected areas. This study aims to assess the seismic performance of earthquake-damaged structures and frame structures reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) using the endurance time method while considering the influence of seismic motion duration, and to rapidly determine the optimal FRP reinforcement scheme. First, numerical models of earthquake-damaged frames were established in OpenSees. Then, multi-

\* 收稿日期:2023-10-09;修回日期:2023-12-13

基金项目:国家自然科学基金项目(52278498, 51878268)、湖湘青年英才计划项目(2021RC3041)资助

作者简介:马高(1985—),男,副教授,博士。主要从事结构抗震、装配式结构等研究。E-mail:magao@hnu.edu.cn

ple endurance time acceleration (ETA) curves with different durations were generated, and the structural responses under seismic action were calculated using both the endurance time method (ETM) and incremental dynamic analysis (IDA). By comparing the vulnerability curves derived from ETM and IDA methods, the effectiveness of ETM in evaluating the seismic performance of earthquake-damaged structures was verified. On this basis, the seismic performance of earthquake-damaged frame structures reinforced with different types of FRP was evaluated. Based on a comprehensive analysis of cost-effectiveness, efficiency, and other factors, the optimal reinforcement scheme was selected. This study demonstrates that ETM can efficiently analyze and evaluate structural seismic performance, significantly reducing the computational cost compared to IDA, and can provide important support for the seismic performance assessment and reinforcement design of earthquake-damaged structures.

**Keywords:** endurance time method; earthquake-damaged structure; duration; vulnerability; seismic performance; FRP reinforcement

## 0 引言

近年来,全球多地发生了破坏性大地震,大量建筑结构遭受不同程度的损伤,部分甚至倒塌。统计数据表明,地震主震常伴随一系列余震<sup>[1]</sup>。余震作用使主震损伤结构进一步累积损伤,降低结构整体稳定性和安全性。快速、准确评估震损结构的抗震性能,确定最优修复加固方案,促进地震灾区的功能恢复,已成为学术界和工程界关注的焦点<sup>[2]</sup>。框架结构在历次地震受损结构中占有重要比例,故本文选取框架结构作为研究对象。

目前现有的抗震性能评估方法,如静力弹塑性分析方法(Pushover Analysis)、增量动力分析方法(Incremental Dynamic Analysis, IDA)等,存在准确性和效率兼顾的难题<sup>[3]</sup>。鉴于此,H. E. Estekanchi等<sup>[4]</sup>提出了一种新型评估方法—耐震时程法。该法在保证工程准确性的同时,通过少量动力分析,能简单快速获取结构在不同强度下从弹性到非线性直至倒塌的动力响应<sup>[5]</sup>。V. Valamanesh等<sup>[6]</sup>研究了在混凝土重力坝线性和非线性抗震分析中使用耐震时程法的情况。Hariri-Ardebili等运用耐震时程法分析钢支撑框架的抗震性能<sup>[7]</sup>,表明耐震时程法和IDA法的分析结果能较好吻合。

尽管已有研究关注耐震时程法的应用,但在评估震损结构的抗震性能方面,尤其是在考虑准确量化结构损伤程度和加固前后损伤混凝土本构变化的情况下,对其适用性的研究尚显不足。此外,ETA生成过程中,目标时间点 $t_{\text{Target}}$ 是关键参数<sup>[8]</sup>,受

代表性地震动持续时间的影响<sup>[9]</sup>。但目前缺乏明确的确定方法,不同持续时间对震损结构的影响需进一步探究。

综上所述,本研究旨在应用耐震时程法,开展震损框架抗震性能快速评估与加固方案评价。鉴于纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer, FRP)具有轻量、高强和易施工的特点,本文选用FRP开展加固设计。首先,采用ETM和IDA法计算加固前后震损框架结构的地震响应,并进行易损性分析,验证ETM分析震损结构抗震性能的有效性;再利用阿里亚斯强度与目标时间点的关系,拟合持时公式。最后,基于耐震时间指标对不同加固方案比较,快速确定最佳方案;进行易损性和倒塌储备系数分析,验证耐震时间比选加固方案的可行性。本研究可为震损结构的抗震性能评价与加固设计提供参考。

## 1 耐震时程法原理

耐震时程法通过生成幅值随时间逐渐增加的人工地震动,仅通过一次时程分析便能获得结构的地震响应。该法采用时间作为强度指标,持续时间越长,结构的抗震性能越高<sup>[10]</sup>。因此,耐震时程法可以根据结构能够维持所需性能水平的长度来评估其抗震性能,提升结构抗震性能评估的效率。

耐震时程法的关键是合成耐震加速度时程曲线,要求目标加速度反应谱在指定时程内始终与持时 $t$ 成线性比例关系:

$$S_{aT}(T, t) = \frac{t}{t_{Target}} S_{ac}(T) \quad (1)$$

式中,  $S_{aT}(T, t)$  为时刻  $t$  时的目标加速度反应谱;  $S_{ac}(T)$  为预先指定的反应谱;  $T$  为结构的自振周期;  $t$  为指定时程内任意时间点;  $t_{Target}$  为目标时间点。

由位移与加速度间的关系, 可得到目标位移反应谱  $S_{uT}(T, t)$ , 如(2)式所示:

$$S_{uT}(T, t) = \frac{t}{t_{Target}} S_{ac}(T) \cdot \frac{T^2}{4\pi^2} \quad (2)$$

在指定时程内的任意时间点都严格满足(1)和(2)的要求较难实现, 故采用无约束非线性优化进行优化, 目标函数如(3)式所示:

$$\min F(a_g) = \int_0^{T_{max}} \int_0^{t_{max}} \left\{ [S_a(T, t) - S_{aT}(T, t)]^2 + \alpha [S_u(T, t) - S_{uT}(T, t)]^2 \right\} dt dT \quad (3)$$

式中,  $a_g$  为耐震加速度时程曲线;  $S_a(T, t)$  和  $S_u(T, t)$  分别为  $t$  时间段内的耐震加速度反应谱和耐震位移反应谱;  $\alpha$  为权重系数, 本文选取加速度反应谱作为目标谱, 即  $\alpha=0$ 。该方法通过不断迭代, 得到一个最优的耐震时程曲线, 实现其反应谱在指定时程内与目标谱最大限度吻合的目标。

## 2 算例模型设计与建模

为评估 FRP 加固震损框架结构的抗震性能, 本文选取一栋 5 层 3 跨的框架结构作为研究对象, 几何与配筋信息如图 1、2 所示。结构设计总信息: 抗震设防烈度为 8 度 ( $0.2g$ ), 设计地震分组为第二组, 场地类别为 II 类。结构的荷载、配筋等设计细节详见文献[11]。

采用 OpenSees 建立完好框架、震损框架和 FRP 加固震损框架的数值模型。其中, 混凝土和钢筋本构模型分别选用 Concrete01 和 Reinforcing-Steel; 钢筋混凝土梁和柱采用基于位移的梁柱单元 (Displacement-Based Beam-Column Element); 截面恢复力模型采用纤维截面。对于震损框架, 采用折减强度和弹性模量的方法, 得到损伤混凝土、损伤钢筋的本构模型; 选用 Elastic-Perfectly Plastic 材料模拟纵向 FRP, 同时使用 MinMax 材料对 FRP 的极限应变进行控制; 根据损伤状态调整三折线荷载-位移骨架曲线的特征点参数, 反映箍筋与 FRP 的约束作用, 建立 FRP 加固震损 RC 柱的数值模型<sup>[12]</sup>。

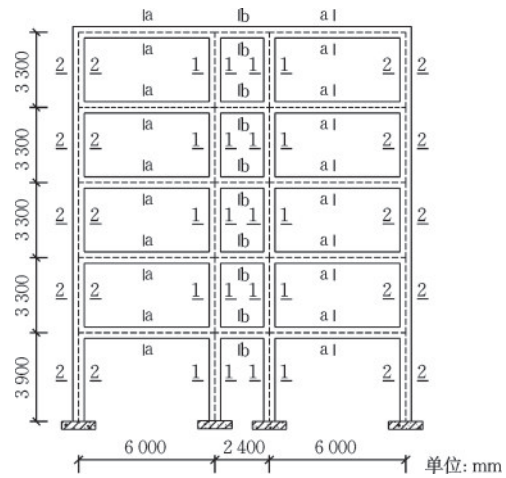


图1 框架立面示意

Fig.1 Elevation of frames

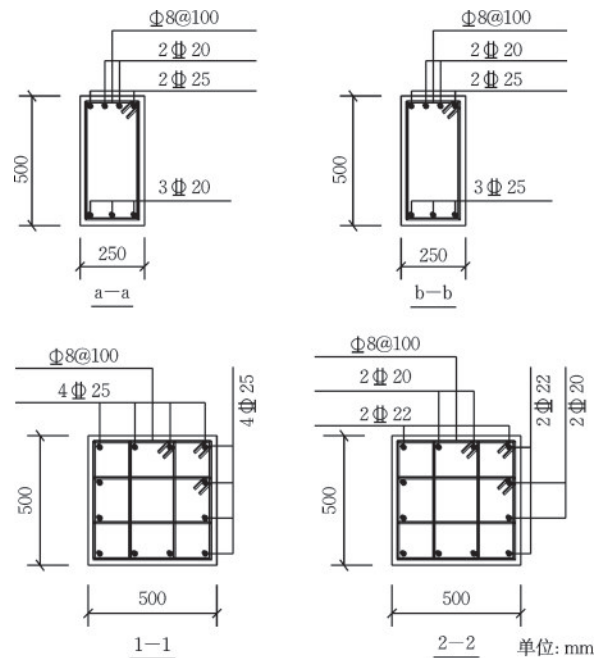


图2 截面尺寸及配筋信息

Fig.2 Cross-section dimensions and reinforcement details

选取 E1 Centro 波作为地震动输入, 对完好框架预制损伤, 为确保结构的可修性, 将预制损伤状态设置为中等破坏程度。采用 Park-Ang 损伤模型<sup>[13]</sup> 计算各构件的损伤指数。根据文献[11]提供的构件损伤状态与 Park-Ang 损伤指数的对应关系, 建立震损框架的数值模型。

对完好框架施加倒三角模式侧向力, 进行推覆分析, 通过控制最大层间位移角使完好结构产生不同等级的破坏。《建筑抗震设计规范》<sup>[14]</sup> 给出了框架不同破坏等级与最大层间位移角的对应关系, 见表 1。图 3 为不同损伤程度框架的基底剪力-顶点水

平位移关系曲线图,相较于完好结构,轻微、中等、严重损伤框架的最大承载力分别下降了2.4%、6.5%、22.4%。数据表明随着损伤程度的增大,结构的强度、刚度和变形能力的降低程度也逐渐增加;严重损伤框架结构的各项性能显著退化。

表1 RC框架不同破坏等级的层间位移角限值

Table 1 Inter-story drift angle limits for different damage levels of RC frames

破坏等级	基本完好	轻微损伤	中等损伤	严重损伤
层间位移角限值	<1/550	1/550-1/250	1/250-1/120	1/120-1/60

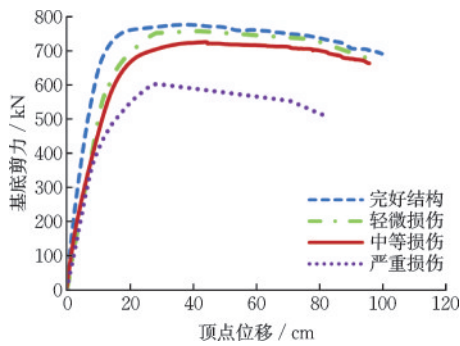


图3 框架能力曲线

Fig.3 Curves of frame capability

### 3 地震动选择和不同持时ETA生成

#### 3.1 地震动记录的选择

从PEER-NGA强震数据库中选取了16条天然地震动,选取原则基于美国ATC-63<sup>[15]</sup>的建议。调幅后,所选天然地震动反应谱均值与规范反应谱曲线吻合较好,如图4所示。

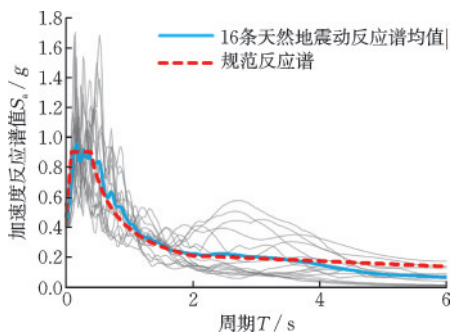


图4 天然地震动反应谱与规范反应谱对比

Fig.4 Comparison between natural ground motion response spectrum and code-specified response spectrum

#### 3.2 不同持时ETA生成

V. Valamanesh等<sup>[16]</sup>探究了不同目标时间点耐震时程曲线特征参数的变化规律,表明在特定时程内,ETA与有效的地震动特征参数间呈现良好的一致性。本文选择我国建筑抗震设计规范反应谱作为目标反应谱 $S_{ac}(T)$ ,采用非线性最小二乘函数对式(3)进行优化求解。目标时间点取值范围0~30s<sup>[17]</sup>,生成 $t_{Target}$ 分别为5、10、15、20、25、30s的ETA各3条,对应的持时分别为15、30、45、60、75、90s,用以研究持时对震损结构抗震性能的影响。由图5可得,在各个目标时间段内,不同持续时间的ETA与规范反应谱均能很好吻合,生成的ETA具有较高的精度。

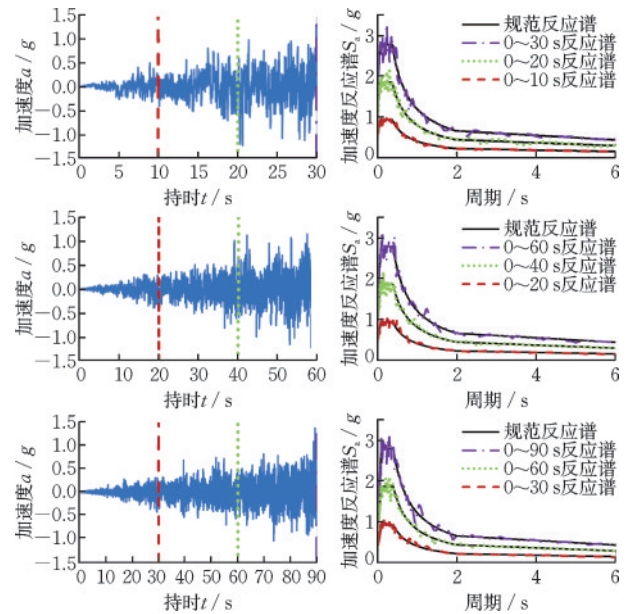


图5 不同持时耐震时程曲线及其反应谱

Fig.5 Endurance time curves and corresponding response spectra for different durations

### 4 考虑持时影响的震损框架抗震性能快速评估

#### 4.1 ETA方法适用性分析

选择最大层间位移角 $\theta_{max}$ 作为结构损伤指标。本文采用IM-DM准则<sup>[18]</sup>,按照DM准则确定立即使用(IO)、生命安全(LS)性能点;按照IM准则确定防止倒塌(CP)性能点。

以目标时间点为10s,持时为30s的3条ETA

作为输入,用耐震时程法对完好结构和震损结构进行分析,得到最大层间位移角。然后用16条天然地震动的IDA分析结果作为基准,对比验证耐震时程法分析结构响应的准确性。

采用3条ETA分析结果的均值,并对均值曲线进行拟合,结构弹性阶段采用线性拟合,非线性阶段采用3次多项式拟合。对于IDA分析结果,采用式(1)将地震动强度 $S_a(T)$ 与耐震时间 $t$ 进行转化。由图6、图7可见,ETM曲线均在各天然地震动IDA曲线的包络线内,表明耐震时程法能够捕捉结构在不同地震作用下的响应特性;且ETM曲线与IDA均值曲线之间具有良好的 consistency,验证了耐震时程法在分析震损结构地震响应方面的准确性和可行性。

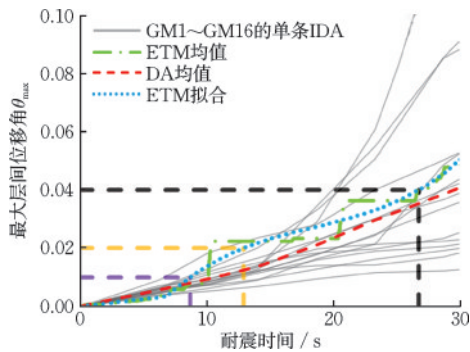


图6 完好结构层间位移角对比

Fig.6 Comparison of inter-story drift angles for intact structure

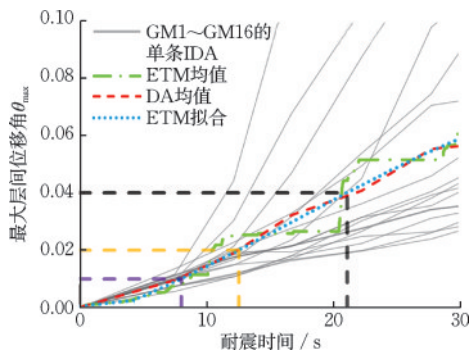


图7 震损结构层间位移角对比

Fig.7 Comparison of inter-story drift angles for earthquake-damaged structure

在分析效率方面,IDA法需要156次时程分析计算,ETM仅需要3次分析便能较好地捕捉到结构的抗震性能,显著提高了结构抗震分析的计算效率,可以高效指导抗震设计和决策。

震损结构达到三个性能点的耐震时间均小于完好结构,尤其是CP状态时,其耐震时间明显小于

完好结构,证明耐震时程法可以通过结构达到目标性能所需的耐受时间长短来评估结构的抗震性能。

#### 4.2 目标时间点和最优持时的确定

地震动持时特性一般用地震动滞回能与输入能的大小来反映,本文引用Arias强度指标<sup>[19]</sup>,研究持时与强度指标间的关系来确定ETA的最优持时。计算不同目标时间点ETA的两个强度指标:地面峰值加速度PGA和阿里亚斯强度 $I_A$ ,具体数据见表2。

表2 不同目标时间点ETA的参数

Table 2 Parameters of ETA at different target time points

ETA参数 目标时间 点/s	持时/ s	全时程 PGA/g	0~ $t_{\text{Target}}$ 间 PGA/g	全时程 $I_A/(m \cdot s^{-1})$	0~ $t_{\text{Target}}$ 间 $I_A/(m \cdot s^{-1})$
5	15	1.27	0.49	21.71	1.19
10	30	1.28	0.49	32.04	1.63
15	45	1.19	0.44	40.63	1.97
20	60	1.24	0.43	55.86	2.53
25	75	1.33	0.40	61.89	2.79
30	90	1.27	0.49	21.71	1.19

观察到,随着持时改变,全时程PGA和0~ $t_{\text{Target}}$ 间PGA基本不发生改变;而0~ $t_{\text{Target}}$ 间的 $I_A$ 值会随着目标时间点改变,且变化幅度呈现出明显的规律,如图8所示。基于计算数据,拟合目标时间点与阿里亚斯强度之间的关系:

$$t_{\text{Target}} = 3.5062(I_A)^{2.1194} \quad (4)$$

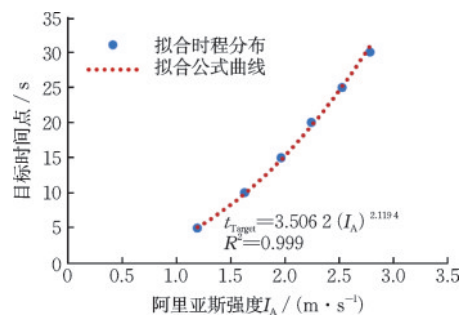


图8 计算点分布与拟合公式曲线对比

Fig.8 Comparison between distribution of calculation points and fitted formula curve

本文所选16条天然地震动的 $I_A$ 均值为2.713 m/s,代入公式(4)中,得到目标时间点 $t_{\text{Target}}$ 约为29 s,相应的持时为87 s。为验证拟合公式的合理性,将不同持时的ETA作用于震损框架结构。图9数据表

明,最优持时为 87 s 的 ETM 分析结果与 IDA 的结果最为接近。因此该拟合公式可以应用于耐震时程法目标反应谱对应的地震动加速度峰值为 0.4g 的目标时间点确定。

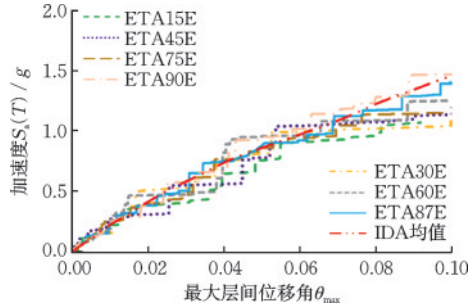


图9 不同持时ETM与IDA的结果对比

Fig.9 Comparison of results between ETM and IDA under different durations

### 4.3 易损性分析

地震易损性有助于预测震后建筑物受损程度。定义为在不同地震动强度参数下,结构的响应参数超过其极限破坏状态的条件失效概率<sup>[20]</sup>。

$$F(y) = P_f[LS|IM=y] = P[C \leq D|IM=y] \quad (5)$$

式中,LS为结构的极限状态;IM为地震动强度指标;D为结构的响应指标;C为结构在极限状态下的损伤指标; $P_f$ 为结构在地震作用下超过极限状态的概率。

结构的抗震失效概率 $P_f$ 表示为:

$$P_f = \Phi \left[ \frac{\ln \left[ \alpha (IM)^\beta / \bar{C} \right]}{\sqrt{\beta_d^2 + \beta_c^2}} \right] \quad (6)$$

式中, $\Phi(\cdot)$ 为正态分布函数, $\beta_d$ 和 $\beta_c$ 分别为地震需求和结构抗力的对数标准差。

在不同耐震时间 $t$ 下,统计出结构超过某极限状态 $LS_i$ 的概率,即 $P(LS_i|t)$ 。结构工程需求参数EDP对IM的条件概率符合对数正态分布,其中IM与 $t$ 具有等效对应关系。根据公式(1),耐震时间 $t$ 与加速度谱 $S_a(T_1, 5\%)$ 可以相互转化,得到以加速度谱 $S_a(T_1, 5\%)$ 作为坐标横轴、 $P_f$ 作为坐标纵轴,描述在极限状态 $LS_i$ 下结构的地震易损性曲线图。

求出不同地震动强度下结构达到IO、LS、CP极限状态的失效概率,绘制地震易损性曲线,如图10所示。对比两种方法的易损性曲线,各性能水准下的变化趋势基本保持一致。随着震损结构的破坏

极限状态加深,耐震时程法建立的易损性曲线增幅较大,同等地震动强度下失效概率增加,表明ETM在较高的 $S_a(T)$ 情况下,结构的响应更加剧烈。这是由于ETM的地震波频谱特性与常规地震波不同,进行非线性时程分析时会对结果造成一定的影响。

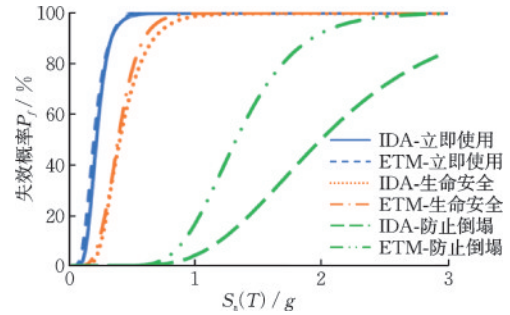


图10 ETM与IDA法的易损性曲线对比

Fig.10 Comparison of vulnerability curves between ETM and IDA methods

## 5 震损框架FRP加固方案的快速评价

根据梁柱构件的损伤情况及构件主要受力区域,采用3种加固方案对震损RC框架进行加固。加固方案1:框架下部仅柱端横向包裹和纵向粘贴FRP;加固方案2:在加固方案1的基础上,框架下部梁端纵向粘贴FRP;加固方案3:框架每层的柱端横向包裹FRP,梁柱端纵向粘贴FRP。图11为FRP加固方案。

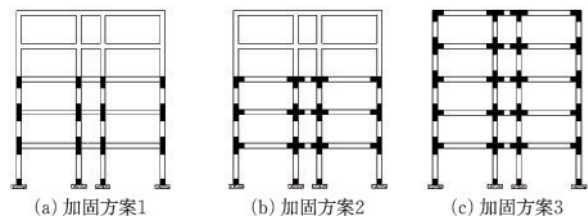


图11 FRP加固方案

Fig.11 Schemes of FRP reinforcement

选择最优持时为 87 s 的 ETA,对三种不同FRP加固震损RC框架方案的地震响应特性进行研究。相较IDA法,耐震时程法无需调幅过程,能有效减少分析计算量,9次时程分析后,就能获得地震响应结果,整个计算过程在1小时内即可完成,可快速提升抗震性能评估工作的效率。

### 5.1 层间位移角分析

本文选取最大层间位移角  $\theta_{max}$  作为结构损伤指标。由于耐震时程响应曲线呈现“阶梯特性”，耐震时程地震响应曲线的斜率经常发生突变，为此，将最大层间位移角达到 0.1 对应的 IM 作为耐震时程响应曲线的倒塌点。

从图 12 的数据观察到：耐震时间为 21.55 s 时，第 1 种 FRP 加固方案的震损结构的  $\theta_{max}$  最先达到 1%；当  $\theta_{max}=4\%$  时，第 1 种加固方案震损结构的耐震时间明显短于第 2 种和第 3 种加固方案的结构，表明在加固柱的同时，加固底部梁也是必要的。第 3 种加固方案结构的耐震时间也小于第 2 种加固方案，说明尽管方案 3 增加了 FRP 用量，但震损框架加固后的抗震性能并未显著提升，甚至稍有下降。即对于中低层框架而言，对底部薄弱部分加固即可，采用全楼层加固方式的提升作用并不明显。

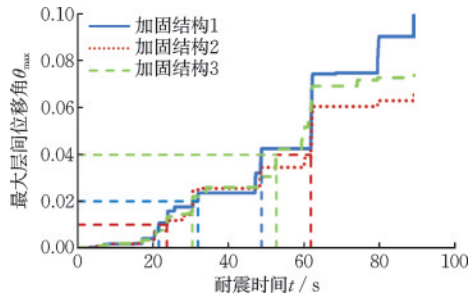


图 12 三种不同的 FRP 加固震损结构的层间位移角对比  
Fig.12 Comparison of inter-story drift angles for earthquake-damaged structures reinforced with three FRP schemes

当耐震时间约为 86 s 时，加固方案 1 的结构发生倒塌，而方案 2 和方案 3 的层间位移角分别为 6% 和 7%，尚未到达倒塌临界点。通过结构达到目标性能的耐受时间长短，可得出方案 2 的加固效果最佳，其次是方案 3，方案 2 和方案 3 明显优于方案 1。用耐震时间指标评估多种加固方案的效果，直观简便，有助于结构的修复加固工作更加迅速展开。

### 5.2 易损性分析

将概率地震需求模型的计算结果代入式(6)，获得不同 FRP 加固震损框架在立即使用 (IO)、生命安全 (LS) 和预防倒塌 (CP) 三种状态下的易损性曲线，具体如图 13 所示。

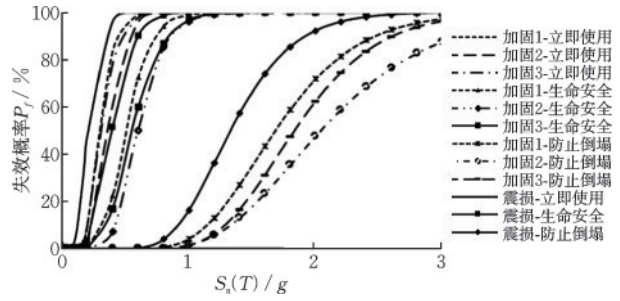


图 13 三种不同的 FRP 加固震损结构的易损性曲线对比  
Fig.13 Comparison of vulnerability curves for earthquake-damaged structures reinforced with three FRP schemes

FRP 加固后的震损框架在三种状态下的失效概率均显著降低，显示出 FRP 加固能有效提升震损框架的抗震性能。方案 2 和方案 3 在失效概率上相差不大，但明显优于方案 1。进一步佐证了耐震时程法通过结构达到目标性能所需的耐受时间长短，评估结构抗震性能的可行性。

### 5.3 抗倒塌能力分析

FEMA P695<sup>[21]</sup> 推荐使用倒塌储备系数 (Collapse Margin Ratio, 简称 CMR) 表征结构整体抗地震倒塌能力，反映结构实际抗倒塌能力与设防需求间的量化关系<sup>[22]</sup>。当选择  $S_a(T_1)$  作为地震强度指标时，CMR 计算公式如下：

$$CMR_{罕遇} = S_a(T_1)_{50\%} / S_a(T_1)_{罕遇} \quad (7)$$

式中， $S_a(T_1)_{50\%}$  表示模型的倒塌概率为 50% 时对应的地震动强度； $S_a(T_1)_{罕遇}$  表示规范建议的罕遇地震下的地震动强度。

在罕遇地震作用下，对三种不同的 FRP 加固震损结构的倒塌储备系数进行了比较，参见图 14 和表 3。加固方案 2 的 CMR 值分别是方案 1 和方案 3

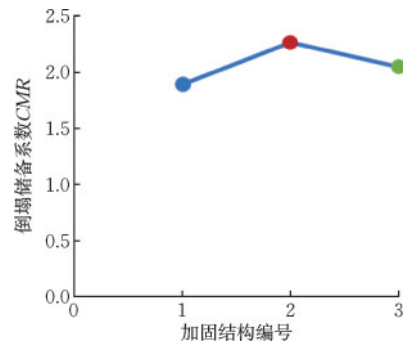


图 14 3 种不同的 FRP 加固震损结构的倒塌储备系数对比  
Fig.14 Comparison of collapse margin ratios of earthquake-damaged structures reinforced with three FRP schemes

表 3 FRP 加固震损结构的倒塌储备系数

Table 3 Collapse margin ratios of FRP-reinforced earthquake-damaged structures

加固结构编号	1	2	3
CMR	1.889	2.267	2.044

的 1.20 和 1.11 倍,较高的 CMR 数值代表结构具有更高水平的抗倒塌能力,表明方案 2 的加固效果最佳。

## 6 结 论

采用耐震时程法,计算完好结构、震损结构、FRP 加固震损框架结构的地震响应,同时考虑持时影响,评估震损结构、FRP 加固震损框架结构的抗震性能,最后采用耐震时间指标和地震易损性曲线快速确定最优的 FRP 加固震损结构方案。可以得到以下结论:

(1) 震损结构的 ETM 曲线位于天然地震动 IDA 曲线的包络线内,且与 IDA 均值曲线紧密契合。表明耐震时程法能有效分析震损结构的地震响应。特别是,结构性能达到 CP 状态时,震损结构的耐震时间显著小于完好结构,验证了耐震时程法可以通过结构达到目标性能所需的耐受时间长短来快速评估震损结构的抗震性能。

(2) 通过拟合公式得到的最优持时 ETM 结果与 IDA 法结果高度一致,表明目标时间点与阿里亚斯强度关系的拟合公式可用于耐震时程法目标时间点确定。

(3) 基于耐震时程法和 IDA 法建立的易损性曲线,在不同性能水平下变化趋势基本一致。耐震时程法显著减少了震损结构地震易损性分析中的非线性动力时程计算次数和时间,证实了其高效的易损性分析能力。

(4) 对 FRP 加固震损结构的耐震时间、易损性曲线以及倒塌储备系数进行比较,得出方案 2 的加固效果最佳,其次是方案 3,值得一提的是,方案 3 的加固用量却明显高于方案 2。

## 参考文献:

[1] 吴开统,李文喜.强余震的灾害评估[J].中国地震,1995(4):368-373.  
Wu K T, Li W X. Disaster estimation of strong after-

shocks[J]. Earthquake Research in China, 1995(4): 368-373. (in Chinese)

[2] 何浩祥,程时涛,廖李灿.考虑残余变形的震损框架结构性能评估及维修优化策略[J].振动工程学报,2022,35(1):23-33.  
He H X, Cheng S T, Liao L C. Performance evaluation and maintenance optimization strategy of seismic damaged frame structure considering residual displacement[J]. Journal of Vibration Engineering, 2022, 35(1): 23-33. (in Chinese)

[3] 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 J L, Yang L, Ou J P. The endurance time method for seismic response analyses of building structures[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(1): 8-18. (in Chinese)

[4] Estekanchi H E, Vafai A, Sadeghazar M. Endurance time method for seismic analysis and design of structures[J]. Scientia Iranica, 2004, 11(4): 361-370.

[5] 白久林,欧进萍.基于耐震时程法的钢筋混凝土框架结构抗震性能评估[J].工程力学,2016,33(10):86-96.  
Bai J L, Ou J P. Seismic performance evaluation of reinforced concrete frame structures using the endurance time method[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(10): 86-96. (in Chinese)

[6] Valamanesh V, Estekanchi H E, Vafai A, et al. Application of endurance time method in seismic analysis of concrete gravity dams[J]. Science Iranica, 2011, 18(3):326-337.

[7] Hariri-Ardebili M A, Sattar S, Estekanchi H E. Performance-based seismic assessment of steel frames using endurance time analysis[J]. Engineering Structures, 2014, 69(15): 216-234.

[8] 钟紫蓝,甄立斌,陈群,等.浅埋地下结构耐震时程分析法最优持时研究[J].岩土工程学报,2021,43(4):698-705.  
Zhong Z L, Zhen L B, Chen Q, et al. Optimal duration of endurance time acceleration functions for shallow buried underground structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(4): 698-705. (in Chinese)

[9] Estekanchi H E, Valamanesh V, Vafai A. Application of endurance time method in linear seismic analysis[J]. Engineering Structure, 2007, 29(10): 2551-2562.

[10] 沈禹,谈华顺,王献挚,等.考虑行波效应的大跨度矮塔斜拉桥耐震时程分析[J].工程力学,2020,37(3):131-141,148.  
Shen Y, Tan H S, Wang X Z, et al. Application of the

- endurance time method to seismic-induced pounding analysis for long-span extradosed cable-stayed bridges considering wave passage effects[J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(3): 131-141, 148. (in Chinese)
- [11] 邹雅峰. FRP加固震损RC框架数值建模方法与抗震性能评估[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.  
Zou Y F. Numerical modeling of earthquake-damaged RC frames retrofitted with FRP and seismic performance assessment [D]. Changsha: Hunan University, 2019. (in Chinese)
- [12] 马高, 邹雅峰. FRP加固震损RC柱建模方法及骨架模型研究[J]. *自然灾害学报*, 2021, 30(1): 89-98.  
Ma G, Zou Y F. Investigation of modeling method and skeleton curve of earthquake-damaged RC columns retrofitted with FRP [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2021, 30(1): 89-98. (in Chinese)
- [13] Park Y J, Ang A H S. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1985, 111(4): 722-739.
- [14] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [15] ATC-63 Quantification of Building Seismic Performance Factors[S]. Washington D C: Applied Technology Council, 2009.
- [16] Valamanesh V, Estekanchi H E, Vafai A. Characteristics of second generation endurance time acceleration functions[J]. *Scientia Iranica*, 2010, 17(1): 53-61.
- [17] 刘向阳. 增量地震激励分析法的研究与应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- Liu X Y. Research and application on structural dynamic analysis using incremental earthquake excitation [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [18] Vamvatsikos D, Cornell C A. Incremental dynamic analysis[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2002, 31(3): 491-514.
- [19] Arias A. A measure of earthquake intensity. seismic design of nuclear power plants[M]. Cambridge MA: MIT Press, 1970.
- [20] 周奎, 林杰, 祝文. 基于增量动力分析(IDA)方法的地震易损性工程实例分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2016, 36(1): 135-140.  
Zhou K, Lin J, Zhu W. Case study of seismic fragility analysis based on the incremental dynamic analysis (IDA) method [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2016, 36(1): 135-140. (in Chinese)
- [21] FEMA. Quantification of building seismic performance factors: FEMA-P695 [R]. Washington DC: Federal Emergency Management Agency, 2009.
- [22] 郑山锁, 温桂峰, 董立国, 等. RC框架结构倒塌地震易损性评估[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2022, 44(5): 177-188.  
Zheng S S, Wen G F, Dong L G, et al. Seismic collapse fragility estimation of RC frame structures [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering (in Chinese and English)*, 2022, 44(5): 177-188. (in Chinese)

(本文编辑: 苏泽云)