

基于倒塌分析的连续梁桥地震损伤评估方法*

黎雅乐¹, 宗周红², 黄学漾^{3,4}, 林元铮², 夏 坚^{3,4}

(1. 江苏开放大学建筑工程学院 南京, 210036) (2. 东南大学土木工程学院 南京, 210096)

(3. 福建省建筑科学研究院有限公司 福州, 350108) (4. 福建省绿色建筑技术重点实验室 福州, 350108)

摘要 为了掌握钢筋混凝土连续梁桥在地震作用下从完好到倒塌的破坏历程, 首先, 基于振动台试验研究对两跨连续梁桥模型进行倒塌仿真分析; 其次, 建立结构层次的单一倒塌准则; 最后, 根据影响结构倒塌的关键构件提出两跨连续梁桥地震损伤的整体评价指标 D 和破坏等级划分标准。结果表明: 提出的能量比指标可以有效识别出地震损伤时刻甚至倒塌时刻, 当能量比小于能量比限值时即可判定进入倒塌阶段; 纵向地震动作用下中墩墩柱和固定支座是关键受力构件; 基于关键构件提出的两跨连续梁桥地震损伤整体评价指标 D 可对不同损伤程度的两跨连续梁模型桥进行评估, 该评价体系也可为同类桥型的地震损伤评估和抗震加固提供参考。

关键词 钢筋混凝土; 连续梁桥; 地震损伤识别; 倒塌破坏; 评估

中图分类号 TU375.1; U441⁺.3; TH123

引 言

钢筋混凝土梁桥是我国中小桥的主要桥型, 该类桥型在多次地震中都发生过地震损伤, 严重时甚至桥梁倒塌。例如: 汶川地震中 S303 线渔子溪 2 号桥主梁断裂后外倾, 之后桥墩倒塌而全桥垮塌; 百花大桥大量墩柱被压溃, 其中第五联整体倒塌^[1-2]。

为保证设计桥梁在地震作用下的安全性, 掌握不同地震作用对结构引起的损伤程度, 合理评价震后桥梁的适用性, 需要开展地震易损性分析。易损性分析指从概率的角度考虑地震动的随机性, 建立不同强度地震作用下结构反应超过某种破坏状态的条件概率即易损性曲线^[3-4]。为了得到构件的易损性曲线, 需要对不同损伤程度进行分级, 因此地震损伤评估是易损性分析的基础, 而地震损伤评估又依赖于损伤评价指标和损伤状态分级标准, 因此损伤指标的选取是易损性分析的核心。

由于桥梁结构的易损性分析可由构件易损性曲线通过概率关系获得, 因此结构的易损性问题就成为组成结构的各构件的易损性问题, 针对各构件进行损伤评定。例如, 陈立波等^[5]以支座剪切应变、桥墩位移延性比、桥台相对位移为损伤指标进行构件易损性曲线计算, 将简支梁桥损伤最严重的构件

损伤等级定义为桥梁损伤等级进行结构易损性曲线计算。上述易损性研究虽然最终可以给出结构整体的易损性曲线, 但无法说明构件损伤导致结构发生倒塌的根本原因, 因此结构层次的桥梁地震损伤指标亟待研究。

目前, 对于连续梁桥体系中的各组成构件的损伤研究^[6-7]已较为充分, 但结构倒塌问题仍是研究热点。由于桥梁结构倒塌试验研究的复杂性和安全性问题, 目前学者主要从数值仿真角度对桥梁结构开展倒塌研究。亓兴军等^[8]利用 LS-DYNA 软件分析一座四跨 30°斜度的装配式连续梁桥在地震作用下的落梁形态。孙鹏等^[9]利用 ABAQUS 软件模拟了一座四跨连续梁桥在地震作用下发生连续倒塌的全过程。左焯等^[10]针对 3 种混凝土连续梁桥进行非线性地震响应分析及倒塌过程的数值仿真。Lee 等^[11]对 2008 年日本岩手宫城内陆地震中由于强震和桥下岩体滑移而倒塌的 Maturube 大桥进行了倒塌模拟。还有部分学者对连续刚构桥^[12]、拱桥^[13-14]和斜拉桥^[15-16]等其他形式的桥梁结构进行倒塌模拟, 这其中关于桥梁结构的倒塌准则和倒塌机理方面的研究尚不多见。

笔者为研究连续梁桥结构层次的损伤评价指标, 首先, 在振动台试验研究的基础上对连续梁桥进行倒塌分析并通过提出的倒塌准则进行倒塌与否的

* 国家自然科学基金资助项目(51678141); 西南交大陆地交通地质灾害防治技术国家工程实验室开放基金资助项目(SWJTU-GGS-2014001); 江苏省高校自然科学研究面上基金资助项目(15KJD580001)

收稿日期: 2018-08-18; 修回日期: 2018-10-30

判定,通过多工况的倒塌分析结果掌握构件损伤到桥梁结构倒塌的基本过程,从而确定影响该桥梁结构倒塌的关键构件;然后,基于关键构件提出两跨连续梁桥地震损伤的整体评价指标 D 和破坏等级划分标准。

1 倒塌准则

1.1 构件的破坏准则

结构的破坏往往是从构件破坏开始,构件的破坏准则有 3 种,分别为变形类、刚度类、能量和变形类。其中:变形类的倒塌准则如桥梁规范^[17]对于桥墩破坏的限制要求(墩顶位移要小于允许值);刚度类的倒塌准则有增量动力分析(incremental dynamic analysis,简称 IDA)准则^[18-19];变形和能量类的倒塌准则如 Park-Ang 损伤指数准则^[20]。

1.2 结构的倒塌准则

用构件的破坏准则作为倒塌准则虽然比较安全,但无法描述从损伤至倒塌全过程的内在机理,倒塌的时间、损伤的先后次序等都无法展现。为了倒塌仿真分析能顺利开展,必须先确定倒塌准则。目前,构件层次的倒塌准则存在不足,因此笔者首先需建立一个更有效的倒塌准则。下面从能量平衡角度研究基于结构层次的桥梁倒塌准则。

基于显式积分方法^[21]可知, t_i 时刻结构体系的运动方程为

$$\mathbf{P}(t_i) - \mathbf{M}\mathbf{a}(t_i) - \mathbf{F}(t_i) + \mathbf{H}(t_i) = 0 \quad (1)$$

其中: $\mathbf{P}(t)$ 为 t_i 时刻的外力; \mathbf{M} 为质量对角矩阵; $\mathbf{a}(t)$ 为加速度; $\mathbf{F}(t)$ 为单元应力场的等效节点力矢量; $\mathbf{H}(t)$ 为沙漏黏性阻尼力。

外力所做功等于结构总能量的增量,对于无损伤结构,结构体系应满足

$$\begin{aligned} \Delta E(t_i) &= \Delta E_K(t_i) + \Delta E_D(t_i) + \Delta E_R(t_i) + \\ &\Delta E_H(t_i) = \Delta W(t_i) \end{aligned} \quad (2)$$

其中: $\Delta E_K(t_i)$, $\Delta E_D(t_i)$, $\Delta E_R(t_i)$, $\Delta E_H(t_i)$ 分别为体系 t_i 时刻的动能、阻尼能、应变能、沙漏能增量; $\Delta E(t_i)$ 为体系 t_i 时刻的总能量增量; $\Delta W(t_i)$ 为时间增量 $\Delta t_{i-1/2}$ (即 $t_{i-1} \sim t_i$)期间外力所做功。

如果地震作用后结构发生损伤,有限元分析中将删去失效单元相关参数,因此只要存在损伤单元,则有限元分析的剩余结构总能量将不等于结构累积外力功。反之,若式(2)关系不再满足,则必然存在构件损伤。当一定量的关键构件破坏,结构将倒塌。

提出一能量比指标 $\xi(t_i)$,为 t_i 时刻结构剩余体系总能量 $E(t_i)$ 与 $0 \sim t_i$ 时间内外力功 $W(t_i)$ 之比。假设 t_{i-1} 时刻结构完好而在 $\Delta t_{i-1/2}$ 时间间隔内结构发生地震损伤,则 t_i 时刻损伤单元被“杀死”,因此 t_i 时刻的剩余结构由地震作用产生的累计总能量 $E(t_i)$ 和外力累计做功 $W(t_i)$ 分别为

$$E(t_i) = E(t_{i-1}) + \Delta E(t_i) - E_{\text{kill}} \quad (3)$$

$$W(t_i) = W(t_{i-1}) + \Delta W(t_i) \quad (4)$$

由于 $E(t_{i-1}) = W(t_{i-1})$, $\Delta E(t_i) = \Delta W(t_i)$,因此

$$\xi(t_i) = \frac{E(t_i)}{W(t_i)} = \frac{W(t_i) - E_{\text{kill}}}{W(t_i)} < 1 \quad (5)$$

因为 $0 \sim t_{i-1}$ 时刻结构完好,所以 $\xi(t_{i-1}) = 1$,即 $\xi(t_{i-1}) > \xi(t_i)$ 。假设 $\Delta t_{i+1/2}$ (即 $t_i \sim t_{i+1}$)期间不发生新的地震损伤,则

$$\begin{aligned} \xi(t_{i+1}) &= \frac{E(t_{i+1})}{W(t_{i+1})} = \frac{E(t_i) + \Delta E(t_{i+1})}{W(t_i) + \Delta W(t_{i+1})} = \\ &\frac{W(t_i) - E_{\text{kill}} + \Delta W(t_{i+1})}{W(t_i) + \Delta W(t_{i+1})} \end{aligned} \quad (6)$$

通过比较式(5),(6)可知, $\xi(t_{i+1}) > \xi(t_i)$ 。将 $\xi(t_{i-1})$, $\xi(t_i)$ 和 $\xi(t_{i+1})$ 相连形成能量比曲线,如见图 1 所示,发现在 t_i 时刻能量比曲线出现拐点,这是由于 $\xi(t_{i-1}) > \xi(t_{i+1}) > \xi(t_i)$ 的关系形成曲线凹凸发生变化,呈现 V 字形尖角。由于 t_i 时刻正是结构发生损伤的时刻,因此可以通过能量比曲线的拐点快速找到损伤发生的时间。

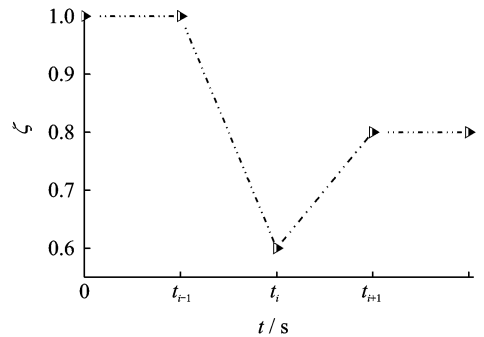


图 1 结构地震损伤前后能量比曲线变化图

Fig. 1 Curve variation diagram of energy ratio curve before and after earthquake damage

由图 1 可见,伴随时间增长,能量比 ξ (无量纲)整体呈下降趋势。桥梁结构中的损伤单元继续增加,能量比 ξ 将不断下降,当损伤程度达到临界状态即为结构倒塌。定义结构倒塌时刻的能量比为 ξ_d ,当 ξ 小于临界值 ξ_d ,即认为结构倒塌。判定结构倒塌的分析流程如图 2 所示。

为了论证该倒塌准则的合理性,以某两跨连续梁模型为研究对象,运用该基于能量平衡的倒塌准

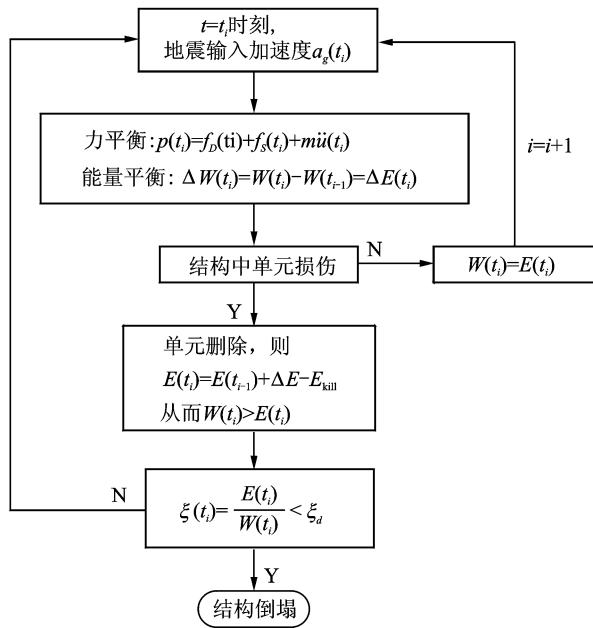


图 2 结构倒塌判定流程

Fig. 2 Judgement process of structural collapse

则分析整体结构的倒塌时刻和倒塌模式。

2 倒塌破坏分析

2.1 倒塌分析模型桥

倒塌分析的对象为一个已开展振动台试验的相似比为 1:3 的两跨连续梁模型桥。模型主梁长度为 14.2 m,横截面为两片 T 梁,桥墩为双柱墩,混凝土强度标号都为 C30,纵筋采用 HPB235 普通钢筋,材料为原型材料,配重质量为 6t,如图 3 所示。支座为普通板式橡胶支座,中墩为固定支座,两侧边墩的支座为活动支座。选定 4 种地震波分别代表坚硬、中硬、中软和软弱 4 种场地土类型,对该模型桥梁进行了地震模拟振动台试验研究,根据相似比关系,确定时间相似比 $S_t = S_l^{0.5} \times S_a^{-0.5} = 0.408$ (S_l, S_a 分别为长度和加速度相似比)^[22]。

2.2 有限元分析模型

2.2.1 单元和材料

为得到该模型桥倒塌模式,分析其倒塌机理,基于振动台试验研究成果,采用 LS-DYNA 软件对该结构的破坏历程进行进一步研究。混凝土为实体单元,立方体抗压强度和单轴抗压强度、单轴抗拉强度分别取 32, 17.4 和 1.39 MPa,弹性模量为 2.75×10^4 MPa。当混凝土压应变大于等于 0.003 3、拉应力大于等于 2.24 MPa 时材料破坏。桥墩用实体单元模

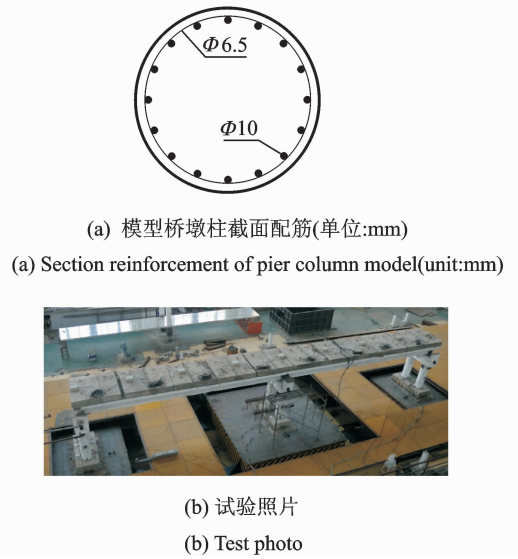


图 3 振动台试验模型桥

Fig. 3 Bridge specimen of shaking table test

拟,材料特性如表 1 所示。支座为弹簧单元模拟,通过有限元模型修正确定各支座弹簧刚度,中支座纵、横、竖刚度分别为 $955, 1 \times 10^3$ 和 5×10^5 kN/m,边支座纵、横、竖刚度分别为 550, 800 和 2×10^5 kN/m。若弹簧力超过支座最大剪切力则退出工作,改由盖梁和主梁直接作用。采用接触方式仿真,接触的动、静摩擦因数为 0.15 和 0.3。在主梁上附有质量单元模拟配重,建立的有限元分析模型如图 4 所示。

表 1 桥墩钢筋材料参数

Tab. 1 Material parameters of piers

参数	纵筋	箍筋
屈服强度 / MPa	351	350
极限强度 / MPa	558	531
弹性模量 / MPa	2×10^5	2×10^5
屈服后切线模量 / MPa	2×10^3	2×10^3

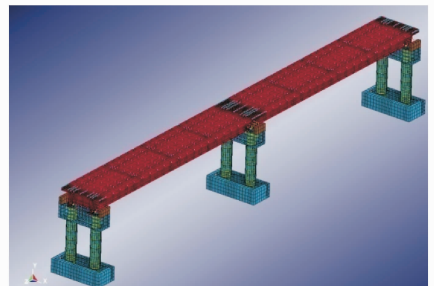


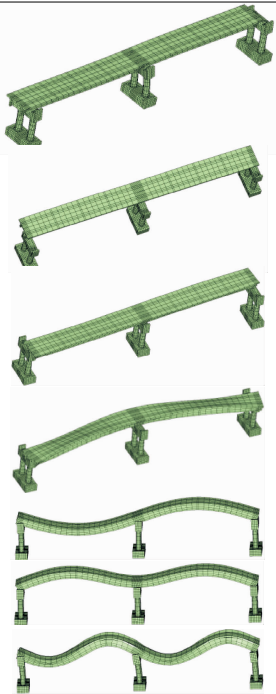
图 4 有限元模型

Fig. 4 FEA model

2.2.2 有限元模型修正及验证

为确保有限元模型的正确性,以振动台试验^[22]实测的自振频率为目标,修正支座弹簧刚度等结构参数,得到修正后的有限元模型修正效果如表 2 所示。

表 2 自振频率对比
Tab. 2 Vibration mode frequency comparison

振动方向	阶次	试验值/Hz	计算值/Hz	误差/%	模态
纵向	1	3.864	3.847	-0.44	
	1	4.264	4.335	1.67	
横向	2	5.364	5.215	-2.78	
	3	12.704	13.167	3.64	
竖向	1	8.519	8.339	-2.11	
	2	12.692	12.345	-2.73	
	3	26.659	27.79	4.24	

2.3 纵向倒塌模式

以纵向倒塌模式为例分析该模型桥的倒塌过程,选取 10 条具有代表性的地震波进行后续有限元分析,地震波的原始信息如表 3 所示。根据相似性对各工况的原始波时间进行了压缩,每种地震波工况最终激励至桥梁倒塌。为节约篇幅,仅列举 El Centro 波和 Chi-chi 波地震波工况进行分析。

表 3 原始地震波信息

Tab. 3 Original shaking wave details

场地	地震	PGA/ g	持续时间/ s
I	Landers(Amboy)	0.115	50
	Lushan(宝兴地办)	1.005	60
II	Northern Calif-01 (Ferndale City Hall)	0.122	40
	Imperial valley(Cerro Prieto)	0.157	64
III	Imperial Valley-02 (El Centro Array #9)	0.281	54
	Humbolt Bay (Ferndale City Hall)	0.039	40
IV	Chi-chi(ILA004)	0.073	100
	Loma Prieta(Foster City-APEEL 1)	0.281	54
	Niigata(FKS020)	0.048	187
	Chi-chi(TCU117)	0.12	90

2.3.1 El Centro 波输入工况

在纵向最大峰值加速度(peak ground accelera-

tion,简称 PGA)为 1.2 g 的 El Centro 波作用下,结构从出现轻微损伤现象到最终倒塌的全过程如图 5 所示。具体叙述如下:当 t 为 0.81s 时,墩底开始出现混凝土开裂;当 t 为 0.84 s 时,墩底破坏加剧,部分箍筋裸露;当 t 为 1.05 s 时,中支座失效,中墩基本破坏导致主梁失去中墩支撑而底部开裂;当 t 为 1.13 s 时,T 梁梁肋持续开裂;最终在 t 为 1.44s 时主梁破坏,桥梁倒塌。在地震输入过程中能量和外力做功的变化曲线如图 6 所示,两者逐渐产生差异。

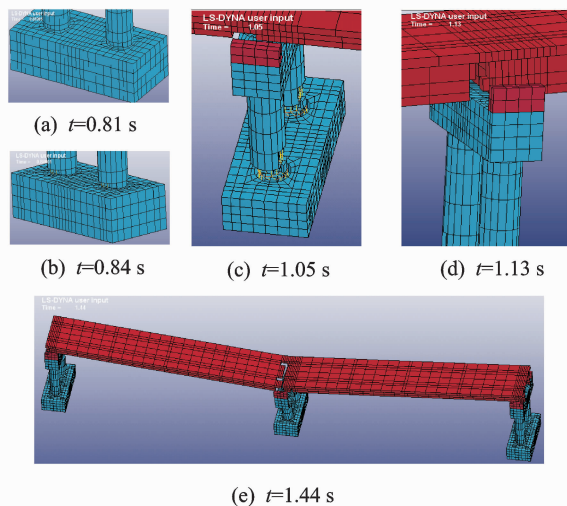


图 5 El Centro 波作用下模型桥纵向倒塌模式

Fig. 5 Longitudinal collapse mode of bridge specimen under El Centro wave

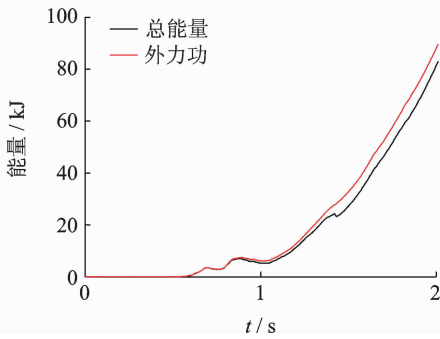


图 6 El Centro 波工况结构总能量和外力功

Fig. 6 Total structure energy and external work in El Centro wave case

图 7 为 1.2 g 的 El Centro 波工况的能量比变化曲线。可以发现,在图 5 的各构件损伤破坏时刻能量比都有明显变化,可以有效识别出损伤时间。

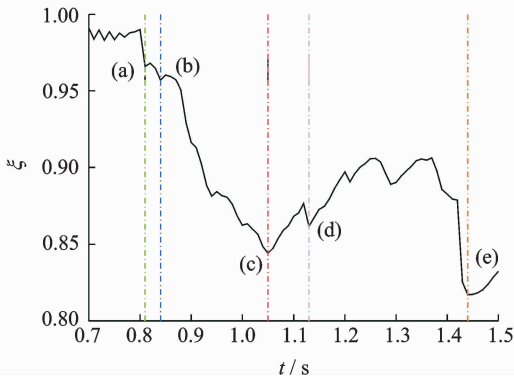


图 7 El Centro 波工况能量比变化曲线

Fig. 7 Energy ratio curve in El Centro wave case

2.3.2 Chi-chi 波 (TCU117) 输入工况

如图 8 所示,当纵向地震动输入为 TCU117 的

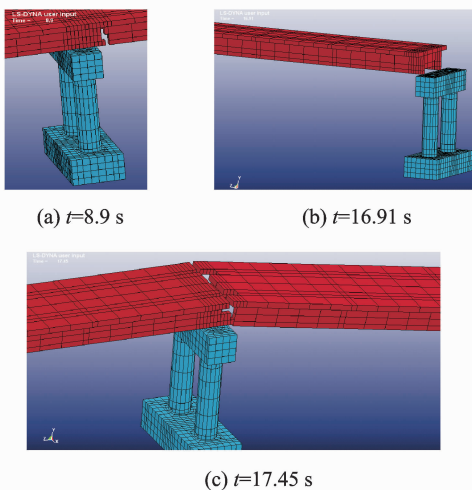


图 8 Chi-chi 波作用下模型桥纵向倒塌模式

Fig. 8 Longitudinal collapse mode of bridge specimen under Chi-chi wave

Chi-chi 地震波时,PGA 增加至 1.2 g 结构最终发生倒塌。具体过程如下:当 t 为 8.9 s 时,中支座失效,同时引起梁底部分损伤;当 t 为 16.91s 时,上部结构几乎脱离桥墩。从图 9 发现此时已发生 40 cm 以上的上下部结构间相对位移;当 t 为 17.45 s 时,上部主梁一端已离开盖梁向下跌落,可以判定桥梁倒塌。在 seismic wave input process, also find that the external work gradually greater than the total energy of the remaining structure, as shown in Figure 10. Figure 11 energy ratio change curve also better identify the damage time.

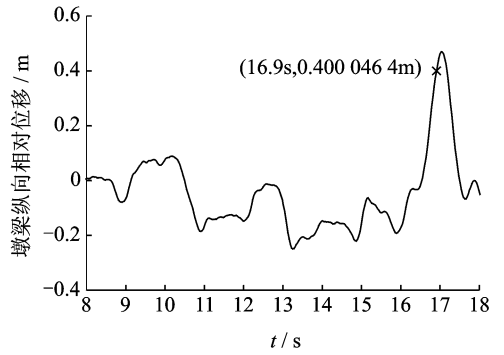


图 9 边墩的墩梁纵向相对位移响应历程

Fig. 9 Relative displacement response of side pier and girder

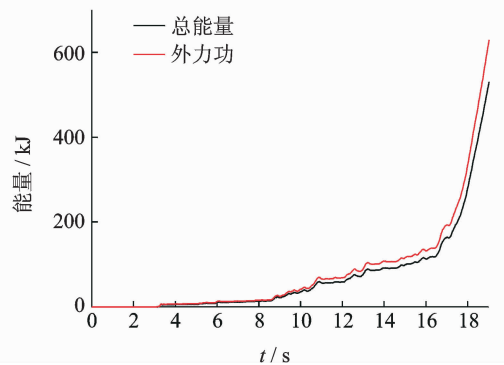


图 10 Chi-chi 波工况结构总能量和外力功

Fig. 10 Total structure energy and external work in Chi-chi wave case

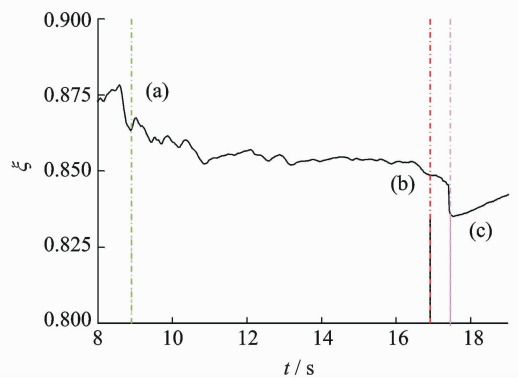


图 11 Chi-chi 波工况能量比变化曲线

Fig. 11 Energy ratio curve in Chi-chi wave case

根据图 2 的设想,当 t 时刻的剩余结构总能量与外力功之比 $\xi(t)$ 小于 ξ_d ,即可判定整体桥梁结构进入倒塌阶段。由于不同地震动输入工况桥梁结构倒塌瞬时的 ξ 大小不完全一致(见图 12),但分布在一定区间内且具有统计规律,现假定 ξ 服从正态分布,取保证率为 95% 确定 ξ_d 的代表值

$$\xi_d = \mu + 1.6\sigma \quad (7)$$

其中: μ 为样本均值; σ 为样本标准差。

通过分析图 12 的计算结果,得到均值和标准差,带入式(11)计算得到 ξ_d 为 90%。

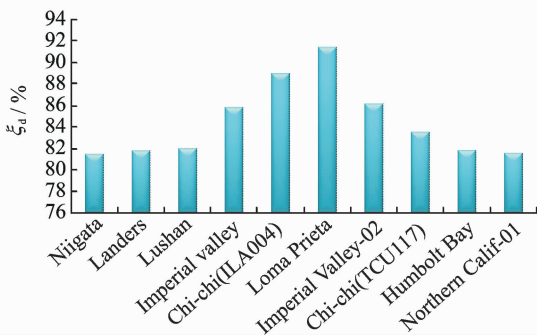


图 12 能量比样本图

Fig. 12 Energy ratio sample diagram

3 桥梁结构地震损伤评估

3.1 损伤指标

倒塌准则判定指标 ξ 只能评价结构是否倒塌,

对于其他程度的损伤不能进行评估。已有的损伤评估指标多为构件层次的指标,笔者提出一种基于结构层次的损伤评价指标 D 。

研究纵向倒塌模式发现,两跨连续梁模型桥的中墩、固定支座在易损件中最为重要,这两者的失效将引起落梁或结构整体倒塌,因此提出损伤评价指标 D 为

$$D = \frac{\delta_1}{\delta_{u1}} \lambda + \frac{\delta_2}{\delta_{u2}} (1 - \lambda) \quad (8)$$

其中: δ_1, δ_{u1} 为中墩柱顶在地震动输入过程中的水平位移峰值和水平极限位移; δ_2, δ_{u2} 为中支座在地震动输入过程中的剪切位移峰值和极限剪切位移; λ 为中墩的耗能比 $\frac{E_1}{E_1 + E_2}$; E_1 为单个地震动工况中中墩能量最大值,即 $E_1(t_i)_{\max}$; E_2 为中支座的能量最大值 $E_2(t_i)_{\max}$ 。

3.2 计算示例

为验证损伤评价指标 D 的正确性,以 El Centro 波和 Chi-chi 波纵向地震动工况为例对模型桥地震损伤进行计算分析。有学者对大量墩柱破坏试验结果统计分析发现,规则桥梁破坏时的墩柱漂移率为 2.23%^[23],因此笔者将两跨连续梁模型桥的 δ_{u1} 取 0.026 8 m。考虑到支座失效时主梁未必落梁,因此 δ_2 取中墩处的墩梁纵向相对位移峰值, δ_{u2} 为盖梁纵向长度,在本算例中即 0.4 m。损伤指标 D 的计算过程及结果如表 4 所示。

表 4 地震损伤评价表

Tab. 4 Earthquake damage assessment table

地震动	PGA/g	δ_1 /mm	δ_1/δ_{u1}	λ /%	δ_2 /mm	δ_2/δ_{u2}	$(1 - \lambda)$ /%	D
El Centro	0.2	2.5	0.09	41	4.3	0.01	59	0.04
	0.4	4.8	0.18	41	8.6	0.02	59	0.09
	0.6	7.1	0.26	41	13.1	0.03	59	0.13
	0.8	9.5	0.36	87	18.6	0.05	13	0.32
	1.0	12.6	0.47	93	19.8	0.05	7	0.44
	1.2	26.4	0.99	89	21.2	0.05	11	0.88
Chi-chi	0.2	2.3	0.09	84	4.0	0.01	16	0.07
	0.4	4.5	0.17	84	8.0	0.02	16	0.14
	0.6	9.0	0.34	26	56.3	0.14	74	0.19
	0.8	9.3	0.35	21	59.9	0.15	79	0.19
	1.0	0.6	0.02	17	179.0	0.45	83	0.38
	1.2	5.8	0.21	17	459.0	1.15	83	0.99

在 El Centro 波输入的振动台试验中,0.2g 工况仅出现中墩墩底轻微开裂的震害,与表 4“基本完好”一致。整体上 El Centro 波产生的地震损伤其特征为:PGA 较小时损伤较小,PGA 较大时中支座将剪切破坏,最终中墩墩底完全失效导致上部结构垮塌。

Chi-chi 波引起模型桥地震损伤,其特征为:PGA 较小时损伤主要由固定墩承担能量输入,中支

座剪断后,Chi-chi 波中的长周期地震波激发较大的墩梁相对位移产生耗量效果从而分担了下部结构的损伤,因此结构最终倒塌模式是落梁。El Centro 波和 Chi-chi 波工况的破坏特征如表 5 所示。

3.3 损伤程度分级评定

根据式(8)提出的损伤指标 D ,分析足够数量的

地震工况计算结果,统计得到本研究的两跨连续梁模型桥的损伤等级与 D 的分布范围。该类桥型的损伤等级的评定方法如表 6 所示。

表 5 模型桥地震损伤过程

Tab. 5 Seismic damage process of bridge model

地震波	PGA/ g	结构损伤值	破坏状态	损伤特征
El Centro	0.2	0.04	基本完好	构件基本弹性
	0.4	0.09	基本完好	构件基本弹性
	0.6	0.13	基本完好	构件基本弹性
	0.8	0.32	中等破坏	中墩底部截面外侧混凝土开裂
	1.0	0.44	中等破坏	桥墩混凝土继续开裂,支座失效
	1.2	0.88	倒塌	中墩倒塌,之后主梁折断
Chi-chi	0.2	0.07	基本完好	构件基本弹性
	0.4	0.14	基本完好	构件基本弹性
	0.6	0.19	轻微破坏	中墩墩底外侧混凝土剥落,支座失效
	0.8	0.19	轻微破坏	中墩墩底外侧混凝土继续剥落,支座失效,墩梁相对位移增加
	1.0	0.38	中等破坏	墩底混凝土向上开裂,支座失效,墩梁相对位移增加但不超过 0.2m
	1.2	0.99	倒塌	落梁

表 6 两跨连续梁桥地震损伤分级表

Tab. 6 Seismic damage classification table of two-span continuous girder bridge

指标	等级	特征描述
$D < 0.15$	基本完好	构件基本都处于弹性状态
$0.15 < D < 0.3$	轻微破坏	混凝土轻微剥落,支座可以失效但墩梁相对位移小于支座长度
$0.3 < D < 0.6$	中等破坏	桥墩内部钢筋屈服,表面混凝土剥落,支座可失效但墩梁相对位移小于 0.5 倍盖梁长
$0.6 < D < 0.8$	严重破坏	桥墩内部钢筋屈服,核心混凝土开始破坏,墩梁相对位移小于盖梁长
$D \geq 0.8$	倒塌	桥墩内部钢筋屈服,核心混凝土压碎,墩梁相对位移大于盖梁长

4 结 论

1) 基于能量平衡原理,提出结构层次的桥梁倒塌准则,并建议按 95% 的保证率确定倒塌准则中的倒塌限值 ξ_d 。由该准则提出的能量比 ξ 不仅可用于判断结构是否倒塌,还能识别结构不同程度的损伤发生的时刻。

2) 通过两跨连续梁模型桥纵向倒塌分析确定中墩墩柱和固定支座为最重要的易损件,说明倒塌分析可以有效识别该模型桥的地震损伤关键受力构件。

3) 提出结构层次的基于关键构件的两跨连续梁桥结构地震损伤指标 D ,并确立损伤程度与损伤指标之间的关联。算例证明,该损伤评价指标可对不同程度损伤的两跨连续梁模型桥给出合理、有效的评价,该评价方法也可为同类桥型的损伤评价提供参考。

参 考 文 献

[1] 庄卫林,刘振宇,蒋劲松. 汶川大地震公路桥梁震害分析及对策[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(7): 1377-1387.
Zhuang Weilin, Liu Zhenyu, Jiang Jinsong. Earthquake-induced damage analysis of highway bridges in wenchuan earthquake and countermeasures[J]. Chi-

nese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009,28(7):1377-1387. (in Chinese)
[2] Deng Lu, Wang Wei, Yu Yang. State-of-the-art review on the causes and mechanisms of bridge collapse [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2015, 30(2): 04015005.
[3] 李宏男,成虎,王东升. 桥梁结构地震易损性研究进展述评[J]. 工程力学,2018,35(9):1-16.
Li Hongnan, Cheng Hu, Wang Dongsheng. Review on the research progress of seismic vulnerability of bridge structures[J]. Engineering Mechanics, 2018,35(9):1-16. (in Chinese)
[4] 黄小宁,杜永峰,李慧. 多维性能极限状态平面不规则结构易损性分析[J]. 振动、测试与诊断,2017,37(3): 560-566.
Huang Xiaoning, Du Yongfeng, Li Hui. Vulnerability analysis of multi-dimensional performance limit state plane irregular structures [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017,37(3): 560-566. (in Chinese)
[5] 陈力波,黄才贵,谷音. 基于改进响应面法的公路简支梁桥地震易损性分析[J]. 工程力学,2018,35(4):208-218.
Chen Libo, Huang Caigui, Gu Yin. Seismic vulnerability analysis of highway simply supported beam bridge based on improved response surface method[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(4): 208-218. (in Chinese)

- [6] 毛云霄,王英杰,肖军华,等. 基于过桥车辆响应的遗传算法桥梁损伤识别[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(4):696-703.
Mao Yunxiao, Wang Yinjie, Xiao Junhua, et al. Genetic algorithm for bridge damage identification based on bridge vehicle response[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(4): 696-703. (in Chinese)
- [7] 赵建锋,李洪一,孙伟帅. 基于易损性曲线的 RC 桥墩地震损伤评估[J]. 青岛理工大学学报, 2017, 38(6): 20-26.
Zhao Jianfeng, Li Hongyi, Sun Weishuai. Seismic damage assessment of RC pier based on vulnerability curve [J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2017, 38(6): 20-26. (in Chinese)
- [8] 亓兴军,孙庆凯. 强震下斜交刚构连续梁桥倒塌特性研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2015, 37(6): 78-85.
Qi Xingjun, Sun Qingkai. Collapse characters of skew rigid continuous beam bridge under strong earthquake [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2015, 37(6): 78-85. (in Chinese)
- [9] 孙鹏,罗韧,李鸿晶,等. 地震作用下混凝土梁桥连续倒塌过程分析[J]. 空间结构, 2015, 21(1): 78-84.
Sun Peng, Luo Ren, Li Hongjing, et al. Progressive collapse analysis of concrete girder bridges subjected to earthquake-induced ground motion[J]. Spatial Structure, 2015, 21(1): 78-84. (in Chinese)
- [10] 左焯,孙广俊,李鸿晶. 混凝土梁桥地震倒塌失效机制[J]. 南京工业大学学报: 自然科学版, 2018, 40(3): 73-80.
Zuo Ye, Sun Guangjun, Li Hongjin. Failure mechanism of earthquake collapse of concrete beam bridge [J]. Journal of Nanjing University of Technology: Natural Science Edition, 2018, 40(3): 73-80. (in Chinese)
- [11] Lee T Y, Hung W H, Chung K J. Seismic-induced collapse simulation of bridges using simple implicit dynamic analysis [J]. Engineering Structures, 2018, 177: 1-11.
- [12] Zong Zhouhong, Xia Zhanghua, Liu Haihong, et al. Collapse failure of prestressed concrete continuous rigid-frame bridge under strong earthquake excitation: testing and simulation[J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2016, 21(9): 04016047.
- [13] Zampieri P, Zanini M A, Faleschini F. Influence of damage on the seismic failure analysis of masonry arches[J]. Construction and Building Materials, 2016, 119: 343-355.
- [14] Lancioni G, Gentilucci D, Quagliarini E, et al. Seismic vulnerability of ancient stone arches by using a numerical model based on the non-smooth contact dynamics method [J]. Engineering Structures, 2016, 119: 110-121.
- [15] 宗周红,黄学漾,黎雅乐,等. 强震作用下大跨度斜拉桥倒塌破坏及其控制研究[J]. 桥梁建设, 2016, 46(1): 24-29.
Zong Zhouhong, Huang Xueyang, Li Yale, et al. Study of collapse failure and failure control of long span cable-stayed bridges under strong earthquake excitation[J]. Bridge Construction, 2016, 46(1): 24-29. (in Chinese)
- [16] Das R, Pandey A D, Mahesh M J, et al. Progressive collapse of a cable stayed bridge[J]. Procedia Engineering, 2016, 144: 132-139.
- [17] 重庆交通科研设计院. JTG/T B02-01—2008, 公路桥梁抗震设计细则[S]. 北京:人民交通出版社, 2008.
- [18] Federal Emergency Management Agency. NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings [R]. Washington DC: SAC Joint Venture, Federal Emergency Management Agency, 1997.
- [19] 范振华. 地震作用下超高墩刚构桥倒塌破坏关键问题研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2013.
- [20] Park Y J, Ang A H S. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1985, 111(4): 722-739.
- [21] Hallquist J O. LS-DYNA theory manual[M]. [S. l.]: Livermore Software Technology Corporation, 2006: 501.
- [22] 黎雅乐,宗周红,刘思明,等. 钢筋混凝土连续梁桥模型振动台台阵试验研究[J]. 中国公路学报, 2016, 29(6): 232-242.
Li Yale, Zong Zhouhong, Liu Siming, et al. Earthquake shaking table array testing of the reinforced concrete continuous girder bridge model[J]. China Journal of Highway Transport, 2016, 29(6): 232-242. (in Chinese)
- [23] 孙颖,卓卫东,房贞政. 规则桥梁抗震性能水准的定义及其量化描述[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(5): 104-112.
Sun Ying, Zhuo Weidong, Fang Zhenzheng. Definition and quantified description of seismic performance levels for regular bridges[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2011, 31(5): 104-112. (in Chinese)



第一作者简介:黎雅乐,女,1986年3月生,博士、讲师。主要研究方向为桥梁减震控制和组合结构桥梁。曾发表《钢筋混凝土连续梁桥模型振动台台阵试验》(《中国公路学报》2016年第29卷第6期)等论文。

E-mail: liyl@jsou. cn

通信作者简介:宗周红,男,1966年10月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为桥梁抗震、桥梁抗爆、结构健康监测、结构损伤识别与预后等。

E-mail: zongzh@seu. edu. cn

