

Collision Simulation Analysis of the Bridge under the Seismic Action

Aiguo Shen

Civil Engineering Institute, South-West Jiaotong University, Chengdu
Email: 32916750@qq.com

Received: Jan. 12th, 2013; revised: Feb. 2nd, 2013; accepted: Feb. 10th, 2013

Abstract: In this paper, with a large span continuous girder bridge as the research object, the simulation analysis of seismic collision and the data microprocessing is carried out. based on this, a new the concept of the collision group was first discovered and put forward. Just because of the loading and unloading process in high-frequency and high-strength happened in a collision group (can also called impact drill effect), the collision damage is resulted. On this basis, we propose a beam end collision damage evaluation method and by applying the evaluation method on to the large span continuous girder bridge, the results of the assessment of the degree of collision damage is given. In this paper, by contrast seismic collision occurred in different models of bridge (with different pier, different base types) , the following suggestions should be pay attention: 1) To mitigate multi-span continuous girder bridge seismic collision, reducing side span girder falling probability, the setting and the design of a brake pier should be reasonable; 2) When set up the model of a bridge, how to simulating the base of pier should be cautious and reasonable; 3) When designing a long span continuous beam bridge with high pier in the high-intensity area, the impact drill effect should be considered.

Keywords: Bridge Seismic Collision; The Collision Group; The Impact of Drill Effect; Collision Damage Rate

大跨度连续梁桥的地震碰撞模拟分析

申爱国

西南交通大学土木工程学院, 成都
Email: 32916750@qq.com

收稿日期: 2013年1月12日; 修回日期: 2013年2月2日; 录用日期: 2013年2月10日

摘要: 本文通过对于一座大跨度连续梁桥地震碰撞过程的模拟分析和数据显微处理, 首次发现并提出了碰撞群的概念, 认为碰撞群中高频高强的加载卸载过程(可称之为冲击钻效应)是导致碰撞破坏的原因。在此基础上, 本文提出了一种梁端碰撞损伤度评估方法, 并针对本文的研究对象给出了碰撞损伤度评估结果。本文还通过对比大桥不同模型(不同墩高、不同基础类型)中所发生的地震碰撞, 提出: 1) 为减轻多跨连续梁桥地震碰撞、降低边跨落梁概率, 应合理设置和设计制动墩; 2) 在建模时, 梁墩基础的模拟方式应谨慎、合理; 3) 在高烈度区进行高墩大跨度连续梁的桥台设计时, 应考虑碰撞中的冲击钻效应所。

关键词: 桥梁地震碰撞; 碰撞群; 冲击钻效应; 碰撞损伤度

1. 引言

桥梁碰撞是地震当中最常见的震害之一。近二十

年来, 世界上所发生的每一次强烈地震都会造成大量的桥梁碰撞震害, 特别是在“5.12”汶川地震当中,

桥梁的碰撞破坏更表现出多样性,为研究地震中桥梁碰撞规律、提高桥梁抗震设计水平、制定预防桥梁碰撞的有效措施、减轻桥梁地震碰撞破坏提供了丰富的资料。

由于桥梁地震碰撞所导致的种种破坏是桥梁震害当中非常典型的震害之一,因而国内外众多研究人员对此展开了广泛而深入地研究^[1-8]。纵观目前论文作者所看到的有关桥梁地震碰撞的研究成果,在早期的研究工作中,所采用的研究方法主要是波动法、功率谱法、随机振动法、能量法、多点输入法等,模型多为简单的由质点和弹簧组成的多自由度体系。由于研究手段、研究方法和研究模型所限,研究内容以宏观的、定性的、概念性的为主,如桥梁结构在地震碰撞中宏观行为、减轻桥梁地震碰撞的措施、桥梁参数(如伸缩缝宽度、墩梁质量比、墩高、桥梁结构刚度差异等)对于碰撞的影响、长大桥梁结构地震碰撞与地震波空间相关性的关系、震源参数(如震级、震中距、断层走向与桥梁纵向夹角的那个)与桥梁碰撞的关系等。近十多年来,由于计算机技术的高速发展和有限元分析软件模拟能力的日益强大,有关桥梁地震碰撞的研究主要以有限元三维模型的实时模拟计算为主,特别是在汶川地震之后,国内涌现出一大批有关桥梁地震碰撞的研究。在有限元模型的实时模拟计算中,梁间碰撞单元从线性弹簧模型、Kelvin模型发展到Hertz模型、Hertz-damp模型、三维接触摩擦模型,而且很多研究人员还在不断研究新的碰撞模型,以便改进、完善和发展桥梁地震碰撞的研究。目前,人们研究的对象主要是梁式桥,如多跨简支梁、高墩大跨度连续梁、城市高架桥、山区地形中的梁式桥,简支梁与连续梁的组合桥等,桥梁建模也越来越精细,桥梁所在的场地环境也受到研究人员的重视并成为模型的一部分,不过主要是直线桥梁,很少涉及到曲线桥。众多研究人员通过对于桥梁地震碰撞的有限元模拟分析获得了大量数据,通过对于这些数据的分析,提出很多有关桥梁地震碰撞的新见解,也提出很多减轻桥梁地震碰撞的建议。

但是我们知道,早期关于桥梁地震碰撞的研究方法通常只适合对于桥梁地震碰撞的原因和结果给予宏观的、定性的描述,无法揭示桥梁地震碰撞过程的细节和微观机制,只有采用有限元模拟分析才有可能

实现这一点。然而,本论文作者看到,研究人员在提取、处理和分析桥梁碰撞模拟计算所获得的大量数据时,仅停留在模拟碰撞发生、宏观过程分析这一层面,并没有对数据进行深层次的挖掘,而本文作者通过研究发现,模拟计算所得到碰撞过程实时数据是在时间和空间域内被高度压缩的信息,对于碰撞微观机制的研究必须采用显微刻画的方式,本文作者通过这种方式,发现梁端的地震碰撞具有复杂的微观结构,因而提出了碰撞群的概念,论文作者还发现,正是碰撞群所代表的高频高强度加载与卸载过程(本文称之为冲击钻效应)造成了梁端的碰撞破坏,作者还在冲击钻效应的基础上,建立了一种评估桥梁碰撞累计损伤度的方法。

2. 连续桥梁碰撞分析模型的建立

本论文针对一座高速铁路三跨连续梁桥(50 m + 84 m + 50 m、墩高H分别为20 m、50 m、80 m)(见图1)展开了详细的地震碰撞模拟分析,采用的地震输入为汶川地震时在广元附近曾家镇记录到的加速度时程。

根据以往桥梁震害的经验和桥梁结构的动力行为特点,桥梁下部结构(主要指桥墩和桥墩基础)在控制地震碰撞当中将发挥更为重要的作用。因此,在本论文的研究当中,针对该连续梁桥分别选用不同高度的桥墩和不形式同的墩基础进行组合,从而产生了6个计算模型。有关6个模型的主要参数列于表1中。

由于在桥梁地震碰撞的模拟计算中,“土-桩基-承台”的功能很难在计算模型中真实再现,因此,可以通过等效转换的方式将“土-桩基-承台”的功能

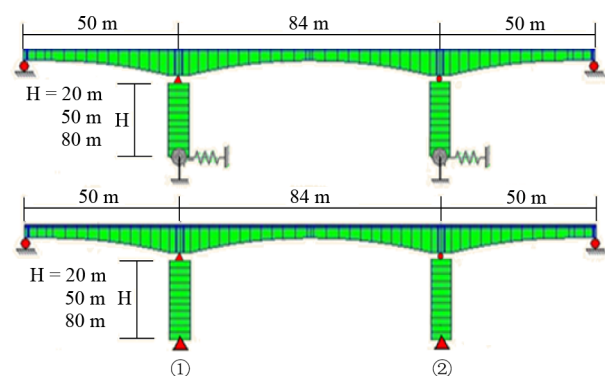


Figure 1. A large span continuous girder bridge with 3 spans
图 1. 三跨连续梁桥模型

Table 1. The main parameters of the models
表 1. 三座桥梁模型的主要参数

模型编号	50 + 84 + 50 m 连续梁		
	H1	H2	基础类型
模型 1	20	20	弹性基础
模型 2			刚性基础
模型 3	50	50	弹性基础
模型 4			刚性基础
模型 5	80	80	弹性基础
模型 6			刚性基础

转化为墩底的等效平动约束弹簧和扭转约束弹簧(如图 1 所示), 转换时采用图 2 所示的三维模型和计算方法。

关于梁体之间的碰撞采用图 3 所示的弹性碰撞单元来实现, 碰撞单元的构造和本构关系如图 3 所示。从图 3 可以看到, 碰撞单元主要由碰撞弹簧和间隙元构成, 间隙元是一种接触性作用单元, 其中初始间隙 d 相当于梁体架设时预留的梁缝, 当梁端之间相对位移将初始间隙 d 压缩尽时, 梁体之间将发生接触性碰撞。因此, 发生碰撞的条件可表示为:

$$u_{ij}(t) + d = u_j(t) - u_i(t) + d \leq 0$$

其中, $u_j(t)$ 为右边梁端的水平位移; $u_i(t)$ 为左边梁端的水平位移; d 为梁缝初始间距, 而碰撞力可以采用下式计算:

$$\begin{cases} f(t) = k(u_{i,j}(t) + d) & u_{i,j}(t) + d < 0 \\ f(t) = 0 & u_{i,j}(t) + d \geq 0 \end{cases}$$

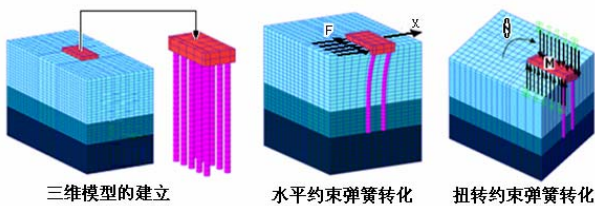


Figure 2. The computing model of elastic foundation
图 2. 桥墩弹性基础的计算模式

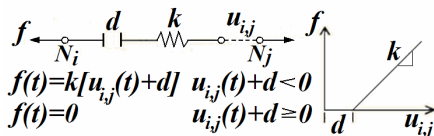


Figure 3. Constitution and constitutive relation of the collision cell
图 3. 碰撞单元的构成和本构关系

碰撞单元在梁端的安置可采用图 4 所示的方式。根据接触单元的性质, 在地震作用下, 相邻梁端之间的相向位移将初始间隙压缩今时时结构将发生碰撞。我国铁路桥梁的梁缝主要是 10 cm 左右, 本论文在模拟计算时采用 15 cm, 而碰撞弹簧的刚度对于碰撞强度影响较大, 因此, 采用合理的碰撞刚度是非常重要的。在本论文的研究中, 碰撞刚度的取值考虑了如下因素:

- 1) 假设梁体之间的碰撞是轴向正碰, 但考虑到轴向碰撞是一种高速加载与卸载过程, 碰撞效应的影响深度主要发生在梁端附近, 因此, 碰撞刚度主要考虑梁端的刚度; 2) 混凝土的动态刚度高于静态刚度, 而碰撞是一种典型的高速加载-卸载过程, 因此, 梁端混凝土的动态刚度将比静态刚度大很多; 3) 为了检验碰撞刚度的合理取值, 本论文针对不同等级的碰撞刚度进行了试算, 发现当碰撞刚度取值为整片梁体轴向静态刚度的 10~100 倍左右时, 梁端的相对位移及和碰撞结果比较合理。

3. 大跨度连续梁桥的地震碰撞模拟结果及一般分析

大跨度连续梁桥经常被用于铁路或公路建设以实现大跨度跨越。但是, 由于连续梁桥的桥墩与梁体之间仅仅是支撑作用, 并且只有一个桥墩控制着梁体的纵向位移, 因此, 大跨度连续梁桥的纵向刚度相对较弱, 外加大跨度连续梁桥的梁体质量巨大, 所以从理论上说, 大跨度连续梁在地震当中容易发生较强的纵向位移, 导致大跨度连续梁梁端发生严重碰撞。

通过对大跨度连续梁六个模型所进行的地震碰撞模拟分析, 本论文得到了一系列非常有意义的计算结果, 这些计算结果的主要内容均绘制在图 5~11 中。分析图 5~11 可以初步得到如下一些基本结论:

- 1) 从图 5~11 所示的计算结果可以看出, 在连续梁桥的 6 个模型中只有模型 2 未发生碰撞, 其余 5 个

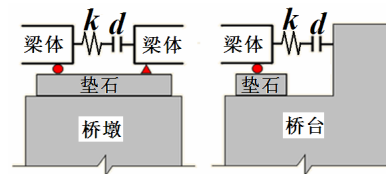


Figure 4. The connection of the collision cell
图 4. 碰撞单元的连接方式

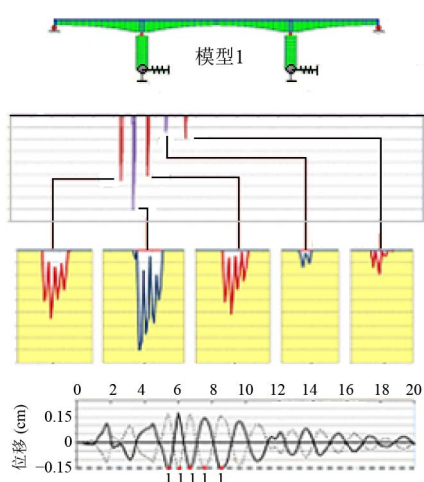


Figure 5. The simulation results of the collision of model 1
图 5. 模型 1 两端碰撞过程和碰撞群的模拟结果

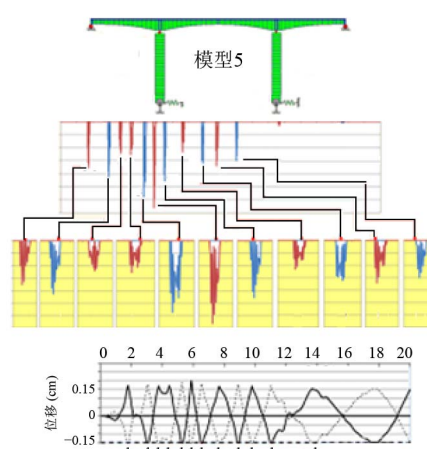


Figure 8. The simulation results of the collision of model 5
图 8. 模型 5 两端碰撞过程和碰撞群的模拟结果

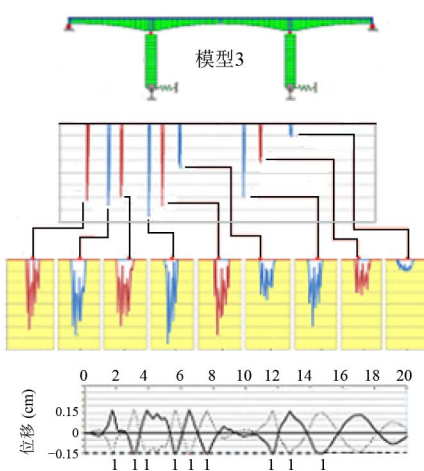


Figure 6. The simulation results of the collision of model 2
图 6. 模型 3 两端碰撞过程和碰撞群的模拟结果

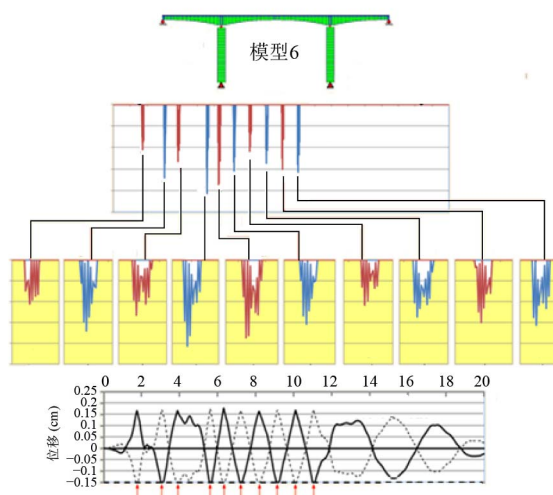


Figure 9. The simulation results of the collision of model 6
图 9. 模型 6 两端碰撞过程和碰撞群的模拟结果

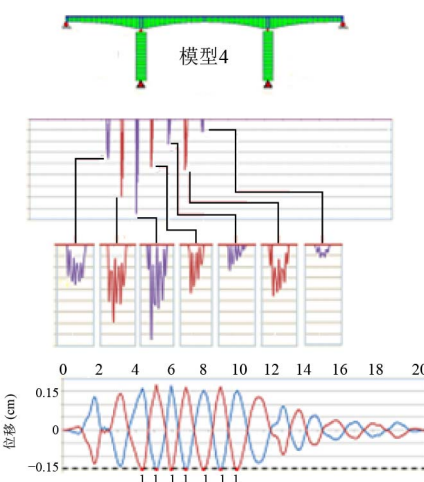


Figure 7. The simulation results of the collision of model 4
图 7. 模型 4 两端碰撞过程和碰撞群的模拟结果

模型(模型 1、3、4、5、6)均发生了碰撞发生了碰撞;

2) 从模型 1、3、4、5、6 所产生的一系列碰撞过程可以看到, 碰撞的强度和频次都随着墩高的增加而增加, 由此可见, 墩高是影响地震碰撞的一个重要因素;

3) 根据图 11 可以看到, 在墩高相同的前提下比较连续梁桥各个模型的碰撞, 无论是碰撞强度还是碰撞频次, 具有弹性基础的桥梁模型较刚性基础桥梁模型要严重很多; 在基础刚度相同的前提下比较连续梁桥各个模型的碰撞, 无论是碰撞强度还是碰撞频次, 具有较高桥墩的桥梁模型较较低桥墩桥梁模型要严重很多;

4) 从图 5~11 所示的碰撞过程可以看到, 连续梁

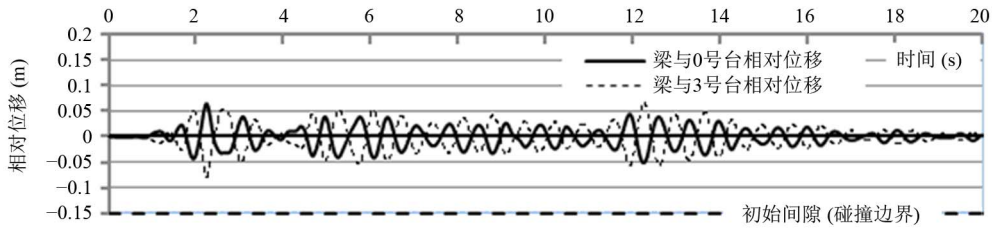


Figure 10. The simulation results of the collision of model 2
图 10. 模型 2 地震碰撞过程模拟结果

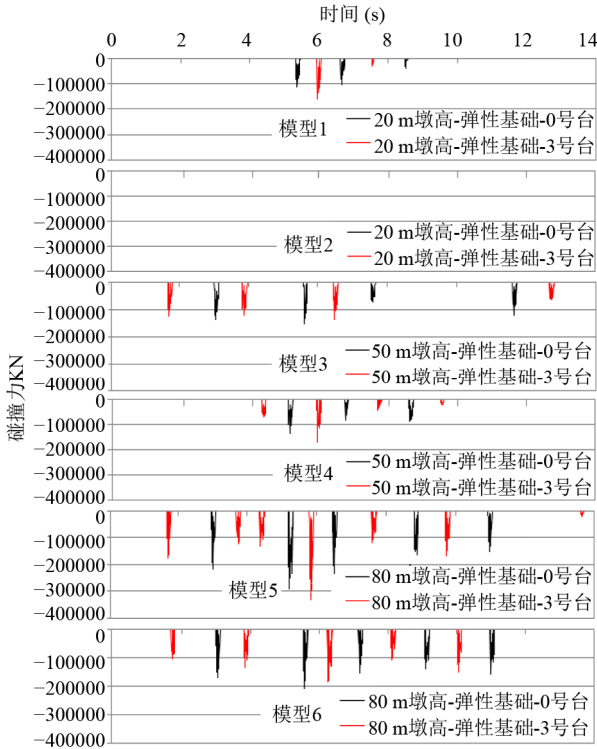


Figure 11. The comparison of the collision force in six
图 11. 六个模型碰撞力的比较

两端的地震碰撞呈现出交替进行的状态，并且交替碰撞的周期主要是由制动墩控制的；

5) 从图 5~11 还可以看到，梁端的每一次碰撞实际上都是由一群碰撞构成的，这一群碰撞可称之为一个碰撞群，这意味着梁端的碰撞过程实际上是由一系列碰撞群构成的，而且，碰撞群的内部构成决定了梁端碰撞的破坏效果；

6) 当连续梁桥的梁端为桥台时，由于桥台混凝土强度比梁体混凝土强度低，一旦遭遇连续梁梁端所产生的如图 5~11 所示的连续撞击时，桥台将有可能遭受较大的破坏；如果连续梁梁端不是桥台而是与其他桥梁相接时，有可能造成梁体之间的碰撞损伤。

4. 大跨度连续梁桥的地震碰撞损伤评估

4.1. 关于碰撞损伤率的理论基础

从前面一系列地震碰撞模拟分析结果可以看到，大跨度连续梁每一个模型的地震碰撞过程是由一系列具有复杂结构的碰撞群构成的，特别是从图 12 所示碰撞群的位移细节和图 13 所示碰撞力细节可以看到，碰撞群所产生的效果如同一次冲击钻工作时所产生的效应，因此，这样的碰撞很容易造成被碰撞结构的严重损伤

在爆炸与冲击作用下，混凝土处于复杂的多轴应力状态。实验结果表明，混凝土的失效强度不仅随平均压应力的增加而增大，而且应力状态的影响明显。例如，不同的侧向压应力会导致不等的三轴抗压强度；在三轴拉、压时，抗压强度会随着拉应力与压应力比值的变化而变化。因此，在三维主应力空间中混凝土的失效面比较复杂。

目前，人们用到最多关于混凝土在动态荷载作用下的失效强度模型是 *HJC* 模型，*HJC* 模型关于强度动态失效的屈服面方程为：

$$\sigma_{eq}^*(p, \dot{\epsilon}, D) = [A(1-D) + Bp^*]^N \cdot [1 + C \ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)] \quad (1)$$

式中：

σ_{eq}^* ——归一化等效应力， $\sigma_{eq}^* = \sigma_{eq}/f_c$ ， f_c 为混凝土单轴抗压强度；

p^* ——归一化静水压力； $p^* = p/f_c$ ；

$\dot{\epsilon}^*$ ——等效应变率；

$\dot{\epsilon}_0$ ——参考应变率，取值为 1.0 s^{-1} ；

A ——内聚力强度，由实验确定的材料常数；

B ——压力强化系数，由实验确定的材料常数；

C ——应变率强化系数，由实验确定的材料常数；

N ——压力强化指数，由实验确定的材料常数；

大跨度连续梁桥的地震碰撞模拟分析

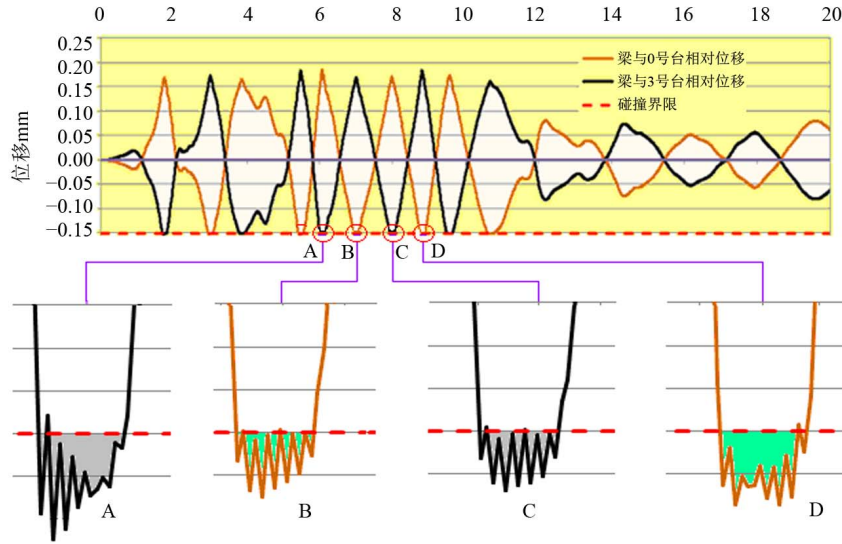


Figure 12. Displacement process of collision group
图 12. 碰撞群的位移过程

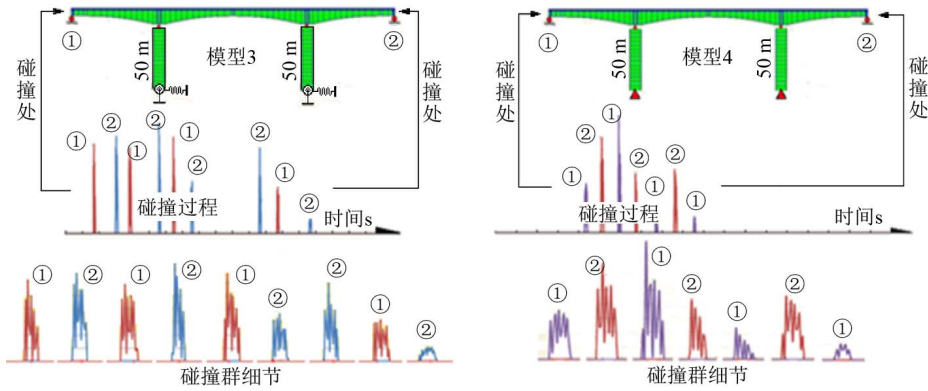


Figure 13. The collision detail of model 3 and model 4
图 13. 连续梁桥模型 3 和模型 4 两端的碰撞过程和碰撞群细节

D ——失效时的损伤变量，主要取决于混凝土在失效之前的变形过程中，塑性应变和塑性体应变的累积。

HJC 方程描述了混凝土从初始屈服 - 失效 - 软化的强度变化全过程，相应地损伤变量 D 从 0 变化到 1，所以，当才用该式计算失效强度时需要确定失效时的损伤变量值。

由于本论文所研究的梁体碰撞破坏都主要发生在梁端表面附近，梁体预应力对于梁端的作用很小，因此，动态屈服面方程可以不考虑有关静水压力的影响，因此，可以假设方程中与 p^* 相关的系数 B 等于 0，这样，便得到如下适用于梁端附近的动态强度失效判断的方程：

$$\sigma_{eq}^* (\dot{\epsilon}, D) = [A(1-D)] \cdot [1 + C \ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)] \quad (2)$$

从该方程可以看到，决定混凝土动态情况下的失效强度主要由当前的损伤率和当前的荷载碰撞速度来决定，显然当前的混凝土损伤度越大，混凝土动态失效的强度就越低；当前碰撞荷载的碰撞速度越快，混凝土动态失效强度就越高，公式中所表现的这种含义显然与人们的认识是一致的，可以被接受，但关键是如何确定方程中的两个系数 A 和 D 。

通过对上述公式的研究发现，系数 A 和系数 D 并不是独立的，而是具有相关性的，只有在特定的相关条件下，才能确保上述公式给出混凝土动态相对强度由 0 到 1 的变化过程。通过对 A 和 D 的相关性分析，

可以将梁端混凝土动态屈服强度方程表为如下形式：

$$\sigma_{eq}^*(\dot{\epsilon}, D) = A(1-D) \cdot \left(1 + 0.22A^{-1.41} \times (\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)^{-0.21} \times \ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)\right) \quad (3)$$

此时，系数 A 的取值范围是 0.1~0.6 之间，本课题考虑到碰撞计算时的相对加载速率以 100 s^{-1} 为主，因此，采用了 $A = 0.125$ 。将其带入式(3)，得：

$$\sigma_{eq}^*(\dot{\epsilon}, D) = 0.125 \times (1-D) \cdot \left(1 + 0.22 \times 0.125^{-1.41} \times \dot{\epsilon}^{-0.21} \times \ln(\dot{\epsilon})\right) \quad (4)$$

(4)式给出了混凝土结构的动强度随损伤率和加载速率而变化的规律，将该式与碰撞群中的微碰撞相结合，便可以计算出每一个碰撞群产生的累计损伤。再将该方法运用到每一个碰撞事件所包含的所有碰撞群中，就可以最终计算出一个碰撞事件。因此，如何计算一个碰撞群的损伤累计效果便成为关键。为此，本课题用图 14 来说明碰撞群的累计损伤率的计算方法。

图 14 是一个典型的碰撞群，其中包含 5 个微碰撞，根据时间发展的方向，每个微碰撞的碰撞阶段分别为：

$A1 \rightarrow B1$ 、 $A2 \rightarrow B2$ 、 $A3 \rightarrow B3$ 、 $A4 \rightarrow B4$ 、 $A5 \rightarrow B5$

每个微碰撞的有效碰撞幅度分别为：

$F_1 = F_{B1} - F_{A1}$ 、 $F_2 = F_{B2} - F_{A2}$ 、 $F_3 = F_{B3} - F_{A3}$ 、 $F_4 = F_{B4} - F_{A4}$ 、 $F_5 = F_{B5} - F_{A5}$

每个微碰撞的碰撞速度分别为：

$1/(t_{B1} - t_{A1})$ 、 $1/(t_{B2} - t_{A2})$ 、 $1/(t_{B3} - t_{A3})$ 、 $1/(t_{B4} - t_{A4})$ 、 $1/(t_{B5} - t_{A5})$

计算碰撞群的累计损伤率的步骤如下：

1) 初始时刻无碰撞，因此，损伤率 $D_0 = 0$ ，混凝土的动强度比 $\sigma_{eq} = 1$ 。

2) 第一个微碰撞发生，撞击速度为 $\epsilon_1 = 1/(t_{B1} - t_{A1})$ ，这时结构出现轻微损伤 D_1 ， D_1 近似用 F_1/fc 计算，然后将分别 ϵ_1 和 D_1 代入公式(4)，得到第一个微碰撞发生后混凝土的动态强度比 σ_{eq1} ，根据 σ_{eq1} 可计算出混凝土受到轻微损伤后的动态强度 $fc_1 = \sigma_{eq1} \times fc$ 。

3) 第二个微碰撞发生，撞击速度为 $\epsilon_2 = 1/(t_{B2} - t_{A2})$ ，这时结构的损伤进一步加剧，损伤率为 $D_2 = F_2/fc_1 + D_1$ ，然后将分别 ϵ_2 和 D_2 代入公式(4)，得到第二个微碰撞发生后混凝土的动态强度比 σ_{eq2} ，根据 σ_{eq2} 可计算出混凝土受到损伤后的动态强度 $fc_2 = \sigma_{eq2} \times fc$ 。

4) 以下不断重复步骤 2)和 3)，直至将碰撞群中每个微碰撞的碰撞效果累计完成，这样便得到了一个碰撞群造成的混凝土累计损伤率。

5) 如果该碰撞群之后紧接着另一个碰撞群，那么下一个碰撞群的损伤率的计算就必须在第一个损伤率基础上继续累积，直至一个碰撞事件中所有碰撞群的碰撞损伤效果被计算完成，这样就可以得到一个碰撞事件完成后的最终累计损伤率，根据最终的累计损伤率可以对此次碰撞时间对桥梁某一处造成的损坏给出定量评估。

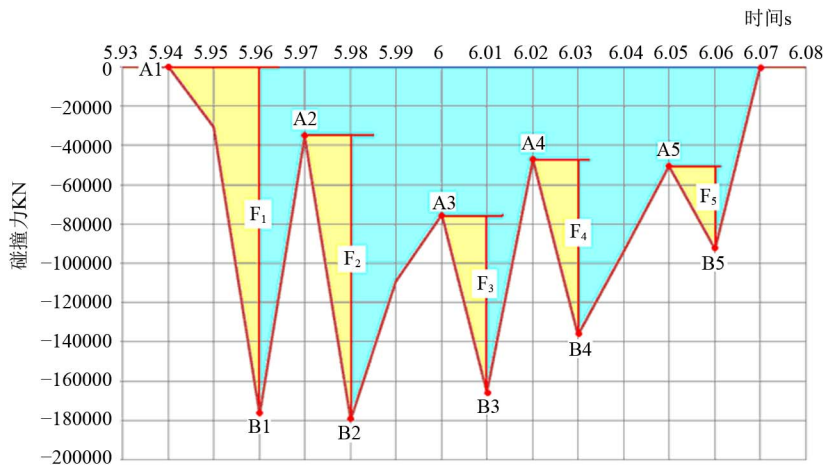


Figure 14. The cumulative damage rate is set by the cumulative effect of a plurality of micro-collision
图 14. 碰撞群产生的累计损伤率是由多个微碰撞的累积效果组成的

按照这样的思路,本课题对连续梁桥 6 个模型中发生碰撞事件的 5 个模型所产生的累计损伤率进行了计算,得到了一些有益的结果。

4.2. 碰撞损伤等级的判别

本文为便于对混凝土的损伤程度进行判断,在此做了如下规定(见表 2)。

在前面连续梁桥碰撞模拟分析的基础上,结合碰撞损伤率的计算理论,对连续梁桥中所发生的碰撞事件进行了损伤率计算,并依据此计算结果对连续梁桥的碰撞损伤等级进行评判,得到如表 3 所示的计算结果。

根据连续梁桥地震碰撞的分析结果和碰撞损伤等级评判结果,可以得到以下结论:

1) 首先,从表 2 可以看到,该连续梁桥在曾家镇地震作用下的地震碰撞是很严重的,不仅 6 个计算模型当中有 5 个发生了碰撞,而且碰撞损伤率非常大,其中 80 m 高墩的梁体两端与桥台之间均发生了毁灭性的碰撞,损伤率达到 100%,无论弹性基础或刚性基础。墩高 50 m 的模型发生的地震损伤也比较重,损伤等级分别达到重度损伤(弹性基础)和中度损伤(刚性基础),而墩高 20 m 的模型,仅弹性基础的模型发生了轻度损伤,而刚性基础模型未发生碰撞。上述模拟分级的结果再次表明,墩身高度对于桥梁的地震碰撞发挥着控制性的作用。

2) 在损伤率计算中看到,模型 5 和模型 6 的毁灭性损伤发生在地震开始后的 5~7 秒左右的时间内,相当于地震发生过程中的早期,其中模型 5 的碰撞破坏发生时刻比模型 6 要早一些,这主要由基础刚度的强弱所决定;但进一步研究还发现,模型 5 和模型 6 的地震碰撞破坏均在第三次宏观剧烈碰撞(既第三个

碰撞群),其后的宏观碰撞将进一步加重桥台或梁端混凝土的破碎和变形。

3) 连续梁桥的地震碰撞表现出有规律的左右交替碰撞的特点,并且交替碰撞的时间间隔与桥梁的振动周期之间有明显的相关性,也就是说连续梁桥的碰撞规律主要由模型的基本振动周期所控制。

4) 地震当中,当连续梁桥的制动墩较高时,不仅造成连续梁的梁端因较大的相对位移而发生严重碰撞,更为严重的后果则很可能因为较大的梁端相对位移而导致落梁。因此,对于制动墩较高的连续梁桥的抗震设计来说,不仅要充分考虑梁端的防碰撞问题,更应该采取有效的防落梁措施。

5) 该连续梁桥碰撞损伤比较严重的原因主要是以下两点: a) 连续梁桥的纵向刚度由一个桥墩所控制,因此,连续梁桥的纵向抗弯刚度相对比较弱,使得连续梁桥左右振动的幅度更大,发生碰撞的模型更多,碰撞的程度更严重; b) 连续梁桥的梁体与桥墩之间是铰接,因此,这也造成连续梁桥的纵向抗弯刚度相对弱一些,使得连续梁桥的地震碰撞更为严重。由于大跨度连续梁桥的梁体质量比较重,惯性比较大,一旦在强震作用下与两侧桥台或引桥发生碰撞,其碰撞过程中的每一次强烈碰撞(碰撞群)都将是一系列连续不断的碰撞所构成,其过程如同冲击钻打孔,很容易造成桥台或引桥梁体的严重破坏。所以,为了提高连续梁桥抵抗地震碰撞的能力,应特别注意加强

Table 2. Provisions of the damage level criterion
表 2. 损伤等级判别标准的规定

损伤率	损伤等级	损伤率	损伤等级
<5%	微损伤	35%~50%	重度损伤
5%~15%	轻度损伤	50%~70%	严重损伤
15%~35%	中度损伤	70%~100%	失效

Table 3. The collision damage rate and damage degree of continuous beam bridge
表 3. 连续梁桥碰撞损伤率和损伤等级

碰撞发生处	模型 1 (20 + 弹性基础)		模型 3 (50 + 弹性基础)		模型 4 (50 + 刚性基础)		模型 5 (80 + 弹性基础)		模型 6 (80 + 刚性基础)	
	损伤率	损伤等级	损伤率	损伤程度	损伤率	损伤程度	损伤率	损伤程度	损伤率	损伤程度
梁与 0 号台	0.12	轻度损伤	0.392	重度损伤	0.185	中度损伤	1	失效	1	失效
梁与 3 号台	0.096	轻度损伤	0.41	重度损伤	0.204	中度损伤	1	失效	1	失效

控制墩的纵向刚度。对于大跨度连续梁桥来说,其纵向位移制动墩决定了梁体与桥台或引桥的碰撞,因此,为了尽可能减小梁体与两侧桥台或引桥的碰撞强度,应当选择大跨连续梁桥中最低的桥墩作为制动墩,这将有利于减小连续梁桥在地震当中的碰撞。

5. 结论

通过本课题的研究,作者发现桥梁碰撞过程中存在着丰富的细节,这些细节对于解释桥梁碰撞破坏机制非常重要,但往往被人们所忽视。作者通过对于碰撞细节的显微研究,发现并提出了碰撞群的概念,并通过对于碰撞群中高频高强加载卸载过程的研究,提出了梁端碰撞损伤度累计计算的方法,将该方法运用于本论文所研究的大跨度连续梁地震碰撞模拟计算时,各个模型碰撞累计损伤度的评估结果与模型的碰撞强度是一致的。本论文通过分析对比大跨度连续梁不同模型(不同墩高、不同基础类型)中所发生的地震碰撞,得到以下有益于减轻连续梁桥地震碰撞损伤的设计建议:

- 1) 为减轻多跨连续梁桥地震碰撞、降低边跨落梁概率,应合理设置和设计制动墩;
- 2) 在进行桥梁建模时,选择梁墩基础的模拟方式应谨慎、合理;
- 3) 在高烈度区进行高墩大跨度连续梁的桥台设计时,应考虑碰撞中的冲击钻效应所。

参考文献 (References)

- [1] 吕龙. 桥梁地震碰撞及应对措施[D]. 西南交通大学, 2011.
- [2] 郭磊. 强震作用下桥梁的碰撞效应及对应措施[D]. 湖南大学, 2010.
- [3] 李中军. 高架桥梁地震碰撞分析及控制[D]. 哈尔滨工业大学, 2010.
- [4] 李晓斌等. 桥梁结构地震碰撞响应相关问题研究述评[A]. 第九届全国桥梁学术会议论文集(下册), 2010.
- [5] 陈学喜. 地震作用下桥梁伸缩缝碰撞响应分析[D]. 北京交通大学, 2006.
- [6] 郭安薪等. 高架桥梁的地震碰撞和落梁分析及其控制[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, Z1: 173-176.
- [7] 王军文, 李建中, 范立础. 非规则梁桥横桥向地震碰撞反应分析[J]. 振动与冲击, 2010, 29(6): 25-30.
- [8] 于海龙. 地震作用下简支梁桥梁间碰撞的反应性能[J]. 北方交通大学学报, 2004, 28(1): 43-46.