

文章编号: 1674—8247(2019)04—0034—04
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2019.04.007

平面混凝土框架结构地震损伤机理研究

游励晖¹ 刘伟¹ 邵长江² 李吉林³ 钱永久²

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 西南交通大学, 成都 610031;
3. 中国国家铁路集团有限公司, 北京 100844)

摘要:桥梁结构振动台试验表明,在上部质量较重的梁柱组合框架结构中,柱子的抗剪性能受自重压力的影响很大,轴力在一定程度上加剧了抗剪能力的衰减,混凝土结构的地震损伤机理是压剪耦合作用下材料性能的劣化,表现为混凝土拉压损伤导致结构刚度的折减和承载能力的降低。文章采用拉压损伤变量分析混凝土材料的损伤机制,并考虑混凝土的拉压异性效应和随动强化效应,给出了相应的弹塑性损伤本构,模拟了混凝土框架结构在地震作用下的非线性响应过程。破坏区域损伤变量时程曲线表明,混凝土柱子是在剪切造成的拉伸和轴向压缩损伤作用下发生破坏而退出工作的。

关键词:损伤; 机理; 本构; 随动强化; 刚度; 折减

中图分类号:U442.55 **文献标志码:**A

Analysis on Damage Mechanism by Earthquake of Plane Concrete Frame Structure

YOU Lihui¹ LIU Wei¹ SHAO Changjiang² LI Jilin³ QIAN Yongjiu²

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;
2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
3. China State Railway Group Co., Ltd., Beijing 100844, China)

Abstract: Shaking table test of bridge structure indicates that the shear capacity may be greatly cooperated to the gravity axial forces in the beam-column structure with weightier upper structure. The axial force accelerates the reduction of shear capacity of the columns. The damage mechanism by earthquake of concrete structure is the degradation of concrete properties under coupling action between the axial and the shear forces, which introduces stiffness delimitation and bearing loss of the system. In this essay, the author simulates the responses of a plane concrete frame excited by seismic loading based on elastoplastic scalar damage constitutive model with the two damage variables corresponding to tensile and compression conditions respectively. The damage variables curves in the area concerned of the structures indicate the cause of collapse is the tensile damage from shear loading and the compressive damage from axial loading. The strain energy norm expression is used as damage criteria during analysis with difference between tension and compression and kinetic hardening being considered.

Key words: damage; mechanism; constitutive relationship; kinematic hardening; stiffness; degradation

收稿日期: 2018-01-03

作者简介: 游励晖(1963-), 男, 教授级高级工程师。

引文格式: 游励晖, 刘伟, 邵长江, 等. 平面混凝土框架结构地震损伤机理研究[J]. 高速铁路技术, 2019, 10(4): 34-37.

YOU Lihui, LIU Wei, SHAO Changjiang, et al. Analysis on Damage Mechanism by Earthquake of a Plane Concrete Frame Structure [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(4): 34-37.

一般认为,梁柱框架结构的地震损伤形态主要是剪切破坏,如建筑的传统分析方法是分析结构底部的剪力需求,并根据结构的抗剪能力进行抗震性能判断。但最新研究表明^[1],结构自重产生的轴力对抗震性能有重要影响,轴力增大在一定程度上导致抗剪能力降低,抗剪性能的下降又导致轴向抗力减少,两者的相互作用最终导致结构承载能力的丧失。

本文认为混凝土结构承载能力的降低源于材料性能的劣化。混凝土的损伤机制主要是各种微裂纹和微空洞的形成、扩展,以至形成宏观裂纹。在材料内部应力进入塑性阶段,产生永久变形的同时,伴随着材料刚度的降低,在宏观上表现为结构变形增大,承载能力降低。因此,损伤的实质是一种不可逆的能量耗散过程,该过程与材料内部微观组织结构的变化相关,反映了物质状态的变化历程。损伤的终极状态是结构形成的架构退出工作并倒塌。因此结构体系在地震作用下的破坏是一个渐进过程,鉴于传统经典弹塑性模型处理刚度降低和断裂力学模型模拟一点上任意开裂的困境,本文认为损伤力学是分析这一历程的有力工具和较好选择。

在激励及边界条件、结构类型已知的情况下,材料的本构方程是影响结构响应的根本原因。本文基于标量损伤变量和能量范数损伤准则,推导了满足热力学第二定律的塑性损伤本构,并根据 Drucker - Prager 型屈服函数的关联流动准则,推导了相应的塑性参数和一致切线模量。在此基础上,计算混凝土框架梁柱的弹塑性损伤响应,与振动台测试结果进行对比,结果表明,材料损伤表现为拉压的联合作用下材料性能的不断劣化,而梁柱结构的损伤破坏则表现为剪切和轴压联合作用下混凝土柱子的承载力丧失。

1 混凝土塑性损伤本构模型

1.1 损伤本构

损伤材料的 Helmholtz 比自由能一般设为应变、损伤变量、温度等的函数,考虑到混凝土的拉压异性,实际混凝土材料在循环荷载作用下的损伤是拉压作用的耦合,不考虑作用反向时刚度的恢复系数,刚度降低系数:

$$d = 1 - (1 - d_c)(1 - d_t) \quad (1)$$

式中: d_t 、 d_c ——拉压状态下的损伤变量。

以 Ψ_0 表示无损状态的自由能,当不考虑温度影响时,混凝土的各向同性损伤的 Helmholtz 自由能 Ψ 可表述为应变 ε 、塑性应力 σ^p 、内变量 q 以及损伤变量

d 的函数^[2-4]。

$$\Psi(\varepsilon, \sigma^p, q, d) := (1 - d)\Psi^0(\varepsilon) + \Xi(q, \sigma^p) \quad (2)$$

满足热力学第二定律,则熵产非负,可得本构关系:

$$\sigma = \frac{\partial \Psi}{\partial \varepsilon} = (1 - d) \frac{\partial \Psi^0}{\partial \varepsilon} - \sigma^p \quad (3)$$

1.2 屈服准则

摩擦型材料的屈服函数为应力张量不变量的标量函数和粘性系数的方程,考虑混凝土材料在压拉作用下的性能差异,用 c_s ($s = c, t$ 分别表示受压和受拉两种受力情况)表示与损伤相关的粘性强度。采用 Drucker - Prager 型损伤屈服准则,考虑后继屈服的随动硬化效应,以应力不变量的形式表示如下^[2]:

$$F(\sigma, d) = \frac{1}{1 - \alpha} [\alpha I_1 + \sqrt{3} J_2] - c_s(d) = 0 \quad (4)$$

式中: α ——待定强度系数。

下标 s 表示 c 受压或 t 受拉的情况。受压情况下 $c_c = (1 - d_c)\sigma_c(\varepsilon_c)$, 受拉情况下 $c_t = \frac{f_{c0}}{f_0}(1 - d_t)\sigma_t(\varepsilon_t)$, 初始抗压屈服强度 f_{c0} 为设计强度 f_c 的 0.3 倍, 初始抗拉屈服值 f_{t0} 等于抗拉强度 f_t , $\sigma_t(\varepsilon_t)$ 、 $\sigma_c(\varepsilon_c)$ 分别为单轴受压和受拉应力应变曲线^[5]。

2 损伤变量及损伤准则

损伤变量是物质结构某种不可逆变化的定量表示,是热力学的内变量。损伤变量取决于材料的体积应变和等效累积塑性应变,为计算方便,可以应力或应变形式表示损伤发生的界限值。

基于无损主应力 σ_i^0 的自由能的损伤准则表达式为^[5]:

$$F = A(\sigma^0) \sqrt{2\rho_0 \Psi^0} - 1 \leq 0 \quad (5)$$

代入自由能表达式,得:

$$F(\sigma^0) = \frac{A(\sigma^0)}{\sqrt{E^0}} \sqrt{\sum_{i=1}^3 (\sigma_i^0)^2} - 1 \leq 0 \quad (6)$$

$$\text{而: } A(\sigma^0) = \frac{r}{\sqrt{2\rho_0(\Psi_t^0)_L}} + \frac{1 - r}{\sqrt{2\rho_0(\Psi_c^0)_L}},$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^3 [\sigma_i^0]}{\sum_{i=1}^3 |\sigma_i^0|}, 2\rho_0(\Psi_{t,c}^0)_L = \sum_{i=1}^3 [\pm \sigma_i^0] \varepsilon_i$$

$$(\Psi^0)_L = (\Psi_t^0)_L + (\Psi_c^0)_L \quad (7)$$

式中: $(\Psi_{t,c}^0)_L$ ——极限拉压状态下的自由能;

$[x]$ ——McAuley 函数;

f_t ——抗拉极限强度, $f_t = (2\rho_0 \Psi_t^0 E^0)^{\frac{1}{2}}$;

f_c ——抗压极限强度, $f_c = (2\rho_0 \Psi_c^0 E^0)^{\frac{1}{2}}$;

ρ_0 ——初始密度;

E^0 ——初始弹性模量。

代入损伤准则表达式,则有:

$$F = \sigma_e - f_s \leq 0$$

$$\sigma_e = [nr + (1-r)] \sqrt{\sum_{i=1}^3 (\sigma_i^0)^2} \quad (8)$$

$$n = \frac{f_c}{f_t}$$

依照 Simo 的思想^[6],给出式(8)的等效形式:

$$F_e = G(\sigma_e) - G(f_s) \leq 0 \quad (9)$$

则损伤变量的演化方程表示为:

$$\dot{d} = \dot{\mu} \frac{\partial F_e}{\partial \sigma_e} = \dot{\mu} \frac{\partial G(\sigma_e)}{\partial \sigma_e} \quad (10)$$

由一致性条件,得:

$$\dot{\mu} = \dot{\sigma}_e = \frac{\partial \sigma_e}{\partial \sigma^0} \dot{\sigma}^0 = \frac{\partial \sigma_e}{\partial \sigma^0} C^0 \dot{\varepsilon} \quad (11)$$

式中: $G(\sigma_e)$ ——等效应力的函数,而等效应力为结构当前耗能和材料断裂能有关^[7]。

对于抗震结构,可通过粘弹性考虑结构在动力荷载作用下的阻尼效应,此时总应力 σ_T 为:

$$\sigma_T = \sigma + \sigma_v = C^s \varepsilon + \alpha C^s \dot{\varepsilon} \quad (12)$$

式中: σ_v ——阻尼应力;

C^s ——阻尼参数;

$\dot{\varepsilon}$ ——应变率。

则应力应变的增量关系为:

$$\Delta \sigma_T = (I - D_v) C^0 \Delta \varepsilon + \alpha C^s \Delta \dot{\varepsilon} \quad (13)$$

$$D_v = dI + \frac{dG(\sigma_e)}{d\sigma_e} (\sigma^0 + \sigma_v^0) \otimes \frac{\partial \sigma_e}{\partial \sigma^0} \quad (14)$$

式中: I ——单位张量;

D_v ——考虑阻尼的损伤张量;

σ^0 ——无损伤应力张量;

σ_v^0 ——无操作阻尼应力张量。

3 算例分析

根据上述算法编制了基于 ABAQUS 的用户材料子程序,通过自定义变量输出得到结构的损伤变量演化曲线,考察结构关键部位在地震激励下及地震结束后的损伤状况,研究结构损伤破坏的物理机制,为混凝土结构的抗震设计提供参考。选取三柱式框架梁的结

构为研究对象,其加载及配重情况如图1所示,振动台台面输入地震波如图2所示。

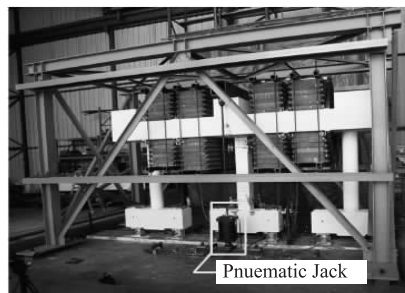


图1 结构加载及配重情况图

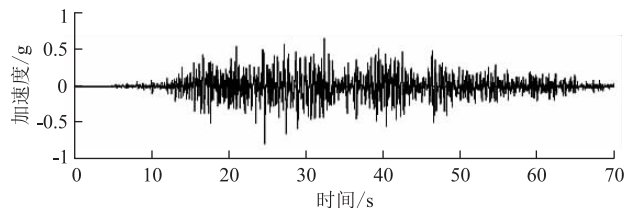


图2 振动台台面地震波

采用上述损伤本构模型,建立有限元模型,模拟混凝土框架模型在地震下的振动行为和损伤模型。计算过程中用平面单元模拟混凝土结构,地震荷载为振动台面的实测加速度时程,主要参数的取值可参见文献[1-2]。

中间柱子顶部损伤如图3所示,其顶部外侧和内部地震损伤演化曲线如图4、图5所示。



图3 中间柱子顶端 24.9 s 时的损伤状态图

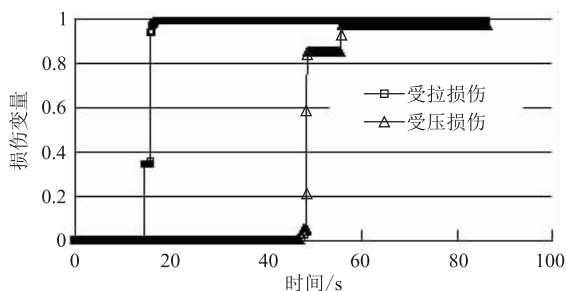


图4 中柱柱顶外侧单元损伤变量演化图

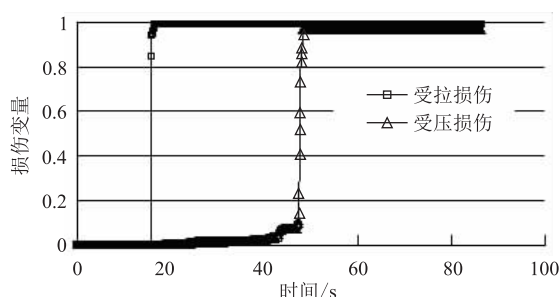


图5 中柱柱顶中间单元损伤变量演化图

4 结论

(1)采用混凝土损伤本构模型模拟混凝土框架结构的损伤机制,能够从本构上反映材料力学性能劣化对结构承载能力降低的影响,在不考虑失稳影响的情况下,可以反映强度特性是结构倒塌影响的物理机制之一。

(2)对于上部较重的混凝土结构体系,重力对结构的倒塌破坏有着重要的影响。高耸结构以及部分大跨度桥梁结构的抗震设计,应考虑响应过程中轴力对承载力降低的影响。

(3)从损伤变量的演化曲线可以看出,结构材料的损伤变量是一个非减量,反映了损伤的累积效应,考虑混凝土材料拉压异性(受拉损伤先于受压损伤出现并迅速发展),损伤本构适于地震作用下结构响应的模拟分析。

参考文献:

[1] Kenneth Joha Elwood, Jack P Moehle. Dynamic Collapse Analysis for a

Reinforced Concrete Frame Sustaining Shear and Axial failures [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2010, 37 (7): 991 - 1012.

[2] 邵长江. 混凝土损伤本构理论及其在大跨桥梁地震响应分析中的应用研究[D]. 成都:西南交通大学,2007.

SHAO Changjiang. Damage Constitutive Theory of Concrete and Its Application and Research in Seismic Response Analysis of Long-span Bridges[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.

[3] 邵长江,吴永红,钱永久. 混凝土桥梁结构非线性地震损伤演化[J]. 中国公路学报,2006,19(5):41-45.

SHAO Changjiang, WU Yonghong, QIAN Yongjiu. Evolution of Nonlinear Seismic Damage of Concrete Bridge Structure[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(5): 41 - 45.

[4] 邵长江,钱永久. Koyna 混凝土重力坝的塑性地震损伤响应分析[J]. 振动与冲击,2006,25(4):129-131.

SHAO Changjiang, QIAN Yongjiu. Seismic Plastic Damage Response Analysis of Koyna Concrete Gravity Dam [J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(4): 129 - 131.

[5] 过镇海. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2003.

GUO Zhenhai. Reinforced Concrete Theory and Analyses [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.

[6] Simo J C, Ju J W. Strain and Stress Based Continuum Damage Models-part I: Formulation [J]. Mathematical & Computer Modelling, 1987, 12(3): 378.

[7] A. H. Barbat, S. Oller, E. Oñate, et al. Viscous Damage Model for Timoshenko Beam Structures [J]. International Journal of Solids & Structures, 1997, 34(30): 3953 - 3976.

(编辑:刘会娟 白雪)

(上接第16页)

[9] 刘志春,李文江,朱永全,等. 软岩大变形隧道二次衬砌施作时机探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 580 - 588.

LIU Zhichun, LI Wenjiang, ZHU Yongquan, et al. Research on Construction Time of Secondary Lining in Soft Rock of Large-deformation Tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 580 - 588.

[10] 刘招伟,王明胜,方俊波. 高地应力大变形隧道支护系统的试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(5): 111 - 116.

LIU Zhaowei, WANG Mingsheng, FANG Junbo. In-situ Study of

Reinforcement Systems for Tunnels Under High Geo-stress and Large Deformation [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(5): 111 - 116.

[11] 李国良,朱永全. 乌鞘岭隧道高地应力软弱围岩大变形控制技术[J]. 铁道工程学报, 2008, 26(3): 54 - 59.

LI Guoliang, ZHU Yongquan. Control Technology for Large Deformation of High Land Stressed Weak Rock in Wushaoling Tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008, 26(3): 54 - 59.

(编辑:车晓娟 张红英)