

基于钢筋低周疲劳的桥墩地震易损性分析

苏俊省¹, 王君杰¹, 郭进², 彭运动³

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043;
3. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100088)

摘要: 基于 Coffin-Manson 钢筋疲劳损伤模型, 采用非线性纤维梁柱单元, 对纵筋采用 HRB335 和 HRB500E 的圆柱形桥墩拟静力试验进行数值模拟, 研究拟静力作用下低周疲劳对钢筋和构件承载力退化的影响。为进一步研究钢筋低周疲劳对试件累积损伤的影响, 将 Takemura 和 Kunnath 提出的两组不同加载模式下的拟静力试验进行数值模拟。结果表明: 基于 Coffin-Manson 模型, 采用纤维单元, 在材料层面上考虑钢筋的低周疲劳, 可以较好地模拟试件在不同加载模式下的累积损伤和承载力退化。

关键词: 钢筋混凝土; 桥墩; 低周疲劳; 累积损伤; 承载力退化; 纤维单元

中图分类号: TU375.3

文献标志码: A

Seismic Fragility Analysis of Bridge Piers Based on Low-cycle Fatigue Life of Reinforcing Steel

SU Junsheng¹, WANG Junjie¹, GUO Jin², PENG Yundong³

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 3. China Highway Planning and Design Institute Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: A nonlinear fiber beam-column element was used to simulate quasi-static tests of circular concrete bridge piers reinforced with HRB335 and HRB500E longitudinal bars based on Coffin-Manson low-cycle fatigue damage model for reinforcing steel. The effects of low-cycle fatigue damage on the strength degradation of reinforcing steel and reinforced concrete specimens were studied. In order to further verify the effect of low-cycle fatigue of reinforcing steel on the cumulative damage of reinforced concrete specimens, two quasi-static tests proposed by Takemura and Kunnath with different loading modes were conducted. The results indicate that, the fiber beam-column element could simulate the

cumulative damage and strength degradation of reinforced concrete columns under different loading modes when considering the low-cycle fatigue of reinforcing steel on material level by using Coffin-Manson model.

Key words: reinforced concrete; bridge piers; low-cycle fatigue; cumulative damage; strength degradation; fiber beam-column element

准确预测结构在地震作用下的损伤程度是结构基于性能抗震设计的关键。地震作用具有持时长、往复振动次数多的特点, 因此地震尤其强震作用下, 结构会产生较大的累计损伤, 导致承载力降低, 试件破坏, 进而引发整体结构倒塌破坏。因此, 为了更好地模拟结构构件在地震作用下的响应, 需要在结构非线性动力分析时考虑累积损伤导致的承载力降低。

反复荷载作用下, 钢筋低周疲劳、混凝土保护层剥落和黏结滑移的劣化引起钢筋混凝土构件承载力退化。Park 等^[1]指出, 钢筋混凝土构件的累积损伤与试件的最大位移和累积滞回耗能相关。文献[2-4]提出了基于最大位移的承载力退化模型, 文献[5-7]提出了基于滞回耗能的承载力退化模型。郭进等^[8]在弯矩-曲率层面提出了以损伤值为变量的强度退化模型。曲哲等^[9]基于力-位移层面的钢筋混凝土构件承载力退化模型, 提出了在纤维模型杆单元中考虑钢筋混凝土构件的承载力退化, 并将构件承载力的退化全部计入钢筋纤维的滞回本构中。

地震损伤破坏主要包括材料、构件和结构整体^[10]3个层面, 其中材料损伤是结构损伤的本质, 而现有的承载力退化模型均为构件或结构层面上的承载力退化模型。因此, 基于材料损伤层面建立强度退化模型, 通过材料层面的强度退化反映结构构件上

收稿日期: 2014-12-26

基金项目: 贵州省“十二五”重大科技专项([2011]6014); 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2013CB036305); 国家自然科学基金(51278373, 51438010, 51508351)

第一作者: 苏俊省(1990—), 男, 博士生, 主要研究方向为桥梁抗震和高性能材料。E-mail: sujunsheng@yeah.net

通讯作者: 王君杰(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为桥梁抗震和桥梁船撞。E-mail: jjwang@tongji.edu.cn

的强度退化,能够更直观地反映试件损伤破坏的本质。

Kunnath 等^[11] 和刘伯权等^[12] 的钢筋混凝土柱低周疲劳试验表明,纵筋的低周疲劳损伤是导致钢筋混凝土试件累积损伤的重要因素。刘鸣等^[13] 通过对钢筋混凝土柱低周疲劳试验研究表明,钢筋混凝土试件的强度退化与构件的损伤过程发展一致。因此,钢筋的低周疲劳损伤与试件的强度退化直接相关,在钢筋本构模型中必须考虑低周疲劳,建立低周疲劳损伤与强度退化之间的关系,在材料层面上解决由累积损伤引起的强度退化问题。

结构弹塑性分析模拟地震作用下结构动力响应时,纤维单元模型与梁柱单元和实体单元相比,能以较低的计算成本获得较高的求解精度^[14-15]。本文采用纤维模型,考虑钢筋材料的低周疲劳性能,对 2 个圆柱形桥墩进行数值模拟,研究钢筋的低周疲劳性能对试件抗震性能的影响。通过模拟 Takemura 和 Kunnath 2 组采用不同加载模式的试验,进一步研究了在材料层面上考虑钢筋低周疲劳时,材料损伤与强度退化之间的关系,可以较好地模拟出不同加载模式下,累积损伤对试件强度退化的影响。

1 钢筋低周疲劳模型

地震作用下,钢筋的低周疲劳对试件的抗震性能有较大影响。钢筋的低周疲劳模型主要包括以下 3 种:基于材料应变幅值和加载周数的 Coffin-Manson 疲劳模型^[16-17],考虑钢筋应力、应变和加载周数的 Smith-Watson-Topper(SWT)疲劳模型^[18]和修正的 SWT 疲劳模型^[19-20],基于耗能的钢筋疲劳模型^[21-23]。由于 Coffin-Manson 模型形式简单,经过大量试验验证能较好地模拟钢筋在大应变下的低周疲劳性能,因此本文采用 Coffin-Manson 疲劳模型。

Coffin^[16] 和 Manson^[17] 首先提出了基于材料应变幅值和加载周数的疲劳寿命方程,如下所示;

$$\epsilon_p = C_f (2N_f)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (1)$$

式中: ϵ_p 为塑性应变; C_f 为疲劳试验测定的材料疲劳常数; α 为疲劳指数; $2N_f$ 为按 ϵ_p 进行等幅值加载直到钢筋断裂时可完成的半周循环加载次数。 ϵ_p 根据下式计算可得:

$$\epsilon_p = \epsilon_t - \frac{\sigma_t}{E_s} \quad (2)$$

式中: σ_t 和 ϵ_t 分别为当前加载循环中材料的总应力和总应变(见图 1a); E_s 为钢筋的弹性模量。

Brown 等^[24] 根据钢筋的 $\epsilon-2N_f$ 低周疲劳公式提出,当钢筋应变幅值为 ϵ_{pi} 时,半周循环引起的钢筋损伤 D_i 为加载周数的倒数(见式(3)),累积损伤 D 为 D_i 之和,计算公式如下所示:

$$D_i = \frac{1}{2N_f} = \left(\frac{\epsilon_{pi}}{C_f} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (3)$$

$$D = \sum D_i = \sum \left(\frac{\epsilon_{pi}}{C_f} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (4)$$

$D=0$ 时表示钢筋无损伤, $D=1$ 时表示钢筋断裂。钢筋断裂后,强度迅速退化为零。

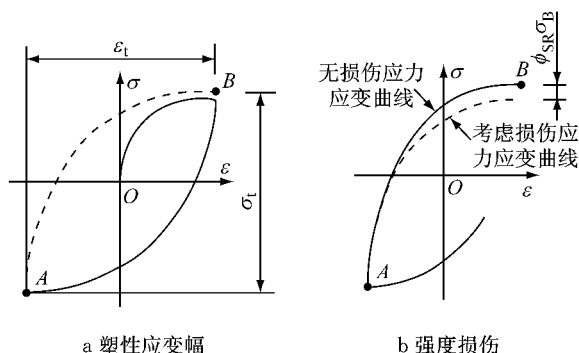


图 1 钢筋疲劳损伤模型

Fig. 1 Fatigue damage model for steel bars

试件循环加载过程中,钢筋疲劳损伤导致钢筋的强度降低,如图 1b 所示。其中钢筋强度降低系数 ϕ_{SR} 与损伤指数 D 线性相关,如下所示:

$$\phi_{SR} = K_1 D \quad (5)$$

$$K_1 = \left(\frac{C_f}{C_d} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (6)$$

其中, C_d 为强度降低常数。因此,钢筋强度降低系数 ϕ_{SR} 可以简化为

$$\phi_{SR} = \sum \left(\frac{\epsilon_{pi}}{C_d} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (7)$$

2 纤维模型介绍

2.1 纤维单元

本文采用纤维模型进行数值模拟,有限单元刚度法在梁柱单元非线性分析中程序较为简单,收敛性较好,因此本文采用刚度法非线性梁柱单元。每个试件沿高度划分为 9 个纤维梁柱单元,每个单元取 5 个积分点。梁柱单元截面采用纤维单元,各构件均将截面离散为核心混凝土、保护层混凝土和钢筋。试件的有限元模型如图 2 所示。数值模拟时采用 OpenSees 有限元软件,核心区混凝土采用 Kent-Park 约束混凝土模型,保护层混凝土采用 Kent-

Park 非约束混凝土模型^[25](由 Concrete02 Material 模型模拟). 钢筋模型采用修正的 Chang-Mander 钢筋模型^[26],并考虑钢筋的屈曲和低周疲劳^[27-28](由 Reinforcing Steel Material 模型模拟).

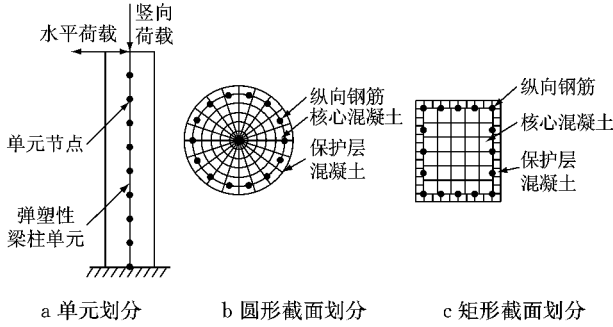


图 2 钢筋混凝土桥墩有限元模型

Fig. 2 Finite element model of reinforced concrete model

2.2 钢筋材料

Reinforcing Steel Material 钢筋本构^[29]模型是基于 Chang-Mander 钢筋本构^[26]发展而来的,钢筋的应力应变曲线如图 3 所示. Chang-Mander 钢筋模型能较好地模拟钢筋的骨架曲线形状,包括弹性阶段、屈服平台段、应变硬化段和应变软化段.为了更好地模拟钢筋的受压屈曲和低周疲劳特性,Kunnath 等^[28]对该模型进行了改进,考虑了钢筋的屈曲和低周疲劳,并将该改进后的 Reinforcing Steel Material 本构模型加入到 OpenSees 有限元软件中^[29].

钢筋本构模型如图 3 所示. 图 3a 表示钢筋的骨架曲线. 其中, f_y 为钢筋屈服应力, f_u 为钢筋极限应力; ϵ_{su} 为钢筋极限应力对应的应变, ϵ_{sh} 为钢筋开始发生硬化时对应的应变; E_s 为钢筋初始弹性模量, E_{sh} 为钢筋硬化弹性模量. 图 3b 表示钢筋的滞回规则. 其中, ①、②表示骨架段, ③、④表示反向段, ⑤、⑥表示返回段, ⑦、⑧表示第 1 过渡段, ⑨、⑩表示第 2 过渡段.

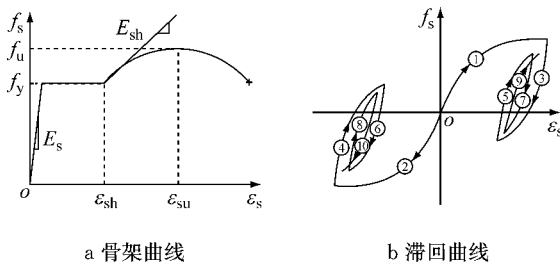


图 3 OpenSees Reinforcing Steel Material 模型应力应变关系

Fig. 3 Stress-strain relationship for OpenSees Reinforcing Steel Material model

2.3 混凝土材料

Concrete02 Material 本构应力应变关系如图 4 所示,该模型是基于 Kent-Park 本构发展而来,混凝土拉压侧软化段均为线性下降. 其中, f_{pc} 和 ϵ_{pc} 分别为混凝土最大压应力和对应的应变; f_{pu} 和 ϵ_{pu} 分别为混凝土压碎时的应力和对应的应变; f_t 和 ϵ_t 分别为混凝土极限拉应力和对应的应变; E_0 为混凝土初始弹性模量,计算如式(8)所示; λ 表示混凝土为压应变 ϵ_{pu} 时卸载斜率与初始刚度的比值; E_t 为混凝土受拉卸载刚度.

$$E_0 = \frac{2f_{pc}}{\epsilon_{pc}} \quad (8)$$

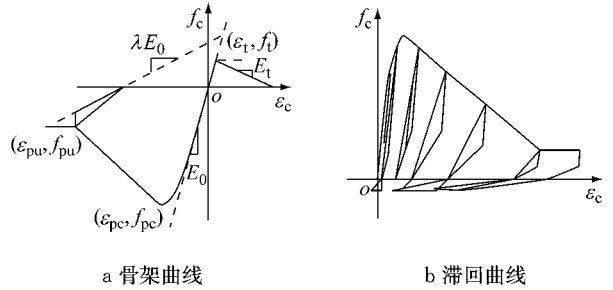


图 4 OpenSees Concrete02 Material 模型应力应变关系
Fig. 4 Stress-strain relationship for OpenSees Concrete02 Material model

3 钢筋混凝土柱试验

3.1 试验介绍

本文进行了 2 个圆柱形桥墩的试验,试件的尺寸与配筋构造完全相同,所采用钢筋类型不同(见图 5). 试件 C-LM-C40 和 C-MM-C40 纵筋分别采用 HRB335 和 HRB500E 钢筋,箍筋均采用 HRB500E 钢筋,钢筋的力学性能见表 1. 试件为钢筋混凝土悬臂柱,截面直径 600 mm,保护层厚度 25 mm,截面有效高度 550 mm,加载中心至墩底高度 2 650 mm,剪跨比 4.82;采用 C40 混凝土,混凝土立方体抗压强度标准值为 42.9 MPa;纵筋采用 D20 钢筋,配筋率 1.56%,箍筋采用 D10 钢筋,箍筋间距 60 mm,体积配筋率为 0.8%. 试验时柱顶施加 760 kN 的轴压力,轴压比为 0.083. 保持轴力恒定,然后施加水平荷载,水平荷载通过位移控制,加载位移 0~10 mm 范围内位移增量为 2 mm,10~50 mm 位移加载段位移增量为 5 mm,50 mm 之后位移增量为 10 mm;每级位移幅值下进行 3 次循环加载,每级加载后,进行 1 次上一级位移幅值的加载. 试验加载规则见图 6 所示.

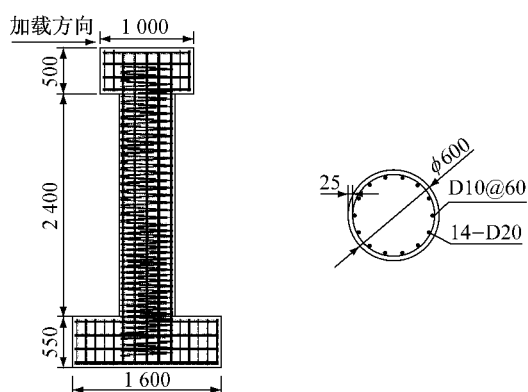


图 5 圆柱形试件尺寸和配筋图(单位:mm)

Fig.5 Dimension and reinforcements of circular specimens(unit:mm)

表 1 钢筋材料性能指标

Tab.1 Material properties of reinforcement

钢筋类型	直径/ mm	屈服强 度/MPa	抗拉强 度/MPa	弹性模量/ MPa	断后伸 长率/%	最大力 下总伸 长率/%
HRB335	20	399	543	1.93×10^5	28.3	12.1
HRB500E	10	536	729	1.51×10^5	21.2	7.4
	20	534	717	1.93×10^5	23.0	10.1

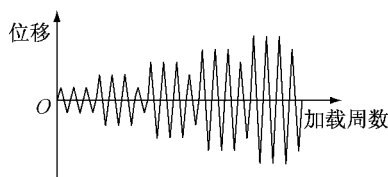


图 6 加载规则曲线

Fig.6 Loading time history

3.2 数值模拟

钢筋混凝土柱钢筋和混凝土材料分别采用上文中介绍的 Reinforcing Steel Material 和 Concrete02 Material 模型进行模拟,材料的力学性能如表 2 和 3 所示。

表 2 数值模拟中混凝土力学特性

Tab.2 Mechanical properties of concrete material in numerical analysis

混凝土	$f_{pc}/$ MPa	ϵ_{pc}	$f_{pu}/$ MPa	ϵ_{pu}	λ	$f_t/$ MPa	$E_t/$ MPa
非约束	36.5	0.002	10.8	0.02	0.1	3.7	300
约束	58.8	0.007	17.6	0.10	0.1	4.2	300

试件采用不同强度的钢筋,因此在考虑钢筋低周疲劳时,低周疲劳参数略有差别。试验中得到的混凝土强度为立方体抗压强度标准值,Concrete02 Material 模型中为圆柱体抗压强度,因此根据文献[30]中规定,采用立方体抗压强度乘以 0.85 获得圆柱体抗压强度。

表 3 数值模拟中钢筋力学特性

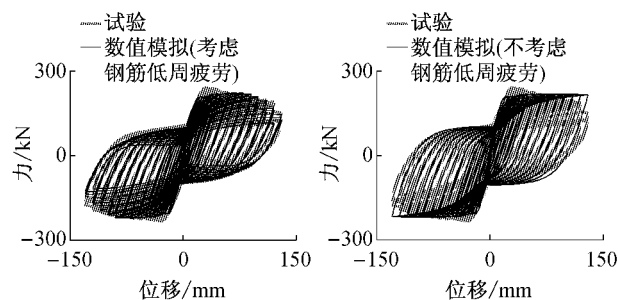
Tab.3 Mechanical properties of reinforcing steel material in numerical analysis

材料	$f_y/$ MPa	$f_u/$ MPa	$E_s/$ MPa	$E_{sh}/$ MPa	ϵ_{sh}	ϵ_{su}
HRB335	399	543	1.93×10^5	6.0×10^3	0.01	0.15
HRB500E	534	717	1.93×10^5	6.0×10^3	0.01	0.15

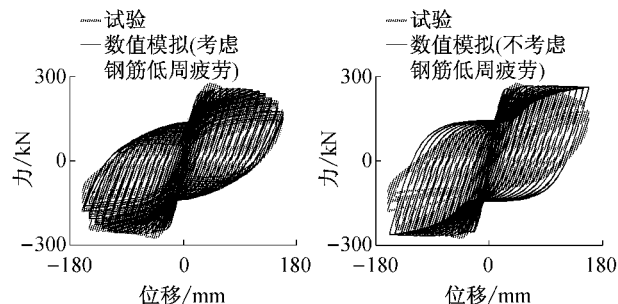
材料	d_b/mm	l_{sr}	β	r	γ	C_t	α	C_d
HRB335	20	3	1	0.4	0.5	0.6	0.506	0.6
HRB500E	20	3	1	0.4	0.5	0.8	0.506	0.8

注: d_b 为纵筋直径; l_{sr} 为纵筋长细比; β 、 r 、 γ 分别为屈曲应力应变曲线幅值参数、屈曲降低指数和屈曲常数,具体定义见文献[29]。

为了研究纵筋低周疲劳对试件数值模拟结果的影响,采用了考虑和不考虑纵筋低周疲劳 2 种数值模拟方法,数值模拟与试验滞回曲线比较如图 7 所示。为了研究试验过程中钢筋的低周疲劳损伤性能,提取了数值模拟时圆形截面最外层纵筋的应力应变曲线,如图 8 所示。根据式(4)计算得到的最外层钢筋损伤指数,如图 9 所示。



a 试件 C-LM-C40



b 试件 C-MM-C40

图 7 试验与数值模拟结果比较

Fig.7 Comparison between experimental and analysis results

由图 9 可知,圆柱形试件 2 与圆柱形试件 1 相比,随着纵筋强度由 HRB335 变为 HRB500E,钢筋低周疲劳性能提高,疲劳常数 C_t 由 0.6 变为 0.8,加载时钢筋损伤值增长变慢,试件的延性性能提高。

加载初期,钢筋疲劳损伤值较小,试件损伤由表层混凝土开裂和脱落引起;加载后期,随着钢筋应变增大,钢筋低周疲劳上升逐渐增大,最后导致钢筋损

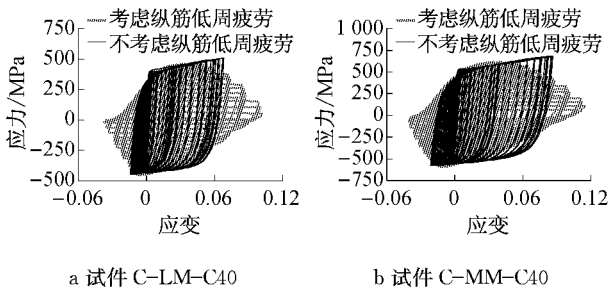


图 8 数值模拟钢筋应力应变曲线

Fig.8 Stress-strain curves of reinforcing steel based on numerical analysis

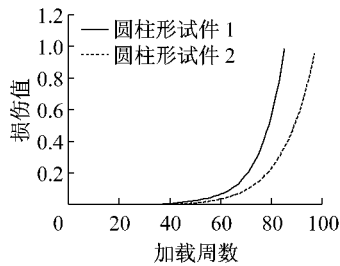


图 9 数值模拟钢筋损伤

Fig.9 Damage of reinforcing steel based on numerical analysis

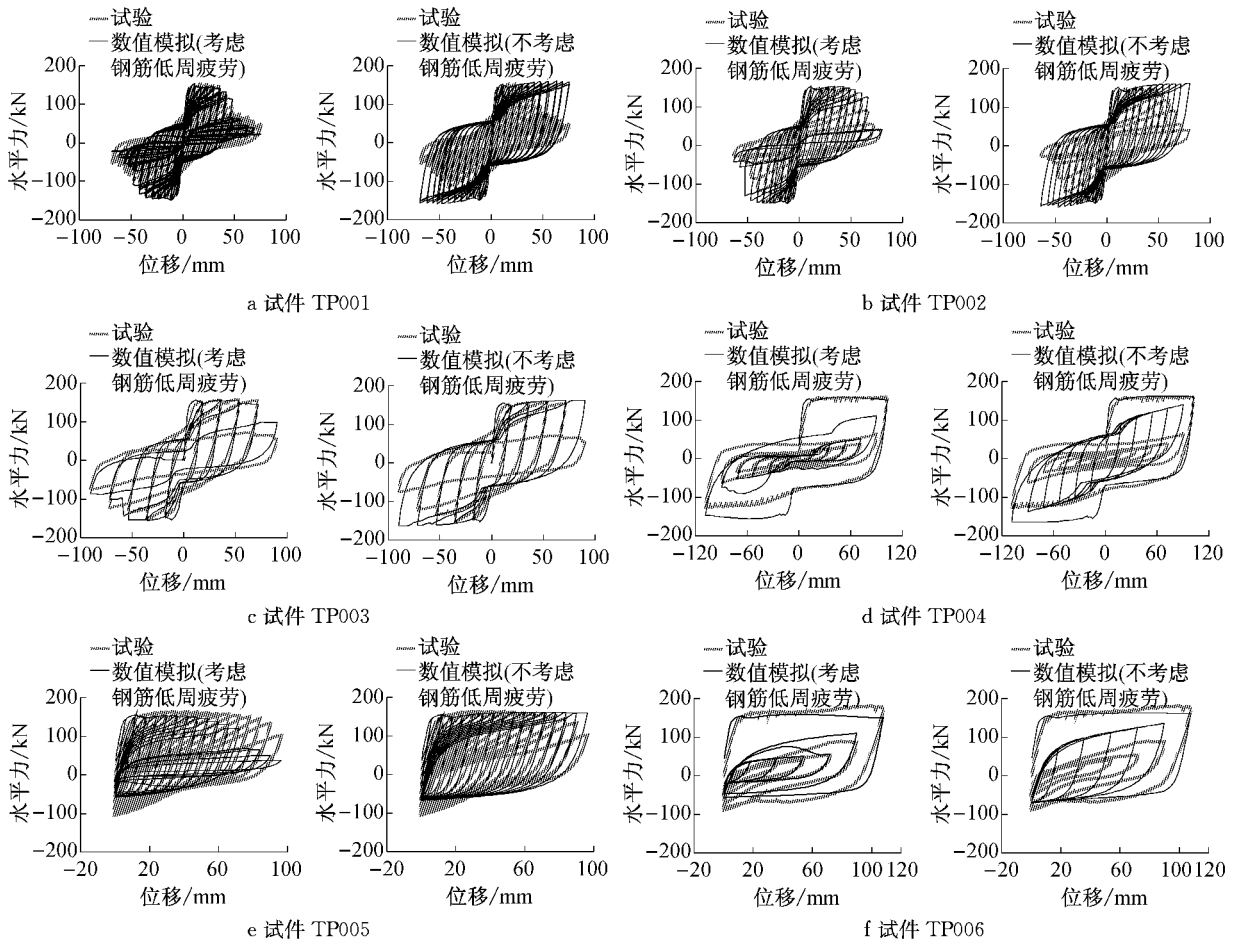


图 10 数值模拟结果与 Takemura 试验结果对比

Fig.10 Comparison between numerical analysis and experimental results of Takemura test

伤断裂,试件破坏。

由图 8 可知,考虑钢筋低周疲劳时,钢筋应力应变曲线随着疲劳指数增大出现明显的强度降低,当疲劳指数为 1 时,钢筋强度退化为零。结合图 7 中力-位移骨架曲线,当考虑钢筋低周疲劳时,钢筋强度明显降低,从而可以较好地模拟钢筋混凝土桥墩强度退化。考虑钢筋低周疲劳时,采用纤维模型可以较好地模拟出钢筋混凝土桥墩的力-位移滞回曲线。

4 基于 Takemura 试验验证

为了进一步研究钢筋低周疲劳对试件累积损伤的影响,本文对 Takemura 等^[31]试验的 1 组采用不同加载模式的 6 个钢筋混凝土柱进行数值模拟。6 个试件的尺寸与配筋构造均完全相同,采用了 6 种不同的加载制度,对应的构件编号分别为 TP001~TP006。

数值模拟时采用了考虑钢筋低周疲劳和不考虑钢筋低周疲劳 2 种方式,结果如图 10 所示。通过考虑与不考虑钢筋低周疲劳数值模拟结果对比发现,

考虑钢筋低周疲劳时,数值模拟可以较好地模拟不同加载模式下钢筋混凝土柱的累积损伤导致的强度退化,从而较好地模拟钢筋混凝土柱的力-位移滞回曲线。

5 基于 Kunnath 试验验证

Kunnath 等^[28]完成的 1 组试验,包括以等幅值等加载模式模拟地震波。通过 Kunnath 试验的数值模拟,进一步验证钢筋的低周疲劳损伤模型,以及考虑钢筋低周疲劳损伤时,采用纤维单元对不同加载模式下累积损伤的模拟效果。12 个试件的尺寸与配

筋构造均完全相同,仅加载制度不同,12 种不同加载模式对应的构件编号分别为 A01~A12。

试验数值模拟采用了考虑和不考虑钢筋低周疲劳 2 种方式,结果如图 11 和 12 所示。由图 11d~f 可知,在相同加载幅值时,采用 Coffin-Manson 钢筋疲劳损伤模型,可以较好地模拟钢筋混凝土试件的低周疲劳损伤破坏。由图 11g~h、图 12a~d 可知,考虑钢筋低周疲劳时,纤维模型能更好地模拟试件累积损伤导致的承载力退化。因此,采用纤维单元时,可以在材料层面考虑钢筋的损伤,并且反映到试件的累积损伤,较准确地模拟钢筋混凝土柱的力-位移滞回曲线。

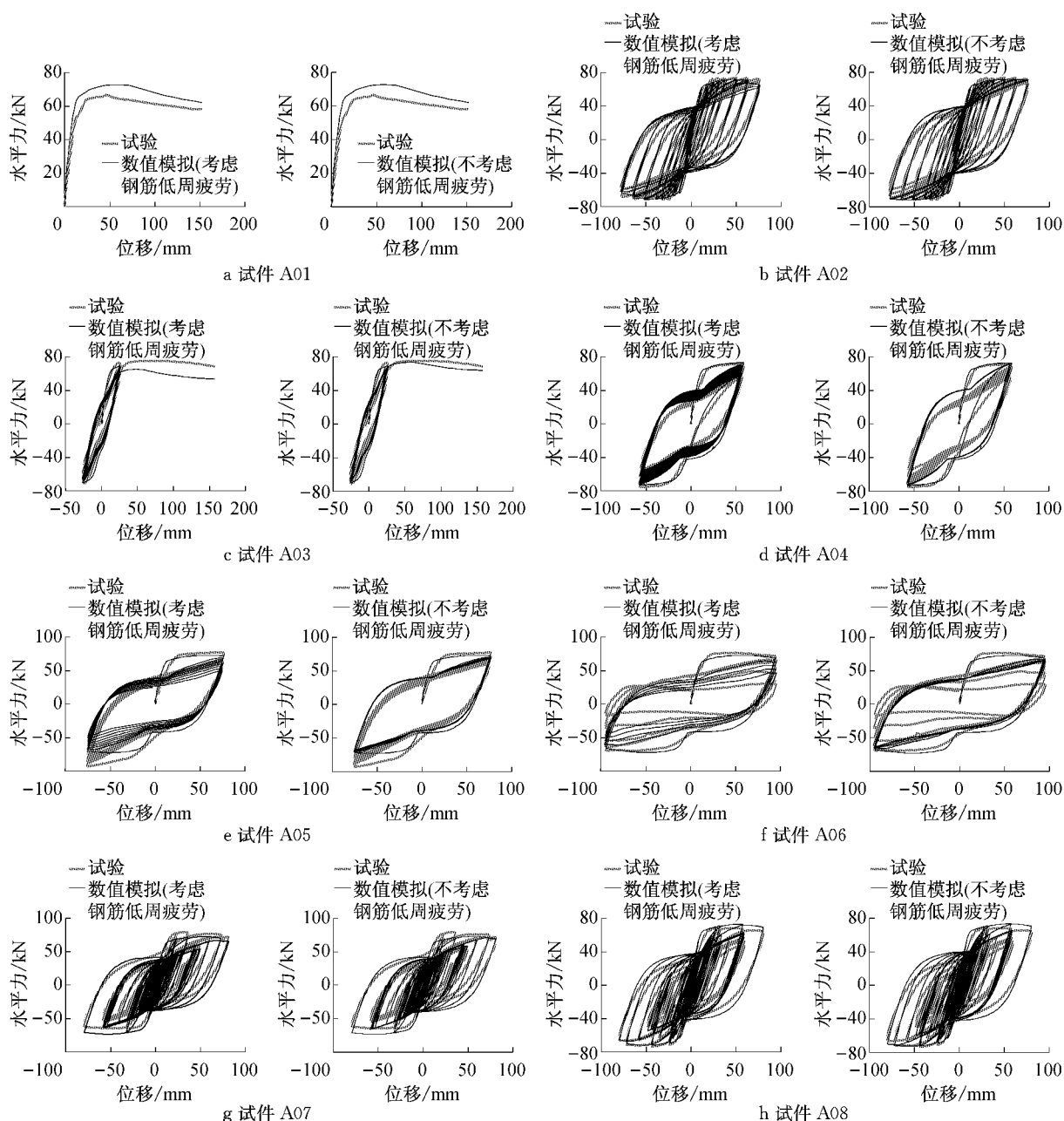


图 11 数值模拟结果与 Kunnath 试验结果对比(试样 A01~A08)

Fig. 11 Comparison between numerical analysis and experimental results of Kunnath test (A01~A08)

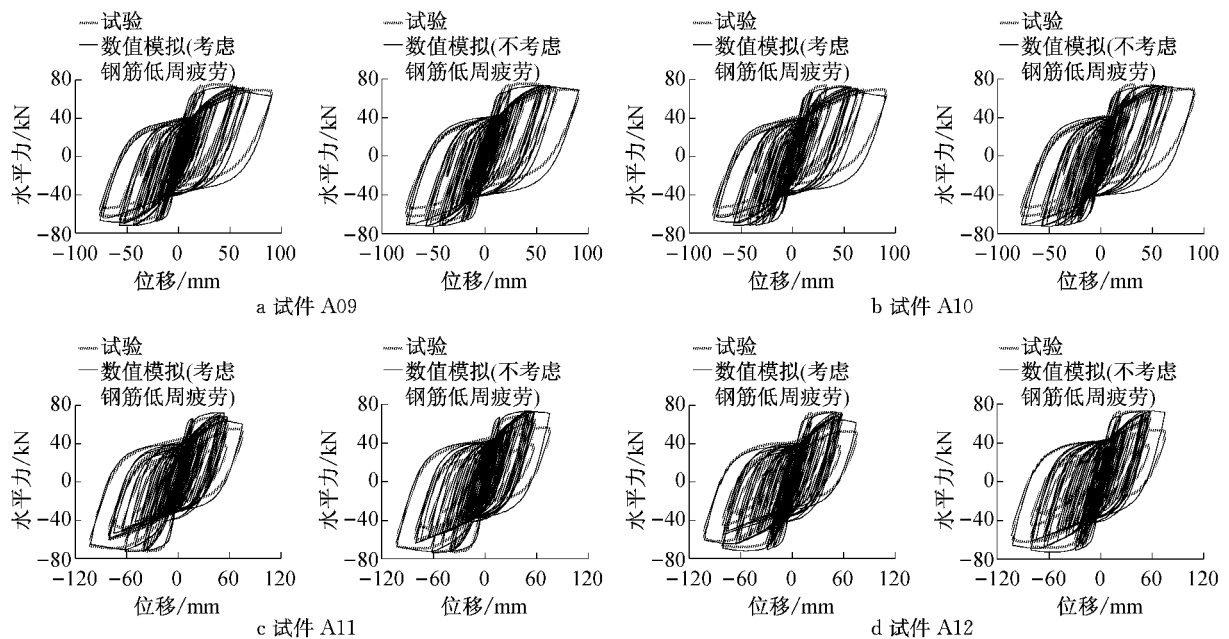


图12 数值模拟结果与 Kunnath 试验结果对比(试样 A09~A12)

Fig.12 Comparison between numerical analysis and experimental results of Kunnath test(A09~A12)

6 结论

(1) 基于纤维单元,采用 Coffin-Manson 钢筋疲劳模型,可以较好地模拟钢筋的强度退化以及由钢筋强度退化导致的钢筋混凝土试件强度退化。

(2) 试件加载初期,钢筋损伤值较小,钢筋混凝土桥墩损伤主要由表层混凝土开裂和脱落引起;随着加载位移增大,钢筋疲劳损伤增大,试件承载力降低;最后钢筋损伤断裂,试件破坏。

(3) 通过纵筋采用 HRB500E 与 HRB335 的钢筋混凝土柱对比可知,高强度钢筋的低周疲劳性能更好,因此采用高强度钢筋的试件具有更好的承载力和变形能力。

(4) 通过对 Takemura 和 Kunnath 2 组采用不同加载模式的试验进行数值模拟可知,采用纤维单元,钢筋低周疲劳可以较好地模拟试件在等幅值和变幅值等不同加载模式下的强度退化和试件破坏。因此,通过考虑钢筋的低周疲劳,可以建立起材料层面上的损伤模型,从而基于材料损伤模拟钢筋混凝土试件的累积损伤和承载力退化。

本文仅考虑了钢筋材料的低周疲劳损伤,未考虑混凝土的损伤,结果与结论适用于低轴压比下以钢筋低周疲劳破坏为主的钢筋混凝土试件,对高轴压比下混凝土试件有待进一步验证。

参考文献:

- [1] Park Y J, Ang A H S. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1985, 111(4): 722.
- [2] Roufaiel M S L, Meyer C. Analytical modeling of hysteretic behavior of R/C frames [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1987, 113(3): 429.
- [3] Chung Y S, Meyer C, Masanobu S. Modeling of concrete damage [J]. ACI Structural Journal, 1989, 86(3): 259.
- [4] Lai S S, Will G T, Otani S. Model for inelastic biaxial bending of concrete members [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1984, 110(11): 2563.
- [5] Youssef M, Ghobarah A. Strength deterioration due to bond slip and concrete crushing in modeling of reinforced concrete members [J]. ACI Structural Journal, 1999, 96(6): 956.
- [6] Kunnath S K, Reinhorn A M, Park Y J. Analytical modeling of inelastic seismic response of R/C structures [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1990, 116(4): 996.
- [7] Mork K J. Response analysis of reinforced concrete structures under seismic excitation [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1991, 23(1): 33.
- [8] 郭进, 王君杰. 基于累积损伤的弯矩-曲率强度退化滞回模型 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2013, 41(12): 1767.
GUO Jin, WANG Junjie. Reinforced concrete strength degradation hysteretic moment-curvature model based on cumulative damage [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2013, 41(12): 1767.
- [9] 曲哲, 叶列平. 基于有效累积滞回耗能的钢筋混凝土构件承载力退化模型 [J]. 工程力学, 2011, 28(6): 45.
QU Zhe, YE Lieping. Strength deterioration model based on effective hysteretic energy dissipation for RC members under

- cyclic loading [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(6): 45.
- [10] 连业达, 王宪杰, 张洵安, 等. 结构地震累积损伤指标研究进展 [J]. *工业建筑*, 2012, 42(4): 118.
LIAN Yeda, WANG Xianjie, ZHANG Xunan, *et al.* Research advances of structural seismic cumulative damage index [J]. *Industrial Construction*, 2012, 42(4): 118.
- [11] Kunnath S K, El-bahy A, Taylor A W, *et al.* Cumulative seismic damage of reinforced concrete bridge piers [R]. Buffalo: National Center for Earthquake Engineering Research, 1997.
- [12] 刘伯权, 白绍良, 徐云中, 等. 钢筋混凝土柱低周疲劳性能的试验研究 [J]. *地震工程与工程振动*, 1998, 18(4): 82.
LIU Boquan, BAI Shaoliang, XU Yunzhong, *et al.* Experimental study of low-cyclic behavior of concrete columns [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1998, 18(4): 82.
- [13] 刘鸣, 刘伯权. 钢筋混凝土柱低周疲劳力学性能分析 [J]. *长安大学学报: 自然科学版*, 2012, 32(5): 65.
LIU Ming, LIU Boquan. Low-cycle fatigue damage for shear behavior of reinforced concrete columns. [J]. *Journal of Chang'an University: Natural Science Edition*, 2012, 32(5): 65.
- [14] Spacone E, Filippou F C, Taucer F F. Fibre beam-column model for non-linear analysis of R/C frames. Part I: formulation [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1996, 25(7): 711.
- [15] Spacone E, Filippou F C, Taucer F F. Fibre beam-column model for non-linear analysis of R/C frames. Part II: applications [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1996, 25(7): 727.
- [16] Coffin L F, Jr. A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal [J]. *American Society of Mechanical Engineers*, 1954, 76: 931.
- [17] Manson S S. Behavior of materials under conditions of thermal stress [R]. Washington D C: National Advisory Committee for Aeronautics, 1953.
- [18] Smith K, Topper T, Watson P. A stress-strain function for the fatigue of metals: stress-strain function for metal fatigue including mean stress effect [J]. *Journal of Materials*, 1970, 5: 767.
- [19] Lorenzo F, Laird C. A new approach to predicting fatigue life behavior under the action of mean stresses [J]. *Materials Science and Engineering*, 1984, 62(2): 205.
- [20] Koh S, Stephens R. Mean stress effects on low cycle fatigue for a high strength steel [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 1991, 14(4): 413.
- [21] Tong X Y, Wang D J, Xu H. Investigation of cyclic hysteresis energy in fatigue failure process [J]. *International Journal of Fatigue*, 1989, 11(5): 353.
- [22] Sugiura K, Chang K, Lee G. Evaluation of low-cycle fatigue strength of structural metals [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1991, 117(10): 2373.
- [23] Mander J, Panthaki F, Kasalanati A. Low-cycle fatigue behavior of reinforcing steel [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1994, 6(4): 453.
- [24] Brown J, Kunnath S K. Low-cycle fatigue behavior of longitudinal reinforcement in reinforced concrete bridge columns [R]. Buffalo: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, 2000.
- [25] Scott B, Park R, Priestley M. Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates [J]. *ACI Journal Proceedings*, 1982, 79(2): 13.
- [26] Chang G A, Mander J B. Seismic energy based fatigue damage analysis of bridge columns part 1 Evaluation of Seismic Capacity [R]. Buffalo: National Center for Earthquake Engineering Research, 1994.
- [27] Gomes A, Appleton J. Nonlinear cyclic stress-strain relationship of reinforcing bars including buckling [J]. *Engineering Structures*, 1997, 19(10): 822.
- [28] Kunnath S K, Heo Y, Mohle J F. Nonlinear uniaxial material model for reinforcing steel bars [J]. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 2009, 135(4): 335.
- [29] Mazzoni S, McKenna F, Scott M H, *et al.* OpenSees command language manual [R]. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2007.
- [30] 范立础, 卓卫东. 桥梁延性抗震设计 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
FAN Lichu, ZHUO Weidong. Ductility seismic design of bridge [M]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [31] Takemura H, Kawashima K. Effect of loading hysteresis on ductility capacity of reinforced concrete bridge piers [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1997, 43A: 849.