

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2016.01.008

弯曲破坏型钢筋混凝土桥墩地震 变形成分及影响因素*

成 虎¹, 李宏男¹, 王东升²

(1. 大连理工大学建设工程学部, 辽宁 大连 116024; 2. 大连海事大学道路与桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116026)

摘要: 钢筋混凝土桥墩拟静力试验表明, 弯曲破坏型桥墩墩顶位移主要由弯曲变形、滑移变形成分构成。为进一步探讨地震荷载作用下弯曲破坏型桥墩地震变形成分及其影响因素, 首先基于 Lehman 以及李贵乾的桥墩试件拟静力试验, 利用 OpenSees 平台采用纤维梁柱单元模型附加零长度截面单元对试验滞回曲线和墩顶变形成分进行数值模拟; 其次建立原型桥墩数值模型, 考虑近断层和远断层地震动进行了非线性动力时程分析, 探讨了最大侧移角、位移延性系数等结构反应参数, 以及剪跨比、纵筋配筋率等构件特征参数对桥墩地震变形成分的影响。结果表明, 墩顶总位移中纵筋粘结滑移成分随最大侧移角和位移延性的增大而增大, 随剪跨比和纵筋配筋率的增大而减小。考虑纵筋粘结滑移的数值模型与仅考虑弯曲变形纤维梁柱单元模型相比, 将增大桥墩的地震位移反应。

关键词: 钢筋混凝土桥墩; 弯曲破坏; 地震位移反应; 弯曲变形; 纵筋粘结滑移

中图分类号: TU375.3 文献标识码: A 文章编号: 1672-2132(2016)01-0062-07

Seismic Deformation Components and Influential Factors of RC Bridge Columns Suffering from Flexural Failure

CHENG Hu¹, LI Hongnan¹, WANG Dongsheng²

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: The related quasi-static tests verify that the top lateral displacements of RC bridge columns suffering from flexural failure consist of bending deformation and bar bond slip deformation (bar pulling out deformation). To further investigate the deformation components under earthquake loading and their influential factors, Lehman and LI Guiqian's test results are simulated for hysteretic curves and deformation components on the platform of OpenSees, with the model of fiber beam-column element adding zero-length section element. Then the prototype models are built for nonlinear dynamic analysis, considering near-fault ground motions and far-fault ground motions. Parameters of structural response (the maximum lateral drift ratio and displacement ductility factor) and structural characteristics (the aspect ratio and longitudinal reinforcement ratio) are taken as influential factors. The results show that the bar bond slip deformation component in total lateral displacement increases with the growing of the maximum lateral drift ratio and displacement ductility factor, and decreases with the increasing of the aspect ratio and longitudinal reinforcement ratio. In addition, the numerical models considering the bar bond slip will magnify the seismic responses of RC bridge columns by comparison with that ignoring the bar bond slip.

Keywords: reinforced concrete bridge column; flexural failure; seismic displacement response; bending deformation; bar bond slip

* 收稿日期: 2015-09-07; 修回日期: 2015-12-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178701)、中央高校基本科研业务费项目(3132015225)、辽宁省高等学校优秀人才支持计划项目(LJQ2013053)资助

作者简介: 成 虎(1989-), 男, 博士研究生。主要从事近海桥梁工程结构全寿命抗震研究。Email: hoocheng@163.com

通讯作者: 李宏男(1957-), 男, 长江学者特聘教授, 博导。主要从事工程结构抗震、抗风、健康监测与诊断研究。

Email: hnli@dlut.edu.cn

引 言

桥墩是桥梁的主要抗震构件,在历次强烈破坏性地震中都有破坏实例,如 1995 年日本 Kobe 地震,阪神高速公路神户线路段大部分高架桥梁震害较重,主要表现为桥墩的变形过大或产生了不可恢复的永久变形(残余变形)。2008 年我国汶川地震中,桥墩尽管因板式支座滑移而受力较小,但仍有开裂、挠曲等严重破坏。地震作用下钢筋混凝土桥墩的失效模式主要有:弯曲破坏、剪切破坏和弯剪破坏^[1],在抗震设计时通常要求桥墩在强震下发生足够延性的弯曲破坏,而剪切破坏和弯剪破坏的桥墩则通过能力设计及细部配箍设计来避免。

目前,基于性能/位移的抗震设计越来越关注钢筋混凝土桥墩的变形能力,其侧向变形一般包括弯曲变形、剪切变形和纵筋粘结滑移变形(纵筋拔出变形)。Lee 等^[2]基于修正压力场理论建立了钢筋混凝土桥墩固定轴压下的剪切力—剪切位移骨架曲线,结合 Ozcebe 等^[3]建议的剪切滞回模型描述桥墩的剪切关系,通过与纤维模型串联以考虑钢筋混凝土桥墩的弯剪耦合作用,但未考虑纵筋粘结滑移的影响。Sezen 等^[4-5]基于试验结果提出了纵筋粘结滑移模型,但采用等效塑性铰模型模拟桥墩的弯曲变形,忽略了该模型本身包含弯曲变形、剪切变形和纵筋粘结滑移变形的问题。文献[6-8]针对钢筋混凝土桥墩基于位移的抗震性能研究开展了大量的工作。Lehman 等^[9]完成了弯曲破坏型钢筋混凝土桥墩拟静力试验,结果表明弯曲变形约占墩顶总位移的 50%,滑移变形占 20%~50%,剪切变形成分占比不足 5%。文献[10-11]认为在端部塑性变形较大的情况下,钢筋的粘结滑移变形成分非常明显,会占到墩顶位移总变形的 30%以上。文献[8,12]注意到地震荷载与拟静力加载方式具有明显的不同,但对弯曲破坏型桥墩墩顶位移中弯曲变形和纵筋粘结滑移变形所占比例尚未有明确论断;一些数值软件通常忽略纵筋粘结滑移变形而仅以纤维梁柱单元估计桥墩的墩顶位移,这种做法是否合适也缺少足够研究。

本文在 Lehman 等^[9]和李贵乾^[13]的拟静力试验基础上,借助于 OpenSees 平台和数值模拟手段,

探讨了弯曲破坏型钢筋混凝土桥墩的地震变形成分及其影响因素,力图为上述问题的解决获得初步线索。

1 钢筋混凝土桥墩拟静力试验简介

Lehman 等^[9]将剪跨比(分别为 4、8 和 10)和纵筋配筋率(分别为 0.75%、1.5%和 3.0%)作为变量,对 5 个钢筋混凝土桥墩试件进行了拟静力试验对比。桥墩试件按 1:3 设计制作,轴压比均为 0.16,参数如表 1 所示。试验加载过程中保持轴力不变,采用力—位移控制加载,每个力或位移峰值循环 3 次。

表 1 文献[9]桥墩试件参数

Table 1 Parameters of column specimens of Reference 9

编号	墩高/ mm	直径/ mm	剪跨 比	配筋 率/%	配箍 率/%	轴力/ kN
407	2438.4	609.6	4	0.75	0.7	653.86
415	2438.4	609.6	4	1.50	0.7	653.86
430	2438.4	609.6	4	3.00	0.7	653.86
815	4876.8	609.6	8	1.50	0.7	653.86
1015	6096.0	609.6	10	1.50	0.7	653.86

李贵乾^[13]考虑墩高、轴压比、纵筋直径和配箍率等作为变量,对约束良好的钢筋混凝土柱抗震性能进行了拟静力试验。测试了 9 个桥墩模型试件,加载方式与 Lehman 等^[9]的试验相同。这些桥墩试件都发生了弯曲破坏,试件参数如表 2 所示。

表 2 文献[13]桥墩试件参数

Table 2 Parameters of column specimens of Reference 13

编号	墩高/ mm	直径/ mm	轴压 比	剪跨 比	配筋 率/%	配箍 率/%	轴力/ kN
4508	1800	400	0.1	4.5	0.8	0.8	173
4515	1800	400	0.2	4.5	1.5	1.0	347
4524	1800	400	0.3	4.5	2.4	1.2	520
5708	2300	400	0.2	5.7	0.8	1.2	347
5715	2300	400	0.3	5.7	1.5	0.8	520
5724	2300	400	0.1	5.7	2.4	1.0	173
7008	2800	400	0.3	7.0	0.8	1.0	520
7015	2800	400	0.1	7.0	1.5	1.2	173
7024	2800	400	0.2	7.0	2.4	0.8	347

2 钢筋混凝土桥墩拟静力试验数值模拟

2.1 钢筋混凝土桥墩有限元模型

本文基于 OpenSees 平台,采用非线性纤维梁

柱单元模拟墩柱的弯曲变形成分,在桥墩底部附加零长度截面单元以模拟墩底的纵筋粘结滑移变形成分。墩底附加零长度截面单元可将弯曲变形和滑移变形分开考虑,有利于变形成分估计。

数值建模中,混凝土选用基于 Kent-Scott-Park 本构模型^[14]的 Concrete01 材料,不考虑混凝土的受拉力学性能;墩柱的钢筋选用 Steel02 材料,该材料采用 Giuffre-Menegotto-Pinto 双线性本构模型^[15],能较好地模拟反复加载下的 Bauschinger 效应和等向应变强化效应。此外,采用 Bond_SP01 材料模拟墩底纵筋粘结滑移现象,该材料用应力—滑移量的关系取代了钢筋的应力—应变关系^[16-17]。

2.2 数值模拟结果与试验结果对比

2.2.1 力—位移滞回曲线

图 1 给出了考虑纵筋粘结滑移与否的桥墩试件 4508 号的数值模拟与拟静力试验结果的对比,总体上看两者都可以对试验滞回曲线实现较好的模拟,但考虑墩底纵筋粘结滑移的数值模型能更好地模拟钢筋混凝土桥墩的初始刚度、承载能力以及卸载刚度。其他试件也有类似结论,限于篇幅不再赘述。

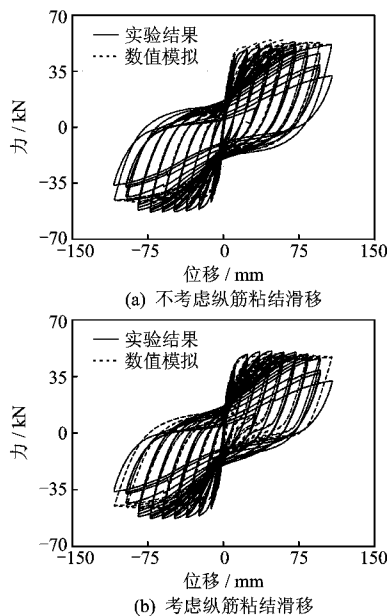


图 1 试件 4508 拟静力试验与数值模拟力—位移滞回曲线
Fig. 1 Comparison of force-displacement hysteretic curves between quasi-static test and numerical simulation for specimen 4508

2.2.2 低周反复加载下桥墩变形成分

图 2 为墩顶总位移中滑移变形成分的试验测定

值与模拟结果的对比情况。以试件 407 和 4524 为例,当位移延性系数超过一定限值时,墩底纵筋粘结滑移变形成分趋于稳定。需要指出的是,Lehman 试验的数值模拟值与试验测定值存在一定的误差,而李贵乾试验的数值模拟结果与试验测定值拟合较好。这种差距可能来源于两个方面,一是试验装置或试验人员数据处理方面的误差;二是数值计算模型方面的不足。本文认为在变形成分占比方面存在 10%左右的误差可接受。

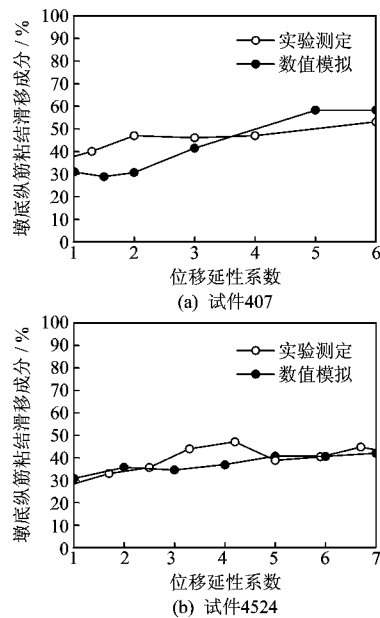


图 2 桥墩试件 407 和 4524 拟静力试验与数值模拟滑移成分占比

Fig. 2 Comparisons of bar bond slip deformation component between quasi-static test and numerical simulation for specimen 407 and 4524

Lehman 的试验结果表明,桥墩试件 407、415 和 430 的墩底纵筋粘结滑移变形占墩顶总位移的 40%~50%,若忽略剪切变形,则弯曲变形占 50%~60%;而桥墩试件 815 和 1015 中纵筋粘结滑移成分为 20%~30%,弯曲变形占 70%~80%。说明墩高对桥墩变形成分有影响,即桥墩越高,纵筋粘结滑移变形成分越小,而弯曲变形成分越大,类似的结论在李贵乾的试验结果中得到了验证。

通过力—位移滞回曲线和墩顶总位移中纵筋粘结滑移成分占比两个方面试验与数值模拟结果对比,就低周反复加载而言,数值模型可对桥墩试件试验数据进行相对合适的模拟。

3 原型钢筋混凝土桥墩地震变形时程分析

3.1 原型桥墩参数

鉴于 Lehman 的试验桥墩试件按 1 : 3 设计制作,故按此比例尺将试件扩展为原型模型,具体参数如表 3 所示。李贵乾试验试件没有明确的比例关系,按照 1 : 3 扩展为原型后,与工程实际桥墩相符。

表 3 原型桥墩参数

Table 3 Parameters of prototype columns

编号	直径/ mm	墩高/ mm	配筋 率/%	配箍 率/%	轴力/ kN
B407	1830	7315	0.75	0.7	5884.74
B415	1830	7315	1.50	0.7	5884.74
B430	1830	7315	3.00	0.7	5884.74
B815	1830	14630	1.50	0.7	5884.74
B407	1830	18290	1.50	0.7	5884.74
B4508	1200	5400	0.80	0.8	1557.00
B4515	1200	5400	1.50	1.0	3123.00
B4524	1200	5400	2.40	1.2	4680.00
B5708	1200	6900	0.80	1.2	3123.00
B5715	1200	6900	1.50	0.8	4680.00
B5724	1200	6900	2.40	1.0	1557.00
B7008	1200	8400	0.80	1.0	4680.00
B7015	1200	8400	1.50	1.2	1557.00
B7024	1200	8400	2.40	0.8	3123.00

3.2 输入地震波

美国 Northridge 地震(1994)、日本 Kobe 地震(1995)以及台湾 ChiChi 地震(1999)中,大量桥梁震害严重,除结构自身原因外,近断层地震动的作用是主要原因。本文对比了近断层和远断层两类地震动对钢筋混凝土桥墩地震变形成分的影响。以是否含有速度脉冲为原则,将输入地震波分为两组,每组 10 条。时程分析时,地震波单向输入,峰值加速度 PGA 分别调整为 0.4g、0.5g 和 0.6g。

3.3 桥墩地震变形成分

对动力时程分析的结果进行整理,以墩底纵筋粘结滑移变形成分为分析对象,研究原型桥墩的地震变形及影响因素。其中,最大侧移角、最大位移延性系数的上限值参考了拟静力试验测定值,即当桥墩墩顶位移时程分析结果大于上述数值时,则认为桥墩已经接近倒塌,讨论中予以舍去。

3.3.1 桥墩地震变形成分与结构反应关系

图 3 所示为墩顶最大侧移角与墩顶总位移中纵筋粘结滑移成分的关系,近断层地震动引起的纵筋粘结滑移成分比远断层地震动大。无论是近断层还是远断层地震动作用下,纵筋粘结滑移成分的初始值约为 15%,且随着最大侧移角的增大而逐渐增大。当最大侧移角小于 3% 时,纵筋粘结滑移变形成分不足 30%,弯曲变形成分在 70% 以上,当最大侧移角大于 3% 时,纵筋粘结滑移变形成分逐渐增大至 60% 左右(剪跨比 ≥ 5.7 的桥墩,纵筋粘结滑移变形成分为 30%~40%),而弯曲变形不足 40%。

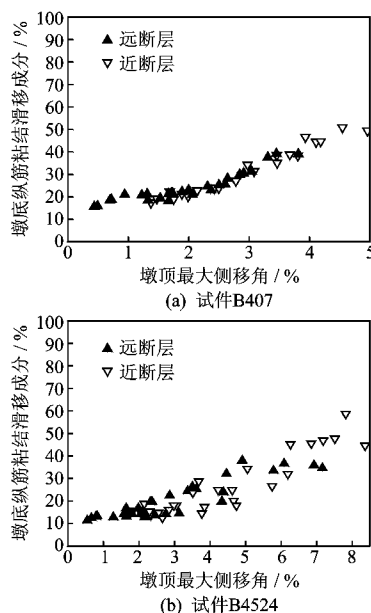


图 3 墩顶总位移中纵筋粘结滑移成分与最大侧移角关系
Fig. 3 Relationship between the bar bond slip deformation component and the maximum lateral drift ratio

图 4 给出了墩顶总位移中纵筋粘结滑移成分与位移延性系数的关系,位移延性系数对纵筋粘结滑移成分的影响与最大侧移角对其的影响大致相同。随着位移延性的增大,纵筋粘结滑移成分增大,且近断层地震动的影响更显著。

3.3.2 桥墩地震变形成分与结构特性关系

图 5 给出了纵筋配筋率为 1.5% 时墩顶总位移中纵筋粘结滑移成分与剪跨比的关系。由图可知,纵筋配筋率相同时,纵筋粘结滑移成分随剪跨比的增大而减小,对于相同剪跨比,近断层地震动的影响明显大于远断层。

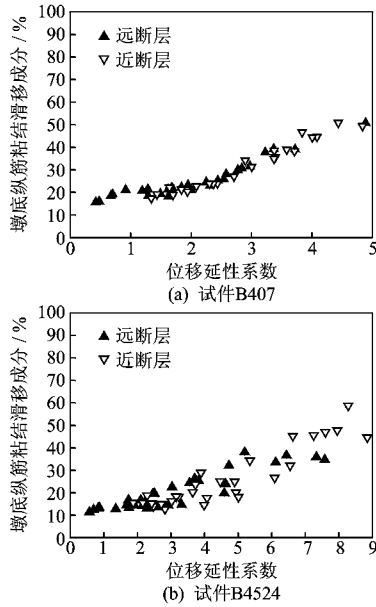


图 4 墩顶总位移中纵筋粘结滑移成分与位移延性系数关系
Fig. 4 Relationship between the bar bond slip deformation component and the displacement ductility factor

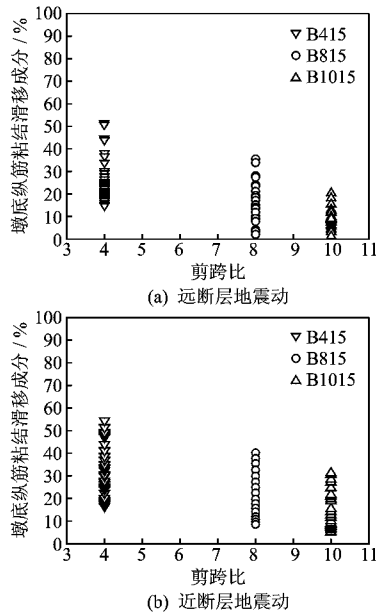


图 5 桥墩地震变形中纵筋粘结滑移成分与剪跨比关系
Fig. 5 Relationship between the bar bond slip deformation component and the aspect ratio

以剪跨比=4 为例,图 6 给出了墩顶总位移中纵筋粘结滑移成分与纵筋配筋率的关系。由图可知,纵筋粘结滑移成分随纵筋配筋率的增大而减小,且近断层地震动的影响明显大于远断层。

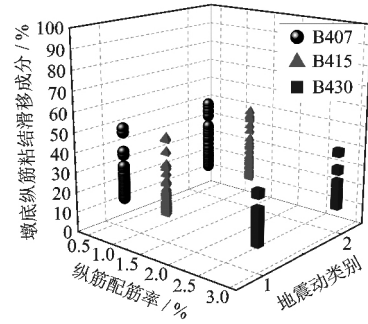


图 6 桥墩地震变形中纵筋粘结滑移成分与纵筋配筋率关系
Fig. 6 Relationship between the bar bond slip deformation component and the longitudinal reinforcement ratio
注:1 为远断层地震动;2 为近断层地震动

4 纵筋粘结滑移对桥墩地震变形影响

目前在建筑结构领域,采用零长度截面单元模拟纵筋粘结滑移及其对框架柱及整体结构地震反应的影响已有一定研究^[16,18-19]。杨红等^[19]通过在梁端附加零长度截面单元以考虑节点内的纵筋粘结滑移问题,基于纤维梁柱单元模拟了罕遇地震下 RC 框架节点区的非线性反应,得出了考虑节点的非弹性变形将使结构的最大顶点位移、最大层间位移角增大或略有变化的结论。本文采用墩顶最大侧移角作为研究指标,对比了在墩底附加零长度截面单元与否对桥墩墩顶位移的影响情况。为此定义最大侧移角误差百分比为:

$$\omega_i = \frac{\theta_{\text{bond-slip},i} - \theta_{0,i}}{\theta_{0,i}} \times 100\% \quad (1)$$

式中, ω_i 为某加速度峰值下某桥墩在第 i 条地震波输入下的最大侧移角误差; $\theta_{\text{bond-slip},i}$ 为某加速度峰值下某桥墩在第 i 条地震波输入下考虑墩底纵筋粘结滑移的最大侧移角; $\theta_{0,i}$ 为某加速度峰值下某桥墩在第 i 条地震波输入下不考虑墩底纵筋粘结滑移的最大侧移角。

就 Lehman 试验对应的原型桥墩试件进行时程分析,为考虑轴压比的影响,还扩展了 B415a 和 B415c 两组桥墩,轴压比分别为 0.08 和 0.24,其余参数均与 B415(轴压比为 0.16)一致。共计完成 7 个桥墩、3 组加速度峰值和 20 条地震记录,以及考虑纵筋粘结滑移与否的 420 次时程分析。

对 ω_i 的数据整理发现,对特定桥墩及给定输入

加速度峰值,存在某条地震波下 w_i 较大(20%~30%以上),而其他地震波输入下 w_i 都很小的情况(不足 10%),为此采用加权平均的方法给出某桥墩在特定输入加速度峰值下的最大侧移角误差 w :

$$w = \frac{\sum \lambda_i w_i}{\sum \lambda_i} \times 100\% \quad (2)$$

式中, w 为某加速度峰值下桥墩考虑纵筋粘结滑移与否的最大侧移角误差; λ_i 为统计加权系数,取 10% 作为区间分隔间距,则 $\lambda_i = n_i/N$, 其中 n_i 为某加速度峰值下落入某区间的分析数据数, N 为某加速度峰值下总的分析数据数。

图 7 给出了考虑墩底纵筋粘结滑移与否的桥墩墩顶最大侧移角误差比值与剪跨比、轴压比以及纵

筋配筋率的关系。可以看出,不考虑墩底纵筋粘结滑移将低估桥墩的最大侧移角,低估程度一般随加速度峰值的增加而增加,从而带来设计上的潜在风险。从图中可以看出,桥墩剪跨比、轴压比以及纵筋配筋率对低估程度的影响,其一般随剪跨比、轴压比的降低和纵筋配筋率的提高而增加,剪跨比可能是重要的影响因素,最不利情况可能低估 20%~30% 的位移反应。若以 B415 作为比较标准(剪跨比 $\lambda = 4$, 轴压比 $n_0 = 0.16$, 纵筋配筋率 $\rho_l = 1.5\%$), 考虑墩底纵筋粘结滑移与否,桥墩最大侧移角的误差总体在 10% 以内,因此认为从保守角度,当剪跨比和轴压比之一小于上述数值,或纵筋配筋率大于上述数值,则宜考虑墩底纵筋粘结滑移的影响。

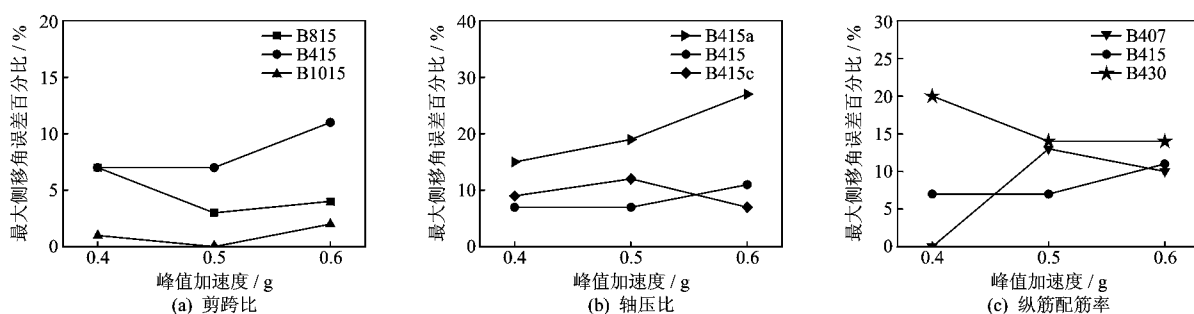


图 7 墩顶最大侧移角误差比值的影响因素

Fig. 7 Influential factors of the error of the maximum lateral drift ratio

5 结 论

基于钢筋混凝土桥墩拟静力试验与数值模拟结果对比,在验证了模型可靠性的基础上研究了桥墩在地震作用下变形成分及影响因素,同时就数值模型是否考虑墩底纵筋滑移影响因素进行了初步探索。主要结论如下:

(1) 墩顶位移中纵筋粘结滑移成分在近断层地震动作用下要大于远断层地震动情况,但无论是近断层还是远断层地震动作用下,纵筋粘结滑移成分的初始值约为 15%。

(2) 墩顶位移中纵筋粘结滑移成分随最大侧移角或位移延性系数的增大而增大,当最大侧移角小于 0.5% 时,滑移成分不足 10%,而当位移延性足够大时,滑移成分在 50% 以上。

(3) 纵筋配筋率相同时,剪跨比越大,墩顶位移中纵筋粘结滑移成分越小;而剪跨比相同时,纵筋配

筋率越高,墩顶位移中纵筋粘结滑移成分越小。

(4) 不考虑墩底纵筋粘结滑移将使桥墩的墩顶位移反应偏低。建议当剪跨比较小或纵筋配筋率较高或轴压比较小时,宜考虑墩底纵筋粘结滑移的影响。

参考文献:

[1] Hashimoto S, Fujino Y, Abe M. Damage analysis of Hanshin expressway viaducts during 1995 Kobe earthquake II: damage mode of single reinforced concrete piers[J]. Journal of Bridge Engineering, 2005, 10(1): 54-60.

[2] Lee D H, Elnashai A S. Seismic analysis of RC bridge columns with flexure-shear interaction[J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(5): 546-553.

[3] Ozcebe G, Saatcioglu M. Hysteretic shear model for reinforced concrete members[J]. Journal of Structural Engineering, 1989, 115(1): 132-148.

- [4] Setzler E J, Sezen H. Model for the lateral behavior of reinforced concrete columns including shear deformations[J]. *Earthquake Spectra*, 2008, 24(2): 493-511.
- [5] Sezen H, Chowdhury T. Hysteretic model for reinforced concrete columns including the effect of shear and axial load failure[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2009, 135(2): 139-146.
- [6] 王东升,李宏男,赵颖华,等. 钢筋混凝土桥墩基于位移的抗震设计方法[J]. *土木工程学报*, 2006, 39(10): 80-86.
Wang D Sh, Li H N, Zhao Y H, et al. Displacement-based seismic design method of RC bridge piers[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39(10): 80-86. (in Chinese)
- [7] 司炳君,李宏男,王东升,等. 基于位移设计的钢筋混凝土桥墩抗震性能试验研究(I): 拟静力试验[J]. *地震工程与工程振动*, 2008, 28(1): 123-129.
Si B J, Li H N, Wang D Sh, et al. Experimental evaluation of the seismic performance of reinforced concrete bridge piers designed on the basis of displacement (I): quasi-static test[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2008, 28(1): 123-129. (in Chinese)
- [8] 艾庆华,李宏男,王东升,等. 基于位移设计的钢筋混凝土桥墩抗震性能试验研究(II): 振动台试验[J]. *地震工程与工程振动*, 2008, 28(3): 39-46.
Ai Q H, Li H N, Wang D Sh, et al. Experimental evaluation of the seismic performance of reinforced concrete bridge piers designed on the basis of displacement (II): shaking table test[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2008, 28(3): 39-46. (in Chinese)
- [9] Lehman D E, Moehle J P. Seismic performance of well-confined concrete bridge columns[R]. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, 2000.
- [10] 罗征,李建中. 钢筋粘结滑移对钢筋混凝土墩柱抗震性能影响[J]. *石家庄铁道大学学报: 自然科学版*, 2011, (4): 7-11.
Luo Zh, Li J Zh. Reinforce bond-slip effect for reinforced concrete columns seismic performance[J]. *Journal of Shijiazhuang Tiedao University: Natural Science*, 2011, (4): 7-11. (in Chinese)
- [11] Filippou F C, Popov E P, Bertero V V. Effects of bond deterioration on hysteretic behavior of reinforced concrete joints [R]. Berkeley: University of California, 1983.
- [12] Mutsuyoshi H, Machida A. Dynamic properties of reinforced concrete piers[C]// *Proceeding of 8th World Conference on Earthquake Engineering*. San Francisco: Earthquake Engineering Research Institute, 1984: 299-306.
- [13] 李贵乾. 钢筋混凝土桥墩抗震性能试验研究及数值分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2010.
Li G Q. Experimental study and numerical analysis on seismic performance of reinforced concrete bridge columns[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
- [14] Kent D C, Park R. Flexural members with confined concrete[J]. *Journal of the Structural Division*, 1971, 97(7): 1969-1990.
- [15] Menegotto M. Method of analysis for cyclically loaded RC plane frames including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under combined normal force and bending [C]// *Proceedings of IABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated Loads*. Lisbon: IABSE, 1973: 15-22.
- [16] Zhao J, Sritharan S. Modeling of strain penetration effects in fiber-based analysis of reinforced concrete structures[J]. *ACI Structural Journal*, 2007, 104(2): 133-141.
- [17] Mazzoni S, McKenna F, Scott M H, et al. OpenSees command language manual [R]. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2006.
- [18] Banon H, Irvine H M, Biggs J M. Seismic damage in reinforced concrete frames[J]. *Journal of the Structural Division*, 1981, 107(9): 1713-1729.
- [19] 杨红,赵雯桐,莫林辉,等. 考虑节点非弹性变形的 RC 框架地震反应分析[J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2014, 41(9): 27-34.
Yang H, Zhao W T, Mo L H, et al. Seismic response analysis of RC frame considering inelastic deformations of beam-column joints[J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2014, 41(9): 27-34. (in Chinese)