

文章编号:1003-4722(2014)06-0057-06

# 基于变形能力的钢筋混凝土桥墩约束箍筋用量评价

马颖<sup>1</sup>,孙治国<sup>2</sup>,王东升<sup>2</sup>,石岩<sup>2</sup>

(1. 华北水利水电大学水利学院,河南 郑州 450045; 2. 大连海事大学  
道路与桥梁工程研究所,辽宁 大连 116026)

**摘要:** 针对地震作用下钢筋混凝土桥墩的变形能力要求,研究桥墩潜在塑性铰区约束箍筋的用量问题。借助美国 PEER 柱抗震性能试验数据库,整理了 35 根弯剪破坏墩柱的拟静力试验数据,通过统计分析评价我国桥梁抗震设计原《公路工程抗震设计规范》(JTJ 004-89)和现行《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01-2008)中最低约束箍筋用量对保证桥墩变形能力的可靠性,并与美国、欧洲主要桥梁抗震设计规范进行对比,之后建立了具有 85% 保证率的弯剪破坏桥墩极限位移角计算公式。研究结果表明:以 2% 桥墩极限位移角为评价目标,现行《公路桥梁抗震设计细则》满足桥墩变形能力要求;而以 3% 桥墩极限位移角为评价目标,该规范配箍要求略偏于不安全,在高地震危险区桥墩抗震设计时应予以注意。

**关键词:** 钢筋混凝土桥墩;约束箍筋;变形能力;极限位移角;设计规范;回归分析

**中图分类号:** U443.22;U442.5 **文献标志码:** A

## Evaluation of Amounts of Confining Stirrups Used for RC Bridge Columns Based on Deformation Capacity

MA Ying<sup>1</sup>, SUN Zhi-guo<sup>2</sup>, WANG Dong-sheng<sup>2</sup>, SHI Yan<sup>2</sup>

(1. School of Water Resources, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China; 2. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

**Abstract:** In accordance with the required deformation capacity for reinforced concrete (RC) bridge columns under the seismic action, the amounts of the confining stirrups used for the potential plastic hinge zones of the columns were studied. From the PEER (the Pacific Earthquake Engineering Research Center, USA) database for seismic performance testing of the columns, the quasi-static test data of 35 columns failing in flexure-shear were collected and sorted and through the statistical analysis, the reliability of the minimum amounts of the confining stirrups that could guarantee the deformation capacity of the columns as provided in the former code for the seismic design of bridges in China, the *Specifications of Earthquake Resistant Design for Highway Engineering* (JTJ 004-89) and in the current code, the *Guidelines for Seismic Design of Highway Bridges* (JTG/T B02-01-2008) was evaluated. The provisions of the minimum amounts of the stirrups in the above codes were then compared to those in the main bridge seismic design specifications of the USA and Europe and finally the formula of the ultimate drift angle having 85% as-

收稿日期:2014-03-28

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51408223);国家自然科学基金项目(51178071,51008041);教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-12-0751);辽宁省高等学校优秀人才资助计划(LJQ2013053)  
Project of Science Foundation for Young Scholars, National Natural Science Foundation of China (51408223); Project of National Natural Science Foundation of China (51178071,51008041); Project Funded by Program of Ministry of Education for New Century Excellent Talents in Universities (NCET-12-0751); Program of Excellent Talents of Liaoning Province Higher Education Institutions (LJQ2013053)

作者简介:马颖,讲师,E-mail:maying123@ncwu.edu.cn。研究方向:桥梁与结构工程抗震。

insurance ratio for the columns failing in flexure-shear was established. The results of the study show that by taking the 2% ultimate drift angle of a column as the evaluation target, the provisions in the current Chinese code JTG/T B02-01-2008 can satisfy the deformation capacity of the column while by taking the 3% ultimate drift angle as the target, the provisions on the amounts of the confining stirrups in the code are somewhat not safe. For the seismic design of the columns in the high risk seismic regions, due attention should be paid.

**Key words:** reinforced concrete bridge column; confining stirrup; deformation capacity; ultimate drift angle; design code; regression analysis

## 1 引言

塑性铰区配置合适的约束箍筋是保证钢筋混凝土桥墩延性抗震的重要因素,早期建造的钢筋混凝土桥墩因对抗剪及延性等问题认识不足,配箍率明显偏低,在历次地震中都有剪切或弯剪破坏发生。为此,国内、外桥梁抗震规范均分别从塑性铰区最低约束箍筋用量和构造措施两个方面对箍筋配置进行了规定,以保证钢筋混凝土桥墩具备足够的地震变形能力。我国桥梁延性抗震研究起步较晚,原《公路工程抗震设计规范》(JTJ 004-89)<sup>[1]</sup>(简称“89规范”)中采用箍筋间距( $s \leq 100$  mm)和箍筋直径( $d_v \geq 8$  mm)对圆形截面桥墩约束箍筋用量进行规定,采用0.3%作为矩形截面桥墩的最小配箍率,考虑因素比较单一且无明显理论依据。2008年汶川地震后施行的《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01-2008)<sup>[2]</sup>(简称“08细则”)中给出了考虑轴压比、纵筋配筋率、混凝土和箍筋强度等影响的桥墩塑性铰区最低约束箍筋用量计算公式,该公式为卓卫东等<sup>[3]</sup>在25个桥墩(柱)试件基础上建立的回归公式,并采用位移延性系数作为桥墩变形能力指标。美国AASHTO规范<sup>[4,5]</sup>采用ACI 318-08公式<sup>[6]</sup>的形式,考虑截面尺寸、混凝土和箍筋强度等因素,计算桥墩塑性铰区最低约束箍筋用量;美国Caltrans桥梁抗震设计规范<sup>[7]</sup>中的计算公式增加了轴力的影响。欧洲Eurocode 8抗震规范<sup>[8]</sup>主要考虑了轴压比及曲率延性系数的影响,分别给出延性(弯曲破坏)桥墩和有限延性(弯剪破坏)桥墩的最低约束箍筋用量计算公式。

随着基于性能(位移)抗震设计理论的发展,学者们越来越多地关注钢筋混凝土桥墩地震变形能力与约束箍筋用量间的量化关系。这些研究工作较多是借助美国PEER柱抗震性能试验数据库(PEER-Structural Performance Database),主要基于对试件弯曲破坏试验的回归分析获得的柱极限位移角(或位移延性系数)与其配箍特征、轴压比等参数的

量化关系。目前研究表明位移延性系数受桥墩剪跨比的影响较大,采用塑性铰区曲率延性系数作为桥墩变形能力指标更为合理,其次是桥墩极限位移角。孙治国等<sup>[9]</sup>分析表明曲率延性系数和极限位移角两者作为桥墩变形能力指标对于具有不同剪跨比的桥墩具有较好的一致性;并且针对国内规范发展,分别以2%和3%极限位移角为延性目标(前者适用于地震危险水平较低地区,而后者适用于地震危险水平较高地区),考虑轴压比和纵筋配筋率等的影响,建立了桥墩塑性铰区约束箍筋用量计算公式。

为给确定满足钢筋混凝土墩柱变形能力要求的约束箍筋用量提供参考,本文主要基于PEER柱抗震性能试验数据库中的弯剪破坏试件,通过统计分析评价“89规范”和“08细则”中最低约束箍筋用量对保证钢筋混凝土桥墩变形能力的可靠性,并与美国、欧洲主要桥梁抗震设计规范和孙治国等的建议公式进行比较,然后建立弯剪破坏桥墩极限位移角计算公式。

## 2 弯剪破坏桥墩试件试验数据及变形能力识别

### 2.1 弯剪破坏桥墩试件及参数

规范及建议公式通常隐含假定当桥墩满足最低约束箍筋用量时,将发生延性弯曲破坏。实际上,若某试件不满足其规定的配箍要求,虽发生了弯剪破坏,但只要其变形能力达到了相应的评价标准,则认为是工程可接受的;若某试件满足其规定的配箍要求但发生了弯剪破坏,且变形能力不能达到评价标准,则认为是危险的。为此,借助美国PEER柱抗震性能试验数据库,整理了35根弯剪破坏墩柱试件的拟静力试验数据进行分析。其中矩形截面试件16根,圆形截面试件19根。试件参数范围:21 MPa  $\leq$  混凝土抗压强度  $f'_c \leq$  86 MPa; 240 MPa  $\leq$  纵筋屈服强度  $f_y \leq$  510 MPa; 0.52%  $\leq$  纵筋配筋率  $\rho_t \leq$  5.21%; 240 MPa  $\leq$  箍筋屈服强度  $f_{yt} \leq$  691.5 MPa; 0  $\leq$  轴压比  $\eta_k \leq$  0.9; 1  $\leq$  剪跨比  $\lambda \leq$  3.2。

### 2.2 弯剪破坏桥墩试件变形能力

PEER 数据库仅有破坏方式分类(弯曲、弯剪和剪切)和荷载~位移滞回曲线数据,因此需要识别发生弯剪破坏桥墩的变形能力。本文以桥墩极限位移角  $R_u$  评价桥墩的变形能力,定义为桥墩极限位移与墩高的比值(%),即  $R_u = (\Delta_u/L) \times 100\%$ 。

本文弯剪破坏桥墩极限位移识别按文献[10]建议的方法:钢筋混凝土桥墩发生弯曲屈服后,当反复施加同一位移幅值  $\delta$  时,若其末次水平荷载(一般循环次数大于等于 3)小于同位移幅值下最大荷载值的 85%时,即  $F_{\delta, end} \leq 0.85F_{\delta, max}$ ,则定义首次施加位移幅值  $\delta$  所对应的水平荷载(最大荷载)为弯剪破坏桥墩试件的抗剪强度,与其对应的位移为极限位移  $\Delta_u$ ,柱试件滞回曲线见图 1。

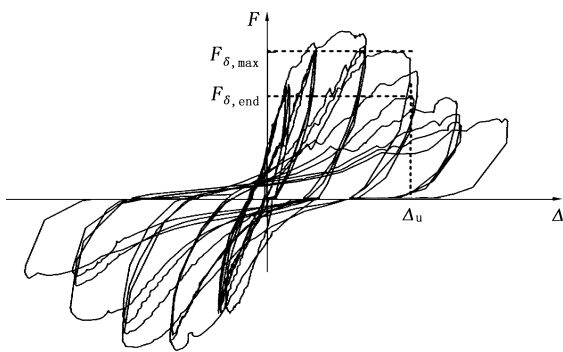


图 1 柱试件滞回曲线

Fig.1 Hysteretic Curves of Bridge Column Specimen

### 3 钢筋混凝土桥墩约束箍筋用量评价

将发生弯剪破坏的各桥墩试件实际配箍与我国“89 规范”和“08 细则”、美国 AASHTO LRFD 2007 和 Caltrans、欧洲 Eurocode 8 规范以及孙治国公式要求的配箍量进行比较,并将配箍比值与试件极限位移角的关系进行对比分析,以评价各规范或公式规定的约束箍筋用量对保证钢筋混凝土桥墩变形能力的可靠性。

#### 3.1 以 3% 极限位移角为目标进行评价

以极限位移角  $R_u \geq 3\%$  作为桥墩变形能力评价标准(适用于高地震危险区)。定义桥墩实际配箍与各规范及公式的要求配箍比值为  $\beta$ ,按截面形状和轴压比  $\eta_k$  将各个试件予以区分,见图 2。以  $R_u = 3\%$  及  $\beta = 1$  为限,将图 2 中的试件划分为 4 个区。理论上,假定当满足最低配箍要求时,桥墩试件仅发生弯曲破坏且变形能力足够。图 2 中,A 区的试件配箍不满足要求而极限位移角大于 3%,表明虽然

试件发生了弯剪破坏,但其变形能力达到了相应的评价标准,说明规范及公式的保守及可接受性;B 区的试件配箍满足要求而极限位移角小于 3%,表明试件不仅发生弯剪破坏且变形不满足评价标准,说明规范及公式的危险性。

由图 2 可知:

(1) 对于我国原“89 规范”,较多轴压比大于 0.2 的试件出现在 B 区中,矩形和圆形截面试件数量占有试件总数的比例分别达到了 37.5% 和 36.8%;A 区只有 1 个圆形截面试件并为轴压比小于 0.2 的试件。说明以 3% 极限位移角为评价目标,“89 规范”对矩形截面和圆形截面试件的配箍要求都将偏于不安全,对高轴压比情况尤甚。

(2) 对于我国现行“08 细则”,虽然试件出现在 B 区的比例明显下降(矩形和圆形截面试件比例分别为 21% 和 25%),但 B 区数据比例仍略高且大多数仍为轴压比大于 0.2 的试件。“08 细则”中试件(矩形)出现在 B 区的比例与美国 Caltrans 规范相比略高,但美国 Caltrans 规范 B 区试件更多位于分界线附近,且美国 Caltrans 规范对圆形截面试件表现出较大的安全性(没有圆形试件出现于 B 区)。

(3) 综合比较所有规范,最低约束箍筋用量对保证桥墩变形能力方面,欧洲 Eurocode 8 规范最为可靠,其位于 B 区试件仅占 10% 左右,而 A 区试件所占比例达到了 30%~40%。对于孙治国建议的公式,矩形截面试件中有 2 根位于 B 区(12.5%),4 根位于 A 区(25%);圆形截面试件中有 2 根位于 B 区(10.5%),1 根位于 A 区(5.26%),仅就位于 B 区的试件的比例而言与 Eurocode 8 规范相当。

(4) 美国 AASHTO LRFD 2007 规范对圆形截面试件表现出较大的保守性,而对于矩形截面试件又偏于危险。

#### 3.2 以 2% 极限位移角为目标进行评价

以极限位移角  $R_u \geq 2\%$  作为桥墩变形能力评价标准(适用于低地震危险区),试件极限位移角相对于实际配箍与各规范及公式配箍要求比值的分布情况见图 3,以  $R_u = 2\%$  及  $\beta = 1$  为限,将图 3 中的试件划分为 4 个区。

由图 3 可知:以 2% 桥墩极限位移角为目标进行评价时,我国原“89 规范”对矩形截面试件配箍要求仍有偏于危险的趋势(B 区占 25%),但对圆形截面试件配箍要求总体可以接受(B 区占 10%);现行“08 细则”无论对何种截面配箍要求都认为是合适的,圆形截面桥墩更具优势;孙治国公式仍表现出与

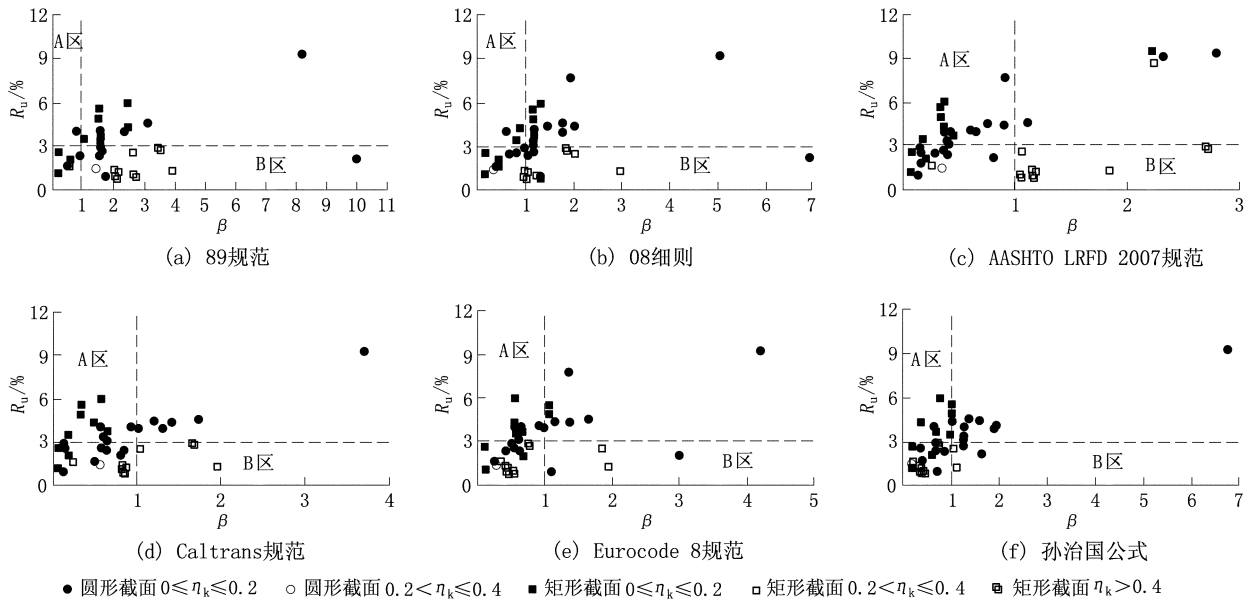


图2 试件极限位移角对于各规范及公式配箍要求的分布情况 ( $R_u=3\%$ )  
 Fig. 2 Ultimate Drift Angles of Bridge Column Specimens Versus Distribution of Stirrups Required in Different Codes and Formula ( $R_u=3\%$ )

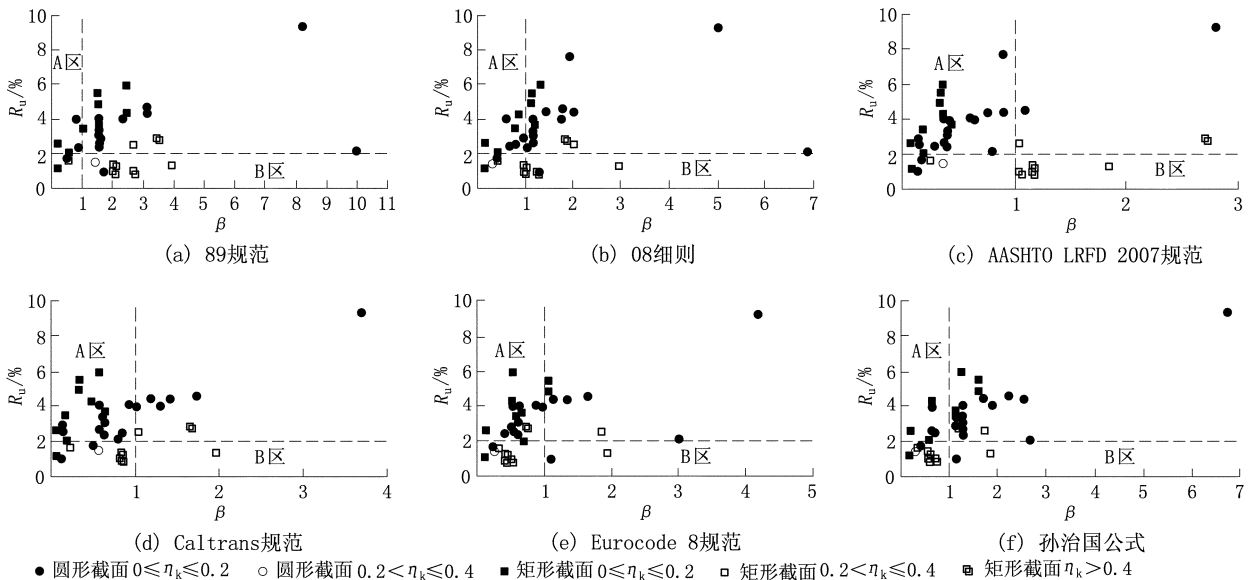


图3 试件极限位移角对于各规范及公式配箍要求的分布情况 ( $R_u=2\%$ )  
 Fig. 3 Ultimate Drift Angles of Bridge Column Specimens Versus Distribution of Stirrups Required in Different Codes and Formula ( $R_u=2\%$ )

欧洲 Eurocode 8 规范相近的统计结果及配箍水平；美国 Caltrans 规范对保证桥墩变形能力最为可靠，位于 B 区矩形截面试件仅占 6%，没有圆形截面试件位于 B 区。总体而言，各国规范及公式对不同截面配箍要求基本上都可满足桥墩 2% 极限位移角的变形能力，圆形截面桥墩表现出更大的偏安全性，仅美国 AASHTO LRFD 2007 和我国原“89 规范”对矩形截面的配箍要求偏于危险。

#### 4 弯剪破坏桥墩变形能力估计公式

桥墩发生弯剪破坏仍表现出具有一定的变形能力(有限延性,图 1)。孙治国等<sup>[9]</sup>整理了 234 根弯曲破坏矩形截面桥墩的拟静力试验数据,经回归分析初步建立了桥墩极限位移角计算公式。初步分析表明该公式及国内学者建议公式并不适合于弯剪破坏情况,将得到偏于危险的变形能力估计。故以本

文收集的 35 根试件为依据,考虑剪跨比的影响,基于回归分析获得弯剪破坏桥墩变形能力估计公式。

参考文献[9]并考虑剪跨比  $\lambda$  的影响,建立桥墩极限位移角回归公式:

$$R_u = A \cdot \rho_{sv} \frac{f_{yt}}{f'_c} \frac{(\lambda + E)}{(C - D\rho_t m) \eta_k} \frac{A_c}{A_g} + B \quad (1)$$

式中,  $\rho_{sv}$  为体积配箍率;  $f'_c$  为混凝土抗压强度;  $f_{yt}$  为箍筋屈服强度;  $\lambda$  为剪跨比;  $\eta_k$  为轴压比;  $\rho_t$  为纵筋配筋率;  $m = f_y / (0.85f'_c)$ , 其中  $f_y$  为纵筋屈服强度;  $A_g$  为桥墩截面面积;  $A_c$  为从箍筋外缘计算的桥墩核心面积;  $A, B, C, D$  为分析待定参数。

对式(1)进行非线性回归分析,得到桥墩极限位移角的计算公式(50%保证率)为:

$$R_u = 4.11 \rho_{sv} \frac{f_{yt}}{f'_c} \frac{(\lambda - 0.8)}{(1.97 - \rho_t m) \eta_k} \frac{A_c}{A_g} + 1.6 \quad (2)$$

具有 85% 保证率的弯剪破坏桥墩极限位移角公式为:

$$R_u = 4.11 \rho_{sv} \frac{f_{yt}}{f'_c} \frac{(\lambda - 0.8)}{(1.97 - \rho_t m) \eta_k} \frac{A_c}{A_g} + 0.5 \quad (3)$$

式(2)、式(3)计算值和实测值的比较见图 4。由图 4(a)可知,计算值与实测值吻合较好,统计相关系数  $R$  为 0.76。由图 4(b)可知,式(3)能基本保证极限位移角的实测值大于其计算值,说明本文提出的具有 85% 保证率的弯剪破坏桥墩极限位移角公式可用于预测地震作用下弯剪破坏桥墩的变形能力。

应当指出,本文建立的桥墩极限位移角公式存在两方面不足:一是试件数量仍显少,二是此公式仅适用于预测弯剪破坏桥墩的变形能力,计算前需要判别桥墩的破坏方式,判别方法参考文献[11]。

根据回归时采用的数据范围,对本文建议的弯剪破坏桥墩极限位移角计算公式的适用范围作如下限制:  $20 \text{ MPa} \leq \text{混凝土抗压强度 } f'_c \leq 80 \text{ MPa}$ ;  $240 \text{ MPa} \leq \text{箍筋屈服强度 } f_{yt} \leq 700 \text{ MPa}$ ;  $240 \text{ MPa} \leq \text{纵$

筋屈服强度  $f_y \leq 500 \text{ MPa}$ ;  $0.5\% \leq \text{纵筋配筋率 } \rho_t \leq 5.0\%$ ;  $0 \leq \text{轴压比 } \eta_k \leq 0.9$ ;  $1 \leq \text{剪跨比 } \lambda \leq 3$ 。

### 5 结 语

本文利用 PEER 柱抗震性能试验数据库中弯剪破坏试件,通过统计分析评价了桥梁抗震设计原“89 规范”和最新“08 细则”中最低约束箍筋用量对保证钢筋混凝土桥墩变形能力的可靠性,并与美国、欧洲主要桥梁抗震设计规范进行了对比。研究得到如下结论:

(1) 以 3% 极限位移角为评价目标(适用于高地震危险区),原“89 规范”对矩形截面和圆形截面的配箍要求都将存在较大危险性;现行“08 细则”对不同截面的配箍要求略偏于不安全,对高轴压比桥墩情况尤甚。

(2) 以 2% 极限位移角为评价目标(适用于低地震危险区),除原“89 规范”对矩形截面的配箍要求偏于不安全外,原“89 规范”对于圆形截面和“08 细则”对不同截面均认为满足变形能力要求。

(3) 孙治国建议的塑性较区配箍公式以不同的设计极限位移角目标相区分,基本能达到预期的变形能力,并且配箍要求接近于欧洲 Eurocode 8 规范。

总体上看我国要求的桥墩配箍水平仍低于美国、欧洲等规范,在高地震危险区桥墩抗震设计时应予以注意。本文综合考虑轴压比、剪跨比、纵筋和箍筋等影响因素给出了具有 85% 保证率的弯剪破坏桥墩极限位移角计算公式,可为相关研究提供参考。另外,本文的研究工作概略总结了已建桥墩的变形能力,汶川地震前已建桥墩依据“89 规范”设计,其极限位移角对圆形截面桥墩可达 2% 以上,而对于矩形截面桥墩可能不足 2%;汶川地震后按“08 细则”设计桥墩的极限位移角可达 2%~3%。

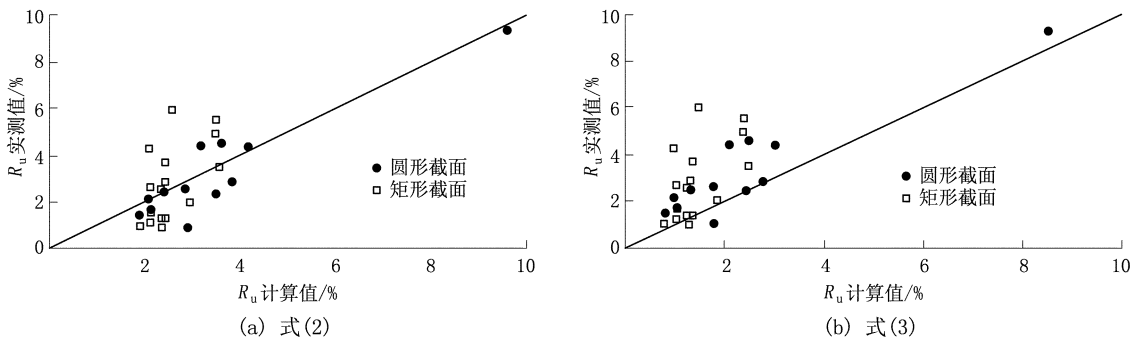


图 4 计算值与实测值比较  
Fig. 4 Comparison of Calculated and Measured Values

## 参考文献 (References):

- [1] JTJ 004-89, 公路工程抗震设计规范[S].  
(JTJ 004-89, Specifications of Earthquake Resistant Design for Highway Engineering[S].)
- [2] JTG/T B02-01-2008, 公路桥梁抗震设计细则[S].  
(JTG/T B02-01-2008, Guidelines for Seismic Design of Highway Bridges[S].)
- [3] 卓卫东, 范立础. 延性桥墩塑性铰区最低约束箍筋用量[J]. 土木工程学报, 2002, 35(5): 47-51.  
(ZHUO Wei-dong, FAN Li-chu. Minimum Quantity of Confining Lateral Reinforcement in the Potential Plastic Hinge Regions of Ductile Bridge Piers[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(5): 47-51. in Chinese)
- [4] AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 2007 [S].
- [5] AASHTO Standard Specification for Highway Bridges 1996[S].
- [6] ACI 318-08, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary[S].
- [7] Caltrans-2003, Bridge Design Specifications[S].
- [8] Eurocode 8-1998, Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures—Part 2: Bridges[S].
- [9] 孙治国, 王东升, 杜修力, 等. 钢筋混凝土桥墩塑性铰区约束箍筋用量研究[J]. 中国公路学报, 2010, 23(3): 48-57.  
(SUN Zhi-guo, WANG Dong-sheng, DU Xiu-li, *et al.*. Research on Amounts of Confining Reinforcement in Potential Plastic Hinge Regions of RC Bridge Pier Columns[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(3): 48-57. in Chinese)
- [10] 王东升, 司炳君, 孙治国, 等. 地震作用下钢筋混凝土桥墩塑性铰区抗剪强度试验[J]. 中国公路学报, 2011, 24(2): 34-41.  
(WANG Dong-sheng, SI Bing-jun, SUN Zhi-guo, *et al.*. Experiment on Shear Strength of Reinforced Concrete Bridge Column in Plastic Hinge Zone Under Seismic Effect[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(2): 34-41. in Chinese)
- [11] 马颖. 钢筋混凝土柱地震破坏方式及性能研究(博士学位论文)[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.

(MA Ying. Study on Seismic Failure Modes and Seismic Behavior of Reinforced Concrete Columns (Doctorate Dissertation)[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012. in Chinese)



MA Ying

马颖

1982-，女，讲师

2005年毕业于华北水利水电学院水利工程专业，工学学士，2008年毕业于华北水利水电学院水利工程专业，工学硕士，2012年毕业于大连理工大学结构工程专业，工学博士。研究方向：桥梁与结构工程抗震

E-mail: maying123@ncwu.edu.cn



SUN Zhi-guo

孙治国

1980-，男，讲师

2003年毕业于青岛理工大学土木工程专业，工学学士，2006年毕业于大连理工大学结构工程专业，工学硕士，2012年毕业于中国地震局工程力学研究所结构工程专业，工学博士。研究方向：桥梁抗震

E-mail: szg\_1999\_1999@163.com



WANG Dong-sheng

王东升

1974-，男，教授

1995年毕业于武汉水利电力大学土木工程专业，工学学士，1998年毕业于中国地震局工程力学研究所防灾减灾及防护工程专业，工学硕士，2002年毕业于中国地震局工程力学研究所防灾减灾及防护工程专业，工学博士。研究方向：桥梁抗震

E-mail: dswang@dlmu.edu.cn



SHI Yan

石岩

1985-，男，博士生

2008年毕业于华北科技学院土木工程专业，工学学士，2011年毕业于石家庄铁道大学桥梁与隧道工程专业，工学硕士。研究方向：桥梁抗震理论与减隔震技术

E-mail: syky86@163.com

(编辑: 叶青)