

文章编号: 1000-4750(2015)05-0028-09

考虑非线性剪切效应的 RC 桥墩抗震分析模型

孙治国¹, 陈 灿¹, 司炳君¹, 王东升²

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

摘 要: 剪跨比较小或配箍不足的钢筋混凝土桥墩易发生剪切破坏, 而现有的纤维单元模型忽略了剪切变形, 不能合理评估弯剪或剪切破坏桥墩的抗震能力。为有效模拟剪切作用影响下钢筋混凝土桥墩的抗震性能, 以 36 个剪切及弯剪破坏圆形截面钢筋混凝土桥墩抗震拟静力试验结果为依据, 建立了墩柱剪切破坏时墩底转角的计算公式。利用 OpenSees 分析平台, 建立了基于非线性纤维梁柱单元和零长度剪切弹簧单元的数值分析模型, 以此来考虑弯曲和剪切效应的耦合作用。以数值模型中墩底转角来监测试件剪切破坏的发生, 剪切破坏发生前模型以纤维梁柱单元模拟的弯曲变形为主; 此后, 桥墩地震反应以剪切弹簧单元控制, 以模拟试件由于剪切破坏导致的强度和刚度退化等行为。通过对 12 个剪切及弯剪破坏圆形截面桥墩抗震拟静力试验的模拟结果表明, 模拟的滞回曲线与试验结果吻合较好, 并且能很好地模拟钢筋混凝土结构由于剪切作用引起的刚度与强度的退化现象, 验证了模型的合理性。

关键词: 桥梁抗震; 钢筋混凝土桥墩; 非线性剪切效应; 模拟; OpenSees; 变形能力

中图分类号: U443.22 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.04.0313

SEISMIC ANALYSIS MODEL CONSIDERING NONLINEAR SHEAR EFFECT FOR RC BRIDGE PIERS

SUN Zhi-guo¹, CHEN Can¹, SI Bing-jun¹, WANG Dong-sheng²

(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: Bridge piers with low aspect ratio or low transverse reinforcement are vulnerable to shear failure under seismic action. The existing fiber element model ignores the nonlinear shear deformation of piers and could not be used to model the seismic behavior of bridge piers failed in shear or flexure-shear modes. In order to simulate the seismic behavior of bridge piers, a rotation-based shear failure model was built based on 36 quasi-static test results of circular piers failed in shear or flexural-shear modes. A numerical analysis model comprising the nonlinear fiber beam column element and the zero-length shear spring element was built on OpenSees analysis platform to simulate flexural shear interaction of piers. The rotation of the end region of the pier in the analysis model was used to monitor shear failure initiation of the specimen. Before shear failure, the cyclic behavior of the pier was controlled by fiber beam column element. Then, seismic response of the pier was governed by the shear spring element to simulate the strength and stiffness degradation behavior as a result of the shear failure. The analysis model was verified through a comparison with the quasi-static test results of 12 nonlinear shear dominated circular bridge piers. The results indicate that the simulated hysteretic curves agree

收稿日期: 2014-04-15; 修改日期: 2014-09-04

基金项目: 国家 973 项目(2011CB013605); 国家自然科学基金项目(50978042, 51008041); 中国博士后科学基金项目(2013M540226, 2014T70250)

通讯作者: 司炳君(1971—), 男, 黑龙江宾县人, 教授, 博士, 从事桥梁与结构工程抗震研究(E-mail: sibingjun@aliyun.com).

作者简介: 孙治国(1980—), 男, 山东德州人, 讲师, 博士后, 从事桥梁抗震研究(E-mail: szg_1999_1999@163.com);

陈 灿(1988—), 男, 安徽六安人, 工程师, 硕士, 从事结构工程抗震研究(E-mail: chencan1221@126.com);

王东升(1974—), 男, 内蒙古哲里木盟人, 教授, 博士, 博导, 从事桥梁抗震研究(E-mail: dswang@dmlu.edu.cn).

well with the test data, the stiffness and strength degradation of the piers as a result of shear failure could be well simulated and the rationality of the model is verified.

Key words: seismic design of bridges; RC bridge piers; nonlinear shear effect; simulation; OpenSees; deformation capacity

剪跨比较低的矮墩在我国铁路和公路桥梁中广泛应用,且配箍不足是早期设计桥墩的典型缺陷。实际震害和大量试验结果表明,此类墩柱在强震下易发生剪切破坏,引起承载力和刚度的迅速退化,延性较差,属典型脆性破坏模式,应予以重视和避免^[1-2]。发展此类构件的非线性数值分析模型,是揭示桥梁抗震薄弱环节、认识全桥地震破坏过程和破坏机理的前提。近年来,随着纤维单元模型的推广和改进,已经能够对钢筋混凝土墩柱的弯曲响应和纵筋拔出变形进行较为准确的模拟^[3-8],但传统的纤维单元模型忽略了构件的剪切变形成分,对于发生剪切或弯剪破坏的钢筋混凝土构件,不能对其抗震性能进行准确的模拟分析。为有效考虑钢筋混凝土墩柱在强震下的非线性剪切变形,国内外学者进行了大量研究工作并取得了不少成果,其中以剪切弹簧单元模拟非线性剪切变形,并与弯曲变形串联,是钢筋混凝土结构弯剪数值分析宏观模型的主要思路。Lee 和 Elnashai^[9]基于纤维单元程序 ADAPTIC 建立了钢筋混凝土墩柱的弯剪数值分析模型,以纤维梁柱单元模拟试件的弯曲变形,非线性剪切变形以与纤维单元串联的剪切弹簧单元模拟,通过修正的压力场理论 MCFT(The Modified Compression Field Theory, MCFT)计算试件非线性剪切变形的骨架曲线并采用 Ozcebe 与 Saatcioglu^[10]建议的剪切滞回模型,对弯剪作用下钢筋混凝土墩柱的滞回曲线进行了成功的模拟分析。Elwood^[11]基于试验结果的统计分析建立了钢筋混凝土柱弯剪及后继发生轴压破坏时的变形能力经验公式,以此为基础定义了数值模型中剪切及轴压破坏的失效面,基于 OpenSees 数值分析平台,利用纤维梁柱单元和剪切弹簧单元耦合,建立了专门针对弯剪及轴压失效破坏钢筋混凝土框架柱滞回分析模型。需要说明,由于所用弹簧单元引入了柱剪切及轴压破坏的失效准则,相对于已有的弯剪数值分析模型,Elwood 模型在模拟弯剪破坏钢筋混凝土柱在倒塌阶段的反应获得了很好的精度。但模型中柱剪切及轴压破坏的发生依赖于所定义的破坏面,限制了模型的适用范围。为克服上述缺陷,Shoraka 等^[12]

基于轴力-剪切-弯曲耦合作用分析 ASFI (Axial-Shear-Flexure Interaction, ASFI)对柱的剪切破坏点进行了理论性的界定,与试验结果的对比表明改进模型获得了很好的模拟效果。Ghannoum 等^[13]则以框架柱塑性铰区转角为指标,定义了弯剪破坏钢筋混凝土柱的破坏准则,对框架柱倒塌阶段显著强度和刚度退化行为进行了较为准确的模拟。我国学者^[14-17]也对钢筋混凝土墩柱的弯剪数值分析模型进行了初步的探索。

注意到 Elwood^[11]与 Ghannoum^[13]定义的墩柱剪切破坏准则主要基于弯剪破坏的钢筋混凝土框架柱试验结果,试件为矩形截面,未涉及圆形截面桥墩的分析。有必要将钢筋混凝土结构弯剪数值分析的思路拓展至圆形截面钢筋混凝土桥墩,特别是倒塌阶段存在严重刚度和强度退化的桥墩试件。

本文发展了圆形截面桥墩弯剪数值分析模型。首先收集了 36 个弯剪和剪切破坏圆形截面钢筋混凝土桥墩抗震拟静力试验数据,基于数值分析手段并与试验结果对比分离了桥墩剪切破坏时塑性铰区墩底转角,通过回归分析建立了桥墩发生剪切破坏时墩底转角计算公式,以此确定数值模型中桥墩剪切破坏的发生时刻。在此基础上发展了考虑非线性剪切效应的桥墩抗震数值分析模型,最后以 12 个圆形截面钢筋混凝土墩柱拟静力试验结果为依据,对模型合理性进行了验证。

1 墩底转动变形关系的建立

1.1 弯剪数值分析模型的基本框架

根据钢筋混凝土结构弯剪数值分析宏观模型的基本假定,钢筋混凝土桥墩总侧向位移可分解为受弯反应和受剪反应之和。其中受弯反应代表桥墩弯曲变形和锚固纵筋在底座中拔出变形,在数值模型中用纤维梁柱单元和零长度转动弹簧单元模拟;受剪反应代表柱的剪切变形,在模型中采用零长度剪切弹簧单元模拟。数值模型中受弯与受剪反应保持串联关系,承受共同的侧向荷载,如图 1 所示。

图 2 表示桥墩在地震作用下的两种变形成分及耦合机理。两种反应中,由弱者主导桥墩的总反应。

对弯曲破坏桥墩, 弯曲反应对应的极限荷载小于试件抗剪强度(对应抗剪曲线 1), 试件总变形始终以弯曲为主, 可获得如图 2(c)中位移反应 1 所示的荷载-变形曲线。对剪切破坏的桥墩试件, 抗剪曲线 2 对应的极限荷载小于抗弯反应对应的极限荷载。在剪切破坏前, 受弯反应主导着柱的受力性能, 受剪反应保持与受弯反应相同的剪力且处于弹性状态。剪切破坏发生后, 试件总变形以剪切为主, 可获得如图 2(c)中位移反应 2 所示的荷载-变形曲线。本文主要关注发生第 2 类破坏模式的桥墩试件。

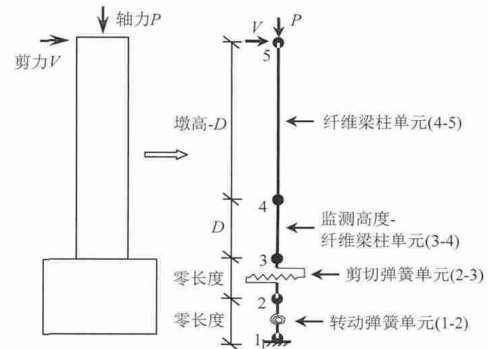


图 1 桥墩弯剪数值分析模型

Fig.1 Flexural-shear analysis model of piers

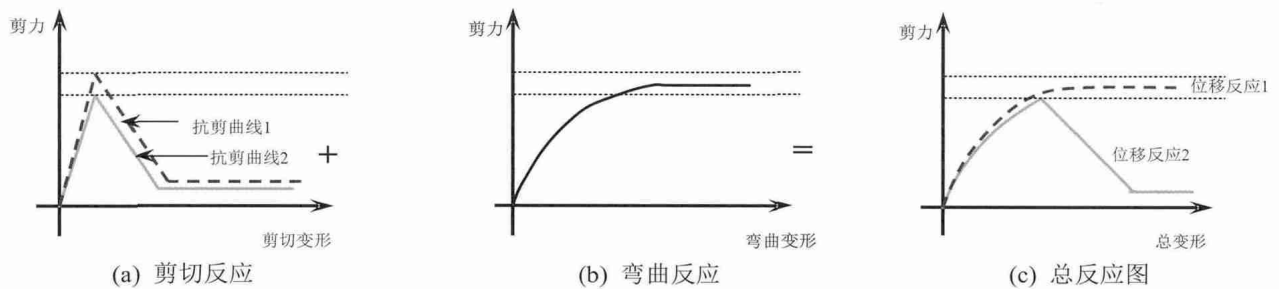


图 2 桥墩的变形成分

Fig.2 Deformation components for RC bridge piers

1.2 墩柱剪切破坏时转动变形的取值

桥墩在剪切破坏之前, 弯曲反应主导墩柱的受力状态; 当桥墩的抗剪能力低于抗弯能力时, 受力状态转为剪切控制。弯剪数值分析模型中需要定义一个破坏面以界定剪切破坏发生的时刻, 数值模型中桥墩变形达到剪切破坏面前, 纤维梁柱单元变形主导试件变形; 达到剪切破坏面后, 零长度剪切弹簧单元主导试件变形。Ghannoum^[13]与 Leborgne^[18]的研究均表明, 以桥墩塑性铰区转角来定义试件剪切破坏时刻具有非常高的精度, 因此, 只要能够对桥墩剪切破坏时刻塑性铰区转角进行准确的估计, 便可以通过数值分析手段对此类构件抗震性能进行准确的模拟。

自 1994 年美国 Northridge 地震中大量桥墩发生剪切破坏后, 国内外学者完成了大量剪切及弯剪破坏桥墩抗震拟静力试验。遗憾的是绝大多数桥墩抗震试验均记录墩顶滞回曲线, 桥墩塑性铰区转角的有效试验数据非常少, 难以利用已完成的试验数据建立墩柱剪切破坏时转动变形的统计公式。

为克服上述困难, 借鉴 Ghannoum^[13]与 Leborgne^[18]对矩形截面墩柱分析的思路, 基于剪切及弯剪破坏圆形墩柱抗震试验结果, 并借鉴数值模拟手段提取剪切破坏时刻的桥墩塑性铰区转角 θ_f ,

建立 θ_f 的统计公式并最终应用于剪切及弯剪破坏桥墩的滞回性能模拟, θ_f 提取的具体步骤如下:

1) 根据弯剪或剪切破坏圆形桥墩试件抗震拟静力试验获得的滞回曲线, 确定试件发生剪切破坏时的墩顶位移。

2) 基于 OpenSees 建立桥墩弯剪数值分析模型, 模型中考虑桥墩弯曲变形、纵筋拔出变形和剪切变形, 弯曲变形以纤维梁柱单元模拟, 纵筋拔出变形以零长度转动弹簧单元模拟, 剪切变形以剪切弹簧单元模拟, 且试件剪切刚度按照下式计算:

$$K_s = \frac{GA_e}{L} \quad (1)$$

式中: G 为混凝土剪切模量; A_e 为桥墩截面面积; L 为墩高。需要注意, 一般认为桥墩塑性转动集中于塑性铰区 D_f (截面直径)长度范围, 为提取 D_f 区域的转角, 桥墩塑性铰区 D_f 长度内需建立 1 个纤维梁柱单元, 图 1 为本文建立的桥墩弯剪数值分析模型。

3) 基于弯剪数值分析模型对试件按照试验加载历程加载至剪切破坏时的墩顶位移, 计算 D_f 长度内的层间转角 θ_{Df} 以及纵筋拔出引起的转角 θ_s , 两者之和即为 θ_f 。图 3 为对 Arakawa 等^[19]完成的剪切破坏试件 28、Wong 等^[20]完成的弯剪破坏试件 2 剪切

破坏前滞回曲线的模拟结果。将剪切破坏时墩顶位移指标(试验直接获得)转为指定区域内 D_r 长度的转角指标(数值模型获得), 以此建立剪切破坏发生时塑性铰区转角计算公式。

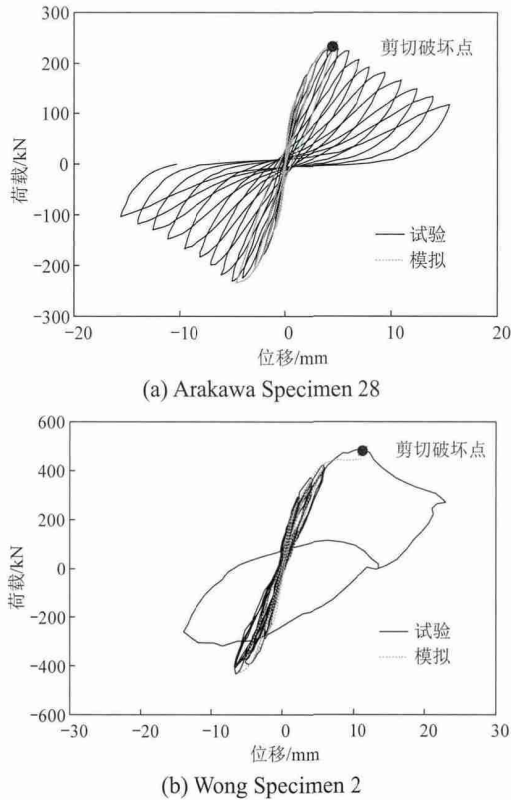


图3 试件剪切破坏前滞回曲线的模拟
Fig.3 Simulation of hysteretic curves before shear failure of specimens

需要强调, 图3模拟滞回曲线与试验结果的对比如, 本文建立弯剪数值分析模型在墩柱剪切破坏前具有足够的精度, 这主要是由于剪切破坏前试

件反应以弯曲为主, 此时以纤维梁柱单元进行模拟具有足够的精度。

1.3 转角 θ_f 的计算

为建立圆形截面钢筋混凝土桥墩发生剪切破坏时转角 θ_f 的计算公式, 基于 PEER(Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER)墩柱抗震性能数据库, 共统计了 36 个弯剪和剪切破坏圆形截面钢筋混凝土桥墩抗震试验数据, 通过 OpenSees 软件分离了剪切破坏时的弯曲及纵筋拔出引起的转角之和 θ_f 。表 1 给出了 36 个墩柱的主要试验参数, 包括试件编号、截面直径 D_r 、箍筋直径 d_t 、轴压比 η 、剪跨比 λ 、截面核心尺寸 D_c (箍筋核心之间的距离)、箍筋间距 s 、混凝土抗压强度 f'_c 、箍筋屈服强度 f_{yt} 、纵筋屈服强度 f_y 以及试件的最终破坏形态等。

说明一点, Ghannoum^[13]和 Leborgne^[18]在建立矩形截面墩柱 θ_f 计算公式时, 主要采用的是弯剪破坏试件。本文则包括了剪切破坏试件, 主要原因有 3 个, 其一, 相比矩形截面墩柱, 目前国内外完成的圆形截面桥墩抗震有效试验数据较少, 仅以弯剪破坏试件进行统计数据不足; 其二, 实际试验过程中, 试件弯曲与剪切破坏的界定标准本身不严格, 因此本文不再进行严格划分; 其三, 发展数值模型的主要目的在于对现有桥墩抗震性能的估计, 而对桥墩实际可能发生的破坏形态进行判别较为困难, 本文希望建立针对桥墩弯剪及剪切破坏的统一计算模型, 因此不再对两种破坏形态进行区分, 而直接通过 θ_f 值控制桥墩实际的变形能力。

表 1 钢筋混凝土圆形桥墩试验数据
Table 1 Test data for circular RC bridge piers

作者	试件编号	θ_f	D_r/m	d_t/mm	η	λ	D_c/mm	s/mm	f'_c/MPa	f_{yt}/MPa	f_y/MPa	破坏形态
Arakawa ^[19]	NO.1	0.00976	275	6	0	1.09	235	100	28.8	368	364	剪切
	NO.2	0.01275	275	6	0	1.09	235	50	29.3	368	365	剪切
	NO.4	0.0066	275	6	0.115	1.09	235	100	29.8	368	366	剪切
	NO.6	0.01	275	6	0.12	1.09	235	50	28.6	368	366	剪切
	NO.8	0.00944	275	6	0.11	1.09	235	35	31.4	368	366	剪切
	NO.10	0.0131	275	6	0.114	1.09	235	50	30.2	368	366	弯剪
	NO.12	0.00613	275	6	0.247	1.09	235	100	27.8	368	366	剪切
	NO.13	0.00945	275	6	0.225	1.09	235	50	30.5	368	366	剪切
	NO.14	0.0126	275	6	0.219	1.09	235	35	31.3	368	366	剪切
	NO.15	0.0143	275	6	0	1.64	235	75	32	381	363	弯剪
	NO.17	0.0096	275	6	0.11	1.09	235	75	31.3	368	366	剪切
	NO.19	0.01	275	6	0.11	1.64	235	75	31.2	368	366	剪切

(续表)

作者	试件编号	θ_f	D_f/m	d_f/mm	η	λ	D_c/mm	s/mm	f'_c/MPa	f_{yt}/MPa	f_y/MPa	破坏形态
Arakawa ^[19]	NO.22	0.0121	275	6	0.167	1.64	235	75	20.5	381	363	剪切
	NO.23	0.01263	275	6	0.081	1.64	235	75	42.2	381	363	弯剪
	NO.24	0.0094	275	6	0.221	1.09	235	75	31.1	381	363	剪切
	NO.25	0.0107	275	6	0.231	1.64	235	75	29.7	381	363	剪切
	NO.27	0.0105	275	6	0.363	1.64	235	75	18.9	381	363	剪切
Petrovski ^[21]	M2E1	0.0298	307	6	0.055	2.93	235	75	35.9	240	240	弯剪
	M2E2	0.0227	307	6	0.1	2.92	235	75	34.4	240	240	弯剪
Wong ^[20]	No.2	0.01258	400	6	0.39	2	364	65	37	340	475	弯剪
Priestley ^[22]	NR1	0.02553	610	6.4	0.057	1.5	578	76.2	30	361	462	弯剪
	NO.2	0.0232	400	6	0	2	364	60	37.2	328	296	弯剪
	NO.3	0.0346	400	6	0	2.5	364	60	36	328	436	弯剪
	NO.4	0.0191	400	10	0	2	360	165	30.6	316	436	剪切
	NO.5	0.0278	400	6	0	2	364	40	31.1	328	436	弯剪
Ghee ^[23]	NO.6	0.0161	400	6	0	1.5	364	60	30.1	328	436	剪切
	NO.7	0.014	400	6	0	2	364	80	29.5	372	448	剪切
	NO.8	0.0348	400	6	0.2	2	364	30	28.7	372	448	弯剪
	NO.11	0.0196	400	6	0.2	2	364	60	29.9	372	448	弯剪
	NO.12	0.0297	400	6	0.1	1.5	364	30	28.6	328	436	弯剪
Kenchiku ^[24]	NO.13	0.04	400	6	0.1	2	364	30	36.2	326	436	弯剪
	NO.19	0.014	400	6	0.1	2.5	364	80	34.4	326	436	剪切
	ws21bs	0.0212	250	8.9	0.194	1	170	33	26.5	335	375	弯剪
	ws25bs	0.0176	250	8.9	0.097	1	170	46	26.5	335	382	弯剪
	Hamilton ^[25]	UC14	0.03475	406.4	4.5	0	2.58	771.2	171	34.7	691.5	458.5

转角 θ_f 反映的是剪切破坏之前试件的弯曲及纵筋拔出变形能力,桥墩延性越大,墩底转动变形能力越大。Ghannoum^[13]基于56个弯剪破坏矩形截面墩柱进行回归分析,建议了如下矩形截面墩柱剪切破坏时刻的 θ_f 计算公式:

$$\theta_f = 0.044 - 0.017 \frac{s}{d} - 0.021\eta - 0.024 \frac{v}{\sqrt{f'_c}} \geq 0.009 \quad (2)$$

式中: d 为自截面受压边缘至最外侧受拉纵筋中心之间的距离; v 为截面剪应力,按下式计算:

$$v = \frac{V}{bd} \quad (3)$$

式中: V 为墩柱承受剪力; b 为垂直加载方向截面宽度。

Leborgne^[18]则针对矩形截面墩柱建议了如下回归公式:

$$\theta_f = 0.027 - 0.01 \frac{s}{d} - 0.033\eta \geq 0.006 \quad (4)$$

Ghannoum 与 Leborgne 的研究均表明,矩形截面墩柱剪切破坏时塑性铰转角主要与轴压比、箍筋间距、截面尺寸以及截面所受剪力有关,考虑圆

形截面桥墩特点,本文建立了如下回归公式进行分析:

$$\theta_f = A + B\eta + C \frac{s}{D_c} + D\lambda \quad (5)$$

$$\theta_f = A + B\eta + D\lambda + E \frac{\rho_s f_{yt}}{f'_c} \quad (6)$$

$$\theta_f = A + B\eta + C \frac{s}{D_c} + D\lambda + E \frac{\rho_s f_{yt}}{f'_c} \quad (7)$$

上述各式中 A 、 B 、 C 、 D 、 E 均为回归系数,各式中未考虑截面剪应力 v ,主要是因为目前各常规抗剪强度模型无法对桥墩抗剪强度进行较为准确的预测,且容易增加 θ_f 计算的复杂性。另外,由于桥墩剪跨比 λ 和箍筋配置对桥墩抗震变形能力影响显著,式(6)、式(7)中增加剪跨比和力学含箍率的影响因素,圆形截面配箍率 ρ_s 按下式计算:

$$\rho_s = \frac{4A_{sp}}{sD_c} \quad (8)$$

式中, A_{sp} 为单根箍筋截面积。

根据本文收集的36根圆形截面墩柱,分别按照式(5)~式(7)进行回归分析,结果为:

$$\theta_f = 0.017 - 0.019\eta - 0.045 \frac{s}{D_c} + 0.008\lambda \quad (9)$$

$$\theta_f = -0.0027 - 0.023\eta + 0.012\lambda + 0.03 \frac{\rho_s f_{yt}}{f'_c} \quad (10)$$

$$\theta_f = 0.011 - 0.02\eta - 0.04 \frac{s}{D_c} + 0.01\lambda + 0.022 \frac{\rho_s f_{yt}}{f'_c} \quad (11)$$

式(9)~式(11)的相关系数 R 分别为 0.82、0.72 和 0.84, 显然式(11)精度最高, 式(10)精度最差。分析式(11), 可发现桥墩转动能力随轴压比、箍筋间距增大而减少, 随剪跨比和力学含箍率增加而增加, 这也与我们对桥墩抗震能力经验认识吻合, 因此本文建议以式(11)作为圆形截面桥墩剪切破坏时刻墩底塑性铰区 D_r 长度范围内转角的计算公式。图 4 为式(11)计算的 θ_f 值与基于数值模型提取结果的对比情况。

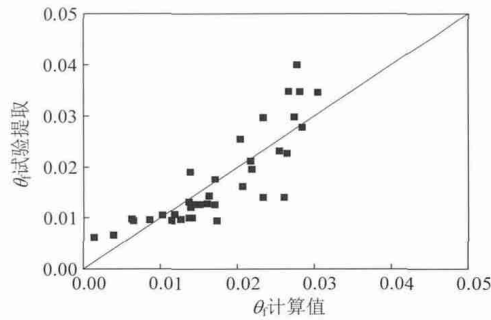


图 4 θ_f 的计算值和试验提取值的对比

Fig.4 Comparison between the calculated and test extracted θ_f

2 剪切变形的模拟

2.1 剪切弹簧单元荷载-位移骨架曲线

赋予图 1 中的剪切弹簧单元荷载-位移骨架曲线及滞回规则, 反复荷载下通过剪切弹簧单元模拟桥墩的剪切变形。图 5 为剪切弹簧单元的骨架曲线, 假定剪切破坏前剪切弹簧单元刚度始终为弹性, 弹性剪切刚度采用式(1)计算。当数值模型中监测到塑性铰区转角达到所定义的极限转角 θ_f 时, 剪切弹簧单元便达到了剪切破坏点 (Δ_{sf}, V_{sf}) , 其中 Δ_{sf} 、 V_{sf} 是纤维模型塑性铰区 D_r 长度内转角达到 θ_f 时对应的剪切变形和承载力。到达剪切破坏点之后, 桥墩的受力性能开始由弯曲控制转为剪切控制, 剪切弹簧单元的强度开始按照退化斜率 K_{deg} 退化至残余抗剪强度 V_r 。各参数定义参考 Leborgne 模型^[18], 详见式(12)~式(14)。

$$\frac{\Delta_r}{L} = -0.16 - 15.4\rho_s - 0.009 \frac{l_d}{d_b} + 0.7 \frac{A_c}{A_c}$$

$$0.58 \frac{f_y \rho_l}{f'_c} \geq 0.02 \quad (12)$$

$$K_{deg} = \frac{V_{sf}}{\Delta_r} \quad (13)$$

$$V_r = 0.2V_{sf} \quad (14)$$

式中: Δ_r 为剪切破坏之后的残余变形; l_d 为表征纵筋所受约束效应的长度; d_b 为纵筋直径; A_c 为核心混凝土面积; ρ_l 为纵筋配筋率, K_{deg} 为剪切强度退化斜率; V_{sf} 为剪切破坏时对应的剪力; V_r 为残余抗剪承载力。

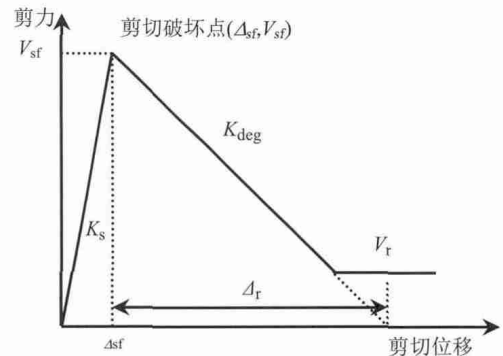


图 5 剪切弹簧单元骨架曲线

Fig.5 Skeleton curve of shear spring element

2.2 剪切弹簧单元滞回规则

剪切弹簧单元滞回规则借鉴 Leborgne 模型^[18], 剪切破坏前, 剪切弹簧单元处于弹性阶段; 当塑性铰区转角 θ_f 达到所定义的剪切破坏转角时, 发生剪切破坏, 剪切弹簧单元的强度开始下降, 位移反应转由剪切控制, 此时定义的非线性剪切材料控制着墩柱的滞回反应。数值模型中采用 Pinch Limit State Material 来模拟剪切弹簧单元的荷载-位移关系, 在循环往复荷载作用下, 该材料能够通过能量损伤和位移损伤自动修正每个循环下剪切弹簧单元的强度和刚度。同时剪切弹簧单元的卸载点、卸载捏缩点和加载捏缩点参数可通过试件的尺寸和材料信息来定义, 可参考文献^[18]取值。

3 数值分析模型的建立及验证

3.1 模型建立

采用图 1 建立的数值分析模型, 以零长度转动弹簧单元模拟纵筋拔出变形, 节点 1、节点 2 间为转动弹簧单元, 坐标位置相同; 节点 2、节点 3 间的零长度剪切弹簧单元模拟剪切变形, 节点 2 与节点 3 初始坐标位置相同, 沿侧向力方向可产生剪切变形; 节点 3 与节点 5 之间的纤维梁柱单元模拟弯

曲变形,且节点3、节点4间长度为 D_r ,以此区域内的转角变形及纵筋拔出变形之和 θ_r 监测试件剪切破坏的发生。当数值模型中两者的总转角达到式(11)定义的转角时,试件开始出现剪切强度退化现象,随后剪切反应控制墩柱的受力状态。

混凝土选用基于 Kent-Scott-Park 模型的 Concrete01 模型,并且不考虑混凝土的受拉应力和刚度,其应力-应变骨架曲线分为两段,上升段为抛物线,下降段为直线,达到残余强度后做水平处理,强度不再降低,模型中考虑了箍筋对混凝土的约束效应。钢筋选用 Steel02,其应力应变关系是基于 Giuffre-Menegotto-Pinto 模型,能很好的考虑钢筋在循环往复作用下的包辛格效应。

零长度转动弹簧单元采用 Bond_SP01 来模拟纵筋,该模型是将钢筋的应力-应变关系改为应力-滑移量关系,以此来模拟桥墩纵筋在底座中拔出的影响。需要说明的是,当改变钢筋的本构关系而不改变混凝土的本构关系,就会出现混凝土达到最大抗压应变并且超过其最大抗压能力,使得该截面开始卸载并且中轴线出现偏移,平截面假定失效。为防止这种情况的发生,对转动弹簧单元内混凝土 Concrete01 的最大抗压应变需乘以一个放大系数 $K^{[4,18]}$,按式(15)计算,虽然这个公式在放大幅度上可能与试件的真实反应情况不一致,但是它能阻止转动弹簧单元截面的卸载并保证纤维梁柱单元和转动弹簧单元之间变形的协调性。

$$K = \frac{f_y d_b}{88\sqrt{f'_c}} \quad (15)$$

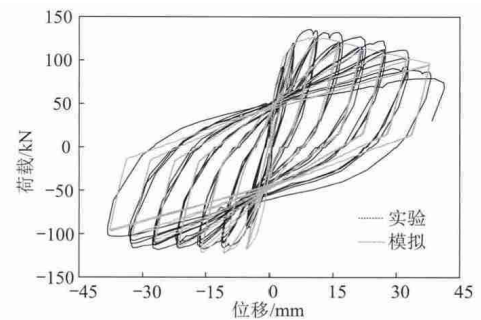
3.2 模型验证

为验证上述模型的准确性,选取司炳君^[26]完成的 A1~A6 试件和 Ghee^[23]完成的 NO.15~NO.18、NO.20、NO.23 共 12 个圆形截面桥墩试件抗震拟静力试验结果,进行滞回性能模拟分析。所有试件设计均为倒“T”型,顶部施加轴力和侧向反复荷载,底部通过横梁固定。司炳君完成的 6 个试件基本为弯剪破坏形态,Ghee 完成的 6 个试件中,NO.15、NO.17 和 NO.23 为弯剪破坏,其余为剪切破坏。

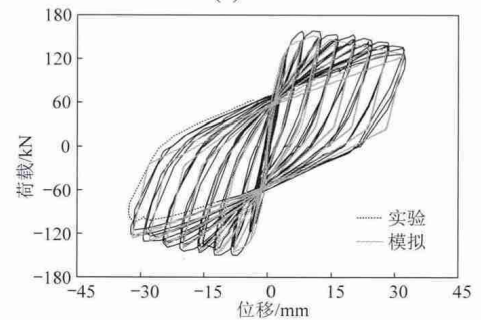
图 6 为司炳君完成的试件滞回曲线对比。从图中可以看出,初始加载阶段桥墩的受力性能由弯曲控制,随着侧向位移增大,塑性铰区转角达到了所定义的剪切破坏转角,试件便进入剪切控制阶段,滞回曲线强度开始出现明显的下降段。从模拟结果

可以看出,初始刚度、极限承载力和强度退化段与试验结果均吻合较好。

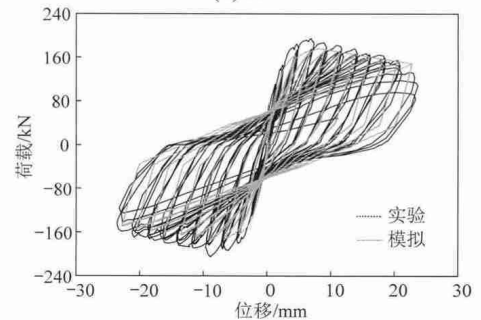
图 7 为 Ghee 完成的试件滞回曲线对比。需要说明的是 Ghee 的实验是将墩柱固定在刚度较小的底座上,由于底座的配筋信息缺失,因此在模型中并未考虑其影响,这就导致模拟得到的试件初始刚度比试验结果略微偏大。但总体来看,模拟得到的滞回曲线和试验结果吻合良好,特别值得关注的是模型很好的模拟了位移循环引起的强度和刚度退化情况。



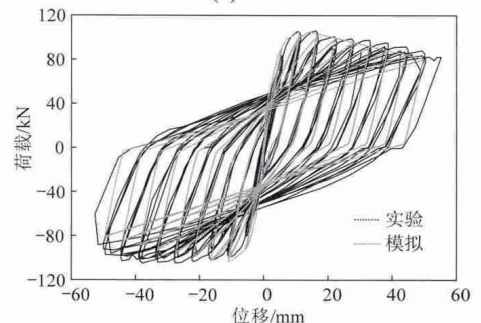
(a) A1



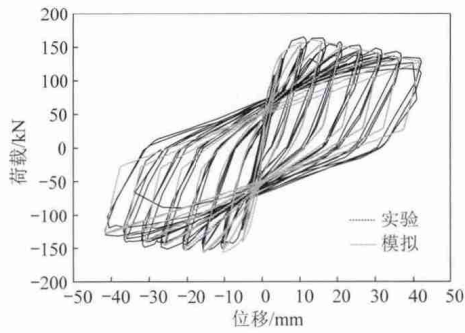
(b) A2



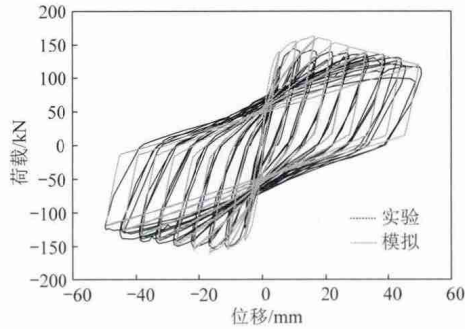
(c) A3



(d) A4



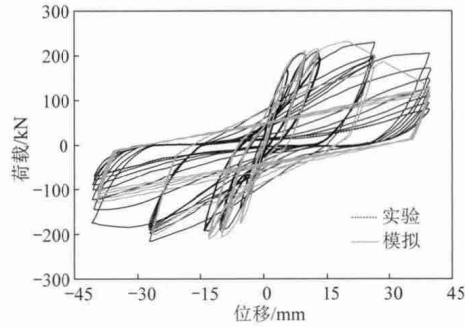
(e) A5



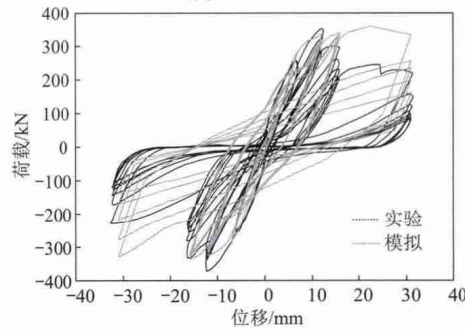
(f) A6

图6 司炳君模拟与试验滞回曲线的对比

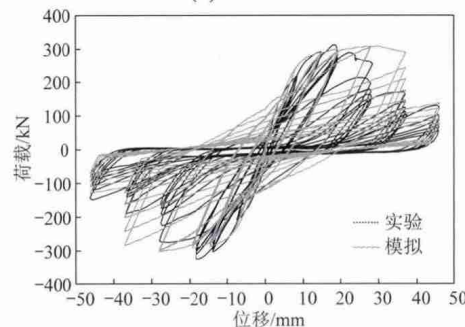
Fig.6 Comparisons of the simulated and tested hysteretic curves for specimens tested by Si Bingjun



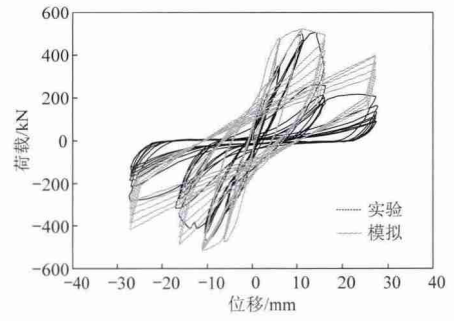
(a) NO.15



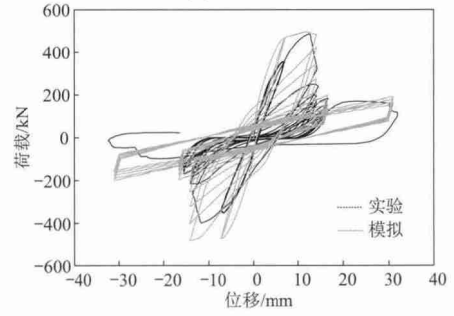
(b) NO.16



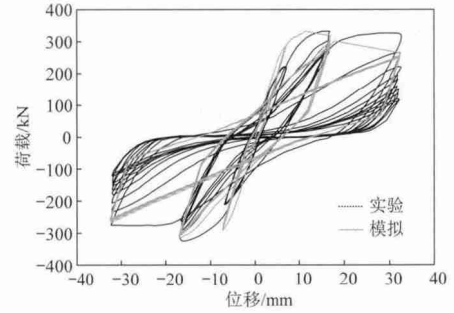
(c) NO.17



(d) NO.18



(e) NO.20



(f) NO.23

图7 Ghee 试件模拟与试验滞回曲线的对比

Fig.7 Comparisons of the simulated and tested hysteretic curves for specimens tested by Ghee

4 结论

本文发展了钢筋混凝土桥墩弯剪数值分析的宏观模型，主要思路在于以桥墩塑性铰区转角确定剪切破坏的发生时刻，剪切破坏前以弯曲变形控制桥墩地震反应，剪切破坏后以剪切变形控制桥墩地震反应。根据收集的 36 个弯剪及剪切破坏圆形桥墩抗震拟静力试验数据，基于数值分析手段提取了试件发生剪切破坏时的塑性铰区转角，通过回归分析建立了桥墩剪切破坏时塑性铰区转角的计算公式。通过 OpenSees 数值分析平台建立了考虑桥墩弯-剪-轴力耦合效应的数值分析模型，模型中通过监测塑性铰区转角确定桥墩剪切破坏的发生。最后以 12 个剪切效应控制的圆形截面桥墩抗震拟静力试验结果为依据，对数值模型的合理性进行了验证，结果表明本文所建立的数值分析模型可对剪切

及弯剪破坏桥墩的滞回曲线进行较为准确的模拟分析。

参考文献:

- [1] Sezen H, Moehle J P. Seismic tests of concrete columns with light transverse reinforcement [J]. *ACI Structural Journal*, 2006, 103(6): 842—849.
- [2] Elwood K J, Moehle J P. Drift capacity of reinforced concrete columns with light transverse reinforcement [J]. *Earthquake Spectra*, 2005, 21(1): 71—89.
- [3] 艾庆华, 王东升, 向敏. 基于纤维单元的钢筋混凝土桥墩地震损伤评价[J]. *计算力学学报*, 2011, 28(5): 737—742.
Ai Qinghua, Wang Dongsheng, Xiang Min. Seismic damage evaluation of RC bridge columns based on fiber elements [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2011, 28(5): 737—742. (in Chinese)
- [4] 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.
- [5] Ceresa P, Petrini L, Pinho R. Flexure-shear fiber beam-column elements for modeling frame structures under seismic loading-State of the art [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2007, 11(1): 46—88.
- [6] 汪训流, 陆新征, 叶列平. 往复荷载下钢筋混凝土柱受力性能的数值模拟[J]. *工程力学*, 2007, 24(12): 76—81.
Wang Xunliu, Lu Xinzheng, Ye Lieping. Numerical simulation for the hysteresis behavior of RC columns under cyclic loads [J]. *Engineering Mechanics*, 2007, 24(12): 76—81. (in Chinese)
- [7] 赫中营, 叶爱君. 力法非线性梁柱单元的合理单元长度划分[J]. *工程力学*, 2014, 31(7): 178—184, 198.
He Zhongying, Ye Aijun. Reasonable discrete element length of force-based nonlinear beam-column elements [J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(7): 178—184, 198. (in Chinese)
- [8] 嵇一, 李忠献. 钢筋混凝土纤维梁柱单元实用模拟平台[J]. *工程力学*, 2011, 28(4): 102—108, 127.
Zhuo Yi, Li Zhongxian. A practical simulation platform of reinforced concrete fiber beam-column element [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(4): 102—108, 127. (in Chinese)
- [9] Lee D H, Elnashai A S. Seismic analysis of RC bridge columns with flexure-shear interaction [J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 2001, 127(5): 546—553.
- [10] Ozcebe G, Saatcioglu M. Hysteretic shear model for reinforced concrete members [J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1989, 115(1): 132—148.
- [11] Elwood K J. Modeling failures in existing reinforced concrete columns [J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2004, 31(5): 846—859.
- [12] Shoraka M B, Elwood K J. Mechanical model for non-ductile reinforced concrete columns [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2013, 17(7): 937—957.
- [13] Ghannoum W M, Moehle J P. Rotation-based shear failure model for lightly confined RC columns [J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 2012, 138(10): 1267—1278.
- [14] 蔡茂, 顾祥林, 华晶晶, 林峰. 考虑剪切作用的钢筋混凝土柱地震反应分析[J]. *建筑结构学报*, 2011, 32(11): 97—108.
Cai Mao, Gu Xianglin, Hua Jingjing, Lin Feng. Seismic response analysis of reinforced concrete columns considering shear effects [J]. *Journal of Building Structures*, 2011, 32(11): 97—108. (in Chinese)
- [15] 雷拓, 钱江, 刘伯权. 考虑非线性剪切效应的钢筋混凝土柱模型化方法及应用[J]. *土木建筑与环境工程*, 2013, 35(4): 13—19.
Lei Tuo, Qian Jiang, Liu Boquan. Modeling and its application of reinforced concrete columns considering nonlinear shear effects [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2013, 35(4): 13—19. (in Chinese)
- [16] 孙治国, 王东升, 李宏男, 杜修力. 钢筋混凝土桥墩弯剪数值分析模型[J]. *计算力学学报*, 2013, 30(2): 249—254.
Sun Zhiguo, Wang Dongsheng, Li Hongnan, Du Xiuli. Flexural-shear analysis model for reinforced concrete bridge piers [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2013, 30(2): 249—254. (in Chinese)
- [17] 杨红, 张睿, 臧登科, 豆德胜. 纤维模型中非线性剪切效应的模拟方法及校核[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2011, 43(1): 8—16.
Yang Hong, Zhang Rui, Zang Dengke, Dou Desheng. Fiber model based nonlinear shear effect modeling method and its calibration [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2011, 43(1): 8—16. (in Chinese)
- [18] Leborgne M R. Modeling the post shear failure behavior of reinforced concrete columns [D]. Austin: University of Texas at Austin, 2012.
- [19] Arakawa T, He M X, Arai Y, Mizoguchi M. Shear resisting behavior of reinforced concrete columns with spiral hoops [J]. *Transactions of the Japan Concrete Institute*, 1998, 10(2): 155—162.
- [20] Wong Y L, Pauly T, Priestley M J N. Response of circular reinforced concrete columns to multi-directional seismic attack [J]. *ACI Structural Journal*, 1993, 90(2): 180—191.
- [21] Petrovski J, Ristic D. Reversed cyclic loading test of bridge column models [R]. Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology, Iran, IIEES Press, Report IZIIZ 84-164, 1984: 1—62.
- [22] Priestley M J N, Benzoni G. Seismic performance of circular columns with low longitudinal reinforcement ratios [J]. *ACI Structural Journal*, 1996, 93(4): 1—12.

(参考文献[23]—[26]转第 50 页)

- Hu Fangxin, Shi Gang, Shi Yongjiu. Analysis on behavior of beam-column connections using high strength steel based on fracture mechanics [J]. *Engineering Mechanics*, doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.10.0902. (in Chinese)
- [15] Kanvinde A M, Deierlein G G. Void growth model and stress modified critical strain model to predict ductile fracture in structural steels [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2006, 132(12): 1907—1918.
- [16] 王伟, 廖芳芳, 陈以一. 基于微观机制的钢结构节点延性断裂预测与裂后路径分析[J]. *工程力学*, 2014, 31(3): 101—108, 115.
Wang Wei, Liao Fangfang, Chen Yiyi. Ductile fracture prediction and post-fracture path tracing of steel connections based on micromechanics-based fracture criteria [J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(3): 101—108, 115. (in Chinese)
- [17] Liao F F, Wang W, Chen Y Y. Parameter calibrations and application of micromechanical fracture models of structural steels [J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2012, 42(2): 153—174.
- [18] ABAQUS User's Manual, Version 6.8 [M]. Providence, RI: Hibbitt, Karlsson and Sorenson, Inc., 2008.
- [19] Anderson T L. *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications* [M]. 3rd ed. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2005.
- [20] McClintock F A. A criterion for ductile fracture by the growth of holes [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1968, 35(2): 363—371.
- [21] Rice J R, Tracey D M. On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields [J]. *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 1969, 17(3): 201—217.
- [22] Hancock J W, Mackenzie A C. On the mechanics of ductile failure in high-strength steel subjected to multi-axial stress-states [J]. *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 1976, 24(3): 147—169.
- [23] ASTM E8-08. Standard test methods for tension testing of metallic materials [S]. West Conshohocken: ASTM, 2008.
- [24] Zener C, Hollomon J H. Effect of strain rate upon plastic flow of steel [J]. *Journal of Applied Physics*, 1944, 15(1): 22—32.
- [25] 石永久, 熊俊, 王元清. 钢框架梁柱节点焊缝损伤性能研究 I: 试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2012, 33(3): 48—55.
Shi Yongjiu, Xiong Jun, Wang Yuanqing. Study on damage behavior of weld of beam-to-column connection in steel frame I: experiment [J]. *Journal of Building Structures*, 2012, 33(3): 48—55. (in Chinese)
- [26] Wu Y M, Wang Y Q, Shi Y J, et al. Effects of low temperature on properties of structural steels [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2004, 11(5): 442—448.
- [27] 刘永明, 张晔江, 陈以一, 等. 焊接热影响区断裂性能试验研究[J]. *力学季刊*, 2002, 23(2): 157—163.
Liu Yongming, Zhang Yejiang, Chen Yiyi, et al. Experimental research on fracture performance in weld heat-affect zone [J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2002, 23(2): 157—163. (in Chinese)

(上接第 36 页)

- [23] Ghee A B, Priestley M J N, Paulay T. Seismic shear strength of circular reinforced concrete columns [J]. *ACI Structural Journal*, 1989, 86(1): 45—59.
- [24] Kenchiku K S. Aseismic analysis of building structural members: a list of experimental results on deformation ability of reinforced concrete columns under large deflection (No.3) [R]. Building Research Institute, Ministry of Construction, Japan, Building Research Institute Press, 1978: 1—80.
- [25] Hamilton C H, Pardo G C, Kazanjy R P. Experimental testing of bridge columns subjected to reversed-cyclic and pulse-type loading histories [R]. University of California, Irvine, CA, Civil Engineering Technical Report Series, Report 2001-03, 2002: 1—125.
- [26] 司炳君, 孙治国, 杜修力, 王东升, 黄照南. 钢筋混凝土桥墩地震弯剪破坏机理与震后快速修复技术研究[J]. *土木工程学报*, 2011, 44(7): 90—99.
Si Bingjun, Sun Zhiguo, Du Xiuli, Wang Dongsheng, Huang Zhaonan. Study on the seismic flexural-shear damage mechanisms and rapid repair techniques for earthquake damaged bridge piers [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, 44(7): 90—99. (in Chinese)