

高强箍筋高强混凝土墩柱弯剪数值分析模型

华承俊^{1 2} 孙治国^{1 2} 司炳君³ 王东升^{1 2}

(1. 大连海事大学 道路与桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116026; 2. 辽宁省公路工程重点实验室, 辽宁 大连 116026;
3. 大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 在**高强混凝土墩柱**中配置**高强度约束箍筋**可有效提高其抗震能力, 本文发展了适用于**高强箍筋高强混凝土墩柱**滞回性能模拟的弯剪数值分析模型。在普通**钢筋混凝土墩柱**弯剪数值分析模型的基础上, 对 22 个具有典型弯剪破坏特征的高强箍筋**高强混凝土柱**试验结果进行分析, 验证了 Elwood 剪切破坏面对**高强箍筋高强混凝土墩柱**的适用性。基于 OpenSees 数值分析平台建立了墩柱的弯剪数值分析模型, 使用 Elwood 剪切破坏面监测墩柱的剪切破坏时刻。模拟了 6 个发生弯剪破坏的**高强箍筋高强混凝土墩柱**滞回曲线, 并与试验结果进行对比。结果表明, 模拟滞回曲线与试验结果吻合良好, 数值模型对**高强箍筋高强混凝土墩柱**的强度、变形能力、残余位移等具有较好的模拟精度。模拟得到的弯曲、剪切及纵筋拔出等各变形成分也与试件的弯剪破坏特征吻合。

关键词: 高强箍筋**高强混凝土墩柱**; 弯剪数值分析; 剪切破坏面; OpenSees; 滞回曲线; 变形成分
中图分类号: TU224; TU317. 1; P315. 92 文献标志码: A

Flexure-shear analysis model for high-strength concrete columns with high-strength stirrups

HUA Chengjun^{1 2}, SUN Zhiguo^{1 2}, SI Bingjun³, WANG Dongsheng^{1 2}

(1. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;
2. Key Laboratory of Highway Engineering, Liaoning Province, Dalian 116026, China;
3. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The seismic performance of high strength concrete (HSC) columns could be improved by using high strength stirrups (HSS). A flexure-shear analysis model to simulate the hysteretic behavior of HSC columns using HSS was developed. Based on the flexure-shear analysis model for columns with normal strength concrete and stirrups, an analysis was conducted for 22 test results of HSC columns using HSS failed in flexure-shear modes. And applicability of Elwood shear failure surface for HSC columns using HSS was verified. The flexure-shear analysis model for columns was built on the basis of OpenSees platform, in which the shear failure of HSC columns using HSS was monitored by Elwood shear failure surface. 6 HSC columns with HSS appearing flexure-shear failure mode were modeled, and the simulated hysteretic curves were compared with test results. It is found that the simulated hysteretic curves agreed well with test results. The flexure-shear analysis model has a high accuracy for HSC columns with HSS in modeling strength, deformation capacity and residual displacement. The simulated flexure, shear and longitudinal bar slip displacement components of the columns agreed well with the flexure-shear failure mode of the specimens.

收稿日期: 2014 - 07 - 11; 修订日期: 2014 - 11 - 17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51008041, 50978042); 中国博士后科学基金项目(2013M540226, 2014T70250); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(3132014073 和 3132014326)

作者简介: 华承俊(1989 -), 男, 硕士研究生, 主要从事桥梁抗震研究. E-mail: 18900965108@163.com

通讯作者: 孙治国(1980 -), 男, 讲师, 主要从事桥梁与结构工程抗震方面的研究. E-mail: szg_1999_1999@163.com

Key words: high strength concrete columns with high strength stirrups; flexure-shear analysis; shear failure surface; OpenSees; hysteretic curves; displacement component

引言

在**高强混凝土墩柱**中,通过配置**高强度约束箍筋**提高其抗剪强度和延性变形能力,最终实现**高强混凝土墩柱**的延性抗震设计,近年来在国内外受到了广泛关注^[1-4]。司炳君等^[3]总结了国内外完成的**混凝土轴心抗压强度**超过 40 MPa,箍筋屈服**强度**超过 400MPa 的**混凝土柱式构件**抗震试验结果,认为即使在轴压比大于 0.6 的高轴压下,采用**高强度箍筋**仍可以对**高强混凝土柱**提供有效约束,充分保证其延性和耗能能力。**高强度约束箍筋**为**高强混凝土**在**强震区**的使用提供了可能的途径^[5]。但应当注意到,配置**高强箍筋**的**高强混凝土墩柱**仍面临较大的剪切破坏风险,孙治国等^[6]完成的 6 个剪跨比在 1.5~2.5 之间的**高强混凝土墩柱**抗震拟静力试验,均表现出明显的弯剪破坏特征。史庆轩等^[7]完成的**高强混凝土短柱**抗震拟静力试验中,箍筋屈服**强度**接近 1000MPa,但仍表现出显著的剪切破坏形态。且这种剪切或弯剪破坏形态在 Xiao^[8],王全凤^[9],姜睿^[10]等完成的柱式构件,特别是短柱抗震拟静力试验中大量存在。有必要建立此类构件抗震性能的数值分析模型。

目前,对剪切及弯剪破坏**钢筋混凝土墩柱**抗震性能模拟的一个重要思路是,基于纤维梁柱单元模型模拟墩柱非线性弯曲变形,非线性剪切变形可通过剪切弹簧单元模拟。纤维梁柱单元模型与剪切弹簧单元串联,共同考虑试件的弯剪耦合作用^[11-14]。其中又包括 3 种主要思路,其一是 Lee 与 Elnashai^[11]建立的墩柱弯剪数值分析模型,主要特点是基于修正的压力场理论计算墩柱非线性剪切变形,并借鉴 Ozcebe^[15]建议的剪切滞回规则描述。其二是 Elwood 等^[12]建立的弯剪数值分析模型,主要特点是通过试验结果的统计分析建立了弯剪破坏墩柱剪切破坏对应的墩顶位移,并以此定义数值模型中的剪切破坏面,当数值模型中墩顶变形达到剪切破坏面时,试件反应以剪切控制,墩柱**强度**、**刚度**发生明显退化,而剪切破坏前以弯曲变形为主。其三是 Leborgne 等^[14]建议的弯剪数值分析模型,与 Elwood 模型相似,所不同的是 Leborgne 模型中是通过监测墩柱塑性铰区转角确定剪切破坏的发生时刻。

本文主要针对 Elwood 模型展开讨论,注意到 Elwood 模型建立的先决条件是对墩柱剪切破坏位移的估计^[16],针对**高强箍筋高强混凝土结构**的发展趋势,有必要将**钢筋混凝土墩柱**弯剪数值分析模型推广到**高强箍筋高强混凝土墩柱**构件。本文通过对 22 个**高强箍筋高强混凝土柱**拟静力试验结果的分析,验证了 Elwood 建立的弯剪破坏墩柱变形能力计算公式对**高强箍筋高强混凝土墩柱**的适用性,基于 OpenSees 数值分析平台,建立了墩柱的弯剪数值分析模型,对 6 个发生弯剪破坏的**高强箍筋高强混凝土柱**滞回性能进行模拟,并将模拟结果与试验结果进行了对比,验证了模型的正确性。并通过对试件各变形成分的分析,发现位移成分模拟结果也与试件的弯剪破坏特征很好地吻合。

1 Elwood 剪切破坏面

钢筋混凝土墩柱在**地震荷载**下的弯剪数值分析模型如图 1 所示,其中纤维梁柱单元模拟弯曲变形(包括纵筋拔出变形),剪切弹簧单元模拟剪切变形,两者峰值剪力的弱者将主导总反应。比如,剪切弹簧峰值剪力(图 1(a)虚线)大于纤维梁柱单元峰值剪力(图 1(b)),则总反应为弯曲破坏(图 1(c)虚线);而若剪切弹簧峰值剪力(图 1(a)实线)小于梁柱单元峰值剪力(图 1(b)),则在剪力达到剪切弹簧峰值剪力时,剪切弹簧刚度退化,发生剪切破坏,总反应为弯剪破坏(图 1(c)实线)。本文主要研究后者。

Elwood 等^[16]基于 50 个弯剪破坏矩形截面墩柱抗震试验结果的统计分析建立了普通**强度钢筋混凝土柱**剪切破坏时的变形能力公式(式(1)),以位移角定义数值模型中墩柱剪切破坏时的破坏面,如图 2 所示。当墩顶位移角达到式(1)计算值时,弯剪数值分析模型中的剪切弹簧刚度退化,试件发生剪切破坏^[12]。

$$\frac{\Delta_s}{L} = 0.03 + 4\rho'' - 0.025 \frac{v}{\sqrt{f'_c}} - 0.025 \frac{P}{A_g f'_c} \geq 0.01 \quad (1)$$

式中 Δ_s 为剪切破坏对应的墩顶位移, L 为墩高, ρ'' 为加载方向配箍率, P 为轴力, A_g 为截面面积, f'_c 为混凝土

土圆柱体抗压强度。\$v\$ 为截面最大剪应力,且:

$$v = \frac{V_u}{b \times d} \quad (2)$$

$$V_u = V_c + V_s \quad (3)$$

$$V_c = k \left(\frac{0.5 \sqrt{f'_c}}{\lambda} \sqrt{1 + \frac{P}{0.5 A_g \sqrt{f'_c}}} \right) 0.8 A_g \quad (4)$$

$$V_s = k \frac{A_{st} f_{yt} d}{s} \quad (5)$$

式中 \$b\$ 为垂直加载方向截面宽度, \$\lambda\$ 为剪跨比, \$A_{st}\$ 为加载方向箍筋总面积, \$f_{yt}\$ 为箍筋屈服强度, \$d\$ 为受拉纵筋中心至截面受压边缘距离, \$s\$ 为箍筋间距, \$k\$ 为反映试件抗剪强度随位移延性系数的退化参数。在建立的墩柱弯剪数值分析模型中,当墩顶位移角达到图 2 中的破坏面时,试件发生剪切破坏。剪切破坏前墩柱反应以纤维梁柱单元模拟的弯曲变形为主,剪切破坏后墩柱反应由剪切弹簧单元控制,试件发生显著的强度和刚度退化。

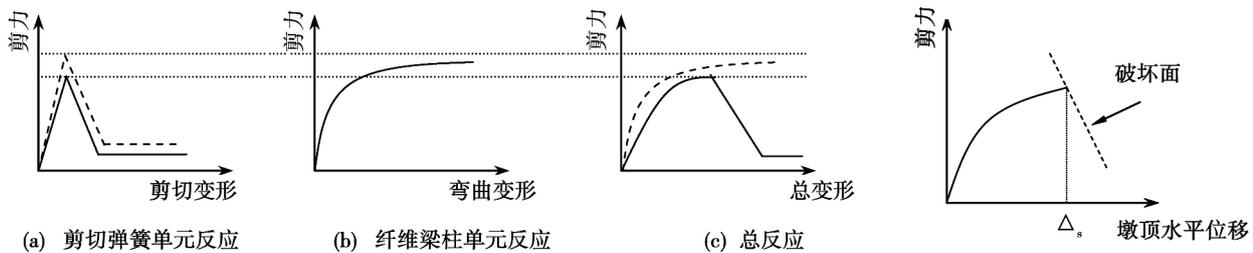


图 1 墩柱弯剪数值分析模型

Fig. 1 Flexure-shear analysis model for columns

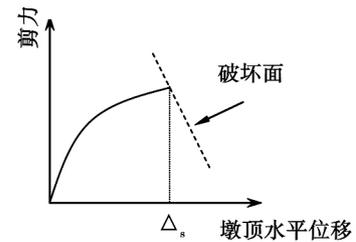


图 2 墩柱剪切破坏面

Fig. 2 Shear failure surface of the columns

剪切破坏发生后,剪切弹簧发生显著的强度和刚度退化,以骨架曲线中的退化斜率 \$K_{deg}\$ 以及残余抗剪强度 \$F_{res}\$ 表示,如图 3 所示。且:

$$K_{deg} = \left(\frac{1}{K'_{deg}} - \frac{1}{K_{unload}} \right)^{-1} \quad (6)$$

$$K'_{deg} = \frac{V_u}{(\Delta_a - \Delta_s)} \quad (7)$$

\$K_{unload}\$ 为梁柱单元卸载刚度,对于悬臂式桥墩:

$$K_{unload} = \frac{3EI_{eff}}{L^3} \quad (7)$$

$$\frac{\Delta_a}{L} = \frac{4}{100} \frac{1 + (\tan \theta)^2}{\tan \theta + P \left(\frac{s}{A_{st} f_{yt} d_c \tan \theta} \right)} \quad (9)$$

$$F_{res} = 0.2 V_u \quad (10)$$

式中 \$K_{deg}\$ 为剪切弹簧骨架曲线退化刚度, \$K_{degt}\$ 为总反应曲线退化刚度, \$E\$ 为混凝土弹性模量, \$I_{eff}\$ 为混凝土有效截面抗弯惯性矩, \$I_g\$ 为毛截面惯性矩, \$\Delta_a\$ 为发生轴向破坏时的墩顶位移, \$\theta\$ 为裂缝与水平方向的夹角,取 \$65^\circ\$, \$d_c\$ 为自箍筋中心计算的截面核心长度, \$F_{res}\$ 为剪切弹簧骨架曲线残余抗剪强度,详见文献 [17 - 19]。

2 剪切破坏面适用性验证

2.1 试验情况介绍

注意到 Elwood 建立的墩柱剪切破坏面基本以普通强度钢筋混凝土墩柱拟静力试验结果为依据,为建立破坏面而收集的钢筋混凝土墩柱抗震试验参数范围为:混凝土圆柱体抗压强度 \$f'_c\$ 为 13.1 ~ 44.8 MPa,平均

为 24.8 MPa, 箍筋屈服强度 f_{yt} 为 317 ~ 648 MPa, 平均为 427 MPa。因此, 公式的适用范围也限于普通强度的钢筋混凝土墩柱。

为验证模型对高强箍筋高强混凝土墩柱的适用性, 以孙治国^[6]、史庆轩^[7]、Xiao^[8]、姜睿^[10]等人完成的 22 个墩柱拟静力试验结果进行分析, 对式(1)的适用性进行判断。选取孙治国^[6]的 G1-G6 试件, 剪跨比在 1.5 ~ 2.5 之间, 轴压比为 0.05 和 0.15, 试件混凝土立方体抗压强度为 54 ~ 64 MPa, 箍筋屈服强度为 511 MPa。

史庆轩的^[7] HHSC2-HHSC14 试件, 去除未形成滞回环的 HHSC7、HHSC12 和 HHSC13 试件, 共 10 个试件, 剪跨比在 1.5 ~ 2.0 之间, 轴压比在 0.5 ~ 0.7 之间, 试件混凝土轴心抗压强度分别为 54 MPa 和 64 MPa, 箍筋屈服强度为 998 MPa。Xiao^[8]的 HC4-8L16-T6-0.1P 和 HC4-8L16-T6-0.2P 试件, 剪跨比为 2.0, 轴压比分别为 0.1 和 0.2, 混凝土圆柱体抗压强度为 86 MPa, 箍筋屈服强度为 449 MPa。以及姜睿的^[10] RC27-42-50 至 RC27-46-50 共 4 个试件, 剪跨比为 2.75, 轴压比在 0.29 ~ 0.41 之间, 混凝土立方体抗压强度为 103 ~ 120 MPa, 箍筋屈服强度为 518.5 MPa。将混凝土立方体试块、圆柱体试块和棱柱体试块强度进行换算, 可以发现, 本文收集试件的混凝土轴心抗压强度范围为 43 ~ 105 MPa, 箍筋屈服强度范围为 449 ~ 998 MPa。已远远超出了 Elwood 剪切破坏面公式的适用范畴。所有试件均发生弯剪破坏, 或虽定义为剪切破坏, 但具有一定延性变形能力试件。

2.2 Elwood 剪切破坏面适用性分析

为验证 Elwood 的墩柱剪切破坏面对高强箍筋高强混凝土墩柱的适用性, 根据式(1)计算了上述 22 个试件的极限位移角, 并与试验结果进行了对比, 如图 4 所示。试验结果与式(1)计算值比值的平均值为 1.5, 即试验结果偏大。同时注意到本文统计分析的 22 个试验数据中, 仅有 2 个试件试验得到的极限位移角小于式(1)计算结果, 其余 20 个试件试验得到的极限位移角均大于式(1)计算结果, 这都表明利用式(1)定义高强箍筋高强混凝土墩柱的极限位移角偏于安全。由于目前国内外完成的此类构件试验结果不多, 暂以式(1)计算高强箍筋高强混凝土墩柱的变形能力是合适的。

从影响钢筋混凝土墩柱变形能力的机理进行分析, 式(1)表明, 影响墩柱变形能力的主要因素为试件配箍率、截面最大剪应力、混凝土强度以及轴压比。由于配箍率、轴压比本身为无量纲值, 就式(1)而言, 墩柱混凝土和箍筋强度提高将引起截面最大剪应力提高, 但同时与 $\sqrt{f_c}$ 的比值又进一步削弱了其影响。这就造成式(1)对混凝土和箍筋强度不敏感, 因此式(1)可用于高强箍筋高强混凝土墩柱的变形能力估计。

3 弯剪数值分析模型

3.1 数值模型的建立

基于 OpenSees 中的非线性梁柱单元^[20]、零长度转动弹簧单元和零长度剪切弹簧单元建立高强箍筋高强混凝土墩柱的弯剪数值分析模型, 如图 5 所示。其中非线性梁柱单元模拟试件弯曲变形, 零长度转动弹簧单元模拟纵筋拔出变形。剪切弹簧单元模拟试件剪切变形, 使用 Elwood 剪切破坏面(式(1))监测试件剪切破坏的发生, 剪切骨架曲线基于修正的压力场理论计算^[21]。模型中, 混凝土采用 Kent-Park 本构模型, 钢筋本构采用 Menegotto-Pinto 模型。其中, 零长度转动弹簧单元的黏结-滑移参数根据试验者的拔出试验或经验

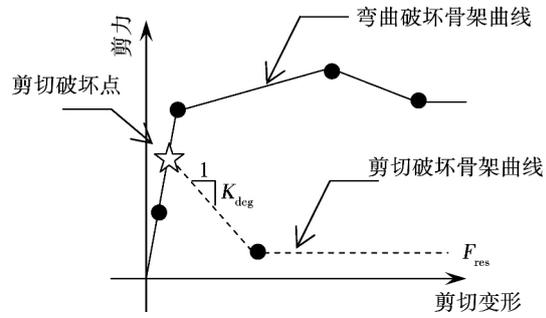


图 3 剪切破坏前后剪切弹簧的骨架曲线

Fig. 3 The backbone of the shear spring before or after shear failure

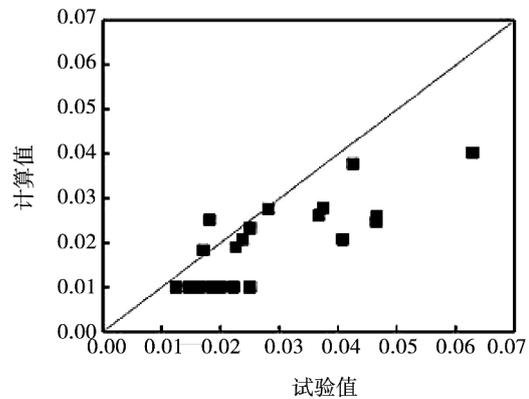


图 4 高强箍筋高强混凝土柱极限位移角对比

Fig. 4 Comparison of the ultimate drift ratios for HSC columns with HSS

公式定义^[22]。由 $K, f_y, S_y, f_u, S_u, b, R$ 等参数控制,其中 K 为钢筋弹性模量 f_y 为钢筋屈服应力 S_y 为屈服滑移量 f_u 为钢筋极限应力 S_u 为极限滑移量 b 为刚度折减系数 R 为钢筋在循环荷载下的捏缩系数。 S_y 根据拉拔实验数据拟合而得到,计算公式如下:

$$S_y = 2.54 \left(\frac{d_b}{8437} \frac{f_y}{\sqrt{f_c}} (2\alpha + 1) \right) \frac{1}{\alpha} + 0.34 \quad (11)$$

式中 d_b 为钢筋直径 α 是局部黏结滑移参数,取 0.4。另根据建议 $S_u = (30 \sim 40) S_y, b$ 取 0.3 ~ 0.5 R 取 0.5 ~ 1.0。

3.2 模型验证

选取孙治国^[6]的 G1、G2、G5、G6 试件、Xiao^[8]的 HC4-8L16-T6-0.1P 和 HC4-8L16-T6-0.2P 试件对模型准确性进行验证,各试件参数见表 1 所示。图 6 为模拟得到的滞回曲线及与试验结果的对比情况。总体来看,模拟滞回曲线与试验结果基本吻合,模拟得到的各试件强度、变形能力、残余位移等与试验结果基本一致。这表明,本文建立的钢筋混凝土墩柱弯剪数值分析模型适用于高强箍筋高强混凝土构件抗震性能模拟分析。

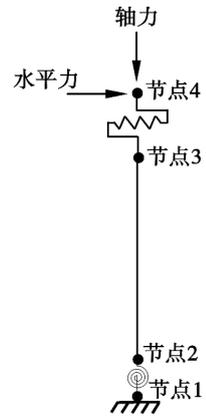


图5 数值分析模型

Fig.5 Numerical analysis model

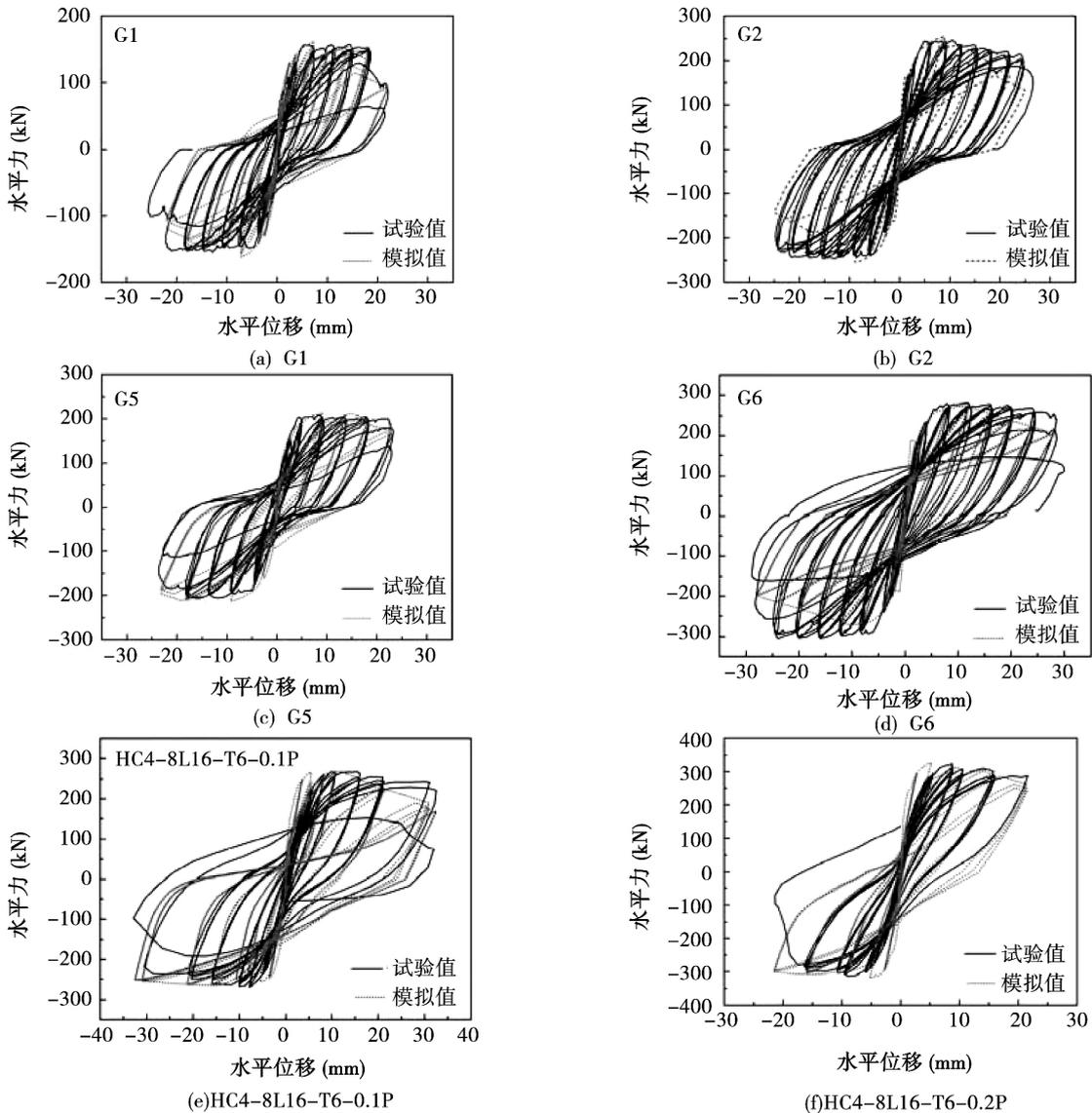


图6 模拟与试验滞回曲线对比

Fig.6 Comparison between the simulated and tested hysteretic curves

表 1 模型验证试件参数

Table 1 Parameters of the specimens for model verification

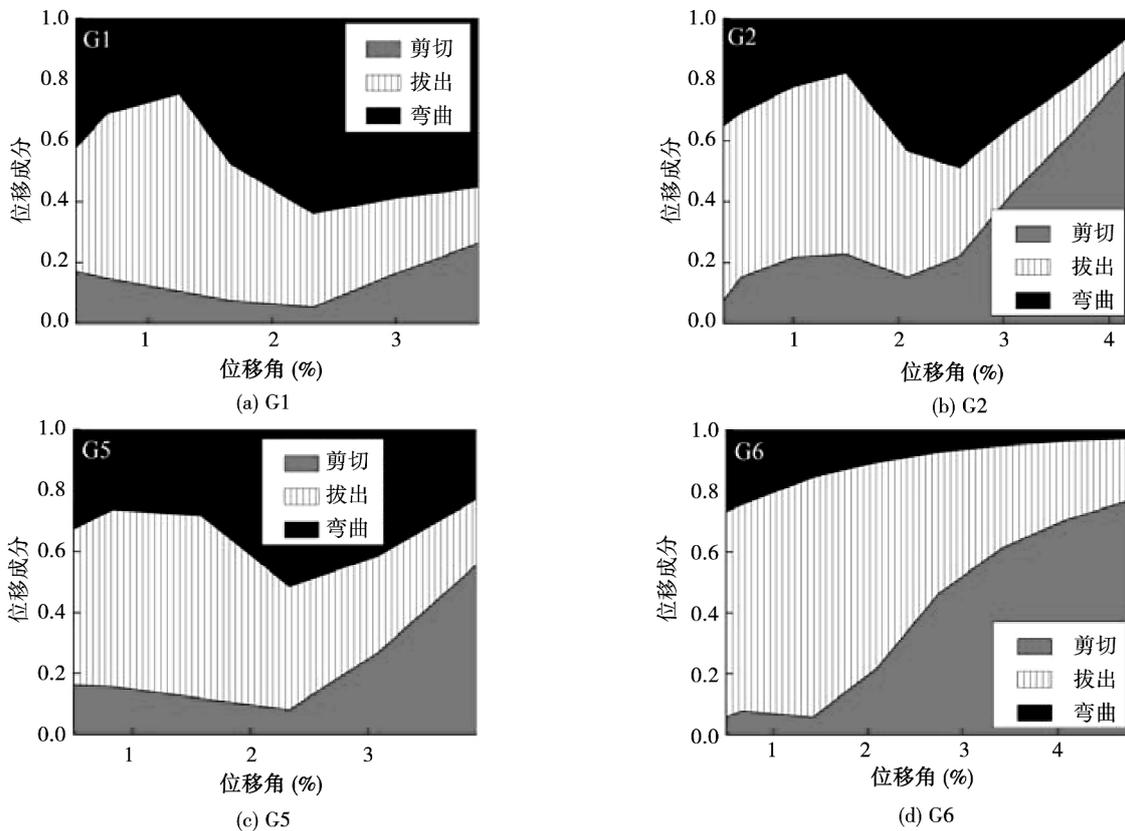
试件	f_c (MPa)	f_{yt} (MPa)	$P/(f_c A_g)$	s (mm)	λ	ρ''	Δ_s/L	Δ_u/L
G1	42.8	511	0.05	80	2.0	0.002 36	0.026 15	0.066 74
G2	42.8	511	0.15	80	2.0	0.002 36	0.020 77	0.038 76
G5	50.5	511	0.05	60	2.0	0.003 14	0.027 81	0.070 87
G6	54.3	511	0.15	40	2.0	0.004 72	0.025 89	0.052 04
HC4-8L16-T6-0.1P	86	449	0.1	51	2.0	0.006 55	0.040 16	0.062 31
HC4-8L16-T6-0.2P	86	449	0.2	51	2.0	0.006 55	0.037 65	0.044 40

模拟得到的 G2、G6 和 HC4-8L16-T6-0.1P 试件峰值荷载后的强度退化速率较试验结果偏大,这主要是由于按照 Elwood 模型计算的墩顶破坏面偏小,模型中桥墩较试验提前发生了剪切破坏所致,但总体来讲模拟结果偏于安全。

另外应当注意,除 Elwood 剪切破坏面计算公式(式(1))外,为建立高强箍筋高强混凝土墩柱弯剪数值分析模型,所涉及的墩柱轴压破坏时刻变形能力计算公式(式(9))、墩柱抗剪强度计算公式(式(4))、混凝土轴压本构模型等,实质上均是基于普通强度钢筋混凝土墩柱试验结果或理论模型建立。图 6 中滞回曲线的模拟结果可以在一定程度上证明,将混凝土抗压强度和箍筋屈服强度进行有限拓展,对墩柱变形能力、刚度退化、抗剪强度等规律未产生实质性改变。这与文献[23]中对钢筋混凝土墩柱变形能力的认识规律一致。

3.3 变形成分模拟

图 7 为模拟得到的各试件弯曲、剪切、纵筋拔出等各变形成分随侧向位移角的变化规律。可以看出,加载初期,各试件变形以弯曲和纵筋拔出为主,两者所占总变形的比例在 80% 以上,剪切变形所占比例不超过 20%。随侧向位移角增大,各试件剪切变形均表现出显著增大的趋势,相比之下,弯曲与纵筋拔出变形所占比例明显减小。加载后期,除 G1 试件外,其余 5 个试件的剪切变形占总位移成分的比值在 60% ~ 80% 以上。而试验结果也表明,各试件呈现出显著的弯剪破坏特征,加载初期以弯曲破坏为主,试件形成塑性铰并



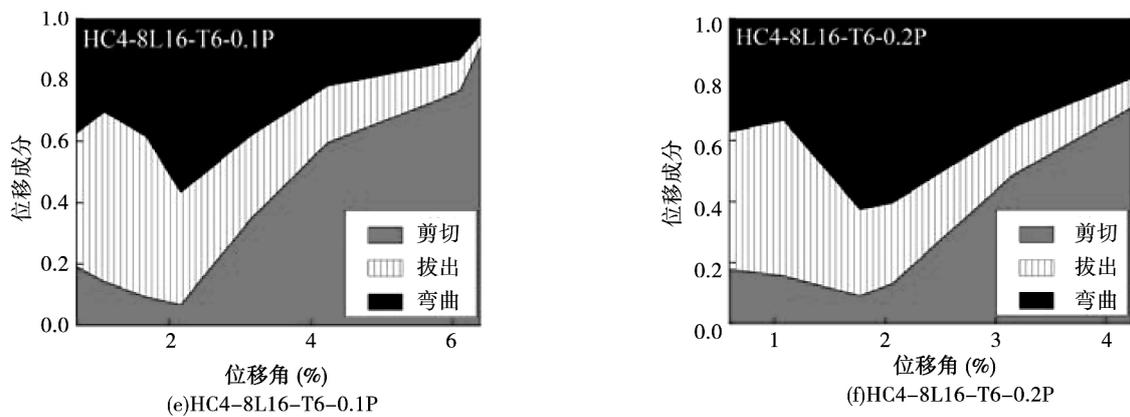


图7 位移成分

Fig. 7 Displacement components

表现出较好的延性及耗能能力, 记载后期因塑性铰区抗剪强度不足出现显著的剪切斜裂缝, 试件发生剪切破坏。各试件位移成分模拟结果与其弯剪破坏特征很好地吻合, 并且各变形成分与 Lehman^[24]、Sezen^[25] 等的试验结果也具有很好的一致性。

4 结论

通过 22 个墩柱试验结果的统计分析, 验证了 Elwood 剪切破坏面对高强箍筋高强混凝土墩柱的适用性。基于 OpenSees 平台, 建立了墩柱抗震的弯剪数值分析模型, 利用 Elwood 剪切破坏面监测试件剪切破坏时刻。对 6 个发生弯剪破坏的高强箍筋高强混凝土墩柱进行滞回性能模拟, 将模拟与试验滞回曲线进行对比, 主要结论为:

(1) 利用 Elwood 模型直接定义高强箍筋高强混凝土墩柱的极限位移角偏于安全, 说明 Elwood 建立的普通强度钢筋混凝土墩柱变形能力公式同样适用于高强箍筋高强混凝土墩柱。

(2) 利用 Elwood 弯剪数值分析模型模拟高强箍筋高强混凝土墩柱的滞回曲线具有较高的精度, 模拟滞回曲线强度、变形能力、残余位移等均与试验结果吻合较好。

(3) 数值模拟结果表明, 加载初期, 各试件以弯曲和纵筋拔出变形为主, 剪切变形所占比例不足 20%; 加载后期, 剪切变形所占比例明显增大, 体现出试件弯剪破坏的特征。

参考文献:

- [1] Xiao Y, Yun H W. Experimental studies on full-scale high-strength concrete columns[J]. *ACI Structural Journal*, 2002, 99(2): 199-207.
- [2] Légeron F, Paultre P. Behavior of high-strength concrete columns under cyclic flexure and constant axial load[J]. *ACI Structural Journal*, 2000, 97(4): 591-601.
- [3] 司炳君, 孙治国, 王东升, 等. 高强箍筋约束高强混凝土柱抗震性能研究综述[J]. *土木工程学报*, 2009, 42(4): 1-9.
SI Bingjun, SUN Zhiguo, WANG Dongsheng, et al. Review of studies on the seismic behavior of high strength concrete columns with high strength transverse reinforcement[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009, 42(4): 1-9. (in Chinese)
- [4] 史庆轩, 杨坤, 白力更, 等. 高强箍筋约束高强混凝土柱抗震性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2011, 44(12): 9-17.
SHI Qingxuan, YANG Kun, BAI Ligeng, et al. Experiments on seismic behavior of high-strength concrete columns confined with high-strength stirrups[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, 44(12): 9-17. (in Chinese)
- [5] ACI-ASCE Committee 441. High-strength concrete columns: State of the Art[J]. *ACI Structural Journal*, 1997, 94(3): 323-335.
- [6] 孙治国, 司炳君, 王东升, 等. 高强箍筋高强混凝土柱抗震性能研究[J]. *工程力学* 2010, 27(5): 128-136.
SUN Zhiguo, SI Bingjun, WANG Dongsheng, et al. Research on the seismic performance of high-strength concrete columns with high-strength stirrups[J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(5): 128-136. (in Chinese)
- [7] 史庆轩, 杨文星, 王秋维, 等. 高强箍筋高强混凝土短柱抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2012, 33(9): 49-58.
SHI Qingxuan, YANG Wenxing, WANG Qiwei, et al. Experimental research on seismic behavior of high-strength concrete short columns with high-strength stirrups[J]. *Journal of Building Structures*, 2012, 33(9): 49-58. (in Chinese)
- [8] Xiao Y, Martirosyan A. Seismic performance of high-strength concrete columns[J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1998, 124(3): 241-251.

- [9] 王全凤, 沈章春, 杨勇新, 等. HRB400 级钢筋混凝土短柱抗震试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(2): 114–117.
WANG Quanfeng, SHEN Zhangchun, YANG Yongxin, et al. Seismic behavior of HRB400 reinforcement concrete short columns[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(2): 114–117. (in Chinese)
- [10] 姜睿. 超高强混凝土组合柱抗震性能的试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
JIANG Rui. Experimental study on seismic performance of reinforced super-high-strength concrete composite columns[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [11] 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.
- [12] Elwood K J. Modelling failures in existing reinforced concrete columns[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2004, 31(5): 846–859.
- [13] Sezen H, Chowdhury T. Hysteretic model for reinforced concrete columns including the effect of shear and axial load failure[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2009, 135(2): 139–146.
- [14] Leborgne M R. Modeling the post shear failure behavior of reinforced concrete columns[D]. Austin: The University of Texas at Austin, 2012.
- [15] Ozcebe G, Saatcioglu M. Hysteretic shear model for reinforced concrete members[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1989, 115(1): 132–148.
- [16] Elwood K J, Moehle J P. Drift capacity of reinforced concrete columns with light transverse reinforcement[J]. Earthquake Spectra, 2005, 21(1): 71–89.
- [17] Sezen H, Moehle J P. Shear strength model for lightly reinforced concrete columns[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2004, 130(11): 1692–1703.
- [18] Elwood K J, Moehle J P. Dynamic collapse analysis for reinforced concrete frame sustaining shear and axial failures[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2008, 37(7): 991–1012.
- [19] Elwood K J, Moehle J P. Axial capacity model for shear-damaged columns[J]. ACI Structural Journal, 2005, 102(4): 578–587.
- [20] 李忠献, 李杨, 李宁. RC 桥墩抗震性能分析模型与验证[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(1): 71–80.
LI Zhongxian, LI Yang, LI Ning. Seismic analysis model of RC bridge piers: simulation and verification[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(1): 71–80. (in Chinese)
- [21] Bentz E V, Vecchio F J, Collins M P. Simplified modified compression field theory for calculating shear strength of reinforced concrete elements[J]. ACI Structural Journal, 2006, 103(4): 614–624.
- [22] 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.
- [23] 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 Zhiguo, WANG Dongsheng, DU Xiuli, et al. Research on amount of confining reinforcement in potential plastic hinge regions of RC bridge columns[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(3): 48–57. (in Chinese)
- [24] Lehman D E, Moehle J P. Seismic performance of well-confined concrete bridge columns[R]. PEER Report, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, 2000.
- [25] Sezen H, Moehle J P. Seismic tests of concrete columns with light transverse reinforcement[J]. ACI Structural Journal, 2006, 103(6): 842–849.