

# 钢筋混凝土桥墩弯剪数值分析模型

孙治国<sup>1</sup>, 王东升<sup>\*1</sup>, 李宏男<sup>2</sup>, 杜修力<sup>3</sup>

(1. 大连海事大学 道路与桥梁工程研究所, 大连 116026; 2. 大连理工大学 建设工程学部, 大连 116024;  
3. 北京工业大学 城市与工程安全减灾省部共建教育部重点实验室, 北京 100124)

**摘要:** 基于修正的压力场理论 MCFT(The Modified Compression Field Theory)和纤维单元模型建立了钢筋混凝土桥墩的弯剪数值分析模型, 以 MCFT 理论确定桥墩的剪切力-剪切位移关系, 并与考虑桥墩弯曲变形的纤维单元模型组合, 共同考虑桥墩的弯-剪-轴力耦合作用。通过与六个弯剪破坏控制的圆形截面钢筋混凝土桥墩拟静力试验结果的对比, 对分析模型进行了验证。主要认识结论为基于 MCFT 理论可准确地计算弯剪破坏桥墩的屈服荷载、极限荷载和弹性阶段剪切刚度, 剪切开裂是引起钢筋混凝土构件剪切力-剪切位移关系刚度突变的主要因素, 而弯曲开裂与纵筋屈服对刚度的影响较小; 分析模型对弯剪破坏桥墩的滞回曲线、弯曲与剪切变形成分均进行了较为准确的模拟分析。

**关键词:** 钢筋混凝土桥墩; 弯剪分析模型; 修正的压力场理论; 纤维单元模型; 滞回曲线

**中图分类号:** U442.5; TU375.3; O241 **文献标志码:** A **doi:** 10.7511/jslx201302013

## 1 引言

在钢筋混凝土桥墩抗震能力的数值分析技术中, 纤维单元模型<sup>[1,2]</sup>、集中塑性铰模型<sup>[3]</sup>和基于实体单元的有限元模型<sup>[4,5]</sup>, 均获得了广泛应用。但值得关注的是纤维模型忽略了构件的剪切变形成分, 对于弯剪或剪切破坏控制的桥墩无法进行准确的模拟, 集中塑性铰模型虽然考虑桥墩弯曲、剪切和纵筋拔出对墩顶变形的影响, 但由于从弯曲破坏的桥墩试件统计得来, 仅适用于剪跨比较大、以弯曲破坏为主的桥墩试件<sup>[6]</sup>。基于实体单元的有限元模型在强非线性情况下, 计算收敛的困难是实体模型面临的主要挑战, 且计算效率也不能满足工程结构抗震分析的需求。结合汶川大地震中回澜立交桥<sup>[7]</sup>、百花大桥<sup>[8]</sup>桥墩发生的严重弯剪破坏, 对这类桥墩构件的抗震能力进行准确的模拟分析, 是实现全桥破坏过程和破坏机理认识的重要前提。

在纤维模型的基础上进一步考虑桥墩的剪切力-剪切位移关系, 建立桥墩的弯剪数值分析模型,

是近年来桥梁抗震研究的重要课题。基于修正压力场理论 MCFT(The Modified Compression Field Theory)<sup>[9,10]</sup>计算钢筋混凝土结构的剪切力-剪切位移关系, 由于其准确性而得到重视<sup>[11]</sup>。本文通过 MCFT 理论计算了桥墩的剪切力-剪切位移关系, 并通过与试验结果对比分析进行了合理改进, 在此基础上通过与纤维分析模型耦合, 建立了钢筋混凝土桥墩的弯剪数值分析模型, 最后结合已有试验结果对模型的准确性进行了验证。

## 2 弯剪分析模型的建立

### 2.1 弯剪分析模型的简单描述

确定钢筋混凝土桥墩的剪切力-剪切位移关系, 并通过弹簧单元与纤维单元模型串联, 建立钢筋混凝土桥墩的弯剪数值分析模型, 如图 1 所示。模型中, 桥墩的弯曲变形通过纤维模型进行模拟, 剪切变形通过 MCFT 理论考虑, 通过两者耦合共

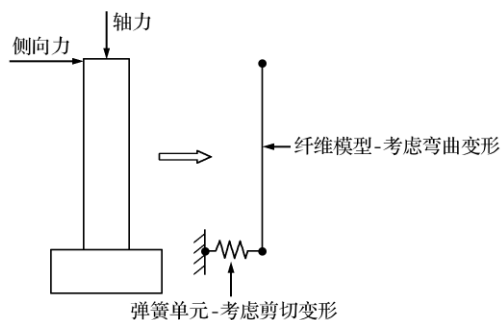


图 1 钢筋混凝土桥墩弯剪分析模型

Fig. 1 Flexure-shear analytical model for RC bridge piers

收稿日期: 2012-02-13; 修改稿收到日期: 2012-06-05.

基金项目: 国家 973 计划课题(2011CB013605); 国家自然科学基金(51008041, 51178071); 中央高校基本科研业务费(2011JC011)资助项目.

作者简介: 孙治国(1980-), 男, 博士;  
王东升\*(1974-), 男, 博士, 教授, 博士生导师 (E-mail: dswang@dlmu.edu.cn);  
李宏男(1957-), 男, 博士, 教授, 博士生导师;  
杜修力(1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师.

同考虑桥墩的弯剪作用。纤维模型中,混凝土单轴受压应力-应变关系采用改进的 Mander 模型<sup>[12]</sup>,采用 Menegotto-Pinto 模型<sup>[13]</sup>描述纵筋的本构关系,可考虑反复荷载下纵筋的包兴格效应。

### 2.2 MCFT 理论的基本概念

MCFT 的基本理论框架是 1986 年 Vecchio 和 Collins 在加拿大多伦多大学建立起来的,他们基于钢筋混凝土平板加载试验,提出了描述开裂混凝土受压和受拉的本构关系,在考虑开裂混凝土中拉应力的基础上,假定混凝土的主应力和主应变同向,并忽略钢筋与混凝土之间的滑移,根据平衡方程、变形协调关系、钢筋的应力-应变关系和受压、受拉开裂混凝土的应力-应变关系,提出了钢筋混凝土截面抗剪分析的修正压力场理论(MCFT)。基于 MCFT 基本理论和平截面假定,将截面划分为若干层,每层作为一个双轴应力单元按 MCFT 进行分析,各层的纵向应变由平截面假定保证了协调性,并忽略了各层之间的夹持力,可用来完成钢筋混凝土梁、柱构件在弯、剪、轴力组合作用下的荷载-位移全过程分析。同时,可方便地获得构件直至破坏阶段各个截面的剪应变分布情况,则桥墩剪切变形  $\Delta_v$  可按下式计算。

$$\Delta_v = \int_0^L \gamma(x) dx \quad (1)$$

式中  $\gamma$  为沿桥墩  $x$  高度处柱截面的平均剪切应

变, $L$  为桥墩高度。通过计算桥墩各个荷载下的剪切变形,便可获得构件受力全过程的剪切力-剪切变形关系<sup>[9,10]</sup>。

### 2.3 MCFT 理论的验证

建立桥墩的剪切力-剪切位移滞回关系是实现弯剪数值分析的关键,本文基于 MCFT 理论计算桥墩的剪切力-剪切位移骨架曲线,并通过与试验结果的对比验证进行合理改进。滞回规则采用 Ozcebe 和 Saatcioglu 建议的剪切滞回模型<sup>[14]</sup>。

以司炳君等<sup>[15]</sup>进行的六个弯剪破坏钢筋混凝土桥墩拟静力试验结果为依据,对 MCFT 理论的计算精度进行验证。首先基于 MCFT 计算了各桥墩试件的剪切力  $V$  与剪切位移  $\Delta_v$  的关系及试件的弯曲开裂、剪切开裂、纵筋屈服和极限承载力状态,如图 2 所示(限于篇幅,仅列出 A1~A3 试件结果)。同时,将计算的纵筋屈服荷载、极限荷载与试验结果进行对比列入表 1。从图 2 可以看出,由于 MCFT 计算至桥墩极限荷载后便停止,得到的各桥墩试件剪切力-剪切位移关系呈双折线形式,且剪切开裂荷载对应桥墩剪切力-剪切位移曲线中刚度的突变,而弯曲开裂和纵筋屈服并未引起桥墩剪切刚度的显著变化。同时,由表 1 可知,基于 MCFT 理论计算的桥墩纵筋屈服荷载和极限荷载与试验结果吻合良好。

表 1 桥墩屈服荷载、极限荷载与弹性剪切刚度

Tab. 1 The yield loads, ultimate loads, and elastic shear stiffness of the bridge piers

试件编号	纵筋屈服荷载/kN			极限荷载/kN			弹性剪切刚度/kN/mm		
	MCFT	试验	试验/MCFT	MCFT	试验	试验/MCFT	MCFT	式(2)	式(2)/MCFT
A1	100	98	0.98	117.3	126.8	1.08	1425.5	1330.8	0.93
A2	115	106	0.92	136.1	154.6	1.14	1422.4	1392.7	0.98
A3	135	139	1.03	163.3	199.9	1.22	2077.0	1774.4	0.85
A4	82	82	1.0	98.8	105.3	1.07	987.6	1077.2	1.09
A5	118	125	1.06	141.9	159.4	1.12	1401.9	1282.4	0.91
A6	118	100	0.85	141.2	148.7	1.05	1403.5	1392.7	0.99

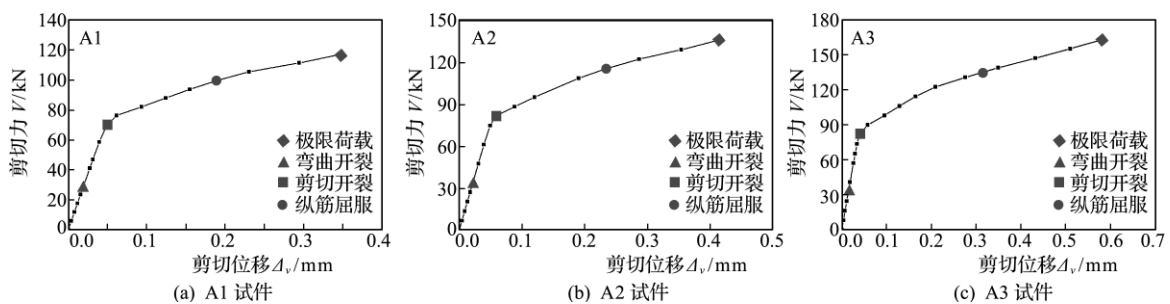


图 2 基于 MCFT 理论计算的桥墩剪切力-剪切位移关系

Fig. 2 The shear force-shear displacement relationships of the bridge piers based on MCFT

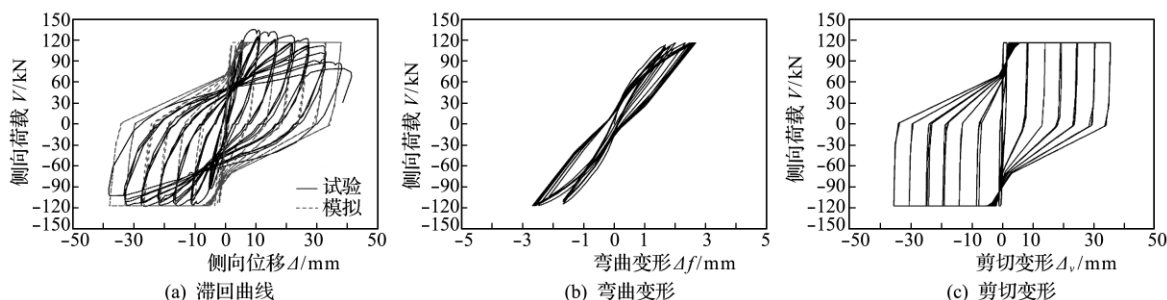


图3 低估桥墩极限承载力时的模拟结果 (A1 试件)  
Fig. 3 The simulated results by using underestimated ultimate loads (specimen A1)

根据弹性理论,混凝土结构开裂前剪切刚度的估计可按式计算:

$$K_{\text{shear}} = GA/L \quad (2)$$

式中  $A$  为墩柱的截面积,  $L$  为柱高度,  $G$  为混凝土的剪切模量,可定义为

$$G = E_c / 2(1 + \mu) \quad (3)$$

式中  $\mu$  为混凝土泊松比,本文取 0.2,  $E_c$  为混凝土弹性模量。

由于 MCFT 计算的墩柱剪切力-剪切位移关系在混凝土剪切开裂前基本为直线,本文将 MCFT 计算的剪切开裂前刚度与经验公式(2)计算的刚度值进行对比,如表 1 所示,可以看出,MCFT 计算的桥墩弹性阶段剪切刚度与经验公式吻合良好。

### 2.4 剪切力-剪切位移关系的建立

基于纤维模型计算了各桥墩试件的极限荷载,并与试验结果对比列入表 2。可以看出,与试验结果相比,无论是 MCFT 还是纤维模型,对弯剪破坏桥墩极限承载力的计算都达到了很好精度。但值得关注的是,无论与纤维模型还是试验结果相比,MCFT 计算的极限荷载值均略偏低。这主要是由于 MCFT 理论采用开裂混凝土受压和受压的本构关系,未考虑箍筋约束效应引起的混凝土抗压强度的提高,而纤维模型则考虑了箍筋约束效应。

表 2 利用 MCFT 与纤维模型计算的桥墩极限荷载值  
Tab. 2 The ultimate loads of the bridge piers calculated by MCFT and fiber model

试件编号	MCFT /kN	纤维模型 /kN	试验 /kN	试验 /MCFT	试验 /纤维模型	纤维模型 /MCFT
A1	117.3	130.3	126.8	1.08	0.97	1.11
A2	136.1	155.5	154.6	1.14	0.99	1.14
A3	163.3	185.8	199.9	1.22	1.08	1.14
A4	98.8	106.2	105.3	1.07	0.99	1.07
A5	141.9	159.1	159.4	1.12	1.0	1.12
A6	141.2	160.5	148.7	1.05	0.93	1.14

考虑到 MCFT 理论计算的桥墩极限承载力略低于试验结果,当利用 MCFT 理论计算的剪切力-剪切位移关系定义桥墩的抗剪骨架曲线并建立弯剪分析模型后,由于 MCFT 计算的桥墩极限承载力偏低,未达到桥墩实际承载能力,会使得纤维模型计算的桥墩弯曲变形成分大大减小,高估桥墩的剪切变形,导致计算结果产生较大误差,如图 3 所示。

桥墩弯剪破坏的本质是塑性铰形成后由于抗剪强度不足发生的剪切破坏,此时桥墩已经达到极限抗弯能力,考虑到 MCFT 理论计算的桥墩极限承载力可能低于桥墩实际的抗弯能力,从而,在数值模型中低估桥墩的弯曲变形成分,本文建立剪切力-剪切位移骨架关系时进行了如下考虑。

(1) 剪切力-剪切位移骨架曲线采用图 4 的折线形式,  $(\Delta_{cr}, V_{cr})$  点对应的是桥墩剪切开裂时的剪切位移与荷载,即图 2 中剪切力-剪切位移曲线的拐点,  $(\Delta_y, V_y)$  点则对应 MCFT 理论计算的极限位移与极限荷载,  $V_m$  则对应纤维模型计算的极限荷载。

(2) 自初始加载至  $(\Delta_y, V_y)$  点的剪切力-剪切位移关系仍按照 MCFT 理论计算。

(3) 自  $(\Delta_y, V_y)$  点至  $(\Delta_m, V_m)$  点的刚度值取初始刚度的 1/100。

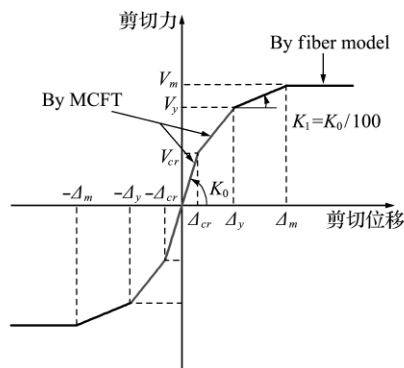


图 4 建立的剪切力-剪切位移骨架曲线  
Fig. 4 The shear force-shear displacement primary curve proposed in the current work

### 3 弯剪分析模型的验证

利用所建立的弯剪数值分析模型模拟了司炳君等<sup>[15]</sup>进行的六个弯剪破坏桥墩试件的滞回曲线,并获得了各试件的弯曲及剪切变形成分;同时,利用纤维单元模型对各桥墩试件进行了滞回性能的模拟,限于篇幅,仅给出了A1与A3试件的模拟结果,如图5和图6所示。可以看出,弯剪分析模型

模拟的滞回曲线与试验结果吻合较好,与纤维模型模拟结果相比,弯剪分析模型的最大优点在于更好的模拟了滞回曲线的捏拢效应。从弯曲与剪切变形成分进行分析,A1试件中,试件剪切变形占总变形的比重约为10%;对A3试件,剪切变形所占比重较大,严重破坏前剪切变形占总变形的比重约在30%左右,最终破坏时可达总变形的50%以上,即试件最终的变形由剪切破坏引起,这与钢筋混凝土

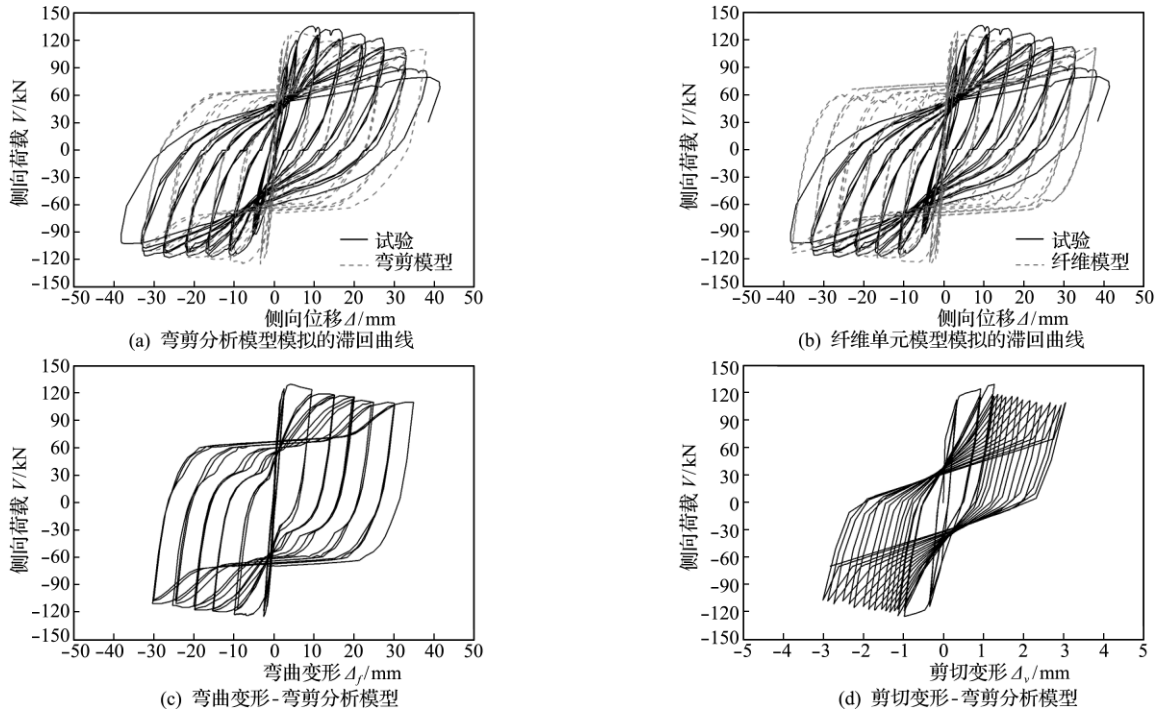


图5 试件A1模拟结果

Fig. 5 The simulated results of specimen A1

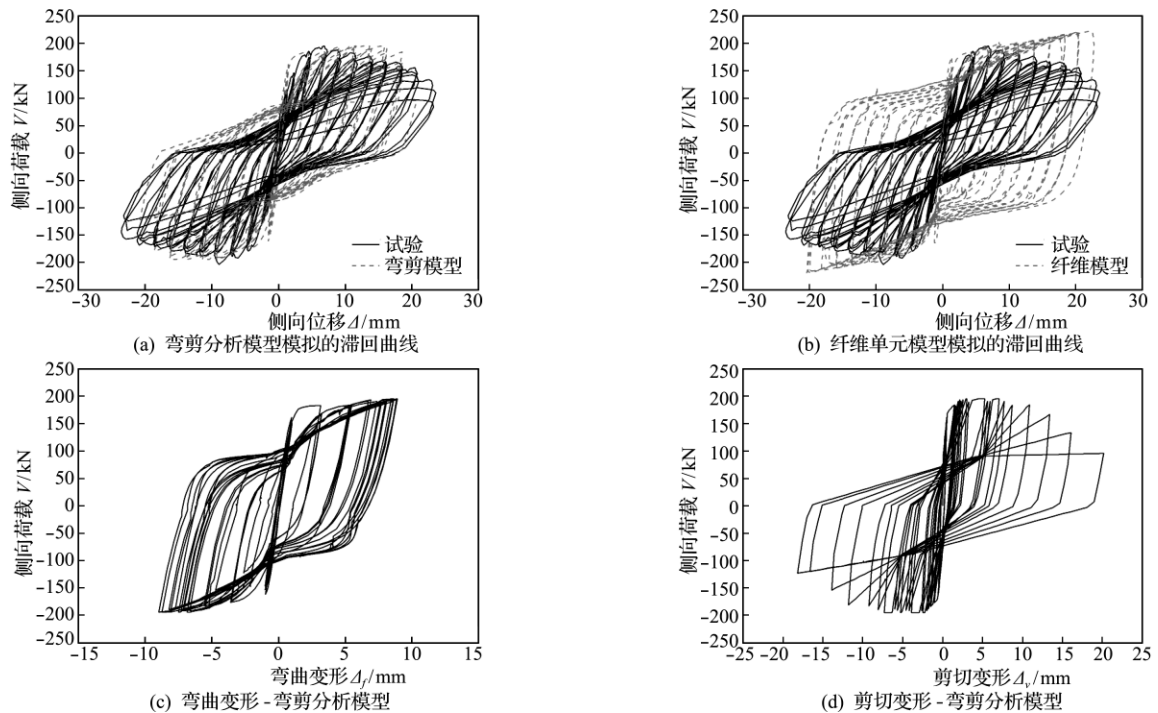


图6 试件A3模拟结果

Fig. 6 The simulated results of specimen A3

桥墩的弯剪破坏机理与破坏过程都很好的吻合。

## 4 结 论

本文基于 MCFT 理论建立了钢筋混凝土桥墩的剪切力-剪切位移关系,并以纤维模型确定剪切力的极限荷载,进而与考虑桥墩弯曲变形的纤维单元模型耦合,建立了钢筋混凝土桥墩的弯剪数值分析模型。并通过与六个圆形截面钢筋混凝土桥墩的拟静力试验结果对比,验证了模型的准确性,本文主要研究结论如下。

(1) MCFT 理论计算的弯剪破坏钢筋混凝土桥墩的屈服荷载、极限荷载均与试验结果吻合很好,计算的弹性阶段剪切刚度与经验模型基本一致,实现了钢筋混凝土桥墩在承载力意义上的准确预测。

(2) 剪切开裂是引起钢筋混凝土桥墩剪切力-剪切位移关系刚度突变的主要原因,弯曲开裂与纵筋屈服对剪切刚度的影响较小。

(3) 分析模型克服了由于 MCFT 理论预测的极限承载力偏低而难以有效考虑桥墩弯曲变形成分的问题,对弯剪破坏钢筋混凝土桥墩的滞回曲线、剪切与弯曲变形成分进行了较为准确的预测。在变形能力范畴上对弯剪破坏钢筋混凝土结构进行了较为准确的模拟分析。

## 参考文献(References):

- [1] 孙治国,郭 迅,王东升,等. 钢筋混凝土空心墩延性变形能力分析[J]. 铁道学报, 2012, **34**(1): 91-96. (SUN Zhi-guo, GUO Xun, WANG Dong-sheng, et al. Analysis on ductile deformability of hollow reinforced concrete bridge piers [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2012, **34**(1): 91-96. (in Chinese))
- [2] 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 Qing-hua, WANG Dong-sheng, 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))
- [3] 艾庆华,王东升,李宏男,等. 基于塑性铰模型的钢筋混凝土桥墩地震损伤评价[J]. 工程力学, 2009, **26**(4): 158-166. (AI Qing-hua, WANG Dong-sheng, LI Hong-nan, et al. Seismic damage evaluation of RC bridge columns based on plastic hinge model [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, **26**(4): 158-166. (in Chinese))
- [4] Lampropoulos A P, Dritsos S E. Modeling of RC columns strengthened with RC jackets [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2011, **40**(14): 1-17.
- [5] Sun Z G, Si B J, Wang D S, et al. Experimental research and finite element analysis of bridge piers failed in flexure-shear modes [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2008, **7**(4): 403-414.
- [6] 孙治国,王东升,郭 迅,等. 钢筋混凝土墩柱等效塑性铰长度研究[J]. 中国公路学报, 2011, **24**(5): 56-64. (SUN Zhi-guo, WANG Dong-sheng, GUO Xun, et al. Research on equivalent plastic hinge length of reinforced concrete bridge column [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2011, **24**(5): 56-64. (in Chinese))
- [7] 孙治国,王东升,郭 迅,等. 汶川大地震绵竹市回澜立交桥震害调查[J]. 地震工程与工程振动, 2009, **29**(4): 132-138. (SUN Zhi-guo, WANG Dong-sheng, GUO Xun, et al. Damage investigation of Huilan interchange in Mianzhu after Wenchuan earthquake [J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2009, **29**(4): 132-138. (in Chinese))
- [8] Li J Z, Peng T B, Xu Y. Damage investigation of girder bridges under the Wenchuan earthquake and corresponding seismic design recommendations [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2008, **7**(4): 337-344.
- [9] Vecchio F J, Collins M P. The modified compression field theory for reinforced concrete elements subjected to shear [J]. *ACI Structural Journal*, 1986, **83**(2): 219-231.
- [10] Bentz E C, 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): 614-623.
- [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] Mzrtinez-Rueda J E, Elnashai A S. Confined concrete model under cyclic load [J]. *Materials and Structures*, 1997, **30**(3): 139-147.
- [13] Menegotto M, Pinto P E. Method of Analysis for Cyclically Loaded Reinforced Concrete Plane Frames Including Changes in Geometry and Nonelastic Behavior of Elements Under Combined Normal Force and Bending [R]. IABSE Preliminary Report for Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Struc-

tures Acted on by Well-Defined Repeated Loads, Lisbon, Portugal, 1973.

- [14] Ozcebe G, Saatcioglu M. Hysteretic shear model for reinforced concrete members [J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1989, **115**(1):132-148.
- [15] 司炳君, 孙治国, 杜修力, 等. 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 Bing-jun, SUN Zhi-guo, DU Xiu-li, et al. 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))

## Flexural-shear analysis model for reinforced concrete bridge piers

SUN Zhi-guo<sup>1</sup>, WANG Dong-sheng<sup>\*1</sup>, LI Hong-nan<sup>2</sup>, DU Xiu-li<sup>3</sup>

(1. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

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

3. The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of the Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** The analysis model for RC bridge piers with flexural-shear interaction was proposed based on the Modified Compression Field Theory (MCFT) and fiber element model. In the analysis model, the shear force-shear displacement relationship was obtained by the MCFT, and implemented in a nonlinear fiber analysis program to simulate the flexure-shear-axial interaction of the bridge piers. The accuracy of the analysis model was verified by comparing with quasi-static test results of 6 circular bridge piers failed in flexural-shear mode. It is found that the yield strength, ultimate strength and elastic shear stiffness of the bridge piers predicted by MCFT are very accurate. The shear cracking is the key influencing factor induced the changing of shear stiffness, while the flexural cracking and yielding of the longitudinal bars has little influence. Compared with test results, the proposed flexural-shear interaction analysis model simulated the hysteretic curves, flexural and shear deformations of the bridge piers well.

**Key words:** RC bridge piers; flexural-shear analysis model; The Modified Compression Field Theory (MCFT); fiber element model; hysteretic curves