

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230123001

地震下RC空心墩弯-剪数值模型及混合试验验证*

蒋雨润¹, 梅竹^{2,3}, 刘洋^{2,4}, 陈江¹, 熊峰¹

(1. 四川大学建筑与环境学院, 四川成都 610065; 2. 温州大学建筑工程学院, 浙江温州 325035; 3. 中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150080; 4. 滨海软土地基防灾减灾技术浙江省工程研究中心, 浙江温州 325035)

摘要: 地震作用下钢筋混凝土空心截面中高桥墩多发生弯剪破坏, 而其弯剪耦合反应的数值模拟方法尚不完善。针对当前弯剪串联模型中的剪切模型未考虑空心截面特征的问题, 提出基于关键参数的剪切模型修正方法, 并通过混合试验进行验证。分别从桥墩的剪跨比、混凝土开裂后剪切刚度、等效截面面积、桥墩有效高度与墩身混凝土斜裂缝倾角等参数入手, 提出剪切模型关键参数的修正方法; 基于修正的开裂剪切强度、开裂剪切位移、剪切极限承载力及其对应的剪切位移与剪切破坏位移, 提出适用于空心桥墩剪切性能模拟的三折线型骨架曲线建立方法; 通过组合剪切模型与基于纤维单元的弯曲模型, 建立空心墩弯剪耦合反应的数值模型; 与一座空心高墩桥混合试验结果对比, 其桥墩子结构的物理试验结果验证了数值模拟方法。分析表明: 通过本文所提数值模拟方法得到的空心桥墩弯剪滞回曲线与真实地震加载路径下的试验曲线匹配良好, 能够模拟空心墩在真实地震作用下的弯剪滞回行为。

关键词: 钢筋混凝土空心墩; 弯-剪耦合; 剪切骨架模型; 地震响应模拟; 混合试验

中图分类号: U443.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)03-0596-09

Seismic Bending-Shear Model for RC Hollow Pier and the Hybrid-test Validation

JIANG Yurun¹, MEI Zhu^{2,3}, LIU Yang^{2,4}, CHEN Jiang¹, XIONG Feng¹

(1. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China;

3. Key Laboratory of Vibration Earthquake Engineering and Engineering Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 4. Zhejiang Engineering Research Center of Disaster Prevention and Mitigation for Coastal Soft Soil Foundation, Wenzhou 325035, China)

Abstract: Seismic action on reinforced concrete hollow-section medium-high piers often results in bending-shear failure. However, studies on numerical simulation for their coupled bending-shear behavior are not yet fully developed. Addressing the issue that current shear models in bending-shear series models do not consider the characteristics of hollow sections, this paper proposes a method for

* 收稿日期: 2023-01-23; 修回日期: 2023-03-28

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51908384)、国家重点研发计划项目(2021YFB2600500)、中国博士后科学基金面上资助项目(2019M663500, 2020M673223)、中国地震局工程力学研究所基本业务费专项项目(2019D18)资助

作者简介: 蒋雨润(1998—), 男, 硕士研究生。主要从事钢筋混凝土刚构桥抗震性能研究。

E-mail: jiangyurun2151@foxmail.com

modifying the shear model based on key parameters and verifies it through hybrid testing. By focusing on parameters such as the shear span ratio of the pier, post-cracking shear stiffness of the concrete, equivalent cross-section area, effective height of the pier, and the inclination angle of the concrete diagonal cracks in the pier, this paper proposes a modification method for the key parameters of the shear model. Based on the corrected cracking shear strength, cracking shear displacement, ultimate shear capacity, and its corresponding shear displacement and shear failure displacement, a trilinear skeleton curve establishment method suitable for simulating the shear performance of hollow piers was proposed. By combining the shear model with a bending model based on fiber elements, a numerical model for the coupled bending-shear response of hollow piers was established. Comparison with the hybrid test results of a hollow high-pier bridge validated the numerical simulation method through the physical test results of the pier substructure. Results showed that the bending-shear hysteretic curves provided by the numerical model matched well with the experimental curves under real seismic loading paths. The proposed model can accurately simulate the bending-shear hysteretic behavior of hollow piers under actual earthquake loading conditions.

Keywords: reinforced concrete hollow pier; bending-shear model; shear skeleton model; seismic responses; hybrid test

0 引言

空心截面能够在保证钢筋混凝土桥墩具有一定抗弯刚度的前提下大幅减少自重及材料用量,因此逐渐发展成为我国山区大跨高墩桥的主要截面形式之一^[1]。空心截面在减小桥墩横截面积的同时,显著削弱了桥墩的抗剪能力,地震作用下的剪切变形在桥墩总变形中占有相当大的比重^[2-3],这一特点已被试验验证^[4]。然而,当前针对该类钢筋混凝土空心墩弯-剪滞回性能的数值模拟研究仍然存在较多不足。

在地震作用下,以弯曲变形为主的中高墩,其力一位移滞回性能采用纤维模型模拟具有较好的分析精度和效率^[5]。但在剪切效应占比较大的空心桥墩中,基于平截面假定和单轴本构关系的纤维模型难以充分考虑剪切效应的影响,直接利用纤维模型进行空心桥墩的动力响应分析往往会产生较大误差^[6-7]。针对桥墩弯-剪耦合模拟,目前主流的方法是建立纤维模型用于模拟桥墩弯曲性能,然后将其与力一位移剪切模型进行串联。其中,纤维模型的发展较为成熟,具有较好的模拟精度。因此,目前对空心桥墩弯-剪性能模拟的工作主要集中于对剪切模型的研究。

桥墩剪切模型模拟的准确性,主要依赖于剪力一位移剪切模型骨架曲线中关键参数的确定。主要

有两种方法:一种是 MCFT (Modified Compression Field Theory) 理论^[8],一种是基于桥墩抗剪性能经验公式^[9-10]。MCFT 理论计算精度相对较高,但原理相对复杂且计算量大,针对复杂结构的应用受限。桥墩抗剪性能经验模型能够较好地兼顾易用性、计算效率与精度,因此在桥墩弯-剪耦合模拟中被广泛地采用。针对实心墩柱,雷拓等^[9]假定在剪切破坏前,墩柱保持弹性,剪力一位移骨架曲线的特征点在一条直线上。此方法计算简单,但由于忽略了剪切开裂后抗剪刚度的变化,致使对墩柱弯-剪性能模拟不够准确。蔡茂等^[10]结合现有经验公式,得到实心墩柱的三折线型剪力一位移骨架曲线,以此考虑剪切开裂导致的剪切刚度减小及破坏阶段的剪切承载力衰退,具有较好的模拟精度。针对钢筋混凝土空心墩柱,基于经验模型的剪切性能模拟研究还不够充分,秦海^[11]采用单直线模型模拟空心桥墩剪切滞回性能,与真实空心墩柱的地震弯剪效应偏差较大。

本文结合现有钢筋混凝土墩柱剪切性能经验公式,针对空心截面特性^[12]对经验公式中的剪跨比、混凝土开裂后构件刚度、墩柱有效高度、等效横截面面积与墩身表层混凝土斜裂缝倾角等参数进行修正,给出空心桥墩剪切模型骨架曲线中开裂剪切强度、开裂剪切位移、极限剪切承载力与其对应的剪切位移等关键参数的经验计算公式;基于 Opensees 平台,将该剪切模型与基于纤维截面的弯

曲模型进行串联,建立空心桥墩的弯-剪模型。最后,通过能够反映地震作用下真实加载路径的高墩桥混合试验数据^[13]对此模型进行验证,并与两组对照组(直线型剪切模型和基于MCFT理论的三折线模型)结果进行对比分析。

1 空心桥墩剪力-剪切位移模型

1.1 桥墩骨架曲线的三折线模型

描述钢筋混凝土墩柱剪力-剪切位移关系的骨架曲线主要有直线模型和三折线模型两种。直线模型^[9]的关键折点可由初始剪切刚度 K_{shear} 和剪切破坏承载力 V_n 来确定,如图1(a)所示。该模型假定构件剪切刚度不变,力和位移关系曲线为线性,直至达到剪切承载力 V_n 处发生破坏。当达到最大剪切承载力后,桥墩抗剪能力发生退化,采用图1(a)所示下降段直线进行描述。图中 V_{res} 为桥墩残余抗剪能力。

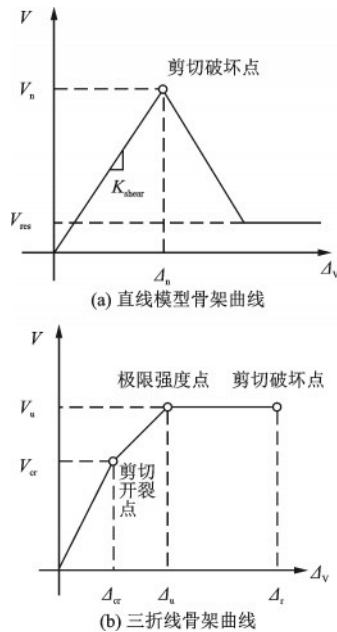


图1 桥墩现有剪切骨架曲线示意

Fig.1 Schematic diagram of shear skeleton curve of pier

有研究表明,混凝土开裂后,桥墩的剪切刚度会发生明显降低^[14];并且,在桥墩达到剪切承载力后,还存在一定的延性,不会立刻发生破坏^[11]。为此,三折线模型被提出。该模型通过增加开裂控制点($V_{\text{cr}}, \Delta_{\text{cr}}$)来考虑混凝土开裂前后桥墩剪切刚度的变化,如图1(b)所示。 V_{cr} 和 Δ_{cr} 为桥墩的剪切开裂

荷载和位移; V_n 和 Δ_n 为桥墩的剪切极限荷载和对应位移;同时,三折线模型通过增加一段水平线来模拟桥墩达到剪切承载力后的延性, Δ_r 是最终发生破坏时的位移。当桥墩达到剪切破坏点,桥墩抗剪能力退化,三折线模型采用与直线模型相同的方法来描述其剪切能力的退化。

三折线模型由剪切开裂点、极限强度点和剪切破坏点三个控制点来确定。针对这三个控制点的五个参数,有学者给出了易于应用的经验计算公式^[15]。也有学者提出修正压力场理论(MCFT),分析计算钢筋混凝土构件开裂和破坏时的位移和力。尽管MCFT理论计算结果较为精确,但是其计算原理和过程相对复杂;在理论的基础上,往往还需要相关软件的支持。为兼顾计算精度与效率,目前桥墩三折线模型关键参数多基于经验计算公式来确定。

目前针对三折线模型关键参数经验公式的研究是相对独立的,笔者将现有可用成果进行了整合。

1.1.1 剪切开裂点

如前所述,混凝土剪切开裂是影响钢筋混凝土空心桥墩抗剪性能的主要因素之一^[14]。然而,我国《公路桥梁抗震设计规范》^[16]在计算实心桥墩抗剪能力时,没有给出混凝土剪切开裂荷载和位移的相关计算公式。因此,本文建议采用美国规范^[17]给出相关计算公式:

$$V_{\text{cr}} = 0.8v_b A_g + \frac{0.167P}{\lambda} \quad (1)$$

$$\Delta_{\text{cr}} = \frac{V_{\text{cr}}}{K_{\text{shear}}} \quad (2)$$

式中, V_{cr} 和 Δ_{cr} 为桥墩的剪切开裂荷载和位移; K_{shear} 为初始剪切刚度; v_b 为混凝土承受的剪应力; A_g 为桥墩横截面面积; λ 为桥墩剪跨比; P 表示轴力。

其中, K_{shear} 和 v_b 的计算公式为:

$$v_b = (0.067 + 10\rho_s) \sqrt{f_c} \leq 0.2 \sqrt{f_c} \quad (3)$$

$$K_{\text{shear}} = \frac{A_g \cdot G}{H} \quad (4)$$

式中, ρ_s 为纵筋配筋率; f_c 为混凝土抗压强度; G 为混凝土剪切模量,可近似地取混凝土弹性模量的0.45倍; H 为桥墩高度。

1.1.2 极限强度点

桥墩剪切极限强度点需要由剪切极限位移和剪切极限强度两个参数来确定。针对极限剪切位移 Δ_n 的研究还很不充分,现有经验公式不适用于空

心桥墩。针对桥墩剪切极限承载力 V_n 的研究相对丰富,本文修正公式以认可度较高的 M.N.Priestley 等^[18]提出的经验公式为基础。该公式考虑混凝土、箍筋和轴力的贡献三方面因素,其具体表达式为:

$$V_n = V_c + V_p + V_s \quad (5)$$

式中, V_c 、 V_p 、 V_s 分别为混凝土、轴力和箍筋提供的抗剪能力。

其中,
$$V_c = k\sqrt{f_c}(0.8A_g) \quad (6)$$

$$V_p = \frac{h-c}{2H} P \quad (7)$$

$$V_s = \frac{A_{sh}f_{yt}h}{s} \cot\theta \quad (8)$$

式中, A_g 表示桥墩横截面面积; c 为截面受压区高度; A_{sh} 表示箍筋面积总和; f_{yt} 表示箍筋屈服强度; h 为沿加载方向上的截面宽度; s 表示箍筋间距; θ 为剪切裂缝与桥墩轴线的夹角; k 为与延性系数 μ_Δ 相关的混凝土抗剪强度退化系数^[18], 建议取值如下:

$$k = 0.29 \quad \mu_\Delta < 2.0 \quad (9)$$

$$k = 0.1 + 0.095\mu_\Delta \quad 2.0 \leq \mu_\Delta \leq 4.0 \quad (10)$$

$$k = 0.1 \quad \mu_\Delta > 4.0 \quad (11)$$

1.1.3 剪切破坏点

三折线模型中,桥墩达到剪切极限强度后,其剪切强度不再增加,只发生剪切变形,其延性性能由一段水平线来模拟,因此,桥墩剪切破坏点只需要剪切破坏位移来确定。作者在目前文献中未找到可用的空心桥墩的剪切破坏位移经验公式。

1.2 空心桥墩的三折线模型

1.2.1 待修正参数概述

本文的空心桥墩三折线模型,其函数表达式采用与现有三折线模型相同的形式,如图1所示。本文针对空心截面特性,基于现有关键参数的经验公式,提出能够描述空心桥墩剪切骨架曲线三折线模型的关键参数经验公式。

为清晰明了,将骨架曲线关键参数与桥墩材料、尺寸、荷载等参数的函数关系表达为:

$$V_{cr} = f(P, \lambda, A_g, f_c, \rho_s) \quad (12)$$

$$\Delta_{cr} = g(P, \lambda, A_g, f_c, \rho_s, G, H) \quad (13)$$

$$V_n = f(P, k, A_g, f_c, f_{yt}, A_{sh}, c, H, h, s, \theta) \quad (14)$$

与空心截面特性相关、待修正的参数有 A_g 、 λ 和 θ 。由于空心截面剪应力分布与实心截面不同,所以对截面上剪力有贡献的截面积亦不同,参考之前

研究成果^[19],本文建议将横截面面积 A_g 修正为腹板面积。对于剪跨比 λ 和倾角 θ 的修正,请见后文详述。

如前文所述,确定三折线模型所需的关键参数中,剪切极限位移 Δ_n 与破坏位移 Δ_r 没有可参考的经验公式,本节将给出确定方法。

1.2.2 剪跨比 λ 修正与倾角 θ 修正

(a) λ 的修正

桥墩剪跨比 λ , 反映的是截面上正应力与切应力的比例关系。本文作者的研究表明^[12], 现有桥墩经验剪跨比公式 $\lambda = H/h$ 不能够正确反映钢筋混凝土空心截面的应力关系,并针对空心桥墩提出了新的剪跨比计算公式:

$$\lambda = \frac{1}{1 + 2(\beta - 2\gamma)(1 - \gamma)} \cdot \frac{H}{h} \quad (15)$$

式中, h 为加载方向上截面有效高度; γ 为壁厚比, $\gamma = t/h$; β 为宽长比, $\beta = b/h$, 如图2所示。 H 为桥墩有效高度,若墩梁铰接(墩顶无转动约束), H 建议取桥墩全高;若墩梁固接(墩顶有转动约束), H 建议取桥墩半高。空心桥墩往往与高墩伴随出现,高墩桥梁受高阶振型影响较大,墩身可能出现多个反弯点,桥墩有效高度 H 采用桥墩半高和全高均不适用,基于作者之前的研究成果^[12], 本文建议 H 取墩身由下至上第一个反弯点的高度,如图3所示。

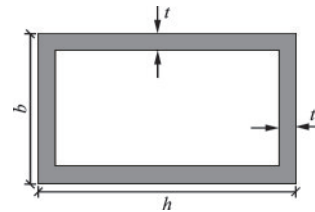


图2 空心桥墩截面示意

Fig.2 Schematic diagram of rectangular hollow pier section

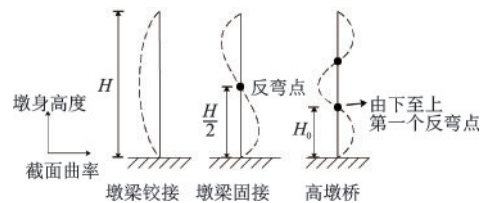


图3 桥墩有效高度

Fig.3 Effective height of piers

(b) θ 的修正

普通实心桥墩弯剪破坏时,其剪切斜裂缝与轴线的夹角约为 35° (图4(a))。而现有试验结果显

示^[14],空心桥墩发生弯剪破坏时剪切斜裂缝发展与常规桥墩不同,剪切斜裂缝与轴线的夹角约为 60° ,如图4(b)所示。由文献[18]可知, θ 主要用来确定由箍筋提供的剪力。因此,空心桥墩箍筋贡献的抗剪能力与常规实心桥墩不同,式(8)中 θ 建议修正为 60° 。

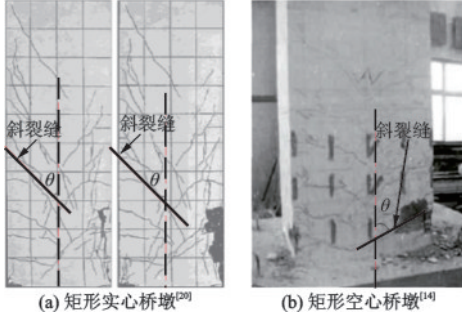


图4 混合试验桥墩裂缝分布对比

Fig.4 Comparison of crack distribution of pier in hybrid test

1.2.3 剪切极限位移 Δ_n

目前对空心桥墩极限剪切位移的计算公式研究仍不是很充分。本文提出采用纵筋屈服点(V_y 、 Δ_y)计算极限位移。有研究指出桥墩纵筋屈服对剪切刚度的影响不大^[8],即纵筋屈服点引起的刚度变化可以忽略。故本文认为剪切开裂点(V_{cr} 、 Δ_{cr})与极限强度点(V_n 、 Δ_n)间可视为直线,如图5所示。

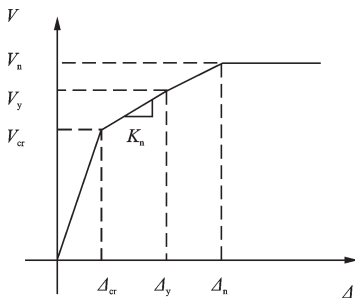


图5 开裂后剪切刚度

Fig.5 Shear stiffness after cracking

基于此,本文通过现有屈服强度和屈服位移的经验公式^[15],首先确定混凝土开裂之后的刚度 K_n :

$$K_n = \left(\frac{0.2 + 0.4\eta}{3} \right) \frac{E(0.8A_g)}{H} \quad (16)$$

然后结合极限剪切承载力 V_n 确定对应极限位移 Δ_n :

$$\Delta_n - \Delta_{cr} = \frac{V_n - V_{cr}}{K_n} \quad (17)$$

式中, E 为混凝土弹性模量; η 表示轴压比; A_g 为针对空心截面修正后的截面面积。

综上,公式(4)、(7)、(13)、(14)和(16)中提及的桥墩高度 H ,针对中低墩,自由端采用全墩高,固定约束采用半墩高,高墩采用第一个反弯点处墩高。

1.2.4 剪切破坏位移 Δ_r

由前文可知,针对三折线模型中剪切破坏位移 Δ_r 的相关研究较少,没有可用经验公式。针对矩形空心截面桥墩,文献[11]通过对试验数据进行统计,得到其破坏时总变形 Δ_s (弯曲变形与剪切变形之和)与桥墩材料、尺寸和荷载等参数的回归公式为:

$$\Delta_s = 14.1n + 2.6m - 6.8\eta - 0.1\lambda + 6.05\gamma + 0.33 \geq \frac{L}{100} \quad (18)$$

$$n = \rho_v f_{yt} / f_c \quad (19)$$

$$m = \rho_s f_y / (0.85f_c) \quad (20)$$

式中, η 为轴压比; γ 为壁厚比; ρ_v 为加载方向的配箍率; f_{yt} 为箍筋屈服强度; f_c 为混凝土抗压强度; ρ_s 为纵筋配筋率; f_y 为纵筋屈服强度; λ 为剪跨比(需采用本文修正后的空心桥墩剪跨比)。

同时,墩柱弯曲性能的分析理论与数值模拟发展很成熟,弯曲位移的分析结果较为准确,因此,本文提出采用桥墩破坏时的总变形(Δ_s)与弯曲变形 Δ_b 之差计算得到破坏时的剪切位移,即 Δ_r :

$$\Delta_r = \Delta_s - \Delta_b \quad (21)$$

2 空心桥墩弯-剪模型试验验证

以钢筋混凝土空心高墩刚构桥混合试验的子结构试验数据为依据,对本文所提出的弯-剪串联模型进行验证。钢筋混凝土空心高墩刚构桥混合试验地震荷载采用的是El-Centro(NS,1940)地震记录,其试验子结构的加载路径为该地震作用下产生的桥墩节点真实的位移路径。

2.1 弯-剪串联数值模型

基于Opensees软件平台,将本文提出的三折线剪切模型与纤维模型进行串联,建立如图6所示的桥墩弯剪数值模型。其中,节点1~2是纤维梁柱单元,可较为精确地考虑模型的弯曲变形;节点2~3

是零长度剪切弹簧单元,其剪切力一位移曲线为三折线模型,其拐点关键参数由本文提出的计算公式确定。两个单元串联以共同模拟桥墩的位移响应。

桥墩底部为固结形式,顶部节点受水平、轴向和转角三个自由度上的位移荷载。值得说明的是,墩顶三个自由度上的位移荷载,是由高墩刚构桥混合试验得到的在地震作用下真实的桥墩位移响应。

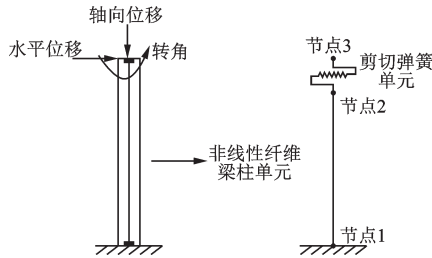


图6 桥墩弯剪串联模型
Fig.6 Schematic diagram of pier model

模型主体为纤维梁柱单元,混凝土和钢筋材料分别由 Concrete01 和 Steel02 定义;纤维梁柱单元所使用的纤维截面具体划分如图7所示。图中浅色圆点代表钢筋纤维,深色部分代表核心混凝土,外侧浅色则为表层混凝土。零长度剪切弹簧单元采用 Limit State Material 和 Limit curve 定义,具体参数采用前文提供的修正公式计算,具体见表1。

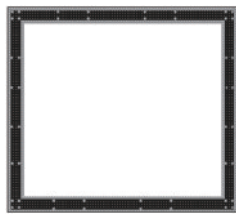


图7 纤维截面示意
Fig.7 Schematic diagram of fiber section

2.2 算例桥墩原型结构

本文模拟的空心桥墩为云南省一座高墩刚构

表1 本文模型骨架曲线关键参数

| 剪切弹簧参数 | V_{cr}/kN | Δ_{cr}/mm | V_n/kN | Δ_n/mm | Δ_r/mm |
|--------|-------------|------------------|----------|---------------|---------------|
| 取值 | 137.5 | 0.36 | 246.2 | 1.96 | 8.03 |

桥左桥墩的一部分,如图8所示。该高墩刚构桥为三跨钢筋混凝土连续刚构桥,桥跨布置为90 m+170 m+90 m,全长350 m。主桥两桥墩完全相同,墩高为126.06 m。该桥混合试验以左墩高31.2 m作为试验子结构,其余实线部分为数值子结构。试验子结构的1:12缩尺试件在哈尔滨工业大学结构与抗震教育部重点实验室进行加载。试验子结构试件的材料参数见表2。

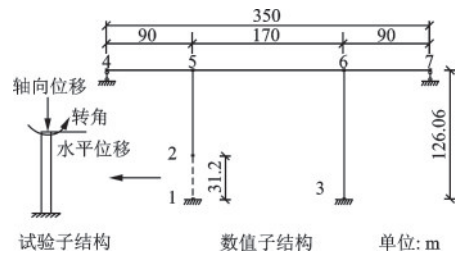


图8 混合试验示意
Fig.8 Schematic diagram of hybrid test

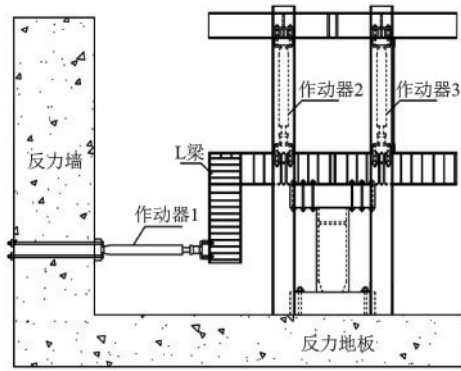
试验子结构由一个水平作动器实现水平位移,由两个竖向作动器实现轴向位移和平面内转角,试验子结构的加载装置如图9所示。试验子结构试件的加载位移是由空心高墩刚构桥在混合试验过程中得到的真实地震作用下左桥墩2节点处的位移响应,反映了地震作用下试件在水平、轴向和转角三个自由度上的真实加载路径。

本文以桥墩出现较强非线性的地震峰值加速度 $PGA=0.62g$ 和 $PGA=1.0g$ 两个工况为模型验证工况,试验获得的桥墩试验子结构试件顶端的真实加载路径如图10~12所示。其中,图11和图12的数据与文献[13]数据相同。与拟静力试验相比,混合试验采用真实地震作用下的结构响应作为验证数据,其验证后的桥墩弯-剪模型更能反映结构的动力特性,具有更好的通用性。

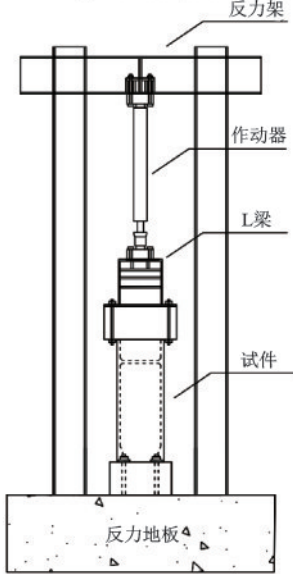
表2 试验子结构参数

Table 2 Parameters of test substructure

| 试件尺寸/m | | | 屈服强度/MPa | | 钢筋直径/mm | | 配筋率/% | 体积配箍率/% | 混凝土抗压强度/MPa |
|--------|------|------|----------|-------|---------|-----|-------|---------|-------------|
| h | b | t | 纵筋 | 箍筋 | 纵筋 | 箍筋 | | | |
| 1 | 0.89 | 0.07 | 427 | 313.4 | 8 | 2.4 | 0.98 | 0.46 | 27.3 |



(a) 试验子结构正视图



(b) 试验子结构侧视图

图9 试验子结构加载方案^[13]

Fig.9 Loading scheme of test substructure^[13]

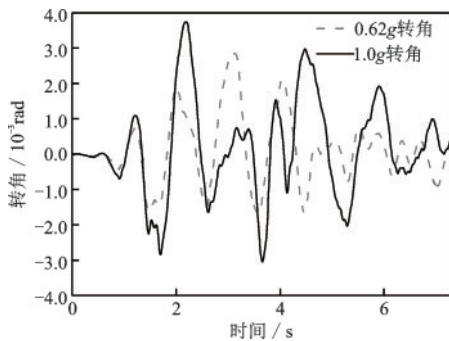


图10 试验子结构顶部节点转角历程

Fig.10 Time history diagram of rotation of top node of test substructure

2.3 对比验证

模型分析与试验的对比结果如图13所示。作为参考,本文同时给出了直线型剪切模型与MCFT剪切模型的分析结果。其中,直线型剪切模型采用

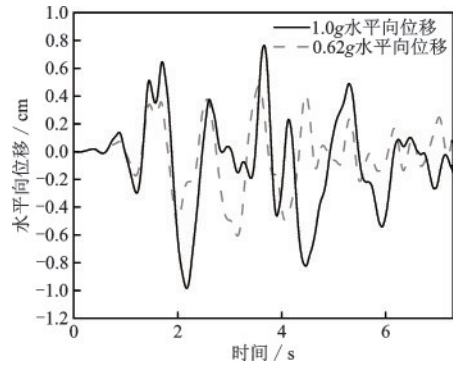


图11 试验子结构顶部节点水平向位移历程

Fig.11 Time history diagram of horizontal displacement of top node of test substructure

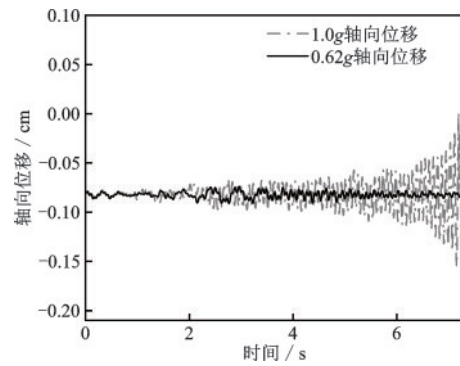
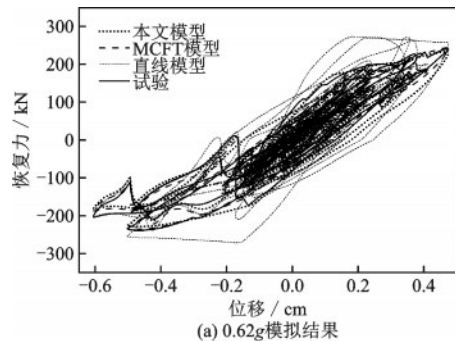
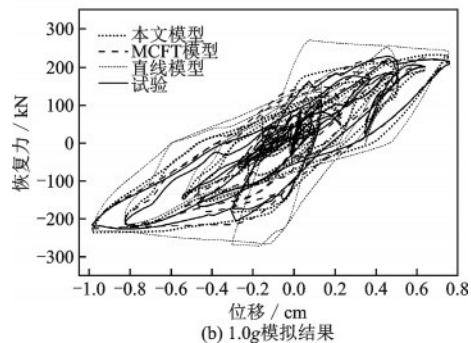


图12 试验子结构顶部节点轴向位移历程

Fig.12 Time history diagram of axial displacement of top node of test substructure



(a) 0.62g模拟结果



(b) 1.0g模拟结果

图13 恢复力—位移曲线模拟结果

Fig.13 Simulation results of restoring force—displacement curve

未修正的抗剪承载力 V_n 。MCFT 模型^[8]是指其曲线形式是与本文相同的三折线模型,关键性能参数采用 MCFT 理论分析得到。三个模型的关键性能参数见表 3。

由图 13 可知,直线型模型误差最大,其假设剪切破坏前后,剪切刚度保持不变与实际存在较大偏差。三种模型分析结果与极限强度误差见表 4,MCFT 理论分析得到的分析结果误差最小,其缺点在于该理论原理相对复杂且计算量大。基于本文所提出的三折线模型的极限强度误差为 8.79%,模拟的准确性较好,且模型关键参数可由修正的经验公式计算得到,易于工程应用。

表 3 对比模型骨架曲线关键参数

Table 3 Key parameters of the skeleton curve

| | V_{cr}/kN | Δ_{cr}/mm | V_n/kN | Δ_n/mm |
|---------|--------------------|-------------------------|-----------------|----------------------|
| 直线模型 | — | — | 272.4 | 0.30 |
| MCFT 模型 | 156.0 | 0.34 | 219.0 | 1.92 |

表 4 对比模型极限强度误差对比

Table 4 Comparison of ultimate strength errors

| | 分析结果/kN | 试验结果/kN | 误差% |
|---------|---------|---------|-------|
| 本文模型 | 246.2 | | 8.79 |
| 直线模型 | 272.4 | 226.3 | 20.37 |
| MCFT 模型 | 219.0 | | 3.23 |

试验验证结果表明,本文基于修正关键性能参数建立的弯—剪串联模型,能对试件剪切力—剪位移曲线进行较为准确的预测,数值模拟结果与试验数据的吻合较好,由此方法建立起的数值模型通过串联剪切弹簧比较准确地分析了试件由于空心桥墩的剪切效应。

3 结 论

(1) 基于现有墩柱抗剪强度计算方法,通过修正剪跨比、混凝土开裂后构件刚度、横截面面积、桥墩有效高度与墩身斜裂缝倾角等控制参数,给出了空心桥墩抗剪强度和位移的计算方法,建立了空心截面墩的三折线剪切骨架模型。

(2) 针对空心截面墩,本文所提出的三折线剪切模型串联纤维单元的弯—剪模型,能够考虑混凝土剪切断裂导致的刚度变化和达到极限剪切强度后的延性。

(3) 通过试验验证,本文提出的三折线模型显著提高了对空心墩弯—剪滞回模拟的准确性,能够包含地震作用加载路径对结构响应的影响。

参考文献:

- [1] Alajarmeh O S, Manalo A C, Benmokrane B. Hollow concrete columns: review of structural behavior and new designs using GFRP reinforcement [J]. *Engineering Structures*, 2020, 203: 109829.
- [2] Takahashi Y, Iemura H. Inelastic seismic performance of RC tall piers with hollow section [C] // *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*. Auckland: 12WCEE Publications, 2000.
- [3] 张锡治, 李星乾, 章少华, 等. 钢筋混凝土矩形空心墩受剪承载力研究 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2022, 43(2): 203-211.
Zhang X Z, Li X Q, Zhang S H, et al. Research on shear strength of rectangular hollow reinforced concrete piers [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2022, 43(2): 203-211. (in Chinese)
- [4] 田明丞, 徐锋, 王曙光, 等. 高轴压作用下矩形 RC 空心柱抗剪承载力 [J]. *土木工程与管理学报*, 2018, 35(3): 157-166.
Tian M C, Xu F, Wang S G, et al. Shear capacity of rectangular RC hollow column under high axial compression [J]. *Journal of Civil Engineering and Management Journal*, 2018, 35(3): 157-166. (in Chinese)
- [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(Sup1): 46-88.
- [6] Pinto A V, Verzeletti G, Magonette G, et al. Pseudo-dynamic testing of large-scale RC bridges in ELSA [C] // *Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering*. Acapulco: Elsevier Science Ltd., 1996: 1-8.
- [7] 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.
- [8] 司炳君, 孙治国, 王东升. 考虑剪切变形的 RC 薄壁空心墩滞回分析模型 [J]. *大连理工大学学报*, 2013, 53(6): 864-870.
Si B J, Sun Z G, Wang D S. Hysteretic analysis model of RC thin-walled hollow pier considering shear deformation [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2013, 53(6): 864-870. (in Chinese)

- [9] 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 T, Qian J, Liu B Q. 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)
- [10] 蔡茂, 顾祥林, 华晶晶, 等. 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 M, Gu X L, Hua J J, et al. Seismic response analysis of reinforced concrete columns considering shear effects[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(11): 97-108. (in Chinese)
- [11] 秦海. 基于桥墩地震破坏模式的滞回性能模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
Qing H. Hysteretic behavior simulation based on the pier failure mode [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [12] Yang L, Zhu M, Bin W. Seismic behaviour and failure-mode-prediction method of a reinforced-concrete rigid-frame bridge with thin-walled tall piers: Investigation by model-updating hybrid test [J]. Engineering Structures, 2020, 208: 110302.
- [13] 梅竹. 基于材料本构模型参数更新的RC结构混合试验方法及应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
Mei Z. RC structural hybrid simulation with model updating of material constitutive law [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese)
- [14] 孙治国. 钢筋混凝土桥墩抗震变形能力研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2012.
Sun Z G. Research on the seismic deformation capacity of RC bridge columns [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2012. (in Chinese)
- [15] Sezen H. Seismic behavior and modeling of reinforced concrete building columns [D]. Berkeley, California: University of California, Berkeley, 2000: 48-265.
- [16] 公路桥梁抗震设计规范: JTG/T 2231-01—2020[S]. [S.l.: s.n.], 2020.
- [17] ASCE-ACI Joint Task Committee 426. Shear strength of reinforced concrete members [J]. Journal of Structural Engineering, 1973, 99(6): 1091-1187.
- [18] Priestley M N, Vema R, Xiao Y. Seismic shear strength of reinforced concrete columns [J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(8): 2310-2329
- [19] 孙治国, 王东升, 郭迅. 地震作用下RC薄壁空心墩抗剪强度比较研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(12): 81-89.
Sun Z G, Wang D S, Guo X. Comparative study on shear strength of RC thin-walled hollow bridge piers under seismic effect [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(12): 81-89. (in Chinese)
- [20] 刘力维. 弯剪破坏钢筋混凝土柱的抗震性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
Liu L W. Study on seismic behavior of RC columns in flexural-shear failure [D]. Changsha: Hunan University, 2018. (in Chinese)

(本文编辑: 池营营)



(上接第 578 页)

- [27] 刘少伟, 何亚飞, 付孟雄, 等. 矿用树脂锚固剂固胶比与锚固性能关系[J]. 煤炭学报, 2021, 46(12): 3819-3832.
Liu S W, He Y F, Fu M X, et al. Relationship between catalyst-resin mastic ratio and anchoring performance of mineral resin grout [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(12): 3819-3832. (in Chinese)
- [28] 李英勇, 张思峰. 岩土预应力锚固结构服役寿命研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3704-3708.
Li Y Y, Zhang S F. Study of service life of geotechnical prestressed anchorage structure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12): 3704-3708. (in Chinese)
- [29] 岩石物理力学性质试验规程 第19部分: 岩石单轴压缩变形试验: DZ/T 0276.19—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [30] 杜云楼. 全长锚固系统力学行为及承载特性研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.
Du Y L. Research on mechanical behaviors and bearing characteristics of fully grouted anchorage system [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [31] 薛亚东, 黄宏伟. 锚索锚固力影响因素的试验分析研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1523-1526.
Xue Y D, Huang H W. Experimental study on affect factors on anchoring force of cable bolts [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(9): 1523-1526. (in Chinese)
- [32] 冯禹杰, 吴备创, 张圣帅. 锚杆局部黏结-滑移特性与围岩的相关性研究[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(9): 68-73.
Feng Y J, Wu B C, Zhang S S. Study on the correlation between the local bond and slip characteristics of bolt with the surrounding rocks [J]. Mining Research and Development, 2021, 41(9): 68-73. (in Chinese)