

Research on Double Plastic Hinges of Reinforced Concrete Pier Based on ABAQUS

Pei Liu¹, Jiangdong Deng¹, Zhouhong Zong²

¹Civil Engineering College, Guangzhou University, Guangzhou Guangdong

²Civil Engineering College, Southeast University, Nanjing Jiangsu

Email: liupe1992lp@163.com

Received: Feb. 28th, 2019; accepted: Mar. 14th, 2019; published: Mar. 21st, 2019

Abstract

In order to study the seismic performance of reinforced concrete column piers, the horizontal two-way reciprocating pseudo-static test of box-section concrete column piers was carried out. The finite element analysis software of ABAQUS was used to simulate the pushover performance based on the PQ-Fiber subroutine. The simulation results were basically consistent with the experiment results. Partial reinforcement is cut off on the basis of the experiment, and the model analysis of the double plastic hinges is carried out, which shows that the double plastic hinges can be formed on the column pier. The skeleton curves, hysteresis curves and strain curves of the single and double plastic hinges piers are compared. It shows that the double plastic hinges improve the ultimate deformation capacity of the pier, and the seismic capacity of the pier is enhanced.

Keywords

Reinforced Concrete Column Pier, Double Plastic Hinges, Finite Element Analysis, Hysteresis Curve, Skeleton Curve, Seismic Performance

基于ABAQUS的钢筋混凝土柱墩双塑性铰研究

刘培¹, 邓江东¹, 宗周红²

¹广州大学土木工程学院, 广东 广州

²东南大学土木工程学院, 江苏 南京

Email: liupe1992lp@163.com

收稿日期: 2019年2月28日; 录用日期: 2019年3月14日; 发布日期: 2019年3月21日

摘要

为研究钢筋混凝土柱墩的抗震性能, 进行了箱型截面混凝土柱墩水平双向往复拟静力试验, 利用ABAQUS

有限元分析软件在PQ-Fiber子程序的基础上进行了pushover数值模拟,模拟结果与实验基本吻合。在实验基础上截断部分钢筋进行双塑性铰的模型分析,表明可以在墩底形成双塑性铰,通过对比单双塑性铰柱墩的骨架曲线、滞回曲线、应变曲线等,表明双塑性铰柱墩承载力没有明显变化,而极限变形能力明显提高,桥墩的抗震能力得到增强。

关键词

钢筋混凝土柱墩, 双塑性铰, 有限元分析, 滞回曲线, 骨架曲线, 抗震性能

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

钢筋混凝土柱墩作为桥梁结构中的主要承载地震力的构件,震损破坏通常出现在柱墩的底部或顶部,国内外学者研究发现通过加固或使用特殊材料可以使塑性铰发生转移。邓江东[1]研究了一种新型复合立柱,通过在钢筋混凝土柱外表面粘贴一定的高度和厚度的钢板并将其焊接在基座的嵌入式工字钢上,发现柱底和加强钢板的上边缘可以形成双塑性铰,双塑性铰桥墩的最大承载力、极限变形、耗能能力都显著提高。美国加州大学 Panagiotou [2]对高层建筑中剪力墙结构采用双塑性铰 DPH 设计方法,即在结构的底部和 1/2 处分别设置塑性铰,表明双塑性铰链可消耗大部分的地震能量,延长结构周期,减小地震力的作用,而且合理的布置还可降低经济成本。梁兴文[3]建立了钢筋混凝土剪力墙模型,对 6 种不同的塑性铰数量和布置位置进行了非线性时程分析,表明多塑性铰区的塑性变形可减小高阶振型的影响,提高抗震性能。蒋永生[4]采用 2 种人工塑性铰转移铰方案,将塑性铰设置在离柱边一定距离的梁腹中下部,实验结果表明塑性铰转移后节点抗震性能优良。闻洋[5]通过对三层框架矩形截面钢管混凝土进行低周反复试验,试验发现塑性铰出现的顺序从中间层梁端到底层再到顶层梁端,最后出现在柱底部,体现了“强柱弱梁”的破坏机制,采用 ABAQUS 模拟得到的滞回曲线相吻合,抗震性能良好。

但总体来说对混凝土柱墩产生双铰的研究很少,在模型试验的基础上,本文采用原有钢筋截断的方法在截面的 1/4 处及柱底形成双塑性铰,并用 ABAQUS 进行模拟计算分析双塑性铰的滞回性能、骨架曲线,表明形成双塑性铰对结构的抗震更加有益。

2. 实验模型

2.1. 截面设计

本次桥墩实验共包括两个试件, A1 试件加载高度为 3.2 米, 竖向轴力为 420 KN, 轴压比 0.2。 B1 试件加载高度为 2.2 米, 轴压比 0.1。为了在柱的顶部进行两个方向的往复推拉, 设计了 $540 \times 700 \times 720$ mm 的柱帽, 为了锚固墩底, 设计了尺寸为 $250 \times 800 \times 1300$ mm 的基座。采用 C50 细石混凝土, 模型柱纵筋配 $28\phi 8$, 箍筋 $\phi 6$, 间距通长 100 mm, 具体截面尺寸和配筋如图 1, 力学参数见表 1。

2.2. 加载方式

模型竖直和水平方向采用不同的加载方式, 竖直方向实施力控制加载, 采用千斤顶预加载并保持恒定的力。水平方向位移加载, 采用双向受力同步加载制度, 加载曲线如图 2 (单位: mm)。

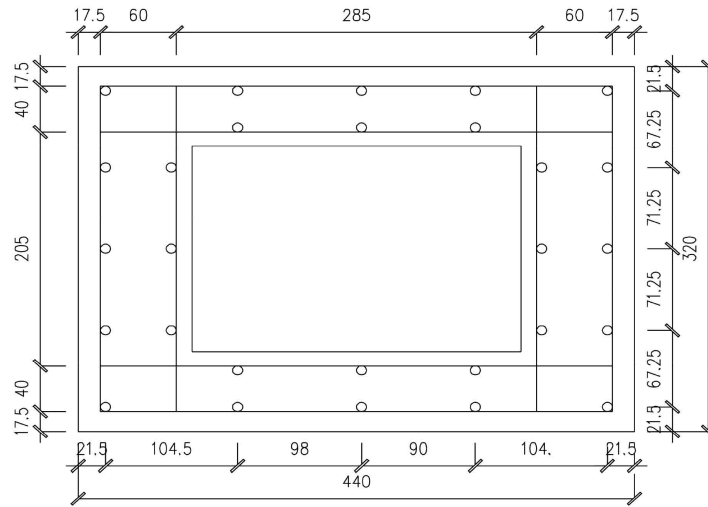


Figure 1. Cross-section reinforcement
图 1. 截面配筋

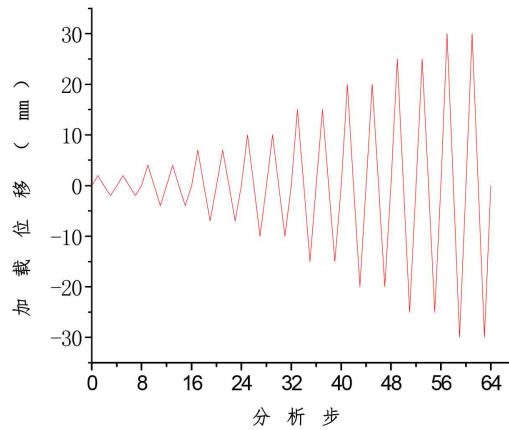


Figure 2. Horizontal loading amplitude curve
图 2. 水平加载幅值曲线

Table 1. Mechanical parameters of concrete (mpa)

表 1. 混凝土的力学参数(mpa)

强度等级	抗压强度	抗拉强度	弹性模量
C50	37	3.3	3.54×10^4
钢筋的力学参数 Mechanical parameters of steel bars			
直径	屈服强度	极限强度	弹性模量
6	375.27	503.81	2.11×10^5
8	326.51	456.6	2.12×10^5

3. 基于 ABAQUS 的数值模拟

3.1. 混凝土材料本构模型

3.1.1. 受压本构

ABAQUS 提供了三种自带的混凝土模型，本文采用能模拟往复加载的塑性损伤模型(Concrete

Damage Plasticity), 混凝土的应力应变关系曲线多种多样, 选用我国规范(GB 50010-2010)本构[6], 由 80 年代早期清华大学过镇海等人提出的计算式能较好的用于 ABAQUS 模拟。其受压曲线表达式如下:

上升段 x 升段其受压曲线表达式如下: $y = a_a x + (3 - 2a_a)x^2 + (a_a - 2)x^3$

下降段 x 降段受压曲线表达式如下:

$$y = \frac{x}{a_d(x-1)2+x}$$

$$\varepsilon_d = (700 + 172f_{ck}^{0.5}) * 10^{-6}$$

$$\alpha_a = 2.4 - 0.0125f_{ck}$$

$$\alpha_d = 0.157f_{ck}^{0.785} - 0.905$$

其中, $x = \varepsilon/\varepsilon_d$, $y = \sigma/f_{ck}$, f_{ck} 为混凝土轴心抗压强度, 若有实测值则取实测。 α_a 为上升段参数, α_d 为下降段参数, ε_d 为混凝土峰值应力所对应的应变。 E_c 为弹性模量, E_0 为 $0.7f_c$ 对应的割线模量, 根据计算得出表 2 数据。曲线应变截断值取 3 倍峰值应力对应的应变[7] [8]。

Table 2. Compressive constitutive parameters of concrete (unit: Mpa)

表 2. 混凝土的受压本构参数(单位: Mpa)

f_c	ε_d	α_a	α_d	E_0
37	0.00175	1.9375	1.7676	3.22765×10^4

3.1.2. 受压损伤因子 d_c

采用由 sidiroff 根据能量等价原理, 应力作用在受损材料产生的弹性余能与作用在无损材料的余能在形式上相同, 将弹性模量改为损伤时的等效弹性模量, 得出的无损方程:

$$W_0^e = \frac{\sigma^2}{2E_0}$$

等效有损伤弹性余能:

$$W_d^e = \frac{\sigma'^2}{2E_d}$$

化简得到: $d = 1 - (\sigma/E_0\varepsilon)^{0.5}$ 。

3.1.3. 受拉本构

ABAQUS 中提供了 3 种定义混凝土单轴受拉应力 - 应变关系的接口, 包括应力 - 开裂应变关系; 应力 - 裂缝宽度关系; 直接输入受拉断裂能。由混凝土断裂能准则可以看出混凝土的应力 - 开裂应变关系与单元尺寸有关, 网格大小不同时, 应力应变关系也不同, 本文通过建模分析时发现钢筋应变达到 0.066 作为柱的破坏准则。因此, 为减少建模工作量及结果分析的准确性, 采用直接输入断裂能, 按欧洲规范 CEB-FIP MC90 [9] 建议计算:

$$G_f = \alpha(0.1f_c)^{0.7}$$

式中: f_c 单位为 MPa; G_f 单位为 N/mm; 系数 α 与混凝土最大骨料直径 D_{\max} 有关, CEB-FIP MC90 中建议, $D_{\max} = 8$ mm 时, $\alpha = 0.025$; $D_{\max} = 16$ mm 时, $\alpha = 0.03$; $D_{\max} = 32$ mm 时, $\alpha = 0.058$ 。

3.1.4. 其他参数

混凝土粘滞参数影响着 ABAQUS 计算收敛, 太大结果不精细, 太小不易收敛, 本次模型取值 0.05,

具体参数如表 3 所示。

Table 3. Concrete plastic properties parameters

表 3. 混凝土塑性性能参数

膨胀角	偏心率	f_{bo}/f_{c0}	k_c	粘性参数
30	0.1	1.16	0.667	0.05

3.2. 钢筋本构

对于 ABAQUS 自带的钢筋本构, 属于纯钢筋滞回规则, 不能很好的模拟出“捏拢”效应, 因此本文通过子程序 PQ-Fiber [10] [11] [12] 引入钢筋本构通过削弱钢筋卸载刚度来模拟这种效果。PQ-Fiber 是清华大学土木工程系结构工程研究所潘鹏副教授和曲哲博士基于大型通用有限元程序 ABAQUS 开发的一组材料单轴滞回本构模型的集合。选用再加载刚度按 Clough 本构退化的随动硬化单轴本构模型 USteel02, 如图 3 所示。

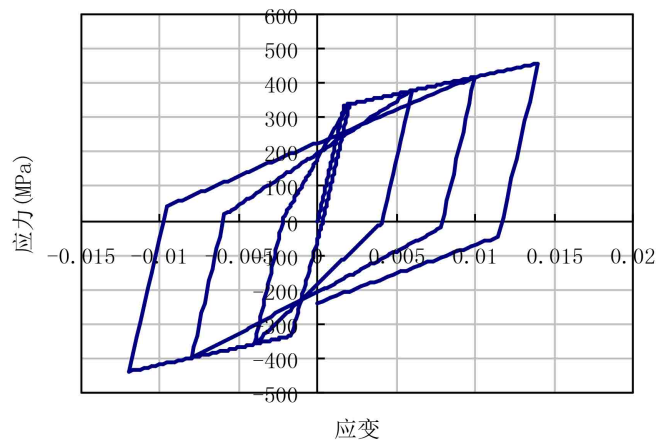


Figure 3. Uniaxial stress-strain relationship during reciprocating loading

图 3. 往复加载时的单轴应力应变关系

3.3. 模型的建立

有限元 ABAQUS 混凝土单元选用 C3D8R, 钢筋选用桁架单元 T3D2, 钢筋与混凝土之间的约束采用“Embedded Region”。为防止 RF1, RF2 两个参考点直接加载在混凝土柱墩顶部出现应力集中及过约束, 建立了正六面体钢板, 通过参考点同时施加 X、Y 方向荷载, 耦合到钢板的侧面底边线中点。模型初始分析步约束基座侧面及底面的各方向位移, 模拟固定端。第一个分析步, 同时施加柱顶的轴压及重力, 使关系平稳的建立起来, 第二个分析步施加两方向的水平推力。柱墩网格划分先分割部件, 再按 120 mm 设置全局种子, 钢筋按 100 mm 分网, 其他辅助加载部分适当加大网格尺寸, A1 共 3651 个单元, 模型建立如图 4 所示。

4. 双塑性铰位置分析

塑性铰是指在弯矩基本保持不变的情况下, 截面曲率激增, 形成了一个能转动的“铰”。塑性铰是在破坏开始时形成的, 故将其作为试件破坏的标志。双塑性铰即在一个设计截面形成了两个能转动的铰, 通过实验与模拟对比分析, 本文判定双塑性铰产生的条件是钢筋应变在破坏处同时达到 0.0667。A2, B2 组试件在原实验的基础上进行了部分钢筋截断[13] [14]如图 5, 使其在截断处与柱底产生双塑性铰, 截断

钢筋用红色标记，轴压比等其他参数与实验的参数一致，具体信息见表4。

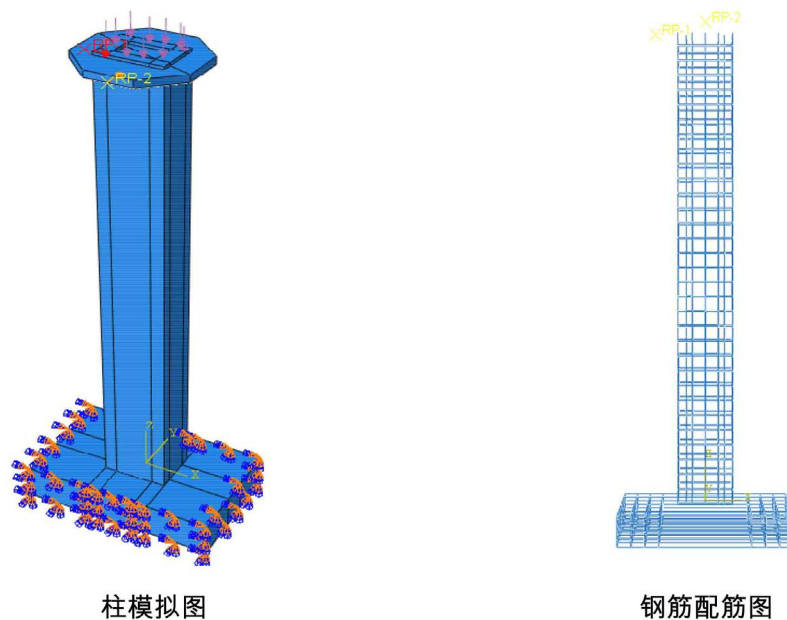


Figure 4. Finite element model
图4. 有限元模型

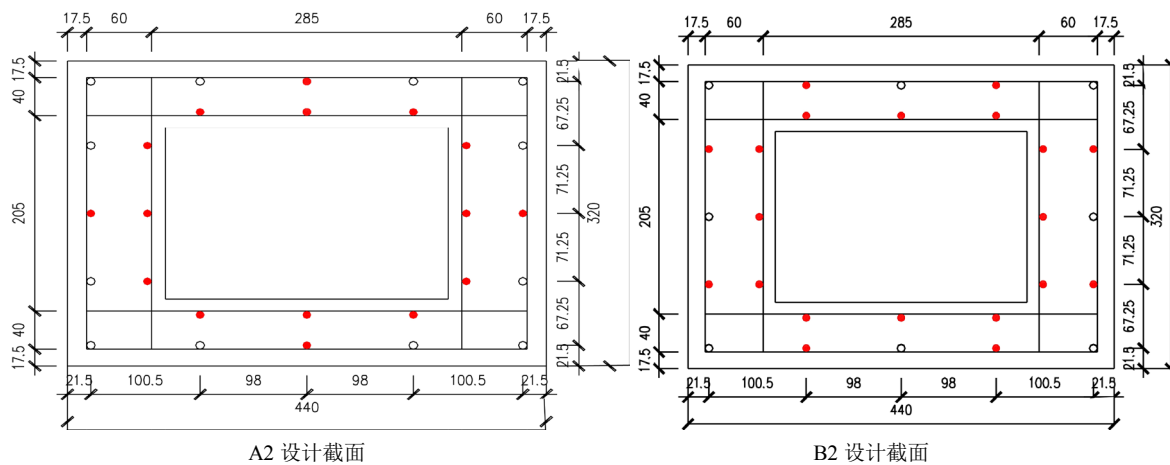


Figure 5. Double plastic hinges design section
图5. 双塑性铰设计截面

Table 4. Column design parameters
表4. 柱的设计参数

组	编号	轴压比	加载高度(m)	截断高度(m)	绞的个数	配筋率	实验与模拟
C	C1	0.2	3.2	0	1	1.437%	实验及模拟
	C2		3.2	0.8	2	柱底 1.437%， 截断处 0.617%	模拟
E	E1	0.1	2.2	0	1	1.437%	实验及模拟
	E2		2.2	0.55	2	柱底 1.437%， 截断处 1.026%	模拟

4.1. 应变曲线

纵筋的应变显示 A2、B2 在墩底和 1/4 柱高处，即分别距墩底 800 mm、550 mm 处，形成了两个塑性铰(图 6)。两个塑性铰位置钢筋最大应变均达到 0.066。

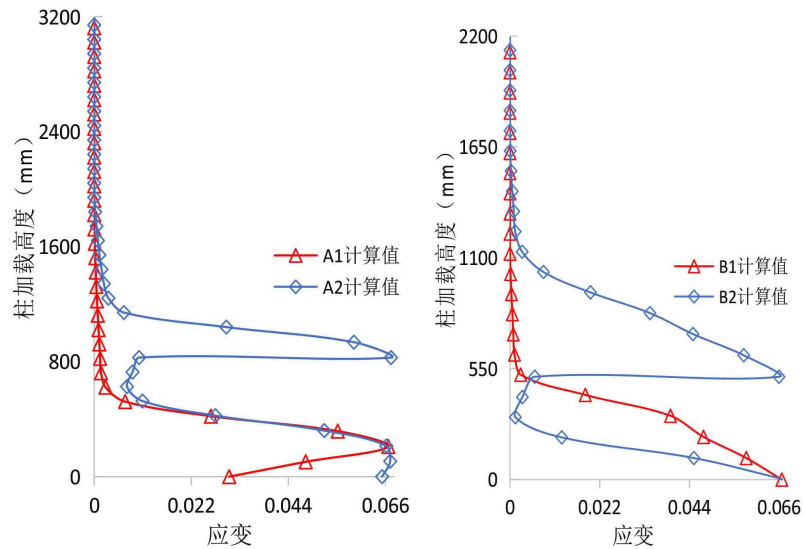
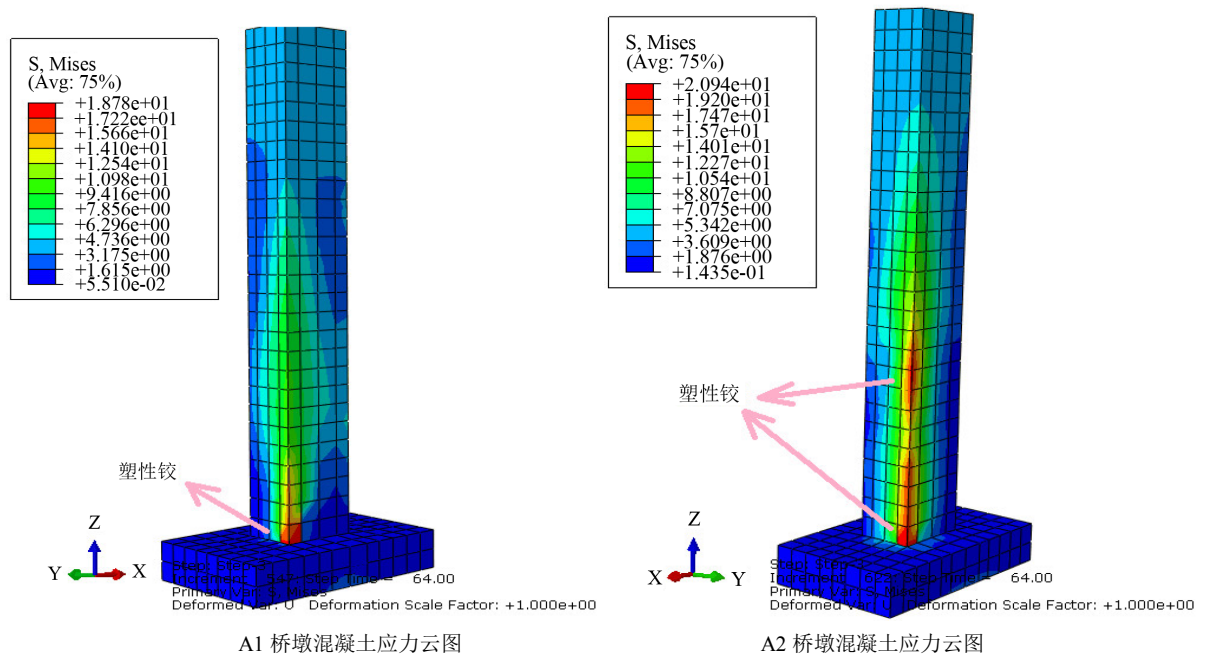


Figure 6. Comparison of plastic hinge strain values between double plastic hinges and column bottom
图 6. 双塑性铰与柱底塑性铰应变值对比

4.2. 混凝土应力云图

计算所得混凝土桥墩 A1 和 B1 的应力云图如图 7，可以看出当出现塑性铰时混凝土应力约达到抗压强度 f_c 的 50%，此时钢筋已经屈服破坏出现在柱底及截断处的对角边，与实验结果相符。A2 和 B2 桥墩的应力云图显示，在底部区域形成了两个塑性铰，和图 6 中的应变数据对应。



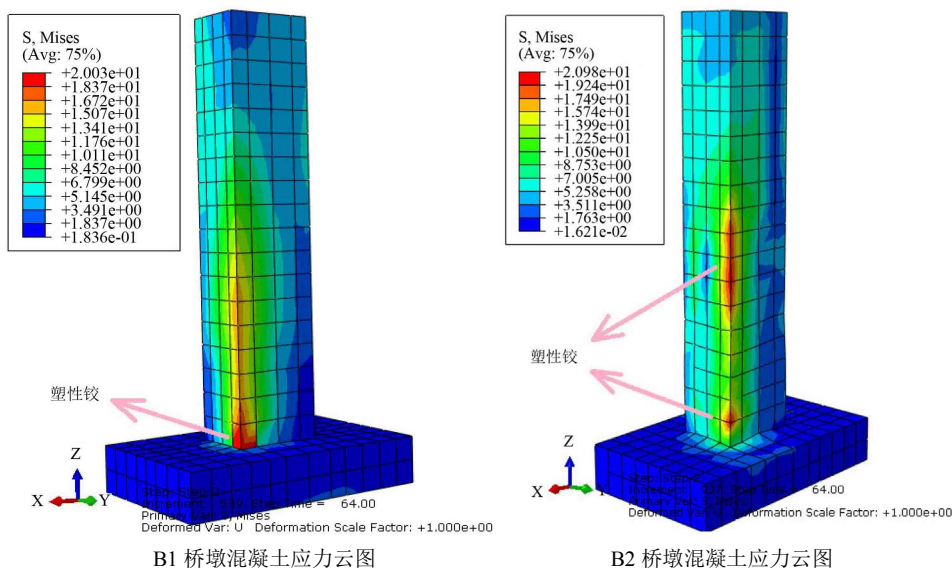


Figure 7. Plastic hinged stress cloud diagram of double plastic hinges and column bottom
 图 7. 双塑性铰与柱底塑性铰应力云图

5. 模拟结果与实验结果对比分析

5.1. 滞回曲线

计算所得曲线如图 8 所示。为了和模型实验对比，模拟的结果加了试验与千斤顶之间滑动摩擦力，摩擦系数为 0.03。

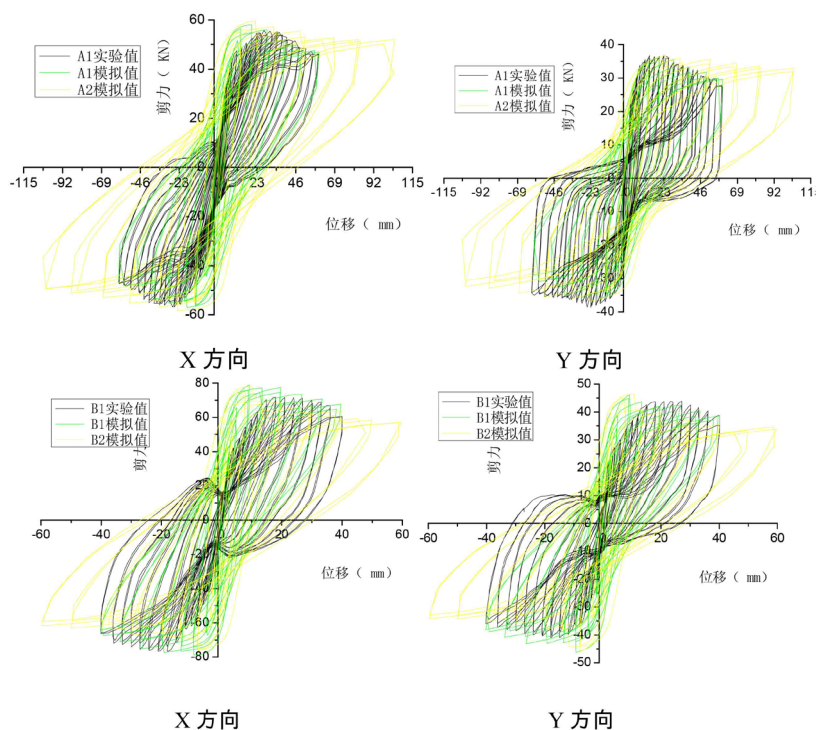


Figure 8. Comparison of double plastic hinges and hysteresis curve at the bottom of the column
 图 8. 双塑性铰与柱底滞回曲线对比

由上图可以看出, 实验与计算曲线整体吻合程度较好。模拟曲线初始刚度偏大, 可能是混凝土材料本构曲线较为复杂, 初始弹模取值较大造成的。滞回曲线的捏拢效应没有试验的明显, 可能原因是有限元没有考虑钢筋与混凝土之间的粘结滑移, 后续有待研究。对比单双铰模型结果, 可以看出双塑性铰模型滞回圈更饱满, 抗震性能更好, 但最大抗剪承载力无明显变化。

5.2. 骨架曲线

骨架曲线是通过连接滞回曲线中各级位移加载峰值时对应的荷载值, 平滑连接, 形成的一条滞回曲线的包络线。如图 9 所示, A1 的极限位移为 60 mm, A2 的极限位移提高了 75%, 达到 105 mm。B1 的极限位移为 40 mm, B2 为 60 mm, B2 的极限位移比 B1 提高了 50%。可以看出双塑性铰相比传统柱底出现的单铰增大了柱墩的极限位移。

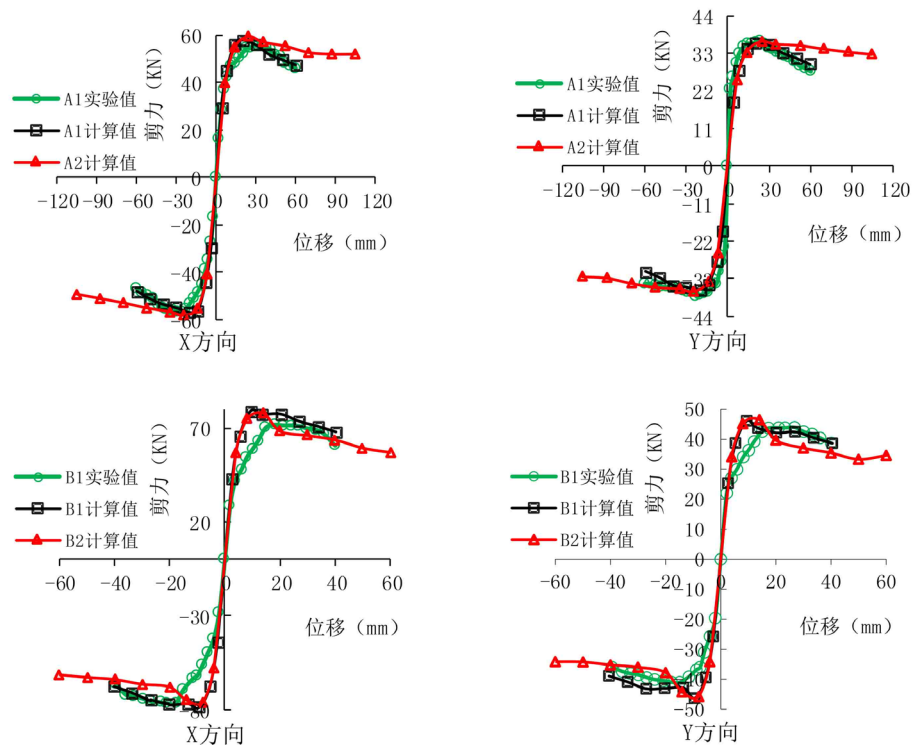


Figure 9. Comparison of double plastic hinges and plastic hinge frame at the bottom of the column
图 9. 双塑性铰与柱底塑性铰骨架对比

6. 结论

在模型试验的基础上, 本文利用 ABAQUS 建立了双向往复荷载作用下混凝土桥墩柱的非线性有限元模型, 进而设计了双塑性铰柱墩, 并与单塑性铰柱墩进行了对比, 得到如下结论:

- 1) 通过有限元计算与实验结果比较, ABAQUS 计算所得的滞回曲线、骨架曲线与实验大致吻合, 表明通过本文建立的非线性有限元模型能较好地反映钢筋混凝土墩柱的受力性能。
- 2) 通过设计截断钢筋截面的不同的位置、数量和配筋率, 表明可以在混凝土柱墩底部形成两个塑性铰。
- 3) 通过对比单双塑性铰柱墩, 结果表明在墩底形成双塑性铰的情况下桥墩具有更好的极限变形能力, 混凝土柱墩的抗震性能得到增强, 但极限承载力无明显变化。

基金项目

广州市科技计划项目(201607010094); 广州市属高校“羊城学者”科研项目(1201541551); 广东省教育厅“创新强校工程”项目(2017KTSCX147)。

参考文献

- [1] Deng, J., Ma, Z.J., Liu, A., Zhou, T. and You, C. (2017) Seismic Performance of Composite Column with Double Plastic Hinges. *Composite Structures*, **182**, 435-446. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.09.024>
- [2] Panagiotou, M. and Restrepo, J.I. (2009) Dual-Plastic Hinge Design Concept for Reducing Higher-Mode Effects on High-Rise Cantilever Wall Buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **38**, 1359-1380. <https://doi.org/10.1002/eqe.905>
- [3] 梁兴文, 王照耀, 于婧, 等. 钢筋混凝土剪力墙结构多塑性铰区合理布置研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2018, 50(2): 169-175.
- [4] 蒋永生, 卫龙武, 陆建忠, 等. 钢筋混凝土框架节点梁端人工塑性铰新方案的探索[J]. 东南大学学报, 1991, 21(1): 42-49.
- [5] 闻洋, 于洋, 杨铮, 等. 某三层矩形钢管混凝土框架塑性铰长度试验研究[J]. 建筑结构, 2017, 47(23): 61-65+45.
- [6] 过镇海. 混凝土的强度和本构关系: 原理与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [7] 方自虎, 周海俊, 赖少颖, 等. ABAQUS 混凝土应力-应变关系选择[J]. 建筑结构, 2013(S2): 559-561.
- [8] 方自虎. ABAQUS 混凝土损伤参数计算方法[C]//第二届大型建筑钢与组合结构国际会议. 第二届大型建筑钢与组合结构国际会议论文集. 北京: 建筑结构杂志社, 2014: 3.
- [9] 聂建国, 王宇航. ABAQUS 中混凝土本构模型用于模拟结构静力行为的比较研究[J]. 工程力学, 2013, 30(4): 59-67+82.
- [10] 高向玲, 张元达. 反复荷载作用下钢筋混凝土柱的非线性分析[J]. 结构工程师, 2014, 30(3): 56-63
- [11] 曲哲, 叶列平. 基于有效累积滞回耗能的钢筋混凝土构件承载力退化模型[J]. 工程力学, 2011, 28(6): 45-51.
- [12] 陆新征, 叶列平, 廖志伟. 抗震弹塑性分析[M]. 北京: 北京中国建筑工业出版社, 2009.
- [13] 高蒙. 配置局部起波钢筋的混凝土梁受力性能试验研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2016.
- [14] Lee, J. and Fenves, G. (1998) Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures. *Journal of Engineering Mechanics*, **124**, 892-900. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1998\)124:8\(892\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:8(892))



知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: hjce@hanspub.org