

文章编号: 1674—8247(2020)01—0041—06
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2020.01.009

地震作用下铁路桥墩设计参数对抗剪性能的影响

许敏¹ 陈克坚¹ 罗立洋² 程志宝²

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 北京交通大学, 北京 100044)

摘要:为研究地震作用下铁路桥墩设计参数对抗剪性能的影响,本文建立了用于钢筋混凝土桥墩抗剪性能分析的有限元模型,通过与桥墩拟静力试验结果的对比,验证了该有限元模型的准确性和可靠性。并基于所建立的有限元模型,计算研究了轴压比、剪跨比、纵筋率、宽高比等参数对铁路桥墩抗剪性能的影响规律。研究表明:(1)轴压比的增加会使混凝土桥墩的极限抗剪承载力提高,但会降低位移延性系数;(2)剪跨比的增加会降低桥墩的极限抗剪承载力,但随着剪跨比的增大,抗弯开始趋于控制桥墩设计;(3)宽高比对桥墩的抗剪性能影响不大;(4)提高纵筋率并不能显著提高桥墩的抗剪能力,同时有可能导致位移延性系数的降低,因此在桥墩抗震设计时,不宜盲目的提高纵筋率,应综合考虑桥墩强度和延性要求合理确定。

关键词:抗剪性能;有限元;抗剪承载力;位移延性

中图分类号:U441+.5 **文献标志码:**A

Study on Influence of Design Parameters of Railway Piers on Shear Performance under Earthquake

XU Min¹ CHEN Kejian¹ LUO Liyang² CHENG Zhibao²

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;
2. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In order to study the influence of the design parameters of railway piers on the shear performance under earthquake, a finite element model is established for the shear performance analysis of the reinforced concrete piers and the accuracy and reliability of this finite element model are verified by comparison with the results of the quasi-static test of piers in the paper. Based on the finite element model established in this paper, the influence of such parameters as axial compression ratio, shear span ratio, longitudinal reinforcement ratio and ratio of width to height on the shear performance of reinforced concrete bridge piers is studied. The results show that (1) the increase of axial compression ratio will increase the ultimate shear capacity of concrete piers, but reduce the displacement ductility coefficient; (2) the increase of shear span ratio will reduce the ultimate shear capacity of piers, but with the increase of shear span ratio, the bending resistance tends to control the piers design; (3) the ratio of width to height has little influence on the shear performance of piers; (4) the increase of the longitudinal reinforcement rate does not significantly improve the shear capacity of piers, and may result in the reduction of the displacement ductility coefficient, therefore, in the seismic design of the pier, it is not suitable to blindly increase the longitudinal reinforcement rate. The longitudinal reinforcement rate of the pier should be reasonably determined by considering the strength and ductility requirements of

收稿日期:2019-07-04

作者简介:许敏(1980-),女,高级工程师。

引文格式:许敏,陈克坚,罗立洋,等.地震作用下铁路桥墩设计参数对抗剪性能的影响[J].高速铁路技术,2020,11(1):41-46.

XU Min, CHEN Kejian, LUO Liyang, et al. Study on Influence of Design Parameters of Railway Piers on Shear Performance under Earthquake[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(1): 41-46.

piers.

Key words: shear performance; finite element method; shear capacity; displacement ductility

地震是威胁人类安全的主要自然灾害之一。桥墩在地震下的典型破坏形态主要有三种,分别是弯曲破坏、剪切破坏和弯剪破坏。弯曲破坏是指由桥墩抗弯性能控制的破坏形态,通常发生在剪跨比较高的桥墩,墩身有明显塑性铰产生,具有较好的变形能力,属于延性破坏;剪切破坏是指桥墩在抗剪强度不足情况下发生的破坏形态,通常发生在剪跨比小的矮墩,墩身出现贯通剪切破坏面,延性和耗能能力差,属于脆性破坏;弯剪破坏是指桥墩由弯曲损伤引起抗剪能力下降,最终因抗剪强度不足而达到极限状态的破坏形态,是介于弯曲破坏与剪切破坏之间的一种破坏形态。在破坏形式上同时含有弯曲裂缝和剪切裂缝,破坏时以剪切裂缝为主。与弯曲破坏相比,弯剪破坏的变形能力仍较差,从损伤到破坏之间的变形能力有限,属于脆性破坏^[1]。

随着人们对地震和结构动力特性认识的不断深入,桥梁抗震设计思路从强度设计向延性设计转变。墩柱轴压比、剪跨比、纵筋率、宽高比等均会影响其延性系数。Iwasaki 等人^[2]进行了剪跨比为 2.2、3.8 和 5.4 的 3 个墩柱试验,剪跨比为 3.8 和 5.4 的墩呈现明显的弯曲破坏,剪跨比为 2.2 的墩呈现明显的剪切破坏,位移能力随墩高的增大而增大,两个较高桥墩的位移延性系数近似相等,最矮墩的位移延性系数较低。Saatcioglu 等人^[3]对墩柱的轴力进行研究,结果表明较大轴力会降低受压破坏墩的位移能力。Priestly 等人^[4]对纵筋率为 0.48%、0.87% 和 1.79% 的桥墩进行试验研究,结果表明最大位移能力为纵筋率为 0.87%

的桥墩,纵筋率 0.48% 和 1.79% 的桥墩位移能力相对较小。然而受试验规模的限制,墩柱抗震性能分析试验的设计参数取值范围较小,分析结果并不具有代表性,以致于研究者们根据各自试验结果得出的结论不一致,甚至出现相悖结论。故本文建立了适用于钢筋混凝土桥墩抗剪性能分析的有限元模型,并研究了轴压比、剪跨比、纵筋率、宽高比等参数对桥墩抗剪性能的影响规律。

1 钢筋混凝土桥墩有限元模型

桥梁在地震作用下最易破坏的构件是桥墩,其滞回性能很大程度上决定了桥梁的抗震能力。因此,合理模拟钢筋混凝土桥墩在往复作用下的非线性滞回响应是研究桥梁结构抗震性能的重要内容。非线性纤维梁柱模型因具有高效模拟钢筋混凝土结构非线性行为性能而被广泛用于钢筋混凝土构件非线性滞回分析^[5]。

本文采用 ABAQUS 建立有限元模型,单元类型采用 ABAQUS 的铁木辛柯纤维梁单元 B21,钢筋和混凝土材料本构分别采用 PQ-fiber 中的 USteel02 和 UConcrete02^[6],将墩底节点完全固结,首先施加轴力,然后按位移控制施加水平位移荷载,最终建立模型。为验证模拟精度,同步开展了拟静力试验,模拟与试验采用相同的位移加载步,试验参数如表 1 所示。将计算数值分析结果与试验测试结果的滞回曲线进行对比,结果如图 1 所示。

表 1 试验模型参数表

模型编号	截面形状	截面尺寸/mm	有效高度/mm	纵筋率/%	配箍率/%	轴压力/kN	轴压比/%	剪跨比
1	矩形	720 × 420	840	0.93	0.12	120	0.99	2.0

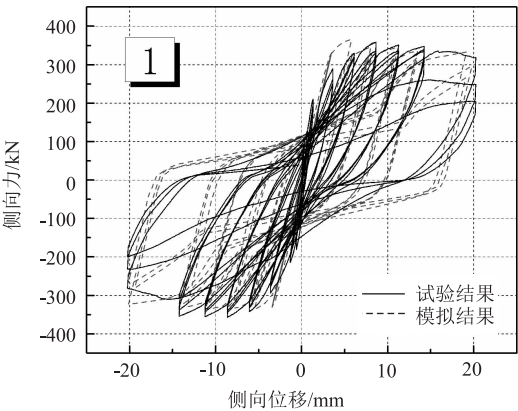


图 1 模拟结果与试验结果滞回曲线对比图

由图 1 可知,模型对试件承载能力及进入弹塑性阶段后承载力下降过程的模拟均较为精确,能较好地模拟桥墩的非线性行为^[7]。

2 钢筋混凝土桥墩塑性铰区抗剪性能研究

基于 ABAQUS 有限元模型,对钢筋混凝土桥墩的抗剪性能影响因素进行系统研究分析,探讨纵筋率、剪跨比、轴压比、宽高比等因素对钢筋混凝土桥墩抗剪性能的影响规律。

2.1 纵筋率

以试件1为原型,改变纵筋率,建立1组有限元模型,以研究纵筋率对桥墩抗剪性能的影响。考虑到铁路桥墩的纵筋率一般较低,首先建立了6个低纵筋率的计算模型,其纵筋率分别为0.2%、0.5%、0.8%、1.1%、1.4%、1.7%;根据GB 50111-2006《铁路工程抗震设计规范》规定:墩身主筋全截面纵筋率不应小于0.5%,并不大于4%^[8]。故又建立了5个高纵筋率的有限元模型,其纵筋率分别为2%、2.5%、3%、3.5%、4%。将这11个试件定义为A组,同时定义 v 为墩顶侧向力, A_g 为桥墩毛截面面积, f_c 为混凝土立方体抗压强度,A组骨架曲线对比及极限名义抗剪承载力随纵筋率的变化规律曲线如图2、图3所示。

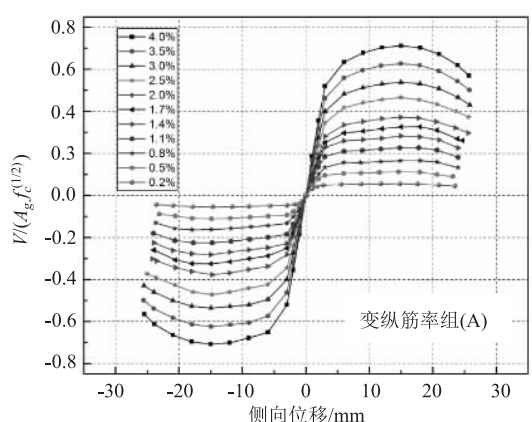


图2 A组骨架曲线对比图

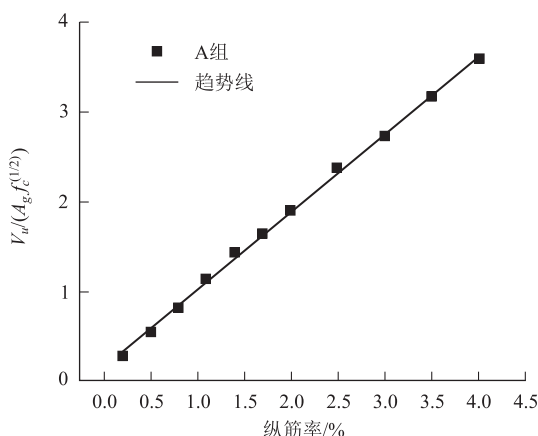


图3 极限名义抗剪承载力随纵筋率的变化图

从图2、图3中可以看出,各模型的骨架曲线均随纵筋率的增加而升高;随着纵筋率的增加,试件的极限名义抗剪承载力几乎呈线性增加。

位移延性系数是桥墩的延性性能指标,其大小反映了试件的非弹性变形能力。A组11个模型的位移延性系数随纵筋率的变化规律如图4所示。由图4

可知,随纵筋率的增大,位移延性系数逐渐降低,当纵筋率较低时(2%以下),桥墩位移延性系数下降较快,纵筋率大于2%以后,其下降速度逐渐变慢^[10]。总体来说,纵筋率越高,桥墩的位移延性系数越低,桥墩发生脆性破坏的可能越大。

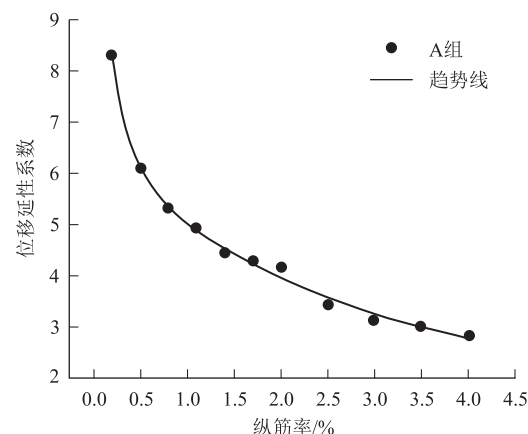


图4 位移延性系数随纵筋率的变化规律图

在既有的抗剪强度公式中^[10],只有少数认为桥墩的抗剪能力与纵筋率有关。根据能力-需求曲线分析,提高纵筋率将使需求曲线升高,但并不能改变能力曲线,从而使二者的交点向左上方移动,表现为桥墩的极限抗剪承载力增大,位移延性系数减小。

综上所述,在其他参数相同的情况下,提高纵筋率并不能明显地增大钢筋混凝土桥墩的抗剪能力,但可有效地提高桥墩的极限抗剪承载力,可位移延性系数的随之降低,增大了桥墩发生脆性破坏的风险。因此在桥梁抗震设计时,不能盲目地提高纵筋率,应将纵筋率控制在合适的范围内。当纵筋率较高时,应适当提高配箍率,以保证桥墩足够的延性^[11]。

2.2 剪跨比

既有研究结果表明,剪跨比较大的桥墩大多发生弯曲破坏,而本文主要研究桥墩的抗剪性能,因此所建立的模型以低矮墩为主。以试件1为原型,改变剪跨比,建立9个有限元模型,以研究剪跨比对桥墩的抗剪性能影响。将该组定义为B组,其剪跨比分别为1.0、1.4、1.8、2.2、2.6、3.0、3.4、3.8、4.2。其骨架曲线结果对比及桥墩极限名义抗剪承载力随剪跨比的变化规律曲线如图5、图6所示。

从图5、图6中可以看出,随着剪跨比的增大,骨架曲线逐渐降低,且逐渐趋近于重合。对比骨架曲线下降段可以看出,随着剪跨比的增大,桥墩的极限名义抗剪承载力逐渐降低,且其下降速度逐渐减慢,当剪跨比增大到一定程度后,极限名义抗剪承载力将趋近于一个定值^[13]。

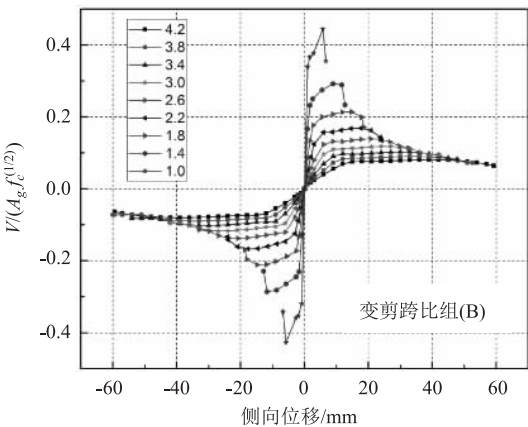


图 5 B 组骨架曲线对比图

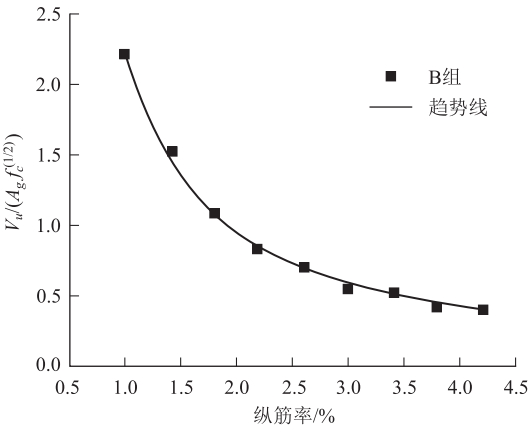


图 6 极限名义抗剪承载力随剪跨比的变化图

B 组桥墩位移延性系数随剪跨比的变化规律如图 7 所示,由图 7 可知,随着剪跨比的增大,桥墩的位移延性系数有呈线性增加的趋势,但位移延性系数的增大远不及极限位移增大的明显,这是因为随着剪跨比的增大,桥墩的屈服位移也在逐渐增大,故而导致位移延性系数增加的较缓慢。

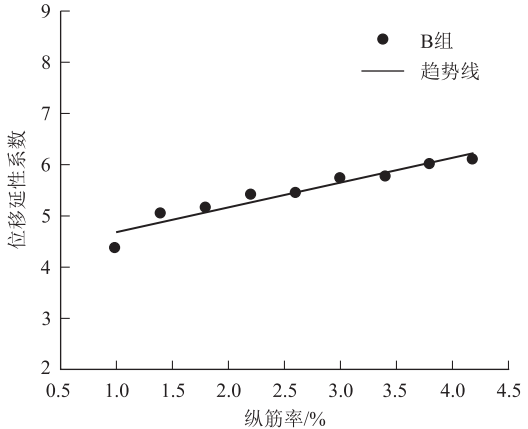


图 7 位移延性系数随剪跨比的变化规律图

既有研究结果表明,桥墩的抗剪能力随剪跨比的增大而降低。根据能力-需求曲线分析,随着剪跨比的增大,需求曲线和能力曲线均会降低,二者的交点将会向右下方移动,表现为极限抗剪承载力不断减小,位移延性系数逐渐增大。

综上所述,在其他参数相同的情况下,随着剪跨比的增大,钢筋混凝土桥墩的抗剪能力和极限抗剪承载力均会逐渐降低,而位移延性系数会逐渐增大,使桥墩发生剪切破坏的可能性逐渐减小。

2.3 轴压比

结合铁路桥墩轴压比一般较低的特点,以试件 1 为原型,建立了 1 组轴压比在较低范围内变化的有限元模型,以此来研究低轴压比下的桥墩抗剪性能,其轴压比分别为 0%、2%、4%、6%、8%、10%。为了进一步研究较高轴压比下桥墩的抗剪性能,另外建立了 1 组较高轴压比的有限元模型,其轴压比分别为 15%、20%、25%、30%。将这 10 个模型定义为 C 组,其骨架曲线结果对比及桥墩极限名义抗剪承载力随轴压比的变化规律曲线如图 8、图 9 所示。

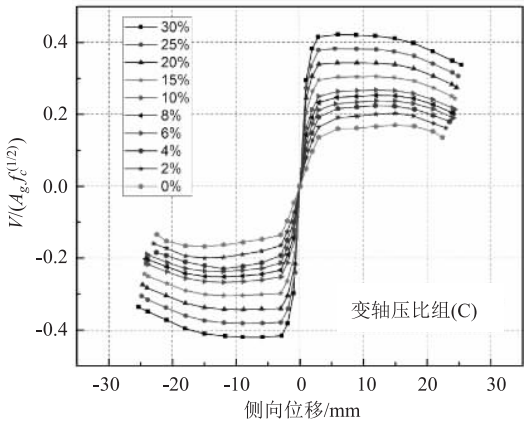


图 8 C 组骨架曲线对比图

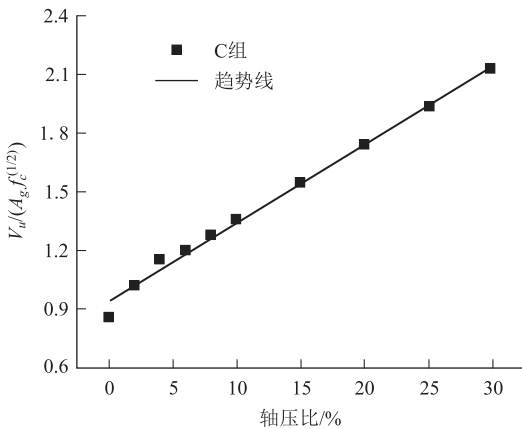


图 9 极限名义抗剪承载力随轴压比的变化图

从图 8、图 9 可以看出,随着轴压比的提高,桥墩的骨架曲线逐渐升高,桥墩的极限名义抗剪承载力几乎呈线性增加,但在低轴压比(10 % 以下)时,其增速有逐渐减慢的现象。

C 组各模型的位移延性系数随轴压比的变化规律如图 10 所示。由图 10 可知,随着轴压比的增大,位移延性系数逐渐减小,但其减小速度逐渐变慢。在加载初期,提高轴压比将增大混凝土受压区面积,从而推迟纵筋的屈服,导致屈服位移增大,因此使位移延性系数降低。

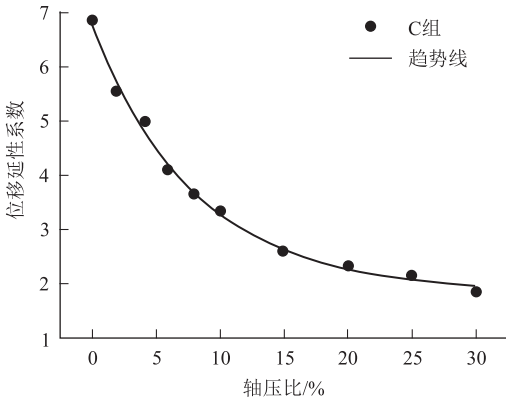


图 10 位移延性系数随轴压比的变化规律图

在 Priestley、Sezen 等学者提出的抗剪强度公式中都体现了轴压力对桥墩抗剪强度的影响, Priestley 甚至在公式中将轴压力提供的抗剪能力单列为一项。根据能力-需求曲线分析,增大轴压比,能力曲线和需求曲线均会升高,其交点将会向左上方移动,表现为极限抗剪承载力增大,位移延性系数降低。

综上所述,提高轴压比,将提高桥墩的抗剪能力和极限抗剪承载力,但会使其位移延性系数降低,增大其发生脆性破坏的风险。因此,为了保证桥墩具有足够的延性,可通过增大截面面积的方法,将轴压比控制在合适的范围内。

2.4 宽高比

铁路桥梁设计荷载较大,且对桥梁平顺性的要求较高,因此较宽大桥墩在铁路桥梁中被广泛使用,在多线铁路桥梁中使用更多。但对宽高比较大的桥墩抗剪性能的研究较少。以试件 1 为原型,建立 9 个宽高比的桥墩模型,定义为 D 组,以研究宽高比对桥墩抗剪性能的影响,其宽高比分别为 1、1.5、2、2.5、3、3.5、4、4.5、5,基本涵盖了铁路桥墩常用宽高比的范围。骨架曲线结果对比及桥墩极限名义抗剪承载力随宽高比的变化规律曲线如图 11、图 12 所示。

从图 11、图 12 中可以看出,消除混凝土强度和截面面积的影响后,各种宽高比桥墩的骨架曲线几乎

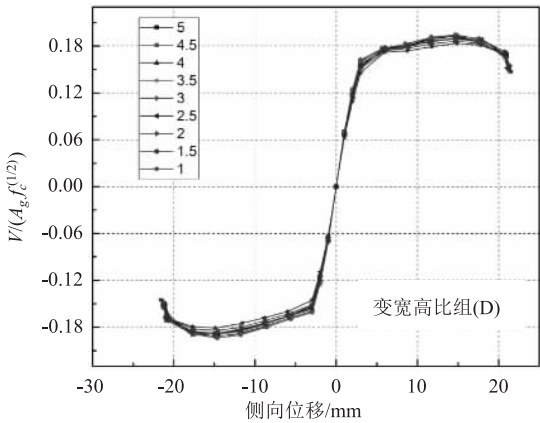


图 11 D 组骨架曲线对比图

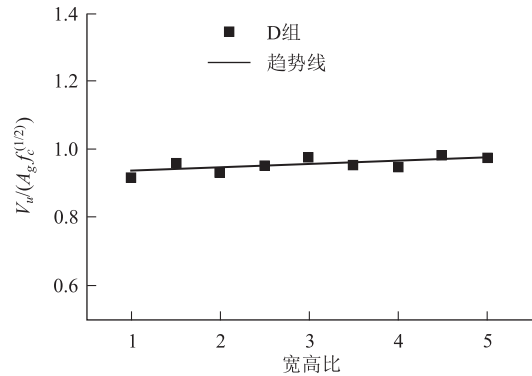


图 12 极限名义抗剪承载力随宽高比的变化图

重合;随着宽高比的增大,桥墩的极限名义抗剪承载力有增大的趋势,但增速非常缓慢,由此可以认为,改变宽高比并不能有效地改变桥墩的极限名义抗剪承载力。

D 组位移延性系数随宽高比的变化规律如图 13 所示。从图 13 可以看出,随着宽高比的增大,桥墩的位移延性系数略有增加,但增加幅度非常微弱。由此可以认为,改变宽高比并不能显著地改变桥墩的延性性能。

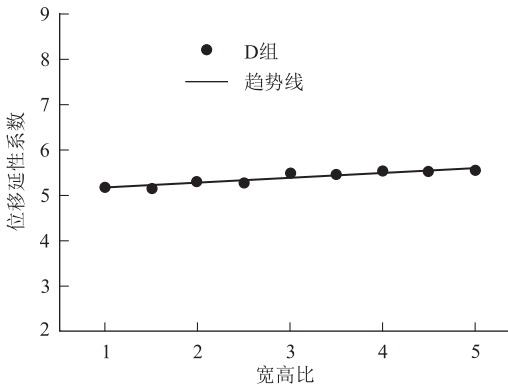


图 13 位移延性系数随宽高比的变化规律图

研究表明,宽高比对桥墩的抗剪性能影响不大。根据能力-需求曲线分析,改变宽高比对桥墩的能力曲线和需求曲线都没有明显改变,因此桥墩的极限抗剪承载力和位移延性系数都没有明显的变化。

3 结论

本文基于建立的 ABAQUS 有限元模型,计算研究了纵筋率、剪跨比、轴压比、宽高比对钢筋混凝土桥墩抗剪性能的影响规律。研究表明:

(1)纵筋率范围在 0.5%~4.0% 时,提高纵筋率可使桥墩的极限承载力增加,但不能显著提高桥墩的抗剪能力,且位移延性系数会随之降低,因此在桥墩抗震设计时,不能盲目提高纵筋率,应综合考虑桥墩强度和延性要求,合理确定桥墩纵筋率。

(2)增大剪跨比,需求曲线和能力曲线均会降低,二者的交点将会向右下方移动,表现为极限抗剪承载力不断减小,位移延性系数增大,使其发生剪切破坏的风险逐渐减弱。

(3)提高轴压比,会使桥墩的抗剪能力和极限抗剪承载力均提高,位移延性系数降低。

(4)改变宽高比对桥墩的能力曲线和需求曲线都没有明显改变,桥墩的极限抗剪承载力和位移延性系数都没有明显变化,因此宽高比对桥墩的抗剪性能影响不大。

参考文献:

- [1] 叶爱君,管仲国. 桥梁抗震[M]. 北京:人民交通出版社,2011.
YE Aijun, GUAN Zhongguo. Seismic Design of Bridges [M]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [2] Iwasaki T, Kawashima K, Hagiwara R, et al. Experimental

Investigation on Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Columns [C] //Proceedings of the Second Joint U. S. -Japan Workshop on Performance and Strengthening of Bridge Structures and Research Needs. San Francisco, 1985.

- [3] Saatcioglu M, Razvi. Behavior of High Strength Columns Subjected to Axial Load [R]. Chicago: Fifth U. S. National Conference on Earthquake Engineering, 1994.
- [4] 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.
- [5] 范振华. 地震作用下超高墩刚构桥倒塌破坏关键问题研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
FAN Zhenhua. Research on Collapse of Rigid Frame Bridge with Super High Rise Piers under Earthquake [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.
- [6] 李徐, 钟铁毅, 夏禾, 等. 轴压下钢筋混凝土桥墩塑性铰特性研究[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(1): 34-41.
LI Xu, ZHONG Tieyi, XIA He, et al. Study on the Characteristics of Plastic Hinge of Reinforced Concrete Pier under Axial Load [J]. China Railway Science, 2014, 35(1): 34-41.
- [7] Chung-Hao Wu, Yu-Cheng Kan, Chung-Ho Huang, et al. Flexural Behavior and Size Effect of Full Scale Reinforced Lightweight Concrete Beam [J]. Journal of Marine Science and Technology, 2011, 19(2): 132-140
- [8] GB 50111-2006 铁路工程抗震设计规范[S].
GB 50111-2006 Code for Seismic Design of Railway Engineering [S].
- [9] Sezen H, Setzler E J. Reinforcement Slip in Reinforced Concrete Columns [J]. ACI Structural Journal, 2008, 105(3): 280-289.
- [10] 李贵乾. 钢筋混凝土桥墩抗震性能试验研究及数值分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2010.
LI Guiqian. Experimental Study and Numerical Analysis on Seismic Performance of Reinforced Concrete Bridge Columns [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2010.

(编辑:车晓娟 张红英)