

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.06.014

钢筋混凝土矩形空心墩延性能力数值分析

刘志峰¹,王同珍²,罗 征³

(1.济南市公路管理局, 山东 济南 250014; 2.济南职业学院 机械制造学院, 山东 济南 250014;

3.浙江大学 宁波理工学院 土木建筑工程学院, 浙江 宁波 315000)

摘 要: 为了分析配筋率、轴压比、壁厚、及纵筋强度等参数对空心墩柱延性能力的影响,通过拟静力试验,研究了配箍率及剪跨比等参数对钢筋混凝土空心墩抗震性能的作用,同时通过建立混凝土矩形空心墩模型进行有限元分析,验证试验结果的准确性。结果表明:提高配筋率、轴压比及纵筋强度虽然能提高矩形空心墩柱的承载力,但会降低矩形空心墩柱延性能力,而提高配箍率与降低剪跨比却能在提高承载力的同时,也提高空心墩柱的延性能力。

关键词: 空心墩;延性能力;拟静力试验;有限元分析

中图分类号: U443.22

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2018)06—0072—05

Numerical Analysis of Ductility of Reinforced Concrete Rectangular Hollow Piers

LIU Zhifeng¹, WANG Tongzhen², LUO Zheng³

(1. Ji'nan Highway Administration Bureau, Jinan, Shandong 250014, China;

2. Jinan Vocational College, Jinan, Shandong 250014, China;

3. Zhejiang University Ningbo Institute of Technology, School of Engineering & Architecture, Ningbo, Zhejiang 315000, China)

Abstract: In order to analyze the influence of reinforcement ratio, axial compression ratio, wall thickness and longitudinal reinforcement strength on ductility of hollow pier, this paper analyzed the effects of stirrup ratio and shear span ratio on seismic behavior of reinforced concrete hollow piers by pseudo-static test, and verified the accuracy of the test results through finite element analysis. The results showed that: as the reinforcement ratio, axial compression ratio and longitudinal reinforcement strength increase, the bearing capacity of rectangular hollow pier improve accordingly, but the ductility of rectangular hollow pier reduce, therefore the increase of stirrup ratio and the decrease of shear span ratio can not only increase the bearing capacity, but also improve the ductility of hollow pier columns.

Keywords: hollow pier; ductility; quasi-static test; finite element analysis

近年来,钢筋混凝土空心墩在大跨径高墩桥梁中应用较多,但关于空心墩的抗震性能方面的研究较少,故本文针对钢筋混凝土空心墩的延性能力进行了分析。

延性是混凝土桥墩的一个重要性能^[1]。现在的国内外学者对空心墩的配筋率、配箍率以及轴压比对墩柱的延性能力的影响进行了多方面的研究,长安大学崔海琴等^[2]和北京工业大学杜修力等^[3]以及同济大学宋晓东^[4]分别对矩形空心墩柱进行了拟静力试验;以壁厚、配筋率等为研究参数,提出了各参数对延性能力的影响。但对不同剪跨比下各方面影

响研究的很少。本文通过有限元分析软件 Opensees 建立合理数值计算模型,研究分析了不同剪跨比下配筋率、轴压比、壁厚、混凝土强度及纵筋强度等参数对空心墩柱极限承载力与延性变形能力的影响。

1 钢筋混凝土矩形空心墩拟静力试验

本文分别对 4 个矩形空心墩进行了拟静力试验,试件编号分别为 201、603、704、706,其截面相同,几何尺寸见图 1;混凝土采用 C40,纵筋及箍筋均为 II 级钢筋见图 2;各试件的参数见表 1^[5]。试件分为两个组,分别研究分析不同剪跨比和配箍率的影响。

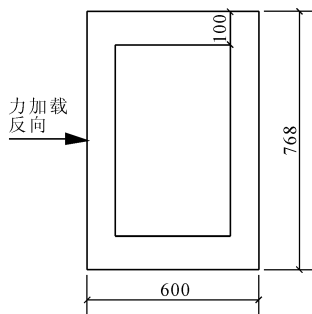


图 1 截面几何尺寸图(单位:mm)

这里需要特殊指出的是,国内采用的混凝土强度为立方体轴心抗压强度,而在数值计算时需要将其换算为圆柱体抗压强度。本文以位移延性能力作为检验空心墩柱变形能力的性能指标,为了计算桥墩的延性变形能力,在确定桥墩的等效屈服位移后,

表 1 构件参数

试件	计算高度/mm	剪跨比	混凝土强度/MPa		轴压比	纵筋型号	纵筋配筋率/%	箍筋型号	箍筋间距/mm	箍筋配筋率/%
			立方体强度	圆柱体强度						
201	2800	4.7	65.3	51.6	0.1	Φ12	1.93	Φ8	100	1.82
603	4000	6.7	65.3	51.6	0.1	Φ12	1.93	Φ8	100	1.82
704	4600	7.7	65.3	51.6	0.1	Φ12	1.93	Φ6	100	1.10
706	4600	7.7	65.3	51.6	0.1	Φ12	1.93	Φ10	100	2.75

试验墩柱的位移延性能力如表 2^[5]所示:(1) 4 个钢筋混凝土矩形空心墩抗震性能良好;(2) 配箍率不变的情况下,空心墩柱的极限承载力和延性能力随剪跨比的减小而有所提高;(3) 剪跨比相同,配箍率的提高使空心墩的极限承载力与墩柱位移延性能力都有提高。

表 2 矩形空心墩位移延性能力

试件编号	等效屈服位移/mm	极限承载力/kN	位移延性系数
试件 201	24.24	285	4.12
试件 603	40.33	187	4.02
试件 704	50.31	164	3.66
试件 706	50.53	171	3.90

尽管试验研究了剪跨比、配箍率等参数对空心墩柱抗震性能的影响,但配筋率、轴压比、壁厚、纵筋强度等参数对空心墩柱抗震性能的影响尚未可知。本文首先将建立纤维有限元模型,利用 4 个空心墩柱的试验结果验证纤维模型的正确性。

2 纤维单元模型

2.1 混凝土材料本构

约束混凝土与无约束混凝土材料应力 - 应变关

尚须确定其极限状态。
本文采用以下首先达到极限状态(抗压强度下降到 80%、纵筋屈曲断裂或核心混凝土破坏)的墩柱来确定承载能力。

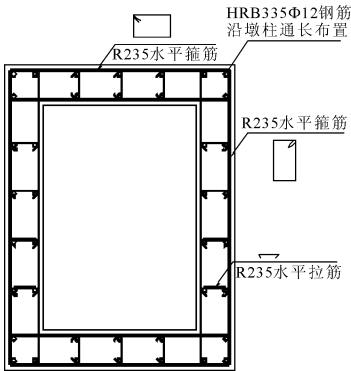


图 2 钢筋构造图(单位:mm)

系采用 Opensees 材料库中的 Kent - Park 提出的 Concrete01 模型^[6-7],该模型是 Kent 等人通过大量矩形箍筋墩柱的试验提出的,并在实践中得到了广泛应用。

2.2 钢筋本构

钢筋材料应力 - 应变关系采用 Opensees 材料库中 Mander 与 Chang 所提出的等向强化非线性钢筋模型 ReinforcingSteel^[6,8]。在 Mander 钢筋模型基础上,本文选用 Coffin - Manson 模型^[9],考虑由于低周期疲劳引起的钢筋强度和刚度退化,该模型主要由 3 个参数控制:损伤累积系数 α 、疲劳延性系数 C_f 、疲劳强度退化系数 C_d 。Brown^[10]的钢筋低周疲劳材料试验研究得出上述三个参数的推荐值分别为: $\alpha = 0.506$, $C_f = 0.26$, $C_d = 0.389$;图 3 为考虑低周期疲劳后钢筋材料滞回曲线。

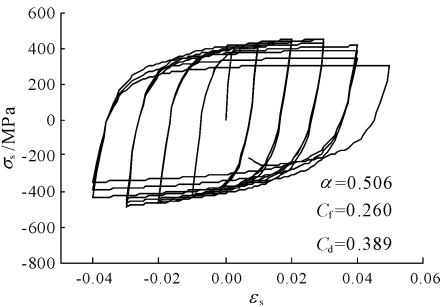


图 3 Coffin&Manson 钢筋应力 - 应变滞回曲线

3 数值模型验证

采用 OpenSees 建立矩形空心墩的纤维单元模

型,对 4 个矩形空心墩柱在考虑强度退化和粘结滑移的情况下的墩顶位移进行数值模拟,如图 4、图 5 所示。

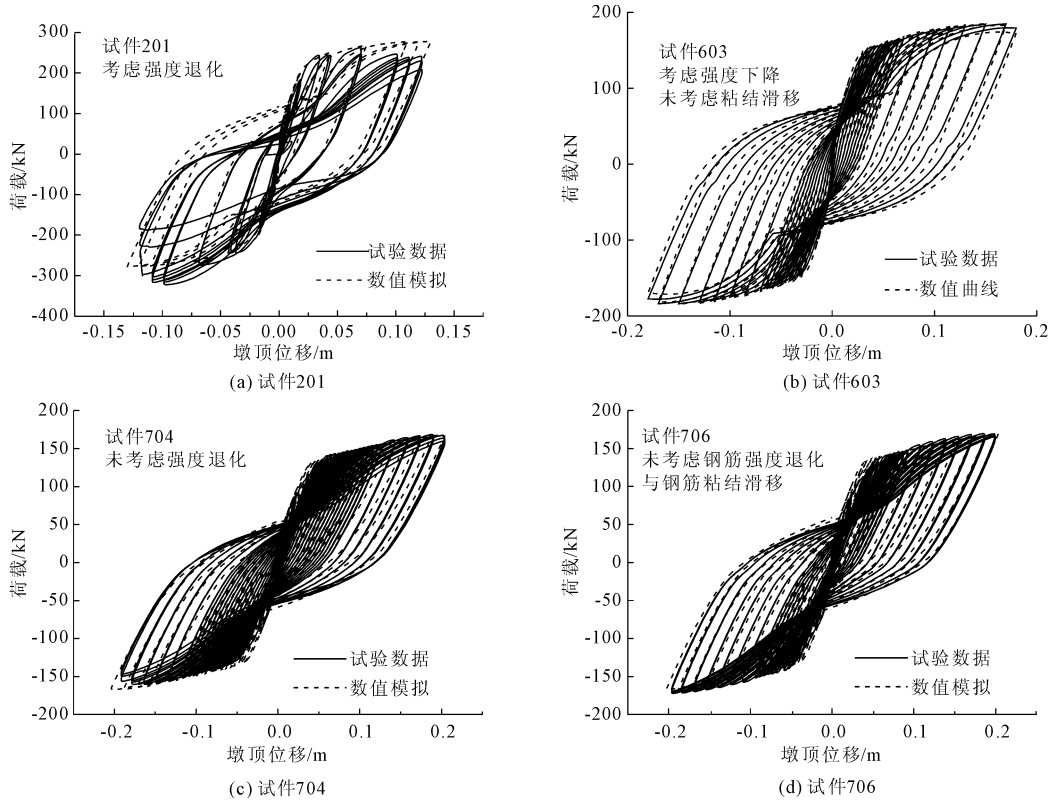


图 4 数值模拟与试验数据滞回曲线对比

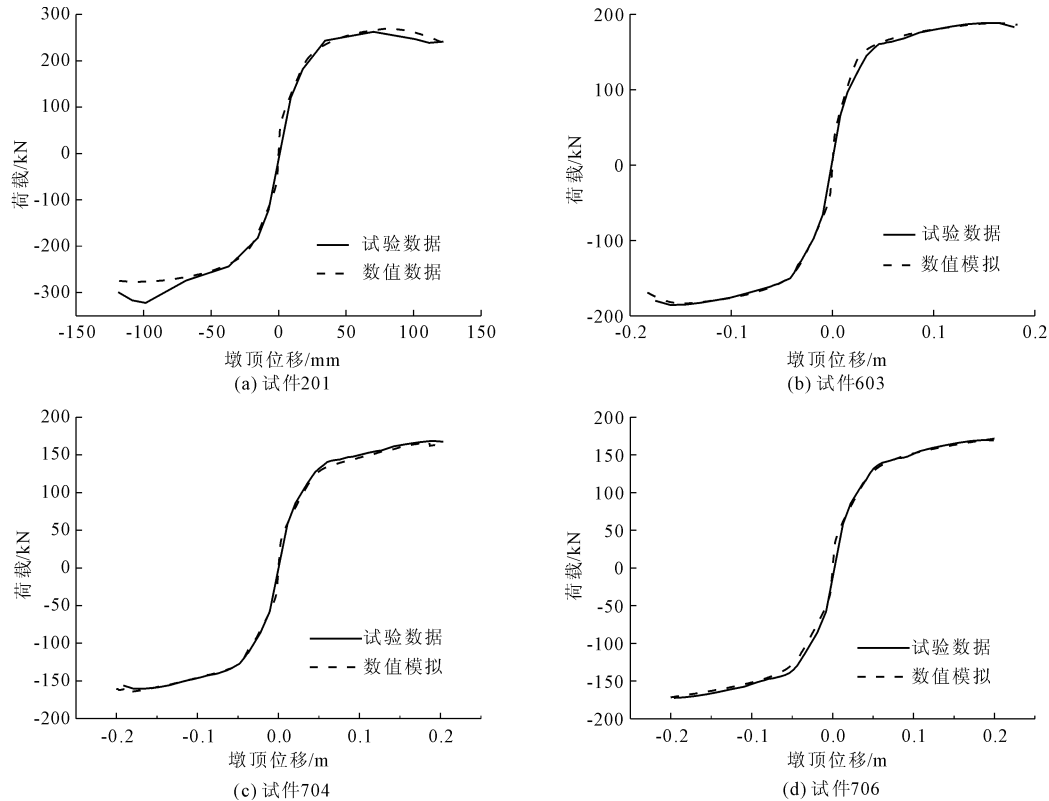


图 5 数值模拟与实验数据骨架曲线对比

从图 4、图 5 可以看出,各空心墩试件滞回曲线与骨架曲线的计算值与试验值较为吻合,说明混凝土采用 Kent - Park 本构模型,纵筋采用 Mander - Chang 本构模型,同时模型中考虑钢筋的强度退化,纤维模型可对钢筋混凝土空心墩滞回性能进行较为准确模拟分析,验证了纤维模型的正确合理性。

4 空心墩延性变形能力参数分析

下面对可能影响矩形空心墩变形能力的参数进行敏感性分析,孙治国等通过有限元模拟,采用位移角作为延性目标对圆形空心墩的延性性能进行了研究。但国内对于桥梁结构而言,一般采用位移延性能力作为检验墩柱延性能力的指标。固本文采用位移延性能力作为延性指标,对纵筋配筋率、壁厚、轴压比及纵筋强度等参数对矩形空心墩抗震能力的影响。

4.1 纵筋配筋率的影响

取剪跨比 λ 为 4、轴压比 η_k 为 0.1、壁厚 t 为 100 mm,不同配筋率的三种矩形空心墩,矩形空心墩主筋配筋率分别为 0.96%、1.93%、2.93%,进行 Pushover 分析,其对应的能力曲线如图 6 所示,配筋率提高一倍,空心墩承载能力可提高 75%左右,但位移延性随着配筋率的增大而减小。

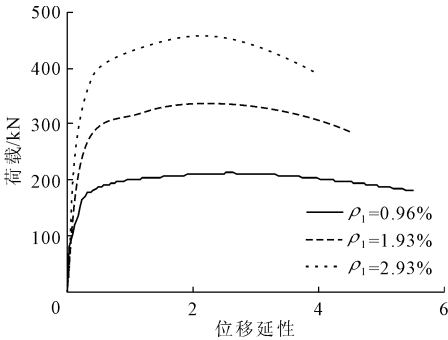


图 6 不同配筋率骨架曲线

矩形空心墩壁厚为 100 mm,不同轴压比、不同剪跨比时,空心墩位移延性随纵筋配筋率变化情况见图 7。随着纵筋配筋率提高,不同轴压比及剪跨比的空心墩延性变形能力曲线基本呈降低趋势。

4.2 壁厚的影响

取剪跨比 λ 为 4、配筋率 ρ_l 为 0.96%、轴压比 η_k 为 0.1,不同壁厚 t 的三种矩形空心墩,三种矩形空心墩壁厚,分别为 100 mm、200 mm、300 mm,进行 Pushover 分析,其对应的能力曲线如图 8 所示,不同壁厚的空心墩骨架曲线重合,空心墩壁厚的提高对空心墩的承载能力及位移延性能力影响不大。这一点与孙治国的研究成果有出入,究其原因可能是由于剪跨比的不同,对于剪跨比小于 4 的矮墩^[11]而言,位

移延性能力随着壁厚的提高而减小,而本文中对于剪跨比大于 4 的高墩而言,壁厚的变化对延性延性影响不大。

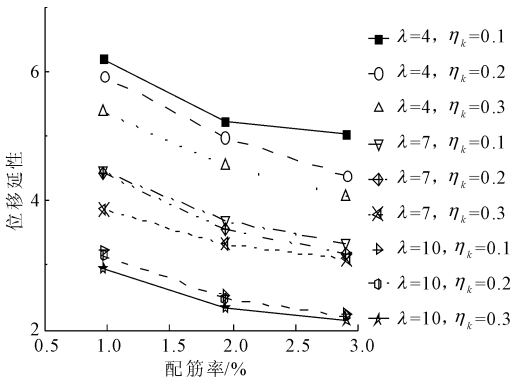


图 7 壁厚不变,配筋率对矩形空心墩延性变形性能影响

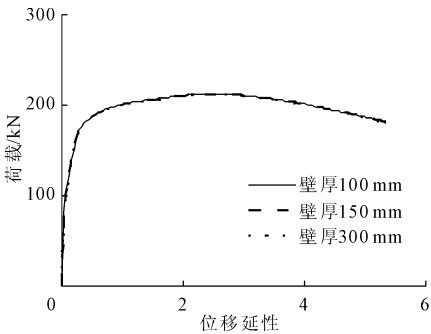


图 8 不同空心墩壁厚骨架曲线

矩形空心墩配筋率为 0.96%,不同轴压比、剪跨比(剪跨比大于 4 的墩)时,空心墩位移延性随空心墩壁厚 t 与空心墩边长 b 之比变化如图 9 所示。在轴压比、纵筋配筋率不变的情况下,壁厚变化对空心墩极限变形能力影响不大^[12],空心墩延性变形能力基本保持稳定。

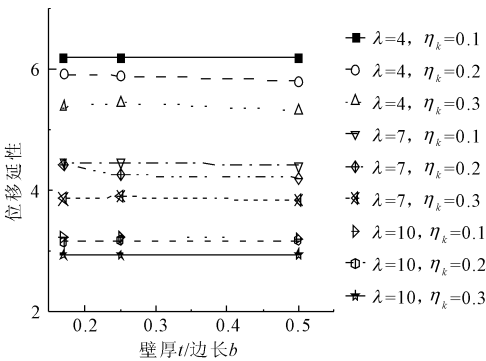


图 9 壁厚对矩形空心墩延性变形性能的影响

4.3 轴压比的影响

取剪跨比 λ 为 4,配筋率 ρ_l 为 0.96%、壁厚 t 为 100 mm,不同轴压比 η_k 的三种矩形空心墩,轴压比

分别为 0.1、0.2、0.3, 进行 Pushover 分析, 其对应的能力曲线如图 10 所示, 由图 10 可知, 轴压比增加 1 倍, 空心墩的承载能力增加近 50%, 同时空心墩位移延性随着轴压比的提高而有所降低。

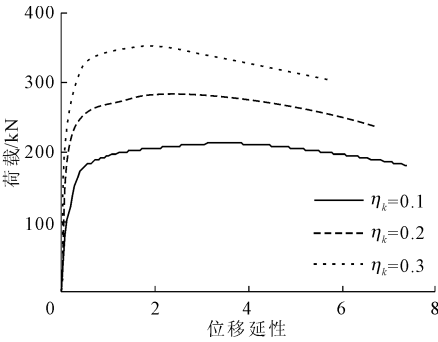


图 10 剪跨比、配筋率和壁厚不变, 不同轴压比骨架曲线

矩形空心墩壁厚为 100 mm, 在不同配筋率、剪跨比, 空心墩位移延性随轴压比变化情况见图 11, 壁厚不变, 配筋率、剪跨比不同的情况下, 空心墩延性变形能力随轴压比的提高而降低。

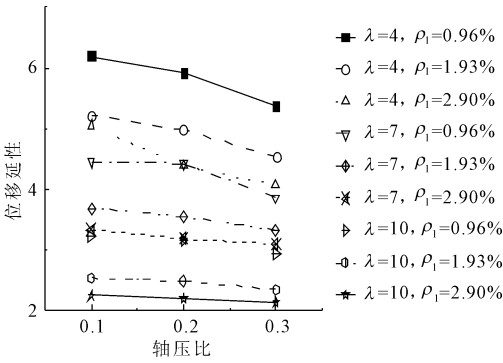


图 11 配筋率、剪跨比不同, 轴压比对矩形空心墩延性变形性能影响

4.4 纵筋强度的影响

取剪跨比 λ 为 4, 轴压比 η_k 为 0.1, 配筋率 ρ_l 为 0.96% 在不同纵筋强度的三种矩形空心墩, 纵筋强度分别为 464 MPa、507 MPa、542 MPa, 进行 Pushover 分析, 其对应的能力曲线如图 12 所示, 由图 12 可知, 纵筋强度的提高对空心墩的承载能力有所提高, 但空心墩位移延性随着纵筋强度的提高而减小。

矩形空心墩轴压比为 0.1, 在不同剪跨比、配筋率时, 空心墩位移延性随纵筋强度变化情况见图 13。由图 13 可以看出: 剪跨比、纵筋配筋率不变时, 空心墩极限变形能力随着纵筋强度的提高而减小, 同时图中各线基本平行, 说明由于纵筋强度的提高, 空心墩位移延性的下降变化率不受剪跨比与配筋率的影响。

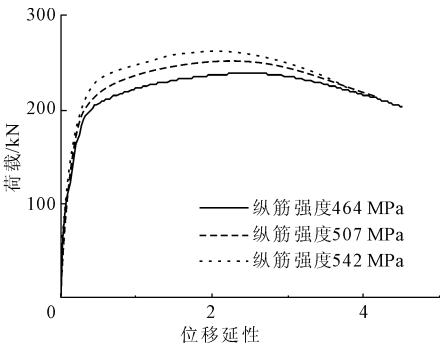


图 12 剪跨比、轴压比、配筋率相同, 不同纵筋强度骨架曲线

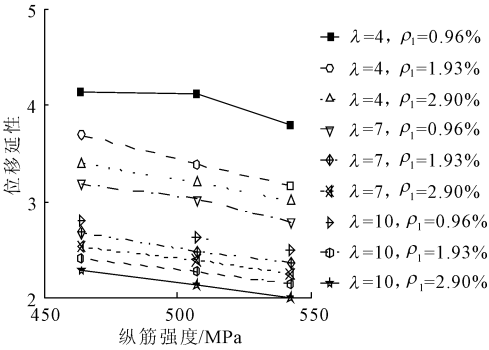


图 13 轴压比不同, 剪跨比和配筋率相同, 不同纵筋强度对矩形空心墩延性变形性能影响

5 结 论

本文通过建立钢筋混凝土空心墩纤维有限元模型^[13], 对空心墩延性变形能力进行参数分析, 分别讨论纵筋配筋率、壁厚、混凝土强度、轴压比等因素对空心墩延性影响^[12]。现总结如下:

- (1) 当轴压比、剪跨比一定时, 延性变化率不受轴压比与剪跨比不同的影响, 随着纵筋配筋率的提高, 空心墩的承载力提高, 延性能力却降低。
 - (2) 当轴压比、剪跨比一定时, 空心墩壁厚的提高对空心墩的承载力与延性变形能力影响不大。
 - (3) 当剪跨比、配筋率一定时, 空心墩的承载力随着轴压比的提高而提高, 延性变形能力随轴压比率提高而降低。
 - (4) 当剪跨比、配筋率一定时, 空心墩的承载力随着纵筋强度的提高而提高, 延性变形能力随混凝土强度的提高而减小。
- 综上所述, 尽管提高配筋率、轴压比及增加纵筋强度能有效的提高空心墩柱的承载能力, 但随之带来的是降低空心墩柱延性能力的负面影响; 但提高配筋率、降低剪跨比却能在提高承载力的同时, 提高空心墩柱的延性能力。 (下转第 81 页)

基的承载力和沉降的可靠性。

参考文献:

[1] 阎明礼,张东刚.CFG 桩复合地基技术及工程实践[M].北京:中国水利水电出版社,2001:1-6.

[2] 龚晓南.复合地基理论及工程应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2002:3-17.

[3] 陈东佐,梁仁旺.CFG 桩复合地基的试验研究[J].建筑结构学报,2002,23(4):71-74.

[4] 刘小高,黄立夫,谭博,等.市政道路施工海相深厚软土组合型地基处理技术[J].水利与建筑工程学报,2014,12(6):78-82.

[5] 曾召田,吕海波,尹闯,等.CFG 桩复合地基加固机理及工程实例分析[J].铁道建筑,2014(1):79-81.

[6] 魏钱钰,方云飞,卢萍珍,等.CFG 桩复合地基承载力检测方法讨论与实例分析[J].建筑结构,2016,46(S2):531-534.

[7] 房飞.CFG 复合地基承载力研究[J].湖南城市学院学报(自然科学版),2016,25(2):32-33.

[8] 邝彬,李戈,王永鑫,等.CFG 桩复合地基承载性状试验研究[J].建筑结构,2017,47(23):100-102,71.

[9] 崔亚楠,洪宝宁,李凯,等.高填方路段 CFG 桩复合地

基变形规律计算分析[J].水利与建筑工程学报,2013,11(3):131-134.

[10] 肖航,曹丹.某工程 CFG 桩复合地基设计及施工[J].施工技术,2016,45(17):56-59,70.

[11] 何志鹏.CFG 桩复合地基工程应用与分析[J].露天采矿技术,2016,31(8):88-90.

[12] 邵国霞,苏谦,尹紫红,等.不同垫层下管桩复合地基现场对比试验研究[J].西南交通大学学报,2018,53(2):279-285.

[13] 苏旭文,陈行,陈文宇,等.复合地基粉煤灰碎石桩的褥垫层特性影响[J].粉煤灰综合利用,2018(3):18-21.

[14] 王勇,蔡智,屈洋,等.CFG 桩复合地基加筋褥垫层作用机理数值分析[J].水利与建筑工程学报,2016,14(1):96-100.

[15] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑地基处理技术规范:JGJ 79—2002[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.

[16] 闫明礼,罗鹏飞,佟建兴,等.复合地基面积置换率[J].工程勘察,2014,42(9):30-35.

[17] 建筑地基处理技术规范:JGJ 79—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.



(上接第 76 页)

参考文献:

[1] 黄峥,白植舟.钢筋混凝土空心薄壁桥墩的延性[J].公路交通科技(应用技术版),2013,9(4):195-197.

[2] 崔海琴,贺拴海,宋一凡.空心矩形薄壁墩抗震性能试验研究[J].公路交通科技,2010,27(6):58-63.

[3] 杜修力,陈明琦,韩强.钢筋混凝土空心桥墩抗震性能试验研究[J].振动与冲击,2011,30(11):254-259.

[4] 宋晓东.桥梁高墩延性抗震性能的理论 and 试验研究[D].上海:同济大学,2004.

[5] 罗征,李建中.低周往复荷载下空心矩形墩抗震性能试验研究[J].振动与冲击,2013,32(8):183-184.

[6] Mazzoni S, McKenna F, Fenves G L. OpenSees Command Language Manual[M]. Berkeley: PEER, University of California, 2007.

[7] Kent D C, Park R. Flexural members with confined concrete[J]. Journal of the Structural Division, 1971, 97(7): 1969-1990.

[8] Chang G, Mander J. Seismic energy based fatigue damage analysis of bridge columns: Part I evaluation of seismic capacity[R]. Buffalo, N. Y: U. S. National Center for Earthquake Engineering Research. NCEER Technical Report, 1994 - 0006.

[9] 苏俊省,王君杰,郭进,等.基于钢筋低周疲劳的桥墩地震易损性分析[J].同济大学学报(自然科学版),2016,44(1):29-36.

[10] Brown J, Kunnath S K. Low cycle fatigue behavior of longitudinal reinforcement in reinforced concrete bridge columns[R]. Technical Report NCEER - 00 - 0007, 2000.

[11] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.

[12] 孙治国,王东升,郭迅.钢筋混凝土空心墩延性变形能力分[J].铁道学报,2012,34(1):91-96.

[13] 陈昕,马麟.高墩大跨连续刚构桥抗震性能分析[J].水利与建筑工程学报,2012,10(4):74-77.