



大直径钢护筒、钢横撑与钢筋混凝土桩基 联合受力的节点力学性状研究*

刘建国^{1,2,3}, 汪承志^{1,2}, 潘时蕴^{1,2}

(1. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 2. 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 530011;
3. 重庆市交通规划勘察设计院, 重庆 400067)

摘要: 对直径2.2 m钢护筒内填钢筋混凝土桩基与纵横向直径1.5 m空心钢管联系撑组成的码头水工结构节点, 在大型通用有限元工具Abaqus二次开发和并行算法的基础上, 建立考虑节点局部细化的码头三维数值模型。通过与现场测试对比验证和大量变动参数的数值分析, 得到了核心钢筋混凝土桩基应力、外侧钢护筒应力、纵横联系撑应力、钢筋拉力和破坏模式等节点力学性状, 并分析了最不利荷载工况组合时节点工作机理, 随后针对节点的力学性状和“强节点、弱构件”的原则对节点进行了优化设计。

关键词: 节点; 大水位差码头; 数值模拟; 钢护筒; 联合受力

中图分类号: U 656.1⁺13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)09-0132-06

On behavior of concrete-filled large-diameter steel casings connections with steel beam

LIU Jian-guo^{1,2,3}, WANG Cheng-zhi^{1,2}, PAN Shi-yun^{1,2}

(1. College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. National inland Waterway Regulation Engineering Technology Research Center, Chongqing 400074, China;

3. Chongqing Communications Planning Survey & Design Institute, Chongqing 400067, China)

Abstract: For the hydraulic structures of wharf node composed of the 2.2 m-diameter pile filled with reinforced concrete and the 1.5 m-diameter vertical and horizontal of ties for hollow tubes, based on secondary development and parallel algorithm of large general finite element software Abaqus, we establish a 3D numerical model of wharf considering the nodes local refinement. According to the comparison and verification of spot test and numerical analysis of large variation of parameter, we get the nodes' mechanical behavior of the core reinforced concrete pile stress, the outer steel casing stress, the vertical and horizontal ties stress, the tensile force of reinforcing and the failure mode, and analyze the working condition of nodes of the most unfavorable load combination. According to the mechanical behavior of the nodes and the principle of "Strong Connection & Weak Components", we optimize the design on nodes.

Key words: inland river; overhead upright wharf; numerical simulation; steel casing; combined bearing

三峡等内河山区河流水电工程蓄水后, 码头建设都将面临长时间深水期和水文陡涨陡落的洪

水期, 低水施工时间很短, 加之码头水工结构需要承受不同水位时船舶撞击力, 致使架空直立式

收稿日期: 2013-03-18

*基金项目: 国家科技支撑计划(2011BAB09B00); 国家青年科学基金项目(51209242); 重庆市重大科技攻关项目(CSTC, 2009AA6029); 重庆市交委科技项目(2011-15)。

作者简介: 刘建国(1976—)男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事水运项目规划、咨询、勘察、设计和研究工作。

码头水工结构选择大直径、大跨度桩基和便于快速施工的钢结构成为趋势。目前这种结构最常用的结构形式是: 由大直径钢护筒和钢筋混凝土桩芯组成桩基, 由大尺度空心钢管或空心钢箱焊接在钢护筒外侧壁上形成施工水位的纵横联系撑。由于钢护筒混凝土内钢筋混凝土桩芯需要采用钻孔施工, 导致在纵横联系撑与桩基节点处不可能设置加强装置, 钢纵横联系撑也不可能深入钢筋混凝土桩基内, 这类节点的工作性状直接影响着整个码头结构的安全性能, 因此需要在考虑码头整体工作性状的基础上分析这类节点的工作状况。

对于钢管混凝土梁柱连接, 目前已经研究了比较丰富的节点类型与形式^[1-4], 但是这些节点梁柱的尺寸远没有码头结构大, 同时横向荷载和组合工况也没有水工结构复杂, 导致相应的计算理论和计算方法有一定的局限性。在数值分析方面, 很多学者都进行了有益的探讨^[5-8], 但是这些分析没有考虑码头整体荷载工况, 且荷载的类型和受载方式与码头相差加大。

为此, 针对内河大水位差大直径钢护筒、钢横撑与钢筋混凝土桩基联合受力节点的实际受载特点, 借鉴各位学者在圆形钢管混凝土梁柱节点上的丰富研究成果, 以重庆港钢护筒和钢筋混凝土联合受力结构水工工程为实例, 参照码头水工结构实际观察数据, 建立该工程的三维数值分析模型, 其中节点处采用局部细化模型, 利用大型通用有限元Abaqus二次开发和并行算法平台, 探讨这类节点的整体工作性状、破坏模式和优化措施。

1 数值模型、现场测试与节点细部构造

大直径钢护筒、钢横撑与钢筋混凝土桩基联合受力水工平台采用4排桩基(图1), 平台前排桩基采用2.2 m δ 16钢护筒内填32根 ϕ 28的二级钢筋混凝土桩芯; 后3排均采用1.8 m δ 16钢护筒内填28根 ϕ 25的二级钢筋混凝土桩芯; 桩中心间的纵横间距均为8 m。每段水工平台两端悬臂3.0 m, 桩基钢筋混凝土部分进入中风化基岩不小于4倍桩基直径。为保证低水位时结构靠泊安全, 在165.00 m处设置横纵联系撑一层, 横纵联系撑均采用直径1.5 m δ 20的空心钢管, 钢管与钢护筒外壁采用厚

12 mm的焊缝焊接(图2)。

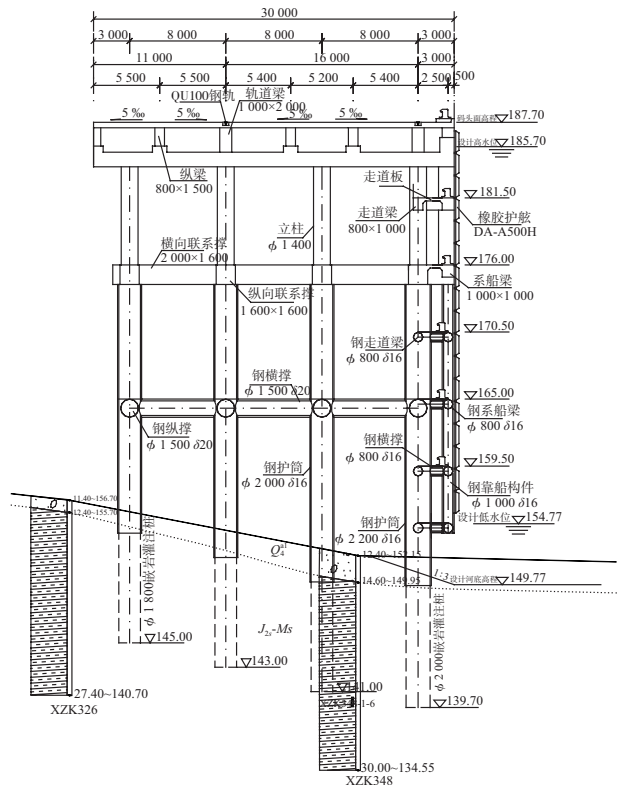


图1 码头架空平台断面图

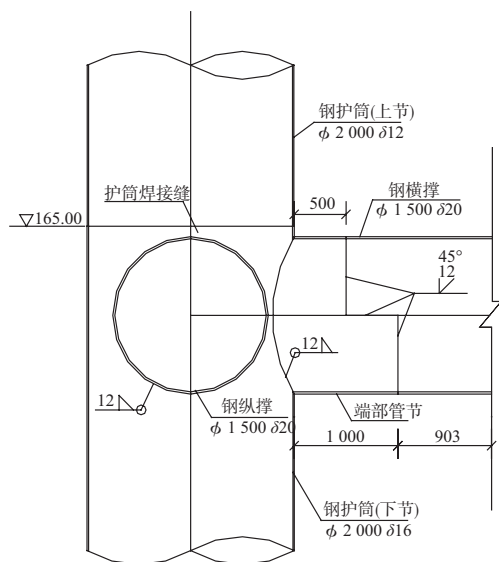


图2 节点连接大样

对该结构考虑大直径钢护筒、钢横撑与钢筋混凝土桩基联合受力特点, 采用大型通用有限元软件Abaqus强大的二次开发和并行算法, 建立考虑相互作用的三维数值分析模型(图3)。模型各构件的断面尺寸和参数与设计图相同, 单元连接采用网格细化与约束相协调的方式处理。计算指

标和参数如表1。钢护筒采用4节点减缩积分壳单元S4R进行模拟,钢筋混凝土则采用8节点减缩积分实体单元C3D8R进行分析,钢筋骨架采用truss单元,钢护筒壁和钢筋混凝土之间采用接触交互作用加以模拟,同时考虑该接触面的法向和切向性质:法线方向定义为硬接触,两者不发生穿透;在切向则定义钢护筒壁与混凝土之间的静摩擦系数0.25,以真实反映钢护筒壁对混凝土的侧向压应力限制和轴向摩擦力等相互作用。

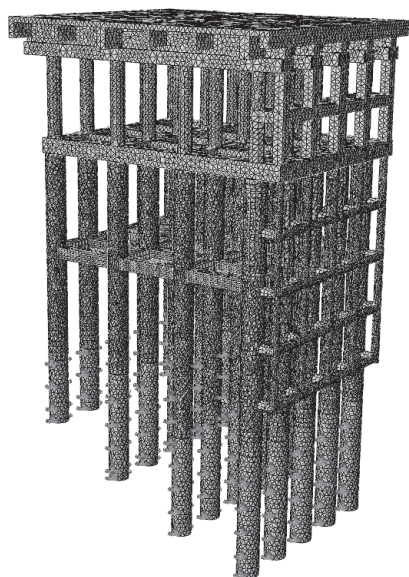


图3 有限元分析模型

表1 节点连接各截面参数

序号	截面直径/mm	壁厚/mm	钢材强度/MPa	混凝土强度/MPa	混凝土钢筋
桩1	2 200	16	235	26.5	Ⅱ级32根 ϕ 28
桩2	1 800	16	238	26.5	Ⅱ级28根 ϕ 25
横向	1 500	20	235	无	无
纵向	1 500	20	235	无	无

分析时假定钢材为理想弹塑性材料^[10],钢材的屈服应变 $\epsilon_y=f_y/E_s$, f_y 为钢材的屈服应力, E_s 为钢材的屈服模量。

混凝土采用考虑张开裂纹破坏和压碎破坏的连续损伤Concrete smeared cracking model,其中压区使用等向硬化弹塑性模型,流动法则为相关联流动法则。其他区使用弹性开裂模型,开裂前为线弹性本构关系,开裂后仍然采用弹性本构关系,但要设置与裂纹垂直方向开裂应变值及裂纹

状态相关的弹性参数折减系数,即调整弹性本构矩阵,以描述开裂混凝土的骨料连锁效应,并结合开裂塑性破坏面模拟混凝土软化阶段行为。开裂时使用开裂塑性破坏面确定裂纹发生的应力状态和裂纹方向,并计算开裂的应变增量。

为验证数值模型的可靠性,在室内进行了1:10比例的室内测试(图4),通过模型换算对结构中间跨横梁后端部位移进行了室内与数值分析的可靠性对比验证(图5),表明数学模型是可靠的。



图4 室内对比分析1:10比例模型

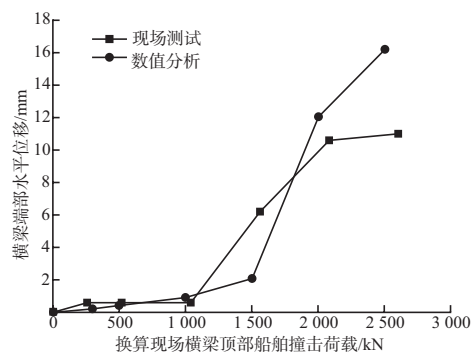


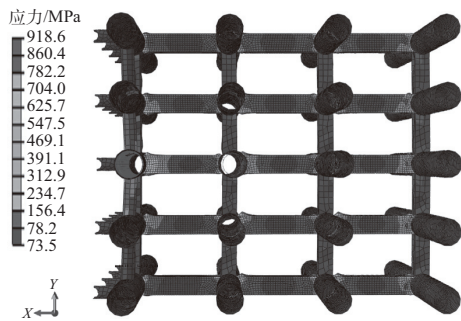
图5 模型换算位移与数值分析对比分析

2 节点力学特性分析

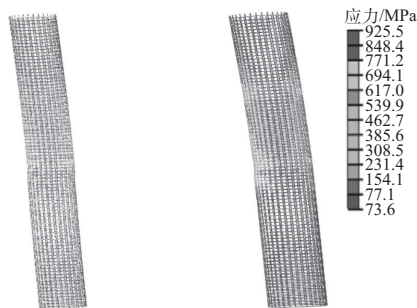
2.1 单一撞击荷载下钢护筒节点箍筋力学特性分析

分析不同撞击位置时节点的力学特性表明,撞击在钢纵横撑连续梁高程时,节点的力学特性最不利(图6, 7)。可以看出撞击在纵横联系撑时,钢筋笼在钢纵横联系撑处的箍筋拉力较大,表明节点处的剪力较大,综合竖向钢筋的拉力较大,可以发现节点处于双向受拉、受剪状态。这种状态主要是由于钢护筒顶部处于自由状态,且刚度

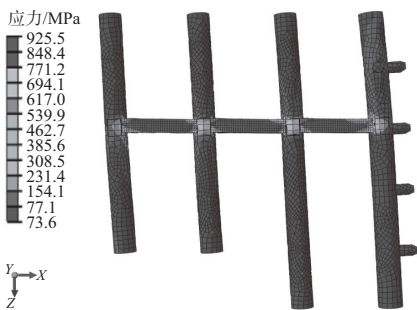
大于混凝土结构, 导致在撞击荷载作用时整体向后排压缩所致, 在单一钢护筒与纵横联系撑焊接时, 节点受力较复杂。



a) 钢护筒应力平面分布



b) 第1排和第2排钢筋应力



c) 中间排架钢护筒应力分布

图6 撞中间排架钢纵横联系撑时的应力分布

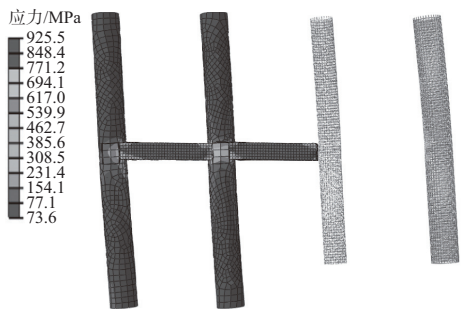
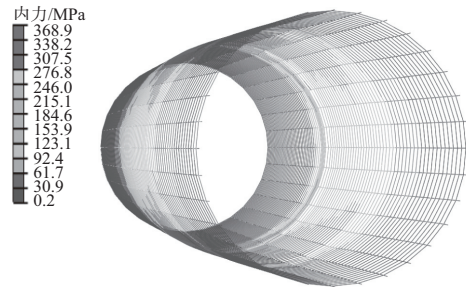


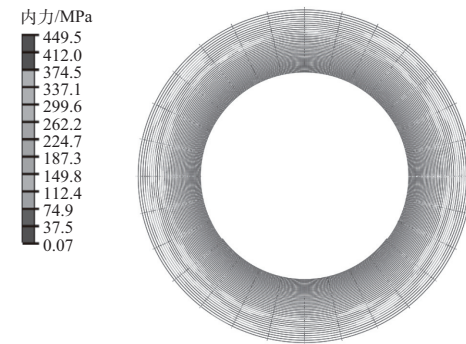
图7 中间排架钢筋应力与钢护筒应力关系

2.2 单一撞击荷载下节点竖向钢筋力学特性分析
进一步选取第1排桩基、第2排桩基和最后一排的钢护筒的应力分布图进行分析(图8, 9),

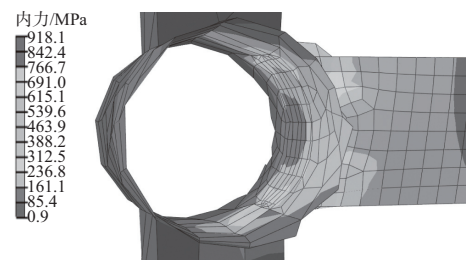
钢护筒与纵横联系撑连接端内的钢筋受力都很复杂, 且纵向钢筋受力的范围是纵横联系撑下底面开始往顶部约2倍的纵横联系撑高度内, 这段纵向钢筋拉力都很大。表明在水平桩基作用下, 纵横联系撑连接处的纵向连接钢筋的面积宜加大, 以保证节点能够高效工作。在这类结构设计时需要加强节点的布置。



a) 第1排桩基钢筋笼内力

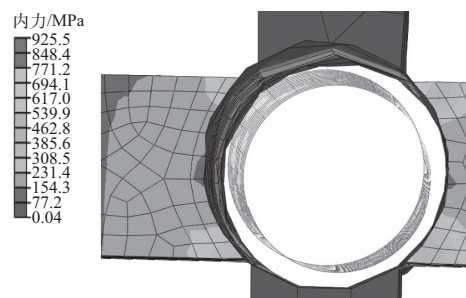


b) 第2排桩基钢筋笼内力



c) 后排钢护筒内力

图8 钢筋笼内力与钢护筒内力分布



a) 前排桩基

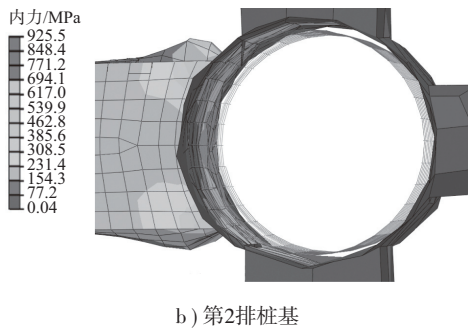


图9 前排桩基和第2排桩基钢护筒与钢筋内力分布

进一步分析单一荷载下，节点混凝土核心的受力模式，选取撞击工况时节点处的核心混凝土应力分布云图（图10）。分析可以发现，前后排桩基核心混凝土处于受弯状态，中间两排桩基的云图很均匀（图11），其中第3排桩基核心混凝土应力两侧都很大，第2排桩基内侧核心混凝土应力略大于外侧。这说明第2排桩基节点受力略倾向于压弯构件，第3排混凝土倾向于压剪构件。

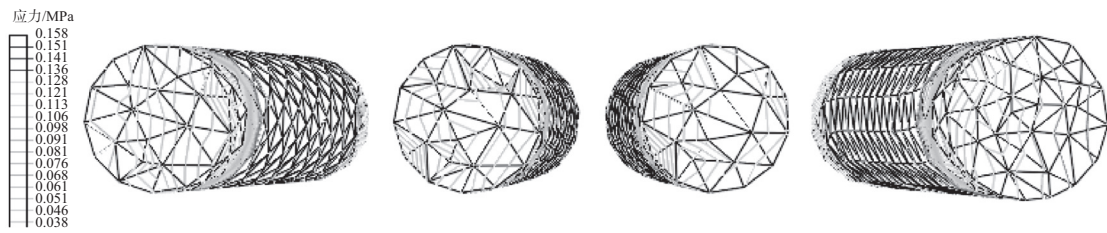


图10 节点处混凝土芯应力分布云图

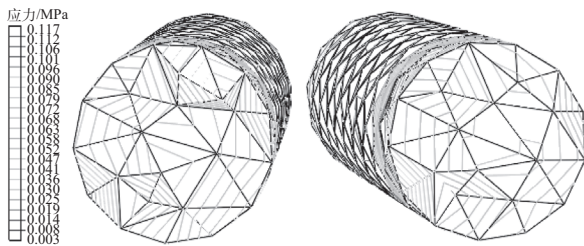
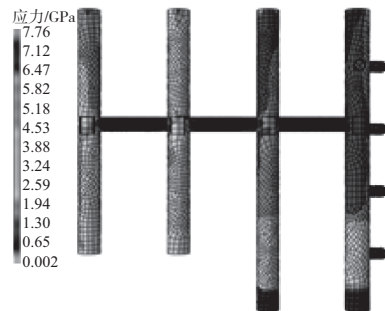


图11 中间两排桩基核心混凝土应力分布云图



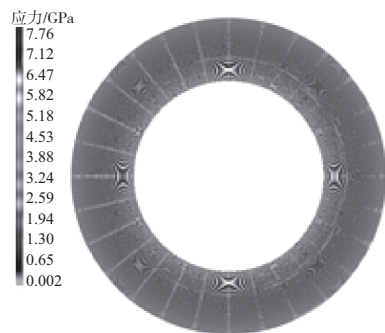
a) 中间排架钢结构应力分布

2.3 节点最不利组合工况下的工作性状分析

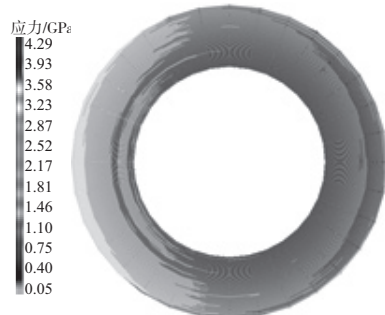
为探讨节点的弯矩分布规律，采用荷载组合法详细模拟实际可能出现的荷载状况。其中恒载作用有：框架结构的自重、码头面板自重、纵梁自重等荷载。可变荷载主要有：1) 撞击力；2) 系缆力；3) 码头面堆载和汽车荷载；4) 船舶挤靠力；5) 门机荷载和水流。计算分析得到每个单元的内力后，针对每个单元进行正负两个值的荷载组合（钢筋混凝土内力组合，钢护筒应力和截面内力组合）。

得到节点最不利弯矩工况时的结构应力分布如图12，从图中可以看出竖向钢筋的内力明显加大，但在钢纵横联系撑连接处的箍筋拉力依然较大，其分布的范围大致是在纵横联系撑的上下1/2倍的高度。

前排桩基的后侧竖向钢筋的拉力较大，而后两排钢护筒的应力分布也较大，表明组合工况下，后排结构内力较大，特别是最后排钢护筒的内



b) 中间排架第2排桩基钢筋应力分布



c) 中间排架前排桩基钢筋应力分布

图12 最不利工况组合下钢护筒与钢筋笼的内力

力较大,且在整个桩长范围内都有较大的分布。

2.4 节点优化设计方案

以上分析表明,节点存在较多的优化空间,结合数值分析,提出了几个优化设计方案:

1) 在钢纵横联系撑1倍高度范围内增加箍筋,且箍筋型号不宜小于二级。

2) 在钢纵横联系撑下部1倍高度,上部2倍高度范围内适当增加竖向钢筋。

3) 后排纵横联系撑与钢护筒连接处设置扩散角。

3 结论

针对内河大水位差大直径钢护筒、钢横撑与钢筋混凝土桩基联合受力节点的实际受力特点,借鉴圆形钢管混凝土梁柱节点上的丰富研究成果,以重庆港钢护筒和钢筋混凝土联合受力结构水工工程为实例,参照码头水工结构实际观察数据,建立该工程的三维数学分析模型,通过大量变动参数的数值分析研究发现:

1) 这类节点的钢筋笼在钢纵横联系撑处的箍筋拉力较大,表明节点处处的剪力较大。

2) 钢护筒与纵横联系撑连接端内的钢筋受力都很复杂,且纵向钢筋受力的范围是纵横联系撑下底面开始往顶部约2倍的纵横联系撑高度内,这段纵向钢筋拉力都很大。

3) 前后排节点桩基核心混凝土处于受弯状态,第2排桩基节点受力略倾向于压弯构件,第3排混凝土倾向于压剪构件。

4) 组合工况下后排结构内力较大,特别是最

后排钢护筒的内力较大,且在整个桩长范围内都有较大的分布。

参考文献:

- [1] 韩林海. 钢管混凝土结构[M]. 北京:科学出版社,2000.
- [2] Beutel J, Thambiratnam D, Perera N. Cyclic behavior of concrete filled steel tubular column to steel beam connection[J]. Engineering Structure, 2002(24): 29-38.
- [3] 蔡健, 黄泰赟. 钢管混凝土柱节点的应用现状与存在问题[J]. 建筑结构, 2001(7): 8-10,13.
- [4] 吕西林, 李学平, 余勇. 方钢管混凝土柱与钢梁连接的设计方法[J]. 同济大学学报, 2002(1): 1-5.
- [5] 聂建国, 赵洁, 柏宇, 等. 钢管混凝土核心柱轴压极限承载力[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2005(9): 1 153-1 156.
- [6] 韩林海, 冯九斌. 混凝土的本构关系模型及其在钢管混凝土数值分析中的应用[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1995(5): 26-32.
- [7] 卢明奇. 钢管混凝土结构三维非线性有限元分析和设计理论的研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.
- [8] Prichard S J, Perry S H. Impact behaviour of sleeved concrete cylinders[J]. Structural Engineering, 2000(78A): 17-23.
- [9] Han Linhai, Liu Wei, Yang Youfu. Behaviour of concrete-filled steel tubular stub columns subjected to axially local compression[J]. Journal of Concrestructional Steel Research, 2008, 64:377-387.
- [10] 吕天启, 赵国藩. 内(圆)钢管增强方钢管混凝土偏压柱极限承载力分析数值方法[J]. 大连理工大学学报, 2001(5): 612-616.

(本文编辑 武亚庆)

