

文章编号:1000-582X(2010)04-070-05

型钢混凝土桁架节点的非线性数值模拟

袁政强¹, 向皓¹, 李保明², 周宏文³

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 成都市兴蓉投资有限公司, 成都 610062;
3. 贵州省住房和城乡建设厅, 贵阳 550003)

摘要:利用有限元分析软件 ANSYS 对某工程的大跨度型钢混凝土桁架转换层节点进行了实体非线性数值模拟,得到了按整体模型逐层顺序分析所得节点处各构件内力作用下型钢混凝土节点的应力分布和变形性能。施工阶段对节点的监控结果表明,现场实测结果与非线性条件下数值模拟分析结果吻合较好,可为此类构件的节点设计及其性能分析提供理论参考。

关键词:型钢混凝土;桁架节点;非线性分析;数值模拟

中图分类号:TU311.41

文献标志码:A

Nonlinear numerical simulation of steel reinforced concrete truss joints

YUAN Zheng-qiang¹, XIANG Hao¹, LI Bao-ming², ZHOU Hong-wen³

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;

2. Chengdu Xingrong Investment CO., LTD, Chengdu 610062, P. R. China;

3. Guizhou Province Housing and Urban-Rural Construction Department, Guiyang 550003, P. R. China)

Abstract: This paper analyzes the steel reinforced concrete large span transfer truss joints using the finite element analysis software ANSYS, and get the joints deformation and the mechanics increase, such as deformation properties, stress distribution. The monitoring results during construction phase show that nonlinear numerical simulation analysis, which is in good agreement with the test results, is an effective method for the mechanical property analysis on this kind of structural components.

Key words: steel reinforced concrete; truss joints; nonlinear; numerical simulation

近年来,型钢混凝土结构在工程建设中得到了广泛的应用,但相关理论研究还相对比较滞后^[1-2]。由于目前型钢混凝土试验装置多为平面加载的形式,进行空间节点的加载和试验研究还比较困难。因此,现有条件下采用有限元方法对此类节点进行数值模拟来分析其性能比较适宜。根据国内外相关文献[3-9]可知:以往的试验和理论研究主要集中于型钢混凝土节点的承载能力和破坏形态方面,对节点构造影响和应力传递机制的研究不够深入;工程

设计多以弹性分析为主,非线性因素影响较少计及,节点内不同材料的实际受力状态不易把握;且试件梁、柱内型钢大多采用轧制型钢,难以适应实际工程中对多种型钢样式的需求。随着型钢混凝土的不断发展,通过有效的模型建立分析复杂的节点形式,可进一步明确节点受力、传力的机制和过程,使其在结构工程中能够广泛应用^[10]。

型钢混凝土桁架节点是较为复杂空间节点,由型钢混凝土柱、梁、斜撑等在同一位置连接交汇形

收稿日期:2009-11-04

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(90815011)

作者简介:袁政强(1962-),男,重庆大学副研究员,博士,主要从事钢筋混凝土结构分析和计算数学研究,
(E-mail)zqyuan@cqu.edu.cn。

成。文中以贵阳市某大楼的型钢混凝土转换层桁架节点为背景。该楼属框架-剪力墙结构,地上主体 18 层,地下 2 层,主体下部设有裙楼 4 层。主体结构 1~4 层中庭纵横 18.8 m×24 m 镂空,在第 4~5 层之间设置型钢混凝土桁架转换层,由中庭横向两侧各设 4 根型钢混凝土柱支撑,将柱距由上部的 8 m 转换为下部的 24 m。该桁架转换层作为荷载传递枢纽,跨度较大,节点部位构造复杂,上部 13 个楼层的竖向荷载直接作用于桁架之上,是保证结构整体承载力和刚度的重要部位。因此,笔者就该类型的复杂节点进行了非线性数值模拟和计算,并对其传力机制和受力情况进行研究分析,验证了该节点传力的有效性,并与对应的施工阶段现场实测数据^[11]相对比,为该类复杂节点形式在工程中的应用提供了理论依据。

1 单元类型和材料模型

1.1 单元类型

型钢混凝土桁架内型钢都是由钢板组合焊接而成,钢板的厚度远小于钢板的平面尺寸,在节点的有限元模型中,采用 4 结点空间三维壳体单元 Shell181 单元进行模拟^[12]。节点的有限元模型中的混凝土考虑钢筋弥散,采用 ANSYS 中预设的八结点六面体实体单元 Solid65 单元进行模拟^[13]。

1.2 材料模型

考虑到结构加载过程的单向性和一次性作用,将型钢及钢筋视为理想弹塑性材料,不考虑其刚度退化和 Bauschinger 效应,采用双线性等向强化模型(BISO)输入,将材料屈服后的切线模量设置为 0,成理想弹塑性材料,其模型如图 1(a)所示。

混凝土单元采用弹塑性本构模型。通过实测数据对比,考虑采用多线性等向强化模型(MISO)模拟。混凝土受压应力-应变曲线采用 GB50010-2002 附录 C 中的方程,即式(1)(2)所示,模型曲线如图 1(b)。

当 $x \leq 1$ 时:

$$y = \alpha_a + (3 - 2\alpha_a)x^2 + (\alpha_a - 2)x^3, \quad (1)$$

当 $x > 1$ 时:

$$y = \frac{x}{\alpha_d(x-1)^2 + x}, \quad (1)$$

式中: α_a, α_d 为单轴受力应变曲线上、下降的参数值,按规范^[14]取用; $x = \frac{\epsilon}{\epsilon_c}, y = \frac{\sigma}{f_c^*}$; f_c^* 为混凝土单轴抗压强度; ϵ_c 为与 f_c^* 相应的混凝土峰值压

应变。

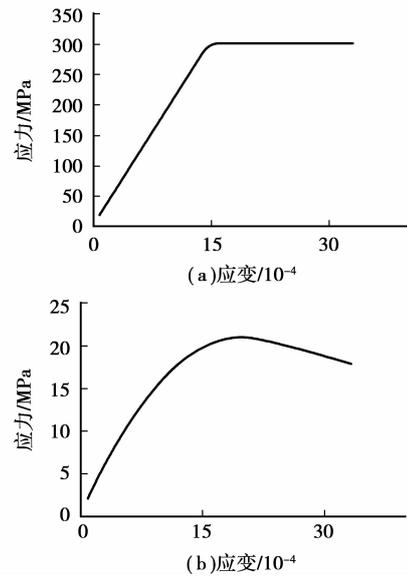
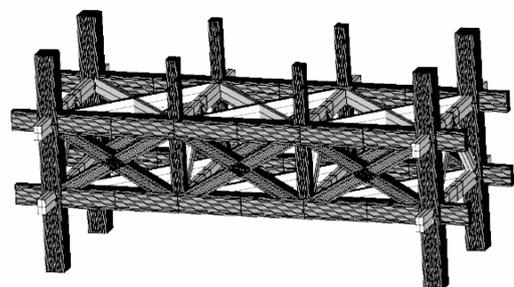


图 1 材料单轴应力应变

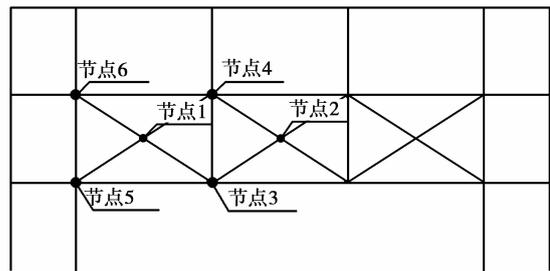
2 模型的建立

2.1 分析的对象

转换层型钢混凝土桁架整体模型如图 2(a)所示,节点按对称关系编号为节点 1~6 号,如图 2(b)所示。各节点分别建立有限元实体模型,进行非线性模拟分析,并将分析结果与施工阶段现场实测结果进行了对比。文中主要介绍节点 5 的模型建立过程与分析结果的对比。



(a)桁架整体模型



(b)节点编号

图 2 转换桁架整体模型及节点编号图

2.2 模型的建立

由于该节点构造十分复杂,有限元模型中采取混凝土单元与型钢单元分别建立模型,再耦合混凝土和型钢对应位置节点的自由度^[15]。

型钢单元:首先建立型钢位置相应的几何面,然后将几何面离散,最后映射四边形网格图。如图 3(a)所示。

混凝土单元:首先建立混凝土单元所对应的几何实体;再按照配筋情况切分并且赋上相对应单元的实常数,来反映构件内的配筋情况;最后遵照混凝土单元网格与型钢单元网格在相同位置一一对应的原则,对混凝土几何实体进行切分。局部不规则部分采用先划分不规则面的面网格,再扫掠(sweep)生成体网格,从而保证 2 种不同单元网格的对应。最终混凝土几何实体离散的六面体映射网格如图 3(b)所示。

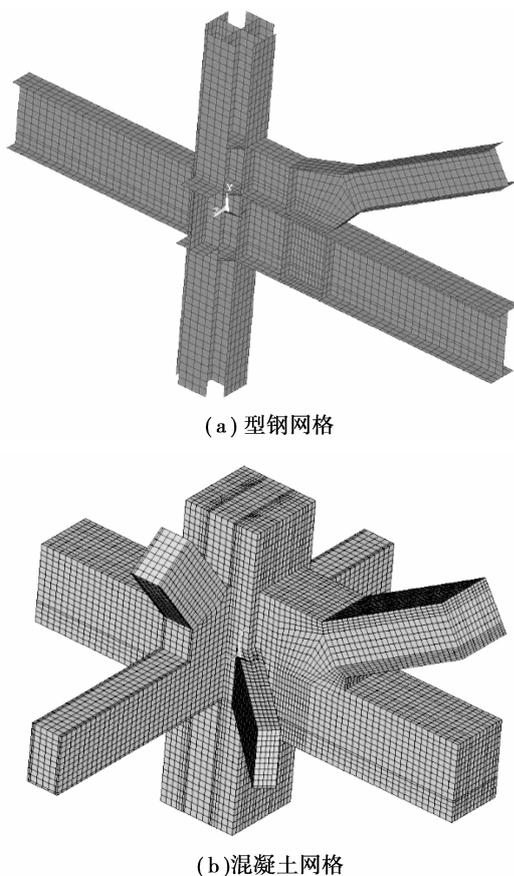


图 3 节点 5 模型有限元网格图

2.3 加载方式

为了结果能够与实测数据进行对比分析,采用的荷载来自于该结构按整体模拟施工方法进行计算得到的结点处构件的内力,即转换层桁架以上每施工一层就建立相应状态下的整体模型来计算结点处

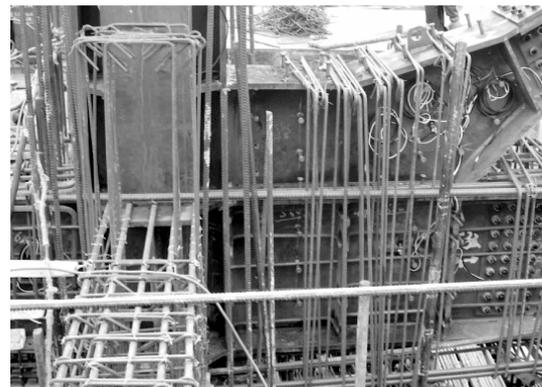
各构件的内力,并将得到的内力以荷载方式施加到对应的结点模型进行计算,使计算过程与现场施工过程中实测数据的顺序一致。

为避免实体模型上直接加载产生应力集中影响非线性计算的准确性,模型中所有的加载端和约束端均设置弹性垫板。节点处各构件传递的轴力和剪力平均分配到加载端面弹性垫板的全部结点,而弯矩只加载在弹性垫板端面型钢翼缘板所对的结点处,并满足 2 个型钢翼缘板上合力所形成的力偶与荷载弯矩相等。约束柱的下部加载端全部自由度。最后耦合型钢单元与混凝土单元对应结点的 3 个平动自由度,以保证 2 种单元协同受力^[16-17]。模拟分析结果中截去弹性垫板部分,最终获得节点区域的内力分布和变形。

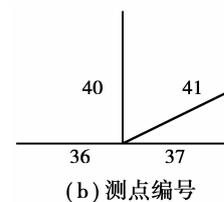
3 实测结果与计算结果的对比分析

3.1 节点部位应变的实测

实际施工过程中,在桁架节点的相应部位安装了振弦式应变传感器,如图 4(a)所示。按照桁架上部结构的逐层施工顺序,对节点应变数据进行了连续测量,得到了各个节点在上部结构建造的过程中各测点部位应变变化全过程。测点编号如图 4(b)所示。



(a) 传感器安装部位



(b) 测点编号

图 4 传感器安装部位及测试点编号

3.2 模拟结果与实测数据对比

3.2.1 应变结果

为了能够直观地揭示在转换层上部荷载逐层增大过程中节点内的应力传递规律,绘制了该节点各

测点在逐层施工下型钢实测应变变化规律,同时也绘制出节点所对应计算模型分别按弹性和非线性计算的结果进行对比(如图 5~8 所示)。

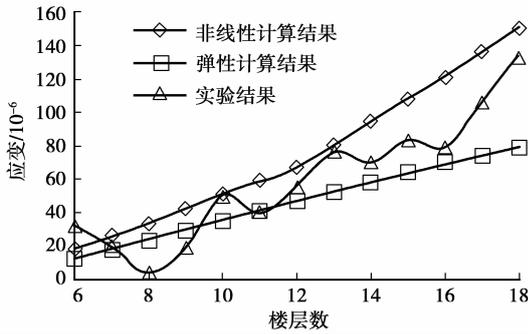


图 5 测点 36 应变对比

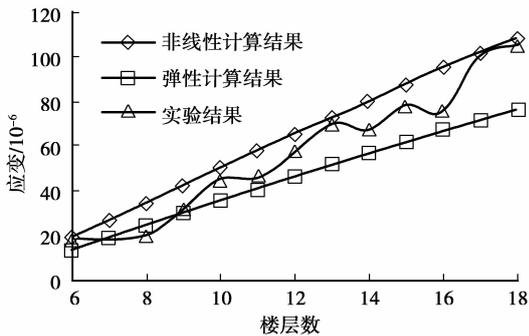


图 6 测点 37 应变对比

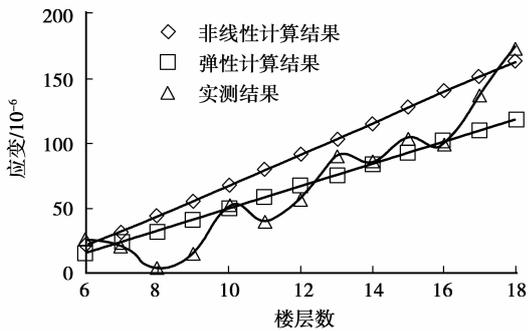


图 7 测点 40 应变对比

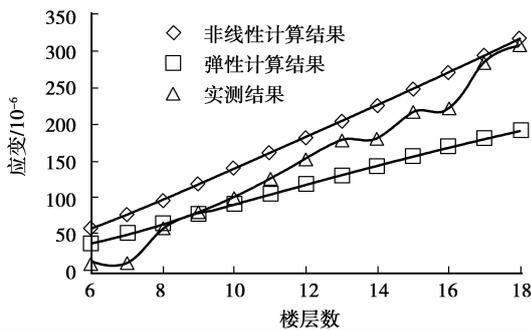


图 8 测点 41 应变对比

从以上各测点应变的对比图可以得出:

1)型钢的弹性与非线性模拟分析得出的应变结果与实测结果随荷载增长的规律基本一致。在桁架上部结构完成后,弹性分析所得型钢应变结果均小于实测结果,而非线性分析所得型钢应变则略大于实测应变结果,从而揭示了考虑混凝土材料非线性特点后受力性能产生差异而导致的混凝土的卸载效应,即混凝土应力减小而对应型钢应力增大的应力重分布规律,证明了文中所介绍的对此类复杂的型钢混凝土节点的非线性分析方法能有效的模拟其实际变化规律。

2)非线性计算和实测结果均表明:随着上部结构逐层施工,型钢应变增长基本上处于线性增加状态,测点的最大应变为 317.9×10^{-6} ,表明型钢处于弹性工作阶段,该桁架节点应力水平正常,桁架设计较为合理。

3)由于施工阶段模板安拆对上部荷载的传递路径产生影响,致使实测应变出现一些波动,但各测点结果均表明:随着结构整体施工的完成,非线性理论计算结果与测试结果更加吻合,高于弹性分析结果,说明该方法在分析此类节点受力性能时考虑非线性影响的必要性。

3.2.2 应力结果

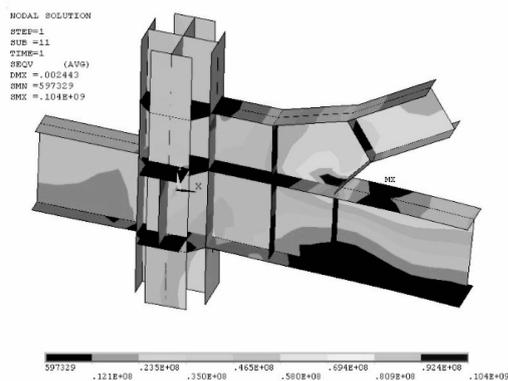
该节点在结构整体施工完成状态的内力作用下,型钢和混凝土的应力云图分别如图 9、图 10 所示。

通过分析弹性计算和非线性计算应力分布结果可以得出:

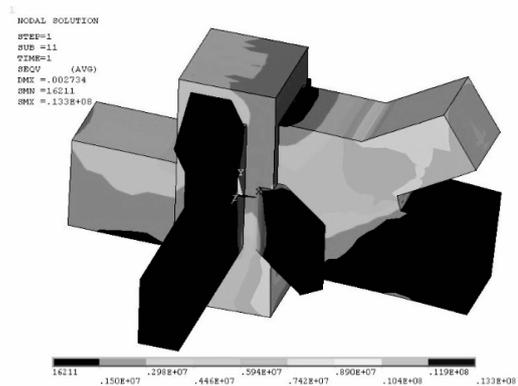
1)非线性分析的型钢应力最大区域出现在节点混凝土截面发生突变的地方,并且最大等效应力值较弹性分析时有较大增加,这与实际情况下混凝土受力后表现出非线性性质并导致内力重分布的特性相吻合,由此表明,分析此类复杂的型钢混凝土节点受力性能时考虑非线性的必要性。

2)弹性计算中易出现局部混凝土拉应力过大与实际情况不符,非线性模拟计算克服了这一缺点,能够较准确的反映混凝土开裂后应力释放并重新分布到型钢上的趋势和过程。

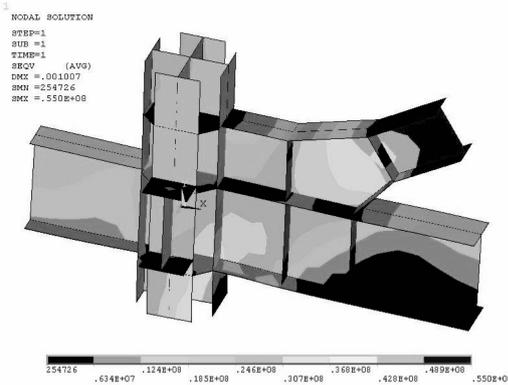
3)非线性计算能够更加真实的反映应力在节点内部的传递和分布规律,所得出的节点薄弱处较线性分析更接近实际情形,其结果能够更好的指导此类构件的设计和加固。



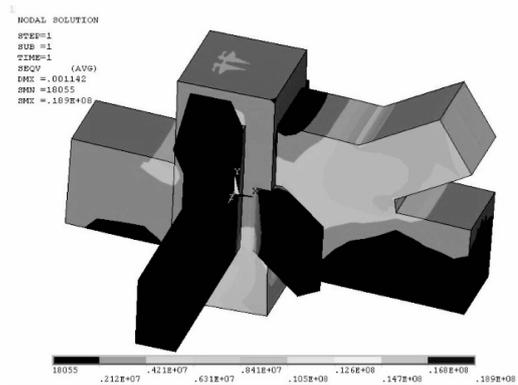
(a) 非线性分析



(a) 非线性分析



(b) 弹性分析



(b) 弹性分析

图9 节点型钢 Von Mises 应力云图

图10 节点混凝土 Von Mises 应力云图

4 结 语

型钢混凝土桁架节点的构造复杂、形式多样,受到与之相连的腹杆、弦杆等构件传递的弯矩、剪力、轴力的影响,且混凝土与型钢处于协同受力状态,考虑非线性条件下内力分布和传递不明确,试验难度大,难以把握节点在不同荷载形式下的应力应变规律。节点数值模拟分析方法能够对不同的构造形式和型钢样式进行模拟分析,通过非线性分析得出节点内部型钢和混凝土更加接近实际状态的应力分布,为节点内部应力传递机制的研究提供了有力的分析手段和直观的分析结果。针对确定的节点形式,可通过调整模型的各项参数(如材料强度、板材厚度、配筋等)以明确相应的影响,为有针对性的进行节点设计和优化提供科学依据。文中的背景工程项目正是应用了该模拟分析方法来完成结构的设计和优化过程,目前项目已经建成并投入使用。

参考文献:

- [1] 陈丽华, 李爱群, 赵玲. 型钢混凝土梁柱节点的研究现状[J]. 工业建筑, 2005, 35: 32-45.
CHEN LI-HUA, LI AI-QUN, ZHAO LING. Present

situation of research on steel reinforced concrete beam-column joints [J]. Industrial Construction, 2005, 35: 32-45.

- [2] 叶列平, 方鄂华. 钢筋混凝土构件的受力性能研究综述[J]. 土木工程学报, 2000(5): 52-56.
YE LI-EPING, FANG E-HUA. State-of-the-art of study on the behaviors of steel reinforced concrete structure [J]. China Civil Engineering Journal, 2000 (5): 52-56.
- [3] 傅剑平, 张川, 白绍良. 钢筋混凝土抗震框架节点各机构传递剪力的定量分析[J]. 建筑结构学报, 2005(2): 91-96.
FU JIAN-PING, ZHANG CHUAN, BAI SHAO-LIANG. Quantitative evaluation of two shear transfer mechanisms in earthquake resistant beam-column joints[J]. Journal of Building Structures, 2005(2): 91-96.
- [4] 薛建阳, 刘义, 赵鸿铁, 等. 型钢混凝土异形柱框架节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(4): 69-77.
XUE JIAN-YANG, LIU YI, ZHAO HONG-TIE, et al. Experimental study on seismic behavior of steel reinforced concrete special-shaped columns-beam joints [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30 (4): 69-77.

(下转第 87 页)

- [15] 王恩志,王洪涛,邓旭东.“以管代孔”一排水孔模拟方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(3):346-349.
WANG EN-ZHI, WANG HONG-TAO, DENG XU-DONG. Pipe to represent hole-numerical method for simulating single drainage hloe in rock-masses [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001,20(3): 346-349.
- [16] 王恩志,王洪涛,王慧明.“以缝代井列”一排水孔幕模拟方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(1):98-101.
WANG EN-ZHI, WZNG HONG-TAO, WANG HUI-MING. Fissure to represent ling of hholes-numerical method for simulating the drainage hole cuatain in roch masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2002,21(1): 98-101.
- [17] 朱岳明,张燎军. 排水孔穿过自由面时渗流场的改进排水子结构法求解[J]. 岩土工程学报,1997(2):69-76.
ZHU YUE-MING, ZHANG LIAO-JUN. Solution to seepage field problem with the technique of improved drainage substructure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 19(2):69-76.
- [18] 郑颖人,唐晓松. 库水作用下的边(滑)坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报,2007,27(8):1115-1121.
ZHENG YING-REN, TANG XIAO-SONG. The stability analysis of slope under reservoir drawdown condition [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2007,27(8): 1115-1121.
- [19] 胡静. 空气单元法模拟渗流场分析中的排水孔[J]. 水力发电,2005,31(12):34-36.
HU JING. The drainage hole in the analysis of using air element method to simulate seepage field[J]. Water Power, 2005,31(12): 34-36.
- [20] 胡静,陈胜宏. 渗流分析中排水孔模拟的空气单元法[J]. 岩土力学,2003,4(2):281-283.
HU JING, CHEN SHENG-HONG. Air element method for modeling drainage holes in seepage analysis [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003,4(2): 281-283.
- [21] CHEN S H, XU Q, HU J. Composite elements method for seepage analysis of geotechnical structures with drainage hole array[J]. Journal of Hydrodynamics, 2004, 16(3): 260-266.

(编辑 陈移峰)

~~~~~

(上接第74页)

- [5] FRANK C C WENG, WANG H S. Proceedings of the fourth international conference on advances in steel structures: Seismic behavior of steel beam to steel reinforced concrete (SRC) column connections, Shanghai, June 13-15, 2005 [C]. Amsterdam, Boston: Elsevier, 2005.
- [6] JGJ 138-2001, 型钢混凝土组合结构技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [7] BEUTEL J, THAMBIRATNAM D, PERERA N. Cyclic behavior concrete filled steel tubular column to steel beam connection [J]. Engineering Structures, 2002, 24: 29-38.
- [8] 周学军,曲慧. 方钢管混凝土框架梁柱节点在低周期往复荷载作用下的抗震性能研究[J]. 土木工程学报, 2006,39(1):38-42.  
ZHOU XUE-JUN, QU HUI. Seismic resistance of bole-weld joint and all-weld joint of concrete filled square steel tube and steel beam under cyclic load[J]. China Civil Engineering Journal,2006, 39(1): 38-42.
- [9] 赵鸿铁. 钢与混凝土组合结构[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [10] 王新敏. ANSYS工程结构数值分析[M]. 北京:人民交通出版社,2007.
- [11] 杨成武. 钢管混凝土桁架转换层施工监控研究[D]. 重庆:重庆大学,2008.
- [12] DVORKIN E N, BATHE K J A. Continuum mechanics based four-node shell element for general nonlinear analysis[J]. Engineering Computations, 1984, 1(1): 77-88.
- [13] 陆新征,江见鲸. 利用 ANSYS Solid 65 单元分析复杂应力条件下的混凝土结构[J]. 建筑结构, 2003,33(6): 22-24.  
LU XIN-ZHENG, JIANG JIAN-JING. Analysis for concrete structure under complex stress condition with solid 65 FEA element of ANSYS [J]. Building Structure, 2003, 33(6): 22-24.
- [14] GB 50010-2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [15] LU X Z, TENG J G, YE L P, et al. Intermediate crack debonding in FRP-strengthened RC beams: FE analysis and strength model [J]. Journal of Composite for Construction, ASCE, 2007, 11(2): 161-174.
- [16] 查晓熊,唐家祥. 钢管混凝土结构非线性有限元分析中混凝土界面模型的研究及应用[J]. 工程力学, 1999, 16(6):29-35.  
ZHA XIAO-XIONG, TANG JIA-XIANG. The study and application of concrete bounding surface constitutive relationships to the nonlinear finite element analysis of concrete filled steel tubular structures [J]. Engineering Mechanics, 1999,16(6):29-35.
- [17] YUNUS S M, PAWLAK T P, COOK R D. Solid elements with rotational degrees of freedom[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1991,31:573-592.

(编辑 陈移峰)