

文章编号:1673-9469(2010)01-0025-04

钢管混凝土组合节点的非线性有限元分析

李华¹,黎立云²

(1.中国矿业大学 研究生院,北京 100083;2.中国矿业大学 力学与建筑工程学院,北京 100083)

摘要:在钢管混凝土柱—钢骨混凝土梁组合节点试验研究的基础上利用有限元软件 ANSYS 进行了反复荷载作用下的数值模拟,并对不同腹板厚度和钢骨混凝土梁纵筋配筋量对该组合节点承载力的影响进行了分析。结果表明,有限元计算所得的结果基本能反映结构在反复荷载作用下的应力状态、受力性能等。

关键词:钢管混凝土;组合节点;有限元分析;ANSYS

中图分类号: TU311

文献标识码: A

The nonlinear finite element analysis of a composite joint between steel tube column and steel rein - forced concrete beam

LI Hua¹, LI Li-yun²

(1. Graduate school, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 2. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: With the development of the high composite structure, the composite joint comes to be a hot spot. Based on an experiment of a composite joint between steel tube column and steel rein - forced concrete beam, it is analyzed through finite element software ANSYS. The influence of configurations, such as the thickness and the amount of steel reinforcement, to the bearing capacity of the composite joint are analyzed. It can be concluded that the result of numerical simulation is comparatively correct.

Key words: steel tube column; composite joint; finite element analysis; ANSYS

加强环式节点是钢管混凝土结构目前研究最成熟、应用较多的一种刚接节点。在实际应用中为了满足防火等要求,常常在节点区外包钢筋混凝土形成钢骨混凝土组合节点,对这类节点的研究较少。本文在文献 1 的基础上,利用有限元软件 ANSYS 对该组合节点进行了数值模拟并与试验结果进行了对比分析。

1 模型的建立

试验所用钢—混凝土组合结构试件的柱为钢管混凝土构件,梁为钢骨混凝土构件。梁柱节点通过在柱上设置的上下加强环板与工字钢梁的上下翼缘焊接、柱上耳板与钢梁腹板螺栓连接、梁的钢筋与柱焊接。以梁柱节点为中心,上下各取半

层高,左右各取半跨梁长,组成一个平面十字形试件,梁柱截面取足尺寸。

因节点构造较复杂,为便于计算在模拟中采取适当简化:不考虑上下加强环板与工字钢梁的上下翼缘焊接、焊接残余应力的影响、节点的几何缺陷以及柱上耳板与钢梁腹板螺栓连接,假定在这些部位可靠连接;不考虑钢管及钢筋与混凝土的粘结滑移,即在有限元模型中使钢管与混凝土划分一致并共用节点;由于本节点的模拟是为了分析钢骨外包混凝土之后的力学性能,所以钢骨混凝土梁内的纵筋、箍筋及节点区域的环向钢筋等均采用在 Solid65 单元中输入参数来考虑。

1.1 混凝土本构关系

混凝土采用 Solid65 单元,其破坏面为改进的

William - Warnke 五参数破坏曲面。采用多线性随动硬化模型, Mises 屈服准则, 并假定反复荷载下混凝土的应力—应变曲线的外包络线与等效单轴应力—应变曲线重合, 不考虑混凝土的下降段, 混凝土的开裂采用 Rankine 最大拉应力准则, 当达到最大拉应力时混凝土即开裂, 拉应力松弛。当混凝土开裂后应变软化至 6 倍的开裂应变时, 应力降低为 0。混凝土裂缝张开剪力传递系数 β_t 取 0.5, 裂缝闭合剪力传递系数 β_c 取 0.95。

钢管混凝土梁中 C30 混凝土的应力—应变关系式采用我国《混凝土结构设计规范》(GB50010 - 2002) 中的表达式, $\sigma - \epsilon$ 如图 1 所示。对钢管混凝土柱中的 C60 核心混凝土采用韩林海教授的考虑混凝土强度和约束效应的模型^[2] $\sigma - \epsilon$ 如图 2 所示。

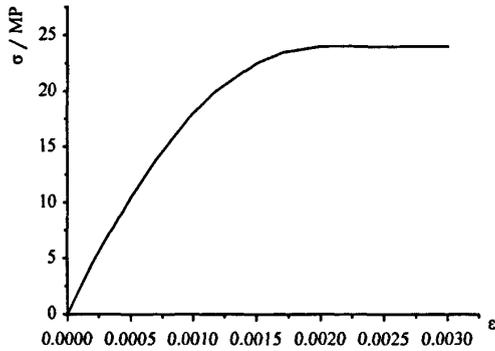


图1 梁混凝土的 $\sigma - \epsilon$ 曲线

Fig.1 Stress-strain curve of concrete of concrete beam

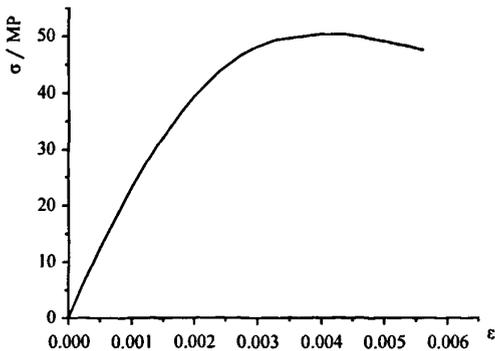


图2 柱混凝土 $\sigma - \epsilon$ 曲线

Fig.2 Stress-strain curve of concrete in steel tube column

1.2 型钢及钢筋本构

型钢、钢材均用 Shell181 单元, 钢骨截面: H400mm × 150mm × 6mm × 10mm, Q345 钢, C30 混凝土截面: 500mm × 300mm。钢骨混凝土梁纵筋采用 $\phi 16$ 的二级钢筋, 箍筋为 $\phi 8 \times 100$, 对钢材采用理性弹塑性模型 (BKIN), 该模型把塑性阶段和强化阶段简化一条直线, 较好地模拟了材料的弹塑性大变形阶段。计算中采用 Von - Mises 屈服准则及相关流动法则。其有限元模型见图 3

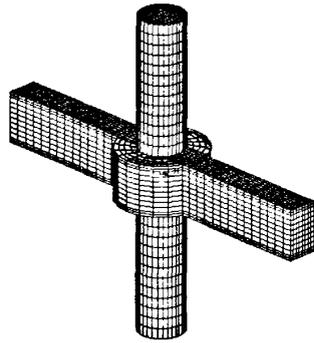


图3 节点整体有限元模型

Fig.3 Integral finite element of the joint

1.3 边界条件及加载

有限元计算时, 模型的边界条件及加载方式尽量与试验一致。约束柱底端节点的 X、Y、Z 向的位移, 约束柱顶节点的 X、Y 向位移。

加载采用力加载方式, 先在柱顶端施加竖向轴心压力 800kN, 保持恒定, 采用阶梯式的加载方式, 此阶段为第一荷载步。然后采用分级加载制度在梁端施加同步反对称荷载并循环往复一次, 直至构件破坏。

在试验中梁端的反复荷载加载施加的是集中力, 而在有限元模型中, 根据圣维南原理, 如果对模型的某个节点施加较大的集中载荷, 容易对该节点的相邻区域造成很大的影响, 造成程序计算收敛困难, 本文中将加载区节点加载方向上的位移耦合, 然后再施加荷载或位移^[3]。

2 结果分析

2.1 变形及应力

有限元计算该组合节点的破坏发生在梁根部, 与试验中试件的破坏位置一致, 符合“强柱弱梁”的原则。有限元计算中开裂荷载、裂缝分布位

置、应力分布等结果与试验中一致。因此,有限元计算所得的结果基本能反映结构在反复荷载作用下的应力状态、受力性能等。但由于有限元计算中梁根部混凝土单元在反复荷载作用下发生了较大的变形,导致计算终止从而未能模拟试件在反复荷载作用下破坏的全过程。

2.2 滞回曲线

结构或构件在反复荷载作用下,内力和变形关系表现出滞回现象。滞回曲线可以综合反映结构或构件的弹性、非弹性性质、耗能等抗震性能。骨架曲线则是把每次滞回曲线的峰值点都连起来所得的包络线。

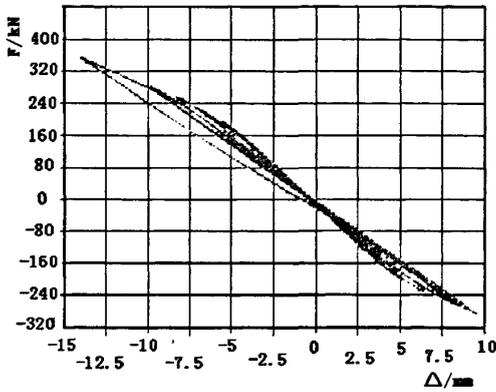


图4 有限元计算所得荷载-位移滞回曲线

Fig. 4 The curve of loading-displacement hysteretic obtained by finite element

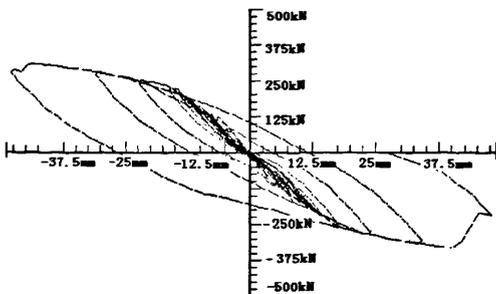


图5 试验所得荷载-位移滞回曲线

Fig. 5 The curve of loading-displacement hysteretic obtained by experiment

有限元计算所得的梁端荷载-位移滞回曲线如图 4 所示。与试验所得荷载-位移曲线如图 5 所示的内环较相似。随着梁端荷载的增加,梁端位移不断增加,但是由于节点此时还处于弹性阶段,卸载后荷载位移曲线原路返回,残余变形很

小,当荷载继续增大,荷载位移曲线滞回环逐渐增大,但是由于有限元计算中节点区混凝土单元发生了严重变形,导致计算停止。而试验中当节点区混凝土开裂,产生贯通梁根部的裂缝,节点区混凝土被压碎脱落时还可以继续加载,因此,试验所得的滞回曲线圈数较多,滞回曲线要饱满的多。

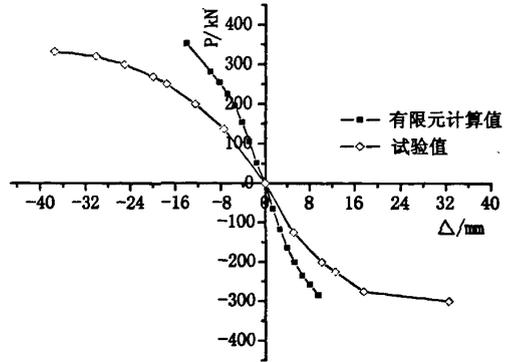


图6 反复荷载作用下的骨架

Fig. 6 Comparison of the skeleton curves on low-cyclic load

有限元计算荷载-位移骨架曲线如图 6 所示,在荷载作用初始阶段计算曲线与试验曲线吻合较好,但随着荷载的逐渐加大,两曲线逐渐分离,有限元计算极限荷载值略高于试验值(试验值为 333kN,有限元计算值为 350kN),主要是由于未考虑钢与混凝土之间的粘结滑移,在荷载作用后期整个节点的计算模型与实际受力不相符,使得整个构件的整体刚度偏高导致的。由于混凝土单元变形,有限元计算最大位移值相对试验值要小。

有限元计算得出的骨架曲线中非线性效应并不明显,这是由于节点局部应力最大处材料已达到所能承受的极限而破坏导致计算不收敛。

2.3 结果差异分析

有限元与试验结果产生差异的原因主要是:

1)该节点在反复荷载作用下,梁根部的混凝土在承受反复拉、压,而混凝土抗拉强度只有抗压强度的 1/10 左右。在有限元计算中,由于钢骨混凝土梁最先受拉的混凝土单元变形过大使得计算中止,试验中当混凝土开裂,产生贯通梁根部的裂缝,甚至混凝土被压碎脱落时还可以继续加载。因此,有限元所得结果仅为试验结果的一部分。

2)有限元计算中假设钢管与钢管内混凝土位移协调,钢筋与钢筋外包混凝土位移协调,没有考

考虑二者之间的相互作用,导致节点的整体刚度大于节点的实际刚度,使得计算所得承载力略高于试验承载力。

3) ANSYS 中的多线性随动硬化模型虽然在合理的选取参数后可以比较接近混凝土模型,可以在一定范围内描述混凝土的特性,如线弹性阶段或混凝土单调加载进入非线性阶段。但该模型还是不足以完整的描述混凝土特性的^[4]。尤其是对于复杂加载路径下结构的响应,如地震动作用下结构的滞回性能的分析,由于本构模型过于粗糙,得不到令人满意的结果^[5]。

3 影响因素分析

3.1 腹板厚度的影响

组合节点的腹板厚度对整个节点的承载力有重要意义。但对于钢管混凝土梁—钢骨混凝土梁节点由于混凝土及钢筋的存在腹板对于节点的影响可能会减小,但是其程度还没有一个明确的认识。本文所模拟的节点腹板厚度为 6mm,加环环及翼缘为 10mm。通过有限元软件在不改变其他参数的情况下,研究不同腹板厚度($t = 6, 8, 10, 12, 14\text{mm}$)对此类节点承载力的影响。

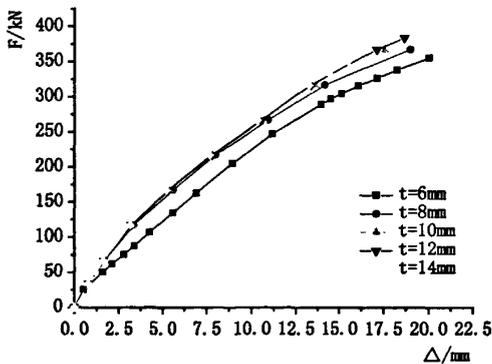


图7 不同腹板厚度节点的荷载—位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curves in different thickness of web plate

由图 7 可看出,随着腹板厚度的增加,节点的刚度增大,承载力有所提高, $t = 6\text{mm}$ 时极限荷载为 354.68kN,位移为 20.02mm, $t = 12\text{mm}$ 时其极限荷载为 383.34kN,位移为 18.67mm,而 $t = 14\text{mm}$ 时其极限荷载为 350kN,位移为 15.51mm。 $t = 6$ 与 $t = 14$ 时节点的承载力相当,但是有限元所能计算出的最大位移逐渐变小,也就是腹板厚度超过一定限值时,整个节点的延性变差,即耗能能力逐渐

减弱。所以,提高腹板厚度对节点的承载力是有所提高的,但是不能超过一定限值。

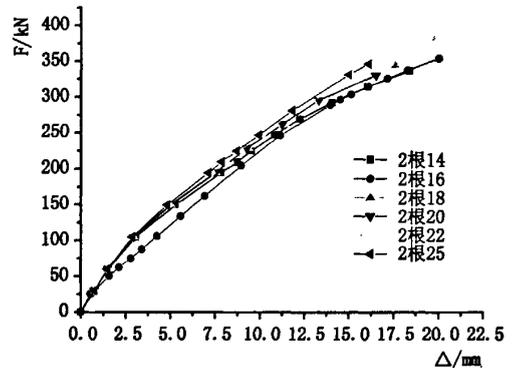


图8 不同纵筋量节点的荷载—位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curves in different amount of steel reinforcement

3.2 纵筋配筋量的影响

配筋率对于钢骨混凝土梁的承载力有很大的影响,对于此类节点的影响尚不清楚。本文模拟节点的钢骨混凝土梁纵筋为 2 根 $\phi 16$,不同配筋量下该组合节点的荷载—位移曲线如图 8 所示。从图中可以看出,此节点在不同纵筋量下的承载力总体上是随着纵筋配筋量的增大而提高。但是,提高的幅度并不大。

4 结论

1) 有限元计算中结构最终以节点区混凝土严重变形而破坏,这与试验中试件的破坏形态相同。有限元计算终止,而试验中继续加载直至梁端承载力达到极限状态并有所下降。

2) 有限元计算与试验所得滞回曲线及骨架曲线很相似,但因有限元计算中未考虑型和混凝土之间的粘结滑移,使得节点的整体刚度大于实际刚度,极限荷载略高于试验值。因此这种方法可以用于该节点的承载力分析。

3) 适当增加腹板厚度可以提高该组合节点的承载力,但是腹板厚度的增加会导致节点刚度增大,耗能能力减弱。增大钢骨混凝土梁的纵筋量对提高承载力的作用不明显。

4) 有限元计算能有效的模拟此类节点弹性和部分塑性阶段的应力及变形,能与试验初期的弹塑性破坏现象符合很好,但不能模拟此类节点从开裂到构件断裂到完全破坏这一全过程。

(下转第 37 页)

6 结论

1)通过利用有限差分强度折减法对坝头开挖边坡的稳定性计算,可以得出,蓄水前,在天然工况下其稳定性系数为1.45;蓄水后,在天然工况下其稳定性系数为1.50。结合大块体的边界条件分析,可以认为,在施工期及蓄水工况下,左岸坝头开挖边坡蓄水前后在天然工况下,整体是稳定的。

2)对于岩质边坡而言,控制其稳定性的因素主要是发育在边坡内部的控制性结构面,应用有限差分强度折减法可以成功地解决岩体滑动面的空间组合滑动范围等问题,同时可以再现岩体各部位的变形状况随时间的发展演化趋势。

参考文献:

- [1] 赵尚毅,郑颖人,张玉芳.极限分析有限元法讲座Ⅱ—有限元强度折减法中边坡失稳的判据探讨[J].岩土力学,2005,26(2):332-335.

(上接第28页)

参考文献:

- [1] 张莉若,王明贵.钢—混凝土组合结构梁柱节点承载力试验研究[J].建筑科学,2003,19(5):16-18.
 [2] 韩林海.钢管混凝土结构—理论与实践[M].北京:科学出版社,2007.
 [3] 王连广,慕光波,王澈.钢管高强混凝土柱的非线性

- [2] 连镇营,韩国城,孔宪京,等.强度折减有限元法研究开挖边坡的稳定性[J].岩土工程学报,2004,23(4):407-411.
 [3] 栾茂田,武亚军,年廷凯.强度折减有限元法中边坡失稳的塑性区判据及其应用[J].防灾减灾工程学报,2003,23(3):1-8.
 [4] 陈菲,邓建辉.岩坡稳定的三维强度折减法分析[J].岩石力学与工程学报,2006,25(12):2546-2551.
 [5] 李红,官必宁,陈琰.有限元强度折减法边坡失稳判据[J].水利与建筑工程学报,2007,5(1):79-82.
 [6] 刘祚秋,周翠英,董立国,等.边坡稳定及加固分析的有限元强度折减法[J].岩土力学,2003,24(4):644-648.
 [7] 刘金龙,栾茂田.关于强度折减有限元方法中边坡失稳判据判断[J].岩土力学,2005,26(8):1345-1348.
 [8] 肖武.基于强度折减法和容重增加法的边坡稳定分析及工程研究[D].南京:河海大学,2005.
 [9] 丁秀美.西南地区复杂环境下典型堆积(填)体斜坡变形及稳定性研究[D].成都:成都理工大学,2005.

(责任编辑 刘存英)

分析[J].沈阳建筑大学学报,2005,21(2):107-110.

- [4] 王萱,赵星明,王慧,等.基于ANSYS的钢筋混凝土结构三维实体建模技术探讨[J].山东农业大学学报(自然科学版),2004,35(1):113-115.
 [5] 汪冬生,吴铁君.ANSYS中的钢筋混凝土单元[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2004,28(4):526-529.

(责任编辑 刘存英)

钢管混凝土组合节点的非线性有限元分析

作者: [李华](#), [黎立云](#), [LI Hua](#), [LI Li-yun](#)

作者单位: [李华, LI Hua \(中国矿业大学研究生院, 北京, 100083\)](#), [黎立云, LI Li-yun \(中国矿业大学力学与建筑工程学院, 北京, 100083\)](#)

刊名: [河北工程大学学报\(自然科学版\)](#) 

英文刊名: [JOURNAL OF HEBEI UNIVERSITY OF ENGINEERING \(NATURAL SCIENCE EDITION\)](#)

年, 卷(期): 2010, 27(1)

被引用次数: 3次

参考文献(5条)

1. 张莉若;王明贵 [钢-混凝土组合结构梁柱节点承载力试验研究](#)[期刊论文]-[建筑科学](#) 2003(05)
2. 韩林海 [钢管混凝土结构一理论与实践](#) 2007
3. 王连广;慕光波;王澈 [钢管高强混凝土柱的非线性分析](#)[期刊论文]-[沈阳建筑大学学报](#) 2005(02)
4. 王萱;赵星明;王慧 [基于ANSYS的钢筋混凝土结构三维实体建模技术探讨](#)[期刊论文]-[山东农业大学学报\(自然科学版\)](#) 2004(01)
5. 汪冬生;吴铁君 [ANSYS中的钢筋混凝土单元](#)[期刊论文]-[武汉理工大学学报\(交通科学与工程版\)](#) 2004(04)

本文读者也读过(10条)

1. [钢管混凝土柱—钢骨梁节点非线性分析](#)[期刊论文]-[四川建筑科学研究](#)2009, 35(5)
2. [徐阳](#), [柳春红](#), [宇霞](#) [钢管混凝土轴压中长柱非线性有限元分析](#)[期刊论文]-[低温建筑技术](#)2008, 30(2)
3. [杨包生](#), [李斌](#), [吴波](#), [闫炳成](#), [YANG Bao-sheng](#), [LI Bing](#), [WU Bo](#), [YAN Bing-chen](#) [钢管-钢管混凝土组合柱轴压承载力试验和有限元分析](#)[期刊论文]-[内蒙古科技大学学报](#)2008, 27(3)
4. [赵明](#), [甄伟](#), [盛平](#) [广州新客站钢管混凝土柱-混凝土梁节点设计研究](#)[会议论文]-2009
5. [曹宝珠](#), [张耀春](#), [余红军](#), [许辉](#), [CAO Bao-zhu](#), [ZHANG Yao-chun](#), [YU Hong-jun](#), [XU Hui](#) [薄壁钢管混凝土节点的试验研究与ANSYS有限元分析](#)[期刊论文]-[吉林建筑工程学院学报](#)2007, 24(2)
6. [刘承亮](#), [吴洋](#), [孙永炜](#) [箱型柱与H型梁节点在设和不设加劲板时受力性能的分析](#)[期刊论文]-[工会博览·理论研究](#) 2010(7)
7. [崔来奇](#), [徐亚丰](#) [轴心受压T形钢管混凝土芯柱受力性能研究](#)[会议论文]-2009
8. [李军](#), [张维锦](#), [张元凯](#), [LI Jun](#), [ZHANG Wei-jin](#), [ZHANG Yuan-kai](#) [基于ANSYS的钢管混凝土轴压短柱承载力分析](#)[期刊论文]-[山西建筑](#)2007, 33(10)
9. [安智](#) [劲性钢筋混凝土梁刚度和裂缝研究](#)[学位论文]2002
10. [张松](#), [郑新敏](#), [ZHANG Song](#), [ZHEN Xin-min](#) [钢管混凝土柱脚的有限元分析](#)[期刊论文]-[山西建筑](#)2010, 36(35)

引证文献(3条)

1. [罗太安](#), [冯建光](#), [安文东](#) [钢管-水泥土组合桩的抗拔性能](#)[期刊论文]-[黑龙江科技学院学报](#) 2010(5)
2. [李秋英](#), [刘丽丽](#), [董宏伟](#) [湿式外包钢法加固RC-L形柱的有限元仿真分析](#)[期刊论文]-[河北工程大学学报\(自然科学版\)](#) 2010(2)
3. [谭燕秋](#), [韩旭飞](#), [史三元](#), [张宏磊](#) [钢管-钢管混凝土框架结构抗震性能比较](#)[期刊论文]-[河北工程大学学报\(自然科学版\)](#) 2011(3)