

钢筋混凝土斜柱转换节点的非线性有限元分析*

钟树生¹, 勾清媛¹, 张翼²

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 四川省建筑科学研究院, 成都 610081)

摘要:采用有限元分析程序 ANSYS 对三个钢筋混凝土斜柱转换节点在竖向荷载下的受力性能进行非线性分析, 研究斜柱转换节点的受力特点、传力方式及破坏方式等结构性能, 并与试验结果进行对比, 讨论 ANSYS 在该类钢筋混凝土异形节点非线性分析中的可靠性。

关键词:钢筋混凝土; 转换节点; 非线性; 有限元

中图分类号: TU973⁺.257 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7329(2005)03-0057-06

Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Transferring Joints with Inclined Columns

ZHONG Shu - sheng¹, GOU Qing - yuan¹, ZHANG Yi²

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Sichuan Academy of Construction Science, Chengdu, P. R. China)

Abstract: A nonlinear finite element analysis using ANSYS is applied to the vertical mechanical behaviors of three specimens of reinforced concrete transferring joints with inclined columns, which are used in high-rise buildings. A comparison is made between the analytical achievements and the test results, including the mechanical behaviors, load-transferring path and the failure modes, and a good agreement is obtained. The reliability of the software ANSYS in the nonlinear analysis of such reinforced concrete structures is verified and developed.

Keywords: reinforced concrete; transferring joint; nonlinear; finite element analysis

高层建筑沿高度方向建筑功能的变化, 需要在上下结构变化处设置水平转换构件, 即结构转换层。斜柱转换是近几年才出现的转换形式, 主要用于上、下结构形式不同但轴线一致或轴线偏差不大的情况。这一转换形式已在工程中被逐渐使用, 如深圳 2000 大厦、沈阳华利广场等。但是, 斜柱转换节点传力机制复杂, 目前对这种转换形式的理论分析和试验研究的工作很少, 对其受力特征并不完全了解。设计中通常采用的 TBSA、SATWE 等软件, 无法反映这类结构在转换节点处的真实受力状态, 而有限单元法对分析复杂结构模型的受力情况具有不可比拟的优势。基于以上情况, 本文在三个斜柱转换节点试件竖向加载试验^[1,2]的基础上, 采用大型有限元分析程序 ANSYS 对其进行非线性分析, 并与试验结果相对比, 观察大型通用有限元软件在钢筋混凝土结构节点分析领域的适用性, 并探索试验无法揭示的结构性能, 希为工程设计提供参考。

1 计算模型的选取

1.1 模型尺寸

本次分析是对三个试验的对比分析, 用于对比的试验以一实际工程为原型, 经适当整合后制作 1/3

* 收稿日期: 2005-01-10

基金项目: 重庆市科委资助项目

作者简介: 钟树生(1963-), 男, 四川威远人, 副教授, 博士, 主要从事高层钢筋混凝土结构的研究。

的缩尺模型,试件编号分别为 W1、W2、W3,试件尺寸如图 1 所示,三个试件主要区别是转换梁高度、斜柱角度及配筋,分析模型采用与试验试件相同的尺寸及配筋。

表 1 转换梁高度、斜柱角度的对比关系

编号	转换梁高度/mm	斜柱角度
W1	250	25°
W2	400	25°
W3	250	20°

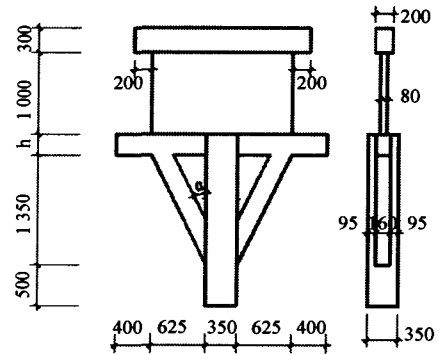


图 1 试验试件尺寸

1.2 边界条件与荷载的施加

有限元分析的模型必须尽可能的满足边界条件,即模型的约束与荷载应与实际受力状况相一致,以保证分析结果的有效性。

在有限元分析时只要在某时刻对应的试验中构件有任意一个部位破坏,则此时计算将不收敛,即,有限元分析的极限荷载应定义为对应试验中构件最早有部位发生明显破坏时刻的荷载。本文中有限元分析时的加荷终点定为在试验时的破坏荷载 P ,换算为面载为:

$$p = P/A \quad (1)$$

式中: A 为方柱的截面面积,荷载以面荷载的方式施加到方柱底面。

2 有限元分析模型的建立

采用美国 SASI 公司开发的大型有限元分析程序 ANSYS v7.0^[3] 进行分析。

2.1 单元类型和单元划分

本文采用实体建模,考虑到模型的几何结构、配筋形式、加载方式均为轴对称,建模时沿对称轴只建立了试件的一半来分析,以节约机时。混凝土材料用 SOLID65 单元^[3],钢筋用 LINK8 单元^[3]模拟,认为两种材料之间粘结良好无滑移。这与实际情况不符,但若加入模拟钢筋和混凝土粘结行为的单元(如 COMBIN14 单元^[3]),在模拟两种材料共同工作上固然更完善,但必然在非线性分析时会增加模型的不收敛性,因此,本文模型中没有采用粘结单元。

2.2 参数的选取

在本文分析中,对不同部位的混凝土建立不同的混凝土材料模型。

剪力墙混凝土应力-应变关系按混凝土结构设计规范^[5]推荐的本构关系方程取点:

$$\varepsilon \leq \varepsilon_c, \sigma = f_c [\alpha_a x + (3 - 2\alpha_a)x^2 + (\alpha_a - 2)x^3] \quad (2)$$

$$\varepsilon > \varepsilon_c, \sigma = f_c \frac{x}{\alpha_d(x-1)^2 + x} \quad (3)$$

式中: $x = \varepsilon/\varepsilon_c$; α_a, α_d 为单轴受压应力-应变上升段、下降段参数值, 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,按文献^[5]表 C.2.1 采用。

其他部位为体现箍筋的约束作用采用修正 Kent-Park 本构模型^[6]取点:

$$\varepsilon \leq 0.002K, \sigma = Kf_c \left[\frac{2\varepsilon}{0.002K} - \left(\frac{\varepsilon}{0.002K} \right)^2 \right] \quad (4)$$

$$\varepsilon > 0.002K, \sigma = Kf_c [1 - Z(\varepsilon - 0.002K)] \quad (5)$$

式中: $K = 1 + \rho_v f_{yh}/f_c$, 为矩形箍筋约束下混凝土强度提高系数, ρ_v 为约束混凝土相对于核心区的体积配箍率,峰值点应变与峰值强度提高倍数相同。

纵向钢筋的作用用两种方法模拟。在剪力墙中利用 SOLID65 单元自带弥散式钢筋模型;在其他部位用 LINK8 单元模拟钢筋,即分离式钢筋模型;箍筋的作用用约束混凝土模型来考虑。钢筋材料用 Von Mises 硬化模型^[3]来表示超过屈服点后材料的行为,采用双线性随动硬化模型来定义,第二段弹性模量定义为弹性段的 1%。

2.3 单元的划分

纵筋通过几个正交的面切割块体生成,而混凝土保护层对计算模型几乎没有影响,在模型中若生成了保护层反而会由于保护层厚度很小因而生成小尺寸单元影响计算的收敛性^[4],因此没有在模型中表现混凝土保护层,用构件块体的棱线作为纵筋的模型,这样减少了单元数量,提高了模型的收敛性。

模型各部位混凝土及钢筋单元尺寸见表2,经过网格划分后的模型如图2。

表2 模型各部分单元尺寸

部位	混凝土/mm	钢筋/mm
方柱	100	50
斜柱	100	50
剪力墙	50	50
转换梁	50	50
梁柱节点	50	50

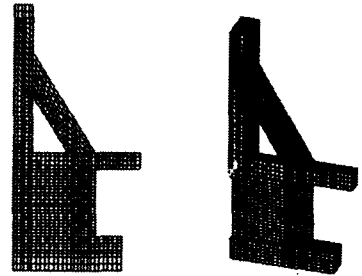


图2 网格划分后的模型

3 有限元分析结果与试验结果的对比

应该明确,如果以实际试验的破坏荷载为有限元分析的加载终点,那么在非线性有限元分析中,这个终点是很难达到的。因为,在计算中,临近破坏荷载时,模型的某些部位已经进入不收敛的迭代阶段,对应混凝土试件被压碎、掉渣、压酥。当进入不稳定裂缝扩展阶段,裂缝数量和宽度急剧增加,连续裂缝开始形成。在非线性有限元分析中,一般对应这个时刻迭代收敛性能就明显降低甚至不收敛。尽管如此,在达到极限荷载之间的加载段,ANSYS 能较好地模拟混凝土试件的受压情况,包括应力、应变分布以及压碎单元的出现等。虽然我们不能通过有限元分析得到试件的实际极限破坏状态,但通过 ANSYS 我们能够获得在达到极限承载力之前的受力阶段的大量信息。

在描述加载段时,本文采用分析中所达到的荷载与实际试验极限荷载的百分比 K 的形式来表达。表3 为本文的分析结果和试验结果得到的各自最终荷载的对比(表中的荷载均指方柱端的面荷载,单位为 MPa)。

表3 分析结果和试验结果得到的各自最终荷载的对比

试件	W1	W2	W3
试验达到的极限荷载 R_E (MPa)	22.857	17.14	13.06
有限元分析达到的极限荷载 R_A (MPa)	16.594	13.918	10.213
$K = R_E/R_A \times 100\%$	72.6%	81.2%	78.2%

3.1 裂缝的对比分析

对比试验结果和分析结果,发现两种结果的裂缝分布和发展情况非常一致,三个试件都是如此,现以 W1 为例说明。图3 为试件 W1 裂缝分布图。

3.1.1 裂缝出现的时间及位置 在 $K = 17.5\%$ 时,分析显示,在转换梁和方柱相交的部位,转换梁外侧混凝土出现开裂单元; $K = 18.4\%$ 时,除原有的开裂单元有所发展外,在转换梁同斜柱相交处也出现了单元的开裂现象,见图4。这和文献[1]中描述的“当荷载达到 400 kN 时,在 B 肢转换梁跨中离斜柱约 11 cm 处的梁底面出现一条贯穿梁底的横向裂缝 1(图5),并延伸到正面的梁上,当加载到 500 kN 时,该裂缝在正面的转换梁上也出现了延伸段,在后续加载中该裂缝一直向上延伸”对比,试验中的 400 ~ 500 kN 对应分析中在方柱端加面载 3.3 ~ 4.1 MPa 的阶段,即 $K = 14.4\% \sim 17.9\%$,且该裂缝在分析结果中出现的位置和试验也非常一致。

3.1.2 转换梁中裂缝的分布与发展 此后,梁与方柱相交处的开裂单元集中区向梁-柱节点中发展,并进而向方柱中发展;在梁与斜柱相交处的开裂单元集中区,开裂单元一方面在梁底面向斜柱发展,一方面向梁腹深入,靠近方柱的梁上开裂单元方向与 Y 轴呈 60° 夹角,为典型的剪切斜裂缝的分布状态。到计算的终点 $K = 72.6\%$ 时,所有分布在节点上和方柱与斜柱之间的梁段上,以及梁与斜柱相交区域的

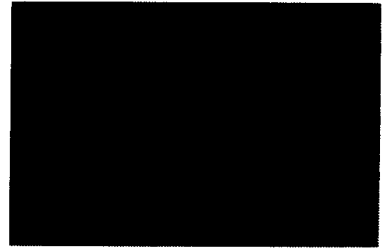
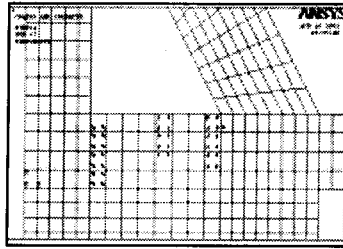
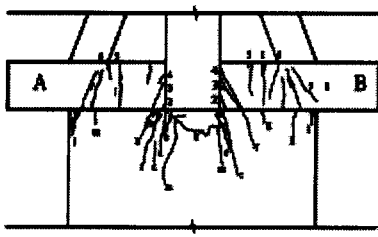


图3 试件 W1 裂缝分布图 图4 转换梁混凝土开裂单元分布图 图5 试验得到的转换梁裂缝图

大部分上的单元都开裂(图6)。文献[1]中描述“当荷载达到1900 kN时,B 肢转换梁与斜柱的交线处出现一条水平夹角为70°的斜向裂缝6(图3),几乎贯穿整个梁高”,这两条裂缝分别和梁和斜柱相交处的内侧、外侧开裂单元分布几乎完全相同。

综上所述,转换梁和梁-柱节点区的裂缝分布和发展大致都是从梁和方柱、斜柱相交区域出发,向节点以及梁的其他部位延伸,最后几乎所有在方柱和斜柱之间区域的梁上单元都开裂,这和试验过程中裂缝的分布与发展相一致。

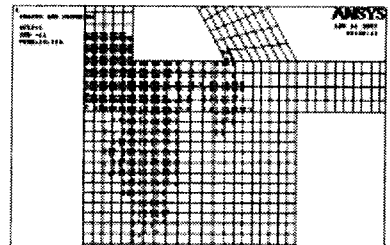
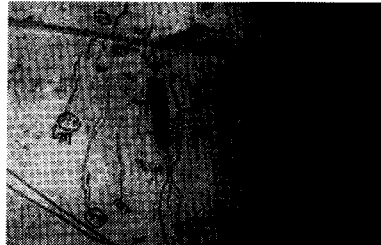
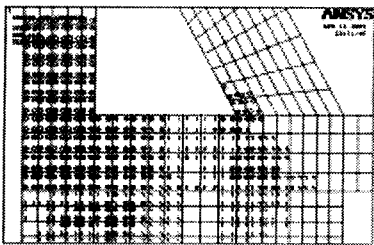


图6 $K=72.6\%$ 梁开裂单元分布图 图7 剪力墙裂缝分布照片 图8 $K=43.8\%$ 墙体开裂单元分布

3.1.3 剪力墙中裂缝的分布与发展 在转换梁与斜柱相交处出现开裂单元时,即 $K=17.5\%$ 时,墙体单元尚无开裂显示,到 $K=23.2\%$ 时,转换梁与方柱相交处的竖向裂缝已经沿梁高度方向贯通,并伸入墙体。随着荷载增大,裂缝向墙体上部发展,到 $K=43.8\%$ 时,墙体内单元已大部分开裂,且主要集中在转换梁与方柱相交区域开裂单元的投影范围内,见图8,在这个位置的开裂单元发展情况对应试验中的裂缝 a 和 b(图3)，“当荷载达到650 kN时,A 肢方柱脚部下方的剪力墙上率先出现短小的水平夹角约为70°的斜向裂缝 a”。试验中该裂缝的出现荷载约为 $K=23.2\%$ 左右,这和分析结果非常一致。“当荷载达到800 kN时,A 肢离方柱约7 cm 剪力墙上出现一条短小的斜裂缝 b,上端与梁顶面相接”,该裂缝的出现机理和 a 相似,都是方柱中的荷载向墙中传递的结果,和分析结果也是符合的。在后面的加载过程中,墙体内开裂单元区域稳定地向墙顶和两侧延伸,至计算终点时墙体内开裂单元约占墙体面积的1/2以上。

值得注意的是,在接近计算终点的很短加载段内($K=70.0\% \sim 72.6\%$),在剪力墙中开裂单元突然增多,并出现了混凝土压碎单元。这表明在方柱和转换梁相交位置下方的剪力墙混凝土在逐渐被压碎,这和试验中同一位置在加载终点混凝土被压碎、落屑、掉渣的现象是一致的。

3.2 应力分析比较

在加载早期,转换梁与方柱相交的部位的**第一主应力**为斜向拉力,第三主应力为压力。此时产生裂缝的主拉应力主要是在与梁侧面平行的平面内,而主压应力还很小,裂缝的出现由主拉应力控制。在加载后期,原主拉应力的影响已经远不及主压应力,而此时梁内特别是梁与斜柱相交的区域仍有单元开裂,出现的位置主要是梁与方柱相交的节点和梁与斜柱相交的区域,可以认为这时梁内的开裂单元是方柱和斜柱传来的较大荷载作用造成的。

3.2.1 转换梁中钢筋的应力 考查钢筋应力,取计算终点查看转换梁中钢筋的应力状况,取纵筋受拉最严重的部位——斜柱和梁相交部位的梁底纵筋进行比较。图9为三个试件上述部位纵筋应力的对

比。可以看出,分析结果在梁刚开裂时刻应力突然增大,而试验结果的应力增大是渐变的,但钢筋应力的变化趋势是一致的。

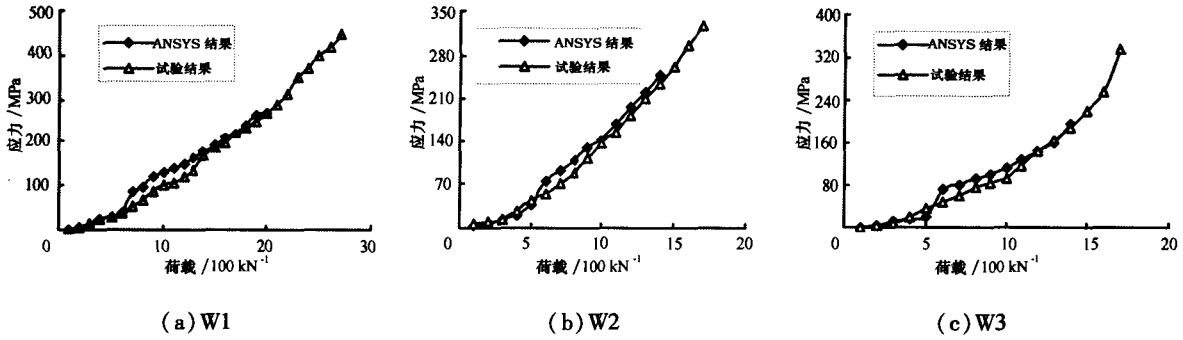


图9 各试件转换梁与斜柱相交部位梁纵筋应力比较

从梁底部纵筋应力随荷载变化图(图10)可以看出,转换梁和斜柱相交位置钢筋应力始终是最大的。还可以发现,在 $K = 17.5\%$ 和 $K = 21.9\%$ 这一很短加载区间内,纵筋应力分布发生了明显的变化, $K = 17.5\%$ 时方柱、斜柱之间梁的纵筋应力分布均匀,而 $K = 21.9\%$ 时该段纵筋应力出现了两个明显的峰值点,其位置分别对应方柱、斜柱和梁相交处,这个变化和试验及有限元分析中都得到了的在这两个位置混凝土开裂的结论是很一致的。在加载初期,上述两个峰值点始终存在,应力值稳定提高,随着荷载增加,这两个峰值点之间的下凹段渐渐消失,表示该段纵筋处的混凝土都已开裂,其原先承受的拉力转移给钢筋承担。在以后的受荷阶段纵筋将保持这种应力分布状态。

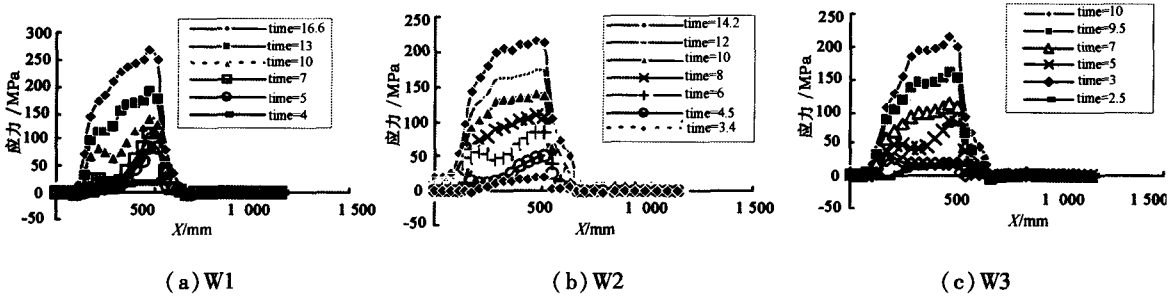


图10 梁底纵筋应力分布

3.2.2 剪力墙中应变分析 比较分析和试验得到的剪力墙同一水平位置上各点混凝土的应变分布图(图11)可以看出,分析与试验结果应变沿墙的分趋势比较一致但应变数据值差距较远。这是因为分析中剪力墙采用 SOLID65 单元自带弥散式钢筋模型,这种分布式模型把钢筋均匀分布在混凝土中,相当于增加了墙体的刚度,从而导致分析结果偏小。一个重要的差异是试验结果最大应变出现在方柱下方偏向方柱和梁相交位置,而分析结果中最大应变出现在方柱截面形心位置。另一个明显不同的地方是 ANSYS 分析结果中方柱和转换梁相交位置的应变在加载后期突然增大,这和试验结果是有较大差异的。这个陡变的原因是由于剪力墙中混凝土被大量压碎,剪力墙刚度降低,导致了竖向应变的陡增。而试验中之所以这个现象不明显,可能是由于混凝土材料的离散性,使剪力墙内混凝土并非在同一时刻都达到破坏状态,而是有一个渐变的过程,这就使混凝土的应变变化没有电算那么剧烈。

4 结论

1) 使用 ANSYS 对钢筋混凝土材料模型进行静力模拟,在采用 SOLID65 单元和 CONCRETE 材料^[3]模拟混凝土材料, LINK8 单元模拟钢筋材料的情况下,使用来自试验实测的材料参数,并用修正的 Kent-Park 模型模拟箍筋对混凝土的强度提高作用,经过多次试算,不断调整收敛容限和迭代步长,得到的非线性分析结果和试验结果是一致的。

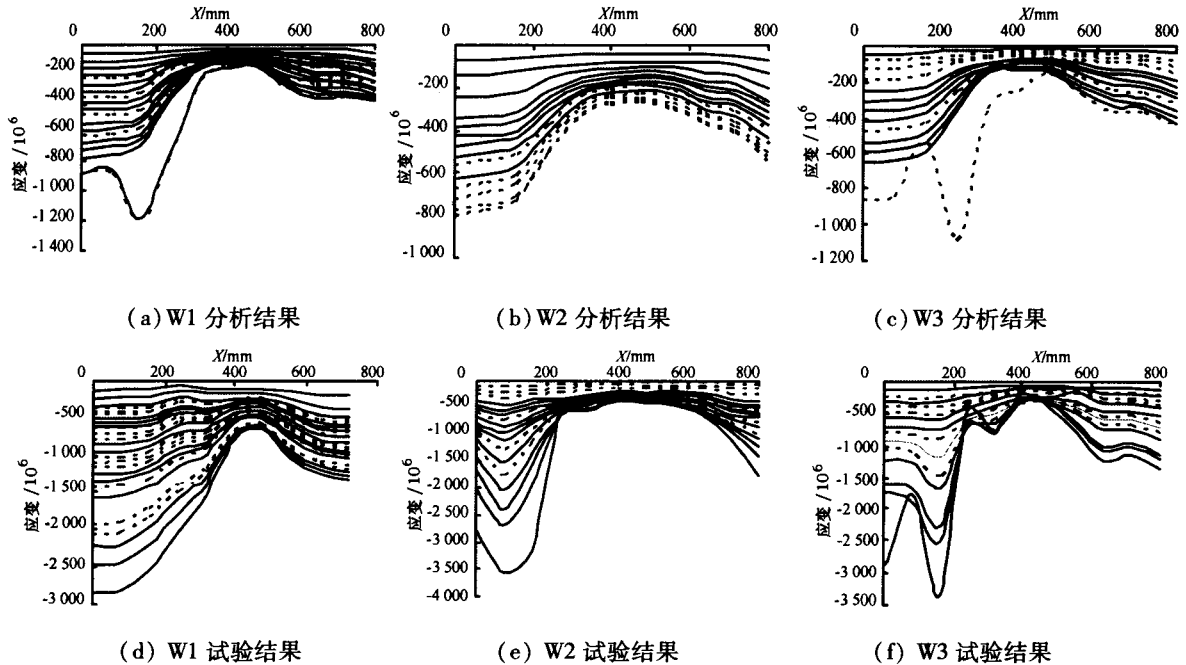


图 11 剪力墙混凝土应变分布

2) 运用 ANSYS 进行钢筋混凝土复杂节点的非线性分析虽然不能达到试验的极限荷载,但是在可分析的荷载增长范围内,分析结果与试验结果吻合良好,尤其在裂缝的出现和发展方面、结构内力随荷载的变化趋势方面,ANSYS 分析结果与试验结果具有很好的一致性,说明了该软件在这类分析中具有一定的可靠性。

3) 斜柱转换节点的转换梁在竖向荷载作用下是一个偏拉构件,结构最早在转换梁与方柱、斜柱相交部位开裂,导致梁纵筋应力以及斜柱、方柱荷载传递比例发生突变。在方柱和梁相交部位,转换梁还表现出明显的受剪破坏特点,出现与水平面呈 45° 角的斜裂缝。

4) 剪力墙开裂单元有两个集中出现区域,分别位于方柱和斜柱与梁相交部位上方,而又以方柱上方开裂最严重。剪力墙传来的竖向荷载向下方传递的路径大致有三种:第一种,也是最主要的一种,是荷载直接传递到方柱上方的转换梁再传到方柱上;第二种,是荷载传递到斜柱上方的转换梁上,再通过梁受剪的拱作用向方柱传递;第三种,是荷载通过转换梁传递到斜柱,再由斜柱传递到方柱。前两种传力方式传递的荷载约占整个荷载的 60%。

5) 可以通过非线性有限元分析来弥补试验个数的不足并进一步确定斜柱转换节点的受力性能。

参考文献:

- [1] 凌焕文,钟树生. 梁截面高度对钢筋混凝土斜柱-剪力墙局部转换节点竖向受力性能影响的研究[D]. 重庆:重庆大学,2004.
- [2] 曹林,钟树生. 竖向荷载作用下钢筋混凝土框支-短肢剪力墙变角斜柱局部转换节点研究[D]. 重庆:重庆大学,2004.
- [3] ANSYS 使用手册[M]. ANSYS Inc. 201 Johnson Road Houston, PA 15342.
- [4] 陆新征,江见鲸. 用 ANSYS Solid 65 单元分析混凝土组合构件复杂应力[J]. 建筑结构,2003,33(6):22-24.
- [5] GB 50010-2002, 混凝土结构设计规范[S].
- [6] B. D. Scott, R. Park, M. J. N. Priestley. Stress-strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates[J]. ACI Journal, 1982, 79:13-27.