



全装配式混凝土框架型钢暗牛腿节点受力性能分析

廖振¹, 梁书亭¹, 朱筱俊², 庞瑞¹

(1.东南大学 土木工程学院, 南京, 210096; 2.东南大学 建筑设计研究院, 南京, 210096)

摘要:型钢暗牛腿节点是一种新型的全装配式混凝土结构节点连接形式, 这种连接形式具有传力路径明确、承载能力高等优点而日益受到人们关注。但是, 由于受力复杂和局压的现象, 该节点中型钢下的混凝土存在着极容易被压碎的问题。基于此, 本文利用在型钢下加焊承压角钢的办法来改进这种连接形式, 并通过有限元软件对这种改进后的型钢暗牛腿进行了非线性分析。最后本文给出了节点改进前后的破坏形式和极限承载力的对比, 并对此类节点的工程应用给出了建议。

关键词: 预制混凝土; 框架节点; 型钢暗牛腿; 有限元; 局部承压

Analysis of the Bearing Performance on the Steel Hidden Corbel Joints of Total-prefabricated Concrete Frame

Liao Zhen¹, Liang Shuting¹, Zhu Xiaojun², Pang Rui¹

(1.College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing, 210096;

2.Architectural Design&Research Institute, Southeast University, Nanjing, 210096)

Abstract: Steel hidden corbel is an new-type dry-connection of precast concrete frames, and this dry-connection is popularized by its definitely transfer paths of stress and high bearing capacity. But the concrete under the Steel in this dry-connection is easy to be failure for its complicated stress and local bearing. For above mentioned, the dry-connection was improved with pressure steel angle. By the nonlinear analyses of the hidden corbels with finite element software ANSYS, finally, the relative analysis on the ultimate bearing capacity and failure mode was summarized and the advice to this new-type dry-connection was discussed.

Key words: precast concrete; frame joint; Steel hidden corbel; finite element method; local bearing

预制构件组成的装配式结构的安全性, 不完全取决于构件的质量, 同时还取决于这些构件与周边构件的连接。可靠的连接可以按设计的要求实现合理传递规定的内力。

据几次大地震的调查表明, 预制混凝土墙结构在震后破坏较轻, 而大空间的预制混凝土框架结构破坏较严重, 主要表现为因各构件间的连接破坏而导致结构整体离散、倒塌^[4]。预制构件间的连接是预制混凝土结构的薄弱环节, 也是预制混凝土结构

研究的重点及结构整体抗震研究的前提和基础。

1 问题的提出

国外装配式框架节点考虑延性的设计方法比较先进, 技术上的进步已经达到了对任何常用的框架结构, 都可以建造具有抗震能力的整体结构^[1]。我国的预制装配式延性框架的研究还比较落后, 与发达国家的先进水平在研发和应用上还有较大的差距, 客观上要求开发新型的装配式延性框架及其延性连接节点的构造方法。

新型延性框架中的“干式”节点除了满足承载能力要求外还将考虑节点的抗震性能, 把构件端部的变形性能也考虑进来。根据预制混凝土结构的特点, 新型节点的构造应该具备如下特点:

(1)对于预制装配式框架结构而言连接方式应

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金 (20060286043); 江苏省“六大人才高峰”资助项目 (1105000150)。

作者简介: 廖振, (1986-), 男, 硕士研究生, E-mail: lz0531@126.com; 梁书亭 (联系人), (1963-), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: stling@seu.edu.cn。

为刚接，形成强节点。

(2) 传力路径明确，尽量将剪力传递路径与弯矩传递路径分开。

(3) 充分利用延性较好的钢材形成塑性铰，并且尽量使塑性铰区在离开柱边的地方产生，这样可以保证节点核心区的受力安全。

本文主要针对一种新型干式节点进行分析其受力性能以及存在的不足，给出自己的改善方法并对这种改善后的节点进行了有限元分析，最后对该新型节点的发展提出自己的建议。

2 一种新型干式连接的优缺点

由于牛腿的承载力很高，竖向力能较可靠地传递，牛腿连接的方式在干式连接中相当普遍。在住宅或商业用房中，牛腿应尽量满足建筑的要求，此时常把牛腿做成不影响美观的暗牛腿。对于暗牛腿，可以有很多种做法，如型钢暗牛腿，混凝土暗牛腿等。

在这些暗牛腿连接中，型钢暗牛腿连接由于其传力明确，变形性能良好使得这种连接方式具有很好的未来前景。下面将对这种型钢暗牛腿连接节点的连接形式以及受力性能进行简要的介绍。

如图 1 所示该节点就是将型钢直接伸出来而不用混凝土包裹直接做成暗牛腿，梁端的剪力可以直接通过牛腿传递到柱子上，梁端的弯矩可以通过梁端和牛腿顶部设置的预埋件传递。当剪力较大时，用型钢制成的牛腿还可以减小暗牛腿的高度，相应地增加梁端缺口梁的高度以增加抗剪能力。

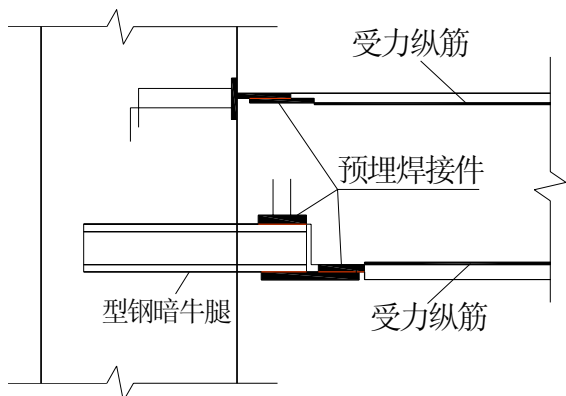


图 1 型钢暗牛腿连接示意图

由此可见，新型节点的牛腿与普通的牛腿的区别在于：牛腿不仅要为预制梁端提供竖向反力，而且能够提供反向弯矩，并且该种连接有效地将剪

力与弯矩的传递路径分开。通过合理的设计连接盖板，可以较好的发挥钢材的延性，是连接构件产生塑性变形进而保护混凝土构件。

但是该种连接形式中型钢暗牛腿下的混凝土受力是相当复杂的，型钢暗牛腿下的混凝土极容易被压碎，也就是存在着局压现象。混凝土的局压破坏可以导致整个梁柱节点丧失承载能力，使得节点无法充分发挥其承载力以及变形能力。这是该种连接方式的一个缺点^[2]。

本文将对这种型钢下混凝土存在的局压现象提出自己的改进措施，并用有限元对改进后的型钢暗牛腿节点进行受力分析，对比改进前的节点承载力提出建议。

3 改进后节点的有限元分析

本文上述部分说明了型钢暗牛腿节点的受力性能良好，并且传力路径明确的优点。但是局部承压问题是该连接方式的一个不足之处。为了使得该连接形式的各部分能充分发挥其承载力以及变形性能，可以通过在型钢暗牛腿的上下各一定高度范围内加密柱的箍筋，或者在柱边型钢的下翼缘外侧加焊一块角钢等办法来使竖向应力更好的传递并且防止局部受压破坏^[3]。

由于型钢暗牛腿节点本身采用的就是焊接连接形式，故在型钢底部加焊一块角钢的办法在工程中的应用可行性是很高的。本文着重对这种改进办法进行有限元的分析。通过有限元分析来了解这种改良办法的效果，以及改良后的节点承载力提高的情况。

3.1 有限元算例的参数介绍

本次有限元分析采用的软件为美国 ANSYS 公司开发研制的 ANSYS 10.0，该软件可以得到大量的结构反应信息，比如结构位移、应变、应力、裂缝发展状态等。为了能把这种改良后的节点承载力状况和参考文献[3]中的原节点的承载力状况进行对比，故有限元分析中模型的尺寸均与文献[3]中的一致。下面进行简要的模型参数介绍：

模型中的混凝土材料均采用 solid65 进行模拟，solid65 单元可以很好地模拟混凝土的开裂（三个正交方向）、压碎、塑性变形及徐变，还可以模拟钢筋的拉伸、压缩、塑性变形及蠕变。模型中采用分离



式配筋, 钢筋采用 link8 模拟。模型中的承压钢板则采用 solid95 模拟, 该单元具有二十个节点每个节点都有 3 个自由度, 是一种高精度单元。可以模拟各种金属材料, 如钢板等。

型钢暗牛腿选用槽钢 2[16, 埋入柱内 500mm, 伸出柱面 200mm, 柱为边长 600mm 的方柱, 柱高取 2900mm, 柱子的混凝土强度等级为 C30。柱中箍筋为 HPB 235 级钢筋直径均为 8mm 且间距为 100mm。柱中纵向受力钢筋为 HRB 335 级钢直径为 20mm, 型钢以及改良该节点性能所用的承压角钢均采用 HPB 235 级钢。型钢下边缘加入承压角钢, 选用等边角钢 L100×10。

本次模拟采用映射分网形式, 将单元划分为长宽高相差不大的实体, 并在着重研究的部位如型钢下的混凝土以及承压角钢处进行比较密的划分, 以求得更加真实的应力。通过约束位移来模拟边界条件, 将柱的最下端固结; 将柱子最上端水平面内的水平位移释放掉来模拟滑动铰支座。

由于本次有限元分析着重考虑型钢下的混凝土局压现象以及改良后的效果, 所以本次模拟不考虑梁的受力性能, 所以将梁传来的荷载转化为面载加在型钢上部表面, 并且不考虑牛腿下部梁端传来的水平力。

3.2 有限元结果分析

本次试算采用非线性分析, 首先初步估算一个极限承载力, 然后将这个数值乘以一个比较大的系数进行荷载的施加, 求出不收敛时承载力的大致范围, 然后通过荷载步的方法往前找到模型破坏时的承载力。

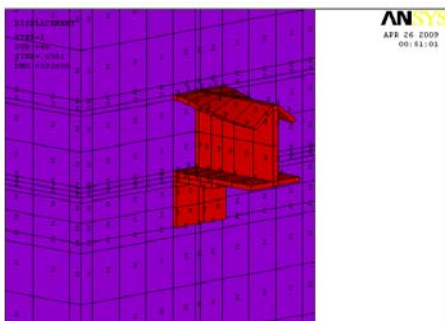


图 2 改良后的型钢暗牛腿破坏形式

如图 2 模型结果显示, 改良后的节点破坏原因为型钢翼缘的屈曲破坏, 而并非是型钢下的混凝土被压坏。这与原节点的破坏形式有着明显的不同, 这种破坏形式可以充分的发挥型钢的承载能力以及

延性性能, 从而保护了节点区。

加焊承压角钢后的应力分布如图 3 所示, 可以从图中发现型钢下混凝土应力均匀且在较小的水平, 局部承压现象得到明显改善。也就是说所加的承压角钢对型钢下的混凝土的局压现象有很好的改善效果。

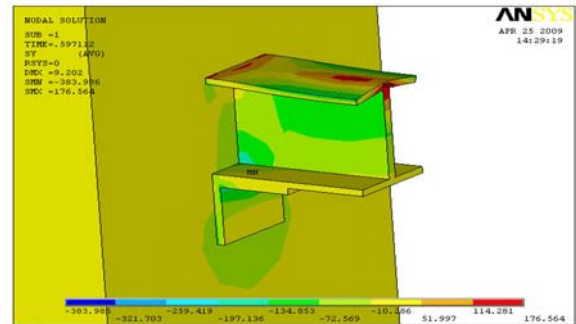


图 3 改良后的型钢暗牛腿应力云图

由于承压角钢很好的保护了型钢下的混凝土不受到局部压应力的影响, 使得整个节点的承载力有了很大程度的提高。由文献[2]中所给的局部承压计算公式 1 计算出来的原节点受局压破坏时的极限承载力、有限元计算出来的没有加焊承压角钢的极限承载力以及由本文用 ANSYS 分析计算出来的加焊承压角钢后的节点极限承载力分别列于表 1 中进行对比:

表 1 节点改良前后的极限承载力 (kN)

节点种类	原型钢暗牛腿节点		本文改良后节点有限元计算
	公式1计算	有限元计算	
极限承载力	104.28	105.67	

注: 原型钢暗牛腿节点有限元计算值参看文献[3]

$$V \leq \frac{0.7bf_c'}{4 + \frac{6a}{l}} - \frac{3H}{4l + 6a} F_{h2} \quad (1)$$

注: 公式推导参看参考文献[2]

式中: l —埋入柱中的型钢长度;

a —剪跨;

b —型钢的宽度;

f_c' —柱中混凝土的抗压强度设计值;

H —型钢暗牛腿的截面高度;

表 1 中原节点的承载力是型钢下混凝土的局部压应力起控制作用, 也就是通过计算混凝土受局压破坏时的荷载来定义承载力。改良后的节点局部压应力已不再起控制作用, 其承载能力是由型钢翼缘

屈服时的承载能力为准，所以改良后节点的承载力是由型钢翼缘屈曲破坏时的荷载来定义的。

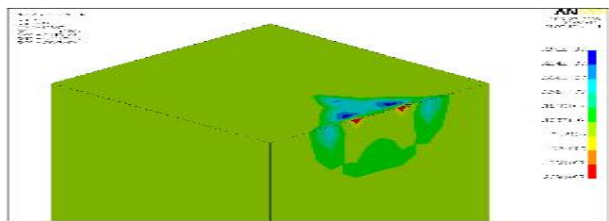


图4 原型钢暗牛腿的局压破坏

通过表1中的承载力对比，可以清楚地看到改良后的节点的承载力有明显的增加。这是由于原节点存在着比较大的局压（如图4所示），混凝土极易被压碎，节点其他部分的承载能力无法充分的发挥，所以当荷载过大节点就产生的局压破坏。而加焊了承压角钢之后，承压角钢承受了部分型钢传来的力，减轻了型钢下混凝土的局部受压状况，很好的保护好了型钢下的混凝土，使得节点各部分的性能更好的发挥，由于混凝土受压应力均匀所以破坏形态也发生了改变，不再是局压破坏而是型钢翼缘屈曲破坏（如图2所示），解决局部压应力问题使得承载力也提高了很多。

4 结论

型钢暗牛腿的受力是相当复杂的，特别是埋在混凝土柱中的部分，国内外对于这种连接方式的理论研究都还不成熟，本文主要针对这种节点做了改进并通过有限元分析了改进后的节点受力性能。总结全文，主要包括以下几个方面：

(1) 加焊承压角钢后，型钢下的混凝土得到了很好的保护，破坏形式由混凝土局压破坏转化为型钢翼缘变形过大而发生的翼缘屈曲破坏。这种破坏形式很好的保护了节点区，实现了“强节点，弱构件”的抗震设计要求。

(2) 加焊承压角钢后，局压破坏已不再是节点承载能力的制约原因，节点各部分可以更好的发挥性能，节点的承载力有了明显提高，本文算例中的竖向承载力提高了近60%。

(3) 由于混凝土节点区的增强，破坏形式为型钢翼缘屈服破坏，这种破坏形式充分的发挥钢材的延性，有利于在地震作用下增强结构的延性，起到更好的耗能作用。

参考文献：

- [1] 薛伟辰. 预制混凝土框架结构体系研究与应用进展[J]. 工业建筑, 2002,31(11): 47-50.
- [2] 朱筱俊, 黄祥海, 梁书亭. 型钢暗牛腿柱内混凝土局压验算[J]. 特种结构, 2008, 25(2): 107-110.
- [3] 黄祥海. 新型全预制装配式混凝土框架节点研究[D]. 东南大学硕士学位论文, 2006.3.
- [4] 范力. 装配式预制混凝土框架结构抗震性能研究[D]. 同济大学硕士学位论文, 2007.12.
- [5] 林宗凡, E.I.Sagan, M.E.Kreger. 装配式抗震框架延性节点研究[J]. 同济大学学报, 1998, 26(2): 134-138.
- [6] 刘正勇, 应惠清. 装配式混凝土框架结构节点构造方法简介[J]. 施工技术, 2008, 37: 26-29.