

考虑粘结滑移的新型斜柱转换结构静力分析

张季阳, 范余辉, 朱勇超, 吴洪梅, 郑田洪, 刘 博

(贵州大学 空间结构研究中心, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 新型斜柱转换结构改善了传统斜柱转换结构的抗震性能。为了研究新型斜柱转换结构在考虑粘结滑移时的静力力学特征,利用 ABAQUS 建立 3 组共 6 个有限元模型。采用三个不同的轴压比,每个轴压比两个模型,其中一个型钢与混凝土之间建立非线性弹簧模拟粘结滑移作用,另一个完全嵌固忽略粘结滑移作用。对比分析表明:在静力加载作用下,考虑型钢混凝土粘结滑移的模型相对忽略粘结滑移作用的模型,其荷载位移曲线有较明显的下降段,更为符合实际情况,可以在实际工程中应用此方法进行模拟。

关键词: 新型斜柱转换结构; 粘结滑移; 数值模拟; 轴压比

中图分类号: TU312⁺.1

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2020)04—0099—06

Static Analysis of New Inclined Column Transfer Structure Considering Bond Slip

ZHANG Jiyang, FAN Yuhui, ZHU Yongchao, WU Hongmei, ZHENG Tianhong, LIU Bo

(Space Structure Research Center (SSRC) of Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract: The seismic performance of the new inclined column transfer structure can be improved. In order to analyze the static mechanical characteristics of the new inclined column transition structure considering bond slip, this paper analyses three groups of six finite element models by ABAQUS. Three different axial compression ratios were used, two models for each axial compression ratio. A nonlinear spring was proposed to simulate bond slip between one section of steel and concrete, while another was completely imbedded which ignores bond slip. The comparative analysis shows that under the static loading, the model considering the bond slip of steel reinforced concrete will ignore the bond slip, and its load displacement curve has a more obvious descending section, which is more in line with the actual situation, so this method can be used to simulate practical projects.

Keywords: new inclined column transfer structure; bond slip; numerical simulation; axial compression ratios

在建筑结构设计,建筑物某层的上部与下部因平面使用功能不同,楼层上部与下部必须采用不同结构类型,那么就需要在该层设置转换层进行结构转换。斜柱转换结构广泛应用于上下层轴网不一致的高层建筑中。传统的钢筋混凝土斜柱转换结构传力直接、明确,受力合理,文献[1-6]研究表明斜柱转换结构具有较好的抗侧刚度,易于满足抗震设计要求,正逐步应用于框支剪力墙结构中,但其延性

和耗能能力较差。为了增强其延性和耗能能力,文献[7-8]提出了一种新型斜柱转换结构,在转换梁和斜柱中植入型钢,如图1所示。新型斜柱转换结构能改善相邻层的侧向刚度比,避免层间刚度突变,增强了延性。

相关文献研究了新型斜柱转换结构的静力力学性能,文献[9-10]研究表明轴压比应控制在0.1~0.4之间,剪力墙的肢厚比应控制在8.5~9.5之

间,斜柱角度控制在 $60^\circ \sim 70^\circ$ 之间。文献[11]研究表明:转换梁与斜柱部位交接处钢筋和型钢屈服严重,结构耗能能力一般,型钢存在结构失效时能保持较大承载力和刚度。

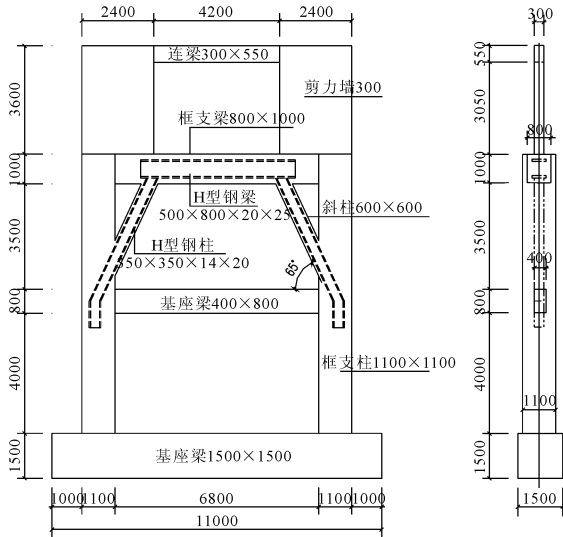


图 1 新型斜柱转换结构模型尺寸图(单位:mm)

以往研究的有限元模拟分析中均未考虑型钢与混凝土之间的粘结滑移,这对结构的力学性能会有所影响^[12-15],并且与工程实际情况有所差异。为了研究这种影响,本文在已有粘结滑移公式的基础上,建立轴压比分别为 0.2、0.3、0.4 模型各两组。在第一组中考虑型钢与混凝土之间的粘结滑移作用,第二组中型钢与混凝土完全嵌固,忽略粘结滑移作用。对该六个模型进行竖向静力加载和单向水平荷载加载,研究其力学性能。

1 建立模型

1.1 有限元分析模型来源

本研究所用的有限元分析模型来自于实际工程,该工程位于贵州省贵阳市某处。总高度为 97 m,31 层,结构形式为框架核心筒结构。第一层至第二层为大开间,柱网较稀,底部楼层设置了数片剪力墙。转换层设置在第三层,用作设备间和仓库,层高为 4.5 m,四层及以上均为 3 m 层高的小开间剪力墙结构,用作住宅。该工程的转换层的平面布置图如图 2 所示。

实际工程中的型钢混凝土斜柱和型钢混凝土转换梁的截面尺寸,由斜柱与转换梁的刚度比值确定^[11]。从图 2 中的 2 号轴选取一榀转换层及其上下层的单跨结构,以此为依据建立新型斜柱转换结构有限元模型。模型的各个部件截面尺寸以及配筋

情况通过整体分析确定。本文中共建立六个模型,模型的外部尺寸、材料属性、配筋情况皆相同,不同之处在于内置型钢与混凝土之间的相互关系以及剪力墙顶部所加的竖向荷载。该分析模型分别命名为 MJ1 - MJ6,各截面的尺寸如图 1 所示。

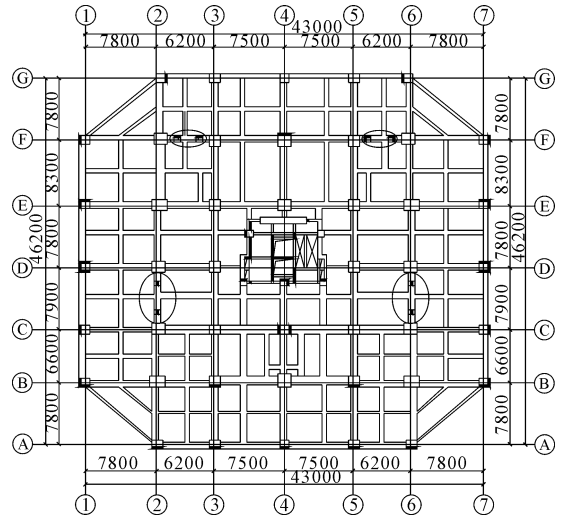


图 2 结构转换层平面布置图(单位:mm)

1.2 型钢混凝土有限元模型

有限元模型中的主要材料参数见表 1。

表 1 材料属性参数

材料类型	型号	密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 /MPa	泊松比	屈服应力 /MPa
混凝土	C55	2400	3.55×10^4	0.2	—
钢筋	HRB400	7800	2.00×10^5	0.3	400
型钢	HRB400	7800	2.06×10^5	0.3	235

本文钢筋采用理想弹塑性模型。混凝土的单轴受拉、受压的应力 - 应变曲线采用混凝土结构设计规范中的塑性损伤模型^[16]。

混凝土塑性损伤模型的损伤因子及相关参数见文献[17],该文献基于混凝土结构设计规范提供的混凝土本构关系,引入损伤因子对 ABAQUS 混凝土塑性损伤模型中所涉及的材料参数进行了研究。ABAQUS 中混凝土的其他参数如表 2 所示。各个模型具体情况如表 3 所示。

本文采用 ABAQUS 单元库中的八节点减缩积分单元(C3D8R)对混凝土和型钢进行模拟。钢筋采用二节点三维桁架单元(T3D2)进行模拟。

表 2 混凝土损伤塑性模型其余相关参数

膨胀角/($^\circ$)	偏心率	f_{b0}/f_{c0}	K_c	粘性参数
30	0.100	1.160	0.667	0.005

表 3 各模型具体情况

试件编号	设计轴压比	肢厚比	斜柱角度 / (°)	匹配刚度比	粘结滑移
MJ1	0.2	9	65	5.9	是
MJ2	0.2	9	65	5.9	否
MJ3	0.3	9	65	5.9	是
MJ4	0.3	9	65	5.9	否
MJ5	0.4	9	65	5.9	是
MJ6	0.4	9	65	5.9	否

按照模型中各部件的相对位置关系进行部件的组装,装配后的模型如图 3 所示。斜柱型钢和转换梁型钢在进行网格划分时,将型钢单元与所对应的混凝土单元保持一致,使型钢单元与混凝土单元在相同位置形成结点,为后续弹簧的布置做铺垫。

性弹簧单元模拟型钢与混凝土之间的粘结滑移。

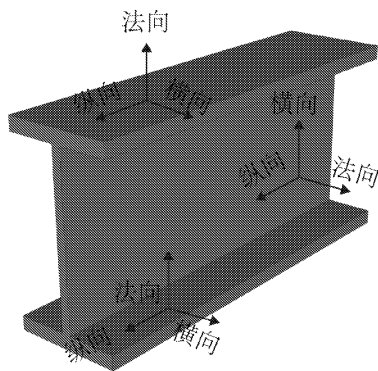


图 4 接触面示意图

弹簧的应力 τ - 位移 S 关系计算公式见文献 [15], 其中, C_{ss} 为混凝土保护层厚度; ρ_{sv} 为横向配箍率; L_e 为型钢埋置长度; d 为型钢截面高度; f_t 为混凝土抗拉强度。参数选取如表 4。

表 4 粘结强度影响因素参数

材料名称	C_{ss}/mm	$\rho_{sv}/\%$	L_e/mm	d/mm	f_t/MPa
转换梁	25	0.44	6200	600	1.96
斜柱	25	0.51	4540	350	1.96

将以上参数代入 $\tau - S$ 本构模型, 计算得出转换梁与斜柱的粘结滑移基准本构模型如图 5 所示。

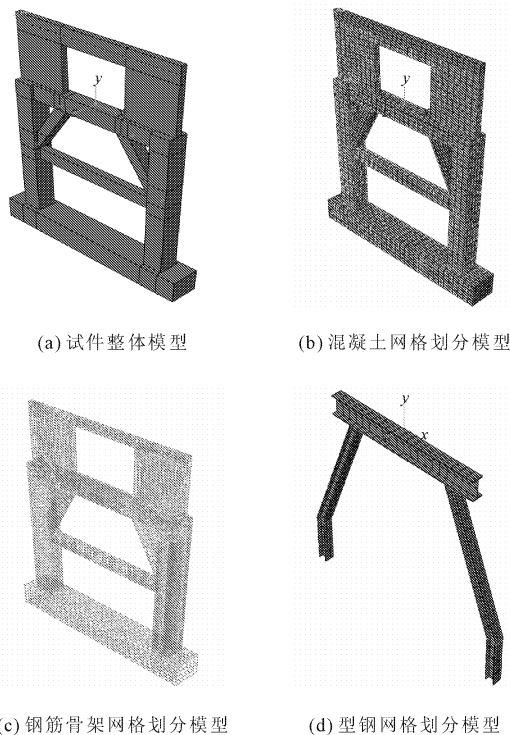
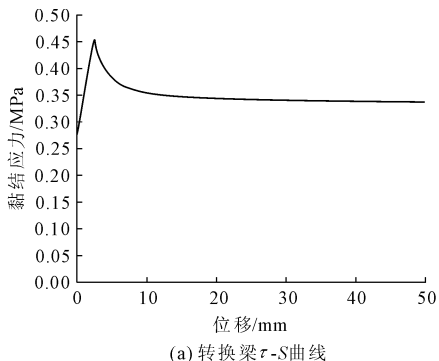


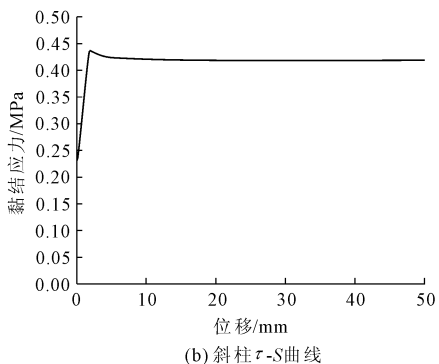
图 3 有限元模型

1.3 粘结滑移模拟

型钢与混凝土之间的粘结作用通过非线性弹簧单元进行模拟。ABAQUS 里的非线性弹簧单元 SPRING2 具有两个节点, 本身没有形状。通过定义力 F - 位移 S 的曲线来定义非线性弹簧的受力性质。型钢与混凝土接触面有三个方向的作用, 分别为纵向、法向、横向, 各方向定义如图 4 所示。在本文中, 型钢和混凝土交界面之间, 横向与法向采用硬接触^[14], 并在横向和法向混凝土单元和型钢单元相对应的两节点间建立线性弹簧单元, 纵向采用非线



(a) 转换梁 $\tau - S$ 曲线



(b) 斜柱 $\tau - S$ 曲线

图 5 粘结滑移基准本构模型

非线性弹簧力 F - 位移 S 曲线中的力由下式计

算:

$$F = \tau \times A \quad (1)$$

其中 A 为弹簧连接面的面积, τ 为计算得到的型钢与混凝土纵向的粘结应力值。将每个区域的计算面积与相对应的粘结应力 τ - 位移 S 相乘, 即可得到相应弹簧的力 F - 位移 S 曲线。力 F - 位移 S 曲线表达为表格形式。

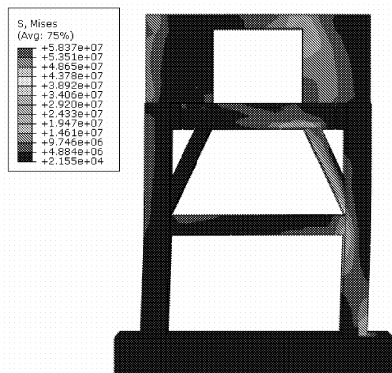
1.4 施加约束和荷载

对基座梁底端施加固定约束。竖向荷载施加于左右两剪力墙顶端。轴压比为 0.2、0.3、0.4 的模型, 竖向荷载分别为 7.10 MPa、10.65 MPa、14.20 MPa。

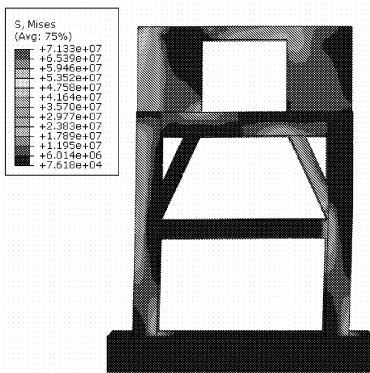
2 不同粘结滑移有限元结果分析

2.1 模型加载过程分析

不同轴压比模型在竖向加载过程中的应力应变分布和发展情况相似, 以轴压比为 0.2 的模型为例进行说明。两个模型的压缩变形均从剪力墙到基座梁逐渐减小。MJ1 剪力墙和基座梁的变形大于 MJ2。MJ1 在转换梁与斜柱的交界处应变较大, 而 MJ2 的转换梁上变形较为均匀。MJ1 的框架梁变形较为均匀, MJ2 的框架梁两侧变形较大, 中间变形较小。MJ1 斜柱与转换梁交界处的应力最大, 剪力墙外侧下部、斜柱下部和框支柱下部应力较大。



(a) 模型MJ1混凝土应力图



(b) 模型MJ2混凝土应力图

图 6 加载完成后的应力分布图

2.2 弹簧单元荷载位移分析

从模型中选取转换梁中部的弹簧 S102、左斜柱中部弹簧 S458 以及右斜柱中部弹簧 S744, 弹簧位置如图 7 中黑点所示。

竖向荷载作用下, 模型 MJ1、MJ3、MJ5 三个模型弹簧的荷载位移曲线变化趋势基本相同, 以 MJ1 为例进行说明, 表 5 为各弹簧最大位移和最大荷载值, 荷载与位移呈线性变化。弹簧的最大位移和最大荷

MJ2 剪力墙外侧下部的应力最大, 框支柱、斜柱与框架梁交界处的下部应力较大。随着轴压比升高各部分应力值增大, 分布相似。

在竖向荷载加载完成后, 对六个模型施加水平位移加载, 六个模型的水平位移加载均为 450 mm, 结果显示, 随着水平加载位移的增大, MJ1 的混凝土部分在斜柱与转换梁的交界部位最先出现压缩损伤, 不断向上发展, 逐渐扩展到剪力墙内侧与转换梁的交接处。斜柱与转换梁交接处最先出现拉伸损伤并逐渐扩展。MJ2 的混凝土部分在框架梁右侧与框支柱交接处、右剪力墙内侧与左剪力墙内侧三个位置最先发生压缩损伤。拉伸损伤最先出现在框架梁两端、左斜柱与转换梁交接处。随着加载的进行, 逐渐扩展到整个左斜柱, 转换梁。轴压比升高, 损伤提前出现, 位置不变, 分布面积与损伤值有所增加。

模型 MJ1 和 MJ2 各部分的应力分布如图 6 所示。MJ1 左侧的压应力迅速退化, 开始表现为拉应力, 右侧的压应力增加明显。最大压应力出现在左剪力墙外侧以及右斜柱下侧。最大拉应力出现在左框支柱中部。MJ2 左侧的压应力迅速退化, 开始表现为拉应力。转换梁中部的压应力向左侧发展。最大压应力和最大拉应力出现的位置与模型 MJ1 的相同。随着轴压比的增大, 应力分布位置不变, 但值有所增加。

载与模型轴压比高度正相关。

表 5 模型 MJ1 竖向荷载下各弹簧最大位移和最大荷载值

弹簧编号	MJ1 - S102	MJ1 - S458	MJ1 - S744
最大位移/mm	1.28×10^{-6}	4.26×10^{-6}	-1.53×10^{-5}
最大荷载/kN	0.1447	0.2988	-1.0700

水平位移作用下的各个弹簧的最大位移和最大荷载如表 6—表 8 所示, 各弹簧荷载位移曲线如图 8

所示。竖向荷载的不同对弹簧位移有较大影响,轴压比从 0.2 升高到 0.3 时,模型左斜柱中部弹簧、转换梁中部弹簧的最大位移和最大荷载都有所增长,而轴压比从 0.3 升高到 0.4 时,弹簧最大荷载和最大位移下降。右斜柱中部弹簧的最大荷载和最大位移都随着轴压比的增大而减小。

表 6 水平位移作用下模型 MJ1 各弹簧最大位移和最大荷载值

弹簧编号	MJ1 - S102	MJ1 - S458	MJ1 - S744
最大位移/mm	-0.00144	-0.9937	1.0539
最大荷载/kN	-15.7938	-11.8654	12.1390

表 7 水平位移作用下模型 MJ3 各弹簧最大位移和最大荷载值

弹簧编号	MJ1 - S102	MJ1 - S458	MJ1 - S744
最大位移/mm	-1.9014	-1.2021	1.0229
最大荷载/kN	-17.0495	-12.8113	11.9983

表 8 水平位移作用下模型 MJ5 各弹簧最大位移和最大荷载值

弹簧编号	MJ1 - S102	MJ1 - S458	MJ1 - S744
最大位移/mm	-1.8805	-0.7837	0.6922
最大荷载/kN	-16.9931	-10.9100	10.4954

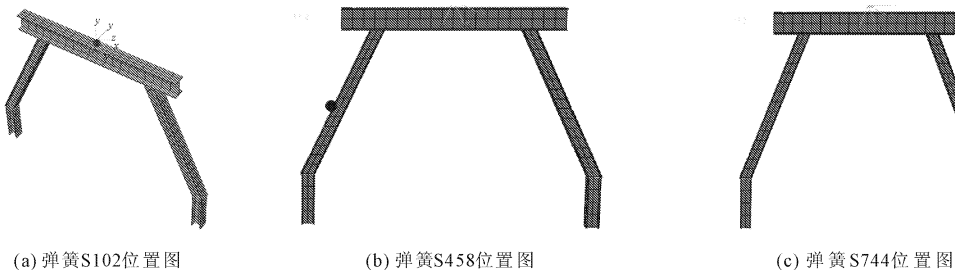


图 7 弹簧位置图

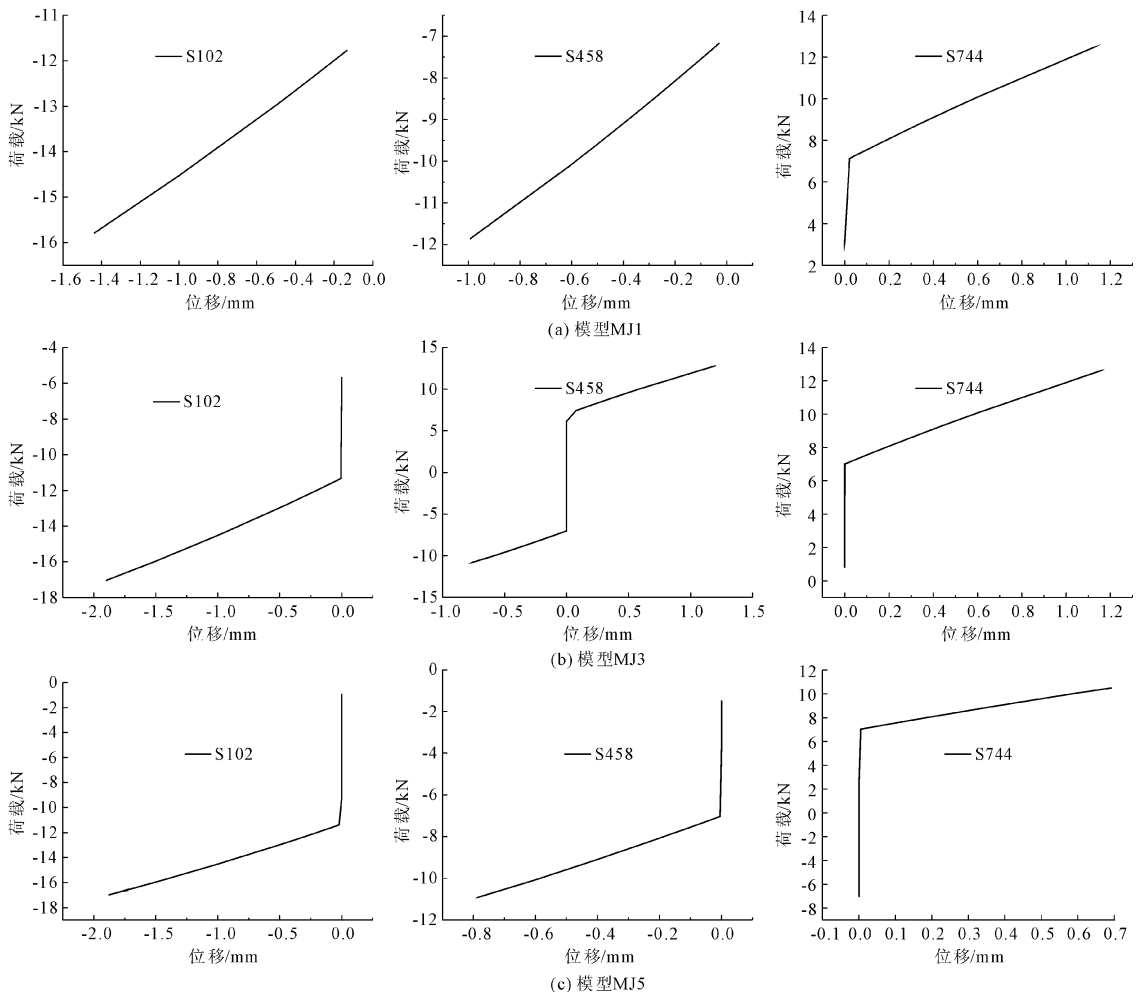


图 8 水平荷载作用下模型各弹簧荷载位移曲线

2.3 加载点荷载位移曲线分析

各个模型水平位移加载下,加载点荷载-位移曲线如图 9 所示。加载初期,荷载与位移呈线性变化,模型处于弹性阶段。同一轴压比下,考虑粘结滑移的模型屈服荷载略大于忽略粘结滑移的模型,且初始刚度略大。考虑粘结滑移的模型承载力极限值小于忽略粘结滑移的模型。各模型在 22.4 mm 附近皆达到屈服,同一轴压比模型的屈服位移相近,随着轴压比升高,屈服位移略有增加。随后模型相继达到极限位移,忽略粘结滑移的模型极限位移大于考虑粘结滑移的模型,且在达到极限荷载后承载力急剧下降。随着轴压比的升高,模型的极限位移,极限承载力有一定程度的提高。

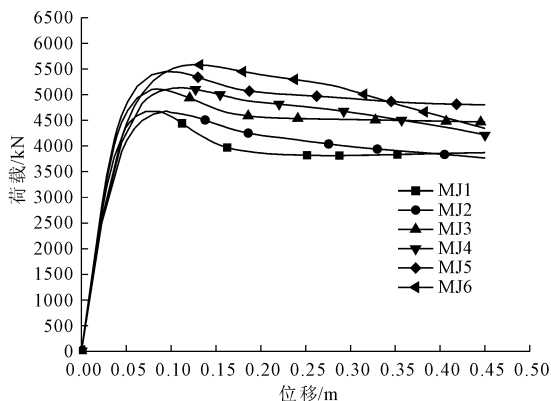


图 9 加载点荷载-位移曲线

2.4 承载能力与位移延性分析

本文将钢筋开始屈服时对应的荷载作为屈服荷载,此时屈服荷载对应的位移作为屈服位移。以下对各个模型在静力水平位移加载下的强屈比和延性比进行分析。如表 9 所示,同一轴压比下,考虑粘结滑移的模型强屈比和延性比皆小于忽略粘结滑移的模型。说明型钢与混凝土之间存在滑移的模型延性、强度储备皆低于型钢与混凝土之间忽略滑移的模型。随着轴压比的增大,考虑粘结滑移的模型和忽略粘结滑移的模型的强屈比和延性比都在增大,说明模型延性能力和强度储备均有所增大。

表 9 加载点荷载与位移

模型编号	屈服荷载 /kN	屈服位移 /m	极限荷载 /kN	极限位移 /m	强屈比	延性比
MJ1	4246.46	0.0469	4671.93	0.0717	1.1002	1.5288
MJ2	4183.58	0.0538	4681.03	0.0947	1.1189	1.7602
MJ3	4610.92	0.0492	5108.62	0.0843	1.1079	1.7134
MJ4	4471.85	0.0569	5134.87	0.1125	1.1483	1.9772
MJ5	4887.48	0.0523	5451.86	0.0943	1.1155	1.8031
MJ6	4882.56	0.0629	5585.19	0.1243	1.1439	1.9762

3 结 论

(1) 在竖向荷载加载阶段,随着加载的进行,型钢与混凝土之间的滑移增大,但滑移量较小。考虑粘结滑移的竖向变形大于忽略粘结滑移的模型。

(2) 在水平位移加载阶段,不考虑粘结滑移的模型荷载极限值和极限位移均大于考虑粘结滑移的模型。初始加载段六个模型基本保持一致,达到极限值后,考虑粘结滑移的模型承载力随着位移增大而下降至最大值的 80%,之后荷载值随着位移变化保持不变。不考虑粘结滑移的模型下降段不明显。忽略型钢与混凝土之间粘结滑移的模型拥有更高的强度储备和更好的延性,轴压比的提高在一定程度上能提高模型的延性能力。

(3) 在同一轴压比下,考虑粘结滑移的模型在应力应变和损伤分布上均与不考虑粘结滑移的模型有所不同。随着轴压比的增大,应力应变和损伤的分布情况保持不变,但值有所增加,开裂和屈服出现的时间提前。

参考文献:

- [1] 华刚,董军.斜柱转换与桁架转换在某高层钢结构中的比较分析[J].建筑钢结构进展,2013,15(6):58-62.
- [2] 曹秀萍,马耀庭.斜柱在深圳 2000 大厦高位转换中的应用[J].建筑结构,2002,32(8):15-19.
- [3] 朱颖杰,聂建国,樊健生.交叉斜柱转换节点受力性能试验研究[J].建筑结构学报,2016,37(6):115-122.
- [4] 曹正罡,武岳,周威.斜交网格筒体 Y 型混凝土转换节点静力试验研究[J].建筑结构,2013,43(S1):456-461.
- [5] 马英超,贾金青,张建成.型钢超高强混凝土框架不同剪跨比抗震性能试验研究[J].水利与建筑工程学报,2016,14(4):188-194.
- [6] Lee D, Lee J, Kim J, et al. Investigation on material layouts of structural diagrid frames by using topology optimization[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2014, 18(2):549-557.
- [7] 李梦,申波,谢成吉,等.带新型斜柱转换的框支剪力墙结构力学性能分析[J].贵州大学学报(自然科学版),2015,32(2):94-98.
- [8] 杨磊,申波,周世明,等.新型斜柱转换结构的抗震性能分析[J].贵州大学学报(自然科学版),2016,33(6):67-70,108.
- [9] 周世明.新型斜柱转换结构应用于框支剪力墙中的抗震性能分析[D].贵阳:贵州大学,2016.