

无粘结预应力板-柱结构抗连续倒塌模式研究

程东辉,宋超,杨燕红

(东北林业大学土木工程学院,黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要 目的 研究无粘结预应力混凝土板-柱结构的抗连续倒塌模式,为钢筋混凝土板柱结构防连续倒塌设计提供参考. 方法 采用有限元软件 ABAQUS 对一栋 8 层的无粘结预应力板-柱结构进行连续倒塌分析,探讨在柱失效工况和板-柱节点失效工况下板、柱以及板-柱节点的应力状况. 结果 两种失效工况下都以普通钢筋和预应力筋被拉断,板受拉薄膜力失效而宣告破坏;不同失效工况的板面破坏呈现模式存在差异,柱失效体现为屈服线破坏,节点失效体现为冲切裂缝破坏. 结论 在节点失效工况的初期,从增长速度上来说,无粘结预应力板柱结构普通钢筋和预应力筋应力增长速度较快,在连续倒塌前增长速度较慢;而柱失效工况则与之相反,在柱失效后的初始阶段,失效柱所在跨内其他节点处普通钢筋和预应力筋的应力增长速度较慢,随着连续倒塌极限状态的临近,增长速度逐渐加快.

关键词 无粘结预应力板-柱结构;连续倒塌模式;数值分析;柱失效;节点失效

中图分类号 TU528

文献标志码 A

Study on Mode of Unbonded Prestressed Slab-Column Structures against Progressive Collapse

CHENG Donghui, SONG Chao, YANG Yanhong

(School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin, China, 150040)

Abstract: In order to study the mode of unbonded prestressed concrete slab-column structures against progressive collapse and provides reference for the design of unbonded prestressed concrete slab-column structures against progressive collapse, progressive collapse analysis of an 8-layer unbonded prestressed slab-column structure is studied using ABAQUS; The stress state of slab, column and slab-column joints under column failure condition and slab-column joint failure condition are discussed. Under both failure conditions, it is declared to be damaged due to ordinary reinforcing bars and prestressed tendons are pulled off, and the failure of the slab tension film force; There are differences in the failure modes of the slab surface under different failure conditions. Under the col-

收稿日期:2018-11-16

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划项目(90915003);哈尔滨市科技创新人才研究专项基金项目(2012RFXXS111);中央高校基本科研业务费创新团队与重大项目培育资金项目(2572016EBC1)

作者简介:程东辉(1971—),男,教授,博士,主要从事预应力混凝土和装配式混凝土结构等方面研究.

umn failure condition,the failure mode of the slab surface presents yield line failure,and under the joint failure condition,the failure mode of punching crack appears on the slab surface. In the initial stage of joint failure,the stress speed of ordinary reinforcing bars and prestressed tendons of unbonded prestressed slab-column structure is faster,and it is slow before continuous collapse. In contrast to the failure condition of the column,the stress growth rate of ordinary reinforcing bars and prestressed tendons is slow in the initial stage after the failure of the column at other nodes in the span where the failure column is located,and it is faster near the ultimate state of continuous collapse.

Key words:unbonded prestressed slab-column structure;progressive collapse mode;simulation analysis;column failure;slab-column joint failure

建筑结构的服役过程整体上呈现出不稳定,经常在各类不可预知的灾害中受到损伤,损失可能会远远高于预期,甚至可能会使整体结构出现倒塌^[1].

以钢筋混凝土为研究对象,国内外许多专家与研究人员都对其抗连续倒塌能力开展相关研究.杨涛等^[2-3]对边柱失效情况下 RC 板柱结构的倒塌破坏模式和破坏机理进行了研究,提出了边柱失效情况下板柱结构的抗倒塌承载力计算模型;李凤武等^[4]进行了钢筋混凝土空间框架的倒塌试验,并通过试验证实,在底层单个边柱失效的情况下,如果框架结构的设计符合抗震规范,那么整体建筑结构对连续倒塌也有较好的抵抗能力.黄文君等^[5-8]对混凝土板柱子结构进行连续倒塌静力加载试验,结果表明小变形下试件通过楼板面外受弯能力和面内受压薄膜效应承载,大变形下试件通过周边节点的残余弯矩和面内受拉薄膜效应承载;易伟健等^[9-11]对钢筋混凝土板-柱结构分别进行了中柱失效和无梁楼板下层支撑构件失效下的静载试验,试验证明,楼面荷载传递与两个因素有密切关联,一个是板的挠曲,另一个是薄膜作用;对于无梁楼板而言,当支撑构件的效用无法发挥,薄膜作用和悬索作用可以充分得到利用;J. M. Russell 等^[12]选择 1/3 比例的 RC 平板为研究对象,对平板突然失柱后的动力进行分析,发现虽然板面遭受破坏后出现弯曲,但平板内部动力可以进行二次重构,从而防止倒塌. P. Olmati 等^[13]对 RC 平板结构节

点在极端情况下的受力状态进行研究,在重力荷载方面总结出了更为便捷有效的设计方法.

但当前针对连续倒塌试验的研究还有一定的局限性,除了缩尺结构外,主要针对单层平板结构进行分析,而关于全比例整体结构连续倒塌的研究却较为片面,只在数值模拟中有提及.从已发生的工程倒塌事故^[14-16]来看,柱失效破坏和板柱节点失效破坏是板柱结构连续倒塌的典型模式.基于此,笔者在研究中充分结合拆除构件法理论,对柱失效和节点失效两种工况下钢筋混凝土板柱结构的破坏模式进行分析,以期为钢筋混凝土板柱结构防连续倒塌设计提供参考.

1 数值模型的建立

1.1 数值模拟方法的验证

为验证文中 ABAQUS 建模方式是否能发挥其有效性,笔者选择 2×2 跨的板-柱结构拆除中柱倒塌试验^[11],该项试验已经在湖南大学初步完成,主要针对这项试验开展非线性静力分析模拟,图 1 是试验示意图.

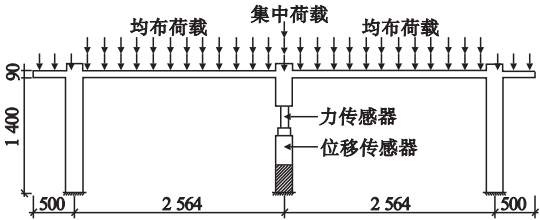


图 1 板-柱结构拆除中柱倒塌试验示意图
Fig. 1 Diagram of collapse test of mid-column demolition in slab-column structure

在对数值进行统计计算的基础上,中柱位移-荷载曲线可以初步形成,图2展示了该曲线与试验关系曲线的对比.可以看出,随着中柱位移的加大,两条曲线基本上重合,说明利用有限元软件 ABAQUS 分析结果是可行的.

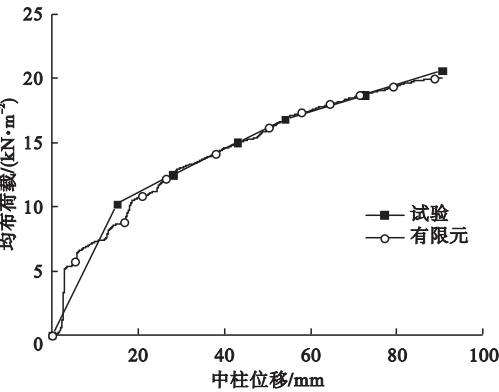


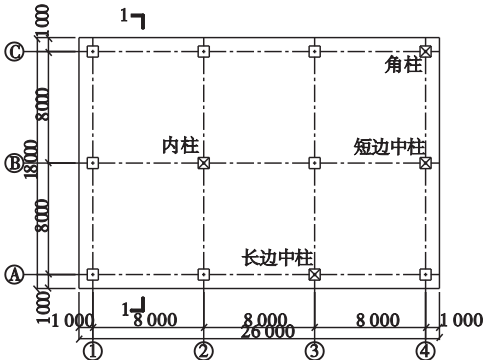
图2 中柱位移-荷载关系数值模拟曲线与试验曲线对比

Fig.2 Comparison between simulated curve and test curve of mid-column displacement-load relationship

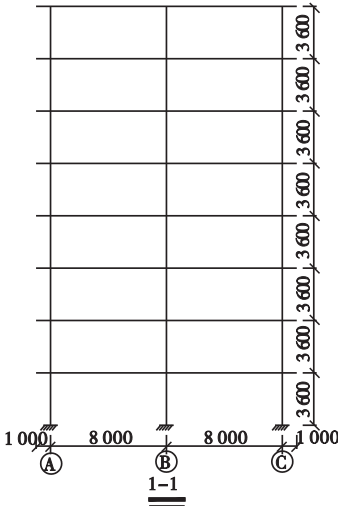
1.2 板柱结构模型的建立

板-柱结构的抗连续倒塌性能在一定程度上受到典型拆除柱位置的影响,同时,在典型拆除柱研究后期,还需要分析拆除柱所在的层数,为了简化计算流程,研究中选择 的 2×3 跨平板结构体系无托板和柱帽,结构平面图和立面图如图3所示.

板、柱的混凝土强度等级分别为 C30、C40,无粘结预应力筋采用 1860 级的 ϕ^{15} .2 钢绞线,纵向受力钢筋强度等级为 HRB400,箍筋强度等级为 HPB300,所有材料力学性能的取值都符合《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)的相关规定.建筑场地为 II 类场地,设计地震分组为第二组,抗震设防烈度为 7 度(0.10 g).环境类别为 I 类.混凝土本构模型采用混凝土塑性损伤模型,混凝土单轴受压(拉)应力应变曲线采用《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)附录 C 标准.



(a)平面图及初始破坏柱位置



(b)立面图

图3 结构平面图及立面图

Fig.3 Structural plane and elevation

1.3 倒塌判定

国内外已经有多项研究证实,钢筋混凝土结构的连续倒塌通常分为四个阶段:弹性抗力阶段,弹塑性抗力阶段,悬链线抗力阶段和倒塌极限阶段.结合 GSA2013^[17]和 DoD2013^[18]对失效范围限值的规定,笔者分别以该构件所在跨内与该构件直接相邻的上层楼板范围内,且占该楼层总面积 30% 及 15% 区域内的普通钢筋和预应力筋达到极限强度标准值(被拉断)作为板-柱结构发生连续倒塌的判定标准.

2 柱失效工况下连续倒塌模式分析

2.1 连续倒塌过程及极限状态判定

图4 为分析模型当底层短边中柱失效后

达到结构连续倒塌极限状态时的结构应力云图和整体变形云图.

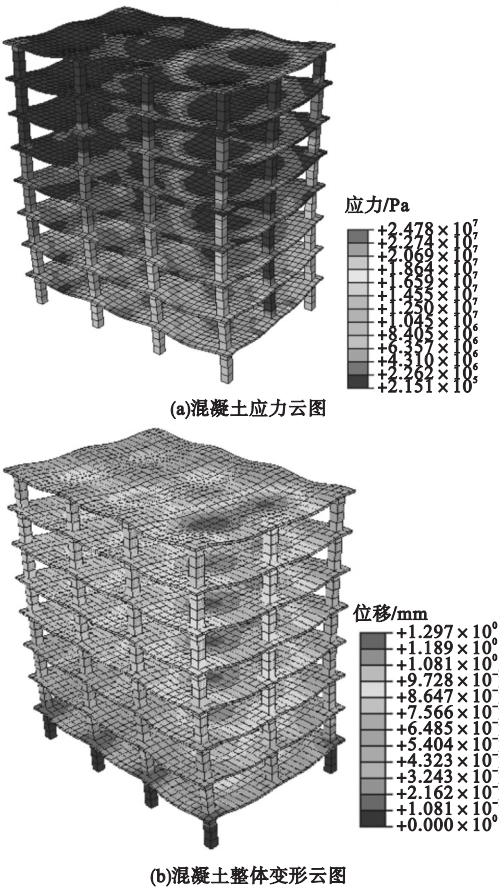


图 4 混凝土应力云图与整体变形云图

Fig. 4 Stress nephogram and integral deformation nephogram of concrete

由图 4 可以看出,结构达到连续倒塌极限状态时,失效柱所在跨内板顶负弯矩区段内的混凝土达到其轴心抗拉强度,板顶的混凝土开裂组合成环形圈状,在板底,正弯矩区混凝土沿对角线方向达到了抗拉强度,且混凝土应力较大.从分布上来说,混凝土应力的分布与屈服线破坏模式相符,且层数越低,板顶负弯矩区和板底正弯矩区混凝土受拉应力越大,在连续倒塌极限状态,柱混凝土结构仍然较为完整,没有被压碎.此外,随着与失效柱距离的拉近,板、柱混凝土应力也逐渐加大,这表明不平衡荷载在连续倒塌过程中并不是无序传递,而是与距离远近有着一定联系,基本上与就近原则相符.

图 5 给出了底层短边中柱失效后普通钢筋和预应力筋应力云图.由图 5 可以看出,在连续倒塌极限状态下,位于柱上板带核心区域(宽度约暗梁宽度)内的多数普通钢筋的极限抗拉强度都达到了 540 MPa,位于跨中板带核心区域(宽度约为 $l/3 \sim l/2$, l 为板的跨度)内的普通钢筋也基本上达到了极限抗拉强度.因此,根据短边中柱的失效范围可以对是否发生连续倒塌进行判断,图 5 的短边中柱失效范围已经达到 70.4 m^2 ,代表已经发生连续倒塌.位于柱上板带和跨中板带边缘区域的普通钢筋没有较大应力,也没有达到屈服,代表在连续倒塌的四个阶段中,受力最大的为柱上板带核心区域及跨中板带普通钢筋,受力最小的为柱上板带和跨中板带边缘区域的普通钢筋.对于柱内普通钢筋而言,其既没有较高的应力,也未能充分发挥材料性能.

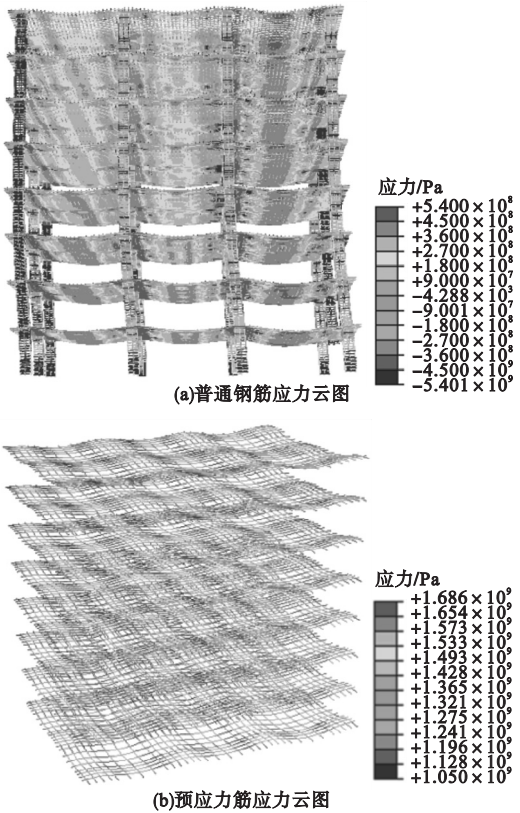


图 5 普通钢筋和预应力筋应力云图

Fig. 5 Stress nephogram of reinforcing bars and prestressed tendons

此外,无粘结预应力筋最大应力基本出现在失效柱所在跨上层楼板板柱节点处.这也是上层结构和周边结构拉结作用的体现,尤其体现出在底层柱失效后,下层结构构件在竖向和水平状态下受到的上层与周边结构的作用.也就是在连续倒塌状态下,失效柱所在竖向柱列的受力方向和受力程度都会发生相应改变,在上层柱的拉结力作用下,下层柱荷载的传递需要经过从上层板到周边柱的过程.

2.2 发生连续倒塌时柱的应力状况

相邻柱列混凝土应力分析点位置如图6所示.底层短边中柱失效工况下顶层柱柱顶混凝土应力与失效柱上方节点竖向位移的关系如图7所示.图中,C、I分别表示与失效柱直接相邻的角柱及内柱;按柱顶仅承受板面荷载以角标C表示,柱顶截面钢筋协助混凝土在压力作用下应力值的大小不在考虑范围内;经过数值的计算分析,柱顶混凝土应力值用角标A来表示;与失效柱成轴对称的两列柱分别用角标1和角标2来表示.对图7进行分析可知,柱顶混凝土受压应力值并不是固定的数值,相比较而言,通过计算得到的该值小于数值分析得到的值.以上分析证明,与失效柱直接相邻的其他柱所在竖向柱列承受的荷载主要来自于两个方面,一方面是由顶板传来的荷载,另一方面是失效柱所在竖向列传来的荷载——这部分荷载具有一定不平衡性.也就是说,在连续倒塌的四个阶段中,失效柱所在竖向柱列经过传递,从下层柱向上层柱传递的“被拉结力”在完成向顶板的传递后,会再继续保持向与失效柱直接相邻的其他柱传递,并在其他柱的传递下到达基础.同时,分析连续倒塌阶段失效柱上方节点竖向位移关系曲线可知,C_{1A}和C_{2A}相应的柱顶混凝土应力曲线基本保持一致,这代表从受力上来说,在整个连续倒塌阶段,与失效柱所在竖向列成轴对称的两列柱受力基本相同.

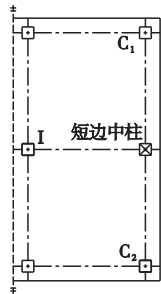


图6 相邻柱列混凝土应力分析点位置

Fig. 6 Location of stress analysis points of adjacent column concrete

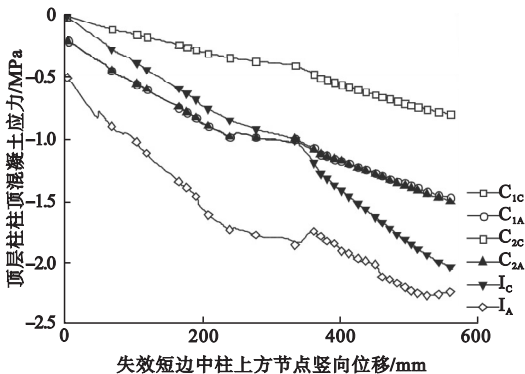


图7 顶层柱柱顶混凝土应力与失效柱上方节点竖向位移的关系曲线

Fig. 7 Relation curve between concrete stress at the top of the top column and vertical displacement of joint above failure column

2.3 发生连续倒塌时板的应力状况

为进一步探讨无粘结预应力板-柱结构在柱失效工况下的连续倒塌模式,对板内薄膜效应进行了研究.图8表示了板侧水平位移分析点的位置,图9中的曲线表示板侧水平位移与失效柱上方节点竖向位移的关系.在图9中,板侧向外水平位移用正值来表示.对曲线走势进行分析可知,板侧向外水平位移随着失效柱上方节点竖向位移的增加而增加,同时,在失效柱上方节点竖向位移增加条件下,周围的水平构件开始对运动趋势形成制约,进而形成相应推力,在板内发挥作用,这种推力也就是受压薄膜力.在板侧向外水平位移增加到一定程度后,当失效柱上方节点竖向位移再增大时,板侧向外水平位移将会呈现减小趋势.直到板跨中挠度与板厚

一致,向外水平位移将转变为向内水平位移。在这个过程中,周围水平构件也会对向内移动的趋势造成影响,在板内形成推力,也就是在钢筋的悬索作用下由板承担荷载。

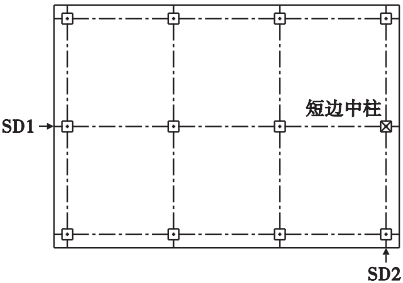


图8 板侧水平位移分析点位置

Fig. 8 Analysis point location of horizontal displacement of slab side

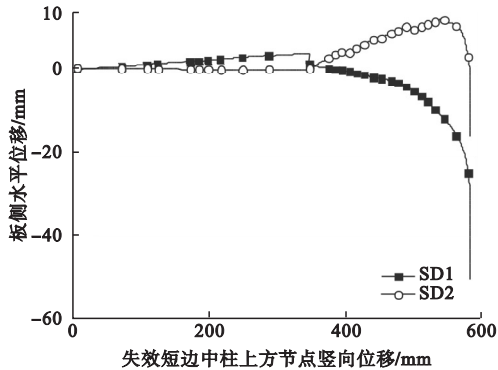


图9 板侧水平位移与失效柱上方节点竖向位移关系

Fig. 9 Relationship between horizontal displacement of slab side and vertical displacement of joints above failure column

普通钢筋和预应力筋应力分析点位置如图 10(a)、10(b)所示。图 11 为底层短边中柱

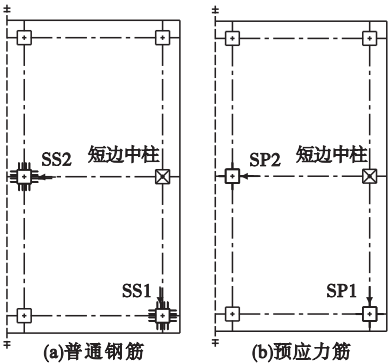
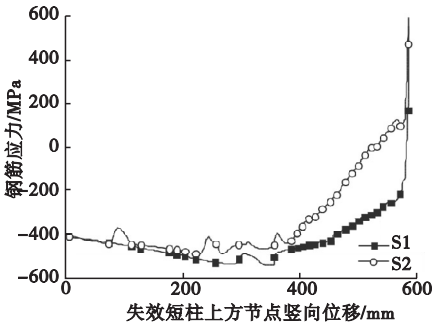


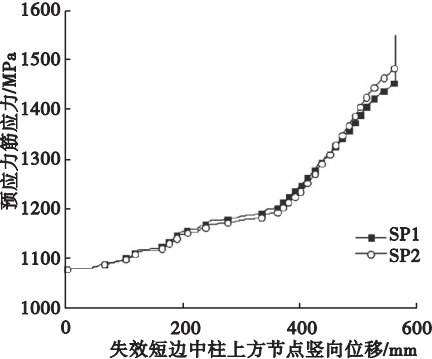
图10 普通钢筋和预应力筋应力分析点位置

Fig. 10 Location of stress analysis point of reinforcing bar and prestressed tendons

失效工况下板底普通钢筋应力和预应力筋应力与失效柱上方节点竖向位移关系。



(a)板底普通钢筋应力与失效柱上方节点竖向位移



(b)板底预应力筋应力与失效柱上方节点竖向位移关系

图11 板底普通钢筋应力和预应力筋应力与失效柱上方节点竖向位移关系

Fig. 11 Relationship between ordinary reinforcing bar stress and prestressed tendon stress at the bottom of the slab and vertical displacement of joints above failure column

对图 11(a) 进行分析可知,对于失效柱所处跨内节点处而言,在荷载承担刚开始时,板底普通钢筋主要保持在受压状态;后期均布荷载逐渐加大,普通钢筋的受压应力也会随之加大;当非失效柱所在跨内的板跨中挠度与板厚一致时,该压力会相应减小,并逐渐趋于 0。在失效柱所在跨内跨中挠度与板厚一致时,原本受压的失效柱所在跨内节点板底普通钢筋应力向受拉转变,且应力值迅速增加。随着连续倒塌极限状态的临近,失效柱所在跨内钢筋悬链线效应得到充分发挥,进而作用在失效柱上方节点,提供有效拉结力。在钢筋受拉应力增加到极限,无法再抵抗拉力时,钢筋断裂,悬索的功能性丧失,板的受拉薄膜

力无法再有效发挥,结构发生连续倒塌.

对图 11(b) 进行分析可知,撤柱之后,失效柱所在跨内节点处预应力筋应力在整个受力阶段都呈现出加大趋势. 尤其是在连续倒塌极限状态临近时,无粘结预应力筋应力增长速度大幅度增加,这是由于在即将倒塌时,出于抵抗性需求,无粘结预应力筋提供的拉结力将充分发挥其抗力效应.

2.4 发生连续倒塌时板柱结点的应力状况

纵横向普通钢筋和预应力筋应力分析点位置如图 12(a)、12(b) 所示. 发生连续倒塌时板柱节点板底普通钢筋和预应力筋应力与失效柱上方节点竖向位移关系如图 13 所示. 分析图 13(a) 可知,在施加均布荷载的开始阶段,板柱节点处板底普通钢筋保持在受压状态,受压应力在失效柱上方节点竖向位移的增加下也会随之增加. 增加到一定程度后,在失效柱上方节点竖向位移继续增加的情形下,板柱节点处板底普通钢筋受压应力开始减小,横向钢筋的受压应力逐渐转变为受拉应力. 这代表在结构变形的过程中,剩余水平构件的受力模式并不是一成不变的,而是随着结构变形产生波动,失效柱支承的上方板端处于负弯矩状态,在结构变形下逐渐向正弯矩转变.

分析图 13(b) 可知,无粘结预应力筋应力在撤柱后的整个受力阶段都不断加大. 且与横向预应力筋应力相比,纵向应力较大,这也表明从不平衡荷载上来说,纵向预应力筋承担荷载大于横向.

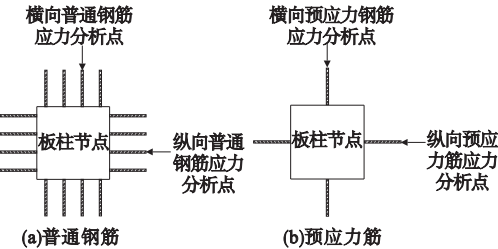


图 12 纵横向普通钢筋和预应力筋应力分析点位置

Fig. 12 Location of stress analysis point of longitudinal and transverse ordinary reinforcing bar and prestressed tendons

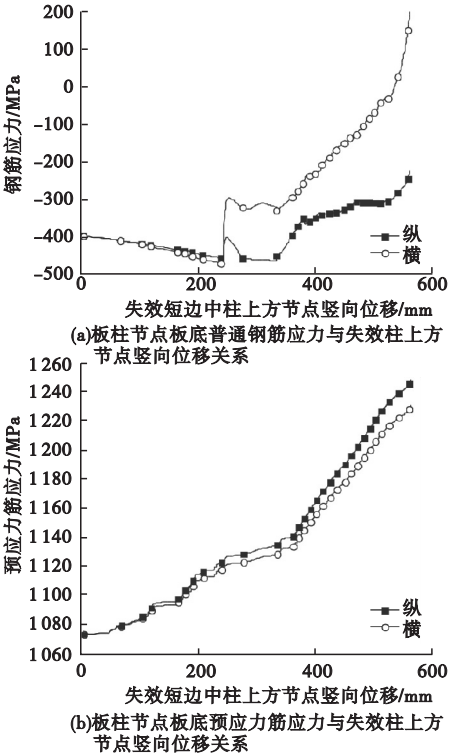


图 13 板柱节点板底普通钢筋和预应力筋应力与失效柱上方节点竖向位移关系

Fig. 13 Relationship between ordinary reinforcing bar stress and prestressed tendon stress at the bottom of the slab-column joint and vertical displacement of joints above failure column

3 节点失效工况下连续倒塌模式分析

在节点失效工况下,为了开展无粘结预应力板-柱结构连续倒塌的模拟分析,将重力加速度场直接在失效柱及节点已撤除的模型上施加,并同时施加均布荷载,以底层板-柱结构短边中柱及节点失效工况下的有限元模型为例进行分析.

3.1 连续倒塌过程及极限状态判定

混凝土应力和整体变形云图如图 14 所示. 由图可知,已达到抗拉强度的混凝土在板面上占据较大比例,其中应力最大的为失效柱周边的板混凝土. 即以失效柱为中心,板面产生的裂缝构呈环形,并向其他方向辐射,最

终延伸到板面边缘.从裂缝形态上来看,板在冲切过程中产生的裂缝与之相似^[19],而在柱失效工况下,板面也会产生屈服线破坏模式下的裂缝,这种裂缝与图 14 的裂缝则有很大差异.

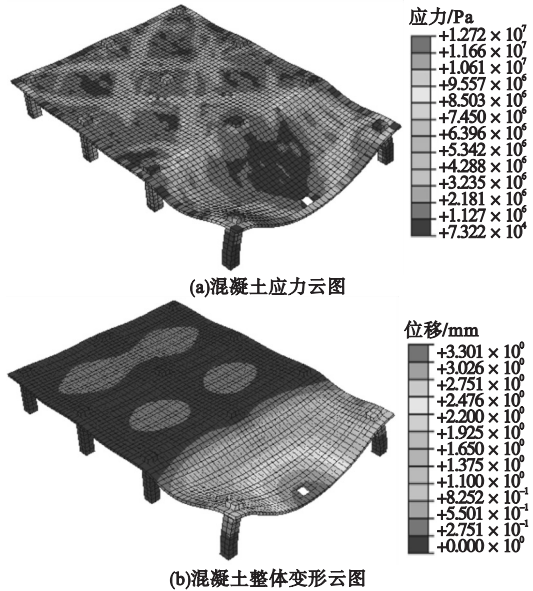


图 14 混凝土应力云图和整体变形云图

Fig. 14 Stress nephogram and integral deformation nephogram of concrete

对图 14 进行分析还可以发现,与板跨中区域的变形程度相比,失效节点所在的跨内暗梁区域变形较大,这代表暗梁刚度在节点失效后迅速减小,直到最后刚度降至 0. 这与柱失效工况下的结果是完全不同的.因而节点失效与柱失效工况下的连续倒塌模式是完全不同的.

图 15 给出了底层板-柱结构短边中柱及节点失效工况下普通钢筋和预应力筋应力云图.对图 15(a)进行分析可知,与其他跨内钢筋应力相比,失效节点所在的跨内钢筋应力明显较大,其中应力最大的为跨内柱上板带核心区域的钢筋,已与极限抗拉强度相等.同时,达到极限抗拉强度的还包括大部分跨中板带核心区域的钢筋应力.而无论是跨中板带边缘区域,还是柱上板带应力都相对较小,这一情形与图 5 中柱失效工况下的结果相符,可以对其作出连续倒塌判断.

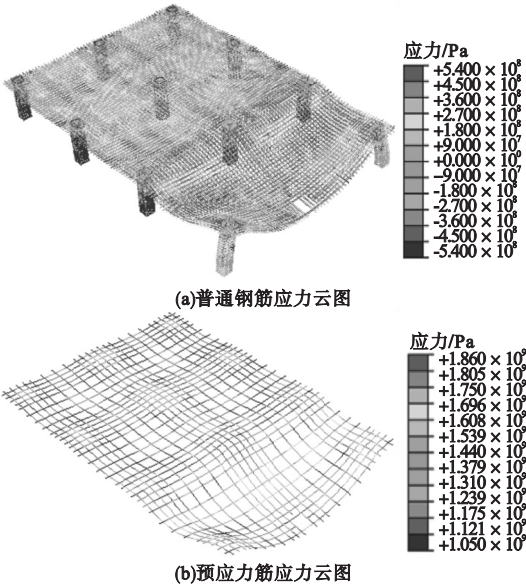


图 15 普通钢筋和预应力筋应力云图

Fig. 15 Stress nephogram of ordinary reinforcing bars and prestressed tendons

对 15(b) 进行分析可知,柱上板带的无粘结预应力筋的应力大于其他区域.且与周边区域相比,节点处的应力也明显较大,尤其是失效节点所在跨内板柱节点处最为明显.

3.2 发生连续倒塌时柱的应力状况

图 16 为与失效节点直接相邻的柱顶混凝土应力与失效节点竖向位移关系曲线.对图 16 进行分析可知,通过计算得到的柱顶混凝土受压应力值比通过数值分析得到的值要小.这表明与失效柱相邻的其他柱所在竖向

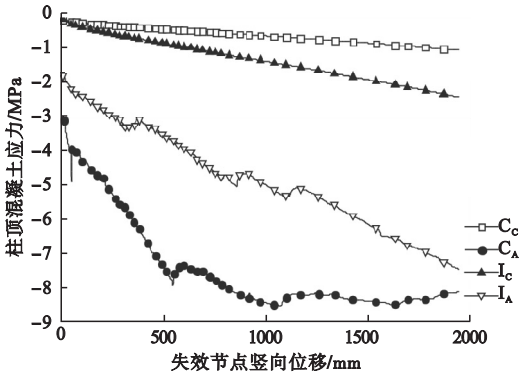


图 16 柱顶混凝土应力与失效节点竖向位移关系曲线

Fig. 16 Relationship between concrete stress on the top of column and the vertical displacement of failure joint

柱列柱顶需要承受两部分荷载,一部分是由楼板传递的荷载,另一部分是由失效柱所在竖向柱列传来的不平衡荷载。

3.3 发生连续倒塌时板的应力状况

为进一步对无粘结预应力板-柱结构的连续倒塌模式进行探讨,笔者分析了板内薄膜效应。图 17 表示了板侧水平位移与失效节点竖向位移的关系,对其进行分析可知,板-柱结构在刚开始承受均布荷载时,板的受拉薄膜力已经出现,比柱失效工况下板受拉薄膜力发挥作用的时间早。

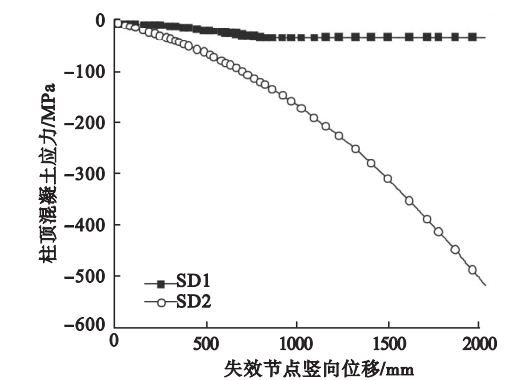
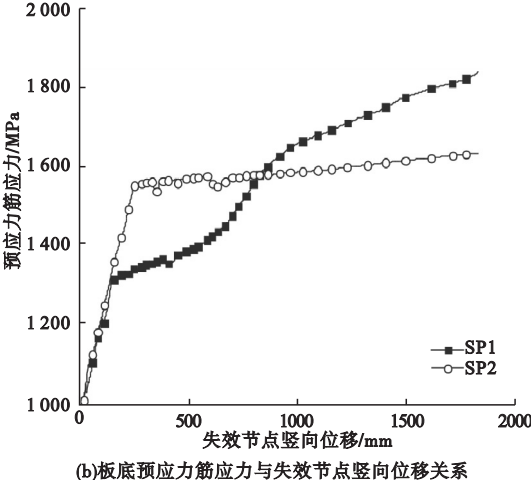
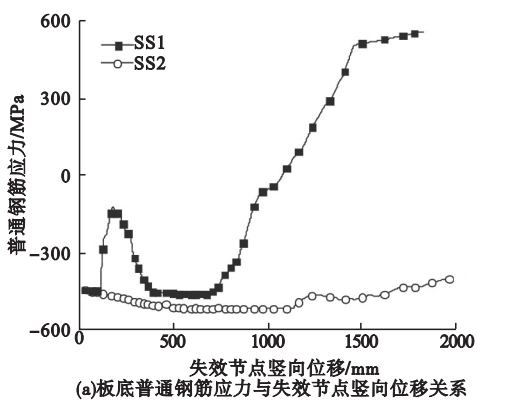


图 17 板侧水平位移与失效节点竖向位移关系
Fig. 17 Relationship between horizontal displacement of slab side and the vertical displacement of failure joint

此外,由图 17 还可以看出,与其他跨板侧向内水平位移相比,失效节点所在跨内板侧水平内向位移较大,代表失效节点所在跨内板受拉薄膜力较大,这与图 15 中失效节点所在跨内普通钢筋和预应力筋较大相符。这主要是由于随着普通钢筋和预应力筋应力的增加,悬索作用得到了充分的发挥,板的受拉薄膜效应得到了充分的体现。

板底普通钢筋应力和预应力筋应力与失效节点竖向位移关系如图 18 所示。对图 18(a)分析可知,在最初均布荷载下,失效节点所在跨内其他节点处板底普通钢筋处于受压状态,而当均布荷载增加,只有与失效节点相邻的角柱节点处板底钢筋受压应力随之增加,其他受压应力都呈现减小趋势,并且在一定

的时间周期内,受压逐渐向受拉转变。从受拉应力的增长速度上来说,在节点刚开始失效时,增长速度较快,而随着连续倒塌的临近,受拉应力增长速度逐渐减缓。而柱失效工况下钢筋的受拉应力增长速度则与之相反。当钢筋的受拉应力达到极限抗拉强度,钢筋断裂,悬索作用无法正常发挥,受拉薄膜力形成受限,整体结构出现连续倒塌。



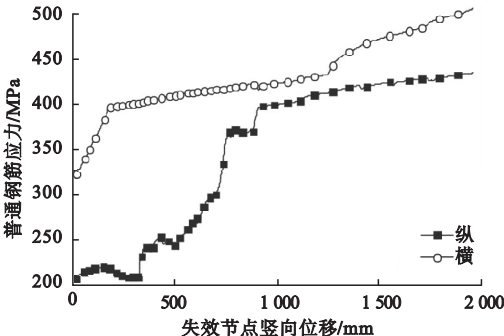
(a)板底普通钢筋应力与失效节点竖向位移关系
(b)板底预应力筋应力与失效节点竖向位移关系
图 18 板底普通钢筋应力和预应力筋应力与失效节点竖向位移关系

Fig. 18 Relationship between ordinary reinforcing bar stress and prestressed tendon stress at the bottom of the slab and the vertical displacement of failure joint

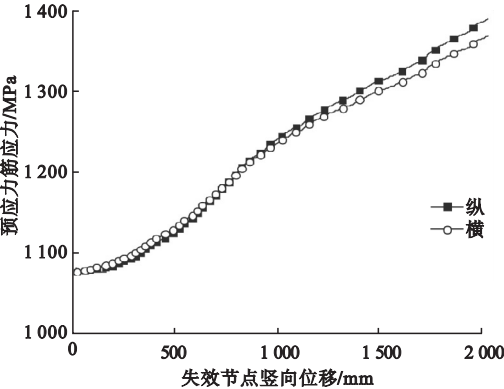
对图 18(b)进行分析可知,受力过程中失效节点所在跨内其他节点处预应力筋应力不断增大,且在节点失效后初期,应力增长速度较快,而随着连续倒塌极限状态的临近,应力增长速度逐渐降低。

3.4 发生连续倒塌时板柱结点的应力状况

图 19 给出了底层板-柱结构短边中柱及节点失效工况下板柱节点板底普通钢筋和预应力筋应力与失效节点竖向位移关系. 对图 19(a) 进行分析可知, 在施加均布荷载的开始阶段, 板柱节点处板底纵横向普通钢筋为受拉状态, 这代表在节点失效工况下, 失效节点所在板端将由负弯矩变为正弯矩作用. 而在柱失效工况下, 在刚开始撤柱时, 失效柱上方节点板底普通钢筋一直处于受压状态, 这种状态的改变源于均布荷载的增加, 在均布荷载增加到一定程度后, 普通钢筋转变为受拉状态. 对图 13 和图 19 进行对比分析可知, 与柱失效工况相比, 板-柱结构在节点失效工况下更容易出现变形.



(a)板柱节点板底普通钢筋应力与失效节点竖向位移关系



(b)板柱节点板底预应力筋应力与失效节点竖向位移关系

图 19 板柱节点板底普通钢筋和预应力筋应力与失效节点竖向位移关系

Fig. 19 Relationship between ordinary reinforcing bar stress and prestressed tendon stress at the bottom of the slab-column joint and vertical displacement of failure joints

对图 19(b) 进行分析可知, 在连续倒塌的四个阶段中, 失效节点边缘纵横向无粘结预应力钢筋应力一直呈现增加趋势, 但与极限抗拉强度还存在一定差距.

4 结 论

(1) 无论是柱失效工况的无粘结预应力板柱结构, 还是节点失效工况下的板柱结构, 其结构破坏的判断依据即为普通钢筋和预应力筋在拉力作用下断裂, 板无法提供受拉薄膜力.

(2) 失效工况主要分为两种类型, 第一种是柱失效, 第二种是节点失效. 失效工况不同, 无粘结预应力板柱结构的连续倒塌破坏机制也存在差异. 第一种失效工况下, 板柱结构的连续倒塌破坏机制表现为板面屈服线破坏; 第二种失效工况下, 板柱结构的连续倒塌破坏机制表现为板面冲切裂缝破坏.

(3) 在柱失效工况下, 失效初期, 无粘结预应力板柱结构失效柱所在跨内其他节点处普通钢筋和预应力筋应力增长速度较慢, 而在临近连续倒塌极限状态时增长速度加快. 节点失效工况与之相反.

参考文献

[1] 王晶,高磊,蒋玉明,等.关于国外抗连续性倒塌设计规范的研究[J].爆破,2009,26(1):37-41.
(WANG Jing, GAO Lei, JIANG Yuming, et al. Research on the design specification of foreign anti-continuity collapse[J]. Blasting, 2009, 26(1): 37-41.)
[2] 杨涛,连金明,张喜德.边柱失效后 RC 板柱结构连续倒塌性能试验研究[J].工程科学与技术,2019,51(1):104-111.
(YANG Tao, LIAN Jinming, ZHANG Xide. Experimental study on progressive collapse performance of RC flat plate structures in the scenario of side column loss[J]. Engineering science and technology, 2019, 51(1): 104-111.)
[3] 杨涛,蓝文武,钱凯.不同板中配筋形式下板柱结构的连续倒塌性能[J].华南理工大学学报(自然科学版),2014,42(10):110-116.
(YANG Tao, LAN Wenwu, QIAN Kai. Progressive collapse performance of flat slab structures with different slab reinforcement details

- [J]. Journal of south China university of technology (natural science edition), 2014, 42 (10): 110 - 116.)
- [4] 李凤武, 肖岩, 赵禹斌, 等. 钢筋混凝土框架边柱突然失效模拟试验与分析研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(4): 9 - 18.
(LI Fengwu, XIAO Yan, ZHAO Yubin, et al. Simulation test and analysis of sudden failure of reinforced concrete frame side columns[J]. Journal of civil engineering, 2014, 47 (4): 9 - 18.)
- [5] 黄文君, 李易, 陆新征, 等. 混凝土板柱子结构抗连续倒塌试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(8): 55 - 61.
(HUANG Wenjun, LI Yi, LU Xinzhen, et al. Experimental study on a flat plate substructure against progressive collapse [J]. Journal of building structure, 2018, 39(8): 55 - 61.)
- [6] 陆新征, 李易, 叶列平. 混凝土结构防连续倒塌理论与设计方法研究[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
(LU Xinzhen, LI Yi, YE Lieping. Research on theory and design method of continuous collapse prevention of concrete structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.)
- [7] 李易, 陆新征, 叶列平. 基于能量方法的 RC 框架结构连续倒塌抗力需求分析 II: 悬链线机制[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(11): 9 - 16.
(LI Yi, LU Xinzhen, YE Lieping. Analysis of continuous collapse resistance demand of RC frame structure based on energy method II: catenary mechanism[J]. Journal of building structure, 2011, 32(11): 9 - 16.)
- [8] 李易, 叶列平, 陆新征. 基于能量方法的 RC 框架结构连续倒塌抗力需求分析 I: 梁机制[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(11): 1 - 8.
(LI Yi, YE Lieping, LU Xinzhen. Analysis of continuous collapse resistance demand of RC frame structure based on energy method I: beam mechanism[J]. Journal of building structure, 2011, 32(11): 1 - 8.)
- [9] 张凡榛, 易伟建. 无梁楼板的抗倒塌性能试验研究及分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2010, 37(4): 1 - 5.
(ZHANG Fanzhen, YI Weijian. Experimental study and analysis of anti-collapse performance of beamless floor slab [J]. Journal of Hunan university (natural science edition), 2010, 37(4): 1 - 5.)
- [10] 易伟建, 水森. 基于节点冲切破坏的板柱结构连续倒塌可靠性分析[J]. 工程力学, 2015, 32(7): 149 - 155, 175.
(YI Weijian, SHUI Miao. Reliability analysis of continuous collapse of slab-column structure based on node punching failure [J]. Engineering mechanics, 2015, 32 (7): 149 - 155, 175.)
- [11] 易伟建, 张凡榛. 钢筋混凝土板柱结构抗倒塌性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(6): 35 - 41.
(YI Weijian, ZHANG Fanzhen. Experimental study on anti-collapse performance of reinforced concrete slab column structure [J]. Journal of building structure, 2012, 33 (6): 35 - 41.)
- [12] RUSSELL J M, OWEN J S, HAJIRASOULI-HA I. Experimental investigation on the dynamic response of RC flat slabs after a sudden column loss [J]. Engineering structures, 2015, 99: 28 - 41.
- [13] OLMATI P, SAGASETA J, CORMIE D, et al. Simplified reliability analysis of punching in reinforced concrete flat slab buildings under accidental actions [J]. Engineering structures, 2017, 130: 83 - 98.
- [14] WOOD J G M. Pipers row car park, Wolverhampton - quantitative study of the causes of the partial collapse on 20th march 1997 [R]. UK: MICE FIStructE CEng Structural Studies & Design Ltd, 2001.
- [15] WOOD J G M. Pipers row car park collapse: Identifying risk [J]. Concrete, 2003, 37 (9): 29 - 31.
- [16] SUZANNE K, NORBERT D J. Collapse of 2000 common wealth avenue: punching shear case study [J]. Journal of performance of constructed facilities, 2004, 18(1): 154 - 161.
- [17] GSA. Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects [S]. Washington DC: US General Services Administration, 2003.
- [18] DOD. Design of buildings to resist progressive collapse [S]. Washington D C: US Department of Defense, 2009.
- [19] 黄小坤, 刘立渠, 陶学康. 考虑纵筋率及加载面边长比影响的板受冲切承载力试验研究 [J]. 土木工程学报, 2008(7): 21 - 26.
(HUANG Xiaokun, LIU Liqu, TAO Xuekang. Experimental study on punching capacity of slab considering the influence of longitudinal reinforcement ratio and side ratio of loading surface [J]. Journal of civil engineering, 2008 (7): 21 - 26.)
- (责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)