

文章编号: 1000-4750(2016)Suppl-0072-07

钢筋混凝土楼板连续倒塌的一种简化模拟方法

刁梦竹¹, 李 易¹, 陆新征², 闫维明¹

(1. 北京工业大学工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 北京 100124;

2. 清华大学土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 楼板作为框架结构的重要组成构件, 显著影响结构抗连续倒塌性能。该文提出了一种新的钢筋混凝土楼板简化数值模拟方法, 把楼板沿两个平面方向离散形成一个梁网, 每个方向上的网络线采用纤维梁单元来模拟钢筋和混凝土的组合受力行为。其中, 采用 T/L 形截面的纤维梁单元模拟楼板边缘区域的梁板交界节点, 以考虑楼板对梁在连续倒塌小变形下弯曲受力以及破坏形态的影响; 采用矩形截面的纤维梁单元模拟楼板的中心区域, 以考虑楼板在大变形下发挥的薄膜拉力。采用这种方法不仅解决了以往用壳单元模拟刚度过高的问题, 还大大提高了整体结构的运算效率。该文对 T/L 形截面异形柱和双向向楼板试验分别进行模拟, 结果表明该简化方法能够高效准确的模拟钢筋混凝土楼板的大变形力学行为, 为整体结构的抗连续倒塌分析提供了有力的工具。

关键词: 钢筋混凝土楼板; 连续倒塌; 数值模拟; 简化方法; 纤维模型

中图分类号: TU375.2 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.05.S026

A SIMPLIFIED SIMULATION METHOD FOR PROGRESSIVE COLLAPSE OF REINFORCED CONCRETE SLABS

DIAO Meng-zhu¹, LI Yi¹, LU Xin-zheng², YAN Wei-ming¹

(1. Beijing Key Laboratory of Earthquake Engineering and Structural Retrofit, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Floor slabs are important components of frame structures which largely affect the structural progressive collapse performance. This paper presents a simplified numerical simulation method for reinforced concrete (RC) slabs. A RC slab is discretized along two directions transferring into a beam network. The meshes at each direction are simulated by fiber beam elements to consider the composite mechanical behavior of steel reinforcement and concrete. In this method, beam-slab joints at the edge area of slabs are simulated by fiber beam elements with T/L sections, by which the effects of slabs on the bending behavior and the damage mode of the beams under small deformation in progressive collapse are considered. On the other hand, fiber beam elements with rectangle sections are used to simulate the interior area of slabs, by which the tensile membrane action of slabs under large deformation can be considered. This method can not only avoid the high stiffness problem when using shell elements, but also greatly improve the efficiency of the calculation of the whole structure. Finally, existing tests on special-shaped columns (T/L cross sections), one-way slabs and two-way slabs are simulated, respectively. The results show that the simplified method can efficiently and accurately simulate the reinforced concrete slabs under large deformation, providing a powerful tool for the simulation of progressive collapse

收稿日期: 2015-05-06; 修改日期: 2015-12-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51208011); 北京市教委科研项目(KM201310005025); 国家博士后科学基金项目(2012M510301); 北京市博士后科研项目(2012ZZ-13)

通讯作者: 李 易(1981—), 男, 湖北人, 副教授, 博士, 从事工程结构防灾减灾研究(E-mail: yili@bjut.edu.cn).

作者简介: 刁梦竹(1993—), 女, 安徽人, 硕士生, 从事工程结构防灾减灾研究(E-mail: ahdzmz1992@126.com);

陆新征(1978—), 男, 安徽人, 教授, 博士, 所长, 主要从事结构非线性计算和仿真研究(E-mail: luxz@tsinghua.edu.cn);

闫维明(1960—), 男, 黑龙江人, 研究员, 博士, 副院长, 主要从事工程结构减震控制研究(E-mail: yanwm@bjut.edu.cn).

analysis of whole structures.

Key words: reinforced concrete slab; progressive collapse; numerical simulation; simplified method; fiber model

楼板作为建筑结构的主要传力和抗力构件,对结构抗连续倒塌性能具有重要影响。现有框架结构的连续倒塌研究中往往偏于保守的忽略楼板的作用。但是根据现有国内外试验和数值模拟研究可知^[1-4],楼板特别是现浇混凝土楼板对结构有很好的拉结作用,能够提高结构的整体性,进而加强结构的抗连续倒塌性能。由于连续倒塌中楼板是双向受力且在局部区域(如塑性铰线区)发生集中的材料破坏和损伤,准确考虑楼板的贡献需要建立精细化的模型,其中单元尺寸不能太大,且需考虑多种材料(如钢筋和混凝土)组合的力学行为。由于该方法计算效率较低,通常用于单个楼板的倒塌试验模拟,难以在整体结构的连续倒塌分析中应用^[5]。

为了考虑楼板对整体结构连续倒塌的影响^[1,6-7],研究人员提出了楼板的简化模拟方法:1)采用分层壳单元模拟框架楼板;2)将楼板等效为框架梁的有效翼缘;3)直接用双向钢筋网模拟楼板的拉结作用。采用壳单元模拟楼板时,考虑到楼板和框架梁单元划分的一致性,单元划分不能采用较精细的网格,这种方法在弹性范围内的小变形情况下比较准确,但是当考虑爆炸、撞击、火灾等意外荷载作用时,楼板会发生较大的变形甚至破坏,此时较粗的壳单元网格会过高估计楼板的刚度和承载力贡献。将楼板等效为框架梁有效翼缘的方法在小变形阶段能够较为准确地考虑楼板对框架梁的刚度和承载力的贡献,在大变形阶段忽略了部分楼板的拉结力,没有考虑楼板在大变形下的膜效应,偏于保守地估计楼板的贡献。直接采用双向钢筋网模拟楼板,能较好的模拟楼板钢筋在大变形下的拉结作用,但忽略了楼板中混凝土在小变形的抗弯和抗剪承载力贡献。

为了兼顾钢筋混凝土框架结构连续倒塌模拟的精度和效率,本文提出了一种楼板简化数值模拟方法,把连续的钢筋混凝土板沿平面的两个方向离散,从而形成一个梁网,在每个方向的网络上采用纤维梁单元来模拟。对于梁板交界处的节点,采用T/L形截面纤维梁模拟,考虑了楼板对梁在小变形下的抗弯能力的加强以及破坏形态的影响。对楼板内部采用矩形纤维梁模拟,来考虑大变形下的薄膜张力。通过一系列试验结果的验证表明,该方法既

考虑了钢筋和混凝土两种材料的共同作用和楼板的膜效应(特别是在大变形下),能够简化建模过程和提高运算效率,可用于钢筋混凝土框架整体结构的抗连续倒塌分析。

1 钢筋混凝土楼板模拟方法

连续倒塌是整体结构系统的力学行为,通常采用数值方法对其进行研究。由于整体结构分析的计算量较大,因此要求数值模型需要兼顾精度和效率,以满足科学研究和工程设计开展大规模的参数分析的需求。

1.1 楼板的倒塌受力特点

钢筋混凝土梁和板现浇组成的楼盖系统在倒塌过程中经历了小变形和大变形两个阶段,楼盖在两个阶段分别展现出不同的受力特点。

在小变形下,钢筋混凝土框架结构主要通过梁的受弯承载力抵抗结构倒塌,其中与梁相连的一部分楼板充当梁的翼缘参与弯曲受力。这样,楼板对梁的抗倒塌性能产生以下两个方面的影响:1)楼板提高了梁的抗弯承载力,从而增强了结构的连续倒塌抗力,其中楼板增加了负弯矩区梁端的受拉钢筋,增加了正弯矩区梁端的受压混凝土和钢筋;2)楼板改变了小变形下梁的变形能力,其中负弯矩区楼板钢筋大幅提高受拉钢筋数量使梁截面趋向于超筋破坏,该梁截面的延性降低,而正弯矩区楼板钢筋提高了受压钢筋数量使得梁的截面延性提高。当梁和楼板四周具有可靠约束时,楼盖系统还能通过梁内的压拱机制和楼板内的受压薄膜效应抵抗倒塌,此时楼板的影响更加复杂。

在大变形下,钢筋混凝土框架梁发挥悬链线机制,通过轴向拉力提供连续倒塌抗力。楼板则通过板内钢筋的受拉薄膜效应,在两个方向提供拉力贡献,使得倒塌不平衡荷载传递到周边的剩余结构上。

1.2 传统建模方法

钢筋混凝土楼板的有限元模拟一般采用以下两种单元建模:实体单元和分层壳单元。在实体单元建模中,通常对混凝土采用实体单元模拟,钢筋采用杆单元模拟。虽然实体单元建模能较真实的反映实际受力,但是倒塌过程中破坏和非线性发展集

中, 准确模拟需要采用较为精细的单元网格划分, 导致计算量的显著增大和潜在的数值奇异问题, 因此多用于单个构件的数值模拟。

采用分层壳单元建模时, 分层壳模型将混凝土沿厚度方向划分为若干层, 同时将钢筋网弥散为钢筋层插入到混凝土层中以考虑钢筋和混凝土的组合作用。在整体结构中钢筋混凝土梁柱一般采用弹塑性梁单元模拟, 考虑到楼板和框架梁采用整体现浇的方式共同工作, 建模时需将分层壳单元和纤维梁单元采用共结点的方式进行耦合。因此, 分层壳单元模拟楼板的建模虽然相对简单, 但由于楼板的分层壳单元必须和框架梁的纤维梁单元划分一致, 导致网格划分不能太密。而分层壳单元必须在两个方向上满足形函数的连续性要求(有时是高次函数), 较大的网格划分可能导致单元直接跨越局部集中的大变形, 导致数值计算高估了楼板的刚度和承载力贡献。

1.3 建议的建模方法

为了较为准确高效的模拟钢筋混凝土楼板在连续倒塌过程中大小两个变形阶段的受力行为。根据 1.1 节分析的楼板倒塌受力特点, 本文提出如下模型来模拟钢筋混凝土楼板的连续倒塌受力(如图 1 所示): 1) 首先沿平面的两个方向(即受力钢筋的方向)将楼板离散为一个梁网, 单元划分的网格根据框架梁模拟所需的单元数量确定; 2) 采用纤维梁模型模拟梁网上每个网络线, 根据网络线的位置, 分别采用矩形(楼板中心)、T 形(结构内部楼板)和 L 形截面(结构边缘楼板)的纤维梁, 其中楼板翼缘宽度按照现行混凝土规范^[8]确定, 板内和梁内钢筋位置和面积按照实际布置确定。

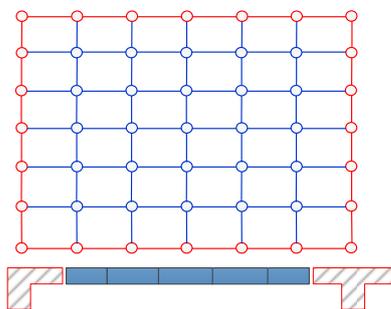


图 1 楼板简化模型

Fig.1 Simplified slab model

在这种建模方法中, 楼板在小变形下对框架梁的承载力和变形的影响通过有效宽度的翼缘板来考虑, 在大变形下的受拉薄膜效应通过内部离散的双向梁网来考虑。需要指出的是, 在小变形下的梁

内压拱效应也能充分考虑, 但是楼板内二维作用的压拱效应被分解为两个单向的压拱作用, 会产生一定的误差。既有研究中, 当纤维梁单元的网格选取合适的时候, 能够用较少的单元准确高效的模拟梁的连续倒塌行为, 因为该方法中整个楼板所用单元数量有限, 计算效率较高。

1.4 纤维模型介绍

本文楼板模拟采用清华大学开发的纤维梁 THUFIBER 程序, 该模型是在通用有限元软件 MSC.MARC 的基础上进行二次开发, 适用于钢筋混凝土杆系结构。大量算例验证表明该平台可以满足连续倒塌分析中大变形的需要^[6]。本文在上述程序中进一步增加翼缘混凝土和钢筋的纤维, 并修正刚度和截面内力的积分规则, 来考虑梁板节点处 T 形或 L 形截面的受力。

2 试验验证

2.1 T/L 形截面纤维梁程序验证

2.1.1 轴心受压柱验证

为了验证 T/L 形截面纤维梁程序的准确性和计算效率, 本文选取了天津大学钢筋混凝土异形柱轴心受压性能试验^[9]中的两根试件柱进行了模拟。“T”形、“L”形试件柱的尺寸及配筋如图 2 所示, 纵筋均采用 12 根、直径为 12 mm 的 HPB235 级钢筋, 箍筋均采用直径为 4 mm, 间距为 84 mm 的 8# 铁丝(因试件的配箍率较小, 本文模拟中不考虑箍筋的作用), 混凝土设计强度为 C25, 试件的尺寸和配筋见图 2, 混凝土和钢筋材料的力学性能见表 1 和表 2。

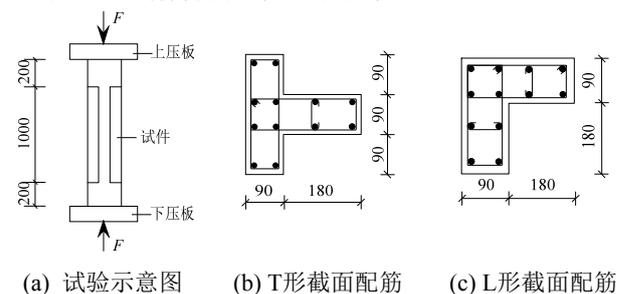


图 2 轴压柱尺寸及配筋 /mm

Fig.2 Dimensions and reinforcement of columns subjected to axial compression

表 1 混凝土材性参数

Table 1 Tested concrete properties

| 试件 编号 | 极限抗压强度 f_{cu}/MPa | 立方体抗压强度 f_c/MPa | 弹性模量 E_c/MPa |
|----------|-------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| ZL | 50.45 | 43 | 34618.82 |
| ZT | 57.48 | 46.67 | 35658.45 |

表2 钢筋材性参数

Table 2 Tested steel properties

| 钢筋种类 | 直径/mm | 屈服强度 f_y /MPa | 极限强度 f_u /MPa | 弹性模量 $E_s/(\times 10^5 \text{ MPa})$ |
|--------|-------|-----------------|-----------------|--------------------------------------|
| 8#铁丝 | 4 | 399.5 | 446.4 | 2.28 |
| HPB235 | 12 | 303.7 | 436.1 | 2.29 |

采用T/L形截面纤维梁模型分别对T形柱和L形柱进行模拟,得到轴心受压时荷载-变形曲线,如图3和图4所示。对比两图的试验和模拟曲线可知,在上升段,T形柱和L形柱的模拟值均与试验值吻合良好。在峰值附近模拟值出现偏差,T形柱和L形柱的模拟峰值均略低于试验值,这可能是由于在建模时没有考虑试件柱的箍筋约束作用导致。下降段中,模拟值与试验值有一定差距,但总体发展趋势和试验结果一致。

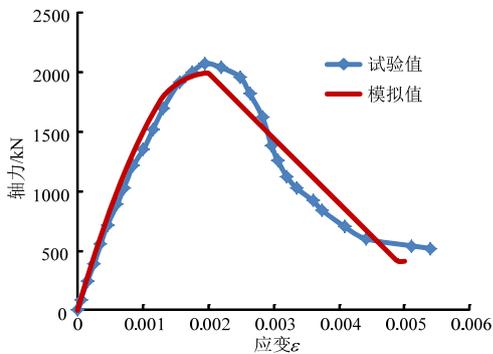


图3 轴压T形柱的试验值与模拟值对比
Fig.3 Comparison of simulation and test values of T-shaped column

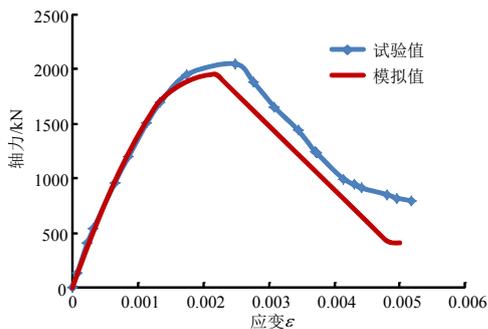


图4 轴压L形柱的试验值与模拟值对比
Fig.4 Comparison of simulation and test values of L-shaped column

2.1.2 偏心受压柱验证

偏心受压的验证选取新泽西技术学院RC异形柱偏压试验^[10]中的#3L柱试件。试件的混凝土实测圆柱体抗压强度为29.0 MPa,偏心受压柱的主筋采用#3热轧钢筋($d=9.52 \text{ mm}$, $A=71.18 \text{ mm}^2$),箍筋采用#1热轧钢筋($d=3.17 \text{ mm}$, $A=7.91 \text{ mm}^2$),加载偏心

距 $e_x=42.67 \text{ mm}$, $e_y=139.7 \text{ mm}$,如图5(a)所示。实测钢筋的力学性能见表3,加载及配筋情况见图5(a)和图5(b)。

表3 钢筋基本力学性能

Table 3 Mechanical properties of reinforcement

| 钢筋种类 | 直径/mm | 屈服强度 f_y /MPa | 弹性模量 E_s /MPa |
|------|-------|-----------------|--------------------|
| #3 | 9.52 | 462 | 2.41×10^5 |

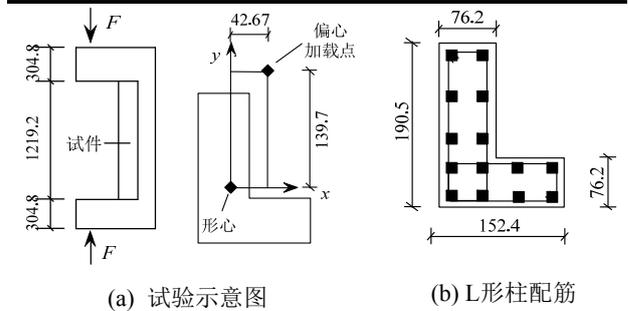


图5 偏压L柱尺寸及配筋 /mm

Fig.5 Dimension and reinforcement of columns subjected to eccentric compression

利用T/L形截面纤维梁模拟偏心受压柱,得到荷载-变形曲线,如图6所示。因为模型中没有考虑实际试件初始偏心及箍筋的影响,导致模拟值的轴力在达到200 kN之前一直低于试验值。当y向跨中挠度较大时,钢筋逐渐屈服,曲线走势趋于平缓,最终模拟值要稍高于试验值。

总的来说,利用T/L形截面纤维梁模拟的试件柱力学计算结果与试验结果拟合较好,计算验证表明:T/L形截面纤维梁模型能够比较高效准确的模拟T/L形截面钢筋混凝土构件。

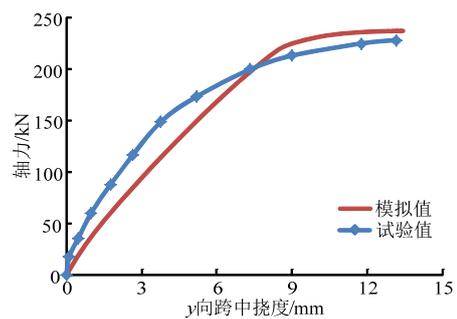


图6 大偏压L形柱试验值与模拟值对比
Fig.6 Comparison of simulation and test values of large eccentric L-shaped column

2.2 纤维梁楼板验证

为了验证用矩形纤维梁来模拟钢筋混凝土楼板是否能达到抗连续倒塌研究中大变形的需求,本节分别对单向板和双向板进行火灾下和常温下受力变形的验证。

2.2.1 底面受火筒支单向板

单向板的验证选取了西安建筑科技大学钢筋混凝土单向板抗火试验^[11]，本文选取B-3构件作为模型验证算例，如图7所示。试验中，试件两边被简支，板被置于封闭燃油炉上使板的底部受火的，试验方案采用先施加均布荷载然后升温的方式进行。

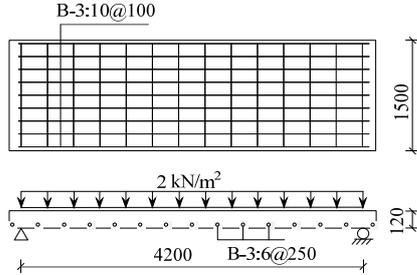


图 7 单向板抗火试验方案

Fig.7 Fire resistance test plan of one-way slab

楼板采用矩形纤维梁来模拟，在楼板两个方向上使用了6×6个纤维梁单元来模拟连续的钢筋混凝土板，形成一个纤维梁网。模拟与试验的拟合情况如图8所示，由图可知模拟值跨中挠度随温度升高的走势与试验值大体一致。在温度达到570℃之前，模拟值的跨中挠度要稍大于试验值，当温度超过570℃，试验值的跨中挠度随温度的增长比模拟值的要快。出现这种现象的原因可能是实际火场温度与标准升温曲线温度有差距。

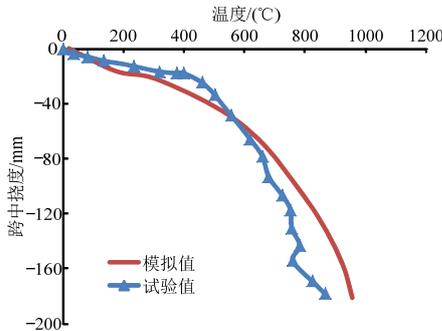


图 8 单向板试验值与模拟值对比

Fig.8 Comparison of simulation value and test value of one-way slab test

2.2.2 底面受火筒支双向板

双向板验证选取了 Canterbury 大学钢筋混凝土双向板抗火性能试验^[12]，本文选取其中两个构件(HD12和D147)作为模型验证算例，如图9所示，两个试件尺寸和外加荷载完全相同，只是配筋率不同。试验中，试件四边被简支，板被置于封闭燃油炉上使板的底部受火的，试验方案采用先施加均布荷载然后升温的方式进行。

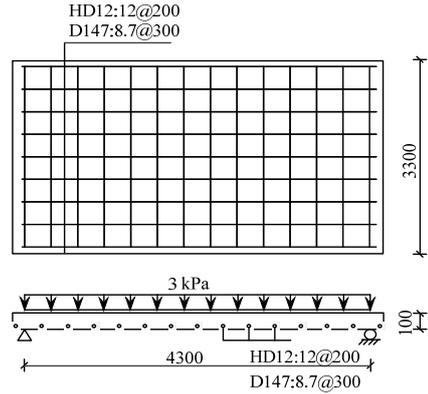


图 9 双向板抗火试验方案

Fig.9 Fire resistance test plan of two-way slab

模型的边界条件及变形云图如图10所示。由图11可知，模拟和试验的变形曲线趋势一致，在16 min和39 min之前，HD12和D147的模拟值与试验值基本完全重合，之后模拟值跨中挠度随时间增长的速度比试验值慢，这是因为实际试验中当试件发生大变形时板的角部及四周会发生翘曲，模型中虽然释放了角部单元的边界条件，但是边部单元的竖向支撑无法释放，板的约束得到增强，跨中挠度增长速度减慢。另外，由于实际受火温度稍低于标准升温曲线温度值，导致两个构件模拟时的破坏均比实际破坏要早。

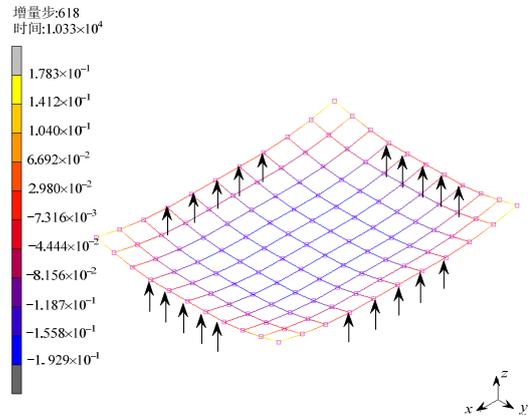
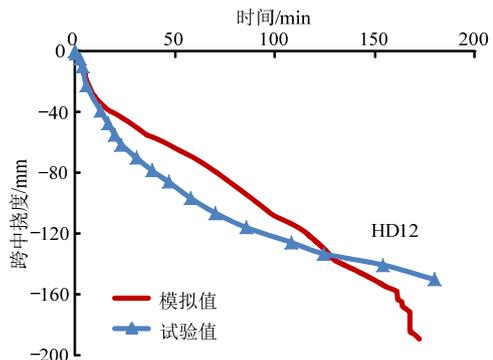


图10 HD12模型的变形云图

Fig.10 Deformation contour plot of HD12 model



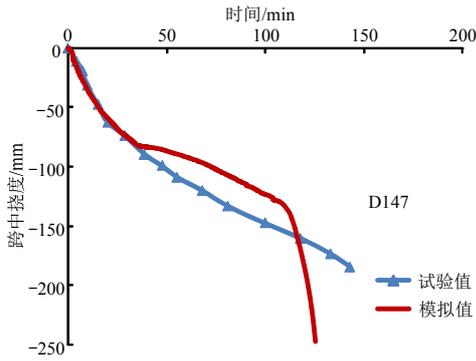


图11 双向板试验值与模拟值对比

Fig.11 Comparison of simulation and test values of two-way slab test

2.2.3 梁-板子结构的连续倒塌试验验证

常温下楼板简化方法的验证选取了烟台大学的钢筋混凝土单向梁板子结构连续倒塌试验^[2]。本文选取S4构件(平面图及配筋图如图12和图13所示)作为模型验证算例。试件加载方式采用位移加载,单向板采用短边固支,长边自由的约束条件。S4试件的混凝土标准立方体抗压强度均值为42 MPa,截面尺寸和配筋信息见表4,钢筋材性参数见表5。

单向板的模拟值与试验值对比曲线如图14所示。模拟值中的反力值随竖向位移的增加趋势与试验值中的一致,但是由于试验中板中钢筋的实际直径比给出值大导致整个过程中模拟值一直小于试验值。而且由于试验板较薄(50 mm),实际板的保护层厚度及钢筋的位置都会对板的受力产生影响,导致模拟值与试验值存在一定的偏差。

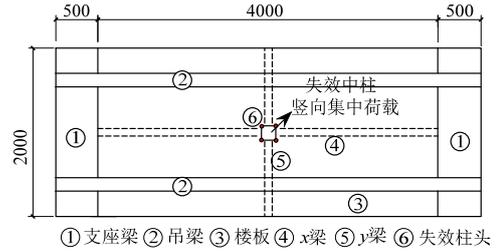


图12 S4平面图

Fig.12 Plan of S4 slab

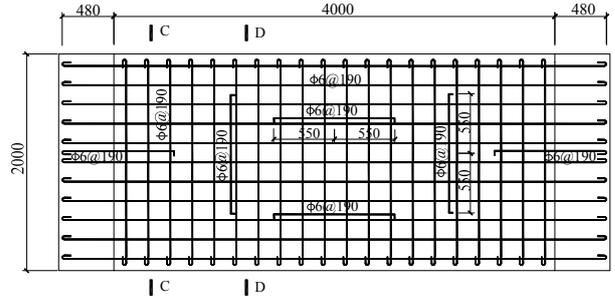


图13 S4配筋图

Fig.13 Reinforcement plan of S4 slab

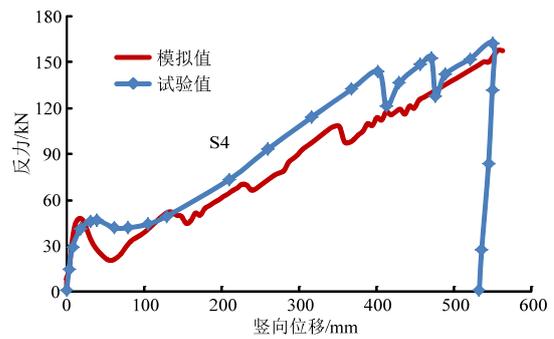


图14 S4的试验值与模拟值对比

Fig.14 Comparison of simulation value and test value of S4 slab test

表4 试件截面尺寸和配筋

Table 4 Sectional dimensions and reinforcement of specimens

| 试件 | 梁高 h | 梁宽 b | 板厚 | 板宽 | 梁顶 | | 梁底 | 楼板底部 | | 楼板顶部 | |
|----|--------|--------|----|------|---------|------|------|--------|--------|--------|--------|
| | | | | | 两端/中间节点 | 跨中 | | 纵向 | 横向 | 纵向 | 横向 |
| S4 | 170 | 85 | 50 | 2000 | 3Φ10 | 2Φ10 | 2Φ10 | Φ6@190 | Φ6@190 | Φ6@190 | Φ6@190 |

表5 钢筋材性参数

Table 5 Tested steel properties

| 试件编号 | 钢筋种类 | 屈服应力/MPa | 极限应力/MPa | 弹性模量/ ($\times 10^5$ N/mm ²) | 伸长率(5d)/(%) |
|------|------|----------|----------|--|-------------|
| S4 | Φ6 | 270 | 405 | 2.09 | 41.1 |
| | Φ10 | 370 | 560 | 2.21 | 31.3 |

3 结论

本文提出了一种新的钢筋混凝土楼板模拟方法,采用T/L形和矩形截面纤维梁分别对梁和板进

行模拟,并在构件层次对该方法进行了验证,结果表明,该方法能够准确反映构件的受力和变形情况。将T/L形截面的梁和矩形截面的楼板用共结点的方式耦合在一起,可用于整体结构抗连续倒塌分析的建模,完全采用纤维梁对整体结构建模可大大提高计算效率,本方法在整体结构中的应用有待进一步验证。

参考文献:

[1] 梁益,陆新征,李易,叶列平,江见鲸. 楼板对结构抗

- 连续倒塌能力的影响[J]. 四川建筑科学研究, 2010, 63(2): 5—10.
- Liang Yi, Lu Xinzheng, Li Yi, Ye Lieping, Jiang Jianjing. Influence of slabs on the progressive collapse behavior of structures [J]. Sichuan Building Science, 2010, 63(2): 5—10. (in Chinese)
- [2] 周育泷. 钢筋混凝土单向梁板子结构抗连续倒塌试验研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2015.
- Zhou Yulong. An experimental study on the one-way reinforced concrete beam-slab substructures to resist progressive collapse [D]. Yantai: Yantai University, 2015. (in Chinese)
- [3] Qian Kai, Li Bing. Slab effects on response of reinforced concrete substructures after loss of corner column [J]. ACI Structural Journal, 2012, 109(6): 845—856.
- [4] Gillie M. Investigation of membrane flexure interaction in the Cardington slab at elevated temperatures [R]. Edinburg: PIT Project Research Report SS3, University of Edinburg, 2000.
- [5] Alashker Y, El-Tawil S, Sadek F. Progressive collapse resistance of steel-concrete composite floors [J]. Journal of Structural Engineering, 2010, 136(10): 1187—1196.
- [6] 李易. RC 框架结构抗连续倒塌设计方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.
- Li Yi. Study on design method for RC frame structures to resist progressive collapse [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011. (in Chinese)
- [7] 梁益, 陆新征, 李易, 叶列平. 国外 RC 框架楼板抗连续倒塌设计方法的检验与分析[J]. 建筑结构, 2010, 40(2): 8—12.
- Liang Yi, Lu Xinzheng, Li Yi, Ye Lieping. Verification and analysis on foreign progressive-collapse-resistance design methods of RC frame structure [J]. Building Structure, 2010, 40(2): 8—12.
- [8] GB50010-2010, 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- GB50010-2010, Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [9] 孙林柱. 钢筋混凝土异形柱轴心受压性能的试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2006.
- Sun Linzhu. Experimental research of RC special-shaped columns under axial force [D]. Tianjin: Tianjin University, 2006. (in Chinese)
- [10] Shah A. Behavior of L-shaped reinforced concrete columns under combined biaxial bending and compression [D]. New Jersey: New Jersey Institute of Technology, 1984.
- [11] 陈礼刚. 钢筋混凝土板受火性能的试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2004.
- Chen Ligang. The experimental research of reinforced concrete slab [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2004. (in Chinese)
- [12] Lim L, Wade C. Experimental fire tests of two-way concrete slabs [R]. New Zealand: Fire Engineering Research Report 02/12, University of Canterbury, 2002.