

玻璃纤维加固梁柱结构抗连续倒塌性能数值分析

秦卫红¹, 冯 鹏², 施凯捷¹, 苏 洋¹

(1. 东南大学 混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 南京 210096; 2. 清华大学 土木工程系, 北京 100084)

摘要: 根据已有试验结果, 采用有限元程序软件 MSC. Marc, 对不同钢筋构造形式和采用玻璃纤维增强材料(GFRP)加固的钢筋混凝土梁柱结构进行了数值分析, 研究了其抗连续倒塌性能. 分析结果与试验结果吻合较好, 表明此分析方法对于加固混凝土梁柱结构抗连续倒塌问题的研究是实用有效的. 同时, 通过该研究结果, 证明了采用 GFRP 加固可以提高框架结构的抗连续倒塌性能.

关键词: 玻璃纤维加固; 梁柱结构; 连续倒塌; 数值分析

中图分类号: TU375.1

文献标志码: A

Numerical Analysis of Progressive Collapse Behavior of Glass Fiber Reinforced Polymer Strengthened Beam-column Structures

QIN Weihong¹, FENG Peng², SHI Kaijie¹, SU Yang¹

(1. Key Laboratory of C & PC Structures of the Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on the experimental results of the progressive collapse behavior of beam-column structures, which had different structural details or were strengthened with different measures by glass fiber reinforced polymer (GFRP) sheets, numerical analysis on the progressive collapse behavior of reinforced concrete beam-column structures was implemented by using commercial finite element software MSC. Marc. The calculated results agree well with the test ones, and the simulation method is proved to be effective and practical. This paper illustrates that the progressive collapse resistance of the reinforced concrete structures can be enhanced by the GFRP sheet strengthening.

Key words: glass fiber reinforced polymer sheet; beam-column structure; progressive collapse; numerical analysis

局部发生破坏并引发连锁反应导致破坏向结构的其余部位扩散, 最终导致整体结构发生与初始不成比例的坍塌破坏. 近年来, 造成重大的人员伤亡和财产损失的建筑结构倒塌事故^[1-3]表明, 大部分伤亡不是初始爆炸或冲击直接造成, 而是由于建筑结构发生连续倒塌来不及逃生引起. 因此, 控制建筑结构连续倒塌破坏是当前研究的热点问题.

国内外规范对抗连续倒塌的规定可以划分为事件控制法、间接设计法与直接设计法三大类. 其中, 直接设计法包括拆除构件设计和关键构件设计. 拆除构件法是分析在拆除某些主要竖向构件后, 剩余结构承受重分布内力能力的抗连续倒塌设计方法. 采用拆除构件法对整体结构进行连续倒塌试验研究成本和难度较大, 故已有为数不多的框架结构连续倒塌试验大多针对梁柱子结构进行, 从研究子结构的抗连续倒塌性能来进一步分析整体结构.

如果能够保证该子结构在柱失效的情况下能承担因原有传力路径中断引起的不平衡荷载, 重新形成新的传力途径, 将能减少钢筋混凝土框架结构发生连续倒塌的风险. 因此, 可通过对框架中的梁柱结构进行加固, 增加其强度、连续性和延性来达到防止建筑发生连续倒塌的目的.

纤维增强复合材料(fiber reinforced polymer, FRP)在加固抗连续倒塌方面具有很好的应用前景. 德克萨斯大学的 Orton 等^[4]运用碳纤维复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)对钢筋混凝土梁柱结构进行加固, 通过试验验证了 CFRP 对梁柱结构抗连续倒塌性能的提升效果. 国内也有不少学者通过试验验证了通过 FRP 加固梁柱结构可减少由于爆炸恐怖活动造成的建筑物连续倒塌的危险性^[5]. 玻璃纤维材料(GFRP)的强度高且极限变形较大, 满足抗连续倒塌性能对材料较高延伸率的要求, 故文献^[6]采用 GFRP 布对梁柱子结构进行加

连续倒塌破坏, 是指在偶然荷载作用下, 结构的

固,并对其进行了抗连续倒塌试验研究. 本文在此基础上对其进行数值分析,并对其提出改进措施.

在倒塌过程中结构处于大位移、大变形和强非线性阶段,对其进行的数值分析需要考虑上述特点. 常用的分析软件有 ANSYS、ABAQUS、ADINA 和 MSC. Marc 等.

文献[7-9]等采用 MSC. Marc 分析了抗震设计和楼板对钢筋混凝土框架结构抗连续倒塌性能的影响;采用体接触算法和非线性(生死)单元方法,实现了砌体结构在罕遇地震下的倒塌全过程分析;利用生死单元技术,通过对典型石拱桥连续倒塌事故的仿真分析,再现了石拱桥的倒塌过程. 上述研究表明,有限元软件 MSC. Marc 有着强大的非线性分析功能,可以很好地用于分析结构的抗连续倒塌性能.

本文将采用有限元分析软件 MSC. Marc^[10],引入合理的材料本构关系,对已进行试验的钢筋混凝土梁柱子结构及加固试件进行数值分析,研究 GFRP 布对其抗连续倒塌性能的加固效果.

1 分析模型概况

研究对象为在清华大学结构试验室进行的框架梁柱子结构抗连续倒塌试验^[6],其结构立面如图 1a. 试件总长 4 000 mm,梁净跨 1 650 mm. 各试件梁与柱的纵筋配置相同(图 1b~1d),采用 HRB400 钢筋,箍筋为 HPB235,加固材料采用 GFRP 布,混凝土采用 C30. 材料性能实测值见表 1. 为防止梁在实验中出现剪切破坏,受剪区配置了足够的箍筋. 梁端采用刚性约束,可有效限制水平、竖向位移和转动位移.

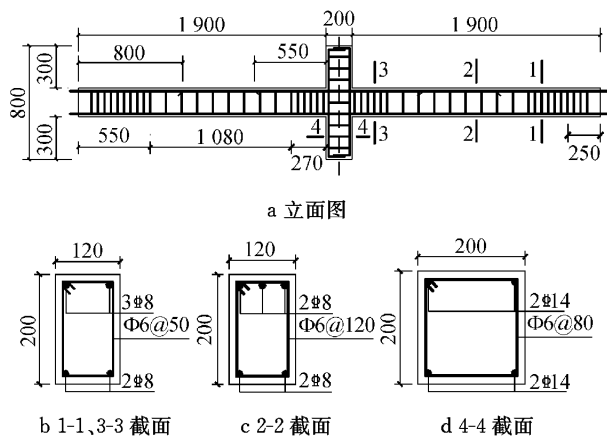


图 1 试件立面图(单位:mm)

Fig.1 Figure of the test specimens (unit: mm)

试件 UL1 为按照规范设计的典型梁柱子结构,

梁底部钢筋在中间节点区贯通,且通长拉直.

表 1 各种材料的性能指标

Tab.1 Material properties

材料	弹性模量/GPa	钢筋屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%
HPB235	206	308	438	24
HRB400	206	480	640	19
GFRP	86.2		1623	2.1

试件 UB2 的梁底部钢筋在节点区贯通,在每跨梁的两个反弯点处(即固支梁在满跨均布荷载下弯矩图的两个反弯点截面)底部钢筋弯折成直径为 40 mm 的 1/2 圆^[6],以增加该截面钢筋的变形能力,提高构件的延性.

试件 RL5 的梁底部钢筋在中间节点区锚固,符合规范的有关规定. 其加固方式(图 2)为:第一层在梁的底面和顶面沿纵向粘贴 GFRP 布,并弯折延伸粘贴在柱侧表面;第二层为仅在梁顶部和底部粘贴而不延伸到柱子的侧面. 为防止 GFRP 布与混凝土发生界面剥离,再粘贴 GFRP 环形箍. 纵向 GFRP 布每层计算厚度为 0.169 mm,宽度为 100 mm, GFRP 环形箍宽度为 50 mm.

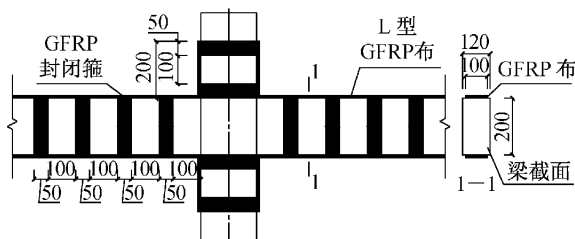


图 2 试件 RL5 加固图(单位:mm)

Fig.2 Strengthening figure of RL5 (unit: mm)

2 数值分析模型的建立

运用数值分析软件 MSC. Marc 进行研究. 建模时,采用分离式钢筋混凝土有限元模型^[11],即按照混凝土与钢筋各自力学性能,分别对混凝土与钢筋选择不同的单元形式. 钢筋通过嵌入的方式组合到混凝土中,并假定钢筋与混凝土之间完全粘结,不产生相对滑移. 同时,为保证计算精度,将单元划分得足够小.

2.1 材料的本构关系

混凝土采用全积分的 8 节点六面体应力分析单元,混凝土单轴受压应力-应变关系采用 Hongnestad 表达式^[12],其骨架线分为两段,表达式为:

$$\sigma = \begin{cases} f_c \left[2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 \right], & \varepsilon \leq \varepsilon_0 \\ f_c \left[1 - 0.15 \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon_u - \varepsilon_0} \right)^2 \right], & \varepsilon > \varepsilon_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: f_c 、 σ 分别为混凝土抗压强度和压应力; ε 、 ε_0 分别为混凝土压应变和对应峰值压应力的应变; ε_u 分别为混凝土极限压应变。

开裂采用 Rankine 最大拉应力准则, 取开裂应力 2.3 MPa; 压缩破坏采用最大塑性压应变准则, 取极限应变 0.004; 开裂模型采用弥散裂缝模型, 取软化模量 2 GPa, 剪切残余系数 0.5。

钢筋和箍筋采用杆单元, 屈服准则采用适合金属材料的 Von Mises 准则。由于钢筋对建筑结构的抗连续倒塌性能起着决定性的作用, 在偶然荷载作用下, 混凝土已开裂退出工作, 剩余结构靠钢筋骨架来支撑, 结构处于弹塑性, 钢筋本构不能用简单的理想弹塑性模型。本文采用清华大学汪训流等开发的较为精确的钢筋本构模型^[13-14], 如图 3 所示, 图中, f_y 、 ε_y 分别为钢筋的屈服应力和屈服应变; k_1 为钢筋硬化起点应变与屈服应变的比值; k_2 为钢筋峰值应变与屈服应变的比值; k_3 为钢筋极限应变与屈服应变的比值; k_4 为钢筋峰值应力与屈服应力的比值。对应本文试件, 几个比值分别取为: $k_1 = 2.1$, $k_2 = 16.6$, $k_3 = 33.3$, $k_4 = 1.2$ 。

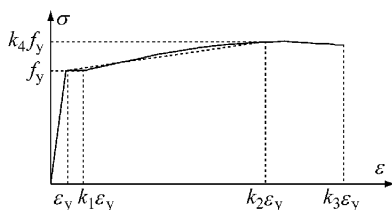


图 3 钢筋单轴拉伸本构关系曲线

Fig.3 Uniaxial tension stress-strain curve of steel bar

碳纤维布采用壳单元模拟, 取为单向线弹性材料, 以 Rankine 最大拉应力准则为破坏准则。由于本文采用的加固方式采用环形箍, 可有效避免节点破坏前 GFRP 布与混凝土之间的剥离, 故不设置 GFRP 布与混凝土的界面弹簧单元, 而采用共用节点的方式使二者在连接处完全耦合。

2.2 模型的建立与数值求解算法

本文采用三维立体模型, 对 UL1、UB2、RL5 三个试验构件进行数值分析, 模拟整个试验倒塌过程。整体模型图及加载方式示意图 4。

实验模拟采用非线性静力 Pushdown 分析方法, 通过在上柱顶部施加逐步增大的竖向荷载, 直至子结构发生倒塌破坏, 得到子结构变形和竖向荷载

之间的关系曲线, 以此研究梁柱子结构的倒塌竖向承载力和竖向荷载下倒塌破坏的机制。

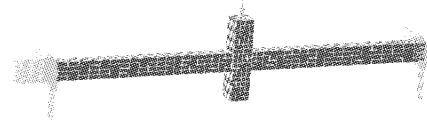


图 4 建立的有限元模型

Fig.4 Finite element model based on Marc

计算分析时以位移控制的方式, 对节点上柱的中心点进行加载, 直至子结构达到极限状态而发生倒塌破坏。采用荷载增量法求解, 分析的收敛容差为: 位移相对残差 5%, 力相对残差 5%。

3 数值分析结果

3.1 试件 UL1 模拟结果

将采用数值计算得到的试件 UL1 各级荷载作用及相应的节点竖向位移提取出来, 并绘制荷载-位移曲线, 与实测的荷载-位移曲线进行对比(图 5)。

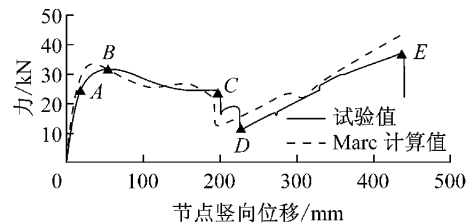


图 5 试件 UL1 荷载-位移曲线试验值与有限元对比

Fig.5 Comparison of the FEM calculation load-deflection curves with the test results of UL1

从图 5 可以看出, 数值计算所得的钢筋混凝土梁柱结构抗连续倒塌的全过程曲线和试验吻合较好。与试验结果相同, 其全过程曲线也可以分为三个阶段——受弯阶段(OA 段)、压拱阶段(AC 段)及悬链线阶段(CE 段), 各阶段受力机制示意图如图 6 所示。

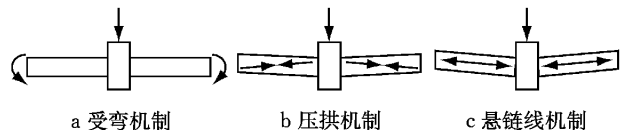


图 6 梁柱结构受弯、压拱及悬链线机制示意图

Fig.6 Mechanism of flexural action, compressive arch action and catenary action of RC beam-column structures

加载初期为受弯阶段, 试件主要通过梁的受弯承载力来提供抗倒塌抗力, 试件的竖向承载力随着位移的增加而逐渐增大。当到达 A 点时, 试件的所有

关键截面的塑性铰都产生,受弯阶段结束。

受弯阶段结束后,由于反力架能够有效限制试件的水平位移,为梁端提供轴向约束,当竖向位移继续增加时,梁中产生轴向压力并逐渐增大,梁进入压拱效应阶段。此时的荷载-位移曲线仍然继续上升。曲线到达 B 点时,承载力达到峰值。之后梁中的裂缝向混凝土受压区发展,能够承受压应力的未开裂混凝土面积减小,梁中的压拱效应逐渐减弱,梁的承载力开始降低,而节点竖向位移仍在增大,荷载-位移曲线进入下降段。

当裂缝发展到受压区,贯穿梁全截面时,梁中开始产生拉力,结构进入悬链线阶段。悬链线阶段结构利用钢筋的抗拉强度来平衡施加的荷载。随着试件变形的增加,梁的抗连续倒塌承载力随梁内钢筋拉应力的增大而增大,曲线又开始往上升。在 CD 段,位移分别达到 200 mm 和 225 mm 时,中间节点处梁底部的两根钢筋应变超过极限拉应变而先后发生断裂,曲线出现两个突然下降段。之后,结构承载力继续上升并超过压拱阶段最高点(B 点)。当位移达到 440 mm 时(E 点),支座梁端顶部两根钢筋突然断裂,试件发生倒塌破坏。

数值计算得到的压拱阶段的峰值承载力、悬链线阶段的极限承载力与试验的对比结果见表 2。表中, P_{cu} 为压拱阶段峰值承载力, P_u 为悬链线阶段极限承载力。表中分析计算结果比试验值大,主要原因是由于试验条件的限制,梁的支座约束不能实现有限元软件中的理想刚性约束。但如表所示误差较小,可以认为所建数值分析模型,能较好预测压拱阶段的峰值承载力与悬链线阶段的极限承载力。

表 2 试件 UL1 承载力数值计算结果与试验值对比

Tab. 2 Comparison of the finite element method calculated bearing capacity with the test results (UL1)

试件 UL1	P_{cu}/kN	P_u/kN
有限元分析	31.6	36.8
计算结果	33.1	42.6
误差/%	4.5	13.6

3.2 试件 RL5 模拟结果

RL5 采用 GFRP 布加固,钢筋混凝土部分与 UL1 相同,其有限元模型如图 7 所示。运用有限元计算得到的荷载-位移曲线与实测曲线对比如图 8 所示。由图中曲线可以看出,通过 GFRP 布加固的试件 RL5 试件同样经历了三个阶段,即受弯阶段、压拱阶段和悬链线阶段。数值计算得到的荷载-位移曲线和试验结果吻合较好,能较好反映 GFRP 布加固钢筋

混凝土梁柱结构抗连续倒塌的全过程。



图 7 GFRP 布有限元模型

Fig. 7 Finite element model of the GFRP sheets

在加载后期,有限元计算的结果高于实测值。这是由于试验时,在悬链线发展过程中,RL5 的节点底部 GFRP 布与混凝土发生剥离,且剥离的长度逐渐变大,剥离破坏延伸至粘贴在柱子上的 GFRP 布,并将下柱 GFRP 环向箍拉断,GFRP 布对分担梁中拉力的贡献减小。而有限元分析时采用共节点的方式使混凝土与 GFRP 布的自由度耦合,不考虑两者的剥离,导致有限元计算的承载力偏高。

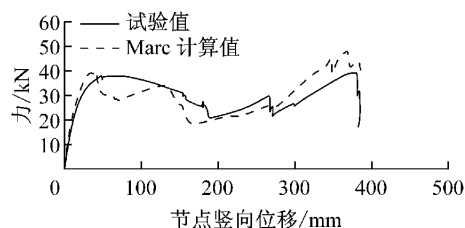


图 8 试件 RL5 荷载-位移曲线试验值与有限元对比
Fig. 8 Comparison of the FEM calculation load-deflection curves with test results of RL5

3.3 试件 UB2 模拟结果

试件 UB2 设置弯折钢筋,若在利用 Marc 建模时直接将底部钢筋以同样的方式进行弯折,发现分析过程很难收敛,故需要采取下述方式来模拟钢筋弯折对构件受力性能的影响。

试验前对一段带弯钩的钢筋(图 9a)进行了拉伸试验,得到带弯钩钢筋段的荷载-位移曲线,将其作为此段钢筋的应力-应变曲线(图 9b)。从图中可以看出,在开始拉伸时,曲线斜率很小,表明带弯钩钢筋的刚度很小;待钢筋完全被拉直后,曲线斜率开始变大;随后钢筋达到屈服强度,并进入强化段,最终被拉断裂。

在建模时,可将带弯钩的钢筋段建成直线段,通过输入如图 9 所示的实测应力-应变曲线来体现钢筋弯折对钢筋受力性能的影响。然而,在试验中发现,节点附近梁底部的弯折钢筋尚未被完全拉直就被拉断,其断裂时所提供的强度还未达到上述应力-应变曲线上的第一个拐点处的应力。故对此试件进行建模,并输入带弯钩的那段钢筋的应力-应变曲线时,只考虑该段钢筋中的应力从原点发展到曲

线上第一个拐点,即应力达到 162 MPa 时断裂。

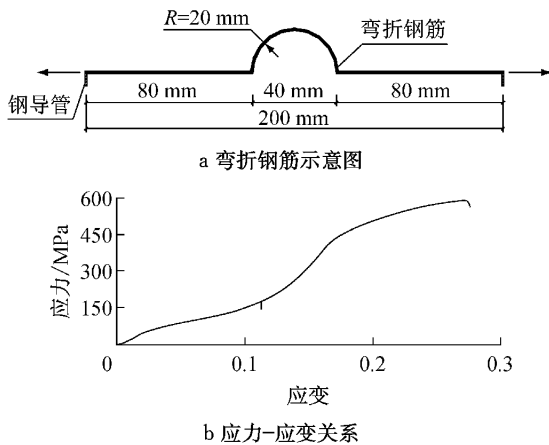


图 9 弯折钢筋应力-应变关系曲线图

Fig.9 Stress-strain curve of the steel bar segment with a hook

计算得到的 UB2 的荷载-位移曲线与实测值对比如图 10 所示。可以看出,数值计算的荷载-位移曲线与试验曲线吻合良好。

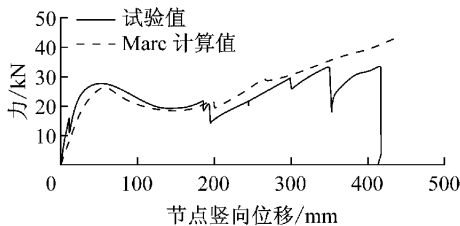


图 10 试件 UB2 荷载-位移曲线试验与有限元对比

Fig.10 Comparison of FEM calculation load-deflection curves with the test results of UB2

相比试件 UL1,试件 UB2 梁底部钢筋带有弯折,梁塑性铰的位置由柱边转移到该截面。两试件的最终破坏状况分别见图 11 和图 12。

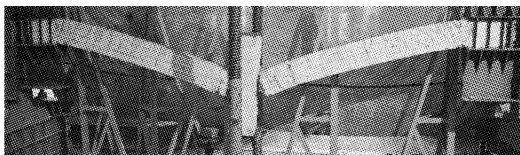


图 11 试件 UL1 最终破坏照片

Fig.11 The final failure photograph of UL1

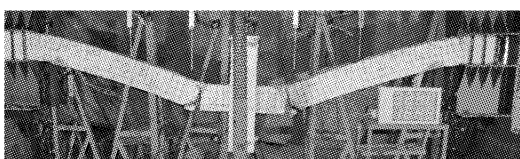


图 12 试件 UB2 最终破坏照片

Fig.12 The final failure photograph of UB2

对比图 5 和图 10 的荷载-位移曲线可以看出,

在受弯阶段后期和压拱阶段,UB2 的承载力虽略小于 UL1,但是 UB2 进入悬链线阶段要早于 UL1,且 UB2 在此阶段的抗倒塌承载力高于 UL1。悬链线效应对结构的连续倒塌起着重要的减缓与抑制作用。

试件 UB2 的这种构造措施不仅改变了试件的塑性铰位置,而且使试件能提前进入悬链线阶段,在悬链线阶段能提供较高的承载力,充分发挥了悬链线效应。

3.4 GFRP 加固试件 UB2 的模拟分析

由于试件 UB2 弯折钢筋截面的抗弯承载力较低,尽管在均布荷载下该截面不承受弯矩,但如果梁上承受集中荷载,该截面的弯矩较大,很容易使梁底混凝土出现裂缝。

故现尝试采用 GFRP 布对 UB2 带弯折钢筋截面进行加固,具体方式为:在弯折钢筋处的梁底纵向粘贴 GFRP 布,并用 GFRP 环形箍缠绕以防止纵向 GFRP 布的剥离,如图 13 所示。

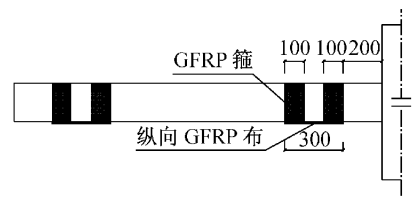


图 13 GFRP 布加固试件 UB2 示意图(单位:mm)

Fig.13 Diagram of UB2 strengthened with GFRP sheets(unit: mm)

将此加固后的试件称为 RB6 试件,纵向 GFRP 布粘贴层数取一层与两层两种情况,进行有限元模拟。考虑弯折钢筋受拉时的不利情况,输入带弯钩那段钢筋的应力-应变曲线时,依然只考虑第一段曲线。

3.4.1 试件 RB6-1(纵向粘贴一层 GFRP 布)

(1) 裂缝发展情况

在加载初期,由于试件变形和挠度较小,GFRP 布发挥的抗拉强度比较有限,在 Marc 软件分析中可以显示出微小裂缝同时出现在梁柱节点处柱边梁端截面和弯折钢筋截面处(图 14a)。随着荷载的增加,试件的挠度越来越大,GFRP 布发挥其抗拉强度的作用越来越明显,弯折钢筋截面梁底混凝土裂缝的发展逐渐减缓,节点处梁截面底部裂缝发展较快,宽度越来越大。同时,支座梁端顶部的混凝土裂缝也开始出现(图 14b)。

节点竖向位移到达 260 mm 左右时,节点附近带弯钩钢筋处的 GFRP 布被拉断,由于弯折钢筋无法承受原先 GFRP 布承受的拉力,弯折钢筋也被拉

断.之后,随着荷载的继续增加,该截面的裂缝发展逐渐加快,节点附近出现两个较宽的主裂缝,支座顶部梁混凝土的裂缝也相对较宽(图14c).

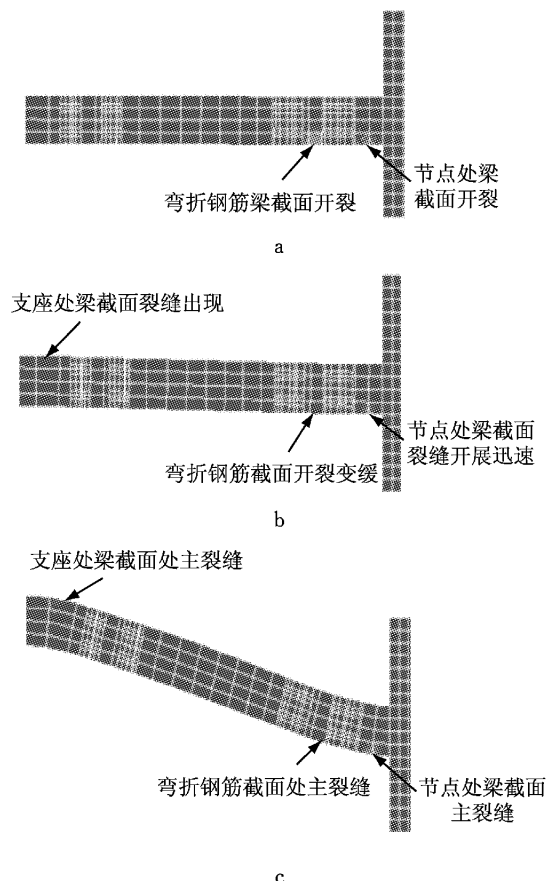


图14 试件RB6-1有限元分析各阶段裂缝图

Fig.14 Figure of crack propagation based on finite element method

(2) 荷载-位移曲线

图15给出了计算所得试件RB6-1与UB2的荷载-位移曲线图.从图中可以看出,在弯折钢筋截面的梁底纵向粘贴一层GFRP布后,试件的抗连续倒塌承载力有了较大的改善.从能量的角度来说,由于单跨梁中产生了三个塑性铰(梁端、节点处、节点附近弯折钢筋截面处),吸收和耗散大量倒塌产生的能量,使试件的承载力和刚度得到了提高,加固后的试

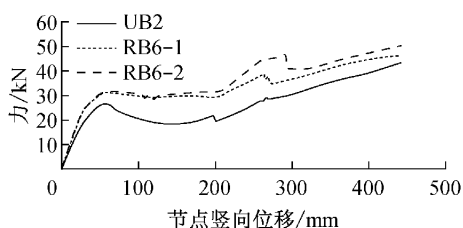


图15 试件RB6-1、RB6-2与UB2的荷载-位移曲线图

Fig.15 The load-deflection relationship of RB6-1, RB6-2 and UB2

件具有良好的抗连续倒塌性能.

3.4.2 试件RB6-2(纵向粘贴两层GFRP布)

(1) 裂缝发展情况

在加载前中期,试件RB6-2(即加固试件RB6纵向粘贴两层GFRP布)的裂缝发展情况同RB6-1一样.加载后期,由于纵向粘贴了两层,GFRP布没有发生断裂,弯折钢筋处截面裂缝由于GFRP布的存在有效得到了控制,梁的裂缝主要在节点处梁混凝土中发展,最终破坏时试件裂缝图如图16所示.

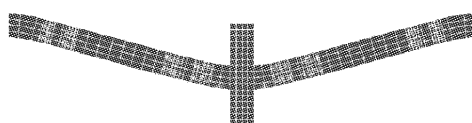


图16 最终破坏时试件裂缝图

Fig.16 Calculated graph of the cracks during failure stage

(2) 两种加固方式荷载-位移曲线对比分析

将试件RB6-2与RB6-1的荷载-位移曲线对比(图15),可以看出,在试验前期,即受弯阶段和压拱阶段,两个加固试件的竖向承载力基本相同.但是,进入悬链线阶段后,随着RB6-1节点附近弯折钢筋处梁底纵向GFRP布的断裂,其竖向承载力逐渐低于RB6-2.试件RB6-2在竖向位移达到300 mm时,节点处梁底部钢筋被拉断,承载力突然下降.

4 结论

(1) 本文采用有限元软件MSC. Marc建模,对GFRP布加固钢筋混凝土梁柱结构的抗连续倒塌性能进行了数值分析研究,计算结果与试验的对比证明两者吻合较好.本文方法可以推广应用于加固RC框架结构抗连续性倒塌性能的数值模拟.

(2) 针对试验中带弯折钢筋构造形式的钢筋混凝土梁在集中荷载下容易出现裂缝的情况,提出了采用GFRP布进行加固的方式.数值分析研究证明,纵向粘贴GFRP布对带弯折钢筋的钢筋混凝土梁柱试件的抗连续倒塌承载力有较明显的提高;纵向粘贴GFRP布的层数不同,其加固试件在悬链线阶段后期的破坏位置和承载力也有显著差异.

参考文献:

- [1] Pearson C, Delatte N. Ronan point apartment tower collapse and its effect on building codes[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2005, 19(2): 172.

- [2] Bazant Z P, Zhou Y. Why did the World Trade Center collapse? —simple analysis [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2002, 128(1): 2.
- [3] 张树传, 谢宜人, 肖伟, 等. 从汶川地震震害谈建筑结构抗连续倒塌设计方法[J]. 福建建筑, 2009(10): 82.
ZHANG Shuchuan, XIE Yiren, XIAO Wei, *et al.* Discuss the design method to resist progressive collapse of building structures base on the earthquake disasters of Wenchuan earthquake [J]. Fujian Architecture & Construction, 2009 (10): 82.
- [4] Orton S, Jirsa J O, Bayrak O. Carbon fiber-reinforced polymer for continuity in existing reinforced concrete buildings vulnerable to collapse[J]. ACI Structural Journal, 2009, 106 (5): 608.
- [5] 鲍育明, 赵艳秋. 碳纤维布加固钢筋混凝土构件抗爆性能研究综述[J]. 建筑科技, 2006, 37(6): 428.
BAO Yuming, ZHAO Yanqiu. Study on blast resistant behavior of reinforced concrete component with CFS[J]. Architecture Technology, 2006, 37(6): 428.
- [6] 冯鹏, 施凯捷, 秦卫红, 等. GFRP 加固 RC 梁柱结构抗连续倒塌试验[J]. 工业建筑, 2013, 43(S1): 64.
FENG Peng, SHI Kaijie, QIN Weihong, *et al.* Experimental study on progressive collapse of GFRP strengthened RC beam-column structures[J]. Industrial Construction, 2013, 43(S1): 64.
- [7] 李易, 陆新征, 叶列平, 等. 基于 Pushdown 分析的 RC 框架抗连续倒塌承载力研究[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2011, 27(1): 10.
LI Yi, LU Xinzhen, YE Lieping, *et al.* Study on progressive-collapse resistance capacity of RC frame structures based on pushdown analysis [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2011, 27(1): 10.
- [8] 陈肇元, 钱稼茹. 建筑与工程结构抗倒塌分析与设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
CHEN Zhaoyuan, QIAN Jiaru. Collapse resistant analysis and design of architectural and engineering structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [9] 卢啸, 陆新征, 张劲泉, 等. 某石拱桥连续倒塌模拟及构件重要性评价[J]. 兰州交通大学学报. 2010, 29(6): 25.
LU Xiao, LU Xinzhen, ZHANG Jinqian, *et al.* Progressive collapse simulation and components importance evaluation of a stone arch bridge[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2010, 29(6): 25.
- [10] 陈火红, 杨剑, 薛小香, 等. 新编 Marc 有限元实例教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
CHEN Huohong, YANG Jian, XUE Xiaoxiang, *et al.* New marc finite element instance tutorial [M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [11] 江见鲸, 陆新征, 叶列平. 混凝土结构有限元分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
JIANG Jianjing, LU Xinzhen, YE Lieping. Finite element analysis of concrete structures [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [12] 梁兴文, 叶艳霞. 混凝土结构非线性分析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
LIANG Xingwen, YE Yanxia. Nonlinear analysis of concrete structures[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.
- [13] 陆新征, 叶列平, 缪志伟. 建筑抗震弹塑性分析——原理、模型与在 ABAQUS, MSC. Marc 和 SAP2000 上的实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
LU Xinzhen, YE Lieping, MIAO Zhiwei. Elasto-plastic ananalysis of buildings against earthquake—theory, model and implementation on ABAQUS, MSC. MARC and SAP2000 [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [14] 汪训流, 陆新征, 叶列平. 往复荷载下钢筋混凝土柱受力性能的数值模拟[J]. 工程力学, 2007, 24(12): 76.
WANG Xunliu, LU Xinzhen, YE Lieping. Numerical simulation for the hysteresis behavior of RC columns under cyclic loads[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(12): 76.