

文章编号:1671-6833(2021)02-0031-06

钢筋混凝土框架抗倒塌性能影响因素分析

陈伟宏¹, 刘方豪¹, 乔泽惠¹, 崔双双²

(1.福州大学 土木工程学院,福建 福州 350108; 2.福建工程学院 土木工程学院,福建 福州 350108)

摘要:为了研究钢筋混凝土(reinforced concrete, RC)框架结构抗倒塌性能的影响因素,首先采用两榀混凝土平面框架抗倒塌试验对 ABAQUS 有限元模型进行验证与校准。然后基于验证后的模型,建立 15 个 3 层 4 跨的混凝土平面框架进行不同层数的中柱失效、梁下部钢筋配筋率和梁上部钢筋配筋率等参数变化的抗倒塌分析。研究结果表明:失效柱所在楼层越低,悬链线效应越难发挥作用;梁下部钢筋配筋率的提高对悬链线效应没有正面影响,当配筋率过高时反而会削弱结构的悬链线效应;梁上部钢筋配筋率的提升可以显著增强结构的悬链线效应。悬链线效应阶段消耗的能量至少占倒塌全过程消耗总能量的 70%,评价结构的鲁棒性时应结合悬链线效应的作用。

关键词: RC 框架结构;连续倒塌;悬链线效应;中柱失效;配筋率

中图分类号: TU375.4

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2021.02.007

0 引言

研究数据表明,近些年,有相当一部分建筑结构的倒塌是由意外事件(爆炸、冲击、地震等)引起的^[1-2],建筑结构的抗倒塌能力需要进一步的关注与明确。在这种情况下,如何增强结构的抗连续性倒塌的能力,提高建筑结构消能的鲁棒性是预防和控制偶然荷载作用引起结构损伤的必然要求^[3]。

为了明确混凝土结构的连续倒塌机理,国内外学者进行了大量的研究。Yu 等^[4]完成了 2 个 1/2 缩尺的中柱失效的钢筋混凝土梁柱子构件连续倒塌试验,结果表明:与传统的屈服强度相比,压拱机制和悬链线作用均可以显著提高结构的抗力。Dat 等^[5]通过梁板结构构件的连续倒塌试验,证明了悬链线作用的持续发展可以提升结构的整体承载能力,但会受到梁底钢筋断裂和梁柱节点受压破坏等部分失效的不利影响。随后, Dat 等^[6]又研究了钢筋混凝土构件在边柱失效时的抗连续倒塌能力,研究中考虑了冗余钢筋的数量、冗余的梁纵向钢筋和板的横纵比的影响。Kang 等^[7]研究得出:预制混凝土框架能够在初始加载阶段出现压拱作用,但是具有较小侧柱的框架在

侧面接合处出现剪切破坏,阻碍了梁中悬链线作用的发展。Hou 等^[8]研究了中柱失效下框架梁的悬链线作用的发展和框架板的薄膜效应,建立了钢筋混凝土框架结构抵抗中柱失效引起的抗连续倒塌的抗力计算模型。易伟建等^[9]设计了一榀中柱失效的 4 跨 3 层的钢筋混凝土平面框架并进行了倒塌全过程试验,分析了 RC 框架结构在倒塌过程中受力机制转换的过程,提出了各受力阶段结构极限承载能力的计算公式。于晓辉等^[10]采用数值分析的方法研究了悬链线效应对 RC 框架结构抗倒塌能力的影响。结果表明:不考虑悬链线效应的影响将低估 RC 框架结构的抗连续倒塌能力。由此可知,悬链线效应对结构抗倒塌能力有显著的影响。

为提高钢筋混凝土结构抗倒塌性能,本文提出一种混凝土结构抗倒塌措施,研究失效柱所在层数、梁底部配筋率和梁上部配筋率等参数变化对结构悬链线的影响规律。

1 ABAQUS 有限元模型的试验验证

1.1 RC 平面框架倒塌机理试验

两榀 1:2 比例的底层中跨 RC 平面框架,其中一榀框架 S1 梁上部纵向受力钢筋在跨中截断,

收稿日期:2020-09-03;修订日期:2020-11-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51508099);福建省交通厅重点项目(201914)

通信作者:崔双双(1983—),女,山西翼城人,福建工程学院副教授,博士,主要从事结构抗震与抗连续倒塌性能研究, E-mail: cshuangshuang@163.com。

另一榀框架 S2 梁上部钢筋不截断。框架 S1 的截面尺寸和配筋情况如图 1 所示。S2 与 S1 仅 2-2 剖面配筋图不同,即 S2 上部钢筋不截断,为 3C8。

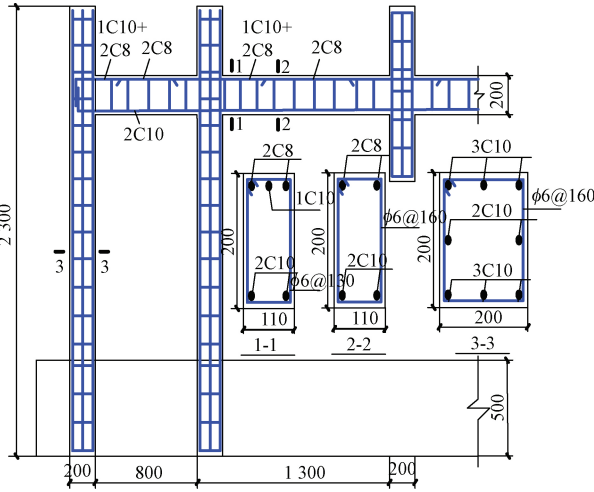


图 1 RC 平面框架 S1 配筋图 (mm)
Figure 1 Reinforcement diagram of RC plane frame S1 (mm)

梁、柱及基础的混凝土强度等级为 C30,梁柱内的纵向受力钢筋为 HRB400 级钢筋,箍筋采用 HPB300 级钢筋。为了更好地模拟实际建筑物与地面之间的刚性连接,下部设计了一个 5.7 m×0.7 m×0.5 m 的基础,用地脚螺栓将基础与试验场地进行连接。混凝土抗压强度实测值为 33.9 MPa。钢筋材料性能如表 1 所示。

表 1 钢筋材料性能

强度等级	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/GPa
HPB300	410	457	216
HRB400	431	584	201

采用 MTS 电液伺服加载系统进行试验,装置如图 2 所示。为了避免试件在加载过程中发生平面外失稳,在梁跨中安装横向约束装置,并将装置与试验场地固定。线性可变差分传感器 (LVDT) 水平安装在 2 个端柱处,用以测量框架加载时的水平位移变化情况。将预先嵌入的钢筋应变片的导线与应变采集箱连接,并设置钢筋应变的采集频率为 5 s/次。

采用准静态加载试验方法,用位移控制加载。加载速率通过与作动器连接的电脑控制。在加载过程中,根据框架所处的 3 个不同阶段,即弹性阶段、压拱阶段和悬链线阶段,进行分级加载。加载速度分别为 1、4、10 mm/min。失效柱一侧混凝土梁上部钢筋被拉断时停止加载。跨中和边支座的破坏模式如图 3 所示。

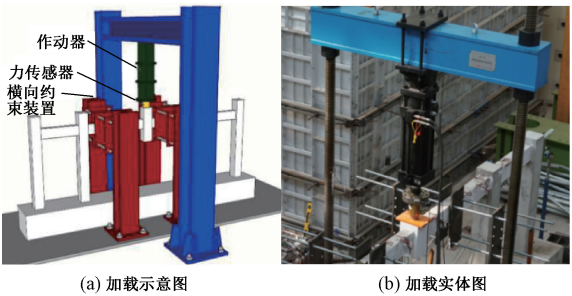


图 2 试件加载
Figure 2 Specimen loading diagrams

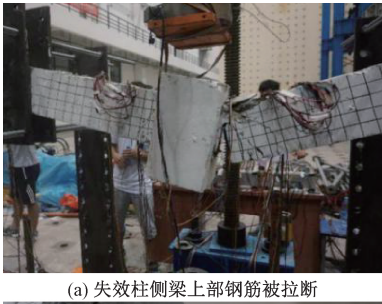


图 3 试件最终破坏图
Figure 3 Specimen at failure

试件 S1、S2 的荷载-位移曲线如图 4 所示。由图 4 可以看出,在整个破坏过程中,结构经历了梁机制阶段以及悬链线效应阶段。试件 S2 由于梁上部钢筋贯通,在悬链线阶段明显展现出了更高的承载能力。图 3 给出了结构最终的倒塌模式。除了失效柱附近的梁区域,两侧对称区域的破坏模式基本相同,裂缝分布基本对称。由于失效柱的上部加载装置缺少转动约束,柱在平面内发生转动,最终会转向梁的一侧,在该侧的梁底部产生巨大的宽裂缝,并且该侧底部的钢筋由于应变过大发生断裂现象。继续加载,最终远离失效柱的梁端上部钢筋被拉断,RC 框架倒塌。

1.2 ABAQUS 有限元模型的验证与校准

采用 ABAQUS/CAE 建立数值分析模型,并采用 ABAQUS/Standard 模块进行分析求解。选用三维实体单元 (C3D8R) 模拟混凝土,桁架单元 (T3D2) 模拟钢筋构件,钢筋与混凝土之间

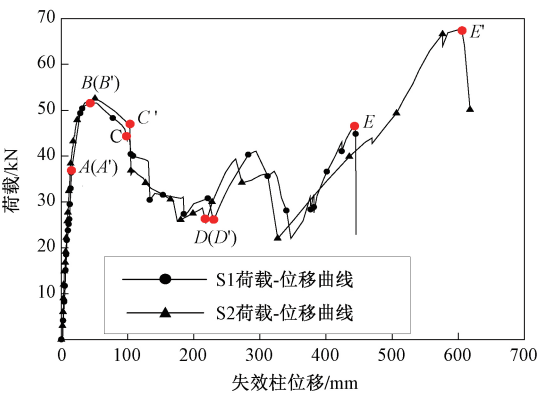


图 4 构件荷载-位移曲线

Figure 4 Load-displacement curves of specimen

的相互作用通过嵌入 (embedded) 约束对框架结构进行模拟。混凝土材料本构模型采用塑性损伤模型 (CDP 模型) [11] 进行建模分析。混凝土的本构关系为:

$$\sigma_k = (1 - D_k) E_c (\varepsilon - \varepsilon_k^{pl}), \quad k = t, c. \quad (1)$$

式中: σ_k 为混凝土应力, N; D_k 为损伤因子; E_c 为混凝土弹性模量, N/mm²; ε 为混凝土应变, mm; ε_k^{pl} 为混凝土塑性应变, mm。

为了描述钢筋在倒塌过程中出现的颈缩和断裂现象,钢筋本构模型采用延性金属损伤模型中的柔性损伤模型,如图 5 所示。该本构模型结合了三折线的弹塑性本构模型和钢筋的刚度退化以及材料损伤,在钢筋的应变达到损伤起点 d 后,钢筋开始产生颈缩现象,强度下降;当钢筋的应变达到极限应变时,钢筋断裂。图 5 中 $abcde'$ 曲线段为钢筋无损伤时的本构关系,钢筋出现损伤后,其强度及刚度的退化通过定义损伤变量 D 来描述,钢筋的应力 σ 与无损伤的应力 $\bar{\sigma}$ 满足 $\sigma = (1 - D)\bar{\sigma}$ 关系,当钢筋的应变达到损伤起点 d 时,损伤变量 D 的值为 0,当钢筋的应变达到断裂点 e 时,损伤变量 D 的值为 1, E 为弹性模量。

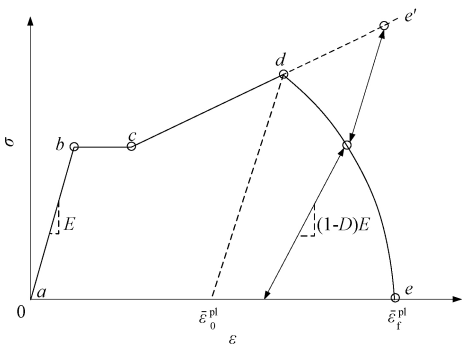


图 5 钢筋损伤本构模型

Figure 5 Reinforcement damage constitutive model

ABAQUS 模拟时,双轴极限抗压强度与单轴

极限抗压强度的比值 f_{b0}/f_{c0} 、偏心率以及拉压子午线上第二应力不变量的比值 K 等参数的详细信息见表 2。

表 2 ABAQUS 混凝土参数设置

Table 2 Concrete parameter settings in ABAQUS				
膨胀角/(°)	偏心率	f_{b0}/f_{c0}	K	黏性系数
30	0.1	1.16	0.666 7	0.000 5

采用有限元方法对试验模型进行数值模拟,以 S1 为例,其荷载-位移曲线如图 6 所示,倒塌破坏时试件应力云图如图 7 所示。由图 6、7 可知,有限元模型能够模拟构件倒塌全过程的损伤破坏特征。

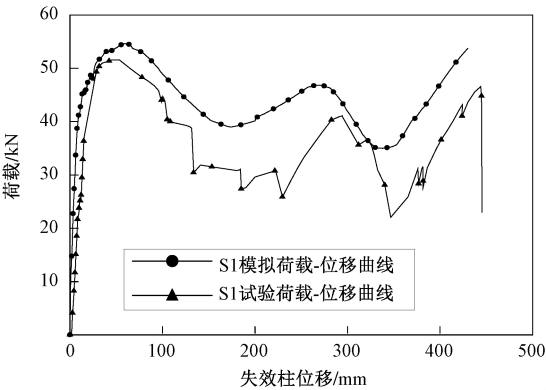


图 6 试件 S1 荷载-位移曲线实测值与模拟值对比
Figure 6 Comparison of measured and simulated data about load displacement curves of specimen S1

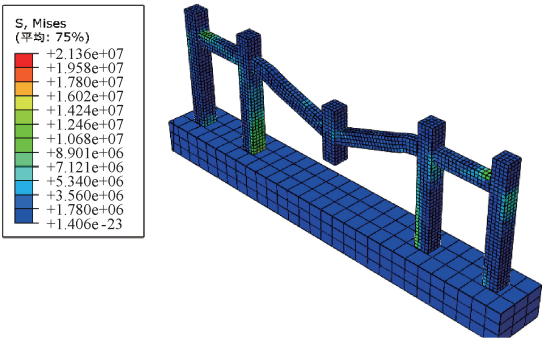


图 7 倒塌破坏时试件 S1 应力云图
Figure 7 Stress cloud maps of specimen S1 when collapsed

为进一步研究框架梁的抗竖向倒塌能力,分别考虑失效柱所在结构层数、梁下部和上部钢筋配筋率 3 个参数变化对荷载-位移曲线的影响。建立了 15 个具有初始损伤的 3 层 4 跨 RC 平面框架结构模型 (模型尺寸与 S1 相同),并分别设置各层的中柱为初始失效柱。之后采用控制变量方法分别在这 3 个框架模型的基础上建立不同的下部和不同的上部钢筋配筋率,参数的详细信息见表 3。材料性能依旧选取试验值。采用对失效

柱的分段位移控制加载。

2 失效柱所在层数对倒塌性能影响

为了研究不同层的中柱失效对悬链线效应的影响,选取梁纵向钢筋的布置形式和配筋率相同的 3 个模型 MY2、ME2、MD2 进行对比分析,其倒塌状态钢筋应力如图 8 所示。其荷载-位移曲线如图 9 所示。图 10 为这 3 个模型各阶段耗能占结构倒塌时总耗能的百分比,能够反映出各阶段的机制对结构抗倒塌能力的贡献率。

从图 8~10 可以看出,随着失效柱所在楼层的增加,弹性阶段和压拱阶段对抗倒塌能力贡献率逐渐降低,悬链线阶段对抗倒塌能力贡献率逐渐增加,但各模型之间的差别并不明显,这意味着不同层中柱失效不会显著影响各作用阶段对结构抗倒塌能力的贡献率。

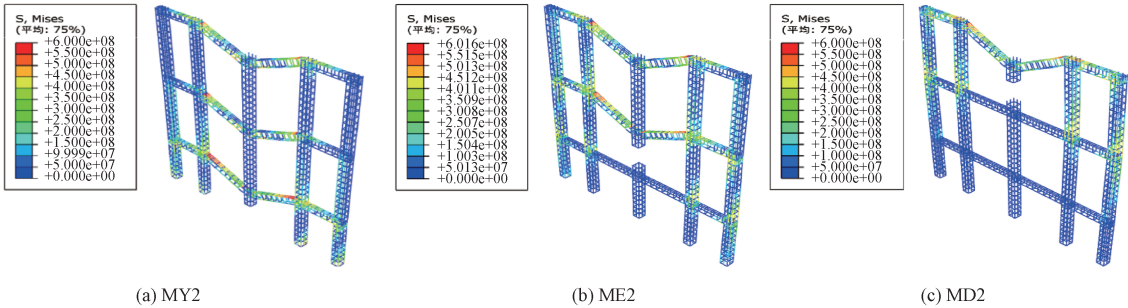


图 8 MY2、ME2、MD2 倒塌状态钢筋应力云图

Figure 8 Reinforced stress cloud maps of MY2,ME2,MD2 when collapsed

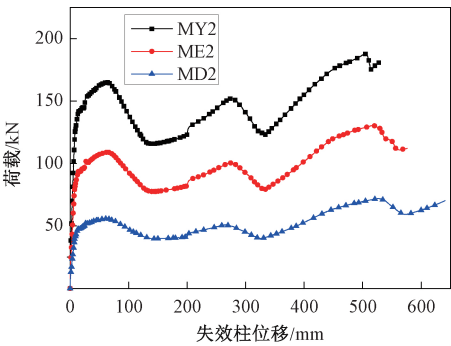


图 9 MY2、ME2、MD2 荷载-位移曲线

Figure 9 Load-displacement curves of MY2,ME2,MD2

悬链线阶段结构的峰值抗力较梁阶段均有明显的提高,但提升率从顶层到底层依次降低,这意味着失效柱所在楼层越低,悬链线阶段越难发挥作用。

3 梁下部配筋率对倒塌性能影响

为了研究梁下部钢筋配筋率对 RC 结构悬链

表 3 钢筋布置

Table 3 Reinforcement arrangement

模型 编号	梁内钢筋		梁配筋率/%	
	上部	下部	上部	下部
MY1	1C10+2C8	2C8	0.87	0.49
MY2	1C10+2C8	2C10	0.87	0.77
MY3	1C10+2C8	2C12	0.87	1.12
MY4	3C8	2C10	0.74	0.77
MY5	3C10	2C10	1.16	0.77
ME1	1C10+2C8	2C8	0.87	0.49
ME2	1C10+2C8	2C10	0.87	0.77
ME3	1C10+2C8	2C12	0.87	1.12
ME4	3C8	2C10	0.74	0.77
ME5	3C10	2C10	1.16	0.77
MD1	1C10+2C8	2C8	0.87	0.49
MD2	1C10+2C8	2C10	0.87	0.77
MD3	1C10+2C8	2C12	0.87	1.12
MD4	3C8	2C10	0.87	0.77
MD5	3C10	2C10	0.74	0.77

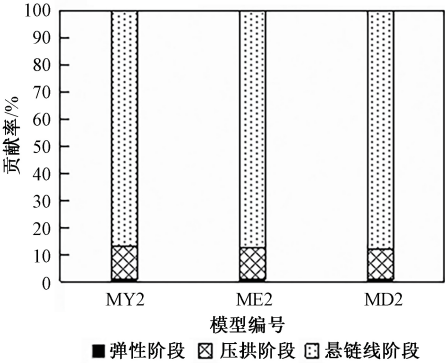


图 10 各作用机制阶段不同模型抗倒塌贡献率

Figure 10 Contribution rate of collapse resistance of each mechanism stage of different models

线效应的影响,选取 3 组不同层失效的模型进行分析,每组模型的梁上部钢筋配筋率与钢筋布置形式完全相同。各组模型的荷载-位移曲线如图 11所示,各作用机制阶段抗倒塌贡献率如图 12 所示。

从图 11~12 可以看出,随着梁下部钢筋配筋率的增加,梁机制阶段(弹性阶段和压拱阶段)对

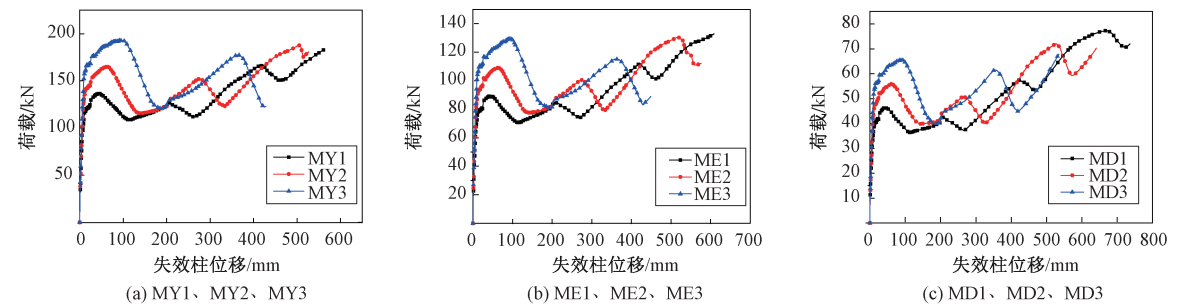


图 11 不同模型荷载-位移曲线

Figure 11 Load-displacement curves of different models

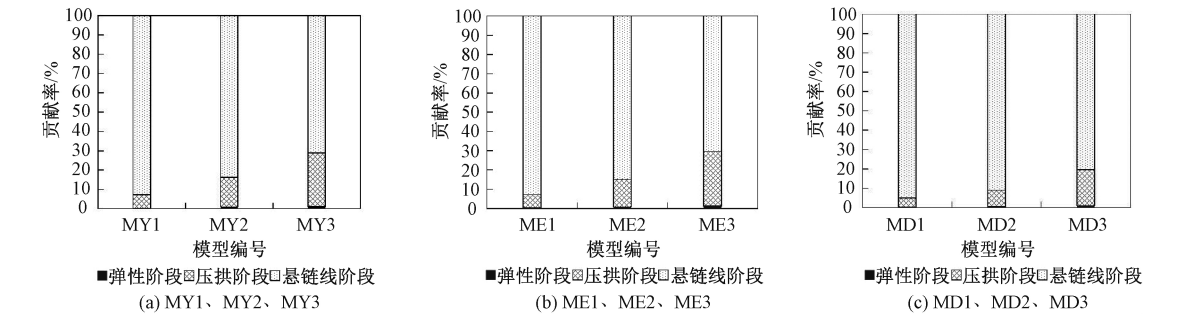


图 12 各作用机制阶段不同模型抗倒塌贡献率

Figure 12 Contribution rate of collapse resistance of each mechanism stage of different models

结构抗倒塌能力的贡献率逐渐增加,悬链线阶段对结构抗倒塌能力的贡献率降低。梁下部钢筋配筋率的提升明显提高了结构梁机制阶段的抗力,但悬链线阶段的抗力却随着梁底部钢筋配筋率的上升而降低。悬链线效应阶段的耗能占比最高,至少达到了结构倒塌时总耗能的 70%。

4 梁上部配筋率对倒塌性能影响

为了研究梁上部钢筋配筋率对 RC 结构悬链线效应的影响,选取 3 组不同层失效的模型进行分析,每组模型的梁下部钢筋配筋率与钢筋布置形式完全相同。各组模型的荷载-位移曲线如图 13 所示,各作用机制阶段抗倒塌贡献率如图 14

所示。

从图 13、14 可以看出:梁上部钢筋配筋率的提升可以同时增加结构梁机制阶段和悬链线机制阶段的抗力,但梁机制阶段抗力提升较小,悬链线机制阶段的抗力有较为明显的提高。

梁机制阶段对结构抗倒塌的贡献率随着梁上部钢筋配筋率的增加而降低,悬链线机制阶段的贡献率随梁上部钢筋的配筋率的增加而提高。

随着梁上部配筋率的提高,悬链线阶段的峰值抗力与梁机制阶段峰值抗力的比值增大,这意味着增加梁上部钢筋的配筋率可以显著提高结构的悬链线效应,对抵抗结构的连续性倒塌有着十分重要的意义。

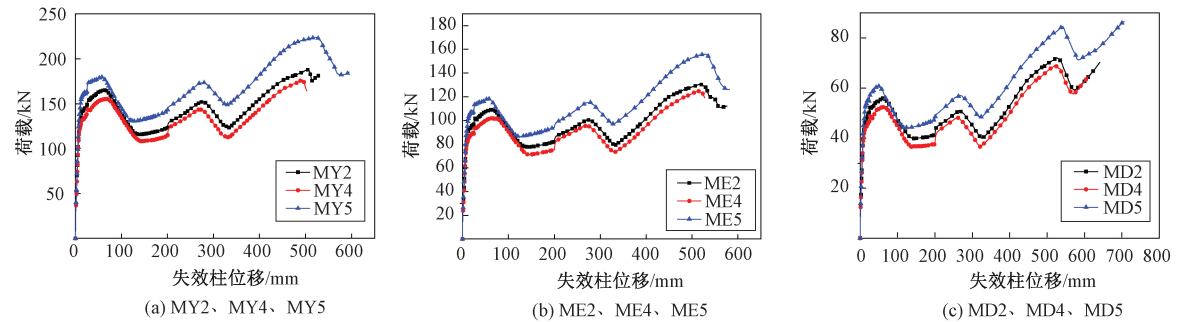


图 13 不同模型荷载-位移曲线

Figure 13 Load-displacement curves of different models

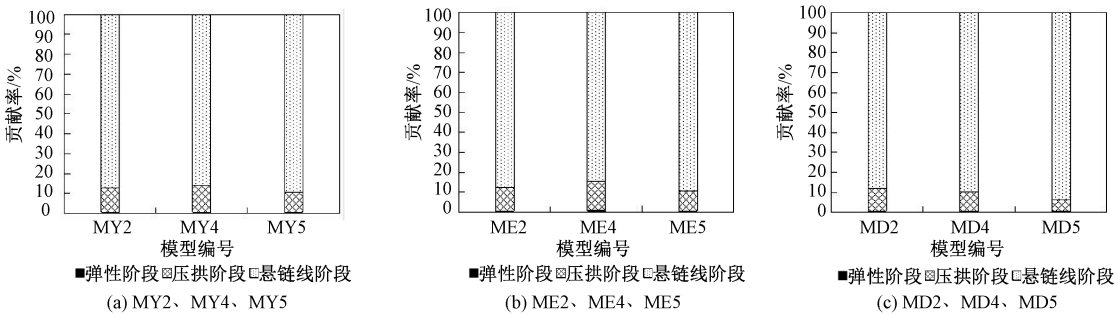


图 14 各作用机制阶段不同模型抗倒塌贡献率

Figure 14 Contribution rate of collapse resistance of each mechanism stage of different models

5 结论

(1)无论哪层的中柱失效,悬链线阶段结构的峰值抗力较梁机制阶段均有明显的提高,但提升率从顶层到底层依次降低,这意味着失效柱所在楼层越低,悬链线阶段越难发挥作用。

(2)随着梁下部钢筋配筋率的增加,梁机制阶段(弹性阶段和压拱阶段)对结构抗倒塌能力的贡献率逐渐增加,悬链线阶段对结构抗倒塌能力的贡献率降低。下部钢筋配筋率的提高对悬链线效应没有正面影响,当配筋率过高时反而会削弱结构的悬链线效应。

(3)梁上部钢筋配筋率的提升可以同时增加结构梁机制阶段和悬链线机制阶段的抗力,但梁机制阶段的抗力提升较小,悬链线机制阶段的抗力有较为明显的提高。梁机制阶段对结构抗倒塌的贡献率随着梁上部钢筋配筋率的增加而降低,悬链线机制阶段的贡献率随梁上部钢筋的配筋率的增加而提高。

(4)从耗能的角度出发,结构倒塌时悬链线效应阶段的耗能占比最高,至少达到了结构倒塌时总耗能的 70%。这意味着悬链线阶段具有良好的耗能能力,忽略悬链线阶段的耗能能力将严重低估结构的抗连续性倒塌的能力。

参考文献:

[1] HADIPRIONO F C. Analysis of events in recent structural failures [J]. Journal of structural engineering, 1985, 111(7): 1468-1481.

[2] HADIPRIONO F C. Closure to "study of recent building failures in the United States" by Kumalasari Wardhana

and Fabian C. Hadipriono [J]. Journal of performance of constructed facilities, 2005, 19(2): 182-183.

[3] 方召欣,李惠强.结构鲁棒性与风险防控[J].工程力学, 2007, 24(增刊 1): 79-82.

[4] YU J, TAN K H. Experimental and numerical investigation on progressive collapse resistance of reinforced concrete beam column sub-assemblages [J]. Engineering structures, 2013, 55: 90-106.

[5] DAT P X, TAN K H. Experimental study of beam-slab substructures subjected to a penultimate-internal column loss [J]. Engineering structures, 2013, 55: 2-15.

[6] DAT P X, TAN K H. Experimental response of beam-slab substructures subject to penultimate-external column removal [J]. Journal of structural engineering, 2015, 141(7): 04014170.

[7] KANG S B, TAN K H. Robustness assessment of exterior precast concrete frames under column removal scenarios [J]. Journal of structural engineering, 2016, 142(12): 04016131.

[8] HOU J, SONG L, LIU H H. Progressive collapse of RC frame structures after a centre column loss [J]. Magazine of concrete research, 2016, 68(8): 423-432.

[9] 易伟建,何庆锋,肖岩.钢筋混凝土框架结构抗倒塌性能的试验研究[J].建筑结构学报, 2007(5): 104-109, 117.

[10] 于晓辉,钱凯,吕大刚.考虑悬链线效应的钢筋混凝土框架结构抗连续倒塌能力分析[J].建筑结构学报, 2017, 38(4): 28-34.

[11] LEE J, FENVES G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures [J]. Journal of engineering mechanics, 1998, 124(8): 892-900.

(下转第 104 页)

asphalt mixture were studied. The high and low temperature properties, water-stability properties, self-healing and fatigue properties of SEBS modified asphalt mixture were evaluated by the rutting test, beam bending test, water-stability test, and four-point bending fatigue test. The results showed that dynamic stability increased with the increase of the SEBS content, and the increase was small when the content exceeded 4%. The incorporation of SEBS could significantly improve the low temperature performance and water stability of the asphalt mixture after freeze-thaw cycles. The fatigue life of the modified asphalt mixture was reduced, but the initial stiffness modulus was significantly higher than that of the base asphalt. After self-healing of secondary loading, the late modulus of the modified asphalt mixture and its fatigue life were significantly higher than the base asphalt mixture. The incorporation of SEBS could significantly improve the road performance and self-healing life of the asphalt mixture, but the increase of stiffness modulus, thereby reducing the initial fatigue life of the mixture.

Key words: SEBS; high temperature performance; low temperature crack resistance; water stability; fatigue resistance; self-healing

(上接第 36 页)

Analysis on Factors Affecting the Capability of Collapse of Reinforced Concrete

CHEN Weihong¹, LIU Fanghao¹, QIAO Zehui¹, CUI Shuangshuang²

(1.School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fujian 350108, China; 2.School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fujian 350108, China)

Abstract: In order to examine on the factors to collapse resistance of the structure, the ABAQUS finite element model was firstly verified and calibrated by using the progressive collapse test results of the two-layer concrete plane frame. Then 15 three-story and four-span concrete plane frames were established to carry out the progressive collapse analysis on three parameters based on the verified model. The parameters included the failure of the middle column of the different layers, the reinforcement ratio at the bottom of the beams, and the reinforcement ratio at the top of the beams. The results showed that the lower the floor where the failure of the center column is, the more difficult the catenary action is to play a role. The improvement of the reinforcement ratio at the bottom of the beams had no positive effect on the catenary action. The catenary action of the structure was weakened when the reinforcement ratio was too high. The increase in the reinforcement ratio of the upper part of the beam could significantly enhance the catenary action of the structure. The energy dissipation at the catenary action accounted for at least 70% of the total energy dissipation during the collapse process. Thus, the contribution of the catenary action should be considered when evaluating the structural robustness.

Key words: RC frame structure; progressive collapse; catenary action; column loss; reinforcement ratio