

# 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

李 易<sup>1,2</sup>, 陆新征<sup>2</sup>, 叶列平<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学 城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 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:** 悬链线机制下的连续倒塌抗力需求计算是 RC 框架结构大变形阶段抗连续倒塌设计的关键。现有规范方法没有考虑非线性动力效应对该阶段抗力需求的影响, 因而导致不安全的设计结果。根据 RC 框架结构基于能量平衡原理的抗连续倒塌抗力需求分析的理论框架, 推导了 RC 框架结构在悬链线机制下抗连续倒塌子结构及其构件的非线性动力抗力需求与非线性静力抗力需求之间的关系, 建立了 RC 框架结构悬链线机制下连续倒塌抗力需求计算的理论方法。通过数值算例验证了本文方法能够正确描述 RC 框架在悬链线机制下的连续倒塌抗力需求关系。

**关键词:** RC 框架结构; 抗连续倒塌; 悬链线机制; 抗力需求; 能量方法

**中图分类号:** TU375.401 **文献标志码:** A

## Progressive collapse resistance demand of RC frame structures based on energy method II: catenary mechanism

LI Yi<sup>1,2</sup>, LU Xinzheng<sup>2</sup>, YE Lieping<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of China Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

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

**Abstract:** The key issue of the progressive collapse (PC) design of RC frame structures at large deformation stage is to calculate the PC resistance demand of the structure under catenary mechanism. The existing design codes for PC design are unsafe because of ignoring the effect of nonlinear dynamic behavior of PC resistance demand under catenary mechanism. According to the theoretical framework of the PC resistance demand analysis based on the energy conservation principle, the relationship between the nonlinear dynamic and nonlinear static PC resistance demands for RC frame structures under catenary mechanism was derived. And the theoretical method to calculate the PC resistance demand of RC frame structures under catenary mechanism was established. At last, the proposed method describing the PC resistance demand relationship of RC frames with catenary mechanism was validated through numerical examples.

**Keywords:** RC frame structure; progressive collapse; catenary mechanism; resistance demand relationship; energy conservation principle

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2012CB719703), 国家科技支撑计划项目(2006BAJ03A02), 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0528)。

作者简介: 李易(1981—)男, 湖北襄阳人, 工学博士, 讲师。E-mail: yili@bjut.edu.cn

通讯作者: 叶列平(1960—)男, 浙江温州人, 工学博士, 教授。E-mail: ylp@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2011年6月

## 0 前言

试验<sup>[1]</sup>和数值分析<sup>[2-3]</sup>研究表明: RC 框架结构的连续倒塌过程中,当梁(板)构件进入大变形阶段后,抗倒塌子结构能够通过悬链线机制(梁(板)构件的轴向受拉承载力)提供抗连续倒塌承载力,如图 1 所示。现有抗连续倒塌设计规范<sup>[4-6]</sup>中的拉结强度法即是通过悬链线机制下梁(板)的轴向受拉承载力的设计,来保证 RC 框架结构在大变形状态下的抗连续倒塌能力。但现有规范<sup>[4-6]</sup>在计算抗倒塌子结构中梁(板)构件悬链线机制下的抗力需求时,通过对悬链线机制下抗倒塌子结构的极限变形状态进行非线性静力分析来确定构件抗力需求,其结果仅满足非线性静力平衡条件。而连续倒塌是一个非线性动力过程,因此现有规范<sup>[4-6]</sup>方法将会导致不安全的设计结果<sup>[7]</sup>,有必要针对抗倒塌子结构大变形阶段悬链线机制下的连续倒塌抗力需求进行深入研究。

文献[8]建立了基于能量方法的连续倒塌抗力需求计算的理论框架和方法,并推导了 RC 框架结构在梁机制下的静-动力抗力需求关系,且基于该关系给出了线性静力拆除构件法连续倒塌抗力需求的计算方法。本文基于相同的理论框架,推导了 RC 框架结构在悬链线机制下的静-动力抗力需求关系,在此基础上给出了拉结强度法连续倒塌抗力需求的计算方法。

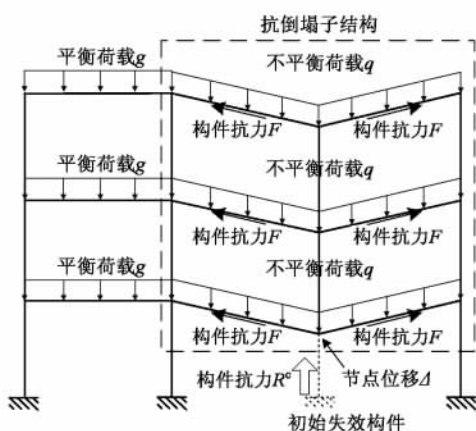


图 1 RC 框架结构抗连续倒塌的悬链线机制  
Fig. 1 Catenary mechanism of progressive collapse and resistance of RC frame structure

## 1 悬链线机制的结构抗力曲线

如图 1 所示,抗倒塌子结构中各层框架梁均满足连续倒塌抗力需求时,抗倒塌子结构的连续倒塌抗力需求也能够满足,因此取图 1 中抗倒塌子结构

中的一个框架梁进行抗力需求分析。悬链线机制下抗倒塌子结构的抗力由框架梁或楼板的轴向受拉承载力提供。根据框架梁和楼板上分布荷载形式和支座水平约束刚度的不同,有曲线型悬链线和直线型悬链线(图 2)。当框架梁板上的荷载作用形式以均布荷载为主时,梁板构件的变形模式为曲线型悬链线,现有规范的拉结强度法<sup>[4-6]</sup>即采用曲线型悬链线进行设计;当框架梁板上的荷载以集中荷载为主时,梁板构件的变形模式为直线型悬链线,如文献[1]RC 平面框架倒塌试验。另外,当支座水平约束刚度较弱时,即使在均布荷载作用下,梁板构件的变形模式会更接近直线型悬链线<sup>[9]</sup>。

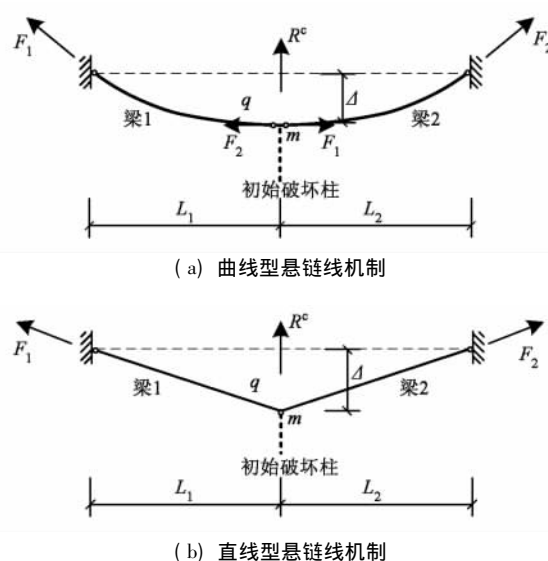


图 2 抗倒塌子结构的悬链线机制示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of substructure under catenary mechanism

为便于两种悬链线机制间的比较,并保持与现有拉结强度法的一致性,本文以均布荷载  $q$  下的曲线型悬链线机制来讨论抗倒塌子结构的连续倒塌抗力需求。文献[8]基于能量方法给出了 RC 框架梁机制抗连续倒塌的静-动抗力需求关系,并论证了该静-动抗力需求关系的普遍性,该普遍性同样适用于 RC 框架结构悬链线机制抗连续倒塌的静-动抗力需求关系。

### 1.1 曲线型悬链线机制

当梁板受均布荷载  $q$  作用时,曲线型悬链线的最大竖向位移  $\Delta$  发生在  $(L_1 + L_2) / 2$  处(图 2a),则可以得到结构抗力需求  $R^c$  和构件抗力需求  $F_1$ 、 $F_2$  关系为:

$$R^c = \frac{8\Delta}{(L_1 + L_2)} \cdot F_1 \quad (1a)$$

$$F_1 = F_2 \quad (1b)$$

式中:  $F_1$  和  $F_2$  分别为图 2a 中梁 1 和梁 2 端部的轴向拉力,该拉力主要由梁板中的钢筋承担;  $\Delta$  为节点的竖向位移。梁板中钢筋受拉屈服前,梁板变形主要

为端部塑性铰区的转动变形,其轴向变形不大,可由图 1a 的梁变形模式得:

$$F_1 \approx E_1 A_1 \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{L_1 + L_2}{2}\right)^2 + \Delta^2} - \frac{L_1 + L_2}{2}}{\frac{L_1 + L_2}{2}} \approx E_1 A_1 \cdot \frac{2\Delta^2}{(L_1 + L_2)^2} \quad (2)$$

式中:  $E_1$ 、 $A_1$  分别为梁板中全部纵向钢筋的弹性模量和截面面积。

合并式(1)和式(2),可得梁板受拉屈服前悬链线机制下结构抗力  $R_L^c$  的表达式为:

$$R_L^c = \frac{16E_1 A_1}{(L_1 + L_2)^3} \cdot \Delta^3 \quad (3a)$$

式(3a)即为图 3 中曲线  $OAB$  表达式。

当梁板中钢筋受拉屈服后,梁板轴力和变形之间的关系不满足式(2)。轴力  $F_1$  保持屈服轴力  $F_{1y}$  不变(即  $F_1 = F_{1y}$ ),则由式(1)可得钢筋受拉屈服后抗倒塌子结构悬链线机制的抗力  $R_N^c$  表达式为:

$$R_N^c = \frac{8F_{1y}}{(L_1 + L_2)} \cdot \Delta \quad (3b)$$

式(3b)即为图 3 中直线  $OC$  表达式。

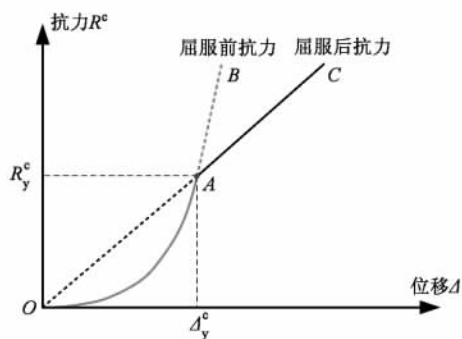


图 3 悬链线机制下 RC 框架结构抗力曲线  
Fig. 3 Resistance curves of RC frame structure under catenary mechanism

如图 3 所示,完整的悬链线机制抗力曲线包括受拉钢筋屈服前由式(3a)描述  $OA$  曲线段和屈服后由式(3b)描述  $AC$  直线段组成。可以看到,对于曲线型悬链线机制,在梁板中钢筋受拉屈服前(图 3 中  $A$  点前)尽管构件抗力处于弹性阶段,但由于悬链线大变形的几何非线性,结构抗力表现出非线性特征,即图 3 中  $OA$  曲线段;在梁板中钢筋受拉屈服后,构件抗力进入弹塑性阶段,但是该弹塑性影响和结构的几何非线性影响相互抵消,结构抗力表现出线性特征,即图 3 中  $AC$  直线段, $C$  点为悬链线机制的极限变形。

### 1.2 直线型悬链线机制的抗力曲线

根据图 2b 所示的直线型悬链线机制,可以得到

结构抗力需求  $R^c$  和构件抗力需求  $F_1$ 、 $F_2$  关系为:

$$R^c = \frac{(L_1 + L_2) \Delta}{L_1 L_2} \cdot F_1 \quad (4a)$$

$$F_1 = F_2 \quad (4b)$$

采用类似曲线型悬链线机制的分析,可以得到受拉钢筋屈服前和屈服后直线型悬链线机制下的结构抗力表达式分别为:

$$R_L^c = \frac{E_1 A_1 (L_1 + L_2)}{2L_1^3 L_2} \cdot \Delta^3 \quad (5a)$$

$$R_N^c = \frac{(L_1 + L_2) F_{1y}}{L_1 L_2} \cdot \Delta \quad (5b)$$

由式(5)可知,直线型悬链线机制的抗力曲线也具备图 3 中相同的特征。

### 1.3 梁机制的影响

对于混凝土框架梁,在进入悬链线机制前,首先经历梁机制阶段,因此框架梁的完整抗力曲线如图 4 实线所示,包含梁机制阶段  $ODEFA$  和悬链线机制阶段  $AC$ ,其中  $\Delta_f^c$  为悬链线机制的极限变形,相应的结构抗力为  $R_f^c$ 。以下首先讨论悬链线机制下的结构和构件抗力需求,然后再进一步考虑梁机制对后续悬链线机制抗力需求的影响。楼板受弯承载力较小,可忽略其对梁机制的贡献。

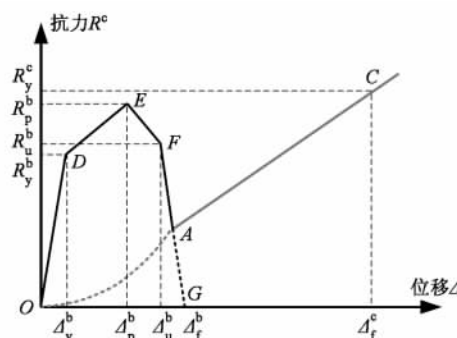


图 4 RC 框架结构全抗力曲线  
Fig. 4 Full resistance curve of RC frame structure

## 2 悬链线机制下抗倒塌子结构的非线性动力抗力需求

当悬链线机制发挥作用时,RC 框架结构的梁板构件已发生较大的变形,并已进入非线性抗力阶段,拉结强度设计法即是通过对该阶段抗倒塌子结构的受力和变形模式进行分析,获得结构和构件的非线性静力抗力需求。在此基础上,根据文献[8]基于能量平衡原理的理论框架,建立悬链线机制下抗倒塌子结构的静-动力的抗力需求关系,进而根据上述悬链线机制下抗倒塌子结构抗力与构件抗力间的转换关系,确定相应的构件非线性动力抗力需求。

现有规范<sup>[4-6]</sup>在悬链线机制的抗连续倒塌设计中,取悬链线机制的极限位移 $\Delta_f^c = 0.2L$ ( $L$ 为梁跨度)。因此,悬链线机制下的非线性静力抗力需求 $R_{NS}^c$ 和非线性动力抗力需求 $R_{ND}^c$ 也以此极限位移 $\Delta_f^c = 0.2L$ 进行计算,即取 $\Delta_{NS}^c = \Delta_{ND}^c = \Delta_f^c$ (图5)其中 $\Delta_{NS}^c$ 为非线性静力位移, $\Delta_{ND}^c$ 为非线性动力位移。考虑到悬链线机制屈服前耗能占总耗能的比例较低(约为5%)<sup>[9]</sup>,为方便讨论,以下分析中假设抗倒塌子结构非线性静力抗力曲线上(图5中 $OAB$ )的屈服抗力 $R_{y1}^c$ 和非线性动力抗力曲线上(图5中 $ODE$ )的屈服抗力 $R_{y2}^c$ 所对应的屈服位移相同,即图5中 $\Delta_y^c$ 。

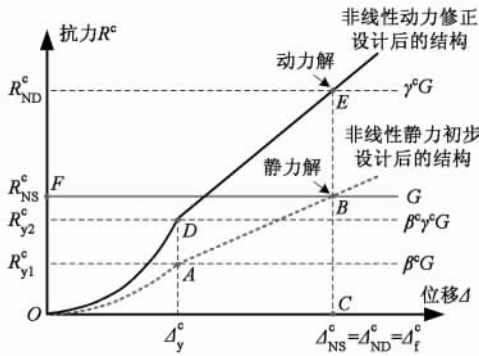


图5 结构悬链线机制的抗力需求  
Fig. 5 Resistance demands of structure under catenary mechanism

以曲线型悬链线机制为例,分析悬链线机制下抗倒塌子结构的非线性静力抗力需求与非线性动力抗力需求间的关系,即抗倒塌子结构的静-动力抗力需求关系。直线型悬链线机制的结果与曲线型悬链线机制相同,不再叙述。

曲线型悬链线机制下结构抗力需求的非线性静力解和非线性动力解的物理意义可用图5说明。非线性静力抗力需求对应结构倒塌过程中的力平衡状态,即图5中 $B$ 点,此时结构的非线性静力抗力需求 $R_{NS}^c$ 等于结构的不平衡重力荷载 $G$ ,即 $R_{NS}^c = G$ 。而结构的非线性动力抗力需求 $R_{ND}^c$ 对应结构倒塌过程中的能量平衡状态,即图5中 $E$ 点,此时结构的耗能( $ODEC$ 包围的面积)等于结构不平衡重力荷载 $G$ 做功( $OFBC$ 包围的面积)。

曲线型悬链线机制下结构的非线性动力抗力需求 $R_{ND}^c$ 和位移 $\Delta_{ND}^c$ 可以通过能量平衡原理获得<sup>[8]</sup>,其能量平衡方程式为:

$$G\Delta_{ND}^c = \int_0^{\Delta_{ND}^c} \frac{16E_1A_{ND}}{(L_1 + L_2)^3} \Delta^3 d\Delta + \frac{1}{2} (R_{y2}^c + R_{ND}^c) \times (\Delta_{ND}^c - \Delta_y^c) \quad (6)$$

其中: $A_{ND}$ 为构件(框架梁板)非线性动力需求下的配筋面积; $\Delta_y^c$ 为悬链线机制下屈服位移; $R_{y2}^c$ 为非线性

动力抗力曲线上相应屈服位移 $\Delta_y^c$ 时的屈服抗力。 $R_{y2}^c$ 和 $\Delta_y^c$ 满足式(3a),即:

$$R_{y2}^c = \frac{16E_1A_{ND}}{(L_1 + L_2)^3} \cdot (\Delta_y^c)^3 \quad (7)$$

在悬链线机制下,当抗倒塌子结构的非线性动力位移 $\Delta_{ND}^c$ 达到极限位移 $\Delta_f^c$ 时,即为倒塌极限状态。根据文献[8],取悬链线机制下屈服位移 $\Delta_y^c$ 和极限位移 $\Delta_f^c$ 之比为 $\beta^c$ ,则有:

$$\Delta_y^c = \beta^c \Delta_{NS}^c = \beta^c \Delta_{ND}^c \quad (8)$$

根据式(3b)和式(8),则有:

$$R_{y1}^c = \beta^c R_{NS}^c \quad (9a)$$

$$R_{y2}^c = \beta^c R_{ND}^c \quad (9b)$$

由式(6)~(9),可得曲线型悬链线机制下的非线性动力结构抗力需求 $R_{ND}^c$ 为:

$$R_{ND}^c = \frac{4G}{2 - (\beta^c)^2} \quad (10)$$

根据文献[1]对静-动力抗力需求关系的定义和 $R_{NS}^c = G$ ,由式(10)可得:

$$\gamma^c = \frac{R_{ND}^c}{R_{NS}^c} = \frac{4}{2 - (\beta^c)^2} \quad (11)$$

式(11)即为曲线型悬链线机制下的结构非线性动力抗力需求 $R_{ND}^c$ 与非线性静力抗力需求 $R_{NS}^c$ 间的关系。

如果考虑悬链线机制发挥作用前,梁机制已经消耗了部分重力势能,则悬链线机制下结构的抗力需求会有所减小。假设梁机制耗能 $U^b$ 为:

$$U^b = \psi G \Delta_{ND}^c \quad (12)$$

其中: $\psi$ 为梁机制耗能系数,表示梁机制下耗能占总耗能需求的比例。

考虑梁机制耗能后的结构非线性动力抗力需求和非线性静力抗力需求间的关系 $\gamma^{c'}$ 为:

$$\gamma^{c'} = \frac{4(1 - \psi)}{2 - (\beta^c)^2} \quad (13)$$

对于曲线型悬链线机制,由于结构已发挥最大变形能力,因此由式(11)可得曲线型悬链线机制下结构的抗连续倒塌最低承载力储备需求 $\gamma_{min}^c$ 为:

$$\gamma_{min}^c = \gamma^c = \frac{4}{2 - (\beta^c)^2} \quad (14)$$

同理,由式(13)可得考虑梁机制耗能后曲线型悬链线机制下结构的抗连续倒塌最低承载力储备需求 $\gamma_{min}^{c'}$ 为:

$$\gamma_{min}^{c'} = \gamma^{c'} = \frac{4(1 - \psi)}{2 - (\beta^c)^2} \quad (15)$$

直线型悬链线机制抗连续倒塌的最低承载力储备需求分析与曲线型悬链线机制相同,仅是推导过程中式(6)~(7)采用直线型悬链线的表达式,对结果没有影响,故不再赘述。

### 3 悬链线机制下结构抗力需求与构件抗力需求的关系

由式(3b)可得曲线型悬链线机制下构件的非线性静力抗力需求  $(F_{1y})_{NS}$  和结构的非线性静力抗力需求  $R_{NS}^c$ 、构件的非线性动力抗力需求  $(F_{1y})_{ND}$  和结构的非线性动力抗力需求  $R_{ND}^c$  分别满足关系式为:

$$R_{NS}^c = \frac{8\Delta_{NS}^c}{L_1 + L_2} \cdot (F_{1y})_{NS} \quad (16a)$$

$$R_{ND}^c = \frac{8\Delta_{ND}^c}{L_1 + L_2} \cdot (F_{1y})_{ND} \quad (16b)$$

因此,曲线型悬链线机制下构件抗力需求关系  $\gamma_m^c$  和结构抗力需求关系  $\gamma^c$  之间满足:

$$\gamma_m^c = \frac{(F_{1y})_{ND}}{(F_{1y})_{NS}} = \frac{R_{ND}^c \cdot \Delta_{NS}^c}{R_{NS}^c \cdot \Delta_{ND}^c} = \frac{R_{ND}^c}{R_{NS}^c} = \gamma^c \quad (17)$$

由式(17),曲线型悬链线机制下构件抗连续倒塌最低承载力储备需求  $(\gamma_m^c)_{min}$  和结构抗连续倒塌最低承载力储备需求  $\gamma_{min}^c$  之间满足式(18)。

$$(\gamma_m^c)_{min} = \gamma_{min}^c \quad (18)$$

采用直线型悬链线的抗力表达式,同样可以得到上述结论。式(18)表明悬链线机制下结构和构件的抗力需求关系具有一致性,因此可直接应用式(14)和式(15)进行构件的设计。

### 4 悬链线机制抗力需求验证

#### 4.1 验算方法

采用图6a所示单层两跨连续框架梁结构对悬链线机制抗力需求分析结果进行验证。验算方法如下:

(1)按图6a建立框架结构非线性分析模型,拆除中部竖向构件后,计算在结构重力荷载  $G$  作用下达到静力平衡状态,如图6b中计算时间  $t = 1.0$  s时的状态。

(2)瞬间移除中间支座,采用非线性动力方法计算结构的响应(计算时间3 s),调整框架梁配筋直到框架梁能够发挥悬链线机制,并且其变形达到现有规范<sup>[4-6]</sup>规定的悬链线极限变形  $(\Delta_f^c = 0.2L)$ ,提取最大节点位移响应作为承载力分析的最大目标位移,如图6b所示。

(3)在上述配筋的两跨框架梁施加荷载进行非线性静力 Pushdown 分析<sup>[3]</sup>(图6c),取结构达到最大目标位移时所对应的结构抗力作为图6b非线性动力分析中框架梁的非线性动力结构抗力,即为  $R_{ND}^c$ 。

(4)考虑到非线性静力结构抗力  $R_{NS}^c$  等于结构重力荷载  $G$ ,因此  $R_{ND}^c$  和  $G$  的比值即为结构的抗连续倒塌

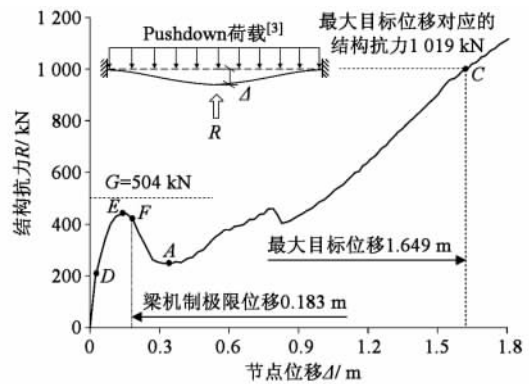
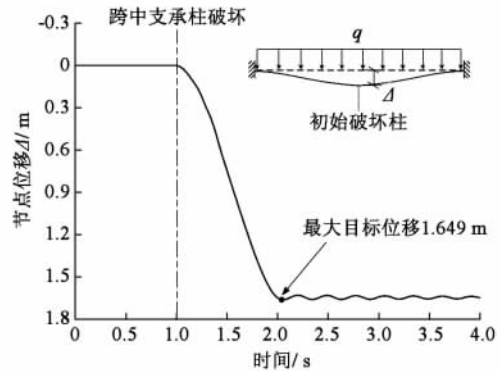
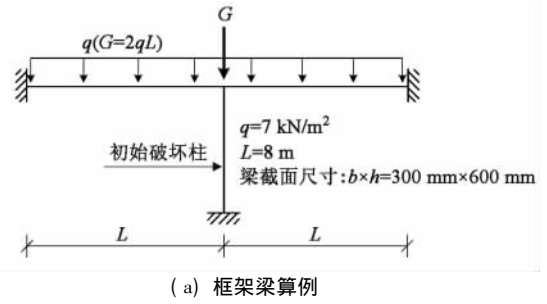


图6 悬链线机制抗连续倒塌承载力储备需求的验算方法示例

Fig. 6 Schematic diagram of verifying method for PC resistance demand under catenary mechanism

塌承载力储备实际值  $\gamma_a^c$ 。

(5)将式(14)和式(15)的抗连续倒塌承载力储备设计值  $\gamma_d^c$  与上述抗连续倒塌承载力储备实际值  $\gamma_a^c$  进行比较,检验式(14)和式(15)的合理性。

#### 4.2 算例结构参数

为使验算结果具有代表性,对不同荷载形式、荷载幅值、梁跨度和梁截面高度的算例结构进行分析,共计180个算例,其参数取值见表1。验算中假设梁承担4.5m楼板板宽度内的重力荷载。验算时,分别在框架梁上施加均布荷载和跨中集中荷载,使框架梁分别形成直线型悬链线机制和曲线型悬链线机制,以确定相应的连续倒塌抗力需求。

表1 算例结构的参数

Table 1 Parameters of verifying examples

荷载形式	跨度 $L/m$	荷载/ $(kN \cdot m^{-2})$	端部负弯 矩配筋	截面尺寸	
				$h/mm$	$b/mm$
均布	6	5	2 $\Phi$ 22	400	300
	8	7		450	300
	10	9		500	300
跨中集中	10	9	6 $\Phi$ 22	550	300
				600	300

按抗震设计时, 框架梁端部负弯矩配筋较大, 在梁机制阶段能提供较大的耗能能力, 为考察该因素对悬链线机制下结构抗力需求的影响, 算例梁端支座处的负弯矩钢筋分别采用 2  $\Phi$  22 和 6  $\Phi$  22 两种配筋方式, 分别代表“非抗震设计”和“抗震设计”算例。对于“抗震设计”算例, 框架梁端受拉钢筋配筋率范围为 1.3% ~ 2.1%, 均小于 GB 50011—2001《建筑抗震设计规范》<sup>[10]</sup> 规定的最大配筋率要求 2.5%。“非抗震设计”算例, 框架梁端受拉钢筋配筋率范围为 0.22% ~ 0.34%, 均大于 GB 50010—2002《混凝土结构设计规范》<sup>[11]</sup> 规定的最小配筋率要求 0.2%。因此上述算例考虑了梁机制影响的上下限, 验算结果具备代表性。梁端部负弯矩钢筋仅在距离梁端 1/3 跨度内布置, 梁跨中截面上部统一按 2  $\Phi$  22 配筋, 如图 7 所示。

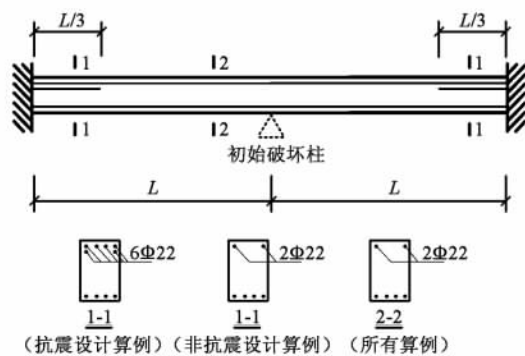


图7 算例框架梁的钢筋布置

Fig. 7 Arrangement of steel bars in verifying examples

验算时反复调整框架梁截面下部纵向钢筋, 使其达到悬链线机制的目标位移  $\Delta_f = 0.2L$ 。由于悬链线机制的抗力由框架梁跨中截面配筋决定, 因此上述验算不会使悬链线机制的抗力受到梁端抗震配筋的影响。

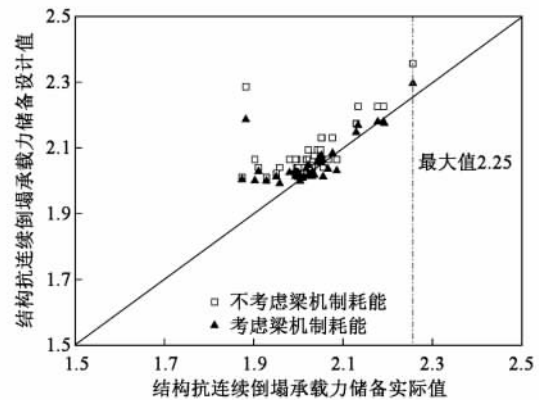
#### 4.3 验算结果

按式(14)和式(15)分别计算表1各算例的抗连续倒塌承载力储备设计值, 其中参数  $\beta^c$  按式(8)计算。结构屈服变形  $\Delta_y^c$  的取值方法如下: 在 Pushdown 分析获得的结构抗力曲线(图6c)中, 取梁机制结束、悬链线机制开始处极值点(图6c点A)的变形作为悬链线机制的屈服变形  $\Delta_y^c$ 。当框架梁的变形超过屈

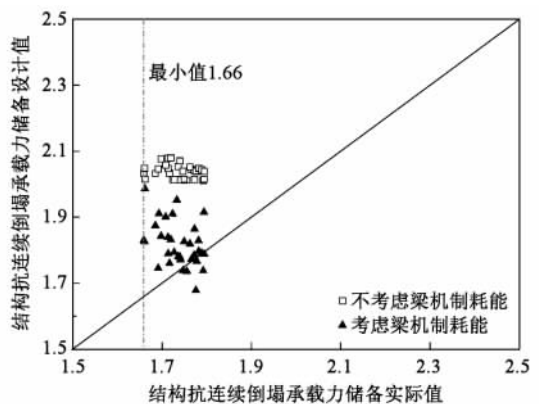
服变形  $\Delta_y^c$  后, 悬链线机制的抗力曲线基本保持直线(图6c), 这与本文中式(3b)和式(5b)的理论推导相符。根据前述梁机制耗能参数  $\Psi$  定义, 梁机制耗能参数  $\Psi$  可偏于保守的取梁机制抗力拐点对应的极限位移(图6c点F)与悬链线机制的最大目标位移(图6c点C)之比。

对于均布荷载作用下的曲线型悬链线机制, 非抗震设计算例的抗连续倒塌承载力储备验算结果如图8a所示。可以发现, 式(14)和式(15)得到的抗连续倒塌承载力储备设计值与前述分析得到的实际值接近, 表明式(14)和式(15)能够很好的预测非抗震设计的结构抗连续倒塌承载力储备。验算结果表明, 式(15)的设计值比式(14)更接近抗连续倒塌承载力储备的实际值, 这是因为非抗震设计算例的梁端部负弯矩钢筋较少, 梁机制下梁的耗能低, 悬链线机制的抗力需求受梁机制的影响较小。

对于均布荷载作用下的曲线型悬链线机制, 抗震设计算例的抗连续倒塌承载力储备的验算结果如图8b所示。可以发现, 由于抗震设计算例中梁机制下的耗能能力增强, 不考虑梁机制耗能能力的式



(a) 非抗震设计



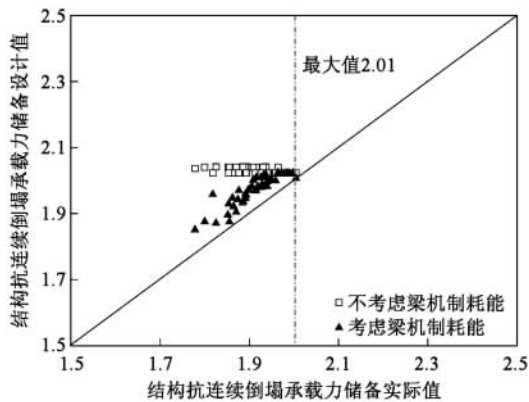
(b) 抗震设计

图8 曲线型悬链线机制的抗连续倒塌承载力储备需求验证

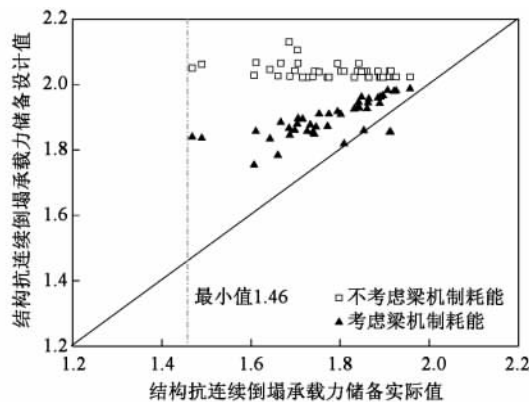
Fig. 8 Verification of PC resistance demand of catenary mechanism

(14) 得到的抗连续倒塌承载力储备设计值显著大于实际值。近似考虑梁机制耗能后,按式(15)计算得到的抗连续倒塌承载力储备设计值更接近实际值。此外,由于抗震设计的影响,随着梁机制耗能的增大,悬链线机制下的结构连续倒塌抗力需求相应显著降低,其范围从 1.87~2.25 降低到 1.66~1.80。综合上述结果,本文曲线型悬链线机制算例的抗连续倒塌承载力储备值在 1.66~2.25 之间。

采用相同方法分析了集中荷载作用下的直线型悬链线机制的抗连续倒塌承载力储备,如图 9 所示。可以发现,上述类似的规律也体现在直线型悬链线机制中。本文直线型悬链线机制算例的抗连续倒塌承载力储备值在 1.46~2.01 之间。直线型悬链线机制的抗连续倒塌承载力储备低于曲线型悬链线机制,其原因是:在相同重力荷载作用下,直线型悬链线机制的构件抗力需求大于曲线型悬链线机制,因此导致梁内配筋的增加,进而使得梁机制下的结构耗能能力相应的提高,最终降低了悬链线机制下结构的抗连续倒塌承载力储备需求。



(a) 非抗震设计



(b) 抗震设计

图 9 直线型悬链线机制的抗连续倒塌承载力储备需求验证

Fig. 9 Verification of PC resistance demand of straight tension mechanism

上述算例验证表明,本文建立的悬链线机制下的静-动抗力需求关系准确合理。

## 5 结论

本文基于能量平衡原理,推导建立了 RC 框架结构在悬链线机制下的抗连续倒塌的非线性动力抗力需求与非线性静力抗力需求之间的关系,主要结论如下:

(1) 建立了直线型悬链线机制和曲线型悬链线机制下 RC 框架结构的抗力表达式。

(2) 基于能量平衡原理建立了悬链线机制下的结构(构件)的抗连续倒塌非线性静力抗力需求和非线性动力抗力需求之间的关系。

(3) 通过抗震和非抗震设计的算例分析,验证了本文建议的悬链线机制的抗力需求关系计算公式的正确性,并给出了悬链线机制下抗连续倒塌承载力储备的常用取值范围。

### 参考文献

- [1] 易伟建,何庆峰,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,2007,28(5): 104-109. (YI Weijian, HE Qingfeng, XIAO Yan. Collapse performance of RC frame structure [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(5): 104-109. (in Chinese))
- [2] 李易,陆新征,叶列平,陈适才. 钢筋混凝土框架抗连续倒塌机制研究[J]. 建筑科学,2011,27(5): 12-18. (Li Yi, Lu Xinzheng, Ye Lieping, Chen Shicai. Study on the progressive collapse mechanism of RC frame structures [J]. Building Science, 2011, 27(5): 12-18. (in Chinese))
- [3] 李易,陆新征,叶列平,陈适才. 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): 10-18. (Li Yi, Lu Xinzheng, Ye Lieping, Chen Shicai. Study on progressive collapse-resisting capacity of RC frame structures based on Pushdown analysis [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2011, 27(1): 10-18. (in Chinese))
- [4] DoD2010 Design of structures to resist progressive collapse [S]. Washington DC: Department of Defense, 2010.
- [5] Eurocode 2 Design of concrete structures: part 1: general rules and rules for buildings [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
- [6] BS 8110 Structural use of concrete: part 1: code of practice for design and construction [S]. London: British Standard Institute, 2002.
- [7] 梁益,陆新征,李易,叶列平. 国外 RC 框架抗连续

- 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 structures[J]. Building Structure, 2010, 40(2): 8-12. (in Chinese))
- [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 Xinzheng. Progressive collapse resistance demand of RC frame structures based on energy method I: beam mechanism[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(11): 1-8. (in Chinese))
- [9] 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: 79, 105. (Li Yi. Study on design method for RC frame structures to resist progressive collapse[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011: 79, 105 (in Chinese))
- [10] GB 50011—2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001. (GB 50011—2001 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001. (in Chinese))
- [11] GB 50010—2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. (GB 50010—2002 Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002. (in Chinese))