建筑结构学报 Journal of Building Structures
第32卷 第11期 2011年11月
Vol. 32 No. 11 Nov. 2011
001
文章编号:1000-6869(2011)11-0001-08

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

李 易[1,2],叶列平[2],陆新征[2]
(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: 结构抗连续倒塌设计方法的关键是确定因偶然作用导致局部构件失效后剩余结构的连续倒塌抗力需求。现有规范对连续倒塌抗力需求计算采用经验系数法,因缺乏理论基础,难以合理考虑结构连续倒塌过程中的非线性和动力效应的影响,其可靠性不足。基于能量方法,建立了RC框架结构连续倒塌抗力需求分析的理论框架,推导出RC框架结构梁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线性静力抗力需求之间的关系,通过该关系对线性静力抗力需求的修正,能够综合考虑RC框架结构在梁机制下连续倒塌过程中的非线性和动力效应的影响。通过数值算例分析了现有规范中经验系数法的问题,验证了本文方法的正确性。

关键词: RC框架结构;抗连续倒塌;梁机制;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 Ⅰ: beam mechanism

LI Yi[1,2], YE Lieping[2], LU Xinzheng[2]
(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 method is to determine the PC resistance demand of the structure with removed members due to accidental action. The empirical parameters that are adopted in the design methods of the existing codes are difficult to reasonably consider the effect of nonlinear and dynamic behavior during the PC process of building structures due to the weak theoretical basis. A theoretical framework for the PC resistance demand analysis of RC frame structures was established based on the energy conservation principle. In this framework, the relationship between the nonlinear dynamic and linear static PC resistance demands for RC frame structures with beam mechanism to resist PC was derived. The influences of nonlinear and dynamic behaviors were comprehensively considered so that the nonlinear dynamic PC resistance demands could obtained by using the linear static analysis. At last, the empirical parameters in existing codes were discussed and the proposed demand relationship based on the energy conservation principle was validated through numerical examples.

Keywords: RC frame structure; progressive collapse; beam mechanism; resistance demand; energy conservation principle

基金项目:国家科技支撑计划项目(2006BAJ03A02),国家重点基础研究发展计划(973)项目(2012CB719703),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

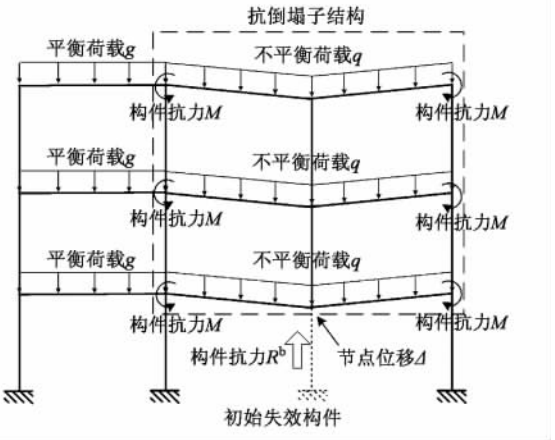
© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

0 前言

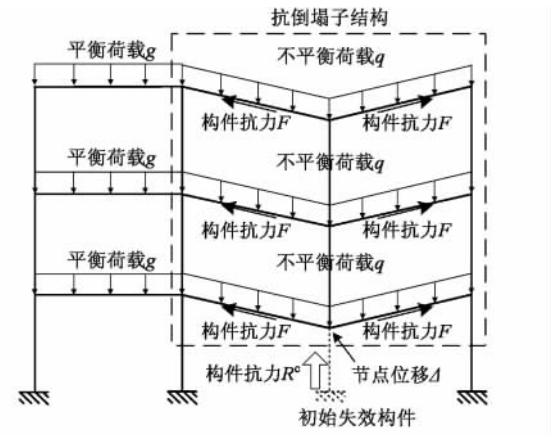
结构抗连续倒塌的目标是当偶然作用导致结构中局部构件破坏失效后，剩余结构中的构件不会因初始局部构件破坏失效后所产生的不平衡重力荷载而发生连续性破坏失效，进而导致结构大部分破坏失效、甚至整体结构的倒塌。剩余结构中能够承受不平衡荷载的结构部分称为“抗倒塌子结构”，见图1。结构抗连续倒塌设计需要解决两个问题：一是抗倒塌子结构的受力机制，即抗倒塌子结构以何种受力方式抵抗不平衡荷载。对于RC框架结构，抗倒塌子结构的受力机制包括梁机制（图1a）和悬链线机制（图1b）[1-3]；二是抗倒塌子结构的连续倒塌抗力需求，即在相应的受力机制下，抗倒塌子结构及其构件需要提供多大的抗力来抵抗不平衡重力荷载。对于RC框架结构，连续倒塌抗力需求包括抗倒塌子结构的抗力 R^b 或 R^c 及其相应的构件抗力 M 或 F，如图1所示。在结构抗连续倒塌设计时，只有当设计所采用的抗倒塌子结构受力机制与结构的实际抗倒塌受力机制相一致，且该受力机制的抗力足够时，结构才具有抗连续倒塌能力。

根据所采用计算方法的不同，连续倒塌抗力需求可按线性静力方法、线性动力方法、非线性静力方法和非线性动力方法确定[4-5]，其中非线性动力抗力需求能全面反映结构连续倒塌过程中的力学行为，但是该方法建模复杂、分析花费时间较多，因此一般仅用于有特殊要求结构的抗连续倒塌设计。相对于非线性动力方法，按线性静力和非线性静力方法分析抗力需求的计算较为简单，在此基础上通过引入动力放大系数和非线性内力折减系数进行修正，可近似确定非线性动力抗力需求。但基于弹塑性动力学分析的方法只能通过数值方法进行，无法直接准确给出这两个修正系数，因此现有规范[4-5]都是采用经验修正系数，文献[6-8]对这两个经验修正系数的合理性提出了质疑。

局部构件失效后的结构连续倒塌过程可以用能量方法进行描述。能量方法可以考虑局部构件失效后倒塌动力过程中不平衡荷载的做功和结构非线性变形能（耗能），故基于能量方法所获得的连续倒塌抗力需求，能够综合反映结构连续倒塌过程的动力效应和非线性行为。然而，直接采用能量方法求解结构连续倒塌非线性动力抗力需求时，须计算结构耗能和不平衡重力荷载做功，其分析过程复杂，难以直接在工程设计中应用[9-11]。Pujol等[12]利用基于能量平衡方程建立了结构屈服状态和结构倒塌极限状态间的关系，可显著简化计算的复杂程度，但该方法因考虑的受力机制和受力特征不全面，不具有一般性和普遍性。



（a）梁机制



（b）悬链线机制

图1 RC框架结构抗连续倒塌机制与连续倒塌抗力

Fig. 1 Progressive collapse mechanism and resistance of RC frame structure

本文基于能量平衡原理，通过建立抗倒塌子结构的线性（非线性）静力抗力需求与抗倒塌子结构的非线性动力抗力需求间的关系，根据抗倒塌子结构的受力机制确定相应的构件抗力需求，得到一种简单有效且理论严密的结构连续倒塌抗力需求的计算方法。

1 理论框架

结构抗连续倒塌设计的关键是确定抗倒塌子结构构件的非线性动力（nonlinear dynamic，ND）抗力需求（图2中的 M_{ND} 或 F_{ND}），并据此对构件进行承载力设计。非线性动力拆除构件设计法可直接求解构件的非线性动力抗力需求（M_{ND} 或 F_{ND}），即图2中的步骤⑤，但如前所述，该计算需考虑结构非线性和动力因素，计算过程较为复杂。现有规范[4-5]的设计方法中，线性静力拆除构件法可方便地获得梁机制下

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

构件的线性静力(linear static，LS)抗力需求(M_{LS})，而拉结强度法可方便地获得悬链线机制下构件的非线性静力(nonlinear static，NS)抗力需求(F_{NS})，即图2中的步骤③。如果能够建立构件线性(非线性)静力抗力需求(M_{LS}或F_{NS})与构件非线性动力抗力需求(M_{ND}或F_{ND})间的关系，即图2中的步骤④的构件静-动力抗力需求关系，即可利用该关系对构件线性(非线性)静力抗力需求(M_{LS}或F_{NS})进行修正，获得构件非线性动力抗力需求(M_{ND}或F_{ND})。

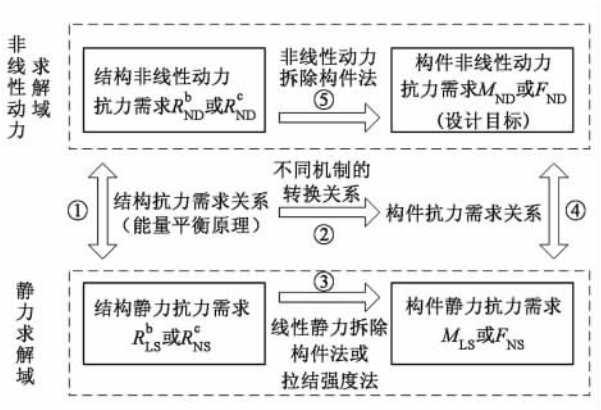


图2　基于能量方法抗力需求分析的理论框架

Fig. 2　Framework of PC resistance demand analysis based on energy conservation principle

由于抗倒塌子结构由多个构件组成，如果直接建立构件层次的能量平衡方程，则图2中步骤④构件抗力需求的计算过程非常复杂，难以直接在工程中应用。由图1可知，抗倒塌子结构的抗力可以通过图1中的节点位移Δ来表达，因此基于能量方法可方便地确定抗倒塌子结构的静-动力抗力需求间的关系(图2中①)，然后根据抗倒塌子结构的受力机制，由抗倒塌子结构与其构件间的受力关系，将抗倒塌子结构的静-动力抗力需求关系转化为构件的静-动力抗力需求关系(图2中②)。

由图2的理论框架，结构连续倒塌的构件抗力需求分析的步骤如下：

(1)以抗倒塌子结构为对象，利用能量平衡原理建立结构层次的静-动力抗力需求关系。

(2)根据抗倒塌子结构受力机制下的结构抗力和构件抗力间的转换关系(图2中②)，将结构层次的静-动力抗力需求关系转换为构件层次的静-动抗力需求关系。

(3)利用线性静力或非线性静力分析方法确定构件的静力抗力需求M_{LS}或F_{NS}。

(4)利用步骤(2)得到的构件层次的静-动力抗力需求关系修正M_{LS}或F_{NS}，得到构件非线性动力构件抗力需求M_{ND}或F_{ND}。

2　基于能量平衡原理的结构静-动力抗力需求关系

局部构件失效后，抗倒塌子结构在不平衡重力荷载作用下变形过程的能量转化可用图3所示的单自由度模型示意。将初始破坏发生后的不平衡重力荷载视为一质点，其质量为m，其重力荷载为G。抗倒塌子结构的连续倒塌抗力性能用抗力弹簧K表示，其抗力为$R(\Delta)$，Δ为图1中抗倒塌子结构的节点位移。与倒塌阶段的结构变形相比，竖向支撑构件发生初始破坏前未损伤结构的初始变形非常小，故假设竖向支撑构件破坏瞬间的结构状态为初始未变形状态，相应的质点m的位置为初始位置。假设结构倒塌结束时质点m相对于初始位置的竖向位移为Δ，则失稳质点m以重力做功形式向抗倒塌子结构输入的能量W为：

$$W = G\Delta \tag{1}$$

在此过程中，抗倒塌子结构的弹塑性变形耗能U可表示为：

$$U = \int R(\Delta)\,\mathrm{d}\Delta \tag{2}$$

当抗倒塌子结构的弹塑性变形耗能能力U等于输入能量W时，即满足式(3)时，倒塌过程终止。其临界方程为：

$$U = W \tag{3}$$

式(3)即为倒塌过程中的能量平衡方程，此时得到的U即为抗倒塌子结构所应具有的最小耗能能力，若抗倒塌子结构的耗能能力满足$U \geqslant W$，则抗倒塌子结构就不会发生连续倒塌。

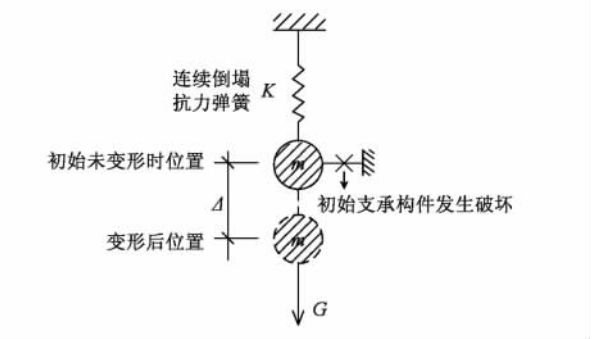


图3　结构抗连续倒塌单自由度分析模型

Fig. 3　Single degree of freedom model for PC analysis

针对抗倒塌子结构，基于上述能量平衡原理，可建立结构线性(或非线性)静力抗力需求与结构非线性动力抗力需求关系(结构静-动力抗力需求)，具体方法如下：

(1)采用线性(或非线性)静力分析方法，计算移除支撑构件后抗倒塌子结构在不平衡荷载G作用下

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的静力抗力需求 $R_S(G,\Delta_S)$，其中 Δ_S 为移除支撑构件后不平衡荷载 G 作用下抗倒塌子结构的静力位移。

(2) 根据抗倒塌子结构非线性抗力 R-Δ 关系，由式(1)～(3)的能量平衡方程确定不平衡荷载 G 作用下抗倒塌子结构的非线性动力抗力需求 $R_{ND}(G,\Delta_{ND})$，其中 Δ_{ND} 是抗倒塌子结构非线性动力位移。

(3) 抗倒塌子结构的屈服位移 Δ_y、静力位移响应 Δ_S 和非线性动力位移响应 Δ_{ND} 都位于结构非线性抗力 R-Δ 关系曲线上，因此分别定义结构的非线性变形系数 μ 和屈服系数 β 为:

$$\mu = \frac{\Delta_{ND}}{\Delta_y} \tag{4}$$

$$\beta = \frac{\Delta_y}{\Delta_S} \tag{5}$$

(4) 合并式(1)～(3)，并令 γ 为结构非线性动力抗力需求 R_{ND} 与静力抗力需求 R_S 之比，即可得到抗倒塌子结构的静-动力抗力需求关系为:

$$\gamma = \frac{R_{ND}(G,\Delta_{ND})}{R_S(G,\Delta_S)} = f(\mu,\beta) \tag{6}$$

式(6)中静-动力抗力需求关系系数 γ 即为考虑非线性影响的动力放大系数，也可理解为“结构抗连续倒塌的最低承载力储备需求”，即相对于结构静力抗力需求点 $R_S(G,\Delta_S)$，为满足结构抗连续倒塌目标所需的最低承载力储备需求。若已知抗倒塌子结构的塑性极限变形 Δ_u 和屈服系数 β，则通过式(6)可以获得 γ 的最小值 γ_{min}，其物理意义是: 结构在满足与不平衡重力荷载静力平衡的条件下，为满足倒塌动力过程的耗能要求所需的额外抗力。

由于 RC 框架在梁机制和悬链线机制下的连续倒塌抗力曲线具有不同的特征，因此两种机制下抗倒塌子结构的抗力与构件抗力需求关系也有所不同，需分别进行讨论。本文首先介绍梁机制下 RC 框架结构连续倒塌抗力需求的分析方法，悬链线机制下的抗力需求分析将在文献[13]中介绍。

3 梁机制下的结构抗力曲线

当结构中各层框架梁均满足各自的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，因此以下取图 1a 梁机制抗倒塌子结构中的一个框架梁进行抗力需求分析，如图 4 所示。RC 框架结构梁机制下的结构抗力由框架梁端受弯承载力提供。为便于分析，假设不平衡重力荷载为集中质量 m'(重力为 G)，由于竖向构件破坏可能对其所支撑的节点(图 4 中的集中质量 m')造成损伤，其受弯承载力不可靠，不考虑其受弯能力贡献，故重力 G 只由框架梁两端支座处的受弯能力 M_1 和 M_2 分担，并假定梁 1 和梁 2 的截面参数相同。需要指出的是，荷载的作用形式、梁的几何尺寸和材料参数以及跨中弯矩的存在，仅对梁 1 和梁 2 间分担荷载的比例产生影响，与结构(构件)的静-动力抗力需求间的关系无关，因此基于上述假设所推导的结论具有普遍性，其证明见本文附录。

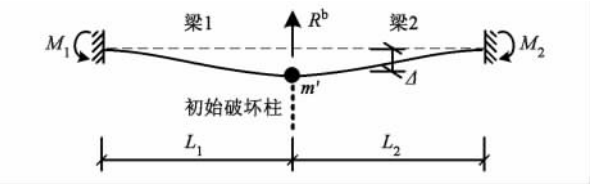
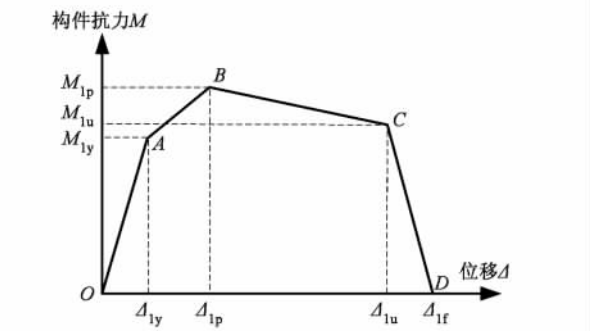


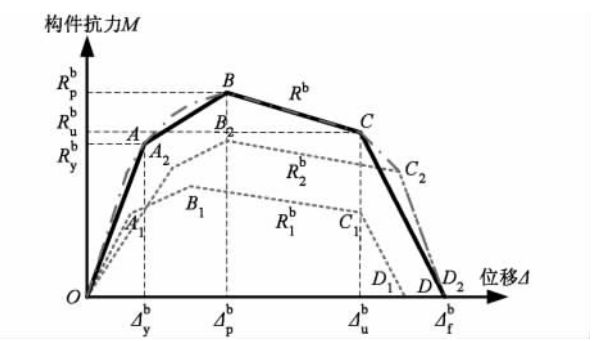
图 4 抗倒塌子结构梁机制示意图

Fig. 4 Schematic diagram of substructure under beam mechanism

质点 m' 的位移、结构和构件的变形可用节点位移 Δ 来描述。梁 1 和梁 2 的构件抗力需求分别为梁端受弯承载力需求 M_1 和 M_2，梁 1 和梁 2 组成的抗倒塌子结构的抗力需求为 R^b(图 4)。单个框架梁的构件抗力(支座处受弯承载力)曲线可简化为图 5a 所示的多折线，包括线性段 OA、强化段 AB、下降段 BC 和破坏段 CD。图 5a 中 M_{1y}、M_{1p}、M_{1u} 分别为梁 1 的屈服抗力、峰值抗力和极限抗力，相应的 Δ_{1y}、Δ_{1p}、Δ_{1u}、Δ_{1f} 分别为梁 1 的屈服位移、峰值位移、极限位移、破坏位移。极限位移 Δ_{1u} 是指梁 1 左端塑性铰破坏、承载力开始大幅降低所对应的位移(图 5a 中 C 点)，相



(a) 构件抗力



(b) 子结构抗力

图 5 梁机制下结构和构件抗力曲线

Fig. 5 Resistance curves of structure and member under beam mechanism

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

应的抗力为极限抗力 M_{1u}。梁 2 的相关参数的含义与梁 1 相同。

根据梁的内力平衡条件，可得梁机制下抗倒塌子结构的抗力需求 R^b 与框架梁的构件抗力需求 M_1 和 M_2 的关系为：

$$R^b = R_1^b + R_2^b = \frac{M_1}{L_1} + \frac{M_2}{L_2} \tag{7}$$

因此，通过式(7)可将梁 1 和梁 2 的构件抗力需求 M_1 和 M_2 转换为各自的倒塌抗力需求 R_1^b 和 R_2^b，两者之和 $(R_1^b + R_2^b)$ 即为由梁 1 和梁 2 组成的抗倒塌子结构的抗力需求 R^b（图 5b 中点划线）。R^b 的抗力曲线也包括弹性工作段 OA、强化段 AB、下降段 BC 和破坏段 CD。其中 R_y^b、R_p^b、R_u^b 分别为结构在梁机制下的屈服抗力、峰值抗力和极限抗力，Δ_y^b、Δ_p^b、Δ_u^b、Δ_f^b 分别为相应的抗倒塌子结构的屈服位移、峰值位移、极限位移、破坏位移。其中，屈服位移 Δ_y^b 参照 Pujol 等[12]的工作，按式(8)确定。

$$\Delta_y^b = \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2} \tag{8}$$

式中：Δ_1 为抗倒塌子结构中的第一个梁发生屈服时的结构位移；Δ_2 为所有梁进入屈服时的结构位移。峰值位移 Δ_p^b 为抗倒塌子结构达到峰值抗力时的位移。徐福江[14]对国内外 154 个弯曲破坏梁（剪跨比大于 2）试验数据的统计结果表明，梁的极限位移 Δ_u 大致是屈服位移 Δ_y 的 10 倍。这表明除非特殊情况（如共节点的多个框架梁的跨度之比超过 10），组成抗倒塌子结构的多个框架梁能够共同达到较高的抗力水平。所以梁机制下结构的峰值抗力可以取所有框架梁的峰值弯矩按式(7)转换得到的结构抗力，相应的结构峰值位移取最大跨度梁的峰值位移。极限位移 Δ_u^b 可以取最小跨度梁受弯承载力大幅下降时的极限位移 Δ_u，相应的结构抗力为极限抗力 R_u^b。破坏位移 Δ_f^b 取所有框架梁受弯承载力都失效时的结构位移 Δ_f。

抗倒塌子结构的真实抗力曲线如图 5b 中点划线所示。取上述关键点的连线作为抗倒塌子结构的简化抗力曲线（图 5b 中的实线）。因为可能存在抗倒塌子结构极限抗力 $R_u^b < G$ 的情况，梁机制抗倒塌子结构下降段的抗力不可靠，因此在梁机制抗力需求分析中仅考虑结构抗力的上升段贡献，即梁机制下抗倒塌子结构的耗能能力仅考虑到图 5b 中的 B 点。

4 梁机制下抗倒塌子结构的非线性动力抗力需求

RC 框架结构梁机制下抗倒塌子结构的非线性抗力曲线可取图 6 所示的强化型非线性模型。考虑到线性静力设计时结构抗力需满足与不平衡重力荷载 G 的力平衡条件，所以结构屈服抗力 $R_y^b > G$，因此梁机制下抗倒塌子结构的静力抗力需求 R_{LS}^b 在其抗力曲线的线性段（图 6 中 A 点）。由力平衡关系可得梁机制下抗倒塌子结构的线性静力抗力需求 $R_{LS}^b = G$。

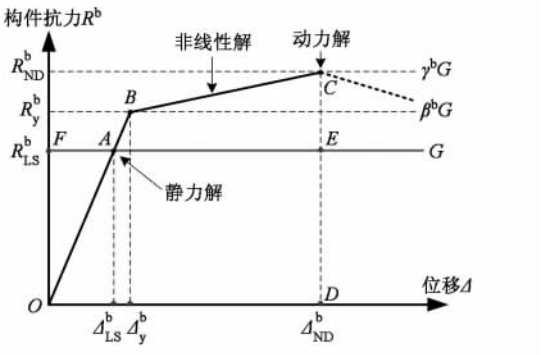


图 6 结构梁机制的抗力需求

Fig. 6 Resistance demands of structure under beam mechanism

图 6 中的 C 点位移为结构变形能力极限，即抗倒塌子结构的非线性动力解的上限。根据能量平衡原理，抗倒塌子结构还需满足式(9)的能量平衡关系，即结构的耗能（$OBCD$ 包围的面积）等于结构不平衡质量的势能差（$OFED$ 包围的面积）。因此由前述能量平衡方法得到的式(1)～(3)，可得梁机制下抗倒塌子结构非性动力抗力需求 R_{ND}^b 与相应的非性动力结构位移 Δ_{ND}^b 的关系为：

$$G\Delta = \frac{1}{2}R_y^b\Delta_y^b + \frac{1}{2}(R_y^b + R_{ND}^b)(\Delta_{ND}^b - \Delta_y^b) \tag{9}$$

其中：R_y^b 为梁机制下抗倒塌子结构的屈服抗力；Δ_y^b 为梁机制下抗倒塌子结构的屈服位移；R_{ND}^b 为梁机制下抗倒塌子结构的动力抗力需求；Δ_{ND}^b 为梁机制下抗倒塌子结构的动力位移响应，Δ_{ND}^b 取图 6 中 C 点的位移。

根据式(5)的定义，并考虑到抗倒塌子结构的线性静力抗力需求点 A 和抗力屈服点 B 均位于结构抗力曲线的线性段，因此梁机制下抗倒塌子结构的屈服系数为：

$$\beta^b = \frac{\Delta_y^b}{\Delta_{LS}^b} = \frac{R_y^b}{R_{LS}^b} \tag{10}$$

由式(9)和式(10)可得梁机制下抗倒塌子结构的动力抗力需求为：

$$R_{ND}^b = \frac{2G\Delta_{ND}^b - \beta^b R_{LS}^b \Delta_{ND}^b}{\Delta_{ND}^b - \Delta_y^b} \tag{11}$$

考虑式(4)和式(6)的定义，由 $R_{LS}^b = G$，可以得到梁机制下抗倒塌子结构非线性动力抗力需求 R_{ND}^b 与其线性静力抗力需求 R_{LS}^b 间的关系 γ^b 为：

$$\gamma^b = \frac{R_{ND}^b}{R_{LS}^b} = (2 - \beta^b) \cdot \frac{\mu^b}{\mu^b - 1} \tag{12}$$

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

其中 $\mu^b = \Delta^b_{ND}/\Delta^b_y$，为梁机制下抗倒塌子结构的非线性变形系数。

抗倒塌子结构的极限变形能力决定了其非性动力结构位移需求 Δ^b_{ND} 的最大值 $(\Delta^b_{ND})_{max}$，此时结构的最大非线性变形系数 $(\mu^b)_{max}$ 即为结构的延性系数 μ^b_u:

$$\mu^b_u = \frac{(\Delta^b_{ND})_{max}}{\Delta^b_y} = (\mu^b)_{max} \tag{13}$$

因此，梁机制下抗倒塌子结构抗连续倒塌的最低承载力储备需求 $(\gamma^b)_{min}$ 为:

$$(\gamma^b)_{min} = (2-\beta^b)\cdot\frac{\mu^b_u}{\mu^b_u-1} \tag{14}$$

由于结构初始设计时已满足线性静力要求 $R^b_y > G = R^b_{LS}$，所以有 $\beta^b > 1$；若 $\beta^b \geqslant 2$，其解则为线性动力抗力需求。因此，$1 < \beta^b < 2$，即 $0 < 2-\beta^b < 1$。在设计中可偏保守的取:

$$(\gamma^b)_{min} = \frac{\mu^b_u}{\mu^b_u-1} \tag{15}$$

5 梁机制下抗倒塌子结构抗力需求与构件抗力需求关系

确定抗倒塌子结构的抗力需求后，还需根据抗倒塌子结构抗力与其构件抗力间的关系，将抗倒塌子结构抗力需求转换为构件抗力需求。由图4可知，梁的线性静力抗力需求 $(M_1)_{LS}$ 和 $(M_2)_{LS}$ 分别为:

$$(M_1)_{LS} = -\frac{6E_1I_1\Delta}{L_1^2} \tag{16a}$$

$$(M_2)_{LS} = -\frac{6E_2I_2\Delta}{L_2^2} \tag{16b}$$

由式(7)、式(16)可知，构件的线性静力抗力需求 $(M_1)_{LS}$ 和 $(M_2)_{LS}$ 与结构的线性静力抗力需求 R^b_{LS} 之间满足线性关系如下:

$$(M_1)_{LS} = \frac{E_1I_1L_1L_2^3}{E_1I_1L_2^3+E_2I_2L_1^3}R^b_{LS} \tag{17a}$$

$$(M_2)_{LS} = \frac{E_2I_2L_1^3L_2}{E_1I_1L_2^3+E_2I_2L_1^3}R^b_{LS} \tag{17b}$$

在非线性阶段，构件动力抗力需求 $(M_1)_{ND}$、$(M_2)_{ND}$ 和结构动力抗力需求 R^b_{ND} 不再满足式(17)的线性关系。但在设计中，如果保证结构和构件的非线性抗力需求保持式(17)的关系不变，则相应的构件动力抗力需求为:

$$(M_1)_{ND} = \frac{E_1I_1L_1L_2^3}{E_1I_1L_2^3+E_2I_2L_1^3}R^b_{ND} \tag{18a}$$

$$(M_2)_{ND} = \frac{E_2I_2L_1^3L_2}{E_1I_1L_2^3+E_2I_2L_1^3}R^b_{ND} \tag{18b}$$

因此，梁机制下构件动力与线性静力抗力需求的关系 γ^b_m 和抗倒塌子结构动力与线性静力抗力需求关系 γ^b 之间满足:

$$\gamma^b_m = \frac{(M_1)_{ND}}{(M_1)_{LS}} = \frac{(M_2)_{ND}}{(M_2)_{LS}} = \frac{R^b_{ND}}{R^b_{LS}} = \gamma^b \tag{19}$$

进一步，梁机制下构件抗连续倒塌最低承载力储备需求 $(\gamma^b_m)_{min}$ 和结构抗连续倒塌最低承载力储备需求 $(\gamma^b)_{min}$ 之间满足关系式为:

$$(\gamma^b_m)_{min} = (\gamma^b)_{min} \tag{20}$$

上述处理方式的物理意义为: 当抗连续倒塌设计使得构件的抗连续倒塌承载力储备满足式(15)的最低需求时，结构的抗连续倒塌承载力储备也满足式(15)的最低需求，结构能够达到抗连续倒塌设计目标。因此可直接采用式(15)对构件进行抗力需求计算。

6 算例验证

文献[2]通过非线性静力 Pushdown 分析，获得了6个典型8层 RC 框架结构(3种设防烈度的整体现浇板框架和非整体现浇板框架)在梁机制下的连续倒塌最大结构抗力，而结构的线性静力抗力需求即是1倍竖向重力荷载，两者之比即为梁机制下结构的抗连续倒塌承载力储备实际值 γ^b。当结构的抗连续倒塌承载力储备实际值大于等于式(15)的结构抗连续倒塌最低承载力储备需求 $(\gamma^b)_{min}$ 时，即 $\gamma^b \geqslant (\gamma^b)_{min}$ 时，结构可满足抗连续倒塌要求，反之如果 $\gamma^b < (\gamma^b)_{min}$，则不满足抗连续倒塌要求。

文献[1]通过非线性动力拆除构件法对上述算例的抗连续倒塌能力进行了检验。图7给出了这6个典型8层框架所有抗倒塌子结构承载力储备实际值 γ^b，其中非线性动力拆除构件分析[1]中发生倒塌的工况用空心点标出，未发生倒塌的工况用实心点标出。抗倒塌子结构的延性系数 μ^b_u 取 Pushdown 分析中峰值位移 Δ^b_p 和屈服位移 Δ^b_y 的比值，即 $\mu^b_u = \Delta^b_p/\Delta^b_y$。

由图7验算结果可知，本文基于能量平衡原理得到的 RC 框架结构梁机制下抗连续倒塌的最低承载力需求关系(式(15))曲线能够很好的预测结构的抗连续倒塌最低承载力需求: 当结构抗连续倒塌承载力储备设计值 γ^b 大于该需求关系预测的结构抗连续倒塌最低承载力储备需求时，结构基本都可实现抗连续倒塌目标，反之结构则未实现抗连续倒塌目标。此外，由式(15)的抗力需求关系曲线可知，结构的倒塌抗力与结构的延性相关，当结构延性较好时，其倒塌抗力需求较小; 反之，当结构延性较小时，其倒塌抗力需求较大。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

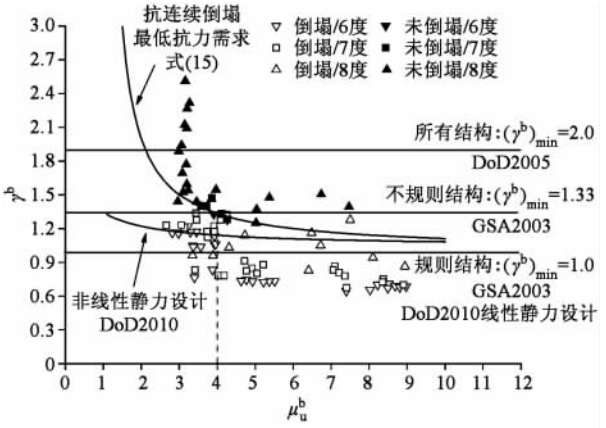


图7　结构梁机制抗连续倒塌承载力储备需求的算例验证

Fig. 7　Validation for PC resistance demand of structure under beam mechanism

7　现有国外规范修正系数的讨论

现有国外规范的线性静力拆除构件设计法中分别采用内力折减系数和动力放大系数考虑非线性和动力效应的影响，这两个修正系数之积相当于本文提出的最低抗连续倒塌承载力储备 $(\gamma^b)_{min}$，将现有规范的抗连续倒塌承载力储备在图7中标注，可以发现现有国外规范所规定的抗连续倒塌承载力储备间的差异较大，从而可能会影响到抗连续倒塌涉及的可靠性或经济性，具体如下：

(1) DoD2005[15] 对于所有结构取 $(\gamma^b)_{min}=2.0$，远高于大部分未发生连续倒塌算例的承载力储备需求。这表明DoD2005的要求远高于实际需求。从理论角度分析，该结果为线弹性结构的抗连续倒塌承载力储备需求，如果按该值进行设计，则结构在局部初始破坏发生后，剩余结构保持线弹性，这将导致设计结果较为保守。

(2) GSA2003[4] 对规则结构取 $(\gamma^b)_{min}=1.0$，有一半发生连续倒塌的结构算例的抗连续倒塌承载力储备需求都高于于该值，这表明该储备要求低于实际需求。从理论角度分析，该储备要求相当于不考虑结构倒塌过程中的动力效应，因此会导致不安全的设计结果。DoD2010[5] 的线性静力拆除构件法修改了DoD2005的规定，与GSA2003中规则结构的要求保持一致，也取 $(\gamma^b)_{min}=1.0$，因此DoD2010也存在类似问题。

(3) GSA2003[4] 对不规则结构取 $(\gamma^b)_{min}=1.33$，该值基本处于连续倒塌算例和未发生连续倒塌算例间的界限上，本文中发生连续倒塌的算例抗连续倒塌承载力储备都低于该值，这表明该储备要求较为合理。

(4) DoD2010[5] 的非线性静力拆除构件法采用了一个与延性相关的承载力储备值，但是该值的取值依然偏低，可能导致不安全的设计结果。

通过上述讨论可见，现有规范的线性静力拆除构件法中关键参数的取值主要依靠经验，缺乏理论基础，导致设计结果的安全度偏高或偏低。本文基于能量平衡原理建立的抗力需求关系(式(15))，能够从理论上更清晰的描绘RC框架在梁机制下的倒塌抗力需求，由式(15)可知，抗连续倒塌承载力储备需求与结构延性系数 μ_u^b 相关，而 μ_u^b 一般需要通过试验或分析确定，为减少抗连续倒塌设计的工作量，可偏于安全给出结构延性系数 μ_u^b，以简化结构的抗连续倒塌设计。

RC框架结构在梁机制作用下的连续倒塌抗力由不同尺寸和配筋的框架梁的受弯承载力共同提供，结构的延性系数由转动变形能力最弱的框架梁延性系数控制。文献[1-2]的典型8层RC框架结构算例中，不同部位抗倒塌子结构的延性系数在3～9之间，与徐福江[14]对国内外的154个弯曲破坏梁(剪跨比均大于2)试验数据的统计一致。GB 50010—2002《混凝土结构设计规范》偏于保守的给出了RC框架梁的延性系数(3～4)。将 $\mu_u^b=4$ 代入本文建议的抗连续倒塌承载力储备需求公式(式(15))中，可得梁机制下结构抗连续倒塌最低承载力储备需求 $(\gamma^b)_{min}=1.33$，与GSA2003[4] 建议的不规则结构一致。本文算例验证也表明该值具有足够的可靠性，同时经济性也较好，因此建议简化设计中可取1.33作为RC框架结构抗连续倒塌设计的最低承载力储备需求。

8　结论

基于能量平衡原理，针对RC框架结构梁机制下的受力特征，从理论上建立了RC框架结构连续倒塌抗力需求的计算方法，为RC框架结构抗连续倒塌设计提供了依据。主要结论如下：

(1) 建立了基于能量的结构连续倒塌抗力需求分析的理论框架，使基于能量的抗力需求计算能够应用于工程设计。

(2) 利用能量平衡原理分析了RC框架结构梁机制下抗倒塌子结构(构件)的线性静力抗力需求与非线性动力抗力需求之间的关系。

(3) 算例分析结果表明，按本文基于能量平衡原理分析得到的RC框架结构梁机制下抗连续倒塌最低承载力储备进行设计，具有足够的可靠性，且经济性也较好。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

附录:梁机制下连续倒塌抗力需求关系的普遍性证明

本文建立的是抗力需求非线性动力解与线性静力解之间的关系,而不是结构抗力和构件抗力间的关系,因此该关系表达式与结构构件的材料、几何等因素无关。该结论也可从数学角度进行如下证明。

当组成子结构的两个梁的几何与材料参数发生变化时,式(16)~(18)中构件抗力和结构抗力间的比例系数发生变化。但是由式(19)可知,该比例系数在计算过程中消去,这表明梁的几何与材料参数的变化将不会改变结构的静-动力抗力需求关系(R^{b}_{ND}/R^{b}_{LS})和构件的静-动力抗力需求关系($(M_1)_{ND}/(M_1)_{LS}$或$(M_2)_{ND}/(M_2)_{LS}$)。同理可知,不同的结构布置(如更多的梁参与作用)和荷载形式,以及跨中弯矩的存在仅对式(7)产生影响,进而影响式(17)~(18)中构件抗力和结构抗力间的比例系数,但不对结构和构件的静-动力抗力需求关系产生影响。因此本文推导抗连续倒塌最低承载力储备要求(式(15))具有普遍性,能够应用于任意RC框架结构的梁机制抗连续倒塌设计中。

参 考 文 献

[1] 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]. Buiding Science,2011,27(5):12-18.(in Chinese))

[2] 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))

[3] 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))

[4] GSA2003 Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization project[S]. Washington DC:United States General Services Administration,2003.

[5] DoD2010 Design of structures to resist progressive collapse[S]. Washington DC:Department of Defense,2010.

[6] Powell G. Progressive collapse case studies using nonlinear analysis[C]//Metropolis & Beyond:Proceeding of ASCE/SEI Structures Conference. New York:ASCE/SEI,2005.

[7] Marjanishvili S M,Agnew E. Comparison of various procedures for progressive collapse analysis[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities,ASCE,2006,20(4):365-374.

[8] Ruth P,Marchand S M,Williamson E B. Static equivalency in progressive collapse alternate path analysis:reducing conservatism while retaining structural integrity[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities,ASCE,2006,20(4):349-364.

[9] Dusenberry D O,Hamburger R O. Practical means for energy-based analyses of disproportionate collapse potential[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities,2006,20(4):336-348.

[10] Izzuddin B A,Vlassis A G,Elghazouli A Y,et al. Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss:part I:simplified assessment framework[J]. Engineering Structures,2008,30(5):1308-1318.

[11] Vlassis A G,Izzuddin B A,Elghazouli A Y,et al. Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss:part II:application[J]. Engineering Structures,2008,30(5):1424-1438.

[12] Pujol S,Smith-Pardo J P. A new perspective on the effects of abrupt column removal[J]. Engineering Structures,2009,31(4):869-874.

[13] 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 Xinzheng,YE Lieping. Progressive collapse resistance demand of RC frame structures based on energy method II:catenary mechanism[J]. Journal of Building Structures,2011,32(11):9-16.(in Chinese))

[14] 徐福江. 钢筋混凝土框架-核心筒结构基于位移抗震设计方法研究[D]. 北京:清华大学,2006:77-85.(Xu Fujiang. Studies on displacement-based seismic design methodology of reinforced concrete frame-core wall structures[D]. Beijing:Tsinghua University. 2006:77-85.(in Chinese))

[15] DoD2005. Design of structures to resist progressive collapse[S]. Washington DC:Department of Defense,2005.

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net