

文章编号: 188

结构抗连续倒塌的拉接强度设计方法

李 易^{1,2}, 陆新征^{1,2}, 叶列平^{1,2}, 马一飞^{1,2}, 梁 益^{1,2}

(1. 清华大学 土木工程系, 2. 清华大学 结构工程与振动教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要: 拉结强度法是国外抗连续倒塌设计规范采用的主要设计方法之一, 我国还没有这方面的相关研究。拉结强度法通过假设破坏模式, 将超静定结构在局部转化为静定结构进行分析, 从而对结构的拉结强度进行验算和设计。该方法无需对整个结构进行受力分析, 比较简便易行, 是一种适合工程设计的设计方法。但由于其计算模型过于简化, 设计参数的经验性成分较多, 其可靠性和适用性需要进一步的检验。本文总结了国外抗连续倒塌设计规范的拉结强度法的概念和条文, 通过有限元数值仿真证明了国外拉结强度法不能明显提高我国混凝土框架结构抗连续倒塌能力的结论。最后, 本文对国外拉结强度法的基本拉结强度的计算原理进行了分析, 指出了该方法计算模型的不足, 建议对该方法进行改进使之能够适应我国混凝土框架结构的抗连续倒塌设计。

关键词: 混凝土框架结构, 连续倒塌, 规范设计方法, 拉结强度法

中图分类号: TU375.4

文献标识码: A

Tie force method for progressive collapse resistance of structures

Li Yi^{1,2}, Lu Xinzheng^{1,2}, Ye Lieping^{1,2}, Ma Yifei^{1,2}, Liang Yi^{1,2}

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084, China.

2. Key Laboratory of Structural Engineering and Vibration of China Education Ministry, Tsinghua University)

Abstract: Tie force (TF) method is one of the major design methods proposed by foreign codes to resist progressive collapse, but the related researches are still lack in China. TF method is convenient to implement because it does not need to calculate the response of the whole structure. However, as too many assumptions have been set to build up this method, the empirical factors are needed to be carefully checked to guarantee the safety of the TF design. This paper summarized the conceptions and specifications of TF methods in foreign codes. Then foreign TF methods were proved to be not safety for Chinese concrete frames with nonlinear finite element dynamic analysis. In order to explain this phenomenon, the drawbacks in foreign TF methods were pointed out from the discussion of the fundamental principles of TF methods. And the suggestions from these discussions will be helpful to setup a feasible TF method in China.

Keywords: concrete frame structures; progressive collapse; design codes; tie force method

1. 前言

结构的连续倒塌是指由于意外荷载造成结构的

局部初始破坏, 继而引发连锁反应形成与初始破坏不成比例的破坏。连续倒塌往往引起很大损失, 自从1968年英国 Ronan Point 公寓倒塌事件发生以来, 国外对连续倒塌问题已经进行了四十年的研究。

目前世界上一些主要国家如: 英国^[1-2]、欧洲^[3]、加拿大^[4]、美国^[5-7]、日本^[8]、俄罗斯^[9]都制定了的本国的抗连续倒塌设计规范或设计指南。而我国仅在混

基金项目: 国家十一五科技支撑计划 (2006BAK01A02-09) 和清华大学基础研究基金 (JC2007003)。

作者简介: 李易 (1981—), 男, 湖北襄樊人, 博士研究生。

收稿日期:

混凝土结构设计规范 GB50010^[10]作了简单的说明, 没有提出设计的具体方法和准则, 缺乏可操作性。伴随我国经济和生活水平的提高, 对建筑结构安全的要求和面临的连续倒塌风险也在提高。1990年辽宁盘锦发生由于燃气爆炸导致主体结构倒塌的事故, 2007年山西大同发生一起同样是由于燃气爆炸导致的某居民楼部分坍塌事件, 因此我国亟需一套适合我国工程实际的抗连续倒塌设计方法。

在国外规范的抗连续倒塌设计方法中, 拉结强度法是几种主要的设计方法之一。本文对国外规范中的拉结强度法进行了研究, 为我国的拉结强度法的研究作参考。

2. 国外拉结强度法介绍

拉结强度设计通过已有构件和连接进行拉结, 提供结构的整体牢固性以及荷载的多传递路径。对于各种拉结, 要求其传力路径连续、直接, 并要求拉结强度满足一定的要求。

一般来说, 结构材料不同, 拉结强度的要求也不一样。以内部拉结为例, 英国规范^[2]中混凝土结构和钢结构的内部拉结强度计算公式中荷载组合系数有差异, 本文选择混凝土结构的拉结强度法进行研究。

Ronan Point 公寓事件后, 自英国规范^[2]最先提出了拉结强度法。欧洲规范^[3]也基本采用了和英国规范基本相同的方法, 基本拉结力的计算模型和公式则完全一致。美国国防部规范 DoD2005^[7]认为美国建筑和英国建筑很相似, 目前直接使用英国规范的条文, 但是该规范同时也指出, 仍然需要通过研究工作来证实引用英国规范的拉结强度法时是否需要对相关条文加以修改。因此本文主要通过研究英国规范设计条文的研究, 来了解混凝土结构的拉结强度设计法。

英国规范的拉结强度设计法按照拉结的位置和作用可分为内部拉结、周边拉结、对墙/柱的拉结以及竖向拉结四种类型^[2], 如图 1 所示。对于各种拉结的强度要求如下:

(1) 内部拉结

结构的内部拉结沿互相垂直的两个方向分布在各个楼层, 拉结强度应取下列两者的较大值:

a) $1.0F_t$;

b) $\frac{1.0D+1.0L}{7.5} \frac{I_r}{5} F_t$ 。

其中, D 为该构件承受的恒载标准值; L 为该构件承受的活载标准值; I_r 表示该拉结方向柱距的最大值; F_t 为基本拉结强度 (kN), 取 $20+4n_o$ 和 60 的较小值; n_o 表示建筑的层数。

(2) 周边拉结

在结构的每一层均须提供沿结构周边的有效拉结, 拉结强度必须大于 $1.0F_t$ 。

(3) 对墙/柱的拉结

对于结构的外围柱或墙必须进行水平拉结使其嵌入结构整体, 对于结构的角柱则须在两个方向均进行拉结, 拉结强度取下列两者的较大值:

a) $2.0F_t$ 和 $\frac{I_s}{2.5} F_t$ 的较小值;

b) 该墙/柱承受的荷载标准值的 3%。

其中 I_s 表示层高, 其他符号含义与前述相同。

(4) 竖向拉结

每一根柱/墙均必须从基础到结构顶部进行连续的拉结, 拉结强度必须大于该柱/墙承受的最大楼层荷载标准值, 并且柱的钢筋连接不应设置在与楼层交界处以及楼层柱的中点处。

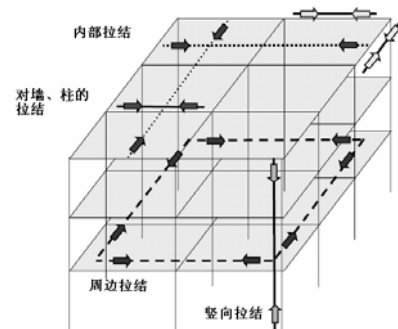


图 1 拉结示意图

Fig. 1 Schematic of Tie Forces in a Frame Structure

3. 国外拉结强度法的应用

采用 PKPM 设计软件建立一个符合我国设计规范的八层框架结构模型, 并计算得到配筋结果。通过有限元方法分析研究原始结构的抗连续倒塌性能。然后应用英国规范中的拉结强度设计法进行设计, 并用有限元方法评估拉结强度法的设计效果。

3.1 工程概况

结构首层层高 4.2m, 其余层高 3.6m。框架梁、柱和楼板均为现浇, 柱截面尺寸 550×550mm, 纵梁截面尺寸 300×550mm, 横梁截面尺寸 300×500mm, 楼板厚度 120mm。房屋内外隔墙均为轻质墙。柱脚假设理想固接于地面。梁、板、柱混凝土强度等级均采用 C30, 纵向受力钢筋选用 HRB335, 箍筋选用 HPB235。建筑场地土类型为 II 类, 抗震设防烈度为 8 度, 设计基本地震加速度值为 0.20g, 设计地震分组为第一组。框架抗震等级为二级, 周期折减系数取 0.75。荷载取值和组合均按照我国相关规范^[11]进行。

3.2 有限元方法介绍

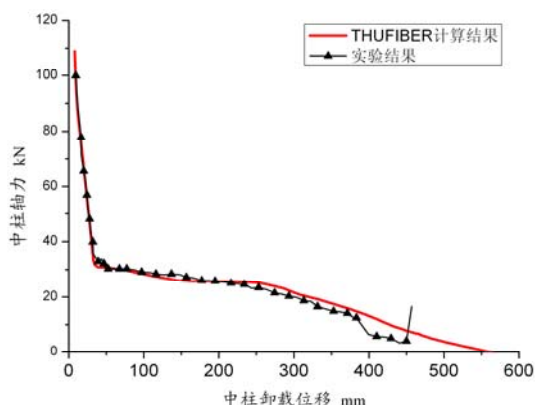


图 2 文献[12]试验结果与 THUFIBER 程序分析结果的对比
Fig.2 Comparison of THUFIBER program results to experimental results in literature[12]

对结构的倒塌破坏过程进行准确的仿真模拟是进行结构抗连续倒塌能力分析的基础。清华大学开发了适用于钢筋混凝土杆系结构的 THUFIBER 纤维梁程序, 该程序在钢筋混凝土框架结构抗震和抗倒塌分析方面有着成功的应用。图 2 为 THUFIBER 程序对湖南大学平面框架连续倒塌试验^[12]的模拟, 该程序准确的计算了该试验过程中的大变形和破坏过程, 计算结果和试验吻合良好, 显示出该程序的准确性和可靠性。本文将以此程序作为检验结构连续倒塌的工具。

3.3 国外拉结强度法的应用

用第 2 节中的拉结强度法对本节算例进行抗连续倒塌设计。用 THUFIBER 对原始结构和经过拉结强度法加强之后的结构进行模拟, 分析结构的抗连续倒塌性能。采用非线性动力分析方法, 逐个拆除结构的每层长短边中柱、角柱以及底层中间柱, 检验结构是否发生倒塌。图 3 和图 4 为倒塌模拟的典型工况。表

1 为原始结构和拉结强度法设计之后的结构的倒塌模拟分析结果, 可以发现, 国外规范中的拉结强度法应用于我国建筑结构的效果并不明显。

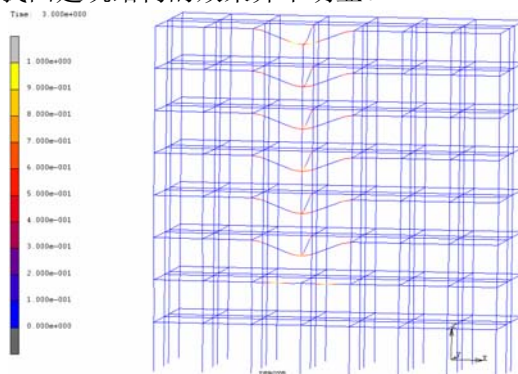


图 3 第三层长边中柱拆除后, 其支承的上部结构未发生倒塌
Fig. 3 Structure survived after a column near the middle of the long side on the third floor was removed

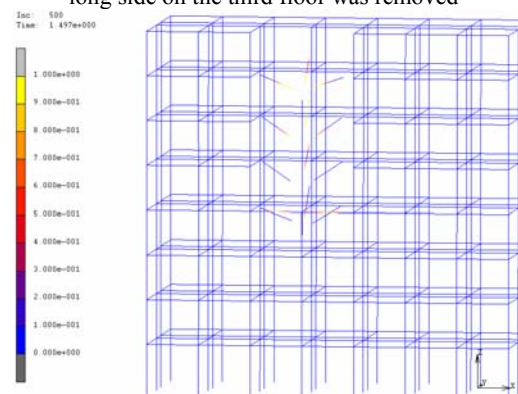


图 4 第五层长边中柱拆除后, 其支承的上部结构发生倒塌
Fig. 4 Structure collapsed after a column near the middle of the long side on the fifth floor was removed

表 1 原始结构和拉结设计后结构的倒塌模拟分析结果

Table 1 The results of simulations for collapse of original frame and frame after TF design

		角柱	长边中柱	短边中柱	内柱
首层	原始结构	不倒塌	不倒塌	不倒塌	不倒塌
	加强结构	不倒塌	不倒塌	不倒塌	不倒塌
第 2 层	原始结构	不倒塌	不倒塌	不倒塌	—
	加强结构	不倒塌	不倒塌	不倒塌	—
第 3~4 层	原始结构	倒塌	不倒塌	不倒塌	—
	加强结构	倒塌	不倒塌	不倒塌	—
第 5~8 层	原始结构	倒塌	倒塌	不倒塌	—
	加强结构	倒塌	倒塌	不倒塌	—

4. 国外拉结强度法的问题

国外规范的拉结强度法基于的工程背景与我国不同, 在材料参数、可靠度、设计方法等方面均有差异, 因此将其应用在我国工程结构上将不能满足抗连续倒塌要求。但是除此以外, 其方法本身也有不足之

处, 有些研究发现即使满足现行拉结强度规定, 结构在抵御连续倒塌方面仍然具有明显的弱点^[13]。因此有必要对国外规范拉结强度法的基本原理及其不足进行分析。

4.1 国外拉结强度法设计基本原理

由第2节所述可知, 拉结强度法中对各种拉结的强度要求都是基于基本拉结强度 F_t 进行的, 基本拉结强度表示的是满足抗连续倒塌时构件所需要得最小连接力, 拉结强度法以此为基础构建了整个拉结强度法的体系。

为较为简便的获得构件在极限状态下所需的基本拉结强度, 国外规范假设结构的极限破坏模式为悬链线机理, 认为水平构件能够通过发挥出悬链线作用来避免本层构件坠落破坏, 从而将整个复杂的超静定结构转化为一个静定结构来进行分析, 其计算简图如图5所示。

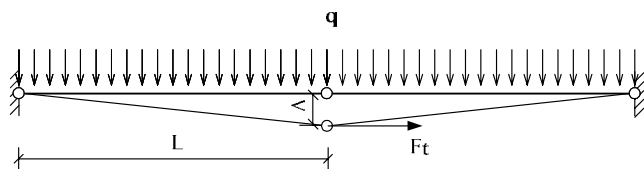


图5 国外规范基本拉结强度计算简图

Fig.5 Calculating diagram for basic tie strength in foreign codes

根据计算简图可以得到:

$$F_t = \frac{qL^2}{2\Delta} \quad (1)$$

式中, F_t 为跨中塑性铰的总拉力, q 为作用在梁上的均布荷载, L 为梁跨度, Δ 为梁可接受挠度。

在英国规范中, 用几个代表性值带入(1)式获得了基本拉结强度, 其中楼面恒载取 3.6kN/m^2 , 活载取 1.2kN/m^2 , 跨度为 5m , 挠度取 $L/5$, 这样得到 $F_t=60\text{kN/m}$ 。

4.2 国外拉结强度法的问题

(1) 未考虑集中荷载影响

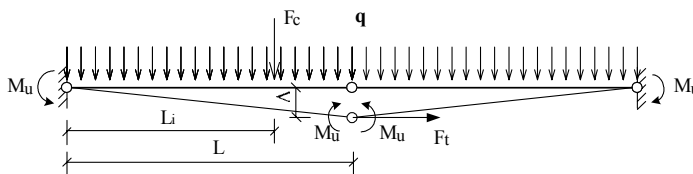


图6 实际工程中梁在拉结时的受力情况

Fig.6 Force condition of tie beams in practical engineering

国外拉结强度法的计算模型只考虑了均布荷载, 未考虑集中荷载的作用。以本文算例为例, 拆除柱上

方的未破坏柱自重产生的集中力没有考虑。在具体工程实践中, 次梁的存在和不规则的结构布置也会产生集中力。考虑集中力作用的计算简图如图6所示, F_c 为集中力, L_i 为集中力的作用位置。

(2) 未考虑梁端塑性弯矩

国外拉结强度法中的悬链线机理只考虑了梁的轴向拉结力, 实际上对于钢筋混凝土梁而言, 破坏极限状态并非完全的悬链线机构, 梁端还有塑性弯矩的存在。特别是对于经过抗震设计的结构, 其梁端的上部钢筋配置较高, 能够提供较大的梁端负弯矩。如图6所示, M_u 为极限塑性弯矩。在国外抗连续倒塌规范的非线性动力分析中, 要求在计算过程中在塑性达到一定程度的部位插入塑性铰和极限塑性弯矩^[6-7], 也是基于这样的考虑。

(3) 未考虑荷载的空间传力;

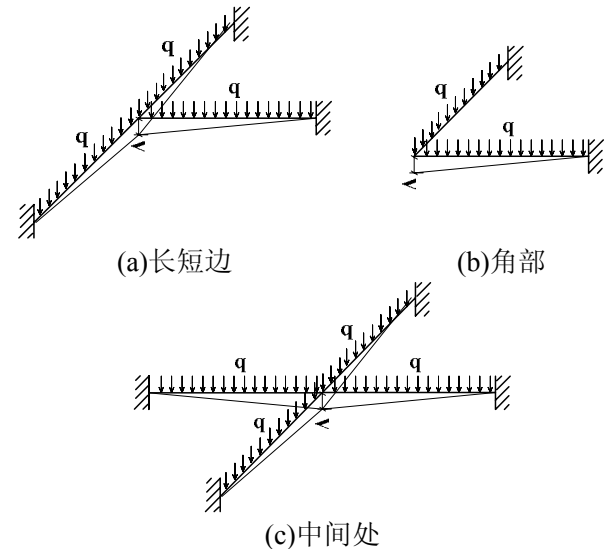


图7 不同位置处的基本拉结强度计算简图

Fig.7 Calculating diagram for basic tie strength in diferent locations

实际的结构是一个空间传力体系, 国外拉结强度法计算基本拉结强度时并没有考虑不同位置处的空间传力特点。即使相同跨度、相同刚度的梁所处的位置不同时, 在拉结时所需要分担的拉力也不同, 因此应该对不同位置处的基本拉结强度分类计算获得, 如图7。

(4) 未考虑不同位置处梁极限挠度的不同

梁所能容许的最大挠度对基本拉结强度影响较大, 容许挠度越大, 所需要的拉结力就越小, 国外规范规定梁挠度均取 $1/5$ 跨度。实际上, 不同位置处的

梁所能容许的最大挠度也不同。例如, 对于中间处的情况, 如图 7 (c), 由于参与不平衡荷载分配的梁较多, 可以通过增大容许最大挠度, 来适当降低每个梁提供的拉结力。

(5) 楼层高度超静定次数影响考虑不合理

在国外基本拉结强度的计算时, 取 $(20+4n_o)$ kN 和 60kN 的较小值 (n_o 表示建筑的层数)。这意味着对于层数较低的结构需要的拉结力较小, 而事实上, 层数较高的结构由于其超静定次数较高, 结构在局部发生初始破坏后, 剩余结构中参与分担不平衡荷载的构件较多, 抵御抗连续倒塌的能力也强一些, 所需要的拉结力相应就小一些。

5. 结论

现有国外抗连续倒塌设计规范中的拉结强度法的设计条文并不适合我国建筑结构, 除了在工程背景的不同, 其设计条文的基础——基本拉结强度的计算上也有不足。因此在研究我国拉结强度法时需要对外基本拉结强度的计算模型和计算公式进行改进。

参考文献

- [1] Moore D B. The UK and European regulations for accidental actions [C]. Workshop on Prevention of Progressive Collapse, National Institute of Building Sciences, Washington, D.C
- [2] BS 8110-1: 1997, Structural use of concrete: Part 1: Code of practice for design and construction[S].
- [3] Draft prEN 1991-1-7, Eurocode 1-Actions on structures,Part 1-7: General Actions - Accidental actions[S].
- [4] NBCC—1995, National Building Code of Canada [S].
- [5] Building code requirements for structural concrete (ACI 318M-02) and commentary (ACI 318RM-02) [S]. American Concrete Institute, 2002.
- [6] GSA2005, Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization project[S].
- [7] UFC 4-023-03, Design of Structures to Resist Progressive Collapse[S].
- [8] Japanese Society of Steel Construction & Council on Tall Building and Urban Habitat: Guidelines for Collapse Control Design –Construction of Steel Buildings with High Redundancy, 2005.
- [9] 俄罗斯防止连续倒塌措施(MTCH-19-05, 附件 6.1) [S]
- [10] GB50010-2002, 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
GB50010-2002, Code for design of concrete structures [S], Beijing: China Building Industry Press, 2001.
- [11] GB50009-2001, 建筑结构荷载规范[S]. 北京, 中国建筑工业出版社, 2001
GB50009-2001, Load code for the design of building structures[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2001.
- [12] 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, 28(5):104-109.
Yi WJ, He QF, Xiao Y. Collapse performance of RC frame structure[J], Journal of building structures, 2007, 28(5):104-109.
- [13] Abruzzo John, Matta Alain, Panariello Gary. Study of mitigation strategies for progressive collapse of a reinforced concrete commercial building[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2006, 20(4):384-390.