

[文章编号] 1003-4684(2023)05-0105-05

# 不规则 RC 框架结构抗连续倒塌性能分析

徐明明, 柯长仁

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

**[摘要]** 为研究不规则 RC 框架结构抗连续倒塌性能,采用 ABAQUS 显式模型,建立二层、三层、四层不规则形式不同的十一个平面子结构模型。通过拆除构件法,在十一个平面子结构模型拆除中柱及角柱后进行考虑动力放大系数的非线性静力 Pushdown 分析。结果表明:当建筑结构底层中柱破坏时,不规则建筑结构形式抗连续倒塌性能降低约 30%,并且随着建筑物层数的增加,数值逐渐降低。建筑底层边柱破坏时,结构不规则程度对结构抗连续倒塌能力影响较大,最大降低约 60%。可见:建筑结构在满足其功能与形式的要求的前提下,降低结构的不规则程度或加强裙楼顶部水平承重构件有利于提高结构竖向抗连续倒塌能力并防止剩余结构发生连续性倒塌。

**[关键词]** 连续倒塌; 不规则结构; 子结构; 拆除构件法; 非线性静力分析

**[中图分类号]** TU375.4 **[文献标识码]** A

近年来,随着建筑倒塌事故的发生,国内外学者对建筑结构抗连续倒塌问题开展了一系列的研究。对于规则 RC 框架结构连续性倒塌方面,易伟建<sup>[1]</sup>等在国内较早地对三层 RC 框架结构进行了模拟中柱失效加载试验,研究了平面内 RC 框架结构抗倒塌能力;戎贤<sup>[2]</sup>等进行 1/3 比例的两层 3×2 跨 RC 框架的底层柱失效及静力加载试验;Ma<sup>[3]</sup>等设计单层 1/3 缩尺 RC 框架,对其板柱子结构进行了拆柱试验。对不规则 RC 框架结构连续性倒塌方面的研究,杜永峰<sup>[4-6]</sup>等分别从拆除不同层中柱和塌楼裙楼比例对多个不规则结构放大系数和鲁棒性进行研究;陈锐<sup>[7]</sup>对 4 层 L 型 RC 框架办公楼,分析底层、中间层和顶层构件拆除情况来研究其结构抗连续倒塌能力;Qian<sup>[8]</sup>等设计了十字形平面和空间 RC 框架梁柱子结构模型拟静力加载试验。而基于理论分析的数值模拟方面的研究,杜修力<sup>[9]</sup>采用显式有限元软件 LS-DYNA 对一栋 4 层钢框架结构在爆炸荷载下的连续倒塌性能分析;周云<sup>[10]</sup>等用 ABAQUS 有限元软件对平面框架子结构及多个空间框架静力加载试验;Rousseau<sup>[11]</sup>等将离散单元能量和有限单元能量结合对混凝土板冲击问题进行研究。对上述研究发现,目前不规则 RC 框架结构的抗连续倒塌的研究主要从塔楼层数、拆除结构不同层柱、不规则结构形式和裙楼塔楼跨数等方面分别进行研究,而对结构上部塔楼位置及拆柱位置的研究较为缺乏。

因此本文在杜永峰教授研究的基础上采用 ABAQUS 有限元显示模块,对 26 个不规则 RC 框架结构从结构层数、塔楼裙楼比、塔楼位置和拆除柱位置四个方面综合考虑,进一步对不规则结构抗连续倒塌性能进行了研究,其结构不规则程度,塔楼位置与破坏柱位置对结构抗连续性倒塌影响较大。

## 1 模型设计

### 1.1 设计参数

结构总体信息:首层层高为 3900 mm,其余各层均为 3300 mm。(注:未拆除柱均假定理想固定于地面)材料信息:框架各构件混凝土均采用 C30,各构件受力钢筋及箍筋均选用 HRB400。

荷载信息:楼面恒载 8 kN/m<sup>2</sup>;楼面活载 2 kN/m<sup>2</sup>;屋面恒载 8.5 kN/m<sup>2</sup>;屋面活载 2.5 kN/m<sup>2</sup>。

地震信息:抗震设防烈度取 7 度;地震加速度值取 0.10 g;框架抗震等级取三级。

风荷载信息:修正后基本风压取 0.75 kN/m<sup>2</sup>。

荷载分项系数:恒荷载分项系数取 1.3;活荷载分项系数取 1.5;组合值系数为 0.7;重力荷载代表值系数 0.5;准永久值系数 0.5;频遇值系数 0.6。

### 1.2 PKPM 建模

基于我国现行的建筑结构设计规范<sup>[12]</sup>,采用 PKPM 设计软件分别设计二层,三层,四层 4 跨多

[收稿日期] 2022-03-10

[第一作者] 徐明明(1996—),男,安徽阜阳人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为结构优化与连续倒塌。

[通信作者] 柯长仁(1974—),男,湖北武汉人,湖北工业大学副教授,研究方向为结构优化与连续倒塌。

个 RC 框架结构, 详见下图模型 19-1、1-1、20-1 并计算得到配筋信息。并基于模型 19-1、1-1、20-1 设计不规则形式不同的平面子结构模型对照组, 详见图 1 和表 1。

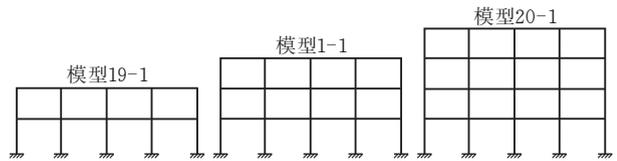


图 1 基础模型

表 1 建筑结构模型参数

模型编号	楼层数	跨数	跨距	柱截面尺寸	梁截面尺寸	保护层厚度	板厚
19-1	二层	四跨	5000	400×400	250×550	20	100
30-1	二层	四跨	5000	400×400	250×550	20	100
32-1	二层	四跨	5000	400×400	250×550	20	100
1-1	三层	四跨	5000	400×400	250×550	20	100
26-1	三层	四跨	5000	400×400	250×550	20	100
28-1	三层	四跨	5000	400×400	250×550	20	100
20-1	四层	四跨	5000	400×400	250×550	20	100
27-1	四层	四跨	5000	400×400	250×550	20	100
31-1	四层	四跨	5000	400×400	250×550	20	100
29-1	四层	四跨	5000	400×400	250×550	20	100
33-1	四层	四跨	5000	400×400	250×550	20	100

## 2 ABAQUS 显式建模方法

### 2.1 拆除构件法及其分析流程

能够造成连续倒塌的偶然荷载情况大致分为五种: 爆炸荷载、撞击荷载、高温荷载、设计或施工失误、地基失效。而当结构在正常使用情况下遭到偶然荷载的影响而引起局部发生破坏并失去原有的承载能力, 剩余结构若不能承担这种内力变化则会最终使整体结构发生不同程度的破坏。拆除构件法的原理则是通过提供有效的替代传力路径, 以提高建筑结构抗连续倒塌能力。

根据 DoD2010 要求, 对于典型框架结构, 需拆除结构边中柱及角柱进行拟静力加载分析, 当底层有其他大空间时, 则有必要对底层内柱也进行拆除研究。本文采取非线性静力法分析, 荷载采取如下组合:  $2(1.2D+0.5L)$ 。其中,  $2$  为动力放大系数,  $D$ 、 $L$  分别为恒载和活载。变形破坏准则使用 GSA2003 规范。规定了: 如果被拆除点出现的最大垂直位移小于该点连接最短梁长度的五分之一, 则不会引起连续倒塌破坏。

下面以平面框架结构为例介绍拆除构件法的步骤如图 2 所示: ①对完整结构施加重力场。②施加初始荷载 ( $dI+0.25II$ ) 进行静力分析, 算得关键柱失效点轴力  $N$ 。③拆除关键柱, 在柱失效节点竖向相邻部位设置约束点位, 在该约束点位上施加竖直向上的轴力  $N$  来代替被拆除的关键柱, 使剩余结构保持原完整建筑结构的平衡状态。④在该约束点位上施加竖直向下的集中荷载  $-N$ , 并以极短的时间 ( $\Delta t$ ) 释放至 0, 模拟关键柱失效。⑤分析拆除关键柱后

剩余结构的动态响应问题。

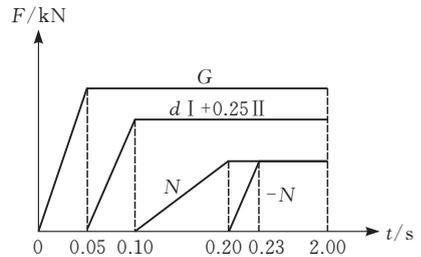


图 2 加载示意图

### 2.2 材料本构

1) 钢筋本构 结构模型建立与计算过程中所使用的钢筋均为 HRB400。根据 GB 50010-2010《混凝土结构设计规范》<sup>[12]</sup> 中的钢筋本构关系, 如图 3 所示。

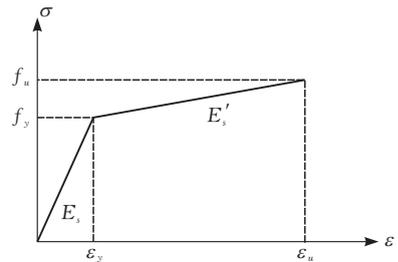


图 3 钢筋本构模型

使用规范中有屈服点钢筋本构关系式。如:

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \epsilon_s, & \epsilon_s \leq \epsilon_y \\ f_{y,r}, & \epsilon_y < \epsilon_s \leq \epsilon_{uy} \\ f_{y,r} + k(\epsilon_s - \epsilon_{uy}), & \epsilon_{uy} < \epsilon_s \leq \epsilon_u \\ 0, & \epsilon_s > \epsilon_u \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $E_s$  为弹性模量;  $\sigma_s$  为钢筋应力;  $\epsilon_s$  为钢筋应变;  $f_{y,r}$  为钢筋屈服强度代表值;  $f_{st,r}$  为钢筋极限强度代表值;  $\epsilon_y$  为与  $f_{y,r}$  相应的钢筋屈服应变, 取

$f_{y,r} / E_s$ ;  $\epsilon_{uy}$  为钢筋硬化起点应变;  $\epsilon_u$  为与  $f_{st,r}$  相应的钢筋峰值应变;  $k$  为钢筋硬化段斜率,  $k = (f_{st,r} - f_{y,r}) / (\epsilon_u - \epsilon_{uy})$ 。

2) 混凝土本构 结构模型中所使用的混凝土为 C30, 根据 GB 50010-2010《混凝土结构设计规范》<sup>[12]</sup> 中的混凝土本构关系, 混凝土抗压强度等级及抗拉强度等级平均值  $f_{cm}$ 、 $f_{tm}$  按照式(2)和式(3)计算:

$$f_{cm} = f_{ck} / (1 - 1.645 \delta_c) \quad (2)$$

$$f_{tm} = f_{tk} / (1 - 1.645 \delta_c) \quad (3)$$

式中:  $f_{cm}$ 、 $f_{ck}$  分别为混凝土抗压强度平均值、标准值;  $f_{tm}$ 、 $f_{tk}$  分别为混凝土抗拉强度平均值、标准值;  $\delta_c$  为混凝土强度变异系数。

混凝土单轴受压应力应变按照式(4)和式(5)计算:

$$\sigma = (1 - d_c) E_c \epsilon \quad (4)$$

$$d_c = \begin{cases} 1 - \frac{\rho_c n}{n - 1 + x^n} & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_c}{\alpha_c (x - 1)^2 + x} & x > 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\alpha_c$  为混凝土单轴受压应力-应变曲线下降段参数值;  $d_c$  为混凝土单轴受压损伤演化参数;  $E_c$  为弹性模量;  $\sigma$  为单轴受压应力;  $\epsilon$  为单轴受压应变。

## 2.3 验证方法

本节对侯炜<sup>[13]</sup>的 2 层 RC 框架子结构连续倒塌拟静力试验开展有限元验证。采用相同的材料本构与建模方法建立与侯炜试验尺寸相同的有限元模型, 采取同样加载方式并将模拟结果与试验结果进行对比分析, 以此核验本文材料本构关系选取的合理性和建模方法的正确性。对比结果可知在相同荷载下的有限元模型最大倒塌位移与试验的最大倒塌位移相同, 总体曲线吻合度较高, 如图 4 所示。

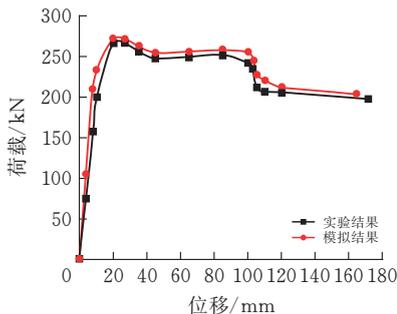


图 4 竖向位移-荷载曲线比较

## 3 非线性静力计算及结果分析

本文所建立的模型跨距均为 5000 mm, 根据倒塌变形准则, 非线性静力分析加载到柱竖向位移达到 920 mm 即可。故本文所有模型均以拆除柱点位竖向位移达到 920 mm 进行研究分析。

图 5 模型 19-1、30-1、32-1 为进行拆除底层中柱计算模型, 其余为进行拆除底层边柱计算模型。由图中数据显示, 从拆除柱静力加载至倒塌时, 均分为三个阶段, I 拱作用阶段、II 悬链线作用阶段和 III 倒塌阶段, 拱作用阶段, 柱轴力与柱竖向位移基本处于线性关系; 悬链线作用阶段, 柱轴力增长变缓, 柱竖向位移继续持续增长; 倒塌阶段柱轴力增长明显缓慢, 柱竖向位移急剧增加。拆除底层中柱计算模型最大柱轴力依次为 225.3 kN、220.3 kN、166.3 kN, 表明当结构整体若依旧为规则建筑, 底层中柱受到偶然荷载破坏时, 裙楼上方有塔楼对整体结构基本无影响, 若裙楼塔楼整体为不规则形式时, 其抗倒塌能力降低了 0.35 倍。拆除底层边柱计算模型最大柱轴力依次为 113.1 kN、97.9 kN、20.8 kN、20.5 kN, 若拆除底层边柱不在塔楼一侧, 则对整体结构抗倒塌能力影响较小, 但依然有 0.1~0.2 倍的降低, 若拆除底层柱在塔楼一侧, 则整体抗倒塌能力急剧降低, 其抗倒塌能力只有规则结构抗倒塌能力的 1/8~1/10。

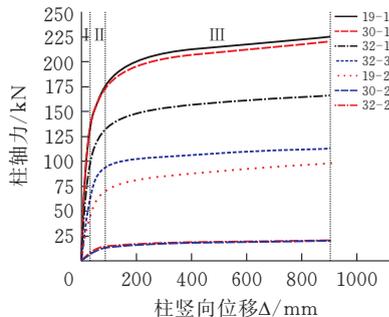


图 5 2 层模型柱荷载-位移

图 6 模型 1-1、26-1、28-1 为拆除底层中柱计算模型, 其余为进行拆除底层边柱计算模型。所有模型进行非线性静力加载试验, 也分为三个阶段。拆除底层中柱轴力最大分别为 330.1 kN、326.6 kN、271.4 kN, 当裙楼上部塔楼在外侧时, 整体建筑结构处于不规则状态, 其抗倒塌能力降低了 0.21 倍。拆除底层边柱最大柱轴力为 145 kN、145.4 kN、98.2 kN、97.9 kN 拆除底层边柱时, 若拆除边柱处于塔楼下方一侧则上部塔楼位置基本无影响, 若拆除底层边柱位于远离塔楼一侧, 则抗倒塌能力较规则建筑结构降低降低了 0.48 倍, 而上部塔楼位置同样对于结构抗倒塌能力基本无影响。此时结构抗倒塌能力达到规则结构抗倒塌能力的 3/10。

图 7 模型 20-1、31-1、33-1 为拆除底层中柱计算模型, 其余为拆除底层边柱计算模型所有模型进行非线性静力加载试验, 分为三个阶段。拆除底层中柱最大柱轴力分别为 433 kN、429.3 kN、375 kN, 拆除底层中柱时若整体结构依然为规则结构, 则结构

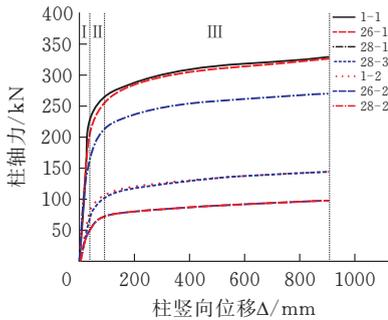


图6 3层模型柱荷载-位移

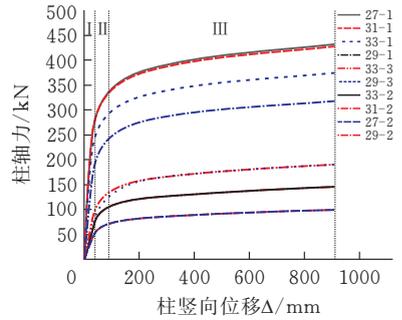


图8 4层不同塔楼层数模型柱荷载-位移

抗倒塌能力几乎没有降低,但上部塔楼在一侧,整体结构呈不规则时,结构抗倒塌能力降低0.15倍。拆除底层边柱时,柱轴力分别为191.3 kN、190.6 kN、144.3 kN、145 kN。若拆除边柱处于塔楼下方一侧则上部塔楼位置基本无影响,若拆除底层边柱位于远离塔楼一侧,则抗倒塌能力较规则建筑结构降低了0.32倍,而上部塔楼位置同样对于结构抗倒塌能力基本无影响。此时结构抗倒塌能力达到规则结构抗倒塌能力的1/3。

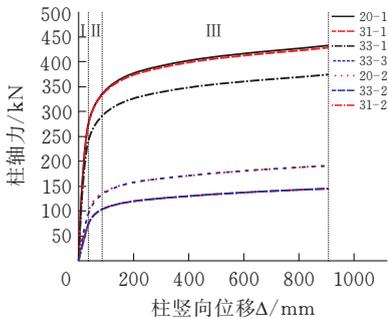


图7 4层一塔楼模型柱荷载-位移

图8所示均为上部设有塔楼计算模型,建筑总层数为4层,分为两层裙楼两层塔楼和三层裙楼一层塔楼。其中27-1、31-1、33-1、29-1为拆除底层中柱计算模型,柱轴力为429.1 kN、429.3 kN、375 kN、316.1 kN。整体结构依然为规则拆除底层中柱时,上部塔楼层数对结构整体抗倒塌能力基本无影响。若塔楼裙楼一侧,结构整体呈不规则形式,结构整体抗倒塌能力分别降低0.14倍和0.36倍,此时结构上部塔楼层数对整体结构抗倒塌能力影响较大。其余为拆除底层边柱模型,柱轴力分别为191.3 kN、190.8 kN、144.3 kN、145 kN、98.1 kN、97.6 kN。当上部塔楼位于裙楼一侧,拆除塔楼下方底层柱时整体结构抗倒塌能力基本不受上部塔楼层数影响。当拆除远离塔楼底层柱,上部塔楼位置对整体结构抗倒塌能力基本无影响,但抗倒塌能力较拆除塔楼侧底层柱降低了0.32倍。上层塔楼数为两层时,拆除远离塔楼底层柱,上部塔楼位置对整体结构抗倒塌能力基本无影响,较只有一层塔楼时,抗倒塌能力降低了0.48倍。

## 4 结论

本文从结构层数、塔楼裙楼比、塔楼位置和拆除柱位置四个方面综合考虑,对不规则RC框架结构抗连续倒塌性能做了分析研究。

1)结构层数与结构抗连续倒塌能力呈正相关,规则建筑结构随层数增长其抗连续倒塌能力分别增长了46.7%、31.2%,不规则建筑结构随层数增长其抗连续倒塌能力分别增长了63.3%、38.4%。总体结构层数与结构抗连续倒塌能力呈正相关,但增长的幅度随结构层数的增长变缓。

2)塔楼层数在底层中柱遭到破坏时对结构整体抗连续倒塌能力影响不大,但边柱破坏时,塔楼层数的增高对抗倒塌能力不利。

3)塔楼位置对结构抗连续倒塌能力影响较大,当塔楼位于中部时,结构形式对于建筑结构抗连续倒塌能力影响不大,当塔楼位于结构一侧时,其抗连续倒塌能力分别降低了32.5%、20.3%、14.4%。总体呈负相关,但当塔楼层数一定时,结构抗连续倒塌能力随建筑结构层数的增长幅度变缓。

4)底层柱破坏位置对结构抗连续倒塌能力影响较大,当底层中柱破坏时,对结构整体抗连续倒塌能力影响在30%以内,当底层边柱破坏时,塔楼处于裙楼中部或一侧,剩余结构抗连续倒塌能力分别只达到规则结构的20.9%、67.3%、75.8%,整体均小于规则结构,但随着层数的增加,其差值缩小。

## [参考文献]

- [1] 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(05):104-109.
- [2] 戎贤,张建新,李艳艳.钢筋混凝土异形柱空间框架抗倒塌试验研究[J].工程力学,2016,33(10):189-196.
- [3] MA F, GILBERT B P, GUAN H, et al. Experimental study on the progressive collapse behaviour of RC flat plate substructures subjected to edge-column and edgeinterior-column removal scenarios [J]. Engineering

- Structures, 2020, 209: 110299.
- [4] 杜永峰,包超,李慧.竖向不规则框架结构连续性倒塌分析[J].防灾减灾工程学报,2014,34(02):229-234.
- [5] 杜永峰,包超,李慧,等.竖向不规则 RC 框架结构连续倒塌动力放大系数研究[J].四川大学学报(工程科学版),2015,47(02):43-49.
- [6] 杜永峰,包超,张尚容,等.竖向不规则 RC 框架抗竖向连续倒塌鲁棒性分析[J].土木工程学报,2014,47(增刊 2):101-107.
- [7] 陈锐.平面不规则 RC 框架结构抗连续性倒塌研究[D].西南交通大学,2015.
- [8] QIAN K, LI B, MA J X. Load-carrying mechanism to resist progressive collapse of RC buildings[J]. Journal of Structural Engineering, 2015, 141(02): 04014107.
- [9] 杜修力,石磊.爆炸荷载作用下钢框架结构连续倒塌分析[J].北京工业大学学报,2013,39(07):986-993.
- [10] 周云,陈太平,胡翔,等.考虑周边结构约束影响的 RC 框架结构防连续倒塌性能研究[J].工程力学,2019,36(01):216-226.
- [11] ROUSSEAU J, FRANGIN E, MARIN P, et al. Multidomain finite and discrete elements method for impact analysis of a concrete structure[J]. Engineering Structures, 2009, 31(11): 2735-2743.
- [12] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [13] 侯炜.钢筋混凝土核心筒抗震性能及其设计理论研究[J].西安建筑科技大学,2011.
- [14] 包超,张尚荣,马肖彤,等.不规则性对基础隔震结构抗连续倒塌性能影响研究[J].地震工程学报,2018,40(03):480-489.
- [15] 程志辉,张震,刘凌菁.不规则框架结构在大震下的倒塌概率分析[J].工程抗震与加固改造,2017,39(01):35-40.
- [16] ZHENG Z, TIAN Y, YANG Z B, et al. Hybrid framework for simulating building collapse and ruin scenarios using finite element method and physics engine[J]. Applied Sciences, 2020, 10(12): 4408.

## Analysis of Progressive Collapse Performance of Irregular RC Frame Structure

XU Mingming, KE Changren

(School of Civil Engin. Architecture and Environment, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China)

**Abstract:** In order to study the progressive collapse resistance of irregular RC frame structures, this paper adopts the ABAQUS explicit model to establish eleven plane substructure models with different irregular forms of two, three, and four layers. By the dismantling member method, in eleven, the nonlinear static Pushdown analysis considering the dynamic amplification factor was carried out after the central column and angle column were removed from the plane substructure model. The results show that the progressive collapse resistance of irregular building forms decreases about 30% when the middle column of the ground floor is destroyed, and the value decreases gradually with the increase in building floors. The structure of the ground floor is irregular when the side column is damaged. The degree has a great influence on the progressive collapse resistance of the structure, and the maximum reduction is about 60%. It can be seen that the building structure is satisfying its function and shape on the premise of the requirements of the formula; reducing the irregular degree of the structure is beneficial to improving the vertical progressive collapse capacity of the structure.

**Keywords:** progressive collapse; irregular structure; minor structure; alternate path method; non-linear static analysis

[责任编辑:裴 琴]