DOI: 10.11883/bzycj-2016-0231 文章编号: 1001-1455(2018)02-0339-06

板状钢筋混凝土结构燃气爆炸荷载安全评估变分法分析*

徐赐敏[1,2],姚文娟[1],房霆宸[3]
(1. 上海大学土木工程系,上海 200444;
2. 上海宝冶工程技术有限公司,上海 200941;
3. 上海建筑工集团有限公司,上海 200080)

摘要: 为快速评定民用建筑在燃气爆炸后的安全性,需要确定爆炸作用在结构上的荷载值。本文中通过变分法中的伽辽金法,从虚位移原理出发,推出燃气爆炸时的面荷载作用值与钢筋混凝土板的几何边界条件、最大挠度、抗弯刚度间的函数关系。结合建筑物爆炸后现场检测的板的最大挠度数据,反推该次燃气爆炸时混凝土板的伪静荷载值,该值在运用数字模拟燃气爆炸过程中管道侧壁面的上压强值范围内;该数值与有限元精确解的误差约 2%。再用该伪静荷载对结构进行静力分析,为快速评估结构安全提供参考。结合建筑物爆炸后的检测,对可能引起燃气爆炸的房间楼面提出了防止连续倒塌的构造措施。

关键词: 反推爆炸值;安全评估;伽辽金法;抗爆措施
中图分类号: O383.2 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

据燃气网资料,2015 年 4 月国内燃气爆炸有 51 起,每一起爆炸,就是一栋楼受灾。建筑物爆炸破坏形态各异,损坏程度与建筑物的结构形式、易损度、建造年代、围护结构形式、起爆点位置、燃气混合浓度等有着密切的关系。为了定量评定灾后的结构安全,精确地建立以爆炸时间为自变量,荷载大小为变量的曲线函数,再用该荷载函数对建筑结构进行动态时程分析,得出结构的动态响应,是最精确的方法。计算结构的应力分布计算工作量很大,通常需用到多种专业软件,如用 LS-DYNA3D 软件进行爆炸荷载的数值模拟,再用 ABAQUS 软件对局部构件显式非线性动态分析。上述计算过程复杂,在工程评估中不利于快速评估。

本文中运用变分法的极值问题方法,通过变分法中的伽辽金法从虚位移原理出发,反推出燃气爆炸时结构受到的伪静荷载,再用该伪静荷载对结构进行静力分析,提出了快速评估灾后建筑物爆炸核心区结构安全的方法。

1 变分法对薄板弯曲挠度微分方程的近似解

变分法是个泛函的极值问题。为求解微分方程的定解,可构造相应的泛函,使求泛函的极值与求解微分方程的定解等价[1]。根据文献[2],薄板的厚度 t 与板面的最小尺寸 b 的比值约在 $(1/80\sim1/100)\leqslant t/b\leqslant(1/5\sim1/8)$ 范围内,可简化为薄板结构,并将平分板厚度 t 的平面称为板的中面,垂直板面的荷载将使板弯曲,中面内各点的横向位移称为挠度。薄板弯曲问题常用变分法,常用的有里兹法、伽辽金法[3-5]。伽辽金法可以根据虚位移原理求得近似解,从而避免不知道总势能的难度。伽辽金法从虚位移原理出发推出平衡系统的力在虚位移上所做的功等于零。

对薄板进行伽辽金法方程推导[4],则有:

$$\iint D(\nabla^4 w)w_m \mathrm{d}x\mathrm{d}y=\iint q w_m \mathrm{d}x\mathrm{d}y \tag{1}$$

* **收稿日期**: 2016-08-16; **修回日期**: 2017-02-24
基金项目: 国家自然科学自然基金项目(11572186);上海宝冶企业科研基金项目(2014-16)
第一作者: 徐赐敏(1971—),男,博士,高级工程师; **通信作者**: 房霆宸,444105838@qq.com。

式中：$D\nabla^4 w$ 和 q 为平衡力系，δw 为虚位移，∇为拉普拉斯微分算子，由变分 δC_m 的任意和不为零，可得关于系数 C_m 的线性方程组。

2 钢筋混凝土楼板燃气爆炸实例

2.1 工程概况

2012 年 7 月，西安市某小区 1 号楼 1307 室发生燃气爆炸，造成人员伤亡。爆炸同时对该幢房屋结构造成了破坏，业主为了解爆炸后房屋的安全情况，要求做安全性鉴定。经过对受损严重的 1 号楼 1307 室厨房客厅进行检测，发现下楼板混凝土已出现较大裂缝，楼板下底面已成锅底状，测出板跨中最大挠度值达 133 mm，已超出混凝土设计和验收规范要求[3]，需进行结构加固。周边框架梁变形，未超出设计规范值，为得出该梁的钢筋应力情况，需耦合出爆炸时的静荷载，再计算梁上钢筋应力，为该楼的其他结构构件安全评估提供荷载依据，同时也为以后的民用建筑中燃气使用场所抗连续倒塌设计提供实践数据。

该 1 号楼建筑面积约为 34 000 m^2，建筑平面尺寸约 62.2 m×23.0 m，建筑层数为地上 24 层、地下 1 层，建筑高度 80.10 m，地下室埋置深度 6.60 m。建筑结构形式为框架剪力墙结构，地震分组为第一组，建筑物抗震设防烈度为 8 度，场地Ⅱ类别，设计基本地震加速度值为 0.2g。爆炸楼层处在第 13 层，层高 2.9 m，爆炸房间开窗洞(3.6 m×1.8 m)，3 个门洞(0.9 m×2.1 m)，爆炸冲击波将房间所有围护结构粉碎性推倒。爆炸源所在位置及损坏范围平面图[5]和结构布置图分别如图 1～2 所示。爆炸后人工琢去混凝土后的板内钢筋网如图 3 所示，体现为钢筋混凝土板适筋弯曲破坏后的钢筋。爆炸后室内情况如图 4～5 所示。

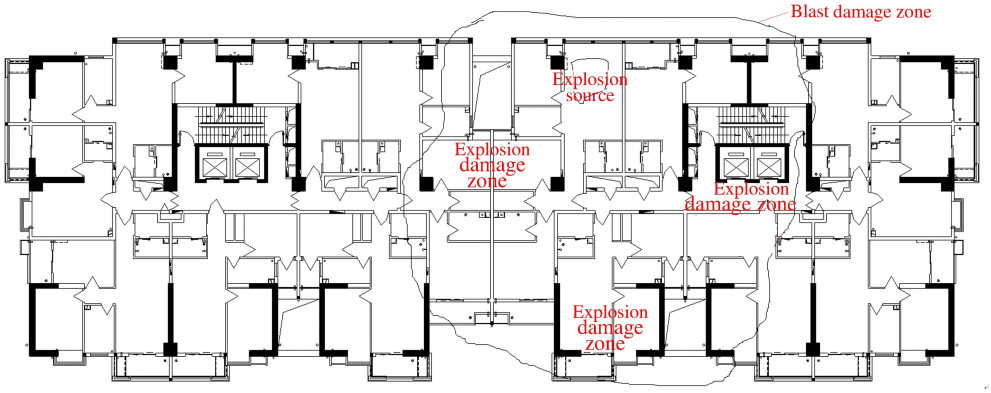


图 1 爆炸所在平面位置及损坏范围平面图

Fig. 1 Layout of where explosion occurs and its damage zones

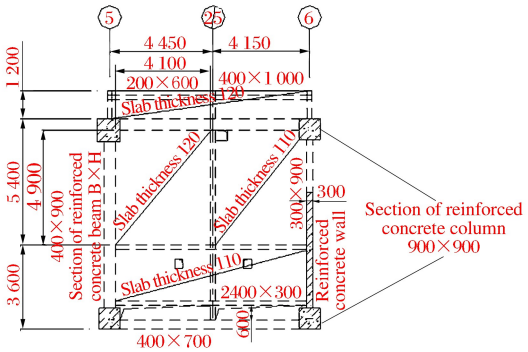


图 2 爆炸源所在房间结构布置平面图(单位：mm)

Fig. 2 Layout of the room where explosion originates(unit: mm)



图 3 去除混凝土后的板底跨中钢筋

Fig. 3 Layout of where explosion occurs and its damage zones



图 4 爆炸后室内走道区，烧结多孔砖填充墙破坏

Fig. 4 Indoor walkway area after the explosion, with its wall of sintered perforated bricks damaged



图 5 爆炸后客厅区，四周填充墙被冲击倒

Fig. 5 Living room area after the explosion, with its walls all damaged

2.2 楼板挠度方程建立及求解

将问题简化，使之符合薄板定义[3]。因板四边梁 Z 向抗弯刚度远大于板刚度，板计算模型简化为四边固结，建立如图 6～7 所示的坐标系简图。以板形心为坐标系原点 $O(0,\ 0,\ 0)$。该楼板[5]厚度 $t_1=120$ mm，短边长 $a_1=4\ 100$ mm，长边长 $b_1=4\ 900$ mm，$t/b=1/34$，($2a=4.1$ m，$2b=4.9$ m，$t/2=60$ mm)，板底配筋∅10 mm×200 mm 双向布置。现场测量挠度 $w_{max}=133$ mm，求均布荷载 q_0。

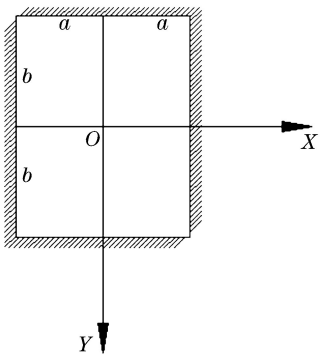


图 6 板四边约束简图

Fig. 6 Sketch of slab's

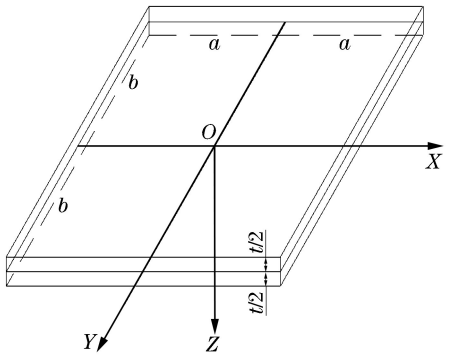


图 7 板三维计算简图

Fig. 7 Sketch of 3D calculation

该板的边界条件为：

$$(w)_{x=\pm a}=0,\qquad \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)_{x=\pm a}=0,\qquad (w)_{y=\pm b}=0,\qquad \left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)_{y=\pm b}=0$$

设挠度表达式为：

$$w=\sum_m C_m w_m=(x^2-a^2)^2\ (y^2-b^2)^2(c_1+c_2x^2+c_3y^2+\cdots) \tag{2}$$

上述表达式能满足位移和内力边界条件。考虑到高阶小量，仅取前一个系数 c_1，即

$$w=c_1w_1=c_1\ (x^2-a^2)^2\ (y^2-b^2)^2 \tag{3}$$

于是有：

$$w_m=w_1=(x^2-a^2)^2\ (y^2-b^2)^2 \tag{4}$$

利用拉普拉斯微分算子，有：

$$\nabla^4 w=\frac{\partial^4 w}{\partial x^4}+2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2\partial y^2}+\frac{\partial^4 w}{\partial y^4}=8\left[3\ (y^2-b^2)^2+3\ (x^2-a^2)^2+4(3x^2-a^2)\ (3y^2-b^2)\right]c_1 \tag{5}$$

将式(3)、(5)代入式(1)，并考虑板的几何对称性(其中板弯曲刚度 $D=\dfrac{Et^3}{12(1-\mu^2)}$)，得到：

$$4D\int_0^a\int_0^b 8\left[3\left(y^2-b^2\right)^2+3\left(x^2-a^2\right)^2+4\left(3x^2-a^2\right)\left(3y^2-b^2\right)\right]c_1\left(x^2-a^2\right)^2\left(y^2-b^2\right)^2\mathrm{d}x\mathrm{d}y=$$

$$4q_0\int_0^a\int_0^b\left(x^2-a^2\right)^2\left(y^2-b^2\right)^2\mathrm{d}x\mathrm{d}y \tag{6}$$

积分后求出 c_1，代入式(3)，即得：

$$w=\frac{7q_0\left(x^2-a^2\right)^2\left(y^2-b^2\right)^2}{128\left(a^4+b^4+\frac{4}{7}a^2b^2\right)D} \tag{7}$$

薄板形心处即坐标原点。当 $x=0$，$y=0$ 时，薄板的最大挠度近似解为：

$$w_{\max}=(w)_{x=y=0}=\frac{7q_0\left(-a^2\right)^2\left(-b^2\right)^2}{128\left(a^4+b^4+\frac{4}{7}a^2b^2\right)D}=\frac{7q_0a^4b^4}{128\left(a^4+b^4+\frac{4}{7}a^2b^2\right)D} \tag{8}$$

整理后可得板面均布荷载 q_0（包括板自重）：

$$q_0=\frac{128\left(a^4+b^4+\frac{4}{7}a^2b^2\right)Dw_{\max}}{7a^4b^4} \tag{9}$$

令 $\alpha=\dfrac{128\left(a^4+b^4+\frac{4}{7}a^2b^2\right)}{7a^4b^4}$，则式(9)简化为：

$$q_0=\alpha Dw_{\max} \tag{10}$$

式中：q_0 为板面均布荷载，α 为板平面几何参数，D 为板抗弯刚度，$w_{\max}$ 为板几何中心的最大挠度。式(10)即为挠度最大值与荷载之间的简洁函数表达式。

2.3 燃气爆炸荷载计算

在文献[6]中，HRB400 钢筋在快速加载情况下，只有屈服强度和极限强度的提高，而塑性和弹性模量基本保持不变，钢筋本构关系采用静载作用时的本构关系。混凝土[3] C30，计算弹性模量 E 时，取一根直径 10 mm 的钢筋及截面 200 mm×120 mm 的混凝土为计算单位。其中钢筋面积 $A_s=78.5\ \mathrm{mm}^2$，模量 $E_s=200$ GPa，钢筋泊松比 $\mu_s=0.3$，混凝土弹性模量 $E_c=30.0$ GPa，泊松比 $\mu_c=0.2$。

对钢筋混凝土截面(200 mm×120 mm)加权后，计算其弯曲刚度：

$$D=\frac{Et^3}{12(1-\mu^2)}=\frac{\left(\dfrac{78.5\times2\times10^5+(200\times120-78.5)\times3\times10^4}{200\times120}\right)\times120^3}{12\times\left(1-\left(\dfrac{(78.5\times0.3+0.2\times(200\times120-78.5)}{200\times120}\right)^2\right)}=4.584\ 025\ \mathrm{GN\cdot mm}$$

将上述数据代入式(9)，得该板在最大挠度为 133 mm 时燃气爆炸荷载作用为：

$$q_0=\frac{128\left(a^4+b^4+\frac{4}{7}a^2b^2\right)Dw_{\max}}{7a^4b^4}=$$

$$\frac{128\times\left(2\ 050^4+2\ 450^4+\frac{4}{7}\times2\ 050^2\times2\ 450^2\right)\times4.584\ 025\times10^9\times133}{7\times2\ 050^4\times2\ 450^4}=1.193\ 3\ \mathrm{MPa}$$

得到该板在最大挠度为 133 mm 时燃气爆炸荷载作用为 1.193 3 MPa，含板自重作用 4.5 kPa，则燃气爆炸净荷载为 1.188 8 MPa。板自重 $q_{自重}=25\times0.12+20\times0.075=4.5$ kPa。

上述荷载虽然很大，但爆炸荷载作用的时间很短，约 0.2 s[7]，使该楼 1307 室的楼板的底部钢筋被拉伸，根据后来跨中钢筋取样[8]，爆炸后板钢筋的伸长率仍有 7.5%，通常规范合格 HRB400 钢筋的伸长率为 16%～21%，也就是说爆炸使板跨中钢筋约拉伸了 8.5%～13.5%，这得益于楼板是现浇板的连续性。民用建筑预制板中的钢筋通常采用伸长率为 3.5%的小直径预应力筋，则在此次燃气爆炸中，跨中预制板钢筋会被拉断，房屋可能出现更大的损伤。

2.4 对解析解计算结果验证

利用民用住宅中的燃气爆炸的实际工程，对燃气爆炸后钢筋混凝土楼板的变形进行了测量，根据楼

板最大挠度测量值，运用变分学中的伽辽金法，从虚位移原理出发，推出燃气爆炸时的荷载作用值为 1.19 Pa。文献[9]中用数值模拟的方法模拟了燃气爆炸的情况：在工业燃气管道中，一端封闭，一段开口，起爆点在封闭端，燃气与空气混合密度为 1.19×10^{-3} g/cm^3，按化学当量进行混合，该密度环境下，数值模拟得出侧壁面上压强曲线在 0.75～1.8 MPa 内波动，模拟爆炸作用时间段在 0.3～32 ms 之间；在 $t=0.9$ ms 时，管道侧壁面上压强达 1.2 MPa。本文计算结果与该模拟压强值较为一致。

由于从式(2)到式(3)作简化后得到的是个近似解，为分析其误差，用有限元软件对该板进行试算，条件为：C30 钢筋混凝土板，四边固结，荷载组合采用标准组合，恒载组合系数 1.0，活载组合系数 1.0；当板面恒载为 4.5 kPa、活载为 1.213 MPa 时，计算板挠度，板的最大竖向位移为 133 mm。图 8 为板计算条件图，图 9 为板挠度图。误差为(1.123－1.189)/1.123＝1.98%，本文变分法计算出来的结果与有限元法精确解误差约 2%。

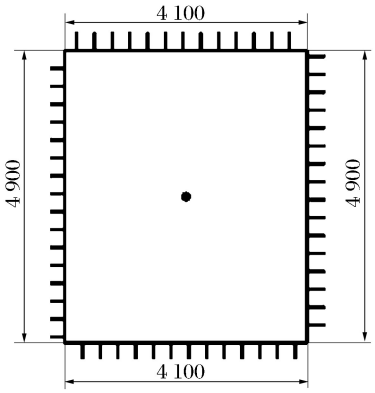


图 8 板计算条件图(单位：mm)

Fig. 8 Sketch of slab's computational condition (unit: mm)

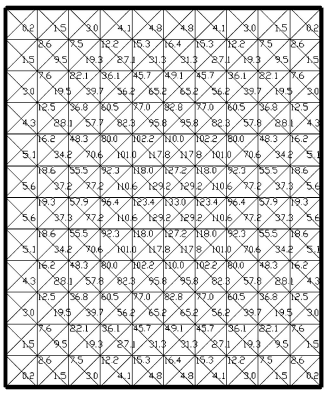


图 9 板挠度图(单位：mm)

Fig. 9 Deflection of slab (unit: mm)

3 结　语

运用变分法的极值问题方法，反推出燃气爆炸时结构受到的伪静荷载，并结合实际工程案例，得出下列观点及防爆措施：

(1)在民用建筑燃气爆炸后，通过检测变形大的钢筋混凝土楼板，用变分法反推爆炸对结构的荷载作用大小是可行的。反之，该偶然荷载作用对结构进行极限变形设计验算有着实际意义。

(2)爆炸后被拉伸楼板钢筋的残余伸长率的检测，表明爆炸使板跨中钢筋拉伸了较大。中国在 1970～1999 年建造的大量住宅采用的预应力空心楼板，这些预应力空心楼板在燃气爆炸时易被拉断。也就是说，这些用预应力空心楼板的房屋在煤气爆炸时局部垮塌是大概率事件。

(3)为了达到受损可控原则，延伸率小于 9%的钢筋不宜单独用做民用建筑的可能发生燃气爆炸的房间楼板受力筋。

(4)通过楼板变形效应计算出的荷载值，在混凝土梁构件安全性鉴定时可供参考。该数据也为以后的民用建筑燃气使用场所的抗连续倒塌设计提供重要数据资料。

(5)抗爆措施：为使楼房在燃气爆炸时不发生连续倒塌，楼板内不能只配预应力钢筋，应加强板端拉结钢筋的配置，应加强承受竖向荷载构件而且不应只有砌体墙，泄爆口合理设计等，同时也应加强人员被气浪抛出屋内的其他技术措施。

参考文献：

[1] 胡海昌. 广义变分原理在近似解中的合理应用[J]. 力学学报，1982，14(1)：1-7.
HU Haichang. Generalized variational principle in reasonable application of approximate solutions[J]. Journal of Mechanics, 1982(1): 1-17.

[2] 欧斐君. 变分法及其应用[M]. 北京:高等教育出版社,2013:132-135.
[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB50010-2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
[4] 毕继红,王晖. 工程弹塑性力学[M]. 天津:天津大学出版社,2003:165-185.
[5] 段怡敏. 西安市春晓新苑 1 号楼施工图[Z]. 西安:中国建筑西北设计研究院, 2007.
[6] 高永红,范俊奇,楼梦麟. 新Ⅲ级钢筋动力性能及在抗爆结构中应用实验[J]. 同济大学学报(自然科学版),2012,40(12):1778-1782.
GAO Yonghong, FAN Junqi, LOU Menglin. New level III dynamic performance of steel and its application in blast-resistant structures[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2012,40(12):1778-1782.
[7] 中国工程建设标准化协会. 建筑结构荷载规范: GB5009-2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
[8] 徐赐敏. 西安市春晓新苑 1 号楼爆炸后检测报告[R]. 上海:上海宝冶工程技术有限公司,2012.
[9] 宁建国,王成,马天宝,等. 爆炸与冲击动力学[M]. 北京:国防工业出版社,2010:364-366.

Variational analysis in safety assessment for slab-shaped reinforced concrete structure's load plate in gas explosion

XU Cimin[1,2], YAO Wenjuan[1], FANG Tingchen[3]
(1. *Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai* 200444, *China*;
2. *Shanghai Baoye Engineering Technology Corp. Ltd.*, *Shanghai* 200941, *China*;
3. *Shanghai Construction Group Co. Ltd.*, *Shanghai* 200080, *China*)

Abstract: It is necessary to determine the greatest possible load that a civil building can bear in a gas explosion in a quick safety assessment of the building. In this paper, according to the principle of virtual displacements, we derived the function relationships between the slab's surface load and its bending stiffness, maximum deflection, flexural stiffness and geometric boundary conditions, at the time of gas explosion, using the Galerkin variational method, and reversely we derived the slab's pseudo static load and maximum deflection by combining them with the slab's maximum deflection collected in the actual in-situ explosion test. The result shows that the pressure curve range of the sidewall falls within the numerical simulation results of the gas explosion, with an error of only 2% between the method and the finite element method. The static analysis of the structure in combination with the pseudo static load can provide a reference for the rapid assessment of structural safety. Also, following the site check of the building after the explosion, we proposed constructing measures for preventing continuous collapse that might result from gas explosion in a civil building.

Keywords: reverse bang size; safety assessment; Galerkin method; blast-resistant measures

(责任编辑 曾月蓉)