

近场爆炸作用下比例距离参数对抗爆间室结构可靠度的影响分析

李 闯¹,徐自强²,王丽娟²,时小凡¹

(1. 沈阳建筑大学交通与测绘工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 中煤科工集团沈阳设计研究院民爆所,辽宁 沈阳 110015)

摘要 目的 研究爆炸作用下的比例距离参数对墙板结构可靠度影响,提出基于蒙特卡洛取样的墙板结构可靠度分析方法。**方法** 以抗爆间室墙板结构为研究对象,采用 LS-DYNA 求解器,模拟得到不同比例距离下的结构变形云图;计算墙板结构在爆炸冲击下的位移响应,分别为跨中最大位移与塑性位移;考虑板件材料强度和尺寸的不确定性,以构件延性比指标建立功能函数,计算爆炸冲击下的墙板结构可靠度。**结果** 当比例距离为 $0.7 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$ 时,板结构的毁伤效应最严重,背爆面出现多条固定端裂缝、环向拉伸裂缝等。随着比例距离的增加,结构的最大位移和塑性位移逐步减小,失效概率不断降低,当比例距离为 0.9 、 0.95 、 $1 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$ 时,失效概率趋近于 0 ,得到了不同比例距离下的结构失效概率与可靠指标规律。**结论** 比例距离是影响爆炸作用下墙板结构损伤程度的重要参数,抗爆间室的可靠度研究有助于解决抗爆间室结构设计和性能评价难题。

关键词 近场爆炸;抗爆间室;塑性位移;延性比;蒙特卡洛;失效概率

中图分类号 TU59;TN253;TP212 文献标志码 A

Influence of Proportional Distance Parameter on Structural Reliability of Blast Resistant Chamber Structure under Explosion

LI Chuang¹, XU Ziqiang², WANG Lijuan², SHI Xiaofan¹

(1. School of Transportatin and Geomatics Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Civil Explosive Station, CCTEG Shenyang Engineering Company, Shenyang, China, 110015)

Abstract: In order to study the influence of proportional distance parameters on the reliability of wallboard structure under explosion, a reliability analysis method of wallboard structure based on

收稿日期:2021-07-30

基金项目:国家自然科学基金青年项目(51808355);中国煤炭科工集团有限公司科技创新创业项目(2019-MS001)

作者简介:李闯(1990—),男,博士,主要从事结构健康监测方面研究。

Monte Carlo sampling is proposed. Structural deformation nephogram under different scale distance is simulated by using LS-DYNA finite element program. The displacement response of wallboard structure under explosion impact is calculated, which is the maximum displacement and plastic displacement in the middle of span, respectively. Considering the uncertainty of plate material strength and size, a function is established with the ductility ratio as the index to calculate the reliability of wallboard structure under explosion impact. The results show that when the proportional distance is $0.7 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$, the damage of the concrete slab structure is the most serious, and many cracks appear at the fixed end and circumferential tensile cracks on the blasting surface of the slab back. With the increase of the proportional distance, the maximum displacement and plastic displacement of the structure decrease, and the failure probability gradually decreases. When the proportional distance is $0.9, 0.95$ and $1 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$, the failure probability is almost 0. And the failure probability and reliability index curves of the structure under different proportional distances are obtained. Proportional distance is an important parameter affecting the damage degree of wallboard structure under explosion, which is helpful to solve the problems of structural design and performance evaluation.

Key words: near field explosion; anti explosion room; plastic displacement; ductility ratio; monte carlo simulation; failure probability

抗爆间室^[1]用于存放炸药,主要为钢筋混凝土墙板结构,双面配筋保证结构具有良好的延性和抗剪性能。抗爆间室内的炸药一旦发生偶然爆炸,引起的峰值瞬时压力对结构表面产生强力冲击,爆炸后需要对结构进行评估。《抗爆间室结构设计规范》(GB 50907—2013)仅通过抵抗爆炸次数将抗爆结构分为3级,既有评价方法没有考虑炸药质量、爆心距离和结构尺寸等因素,评价方法过于简单。作用于抗爆间室结构上的爆炸荷载容易受到现场温湿度、构件形状及材料属性等影响,具有明显不确定性,使结构响应与破坏形式呈现出显著的概率特性^[2]。可靠度^[3]定义为“结构在规定的时间内,在规定的条件下,完成预定功能的概率”。在可靠度理论的指导下,可定义抗爆间室可靠度为“在抗爆间室结构设计基准期内,通过规范地设计与施工,抗爆间室抵抗爆炸作用并正常运营的概率”,对此,抗爆间室的结构性能可以采用可靠度指标进行评价。王英等^[4]考虑爆炸荷载引起的材料应变率效应,提出了爆炸冲击下的材料强度设计方法。李忠献等^[5]考虑材料性能、爆炸效应和构件尺寸不

确定性的影响,提出钢梁结构在不确定爆炸荷载下的可靠度计算方法。H. Y. Low 等^[6]采用数值模拟的方法计算了爆炸冲击下混凝土单向板的弯曲变形,得到了混凝土板的失效概率与爆炸荷载正超压的函数关系。M. Soares 等^[7]基于响应面方法计算材料强度的概率函数,分析板架结构可靠性的影响因素。在爆炸荷载作用下,结构尺寸、材料属性甚至模型的不确定性^[8-9],反映结构爆炸过程的随机属性。比例距离^[10-11]指爆炸中心距结构的最小距离和炸药质量立方根的比值,是影响爆炸冲击下墙板结构失效的重要参数。笔者选取钢筋混凝土板为研究对象,进行爆炸冲击下的结构响应^[12-13]计算,通过统计分析方法,考虑材料强度与构件尺寸的随机属性,提出爆炸冲击作用下的比例距离参数对墙板结构可靠度影响分析,得到板失效概率-比例距离关系曲线。

1 数值模型

1.1 材料模型

1.1.1 混凝土材料本构模型

采用 LS-DYNA 有限元软件进行数值模

拟。混凝土选用改进 K & C 混凝土本构模型,本构模型由 M. Alex 等^[14]提出,是根据伪张量材料模型发展而来,提高了数值模拟软件的计算性能。混凝土材料本构关键字为 Mat_072R3,混凝土参数如表 1 所示。

表 1 混凝土参数

Table 1 Concrete parameters

标号	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比	抗压强度/MPa
C30	2 400	0.2	30

采用欧洲混凝土规范 CEB 的推荐公式^[15], x 轴的正值为抗压强度动载增大系数 $CDIF$ 、负值为抗拉强度动载增大系数 $TDIF$, 计算式为

$$CDIF = \frac{f_{dc}}{f_c} \begin{cases} \left(\frac{\varepsilon'}{\varepsilon'_{stat}}\right)^{1.026\alpha}, & \varepsilon'_{stat} < \varepsilon' \leq 30; \\ \gamma \left(\frac{\varepsilon'}{\varepsilon'_{stat}}\right)^{1/3}, & 30 < \varepsilon' \leq 300. \end{cases} \quad (1)$$

式中: f_{dc} 为混凝土动态抗压强度; f_c 为混凝土静态抗压强度; ε' 为动载应变率; ε'_{stat} 为静态应变率, $\varepsilon'_{stat} = 30 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$; α 、 γ 均为动载增大系数, $\alpha = (5 + 9f_c/10)^{-1}$, $\log \gamma = 6.15\alpha - 2$ 。

$$TDIF = \frac{f_{dt}}{f_t} \begin{cases} \left(\frac{\varepsilon'}{\varepsilon'_{stat}}\right)^{1.016\alpha}, & \varepsilon'_{stat} < \varepsilon' \leq 30; \\ \alpha_1 \left(\frac{\varepsilon'}{\varepsilon'_{stat}}\right)^{1/3}, & 30 < \varepsilon' \leq 300. \end{cases} \quad (2)$$

式中: f_{dt} 为混凝土动态抗拉强度; f_t 为混凝土静态抗拉强度, $\log \alpha_1 = 7.112\delta - 2.33$ 。

材料损伤^[16]本构的关键字为 Mat_072R3,具体公式为

$$\delta = \frac{2}{1 + \lambda_m/\lambda}. \quad (3)$$

式中: δ 为损伤标量,当 $0 \leq \delta < 1$,材料单元处于强化阶段;当 $1 \leq \delta \leq 2$,材料单元处于软化阶段; λ_m 为极限强度面上修正的有效塑性应变; λ 为修正的有效塑性应变,为有效塑性应变和应变率增大系数的函数作为混凝土单元失效判据。

1.1.2 钢筋材料本构模型

钢筋采用双线性弹塑性模型^[17],该模型对模拟钢筋的弹塑性阶段具有良好作用,包括等向强化、随动强化效应等。钢筋本构关键字为 Mat_003,钢筋参数如表 2 所示。

表 2 钢筋参数

Table 2 Reinforcement parameters

牌号	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比	屈服强度/MPa
HPB400	7 800	200 000	0.3	400

钢筋的应变率效应采用 Cowper-Symonds 模型进行计算,屈服强度动载增大系数 DIF 计算式为

$$DIF = 1 + \left(\frac{\varepsilon'}{C}\right)^{\frac{1}{P}}. \quad (4)$$

式中: C 、 P 为 Cowper-symonds 应变率影响系数, $C = 40$, $P = 5.5$; ε' 为钢筋应变率。

屈服强度动载增大系数 DIF 采用 M. Alex^[14]提出的方法计算,关键字为 Mat_003,其本构自带应变失效准则,失效应变为 0.12。

1.2 计算模型

以抗爆间室的墙板为研究对象,采用分离式钢筋混凝土模型,旨在模拟墙板结构在爆炸冲击下的位移响应。混凝土强度为 C30,保护层厚度为 25 mm,钢筋型号为 HPB400,采用对称配筋方式,配筋率为 1.0%。试件为四边约束的双向板,有效迎爆面长宽厚为 3 000 mm × 3000 mm × 160 mm,网格长宽高为 20 mm × 20 mm × 20 mm。由于对称性质,取用 1/4 模型进行计算,试验中将爆心距控制在 1.5m, TNT 当量分别取 9.84、8.66、5.5、4.63、3.94 和 3.38 kg,对应的比例距离分别为 0.7、0.75、0.8、0.85、0.9、0.95 及 1.0 m/kg^{1/3}。

2 结构响应

2.1 结构变形

图 1 为不同比例距离下的板在爆炸冲击下的损伤云图。

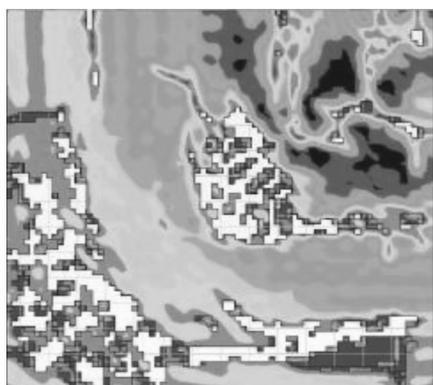
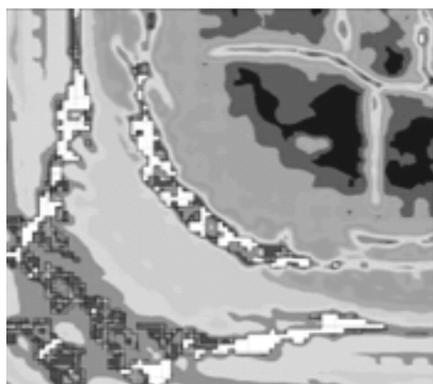
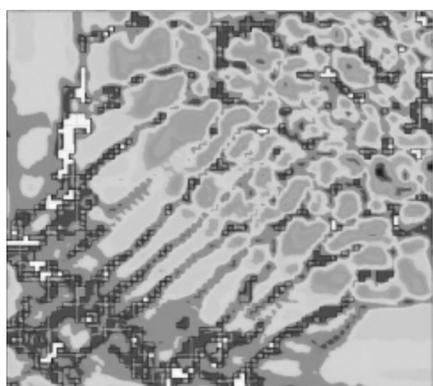
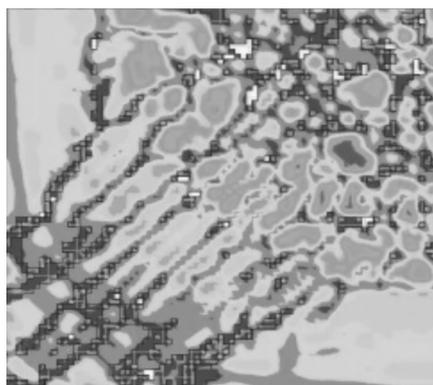
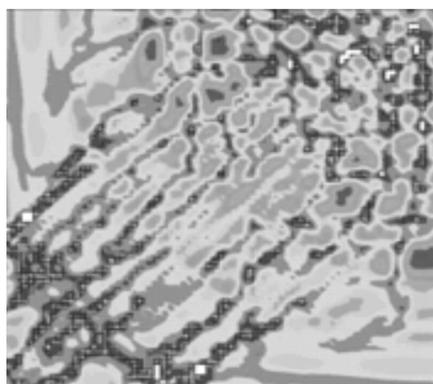
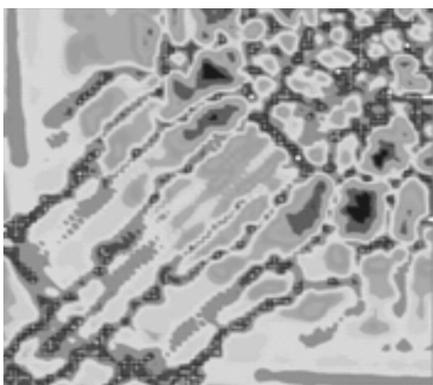
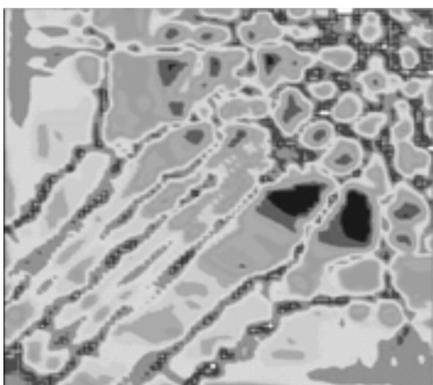
(a)比例距离为 $0.70 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$ (b)比例距离为 $0.75 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$ (c)比例距离为 $0.80 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$ (d)比例距离为 $0.85 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$ (e)比例距离为 $0.90 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$ (f)比例距离为 $0.95 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$ (g)比例距离为 $1.0 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$

图 1 不同比例距离的损伤积累云图

Fig. 1 Damage distribution of different proportional distance

从图 1 可以看出,比例距离为 $0.7 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$ 时,混凝土板构件破坏最严重。其中,板背爆面出现多条环向拉伸裂缝和径向拉伸裂缝,塑性铰充分开展,原因是由于背爆面受拉伸波作用,混凝土材料的抗拉强度比较低,引起数值模拟单元失效。并且,在固定端附近均出现宽裂缝,构件角点具有明显的破坏特征,因

为在爆炸冲击作用下混凝土板的固定边界处产生较大拉应力,出现应力集中现象。当比例距离为 $0.8 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$ 时,结构产生塑性变形。随着比例距离的增加,混凝土板背爆面径向裂纹和环形裂纹不断减少,板的破坏程度逐渐减轻,破坏等级依次减弱,板跨中位移逐渐减小。

2.2 板跨中位移响应

2.2.1 跨中位移时程

图2为不同比例距离下的结构位移响应曲线。在爆炸冲击作用下,由于拉伸波作用,在板结构的背爆面,导致混凝土板产生拉伸变形,位移为负。混凝土板产生极限变形,所需时间为30 ms左右,随后结构开始回弹,做往复自由振动,结构背爆面处于受拉-受压往复受力状态。如果混凝土板的峰值位移小于弹性极限位移,混凝土板为弹性变形,最终位移为0;如果混凝土板的峰值位移大于弹性极限位移,弹性位移可恢复,最终位移响应为塑性变形,塑性变形和最大变形的差值为弹性极限位移。从图2跨中位移时程曲线可知,在爆炸冲击的作用下,混凝土板已经产生塑性变形。

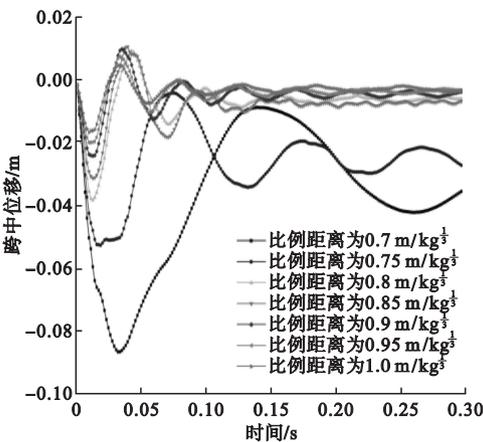


图2 不同比例距离下的跨中位移时程曲线

Fig. 2 Displacement time history curves in the middle of span under different proportional distances

2.2.2 跨中最大位移和塑性位移

钢筋混凝土板在爆炸作用下的跨中位移是衡量结构抵抗爆炸性能的重要指标,主要

包括跨中最大位移和跨中塑性位移。图3为不同比例距离下的结构跨中最大位移响应曲线和塑性位移响应曲线。从图可知,随着比例距离的增大,混凝土板板底最大挠度不断降低,混凝土板跨中最大位移与比例距离参数具有非线性关系。与图3相对应,在不同比例距离的爆炸冲击下,混凝土背爆面产生大面积塑性损伤,引起相对应的塑性变形,当比例距离为 $0.7, 0.75 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$, 板结构的屈服位移明显大于其他工况,结构破坏情况严重。因此,在工程设计中,比例距离建议大于 $0.8 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$ 。笔者选取爆炸的比例距离分别为 $0.7, 0.75, 0.8, 0.85, 0.9, 0.95, 1 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$, 在这个变化区间,混凝土板产生塑性变形,为爆炸冲击下混凝土板结构的可靠度评估计算提供适当的比例距离参数。

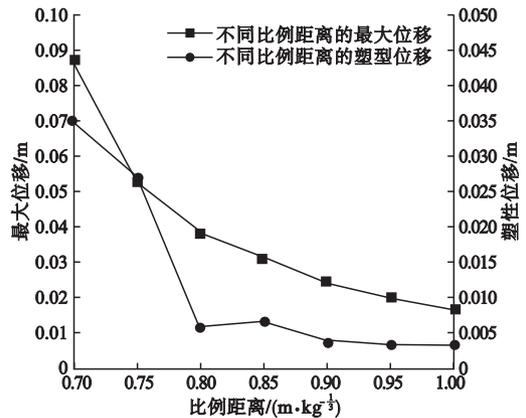


图3 不同比例距离的跨中最大位移和塑性位移曲线

Fig. 3 Maximum displacement and plastic displacement in the middle of span under different proportional distance

3 可靠度计算

3.1 随机变量

针对板件材料强度,采用蒙特卡洛抽样方法进行统计分析,选取比例距离分别为 $0.7, 0.75, 0.8, 0.85, 0.9, 0.95, 1 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$, 针对每个比例距离参数,数值模拟80次,共计560次。混凝土板厚、材料强度和弹性模量

等随机变量满足正态分布特征,变异系数为0.05,随机变量及分布特征如表3所示。

表3 随机变量及分布特征

Table 3 Random variables and distribution characteristics

板厚/mm	强度/MPa	弹性模量/GPa	变异系数
160	30	30	0.05

根据《抗爆间室结构设计规范》(GB50907—2013),采用位移延性破坏准则,建立功能函数:

$$g = u - \frac{y_{\max}}{y_e} \quad (5)$$

式中: g 为功能函数; u 为容许延性比限值; y_{\max} 为最大位移; y_e 为屈服位移或者塑性位移。

可靠指标为

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (6)$$

式中: β 为可靠指标; μ_z 、 μ_R 、 μ_S 分别为功能函数均值、抗力变量均值、荷载变量均值; σ_z 、 σ_R 、 σ_S 分别为功能函数标准差、抗力变量标准差、荷载变量标准差。

采用蒙特卡洛取样方法,结构失效概率 P_f 计算为

$$P_f = \frac{n_f}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I[g(x_i)] \quad (7)$$

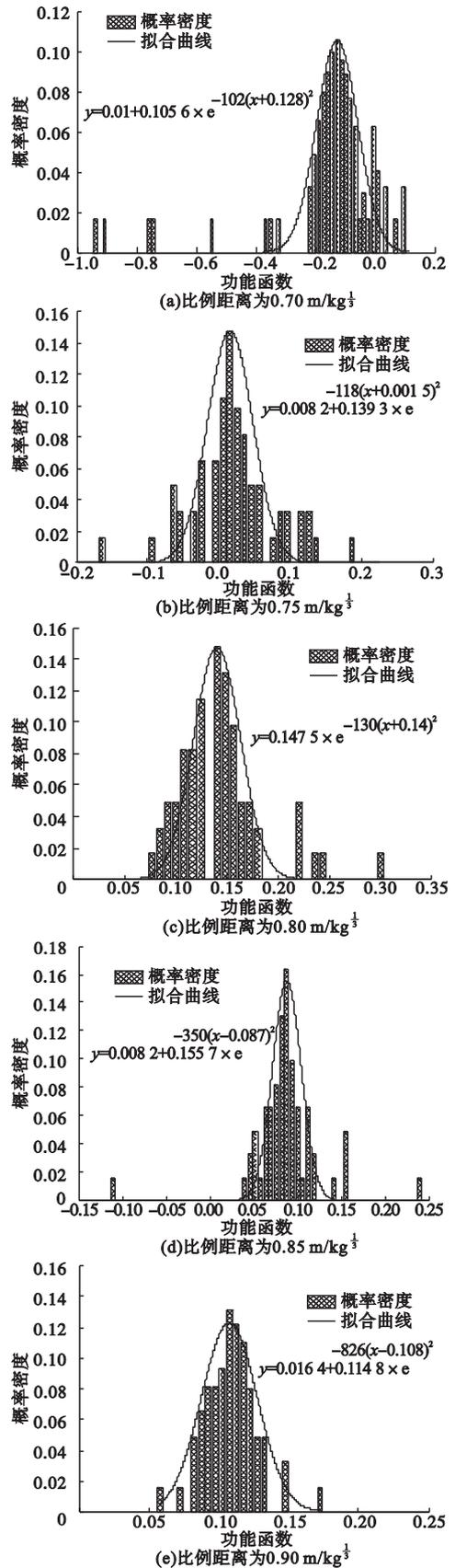
其中,

$$I[g(x_i)] = \begin{cases} 0, & g(x_i) \geq 0; \\ 1, & g(x_i) < 0. \end{cases} \quad (8)$$

式中: P_f 为失效概率; n_f 为完成预定功能的样本数量; N 为样本总数; $I[g(x_i)]$ 为指示函数。

3.2 概率密度分析

考虑爆炸荷载、构件尺寸及材料强度的不确定性,计算结构的延性比,将延性比功能函数指标等分为若干区间,将延性比功能函数指标计算结果落入区间,给出每个区间内的指标数据的频率密度,得到频率密度,不同比例距离下的概率密度如图4所示,概率密度函数满足正态分布。



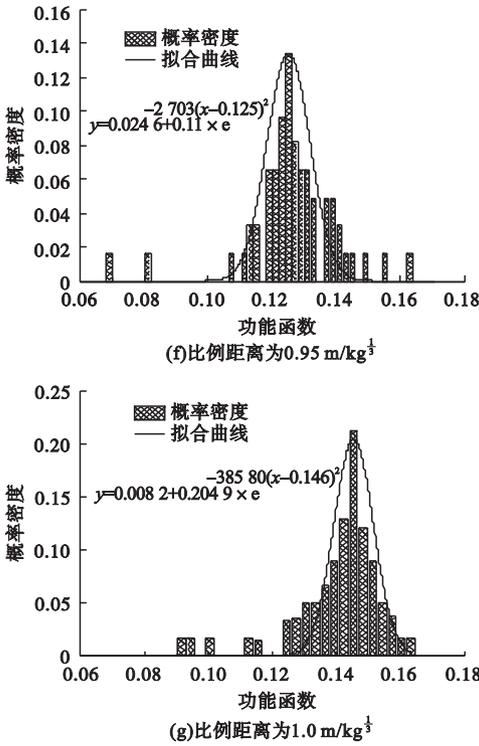


图4 不同比例距离下的概率密度曲线
Fig. 4 Probability density under different proportional distances

表4为不同比例距离下的可靠指示与失效概率。

表4 不同比例距离下的可靠指示与失效概率
Table 4 Reliability index and failure probability under different proportional distances

比例距离/ (m·kg ^{-1/3})	均值	方差	可靠指标	失效概率/%
0.70	-0.128	0.07	-1.829	88.3
0.75	0.0015	0.0655	0.023	39.3
0.80	0.140	0.0616	0.227	14.8
0.85	0.087	0.0378	2.30	8.2
0.90	0.108	0.0246	4.39	0
0.95	0.125	0.0136	9.19	0
1.00	0.146	0.0036	40.55	0

考虑材料尺寸及性能的不确定性,得到不同比例距离下的结构失效概率与可靠指标的关系曲线(见图5)。从图5可以得到比例距离参数对混凝土板可靠度的影响规律。随着比例距离的增加,可靠指标持续增加,具有

正相关关系,失效概率逐渐降低,具有负相关关系。当比例距离为0.7 m/kg^{1/3}时,失效概率为88.3%,结构产生明显的塑性变形,当比例距离为0.9、0.95、1 m/kg^{1/3}时,失效概率趋近于0。在抗爆结构的实际工程设计中,比例距离参数越大,结构可靠性越高,完成结构抗爆功能的概率越大。

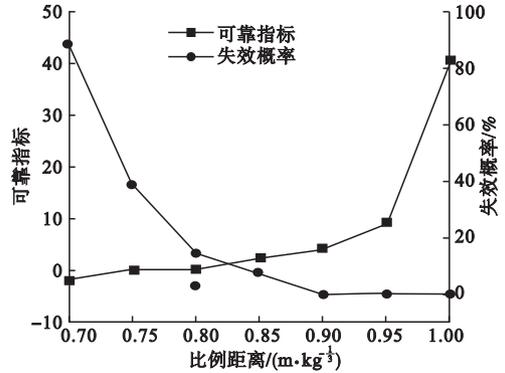


图5 不同比例距离的可靠指标与失效概率曲线关系
Fig. 5 Relationship between reliability index and failure probability under different proportional distances

4 结论

(1)当比例距离为0.7、0.75 m/kg^{1/3}时,板背爆面出现多条环向拉伸裂缝和径向拉伸裂缝,塑性铰充分开展;当比例距离为0.8、0.85、0.9、0.95和1 m/kg^{1/3}时,结构仅产生塑性损伤。比例距离越大,结构破坏程度越低。

(2)比例距离越大,结构跨中最大位移和屈服位移越小,位移响应与比例距离具有非线性关系。

(3)当比例距离为0.7 m/kg^{1/3}时,最大失效概率为88.3%,得到了不同比例距离与可靠指标、失效概率的关系。

(4)比例距离是爆炸冲击下的结构可靠度重要指标,在工程设计中,应该对防爆结构的比例距离参数进行设计,提高结构的抗爆性能。

参考文献

[1] 张建军,马俊丰,马素鹏,等. 抗爆间室外小药

- 量防护钢板计算[J]. 煤矿爆破, 2019, 37(3):5-7.
(ZHANG Jianjun, MA Junfeng, MA Supeng, et al. Calculation of small dosage of outdoor protective steel plate in anti-explosion room [J]. Coal mine blasting, 2019, 37(3):5-7.)
- [2] SINHA N, WANG Y, ANDREW D. Structural brain network abnormalities and the probability of seizure recurrence after epilepsy surgery [J]. Neurology, 2021, 96(5):1-10.
- [3] SUN L, LI C. The strain transfer mechanism of Fiber Bragg Grating sensor for extra large strain monitoring [J]. Sensors, 2019, 19(8):1-14.
- [4] 王英, 林峰, 顾祥林. 爆炸荷载作用下材料强度设计值的确定方法[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(增刊2):220-225.
(WANG Ying, LIN Feng, GU Xianglin. Method to determinate design value of material strength for structures under blast loads [J]. Journal of building structures, 2010, 31(S2):220-225.)
- [5] 李忠献, 路建辉, 师燕超, 等. 不确定爆炸荷载作用下钢梁的可靠度分析[J]. 工程力学, 2014, 31(4):112-118.
(LI Zhongxian, LU Jianhui, SHI Yanchao, et al. Reliability analysis of steel beam under uncertain blast loads [J]. Engineering mechanics, 2014, 31(4):112-118.)
- [6] LOW H Y, HAO H. Reliability analysis of direct shear and flexural failure modes of RC slabs under explosive loading [J]. Engineering structures, 2002, 24(2):189-198.
- [7] SOARES M, GUEDES C. Response surface approach to the probability distribution of the strength of compressed plates [J]. Marine structures, 2002, 15(2):139-156.
- [8] 钟永, 武国芳, 陈勇平, 等. 结构用木竹材料弹性模量标准值确定方法[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(2):142-150.
(ZHONG Yong, WU Guofang, CHEN Yongping, et al. Determination method for characteristic value of elastic modulus of structural wood and bamboo materials [J]. Journal of building structures, 2021, 42(2):142-150.)
- [9] 汪秋红, 李扬, 徐惟雄, 等. FRP 筋混凝土受弯构件裂缝控制可靠度分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(3):226-231.
(WANG QiuHong, LI Yang, XU Weixiong, et al. Reliability analysis of crack control of FRP reinforced concrete flexural members [J]. Engineering journal of Wuhan, 2021, 54(3):226-231.)
- [10] JUNG M, SANG J. Numerical investigation of structural response of corrugated blast wall depending on blast load pulse shapes [J]. Latin American journal of solids and structures, 2019, 14(9):15-22.
- [11] 秦业志, 王莹, 王志凯, 等. 小当量柱型装药水下近场爆炸固支单层方形钢板毁伤特性研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(7):29-36.
(QIN Yezhi, WANG Ying, WANG Zhikai, et al. Damage characteristics of fixed single-layer square steel plate under near-field underwater explosion of small equivalent column charge [J]. Journal of vibration and shock, 2021, 40(7):29-36.)
- [12] 田力, 李伟. 冲击波和破片复合作用下 RC 框架结构损伤倒塌及防护技术研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(3):806-819.
(TIAN Li, LI Wei. Study on damage-collapse and protection technology of RC frame structure subjected to synergistic effects of blast and fragments [J]. Journal of central south university (science and technology), 2021, 52(3):806-819.)
- [13] RICHARD H, BOUMA E, ANTOINE E. The effect of RDX crystal defect structure on mechanical response of a polymer-bonded explosive [J]. Propellants, explosives, pyrotechnics, 2016, 41(3):33-41.
- [14] ALEX M, BRIAN U. Explosive testing and modelling of square tubular steel columns for near-field detonations [J]. Journal of constructional steel research, 2014, 15(3):101-112.
- [15] SOHN W, HONG E. Monte Carlo simulation for verification of nonparametric tests used in final status surveys of MARSSIM at decommissioning of nuclear facilities [J]. Nuclear engineering and technology, 2021, 53(5):100-115.
- [16] 温全, 周文君, 聂红鑫. 箍筋对内置压型钢板装配式宽连梁抗爆性影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(6):996-1002.
(WEN Quan, ZHOU Wenjun, NIE Hongxin. The influence research of stirrups on resistance explosion that wide coupling beam built-in steel plates [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(6):996-1002.)
- [17] Lü D, YAN C, CHEN G. Mechanistic prediction for cutting force in rotary ultrasonic machining of BK7 glass based on probability statistics [J]. Ultrasonics, 2020, 9(10):101-110.
(责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)