

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20211223003

地震-燃气爆炸灾害链效应对剪力墙结构的损伤研究*

霍林生, 英培钰, 薛兆余, 李宏男

(大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 地震可能会导致管道损坏和燃气泄露并引发爆炸, 从而在短时间内形成灾害链效应作用于结构上。目前研究大多对地震或爆炸单独作用于结构对其动力响应进行分析, 对于这种灾害链效应所导致的损伤规律尚不清楚。提出剪力墙结构考虑地震-燃气爆炸灾害链效应的动力响应分析方法, 利用 TNT 当量法将燃气荷载等效为立方体炸药, 在地震作用结束后一段时间内施加爆炸荷载以模拟灾害链效应, 通过 ANSYS/LS-DYNA 软件分析结构的动力响应。以一个 12 层剪力墙建筑结构为例, 选取 3 条地震波并考虑不同的爆炸位置的影响进行非线性时程分析, 研究剪力墙结构的动力响应和损伤规律。结果表明: 同地震单独作用相比, 地震-燃气爆炸灾害链效应会进一步导致结构的局部出现明显损伤; 燃气爆炸荷载作用于结构中间楼层时, 结构的总体损伤面积增大, 剪力墙严重破坏甚至丧失承载能力; 燃气爆炸荷载作用于楼层中心位置时, 结构的损伤程度明显大于其作用于同楼层角部位置时的工况。

关键词: 剪力墙; 灾害链; 地震; 燃气爆炸; 损伤机制

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)02-0251-08

Research on Damage of Shear Wall Structures Subjected to Earthquake-Gas Explosion Hazard Chain Effect

HUO Linsheng, YING Peiyu, XUE Zhaoyu, LI Hongnan

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Earthquakes may break the pipeline and result in gas leakage and explosion, thus forming a disaster chain to the structure in a short time. However, the dynamic structural responses under earthquakes or explosion are always separately investigated, and the damage patterns due to the disaster chain (e.g., the continuous earthquake-gas explosion) is not clear. A comprehensive dynamic response analysis method is proposed for shear wall structures considering the effect of the earthquake-gas explosion disaster chain. The gas explosion load is calculated by simulating the TNT as a cube explosive. The explosion load is applied to the structure after a couple of minutes of the ending of an earthquake to simulate the disaster chain, and the dynamic response of the structure is analyzed by ANSYS / LS-DYNA software. A 12-story shear wall building structure is used as a representative case, in which three earthquake records are selected for nonlinear time history analysis. Different ex-

* 收稿日期: 2021-12-23; 修回日期: 2022-01-18

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51738007)、大连市高层次人才创新项目(2019RD01)资助

作者简介: 霍林生(1975—), 男, 教授, 博士。主要从事结构工程方面的研究。E-mail: lshuo@dlut.edu.cn

plosion positions are selected to study the dynamic response and damage patterns of the shear wall structure. The numerical results indicate that the effect of the earthquake-gas explosion chain will further aggravate the local damage of the structure compared to the individual seismic excitations. In addition, the shear wall structure will have a larger overall damage area and will experience severe damage or even lose its bearing capacity when the gas explosion is located in the middle story of the structure. Compared to the gas explosion load acting on the corner of the same floor, the damage degree of the structure is more significant for the explosion locating near the center of the floor.

Keywords: shear wall; hazard chain; earthquake; gas explosion; damage mechanism

引 言

结构在全寿命周期中将承受永久荷载、可变荷载和偶然荷载的共同作用。强地震和爆炸等极端偶然荷载会导致结构的巨大破坏,并严重威胁人类的生命和财产安全。但是传统的结构设计时通常将各种极端偶然荷载作用分开考虑,结构验算也只针对单一灾种分别进行,较少考虑多种极端偶然荷载短时内共同作用于结构的情况,从而导致结构抗多灾性能严重不足^[1-5]。考虑结构在全寿命周期内可能遭受的多重和多种灾害,建立合理的结构抗多灾设计方法,这对于保障工程结构的安全性和全面提升全社会防灾减灾能力,具有重要的理论意义与应用价值。

目前已经有一些学者提出了结构考虑多灾害作用的分析方法。李宏男等^[6]系统介绍了工程结构在多次多种灾害作用下设计理论的研究进展,并提出了基于 Copula 函数的联合概率模型及工程结构在多种灾害耦合作用下的风险分析方法,为该领域的研究提供了理论基础和技术手段。吕光辉等^[7]提出了一种考虑洪水和地震作用下砌体结构的失效风险评估方法,综合考虑了灾害危险性和结构易损性。Y.K.Wen 等^[8]建立了多灾害作用下结构全寿命周期总成本的数学模型,解决了结构可靠性与全寿命周期成本之间的平衡问题。D.Asprone 等^[9]考虑了地震和飓风作用下建筑结构的加固设计,实现了结构发生故障后的失效概率评估。卢颖等^[10]建立了耦合模型并结合风险矩阵得出城市规划用地面对多灾害的综合风险,提高了多灾种耦合危险性评估的合理性。刘杨等^[11]研究了风和地震耦合作用下钢管混凝土框架-防屈曲支撑结构的易损性,为结构的性能评价和设计理论提供了重要依据。陈国华等^[12]构建了多灾种耦合脆弱性框架,分析了多灾种

耦合脆弱性方法的优缺点,为结构多灾种耦合评估提供依据。近年来,多灾害研究中涉及的荷载组合也不断扩展,包括地震和海啸^[13-14]、地震和风荷载^[15-17]等。

尽管建筑结构在多灾害场景下的分析方法正快速发展,然而,目前研究中多数单独研究结构在地震和爆炸作用下的性能评估^[18-19],少数考虑到结构在地震和爆炸两种极端灾害耦合作用下的风险概率评估^[20]。地震发生时,往往伴随着其他次生灾害。在众多极端偶然荷载中,地震和爆炸的破坏作用显著,且地震发生时,存在燃气爆炸的潜在风险^[21-22]。燃气管道在地震动的过程中可能发生破裂并导致燃气泄漏扩散,当室内的燃气浓度超过一定的阈值就可能会引发爆炸。地震经常会导致管道损坏而引发燃气泄露,而且近年来住宅中燃气爆炸事故频发,因此地震-爆炸灾害链效应引起了人们的关注。尽管地震与燃气爆炸联合发生的概率较小,但一旦发生,结构在地震和爆炸双重极端荷载的作用下,将承受远超出预先设计值的荷载作用,存在较大的失效风险。

虽然目前结构的抗震减震工作较为成熟,设计规范相对完善。但是,结构能否同时抵御地震-燃气爆炸灾害链效应尚待研究^[23]。因此,有必要针对地震与燃气爆炸两种极端荷载作用对结构的影响开展研究。综合上述问题,本文提出了一种考虑地震-燃气爆炸灾害链效应的数值模拟分析方法。利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元分析平台,实现剪力墙结构在同一时刻、特定炸药当量、不同爆炸位置下综合考虑地震和燃气爆炸两种极端偶然荷载的灾害链效应。基于此,分别研究结构在仅地震作用、地震与燃气爆炸联合作用下的动力响应和损伤情况,总结剪力墙结构在地震-燃气爆炸灾害链效应下的损伤规律,为结构抗多灾害的设计与防护提供参考。

1 有限元模型的建立

1.1 结构计算模型

以某12层剪力墙建筑结构作为研究对象,该建筑层高3.6 m、总高度43.2 m、平面布置长24.6 m、宽9.4 m、板厚120 mm、墙厚200 mm,混凝土强度等级为C30。钢筋混凝土楼板、剪力墙体、爆炸气体及空气均采用SOLID164实体单元建模。底层柱脚与地面固接。爆炸气体体积为0.2 m×0.2 m×0.2 m,为避免计算过程中发生网格严重畸变,定义固体结构为Lagrange算法,混合气体炸药及空气为ALE(Arbitrary Lagrange-Euler)算法,气体单元与固体结构单元间通过*CONSTRAIN_ED_LAGRANGE_IN_SOLID关键字流固耦合连接,以实现爆炸冲击波与结构的相互作用。为节省计算时间,建立适当空气域,并设置无反射边界条件。结构的有限元计算模型如图1所示。

1.2 材料的本构模型

混凝土材料的本构模型采用HJC(Johnson-Holmgvist_Concrete)模型,它能充分反映不同

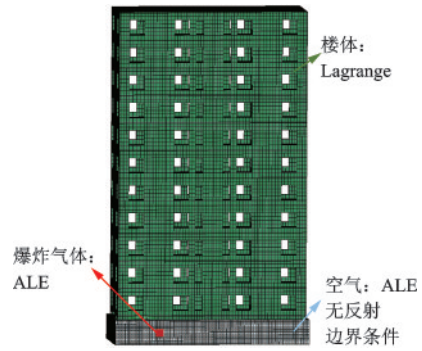


图1 计算模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of computational model

应变率下混凝土在弹性及塑性阶段的力学性能^[19-24]。HJC模型表达式为:

$$\sigma^* = [A(1 - D) + BP^{*N}][1 + C \ln \epsilon^*] \quad (1)$$

式中, σ^* 为标准化等效应力, $\sigma^* = \sigma/f_c$, σ 为实际等效应力; f_c 为静态抗压强度; P^* 为归一化压力, $P^* = P/f_c$, P 为实际压力; ϵ^* 为等效应变率, $\epsilon^* = \epsilon/\epsilon_0$, $\epsilon_0 = 1.0s^{-1}$ 为参考应变率; A 、 B 、 C 和 N 为混凝土强度参数,其中 A 为标准内聚力强度, B 为标准压力硬化系数, N 为压力增大指数, C 为应变率系数, D 为损伤因子。针对失效准则,设置失效拉应变0.001作为混凝土的失效判据^[24]。混凝土模型各参数见表1。

表1 混凝土模型材料参数

Table 1 Material parameters of the concrete model

参数	$\rho/(kg \cdot m^{-3})$	G/Pa	A	B	C	N	FC/Pa	T/Pa	$EPSO/s^{-1}$	$EFMIN$
数值	2 550	1.278e7	0.79	1.60	7e-3	0.61	3.5e4	3.6E3	1e-6	0.01
参数	$SFMAX/Pa$	PC/Pa	UC	PL/Pa	UL	D_1	D_2	K_1/Pa	K_2/Pa	K_3/Pa
数值	7e8	1.167e4	6.85e-4	3.8e4	0.05	0.036 8	1.0	8.5e7	-1.71e8	2.08e8

注: ρ 为混凝土密度; G 为剪切模量; FC 为抗拉强度; T 为抗压强度; $EPSO$ 为参考应变率; $EFMIN$ 为断裂塑性应变; $SFMAX$ 为相对强度; PC 为压碎应力; UC 为压碎体积应变; PL 为锁定压力; UL 为锁定体积应变; D_1 、 D_2 为损伤因子; K_1 、 K_2 、 K_3 为压应力常数

2 灾害链荷载模型和组合工况

2.1 地震作用

该剪力墙结构的地震设防烈度为Ⅶ度,建筑场地类别为Ⅱ类场地土,设计地震分组为第三组,根据《建筑抗震设计规范》规定至少需选取3条地震波进行结构动力时程分析,故选择El Centro波、San Fernando波、Taft波南北分量作为地震动输入荷载,将加速度峰值调整为100 cm/s²。调整后的地震波时程曲线及加速度反应谱和规范加速度反应谱如图2所示。

2.2 燃气爆炸荷载

天然气的主要成分是甲烷(CH₄),在爆炸极限(5%~15%)范围内,甲烷-空气混合气体在一定点火能量下会发生爆炸甚至爆轰^[25]。已有研究表明爆炸威力最强的混合气体中燃气的体积浓度约为9.5%,考虑最不利爆炸荷载工况,根据TNT当量法将此燃气爆炸荷载等效为18 320 g当量的TNT立方体炸药模型。炸药采用LS-DYNA提供的*MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN材料模型及其状态方程*EOS-JWL描述。空气假定为无黏性理想气体,采用*MAT_NULL材料模型及其状态方程

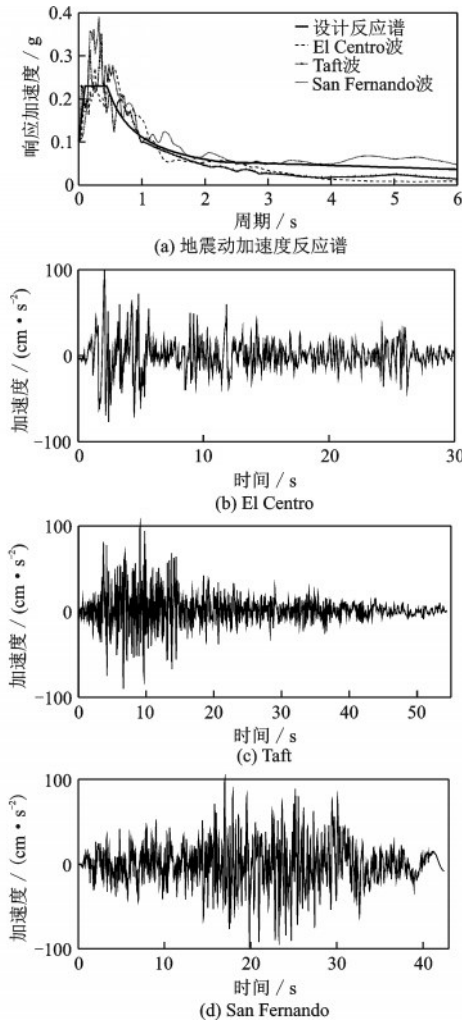


图2 地震加速度反应谱与时程曲线

Fig.2 Acceleration response spectrum and time history of input earthquake ground motions

*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 描述。

LS-DYNA 中的 “*EOS-JWL” 即为 JWL (Jones-Wilkins-Lee) 状态方程, 具体形式为:

$$P_1 = A_1 \left(1 - \frac{w}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + B_1 \left(1 - \frac{w}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{w E_0}{V} \quad (2)$$

式中, P_1 为爆轰压力; V 为相对体积; E_0 为炸药单位体积初始内能; A_1 、 B_1 、 R_1 、 R_2 、 w 为材料常数。爆炸气体材料模型各参数见表 2。

*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 即为线性多项式状态方程:

$$P_2 = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E \quad (3)$$

$$\mu = \frac{1}{V} - 1 \quad (4)$$

式中, P_2 为气体超压; V 为相对体积; E 为爆炸气体的单位体积内能; $C_0 \sim C_6$ 为状态方程参数。空气材料模型各参数见表 3。关键字选项卡中, ρ_1 为炸药密度, ρ_2 为空气密度。

为分析不同爆炸荷载位置对结构的影响, 选取边角、中部为代表性位置。由于顶层爆炸对于整体结构的损坏影响较小, 故选取一层、六层为代表性楼层, 爆炸荷载的施加位置如图 3 所示。

表 2 爆炸气体模型材料参数

Table 2 Material parameters of the explosive gas model

参数	$\rho_1 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	A_1 / GPa	B_1 / GPa	R_1	R_2	w	V	$E_0 / (\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3})$
数值	2 290	374	323	4.15	1.4	0.25	1.0	3 408

表 3 空气模型材料参数

Table 3 Material parameters of the air model

参数	$\rho_2 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	$E / (\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3})$	V
数值	1.292 9	-1.0e5	0.0	0.0	0.0	0.4	0.4	0.0	253	1.0

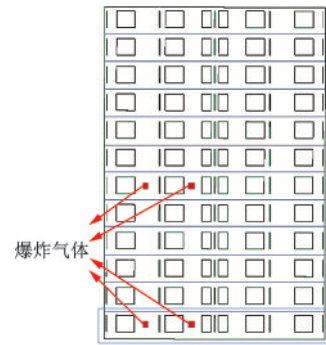


图3 爆炸荷载位置示意图

Fig.3 Schematic diagram of explosion load location

2.3 灾害链效应

地震中燃气爆炸的发生与地震是相互独立但密切相关的事件, 由于地震导致机械设施损坏从而气体泄漏而发生爆炸, 这可能发生在地震之后或与地震同时发生^[21-20]。本研究考虑燃气爆炸发生在地震结束后 0.3 s, 考虑到爆炸发生位置的随机性, 分别在结构的一层角部、一层中部、六层角部、六层中部等 4 个房间建立炸药模型以进行 2 种极端荷载的组合, 提出不同的荷载组合场景。为考虑同一时刻、同一炸药当量、不同爆炸发生位置的地震-燃气爆炸灾害链效应对于剪力墙结构损伤情况, 设计三类情形, 共 15 种工况, 见表 4。

表4 组合作用工况设计

Table 4 Composite action of blast and earthquake

地震作用	一类工况	炸药位置	地震作用	二类工况	炸药位置	地震作用	三类工况	炸药位置
El Centro波	1-1	无爆炸	Taft波	2-1	无爆炸	San Fernando波	3-1	无爆炸
	1-2	一层边角		2-2	一层边角		3-2	一层边角
	1-3	一层中部		2-3	一层中部		3-3	一层中部
	1-4	六层边角		2-4	六层边角		3-4	六层边角
	1-5	六层中部		2-5	六层中部		3-5	六层中部

3 数值模拟结果与分析

3.1 损伤情况

燃气爆炸发生后,爆炸荷载以冲击波的形式在结构中传播。冲击荷载对结构的直接作用过程往往是一个瞬时过程,在这一复杂的作用过程中,伴随着爆炸超压的不断变化,即从正压峰值至负压峰值的变化。图4给出了爆炸冲击波超压时程曲线。从图中可以看出,冲击超压达到峰值后,压力迅速衰减进入负压区,部分能量被结构吸收,随后迅速进入正压区,在正压区内超压曲线逐渐趋于平缓,整个爆炸过程持续大约10 ms。这与燃气爆炸的理想三角形冲击荷载形式一致,证明TNT当量法等效成燃气爆炸荷载是可行的。

当瞬时冲击荷载作用结束后,结构在惯性力的影响下发生自由振动。由于位移是与混凝土构件损伤破坏直接相关的关键参数,因此在后续分析中提取地震结束后10 s内的位移数据进行研究,重点关注灾害链效应对结构位移的影响规律。

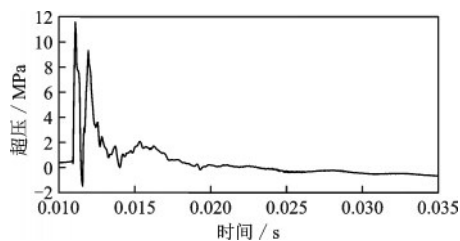


图4 爆炸荷载超压曲线

Fig.4 Explosion load overpressure curve

图5给出了结构在El-Centro地震-燃气爆炸灾害链作用下的位移时程曲线(爆炸荷载作用于首层)。可以看出,结构受地震作用时,顶层产生1 cm左右的位移幅值;燃气爆炸发生的瞬间,爆炸作用使得剪力墙结构水平位移产生了较大的突变,位移

值出现不同程度的增大,此时构件有失去承载力从而失效的风险。燃气爆炸荷载位于结构首层,导致首层位移幅值突变最大,而距离爆炸荷载较远的六层、十二层仅产生小位移。爆炸瞬时冲击波消失后,结构进入自由振动阶段,产生塑性变形。比较爆炸荷载位于一层边角和一层中部位置两种工况,一层边角位置有4 mm的残余变形,小于一层中部位置的6 mm残余变形。

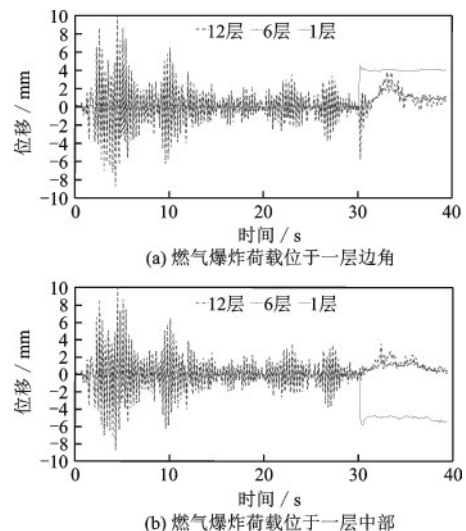


图5 地震-燃气爆炸灾害链效应下结构的位移响应时程曲线

Fig.5 Displacement response time history curve of structure under earthquake and gas explosion disaster chain effect

图6给出了建筑在地震-燃气爆炸灾害链效应作用下的局部损伤情况。地震作用会导致整体结构损伤,而燃气爆炸对于结构局部有巨大破坏作用。当两种极端偶然荷载联合作用时,剪力墙会出现不同程度的损坏,大量单元失效。其中,六层结构的破坏作用远大于一层结构,当六层中部发生地震-燃气爆炸灾害链效应时剪力墙体出现严重破坏,失去承载能力后导致六层以上楼体倒塌现象。

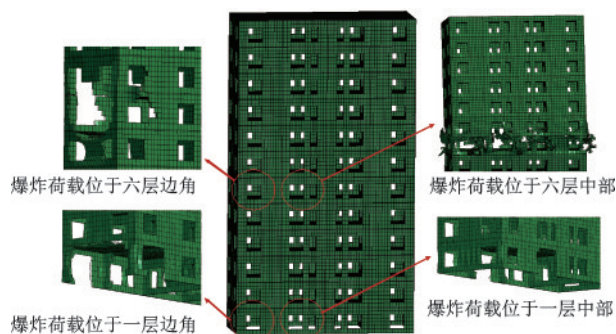


图6 结构局部损伤情况

Fig.6 Local damage of the structure

3.2 层间位移角

为分析剪力墙结构在地震-燃气爆炸灾害链效应下的变形,选取剪力墙中心处、楼板中心处等典型的破坏较为严重位置,以层间位移角(楼层层间最大位移与层高之比)为分析指标^[26],如图7所示。

由图7可见,三类工况地震作用下,各层层间位移角均未超过规范规定弹性层间位移角限值(1/1 000)^[27]。相比于地震作用下的损伤,当爆炸荷载位于一层边角位置时,结构一、二层的层间位移角平均增大约6倍;当爆炸荷载位于一层中部位置时,结构一、二层的层间位移角平均增大约8倍。这是由于位于中部位置的爆炸冲击波向周围传播扩散范围更广,从而对结构产生更大的损伤变形,而位于边角位置的爆炸冲击波传播范围受限,对结构的影响较小。

结构三层以上的层间位移角出现约等于甚至小于地震作用下层间位移角的现象,这是由于地震和燃气爆炸本是两个独立事件,且燃气爆炸在地震后发生,地震虽对结构造成一定的损伤积累,但主要使结构处于弹性变形阶段^[9],且远离爆炸荷载作用位置的结构为非直接承受爆炸荷载的构件,受爆炸影响较小,因此三层以上结构在燃气爆炸荷载作用下基本未发生塑性变形。对于一、二层结构,地震作用及燃气爆炸荷载导致层间位移角超过规范规定弹性层间位移角限值(1/1 000)^[27],产生局部损坏,但未超过弹塑性层间位移角限值(1/120)^[27],故不会发生倒塌,这是由于地震作用对于底层结构的损坏较小,同时结构底部与地面的刚性连接大大减小了燃气爆炸对于整体结构的破坏作用。

表5总结了结构在3条地震波作用与作用于六层不同位置的燃气爆炸荷载联合作用下的层间位移角。从表中可以看出地震-燃气爆炸灾害链效应会导致结构整体变形增大,但直接承受爆炸荷

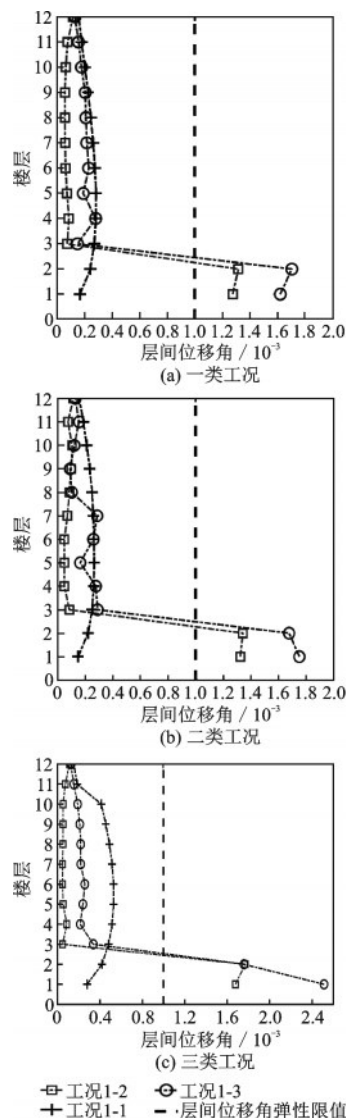


图7 爆炸荷载在一层时层间位移角

Fig.7 Inter story displacement angle when explosion load is on the first floor

载的楼层变形增大幅度远大于其他楼层。相较于结构一层,地震作用对于结构六层的损伤更大,此时若增加燃气爆炸荷载联合作用,荷载作用在六层时冲击波将能量传递到其他更多的楼层,影响范围更大,导致六层结构变形远大于爆炸荷载作用于一层。当燃气爆炸荷载位于六层边角时,建筑物遭受局部损坏,六、七层的层间位移角均超过弹塑性限值,引起了局部倒塌。当燃气爆炸荷载位于六层中部时,瞬时冲击波使得直接承受爆炸荷载的构件失效,当某些关键构件丧失承载能力后,结构体系变得十分脆弱,无法进一步抵抗燃气爆炸荷载,从而导致结构在六层以上基本无完整构件,发生倒塌。

表5 结构六层层间位移角
Table 5 Storey drift angle of the sixth floor

单位: 10^{-3}

工况	1F	2F	3F	4F	5F	6F	7F	8F	9F	10F	11F	12F
1-4	0.10	0.31	0.26	0.18	0.16	14.60	10.42	3.48	0.27	0.30	0.32	0.33
1-5	0.09	0.32	0.31	0.33	0.72	162.80	120.82	26.96	27.54	27.64	27.69	27.67
2-4	0.17	0.21	0.27	0.18	0.17	16.54	12.99	3.15	0.32	0.30	0.28	0.26
2-5	0.09	0.20	0.33	0.33	0.37	330.13	180.28	55.22	39.98	40.51	40.52	40.49
3-4	0.09	0.26	0.25	0.41	0.38	16.44	11.99	4.47	0.24	0.21	0.22	0.25
3-5	0.13	0.42	0.38	0.31	0.51	45.81	170.17	27.06	52.82	51.63	51.65	51.51

4 结 论

(1)当地震-燃气爆炸灾害链效应作用于本文结构的一层时,结构发生局部损坏。作用于一层中部时结构的损坏大于作用于一层边角。

(2)当地震-燃气爆炸灾害链效应作用于本文结构的六层时,剪力墙体出现严重剪切破坏,趋于剪断,甚至六层以上墙体发生倒塌。因此,当爆炸发生于中间楼层时,这种灾害链效应可能会导致结构更严重的损伤和破坏。

(3)中震对于结构的破坏较小,与燃气爆炸荷载联合后结构产生塑性变形,位移有不同程度的增加,本文中可达到约6~8倍的增大幅度。因此,在结构设计中,“小概率-大危害”事件应当给予充分考虑。

本文的研究初步揭示了一些地震-燃气爆炸灾害链效应对剪力墙结构整体的破坏规律,但研究中尚有不足,如剪力墙结构的建模中忽略了钢筋的作用,地震作用仅仅考虑了中震作用,对于灾害链效应所导致的结构破坏机理的解释尚不充分,考虑灾害链效应的结构分析方法尚未形成一个易于实施的流程和框架,后续将进一步开展深入研究。

参考文献:

- [1] Li H N, Zheng X W, Li C. Copula-based approach to construct a joint probabilistic model of earthquakes and strong winds[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2019, 19(4): 1950046.
- [2] Zheng X W, Li H N, Yang Y B. Damage risk assessment of a high-rise building against multihazard of earthquake and strong wind with recorded data[J]. Engineering Structures, 2019, 200: 109697.
- [3] Zheng X W, Li H N, Paolo G. Reliability-based design approach for high-rise buildings subject to earthquakes and strong winds [J]. Engineering Structures, 2021, 244: 112771.
- [4] 李宏男, 郑晓伟, 李超. 高性能结构抗多次多种灾害

全寿命性能分析与设计理论研究进展[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(2):56-69.

Li H N, Zheng X W, Li C. Research progress on life-cycle multihazard-based design theory for high-performance structures [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(2):56-69. (in Chinese)

- [5] 王静好, 袁万城. 地震爆炸联合作用下桥梁响应与损伤的数值模拟[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(5):643-649.

Wang J S, Yuan W C. Numerical simulation of the response and damage of girder bridges subjected to the combined action of earthquake and blast [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(5):643-649. (in Chinese)

- [6] 李宏男, 李钢, 郑晓伟, 等. 工程结构在多灾害耦合作用下的研究进展[J]. 土木工程学报, 2021, 54(5): 1-14.

Li H N, Li G, Zheng X W, et al. Research progress in engineering structures subject to multiple hazards [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(5): 1-14. (in Chinese)

- [7] 吕光辉, 李钢, 董志骞, 等. 洪水冲刷和地震联合作用下砌体结构的失效风险评估[J/OL]. 防灾减灾工程学报: 1-9 [2021-03-05]. <https://doi.org/10.13409/j.cnki.jdpme.201910025>.

Lyu G H, Li G, Dong Z Q, et al. Failure risk assessment of masonry structures under flood scouring and earthquakes [J/OL]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering: 1-9 [2021-03-05]. <https://doi.org/10.13409/j.cnki.jdpme.201910025>. (in Chinese)

- [8] Wen Y K. Minimum lifecycle cost design under multiple hazards [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2001, 73(3):223-231.

- [9] Asprone D, Jalayer F, Prota A, et al. Proposal of a probabilistic model for multi-hazard risk assessment of structures in seismic zones subjected to blast for the limit state of collapse [J]. Structural Safety, 2010, 32(1): 25-34.

- [10] 卢颖, 郭良杰, 侯云玥, 等. 多灾种耦合综合风险评估方法在城市用地规划中的应用[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2015(3):538-546.

- Lu Y, Guo L J, Hou Y Y, et al. Comprehensive multi-hazard risk assessment method applicated in urban land-use planning[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015 (3):538-546. (in Chinese)
- [11] 刘杨, 李宏男, 李超, 等. 风与地震耦合作用下钢管混凝土框架-防屈曲支撑结构体系易损性研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(2):56-65.
- Liu Y, Li H N, Li C, et al. The study on the vulnerability of the concrete stilled steel tubular frame with buckling-restrained braces structure under the coupling of wind and earthquake [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(2): 56-65. (in Chinese)
- [12] 陈国华, 邹梦婷, 黄孔星, 等. 化工园区多灾种耦合脆弱性方法探究与前沿综述[J]. 化工进展, 2019, 38(5):2527-2535.
- Chen G H, Zou M T, Huang K X, et al. Methods analysis and frontiers review of vulnerability for coupled multihazard in Chemical Industry Park[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(5): 2527-2535. (in Chinese)
- [13] 李泽华. 地震—海啸多灾害作用下近海桥梁的抗灾性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- Li Z H. Disaster-resistance performance of coastal bridge under earthquake-tsunami multiple hazards[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
- [14] 吴杰春. 近海桥梁在地震海啸多灾害作用下的结构性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- Wu J C. Study on structural performance of coastal bridges under multiple hazards of earthquake and tsunami[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [15] Asareh M A, Schonberg W, Volz J. Effects of seismic and aerodynamic load interaction on structural dynamic response of multi-megawatt utility scale horizontal axis wind turbines [J]. Renewable Energy, 2016, 86 (2): 49-58.
- [16] 戴靠山, 赵志, 孟家瑶. 风电塔在地震和风荷载下的失效概率评估[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(2): 38-44.
- Dai K S, Zhao Z, Meng J Y. Failure probability evaluations of a wind turbine under earthquakes and wind loads [J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(2): 38-44. (in Chinese)
- [17] 周颖, 单慧伟, 邢丽丽, 等. 地震和风耦合作用下上海中心大厦结构易损性研究[J]. 世界地震工程, 2020, 36(2):1-11.
- Zhou Y, Shan H W, Xing L L, et al. Study on vulnerability of Shanghai Tower under combined actions of wind and earthquake [J]. World Earthquake Engineering, 2020, 36(2):1-11. (in Chinese)
- [18] Li Y, Ahuja A, Padgett J E. Review of Methods to Assess, Design for, and Mitigate Multiple Hazards [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2012, 26(1):104-117.
- [19] 刘晓蓬. 爆炸荷载和地震作用下混凝土坝动力破坏及防护措施研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- Liu X P. Research on dynamic damage and protective measures of concrete dam under explosive load and earthquake[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [20] Faghihmaleki H, Nejati F, Mirzagoltabar-roshan A, et al. An evaluation of multi-hazard risk subjected to blast and earthquake loads in RC moment frame with shear wall[J]. Journal of Engineering Science and Technology, 2017, 12(7):314-331.
- [21] Abdollahzadeh G, Faghihmaleki H. Seismic-explosion risk-based robustness index of structures[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2017, 26(4):1-18.
- [22] Abdollahzadeh G, Faghihmaleki H. Proposal of a probabilistic assessment of structural collapse concomitantly subject to earthquake and gas explosion[J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2018, 12 (3): 425-437.
- [23] Abdollahzadeh G, Faghihmaleki H, Avazeh M. Progressive collapse risk and reliability of buildings encountering limited gas – pipe explosion after moderate earthquakes[J]. SN Applied Sciences, 2020, 2(4):1-13.
- [24] 龚顺风, 邓欢, 朱升波, 等. 近爆作用下钢筋混凝土板动态破坏的数值模拟研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(2):20-24,100.
- Gong S F, Deng H, Zhu S B, et al. Numerical simulation for dynamic failure of a reinforced concrete slab under close-in explosion [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(2):20-24,100. (in Chinese)
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [26] 吴燕燕. 室内燃气爆炸作用下钢框架结构动力响应与连续倒塌分析[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.
- Wu Y Y. Analysis on dynamic responses and progressive collapse of steel frame structure subject to internal gas explosion[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2012. (in Chinese)
- [27] 张偲严, 李宏男, 李超. 装配式剪力墙高效阻尼器耗能连接的简化模型研究与数值分析[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(10):61-68.
- Zhang C Y, Li H N, Li C. Simplified model development and numerical simulation of a high-efficiency energy-dissipating joint for prefabricated concrete shear walls [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(10):61-68. (in Chinese)

(本文责编:赵霞)