

文章编号: 1000-4750(2011)11-0114-10

地下隧道内爆炸冲击下地表多层建筑的 动力响应研究

*田 力¹, 高芳华²

(1. 天津大学建筑工程学院/滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072; 2. 中国建筑设计研究院, 北京 100044)

摘 要: 该文对带有筏板基础和地下室的多层框架及框剪建筑物在遭受邻近地下隧道内爆炸冲击作用下的动力响应进行了分析研究。采用 ABAQUS 软件建立了考虑地基土和混凝土等材料非线性的隧道-土体-多层建筑耦合体系的三维数值模型, 经与 LS-DYNA 模型结果的比较分析验证了该文所建体系模型的正确性和有效性。通过大量的算例分析, 对隧道内爆炸冲击下地表多层建筑在单线、双线隧道布局、建筑物与爆炸隧道之间距离的变化、以及爆炸点沿隧道纵轴线的位置移动等 3 组工况下的动力响应规律进行系统研究。结果显示: 介于建筑物与爆炸隧道之间的另一平行隧道使爆炸波在土中的传播受到明显阻碍, 继而削弱了建筑物的动力响应幅值; 不同类型的多层建筑随着与爆炸点位置的不断接近均产生愈发强烈的动力响应, 而彼此之间抗爆动力性能的差异也更为显著。

关键词: 隧道内爆炸; 筏板基础; 地下室; 框架结构; 框剪结构; 动力响应

中图分类号: TU435; TU352.1⁺2; TD235.1⁺1 **文献标志码:** A

DYNAMIC RESPONSE OF THE MULTI-STOREY BUILDING SUBJECTED TO BLAST LOADING IN UNDERGROUND TUNNEL

*TIAN Li¹, GAO Fang-hua²

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University /

Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety (Tianjin University), Ministry of Education, Tianjin 300072, China;

2. China Architecture Design & Research Group, Beijing 100044, China)

Abstract: The dynamic response of three types of a multi-storey building (including a framed structure with raft foundation, a frame-shear wall structure with raft foundation, a framed structure with basement) under a blast loading generated by an in-tunnel explosion is investigated numerically. The ABAQUS software is used to establish a three-dimension tunnel-soil-multi-storey building coupling model considering the material nonlinearity of the concrete and soil. The accuracy and validity of the coupling model set up with the ABAQUS software are verified by a comparison between its results and those from a LS-DYNA coupling model. A large number of example analyses are carried out to systematically disclose the response characteristics of the aboveground building subjected to an in-tunnel explosion in three groups of cases, i.e. the one-way and two-way tunnel layouts, the change of a distance between the building and the explosion-happening tunnel, and the change of the explosive position along the tunnel's longitudinal axis. The results show that another parallel tunnel set between the building and the explosion-happening tunnel has an obstructive effect on the blast waves' propagation in soil, resulting in a distinct decrease of peak responses of aboveground structures; all types of buildings have an

收稿日期: 2010-03-16; 修改日期: 2010-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(50678116); 国家科技支撑计划重点项目(2006BAJ13B02); 天津市应用基础与前沿技术研究计划重点项目(08JCZDJC19500)

作者简介: *田 力(1970—), 男, 天津市人, 副教授, 博士, 从事结构工程研究(E-mail: ltian@tju.edu.cn);

高芳华(1985—), 女, 湖南娄底人, 硕士, 从事结构设计工作(E-mail: gladstone120@sina.com).

increasingly violent response when the explosive position is closer to the structure, while their difference of anti-explosion capability from one another become more remarkable during this course.

Key words: in-tunnel explosion; raft foundation; basement; frame structure; frame-shear wall structure; dynamic response

随着近年来城市交通基础设施的跨越式发展,在居民住宅和各类重要公共建筑附近兴建了大量地铁,缓解了交通拥堵且方便了人们出行。然而,遍布世界的恐怖组织正频繁地将袭击现场锁定在地铁内,利用其封闭环境加之人流密集,蓄意制造爆炸,造成人员大量伤亡和地铁衬砌的严重毁损,而传播至地表的冲击波也会引起周围建筑物振动,使其安全受到威胁。作为地铁沿线附近最为普遍的一种民用建筑,多层框架、框剪结构的防灾重点以往多集中于抗震、抗风领域,但其在遭受邻近地下隧道内爆炸冲击下的响应特征及损坏模式的研究,至今尚属少见。为了有效减免此类爆炸带给周边结构的破坏性恶果,需及时地开展上述工作,探究其内在规律,继而总结出工程上合理实用的防爆设计及安全措施^[1]。

本文运用 ABAQUS 软件^[2-3]进行上述课题的数值研究。首先对由单(双)线隧道、周围土体以及地表多层结构(筏基框架、筏基框剪、或带地下室的筏基框架)所组成的相互作用体系建立数值模型,将隧道内壁上的爆炸荷载、土体和结构的材料非线性、土-结构接触模式以及远场边界条件等分别作出合理模拟或处理。然后通过与 LS-DYNA 软件^[4]所建类似模型的计算结果进行比较,验证了本文方法的合理与有效。最后根据大量的算例分析,归纳出在隧道内爆炸冲击下邻近地表的 3 类多层建筑各层柱子的位移峰值、剪力峰值及 Mises 应力峰值等随着单线、双线隧道布局改变、结构距离爆炸隧道远近、以及爆炸点沿隧道纵轴线位置移动等的变化规律,进而区分出三类结构的抗爆性能优劣,为后续的工程防爆研究与设计提供重要的参考。

1 数值模型

应用 ABAQUS 有限元软件,建立起包含地下隧道、周围土体以及邻近的地表多层建筑(包括筏基框架、筏基框剪、带地下室的筏基框架等 3 类结构)等在内的相互作用体系模型,如图 1 所示。其中,隧道内爆炸荷载的施加、各部分材料模型的确定以及边界处理等具体说明如下。

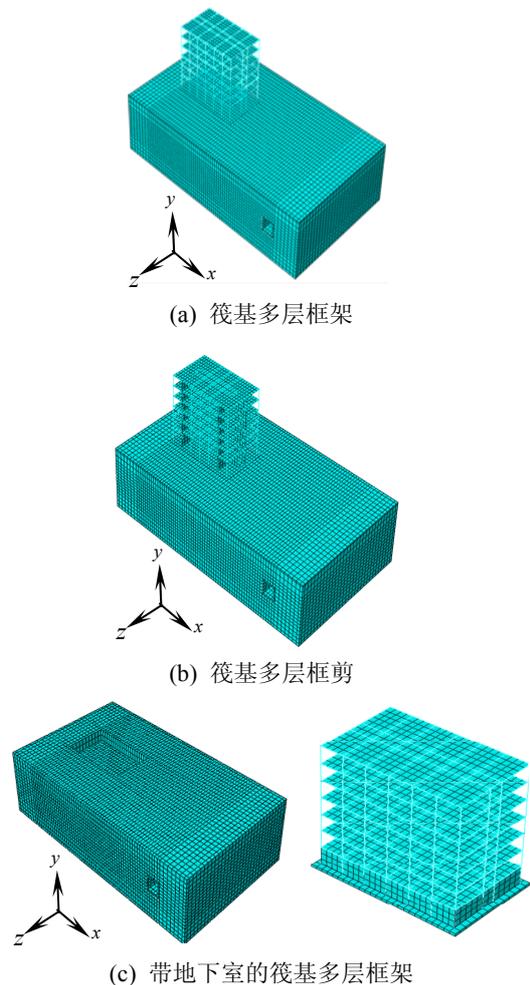


图 1 隧道-土体-多层建筑体系的网格模型

Fig.1 The mesh model of the tunnel-soil-multi-storey building system

1.1 隧道内壁爆炸超压荷载

针对隧道内爆炸产生的内壁超压的模拟,本文采用 LS-DYNA 软件建立包含炸药、空气和混凝土墙壁在内的三维模型。其中,炸药和空气由欧拉网格建模,混凝土墙壁由拉格朗日网格建模,应用 ALE 耦合算法进行计算。将炸药置于矩形截面隧道的纵轴线上,利用体系的对称性建立其 1/8 模型。本文算例中所采用的隧道截面宽、高均为 4m,衬砌厚 0.5m。沿隧道长度方向则根据内壁超压的有效加载范围取为 8m,药量体积为 $0.2\text{m}\times 0.2\text{m}\times 0.2\text{m}$ (炸药总质量约为 105kg)。隧道墙壁定义为刚体,其两端设为无反射面。图 2 示意了内壁上距离爆源最近

与最远的两个单元上的爆炸超压时程曲线。

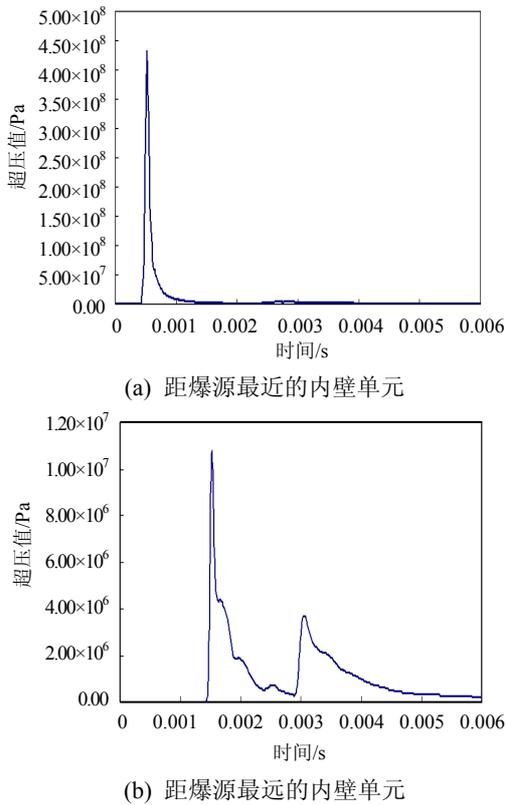


图2 隧道内壁两单元上的超压时程曲线
Fig.2 Overpressure histories on two elements of the tunnel wall's inner-surface

1.2 土体的本构模型

强烈爆炸波的冲击势必引起隧道周边部分土体的塑性变形，因而本文选用 ABAQUS 中的 Drucker-Prager 准则模拟土体材料的变形，它是经典 Drucker-Prager 准则的进一步扩展。在 ABAQUS 显式运算所用的 Drucker-Prager 线性屈服面模型表示为：

$$f(p, q) = q - 3\sqrt{3}\alpha p - \sqrt{3}k = 0 \quad (1)$$

式中： $f(p, q)$ 为屈服函数； p 为平均应力； q 为广义剪应力； α 、 k 为材料参数。鉴于土工试验常以 Mohr-Coulomb 模型的 σ - τ 平面给出数据，还应根据压缩锥公式^[5]将 M-C 数据向 D-P 模型进行标定。本文采用折中锥公式来标定 M-C 数据。将文献[5]中折中锥相应材料常数代入式(1)得到：

$$f(p, q) = q - \frac{18\sin\phi}{9 - \sin^2\phi} p - \frac{18c\cos\phi}{9 - \sin^2\phi} \quad (2)$$

若采用相关流动法则， π 平面上屈服形状的参数 $K=1.0$ ，由此得到 M-C 模型的 σ - τ 平面数据与 Drucker-Prager 线性屈服面模型的 p - t 平面数据之间的换算关系，即：

$$\tan\beta = \frac{18\sin\phi}{9 - \sin^2\phi} \quad (3)$$

$$d = \frac{18c\cos\phi}{9 - \sin^2\phi} \quad (4)$$

本文算例中，根据式(3)和式(4)对各层土体的工程数据进行处理，得到表 1。

表1 土体特性参数

Table 1 Parameters of soil material

层号	土类别	厚度/ m	重度/ (kN/m ³)	泊松比	粘聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	压缩模量/ MPa
1	粘性土	4	18.9	0.35	18.0	14.5	570
2	粘性土	11	19.5	0.35	17.6	28.6	630
3	砂性土	5	19.4	0.35	26.5	23.4	580

1.3 混凝土的本构模型

隧道衬砌及上部建筑均采用钢筋混凝土结构，其在隧道内强烈的爆炸冲击下不可避免地出现不同程度的损伤破坏。因而对其中的混凝土材料选用 ABAQUS 中的混凝土塑性损伤模型进行模拟，至于钢筋材料的影响，则仅仅考虑其弹性模量对混凝土的贡献，按照加权方法来修正混凝土的弹性模量。本文算例选用 C30 混凝土和 HRB300 钢筋，结构各个截面的配筋率均为 1.5%，得到修正后的混凝土弹性模量为 3.1027×10^4 MPa，泊松比为 0.15。所用的塑性损伤参数如表 2 所示。考虑应变率影响后的混凝土抗压/抗拉塑性本构关系采用 Lu 和 Xu 的数值结果^[6]，具体参数详见文献[7]。ABAQUS 软件中，混凝土塑性损伤模型采用各向同性损伤，其拉、压损伤参数 d_t 、 d_c 可根据表 3 数据按线性插值方式计算^[7]。

表2 ABAQUS 中混凝土塑性损伤模型参数

Table 2 Input parameters of concrete damaged plasticity model

膨胀角	离散率	f_{bo}/f_{c0}	K_c	粘滞系数
30	0.1	1.16	0.66667	0

表3 混凝土受压/受拉损伤数据

Table 3 Damage parameters in concrete's compression and tension model

受压损伤参数 d_c		受拉损伤参数 d_t	
损伤参数	塑性应变	损伤参数	塑性应变
0	0	0	0
0.01	0.001	0.01	0.0003
0.02	0.007	0.02	0.0005
0.035	0.012	0.04	0.0015
0.06	0.017	0.08	0.0025
0.09	0.022	0.13	0.0035
0.125	0.027	0.19	0.0045
0.17	0.032	0.26	0.0055
0.22	0.037	0.34	0.0065
无数据		0.43	0.0075

1.4 半无限地基的边界处理

为了真实地模拟出爆炸冲击波透过耦合模型的土体边界向外传播的物理过程, 本文在该边界处设置三维一致粘弹性模型, 通过粘弹性人工边界理论推导出三维一致粘弹性边界单元的刚度矩阵、阻尼矩阵, 根据单元矩阵的等效原理, 建立起等效的粘弹性边界单元^[8]。该单元采用八结点六面体单元, 如图 3 所示, 其等效的剪切模量 \tilde{G} 、弹性模量 \tilde{E} 及阻尼系数 $\tilde{\eta}$ 表示如下:

$$\tilde{G} = \alpha_T h \frac{G}{R} \quad (5)$$

$$\tilde{E} = \alpha_N h \frac{G(1+\tilde{\nu})(1-2\tilde{\nu})}{R(1-\tilde{\nu})} \quad (6)$$

$$\tilde{\eta} = \frac{\rho R}{3G} \left(2 \frac{c_S}{\alpha_T} + \frac{c_P}{\alpha_N} \right) \quad (7)$$

式中: G 为土体剪切模量; E 为土体弹性模量; α_T 和 α_N 为人工边界参数, 计算取 $\alpha_T=0.67$ 和 $\alpha_N=1.33$; h 为等效人工边界单元的厚度, 取为 1m; $\tilde{\nu}$ 为等效泊松比, 取为 0; R 为波源至人工边界点的距离; ρ 为土体质量密度; c_S 和 c_P 分别为 S 波和 P 波波速。

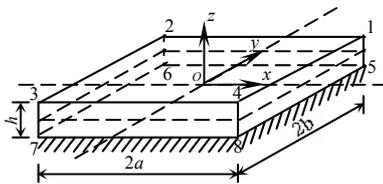


图 3 八结点六面体单元

Fig.3 Eight-node hexahedron element

1.5 土-结构接触面模型

在强烈的爆炸波冲击下, 土体与结构之间容易发生相互滑移、脱离及闭合等复杂过程。目前通常采用在两种介质之间设置接触面单元(例如 Goodman 无厚度单元^[8]和 Desai 薄层单元^[9]等)和直接定义接触面对(master-slavery surface)两种数值求解方法。本文选择后者, 应用 ABAQUS 中的主从接触面对来模拟土-结构间的动态接触过程。结构表面作为主接触面, 其结点为主结点, 而土体表面作为从接触面, 其结点为从结点, 主接触面能侵入从接触面, 但从接触面无法侵入主接触面^[3,10]。图 4 给出了土体与隧道衬砌之间的接触面示意图。

1.6 相互作用体系模型的算例验证

分别应用 ABAQUS 软件和 LS-DYNA 软件, 建立起由地下隧道、周围土体以及地表筏基多层框架结构组成的相互作用体系的三维数值模型, 如

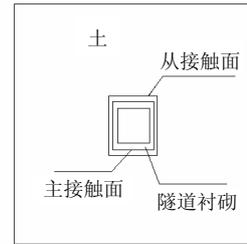


图 4 土-隧道接触面

Fig.4 Soil-tunnel interface

图 5 和图 6 所示。在两种模型中, 整个土体尺寸均为 80m×46m×20m, 各土层的特性参数参见表 1, 隧道距离建筑物右侧 30m。筏基框架结构共有 6 层, 层高 3.3m, 柱子尺寸均为 500mm×500mm, 梁尺寸均为 300mm×500mm, 楼板厚 150mm, 筏板基础厚度 500mm, 其平面布置、柱顶标记及地下爆炸波传播方向等如图 7 所示。在 ABAQUS 模型和 LS-DYNA 模型中, 楼板分别采用 Shell4R 和 Shell63 壳单元, 梁柱分别采用 Beam31 单元和 Beam161 单元, 土体和隧道衬砌均采用实体单元, 分别选用 Solid(C3D8R)和 Solid164 单元。在 LS-DYNA 建模中, 将土体边界设置为无反射面, 土-结构接触面设置为面面接触, 这与 ABAQUS 中采用等效一致粘弹性边界单元以及采用土-结构接触面对的处理有所区别, 其它有关材料的本构模型及各参数均与 ABAQUS 中的相同。两种软件的对比计算结果如图 8~图 10 所示。

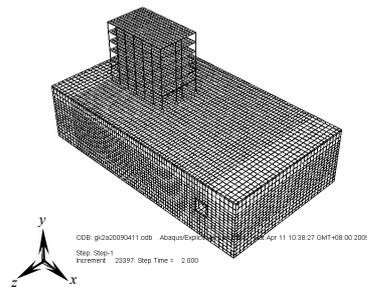


图 5 ABAQUS 建立的体系模型

Fig.5 System model established by ABAQUS software

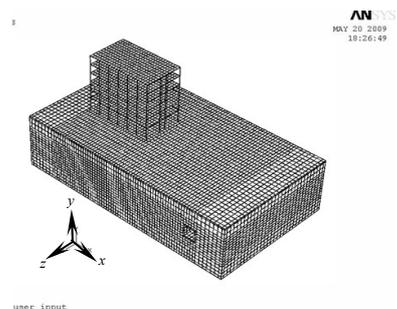


图 6 LS-DYNA 建立的体系模型

Fig.6 System model established by LS-DYNA software

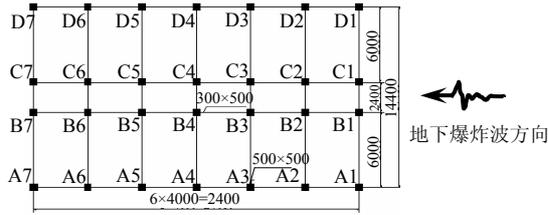


图 7 框架结构平面布置及地下爆炸波传播方向示意图
Fig.7 Layout plain of frame structure and traveling direction of underground blast waves

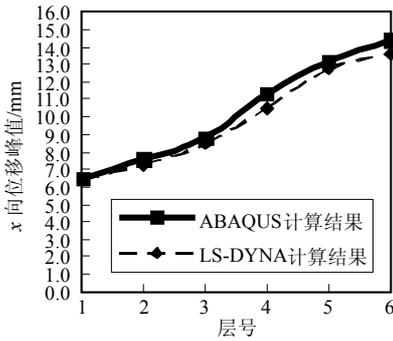


图 8 各楼层柱顶 x 向位移峰值
Fig.8 Peak displacement of column top of 1st~6th floor in x direction

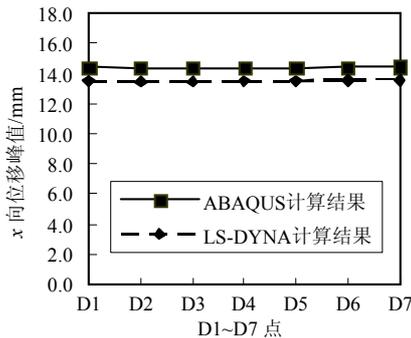


图 9 6 层柱顶 D1~D7 点 x 向位移峰值
Fig.9 Peak displacements of column tops D1~D7 of the 6th floor in x direction

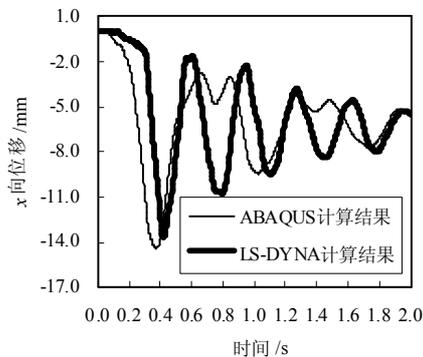


图 10 6 层柱顶 D1 点的 x 向位移时程
Fig.10 Displacement history of column top D1 of 6th floor in x direction

从图 8~图 10 的结果可知：两种软件计算所得的各层柱顶的 x 向位移峰值非常接近，最大相对误

差出现在第 4 层，LS-DYNA 的计算值相比 ABAQUS 低了 9%。二者算得的柱顶 x 向位移时程曲线也很相似，其各个波峰、波谷的数值及对应的时刻彼此均很接近。这些充分说明：本文应用 ABAQUS 建立的隧道-土-多层建筑三维体系模型，能够准确、有效地进行隧道内爆炸冲击下地表多层建筑物的动力响应分析。此外，图 10 所示 6 层柱顶 D1 点的 x 向位移响应的最终平衡位置明显地偏离其初始位置(沿 x 轴负方向)，这说明在隧道内爆炸冲击过后，隧道周边的地基土出现了一些塑性残余变形，致使建筑物整体上沿远离隧道的方向产生了稍许位移。

2 算例分析

基于上述理论和方法，本文应用 ABAQUS 软件建立起包含隧道、周围土体以及地表多层建筑在内的三维体系模型，进行隧道内爆炸冲击下地表多层建筑动力响应规律的研究。其中，多层建筑分为筏基框架、筏基框剪和带地下室的筏基框架 3 种类型，其平面布置可参见图 7 和图 11。有关爆炸荷载、土体、隧道及建筑物的几何、材料、本构及其它建模所需的参数详见上述 1.1 节~1.6 节内容。此外，需要补充说明的参数包括：框剪结构中的剪力墙板厚度为 190mm，带地下室框架结构采用一层地下室，层高 3.5m，地下室外墙厚度 190mm。

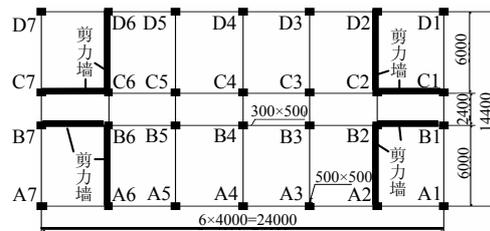


图 11 框剪结构平面布置图
Fig.11 Layout plain of frame-wall structure

2.1 单线、双线隧道内爆炸荷载作用下筏基框架结构的动力响应

继建立了单线隧道布局下的隧道-土-筏基框架结构相互作用体系模型(参见图 5)之后，在该爆炸隧道与建筑物之间距离爆炸隧道 13m 处铺设另一平行隧道，形成双线隧道布局的相互作用体系模型，如图 12 所示。将爆炸点分别设置在爆炸隧道内部中点、沿隧道纵轴线向一个方向偏移 8m、以及偏移 16m 等 3 个位置，分别记为第 1 爆炸点、第 2 爆炸点、第 3 爆炸点位置。

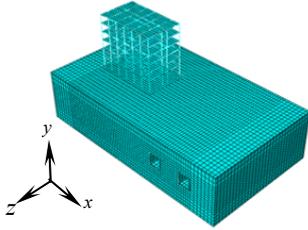
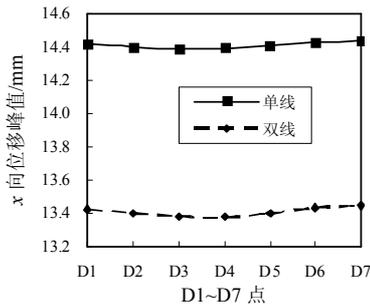
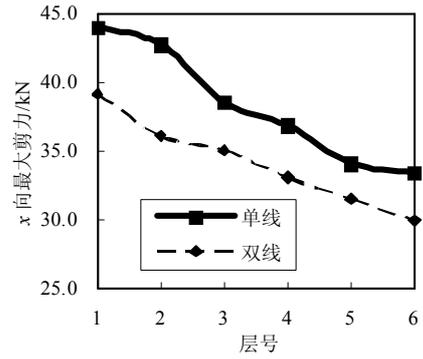


图 12 双线隧道-土体-筏基框架结构相互作用体系模型
 Fig.12 Interaction system model including two-way tunnel, soil and frame structure with raft foundation

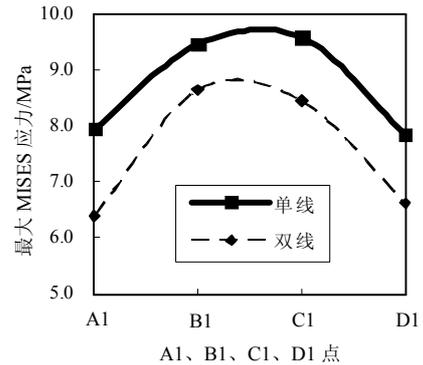
图 13~图 15 给出了单线、双线隧道布局下筏基框架结构在 3 个爆炸点分别发生爆炸时的部分动力响应对比结果。从中可见：双线隧道布局下，框架顶层(第 6 层)柱顶 D1~D7 点 x 向位移峰值、各层柱底 x 向最大剪力以及底层柱底 A1~D1 点最大 MISES 应力均低于单线隧道布局时的结果，这说明位于框架结构与爆炸隧道之间的另一平行隧道的存在对土中爆炸波的传播起到一定的阻挡作用，消耗了部分爆炸波的能量，从而缓减了上部框架结构的动力响应。此外，在框架结构与爆炸隧道之间无论是否存在另一平行隧道，各个楼层柱底 x 向最大剪力值均呈现出由底层至顶层逐渐减小的趋势，而同一楼层(例如 6 层)距离爆炸点由近及远的一列柱(例如 D1~D7)顶部的 x 向位移峰值则是变化甚微。这不仅预示了框架底层柱子的强度验算需列为此类结构抗爆设计的一个重要环节，同时也说明楼板沿 x 向的极大的平面内刚度有助于提高框架结构的整体空间整体性，使同一楼层各个柱子的侧向变形趋于一致。不过，随着爆炸点沿隧道纵轴线由其中部向一侧的逐渐偏移，底层距离该爆炸点最近的一排柱 A1~D1 的最大 MISES 应力呈现出：从中间(B1 和 C1)最大两边(A1 和 D1)较小的抛物线型，过渡到左边(A1 和 B1)较大右边(C1 和 D1)递减的“ \sim ”型，再到左边(A1 和 B1)较大右边(C1 和 D1)较小的“ \sim ”型，这清楚地反映出：离爆炸点越近的柱子内力响应越强烈，容易遭受损坏；而离爆炸点越远的柱子内力响应随之减少，相对比较安全。



(a) 6 层柱顶 D1~D7 点 x 向位移峰值



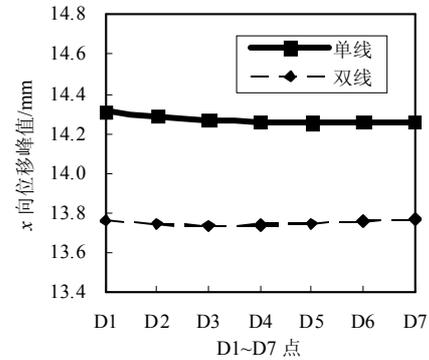
(b) 各层柱底 x 向最大剪力



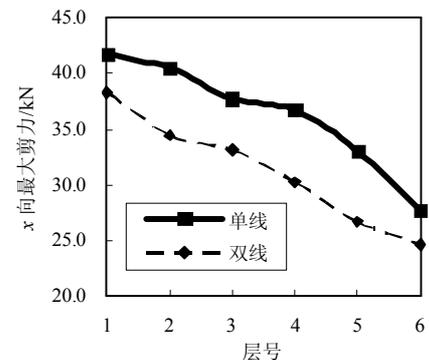
(c) 1 层柱底 A1~D1 点最大 MISES 应力

图 13 第 1 爆炸点位置发生爆炸时单线、双线隧道布局下筏基框架结构的动力响应

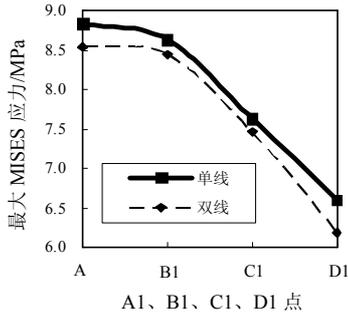
Fig.13 Dynamic responses of frame structures with raft foundation to an explosion at the first explosive position under one-way and two-way tunnel layout



(a) 6 层柱顶 D1~D7 点 x 向位移峰值



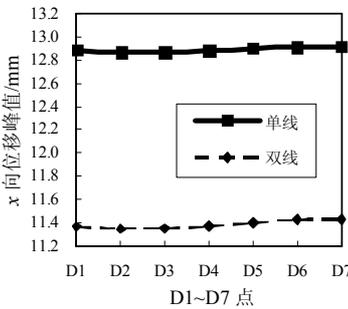
(b) 各层柱底 x 向最大剪力



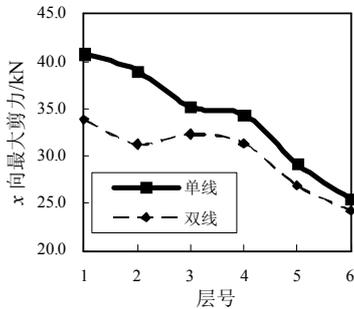
(c) 1 层柱底 A1~D1 点最大 MISES 应力

图 14 第 2 爆炸点位置发生爆炸时单、双线隧道布局下筏基框架结构的动力响应

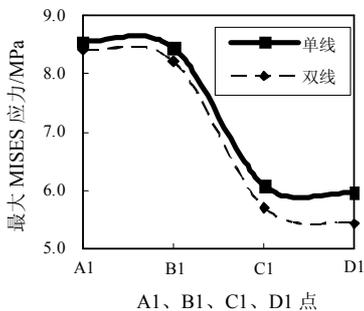
Fig.14 Dynamic responses of frame structures with raft foundation to an explosion at the second explosive position under one-way and two-way tunnel layout



(a) 6 层柱顶 D1~D7 点 x 向位移峰值



(b) 各层柱底 x 向最大剪力



(c) 1 层柱底 A1~D1 点最大 MISES 应力

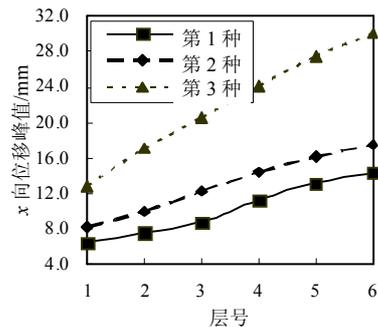
图 15 第 3 爆炸点位置发生爆炸时单、双线隧道布局下筏基框架结构的动力响应

Fig.15 Dynamic responses of frame structures with raft foundation to an explosion at the third explosive position under one-way and two-way tunnel layout

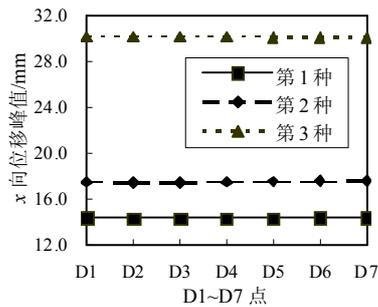
2.2 筏基框架结构在与爆炸隧道相隔不同距离时的动力响应

在图 5 所示的框架结构与爆炸隧道相距 30m 的模型基础上，让二者间的距离分别缩短至 20m 和 10m，建立相应的体系模型。这 3 个模型可分别简记为第 1 种、第 2 种、第 3 种距离情况。爆炸点均施加在隧道内中点位置。

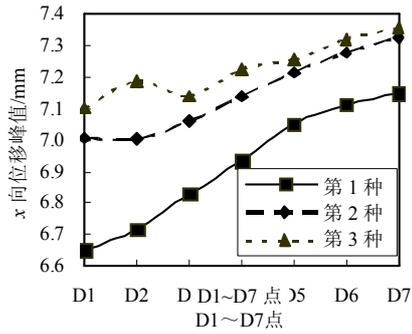
图 16 显示了筏基框架结构在与爆炸隧道相隔上述 3 种距离时因隧道内爆炸引起的部分动力响应的对比结果。显而易见，随着爆炸隧道相距筏基框架结构越来越近，各个楼层柱顶的 x 向位移峰值、各层柱底的 x 向最大剪力以及各层柱子的最大 MISES 应力均逐渐升高，并且在隧道距离建筑物最近时的数值相比于二者间距较远时的数值的增长幅度，要明显高于后者相对于二者间距最远时的数值的增幅。这说明筏基框架结构在邻近地下隧道内爆炸冲击下的动力响应峰值与它和隧道间的距离存在着高度的非线性关联，二者靠得越近，爆炸引起的结构响应的上升梯度也越大，这对结构的破坏极为严重，于抗爆不利。另外，从图 16(c)、图 16(d) 可见，在 3 种距离情况下，框架一层距离爆炸点由近及远的一排柱 D1~D7 的底部沿 x (水平) 和 y (竖直) 两个方向的位移峰值均呈现出由近处 D1 点向远处 D7 点逐渐升高的趋势，且当隧道距离结构物越近时，这种升高的幅度便越大，各个柱底的位移峰值也随之增大。这意味着筏基框架结构在隧道内爆



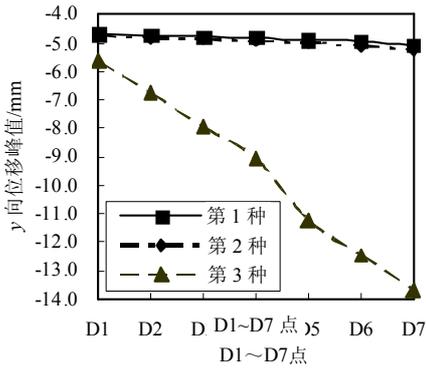
(a) 各楼层柱顶 x 向位移峰值



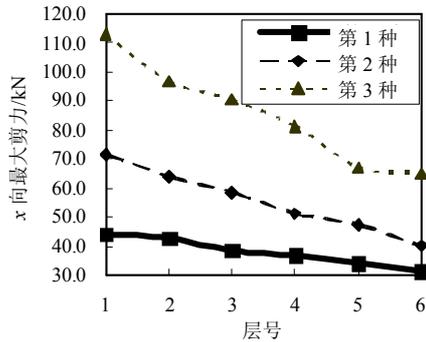
(b) 6 层柱顶 D1~D7 点 x 向位移峰值



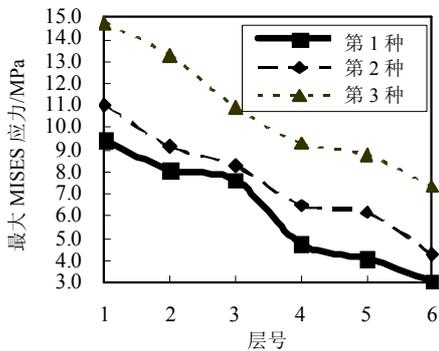
(c) 1层柱底 D1~D7 点 x 向位移峰值



(d) 1层柱底 D1~D7 点 y 向位移峰值



(e) 各层柱底 x 向最大剪力



(f) 各层柱子最大 MISES 应力

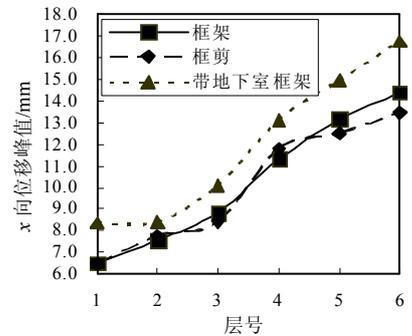
图 16 3 种距离情况下筏基框架结构遭受隧道内爆炸冲击引起的动力响应结果

Fig.16 Dynamic responses of frame structure with raft foundation to an in-tunnel explosion under three different distance cases

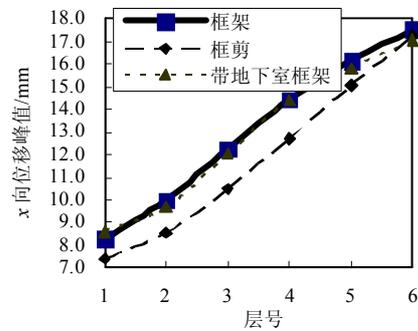
炸冲击下会发生向远离隧道方向的整体倾斜和偏移现象, 爆炸隧道越靠近框架结构, 其倾斜和偏移得越严重。

2.3 3 种不同类型的多层结构在与爆炸隧道相隔不同距离时的动力响应

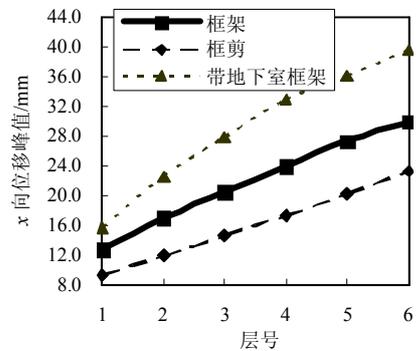
分别将上述筏基框架、筏基框剪和带地下室的筏基框架等 3 种结构模型与土体和隧道组建成 3 类相互作用体系模型, 即所谓的隧道-土-筏基框架模型、隧道-土-筏基框剪模型、隧道-土-带地下室筏基框架模型。应用这 3 类模型, 对于 3 种不同类型的多层结构在上述 3 种距离情况下因隧道内爆炸引起的动力响应进行分析, 其中爆炸点位置均设置在隧道内中点处。图 17~图 19 给出了部分响应的对比结果。



(a) 第 1 种距离情况



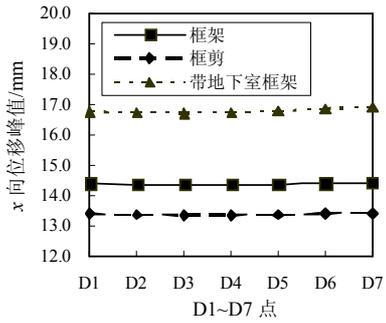
(b) 第 2 种距离情况



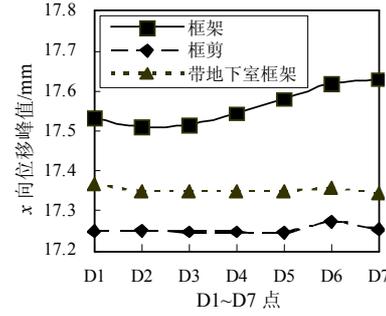
(c) 第 3 种距离情况

图 17 各楼层柱顶 x 向位移峰值

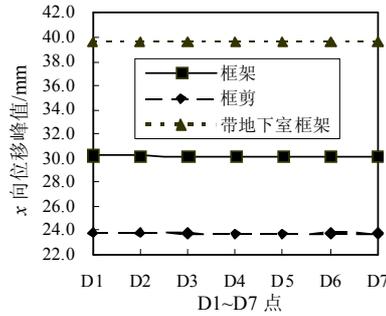
Fig.17 Peak displacement of column top of 1st~6th floor in x direction



(a) 第 1 种距离情况



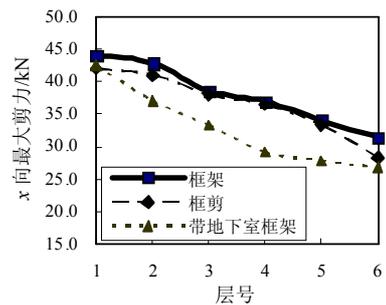
(b) 第 2 种距离情况



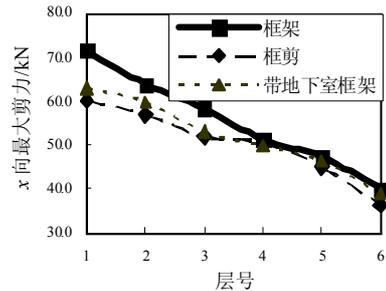
(c) 第 3 种距离情况

图 18 6 层柱顶 D1~D7 点 x 向位移峰值

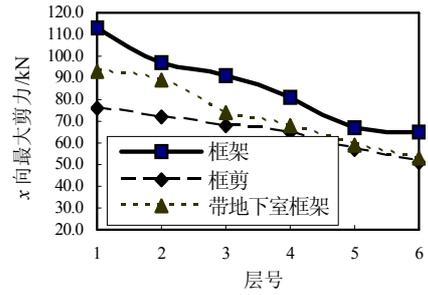
Fig.18 Peak displacements of column tops D1~D7 of the 6th floor in x direction



(a) 第 1 种距离情况



(b) 第 2 种距离情况



(c) 第 3 种距离情况

图 19 各楼层柱底 x 向最大剪力

Fig.19 Peak shearing force of column bottom of 1st~6th floor in x direction

从这些计算数据可以发现：在隧道与建筑物之间的 3 种距离情况下，由隧道内爆炸引起的筏基框剪结构的各楼层柱顶 x 向位移峰值、6 层柱顶 D1~D7 点 x 向位移峰值、以及各楼层柱底 x 向最大剪力在绝大多数情况下(图 19(a)除外)均低于筏基框架和带地下室筏基框架的相应结果；带地下室的框架结构在各楼层柱顶 x 向位移峰值、6 层柱顶 D1~D7 点 x 向位移峰值这两方面多数情况下(图 17(b)和图 18(b)除外)均明显高于其他两种结构的响应，而在各楼层柱底 x 向最大剪力方面则明显低于无地下室的框架结构。这些结果说明：框剪结构由于剪力墙的设置而使其层间抗侧刚度大大强于其他两种框架结构，使得其柱体的位移以及所分担的内力均显著下降，因而抗爆性能最佳；与无地下室的筏基框架结构相比，带地下室的框架结构因地下室的超大刚度和地基的嵌固作用，致使其一层和地下室之间的抗侧刚度发生突变，加剧了地上各层的位移响应，但各楼层柱底的剪力峰值则由于地下室吸收了部分冲击波能量而有所降低，因而其抗爆性能总体上要好于无地下室的框架结构。此外，由上述各图还可看出：随着爆炸隧道距离建筑物越来越近，3 种结构的动力响应峰值均明显增大，其变化规律与 2.2 节筏基框架的情形完全一致；同时，3 种结构在各个楼层的柱顶 x 向位移峰值和柱底 x 向最大剪力等数据彼此之间的差值也随着爆炸隧道逐渐靠近建筑物而急剧增大，这表明爆炸点离建筑物越近，3 种结构抗爆性能的区别也愈发明显，框剪结构的抗爆优势得以充分体现。

3 结论

通过上述分析，得到以下结论：

(1) 设置于建筑物和爆炸隧道之间的另一平行隧道，能够有效地阻挡土中爆炸冲击波的传播，同

时吸收一部分能量,使得在此经过复杂衍射、反射后传至建筑物的冲击波的作用效能明显减弱,对结构抗爆十分有利。

(2) 筏基框架、框剪结构在遭受邻近地下隧道内爆炸冲击时,其底层柱子最为薄弱,且离爆炸点越近则出现破坏的可能性越大,应将其强度验算列为此类抗爆设计的重要环节,并对邻近隧道的柱子做好防护或加固处理。

(3) 随着隧道与多层结构之间距离的逐渐减小,筏基框架、框剪结构因邻近隧道内爆炸引起的动力响应峰值呈现出非线性的急速上升态势,结构整体上产生愈加严重的沿远离隧道方向的倾斜和偏移的现象。这预示着靠隧道越近的多层建筑遭受此类爆炸袭击而破坏的概率大大增加,需采取必要的防范措施以提高其安全性。

(4) 针对邻近隧道内的爆炸冲击作用,框剪结构的抗爆性能明显优于无地下室和带地下室的框架结构,而无地下室框架结构的抗爆性能表现最差。3种结构抗爆性能之间的差异随着其与爆炸隧道间距的缩短而越发凸显,框剪结构的抗爆优势显露无疑。

参考文献:

- [1] 田力. 地下爆炸波冲击下地面结构动力响应及滑移隔震研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.
Tian Li. Response and sliding isolation of structures on the ground subjected to underground explosion waves [D]. Tianjin: Tianjin University, 2004. (in Chinese)
- [2] 庄茁, 张帆. ABAQUS 非线性有限元分析与实例 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
Zhuang Zhuo, Zhang Fan. Analysis and example using non-linear finite element in ABAQUS software [M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- [3] ABAQUS Inc. ABAQUS analysis user's manual [Z]. USA: ABAQUS Company, 2005.
- [4] 尚晓江, 苏建宇. Ansys/LS-DYNA 动力分析方法与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
Shang Xiaojiang, Su Jianyu. Dynamic analysis method used in ansys/LS-DYNA software and its engineering example [M]. Beijing: China Waterpower Press, 2008. (in Chinese)
- [5] 张学岩, 闫树旺. 岩土塑性力学基础[M]. 天津: 天津大学出版社, 2004.
Zhang Xueyan, Yan Shuwang. Foundation of plastic mechanics of rock and soil [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2004. (in Chinese)
- [6] Lu Yong, Xu Kai. Modeling of dynamic behavior of concrete materials under blast loading [J]. International Journal of Solids and Structures, 2004, 41(1): 131-143.
- [7] 李朋. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土板和柱的动力响应分析[D]. 天津: 天津大学, 2007.
Li Peng. Analysis for dynamic response of RC slab and column under blast loading [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese)
- [8] 谷音, 刘晶波, 杜义欣. 三维一致粘弹性人工边界及等效粘弹性边界单元[J]. 工程力学, 2007, 24(12): 31-37.
Gu Yin, Liu Jingbo, Du Yixin. 3D consistent viscous-spring artificial boundary and viscous-spring boundary element [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(12): 31-37. (in Chinese)
- [9] Desai C S, Zammzn M M, Lightner J G, et al. Thin layer element for interfaces and joins [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geo-mechanics, 1984(1): 19-43.
- [10] Clough G W, Duncan J M. Finite element analysis of retaining wall behavior [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations, ASCE, 1971(SM12): 1657-1672.