DOI: 10.11883/1001-1455(2015)05-0703-08

土中爆炸波与地下结构相互作用计算方法研究综述*

王 羽,高康华
(中国人民解放军理工大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室,江苏 南京 210007)

摘要: 土中爆炸波与结构相互作用是地下工程结构抗爆计算的理论基础,理论研究中通常在宏观试验基础上,引入合理的介质动力本构模型分析波动问题。针对工程防护中的计算模型和解析方法,综述了岩土介质中爆炸波与结构相互作用的现状和研究进展,内容包括土的动力本构模型,自由场中爆炸波的传播、爆炸波与箱型、圆柱形和直墙圆拱型等地下结构的相互作用等。重点阐述了常用的非饱和土和饱和土的动力本构模型、考虑松弛效应的土的综合弹塑性模型,一维平面波在不均匀介质和分层介质中的传播及地下结构爆炸荷载计算方面的研究成果,分析了各种模型和计算方法的适用范围和存在问题。

关键词: 爆炸力学;防护工程;本构模型;土;爆炸波;地下结构;相互作用
中图分类号: O382 **国标学科代码**: 1303520 **文献标志码**: A

精确制导武器和钻地弹的发展对防护工程设计提出了更高的要求,恐怖炸弹袭击、偶然性事故爆炸也使隧道、地铁等民用地下结构面临的爆炸威胁日益严峻。爆炸波在岩土中传播遇结构产生反射、折射等现象,在结构表面形成压力并引发结构整体沉陷和局部变形,而结构的沉陷和变形又反过来改变爆炸波参数和结构表面压力,这种相互改变和影响称为土中爆炸波与结构的相互作用[1]。研究两者相互作用可综合分析土体和结构变形、运动的相互制约,揭示土中结构动载形成机理和发展规律,对精确分析爆炸冲击波的动力效应及地下结构防护设计具有重要意义。

土中爆炸波与结构的相互作用,取决于土和结构实际特性及求解波动问题的特点。当前基于实验得到大量土中爆炸波参数经验公式[2-3];[4]46-89;[5]并建立各种土体动力本构模型,得到了土中波传播及与障碍物相互作用一维问题的一系列解析解[6-9]。对相互作用的二维和三维问题,由于直接求解波动方程十分困难,多采用有限元、边界元及无限元法等数值模拟方法。本文主要针对工程防护中的力学模型和实用解析计算方法,从土中爆炸波的传播和波与结构相互作用两部分,对土的动力本构模型、自由场中波的传播、工程结构爆炸荷载的确定等方面进行简述。

1 土中爆炸波的传播

土中爆炸波一般由空气冲击波感生或土中炸药爆炸直接作用产生,常以压缩波形式传播。通常根据爆炸波宏观实验结果和解决问题的特点建立土体动力本构模型,在此基础上求解相应波动方程,进而分析爆炸波在土中的传播规律。

1.1 土的动力本构模型

土的动力本构模型一般指岩土动应力-动应变关系,受诸多因素影响,难以用统一公式涵盖所有情况,工程计算中常选取既能满足实际情况精度要求又能简化计算的动力本构模型。当前研究土中爆炸效应时将土体视为空间紧密充满的连续介质,在实验基础[3,10]上建立了线黏弹性、非线弹性、弹塑性等各种动力本构模型[11-12]。其中线性模型可简化复杂问题,得到波动问题解析解,但只适用于低应力且土

* **收稿日期**: 2014-04-11; **修回日期**: 2014-07-29
基金项目: 国家自然科学基金项目(51021001,51308542)
第一作者: 王 羽(1971—),男,博士研究生; **通讯作者**: 高康华,weikang515@163.com。

体不屈服的情况，如 Kelvin-Voigt 模型、Burgers 模型和 Maxwell 模型等；非线弹性模型可反映土体屈服后的非线性变形，适用于加载曲线与卸载曲线相差不大，残余变形较小的情况，如 Duncan-Chang 模型和超弹性模型等；弹塑性模型能够描述较高应力状态下土的应力应变关系，在分析土中爆炸波动问题中应用广泛，包括双线性模型、双曲线模型、C. C. Grigorian 模型和综合弹塑性模型等。

1.1.1 非饱和土和饱和土的动力本构模型

在常用工程抗力范围内，非饱和土中爆炸波计算采用的弹塑性模型，忽略应变速率、能量空间弥散和黏性影响，得到的压缩波最大压力衰减幅值较实际小，但多数情况下结构遇到土中压缩波峰值压力等级均处于岩土加载曲线第 2 阶段[13]。考虑工程实用性和安全性，在弹塑性模型分析基础上经实验修正后确定的土中压缩波峰值压力可以满足工程需求，当爆炸波强度小于 1.5 MPa 时，可直接采用 Prantle 曲线[4]。饱和土动力本构模型研究则主要以 Boit 理论[14]和 Ляхов 理论[15]为基础，图 1(a)给出了爆炸条件下饱和土动力本构曲线，图中 p 为压力，v 为比容，p_a，p_b 为分界应力，曲线显示压力较小时，应力应变为递减硬化关系，土骨架有效应力不为零；随着压力增大，曲线呈递增硬化特性；拐点 B 处的界限压力只受饱和土中气体含量影响，压力波通过该点时可能会产生强间断，出现再生冲击波。为便于工程分析，文献[16]给出了简化的本构曲线，用 2 根直线逼近加载曲线，卸载或按等应变卸载或按第 2 加载直线卸载，如图 1(b)所示，图中 A_1、A_2 和 A 分别为介质加、卸载波阻抗。

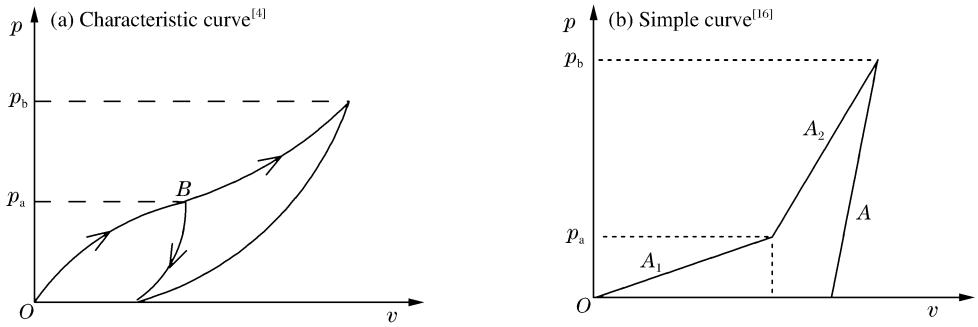

图 1 饱和土动力本构曲线

Fig. 1 Dynamic constitutive curves for saturated soil

1.1.2 C. C. Grigorian 模型和综合弹塑性模型

C. C. Grigorian[10]提出了土的弹塑性模型的普遍形式，认为土的体积变形只与平均法向应力有关，剪切变形特性在到达极限状态前符合线弹性，在极限状态下则符合具有 Mises-Schleiher-Боткин 塑性条件的 Prandtl-Rice 图形，在球对称情况下，介质状态由体积压缩和卸载规律及塑性条件来确定。C. C. Grigorian 模型能够正确反映爆炸能量损耗机制，在理论模拟中能较准确地再现爆炸波参数，适用范围广，但由于未考虑土中变形应力松弛效应，无法解释一些实验结论，如应力突跃现象、最大变形有时在应力衰减阶段达到、所有应力值的动力压缩曲线都朝向变形轴凸起情况下发生冲击波转化为连续波的现象等。为克服 C. C. Grigorian 模型的不足，A. H. Ставрогин 等[17]在该模型基础上，将自由孔隙空间和非结合液体看作土体构造中的缺陷，塑性变形视为加载和卸载过程的泛函，其数学结构取决于缺陷彼此之间以及和土体骨架之间相互作用的规律性，包含有描述缺陷相互作用、活动性以及缺陷稳定条件函数等，并在状态方程中将压力和变形及其时间导数联系起来，提出了综合弹塑性模型。该模型考虑了岩土塑性变形松弛效应，真实反映了爆炸波传播时土体变形特性，在定性和定量上均在理论模拟时较好再现爆炸波特征值：质量速度的振幅、增长到最大值的时间和最大位移。

1.2 自由场传播规律

对土体自由场中爆炸波的传播，当前理论研究多按一维平面波传播分析，并基于实验引入修正参数考虑实际问题，得到的波参数公式应用简便，但适用范围受限制；非平面波的传播由于波动方程数学求解较复杂，理论分析时常选取简化的计算模型确定解析解，对饱和土等非线性动力本构介质中波的传播，则多采用数值模拟进行分析。

1.2.1　一维平面爆炸波

在核爆和大装药量化爆远距爆心位置条件下，由空气冲击波产生的土中爆炸波曲率半径较大，可视为一维平面波[6,9]，通常运用介质弹塑性模型和特征线法求解波动方程。为考虑能量空间耗散和黏性影响，可根据实验数据对波参数进行修正，下式给出了非饱和土中核爆条件下感生地冲击波参数[13]：

$$p_{\mathrm{h}}=\left[1-\frac{h}{c_1 t_{\mathrm{d}}}\left(1-\frac{1}{\gamma_2^2}\right)\right]\Delta p_{\mathrm{m}},\qquad t_{\mathrm{dh}}=(\gamma_c-1)\frac{1}{c_0},\qquad \gamma_c=c_0/c_1,\qquad \gamma_2=c_2/c_1 \tag{1}$$

式中：p_{h} 为土中压缩波峰值压力；Δp_{m} 为地面冲击波峰值超压；h 为土体计算深度；c_0 为起始压力波速；c_1 为峰值压力波速；c_2 为卸载波速；t_{d} 为地面冲击波等冲量降压时间；t_{dh}为压缩波升压时间。

岩土实际为不均匀介质，土中爆炸波传播实质是波与介质边界的相互作用。文献[4]$^{126\text{-}292}$假定介质波阻抗沿质量长度线性变化，推导了表面线性衰减压力作用下介质中加载和卸载区域压力和粒子速度的解析解，解释了饱和土中出现的入射荷载峰值随深度增大而增大的“倒衰减”现象，原因在于波传播方向上介质波阻抗逐渐增大。文献[18]分析了压缩波在多层介质中传播时界面反射和透射过程，忽略介质层厚影响，按界面处应力和速度连续推导了各层介质压力 p 和质量速度 u 的计算公式：

$$p_{a(m+1)}=\frac{2^m}{\prod_{i=1}^{m}(1+A_i/A_{i+1})}p_{a1},\qquad u_{a(m+1)}=\frac{2^m}{\prod_{i=1}^{m}(1+A_{i+1}/A_i)}u_{a1} \tag{2}$$

式中：A_i 为波阻抗，下标 ai 表示界面，m 表示某层编号。式(2)表明 $A_i<A_{i+1}$ 时介质压力逐渐增长、质量速度降低，同样解释了上述倒衰减现象。

1.2.2　非平面爆炸波

常规炸药产生的土中爆炸波，波阵面曲率半径小，应按非平面波研究。化爆条件下感生地冲击波参数的计算公式[13]：

$$p_{\mathrm{h}}=\left[1-\frac{h}{2\eta v_1 \tau}\left(1-\frac{1}{\gamma_2^2}\right)\right]\Delta p_{\mathrm{m}},\qquad t_{\mathrm{dh}}=(\gamma_c-1)\frac{h}{c_0} \tag{3}$$

式中：τ 为化爆空气冲击波的等冲量作用时间。式(3)在一维平面波理论分析和实验基础上引入修正系数 $\eta=1.5\sim2.0$，可综合考虑波的非平面性以及传播时能量的扩散和耗散。

对地下炸药爆炸产生的直接地冲击波，传播过程中发生几何扩散，并在波阵面后方产生拉应力和振荡现象[19]。为简化波动方程的数学计算，对深埋爆炸可忽略地表面的反射影响，视为无限空间内膨胀的球对称问题[20-21]。文献[4]$^{126\text{-}292}$中按弹塑性动力本构模型给出了非饱和土中球面弹塑性波和冲击波传播的解析解；饱和土由于压缩性呈明显的非线性特征，常采用数值模拟分析，可适当简化：在爆源附近适当比例距离处以爆心为球心取一球面，通过实验或一维数值模拟手段确定球面上压力时程波形，再将球面作为载荷边界分析爆源远场的波场参数。对浅埋爆炸，则需考虑地表面对爆炸波传播的影响，地表未发生破坏时，可运用弹性动力学理论按半空间边界上弹性波反射问题研究[22-23]。文献[24]根据爆炸等效荷载理论，把浅埋爆炸的整个非弹性破坏区看成震动源，在爆炸波传播到地表以前是球对称问题，当波入射到地表面发生反射时，则转变成轴对称问题。唐廷[25]在此基础上，以非弹性变形区边界的径向粒子速度作为爆炸等效荷载，分析了土中球面入射波和反射波的传播过程，并给出了地下爆炸岩土自由表面位移场的精确解和近似解。

2　爆炸波与地下结构相互作用

地下结构动力分析大体可分 2 类：(1)先确定结构周边动载，再按振动理论计算结构变形；(2)将土体和结构在爆炸作用下视为统一整体，运用波动理论或数值模拟求解问题[13]。前者是在确定荷载中考虑波与结构相互作用，结构的整体沉陷和构件变形是主要影响因素，常用于工程结构抗爆设计；后者则在整个系统中考虑相互作用，包括介质边界、结构对波的散射，波在结构中折射和结构变形、运动等方面，多用于分析爆炸波作用下岩土和结构内部的位移场和应力场。

2.1 箱型结构

箱型结构是地下防护结构常见形式之一，确定该结构动载方法有半经验半理论法和相互作用法。前者使用简便，但难以准确描述爆炸压缩波作用下土与结构相互作用机理，相关公式适用范围受到限制；后者将土与结构视为整体，采用耦合分析的方法，通过压缩波在土中传播、遇结构反射和卸荷等效应确定结构动载，受波动方程解析计算复杂的限制，现有研究大多仍是基于一维波理论分析并适当考虑二维修正，得到的公式已成熟运用到当前防护结构设计中。

2.1.1 半经验半理论法

半经验半理论法有系数法、等效静态加载法和拱效应法等。防护结构分析中的三系数法在确定顶板荷载时引入综合反射系数，该系数由考虑波与结构及自由表面相互作用基础上根据实验结果得到，适用于整体式中等跨度的平顶钢筋混凝土结构。该方法忽略了结构整体运动产生的惯性荷载，未充分考虑地表与结构卸载的影响，与实际动载波形相差较大，且覆土层越薄误差越大[1]。波阵面平行于地表压缩波作用时，浅埋结构承受最大荷载 $\sigma_{\max}$ 可按下式计算[26]：

$$\sigma_{\max}=\Delta p_{\mathrm{m}}K_{\Psi}K_{\Theta}K_{\mathrm{OTP}},\qquad K_{\mathrm{OTP}}=K_{\mathrm{OTP}}^{*}\sin^{2}\alpha/K_{\Theta}+\cos^{2}\alpha \tag{4}$$

式中：K_{Ψ} 为衰减系数，K_{Θ} 为侧压力系数，K_{OTP} 为广义反射系数，α 为结构墙壁与水平面的倾角；K_{OTP}^{*} 为波在不动障碍物上的正反射系数，当土按 Prantle 曲线计算时，有 $K_{\mathrm{OTP}}^{*}=2-(1-c_1/c_0)\sigma_{\mathrm{s}}/\sigma_{\Phi}(x)$，$\sigma_{\mathrm{s}}$ 为土体弹性极限，$\sigma_{\Phi}(x)$ 为土深 x 处的应力。

土中 TNT 装药爆炸波作用下，深埋结构承受动载可按等效静态加载[27]确定：

$$q_{\mathrm{e}}=k_{\mathrm{A}}k_{\mathrm{B}}Q^{2/3}\omega f(\beta)/R^{2},\qquad \sqrt[6]{Q}\sqrt{R}/T\leqslant 1\,000 \tag{5}$$

式中：q_{e} 为等效静载；Q 为装药量；R 为装药中心到障碍物距离；k_{A} 为土壤特性系数，对自然湿度砂取 0.001 1，对饱和水砂取 0.001 3，对自然湿度黏土取 0.001 4；k_{B} 为填塞系数，装药爆炸深度 $h\geqslant 5r_0$ 时取 1，在地表爆炸时取 0.2，在其他高度爆炸时取 0.5；ω 为不考虑土壤影响时障碍物固有振动第一振型频率；$f(\beta)$ 为考虑障碍物法向和波运动方向间夹角 β 加载关系的系数，$15r_0\leqslant R\leqslant 25r_0$ 时取 $f(\beta)=1$，$R>25r_0$ 时取 $f(\beta)=0.3+0.7\cos\beta$；$r_0$ 为炸药平均半径；T 为不考虑土壤的结构固有振动周期。

拱效应法是指利用土的成拱效应确定地下结构的荷载分布，强度取决于结构变形程度和土的抗剪能力[28]，成拱系数 k_{g} 可按下式确定[29]：

$$k_{\mathrm{g}}=p_{\mathrm{q}}/p_{\mathrm{s0}}=\exp\left[\frac{-2K_0(\tan\varphi)(a+1)bL^{2}}{aL^{2}}\right] \tag{6}$$

式中：p_{q} 为作用在结构顶板的应力，p_{s0} 为地面超压，K_0 为静土压力系数，φ 为土的内摩擦角，L 为结构跨度，a、b 分别为结构长度和深度与跨度的比值，系数 a 表明拱效应法考虑了二维效应的影响。当 φ 接近零时土的剪切抗力很小，基本不产生拱效应；当压缩波未到达结构表面或结构产生变形以前，或外加压力超过土壤抗剪强度时（通常在 3.5 MPa 以上[13]），也可不考虑成拱效应。拱效应法概念和表达式较简单，但在确定土中浅埋结构荷载时以位移场出发，基于太沙基静载条件下拱效应概念构造，难以准确反映土中结构在爆炸波作用下与介质产生的动力相互作用现象。

2.1.2 土与结构相互作用法

当前有学者[6-9]运用土与结构相互作用法给出了考虑结构变形、沉陷以及地表卸载影响下的相互作用系数曲线，建立了结构顶板动压力计算方法；钱七虎等则在此基础上深入研究覆土中由结构卸荷以及地表卸荷引起的各种卸荷波的发生和发展，将相互作用理论推广到层状地基以及包括成层式结构等多种常用结构形式，解释了实验中发现的作用在土中浅埋结构上的荷载在不深不浅处为最大的现象[1,13]。这些研究主要针对核爆条件下土中压缩波与结构相互作用，多以一维平面波理论为基础，对常见的刚性结构在不考虑侧壁剪切力时，结构压力可按下式确定。

加载阶段：

$$p_{\mathrm{j}}(t)=2p(t)-\rho c_1 v(t),\qquad p_{\mathrm{g}}(t)=\rho' c_1' v(t) \tag{7a}$$

$t_0<t\leqslant t_{\mathrm{p}}$，卸载阶段：

$$p_j(t)=p^*(t)-\rho H_j(t)\frac{dv(t)}{dt},\qquad p_g(t)=\rho' c'_1 v(t) \tag{7b}$$

$t_0>t_p$，卸载阶段：

$$p_j(t)=p(t)-\rho_1 H\frac{dv(t)}{dt},\qquad p_g(t)=p(t)-(m+\rho_1 H)\frac{dv(t)}{dt} \tag{7c}$$

式中：$p_j(t)$和 $p_g(t)$分别为结构顶板和底板受到的压力；t_p 为地表卸载波与结构卸载波相交时刻；$v(t)$为结构整体沉陷位移速度；c_1 和 ρ 分别为顶板上土壤的塑性波速和密度；c'_1和 ρ' 分别为基地土壤塑性波速和密度；$p(t)$为入射压缩波压力；$p^*(t)$为作用在卸荷土顶的土压力；$H_j(t)$为不同时刻结构卸载波的高度；ρ_1 和 H 分别为覆土的密度和厚度；m 为刚性结构单位面积质量。

若考虑结构侧墙与周围岩土介质的粘结力和摩擦力，则应计入剪切力 $\tau(h,t)$影响，表达式为：

$$\tau(h,t)=\rho_1 c_s[v_0(h)-v_h(h,t)] \tag{7d}$$

式中：c_s 为侧壁外土壤剪切波速；$v_h(h,t)$为侧墙外深度处土壤介质质点运动速度。

对埋设在柔性地基土中的齐地表刚性工事，冲击波正压作用时间较短时，小跨度工事侧壁剪切效应对工事底部动反力及顶、底动力设计荷载具有不可忽视的影响[30]。一维波理论对无限宽跨度刚性浅埋或齐地表结构是正确的，而实际结构跨度尺寸有限，在结构计算中考虑结构介质相互作用的二维效应十分必要。当土中浅埋结构纵长方向远较其他 2 个方向大时，可按平面应变问题求解。根据二维弹性波动理论，结构底部荷载不仅与结构运动速度有关，还与结构位移项及位移积分有关[31]。

对受冲击荷载的地表无限长条刚性基础，均匀分布的底部反力 $R(t)$可按下式确定：

$$R(t)=Fp_g(t)=\rho c_p F\frac{dw(t)}{dt}+\rho c_p^2 LA_v w(t)+\frac{\rho c_p^2 L(D_w-A_v)}{2[\alpha F/(Lc_p)]^3}\int_0^t w(t-\tau)\tau^2 e^{-\tau\frac{Lc_p}{\alpha F}}d\tau \tag{8}$$

式中：ρ 和 c_p 分别为介质密度和压缩波速度；D_w、A_v 和 α 为介质常数；对平面问题取 $L=2$；F 为结构顶、底板受载面积；$w(t)$为土体位移。

式(8)右边第 1 项反映一维效应，第 2 项反映地基动刚度，第 3 项则反映辐射阻尼和地基效应的积分项，在工程范围内该积分项可忽略不计。实验数据和数值计算表明[30,32]，用一维波平面理论确定顶盖荷载在数量上能够与实验结论相吻合，但对底板荷载则误差较大。随结构跨度减小，二维效应越发显著，表现为位移项的影响越来越大，此时浅埋结构底板荷载应按式(8)前 2 项近似表示。从理论上分析，图 2 给出了介质近区应力波图形，浅埋刚性结构顶板峰值荷载出现在入射压缩波升压时刻 t_{ch}，在 $t<t_{ch}$时刻不考虑覆土中卸载波的影响[1]。图 2 显示在应力 σ 和速度 v 达到峰值前，介质位移 w 很小，故确定顶板荷载峰值时不考虑二维效应与实验结果相差不大。但随着顶板荷载的进一步发展，由于土介质位移的相对增加，摩擦作用承担了部分荷载，出现荷载下降的所谓“变窄”现象。而底板荷载达到最大值时，卸荷波已充分发展，图中曲线表明在应力和速度下降阶段介质位移不断增大，并在受限变形下进一步克服摩擦力做功，此时确定底板荷载时忽视二维效应则会产生较大误差，因此在式(8)中引入位移项反映地基的动刚度。

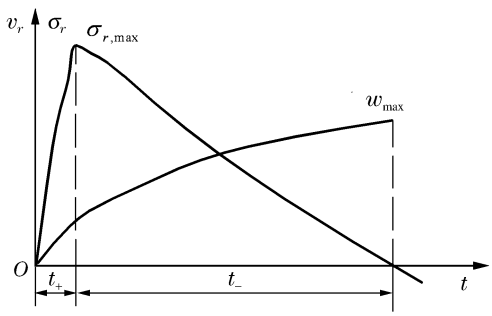

图 2 介质近区应力波[1]

Fig. 2 Stress wave for the near zone[1]

上述计算模型均认为是土中爆炸波瞬间包围结构完成加载，若波长与结构尺寸相仿，则应考虑入射波通过结构的衍射过程。该过程分析的数学表达较复杂，为简化计算，文献[33-35]将土体视为无限、均匀、各向同性线弹性介质，结构视为只考虑整体沉陷、忽略构件变形的刚性均质夹塞物，将问题转化为求解无限弹性介质中平面入射波作用下可动刚体的散射问题。文献[36]将系统总波场视为由入射波场、结构边长处反射波场和转角处衍射波场组成的加载波场和结构平动、转动形成的卸载波场的线性叠加，

分析了无限介质中爆炸波与地下箱型结构的相互作用。该方法认为结构与介质刚性接触,没有考虑弹性垫层的影响,且在波传播受到较多干扰的情况下应用受限。此外,对化爆条件下的土中非平面压缩波,作用时间较短,可不考虑地表反射拉伸波影响,结构也仅考虑迎爆面构件变形,忽略整体变形和其他面变形[13],文献[28]给出了按相互作用理论确定的结构化爆荷载简化方法。

2.2 圆柱型、直墙圆拱型结构

对圆柱型或直墙圆拱型地下结构,当前动力分析时常假设爆炸波阵面曲率半径很大、结构几何尺寸相对较小且各点同时受载,按一维波平面[37]传播和反射理论,结合实验数据确定结构荷载。文献[38-39]考虑各种地下爆炸波组合作用、各个波传到结构的入射角和波在不同时刻的计算参数等因素,将结构简化为有限数量自由度的离散体系,以一系列作用在集中质量上的等效节点力替代爆炸波荷载,运用链杆法以合理数目的弹性链杆表征围岩弹性抗力,以此考虑岩土与结构相互作用。该方法忽略结构自身柔性特征,认为波与结构开始作用时结构完全刚性且静止不动,舍弃结构初期整体运动卸载和局部变形耗能的有利影响,计算得到的荷载数值偏大,但从结构抗爆设计角度是安全可靠的。

对爆炸波与此类结构相互作用的二维、三维问题,波动方程求解较复杂,可将土体与结构视为整体系统,根据边界条件和界面耦合条件求解动力学方程,得到系统应力场和位移场。此类问题大多属于瞬态反应问题,常采用 Laplace 变换处理时间变量,实际问题中求解逆变换的计算较复杂,多采用数值解法[40-41]。为克服研究非线性问题时数学计算困难,房营光等针对爆炸条件下非线弹性岩土中波与地下单层、多层圆柱形、直墙圆拱形结构的相互作用,提出简化解析计算方法[42]:不考虑自由面影响,把系统基本方程按入射波场小参数展开为各阶线性渐近方程,引用位移函数解耦方程,利用保角变换函数将非圆周边界变换成圆周边界,采用谐振波叠加法将单个冲击波对结构作用转换为长周期简谐波对结构作用,从而计算整个系统应力场和位移场。该方法避免积分变换求逆困难,减小计算量,计算精度与 Laplace 变换法较一致,适用于分析无限介质中各种形式入射波与结构相互作用。

3 结 语

(1)土的弹塑性动力本构模型在工程计算中应用广泛,其中综合弹塑性模型考虑了土的松弛效应,可较真实地反映爆炸波传播时土体的变形特性。

(2)对爆炸波和结构的相互作用,防护结构设计中体现在结构的爆炸荷载上。现有半经验半理论公式使用简便,但适用范围受限;理论计算中常按一维平面波运动理论,选取合理介质模型确定动载,并进行必要的二维效应修正,即要考虑低频下位移引起的摩擦效应。

(3)对土中波传播及与地下结构相互作用的二维、三维问题,可考虑自由场动力响应及介质边界、结构对波的散射的影响,将土与结构视为整体系统,分析爆炸作用下系统内部的位移场和应力场。

实际上,理想动力本构模型应能够反映复杂应力路径和不规则加载情况下,土的刚度折减、能量耗散、体积变形和剪切畸变耦合以及液化和失稳等全过程[43],当前应用的动力模型大多是在某些方面对实际问题的简化近似;其次,现有理论计算模型中常将结构遇到的较大曲率的压缩波近似为平面波,这在爆源距结构较近的情况下会产生误差,当前对波阵面曲率及其传播方向对结构影响研究不多;土中爆炸波与结构相互作用影响因素众多,如结构整体沉陷与顶底板变形的耦合、土与结构接触界面的耦合、自由边界的影响以及土壤变形应力状态的二维、三维性质等,因此两者相互作用问题在上述这些方面还有待深入研究。

参考文献:

[1] 钱七虎,王明洋.高等防护结构计算理论[M].南京:江苏科技出版社,2009:315-403.

[2] 梁霍夫.岩土中爆炸动力学基础[M].刘光寰,王明洋,译.南京:工程兵工程学院,1993:9-40.

[3] 亨利奇.爆炸动力学及其应用[M].熊建国,译.北京:科学出版社,1987:161-324.

[4] 钱七虎,王明洋.岩土中的冲击爆炸效应[M].北京:国防工业出版社,2010:46-89,126-292.

[5] 戚承志，钱七虎. 岩体动力变形与破坏的基本问题[M]. 北京：科学出版社，2009：126-166.

[6] 李国豪. 工程结构抗爆动力学[M]. 上海：上海科学技术出版社，1989：162-225.

[7] US Department of the Army. TM5-855-1：Fundamental of protective design for conventional weapons[S]. Washington D C：US Department of the Army，1986：95-102.

[8] US Department of the Army. TM5-1300：Design of structures to resist the effects of accidental explosions[S]. Washington D C：US Department of the Army，1990：70-76.

[9] Боданский М Д，Горшков Л М，Морозов В И，等. 掩蔽所结构计算[M]. 蔡益燕，任玉光，译. 北京：中国建筑工业出版社，1978：136-156.

[10] 奥尔连科. 爆炸物理学[M]. 孙承纬，译. 北京：科学出版社，2011：656-729.

[11] 李亮，赵成刚. 饱和土体动力本构模型研究进展[J]. 世界地震工程，2004，20(1)：138-148.
Li Liang，Zhao Cheng-gang. Advances on the research of dynamic constitutive models of saturated soils[J]. World Earthquake Engineering，2004，20(1)：138-148.

[12] 赵成刚，刘艳，周贵荣，等. 非饱和土本构模型研究进展[J]. 北京工业大学学报，2008，34(8)：820-829.
Zhao Cheng-gang，Liu Yan，Zhou Gui-rong，et al. Research progress of constitutive models for unsaturated soils [J]. Journal of Beijing University of Technology，2008，34(8)：820-829.

[13] 方秦，柳锦春. 地下防护结构[M]. 北京：中国水利水电出版社，2010：72-114.

[14] Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid[J]. Journal of Acoust，1956，28(2)：168-191.

[15] Ляхов Г М. Основы динамики взрывных воли в грунтах и горных иородах[M]. Москва：Недра，1974：1-220.

[16] 王明洋，杨林德，钱七虎. 爆炸波在饱和土中与障碍物相互作用的解析法[J]. 同济大学学报，1997，25(2)：200-205.
Wang Ming-yang，Yang Lin-de，Qian Qi-hu. Analytical method of explosive loading interaction with obstacle in saturated soil[J]. Journal of Tongji University，1997，25(2)：200-205.

[17] Ставрогин А Н，Протосеня А Г. Механика деформирования иразрушеия горных пород[M]. Москва：Недра，1992：1-223.

[18] Фомин В М，Гулидов А И，Сапожников Г А. Высокоскоростное взаимодействие тел[M]. Новосибирск：Издательство Соран，1999：1-600.

[19] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京：国防工业出版社，2005：227.

[20] Starfield A M，Pugliese J M. Compression waves generated in rock by cylindrical explosive charges：A comparison between a computer model and field measurements[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts，1968，5(1)：65-77.

[21] Favreau R F. Generation of strain waves in rock by an explosion in a spherical cavity[J]. Journal of Geophysical Research，1969，74(17)：4267-4280.

[22] Lee I M. Transient ground motion in an elastic homogeneous half space to blasting loading[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering，1996，15(3)：151-159.

[23] Нинифоровский В С，Шемякин Е И. 固体动力破碎[M]. 余静，彭庆霁，译. 北京：煤炭工业出版社，1985：1-331.

[24] Achenbach J. Wave propagation in elastic solid[M]. Amsterdam：North-Holland Publishing Company，1984：79-120.

[25] 唐廷. 地下爆炸的地表运动和结构安全评估[D]. 南京：中国人民解放军理工大学，2008：60-84.

[26] Котляревский В А，Ганушкин В И，Костин А А，и т. д. Убежища гражданской обороны：Конструкции и расчет[M]. Москва：Стройиздат，1989：524-543.

[27] Коренев Б Г，Рабинович И М. Динамический расчет сооружений на специальные воздействия[M]. Москва：Стройиздат，1981：8-10.

[28] Crawford R E，Higgins C J，Bultmann E H. The air force manual for design and analysis of hardened structures [M]. Washington D C：Air Force Weapons Laboratory，1987：35-80.

[29] Committee on Structural Dynamics of the Engineering Mechanics Division through its Manual Subcommittee，ASCE. ASCE-manuals and reports on engineering practice：Design and analysis of structures to resist nuclear weapons effects[M]. New York：American Society of Civil Engineers，1985：95-96.

[30] 俞儒一,宗福开. 核爆炸作用下土中浅埋刚性结构的二维有限元分析[J]. 工程兵工程学院学报,1985(1):29-34,44.
[31] 严人觉,王贻荪,韩清宇. 动力基础半空间理论概论[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1981:1-504
[32] 钱七虎,王明洋. 核爆条件下浅埋结构荷载理论与试验结果的对比研究[J]. 爆炸与冲击,1994,14(1):9-18.
Qian Qi-hu, Wang Ming-yang. Comparison studies on the loading theory and test results for shallow-buried structures under nuclear explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 1994,14(1):9-18.
[33] Mow C C, Pao Y H. The diffraction of elastic waves and dynamic stress concentrations[M]. Santa Monica: RAND Corporation, 1971:1-696.
[34] Lee V W, Karl J. Diffraction of SV waves by underground circular cylindrical cavities[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1992,11(8):445-456.
[35] Lee V W, Karl J. On deformation of near a circular underground cavity subjected to incident plane P waves[J]. European Journal of Earthquake Engineering, 1993,7(1):29-36.
[36] 吴永忠. 爆炸地震波作用下地下结构动力计算模型及对比研究[D]. 南京:中国人民解放军理工大学,2013:107-138.
[37] 王年桥. 防护结构计算原理与设计[M]. 南京:中国人民解放军理工大学,2002:30-90.
[38] 冯淑芳. 深埋地下结构抗爆动力计算方法研究[D]. 南京:中国人民解放军理工大学,2011:23-98.
[39] 冷星. 爆炸地震波作用下地下圆形衬砌结构的动力响应研究[D]. 南京:中国人民解放军理工大学,2013:9-66.
[40] 高盟. 土与衬砌结构动力相互作用的瞬态问题研究[D]. 上海:同济大学,2009:12-100.
[41] 陈成振. 爆炸荷载作用下饱和土及准饱和土中隧道的瞬态动力响应研究[D]. 杭州:浙江大学. 2010:14-63.
[42] 房营光. 岩土介质与结构动力相互作用理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,2005:184-260.
[43] 吴世明. 土动力学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2000:75-106.

Review on calculation methods for interaction between explosion waves in soil and underground structures

Wang Yu, Gao Kang-hua
(*State Key Laboratory for Explosion & Impact and Disaster Prevention & Mitigation, PLA University of Science and Technology, Nanjing* 210007, *Jiangsu, China*)

Abstract: The interaction between explosion waves in soil and underground structures is the theory basis of underground protective structures design. Based on the tests, the rational media dynamic constitutive relationships were introduced and the wave propagation problems were solved. The recent advancements of calculation models and analytical methods on the interaction between explosion waves in soil and underground structures were reviewed. They were categorized into three parts: the dynamic constitutive models of soil, the explosion wave propagation in free field and the interaction between blast waves and underground structures such as box-framed structures, circular structures and horseshoe structures. The conventional dynamic constitutive models of unsaturated soil and saturated soil were itemized in details. The integrated elastoplastic dynamic constitutive model for soil was introduced, which can reflect relaxation effects of soil. The research achievements for one-dimensional plane wave propagation in inhomogeneous or layered media and the explosion load for underground structures were emphatically described. The applicable range and main deficiencies of various calculation models and analytical methods were analyzed.

Key words: mechanics of explosion; mitigation engineering; constitutive model; soil; explosion wave; underground structure; interaction

(责任编辑 张凌云)