

文章编号: 1000—7598 (2013) 05—1495—06

深埋地下结构静动力耦合响应分析的边界条件设置方法

赵跃堂, 罗中兴, 李振慧, 储 程

(解放军理工大学 国防工程学院, 南京 210007)

摘 要: 针对深埋地下结构的荷载环境特点, 提出了深埋地下结构静动力耦合计算过程中边界条件的合理设置方法。该方法通过构建边界上的力系来平衡计算区域的初始地应力, 然后将该力系设置成阶跃函数形式的动荷载作用于边界, 并与后续的动荷载共同作用。研究表明, 一次完整的地下结构静动力耦合分析过程, 边界条件必须经过变换设置才能得到合理的计算结果。另外, 只要计算软件具有黏性边界条件设置功能就能准确地完成地下结构静动力耦合响应分析。算例分析显示, 该边界条件设置方法精度和效率高, 简单适用。

关 键 词: 人工边界条件; 耦合静动力分析; 深埋地下结构

中图分类号: TU 470

文献标识码: A

Boundary condition setting method for coupled static and dynamic response analysis of deep underground structure

ZHAO Yue-tang, LUO Zhong-xing, LI Zhen-hui, CHU Cheng

(National Engineering College, The PLA University of Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: Based on the specialty of loading environment for the deep underground structure, a reasonable boundary condition setting method is developed to the coupled static and dynamic response analysis of deep structure. The system of forces on the boundaries of computational region is determined and used to match the inner initial earth stresses; and then the system of forces is transformed to that of dynamic forces in the form of step function. Finally, this system of dynamic forces and subsequent dynamic loading act together. Research results show that the reasonable results can be gotten through indispensable transform of boundary condition during a complete coupled static and dynamic analysis. In addition, the coupled static and dynamic response analysis can be done well with the artificial viscous boundary condition in software simply. The case studies indicate that the boundary condition setting method has many advantages such as good accuracy, efficiency and convenience.

Key words: artificial boundary condition; coupled static-dynamical response analysis; deep underground structure

1 引 言

在工程实践中经常会遇到求解深埋地下结构动力响应的实际问题。对于这类问题, 至少需要关注两个方面的内容。第一, 围岩和地下结构在初始地应力场作用下的应力和变形状态。许多情况下, 围岩在未受到动力荷载作用时可能已经出现塑性应变, 甚至有局部破坏; 还有一些情况, 地下结构原来是按照静力荷载条件进行设计, 需要考虑其在动力荷载作用下的变形或者破坏问题, 比如许多地下结构面临的反恐怖爆炸问题和地冲击问题。所有这

些都要求准确地考虑围岩和结构的初始应力和应变状态。第二, 在完成初始应力-应变状态的确定后, 需要在此基础上叠加动荷载的作用来求解地下结构的动响应问题, 即进行静动力耦合响应分析, 由于计算规模的限制, 需要人为截取一定的区域作为计算区域, 这势必会诱发一系列的边界设置问题。比如图 1 所示的计算区域表示深埋结构承受垂直方向地冲击荷载的作用, 边界 Ba 处既有来自上部初始静压力的作用, 也有来自上部的地冲击荷载的作用。此外, 由于内部结构的存在, 边界 Ba 还要对来自于结构的散射荷载进行透射。边界 Bb 处既有来自

收稿日期: 2012-03-19

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(No. 50978253); 国家基础研究发展计划(973 项目)(No. 2009CB724608); 国家自然科学基金创新研究群体基金(No. 51021001)。

第一作者简介: 赵跃堂, 男, 1967 年生, 博士, 教授, 主要从事防震减灾工程与防护工程方面的研究工作。E-mail: yuetangzh@163.com

下部初始静压力的作用,还要对来自上部的地冲击荷载进行透射。因此,在有限元动力分析时合理地设置边界条件,并综合考虑静力和动力荷载的共同作用将是求解此类问题的关键。

在地下结构的动力分析过程中常常不考虑初始静荷载的作用^[1-3],这将会给分析结果带来一定程度的误差。吴艺^[4]对一维等效远置动力人工边界条件进行了研究。刘晶波等^[5]提出了三维黏弹性静-动力统一人工边界来模拟土木工程中的结构-地基系统。廖维张等^[6]提出的黏弹性人工边界克服了透射人工边界、黏性人工边界在数值稳定性方面的困难,该方法沿人工边界施加的弹簧对有界的求解区域提供了弹性约束作用,使得求解不存在零频限制。谷音等^[7]基于黏弹性人工边界推导了三维一致黏弹性人工边界单元的刚度及阻尼矩阵,利用单元矩阵等效原理,采用普通有限单元构造了等效黏弹性边界单元来模拟三维黏弹性边界。然而这些方法主要是用于模拟土与基础的相互作用问题,对于深埋地下结构不太适用,这主要表现在下面几个方面:

①如图 1 中边界 Ba 既是外部动荷载输入边界,也必须是透射边界,它需要透射来自于计算区域内部的动荷载;②在整个计算过程中,边界处初始静力平衡条件必须满足。黏弹性人工边界条件可以使无限域的土-结构开放系统转化为有限尺寸的等效封闭系统,但需要在边界周围设置一定厚度的等效人工边界单元层或者在边界上添加弹簧-阻尼器并联系系统,其等效物理系统参数有一些经验成分,而且它对初始地应力场的模拟也存在一定的局限。鉴于此,笔者尝试使用新的方法来处理深埋结构动力分析时的人工边界设置问题。

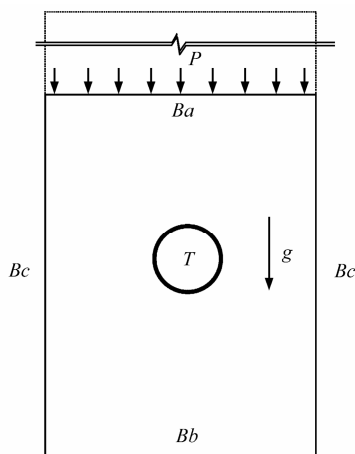


图 1 深埋地下结构边界条件

Fig.1 Boundary condition of deep-buried underground structure

ANSYS/LS-Dyna 软件^[8]在分析介质和结构的动力响应时得到了广泛应用,故以此软件为平台来说明边界的设置方法。

2 边界条件对模拟初始静力条件的模拟

一般的黏性边界条件设置方法是在边界处设置阻尼器,在边界上施加黏性阻尼分布力。该分布力与边界处质点的运动速度分量成正比,与位移分量无关:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n &= \rho c_p v_n \text{ (法向)} \\ \sigma_s &= \rho c_s v_s \text{ (切向)} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: σ_n 和 σ_s 分别为法向和切向的黏性阻尼分布力; ρ 为介质密度; c_p 和 c_s 分别为介质的膨胀波和剪切波波速; v_n 和 v_s 分别为边界质点的法向和切向运动速度。

黏性边界条件为一阶精度局部人工边界,由于其只考虑了对散射波的吸收,不能模拟计算区域内部初始应力场的作用,这在模拟深埋结构时有明显的局限性。

Deek^[9]在黏性边界的基础上提出了黏弹性人工边界。通过在人工边界处设置一系列由线性弹簧和阻尼器组成的简单力学模型,吸收射向人工边界的波动能量,同时黏弹性人工边界还能模拟无限地基的弹性恢复力。该局部人工边界条件与边界处的位移和速度相关:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n &= \rho c_p v_n + \alpha_n G/R \text{ (法向)} \\ \sigma_s &= \rho c_s v_s + \alpha_s G/R \text{ (切向)} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: α_n 和 α_s 分别为法向与切向黏弹性人工边界修正系数; G 为人工边界处介质的剪切模量; R 为散射波源到人工边界的距离。黏弹性人工边界经过必要的修正可以模拟静力学问题^[5],主要的修正手段是调整与弹簧刚度相关的系数 α_n 和 α_s 。

深埋结构由于受到围岩自重和构造应力场的共同作用,它的初始应力-应变状态非常复杂。初始地应力场的数值模拟有许多的方法可用,设置黏弹性人工边界是一个选择,但其实施起来比较复杂,需要设置大量的弹簧和阻尼器,而且对初始应力、应变状态的模拟不是很严格(由于计算区域和弹簧系统的相互作用,初始应力、应变场会引起人工边界处弹簧的变形,而计算区域内的应力、应变数值也会发生变化,这与实际情况不符)。黏性边界由于只考虑了速度的影响,它对静力荷载作用会出现计算

不收敛,而大部分的软件,比如 Ls-dyna 中对模拟无限域的波传播问题只提供了黏性边界条件。

静力问题的求解一般采用隐式算法,而瞬态波传播问题的分析常常采用显式时间逐步积分算法。在进行动力分析前,计算模型内部若存在不为 0 的初始应力,在计算模型边界上必须有一组力来平衡。如果能将该初始静力平衡状态转变为一个动力平衡状态作为动力荷载的一部分嵌入到动力分析过程中,并与后续的动力荷载共同作用就达到计算目的。这样,仅仅通过常规的动力分析,就可以完整地模拟静力和动力的共同作用过程。该方法不仅避开了设置弹簧元件带来的一系列问题,而且对于实测的初始应力应变场的输入也很方便,这在分析深埋地下工程动力变形和破坏问题时显得非常重要。

计算模型边界上的静力荷载可以描述为作用时间无限长的恒值荷载,数学上可以用阶跃荷载 $H(0)\sigma$ 表示, $H(0)$ 为阶跃函数, σ 为计算边界上的静力荷载,荷载作用时间从动力荷载开始作用时刻开始。计算模型边界上施加的阶跃荷载 $H(0)\sigma$ 和模型中的初始应力荷载将构成一平衡力系,它们将自动满足动力平衡条件。进行动力计算时,在需要设置透射边界的边界处,将形成复合边界条件,边界上既有黏滞阻尼器,也有力的作用。在需要施加动力荷载的边界上,将存在荷载的叠加作用。这种初始静力平衡状态的解决方案可以很好地避免直接将初始应力作为动力施加到结构上引起的动力效应,彻底避免了可能引起的“过冲”现象。

下面将通过算例来说明这种边界设置方法的适用性。

3 算例验证

如图 2 所示深埋介质中的波传播问题。为了简化计算,不考虑重力的影响,取空间轴对称模型,模型水平方向和垂直分别为 1.0 m 和 4.0 m,初始条件为水平和垂直方向分别作用荷载 p_h 和 p_v 。根据大量的地质力学统计资料^[10],从地表向下一定深度范围内水平应力普遍大于垂直应力,不妨取 $p_h = 2p_v = 2 \text{ MPa}$ 。在 Ls-dyna 软件中,对于二维问题的模拟在材料模型的选择上有许多的局限性。为了与解析结果对比,对介质取弹性材料进行分析,材料参数密度为 2.65 g/cm^3 ,弹性模量为 25 GPa,泊松比为 0.2。

图 2 中,标志 (0) 表示该元件仅在计算初始应力场时采用, (1) 表示该元件仅在后面动力计算时

采用, (0,1) 表示该元件在初始应力场计算和动力计算时都采用。具体的计算过程分两步: ①模型上仅施加法向力 p_h 和 p_v , 计算结果作为后续动力计算的初始应力-应变状态。②去除 p_h 作用,将右边界改为法向约束条件。为了模拟上下边界的无限域条件,将上下边界分别设置透射边界条件,同时在上边界施加动荷载 p_d 。 p_d 的波形见图 3 所示,其中 $p_m = 5 \text{ MPa}$, $t_r = 0.001 \text{ s}$, $t_z = 0.003 \text{ s}$ 。计算输出图 2 标注节点 N51 和单元 E50 的时程曲线。需要说明的是在进行动力分析时,只计入前面的初始应力和应变,位移归零,这比较符合实际情况。

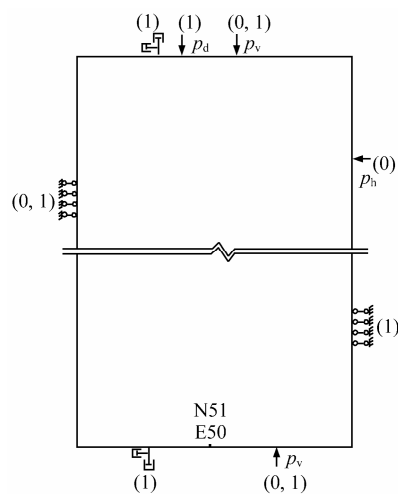


图 2 计算模型 I
Fig.2 Computational model I

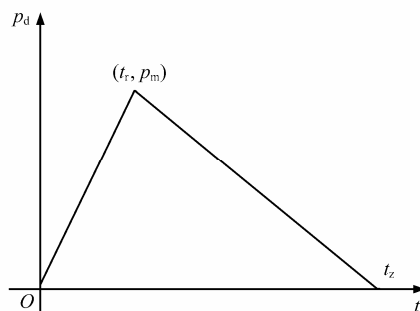


图 3 荷载示意图
Fig.3 Schematic diagram of loading

对于图 2 中的上边界,该边界既是外荷载输入边界,又是透射边界,同时还要施加初始静力平衡荷载 p_v 。计算时对于图 3 所示的外荷载在施加时要进行适当调整,其中荷载的升压时间和正压时间不变,假设调整后荷载峰值 p_m 的数值变为 p'_m ,如果边界附近为弹性变形,对于垂直入射问题,有^[11]

$$p'_m = 2p_m \quad (3)$$

对于斜入射问题, 有^[12]

$$p'_m = \rho c_s (1 + \cos \theta) v \quad (4)$$

式中: θ 为入射角; v 为质点运动速度。斜入射问题边界的设置比较复杂, 考虑到深埋地下结构地冲击荷载的作用主要考虑垂直入射的情况, 这里不进行深入分析。

图 4 是单元 E50 垂直方向的应力-时程曲线, 计算结果与理论结果完全一致。从图中可以看出, 不考虑初始地应力的计算结果和考虑初始地应力的计算结果的差正好等于初始地应力, 这完全符合弹性问题的叠加原理。其他位置的应力计算结果与此规律完全相同。

节点 N51 竖向位移的计算结果示于图 5, 由于在动力计算过程中没有考虑初始时刻的位移, 而且计算只考虑弹性变形, 因此, 初始地应力对位移的计算结果没有影响, 即两者的计算结果完全重合。其他位置的位移和速度计算结果都有与之相同的规律。

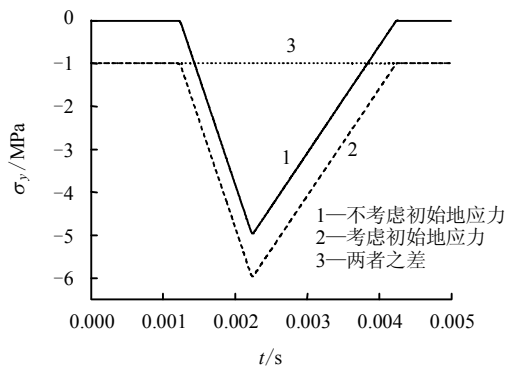


图 4 单元 E50 的竖向应力-时程曲线
Fig.4 Time history of vertical stress for E50

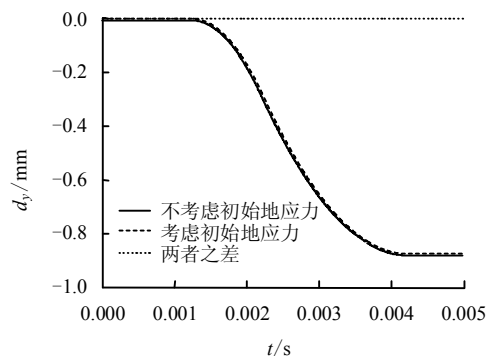


图 5 节点 N51 的竖向位移-时程曲线
Fig.5 Time history of vertical displacement for N51

应力、位移和速度等物理量的计算结果与理论解吻合很好, 这说明边界的设置方法是完全合理的。

4 塑性变形对边界条件设置的影响

深埋地下结构常常涉及到塑性变形问题。主要分两种工况: ①初始应力-应变状态没有塑性变形发生, 动荷载作用过程中出现了塑性变形; ②初始应力-应变状态有塑性变形发生, 动荷载作用过程中塑性变形进一步发展。这两种类型可以通过不同的荷载组合实现。

如图 6 所示深埋球腔承受来自于上表面的均匀动荷载作用, 计算模型水平方向为 4 m, 垂直方向为 8 m, 地冲击荷载作用于上表面。由于 LS-DYNA 软件的二维求解器对材料模型的支持有限, 这里选用 PLASTIC_KINEMATIC 模型, 具体的材料参数如下: 密度为 2.6 g/cm³, 弹性模量为 25 GPa, 泊松比为 0.2, 屈服应力为 20 MPa, 切向模量为 1.5 GPa, 硬化系数为 0.5。边界设置方法见图 6。加载工况有两种, 具体数值如下: ①工况 1: $p_h = 2p_v = 10$ MPa, $t_z = 3t_r = 12$ ms, $p_m = 20$ MPa, 对应于 $p'_m = 40$ MPa; ②工况 2: $p_h = 2p_v = 20$ MPa, $t_z = 3t_r = 12$ ms, $p_m = 20$ MPa, 对应于 $p'_m = 40$ MPa。

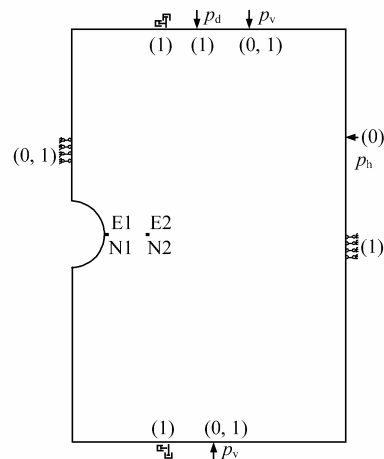


图 6 计算模型 II
Fig.6 Computational model II

计算结果表明, 工况 1 初始应力状态下没有塑性应变发生, 工况 2 初始应力状态下有塑性应变发生, 具体的塑性应变计算结果见图 7, 所有工况中的塑性应变都分布在球腔内壁, 外边界附近没有塑性应变发生。

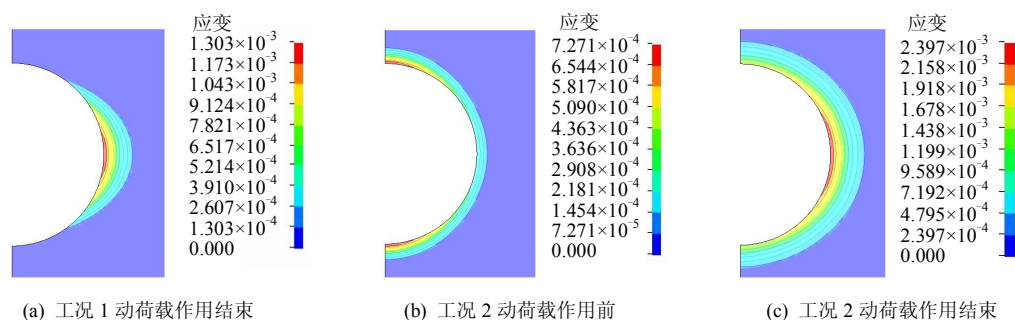
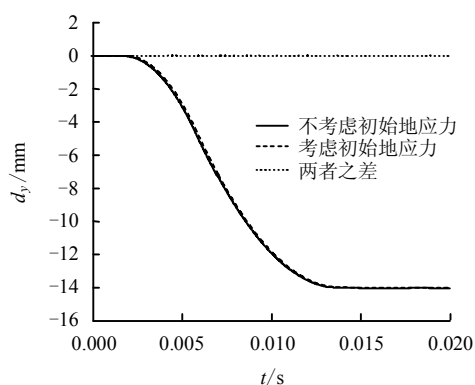


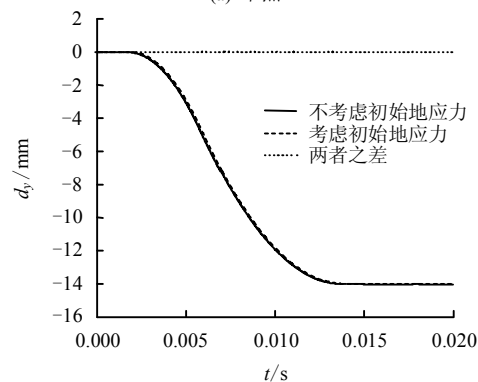
图7 最终的塑性应变图

Fig.7 Final plastic strain

考察计算区域内单元和节点的物理量时程变化规律可以发现, 两个荷载工况的位移和应力变化规律基本相同: ①塑性区内单元的应力变化规律与弹性区明显不同, 在弹性区, 初始地应力对弹性区单元应力的影响规律与前面第3节完全相同。在塑性区, 初始应力状态对应力计算结果的影响不再满足叠加原理; ②节点位移的变化规律在弹性区和塑性区差别不大。这些规律性可以从图8、9中表现出来, 图8是工况1荷载条件下节点1和节点2(标注于图6中, 单元E1和节点N1位置几乎重合, 单元E2和节点N2的位置也是如此)的竖向位移计算结果, 它的变化规律与图5完全相同。图9是单元1和单元2(标注于图6中)竖向应力的计算结果。



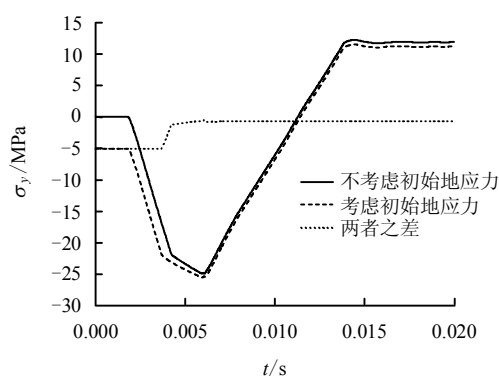
(a) 节点1



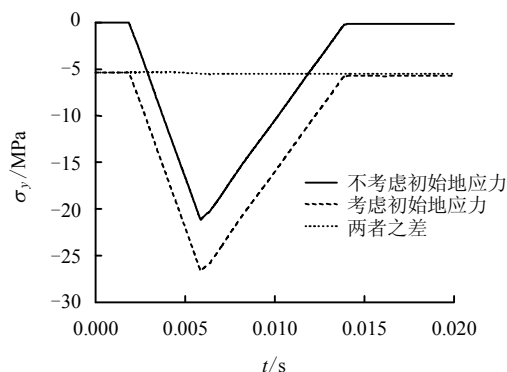
(b) 节点2

图8 工况1中节点1和节点2的竖向位移

Fig.8 Vertical displacement of node 1 and node 2 for case 1



(a) 单元1



(b) 单元2

图9 工况1中单元1和单元2的竖向应力

Fig.9 Vertical stress of element 1 and element 2 for case 1

5 结论

(1) 许多情况下, 深埋结构的变形和破坏过程受初始地应力的影响比较大, 动力分析前准确地施加初始地应力的作用成为控制计算结果合理性的关键因素之一。构建与初始地应力场相匹配的荷载边界条件共同组成平衡力系, 然后将该平衡系统转换为动力平衡系统参与后续的动荷载作用, 可以方便地实现对初始地应力状态的模拟。

(2) 结合 LS-DYNA 软件的计算结果表明, 该复合边界条件的施加方法有助于准确、合理地模拟深埋结构中的波传播问题, 它们既能满足对入射应力波荷载的传递作用, 也能满足对外辐射应力波的

透射作用, 同时又能准确考虑初始地应力荷载的影响。

(3) 本文提出的边界设置方法实施简单, 不需要设置额外的参数, 比如黏弹性边界条件中与弹簧有关的系数, 黏弹性边界条件是速度+位移模式, 本文给出的边界条件是速度+力模式, 其对于初始应力场的模拟是精确的, 结合黏性边界条件, 完全可以满足静动力耦合作用下深埋结构变形和破坏分析对边界条件设置的要求。

参考文献

- [1] 孙惠香, 许金余, 李庆. 爆炸荷载作用下地下结构破坏模式研究[J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(5): 89—93.
SUN Hui-xiang, XU Jin-yu, LI Qing. The failure model study of underground structure subjected to blast load[J]. **Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance**, 2011, 31(5): 89—93.
- [2] SHAHNAZARI H, ESMAEILI M, HOSSEINI RANJBAR H. Simulating the effects of projectile explosion on a jointed rock mass using 2D DEM: A case study of Ardebil-Mianeh railway tunnel[J]. **International Journal of Civil Engineering**, 2010, 8(2): 125—133.
- [3] 鞠杨, 夏昌敬, 谢和平, 等. 爆炸荷载作用下煤岩巷道底板破坏的数值分析[J]. 岩土力学与工程学报, 2004, 23(21): 3664—3668.
JU Yang, XIA Chang-jing, XIE He-ping, et al. Numerical analysis on rupture of subfloor of coalmine tunnel subjected to blasting loads[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(21): 3664—3668.
- [4] 吴艺. 一维问题的等效远置动力人工边界条件[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3508—3514.
WU Yi. An equivalent far-field artificial dynamic boundary condition for one-dimensional problem[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(11): 3508—3514.
- [5] 刘晶波, 李彬. 三维黏弹性静-动力统一人工边界[J]. 中国科学(E 辑): 工程科学、材料科学, 2005, 35(9): 966—980.
LIU Jing-bo, LI Bin. 3D viscoelastic artificial boundary with static and dynamical load[J]. **Science in China (Series E): Engineering and Materials Science**, 2005, 35(9): 966—980.
- [6] 廖维张, 杜修力, 赵密, 等. 开放系统非线性动力反应分析的一种算法[J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(2): 115—119.
LIAO Wei-zhang, DU Xiu-li, ZHAO Mi, et al. An algorithm of the nonlinear dynamic analysis of open system[J]. **Journal of Beijing University of Technology**, 2006, 32(2): 115—119.
- [7] 谷音, 刘晶波, 杜义欣. 三维一致黏弹性人工边界及等效黏弹性边界单元[J]. 工程力学, 2007, 24(12): 31—37.
GU Yin, LIU Jing-bo, DU Yi-xin. 3D consistent viscous-spring artificial boundary and viscous-spring boundary element[J]. **Engineering Mechanics**, 2007, 24(12): 31—37.
- [8] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA Keyword user's manual (Version 971)[R]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2009.
- [9] DEEK A J, RANDOLPH M F. Axisymmetric time-domain transmitting boundaries[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 1994, 120(1): 25—42.
- [10] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [11] 王明洋, 赵跃堂, 钱七虎. 用波动有限元分析土与结构相互作用问题时设置人工边界的两个基本问题[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(1): 92—95.
WANG Ming-yang, ZHAO Yue-tang, QIAN Qi-hu. Two problems in setting up artificial boundary while analyzing soil-structure interaction by finite element method for wave motion[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1995, 17(1): 92—95.
- [12] LIU JINGBO, LU YANDONG. A direct method for analysis of dynamic soil-structure interaction based on interface idea[M]//Dynamic Soil-Structure Interaction, Developments in Geotechnical Engineering. Amsterdam: Elsevier, 1998: 261—276.
- [20] BROEK D. Elementary engineering fracture mechanics[M]. Dordrecht: Martinus Nijhoff, 1986.
- [21] TADA H, PARIS P C, IRWIN G R. The stress analysis of cracks handbook[M]. St Louis: Paris Productions, 1985.
- [22] 曲嘉. 钢纤维混凝土劈拉强度的实验研究[博士学位论文 D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- [23] CHARLES R J. Static fatigue of glass[J]. **Journal of Applied Physics**, 1958, 29(11): 1549—1560.
- [24] ATKINSON B K. Subcritical crack growth in geological materials[J]. **Journal of Geophysical Research**, 1984, 89(6): 4077—4114.
- [25] 于浩, 李海芳, 温彦锋, 等. 九甸峡堆石料三轴蠕变试验初探[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊 1): 103—106.
YU Hao, LI Hai-fang, WEN Yan-feng, et al. Study on triaxial creep test for Jiudianxia rockfill materials[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(Supp.1): 103—106.

上接第 1494 页