

强夯大变形冲击碰撞数值分析^{*}

Numerical analysis of large deformation impact and collision properties during dynamic compaction

蒋 鹏

(成都理工学院工程地质研究所, 成都, 610059)

李荣强

孔德坊

(深圳市勘察研究院, 深圳, 518026) (成都理工学院工程地质研究所, 成都, 610059)

文 摘 本文采用动力接触有限元法分析了强夯对地基土的冲击碰撞过程。夯击过程中, 夯点周边地基土存在局部大变形现象。采用无限小应变度量将不能消除刚体位移的影响, 必须采用大变形理论。为了保证显示算法的网格稳定性, 计算模型中考虑了侵蚀分析。锤底接触力和夯沉量在计算过程中直接求得, 模型考虑了夯锤自重, 能够模拟夯锤与地基土的多次接触分离过程, 适应于各种复杂的地基土结构。文章最后给出了一个工程实例, 以验证本文计算模型。

关键词 强夯, 有限元法, 大变形, 冲击, 动力接触

中图法分类号 TU 472.36⁺1

作者简介 蒋 鹏, 男, 1972年生, 1999年于成都理工学院获博士学位, 现任职于深圳市勘察研究院, 主要从事地基处理理论和在岩土工程中的应用研究。

Jiang Peng

(Chengdu University of Technology, Chengdu, 610059)

Li Rongqiang

Kong Defang

(Shenzhen Investigation & Research Institute, Shenzhen, 518026) (Chengdu University of Technology, Chengdu, 610059)

Abstract This paper uses dynamic contact FEM to analyze impact and collision course of dynamic compaction to foundation soil. There is local large deformation in the peripheral foundation soil of the compacting spots. Since the mechanical derivation of infinitesimal strain can't eliminate effect of rigid displacement, large deformation theory must be used in it. Erosion element is used in calculation model for ensuring the mesh stability of explicit algorithm. The hammer's contact force and contact displacement are worked out in the course of calculation, and dead weight of hammer is taken into account. The model used can simulate the separating or contacting course between hammer and foundation soil and it is applicable to cases of complex foundation soil structure. At the end of this paper, an engineering example is discussed to test and verify this model.

Key words dynamic compaction, finite element method, large deformation, impact, dynamic contact

1 引 言^{*}

强夯涉及的是地基土在巨大的冲击力作用下的动态响应问题, 其复杂性决定了夯击过程分析难以用常规解析方法推证, 而必须借助各种数值方法。

钱家欢、帅方生^[1]等曾提出一种加卸载双线性强夯本构模型, 采用边界元法对低能量强夯问题进行了分析, 并得出了锤底应力的变化规律, 但该法未考虑夯锤自重, 主要适用于均质地基; 吴铭炳^[2]、梁志荣^[3]、李本平^[4]等利用动力有限元法对强夯问题进行了细致的研究, 根据经验将强夯产生的瞬态荷载简化为一已知的三角形波或半正弦波, 将其作为输入应力边界进行计算, 锤底应力设为均布的, 由于确定的已知荷载与强夯实际之间不可避免的差异, 将影响结果的合理性。孔令伟^[5]针对强夯边界接触应力和沉降特性, 利用积分变换和传递矩阵法对锤底接触应力和沉降特性进行

了研究, 其结果与边界元法、有限元法结果有可类比性, 但限于弹性成层地基, 也没有考虑夯锤可能出现的弹跳及其反复的接触和分离过程。

以上分析都是建立在经典力学中的“小变形”假定上的, 而实际夯击过程中夯坑周边土体将产生很大的变形破坏区域, 其直观表现是产生了一定深度的直立夯坑, 对于高能量的强夯加固, 首击夯沉量可达1 m以上, 土体的位移此时很大一部分实为刚体位移, 采用无限小应变度量却不能反映刚体位移的影响, 所以必须采用大变形理论进行分析。

有限元法的优点是可以方便地实现对涉及各类复杂的本构模型、边界条件和复杂形体等问题的数值分析, 只要有恰当的本构模型, 人们几乎可以得到对任何复杂问题的模拟结果。目前冲击碰撞、动力接触问题的有限元法研究已较为深入, 其基本思想是接触体之

^{*} 到稿日期: 1999-05-11

间的相互作用可以通过建立接触面上的补充方程解得,这已使人们可以对诸如高速撞击、贯穿、加工成型等问题得到总体合理的结果,而强夯加固的本质可简化为一个夯锤对地基土的轴对称冲击-动力接触问题,但从冲击碰撞的角度来建立强夯数值模拟还未见文献反映。因此,本文研究将从这一角度出发,探讨建立强夯的数值模型。

2 强夯冲击碰撞分析的基本方程

2.1 强夯大变形有限元系统动力平衡方程

对于强夯加固分析,由于目前还没有一个合理的强夯本构关系,而本构分析已超出本文讨论范围,为方便分析,此处采用了钱家欢^[1]提出的加卸载双线性模型。加、卸载双线性强夯本构模型应力应变关系在确定的时步上是线性弹性的,所以考虑了几何非线性的强夯本构方程在形式上与小变形本构方程类似,所不同的是,本构方程应建立在变形过后的现时构形之上。可以推得采用 Lagrange 描述方法,以 Kirchhoff 应力张量和 Green 应变张量表示的本构关系

$$T_{IJ} = D_{IJKL} E_{KL} \quad (1)$$

D_{IJKL} 为四阶弹性张量,对于各向同性材料 D_{IJKL} 可用两个独立弹性常数如 E 和 μ , λ 和 G 表示。

对轴对称问题,若记

$$\{T\} = [T_{11} \quad T_{22} \quad T_{12} \quad T_{33}]^T \quad (2)$$

$$\{E\} = [E_{11} \quad E_{22} \quad E_{12} \quad E_{33}]^T \quad (3)$$

可得与小变形线性弹性形式完全一样的本构方程

$$\{T\} = [D]\{E\} \quad (4)$$

式中 $[D]$ 为弹性矩阵。

对于动力大变形问题,其虚功方程可写为

$$\delta \Delta \pi = \sum \int_v T_{IJ} \delta E_{IJ} dv + \int_v \rho \dot{u}_i \delta \Delta u_i dv - \int_v p_i \delta \Delta u_i dv - \int_s \bar{p}_i \delta \Delta u_i ds = 0 \quad (5)$$

U. L 法以 t 时刻构形为参考构形,求解 $t + \Delta t$ 时刻构形时不考虑 t 时刻构形的变形,即 t 时刻单元应变为零,所以 $t + \Delta t$ 时刻单元应变就是单元应变增量。对轴对称问题,根据环向伸长度与径向位移的关系定义环向 Green 应变增量。

$$\Delta E_{33} = \frac{\Delta u_1}{X_1} + \frac{1}{2} \left| \frac{\Delta u_1}{X_1} \right|^2 \quad (6)$$

推得反映应变与位移关系的大变形几何方程

$$[B] = [B_L] + [B_N^*] \quad (7)$$

其中

$$[B_L] = [L][N] \quad (8)$$

$$[B_N^*] = \frac{1}{2} [\Delta \theta] [G] \quad (9)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial X_1} & 0 & \frac{\partial}{\partial X_2} & \frac{1}{X_1} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial X_2} & \frac{\partial}{\partial X_1} & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$[\Delta \theta] = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_1}{\partial X_1} & \frac{\partial u_2}{\partial X_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial u_1}{\partial X_2} & \frac{\partial u_1}{\partial X_2} & 0 \\ \frac{\partial u_1}{\partial X_2} & \frac{\partial u_2}{\partial X_2} & \frac{\partial u_1}{\partial X_1} & \frac{\partial u_2}{\partial X_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{X_1} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$[G]_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial X_1} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial X_2} & 0 & \frac{N_i}{X_1} \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial X_1} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial X_2} & 0 \end{bmatrix} \quad (i = 1, M; \quad M \text{ 为单元节点数}) \quad (12)$$

所以

$$\{E\} = \{\Delta E\} = [B]\{\Delta u\}^e \quad (13)$$

$[B_L]$ 称为线性几何矩阵,其形式完全与小变形问题的几何矩阵相同; $[B_N^*]$ 称为非线性几何矩阵; $[N]$ 是单元形函数矩阵, $\{\Delta u\}^e$ 是单元节点位移向量。

由于采用了 U. L 法, t 时刻参考构形的 Kirchhoff 应力就是 Cauchy 应力。于是有 $t + \Delta t$ 时刻 Kirchhoff 应力张量

$$\{T\} = \{\sigma\} + \{\Delta T\} \quad (14)$$

$$\{\Delta T\} = [D]([B_L] + [B_N^*])\{\Delta u\}^e \quad (15)$$

将(13)、(14)代入虚功方程(5),经整理后并添加阻尼项,可得总体刚度方程

$$[M]\{\dot{U}_{t+\Delta t}\} + [C]\{U_{t+\Delta t}\} + [K]\{\Delta U\} = \{R_{t+\Delta t}\} - \{F_t\} \quad (16)$$

其中

$$[K] = \sum_e ([k_i]^e + [k_o]^e + [k_l]^e) \quad (17)$$

单元小位移刚度矩阵

$$[k_o]^e = \int_e [B_L]^T [D] [B_L] dv \quad (18)$$

单元初应力刚度矩阵

$$[k_o]^e = \int_e [G]^T [\sigma] [G] dv \quad (19)$$

单元大位移刚度矩阵

$$[k_l]^e = \int_v ([B_L]^T [D] [B_N^*] + 2[B_N^*]^T [D] [B_L] + 2[B_N^*]^T [D] [B_N^*]) dv \quad (20)$$

$$[G] = \begin{bmatrix} \sigma_{11}[I]_{2 \times 2} & \sigma_{12}[I]_{2 \times 2} & 0 \\ \sigma_{21}[I]_{2 \times 2} & \sigma_{22}[I]_{2 \times 2} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (21)$$

式(16)为一个非线性方程组,对几何非线性有限元,线性化求解一般采用舍去大位移刚度矩阵 $[K_I]$ 的方法,所以

$$[M]\{\ddot{U}_{t+\Delta t}\} + [C]\{\dot{U}_{t+\Delta t}\} + ([K_0] + [K_0])\{\Delta U\} = \{R_{t+\Delta t}\} - \{F_t\} \quad (22)$$

式中 $[M]$ 为质量矩阵; $[C]$ 为阻尼矩阵,采用瑞雷阻尼 $[C] = a[M] + b[K]$; a, b 为常数; $\{R_{t+\Delta t}\}$ 为荷载向量; $\{F_t\}$ 为节点力向量; $\{\dot{U}_{t+\Delta t}\}$ 、 $\{U_{t+\Delta t}\}$ 和 $\{\Delta U\}$ 分别为 $t + \Delta t$ 时刻的待求运动量。

对于式(22)所表强夯瞬态动力平衡方程,可采用 Newmark- β 直接积分法求解。

2.2 节点动力接触条件和初始分离校正

由于接触面上的作用力是未知量,则式(22)所给方程组是欠定的,必须通过建立补充方程才能求解。补充方程可以通过接触面之间的几何协调和力的平衡建立,两个相互接触的物体在接触面上的接触方式分为三种类型(粘性接触、开式接触和滑移接触)。考虑到强夯问题中夯锤与地基土之间的摩阻力,远小于锤底接触力,因此本文研究忽略了摩阻力,使接触关系仅限于粘性接触和开式接触。对于二维问题,通过如图1所示的建立在接触面上的局部坐标系, (局部坐标系建立在物体B上, ξ 为切线方向, ζ 为法线方向) 根据位移协调、物质不可渗透和力的平衡关系,接触条件按增量形式可以表述为粘性接触和开式接触。

粘性接触

当两个物体法线方向接触,且无切向位移时

$$\Delta u_{\xi}^A - \Delta u_{\xi}^B = 0 \quad (23)$$

$$\Delta u_{\zeta}^A - \Delta u_{\zeta}^B + {}^0d_{\zeta} = 0 \quad (24)$$

$${}^0p_{\zeta} + \Delta p_{\zeta} > 0 \quad (25)$$

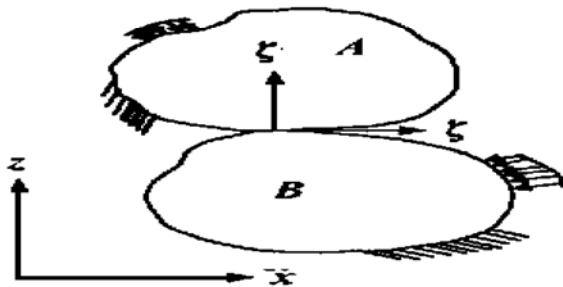


图1 两接触的物体

Fig. 1 Two bodies in contact

开式接触

当两个物体分开时

$$\Delta u_{\zeta}^A - \Delta u_{\zeta}^B + {}^0d_{\zeta} > 0 \quad (26)$$

$${}^0p_k + \Delta p_k = 0 \quad (k = \xi, \zeta) \quad (27)$$

式(23)~(27)中,右上标A、B表示两个物体各自的相应量,左上标0表示初始值, d 为间距, p 为接触力。

Newmark- β 直接积分法,其速度和加速度均根据上一时步求得。但是,在初始接触和接触分离的时刻,接触力将发生突变,直接积分的线性假定将引起计算的剧烈振荡失稳。所以应用 Newmark- β 法求解冲击-动力接触问题在初始接触和初始分离时必须进行校正,其意义可参见有关文献^[6,9]。初始接触和初始分离的方法,可采用拉格朗日乘法^[8]、等效节点面积加权系数法^[9]等,本文采用了后一种方法,其校正公式为

初始接触

$$\begin{aligned} \dot{u}_{\xi}^{A+} &= \dot{u}_{\xi}^{B+} = \frac{\rho_X^A \dot{u}_{\xi}^{A-} + \rho_X^B \dot{u}_{\xi}^{B-}}{\rho_X^A + \rho_X^B} \\ \dot{u}_{\zeta}^{A+} &= \dot{u}_{\zeta}^{B+} = \frac{\rho_X^A \dot{u}_{\zeta}^{A-} + \rho_X^B \dot{u}_{\zeta}^{B-}}{\rho_X^A + \rho_X^B} \end{aligned} \quad (28)$$

初始分离

$$\begin{aligned} \dot{u}_{\xi}^{A+} &= \dot{u}_{\xi}^{A-} + \frac{\alpha \Delta t}{\eta \rho_X^A} \dot{p}_{\xi} \\ \dot{u}_{\zeta}^{B+} &= \dot{u}_{\zeta}^{B-} + \frac{\alpha \Delta t}{\eta \rho_X^B} \dot{p}_{\zeta} \end{aligned} \quad (29)$$

式中 ρ 为接触体的密度, X 代表接触单元在接触方向上的深度,上标 $-$ 和 $+$ 代表校正前后的状态量, α 为 Newmark 系数, η 代表接触单元的体积权重,可由单元的形函数获得。

2.3 强夯网格稳定性和侵蚀

强夯过程模拟中,夯坑周边土体单元将形成较大的变形破坏范围,特别是由于夯锤的冲剪作用,夯坑侧壁理论上将形成一剪切滑移带,若不采用特殊处理,将很容易出现计算过程中网格翻转或过大的网格畸变而导致计算网格失稳,而采用三角格元和重分区技术都不能完全保证计算的顺利推进。文献[10]中介绍:在1986年版 EPIC 编码程序以及 Kimsey 和 Zukas 的文章中引入了侵蚀(erosion)的概念。当某一单元的等效塑性应变达到某一指定的临界数值时,便认为该单元完全破坏,丧失抵抗变形的能力,只在单元节点上保留该单元的质量,随后只在体力作用下运动。引入侵蚀后可计算靶体受超高速碰撞形成碎片云这样一类变形极大的问题。

本文将侵蚀概念引入到了强夯计算模型中来,实践证明,经直接引入侵蚀元,采用矩形格元分析强夯冲击过程,可很好地消除单元网格畸变的影响,而不需再作其他特殊处理,且可模拟分析较大的夯沉量。侵蚀

的临界应变判据既可以采用等效应变强度,也可以根据实际需要采用剪应变强度判据。由于侵蚀的临界应变取值并不能直接由材料性能实验获得,主要依赖于数值模拟的经验^[10]。

3 工程实例分析

本文根据以上动力接触基本分析原理,编制了相应的有限元程序,可以用于轴对称冲击碰撞问题的一般分析。接触碰撞方程的求解采用罚单元法,经对一些简单的力学问题(弹性杆正碰撞、Hize 接触问题等)进行求证后,本文研究将其用于强夯加固过程模拟。

宁波镇海港区 $30 \times 10^5 \text{ m}^2$ 吹填粉煤灰场地地基处理^[3],现场试验的结果表明,重锤夯实效果最好。为了分析强夯加固特性,梁志荣曾对镇海电厂粉煤灰场地加固作了定量分析,场地在粉煤灰层表面铺设厚度为1.0 m的工作垫层,以下粉煤灰层厚达20.0 m,强夯荷载根据经验式简化为一对称三角形波作为应力边界输入,计算输入最大接触应力为1 470 kPa(最大接触力5.58 MN),接触应力接触时间为85.6 ms,计算出的夯沉量为28.1 m,与实测值相一致。孔令伟等^[5]采用矩阵法求得接触时间为0.09 s,计算夯沉量约为22.6 cm。

为便于对比分析,直接选用了^[3]中地基土参数,主要计算参数见表1(强夯有限元主要计算参数:夯锤吊高13.0 m;夯锤半径1.128 m;夯锤质量10.0 t;夯锤泊松比0.25;夯锤弹模 $700 \times 10^3 \text{ MPa}$;计算时步0.001 s;阻尼系数 a 为4.6;阻尼系数 b 为0.004 6)。计算所得锤底接触力时程曲线如图2,图3所示,计算结果表明,夯锤与地基土之间仅存在锤底个别节点有脱离接触的现象。随着时间增长接触力直接衰减为夯锤自重,从冲击接触开始至接触力衰减为自重的历时计0.095 s,最大接触力为9.9 MN。锤底位移 D_r 时程曲线如图4所示,锤底位移发展滞后于锤底接触力。计算所得最终夯沉量为27.3 cm,夯后夯坑形态完整、夯坑平直,如图5所示。图6给出了夯锤中心点以下地基土夯沉量随深度的变化,由图中虚线与实线交点所示,地基土的垂向变形集中在深度8 m以内,与工程实际符合。

表1 强夯有限元主要计算参数

Table 1 Parameters for dynamic compaction FEM calculation

土层名称	容重 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	加载弹模 /MPa	卸载弹模 /MPa	计算层厚 /m
垫层	20.0	0.35	8.00	40.00	1.0
粉煤灰	14.5	0.42	2.15	10.75	20.0

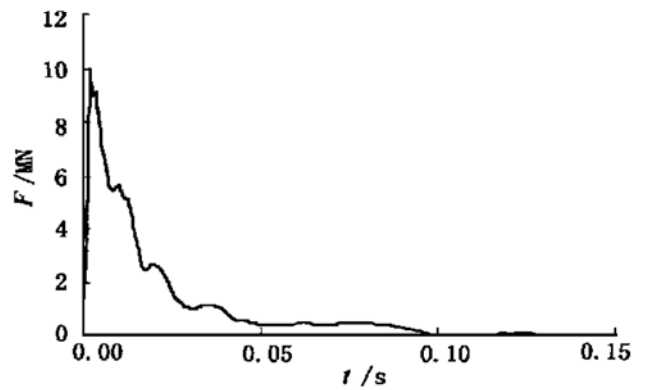


图2 夯击初期底接触力时程曲线

Fig. 2 Preliminary time contact force curve

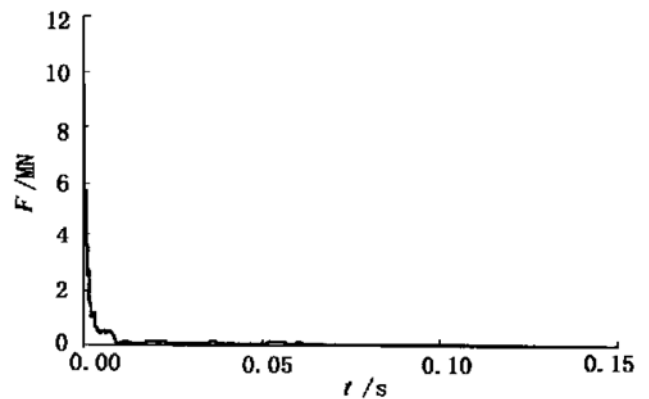


图3 完整的锤底接触力时程曲线

Fig. 3 Whole time contact force curve

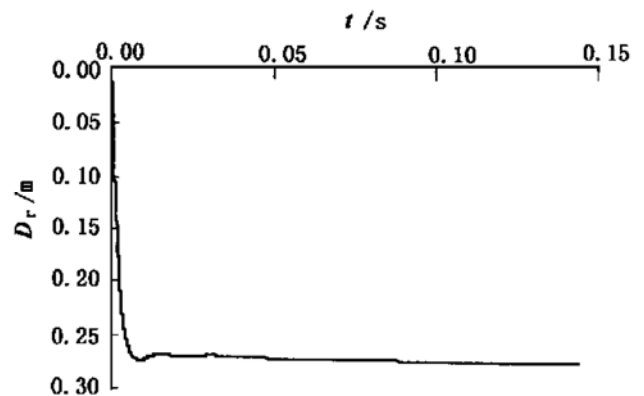


图4 锤底垂向位移时程曲线

Fig. 4 Curve of time vertical displacement at the bottom of hammer

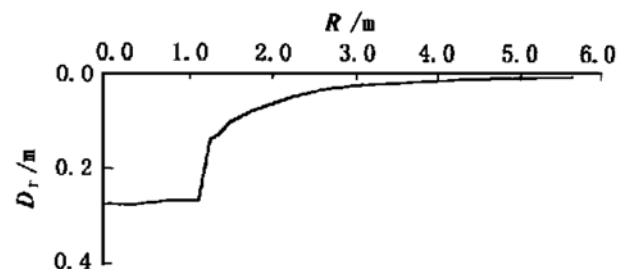


图5 地表永久垂向位移

Fig. 5 Vertical displacement at soil surface

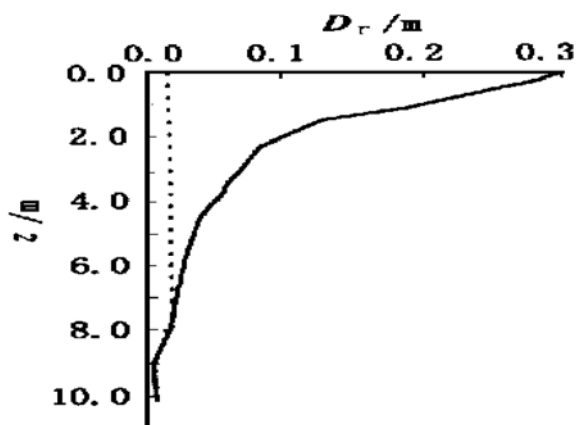


图6 垂向位移沿深度的变化

Fig. 6 Vertical displacement at different depth

4 结 语

本文采用考虑大变形的冲击碰撞模型研究强夯过程,在力学度量上更趋合理,碰撞分析更符合强夯加固实质。工程实例分析表明,计算结果符合于工程实测资料,与前人强夯数值分析结果也具可比性,且几乎可以克服其他数值方法的不足之处,说明直接从冲击碰撞出发进行强夯数值分析是实际可行的,值得在今后研究中深入、推广。

本文采用的加、卸载双线性模型在很多方面尚有待改进。鉴于目前还没有一个真正适合强夯问题的本

构关系,研究符合工程实际、合理可行的强夯本构模型希望能在将来工作中得到大力发展。

参 考 文 献

- 1 钱家欢,帅方生. 边界元法在地基强夯加固中的应用. 中国科学(A辑), 1987(3): 329~ 336
- 2 吴铭炳,王钟琦. 强夯机理的数值分析. 工程勘察, 1989(3): 1~ 5
- 3 梁志荣,曹名葆,叶柏荣. 强夯特性的数值分析. 地基处理, 1992, 3(12): 20~ 26
- 4 李本平. 有限元法分析强夯加固机理: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 1993
- 5 孔令伟,袁建新. 强夯的边界接触应力与沉降特性研究, 岩土工程学报, 1998, 20(2): 86~ 92
- 6 陈兵奎,李润方. 冲击-动力接触问题的几点注记. 计算结构力学及其应用, 1996, 13(2): 248~ 251
- 7 Kanto Y, et Yagawa G. A dynamic contact bucking analysis by the penalty finite element method, Int J Num Meth Engng, 1990, 29: 755~ 774
- 8 Taylor R, et al. On a finite element method for dynamic contact/impact problems. Int J Num Meth Engng, 1993, 36: 2123~ 2140
- 9 Chen W H, et Yeh J-T. Three-dimensional finite element analysis of static and dynamic problems with friction. Comp And Struct, 1990, 35(5): 541~ 552
- 10 谈庆明. 超高速碰撞效应的数值模拟. 力学进展, 1993, 23(4): 487~ 492

请订阅《岩土工程学报》

《岩土工程学报》创办于1979年,是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的核心期刊。由南京水利科学研究院承办,国内外公开发刊。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表我国理论和实践水平的论文、报告、实录等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿,倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿,并优先刊用这些稿件。主要栏目有论文、短文、工程实录、展望21世纪岩土力学、焦点论坛、学术讨论和动态简讯等。

本刊获“国家自然科学基金性、高科技学术期刊经费”资助。

凡本刊刊登的文稿均收入相应光盘版及Internet网;

本刊于1992年,1996年两次被确认为我国核心期刊;

本刊被《中国学术期刊文摘》、《中国科学引文数据库》、《中国科技论文统计与分析数据库》收录。

本刊被美国《工程索引》(Ei)确认为Ei Page One数据库收录

期刊;

本刊被 Geotechnical Engineering International Resources Center (GE-IRC) 确认为岩土工程核心期刊。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等系统中的科研、教学及其他工程技术人员。

本刊为双月刊,大16开本,双栏排版,120页左右,单月30日出版。每期定价10元(邮购每册另加1元),全年60元(邮购66元)。漏订或补缺者请向编辑部邮购。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000-4548,国内统一刊号 CN32-1249/TU,国内发行代号 28-62,国外发行代号 BM520。

本刊还承办广告业务,欢迎惠顾。

编辑部地址: 南京虎踞关34号 邮编: 210024

(南京水利科学研究院土工所内)

电话: (025) 3739178-512 传真: (025) 3734321 电挂: 5710

E-mail: ge@njhri.edu.cn

(本刊编辑部)