

# RIC 工法的大变形有限元数值分析

徐彬<sup>1,2</sup>, 吴军君<sup>1</sup>, 刘述丽<sup>3</sup>, 孙文怀<sup>2</sup>

1. 浙江省钱塘江管理局勘测设计院, 杭州 310016
2. 华北水利水电学院资源与环境学院, 郑州 450011
3. 浙江同济科技职业学院, 杭州 311231

**摘要** 快速冲击夯实 RIC 工法是一种填土压实施工新方法,用数值方法进行模拟和分析对工程实践有着重要的指导意义。考虑到 RIC 工法夯实土体过程中实际土体的变形基本属于大变形,故采用大变形几何非线性有限元法对该工法进行分析。通过应用相应的大变形动力有限元程序,对该工法加固土体的过程进行数值分析与计算,并结合一个工程实例,与实测数据进行对比,从而验证了数值分析的正确性,得出了 RIC 工法的影响深度和有效加固深度,最后给出了确定最佳夯击次数的方法。

**关键词** RIC 工法;有限元;大变形;压实度

**中图分类号** TU472

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.06.009

## Numerical Analysis of RIC Construction Technology by Finite Element Method Based on Large Deformation Theory

XU Bin<sup>1,2</sup>, WU Junjun<sup>1</sup>, LIU Shuli<sup>3</sup>, SUN Wenhui<sup>2</sup>

1. Survey and Design Institute, Qiantang River Administration of Zhejiang Province, Hangzhou 310016, China
2. School of Resource and Environment, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China
3. Zhejiang Tongji Vocational College of Science and Technology, Hangzhou 311231, China

**Abstract** The RIC construction technology is a kind of new methods of foundation treatment. This paper presents a numerical analysis of the RIC method. The soil deformation is basically large in the process of using the RIC method, therefore, this paper uses the finite element method based on the large deformation theory. The influence depth, the effective reinforcement depth, and the optimal compacting count of RIC method are determined. The numerical analysis is validated by some measurements of an engineering example.

**Keywords** RIC construction technology; finite element method; large deformation; degree of compaction

### 0 引言

在高路堤填筑中,因碾压分层过多,不易控制质量,有可能引起路面的工后沉降大,路堤承载力不足,甚至导致路堤边坡失稳。特别是在公路工程施工中某些特殊地段由于施工条件的限制,路堤土或回填土难以压实,不能达到工程要求的压实度(例如桥台背路堤填土),致使公路运行后出现各种异常情况,严重时影响道路的正常运行,如桥头跳车、路面破损等现象。快速冲击夯实(Rapid Impact Compaction, RIC)工法

是一种路堤填土压实的新的岩土工程施工技术,对填土的压实程度较高,可较好地解决上述问题。相比传统的分层碾压路基填土压实方法, RIC 工法具有压实效果好、一次处理深度高等优点。在中国,该工法在郑州—少林寺高速公路的路基及桥涵台背填土压实中得到首次应用,并取得了较为理想的结果<sup>[1]</sup>。

目前,国内孙文怀、董金玉等<sup>[1-2]</sup>对 RIC 工法压实填土进行了试验研究,提出了相关的施工控制技术参数及工艺,但

收稿日期:2011-09-06;修回日期:2012-02-08

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划课题(2006BAB04A10)

作者简介:徐彬,工程师,研究方向为岩土工程数值分析、膨胀土,电子信箱:xubin@263.net

在 RIC 工法数值分析方面鲜有报道。Kristiansen 等<sup>[3]</sup>对 RIC 工法加固非饱和土进行了试验研究,认为其作用与室内击试验相似,取决于土的结构破坏、土中裂隙的形成和孔隙水的排出。Tara 等<sup>[4]</sup>对土体在 RIC 工法冲击荷载下的性状进行了基于小变形理论的数值模拟,得出地基土视冲击荷载在地表一定深度以上起破坏作用,以下起辅助加固作用的结论。事实上, RIC 工法夯实土体的原理为相对高频动态压实<sup>[2]</sup>,实际夯击过程中夯坑周边土体将产生较大的变形破坏区,土体的沉降量较大,小变形度量的有限元法不能真实反应土体的变形情况。鉴于此,本文引入大变形理论,建立有限元大变形动力平衡方程对 RIC 工法引起的振动问题进行数值分析,以期使数值计算结果更为接近实际,从而提出更为准确的施工控制技术参数,为 RIC 工法在国内路基填土压实施工中的推广与应用提供参考。

### 1 RIC 工法简介

RIC 工法是用履带式反铲挖掘机为基础车,在其臂架上安装一台夯实机具,通过夯实机具相对高频(40—60 次/min)连续的夯击地面以加固地基。RIC 工法的夯击设备形成于 20 世纪 90 年代初,起初用于英国军事,以后广泛应用于机场、公路、铁路、工业及民用建筑等土木工程中<sup>[2]</sup>。国内于 2002 年引进此设备,并在郑州至少林寺高速公路填土压实施工中得到首次应用。

RIC 工法压实填土的原理为相对高频动态压实,夯实设备是以较大重量的液压锤为基础开发的高速移动性设备,液压锤重量为 50—90kN,夯实能量通过专用的锤脚直接传入作业面,保证了能量的有效传播(图 1(a))。夯实设备还提供了自动监测控制系统进行作业记录,便于质量控制和数据采集(图 1(b))。



(a) 夯实设备 (b) 监控设备  
(a) Tamper (b) Monitor equipment

图 1 RIC 工法的夯实设备和监控设备  
Fig. 1 Tamper of RIC construction technology and monitor equipment

## 2 模型的建立

### 2.1 本构关系

RIC 工法夯实土体对土体的加载形式属于瞬态冲击动力荷载,土体在这种荷载下的性质不同于静态荷载和一般动力循环荷载作用下的性质,目前尚无直接应用于 RIC 工法的土

体本构模型。本文选用修正剑桥模型<sup>[5]</sup>用于 RIC 工法加固路基模拟计算,模型的屈服方程为

$$p + \frac{q^2}{M^2(p+p_r)} = p_a \exp\left(\frac{1+e_0}{\lambda-\kappa} \varepsilon_v^p\right) \quad (1)$$

其中,  $M = \frac{6\sin\varphi}{3-\sin\varphi}$ ;  $\varphi$  为土体剪切强度指标内摩擦角;  $p_r = c \cot\varphi$ ;  $p$  为平均应力;  $q$  为广义剪应力;  $\varepsilon_v^p$  为塑性体积应变;  $p_a$  为初始平均应力。  $e_0$  为土体的初始孔隙比;  $\lambda$  和  $\kappa$  为试验常数,分别为各向等压试验加载曲线及卸载曲线的斜率,无量纲。

### 2.2 大变形动力有限元平衡方程

几何非线性动力平衡方程的推导采用了改进拉格朗日法。在时间步长  $[t, t+\Delta t]$  的增量求解期间,所有变量应以时刻  $t$  (这个步长的开始时刻) 的构形为参考构形定义,对不同的时间步长的增量求解,不断地修改参考构形。忽略了阻尼项的几何非线性有限元系统的动力平衡方程为<sup>[6]</sup>

$$M\ddot{U}_{t+\Delta t} + K_T \cdot \Delta U - R_{t+\Delta t} + F_t = 0 \quad (2)$$

其中,  $M$  为质量矩阵;  $\ddot{U}_{t+\Delta t}$ ,  $\Delta U$  分别为  $t+\Delta t$  时刻待求的加速度和沉降量;  $R_{t+\Delta t}$  为荷载向量;  $F_t$  为节点力向量;  $K_T$  为整体切线刚度矩阵

$$K_T = \sum_e k_0^e + \sum_e k_\sigma^e + \sum_e k_L^e \quad (3)$$

其中,  $k_0^e$  为单元小位移刚度矩阵

$$k_0^e = \int_v B_L^T D B_L dv \quad (4)$$

$e$  表示系统中的单元;  $D$  为单元节点位移向量矩阵;  $B_L$  为线性几何矩阵,形式与小变形问题的几何矩阵相同

$$B_L = LN \quad (5)$$

$N$  为单元形函数矩阵;  $L$  为

$$L = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial X_1} & 0 & \frac{\partial}{\partial X_2} & \frac{1}{X_1} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial X_2} & \frac{\partial}{\partial X_1} & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$X$  为单元总体位移,其下标 1 表示  $t$  时刻,下标 2 表示  $t+\Delta t$  时刻。

$k_\sigma^e$  为单元初应力刚度矩阵

$$k_\sigma^e = \int_v G^T \sigma G dv \quad (7)$$

其中

$$G_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial X_1} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial X_2} & 0 & \frac{N_i}{X_1} \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial X_1} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial X_2} & 0 \end{bmatrix} \quad (i=1, 2, \dots, n, \text{为单元节点数}) \quad (8)$$

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} I_{2 \times 2} & \sigma_{12} I_{2 \times 2} & 0 \\ \sigma_{21} I_{2 \times 2} & \sigma_{22} I_{2 \times 2} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$k_L^e$  为单元大位移刚度矩阵,是大位移引起的结构刚度变化,是  $\Delta U$  的一阶和二阶函数,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的方法,所以

$$K_T = \sum_e k_0^e + \sum_e k_c^e \quad (10)$$

较小变形条件下的刚度矩阵  $K = \sum_e k_0^e = \sum_e \int_v B_L^T D B_L dv$ , 可见考虑大变形之后整体刚度矩阵更加复杂, 在力学度量上更趋合理, 也更符合 RIC 工法夯实土体的实质。

### 2.3 锤底接触动应力的确定

Thilakasin<sup>[7]</sup>对夯击时产生的表面接触动应力随时间的变化进行了室内试验研究, 裘以惠等<sup>[8]</sup>对夯锤下的接触动应力进行了现场实测。从室内和现场试验结果可以看出, 表面接触动应力为一尖峰, 没有明显的第二应力波, 作用时间为 0.04—0.2s。所以, 本文采用把冲击荷载简化为三角形的方法, 如图 2 所示, 图中  $\sigma$  为锤底接触动应力,  $t$  为接触时间。经现场试验测定, RIC 工法的锤底表面接触动应力的最大值为 270kPa, 作用时间  $t$  取 0.1s。

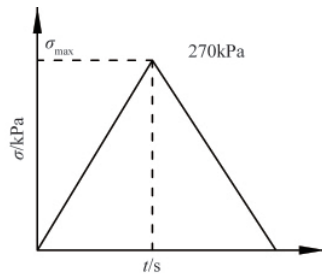


图 2 RIC 工法荷载瞬态模型  
Fig. 2 Transient model of RIC

### 2.4 边界条件的选取

本文 RIC 工法动力边界条件的处理采用截断边界法<sup>[2]</sup>。工程实践表明<sup>[1]</sup>, RIC 工法夯实土体过程中, 其单锤夯击能小于 108kN·m, 有效影响范围在径向上为 0.5—2.5m, 在竖直向上为 3—6m, 且对于土性较软弱的地基, 反射波能在土体中很快消散。可以认为在距夯锤中心一定距离之外土体的变形为 0, 因此可以采用同静力计算一样的截断边界方法, 在离夯锤一定距离处将土体截断建立边界条件, 并设置刚性支撑或自由变形节点等。

## 3 工程实例

### 3.1 计算模型的建立

河南郑—少高速公路某标段建立试验点, 对 RIC 工法夯实高填方路基填土进行了试验研究。填方厚度为 4m, 夯锤重量 50kN, 夯锤直径 1m, 夯锤落距 1m, 填土容重 20kN/m<sup>3</sup>。计算模型的地基处理厚度取 4m, 场地半径取 2.5m, 计算断面和单元划分如图 3 所示, 共分 180 个 4 节点二维轴对称等参单元, 每个节点有两个自由度, 分别是水平方向和竖直方向的平移。主要计算参数见表 1。

### 3.2 计算结果分析

通过编制相应的计算程序对上述计算模型进行分析计算。图 4 为现场实测的夯击沉降量与理论计算的夯击沉降量

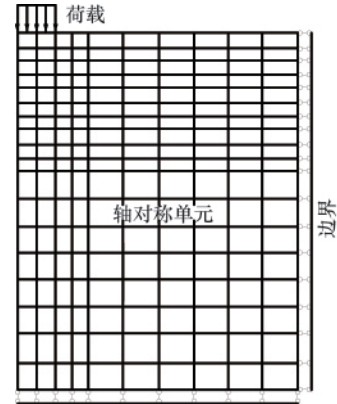


图 3 计算断面与网格划分

Fig. 3 Calculation section and meshes of RIC

表 1 有限元主要计算参数

Fig. 1 Parameters for RIC FEM calculation

层厚 /m	容重 / (kN·m <sup>-3</sup> )	弹性模量 /kPa	泊松比	最大主应力 / MPa	黏聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)	剪胀角 / (°)
4	20	7900	0.34	5.92	13.4	31.5	12.5

之间的关系。在实际夯击过程中, 夯坑周围将形成一定范围的塑性区, 性质比较复杂, 而采用 Drucker-Prager 模型计算的土体卸荷回弹量过大, 使得计算结果与实测结果相比要偏小; 夯击过程中土体将产生一定的水平位移, 表明在水平方向也有一定的加固作用, 但在计算时将被忽略, 这也是计算结果要小于实际的夯击沉降量的原因。从图中可以看出, 夯击沉降量随着夯击次数的增多而增大, 单击夯击量逐渐减少, 夯击沉降量的增长速率由快变慢, 最后趋于稳定, 计算结果与现场实测数据吻合得较好。

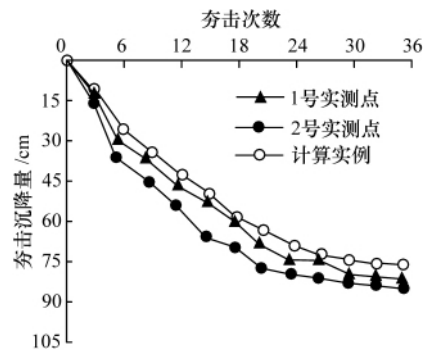


图 4 夯击沉降量与夯击次数的关系

Fig. 4 Relation between compacting settlement and number of impacts

图 5 是夯击次数为  $N=35$  时竖向位移沿深度的关系曲线。从曲线的变化趋势可以看出, 随着深度的增加, 夯击沉降量迅速变小, 距地表 1.5m 处, 沉降量降为 23.65cm, 而到达 5.1m 时沉降量仅为 2.55cm, 并且此时的夯击沉降量的增量已经很小, 于是可以认为 RIC 工法加固地基土的影响深度集中在 5.1m 以内。

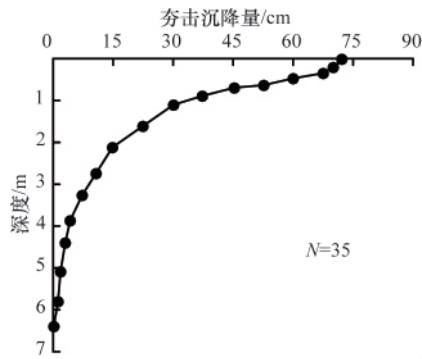


图 5 夯坑下方竖向位移沿深度的分布曲线

Fig. 5 Curve of vertical displacement at different depth

图 6 描述了夯击次数  $N=35$  时夯坑中心点压实度随深度的变化关系。可以看出,压实度随深度的增加而变小,在距地表 3.9m 以上范围内各点压实度均大于 91%, 满足试验要求的路基填土压实标准<sup>[1]</sup>,因此可以认为 RIC 工法的有效加固深度为 3.9m。

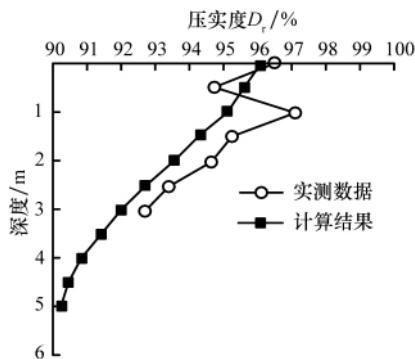


图 6 夯坑中心点压实度沿深度的分布曲线

Fig. 6 Curves of vertical displacement at different depth under the crater

图 7 描述了夯坑中心点不同深度处压实度随夯击次数的变化关系。可以看出,压实度随夯击次数的增加而增大,压实度的增大速率由快变慢,最后趋于稳定,说明存在一个最佳夯击数,不仅能满足要求的加固深度和压实标准,也能有

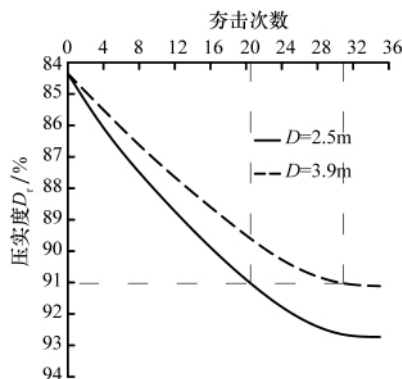


图 7 夯坑中心点不同深度处压实度随夯击次数的变化曲线

Fig. 7 Curves of displacement at different depth versus compacting number

效避免浪费夯击能量。利用计算程序可以得出夯坑中心点各深度处压实度随夯击次数的变化关系,对于给定的填土压实标准和设计加固深度,便可以确定最佳夯击数。以本文为例,填土压实标准取压实度  $D_r \geq 91\%$ , 若设计加固深度  $D$  取 2.5m,则最佳夯击次数为 21 次;若设计加固深度  $D$  取 3.9m,则最佳夯击次数为 31 次。须要指出的是,设计加固深度的取值不应大于由图 6 确定的有效加固深度。

#### 4 结论

本文应用大变形非线性有限元法对 RIC 工法处理高填方路基填土问题进行了数值模拟,通过与实测资料的比较,表明计算结果基本符合土体的变形规律,给出了对于本文所用的地质资料、夯击参数和填土压实标准的影响深度、有效加固深度和最佳夯击次数的确定方法。

本文采用的修正剑桥模型在很多方面尚待改进,如果能在大变形理论的基础上,再考虑土骨架和孔隙水的耦合作用,将会取得满意的模拟效果。因此,土体本构模型的选取需做进一步研究。

#### 参考文献 (References)

- [1] 孙文怀,崔国喜,董金玉,等. 高速公路桥台背填土压实的 RIC 工法实验研究[J]. 岩土工程学报, 2004(5): 702-705.  
Sun Wenhui, Cui Guoxi, Dong Jinyu, et al. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004(5): 702-705.
- [2] 董金玉,李日运,孙文怀,等. 快速夯实法在高速公路高填方及台背填土施工中的技术研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(3): 422-426.  
Dong Jinyu, Li Riyun, Sun Wenhui, et al. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(3): 422-426.
- [3] Kristiansen H, Davies M. Ground improvement using RIC method[R]. 13th World Conference on Earthquake Engineering, 2004: 496-501.
- [4] Tara D, Wilson P. Rapid impact compactor ground improvement [R]. Canada: Rapid Impact Compactors Ltd, 2004.
- [5] 蒋彭年. 土的本构关系[M]. 北京: 科学出版社, 1982.  
Jiang Pengnian. Constitutive relationship of soils [M]. Beijing: Science Press, 1982.
- [6] 何君毅,林祥都. 工程结构非线性问题的数值解法 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1994.  
He Junyi, Lin Xiangdu. Numerical solution method for solving the nonlinear problems in engineering structures [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1994.
- [7] Thilakasiri H S, Gunaratne M, Mullins G, et al. Investigation of impact stresses induced in laboratory dynamic compaction of soft soils [J]. Int J Number Anal Methods Geomech, 1996, 20(10): 753-756.
- [8] 裘以惠,郭玉铃. 强夯法加固地基的土体动应力量测 [C]//中国建筑学会工程勘察学术委员会第二届工程勘察学术交流会议论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1984.  
Qiu Yihui, Guo Yuling. Measurement of dynamic stress in soil mass during heavy tamping by dynamic consolidation method in ground improvement [C]//The Proceeding of the Second Geotechnical Investigation & Surveying Academic Communication Conference of Geotechnical Investigation & Surveying Committee of Architectural Society of China. Beijing: China Architecture and Building Press, 1984.

(责任编辑 刘志远)