

夯实水泥土桩复合地基载荷试验及数值模拟

司海宝¹, 肖昭然²

(1. 安徽工业大学建筑工程学院, 安徽 马鞍山 243002; 2. 河南工业大学土木建筑工程学院, 河南 郑州 450052)

摘要: 夯实水泥土桩复合地基处理技术已得到了广泛的应用, 然而其设计理论和计算方法却严重滞后, 主要借鉴水泥土搅拌桩的计算理论和方法。载荷试验目前是确定地基承载力的主要方法, 但试验存在许多如工期长、费用高等问题。鉴于上述问题, 利用通用的有限元计算软件 ABAQUS, 并进行二次开发, 采用南水双屈服面土体本构模型和增量加载数值计算方法, 模拟载荷试验, 并与夯实水泥土桩的现场载荷试验比较, 载荷曲线与沉降曲线基本吻合, 结果表明, 只要土体力学参数与实际工程情况一致, 载荷试验结果可以通过数值计算来获取。

关键词: 载荷试验; 土体本构; 增量加载; 地基承载力

中图分类号: TU472 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)S2-0480-05

作者简介: 司海宝(1974-), 男, 安徽安庆人, 讲师, 博士研究生, 从事工程数值计算等研究工作。E-mail: hbsi@nhri.cn。

Loading tests on composite foundation with compacted cement-soil piles and numerical simulation

SI Hai-bao¹, XIAO Zhao-ran²

School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Henan University of Technology, Zhengzhou 450052, China

Abstract: The processing technology for composite foundation with compacted cement-soil piles has been widely utilized. Nonetheless, the related design theory and calculation method seem out of date, which usually refers to the counterparts for cement-soil mixing piles. Loading tests are the primary method to determine the bearing capacity of foundation recently, while there're some undesirable problems with regard to the tests such as the long experiment term. Considering these issues, the secondary development is made in this study on the ABAQUS platform, and the NHRI model and incremental loading numerical calculation method are adopted to simulate the actual loading test. A comparison between the results from in-site loading tests and numerical simulation is made. The loading curves and settlement curves are in agreement. A conclusion is drawn: the results of actual loading tests can be obtained from numerical simulation as long as the mechanical parameters of soil adopted in numerical simulation are consistent with those in the actual projects.

Key words: loading test; constitutive model; step-loading; bearing capacity

1 引言

夯实水泥土桩是采用人工或机械挖孔, 选用相对单一的土质材料与水泥按一定配比, 在孔外充分搅拌均匀制成水泥土, 分层向孔内回填并强力夯实, 制成均匀的水泥土桩^[1]。水泥土桩、桩间土和褥垫层一起形成复合地基^[2]。夯实水泥土桩作为中等黏结强度桩, 比较适用于地下水位以上淤泥质土、素填土、粉土、粉质黏土等地基加固^[3]。夯实水泥土桩复合地基处理软弱地基在实际工程中已经得到广泛应用。

目前, 夯实水泥土桩设计理论和计算方法却严重滞后, 设计理论和加固机理等方面的内容缺乏深入的

研究; 在设计过程中主要还是借鉴同类型的水泥土搅拌桩和粉喷桩复合地基相关的结论和经验, 因而有必要对夯实水泥土桩复合地基的工程特性进行系统研究^[4-5]。确定夯实水泥土桩复合地基承载特性和变形特性的最佳方法是进行复合地基载荷试验。本文通过夯实水泥土桩复合地基三维数值模拟, 与现场载荷试验分析比较, 研究其承载特性、变形特性和加固机理, 为工程设计、施工与优化提供技术支持。

2 现场载荷试验

试验场地位于石家庄市元氏县某试验场地, 以粉土和粉质黏土为主。现场开挖 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 平面区域, 开挖深度 0.3 m, 现场打设试验桩, 进行复合地基静载荷试验, 见图 1。

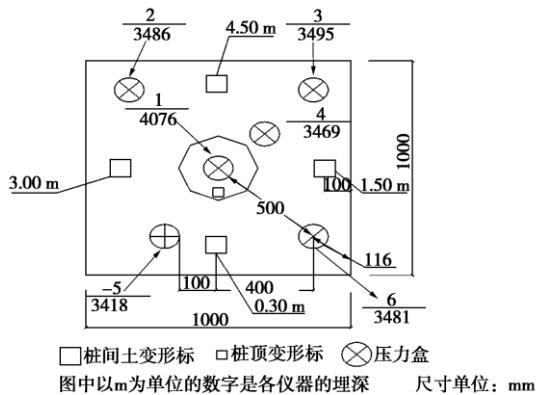


图 1 仪器埋设平面布置图

Fig. 1 Plan layout of instruments

试验仪器与设备由反力系统、加载系统、沉降观测和应力观测四部分组成, 应力观测仪采用 0.5~4.0 MPa 钢弦式土压力盒。数据采集使用 JD-9A 型弦式传感器测定仪, 见图 2。



图 2 加载系统

Fig. 2 Loading system

试验时在不同深度和位置处分别埋设 5 个变形标和 6 个振弦式土压力盒, 分别测得不同位置处的土体的沉降量和土压力, 见图 3。



图 3 仪器埋设

Fig. 3 Installation of instruments

试验桩采用直径 D 为 300 mm, 桩长 L 为 4 m, 面积置换率 m 为 0.07, 水泥掺入比 $a_w = 15\%$, 水泥土混合料含水率按最优含水率 18% 控制, 并分层回填厚度为 20 cm, 通过现场夯实, 确定每层夯击 4 次, 每次夯击能 600 N·m, 夯实水泥土干密度为 1.78 g/cm^3 , 养护 28 d。垫层为 0.3 m 的粗粒土。

试验采用分级慢速维持载荷法, 加载增量每级为极限载荷的 1/12, 直至复合地基破坏, 桩与桩间土的应力与沉降观测同步进行。试验结束后, 检查桩体损伤情况, 见图 4。

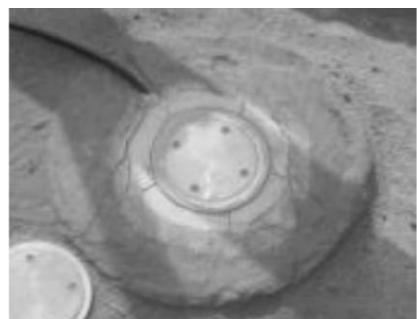


图 4 试验后的桩头破坏

Fig. 4 Damaged pile head after tests

3 载荷试验数值模拟

3.1 土体本构模型

土体具有非线性、非弹性、塑性体应变和剪胀等特性, 选取合适的本构模型是有限元计算的核心问题, 直接影响数值计算结果^[6-7]。现有计算方法是建立在 Mohr-Coulomb 屈服准则或广义 Mises 屈服准则基础上的理想弹塑性本构理论^[8-10], 不能反映土体的塑性体应变及剪胀等特性, 而地基土体的剪切破坏是夯实水泥土桩复合地基破坏失稳的主要原因。因而本次计算地基土体本构采用能较好反映土体塑性体应变和剪胀等特性南水双屈服面模型^[11], 南水模型的屈服面方程为:

$$f_1 = p^2 + r^2 q^2 \quad , \quad (1)$$

$$f_2 = \frac{q^s}{p} \quad , \quad (2)$$

式中 r, s 为屈服面参数, p 和 q 为八面体正应力及八面体剪应力。采用正交流动法则, 弹塑性应力应变关系表示式为:

$$\{\Delta\varepsilon\} = [D]^{-1}\{\Delta\sigma\} + A_1 \Delta f_1 \frac{\partial f_1}{\partial \sigma_{ij}} + A_2 \Delta f_2 \frac{\partial f_2}{\partial \sigma_{ij}} \quad , \quad (3)$$

$$A_1 = \frac{\eta(\gamma_{E_t} - 3\mu/\gamma_{E_t} - \gamma_{G_e}) + 2s(\gamma_{E_t} - \gamma_{B_e})}{4\sqrt{2}(1 + \sqrt{2}r^2\eta)(s + r^2\eta^2)} \quad , \quad (4)$$

$$A_2 = \frac{(\gamma_{E_t} - 3\mu_{E_t} - \gamma_{G_e}) - 2r^2\eta(\gamma_{E_t} - \gamma_{B_e})}{\sqrt{2}\eta^2(\sqrt{2}s - \eta)(s + r^2\eta^2)}, \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} d\epsilon_v \\ d\epsilon_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{K} + 4p^2 A_1 + \frac{\tau^{2s}}{p^4} A_2 & 4r^2 p \tau A_1 - \frac{s\tau^{2s}}{p^3 \tau} A_2 \\ 4r^2 p \tau A_1 - \frac{s\tau^{2s}}{p^3 \tau} A_2 & \frac{1}{G} + \frac{2}{3}(4r^2 \tau^2 A_1 + \frac{s^2 \tau^{2s}}{p^2 \tau^2} A_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dq \\ dp \end{bmatrix}. \quad (6)$$

理论假定三轴试验中的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon_1$ 关系曲线仍为双曲线, 而 $\epsilon_v - \epsilon_1$ 的关系曲线为抛物线, 则相应参数表达形式为:

$$E_t = E_i(1 - R_f D_s)^2, \quad (7)$$

$$B = \frac{E_{ur}}{3(1-2\nu)}, \quad (8)$$

$$G = \frac{E_{ur}}{2(1+\nu)}, \quad (9)$$

$$D_s = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}, \quad (10)$$

$$u_t = 2C_d \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^d \frac{E_i R_f}{\sigma_1 - \sigma_3} \frac{1 - R_d}{R_d} \left(1 - \frac{D_s}{1 - D_s} \frac{1 - R_d}{R_d} \right), \quad (11)$$

式中, E_t 为初始模量, R_f 为破坏比, D_s 为应力水平, C_d 为 σ_3 等于一个标准大气压时的最大收缩体应变, n_d 为收缩体应变随 σ_3 增加而增加的幂指数, R_d 为发生最大收缩时的 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与偏应力的渐进值 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 之比。南水模型包括 c , ϕ , $\Delta\phi$, R_f , K , K_{ur} , n , C_d , n_d , R_d 等 8 个材料参数。

3.2 加载过程模拟

在载荷试验的过程中, 土体的破坏是一个渐进的过程, 基础土体由初始的弹性状态过渡到塑性流动的极限破坏状态。有限元数值计算采用增量加载的方式来模拟, 随着载荷的增加, 土体由弹性过渡到塑性, 最后达到极限状态, 此时对应的载荷就是地基的极限承载力。在一个增量步内, 增量步开始时, 已知应力 $\{\sigma\}_n$ 、有效塑性应变 ϵ_i^n 、硬化参数 k^n 和变位 $\{\delta\}_n$ 。设屈服面为:

$$F(\{\sigma\}, \epsilon_i^n, k^n) \neq 0, \quad (12)$$

根据弹塑性本构方程

$$\{\Delta\sigma\} = [D]^{ep} \{\Delta\epsilon\} \quad (13)$$

求出满足屈服条件的应力增量 $\{\Delta\sigma\}_{n+1}$, 全部应力和应变都是在高斯积分点计算, 确定该点是否进入塑性状态, 并调整应力和应变值直到满足屈服条件和本构方程。再进行下一增量步的计算。

利用 ABAQUS 强大的非线性数值计算平台和前后处理程序, 依据式 (1) ~ (13), 利用程序接口, 完成了上述过程的二次开发。程序开发流程详见文献 [12]。

4 试验与计算结果比较分析

采用大型通用有限元分析软件 ABAQUS, 在二次开发的基础上, 建立三维有限元分析模型, 考虑桩、土间的相互作用, 比较真实地模拟了水泥土桩成桩、堆载的全过程。

4.1 模型计算参数

地基土成层状分布, 层内土体性质比较均匀, 而各层之间差异较大。对各层土取样、试验获取土的力学性质参数。通过现场采集土样, 室内三轴试验来确定, 每组土样开展一次平行试验, 经计算模型参数如表 1。

表 1 NHRI 本构模型试验参数

Table 1 Parameters for NHRI constitutive model

土样	Φ	$\Delta\Phi$	K	n	R_f	C_d	n_d	R_d
砂垫层	52.1	12.1	540.1	0.293	0.69	0.012	0.571	0.66
粉土①	26.6	10.2	20.2	0.67	0.48	0.037	0.28	0.58
粉质黏土	36.3	11.2	83.4	0.46	0.57	0.024	0.37	0.61
粉土②	24.1	8.6	40.8	0.62	0.51	0.05	0.21	0.6

在成桩过程中, 由于就地取材, 采用挖出土体与水泥混合形成水泥土桩, 导致不同深度处桩体强度发生改变, 对不同性质水泥土块开展单轴抗压强度试验, 测得粉土水泥土块的弹性模量平均值为 2.82 GPa, 泊松比为 0.23; 粉质黏土水泥土块的弹性模量平均值为 2.172 GPa, 泊松比为 0.21。

为了真实模拟夯实水泥土桩复合地基挖孔、成桩及加载过程。在开挖前, 先进行地应力平衡, 即在基础土层施加自重应力后, 节点初始位移为零, 这是后续开挖的关键。采用空气单元来模拟挖孔及成桩过程。挖孔时, 将对应单元的刚度矩阵和质量乘以一个极小值, 这样其刚度和质量近似为零, 使这部分单元在计算中扣除, 来模拟挖孔过程。激活桩体对应单元, 使这些单元恢复原来的刚度和质量, 这时单元上既没有初始应力, 也没有初始应变, 来模拟成桩过程。应用增量加载模拟试验的加载过程, 共分 12 载荷步, 每级载荷步增量与试验相同, 为 40 kPa。

4.2 计算结果与实测结果比较分析

载荷试验是一个轴对称模型, 因而只要计算模型的 1/4, 经计算, 水平方向取 3 倍垫层宽度, 垂直方向取 3 倍桩长。模型底部为全约束边界, 四周在水平面上约束, 顶部为自由边界。桩与土体及垫层之间设置接触, 桩底部与土体绑定, 见图 5。

模型采用 C3D8I 单元, 利用自底向顶的网格划分技术, 共划分 5137 个单元, 见图 6。

(1) 桩和桩间土载荷分布

有限元计算结果与试验结果基本一致, 仅在初始阶段存在较小差异, 见图 7~8。随着外载荷的增加, 水泥土桩和土体分担的载荷同步增加。在外载荷 $P < 310 \text{ kN}$ 时, 桩和桩间土分担的载荷曲线可近似为直线, 在此阶段上部施加载荷按比例分配到桩和桩间土中去, 但是桩体载荷增加幅度大于桩间土载荷的增加幅度, 表现为桩体的载荷曲线斜率大于桩间土分担载荷曲线的斜率, 此时桩体产生的应力集中越来越显著。总载荷 P 增加到 $300 \sim 400 \text{ kN}$ 时, 桩和桩间土的分担载荷曲线出现拐点, 此时桩体的载荷值出现最大值, 桩体发生屈服使侧摩阻力达到最大限度。随着载荷继续增加, 桩身屈服破坏后桩体分担的载荷将出现缓慢减少, 外载荷主要由土体来承担。随后桩体承担的载荷趋于稳定, 来自上部增加的载荷全部作用在桩间土上, 桩土共同作用失效复合地基出现破坏。

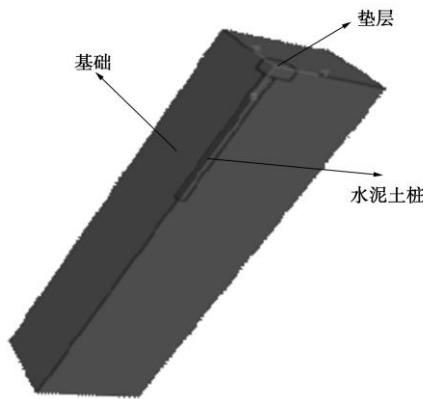


图 5 夯实水泥土桩分析模型

Fig. 5 Model of compacted cement-soil pile

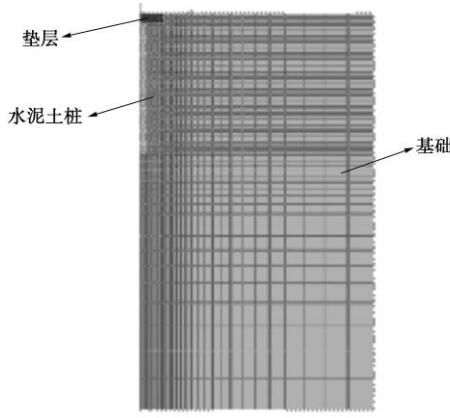


图 6 模型网格剖分

Fig. 6 Computational mesh

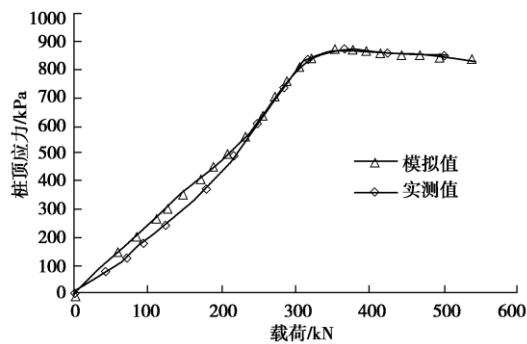


图 7 桩顶分担载荷曲线

Fig. 7 Load curves shared by piles

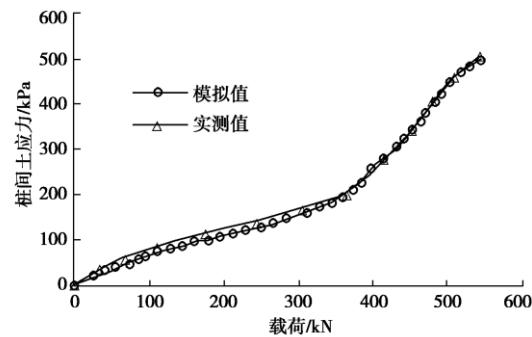


图 8 桩间土分担载荷曲线

Fig. 8 Load curves shared by soil between piles

(2) 桩和桩间土变形分析

在载荷加载初始阶段夯实水泥土桩复合地基 $P-s$ 曲线关系基本为直线形, 土体处于弹性状态, 随着载荷增大, 变形增加, 在载荷约为 330 kN 时, 实测水泥土桩复合地基 $P-s$ 曲线出现拐点, 复合地基沉降量迅速增加, 表明桩端土体及载荷板下土体塑性区已达极限状态, 复合地基接近破坏, 因而, 夯实水泥土桩复合地基的极限荷载力是 330 kN 。桩及桩间土的荷载沉降曲线见图 9~10。

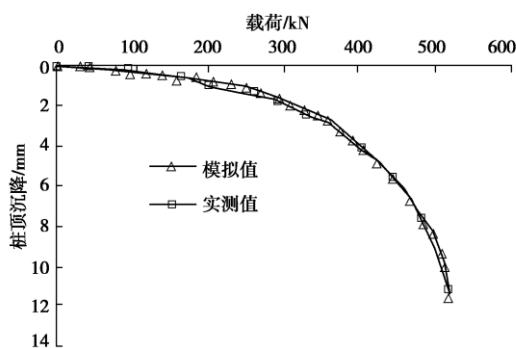


图 9 桩顶沉降曲线

Fig. 9 Settlement curves of pile top

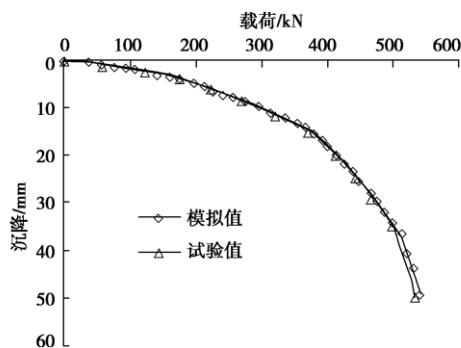


图 10 桩间土沉降曲线

Fig. 10 Settlement curves of soil between piles

5 结 论

随着 CAE 仿真技术的发展,有限元的数值计算已成为土木工程领域分析的重要手段。通过夯实水泥土桩复合地基数值计算与现场载荷试验的比较分析,两者桩身与桩间土承担应力曲线和沉降曲线基本吻合,仅在初始阶段有较小差异,说明只要准确获取土体力学参数,选用合适的土体本构模型,利用增量加载的数值计算方法,有限元数值计算结果是可靠的,可以准确地获取夯实水泥土桩复合地基与现场载荷试验相一致的计算结果。

参考文献:

- [1] 马时冬. 水泥搅拌桩复合地基桩土应力比测试研究[J]. 土木工程学报, 2002, 35(2): 48 - 51. (MA Shi-dong. Test on pile-soil stress ratio of composite foundation with cement-soil pile[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(2): 48 - 51. (in Chinese))
- [2] 徐超, 叶观宝. 水泥土搅拌桩复合地基的变形特性与承载力[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(5): 600 - 603. (XU Chao, YE Guan-bao. Deformation and bearing capacity of composite foundation with cement-soil mixed piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(5): 600 - 603. (in Chinese))
- [3] 林彤. 粉喷桩加固软基的试验研究[J]. 岩土力学, 2000, 21(2): 134 - 137. (LIN Tong. An experimental study on DJM piles improving soft foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(2): 134 - 137. (in Chinese))
- [4] 张凤文, 周洪彬. 强夯置换碎石桩复合地基承载力的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 522 - 525. (ZHANG Feng-wen, ZHOU Hong-bin. Testing study on the dynamically formed stone column compound foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(4): 522 - 525. (in Chinese))
- [5] 徐辉, 杨为民, 司海宝. 夯实水泥土桩复合地基承载和变形特性的试验研究[J]. 安徽建筑工业学院学报, 2006(2): 7 - 10. (XU Hui, YANG Wei-min, SI Hai-bao. Test study on loading-bearing and deformation characteristic of rammed soil-cement pile composite foundation[J]. Journal of Anhui Institute of Architecture & Industry, 2006(2): 7 - 10. (in Chinese))
- [6] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 第二版. 北京: 中国水利水电出版社, 1996: 387 - 395. (QIAN Jia-huan, YIN Zong-ze. Principle and calculation of geotechnical engineering[M]. 2nd ed. Beijing: China Water Power Press, 1996: 387 - 395. (in Chinese))
- [7] 郑颖人, 沈珠江, 龚晓南. 岩土塑性力学原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. (ZHENG Yin-ren, SHEN Zhu-jiang, GONG Xiao-nan. Then principles of geotechnical plastic mechanics[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002. (in Chinese))
- [8] 王勣成. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001. (WANG Xu-cheng, SHAO Ming. The basic theory and numerical method of FEM[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001. (in Chinese))
- [9] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 第二版. 北京: 中国水利水电出版社, 1998. (ZHU Bo-fang. The finite element method theory and application[M]. 2nd ed. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 1998. (in Chinese))
- [10] 郑楚键, 唐晓松, 郑颖人, 等. 载荷试验有限元数值模拟[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊): 249 - 253. (DENG Chu-jian, TANG Xiao-song, ZHENG Yin-ren, et al. Numerical analysis of the plate loading test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(S0): 249 - 253. (in Chinese))
- [11] 沈珠江. 考虑剪胀性的土和石料的非线性应力应变模式[J]. 水利水运科学研究, 1986(4): 1 - 14. (SHEN Zhu-jiang. A nonlinear dilatant stress-strain mode for soil and rock materials[J]. Hydro-science and Engineering, 1986(4): 1 - 14. (in Chinese))
- [12] 司海宝, 化西婷. 南水模型在 ABAQUS 中的实现及应用[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 2(1): 52 - 56. (SI Hai-bao, HUA Xi-ting. Development of NHRI constitutive model in ABAQUS and application in engineering[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science Technology, 2010, 2(1): 52 - 56. (in Chinese))