Vol. 26 No. 1 Feb. , 2015

DOI:10.11705/j. issn. 1672 - 643X. 2015. 01. 039

基于 ABAQUS 的边坡降雨入渗边界的开发及其验证

李宁1,2,许建聪2

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘 要:为了克服 ABAQUS 在进行降雨入渗模拟方面的局限性,采用 Python 语言对 ABAQUS 软件的降雨入渗边界进行二次开发,将降雨边界作为不定边界,采用迭代算法对降雨入渗边界进行处理,开发出基于 ABAQUS 软件的降雨模块。该模块可以根据降雨强度与土壤入渗能力之间的关系,即时改变降雨边界条件,从而准确的反映降雨过程中降雨边界的动态变化过程,这克服了 ABAQUS 软件中只能模拟降雨全部入渗,入渗率保持不变的单一情况,完善了 ABAQUS 软件的降雨入渗分析功能。结果表明:开发出的降雨模块是稳定可靠的,可以用于边坡降雨入渗的分析;同时,借助于 ABAQUS 的强大功能,该模块可以为以后进行更复杂的降雨相关问题的研究提供一个良好的研究平台。

关键词:边坡;降雨入渗;饱和-非饱和渗流;入渗边界;动态过程;ABAQUS

中图分类号:TV121.1 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2015)01-0197-06

Development and verification of boundary of slope rainfall infiltration based on ABAQUS

LI Ning^{1,2}, XU Jiancong²

School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
 Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to overcome the limitation of ABAQUS in simulation of rainfall infiltration, the paper used Python language to develop the rainfall infiltration boundary of ABAQUS software secondary. It considered the rainfall boundary as an uncertain boundary, used the iterative algorithm to treat the boundary, and developed rainfall modulus. The modulus can change instantaneously rainfall boundary conditions according to the relation between rainfall intensity and infiltration capacity of soil, and thereby reflects the dynamic changing process of the boundary condition in rainfall process, and overcomes the unchanged infiltration rate adopted in ABAQUS, thus improves the analysis function of rainfall infiltration by use of ABAQUS. The results show that the developed rainfall modulus is reasonable can be used in analysis of slope rainfall infiltration; meanwhile, by the aid of the powerful feature of ABAQUS, this modulus can provide a good research platform for more complicated rainfall problems in the future.

Key words: slope; rainfall infiltration; saturated – unsaturated seepage; rainfall infiltration boundary; dynamic changing process; ABAQUS

1 研究背景

斜坡失稳产生的滑坡已成为与地震和火山相并列的全球性三大地质灾害之一,其危害已成为仅次于地震的第二大自然灾害^[1]。大量的滑坡实例表明,降雨尤其是暴雨是触发滑坡的主要诱因。长期以来,国内外学者针对降雨作用下边坡稳定性问题

开展了大量的研究工作:海龙等^[2]采用 Geostudio 软件对降雨强度和降雨持时对边坡稳定性的影响进行了研究;付宏渊等^[3]采用 Geostudio 软件进行降雨作用下软岩边坡渗流场计算,然后将水压计算结果导入 FLAC^{3D}中,对软岩边坡稳定性进行了分析;唐栋等^[4]采用 Geostudio 软件,研究了前期降雨对不同土体边坡稳定性的影响;戚国庆等^[5]采用自编程序对

岩质边坡降雨入渗过程进行了数值模拟;Cai Fei^[6] 通过自编程序研究了降雨对边坡稳定性的影响。当采用 Geostudio 进行计算时,往往不考虑土体的变形,因此不能考虑降雨过程中非饱和土的流固耦合效应,且该软件主要是针对二维计算,无法反映边坡的三维特性。而自编程序,则由于其计算程序编制的复杂性以及运用的针对性较强,所以难得到广泛的推广应用。近年来,许多学者采用 ABAQUS 软件进行降雨边坡的研究工作。

ABAQUS 软件是一套功能强大的工程模拟有限元软件,其提供的材料模型库能较好的模拟土体与岩石等地质材料的性能,可以灵活地建立初始应力状态,并具备处理填土或开挖等岩土工程中特定问题的能力,对岩土工程有很强的适用性。同时还提供了位移 – 孔压耦合单元,可以方便的进行三维非饱和土流固耦合计算,因此被越来越多的科研人员用以降雨边坡的研究工作:徐晗等[7]采用 ABAQUS软件进行降雨人渗下非饱和土边坡渗流场与应力场耦合的数值模拟,得到了非饱和土边坡变形与应力的若干重要规律;崔亮等[8]基于 ABAQUS 软件对降雨条件下土坡稳定性进行了数值模拟。

但采用 ABAQUS 进行计算时,只能将降雨边界作为流量边界来处理,这在降雨强度小于土体饱和渗透系数时是合适的;但当降雨强度大于饱和渗透系数时,初始时刻降雨强度小于土壤人渗能力,坡面为流量边界条件,当降雨持续一段时间以后,降雨强度将大于土壤人渗能力,此时坡面将出现积水或径流,坡面变为水头边界条件[9-10],ABAQUS 提供的降雨边界并不能反映这种降雨边界的动态变化过程。因此,章正等[11]中指出:"ABAQUS 在模拟边坡降雨入渗问题时,对于从本质上反映降雨入渗过程与行为的降雨入渗边界条件还未有较为科学、全面的处理方法,所模拟的情况还很单一,即地表径流不会发生,降雨将全部入渗,水的入渗率保持不变的情况,回避了降雨入渗的复杂性。所以,目前 ABAQUS 在边坡降雨入渗模拟方面的应用有一定的局限性"。

为了克服 ABAQUS 在进行降雨入渗模拟方面的局限性,更加有效的利用 ABAQUS 软件进行降雨边坡的研究工作,本文采用 Python 语言对 ABAQUS 软件的降雨入渗边界进行二次开发,将降雨边界作为不定边界,采用迭代算法对降雨入渗边界进行处理,开发出基于 ABAQUS 软件的降雨模块。该模块可以根据降雨强度与土壤入渗能力之间的关系,即时改变降雨边界条件,从而准确的反映降雨过程中

降雨边界的动态变化过程,同时还可以方便的利用 ABAQUS 软件中已有的降雨入渗功能,进行三维非 饱和土边坡流固耦合计算。最后,通过与文献[6] 的边坡降雨入渗结果进行比较,对本文二次开发的 可行性进行了验证。

2 降雨人渗边界的处理

人们通常根据降雨强度与土体饱和渗透系数及 土体入渗能力之间的关系,将降雨入渗分为3种不 同情况^[12]:

情况 A:降雨强度小于土体饱和渗透系数($p < k_s$)。这种情况下雨水将全部入渗,不会出现径流。这种情况对应于图 1 中的 A 线。

情况 B:降雨强度大于土体饱和渗透系数而小于土体入渗能力($k_s)。在这个阶段,雨水将全部入渗,未出现径流。图 1 中 BC 线中的线 B对应于该阶段。$

情况 C:降雨强度大于土体饱和渗透系数且大于土体入渗能力($k_s < f_p \le p$)。在这个阶段,由于降雨强度超出了土体入渗能力,所以将产生径流。图 1 中 BC 线中的线 C 对应于该阶段,其中线 D 代表土体入渗能力曲线。

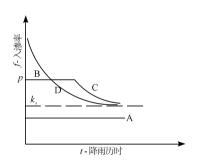


图 1 降雨条件下不同入渗情况

从图 1 可以看出,降雨入渗的过程十分复杂,入 渗边界条件是根据降雨强度与土体入渗能力的相对 关系来确定的,而土体入渗能力又随着降雨时间而不 断发生变化,因此入渗边界条件事先很难精确确定。

关于降雨入渗边界的处理很多学者都提出了各自的解决方法:高润德等^[13]将入渗边界作为流量已知边界,直接将降雨强度作为边界入渗率;吴宏伟等^[14]假定70%的入渗量作为土体的入渗率;李兆平等^[15]根据降雨强度与饱和渗透系数的关系来确定入渗率,当降雨强度小于土体饱和渗透系数时,降雨全部入渗,入渗边界为流量已知边界,当地表的渗透系数等于土体的饱和渗透系数时,入渗边界转换为水头已知边界。朱伟等^[9]结合陈学东^[16]的降雨

入渗试验,指出实际入渗边界是在流量边界与水头 边界间不断变化,在数值模拟时应以积水点的出现 为判断标准,对降雨入渗边界进行转换。

为了更准确的模拟降雨入渗边界,本文将降雨 入渗边界作为不定边界来处理:

(1)未出现径流时(对应于情况 A,B):

当坡面未出现径流时,降雨入渗边界可以作为流量边界来处理:

$$\left[\bar{k} \cdot \overline{\nabla} (h+z) \right] \cdot \bar{n} \mid_{\Gamma} = p \tag{1}$$

式中: \bar{k} 为渗透系数张量; ∇ 为微分算子; h 为压力水头; z 为位置水头; \bar{n} 为坡面的外法线方向向量; p 为坡面上的降雨强度,以流入坡体为正。

此时降雨强度小于土体入渗能力,雨水将全部 入渗,因此降雨边界上各点的压力水头应满足:

$$h \le 0 \tag{2}$$

(2)出现径流时(对应于情况 C):

当坡面出现径流时,可以将降雨边界条件作为 水头边界处理,考虑到坡面倾斜,坡面上的积水能迅 速流走,因此坡面压力水头可取为0,即:

$$h = 0 (3)$$

此时降雨强度大于土体入渗能力,雨水未能全部入渗,因此降雨边界上的流量应满足:

$$\left[\, \bar{k} \cdot \, \overline{\, \, \nabla \,} \left(\, h \, + z \right) \, \right] \cdot \, \stackrel{\cdot}{n} \, |_{\, \Gamma} \, < \, p \tag{4} \right)$$

从公式(1)~(4)可以看出,降雨入渗边界为不 定边界,在每一个计算时步开始时无法精确确定,因 此需要采用迭代算法对其进行求解。其中式(1)可 以作为未出现径流时的定解条件,而式(2)则作为 相应的校核条件;式(3)可以作为出现径流时的定 解条件,而式(4)则作为相应的校核条件。

3 基于 ABAQUS 的降雨人渗边界的 开发

从本文第 2 节中给出的降雨入渗不定边界条件可以看出,定解条件式(1)可以通过 ABAQUS 软件提供的流量边界来实现;定解条件式(3)可以通过 ABAQUS 软件提供的水压边界来实现;校核条件式(2)可以根据水压计算结果进行直接判断。而只有校核条件式(4)不能进行直接判断,因此需要将该式转化为边界上的等效结点流量形式,以便在ABAQUS 中编程实现。

考虑耦合的饱和 – 非饱和渗流连续方程为[17]:

$$C\frac{\partial h}{\partial t} + S_w \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = \overline{\nabla} \cdot \left[\bar{k} \cdot \overline{\nabla} (h + z) \right]$$
 (5)

式中: $C = n \frac{dS_w}{dh}$; $h = \frac{p_w}{\gamma_w}$ 为压力水头; S_w 为饱和度; ε_v 为体积应变;其他符号同前,在此不再赘述。

为了推导便利,将校核条件式(4)改写成如下 形式:

$$\left[\bar{k} \cdot \overline{\nabla} (h+z) \right] \cdot \bar{n} |_{\Gamma} = q$$

下面以一个边界单元为例,推导该单元的等效结点流量;设单元的形函数为 N_i ,并选取权函数等于试函数,将其分别代入式(5)、(6);然后采用加权余量法,可得:

$$\int_{v} N_{i}CN_{j}dV \frac{\partial \{h\}}{\partial t} + \int_{v} N_{i}S_{w}M^{T}[B]dV \frac{\partial \{f\}}{\partial t} + \int_{v} \overline{\nabla} N_{i} \cdot \bar{k} \cdot \overline{\nabla} N_{j}dV \{h\} + \int_{v} \overline{\nabla} N_{i} \cdot \bar{k} \cdot \overline{\nabla} zdV$$

$$= \int N_{i}qds \tag{7}$$

式中: $M^{T} = \{1,1,1,0,0,0\}$; [B] 为应变 – 位移矩阵; $\{f\}$ 为结点位移向量。

式(7) 可进一步写为:

$$[S] \frac{\partial \{h\}}{\partial t} + [K] \frac{\partial \{f\}}{\partial t} + [H] \{h\} + [F]$$

$$= \int_{S} N_{i} q ds$$
(8)

$$\overrightarrow{x} . \ \ | \ [S] = \int_{v} N_{i} C N_{j} \mathrm{d}V; \ [K] = \int_{v} N_{i} S_{w} M^{\mathrm{T}} [B] \mathrm{d}V;$$

$$[H] = \int_{v} \overline{\nabla} N_{i} \cdot \overline{k} \cdot \overline{\nabla} N_{j} \mathrm{d}V; \ [F] = \int_{v} \overline{\nabla} N_{i} \cdot \overline{k} \cdot \overline{\nabla} z \mathrm{d}V_{\circ}$$

将式(8) 两端对时间积分,并采用向后差分法,可得:

$$[S]^{\iota+\Delta\iota}[\{h\}^{\iota+\Delta\iota} - \{h\}^{\iota}] + [K]^{\iota+\Delta\iota}[\{f\}^{\iota+\Delta\iota} - \{f\}^{\iota}] + [H]^{\iota+\Delta\iota}\{h\}^{\iota+\Delta\iota}\Delta t + [F]^{\iota+\Delta\iota}\Delta t = \int_{s} N_{i}q ds$$

$$(9)$$

将式(6) 与式(9) 相结合,可得:

$$[S]^{\iota+\Delta\iota}[\{h\}^{\iota+\Delta\iota} - \{h\}^{\iota}] + [K]^{\iota+\Delta\iota}[\{f\}^{\iota+\Delta\iota} - \{h\}^{\iota}] + [K]^{\iota+\Delta\iota}[\{f\}^{\iota+\Delta\iota}] + [K]^{\iota+\Delta\iota}[\{f]^{\iota+\Delta\iota}] + [K]^{\iota+\Delta\iota}[\{f]^{\iota+\Delta\iota}] + [K]^{\iota+\Delta\iota}[\{f]^{\iota+\Delta\iota}] + [K]^{\iota+\Delta\iota}[\{f]^{\iota+\Delta\iota}[K] + [K]^{\iota+\Delta\iota}[K] + [K]^{\iota+\Delta\iota}[K] + [K]^{\iota+\Delta\iota}[K] + [K]^{\iota+\Delta\iota}[K] + [K]^{\iota+\Delta\iota}[K] + [K]^{\iota+\Delta\iota}[K] + [$$

$$\{f\}^{\iota}$$
 + $[H]^{\iota+\Delta\iota}\{h\}^{\iota+\Delta\iota}\Delta t + [F]^{\iota+\Delta\iota}\Delta t < \int_{s} N_{i}p\mathrm{d}s$ (10)

式(10)的左边表示单元内部形成的等效结点流量,右边表示降雨强度 p 形成的等效结点流量,该式可通过每一时间步水压与位移的计算结果编程进行判断。

为了后续描述方便,设:

$$Q = [S]^{\iota+\Delta\iota}[\{h\}^{\iota+\Delta\iota} - \{h\}^{\iota}] + [K]^{\iota+\Delta\iota}[\{f\}^{\iota+\Delta\iota} - \{f\}^{\iota}] + [H]^{\iota+\Delta\iota}\{h\}^{\iota+\Delta\iota}\Delta t + [F]^{\iota+\Delta\iota}\Delta t - \int_{s} N_{i}p\mathrm{d}s$$
 则式(10) 可进一步表示为:

$$Q < 0 \tag{11}$$

以上公式推导是针对一个边界单元,如果某一边 界结点对应于多个边界单元,则该结点的等效结点流 量等于各边界单元在该点等效结点流量的叠加。

至此,本文第2节中提出的降雨入渗边界的定解条件及校核条件都可以在 ABAQUS 软件中实现。然后采用 Python 语言对 ABAQUS 软件进行二次开发,其具体实施过程如下:

- (1)首先在初始时步,将降雨入渗边界作为流量已知边界(即降雨强度),对于其他时步,则以时步初的实际降雨入渗边界作为迭代的初始边界。然后采用 ABAQUS 进行计算,求得相应的渗流场及位移场分布。
- (2)对于降雨入渗边界为流量边界的单元,检查各单元入渗边界上结点的压力水头,若h>0,则将这些结点修改为水头边界条件,反之则无需修改;对于降雨入渗边界为水头边界的单元,检查各单元入渗边界上结点的等效结点流量,若Q>0(Q以流出坡体为负,流入坡体为正),则将其修改为流量边界条件(即降雨强度P),反之则无需修改。
- (3)根据第(2)步中的边界条件,再采用ABAQUS进行计算,求得渗流场及位移场的分布。重复第(2)步,直到前后两次计算的降雨入渗边界完全一致,则结束迭代,进行下一时间步的计算。

4 实例验证

Cai Fei 等^[6]通过自编程序,实现了降雨边界的 动态变化过程,并对边坡降雨入渗进行了研究;因此,选取文献[6]中的匀质土坡作为算例,利用本文第 3 节中开发出的基于 ABAQUS 的降雨模块对该算例边坡在降雨条件下的渗流情况进行分析,然后与文献中的计算结果进行比较,从而对本文第 3 节中二次开发的正确性进行验证。

4.1 计算模型及条件

匀质土坡的坡高为 10 m,坡高比为 1: 1.5,其 具体几何模型尺寸及有限元模型网格划分如图 2 所 示,其中初始地下水位水平且与 IH 面等高,初始时刻地表的相对饱和度 $S_e=0.720$,并随着坡高线性变化到地下水位处。JE、EF 边界为不透水边界,IJ、IH 为水头边界,GH、GF 为降雨入渗边界,施加的降雨强度为 10 mm/h,持续 72 h。 土体材料参数按文献[6]中的 USS 选取,具体见表 1。

文献[6]采用自编程序进行降雨入渗的计算, 选取的单元为三结点和四结点的孔压单元。而 ABAQUS 中没有单独的孔压单元,这里选用位移 - 孔压耦合单元,然后通过约束所有的节点位移来模拟孔压单元^[18]。由于 ABAQUS 中未提供三结点位移 - 孔压耦合单元,因此土体均采用四结点位移 - 孔压耦合单元来模拟,这一点与文献[6]稍有差别,其他条件均与文献[6]相同。

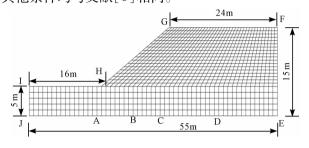


图 2 有限元网格图

表 1 土体材料参数(VG 模型参数)

$ heta_r$	$ heta_s$	α/m^{-1}	n	k_s / (cm • s ⁻¹)
0.049	0.304	7.087	1.810	18.292×10^{-4}

4.2 不同降雨时间下的水压力比较

文献[6]中只给出了降雨 24h 及 72h 后的压力 水头分布图,因此本节选取这两个时间点,将本文及 文献[6]的计算结果进行比较。

图 3 是文献[6]中通过自编程序得到的降雨 24 h 后边坡内压力水头的分布图;图 4 是本文得到的降雨 24 h 后边坡内的水压力分布图,为了准确的显示浸润线,图 4 中的非饱和区水压分布未予显示。由图可以看出,本文得到的浸润线及水压分布形式与文献[6]是一致的。

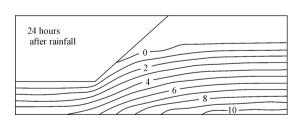


图 3 降雨 24 h 后边坡内压力水头分布图(文献[6])

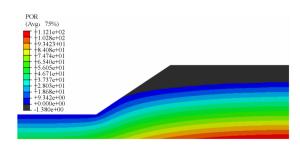


图 4 降雨 24 h 后边坡内水压力分布图(本文)

然后进一步对降雨 24 h 后的水压数值进行比较,分别将本文得到的 A、B、C、D、E 点(见图 2)的

水压力计算结果换算成相应的压力水头,然后与文献[6]中得到的压力水头进行比较,结果见表2。

表 2 降雨 24 h 后各点压力水头比较

点位	压力 カ	相对误差/	
	本文	文献[6]	%
A	5.92	5.87	0.9
В	8.01	7.89	1.5
C	9.51	9.44	0.7
D	10.55	10.38	1.6
E	11.21	11.01	1.8

由表 2 可以看出,本文得到的各点的压力水头与文献[6]得到的压力水头很接近,最大相对误差只有 1.8%。

图 5 是文献[6]中通过自编程序得到的降雨72h后边坡内压力水头的分布图;图 6 是本文得到的降雨72h后边坡内的水压力分布图,为了准确的显示浸润线,图 6 中的非饱和区水压分布未予显示。由图可以看出,本文得到的浸润线及水压分布形式与文献[6]是一致的。

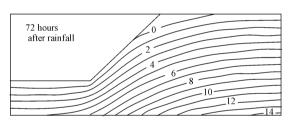


图 5 降雨 72 h 后边坡内压力水头分布图(文献[6])

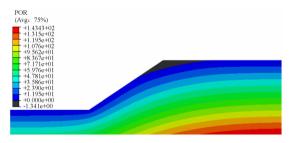


图 6 降雨 72 h 后边坡内水压力分布图(本文)

然后进一步对降雨 72h 后的水压数值进行比较,结果见表3。

表 3 降雨 72 h 后各点压力水头比较

点位	压力。	相对误差/	
	本文	文献[6]	%
A	6.09	6.06	0.5
В	8.95	8.94	0.1
C	11.27	11.19	0.7
D	13.76	13.51	1.9
E	14.34	14.31	0.2

由表 3 可以看出,本文得到的各点的压力水头与文献[6]得到的压力水头很接近,最大相对误差只有 1.9%。

4.3 不同点位处的水压力比较

从 4.2 节的比较可以看出,在任一降雨时间下,各点位中 A 点的压力水头最小,E 点的压力水头最大;因此本节选取 A 点与 E 点,分别对不同降雨时间下本文及文献[6]中的计算结果进行比较。

从表 4、表 5 可以看出,在不同的降雨时间下,本文得到的点位 A、E 的压力水头与文献[6]得到的压力水头基本上是一致的,最大相对误差为 1.4%。

表 4 各降雨时间下的压力水头比较(点 A)

降雨时间/	压力水头/m		相对误差/
h	本文	文献[6]	%
30	5.95	5.87	1.4
40	6.01	6.00	0.2
50	6.05	6.02	0.5
60	6.09	6.05	0.7
70	6.09	6.06	0.5

表 5 各降雨时间下的压力水头比较(点 E)

降雨时间/	压力水头/m		相对误差/
h	本文	文献[6]	%
30	11.79	11.63	1.4
40	13.05	13.01	0.3
50	13.87	13.85	0.1
60	14.27	14. 25	0.1
70	14.34	14.31	0.2

通过以上对比可以看出,本文与文献[6]得到的浸润线是基本一致的,得到的各降雨时间下的水压也是很接近的,最大相对误差均不超过2%。误差产生的原因可能是因为所采用的有限元网格不同,但总体来看,两者的误差并不大。因此,本文基于 ABAQUS 的边坡降雨入渗边界的开发是可行的,可以进行降雨作用下边坡的入渗分析。

5 结 语

(1)采用 Python 语言对 ABAQUS 软件的降雨人 渗边界进行二次开发,将降雨边界作为不定边界,采 用迭代算法对降雨人渗边界进行处理,开发出基于 ABAQUS 软件的降雨模块。该模块克服了 ABAQUS 软件中只能模拟降雨全部人渗,水的人渗率保持不 变的单一情况,可以根据降雨强度与土壤人渗能力 之间的关系,即时改变降雨边界条件,从而准确的反 映降雨过程中降雨边界的动态变化过程,完善了 ABAQUS 软件的降雨入渗分析功能。

- (2)通过与文献[6]的对比分析可以看出,开发出的降雨模块是稳定可靠的,可以用于边坡降雨人渗的分析;与文献[6]中的自编程序相比,开发出的模块可以进一步利用 ABAQUS 提供的位移 孔压单元,进行降雨作用下三维边坡的流固耦合计算。
- (3)该降雨模块是基于 ABAQUS 软件进行的二次开发,便于利用 ABAQUS 软件所提供的各类功能完成更加复杂的研究工作;因此,可以为以后进行与降雨相关的更复杂问题的研究提供一个良好的研究平台。

参考文献:

- [1] Dai F C, Lee C F, Ngai Y Y. Landslide risk assessment and management an overview [J]. Engineering Geology, 2002,64(1):65-87.
- [2] 海 龙,梁 冰. 考虑降雨入渗条件的土体边坡稳定性分析 [J]. 水资源与水工程学报,2010,21(4):46-50.
- [3] 付宏渊,曾 铃,王桂尧,等.降雨入渗条件下软岩边坡稳定性分析[J].岩土力学,2012,33(8):2359-2365.
- [4] 唐 栋,李典庆,周创兵,等. 考虑前期降雨过程的边坡稳定性分析[J]. 岩土力学,2013,34(11):3239 3248.
- [5] 戚国庆,黄润秋,速宝玉,等. 岩质边坡降雨入渗过程的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(4):625-629.
- [6] Cai Fei, Ugai K. Numerical analysis of rainfall effects on slope stability[J]. International Journal of Geomechanics, 2004,4(2):69-78.
- [7] 徐晗,朱以文,蔡元奇,等. 降雨入渗条件下非饱和土边

- 坡稳定分析[J]. 岩土力学,2005,26(12):1957-1962.
- [8] 崔 亮,崔可锐.基于 ABAQUS 对降雨条件下非饱和土坡稳定性的研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2012,35(11):1560-1564.
- [9] 朱 伟,程南军,陈学东,等. 浅谈非饱和渗流的几个基本问题[J]. 岩土工程学报,2006,28(2):235-240.
- [10] Santoso A M, Phoon K K, Quek S T. Effects of soil spatial variability on rainfall induced landslides [J]. Computers & Structures, 2011, 89(11-12):893-900.
- [11] 章 正,张本卓. 应用 ABAQUS 模拟边坡降雨入渗的评价性分析[J]. 中国科技信息,2012(9):80.
- [12] Mein R G, Larson C L. Modeling infiltration during a steady rain[J]. Water Resources Research, 1973,9(2): 384-394.
- [13] 高润德,彭良泉,王钊. 雨水入渗作用下非饱和土边坡的稳定性分析[J]. 人民长江,2001,32(11):25-27.
- [14] 吴宏伟,陈守义,庞宇威. 雨水入渗对非饱和土坡稳定性影响的参数研究[J]. 岩土力学,1999,20(1);2-15.
- [15] 李兆平,张 弥. 考虑降雨入渗影响的非饱和土边坡瞬态 安全系数研究[J]. 土木工程学报,2001,34(5):57-61.
- [16] 陈学东. 浅层非饱和带降雨入渗规律的试验与数值研究[D]. 南京:河海大学,2005
- [17] Kim J M, Parizek R R. Three-dimensional finite element modeling for consolidation due to groundwater withdrawal in a desaturating anisotropic aquifer system [J]. International Journal for Numerical and Analytical methods in Geomechanics, 1999,23(6):549-571.
- [18] 费康,张建伟. ABAQUS 在岩土工程中的应用[M]. 北京;中国水利水电出版社,2010.

(上接第196页)

- [6] 彭志鹏. CFG 桩处理中等压缩性土地基试验研究[J]. 铁道建筑,2009(7):13-18.
- [7] 闫韩生,曹森虎,韩茂蔚. CGF 桩在处理湿陷性黄土地基中的应用研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2008,40(2):218-223.
- [8] 王炳龙,杨龙才,周顺华,等. CFG 桩控制深厚层软土地 基沉降的试验研究[J]. 铁道学报,2006,28(6):112 -116.
- [9] 潘纪顺,刘志伟,姬计法,等. CFG 桩复合地基承载性状的试验研究[J]. 地质与勘探,2001,37(4):92-94.
- [10] 薛新华,魏永幸,杨兴国,等. CFG 桩复合地基室内模型 试验研究[J]. 中国铁道科学,2012,33(2):7-12.

- [11] 韦复才. 桂林红粘土的物质组成及工程地质性质特征 [J]. 江西师范大学学报(自然科学版),2005,29(5): 460-464.
- [12] Singer A. Weathering patterns in representative soils of Guangxi Province, South-east China, as indicated by detailed clay mineralogy [J]. Journal of Soil Scince, 1993, 44(1):173-188.
- [13] Gao Guorui. The distribution and geotechnical properties of loess soils, lateritic soils and clayey soils in China[J]. Engineering Geology, 1996, 42(1):95-104.
- [14] 中国建筑科学研究院. JGJ79 2012 建筑地基处理技术 规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.