

文章编号: 1000 - 7598 - (2006) 05 - 0787 - 05

地层结构对砂土液化影响的有效应力动力分析

孙吉主, 罗新文, 高 晖

(武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 武汉 430070)

摘 要: 根据上海市区典型土层的力学参数, 构造不同地层组合的计算剖面, 利用 Biot 固结理论和亚塑性界面模型的排水有效应力动力分析法, 研究地层结构对砂土液化的影响。分析发现: 上覆土层厚度增加时, 砂土峰值孔压比随之减小; 上覆土层较软时, 砂土峰值剪应力先增加、后减小; 较硬时, 峰值剪应力单调增加。下卧土层越厚, 砂土层的峰值孔压比越小, 峰值剪应力愈大, 总体变化都不大, 但下卧土层较软时, 砂土层的峰值孔压比变化相对明显。

关 键 词: 地层结构; 砂土液化; 有效应力; 亚塑性

中图分类号: TU 441

文献标识码: A

Effects of soil layer construction on liquefaction of sandy soil by means of effective stress analysis method

SUN Ji-zhu, LUO Xin-wen, GAO Hui

(School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Based on the mechanical behaviors of representative soil layer in Shanghai, several computation profiles with different soil layer constructions are built. An effective-stress procedure, in which the bounding surface hypoplasticity model and Biot consolidation formulation are coupled, is used to analyze the effect of soil layer constructions on liquefaction of sandy soil. The results show: the thickness of covering soil layer increases, peak pore pressure ratio of sandy soil decreases; when it is softer, shear stress of sandy soil increases firstly, then decreases; but harder, it increases continuously. The deeper underlying soil layer is, the smaller peak pore pressure ratio and the more shear stress of sandy soil is; both are not obvious. But, if softer, the peak pore pressure ratio of sandy soil changes more sharply.

Key words: soil layer construction; sand liquefaction; effective stress; hypoplasticity

1 引 言

砂土液化是造成场地地震害的首要原因之一, 有关砂土液化的判别方法多达 40 余种, 其中由 Seed 和 Idriss 所倡导的剪应力对比法现已被人们广泛应用^[1, 2]。这些方法都是经验公式, 有其局限性甚至错误的地方^[2], 原因之一是没有综合考虑相邻土层的赋存条件和物理力学性质, 如渗透性、软硬程度、模量非线性等重要因素的影响。事实上, 砂土液化是在地震动作用下, 整个地层系统中砂土单元的动力响应, 与土层结构密切相关, 应进行地震反应分析。

在工程场地土层地震反应分析中, 通常采用的方法是频域等效线性化总应力分析方法^[3], 当基岩

输入的地震动幅值较大时, 会增大其非线性化计算效应, 特别是含有软弱层时。庄迎春等^[4]研究了地层组合对砂土液化的影响, 但采用的也是总应力分析法。本文采用 Biot 动力固结理论, 并结合土的界面亚塑性模型, 用有效应力动力分析法研究土层结构对砂土液化的影响。

2 有效应力动力分析模型

2.1 动力分析方程

在地震荷载作用下, 水平地层的动力反应分析可以作为一维边值问题研究, 根据部分应力、应变分量建立方程即可^[5]。在如图 1 所示坐标系下, 水

平地层受垂直传播的压缩和剪切波作用,假设黏滞阻尼矩阵是对角矩阵,则增量本构方程可表述为

$$\begin{Bmatrix} \Delta\sigma_{13} \\ \Delta\sigma_{33} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{13} \\ d_{31} & d_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -\Delta u_{1,3} \\ -\Delta u_{3,3} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \frac{-\eta_s \partial(\Delta u_{1,3})}{\partial t} \\ \frac{-\eta_c \partial(\Delta u_{3,3})}{\partial t} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

代入 Biot 动力固结方程可得

$$\rho \frac{\partial^2 \Delta u_1}{\partial t^2} - \eta_s \frac{\partial^3 \Delta u_1}{\partial x_3^2 \partial t} - d_{11} \frac{\partial^2 \Delta u_1}{\partial x_3^2} - d_{13} \frac{\partial^2 \Delta u_3}{\partial x_3^2} = 0 \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial^2 \Delta u_3}{\partial t^2} - \eta_c \frac{\partial^3 \Delta u_3}{\partial x_3^2 \partial t} - d_{31} \frac{\partial^2 \Delta u_1}{\partial x_3^2} - d_{33} \frac{\partial^2 \Delta u_3}{\partial x_3^2} + \frac{\partial \Delta p}{\partial x_3} - \rho g = 0 \quad (3)$$

$$\frac{k}{g} \frac{\partial^3 \Delta u_3}{\partial x_3 \partial t^2} + \frac{k}{\rho_w g} \frac{\partial^2 \Delta p}{\partial x_3^2} - \frac{1}{\Gamma} \frac{\partial \Delta p}{\partial t} - \frac{\partial^2 \Delta u_3}{\partial x_3 \partial t} = 0 \quad (4)$$

式中 ρ 为土体密度; ρ_w 为孔隙水的密度; k 为垂直向渗透系数; Γ 为孔隙水压缩系数; g 为重力加速度; p 为孔压; η_s , η_c 分别为剪切和压缩黏滞系数; $u_i (i=1,3)$ 为土骨架位移; $\sigma_{ij} (i=1,3, j=1,3)$ 为土骨架的有效应力分量; $d_{ij} (i=1,3, j=1,3)$ 为弹塑性模量矩阵的元素; 式(1)中的本构关系本文采用亚塑性界面模型^[5], 动力方程组(2)~(4)空间上用基于 Galerkin 加权残数法的有限元离散, 同时采用 Hilber- α 修正的 Newmark- β 法进行时间积分, 假定基岩不透水并为弹性边界, 可以解出每一单元的位移 u_1 , u_3 和孔压 p 。

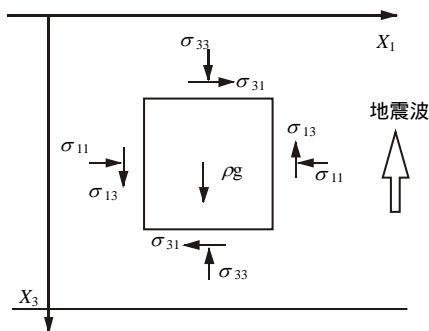


图1 水平地层地震反应计算坐标系

Fig.1 Coordinate system for level ground response analysis

2.2 亚塑性界面模型简介^[5]

在基岩的地震荷载作用下,水平地层的动力反应分析可以作为一维边值问题研究,土的亚塑性界面模型可以简化,根据部分应力、应变分量建立即可^[5]。如图1所示坐标系下,水平地层受垂直传

播的压缩和剪切波作用,土体中的应力、应变状态完全可以用4分量矢量表征,即

$$\begin{Bmatrix} \{\sigma\} \\ \{\varepsilon\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{\sigma_{13}, \sigma_{23}, q^*, p\}^T \\ \{\varepsilon_{13}, \varepsilon_{23}, \varepsilon_q^*, \varepsilon_v\}^T \end{Bmatrix} \quad (5)$$

式中 $q^* = (\sigma_{33} - \sigma_{11})/\sqrt{3}$; $p = (\sigma_{33} + 2\sigma_{11})/3$;

$\varepsilon_q^* = 2(\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11})/\sqrt{3}$; $\varepsilon_v = \varepsilon_{33} + 2\varepsilon_{11}$ 。

定义偏应力比矢量 $\{r\} = \{\sigma_{13}/p, \sigma_{23}/p, q^*/p\}$ 和偏应变矢量 $\{\varepsilon_d\} = \{\varepsilon_{13}, \varepsilon_{23}, \varepsilon_q^*\}$, 简化亚塑性界面模型便是应变增量 $\{d\varepsilon_d\}$ 和 $d\varepsilon_v$ 与应力增量 $\{dr\}$ 和 dp 之间的关系, 将总应变分解为弹性和塑性两部分, 弹性应变增量可表示为

$$\begin{Bmatrix} d\varepsilon_d^e \\ d\varepsilon_v^e \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{1}{G} (p\{dr\} + dp\{r\}) \\ \frac{1}{K} dp \end{Bmatrix} \quad (7)$$

塑性应变增量可由下式计算:

$$\{d\varepsilon_d^p\} = \frac{p\{dr\}^T\{n\}}{H_r}\{n\} + \frac{h(p-p_m)\langle dp \rangle}{H_p}\{r\} \quad (8)$$

$$d\varepsilon_v^p = \frac{p\{dr\}^T\{n\}}{K_r}\{n\} + \frac{h(p-p_m)\langle dp \rangle}{K_p} \quad (9)$$

式中 H_r , K_r 分别为与偏应力比增量有关的塑性剪切和体积模量; H_p , K_p 分别为与平均应力增量相关的塑性体积和剪切模量; n 为由 $\{dr\}$ 引起的塑性偏应变增量方向的单位矢量; p_m 为加载过程中 p 的最大值。阶跃函数 $h(p-p_m)$ 和 Macauley 括号 $\langle \rangle$ 意味只有 $p = p_m$ 和 $dp > 0$ 时, dp 才会引起塑性应变。

3 土层剖面和计算参数

计算剖面由厚度不等的3层饱和土构成,中间为15 m厚的粉细砂层,上、下层分别为黏土或软黏土。参考上海市区覆盖土层的勘察资料和有关研究文献^[5~8],相关土层的物理力学性质如表1,亚塑性模型参数如表2,具体意义及标定方法参见文献^[5]。

表1 计算剖面相关土层的物理参数

Table 1 The constants of all soil layers related to computation profiles

参数	土层编号			
重度/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	17.4	18.2	20.0	19.2
渗透系数/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	3.0×10^{-9}	5.8×10^{-7}	5.8×10^{-7}	1.2×10^{-5}
厚度/m	0~15	1~15	1~15	15

注: 为淤泥质黏土; 为灰色粉质黏土; 为粉质黏土; 为粉细砂。

表 2 各类土层的模型参数
Table 2 The model parameters of all the soil layers

土层	ϕ	G_0	λ	κ	h_t	d	R_p/R_t	k_r	b	h_p
	13.0	75.7	0.005 0	0.004 2	0.763	100.0	1.0	100.0	2.0	35.0
,	24.0	130.0	0.025 1	0.001 5	0.763	100	0.75	1.200	2.0	35.0
	35.0	190.0	0.019	0.001 6	0.294	1.0	0.75	0.40	2.0	35.0

采用 1971 年在 SAN FERNANDO 地震中记录的前 15 s 水平加速度时程曲线为输入地震波,并作一定比例的缩放,使地表最大加速度约为 0.1 g。

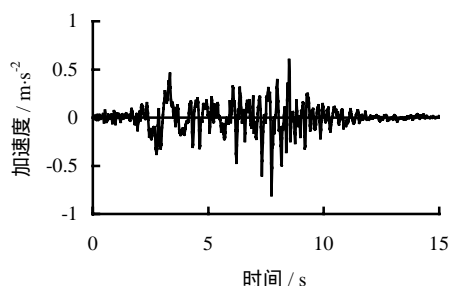
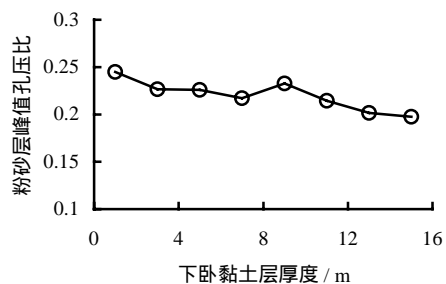
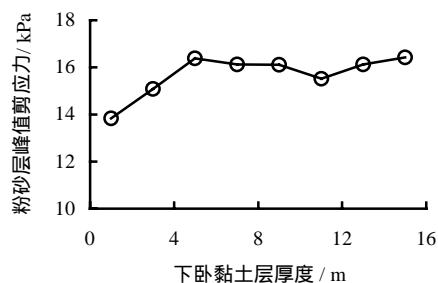


图 2 输入地震动的加速度时程
Fig.2 Input acceleration time history



(a)



(b)

图 3 下卧黏土层厚度对粉砂层峰值孔压比和剪应力的影响
Fig.3 The effect of underlying clay thickness on peak pore pressure ratio and shear stress of sandy layer

4 计算结果及分析

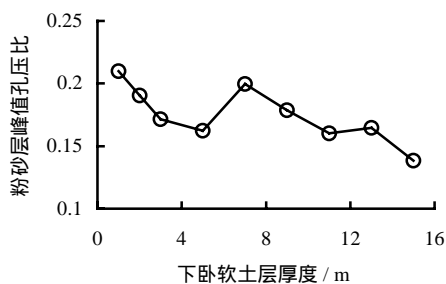
砂土液化较为确切的定义是,饱和松砂在反复荷载作用和其他动荷载作用下,由于孔隙水压力的升高,其抗剪强度丧失的现象^[9]。据此,以下研究地层结构变化对砂土峰值孔压比和剪应力的影响。

4.1 下卧层

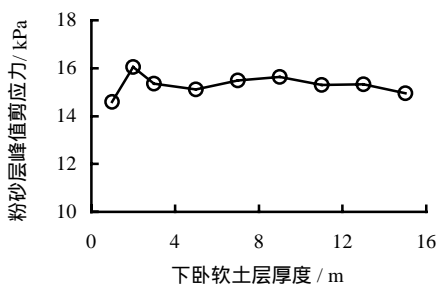
选取上层厚为 15 m 的淤泥质黏土,下卧粉质黏土或淤泥质黏土厚度从 1 ~ 15 m 变化,构成计算剖面,得到粉砂层峰值孔压比和剪应力随下卧土层厚度的变化规律如图 3、图 4 所示。

从图 3 可以看出:下卧黏土层越厚,砂土层的峰值孔压比减小,峰值剪应力愈大,变化趋势相反,但总体变化都不大。这与文献[9]结论相反。原因可能是下卧层厚度增加时,上面砂土愈来愈远离不透水的基岩,其超孔压向下消散的范围就越大,使得孔压不易累积。

图 4 表明,当下卧软弱层厚度增加时,砂土层的峰值孔压比减小(中间有波峰),并且变化明显;峰值剪应力变化不大。厚度超过 5 m 后,二者变化趋势相同。由于与黏土相比,软土的剪切模量较小,不利于动剪应力向上传播,所以传播到砂层的动剪应力较小,同时降低了砂土震动孔压。



(a)



(b)

图 4 下卧软土层厚度对粉砂层峰值孔压比和剪应力的影响
Fig.4 The effect of underlying soft soil thickness on peak pore pressure ratio and shear stress of sand layer

4.2 上覆层

选取下层为厚 15 m 的粉质黏土,上覆淤泥质黏土或粉质黏土厚度从 1~10 m 变化,构成计算剖面,得到粉砂层峰值孔压比和剪应力随上覆土层厚度的变化规律如图 5、图 6 所示。

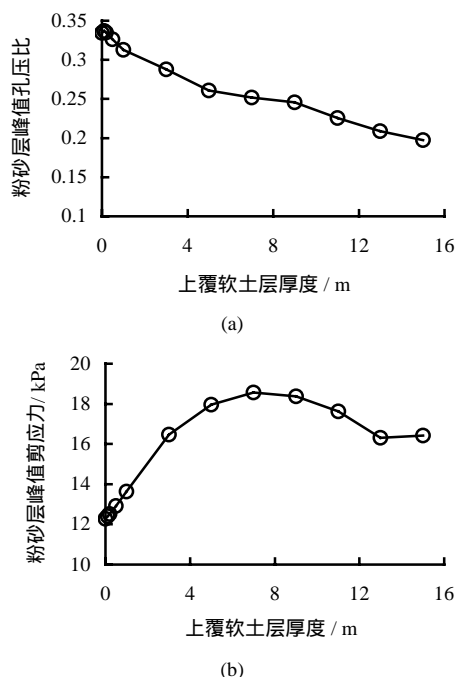


图5 上覆软土层厚度对砂土层峰值孔压比和剪应力的影响
Fig.5 The effect of covering soft soil thickness on peak pore pressure ratio and shear stress of sandy layer

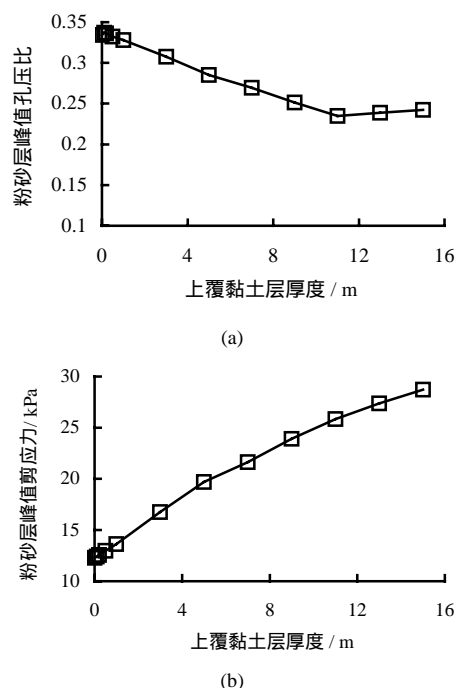


图6 上覆黏土层厚度对砂土层峰值孔压比和剪应力的影响
Fig.6 The effect of covering clay thickness on peak pore pressure ratio and shear stress of sandy layer

从图 5 可以发现,上覆软土层厚度增加时,砂土层峰值孔压比随之减小,这是因为砂土初始有效应力增加了;厚度小于 7 m 时,砂土峰值剪应力增加,但厚度超过 7 m 后,剪应力减小。

图 6 表明,上覆黏土层厚度增加时,砂土层峰值孔压比随之减小,原因与上述相同,这也使得砂土峰值剪应力随黏土厚度单调增加。

值得注意的是:各种液化判别方法都认为,上覆土层厚度(埋深)越大,砂土液化的难度越大,反之亦然。事实上随上覆土层厚度减小,砂土层液化所需聚集的孔隙水压力就越小,液化可能性增加;但另一方面,砂土向地表排水的路径也变短了,动孔压更易消散,难于液化。如图 5、图 6 即使在砂土处于地表时,孔压比峰值仍然小于 1,而且剪应力较小,没有达到液化。

5 结 论

利用有效应力地震反应分析法,研究了土层结构对砂土液化的影响,具体认识如下:

(1)下卧黏土层越厚,砂土层的峰值孔压比越小,峰值剪应力愈大,但总体变化都不大。下卧软弱层厚度增加时,砂土层的峰值孔压比减小(中间有波峰),并且变化明显;峰值剪应力变化不大,厚度超过 5 m 后,二者变化趋势相同。

(2)上覆软土层厚度增加时,砂土层峰值孔压比随之减小,而峰值剪应力先增加、后减小。上覆黏土层厚度增加时,砂土层峰值孔压比随之减小,这也使得砂土峰值剪应力随黏土厚度单调增加。

总体上,不同的地层结构对砂土液化势有很大的影响,但表现出一定的复杂性和多变性,砂土液化与否,需根据具体的土层剖面结构,用有效应力法进行地震反应分析。

参 考 文 献

- [1] 陈国兴, 胡庆兴. 关于砂土液化判别的若干意见[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(1): 141 - 151.
CHEN Guo-xing, HU Qing-xing. Some comments on methodologies for estimating liquefaction of sandy soil[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(1): 141 - 151.
- [2] 刘金稻, 金晓媚. 饱和砂土液化判别方法中问题浅[J]. 工程地质学报, 1992, 8(3): 379 - 384.
LIU Jin-tao, JIN Xiao-mei. Preliminary analysis of the method of discrimination of sandy soil liquefaction[J]. Journal of Engineering Geology, 1992, 8(3): 379 - 384.

加载,其沉降曲线是多个 S 形状曲线的叠加,纵然是有学者对多级加载采用了数学曲线的叠加模拟,由于采用的单个 S 形状模型存在不足^[5],叠加后的预测结果必定无法满足工程需要。由于 Weibull 模型具有较好的适用性,可以考虑采用 Weibull 模型和固结理论相结合的方法对多级加载动态沉降进行模拟,对此需要进一步的研究和探讨。

参考文献

- [1] 河海大学,江苏宁沪高速公路股份有限公司. 交通土建软土地基工程手册[M]. 北京:人民交通出版社,2001.
- [2] 刘玉卓. 公路工程软基处理[M]. 北京:人民交通出版社,2002.
- [3] 宰金珉,梅国雄. 全过程的沉降量预测方法研究[J]. 岩土力学,2000,21(4): 322 - 325.
ZAI Jin-min, MEI Guo-xiong. Forecast method of settlement during complete process of construction and operation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2000, 21(4): 322 - 325.
- [4] 赵明华,刘煜,曹文贵. 软土路基沉降发展规律及其预测[J]. 中南大学学报(自然科学版),2004,35(1): 157 - 161.
ZHAO Ming-hua, LIU Yu, CAO Wen-gui. The developing regularity and forecasting of settlement in soft clay roadbed[J]. **Journal of Central South University (nature science)**, 2004, 35(1): 157 - 161.
- [5] 王志亮,郑明新,吴勇,等. 增加曲线模型在路基沉降预测中的应用研究[J]. 岩土力学,2004,25(6): 901 - 903.
WANG Zhi-liang, ZHENG Ming-xin, WU Yong, et al. Study on application of logistic curve model to settlement prediction of roadbed subjected to multilevel loadings[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(6): 901 - 903.
- [6] 冯震,祝海涛,熊仲华. 泊松曲线预测路基沉降. 华东地质学院学报,2004,(2): 39 - 40.
FENG Zhen, ZHU Hai-tao, XIONG Zhong-hua. Forecasting embankment settlement with poisson model[J]. **Journal of East China Geological Institute**, 2003, (2): 39 - 40.
- [7] 梅国雄,宰金珉,殷宗泽,等. 沉降时间曲线呈“S”型的证明[J]. 岩土力学,2004,25(1): 20 - 22.
MEI Guo-xiong, ZAI Jin-min, YIN Zong-ze, et al. Proof of s-t curve appearing “S” shape based on one dimensional consolidation theory[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(1): 20 - 22.
- [8] Das B M. Advanced soil mechanics[M]. New York: Hemisphere publishing corporation, 1983. 280 - 282.
- [9] 卢廷浩. 土力学[M]. 南京:河海大学出版社,2002.
- [3] 薄景山,李秀领,刘红帅. 土层结构对地表加速度峰值的影响[J]. 地震工程与工程振动,2003,23(3): 35 - 40.
BAO Jin-shan, LI Xiu-ling, LIU Hong-shuai. Effects of soil construction on peak acceralations of ground motion [J]. **Earthauke Engineering and Engineering Vibration**, 2003, 23(3): 35 - 40.
- [4] 庄迎春,谢康和,朱益军,等. 地层组合对砂土液化的影响分析[J]. 岩土力学,2003,24(6): 991 - 996.
ZHUANG Ying-chun, XIE Kang-he, ZHU Yi-jun, et al. Analysis for influence of multi-layered soil stratum on sand liquefaction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(6): 991 - 996.
- [5] Li X S. Reduced-order sand model for ground response analysis[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 1996, 122(9): 872 - 881.
- [6] 蔡宏英,周健. 深厚覆盖软土地层多向地震动力反应分析[J]. 同济大学学报,2000,28(2): 177 - 182.
CAI Hong-ying, ZHOU Jian. Elasto-plastic dynamic response of horizontally layered sites under multidirectional earthquake shaking[J]. **Journal of Tongji University**, 2000, 28(2): 177 - 182.
- [7] 王天龙,胡文尧. 上海覆盖土层的地震反应分析[A]. 高大钊主编. 软土地基理论与实践[C]. 北京:中国建筑工业出版社,1992,55 - 61.
- [8] 黄雨,叶为民,唐益群,等. 上海深厚饱和覆盖土层的动力耦合地震反应分析[J]. 岩土力学,2002,23(4): 411 - 416.
HUANG Yu, YE Wei-min, TANG Yi-qun, et al. Coupled seismic response analysis of deep saturated soil covering layers in Shanghai[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(4): 411 - 416.
- [9] 周健,屠洪权,缪俊发. 地下水位与环境岩土工程[M]. 上海:同济大学出版社,1994.

上接第 790 页