

文章编号: 1000-7598-(2009)01-0226-05

迭代增量法分析地下连续墙的受力性状

冯世进¹, 陈晓霞², 高广运¹, 张建新³

(1. 同济大学 地下建筑与工程系/岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;

2. 安阳工学院, 河南 安阳 455000; 3. 铁道第三勘察设计院, 天津 300142)

摘要: 围护结构的位移是影响土压力的重要因素, 目前深基坑中地下连续墙分析时采用的增量法没有考虑墙体位移对增量荷载的影响。根据墙体位移对增量荷载的影响, 假设在每一步开挖过程中围护墙体位移不变, 由此确定初始增量荷载。根据计算得到的位移, 用迭代法对增量荷载进行修正, 分析地下连续墙的变形和内力。最后, 通过与实测资料的对比, 证实了迭代增量法的合理性。

关键词: 迭代; 增量法; 地下连续墙

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Analysis of underground diaphragm wall by iterative incremental method

FENG Shi-jin¹, CHEN Xiao-xia², GAO Guang-yun¹, ZHANG Jian-xin³

(1. Department of Geotechnical Engineering, Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education,

Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Anyang Institute of Technology, Anyang 455000, China;

3. The Third Railway Survey & Design Institute, Tianjin 300142, China)

Abstract: The displacement of braced structure is the important factor, which affects the earth pressure. Now, in the calculation of underground diaphragm wall in the deep excavation, the effect of displacement is not accounted in the incremental method. In this paper, based on the effect of displacement on the incremental load, on the assumption that the displacement of underground diaphragm wall is invariable in every excavation, then, the initial incremental load is calculated. According to the calculated displacement, the incremental load is modified by the iteration method; the displacement and internal force of underground diaphragm wall are calculated. With the contrast to the results of in-situ measurement, the rationality of the iterative incremental method is demonstrated.

Key words: iterative; incremental method; underground diaphragm wall

1 前言

考虑深基坑地下连续墙施工过程相关性的设计方法主要分为增量法和总量法两种, 这两种方法均适用于整个受力过程中刚度不变的情况, 若有刚度变化时则应考虑采用增量法。采用增量法计算时, 外荷载是从上一阶段施工到现阶段时所产生的荷载增量, 所求得的支护结构的位移与内力相当于前一阶段施工完成后的增量。当墙体刚度不发生变化时, 与前一施工阶段完成后的墙体位移及内力相叠加, 可以计算出当前施工阶段完成后支护结构的实际总位移与总内力^[1-4]。但支护结构的位移是影响土压力的重要因素, 目前深基坑中地下连续墙计算时应

用的增量法没有考虑位移对增量荷载的影响。本文首先对增量法进行理论分析, 提出增量法的理论合理性, 然后根据墙体位移对增量荷载的影响, 假设在每一步开挖过程中围护墙体位移不变, 由此确定初始增量荷载, 根据计算得到的位移, 用迭代法对增量荷载进行修正, 提出具体的计算方法分析地下连续墙的位移和内力。

2 增量法的理论分析

在增量法计算中作用在墙体上的土压力是上一次开挖完成后到当前位置时的土压力增量, 从另外的角度理解, 该土压力增量正是由于基坑开挖侧土体的开挖卸荷所产生的不平衡力, 故也可称其为卸

收稿日期: 2007-05-14

基金项目: 同济大学青年优秀人才培养行动计划资助 (No. 2006KJ044); 上海市晨光计划资助项目 (No. 2007CG23)。

作者简介: 冯世进, 男, 1978 生, 博士, 讲师, 主要从事环境土工、土动力学和桩基工程等方面的研究。E-mail: fsjgly@mail.tongji.edu.cn

荷量。图 1(a)为第 1 步开挖前的初始状态, 墙体没有位移, 作用在墙体两面的土压力为静止土压力, 作用在围护结构上的荷载为 0。图 1(b)为基坑开挖到某个深度时的工况, 先假设开挖时墙体不动, 开挖侧和非开挖侧仍为静止土压力, 开挖侧土压力为 $p_{o\alpha}$, 非开挖侧为 $p_{o\beta}$, 其差值如图 1(c)所示, $\Delta p = p_{o\beta} - p_{o\alpha}$, 即为这一步开挖过程中减少的土压力。但荷载增量不仅局限于土压力增量, 在此次开挖中开挖侧挖去的土体反力和对支撑施加的预应力都为荷载增量。增量法的一般计算模式如图 2 所示^[1-4]。图 2(a)为上次开挖状态, 开挖深度为 h_1 , 图 2(b)为当前开挖状态, 开挖深度为 h_2 。 T^1 为第 1 道支撑力, 在有预应力时 T^1 不为 0。在本次开挖过程中, 荷载增量包括土压力 q_2 、预应力 T^2 和此次开挖过程中挖掉部分的土体所产生的抗力 p_2 , 这些荷载由支撑 (或锚杆) K_{B1} 和被动区开挖面以下土的弹簧 K_{s1}^2 共同承担。将这次增量值代入增量有限元方程中即可得到相应的位移增量, 进一步求出内力增量, 与上次开挖完成后相应的总位移与内力值相叠加, 即可得到此次开挖完成后的实际位移与内力值。以上阐述了增量法的基本计算原理, 下面尝试从理论上揭示增量法能够考虑开挖过程的原因, 并阐述增量法如何模拟开挖过程。图 2(c)为不考虑开挖过程的计算简图, 是 2 次开挖后基坑的受力状态。如果图 2(a)、2(b)所示的 2 次增量计算结果与图 2(c)计算结果相同, 则说明逐次增量计算是不必要的, 如果二者计算结果不同, 可以发现二者所存在的差别, 进而分析产生这种差别的原因及其对计算结果的影响, 下面对两种计算模式进行具体分析^[1]。

由图 2 可以看出, 无论在三角形分布区, 还是在矩形分布区, $q = q_1 + q_2$ 均成立。若分别用 $\{q\}$ 、 $\{q_1\}$ 、 $\{q_2\}$ 表示有限元计算时土压力在节点处的等效荷载向量, 相应地存在假定 $[K_p]$ 为墙体离散后所形成的总刚度矩阵; $[K_{s1}^1]$ 为第 1 次开挖后被动区土体所形成的刚度矩阵; 上标 1 表示工况 1, 下标 s 表示土弹簧, 下标 1 表示开挖后剩下的土弹簧, 下标若是 2 则表示开挖掉的土体弹簧, 以下编号同。 $[K_{s1}^2]$ 为第 2 次开挖后被动区土体所形成的刚度矩阵; $[K_{s2}^2]$ 为第 2 次开挖时挖掉部分的土体在第 1 次开挖计算中所形成的刚度矩阵; $[K_{B1}]$ 为第 1 道支撑所形成的刚度矩阵; $\{x^1\}$ 为第 1 次开挖后墙体产生的位移向量; $\{x^2\}$ 为第 2 次开挖后墙体产生的位移增量; $\{x\}$ 为不考虑开挖过程计算得到的位移向量; $\{T^1\}$ 、 $\{T^2\}$ 分别为第 1、2 次开挖后施加的预应力。则第 1、2 次开挖后和不考虑开挖过程的 3 个状态的

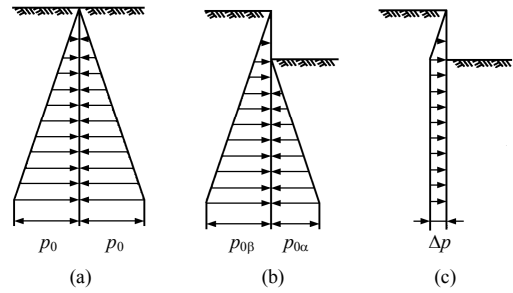


图 1 开始第一步开挖示意图

Fig.1 Sketch figure of the first excavation step

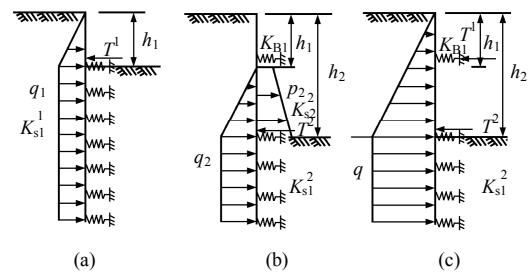


图 2 增量法的一般计算简图

Fig.2 Calculation model of incremental method

有限元计算方程分别为

$$\left. \begin{aligned} ([K_p] + [K_{s1}^1])\{x^1\} &= \{q_1\} + \{T^1\}; \\ ([K_p] + [K_{s1}^2] + [K_{B1}])\{x^2\} &= \{q_2\} + [K_{s2}^2]\{x_1\} + \{T^2\}; \\ ([K_p] + [K_{s1}^2] + [K_{B1}])\{x\} &= \{q\} + \{T^1\} + \{T^2\} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

第 2 步开挖的土弹簧刚度矩阵与剩下的土弹簧刚度矩阵之和应等于第 1 步开挖后剩下的土弹簧刚度矩阵, 即

$$[K_{s1}^1] = [K_{s2}^2] + [K_{s1}^2] \quad (2)$$

将式 (1)、(2) 代入 $q = q_1 + q_2$, 经整理得

$$\begin{aligned} ([K_p] + [K_{s1}^2])\{x^1\} + ([K_p] + [K_{s1}^2] + [K_{B1}])\{x^2\} &= \\ ([K_p] + [K_{s1}^2] + [K_{B1}])\{x\} \end{aligned} \quad (3)$$

式 (3) 左端是考虑各次开挖计算结果的叠加, 右端是不考虑开挖过程时的有限元方程, 为总量法的计算方法。比较两边系数, 如果左边存在 $[K_{B1}]\{x^1\}$, 就可以得到 $\{x^1\} + \{x^2\} = \{x\}$, 并进一步可以得出墙体内力相同的结论, 意味着考虑与不考虑开挖过程计算结果是相同的。但事实上, 式 (3) 左端不会存在 $[K_{B1}]\{x^1\}$ 这一非 0 项, $[K_{B1}]\{x^1\}$ 的含义为在对上次开挖状态进行计算时, 支撑 $[K_{B1}]$ 已经存在并对支护结构发挥了大小为 $[K_{B1}]\{x^1\}$ 的支撑作用。然而, 实际上第 1 道支撑是开挖到 h_1 处才施加上去的, 之前根本不存在, 不可能发挥作用。

因此不难发现, 不考虑开挖过程的计算方法是假定在所有支撑施工前就已经存在了, 如上面所述工况, 在基坑开挖前第 1 道支撑就已经存在了。考虑开挖过程的计算方法即增量法是边开挖边施工支撑, 这是二者的根本区别, 增量法考虑了开挖过程, 与实际工况相符。

3 迭代增量法的计算原理

根据对土压力进行的实测研究^[5], 墙体位移对土压力影响显著, 传统的增量法没有考虑增量位移对增量土压力的影响, 本文假设增量位移对增量荷载的影响为线性的, 如式 (4) 所示。

$$\Delta p_{i+1}^n = \Delta p_i^n \pm \Delta \delta_i^n k_s^n \quad (4)$$

式中: i 为迭代计算的次数, $i = 0, 1, 2, 3, \dots$; $\Delta \delta_i^n$ 为该点第 i 次迭代的增量位移; k_s^n 为该点第 n 工况的土弹簧刚度; Δp_i^n 为该点第 i 次迭代的增量荷载; Δp_{i+1}^n 为该点第 $i+1$ 次迭代的增量荷载。

增量法的关键是如何确定在基坑开挖过程中引起体系内力改变的每一个荷载增量, 通过上述分析, 增量荷载主要包括三部分:

(1) 由于开挖侧土体的开挖卸荷, 开挖侧被动土压力的减小所产生的增量荷载, 也可以认为是非开挖侧主动土压力的增加所致, 本文假设初始的土压力增量 Δp_0^n 为

$$\left. \begin{aligned} \Delta p_0^n &= \gamma(z - h^{n-1})K_0, \quad (h^{n-1} < z < h^n); \\ \Delta p_0^n &= \gamma(h^n - h^{n-1})K_0, \quad (z \geq h^n) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: γ 为土体重度; h^{n-1} 为上一工况基坑开挖深度; h^n 为本次工况开挖深度; K_0 为静止土压力系数; 计算得到初始土压力增量 Δp_0^n 后, 将其转换为节点等效荷载 $\{\Delta p_0^n\}$, 对于杆系有限单元法, 可以直接把非节点荷载转换为等效节点荷载。

(2) 开挖侧土弹簧的消除所产生的增量荷载; 上一工况墙体的位移向量为 $\{\Delta \delta^{n-1}\}$, 由于开挖消除的土弹簧的刚度矩阵为 $[K_{s2}^n]$, 则消除的土弹簧力为

$$\{f^n\} = [K_{s2}^n] \{\Delta \delta^{n-1}\} \quad (6)$$

单个土弹簧计算采用 $K = K_h B l$, 其中 l 为节点上下 2 个梁单元长度一半之和。

(3) 对支撑或锚杆施加的预应力 $\{T^n\}$ 所产生的增量荷载。

除了上述 3 个因素外, 还有其他的一些因素, 如偶然的荷载等, 此处只考虑上述 3 种荷载, 将 $\{\Delta p_0^n\}$ 、 $\{f^n\}$ 、 $\{T^n\}$ 相加即记为本次工况的初始增量荷载 $\{\Delta q_0^n\}$, 即

$$\{\Delta q_0^n\} = \{\Delta p_0^n\} + \{f^n\} + \{T^n\} \quad (7)$$

本文在现有增量法的基础上, 提出迭代增量法, 考虑墙体的位移对增量土压力的影响, 具体计算过程为

①对地下连续墙进行离散, 支撑设置处、土层变化处、各工况开挖面处、楼板设置处作为节点处理, 梁单元划分尽量均匀, 梁单元长度以 1 m 左右为宜。

②计算墙体梁单元刚度矩阵 $[K_p^n]^e$, 由墙体梁单元刚度矩阵合成墙体整体刚度矩阵 $[K_p^n]$ 。计算基坑开挖后剩余的土体弹簧的单元刚度矩阵 $[K_{s1}^n]^e$ 和由于开挖消除的土弹簧单元刚度矩阵 $[K_{s2}^n]^e$, 将其转换为整体刚度矩阵 $[K_{s1}^n]$ 、 $[K_{s2}^n]$ 。计算本次工况开挖后各道支撑的单元刚度矩阵 $[K_b^{n-1}]^e$, 若本次工况架设的支撑施加预应力, 则计算本次工况架设支撑的单元刚度矩阵 $[K_b^n]^e$, 将其转换为整体刚度矩阵 $[K_b^{n-1}]$ 、 $[K_b^n]$, 本次工况施加的支撑在本次计算中并没有发挥作用, 故本次工况结构总刚度矩阵 $[K] = [K_p^n] + [K_{s1}^n] + [K_b^{n-1}]$ 。

③地面超载取 20 kPa, 并入初始工况中作为增量荷载进行计算。根据前述式 (5) 算出初始增量荷载 Δp_0^n , 再将其转化为等效节点荷载 $\{\Delta p_0^n\}$, 根据式 (6) 计算出消除的弹簧力向量 $\{f^n\}$ 、计算出预应力向量 $\{T^n\}$, 最终计算出初始增量荷载 $\{\Delta q_0^n\}$ 。三者相加即得到荷载向量 $\{\Delta q_0^n\}$ 。

④以此初始增量荷载 $\{\Delta q_0^n\}$ 为已知量, 解方程组:

$$[K] \{\Delta \delta_0^n\} = \{\Delta q_0^n\} \quad (8)$$

采用杆系有限元法计算增量荷载引起的增量位移 $\Delta \delta_0^n$ 、增量内力, 利用式 (4) 对增量荷载进行修正, 再以修正后的荷载进行计算。直到修正的增量荷载 Δp_{i+1}^n 与上一次 Δp_i^n 的差异可以忽略不计为止。

⑤迭代中得到的 Δp_i 与上一工况的土压力 P 相加, 其值应介于主动土压力和被动土压力之间; 计算的位移向量与上次结果差的平方和小于某个规定值即止。

⑥ $\{f^n\}$ 为上次工况的增量荷载引起的位移与本次开挖消除的土弹簧整体刚度矩阵相乘得到的等效节点力, 在本次工况的各次迭代计算过程中, 是不变的。若本次工况架设支撑施加预应力; 假设预应力 $\{T^n\}$ 在迭代计算过程中也是不变的。

⑦将第④步计算的最终增量位移、最终增量荷载作为本工况增加的位移、内力叠加到上一工况中,

就得到本次工况的总位移和内力。

4 迭代增量法分析地下连续墙的受力与变形

上海某基坑开挖深度为 12.45 m, 采用 0.6 m 地下连续墙围护结构, 墙深 27.7 m, 墙顶标高 0.0 m, 计算时考虑地面超载 20 kPa。设 3 道混凝土支撑, 分别位于 -1.45、-5.25 m 和 -9.20 m 标高处, 支撑宽 1.0 m、高 0.8 m。土层物理力学指标见表 1。

下面采用迭代增量法分析地下连续墙的受力与变形, 由于本工程设置 3 道支撑, 将整个工程分为 4 步: 第 1 步开挖加第 1 道支撑为第 1 工况, 第 2 步开挖加第 2 道支撑为第 2 工况, 第 3 步开挖加第 3 道支撑为第 3 工况, 第 4 步开挖为第 4 工况。图 3 为第 4 工况时计算的增量位移随着深度的变化曲线, 由图可知, 随着深度增加, 这一步的增量位移逐渐增大, 达到最大开挖深度后, 增量位移逐渐减小, 深度超过 22.5 m 后变化不太大。图 4 为基坑开挖完毕后理论计算的墙体侧向位移沿深度的分布与实测值的对比可以发现, 采用迭代增量法计算的结果与实测值较为接近。

表1 土层物理力学指标

Table 1 Physico-mechanical properties of soils

土层	层底标高 / m	层厚 / m	重度 / (kN/m ³)	φ / (°)	c / kPa
②褐黄色粉质黏土	-1.8	1.8	18.8	13.5	15.0
③淤泥质粉质黏土	-5.8	4.0	17.8	14.8	8.0
④淤泥质粉土	-12.8	7.0	16.9	12.3	6.0
⑤-1 灰色黏土	-16.3	3.5	17.7	15.6	3.5
⑤-2 灰色粉质黏土	-25.3	9.0	18.3	15.0	9.0
⑥暗绿色粉质黏土	-75.3	50.0	20.2	13.0	33.0

图 5(a)为不同工况时采用迭代增量法计算墙体的侧向位移沿深度的变化。由图可以发现, 第 1 工况时计算的最大位移为 5.5 mm, 与总量法计算结果相同, 是由于该工况结构型式没有变化, 迭代增量法的增量荷载和总量法的总量荷载相同, 故计算结果相同。第 2 工况时, 迭代增量法计算的累计最大位移为 16.7 mm。第 3 工况时, 迭代增量法计算的累计最大位移为 30.2 mm。第 4 工况时, 迭代增量法计算的累计最大位移为 34.0 mm, 位于地面以下 8.8 m 处, 墙体最终位移在开挖面以上迭代增量法计算值比总量法和一般增量法计算值要大, 在开挖面以下相反, 这主要是由于迭代增量法考虑了墙体位移的影响, 对土压力进行了修正, 从荷载的角度讲, 相当于一个荷载释放的过程。

图 5(b)为不同工况时采用迭代增量法计算墙体的弯矩沿深度的变化, 可以发现第 1 工况时迭代增量法计算的弯矩值与总量法计算值相同。第 2 工况时迭代增量法的最大负弯矩为 225.9 kN·m, 位于地面以下 3.8 m, 最大正弯矩为 145.2 kN·m, 位于地面以下 11.2 m。第 4 工况时, 迭代增量法计算的最大负弯矩为 716.7 kN·m, 最大正弯矩为 359 kN·m。与总量法计算值比较, 可见总量法计算的墙体弯矩比迭代增量法要大, 这主要是由于采用总量法计算时开挖之前支撑就已经存在了, 使结构整体刚度增大所致。与一般增量法计算值相比较, 迭代增量法计算的墙体弯矩偏小, 这也是由于迭代增量法考虑了墙体位移, 对土压力进行了修正所致。

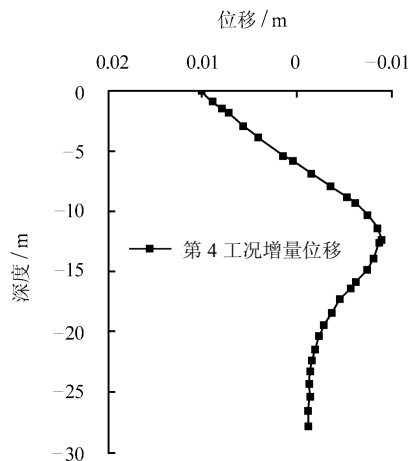


图3 第4工况发生的增量位移

Fig.3 Incremental displacement in the forth excavation step

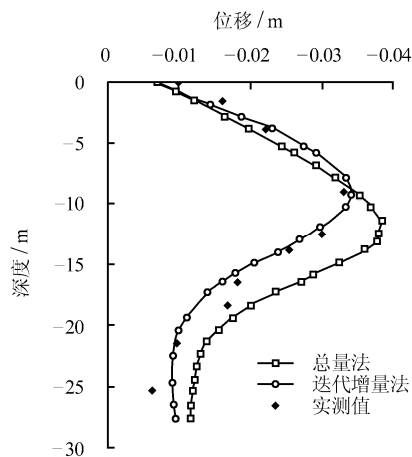


图4 理论计算值与实测值的对比

Fig.4 Comparison of the theoretical calculation results with in situ measurement

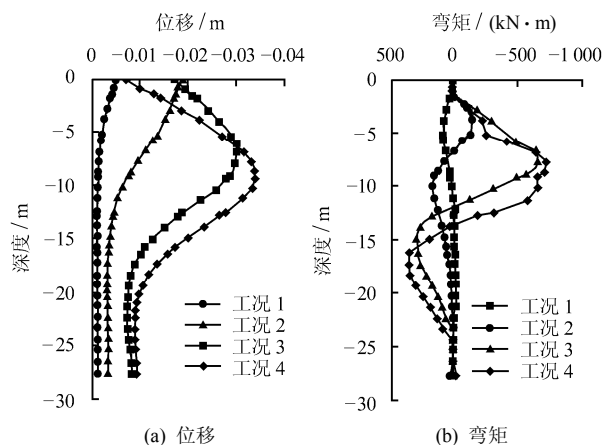


图5 各工况墙体位移和弯矩图

Fig.5 Displacements and moments with depth for different excavation steps by the iterative incremental methods

5 结 论

(1) 在一般增量法的基础上, 提出了迭代增量法, 考虑地下连续墙的位移对增量土压力的影响, 使得计算时的土压力更接近于真实的土压力。

(2) 墙体最终位移在开挖面以上用迭代增量法计算的值比总量法和一般增量法计算值要大, 在开挖面以下相反, 这主要是由于迭代增量法考虑了墙体位移的影响, 对土压力进行了修正。

(3) 总量法计算的墙体弯矩比迭代增量法要大, 这是由于采用总量法时, 开挖之前支撑已经存在, 使得结构整体刚度增大所致。与一般增量法计算值相比较, 迭代增量法计算的墙体弯矩偏小, 这也是由于迭代增量法考虑了墙体位移, 对土压力进行了修正所致。

参 考 文 献

- [1] 武亚军, 栾茂田, 任汉锋. 深基坑支护设计增量法的理论分析及其应用[J]. 工业建筑, 2004, 34(9): 1—4.
WU Ya-jun, LUAN Mao-tian, REN Han-feng. Theoretical analysis and applications of the incremental method for design of deep excavation support[J]. **Industrial Construction**, 2004, 34(9): 1—4.
- [2] 杨光华, 陆培炎. 深基坑开挖中考虑施工过程的多撑或多锚地下连续墙的增量算法[J]. 建筑结构, 1994, (8): 28—47.
YANG Guang-hua, LU Pei-yan. The incremental calculation method for the diaphragm wall with multi-brace or multi-anchor in deep excavation[J]. **Building Structure**, 1994, (8): 28—47.
- [3] 杨光华. 深基坑开挖中预应力锚杆或预应力支撑支护结构的计算分析[J]. 建筑结构, 1996, (4): 9—12.
YANG Guang-hua. The analysis of the retaining structure with prestressed anchor or prestressed brace in deep excavation[J]. **Building Structure**, 1996, (4): 9—12.
- [4] 杨光华. 深基坑支护结构的实用计算方法及其应用[J]. 岩土力学, 2004, 25 (12): 1885—1896.
YANG Guang-hua. Practical calculation method of retaining structures for deep excavations and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(12): 1885—1896.
- [5] 刘国彬, 黄院雄, 侯学渊. 水及土压力的实测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 205—210.
LIU Guo-bin, HUANG Yuan-xiong, HOU Xue-yuan. Discussion on water and earth pressure of supporting structure in soft area[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(2): 205—210.
- [8] 罗谷怀, 罗玉龙, 刘振宇, 等. 洞庭湖区堤内压盖模型渗流有限元优化[J]. 武汉大学学报(工学版), 2007, 40(1): 61—65.
LUO Gu-huai, LUO Yu-long, LIU Zhen-yu, et al. Optimization of model of covering soil layer inside levee for Dongting Lake region by seepage FEM[J]. **Engineering Journal of Wuhan University**, 2007, 40(1): 61—65.
- [9] 毛昶熙, 段祥宝, 李祖贻, 等. 渗流数值计算与程序应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 1999: 61—65.
- [10] 吴梦喜, 张学勤. 有自由面渗流分析的虚单元法[J]. 水利学报, 1994, 24(8): 67—70.
- [11] 胡静, 陈胜宏. 渗流分析中排水孔模拟的空气单元法[J]. 岩土力学, 2004, 24(2): 281—284.
HU Jing, CHENG Sheng-hong. Air element method for modeling drainage holes in seepage analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 24(2): 281—284.
- [12] 刘光跃, 罗谷怀, 余元君, 等. 洞庭湖堤防渗控技术研究[R]. 长沙: 湖南省洞庭湖水利工程管理局, 2005.

上接第225页