

珠江口崖门出海航道骤淤分析

丁 坚, 陶爱峰, 王昌杰

(河海大学物理海洋研究所, 江苏 南京 210098)

摘要 崖门航道位于黄茅海海域, 针对该水域风浪、水流、地形及泥沙特点, 从悬移质不平衡输沙方程出发, 导出估算挖槽回淤的计算公式; 根据实测资料和潮流数值计算决定其中主要参数; 根据 1990 年崖门试挖槽回淤资料确定公式中待定的综合系数。在此基础上估算极端水文条件下不同方案的回淤强度与回淤量, 并进行了相应的分析。结果表明, 崖门出海航道及其所在水域目前基本处于平衡微淤状态; 台风、大潮、大汛同时作用下航道有较大淤积; 西航道在大风浪作用下的回淤比东航道要大得多, 这在航道选线时应予充分考虑。

关键词 航道; 潮流挟沙; 极端水文条件; 不平衡输沙; 泥沙淤积

中图分类号: U612.3

文献标识码: A

文章编号: 1006-764X(2005)06-0041-05

Sudden deposition in Yamen outfall waterway at Zhujiang River Estuary//DING Jian, TAO Ai-feng, WANG Chang-jie
(Institute of Physical Oceanography, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : The Yamen waterway is located in the Huangmao Sea. In consideration of the characteristics of wind waves, water flow, topography, and sediment in this area, formulas for calculation of the sudden deposition in the waterway were derived from the non-equilibrium sediment transport equations for suspended loads, and the main parameters were determined by numerical simulation of tides and field data. Then, the comprehensive coefficient of the formulas was determined based on the sediment deposition data of the Yamen waterway during a trial dredging process in 1990. With the formulas, the intensity and amount of deposition in different schemes under extreme hydrological conditions were evaluated and analyzed. The results show that the water area of the Yamen waterway is in the slight deposition state, that the coaction of typhoons, tides, and winds intensifies the deposition in the waterway, and that the deposition in the west waterway is more serious than that in the east waterway under the action of wind waves, and the factor should be fully considered in route selection.

Key words : waterway; sediment-laden stream; extreme hydrological condition; non-equilibrium sediment transport; sediment deposition

崖门是珠江八大口门最西边的两个河口之一, 黄茅海是崖门口航道所在海域, 位于东经 $113^{\circ}00' \sim 113^{\circ}12'$, 北纬 $21^{\circ}52' \sim 22^{\circ}13'$ 之间, 是一个喇叭状河口湾, 海域面积达 500 多 km^2 , 属于潮流作用优势河口。该海域经常有大风经过, 8 级风的重现期约为 1.7 a, 大风浪作用下, 水体被充分搅动, 含沙量迅速增大, 挖槽将产生较强的悬沙淤积; 巨浪也可能使海床底部产生推移质运动, 引起相应的底床淤积, 但对水深不是太小的航道, 推移质输沙量相对较少。大风浪持续作用的时间一般不长, 但它造成的淤积却不容忽视。本文从悬移质不平衡输沙方程出发, 导出估算挖槽回淤的计算公式, 根据实测资料和潮流数值计算决定其中主要参数; 由 1990 年崖门试挖槽回淤资料率定公式中待定的综合系数, 在此基础上估算

大风浪、台风大潮同时发生及台风大潮大汛同时发生等 3 种极端水文条件下不同方案的回淤强度与回淤量, 并进行了相应的分析。

1 设计方案回淤计算分段及泥沙组成

1.1 航道设计方案与回淤计算分段

崖门出海航道平面布置与航道中心线控制点坐标见图 1。东、西航道的设计尺度如下: 设计水深分别为 5.5 m、6.5 m、7.5 m、7.7 m、7.9 m 和 8.1 m; 单线航道设计底宽分别为 80 m, 双线航道为 160 m; 设计挖槽边坡为 1:8。崖门航道设计航槽范围内各处水深、泥沙组成及水流动力条件等要素均有变化, 根据航槽水深沿程变化并结合其平面转折情况, 将航槽概化为阶梯形变化的 E1—E14, W1—W4 共 18 个计

算段,如图 1 所示。

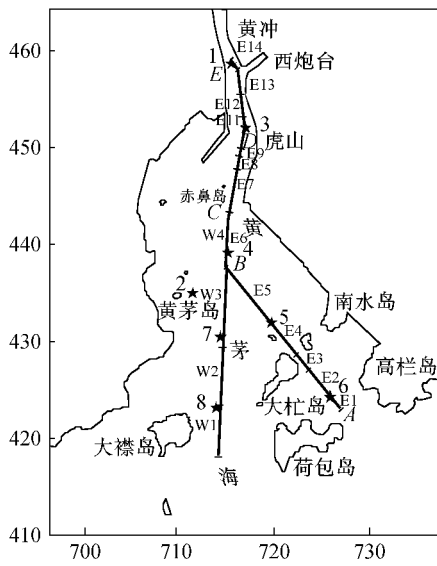


图 1 崖门航道平面布置示意图(单位:km)

1.2 泥沙来源及其组成分析

径流挟带的泥沙是黄茅海海域主要的泥沙来源。径流挟沙向海域下泄的同时向两侧边滩扩散并沉积。边滩淤积的泥沙在潮流、风浪等动力作用下又可能再悬浮,影响航道。潮流挟带泥沙在海域内往复搬运,其中也将部分泥沙自外海携入海域。

2003 年 4 月在东西航道沿线以及黄茅岛东侧设 8 条垂线,实测大、小潮水文泥沙资料^①,垂线位置见图 1。各测流垂线处床沙除 4 号垂线外,各处床沙组成都很细。1990 年 9 月进行了试挖槽,其后 1 年的观测表明,挖槽内新淤积物很细,中值粒径 D_{50} 仅在 0.005mm 左右。因此,可以认为一般风浪条件下对挖槽回淤起作用的主要是潮流往复搬运的悬移质,但大风情况下可能有较大波浪产生,则有可能导致海床骤淤。

1.3 含沙量与水流要素的关系

大风浪引起的海床骤淤,本质上是搏浪掀沙、增大潮流水体含沙量,而潮流挟沙能力不足造成的悬沙落淤。根据 2003 年 6 月大、小潮期间现场潮流、泥沙测验资料^①,由各测站的流速、含沙量求得垂线平均值,然后对有关的实测资料进行分析整理,并注意风浪与潮流共同作用后,流速将增大,流向也有变化,可得

$$S = k \frac{V^2}{gh} \quad (1)$$

或

$$S = \beta \rho_s \frac{V^2}{gh} \quad (2)$$

式中: S 为含沙量, kg/m^3 ; $\frac{V^2}{gh}$ 表示水流条件, h 为垂

线水深, m ; g 为重力加速度, m/s^2 ; k 为相关关系的比例因子, kg/m^3 ; β 为无因次系数; ρ_s 为泥沙颗粒密度,取 $2650 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。根据统计结果,一般条件下,在回淤计算中对 1 号垂线及其附近 E12—E14 计算段取 $\beta = 0.01284$,其他各计算段取 $\beta = 0.00611$;大风情况下,根据 1991 年试挖槽经历 12 级台风作用两昼夜的动力条件及之后回淤情况,对 β 进行率定。一般条件下 V 为垂线平均流速, m/s ,考虑风浪与潮流的共同作用后,对 V 作如下相应修正^[1]:

$$V = |V_W| + |V_{bt}| \quad (3)$$

$$V_{bt} = V_b + V_t \quad (4)$$

$$V_b = 0.02w \quad (5)$$

$$V_W = 0.2 \frac{H}{h} C \quad (6)$$

式中: V_W 为波浪水质点的平均水平速度, m/s ; V_{bt} 为潮流和风吹流的合成流速, m/s ; V_b 为风吹流的垂线平均流速, m/s ; V_t 为潮流的垂线平均流速, m/s ; w 为风速, m/s ; H 为波高, m ; C 为波速, m/s ; h 为垂线水深, m 。

2 悬移质淤积

2.1 基本方程与计算公式

由现场取样资料及不平衡输沙方程,泥沙单宽运动方程可写为^[2]

$$\frac{\partial(qS)}{\partial x} + \alpha\omega(S - S_*) = 0 \quad (7)$$

式中: q 为单宽流量, m^2/s ; ω 为悬移质泥沙的沉速, m/s ; S_* 为水流挟沙力, kg/m^3 ; α 为泥沙沉降概率; x 为沿流向的坐标, m 。

另一方面,海床变形方程为

$$\frac{\partial(qS)}{\partial x} + \rho_0 \frac{\partial z_0}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

式中: ρ_0 为淤积泥沙干密度; z_0 为床面高程, m ; t 为时间坐标, s 。

将式(7)和(8)相减,可得

$$\frac{\partial z_0}{\partial t} = \frac{\alpha\omega}{\rho_0}(S - S_*) \quad (9)$$

其差分形式为

$$\Delta z_0 = \frac{\alpha\omega\Delta t}{\rho_0}(S - S_*) \quad (10)$$

式中: Δt 为冲淤时段, s ; Δz_0 为相应的冲淤厚度, m 。

以下标“1”和“2”分别表示挖槽前后,并以淤积为正、冲刷为负,则由式(10)可得

$$\Delta z_{01} = \frac{\alpha\omega\Delta t}{\rho_0}(S_1 - S_{*1})$$

①上海航道勘察设计研究院.崖门 5000 吨级出海航道整治工程水文测验技术报告,2003。

$$\Delta z_{02} = \frac{\alpha \omega \Delta t}{\rho_0} (S_2 - S_{*2})$$

挖槽工程实施后由悬沙落淤产生的淤积强度 P 为

$$P = \Delta z_{02} - \Delta z_{01} = \frac{\alpha \omega \Delta t}{\rho_0} (S_{*1} - S_{*2} + S_2 - S_1) \quad (11)$$

由于挖槽不会改变当地的泥沙条件,设工程前后来沙量不变,即 $S_1 = S_2$,故有

$$P = \frac{\alpha \omega S_{*1}}{\rho_0} \left(1 - \frac{S_{*2}}{S_{*1}} \right) \Delta t \quad (12)$$

将式(1)泥沙关系中的 S 作为具有水流挟沙力 S_* 含义的含沙量,并代入式(12)得挖槽回淤的计算公式

$$P = \frac{K \omega}{\rho_0} S_{*1} \left[1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2 \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \right] \Delta t \quad (13)$$

式中: P 为航道底面的淤积强度, m ; ω 为细颗粒泥沙的絮凝沉降速度, m/s ; ρ_0 为淤积物的干密度, kg/m^3 ; S_{*1} 为工程前水流挟沙力,也就是为该段海域的饱和含沙量, kg/m^3 ,可根据各计算段所在的位置由式(2)确定,水流要素由流场数值计算^[3~6]提供; V 为垂线平均流速, m/s ; h 为平均潮位下的相应水深, m ; Δt 为淤积历时, s ; K 为综合待定系数,与泥沙沉降率 α 有关, K 值应根据实测资料率定而得,它与按式(2)推算的水流挟沙力与实际情况可能存在的差异等因素有关,其余符号含义同前。

2.2 有关参数的确定

崖门出海航道所在海域的水体有一定的盐度,应考虑细颗粒泥沙的絮凝作用。其絮凝沉速 ω 大致为 $0.0004 \sim 0.0006 m/s^{[2]}$,取 $\omega = 0.0005 m/s$ 。淤积泥沙干密度 ρ_0 可按式推求^[1]:

$$\rho_0 = 1750 D_{50}^{0.183} \quad (14)$$

式(14)中, D_{50} 为淤积物的中值粒径, mm 。式(13)中,挖槽内外流速由流场数值计算确定。

2.3 验证计算

1990年9月崖门出海航道曾在黄茅海浅滩进行了试挖槽。该挖槽起于图1中B点的东南,大致沿BA方向,方向角 141.4° ,长约 $7400 m$,底宽 $60 m$,边坡 $1:6$,平均增深 $1.18 m$,历时 $47 d$ 竣工。在其后一个水文年内,进行了4次水深测量,期间虽经9108风力达12级强台风的正面袭击,但一年后槽形依然完好。本文以试挖槽两年回淤 $0.53 m$ 作为验证的依据^[7,8]。计算所需的挖槽外和挖槽内水力要素由流场数值计算提供,按式(13)计算挖槽的回淤厚度与回淤过程。计算中假定槽外滩面上的水深与潮流过程不受挖槽淤积的影响。参考流场计算的潮型,决定每一计算周期由 $15 d$ 组成,其中大潮 $6 d$,小潮 $9 d$,计

算时步长 $\Delta t = 15 min$ 。计算中随挖槽的淤积及时调整槽内水深 h_2 和槽内流速 V_2 。

通过试算,知 $K = 0.77$ 时试挖槽两年淤积 $0.53 m$,与实测值一致。该 K 值就作为预报各计算段回淤的关键参数。

3 浮泥及推移质淤积

根据对1991年试挖槽的观测,台风袭击后,挖槽普遍存在浮泥。浮泥密度小、流动性大。在潮流作用下,一部分浮泥被冲走,另一部分可固结而成为淤泥。这一过程相当复杂,目前尚难以准确地进行定量计算。在水深较小的边滩,泥沙于大风作用下的推移运动不容忽视,但对崖门入海航道而言,在大风浪情况下,挖槽回淤的主体仍是悬移质,推移质只占很少的一部分。浮泥的泥沙组成很细,本身就是由悬移质落淤而来,故可将浮泥和推移质一并归入悬移质,并由试挖槽经历12级台风作用2昼夜之后回淤的情况率定含沙量公式(2)中的系数 β 。

4 挖槽骤淤估算

4.1 计算条件

为了崖门航道工程需要,需计算台风、大潮共同作用的“二碰头”和台风、大潮、大汛同时作用的“三碰头”条件下挖槽的骤淤。“三碰头”属特殊情况,本文以荷包岛历史最大风速 $40 m/s$ 的风浪与大潮、汛期共同作用来代表。“二碰头”出现的机会略多一些,本文以非汛期、5年一遇大风、风速 $31 m/s$ 的风浪和大潮的共同作用来代表。对于挖槽淤积而言,汛期的影响主要在于水体有较高的含沙量。由统计资料知,拦门沙汛期平均含沙量为 $0.34 kg/m^3$,年平均含沙量为 $0.20 kg/m^3$ 。故在“二碰头”计算中,含沙量较“三碰头”低 $0.14 kg/m^3$ 。

由蒲氏风力表知,8级风平均风速为 $19 m/s$,该级风在黄茅海是常见的,其重现期约为 $1.7 a$ 。因此本文同时计算了非汛期、8级风,风速 $19 m/s$ 的风浪和大潮共同作用引起的骤淤。风浪要素采取东南风下的情况。

4.2 计算结果

计算得“二碰头”、“三碰头”和8级风作用下不同方案各计算段淤厚以及三者对各方案造成的包括边坡淤积在内的回淤量,主要成果的图示见图2~4。由结果可知,西航道W3的回淤比东航道E5的回淤要大得多,而两者在正常情况下的年淤强却差不多。这是因为SE向的强风与东航道的走向基本一致,而与西航道却有约 45° 的交角,从而在西航道造成较大的回淤。“二碰头”条件下的风速和水体含沙

量均比“三碰头”小,造成的回淤也较少.以底宽80 m,设计水深6.5 m为例,东、西航道在“二碰头”条件下的回淤量分别为 $38.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $70.6 \times 10^4 \text{ m}^3$,在“三碰头”条件下的回淤量则分别增大为

$55.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $104.5 \times 10^4 \text{ m}^3$.对最不利的“三碰头”条件,底宽80 m时,各水深方案在东航道的回淤量为 $34.2 \times 10^4 \sim 89.2 \times 10^4 \text{ m}^3$,在西航道的回淤量为 $77.2 \times 10^4 \sim 151.3 \times 10^4 \text{ m}^3$,在工程措施可以承受的

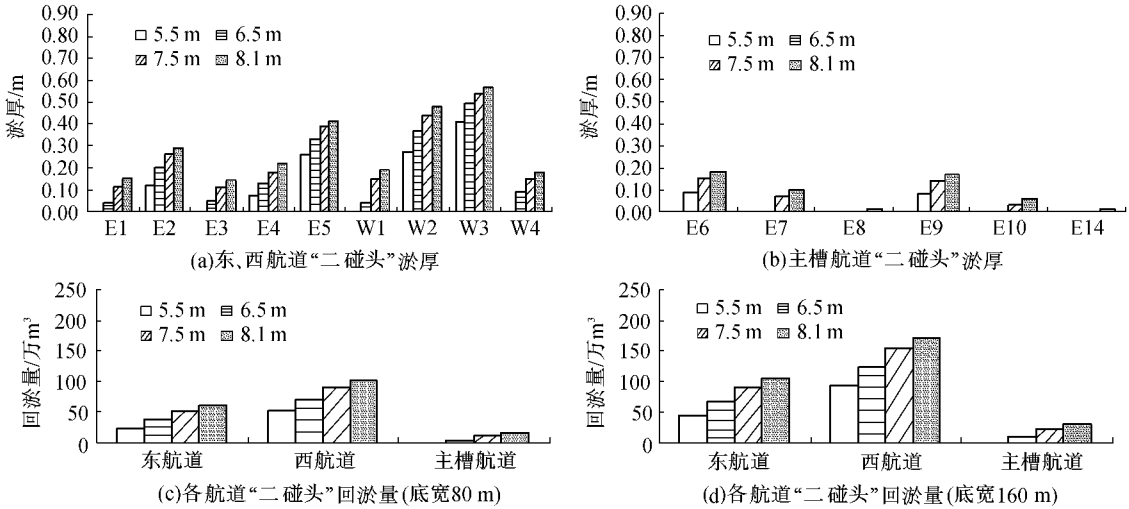


图2 “二碰头”时各航道淤厚和淤积量

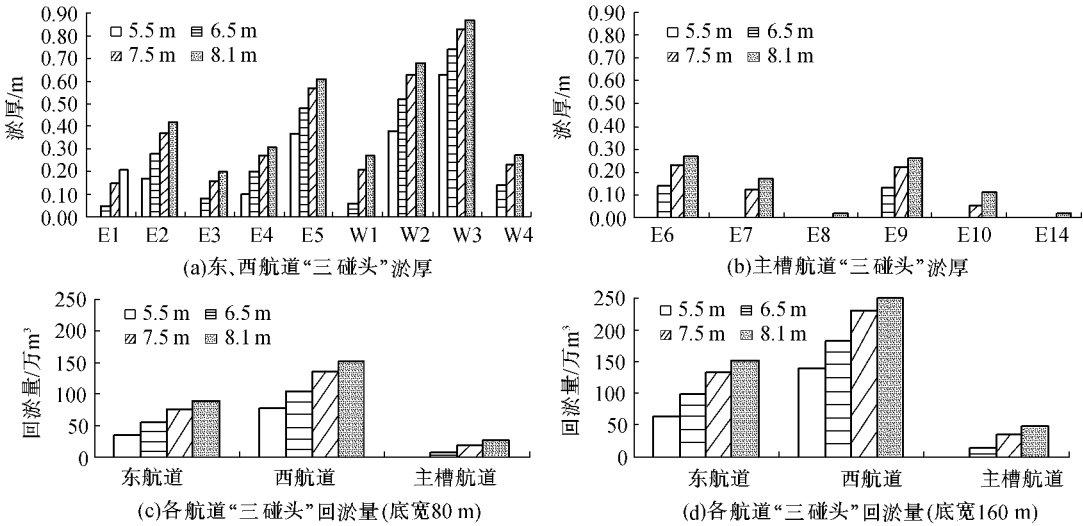


图3 “三碰头”时各计算段淤厚和各航道淤积量

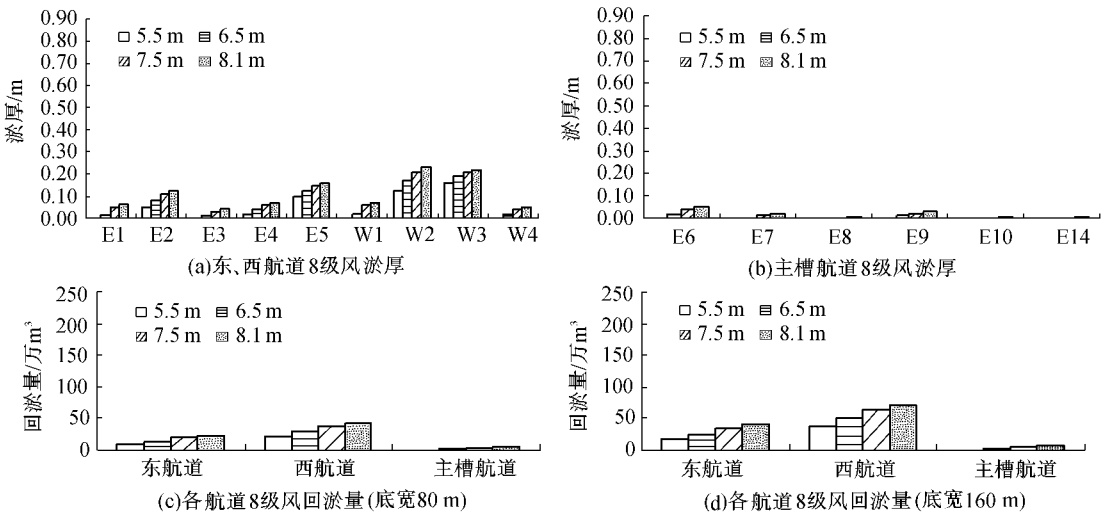


图4 8级风作用下各计算段淤厚和各航道淤积量

范围之内.但从上述数据可见,西航道在大风浪作用下的回淤比东航道要大得多,在航道选线时必须考虑这一因素.

5 结 语

本文用当地实测资料统计水沙关系,从悬移质不平衡输沙方程出发,导得了估算挖槽回淤的计算公式;由实测资料和潮流数值计算得到了其中主要参数.根据1990年崖门试挖槽回淤资料决定公式中待定的综合系数.然后,按照工程需要分别计算了大风浪、台风加大潮、台风大潮大汛3种工况引起的骤淤.

崖门出海航道及其所在水域目前基本上处于平衡微淤的状态,潮流是使其得以维持的主要动力因素.悬沙是该水域泥沙的主要运动形式并对挖槽回淤起主要作用.大风浪作用下航道骤淤估算表明,在“三碰头”极端条件下,航道有较大的淤积,但在工程措施可以承受的范围之内.“二碰头”的骤淤淤积量要小一些.由于黄茅海的强风向SE向与东航道一致,而与西航道有45°的交角,大风浪将造成较大的淤积.再加上西航道要穿越广阔的中滩,该处流速和水深均较小,西航道骤淤淤积量明显大于东航道.对台风重现期的分析和对1995年东航道全线浚深后挖槽实测回淤的校核计算表明,用计及一次8级风

作用的常年淤强和常年回淤量作为挖槽年回淤的预估值是恰当的.东航道的常年回淤量各方案至少比西航道小 $23 \times 10^4 \text{ m}^3$,多年来,其走向和长期稳定的东槽基本一致.

参考文献:

[1] JTJ213-98,海港水文规范[S].
[2] 龚国仁.潮汐水流中的悬沙运动和冲淤计算[J].水利学报,1963(4):5—11.
[3] 李瑞杰,严以新,宋志尧.太平水道悬移质输运数学模型[J].泥沙研究,2003(4):46—51.
[4] 李瑞杰,褚裕良,郑金海.虎门太平水道航道整治工程潮流数模计算[J].水运工程,2003(3):38—42.
[5] 陈界仁,陈国祥.赣江航道整治工程泥沙数学模型[J].河海大学学报(自然科学版),2003,31(2):224—228.
[6] 谭亚,郑军田,谢永玉.引航道出口形态对泥沙淤积影响的数学模型研究[J].河海大学学报(自然科学版),2003,31(4):456—543.
[7] 陈惠珍.崖门出海航道整治技术研究[A].交通部水运司.内河航道整治工程技术交流大会文集[C].北京:人民交通出版社,1998.23—26.
[8] 罗肇森,等.珠江崖门口拦门沙航道开发模型试验研究[A].交通部水运司.内河航道整治工程技术交流大会文集[C].北京:人民交通出版社,1998.12—17.

(收稿日期:2005-04-22 编辑:马敏峰)

(上接第40页)

b. 砂井地基中,如何考虑砂井是一个很重要的问题.本文提出的砂井转换为砂墙的方法,结合二维平面应变方法计算,能较好地模拟其沉降性状.

c. 由于种种原因,对塑料排水板预压地基的数值计算参数选取不能令人满意,应用反分析的方法可以较好地解决这个问题.优化方法中的复合形法由于不需求导,收敛性较好,应用较简单,因此应用中取得了较满意的效果.

参考文献:

[1] Indraratna B, Redana I W. Numerical modeling of vertical drain with smear and well resistance installed in soft clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000(1):132—145.
[2] 曾国熙.砂井地基的若干问题[J].岩土工程学报,1981(3):74—81.
[3] Sanchez J M, Sagaseta C. Analysis of staged construction of embankments on soft soil[A]. In: Proc 2nd European Speciality Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering [C]. Santander, 1990. 457—471.
[4] Hird C C, Pyrah I C, Russel D. Finite element modeling of vertical drains beneath embankments on soft ground[J]. Geotechnique, 1993(4):499—511.

[5] 赵维炳,陈永辉,龚友平.平面应变有限元分析中砂井的处理方法[J].水利学报,1998(6):53—57.
[6] Chai J C, Miura N, Bergado D T. Behavior of vertical drain improved subsoil under embankment loading[J]. Soils and Foundations, 1995(4):49—61.
[7] Bergado D T. Prefabricated vertical drains(PVDs) in soft Bangkok Clay: a case study of the new Bangkok international airport project[J]. Can Geotech J, 2003(2):304—315.
[8] 杨林德.岩土工程问题反演理论与工程实践[M].北京:科学技术出版社,1996.5—28.
[9] 龚晓南.土塑性力学[M].杭州:浙江大学出版社,1999.173—179.

(收稿日期:2005-03-29 编辑:马敏峰)

