

河口泥沙通量的研究现状

李保杰^{1,2}, 黄巧华¹, 于法展¹, 马明栋², 周 婷¹, 李战成^{1,2}, 王巧成^{1,2}

(1. 徐州师范大学城市与环境学院; 2. 徐州师范大学地球空间信息科学与工程研究所, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 文章介绍了国内外河口泥沙通量的研究现状及方法, 河口泥沙通量的研究方法有: 仪器直接测量法、数学模型法、元素跟踪法、地理信息系统研究法及多种研究方法相结合等。由于大多数模型不能对河口泥沙通量的未来的趋势进行预测且精度不够等, 笔者提出分析河口泥沙通量的研究方法——内插法研究河口泥沙通量。

关键词: 河口; 泥沙; 通量

中图分类号: S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2006)02-0142-03

The Present Situation on Bayou Silt Flux

LI Bao-jie^{1,2}, HUANG Qiao-hua¹, YU Fa-zhan¹, MA Ming-dong²,
ZHOU Ting¹, LI Zhan-cheng^{1,2}, WANG Qiao-cheng^{1,2}

(1. College of Urban & Environmental Science, Xuzhou Normal University;

2. The Institute of Earth Space Information Science and Engineering, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: The present situation about bayou silt flux of home and abroad was analyzed. The methods what the bayou flux chiefly has adopted are: instrument direct measurement, mathematical model modular concept, element tracking and geographical information system as well as the combination of many kinds of research methods. Because the majority models mentioned above can not predict the trend of bayou flux and inaccurate, the research method——interpolation method was put forward.

Key words: bayou; silt flux

1 前 言

河口泥沙通量的研究既是与全球变化研究有关的理论课题,也是与河口工程、经济生活密切相关的课题,同时河口是大陆与海洋之间的物质和能量交换的重要场所,而从河口流经的泥沙所携带的泥沙对全球的生物与化学物质的循环以及碳氮等生命物质的循环有着深远的意义。每年有大量的泥沙等沉积物经河口入海,其中水体所携带的泥沙及泥沙携带的各种营养物质、有机物质及污染物等对河口附近的水域生态环境有着深远的影响。因此研究河口泥沙的通量不仅对该地区的经济发展有着深远的意义而且为其它河流这一方面的研究开创了先河。同时本文还系统地收集整理河流入海泥沙通量研究资料,总结已有的研究方法,探索新的研究方法,为即将启动的“973”项目分解课题(“河流入海物质通量变异及其对流域自然变化和人类活动的响应”)研究做准备。

2 国内外关于河口泥沙通量的研究方法

2.1 国外关于河口泥沙通量的研究方法

关于河口泥沙通量的研究国外的科研工作者起步比较早,发展至今已经积累了丰富的研究方法,主要的研究方法为:

2.1.1 仪器直接测量法

根据目前的研究,国内外采用的仪器直接测量的方法主要是——沉积物捕捉法,即用沉积物捕捉装置置于河流的纵

剖面的不同高度,通过该装置捕获泥沙的量来测量某一时段河流的泥沙的通量。David A. Timothy, Maureen Y. S. Soon 等人利用多年沉积物捕捉法所测得的 Saanich and Jervis 河流入口泥沙等沉积物的数据,对该河口泥沙等沉积物的通量进行分析,所测的结果与实际比较吻合。

除了上述方法之外,还可以采用高波段雷达或者采用声波等技术对河流泥沙的通量进行研究。D. PRANDLE, G. BALLARD, D. FLATT, 等人利用模拟以及检测等方法研究了流经多佛(尔)海峡的水以及水中的泥沙等物质的通量,利用固定于河岸的高波段雷达以及安装在河流底部的多普勒声波流量断面仪(由雷达或激光测高仪与高差仪组成,沿摄影基线记录高程点而获得地形剖面的航摄辅助仪器)测量多年流经多佛(尔)海峡的流量。所测得的结果与 Salomon 等人建立的模型所得到的结果比较吻合。采用仪器直接测量河流的泥沙通量优点是比较直观,适用范围比较广泛不仅可以测得泥沙的通量还可以对污染物(如: Al, Fe, Mn, Cd, Pb, Cu 和 Zn 等)的通量进行研究,但是其测量结果的精确度往往不是太令人满意,主要受到仪器的精确度、测量的时间以及测量人对该仪器的操作等的影响。其次采用仪器测量的时间跨度不大,仅仅对当时的时段的泥沙的通量进行测量,对将来以及过去时段的泥沙等沉积物的通量不能进行预测。

2.1.2 数学模型法

应用数学方法对河口泥沙、流量、河流底部对水体流动

收稿日期: 2005-06-27

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目“中国典型河口—近海陆海相互作用及其环境效应第一子课题(河流入海物质通量变异及其对流域自然变化和人类活动的响应)”(2002CB412401); 徐州师范大学基金项目(XSL 2003057)

作者简介: 李保杰(1979 -), 男, 江苏徐州人, 硕士, 研究方向为水资源水环境 GIS 应用等。

的阻力、河流中的淡水和海水因密度不同而造成的湍流作用、以及海浪的作用进行模拟。由于现在数学方法的不断进步促使数学建模的方法日臻完善。Helmert Baumert a, Georges Chapalain 等人通过建立二维数学模型来模拟波浪、河流由于河水的密度不同造成的湍流作用与河流泥沙等悬移物质之间的关系。在进行数学模拟时用到了许多经验数值。该模型对该河流未来的泥沙的量进行了预测。

Mark D. Moreheada, James P. Syvitski 等人通过建立三维数学模型对萨斯喀彻温省(加拿大)中的河流来模拟该河流的泥沙等沉积物的通量的年际变化。河口泥沙模拟的二维模型主要是对河流纵剖面的深度、河水在某一深度的流速、水平梯度的微分算子、河流底部对水流的摩擦阻力等进行模拟。但是对河流泥沙通量进行数学建模时不能应用现成的数学模型还要研究该数学模型对该河流以及该河段是否适应。但是该模型不能给出河流低部的泥沙信息、也不能对将来某一时段的泥沙通量给出准确的预测。

针对上述原因, Engelund 和 Fredsoe 等人在原有的数学模型的基础之上对河流的二维模型进行完善, 在考虑到河流底部的泥沙因素的基础之上 Engelund 和 Fredsoe 等建立了基于河床所携带的泥沙等沉积物的数学模型。河水与河床的摩擦力为 P , 沉积物颗粒在某一层的沉积物量为:

$$q_b = 9.3 \frac{\pi}{6} \rho d_{50} U_* (1 - 0.7 \sqrt{\frac{\tau_*}{\tau}}) \quad (1)$$

式中: U_* —— 受到摩擦力时的流速 = $\sqrt{\tau_b / \rho}$ 是水体表面压力; τ_b 和 τ 是 Shields 系数(或者是非空间剪切力), 公式

$$\tau_b = \frac{U_*^2}{(P_* / \rho - 1) g d_{50}} \quad (2)$$

$$\tau = \frac{U_*^2}{(P_* / \rho - 1) g d_{50}} \quad (3)$$

对于临界表面压力, 在上述公式中 U_* 是由于摩擦力影响的速率的临界值, 等式 3 中的 ρ 的计算公式为^[12]:

$$\rho = [1 + (\frac{\pi/6 \tan(\alpha)}{\tau - \tau_c})^4]^{-1/4} \quad (4)$$

三维模型虽然能够比较准确地对各种影响泥沙通量的各种因素进行较准确的模拟, 但是由于泥沙在河口的沉积是由许多复杂的因素共同作用的结果, 譬如说: 在不同的时段内河流的流量不同、泥沙由于海水和淡水的密度不同所造成的湍流作用、洋流作用等使得河口泥沙的数学建模变得更加复杂, 这些因素无疑成为制约数学建模的一个瓶颈问题, 但是由于计算机等技术的不断发展, 该方法不失为研究河口泥沙通量的首选方法。

2.1.3 元素追踪法

元素追踪法即采用某一种元素作为沉积物的追踪元素来测定泥沙等沉积物的通量。Jaeil Leea, Peter D. Clift 等人通过元素追踪法: 即通过角闪石的组成成分的变化跟踪测定了 Indus 河流泥沙的通量。结果证明采用元素追踪法测定河口泥沙通量在一定程度上具有一定的优越性, 尤其在泥沙等沉积物的来源处于一种比较复杂的环境条件下来测量泥沙通量不失为一种首选方法。

Petra Tallberga, Jukka Koski- V. ah al aa, 等人用锆作为追踪元素测定了清水中的硅的通量。沉积物捕捉法在比较复杂的环境条件有着独特的优越性。但是用沉积物捕捉法得到的结果不够精确, 因为采用沉积物捕捉法时追踪元素在流动的过程中容易沉积于河流的底部。这样往往使测出的结果比实际值小。

2.1.4 数学统计法

该方法适用于较长尺度时段内泥沙沉积物通量的研究,

对较小时段内的泥沙通量的测量结果不够精确。因为我们对认识泥沙系统变化的影响因素的主要障碍是缺乏适宜的时间尺度, 这个时间尺度是一个较长时间的尺度, 在该时间尺度内整个泥沙系统的性质可以得以观察。所以 John A. Dearing, Richard T. Jones 等人采用数学统计法从不同的时间尺度、流域尺度, 研究了世界不同的湖泊以及河流的总的泥沙通量(TSS)进行了研究。目前许多发表的文章中对整个全新世或者这部分全新世的时间尺度的沉积率的文章中大部分采用¹⁴C 和²¹⁰Pb 测年。所研究的结果表明气候对小尺度的流域在全新世气候对河流泥沙通的影响仅次于人类对泥沙通量的影响。由于人类活动对泥沙通量的影响使泥沙通量增加至没受扰动时河流的通量的 5-10 倍。经对沉积物的来源研究表明: 土壤的表层对泥沙等沉积物的通量的影响并不起到主导作用, 河道或者沟渠对泥沙等沉积物的通量起到主导作用, 即使在小的流域范围内亦如此。对于较大的流域而言河流泥沙等沉积物对各种影响因素的反映没有那么明显。根据现在的研究表明: 目前的泥沙通量近似于长期泥沙通量的平均值, 经过系统的分析随着流域面积的增大, 各种因素的变化导致泥沙通量的变化的影响逐渐减弱。

2.1.5 采用多种方法相结合

由于上述各种方法均有优缺点, 所以把两种或者两种以上的方法结合起来使用, 可以避免由于某一种方法所带来的误差, 使得到的结果比较准确。A. S. Ogston, J. V. Guerrab, 等人通过分析多年收集的河口流量、海平面的变化以及悬移物质的密度数据来分析加利福尼亚北部的 Eel 河流悬移泥沙等沉积物的通量, 并且结合固定在三脚架上的传感器所测得的悬移物质浓度的数据分析悬移物质的通量。分析的结果表明河流的悬移物质的通量主要受到悬移物质的粒径、河床的粗糙程度、河流的速度等以及河水与海水之间由于密度不同所造成的湍流作用有关而且测得的结果与实际泥沙通量比较吻合。

M. C. Christie, K. R. Dyer and P. Turner 等人通过利用监测仪器并结合建立多元回归分析来建立预测河流泥沙通量的经验公式来预测河口泥沙的通量。

2.2 国内河口泥沙通量的研究

国内关于河口泥沙通量的研究起步较晚, 对泥沙通量的研究主要集中在黄河河口泥沙通量的研究, 至今已经取得一定的成果。

张红武、赵连军在以往黄河河道泥沙数学模型研究成果的基础之上, 结合水流运动方程及经过作者修正的泥沙运动方程, 同时引入与实测资料相符合的水流挟沙力、动床阻力、泥沙级配等计算公式作为补充方程, 构造出黄河下游河道准二维泥沙数学模型。结果表明, 该模型不仅能计算黄河下游河道一般洪水引起的河床冲淤变形, 还能成功地模拟出大沙年下游处于强烈淤积时的规律。

吴永胜、王兆印等人认为海洋动力过程对黄河入海泥沙的淤积和扩散具有决定性作用, 利用三维斜压动力——泥沙模型分析了黄河口外海域潮流动力变化与黄河入海泥沙淤积、扩散特性之间的响应关系。季节环流以及涨落潮的分布和变化很好地解释了黄河口南北浮泥的形成和消长变化以及黄河入海泥沙向海扩散的机理。结果表明, 入海泥沙在洪季、枯季和表底层都具有不同的输移特性。

曹文洪、何少苓等人针对黄河河口海岸岸线变化剧烈和含沙量变幅大的特点, 开发和建立了适合黄河河口海岸应用的平面二维动边界非恒定水流泥沙数学模型。验证表明, 该模型可以较好地模拟黄河河口海岸泥沙输移和冲淤变化, 为研究和解决多沙河口海岸的泥沙问题提供技术手段。庞家珍、姜明星、李福林等人研究了黄河口近半个世纪径流量与输沙量

的变化, 20 世纪 50~ 90 年代水、沙量呈明显递减, 预测今后 20 年黄河口多年平均径流量不会超过 $150 \sim 200 \times 10^8 \text{ m}^3$, 多年平均输沙量不超过 $5 \sim 7 \times 10^8 \text{ t}$ 。在研究黄河三角洲海岸线历史变化的基础上, 结合预测的水、沙量, 用地貌模拟法预测了今后 20 年黄河三角洲海岸线的基本走向。

许炯心 以黄河下游历年实测水文泥沙资料为基础, 运用多元回归分析方法, 建立了下游河道淤积量与淤积强度的经验统计关系。揭示了不同粒径组泥沙的来量和它们在全沙中所占的比率对下游河道淤积特征的影响。同时, 研究了高含沙洪水及清水基流对下游河道淤积的影响。

由于上述泥沙通量的研究方法不能够对泥沙通量进行预测, 笔者提出适合计算河口泥沙通量的方法——沉积物捕捉法结合数据内插法: 首先在黄河的纵剖面不同高度用沉积物捕捉法对不同高度的泥沙的通量进行测量, 然后用数据内插法对其他高度进行插值处理推得整个河流断面的泥沙通量的数值。但是使用内插法的缺点: 插值的计算量非常大, 计算过程复杂, 需要编程或者购买专用软件, 这些因素都制约着该方法的进一步应用。

3 结 论

关于河口泥沙问题的研究国外所作的研究较多, 国内相对较少。所采用的方法大部分比较单一, 但是各种方法都有

其局限性, 对此笔者提出以下观点:

(1) 研究河口泥沙的通量首先要明确河口的界限, 同时河口泥沙的通量是各种因素综合作用的结果: 如泥沙入海后受到的德科氏力、海洋洋流、以及河流入海由于密度和温度等不同造成的湍流作用等。因此要求我们要采用综合的方法来研究河口泥沙通量的问题。

(2) 黄河作为我国年输沙量最多的河流, 是最具有代表性的河流, 因此应选择黄河泥沙通量的研究作为深入研究的对象, 以为研究长江等我国其它类似的河流的研究打下坚实的基础, 同时作为课题研究的同时要同当地的经济的发展相结合。

(3) 在上述所采用的水文统计法中, 水文统计资料不齐全, 特别是建国前后和 1960—1969 的水文资料缺失, 有的水文资料单位不统一等, 为研究带来了一定的影响。同时, 所获得的水文资料大都不是真正意义上河口泥沙等的的数据, 因此要在河口建立水文观测点以获得对研究河口泥沙具有真正意义上的数据。

(4) 地理信息系统作为新兴的学科在研究和模拟河口的泥沙通量最具有很大的发展潜力, 这要求必须首先建立比较完善的三维模型和四维模型等。不仅要求建立的模型具有模拟现在泥沙状况的能力, 而且将来和过去河口的泥沙状况都能得以模拟, 这样不仅可以研究现在的泥沙状况而且可以预报将来泥沙通量。

参考文献:

- [1] David A Timothy, M aureen Y S Soon, Stephen E. Calvert Settling fluxes in Saanich and Jervis Inlets, British Columbia, Canada: sources and seasonal patterns[J]. Progress in Oceanography, 2003, 59(1): 31- 73
- [2] Christa Pohl, A nnekatrin Löffler, U rsula Hennings A sediment trap flux study for trace metals under seasonal aspects in the stratified Baltic Sea (Gotland Basin; 57°19' 20"N; 20°03' 00"E) [J]. Marine Chemistry, 2004, 84(3- 4): 143- 160
- [3] Hedges J I, Clark, W A, Quay, P D, et al Compositions and fluxes of particulate organic material in the Amazon River [J]. Limnology and Oceanography, 1986, 31(4): 717- 738
- [4] Robert C Thunell Sediment trap result from Santa Barbara basin, California [J]. Deep-sea Research, 1998, 46: 1 863- 1 884
- [5] Gargett A E, Stucchi D, Whitney F. Physical processes associated with high primary production in saanich Inlet, British Columbia [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2003, 56: 1 141- 1 156
- [6] D Prandle, G Ballard, Flatt, A J Harrison, et al Combining modeling and monitoring to determine fluxes of water, dissolved and particulate metals through the Dover Strait [J]. Continental Shelf Research, 1996, 16(2): 237- 257
- [7] Helmut Baumert, Georges Chapalain, Hassan Smaoui, et al Modeling and numerical simulation of turbulence, waves and suspended sediments for pre-operational use in coastal seas [J]. Coastal Engineering, 2000, 41(1- 3): 63- 93
- [8] Y Wu, R A Falconer, R J Uncles Modeling of water flows and cohesive sediment fluxes in the Humber Estuary [J]. Continental Shelf Research, 2002, 22(3- 7): 145- 156
- [9] A Bilgili, M R Swift, D R, et al Modeling bed-load transport of coarse sediments in the Great Bay Estuary, New Hampshire Estuarine [J]. Coastal and Shelf Science, 2003, 58(4): 937- 950
- [10] Mark D Morehead, James P Syvitskii, Eric W H Hutton, et al Modeling the temporal variability in the flux of sediment from ungauged river basins [J]. Global and Planetary Change, 2003, 39(1- 2): 95- 110
- [11] A Bilgili, M R Swift, D R Lynch Modeling bed-load transport of coarse sediments in the Great Bay Estuary, New Hampshire [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2003, 58(4): 937- 950
- [12] Peter D Clift, Graham Layne, Joel Blum, et al Sediment flux in the modern Indus River inferred from the trace element composition of detrital amphibole grains [J]. Sedimentary Geology, 2003, 160(1- 3): 243- 257
- [13] Petra Tallberg, Jukka Koski, Helina Hartikainen, Germanium - 68 as a tracer for silicon fluxes in freshwater sediment [J]. Water Research, 2002, 36(4): 956- 962
- [14] John A Dearing, Richard T Jones Coupling temporal and spatial dimensions of global sediment flux through lake and marine sediment records [J]. Global and Planetary Change, 2003, 39(1- 2): 147- 168
- [15] M Meybeck, L Laroche, H H Durra, et al Global variability of daily total suspended solids and their fluxes in rivers [J]. Global and Planetary Change, 2003, 39(1- 2): 65- 93
- [16] Gust G, Bowles W, Giordano, et al Particle accumulation in a cylindrical sediment trap under laminar and turbulent steady flow: an experimental approach [J]. Aquatic Sciences, 1996, 58(4): 297- 326

(下转第 167 页)

2 3 复杂块体稳定系数 K

通过上述 (1)~ (26) 式, 我们求出错动面为 α 时复杂块体稳定系数 K 。我们令错动面倾角作为设计变量, 取稳定安全系数为目标函数, 利用优化方法, 找出最小安全系数 K 及其对应的错动面倾角:

$$\begin{cases} K_i = K_i(\alpha) \\ K = \min K_i \end{cases} \quad (27)$$

通过 (27) 式计算出最小安全系数 K , K 就是我们复杂块体的安全系数。

3 工程实例

3 1 计算参数

复杂块体主要由 F22、F20 及下部底滑面三个结构面及边坡面、顶面组成。现场勘查所得各面产状见表 1; 根据实验结果, 我们选取的结构面力学参数见表 2。

表 1 各面产状统计表

名称	F22 断层	F20 断层	Lj301	上下部分割面	坡顶面	边坡面
倾向	50°	305°	340°	340		350°
倾角	60°	60°	22°	90	0°	43°

表 2 结构面力学参数

结构面名称	F20		F22		Lj301	
状态	天然状态	饱水状态	天然状态	饱水状态	天然状态	饱水状态
C/MPa	0.015	0.010	0.015	0.010	0.387	0.330
f	0.534	0.453	0.534	0.453	0.843	0.781

3 2 计算结果及分析

据上述方法, 按迭代法计算的不同工况下复杂块体的整体稳定性, 计算结果见表 3。

通过上述计算结果分析可知: 当错动面 $\alpha=90^\circ$ 时, 复杂

参考文献:

[1] Donald I.Chen Z.Y. Slope stability analysis by the up2 per bound approach: fundamentals and methods[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(6): 853- 862

[2] Goodman R.E, Shi G.H. Block Theory and Its Application to Rock Engineering [M]. [s.l]: Prentice - Hall International, Inc., 1985

[3] 陈祖煜, 汪小刚, 杨健, 等. 岩质边坡稳定性分析——原理·方法·程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005

[4] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002

[5] 梅明荣, 任青文. 基于优化理论的刚体极限平衡模型[J]. 长江科学院院报, 1996, 16(3): 17- 20

[6] 潘家铮. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析[M]. 北京: 水利出版社, 1980

[7] 陈祖煜. 潘家铮最大最小原理的证明[J]. 清华大学学报, 1998, (1): 6- 13

[8] 孙玉科, 等. 中国露天矿边坡稳定性研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1999

(上接第 144 页)

[17] M.C.Christie, K.R.Dyer, P.Turner. Sediment flux and bed Level measurements from a macro tidal Mudflat[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1999, 49(5): 667- 688

[18] McQuoid, M.R., Hobson L.A. A Holocene record of diatom and silicoflagellate microfossils in sediments of Soanich Inlet, ODP leg 169s[J]. Marine Geology, 2001, 174: 111- 123

[19] 高湘, 张建锋, 王华军, 等. 黄河泥沙的絮凝形态学和絮体构造模型问题[J]. 泥沙研究, 2003, (5): 69- 73

[20] 张红武, 赵连军, 王光谦, 等. 黄河下游河道准二维泥沙数学模型研究[J]. 水利学报, 2003, (4): 1- 7

[21] 刘爱霞, 卢金发. 黄河中游悬移质泥沙粒径与流域环境的关系[J]. 地理学报, 2002, (2): 232- 237

[22] 常军. 基于 RS 和 GIS 的黄河三角洲海岸线动态变化监测与模拟预测研究[J]. 山东师范大学学报, 2001, (4): 26- 29

[23] 吴永胜, 王兆印. 渤海动力对黄河入海泥沙输移的影响[J]. 海洋科学进展, 2002, (2): 22- 30

[24] 曹文洪, 何少苓, 方春明. 黄河河口海岸二维非恒定水流泥沙数学模型[J]. 水利学报, 2001, (1): 42- 48

[25] 庞家珍, 姜明星, 李福林. 黄河口径流、泥沙、海岸线变化及其发展趋势[J]. 海洋湖沼通报, 2000, (4): 1- 6

[26] 许炯心. 黄河下游泥沙淤积的经验统计关系[J]. 地理研究, 1997, 10(1): 23- 30

块体为最小安全系数; 斜坡在天然状态下不考虑地震力时处于基本稳定状态, 其稳定系数 $K=1.43$, 当 $a=0.145g$ 时, 其稳定系数 $K=1.19$; 当结构面饱水, 不考虑地震力时, 其稳定系数 $K=1.28$, 当 $K=0.145g$ 时, 其稳定系数 $K=1.08$ 。

表 3 复杂块体稳定性计算结果

计算工况		稳定系数
错动面 $\alpha=90^\circ$	天然状态	1.43
	天然状态+ 地震 $K=0.145g$	1.19
	饱水状态	1.28
	饱水+ 地震 $K=0.145g$	1.08

4 主要结论及认识

- (1) 斜坡后缘发育有方向约 NE20° 宽 3~ 5m、长 100m 左右、错落台坎高 0.5~ 1.5m 的拉张、陷落带;
- (2) 在 1655~ 1670m 高程以上, 斜坡上、下游侧边界结构面具明显的蠕滑变形迹象, 构造岩原始结构被破坏, 且变形体表部裂隙多呈张开状, 岩体松动、拉裂变形较剧烈;
- (3) 在 1655~ 1670m 高程以下在地表斜坡体的下游侧有锯齿状剪张性张裂缝的变形迹象, 张开宽度 5~ 10cm, 在勘探平洞内三壁贯通的陡倾角拉张裂隙较发育。
- (4) 尽管该斜坡体的后缘以及坡体的浅表部存在明显的拉裂、松动变形特征, 但在其下部目前还未形成明显贯通性滑移面, 无显著变形的特征。
- (5) 复杂块体模型计算结果: 复杂块体在天然或潜在滑动面饱水条件下, 其稳定性总体处于稳定状态, 但当考虑饱水和地震影响时, 处在极限平衡状态, 存在失稳的可能。
- (6) 通过对实例分析, 我们所建立的复杂块体模型模拟了不同工况下斜坡的稳定性, 其结论基本符合地质宏观判断, 计算结果实用于工程建设要求。