

# 堆载挤淤沉降断面的分段计算方法

何顺友<sup>1</sup>, 杨春和<sup>1,2</sup>, 汪洪星<sup>2,3</sup>

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 3. 三峡大学 水电工程施工与管理湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 以某拦污坝工程为背景, 建立了堆载挤淤沉降断面的分段计算方法. 根据初期荷载不同挤淤深度时淤泥层的稳定性, 搜索得到挤淤瞬时沉降断面. 在此基础上, 基于比奥固结理论和修正的剑桥模型, 建立数值分析模型, 得到最终的堆载挤淤沉降断面. 计算结果表明, 最终的堆载挤淤沉降断面上覆荷载形式正相关. 挤淤沉降断面呈倒梯形分布. 最后, 采用高密度电法对工程实际堆载挤淤沉降断面进行检测, 验证了上述计算方法的正确性.

**关键词:** 堆载挤淤沉降断面; 固结沉降; 比奥固结理论; 高密度电法

中图分类号: TV 145 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2016)11-1609-06

## Stepwise Calculation Method of Dump Silt-Replacement Settlement Section

HE Shun-you<sup>1</sup>, YANG Chun-he<sup>1,2</sup>, WANG Hong-xing<sup>2,3</sup>

(1. State Key Laboratory for Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. Hubei Key Laboratory of Construction Management in Hydropower Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China. Corresponding author: HE Shun-you, E-mail: heshunyou@qq.com)

**Abstract:** A stepwise calculation method for the silt-replacement settlement section is established in the background of a barrier dam. The silt-replacement instantaneous settlement is searched according to the stability of silt for different silt-replacement depth of the earlier dump. Then the silt consolidation settlement numerical analysis model under the compaction of the earlier and later dump is established and the final dump silt settlement section is got based on the Biot consolidation theory and the modified Cambridge model. The calculation results show that the final dump silt-replacement settlement section is positively correlated to the dump, the dump silt-replacement section appears to be an inverted trapezoidal. Finally, the corresponding calculation method is verified by detecting the real dump silt-replacement settlement section in the engineering by the high density resistivity method.

**Key words:** dump silt-replacement settlement section; consolidation settlement; Biot consolidation theory; high density resistivity method

堆载挤淤作为一种软基处理方法, 在填石堤坝、填石路堤等工程中得到了非常广泛的应用. 如詹巧水<sup>[1]</sup>、王艳芳等<sup>[2]</sup>介绍了堆载挤淤在多个工程中的成功应用. 在工程实践中, 学者们对堆载挤淤沉降提出了多种计算方法, 为堆载挤淤施工设

计提供了坚实的理论基础. 如杨光煦<sup>[3-4]</sup>指出, 当上覆堆载下沉到一定深度, 由于堆载体两侧淤泥的作用, 堆载体将与淤泥层达到极限平衡, 不再下沉. 此时的挤淤沉降就是该堆载体引起的极限挤淤沉降. 随着数值模拟分析方法的出现和发展, 学

收稿日期: 2015-04-29

基金项目: 水电工程施工与管理湖北省重点实验室(三峡大学)开放课题(2014ksd14).

作者简介: 何顺友(1985-), 男, 湖南衡阳人, 重庆大学博士研究生; 杨春和(1962-), 男, 江西丰城人, 中国科学院武汉岩土力学研究所研究员.

者们开始使用数值模拟方法对堆载挤淤沉降进行分析,为堆载挤淤沉降分析开辟了一个新的研究方向:如张明鸣等<sup>[5]</sup>采用颗粒流理论(PFC)模拟了抛石挤淤的施工过程及施工控制条件;余海忠等<sup>[6]</sup>采用有限元数值模拟方法对抛石挤淤成堤的深度和断面形态进行了研究;姜景山<sup>[7]</sup>通过建立弹塑性有限元力学模型,对抛石挤淤处理的路基应力变形性状进行了分析.总而言之,现有研究成果对于堆载挤淤沉降的计算方法大致可以分为两类:①基于淤泥层失稳破坏的解析法,如杨光照<sup>[3-4]</sup>提出的方法;②基于淤泥层固结沉降的数值法,如余海忠等<sup>[6]</sup>使用的方法.实际工程情况下,初期堆载会破坏淤泥层的稳定性,嵌入淤泥中,将淤泥挤开,产生堆载挤淤瞬时沉降;初期堆载与淤泥层一起形成复合结构达到稳定后,后续堆载将不会继续对淤泥层产生破坏,但是会增加淤泥层受到的固结压力,导致淤泥层产生更大的挤淤固结沉降.因此,合理的计算应该既考虑淤泥层在初期荷载作用下的失稳破坏,又考虑其在上覆荷载作用下的固结沉降.

## 1 工程背景

随着某排土场工程的开展,决定将原有排土场向湖中扩容.在湖底12 m左右厚度的湖泥上堆载排土场,并且在湖中距离新排土场边坡坡脚63 m处建立1#拦污坝,防止排土场形成的污水向湖中扩散,对湖水造成污染.拦污坝的设计横断面如图1所示.

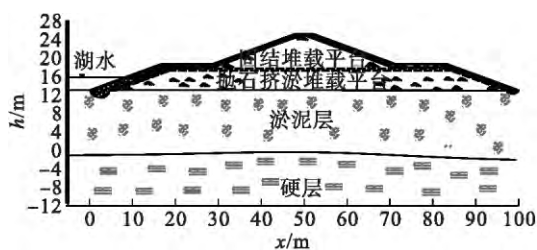


图1 拦污坝设计横断面图

Fig. 1 Designed cross section of barrier dam

为了获取拦污坝附近湖底淤泥的工程力学性质,在现场布置了3条勘探剖面,于坝体中线附近及湖区内各布置3个钻孔.通过钻探,查明坝体和湖区内土体的组成、密实程度及沉积条件,获取拦污坝内部与底部的各种土样.钻探采用了150型钻机,用套管护壁钻进法,终孔直径不小于76 mm.水位以上采用干钻法钻进,水位以下采用套管护壁钻进.钻进达到原自然地面以下1~2 m

处基岩部分.取样间距约为2 m,在重点层区进行了加密取样.取样采用一般取土器,对于软弱的淤泥土采用敞口薄壁取土器.钻探取样结果表明,湖底淤泥厚度为12 m左右,灰色,软塑,含有较多的有机质而具有臭味.如图2所示.



图2 现场淤泥取样

Fig. 2 Silt sampling in the site

## 2 初期堆载挤淤瞬时沉降断面分析

拦污坝的堆载过程中,先通过抛石挤淤筑造高度为6 m的堆载平台,待平台建造完成且下卧淤泥层具有一定强度后再进行上部堆载平台的筑造.因此,在进行拦污坝的挤淤瞬时沉降分析时,应该只计算6 m堆载平台的堆载挤淤瞬时沉降,而后续堆载平台仅对堆载挤淤固结沉降产生贡献.因此,为了确定最终的堆载挤淤沉降断面,需要首先确定初期堆载(6 m堆载平台)作用下的挤淤瞬时沉降.

根据前面的分析可知,初期堆载挤淤瞬时沉降,是淤泥层在上覆堆载作用下失稳破坏且被挤开形成的.因此,可以通过上覆荷载作用下淤泥层的稳定性来确定初期堆载挤淤瞬时沉降断面,详细的计算原理和计算流程已经在文献[8]中说明.本文将直接给出其计算过程.6 m堆载平台作用下的堆载挤淤瞬时沉降计算过程如下:

1) 拦污坝堆载平台的堆载面积较大,其堆载宽度达到了99.5 m,其堆载并不是一次完成,而是由一个个的堆载单元逐步完成的.为了符合实际堆载情况,应该对堆载单元作用下的淤泥层稳定性进行分析,进而对各个堆载单元的挤淤瞬时沉降情况进行分析,得出最终的挤淤瞬时沉降断面.工程实测参数如表1所示,应用有限数值分析软件ABAQUS建立堆载单元数值分析模型,如图3所示.

表1 挤淤参数  
Table 1 Silt-replacement parameters

堆载料容重 $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	淤泥容重 $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	淤泥不排水抗 剪强度/kPa	淤泥层 厚度/m
22	15	20.8	12

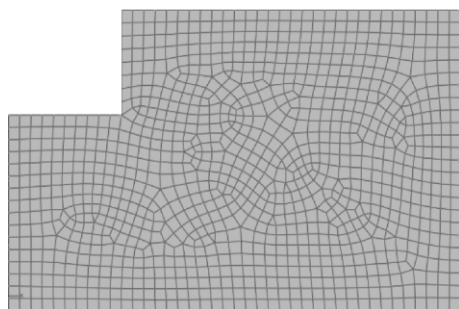


图 3 堆载单元挤淤瞬时沉降分析模型

Fig. 3 Dumping unit silt-replacement instantaneous analysis model

2) 对任一堆载宽度的模型进行试算, 获得不同挤淤瞬时沉降时的安全系数, 绘制挤淤瞬时沉降深度 - 安全系数曲线, 如图 4 所示.

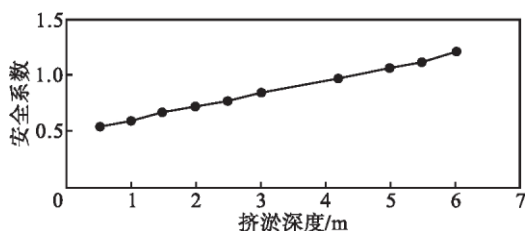


图 4 任一堆载宽度时的代表性挤淤瞬时沉降曲线

Fig. 4 Typical silt-replacement instantaneous settlement curve for any dumping width

曲线表示的是固定堆载高度作用下, 不同堆载单元瞬时沉降深度时淤泥层的稳定性, 沉降深度与安全系数成正比(不同堆载宽度时, 该曲线的规律相似, 只是数值不同); 找到安全系数为 1 的挤淤深度, 即为该堆载单元的挤淤瞬时沉降.

3) 用同样的方法, 对不同堆载宽度的堆载单元的最终挤淤瞬时沉降进行计算, 绘制相应的堆载宽度 - 挤淤瞬时沉降变化关系曲线, 如图 5 所示. 可以看出, 瞬时沉降随堆载单元宽度的增大而单调增大; 但是当堆载宽度大于 5 m 时, 瞬时沉降不再变化, 相应的挤淤瞬时沉降为 4.2 m.

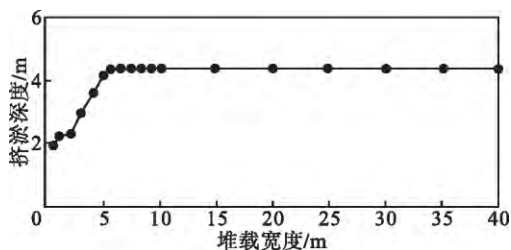


图 5 挤淤瞬时沉降随堆载宽度变化曲线

Fig. 5 Relationship curve between the silt-replacement instantaneous settlement and the dumping width

4) 根据图 5 所示的挤淤瞬时沉降随堆载宽度的变化规律, 在距离堆载的终点 5 m 之外的挤

淤瞬时沉降是 4.2 m; 而在距离堆载终点小于 5 m 的范围内, 挤淤瞬时沉降越靠近终点就越小; 再加上终点附近的三角形荷载的影响, 可以认为在终点附近, 挤淤瞬时沉降是逐渐减小的, 直到挤淤瞬时沉降为 0 的终点处. 从而得到如图 6 所示的挤淤断面.

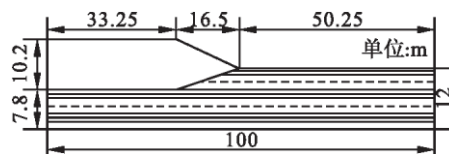


图 6 拦污坝堆载挤淤瞬时沉降计算结果

Fig. 6 Barrier dam dumping silt-replacement instantaneous settlement calculation result

可以看出, 堆载作用下拦污坝挤淤瞬时沉降断面是一条折线, 折线形状与上覆堆载体的断面形状具有正相关性: 从堆载左端到堆载平台坡顶处, 对应的挤淤断面是一条水平直线, 说明这一段的挤淤瞬时沉降是一致的; 从堆载平台坡顶处到坡脚处, 对应的挤淤断面是一条逐渐减小的直线, 说明在这一段挤淤瞬时沉降逐渐减小.

### 3 后续堆载挤淤固结沉降断面分析

#### 3.1 理论基础

比奥(Biot) 根据应力平衡方程、相容方程、应力应变方程和连续性方程, 通过严格的理论推导, 得到了固结渗流分析的控制方程, 可以准确地反映孔压消散与土骨架变形的关系.

修正的剑桥模型是建立在土体的压硬性和剪胀性的基础上的, 它表达意义明确, 参数简单易于从室内获取, 在工程中得到了广泛的应用. 尽管学者们针对土复杂的力学特性, 在修正的剑桥模型基础上, 提出了各种更加高级的本构模型, 但是因为其结构过于复杂, 限制了其在工程中的应用. 因此, 本文选择使用修正的剑桥模型来描述淤泥的力学特性.

比奥固结理论根据完整的力学理论和渗流理论, 对固结过程中的孔压、应力、应变状态进行分析; 当使用的土体本构关系能够准确描述土体的应力应变关系时, 不仅可以准确描述外荷载作用下土体的变形, 而且对孔隙水压力的变化规律的描述也非常准确. 而修正的剑桥模型, 正是一个特别适合反映淤泥应力应变关系的土体本构模型. 因此, 本文将采用修正的剑桥模型来模拟淤泥的力学特性, 结合比奥固结理论, 准确模拟堆载作用下淤泥层的挤淤固结沉降.

为验证比奥固结理论和修正剑桥模型以及相应材料参数的适用性,进行了一批应变控制三轴剪切试验,验证数值模拟计算结果与试验结果的关系.数值分析模型的材料参数通过室内试验得到,如表 2 所示.

表 2 三轴剪切试验数值分析参数  
Table 2 Triaxial shear test numerical analysis parameters

$\lambda/\text{MPa}^{-1}$	$k/\text{MPa}^{-1}$	$e_0$	$e_1$	$v$	$M$	$K/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
0.23	0.025	2.4	2.2	0.3	0.6	$5.92 \times 10^{-7}$

注:  $R$  为对数回弹模量;  $\lambda$  为对数塑性模量;  $v$  为泊松比;  $e_1$  为等向压缩曲线的起点;  $M$  为临界应力比;  $K$  为渗透系数;  $e_0$  为初始孔隙比.

图 7 为不同围压时数值模拟分析和试验分析的竖向应变与孔隙水压力、主应力差的关系曲线;从图中可以看出,不同围压下竖向应变-孔隙水压力、竖向应变-主应力差的数值模拟的结果与试验结果可以较好地吻合.可见比奥固结理论和修正剑桥模型的数值分析和相关材料参数能够对淤泥的力学特性进行准确的模拟.

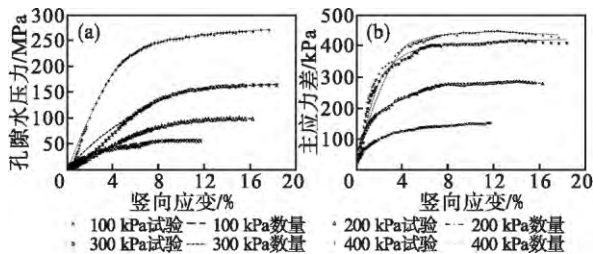


图 7 竖向应变与孔隙水压力、主应力差的关系曲线  
Fig. 7 Vertical strain-pore water pressure, principle stress difference curve  
(a) — 孔隙水压力; (b) — 主应力差.

### 3.2 数值模型的建立

根据挤淤瞬时沉降计算结果,利用有限元分析软件 ABAQUS 建立挤淤固结沉降的数值分析模型如图 8 所示.



图 8 1 号拦污坝模型  
Fig. 8 1# barrier dam model

淤泥原始厚度为 12 m,堆载的坝体分为两个部分:下面部分为 6 m,为初期堆载平台;上面部分为 7 m,为后续的堆载坝体.挤淤固结沉降的计算需要考虑上下两个部分的共同作用.模型的边界条件为:左右侧固定水平向位移,底部固结竖直

向位移.淤泥与堆载料的交界处孔压保持为 0.堆载材料使用摩尔-库伦本构模型,淤泥材料使用修正剑桥模型.材料参数通过室内试验获得,如表 3 所示.

表 3 堆载材料参数  
Table 3 Dumping material parameters

$E/\text{MPa}$	$v$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{°})$
700	0.3	38	27.5

### 3.3 堆载挤淤固结沉降应力场

图 9 图 10 分别为固结完成时的水平应力云图、竖直应力云图、剪应力云图和孔隙水压力云图.

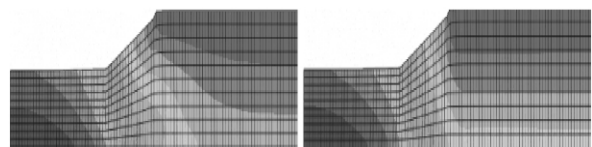


图 9 水平应力、竖直应力云图  
Fig. 9 Lateral stress and vertical stress contours

水平应力与竖直应力有着相同的变化趋势:最大值分布于淤泥层的左下角,最小值于淤泥层的右侧,并且呈现出从左下往右上逐渐减小的趋势.水平、竖直应力最大值分别为 265 400 kPa,最小值分别为 2.6 6 kPa.

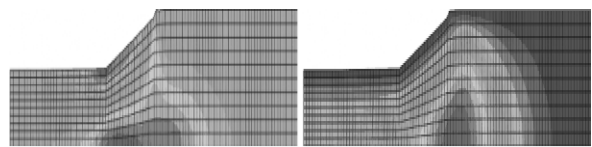


图 10 剪应力、孔隙水压力云图  
Fig. 10 Shear stress, pore water pressure contours

剪应力最大值位于堆载料坡脚处下方淤泥层底部,为 27.35 kPa,最小值位于淤泥面第一个坡脚处,为 -25.71 kPa;由于堆载料坡脚和淤泥面坡脚的存在,淤泥层中产生了非常明显的应力集中现象,这将对堆载作用下的整体稳定性有影响.最大孔隙水压力集中于堆载料坡脚处下方的淤泥底部,为 1.0 kPa,说明固结已经完成.

图 11 所示为淤泥层中轴线底部位置节点孔隙水压力时程图,在荷载施加初期,孔隙水压力随荷载增加而持续增加,当孔隙水压力增加到 60 kPa 时,不再增加,反而随着荷载增加而持续下降;当荷载施加完成以后,即 180 d 以后,荷载不再增加,孔隙水压力剧烈减小,并且最终趋于 0,说明固结作用完成,此时的淤泥层沉降就是最终的固结沉降.

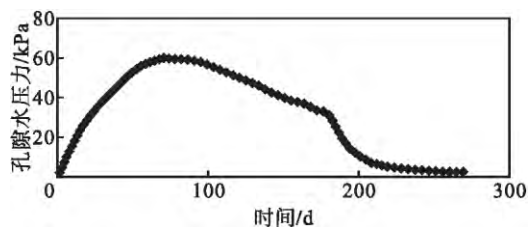


图 11 孔隙水压力时程曲线  
Fig. 11 Pore water pressure time-history curve

### 3.4 堆载挤淤固结沉降位移场

图 12 为固结完成时的水平位移以及竖直位移云图,从图中可以看出,最大的水平位移处于淤泥面坡脚处下方区域,大小为 0.21 m,在一定的范围内集中,最小的水平位移为 0。最大的竖向沉降产生在左上角的淤泥表面处,其值为 1.087 m,最小竖向沉降值为 0。从竖直位移云图可以看出,固结沉降结果分层性比较明显,从上往下,沉降值越来越小;同一深度处,左侧的沉降值大,右侧的沉降值逐渐变小。

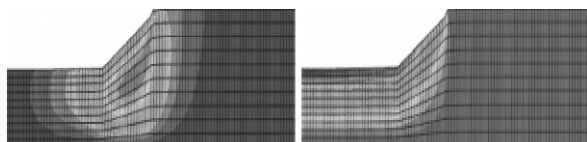


图 12 水平位移、竖直位移云图  
Fig. 12 Lateral and vertical displacement contours

图 13 为淤泥层中轴线处固结沉降时程曲线。从图中可以看出,在荷载施加之前,竖向沉降随荷载增加持续增大,呈现类似线性关系;当荷载施加完成后,竖向沉降继续增加,随着时间增加,竖向沉降增加幅度逐渐减小,并且最后趋于稳定,沉降值不再增加,说明固结完成。

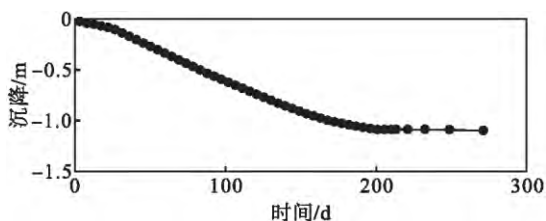


图 13 固结沉降时程曲线  
Fig. 13 Consolidation settlement time-history curve

图 14 为淤泥层与堆载料接触面由于固结沉降作用而产生的沉降分布图,从图中可以看出,荷载作用下,竖向沉降从淤泥层中轴线处向右端逐渐减小,呈现非线性减小的趋势,越往右端,减小的幅度越大。

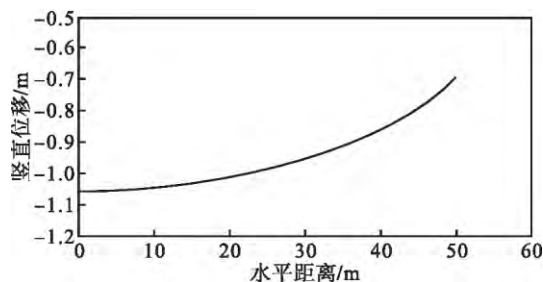


图 14 堆载挤淤固结沉降  
Fig. 14 Dumping silt-replacement consolidation settlement

图 15 为原始淤泥面在经历了堆载体的挤淤瞬时沉降和固结沉降作用之后形成的沉降曲线。从图中可以看出,沉降曲线为一个倒梯形:从淤泥层左端到 33.25 m 处为水平直线段,从 33.25 m 处到堆载体坡脚处为线性减小的斜线段。

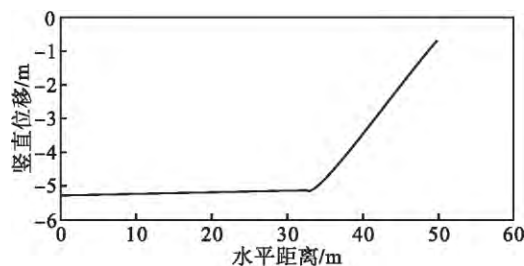


图 15 堆载挤淤总沉降  
Fig. 15 Dumping silt-replacement final settlement

## 4 堆载挤淤沉降断面现场检测

高密度电法作为一种物探方法,具有采集数据量大、分辨率高、信息丰富等优点<sup>[9-10]</sup>。采用 WGMD-3 型高密度电阻率测量系统进行拦污坝挤淤断面形状的检测,其工作原理为:在测量断面的两侧范围内,预估探测深度,确定极距安装电极系;电极系与电极转换器连接;通过高密度主机控制多路电极转换器,经由电极系完成断面数据自动采集;通过通讯程序将原始数据传入计算机;计算机根据不同地层的视电阻率色谱图,解译出对应的断面结果。

根据数值计算结果,预估探测深度,选用测量极距为 5 m,各供电及测量电极采用铜质电极,供电电压为 270 V,最小测量信号大于 5 mV。拦污坝挤淤形成的地层环境中,淤泥视电阻率为  $n \times 10 \Omega \cdot m$ ;第四系黏土视电阻率一般为  $n \times 100 \Omega \cdot m$ ;砂岩视电阻率一般为  $n \times 100 \sim n \times 1000 \Omega \cdot m$ 。根据不同土体的不同电阻率,得到地层的高密度电法视电阻率色谱图,对色谱图进行解译,得到拦污

坝的堆载挤淤断面如图16所示.对比堆载挤淤断面的数值分析结果和现场检测结果,可以发现:最终的堆载挤淤沉降断面为与堆载对应的倒梯形,数值计算结果和现场监测结果可以较好地吻合,证明了堆载挤淤沉降断面分段计算方法的正确性.

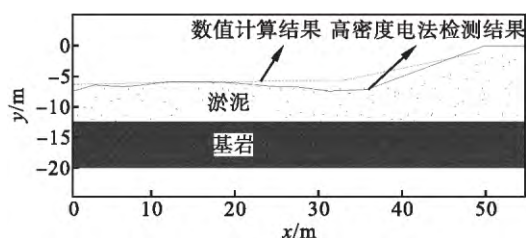


图16 高密度电法断面分析结果

Fig. 16 High density resistivity method section analysis result

## 5 结 语

堆载挤淤沉降断面由初期荷载的挤淤瞬时沉降和后续荷载的挤淤固结沉降组成;挤淤瞬时沉降取决于堆载作用下淤泥层的稳定性;挤淤固结沉降取决于堆载作用下淤泥层的固结压缩.本文以某拦污坝工程为背景,应用有限元数值分析方法,建立了挤淤瞬时沉降和挤淤固结沉降的计算方法,确定了最终的挤淤沉降断面,为下一步的堆载挤淤稳定性分析建模提供了基础.最后,通过高密度电法对现场的堆载挤淤沉降断面进行检测,验证了上述分析方法的正确性.

### 参考文献:

[1] 詹巧水. 压砂挤淤工艺在软基处理中的应用[J]. 广西交通科技 2001 26(4): 78-79.  
(Zhan Qiao-shui. Application of sand flow silt technique in soft ground treatment [J]. *Guangxi Communication Science and Technology* 2001 26(4): 78-79.)

[2] 王艳芳, 俞缙, 周治刚, 等. 深厚软基抛石挤淤技术应用研究[J]. 中国公路学报 2011 6: 24-30.  
(Wang Yan-fang, Yu Jin, Zhou Zhi-gang, et al. Application research on technology of dumping rockfill for extruding silt in deep soft subgrade [J]. *China Journal of Highway and Transport* 2011 6: 24-30.)

[3] 杨光煦. 压载挤淤研究[J]. 岩土工程学报, 1992, 12(2): 72-76.  
(Yang Guang-xu. Compaction silt-replacement research [J]. *Chinese Journal of Geotechnical engineering*, 1992, 12(2): 72-76.)

[4] 杨光煦. 挤淤[J]. 水利学报, 1992, 12(5): 59-64.  
(Yang Guang-xu. Silt-replacement [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1992, 12(5): 59-64.)

[5] 张明鸣, 徐卫亚, 夏玉斌, 等. 抛石挤淤机理及其颗粒流数值模拟研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(1): 310-315.  
(Zhang Ming-ming, Xu Wei-ya, Xia Yu-bin, et al. Mechanism of backfill rocks to squeeze out ooze and simulated by partial flow code [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2010, 41(1): 310-315.)

[6] 余海忠, 刘国楠, 徐玉胜, 等. 抛石挤淤成堤断面形态研究[J]. 中国铁道科学 2011 32(3): 1-7.  
(Yu Hai-zhong, Liu Guo-nan, Xu Yu-sheng, et al. Study on the shape of the dike constructed by squeezing soft clay method [J]. *China Railway Science*, 2011 32(3): 1-7.)

[7] 姜景山. 深厚软基抛石挤淤加固机理数值模拟研究[J]. 长江科学院院报 2013 30(2): 41-46.  
(Jiang Jing-shan. Numerical simulation on the mechanism of reinforcing deep soft soil foundation by dumping riprap to extrude silt [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute* 2013 30(2): 41-46.)

[8] 汪洪星, 杨春和, 陈锋, 等. 大高度堆载挤淤深度分析[J]. 武汉理工大学学报 2014 36(3): 121-127.  
(Wang Hong-xing, Yang Chun-he, Chen Feng, et al. Big height dumping silt-replacement depth analysis [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2014, 36(3): 121-127.)

[9] 严加永, 孟贵祥, 吕庆田, 等. 高密度电法的进展与展望[J]. 物探与化探 2012(4): 576-584.  
(Yan Jia-yong, Meng Gui-xiang, Lyu Qing-tian, et al. The progress and prospect of the electrical resistivity imaging survey [J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2012 (4): 576-584.)

[10] 王恩德, 门业凯, 张忠杰, 等. 基于高密度电阻率法的铁矿山采空区数值模拟[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34(7): 1022-1025.  
(Wang En-de, Men Ye-kai, Zhang Zhong-jie, et al. Numerical simulation on concealed goaf at the iron mine based on high density resistivity method [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2013, 34(7): 1022-1025.)