

# 土石坝分层填筑位移场修正的一种新方法

杜 斌<sup>1)</sup> 吴梦喜

(中国科学院力学研究所环境力学重点实验室, 北京 100190)

**摘要** 在进行土石坝分层填筑情况下的应力变形有限元计算时, 需要对新填土层做位移修正. 考虑牵连位移和相对位移两个方面对新填土层中质点位移的影响, 推导了一维情况下线弹性材料一次加荷与多级加荷时沉降的理论解, 建立了针对新填土层的一种新的位移修正方法, 应用该方法修正分层填筑位移场可以消除位移等值线不合理的锯齿状特征, 并结合典型算例与已有方法进行了对比分析. 结果表明, 新的位移修正方法具有较好的修正效果.

**关键词** 分层填筑, 修正方法, 位移场, 有限元

**中图分类号:** TV641 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0879(2011)04-023-06

## A NEW APPROACH FOR MODIFICATION OF DISPLACEMENT IN INCREMENTAL CONSTRUCTION ANALYSIS OF EARTH-ROCK DAM

DU Bin<sup>1)</sup> WU Mengxi

(Laboratory of Environmental Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract** The incremental construction analysis is widely applied in the Finite Element Analysis of stress and deformation in the construction of earth-rock dams. The simulated displacement field may not be suitable for the use in the practice due to the new filling soil. Thus, the computed displacement field in the new filling soil should be modified. Based on the fact that the total displacement consists of the convected displacement and the relative displacement, the theoretical settlement solutions in the 1-D condition are obtained in two different construction cases. One is in a single lift and the other is in multi lifts. These solutions show that the convected displacement has a great effect on the total displacement. A new approach for modification is proposed, and a comparison with existing approaches is made for a typical example. The results indicate that the new approach is more accurate and effective to eliminate unrealistic features in contours of displacement.

**Key words** incremental construction, modification, displacement, finite element method

在土石坝应力变形的有限元计算中, 已普遍采用逐级加荷的方法模拟坝体逐层填筑的施工过程: 仿照实际施工情况, 计算时划分为若干填筑级, 依次激活各填筑级的单元和载荷, 以模拟坝体逐层填筑的影响. 综合考虑坝高、仿真精度及计算耗时等因素, 填筑级常不能与实际施工层一一对应, 而是将多个实际的施工层简化为计算时的一个填筑级<sup>[1]</sup>, 整个坝体填筑过程往往被人为划分为十多个或数十个填筑级<sup>[2-5]</sup>. 对某个填筑级进行计算时, 荷载增量

是一次施加的, 而与该填筑级相对应的实际施工层是逐层填筑的, 这会导致该填筑级中新填土层的位移场分布与实际不符, 如顶面节点位移不为零, 并最终引起累积位移的等值线出现不合理的锯齿状现象, 需要对该填筑级新填土层的单元节点进行位移修正<sup>[6]</sup>.

若某填筑级的新填土层中只有一层单元, 且单元类型为一次单元, 那么该新填土层中除了上下层面节点外没有层内节点, 仅需对顶面节点做位移修

2011-01-29 收到第 1 稿, 2011-03-30 收到修改稿.

1) 杜斌, 1987 年生, 男, 硕士研究生, 主要从事水工结构、岩土工程中的应力变形仿真方面的研究. E-mail: dubin@live.com

正, 实用上常采用置 0 修正 [7]. 一般情况下, 受限于网格划分, 或为提高有限元计算精度, 一个填筑级中往往包含若干层单元, 或采用高次单元, 使得新填土层内部存在有限元节点, 对此还需要对这些内部节点做位移修正, 即将层内节点的位移计算结果修正成为按逐级填筑施工的位移值.

以一维线弹性土柱的一次加荷与多级加荷时相对位移的理论解为基础, 可采用乘以修正系数的方法 [6,8] 或减去修正值的方法 [9] 修正新填土层内的位移计算结果. 新填土层中某质点的位移 (绝对位移) 包括已填筑土层的顶部土体质点在当前填筑级计算中的位移 (牵连位移) 和新填土层中该质点以下土体的压缩变形 (相对位移) 两部分. 仅考虑相对位移的理论解进而对新填土层进行位移修正的方法会造成修正结果的不准确. 本文将考虑牵连位移和相对位移两个方面的影响, 在推导一维情况下分层填筑问题的理论解的基础上, 试图发展一种简单而有效的新填土层位移修正方法, 并结合典型算例与目前已有修正方法进行对比分析.

### 1 一维情况下分层填筑问题的理论解

为求取一维情况下分层填筑问题中沉降的理论解, 姑且将土作为弹性体、体积压缩系数  $m_v$  设为常量, 来讨论新填土层内距顶部 (如图 1 中  $O$  点所示)  $z$  深度处  $A$  点的沉降.  $A$  点的沉降是  $A$  点以下区域 (即图 1 中  $AF$  区域) 土体的压缩量, 亦可视为  $A$  点相对于  $B$  点的压缩量与  $B$  点在本填筑级计算中的沉降量之和. 图中两相邻黑色实心点间代表一个填筑级, 如  $OB$  区域为同一填筑级;  $\sigma_z$  表示引起  $A$  点土体沉降的应力, 并非全部土体的自重应力. 那么,  $A$  点的沉降  $s$  可表示为

$$s = \int_z^{h+H} m_v \sigma_z d\xi = \int_z^h m_v \sigma_z d\xi + \int_h^{h+H} m_v \sigma_z d\xi \quad (1)$$

式中,  $z$  为  $A$  点距新填土层顶部  $O$  点的深度,  $h$  为新填土层的厚度,  $H$  为已填筑土层的厚度,  $m_v$  为体积压缩系数,  $\sigma_z$  为引起  $A$  点土体沉降的应力.

#### 1.1 新填土层按一次加荷计算

就新填土层 (即  $OB$  区域) 按一次加荷情况来看, 引起  $A$  点沉降的应力在  $AB$  压缩层内呈梯形分

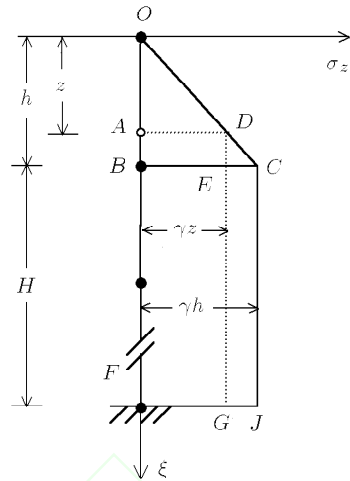


图 1 一维填筑问题的应力示意图

布 (如图 1 中  $ABCD$  所示), 在  $BF$  压缩层内呈矩形分布 (如图 1 中  $BCJF$  所示). 即

$$\sigma_z = \begin{cases} \gamma \xi, & z \leq \xi < h \\ \gamma h, & h \leq \xi \leq (h + H) \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\gamma$  为土体容重.

那么, 将式 (2) 代入式 (1), 可得到一次加荷情况下  $A$  点的沉降  $s_z$

$$s_z = m_v \gamma \cdot (h^2 - z^2)/2 + m_v \gamma h H \quad (3)$$

式 (3) 右边项中的第 1 项表示  $A$  点相对于  $B$  点的压缩量 (相对位移), 下文用符号  $s_{zr}$  表示, 即

$$s_{zr} = m_v \gamma \cdot (h^2 - z^2)/2 \quad (4)$$

式 (3) 右边项中第 2 项表示  $B$  点在本填筑级计算中的沉降量 (牵连位移), 下文用符号  $s_{zc}$  表示, 即

$$s_{zc} = m_v \gamma h H \quad (5)$$

#### 1.2 新填土层按多级加荷计算

对新填土层 (即  $OB$  区域) 按多级加荷情况考虑, 当填土到  $A$  点的高度时,  $A$  点以下土体自重引起的沉降已在填土过程中完成,  $A$  点此时的沉降为零. 当填土超过  $A$  点的高度时,  $A$  点才有沉降.  $A$  点的沉降是  $A$  点以上土体的自重引起的  $A$  点以下土体的压缩, 当填土到该填筑级顶部时, 引起  $A$  点沉降的应力在  $AF$  压缩层内呈矩形分布 (如图 1 中  $ADGF$  所示). 即

$$\sigma_z = \gamma z, \quad z \leq \xi \leq h + H \quad (6)$$

那么, 将式 (6) 代入式 (1), 可得到多级加荷情况下  $A$  点的沉降  $s'_z$

$$s'_z = m_v \gamma z \cdot (h - z) + m_v \gamma z H \quad (7)$$

式 (7) 右边项中的第 1 项表示  $A$  点相对于  $B$  点的压缩量 (相对位移), 下文用符号  $s'_{zr}$  表示, 即

$$s'_{zr} = m_v \gamma z \cdot (h - z) \quad (8)$$

式 (7) 右边项中的第 2 项表示  $B$  点在多级加荷计算中的沉降量 (牵连位移), 下文用符号  $s'_{zc}$  表示, 即

$$s'_{zc} = m_v \gamma z H \quad (9)$$

比较式 (3) 和式 (7), 结果如图 2 所示. 从图中可以看出, 对新填土层按一次加荷与按多级加荷进行计算的结果明显不同. 对新填土层按一次加荷进行计算, 表层土体 ( $O$  点) 的沉降最大; 而按多级加荷进行计算, 表层土体的沉降最小, 为零.

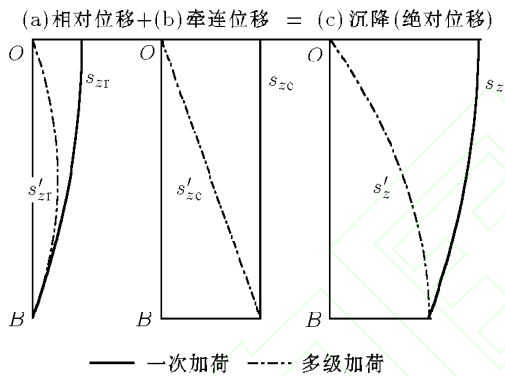


图 2 一次加荷与多级加荷的沉降比较

## 2 修正方法

针对新填土层的位移结果进行修正, 即对每一新填土层把按一次加荷算出的位移  $u$  修正到多级加荷时的位移  $u'$ <sup>[6]</sup>, 保证每一填筑级新填土层的位移分布与按多级加荷的情况一致.

对于上文中的一维问题, 为将式 (3) 结果修正为式 (7) 结果, 也就是将图 2 中沉降曲线 (c) 的一次加荷结果修正到多级加荷的结果. 新填土层中某质点的沉降包括已填筑土层的顶部土体质点在该填筑级计算中的位移 (牵连位移) 和新填土层中该质点以下土体的压缩变形 (相对位移) 两部分, 可以对这两个组成部分分别进行修正. 设相对位移和牵连位移的修正系数分别为  $\beta'$  和  $\beta''$ , 即

$$\beta' = \frac{s'_{zr}}{s_{zr}}, \quad \beta'' = \frac{s'_{zc}}{s_{zc}} \quad (10)$$

将式 (4), (5), (8) 和 (9) 代入式 (10), 则可得

$$\left. \begin{aligned} \beta' &= \frac{m_v \gamma z \cdot (h - z)}{m_v \gamma \cdot (h^2 - z^2)/2} = \frac{2z}{h + z} \\ \beta'' &= \frac{m_v \gamma z H}{m_v \gamma h H} = \frac{z}{h} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

将式 (10) 代入式 (7), 可得

$$s'_z = \beta' s_{zr} + \beta'' s_{zc} \quad (12)$$

利用式 (12), 那么针对新填土层的近似的修正关系为

$$u' = \beta' u_r + \beta'' u_c \quad (13)$$

其中,  $u_r$  和  $u_c$  分别表示新填土层按一次加荷进行计算得到的竖向相对位移 (新填土层中该质点以下土体的压缩变形) 和竖向牵连位移 (已填筑土层的顶部土体质点在该填筑级计算中的位移), 对于一次加荷计算所得的总竖向位移  $u = u_r + u_c$ ;  $u'$  为修正到多级加荷后的竖向位移;  $\beta'$  和  $\beta''$  分别为相对位移和牵连位移的修正系数, 具体计算方法见式 (11).

然而, 在对有限元计算结果进行处理时, 对于大多数问题, 得到牵连位移较为困难, 上述修正方法实用性欠佳, 可考虑采用如下的简化修正方法.

设新填土层位移的总体修正系数为  $\beta$ , 即

$$u' = \beta u \quad (14)$$

对于本文中一维问题, 有

$$\beta = \frac{s'_z}{s_z} \quad (15)$$

将式 (3) 和 (7) 代入式 (15), 化简可得

$$\beta = \frac{\frac{z}{h} \left(1 - \frac{z}{h}\right) \frac{h}{H} + \frac{z}{h}}{\frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{z}{h}\right)^2\right] \frac{h}{H} + 1} \quad (16)$$

将总体修正系数  $\beta$  按  $h/H$  比值的不同分别绘出, 如图 3 所示; 为方便对比, 相对位移和牵连位移的修正系数  $\beta'$  和  $\beta''$  的曲线亦绘于图 3 中. 从图中可知, 随着相对埋深  $z/h$  的增加, 修正系数从 0 逐渐增长到 100%, 总体修正系数介于相对位移修正系数和牵连位移修正系数之间. 以  $h/H = 1/2$  时为例, 即当新填土层厚度为下部已填筑土体厚度的一半时, 牵连位移修正系数  $\beta''$  与总体修正系数的最大差值为 3%, 而相对位移修正系数  $\beta'$  与总体修正系

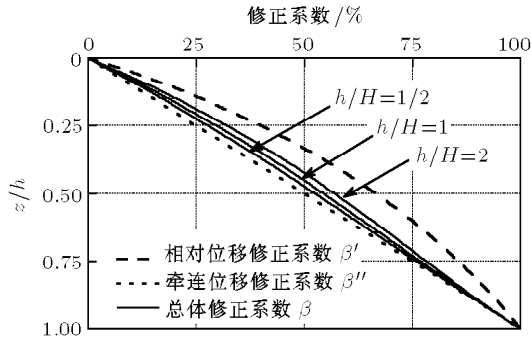


图 3 修正系数的比较

数的最大差值为 14%，这表明与相对位移比，牵连位移对总体位移的影响较大，牵连位移修正系数更接近总体修正系数。

一般而言，采用逐级加荷的方法模拟坝体施工过程中时，新填土层的厚度远小于下部已填筑土体厚度的一半，即  $0 < h/H \ll 1/2$ ，此时， $\beta \approx \beta''$ 。容易证明，在  $z/h \in (0, 1)$ ， $h/H \in (0, +\infty)$  时，随着  $h/H$  的减小， $|\beta - \beta^*|$  亦减小，这表明总体修正系数曲线逐渐接近牵连位移修正系数  $\beta''$  曲线。这同时表明，随着  $h/H$  的减小，总体修正系数曲线与相对位移修正系数  $\beta'$  曲线的差距将逐渐变大。

因此，一般情况下，可取新填土层位移修正系数  $\beta$  等于牵连位移修正系数  $\beta''$ ，即取修正系数  $\beta$  为

$$\beta = \frac{z}{h} \tag{17}$$

综合式 (14) 和式 (17)，得到针对新填土层的近似的修正关系为

$$u' = \frac{z}{h} \cdot u \tag{18}$$

式中， $u$  为新填土层中网格节点在该填筑级计算中所得位移值； $u'$  为修正后的位移值； $z$  为待修正节点距新填土层顶部的深度； $h$  为该节点所处新填土层的厚度。

修正式 (18) 是基于一维情况下线弹性材料的分层填筑模型得到的竖向位移的近似修正关系，而对于二维 / 三维的分层填筑情况，水平位移的修正也可近似采用。应注意，这种修正方法针对的仅是当前填筑级下新填土层的位移计算结果。修正后的位移是为了求累积位移，切不可用来推算应变和应力 [6,9]。

值得注意的是，在推导修正公式时，若仅考虑新填土层中不同填筑方法的相对位移的关系，忽略牵连位移的影响，取总体修正系数为相对位移修正系

数  $\beta'$ ，则可得到文献 [6] 中的修正公式，即

$$u' = \frac{2z}{h+z}u \tag{19}$$

与本文修正公式 (即式 (18)) 相比，新填土层顶面和底面节点位移的修正效果二者相同，即当  $z = 0$  时， $u' = 0$ ；当  $z = h$  时， $u' = u$ 。而修正效果的不同之处体现在对新填土层的层内节点位移的修正上，由前文分析可知，与相对位移比，牵连位移对总体位移的影响较大，一般情况下牵连位移修正系数与总体修正系数的最大差值将小于 3%，而相对位移修正系数与总体修正系数的最大差值将大于 14%，故本文推导修正公式时，取新填土层位移修正系数为牵连位移修正系数  $\beta''$ 。

### 3 算例比较

在实际工程的有限元仿真计算中，土体的本构模型往往采用非线性弹性或弹塑性模型，在国内土石坝变形计算中，多采用 Duncan-Chang 非线性弹性本构模型 [10]。本算例为二维平面应变问题，计算网格和材料参数采用文献 [11] 的数据：简单的心墙堆石坝，对称坝面，坝高 100m，坝顶宽 10m，上下游坝坡坡比 1:2；心墙顶宽 6m，心墙坡比 1:0.2；网格划分为 20 层，每层厚度为 5m；材料的本构模型采用 Duncan-Chang 模型，计算参数见表 1；均采用一次单元，有限元网格如图 4 所示。

表 1 材料的计算参数 [11]

材料	$K$	$n$	$R_f$	$c/$ kPa	$\phi/$ (°)	$K_{ur}$	$K_b$	$m$	$\rho/$ ( $g \cdot cm^{-3}$ )
心墙	500	0.35	0.8	50	30	800	470	0.15	2.0
坝壳料	1100	0.30	0.8	10	40	1800	600	0.1	2.2

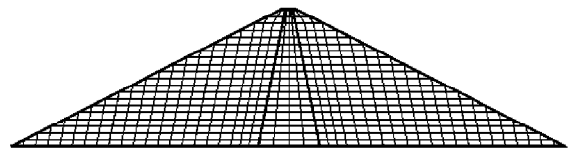


图 4 有限元网格

本文首先采用以下两种方案对坝体进行有限元分析：

方案 1(未修正方案)：10 个填筑级，每个填筑级对应两层网格，不进行位移场修正；

方案 2(本文修正方案)：10 个填筑级，每个填筑级对应两层网格，采用本文式 (18) 对新填土层位移计算结果进行修正。



坝体截面、受力、边界条件关于坝轴线对称，位移结果也是对称分布的，各取坝体的一半进行对比，如图 5 所示。由图 5(a) 可见，应用本文方法修正后得到了平滑的位移等值线，消除了未修正时不合理的锯齿状现象。此外，对于未做修正的结果，坝体顶部的竖向位移为 17.6 cm；经过本文方法修正后，顶部位移为零，这与实际情况下的结果相符。

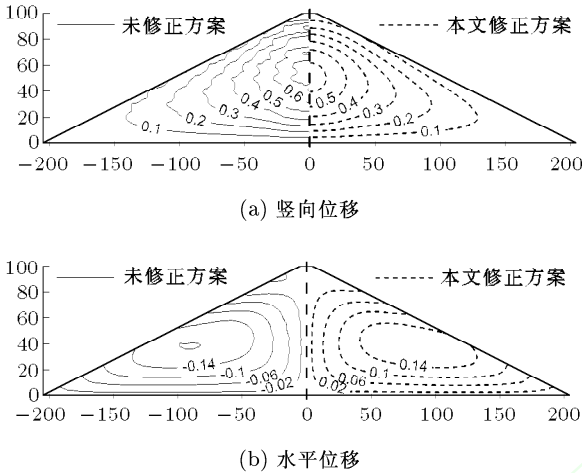


图 5 结果对比

为进一步探讨本文修正方法的精度，并与已有的修正方法进行对比分析，设置如下两种对比方案：

对比方案 1(已有修正方案)：10 个填筑级，每个填筑级对应两层网格，修正公式采用文献 [6] 公式，即本文式 (19)；

对比方案 2(基准方案)：将计算填筑级由 10 个增至 20 个，每个填筑级对应一层网格。对于本算例，此方案可使新填土层仅新增一层节点，即为该填筑级中新填土层的顶面节点，就不存在层内节点位移修正的问题，只需对顶面节点做位移置 0 修正即可，得到较为准确的位移场 [8]。值得注意的是，对于采用一次单元的网格，通过增加填筑级的计算数量可使部分情况下的层内节点转换为顶面节点，但对于高次单元，该方法并不能消除层内节点，仍需对层内节点的位移进行相关修正。

未修正方案、本文修正方案以及两种对比方案的最大位移值的统计数据见表 2。对比垂向位移的最大值可知，与基准方案比，已有修正方案的误差绝对值为 1.6 cm，本文修正方案的误差绝对值为 0.4 cm，相比减小了 75%。

与基准方案比，已有修正方案中所有节点位移的误差绝对值的最大值和平均值分别为 4.6 cm 和 0.7 cm，本文修正方案为 2.2 cm 和 0.2 cm，分别减小

表 2 不同方案计算结果对比

方案	竖向位移		水平位移 最大值 /m
	最大值 /m	所在位置 /m	
未修正方案	0.771	(0,60)	0.181
本文修正方案	0.635	(0,50)	0.176
已有修正方案	0.655	(0,55)	0.177
基准方案	0.639	(0,50)	0.176

了 53% 和 74%。

坝体呈对称的梯形，垂向位移最大值出现在坝轴线处，坝轴线 30~70 m 高程处节点的竖向位移分布曲线如图 6 所示。由图 6 可知，未做修正的位移曲线锯齿状特征明显，这与实际情况下连续而又平滑的位移曲线 [9] 有出入，采用已有修正方案的结果有所好转；本文修正方案消除了不合理的锯齿状特征，得到了形态较为合理的平滑曲线，且与基准方案比，该区域误差绝对值最大为 0.7 cm，占基准方案最大位移的 1%，修正效果较好。此外，本文修正方案的竖向位移最大值出现在 50 m 高程处，这与基准方案相一致。

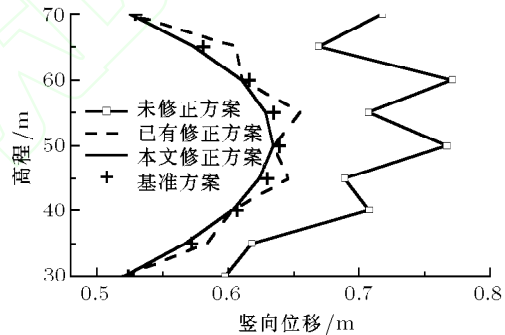


图 6 坝轴线 30~70 m 高程处竖向位移分布对比

为进一步说明几种不同方案中竖向位移的差异，取一新填土层的层内节点面进行分析，如高程为 55 m 的截面，在坝体竣工时该截面上的竖向位移分布如图 7 所示。由图 7 可见，本文修正方案与基准方案结果吻合较好，与已有修正方案相比更加接

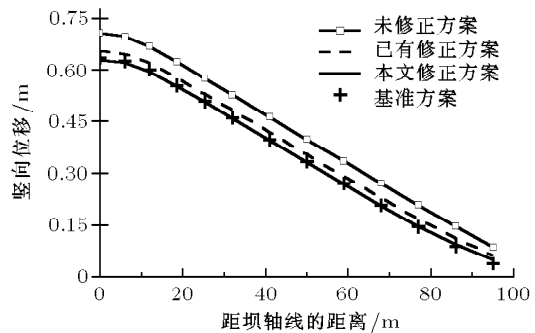


图 7 55 m 高程水平截面上竖向位移分布对比

近基准方案：在该水平截面处，与基准方案结果相比，已有方案的修正误差绝对值介于 2.0~2.3 cm 之间，误差绝对值的平均值为 2.1 cm；本文修正方案的误差绝对值最大为 1.2 cm，相比减小了 49%，误差绝对值的平均值为 0.3 cm，相比减小了 84%。

#### 4 结 论

(1) 考虑牵连位移和相对位移两个方面对新填土层中质点位移的影响，推导了一维情况下线弹性材料一次加荷与多级加荷时沉降的理论解；

(2) 以不同填筑加荷方式下的理论解为基础，得到了新填土层的相对位移修正系数、牵连位移修正系数以及总体修正系数。随着相对埋深的增加，修正系数均从 0 逐渐增长到 100%，总体修正系数介于相对位移和牵连位移修正系数之间。就新填土层厚度  $h$  与下部已填筑土体厚度  $H$  之比  $h/H$  的不同，探讨了对总体修正系数的影响：随着  $h/H$  逐渐减小至 0，总体修正系数逐渐接近牵连位移修正系数；当  $h/H = 1/2$  时，牵连位移修正系数与总体修正系数的最大差值为 3%；一般情况下，可取新填土层位移修正系数等于牵连位移修正系数；

(3) 采用本文式 (18) 对新填土层位移计算结果进行修正可以消除位移等值线不合理的锯齿状特征，更能反映分层填筑施工的真实位移场；

(4) 结合典型算例与目前已有的修正方法进行了对比，结果表明，采用本文方法使得最大误差和平均误差分别减小了 53% 和 74%。

#### 参 考 文 献

1 Naylor DJ. Finite element methods for fills and embank-

ment dams. In: *Advances in Rockfill Structures*. Dordrecht: Kluwer Academic, 1991. 291-340

2 Clough RW, Woodward RJ III. Analysis of embankment stresses and deformations. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 1967, 93(SM4): 529-549

3 Zomorodian SMA, Sahebzadeh K, Haghghi AT. Effect of number of layers on incremental construction analysis of earth and rockfill dam. In: *Dams and Reservoirs, Societies and Environment in the 21st Century*. London: Taylor & Francis, 2006. 825-830

4 唐岷, 陈群. 分层填筑模拟的层数对 300 m 级高土石坝沉降量的影响. *水电站设计*, 2008, 24(4): 15-18 (Tang Min, Chen Qun. Influence of simulated fill layer number on settlement of 300 m high embankment dams. *Design of Hydroelectric Power Station*, 2008, 24(4): 15-18 (in Chinese))

5 谢江红. 土石坝静力有限元分析. *黑龙江科技信息*, 2010, (15): 233

6 钱家欢, 殷宗泽. *土工原理与计算* (第二版). 北京: 中国水利水电出版社, 1996. 93-95

7 Naylor DJ, Mattar DJ. Layered analysis of embankment dams. In: *Numerical Methods in Geomechanics*. Rotterdam: A.A. Balkema, 1988. 1199-1205

8 王敏强, 聂向珍. 土(堆)石坝施工过程位移场有限元仿真分析. *武汉大学学报(工学版)*, 2003, 36(2): 74-78 (Wang Minqiang, Nie Xiangzhen. Displacement simulation of earth-rock dam in construction process by finite element method. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2003, 36(2): 74-78 (in Chinese))

9 陈慧远. *土石坝有限元分析*. 南京: 河海大学出版社, 1988. 38-41

10 Duncan JM, Chang CY. Nonlinear analysis of stress and strain in soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 1970, 96(SM5): 1629-1653

11 费康, 刘汉龙. ABAQUS 的二次开发及在土石坝静、动力分析中的应用. *岩土力学*, 2010, 31(3): 881-890 (Fei Kang, Liu Hanlong. Secondary development of ABAQUS and its application to static and dynamic analyses of earth-rockfill dam. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(3): 881-890 (in Chinese))

(责任编辑: 刘希国)

\*\*\*\*\*  
\* 新书架 \*  
\*\*\*\*\*

### 力学与沙尘暴

沙尘暴是近年来广受关注的环境问题之一。不仅是大气、地学等相关学科研究的重要内容之一，也因为其中有许多基础科学的共性问题，特别是力学问题，而得到其他学科的关注。本书的目的是通过对沙尘暴及其相关问题的介绍，揭示其与力学之间的联系，指出这些力学问题的解决对于力学学科本身发展所将起到的带动作用。全书共包括 25 个章节，分别涉及风沙流形成与发展的微观机理、沙尘暴的测量与预报、风沙电现象及其对电磁波的影响、风沙地貌、防沙治沙工程等多个方面。每个方面均从基本现象出发，着重趣味性，最终引出对其中力学问题的思考。有兴趣的读者只要具备一定的力学知识就能顺利阅读。本书作为中学生、大学生、研究生以及教师、相关科研人员、领导干部的科普读物，有助于对沙尘暴及沙漠化现象的认识和思考。(郑晓静, 王萍编著. 高等教育出版社出版)