第36卷第2期

文章编号:1673-9469(2019)02-0010-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.02.003

土石坝有限元分析中土体卸载时计算方法分析

张琪^{1,2},朱俊高^{1,2},张丹³,王龙^{1,2}

 (1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏南京 210098, 2. 江苏省岩土工程技术工程研究中心, 河海大学, 江苏南京 210098, 3. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072)

摘要: 对糯扎渡心墙堆石坝进行了三维有限元计算,对比分析两种常用于邓肯 E-B 模型的加卸载 准则以及回弹模量取值对土石坝应力变形的影响。结果表明: 大坝施工过程中,基于加载函数的 加却载准则(简称准则1)判断的却载回弹区域一直较大; 准则1下数值计算所得的坝体位移较小, 仅为采用基于应力水平 s 与偏应力(σ1-σ3)的加卸载准则(简称准则2)时计算位移的一半左右,加 卸载准则的选取对坝体应力影响较小; 监测数据表明糯扎渡大坝采用准则2时计算位移更为准确, 在准则2下回弹模量取值对大坝应力变形的影响主要表现为满蓄期坝体水流向位移随回弹模量的 增大而减小。

关键词:邓肯 E-B 模型;上石坝;回弹模量;加卸载准则 中图分类号:TU43 **文献标识码:**A

Analysis of Calculation Method in Finite Element Analysis of Unloading Rockfill Dam

ZHANG Qi^{1, 2}, ZHU Jungao^{1, 2}, ZHANG Dan³, WANG Long^{1, 2}

(1.Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing Jiangsu 210098; 2.Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing Jiangsu 210098; 3.China Power Construction Group Chengdu Survey and Design Institute Limited, Chengdou, Sichuan 610072)

Abstract: A three-dimensional finite element analysis of the model of the Nuozhadu core wall rockfill dam is performed to make a comparison of the two loading-unloading criteria commonly used in the Duncan-Chang model. The influences of the value of the rebound modulus on stress and deformation of the dam are analyzed. The results demonstrate that in the process of construction and impounding,

the loading and unloading criterion based on the loading function (law 1 for short) will lead to a bigger unloading fracture zone. The calculation of settlement in this law is nearly half of that in the loading and unloading criteria based on stress level s and deviatoric stress (σ_1 - σ_3) (law 2 for short). The alternative of loading-unloading criteria has little influence on the stress of dam. Monitoring data of Nuozhadu rockfill dam demonstrates that the calculation of settlement is more accurate in law 2. In case of taking law 2 as the loading and unloading criteria, the influence of modulus of resilience mainly shows that the settlement of impounding dam is decreased when modulus of resilience increase.

Key words: Duncan E-B model; rockfill dam; modulus of resilience; loading-unloading criteria

土石坝中,粗粒土占据大部分的坝体体积。在 填筑过程中以及受蓄水和水位下降的作用时,坝体 中粗粒土可能会经历加载、卸载的受力过程,引起 坝体的应力应变状态变化。为了更准确地掌握土石 坝的应力应变状态,褚福永等^[1]进行了不同粗粒土 的常规三轴加载-卸载-再加载的剪切试验,表明

收稿日期: 2019-01-22

基金项目:国家重点研发计划项目 (2017YFC0404801); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (KYCX18_0563);中央高校基本科研业 务费专项资金资助 (2018B662X14)

作者简介:张琪(1995-),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要从事岩土工程数值计算等方面的研究工作。

回弹模量随应力水平的增加呈驼峰型曲线。朱俊高 等^[2]通过对粗粒土进行的卸载-再加载的三轴固结 排水剪试验,发现粗粒土的回弹模量约为初始模量的 2.5~5.0倍,明显大于目前黏土的回弹模量。但在 实际工程模型的计算分析中,粗粒土回弹模量仍按经 验取值,试验成果尚未得到广泛的应用。对土体卸载 情况进行判断的加卸载准则,也有很多学者^[3-5]进行 相关研究。由于土体的本构模型多种多样,建立的 加卸载准则也是数目众多,在土体加卸载情况的判 断上还可能会互相冲突,这可能会导致有限元计算 结果的不稳定。

本文用邓肯 E-B 模型对糯扎渡心墙堆石坝进行 了三维有限元计算。分别采用基于加载函数的加卸 载准则和基于应力水平 s 与偏应力 (σ₁-σ₃) 的加卸载 准则,并改变粗粒土材料回弹模量数 K_w,研究粗粒 土卸载对坝体应力变形的影响。

1 计算模型与参数

1.1 邓肯 E-B 模型中回弹模量表示

为了反映土体回弹模量和加载模量的差别,邓 肯模型在弹性理论范围内,采用了卸载和再加载模 量不同与初始加载模量的方法。由于卸载一再加载 过程中应力应变表现为一个回滞环,用一个平均斜 率代替,表示为 *E*_{ur}。回弹模量 *E*_{ur} 表达式为:

$$E_{ur} = K_{ur} p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right)^{n_{ur}} \tag{1}$$

式中: K_{ur} 为卸载模量系数, n_{ur} 为卸载模量指数。 n_{ur} 取值一般与加载时相等, K_{ur} 一般根据经验选取 为 1.2 ~ 3.0K,为方便后文表述,将材料回弹模量 数 K_{ur} 与模量数 K 的比值用 N 表示,即一般经验 N=1.2 ~ 3.0。但是,对于粗粒土,文献 [2]的试验 结果显示 K_{ur} 约为 2.5 ~ 5.0K,即 N 的取值范围应 为 2.5 ~ 5。

1.2 糯扎渡心墙坝工程概况

糯扎渡心墙堆石坝位于澜沧江下游干流上。最 大坝高 261.5 m,上游坝坡坡度为1:1.9,下游为 1:1.8。主要材料分区包括:I区粗堆石料、II区 粗堆石料、反滤料 I、反滤料 II、心墙料等。大坝 典型剖面材料分布如图1所示。表1给出了各区土 石料由三轴试验确定的邓肯 E-B 模型参数。数值计 算采用三维静力有限元方法,使用河海大学岩土所 TDAD 三维有限元计算程序。该程序曾用于国内两



注: ED为心墙; F1为反滤I; F2为反滤II; RU1、RD1-I区堆石料; RU2、RD2-II区堆石料; RU3、RD3为细堆石料

图 1 大坝典型剖面材料分布图 Fig.1 Zoning of typical dam profile materials

rad.1 Material parameters of Duncan's E-B model								
	arphi /°	⊿ /°	K	п	K_b	т	Rf	
I区粗堆石料	54.37	10.47	1 491	0.241	683	0.101	0.719	
Ⅱ 区粗堆石料	51.36	9.58	1 400	0.175	474	0.145	0.706	
细堆石料	53.04	8.01	1 300	0.270	650	0.155	0.632	
II 反滤料	52.60	10.16	1 100	0.235	340	0.170	0.761	
I 反滤料	51.35	8.70	1 000	0.115	400	0.103	0.678	
心墙土料	39.47	9.72	388	0.311	206	0.257	0.755	

表 1 邓肯 E–B 模型材料参数 ab.1 Material parameters of Duncan's E-B mod

河口、长河坝等多个土石坝的应力变形计算分析。

2 两种加卸载准则对比分析

土体中应力出现卸载情况时,需要采用一定的 加卸载准则进行判断。邓肯 E-*B* 模型虽然考虑了卸 载再加载的情况,但并无公认准确的加卸载准则。 目前,邓肯 E-*B* 模型在实际应用中一般采用基于加 载函数的加卸载准则(以下简称准则1),以及基于 应力水平 *s* 与偏应力(σ₁-σ₃)的加卸载准则(以下简 称准则2)。下文对这两种准则进行详细介绍,并研 究它们对土石坝变形的影响。

2.1 基于加载函数的加卸载准则

邓肯 (Duncan) 等经研究后于 1984 年提出了如下加载函数:

$$f_l = \frac{\left(\sigma_1 - \sigma_3\right)}{\left(\sigma_1 - \sigma_3\right)_f} \left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right)^{\frac{1}{4}} = s \left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right)^{\frac{1}{4}}$$
(2)

式中 s=(σ1-σ3)/(σ1-σ3)f,称为应力水平。

加卸载准则具体表示为:

$$f_i \ge (f_i)_{\max} \qquad \qquad \text{int} \qquad E = E_i$$

$$0.75(f_i)_{\max} < f_i < (f_i)_{\max}$$
 过渡状态

$$E = E_t + (E_{ur} - E_t) \frac{1 - f_t / (f_t)_{\max}}{1 - 0.75}$$
(3)

 $f_l < 0.75(f_l)_{max}$ 卸载 $E = E_{ur}$

准则1是一种经验方法,理论上并不完善。且 已有文献表明在过渡状态时采用插值法对弹性模量 取值,可能低估了初始过渡阶段的卸载模量^[6];在 复杂应力路径下,该加卸载准则无法正确判别土体 的加卸载状况,导致计算结果失真^[7]。故而,对于 这一加卸载准则的合理性,有待进行更多的试验验 证与改良。

2.2 基于应力水平 s 与偏应力 (σ1-σ3) 的加卸载准则

该加卸载准则出自文献 [8], 表示为:

$$\begin{array}{c} (\sigma_1 - \sigma_3) < (\sigma_1 - \sigma_3)_0 \stackrel{\text{L}}{\coprod} s < s_0 \stackrel{\text{E}}{=} E_{ur} \\ (\sigma_1 - \sigma_3) \ge (\sigma_1 - \sigma_3)_0 \stackrel{\text{L}}{\rightrightarrows} s \ge s_0 \stackrel{\text{E}}{=} E_t \end{array}$$

式中(*σ*₁-*σ*₃)₀为历史最大偏应力,*s*₀为历史最大应力 水平。

相比于准则 1, 准则 2 可由三轴试验的 (σ_1 - σ_3) ~ ε_a 曲线与 Mohr-Coulomb 强度破坏准则推导得到, 理论基础比较完善。但在固结压力 σ_3 降低的情况下, 土体实际上变为超固结土,是另一种形式的回弹。 而该加载准则并不能反映这种变化,限制了其适用 范围。

2.3 两种加卸载准则对土石坝变形影响对比分析

分别采用准则1与准则2作为土体加卸载情况 的判断准则,按经验N取值1.5,不考虑蓄水对坝 体湿化变形与浮托力的影响,对糯扎渡心墙堆石坝 进行三维有限元计算。图2与图3分别给出准则1 与准则2下坝体典型剖面处于施工期、竣工期的卸 载回弹区域示意图,其中施工期中的坝体取填筑至 一半设计高度时作为典型进行分析。图中斜线区域 表示卸载回弹区域,图2中加密斜线区域表示准则 1下处于回弹过渡状态的土体区域。



(a) 施工期坝体卸载回弹区域



(b) 竣工期坝体卸载回弹区域图 2 准则 1 下坝体卸载回弹区域示意图Fig.2 Unloading fracture zone of dam in law 1



(b) 竣工期坝体卸载回弹区域图 3 准则 2 下坝体卸载回弹区域示意图Fig.3 Unloading fracture zone of dam in law 2

对比图 2 与图 3 可以看出,对于施工期至竣工 期的坝体,无论取哪种加载准则,随着填筑高度的 增加,坝体卸载回弹区域面积逐渐增大,心墙土体 一直处于加载状态。准则 1 下竣工期大坝卸载回弹 区域占整体面积的 73.68%,而准则 2 下竣工期卸载 回弹区域占比为 5.26%。可见大坝填筑过程中准则 1 判断的心墙两侧粗粒土料卸载回弹区域明显大于 准则 2。这是由于填筑过程中小主应力 σ₃ 的变化较 小,准则 1 的加载函数主要受应力水平 s 的影响。 而准则 2 中判断卸载则需要满足应力水平 s 与偏应 力 (σ₁-σ₃) 同时小于历史最大值。故当应力水平降低 时,容易出现准则 1 判断卸载而准则 2 判断加载的 状况。

回弹区域在大坝整体体积中的比例与在典型剖 面上有所区别。无论采用准则1或准则2,相对于



(a) 竣工期坝体大主应力等值线



(b) 竣工期坝体沉降等值线图 4 准则 1 下竣工期坝体应力位移等值线图Fig.4 Stress and displacement isolines of dam in law 1



(a) 竣工期坝体大主应力等值线



(b) 竣工期坝体沉降等值线图 5 准则 2 下竣工期坝体应力位移等值线图Fig.5 Stress and displacement isolines of dam in law 2

典型剖面上回弹区域的比例,大坝整体体积中回弹 区域的占比在填筑过程中较小。

图 4 和图 5 分别给出准则 1 与准则 2 下大坝典 型剖面竣工期的大主应力与沉降,竖向位移向上为正。

对比图 4 与图 5 可以看出, 准则 1 与准则 2 下 竣工期坝体应力分布规律基本相同。心墙内大主应 力明显比反滤层中的应力低, 这是由于心墙掺砾料 与堆石料变形模量差值较大, 引起了应力拱效应, 导致应力进行重分布。总的来说, 两种准则下坝体 大主应力值基本相等, 加载准则的选取对坝体应力 较小。

由于准则1判断的坝体卸载回弹区域远大于准则2, 故准则1下计算所得的位移结果与准则2差 异较大。由图4与图5可知, 坝体沉降最大值发生 心墙中心处, 准则1下的最大沉降值为155.6 cm, 准则2下的最大沉降值达287.7 cm。准则2下沉降 与结果为准则1计算结果的1.85 倍。

笔者查询了糯扎渡大坝监测的相关数据^[9],大 坝上游堆石体在竣工期的最大实测沉降出现靠近心 墙的测点,与有限元计算最大沉降位置接近,测值 为253 cm。这一结果与采用准则2计算的结果较为 接近,说明本例中准则2比准则1更为准确。但土 石坝有限元计算影响因素较多,仅凭一例不能断言 两种准则的优劣,还需要进行更多实例的计算验证。

3 回弹模量取值对大坝应力变形影响

为研究回弹模量数对有限元计算的影响,取不同的N,对糯扎渡心墙堆石坝进行三维有限元计算。由于本例中准则2下位移结果更为准确,这里加卸载准则选用准则2。发现当N分别取2、3、4时,计算整理出的坝体应力变形的分布规律与N取值1.5时相同,只有数值不同。对于满蓄期的大坝,将不考虑湿化变形与浮托力作用的情况(记为满蓄期1)与考虑湿化变形与浮托力作用的情况(记为满蓄

表 2 不同 N 时竣工期与满蓄期坝体最大位移
Tab.2 Maximum displacement of dam for different modulus of resilience

	竣工期		满蓄期1		满蓄期2	
Ν	v_{max}/cm	w _{max} /cm	v_{max}/cm	w _{max} /cm	v_{max}/cm	w _{max} /cm
1.5	38.46	287.73	73.5	296.05	55.74	285.03
2	38.34	287.55	70.07	294.88	53.6	285.13
3	38.15	287.47	66.25	293.95	50.95	285.55
4	37.17	287.07	66.01	293.34	48.32	285.27

Tab.3 Principal stress of dam for different modulus of resilience								
	竣_	竣工期		满蓄期1		满蓄期 2		
Ν	$\sigma_{1 \mathrm{max}}/\mathrm{Mpa}$	$\sigma_{3 \rm max}/{ m Mpa}$	$\sigma_{1 \rm max}/{ m Mpa}$	$\sigma_{3 \mathrm{max}}/\mathrm{Mpa}$	$\sigma_{1 \max}/Mpa$	$\sigma_{3 \rm max}/{ m Mpa}$		
1.5	4.128	2.056	4.359	2.106	4.264	2.053		
2	4.13	2.055	4.354	2.11	4.253	2.022		
3	4.128	2.055	4.324	2.105	4.212	2.003		
4	4.126	2.055	4.377	2.078	4,194	1.989		

表 3 不同 N 时竣工期与满蓄期坝体主应力

期 2) 进行对比,其中采用双线法确定湿化后的土材 料参数。

表 2 为不同 N 时竣工期与满蓄期坝体水流向位 移 v、竖向位移 w 的最大值。表 3 为不同 N 时竣工 期与满蓄期坝体最大大主应力 (σ_{1max}) 和最大小主应 力 (\sigma_{3max})。

从表2中可以看出,在竣工期,随着N值的增大, 大坝的沉降与水流向位移有减小的趋势,但程度很 小。在满蓄期,随着 N 值的增大,大坝沉降无明显 变化, N=4时的大坝沉降较 N=1.5时相差仅 1% 左右。 但满蓄期大坝水流向位移随 N 值的增大有明显的降 低,不考虑湿化变形与浮托力作用时, N=4 时的大 坝水流向位移较 N=1.5 时降低了 10.6%; 考虑湿化 变形与浮托力作用时, N=4 时的大坝水流向位移较 N=1.5 时降低了 14.24%。可见回弹模量取值对大坝 变形影响较为明显,主要表现为水流向位移随回弹 模量的增大而减小。从表3看,在大坝竣工期与满 蓄期,随着 N 值的增大,坝体的大主应力与小主应 力最大值均基本不变,说明回弹模量的取值对大坝 应力影响较小。

4 结论

1) 填筑过程中基于准则 1 判断的坝体卸载回弹 区域更大, 该准则判断的竣工期坝体卸载回弹区域 占整体面积的 73.68%, 而准则 2 判断卸载回弹区域 的占比仅为5.26%。

2) 加卸载准则的选择对坝体应力影响较小,对 坝体位移影响较大。采用准则2算得的沉降为另一 准则计算结果的1.85倍。大坝监测数据表明本例中 采用准则2时的计算位移更为准确。

3) 在大坝填筑过程中,回弹区域较小,回弹模 量取值对大坝变形影响很小; 蓄水后大坝回弹区域 增大,回弹模量取值对大坝变形影响较为明显,主 要表现为水流向位移随回弹模量的增大而减小。回 弹模量取值对坝体的应力计算结果影响较小。

参考文献:

- [1] 褚福永,朱俊高,贾华,等.粗粒土卸载-再加载力 学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1061-1066
- [2] 朱俊高, 王元龙, 贾华, 等. 粗粒土回弹特性试验研 究 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33(6): 950-954.
- [3] 戴自航, 陈林靖, 陈福全, 等. 邓肯-张模型应用于基 坑工程中值得注意的问题 [J]. 福州大学学报: 自然科 学版, 2010(1): 120-126.
- [4] 郑颖人, 陈瑜瑶. 广义塑性力学的加卸载准则与土 的本构模型一广义塑性力学讲座(3)[J]. 岩土力学, 2000, 21(4); 426-429.
- [5] 刘元雪,郑颖人.岩土弹塑性理论的加卸载准则探讨 [J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 768-771.
- [6] 吴兴征,栾茂田.修正邓肯模型及在面板堆石坝应力 与变形分析中的应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2001(增刊1): 1098-1102.
- [7] 张宗亮, 贾延安, 张丙印. 复杂应力路径下堆石体本 构模型比较验证[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1147-1151.
- [8] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算 [M]. 北京: 中国水 利水电出版社, 1996.
- [9] 刘伟,温丽丽,覃珊珊.心墙堆石坝上游堆石体内部 沉降变形监测方法探讨[J].水电与抽水蓄能, 2013, 37(3): 47-50.

(责任编辑 李新)