

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2011.05.014

Hardfill 坝的整体稳定安全度

熊^{1 2}, 何蕴龙^{2 3}, 刘俊林^{2 3}

(1. 长江勘测规划设计研究院 湖北 武汉 430010 ;

2. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室 四川 成都 610065 ;

3. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室 湖北 武汉 430072)

摘要 :根据 Hardfill 坝的设计理念,研究适合 Hardfill 坝的整体稳定安全度考察方法,基于弹塑性有限元方法对典型 Hardfill 坝进行了计算,并就 Hardfill 坝材料参数及结构特征对大坝整体稳定安全度的影响进行了敏感性分析.结果表明:以强度储备为主的综合法考察大坝的整体安全度,Hardfill 坝一般存在沿坝基面的整体失稳破坏机理,其破坏模式为剪切屈服区自坝趾开始,沿坝基面向上游扩展,从而导致大坝滑移失稳;与相同地基条件下的重力坝结构相比,梯形结构的 Hardfill 坝的整体稳定安全度有较大提高,坝体与坝基的弹性模量比对 Hardfill 坝的破坏模式及整体安全度影响较小,而坝体的抗剪强度对其则有显著的影响,同时坝坡坡比和坝高对 Hardfill 坝的破坏模式影响也较小;坝趾部位为大坝安全的薄弱部位,在设计与施工中应在该位置适当加大水泥用量以提高其强度.

关键词 :Hardfill 坝,整体稳定安全度,弹塑性有限元

中图分类号:TV314

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2011)05-0550-06

Hardfill 坝是一种新坝型,其基本剖面为上下游坝坡对称的梯形,上游坝面设置面板或其他防渗设施,筑坝材料为价格低廉的低强度胶结砂石料. Hardfill 坝的倡导者认为这种坝型具有高安全性、高抗震性和对地基条件要求低的优点,而且施工简便、快速,造价低廉,对环境的负面影响小^[1]. 20 世纪 90 年代在希腊、多米尼加和法国等地建成了世界上首批 Hardfill 坝^[2],土耳其的 Cindere 坝^[2]和 Oyuk 坝^[3]. 2 座 Hardfill 坝坝高分别达到了 100 m 与 107 m. 日本坝工界对 Hardfill 筑坝技术表现出了极大的热情,投入大量人力物力,根据日本的碾压混凝土技术研究和开发了具有其自身特点的 Hardfill 筑坝技术,并冠之以一个新名称: Cemented Sand & Gravel, 简称 CSG, 所建造的大坝称为 CSG 坝^[4]. 国内先后在贵州省道塘水库上游围堰^[5]、福建街面水电站下游围堰和洪口大坝上游围堰采用了 CSG 方案^[6-7],效果良好.

在国内对 Hardfill 筑坝技术的理论研究中,科研人员陆续对 Hardfill 坝的结构特性、安全性以及断面设计进行了试验与计算分析^[8-10],但目前对其破坏模式研究尚少. 本文根据 Hardfill 坝的设计理念,研究适合 Hardfill 坝的整体稳定安全度考察方法,基于弹塑性有限元方法对典型 Hardfill 坝进行计算分析,探讨破坏过程与破坏机理,并与相同高度的重力坝结构进行比较,最后就 Hardfill 坝的材料参数及结构特征对大坝整体稳定安全度的影响进行了敏感性分析.

1 基于弹塑性有限元方法的大坝整体稳定安全度分析

1.1 整体稳定安全度分析方法

目前基于弹塑性有限元方法探讨大坝破坏过程与破坏机理的数值分析中,大坝整体安全度的考察方法主要有水容重超载法、水位超载法、强度储备法、滑动面的点安全系数法与应力代数和法等. 这些方法不仅所得的大坝整体安全度不同,且破坏形式和机理亦会有较大差异. 将超载与强度储备相结合的综合法能较全面地反映实际问题,对 Hardfill 坝而言,其设计理念是尽可能运用当地易得的砂砾石材料或开挖弃料加入少量胶凝材料后作为筑坝材料,坝体材料性能具有明显的不均匀性与不确定性,比较适合采用以强度储备为主的综合法来考察大坝的整体稳定性. 在对水荷载的超载计算中,除了考虑实际工程中确实可能出现的超载倍数

收稿日期:2010-09-14

基金项目:国家自然科学基金(50679058);四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室开放基金(0912);武汉大学博士研究生科研自主基金(20082060201000021)

作者简介:熊(1984—),男,湖北谷城人,博士,主要从事水工结构抗震与 Hardfill 坝筑坝技术研究. E-mail: frankwhu@foxmail.com

外,由于水荷载是大坝抵御的主要工作荷载,给其以足够的安全储备也是十分必要的,所以在考虑强度储备的基础上可再适当进行更大倍数的水荷载水位超载,以反映坝体抵御水荷载的富裕度。但大坝材料强度的变化幅度有限,且材料的 f 值(内摩擦角)降到残余值后,再很难下降,因此不能将材料强度无限度地降低。

本文采用综合法考察大坝整体稳定安全度的具体计算程序为:首先进行现实中可能出现的 1.2 倍水荷载的水位超载,之后对坝体材料进行强度折减直至强度参数可能的最低值,此时考察大坝的破坏情况。若大坝整体并未失稳,再进一步提高水位以进行水荷载的超载,直至大坝结构破坏。本文在进行强度折减的过程中,由于目前对于 Hardfill 坝材料的试验比较有限,仍采用对 c, φ 等比例降低的方法,且强度参数最多降低至原来的 1/2。在考察大坝整体安全度时以计算的收敛性、大坝变形的突变性和屈服区的贯通性等作为整体失稳判据。大坝最终的整体安全系数 k 为

$$k = k_1 k_2 = \left(2 \frac{H_F}{H_0} - 1 \right) \frac{R_0}{R_F}$$

(1)

式中: k_1 ——水位超载安全系数; k_2 ——强度储备系数; H_0, H_F ——设计水位与超载后的水位; R_0, R_F ——坝体材料设计强度与降低后的强度。

1.2 计算模型

图 1 为 Hardfill 坝的典型剖面,本文的计算模型中大坝坝高 70 m,坝坡的坡比按照 Oyuk 坝^[3]和 Cindere 坝^[2]取为 1:0.7。主要考虑坝体自重、静水压力和扬压力等荷载,上游水位 66 m,下游无水。其中假定扬压力在排水孔幕处折减为水头的 1/2,扬压力在坝底线性分布。建立二维平面应变有限元模型,采用大型有限元软件 ADINA 进行计算分析,其中坝基面考虑为抗剪软弱面,在该位置设置了薄层单元。

根据试验结果,Hardfill 坝材料是一种弹塑性材料,其典型应力应变曲线如图 2 所示。本文 Hardfill 坝材料与坝基采用理想弹塑性本构模型,屈服条件为带拉裂截断的 Mohr-Coulomb 准则。综合 Hardfill 坝材料试验研究成果^[6-7,11-12],本文计算中坝体材料参数值按平均水平选取,见表 1。

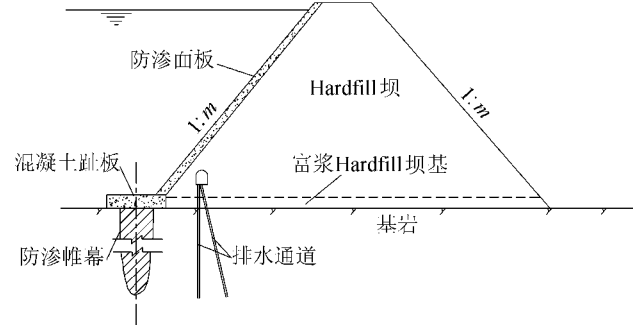


图 1 Hardfill 坝典型剖面^[8]
Fig. 1 Typical profile of Hardfill dam^[8]

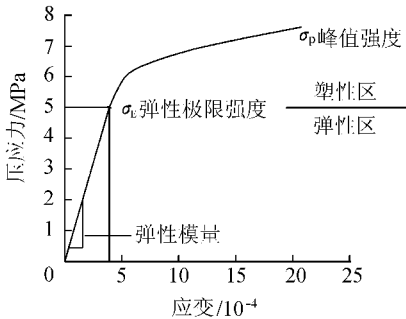


图 2 Hardfill 材料典型应力应变关系曲线^[4]
Fig. 2 Typical stress-strain curve of Hardfill material^[4]

2 典型 Hardfill 坝整体失稳机理与过程

2.1 大坝应力状态特征

图 3 为大坝应力分布图,其中正应力以拉为正,剪应力以向下游为正。在正常荷载作用下,Hardfill 坝基本全断面受压,仅在坝踵有 1 个节点出现较小

表 1 典型 Hardfill 坝整体稳定计算参数

Table 1 Parameters for integral stability calculation of typical Hardfill dam

部 位	弹性模量/ GPa	泊松比	密度/ (kg·m ⁻³)	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)
坝 体	8	0.20	2300	0.60	38
坝 基	15	0.25	2500	1.50	40
坝基面	8	0.20	2300	0.35	35

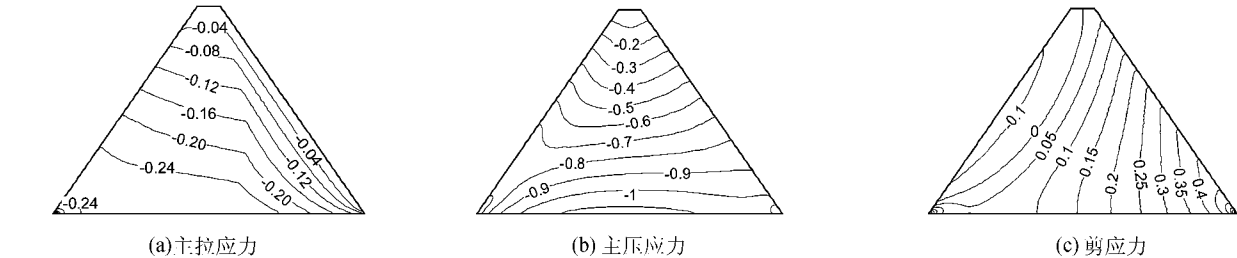


图 3 典型 Hardfill 坝应力特征(单位:MPa)
Fig. 3 Stress characteristics of typical Hardfill dam(units:MPa)

的拉应力值,坝体主压应力分布较为均匀,应力水平较低,坝底面中部出现最大压应力值,在坝趾有一定的压应力集中,坝基面的剪应力水平较高,同时从上游至下游坝体的剪应力逐渐增大,尤其在坝趾有明显的应力集中现象,剪应力的分布情况与常规重力坝类似。

2.2 大坝整体失稳过程分析

经综合法计算,Hardfill 坝在各典型阶段的破坏情况如图 4 所示,其中黑色区域为塑性区。正常荷载作用下坝体基本没有破坏区域,只是在坝踵有范围极小的屈服。图 4(a)水位提高到 1.2 倍正常水位后,坝踵范围极小的屈服区有很小的扩展,大坝仍保持正常工作状态。图 4(b)至图 4(c):此时进行降低强度分析,随着折减系数的增大,坝踵的屈服区沿坝基面向下游很缓慢地扩展,而坝趾处的屈服区一方面沿坝基面向上游较快地延伸,另一方面沿高程方向向上逐渐发展。图 4(d):当强度储备系数大约为 2 时,屈服区在沿坝基面的中上游位置贯通,导致大坝发生沿坝基面的整体失稳。

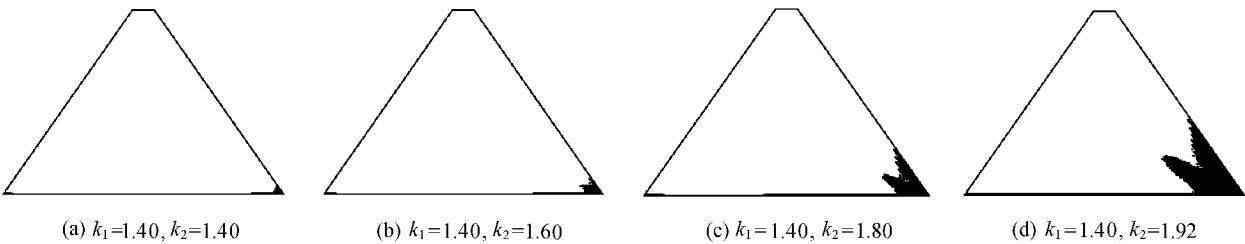


图 4 典型 Hardfill 坝整体破坏过程

Fig. 4 Failure process of typical Hardfill dam

由此可见,在本文计算模型条件下,典型的 Hardfill 坝主要发生了沿坝基面的整体失稳破坏,其破坏主要是剪切屈服区从坝趾开始,沿坝基面向上游扩展的结果。坝踵尽管有拉裂区,但并不会导致坝体的失稳破坏,而坝趾的剪切破坏比较严重。

2.3 整体安全度分析

定义坝基面屈服率为已剪切屈服长度与坝基面总长度之比,则坝基面屈服率与整体安全系数的关系曲线如图 5 所示。由图 5 可知,随着整体安全系数不断增大,坝基面屈服率逐渐增大,并且其变化速率也逐渐增大。按屈服区贯通定义整体安全系数,则当 $k_1 = 1.40$, $k_2 = 1.92$ 时坝基面屈服区贯通,此时 $k = 2.69$ 。

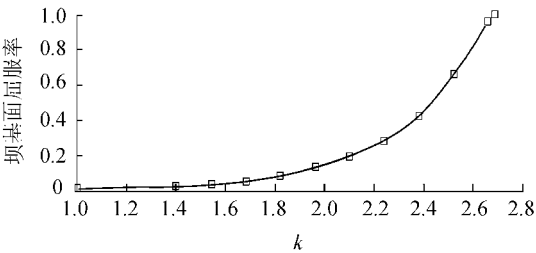


图 5 坝基面屈服率与 k 的关系曲线

Fig. 5 Relation curve of yield ratio of dam base and safety factor

3 与相同高度重力坝整体稳定性的比较

建立与本文 Hardfill 坝具有相同坝高、且位于相同地基条件上的典型重力坝模型,对比梯形结构 Hardfill 坝与三角形结构重力坝的结构破坏特点。其中重力坝下游坝坡坡比为 1:0.8,计算参数见表 2。为尽量保证在相同条件下比较 2 种大坝体型的破坏过程与机理,重力坝坝基面的抗剪强度取值也与 Hardfill 坝相同。

表 2 典型重力坝整体稳定计算参数

Table 2 Parameters for integral stability calculation of typical gravity dam

部 位	弹性模量/ GPa	泊松比	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)
坝 体	25	0.167	2400	1.10	50
坝 基	15	0.250	2500	1.50	40
坝基面	25	0.167	2400	0.85	38

同样采用综合法计算,图 6 为相同计算条件下基本剖面为三角形的重力坝结构的破坏过程,其中黑色区域为塑性区。在正常荷载条件下,重力坝在坝踵与坝趾出现屈服区,随着水位的超载与材料强度的降低,坝踵由于开裂导致拉应力释放,而坝趾的剪切屈服区则沿坝基面向上游扩展,直至整个坝基面屈服区贯通。该大坝的整体破坏模式与 Hardfill 坝类似,但坝趾屈服区的扩展较 Hardfill 坝迅速,大坝失稳时所对应的 $k = 1.96$,明显小于基本剖面为梯形的 Hardfill 坝的整体安全系数。

4 敏感性分析

4.1 材料参数变化时 Hardfill 坝整体稳定性规律

4.1.1 弹性模量敏感性分析

对 Hardfill 坝材料与地基不同的弹性模量比进行了计算分析,所得 Hardfill 坝整体安全系数见表 3.由计算结果可知,坝体与地基材料的弹性模量比对大坝整体安全系数影响较小,大坝最终的破坏模式基本都是沿坝基面整体失稳.但当坝体弹性模量较大时,坝趾更容易发生剪切屈服,这一现象与弹性模量比对重力坝失稳破坏的影响规律^[13]一致.但由于 Hardfill 坝剖面较大,坝体应力比重力坝均匀,因此弹性模量比在一定范围内变化时对大坝整体安全系数的影响较小.

4.1.2 抗剪强度敏感性分析

在 Hardfill 坝材料抗剪强度可能的范围中拟定 5 组参数进行计算,Hardfill 坝整体安全系数见表 4.材料抗剪强度对整体安全系数有较大影响,抗剪强度的增加使大坝安全度提高,并且抗剪强度对大坝最终的破坏模式也有一定的影响.当坝体抗剪强度较高时,坝体只沿坝基面出现屈服区,而当坝体抗剪强度较低时,坝趾屈服区迅速向上游和坝顶发展,最终在坝体的中部发生屈服区贯通,大坝中上部沿倾向下流的滑动面失稳破坏.

表 3 弹性模量敏感性分析

Table 3 Sensitivity analysis of elastic modulus					
坝体弹性模量 E_d/GPa	坝基弹性模量 E_f/GPa	弹性模量比 E_d/E_f	k_1	k_2	k
2	15	0.13	1.40	1.75	2.45
5	15	0.33	1.40	1.90	2.66
8	15	0.53	1.40	1.92	2.69
12	15	0.80	1.40	1.92	2.69
15	15	1.00	1.40	1.92	2.69
8	5	1.60	1.40	1.90	2.66

表 4 材料抗剪强度敏感性分析

Table 4 Sensitivity analysis of material shear strength						
坝体		坝基面		k_1	k_2	k
黏聚力/ MPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)			
0.2	30	0.15	30	1.40	1.30	1.82
0.4	34	0.25	32	1.40	1.50	2.10
0.6	38	0.35	35	1.40	1.92	2.69
0.8	42	0.55	38	1.90	2.0	3.80
1.0	45	0.65	40	2.45	2.0	4.90

4.2 结构特征变化时 Hardfill 坝整体稳定性规律

4.2.1 坝坡坡比敏感性分析

在 Hardfill 坝坝坡可能的坡比范围中拟定了 5 组参数进行计算分析,大坝整体安全系数见表 5. Hardfill 坝坝坡的坡比对整体安全系数有一定影响,较缓的坝坡使大坝拥有较大的安全度.大坝最终的破坏模式基本都是屈服区自坝趾开始发展而大坝沿坝基面整体失稳,但最终的坝体屈服区分布略有不同:当坝坡较陡时,坝趾区域的压应力与剪应力的应力集中现象更为显著,使得除坝基面的屈服区外在坝趾附近也有较大区域的压剪破坏;当坝坡较缓时,大坝主要表现为沿坝基面出现剪切屈服区.

4.2.2 坝高敏感性分析

对坝高拟定了 3 组值,仅改变坝高进行同比例缩放,水位高程同比例变化.大坝整体安全系数列于表 6.图 7 为坝基面屈服率随整体安全系数的变化曲线. Hardfill 坝坝高的变化对整体安全系数有一定影响,大坝最终的破坏模式都是沿坝基面整体失稳,并在坝趾处出现屈服区.当坝高较小时,坝基面的屈服区扩展缓慢,整体安全系数明显增大;而当坝高较大时,整体安全系数较小,坝基面屈服区也发展迅速.这是由于当坝高较小时,黏聚力在抗剪强度中所占比例较大,使得大坝不易发生剪切屈服,同时坝踵也不易发生拉裂或拉剪屈服,抗滑稳定安全度也越高.文献^[13]在分析坝高对重力坝失稳破坏的影响时,也得到了类似

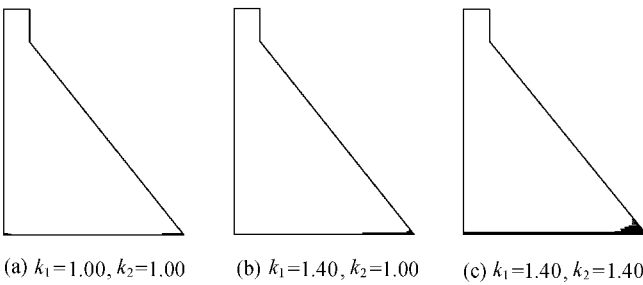


图 6 相同坝高的重力坝整体破坏过程

Fig. 6 Failure process of gravity dams with same heights

表 5 Hardfill 坝坝坡坡比敏感性分析

Table 5 Sensitivity analysis of slope ratio of Hardfill dam			
坡比	k_1	k_2	k
1:0.5	1.40	1.80	2.52
1:0.6	1.40	1.90	2.66
1:0.7	1.40	1.92	2.69
1:0.8	1.46	2.0	2.92
1:0.9	1.55	2.0	3.10

表 6 Hardfill 坝坝高敏感性分析

Table 6 Sensitivity analysis of Hardfill dam heights			
坝高/m	k_1	k_2	k
50	1.87	2.00	3.74
70	1.40	1.92	2.69
100	1.40	1.65	2.38

的结论.

5 结 语

a. 本文采用以强度储备为主的综合法考察大坝整体安全度,Hardfill 坝一般沿坝基面整体失稳破坏,破坏模式主要为剪切屈服区自坝趾开始,沿坝基面向上游扩展,从而导致大坝失稳.同时,在坝趾及下游坝坡附近也有一定的破坏区域.其整体安全度与相同条件下的典型重力坝结构相比有明显的提高.

b. 坝体及坝基弹性模量比对 Hardfill 坝的破坏模式及整体安全度影响较小,坝体抗剪强度对其则有显著的影响.当坝体弹性模量较大时,坝趾更容易发生剪切屈服,坝体抗剪强度的增加使大坝安全度提高.此外,当坝体抗剪强度较高时,大坝的破坏模式为沿坝基面的滑动失稳破坏,而当坝体抗剪强度较低时,大坝的破坏模式为坝体中上部沿倾向下流的滑动面失稳破坏.

c. 坝坡坡比和坝高对 Hardfill 坝的破坏模式影响较小,对大坝的整体安全度有一定影响.当坝坡较缓、坝高较低时,大坝的安全度较高.

d. 大坝的坝趾区域是 Hardfill 坝安全的薄弱部位,在各种情况下大坝的破坏均从坝趾开始,因此在实际设计和施工中应适当加大该位置的水泥含量以提高其强度.

参考文献:

[1] LONDE P ,LINO M. The faced symmetrical Hardfill dam :a new concept for RCC[J]. International Water Power & Dam Construction , 1992 44 (2) :19-24.

[2] BATMAZ S. Cindere dam-107m high roller compacted Hardfill dam(RCHD) in Turkey[C]//Proceedings 4th International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams ,17-19. Madrid [s. n.] 2003 :121-126.

[3] BATMAZ S ,KOKSAL A ,ERGENEMAN I ,等. 土耳其欧峪克(Oyuk)硬填方坝设计概述[J]. 湖南水利水电 ,2009(1) :92-95. (BATMAZ S ,KOKSAL A ,ERGENEMAN I ,et al. Design of the Oyuk Hardfill dam[J]. Hunan Hydro & Power ,2009(1) :92-95.(in Chinese))

[4] HIROSE T. Design concept of trapezoid-shaped CSG dan[C]//BERGA L. Roller Compacted Concrete Dams. SZ Lisse ,The Netherland : A. A. Balkema 2003 :457-464.

[5] 杨朝晖 ,赵其兴 ,符祥平 ,等. CSG 技术研究及其在道塘水库的应用[J]. 水利水电技术 ,2007 ,38(8) :46-49.(YANG Zhao-hui , ZHAO Qi-xing ,FU Xiang-ping ,et al. Study on CSG dam construction technique and its application to Daotang Reservoir projec[J]. Water Resources and Hydropower Engineering 2007 ,38(8) :46-49.(in Chinese))

[6] 贾金生 ,马锋玲 ,李新宇 ,等. 胶凝砂砾石坝材料特性研究及工程应用[J]. 水利学报 ,2006 ,37(5) :578-582.(JIA Jin-sheng , MA Feng-ling ,LI Xin-yu ,et al. Study on material characteristics of cement-sand-gravel dam and engineering application[J]. Journal of Hydraulic Engineering 2006 ,37(5) :578-582.(in Chinese))

[7] 杨首龙. CSG 坝筑坝材料特性与抗荷载能力研究[J]. 土木工程学报 ,2007 ,40(2) :97-103.(YANG Shou-long. Characteristics and load carrying capacity of CSG dam construction material[J]. China Civil Engineering Journal 2007 ,40(2) :97-103.(in Chinese))

[8] 何蕴龙 ,彭云枫 ,熊 . Hardfill 坝结构特性分析[J]. 水力发电学报 ,2008 ,27(6) :68-72.(HE Yun-ong ,PENG Yun-feng ,XIONG Kun. Structural characteristic analysis on hardfill dan[J]. Journal of Hydroelectric Engineering 2008 ,27(6) :68-72.(in Chinese))

[9] 孙明权 ,孟祥敏 ,肖晓春. 超贫胶结材料坝剖面形式研究[J]. 水利水电科技进展 ,2007 ,27(4) :40-41.(SUN Ming-quan ,MENG Xiang-min ,XIAO Xiao-chun. Sectional form of over lean cemented material dam[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources 2007 ,27(4) :40-41.(in Chinese))

[10] 蔡新 ,武颖利 ,李国英. 胶凝面板堆石坝离心模型试验研究[J]. 河海大学学报 :自然科学版 ,2008 ,36(5) :585-589.(CAI Xin , WU Ying-li ,LI Guo-ying. Research on centrifugal model experiment for concrete-faced cemented-rockfill dam[J]. Journal of Hohai University Natural Sciences 2008 ,36(5) :585-589.(in Chinese))

[11] 彭成山 ,张学菊 ,孙明权. 超贫胶结材料特性研究[J]. 华北水利水电学院学报 ,2007 ,28(2) :26-29.(PENG Cheng-shan , ZHANG Xue-ju ,SUN Ming-quan. Research of super poor cemented material characteristi[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power 2007 ,28(2) :26-29.(in Chinese))

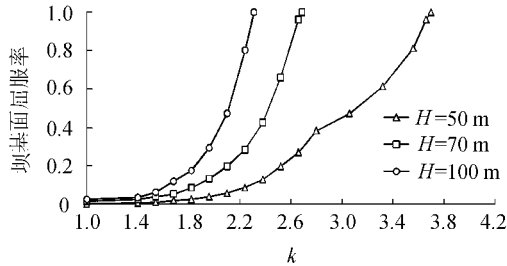


图7 坝高变化时坝基面屈服率与 k 关系曲线
Fig. 7 Relation curves of yield ratio of dam base and safety factor with different dam heights

[12] 唐新军 , 陆述远 . 胶结堆石料的力学性能初探 [J]. 武汉水利电力大学学报 , 1997 , 30 (6) : 15-18. (TANG Xin-jun , LU Shu-yuan . Preliminary research on mechanical behaviors of cemented rockfill material [J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering , 1997 , 30 (6) : 15-18. (in Chinese))

[13] 段亚辉 , 何蕴龙 , 王宏硕 , 等 . 用真实抗剪断强度研究重力坝沿坝基面的失稳破坏过程 [J]. 武汉水利电力大学学报 , 1999 , 32 (3) : 13-18. (DUAN Ya-hui , HE Yun-long , WANG Hong-shuo , et al . Study on failure process of gravity dam along interface between dam and foundation with theory of real shear strength [J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering , 1999 , 32 (3) : 13-18. (in Chinese))

Integral stability of Hardfill dam

XIONG Kun^{1 2} , HE Yun-long^{2 3} , LIU Jun-lin^{2 3}

- (1. Changjiang Institute of Survey , Planning , Design and Research , Wuhan 430010 , China ;
2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering , Sichuan University ,
Chengdu 610065 , China ;
3. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science ,
Wuhan University , Wuhan 430072 , China)

Abstract : An appropriate dam safety evaluation method was studied according to the design concept of the Hardfill dam. Based on the elasto-plastic finite element method , the integral stability of a typical Hardfill dam was analyzed , and the sensitivity analysis was made to assess the effects of the material parameters and structural characteristics on the integral stability of the dam. The results show that the failure mode of the Hardfill dam is mostly integral sliding along the interface between the dam and foundation when the synthesis method based on the intensity reserve is used. The shear yield zone expands from the dam toe towards upstream along the interface , which leads to the slide failure of the dam. Compared with the gravity dam on the same foundation , the trapezoid Hardfill dam is much more stable. The failure mode and integral stability of the Hardfill dam are affected little by elastic modulus , but dramatically by shear strength of the dam. The slope radio and height of the dam have small impact on the dam failure modes. The dam toe is the weakest area of the whole dam body and its strength should be improved by increasing the cement content of the Hardfill material properly in the design and construction.

Key words : Hardfill dam ; integral stability ; elasto-plastic finite element