DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2025.20241793

考虑防渗墙塑性损伤的深厚覆盖层上沥青混凝土心墙坝应力渗流分析

林恒星[1],邹 浩[1],冯先伟[1],孙继文[2a,2b],李文亮[2a,2b]

(1. 上海勘测设计研究院有限公司,上海 200434; 2. 大连理工大学
a. 海岸与近海工程国家重点实验室; b. 水利工程学院工程抗震研究所, 辽宁 大连 116024)

摘要:深厚覆盖层上建坝常采用混凝土防渗墙作为防渗结构,常规有限元分析对混凝土防渗墙通常采用线弹性本构,导致防渗墙易出现应力超限现象,而实际上,应力超限后混凝土防渗墙会发生塑性损伤,应力会释放并重新分布,因此线弹性模型计算的防渗墙应力不符合实际情况。依托某深厚覆盖层上沥青混凝土心墙坝建立三维有限元模型,对混凝土防渗墙分别采用混凝土塑性损伤和线弹性本构,研究对比防渗墙损伤对沥青混凝土心墙坝应力和渗流的影响。结果表明,采用塑性损伤本构后,防渗墙应力出现重分布,拉压应力有所下降,最大拉应力减小了7.00 MPa,最大压应力减小了3.32 MPa;大坝整体的总水头、压力水头和渗漏量变化不大,防渗墙损伤区域的渗透坡降减小,防渗墙的渗漏量因损伤增大了246.21%,大坝整体的渗漏量仅增大了12.33%。

关键词:沥青混凝土心墙坝;三维有限元模型;防渗墙;应力;渗流

中图分类号:TV698.2+3 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-7709(2025)02-0142-05

1 工程概况

某水电站装机容量为464 MW,为二等大(2)型工程,水库正常蓄水位为3 723 m,正常蓄水位以下库容为1.2×10^8 m^3,坝型为沥青混凝土心墙堆石坝,设计坝顶高程为3 728 m,坝轴线长度为325 m,最大坝高为58 m,上下游坝坡坡比为1∶1.8,大坝沥青混凝土心墙为直心墙,从坝顶0.5 m渐变至底部1.1 m,底部设置2.4 m放大脚。大坝坝址区河道呈"V"型深切河谷,库底覆盖层深厚,最大厚度为170 m,坝基主体以冰积含孤块碎石层和砂卵砾石层组成,局部存在粉土、粉砂和细砂弱透水层。大坝坝基防渗采用混凝土防渗墙全封闭防渗方式,防渗墙深为170 m,厚度为1 m,防渗墙内预留一排帷幕灌浆管,灌浆管间距1.5 m,坝基浅埋的液化砂层进行振冲碎石桩基础处理。混凝土防渗墙与沥青混凝土心墙之间设置3.0 m×3.5 m的廊道相连,两岸基岩采用帷幕灌浆防渗,灌浆控制标准为深入5 Lu线以下5 m。大坝典型剖面见图1。防渗墙因适应性好、防渗性能强、结构可靠、造价低,而广泛应用在土石坝深厚覆盖层地基防渗上[1]。混凝土防渗墙弹性模量比周围覆盖层高数百倍,在荷载作用下,防渗墙与周围土层沉降差很大,使得防渗墙墙顶受到较大压力,两侧受到土体摩擦力,导致防渗墙体易出现损伤,产生众多微裂纹,降低整体结构稳定和防渗效果[2]。以往对大坝进行有限元静动力分析时,均将混凝土防渗墙设为线弹性材料来研究坝体的应力和变形[2-5],这无法考虑防渗墙损伤对墙体应力和坝基渗流的影响,与实际工程不符[6],因此考虑防渗墙

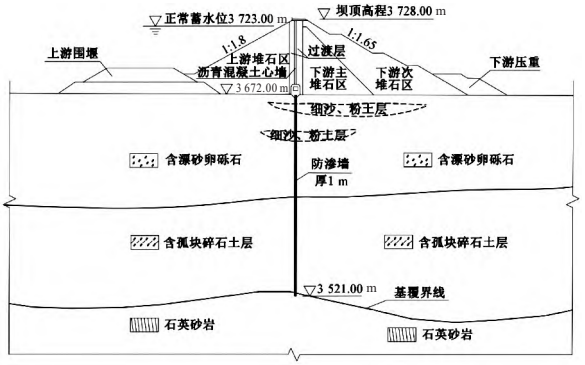


图1 大坝典型剖面

Fig. 1 Typical section of dam

收稿日期:2024-09-20,**修回日期**:2024-11-05

基金项目:上海勘测设计研究院有限公司科研项目资助(2022SD(83)-001)

作者简介:林恒星(1989-),男,硕士、高级工程师,研究方向为水工结构,E-mail:lhx@mail.com

通讯作者:冯先伟(1997-),男,硕士、工程师,研究方向为水工结构应力和渗流分析,E-mail:1982214592@qq.com

塑性损伤的坝体应力和渗流分析更切合实际。本文依托某深厚覆盖层上沥青混凝土心墙坝建立三维有限元计算模型,对混凝土防渗墙分别采用塑性损伤和线弹性本构,并建立损伤开裂与渗透系数变化关系,研究对比防渗墙损伤对沥青混凝土心墙坝应力和渗流的影响,以期为类似深厚覆盖层防渗墙防渗工程的应力计算和渗流分析提供理论和技术支持。

2　基本理论及三维计算模型

2.1　混凝土塑性损伤理论

混凝土塑性损伤结合各向同性弹性损伤和非关联多重硬化塑性理论来表征混凝土压缩和拉伸破坏过程中不可逆刚度退化行为[7]。该模型的屈服 F 定义为:

$$F=\frac{1}{1-\alpha}(\bar{q}-3\alpha\bar{p}+\beta\langle\hat{\sigma}_{\max}\rangle-\gamma\langle-\hat{\sigma}_{\max}\rangle)-f_{c0} \tag{1}$$

$$\alpha=(f_{b0}-f_{c0})/(2f_{b0}-f_{c0}) \tag{2}$$

$$\beta=(1-\alpha)f_{c0}/f_{t0}-(1+\alpha) \tag{3}$$

$$\gamma=3(1-K_c)/(2K_c-1) \tag{4}$$

式中,α、β 均为无量纲常数;$\bar{q}$ 为 mises 等效应力,MPa;$\bar{p}$ 为静水压力,MPa;$\hat{\sigma}_{\max}$ 为最大有效应力,MPa;f_{c0}、f_{t0} 分别为初始的压缩、拉伸屈服应力,MPa;γ 为反应屈服面参数;f_{b0} 为初始双轴压缩屈服应力,MPa;K_c 为拉伸子午线上第二应力不变量的比值。

模型的流动势 G[8] 表示为:

$$G=\sqrt{(\eta\sigma_t\tan\Psi)^2+\bar{q}^2}-\bar{p}\tan\Psi \tag{5}$$

式中,η 为偏心率;σ_t 为拉伸强度,MPa;Ψ 为膨胀角,(°)。

混凝土单轴应力－应变之间的关系见图 2。

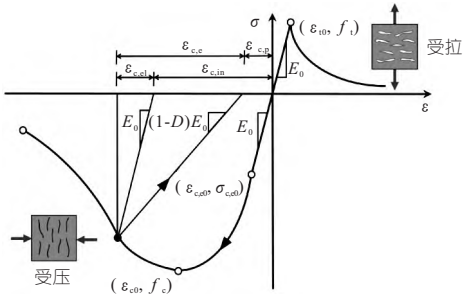


图 2　混凝土单轴应力－应变关系

Fig. 2　Uniaxial stress-strain relationship of concrete

由图 2 可看出,混凝土损伤前压缩弹性应变和拉伸应变之间存在相关关系,混凝土压缩应变和拉伸应变对应的损伤[9]可表示为:

$$\begin{cases}\varepsilon_{c,e0}=\sigma_{c,e0}/E_0\\ \varepsilon_{t,e0}=\sigma_{t,e0}/E_0\end{cases} \tag{6}$$

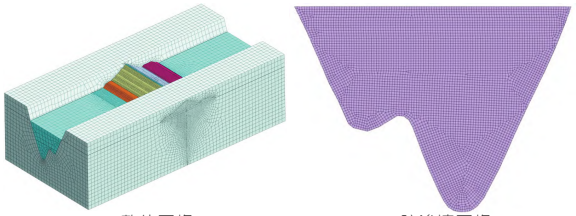
$$\begin{cases}\varepsilon_{c,p}=\varepsilon_c-[\sigma_c/(1-d_c)]E_0\\ \varepsilon_{t,p}=\varepsilon_t-[\sigma_t/(1-d_t)]E_0\end{cases} \tag{7}$$

其中

$$\begin{cases}\varepsilon_{c,in}=\varepsilon_c-\sigma_c/E_0\\ \varepsilon_{t,in}=\varepsilon_t-\sigma_t/E_0\end{cases} \tag{8}$$

式中,$\varepsilon_{c,e0}$、$\varepsilon_{t,e0}$ 分别为压缩、拉伸极限应变,MPa;$\sigma_{c,e0}$、σ_c、d_c、ε_c、$\varepsilon_{c,p}$、$\varepsilon_{c,in}$、E_0 分别为压缩极限应力、压缩应力、压缩损伤参数、压缩应变、压缩塑性应变、非弹性压缩应变、初始弹性模量;$\sigma_{t,e0}$、σ_t、d_t、ε_t、$\varepsilon_{t,in}$ 分别为抗拉极限应力、拉伸应力、拉伸损伤参数、拉伸应变、拉伸塑性应变、非弹性拉伸应变。

根据坝体和覆盖层断面信息,建立了沥青混凝土心墙坝三维分析模型,见图 3。整体模型顺水流方向长约 1 200 m,垂直水流方向约 600 m,模型总高度约 360 m。顺河向边界各取至上下游坝脚外 500 m。有限元模型整体单元数为 88.66×10^4 个,节点数为 252.56×10^4 个,其中防渗墙网格尺寸为 2 m,坝体其余部位网格尺寸为 5 m,覆盖层的主要网格尺寸为 5～10 m。



(a) 整体网格　(b) 防渗墙网格

图 3　沥青混凝土心墙坝三维有限元网格

Fig. 3　Three-dimensional finite element mesh of asphalt concrete core wall dam

2.2　应力计算方法及参数

大坝典型设计断面覆盖层最大厚度约 175 m,最大坝高为 58 m,蓄水采用大坝正常蓄水位 3 723 m 模拟。坝体填筑共分为 17 级,蓄水分 4 级,按照坝体填筑顺序进行模拟,大坝填筑完成后开始蓄水。填筑坝体之前,对初始状态下的基岩和深厚覆盖层进行位移清零。填筑过程采用分层激活单元法模拟,水压力以面力的形式作用在心墙、廊道和防渗墙上。坝体堆石、过渡料、反滤料、沥青混凝土心墙料以及覆盖层等材料采用邓肯－张本构,计算参数见表 1,各参数含义见文献[10]。基岩和混凝土廊道设为线弹性材料,混凝土防渗墙设损伤方案采用塑性损伤本构[11],不设损伤方案采用线弹性材料,弹性模量和泊松比与塑性损伤本构参数保持一致,计算参数见表 2。在防渗墙与覆盖层、廊道与过渡料之间、沥青混凝土心墙与过渡料之间均设置 Goodman 接触单元,接触面参数见表 3。

表 1 筑坝材料和覆盖层邓肯－张模型计算参数

Tab. 1 Calculation parameters of dam materials and Duncan-Chang model of overburden layer

材料名称	密度	c /kPa	φ /(°)	R_f	n	K	G	F	D	K_{ur}
上游压重	2.05	135	38.0	0.74	805	0.24	0.22	0.115	5.2	1 610
上游堆石料	2.13	160	38.2	0.76	1 185	0.23	0.23	0.090	4.8	2 370
过渡料	2.24	195	38.0	0.72	1 150	0.37	0.29	0.100	8.1	2 300
沥青混凝土心墙	2.40	330	27.0	0.83	640	0.15	0.47	0	0	1 280
下游主堆石料	2.18	200	38.5	0.77	1 335	0.24	0.30	0.090	5.8	2 670
下游次堆石料	2.13	160	38.2	0.76	1 185	0.23	0.23	0.090	4.8	2 370
下游压重	2.05	135	38.0	0.74	805	0.24	0.22	0.115	5.2	1 610
含孤块碎(卵)砾石土层	2.21	10	32.0	0.80	1 200	0.25	0.35	0.160	5.0	2 400
含孤块碎石土层	2.26	10	30.0	0.83	1 150	0.24	0.37	0.151	6.2	2 300
细沙粉土层	2.23	10	30.0	0.81	1 100	0.23	0.38	0.163	5.7	2 200
含(卵)砂砾石层	1.60	40	26.0	0.76	600	0.42	0.34	0.030	3.5	1 200

注:密度单位为 g/cm^3。

表 2 基岩、混凝土廊道和防渗墙材料参数

Tab. 2 Material parameters of bedrock, concrete gallery and cut-off wall

材料名称	密度 ρ /(kg·m^{-3})	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	抗拉强度 f_t/MPa	抗压强度 f_c/MPa
混凝土防渗墙(塑性损伤)	2 500	34.5	0.167	2.64	37.9
混凝土防渗墙(线弹性)	2 500	34.5	0.167		
混凝土廊道	2 500	34.5	0.167		
基岩	2 600	4.0	0.270		

表 3 接触面参数

Tab. 3 Contact surface parameters

接触面位置	内摩擦角 φ/(°)	粘聚力 c/kPa	破坏比 R_f	模量 K	试验常数 n
防渗墙与覆盖层	11	10.5	0.89	757	0.80
混凝土与过渡料	15	1.0	0.80	2 000	0.50
沥青混凝土与过渡料	36	0	0.74	4 800	0.56

2.3 渗流计算参数与边界条件

结合地勘资料、现场试验和工程经验,沥青混凝土心墙坝和覆盖层的各部分材料计算参数见表 4。

表 4 坝体和覆盖层各部分材料计算参数

Tab. 4 Material calculation parameters of each part of dam body and overburden layer cm/s

材料名称	渗透系数	材料名称	渗透系数
上游压重	1×10^{-3}	下游次堆石料	2×10^{-1}
上游堆石料	5×10^{-2}	下游压重	1×10^{-3}
过渡料	5×10^{-3}	含孤块碎(卵)砾石土层	5×10^{-5}
沥青混凝土心墙	1×10^{-7}	含孤块碎石土层	1×10^{-4}
混凝土防渗墙	1×10^{-7}	细沙粉土层	2.5×10^{-4}
下游主堆石料	1×10^{-1}	含(卵)砂砾石层	2.5×10^{-4}

混凝土防渗墙采用塑性损伤本构,在防渗墙出现损伤后,根据损伤区域的损伤程度和面积调整该区域渗透系数,根据文献[12]确定损伤区域渗透系数 K_d:

$$K_d=\varepsilon u^3/(12\lambda l_c) \tag{9}$$

式中,ε 为微裂纹的粗糙度;u 为微裂纹的张开度;λ、l_c 分别为损伤带的损伤系数、宽度。

三维计算模型边界条件设置的已知水头边界包括:上游蓄水位(3 723.00 m)和下游水位(3 680.00 m)淹没线与坝体和基岩相交的以下部分;出渗边界包括水位淹没线以上的土体与大气接触部分边界;不透水边界包括模型四周边界及模型底面截取边界。

3 防渗墙损伤对沥青混凝土心墙坝应力渗流分析

3.1 防渗墙损伤对坝体应力的影响分析

蓄水期混凝土防渗墙最大压应力未超过混凝土的抗压强度,受压损伤较小,防渗墙受拉损伤为主要损伤因素,如图 4 所示,混凝土防渗墙损伤区域主要集中在墙底部凹陷和两侧部位,最大值为 0.70,未超过混凝土破坏损伤值[9]。防渗墙底部凹陷部位的受拉损伤长为 38.5 m、宽为 4 m,左侧损伤长为 26.3 m、宽为 2 m,右侧损伤长为 34.2 m、宽为 26.6 m。

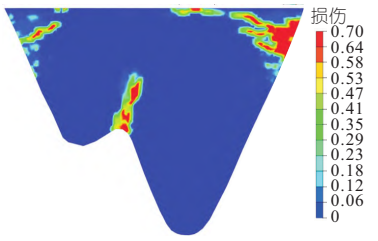


图 4 蓄水期防渗墙受拉损伤

Fig. 4 Tension damage of cut-off wall during impoundment period

图 5 为蓄水期防渗墙不设损伤和设损伤时坝体典型断面大主应力等值线图。由图 5 可知,防渗墙不设损伤和设损伤时蓄水期坝体大主应力基本一致,最大值分别为 0.53、0.51 MPa,主要集中在心墙和廊道周围过渡层部位。图 6 为防渗墙不设损伤和设损伤时蓄水期坝体典型断面小主应力等值线图。由图 6 可知,防渗墙不设损伤和设损伤时蓄水期坝体小主应力基本一致,数值差别不

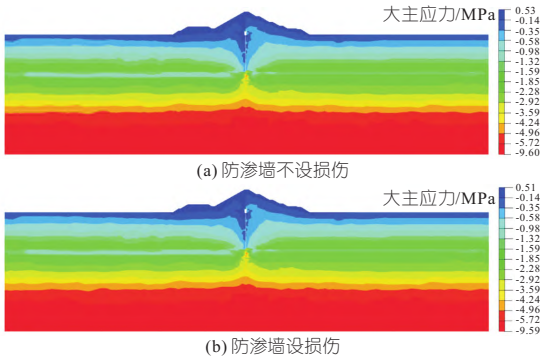


图 5 蓄水期坝体典型断面大主应力等值线图

Fig. 5 Major principal stress contour map of typical dam section in impoundment period

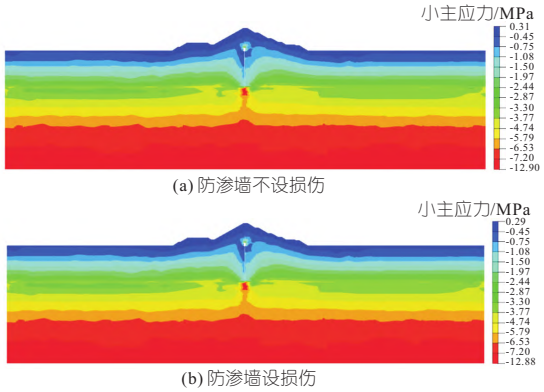


图 6　蓄水期坝体典型断面小主应力等值线图

Fig. 6　Minor principal stress contour map of typical dam section in impoundment period

大,最大值分别为 12.90、12.88 MPa,主要集中在防渗墙底处的基岩部位。

图 7 为蓄水期防渗墙不设损伤和设损伤时大主应力等值线图。由图 7 可知,蓄水期,防渗墙凹陷与基岩接触部位出现应力集中现象,导致防渗墙凹陷处出现拉应力,同时防渗墙两侧土体沉降远大于防渗墙沉降,在防渗墙侧壁产生较大负摩擦力,使得防渗墙两侧出现拉应力。计算结果表明,不设损伤时混凝土防渗墙最大拉应力为 11.50 MPa,最大值主要分布在防渗墙底部凹陷部位,应力极值已经远超混凝土的抗拉强度,设置损伤后,应力被释放并向未损伤区域转移,此时防渗墙最大拉应力降低至 4.5 MPa,减小了 7.00 MPa,最大值分布在防渗墙底部凹陷和两侧部位。

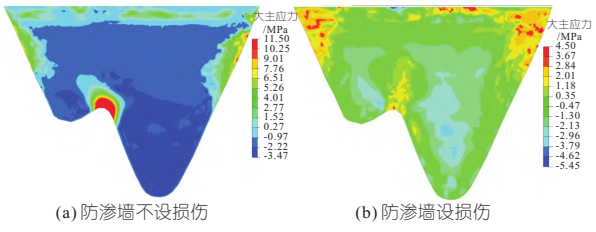


图 7　蓄水期防渗墙大主应力

Fig. 7　Major principal stress of cut-off wall in impoundment period

图 8 为蓄水期防渗墙不设损伤和设损伤时小主应力等值线图。由图 8 可知,蓄水期不设损伤时混凝土防渗墙最大压应力为 34.58 MPa,最大

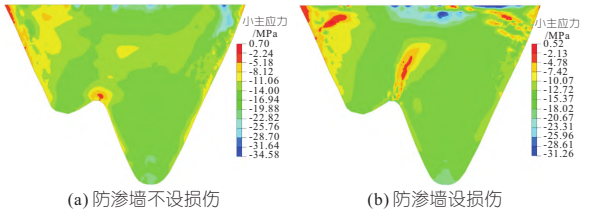


图 8　蓄水期防渗墙小主应力

Fig. 8　Minor principal stress of cut-off wall in impoundment period

值主要分布在防渗墙顶部和底部凸起部位,设置损伤后,应力被释放并向未损伤区域转移,此时防渗墙最大压应力降低至 31.26 MPa,减小了 3.32 MPa,最大值分布在防渗墙顶部和底部凸起部位,这是由于防渗墙顶部与混凝土廊道接触,坝体和廊道自重作用在防渗墙上,使得防渗墙顶部出现较大压应力,同时防渗墙底部凸起部位与基岩接触,出现压应力。

防渗墙设置损伤后拉压应力均满足设计要求,但最大拉压应力仍较大,建议工程中对深厚覆盖层地基加固处理,防渗墙应力较大区域可使用自愈混凝土。

3.2　防渗墙损伤对坝体及坝基渗流的影响分析

防渗墙受到损伤后出现微裂纹,其渗透系数会随着损伤增加逐渐增大,根据式(9)和混凝土防渗墙受拉损伤区域,计算出防渗墙底部凹陷处、左侧、右侧局部损伤分别为 1.22×10^{-5}、2.44×10^{-5}、1.28×10^{-6} cm/s。

图 9 为蓄水期防渗墙未损伤和损伤时坝体典型断面总水头分布图。由图 9 可知,防渗墙未损伤和损伤时坝体总水头基本一致,数值差别不大,总水头等值线主要集中在沥青混凝土心墙、混凝土廊道和防渗墙处。图 10 为蓄水期防渗墙未损伤和损伤时坝体典型断面和防渗墙压力水头分布。由图 10 可知,防渗墙未损伤和损伤时坝体压力水头基本一致,数值差别不大,浸润面在心墙和防渗墙前后形成突降,说明沥青混凝土心墙和混凝土防渗墙组成的防渗系统消减水头。图 11 为蓄水期防渗墙未损伤和损伤时防渗墙渗透坡降图。由图 11 可知,防渗墙未损伤时渗透坡降分布均匀,在防渗墙顶部渗透坡降逐渐减小,最大渗透坡降为 54.26;设置损伤后,防渗墙在损伤区域的渗透坡降减小,其余区域渗透坡降与未损伤一致,最大渗透坡降为 54.02。

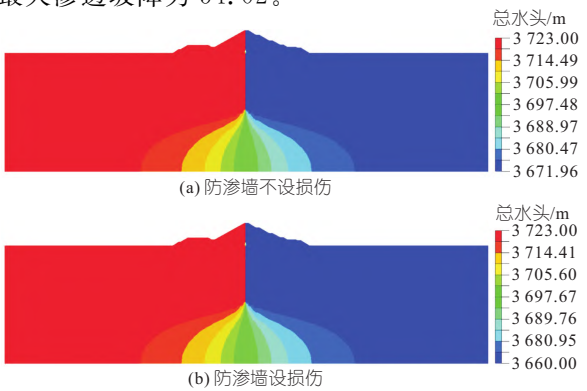


图 9　蓄水期坝体典型断面压力水头分布

Fig. 9　Pressure head distribution of typical dam section during impoundment period

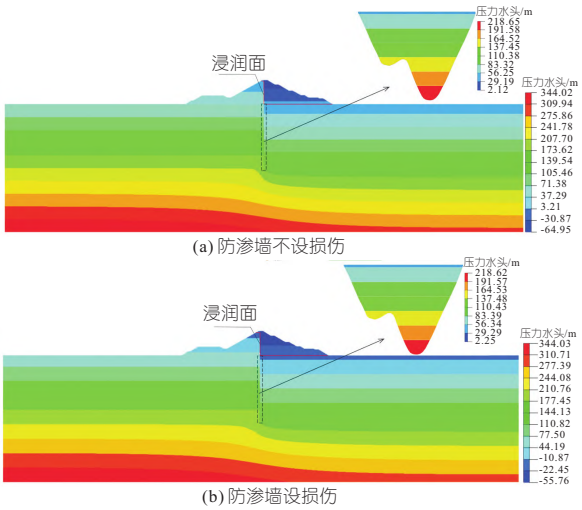


图 10 蓄水期坝体典型断面和防渗墙压力水头分布

Fig. 10 Pressure head distribution of typical dam section and cut-off wall during impoundment period

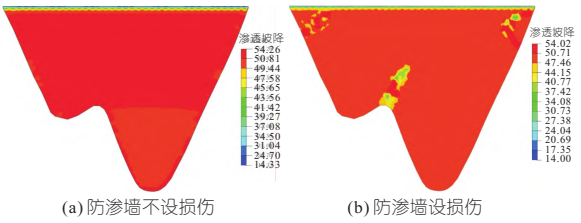


图 11 蓄水期防渗墙渗透坡降

Fig. 11 Seepage gradient of cut-off wall during impoundment period

表 5 为蓄水期混凝土防渗墙未损伤和损伤时地基、心墙和防渗墙渗漏量。

表 5 蓄水期混凝土防渗墙未损伤和损伤时渗漏量

Tab. 5 Leakage of concrete cut-off wall without damage and damage during impoundment period

位置	渗漏量/($m^3 \cdot d^{-1}$)	
	防渗墙未损伤	防渗墙损伤
地基	1 586.25	1 585.51
心墙	75.49	74.15
防渗墙	88.53	306.50

由表 5 可知，防渗墙未损伤时，墙体渗漏量为 75.49 m^3/d，大坝总渗透流量为 1 750.27 m^3/d，小于多年平均流量的 1%；防渗墙损伤后，墙体渗漏量为 306.50 m^3/d，相比未损伤时增大了 246.21%，地基和心墙渗漏量变化不大，大坝整体渗漏量为 1 966.16 m^3/d，相比未损伤时增大了 12.33%，说明防渗墙损伤仅对墙体渗漏量影响较大，对大坝整体的渗漏量影响较小。

4 结论

a. 混凝土防渗墙受拉损伤集中在墙两侧和底部凹陷处，最大值为 0.70，未超过混凝土破坏损伤值。

b. 蓄水期防渗墙设损伤相比不设损伤，坝体和覆盖层应力变化不大，防渗墙应力分布发生变化，应力值有所下降，最大拉应力减小了 7.00 MPa，最大压应力减小了 3.32 MPa。

c. 防渗墙损伤对大坝整体的总水头、压力水头和渗漏量影响较小，损伤区域的渗透坡降减小，对防渗墙渗漏量影响较大，损伤后防渗墙渗漏量相比未损伤增大了 246.21%，但大坝整体的渗漏量仅增大了 12.33%。

参考文献：

[1] 邹德高，屈永倩，孔宪京，等. 深厚覆盖层上土石坝防渗墙损伤开裂精细化分析及防渗功能评价[J]. 水利学报，2024，55(2)：147-157.

[2] 郑光俊，李振华，林威，等. 铜车坝水库泥岩石渣坝复合土工膜与振冲碎石桩地基中混凝土防渗墙综合防渗体系的应力变形特性[J]. 水电能源科学，2024，42(4)：147-150，172.

[3] 崔熙灿，王大勇，张凌凯，等. 基于有限元法的沥青混凝土心墙及坝基防渗墙应力分析[J]. 水电能源科学，2023，41(2)：83-85，149.

[4] 邹德高，屈永倩，孔宪京，等. 超深覆盖层上高沥青心墙坝防渗墙受力状态的精细化分析[J]. 岩土力学，2023，44(6)：1826-1836.

[5] 林恒星，孙继文，熊志豪，等. 超深覆盖层上沥青混凝土心墙坝防渗体应力变形特性及处理措施研究[J]. 水电能源科学，2024，42(6)：175-178，97.

[6] YU X，KONG X J，ZOU D G，et al. Linear elastic and plastic-damage analyses of a concrete cut-off wall constructed in deep overburden[J]. Computers and geotechnics，2015，69：462-473.

[7] LEE J，FENVES G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures[J]. Journal of engineering mechanics，1998，124(8)：892-900.

[8] DRUCKER D C，PRAGER W. Solid mechanics and plastic analysis or limit design[J]. Quarterly of applied mathematics，1952，10(2)：157-165.

[9] GAN L，FENG X W，ZHANG H W，et al. Three-dimensional meso numerical model of freeze-thaw concrete based on the porosity swelling theory[J]. Journal of materials in civil engineering，2023，35(10)：05023005.

[10] 邹德高，屈永倩，孔宪京，等. 超深覆盖层上高沥青心墙坝防渗墙受力状态的精细化分析[J]. 岩土力学，2023，44(6)：1826－1836.

[11] 张飞，马建勋，南燕. 混凝土塑性损伤模型参数的选取与验证计算[J]. 混凝土与水泥制品，2021(1)：7-11，29.

[12] 王庆，姚俊，谭文禄. 类岩石材料的弹性损伤-渗流耦合模型研究[J]. 人民珠江，2019，40(11)：32-39.

（下转第 87 页）

[2] 邱珍锋,卢孝志,伍应华.考虑颗粒形状的粗粒土渗透特性试验研究[J].南水北调与水利科技,2014,12(4):102-106.
[3] 黄达,曾彬,王庆乐.粗粒土孔隙比及级配参数与渗透系数概率的相关性研究[J].水利学报,2015,46(8):900-907.
[4] 彭家奕.颗粒形状对粗粒土渗透特性影响的研究[D].武汉:长江科学院,2017.
[5] 刘杰.土的渗透稳定与渗流控制[M].北京:水利电力出版社,1992.
[6] 朱崇辉,刘俊民,王增红.粗粒土的颗粒级配对渗透系数的影响规律研究[J].人民黄河,2005,27(12):79-81.
[7] 曹志翔,王媛,赵素华,等.粗粒土渗透系数计算模型及试验研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(增刊 2):3701-3708.
[8] 曲诗章,刘晓明,黎莉,等.基于双分形级配模型参数的粗粒土渗透系数计算公式[J].岩土工程学报,2023,45(1):144-152.
[9] 李文波.粗粒土物理力学特性研究[D].昆明:昆明理工大学,2015.
[10] 李文波.粗粒土渗透特性影响因素及渗透规律试验研究[J].价值工程,2013(36):105-107.
[11] 朱崇辉.粗粒土的渗透特性研究[D].西安:西北农林科技大学,2006.
[12] 谢定松,蔡红,魏迎奇,等.粗粒土渗透试验缩尺原则与方法探讨[J].岩土工程学报,2015,37(2):369-373.
[13] 中华人民共和国水利部.土工试验方法标准:GB/T 50123-2019[S].北京:中国计划出版社,2019.
[14] 李广信,周晓杰.土的渗透破坏及其工程问题[J].工程勘察,2004(5):10-13.
[15] 刘广磊.砂卵石土体的渗透性研究[D].烟台:鲁东大学,2023.
[16] 刘洋.土力学基本原理及应用[M].北京:中国水利水电出版社,2016.
[17] 宫凤强,李夕兵,邓建.小样本岩土参数概率分布的正态信息扩散法推断[J].岩石力学与工程学报,2006(12):2559-2564.

Estimation Method of Permeability Coefficient of Gravel Based on Fine Grain Content and Pore Ratio

GU Si-yu[1], SONG Yan-hui[1,2], FENG Man[1]
(1. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering Ministry of Education, Xi'an 710054, China)

Abstract: The permeability coefficient of gravel is related to the mineral composition of the soil, particle gradation, particle shape, dry density, pore ratio, temperature, permeable fluid properties, etc. Based on the existing data in the relevant projects, regression analysis results show that the correlation between the fine grain content and the permeability coefficient was good; The relationship between the two is nonlinear power function with a correlation coefficient of 0.905 3; The two factors of fine particle content and pore ratio have a smooth circular surface with the permeability coefficient, and the correlation coefficient is 0.752 5. An indoor permeability experiment was carried out with gravel from the material source area of Qinghai Ciha-Gorge Hydropower Station to verify the applicability of the established formula. The results show that the formula can be applied to gravel with different pore ratio and particle size distribution, and can be used for similar projects.

Key words: gravel; fine grain content; pore ratio; permeability coefficient; empirical formula

(上接第 146 页)

Stress Seepage Analysis of Asphalt Concrete Core Wall Dam on Deep Overburden Considering Plastic Damage of Cut-off Wall

LIN Heng-xing[1], ZOU Hao[1], FENG Xian-wei[1], SUN Ji-wen[2a,2b], LI Wen-liang[2a,2b]
(1. Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200434, China;
2a. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering; 2b. Institute of Earthquake Engineering, Department of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Concrete anti-seepage wall is often used as anti-seepage structure for dams built on deep overburden. Conventional finite element analysis usually adopts linear elastic constitutive model for concrete anti-seepage wall, which leads to stress overrun of anti-seepage wall. In fact, after the stress exceeds the limit, the concrete of the cut-off wall will be plastically damaged, and the stress will be released and redistributed. Therefore, the stress of the cut-off wall calculated by the linear elastic model does not conform to the actual situation. A three-dimensional finite element model is established based on the asphalt concrete core wall dam on a deep overburden layer. The concrete plastic damage and linear elastic constitutive are used to study the influence of anti-seepage wall damage on the stress and seepage of asphalt concrete core wall dam. The results show that after the plastic damage constitutive is adopted, the stress of the cutoff wall is redistributed, the tensile and compressive stress decreases, the maximum tensile stress decreases by 7.00 MPa, and the maximum compressive stress decreases by 3.32 MPa. The total head, pressure head and leakage of the dam as a whole did not change much, and the seepage gradient in the damaged area of the cut-off wall decreased. The leakage of the cut-off wall increased by 246.21% due to the damage, while the overall leakage of the dam increased by only 12.33%.

Key words: asphalt concrete core wall dam; three-dimensional finite element model; anti-seepage wall; stress; seepage