

一、 工程设计

中美大坝防洪和抗震安全设计理念比较研究

王正发

(中国电力建设集团西北勘测设计研究院有限公司)

[摘 要] 本文根据中美大坝现行防洪标准和抗震标准体系,对比研究了两国大坝防洪和抗震安全设计理念,认为中美两国对大坝防洪安全和抗震安全的要求客观地反映了两国综合国力的差异,大坝防洪和抗震安全设计各有特点、自成体系,均能满足各自国家大坝安全设计和评估的需求。通过比较研究,有助于我们深入理解大坝安全设计理念的内涵,对完善中国大坝安全设计标准体系具有重要意义。文中给出了大坝设计基准期内的防洪安全度、抗震安全度及防洪和抗震综合安全度的计算公式,有助于理解大坝防洪和抗震设计的风险意义。

[关键词] 防洪 安全设计 防洪标准 防洪安全度 抗震标准 基本烈度 设计烈度 抗震安全度 设计基准期

1 引言

据国际大坝委员会(ICOLD)大坝统计资料,截至2015年全世界已在ICOLD注册的坝高15m以上的大坝有58 260座,这些坝及其形成的水库工程主要承担防洪、发电、灌溉、供水等兴利任务,在各国的社会经济发展中具有举足轻重的作用。

大坝支撑着各种规模的水库,关系到坝下游地区人民生命财产的安全。20世纪50年代以来,法国、意大利、美国、印度和中国共有60多座大中型水库大坝失事,造成了严重的生命、财产损失。造成大坝事故的原因主要有洪水、地震、坝年久失修、管理不善等。坝的安全是公共安全问题,越来越受到世界各国政府、社会和人民的重视。从大坝安全设计角度而言,衡量大坝安全的最关键两个方面是防洪和抗震。

中国和美国已注册大坝数分别是23 842座和9265座,是世界第一和第二坝工大国。美国经济实力雄厚,科技水平高,大坝安全设计理念先进,具有完整的设计标准体系。中国自1979年实行改革开放政策以来,经济取得了举世瞩目的成就,是正在崛起的新兴大国,20世纪90年代以来,中国进入大坝发展的高峰时期,成为世界建坝中心,无论从建坝数量、建坝规模和技术难度来说,中国都居于世界首位,在大坝安全设计方面也积累了比较丰富的经验,形成了比较完整的设计标准体系。中美两国大坝防洪和抗震安全设计各有特点,因此,对其进行比较研究,有助于我们深入理解大坝安全设计理念的内涵,对完善中国大坝安全设计标准体系具有重要意义。

2 中美大坝防洪安全设计理念比较

由于洪水发生具有随机性,受流域特性、气候条件、洪水资料等的影响,因此设计洪水成果存在很大的不确定性。其次,由于世界各国经济发展水平不同,对防洪安全的要求也不同,各国现行大坝防洪设计规范采用的设防标准颇不统一。

中美大坝防洪安全设计均是以大坝防洪标准予以保证。大坝防洪标准是指水库大坝保证自身防洪安全所必须达到的防御洪水的标准,反映水库大坝自身抵御洪水的能力。

中国现行的大坝防洪标准主要有 GB 50201—2014《防洪标准》、DL 5180—2003《水电枢纽工程等级划分及设计安全标准》和 SL 252—2000《水利水电工程等级划分及洪水标准》,三个标准在大坝防洪标准方面的规定是一致的。GB 50201—2014《防洪标准》是新修订的,自 2015 年 5 月 1 日实施。GB 50201—1995《防洪标准》的全部内容为强制性国家标准,而 GB 50201—2014《防洪标准》只有特别重要的部分条文为强制性条文,相比较而言,GB 50201—2014《防洪标准》的强制性范围缩小了。随着 GB 50201—2014《防洪标准》的实施,DL 5180—2003《水电枢纽工程等级划分及设计安全标准》和 SL 252—2000《水利水电工程等级划分及洪水标准》正在进行修订。

中国大坝防洪标准以防御的洪水或潮水的重现期表示;对于特别重要的大坝,可采用可能最大洪水表示。防洪标准可根据防护对象的不同需要,采用设计一级或设计、校核两级。

设计洪水成果是大坝防洪安全的最终体现。在工程设计中,大坝防洪标准通常采用设计、校核两级,相应的洪水分别称为设计洪水和校核洪水。设计洪水是指给定设计频率 p (%) 的洪水,包括设计洪峰流量、设计洪量及设计洪水过程线, p (%) 是年超越概率,与重现期 T (年) 互为倒数;校核洪水是指给定设计频率 p (%) 的洪水或可能最大洪水。

中国大坝防洪标准的确定是按其工程规模、总库容、效益和在国民经济中的重要性先划分工程等别,再根据工程等别按永久或临时水工建筑物在工程中的重要性确定其级别,同时考虑坝型、坝高、工程地质条件,以及工程失事后对下游危害等因素判定其级别是否提高一级或降低一级,最后以水工建筑物的级别和筑坝材料的类型(土石坝或混凝土坝、浆砌石坝)按山区、丘陵区和平原、滨海区分别确定水库工程建筑物的防洪标准。这种先分等再根据工程等别分级的做法已在中国沿用了几十年,证明在工程实践中是切实可行的。

中国大坝防洪标准制定体现了以下理念:① 设计标准,是指当发生小于或等于该标准洪水时,应保证大坝的安全或防洪设施的正常运行;② 校核标准,是指遇该标准相应的洪水时采取非常运用措施,在保证大坝安全的前提下,允许次要建筑物局部或不同程度的损坏,次要防护对象受到一定的损失。对于失事后果严重的重要工程,人们都认为是不能失事的,自古以来就有“万无一失”的说法,要做到“万无一失”,其标准应不低于万年一遇。因此,从中国历次防洪标准的变化过程来看,水利水电工程的最高防洪标准定为 10 000 年一遇或可能最大洪水 (probable maximum flood, PMF),即把 PMF 与万年一遇

洪水并列，反映了人们对防洪安全的合理需求。

美国现行的大坝防洪标准体系由联邦政府、各州政府和著名的机构，如陆军工程师兵团（USACE）、垦务局（USBR）、大坝委员会等颁布的指南所组成，没有强制性标准。相对而言，1979 年 USACE 建议的大坝防洪标准、2004 年联邦应急管理署（FEMA）颁布的大坝防洪安全规范（联邦设计规范 7509.11_0_code——美国联邦建议的溢洪道设计洪水）具有一定的代表性。USACE 建议的防洪标准见表 1～表 3，FEMA 建议的防洪标准见表 4。

表 1 规 模 类 别

类 别	库容 (hm ³)	坝高 (m)
小	0.62~1.23	7.6~12.2
中	1.23~61.5	12.2~30.5
大	≥61.5	≥30.5

表 2 潜 在 灾 害 类 别

类别	生命损失 (开发程度)	经济损失 (开发程度)
低	没有预期 (没有供居住的永久建筑物)	小 (未开发至临时建筑物或农业)
显著	几个 (只有少数)	可观的 (显著的农业、工业或建筑物)
高	较多 (高于少数)	过度 (广阔的社区、工业或农业)

表 3 建 议 的 安 全 标 准

灾 害	规 模	安全标准
低	小	50 年一遇至 100 年一遇洪水
	中	100 年一遇洪水至 50% PMF
	大	(50%~100%) PMF
显著	小	100 年一遇洪水至 50% PMF
	中	(50%~100%) PMF
	大	PMF
高	小	(50%~100%) PMF
	中	PMF
	大	PMF

表 4

FEMA 建议的溢洪道设计洪水

潜在的灾害	规 模	溢洪道设计洪水
高： 可能的生命损失 预期的环境、经济和生命损失	A	PMF
	B	PMF
	C	(1/2~1) PMF
	D	100 年一遇洪水至 1/2 PMF
中： 没有预期的生命损失 预期的环境、经济和生命损失	A	PMF
	B	(1/2~1) PMF
	C	100 年一遇洪水至 1/2 PMF
低： 没有预期的生命损失 低或有限的环境、经济和生命损失	A	(1/2~1) PMF
	B	100 年一遇洪水至 1/2 PMF
	C	50 年一遇至 100 年一遇洪水

美国大坝防洪标准以防御的频率洪水（只用到 100 年一遇）或 1/2 PMF 或 PMF 表示。防洪标准采用设计一级。

美国大坝防洪标准是根据坝失事后对其下游的潜在灾害的大小和坝的规模（三级或四级）来选定。

美国大坝防洪标准制定体现了以下理念：当发生小于或等于防洪标准洪水（设计洪水）时，应保证大坝的安全或防洪设施的正常运行；当发生大于防洪标准洪水时，在保证大坝安全的前提下，允许次要建筑物局部或不同程度的损坏，次要防护对象受到一定的损失。

从中美大坝防洪标准的变化过程看，制定防洪标准时均遵循了以下原则：以工程失事后对政治、经济、社会和环境的影响大小为依据，影响较大的工程承担风险小一点；反之则可大一些，不顾经济代价，片面提高防洪标准和安全性是不合适的。

世界上没有绝对安全的大坝，大坝均存在失事的风险，差别仅仅是失事的风险大小而已。传统的大坝防洪安全分析认为漫坝风险主要来自超标洪水。大坝在整个运行期间抗御洪水的安全度取决于设计洪水重现期 $T_{洪水}$ （年）和设计基准期 N （年）。中美现行大坝防洪标准的防洪安全度为

$$R_{防洪,N} = (1 - p_{年、洪水})^N = \left(1 - \frac{1}{T_{洪水}}\right)^N$$

(1)

或

$$R_{防洪,N} = 1$$

(2)

3 中美大坝抗震安全设计理念比较

由于地震发生的不确定性，以及所取得的强震记录仍属有限，各国现行大坝抗震设计规范采用的设防标准颇不统一。

中美大坝抗震安全设计均是以大坝抗震设防标准予以保证。大坝抗震设防标准是指水库大坝保证自身抗震安全所必须达到的抗御地震破坏的标准，反映水库大坝自身抗御地震

破坏的能力。

中国现行的大坝抗震标准主要有 DL 5073—2000《水工建筑物抗震设计规范》和 SL 203—1997《水工建筑物抗震设计规范》。前者是水电行业标准，后者是水利行业标准，两个标准在大坝抗震设防标准方面的规定是一致的，均是强制性行业标准。

中国大坝抗震设防标准以设计基准期内抗御的地震烈度的超越概率表示，采用一级设计标准设防。

大坝抗震设防类别应根据大坝的重要性和工程场地基本烈度确定。基本烈度是指 50 年期限内一般场地条件下可能遭遇超越概率 P_{50} 为 0.10 的地震烈度。一般为《中国地震烈度区划图（1990）》上所标示的地震烈度值，对重大工程应通过专门的场地地震危险性评价工作确定。设计烈度是在基本烈度的基础上确定的作为工程设防依据的地震烈度。大坝抗震设计的设计烈度一般采用基本烈度；工程抗震设防类别为甲类的大坝，可根据其遭受强震影响的危害性在基本烈度基础上提高 1 度作为设计烈度；凡按规范规定必须作专门的地震危险性分析的工程，其设计地震加速度代表值的概率水准，对壅水建筑物应取设计基准期 100 年内超越概率 P_{100} 为 0.02，对非壅水建筑物应取设计基准期 50 年内超越概率 P_{50} 为 0.10；其他特殊情况需要采用高于基本烈度的设计烈度时，应经主管部门批准；施工期的短暂状况可不与地震作用组合，空库时，如需要考虑地震作用，可将设计地震加速度代表值减半进行抗震设计。

设计地震加速度和设计反应谱成果是大坝抗震安全的最终体现。中国大坝设计地震加速度须根据确定的抗震设防标准（概率水准）由专门的地震危险性分析确定。设计反应谱应根据场地类别和结构自振周期 T 按规范给定的设计反应谱确定。

中国大坝抗震设防标准的确定是按其工程的重要性和工程场地基本烈度，先确定工程抗震设防类别，再根据建筑物级别，按壅水和非壅水确定场地基本烈度，一般采用基本烈度作为设计烈度；同时，对于工程抗震设防类别为甲类的大坝，可根据其遭受强震影响的危害性在基本烈度的基础上提高 1 度作为设计烈度。这种先分等再根据建筑物级别的做法已在中国沿用了几十年，证明在工程实践中是切实可行的。

中国大坝抗震设防标准采用一级设计标准，体现了以下理念：根据现行抗震设计规范进行抗震设计的水工建筑物能抗御设计烈度地震；如有局部损坏，经一般处理后仍可正常运行。

美国现行的大坝抗震标准体系由联邦政府、各州政府和著名的机构，如陆军工程师兵团（USACE）、大坝委员会等颁布的规定和指南所组成，没有强制性标准。主要有陆军工程师兵团的 ER 1110-2-1806《土木工程项目地震设计与评估》（1995）、EP 1110-2-12《碾压混凝土坝地震设计规定》（1995），联邦应急管理署（FEMA）颁布的 FEMA 65《联邦大坝安全指南——坝的地震分析与设计》（2005）。

美国大坝抗震设防标准也是以设计基准期内抗御的地震的超越概率表示，采用两级标准，即运行基准地震（operating basis earthquake, OBE）和最大设计地震（maximum design earthquake, MDE）或安全评估地震（safety evaluation earthquake, SEE）。对于特别重要的大坝，其 MDE 或 SEE 可采用最大可信地震（maximum credible earthquake,

MCE)。

OBE, 运行基准地震, 通俗地理解, 相当于设计标准, 是指在工程设计基准期 (或设计使用寿命) 内, 在一个工程场址合理地可预期发生的产生地面运动的地震。OBE 的相关功能要求是大坝在遭遇 OBE 时, 其功能不受影响, 在设计工况下能正常安全运行。OBE 旨在保护大坝免受经济损失或丧失服务功能。因此, OBE 的概率水准可以基于经济考虑而选择。

MDE 或 SEE, 最大设计地震或安全评估地震, 通俗地理解, 相当于校核标准, 是指能产生对待设计或评估的大坝而言的最高级别地面运动的地震。MDE 或 SEE 可视情况取为 MCE 或一个低于 MCE 的设计地震。在确定 MDE 或 SEE 的大小时, 要考虑的因素是大坝的潜在灾害类别、项目功能 (供水、娱乐、防洪等) 的关键性和恢复运行功能需要的时间。一般情况下, MDE 或 SEE 相关功能要求是大坝在遭遇 MDE 或 SEE 时, 不能导致灾难性的事故, 例如水库的不受控制的泄洪, 尽管可以容忍重大损害或经济损失。如果大坝包括一个关键的供水水库, 那么预期的损害应限制允许大坝水库在一个可接受的时间内恢复到正常运行状态。MDE 是用来评估结构物抗震性能的, 通常取对结构起控制作用的 MCE; 然而, 如大坝失事不会产生生命损失, 且假定产生的成本效益和财产损失的风险是可以接受的, 那么取一个较小的地震作为 MDE 是可以的。

MCE, 最大可信地震, 是指沿一个已知断层或在一个特定的地震构造区或当前的地壳构造框架下很有可能发生的最大地震。由于场址受各种震源产生的地震影响, 每一个地震均有其自身的断层机制、最大地震震级和离场址的距离, 因此, 一个工程场址往往有多个由不同震源产生的 MCE, 每个 MCE 都有其特定的地震动参数和反应谱形状。最终的起控制作用的工程场址 MCE 由确定性地震灾害分析法 (deterministic seismic hazard analysis, DSHA) 确定, 可基于所有已知的区域的和当地的地质和地震资料通过判断确定。

设计地震动特性参数是大坝抗震安全的最终体现, 主要包括地面动峰值加速度、场地反应谱和振动持续时间, 由美国地质调查局定期公开发布。

美国大坝抗震设防标准采用两级设计标准, 体现了以下理念: 当大坝遭受 OBE 的地震作用时, 要求大坝保持正常运行功能, 所受震害轻微。在遭受最大设计地震 MDE 作用时, 要求大坝至少保持蓄水能力, 不发生溃坝但可容许大坝发生某种程度甚至严重的震害。

从中美两国大坝抗震标准的变化过程看, 制定抗震标准时均遵循了以下原则: 以工程失事后对政治、经济、社会和环境的影响大小为依据, 影响较大的工程承担风险小一点; 反之则可大一些, 不顾经济代价, 片面提高抗震标准和安全性是不合适的。

现行中美大坝抗震标准的主要区别是美国抗震标准倾向于用以风险分析为基准的方法来确定大坝的抗震概率水平。风险分析方法强调了“潜在破坏模态分析”的重要性。要求识别大坝的各种破坏模式, 了解破坏发展进程中大坝特性的变化及其发生机制, 了解超越峰值强度后的材料剩余强度, 以判定大坝破坏发展进程的快慢程度。在大坝的健康诊断与安全监测中目前已强调了“性能指标”的内容, 以便加深对破坏模态发展过程的了解并及

早提出预警信号。为此，需要确定性能指标所相应的安全限值和预警限值。

大坝抗震安全的风险主要来自超标地震。大坝在整个运行期间抗御地震的安全度，用超越概率可表示为 $1 - P_N$ ；若用设计地震的重现期 $T_{\text{地震}}$ （年）和设计基准期 N （年）表示，则中美两国现行大坝抗震标准的抗震安全度为

$$R_{\text{抗震},N} = 1 - P_N = (1 - p_{\text{年,地震}})^N = \left(1 - \frac{1}{T_{\text{地震}}}\right)^N$$

(3)

或

$$R_{\text{抗震},N} = 1$$

(4)

4 中美大坝防洪和抗震安全设计理念比较

中美大坝防洪标准的概率水平是以年超越概率表示，而抗震标准的概率水平是以设计基准期内的超越概率表示。尽管中美两国大坝防洪和抗震标准的概率水平表示方式不同，但中美两国现行大坝防洪标准的防洪安全度和大坝抗震标准的抗震安全度的计算公式是一样的。年超越概率 p （%）、设计基准期 N （年）、设计基准期内超越概率 P_N （%）、重现期 T （年）和可靠度 R_N 之间的关系为

$$R_N = 1 - P_N = (1 - p)^N = \left(1 - \frac{1}{T}\right)^N$$

(5)

工程项目设计基准期取 100 年和 50 年，项目各频率防洪安全度成果见表 5，项目抗震安全度成果见表 6。

表 5 项目各频率的防洪安全度成果

年超越概率 p (%)	重现期 T (年)	防洪安全度 $R_{\text{防洪}}$	
		设计基准期 $N=50$ 年	设计基准期 $N=100$ 年
1	100	0.605 0	0.366 0
0.1	1000	0.951 2	0.904 8
0.05	2000	0.975 3	0.951 2
0.02	5000	0.990 0	0.980 2
0.01	10 000	0.995 0	0.990 0

表 6 项目设计基准期内超越概率为 P_N （%）的抗震安全度成果

项目设计基准期 超越概率 P_N (%)	设计基准期 N (年)	重现期 T (年)	年超越概率 p (%)	抗震安全度 $R_{\text{抗震}}$
50	100	144.77	0.690 750 5	0.500 0
10	100	949.62	0.105 305 0	0.900 0
5	100	1950.07	0.051 280 1	0.950 0
2	100	4950.33	0.020 200 7	0.980 0
1	100	9950.42	0.010 049 8	0.990 0
50	50	72.64	1.376 729 6	0.500 0

续表

项目设计基准期 超越概率 P_N (%)	设计基准期 N (年)	重现期 T (年)	年超越概率 p (%)	抗震安全度 $R_{抗震}$
10	50	475.06	0.210 499 2	0.900 0
5	50	975.29	0.102 534 0	0.950 0
2	50	2475.42	0.040 397 3	0.980 0
1	50	4975.46	0.020 098 7	0.990 0

根据概率论，项目在其设计基准期内，防洪和抗震综合安全的可靠度应为

$$R_{\text{防洪、抗震},N} = R_{\text{防洪},N} \times R_{\text{抗震},N} = (1 - p_{\text{洪水,年}})^N \times (1 - P_N) = (1 - p_{\text{洪水,年}})^N \times (1 - p_{\text{地震,年}})^N \tag{6}$$

或

$$R_{\text{防洪、抗震},N} = R_{\text{防洪},N} \times R_{\text{抗震},N} = \left(1 - \frac{1}{T_{\text{洪水}}}\right)^N \times \left(1 - \frac{1}{T_{\text{地震}}}\right)^N \tag{7}$$

中美防洪设计中均有可能最大洪水的概念，若从发生概率来理解，可能最大洪水应是防洪的最高级别。

中国大坝抗震设计中没有最大可信地震的概念，而美国抗震设计中有最大可信地震的概念，若从坝失事的潜在灾害大小考虑，具有与可能最大洪水相当的安全意义。

5 结论

中美大坝防洪和抗震安全设计标准各成体系，均能满足各自国家大坝安全设计和评估的需求。中美大坝防洪设计分别采用二级和一级，以年超越概率表示；而中美大坝抗震设计分别采用一级和二级，以设计基准期内的超越概率表示。设计基准期内的防洪安全和抗震安全的可靠度计算公式具有相同的形式。

中美大坝防洪安全和抗震安全设计理念的重大差异是美国大坝防洪标准和抗震标准的确定基本达到了统一，均是以坝失事后的潜在灾害类别作为重要判据，重视风险分析。

中美两国对大坝防洪安全和抗震安全的要求客观地反映了中美两国综合国力的差异，防洪安全和抗震安全设计本质上是防洪安全、抗震安全与经济之间的权衡，应与国家的经济实力相适应。防洪和抗震既不能过度，也不能失度，防洪安全和抗震安全设计必须妥善解决好安全与经济、社会、环境之间的矛盾。

参考文献

[1] DEPARTMENT OF THE ARMY, U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, “Inflow Design Floods for Dams and Reservoirs”, Engineer Regulation No. 1110-8-2 (FR), 1991.

[2] U. S. DEPARTMENT OF HOMELAND SECURITY, FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY, FEMA 333, “Federal Guidelines for Dam Safety—Hazard Potential Classification System for Dams”, January 2004.

[3] U. S. DEPARTMENT OF HOMELAND SECURITY, FEDERAL EMERGENCY MANAGE-

- MENT AGENCY, FEMA 94, "Federal Guidelines for Dam Safety—Selecting and Accommodating Inflow Design Floods for Dams", April 2004.
- [4] 林皋. 大坝抗震安全//中国工程院第三次地下工程与基础设施公共安全学术研讨会论文集, 2007.
- [5] DEPARTMENT OF THE ARMY, U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, "Earthquake Design and Evaluation for Civil Works Projects", Engineer Regulation No. 1110-2-1806, 31 July 1995.
- [6] DEPARTMENT OF THE ARMY, U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, "SEISMIC DESIGN PROVISIONS FOR ROLLER COMPACTED CONCRETE DAMS", Engineer Pamphlet No. 1110-2-12, 30 September 1995.
- [7] U. S. DEPARTMENT OF HOMELAND SECURITY, FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY, FEMA 65, "Federal Guidelines for Dam Safety—Earthquake Analyses and Design of Dams", May 2005.

作者简介

王正发 (1965—), 男, 安徽省南陵县人, 教授级高工, 主要从事工程水文及水资源设计研究工作。

某大坝右岸防渗缺陷和新增防渗排水措施效果分析

吕高峰 王玉洁 朱锦杰 张 猛

(国家能源局大坝安全监察中心)

[摘 要] 某大坝是国内已建工程中覆盖层最深的,尤其是其右岸覆盖层最大深度达到420m。工程运行中发现右岸渗漏量较大,且右岸山坡右岸地下水位整体偏高,局部山坡和排水廊道发生渗透破坏。结合工程现场检查情况和现有监测资料对该大坝右岸渗流性状进行综合分析,分析渗水的主要来源和途径、渗流稳定以及防渗系统存在的缺陷。根据现阶段右岸出现的问题,初拟两种防渗系统延长方式及新增排水廊道的处理方案,运用有限元计算对渗流场进行计算,对比分析两种初拟方案对控制减少渗漏量和降低山坡地下水位的效果。结果表明,在0+610~0+710m底部新增封闭式防渗墙与帷幕灌浆,能有效减少渗漏量并能降低防渗系统右端沿线的水头,新增排水廊道排水孔能有效降低排水廊道附近分布的水头,对右岸边坡渗透稳定有利。所以,截渗与导渗相结合是较为有效的防渗处理措施。

[关键词] 大坝右岸 覆盖层 防渗墙 渗流 防渗排水措施

1 工程概况

某大坝为沥青混凝土心墙堆石坝,坝基开挖高程2530.00m,坝顶高程2654.80m,防浪墙顶高程2656.00m,最大坝高124.5m,坝顶宽度14m。

大坝河床及右岸由第四纪堆积层组成,其右岸覆盖层最大深度达到420m。第四纪堆积层主要由中、上更新统卵砾石层、粉质壤土及块碎石组成,具有不同程度的液质质弱胶结作用和超固结压实作用,结构紧密,具有成岩特征。该堆积层自下而上有五个岩组构成,覆盖层情况见图1。

第一岩组为弱胶结卵砾石层,最大厚度超过100m,具有一定的透水性,该层上、下分别由透水性较弱的第二岩组覆盖和一层深灰色块碎石土层顶托,从而使该层内的地下水具有埋藏深、承压水头高、动态稳定等特点,且不与基岩裂隙承压水直接发生交换。第二岩组自坝址向上、下游延伸均达1.3~1.5km,厚度自上游往下游逐渐变厚。向上游105km附近基本尖灭,往右岸盆地中心延伸约600m逐渐减至尖灭,并与上部的第三岩组的粉质壤土层相搭接。第二岩组是坝址深部第一岩组承压水的隔水层。第三岩组是弱胶结卵砾石层与粉质壤土互层,属弱透水层。该层中的含砾粉质壤土层进入坝体后开始出现,到坝轴线以后逐渐密集,而卵砾石层坝体下游尖灭。第四岩组是弱胶结卵砾石层,透水性在五个岩层中相对较大,分布于右岸坝肩一带,在坝址处

出露高程为 2500~2560m。第五岩组为粉质壤土夹含炭化植物碎屑层,分布于高程 2650m 以上谷坡一带。

考虑大坝右岸防渗问题,大坝右岸防渗坝 0+343.500~坝 0+610.000m 段采用“防渗墙+帷幕灌浆”处理,防渗墙最大深度约 140m,帷幕深入基础相对隔水第二岩组内 5.0m 以上。防渗墙厚度 1.0m,墙体分廊道上、下两段,上层墙从坝肩分台阶施工,下层墙为廊道内劈槽成墙;墙下为 3 排帷幕灌浆,最大帷幕深度为 120 余米。坝 0+610.000~坝 0+710.000m 段:右坝肩深厚覆盖层绕渗区,采用“悬挂式防渗墙”处理,墙体深入第三岩组一定高程下的粉质壤土内,为台地上劈槽成墙,墙厚 1.0m,墙底高程约为 2561m,墙深 78.5m。防渗情况见图 1。

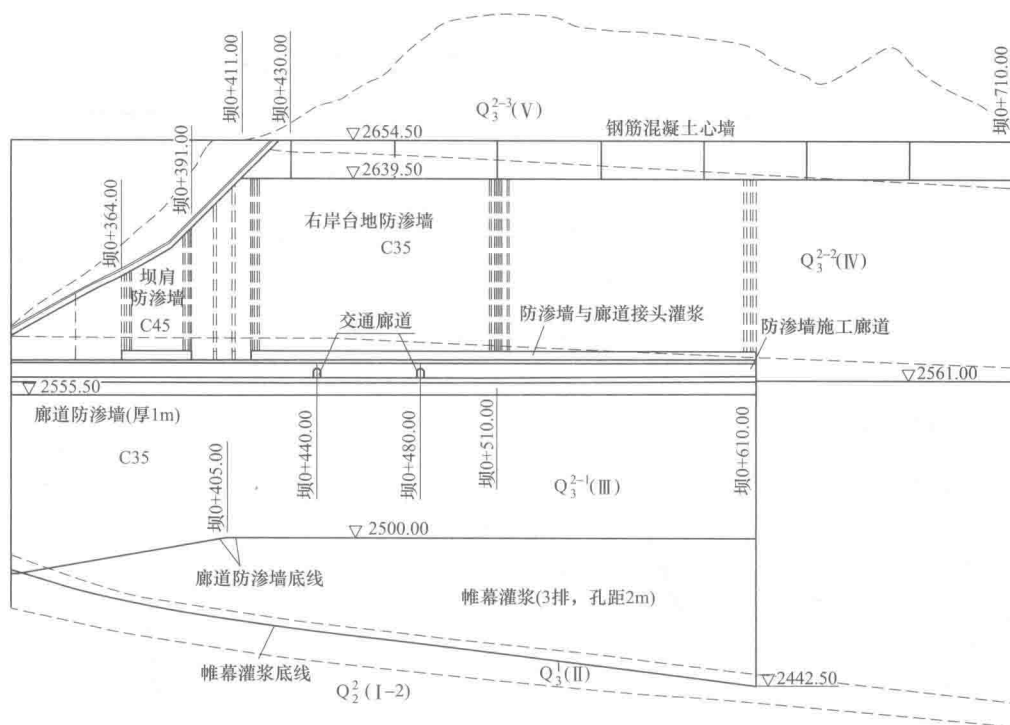


图 1 右岸防渗系统布置图

根据建坝蓄水后坝址区地下渗流场分析,右岸 8 号沟上游山坡的浸润面偏高,右岸山坡的抗滑稳定不能满足要求,在右岸山体下游高程 2561.00m 布置了一条长约 300m 的排水廊道,沿廊道全线布置垂直向 $\phi 100\text{mm}$ 排水孔,孔距 3.0m。同时,结合右坝肩廊道内防渗墙施工需要,右岸还布置了两条交通廊道,并在排水廊道下游 80m 范围内的两条交通廊道内水平布置 $\phi 100\text{mm}$ 排水孔,孔距 3.0m。施工、排水和交通廊道以及排水孔布置见图 2。

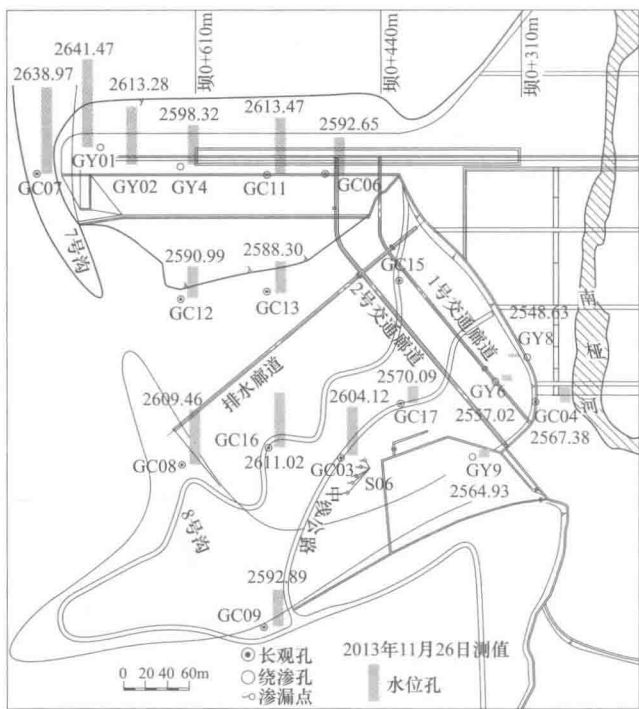


图2 大坝右岸岸坡水位孔 2013 年 11 月 26 日测值分布图

2 渗水性状分析

2.1 渗水来源

为了监测右岸渗流量，在 1、2 号交通廊道排水沟内分别设置量水堰 2 个（1 号交通廊道：WE3-1 和 WE3-2，2 号交通廊道：WE4-1 和 WE4-2）。其中，1 号交通廊道 WE3（WE3-1、WE3-2 之和）所测为坝 0+440.00m 以左排水廊道和施工廊道渗流量；2 号交通廊道 WE4（WE4-1、WE4-2 之和）所测为坝 0+440.00m 以右排水廊道和施工廊道渗流量。在 8 号沟设置量水堰 2 个（WE7 和 WE8），WE7 监测 8 号沟靠近坝体侧渗流量，WE8 监测 8 号沟靠近右岸侧渗流量。图 3 为右岸施工排水廊道渗流量测值过程线。由图可知：

（1）WE3、WE4、WE7 和 WE8 的渗流量与库水位呈明显的正相关，库水位对渗流量影响很大，库水是施工排水廊道渗漏的主要来源。因施工期间就已发现排水廊道内有较大流量，地下水也是 WE3、WE4 渗流量的来源。WE7 的渗流量在库水位降落到一定高程后，渗流量趋于零，而 WE8 依旧有一定的渗流量，从现场情况看，WE8 所测渗流量包含部分 8 号沟右侧坡（远离库水一侧山坡）的地下水，地下水对右岸 8 号沟渗流量也有一定的影响。因当地降雨较多，降雨对右岸 8 号沟总渗流量也有一定的影响。

（2）截止到 2014 年 3 月 7 日，WE3 的最大测值为 4.17L/s，WE4 的最大测值为 137.36L/s，且渗流量主要集中在量水堰 WE4-1，说明坝 0+440.00m 以左排水廊道和施工廊道渗流量很小，渗流量主要集中在坝 0+480.00m 以右排水廊道。

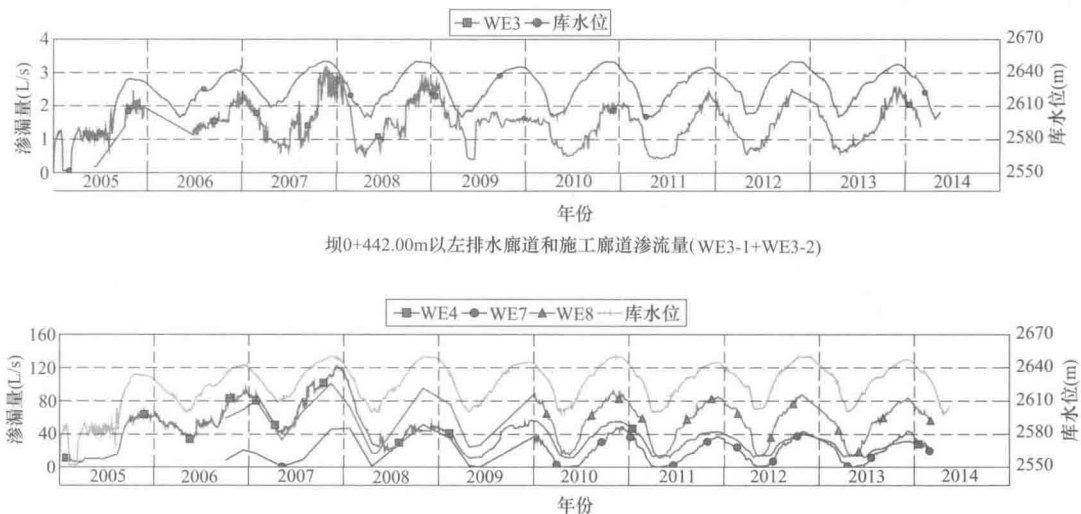


图3 量水堰渗流量过程线

2.2 渗水路径

为了解蓄水过程和运行期防渗体下游地下水位的变化及绕坝渗流的途径和态势,在右岸灌浆帷幕端头和下游岸坡选择适当位置分别布置 20 个地下水位孔。地下水位孔布置和地下水位孔 2013 年 11 月 26 日测值分布见图 2。由图可知:

(1) 水位孔测值整体上呈现从上游往下游递减、右岸往坝体方向递减的规律, GC07 位于 7 号冲沟内,测值非常接近上游库水位,排水廊道上游侧的 GC12 和 GC13 测值小于排水廊道下游侧的 GC08 和 GC16,部分因 GC12 和 GC13 位于第三岩组,其渗透系数较大,因排水廊道的排水作用,从而导致其测值较小;另一方面, GC07~GC09 测值整体上呈现从上游到下游递减的趋势。库水通过防渗墙右侧的 7、8 号沟进入下游的可能性极大。

(2) 位于坝 0+543.50m 的 GC11 测孔测值明显大于其左右两侧测孔 GY4、GC6,坝 0+543.50m 附近防渗墙存在较为明显的渗漏现象,且该孔正对下游侧的排水廊道内的排水孔渗流量较大,该孔位置与雷达探测结论中疑似渗漏的桩号段 0+503~0+516m 非常接近。

2.3 渗流稳定

根据邻近水位孔的监测数据,计算邻近水位孔的平均渗透坡降。靠近排水廊道的水位孔,根据水位孔到排水廊道的最近距离和假定孔口出逸计算排水廊道出逸渗透比降,根据靠近地表出逸点的水位孔数据和出逸点高程计算出逸点渗透坡降,超过允许渗透坡降的成果见表 1。计算表明:

(1) 各水位孔之间平均渗透坡降的最大值整体都很大,对边坡稳定不利。

(2) 根据靠近排水廊道的水位孔计算得到的排水廊道渗透坡降测值整体较大,尤其是 GC08 平均渗透坡降最大值达到了 1.80,已经超过该部位所处的第四岩组的允许渗透坡降(允许渗透坡降为 1.0~1.1),出逸位置靠近前期渗水含沙量较大的排水孔 X1、X3 和 X61。从前期运行情况看, X61 排水孔(坝 0+486.00m、拦 0+132.40m)分别于 2008 年 12 月 3 日、18 日两次出现浑水现象,浑水呈青灰色,其中含大量粉土、粉细砂和少量

腐殖质，可能还含部分水泥。

(3) GC03 与渗漏点 S06 的最大渗透坡降为 1.14，渗透坡降也较大。下游渗漏点 S06 处于第四岩组，其允许渗透坡降在 1.0~1.1，计算的渗透坡降是两孔间平均渗透坡降的最大值，局部渗透坡降最大值高于计算值，渗漏点易产生渗透破坏。

表 1 大坝渗透坡降计算结果统计

水位孔	位 置		出逸位置	距离 (m)	平均渗透坡降 最大值 (m)
	埋设桩号	坝轴距			
GC08	坝 0+621.86	0+276.995	排水廊道	30.89	1.80
GC03	坝 0+476.22	0+269.834	渗漏点 S06	21.00	1.14

结合现场查看情况看，右岸边坡局部破坏较为严重（局部混凝土预制块下回填的砂卵石、反滤层及原本的堆积体都被严重掏空，局部浆砌石挡墙被护坡严重挤压变形）。反滤层和外侧堆石体的掏空及浆砌石挡墙的挤压变形对边坡稳定极为不利。

3 新增防渗排水措施分析

从上节分析已知，库水主要通过防渗墙右侧进入下游，且右岸地下水位整体较高，排水孔渗水含沙，渗流未稳定；右岸边坡局部混凝土预制块下回填的砂卵石、反滤层及原本的堆积体都被严重掏空。针对以上问题，提出两点建议：一是延长右岸防渗墙，减小渗漏量；二是在右岸新增排水廊道，减小岸坡地下水位，防止边坡发生渗透破坏。本节就延长防渗墙两种方式以及新增排水廊道的建议进行有限元分析，评价新增防渗排水措施的效果。

3.1 计算模型与参数

网格区域包括坝轴线以上 740m 到坝轴线以下 650m，总长 1390m；坝轴向从坝 0+411m 到坝 0+880m，总长 469m；在高程方向，网格从山顶高程 2720m 到基岩 2200m 高程，包含已勘测查明的所有覆盖层。防渗结构包括坝体的沥青混凝土心墙，上下分段式防渗墙、帷幕灌浆接头，深入基础相对隔水第二岩组内 5.0m 以上的帷幕。帷幕灌浆接头网格形态按设计图纸形态建立，底部帷幕厚度为 3m。右岸有限元网格见图 4。

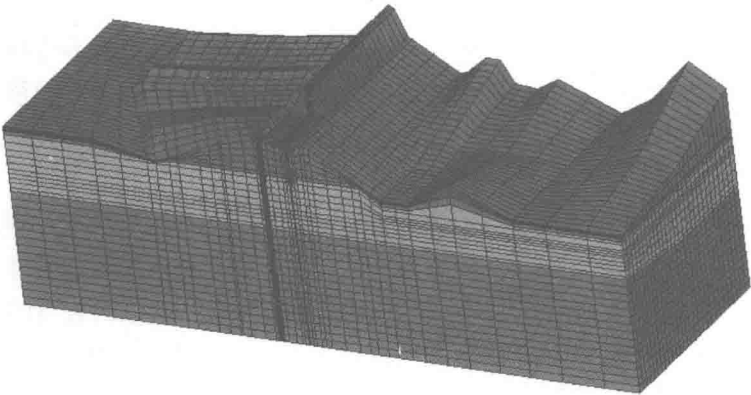


图 4 右岸有限元网格

依据该工程前期试验和参照其他工程资料，计算参数见表 2。

表 2 各种材料渗透参数

材料编号	材料名称	渗透系数 (cm/s)	材料编号	材料名称	渗透系数 (cm/s)
1	δO ₂ 基岩	1×10 ⁻⁵	9	防渗墙帷幕接头	8×10 ⁻⁵
2	第一岩组 (Q ₂ ¹ I)	1×10 ⁻⁵	10	防渗墙底部帷幕	8×10 ⁻⁵
3	第一岩组 (Q ₂ ² I)	3×10 ⁻³	11	坝体堆石料 (I)	5×10 ⁻³
4	第二岩组 (Q ₃ ¹ II)	2.2×10 ⁻⁵	12	坝体堆石料 (II)	1×10 ⁻²
5	第三岩组 (Q ₃ ²⁻¹ III)	1×10 ⁻³	13	过渡料	1×10 ⁻²
6	第四岩组 (Q ₃ ²⁻² IV)	3×10 ⁻³	14	施工廊道衬砌	1×10 ⁻⁷
7	沥青混凝土心墙	1×10 ⁻⁷	15	坝体表面护坡	5×10 ⁻²
8	防渗墙	8×10 ⁻⁷			

3.2 计算方案

为评价不同延长防渗墙的方式以及新增排水廊道对渗流的影响，初拟的计算方案见表 3。计算中取上游水位为 2650m，下游水位为 2540m。

表 3 计 算 方 案

方案	说 明
1	没有排水廊道
2	现阶段实际情况
3	在现阶段实际情况下，在防渗墙右端新增 100m 长、78.5m 深的防渗墙，底部位置为施工廊道顶部。具体位置见图 5
4	在现阶段实际情况下，在防渗墙右端 0+610~0+710m 底部增加防渗墙与帷幕，帷幕深入基础相对隔水第二岩组内 5.0m 以上，具体位置见图 5
5	在现阶段实际情况下，在原排水廊道下游侧新增一条排水廊道，主要位于现阶段山坡集中出水的底部，与原排水廊道高程和长度一致
6	在现阶段实际情况下，按方案 4 新增防渗墙、帷幕，并且按方案 5 新增排水廊道

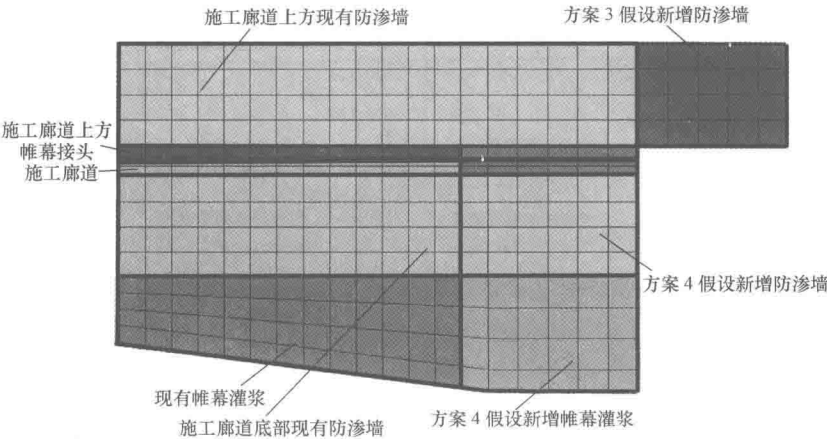


图 5 方案 3 和方案 4 假设新增防渗墙及帷幕灌浆网格图

3.3 计算结果分析

图 6 为方案 1~6 高程 2570m 水头等值线图, 由图可知:

(1) 现有深入基础相对隔水第二岩组内 5.0m 以上的防渗系统的防渗效果很好, 库水主要从防渗系统的右侧进入下游。在现有防渗系统而不设置施工排水廊道的情况下, 地下水位等势线在下游均匀分布, 下游地下水位很高, 对岸坡极其不利。增加排水廊道排水孔的作用, 排水廊道上方水头值较相邻部位明显较低, 现有的施工排水廊道能够有效降低紧挨坝体下游边坡的地下水位, 有效地提高了边坡稳定性。

(2) 方案 3 与方案 2 在高程 2570m 的水头等势线差别极小, 说明在现有防渗墙右侧延长 100m 长、深为 78.5m 的防渗墙对水头等势线影响很小。方案 4 的水头等势线与方案 2 对比发现, 方案 4 新增防渗系统附近的水头等势线有一定的降低, 在 0+610~0+710m 底部新增防渗墙与帷幕灌浆, 帷幕灌浆深入基础相对隔水第二岩组内 5.0m 以上, 能够局部减小新增防渗系统附近的水头等势线, 但对下游坝坡的水头等势线影响较小。纯粹延长

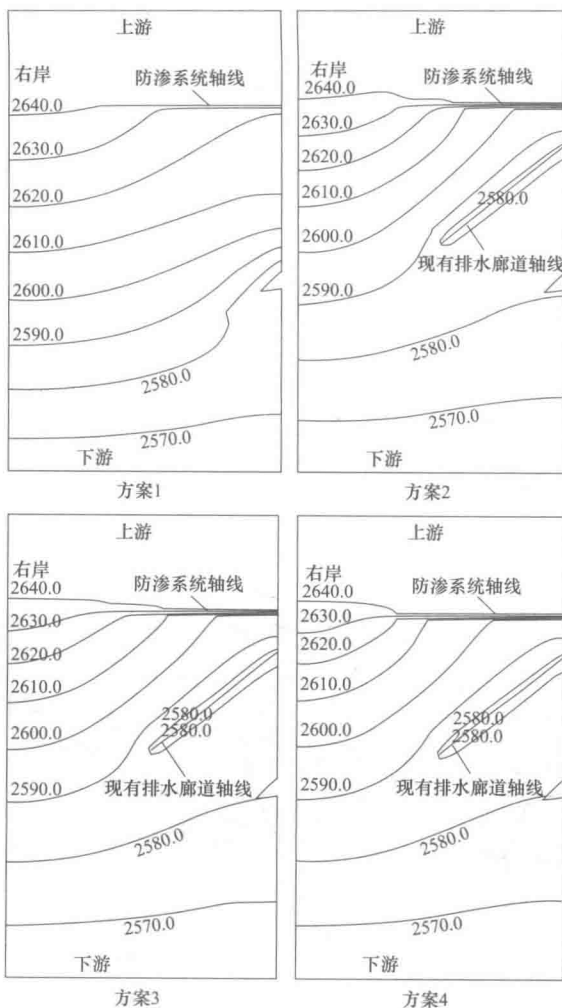


图 6 方案 1~6 高程 2570m 水头等值线图 (一)

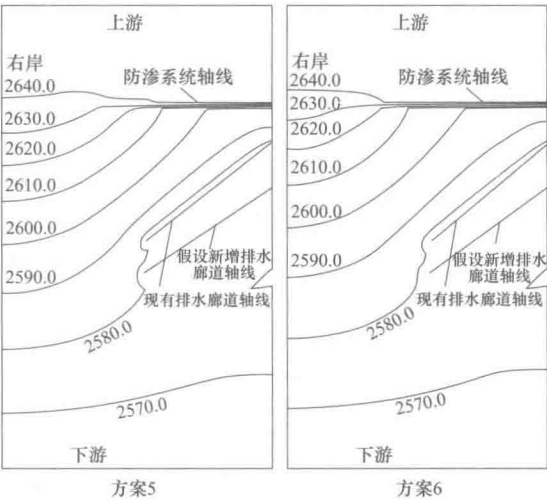


图6 方案1~6 高程2570m 水头等值线图（二）

防渗系统而不进入相对隔水层对右岸渗流场影响甚微。

（3）在现阶段排水廊道下游处，漏水区域底部新增排水廊道能够有效减小该部位的水头，对坝坡渗透稳定有利。

（4）方案6的水头等势线分布图既包含因0+610~0+710m底部新增防渗墙与帷幕灌浆从而使防渗系统附近的水头等势线减小的特点，也包含下游新增排水廊道，下游坝坡水头减小的特点，表明对渗透水流采取截堵与导渗相结合方法是较为有效的措施。

表4是方案2~6排水孔渗漏量统计表，由表可知：延长100m长、78.5m深的防渗墙对排水孔总渗漏量影响甚微，但采用在0+610~0+710m底部新增防渗墙与帷幕灌浆，帷幕灌浆深入基础相对隔水第二岩组内5.0m以上的措施，排水孔渗漏量有明显的减小。新增排水廊道排水孔后，因排水孔数量的增多，将明显增大总渗漏量。

表4 方案2~6排水孔渗漏量统计

方案	2	3	4	5	6
渗漏量 (L/s)	144.5	136.5	98.8	220.2	194.3

4 小结

通过结合工程现场实际情况和监测数据分析，可得出以下结论：

（1）右岸渗漏量整体较大，库水是渗水的主要来源，地下水和降雨也是渗水的组成部分。库水通过防渗墙右侧的7、8号沟进入下游的可能性极大。

（2）从监测数据看，GC11测孔附近防渗墙可能存在渗漏现象，且该孔与雷达探测结论中重点关注的桩号段0+503~0+516m非常接近。坝0+315m和0+405m断面防渗墙也存在渗流现象。

（3）各水位孔之间、水位孔与排水孔之间以及水位孔与渗水点平均渗透坡降的最大值