

青年博士学术专栏



移动扫码阅读

曹志国. 煤矿地下水库不同人工坝体结构抗震性能研究 [J]. 煤炭科学技术, 2020, 48 (12): 237-243. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2020.12.030
CAO Zhiguo. Study on aseismic performance of different artificial dam structures of coal mine underground reservoir [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48 (12): 237-243. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2020.12.030

煤矿地下水库不同人工坝体结构抗震性能研究

曹志国

(国家能源集团 煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室, 北京 100011)

摘要:作为新型地下工程构筑物,煤矿地下水库工程在西部神东矿区已得到成功应用。长期安全稳定运行是煤矿地下水库技术的核心要素之一。作为煤矿地下水库挡水构筑物的水库坝体,尤其是人工坝体,是煤矿地下水库安全运行的重要组成部分。为保证煤矿地下水库在极端条件(如矿震、地震等条件)的安全性,需对人工坝体结构进行抗震安全分析。人工坝体结构一般为平板型,考虑到矿震或地震条件下坝体结构的破坏通常为剪切破坏,为提高人工坝体的抗震性能,提出新型煤矿地下水库人工坝体结构—拱形人工坝体,对比分析了平板式和拱形人工坝体的受力状态;采用有限元方法,得到了震级烈度分别为 7、8、9、10 时的平板式人工坝体和拱形人工坝体的剪切应力与位移分布云图,对比分析了 2 种坝体的整体安全系数及可能破坏模式。结果表明:人工坝体的薄弱部位是其与煤岩体的接触部位;地下水库人工坝体受顶底板和周边煤岩体约束,在极端特殊工况条件下仍能保持较好的安全性能,地震烈度达到 10 时,拱形和平板式人工坝体安全系数分别为 22.6 和 6.4;拱的作用使得煤柱对人工坝体的反作用力中产生了部分压应力,拱形人工坝体受到的部分矿震荷载传递至煤柱坝体,减少了由于矿震引起的人工坝体剪切应力,提高了拱形人工坝体的抗震性能,地震烈度 10 时拱形人工坝体安全系数是平板式人工坝体的 3.5 倍以上。

关键词:煤矿地下水库;平板式人工坝体;拱形人工坝体;数值模拟;抗震安全性评价

中图分类号:TD74 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2020)12-0237-07

Study on aseismic performance of different artificial dam structures
of coal mine underground reservoir

CAO Zhiguo

(State Key Laboratory of Water Resource Protection and Utilization in Coal Mining, China Energy Investment Corporation, Beijing 100011, China)

Abstract: Coal mine underground reservoir has successfully constructed in Shendong Coal Mine Area in western China, as an original underground engineering structure. Safe operation is critical to coal mine underground reservoir. The dam of coal mine underground reservoir, especially artificial dam, is an important part for safe of the engineering. In order to ensure the safety of coal mine underground reservoirs under extreme conditions (such as mine earthquakes, earthquakes, etc.), it is necessary to conduct seismic safety analysis of artificial dam structures. The artificial dam structure is generally flat. Considering that the damage of the dam structure undermine earthquake or earthquake conditions is usually shear failure, a creative dam structure—artificial arch dam is put forward to improve the seismic performance of the artificial dam, and force of artificial plat and arch dam is analyzed. Using FEM, shear stresses and displacement cloud chart of artificial plat and arch dam is obtained, with different earthquake intensity (7, 8, 9 and 10 degree) and same numerical parameters. Weak position safety factors of artificial plat and arch dam are compared and analyzed. The result reveal following: the contact part between artificial dam and coal stratum is weakest of the coal mine underground reservoir; artificial dam is safe in operation under extreme operating conditions due to the restraint of roof, floor, coal pillar and stratum, as the safety factor of artificial arch dam and artificial plat dam are 22.6 and 6.4

收稿日期: 2020-05-04; 责任编辑: 郭鑫

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0501104); 煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室开放基金资助项目(SHJT-16-30.5)

作者简介: 曹志国(1980—), 男, 山西灵石人, 高级工程师, 博士。Email: zgcao2008@163.com

when earthquake intensity is 10 degree;the action of the arch causes partial compressive stress in the reaction force of the coal pillar on the artificial dam body ,part of the seismic load received by the arch artificial dam body is transferred to the coal pillar dam body ,reducing the artificial dam body shear caused by the mine earthquake,which improves the seismic performance of the arched artificial dam.

Key words: coal mine underground reservoir;artificial plat dam;artificial arch dam;numerical stimulation;aseismatic performance assessment

0 引 言

西部已成为我国煤炭主产区,煤炭产量占全国的 77%左右^[1],且随着东中部煤矿区资源逐渐转入深部,条件日趋复杂,西部矿区煤炭产量比例还将增大。但是,西部地区生态本底脆弱,水资源匮乏,水资源量仅占全国 3.9%左右,且地表蒸发量是降雨量的 6 倍左右,水资源短缺已成为制约西部经济社会可持续发展的主要瓶颈^[2-4]。同时,煤炭开采形成大量矿井水,为确保安全,传统的手段是将矿井水外排地表达标处理后排放,由于蒸发量大,很快蒸发,难以得到有效利用,为此矿井水保护利用是西部矿区科学开发面临的重大技术难题之一^[5-6]。神东矿区位于西部能源“金三角”核心区域,为保护利用矿井水资源,经过 20 余年的技术探索和工程实践,提出了煤矿地下水库储用矿井水的理念,构建了煤矿地下水库技术体系;该技术在神东矿区推广应用,建成 35 座煤矿地下水库,储水量达 2 700 万 m³,为矿区提供了 95%以上的用水,保障了矿区的可持续发展^[7-9]。煤矿地下水库是利用煤炭开采形成的采空区岩体空隙储水,用人工坝体将不连续的安全煤柱连接,形成水库坝体,建设取用水设施,并充分利用采空区岩体净化矿井水,是新型地下工程结构。人工坝体结构型式及其安全稳定是煤矿地下水库安全运行的核心要素,地面水库经过百余年发展,已经形成了不同结构形式的坝体,并在工程实践中应用,地震条件下的坝体安全稳定性评价是地面水库安全运行的重要内容,学者们对地面水库各种坝体进行了抗震安全性评价,取得了一系列成果^[10-19],为煤矿地下水库不同结构人工坝体的抗震性能分析评价提供了借鉴参考。由于煤矿地下水库所处工况特殊性,人工坝体处于矿压和水压等组合作用下,且井下采煤活动和老空区岩层运行引发的矿震频繁,对人工坝体的安全性提出了更高的要求。顾大钊等^[20]率先开展了煤矿地下水库煤柱动力响应和稳定性分析评价工作,采用物理模拟和数值仿真方法,进行了不同烈度条件下坝体动力破坏试验研究,与地面水库坝体进行了同等条件下的抗震安全对比分析,提出了煤矿地下水库坝体安全系数概念,为煤矿地下水库坝体抗震评价提供了理论基础。不同结构形式

的煤矿地下水库人工坝体结构的抗震性存在差异,基于此,提出型煤矿地下水库人工坝体结构,即拱形坝体,并与工程实践中应用较为广泛的平板型坝体进行了受力对比分析,采用数值模拟方法,对同等条件下 2 种坝体的抗震性进行了安全分析,对比分析了不同烈度下 2 种坝体的安全系数,为煤矿地下水库坝体优化设计提供科学依据。

1 煤矿地下水库拱形坝体结构分析

目前,因其设计经验成熟、施工工艺相对简单等,在工程实践中应用较为广泛的是平板式人工坝体(图 1)。

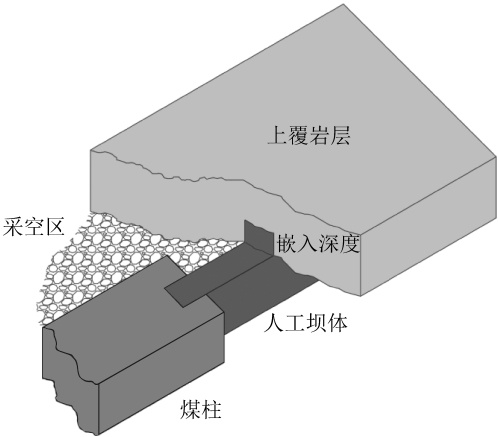


图 1 煤矿地下水库平板式人工坝体

Fig.1 Artificial plat dam of coal mine underground reservoir

平板式人工坝体受力如图 2 所示,通过对坝体受力分析知,坝体受到上覆岩层压力、储水水压、采空区岩体侧向压力、采空区岩体大面积跨落引发的水体冲击力、地震或矿震(采动或老空区岩体跨落引发)等组合作用,其中,采空区岩体大面积跨落引发的水体冲击力、地震或矿震属于特殊工况,一旦引发溃坝,导致库内水体涌出,严重威胁井下生产安全,因此必须确保坝体在特殊工况条件下的安全稳定。

借鉴地面水库拱坝结构形式,提出煤矿地下水库拱形坝体的新型地下水构筑物形式(图 3);与平板式人工坝体相比较,由于拱形的人工挡水坝的凸面朝向地下水库,在矿震过程中,由于拱的作用使得煤柱对人工坝体的反作用力中产生了部分压应力,从而减少了坝体内的剪切应力及拉应力,使人工坝体结构在矿震作用下更加安全稳定(图 4)。

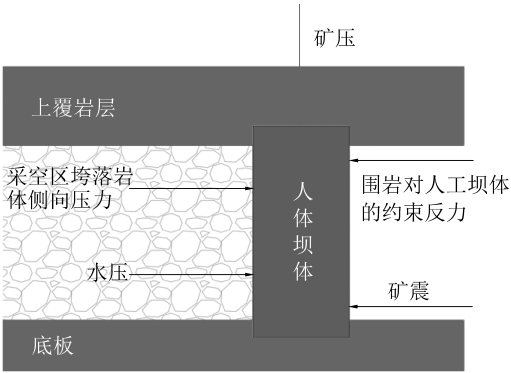


图 2 平板式人工坝体受力分析

Fig.2 Analysis of force applied to artificial plat dam

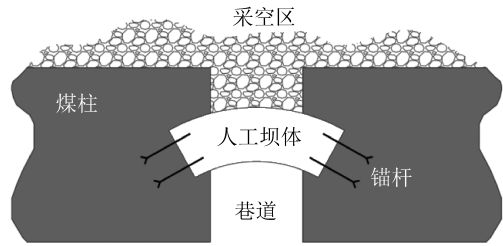


图 3 拱形人工坝体结构

Fig.3 Artificial arch dam structure

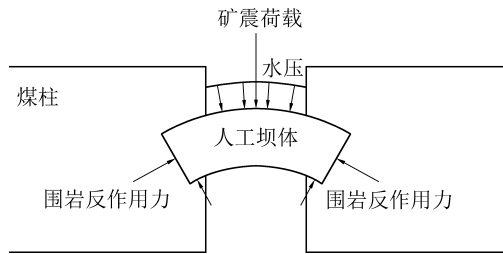


图 4 拱形人工坝体受力分析

Fig.4 Analysis of force applied to the artificial arch dam

2 坝体抗震安全性评价步骤

为对比分析平板式和拱形坝体在不同震级烈度条件下的抗震安全性能,采用 MIDAS 软件模拟了不同震级烈度条件下 2 种坝体的剪切应力变化情况,在数值模型构建、边界条件、煤岩力学参数等方面尽量保持一致,分析坝体薄弱部位受力,计算坝体薄弱部位的安全系数。具体步骤为:

1)数值模型构建。以大柳塔煤矿 2⁻²煤矿地下水库为研究对象,其埋藏深度为 120 m,对 2 类坝体及所处地质环境进行分析,根据模拟要求,将其划分为 2 万~3 万个网格单元,构建坝体数值模型。

2)边界条件设定。结合工程实践情况,设定模型前后左右受力边界条件。模型的边界条件设定为:模型的前后左右边界施加黏性边界条件来吸收

入射波;模型的底部边界设置粘性边界;模型顶部为自由边界,人工坝体顶部受覆岩约束。

3)煤岩与坝体力学参数设定。设定煤岩的容重、抗压强度、黏聚力、内摩擦角、弹性模量、泊松比等力学参数,以及坝体容重、抗压强度、抗剪强度、弹性模量、泊松比等力学参数,其中人工坝体材料为 C20 混凝土材料,为便于对比分析,2 类模型设定的煤岩与坝体力学参数一致,见表 1 和表 2。

表 1 煤岩力学参数

Table 1 Mechanical parameters of coal and stratum						
项目	容重/ (kN · m ⁻³)	抗压 强度/ MPa	黏聚力/ MPa	内摩 擦角/ (°)	弹性 模量/ GPa	泊松 比
煤岩材料	13	15	1.2	38	1.50	0.25

表 2 人工坝体力学参数

Table 2 Medanical parameters of artificial dam					
项目	容重/ (kN · m ⁻³)	抗压强度/ MPa	抗剪强度/ MPa	弹性模量/ GPa	泊松比
C20 混凝土	24	9.6	1.76	2.55	0.20

4)模拟不同震级烈度条件下坝体剪切应力变化。分析表明,人工坝体在地震过程中引起的破坏一般都是剪切破坏,在数值动力分析中仅考虑剪切应变;模拟了从地震峰值加速度(0.1~1.0) g(地震烈度最高达 10 度)工况条件下 2 类坝体的剪切应变分布云图。

5)计算坝体薄弱部位安全系数。分析 2 类坝体不同震级烈度下坝体薄弱部位(剪切应变最大部位)的剪切应变云图,采用安全系数(坝体抗剪承载能力与实际承载能力的比 k)表征该震级烈度下的坝体抗震安全性能^[14]。k 越大,表示该测点处越安全。

$$k = \tau_y / \tau_s$$

式中: τ_y 为混凝土的抗剪强度,MPa; τ_s 为坝体薄弱环节的实际剪切力,MPa。

6)对比分析 2 种坝体抗震安全性。对同等震级烈度条件下 2 种坝体薄弱部位的安全系数对比,分析 2 种坝体的抗震安全性能,为地下水库坝体工程实践提供技术参考。

3 人工坝体结构抗震安全数值模拟

3.1 平板式人工坝体抗震安全性分析

煤矿地下水库平板式人工坝体抗震性分析的数值模型如图 5 所示。其中,煤层高度 5 m,人工坝体尺寸为 5.5 m×5.5 m×1.0 m,底板厚度 10 m,网格单元数量约 24 000 个。

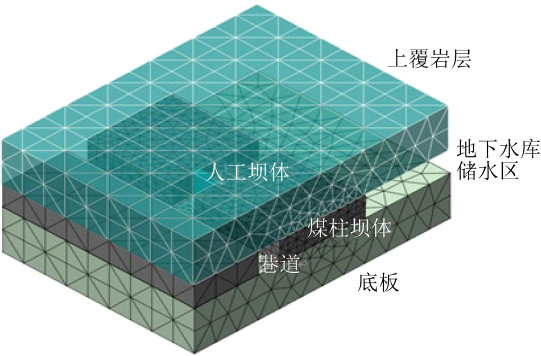


图 5 平板式人工坝体抗震性数值模型
Fig.5 Aseismic performance numerical model of artificial plat dam

为便于比较 2 种坝体的抗震安全性能,模型的边界条件、煤岩力学参数和人工坝体力学参数采用第 2.2 节中所设定的参数。考虑到地震过程中发生

的破坏一般都是剪切破坏,受力分析中主要考虑剪切力。图 6 为平板式人工坝体在地震烈度 7~10 度时的最大剪切力分布云图,图 7 为人工坝体法向位移的分布云图。分析表明,由于平板式人工坝体通过嵌入煤柱坝体和岩层中进行约束和固定,坝体最大切应力出现在连接部位处,随地震强度的加大,最大剪切力明显增大;应力及位移分布规律没有明显改变,表明受到煤柱及上覆岩层的约束,人工坝体结构在 10 度地震作用下应力应变仍处于弹性阶段。根据模型的力学参数及计算得到的应力结果,计算坝体薄弱环节处的安全系数(图 8)。模拟结果表明,随着地震烈度的增大,平板式人工坝体的安全系数不断减小;在地震烈度达到 10 度时,人工坝体的安全系数为 6.4,表明在该条件下人工坝体仍处于比较安全的状态。

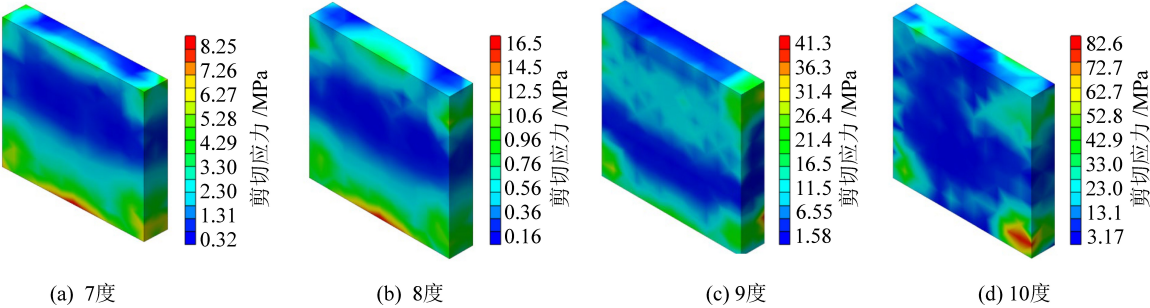


图 6 不同地震烈度条件下平板式人工坝体剪应力
Fig.6 Shear stresses of artificial plat dam with different earthquake intensity

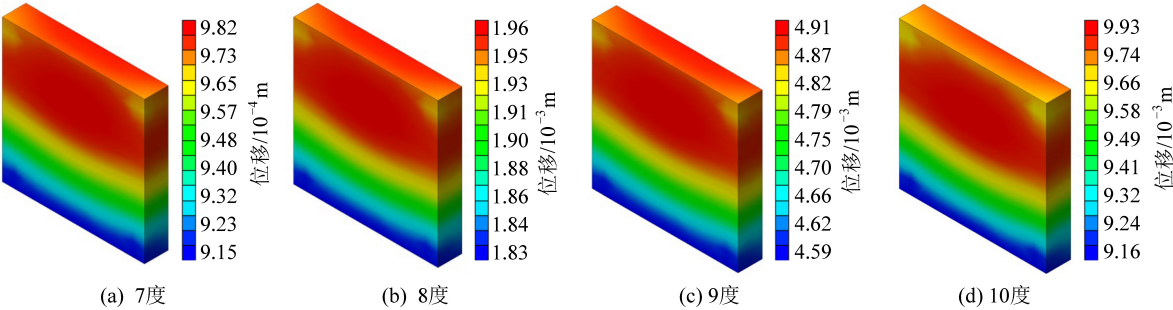


图 7 不同地震烈度条件下平板式人工坝体位移分布
Fig.7 Displacement of artificial plat dam with different earthquake intensity

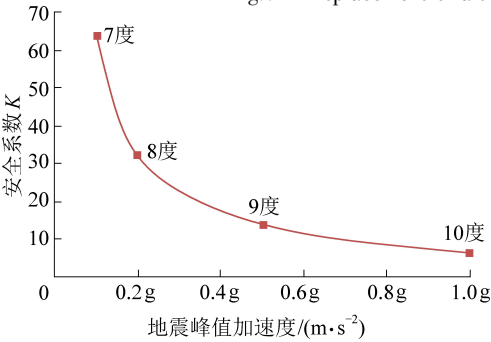


图 8 不同地震烈度条件下直板式人工坝体安全系数变化
Fig.8 Safety factor change of artificial plat dam with different earhwuske intensity

3.2 拱形人工坝体抗震安全性分析

地下水库拱形人工坝体抗震性分析的数值模型如图 9 所示。其中,煤层高度 5 m,拱坝外径 8 m,内径 7 m,拱坝厚度 1 m,拱坝高度 5.5 m,底板厚度为 10 m,划分网格单元 25 000 个。

为便于比较 2 种坝体的抗震安全性能,拱形坝体模型的边界条件、煤岩力学参数和人工坝体力学参数采用第 2.2 节中力学参数值。地震过程中发生的破坏一般都是剪切破坏,受力分析中主要考虑剪切力。图 10、图 11 分别为人工坝体模型在不同地

震烈度条件下的最大剪切应力与位移的分布。由于拱形人工坝体同样通过嵌入煤柱坝体和岩层中进行约束和固定,坝体的最大切应力出现在连接部位处。与平板式人工坝体类似,随着地震强度的加大,最大剪切力明显增大,但最大剪应力的分布规律变化不大。

根据模型的力学参数及计算得到的应力结果,计算最危险位置处的安全系数(图 12)。分析表明,与平板式人工坝体结构类似,随着地震烈度的增大,拱坝式人工坝体的安全系数不断减小;在地震烈度达到 10 度时,人工坝体的安全系数仍保持在 20 左右,坝体处于安全稳定状态。

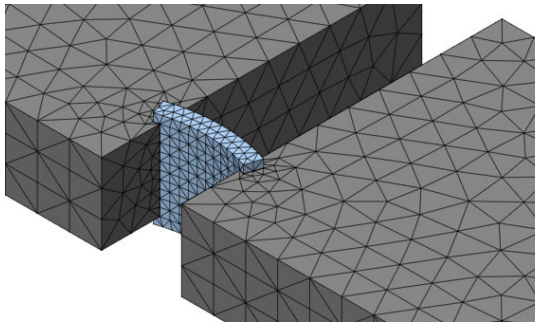


图 9 拱形坝体抗震性数值模型

Fig.9 Aseismic performance numerical model of artificial arch dam

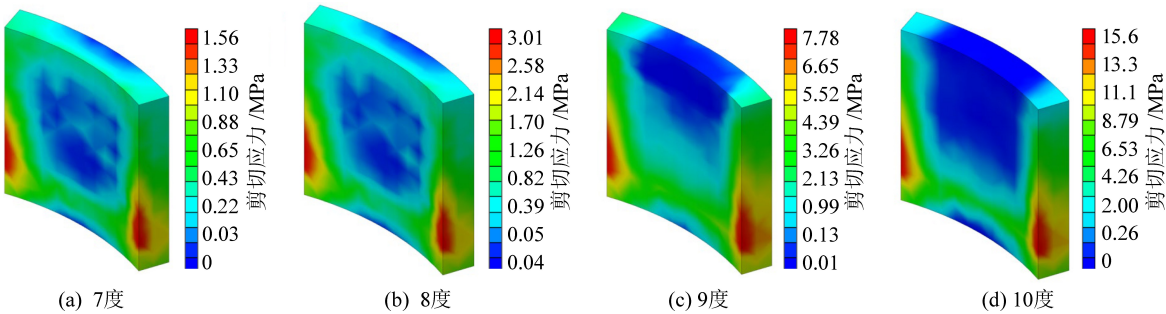


图 10 不同地震烈度条件下拱形人工坝体剪应力分布

Fig.10 Shear stresses of artificial arch dam with different earthquake intensity

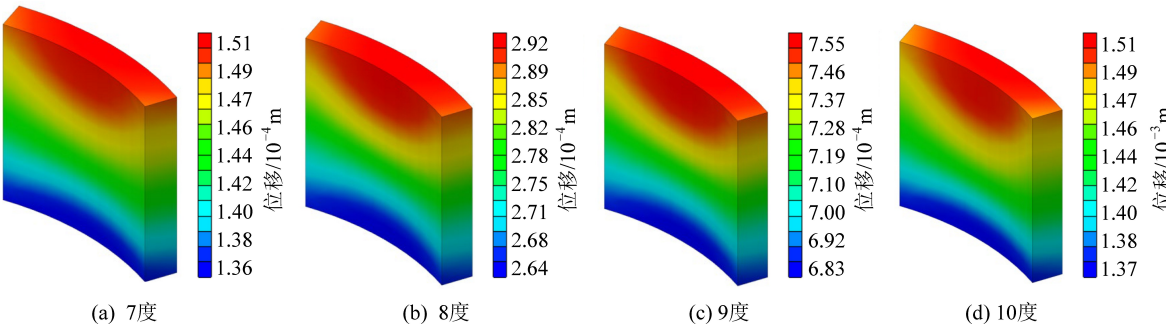


图 11 不同地震烈度条件下拱形人工坝体位移分布

Fig.11 Displacement of artificial arch dam with different earthquake intensity

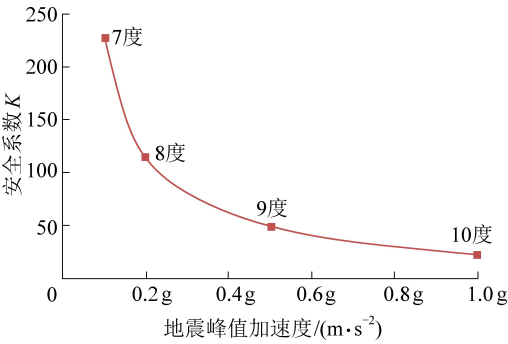


图 12 不同地震烈度条件下拱形人工坝体安全系数对比

Fig.12 Safety factor change of artificial plat dam with different earhwuske intensity

3.3 平板式和拱形人工坝体抗震安全性对比

同等烈度条件下 2 种坝体薄弱环节抗震安全性 (安全系数) 对比(图 13) 表明,拱形人工坝体与直墙式人工坝体结构相比,在相同地震烈度条件下拱坝式人工坝体结构的最大剪切力明显要小得多,安全系数要大。主要原因在于:直板式人工坝体垂直嵌入煤柱坝体和围岩,当输入的振动荷载与坝体墙面垂直时,煤柱坝体和围岩对直墙式人工坝体产生的约束反力垂直墙面方向,直板式人工坝体内会产生较大的剪切应力。拱形人工坝体在受到径向的输入荷载时,煤柱坝体和围岩对人工坝体的约束反力包含 2 部分:①垂直人工坝体墙面的剪切力;②煤柱

坝体对人工坝体端部的压力,分解了垂向力,降低了由于矿震引发的垂直剪切力,相同条件下拱形人工坝体内部产生的剪切应力要远小于直板式人工坝体内的剪切应力,经计算当地震烈度为10时,拱形人工坝体安全系数是平板式的3.5倍左右,安全稳定性更高。

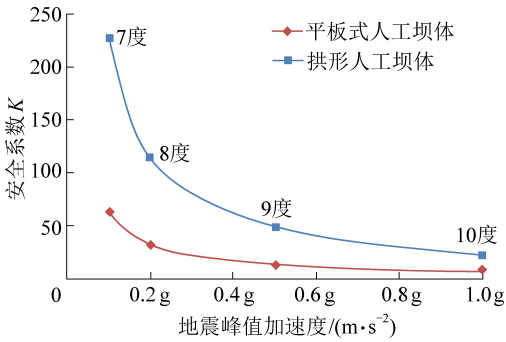


图13 平板式与拱形人工坝体安全系数对比

4 结 论

1) 拱形人工坝体结构和平板型人工坝体结构在不同地震条件下的受力情况表明,人工坝体结构的薄弱位置是其与煤岩体的接触部位。地下水库人工坝体受顶底板和周边煤岩体约束,在极端特殊工况条件下仍能保持较好的安全性能,如地震烈度达到10时,拱形和平板式人工坝体安全系数分别为22.6和6.4。

2) 同地质和震级烈度条件下,拱形人工坝体的抗震安全性能大大优于平板式人工坝体,如地震烈度10度时拱形人工坝体安全系数是平板式人工坝体的3.5倍以上,原因在于:拱的作用使得煤柱对人工坝体的反作用力中产生了部分压应力,拱形人工坝体受到的部分矿震荷载传递至煤柱坝体,减少了由于矿震引起的人工坝体剪切应力,提高了拱形人工坝体的抗震性能。

3) 从理论分析的结果来看,拱形人工坝体具有较好的抗震安全性能,能有效提高煤矿地下水库坝体结构的安全性。但从实际工程角度来看,由于人工坝体施工前需要在煤柱坝体结构上掏槽后进行浇筑,相比于平板型人工坝体结构而言,现有防渗方法对拱形人工坝体结构的适用性不强。因此下一步将研究如何提高拱形人工坝体与煤柱坝体连接部位的防渗性能,推进拱形人工坝体结构在实际工程中的应用。

参考文献 (References) :

[1] 中国煤炭工业协会.2019 煤炭行业发展年度报告[R].北京:中国煤炭工业协会,2020.

[2] 顾大钊,张 勇,曹志国.我国煤炭开采水资源保护利用技术研究进展[J].煤炭科学技术,2016,44(1):1-7.
GU Dazhao, ZHANG Yong, CAO Zhiguo. Technical progress of water resource protection and utilization by coal mining in China [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1):1-7.

[3] 钱鸣高.煤炭产能扩张引发中西部环境隐忧[J].资源与环境发展,2011(4):4-7,35.
QIAN Minggao. Coal production expansion triggers environmental concerns in the midwest [J]. Resources Environment and Development, 2011(4):4-7,35.

[4] 钱鸣高,缪协兴,许家林.资源与环境协调(绿色)开采[J].煤炭学报,2007,32(1):1-7.
QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin. Green mining of coal resources harmonizing with environment [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(1):1-7.

[5] 顾大钊.能源“金三角”煤炭现代开采水资源及地表生态保护技术[J].中国工程科学,2013,15(4):102-107.
GU Dazhao. Water resource and surface ecology protection technology of modern coal mining in China's energy “Golden Triangle” [J]. Engineering Sciences, 2013, 15(4):102-107.

[6] 鞠金峰,许家林,朱卫兵.西部缺水矿区地下水库保水的库容研究[J].煤炭学报,2017,42(2):381-387.
JU Jinfeng, XU Jialin, ZHU Weibing. Storage capacity of underground reservoir in the Chinese western water-short coalfield [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(2):381-387.

[7] 曹志国,李全生,董斌琦.神东矿区煤炭开采水资源保护利用技术与应用[J].煤炭工程,2014,46(10):162-164,168.
CAO Zhiguo, LI Quansheng, DONG Binqi. Water resource protection and utilization technology and application of coal mining in shendong mining area [J]. Coal Engineering, 2014, 46(10):162-164,168.

[8] 曹志国,何瑞敏,王兴峰.地下水受煤炭开采的影响及其储存利用技术[J].煤炭科学技术,2014,42(12):113-116,128.
CAO Zhiguo, HE Ruimin, WANG Xingfeng. Coal mining affected to underground water and underground water storage and utilization technology [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(12):113-116,128.

[9] 顾大钊.煤矿地下水库理论框架和技术体系[J].煤炭学报,2015,40(2):239-246.
GU Dazhao. Theory framework and technological system of coal mine underground reservoir [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2):239-246.

[10] DONLON W P, HALL J F. Shaking table study of concrete gravity dam monoliths [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1991, 20(8):769-786.

[11] MIR R A, TAYLOR C A. An experimental investigation into earthquake-induced failure of medium to low height concrete gravity dams [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1995, 24(3):373-393.

[12] 赵剑明,王海峰,刘小生.不同输入地震波作用下高土石坝地震反应分析与评价[J].水力发电学报,2015,34(1):169-174.
ZHAO Jianming, Wang Xiaosheng. Assessment on seismic

- response analysis of high rock-fill dam under different inputted earthquake waves [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(1):169-174.
- [13] 李晓燕,钟 红,林 皋.地震作用下混凝土重力坝破坏过程与破坏形态数值仿真[J].水利学报,2011,42(10):1209-1217.
LI Xiaoyan, ZHONG Hong, LIN Gao. Numerical simulation of damage process and failure modes of concrete gravity dams due to earthquakes [J]. Jourual of Hydraulic Engineering, 2011, 42(10):1209-1217.
- [14] 张伯艳,陈厚群,涂 劲.基于动接触力法的拱坝坝肩抗震稳定有限元分析[J].水利学报,2004,35(10):7-12.
ZHANG Boyan, CHEN Houqun, TU Jin. Improved FEM based on dynamic contact force method for analyzing the stability of arch dam abutment [J]. Jourual of Hydraulic Engineering, 2004, 35(10):7-12.
- [15] 孔宪京,邹德高,邓学晶等.高土石坝综合抗震措施及其效果的验算[J].水利学报,2006,37(12):1489-1495.
KONG Xianjing, ZOU Degao, DENG Xuejing, *et al.* Comprehensive earthquake resistant measure of high earth-rockfill dams and effectiveness verification [J]. Jourual of Hydraulic Engineering, 2006, 37(12):1489-1495.
- [16] 赵剑明,温彦锋,刘小生,等.深厚覆盖层上高土石坝极限抗震能力分析[J].岩土力学,2010,31(S1):41-47.
ZHAO Jianming, WEN Yanfeng, LIU Xiaosheng, *et al.* Study of maximum aseismic capability of high earth-rock dam on deep riverbed alluviums [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S1):41-47.
- [17] 张社荣,俞祥荣,王高辉,等.混凝土重力坝整体抗震及破坏特性分析[J].四川大学学报(工程科学版),2012,44(6):34-39.
ZHANG Sherong, YU Xiangrong, WANG Gaohui, *et al.* Anti-seismic and failure characteristics analysis of integral concrete gravity dam [J]. Journal of Sichuan University (Engineering science edition), 2012, 44(6):34-39.
- [18] 赵剑明,刘小生,杨玉生,等.高面板堆石坝抗震安全评价标准与极限抗震能力研究[J].岩土工程学报,2015,37(12):2254-2261.
ZHAO Jianming, LIU Xiaosheng, YANG Yusheng, *et al.* Criteria for seismic safety evaluation and maximum aseismic capability of high concrete face rockfill dams [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2015, 37(12):2254-2261.
- [19] 张伯艳,陈厚群,杜修力,等.拱坝坝肩抗震稳定分析[J].水利学报,2000,11:55-59.
ZHANG Boyan, CHEN Houqun, DU Xiuli, *et al.* Arch dam abutment asiesmatic stability analysis [J]. Jourual of Hydraulic Engineering, 2000, 11:55-59.
- [20] 顾大钊,颜永国,张 勇,等.煤矿地下水库煤柱动力响应与稳定性分析[J].煤炭学报,2016,41(7):1589-1597.
GU Dazhao, YAN Yongguo, ZHANG Yong, *et al.* Experimental study and numerical simulation for dynamic response of coal mine underground reservoir [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(7):1589-1597.