

DOI: 10.16285/j.rsm.2022.0985

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

邹德高^{1,2}, 屈永倩^{1,2}, 孔宪京^{1,2}, 陈 楷^{1,2}, 刘京茂^{1,2}, 龚 瑾^{1,2}

(1. 大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 水利工程学院 工程抗震研究所, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 混凝土防渗墙是深厚覆盖层地基上修建土石坝的主要坝基防渗结构, 是保证大坝安全的关键防线, 因此, 精细模拟防渗墙的受力状态, 对于合理评价深厚覆盖层上土石坝工程具有重要意义。联合增量迭代法和有限元-比例边界有限元耦合方法, 实现了土石坝应力变形的跨尺度精细化分析, 克服了中点增量法求解局部强非线性问题时精度低的缺陷; 发现了防渗墙-心墙接头附近和防渗墙底部土体剪切带的局部大应变特性, 阐明了传统方法无法描述土体局部大应变而高估防渗墙应力的机制; 提出了设置薄层单元来模拟应变局部效应的高效计算方法, 实现了超深覆盖层上高沥青心墙坝防渗墙受力状态的三维精细化分析。本研究发展的有限元-比例边界元-增量迭代法-预设薄层单元的跨尺度非线性分析方法可为深厚覆盖层上土石坝防渗墙的安全评价和设计优化提供理论和技术支持。

关 键 词: 防渗墙; 精细化分析; 深厚覆盖层; 土石坝

中图分类号: TV641

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2023)06-1826-11

Refined analysis on stress state of cutoff wall of high asphaltic core dam on super-deep overburden

ZOU De-gao^{1,2}, QU Yong-qian^{1,2}, KONG Xian-jing^{1,2}, CHEN Kai^{1,2}, LIU Jing-mao^{1,2}, GONG Jin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

2. Institute of Earthquake Engineering, School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: The concrete cutoff wall is the main anti-seepage structure of the rockfill dam resting on the deep overburden foundation, and is the key to ensuring the dam safety. Therefore, it is of great significance to accurately simulate the stress state of cutoff wall for evaluation of the rockfill dam resting on the deep overburden. Combining the incremental iteration method and the finite element-scaled boundary finite element coupling method (FEM-SBFEM), this paper realizes the trans-scale refined numerical analysis of the stress and deformation of the rockfill dam, which overcomes the low precision of the conventional midpoint increment method in solving local strong nonlinear problems. The characteristics of local large strain in band-shaped connected zone between cutoff wall and core wall and the bottom of cutoff wall are found. The overestimate of cutoff stress is due to the failure of conventional methods to describe local large strain of soil. The three-dimensional efficient refined analysis of cutoff wall of high asphaltic core dam on the super-deep overburden is performed by setting thin-layer elements to simulate the local large strain. The proposed trans-scale analysis method based on FEM-SBFEM-incremental iteration method-embedding thin-layer elements provides theoretical and technical support for the safety evaluation and design optimization of cutoff wall of rockfill dam resting on deep overburden.

Keywords: cutoff wall; refined analysis; deep overburden; rockfill dam

1 引 言

面向国家重大战略需求, 加快西南水电基地建设

设、推进雅鲁藏布江下游水电开发已被列为“十四五”规划的重点任务^[1]。高坝建设是水能开发的重要基础, 随着开发工作的持续深入, 近年来我国水利

收稿日期: 2022-06-28

录用日期: 2022-07-18

基金项目: 国家自然科学基金 (No.52192674, No.52109151, No.U1965206); 云南省重大科技专项计划 (No.202102AF080002); 中央高校基本科研业务费 (No.DUT23RC(3)001)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52192674, 52109151, U1965206), the Yunnan Major Science & Technology Special Project (202102AF080002) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (DUT23RC(3)001).

第一作者简介: 邹德高, 男, 1973 年生, 博士, 教授, 主要从事岩土地震工程、高坝和核电工程抗震研究。E-mail: zoudegao@dlut.edu.cn

通讯作者: 屈永倩, 男, 1990 年生, 博士, 副教授, 主要从事高土石坝工程抗震研究。E-mail: quyongqian@dlut.edu.cn

工程选址地质条件日趋复杂,深厚覆盖层地基条件下建坝“难以避让”^[2-3]。由于土石坝具有复杂地形适应强、施工周期短、建造成本低等显著优势,是深厚覆盖层坝址区的重要坝型。目前我国已建成狮子坪、黄金坪、下坂地、泸定、旁多、冶勒等土石坝,并规划有紫霞、乔诺、库尔干等工程,其覆盖层深度均超 100 m,其中旁多、冶勒均为覆盖层深度超 400 m 的沥青混凝土心墙坝^[4-6]。

此类土石坝体系中,防渗墙是保证其平稳运营的关键防线,但防渗墙主要为混凝土,其材料特性与堆石料、覆盖层力学特性差异很大,坝体自重会使覆盖层产生较大变形,导致心墙-防渗墙接头部位和防渗墙底部土体出现过不均匀沉降,加之墙身周边土体摩阻力、土压力、水压力、基岩约束和顶托等共同作用,使得防渗墙空间应力状态极为复杂,这可能诱发墙体性能弱化、甚至发生宏观裂缝,对大坝安全构成严峻的潜在威胁。如 Manic 3 水库的混凝土防渗墙与基岩接触部位发生了挤压破坏^[7];牛头山水库蓄水后,混凝土防渗墙在墙体顶部发生了开裂破坏^[7-8]。因此,开展混凝土防渗墙的精细化分析研究,对科学把握结构的真实工作状态,继而合理评估深厚覆盖层土石坝的安全性态至关重要^[2-3,9]。

目前的土石坝防渗墙数值模拟中,主要关注典型工程中防渗墙的应力及变形的大小^[10-15],对防渗墙周围土体的变形特性及对防渗墙受力状态的影响研究较少。而该部分的变形特性对防渗墙的力学状态具有显著影响^[5]。

对于深厚覆盖层上的土石坝工程,精准描述防渗墙两端土体变形具有以下两方面的难题。一是需要精细化的网格剖分。已有研究表明^[5,16],对于土质心墙坝,接头区网格尺寸需达到防渗墙厚度的 1/8 (约 0.1 m),这对于三维非线性分析是难以承受的。二是强非线性的求解精度问题。传统土石坝数值仿真由于非线性收敛困难,一直采用中点增量法。理论上来说只要增量步足够小,总能得到精确解。然而,土石坝工程规模宏大,分析中的增量步数量是十分有限的。对于强非线性问题,积累误差有可能很大且无法估计,以致造成极大偏离而使解失真^[17]。目前的分析方法难以高效开展深厚覆盖层上土石坝防渗墙的三维精细化分析,且容易高估防渗墙的应力^[18]。

针对上述问题,本文首先采用增量迭代法和有限元-比例边界元耦合的跨尺度分析方法,开展深厚覆盖层上土石坝防渗墙的精细模拟,研究防渗墙

两端的土体变形特性及对防渗墙应力的影响机制,基于此提出设置薄层单元来模拟应变局部化效应的高效分析方法,并应用于三维分析。本文发展的有限元-比例边界元-增量迭代法-预设薄层单元的高效精细化非线性分析方法可为深厚覆盖层上土石坝防渗墙的安全评价和设计优化提供理论和技术支撑。

2 理论方法

2.1 非线性求解方法

2.1.1 中点增量法

增量法基本思想是将一个非线性的全过程分成若干段,每一段用一个线性问题去近似,然后将其累加起来就得到总的解。从理论上讲,如将每一段取的足够小,总可以逼近真实的非线性过程。在我国的土石坝工程分析中普遍采用中点增量法^[17],在计算中,首先取每级增量荷载的一半分析一次,以此时的状态建立中点的刚度矩阵;接着用增量荷载以及上述中点的刚度矩阵再分析一次,从而求出位移增量和应力增量,见图 1。该方法的优点是能了解加载全过程,如果增量足够小,总能收敛到真实解。缺点是实际增量步不可能无限小,因此,积累误差有可能很大且无法估计,以致造成极大偏离而使解失真。由于土石坝工程规模宏大,迭代法的计算耗时长且收敛困难,因此在土石坝领域目前仍普遍采用中点增量法^[17]。

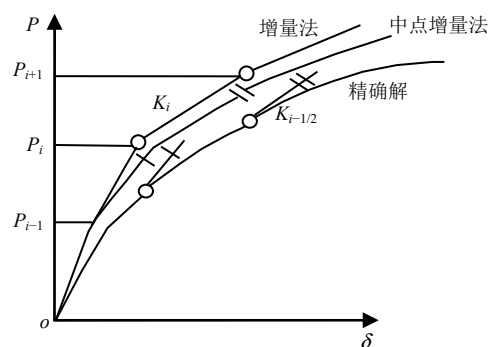


图1 中点增量法

Fig.1 Midpoint increment method

2.1.2 增量迭代法

将荷载一次加上,并假设一个位移的初始解,求出各单元的割线刚度阵,再组装成结构总的割线刚度阵,然后求解总的平衡方程得到第1次近似解;将其再代回原方程组求解得出第2次近似解,通过反复迭代,逐次修正其割线刚度阵并求解,直至满足方程组。增量迭代法^[17]首先将总荷载分成若干个

增量步, 在每个增量步内采用迭代法求解, 见图 2。该方法目前在非线性有限元程序和商用软件中得到广泛应用。

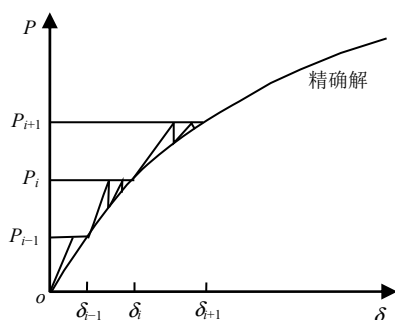


图 2 增量迭代法
Fig.2 Incremental iteration method

2.2 跨尺度建模与分析方法

Song 等^[19-20]提出了一种半解析方法——比例边界有限元法 (SBFEM)。该方法支持任意边数的多边形和任意面数的多面体单元, 在跨尺度网格的疏密网格过渡处理中具有无法比拟的优势。但由于该方法径向采用解析解, 环向边界上进行高斯积分, 不能描述单元内部应力屈服情况, 无法求解非线性问题, 这使得 SBFEM 被限制在线弹性领域^[21-23]。Chen 等^[24-26]基于该方法原有边界高斯积分点, 通过 SBFEM 理论构造用于非线性分析的单元插值函数和位移应变矩阵, 采用材料常刚度矩阵方

法计算相关系数矩阵。通过增加单元内部高斯点, 采用内部积分方案求解位移应变协调矩阵、单元刚度矩阵和应力积分等, 发展了可用于弹塑性分析的多边形和多面体单元, 解决了 SBFEM 受限于弹性分析的问题。

2.3 ALE 框架下的无网格大变形分析方法

无网格法是由 Lucy^[27]于 1977 年提出, 随后广泛地应用于岩土工程问题中^[28-29]。由于无网格法仅需节点离散几何模型, 无需网格的拓扑结构, 在本质上回避了网格扭曲的问题, 其在大变形中有着天然的优势, 然而由于自身稳定性及计算效率的问题, 一直无法应用到大规模岩土工程模拟中。针对上述问题, 笔者在任意拉格朗日-欧拉 (ALE) 框架下, 开发了无网格大变形分析方法。在拉格朗日步, 引入背景网格, 生成高斯点, 建立并求解平衡方程; 在随后的欧拉步中, 节点和高斯点在固定背景网格上流动, 并采用径向基函数更新高斯点相关信息。同时自适应识别并加密边界附近背景网格, 进一步提高该方法在边界处的精度。

3 超深覆盖层上高沥青心墙坝防渗墙受力状态精细化分析

3.1 有限元模型及参数

首先采用二维模型开展研究, 深厚覆盖层上的沥青混凝土心墙坝分析模型如图 3 所示。坝高为 150 m, 上游坡度为 1:2.5, 下游坡度为 1:2.1, 坝顶

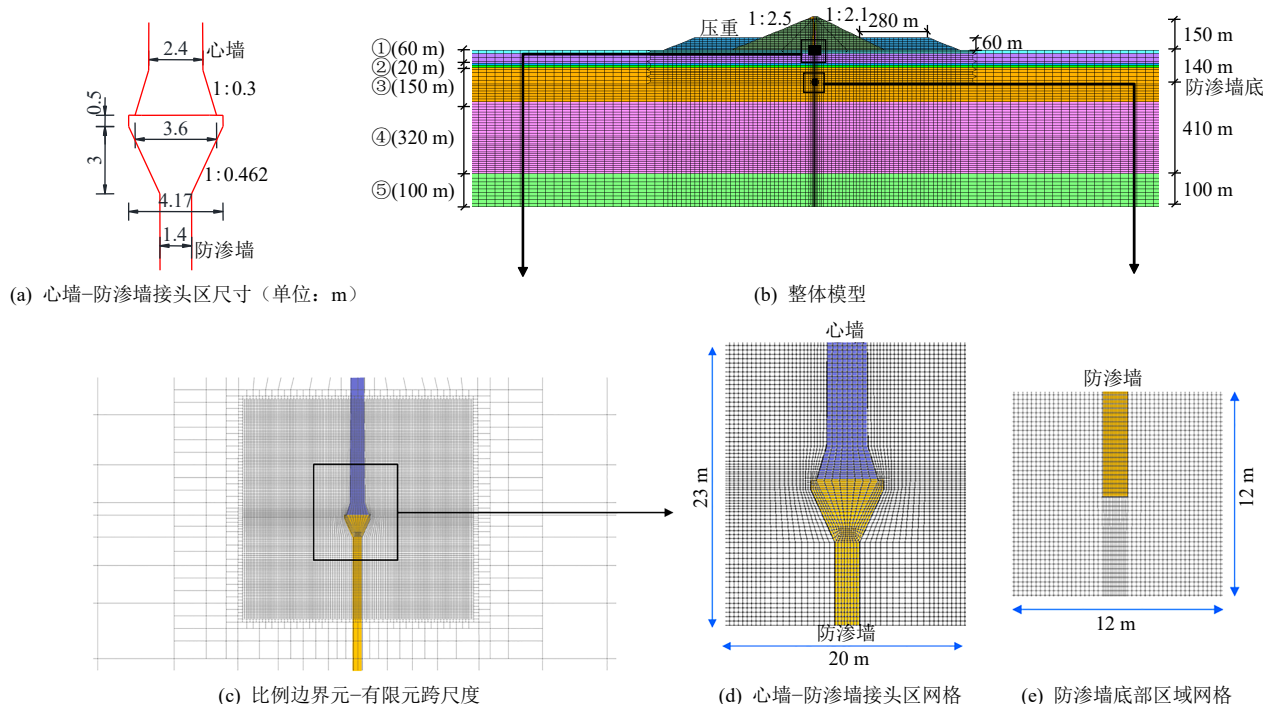


图 3 深厚覆盖层上沥青混凝土心墙坝二维分析模型

Fig.3 Two-dimensional models of asphaltic concrete core dam resting on deep overburden

宽为 10 m。坝体上下游设置长为 280 m、高为 60 m 的压重区。覆盖层厚度为 550 m，分为 4 层，从上至下，厚度依次为 60、20、150、320 m。底部基岩为第⑤层。防渗墙深 140 m，延伸至第③层；宽为 1.4 m，顶部有一扩大端，顶宽为 4.17 m。心墙厚度为 2.4 m，与防渗墙连接处有一扩大端，底部宽度为 3.6 m，见图 3(a)。本文的主要目的为研究防渗墙的受力状态，因此，采用比例边界元-有限元耦合的跨尺度分析方法对防渗墙上下两端的网格进行了

加密（见图 3(c)），局部网格尺寸为 0.25 m（见图 3(d)、3(e)）。

采用非线性弹性邓肯-张 $E-\mu$ 模型模拟土体的应力-应变关系，坝体和覆盖层材料的计算参数见表 1。防渗墙采用 C45 混凝土，模量为 33.5 GPa，密度为 2 500 kg/m³，泊松比为 0.167。在防渗墙与覆盖层土体之间、沥青混凝土与过渡料之间均设置 Goodman 接触单元，采用双曲线模型描述其接触特性，参数见表 2。

表 1 坝料参数表

Table 1 Material parameters of dam

| 土层 | 干密度 (g · cm ⁻³) | 饱和密度 (g · cm ⁻³) | 线性指标 | | 非线性指标 | | 邓肯-张参数 | | | | | |
|--------|--------------------------------|---------------------------------|-------|----------------------|------------------------|----------------------------|--------|------|-------|------|------|------|
| | | | c/kPa | $\varphi/(^{\circ})$ | $\varphi_0/(^{\circ})$ | $\Delta\varphi/(^{\circ})$ | K | n | R_f | G | F | D |
| 沥青混凝土 | 2.392 | — | 320 | 33.5 | — | — | 438.8 | 0.19 | 0.69 | 0.49 | 0.00 | 0.00 |
| 反滤料 | 2.090 | 2.25 | 0 | 36 | 45 | 10 | 850 | 0.29 | 0.73 | 0.28 | 0.10 | 5.60 |
| 过渡料 | 2.120 | 2.30 | 0 | 42 | 50 | 8 | 960 | 0.33 | 0.79 | 0.32 | 0.10 | 5.17 |
| 盖重和堆石料 | 2.180 | 2.30 | 0 | 45 | 52 | 7 | 1 050 | 0.37 | 0.71 | 0.30 | 0.09 | 5.80 |
| 覆盖层① | — | 2.08 | 1.6 | 33.4 | — | — | 350 | 0.44 | 0.75 | 0.44 | 0.08 | 1.80 |
| 覆盖层② | — | 1.99 | 34.1 | 30.4 | — | — | 280 | 0.43 | 0.81 | 0.42 | 0.13 | 2.00 |
| 覆盖层③ | — | 2.13 | 50 | 34 | — | — | 380 | 0.43 | 0.73 | 0.44 | 0.10 | 2.00 |
| 覆盖层④ | — | 2.42 | — | — | 52 | 6 | 1 800 | 0.60 | 0.69 | 0.41 | 0.01 | 3.00 |

表 2 双曲线接触面材料参数

Table 2 Material parameters of interface

| 接触面位置 | $\varphi/(^{\circ})$ | c/kPa | R_f | K | n |
|-----------|----------------------|-------|-------|-------|------|
| 防渗墙与覆盖层 | 11 | 10.5 | 0.89 | 757 | 0.80 |
| 沥青混凝土与过渡料 | 36 | 0.0 | 0.74 | 4 800 | 0.56 |

计算采用大连理工大学自主研发的大型岩土工程高性能分析软件系统 GEODYNA，该软件已集成了有限元-比例边界元-无网格-离散元耦合的多数值分析方法，有中点增量法、增量迭代法、等效线性方法等隐式求解方法和显式求解方法。该软件已广泛应用于土石坝的静、动力分析，相关介绍及部分应用可参考相关文献[5, 9-10, 24-26, 30-31]。

3.2 防渗墙-心墙接头区的变形模式

采用中点增量法和增量迭代法两种非线性求

解方法模拟大坝的填筑过程。竣工期大坝的沉降变形见图 4，剪应变分布见图 5。两种方法计算的大坝宏观变形基本一致，最大竖向变形发生在防渗体系两侧的坝基交界面处，为 7.5 m。大坝的整体剪应变均在 5%以下，而防渗墙上下两端局部区域的剪应变较大。由于防渗墙的刚度远大于覆盖层土体，其竖向变形基本不随深度发生变化，在坝基交界面处防渗墙的竖向位移小于周围土体的变形，而在防渗墙底部墙体竖向位移大于周围土体的变形。因此，防渗墙两端土体存在较大的剪切变形。

首先探讨心墙-防渗墙接头区的变形模式，将该区域的剪应变和网格变形分别绘于图 6 和图 7，中点增量法计算的防渗墙顶部两侧土体的剪应变已超过 100%，而增量迭代法计算的剪应变超过

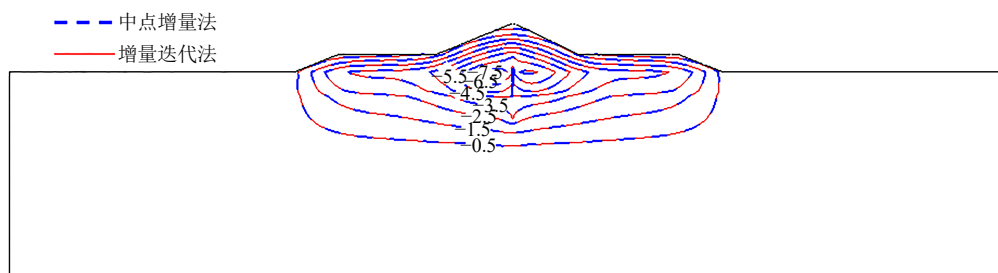


图 4 竣工期大坝的竖向变形（单位：m）

Fig.4 Vertical deformation of dam after construction (unit: m)

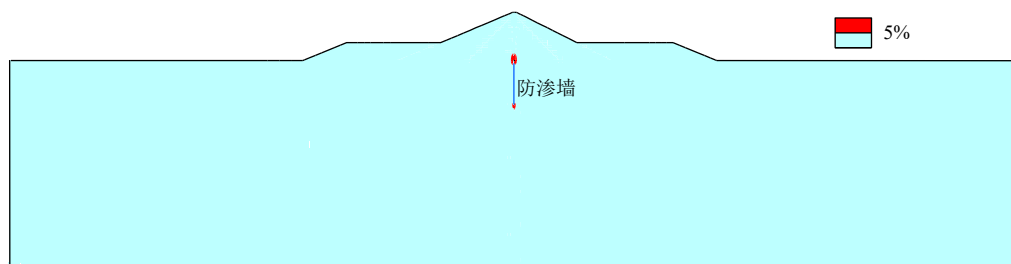
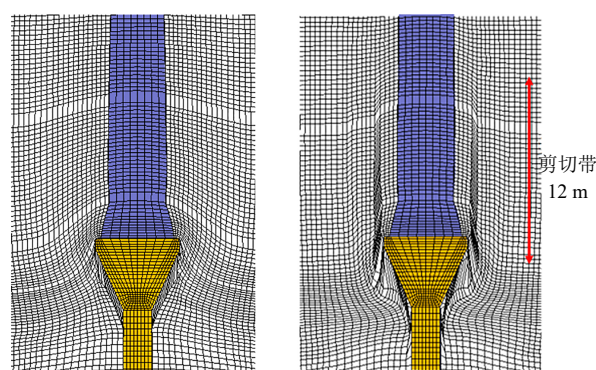


图5 竣工期大坝的剪应变
Fig.5 Shear strain of dam after construction

500%。对于土石坝领域常用的中点增量法，应变越大，其计算值偏离精确解的程度越大，且计算的应变值偏小（见图1）。从增量迭代法的结果可以发现：防渗墙顶部两侧土体出现了带状分布的剪切变形区，长度为12 m。两种方法的防渗墙竖向应力分布见图8，增量迭代法计算的防渗墙顶部压应力为18.43 MPa，而中点增量法计算的防渗墙顶部的竖向应力为23.38 MPa，高估了26.8%。

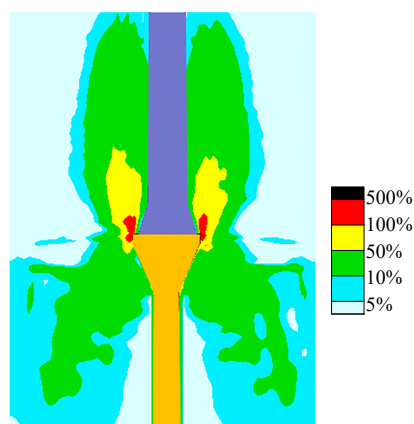
心墙-防渗墙接头区局部土体的剪应变已经超过了100%，需要对基于小变形假设的有限元方法进行



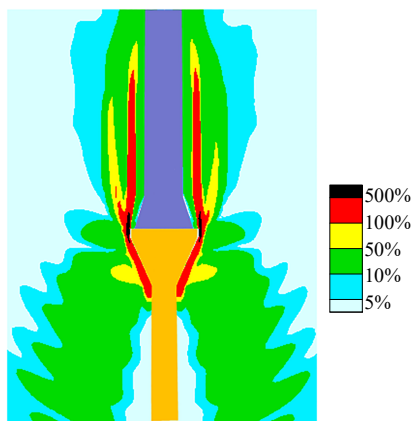
(a) 中点增量法 (b) 增量迭代法

图7 心墙-防渗墙接头区的网格变形图

Fig.7 Mesh deformation of connected zone between core wall and cutoff wall



(a) 中点增量法



(b) 增量迭代法

图6 心墙-防渗墙接头区的剪应变

Fig.6 Shear strains of connected zone between core wall and cutoff wall

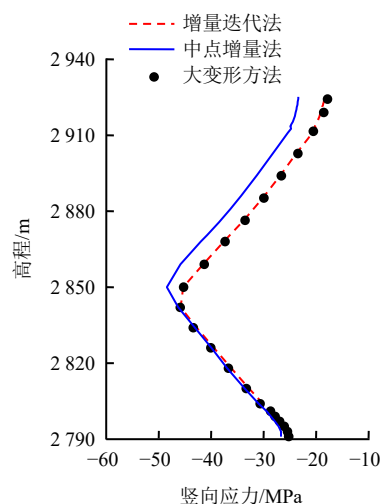


图8 防渗墙的竖向应力

Fig.8 Vertical stresses of cutoff wall

的计算精度进行验证。因此本文采用有限元-无网格耦合的大变形分析方法进行验证。为提高计算效率，仅将发生大应变的接头区局部土体采用无网格大变形方法进行模拟，其余土体采用有限元方法模拟，模型见图9。

接头区的变形模式见图10。从图中可以发现：防渗墙顶部两侧土体同样发生了带状的剪切变形，

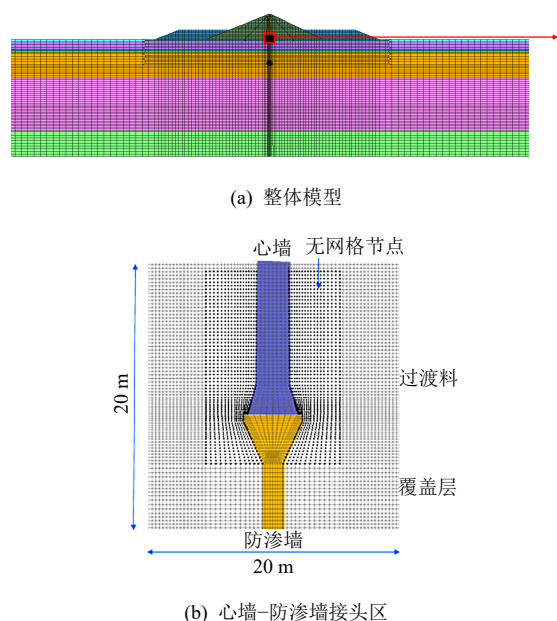


图 9 有限元-无网格大变形分析模型
Fig.9 Model of FEM-meshless method for large deformation analysis

长度为 11.6 m，与增量迭代法计算的剪切带长度相差约 3%。防渗墙的竖向应力见图 8，顶部的应力为 17.81 MPa，与增量迭代法的计算结果相差约 3.5%。因此，对于沥青混凝土心墙-防渗墙接头区的模拟问题，采用增量迭代法的有限元分析可以满足精度要求。

综上所述，中点增量法可以用来计算大坝的整体宏观变形，但是对于防渗墙应力，局部存在的大应变、强非线性问题是不能忽略的，建议采用增量迭代法进行求解。

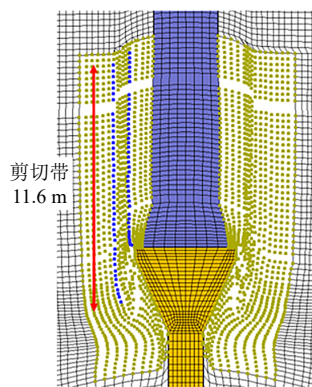


图 10 基于大变形分析的心墙-防渗墙接头区网格变形图
Fig.10 Mesh deformation of connected zone between core wall and cutoff wall based on large deformation analysis

3.3 网格尺寸的影响

由 3.2 节的分析可知，心墙-防渗墙接头区存在应变高度集中的剪切带，与周围土体的应变梯度很大，这对于网格尺寸提出了较高的要求。本节采用

4 种网格尺寸（见表 3），研究心墙-防渗墙接头区的网格敏感性。不同网格尺寸计算的防渗墙竖向应力见图 11 和表 3，随着网格尺寸逐步减小，防渗墙顶部的竖向应力逐渐减小并收敛。当网格尺寸加密至 0.25 m 时，可以满足精度要求。此外，将网格尺寸为 4.0 m 的接头区网格变形绘于图 12，较大的网格尺寸无法描述防渗墙顶部两侧土体剪切带，高估土体的刚度和防渗墙应力。

表 3 网格尺寸对防渗墙应力的影响

| Table 3 Influences of mesh size on stress of cutoff wall | | |
|--|---------------|-------|
| 网格尺寸/m | 防渗墙顶部竖向应力/MPa | 误差/% |
| 4.000 | 28.02 | 52.95 |
| 1.000 | 20.20 | 10.26 |
| 0.250 | 18.33 | 0.05 |
| 0.125 | 18.32 | — |

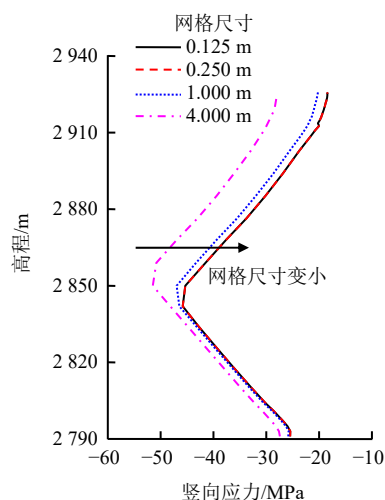


图 11 网格尺寸对防渗墙应力的影响
Fig.11 Influences of mesh size on stress of cutoff wall

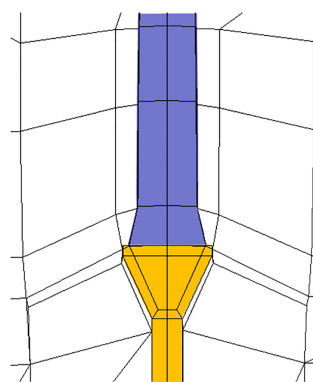


图 12 网格尺寸为 4 m 时的心墙-防渗墙接头区网格变形图
Fig.12 Mesh deformation of connected zone between core wall and cutoff wall for mesh size of 4 m

因此，对于深厚覆盖层上沥青混凝土心墙坝，非线性算法和网格尺寸均需要精细化才能保证计算

结果的准确性。

3.4 发展的高效精细化分析方法

由 3.3 节分析可知, 保证防渗墙计算精度的网格尺寸为 0.25 m, 这对于三维的非线性分析是难以承受的, 需要发展一种兼顾精度和效率的分析方法。心墙-防渗墙接头区的剪切带对防渗墙的计算精度至关重要。因此, 在精细分析发现的剪切带位置处预设薄层单元, 来描述剪切带的变形特性, 同时放松周围其他网格的尺寸要求, 见图 13。薄层单元的厚度为 0.25 m, 总长度为 12 m, 根据精细分析结果确定; 接头区土体的网格尺寸为 4 m。剪切带截断处产生的多边形单元采用比例边界元模拟。

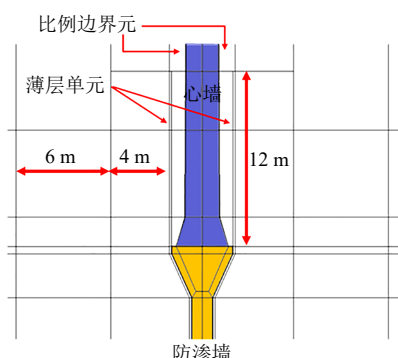


图 13 高效精细分析的解决方案

Fig.13 Scheme for efficient refined analysis

采用 4 m 网格尺寸+预设薄层单元的方法后, 心墙-防渗墙接头区的剪应变见图 14。预设的薄层单元的剪应变超过了 500%, 而其他部位的剪应变小于 10%。薄层单元很好地描述了心墙-防渗墙接头区的应变集中现象。防渗墙应力的计算结果见图 15, 4 m 网格尺寸计算的防渗墙顶部竖向应力为 28.02 MPa, 误差为 52.9%; 设置薄层单元后, 防渗墙顶部的竖向应力降至 17.64 MPa, 误差为 3.8%,

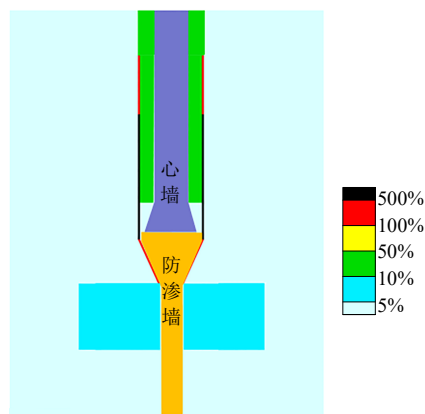


图 14 心墙-防渗墙接头区的剪应变

Fig.14 Shear strains of connected zone between core wall and cutoff wall

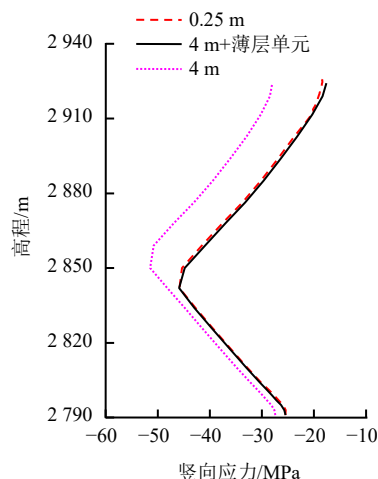


图 15 防渗墙应力计算结果

Fig.15 Calculation results of stress of cutoff wall

而接头区的网格尺寸要求降低了 93.75%。

3.5 防渗墙底部区域变形模式和高效精细化方法

采用同样的思路, 首先研究防渗墙底部土体的网格敏感性, 由于防渗墙底部的剪应变要小于接头区, 可以认为 0.25 m 网格尺寸同样满足精度要求, 其结果可以作为网格敏感性分析的基准。防渗墙底部区域网格尺寸为 0.25 m 和 2 m 的计算结果见图 16, 防渗墙底部同样存在网格敏感性, 2 m 网格高估了防渗墙中部以下区域的竖向应力, 最大误差达到 38.6%。

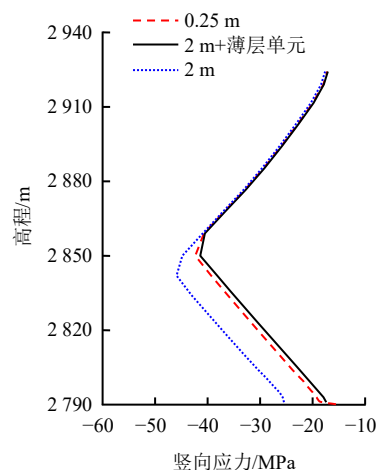


图 16 防渗墙底部区域网格对防渗墙应力的影响

Fig.16 Effects of size of mesh at the bottom on stress of cutoff wall

图 17 为防渗墙底部网格尺寸为 0.25 m 时的局部剪应变, 防渗墙两侧底部土体发生了明显的呈带状分布的剪切变形, 剪切带长度为 3.8 m。精细化分析可以描述防渗墙底部土体的应变局部化现象, 并定位了剪切带的位置和长度。

采用与心墙-防渗墙接头区同样的处理方式, 基于精细化分析定位的剪切带位置, 在 2 m 网格基础上, 预设薄单元描述剪切带的变形特性, 见图 18。此时的防渗墙应力见图 16, 设置薄层单元后, 误差仅为 5%, 网格尺寸要求降低了 87.5%。

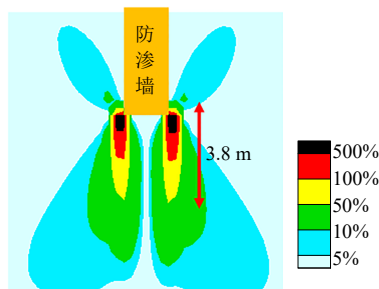


图 17 防渗墙底部土体的剪应变

Fig.17 Shear strains of soil at the bottom of cutoff wall

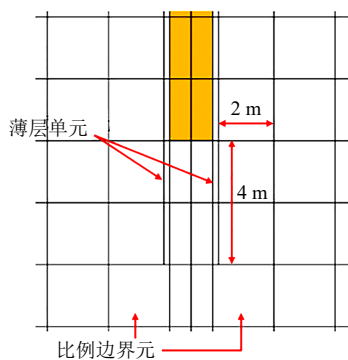


图 18 防渗墙底部的高效高精度精细模拟方案

Fig.18 Scheme for efficient refined analysis of the bottom of cutoff wall

3.6 提出方法的综合应用效果

前述研究分别讨论了心墙-防渗墙接头区和防渗墙底部的预设薄层单元的高效分析方法和效果。本节同时在接头区和防渗墙底部采用预设薄层单元的方法, 综合应用效果见图 19 和表 4。采用提出的预设薄层单元的高效分析模型后, 防渗墙应力与全密模型结果基本一致, 误差不超过 4%, 而传统方法则高估整个防渗墙的应力约 10 MPa, 其中顶部应力高估了 53.4%, 底部应力高估了 98.8%, 最大应力高估了 33.5%。

4 三维分析应用

4.1 分析模型

深厚覆盖层上沥青混凝土心墙坝的三维分析模型见图 20。根据上文的研究结果, 以常规网格尺寸模型 (见图 20(a), 单元数 111 万) 为基础, 在防渗墙底部采用有限元-比例边界元耦合跨尺度分析

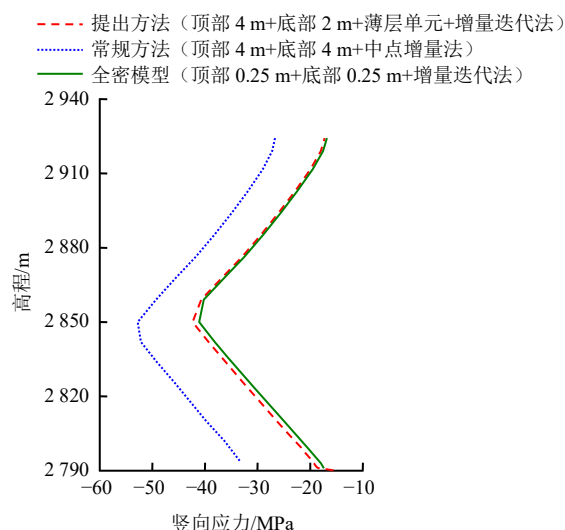


图 19 提出的高效精细化方法的应用效果

Fig.19 Application effect of the proposed efficient refined method

表 4 提出的高效精细化方法的应用效果

Table 4 Application effect of the proposed efficient refined method

| 方法 | 顶部 | | 最大值 | | 底部 | |
|------|--------|------|--------|------|--------|------|
| | 应力/MPa | 误差/% | 应力/MPa | 误差/% | 应力/MPa | 误差/% |
| 全密模型 | 17.4 | — | 41.1 | — | 16.8 | — |
| 提出方法 | 17.9 | 2.8 | 41.4 | 0.7 | 17.4 | 3.6 |
| 常规方法 | 26.7 | 53.4 | 52.7 | 33.5 | 33.4 | 98.8 |

方法^[25], 实现防渗墙局部网格的多级细分, 将该区域网格加密至 2 m; 通过多面体单元连接交界处网格, 实现不同网格尺寸的无缝跨越; 在心墙-防渗墙接头区和防渗墙底部设置薄层单元模拟剪切带。最终建立三维的有限元-比例边界元耦合的防渗墙精细分析模型 (单元数 122 万), 见图 20(b)。相比于常规模型, 精细分析模型单元数量仅增加了 10%。

4.2 应用效果

图 21 为沥青混凝土心墙坝的常规模型和精细模型计算的防渗墙竖向应力, 以及二维和三维的精细化分析效果对比。三维精细分析效果与二维一致, 表明二维的研究成果推广至三维是可行的。常规方法高估河谷处防渗墙应力 12 MPa (高估了 31%), 影响范围达到了 950 m, 约占整个防渗墙长度的 54%; 高估防渗墙两端应力 30 MPa (高估了 25%)。

本文通过网格敏感性分析和增量迭代法, 确定了防渗墙上下两端土体所需的网格尺寸和剪切带的长度和宽度。算例中将薄层单元的厚度取为网格尺寸, 即 0.25 m; 长度取为剪切带长度, 即接头区为 12 m、防渗墙底部区域为 4 m, 防渗墙应力的计算误差不超过 4%, 取得了良好的应用效果。因此,

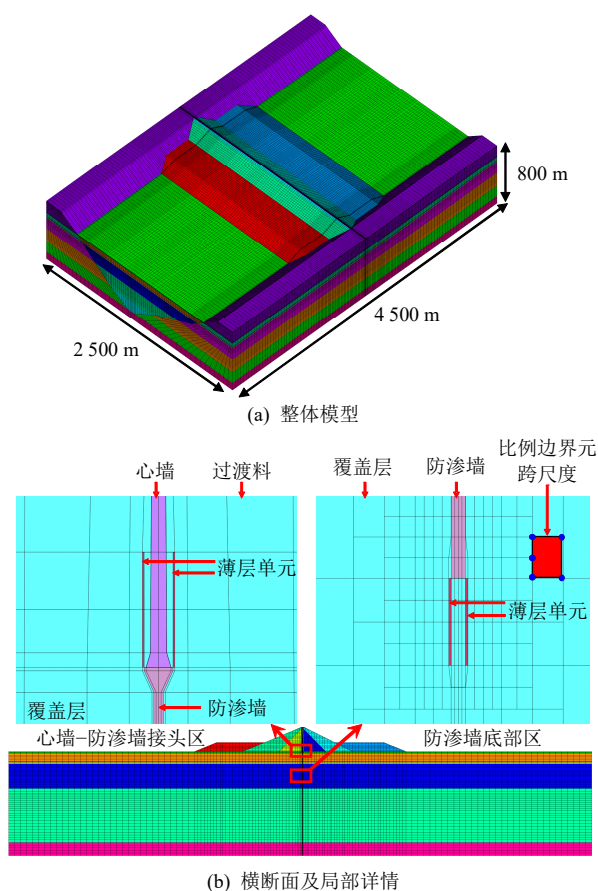


图 20 深厚覆盖层上沥青混凝土心墙坝的三维分析模型
Fig.20 3D model of asphaltic concrete core dam resting on deep overburden

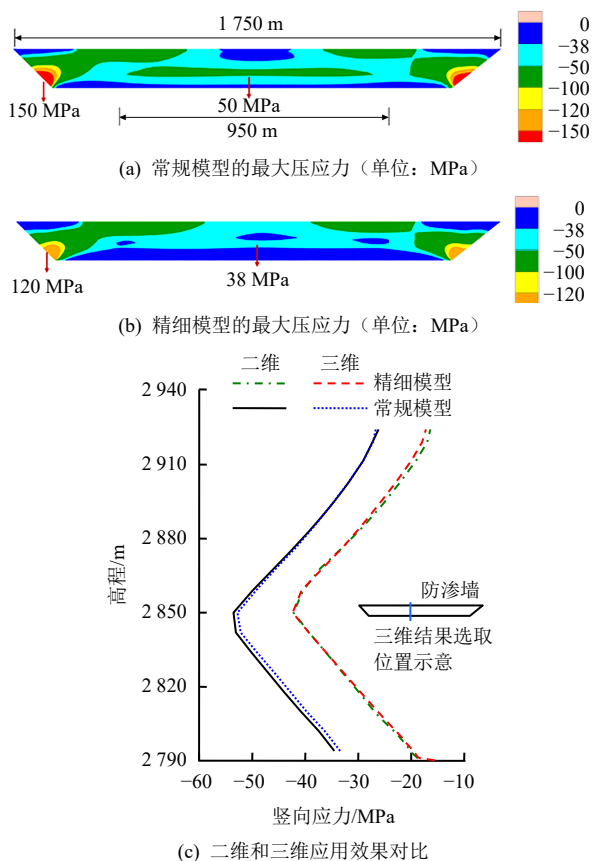


图 21 防渗墙应力计算结果
Fig.21 Calculation results of stress in cutoff wall

建议在实际应用中, 预设的薄层单元厚度宜不超过敏感性分析确定的网格尺寸, 长度宜不小于精细分析确定的剪切带的长度。此外, 由于本算例的覆盖层深度已达 550 m, 且覆盖层的力学特性相对较差, 其防渗墙上下两端土体的剪应变程度和剪切带长度相对较大。因此, 对于一般的深厚覆盖层上土石坝工程, 本文确定的薄层单元尺寸也具有一定的参考性。

5 结 论

本文联合增量迭代法和有限元-比例边界有限元耦合的分析方法, 开展了深厚覆盖层上土石坝应力变形的跨尺度精细化分析, 研究了防渗墙两端局部土体的变形模式, 探讨了非线性求解方法和网格尺寸对防渗墙力学状态模拟精度的影响, 提出了防渗墙模拟的高效精细化分析方法, 并应用于深厚覆盖层上土石坝防渗墙的三维分析。主要结论如下:

(1) 中点增量法可以用来计算大坝的整体宏观变形, 但是对于防渗墙应力, 局部存在的大应变、强非线性问题不能忽略, 建议采用增量迭代法进行求解。

(2) 防渗墙-心墙接头附近和防渗墙底部土体呈带状剪切的局部大应变特性, 土石坝分析常用的中点增量法难以描述土体局部大应变特性, 是高估防渗墙应力的主要原因。

(3) 通过在精细化分析定位的剪切带位置处设置薄层单元来模拟应变局部化效应, 可在保证精度的基础上, 大幅度放松对网格尺寸的要求, 使三维精细分析成为可能。

(4) 三维精细化分析结果表明: 传统方法会高估整个防渗墙的应力, 其中河谷处应力高估了 30% (局部可达 90%), 最大应力高估了 25%。

(5) 本文发展的有限元-比例边界元-增量迭代法-预设薄层单元的高效精细化非线性分析方法, 为深厚覆盖层上土石坝防渗墙的安全评价和设计优化提供了理论和技术支持。

参 考 文 献

- [1] 新华社. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要[EB/OL]. (2021-03-13) [2023-05-01]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.
Xinhua News Agency. The outline of the 14th five-year plan for economic and social development and long-range

- objectives through the year 2035 of the People's Republic of China[EB/OL]. (2021-03-13) [2023-05-01]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.
- [2] 孔宪京, 陈健云, 邹德高. 高坝抗震安全理论发展趋势研究[J]. 水力发电学报, 2020, 39(7): 1-11.
KONG Xian-jing, CHEN Jian-yun, ZOU De-gao. Study on development trend of seismic safety theory for high dams[J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2020, 39(7): 1-11.
- [3] 陈生水. 复杂条件下特高土石坝建设与长期安全保障关键技术研究进展[J]. 中国科学: 技术科学, 2018, 48(10): 1040-1048.
CHEN Sheng-shui. Research progresses in key technologies for construction and longterm safety protection of extra high earth-rock dams under complicated conditions[J]. **Scientia Sinica (Technologica)**, 2018, 48(10): 1040-1048.
- [4] 陈祖煜, 程耿东, 杨春和. 关于我国重大基础设施工程安全相关科研工作的思考[J]. 土木工程学报, 2016, 49(3): 1-5.
CHEN Zu-yu, CHENG Geng-dong, YANG Chun-he. Research work on construction safety of major infrastructures in China: overview and a forward look[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2016, 49(3): 1-5.
- [5] 余翔. 深厚覆盖层上土石坝静动力分析方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
YU Xiang. Study on methods for the static and dynamic analysis of earth dam constructed on deep overburden[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [6] 李江, 柳莹, 贾洪全, 等. 新疆深厚覆盖层坝基超深防渗墙建设关键技术[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2022, 20(1): 47-56.
LI Jiang, LIU Ying, JIA Hong-quan, et al. Key technology for construction of super deep cut-off wall of dam foundation with deep overburden layer in Xinjiang[J]. **Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research**, 2022, 20(1): 47-56.
- [7] 温立峰, 李炎隆, 柴军瑞. 坝基混凝土防渗墙力学性状的统计分析[J]. 水利学报, 2021, 52(2): 241-254.
WEN Li-feng, LI Yan-long, CHAI Jun-rui. Statistical analysis of mechanical properties of dam foundation concrete cutoff wall[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2021, 52(2): 241-254.
- [8] 马希正. 临海市牛头山水库混凝土防渗墙裂缝检测及处理[J]. 浙江水利科技, 2006(2): 65-66.
MA Xi-zheng. Crack detection and treatment of concrete cut off wall of Niutoushan Reservoir in Linhai city[J]. **Zhejiang Hydrotechnics**, 2006(2): 65-66.
- [9] 罗玉龙, 张兴杰, 张海彬, 等. 深厚覆盖层地基潜蚀研究综述[J]. 岩土力学, 2022, 43(11): 3094-3106.
LUO Yu-long, ZHANG Xing-jie, ZHANG Hai-bin, et al. Review of suffusion in deep alluvium foundation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(11): 3094-3106.
- [10] YU Xiang, KONG Xian-jing, ZOU De-gao, et al. Linear elastic and plastic-damage analyses of a concrete cutoff wall constructed in deep overburden[J]. **Computers and Geotechnics**, 2015, 69: 462-473.
- [11] YU Xiang, ZOU De-gao, KONG Xian-jing, et al. Large-deformation finite element analysis of the interaction between concrete cutoff walls and high plasticity clay in an earth core dam[J]. **Engineering Computations**, 2017, 34(4): 1126-1148.
- [12] 余翔, 孔宪京, 邹德高. 混凝土防渗墙变形与应力分布特性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(9): 1704-1711, 1734.
YU Xiang, KONG Xian-jing, ZOU De-gao. Deformation and stress distribution characteristics of concrete cut-off wall[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2017, 51(9): 1704-1711, 1734.
- [13] 温立峰, 李炎隆, 柴军瑞. 混凝土面板堆石坝地基防渗墙塑性损伤数值分析[J]. 水利学报, 2021, 52(6): 673-688.
WEN Li-feng, LI Yan-long, CHAI Jun-rui. Numerical analysis of plastic damage of concrete cutoff wall for concrete face rockfill dam[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2021, 52(6): 673-688.
- [14] 潘迎, 何蕴龙, 周小溪, 等. 河谷地形对深覆盖层中防渗墙应力变形影响分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 2023-2030.
PAN Ying, HE Yun-long, ZHOU Xiao-xi, et al. Analysis of effect of canyon terrain on stress and displacement of cutoff wall in dam foundation with deep overburden[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(7): 2023-2030.
- [15] WEN L, CHAI J, WANG X, et al. Behaviour of concrete-face rockfill dam on sand and gravel foundation[J]. **Geotechnical Engineering**, 2015, 168(5): 1-18.
- [16] 邹德高, 陈楷, 张仁怡, 等. 基于 SBFEM 的心墙坝基座跨尺度精细应力分析[J]. 人民长江, 2019, 50(9): 168-174.

- ZOU De-gao, CHEN Kai, ZHANG Ren-yi, et al. Cross-scale refined stress analysis on base-support of core wall concrete dam based on scaled boundary finite element method[J]. **Yangtze River**, 2019, 50(9): 168-174.
- [17] 朱百里, 沈珠江. 计算土力学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1990.
- ZHU Bai-li, SHEN Zhu-jiang. Computational soil mechanics[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1990.
- [18] 丁艳辉, 张其光, 张丙印. 高心墙堆石坝防渗墙应力变形特性有限元分析[J]. 水力发电学报, 2013, 32(3): 162-167.
- DING Yan-hui, ZHANG Qi-guang, ZHANG Bing-yin. FEM analysis of stress-deformation characteristics of cut-off walls in high core rockfill dam[J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2013, 32(3): 162-167.
- [19] SONG C M, WOLF J P. The scaled boundary finite-element method—alias consistent infinitesimal finite-element cell method for elasto-dynamics[J]. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 1997, 147(3-4): 329-355.
- [20] WOLF J P. The scaled boundary finite element method[M]. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd., 2003.
- [21] LIU J, ZHANG P, LIN G, et al. Solutions for the magneto-electro-elastic plate using the scaled boundary finite element method[J]. **Engineering Analysis with Boundary Elements**, 2016, 68: 103-114.
- [22] LIU Jun, LIN Gao. A scaled boundary finite element method applied to electrostatic problems[J]. **Engineering Analysis with Boundary Elements**, 2012, 36(12): 1721-1732.
- [23] SHI M, ZHONG H, OOI E T, et al. Modelling of crack propagation of gravity dams by scaled boundary polygons and cohesive crack model[J]. **International Journal of Fracture**, 2013, 183(1): 29-48.
- [24] CHEN Kai, ZOU De-gao, KONG Xian-jing, et al. A novel nonlinear solution for the polygon scaled boundary finite element method and its application to geotechnical structures[J]. **Computers and Geotechnics**, 2017, 82: 201-210.
- [25] CHEN Kai, ZOU De-gao, KONG Xian-jing, et al. An efficient nonlinear octree SBFEM and its application to complicated geotechnical structures[J]. **Computers and Geotechnics**, 2018, 96: 226-245.
- [26] CHEN Kai, ZOU De-gao, KONG Xian-jing, et al. Elasto-plastic fine-scale damage failure analysis of metro structures based on coupled SBFEM-FEM[J]. **Computers and Geotechnics**, 2019, 108: 280-294.
- [27] LUCY L B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis[J]. **The Astronomical Journal**, 1977, 8(12): 1013-1024.
- [28] BELYTSCHKO T, LU Y Y, GU L. Element free Galerkin methods[J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 1994, 37: 229-256.
- [29] JIE Y, TANG X W, LUAN M T, et al. Adaptive element free Galerkin method to analysis of earthquake induced liquefaction[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2008, 7(2): 217-224.
- [30] 屈永倩. 面板堆石坝地震损伤演化—破坏分析方法与应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- QU Yong-qian. Research on method and application of seismic damage evolution-failure on concrete faced rockfill dam[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [31] 孔宪京, 邹德高, 陈楷. 比例边界有限元在岩土工程中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- KONG Xian-jing, ZOU De-gao, CHEN Kai. Application of scaled boundary finite element method in geotechnical engineering[M]. Beijing: Science Press, 2022.