

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.02.007

深厚覆盖层中新型扩底防渗墙对防渗效果的影响

罗玉龙,孔祥峰,罗 斌,詹美礼,盛金昌,何淑媛

(河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:为降低防渗墙端部的渗透坡降,提出改变防渗墙端部局部的结构形式,将常规长方体结构形式改为新型扩底结构形式,并对比分析了常规结构形式和扩底结构形式防渗墙端部渗透坡降的分布规律。研究表明:与常规结构形式相比,扩底结构形式能够显著降低防渗墙端部和下游坝脚出溢处的最大坡降;扩底结构的半径越大,防渗墙端部的最大渗透坡降越小,下游坝脚出溢处的最大渗透坡降越小;对于概化模型,常规结构形式防渗墙贯入深度为35 m时,防渗墙端部最大坡降为0.85,下游坝脚处最大渗透坡降为0.27,要达到相同防渗效果,半径1.5 m的扩底结构形式防渗墙的贯入深度仅需23 m;扩底结构形式显著优于常规形式,它能够大幅度降低防渗墙建设的工程量和工程造价,显著缩短防渗墙施工工期。

关键词:深厚覆盖层;防渗墙;扩底形式;渗透坡降;渗透稳定性

中图分类号:TV543+.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2018)02-0140-06

Influence of a new cutoff wall of expanded base type on the seepage controlling in deep overburden foundation

LUO Yulong, KONG Xiangfeng, LUO Bin, ZHAN Meili, SHENG Jinchang, HE Shuyuan
(College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The hydraulic gradient at the bottom of cutoff wall in a deep overburden foundation is large, and may cause the local seepage failure near the bottom of cutoff wall, which may induce the differential settlement and crack of anti-seepage structure threatening the dam safety. In order to reduce the hydraulic gradient at the bottom of cutoff wall, a new cutoff wall of expanded base type was proposed to change the local structure type of the cutoff wall tip. The distributions of the hydraulic gradient at the bottom of cutoff wall were compared and analyzed with different types of local structure. The results show that the expanded base structure could significantly reduce the maximum hydraulic gradient at the bottom of cutoff wall and the maximum hydraulic gradient at the downstream side; the larger the radius of expanded base structure was, the smaller the maximum hydraulic gradient was. For the generalized model, when the penetration depth of cutoff wall with the conventional type was 35 m, the maximum hydraulic gradient at the bottom of cutoff wall was 0.85, and the maximum hydraulic gradient at the downstream side was 0.27. For the cutoff wall of expanded base type with a radius of 1.5 m, in order to achieve the same anti-seepage effect, the penetration depth was only 23 m. It can be seen that the type of a expanded base structure was significantly superior to the conventional type. It can significantly reduce the construction quantity, the investment, and the construction period of cutoff wall.

Key words: deep overburden alluvium; cutoff wall; expanded base type; hydraulic gradient; seepage stability

深厚覆盖层是指堆积于河谷之中,厚度大于30 m的第四纪松散沉积物,它具有结构松散、岩性不连续、成因类型复杂、物理力学性质不均匀等特点^[1]。深厚覆盖层地基中常存在级配不良的管涌型土^[2],这类土

基金项目: 国家自然科学基金(51679070, 51579078, 51474204);中央高校基本科研业务费专项(2015B20514)
作者简介: 罗玉龙(1980—),男,副教授,博士,主要从事岩土体渗流控制研究。E-mail: ly18766@126.com
引用本文: 罗玉龙,孔祥峰,罗斌,等. 深厚覆盖层中新型扩底防渗墙对防渗效果的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(2): 140-145. DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.02.007.

体的骨架多为漂(卵)砾石,而填充细颗粒则为砾质砂、粉细砂及粉土等。填充细颗粒非常容易在漂(卵)砾石构成的骨架孔隙中移动并被带出土体^[3]。大量细颗粒的运移可能诱发地基的不均匀沉降,甚至导致大坝防渗体开裂,威胁大坝安全。混凝土防渗墙作为一种常用的防渗设施,目前已广泛应用于深厚覆盖层地基的防渗处理工程中,如小浪底斜心墙堆石坝坝基防渗墙最大深度 82 m,瀑布沟心墙堆石坝坝基防渗墙深度 70 m,冶勒大坝的防渗墙深度达 140 m 等^[4]。

防渗墙的建设增加了大坝整体的渗透稳定性,降低了地基内部整体的渗透坡降,但是却增大了防渗墙端部附近的渗透坡降^[5],从而大大增加了防渗墙端部附近土体发生局部渗透破坏的可能性^[6-10]。目前,关于覆盖层地基,特别是防渗墙端部附近土体的渗透稳定性,通常采用对比计算和允许渗透坡降的方式进行简单评价^[11-13]。如果计算坡降大于土体允许坡降,将建议继续增大防渗墙的贯入深度,直至满足土体渗透稳定性要求。防渗墙深度的增加,将显著增加工程投资,同时,如果防渗墙贯入深度过大,其施工质量也难以有效控制,可能出现开叉等现象,会显著影响防渗效果。此外,对于一些覆盖层特别深厚(如 Science 报道^[14],雅鲁藏布江大拐弯地区覆盖层的最大厚度超过 500 m)的工程而言,由于目前防渗墙施工水平的限制,一味地增加防渗墙贯入深度也可能仍然无法满足地基渗透稳定性的要求。

解决上述问题的关键是如何有效降低防渗墙端部局部过大的渗透坡降,为此,笔者提出改变防渗墙端部局部的结构形式,将常规的长方体结构形式(简称常规形式)改为如图 1 所示的扩底结构形式(简称扩底形式),通过增加防渗墙端部局部的渗径长度,改善端部的渗透坡降分布规律。为了评价 2 种结构形式的防渗效果,重点对比分析了相同贯入深度条件下,常规形式和不同半径的扩底形式防渗墙端部渗透坡降的分布规律。

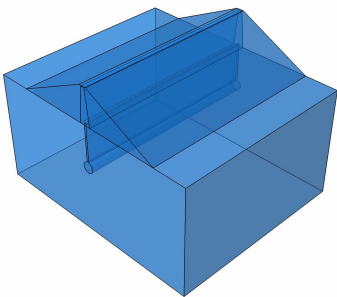


图 1 新型扩底式防渗墙三维模型
Fig. 1 Three-dimensional model of a new cutoff wall of expanded base type

1 防渗墙端部结构形式对防渗效果的影响

1.1 渗流计算模型概化

为了研究深厚覆盖层地基中防渗墙端部结构形式对防渗效果的影响,参照一般土石坝工程设计,建立了如图 2 所示的二维计算概化模型:假设土石坝坝高 10 m,上下游坝坡坡比为 1 : 2,心墙上下游坡比为 1 : 0.1,深厚覆盖层地基厚度为 50 m,覆盖层地基以下为不透水地基。坝体防渗采用黏土心墙,心墙底部和顶部宽度分别为 3 m 和 1 m,坝基防渗采用混凝土防渗墙,墙体厚度 0.5 m,防渗墙端部对比考虑 2 种结构形式:常规形式和扩底形式,2 种结构形式的防渗墙的贯入深度相同,均为 H ,扩底形式的半径为 R 。

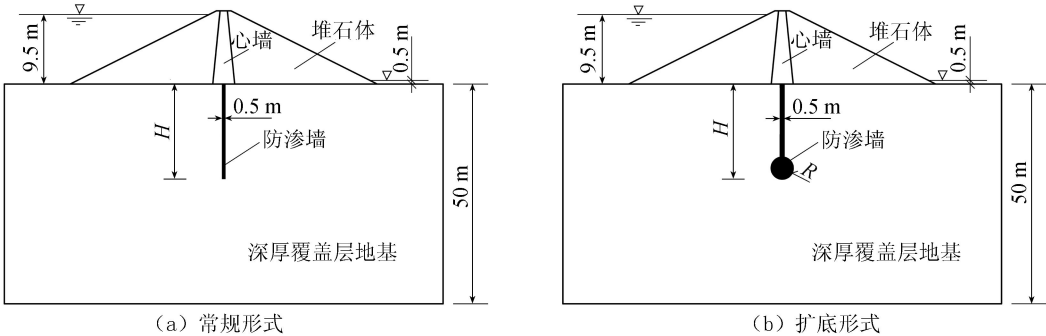


图 2 防渗墙端部不同结构形式对防渗效果影响概化模型

Fig. 2 Generalized model for the influence of different structure types of cutoff wall tip on the seepage controlling

1.2 渗流计算参数及边界条件

参照实际土石坝工程中各材料的渗流计算参数取值,拟定渗流计算参数如下:堆石体、覆盖层地基、心墙和混凝土防渗墙的渗透系数分别为 1.0×10^{-4} m/s、 1.0×10^{-5} m/s、 1.0×10^{-8} m/s 和 1.0×10^{-10} m/s。渗流计算边界条件如下:上游库水位 9.5 m,即上游库水位以下的坝体上游坝坡坡面及库底边界为上游已知水头边界,总水头为 9.5 m;下游水位 0.5 m,即下游水位以下的下游坝坡坡面及下游地表为下游已知水头边界,总

水头为 0.5 m;下游水位以上的下游坝坡坡面为可能出溢边界;模型上下游侧竖向切取边界和坝基底面均为不透水边界。本次采用 Abaqus^[15] 进行渗流计算。

1.3 渗流计算分析组合

为了对比防渗墙端部的不同结构形式对防渗墙端部和下游坝脚出溢处渗透坡降的影响,开展了三方面的渗流分析:(a) 常规形式防渗墙的贯入深度(H)对防渗效果的影响;(b) 不同半径($R=1.5\text{ m}$ 和 2.5 m)的扩底形式防渗墙的贯入深度对防渗效果的影响;(c) 防渗墙贯入深度一定时,扩底形式防渗墙的不同扩底半径对防渗效果的影响。

2 结果分析

2.1 防渗墙端部结构形式对端部附近最大和平均渗透坡降的影响

图 3 为不同防渗墙端部结构形式下的渗流场等势线。从图 3 可以看出,对于常规形式而言,防渗墙端部等势线最为密集,表明该处渗透坡降最大。与常规形式相比,扩底形式在下游坝脚处的等势线较为稀疏,扩底结构形式的等势线最为密集的区域集中在端部的扩底区域。扩底形式端部的渗径相比于常规形式显著增大,因此对于扩底形式而言,防渗墙端部的最大渗透坡降显著降低。

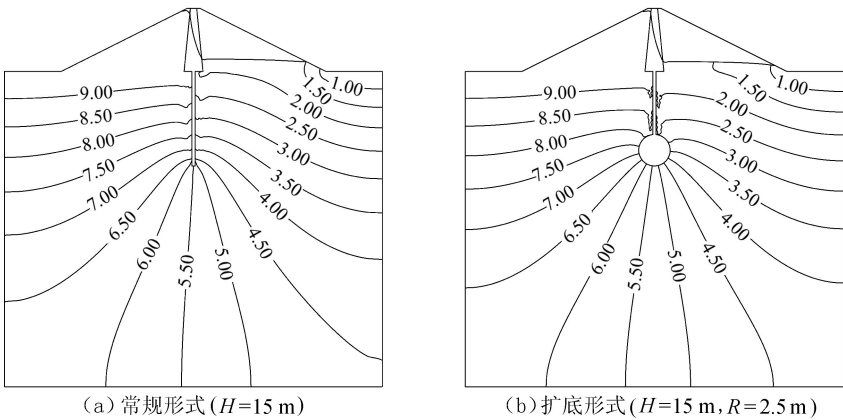


图 3 防渗墙端部不同结构形式下的渗流场等势线(单位:m)

Fig.3 Equipotential lines under different structural types at the bottom of cutoff wall(units:m)

图 4 为不同防渗墙端部结构形式下的渗透坡降等值线。从图 4(a) 中可以看出,常规形式下防渗墙端部附近区域渗透坡降等值线最为密集,端部渗透坡降最大,达到 1.18。该区域以外,渗透坡降明显降低。对于扩底形式而言,防渗墙端部的扩底区域等值线最为密集,端部的渗透坡降最大,达到 0.52(图 4(b)),该区域以外,与常规形式分布规律基本一致。

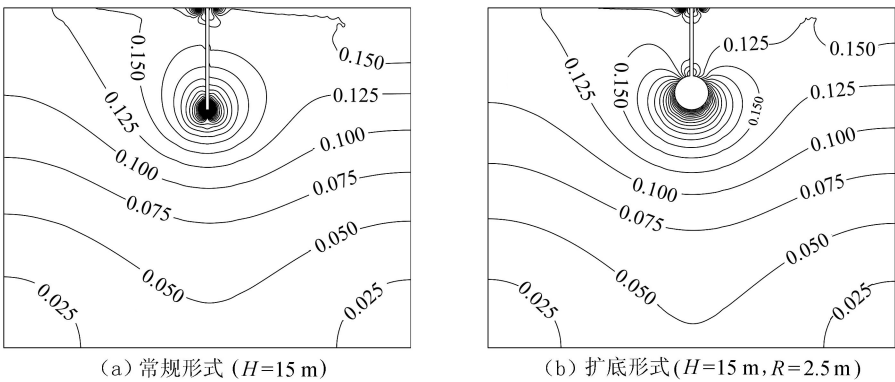


图 4 防渗墙端部不同结构形式下的渗透坡降等值线

Fig.4 Hydraulic gradient contours under different structural types at the bottom of cutoff wall

相同贯入深度($H=15\text{ m}$)条件下,常规形式和不同半径($R=1.5\text{ m}$ 和 $R=2.5\text{ m}$)的扩底形式的防渗墙端部附近最大渗透坡降的计算结果如下:常规形式时,最大渗透坡降达到 1.18,而扩底形式时, $R=1.5\text{ m}$ 和 $R=2.5\text{ m}$ 情况下的最大坡降分别为 0.68 和 0.52。由上述结果可以得出,防渗墙端部的结构形式对防渗墙端部

附近的最大渗透坡降的影响十分显著,扩底形式远小于常规形式的渗透坡降。同时,扩底形式的半径也对最大坡降有一定影响。

为了分析防渗墙端部结构形式对端部附近区域平均坡降的影响规律,统计了上述 3 种情况下防渗墙端部附近 6 m×6 m 和 10 m×10 m 正方形区域内的平均坡降。结果表明,常规形式 ($H=15\text{ m}$) 和扩底形式 ($H=15\text{ m}$, $R=1.5\text{ m}$; $H=15\text{ m}$, $R=2.5\text{ m}$) 6 m×6 m 和 10 m×10 m 正方形范围内的平均坡降均分别为 0.22 和 0.17。因此,防渗墙端部结构形式不会对防渗墙端部附近的平均坡降造成较大影响。

综上,防渗墙端部结构形式仅对端部附近区域的最大坡降产生显著影响,但对该区域的平均坡降影响较小,其原因为:在防渗墙贯入深度一定的情况下,2 种结构形式下,防渗墙端部 A、B 两点间水头差几乎相等,而扩底形式端部的渗径长度比常规端部渗径大,如图 5 所示,因此,扩底形式端部比常规端部的渗透坡降小。

2.2 防渗墙端部不同结构形式下防渗墙贯入深度与端部最大坡降的关系

图 6 为端部不同结构形式防渗墙贯入深度与防渗墙端部最大渗透坡降 J_1 的关系。从图 6 可以看出,无论何种结构形式,35 m 均为防渗墙的最优贯入深度,此时端部最大渗透坡降最小。该结论与文献[16]的结论一致,即贯入比(防渗墙贯入深度与覆盖层厚度之比)在 0.7 左右为防渗最优取值;同时可以看到在常规形式下,最优防渗墙深度为 35 m 时,端部最大渗透坡降为 0.85,而扩底形式 ($R=1.5\text{ m}$) 下,防渗墙的贯入深度仅需约 7.5 m 即可达到相同的防渗效果。

图 7 给出了在防渗墙贯入深度 10 m 时,常规形式与扩底形式在不同扩底半径下的端部最大渗透坡降。从图 7 可以看出,当扩底形式的防渗墙扩底半径大于常规形式的防渗墙宽度时,扩底形式会显著减小端部最大渗透坡降。同时可以看到,随着扩底半径增大,防渗墙端部的最大渗透坡降逐渐减小。

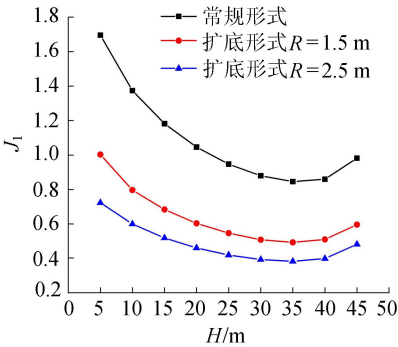


图 6 防渗墙贯入深度与端部最大坡降关系
Fig. 6 Relationships between the penetration depth of cutoff wall and the maximum hydraulic gradient at the bottom

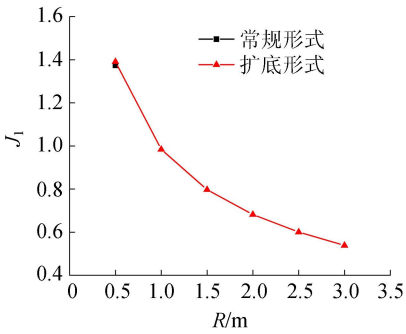


图 7 扩底形式半径与端部最大坡降关系
Fig. 7 Relationships between the radius of expanded base and the maximum hydraulic gradient at the bottom of cutoff wall

图 8 为端部不同结构形式,防渗墙贯入深度与下游坝脚处最大渗透坡降 J_2 的关系。由图 8 可知,常规形式下,最优防渗墙深度为 35 m 时,下游坝脚处最大渗透坡降为 0.27,而扩底形式 ($R=1.5\text{ m}$) 下,防渗墙的贯入深度仅需约 23 m 即可达到相同的防渗效果,保证下游坝脚处溢处渗透稳定。

图 9 给出了在防渗墙贯入深度 10 m 时,常规形式与扩底形式在不同扩底半径下的下游坝脚处最大渗透坡降。从图 9 可以看出,当扩底形式的防渗墙扩底半径等于常规形式的防渗墙宽度时,扩底形式仍会大幅减小下游坝脚处最大渗透坡降。同时可以看到,随着扩底半径增大,下游坝脚处的最大渗透坡降逐渐减小。

综上,对于扩底形式的防渗墙而言,其在较小贯入深度的条件下,就可以达到与常规形式防渗墙较大贯入深度条件下的防渗效果。由此可见,扩底结构形式显著优于常规形式,它能够大幅降低防渗墙建设的工程量和工程造价,显著缩短防渗墙施工工期。

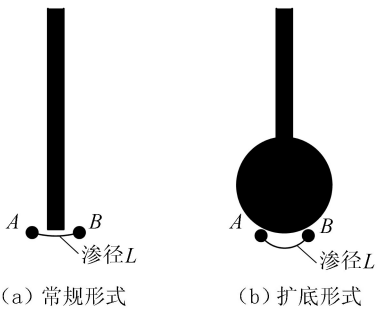


图 5 模型原理解释
Fig. 5 Interpretation diagram of the model principle

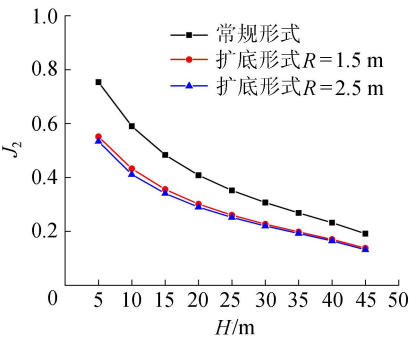


图8 防渗墙贯入深度与下游坝脚处最大坡降关系
Fig.8 Relationships between the penetration depth of cutoff wall and the maximum hydraulic gradient at the downstream side

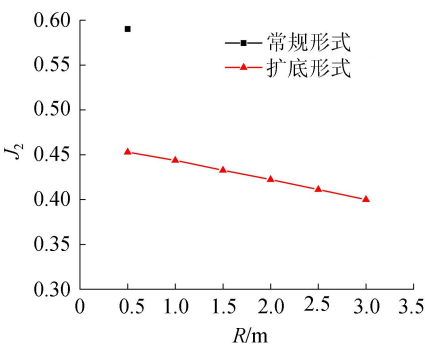


图9 扩底形式半径与下游坝脚处最大坡降关系
Fig.9 Relationships between the radius of expanded base and the maximum hydraulic gradient at the downstream side

3 结 语

为防止深厚覆盖层地基中防渗墙端部的渗透坡降过大,引起防渗墙端部附近局部土体的渗透破坏。提出改变防渗墙端部局部的结构形式,将常规长方体结构形式改为扩底结构形式,对比分析了2种不同的防渗墙端部结构形式对防渗墙防渗效果的影响,研究表明:(a)与常规形式相比,相同贯入深度时,扩底形式能够显著降低防渗墙端部的最大坡降;(b)相同贯入深度时,扩底结构的半径越大,防渗墙端部的最大坡降越小;(c)较浅贯入深度条件下的扩底形式防渗墙能够达到与常规形式防渗墙较深贯入深度条件下相同的防渗效果,对于本文的概化模型,常规形式防渗墙贯入深度为35 m时,端部最大坡降为0.85,下游坝脚处最大坡降为0.27,要达到相同防渗效果,半径1.5 m的扩底形式的防渗墙的贯入深度仅需23 m。由此可见,扩底结构形式显著优于常规形式。

本文仅从渗流数值分析的角度对扩底形式防渗墙的优越性进行了研究,未来还应该开展一些实验工作,全面深入地分析不同结构形式的防渗墙端部附近的渗透坡降的分布规律,以验证数值分析的结果。此外,本文也未详细讨论新型扩底防渗墙的施工可行性等问题,但是鉴于目前桩基扩底造孔施工工艺已比较成熟^[17],这可以为未来扩底型防渗墙施工工艺的研究提供一定的借鉴。

参考文献:

[1] 陈海军,任光明,聂德新,等.河谷深厚覆盖层工程地质特性与其评价方法[J].地质灾害与环境保护,1996,7(4):53-59. (CHEN Haijun, REN Guangming, NIE Dexin, et al. Study on engineering geologic characteristic of the deep alluvium in valleys and its evaluation methods[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1996,7(4):53-59 (in Chinese))

[2] 谢定松,蔡红,魏迎奇,等.覆盖层不良级配砂砾石料渗透稳定特性及影响因素探讨[J].水利学报,2014,45(增刊2):77-82. (XIE Dingsong, CAI Hong, WEI Yingqi, et al. Discussion of seepage stability characteristic of bad graded sand and gravel overlay[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(Sup2): 77-82. (in Chinese))

[3] 罗玉龙,速宝玉,盛金昌,等.对管涌机理的新认识[J].岩土工程学报,2011,33(12):1895-1902. (LUO Yulong, SU Baoyu, SHENG Jinchang, et al. New understanding on piping mechanism[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(12): 1895-1902. (in Chinese))

[4] 党林才,方光达.深厚覆盖层上建坝的主要技术问题[J].水力发电,2011,37(2):24-28. (DANG Lincui, FANG Guangda. Major technical problems of constructing dam on deep overburden[J]. Water Power, 2011, 37(2): 24-28. (in Chinese))

[5] 詹美礼,闫萍,尹江珊,等.不同轴压下悬挂式防渗墙堤基渗透坡降试验[J].水利水电科技进展,2016,36(3):36-40. (ZHAN Meili, YAN Ping, YIN Jiangshan, et al. Experimental study on seepage gradient of embankment foundations with suspended cut-off walls under different axial pressures[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016,36(3):36-40. (in Chinese))

[6] 蔡元奇,朱以文,唐红,等.在深厚覆盖层坝基上建堆石坝的防渗研究[J].武汉大学学报(工学版),2005,38(1):18-

22. (CAI Yuanqi, ZHU Yiwen, TANG Hong, et al. Research on anti-seepage for rockfill dam on deep overburden[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2005, 38(1): 18-22. (in Chinese))

[7] RICE J D, DUNCAN J M. Findings of case histories on the long-term performance of seepage barriers in dams[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(1): 2-15.

[8] LUO Yulong, NIE Min, XIAO Ming. Flume-scale experiments on suffusion at the bottom of cutoff wall in sandy gravel alluvium [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, 54(12): 1716-1727.

[9] LUO Yulong, WU Qiang, ZHAN Meili, et al. Hydro-mechanical coupling experiments on suffusion in sandy gravel foundations containing a partially penetrating cut-off wall[J]. Natural Hazards, 2013, 67(2): 659-674.

[10] WANG Shuang, CHEN Jinchang, LUO Yulong, et al. Experiments on internal erosion in sandy gravel foundations containing a suspended cutoff wall under complex stress states[J]. Natural Hazards, 2014, 74(2): 1163-1178.

[11] 沈振中,张鑫,陆希,等. 西藏老虎嘴水电站左岸渗流控制优化[J]. 水利学报, 2006,37(10): 1230-1234. (SHEN Zhenzhong, ZHANG Xin, LU Xi, et al. Seepage control optimization of left bank of Laohuzui hydropower station[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(10): 1230-1234. (in Chinese))

[12] 王学武,党发宁,蒋力,等. 深厚复杂覆盖层上高土石围堰三维渗透稳定性分析[J]. 水利学报, 2010, 41(9): 1074-1078. (WANG Xuewu, DANG Faning, JIANG Li, et al. Three-dimensional seepage stability analysis of high earth-rock cofferdam built on complex layer of deep coverage[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(9): 1074-1078. (in Chinese))

[13] 吴梦喜,杨连枝,王锋. 强弱透水相间深厚覆盖层坝基的渗流分析[J]. 水利学报, 2013, 44(12): 1439-1447. (WU Mengxi, YANG Lianzhi, WANG Feng. Seepage analysis of a dam foundation with deep deposit composed of strong and weak permeable layers alternately[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(12): 1439-1447. (in Chinese))

[14] WANG Ping, SCHERLER Dirk, LIU-ZENG Jing, et al. Tectonic control of Yarlung Tsangpo Gorge revealed by a buried canyon in Southern Tibet[J]. Science, 2014, 346(6212): 978-981.

[15] Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc.. ABAQUS theory manual and analysis user's manual[R]. Pawtucket, USA: Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc. ,2002.

[16] 谢兴华,王国庆. 深厚覆盖层坝基防渗墙深度研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2708-2712. (XIE Xinghua, WANG Guoqing. A study of anti-seepage wall depth in thick overburden dam base[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(9): 2708-2712. (in Chinese))

[17] 中国水电顾问集团西北勘测设计研究院. 水电水利岩土工程施工及岩体测试造孔规程:DL/T 5125—2009[S]. 北京:中国电力出版社, 2009.

(收稿日期:2017-07-10 编辑:刘晓艳)



· 简讯 ·

河海大学 5 名教授入选第 3 批国家“万人计划”

中共中央组织部办公厅公布的第 3 批国家“万人计划”入选人员名单中,我校王沛芳教授、杨涛教授、李轶教授、郑金海教授入选科技创新领军人才,敖燕辉教授入选青年拔尖人才。获批数量较前 2 批又有提高。

“万人计划”,即国家高层次人才特殊支持计划,是与引进海外高层次人才的“千人计划”并行、国家层面实施的重大人才工程,定位于国内高层次人才的培养支持。该计划由中组部牵头实施,分为杰出人才、领军人才和青年拔尖人才 3 个培养层次。其中,领军人才计划又分为科技创新领军人才、科技创业领军人才、哲学社会科学领军人才、教学名师四大类。

学校牢固树立人才优先发展理念,构建完善人事人才工作协同机制,扎实推进高层次人才队伍建设,取得明显成效,截至目前河海大学已有 9 人入选国家“万人计划”。

(本刊编辑部供稿)