

横风作用下坝体与心墙填筑高差的防风结构研究

郭立博,何建新,杨海华

(新疆农业大学水利与土木工程学院,新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要:为降低碾压式沥青混凝土心墙在强风下填筑时心墙施工区风速,使风力等级达到规范要求,提出了利用坝体与心墙填筑高差形成防风结构的方法对心墙处近地面风速进行消减,并通过现场试验和数值模拟的方法对横风下不同设计形式的防风结构风力消减效果进行了评估。结果表明:增加防风结构高差和减小设置距离有利于心墙处近地面风速的消减;8级风(风速20.7 m/s)条件下,防风结构设置距离为9.08 m时,高差为10 m和12 m的心墙处近地面风力可消减至4级风(风速5.5 m/s)以下;设置距离和达到防风要求的最小高差呈线性关系;风速和达到防风要求的最小高差符合二次多项式关系。

关键词:防风结构;填筑高差;设置距离;横风作用;数值模拟;碾压式沥青混凝土心墙

中图分类号:TV314 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2020)05-0089-06

Study on wind-proof structure with filling height difference between dam body and core wall under crosswind//
GUO Libo, HE Jianxin, YANG Haihua (College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: In order to reduce the wind speed to satisfy code requirement for the core wall construction area under strong wind, the method of wind-proof structure formed by height difference between dam body and core wall was proposed to reduce the wind velocity near the surface of the core wall. The effects of wind-proof structure with different arrangements were studied by field test and numerical simulation. The results show that increasing the height difference of the wind-proof structure and decreasing the setting distance are propitious to reduce the wind speed near the core wall. When the distance of wind-proof structure is set to be 9.08 m and the height difference is between 10 m and 12 m, the wind level 8 (wind speed 20.7 m/s) can be reduced to less than level 4 (wind speed 5.5 m/s) near the core wall ground. There is a linear relationship between the distance of the wind-proof structure and the minimum height difference to meet the wind-proof requirement. The fitting between the wind speed and the minimum height difference to meet the wind-proof requirement has a quadratic polynomial relationship.

Key words: wind-proof structure; filling height difference; setting distance; crosswind action; numerical simulation; roller compacted asphalt concrete core wall

碾压式沥青混凝土心墙施工要求日降雨量或降雪量宜小于5 mm、施工时风力宜小于4级、大气环境温度宜不低于0℃^[1]。位于新疆“百里风区”^[2]的大河沿水库工程,年平均8级以上大风108 d,给施工带来较大困难,质量难以控制。沥青混凝土碾压过程中,在大风作用下表面温度损失较快^[3],易出现心墙表层温度降至130℃以下未能及时碾压和终碾后表层温度低于110℃的现象,影响心墙层间结合的质量^[4]。因此,为保证沥青混凝土心墙的防渗性能,应采取必要的防风措施,以降低风速。近年,防风技术

的研究主要针对铁路、高速公路等路基防风工程,例如:程建军等^[5-6]对风害防治工程措施及功效进行了研究;刘凤华等^[7-8]通过数值模拟对不同形式挡风墙的防风功效进行了探讨;杨斌等^[9-11]对挡风墙距道路的合理位置和挡风墙的合理高度进行了研究,并取得了较好的成果。以上研究为防风工程的设计提供了参考^[12-13],但对于防风问题的解决方案均是在保护工程之外另行修建防风建筑物,从而使施工成本额外增加。针对强风区碾压式沥青混凝土心墙坝施工过程中填筑防风要求,本文提出利用坝体自身填筑高差形

成防风结构的方法使心墙施工区风力达到施工规范要求,并对防风结构不同设计形式以及不同风速下的防风效果进行评价,提出合理的设计方案,以期为强风区心墙沥青混凝土快速施工提供参考。

1 工程概况

大河沿流域位于吐鲁番市北部,北部与吉木萨尔县,西部与乌鲁木齐县接壤,河流发源于天山北坡,呈北南走向,流域地理位置为 88°50'E ~ 89°10'E, 44°40'N ~ 43°40'N。平原区全年盛行西北风,风向季节变化不大,春秋多大风,夏季多干风,以 3 ~ 6 月最盛行。年平均 8 级以上大风日数为 108 d,最多达 135 d,最大风速为 25 m/s,出现在 1983 年 4 月 27 日,主导风向为 E、N,主导风向频率为 7%;次多风向为 SE、W、ENE。风灾是该区域内的主要灾害之一。气象要素见表 1。

表 1 吐鲁番气象站风速统计

月份	平均风速/ (m·s ⁻¹)	最大风速/ (m·s ⁻¹)	月份	平均风速/ (m·s ⁻¹)	最大风速/ (m·s ⁻¹)
1	0.5	5.0	7	1.3	17.0
2	0.6	9.9	8	1.2	16.0
3	1.1	12.0	9	0.9	15.3
4	1.3	25.0	10	0.6	9.0
5	1.4	14.0	11	0.4	15.0
6	1.4	19.0	12	0.4	6.1

大河沿工程在大风环境下施工时,通常现场对沥青混合料各施工环节采用如下保温和温度控制措施:沥青混合料采用带电加热板的保温罐储存,采用车斗四周及底板带保温板的自卸式运输车,各保温机械料斗上架设保温篷布;心墙摊铺后覆盖防风帆布,压实后上层再加棉被保温;各施工环节温度均采用施工规范规定的上限值或适当提高最低下限值,特别针对初碾温度和终碾温度,采用初碾温度不宜低于 140℃,终碾温度不宜低于 120℃。尽管采用了

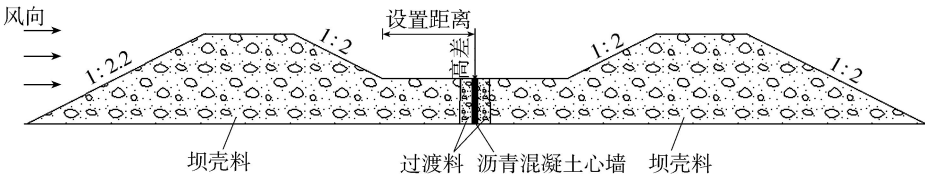


图 1 坝体防风结构填筑简图

表 3 不同防风结构的测点风速

防风结构 1			防风结构 2			防风结构 3		
观测时间	气象站风速	心墙风速	观测时间	气象站风速	心墙风速	观测时间	气象站风速	心墙风速
2018-03-27T11:20	18.6	13.5	2018-03-28T13:10	17.4	9.3	2018-03-31T17:40	19.3	8.2
2018-03-27T16:00	15.6	11.5	2018-03-28T17:10	15.0	8.6	2018-03-31T20:10	15.9	6.8
2018-03-27T22:00	12.2	8.8	2018-03-28T20:50	11.4	6.5	2018-03-31T13:00	12.8	5.4
2018-03-27T07:20	9.4	6.1	2018-03-28T15:40	9.2	5.4	2018-03-31T10:30	10.0	4.2
2018-03-27T14:50	6.8	5.1	2018-03-28T11:00	7.0	3.7	2018-03-31T04:20	7.3	2.9
2018-03-27T00:30	4.9	3.1	2018-03-28T06:20	4.7	2.7	2018-03-31T23:40	4.8	2.1

上述措施,大风环境下沥青混合料运输和摊铺过程中温度散失过快、入仓后沥青混合料排气时间较短、碾压后沥青混合料表面容易形成硬壳层等原因还是会给施工带来困难,不仅增加了能耗,还影响施工质量。

2 坝体防风结构

沥青混凝土心墙坝施工时利用坝体自身填筑,将上、下游坝壳料超前于心墙与过渡料的铺筑,使坝壳料填筑高度高于过渡料和心墙的填筑高度,从而在心墙施工断面形成凹槽。坝体与心墙填筑高差产生后,相当于在心墙迎风侧设置类似风场障碍物的土堤式挡风墙(即防风结构),可有效消减凹槽内心墙施工区风速。坝体两侧防风结构对称布置,坝体防风结构填筑简图如图 1 所示。坝体防风结构防风效果主要受高差和设置距离的影响,其中高差为坝壳料与心墙填筑面的垂直高度,设置距离为防风结构背风侧坡脚距沥青混凝土心墙中心的距离。

3 现场试验

大河沿水库枢纽工程于 2018 年 3 月末进行了 3 种坝体防风结构的现场防风试验,防风结构填筑参数见表 2。现场试验中,在迎风侧坝壳料顶面距坝壳料坝肩 18.82 m 处装配自动气象站,同时在心墙上游距心墙中心 2.36 m 位置布置风速仪,对两处测点进行实时风速观测。

表 2 不同防风结构的填筑参数

防风结构	高差/m	设置距离/m	心墙填筑高度/m
结构 1	4.40	13.80	10.80
结构 2	4.40	9.08	10.80
结构 3	7.00	9.08	10.80

现场共进行了 3 种防风结构累计 3 d 不同时刻的风速观测,结果见表 3。从表 3 可以看出,3 种防

风结构的平均风速比(心墙风速/气象站风速)分别为70.3%、56.1%、42.2%,说明防风结构能有效地降低心墙施工区的风速。3种防风结构的减风效果为结构3优于结构2,结构2优于结构1。说明相同设置距离条件下,高差越大,防风结构的防风减风效果越好;对于相同的高差,设置距离越小,防风结构的防风效果越好。

4 数值计算模型

4.1 数值计算方法

沥青混凝土心墙是沿坝轴线方向分层铺筑碾压的防渗体^[14],当计算顺河道流动的横风作用下防风结构的防风效果时,可将其简化为二维问题处理。因横风风速小于70 m/s,马赫数小于0.3,可按不可压缩流体处理^[15]。选用商用CFD软件FLUENT提供的工程上应用广泛的标准 $k-\varepsilon$ 模型进行计算,计算中不考虑热量交换。控制方程^[16]包括:连续性方程、动量方程、湍流模型中的湍流动能方程和湍流能耗散率方程。计算方法为有限体积法,采用SIMPLE算法对压力和速度耦合进行处理,一阶迎风格式离散对流项。

4.2 计算域、边界条件及网格划分

建立大河沿水库工程坝体数值计算模型如图2所示。计算区域的高度、长度分别为300 m、1 840 m,其中,坝基宽340 m、来流长度450 m、尾流长度1 050 m。坐标原点设在坝趾处(如图2所示),上游坝坡坡比为1:2.2,其余边坡坡比均为1:2,心墙中心坐标为(184,10.8)。

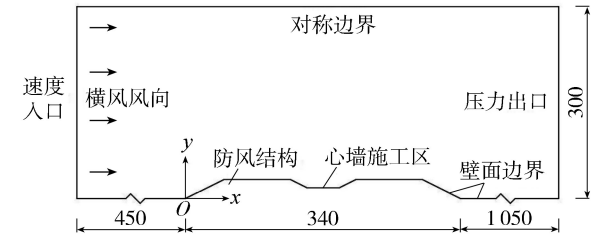


图2 数值计算模型简图(单位:m)

边界条件:入口设置为速度进口,在 x 方向采用均匀来流,防风结构不同设计形式时取风速 $v_x=20.7\text{ m/s}$ (8级风力风速上限)^[17],不同风级时 v_x 取对应风级最大风速, y 方向速度为零;出口设定为压力出口,静压为零;坝体表面及地面均采用无滑移边界条件;顶部设为对称边界,模拟顶部气体自然流动状态。

采用四边形结构化网格对计算模型进行网格划分。为提高数值计算精度,对防风结构和心墙施工区附近采用小尺寸网格进行划分,其余区域网格由心墙向两侧方向按比例稀疏,心墙施工区网格如

图3所示。以心墙中心1 m高处测点风速变化范围在3%以内为依据,进行网格无关性检验,结果满足要求,最终各试验模型网格数均在110万左右。

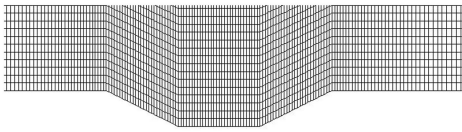


图3 心墙附近网格

4.3 模型验证

对现场试验3种防风结构进行数值计算,当气象站风速的计算值与实测值完全吻合时,将心墙风速的计算值与现场实测值进行对比,结果见图4。

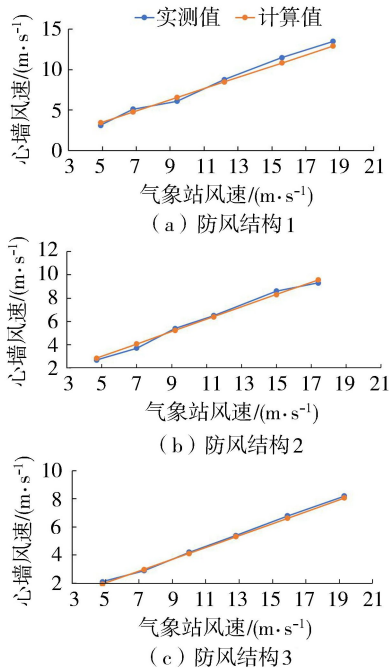


图4 不同防风结构心墙风速实测值与计算值对比

由图4可见,3种防风结构心墙风速的实测值和计算值最大相对误差分别为9.8%、7.5%和9.4%,均小于10%,在容许范围内,表明数值模型准确可靠,可进一步模拟防风结构不同设计形式下的防风效果。

4.4 模拟方案

进行防风结构形式设计时,考虑施工所需的最小设置距离和最大高差限制因素:防风结构设置距离不宜太小,需满足施工区机械交叉作业对运行空间的要求;防风结构高差不宜过大,较大时不利于心墙和过渡料的物料运输,需增设坡度较缓的下坡临时道路。结合大河沿工程现场试验坝体填筑参数,设计不同形式防风结构的数值计算方案如下:固定防风结构高差为4.4 m,设置距离分别为5.0 m、7.5 m、10.0 m、12.5 m、15.0 m;固定防风结构设置距离为9.08 m,高差分别为4 m、6 m、8 m、10 m、12 m。

模拟不同风速情况下的防风效果时,取风力 4 ~ 10 级,入口风速按各风级最大风速^[17]进行计算。

5 数值模拟结果与分析

5.1 防风结构对心墙施工区防风效果的影响

通过对数值计算结果进行可视化处理,得到防风结构不同设计形式下心墙施工区的风速云图如图 5 和图 6 所示。

由图 5 和图 6 可知,当入口风速一定时,随着设置距离和高差的增大,防风结构背风侧风速衰减区域面积增大。但对本次研究关注的心墙施工区,防风结构设置距离和高差对其风场的影响不同。由图 5 可知,随着设置距离逐渐增大,风速云图中蓝色转淡,各风速等值线逐渐接近心墙施工区地表,表明设置距离越大,心墙施工区防风效果越差。由图 6 可知,随着高差逐渐增大,风速云图中蓝色加深,各风速等值线逐渐向上移,表明高差越高,心墙施工区

防风效果越好。

结合现场摊铺机出料口位置高度,认为沥青混合料受风力影响最大高度不超过 1 m,则以心墙施工面 1 m 高作为心墙施工区近地面。由数值计算数据得心墙施工区近地面风速分布情况如图 7 和图 8 所示。

由图 7 可知,高差为 4.4 m 时,设置距离为 5.0 m、7.5 m、10.0 m、12.5 m、15.0 m 的心墙处近地面风速分别为 8.5 m/s、10.0 m/s、11.6 m/s、13.4 m/s、15.5 m/s。可以看出,以上防风结构设计形式下心墙处近地面风力均超过施工规范建议值(风力 4 级,最小风速为 5.5 m/s)。设置距离为 5 m 时心墙处近地面防风效果为 58.9%,随着设置距离的增大,防风效果逐渐降低,设置距离为 7.5 m、10.0 m、12.5 m、15.0 m 时,防风效果分别降为 51.7%、44.0%、35.3%、25.1%。出现这种现象是由于气流绕过防风结构后过流断面增大,气流开始扩散。随设置距离增大,扩散沿流向发展越充分,对垂直方向

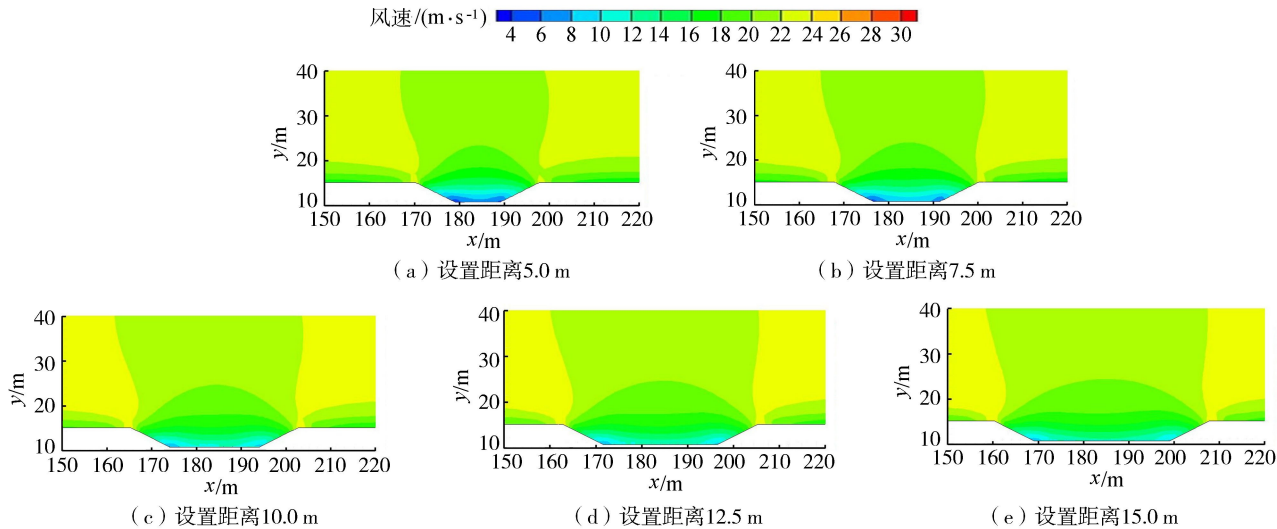


图 5 高差 4.4 m 时不同设置距离的心墙施工区风速云图

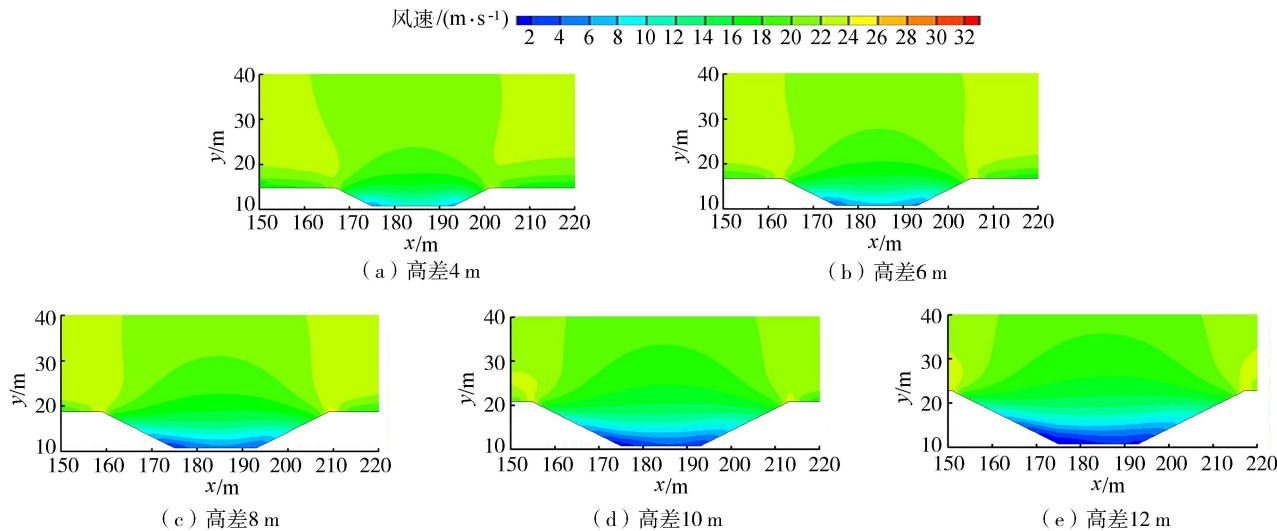


图 6 设置距离 9.08 m 时不同高差的心墙施工区风速云图

■ 设置距离5.0 m ◆ 设置距离7.5 m ▲ 设置距离10.0 m
— 设置距离12.5 m ● 设置距离15.0 m

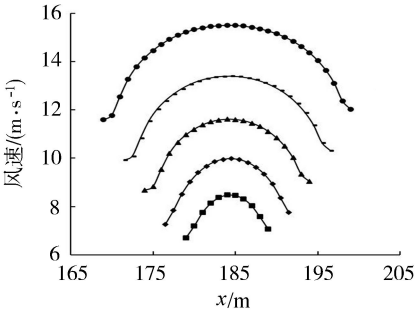


图7 高差4.4 m时不同设置距离下
心墙施工区近地面风速分布

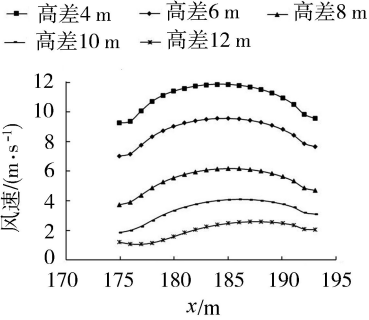


图8 设置距离9.08 m时不同高差下
心墙施工区近地面风速分布

的风速梯度分布影响越平缓,防风效果越差。

由图8可知,设置距离为9.08 m时,高差为4 m、6 m、8 m、10 m、12 m的心墙处近地面风速分别为11.9 m/s、9.6 m/s、6.2 m/s、4.0 m/s和2.4 m/s。其中高差为4 m、6 m、8 m的心墙处近地面风速大于5.4 m/s,超出施工规范建议值;而高差为10 m和12 m时心墙处近地面风速都在5.4 m/s以下,满足施工防风要求。高差为4 m时心墙处近地面防风效果为42.6%,随着高差的增大,防风效果越好,高差为6 m、8 m、10 m、12 m的防风效果分别增至53.7%、70.2%、80.7%和88.5%。这是因为空气经过大坝绕流时,大坝边坡具有导流作用。防风结构高差越大,大坝迎风面边坡越长,导流作用越强,产生的防风效果越好。

5.2 设置距离与达到防风要求的最小高差的关系

取风速为20.7 m/s,计算得到防风结构设置距离为5.0 m、7.5 m、10.0 m、12.5 m、15.0 m时,心墙施工区达到防风要求的最小高差分别为6.2 m、7.9 m、9.4 m、11.1 m、12.4 m。对设置距离与达到防风要求的最小高差之间的关系进行拟合,得到拟合曲线及相应的函数关系如图9所示。从图9可以看出,两者之间呈线性关系,拟合方程为 $y=0.624x+3.16$ 。由此拟合函数可插值取得设置距离在5~15 m范围达到防风要求的最小高差。考虑心墙施工区机械交叉作业对运行空间的需要,建议施工时将防风结构

设置距离控制在10 m,此时高差控制在9.4 m,即可满足8级风力下最大风速的防风需要。

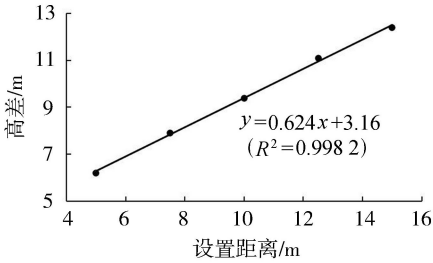


图9 设置距离与达到防风要求的最小高差的关系

5.3 风速与达到防风要求的最小高差的关系

取防风结构设置距离为10 m,对风力4~10级各风级最大风速情况进行计算,得到入口风速分别为7.9 m/s、10.7 m/s、13.8 m/s、17.1 m/s、20.7 m/s、24.4 m/s、28.4 m/s时心墙施工区达到防风要求的最小高差,结果见图10。对风速与达到防风要求的最小高差之间的关系进行拟合,得到拟合曲线及相应的函数关系如图10所示。由图10可知,两者之间符合二次多项式关系,拟合方程为 $y=-0.0162x^2+1.0449x-5.0911$ 。由此函数可得7.9~28.4 m/s风速范围内达到防风要求的最小高差在1.9~11.7 m之内。

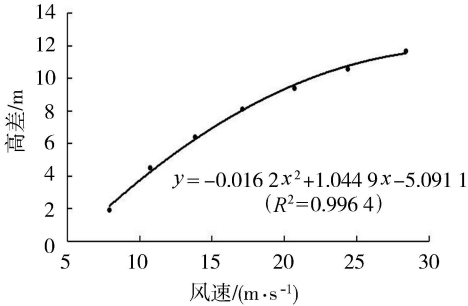


图10 风速与达到防风要求的最小高差的关系

6 结 论

a. 现场试验结果表明,坝体与心墙填筑高差的施工技术具有一定的防风效果。高差越大,防风效果越好;设置距离越小,防风效果越好。

b. 数值模拟结果显示,防风结构高差的增大和设置距离的减小有利于心墙施工区近地面风速的消减;来流8级风(风速20.7 m/s)情况下,防风结构设置距离为9.08 m,高差分别为4 m、6 m、8 m、10 m、12 m时,心墙处近地面风速分别消减至11.9 m/s、9.6 m/s、6.2 m/s、4.0 m/s和2.4 m/s;防风结构高差为4.4 m,设置距离分别为5 m、7.5 m、10 m、12.5 m、15 m时,心墙处近地面风速分别消减至8.5 m/s、10.0 m/s、11.6 m/s、13.4 m/s、15.5 m/s。

c. 8级风(风速20.7 m/s)情况下,防风结构设置距离和达到防风要求的最小高差之间呈线性关

系,两者拟合方程为 $y=0.624x+3.16$,最小高差随设置距离的增大而增大。若防风结构设置距离控制在 10 m,心墙处近地表风速满足施工要求所需高差至少为 9.4 m。

d. 防风结构设置距离为 10 m 时,风速和达到防风要求的最小高差之间的关系式为 $y=-0.0162x^2+1.0449x-5.0911$ 。由此可得风速 7.9~28.4 m/s 范围内达到施工规范防风要求的最小高差在 1.9~11.7 m 之内。

参考文献:

[1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 水工碾压式沥青混凝土施工规范:DL/T5363-2006 [S]. 北京:水利水电出版社,2013.

[2] 蒋富强,李莹,李凯崇,等. 兰新铁路百里风区风沙流结构特性研究[J]. 铁道学报,2010,32(3):105-110. (JIANG Fuqiang, LI Ying, LI Kaichong, et al. Study on structural characteristics of Gobi wind sand flow in 100 km wind area along Lan-Xin Railway [J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(3):105-110. (in Chinese))

[3] 向尚君,石林,廖佼. 高海拔地区碾压式沥青混凝土心墙施工技术:以旁多水利枢纽大坝为例[J]. 水利水电科技进展,2014,34(2):50-53. (XIANG Shangjun, SHI Lin, LIAO Jiao. Construction technology of roller-compacted asphalt concrete core walls in high-altitude areas; a case study of dams in Pangduo Hydraulic Project [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2014,34(2):50-53. (in Chinese))

[4] 李江,柳莹,何建新. 新疆碾压式沥青混凝土心墙坝筑坝技术进展[J]. 水利水电科技进展,2019,39(1):82-89. (LI Jiang, LIU Ying, HE Jianxin. Advances in construction technology of roller compacted asphalt concrete core wall dams in Xinjiang [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(1):82-89. (in Chinese))

[5] 程建军,蒋富强,杨印海,等. 戈壁铁路沿线风沙灾害特征与挡风沙措施及功效研究[J]. 中国铁道科学,2010,31(5):15-20. (CHENG Jianjun, JIANG Fuqiang, YANG Yin Hai, et al. Study on the hazard characteristics of the drifting sand along the railway in Gobi area and the efficacy of the control engineering measures [J]. Chinese Railway Science, 2010, 31(5):15-20. (in Chinese))

[6] 葛盛昌,蒋富强. 兰新铁路强风地区风沙成因及挡风墙防风效果分析[J]. 铁道工程学报,2009,26(5):1-4. (GE Shengchang, JIANG Fuqiang. Analyses of the causes for wind disaster in strong wind area along Lanzhou-Xinjiang Railway and the effect of windbreak [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009, 26(5):1-4. (in Chinese))

[7] 刘风华. 不同类型挡风墙对列车运行安全防护效果的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版),2006,37(1):176-182. (LIU Fenghua. Wind-proof effect of different

kinds of wind-break walls on the security of trains [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2006, 37(1):176-182. (in Chinese))

[8] 庞巧东,程建军,蒋富强,等. 戈壁铁路挡风墙背风侧流场特征与挡风功效研究[J]. 铁道标准设计,2011(2):1-5. (PANG Qiaodong, CHENG Jianjun, JIANG Fuqiang, et al. Study on the characteristics of the flow field on the leeward side of the wind-break wall of the Gobi Railway and the wind-break efficiency [J]. Railway Standard Design, 2011(2):1-5. (in Chinese))

[9] 杨斌,刘堂红,杨明智. 大风区铁路挡风墙合理设置[J]. 铁道科学与工程学报,2011,8(3):67-72. (YANG Bin, LIU Tanghong, YANG Mingzhi. Reasonable setting of wind-break wall on railway in strong wind areas [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2011, 8(3):67-72. (in Chinese))

[10] 刘风华. 加筋土式挡风墙优化研究[J]. 铁道工程学报,2006,23(1):96-99. (LIU Fenghua. Study on the optimization of wind-break wall of the reinforced concrete shaped type [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2006, 23(1):96-99. (in Chinese))

[11] 高广军,段丽丽. 单线路堤上挡风墙高度研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2011,42(1):254-259. (GAO Guangjun, DUAN Lili. Height of wind barrier on embankment of single railway line [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(1):254-259. (in Chinese))

[12] CHUANG Weichu, SPENCE S M J. Rapid uncertainty quantification for non-linear and stochastic wind excited structures: a metamodeling approach [J]. Meccanica, 2019,54(9):1327-1338.

[13] KÄLLSTRAND B, BERGSTRÖM H, HØJSTRUP J, et al. Mesoscale wind field modifications over the Baltic Sea [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2000, 95(2):161-168.

[14] 何建新,杨武,柴龙胜,等. 沥青心墙与混凝土基座连接材料研究[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(5):219-222. (HE Jianxin, YANG Wu, CHAI Longsheng, et al. Study on the connection material between asphalt core wall and concrete base [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28(5):219-222. (in Chinese))

[15] 吴建民. 高等空气动力学[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1992.

[16] 蔡钊,刘九夫,李薛刚,等. 风场对雨量计收集降水影响的流体动力学研究[J]. 水利水电科技进展,2019,39(6):17-23. (CAI Zhao, LIU Jiufu, LI Xuegang, et al. CFD simulation of wind field impact on gauge precipitation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(6):17-23. (in Chinese))

[17] 姜瑜君,桑建国,张伯寅. 高层建筑的风环境评估[J]. 北京大学学报(自然科学版),2006,42(1):68-73. (JIANG Yujun, SANG Jianguo, ZHANG Boyin. An evaluation on wind environment around skyscrapers [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2006, 42(1):68-73. (in Chinese))

(收稿日期:2019-10-31 编辑:雷燕)