

利用真空脱水工艺提高水工混凝土抗裂性

张燕迟, 欧阳幼玲

(南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 为探讨真空脱水工艺对水工混凝土抗裂性能的影响, 研究分析了混凝土经真空脱水工艺处理后的水胶比、孔结构、干缩变形和强度的变化, 以及高抗冲磨性能真空混凝土配合比特点对降低混凝土放热的作用, 说明了真空混凝土的脱水密实作用可明显增强水工混凝土抵抗表层变形开裂的能力. 工程实例表明真空脱水工艺对水工混凝土表面裂缝具有明显控制作用.

关 键 词: 水工混凝土; 真空脱水; 抗裂

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2012)03-0032-05

水工混凝土的裂缝现象十分普遍, 多年来在工程实践中都没有很好地得到控制. 从材料角度来看, 裂缝的发生大多为干缩和温度变化而引起, 通常又从表面开始^[1]. 大多面积大的水工混凝土, 施工期内很快就会产生裂缝, 并在较长时间内持续发生^[2].

20世纪80年代, 公路建设中大量采用的混凝土真空脱水工艺被移植应用于水工大坝溢流面混凝土施工, 结果表明真空脱水工艺对控制混凝土的表面裂缝具有很好的作用^[3], 时隔7年后对所应用工程进行调查时, 坝面仍未见明显的开裂现象.

目前, 对于水工混凝土建筑出现大量裂缝的现象采取了很多技术措施, 但实践结果却不尽如人意. 当年由于受工艺方面的限制, 混凝土真空脱水技术未能在水工建筑施工中得以推广, 但其对混凝土, 尤其是水工大仓面混凝土控制裂缝的特殊作用, 仍然值得重视. 本文介绍了中低标号混凝土在真空脱水处理后, 混凝土性能的变化对改善抗裂性的作用, 还介绍了水工高标号混凝土怎样利用真空脱水工艺的作用, 实现降低混凝土产生温度裂缝的可能性.

1 试验配合比和方法

选用试验材料如下: P. O42.5 的水泥; II 级粉煤灰作为掺合料; $M=2.8$ 的河砂; 直径 5~25 mm 的石灰石和聚羧酸系外加剂. 试验配合比为: 设计强度 C25 时, 水、胶凝材料、砂、石、减水剂的用量分别为 150, 300, 751, 1 184 和 0 kg/m³; 设计强度 C45 时, 水、胶凝材料、砂、石、减水剂的用量分别为 138, 493 (比表面积 280 m²/kg), 741 (饱和面干), 1 085 和 6.41 kg/m³; 设计强度 C40 时, 水、胶凝材料、砂、石、减水剂的用量分别为 138, 383 (比表面积 280 m²/kg), 876 (饱和面干), 1 047 和 4.98 kg/m³. 混凝土成型后, 将吸盘置于混凝土试件上表面进行真空脱水处理. 控制最大真空度 0.08 MPa, 脱水处理时间 20 min.

2 真空混凝土抗裂性能分析

2.1 混凝土干缩

混凝土的干缩主要源自于水泥石, 混凝土中水泥组分的含量直接影响干缩的大小, 因此, 不同的水胶比和不同集灰比的混凝土, 其干缩也相应不同.

收稿日期: 2011-10-14

基金项目: 十一五科技支撑计划项目(2008BAB29B04)

作者简介: 张燕迟(1956-), 男, 江苏南京人, 高级工程师, 主要从事混凝土性能研究. E-mail: yczhang@nhri.cn

研究^[4-5]表明,低水胶比高性能混凝土的变形主要由内部自干燥失水收缩所致,而普通混凝土的收缩变形主要是毛细水蒸发所产生,并与水胶比呈正比关系.水胶比降至0.40左右时,混凝土的干缩值见表1^[6].中低标号普通混凝土的真空脱水率一般可达20%,甚至更大,可计算出脱水前后混凝土水胶比变化约为0.10.试验设计水胶比为0.50,经脱水降至0.40,相应干缩值可由脱水前的 600×10^{-6} 降低为 400×10^{-6} .

表1 不同水胶比和集灰比下的混凝土干缩

Tab. 1 Drying shrinkage of concrete with different water-binder ratios and aggregate-binder ratios

集灰比	180 d 收缩值/(10 ⁻⁶)		集灰比	180 d 收缩值/(10 ⁻⁶)	
	水胶比0.40	水胶比0.50		水胶比0.40	水胶比0.50
1/3	800	1 200	1/5	400	600
1/4	550	850	1/6	300	400

混凝土中水泥含量越多,混凝土的渗透性越小,水泥吸附水越多,对于真空混凝土其脱水率就越低,因此,真空混凝土设计时,通常都在优化条件下,尽量采用相对普通混凝土较大的集灰比.由表1还可见,混凝土集灰比越大、水泥用量越低时,各种水灰比下的干缩值都明显降低.

2.2 混凝土的强度发展

混凝土脱水控制真空度达到0.08 MPa时,脱水模板内外的压差可产生约8 t/m²的荷载作用于新拌混凝土表面,将塑性拌合物挤压密实,其体积压缩量理论上为排出的水量和空气所占体积的和.但由于颗粒间摩擦阻力,不可能将脱水孔隙完全填充密实,一般真空负压作用下,塑性混凝土体积变形量可在1%~2%,脱水结束后采取二次振动处理,体积压缩量可增大至3%或更多.取样测试脱水后的即时强度以及抗拉强度发展(采用真空混凝土上层混凝土成型试件):普通混凝土20 min的抗压强度为0,而真空混凝土为0.3 MPa;普通混凝土3,7和28 d的抗拉强度分别为1.31,2.54和3.27 MPa,表层真空混凝土的分别为2.02,3.25和3.73 MPa.可见,脱水后混凝土在尚未凝结或初凝时已具有0.3 MPa的构造(抗压)强度,相对非真空混凝土的3,7和28 d各龄期抗拉强度分别提高了54%,28%和14%.

由此可见,经真空脱水处理后,由于水胶比的降低(但并不增加总胶凝材料量,这与具有相同水胶比的普通混凝土有很大不同)混凝土的干缩变形减小,同时各龄期的抗拉强度相对提高,有效地降低了混凝土的开裂风险.事实上,试验还未单独考虑真空混凝土表层的干缩变化情况,而干缩恰恰主要产生于表层.因此,真空混凝土降低干缩开裂风险的可能性还将会明显好于试验的结果.

2.3 混凝土温度变形

高强度的水工抗冲磨混凝土胶材用量大,水化热高,温度变形是这种混凝土开裂的重要原因.混凝土的胶材用量越大,真空脱水作用的效果相对越不明显,但借助真空脱水的作用,可以设计C40~C45的混凝土替代C70或更高强度的混凝土来满足抗冲磨的要求,这样由于相对明显减少具有同等级抗冲磨性能混凝土的胶材用量(C70,C45和C40混凝土的胶材用量分别为600,493和383 kg/m³)使得混凝土的绝热温升明显降低,进而降低了高抗冲磨混凝土的开裂风险.

根据文献[7]的研究,对于混凝土28 d实测抗压强度,C70的脱水前为77.5 MPa,C45的脱水前后分别为51.4和56.7 MPa,C40的脱水前后分别为46.3和51.7 MPa;对于混凝土72 h抗冲磨强度,C70的脱水前为27.05 h/(kg/m²),C45的脱水后为39.21 h/(kg/m²),C40的脱水后为26.23 h/(kg/m²).可见,所设计C40和C45真空混凝土的综合强度虽然相对较低,但磨耗层的抗磨强度C40混凝土可与C70相当,C45混凝土的抗磨强度达到C70的1.5倍.在此条件下,真空混凝土的胶材用量相对于C70混凝土可降低107~217 kg/m³.

根据测得的水化热及混凝土比热,可以估算出每方混凝土降低胶材用量107和217 kg/m³时的相应温升(见表2).可见,采用设计相对较低标号的真空混凝土取代高标号抗冲磨混凝土,早期至后期可以直接降低绝热温升6~15℃和12~31℃.

表 2 水泥、混凝土热学性能

Tab. 2 Thermal properties of cement and concrete

龄期/ d	水泥水化热/ (J·g ⁻¹)	相应降低绝热温升 T/ °C		龄期/ d	水泥水化热/ (J·g ⁻¹)	相应降低绝热温升 T/ °C	
		减少胶材用量	减少胶材用量			减少胶材用量	减少胶材用量
		107 kg/m ³	217 kg/m ³			107 kg/m ³	217 kg/m ³
1	132.31	5.9	12.0	14	317.88	14.2	28.9
3	214.34	9.6	19.5	28	347.16	15.6	31.6
7	278.73	12.5	25.3				

3 孔隙含水量和孔结构变化

混凝土的干缩变形理论有多种^[8-9],毛细管张力学说认为在环境湿度小于 100% 时,毛细管内部的水面下降形成弯液面,在水的表面张力作用下,便会在毛细管中产生附加压力: $\Delta P = 2\sigma \cos\theta/\gamma$ (其中, ΔP 为弯曲液体表面下的附加压力; σ 为毛细孔水表面张力; θ 为水与毛细孔壁的接触角; γ 为毛细孔半径)。

究其变形发生过程,发现毛细孔水的变化(趋于不饱和状态)引起弯液面变化,从而增大了附加压力 ΔP 。大量研究表明,施工期混凝土因失水产生的收缩主要可分为塑性收缩、干缩和自收缩^[1]。混凝土上表面失水收缩,下部膨胀,沿厚度方向非线性分布的不均匀变形,使上表面产生拉应力形成表面裂缝。而若在充分保水至抗拉强度大于变形应力的理论条件下,混凝土便不会出现这类裂缝。

脱水过程中,真空泵产生的负压向新拌混凝土内部传递(实测中低标号混凝土负压可传递 20~25 cm)。同时,在脱水模板内外形成的压差挤压的共同作用下,将孔隙中水分和空气排出混凝土体外。在中低标号混凝土的试验配合比条件下,真空传递有效范围内可排出混凝土中拌和水量的 20% 左右,混凝土水胶比从 0.50 降至 0.41。事实上,脱水混凝土沿深度方向的水胶比是连续变化的,表层的水胶比最低。采用新拌混凝土水胶比分析法,将脱水后未凝结的混凝土分层进行水胶比分析,由表层向下 1~5 cm,5~10 cm 和 10~20 cm 各层厚度内混凝土的水胶比分别为 0.31,0.41 和 0.48。可见,混凝土成型后迅速脱水处理,其水泥石结构尚未形成、孔隙水在大量蒸发前就已被大量减少。

另一方面,由于水分的蒸发与液面的饱和蒸汽压有关,混凝土毛细孔径越小,弯液面上饱和蒸汽压越低,水分蒸发越困难。姜正平等^[10]对低标号真空混凝土孔结构的研究表明(表 3),混凝土经真空脱水和挤压密实的作用后孔隙率降低。

表 3 中低标号混凝土孔结构比较

Tab. 3 Middle and low strength concrete pore microstructure

部 位	总孔体积/(cm ³ ·g ⁻¹)			孔径大于 100 nm 的孔体积/(cm ³ ·g ⁻¹)		
	普通砂浆	真空砂浆	真空/普通	普通砂浆	真空砂浆	真空/普通
表 层	0.086 06	0.045 34	0.526 8	0.021 902	0.008 040	0.367 1
底 层	0.069 43	0.057 68	0.830 8	0.015 212	0.009 196	0.604 5

在表层,真空混凝土的总孔体积仅为普通混凝土的 52%,大于 100 nm 的有害孔体积仅为 37%。高标号混凝土尽管脱水率相对较低,但采用压汞法测试的孔结构,其测试结果相似(表 4),真空混凝土试件上表层的最可几孔径(出现几率最大的孔径,代表混凝土孔隙率和孔径分布特点)、临界孔径(指能够将较大的孔隙连通起来的各孔的最大孔径,反映孔结构网络的连通性)、平均孔径相对非真空混凝土都明显降低。总孔隙率真空混凝土上表层为非真空混凝土(非上表层)的 63%(若相对非真空混凝土上表层应该更低),中层为 76%,从而降低了混凝土凝结后,因失水过程产生的孔隙弯液面变化和由其增大的附加压力。从原理上说,真空混凝土相对普通混凝土的干缩会明显降低,尤其是脱水还使大量水泥颗粒富集于混凝土表面,在表面形成非常致密层,脱水后,表层混凝土呈干硬状态,完全无普通混凝土成型后上层混凝土含水率较高、表面浮水的

情况,避免了施工早期混凝土塑性开裂的发生.

表4 高标号混凝土的孔结构比较
Tab.4 High strength concrete pore microstructure

试件	最可几孔径/ nm	临界孔径/ nm	平均孔径/ nm	总孔隙率/ %
非真空混凝土	35.5	74.0	50.7	5.743
真空混凝土				
上表层	26.9	60.1	44.6	3.608
中间层	33.3	71.2	50.2	4.358
下底层	35.8	75.8	52.4	4.737

4 工程实例

1987年吉林红石电站工程采用真空滑模进行溢流面混凝土施工.通常,采用滑模施工的溢流面混凝土硬化后可见大量明显的龟裂纹,但该工程施工验收时,几乎未发现任何表面裂缝,时隔数年后进行现场调查,仍未发现裂缝现象,这是水工建筑施工中较少见的,为上述研究分析提供了有力的佐证.

5 结 语

(1)中低标号真空混凝土的干缩相对普通混凝土得到明显改善.通过优化真空混凝土配合比,还能进一步降低混凝土的变形.早期强度发展相对普通混凝土快得多,在真空挤压、脱水作用下,混凝土终凝前即具有0.3 MPa的构造强度,各龄期抗拉强度相应提高,从而降低了混凝土的开裂风险.

(2)可通过采用相对低强度的真空混凝土替代高标号抗冲磨混凝土,既满足抗冲磨性能的要求,又明显降低混凝土的胶凝材料用量及其温升水平,从而明显降低混凝土的干缩和温度裂缝的风险.

(3)中低标号混凝土经真空脱水处理使其抗裂性能改善,主要源于脱水明显降低水胶比,混凝土的孔结构得以改善,尤其在混凝土表层,总孔隙率降低近一半,大孔减少超过60%,塑性状态时混凝土表面完全无浮水,呈干硬状,降低了孔液失水变化过程产生的弯液面附加压力.

参 考 文 献:

- [1] 张国新, 历易生. 堆石坝面板收缩性贯穿裂缝的理论分析及防裂措施[J]. 水力发电学报, 2005, 24(3): 30-33. (ZHANG Guo-xin, LI Yi-sheng. Theoretical analysis of through shrinkage cracks in the face slabs of CFRD and the preventive measures[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 24(3): 30-33. (in Chinese))
- [2] 李家正, 桂全良, 杨华全. 防止面板混凝土收缩裂缝的措施探讨[J]. 水力发电, 2004, 30(1): 32-35. (LI Jia-zheng, GUI Quan-liang, YANG Hua-quan. Study on measures for avoiding the contraction cracks of faceslab concrete[J]. Water Power, 2004, 30(1): 32-35. (in Chinese))
- [3] 邵文健, 张燕迟, 王端良. 真空滑模在水利工程中的应用[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 1983. (SHAO Wen-jiang, ZHANG Yan-chi, WANG Duan-liang. The applications of slip-form construction by vacuum dewatering process in hydraulic engineering[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 1983. (in Chinese))
- [4] 蒋正武, 孙振平, 王新友, 等. 国外混凝土自收缩研究进展评述[J]. 混凝土, 2001(4): 30-33. (JIANG Zheng-wu, SUN Zhen-ping, WANG Xin-you, et al. Review on research progress of autogenous shrinkage of concrete overseas[J]. Concrete, 2001(4): 30-33. (in Chinese))
- [5] 刘建忠, 孙伟, 缪昌文, 等. 矿物掺合料对低水胶比混凝土干缩和自收缩的影响[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2009, 39(3): 580-585. (LIU Jian-zhong, SUN Wei, MIAO Chang-wen, et al. Effect of mineral admixtures on drying and autogenous shrinkage of concrete with low water-binder ratio[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2009, 39(3): 580-585. (in Chinese))

- [6] 程作渭, 陈章洪. 混凝土真空脱水技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986. (CHEN Zuo-wei, CHEN Zhang-hong. Concrete technique of dewatering in vacuum[M]. Beijing: Chinese Building Industry Press, 1986. (in Chinese))
- [7] 张燕迟, 陈迅捷, 欧阳幼玲, 等. 抗冲耐磨混凝土的真空脱水工艺研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2011. (ZHANG Yan-chi, CHEN Xun-jie, OUYANG You-ling, et al. Study on vacuum dewatering process in concretes of high abrasion resistance properties[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2011. (in Chinese))
- [8] 韩建国, 杨富民. 混凝土减缩剂的作用机理及其应用效果[J]. 混凝土, 2001(4): 25-29. (HAN Jian-guo, YANG Fu-min. Action mechanism and effect of application of concrete shrinkage reducing admixture[J]. Concrete, 2001(4): 25-29. (in Chinese))
- [9] 陈立军, 李世禹. 高性能混凝土自收缩增大的机理与改善途径[J]. 混凝土与水泥制品, 2004(5): 10-12. (CHEN Li-jun, LI Shi-yu. Discussion on mechanism and improving ways of autogenous shrinkage increase of high performance concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2004(5): 10-12. (in Chinese))
- [10] 姜正平, 杨长友, 吴中伟. 真空混凝土的孔结构特征[J]. 硅酸盐通报, 1988(6): 68-72. (JIANG Zheng-ping, YANG Chang-you, WU Zhong-wei. Pore microstructure of concrete made by vacuum dewatering process[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 1988(6): 68-72. (in Chinese))

Successful application of a vacuum dewatering process to increasing crack resistance of hydraulic concrete

ZHANG Yan-chi, OUYANG You-ling

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: In order to discuss the influence of a vacuum dewatering process on crack resistance property of hydraulic concrete, the changes of water-binder ratio, pore microstructure, drying shrinkage and strength of concrete made by the vacuum dewatering process are studied, and the role of the mixture of high abrasion resistance property of concrete made by the vacuum dewatering process in decreasing concrete heat generation is analyzed. The research results show that the crack resistance capability of hydraulic concrete surface consolidated by the vacuum dewatering process is reinforced. Practical engineering indicates that the vacuum dewatering process is obviously effective for crack resistance of hydraulic concrete surface.

Key words: hydraulic concrete; vacuum dewatering process; crack resistance property