

不同荷载作用下塑性混凝土渗透性试验研究

宋博¹, 何江涛², 刘长礼¹

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061; 2. 中国地质大学, 北京 100083)

摘要: 基于达西定律, 采用稳态水流测量方法探讨了塑性混凝土在荷载不变和荷载逐渐提高两种条件下的渗透性能, 及其随荷载和自身内部裂隙变化的规律。研究发现, 荷载不变且不产生破坏时, 塑性混凝土的渗透系数基本保持稳定; 当荷载逐渐增大直至塑性混凝土破坏, 渗透系数在应力比 η 小于30%时略有降低, 在 η 为30%~60%之间时明显减小, 在 η 大于60%时开始增加, 当 η 达到80%之后显著增加。

关键词: 塑性混凝土; 荷载; 应力比; 渗透系数

中图分类号: TV 528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672 1683(2015) 02-0309-05

Experimental study on permeability of plastic concrete under different load levels

SONG Bo¹, HE Jiang-tao², LIU Chang-li¹

(1. The Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang 050061, China;

2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Permeability of plastic concrete under the two conditions, including the same load level and increasing load level with time, was investigated using the steady state flow measurement method based on Darcy's Law, and the relationships between the permeability and load and between the permeability and internal crack were analyzed. The results showed that when load is constant and the plastic concrete sample is not destroyed, the permeability coefficient remains stable; while load increases step by step until the sample is destroyed, the permeability coefficient reduces slightly when stress ratio (η) is less than 30%, reduces significantly when η is between 30% to 60%, begins to increase when η is greater than 60%, and increases remarkably when η reaches 80%.

Key words: plastic concrete; load; stress ratio; permeability coefficient

塑性混凝土是减少水泥使用量, 并掺入膨润土或黏土等材料的大流动性混凝土。其配制原材料包括水泥、膨润土(黏土)、砂、石、水和外加剂等^[1]。由于掺有膨润土(黏土), 塑性混凝土与普通混凝土相比具有如下特性: 弹性模量低, 极限应变大, 有良好的抗裂性能, 安全使用寿命比普通混凝土长; 防渗效果较好, 渗透系数会随着水泥和膨润土掺量的增大而减小; 抗压强度低于普通混凝土, 一般为3~5 MPa, 但由于它的弹性模量与周围土层的弹性模量相近, 所以能承受比普通混凝土大得多的变形; 拌和物的流动性和黏聚性较好, 易于泵送并无需振捣, 不易离析和堵管, 能够自流平和自密实, 初凝和终凝时间长于普通混凝土; 水泥用量相对较少, 可以减少污染, 降低工程造价^[2,3]。正是基于这些特性, 塑性混凝土作为建筑材料被广泛应用于大坝防渗墙、堤防防渗加固连续墙及地下环防渗墙中^[4,6]。

塑性混凝土的碳化、冻融破坏、碱骨料反应、化学侵蚀

等耐久性问题都与其渗透性密切相关, 抗渗性的好坏决定着防渗墙的质量和安全性^[7,8]。实际工程中, 不同类型的荷载作用会在塑性混凝土内部形成大量微裂隙, 成为影响防渗墙渗透性的重要因素。近年来, 荷载作用下混凝土破坏机理问题逐渐受到关注^[9,11], 但已有研究大都聚焦在弯曲荷载或短暂荷载作用下混凝土的渗透性问题, 而对轴向持续压荷载作用下混凝土渗透性的研究较少见到^[12,14]。因此, 有必要对持续荷载作用下塑性混凝土的渗透特性进行深入研究, 明确不同荷载作用下塑性混凝土的渗透系数变化规律。

1 试验材料与方法

1.1 原材料

本试验使用的水泥是普通袋装硅酸盐水泥, 强度等级

收稿日期: 2014-05-27 修回日期: 2015-01-29 网络出版时间: 2014-03-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150318.1543.007.html>

基金项目: 国家863计划“重大环境污染事件应急技术系统研究开发与应用示范”重大项目“重大环境污染事件污染场地净化与修复技术”课题(2007AA06A410)

作者简介: 宋博(1984), 男, 河北张家口人, 助理研究员, 主要从事水工环地质及相关材料应用研究。E-mail: songbosyw@126.com

32.5 MPa。所用膨润土是朝阳亚细亚膨润土有限公司生产的钠基膨润土,技术指标见表 1(性能指标由厂家提供)。所用砂是河砂,为建筑用中砂。所用石是天然卵石,为粒径 5~15 mm 的碎石。所用外加剂是 JF 809 引气减水剂,具有引气、减水^[19]、分散作用并可使气泡均匀分布,其主要性能指标见表 2(性能指标由厂家提供)。

表 1 试验所用膨润土的技术指标

Tab. 1 Specifications of bentonite used in the experiment

项目	吸蓝量	膨胀倍数	胶质价	pH	粒度	水分
指标	≥32	≥20	≥100	9.0~10.0	200 目过 98%	≤10

表 3 水泥-膨润土比例变化试验配合比

Tab. 3 Proportion in the experiments with cement-bentonite ratio variations

试验编号	单位体积各种材料用量					
	水泥/(kg·m ⁻³)	膨润土/(kg·m ⁻³)	砂/(kg·m ⁻³)	石/(kg·m ⁻³)	水/(kg·m ⁻³)	外加剂(%)
E1	200	0	931	835	210	0.3
E2	190	10	931	835	210	0.3
E3	180	20	931	835	210	0.3
E4	160	40	931	835	210	0.3
E5	140	60	931	835	210	0.3

渗透试验结果见表 4。

通过配合比试验,根据降低渗透系数,增大抗压抗剪强度,减小弹性模量,改善拌合物和易性的原则,确定优化配合比。具体要求如下。

表 2 JF 809 引气减水剂的主要性能指标

Tab. 2 Specifications of JF 809 gas lift water reducing agent

项目	外观	掺量(按水泥重)	减水率	含气量
指标	灰色粉状	0.1%~0.5%	10%~15%	<5%

1.2 优化配合比的选择

为确定本试验的塑性混凝土优化配合比,设计了水泥膨润土用量不同配合比对比试验,即保持塑性混凝土中细料(水泥和膨润土)总量不变,通过调整水泥和膨润土含量(表 3),测定塑性混凝土的坍落度、强度、弹性模量和渗透系数等指标。各配合比塑性混凝土的无测压试验、三轴压缩试验和

- (1) 首先要满足渗透系数达到 10⁻⁶~10⁻⁷ cm/s;
 - (2) 28 d 抗压强度达到 6 MPa 以上;
 - (3) 坍落度在 16~22 cm。
- 通过筛选对比,选择 E2 试验配合比作为优化配合比。

表 4 水泥-膨润土比例变化试验结果

Tab. 4 Experiment results of cement-bentonite ratio variations experiment

试验编号	坍落度/cm	黏聚性	7 d 抗压强度/MPa	28 d 抗压强度/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角(°)	弹性模量/MPa	平均渗透系数 k/(cm·s ⁻¹)
E1	13	一般	2.8	6.03	1.93	22.01	12 506	5.62E-07
E2	18	较好	2.6	6.01	1.88	24.29	12 163	4.13E-08
E3	19	较好	2.3	5.88	1.64	25.13	11 916	1.14E-06
E4	19	较好	1.8	5.11	1.26	28.84	11 004	3.36E-06
E5	—	差	0.9	2.17	—	—	9 037	—

此配合比塑性混凝土的各项性能指标见表 5。

表 5 优化配合比塑性混凝土的各项性能指标

Tab. 5 Performance indicators of plastic concrete with optimized proportion

和易性	坍落度/cm	18
	黏聚性	较好
	含砂情况	中
	析水情况	中
抗压强度	7 d 抗压强度/MPa	2.6
	28 d 抗压强度/MPa	6.01
抗剪强度	黏聚力/MPa	1.88
	内摩擦角(°)	24.29
弹性模量	弹性模量/MPa	11 163
渗透系数	平均渗透系数 k/(cm·s ⁻¹)	4.13E-08

1.3 试验方法与装置

塑性混凝土不同于普通混凝土,其渗透系数较大,一般为 10⁻⁶~10⁻⁸ cm/s,采用流量法进行常水头渗透试验较为

合理有效^{[16][17]}。根据达西定律计算渗透系数,其计算公式为

$$k = \frac{QL}{HA t} \tag{1}$$

式中:Q 为渗水量(cm³);k 为渗透系数(cm/s);H 为水头高度(cm);L 为渗流路径长度(cm);A 为试样截面积(cm²);t 为时间(s)。

在某一时刻,

$$k = \frac{\frac{dQ}{dt} \Delta t \cdot L}{H A \Delta t} = \frac{dQ}{dt} \frac{L}{H A} \tag{2}$$

渗透试验使用 TAW-2000 电液伺服三轴刚性试验机(图 1),该仪器具有轴压、围岩、孔隙水压和温度独立闭环控制系统。主机采用美国 MTS 三轴主机结构,刚度大于 10 GN/m,轴压 2 000 kN,围压 100 MPa,孔隙水压 60 MPa,温度为 -50℃~200℃,试件直径 25~100 mm,最小采样时间间隔为 1 ms。试验采用微机控制,实时显示试验全过程。试件是直径为 50 mm,高为 100 mm 的圆柱型塑性混凝土试件。



图 1 TA W-2000 电液伺服三轴刚性试验机

Fig. 1 TA W-2000 electro hydraulic servo triaxial rigidity tester

2 试验结果与讨论

塑性混凝土是典型的非均匀材料,其内部存在微裂缝,甚至含有诸如裂纹、夹杂、气泡、孔穴等宏观缺陷,随机缺陷具有一定的方向性,长度一般小于 0.5 mm。塑性混凝土的内部结构及裂缝扩展会直接影响其强度、变形和破坏性能。集料与水泥浆体界面的过渡区是塑性混凝土中的薄弱部位,在受应力作用时容易引发裂缝的生成和扩展,成为水渗透的快速通道^[18-19]。在实际工程中,地下混凝土防渗墙会承受不同类型的荷载作用,荷载往往会引起塑性混凝土中微裂隙的闭合和扩展,从而影响塑性混凝土的渗透性。

以本试验试件为例,测定塑性混凝土在水压不变,不同荷载下的渗水量,计算每一时刻的渗透系数。试件为底面直径 50.78 mm,高 110.2 mm 的圆柱体。试验仪器为微机控制电液伺服岩石三轴试验机,每隔 0.1 s 自动记录当前荷载和通过试件的渗水量。试验过程中保持试件围压为 2 MPa;水压为 0.89 MPa,即 8 900 cm 的水头压力。试验分三个阶段进行。首先对试件施加由 0 增加到 3 kN 的荷载,然后维持 3 kN 荷载一段时间,继而逐渐提高荷载,直至试件产生宏观裂隙并破坏。实验过程中围压、水压、水流量、负荷随时间的变化见图 2。

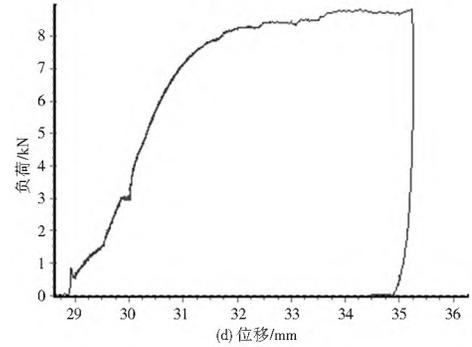
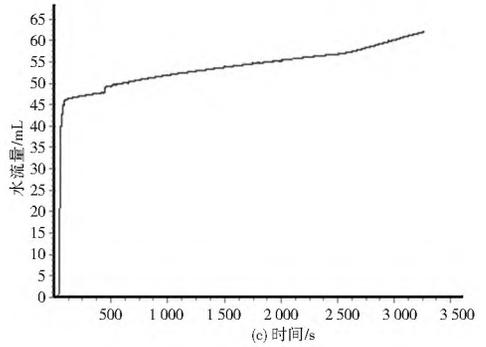


图 2 渗透试验曲线

Fig. 2 Permeability test curves

荷载从 0 逐渐提高到 3 kN,水流量与时间的关系见图 3。

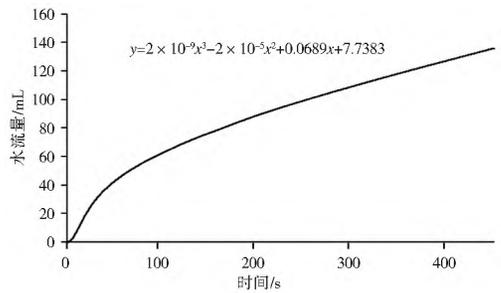


图 3 水流量和时间的关系

Fig. 3 Relationship between water flow and time

关系式为

$$Q = 2 \times 10^{-9} t^3 - 2 \times 10^{-5} t^2 + 0.0689t + 7.7383 \quad (3)$$

$$k = \frac{dQ}{dt} = \frac{(6 \times 10^{-9} t^2 - 4 \times 10^{-5} t + 0.0689) \times 11.02}{8900 \times \pi \times 2.539 \times 2.539} \quad (4)$$

塑性混凝土试件渗透系数 k 随时间变化曲线见图 4。可以看出,保持围压、水压不变,荷载由 0 逐渐提高到 3 kN,塑性混凝土的渗透系数逐渐减小,且变化较小。

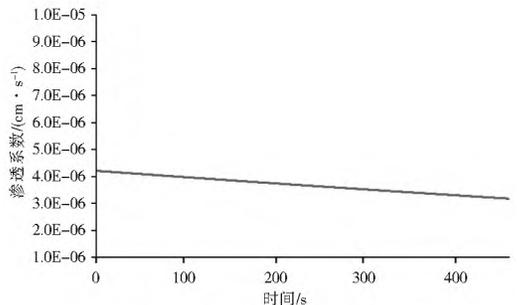
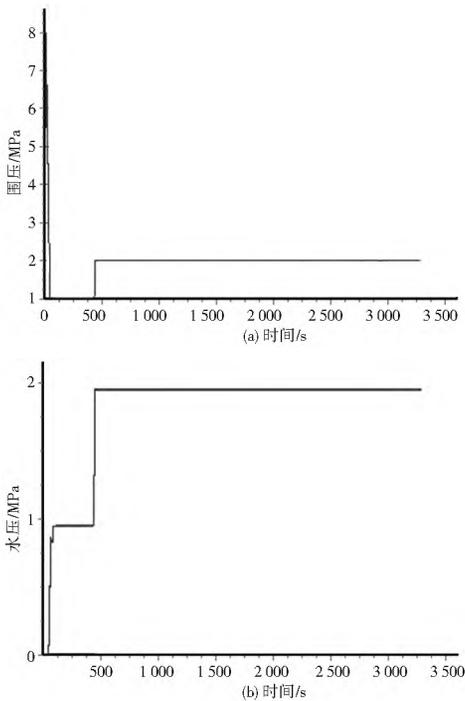


图 4 渗透系数和时间的关系

Fig. 4 Relationship between permeability coefficient and time

荷载保持在 3 kN 时,水流量与时间的关系见图 5,关系式为

$$Q = 3 \times 10^{-9} t^3 - 3 \times 10^{-6} t^2 + 0.0057t + 50.094 \quad (5)$$

$$k = \frac{dQ}{dt} \frac{L}{HA} = \frac{(9 \times 10^{-9} t^2 - 6 \times 10^{-6} t + 0.0057) \times 11.02}{8900 \times \pi \times 2.539 \times 2.539} \quad (6)$$

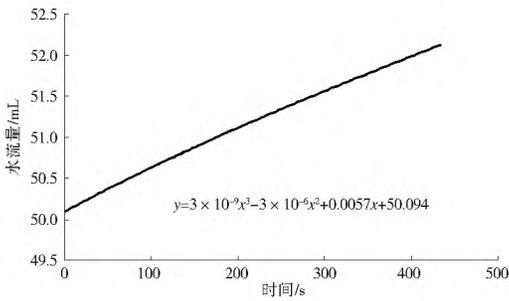


图 5 水流量和时间的关系

Fig. 5 Relationship between water flow and time

塑性混凝土试件渗透系数 k 随时间变化曲线见图 6, 可以看出, 保持围压、水压不变, 荷载稳定在 3 kN, 塑性混凝土的渗透系数保持稳定。

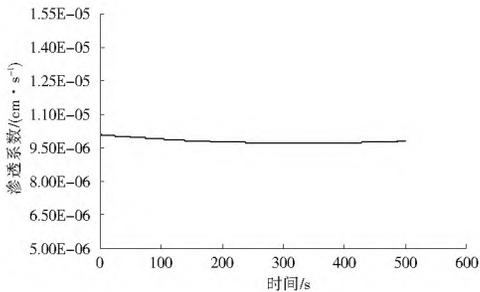


图 6 渗透系数和时间的关系

Fig. 6 Relationship between permeability coefficient and time

渗透系数稳定后, 荷载开始逐渐增加, 荷载增加曲线见图 7, 可以看出, 该塑性混凝土试件的极限荷载约为 8.9 kN。

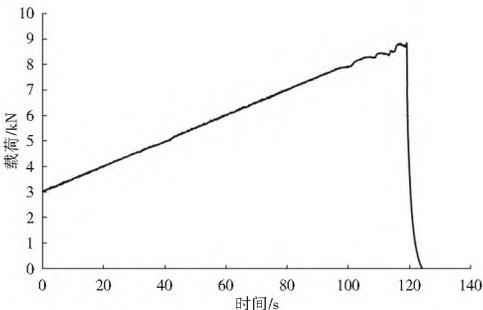


图 7 荷载和时间的关系

Fig. 7 Relationship between load and time

随荷载增加, 水流量与时间关系见图 8, 关系式为

$$Q = 2 \times 10^{-5} t^3 - 0.0026t^2 + 0.2547t + 227.57 \quad (7)$$

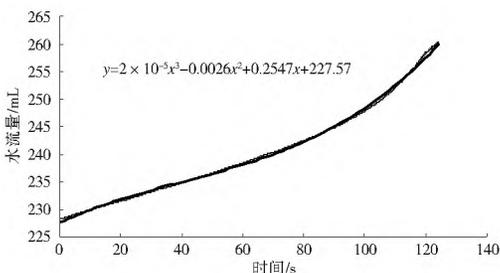


图 8 水流量和时间的关系

Fig. 8 Relationship between water flow and time

$$k = \frac{dQ}{dt} \frac{L}{HA} = \frac{(6 \times 10^{-5} t^2 - 0.0052t + 0.2547) \times 11.02}{8900 \times \pi \times 2.539 \times 2.539} \quad (8)$$

得到水流量与时间的塑性混凝土试件渗透系数 k 随时间变化曲线见图 9。

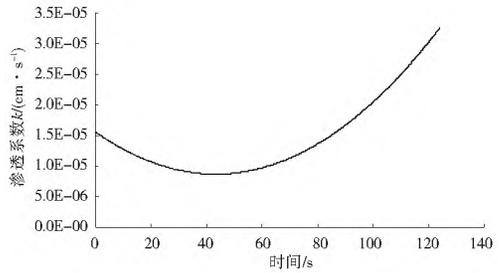


图 9 渗透系数和时间的关系

Fig. 9 Relationship between permeability coefficient and time

根据塑性混凝土试件在最后 120 s 内受到的荷载及渗透系数变化, 得出了荷载和渗透系数随时间的变化规律(图 10)。

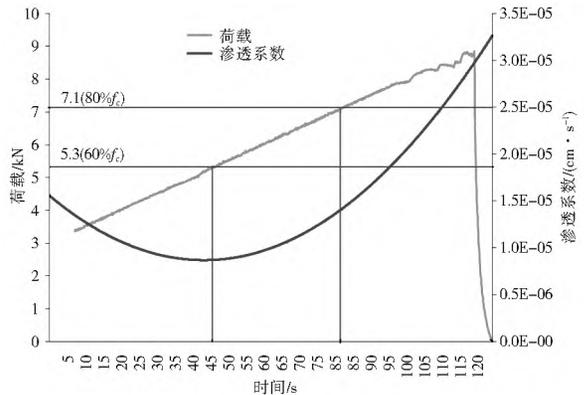


图 10 荷载和渗透系数随时间变化

Fig. 10 Variations of load and permeability coefficient with time

综上所述, 当应力比 η (即荷载 f 与极限荷载 f_c 的比值) 小于 30% 时, 塑性混凝土中的集料水泥浆体界面缝是稳定、不会扩展的, 渗透系数随着荷载增加略有降低但变化较小。当应力比 η 增加到 30% 时, 渗透系数保持稳定。当应力比 η 增加到 30% ~ 60% 时, 荷载使得塑性混凝土中的原始微裂隙产生闭合, 减少了水的渗透路径, 渗透系数明显减小, 这时塑性混凝土处于弹性阶段。从理论上讲, 此时荷载已足以引起裂缝的扩展, 因此渗透系数的继续减小说明此时裂缝的扩展和形成对混凝土渗透性的增大效应仍小于与水渗流方向平行的裂缝压合对渗透性的降低效应。当应力比 η 进一步增加到 60% 时, 塑性混凝土进入塑性阶段, 集料水泥浆体界面不断产生新裂缝并开始扩展, 渗透系数开始增大。当应力比 η 达到 80% 以上时, 砂浆部分也开始产生裂缝, 并不断发展与毛细孔等渗水通道相互联结, 塑性混凝土内部出现了宏观裂隙, 这时渗透系数显著增加, 裂缝扩展对渗透性的影响已大大超过了裂缝压合的影响。

3 结论

(1) 试验中使用的 TAW-2000 电液伺服三轴刚性试验机可以用于持续荷载作用下塑性混凝土的水渗透性测试。通过稳态水压测量的方法, 可以根据达西定律计算出渗透系数。

(2) 保持围压、水压、荷载不变,在不产生破坏的条件下,塑性混凝土的渗透系数保持稳定。

(3) 保持围压、水压不变,提高荷载,塑性混凝土的渗透系数会发生变化。当应力比小于 30% 时,渗透系数变化很小;当应力比增加到 30%~60% 时,渗透系数明显减小,塑性混凝土处于弹性阶段;当应力比大于 60% 时,塑性混凝土进入塑性阶段,渗透系数开始增大;当应力比达到 80% 以上时,塑性混凝土内部出现了宏观裂隙,渗透系数显著增加。

参考文献(References):

- [1] 李孝成. 防渗墙体材料 塑性混凝土的试验研究[J]. 水利科技, 2011, 4: 33-35. (LI Xiaocheng. Anti seepage wall materials plastic concrete experiment research[J]. Hydraulic Science and Technology, 2011, 4: 33-35. (in Chinese))
- [2] 张鹏. 塑性混凝土材料性能试验研究及其应用[D]. 郑州: 郑州大学, 2005. (ZHENG Peng. Experimental study on the material properties of plastic concrete and its application[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2005. (in Chinese))
- [3] 张波. 防渗墙墙体材料研究探讨[J]. 科技信息, 2011, 25: 600. (ZHANG Bo. Discussion on cut off wall materials[J]. Science & Technology Information, 2011, 25: 600. (in Chinese))
- [4] D P T Rivedi, R G G Holmes, D Brown. Monitoring the in situ performance of a cement/bentonite cut off wall at a low level waste disposal site[J]. Cement and Concrete Research, 1992, 22 (2-3): 339-349.
- [5] 周传弘, 王威. 简述 塑性混凝土防渗墙墙体材料[J]. 黑龙江水利科技, 2003, 4: 84-85. (ZHOU Chuanhong, WANG Wei. SKETCH of plastic concrete cut off wall materials[J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2003, 4: 84-85. (in Chinese))
- [6] 丛蔼森. 地下连续墙的设计施工与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001: 552-614. (CONG Aisen. The design and construction and application of underground continuous wall[M]. Beijing: China Water Power Press, 2001: 552-614. (in Chinese))
- [7] 洪雷, 危行财, 汪明刚. 单轴压荷载下掺合料对混凝土渗透性的影响[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(1): 143-152. (HONG Lei, WEI Xingcai, WANG Minggang. Influence of mineral admixtures on permeability of concrete under sustained uniaxial compressive load[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(1): 143-152. (in Chinese))
- [8] 张亦涛, 方永浩, 郑波. 荷载与其它因素共同作用下混凝土耐久性研究进展[J]. 材料导报, 2003, 17(9): 48-50. (ZHANG Yitao, FANG Yonghao, ZHENG Bo. Recent advances in research on concrete durability under simultaneous action of load and other factors[J]. Materials Review, 2003, 17(9): 48-50. (in Chinese))
- [9] 宿辉, 李芳, 马秋娟. 塑性混凝土抗渗测试方法及性能评价研究[J]. 中国农村水利水电, 2007, 10: 91-93. (SU Hui, LI Fang, MA Qiuruan. Study on testing methods and performance appraisal for plastic concrete anti permeability[J]. China Rural Water and Hydropower, 2007, 10: 91-93. (in Chinese))
- [10] 肖树斌. 塑性混凝土防渗墙的抗渗性和耐久性[J]. 水力发电, 1999, 11: 24-27. (XIAO Shubin. The permeability resistance and durability of plastic concrete cutoff wall[J]. Water Power, 1999, 11: 24-27. (in Chinese))
- [11] 方永浩, 张亦涛, 章凯. 弯曲荷载对硬化水泥浆体和砂浆碳化过程的影响[J]. 材料导报, 2004, 18(10): 97-99. (FANG Yonghao, ZHANG Yitao, ZHANG Kai. Influence of flexural load on the carbonation processes of cement paste and mortar[J]. Materials Review, 2004, 18(10): 97-99. (in Chinese))
- [12] Picandet V, Khelidj A, Bastian G. Effect of axial compressive damage on gas permeability of ordinary and high performance concrete[J]. Cem Concr Res, 2001, 31(11): 1525-1532.
- [13] Mohammed T U, Otsuki N, Hamada H. Oxygen permeability in cracked concrete reinforced with plain and deformed bars[J]. Cem Concr Res, 2001, 31(5): 829-834.
- [14] Lim C C, Gowripalan N, Sirivatnanon V. Microcracking and chloride permeability of concrete under uniaxial compression[J]. Cem Concr Comput, 2000, 22(5): 353-360.
- [15] 刘松柏. 混凝土外加剂的使用[J]. 中国三峡建设, 2003, 3: 19-20. (LIU Songbai. The use of concrete admixture[J]. China Three Gorges Construction, 2003, 3: 19-20. (in Chinese))
- [16] 田建设. 塑性混凝土渗透试验方法的探讨[J]. 混凝土, 2013, 9: 1-4. (TIAN Jianshe. Discussion of seepage test method for plastic concrete[J]. Concrete, 2013, 9: 1-4. (in Chinese))
- [17] R P Khatri, V Sirivatnanon. Methods for the determination of water permeability of concrete[J]. ACI Materials Journal, 1997, 94(3): 257-261.
- [18] 方永浩, 李志清, 张亦涛. 持续压荷载作用下混凝土的渗透性[J]. 硅酸盐学报, 2005, 33(10): 1281-1286. (FANG Yonghao, LI Zhiqing, ZHANG Yitao. Permeability of concrete under sustained compressive load[J]. Journal of The Chinese Ceramic Society, 2005, 33(10): 1281-1286. (in Chinese))
- [19] 赵吉坤, 张子明, 祁顺彬. 混凝土破裂过程微观损伤与渗流耦合模拟[J]. 河海大学学报, 2008, 36(1): 71-75. (ZHAO Jikun, ZHANG Ziming, QI Shunbin. Coupled simulation of meso damage and seepage during the process of concrete failure[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2008, 36(1): 71-75. (in Chinese))