

孔隙水对混凝土静力特性的影响研究综述

郑丹, 李鑫鑫

(重庆交通大学河海学院, 重庆 400074)

摘要 对现有孔隙水对混凝土静力特性影响的试验和理论研究成果进行综述。总结目前的试验研究方法和结论, 分析湿度梯度、孔隙水压力以及液体表面张力等因素对混凝土弹性模量和强度的影响机理, 指出孔隙水对混凝土特性的影响是多种因素共同作用的结果。

关键词 混凝土结构; 孔隙水; 湿度梯度; 表面张力; 结构强度; 综述

中图分类号 TU528.1

文献标识码 A

文章编号 1006-7647(2011)01-0090-05

Review of researches on influences of pore water on static properties of concrete//ZHENG Dan, LI Xin-xin (Department of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract : The current experimental and theoretical researches on influences of pore water on static properties of concrete were reviewed. The existing experimental methods and conclusions were summarized. The mechanism of influences of moisture gradient, pore water pressure and water surface tension on elastic modulus and strength of concrete was analyzed. A conclusion is drawn that the influences of pore water on the properties of concrete are made by various factors.

Key words : concrete structure ; pore water ; moisture gradient ; surface tension ; structural strength ; review

在水环境中工作的混凝土结构, 如大坝、桥墩、近海及海岸建筑物等, 外界水会渗入混凝土中, 影响其力学性能。水不仅影响混凝土内部的湿度分布, 同时也作为一种荷载作用于混凝土结构上, 尤其在高水头作用下, 混凝土局部将承受较大的水压力, 混凝土结构的应力可能达到或超过其承载能力, 导致原有结构局部破坏和部分功能退化, 甚至影响结构整体功能。现有的研究多数不能反映孔隙水对混凝土力学性能影响这一特征。因此, 开展孔隙水作用下混凝土力学性质的研究, 为混凝土结构设计提供更为准确的力学参数显得尤为重要。

1 水对混凝土弹性性能的影响

大量试验研究表明, 在孔隙率相同的条件下, 混凝土含水量越大, 弹性模量越高^[1-3]。一般认为, 相对于空气而言水为不可压缩的液体, 因此混凝土中的孔隙水在应力作用下变形很小, 使得含水量高的混凝土弹性模量增加。Yaman 等^[4-5]根据混凝土孔隙是否与外界连通, 将孔隙分为活性孔隙和非活性孔隙, 并认为非活性孔隙水不能渗入, 不受湿度影响, 而活性孔隙影响混凝土的弹性力学性能。在此

基础上, Yaman 等考虑混凝土基体中夹杂有空气和水等, 采用细观力学理论方法计算了混凝土的等效弹性模量, 但由于模型中未考虑孔隙水黏滞性等因素, 模型计算值和试验值有较大差异。Wang 等^[6]考虑了水泥后期水化和水的黏滞力对湿态混凝土弹性模量的影响, 采用 Mori-Tanaka 模型分析了水对混凝土弹性模量的影响。计算结果表明, 该模型计算结果和试验结果吻合较好(图1), 可以有效地预测湿态混凝土的弹性模量。

从上述研究可以看出, 由于孔隙水对混凝土弹性模量的影响研究较为深入, 而且细观力学关于各向异性复合材料的弹性理论发展较为充分, 可以较为准确地分析各种含水量下混凝土的弹性模量。

2 水对混凝土强度的影响

相对于弹性性能而言, 工程设计和研究人员对混凝土的强度更为关心, 因为强度直接关系到工程结构的安全可靠性。众所周知, 水对混凝土强度的影响主要体现在两方面^[7]: 一方面是水泥的水化, 是稳步增长且不可逆的; 另一方面是水分迁移, 是随着介质湿度的不同而变化的, 是可逆的。

基金项目 国家自然科学基金(50809079)

作者简介 郑丹(1979—), 男, 重庆人, 副教授, 博士, 从事混凝土性能的研究。E-mail: zhengdan@cquc.edu.cn

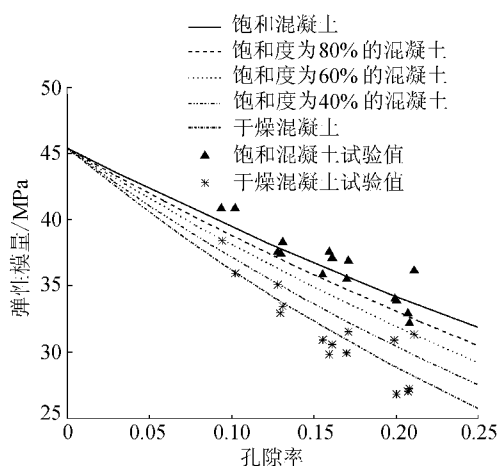


图1 不同饱和度的混凝土弹性模量和孔隙率的关系

2.1 水对混凝土强度影响的试验研究

研究人员开展了不同含水量的混凝土强度试验,试验结果表明^[8-14] 湿态混凝土的强度比干燥混凝土强度低,即使是原材料和养护条件完全相同的混凝土,临时改变其饱和度,混凝土的强度也会随之改变。但由于研究人员采用的养护方式和试验条件不同,所得到的试验结论也有所差异。

Li^[8]通过试验研究了混凝土强度和含水量之间的关系。试验中先将试件自然养护 28 d,干燥后将试件浸入水中,经过不同时间的浸泡后取出测量其强度,试验结果如图 2 所示。试验结果表明,干燥混凝土的强度要明显高于普通混凝土,并且随着浸水时间的增加,混凝土强度逐渐降低,湿度变化对水灰比(W/C)高的混凝土强度影响更加明显。

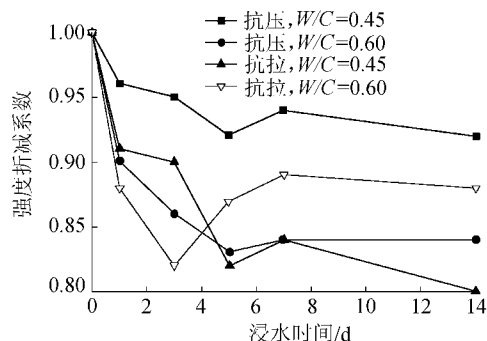


图2 不同浸水时间对混凝土抗压强度的影响

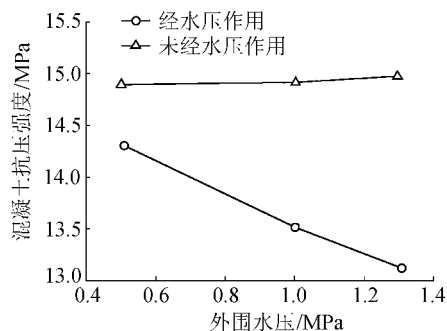


图3 外围水压与混凝土抗压强度之间的关系

杜守来等^[9]也进行了类似的试验,试验中先将混凝土试件进行养护,然后浸入不同水压力的水中,经过一段时间后取出测量其抗压强度。试验结果表明 经过水压力作用的混凝土强度有所降低,并且随着水压力和作用时间的增加,混凝土强度的降低程度增大,如图 3、图 4 所示。

在 Cadoni 等^[10]的试验中,先将混凝土在温度为 20 ℃、相对湿度为 95% 的条件下养护 90 d,再用 50 ℃ 的烘箱干燥,然后将试件浸入水中并密封,之后取出试件进行试验,试验结果表明,混凝土的抗拉强度从干燥时的 3.28 MPa 下降到饱和时的 3.02 MPa,下降了 7.62%。闫东明等^[11]将 300 d 龄期的试件浸泡在水中 60 d 后取出进行直接拉伸试验,试验结果表明,当混凝土的含水量从 0.31% 增加到 4.80% 时,强度降低了 41.2%。王海龙等^[12-14]在试验中,先将试件在水中养护 48 d 得到饱和混凝土,然后将试件取出烘干至质量恒定,得到干燥混凝土,随后测量各自的强度。试验表明饱和混凝土与干燥混凝土相比,抗压强度下降了 4.5%,劈拉强度下降了 11.41%。Vu 等^[15]、Wittmann 等^[16-17]进行的试验也得到了类似的结论,同时试验还表明浸泡 NaCl 溶液后的混凝土强度降低更明显。

对于多轴情况,研究人员也进行了相应的试验研究工作,所得到的试验结果和单轴情况基本一致。Imran 等^[18]进行了不同水灰比的干燥、饱和混凝土三轴压缩试验,试验结果表明,饱和混凝土的三轴强度比干燥混凝土略低,高水灰比混凝土的强度弱化更加明显。Vu 等^[15]进行了围压从 50 MPa 到 650 MPa 下混凝土的三轴抗压试验,结果表明围压下的混凝土强度大幅降低,在 650 MPa 的围压作用下,干燥混凝土的强度为 900 MPa,而饱和混凝土的强度仅为 200 MPa。

在上述试验中,围压的施加方法是将试件密封,然后再施加周向围压。但对于在水环境中工作的混凝土结构,水是直接作用于混凝土上,因此研究人员也开展了真实水压力下孔隙水对混凝土强度影响的

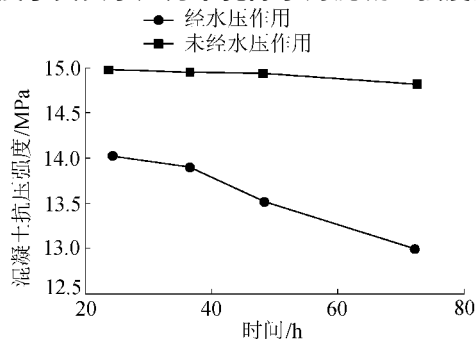


图4 浸水时间对混凝土抗压强度的影响

试验研究。Bjerkei 等^[19]通过试验研究了处于水压力下混凝土的强度及变形发展规律,试验结果表明:在水压力作用下,混凝土内会产生孔隙水压力,其大小和混凝土渗透系数和吸附水的能力有关;在水压力(水头小于 800 m)作用下的混凝土,如果养护条件和试验条件相同,那么孔隙水不会影响混凝土的抗压强度。Chen 等^[20]、李庆斌等^[21]以混凝土内部湿度和水荷载作用方式为可变参数,研究了混凝土在水压力作用下的多轴强度。试验结果表明,密封条件下干燥和饱和混凝土的抗压强度都随着围压的增加而增加,但饱和混凝土围压效应较小。在不密封条件下,干燥和饱和混凝土抗压强度较密封条件下均有大幅度降低,与单轴强度相比,干燥混凝土抗压强度降低较大,而饱和混凝土抗压强度降低很小。

2.2 水对混凝土强度影响的理论研究

从上述试验结果可以看出,孔隙水对混凝土的强度有较大影响,这在结构设计中不容忽视,国内外专家学者对此进行了广泛而深入的研究。但由于混凝土内部含有很多微裂缝和孔洞,当水浸入后使其内部情况发生变化。同时在荷载作用下随着裂纹、孔洞的发展演化,混凝土内部水分也会发生迁移,使得受力情况更加复杂。因此,虽然已经开展了大量的研究工作,但对湿态混凝土强度降低的物理机理仍没有较完善的解释。现有文献中关于孔隙水对混凝土强度影响的理论解释主要有以下几种。

2.2.1 湿度梯度对混凝土强度的影响

研究表明^[22],由于混凝土中凝胶体的毛细孔处于饱和状态,吸附水分的能力较差,因此水分在混凝土中的扩散较慢,混凝土在常压下很难达到饱和。deLarrard 等^[23]测量了直径为 16 cm 的混凝土圆柱形试件的湿度分布情况,试验结果表明,在空气中干燥 27 d 的试件仅外层的 2.5 cm 湿度发生了改变,经过 4 年后混凝土试件中的湿度才达到较均匀的状态。因此,对于试验和实际结构中的混凝土而言,很难达到真正的完全饱和状态,混凝土内部不可避免地会产生湿度梯度,这个梯度也会对混凝土的性能造成一定影响。

Popovics^[24]认为当混凝土试件外部和内部湿度存在差异时,水分较高的部分产生膨胀,而水分的失去会产生收缩,这些不均匀变形在混凝土内部产生不均匀的拉、压应力,使得混凝土的强度降低。Bartlett 等^[25]认为凝胶孔吸水后将引起试件内部膨胀,当外荷载增加时,吸收的水分不能马上排出,使试件固体基质内部产生超静水压力,引起横向挤压效应,从而导致混凝土抗压强度降低。

由于混凝土中湿度扩散较慢,试验存在一定的

湿度分布不均匀现象,这会对混凝土的性能产生一定影响。但是试验中发现在不存在湿度梯度的情况下,水仍然会影响混凝土的强度,如完全干燥的混凝土比完全饱和的混凝土强度要高,因此这种理论只能在一定程度上解释现有试验现象。

2.2.2 孔隙水压力对混凝土强度的影响

根据 Biot 的孔隙力学理论,多孔材料中的孔隙水在荷载作用下会产生一定的水压力,因此混凝土中的孔隙和微裂缝内的自由水受压会产生超孔隙水压力,并对混凝土的性能产生影响。

徐世沅等^[26-27]通过进行不同水压下混凝土试件断裂试验,认为静水压力的增加使同等条件下裂缝内的水压力逐渐增大,造成试件的抗裂能力降低,峰值荷载减小。Oshita 等^[28-29]通过测量混凝土中孔隙水压力的发展发现,当湿态混凝土的体积变形处于压缩状态时,孔隙水压力逐渐增长且与外部压力和变形呈线性关系。因此认为孔隙水压力对混凝土的开裂有促进作用。Guo 等^[30]利用弹性力学方法计算混凝土受轴向压应力,发现完全充满水的孔隙最大环向应力比在充满空气时要大 67%,环向应力会促进混凝土破坏,进而减小混凝土的抗压强度。

王海龙等^[13,31-32]利用断裂力学方法探讨了湿态混凝土在承受单轴压缩荷载时孔隙水压力对混凝土开裂、扩展和抗压强度的影响。认为混凝土中的孔隙水压力减小了阻碍混凝土开裂的摩阻力,相当于楔体的‘楔入’作用,加速了混凝土的损伤和微裂纹的扩展,因此湿态混凝土强度降低。白卫峰等^[33-34]假设混凝土中的孔隙水压力和活性孔隙率及外荷载成正比,并假设湿态情况下水泥砂浆基体的断裂韧度和裂纹扩展特征长度,采用细观夹杂理论和断裂力学方法计算了混凝土强度和孔隙率、砂浆和骨料弹性模量比之间的关系。

对于围压情况,Imran 等^[18]对此的解释是:在三轴试验过程中,饱和混凝土试样内部孔隙水压力发展,降低了有效侧向应力,因此强度的围压增加效应要小于干燥混凝土。在直接水压力作用下,Chen 等^[20]、李庆斌等^[21]认为干燥混凝土强度在围压下降低较大的主要原因是:当加载速率较慢时,裂纹的扩展速率也较慢,在不密封条件下外部水压总能及时到达裂缝尖端,形成‘楔入’作用,促使裂纹的开展,降低了混凝土的强度。

采用孔隙水压力理论可以在一定程度上解释湿度对混凝土强度的影响,但由于孔隙水压力很难测量,因此较难定量分析其实际影响。同时因为孔隙水压力的大小和体积变形成正比,但试验表明混凝土的劈拉强度随湿度的增加也减小,也就是说在受

拉荷载下,混凝土中较难产生孔隙水压力的情况时,湿度对混凝土的强度也有影响。并且,混凝土等脆性材料实际上具有剪胀特性^[1],即当混凝土发生单轴压缩破坏时,随着荷载的逐渐增加体积先减小而后增加,在外荷载接近其抗压强度时,混凝土的体积实际上是膨胀的,很难产生较大的孔隙水压力。因此孔隙水压力理论并不能完全反映水对混凝土强度的影响机理,仅采用孔隙水压力理论很难解释现有试验现象。

2.2.3 填充液体表面张力对混凝土强度的影响

根据 Griffith 的断裂力学理论,材料中裂缝的产生和发展需克服其表面能,对于脆性体固体而言,表面能就是材料的抗裂阻力,也决定了材料的断裂韧度和强度^[35]。因此混凝土的强度与裂纹面的表面能高度相关,表面能是裂缝形成的必要条件。根据物理化学中的杨氏方程(Young's Equation)^[36],固液面的表面能可以表示为

$$\gamma_{sl} = \gamma_s - \gamma_l \cos \theta \tag{1}$$

式中: γ_{sl} 为固液面的表面能; γ_s 为干燥固体的表面能; γ_l 为饱和液体的表面能; θ 为固体和液体的接触角,如图 5 所示。

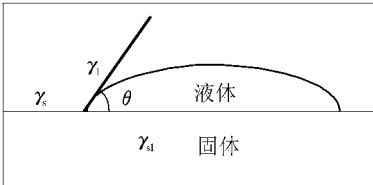


图 5 固液面表面能示意图

由于混凝土凝胶颗粒极度亲水,新形成的裂缝在高能状态下,任何液体都可以流动传输,所以可以认为 θ 为零^[37]。由式(1)可以看出,当自由液体进入混凝土后,减小了混凝土凝胶颗粒间的黏聚力,降低了材料表面能,因此混凝土的强度也随之降低,降低程度与液体的表面张力成正比。

在 Matsushita 等^[37]进行的试验中,将砂浆试件在水中养护 28 d 后放入 110 ℃ 的烘箱中烘干,然后放入多种不同表面张力、无腐蚀性的液体中直至质量恒定,再测量其抗压强度。试验结果表明:试件的抗压强度随着浸入液体表面张力的增加大致呈线性降低的关系(表 1)。同时试验还表明,水灰比越大,表面张力对混凝土的抗压强度影响也越大。

研究表明,浸入液体对混凝土表面能的削弱是材料强度降低的重要原因。但由于在试验中很难测量表面能的大小,尤其是混凝土等含孔隙材料在液体浸入后不同饱和度下材料表面能的降低情况更难测量。因此,如何准确定量地分析浸入液体对混凝土强度的削弱仍需要开展大量的研究工作。

表 1 砂浆抗压强度与填充液体表面张力的关系^[37]

浸没介质	液体表面张力/ (N·m ⁻¹)	水泥砂浆抗压 强度/MPa
空气	0	66.8
二乙醚	0.0170	56.8
己烷	0.0184	60.8
乙醇	0.0227	44.1
环己胺	0.0255	60.1
苯甲醇	0.0390	55.0
安息香醛	0.0400	57.6
水	0.0728	44.7

2.2.4 凝胶体与水发生化学反应对混凝土强度的影响

混凝土中水泥浆体和骨料之间存在界面过渡区,过渡区是决定混凝土中的关键相。当水进入凝胶体引起膨胀,加上凝胶体和骨料吸水后膨胀系数不一样导致应力集中,对强度有一定的削弱。

Feldman 等^[38]认为水泥凝胶颗粒吸水后 Si-O 化学键容易断裂形成 Si-OH HO-Si 化学键,导致强度降低,并且当水分子的浓度足以维持水分裂纹的扩展,导致混凝土强度进一步降低。王少明^[39]和邢林生等^[40]认为当外界水浸入后,混凝土中未反应完的熟料继续发生水化反应,新生成的水化物膨胀,造成混凝土强度降低,同时由于渗透压力增加,使更多的水进入凝胶体,造成 Ca(OH)₂ 和 CaO 等不断溶出,形成较大的空隙,导致混凝土强度不断降低。

但是,由于试验中自由水分与混凝土的作用时间有限,同时现有工程监测数据表明,在水中工作的混凝土强度并未显著降低^[41],因此水分与混凝土中凝胶体发生反应在多大程度上会影响混凝土的强度,还值得进一步研究。

3 结 语

对现有孔隙水对混凝土力学性能的影响研究现状进行了综述和总结。从现有研究成果情况来看,孔隙水会影响混凝土的弹性模量和强度等特性,因此在结构设计中应引起注意。但由于孔隙水对混凝土特性影响的物理机理比较复杂,多数研究仅仅是对试验数据的简单拟合,并不能很好地解释不同湿度的混凝土力学性质的差异。同时,当水进入混凝土后,湿度梯度、表面张力和孔隙水压力都会对混凝土的性能产生一定的影响,但现有研究大多针对单个因素开展工作,而对多因素共同作用的研究较少。因此有必要继续开展这方面的理论和试验研究,提出更为准确的材料力学参数,为在水环境下工作的混凝土结构设计和安全性评价提供参考。

参考文献:

[1] MEHTA P K, NONTEIRO P J M. Concrete Microstructure

- Properties and Materials [M]. New York : Indian Concrete Institute, 1997.
- [2] NEVILLE A. Properties of concrete [M]. Pitman, London : McGraw-Hill, 1973.
- [3] 马莉, 彭刚. 水饱和混凝土力学性能的研究现状与展望 [J]. 灾害与防治工程, 2009, 66(1) : 52-56.
- [4] YAMAN I O, HEARN N, AKTAN H M. Active and non-active porosity in concrete I : experimental evidence [J]. Materials and Structures, 2002, 35 : 102-109.
- [5] YAMAN I O, AKTAN H M, HEARN N. Active and non-active porosity in concrete II : evaluation of existing models [J]. Materials and Structures, 2002, 35 : 110-116.
- [6] WANG Hai-long, LI Qing-bin. Prediction of elastic modulus and Poisson's ratio for unsaturated concrete [J]. International Journal of Solid and Structures, 2007, 44 : 1370-1379.
- [7] 郭成举. 混凝土的物理和化学 [M]. 北京 : 中国铁道出版社, 2004.
- [8] LI Guang. The effect of moisture content on the tensile strength properties of concrete [D]. Gainesville, Florida : University of Florida, 2004.
- [9] 杜守来, 李宗利, 金学洋. 孔隙水压对混凝土抗压强度影响的初步研究 [J]. 人民长江, 2009, 40(3) : 54-56.
- [10] CADONI E, LABIBES K, ALBERTINI C, et al. Strain-rate effect on the tensile behavior of concrete at different relative humidity levels [J]. Materials and Structure, 2001, 34 : 21-26.
- [11] 闫东明, 林皋, 王哲, 等. 不同环境下混凝土动态直接拉伸特性研究 [J]. 大连理工大学学报, 2005, 45(3) : 416-421.
- [12] 王海龙, 李庆斌. 不同加载速率下干燥与饱和混凝土抗压性能试验研究分析 [J]. 水力发电学报, 2007, 26(1) : 84-89.
- [13] 王海龙, 李庆斌. 孔隙水对湿态混凝土抗压强度的影响 [J]. 工程力学, 2006, 23(10) : 141-145.
- [14] 王海龙, 李庆斌. 不同加载速率下饱和混凝土的劈拉试验研究及强度变化机理 [J]. 工程力学, 2007, 24(2) : 105-109.
- [15] VU X H, MALÉCOT Y, DAUDEVILLE L, et al. Experimental analysis of concrete behavior under high confinement : effect of the saturation ratio [J]. Int J Solids Struct, 2009, 46 : 1105-1120.
- [16] WITTMANN F H, SUN Zhi-wei, ZHAO Tie-jun. Strength and fracture energy of concrete in seawater [C]//The 6th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures. London : Taylor&Francis, 2007.
- [17] WITTMANN F H, SUN Zhi-wei, ZHAO Tie-jun. Surface energy and fracture energy [C/CD]//The 7th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures. Chongqing : Chongqing Jiaotong University, 2010 : 13-18.
- [18] IMRAN I, PANTAZOPOULOU S J. Experimental study of plain concrete under triaxial stress [J]. ACI Materials Journal, 1996, 93(6) : 589-601.
- [19] BJERKEI L, JENSEN J J, LENSCHOW R. Strain development and static compressive strength of concrete exposed to water pressure loading [J]. ACI Structural Journal, 1993, 90(3) : 310-315.
- [20] CHEN Z F S, HU Yu, LI Qing-bin, et al. Behavior of concrete in water subjected to dynamic triaxial compression [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2010, 136(3) : 379-389.
- [21] 李庆斌, 陈樟福生, 孙满义, 等. 真实水荷载对混凝土强度影响的试验研究 [J]. 水利学报, 2007, 38(7) : 786-791.
- [22] 孙迎迎. 混凝土水饱和系数影响因素的研究 [D]. 哈尔滨 : 哈尔滨工业大学, 2006.
- [23] deLARRARD F, BOSTVIRONNOIS J L. Long-term strength losses of silica-fume high-strength concretes [J]. Magazine of Concrete Research, 1991, 43 : 109-119.
- [24] POPOVICS S. Effect of curing method and final moisture condition on compressive strength of concrete [J]. ACI Materials Journal, 1986, 83(3) : 227-236.
- [25] BARTLETT F M, MACGREGOR J G. Effect of moisture condition on concrete core strengths [J]. ACI Materials Journal, 1993, 90(3) : 227-236.
- [26] 徐世晔, 王建敏. 静水压力下混凝土双 K 断裂参数试验测定 [J]. 水利学报, 2007, 38(7) : 792-798.
- [27] 徐世晔, 王建敏. 水压作用下大坝混凝土裂缝扩展与双 K 断裂参数 [J]. 土木工程学报, 2009(2) : 119-125.
- [28] OSHITA H, TANABE T. Water migration phenomenon model in cracked concrete I : formulation [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126 : 539-543.
- [29] OSHITA H, TANABE T. Water migration phenomenon model in cracked concrete II : calibration [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126 : 544-549.
- [30] GUO J S, WALDRON P. An elastic model to quantify the effect of moisture on the mechanical properties of concrete at the time of test [J]. Magazine of Concrete Research, 2001, 53(3) : 151-162.
- [31] 王海龙, 李庆斌. 饱和混凝土静动力抗压强度变化的细观力学机理 [J]. 水利学报, 2006, 37(8) : 958-962.
- [32] 王海龙, 李庆斌. 围压中自由水影响混凝土力学性能的机理 [J]. 清华大学学报 : 自然科学版, 2007, 47(9) : 1443-1446.
- [33] 白卫峰, 陈健云, 范书立. 细观夹杂理论预测湿态混凝土抗压强度 [J]. 工程力学, 2008, 25(11) : 134-140.
- [34] 白卫峰, 陈健云, 范书立. 饱和混凝土单轴拉伸动态统计损伤本构模型 [J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 29(1) : 16-21.
- [35] 范天佑. 断裂理论基础 [M]. 北京 : 科学出版社, 2003.
- [36] 程传煊. 表面物理化学 [M]. 北京 : 人民交通出版社, 1999.
- [37] MATSUSHITA H, ONOUE K. Influence of surface energy on compressive strength of concrete under static and dynamic loading [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2006, 4(3) : 409-421.
- [38] FELDMAN R F, SEREDA P J. New model for hydrated Portland cement and its practical implications [J]. Engineering Journal, 1970, 53(8/9) : 53-57.
- [39] 王少明. 大黑水汀水库混凝土坝的环境水侵蚀研究 [J]. 水利水电科技进展, 1998, 18(6) : 44-45.
- [40] 邢林生, 聂广明. 混凝土坝坝体溶蚀病害及治理 [J]. 水力发电, 2003, 29(11) : 60-63.
- [41] 袁群, 李宗坤, 李杉. 现场运行近 50 年水工混凝土性能的试验研究 [J]. 混凝土, 2007, 37(1) : 4-13.

(收稿日期 2010-04-23 编辑 方宇彤)