

文章编号: 1000-7598 (2010) 05-1469-06

海水侵蚀环境下混凝土力学性能退化模型

张峰¹, 祝金鹏², 李术才¹, 纪圣振¹

(1. 山东大学 岩土与结构研究中心, 济南 250061; 2. 山东省路桥集团工程设计咨询有限公司, 济南 250014)

摘要: 基于混凝土干湿循环试验和混凝土细观力学, 对混凝土在海水侵蚀环境下力学性能的变化进行了研究。混凝土干湿循环试验方面, 采用加速腐蚀试验。对混凝土试件和根据混凝土配比制成的砂浆试件进行 0、10、20、30、40、50 次干湿循环, 利用大型混凝土静、动三轴试验系统, 检测了海水侵蚀作用对混凝土抗压强度、抗拉强度、弹性模量及应力-应变关系的影响。依据混凝土细观力学理论, 对混凝土试块进行了细观数值模拟, 考虑了混凝土各组成相的非均匀性、材料性质按照 Weibull 分布来赋值。同时, 为反映海水侵蚀作用对混凝土的影响, 砂浆的强度和弹性模量均以砂浆干湿循环试验所得结果为准, 最后建立了混凝土随干湿循环次数变化的抗压强度折减模型, 抗拉强度折减模型和弹性模量的折减模型。

关键词: 混凝土; 海水侵蚀; 细观数值模拟; 加速腐蚀试验

中图分类号: TV 523

文献标识码: A

Mechanical property deterioration model for concrete in environment with salt solution

ZHANG Feng¹, ZHU Jin-peng², LI Shu-cai¹, JI Sheng-zhen¹

(1. Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Engineering Consulting Co., Ltd. of Shandong Luqiao Group, Jinan 250014, China)

Abstract: Based on the dry-wet cycling experiment of concrete and micromechanics, the study of mechanical properties of concrete in seawater erosion is carried out. In the aspect of dry-wet cycling, by accelerated corrosion test method, the experiment of concrete specimens and mortar specimens which are made according to the ratio of concrete, has been completed after 0, 10, 20, 30, 40 and 50 times dry-wet cycles. Under the influence of seawater erosion on the concrete, its compressive strength is tested, together with the tensile strength of concrete, elastic modulus and stress-strain relationship, using the large static-dynamic triaxial test system for concrete. According to the theory of micromechanics, the concrete test block is numerically simulated on meso-level. Considering various components, the material nature of its components is assigned in accordance with the Weibull distribution. In order to reflect the influence of seawater erosion on the concrete, the strength and elastic ratio of mortar specimens are assigned according to the result of dry-wet cycling experiment. Finally, through the analysis and study of the concrete above all, the compressive strength reduction model, the tensile strength reduction model, and the elastic ratio reduction model, are determined with the change in the number of dry-wet circle.

Key words: concrete; seawater corrosion; mesoscopic numerical simulation; accelerated corrosion experiment

1 引言

混凝土在海洋与沿海、道路除冻盐、盐碱地、工业盐环境中会发生侵蚀破坏, 这种破坏的主要原因是混凝土遭受环境中氯离子、镁离子和硫酸根的侵蚀, 有害离子通过混凝土孔隙进入到内部, 并与混凝土中的氢氧化钙及水化铝酸钙作用生成新的盐类物质, 生成的难溶盐类物质往往产生较大的体积

膨胀, 在孔隙的内部产生很大的内应力, 长期的积累会使混凝土开裂; 一些可溶性的盐在海水的反复冲刷下溶解析出, 使混凝土孔隙率增加, 增大了氯离子渗入混凝土内部的孔道, 加剧了钢筋锈蚀, 并使混凝土涨裂剥落。另外, 如果水灰比控制不严, 施工质量较差, 混凝土振捣不密实, 甚至出现蜂窝麻面等现象, 都会加剧盐溶液环境对混凝土的侵蚀, 使结构变得松软, 强度降低, 耐久性下降^[1]。

收稿日期: 2008-10-27

基金项目: 山东省博士后创新项目 (No. 200703072); 国家自然科学基金面上项目 (No. 50574053)。

第一作者简介: 张峰, 男, 1979 年生, 博士研究生, 主要从事大型桥梁安全研究工作。E-mail: 249282876@qq.com

关于混凝土经海水侵蚀作用后力学性能变化目前研究较少,而基于混凝土细观力学对混凝土在海水侵蚀作用后的数值分析的研究也未见相关报道。文献[2—4]通过加速腐蚀试验研究了普通硅酸盐水泥和矿渣硅酸盐水泥在海水侵蚀后物理力学性能的变化,但没有进行混凝土细观力学方面的分析。文献[5—8]研究了主要力学参数的随机分布对混凝土试件宏观表征力学性质的影响。文献[9—11]通过物理模型试验,研究了混凝土结构的损伤演化过程以及在循环动荷载作用下变形的发生和发展规律。以上研究均没有将试验和数值分析结合起来,也没有通过细观数值分析研究混凝土受海水侵蚀的影响。

本文通过将混凝土干湿循环试验和细观力学分析相结合,建立了海水侵蚀作用下混凝土力学性能退化模型,对混凝土受海水侵蚀作用影响的研究方面具有一定的参考价值。

2 混凝土干湿循环试验

进行干湿循环试验的混凝土是以在建的青岛海湾大桥下部结构混凝土的配比配制而成的,试配强度为 43.2 MPa,见表 1。混凝土试件的规格为 100 mm×100 mm×100 mm。试件均采用标准钢模成型,24 h 拆模后露天盖草袋养护。为了在短时间内进行有效的试验,本试验采用人工海水作为侵蚀液,配制 5 倍于海水浓度的侵蚀液,称为人工海水。其中各种盐含量见表 2。

表 1 每立方米引气混凝土的配合比
Table 1 The gradients per cubic meter air-entrained concrete

材料	配比	材料	配比
W/B	0.34	碎石/kg	938
水泥/kg	164	水/kg	155
矿粉/kg	212	减水剂/kg	4.47
粉煤灰/kg	94	阻锈剂/kg	6.0
沙子/kg	737	引气剂/kg	0.011 8

表 2 人工海水的配制成分^[2]
Table 2 Preparation of artificial seawater composition

天然海水所含化学成分	天然海水各成分含量/(g/L)	人工海水各成分含量/(g/L)
NaCl	21.00	105.00
MgCl ₂	2.54	12.70
MgSO ₄ ·7H ₂ O	1.54	7.70
CaSO ₄ ·2H ₂ O	2.43	12.15
CaCO ₃	0.10	0.50

本次试验采用试验室加速试验方法,即按一定配合比制备 100 mm×100 mm×100 mm 的混凝土试件,将成型试件在标准养护室中养护 28 d,到 56 d 龄期开始浸—烘循环。为减少试验结果的离散性,分别将循环试件全部浸泡在人工海水溶液中 16 h,然后拿出置于 80 ℃条件下烘 8 h 为一个循环。如此反复循环,在此期间每间隔 10 次分别测定试件的抗压和抗拉强度。

混凝土力学性能试验在大型三轴电液伺服试验机上完成。试验时,将试件安装在试验机的加载板间,试件加载面与加载板之间采取减摩措施,减摩材料采用塑料薄膜和甘油。每种工况至少试验 3 个试件。发现离散较大时增加试件数目,以求数据的完整准确,试件承受的压力、位移和应变值均由计算机动态采集。

2.1 试块单轴劈裂抗拉试验

混凝土立方体劈裂抗拉强度:

$$f_{ts} = \frac{2F}{\pi A} = 0.637 \frac{F}{A} \quad (1)$$

式中: f_{ts} 为混凝土立方体劈裂抗拉强度 (MPa); F 为极限荷载 (N); A 为试件劈裂面面积 (mm²),为试件横截面面积。

混凝土随不同干湿循环次数变化的抗拉强度的试验结果见表 3,其破坏情况如图 1 所示。

表 3 混凝土在不同干湿循环次数后的抗拉强度试验值
Table 3 Tensile strength of concrete after various cycles of dry-wet cycling in experiment

干湿循环次数 / 次	抗拉强度/MPa		
	试块 1	试块 2	试块 3
0	5.95	5.23	5.37
10	5.10	4.28	4.53
20	4.51	4.13	4.77
30	4.08	4.40	3.86
40	3.48	3.43	3.79
50	2.97	3.56	3.18

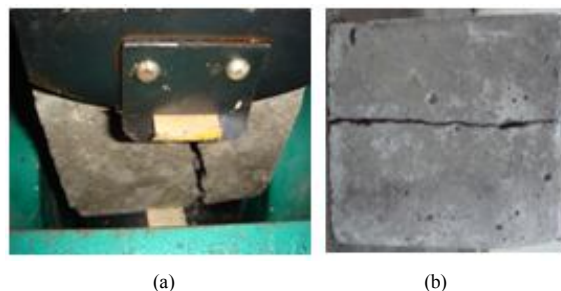


图 1 海水侵蚀后混凝土试块单轴劈裂破坏
Fig.1 Failure form of concrete under uniaxial splitting tensile after dry-wet cycling

2.2 试块单轴压缩试验

试验所得混凝土在单轴压缩载荷作用下随不同干湿循环次数变化的应力-应变曲线的试验结果(平均值)如图2所示,其单轴受压后破坏情况如图3所示。

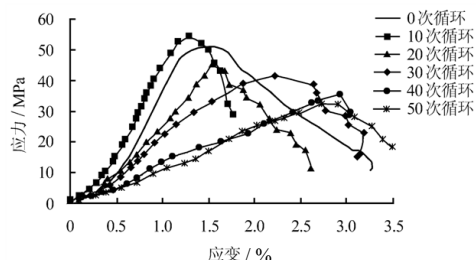


图2 混凝土在不同干湿循环次数后单轴压应力-应变关系曲线

Fig.2 Curves of stress and strain of concrete after various cycles of dry-wet cycling in experiment

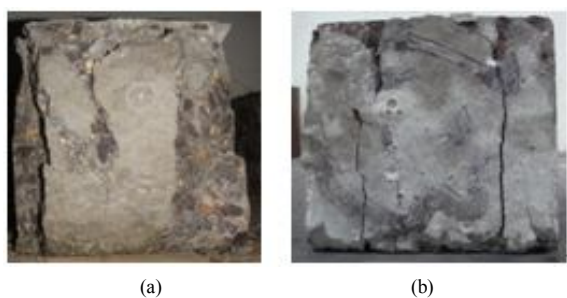


图3 海水侵蚀后混凝土试块单轴受压破坏
Fig.3 Failure form of concrete under uniaxial compression after dry-wet cycling

2.3 试验结果分析

通过试验结果可以看出,10次循环后混凝土的抗压强度较无循环大,而抗拉强度则不然。分析认为,侵蚀循环的初期阶段,侵蚀液中的钠离子、氯离子、镁离子及硫酸根离子进入混凝土内部,硫酸根离子、镁离子分别与氢氧化钙和水化铝酸钙发生化学反应,在水泥石毛细孔内生成一些不溶性物体,使混凝土逐渐变得密实,导致混凝土试件的抗压强度有所提高。而影响混凝土劈裂抗拉强度的主要因素是水胶比,当骨料性能一定时,混凝土抗拉强度随着胶凝体和骨料之间黏结强度的提高而提高。混凝土在侵蚀循环的作用下其胶凝体和骨料之间黏结强度是降低的,而因侵蚀作用使混凝土变得密实,对提高其抗拉强度并没有多少意义。

3 混凝土细观力学分析

3.1 混凝土数值模型

基于混凝土细观力学,利用 RFPA 数值模拟软

件,把混凝土视为由砂浆基质骨料以及两相之间界面组成的三相复合材料。为了考虑各组成相的非均匀性,各组成相的材料性质按照 Weibull 分布来赋值。首先,用一个 Weibull 分布来表达整个试样的材料性质分布,这相当于生成砂浆基质试样,该试样的力学性质要与真实的硬化水泥砂浆体的参数基本一致。然后,在该基质试样中添加骨料颗粒,程序会自动搜索骨料的边界并把边界上的单元赋上相应的力学参数。骨料的参数参照岩石的力学性质参数选取,对于普通混凝土,骨料的强度相对于砂浆基质的强度较高,并且其均值度也较高。砂浆的参数参照依据混凝土配比制成的砂浆试件的干湿循环试验所得到的结果进行赋值。界面的参数没有现成的试验依据,参数取值参考文献[12],见表4。

表4 混凝土试件的 Weibull1 分布力学参数^[5,12]

Table 4 Mechanical parameters of Weibull distribution of concrete specimens

组分	弹性模量均值 / GPa	强度均值 / MPa	均质度 m
骨料	32.0	500	3.0
砂浆	11.4	215	1.5
胶结面	22.0	200	1.5

为了反映海水侵蚀作用对混凝土性能的影响,根据其配比制成的砂浆试件进行了10、20、30、40、50次的干湿循环试验,在干湿循环后分别进行了劈裂抗拉试验和单轴压缩试验测得了其抗拉强度、抗压强度和弹性模量。利用式(2)、(3)得到了数值模拟时砂浆基质在 Weibull 分布赋值时的弹性模量和强度的均值,见表5。

表5 砂浆试件随干湿循环次数变化的 Weibull1 分布力学参数

Table 5 Mechanical Parameters of Weibull Distribution of mortar after various cycles of dry-wet cycling

干湿循环次数 / 次	弹性模量均值 / GPa	强度均值 / MPa	均质度 m
0	12	215	1.5
10	11.4	208	1.5
20	10.5	201	1.5
30	9.5	194	1.5
40	8.7	185	1.5
50	8.1	173	1.5

$$\frac{F}{F_0} = 0.260 \cdot 2 \ln m + 0.023 \cdot 3, (1.2 \leq m \leq 50) \quad (2)$$

$$\frac{E}{E_0} = 0.141 \cdot 2 \ln m + 0.647 \cdot 6, (1.2 \leq m \leq 10) \quad (3)$$

式中: E_0 、 F_0 分别为 Weibull 分布赋值时弹性模量和强度的均值; E 、 F 分别为数值试样宏观的弹性模量和强度。

3.2 细观单元的弹性损伤本构关系

一般认为, 混凝土应力-应变曲线的非线性是由于其受力后的不断损伤所引起的微裂纹萌生和扩展造成的, 而不是由于其塑性变形引起。因此, 用弹性损伤力学的本构关系来描述混凝土的细观单元的力学性质是合适的。按照应变等价原理, 认为应力 σ 作用在受损材料上引起的应变与有效应力作用在无损材料上引起的应变等价。根据这一原理, 受损材料的本构关系可通过无损材料中的名义应力得到, 即

$$\sigma = E_0(1-D)\varepsilon \quad (4)$$

式中: E_0 为初始弹性模量; D 为损伤变量。

3.2.1 拉伸损伤演化方程

单轴拉伸应力状态下细观单元的弹性损伤本构关系见图 4。相应地, 损伤的定量表达式为式 (5)。

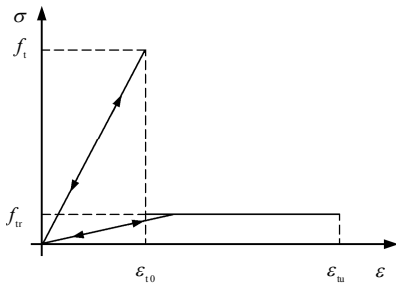


图 4 细观单元单轴拉伸时的损伤本构关系

Fig.4 Uniaxial tension damage constitutive relation for mesoscopic element

$$D = \begin{cases} 0, & (\varepsilon < \varepsilon_{t0}) \\ 1 - \frac{f_{tr}}{E_0 \varepsilon}, & (\varepsilon_{t0} \leq \varepsilon < \varepsilon_{tu}) \\ 1, & (\varepsilon \geq \varepsilon_{tu}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: f_{tr} 为单元的残余强度; ε_{t0} 为弹性极限所对应的拉伸应变, 称作拉伸损伤应变阈值; ε_{tu} 为单元的极限拉伸应变, 当单元单轴拉伸应变达到极限拉伸应变时, 单元将完全损伤, 达到拉伸断裂 (破坏) 状态, 即 $D=1$ 。

3.2.2 压缩剪切损伤演化方程

为了反映细观单元在压缩或剪切应力下的损伤, 这里选择摩尔-库仑准则作为第二个损伤阈值判据。

$$\left. \begin{aligned} F &= \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_1 - \sigma_3 \geq f_c \\ \varphi &= \arcsin \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha} \\ \alpha &= \frac{f_t}{f_c} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: φ 为细观单元的内摩擦角; f_c 为细观单元的单轴抗压强度 (为正数); σ_1 和 σ_3 分别为细观单元的最大和最小主应力值。

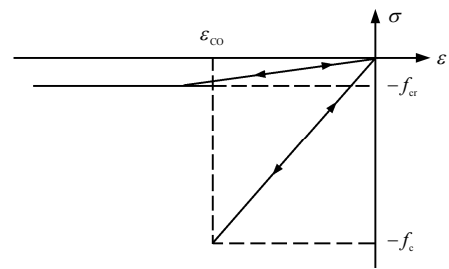


图 5 细观单元单轴压缩时的损伤本构关系

Fig.5 Uniaxial compression damage constitutive relation for mesoscopic element

对应于图 5 中的单轴压缩应力状态下的本构关系, 其损伤变量为

$$D = \begin{cases} 0, & (\varepsilon > \varepsilon_{c0}) \\ 1 - \frac{\lambda \varepsilon_{c0}}{\varepsilon}, & (\varepsilon_{cu} < \varepsilon \leq \varepsilon_{c0}) \\ 1, & (\varepsilon \leq \varepsilon_{cu}) \end{cases} \quad (7)$$

式中: ε_{c0} 为单元应力达到抗压强度时的压应变; ε_{cu} 为极限压应变, 取定值为 0.003 3。当应变达到极限压应变时, 单元的刚度将急剧退化为接近于 0 矩阵的矩阵^[7]。

3.3 数值模拟

建立 100 mm×100 mm 混凝土试件的随机骨料 (断面骨料填充率为 40%; 骨料的粒径范围为 5~20 mm, 规格比例为: (5~10):(10~20)=(30:70) 细观数值模型, 并把它分割为 0.5 mm×0.5 mm 的有限元网格。

3.3.1 拉伸损伤破坏

混凝土在劈拉载荷作用下随不同干湿循环次数变化的抗拉强度的数值模拟结果见表 6, 其破坏情况如图 6 所示。

表6 干湿循环后混凝土试块抗拉强度计算值
Table 6 Tensile strength of concrete after various cycles of dry-wet cycling by calculation

干湿循环次数 /次	抗拉强度/MPa		
	试块1	试块2	试块3
0	5.47	5.83	5.26
10	5.24	4.67	4.83
20	4.38	4.95	4.77
30	4.02	3.77	4.35
40	3.17	4.15	3.62
50	2.85	3.28	3.54

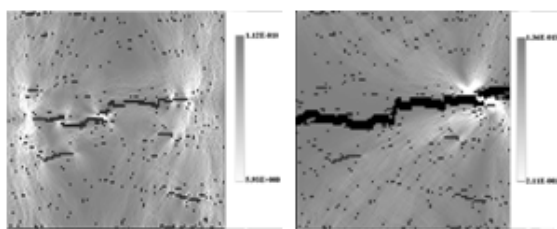


图6 海水侵蚀后混凝土试块单轴劈拉破坏
Fig.6 Failure form of concrete under uniaxial splitting tensile after dry-wet cycling

3.3.2 压缩损伤破坏

混凝土在单轴压缩载荷作用下随不同干湿循环次数变化的应力-应变曲线的数值模拟结果的平均值如图7所示,混凝土单轴受压后破坏情况如图8所示。

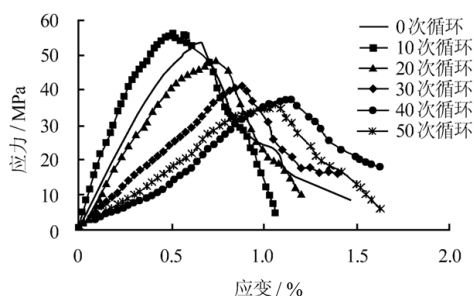


图7 计算所得混凝土在不同干湿循环次数后单轴压应力-应变关系曲线

Fig.7 Curves of stress and strain of concrete after various cycles of dry-wet by calculation

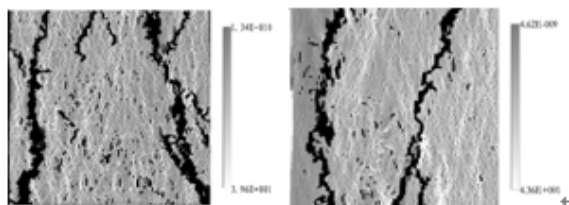


图8 海水侵蚀后混凝土试块单轴受压破坏
Fig.8 Failure form of concrete under uniaxial compression after dry-wet cycling

通过表3与表6混凝土抗拉强度试验值与计算值的对比,图1与图6混凝土单轴压缩应力-应变关系曲线的对比,以及图1、3与图6、8裂纹产生、发展和贯通情况的对比可以发现,基于混凝土细观力学进行数值模拟的计算结果与混凝土干湿循环试验所得的试验结果吻合较好。

4 混凝土在海水侵蚀作用后的力学性能退化模型

通过以上混凝土干湿循环试验和混凝土细观力学分析,将得到的混凝土在不同干湿循环次数下的极限抗压强度、极限抗拉强度和弹性模量的试验结果和计算结果进行了整合,利用计算结果和试验结果的互补性,得到了混凝土随干湿循环次数变化的抗拉强度折减曲线、抗压强度折减曲线和弹性模量折减曲线以及相应的折减方程。

通过最小二乘法得到的混凝土随干湿循环次数变化的抗拉强度折减方程式(8)及相应的抗拉强度折减曲线如图8所示。

$$T = 5.479 \cdot 6e^{-0.010 \cdot 4N} \quad (8)$$

通过最小二乘法得到的混凝土随干湿循环次数变化的抗压强度折减方程式(9)及相应的抗压强度折减曲线如图9所示。

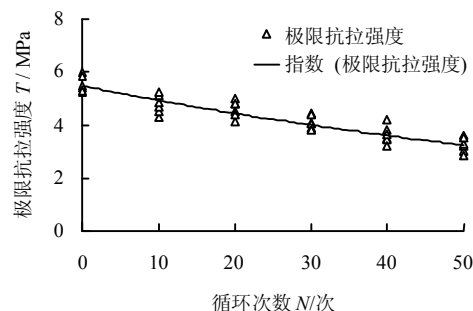


图8 混凝土抗拉强度与干湿循环次数的关系
Fig.8 Concrete tensile strength versus the dry-wet cycling N

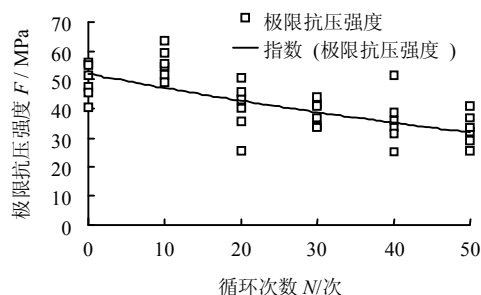


图9 混凝土抗压强度与干湿循环次数的关系
Fig.9 Concrete compressive strength versus the dry-wet cycling N

$$F = 53.789e^{-0.0117N} \quad (9)$$

通过最小二乘法得到的混凝土随干湿循环次数变化的弹性模量折减方程为

$$E = 64.735e^{-0.0191N} \quad (10)$$

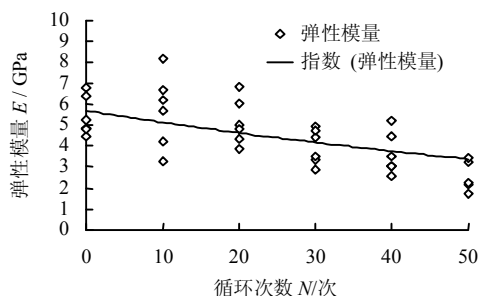


图 10 混凝土弹性模量与干湿循环次数的关系

Fig.10 Concrete elastic ratio versus the dry-wet cycling N

5 结 论

(1) 混凝土在单轴压荷载作用下的极限拉应力、极限压应力和弹性模量随干湿循环次数的增加逐渐降低, 50 次干湿循环以后抗拉强度降低约 40.4%, 抗压强度降低约 33.4%, 弹性模量降低约 60.8%。

(2) 由数值模拟得到的虚拟试验结果与真实结果的误差在允许范围内, 而且由模拟单轴抗拉、抗压所得到的混凝土的开裂位置、开裂方向和应力-应变曲线等情况均与试验结果吻合较好。

(3) 根据试验结果和计算结果, 建立了混凝土随干湿循环次数变化的抗压强度折减模型、抗拉强度折减模型和弹性模量的折减模型。

(4) 从混凝土细观力学的角度研究海水侵蚀作用对混凝土力学性能的影响, 通过与试验结果比较可知, 本文方法对混凝土受海水侵蚀作用的模拟结果与试验结果较为吻合, 对混凝土受海水侵蚀作用影响的研究方面具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] ZHANG Y M, WANG T C. Prediction for Seawater-corrosive concrete strength by BP neural network[J]. *Journal of Jinan University*, 2003, (3): 248—250.
- [2] 张玉敏, 王铁成. 人工海水对混凝土侵蚀性的研究[J]. *混凝土*, 2001, (11): 48—50.
ZHANG Yu-min, WANG Tie-cheng. The research of concrete corrodibility by artificial seawater[J]. *Concrete*, 2001, (11): 48—50.
- [3] 张玉敏, 王铁成. 人工海水对混凝土侵蚀性的研究(续)[J]. *混凝土*, 2001, (12): 51—53.

- ZHANG Yu-min, WANG Tie-cheng. The research of concrete corrodibility by artificial seawater[J]. *Concrete*, 2001, (12): 48—50.
- [4] HAYNES H H. Permeability of concrete in seawater[J]. *Special Publication*, 2004, 65: 21—38.
- [5] 夏晓舟, 章青, 汤书军. 混凝土细观损伤破坏过程的数值模拟[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(3): 319—325.
XIA Xiao-zhou, ZHANG Qing, TANG Shu-jun. Numerical simulation of meso-damage process for concrete material[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2007, 35(3): 319—325.
- [6] 李建波, 林皋, 陈健云. 混凝土损伤演化的随机力学参数细观数值影响分析[J]. *建筑科学与工程学报*, 2004, 24(3): 7—12.
LI Jian-bo, LIN Gao, CHEN Jian-yun, et al. Mesoscopic numerical influence analysis of random mechanical parameter of concrete damage evolution[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2007, 24(3): 7—12.
- [7] 林皋, 李建波, 赵娟, 等. 单轴拉压状态下混凝土破坏的细观数值演化分析[J]. *建筑科学与工程学报*, 2007, 24(1): 1—6.
LIN Gao, LI Jian-bo, ZHAO Juan, et al. Mesoscopic numerical evolution analysis of concrete damage under uniaxial tension and compression[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2007, 24(1): 1—6.
- [8] MARKUS WICKLEIN, KLAUS THOMA. Shock properties of conventional and high strength concrete experimental and mesomechanical analysis[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(3): 155—171.
- [9] 王春来, 徐必根, 李庶林, 等. 单轴受压状态下钢纤维混凝土损伤本构模型研究[J]. *岩土力学*, 2006, 27(1): 151—154.
WANG Chun-lai, XU Bi-gen, LI Shu-lin, et al. Study on a constitutive model of damage of SFRC under uniaxial compression[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(1): 151—154.
- [10] 曹茂森, 任青文, 翟爱良, 等. 混凝土结构损伤的分形特征试验分析[J]. *岩土力学*, 2005, 26(10): 1570—1574.
CAO Mao-sen, REN Qing-wen, ZHAI Ai-liang, et al. Experimental study on fractal characterization in damages of concrete structures[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(10): 1570—1574.
- [11] 骆行文, 管昌生. 再生混凝土力学特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(11): 2440—2444.
LUO Xing-wen, GUAN Chang-sheng. Experiment research on mechanical characteristics of reproductive concrete[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(11): 2440—2444.
- [12] 唐春安, 朱万成. 混凝土损伤与断裂——数值试验[M]. 北京: 科学出版社, 2003.