

文章编号: 1671-6833(2006)04-0058-04

干燥作用对水泥基材料影响的研究

陈 达¹, YURTDAS Ismail²

(1. 河海大学交通与海洋工程学院, 江苏 南京 210098; 2. Laboratoire de Mécanique de Lille, 法国 里尔 59655)

摘 要: 水泥基材料在适宜的环境中养护成熟后其内部多余的自由水分会不断的挥发到空气中, 材料也从饱和状态过渡到非饱和状态, 其力学性质也相应的发生改变. 首先通过物理实验研究水泥基材料在干燥过程中其主要力学性能的发展, 然后建立损伤—弹塑性—干燥耦合模型来描述水泥基材料在不同的饱和度下的力学表现. 模型计算的结果同实验数据的比较表明: 所建立的模型能够很好的反映水泥基材料的力学性能在干燥过程中的变化.

关键词: 水泥基材料; 力学特性; 干燥作用; 损伤; 弹塑性; 耦合

中图分类号: TU 528; TQ 172

文献标识码: A

0 引言

水泥基材料因其优良的力学性能和较低的造价, 在土木工程中得到了最为广泛的使用, 所以对它们的力学性质的了解和预测也变得格外的重要. 国内外的许多学者都做了很多的实验, 并提出了一些实用模型描述混凝土在荷载作用下的本构特征, 但是这些研究基本上都是以饱和状态下的材料作为研究对象^[1]. 事实上, 水泥基材料在养护成熟之后, 其内部在水化过程中产生的孔隙被多余的自由水分充满, 成为饱和孔隙介质. 当材料处于湿度较低的自然环境中时, 这些自由水分由于干燥作用不断的挥发到空气中, 材料也从饱和状态过渡到非饱和状态, 其力学性质也随之发生改变. 干燥作用产生的孔隙负压力会引起材料的收缩^[2]. 由于材料的低渗透性, 其内部在干燥过程中产生的水力梯度引起的不均匀收缩会导致裂隙的产生^[2,3]. 另一方面, 由于水泥同骨料硬度的不同, 在两者的连接面上也会产生裂隙^[4]. 所以在无力学加载的情况下, 材料内部由于干燥作用的影响就会产生损伤^[3], 从而影响了材料的弹性刚度、破坏强度等参数. 因此, 在研究水泥基材料的力学性能时, 考虑干燥作用的影响是很有必要的.

作者首先通过物理实验研究干燥作用对水泥基材料力学特性的影响. 然后在实验数据的基础上建立弹塑性损伤模型描述不同干燥状态下水泥

基材料的力学性能. 最后将数值计算的结果同实验数据进行比较来验证模型.

1 实验研究

1.1 实验介绍

在实验中, 采用标准砂浆作为研究对象. 砂浆由细砂、普通水泥(CPJ—CEM II/B 32.5R)和水拌和而成. 各成分的重量比为, 水:水泥:砂=0.5:1:3. 试样为直径 37 mm, 高 74 mm 的圆柱体. 在浇筑成型后, 试样被保存在 20 °C 的水中恒温养护 6 个月直到材料成熟, 然后再将其分成 3 组来进行实验: ①用两层铝薄膜包裹试样, 防止水分挥发以保持其内部的饱和状态; ②试样被放在控制室 ($T=21\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $H_r=45\%\pm 5\%$) 中自然干燥一定天数(9 d、30 d、56 d 和 150 d), 得到一系列不同饱和状态下的试样; ③通过烤箱 ($T=60\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $H_r=10\%\pm 1\%$) 加速蒸发, 获得干燥状态下的试样. 对以上试样分别做单向压缩实验来研究材料内部饱和度对其力学性质的影响.

1.2 实验观察

不同饱和状态的试样在单向压缩实验中其轴向应力—应变关系如图 1 所示. 为避免曲线过多重叠, 图中未将所有实验数据列出.

由图可见, 干燥作用导致了材料抗压强度的提高——完全干燥状态下的材料强度比饱和状态提高了 21%, 国外的一些学者在研究中也得到了

收稿日期: 2006-07-22; 修订日期: 2006-09-10

作者简介: 陈 达(1978—), 男, 福建福清人, 河海大学讲师, 博士, 主要从事固体力学及港口工程结构研究.

类似的结论^[5,6].产生这个现象的主要原因^[2,3]:①干燥过程中孔隙负压的产生导致了材料整体处于预压应力状态,从而提高了强度;②试样表层干燥比较快,由干燥引起的收缩也更大,对试样内部产生压应力,从而提高了强度.干燥作用还引起试样弹性刚度的改变.试样在不同饱和度下的弹性刚度如图 2 所示.

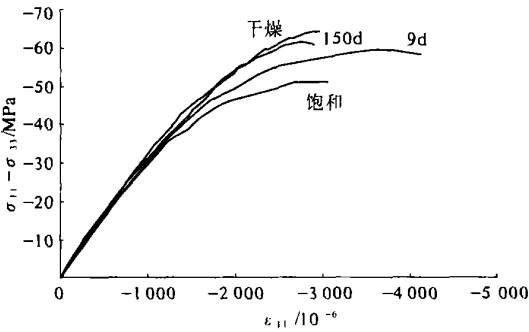


图 1 不同饱和状态的试样轴向受压时轴向应力—应变关系

Fig.1 Axial strain evolution versus uniaxial stress of samples with different saturations

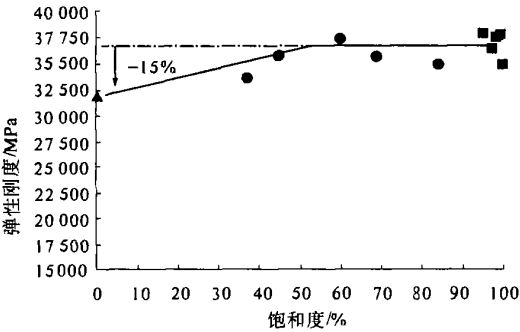


图 2 试样弹性刚度随饱和度的变化

Fig.2 Evolution of axial elastic stiffness versus average saturation degree in mortar samples

由图 2 可见,在干燥的初始阶段,材料的弹性刚度基本保持稳定.当饱和度降低到 52% 以下时,弹性刚度值开始呈线性下降.完全干燥状态下材料的弹性刚度比饱和状态下的值低 15%.材料在干燥过程中由于不均匀收缩产生的裂隙引起弹性刚度的降低;另一方面,由干燥收缩和孔隙负压产生的预压应力状态引起了材料弹性刚度的提高.图 2 中弹性刚度的变化过程就是这两方面共同作用的结果:在干燥的初始阶段,两者的作用相当,弹性刚度保持不变;随着饱和度的持续降低,裂隙开展的影响逐渐占主导地位,弹性刚度值也随之降低^[7].

值得提出的是,干燥作用不但引起材料强度的提高,弹性刚度的降低,同时也降低了材料的塑

性^[8].材料在达到破坏时的塑性变形随着干燥程度的增加而减少.

2 数值模拟

在实验数据的基础上,建立弹塑性—干燥—耦合各向同性损伤的本构模型,然后对数值模拟与实验结果进行比较,验证模型.

2.1 塑性特征

采用小变形假定,假设变形及其增量均由弹性和塑性部分组成.

ε_{ij} = ε^e_{ij} + ε^p_{ij}, dε_{ij} = dε^e_{ij} + dε^p_{ij} (1)

为了考虑塑性和损伤的耦合,作者采用有效应力的概念.从物理角度看,裂缝的产生改变了材料的微观结构,并导致了材料中应力的重新分配.为考虑这个影响,在各向同性的情况下,以损伤有效应力张量 σ̄ 代替名义应力张量 σ.

σ̄_{ij} = (σ_m / (1 - αH(ε^e_v))) δ_{ij} + (S_{ij} / (1 - βd)) (2)

σ_{ij} = σ_m δ_{ij} + S_{ij} (2)

式中: d 为损伤变量; σ_m 和 S_{ij} 分别表示球形应力值和偏斜应力分量.参数 α 和 β 反映了损伤对材料力学性质的影响,其值可通过适当的实验来确定,为简化计算,此处取 α=1, β=1.为了考虑裂缝在卸载过程中重新闭合的影响,引入 Heaviside 函数 H(x),当 x≤0, H(x)=0; x>0, H(x)=1.

通过对实验数据的观察,并参考由 Pietruszczak 等^[9]提出的混凝土弹塑性模型,采用如下塑性破坏面方程:

F = c1 [σ̄_{eq} / f_{c0}] + c2 [σ̄_{eq} / f_{c0}]² - [c3 - I / f_{c0}] = 0 (3)

其中, I = -tr(σ̄), σ̄_{eq} = √(3J₂), J₃ = det S, θ = sin⁻¹((3√3 J₃) / (2 σ̄_{eq}³)), J₂ = 1/2 S_{ij}S_{ij}.

式中: S 为损伤有效偏斜应力张量; f_{c0} 表示饱和状态下的材料轴向抗压强度;参数 c₁, c₂, c₃ 决定了破坏面的位置和形状.

引入塑性强化函数 α_p(γ_p)来研究加载过程.

α_p(γ_p) = γ_p / (A₁ + γ_p) (4)

其中, γ_p = ∫ dγ_p, dγ_p = √(2/3) de^p_{ij}de^p_{ij}, e^p_{ij} = ε^p_{ij} - 1/3 ε^p_{kk} δ_{ij}.

式中:参数 A₁ 控制塑性强化的速度; ε^p 为塑性应变张量.

实验观察表明,在加载过程中试样在经历体

积收缩后,有一个朝塑性体积膨胀的过渡.这个过渡通常是由于裂缝的产生和增加造成的.在模型中引入一个流动法则来描述这个过渡.参照 Pietruszczak 等^[9]的塑性模型,采用以下表达式:

$$g_p = \bar{\sigma} + \eta_c h(\theta) \Pi \ln(\frac{I}{I_0}) = 0, I = c_3 f_{c0} + I \quad (5)$$

式中: I_0 是塑性势能面和 I 轴的交点; η_c 控制塑性膨胀开始的时机; $h(\theta)$ 用来考虑 Lode 角对加载面的影响,该函数可通过实验确定,因实验数据不足,此处取 $h(\theta) = 1$.

2.2 损伤特征

模型假定损伤为各向同性,用标量 d 表征损伤量的大小.参考 Mazars 的研究^[10],采用如下的损伤准则:

$$f_d = A_2 - \frac{A_2}{\exp[B(\zeta_d - \zeta_d^0)]} - d = 0 \quad (6)$$

$$\zeta_d = \left[\frac{1}{2} \alpha k_0 (\epsilon_v^e)^2 + (\epsilon_v^p)^2 + \beta \mu_0 (e_{ij}^e e_{ij}^e + e_{ij}^p e_{ij}^p) \right] \quad (7)$$

其中,参数 A_2 为材料破坏时可达到的最大损伤值; B 和 ζ_d^0 分别控制加载过程中损伤发展的速度和开展的时机; ϵ_v^e 、 ϵ_v^p 分别是弹性、塑性体积应变; e^e 、 e^p 是弹、塑性偏斜应变张量; k_0 和 μ_0 分别是球形体积模量和剪切模量.

2.3 干燥影响

以饱和状态时的材料特性作为参照值来研究材料力学性能随饱和度的变化.通过分析实验结果,作者假定干燥作用的影响主要体现在材料强度的提高上,即

$$f_c(S_{lq}) = f_{c0} R(S_{lq}) \quad (8)$$

式中: $f_c(S_{lq})$ 为各种饱和度下材料的轴向抗压强度; f_{c0} 为饱和状态下材料的轴向抗压强度; 函数 $R(S_{lq})$ 可以通过实验测量各不同饱和状态下的强度值来确定.将 $f_c(S_{lq})$ 替代式(3)中的 f_{c0} 可得到如下关系式:

$$c_1(S_{lp}) = c_{1,0}, \quad c_2(S_{lp}) = c_{2,0} / R(S_{lq}),$$

$$c_3(S_{lq}) = c_{3,0} R(S_{lq}) \quad (9)$$

$c_{i,0} (i = 1, 2, 3)$ 分别是饱和状态下相应的参数值.由式(9)可见, c_2 、 c_3 都是饱和度的函数.

2.4 模型计算

根据实验结果确定模型计算所需要的参数值见表 1,并对已有实验进行模拟.

图 3 比较了各种不同饱和状态下(完全饱和,干燥 9 d、30 d、56 d、150 d,及完全干燥)进行的轴向压缩实验和数值模拟的结果.

由以上各图可见,建立的模型很好反映了各种干燥状态下单向压缩实验的应力—应变关系.随着饱和度的降低,材料的强度和脆性不断提高.

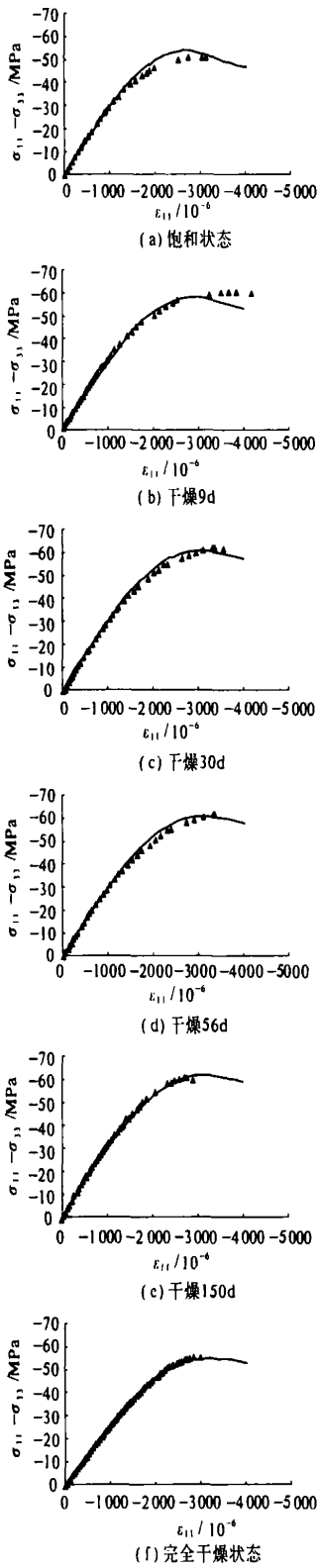


图 3 试样在不同干燥状态下轴向压缩实验同数值计算的比较

Fig.3 Comparison between simulations and experiments with different saturated states of uniaxial tests

表 1 模型参数		
Tab.1 Parameters used in the numerical simulations		
饱和状态	E/MPa	R/S_{Iq}
完全饱和	36 400	1.00
干燥 9 d	36 400	1.06
干燥 30 d	36 400	1.23
干燥 56 d	36 400	1.25
干燥 150 d	35 300	1.27
完全干燥	31 000	1.30
$v=0.19, f_{c0}=50 \text{ MPa}, A_1=6\times 10^{-5},$		
其它参数 $A_2=0.2, B=1.3\times 10^{-6}/\text{Pa}^{-1}, \eta_c=0.95,$		
$\zeta_d^0=4\times 10^4 \text{ Pa}, c_{1,0}=0.4, c_{2,0}=0.3, c_{3,0}=0.15$		

3 结论

对一系列不同饱和度的砂浆试样进行的轴向压缩实验,表明该材料在压缩过程中具有塑性和损伤的双重特征,此外材料内部饱和度对其抗压强度、脆性和弹性刚度都有影响.在实验基础上建立的损伤—弹塑性—干燥耦合模型不但可以描述饱和状态下砂浆材料的力学表现,而且反映了材料内部饱和度对其力学性能的影响.模型计算的结果同实验数据基本吻合,表明该模型可用于各种饱和度下砂浆材料的力学分析,并可扩展到其它水泥基材料的研究.

参考文献:

[1] 杨卫忠,樊 .混凝土单轴受压本构模型及其应用[J].郑州大学学报(工学版),2006,27(1):1~4.
[2] ACKER P. Comportement mécanique du béton : apport

de l'approche physico-chimique[D]. Paris: Ecole Nationale des Pont et Chaussées (in French), 1988.
[3] BAROGHEL—BOUNY V, GODIN J. Experimental study on drying shrinkage of ordinary and high-performance cementitious materials [C]. Paris: RILEM Publication PRO 2000, 215~232.
[4] BIOOCHOP J, PEL L. van Mier J G M. Effect of aggregate size and paste volume on drying shrinkage microcracking in cement-based composites [J]. Creep, Shrinkage & Durability—Mechanics of Concrete and other Quasi-Brittle Materials, 2001, 12: 75~80.
[5] BARTLETT F M, MACGREGOR J G. Effect of moisture condition on concrete core strengths [J]. ACI Materials Journal, 1994, 91 (3): 227~236.
[6] POPOVICS S. Effect of curing method and moisture condition on compressive strength of concrete [J]. ACI Journal, 1986, 83 (4): 650~657.
[7] YURTDAS I, BURLION N, SKOCZYLAS F. Triaxial mechanical behavior of mortar: effects of drying [J]. Cement and Concrete Res, 2004, 34: 1131~1143.
[8] CHEN D, YURTDAS I, BURLION N, et al. Élastoplasticité et endommagement dans un matériau cimentaire en cours de dessiccation (Comparaison essais/calculs) [J]. Revue Européenne de Génie Civil, 2006, 10(3): 405~421.
[9] PIETRUSZCZAK S, JIANG J, MIRZA F A. An elastoplastic constitutive model for concrete[J]. Int J Solids & Structures, 1988, 24 (7): 705~722.
[10] MAZARS J. Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non linéaire et à la rupture du béton de structure[D]. Paris: Université Paris, 1984.

Drying Effects on Mechanical Behavior of Cement Based Materials

CHEN Da¹, YURTDAS Ismail²

(1.College of Traffic and Ocean Hehai University, Nanjing 210098, China; 2.Laboratoire de Mécanique de Lille, Lille 59655, France)

Abstract: After it has matured in suitable environment, the free water in the cement based materials will vaporize, so the materials change from saturated to unsaturated state, and their mechanical properties change with the process. The evolution of mechanical properties as a function of drying process is investigated firstly by physical experiment; then an elastoplastic damage model is proposed to describe mechanical behaviour of cement based materials subject to drying. Comparison between numerical simulation and experimental data puts in light the capacity of the model to reproduce principal characteristics of cement based materials with regard to drying effects and mechanical behaviour.
Key words: cement based material; mechanical property; drying effect; damage; elastoplastic; coupling