

# 粗骨料体积分数对混凝土弹模和抗压强度的影响

韩宇栋<sup>1,2</sup>, 张君<sup>1,2</sup>, 王振波<sup>1,2</sup>

(1. 清华大学 土木工程系, 100084 北京; 2. 清华大学 结构安全与耐久教育部重点实验室, 100084 北京)

**摘要:** 为了研究粗骨料体积分数对早龄期混凝土弹性模量和轴心抗压强度发展的影响, 本文针对水胶比为 0.62、0.43 和 0.3 的三种混凝土分别设计了粗骨料体积分数逐渐增大的系列混凝土配合比. 保持混凝土的砂浆各组分不变, 粗骨料体积分数从零逐渐增大, 同一水胶比的系列混凝土 28 d 静力抗压弹性模量随粗骨料体积分数增大而单调显著增大, 而其轴心抗压强度则呈现“先减小、后增大”的变化规律且变化趋势相对平缓. 环境干燥下混凝土内部可蒸发水散失将降低水泥水化程度, 混凝土的弹性模量和轴心抗压强度均低于密封养护下的同期值; 水胶比越大, 环境干燥的影响越大. 本研究建议的基于水泥水化度发展预测混凝土弹性模量和抗压强度的模型, 对不同水胶比、不同粗骨料体积分数、不同养护条件均适用, 试验值和模型值吻合良好.

**关键词:** 混凝土; 粗骨料体积分数; 弹性模量; 轴心抗压强度; 水泥水化度

**中图分类号:** TU528      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0367-6234(2013)04-0084-08

## Effect of volume fraction of coarse aggregate on elastic modulus and compressive strength of concrete

HAN Yudong<sup>1,2</sup>, ZHANG Jun<sup>1,2</sup>, WANG Zhenbo<sup>1,2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, 100084 Beijing, China; 2. Key Laboratory of Structural Safety and Durability of China Education Ministry, Tsinghua University, 100084 Beijing, China)

**Abstract:** To investigate the effect of volume fraction of coarse aggregate (VFCA) on the developments of elastic modulus and prismatic compressive strength of early-age concrete, mixtures with different VFCA were designed for concretes with water to cementitious material ratio ( $w/b$ ) of 0.62, 0.43 and 0.3 respectively. Keeping the mortar composition and  $w/b$  unchanged, and merely increasing the VFCA gradually from zero, the elastic modulus of concrete at the age of 28 days increased significantly, whereas the compressive strength of prismatic specimen first slightly decreased when VFCA is small, and subsequently increased gently when VFCA became larger. External drying induced evaporable water loss in concrete decreased the degree of cement hydration, which resulted in a reduction on elastic modulus, and a reduction on compressive strength as well in the dried specimens compared to that of sealed ones with the same curing age. The larger the  $w/b$  was, the bigger reduction the elastic modulus exhibited. Degree of cement hydration-based predictions of concrete elastic modulus and compressive strength were proposed, and good agreements were found between the test and the analytical results regardless of  $w/b$ , VFCA and curing conditions.

**Key words:** concrete; coarse aggregate volume fraction; elastic modulus; prismatic compressive strength; degree of cement hydration

收稿日期: 2012-11-09.

基金项目: 国家自然科学基金(51178248); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2009CB623200); 高等学校博士学科点专项科研基金(20100002110016).

作者简介: 韩宇栋(1986—), 男, 博士研究生;  
张君(1962—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 张君, junz@tsinghua.edu.cn.

混凝土的弹性模量和抗压强度是土木工程结构设计中最基本的两个材料参数. 水灰比是决定混凝土强度的重要因素, 同时弹性模量和混凝土强度之间一般呈正相关关系. 若将混凝土看成由砂浆和粗骨料组成的两相复合材料, 则其力学性

能将取决于砂浆和粗骨料这两相的性质及其相互作用。一方面,水灰比、水泥的强度和用量、水化龄期等控制着混凝土中砂浆的强度发展,进而影响混凝土力学性质;另一方面,混凝土中粗骨料的体积分数、粗骨料的强度及其颗粒级配等则直接影响混凝土的强度和弹性模量等力学参数。通常,普通混凝土中粗骨料的体积分数约占总体积的40%~47%,总骨料的体积分数约为混凝土体积的60%~70%。可见粗骨料占据混凝土相当大的体积分量,且常用的破碎石灰石骨料具有较高的强度和弹性模量,因此粗骨料体积分数将对混凝土的力学性能产生明显的影响。Akçay等<sup>[1]</sup>的研究结果显示,对水灰比同为0.46、砂率不变、总骨料体积分数分别为40%、49%、58%、66%的混凝土,其弹性模量随总骨料体积分数的增大而增大(66%骨料混凝土的弹性模量相对于40%骨料混凝土增大30%);韩宇栋等<sup>[2]</sup>的研究表明总骨料体积分数从50%增加至70%时,水胶比为0.62、0.43、0.3的3个系列混凝土的抗弯强度、抗拉强度等均随之增大。

本文研究了3个水胶比系列混凝土在砂浆组成不变前提下单调改变粗骨料体积分数时混凝土弹性模量等力学性能随龄期的发展规律,并建立

了基于水泥水化度的相关预测模型。

## 1 试验设计

### 1.1 原材料

试验采用P·O.42.5普通硅酸盐水泥;粗骨料为破碎石灰石,抗压强度为95 MPa、密度为2 705 kg/m<sup>3</sup>、粒径5~20 mm连续级配、针片颗粒含量小于5%;细骨料为天然砂,细度模数为2.5;粉煤灰为一级低钙灰;硅灰为奥斯SF-93级;减水剂为聚羧酸PCA-I型减水剂。

### 1.2 混凝土配合比

为研究不同强度等级混凝土中的粗骨料体积分数对弹性模量和抗压强度发展的影响,设计了水胶比为0.62、0.43、0.3(依次标记为C3、C5、C8)3个强度系列混凝土;每个水胶比系列中,保持所用胶凝材料及砂浆组成不变,仅在砂浆中单调增加粗骨料,设计总骨料(砂+石)体积分数分别为50%、60%、70%的混凝土及其对应砂浆,依次标记为V50、V60、V70、M,配合比见表1。C3和C5系列中粉煤灰掺量为胶凝材料总质量的20%,C8系列中硅灰掺量为胶凝材料总质量的10%。调整减水剂用量保证新拌混凝土和易性良好、坍落度为80~100 mm。

表1 混凝土的配合比

编号	水泥	水	砂	石	粉煤灰	硅灰	水胶比	减水剂	粗骨料体积分数/%
C3-M	414.7	321.4	1 295.8	0	103.7	0	0.62	0	0
C3-V50*	405.9	314.6	1 268.4	57.7	101.5	0	0.62	0	2.1
C3-V60	323.1	250.4	1 009.5	591.4	80.8	0	0.62	0	21.9
C3-V70	240.2	186.2	750.7	1 125.2	60.1	0	0.62	1.2	41.7
C5-M	576.9	309.4	1 145.5	0	142.2	0	0.43	2.0	0
C5-V50	506.8	271.8	1 006.2	324.8	124.9	0	0.43	2.0	12.0
C5-V60	403.4	216.3	800.9	804.0	99.4	0	0.43	3.1	29.8
C5-V70	299.9	160.8	595.5	1 283.2	73.9	0	0.43	3.6	47.5
C8-M	831.2	277.1	1 071.3	0	0	92.4	0.30	6.4	0
C8-V50	694.3	231.4	894.9	438.2	0	77.2	0.30	6.4	16.2
C8-V60	552.6	184.2	712.3	894.3	0	61.4	0.30	6.6	33.1
C8-V70	410.9	137.0	529.6	1 350.4	0	45.7	0.30	6.8	50.0

注:因C3-V50\*混凝土中粗骨料体积分数仅为2.1%,非常接近C3系列砂浆的配合比,故试验研究中省去此配合比。

根据GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》制作、成型混凝土试件,试件尺寸为100 mm×100 mm×300 mm,各配合比在每个测试龄期轴心抗压强度试验和弹性模量试验各测试3块试件,结果取平均值。为考察养护条件对混凝土弹性模量等力学性质的影响,混凝土试件置于室内自然温湿度环境下,进行干燥和密封养

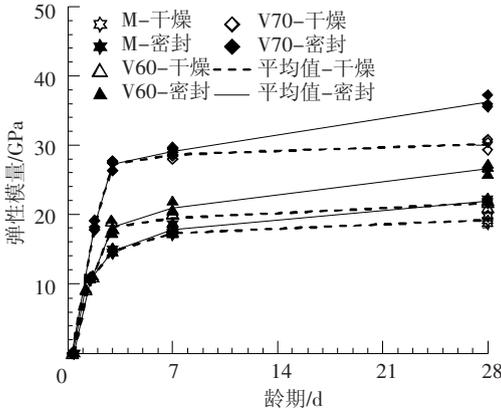
护对比研究。弹性模量和强度试件均在成型1 d后脱模并均用塑料膜严实密封,待3 d龄期时,所有干燥试件均去除塑料膜进行自然干燥养护。实验室环境温度23±2℃,相对湿度34±8%。试验测量1 d、3 d、7 d、28 d四个龄期混凝土的弹性模量和轴心抗压强度。试验在Toni试验机上进行;弹性模量试验中应变采用电阻应变片进行测定。

## 2 结果及分析

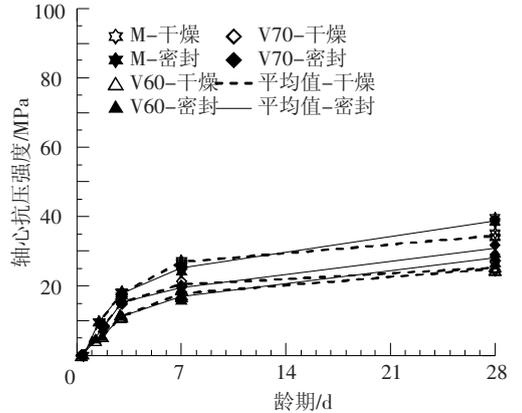
### 2.1 弹性模量和轴心抗压强度

试验得 C3、C5、C8 三个系列混凝土在密封及室内自然干燥养护下弹性模量及轴心抗压强度随龄期(1 d、3 d、7 d 和 28 d)发展曲线,如图 1 所示. 首先可见,水胶比和粗骨料体积分数是决定混凝土弹性模量的两个主要因素. 水胶比降低,弹性模量增高;粗骨料体积分数增大,混凝土的弹性模

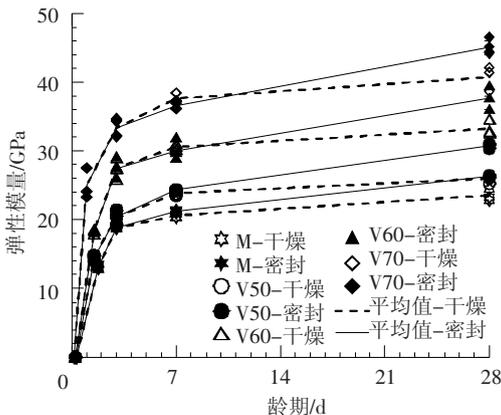
量亦明显提高;其次,粗骨料体积分数单调增加对弹性模量和轴心抗压强度的影响规律不同,上述 4 个典型龄期时 3 个水胶比系列混凝土的弹性模量均随粗骨料体积分数增大而单调增高,且粗骨料体积分数对弹性模量的影响程度大于对同龄期抗压强度的影响;第三,弹性模量随龄期发展速率明显快于抗压强度,以 C3 - V70 密封养护混凝土为例,3 d 龄期的弹性模量已发展至 28 d 龄期值的 75%,而轴心抗压强度的该比值仅为 49%.



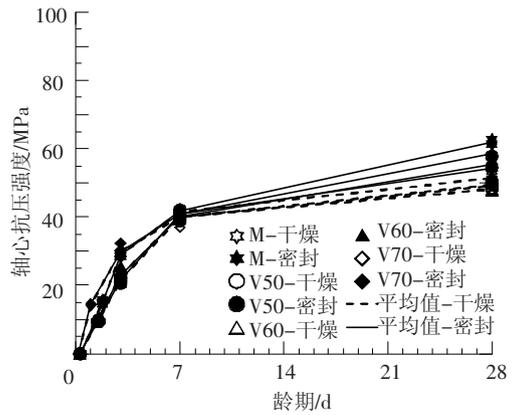
(a) C3, 弹性模量 - 龄期



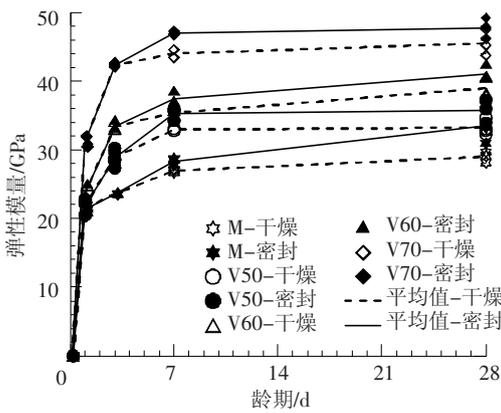
(b) C3, 轴心抗压强度 - 龄期



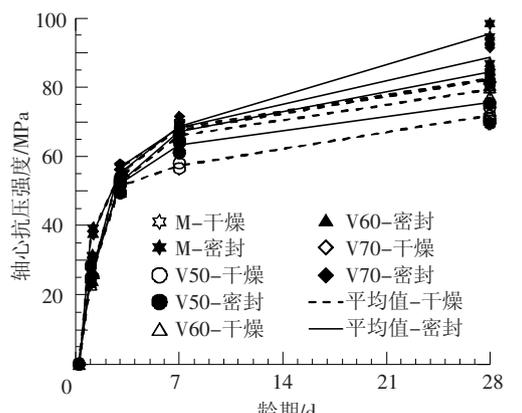
(c) C5, 弹性模量 - 龄期



(d) C5, 轴心抗压强度 - 龄期



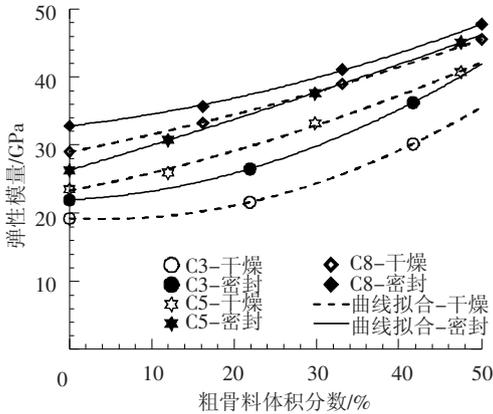
(e) C8, 弹性模量 - 龄期



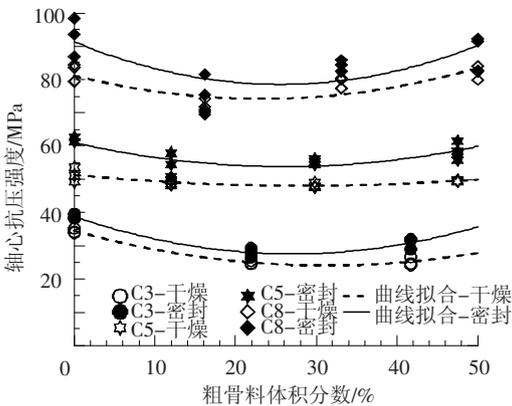
(f) C8, 轴心抗压强度 - 龄期

图 1 密封和干燥养护下混凝土弹性模量和轴心抗压强度随龄期发展曲线

图2分别给出了3个系列混凝土28d弹性模量和轴心抗压强度随粗骨料体积分数的变化曲线。



(a) 弹性模量 - 粗骨料体积分数



(b) 轴心抗压强度 - 粗骨料体积分数

图2 密封和干燥养护下混凝土28d弹性模量和轴心抗压强度随粗骨料体积分数的变化曲线

由图2可见混凝土28d龄期弹性模量均随着粗骨料体积分数增大而单调增高,而轴心抗压强度变化则相对平缓。这是由于石灰石粗骨料体积分数增大时,弹性应力状态下高强、致密的粗骨料受压变形明显小于富含毛细孔的水泥砂浆,且粗骨料表面过渡区体量增多的不利影响在弹性应力范围内尚未凸显,弹性模量测试中混凝土受压总变形减小;密封养护条件下C8、C5和C3的V70混凝土弹性模量相对于砂浆分别提高45.3%、71.4%和65.1%,可见混凝土弹性模量受石灰石粗骨料体积分数影响非常显著。抗压强度测试中当混凝土处于极限应力状态时,中低强混凝土(C5、C3)中砂浆基材先于粗骨料发生破坏,斜剪面上粗骨料大量拔出并未断裂,高强混凝土C8中砂浆基材强度已接近石灰石粗骨料强度,即使破坏面上粗骨料断裂,对抗压强度的提高也有限;加之粗骨料体积分数增大时,抗压极限应力状态时其表面力学性质相对薄弱的过渡区将带来不利影响;另外,对于每组的砂浆(M)试件,因

其单方水泥用量最大,加之无粗骨料表面过渡区引入较大原生裂纹的不利影响,因而抗压强度较高。综上,随粗骨料体积分数增大,混凝土抗压强度呈“两边高、中间低”的变化规律。

另外环境干燥将引起干燥养护混凝土弹性模量的降低,C3、C5、C8系列相比于密封试件值平均降幅依次为16%、12%、7%;这一方面是由于环境干燥将引起混凝土内部水分蒸发散失、混凝土内部相对湿度降低,干燥引起的失水量越大、内部湿度下降越大,混凝土中水泥的水化程度相对于不存在干燥失水时的降低值越大,混凝土的弹性模量降低也越大;另一方面还可能由于干燥养护下水泥石毛细孔的水饱和程度相对于密封养护下有所降低,在弹性应力状态下,毛细孔水受压产生的静水压力减小,相同外荷载作用下水泥石的弹性变形增大,混凝土的弹性模量降低。

## 2.2 基于水泥水化度的混凝土弹性模量与轴压强度模拟

### 2.2.1 水泥的水化度及修正

模拟混凝土力学性质随龄期增长规律,通常有成熟度法和水化度法。混凝土成熟度<sup>[3]</sup>为不同温度历程下混凝土温度对时间的积分。成熟度法<sup>[4]</sup>假设同一配合比的混凝土在水分充足的条件下,由不同的温度历程达到相同成熟度时的混凝土宏观力学性质近似相等。水化度法假设相同配合比的混凝土在达到同样的水泥水化程度时具有近似相同的宏观力学性质和微观孔隙结构。在不存在外环境干燥引发混凝土内部水分散失的情况下,Geert<sup>[5]</sup>证明了此时两种方法的等效性。若早龄期混凝土微观结构生长过程中,因干燥失水而造成水泥水化程度与非失水环境相比有所降低,则混凝土相应的宏观力学性能将有所差异<sup>[6]</sup>,此时成熟度原则不再适用,而水化度原则仍然成立。因此本文参考文献<sup>[7]</sup>,基于水泥水化度并考虑环境干燥对水泥水化的影响<sup>[8]</sup>,对混凝土的弹性模量和抗压强度随龄期发展规律进行模拟。

水泥的水化度通常定义为已完全水化水泥的质量与初始水泥质量之比。目前确定净浆中水泥水化度的微观方法较多<sup>[9]</sup>,如高温灼烧法测定化学结合水的量;热分析或定量XRD法测定Ca(OH)<sub>2</sub>的生成量,SEM成像分析或定量XRD法测定未水化水泥熟料的量等,但上述微观方法对样品的均匀性及取样的代表性要求较高,且连续测定时工作量较大;工程中通常需要连续获得混凝土中水泥水化度随龄期的发展规律,常用量热法确定水泥水化度,因此本文利用绝热温升试验<sup>[10]</sup>测定水化热确

定3个水胶比(0.62、0.43、0.3)系列混凝土的水泥水化度,研究证实同一水胶比不同粗骨料体积分数的系列混凝土的水泥水化度随等效龄期发展规律几乎一致,  $\alpha - t_{eq}$  关系式为

$$\alpha(t_{eq}) = \alpha_u \exp - (A/t_{eq})^B \quad (1)$$

式中:  $A$ 、 $B$  为常数(列于表2);  $\alpha_u$  为最终水泥水化度,是水灰比的函数且其值小于1, Mills<sup>[11]</sup> 对一般混凝土中水泥的最终水化程度进行了研究,给出表达式为

$$\alpha_u = \frac{1.031w/c}{0.194 + w/c} \quad (2)$$

等效龄期  $t_{eq}$  定义为<sup>[12]</sup>

$$t_{eq} = \int_0^t e^{\frac{1}{R} \left( \frac{U_{ar}}{293} - \frac{U_{aT}}{273+T} \right)} dt \quad (3)$$

式中:  $R$  为气体常数,取  $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ;  $U_{ar}$  为参考温度(通常取  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 时水泥水化反应活化能;  $U_{aT}$  为温度为  $T$  时的反应活化能;  $U_a$  是时间和温度的函数,可近似表达为<sup>[13]</sup>

$$U_a = (42\ 830 - 43T)e^{(-0.000\ 177T)} \quad (4)$$

等效龄期建立了经不同温度历程混凝土达到相同成熟度所需时间之间的关系. 应用等效龄期的方法,可以把任意温度历程下混凝土弹性模量和抗压强度发展历程统一等效为参考温度下的发展历程.

环境干燥将引发混凝土内部可蒸发水散失、内部湿度降低值增大,混凝土中水泥水化度相对于密封条件下将降低. 本文参考侯东伟等<sup>[8,14]</sup> 提出的方法对干燥养护混凝土的水化度进行修正. 由绝热温升试验<sup>[10]</sup> 及混凝土内部湿度测量<sup>[15]</sup> 可得密封条件下混凝土水泥水化度(见图3)和内部湿度发展的关系,水泥水化速率( $d\alpha/dt_{eq}$ ) 可一般性地写成相对湿度  $H$  的表达式为<sup>[14]</sup>

$$\frac{d\alpha}{dt_{eq}} = k(H)^n + p \quad (5)$$

式中  $k$ 、 $n$ 、 $p$  为水化速率参数(见表2). 考虑混凝土内部湿度从湿度饱和开始下降时的水化度为临界水化度,即  $\alpha = \alpha_c$  时,  $H = 100\%$ , 得

$$k = \alpha_c \cdot \frac{B}{A} \left( \ln \left( \frac{\alpha_u}{\alpha_c} \right) \right)^{\frac{B+1}{B}} - p \quad (6)$$

则考虑环境干燥影响的水泥水化速率为

$$\frac{d\alpha}{dt_{eq}} = \begin{cases} \alpha \cdot \frac{AB}{t_{eq}^2} \left( \frac{A}{t_{eq}} \right)^{B-1}, & \alpha \leq \alpha_c (H = 100\%); \\ \left( \frac{\alpha_c \cdot B}{A} \left( \ln \left( \frac{\alpha_u}{\alpha_c} \right) \right)^{\frac{B+1}{B}} - p \right) \cdot (H)^n + p, & \alpha > \alpha_c (H < 100\%). \end{cases} \quad (7)$$

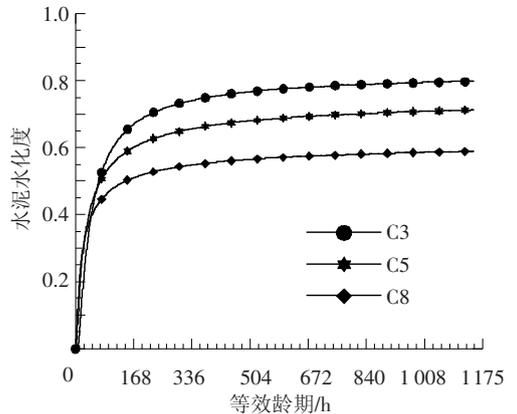


图3 绝热温升试验测得混凝土水泥水化度 - 等效龄期曲线 ( $\alpha - t_{eq}$ )

将干燥试件内部相对湿度按式(7)从干燥时刻起对等效龄期积分,即可获得考虑干燥失水影响的水泥水化度发展规律. 图4给出了3个水胶比混凝土密封和干燥条件下混凝土内部相对湿度和水泥水化度随等效龄期的发展曲线,可见水胶比增大,环境干燥引起的混凝土内部湿度下降增大、混凝土后期水化度降低值增大.

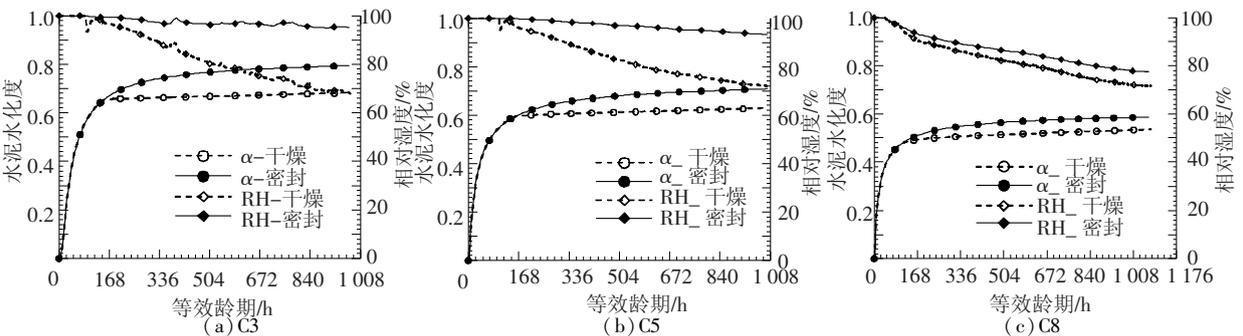


图4 密封和干燥养护下混凝土水泥水化度及内部相对湿度随等效龄期发展曲线

表2 水泥水化度及水化速率函数参数

编号	$\alpha_u$	$A$	$B$	$\alpha_c$	$n$	$p$
C3	0.824 6	32.600	0.960 4	0.572 8	123.1	0.000 031
C5	0.757 1	20.182	0.693 6	0.493 8	69.4	0.000 034
C8	0.626 1	13.323	0.628 1	0.375 3	35.0	0.000 037

### 2.2.2 早龄期混凝土弹性模量与轴压强度模拟

基于试验, Geert 等<sup>[7]</sup> 初步建立了基于水泥水化度的混凝土性能发展的预测模型, 侯东伟等<sup>[8]</sup> 考虑实际混凝土中水泥不能完全水化而对该模型进行了改进, 即混凝土弹性模量和轴心抗压强度

可表达为随水泥水化度发展的函数

$$\begin{cases} E(\alpha) = \beta_E \cdot E_{28} \left( \frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha_u - \alpha_0} \right)^b, \\ f(\alpha) = \beta_f \cdot f_{28} \left( \frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha_u - \alpha_0} \right)^d. \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\beta_E, \beta_f$ 为考虑28 d龄期后混凝土弹性模量和抗压强度的后续增长的系数,即: $\beta_E = E_u/E_{28}$ ,  $\beta_f = f_u/f_{28}$ ;  $E_u, f_u$ 为混凝土水泥水化度达到最终水化度 $\alpha_u$ 时的最终弹性模量和轴心抗压强度. 基于式(8)及试验数据,本研究中3个水胶比系列混凝土 $\beta_E, \beta_f$ 均分别取1.05和1.2.  $\alpha_0$ 为混凝土凝结时的水化度,由试验确定混凝土凝结时的等效时间,再由式(1)计算.  $b, d$ 为参数(见表3),通常为水灰比的函数. 由试验结果,参数 $b, d$ 与混凝土水灰比( $w/c$ )之间的关系可回归为下列线性关系,即

$$\begin{cases} b = 1.163 \cdot (w/c) + 0.299, \\ d = 2.612 \cdot (w/c) + 0.878. \end{cases} \quad (9)$$

混凝土的凝结时间可通过超早龄期混凝土侧向变形膨胀结束点来确定,水灰比越大,混凝土凝结越晚<sup>[16]</sup>. 粗骨料体积分数越高、砂浆量越少,对混凝土流动的润滑作用越弱,粗骨料间的摩阻力增大,使混凝土凝结前的塑性流动受限,粗骨料含量接近其自身紧密堆积状态时形成相互搭接的固体骨架,可使混凝土获得整体刚度的时间提前. 文献[15]测量了本研究C3、C5、C8系列V50、V60、V70混凝土的早龄期侧向变形,结果显示同一水胶比混凝土的侧向变形膨胀结束点对应的等效龄期随粗骨料体积分数增大而提前(见表3). 混凝土的凝结等效时间(h)与水灰比和粗骨料体积分

数之间的关系可模拟为

$$t_{eq0} = \frac{\tau_1 \cdot (w/c)}{\tau_2 + w/c} \cdot (1 - V_{CA})^{\tau_3}. \quad (10)$$

式中: $V_{CA}$ 为粗骨料体积分数, $\tau_1, \tau_2, \tau_3$ 为参数,  $\tau_1 = 91.686, \tau_2 = 4.742, \tau_3 = 0.995$ . 不同系列混凝土等效凝结时间随粗骨料体积分数变化曲线如图5所示. 由式(10)即可获得不同水灰比、不同粗骨料体积分数的混凝土等效凝结时间,进而由式(1)计算 $\alpha_0$ .

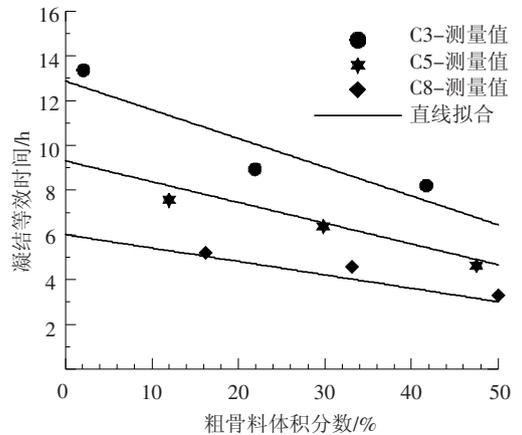


图5  $t_{eq0} - V_{CA}$  曲线<sup>[15]</sup>

不同粗骨料体积分数时3个水胶比系列混凝土的弹性模量和轴心抗压强度随混凝土水泥水化度发展的试验值和基于式(8)的模型值对比如图6、7所示. 由图清晰可见粗骨料体积分数对混凝土弹性模量的影响明显强于对抗压强度的影响; 混凝土弹性模量和抗压强度随水泥水化度增长而呈现两种不同增长规律,水泥水化度小于0.35时,混凝土弹性模量已较大幅度发展,而此时混凝土强度则发展较小.

表3 混凝土轴心抗压强度、弹性模量及等效凝结时间参数

编号	$f_{28\_密封}/MPa$	$d$	$E_{28\_密封}/GPa$	$b$	$\alpha_0$	$t_{eq0}/h$
C3 - M	38.8	2.70	22.0	1.13	0.074	12.88
C3 - V60	28.0	3.38	26.5	1.35	0.026	8.95
C3 - V70	30.9	2.81	36.3	1.14	0.019	8.22
C5 - M	62.0	2.02	26.3	0.93	0.125	9.32
C5 - V50	54.3	2.27	30.8	1.01	0.105	7.57
C5 - V60	55.3	2.39	37.6	0.95	0.082	6.40
C5 - V70	58.4	2.04	45.1	0.76	0.048	4.65
C8 - M	95.6	1.94	32.9	0.79	0.125	6.02
C8 - V50	75.5	1.48	35.7	0.69	0.103	5.21
C8 - V60	84.3	1.81	41.1	0.70	0.089	4.59
C8 - V70	88.7	1.98	47.8	0.59	0.057	3.30

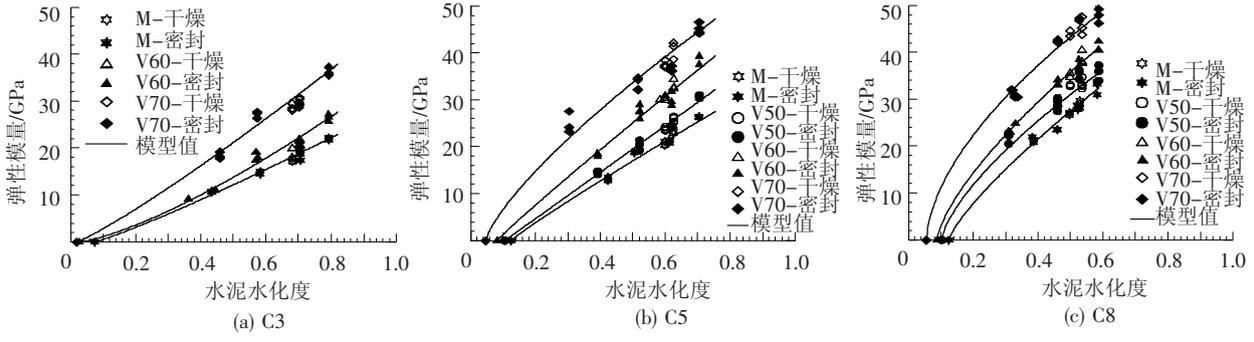


图6 不同粗骨料体积分数的混凝土弹性模量随水泥水化度发展的试验和模型值对比

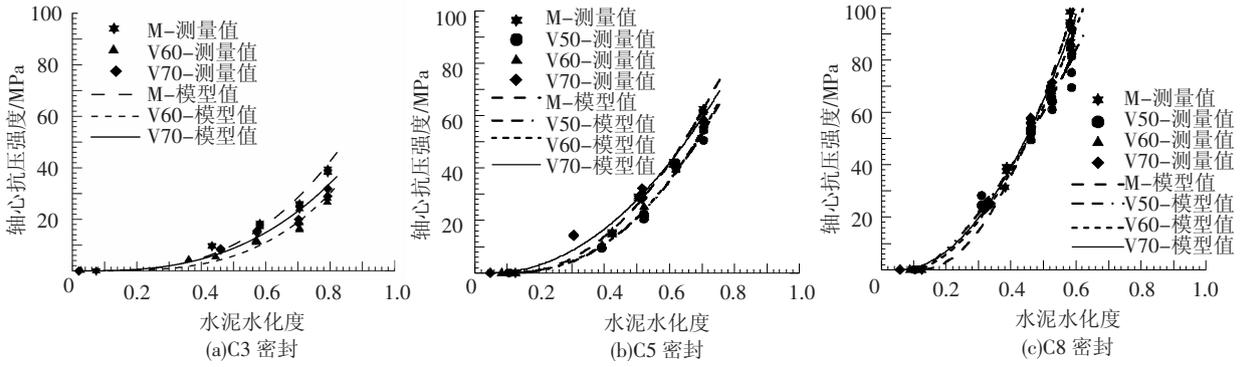


图7 不同粗骨料体积分数的混凝土轴心抗压强度随水泥水化度发展的试验和模型值对比

图8给出了密封和环境干燥养护条件下不同粗骨料体积分数混凝土弹性模量随等效龄期发展的试验值和模型值的对比,可见,在不同水胶比、不同养护条件及不同粗骨料体积分数下,试验值和模型值均吻合良好.结合图6和图8中干燥条

件下混凝土弹性模量随水泥水化度及等效龄期发展的试验值和模型值均吻合良好,也验证了前述基于环境干燥条件下混凝土内部相对湿度的水泥水化度修正方法的合理性.

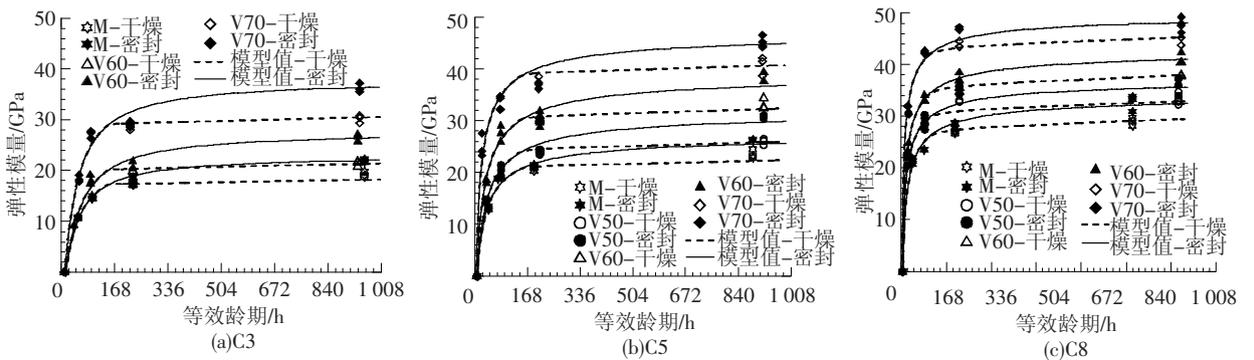


图8 密封和干燥养护下不同粗骨料体积分数的混凝土弹性模量随等效龄期发展的试验和模型值对比

### 3 结论

在水胶比为0.62、0.43、0.3(C3、C5、C8)的3个系列混凝土中,保持砂浆组分不变,逐渐增大每个系列中高强石灰石粗骨料体积分数,设计了总骨料体积分数50%、60%、70%(V50、V60、V70)的3种混凝土及对应砂浆(M);试验研究了密封和环境干燥养护下粗骨料体积分数对早期龄期凝

土弹性模量和轴心抗压强度的影响规律,结论如下:

1) 随粗骨料体积分数增大混凝土弹性模量单调增大;密封养护条件下C8、C5和C3的V70混凝土28d弹性模量较之对应砂浆分别提高45.3%、71.4%和65.1%;而混凝土的抗压强度随粗骨料体积分数增大则呈“两边高、中间低”的变化规律,且变化幅度较小.

2) 自然干燥养护下 C3、C5、C8 系列混凝土 28 d 弹性模量相对于密封试件值平均降幅依次为 16%、12%、7%，即水胶比越大，受环境干燥的影响越大。

3) 所建立的基于水泥水化度预测混凝土弹性模量和轴心抗压强度发展的模型，适用于不同水胶比、不同粗骨料体积分数、不同养护条件，试验值和模型值吻合良好。

## 参考文献

- [1] AKCAY B, AGAR-OZBEK A S, BAYRAMOV F, *et al.* Interpretation of aggregate volume fraction effects on fracture behavior of concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 28(1): 437–443.
- [2] 韩宇栋, 张君, 高原. 粗骨料体积分数对混凝土断裂参数的影响[J]. *工程力学*, 2013, 30(3): 191–197.
- [3] GUO C J. Maturity of concrete: method for predicting early-stage strength[J]. *ACI Materials Journal*, 1989, 86(4): 341–353.
- [4] CARINO N J, LEW H S. The maturity method: from theory to application [C]//*Proceedings of the 2001 Structures Congress & Exposition*. Washington D C: American Society of Civil Engineers, 2001: 1–19.
- [5] GEERT D S. Applicability of degree of hydration concept and maturity method for thermo-visco-elastic behaviour of early age concrete[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2004, 26(5): 437–443.
- [6] MEHTA P K, MONTEIRO P. *Concrete: microstructure, properties, and materials*[M]. 3rd edition. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2005.
- [7] GEERT D. S, TAERWE L. Degree of hydration-based description of mechanical properties of early age concrete [J]. *Materials and Structures*, 1996, 29(6): 335–344.
- [8] 侯东伟, 张君, 陈浩宇, 等. 干燥与潮湿环境下混凝土抗压强度和弹性模量发展分析[J]. *水利学报*, 2012, 43(2): 198–208.
- [9] PARROTTA L J, GEIKER M, GUTTERIDGE W, *et al.* Monitoring Portland cement hydration: comparison of methods[J]. *Cement and Concrete Research*, 1990, 20(6): 919–926.
- [10] 张君, 祁锟, 侯东伟. 基于绝热温升试验的早龄期混凝土温度场的计算[J]. *工程力学*, 2009, 26(8): 155–160.
- [11] MILLS R H. Factors influencing cessation of hydration in water-cured cement pastes. [C]//*Proceeding of the symposium on the structure of Portland cement paste and concrete*. Washington D C: Highway Research Board, 1996, 90: 406–424.
- [12] HANSEN P F, PEDERSEN E J. Maturity computer for controlled curing and hardening of concrete[J]. *Nordisk Betong*, 1977, 1: 19–34.
- [13] PANE I, HANSEN W. Concrete hydration and mechanical properties under nonisothermal conditions [J]. *ACI Materials Journal*, 2002, 99(6): 534–542.
- [14] 侯东伟. 混凝土自身与干燥收缩一体化及相关问题研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- [15] ZHANG Jun, HAN Yudong, GAO Yuan. Effects of water-binder ratio and coarse aggregate content on interior humidity, autogenous and drying shrinkage of concrete [J]. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, 2013, In Press (doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000799).
- [16] 侯东伟, 张君, 孙伟. 基于早期变形特征的混凝土凝结时间的确定[J]. *硅酸盐学报*, 2009, 37(7): 1079–1084.

(编辑 赵丽莹)