

文章编号:1007-9629(2023)11-1229-08

## 基于压入法原理测试混凝土超早期弹性模量

王冬丽<sup>1,2</sup>, 赵庆新<sup>2,\*</sup>, 董炳强<sup>1</sup>, 杨泽宇<sup>1</sup>, 袁丽丽<sup>3</sup>

(1. 东北石油大学 土木建筑工程学院, 黑龙江 大庆 163318; 2. 燕山大学 城市固废无害化协同处理及利用河北省工程研究中心, 河北 秦皇岛 066004; 3. 深圳市国艺园林建设有限公司研发中心, 广东 深圳 518040)

**摘要:** 基于压入法原理, 提出了 1 种混凝土超早期弹性模量的测试方法. 采用数值分析方法设计试件尺寸, 选用 30° 球锥形压头作为混凝土超早期弹性模量的测试压头, 优化压入深度为 5 mm. 通过改变混凝土的水胶比和粉煤灰掺量, 并与超声波法相对比, 对该方法进行验证. 以初凝时刻的弹性模量 0 值为起点, 传统应力-应变方法最早测得的弹性模量为终点, 用这 2 点之间的连线预测混凝土超早期弹性模量. 该预测法与压入法试验结果相比, 误差均在 30% 以内.

**关键词:** 混凝土; 弹性模量; 超早期; 压入法; 压头

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2023.11.012

## Determination of Elastic Modulus of Concrete at Ultra-early Age by Indentation Technique

WANG Dongli<sup>1,2</sup>, ZHAO Qingxin<sup>2,\*</sup>, DONG Bingqiang<sup>1</sup>, YANG Zeyu<sup>1</sup>, YUAN Lili<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China; 2. Hebei Province Engineering Research Center for Harmless Synergistic Treatment and Recycling of Municipal Solid Waste, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 3. Shenzhen Guoyi Park Construction Co., Ltd., Research and Development Center, Shenzhen 518040, China)

**Abstract:** Based on the principle of the indentation method, a test method for the ultra-early elastic modulus of concrete was proposed. The size of the specimen was designed by numerical analysis method, and the spherical conical indenter with a cone angle of 30° was selected as the test indenter for the ultra-early elastic modulus of concrete, the optimal indentation depth was 5 mm. Comparing with the ultrasonic method, the method was verified by changing the water-binder ratio of concrete and the amount of fly ash. The initial setting time is taken as the zero point and the earliest elastic modulus that can be measured by the traditional stress-strain method as the end point, the two-point line is used to predict the super-early elastic modulus of concrete. To compare with the experimental results of the indentation method, the errors are all within 30%.

**Key words:** concrete; elastic modulus; ultra-early age; indentation technique; indenter

开裂是影响混凝土耐久性的重要因素<sup>[1]</sup>, 弹性模量对混凝土开裂具有重要影响. GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》中采用应力-

应变方法测试混凝土的弹性模量<sup>[2]</sup>, 但对于混凝土从初凝到应用应力-应变方法进行测试这段时间(本文定义为超早期), 尚无明确的测试方法. 混凝土超早

收稿日期: 2023-03-18; 修订日期: 2023-05-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52078450); 河北省自然科学基金资助项目(E2021107004); 深圳市科技研发资金资助项目(JSJG20210802152541012)

第一作者: 王冬丽(1979—), 女, 吉林松原人, 东北石油大学副教授, 硕士生导师, 博士. E-mail: dongli.w@126.com

通讯作者: 赵庆新(1973—), 男, 河北玉田人, 燕山大学教授, 博士生导师, 博士. E-mail: zhaoqx2002@163.com

期弹性模量对其早期开裂产生重要影响,也是水泥基材料数值模拟所需的重要力学参数<sup>[3]</sup>,引起了国内外研究者的较大兴趣。

水泥基材料超早期弹性模量分为动弹性模量和静弹性模量<sup>[4-6]</sup>。Reinhardt等<sup>[7]</sup>采用超声波速法测试装置,通过纵横波计算水泥基材料超早期的动弹性模量。Azenha等<sup>[8]</sup>提出了1种通过共振频率演变得到动弹性模量的测试方法。静弹性模量测试法的受力与工程实际更为接近<sup>[9]</sup>。因超早期水泥基材料不能够拆模,无法直接由应力-应变方法测得其弹性模量<sup>[10]</sup>。Delsaute等<sup>[11]</sup>利用压力机和引伸计,测得混凝土浇筑7h后的弹性模量。Staquet等<sup>[12]</sup>将混凝土浇筑于狗骨形水平模具内进行水平加载,测得混凝土浇筑8h后的静弹性模量<sup>[13]</sup>。

一些学者采用纳米压痕法研究水泥基材料的力学行为<sup>[14]</sup>。江俊达等<sup>[15]</sup>建立了1种微观断裂韧度的计算方法。魏亚等<sup>[16]</sup>表征了净浆微观结构力学性能。刘东旭等<sup>[17]</sup>证明了采用宏观压入法研究金属材料弹模的可行性。

本文讨论了采用压入法测试混凝土超早期弹性模量的可能性,以期为水泥基材料超早期力学性能的研究提供一种简单、高效的测试方法。

## 1 压入法基本原理

### 1.1 压入法基本公式

ISO 14577-1: 2015《Metallic materials—Instrumented indentation test for hardness and materials parameters—Part 1: Test method》按压入深度 $h$ 和载荷 $P$ ,将压入法分为:纳米范畴, $h \leq 200$  nm;显微范畴, $P < 2$  N、 $h > 200$  nm;宏观范畴, $2$  N  $\leq P \leq 30$  kN。宏观压入试验借助传感器,记录压头在加载-卸载过程中的 $P$ - $h$ 曲线。对该曲线的分析普遍采用Oliver-Pharr方法<sup>[18]</sup>,此方法基于接触力学理论可以得到材料的弹性模量。加载过程中试件产生弹性变形和塑性变形,卸载过程是弹性变形的恢复过程,最终的残余变形是无法恢复的塑性变形,使试件表面形成压痕。对卸载曲线进行分析,得到材料的弹性模量。选取卸载曲线上部的40%进行拟合,得到式(1)。

$$P = B(h - h_f)^m \quad (1)$$

式中: $h_f$ 为残余压入深度; $B$ 和 $m$ 为拟合参数。

对式(1)进行求导,可得:

$$S = \left( \frac{dP}{dh} \right)_{h=h_{\max}} \quad (2)$$

式中: $S$ 为接触刚度; $h_{\max}$ 为最大压入深度。

压头接触深度 $h_{o\&p}$ 的计算式为:

$$h_{o\&p} = h_{\max} - \varepsilon \frac{P_{\max}}{S} \quad (3)$$

式中: $\varepsilon$ 为压头形状参数,对于圆锥形压头, $\varepsilon=0.73$ ;对于球锥形压头, $\varepsilon=0.75$ 。 $P_{\max}$ 为最大压入载荷。

根据接触力学与弹性力学求得接触刚度 $S$ 与折合弹性模量 $E_r$ 的关系,其计算式为:

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2\beta} \cdot \frac{S}{\sqrt{Ah_{o\&p}}} \quad (4)$$

其中  $\frac{1}{E_r} = \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i}$  (5)

式中: $\beta$ 为压头的形状参数,对于轴对称压头, $\beta=1$ ;  $A$ 为刚性压头的接触面积; $E$ 和 $\nu$ 分别为测试材料的弹性模量和泊松比; $E_i$ 和 $\nu_i$ 分别为压头的弹性模量和泊松比。

需要说明的是,本研究属于压入法的宏观测试,可认为压头的制作误差与磨损的影响相对较小,故接触面积不必修正,近似为压头与试件材料接触的投影面积。

### 1.2 压入法的适用条件

压入法主要用于金属材料。基于弹性接触理论,公认的压入法基本假设为<sup>[19]</sup>:(1)均匀、各向同性的材料;(2)压入凹陷的变形模式,即周围材料随压头下沉而低于初始试件表面;(3)试件表面为平面,可忽略粗糙度影响;(4)材料尺寸远大于压入深度,可忽略边界效应的影响;(5)试样无徐变和松弛,可忽略时间因素的影响。

## 2 可行性研究

### 2.1 试件尺寸设计

相比水泥石和砂浆,混凝土中因粗骨料的存在,其具有明显的不均匀性。为减小尺寸效应的影响,通过数值模拟方法设计混凝土试件尺寸,以满足基本假设中条件(4)的要求<sup>[20-21]</sup>。

本文选用有限元软件Abaqus进行仿真分析,研究试件尺寸对压入行为的影响,以确定合理的压入试件尺寸。控制压入深度不变,改变试件半径和厚度,分析压入荷载的差异。考虑到所使用的钢制圆锥压头和圆柱体混凝土试件均为旋转轴对称体,建立轴对称模型。压头选用30°球锥压头,钢制压头的弹性模量为200 GPa,泊松比为0.30。假定混凝土为线弹性体,其超早期弹性模量为300 MPa、泊松比为0.35。接触类型选择面-面接触,接触属性的切向行为设定为无摩擦,法向行为设定为硬接触。边界条件为:试件对称轴被赋予轴对称边界;试件底面约束轴向位移,即相当于将试件置于刚性底座上。由于压入试验本质上是非线性接触问题,所以选取适合用于接触分析的C4X4R(四节点双线性缩减积分带沙漏

控制的四边形)单元,单元形状选为四边形.控制 $h_{\max}$ 为5 mm,并将试件半径 $R$ 保持为 $h_{\max}$ 的20倍(100 mm).试件底部为固定端,不受外力,得出不同厚度 $H$ 试件的最大压入荷载 $P_{\max}$ .

试件厚度与最大压入深度的比值 $H/h_{\max}$ 对压入行为的影响如表1所示.由表1可知:(1)随着 $H/h_{\max}$ 的降低, $F_{\max}$ 逐渐增大.这是因为当试件厚度小到一定程度时,应力非均匀区域的前沿将直接进入试件底部的刚性底座,导致压入荷载偏高.(2)当 $H/h_{\max}$ 为5.0~10.0时,荷载相对误差偏大,尤其是 $H/h_{\max}$ 降低到7.5时,其已达20%左右.模拟结果显示,厚度不同的混凝土上表面为达到同样的压入变形,厚度越大,混凝土表层变形范围越大,压入影响面越大.这说明对于混凝土超早期压入试件,并非试件厚度越

大越好.综上可知,当 $H/h_{\max}$ 为20.0~50.0时, $H$ 取为150 mm较为理想.

控制 $h_{\max}$ 为5 mm、 $H$ 为150 mm,建模并设计试件半径.试件半径与最大压入深度的比值 $R/h_{\max}$ 对压入行为的影响如表2所示.由表2可知:随着 $R/h_{\max}$ 的降低, $F_{\max}$ 逐渐减小.这是因为当 $R/h_{\max}$ 小于某一界限后,应力非均匀区域内的材料受到四周材料的约束越来越小,使得试件的压入刚度下降,故压入荷载偏低,当 $R/h_{\max}$ 为20时,相对误差的绝对值不足2.0%;当 $R/h_{\max}$ 降低到10时,相对误差的绝对值达到8.0%.据此可知, $R/h_{\max}$ 大于20为宜.由于试件半径 $R$ 的逐步减小,导致混凝土上表面的变形量越来越大,因此试件半径 $R$ 不可过小.综合选定单个压入试件半径 $R$ 为100 mm.

表1 试件厚度与最大压入深度的比值对压入行为的影响

Table 1 Influence of ratio of specimen thickness to maximum indentation depth on indentation behavior

$H/h_{\max}$	60.0	50.0	20.0	10.0	7.5	5.0
$F_{\max}/\text{kN}$	0.998 7	1.011 0	1.073 0	1.135 0	1.193 0	1.344 0
Relative error/%	0	1.2	7.4	13.6	19.5	34.6

Note: Relative error = [(indentation value - maximum size specimen indentation value) / maximum size specimen indentation value] × 100%.

表2 试件半径与最大压入深度的比值对压入行为的影响

Table 2 Influence of ratio of specimen radius to maximum indentation depth on indentation behavior

$R/h_{\max}$	100	60	30	20	10	5
$F_{\max}/\text{kN}$	1.061	1.061	1.057	1.047	0.976	0.787
Relative error/%	0	0	-0.3	-1.3	-8.0	-25.8

为便于试验且兼顾经济性,将模具设计成半径为300 mm、高度为150 mm的圆柱形模具,模具材料选为PVC材质.每个试件以圆心为原点,环向间距200 mm均匀打点,模具尺寸及压入位置如图1所示.图1显示:试件上表面共压入7个点,适用假设条件(4)材料尺寸远大于压入深度,可忽略边界效应的

影响的要求;同时为适用假设条件(5)试样无徐变和松弛,可忽略时间因素的影响,考虑到载荷的时间效应,超早期水泥基材料有徐变特性,会产生徐变和松弛,参考前期水泥基超早期压入法<sup>[22]</sup>,将压入时间设计为1 min.压头形式对水泥基材料也会有较大影响,需要进行压头优选试验.为保证压入法基本假设中接触面无摩擦,混凝土在振动台上振捣1.5 min后,用抹刀将试件上表面抹平至近似镜面状态,以满足假设条件(3)的要求.对振捣抹平后的混凝土上表面,采用钢尺轻轻划破,碰触至下方有粗骨料位置时,测量砂浆层厚度,若该厚度在1~2 mm左右,说明振捣没有过量,满足假设条件(1)要求.经压入试验验证,混凝土超早期压痕满足假设条件(2)的凹陷变形模式.

## 2.2 原材料

原材料选用秦皇岛浅野P·O 42.5R普通硅酸盐水泥、秦皇岛热电厂Ⅱ级粉煤灰和自来水、细度模数为2.7的中砂、粒径为5~20 mm的玄武岩碎石.水泥和粉煤灰的化学组成和比表面积如表3所示.混凝土的配合比见表4.

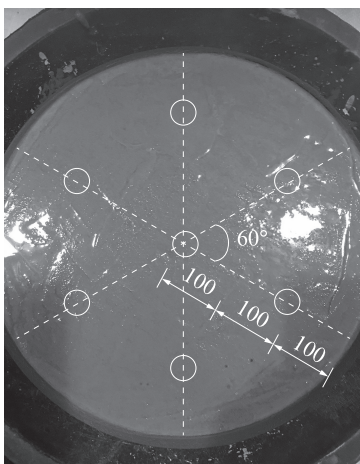


图1 模具尺寸及压入位置

Fig. 1 Mold size and press-in position (size: mm)

表3 水泥和粉煤灰的化学组成和比表面积  
Table 3 Chemical compositions and specific surface areas of cement and fly ash

Material	Chemical composition(by mass)/%									Specific surface area/(m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> )
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	
Cement	62.30	19.70	5.84	4.14	3.13	3.03	0.87	0.49	0.12	350
Fly ash	4.18	48.50	41.00	0.38	2.91	0.14	0.65	1.45	0.20	390

表4 混凝土的配合比  
Table 4 Mix proportions of concretes

Specimen No.	Mix proportion/(kg·m <sup>-3</sup> )				m <sub>w</sub> /m <sub>B</sub>
	Stone	Sand	Cement	Fly ash	
C-0.38	1 200	676	400	0	0.38
C-0.42	1 200	676	400	0	0.42
C-0.44	1 200	676	400	0	0.44
C-0.46	1 200	676	400	0	0.46
C-0.48	1 200	676	400 </td <td>0</td> <td>0.48</td>	0	0.48
C-F0.44	1 200	676	320	80	0.44

2.3 试验仪器

试验仪器为WDW3100型电子万能试验机(载

荷传感器量程为±100 kN,载荷测量精度为±0.5)、千分表、ZKS-100砂浆凝结时间测定仪和XL2101B 5+静态应变仪。

2.4 压头和压入深度选择试验

考虑混凝土粗细骨料粒径的大小及特点<sup>[23-24]</sup>,设计了5组压头(30°球锥压头、30°圆锥压头、90°圆锥压头、90°球锥压头和圆柱压头),将其分别组装于WDW3100型电子万能试验机上.不同形状压头示意图如图2所示,其中90°圆锥压头和90°球锥压头材料为合金钢40Cr,弹性模量为202 GPa,泊松比为0.3.为增大压头硬度,所有压头均经830~860 °C油淬处理,其洛氏硬度达55以上.

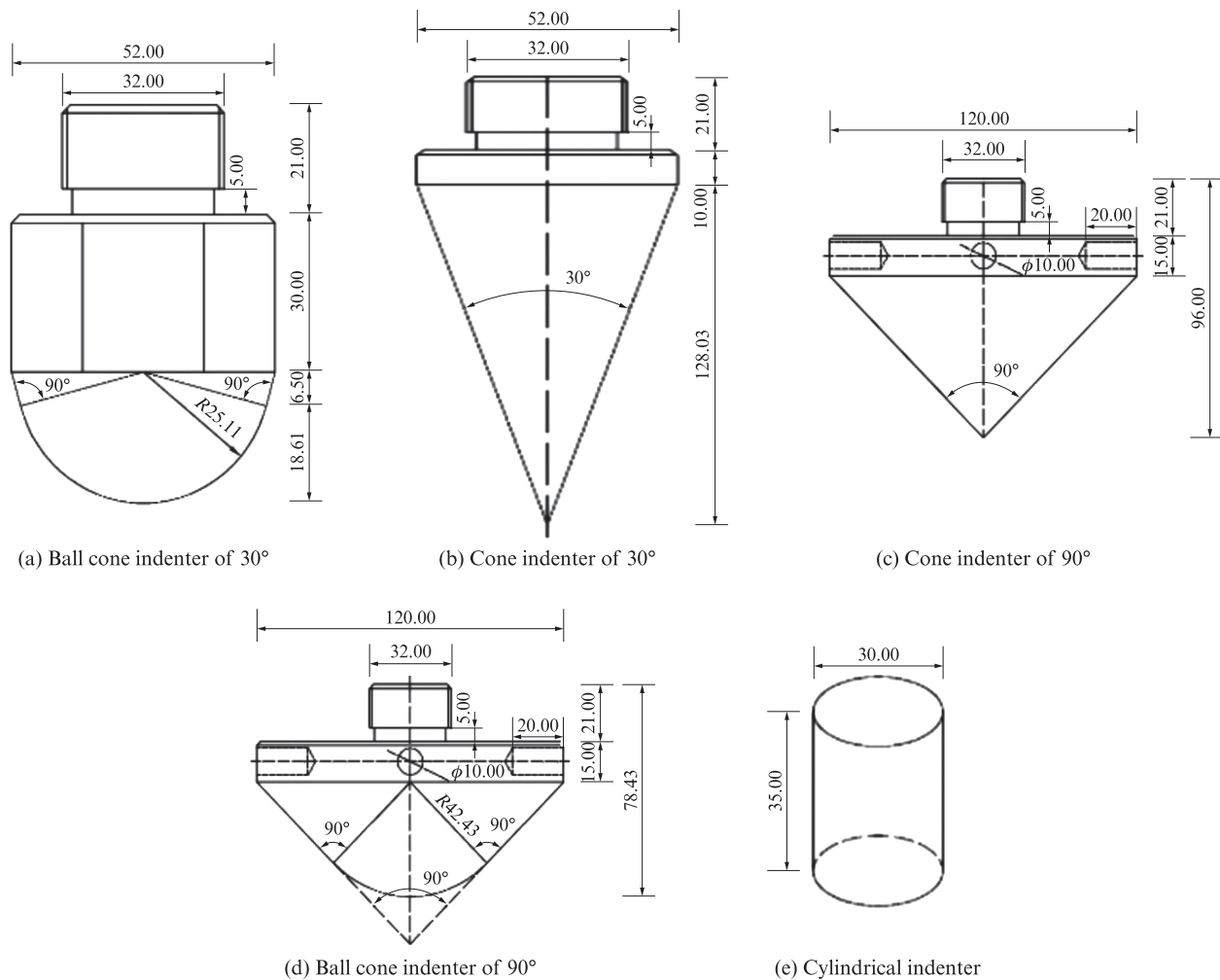


图2 不同形状压头示意图

Fig. 2 Sketch maps of indenters with different shapes(size:mm)



为保证压入时间相同,采用多台压力机并用不同压头同时测试混凝土超早期试件<sup>[25]</sup>.按照GB/T 50081—2019中混凝土弹性模量静力受压测试方法,采用千分表和WDW-50微控电子万能试验机测试试件的弹性模量,弹性模量值取同一测试时间点3组试件的平均值.按照GB/T 50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》,测试混凝土的初凝时间和终凝时间.采用压力试验机及静态应变仪,根据GB/T 50081—2019得到混凝土浇筑12 h时的泊松比.因不可压缩材料的泊松比为0.5,故假设混凝土初凝前泊松比为0.5,由内插法求出试件各时间点的泊松比值.

2.4.1 压入深度的确定

将压入时间设为1 min<sup>[25]</sup>,对不同压头和不同压入深度进行测试.试验发现采用30°圆锥压头和圆柱压头的混凝土超早期荷载-位移( $P-\Delta$ )曲线不稳定,可能与压头过尖或过平有关,故舍弃.针对初凝时间 $t_0$ 为4 h的C-0.46混凝土试件,采用压入深度为8.5 mm的90°圆锥压头,测得的荷载-位移曲线如图3所示.

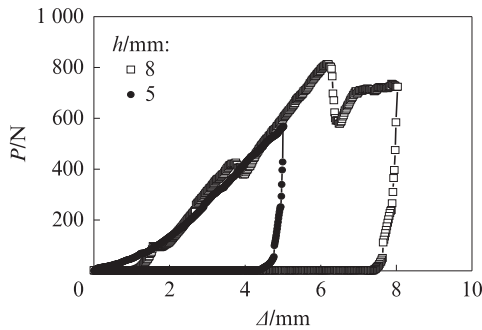


图3 采用90°圆锥压头测得的C-0.46混凝土试件的荷载-位移曲线

Fig. 3 Load-displacement curves of C-0.46 concrete specimen with cone indenter of 90°

由图3可见,当压力深度为8 mm时,C-0.46混凝土试件的压入荷载-位移曲线波动较大,压入困难且不稳定,说明压入深度不宜超过5 mm.

不同压头和不同压入深度试件的弹性模量曲线如图4所示.图4显示,采用压入深度5 mm的30°球锥压头测得的弹性模量值与传统应力-应变法<sup>[2]</sup>测试结果最为接近.故本试验将混凝土超早期压入法测试的压入深度选为5 mm,加载速率选为5 mm/min.

2.4.2 压头的确定

采用与传统应力-应变方法测试结果接近的3组压头——90°圆锥压头、30°球锥压头和90°球锥压头,分别以5 mm/min的加载速率,对C-0.48混凝土试件进行压入法试验,其弹性模量曲线见图5.由图5可

见,采用30°球锥压头压入5 mm的弹性模量曲线与传统应力-应变法弹性模量曲线吻合最好,故选择30°球锥压头作为混凝土在超早期压入法测试的压头.从混凝土拌和物中筛出砂浆,用贯入阻力法测定其初凝时间 $t_0$ 与终凝时间 $t_c$ <sup>[26]</sup>.

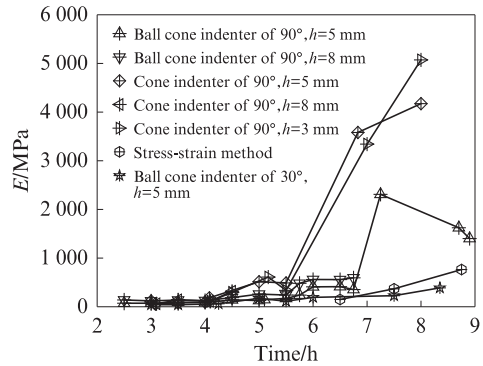


图4 不同压头和不同压入深度的弹性模量曲线  
Fig. 4 Elastic modulus at different indenters and indentation depths

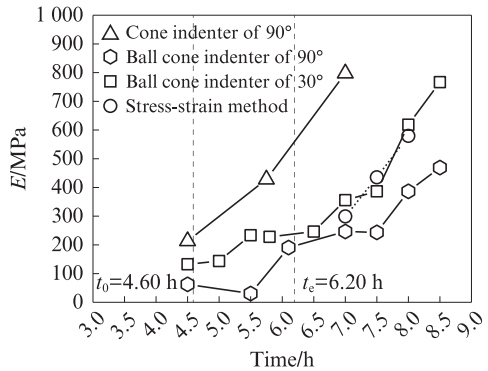


图5 C-0.48混凝土试件的弹性模量曲线  
Fig. 5 Elastic modulus curves of C-0.48 concrete specimen

3 试验验证

针对不同粉煤灰掺量、水胶比和初凝时间的混凝土试件,采用优选后的加载速率5 mm/min和30°球锥压头,进行压入法试验<sup>[27]</sup>.将压入法测得的混凝土超早期弹性模量值与传统应力-应变法、超声波法测得的弹性模量值相比较,来验证压入法的有效性.

3.1 配合比验证试验

分别选用水胶比0.42、0.44和0.46,制备混凝土试件进行压入法测试,并与对应的传统应力-应变方法进行对比,结果见图6.图6显示:采用压入法与传统应力-应变方法测得的混凝土超早期弹性模量的误差在20%以内;随着水胶比的增大,试件的初凝时间随之延长,超早期弹性模量曲线更加平缓.

3.2 超声波法验证试验

参考C-0.46混凝土试件的初凝时间测试试验,

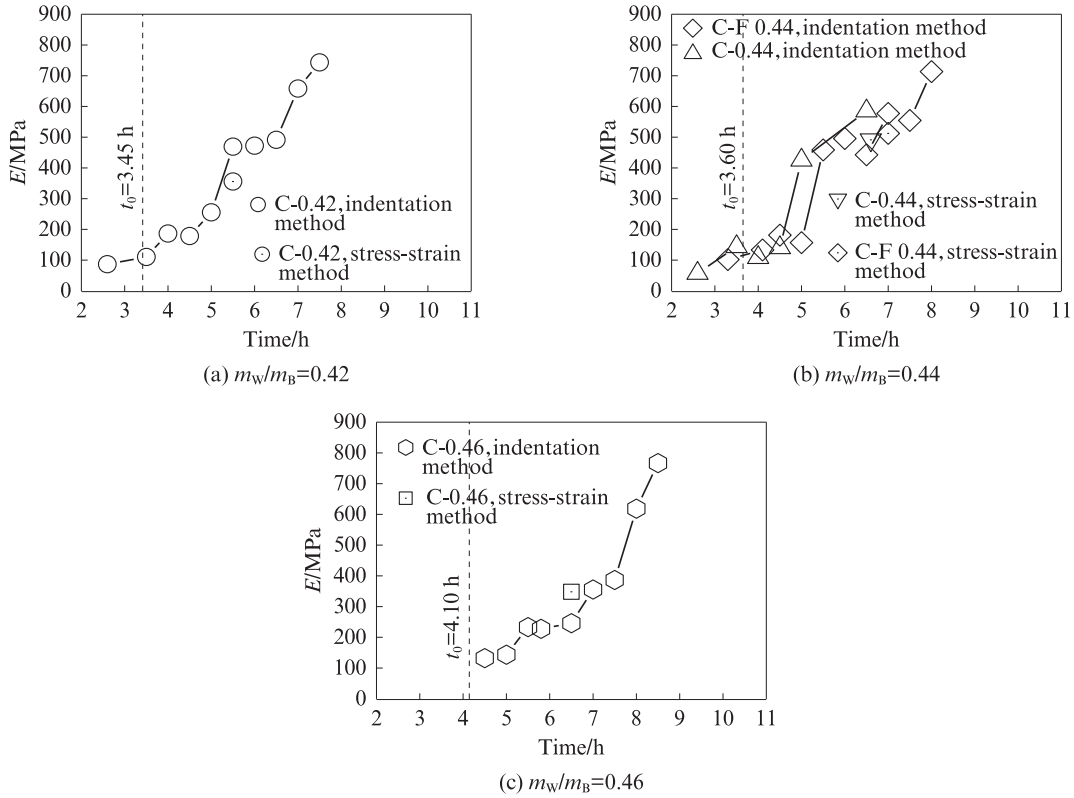


图6 不同配合比混凝土试件的弹性模量曲线  
Fig. 6 Elastic modulus curves of concrete specimens with different mix proportions

将混凝土中5 mm以上的粗骨料筛除,参照现有超声波测试方法,采用康科瑞NM-4A非金属超声波检测分析仪,测试剩余砂浆的纵横波波速.其中横波( $V_s$ )测试主频为100 kHz,试件长200 mm;纵波( $V_p$ )测试主频为50 kHz,试件长25 mm.根据纵横波测试结果求得C-0.46混凝土试件是动弹性模量值<sup>[28]</sup>.比较传统应力-应变法、压入法和超声波法得到的C-0.46混凝土试件的弹性模量曲线如图7所示.

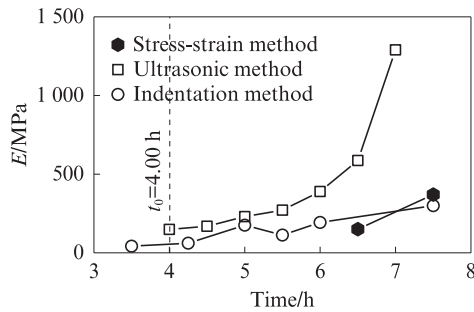


图7 C-0.46混凝土试件的弹性模量曲线  
Fig. 7 Elastic modulus curves of C-0.46 concrete specimen

由图7可见:采用超声波法测得的动弹性模量值,高于采用压入法测得的静弹性模量值;特别是5.5 h后,超声波法测试结果大幅高于压入法测试结果.这可能是超声波法测试结果受力方式不同所致.以上动、静弹性模量测试结果显示,各曲线趋势符合

水泥基材料动、静弹性模量规律,验证了压入法的可行性.

#### 4 混凝土超早期弹性模量预测

混凝土在初凝之前,由于水泥基材料没有固化,还具有流动性和可塑性,其弹性模量值接近于0<sup>[29]</sup>.将弹性模量为0 MPa时所对应的时间设为初凝时间,据此,提出1种混凝土超早期弹性模量的预测方法.测试初凝时间和采用传统应力-应变法拆模后最早可测时间点的弹性模量值,通过此2点数值所在直线对在超早期任意时间的弹性模量进行预测.分别对水胶比为0.38、0.42、0.44、0.46、0.48的混凝土试件和水胶比为0.44且内掺20%粉煤灰的混凝土试件的超早期弹性模量曲线进行拟合,绘制压入法测试曲线、拟合曲线和预测曲线,如图8所示.需要说明的是,压入法的测试起点为混凝土的初凝时刻.图8显示:预测曲线与压入法测试曲线、拟合曲线均较接近;各拟合曲线的相关系数分别为0.938、0.901、0.922、0.943、0.952和0.915,拟合结果呈线性关系;取实测值中间3~5个时间点的弹性模量值与预测曲线的数值进行对比,其相对误差均值在30%以内,说明本预测混凝土超早期弹性模量的方法可行且简便.

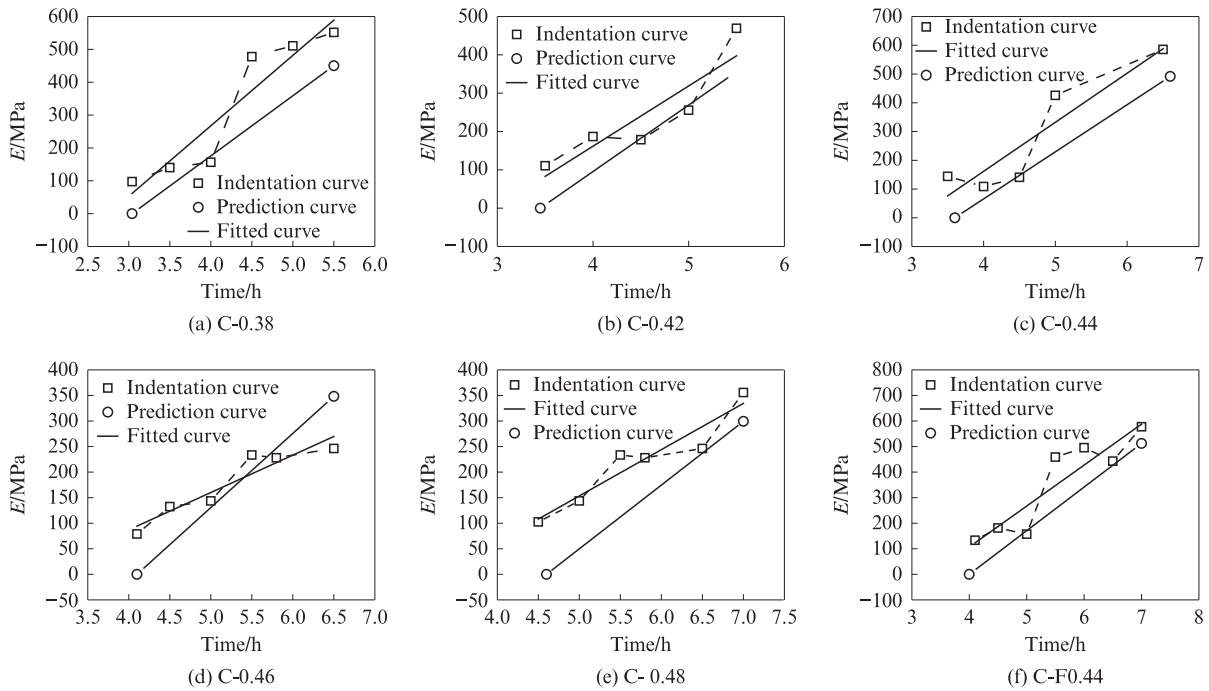


图8 各混凝土试件超早期弹性模量曲线对比

Fig. 8 Comparison of ultra-early elastic modulus curves of various concrete specimens

### 5 结论

(1)通过 Abaqus 仿真分析,研究了混凝土超早期压入行为的尺度效应,得出可忽略尺寸影响的最小混凝土压入试件的尺寸(半径 100 mm,厚度 150 mm). 以此为依据,设计了混凝土超早期弹性模量压入法测试模具尺寸和压入位置.

(2)设计制造了 5 种压头,试验表明,30° 球锥压头比 90° 球锥压头更加适合于压入法测试混凝土超早期弹性模量,压入深度选为 5 mm 为宜.

(3)对于不同配合比的混凝土,采用压入法与传统应力-应变方法测得的超早期弹性模量的相对误差均在 20% 以内,证明采用压入法测试混凝土超早期弹性模量具有可行性. 通过超声波测试混凝土的动弹性模量与压入法静弹性模量曲线趋势一致.

(4)混凝土的超早期弹性模量与时间呈线性函数关系. 基于该结论,提出 1 种相对误差在 30% 以内的混凝土超早期弹性模量的简单预测方法——测试初凝时间并设定其弹性模量为 0 MPa,以传统应力-应变方法最早测得的弹性模量为终点,通过此 2 点数值所在直线对在混凝土超早期任意时间的弹性模量进行预测.

#### 参考文献:

[ 1 ] LI Q H, XU S L. A design concept with the use of RUHTCC

beam to improve crack control and durability of concrete structures [J]. Materials and Structures, 2011, 44(6): 1151-1177.

[ 2 ] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土物理力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2019.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081—2019 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2019. (in Chinese)

[ 3 ] BENTUR A, KOVLER K. Evaluation of early age cracking characteristics in cementitious systems [J]. Materials and Structures, 2003, 36(3): 183-190.

[ 4 ] DE SCHUTTER G, TAERWE L. Degree of hydration-based description of mechanical properties of early age concrete [J]. Materials and Structures, 1996, 29(6): 335-344.

[ 5 ] STEPISNIK J, LUKAC M, KOCUVAN I. Measurement of cement hydration by ultrasonics [J]. American Ceramic Society Bulletin, 1981, 60(4): 481-483.

[ 6 ] KEATING J, HANNANT D J, HIBBERT A P. Comparison of shear modulus and pulse velocity techniques to measure the build-up of structure in fresh cement pastes used in oil well cementing [J]. Cement and Concrete Research, 1989, 19(4): 554-566.

[ 7 ] REINHARDT H W, GROSSE C U. Continuous monitoring of setting and hardening of mortar and concrete [J]. Construction and Building Materials, 2004, 18(3): 145-154.

[ 8 ] AZENHA M, MAGALHAES F, FARIA R, et al. Measurement of concrete E-modulus evolution since casting: A novel method based on ambient vibration [J]. Cement and Concrete Research, 2010, 40(7): 1096-1105.

- [9] CHATTERJEE A, DEBASHIS D, SADHUKHAN A K, et al. Probabilistic assessment of UPV test result of a degasser unit [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2017, 36(1):18-28.
- [10] BOULAY C, STAQUET S, DELSAUTE B. How to monitor the modulus of elasticity of concrete, automatically since the earliest age? [J]. *Materials and Structures*, 2014, 47(1/2):141-155.
- [11] DELSAUTE B, BOULAY C, GRANJA J. Testing concrete E-modulus at very early ages through several techniques: An inter-laboratory comparison [J]. *Strain*, 2016, 52(2):91-109.
- [12] STAQUET S, DELSAUTE B, DARQUENNES A, et al. Design of a revisited TSTM system for testing concrete since setting time under free and restraint conditions [C]// *Proceedings of the Concrack 3—RILEM-JCI International Workshop on Crack Control of Mass Concrete and Related Issues Concerning Early-Age of Concrete Structures*. Paris:Concrack 3—RILEM-JCI,2012:99-110.
- [13] 李一凡, 管学茂, 刘松辉, 等. 压痕点数及解卷积法对水泥纳米压痕试验的影响 [J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(2):291-296. LI Yifan, GUAN Xuemao, LIU Songhui, et al. Influence of indentation points and deconvolution method on cement nanoindentation test [J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(2):291-296. (in Chinese)
- [14] LI J Q, ZHANG W X, MONTEIRO P J M. Preferred orientation of calcium aluminosilicate hydrate compacts: Implications for creep and indentation [J]. *Cement and Concrete Research*, 2021, 143:106371.
- [15] 江俊达, 沈吉云, 侯东伟. 基于纳米压痕的水化硅酸钙断裂韧度测试与计算方法 [J]. *硅酸盐学报*, 2018, 46(8):1067-1073. JIANG Junda, SHEN Jiyun, HOU Dongwei. Determination of fracture toughness of hydrated calcium silicate by nanoindentation [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2018, 46(8):1067-1073. (in Chinese)
- [16] 魏亚, 高翔, 梁思明. 用动态模量成像与纳米压痕技术对硬化水泥浆体中水化产物的识别和表征 [J]. *硅酸盐学报*, 2018, 46(8):1043-1052. WEI Ya, GAO Xiang, LIANG Siming. Identification and characterization of hydration products in hardened cement paste based on modulus mapping and nanoindentation [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2018, 46(8):1043-1052. (in Chinese)
- [17] 刘东旭, 张泰华, 邹勇. 宏观深度测量压入仪器的研制 [J]. *力学学报*, 2007, 39(3):350-355. LIU Dongxu, ZHANG Taihua, HUAN Yong. Development of macro-depth-sensing-indentation instrumentation [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2007, 39(3):350-355. (in Chinese)
- [18] OLIVER W C, PHARR G M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments [J]. *Journal of Materials Research*, 1992, 7(6):1564-1583.
- [19] 张泰华. 微/纳米力学测试技术: 仪器化压入的测量、分析、应用及其标准化 [M]. 北京: 科学出版社, 2013:130-200. ZHANG Taihua. *Micro/nano mechanics testing technology: Measurement, analysis, application and standardization of instrumented indentation* [M]. Beijing: Science Press, 2013:130-200. (in Chinese)
- [20] GAO Y F, XU H T, OLIVER W C, et al. Effective elastic modulus of film-on-substrate systems under normal and tangential contact [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2008, 56:402-416.
- [21] OLIVER B, ULM F J, LEMARCHAND E. A multiscale micromechanics-hydration model for the early-age elastic properties of cement-based materials [J]. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(9):1293-1309.
- [22] WANG D L, ZHAO Q X, ZHANG J R, et al. Experimental research for elastic modulus of cement paste at ultra-early age based on indentation technique [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 226:51-60.
- [23] WEI Y, LIANG S M, GAO X. Indentation creep of cementitious materials: Experimental investigation from nano to micro length scales [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 143:222-233.
- [24] SUN Y, LU J X, POON C S. Strength degradation of seawater-mixed alite pastes: An explanation from statistical nanoindentation perspective [J]. *Cement and Concrete Research*, 2022, 152:106669.
- [25] DE MIRANDA L R M, MARCHESINI F H, LESAGE K, et al. The evolution of the rheological behavior of hydrating cement systems: Combining constitutive modeling with rheometry, calorimetry and mechanical analyses [J]. *Cement and Concrete Research*, 2023, 164:107046.
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土拌合物性能试验方法标准: GB/T 50080—2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. *Standard for test method of performance on ordinary fresh concrete: GB/T 50080—2016* [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2017. (in Chinese)
- [27] 姚淇耀, 陆宸宇, 罗月静, 等. PE/PVA 纤维海砂 ECC 的拉伸性能与本构模型 [J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(9):976-983. YAO Qiyao, LU Chenyu, LUO Yuejing, et al. Tensile properties and constitutive model of PE/PVA fiber sea sand ECC [J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(9):976-983. (in Chinese)
- [28] CARETTE J, STAQUET S. Monitoring the setting process of mortars by ultrasonic P and S-wave transmission velocity measurement [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 94:196-208.
- [29] BHALLA N, SHARMA S, SHARMA S, et al. Monitoring early-age setting of silica fume concrete using wave propagation techniques [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 162:802-815.