

文章编号:1671-8879(2015)04-0001-07

# 基于压缩试验的水泥混凝土弹性模量取值法

延西利<sup>1</sup>,李新波<sup>2</sup>,延凯凯<sup>3</sup>,樊延刚<sup>4</sup>,盛燕萍<sup>4</sup>

(1. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064; 2. 长安大学 理学院,陕西 西安 710064; 3. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司,陕西 西安 710075; 4. 长安大学 材料科学与工程学院,陕西 西安 710061)

**摘要:**水泥混凝土弹性模量的取值是水泥结构设计的基础,试验确定其量值始终是一个复杂的过程。结合水泥路面实际,制作了 C30 水泥混凝土圆柱体试件,在 3 个加载速率下,按照“简单加载至破坏”和“循环加载后至破坏”这 2 种加载方式,进行了简单压缩试验,分析了应力应变关系,计算了不同应力水平和应变水平下的割线模量值。研究表明:水泥混凝土在极限最大应力的 80% 范围内和较高加载速率下,主要表现为线弹性,可用标准弹塑性模型来描述;在较低加载速率下,会表现出微弱粘性;混凝土弹性模量的取值可采用简单加载时的“80%度量法”,无需进行传统的循环加载,极大地简化了试验操作程序。

**关键词:**道路工程;水泥混凝土;压缩试验;弹性模量;80%度量法

**中图分类号:**U414 **文献标志码:**A

## Determination of elastic modulus of cement concrete based on compression test

YAN Xi-li<sup>1</sup>, LI Xin-bo<sup>2</sup>, YAN Kai-kai<sup>3</sup>, FAN Yan-gang<sup>4</sup>, SHENG Yan-ping<sup>4</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. School of Sciences, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 3. CCCC First Highway Consultants Co. Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China; 4. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

**Abstract:** Value choice of elastic modulus is foundational for the design of cement structure, but it is often complicated to determine it by experimentation. Combined with the practice of cement pavement, mark C30 cement concrete samples were confectioned in form of cylinder, and simple compression tests were carried out under 3 loading rates and with 2 kinds of loading path in type of “simple loading to failure” and “cyclic loading to failure”. The stress-strain relationship was analyzed, and the secant modulus was calculated in different stress levels and strain levels. The results show that concrete is a linear elastic body in the range of 80% of maximal stress and under a higher loading rate, but presents minor viscosity with a lower rate; the elastic behaviour can be described by elastic-perfectly plastic model; the elastic modulus can be obtained by the secant modulus of 80% max, named as “80% value-method”, under a simple compression test but not a repeated compression test, which greatly simplifies the traditional operational procedures of tests. 2 tabs, 8 figs, 18 refs.

收稿日期:2015-03-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51208047);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2011ZD013)

作者简介:延西利(1963-),男,陕西绥德人,教授,工学博士,E-mail:xili.yan@chd.edu.cn.

**Key words:** road engineering; cement concrete; compression test; elastic modulus; 80% value-method

## 0 引言

水泥混凝土广泛应用于建筑工程,如桥梁、路面、房屋、码头等,在材料设计和结构计算中,普遍认为水泥混凝土是线弹性体,弹性模量的取值采用推荐值或试验确定这2种方法<sup>[1-8]</sup>。在公路交通行业,中国现行技术规范《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTGE30—2005)<sup>[4]</sup>给出的试验方法,首先需要确定强度值( $f_{cc}$ ),然后以 $1/3f_{cc}$ 值为限进行重复加卸载试验,取割线模量为弹性模量,程序比较复杂,工作量较大,精度不好控制,而且最核心的问题是没有从力学原理上解答混凝土的弹性及其范围,没有解答 $f_{cc}$ 取值 $1/3$ 的力学依据。另一个深刻问题是中国公路行业很多研究人员以为技术规范方法便是基本理论,没有去想为什么或者没有利用力学原理从根本上认识材料的弹性以及其他力学特性,如:在 $1/3f_{cc}$ 范围内如何证明是线弹性而没有粘性、在 $1/3f_{cc}$ 以外的弹性是何种状态、水泥混凝土的应力应变关系或称本构关系如何?等等。除工程技术研究外,国内外一些学者也比较注重力学特性研究<sup>[2-3,9-15]</sup>,如弹性、粘弹性、屈服极限、本构方程等。研究认为在一定的试验条件下,水泥混凝土具有微量粘性,并会表现出徐变和松弛特性。从而说明水泥混凝土的弹性是有条件的,中国公路水泥混凝土技术规范取 $1/3f_{cc}$ 值也可以佐证这点<sup>[4-5]</sup>。如何深入认识水泥混凝土的弹性性质,如何简捷确定弹性范围及其弹性模量,是应用技术的一个基本理论前提,势必对结构设计产生重要影响。只有在解决了水泥混凝土的科学问题之后,才能更好地开展实用技术研究,这是科学技术的基本要求。

为此,本文针对水泥路面板混凝土,通过简单压缩试验研究,重点考察水泥混凝土的弹性及其范围、弹性模量的简捷取值方法、应力应变关系等,从力学特性角度回答工程技术指标问题。通过制作水泥混凝土圆柱体试件,进行了简单压缩试验和流变特性分析。试验设定了3个加载速率,按照“简单加载至破坏”和“循环加载后至破坏”这2种加载方式,实施了压缩试验。并分析了水泥混凝土的极限最大应力、弹性屈服应力和弹性模量,以及混凝土的流变

特性。

## 1 试件制作

考虑到水泥路面混凝土的标号和实验室压力机的吨位,制定水泥混凝土的目标标号为C30。试验采用P.O 32.5普通硅酸盐水泥,细集料为细度模数2.5的中砂,粗集料为粒径范围3~30mm的碎石。按照技术规范<sup>[4]</sup>,进行配合比设计,确定水灰比 $W/C=0.43$ ,粗集料的质量分数和混凝土的配合比见表1。

表1 粗集料的质量分数和混凝土的配合比

Tab. 1 Weight percentage of coarse aggregates and concrete composition

粒径范围/mm	3~5	5~10	10~20	20~30
质量分数/%	5	17	46	32
混凝土配合比/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	水	水泥	砂子	碎石
	180.0	418.6	568.9	1 226.2

采用标准试模,预制了 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 的立方体试块。标准养生28d后,沿预制块振捣的侧向,钻取圆柱体试样(图1)。需要说明的是:①侧向钻取试样的优点在于芯样的2个顶面比较平整且相互平行,利于力学试验,试块制作时钢模的侧向约束可以保证这种效果;②钻头采用100mm直径,考虑了混凝土的匀质性与压力机吨位的匹配。总共制作了12个试件,编号为New-1, ..., New-12,试件的数量可以满足不同加载方式、不同加载速率的要求。

## 2 压缩试验方法

本文采用简单压缩试验,其原理是对圆柱体试件( $100\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ )两头施加压力,实现压缩(图2)。试验采用深圳新三思CMT5305精密型微机控制电子万能试验机。该试验机的最大试验力为300kN,位移速率可调范围为 $0.005 \sim 250\text{ mm/min}$ 。为了精确量测试件的轴向变形,试验时在试件中部安置位移引伸计,标距为100mm、精度为 $1.0 \times 10^{-6}\text{ mm}$ 。通过电脑软件控制,设定加载方式,自动加载和记录试验数据。

压缩试验时,设定3个不同的加载速率( $V$ 分别为0.1、0.3、0.5mm/min),选择2种加载方式:(a)简单加载至破坏,即一次性加载至破坏;(b)循环加

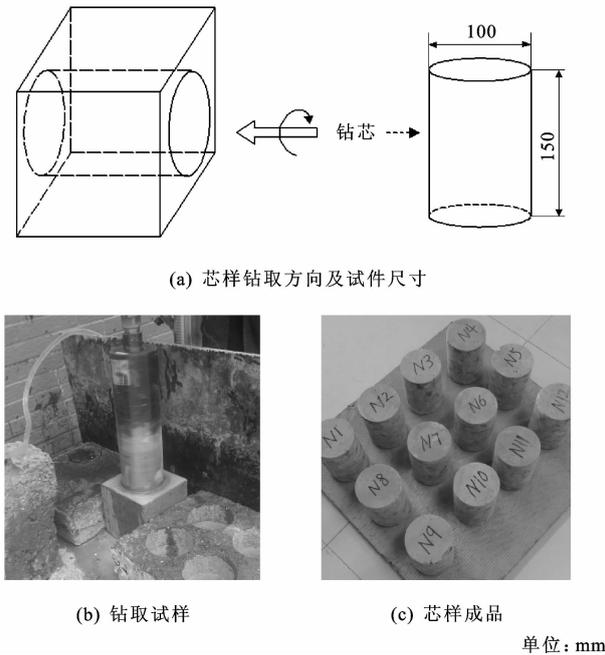


图1 混凝土成型试块及其圆柱体试件的钻取  
Fig.1 Cylindrical samples cored in concrete cubes

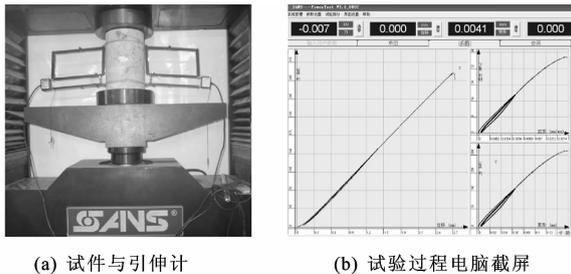


图2 试件与引伸计及试验实况

Fig.2 Specimen with extensometer and the experimentation

卸载5次后至破坏,如图3所示。图3中, $t$ 为加载时间, $L$ 为加载位移, $F$ 为控制位移加载时对应的加载力,试验加载采用位移控制法。试验时,首先进行简单加载,可以获取混凝土试件一次性加载至破坏时的最大极限压力平均值  $F_{\max}$ ;然后进行循环加载,取  $2/3F_{\max}$  为循环加卸载的峰值,相当于将规范加载  $1/3f_{cc}$  扩展到  $2/3f_{cc}$ ,以期进一步认识弹性范围。试验环境温度约  $18\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

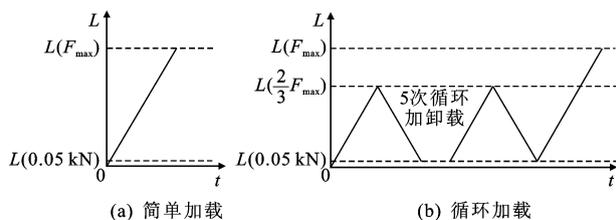


图3 压缩试验的2种加载方式

Fig.3 Two types of loading for compression test

试验操作注意:①安装引伸计时要保证上下2个刃口和试件垂直,刃口无变形、无滑动;②需标定所有力、位移传感器;③试件两头打磨并抹黄油以减小界面摩擦阻力;④施加  $0.05\text{ kN}$  的预压力,以利于试验机压头与试件承载面保持良好接触。

试验中,在任意时刻  $t$  时,数据采集系统自动采集压力机的力  $F$  和位移  $L$ 、引伸计的位移  $\Delta L$ ;试验完成后,对各组试验数据进行编号、存储。此时计算试件的压应力  $\sigma$  和轴向应变  $\epsilon$  为

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad \epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (1)$$

式中: $F$  为试件所承受的压力(N); $A_0$  为试件的受压面积( $\text{mm}^2$ ); $\Delta L$  为引伸计的位移量(mm); $L_0$  为引伸计的测量标距(100 mm); $\sigma$  为试件承受的压应力(MPa); $\epsilon$  为试件的轴向应变(%)。

### 3 试验结果整理

利用式(1)计算各组试验数据对应的  $\sigma$ 、 $\epsilon$  值,通过数据处理软件,绘制各组试验的  $\sigma$ — $\epsilon$  曲线,以便后期数据分析。本文针对3个加载速率和2种加载方式,进行了重复试验,总共进行了12次有效试验,全部试验曲线  $\sigma$ — $\epsilon$  图见文献[15]。典型的试验曲线  $\sigma$ — $\epsilon$  见下页图4。可以看出,混凝土试件的  $\sigma$ — $\epsilon$  曲线稳定连续,符合传统试验结果[2-3,11-14]。图中 New-1, ..., New-12 为试件编号;V-0.1、V-0.3、V-0.5 为加载速率;a、b 为加载方式(对应图3(a)、(b));New-4、V-0.5a 表示试件编号为 New-4,加载速率为  $0.5\text{ mm/min}$ ,简单加载,其他以此类推。

力学参数分析选取了极限应力  $\sigma_{\max}$ 、极限应变  $\epsilon_{\max}$ 、割线模量  $E_s$  和弹性模量  $E_c$ 。这4个常用技术指标。这些力学参数的分析及取值如下页图5所示,具体定义解释如下。

极限应力  $\sigma_{\max}$  即强度  $f_{cc}$  为试件发生破坏时最大应力;极限应变  $\epsilon_{\max}$  为对应于  $\sigma_{\max}$  的应变;割线模量  $E_s$  取应力基点( $\sigma_0 = 0.5\text{ MPa}$ )和应变基点( $\epsilon_0 = 0.006 \times 10^{-3}$ )2种情况,在  $\sigma$ — $\epsilon$  曲线上度量不同的割线模量;弹性模量  $E_c$  为5次循环加卸载的平均割线模量(卸载后基本上沿同样路径返回原点,见图4(b))。

上述力学参数的试验取值结果见下页表2。由于试验调试消耗了个别试件,后又补充了试件,以保证表2中数据为2次重复试验的平均值。

对于本文设定的3个加载速率和2种加载方式(图3),分析表2所列的极限应力  $\sigma_{\max}$  和极限应变

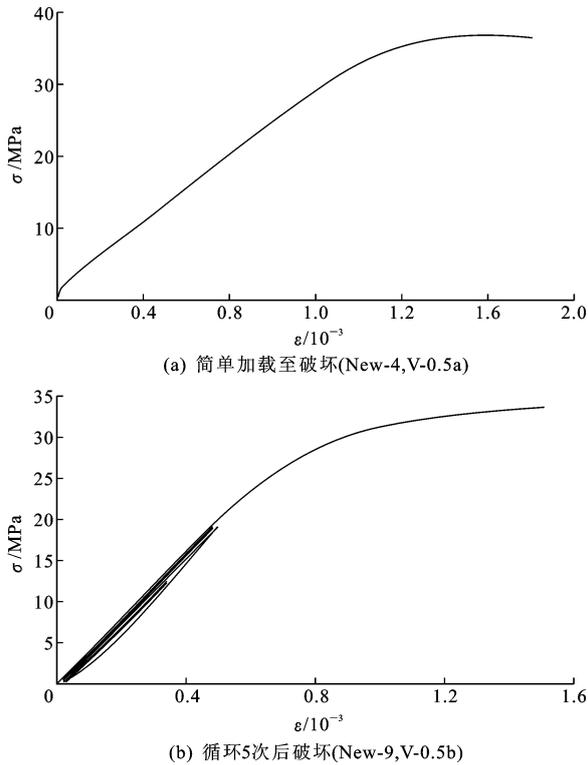
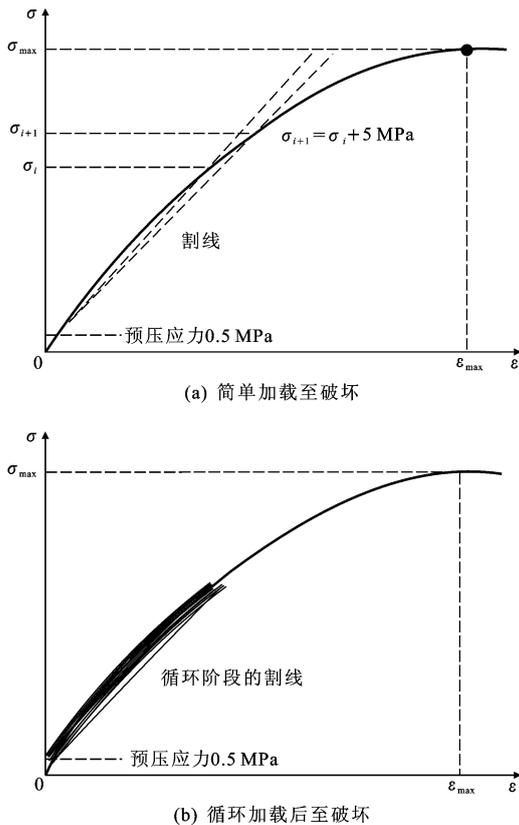
图4 水泥混凝土的 $\sigma\varepsilon$ 典型试验曲线Fig. 4 Example of experimental curve  $\sigma\varepsilon$  for the concrete

图5 力学参数的分析取值

Fig. 5 Determination of values of mechanical parameters  
 $\varepsilon_{\max}$  试验结果, 可以得出如下结果。

表2 混凝土力学参数分析的试验取值结果

Tab. 2 Analytical values of mechanical parameters of concrete

加载方式	加载速率/ (mm · min <sup>-1</sup> )	$\sigma_{\max}$ /MPa	$\varepsilon_{\max}/10^{-3}$	$E_s$ 或 $E_c$ / 10 <sup>4</sup> MPa
简单加载	0.1	31.2	1.63	$E_s$ (见第5节)
	0.3	31.7	1.14	
	0.5	36.7	1.57	
循环加载	0.1	30.3	1.18	3.26
	0.3	29.4	1.32	3.40
	0.5	33.8	1.34	3.64

(1) 试验变化3个加载速率, 简单加载时  $\sigma_{\max}$  的平均值为 33.2 MPa、最大相对误差为 10.5%, 循环加载时  $\sigma_{\max}$  的平均值为 31.2 MPa、最大相对误差为 8.3%, 远小于规范“不超过 15%”的要求<sup>[4-6]</sup>, 且2种加载方式的  $\sigma_{\max}$  均符合 C30 标号。

(2) 不管是那种加载方式, 混凝土的破坏应变(极限应变  $\varepsilon_{\max}$ ) 基本上都在  $(1.14 \sim 1.63) \times 10^{-3}$  之间, 符合传统认识或基本试验<sup>[11-13]</sup>。

(3) 加载速率和加载方式对极限应力  $\sigma_{\max}$  似乎略有影响, 但不很显著; 若  $\sigma_{\max}$  依赖于加载速率, 则认为具有粘性性质(见第4节)。

## 4 流变特性分析

在建筑工程行业, 传统的关于水泥混凝土研究, 一般只注重配合比设计和强度标号等, 很少涉及  $\sigma\varepsilon$  曲线的全过程<sup>[7-8]</sup>。而  $\sigma\varepsilon$  曲线是认识材料力学行为、奠定结构设计理论的根本<sup>[11-12, 14-17]</sup>, 在不同加载条件下, 通过研究  $\sigma\varepsilon$  曲线, 认识材料的弹粘塑性力学行为, 分析流变特性。

### 4.1 粘性成分考察

目前, 关于水泥混凝土粘性特征的描述, 主要有以下3点论述, 或者说具有以下条件之一者, 即反映了水泥混凝土的粘性性质: ①具有徐变与松弛特性<sup>[10]</sup>, 反映了粘弹性性质; ②对加载速率具有依赖性<sup>[2]</sup>, 表现为强度与刚度随加载速率的增大而有所增大; ③具有能量耗散特性<sup>[18]</sup>, 加卸载时  $\sigma\varepsilon$  曲线出现闭合圈, 必然会导致能量耗散(粘性)和能量释放(弹性), 具体分析有待下一步研究。

本文从循环加卸载回路和加载速率影响2个方面入手, 考察水泥混凝土是否具有粘性。不同加载速率下循环加载试验曲线的典型大样图见下页图6。可以发现,  $\sigma\varepsilon$  曲线基本上能够返回原点, 但会产生不同程度的闭合回路。加载速率  $V = 0.1$  mm/min时, 闭合回路较明显;  $V = 0.5$  mm/min时, 闭合回路几乎消失或回路重叠。说明水泥混凝土

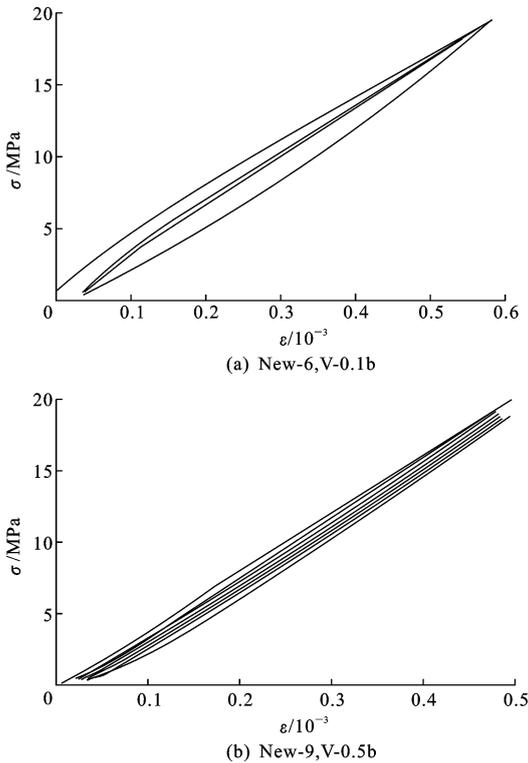


图6 水泥混凝土循环加卸载时2种试件的典型大样

Fig. 6 Typical focus view of cyclic loading for concrete

土在较小加载速率下会表现出粘性,只有当加载速率较大时才会表现出线弹性。

不同加载速率下,考察水泥混凝土的力学参数分析结果(表2),可以发现:混凝土的弹性模量 $E_c$ 随加载速率 $V$ 的增加具有一定程度增加,极限应力 $\sigma_{max}$ 也具有类似的试验现象,充分说明混凝土也具有一定的粘性<sup>[2,10]</sup>。

#### 4.2 弹性特性

弹性判别:循环加载时,若卸载路径可以沿加载路径返回,则为弹性,直线路径为线弹性,曲线路径为非线弹性。因此,为了考察水泥混凝土的弹性及其范围,本文有意扩大循环加载的峰值范围,取值 $\frac{2}{3}\sigma_{max}$ ,而规范<sup>[4]</sup>取值为 $\frac{1}{3}\sigma_{max}$ 。从图6可以发现:①每次加卸载时, $\sigma-\epsilon$ 曲线基本上都可以同步返回原点;② $\sigma-\epsilon$ 曲线似呈闭合回路,但闭合圈十分细长、面积积极小,且加载速率越大闭合圈越趋近为直线。加卸载“如影随形”地沿原路径返回,即为弹性,且路径大致为直线,可认为是线弹性。

同理,为了进一步考察混凝土的弹性,选取并汇总5个简单加载至破坏的 $\sigma-\epsilon$ 试验曲线,如图7(a)所示。可以看出:不同加载速率( $V$ 为0.1、0.3、0.5 mm/min)下,应力水平在 $0 \sim 80\%\sigma_{max}$ 范围内,

5个试验曲线宏观上的差异较小,并与循环加载的局部大样图呈类似形状(图6),反映了水泥混凝土的线弹性性质。本文第5节关于弹性模量的取值法也可佐证这一点。

#### 4.3 弹塑性模型分析

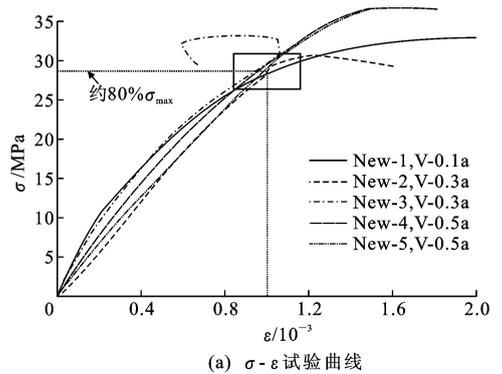
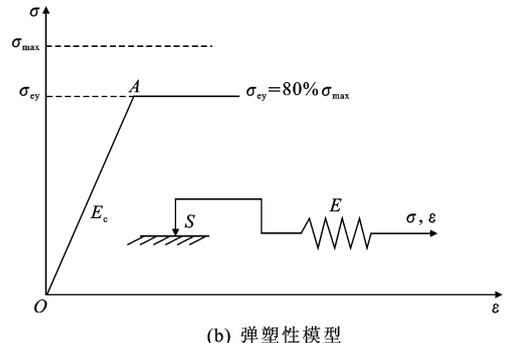
从前面的分析可知,在 $\sigma-\epsilon$ 试验曲线上,水泥混凝土存在一个极限最大应力 $\sigma_{max}$ 或称强度 $f_{cc}$ ,同时存在一个弹性屈服应力 $\sigma_{ey} \approx 80\%\sigma_{max}$ 。如果弹性屈服点之前的应力应变路径或本构关系为线弹性,那么适宜用标准弹塑性模型或称圣-维南(Saint-Venant)模型来分析<sup>[16-17]</sup>,模式化分析如图7(b)所示。

分析计算图7(b)的弹塑性流变模型,得到水泥混凝土的弹性模量和弹性屈服应力为

$$E_c = E_{OA} = E \text{ 和 } \sigma_{ey} = S$$

式中:OA为直线段; $\sigma_{ey} \approx 80\%\sigma_{max}$ ;S、E分别为流变模型的塑性极限和弹性模量。

关系式有助于深化认识水泥混凝土的材料特性,为结构设计提供理论基础。

(a)  $\sigma-\epsilon$  试验曲线

(b) 弹塑性模型

图7 混凝土简单加载的应力应变汇总及弹塑性模型

Fig. 7 Collective curves of simple loading and modeling of elasto-plastic behaviour of concrete

## 5 弹性模量的取值

为了考察弹性模量随加载水平的变化情况,在混凝土试件的简单加载 $\sigma-\epsilon$ 曲线上,分别以应力水平 $\sigma_i$ 和应变水平 $\epsilon_i$ 的情况下取割线模量 $E_s$ 进行分析。

按应力水平取值时,以 0.5 MPa 为基点,取步长为 5 MPa 的应力水平,即以 0.5 ~ 5 MPa、0.5 ~ 10 MPa、0.5 ~ 15 MPa, ..., 直线来度量割线模量。同理,按应变水平取值时,以  $0.006 \times 10^{-3}$  为基点,取步长为  $0.2 \times 10^{-3}$  的应变水平,即以 0.006 ~ 0.2、0.006 ~ 0.4、0.006 ~ 0.6, ..., 直线度量割线模量。取值结果及分析如图 8 所示。

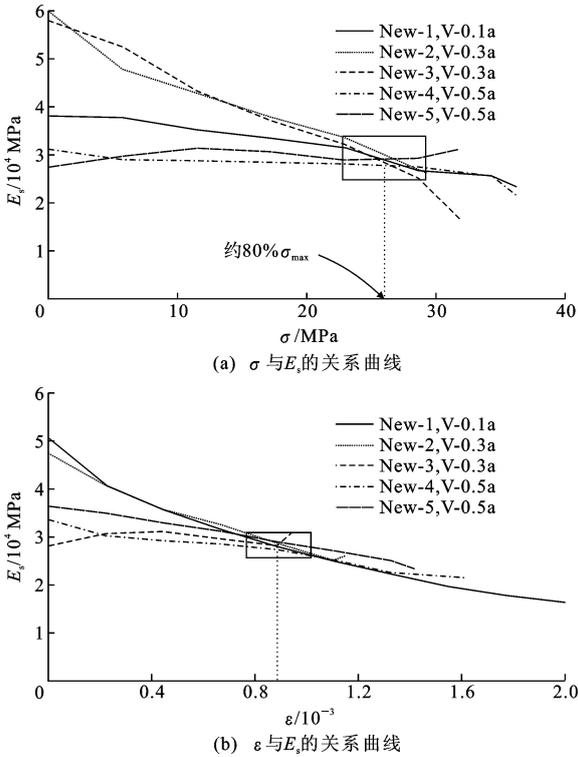


图 8 不同  $\sigma$  和  $\epsilon$  水平时割线模量  $E_s$  的变化规律

Fig. 8 Regularity of secant modulus with different stress and strain levels

由图 8 可以得出:①随着加载水平的增加,割线模量总体上逐渐衰减,在较低加载水平下,混凝土的模量值较大,且初期模量较大时,后期衰减也较大;②不同试验条件下,无论割线模量如何变化,最终相互之间的交汇区域均在  $80\% \sigma_{\max}$  附近,此时割线模量  $E_s \approx 3.2 \times 10^4$  MPa,刚好与 C30 混凝土的弹性模量值  $E_c$  相一致<sup>[7-8,11-13]</sup>,且对应的破坏应变也在  $1 \times 10^{-3}$  附近,反映了混凝土在  $0 \sim 80\% \sigma_{\max}$  应力范围内的线弹性性质。

结合本文第 4 节关于混凝土流变特性的分析,混凝土的弹性范围远不止  $\frac{1}{3} \sigma_{\max}$ ,在  $\frac{2}{3} \sigma_{\max}$  时同样会表现出线弹性(图 6),并在  $80\% \sigma_{\max}$  时仍具有同样的弹性性质(图 7)。另外,规范<sup>[4]</sup>按  $\frac{1}{3} \sigma_{\max}$  对弹性模量取值时,数值可能偏大(图 8),过高地估计了混凝土

的弹性,给混凝土结构设计造成不利影响。

综合上述分析认为,可以在  $\sigma\epsilon$  曲线上取  $80\% \sigma_{\max}$  的割线模量,来表征混凝土的弹性模量。也就是说,在此应力水平范围内,可以认为水泥混凝土是线弹性体。这种方法标称为“80%度量法”。

## 6 结 语

(1)水泥混凝土在较高加载速率和  $80\% \sigma_{\max}$  应力水平范围内,主要表现为线弹性;但在加载速率较小时,也会表现出微弱的粘性。

(2)混凝土存在一个弹性屈服应力  $\sigma_{ey} \approx 80\% \sigma_{\max}$ ,其  $\sigma\epsilon$  曲线或本构关系在此范围内可以用标准弹塑性模型来描述,即圣-维南(Saint-Venant)模型。

(3)水泥混凝土的弹性模量  $E_c$  可以在  $\sigma\epsilon$  曲线上取  $80\% \sigma_{\max}$  的割线模量  $E_s$  来表征,标称为“80%度量法”。

(4)循环加载时  $\sigma\epsilon$  曲线呈微弱闭合圈,说明在水泥混凝土中发生了粘滞能量耗散和弹性能量释放,具体有待下一步进行研究。

## 参考文献:

### References:

- [1] Francois D, Pineau A, Zaoui A. Elasticité et plasticité [M]. Paris: Lavoisier, 2009.
- [2] Bischoff P H, Perry S H. Compressive behaviour of concrete at high strain rate[J]. Materials and Structures, 1991, 24(6): 425-450.
- [3] Hofko B. Addressing the permanent deformation behavior of hot mix asphalt by triaxial cyclic compression testing with cyclic confining pressure[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2015, 2(1): 17-29.
- [4] JTG E30—2005, 公路工程水泥及水泥混凝土试验规程 [S].  
JTG E30—2005, Test methods of cement and concrete for highway engineering[S]. (in Chinese)
- [5] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].  
GB 50010—2010, Code for design of concrete structures[S]. (in Chinese)
- [6] CECS 03: 2007, 钻芯法检测混凝土强度技术规范 [S].  
CECS 03: 2007, Technical specification for testing concrete strength with drilled core[S]. (in Chinese)
- [7] 申爱琴. 水泥与水泥混凝土[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.  
SHEN Ai-qin. Cement and concrete[M]. Beijing: Chi-

- na Communications Press, 2004. (in Chinese)
- [8] 冯乃谦. 新实用混凝土大全[M]. 北京: 科学出版社, 2005.  
FENG Nai-qian. New practical collection of cement concrete[M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- [9] Benmokrane B, Ballivy G, Chaallal O, et al. Experimental study of the strains generated in concrete by variations in climatic conditions[J]. Materials and Structures, 1992, 25(3): 149-156.
- [10] Rossi P, Godart N, Robert J L, et al. Investigation of the basic creep of concrete by acoustic emission[J]. Materials and Structures, 1994, 27(9): 510-514.
- [11] 过镇海. 混凝土的强度和变形——试验基础和本构关系[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.  
GUO Zhen-hai. Strength and deformation of concrete—experimental foundation and constitutive relation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997. (in Chinese)
- [12] 周 氏, 康清梁, 童保全. 现代钢筋混凝土基本理论[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1989.  
ZHOU Di, KANG Qing-liang, TONG Bao-quan. Basic theory of modern reinforced concrete[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1989. (in Chinese)
- [13] 白卫峰. 混凝土损伤机理及饱和混凝土力学性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.  
BAI Wei-feng. Study on damage mechanism of concrete and mechanical property of saturated concrete [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [14] 刘小敏, 王 华, 杨 萌, 等. 混凝土本构关系研究现状及发展[J]. 河南科技大学学报: 自然科学版, 2004, 25(5): 58-62.  
LIU Xiao-min, WANG Hua, YANG Meng, et al. Present research situation and development of constitutive model of concrete[J]. Journal of Henan University of Science and Technology: Natural Science, 2004, 25(5): 58-62. (in Chinese)
- [15] 樊延刚. 新旧水泥混凝土流变特性的试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.  
FAN Yan-gang. Experimental study on rheological behaviour of the old and new concrete [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese)
- [16] Bares H A, Hutton J F, Walters K. An introduction to rheology[M]. New York: Elsevier, 1989.
- [17] Mandel J. Propriétés mécaniques des matériaux: rhéologie-plasticité[M]. Paris: Eyrolles, 1978.
- [18] 谢和平, 鞠 杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3003-3010.  
XIE He-ping, JU Yang, LI Li-yun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principle[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3003-3010. (in Chinese)

## 长安大学“教育部科技查新工作站(G01)”简介

科技查新是为避免科研课题重复立项和客观正确地判别科研成果的新颖性、实用性和可推广性而设立的一项信息服务业务, 由具有科技查新资质的查新机构承担完成。

长安大学“教育部科技查新工作站(G01)”, 经教育部科技发展中心批准(教技发函[2004]8号)于2004年7月成立, 具有在全国范围内开展科技查新工作的专业资质。

本工作站严格按照国家科技部《科技查新规范》开展以下业务工作:

1. 为科研立项、成果鉴定、新产品开发、博士、硕士研究生开题等提供真实可靠的客观依据, 保证每个查新项目的新颖性、科学性和可靠性。
2. 开展课题检索、技术咨询和课题跟踪服务, 为教师及专业技术人员、本科生和研究生提供原文及题录等, 认真准确地为校内外用户提供全面的文献信息线索。
3. 开展文献查收、查引工作, 为校内外用户提供论文被国内外著名检索刊物收录情况的报告。

本工作站设在长安大学图书馆。长安大学图书馆具有丰富的文献资源, 并且开通了 Dialog 国际联机检索系统, 为科技查新工作奠定了良好的资源保障体系。同时, 本查新站制定了严格的内部管理规章制度, 查新人员在开展查新工作的过程中, 能以质量为首要任务, 热情认真地为用户服务。

欢迎广大科技工作者、教师、研究生和新老用户前来联系业务, 本站将认真热情地提供科技查新与文献信息服务。

联系人: 刘壮生 徐 芳 程海涛 张永梅

地 址: 陕西西安南二环路段 长安大学校本部图书馆(北院)一楼信息部

电 话(传真): 029-82334377

网 址: <http://lib.chd.edu.cn/>; E-mail: liuxin@chd.edu.cn。