

文章编号:1671-6833(2009)04-0015-03

# 塑性混凝土弹性模量的计算方法

高丹盈, 赵利梅, 王四巍

(郑州大学 新型建材与结构研究所, 河南 郑州 450002)

**摘要:** 根据塑性混凝土单向轴压应力-应变关系曲线上升段特征, 对比普通混凝土弹性模量计算方法, 认为塑性混凝土应力-应变关系曲线应力上升段中从0.3倍峰值应力到0.6倍峰值应力为斜率较为稳定阶段, 由此建议了适合于塑性混凝土特点的弹性模量计算方法。

**关键词:** 塑性混凝土; 弹性模量; 计算方法; 峰值应力

**中图分类号:** TU 528 **文献标识码:** A

## 0 引言

塑性混凝土是用膨润土或黏土取代普通混凝土中的部分水泥而形成的一种柔性复合材料, 具有强度低、弹性模量小、变形性能和抗渗性能较好等技术特点<sup>[1-2]</sup>, 已应用于水利工程的堤坝基础与地基的结合部以及防渗墙等方面。弹性模量是塑性混凝土的一个重要指标, 由于塑性混凝土组分和性能的特殊性, 普通混凝土弹性模量计算方法对其已经不完全适用。文献[3]和文献[4]均建议塑性混凝土弹性模量可在测得轴压应力-应变曲线后通过作图法求得, 一般取上升段的斜率作为塑性混凝土弹性模量, 但是曲线近似直线而非完全直线, 故切点无法确定, 同时方法不够直观和简便, 笔者通过塑性混凝土弹性模量的试验, 对比普通混凝土弹性模量计算方法, 探讨适合于塑性混凝土的弹性模量的更加直观和简便的计算方法。

## 1 试验材料及试验方法

塑性混凝土制作采用郑州市龙岗水泥厂生产的P. O42.5普通硅酸盐水泥; 黏土由三门峡库区附近就地取材, 经磨细、过筛加工后以干粉形式掺入; 砂子为河砂; 粗骨料为5~20 mm连续级配的碎石; 膨润土为信阳市广运膨润土有限公司生产的钙基膨润土; 外加剂选用郑州建科混凝土外加剂有限公司生产的JKH-1型高效减水剂。

根据试验目的, 共配置了4种配合比的塑性混凝土(见表1), 每个配合比分别制作3个150 mm × 150 mm × 150 mm和3个150 mm × 150 mm × 300 mm的塑性混凝土立方体试块与棱柱体试块。

塑性混凝土立方体与棱柱体试块成型后在温度为20 ± 5 °C的室内静置24 h后拆模, 然后立即放入标准养护室中养护。养护室采用FHBS-60型全自动控温、控湿设备进行温湿控制, 温度为20 °C, 相对湿度为95%。试块养护28 d后开始试验。

试验在3 000 kN数显压力试验机上进行, 采用150 mm × 150 mm × 150 mm的试件测定塑性混凝土立方体抗压强度, 加荷速度为0.10 MPa/s, 为了节省试验量, 本次试验数据将作为后期标距变化弹性模量测试数据对比的基准, 考虑到后期试验仪器装置的方便, 统一采用150 mm × 150 mm × 300 mm的试件测定塑性混凝土弹性模量, 标距为试件全长即300 mm; 各种配合比下的塑性混凝土28 d立方体抗压强度 $f_{cu}$ 、轴心抗压强度 $f_c$ 及不同压应力下整个试件的变形。

塑性混凝土应力-应变关系曲线测试时, 试件的荷载和竖向变形分别采用荷载传感器和电子位移计量测, 并通过自动数据采集仪采集。为方便数据的采集, 采用0.005~0.01 MPa/s的较小加荷速度, 变形的测量标距取整个试件长度300 mm<sup>[3]</sup>, 在试件的两端加盖板, 测定不同压应力下整个试件的变形, 以此变形为基础计算应变,

收稿日期: 2009-03-01; 修订日期: 2009-06-28

基金项目: 河南省重大公益性科研项目(08110912600)

作者简介: 高丹盈(1962-), 男, 河南三门峡人, 郑州大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事新型复合建筑材料及其结构性能研究。

绘出应力-应变关系曲线。

表1 塑性混凝土配合比设计及28 d  
立方体强度和轴心抗压强度

Tab.1 The mix proportion of plastic concrete and  
the result of cubic and axial compressive strength

配合比 序号	塑性混凝土材料用量/(kg·m <sup>-3</sup> )							$f_{cu}$	$f_c$
	水	水泥	石子	砂子	膨润土	黏土	减水剂		
1	300	60	810	810	60	100	—	0.60	0.49
2	300	120	770	770	80	100	—	2.58	2.13
3	320	160	680	680	80	185	3.20	4.85	4.61
4	360	220	630	630	110	150	4.40	5.84	5.33

## 2 弹性模量计算方法

弹性模量反应了材料受力后的应力-应变性质。在塑性混凝土中,由于掺加了膨润土和黏土,使其成为含有许多缺陷和空隙的多相非均质复合材料<sup>[4]</sup>。当塑性混凝土承受荷载时,其中的缺陷和空隙受压变形,同时由于土体的可压缩性质及试验过程中没有进行预压,在初始阶段应力增长缓慢而应变增长较快,如图1所示。图中1-2、2-2、3-3、4-3为试件编号,其中第一个数字表示配合比序号,第二个数字为该配合比中的试件编号。

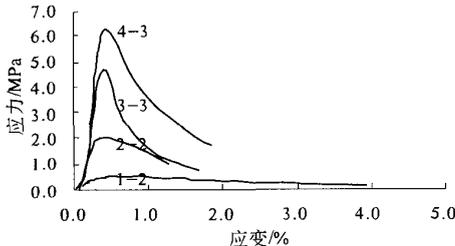


图1 塑性混凝土单轴向受压力-应变曲线  
Fig.1 Axial compressive strain-stress curve  
of plastic concrete

普通混凝土弹性模量的计算是在初始应力0.5 MPa与0.4倍轴心抗压强度的应力上限值之间反复预压3次<sup>[5]</sup>,再以同样的加载速度进行第4次加载,以第4次加载的应力与应变数据为依据进行计算的,根据塑性混凝土单轴应力-应变曲线的特征,规范的公式有时存在很大缺陷:

(1)  $P_1$ 取0.5 MPa的极限荷载:塑性混凝土应力-应变曲线初始弯曲段长,压密段长,塑性变形大,有时0.5 MPa对应应力-应变点仍处于压密段,即塑性变形阶段,利用0.5 MPa对应应力-应变值计算,明显偏离弹性模量的定义。

(2)  $P_2$ 取40%的极限破坏荷载:由于塑性混凝土的强度偏低,比如配置28 d单轴强度1 MPa

的塑性混凝土,则其对应40%的极限破坏荷载为0.4 MPa,利用该公式计算出的弹性模量的结果会出现负值,这也明显不符合弹性模量的要求。

(3)  $P_1$ 和 $P_2$ 取值有时可能造成计算直线段距离很短,增加计算误差。

为了进行比较,笔者以单调荷载作用下的塑性混凝土轴压应力-应变曲线的试验结果为基础,分别按照下式计算塑性混凝土的弹性模量:

$$E_1 = \frac{P_2 - P_1}{A} \cdot \frac{L}{\Delta L_1} \quad (1)$$

$$E_2 = \frac{P_4 - P_3}{A} \cdot \frac{L}{\Delta L_2} \quad (2)$$

$$E_3 = \frac{P_5 - P_2}{A} \cdot \frac{L}{\Delta L_3} \quad (3)$$

$$E_4 = \frac{P_6 - P_4}{A} \cdot \frac{L}{\Delta L_4} \quad (4)$$

式中: $E$ 为静力抗压弹性模量,MPa; $P_1$ 为应力为0.5 MPa时的荷载,kN; $P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$ 分别为30%、40%、50%、60%及70%极限破坏荷载,kN; $\Delta L_1$ 为应力从0.5 MPa增加到40%峰值应力时的试件变形值,mm; $\Delta L_2$ 为应力从30%峰值应力增加到50%峰值应力时的试件变形值,mm; $\Delta L_3$ 为应力从40%峰值应力增加到60%峰值应力时的试件变形值,mm; $\Delta L_4$ 为应力从50%峰值应力增加到70%峰值应力时的试件变形值,mm; $L$ 为测量变形的标距,mm; $A$ 为试件承压面积,mm<sup>2</sup>;

4种配合比共12个150 mm×150 mm×300 mm塑性混凝土试件的抗压弹性模量按照上式的计算结果见表2。

第1种配合比只测得有效数据为两组,同时因为强度较低,式(1)显然已不适用,故未计算。由表2可以看出, $E_1$ 通常小于 $E_2, E_3$ 和 $E_4$ 的值。原因在于当应力很小时,由于塑性混凝土缺陷和空隙受到压缩以及土体压缩变形的影响,导致初始变形较普通混凝土大,当应变达到一定程度时应力与应变的关系才呈线性变化趋势,按照 $E_1$ 的计算方法得到的值为应力从0.5 MPa到0.4倍峰值应力段的割线模量。 $E_2, E_3$ 和 $E_4$ 所计算的弹性模量值相对较为接近,原因在于在0.3倍峰值应力到0.7倍峰值应力上升段中,塑性混凝土基本保持线性变形,应力-应变关系曲线大致为直线。但是 $E_2, E_3$ 和 $E_4$ 并不完全相等,通常 $E_4$ 的值会略小于 $E_2$ 和 $E_3$ ,原因在于 $E_4$ 计算时应力的取值接近峰值应力,应变增长的速率会稍大于 $E_2$ 和 $E_3$ 计算段的增长速率。采用最小二乘法对 $E_2, E_3$

的值进行线性拟合,可得  $E_3 = 118.35 + 0.94E_2$ , 曲线除第1种配合比的两组数据误差较大,其他3种吻合较好.分析原因认为第1种配合比试件强度较低,应力-应变曲线测试结果稳定性不如其他3种配合比,计算可得拟合值与试验计算值比值的平均值为0.94,故可以看出,  $E_2$  和  $E_3$  的值较为接近.同时,可以认为塑性混凝土应力-应变关系曲线应力上升段中从0.3倍峰值应力到0.6倍峰值应力为斜率较为稳定阶段.故参考普通混凝土弹模计算方法,建议塑性混凝土弹性模量计算可取应力-应变曲线上上升段从0.3倍峰值应力到0.6倍峰值应力的割线斜率,即弹性模量计算公式可采用下式:

$$E'_c = \frac{P_5 - P_3}{A} \times \frac{L}{\Delta L_5} \quad (5)$$

式中:  $E'_c$  为按照式(5)计算的静力抗压弹性模量,MPa;  $\Delta L_5$  为应力从30%峰值应力增加到60%峰值应力时的试件变形值,mm;按照式(5)计算得到塑性混凝土的弹性模量见表2.

表2 塑性混凝土不同弹性模量计算方法的计算结果对比  
Tab. 2 The contrast of the different calculating method of elastic modulus of plastic concrete

配合比 序号	试件 编号	轴压强 度/MPa	弹性模量/MPa				
			$E_1$	$E_2$	$E_3$	$E_4$	$E'_c$
1	1-1	0.479	—	179	218	186	198
	1-2	0.493	—	185	150	133	161
2	2-1	2.197	997	1 327	1 218	1 158	1 216
	2-2	2.184	1 388	1 397	1 508	1 050	1 429
	2-3	1.995	1 209	1 256	1 316	1 204	1 268
3	3-1	4.457	1 694	2 246	2 445	2 468	2 354
	3-2	4.703	2 499	3 255	3 304	2 926	3 171
	3-3	4.654	1 522	2 229	2 378	2 257	2 287
4	4-1	5.560	1 752	3 249	3 288	2 965	3 296
	4-2	5.415	2 563	3 748	3 100	2 339	3 423
	4-3	5.019	1 506	2 713	2 777	2 493	2 666

## Research about Calculating Method for the Elastic Modulus of Plastic Concrete

GAO Dan - ying, ZHAO Li - mei, WANG Si - wei

(Research Center of New Style Building Material and Structure, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** In this paper, the axial compressive strain-stress curve of plastic concrete is tested. On the basis of the experimental results, and comparison study of the calculating method of the elastic modulus of plain concrete, It is put off that the slope from 0.3 times peak stress to 0.6 times peak stress is more stable in the upward section of axial compressive strain-stress curve of plastic concrete. Therefor, befitting calculating method of the elastic modulus of plastic concrete has been gained.

**Key words:** plastic concrete; elastic modulus; calculating method; peak stress

普通混凝土当应力较小时,具有线弹性性质,所以普通混凝土弹性模量可用应力-应变曲线过原点的切线的正切值表示.根据塑性混凝土自身特性以及本文弹性模量计算取值范围,为简化计算,建议塑性混凝土弹性模量也可取为应力-应变曲线过  $0.45\sigma_{\max}$  点的切线的正切值.

## 3 结束语

由于塑性混凝土组成材料的复杂性,当应力很小时,其缺陷和空隙受到压缩以及土体产生压缩变形,导致塑性混凝土的初始变形较普通混凝土大,当应变达到一定程度其应力与应变的关系才呈线性变化趋势.针对这些变形特征,探讨了塑性混凝土弹性模量的计算方法,提出了适合塑性混凝土特点的弹性模量的计算方法.

## 参考文献:

- [1] 杨示文,蒋春阳.低弹模塑性混凝土的研究及工程应用[J].水利水电施工,2002,(4):51-53.
- [2] 何润芝,何丽娟.防渗墙低弹塑性混凝土的试验研究与应用[J].混凝土,2006,(9):7-10.
- [3] 李清富,张鹏,张保雷.塑性混凝土弹性模量的试验研究[J].水力发电,2005,31(3):30-32.
- [4] 高丹盈,胡良明,严克兵,等.水泥用量对塑性混凝土强度的影响[J].水利水电技术,2008,37(9):56-58.
- [5] 中华人民共和国建设部.DL/5150—2001 水工混凝土试验规程[S].北京:中国电力出版社,2002.
- [6] 高丹盈,汤寄予,朱海堂.碳纤维高强混凝土的配合比及基本性能研究[J].郑州大学学报:工学版,2004,25(3):46-51.