

塑性混凝土应力应变特性的试验研究

宋力^{1,2}, 常芳芳^{1,2}

(1. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 郑州 450003;
2. 水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心, 郑州 450003)

摘要: 为了分析塑性混凝土应力应变关系, 共设计 8 组配合比 48 个试件, 进行了单轴抗压试验, 得到了塑性混凝土典型的应力应变曲线。通过将其与常规混凝土应力应变关系曲线进行对比, 并从应变、应力、曲线切线斜率、裂缝 4 个方面进行分析, 得到了塑性混凝土全过程的应力应变特性。研究发现, 塑性混凝土应力应变曲线上升段规律符合 Boltzmann 模型, 下降段规律符合 Logistic 模型, 其拟合程度超过 95%。结合上升段和下降段的数学模型, 通过研究给出了模型参数的物理意义, 可反映出塑性混凝土应力应变的基本特性。研究成果对塑性混凝土弹性模量测试、设计、施工等工作具有参考意义。

关键词: 塑性混凝土; 应力应变曲线; Boltzmann 模型; Logistic 模型; 物理意义

中图分类号: TU 528.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)02-0067-04

Study On Stress-strain Characteristics of Plastic Concrete

SONG Li^{1,2}, CHANG Fangfang^{1,2}

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China; 2. Research Center on Levee Safety and Disaster Prevention Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: For the relationship of the stress-strain of plastic concrete, the authors design eight mix proportion and forty-eight specimens to take the single axle compressive test, then we obtain the typical stress-strain curves. Through comparing with the stress-strain curves of ordinary concrete and analyzing four aspects: strain, stress, tangent slope and crack, we get the whole process about stress-strain characteristics of plastic concrete. At the same time, we study the regularity of stress-strain curves and find that the rising is in line with the Boltzmann model, the declining is better with the Logistic model, and the fitting degree is over ninety five percent. Based on the mathematic model and through the study of the physical meaning of the model parameters, they can reflect the basic characteristics of stress and strain. The results have reference significance to the test of elastic modulus of plastic concrete, design, construction and others.

Key words: plastic concrete; stress-strain curve; Boltzmann model; Logistic model; physical meaning

塑性混凝土是介于土和混凝土之间的一种复合材料, 具有低强度、低弹性模量、大应变和一定的抗渗能力的特点, 并具有与周围土层相近的应力、应变关系曲线^[1], 从早期试点应用于大坝围堰防渗墙等临时性工程^[1] 到近年来成为水利水电工程覆盖层防渗处理的首选方案^[2,3], 得到了快速的发展和运用。我国对塑性混凝土的研究始于 20 世纪 80 年代, 但大多侧重于工程实际应用, 缺乏较系统的理论研究, 尤其是对塑性混凝土应力—应变关系的研究甚少^[4]。本文通过对 8 个配合比下共 48 块试件的单轴抗压试验为基础, 探讨了塑性混凝土应力应变关系的相关特性。

1 试验设计

1.1 试验材料

试验中采用的各材料水泥为河南孟电生产的 P·032.5 号普通硅酸盐水泥, 各项指标符合《通用硅酸盐水泥》(GB 175-2007) 标准要求; 细骨料为河砂, 级配曲线位于 0 区, 属于中砂, 各项指标符合《建筑用砂》(GB/T 14684-2001) 标准要求; 粗骨料为粒径 5~25 mm 的石灰岩碎石, 级配连续, 各项指标符合《建筑用卵石、碎石》(GB/T 14685-2001) 标准要求; 水为普通自来水; 考虑黏土的离散性, 掺和材料全部使用

收稿日期: 2014-02-14 修回日期: 2014-03-10 网络出版时间: 2014-03-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtk.2014.02.001.html>

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(HKY-JBYW-2013-10)

作者简介: 宋力(1979-), 男, 河南南阳人, 工程师, 硕士, 主要从事混凝土结构试验、数值仿真模拟等研究。E-mail: songli@yeah.net

膨润土,膨润土为四川乐山生产的钠质膨润土。

试验材料共设计了 8 种配合比,每组仅考虑 28 d 龄期,见表 1。

表 1 塑性混凝土的配合比

Table 1 The mix proportion of plastic concrete

编号	水泥/kg	水/kg	砂/kg	石子/kg	膨润土/kg	水胶比	砂率
I	204	265	872	603	93	0.89	0.6
ò	166	265	1024	686	80	0.94	0.6
ó	160	286	1029	687	80	1.02	0.6
ô	200	281	1000	668	100	1.19	0.6
õ	160	457	682	682	220	1.2	0.5
ö	160	348	764	764	145	1.2	0.5
×	160	337	800	800	120	1.2	0.5
ø	160	338	780	780	120	1.2	0.5

1.2 试件制作

本文试验测试的是棱柱体和圆柱体单轴抗压作用下塑性混凝土的力学特性指标,其中棱柱体试件尺寸为 150 mm × 150 mm × 300 mm,圆柱体试件尺寸为 φ150 mm × 300 mm,每组配合比均制作 6 个立方体试件和 6 个圆柱体试件,共计 48 个试块。塑性混凝土采用机械拌和,振动台振捣,试模成型静置 48 h 后拆模,并移至标准养护室养护至 28 d 龄期,再参照《水工混凝土试验规程》(DL/T 5150 2001)进行相关试验。

1.3 试验方法

与普通混凝土相比,塑性混凝土抗压强度低、变形大,采用应变片法很难反映出塑性混凝土的应变。本文使用全标距法^[9],采用微机控制的 CMT5105 电子万能试验机,位移控制,加载速度 0.2 mm/min。轴向荷载、试件的变形数据均由自动传感器采集,并自动输入计算机内绘制成应力-应变曲线。

2 试件基本力学指标

2.1 试验结果

塑性混凝土基本力学指标除了弹性模量、峰值抗压强度外,尚应考虑初始弹性模量。

目前,对于弹性模量尚无统一规定取值方法。严格来讲塑性混凝土不具备弹性模量,而应是割线模量。但是若以试件出现第一条裂缝统计的应力及应变为依据,此前阶段可认为其为弹性模量阶段。根据试验结果统计,取峰值应力 90% 及对应应变,按式(1)计算试件弹性模量。

$$E = \frac{p_2 - p_1}{A} \times \frac{L}{\Delta L} \quad (1)$$

式中: E 为试件的弹性模量 (MPa); p_2 为极限破坏荷载的 90% (N); p_1 为试件的初始荷载,根据其切线斜率的变化,取极限破坏荷载的 40% (N); A 为试件的承压面积 (mm²); ΔL 为试件从 p_1 增加到 p_2 时的纵向累计变形值 (mm); L 为试件的变形测量标距 (mm)。

初始弹性模量 $E_{初}$ 主要针对未预压构件,根据试验结果统计,初始弹性模量值应按照式(1)进行计算,其值 p_2 为极限破坏荷载的 4.7%,对应的应变约为峰值应变的 15%, p_1 为极限破坏荷载的 2.5%。

按照上述计算方法,8 个配合比下各组试件峰值抗压强

度、峰值应变、弹性模量、初始弹性模量均值的试验结果见表 2。表 2 中,以 3 个试件测定值的算术平均值作为该组试件的抗压强度值。当 3 个测定值中的最大或最小值有一个与中间值的差值超出中间值的 15% 时,则把最大及最小值一并舍去,取中间值作为该组试件的试验值,其中棱柱体和圆柱体试件的试验值用“/”隔开。

对表 2 中同一个配合比下棱柱体和圆柱体试件的初始弹性模量和弹性模量的比值进行统计,棱柱体试件比值平均值为 0.370,标准偏差为 0.086,圆柱体试件比值平均值为 0.462,标准偏差为 0.205,8 组配合比下的统计结果见图 1。

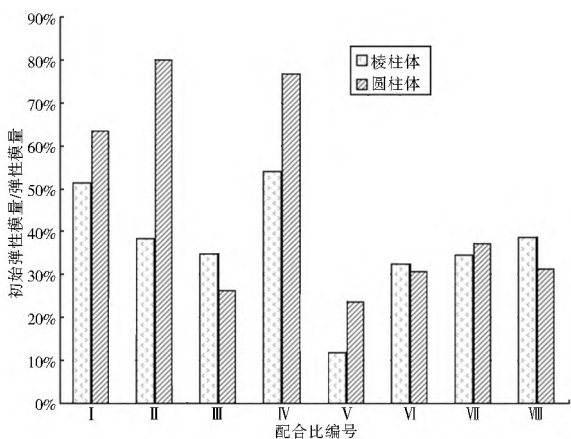


图 1 不同配合比下试件初始弹性模量与弹性模量比值

Fig. 1 The ratio of initial elastic modulus and elastic modulus under the different mix proportion

表 2 试件基本力学指标试验结果

Table 2 The basic mechanical properties test results of the specimens

配合比	峰值抗压强度 / MPa	峰值应变 (10 ⁻³)	弹性模量 / MPa	初始弹性模量 / MPa
I	0.73/0.74	8.3/7.8	195.1/314.4	100.4/52.2
ò	0.85/1.29	10.1/5.8	154.7/148.0	59.4/94.0
ó	0.57/0.99	9.4/6.4	112.7/117.0	39.1/93.6
ô	0.81/0.66	8.9/8.9	156.7/136.8	84.8/36.0
õ	2.90/2.34	13.5/10.9	291.5/275.5	34.5/64.7
ö	3.50/2.62	10.7/8.9	418.6/477.8	135.4/147.0
×	3.26/2.88	10.1/6.8	515.2/360.5	178.4/133.6
ø	2.46/2.80	9.2/6.5	532.9/264.2	205.8/82.7

试验表明相同配合比下,不考虑预压因素,圆柱体的峰值抗压强度在 2.50~ 3.0 MPa,对应峰值应变为 11.0 × 10⁻³ ~ 15.0 × 10⁻³;棱柱体的峰值抗压强度在 2.00~ 2.75 MPa,对应峰值应变为 9.0 × 10⁻³ ~ 14.0 × 10⁻³;考虑预压因素并扣除预压段后,圆柱体的峰值抗压强度在 2.50~ 3.0 MPa,对应峰值应变为 8.0 × 10⁻³ ~ 11.0 × 10⁻³;棱柱体的峰值抗压强度在 2.00~ 2.75 MPa,对应峰值应变为 6.0 × 10⁻³ ~ 8.0 × 10⁻³。可以看出,圆柱体试件试验结果离散性较小,棱柱体试件试验结果稍显离散,棱柱体和圆柱体峰值抗压强度均值之比为 0.75。

2.2 应力应变典型曲线及特征

根据试验结果绘制应力应变典型曲线,见图 2 至图 5。

总结后可以绘制出一般性应力应变关系曲线,见图 6。不难发现,塑性混凝土的应力应变曲线可分为 4 个阶段。

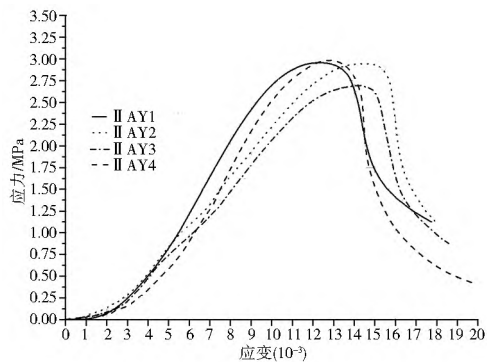


图2 圆柱体典型应力应变曲线(扣除预压)

Fig. 2 Typical stress-strain curve of cylinder (Before preloading)

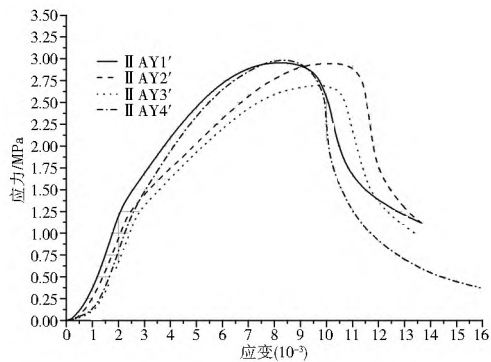


图3 圆柱体典型应力应变曲线(预压后)

Fig. 3 Typical stress-strain curve of cylinder (After preloading)

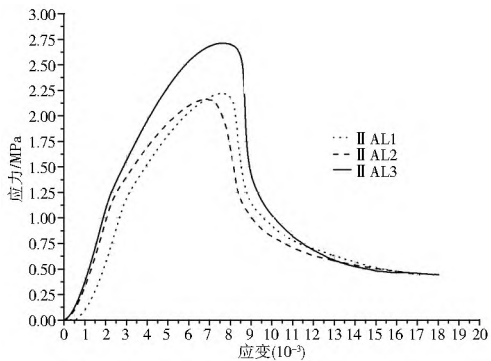


图4 棱柱体典型应力应变曲线(扣除预压)

Fig. 4 Typical stress-strain curve of prism (Before preloading)

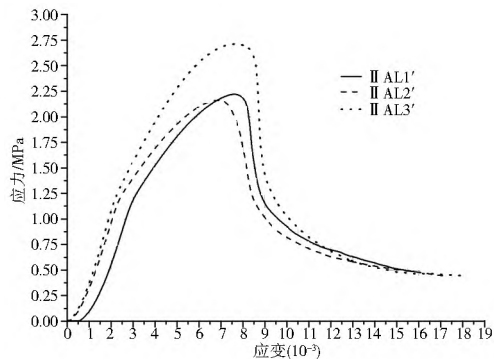


图5 棱柱体典型应力应变曲线(预压后)

Fig. 5 Typical stress-strain curve of prism (After preloading)

(1) 应变从0到第一个拐点A处(OA段)。该阶段的应力增长幅度小于应变增长幅度,曲线呈现凹特征。A点结束处,应变为 1.3×10^{-3} ,为峰值应变的15%,应力约为0.1 MPa,

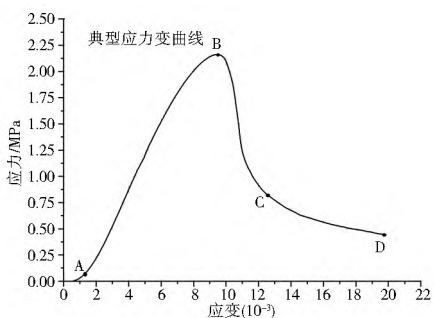


图6 应力应变典型曲线的分段性

Fig. 6 The segmentation of stress-strain curves

为峰值应力的4.7%,对应试件表面无可见裂缝出现。说明在A点之前,塑性混凝土在荷载作用下经历了受压的过程且内部结构的空隙、气泡被进一步压实,逐渐趋近于常规混凝土的性质。对典型曲线OB段曲线按照相邻两个数据点求斜率,见图7。可以看出,在A点之前,OA段斜率一直增加,过了A点后,斜率仍然呈增加趋势,且增加的速率加快。

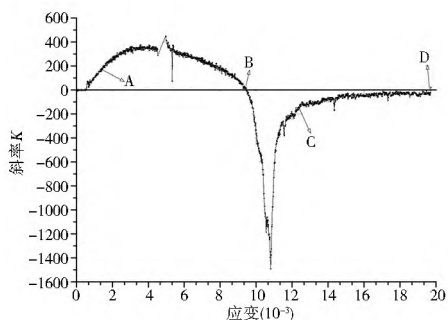


图7 应力应变曲线切线斜率图

Fig. 7 The tangent slope of stress-strain curves

(2) 拐点A处到峰值应力B处(AB段)。该段应力增长幅度大于应变增长幅度,曲线呈现凸特征。曲线在AB段的性质,与常规混凝土较为接近,基本呈现线性变化。对照图7可以看出,在应变为 $4.6 \times 10^{-3} \sim 5.3 \times 10^{-3}$ 之间,对应0.96~1.3 MPa时,曲线从上升变为下降,且其下降趋势接近于直线下降。此时期应变为峰值应变的48%~56%,应力为峰值应力的44%~60%。此时试件对应表面仍无可见裂缝出现,试件的第一条可见裂缝在达到峰值应力的90%处,即应变为 7.7×10^{-3} ,应力为1.95 MPa处。

(3) B点到第三个拐点C处(BC段)。该段应力增长幅度小于应变增长幅度,曲线呈凹特征。在此阶段,试件开始出现大量可见细小裂缝,且裂缝宽度不断增加,一直到C点形成贯穿性裂缝,此时试件已完全开裂,典型裂缝图见图8。C点的应变为 12.5×10^{-3} ,为峰值应变的1.32倍,应力为0.83 MPa,为峰值应力的38%。试件经过B点后,应力下降非常迅速,表现出很小的应变即引起应力的大幅度下降。从图7可以看出,在BC段,应力下降速率表现出明显的两端性,即在应变为 10.8×10^{-3} 时,图6中为过峰值应力后应变增加峰值应变的14%后应力下降速率达到峰值,再增加峰值应变的18%后,应力下降速率迅速减缓。

(4) 拐点C处至试件破坏(CD段),此段应力增长速度小于应变增长速度,曲线呈现凹特征。试件经过的C点之后,



图 8 试件典型破坏形态图

Fig. 8 The rupture of the sample

其应变迅速增大,应力下降速率变缓。试验中表现为试件在形成贯通裂缝后,沿着破坏面不断形成碎块。应力主要由破坏面之间塑性混凝土的摩擦力提供,再经过较大应变到达 D 点后,其应力水平维持稳定。D 点应变为 19.7×10^{-3} ,应力为 0.44 MPa,试验结束时终止应变为峰值应变的 2.1 倍,终止应力为峰值应力的 20%。

对比图 2 至图 5 可知,经过预压之后,塑性混凝土试件的 OA 段表现不明显。同时,对比预压前的曲线并结合工程中对塑性混凝土的应用,可以得到塑性混凝土试件在试验前应预压到拐点 A 后应变约为峰值应变的 50% 处,此时应力控制约为峰值应变的 54%,这与普通混凝土的预压控制标准不同。

2.3 曲线拟合函数

对应力应变典型曲线的分析结果表明,其规律可用分段式函数进行拟合。

对上升段,试验以前的研究模型^[6,8],均无法准确反应其初始应变段及峰值附近,经研究采用 Boltzmann 模型对其进行拟合,可较好的反应其规律,两者相关性达到 99% 以上,典型拟合曲线见图 9。并对 Boltzmann 模型中的参数进行研究,给出式(2)公式及参数物理意义。

对下降段,现有常规混凝土文献无法准确反应其特点,特别是经过反弯点 C 附近的特点,经多次试验采用 Logistic 模型可以较好的与试验数据进行拟合,其拟合相关性达 96% 以上,典型拟合见图 10。

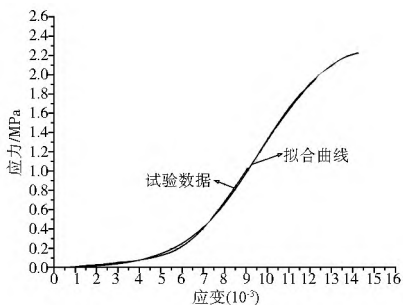


图 9 棱柱体典型应力应变曲线(扣除预压)

Fig. 9 Typical stress-strain curve of prism (Before preloading)

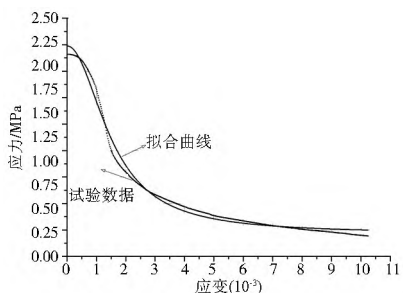


图 10 棱柱体典型应力应变曲线(预压后)

Fig. 10 Typical stress-strain curve of prism (After preloading)

综上所述,应力应变曲线上段和下降段可分别用式(2)、式(3)表示。

$$\frac{\sigma}{f_{cu}} = 1 - \frac{1}{1 + e^{\frac{(\varepsilon - 0.5\varepsilon_c)}{k}}} \quad (2)$$

$$\frac{\sigma}{f_{cu}} = 1 - \frac{1 - \frac{f_c}{f_u}}{1 + \left[\frac{\varepsilon - \varepsilon_u}{\varepsilon_c} \right]} \quad (3)$$

式中: σ 为试件测得的应力(MPa); f_u 为试件的峰值抗压强度,可近似认为其为常数(MPa); f_c 为试件过 D 点后的抗压强度残余值,可近似认为其为常数(MPa); ε 为试件测得的应变,量级为 10^{-3} ; ε_u 为试件的峰值应变,量级为 10^{-3} ; ε_c 为试件的在下降段拐点处 C 对应的应变值,量级为 10^{-3} ; K 反应塑性混凝土配合比、试件浇筑质量综合系数,无单位。

对经过预压后的曲线(图 2、图 5)进行数值拟合研究,发现其曲线上段规律更符合清华大学过镇海教授等所提出的分段式函数^[6]。

3 结论

本文主要通过试验方法研究了塑性混凝土应力应变的特性,通过研究有如下主要结论。(1)塑性混凝土应力应变曲线具有明显的分段性,与普通混凝土相比增加了初始塑性压缩阶段(OA 段),同时在下段具有明显的反弯点 C; (2)塑性混凝土应力应变曲线上段符合 Boltzmann 模型规律,下降段符合 Logistic 模型规律; (3)预压后的塑性混凝土应力应变曲线上段与普通混凝土较为接近,可使用文献[4]推荐的模型进行描述; (4)塑性混凝土试验中可采用预压的方法开展,为有效消除混凝土内部的孔隙,可采用预压到峰值应力的 54% 的标准进行控制。

参考文献(References):

- [1] 王清友. 浅析混凝土防渗墙[J]. 中国水利, 1991, 41(3): 38-39. (WANG Qingyou. A Brief Introduction of Plastic Concrete Cutoff Wall[J]. China Water Resources, 1991, 41(3): 41-42. (in Chinese))
- [2] 蒋凯乐, 李云鹏, 张如满. 塑性混凝土防渗墙土反力系数反演[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 389-394. (JIANG Kaile, LI Yunpeng, ZHANG Rurman. The Soil Reaction Coefficient Inversion of Plastic Concrete Diaphragm Wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 33(2): 389-394. (in Chinese))
- [3] 李青云, 张建红, 包承纲. 风化花岗岩开挖弃料配制三峡二期围堰防渗墙材料[J]. 水利学报, 2004, (11): 114-118. (LI Qingyun, ZHANG JIAN-hong, BAO Cheng-gang. Plastic Concrete for Cutoff Wall Using Weathered Granite Sand in Stage 0 Cof ferdam of Three Gorge Project[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, (11): 114-118. (in Chinese))
- [4] 高丹盈, 王四巍, 宋帅奇. 塑性混凝土单向受压应力应变关系的试验研究[J]. 水利学报, 2009, 40(1): 82-87. (GAO Danying, WANG Siwei, SONG Shuaiqi. Plastic Concrete Single axle Compression Experimental Study on the Stress Strain Relationship[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(1): 82-87. (in Chinese))

(下转第 132 页)

50 kPa、45 kPa、22 kPa、0 kPa。然后同有效应力强度指标 $c' = 17.5 \text{ kPa}$, $\phi' = 27.4^\circ$, $\psi = 7.58^\circ$ 一起代入抗剪强度式计算, 结果见表 4。

表 4 不同含水率土样在不同净法向应力下的抗剪强度

Table 4 Shear strengths under different soil net normal stresses of soil samples with different water contents

ϕ / kPa	含水率 $w(\%)$				
	11	14.4	17.2	29.8	32.8
20	39.8	34.5	33.8	30.8	27.8
50	55.4	50.1	49.4	46.3	43.4
100	81.3	75.9	75.3	72.3	69.3
200	133	127	127	124	121
300	184	179	178	175	173

将表 4 中计算结果用基质吸力对黄土强度的贡献率表示为 $\delta = (\tau_f - \tau_{f0}) / \tau_{f0}$, 见图 4。

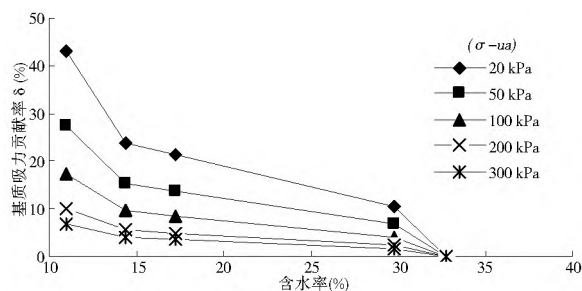


图 4 不同净法向应力下基质吸力贡献率与含水率的关系曲线

Fig. 4 Relationship curves of δ and

water content under different net normal stresses

从图 4 可以看出, 基质吸力的贡献率随着含水率的增加而减小, 含水量在天然状态 (14.4%) 时, 基质吸力强度贡献率最大; 当土处于饱和时, 基质吸力为零。在净法向应力较小时基质吸力对强度的贡献较大; 随着净法向应力的增大, 基质吸力对强度的贡献程度逐渐减弱。对于南水北调中线穿黄工程南岸挖方渠道高边坡, 地下水位较高的黄土地区, 由于黄土的粉粒、细砂粒含量高, 持水能力差, 水易于排出, 而且含水量变化对强度的影响较大, 特别是在低应力条件下更为显著, 所以该处施工采用抽排地下水的方法是合适的。

7 结论与建议

(1) 试验结果表明, 现场取回的 A_{-1} 和 $A_{夹}$ 两层黄土土样

的物理力学性质基本一样。

(2) 通过 A_{-1} 和 $A_{夹}$ 两层饱和黄土的三轴固结不排水剪切试验, 建议 $A_{夹}$ 黄土层强度参数选取为: $c = 31.8 \text{ kPa}$, $\psi = 12.8^\circ$; $c' = 17.2 \text{ kPa}$, $\phi' = 27.2^\circ$; 建议 A_{-1} 黄土层强度参数选取为: $c = 25.1 \text{ kPa}$, $\psi = 12.6^\circ$; $c' = 17.5 \text{ kPa}$, $\phi' = 27.4^\circ$ 。

(3) 土-水特征曲线反映了土体基质吸力随含水率变化的特性, 本次试验曲线规律性较好, 其特点是基质吸力在 0~20 kPa、50~770 kPa 这两个范围内含水率变化不大, 而在 20 kPa~50 kPa 之间, 试样的含水率变化很大, 反映出该两层土以粉粒和砂砾为主 (其含量已达到了 84.5%), 具有持水能力较差的特性。

(4) 通过对 A_{-1} 土层非饱和黄土三轴剪切试验资料进行整理, 得到该层非饱和黄土强度参数 $\psi = 7.58^\circ$ 。

(5) 南水北调中线穿黄工程的黄土易于排水, 且在低应力下基质吸力对黄土强度贡献率显著, 因此采用抽排地下水的施工办法是合适的。

参考文献 (References):

[1] SL 237-1999, 土工试验规程[S]. (SL 237-1999, Specification of Soil Test[S]. (in Chinese))

[2] 邢义川, 吴培安, 骆亚生. 非饱和和原状黄土三轴压缩试验方法研究[J]. 水利学报, 1996, (1): 47-52. (XING Yi chuan, WU Pei an, LUO Ya sheng. Triaxial Test on Undisturbed Unsaturated Loess[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, (1): 47-52. (in Chinese))

[3] Delwyn G · Fredlund, Harianto Rahardjo. 非饱和土土力学[M]. 中国建筑工业出版社, 1997. (DELWYN G · Fredlund, HARIARTO Rahardjo. Soil Mechanics for Unsaturated Soils[M]. China Architecture and Building Press, 1997. (in Chinese))

[4] 缪林昌, 殷宗泽. 非饱和土的抗剪强度[J]. 岩土力学, 1999, 20(3): 1-6. (MIAO Lin chang, YIN Zong-ze. Shear Strength of Unsaturated Soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(3): 1-6. (in Chinese))

[5] 仲晓晨. 吸力在非饱和土强度中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2003, 23(5): 11-13. (ZHONG Xiao chen. Effect of Suction Force on the Strength of Unsaturated Soil[J]. Water Resources and Hydropower Technology Progress, 2003, 23(5): 11-13. (in Chinese))

(上接第 70 页)

[5] 王四巍, 于怀昌, 高丹盈. 塑性混凝土弹性模量室内试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(3): 73-76. (WANG Si wei, YU Huaì chang, GAO Dan ying. Experimental Study on Plastic Modulus of Elasticity Concrete[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2011, 38(3): 73-76. (in Chinese))

[6] 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: 12-15. (GUO Zhen hai. The Test of Bar

sis and Constitutive Relation Concrete Strength and Deformation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997: 12-15. (in Chinese))

[7] Sargin M. Stress-strain Relations for Concrete and the Analysis of Structural Concrete Sections[Z]. Canada, 1971.

[8] Hongstad E. Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design[J]. Journal of ACI, 1955, (12): 455-479.