

# 软土结构性定量化参数研究

张先伟, 王常明

(吉林大学 建设工程学院, 长春 130026)

**摘要:** 土结构性研究的根本任务是寻找能全面反映土在应力作用下结构破损规律的定量化指标。对黄石、漳州、青岛地区软土进行单向与等向压缩试验, 分析结构性土的压缩特性, 探讨了不同试验条件对软土结构性的影响, 结果表明: 当压力低于结构屈服压力时, 主要是初始结构的自我调整过程, 结构存在少量的破损, 压缩性较小; 当压力大于结构屈服压力时, 结构大量破坏, 除了颗粒间的滑移, 还伴随结构的塌陷, 压缩性大大增加; 重塑样在压缩过程中压缩性变化不大, 这是由于重塑样已失去了结构性的影响。根据土样在压缩过程中结构破损情况提出了一个新的判别结构性强弱的定量化参数—结构破损系数, 该值可通过 AutoCAD 软件简单获取, 便于推广。利用该方法判别试验土样中结构性最强的为青岛软土, 黄石软土次之, 漳州软土最弱。最后利用结构破损系数解释了不同扰动程度对压缩曲线的影响。

**关键词:** 土结构性; 压缩曲线; 结构破损; 结构破损系数

**中图分类号:** TU43    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2010)04-0038-06

## Quantitative Parametric Analysis of Soft Clay Structure

ZHANG Xian-wei, WANG Chang-ming

(College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, P. R. China)

**Abstract:** It is a fundamental task for soil structure study to find a quantitative parameter that reflects structural damage under pressure. Based on the unidirectional compression and isotonic compression tests of soft clays from Huangshi, Zhangzhou and Qingdao, the compression properties of structure soil and the effect of different conditions on the properties were investigated. It is found that when the pressure is lower than structure yield stress, it is mainly the initial structure self-alignment procedure and the structure is in few damage and the compressibility is small. When the pressure is bigger than the structure yield pressure, the structure destroys massively and the compressibility increases greatly not only from inter-granular slipping but also from the collapse. With the damage properties in compression, a new coefficient was proposed to evaluate the structural behavior. And this parameter can be obtained simply through the software AutoCAD. With the proposed method, it is found that the soft clay in Qingdao is strongest in structural behavior, followed with that in Huangshi and Zhangzhou.

**Key words:** soil structure characteristics; compression curves; structural damage; structural damage parameter

收稿日期: 2009-11-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(40572153)

作者简介: 张先伟(1982-), 男, 博士, 主要从事软土蠕变特性、软土地基处理技术研究, (E-mail) zhangxianwei414@163.com。

王常明(联系人), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土力学与岩土工程研究, (E-mail) wang\_chm@163.com。

土的结构性,是指土颗粒及孔隙的性状和排列型式及颗粒之间的相互作用。它的形成原因是多种多样的,土颗粒的矿物成分、沉积条件及孔隙水中的化学成分都会影响到土的结构性。目前,土结构性在岩土工程学科发展的重要地位已被大家所认知,国内外对结构性土进行很多研究,也取得了一些有意义的成果<sup>[1-4]</sup>。然而,土结构性研究的根本任务是寻找一个能全面反映土在应力作用下结构破坏规律的定量化指标,并与土的变形强度联系起来,建立和描述它们之间的基本规律,这对研究软土结构性及其对力学性质的影响、结构性土本构模型都具有重大意义。

很多学者从土的微结构形态学入手,建立了土结构形态的定量参数<sup>[5-8]</sup>,但从微观角度研究土的结构性多为定性分析,定量分析的成果较少,且微结构几何形态定量参数测试技术和图象处理技术过于复杂,难以推广应用,而且微结构几何形态定量参数在反映结构强度方面是比较间接的。骆亚生提出应变综合结构势<sup>[6]</sup>,突破了结构性参数在复杂应力条件下应用的局限性。肖树芳等提出了用微型贯入仪测定在各种受力状态下的贯入强度值<sup>[7]</sup>,定义结构强度系数  $m$  作为结构性参数,该参数的测试方法简

单,但若获得精确的参数需要进行大量的不同偏应力的剪切试验,工作量较大。此外,汤连生从能量的角度,把不确定的土的结构要素用统一的熵状态进行定量化方法的评价土的结构性<sup>[8]</sup>。

通过对黄石、漳州、青岛地区软土进行单向与各向等压压缩试验,分析结构性土的压缩特性,探讨了不同试验条件对软土结构性的影响情况,根据土样在压缩过程中结构破坏情况提出了一个新的判别结构性强弱的定量化参数,并通过试验数据验证了该参数的正确性。

## 1 土样性质及结构性试验

### 1.1 土样基本性质

试验原状样与重塑样取于黄石市花湖经济开发区,深约 5 m,属于第四系全新统河湖沉积相灰黑色软土;漳州市九龙江出海口南岸,深 14 m,属于第四系全新世深灰色河海交互相软土;青岛市市内某工地,深 6 m,属于第四系全新世灰色滨海相软土。基本性质指标如表 1,其中粘聚力和摩擦角为三轴固结不排水剪切试验所得。试验土样都具有软土工程地质特征,表现在高含水率,大孔隙比,强度指标低,高压缩性,具有高饱和度。

表 1 软土物理力学性质指标

地区	深度	天然密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	含水率 $w / \%$	干密度 $\rho_d / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	孔隙比 $e$	液性指数 $I_L$	塑性指数 $I_p$	饱和度 $S_r$	压缩系数 $a_{1-2}$	粘聚力 $C / \text{kPa}$	摩擦角 $\varphi / (^\circ)$
黄石	5	1.65	70.5	0.97	1.78	1.09	34	99	1.64	11	20
漳州	14	1.56	69.6	0.93	1.9	1.1	35.7	96	1.3	9	11
青岛	6	1.82	43.1	1.27	1.12	0.62	22	99	0.94	15	26

### 1.2 研究土结构性的试验方法

原状样是采用薄壁取土器取得的天然原状样,在搬运和试验装样过程中减少扰动。重塑土是将原状土自然风干,然后碾碎过筛、称重、测出风干含水量后加水,按原状样含水量计算所需加水量(水为无氧蒸馏水),养护 3 d。

单向压缩试验采用的仪器为 WG 型单杠杆固结仪。在双面排水的情况下采用分级加荷方式进行试验,土样面积  $32.2 \text{ cm}^2$ ,高 2 cm。

等向压缩试验采用的仪器是 TSZ-2.0 型台式三轴剪切仪,试样高为 8 cm,直径为 3.91 cm。采用分级加荷方式,在不排水时施加每一级荷载,等孔隙水压力不再发生变化时开始排水,观测孔隙水压力

和排水量,直到在这一级荷载作用下,孔压消散接近 0 为止(因为实际情况下,一般孔压不会完全消散到 0),然后施加下一级荷载,重复上述步骤。

为了表现加荷时间、卸载情况、试验方法等情况对结构特性的影响,对 3 种软土的原状土样与重塑土样采用了多种试验方案,见表 2。

方案 A 为对黄石软土进行的逐级加载压力的等向压缩试验;单向压缩试验试验对象为 3 种软土。方案 B、C、D 是对漳州软土进行的逐级加载压缩试验,每一级加载时间逐渐减小,分别为 3~4 d、24 h、2 h;方案 E 是对 3 种软土进行的单向压缩试验,与方案 C 每级加压情况基本相同,但加入了卸载过程。

表 2 软土结构性试验方案

试验方法	试验方案编号	试验土样	加荷方案(压力单位为 kPa)
等向压缩试验	A	黄石软土	30→50→100→150→200→250→300→350→400→450(24 h 加一级)
	B	漳州软土	12.5→25→50→100→200→400→800→1600(3~4 d 加一级)
	C	漳州软土	12.5→25→50→100→200→400→800→1600(24 h 加一级)
单向压缩试验	D	漳州软土	12.5→25→50→100→200→400→800→1600(2 h 加一级)
	E	黄石软土、漳州软土、青岛软土	12.5→25→50→75→100→200→400→200→100→0→100→200→400→800→1600 或 12.5→25→50→75→100→200→100→50→0→50→100→200→400→800→1600(24 h 加一级)

考虑当土样结构屈服压力较小,施加压力变化较大时,会很难在压缩曲线上找到明显拐点,难以确定结构屈服压力与结构强度,且试验土样较软,试验的初始施加几级的压力都比较小,如单向压缩试验的初始荷载采用较小值 12.5 kPa。

## 2 软土结构特性分析

图 1 是软土的单向压缩曲线与等向压缩曲线。观察压缩曲线可以得到如下结论:

1) 原状土压缩曲线存在明显的拐点,等向压缩曲线比单向压缩曲线上拐点表现的更明显,这主要是由于试验方法的不同。龚晓南<sup>[9]</sup>、王国欣<sup>[10]</sup>认为天然结构性软土压缩曲线上的拐点称为结构屈服压力  $\sigma_k$ 。各地区软土的结构屈服压力  $\sigma_k$  见表 3,可以认为,对结构性较强的土体,结构屈服压力  $\sigma_k$  体现更明显,超出  $\sigma_k$  压缩性更高,这反映出结构性越强抵抗变形能力也越强,而一旦超出  $\sigma_k$ ,结构性的破坏会使压缩量急剧增大。

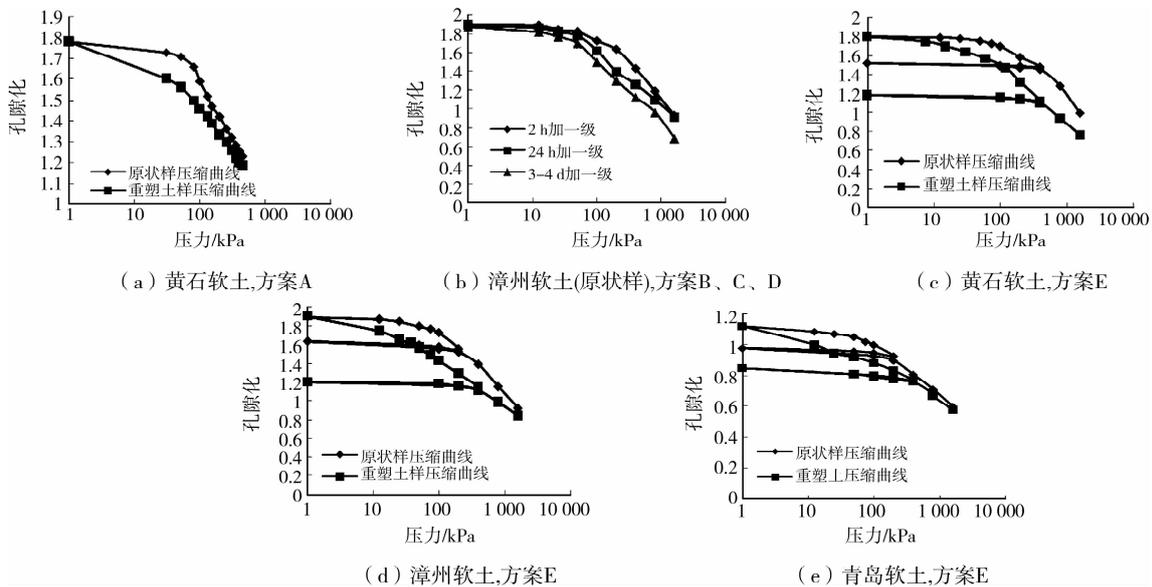


图 1 软土等向压缩与单向压缩曲线

表 3 软土结构性试验结果

土样地区	漳州	黄石	青岛	漳州	漳州	黄石	
试验方案		E		B	C	D	A
$\sigma_k$ /kPa	114	108	101	109	107	118	96
$P_c$ /kPa	107	89	90	99	99	114	86
$\sigma_z$ /kPa	98.2	82.5	88	98.2	98.2	98.2	82.5
$q$ /kPa	7	19	11	10	8	4	10
$\sigma_k/\sigma_z$	1.2	1.3	1.1	1.1	1.0	1.2	1.2
$\sigma_k/P_c$	1.065	1.09	1.12	1.1	1.08	1.035	1.12
$S/\%$	17.7	14	9.6	10.8	14.5	20.6	8.9

传统土力学理论认为利用 Casgrande 法获得那一点压力为先期固结压力  $P_c$ , 通过以上分析可知, 对于结构性土, 此点应为结构屈服压力  $\sigma_k$ , 那么对于结构性土如何确定先期固结压力  $P_c$  呢?

李涛在引入扰动特征量的基础上, 根据土样扰动对  $e-\lg P$  压缩曲线的影响, 建立了利用扰动和重塑样压缩试验的结果来估算理想土样的先期固结压力  $P_c$  的方法<sup>[11]</sup>。

但该方法对于非结构性土或弱结构性土来说是合适的, 对于结构性土通过其扰动土样来确定就不合适了, 因为结构性土的扰动样本本身还是存在一定结构强度的, 所以只有通过几乎完全丧失结构强度的重塑土样的分析, 才能较准确的找出结构性土的先期固结压力。王国欣等对李涛的方法加以改进从重塑土的角度出发, 通过还原压缩曲线来确定天然结构性软土的先期固结压力<sup>[10]</sup>。其用重塑土建立的还原后压缩曲线的数学模型为:

$$e = e_1 - C_r (\lg p_L)^{1-A} \cdot (\lg p)^A \quad (1)$$

其中,

$$A = 1 + \frac{\lg(C_s/C_r)}{\lg(\lg \sigma_k / \lg p_L)} \quad (2)$$

式中:  $e_1$  为压力 1 kPa 时对应的孔隙比, 可由初始孔隙比代替;  $C_r$  为重塑样的压缩指数;  $C_s$  为重塑样的回弹指数,  $\sigma_k$  为原状样的结构屈服应力;  $p_L$  为重塑样与原状样压缩曲线交点对应的压力值;  $A$  为还原系数, 反映还原后压缩曲线的特征。

该文对压缩试验数据采用此方法确定了先期固结压力  $P_c$  值, 以漳州软土为例, 见图 2。具体步骤为:

1) 用室内压缩试验测出重塑样压缩曲线和回弹曲线, 分别求得理想重塑土的压缩指数  $C_r = 0.05$ ,  $C_s = 0.35$ , 以及重塑土样与天然原状样的压缩曲线交点对应的压力值  $p_L = 4\ 000$  kPa。

2) 已知  $e_0 = 1.89$ ,  $\sigma_k = 108$  kPa, 将所得的  $C_r$ ,  $C_s$  和  $p_L$  代入式 1, 算出重塑土还原后的压缩曲线, 最后得到曲线方程为:

$$e = 1.89 - 0.005 \cdot (\lg p)^{4.26} \quad (3)$$

3) 用 Casgrande 法在还原后的压缩曲线上确定先期固结压力的值  $P_c = 114$  kPa。

对根据重塑土还原后压缩曲线采用此方法确定了先期固结压力  $P_c$  值(图 1), 根据取土深度得到上覆压力  $\sigma_z$ , 根据原状样压缩曲线采用 Casgrande 法得到  $\sigma_k$  值, 结构强度  $q$  为先期固结压力  $P_c$  与结构屈服压力  $\sigma_k$  之差, 所得数据汇于表 3。

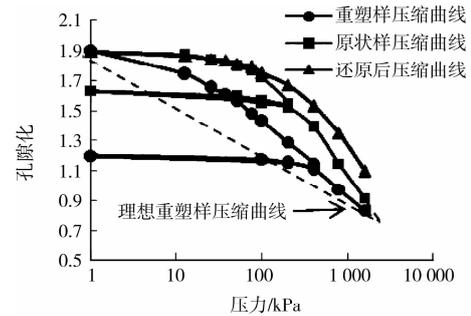


图 2 原状样、重塑土样压缩曲线与还原后压缩曲线(漳州, 方案 E)

可见, 所有土样的固结屈服压力均大于有效上覆压力, 这是受到土结构性影响的天然沉积土的主要特征之一。先期固结压力  $P_c$  与上覆压力接近, 3 种软土基本上属于正常固结土。漳州软土结构应力比在 1~1.2 之间, 黄石软土在 1.2~1.3 之间, 青岛软土为 1.1, 说明软土在沉积过程中产生的结构屈服压力与上覆压力基本上成正比。正常固结的天然沉积土具有大于 1 的结构应力比, 是由土结构性影响引起的, 与由于应力历史引起的超固结比有本质上的区别。

### 3 量化结构性参数

从前述分析可知, 对于结构性土, 在压力未达到  $\sigma_k$  以前, 主要是初始结构的自我调整过程, 此时变形很小, 表现为压应力与体应变之间的线性关系; 在压力达到  $\sigma_k$  后, 土的初始结构被大量破坏, 力的微小增量会引起变形的较大增长; 当作用力继续增长, 随着变形的增长, 被破坏的土结构又会逐渐趋于新的稳定, 使次生结构逐渐形成, 并且在次生结构形成的强度增长不足以补偿外荷应力增长的速度时出现土的最终破坏。因此, 结构性力学试验过程中不同阶段所表现出的结构破损的变化可以用来描述土体结构性逐渐丧失的过程。

张超杰认为原状土的压缩曲线与重塑土的压缩曲线所夹面积代表结构强度的影响区域<sup>[12]</sup>; M D Liu<sup>[13]</sup>、王国欣<sup>[10]</sup>通过还原原状土的压缩曲线, 用作图法得到结构性土不同孔隙比下存在的结构强度, 直观地表现了结构性土逐渐破损的过程, 但并没有给出定量的确定方法, 也没有说明压缩过程中结构破损的变化情况。

在土的压缩过程中, 结构性逐渐破坏, 结构强度随之降低, 最后完全丧失, 使土的性质类似于重塑土。在压缩曲线上可以表现为原状土的压缩曲线和重塑土还原后的压缩曲线最终趋于重合。重塑土还

原后的压缩曲线和原状土的压缩曲线之间存在的一个结构强度区域,代表在受压条件下结构强度破损情况。如能定量的得到结构强度区域的相对大小,就可以对不同地区结构性土的结构强弱进行对比。图 3 为结构性土在受压过程中结构破损区域示意图,下部阴影为理想重塑样的压缩曲线与原状样压缩曲线围成的结构强度区域,面积为  $S_1$ ;上部阴影为还原后的压缩曲线与原状样围成的结构强度区域,面积为  $S_2$ 。定义结构破损系数  $S$ ,表达式为:

$$S = \frac{S_2}{S_2 + S_1} \times 100\% \quad (4)$$

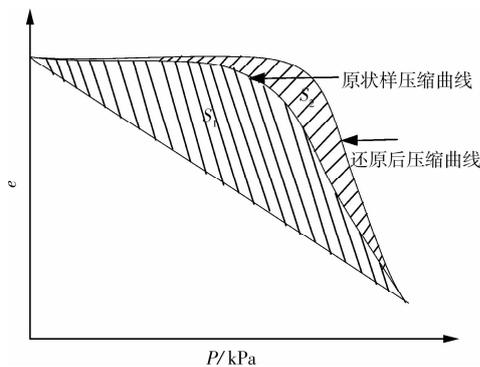


图 3 结构破损区域示意图

该参数与土本身性质和试验方法有关,表现土样在压缩过程中结构破损的情况,可用来判别不同地区结构性土的结构强弱。 $S$  为取值范围为  $0 \sim 1$ ,  $S$  越大,结构性破损程度越大,土具有结构强度越弱;  $S$  越小,结构性破损程度越小,土具有结构强度越强。当  $S = 1$  时,此时原状样压缩曲线为理想重塑线,即土样没有结构性。

阴影面积可利用 AutoCAD 软件计算得到。具体步骤为:1)利用数据点在 AutoCAD 软件中绘制原状土的压缩曲线和重塑土还原后的压缩曲线,得到相交阴影区域。2)利用“REG”命令使阴影区域成为面域。3)对该面域查看特性即可得到该阴影区域的面积。值得注意的是,如图 1 所示,在压缩试验最后一级时(1 600 kPa),原状样压缩曲线最后未与重塑样压缩曲线相交,原状样的压缩曲线上孔隙比大于理想重塑样压缩曲线上的孔隙比,这说明在该压力下,土样结构性并未完全的丧失,在求取区域面积时可按曲线发展趋势延长进而获得相交点,研究表明一般交点在  $0.42 e_0$  处附近<sup>[12]</sup>。

这样就可以简单的定量描述土的结构性强弱,可当  $N_1 < S < 1$ ,称为较弱结构性土;当  $N_2 \leq S \leq N_1$ ,称为较强结构性土;当  $0 \leq S < N_2$ ,称为强结构性土;当  $S = 1$  称为非结构土。其中  $N_1$ 、 $N_2$  为一定值,可通过大量试验统计分析得出。

利用该方法得到不同试验条件下的结构破损系数  $S$ ,汇于表 3。如漳州软土通过试验方案 E 计算得到  $S_1$  的值为 2.337 8,  $S_2$  的值为 0.502 4,所以  $S = 17.7\%$ 。通过该表发现同一种土通过不同试验方法得到的结构破损系数并不相同,说明不同的试验方法对土的结构破损程度不同。同样为方案 E,漳州软土计算得到的结构破损系数为 17.7%,黄石软土的结构破损系数为 14%,青岛软土的结构破损系数为 9.6%,说明 3 种软土中结构性最强的为青岛软土、黄石软土次之、漳州软土最弱。

龚晓南把结构屈服压力  $\sigma_k$  与先期固结压力  $P_c$  的比值大小<sup>[9]</sup>,来判断土的结构强弱,比值越大反映此土的结构性越强。利用文中提出的方法与龚晓南法得到的结果相一致,说明该方法量化判别土结构性强弱的正确性。

为了得到软土在压缩过程中不同阶段结构破损的情况,绘制以不同压力(孔隙比)与结构破损系数  $S$  的关系曲线,得到图 4 和图 5,图 4 中的关系曲线可以分为 3 个阶段,当压力小于结构屈服压力时,只有少量的结构破坏;当压力大于结构屈服压力时,结构开始大量破坏,结构破损系数变化速率突然增大;随着压力的进一步增大,结构破损程度降低,土的性质接近重塑土。从图 5 可见,当孔隙比  $e > 1.3$  时,曲线的斜率变小了,说明土在荷载作用逐渐被压密的过程也是结构大量破坏的过程,当土的压缩性非常小的时候,结构破损的速度也变得缓慢了。

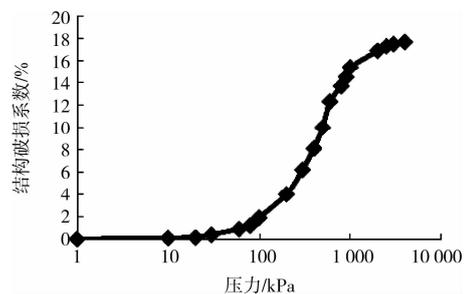


图 4 漳州软土压力与结构破损系数关系曲线

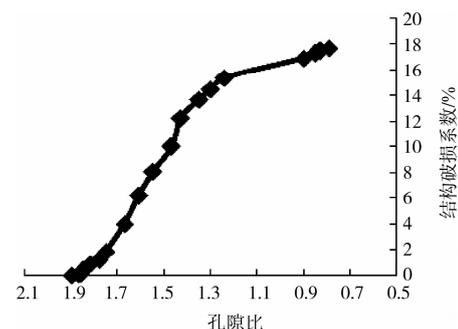


图 5 漳州软土孔隙比与结构破损系数关系曲线

此外,通过结构破损系数还可以解释扰动程度

对压缩曲线的影响。对于结构性土来说,不同的扰动程度意味着土体经历了不同程度的结构破坏。图6为不同扰动度的土的压缩曲线, $D$ 线即该文所指的还原后的压缩曲线,可认为持有完整结构强度的土样的压缩曲线, $A$ 线即理想重塑土的压缩曲线, $B$ 线与 $C$ 线为不同扰动度的土样的压缩曲线,其中 $B$ 线代表的土样扰动度大于 $C$ 线代表的土样。根据结构破损系数的概念, $B$ 线与 $C$ 线所对应的 $S_2 + S_1$ 值相等,但 $B$ 线所对应的 $S_2$ 大于 $C$ 线所对应的 $S_2$ ,所以结构破损系数 $S_B > S_C$ ,即 $B$ 线代表的土样结构损伤程度大于 $C$ 线代表的土样。而实际上 $B$ 线代表的土样扰动度大于 $C$ 线代表的土样,结构强度丧失较多,这正与根据结构破损系数概念推得结论相一致。

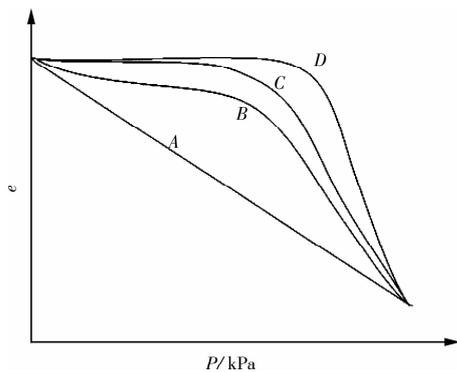


图6 不同扰动度的土的压缩曲线

## 4 结论

1) 对结构性越强的土体,结构屈服压力 $\sigma_k$ 体现越明显,这反映出结构性越强抵抗变形能力也越强。当压力低于结构屈服应力 $\sigma_k$ 前,主要是初始结构的自我调整过程,结构存在少量的破损,压缩性非常小;当压力大于结构屈服压力 $\sigma_k$ 后,土的结构开始大量破坏,此时,除了颗粒之间的滑移外,还伴随着结构的塌陷,土的压缩性大大增加;而重塑样的在压缩过程中压缩性变化不大,这是由于重塑样已完全失去了土的结构性的影响。

2) 土的结构强度随着实验条件的不同而不同,通过单向压缩实验得到的结构强度值比通过等向压缩试验得到的结构强度值大近一倍;加荷间隔与实验持续时间的越大,土表现的结构性越强;卸载再加载对土的结构性强弱影响不大。

3) 结构破损系数与土本身性质和试验方法有关,可表现土样在压缩过程中结构破损的情况,可用于判别不同地区结构性土的结构强弱。 $S$ 越大,结构性破损程度越大,土具有结构强度越弱; $S$ 越小,结

构性破损程度越小,土具有结构强度越强。该值可通过 AutoCAD 软件简单获取,便于推广。通过该方法判别试验土样中结构性最强的为青岛软土、黄石软土次之、漳州软土最弱。通过结构破损系数还可以解释扰动程度对压缩曲线的影响。

## 参考文献:

- [1] LO K Y, HINCHBERGER S D. Stability analysis accounting for macroscopic and microscopic structures in clays [C]//Proceedings of the 4th International Conference on Soft Soil Engineering, 2007: 3-34.
- [2] MUELLER LOTHAR KAY, BEV D, HU CHUNSHENG, et al. Visual assessment of soil structure: Evaluation of methodologies on sites in Canada, China and Germany. Part I: Comparing visual methods and linking them with soil physical data and grain yield of cereals [J]. Soil and Tillage Research, 2009, 103(1): 178-187.
- [3] CETIN HASAN, FENER MUSTAFA, SÖYLEMEZ MEHMET. Soil structure changes during compaction of a cohesive soil [J]. Engineering Geology, 2007, 92(1): 38-48.
- [4] BREYSSE D, NIANDOU H, ELACHACHI S, et al. A generic approach to soil-structure interaction considering the effects of soil heterogeneity [J]. Risk and Variability in Geotechnical Engineering: The Institution of Civil Engineers, 2006: 117-124.
- [5] PAPADIMITRIOU A G, BOUCKOVALAS G D. Modeling sand fabric evolution during cyclic loading [C]//Proceedings of the Fifteenth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Lisse: Balkema, 2001: 235-238.
- [6] 骆亚生, 谢定义, 邵生俊, 等. 复杂应力状态下的土结构性参数 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(24): 4248-4251.  
LUO YA-SHENG, XIE DING-YI, SHAO SHENG-JUN, et al. Structural parameter of soil under complex stress conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(24): 4248-4251.
- [7] 肖树芳, 雷华阳, 房后国, 等. 近代海积软土结构性及弹塑性模型研究 [J]. 工程地质学报, 2000, (4): 394-399.  
XIAO SHU-FANG, LEI HUA-YANG, FANG HOU-GUO, et al. Study on the structural characteristics and elastic-plastic model of recent marine soft soil [J]. Journal of Engineering Geology, 2000, (4): 394-399.
- [8] 汤连生, 廖化荣, 张庆华. 土的结构熵及结构性定量参数 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 1997-2002.

(下转第 48 页)

- 料配合比设计[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2009, 29(1):11-12.
- GENG JIU-GUANG, CHEN ZHONG-DA, LI LONG, et al. Mixing design of cement-emulsified-asphalt-cold-recycled-mixture(CEACRM)[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(1):11-12.
- [7] 吕伟民. 沥青混合料设计原理与方法[M]. 上海: 同济大学出版社, 2001.
- [8] 季节, 高建立, 罗晓辉, 等. 热再生沥青混合料的配合比设计[J]. 公路, 2004(3):73-77.
- JI JIE, GAO JIAN-LI, LUO XIAO-HUI, et al. A design method for hot recycled asphalt mixtures[J]. Highway, 2004(3):73-77.
- [9] 程一鸣, 田晋跃. 再生沥青混合料目标配合比设计方法及应用[J]. 中外公路, 2006, 26(3):263-265.
- CHENG YI-MING, TIAN JIN-YUE. Mix design and usage of reclaimed asphalt mixture[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2006, 26(3):263-265.
- [10] 光同文. 路面混凝土劈裂强度与弯拉强度的相关关系[J]. 当代建设, 2002(1):46-47.
- GUANG TONG-WEN. Relationship between splitting strength and flexural-tensile strength of pavement concrete [J]. Current Construction, 2002(1):46-47.
- [11] 姚辉. 沥青混合料冷再生技术研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2007:14-15.
- [12] BAMES P. Structure and Performance of Cement[M]. Applied Science Publishers LTD, 1983. 238-251, 262-268.
- [13] STEPHAN D, MALLMANLL R, KXLOFEL D, et al. Influence on the hydration properties[J]. Cement and Concrete Research, 1999(12), 1959-1967.
- [14] 钟梦武, 吴超凡, 于永生, 等. 掺加水泥的乳化沥青冷再生沥青混合料设计方法研究[J]. 公路, 2008(1):196-197.
- ZHONG MENG-WU, WU CHAO-FAN, YU YONG-SHENG, et al. A study on design method of cold reclaimed mixture using emulsion asphalt and cement [J]. Highway, 2008, (1):196-197.
- [15] 李龙. 沥青混合料再生利用研究[D]. 西安: 长安大学, 2003.
- [16] 刘海英, 孔玉坤. 水泥稳定土的材料对强度的影响[J]. 北方交通, 2007(2):23-24.
- LIU HAI-YING, KONG YU-KUN. Effect of materials of cement-stabilized soil on strength [J]. Northern Communications, 2007(2):23-24.

(编辑 胡英奎)

(上接第 43 页)

- TANG LIAN-SHENG, LIAO HUA-RONG, ZHANG QING-HUA. Structural entropy of soil and quantitative research for soil structure characteristics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10):1997-2002.
- [9] 龚晓南, 熊传祥, 项可祥. 黏土结构性对其力学性质的影响及其形成原因分析[J]. 水利学报, 2000, 44(10):43-47.
- GONG XIAO-NAN, XIONG CHUAN-XIAN, XIANG KE-XIANG. The formation of clay structure and its influence on mechanical characteristics of clay [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 44(10):43-47.
- [10] 王国欣, 肖树芳, 周旺高. 原状结构性土先期固结压力及结构强度的确定[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2):249-251.
- WANG GUO-XIN, XIAO SHU-FANG, ZHOU WANG-GAO. Determination of preconsolidation pressure and structural strength of undisturbed structural soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(2):249-251.
- [11] 李涛, 钱守易. 土样扰动影响的评议及其先期固结压力的确定[J]. 岩土工程学报, 1987, 9(5):21-30.
- LI TAO, QIAN SHOU-YI. Evaluation of soil sample disturbance and determination of its reconsolidation pressure [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 9(5):21-30.
- [12] 张超杰, 王立忠, 陈云敏, 等. 结构性扰动土一维固结行为的定量分析[J]. 江南大学学报:自然科学版, 2006, 5(6):715-720.
- ZHANG CHAO-JIE, WANG LI-ZHONG, CHENG YUN-MIN, et al. The quantitative analysis of the consolidation behavior of disturbed structural soil[J]. Journal of Southern Yangtze University: Natural Science Edition, 2006, 5(6):715-720.
- [13] LIU M D, CARTER J P. Modeling the destructuration of soils during virgin compression[J]. Geotechnique, 2000, 50(4):479-483.

(编辑 王秀玲)