

文章编号: 1000-7598 (2012) 增 1-0049-07

爆炸挤淤作用对海相软黏土压缩特性的影响

陈 盼¹, 李永和², 王吉利¹, 韦昌富¹, 吴二林¹, 颜荣涛¹

(1. 岩土力学与工程国家重点实验室 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071;

2. 浙江省水利河口研究院, 杭州 310020)

摘 要: 浙江漩门三期围垦项目中采用爆炸挤淤置换法进行筑堤工程, 为了对爆炸置换后海堤的固结沉降预测及稳定性评价提供可靠的试验参数, 取爆炸前后地基范围内的海相软黏土, 进行一维压缩和各向等压固结试验, 并对该地区软土的压缩变形与结构特性进行初步研究。试验结果表明, 海相软黏土存在一定的结构特性, 表现出与其重塑土不同的性质; 通过引入孔隙指数的概念, 研究该地区软黏土的结构性, 证实土体结构性的存在是其压缩特性不同于重塑样压缩曲线的内在原因, 在高压范围其压缩曲线趋近于固有压缩曲线。爆炸挤淤作用对海相软黏土产生较强的扰动效应, 也对其基本物理性质与压缩特性均产生重要影响; 扰动效应造成软黏土的结构屈服应力降低, 结构强度下降, 采用新定义的结构破坏比来定量评估爆炸挤淤作用对海相软黏土结构性的破坏程度, 可为爆炸挤淤置换法处理软基的海堤工程提供一定的理论基础。

关 键 词: 爆炸挤淤; 结构性; 软土; 压缩变形; 软基处理

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Effect of squeezing silt by blasting on compression characteristics of marine soft clays

CHEN Pan¹, LI Yong-he², WANG Ji-li¹, WEI Chang-fu¹, WU Er-lin¹, YAN Rong-tao¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences,

Wuhan 430071, China; 2. Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, China)

Abstract: The blasting-based squeezing and replacing method has been used to treat the soft clay in constructing the rockfill embankments in the reclamation projection in Xuanmen area, Zhejiang province. To obtain reliable soil parameters for the settlement prediction and stability analysis of embankments, in situ soils were sampled just before and after blasting operation in the range of foundations. Then oedometer consolidation and equipressure consolidation tests were performed. The compression and structural characteristics are preliminarily studied on the marine soft clays in the area. The results show that marine soft clays possess intrinsic structure, and behave differently from its disturbed counterpart. With introducing the concept of void index, the effect of soil structure is investigated, showing that the structure of soft clays is the intrinsic reason that the compression characteristics is very different between marine soft clay and its remolding counterpart; and the compression curves of undistributed soils and distributed soils merge into a single curve in the high pressure range. Blasting-based squeezing method can make marine soft clayey soils disturbed largely. And it influences significantly the physical and compression properties of clayey soils. Furthermore, the structural yielding stress and the structural strength are both reduced undergoing the disturbance effect. The defined structural destructive ratio can be used to quantify the degree of damage from blasting-based squeezing effect on the structure of the marine clayey soils. These results may be significant for developing the theoretical basis of blasting-based squeezing for treating the soft foundation of embankments.

Key words: squeezing silt by blasting; structure; soft soil; compression deformation; soft foundation treatment

1 引 言

随着社会经济不断发展, 土地资源变得日益紧

缺, 已成为制约我国经济可持续发展的重大瓶颈。

目前开发和利用沿海地区滩涂资源, 已成为解决土地资源紧缺问题和推动地区经济发展的重要手段之

收稿日期: 2012-02-08

基金项目: 浙江省重大科技专项资助 (No.2009C13010); 广西岩土力学与工程重点实验室开放基金资助 (No.11-KF-05)。

第一作者简介: 陈盼, 男, 1984 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事非饱和土渗流与边坡稳定性问题分析方面的研究工作。E-mail: pchen@whrsm.ac.cn.

通讯作者: 韦昌富, 男, 1966 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事非饱和土力学与多相孔隙介质多场耦合问题方面的研究工作。

E-mail: cfwei@whrsm.ac.cn.

一,我国沿海地区多分布有深厚的淤泥、淤泥质软土层,需要经过处理才能被有效利用。然而,常用的换填挖除的处理方式不仅在施工过程中难以付诸实施,而且工程造价也很高。爆炸挤淤置换法由于其技术的成熟性及适用性已成为围垦工程中广泛采用的软基处理技术^[1]。近年来,沿海围垦工程呈现出逐步向深水、低涂、超软地基发展的特点^[2],即使采用爆炸挤淤置换法,由于深厚软土层的工程特性、施工工艺的限制与节约成本的考虑,回填海堤的底部并未落在深部的、承载力较高的土层上,而是落在承载力并不很高的上伏深厚软土层中,成为所谓的“悬浮式”结构,这种结构的设计及其稳定性分析成为围垦工程的关键问题之一。

海堤地基下的软土具有高含水率、高压缩性、低渗透性、低抗剪强度、显著的结构性和流变性等特点,这些基本特性对工程会产生潜在的不利影响。从物理成因来看,在海相软黏土沉积过程中物理化学作用使土体颗粒间接触面产生胶结作用^[3]。正是这种胶结作用使土体骨架具有一定的强度,能够承受一定的压力作用,一旦土体结构遭到破坏,这种联结作用会失效,使得结构强度减弱甚至丧失。结构破坏后土体会在没有任何征兆的情况下发生变形破坏,对实际工程产生较大的危害^[4],故在工程勘察与设计时需要特别重视软土结构性的调查研究^[5]。

在结构性软土地区实施工程建设时,需要严格控制施工速率,过快的施工速率会使土体的结构性破坏而造成不可逆的变形,产生大的附加沉降^[6],而这种沉降采用常规的固结变形模型无法预测,使得工程的不稳定性因素增大。与一般黏性土不同,具有结构性的原状黏性土由于其结构强度的存在,压缩曲线的拐点所对应的压力大小并不能作为土体的先期固结压力,而是土体的结构屈服应力^[7]。不考虑软黏土本身的结构性,而仅仅采用一般黏性土的描述方法对其进行研究是不合理的。结构性土本构模型的建立是研究结构性土工程特性的重要手段,通过数学描述预测结构性土的变形与强度变化^[8-9]。然而,由于各地软黏土的沉积环境与沉积过程差异甚大,现有的本构模型在描述软土的结构性方面还存在一定的局限性,目前的结构性软土本构模型仍需进一步的完善。

本研究所用土样取自浙江台州地区滨海,与杭州等地区的沉积环境差异较大,故其物理力学性质也有所不同,即使是毗连相接的温州地区软土的研究成果也较台州地区丰富的多。爆炸及其上覆抛石

荷载的作用对软土地基产生附加应力,在附加应力作用下软土将产生挤密、排水固结效应等。迄今为止,国内外岩土工程界针对这些效应对软黏土变形、强度及其结构性的影响问题的研究仍显不够,而解决这些问题对围垦筑堤的沉降、稳定性评价是至关重要的。因此,有必要针对该地区的软土进行相关研究。通过爆炸挤淤施工前后两次原位取样,进行室内软黏土的一维压缩与等压固结试验,并将试验结果进行对比分析,以研究爆炸挤淤置换作用对该地区软黏土压缩变形特性的影响。

2 试验内容与试验方法

2.1 工程背景

浙江省玉环县漩门三期围垦工程是至今该省最大的围垦工程,总围垦面积为 45.3 km²。漩门三期围垦实体工程位于玉环县楚门半岛与玉环岛之间的漩门港湾,东濒东海,南接珠港坎门,背靠芦浦、干江两镇。海堤总长 5 314 m,分为坎门、珠港、干江海堤 3 段。由于地基下存在深厚淤泥质软土层及当地石料储存丰富,海堤地基采用了爆炸挤淤置换法处理。海堤设计置换深度为 27 m,基础底宽 28 m。本次试验重点研究最长的中段珠港海堤范围内的深厚淤泥质软土的工程特性,堤地基土层主要由 I 层淤泥夹粉土、II 层淤泥、III 层淤泥质粉质黏土、IV 层黏土夹粉细砂等组成。

2.2 原位取样

本次分别对爆炸施工前后海堤地基范围内的软土进行了钻探取样。取样孔平面布置图如图 1 所示,其中编号为 BZK 位置为进行爆炸施工前的取样孔,由于取样前海堤已经开始施工建造,该孔选择在离海堤中轴线一定距离的位置,是为了获得未受爆炸施工影响的原状土样进行室内试验。采用控制加载爆炸挤淤置换法对珠港海堤海相软土地基进行了处理,爆炸挤淤置换法施工断面设计药包埋深为泥面下 7~9 m,药包 16 个,药包间距为 3 m,单药包重量为 50 kg,其堤头爆炸设计的参数见文献[10]。海堤爆炸施工完成后,在堤上进行了钻孔取样,取样位置为 AZK1 及 AZK2 二个钻孔和 CZK 位置处一个钻孔,这些位置的地基土层均受到不同程度爆炸施工的扰动。海堤施工位置进行二次 3 个钻孔的取样,主要是为了获得足够数量的土样以满足试验设计要求。钻探机具为 DPP100 型钻机,钻孔直径 $\phi 150$ mm,取样器采用 $\phi 75$ mm、长 50 cm 的薄壁取土器,在软土层中静压连续取样。土样取出后,对土样进行现场土性鉴别与描述,并及时用

蜡密封好，放到室内潮湿处，对土样进行编号(BZK孔土样按顺序编为BZK-1、BZK-2...，AZK孔土样按顺序编为AZK1-1、AZK1-2...，AZK2-1、AZK2-2...，CZK孔土样按顺序编为CZK-1、CZK-2...)。待试样取完后，小心装箱并采取防震措施运回室内，以最大限度地降低对试样的扰动。两次4个钻孔的取样深度及相应的土样数量见图2，最大深度为59.8 m。由于爆炸挤淤置换施工后，地基上部软土层被挤开由碎石填充，爆炸施工后的钻孔只能取到部分II、III层的土样。

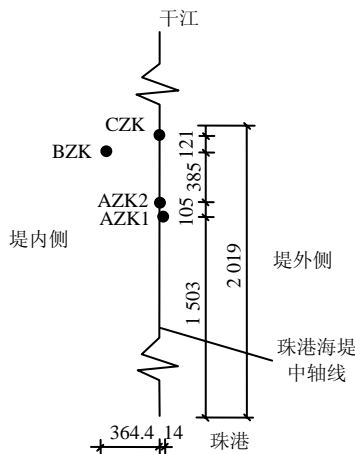


图 1 取样孔位置平面示意图(单位:m)
Fig.1 Sketch of sample positions(unit:m)

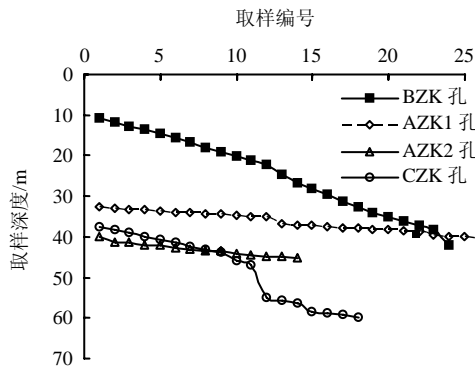


图 2 各钻孔取样深度与取样编号图
Fig.2 The depth and numbers chart of soil samples from different boreholes

2.3 试验方法

根据研究内容，设计相关的室内试验方案，进行基本物理性质试验研究，包括比重、重度、含水率、液塑限、颗粒分析、渗透性等试验项目，同时还开展了一维压缩与各向等压固结试验。一维压缩试验采用了加载、卸载再加载的加荷路径，加荷系列设计为24级，稳定时间为24 h。等压固结试验加卸载再加载荷载级数设计为22级，采用高度为8.0 cm、直径为3.91 cm的三轴试样。为了缩短等压

固结试验的时间，对应变控制式三轴试验仪进行了一定的改进，采用双面排水双体变管量测土样体变的方法，待体变管读数稳定后施加下一级压力进行固结。以上操作与实施均按照《土工试验规程》^[11]严格进行。

3 试验结果及成果分析

3.1 基本物性统计分析

对爆炸前后所取土样进行了室内基本物性试验，为便于对试验参数进行统计分析，通过现场初步判断，结合室内基本物性试验对土样进行定名，结果见表1。表2、3为对各个土样物性试验进行归纳统计的结果。

表 1 土样分层及土性定名
Table 1 The layers and designation of soil samples

土层	试样编号	土性
I	BZK1-3	低液限黏土
II	BZK3-17 AZK1-1-5 AZK2-1-2	高液限黏土
III	BZK18-23 AZK1-6-26 AZK2-3-10 CZK1-5	低液限黏土
IV	BZK-24 CZK-12-13	低液限黏土

表 2 爆破前(BZK孔)软土的基本物性参数
Table 2 Basic physical parameters of soft soil before blasting

项目	含水率/%	重度/(kN/m ³)	土粒相对密度	孔隙比	液限/%	塑限/%	塑性指数	渗透系数/(10 ⁻⁷ cm/s)
样本/个	8	6	2	6	2	2	2	1
I 最大值	58.5	17.5	2.74	1.60	21.6	40.0	18.4	23.3
I 最小值	48.8	16.4	2.74	1.36	20.4	38.1	17.7	23.3
I 平均值	54.1	17.0	2.74	1.49	21.0	39.1	18.1	23.3
样本/个	2	14	5	11	6	6	6	4
II 最大值	63.8	17.3	2.77	1.76	27.8	53.8	26.2	25.7
II 最小值	52.0	16.1	2.74	1.54	22.5	43.6	20.3	3.2
II 平均值	60.3	16.5	2.75	1.68	25.6	48.7	23.1	11.9
样本数/个	21	16	2	6	5	5	5	3
III 最大值	47.4	18.7	2.74	1.33	23.6	39.6	17.4	9.2
III 最小值	37.8	16.7	2.71	1.01	17.9	33.5	14.6	3.1
III 平均值	42.4	17.8	2.73	1.17	20.4	36.1	15.7	5.7

表 3 爆破后(AZK1、AZK2孔)软土的基本物性参数
Table 3 Basic physical parameters of soft soil after blasting

项目	含水率/%	重度/(kN/m ³)	土粒相对密度	孔隙比	液限/%	塑限/%	塑性指数	渗透系数/(10 ⁻⁷ cm/s)
样本/个	10	7	3	7	3	3	3	
II 最大值	55.7	17.1	2.75	1.57	25.4	44.7	21.6	
II 最小值	51.2	16.4	2.72	1.43	21.8	41.9	19.3	
II 平均值	53.8	16.7	2.73	1.51	23.4	43.8	20.3	
样本/个	30	16	3	20	14	14	14	2
III 最大值	50.2	19.0	2.74	1.54	24.3	40.9	19.0	31.4
III 最小值	32.8	16.8	2.72	0.92	17.4	30.7	12.8	3.8
III 平均值	44.4	18.0	2.73	1.22	20.5	37.4	16.9	17.6

由于爆炸挤淤后 I 层土已被完全挤开, 在爆炸后未能取到第一层土进行相关的试验, 试验表格中只给出了爆炸后 II、III 层的基本物性试验结果。从表 2、3 的对比可以看出, 爆炸前后物性指标基本都发生了一定的变化。爆炸后含水率、孔隙比降低明显, 证实爆炸与碎石堆载对土体有一定的压实作用。液限、塑性及塑性指数在爆破后有所升高, 可能是爆炸后碎石置换的挤压作用对土体颗粒产生了一定的破坏效应所致。爆炸后土体的饱和和渗透系数增大, 表明土体的结构有一定的变化。从表 4 可以看出, 爆炸前后颗粒粒径的分布变化并不明显, II 层的细粒含量有所降低, 而 III 层的细粒含量增加。

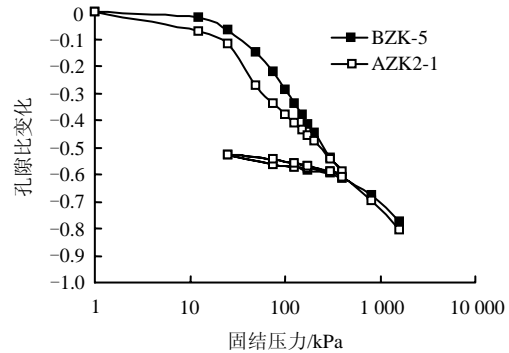
表 4 爆破前后软土的颗粒分析结果
Table 4 Particle analysis results of soft soil

项目	爆前颗粒(mm)组成/%			爆后颗粒(mm)组成/%		
	>0.075	0.075~0.005	<0.005	>0.075	0.075~0.005	<0.005
II						
样本/个	4	4	4	3	3	3
最大值	4.2	65.8	58.2	8.4	50.0	44.8
最小值	1.5	40.3	32.4	6.7	46.2	43.3
平均值	2.3	51.2	46.5	8.0	48.0	44.0
III						
样本/个	2	2	2	6	6	6
最大值	10.0	58.4	37.9	7.4	56.0	47.0
最小值	3.7	56.8	33.2	2.0	49.6	37.4
平均值	6.8	57.6	35.6	5.5	53.5	41.0

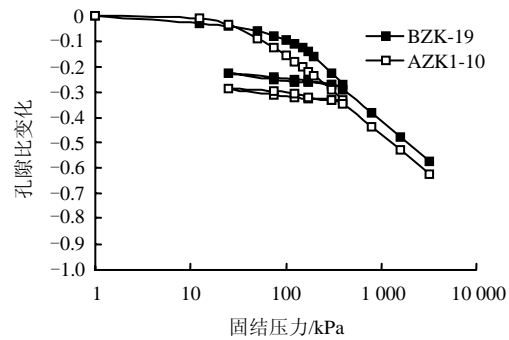
3.2 一维压缩试验结果及分析

对一维压缩试验结果进行整理, 获得了相应的固结变形曲线, 为便于对比分析, 将爆炸前后 II 层土样 (BZK-5, AZK2-1)、III 层土样 (BZK-19, AZK1-10) 的固结变形曲线绘于一张图中, 各层土样的固结压力 σ_v 与孔隙比变化 Δe 曲线如图 3 所示。从图中 BZK 和 AZK 孔 II、III 层土的压缩曲线可以看出, 浙江玉环地区的天然黏土的压缩曲线也存在明显的 3 个阶段^[12]: 第一个阶段为弹性变形阶段, 此时土体的结构性还未发生破坏; 当土体的上覆压力超过土体的结构强度时, 进入第二阶段, 土体结构逐渐破坏, 由于颗粒间的滑移与结构的塌陷, 土体的变形急剧增大; 第三阶段, 结构完全破坏, 颗粒间的滑移是土体变形的的主要原因。Vasseur 等^[13]采用微观观测与测试技术, 对固结状态下的黏土进行的试验研究, 证实了在压缩条件下土体颗粒的旋转与重排现象。从图中可以看出, 原状土体的性质与爆炸后取样的土体性质接近。基于这样的试验现象, 已有研究者提出将结构性黏土抽象为由结构体和结构面组成的复合材料来建立结构性黏土的本构

模型。II 层天然黏性土随荷载的增加, 后期的压缩量变化率降低, 出现压缩系数的“倒大”现象。从图 3 中还可以看出, 爆炸后所取的土样与完全重塑土样的固结性质也不同, 仍具有一定的结构强度, 属扰动土。



(a) II 层土样固结曲线



(b) III 层土样固结曲线

图 3 一维固结压缩曲线

Fig.3 The one-dimensional consolidation compression curves

对重塑黏性土进行归一化研究, 有利于对黏性土的工程特性进行归纳统计。Burland^[14]提出了固有压缩曲线 (ICL) 与沉积压缩曲线 (SCL) 的概念, 能很好地表达较大液限范围内黏性土的压缩特性^[15]。定义孔隙指数为

$$I_v = (e - e_{100}^*) / (e_{100}^* - e_{1000}^*) \quad (1)$$

式中: e 为孔隙比; e_{100}^* 、 e_{1000}^* 分别为重塑土在压力位 100 kPa、1 000 kPa 对应的孔隙比。如缺乏实测资料时, 建议采用如下经验公式,

$$\left. \begin{aligned} e_{100}^* &= 0.109 + 0.679e_L - 0.089e_L^2 + 0.016e_L^3 \\ e_{100}^* - e_{1000}^* &= 0.256e_L - 0.04 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $e_L = w_L G_s$ 为液限含水率状态 w_L 时的孔隙比。固有压缩曲线方程为

$$I_v = 2.45 - 1.285 \lg \sigma_v + 0.015 (\lg \sigma_v)^3 \quad (3)$$

以上经验公式的适用范围是液限与塑性指数落在塑性图中 A 线以上的区域。通过检验本试验所取

的土样的液限与塑性指数都在 A 线以上。将本次爆炸前后土样的固结试验数据转换为孔隙指数与固结压力的关系绘在图 4 的半对数坐标中，并通过回归分析得到沉积压缩曲线，同时图中给出了 ICL。

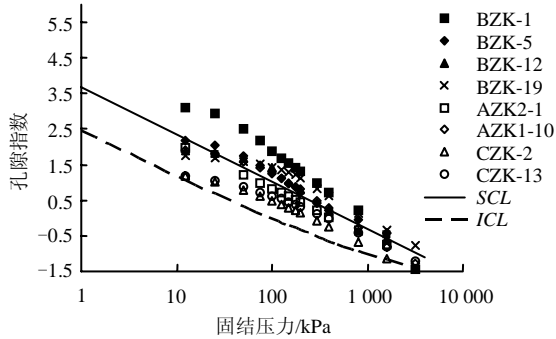


图 4 沉积压缩曲线

Fig.4 Curves of the sediment compression

从图 4 可以看出，几乎全部土样的压缩数据均位于 ICL 上方，即在相同的孔隙指数条件下，不论是原状土还是扰动土，其强度都比重塑土强度高。究其原因，在于重塑成样过程中土体的原有结构性已被破坏。在低压力范围内，ICL 与 SCL 基本平行，而随着压力的增加，两条曲线趋于重合，试验结果与已有文献中的结论相同^[14]，同时证明了试验的可靠性。从图中还可以看出，BZK-1、BZK-5 初始位于压缩曲线上方，试样表现较高的拟前期固结压力，之后随着荷载的增加，压缩曲线骤降越过 SCL 逐渐靠近 ICL。BZK-12、BZK-19 土样接近 SCL，表明结构强度稍低。而扰动样 AZK2-1、AZK1-10、CZK-2、CZK-13 基本落在两特征线之间，表明受爆炸挤淤置换作用的影响，结构强度有所降低。尽管原状样与爆炸影响的土样存在结构强度的差异，但在高压条件下，随着软土结构性的破坏，所有压缩曲线最终趋近于 ICL。

采用 Casagrande 方法确定了爆炸挤淤前所取黏性土样的先期固结压力，获得 I、II、III 层土超固结比 (OCR) 分别为 1.21、1.15、1.13，均属于弱超固结土。鉴于采用常规 Casagrande 方法确定黏性土先期固结压力存在一些问题，Butterfield^[16]提出了双对数坐标的改进方法来确定黏性土结构屈服应力。该方法简便易行，可减小确定最大曲率点产生的人为误差的影响。将固结压缩试验曲线重新绘于双对数坐标图中，见图 5，并求得相应土样的固结屈服应力。从表 1 中可以看出，同是划分为 II 层的 BZK-5 与 AZK2-1，结构屈服应力降低 56 kPa；而 III 层的 BZK-19 与爆炸后该层的土样 AZK1-10，

CZK-2 的结构屈服应力降低 130 kPa 之多表明爆破挤淤作用对土体结构性产生的破坏效应十分明显，在工程设计与评估中须引起重视。

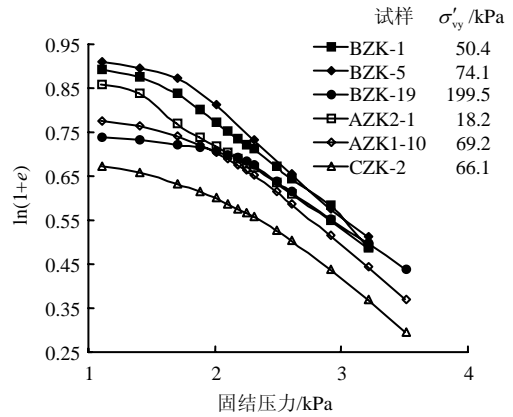


图 5 不同土层土样的结构屈服应力

Fig.5 Structural yield stresses of different samples from different layers

这里定义一个新的变量结构破坏应力比 r_{SF} ：

$$r_{SF} = \frac{\sigma'_{vy0}}{\sigma'_{vyR}} \quad (4)$$

式中： σ'_{vy0} 为原状土样的结构屈服应力； σ'_{vyR} 为受爆炸挤淤作用影响土样的结构屈服应力。由此可知，II、III 层土的结构破坏比分别为 4.07、2.88~3.02。爆炸挤淤作用对 II 层土的破坏效应与 III 层土相比更大，表明 II 层土结构强度降低更明显，与事实相符，因此可以采用结构破坏比 r_{SF} 来评价爆破挤淤作用对海相软黏土的破坏程度。

3.3 等压固结试验结果及分析

为研究三向应力状态下土体的压缩特性，进一步探讨爆炸效应对所取软土的结构强度及压缩特性的影响，对爆炸挤淤施工前后第 III 层土的 BZK-20 与 CZK-4 土样分别进行了各向等压固结试验，其取样深度见图 2，其初始孔隙比分别为 1.23、1.16。试验结果如图 6 所示。从图中的对比可以看出，爆炸挤淤作用后，III 层软土的结构强度减弱，在各向等压条件下初始的变形趋势与爆炸前同层土体的变化相似；随着等压荷载的增大，压力超过约 100 kPa 后，爆炸挤淤后影响的土样的固结变形加大，随着结构的进一步破坏，结构强度逐渐消失，出现变形加速的趋势，而 BZK-20 土样的变形仍较为平缓，表明爆炸挤淤后软土的结构性遭到一定程度的破坏，屈服应力降低，一旦荷载超过屈服应力，土体结构遭到破坏，将出现变形的急剧增加，对地基造成不利影响。因此，在海堤地基的设计中需要充分

考虑爆炸作用对软土结构及强度的不利影响。表5中给出了由试验获得的土体的变形参数,表中 λ 为等压状态下土体的压缩系数; κ 为等压状态下的回弹系数,这些参数的获得可为以后本构关系的建立提供模型参数。

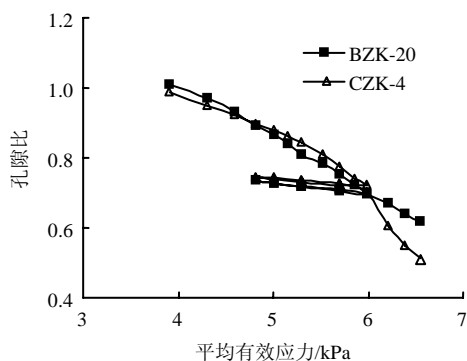


图6 第III层土样等压固结曲线

Fig.6 The equipressure consolidation curves of different samples from the layer III

表5 等压固结试验结果统计表

Table 5 Statistics table of equipressure consolidation test results

位置	土层	压缩指数	回弹指数	λ	κ	屈服应力/kPa
BZK	III	0.371 4	0.072 0	0.110 6	0.030 9	150.0
CZK		0.426 0	0.046 1	0.123 6	0.019 3	75.0

4 结 论

(1) 爆炸施工前后海相软土的基本物性指标都发生了一定的变化。爆炸产生的固结作用使含水率、孔隙比降低明显。在固有压缩曲线参考体系下的研究表明软黏土的结构性对其压缩特性产生了明显的影响。在高压条件下土体结构完全破坏,结构强度消失,所有压缩曲线将最终趋近于 ICL 。

(2) 通过对爆炸挤淤前后海相软黏土的一维固结试验结果的分析表明;受爆炸挤淤作用的影响,海相软黏土的结构屈服应力明显降低,可以采用新定义的结构破坏比来定量评估爆炸挤淤作用对海相软黏土的破坏程度,便于在爆炸挤淤处理海堤地基设计及工后沉降的评估过程中提供量化参考。

(3) 三向应力状态条件下等压固结试验结果的初步分析表明,爆炸挤淤作用后软黏土的屈服应力明显降低,上覆荷载一旦超过土体的屈服应力,软黏土的变形将急剧增大,海堤沉降随之增加。

此次试验获得的土性参数将为结构性软黏土本构关系的建立提供有效的数据,而该地区结构性土本构关系的研究是下一步急需解决的问题。

致谢: 在现场取样过程中得到浙江省玉环县漩门三期工程指挥部的支持、浙江省水利河口研究院张超杰博士和吴雄伟高级工程师的指导、浙江省工程物探勘察院王刚工程师的热心帮助与合作,特此表示感谢。感谢中国科学院武汉岩土力学研究所陈碧君工程师、武昌理工学院伊盼盼博士、中国科学院武汉岩土力学研究所博士生马田田在室内试验上的帮助。

参 考 文 献

- [1] 赵简英,王健,吴京平. 控制加载爆炸挤淤置换法在工程中的应用[J]. 岩土力学, 2006, 27(2): 332—335.
ZHAO Jian-ying, WANG Jian, WU Jing-ping. An application of blast method to squeeze mud and replacement with controlled loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(2): 332—335.
- [2] 张莎. 浙江沿海地区深水软基围垦工程施工方法与实践[J]. 浙江水利水电专科学校学报, 2007, 19(1): 27—30.
ZHANG Sha. Construction method and practice of inning engineering on soft soil under deep water in littoral of Zhejiang[J]. **Journal of Zhejiang Water Construction and Hydrology College**, 2007, 19(1): 27—30.
- [3] 李作勤. 有结构强度的欠压缩土的力学特性[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(1): 34—45.
LI Zuo-qin. Mechanical characteristics of under-consolidated clay soils with structural strength[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1982, 4(1): 34—45.
- [4] 孔令伟,张先伟,郭爱国,等. 湛江强结构性黏土的三轴排水蠕变特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 365—372.
KONG Ling-wei, ZHANG Xian-wei, GUO Ai-guo, et al. Creep behavior of Zhanjiang strong structured clay by drained triaxial test[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(2): 365—372.
- [5] 沈珠江. 土体结构性的数学模型—21世纪土力学的核心问题[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(1): 95—97.
SHEN Zhu-jiang. Mathematical model of structural soil—The key problem for soil mechanics in 21 century[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1996, 18(1): 95—97.

- [6] 张诚厚, 袁文明, 戴济群. 软黏土的结构性及其对路基沉降的影响[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(5): 25—32.
ZHANG Cheng-hou, YUAN Wen-ming, DAI Ji-qun. The structure of soft clay and its effect on settlement of foundation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1995, 17(5): 25—32.
- [7] 沈珠江. 软土工程特性和软土地基设计[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 100—111.
SHEN Zhu-jiang. Engineering properties of soft soils and design of soft ground[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1998, 20(1): 100—111.
- [8] LIU M D, CARTER J P. A structured cam clay model[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2002, 39(6): 1313—1332.
- [9] JIRAYUT S, SUKSUN H, LIU M D, A critical state model for overconsolidated structured clays[J]. **Computers and Geotechnics**, 2011, 38: 648—658.
- [10] 江礼茂, 许羿. 控制加载爆炸挤淤置换法处理软基技术及其工程实践[J]. 土工基础, 2011, 25(5): 27—30, 75.
JIANG Li-mao, XU Yu, Soft soil improvement by the controlled loading blasting replacement method and its engineering applications[J]. **Soil Engineering and Foundation**, 2011, 25(5): 27—30, 75.
- [11] 南京水利科学研究院. SL237—1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [12] 陈铁林, 周成, 沈珠江. 结构性黏土压缩和剪切特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 31—35.
CHEN Tie-lin, ZHOU Cheng, SHEN Zhu-jiang. Compression and shear test of structured clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(1): 31—35.
- [13] VASSEUR G, MAIGRE ID, GRUNBERGER D, et al. Evolution of structural and physical parameters of clays during experimental compaction[J]. **Marine and Petroleum Geology**, 1995, 12(8): 941—954.
- [14] BURLAND J B. On the compressibility and shear strength of natural clays[J]. **Geotechnique**, 1990, 40(3): 329—378.
- [15] FAVRE J L, HATTAB M. Analysis of the 'Biarez-Favre' and 'Burland' models for the compressibility of remoulded clays[J]. **Comptes Rendus Geoscience**, 2008, 340(1): 20—27.
- [16] BUTTERFIELD R. A natural compression law for soils[J]. **Geotechnique**, 1979, 29(4): 469—480.

上接第 48 页

860.

- [7] 冯大阔, 张嘎, 张建民, 等. 常刚度条件下粗粒土与结构接触面三维力学特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(10): 1571—1577.
FENG Da-kuo, ZHANG Ga, ZHANG Jian-min, et al. Experimental study on 3D cyclic behavior of soil-structure interface under constant normal stiffness condition[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(10): 1571—1577.
- [8] 冯大阔, 侯文峻, 张建民. 法向常刚度切向应力控制接触面动力特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(6): 846—852.
FENG Da-kuo, HOU Wen-jun, ZHANG Jian-min. Experimental study on cyclic behavior of gravel-structure interface with stress-control mode under constant normal stiffness[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 33(6): 846—852.
- [9] 周爱兆, 卢廷浩. 基于广义位势理论的接触面弹塑性本构模型[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(10): 1532—1536.
ZHOU Ai-zhao, LU Ting-hao. Elasto-plastic constitutive model of interface under generalized potential theory[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(10): 1532—1536.
- [10] 王伟, 张芳, 孙斌祥. 土-结构接触面剪切试验与应力-位移模型[J]. 煤炭学报, 2011, 36(9): 1469—1473.
WANG Wei, ZHANG Fang, SUN Bin-xiang. Tested and modeled shear stress-displacement behavior of soil-structure interface[J]. **Journal of China Coal Society**, 2011, 36(9): 1469—1473.
- [11] 周爱兆. 基于广义位势理论的土与结构接触面模型研究及应用[D]. 南京: 河海大学, 2009.