

文章编号: 1001-1986(2008)04-0046-04

结构性吹填土压缩变形微观机理试验

成玉祥¹, 杜东菊², 李忠良¹

(1. 长安大学, 陕西 西安 710054; 2. 天津城市建设学院, 天津 300384)

摘要: 吹填土是一种人造土, 具有大孔隙比、压缩性强、低强度等特点, 其微观结构对土的力学性质有很大的影响, 是一种强结构性土。通过分析不同轴向应力下压缩土样的微观 SEM 照片, 探讨了孔隙微结构参数与轴向应力之间的关系, 得出在吹填土压缩变形过程中存在屈服应力。在所受应力大于和小于屈服应力时, 吹填土的压缩性存在差异, 其微观表现为微结构参数在压缩过程中产生了突变, 其根源是在压缩变形过程中, 吹填土的微观结构产生了破坏。简要分析了结构性吹填土压缩变形微观机理。结果表明, 吹填土的压缩过程分为孔隙中气体的压缩与水份的运移、团粒的相对滑移和结构破坏与新结构形成 3 个阶段。

关键词: 吹填土; 结构性; 压缩变形; 微观结构; 机理

中图分类号: TU411 **文献标识码:** A

Mechanism experimental investigation of compression transform of structured hydraulic fill

CHENG Yu-xiang¹, DU Dong-ju², LI Zhong-liang¹

(1. Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300384, China)

Abstract: The hydraulic fill is a kind of artificial soil, having such characteristics as large void proportion, strong compressibility, low strength. The indoor test result shows that the microstructure of hydraulic fill has a great influence on its mechanics property, so it is a kind of strong structured soil. Through microstructure test, the SEM pictures of compression test soil sample under different axial stress are analyzed, and the relation between the void microstructure parameter and axial stress is studied, it is believed that the destroy stress exists during compress distortion. The compress character is different when the stress is larger or less than the destroy stress. The micro-cosmic proof is that the microstructure parameter changes suddenly, because the micro-structure is destroyed during compress distortion. At last the compression transforms mechanism of structured hydraulic fill is analyzed in brief, the result shows that the compressive process of hydraulic fill is thus divided into three stages: (a) the compression of gas in void and migration of the moisture content; (b) mutual slipping of the pellet, and (c) failure of soil structure and the formation of new structure.

Key words: hydraulic fill; structural constitution; compression transform; microstructure; mechanism

国内一些港口将疏浚出来的淤泥用来填海造陆, 已成为沿海城市土地开发的重要手段。因此, 与吹填土有关的岩土工程问题越来越突出。到目前为止, 对吹填土的工程性质还缺乏系统的研究^[1]。

土体的结构性是指土体颗粒和孔隙的性状、排列形式(或组构)及颗粒之间的相互作用。应该说土都具有一定的结构性, 对其土工特性有非常大的影响^[2]。由于吹填土是一种人造土, 具有大孔隙比、压缩性强、低强度等特点, 是一种强结构性土, 所以其结构性控

制着土体的工程地质性质。本文选取天津滨海新区吹填场地的吹填土样, 通过试验, 研究了结构性吹填土在压缩过程中微观结构的变化规律; 探索了吹填土微观结构对其宏观力学性质的影响和结构性吹填土压缩变形微观机理。

1 结构性吹填土压缩性试验

在室内研究土的压缩性一般通过有侧限压缩试验来测定土的压缩性指标。这种方法所用的仪器筒

收稿日期: 2007-11-01

基金项目: 天津市社会发展重点资助项目(04311381)

作者简介: 成玉祥(1978—), 男, 甘肃灵台人, 讲师, 博士研究生, 主要从事地质工程与岩土力学方面的教学与科研工作。

单, 操作方便, 主要设备为杠杆式高压固结仪。固结压力采用 12.5 kPa、25 kPa、37.5 kPa、50 kPa、75 kPa、100 kPa、125 kPa、137.5 kPa、150 kPa、162.5 kPa、175 kPa、187.5 kPa、200 kPa 加载等级; 稳定时间标准为 24 h; 土样面积为 30 cm², 高度为 2 cm。

试验所用土样取自天津滨海新区临港工业区吹填场地地下 3 m, 通过钻孔取得吹填土的原状样, 在试验室分别对原状样和扰动样进行单向压缩试验, 试验结果见图 1。计算得出的原状土压缩性指标 a_{1-2} 介于 0.774~0.947 MPa⁻¹ 之间, 压缩模量 E_{s1-2} 介于 2.157~2.192 MPa 之间。表明这种吹填土为高压缩性土。扰动样的压缩性指标为 $a_{1-2}=0.858$ MPa⁻¹, $E_{s1-2}=2.43$ MPa。另外, 从图 1 可以看出, 在吹填土压缩过程中具有明显的结构屈服应力, 应力约在 112.5 kPa 处, 压缩曲线发生明显的转折, 具有典型结构性粘土压缩曲线的特征^[3], 这证实了天津滨海新区吹填土本身是一种结构性土, 压缩曲线的转折是应力超过结构强度所引起的。也就是说, 在应力达到约 112.5 kPa 时, 吹填土的结构开始发生突变或破坏, 从而导致了吹填土工程性质的改变。这种结构的变化可来自于土颗粒的重新排列、土颗粒(团粒)的破裂或破坏等。

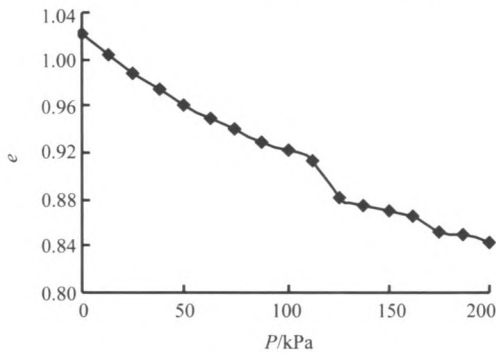


图 1 吹填土压缩 $e-P$ 曲线

Fig. 1 The $e-P$ curve of hydraulic fill compression test

2 结构性吹填土压缩过程中微观参数变化规律

土是一种多孔的连续介质, 土中各级孔隙的成因、大小、形状对土体的变形有着直接的影响。一般情况下, 变形后土样中的拉张孔隙是伴随着剪切应变发展而变化的; 大孔隙较多的土体处于极不稳定状态, 是土变形破坏的根源之一。在其它条件相同的情况下, 孔隙比较高的土易引起压缩变形, 从而导致上部建筑物的破坏。因此, 对孔隙的研究具有十分重要的实际意义^[4]。

2.1 结构性吹填土压缩微观试验

为了研究吹填土压缩过程中的微结构变化规律, 设计了一组压缩试验。压缩试验稳定后取样, 对土样的垂直截面进行电镜扫描。图 2 为不同应力下压缩试

验土样微观电镜扫描照片。

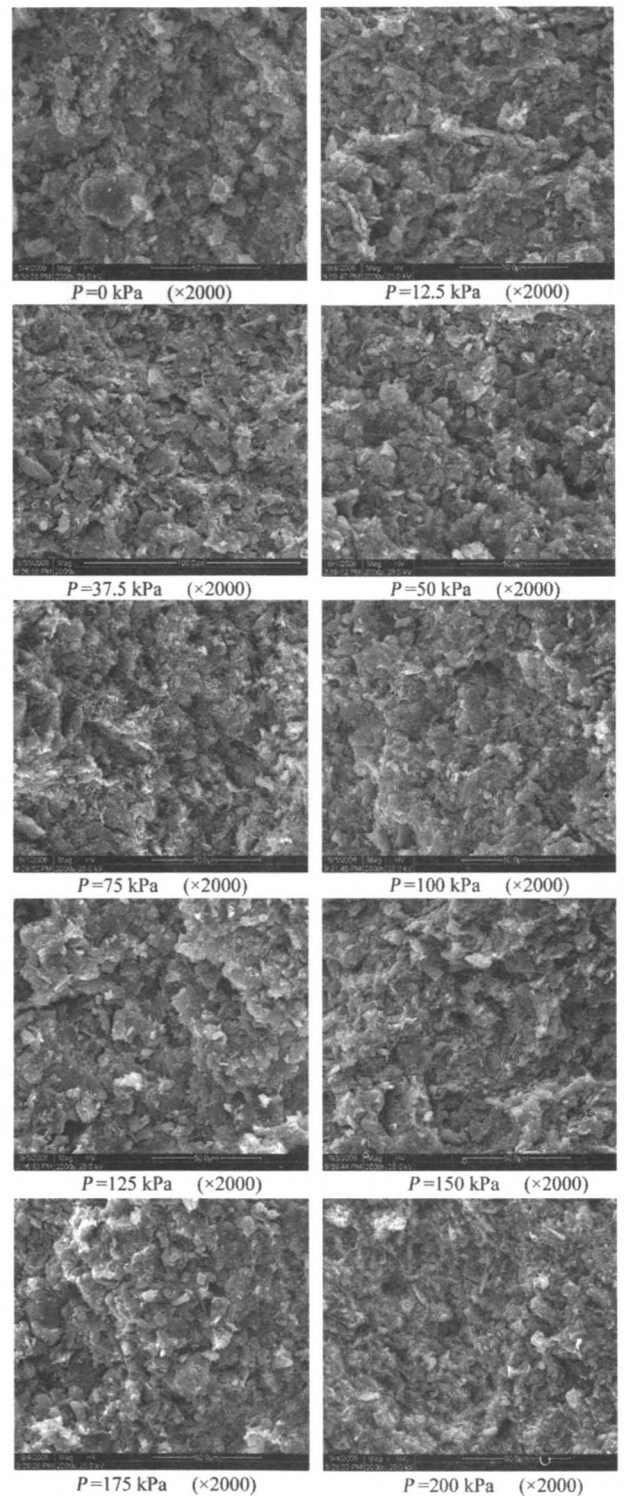


图 2 不同应力下压缩土样 SEM 照片

Fig. 2 The SEM picture of soil sample after the compression test under the different stress

从图中可以看出, 整体结构上, 所有照片都呈片堆状结构。但随着应力的增大, 当应力小于 100 kPa 时, 颗粒排列较为松散, 以线面接触方式为主, 孔隙定向性不是很明显; 当应力在 100~125 kPa 时, 颗粒排列更加松散, 转变为线面接触与面面接触方式, 整

体结构呈片架结构或迭片支架结构；当应力大于 125 kPa 时，颗粒排列逐渐变得紧密，颗粒变细，孔隙变小，孔隙定向性变差，以线面接触方式为主，这主要是由于应力在 100~125 kPa 之间时，结构发生了破坏；当应力超过 125 kPa 时，新的结构已经开始形成。

2.2 吹填土微观结构参数选择

吹填土本身具有高含水量、大孔隙比的特点。吹填土中的孔隙控制着吹填土的渗透固结和压缩性。所以，选择孔隙作为土微观结构量化研究的对象，对吹填土原状土、不同应力等级下的单向压缩试验土样进行电镜扫描，选用统一放大倍数(2 000 倍)照片，对土中孔隙进行量化统计，对孔隙参数随应力的变化情况进行了对比分析^[5-7]。

吹填土的压缩性与其孔隙的大小和形状密切相关，本文选择了以下 5 个孔隙结构参数。

a. 等效直径(D) 即与孔隙面积相等的等效圆的直径。

$$D = 2\sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

式中 A 为孔隙的实际面积。

b. 孔隙数量 从另外一个侧面反映了孔隙的分布以及与土颗粒之间的关系。

c. 孔隙周长(P) 等于所有孔隙边界长度总和。数值与孔隙多少和孔隙的形状有关。

d. 孔隙形态比(S) 孔隙的长轴与短轴之比，其值越大说明孔隙越趋于长条形。

$$S = \frac{L}{B}$$

式中 L 、 B 分别为孔隙的长轴和短轴的长度。

e. 孔隙圆度(R) 这是一个描述孔隙形状的参数，通过下式来计算：

$$R = \frac{P^2}{4 \times \pi \times A \times 1.064}$$

式中 1.064 为一校正系数。圆度的值越大，孔隙形状越不规则，圆度值越趋近于 1，孔隙形状越趋近于圆形。

参数的获取主要通过 Leica Qwin 中的 Field(域)和 Feature(特征块)测量工具对图像中的孔隙部分进行统计计算，得到上述关于土中孔隙的微观结构参数。这些结构参数从不同方面反映了吹填土在变形过程中孔隙的形态特征、排列特征以及其它相应的变化特征。

2.3 结构性吹填土压缩微观参数变化规律

2.3.1 等效直径

等效直径是反映土孔隙大小特征的重要参数。图 3 为不同轴向应力下孔隙等效直径与轴向应力关系曲线。从曲线图中可以看出孔隙等效直径随轴向应力的变化情况。总体上孔隙等效直径呈现随轴向

应力的增大而有所增大的规律，这说明吹填土的压缩过程是孔隙相互连通的过程。值得注意的是，当轴向应力 $P > 100$ kPa 时，孔隙等效直径发生明显的减小；当轴向应力 $P > 125$ kPa 时，孔隙等效直径又随轴向应力的增大而增大。原因在于，当 $P > 100$ kPa 时，已经超过了吹填土的抗压结构强度，吹填土结构开始发生破坏，部分或团粒发生破碎，从而造成孔隙等效直径的减小。而当 $P > 125$ kPa 时，新的结构已经形成，孔隙中的微粒发生运移，导致孔隙之间发生连通，等效直径有增大的趋势。这是吹填土强结构性的反映。

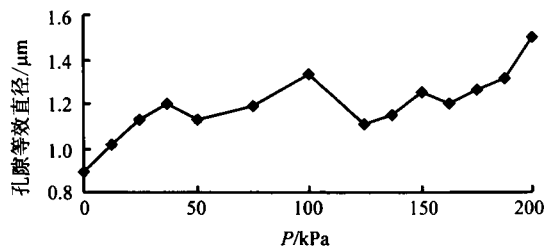


图 3 孔隙等效直径与轴向应力关系曲线

Fig. 3 The relation curve of the void equivalent diameter to axial stress

2.3.2 孔隙数量

在一定的视域范围内，孔隙数量不仅反映了土中水与气体的含量，还反映了土颗粒与水、气体之间的相互作用与分布情况。图 4 为不同轴向应力下孔隙数量与轴向应力关系曲线。从图中可以看出，当轴向应力 $P < 100$ kPa 时，孔隙数量随轴向应力的增大而减小，当轴向应力 $P > 100$ kPa 时，孔隙数量随轴向应力的增大而逐渐增加。原因在于，当轴向应力 $P < 100$ kPa 时，吹填土压缩过程是气体压缩和水份在孔隙中重新分布的过程，孔隙中的细小微粒发生位移，并逐渐附着于较大的团粒上。当轴向应力 $100 \text{ kPa} < P < 125 \text{ kPa}$ 时，颗粒或团粒之间发生相对滑移，土体的整体结构从保持完整、颗粒的滑移导致部分孔隙被分割逐渐转变为团粒发生位移、破碎并重新分布的过程。在这个过程中，部分孔隙被分割，所以孔隙数量增多。当轴向应力 $P > 125$ kPa 时，吹填土新的结构已经开始形成，进入下一个结构强度形成阶段，孔隙中的细小微粒发生位移，并逐渐附着于较大的团粒上，所以，孔隙数量缓慢减小。

2.3.3 孔隙周长

孔隙周长反映了孔隙与颗粒的接触面积，从侧面反映了孔隙的大小、形状以及规则程度。一般情况下，孔隙面积越大，数量越多，形状越不规则，则孔隙周长就越长。反之，孔隙面积越小，数量越少，形状越趋近于圆形，则孔隙周长就越短。图 5 为不同轴向应力下孔隙周长与荷载关系曲线。从图中可以看出，孔

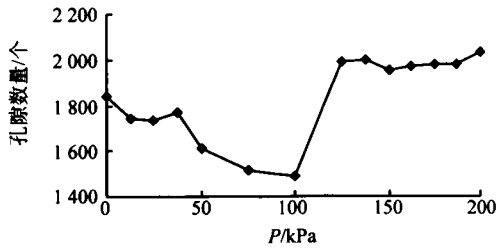


图 4 孔隙数量与轴向应力关系曲线

Fig. 4 The relation curve of the void count to axial stress

隙周长随轴向应力的变化规律与孔隙数量的变化规律十分相似。轴向应力在 100~125 kPa 时, 孔隙周长发生了明显的改变, 由孔隙周长随轴向应力的增大而减小变为孔隙周长随轴向应力的增大而增大。这是孔隙数量增多的反映, 也是孔隙形状更趋于不规则形状的反映, 更是吹填土强结构性的反映。

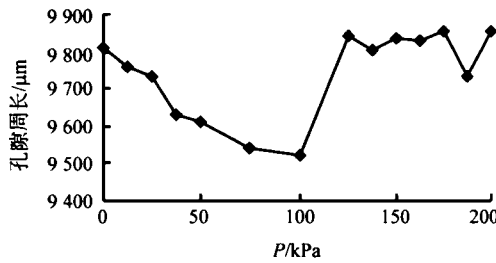


图 5 孔隙周长与轴向应力关系曲线

Fig. 5 The relation curve of the void perimeter to axial stress

2.3.4 形态比

在微结构研究中, 形态比主要用来表征孔隙的形态。形态比越大, 孔隙越趋近于长条形; 形态比趋近于 1, 孔隙越趋近于正方形或圆形。图 6 为不同轴向应力下孔隙形态比与荷载关系曲线。从图中不难发现, 当 $100 \leq P \leq 125$ kPa 时, 形态比随应力增大而减小; 而当 $P > 125$ kPa 时, 形态比随应力增大而增大。原因在于当垂向应力大于 100 kPa 时, 接近吹填土的抗压结构强度, 随应力增大, 部分颗粒发生滑移, 孔隙被分割, 从而导致孔隙的长度减小, 进而形态比减小; 当轴向应力大于 125 kPa 时, 应力已经超过了吹填土抗压结构强度, 新的结构开始形成, 在轴向应力的作用下, 孔隙的形状也就越来越不规则。

2.3.5 圆度

圆度是表征孔隙形态的另外一个参数, 其值越远离 1, 孔隙越不规则; 其值趋近于 1, 孔隙越趋近于圆形; 当其值为 1 时, 孔隙为标准的圆形。图 7 为不同轴向应力下孔隙圆度与轴向应力关系曲线。从图中可以看出, 随着轴向应力的增大孔隙圆度值都有增大的趋势, 说明随轴向应力的增大, 孔隙越来越不规则。另外, 当 $P=50$ kPa 时, 这种增大的趋势

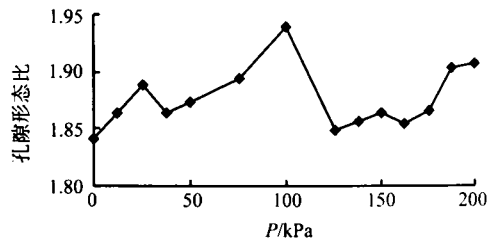


图 6 孔隙形态比与轴向应力关系曲线

Fig. 6 The relation curve of the void aspect ratio to axial stress

发生改变; 而当 $P=125$ kPa 时, 又恢复这种增大的趋势。这种变化是由吹填土的结构所控制的。当应力超过 50 kPa 时, 细小微粒向团粒的集结过程逐渐结束, 孔隙周长增加速度减慢, 同时数量又有所减少, 单个孔隙面积增大, 所以使得圆度下降; 当应力达到吹填土的抗压结构强度时, 结构发生破坏, 颗粒孔隙发生变化, 部分团粒破碎, 孔隙被分割, 从而使圆度值有所减小。

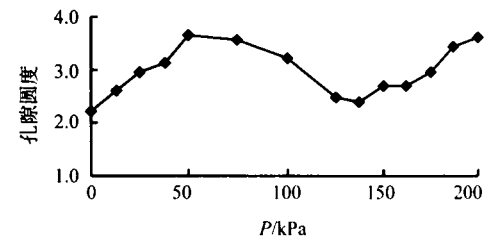


图 7 孔隙圆度与轴向应力关系曲线

Fig. 7 The relation curve of the void roundness to axial stress

3 结构性吹填土压缩微观机理分析

从上述实验结果可以看出: 当轴向应力小于 50 kPa, 吹填土的压缩为孔隙中气体的压缩、水份的运移、微粒向团粒的迁移过程。在这个过程中, 水份逐渐占据了几乎所有孔隙, 饱和度也就趋近于饱和。由于水份的运移使孔隙发生连通, 而使孔隙数量减少, 单个孔隙体积增大。当应力为 50~100 kPa 时, 孔隙被压缩, 但由于渗透系数小, 水份渗出的速度极其缓慢; 当应力为 100~125 kPa 时, 垂向应力接近和超过了吹填土的抗压结构强度, 结构破坏造成团粒破碎, 部分受压缩的气体和水份发生膨胀, 使孔隙总体积稍有增大。团粒破碎造成孔隙数量增加, 单个孔隙体积减小, 同时, 孔隙形状随应力增大而更加不规则; 当应力为 125~200 kPa 时, 垂向应力超过了吹填土的抗压结构强度, 这一阶段是吹填土结构破坏和新结构形成过程, 孔隙重新分布, 随应力增加, 孔隙体积减小。由此总结得出吹填土的压缩过程分为 3 个阶段: 孔隙中气体的压缩、

(下转第 53 页)

表 4 不同开采期次降雨量 P_0 与地表径流量 Rs_0 回归方程
Table 4 Regression equation of time rainfall P_0 and pre-creant surface runoff Rs_0 in different coal mining periods

不同开采期	回归方程	相关系数
1956—1979 年	$Rs_0=0.119P_0-1.836$	$r=0.884$
1980—2003 年	$Rs_0=0.028P_0-0.093$	$r=0.760$

给地下水量最大时的地下水位埋深,若超过这一埋深,降雨入渗补给量就减少^[7],导致降雨入渗过程中蒸发等无效损耗量增加,有效入渗补给量减少,必然导致地下水资源量的减少。

将马圈泉下游阳武河沿长会、芦庄水文站多年基流量及流域平均降水量系列资料,仍按两个不同开采水平期进行对比分析,如表 5,最后一列为累计基流量与累计降雨量的比值,反映降水对地下水的补给强度。

表 5 不同开采期累计降雨量及累计基流量对比
Table 5 Contrast of total rainfall and total basic flux in two different coal mining periods

不同开采期	累计降雨量 $\sum P_i/\text{mm}$	累计基流量 $\sum Q_i/\text{亿 m}^3$	比值系数 $K = \frac{\sum Q_i}{\sum P_i}$
1956—1979 年	12 595.2	15.34	12.2×10^{-4}
1980—2003 年	10 276.8	9.98	9.7×10^{-4}

大规模开采期比值系数为 9.7×10^{-4} ,未大规模开采期比值系数为 12.2×10^{-4} ,前者比后者减少 1/5,说明采煤排水引起地下水位下降,改变了煤矿区的水文地质条件,使三水转化关系发生了变化,导致降水对地下水的补给量减少,必然造成地下水资源量的减少。

3 结论

a. 随着煤炭资源的大量开采,采煤排水对水资源造成了严重的影响,未经处理的矿坑水使河水、

浅层地下水、深层地下水受到污染。以阳武河上游煤矿区为例,矿坑水对河水的污染最为严重,各主要指标的含量污染后是污染前的 1.4~335 倍,其中 NO_2^- 的含量增幅最大(335 倍),其次是 As(4.2 倍);矿坑水对浅层、深层地下水的污染表现为有毒、有机物均有检出。

b. 采煤排水引起水资源量减少表现为两个方面:其一是指区域水资源总量减少;其二是指水资源可利用量减少。从两个开采期水资源量的对比中可以看出,仅由于采煤引起的多年平均地表水资源量减少了 32.2%,地下水天然补给量减少了 14.9%,总水资源量减少了 20.3%。

c. 采煤排水引起水资源减少的根本原因在于采煤排水改变了“三水”转化关系,即采煤排水→地下水位下降→地下水位埋深增大→降雨对地下水的有效补给量减少。

参考文献

- [1] 山西省地县联合调查组. 山西省原平县轩岗地区人畜缺水调查报告[R]. 1990: 2-10.
- [2] 韩行瑞,鲁荣安,李庆松,等. 岩溶水系统—山西岩溶大泉研究[M]. 北京:地质出版社,1993: 286-293.
- [3] 忻州地区水资源管理委员会办公室. 忻州地区采煤对水资源影响调查报告[R]. 1991: 29-49.
- [4] 苗佩芳,郝永和. 山西水资源现状与战略研究[M]. 太原:山西经济出版社,1993: 240-249.
- [5] 河海大学. 阳武河流域水资源计算评价[R]. 1990.
- [6] 忻州地区水资源管理委员会办公室,山西省水文总站. 忻州地区地下水资源评价[R]. 1985.
- [7] 曹万金. 水资源计算评价管理[M]. 南京:河海大学出版社,1990.

(上接第 49 页)

水分的运移阶段;团粒的相对滑移阶段;结构破坏与新结构形成阶段。

4 结论

a. 通过室内试验研究表明,天津滨海新区吹填土是一种强结构性土;

b. 微观试验结果分析表明,吹填土压缩土样在应力超过屈服应力时,孔隙微观结构参数都发生了明显的变化,说明吹填土在压缩过程中出现过结构的破坏。

c. 从吹填土压缩试验微观结构参数定量分析结果可以总结出吹填土的压缩过程分为 3 个阶段:孔隙中气体的压缩、水份的运移阶段;团粒的相对滑移阶段;结构破坏与新结构形成阶段。

参考文献

- [1] 刘莹,肖树芳,王清. 吹填土沉积固化后结构强度增长的机理分析[J]. 同济大学学报, 2003, 31(11): 1295-1298.
- [2] 刘恩龙,沈珠江,范文. 结构性粘土研究进展[J]. 岩土力学, 2005, 26(增刊): 2-8.
- [3] 陈铁林,周成,沈珠江. 结构性粘土压缩和剪切特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 31-35.
- [4] 王清. 海积软土和吹填土固化机理及地基处理机制研究[D]. 吉林大学博士后研究报告, 2002.
- [5] 齐吉琳,谢定义,石玉成. 土结构性的研究方法及其现状[J]. 西北地震学报, 2001, 23(1): 99-103.
- [6] 胡瑞林,李向全. 粘性土微观结构定量模型及其工程地质特征研究[M]. 北京:地质出版社, 1995.
- [7] 齐吉琳,谢定义. 孔隙分布曲线及其在土的结构性分析中的应用[J]. 西安公路交通大学学报, 2000, 20(2): 6-26.