高含水率碱渣的强度特性试验研究

严 驰[1]，宋旭坤[1]，朱 平[1]，孙红月[1]，李亚坡[2]，张俊烽[3]

（1.天津大学建筑工程学院，天津 300072；2.建设部综合勘察研究设计院，北京 100007；3.天津市市政工程设计研究院，天津 300201）

摘 要：目前碱渣大量的用于填筑工程，碱渣的强度特性是分析碱渣地基沉降变形的关键。以不同条件的碱渣三轴试验为基础，研究了碱渣的强度变形特性，并且分析了碱渣强度产生的机理。结果表明：碱渣的强度随着含水率、干密度及龄期的变化而变化，碱渣抗剪强度的最大值不在最优含水率处，这与一般土不同。碱渣强度最大时，黏聚力起主要作用。

关键词：碱渣；含水率；干密度；龄期；三轴试验；强度特性

中图分类号：TU411 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－4548(2007)11－1683－06

作者简介：严 驰(1959－)，女，硕士，从事土力学及岩土工程的教学与研究。E-mail: cytj@tju.edu.cn。

Experimental study on strength characteristics of soda residue with high water content

YAN Chi[1], SONG Xu-kun[1], ZHU Ping[1], SUN Hong-yue[1], LI Ya-po[2], ZHANG Jun-feng[3]

(1. College of Civil Engineering of Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. China Institute of Geotechnical Investigation and Surveying, Beijing 100007, China; 3. Tianjin Municipal Engineering Design & Research Institute, Tianjin 300201, China)

Abstract: At present, the soda residue hasbeen widely used in landfill, and the strength characteristics are crucial to the analysis of the settlement and deformation of the soda foundation. The strength-deformation characteristic of the soda residue and the mechanism of the strength were studied and analyzed on the basis of triaxial test data of residue under different conditions. The conclusion was that the variation of shearing resistance agreed with the change of moisture content, density and age, and the maximum shearing resistance was not correlated with the optimal moisture content. It was different from the common soil. The cohesion would play a key role when the strength of soda residue was the maximum.

Key words: soda residue; moisture content; dry density; age time; triaxial test; strength characteristic

0 前 言

纯碱作为重要的基础化工原料，广泛应用于冶金、化工、建材、造纸、医药、食品等行业。目前，我国氨碱法年生产纯碱约 300 多万 t。每年产生废液 3000 多万 m^3，碱渣近 300 万 t[1]。碱渣的排放，一方面占用大量土地，另一方面对区域环境造成很大危害。天津碱厂是我国最早的碱厂，建厂 90 年来。制碱过程中已生产废渣 1500 万 t 以上。碱渣采取地表堆积的处理方式，大量的碱渣形成一片“白海”，造成周围海域的污染。随着环保意识的增强，碱渣的处理成为日益紧迫的问题。将碱渣作为二次资源用于工业生产，变废为宝，具有明显的社会效益和经济效益，前景广阔。有很多人研究碱渣土的性质[2-3]，但对纯碱渣的研究还很少。本文在大量的室内及现场试验的基础上研究了碱渣的强度特性，并且分析了产生这样强度特性的原因，此期为工程应用提供依据。

1 碱渣的工程性质概况

碱渣的化学组成和矿物成分及结构构造与天然土几乎完全不同：化学成分主要为无毒的无机盐和无机化合物，其中含量最大的为 $CaCO_3$，为 65.1%，在碱渣中以文石和方解石两种形式存在；其次是 MgO，还有 $CaCl_2$，$MgC1_2$，NaC1，$CaSO_4$ 等易溶盐，pH 值为 9.2，呈强碱性。

碱渣中粒径为 0.074～0.01 mm 的颗粒含量占 80% 左右，即以粉粒为主，碱渣比表面积很大，具有胶体性质，在水中沉降速度慢，沉降物含水率高，而且难脱水。天然堆积碱渣的含水率高达 260%，孔隙比大于 2.97（表 1）[4]。易失水，且失水后易粉化，强度丧失。总的说来，碱渣具有高孔隙比、高含水率、较高的粉粒含量及较高的液塑限特性。

收稿日期：2006－10－10

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1 碱渣物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of the soda residue

指标	天然含水率/%	饱和含水率/%	最优含水率/%	天然重度/(kN·m^{-3})	天然干重度/(kN·m^{-3})	最大干重度/(kN·m^{-3})	塑限/%	天然孔隙比	液限/%
量值	>260	140	49.9	12.0~13.0	3.35~6.00	7.73	92.5	>2.97	142.9

3 碱渣的三轴剪切试验

3.1 含水率对碱渣抗剪强度的影响

（1）纯碱渣的剪切特性

对于非饱和的碱渣，如果采用双应力状态强度理论来描述强度及其变化，必须测定其基质吸力。基质吸力并不是一个定值，并且与含水率有密切的关系，相对而言含水率对强度的影响可能比其他因素的影响更大。本文将基质吸力对强度的贡献表述为黏聚力对强度的贡献。

按照击实试验的方法（每个试样分三层，每层 25 击），将不同含水率的碱渣击实试样在静三轴仪上做不排水试验（UU 试验），为了结果的可靠性，同一含水率的试样进行了平行试验，每组做三个试样，围压分别为 100、200 和 400 kPa，加围压σ_3后施加轴向应力（$\sigma_1-\sigma_3$），应变速率为 1%/min 直至破坏。破坏时的轴向应力（$\sigma_1-\sigma_3$）记为（$\sigma_1-\sigma_3$）$_f$。

由图 1 可以看出，击实碱渣的含水率不同应力应变曲线有较大的差别：随着含水率的增加，曲线的峰值越来越明显，峰值应变越来越小；含水率为 49.9%时，破坏应变达到了 15%，试样破坏后，（$\sigma_1-\sigma_3$）的降幅比较小，不到 5%。破坏后的试样表明：随着试样含水率的增加，破坏时试样表面的的裂纹越来越不明显[5]。含水率较高达到 164.1%时，破坏后的试样呈鼓状，表面没有明显的破坏面，仅有少量竖向的细小裂缝。应力－应变曲线达到峰值后仍有较长的水平段。试样的破坏属于柔性破坏。而当试样含水率较低时，如 w=49.9%，试样表面的破坏面很明显，同时试样中会有较大而长的竖向裂缝，呈现出脆性破坏的特征，此种现象随着围压σ_3的增大而越来越明显。

从图 2 可看出，三轴试验得到的纯碱渣抗剪强度指标φ_u随着含水率 w 的增加呈下降趋势：含水率在 24.3%（饱和度 S_r=24%）至 104.7%（饱和度 S_r=85.7%）下降较快（从 27.90° 下降到 10.35°）；含水率 w 从 100%降至 255%（饱和度 S_r=100%）时，φ_u下降较慢（从 10.35° 下降到 3.28°）；前者是后者的 2.5 倍。抗剪强度指标 c_u 随着含水率 w 的增加先上升后下降：含水率 w=90%（饱和度 S_r=82%）时是 c_u 的最大值点（c_u=76.85 kPa），这个值是最优含水率时（c_u=46.95 kPa）的 1.6 倍，对应的抗剪强度指标φ_u=11.8° 是最优含水率时φ_u=23.21° 的 0.5 倍。由 c_u，φ_u 计算得到的临界荷载 $p_{1/4}$ 显示：在最优含水率 w_{op}=49.9%时，碱渣的抗剪强度不为最大值，而在 w=90%左右达到强度的最大值。图 7 所示的碱渣无侧限抗压强度试验结果也证明了这点，这与一般土的性质完全不同[5]。

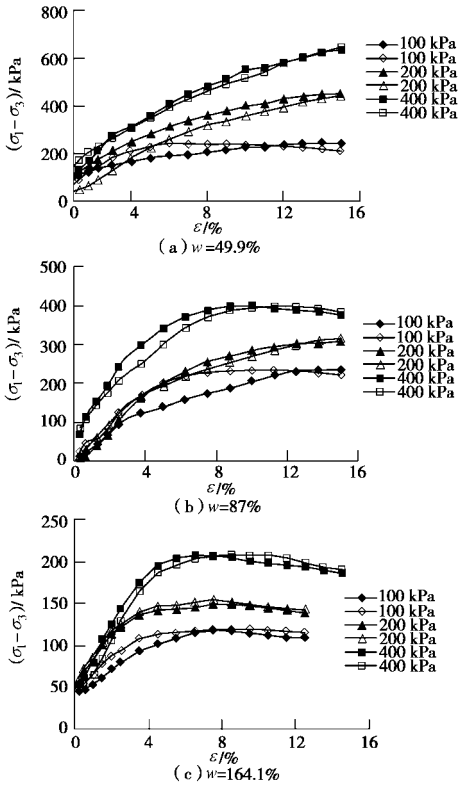


图 1 不同含水率碱渣应力应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of residue with different water contents

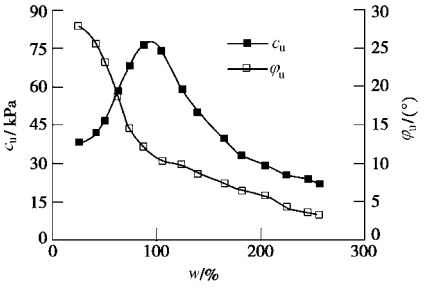


图 2 含水率 w 与抗剪强度指标φ_u和 c_u 的关系曲线

Fig. 2 Water content-shearing strength curves

（2）临界荷载 $p_{1/4}$ 的特性

根据不同含水率时碱渣的重度和抗剪强度指标计

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

算出临界荷载 $p_{1/4}$ 随含水率的变化曲线，如图 3。可以看出碱渣的临界荷载 $p_{1/4}$ 都随含水率的增加先升高，后降低。纯碱渣的含水率在 87%左右时达到最大临界荷载 $p_{1/4}$，这也证明了碱渣在最优含水率时不为抗剪强度的最大值。

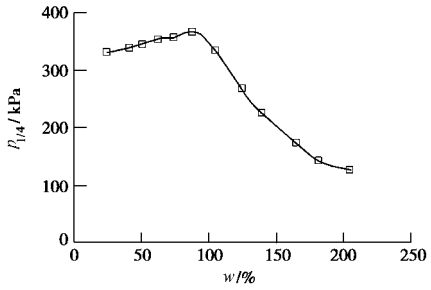


图 3 临界荷载 $p_{1/4}$ 与含水率 w 的关系曲线

Fig. 3 Critical load-water content curve

3.2　干重度对抗压强度的影响

取含水率为 49.9%，87.0%和 139.1%的碱渣，分别制备同一含水率不同干重度的碱渣试样，做三轴不排水剪切试验，测定碱渣抗剪强度指标φ_u和 c_u，试验结果如图 4 所示。

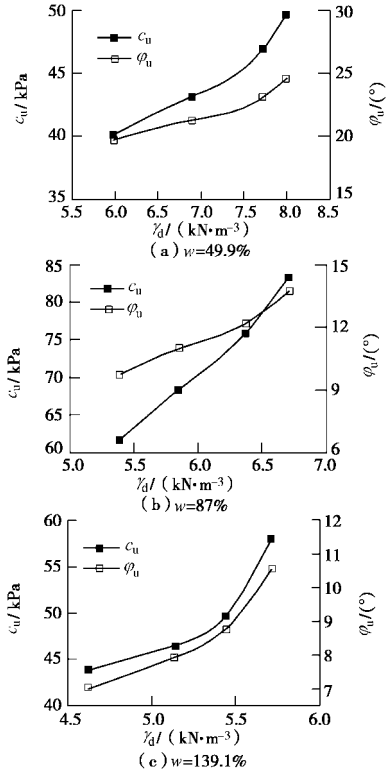


图 4 干重度与抗剪强度关系曲线

Fig. 4 Dry density-shearing strength curves

从图 4 可以看出：击实碱渣在含水率相同的情况下，随着干重度的增大（即密实度的增大），抗剪强度指标φ和 c 都有不同程度的增加；对比三个不同含水率的曲线图，当γ_d 达到某一定值时，抗剪强度指标的增加率会变大，图 4（c）最明显；在含水率为 87%时，测得的 c 值最大，与前面的试验相符合。

3.3　时间对抗剪强度的影响

制备含水率为 49.9%，87.0%和 139.1%的碱渣试样每个含水率五组试样，含水率 49.9%和 87.0%的试样放在相对湿度保湿罐中，含水率为 139.1%的试样放在从现场取的碱渣渗液中，分别养护 3，7 和 28 d。

测其不同龄期的抗剪强度指标φ_u和 c_u，结果如图 5。表 2 为不同龄期试样强度变化情况，可以看出，随着时间的增长，碱渣的抗剪强度指标都有一定程度的增加，但黏聚力 c_u 值增幅较大；从图中可以看出，当龄期小于 7 d 的时候，φ_u和 c_u 的增加速率较快；当龄期大于 7 d 后，黏聚力和内摩擦角随时间变化的趋势逐渐变缓；用碱渣渗液养护的碱渣试样φ_u和 c_u 都有较大的增长，表明碱渣的结构强度随时间增大。

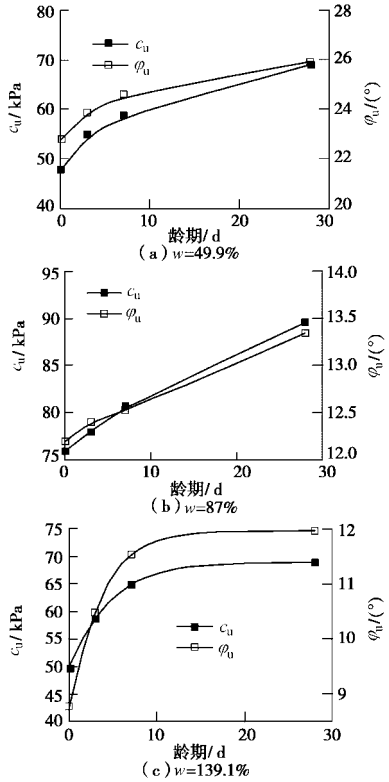


图 5 龄期试验曲线

Fig. 5 Curves of age tests

3.4　原状碱渣的三轴剪切试验

影响抗剪强度指标 c 和φ的因素很多，其中最重要的是排水条件和应力历史。现场取得的原状碱渣在做三轴不排水剪切试验。一组加围压为 350，450，550 kPa，另一组碱渣试样加围压为 100，200，400 kPa。应力应变曲线如图 6。由图可以看出，原状碱渣三轴试验应变应力曲线的峰值较为明显；破坏应变较小（不

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 2 不同龄期试样强度变化结果

Table 2 The variation of strength in age tests

含水率/%	摩擦角φ_u/(°)			黏聚力 c_u/kPa		
	0 d	28 d	增长率/%	0 d	28 d	增长率/%
49.9	22.9	25.9	13	47.2	68.0	44
87.0	12.4	13.5	9	76.1	89.7	18
139.1	8.7	11.8	36	50.0	69.5	39

大于 2%，），破坏后轴向应力随着轴向应变的增加而逐渐减小，呈现出应变软化现象；围压σ_3越大应变软化现象越突出。从试样破坏过程来看：在施加轴向应力过程中，一旦出现第一条小裂纹，轴向应力就急剧下降，试样立即形成一个斜向的贯通面，在试样的破坏面上有一层薄薄的水膜。

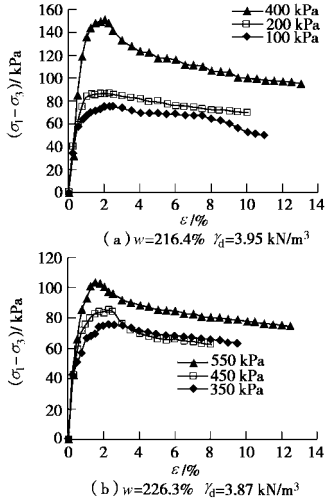


图 6 应力应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves

3.5 无侧限抗压试验

测定碱渣的无侧限抗压强度在无侧限抗压仪上进行。试验结果如图 7（图中曲线为平均值）。从图中可以看出，含水率 w=90%时是曲线的峰值点（c=71.5 kPa），是用无侧限抗压试验所测得的黏聚力 c 的最大值，这个值是最优含水率 w=49.9%时的 1.5 倍。这与图 2 中的曲线 c 相一致，再次证明了碱渣在最优含水率时不为抗剪强度的最大值。

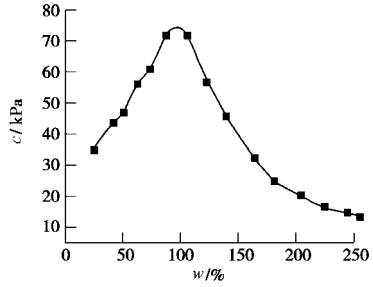


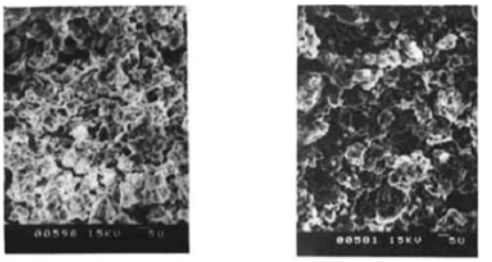
图 7 无侧限抗压强度

Fig. 7 The unconfined compression strength

4 强度机理分析

4.1 含水率对碱渣强度的影响机理

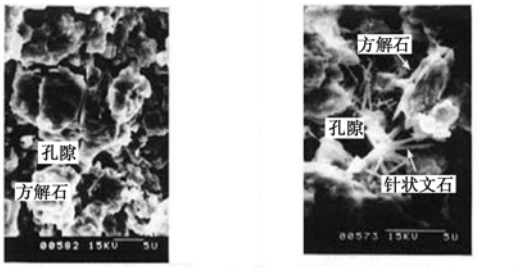
击实后的碱渣破坏原来碱渣的结构，形成了新的结构。在黏土中（碱渣应归于黏土的范畴），含水率会影响颗粒和颗粒群在击实后的重新排列。图 8 和图 9 是碱渣的电镜扫描图（龄期 0 d），两幅图中的（a）代表最优含水率（w=49.9%）的碱渣，（b）代表强度最大（w=90%）时的碱渣。碱渣的电镜的对比来可直观地看出，在相同击实方法和击实功下，最优含水率的击实碱渣的孔隙比最小，密实度最大，随着含水率的增加击实碱渣的孔隙比相应地增加。



（a）碱渣（w=50%）× 1.0 K　（b）碱渣（w=90%）× 1.0 K

图 8 击实碱渣的电镜扫描照片

Fig. 8 Electron microscopic image of compacted soda residue



（a）碱渣中呈现板状的方解石（×3.0 K）　（b）针状的文石晶体（×6.0 K）

图 9 击实碱渣的电镜扫描照片

Fig. 9 Electron microscopic image of compacted soda residue

扩散层的厚度 H 可用下式表示：

$$H=\frac{1}{\varepsilon v}\left(\frac{DkT}{8\pi n_0}\right)^{\frac{1}{2}} \quad , \tag{1}$$

式中，n_0 为距土粒表面较远处水溶液的离子正常浓度，D 为介电常数，k 为 Boitzmoan 常数，T 为温度，ε为单位电子电荷，v 为离子价，H 为扩散层的厚度。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

碱渣最优含水率所对应的强度不为碱渣的最大强度，主要因为碱渣的结构随含水率的增加发生了变化，从图 9 中可以看出，最优含水率时，碱渣的孔隙比较小，碱渣颗粒成分以板状方解石为主（a），含水率在 90%时，碱渣以方解石和针状的文石的交叉结构为主（b）。这种交叉结构，增大了碱渣的连接强度。当含水率达到 90%左右，碱渣中孔隙大部分已被水充满，孔隙液中离子的浓度也增到了最大值。此时在碱渣－水－电解质系统中，颗粒之间的离子静电力发挥到了最佳程度，表现出极高的净吸力。所以碱渣最优含水率对应的不是最大强度。含水率继续增加，孔隙比更大，连接越来越少；n_0 变小，扩散层的厚度变大；含水率增大也溶解了原来固体碱渣中的 $CaCl_2$，作为土骨架的物质减少，碱渣的密实度有一定程度的下降，这会导致碱渣内摩擦阻力的减小[6]。所以强度最大值后，碱渣的强度随含水率增加而降低。

4.2　干重度对碱渣强度的影响机理

碱渣颗粒表面有针状和纤维状的文石向外从聚而生，如图 9 所示，还有其它铝、硅、镁的晶体或非晶体交错生长，这是碱渣颗粒的主要胶结物。碱渣的方解石呈现板状，方解石的边缘有溶蚀现象。干重度增大，碱渣的孔隙就会相应的减小，颗粒的间距变小，粒间接触就会增加，粒间摩擦也就会增加。针状的文石咬合作用就会增强，滑动摩擦就会增大，要发生相对移动就更难，所以碱渣的强度就增大。

4.3　时间对碱渣强度的影响机理

扩散过程和化学反应是依赖于时间的，因此，碱渣在重塑或击实后，由于碱渣自身随时间进行调整（包括在新环境下的孔隙压力重分布），颗粒排列形式和粒间力可发生变化，调整到更加稳定的状态，强度变大。碱渣的主要成分是碳酸钙，以文石和方解石两种晶系存在（图 9）。在常温常压下方解石是稳定相，而文石是不稳定相，文石要向方解石转变。文石转化为方解石后体积有一定程度的增大，这可减小碱渣的孔隙比，增加密实度。文石是碱渣的主要矿物成分。击实的碱渣经过一定的时间后，在碱渣颗粒的表面有针状和纤维状的文石生成，这在颗粒之间起到了连接作用，有助于碱渣强度的提高。如图 10 所示。

在击实碱渣的初始结构形成后，在孔隙水的作用下，各种物质结晶或沉淀到颗粒的表面和粒间接触处，可以随时间发展成胶结结构，也可形成部分可辨的颗粒或部分的颗粒群。这对碱渣的强度有提高的作用。

碱渣击实后，在饱和容器中，相当与给碱渣施加了一定的预压力，碱渣就会随时间的发展而固结，强度就会增加。

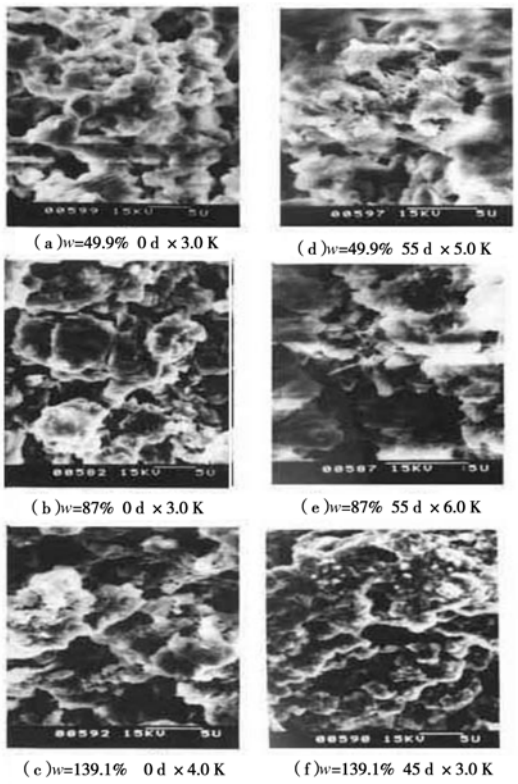


图 10 碱渣结构随龄期变化的扫描电镜照片

Fig. 10 Electron microscopic image of structural variation of soda residue with age

5　结　　论

（1）三轴试验得到的纯碱渣抗剪强度指标 φ_u 随着含水率 w 的增加呈下降趋势，含水率在 24.3%～104.7%之间下降较快，是含水率在 100%～255%之间下降速度的 2.5 倍。抗剪强度指标 c_u 随着含水率 w 的增加先上升后下降，含水率 w=90%时是 c_u 的最大值点（c_u=76.85 kPa），这个值是最优含水率时 c_u（c_u=46.95 kPa）的 1.6 倍。在最优含水率 w_{op}=49.9%不为抗剪强度的最大值，而在含水率 w=90%左右为强度的最大值。这与一般工程土有着根本的不同。

（2）试验证明，一般黏性土在最优含水率时能达到最大干重度 γ_{dmax}，其饱和度一般为 80%左右，此时的力学性能比较好，强度比较高。虽然碱渣在最优含水率时不为强度的最大值，但最大强度时对应的饱和度却为 80%左右，这一点又与一般黏性土相似。

（3）击实碱渣随干重度的增加抗剪强度指标增大。

（4）随着时间的增长，碱渣的抗剪强度指标都有一定程度的增加，但黏聚力值增幅较大。

（5）原状碱渣三轴试验应变应力曲线的峰值较为

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

明显，破坏应变较小（不大于 2%，），破坏后轴向应力下降较快。

（6）无侧限抗压强度试验再次证明了碱渣在最优含水率时不为抗剪强度的最大值。

（7）碱渣的强度受碱渣结构的影响，针状文石结构使碱渣在 w=90%时强度最大。

参考文献：

[1] 刘心中, 姚 德, 董凤枝, 任传成. 氨碱（白泥）综合利用[J]. 化工矿物与加工, 2001, **3**: 2－3. (LIU Xin-zhong, YAO De, DONG Feng-zhi, REN Chuan-cheng. Comprehensive utilization of the soda residue (white clay)[J]. Industrial Minerals and Processing, 2001, **3**: 2－3. (in Chinese))

[2] 闫澍旺, 孟祥忠, 刘 润. 碱渣土的工程性能研究[J]. 岩土工程界, 2002(5): 25－28. (YAN Shu-wang, MENG Xiang-zhong, LIU Run. Study on engineering performance of the soda residue[J]. Geotechnical Engineering World, 2002(5): 25－28. (in Chinese))

[3] 张明义, 韩凤芹, 孙德庆, 周益众. 碱渣土的击实试验[J]. 青岛建筑工程学院学报, 2003(4): 5－7. (ZHANG Ming-yi, HAN Feng-qin, SUN De-qing, ZHOU Yi-zhong. Compacted test of the soda residue[J]. Journal of Qingdao Institute of Architecture and Engineering, 2003(4): 5－7. (in Chinese))

[4] 李 琳, 江志安. 碱渣变形性质的试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2005(5): 77－79. (LI Lin, JIANG Zhi-an. Experimental study on the deformation characteristics of soda residue[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2005(5): 77－79. (in Chinese))

[5] 王文胜. 碱渣的工程特性试验研究及强度形成机理[D]. 天津: 天津大学, 2003: 15－29. (WANG Wen-sheng. Trial study of engineering properties and analysis of mechanism of formative strength of the soda residue[D]. Tianjin: Tianjin University, 2003: 15－29. (in Chinese))

[6] 李 琳. 碱渣的变形性质及其微观机理的研究[D]. 天津: 天津大学, 2004: 30－44. (LI Lin. Engineering properties and microcosmic mechanism of the soda residue[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004: 30－44. (in Chinese))

请订阅《岩土工程学报》

《岩土工程学报》创办于 1979 年，是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办，国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表我国理论和实践水平的论文、报告、实录等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国有自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿，倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿，并优先刊用这些稿件。主要栏目有论文、短文、工程实录、焦点论坛、学术讨论和动态简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续 4 版确认为核心期刊，并在建筑类核心期刊中排列首位；本刊被收录为国家科技部“中国科技论文统计源期刊”（中国科技核心期刊），并被评为“百种中国杰出学术期刊”；本刊被“中国科技论文与引文数据库”、“中国期刊全文数据库”和“中文科技期刊数据库”等多个国内重要的数据库收录，并可在《中国学术期刊（光盘版）》、《中国期刊网》、万方网和重庆维普网全文检索；本刊被美国工程索引 Ei Compendex 等国际检索系统收录。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊，大 16 开，双栏排版，160 页，每月中旬出版，每期定价 15 元，全年 180 元。

本刊国际标准刊号 ISSN1000－4548，国内统一刊号 CN32－1124/TU，国内发行代号 28－62，国外发行代号 BM520。

欢迎广大读者在全国各地邮局订购，也可在编辑部订购（不另收邮费）。编辑部订购地址：（210024）南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部；联系电话：（025）85829534，85829553；传真：（025）85829555；E-mail:ge@nhri.cn。

（本刊编辑部）

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net