

酸碱污染土强度特性的室内试验研究

朱春鹏¹, 刘汉龙^{2,3}, 沈扬^{2,3}

(1. 常州大学岩土工程研究所, 江苏 常州 213164; 2. 河海大学岩土力学与工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 随着环境污染不断加剧, 城市土地被污染亦屡见不鲜, 这使得污染土研究成为环境岩土工程领域中的一个崭新课题。酸碱污染使地基土改性, 因此, 研究酸碱污染土的污染机制、勘察评价和处理措施, 对稳定建筑工程质量, 保护环境有重要意义。通过人工方法制备了 4 种不同浓度的酸碱污染土试样, 通过直剪试验和三轴试验研究了不同浓度酸碱污染土强度特性, 并对影响酸碱污染土直剪强度各种因素进行了分析, 包括土样稠度状态、孔隙比和微观结构的影响。在此基础上, 研究了酸污染土总应力强度指标与其浓度的关系, 得到了计算公式, 便于工程应用。

关键词: 污染土; 抗剪强度; 液性指数; 微观结构; 总应力强度

中图分类号: TU441 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)07-1146-07

作者简介: 朱春鹏(1979-), 男, 江苏扬州人, 博士, 主要从事环境岩土工程科研和教学工作。E-mail: zcpeng@163.com。

Laboratory tests on shear strength properties of soil polluted by acid and alkali

ZHU Chun-peng¹, LIU Han-long^{2,3}, SHEN Yang^{2,3}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: With the aggravation of environmental pollution, the urban soils are severely polluted, which makes the research on polluted soils a new topic in the environmental geotechnology and much attention is attracted from the academic and engineering fields. The properties of the foundation soils are changed by acid and alkali pollution. Hence, environmental protection is of great significance for studying the pollution mechanism, survey evaluation and treatment of polluted soils. The polluted soils with 4 different concentrations of acid and alkali are artificially prepared. The strength characteristics of the polluted soils are studied by means of direct shear tests and triaxial tests, and the influences of consistency phase of soils, pore-solid ratio and microstructure on the direct shear strength of the acid polluted soils are analyzed. Based on the relationship between the total stress strength index of acid polluted soils and its concentration, the relevant formula is obtained, and it is practical in engineering.

Key words: polluted soil; shear strength; liquidity index; microstructure; total stress strength

0 引言

随着装备制造业的迅速发展, 自然环境遭到一定程度甚至相当严重的破坏, 这其中工业企业对地基土污染问题就是较为严重的环境岩土工程问题^[1]。与此同时, 城市化水平不断提高, 使得以前在城市中建设的一些对环境有污染的企业重新搬迁, 部分搬迁企业的地基土已遭到污染。污染土的研究涉及到岩土工程、环境工程、土壤科学、化学与化工工程、生态学、卫生与防护以及测试技术等多学科领域, 是介于这些学科边缘的交叉学科^[2]。1985 年 11 月, 在荷兰 Utrecht 召开的第一届国际污染土会议对污染土作了第一次世

界性的学术交流。如美国的 Loveland, Lehigh 大学, 英国的 Thamesmead Arsenal, 德国的 Georgswerder, 荷兰的 Lekkerkerk 等地都有许多研究、治理污染土的经验^[3-6]。国外的研究多集中在污染物在土中运移、污染土的污染机理和污染土的治理方法, 偏向于环境工程方面。在中国, 20 世纪 80 年代同济大学学者在国家自然科学基金的资助下开展了污染物离子在土层迁移规律的研究^[7]。但中国对污染土的研究工作相对滞后, 有关污染土的研究论文较少, 而且大多数是有关

环境保护和土壤学方面的, 而纯岩土工程意义上的成果更少, 而且多为工程实例的报道。

现有有关污染土的工程事例报道和造成建构筑物破坏的事故多集中在酸碱造成的污染, 所以研究酸碱污染土的工程性质, 探讨酸碱污染土的污染机理和勘察评价, 因地制宜采取整治措施, 对稳定建设工程质量, 保护环境具有重要意义^[8]。土的强度特性受其成因、应力历史以及周围环境影响, 因而十分复杂, 是土工程性质研究的重要内容^[9]。污染土作为一种特殊土, 其强度特性与原天然土有直接关系, 但也与污染物及其浓度有着密切关系, 使得污染土的强度特性与一般土有着明显的不同。

本文通过人工制备的酸碱污染土, 研究不同浓度酸碱污染的直剪强度特性, 并对影响直剪强度特性的各种因素进行分析研究。同时, 研究酸碱污染土三轴固结不排水的抗剪强度指标及其性质和变化规律与其浓度的关系。

1 土样的人工制备

1.1 土样的选取

试验用的土样取自于宁波市绕城工路的施工工地, 原状土样的类型是饱和淤泥质黏土, 含少量有机质, 取土深度约为 2 m。

1.2 酸碱溶剂的选择及配置

碱溶剂选择在化工工业、造纸工业等工业生产中最用的最多的 NaOH 进行配置; 而酸溶剂常用的有浓 HCl 和浓 H₂SO₄ 这两种酸, 前人研究酸污染土时, 选用这两种酸进行研究的都有。考虑到试验操作, 酸溶液的配制选用浓 HCl。溶液浓度是结合目前工程实例以及前人所做试验的经验来选取的, HCl 浓度分别为 1%, 4%, 8%, 12%; NaOH 浓度为 4%, 8%, 12%, 16%。

1.3 实验方法

(1) 直剪试验

实验方案是首先把土置于不同浓度的酸碱溶液中浸泡, 使土与不同浓度的酸碱溶液反应, 然后把土样放入直剪仪中, 测定污染土的强度指标。实验在常温常压下进行的^[10]。具体实验步骤: 天然原状样用取土器取出, 用 30 cm×30 cm×2 cm 规格的环刀切成试样后, 环刀两端加滤纸用透水石封盖, 环刀周围涂一薄层硅脂, 以防止酸液腐蚀, 然后放置于配置好溶液的大烧杯中浸泡 (见图 1), 浸泡 7 d 后, 具体见图 1 所示, 把土样放入直剪仪中, 进行固结快剪试验。

(2) 三轴试验

实验方案是首先把土置于不同浓度的酸碱溶液

中浸泡, 使土与不同浓度的酸碱溶液反应, 然后把土样放入三轴仪中, 测定污染土的强度指标。实验在常温常压下进行的。具体实验步骤: 天然原状样用取土器取出, 放入切土盘中, 把试样切成 $\Phi 3.91 \text{ cm} \times 8 \text{ cm}$ 的土柱, 装入饱和器中。由于酸碱对饱和器具有腐蚀性, 不能把装有土样的饱和器直接放入溶液中浸泡, 所以要制作一个类似饱和器这样的工具来装土样。根据承膜筒的样子, 设计了一个装土样的工具。筒身是用抗酸碱腐蚀的 PVC 材料制成的。先把橡皮膜翻套在筒上, 然后将饱和器中切好的土样装进筒中, 两端贴上滤纸, 用透水石封盖, 然后用橡皮筋或棉线绑紧 (见图 2), 将制好的土样分别浸泡于配置的酸碱溶液中, 浸泡 30 d 后, 把试样装入三轴仪中, 进行固结不排水剪实验。



图 1 土样浸泡在溶液中

Fig. 1 Soil sample immersing in liquor

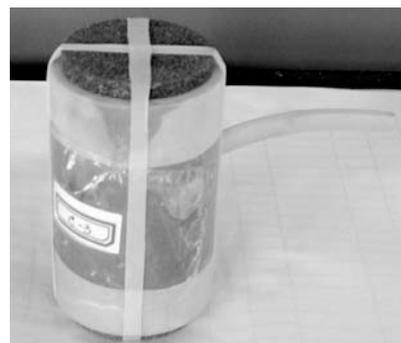


图 2 制备好的土样

Fig. 2 Prepared soil sample

2 酸碱污染土直剪试验研究

2.1 直剪强度特性

前人对污染土开展的直剪试验通常都是采用快剪法, 得到的结论都是土体腐蚀后其抗剪强度变差, 黏聚力 c 和内摩擦角 ϕ 同时减小^[11]。而本文开展的酸碱污染土直剪试验采用的是固结快剪法。受不同浓度的

酸溶液和碱溶液浸泡污染后的土样，其直剪强度线见图 3，从两幅图中可以看出，随着酸浓度的增加，酸污染土的内摩擦角 φ 值并没有明显的变化，总的趋势是震荡减小，而黏聚力 c 值逐渐增大，且比原状土样的大；碱污染土内摩擦角 φ 比原状土样的小，并随着碱浓度的增加而减小，而黏聚力 c 随碱溶液浓度的增大而增大，且较原状土样发生了明显的增大。

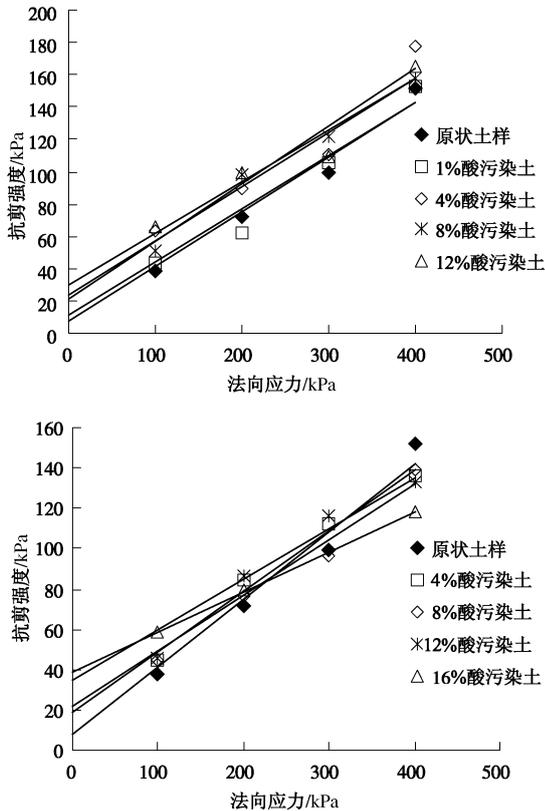


图 3 酸碱污染土的直剪试验强度线

Fig. 3 Curves of direct shear strength for soils polluted by acid and alkali

土样受到酸碱污染后，土颗粒间结构胶结物质被溶蚀，结构连接变弱，孔隙变大。此时土样在法向应力的作用下孔隙被压缩，结合水膜变薄，土颗粒结合水膜之间的接触面增大。土体的结合水膜对土体的黏聚力起着重要的作用，黏聚力是由各个颗粒间距离最短的各点所控制的，当结合水膜变薄，接触面变大时，颗粒间的距离也就变短，黏聚力也就不断增强。因此，酸碱污染土固结稳定后其土的黏聚力都是增大的。

对于内摩擦角来说，不同浓度的酸污染土在固结稳定后结合水膜的连结作用和颗粒的几何排列基本上没有很大程度的改变，其内摩擦角的变化不大；而碱污染土虽然在固结排水过程中结合水膜变薄，但是原先污染过程中大量 Na^+ 进入结合水膜，已经使结合水膜厚度大大增加，固结排水过程中不能完全抵消碱污染土结合水膜厚度增大影响。因此在同等固结压力作用下，受高浓度碱液污染的土样比未受污染的土样的

结合水膜厚，继而碱污染土的内摩擦角随污染浓度的增大而减小。

2.2 影响直剪强度特性的因素

土的抗剪性说明了土抵抗外力破坏能力的大小，其影响主要由土本身的抗力和受力条件两方面决定^[12]，这里不讨论受力条件的影响，主要讨论土体稠度状态、孔隙比、结构强度及微观结构的影响。

(1) 稠度状态的影响

黏土的天然含水率决定着土的连接强度，随着含水率的增大，土的连接强度降低^[13-14]。对于酸、碱污染土，由于酸、碱溶蚀了土中的各种矿物、胶体和有机质，使得土中孔隙体积变大，土的含水率也变大。对于碱污染土，还包括浸碱膨胀造成的孔隙增大所导致的含水率增加。土中含水率的改变可用液性指数来表示，它能反映土颗粒间的连接强度，大略的说明土抵抗外力变形及破坏的能力。酸、碱污染土的液性指数采用液、塑联合测定法，且与黏聚力及内摩擦角的关系分别见图 4, 5 所示。

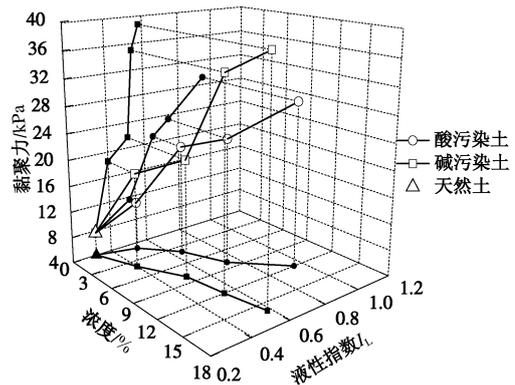


图 4 酸碱污染土液性指数与黏聚力的关系

Fig. 4 Relationship between liquidity index of polluted soils and cohesion

由图 4 可知，随着酸碱污染土液性指数的增加，污染土的黏聚力不断增大，都高于天然土的黏聚力，且碱污染土黏聚力的增加更显著。通常的天然土随着液性指数的增加，土的连接减弱，土的黏聚力不断减小。造成的主要原因是由于当土受酸碱污染后，土的液性指数增加，土的结构连接减弱，此时在外荷载作用下，土颗粒结合水膜之间的接触面增大颗粒间的距离也就变短，黏聚力也就不断增强。因此，酸碱污染土的固结快剪切试验的黏聚力随着污染土的液性指数的增加而增大的。

从图 5 可见，随着酸浓度的增加，土的液性指数随之减小，酸污染土的内摩擦角也随着震荡减小，但与天然土的内摩擦角相比较而言，值减小很少。但对于碱污染土，随着碱浓度的增加，土的内摩擦角随着液性指数的增加而减小，两者之间近乎直线的关系。

总之, 随着酸碱污染土液性指数的增加, 土的内摩擦角是减小的, 但碱污染土内摩擦角减小的较为明显。

通常情况下, 随着地基土液性指数的增大, 黏聚力不断减小。而在实际污染场地中, 场地中不同位置的污染土, 它的液性指数是不相同的, 并且随着液性指数的增大, 污染土的黏聚力也增大, 这与通常的场地上地基土有区别, 应值得注意。

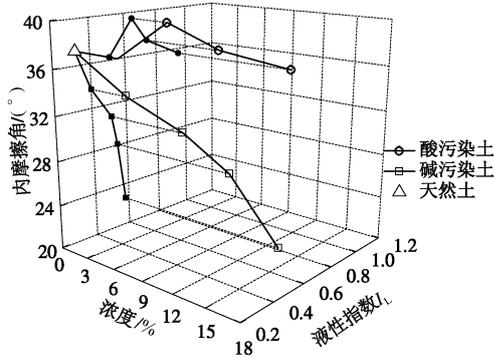


图 5 酸碱污染土液性指数与内摩擦角的关系

Fig. 5 Relationship between liquidity index of polluted soils and internal friction angle

(2) 孔隙比的影响

随着土体孔隙比的减小, 土的密实度变大, 土颗粒的接触点增多, 土强度增大^[13, 15]。对于酸碱污染土, 由于酸碱腐蚀土的矿物和胶体, 使得土的孔隙增加, 同时碱污染土体积膨胀也使得土孔隙增加。酸碱污染土的孔隙比与抗剪强度的关系见图 6 所示。

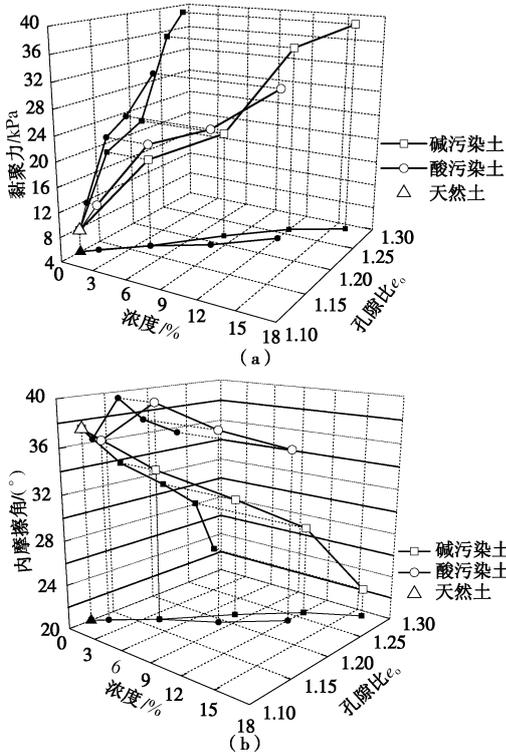


图 6 酸碱污染土孔隙比与抗剪强度的关系

Fig. 6 Relationship between void ratio of polluted soils and direct shear strength

从图 6 可见, 随着孔隙比的增加, 酸污染土的黏聚力增加速度大于碱污染土的, 且在相同孔隙比条件下, 酸污染土的黏聚力大于碱污染土的。通常的普通土, 随着孔隙比的增加, 土的黏聚力是减小的。酸碱污染土的内摩擦角随着孔隙比的增大而减小, 酸污染的改变不明显, 而碱污染土的内摩擦角随着孔隙比的增大而增大, 但增加的趋势却是变缓的。

(3) 土的微观结构对直剪强度的影响

由于酸、碱溶液对土体的各种矿物和胶体产生腐蚀, 使得土的结构连接发生改变, 土中的孔隙、颗粒和胶体形态都发生了变化, 微观结构的改变对土的抗剪强度有着重要的影响^[16], 因此开展了污染前后土的微结构与其抗剪强度关系的研究。

采用扫描电子显微镜对原状样和被浓度分别为 1%, 4%, 8% 和 12% 的 HCl 溶液以及被浓度分别为 4%、8%、12% 和 16% 的 NaOH 溶液浸泡污染后的土样进行观测。观测照片 (放大 1000 倍) 见图 7。采用河海大学岩土所自主开发研制的 GeoImage 程序对扫描电镜后得到的土体微观图片进行分析并提取结构参数^[17]。分析时, 选取原状土样和不同浓度的酸碱污染土样, 共 9 个样品, 10 个结构参数为自变量, 黏聚力和内摩擦角为因变量, 进行单相关分析。具体数据见表 1, 相关分析结果见表 2。

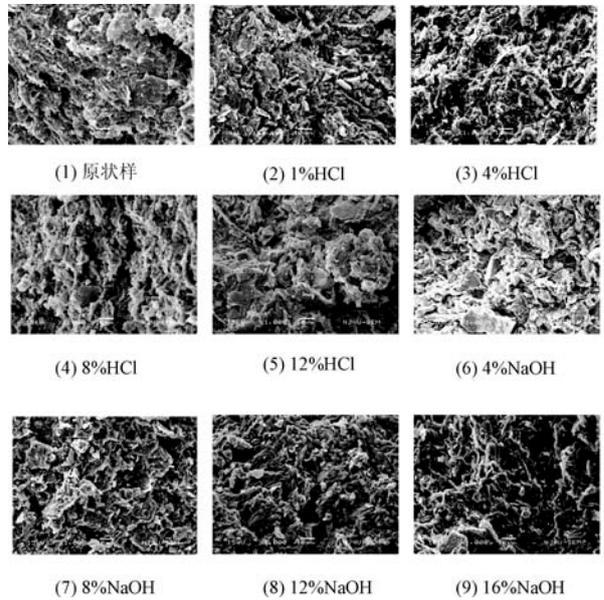


图 7 SEM 照片

Fig. 7 SEM images

由表 2 可知, 与摩擦角相关度最高的结构参数为联结物的圆形度 x_6 , 其相关系数为 -0.518, 但相关度并不显著, 相关方程为

$$\varphi = -168.34x_6 + 105.82 \quad (1)$$

式中, φ 表示污染土的摩擦角。

污染土的摩擦角随联结物的圆形度的变化关系见

表 1 酸碱抗剪强度及结构参数统计表

Table 1 Statistic values for shear strengths and structural parameters of polluted soils

土样	定向度			圆形度			分布分维			欧拉数 (x_{10})	抗剪强度	
	颗粒 (x_1)	孔隙 (x_2)	联结物 (x_3)	颗粒 (x_4)	孔隙 (x_5)	联结物 (x_6)	颗粒 (x_7)	孔隙 (x_8)	联结物 (x_9)		黏聚力 c /kPa	内摩 擦角 φ /($^\circ$)
天然土	0.498	0.478	0.537	0.692	0.682	0.405	2.015	1.907	1.771	0.681	7.54	37.26
1%酸	0.494	0.482	0.536	0.774	0.750	0.413	1.966	1.940	1.850	0.701	11.56	36.23
4%酸	0.479	0.485	0.563	0.783	0.794	0.416	1.948	1.956	1.865	0.709	20.98	39.44
8%酸	0.461	0.492	0.571	0.820	0.885	0.442	1.944	1.964	1.867	0.719	23.33	37.26
12%酸	0.454	0.498	0.596	0.869	0.999	0.452	1.911	1.982	1.887	0.735	29.2	35.54
4%碱	0.518	0.470	0.542	0.700	0.797	0.422	1.992	1.927	1.777	0.683	18.51	33.71
8%碱	0.515	0.472	0.551	0.736	0.802	0.433	1.983	1.930	1.790	0.689	21.65	30.84
12%碱	0.513	0.475	0.563	0.748	0.842	0.443	1.968	1.931	1.814	0.698	35.01	28.09
16%碱	0.500	0.481	0.589	0.829	0.907	0.444	1.965	1.955	1.900	0.703	38.76	22.59

表 2 微观结构参数与抗剪强度相关系数统计表

Table 2 Micro-structural parameters and correlation coefficient of shear strength

参数	定向度			圆形度			分布分维数			欧拉数 (x_{10})
	颗粒 (x_1)	孔隙 (x_2)	联结物 (x_3)	颗粒 (x_4)	孔隙 (x_5)	联结物 (x_6)	颗粒 (x_7)	孔隙 (x_8)	联结物 (x_9)	
摩擦角	-0.500	0.370	-0.356	-0.103	-0.320	-0.518	-0.122	-0.059	-0.135	0.177
黏聚力	-0.055	0.168	0.813	0.574	0.778	0.863	-0.491	0.511	0.550	0.426

图 8。同样，由表可知，黏聚力与摩擦角相关显著的结构参数为联结物的圆形度 x_6 ，其相关系数为 0.813，相关方程为

$$c = 531x_6 - 205.43 \quad (2)$$

式中， c 表示污染土的黏聚力。

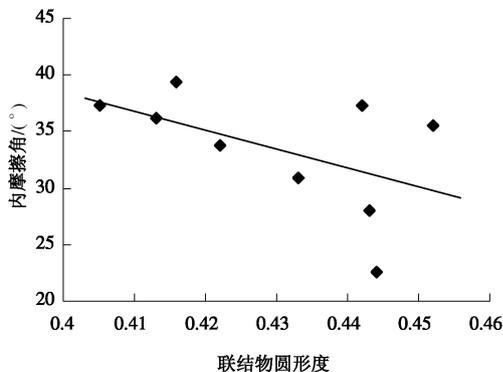


图 8 酸碱污染土内摩擦角与联结物圆形度的关系

Fig. 8 Relationship between roundness degree of binding matter and internal friction angle

污染土的内聚力随联结物的圆形度的变化关系见图 9。酸碱污染土的直剪切强度与微观结构参数相关度最高的都是联结物的圆形度。

3 酸碱污染土三轴试验研究

3.1 最大主应力差与围压的关系

酸、碱污染土三轴抗剪强度在国内外的研究鲜有报道，为了了解围压对不同酸、碱污染土抗剪强度的影响程度，对三轴剪切试验结果的最大主应力差与围

压的关系进行了分析，最大主应力差取应力应变曲线中的应力峰值。不同酸、碱污染土的最大主应力差与围压的关系见图 10。

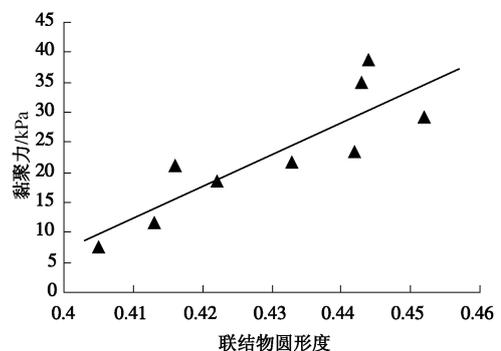


图 9 酸碱污染土黏聚力与联结物圆形度的关系

Fig. 9 Relationship between roundness degree of binding matter and cohesion

从图 10 可知，受不同酸污染土土样的最大主应力差与围压的关系曲线基本彼此平行，都差不多平行于天然土的最大主应力差与围压的关系曲线；而不同碱污染土样三轴固结不排水剪切试验中的最大主应力差，都随着围压的增大，最大主应力差增大的趋势而逐渐变缓。从图中可看见，随着围压的增加，碱污染土样的最大主应力差的增大速度要比天然原状土来的小，所以天然原状土的主应力差与围压的关系曲线和不同碱污染土的主应力差与围压的关系曲线相交。

3.2 酸污染土总应力强度指标与其浓度的关系

由于酸污染土的三轴总应力强度随着浓度的不同而发生变化，因此研究总应力强度与酸浓度的关系，

建立总应力强度与酸浓度之间的计算公式, 以便于实际工程应用。现推导酸污染后, 土的总应力强度与原状土及其酸浓度的关系。首先, 从图 10 可知, 最大主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ 、围压与污染物浓度可建立一个空间的曲面, 此曲面可用下式拟合:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max} = 2q = 2\xi + 2\mu n_c + 2\alpha P + 2\beta n_c P, \quad (3)$$

式中, ξ , μ , α 和 β 为拟合参数, q 为土样受到的最大剪应力, p 表示土样在试验时所受围压, n_c 表示酸溶液的百分比浓度。

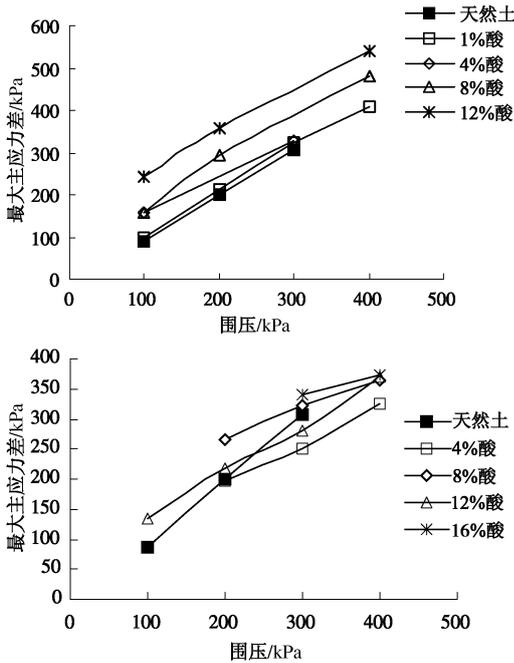


图 10 固结不排水剪切试验中最大主应力差与围压的关系

Fig. 10 Relationship between maximum principle stress difference and confining press during consolidated undrained shear tests

为了简便, 先在土样的破坏点连线, 即 k_f 线上推导, 然后在转化为强度指标。如图 11 所示, 其中 k_f 线为天然原状土的破坏点连线, 其斜率为 $\tan\theta$, 截距为 γ , 线上的 A, B 两点分别表示在围压 P_A, P_B 时所做三轴试验。图中 k'_f 线表示污染土的破坏点连线, 其污染物的百分比浓度为 n_c , k'_f 线的斜率为 $\tan\theta'$, 截距为 γ' , A, B 两点同样分别表示在围压 P_A, P_B 时所做三轴试验。

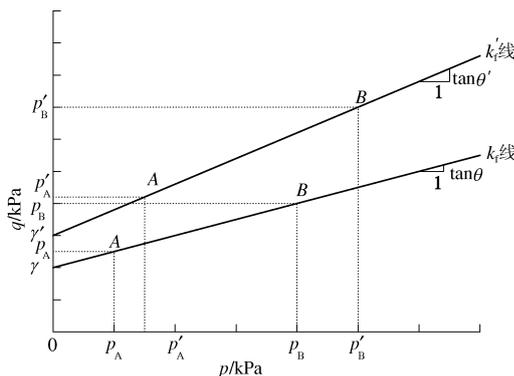


图 11 天然土的 k_f 线和污染土 k'_f 的线

Fig. 11 k_f curve of natural soils and k'_f curve of polluted soils

由污染土 k'_f 线的斜率、截距与抗剪强度指标 c'_{cu} , ϕ'_{cu} 的关系, 可推导得

$$\phi'_{cu} = \arcsin\left[\frac{\sin\phi_u + (1 - \sin\phi_u)\beta n_c}{1 + (1 - \sin\phi_u)\beta n_c}\right], \quad (4)$$

$$c'_{cu} = \frac{c_{cu} \cos\phi_{cu} + (1 - \sin\phi_{cu})\mu n_c}{[1 + (1 - \sin\phi_{cu})\beta n_c] \cos\phi'_{cu}}. \quad (5)$$

式中参数的确定方法, 把式 (1) 可改写为

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max} = (2\xi + 2\mu n_c) + (2\alpha + 2\beta n_c)P, \quad (6)$$

则可发现 $k = 2\alpha + 2\beta n_c$ 和 $l = 2\xi + 2\mu n_c$, 即 $\beta n_c = (k/2) - \alpha$ 和 $\mu n_c = (l/2) - \xi$ 。那么根据不同污染浓度可拟合得到不同的斜率 k 和 l , 点绘 $(k/2 - \alpha)$ 与浓度 n_c 及 $(l/2 - \xi)$ 与浓度 n_c 的关系, 再进行线性拟合, 得到参数 β 和 μ 。现以酸污染土为例说明, 用式 (4)、(5) 得到不同污染浓度时的强度指标, 具体计算值见表 3, 可见计算值与试验值相同或基本接近。

表 3 酸污染土的固结不排水剪切强度指标的计算值

Table 3 Calculated values of shear strength from consolidated

抗剪强度指标		酸污染后土样			
		(1%)	(4%)	(8%)	(12%)
试验值	c_{cu}/kPa	13.5	16.1	18.1	19.7
	$\phi_{cu}/(^{\circ})$	19.5	20.3	23.6	23.9
拟合值	c'_{cu}/kPa	13.7	15.6	18.0	20.2
	$\phi'_{cu}/(^{\circ})$	19.9	21.1	22.5	23.9

4 结 论

(1) 酸、碱污染土固结快剪强度, 随着酸碱浓度的增加, 黏聚力 c 值是逐渐增大, 且碱污染土的 c 值增加更显著。酸污染土的内摩擦角 ϕ 值随着酸浓度的增加震荡减小; 碱污染土内摩擦角 ϕ 比原状土样的小, 并随着碱浓度的增加而减小。

(2) 对于碱污染土固结快剪强度, 随着液性指数愈大, 黏聚力 c 值也愈大, 酸污染土与此相反。对于酸污染土, 液性指数对内摩擦角的影响较小; 而对于碱污染土, 液性指数愈大, 内摩擦角 ϕ 值愈小。

(3) 酸、碱污染土的固结快剪强度中的黏聚力随着污染土液性指数的增加而增大, 而内摩擦角则是减小的。在实际污染场地中, 场地中不同位置的污染土, 液性指数是不相同的, 并且随着液性指数的增大, 污染土的黏聚力也增大, 这与通常的场地上地基土有区别, 应值得注意。

(4) 研究了污染土的微观结构对其抗剪强度的影响, 通过对结构参数与黏聚力及内摩擦角进行单相关分析, 得到酸碱污染土的直剪切强度与微观结构参数

相关度最高的都是联结物圆形度,但联结物圆形度与内摩擦的相关度并不显著。

(5)根据不同浓度酸污染土抗剪强度与围压的关系,提出了酸污染土总应力强度随酸浓度变化的计算公式,并根据已知条件进行了计算,计算结果与本文的试验结果进行比较,结果比较接近。

参考文献:

- [1] 李相然,姚志祥,曹振斌. 济南典型地区地基土污染腐蚀性性质变异研究[J]. 岩土力学, 2004, **25**(8): 1229 - 1233. (LI Xiang-ran, YAO Zhi-xiang, CAO Zhen-bin. Study on physical and mechanical property variation of pollution erosive foundation soils in typical district of Jinan[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(8): 1229 - 1233. (in Chinese))
- [2] KOOPER W F, MANGNUS G A. Contaminated soil[M]. Martinus Nijhoff Publishers, 1986: 25 - 27.
- [3] SRIDHARAN A, NAGARAJ T S, SIVAPULLAIAH P V. Heaving of soil due to acid contamination[J]. Geotechnique, 1980, 2.
- [4] HO Y A, PUFAHL D E, BARBOUR S L. Effects of brine contamination on volume change behavior of fine-grained soils, Materials from Theory to Practice[C]// Proceedings of the 42nd Canadian Geotechnical Conference. Winnipeg: 1989, 272 - 279.
- [5] RAJPUT V S, HIGGINS A J, SINGLE M E. Cleaning of excavated soil contaminated with hazardous organic compounds by washing[C]// Water Environment Federation. Alexandria, 1994: 819 - 827.
- [6] PICCOLL, STEFANO, BENOIT. Geo-environmental testing using the Envirocone[C]// Proceeding of the Specialty Conference on Geotechnical Practice in Waste disposal. Part 1(of 2). New Orleans: Geotech. Spec. Publ. 1995: 93 - 104.
- [7] 朱春鹏,刘汉龙. 污染土的工程性质研究进展[J]. 岩土力学, 2007, **28**(3): 625 - 630. (ZHU Chun-peng, LIU Han-long. Study on engineering properties of polluted soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(3): 625 - 630. (in Chinese))
- [8] 饶为国. 污染土的机制、检测及整治[J]. 建筑技术开发, 1999, **26**(1): 20 - 21. (RAO Wei-guo. The pollution mechanism, testing and prevent and cure of contamination soil[J]. The Exploiture of Construction Technology, 1999, **26**(1): 20 - 21. (in Chinese))
- [9] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (YIN Zong-ze. (in Chinese))
- [10] 刘汉龙,朱春鹏,张晓璐. 酸碱污染土基本物理性质的室内测试研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(8): 1213 - 1217. (LIU Han-long, ZHU Chun-peng, ZHANG Xiao-lu. Test and study the fundamental physical properties of polluted soil by acid and alkali in laboratory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(8): 1213 - 1217. (in Chinese))
- [11] 傅世法,林颂恩. 污染土的岩土工程问题[J]. 工程勘察, 1989(3): 19 - 21. (FU Shi-fa, LIN Song-en. Geotechnical problem of pollution soil[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 1989(3): 19 - 21. (in Chinese))
- [12] 唐大雄,刘佑荣,等. 工程岩土学[M]. 第二版. 北京: 地质出版社, 1999.
- [13] BURLAND J B. On the compressibility and shear strength of natural clays[J]. Geotechnique, 1990, **40**(3): 329 - 378.
- [14] AZZOUZ A S, KRIZEK R B, COROTIS R B. Regression analysis of soil compressibility[J]. Soils and Foundation, 1976, **16**(2): 19 - 29.
- [15] BOLT G H. Physico-chemical analysis of the compressibility of pure clays [J]. Geotechnique, 1956, **6**(2): 86 - 93.
- [16] MITCHELL J K, SINGH A, Campanella R G. Bonding, effective stresses, and strength of soils[J]. Journal of the soil mechanics and Foundation Division, ASCE. 1976, **95**(5): 1219 - 1246.
- [17] 朱春鹏,刘汉龙,张晓璐. 酸碱污染土压缩特性的室内试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(10): 1477 - 1483. (ZHU Chun-peng, LIU Han-long, ZHANG Xiao-lu. Test and study the compression character of polluted soil by acid and alkali in laboratory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(10): 1477 - 1483. (in Chinese))