

TIANJIN JIANCHANG JIANZHATU DE
GONGCHENG LIYONG YANJIU

天津碱厂碱渣土的 工程利用研究

李显忠 主编



天津碱厂碱渣土的 工程利用研究

李显忠 主编

海洋出版社

2013 年 · 北京

图书在版编目 (CIP) 数据

天津碱厂碱渣土的工程利用研究/李显忠主编.

—北京: 海洋出版社, 2013. 12

ISBN 978 - 7 - 5027 - 8777 - 6

I. ①天… II. ①李… III. ①制碱厂 - 碱渣 - 废物综合利用 - 研究 IV. ①X705

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 005037 号

责任编辑: 杨海萍 张 荣

责任印制: 赵麟苏

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编: 100081

北京旺都印务有限公司印刷 新华书店北京发行所经销

2013 年 12 月第 1 版 2013 年 12 月第 1 次印刷

开本: 787 mm × 1092 mm 1/16 印张: 18.75

字数: 342 千字 定价: 68.00 元

发行部: 62132549 邮购部: 68038093 总编室: 62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

序 言

纯碱是重要的化工原料。目前我国生产纯碱多采用氨碱法，其产量占纯碱总产量的60%以上。这一工艺在我国沿用数十年，其致命弱点是蒸氨工艺流程产生大量的废渣废液。我国现有多个大型碱厂，年产碱渣上千万吨。

目前，国内外对碱厂产生的碱渣大规模处理没有找到合适的方法，都或多或少存在污染问题，且碱渣的处理费用越来越高，严重影响了碱厂的生存和发展。

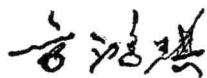
本书介绍的“天津碱厂碱渣土的工程利用研究”是建设部科学技术成果，鉴定证书“建科鉴字[97]第95号”，建设部2000年科技成果推广转化指南项目。

这是一项制碱工业废弃物利用“变废为宝”的环境工程研究成果。通过天津碱厂碱渣及不同拌和材料和配比的碱渣土进行了化学成分、物理力学性质指标、微观结构、强度形成机理等方面的研究，通过大量可靠的室内外试验和工程实践将碱渣制成有最合理配比的碱渣土，适用于天津市塘沽区、开发区、保税区、天津港等滨海高盐渍土地带，并在实际应用中大规模用于低洼区、滩涂区的工程填垫，从根本上解决了天津碱厂碱渣无处堆放和引起的环境恶化问题，有效的保护和开发利用了土地资源，产生直接经济效益30亿元左右。

填垫回用后，不会引起土壤、地下水环境中盐基离子、有害元素的二次污染。将碱渣变废为宝，在碱渣土填垫区域新建了大量的住宅小区和休闲公园，改善了人民生活，社会和环境效益亦极为显著。

同时，该成果具有碱渣处理费用低、碱渣土工程利用技术可靠、易操作等特点，为我国其他大型碱厂的碱渣大规模处理提供了行之有效的处理方法，因而有着很大的应用推广市场，必将产生更大的社会、经济与环境效益。

该书实用性强，技术先进，应用推广市场广泛。将其出版发行将具有重要的社会意义。



教授 中国勘察大师

前 言

天津碱厂碱渣山是天津市最大的工业固体废弃物污染源，碱渣治理工程为天津市十大重点环保工程之一。为此，当地政府投入了大量人力、物力进行了专项治理工程，历时5年完成。“天津碱厂碱渣土的工程利用研究”通过对碱渣土微观机理的研究，将碱渣与粉煤灰等废弃物配制成工程土，大规模应用于塘沽区低洼地带及滩涂区的工程填垫，将碱渣“变废为宝”，有效增加了土地利用资源、改善了人民生活条件、解决了对环境的污染，经济、社会、环境效益明显，是一项“功在当代、利在千秋”的伟大壮举。

本书就是对该研究的成果总结。

本书由中国建筑科学研究院、中国建筑技术集团副总工程师李显忠教授主编，共8章。参加本书编写工作的有：中国建筑技术集团有限公司石明磊、冯禄、奚道雷、顾业锋、魏金玉、董海欧、孟庆周、郝世华、靳成强；中铁工程设计院有限公司张效军；山东鑫国基础工程有限公司王红兵、王庆海；北京通联地基基础工程有限公司佟玉良；铁道第三勘察设计院集团有限公司田学伟。

在研究过程中，得到了科技部、住房和城乡建设部、中国建筑科学研究院、中国建筑技术集团有限公司、建设部综合勘察研究设计院、建设部建设环境工程技术中心、天津市塘沽区政府、天津塘沽区碱渣治理领导小组、天津碱厂、天津塘沽房地产开发总公司、天津大学岩土工程研究所、天津市塘沽区环保局、青岛海洋大学有关领导、专家和同事的大力支持和帮助，在此向他们表示衷心的感谢。

国家勘察大师方鸿琪教授为本书作序，在此表示深深的感谢；在统稿过程中，石明磊、董海欧等付出了辛勤劳动，向他们表示衷心的感谢；本书出版工作得到海洋出版社杨海萍编辑和张荣编辑的倾心帮助，在此也表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限，书中难免有欠妥之处，敬请读者批评指正。

编者语

目 录

1 绪论	(1)
1.1 碱渣治理研究现状	(1)
1.2 碱渣土研究理论与方法综述	(5)
1.3 碱渣土工程利用研究的现状及创新点	(10)
1.4 碱渣治理工程实施意义	(11)
2 碱渣的工程性质与微观研究	(14)
2.1 碱渣的生成、化学成分及物理力学性质	(14)
2.1.1 碱渣的生成与堆存	(14)
2.1.2 碱渣的化学成分	(15)
2.1.3 碱渣的物理力学性质	(16)
2.2 碱渣的微观结构及其成因	(19)
2.2.1 碱渣的微观结构	(19)
2.2.2 碱渣微观结构的成因	(23)
3 碱渣土的工程性质与微观研究	(31)
3.1 碱渣土的工程性质	(31)
3.1.1 碱渣土的物理指标	(31)
3.1.2 碱渣土的力学指标	(33)
3.1.3 不同拌和材料和配比的碱渣土的物理力学性质指标	(38)
3.1.4 现场地基承载力试验	(42)
3.1.5 结论意见	(47)
3.2 碱渣土与一般黏性土的工程特性的比较	(48)
3.2.1 概述	(48)
3.2.2 塘沽软土的矿物成分和微观结构	(48)

3.2.3	新港软土与吹填的碱渣土的物理力学性质的比较	(50)
3.2.4	碱渣土与黏性土的工程性质的比较	(50)
3.3	碱渣土的强度形成机理	(53)
3.3.1	碱渣废液的胶体化学性质	(53)
3.3.2	孔隙水与矿物颗粒的相互作用	(57)
3.3.3	碱渣制工程土的强度形成机理	(60)
3.4	碱渣与增钙灰拌和形成的碱渣土的微观结构及工程性质	(62)
3.4.1	引言	(62)
3.4.2	增钙灰对碱渣的强度提高机理	(63)
3.4.3	小结	(65)
3.5	碱渣工程土微观结构的定量分析	(66)
3.5.1	综述	(66)
3.5.2	分形维数	(69)
3.5.3	碱渣土微观结构指标的选取	(74)
3.5.4	土体微观结构图像处理系统	(77)
3.5.5	碱渣土微结构定量化的结果	(83)
3.5.6	小结	(88)
3.6	碱渣制工程土微观结构分析与强度形成机理结论	(89)
4	碱渣土的工程利用研究	(92)
4.1	经碳化压滤的碱渣土特性	(92)
4.1.1	室内试验	(93)
4.1.2	载荷试验	(106)
4.2	软基加固	(111)
4.2.1	概述	(111)
4.2.2	碱渣的室内试验分析	(112)
4.2.3	碱渣的真空预压加固现场试验	(119)
4.2.4	对拟建的北疆码头后方碱渣堆场加固的建议	(139)
4.2.5	结论	(140)

4.3	改性处理	(140)
4.3.1	试样的拌和成分	(141)
4.3.2	击实试验	(141)
4.3.3	单轴压缩试验	(149)
4.3.4	试验结果分析	(150)
4.3.5	结论	(154)
4.4	双层地基	(155)
4.4.1	试验	(155)
4.4.2	现场施工要点及经济效益	(164)
4.4.3	结论	(167)
4.5	碱渣制工程用土	(168)
4.6	天津碱厂老碱渣土底层碱渣的加固处理	(170)
5	碱渣对建筑物、建筑材料及其制品的影响	(175)
5.1	碱渣对建筑物的影响	(175)
5.1.1	碱渣对建筑物自身的影响	(175)
5.1.2	碱渣对地下管道的影响	(180)
5.2	碱渣对建筑材料及其制品的影响	(180)
5.2.1	碱渣对水泥砂浆的腐蚀性	(181)
5.2.2	碱渣对钢筋的锈蚀	(182)
6	碱渣土对生态环境的影响	(184)
6.1	概况	(184)
6.1.1	目的和意义	(184)
6.1.2	监测区域环境基本特征	(184)
6.1.3	碱渣的成分分析	(184)
6.1.4	监测因子的选择	(185)
6.1.5	布点采样	(185)
6.2	分析方法及结论	(186)
6.2.1	分析方法	(187)

6.2.2	监测结果分析	(187)
6.2.3	碱渣制工程土回用的可能影响分析	(199)
6.2.4	结论及建议	(199)
6.3	绿化实例	(201)
7	碱渣土的工程利用研究结论及其应用建议	(208)
7.1	碱渣土的工程利用研究结论	(208)
7.2	应用建议	(210)
8	天津市塘沽区碱渣治理开发工程	(211)
8.1	概述	(211)
8.1.1	工程概况	(211)
8.1.2	气象条件,场地的工程及水文地质概况	(217)
8.1.3	方案设计范围	(218)
8.1.4	方案设计主要依据	(218)
8.2	工程实施方案	(220)
8.2.1	三号路碱渣山清理工程方案设计与实施	(221)
8.2.2	碱渣制工程土填垫工程方案设计与实施	(222)
8.2.3	碱渣治理开发实施对环境的影响分析	(233)
8.2.4	碱渣制工程土营造屏蔽山(碱渣山公园)工程实施方案设计	(233)
8.2.5	碱渣花园居住小区规划及配套相关工程	(242)
8.3	概算、资金来源及盈亏分析	(247)
8.3.1	总投资概算	(247)
8.3.2	资金筹措	(249)
8.3.3	盈亏分析	(251)
8.3.4	计算动态指标	(252)
8.3.5	国民经济评价	(254)
8.4	工程综合效益分析	(256)
8.4.1	治理碱渣山的重要性和紧迫性	(256)

8.4.2 工程综合效益分析	(257)
8.5 工程实施及成果	(257)
8.5.1 工程施工过程	(257)
8.5.2 治理工程成果	(260)
参考文献	(269)
附件1 碱渣土回填的技术规程	(271)
附件2 建设部科学技术鉴定证书	(276)
附件3 国家环保总局专家论证意见	(285)
附件4 建设部科技成果推广转化指南项目证书	(288)

1 绪论

1.1 碱渣治理研究现状

纯碱是重要的化工原料，在国民经济中占有重要的地位，目前我国生产纯碱多采用氨碱法，其产量占纯碱总产量的 60% 以上，这一工艺在我国沿用数十年，其致命弱点是蒸氨工艺流程产生大量的废渣废液。据统计，每生产 1 t 纯碱，排放约 10 m^3 的废液，其中含废渣约 300 ~ 600 kg（视石灰石原料的好坏而定）。其排放和堆存给周围环境造成较大的影响。

目前国内对碱渣的处理，有的碱厂采用从废液中澄清碱渣，然后堆放在堆场上的处理方法，有的碱厂废液废渣直接流入海湾。国内 6 个大型碱厂废液废渣的处理方式如表 1.1.1 所示。表中同时给出各厂废液量、废渣量以及排放地。

在表 1.1.1 的 6 个碱厂中，前两个碱厂建成最早，排放的废渣最多，急需处理的问题最为突出。

表 1.1.1 国内主要碱厂情况一览表

厂名	厂址	规模 (万吨/年)	废液量 (万吨/年)	废渣量 (万吨/年)	排放地	排放方式
大连化学工业公司碱厂	大连湾	55	550	31	大连湾北岸	直接排入
天津碱厂	塘沽	45	450	15	滨海滩涂	围堰
青岛碱厂	沧口区	30	300	5	胶州湾东岸	直接排入
潍坊碱厂	寿光	60	600	25	莱州湾大家洼	围堰
连云港碱厂	连云港	60	600	25	海州湾	围堰
唐山碱厂	唐山	60	600	25	渤海湾	围堰

天津碱厂始建于1923年，是我国最早的碱厂，该厂废液排放是由蒸馏塔底排出后，用泵送到排渣场地，沉积废渣。建厂70余年来，制碱过程中已生产废渣 $1\,500 \times 10^4$ t 以上，堆放高度在10 m 以上，不仅占用了厂区附近场地，而且堆满了天津盐厂的6号汪子（即蒸发池）（见图1.1.1~1.1.3）、3号汪子（图1.1.4，1.1.5），总占地面积约 3.26 km^2 。因受外界影响曾造成三次塌方事故，其中尤以1976年的“唐山大地震”波及该厂的“白灰埕”塌方事故最为严重（图1.1.6）。该厂每年用于渣场的维修费即达200万元。

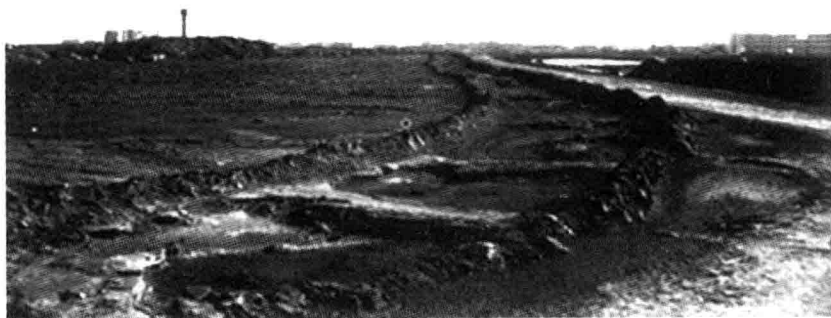


图 1.1.1 6号汪子碱渣山



图 1.1.2 碱渣山断面

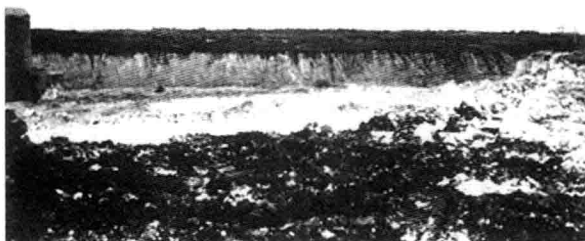


图 1.1.3 碱渣山局部剖面



图 1.1.4 3号汪子碱渣山



图 1.1.5 3号汪子碱渣山



图 1.1.6 碱渣山地震坍塌点

随着沿海天津开发区、天津港保税区的建立，可供堆放碱渣的滩涂、汪子已不复存在，而老渣场即将堆满，解决碱渣的堆放问题已刻不容缓。

综观国外氨碱厂的废渣的排放处理，以俄国氨碱厂的排放问题最为严重。俄国是一个纯碱生产大国，氨碱厂占了一大半，且大部分在内地统计结果表明，仅建立排渣场的废渣堆存费用超过了其加工成商品的费用。例如：斯天杨斯克纯碱联合企业在 20 世纪 80 年代建设排渣场的投资为每平方米 2.32 卢布。

欧洲各国对废渣的处理，措施比较得力，一些国家的氨碱厂先将悬挂浮在废渣中的碱渣澄清，澄清后的碱渣用河水冲淡再送入排渣场，因而除去了大量的 CaCl_2 和 NaCl ，易于作为建筑堤坝之用，起到了较好的效果。英国将洗好的废渣与精制的盐水兑合后排入部分开采的盐洞中，也是一个好的方法。意大利罗西略诺厂废液渣直接排海，但在我国是不可行的，因为直接排海浪费了废液中的有效成分（如 NaCl ， CaCl_2 ）。此外，废液废渣的排海会使海湾港口淤塞，影响海洋生物的生存。

而天然碱相当丰富的美国到了 1986 年已陆续关闭在 1881—1935 年间建立的 9 个大型氨碱厂，改用天然碱加工生产纯碱，其关闭的主要原因就是能源和污染问题。在各氨碱厂的生产过程中，也曾针对废液废渣对环境的污染问题做了大量的研究工作。以美国纽约州西拉丘斯氨碱厂为例，每天生产 2 500 t 纯碱时，生产固体废物 28 350 m^3 ，制成 5% 的泥浆，顺沟排放到安大略湖两岸堆放废物的渣场，并筑堤筑坝，废渣堆放满后，再加高 1.22 ~ 1.52 m，堤坝高处达 18.23 m。1943 年堤坝断裂一段，废渣流出，铺满附近公路、铁路和纽约州的部分地区，危害很大，对周围环境造成污

染。1973 年该厂用 21 千米管道将 $4\,000\text{ m}^3/\text{d}$ 的废液排放到城市废渣液管理厂，用作化学处理的添加剂。

我国是发展中国家，天然碱不够丰富，所以不可能像美国那样关闭氨碱厂。因此，氨碱厂存在一天，废液废渣就存在一天。

所以，对废液废渣加以研究利用，力图变废为宝，成为我国面临的一个十分急迫的任务。

天津碱厂多年来一直努力尝试碱渣综合利用的各种可能途径，取得了可喜成果，如生产氯化钙、碱渣水泥、超细工业添加剂等，但由于资金和场地问题影响了这些成果的迅速投产。另一方面，将碱渣作为二次资源用于工业生产，是一条很有价值的利用途径，但其利用量毕竟有限，想在几年内解决碱渣排放问题是不可能的。

由于天津碱厂碱渣堆积而成的碱渣山地处塘沽城区中心，周围的环境敏感点众多（图 1.1.7，图 1.1.8）。数十年来，由它所引起的多种污染后果困扰着当地政府和居民群众。随着该地区经济建设的迅速发展和环境意识的增强，它的严重制约作用日益突出，因此寻找一条将碱渣在短时间内进行大规模治理利用的途径意义十分重大。

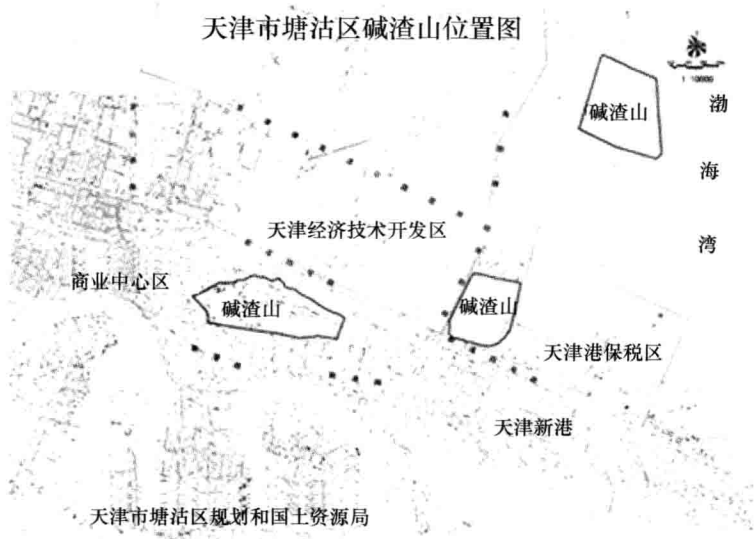


图 1.1.7 天津市塘沽区碱渣山位置图

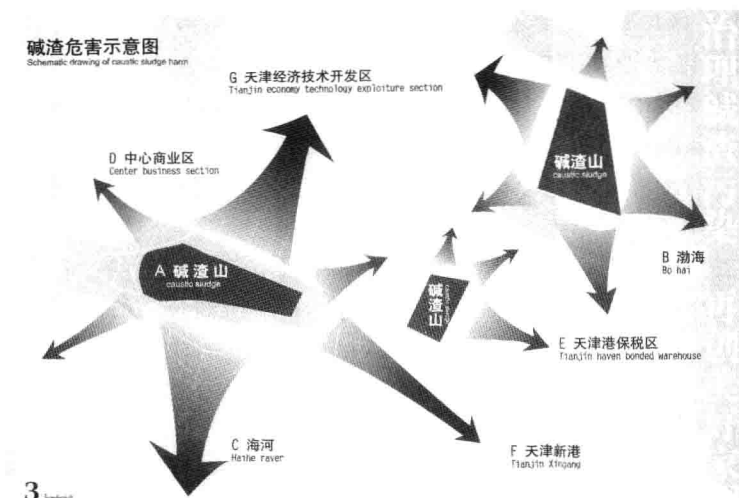


图 1.1.8 碱渣危害示意图

1.2 碱渣土研究理论与方法综述

由于地质历史、地质环境以及人工活动的影响，自然中存在着多种类型的土，其工程性质也千差万别。对各种类型的土以工程建设为目的进行的分类，称之为土质分类。土质分类是土力学与土质学的基础理论之一，其任务是将各种类型的土，根据当前的认识水平，按其在实际应用中的共性划分为类或组。只有把一件事物的基本性质弄清楚以后，才能对它进行分类。土亦然，必须充分了解了它的宏观、微观性质以后才能对它分门别类，因此可以说土质分类的发展反映了本学科发展现状与发展历史。

现代对各种类型的土的研究表明，土的工程性质不仅仅与粒度组成有关，矿物成分、化学组成、交换阳离子、颗粒间的联系以及地质历史对土的工程性质都有较大的影响。而且随着现代科学技术的发展，研究手段也越来越先进，越来越有利于揭示土力学的本质。

近年来，在各方面的共同努力下，碱渣土作为工程土应用时表现出来的宏观物理力学性质，如强度及变形特性，已基本搞清。碱渣土作为素土的替代物用于低洼地填垫的工程实践已有相当的规模，用碱渣土做公路地基的研究也在进行。

碱渣土作为一种工程用土，在研究方法上自然与其他类型的土有一定的共性，因此在研究中采用了一些常用的研究方法，例如，用差热分析和 X—射线衍射来确定碱渣土的矿物成分，同时又根据现有的条件采用了一些新方法和新理论，如利用分形理论对碱渣土的微观图像进行量化。表 1.2.1 ~ 表 1.2.6 列出了各类土（包括碱渣土）的平均的物理力学性质及常用的研究方法。

表 1.2.1 各类土的平均物理学性质的指标

土类	孔隙比 e	天然含水量 ω (%)	塑限 ω_p (%)	液限 ω_L (%)	密度 ρ (g/cm^3)	黏聚力 c (kpa)	内摩擦角 (度)	变形模 量 E_0 (MPa)
粗砂	0.4 ~ 0.7	15 ~ 25			2.05 ~ 1.90	2 ~ 0	42 ~ 38	46 ~ 33
中砂	0.4 ~ 0.7	15 ~ 25			2.05 ~ 1.90	3 ~ 1	40 ~ 35	46 ~ 33
细砂	0.4 ~ 0.7	15 ~ 25			2.05 ~ 1.90	6 ~ 2	38 ~ 32	37 ~ 24
粉砂	0.4 ~ 0.8	15 ~ 25			2.05 ~ 1.90	8 ~ 4	36 ~ 28	14 ~ 10
粉土	0.4 ~ 0.7	15 ~ 25	< 9.4		2.10 ~ 1.95	10 ~ 5	30 ~ 27	18 ~ 11
	0.4 ~ 0.7	15 ~ 25	9.5 ~ 12.4		2.10 ~ 1.95	12 ~ 6	25 ~ 23	23 ~ 13
黏性土	0.4 ~ 0.8	15 ~ 29	12.5 ~ 15.4		2.10 ~ 1.90	42 ~ 7	24 ~ 21	45 ~ 12
	0.5 ~ 1.0	19 ~ 40	15.5 ~ 18.4		2.00 ~ 1.80	50 ~ 8	22 ~ 18	39 ~ 8
	0.6 ~ 1.0	23 ~ 40	18.5 ~ 22.4		1.95 ~ 1.80	68 ~ 19	20 ~ 17	33 ~ 9
黏土	0.7 ~ 1.1	26 ~ 40	22.5 ~ 26.4		1.90 ~ 1.75	82 ~ 36	18 ~ 16	28 ~ 11
	0.8 ~ 1.1	30 ~ 40	26.5 ~ 30.4		1.85 ~ 1.75	94 ~ 47	16 ~ 15	24 ~ 14
黄土	0.85 ~ 1.24	8.1 ~ 25	14.0 ~ 19.7	23.9 ~ 29.4	1.35 ~ 1.73	10 ~ 35	24 ~ 36	
膨胀土	0.62 ~ 1.53	23 ~ 37.3	19.5 ~ 26.1	44.8 ~ 68.0	1.87 ~ 2.11			
红黏土	1.1 ~ 1.7	30 ~ 60	60 ~ 110	25 ~ 50	1.68 ~ 1.89			10 ~ 30
软土	0.97 ~ 1.86	34 ~ 71	17 ~ 40	34.0 ~ 72.0	1.86 ~ 1.60	5 ~ 17	5 ~ 15	
碱渣土	4.93	80 ~ 90	62.5	80.2	2.35	50	43	14.6 ~ 37.5