

粗颗粒盐渍土的溶陷性及其简便判别方法

胡义生 贾亦斌 马文艳

上海电力设计院有限公司, 上海 200025

[摘要]针对粗颗粒盐渍土难以采集原状土样通过室内试验直接获得溶陷系数的痛点,分析了粗颗粒盐渍土浸水溶陷的产生机理及影响因素,围绕含盐量、水、颗粒级配、地层结构等主要影响因素总结了定性判断粗颗粒盐渍土是否溶陷的方法,结合已有研究成果中不同颗粒级配下溶陷系数与含盐量的经验公式,采用三维曲面拟合方法获得了溶陷系数与粗细颗粒比、含盐量等常规物理试验指标的换算关系,形成了一套粗颗粒盐渍土溶陷性简便判别方法。最后以甘肃瓜州某 330kV 升压站项目为案例,通过浸水载荷试验验证了这套简便判别方法的准确性与可靠性。

[关键词]粗颗粒土; 盐渍土; 含盐量; 溶陷性; 溶陷系数

DOI: 10.33142/ec.v8i4.16289

中图分类号: TU448

文献标识码: A

The Collapsibility of Coarse-grained Saline Soil and Its Simple Discrimination Method

HU Yisheng, JIA Yibin, MA Wenyan

Shanghai Electric Power Engineering Co., Ltd., Shanghai, 200025, China

Abstract: In response to the pain point of difficulty in collecting undisturbed soil samples for coarse-grained saline soil and obtaining the dissolution coefficient directly through indoor experiments, the mechanism and influencing factors of coarse-grained saline soil dissolution in water were analyzed. Qualitative methods for determining whether coarse-grained saline soil has dissolved were summarized based on the main influencing factors such as salt content, water, particle size distribution, and geological structure. Combined with empirical formulas for dissolution coefficient and salt content under different particle size distributions in existing research results, a three-dimensional surface fitting method was used to obtain the conversion relationship between dissolution coefficient and conventional physical test indicators such as coarse to fine particle ratio and salt content, forming a set of simple discrimination methods for coarse-grained saline soil dissolution. Finally, taking a 330kV substation project in Guazhou, Gansu Province as a case study, the accuracy and reliability of this simple discrimination method were verified through immersion load tests.

Keywords: coarse grained soil; saline soil; salt content; solubility; dissolution coefficient

引言

盐渍土在我国分布非常广泛,面积约占国土总面积的十分之一,主要分布在西北、华北、东北、华东地区。从颗粒组成角度考虑,盐渍土可划分为粗颗粒盐渍土和细颗粒盐渍土。其中,粗颗粒盐渍土是指:盐渍土经过洗盐后,粒径超过 0.075mm 和不大于 60mm 的颗粒含量大于总质量 50% 的土^[1]。

对于细颗粒盐渍土,在建设工程的勘察阶段,一般可通过常规勘探取样试验手段获得其溶陷性判定指标;而对于粗颗粒盐渍土,由于难以采集原状土样,利用室内试验直接获取溶陷系数难度很大,而通过现场浸水载荷试验评价该类土层的溶陷性虽然准确可靠,但试验周期长、成本高,难以推广应用。因此,针对粗颗粒盐渍土寻找经济适用、准确高效的溶陷性判别方法具有重要的现实意义。

1 粗颗粒盐渍土溶陷性研究现状

刘亚峰等^[2]研究了敦煌地区粗颗粒盐渍土的工程性质及其对风电工程的影响,提出了研究区风电场粗颗粒盐渍土地基溶陷病害的几种防治方法。程东幸等^[3]分析了新疆、甘肃两地 4 个试验场 28 个现场试验点的溶陷性试验

结果,总结认为当地基土中易溶盐含量超过 0.5%~1%,且地基土渗透系数不低于 10^{-7} cm/s 时,常会发生溶陷现象。孙安元^[4]认为颗粒粒径是影响粗颗粒盐渍土溶陷性的关键指标,随着颗粒粒径的增大,粗颗粒硫酸盐渍土在相同工况下溶陷呈减弱趋势。国际上对于盐渍土的研究,以前苏联加盟共和国研究水平较高,研究成果较为系统。20 世纪 40 年代以考夫达、崔托维奇等为代表的前苏联科学家率先开展了盐渍土工程特性研究工作,并对盐渍土的形成原因、影响因素及分布规律等展开了系统性的研究,奠定了盐渍土研究领域的基石^[4]。

虽然国内外专家学者对粗颗粒盐渍土进行了一定的研究,但研究成果还不够系统,对粗颗粒盐渍土溶陷性与常规物理力学化学试验指标的关系还有待进一步研究。

2 粗颗粒盐渍土溶陷性的影响因素

盐渍土溶陷是盐渍土在自重压力或附加压力作用下受水浸湿时所产生的变形现象,一般认为其包括溶陷变形和潜蚀变形两部分^[3]。分析盐渍土溶陷产生的机理,可以发现影响粗颗粒盐渍土溶陷性的因素主要有:土壤含盐量、地下水、温度、颗粒级配和地层结构等。

(1) 含盐量

土中盐分的存在,是地基土产生溶陷的物质基础。粗颗粒盐渍土的溶陷性与其含盐类型、含量及可溶程度密切相关。一般情况下,地基土中易溶盐含量越高,其溶陷能力越强,反之,易溶盐含量越低,则其溶陷能力相应越弱。这种现象不管在平面上还是剖面上均有明显表现。

(2) 地下水

地下水对盐分的溶解特性使得作为土体骨架一部分的盐晶转化为液态而丧失支撑作用。一般而言,当土体含水量较低时,土体的溶陷量会随着含水量的增大而显著增加,但是当土体的含水量增大到一定程度时,土壤易溶盐主要以溶液的形式存在,此时再增大土体含水量对溶陷性的影响将不再明显。地下水对粗颗粒盐渍土溶陷性的影响还表现在地下水渗流带来的潜蚀变形,这种变形又可分为化学潜蚀及力学潜蚀,且化学潜蚀作用形成的通道又促进了力学潜蚀的发展^[5]。

(3) 温度

在盐渍土地基充分浸水的工况下,温度是影响其溶陷性的又一关键因素。通常,随着温度的升高,盐分在水中的溶解度增大,溶陷变形的变化速率加快,但总溶陷变形量的大小基本不受影响。随着温度的降低,溶解度减小,在温度低于凝固点后,溶液凝结成冰,此时温度可能导致盐渍土的冻胀融沉。

(4) 颗粒级配

颗粒级配对粗颗粒盐渍土溶陷性的影响主要表现在骨架颗粒含量及与颗粒组成关联的毛细上升高度上。粗颗粒盐渍土经洗盐后粒径大于 2mm 的颗粒一般称之为骨架颗粒。骨架颗粒含量越高,对溶陷的抑制作用越强。土的颗粒级配与毛细上升高度关联性较强,深部土颗粒空隙中的盐溶液在毛细作用下上升到浅部土层后,水分蒸发、盐分残留,能够增加浅部土层的含盐量,从而调整盐渍土溶陷在竖向上的分布规律。

(5) 地层结构

地层结构对粗颗粒盐渍地基土溶陷性的影响主要表现为两个方面:一是不同岩性地层的组合。通常情况下性质均匀的粗颗粒地基土溶陷性较强,而有细粒夹层或黏土充填的粗颗粒盐渍地基土,大多数情况地基土具非溶陷性或溶陷性很弱。二是地层的盐分胶结程度。土体中的盐分呈胶结状态时,渗透系数一般小于 $1.0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$,水分难以渗入土体,盐分溶解受到抑制,此时盐渍土往往变现为非溶陷。

3 粗颗粒盐渍土溶陷性简便判别方法

3.1 溶陷性初判

(1) 根据含水状态判别

我国国家标准《盐渍土地区建筑技术规程》(GB/T 50942—2014)明确提出,当碎石土盐渍土、砂土盐渍土

的湿度为饱和且工程的使用环境条件不变时,可不计溶陷性对建(构)筑物的影响。因此,对于常年位于地下水位以下的粗颗粒盐渍土,可不考虑其溶陷性。

(2) 根据地层结构判别

已有研究表明,盐分胶结型盐渍土场地的低渗透性对地基土的溶陷起了明显的抑制作用,多表现为非溶陷性场地,而盐分充填型场地的溶陷性则与含盐量、颗粒级配及含水状态等因素关系密切。

(3) 根据骨架颗粒含量判别

根据文献^[1],洗盐后地层中大于 2mm 粒径的颗粒质量大于地基土质量的 70%,且地层中不存在层状或窝状易溶盐分布时,可不计溶陷性对建筑物的影响。

(4) 根据干重度及含盐量判别

我国部分研究人员根据现场盐渍土试验并参考原苏联对盐渍土的有关规定,提出了按含盐量 C 和洗盐后土的干重度 γ_d 来判断盐渍土是否具有溶陷性的方法^[6],见图 1。

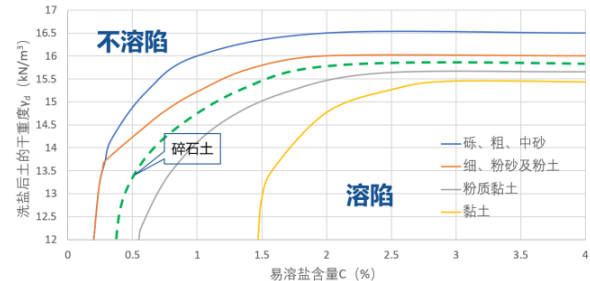


图 1 盐渍土溶陷性与含盐量及干重度的关系曲线

洗盐后土的干重度 γ_d 可通过试验取值,也可按下式计算获得:

$$\gamma_d = \frac{\gamma'_d}{1+C} \quad (1)$$

式中: γ'_d 为未洗盐原状土的干重度。

根据图 1,当盐渍土的含盐量一定时,洗盐后土的干重度超过图中曲线相应数值时,可判断为不具溶陷性,反之,则初步判断具有溶陷性。值得注意的是,碎石土的溶陷性受充填物控制,一般介于砂土与黏性土之间。当碎石土充填的砂土质量不低于总质量的 40%时按砂土曲线,当充填的黏性土质量不低于总质量的 30%时按黏性土曲线。

3.2 判别溶陷程度

采用前文对粗颗粒盐渍土溶陷性的初步判别方法,可以判断盐渍土是否具有溶陷性。对具有溶陷性的盐渍土,还需要进一步判别其溶陷程度。

梁浩等^[7]在室内人工配制了不同级配类型和不同含盐量的粗颗粒盐渍土,按照粗细颗粒比 A/B 进行级配分类, A 为粒径 $d > 5 \text{ mm}$ 的含量百分比, B 为粒径 $0.25 \text{ mm} < d \leq 5 \text{ mm}$ 的含量百分比。所配制的五种粗颗粒盐渍土中,级配一为良砾 (GW),粗细颗粒比为 4;级配二为不良砾 (GP),粗细颗粒比为 2.33;级配三为良砂 (SW),粗细颗粒比为 1;

级配四为良砂 (SW), 粗细颗粒比为 0.429; 级配五为不良砂 (SP), 粗细颗粒比为 0.25。通过开展级配和含盐量双重因素作用下的溶陷试验, 总结了溶陷系数与颗粒级配及含盐量的经验关系。

当含盐量 C 介于 $0.1\% \sim 1\%$ 时, 不同级配粗颗粒盐渍土的溶陷系数 δ_{rx} 由下列方程组控制:

级配一 $\delta_{rx} = -4669.8 C^3 + 86.865 C^2 + 1.0703 C - 0.001$

级配二 $\delta_{rx} = -10128 C^3 + 128.85 C^2 + 1.3565 C - 0.0013$

级配三 $\delta_{rx} = -8162.4 C^3 + 96.702 C^2 + 1.5612 C - 0.0014$

级配四 $\delta_{rx} = -11250 C^3 + 116.36 C^2 + 1.8366 C - 0.0017$

级配五 $\delta_{rx} = -5658.5 C^3 + 36.591 C^2 + 2.2344 C - 0.0019$

当含盐量 X 大于 1% 时, 不同级配粗颗粒盐渍土的溶陷系数 δ_{rx} 可通过下列方程组计算获得:

级配一 $\delta_{rx} = 361.97C^3 - 40.436C^2 + 2.0576C - 0.003$

级配二 $\delta_{rx} = 362.66C^3 - 38.553C^2 + 2.0065C - 0.0017$

级配三 $\delta_{rx} = 367.65C^3 - 37.439C^2 + 1.9474C - 0.0004$

级配四 $\delta_{rx} = 361.18C^3 - 37.026C^2 + 2.0947C - 0.0009$

级配五 $\delta_{rx} = 319.93C^3 - 38.52C^2 + 2.3151C - 0.0013$

上述计算公式可用图 2 中的曲线族表达。分析图 2 可以看出, 当含盐量 C 小于 0.5% 时, 溶陷系数 δ_{rx} 一般小于 0.01 , 不溶陷; 当含盐量 C 为 $0.8\% \sim 1.8\%$ 时, 溶陷系数 δ_{rx} 一般介于 0.01 与 0.03 之间, 溶陷性轻微; 当含盐量 C 为 $2.6\% \sim 4.0\%$ 时, 溶陷系数 δ_{rx} 一般介于 0.03 与 0.05 之间, 溶陷性中等; 当含盐量 C 大于 5.7% 时, 溶陷系数 δ_{rx} 一般大于 0.05 , 溶陷性强; 当含盐量 C 介于 $0.5\% \sim 0.8\%$ 、 $1.8\% \sim 2.6\%$ 、 $4.0\% \sim 5.7\%$ 时, 可按偏不利原则进行溶陷性初判。

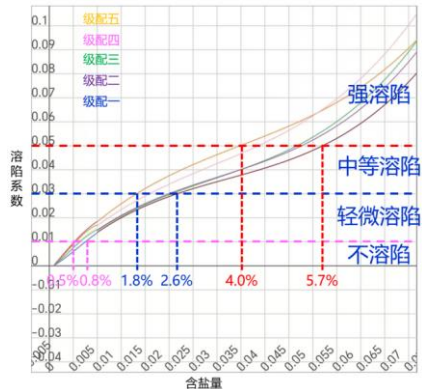


图 2 不同级配粗颗粒盐渍土含盐量与溶陷系数的关系

综上所述, 粗颗粒盐渍土的粗细颗粒比 A/B 介于 $0.25 \sim 4.0$ 之间时, 工程实践中可依据含盐量按表 1 初步判断粗颗粒盐渍土的溶陷程度。

表 1 粗颗粒盐渍土的溶陷性分类

溶陷程度	非溶陷性	轻微溶陷性	中等溶陷性	强溶陷性
含盐量 C (%)	$C < 0.5$	$0.5 \leq C < 1.8$	$1.8 \leq C < 4.0$	$C \geq 4.0$

前文列出了不同粗细颗粒比 A/B 条件下, 粗颗粒盐渍土溶陷系数 δ_{rx} 与含盐量 C 的经验关系。由于公式众多,

且实际工程中土层的粗细颗粒比与公式的适用条件往往不一致, 使用该组公式估算溶陷系数多有不便。本次研究采用非线性曲面拟合法对上述方程组进行拟合, 得到溶陷系数 δ_{rx} 的简化计算公式如下式 (2):

$$\delta_{rx} = 0.067 \tan(12 \cdot C - 0.012) \cdot X^{-0.1} + 0.008 \quad (2)$$

式中: X 为粗细颗粒比 A/B ($0.25 \leq X \leq 4.0$), 其他符号含义同前文。

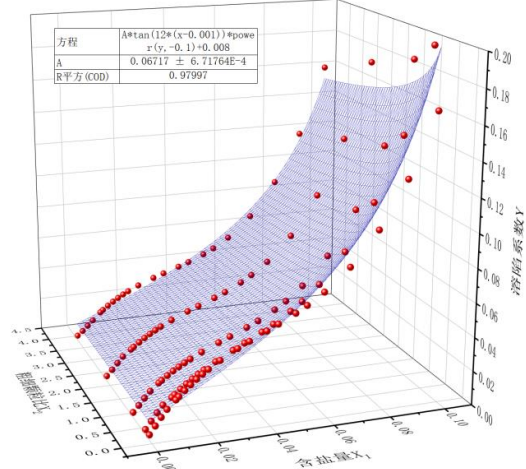


图 3 溶陷系数与含盐量、粗细颗粒比在三维空间的关系

4 粗颗粒盐渍土溶陷性判别案例分析

4.1 粗颗粒盐渍土地基浸水载荷试验

甘肃瓜州某 330kV 升压站位于甘肃省瓜州县西湖镇东部, 站址位于山前冲洪积平原戈壁荒滩地貌单元, 地势平坦, 整体北高南低, 站址海拔高程 $1250 \sim 1260\text{m}$ 。站址地基土主要由第四系更新统冲洪积松散堆积物组成, 自上而下依次为: ①层松散~稍密状砾砂、②层中密~密实状角砾。土壤易溶盐试验结果表明, 场地浅部土层属于粗颗粒盐渍土, 按盐化学成分可划为亚硫酸盐渍土、硫酸盐渍土, 按含盐量可划为中盐渍土。各土层颗粒级配指标见表 2。

表 2 土层颗粒级配数据

土层	名称	①砾砂	②角砾
颗分组成 (mm)	>60	/	17.7
	$60 \sim 40$	/	10.332
	$40 \sim 20$	6.329	5.82
	$20 \sim 10$	8.156	7.687
	$10 \sim 5$	12.388	14.335
	$5 \sim 2$	17.318	16.355
	$2 \sim 0.5$	23.059	16.103
	$0.5 \sim 0.25$	18.953	6.155
	$0.25 \sim 0.075$	11.297	4.648
	<0.075	2.5	0.865
不均匀系数	C_u	13.841	32.17
曲率系数	C_c	0.894	1.532

为了准确判定该站址地基土溶陷性,在场地内布置了3处浸水载荷试验,采用直径为0.8m的圆形承压板,试坑直径2.5m、深1.2m。各试验点含盐量随深度的变化规律如图4所示。

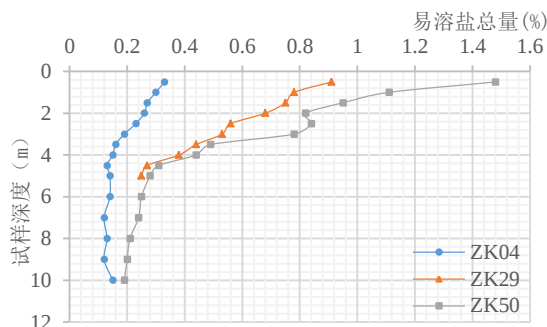


图4 浸水载荷试验点含盐量变化曲线

浸水载荷试验结果显示,本地地3个试验点总溶陷量为20.54~26.27mm,浸润深度2.98~3.29m,试验点溶陷系数0.0069~0.0082。根据试验结果,可判断场地内粗颗粒盐渍土不具有溶陷性。

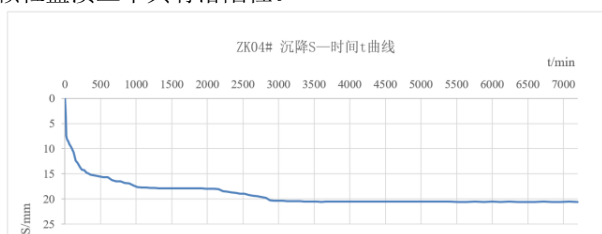


图5 升压站站址浸水载荷试验典型曲线

4.2 浸水试验法与简便方法的对比验证

升压站站址3处浸水载荷试验均针对②层角砾进行。颗粒级配试验成果表明,该层角砾中大于2mm的粒组含量为72.2%,且不存在层状或窝状易溶盐,依据骨架颗粒含量可初判不溶陷。

另根据前文公式(2)估算,可得各浸水载荷试验点溶陷系数为0.0089~0.0117,判断各试验点盐渍土不溶陷~弱溶陷,溶陷性评价结论相对浸水载荷试验法基本相符且略偏保守。

若直接采用溶陷系数与颗粒级配及含盐量的经验关系方程组计算,地基土含盐量均小于1%,粗细颗粒比介于级配二和级配三之间,计算可得各浸水载荷试验点溶陷系数在0.0020~0.0085之间(见表3),均小于0.01,据此可判断各试验点盐渍土不溶陷,溶陷性评价结论与浸水

载荷试验法一致。

表3 浸水载荷试验法与经验公式法判断溶陷性对比

试验点	平均含盐量	实测溶陷系数	根据实测值评价	估算溶陷系数	根据估算值评价
Z04	0.209%	0.0069	不具有溶陷性	0.0020	不具有溶陷性
Z29	0.555%	0.0080	不具有溶陷性	0.0085	不具有溶陷性
Z50	0.573%	0.0082	不具有溶陷性	0.0085	不具有溶陷性

由此可见,采用本文推荐的溶陷性简便判别方法与浸水载荷试验判定结论符合性较好。

5 结语

本文在分析盐渍土溶陷性产生机理及影响因素的基础上,推荐了粗颗粒盐渍土溶陷性的一套简便判别方法。该套方法可根据含水状态、地层结构、骨架颗粒含量、干重度与含盐量初判盐渍土是否溶陷,并可根据颗粒级配和含盐量估算溶陷系数从而判别溶陷程度,判别结论通过了实际工程现场浸水载荷试验的验证。

本文总结的粗颗粒盐渍土溶陷性简便判别方法简单有效、成本低廉,判别精度能够满足一部分工程的建设要求,具有一定的推广和应用价值。

[参考文献]

- [1]中国电机工程学会.T/CSEE 0256-2021 粗颗粒盐渍土区岩土工程勘测技术规程[S].北京:中国电力出版社,2021.
- [2]刘亚峰,文桃,米海珍,等.河西风电场粗颗粒盐渍土地基病害与防治探讨[J].兰州交通大学学报,2014,33(6):98-104.
- [3]程东幸,刘志伟,柯学.粗颗粒盐渍土溶陷性影响因素研究[J].工程地质学报,2013,21(1):109-114.
- [4]孙安元.粗颗粒硫酸盐渍土盐胀及溶陷特性试验研究[D].兰州:兰州交通大学,2018.
- [5]徐攸在.盐渍土地基[M].北京:中国建筑工业出版社,1993.
- [6]徐攸在.确定盐渍土溶陷性的简便方法[J].工程勘察,1997(1):21-22.
- [7]梁浩.粗颗粒硫酸盐渍土溶陷特性试验及其影响因素研究[D].兰州:兰州交通大学,2019.

作者简介:胡义生(1983.1—),男,毕业院校:中国矿业大学硕士,所学专业:地质工程,目前就职单位:上海电力设计院有限公司勘察工程院,职务及年限:勘测专总3年,目前职称:高级工程师。