

DOI:10.12170/20191008001

戴元志, 冯中华, 范成文. 水泥固化锌污染土压缩特性影响因素分析 [J]. 水利水运工程学报, 2020(6): 89-93. (DAI Yuanzhi, FENG Zhonghua, FAN Chengwen. Analysis of the influence factors on the compressive properties of cement solidified zinc contaminated soils[J]. Hydro-Science and Engineering, 2020(6): 89-93. (in Chinese))

水泥固化锌污染土压缩特性影响因素分析

戴元志¹, 冯中华², 范成文³

(1. 江苏河海工程技术有限公司, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 3. 建华建材科技(淮安)有限公司, 江苏 淮安 223200)

摘要: 基于固结试验, 研究了不同养护温度、锌离子质量分数及水泥掺量条件下水泥固化锌污染土的压缩特性, 推导出能够综合反映三者对压缩系数影响规律的经验式。结果表明: 基于该经验公式, 根据某一已知条件(即上述 3 个变量值)对应的固化体或者素土的压缩系数值可以较好地预测其他条件下的固化体压缩系数。此外, 锌离子质量分数一定时, 固化体压缩系数随水泥掺量的增大呈指数性减小。水泥掺量一定时, 压缩系数随锌离子质量分数的增大而增大。压缩系数随养护温度的提高而减小, 固化体压缩系数比值与养护温度之间呈现较好的对数函数关系。

关键词: 锌污染土; 压缩系数; 离子质量分数; 水泥掺量; 养护温度

中图分类号: TU432

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2020)06-0089-05

随着工业水平的飞速发展, 土体的重金属污染与水体污染、大气污染以及固体废弃物污染一样变得越发严重。受到污染的土体会使地下结构被重金属离子间接侵蚀, 严重影响地下结构的使用寿命、结构安全及耐久性^[1]。经研究发现: 多种废弃物与水泥材料的相容性良好, 水泥能够与大部分液相废弃物发生化学反应, 所产生的水泥固化体渗透性低、力学特性及结构较好, 能有效避免污染物扩散^[2-3]。目前, 针对水泥固化污染土的工程特性已经开展了许多研究, 国外相关学者^[4]通过人工制备的酸碱污染土, 研究了土体在不同浓度酸碱污染前后的压缩性质变化, 随着污染浓度的增加, 酸碱污染土的压缩系数增大, 回弹指数也增大。杜延军等^[5]以水泥固化锌污染高岭土为研究对象, 通过无侧限抗压试验得到变形模量随锌离子质量分数增大而减小的结论。魏明俐等^[6]对水泥固化/稳定锌污染黏土的无侧限抗压强度进行试验研究, 认为锌离子质量分数对水泥固化污染黏土变形模量的影响存在“临界质量分数”。廖朱玮^[7]在研究镉污染黏土水泥固封机理的同时, 通过固结试验得到经水泥固化后的镉污染黏土压缩系数随水泥掺量的增加而逐渐降低的结论。由此可知, 目前主要从人工配备重金属污染土对水泥固化污染土压缩特性进行研究, 仅仅从定性或单一变量来分析土体性质, 未综合考虑水泥掺量、锌离子质量分数和养护温度等因素的影响规律。

本文采用人工配制的锌污染土, 通过控制不同锌离子质量分数、水泥掺量及养护温度, 以固结试验中压缩系数作为分析指标, 研究不同试验条件下水泥固化体的压缩特性, 并推导能够综合反映各因素影响规律的经验公式, 为今后实际锌污染场地的固化设计提供一定的参考。

1 试验材料与方法

研究采用取自某一施工现场的淤泥质土样。室内试验采用环刀法测得其湿密度为 1.69 g/cm^3 , 天然含水率为 55.6%。试验把氯化锌作为锌污染源, 其锌离子质量为干土质量的 1.00%、0.20% 和 0.04%。氯化锌

收稿日期: 2019-10-08

作者简介: 戴元志(1965—), 男, 湖南常德人, 高级工程师, 主要从事环境岩土等方向研究。E-mail: dysz3003@163.com

极易溶于水,是一种粉末状或白色粒状的晶体,在空气中潮解性较强,需密封避光保存。由于氯化锌具有毒性,在整个制样过程中需佩戴手套。本实验采用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥,掺量为干土质量的 7.5%、5.0% 和 2.5%。养护温度选用 5、20 和 35 ℃。

制样时,将湿土切成薄片状,然后在干燥箱中烘干 24 h,取出试样并用粉碎机粉碎后过孔径为 1 mm 的筛。试样设计含水量为 50%,据此配制氯化锌溶液,分别配制 3 组不同锌离子质量分数的溶液。充分搅拌干土和水泥,配制 3 组不同水泥掺量的水泥土。把水泥土和溶液混合并进行充分搅拌,再制备固结试样和环刀试样,经标准养护 28 d 后,进行室内固结试验并测定不同试样的压缩系数。试验方案见表 1。

2 水泥固化锌污染土压缩特性

2.1 水泥固化体的压缩系数

图 1 给出了在养护温度为 20 ℃ 时各水泥固化体试样的压缩系数。由图 1 可见:在锌离子质量分数一定的条件下,水泥固化体的压缩系数随着水泥掺量的增大而减小,且减小速率随水泥掺量的提高而降低。水泥掺量不变时,随着锌离子质量分数的增加,水泥固化体的压缩系数随之增大,且水泥掺量较高时的增大幅度更为显著。这主要是由于水泥水化反应受到了锌离子的阻碍,发生反应后生成一些难溶解的盐及沉淀物,阻碍了水泥的水化反应,甚至降低了对土样的固化效果^[8]。此外,当锌离子质量分数达到 1.00% 时,随着水泥掺量的增加,水泥固化体压缩系数的降低幅度明显小于锌离子质量分数为 0.04% 和 0.20% 的情况,此时水泥的水化过程可能因为锌离子质量分数过高而受到抑制,导致无法有效改善污染土的高压缩性。

2.2 锌离子质量分数和水泥掺量对压缩系数的影响

为了研究锌离子质量分数和水泥掺量对水泥固化体压缩系数的影响规律,图 1 也给出了试验值的拟合结果。水泥掺量对固化体压缩系数的影响规律较好地符合如下的指数函数:

$$a_v = A \exp(Bx)$$

(1)

式中: a_v 为水泥固化锌污染土的压缩系数(MPa^{-1}); x 为水泥掺量(%); A 和 B 为影响参数。当水泥掺量不变时,锌离子质量分数越大,对水泥水化阻碍影响越明显,固化体压缩系数越大,随之 A 值减小、 B 值增大。由此可知,锌离子质量分数能够影响 A 和 B 的值,故 A 和 B 非定值。

由于水泥固化锌污染土体的压缩特性受未污染土体原始压缩特性的影响,针对上式固化体压缩系数的变化规律函数,其影响参数 A 应当包含土体原始压缩系数 a_{v0} (无污染素土压缩系数) 的影响,且当水泥掺量

表 1 试验方案
Tab. 1 Testing programs

试验分组	锌离子质量分数/%	水泥掺量/%	养护温度/℃	备注
N ₀	0	0	20	无污染对照组
N ₁₁	0.04	2.5	20	5组试样
N _{12-t}	0.04	5.0	5, 20, 35	
N ₁₃	0.04	7.5	20	
N ₂₁	0.20	2.5	20	
N _{22-t}	0.20	5.0	5, 20, 35	5组试样
N ₂₃	0.20	7.5	20	
N ₃₁	1.00	2.5	20	5组试样
N _{32-t}	1.00	5.0	5, 20, 35	
N ₃₃	1.00	7.5	20	

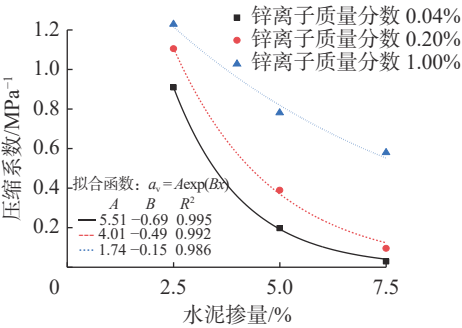


图 1 养护温度为 20 ℃ 时水泥固化体的压缩系数及拟合
Fig. 1 Compression coefficient and fittings of zinc contaminated soil at curing temperature of 20 ℃

和锌离子质量分数均为零时, 固化体压缩系数等于土体原始压缩系数 a_{v0} 。为了满足上述要求, 令 $A=(1+C)a_{v0}$, 参数 C 与锌离子质量分数有关。

锌离子质量分数 α 与参数 C 的关系如图 2 所示。在本试验中, 无污染对照试样(试验分组 N_0)的压缩系数 a_{v0} 为 1.25 MPa^{-1} 。可见, 参数 C 值随着锌离子质量分数的增大而增大, 采用图中指数函数能够较好地描述二者之间的关系。综上分析, 锌离子质量分数对参数 A 的影响可用下式表示:

$$A = (1 + 3.60\exp(-2.22\alpha))a_{v0} \tag{2}$$

式中: α 为锌离子质量分数(%); a_{v0} 为无污染素土的压缩系数(MPa^{-1})。

锌离子质量分数 α 与参数 B 的关系如图 2 所示。可见随着锌离子质量分数的增大, 参数 B 值随之减小。这两者的关系曲线图可用下列函数来表示:

$$B = -0.71\exp(-1.56\alpha) \tag{3}$$

将式(2)和(3)代入式(1), 可以得到在养护温度 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 、龄期 28 d 情况下, 水泥掺量 x 、锌离子质量分数 α 与水泥固化锌污染土体压缩系数的关系:

$$a_v = (1 + 3.60\exp(-2.22\alpha))a_{v0}\exp(-0.71\exp(-1.56\alpha) \cdot x) \tag{4}$$

图 3 给出了养护温度 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时水泥固化体各试样的压缩系数预测值与试验值对比情况。由图 3 可见: 在不考虑养护温度情况下, 试验得到的压缩系数值与采用式(4)的预测值基本吻合, 二者误差很小。值得注意的是, 针对无污染对照组试样, 压缩系数预测值为 5.7 MPa^{-1} , 与实际试验值 1.25 MPa^{-1} 的差异较大。可见, 本文预测公式具有一定的局限性, 对于锌离子质量分数 $0\sim 0.04\%$ 的水泥固化锌污染土, 预测值的误差可能会偏大。

2.3 养护温度对压缩系数的影响

养护温度对水泥固化效果的发挥有着重要的影响, 不同养护条件下固化体力学特性的改善程度及速率是不同的。在一般情况下, 固化体养护温度越高, 水泥水化反应越剧烈, 其力学特性改善的幅度也越大。为了研究养护温度对固化体变形特性的影响规律, 对试验分组 N_{12} 、 N_{22} 和 N_{32} 进行分析。表 2 列出了不同养护温度条件下各组试样的压缩系数试验结果。

由表 2 可知, 当水泥掺量和锌离子质量分数不变时, 随着养护温度的升高, 水泥固化体的压缩系数值会降低, 表明高养护温度能够促进水泥固化法有效改善锌污染土的压缩性。以养护温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时的压缩系数 a_{v20} 作为标准值, 不同养护温度 t 条件下固化体的压缩系数与该标准值的比值定义为 a_{vt}/a_{v20} 。

图 4 描述了 a_{vt}/a_{v20} 与养护温度之间的关系。可见, 水泥掺量和养护温度相同、锌离子质量分数不同时对应的压缩系数比值基本接近, 表明锌离子质量分数对该定义值的影响不大。

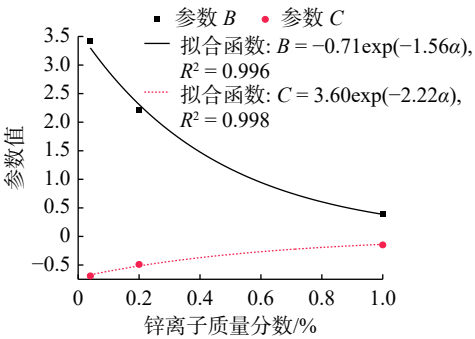


图 2 参数 B、C 与锌离子质量分数的关系

Fig. 2 Relationship between parameters B and C and zinc ion concentration

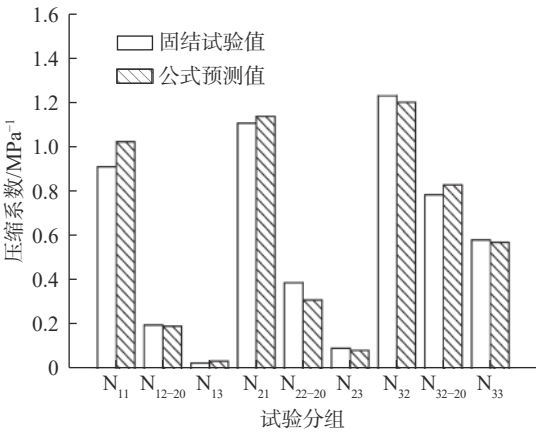


图 3 水泥固化体压缩系数的试验值与预测值

Fig. 3 Testing results and predicted results of compression coefficient

表 2 不同养护温度条件下的压缩系数

Tab. 2 Testing results of compression coefficient at different curing temperatures

试验分组	锌离子质量分数/%	水泥掺量/%	养护温度/℃	压缩系数/MPa ⁻¹	a_{vt}/a_{v20}
N ₁₂	0.04	5.0	5	0.31	1.55
	0.04	5.0	20	0.20	1.00
	0.04	5.0	35	0.15	0.74
N ₂₂	0.20	5.0	5	0.57	1.46
	0.20	5.0	20	0.39	1.00
	0.20	5.0	35	0.26	0.67
N ₃₂	1.00	5.0	5	1.16	1.49
	1.00	5.0	20	0.78	1.00
	1.00	5.0	35	0.55	0.71

由图 4 还可以看出,该压缩系数比值随着养护温度的增大而逐渐减小,且二者之间满足式(5)所示的对数函数关系:

$$a_{vt}/a_{v20} = -0.40\ln t + 2.15 \tag{5}$$

结合式(4)和(5),可得不同水泥掺量、锌离子质量分数和养护温度条件下水泥固化锌污染土压缩系数的变化规律:

$$a_{vt} = (-0.40\ln t + 2.15)(1 + 3.60\exp(-2.22\alpha))a_{v0} \times \exp(-0.71\exp(-1.56\alpha) \cdot x) \tag{6}$$

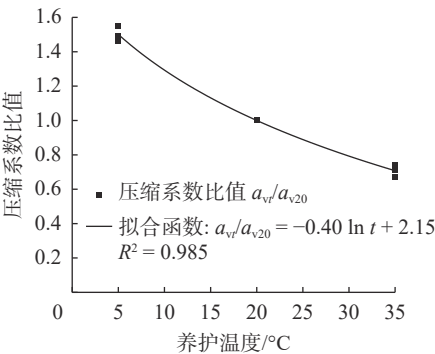


图 4 压缩系数比值与养护温度的关系

Fig. 4 Relationship between compression coefficient ratio and curing temperature

3 结 语

(1)当锌离子质量分数一定时,水泥固化锌污染土的压缩系数随着水泥掺量的增大呈指数性减小。在高锌离子质量分数情况下,继续增加水泥掺量对污染土压缩特性的改善程度变低。当水泥掺量不变时,随着锌离子质量分数的增加,水泥固化锌污染土的压缩系数将增大,且水泥掺量较高时的增幅更为显著。

(2)水泥固化锌污染土的压缩系数随着养护温度的升高而减小。以养护温度为 20 ℃ 的压缩系数 a_{v20} 为标准,不同养护温度 t 时的固化体压缩系数比值 a_{vt}/a_{v20} 与养护温度之间呈现较好的对数函数关系,但锌离子质量分数对该比值影响不大。

本文对人工配制试样进行了初步室内试验研究,研究成果存在一定的局限性,经验公式的合理性和实用性需进一步验证。

参 考 文 献:

[1] 张帆,蒋宁俊. 土壤重金属污染的工程危害及修复方法[J]. 环境监测管理与技术, 2010, 22(4): 58-60. (ZHANG Fan, JIANG Ningjun. Review of hazards induced by soil contamination of heavy metals and remediation techniques[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2010, 22(4): 58-60. (in Chinese))

[2] CONNER J R. Chemical fixation and solidification of hazardous wastes[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990.

- [3] 解仁,蔡超. 浅谈工业废弃物在宁夏水泥行业的资源化研究[J]. 应用化工, 2013, 42(11): 2082-2083. (XIE Ren, CAI Chao. Research of industrial waste comprehensive utilization in Ningxia's cement industry[J]. Applied Chemical Industry, 2013, 42(11): 2082-2083. (in Chinese))
- [4] VOGLAR G E, LEŠTAN D. Solidification/stabilisation of metals contaminated industrial soil from former Zn smelter in Celje, Slovenia, using cement as a hydraulic binder[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 178(1/3): 926-933.
- [5] 杜延军, 蒋宁俊, 王乐, 等. 水泥固化锌污染高岭土强度及微观特性研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(11): 2114-2120. (DU Yanjun, JIANG Ningjun, WANG Le, et al. Strength and microstructure characteristics of cement-based solidified/stabilized zinc-contaminated kaolin[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(11): 2114-2120. (in Chinese))
- [6] 魏明俐, 杜延军, 张帆. 水泥固化/稳定锌污染土的强度和变形特性试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊2): 306-312. (WEI Mingli, DU Yanjun, ZHANG Fan. Fundamental properties of strength and deformation of cement solidified/stabilized zinc contaminated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Suppl2): 306-312. (in Chinese))
- [7] 廖朱玮. 镉污染黏土水泥固封机理及变形规律[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2014. (LIAO Zhuwei. Seal mechanism and deformation law of compacted clay polluted by Cd[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2014. (in Chinese))
- [8] 夏磊. 重金属污染土的工程性质试验研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014. (XIA Lei. Engineering properties of heavy metal contaminated soil[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2014. (in Chinese))

Analysis of the influence factors on the compressive properties of cement solidified zinc contaminated soils

DAI Yuanzhi¹, FENG Zhonghua², FAN Chengwen³

(1. Hohai Engineering Technology Co., Ltd., Nanjing 210098, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Jianhua Construction Materials Technology (Huai'an) Co., Ltd., Huai'an 223200, China)

Abstract: Consolidation tests were carried out to investigate the effects of cement content, zinc ion concentration and curing temperature on the compression coefficient of cement solidified zinc contaminated (CSZC) soil. A regression formula was derived to correlate the compression coefficient of CSZC soil with the above-mentioned three parameters. The results indicate that the regression formula is able to reasonably predict the compression coefficient of CSZC soil provided that the compression coefficient of CSZC soil under a given combination of cement content, zinc ion concentration and curing temperature is known or the compression coefficient of the soil without contamination is known. In addition, the compression coefficient exponentially decreases with increasing cement content for a given zinc ion concentration, and increases with increasing zinc ion concentration for a given cement content. Moreover, the compression coefficient decreases with increasing curing temperature. The ratio of compression coefficient at different temperatures to that at 20 °C satisfies the logarithm relationship of temperature.

Key words: zinc contaminated soil; compression coefficient; ion concentration; cement content; curing temperature