

孔隙水酸污染诱发击实黄土的崩解试验研究

刘 华^{1,2}, 谷宏全¹, 胡鹏飞¹, 胡文乐¹, 牛泽林^{1,2}

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘要:以铜川重塑黄土为研究对象进行崩解室内试验,对硝酸污染后的击实黄土崩解特性进行分析研究。在制备不同干密度、含水率和硝酸浓度等击实试样后,探讨不同工况下的黄土崩解演变规律及其结果和影响。结果表明:干密度一定时,崩解速率随含水率呈现先增加后减小的趋势,当试样含水率在 16% 时崩解速率可达到最大值,当含水率在 20% 时崩解性基本消失;当含水率一定时,崩解速率随干密度的增加而减小;硝酸污染试样的干密度与含水率对崩解速率的影响与未污染试样崩解速率规律基本一致,且随着酸浓度的增加崩解速率增加。同时,基于试验结果分别建立了干密度、含水率和硝酸浓度与崩解速率的函数关系,并进一步探讨各因素间的相关性。研究结果可为黄土地区环境岩土工程问题及工程地质防灾减灾设计和抢险救灾提供数据支撑和理论依据。

关键词: 重塑黄土; 酸污染; 崩解特性; 环境岩土工程

中图分类号: TU411.91

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)02-0178-08

Experimental study on disintegration characteristics of compacted loess induced by acid pollution of pore water

LIU Hua^{1,2}, GU Hongquan¹, HU Pengfei¹, HU Wenle¹, NIU Zelin^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering, Xi'an 710055, China)

Abstract: A laboratory test on the remolded loess from Tongchuan adopts self-assembled loess disintegration tester to study the disintegration characteristics of nitro-polluted loess, and makes samples from the loess with different dry density, moisture content and nitric acid concentration for laboratory tests to explore the disintegration evolution law of loess under different conditions. The corresponding disintegration curve was drawn according to the data of laboratory disintegration test. The results showed that when the dry density was fixed, the disintegration velocity first increased and then decreased along with the moisture content. When the moisture content of sample was 16%, the disintegration velocity reached its maximum value, and when the moisture content reached 20%, the disintegration ability basically disappeared. When the moisture content is constant, the disintegration velocity decreases with the increase of dry density. The effects of dry density and moisture content on disintegration velocity are consistent with that of uncontaminated samples. The disintegration velocity increases as the acid concentration increases. At the same time, the functional relationship between dry density, water content and disintegration velocity and concentration of nitric acid and disintegration velocity were established respectively, and the correlation among various factors was further discussed, which provided the basis for the design of geotechnical problems and geological disaster prevention in acid-polluted loess area.

Key words: remolded loess; acid pollution; disintegration characteristic; environmental geomechanics;

黄土在世界各地分布广泛,其中在我国西北地区的黄土高原分布连续、完整,其特征极为典型,分布面积约为 $63 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占我国陆地总面积的 6.6%^[1]。近年来由于工业、农业、建筑等行业快速发展,使得环境问题日益突出,导致我国酸雨状况日趋严重,我国已成为了中-强酸雨区域面积最大的酸雨区之一,对酸污染土课题的研究

有着实际意义^[2]。

土体的崩解是常见的地质现象之一,土工上是指土体浸水后发生土体碎裂、解体、崩落或强度折减的现象^[3]。近年来,由于岩土体等崩解所引发的工程地质事故屡见不鲜,国内外学者逐渐重视岩土体崩解特性相关研究工作。Lyles 等^[4]在室内模拟降雨条件下,研究了降水强度、持续时间

和风速等对崩解的影响. Graber 等^[5]通过石膏材料、合成有机聚合物和富含有机物的废弃物等材料对土壤进行改良, 改善了土壤结构的稳定性. Geobel 等^[6]从表面张力和接触角等方面研究了土壤润湿特性对部分土壤有机质的稳定性的影响. 李家春等^[7]利用改进型浮筒崩解测试装置对重塑黄土进行室内崩解试验, 得出试样含水率和压实度对崩解速度的影响, 崩解速度随着含水率、压实度的增加而减少, 含水率和压实度达到一定限值时崩解速度很小, 甚至崩解性消失. 袁亮等^[8]对取自不同地区的黄土进行比较, 得出黄土的黏粒含量和矿物成分是影响黄土崩解的重要因素, 不同粒度组成和含水率条件下对其崩解的影响. 谷天峰等^[9]通过对黑方台黄土进行崩解试验, 得出托盘孔径、试样尺寸、初始含水率、水温、pH 值、水中盐度等因素对崩解速度的影响关系. 李喜安等^[10]进行室内和原位崩解试验, 将崩解形式归纳为崩离、迸离和解离三种形式. 黄土发生崩解的物质基础是黏土矿物, 发生的条件为胶结力遇水变弱, 黄土颗粒或块体所受的崩解合力大于其胶结力. 曾庆建等^[11]通过对照试样进行吸水试验, 提出了利用自制设备进行试验的经过修正的崩解量计算公式. 王菁莪等^[12]通过对非饱和和重塑黄土的崩解速率和基质吸力进行试验测算, 最终得出基质吸力越大崩解速率越快, 并给出初始基质吸力与崩解速率的函数关系. 张抒等^[13]对非饱和和花岗岩残积土的崩解机制进行研究, 通过对不同含水率的试样进行崩解试验, 从基质吸力、表面张力和孔隙气压等方面对崩解机理进行分析, 得出平均崩解速率随着有效孔隙率和基质吸力的增加而增加; 金旭等^[14]针对酸污染的花岗岩残积土进行崩解研究, 得出酸浓度、浸泡时间等因素与崩解速率的关系.

目前, 土体崩解主要集中对天然原状土和重塑土的研究, 而对污染重塑黄土的崩解研究较少. 本文通过自行装配的崩解试验装置, 对未污染黄土和硝酸污染黄土进行室内崩解试验, 对含水率、干密度、酸浓度等影响因素对崩解的影响进行了分析比较, 找到含水率、干密度和酸浓度等与崩解速率的变化规律, 以期对酸污染黄土场地的评价和设计施工提供有益的参考.

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验用土取自陕西省铜川市区某施工现场的

Q₃ 黄土, 取土深度 2.0~3.0 m. 基本物理指标见表 1. 颗粒分析曲线见图 1, 不均匀系数 $C_u>5$, 曲率系数 $C_c\in(1, 3)$, 本次土样属于级配良好的黄土状粉质黏土.

表 1 土样的基本物理性质指标
Tab. 1 Physical properties of soil samples

土粒比重 /g · cm ⁻³	液限/%	塑限/%	最大干密度 /g · cm ⁻³	最优含水 率/%
2.67	35.4	21.4	1.78	16.8

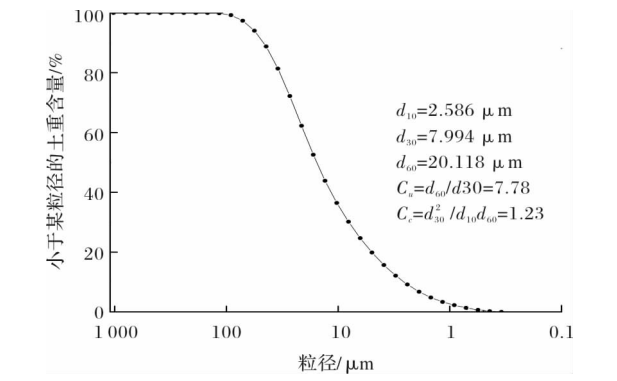


图 1 颗粒分析曲线

Fig. 1 Curve of particle size analysis

依据有关部门针对降雨与环保的监测和统计数据, 我国的酸雨类型有从硫酸型向硫酸-硝酸型转变趋势, 本次试验选用硝酸配置溶质质量浓度为 1%、4%、8%、12% 四种污染液进行试验.

1.2 试验装置与原理

1.2.1 试验装置

《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019) 中崩解试验以及蒋定生等^[3]学者使用浮筒式崩解仪进行了试验. 鉴于黄土在水中崩解时间较短, 利用该装置很难准确计量试样某一时刻的崩解量, 特别对总崩解时间较短的试验误差较大. 因此专家学者通过改进浮筒式崩解仪或自制崩解装置进行崩解试验, 均取得较理想结果^[8, 10-11, 15]. 本试验通过自制装置(图 2)进行试验, 主要由支架、盛水容器、吊篮、拉力计、数据采集器等组成. 盛水容器断面尺寸稍大于吊篮平面尺寸, 吊篮用铁丝拼接绑扎制作成 10 cm×10 cm 边长的正方形网片, 网眼尺寸 10 mm×10 mm, 崩解时用以放置试验土样. 拉力计使用 HP-20 系列推拉力计, 最大负荷 2 Kg, 分度值 0.1 g, 误差±0.5%, 采样时间间隔 0.1 s. 该套装置与传统浮筒式崩解仪相比较的优点: 可直接读出未崩解试样的浮重, 装置的读数精度和频率较高.

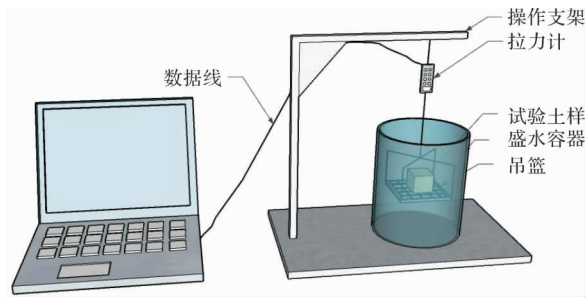


图 2 崩解试验装置

Fig. 2 Apparatus of disintegration test

1.2.2 试验基本原理和计算方法

试验装置通过数据采集记录的是试样在水中的浮重量,崩解率、崩解速度等指标需要对其进行换算.记录数据前将吊篮单独放在水中时将拉力计读数归零,拉力计读数为试样在吊篮上未崩解土体的浸水浮重.

以吊篮上未崩解饱和试样为分析对象列出静力平衡方程:

$$\rho_{\text{sat}} g V_{\text{未崩}} = F_N + \rho_w g V_{\text{未崩}} \quad (1)$$

$$\text{由此可导出: } V_{\text{未崩}} = \frac{F_N}{g(\rho_{\text{sat}} - \rho_w)} = \frac{M}{\rho} \quad (2)$$

$$\text{即: } M_{\text{ND}} = \rho_{\text{sat}} V_{\text{ND}} = \rho_{\text{sat}} \times \frac{M}{\rho} = Mk \quad (3)$$

其中: $k = \frac{\rho_{\text{sat}}}{\rho}$; $V_{\text{ND}} = V_s + V_v$

式中: $M = F_N/g$, 即拉力计读数, g ; ρ_{sat} 为试样饱和密度, g/cm^3 ; M_{ND} 为未崩解土体的饱和质量, g ; V_{ND} 为未崩解土体的体积, cm^3 ; V_s 为未崩解土体中的土颗粒体积, cm^3 ; V_v 为未崩解土体中的孔隙体积, cm^3 ; k 为转换系数(无量纲).

$$\text{崩解率: } H = \frac{M_D}{M_{\text{sat}}} = \frac{M_{\text{sat}} - M_{\text{ND}}}{M_{\text{sat}}} \quad (4)$$

$$\text{平均崩解速率: } v = \frac{\Delta M}{M_{\text{sat}} \Delta t} \times 100\% \quad (5)$$

式中: M_{sat} 为试样理论饱和质量, g ; M_D 为已崩解土体的饱和质量, g .

试样放入水中初期,由于进入孔隙水分大于试样崩落土颗粒,试样浮重增加,在此段时间内的崩解量无法计量.当试样吸水量与崩解量平衡时,试样达到最大质量,通过观察此刻试样周围气泡明显减少,假定此刻试样完全饱和,式中 M_{sat} 利用计算的理论饱和质量.

1.3 试样制备与方法

1.3.1 试样制备

首先将制样备用的黄土碾碎过 2 mm 筛,筛余土颗粒晾干装袋并测其含水率,以备制样.按照试验方案配置不同含水率、干密度和污染液浓度

的土样,其中硝酸污染试样以硝酸溶液的质量与土粒质量的比值作为名义含水率进行配置.配置好后装袋密封静置养护 24 h,使土壤内水量分布均匀.将配置好含水率的土壤,根据不同干密度计算出质量分 2~3 次放入直径 100 mm、高 126 mm 的轻型击实筒内,击实到计算试样高度处,击实完毕将试样小心取出后用削土刀切成 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 的立方体试样.切土过程尽量缩短时间,减少水分流失,以保证试样含水率的准确性.

依据前人研究成果和土体基本物理特性相结合,含水率、干密度(压实度)、硝酸浓度取值见下表.

表 2 试验变量因素

Tab. 2 Experimental variable factors

变量	数值
含水率/%	8、10、12、14、16、18、20
干密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1.4、1.5、1.6、1.7
硝酸质量浓度/%	1、4、8、12

1.3.2 试验步骤

为消除试验过程中其他因素影响,除试验变量以外的其他条件尽量保持一致.记录前将吊篮单独悬挂在拉力计上放入水中,将拉力计读数清零;然后将吊篮拿出,把试样放置在吊篮中间位置,将吊篮和试样悬挂在拉力计下部,点击开始记录数据后将吊篮和试样放入水中,保证试样垂直悬挂,且吊篮不得与容器壁接触;按照一定时间间隔(10 s)记录崩解过程中试样的质量变化,并留存影像,至土样完全崩解或拉力计读数不再变化时停止记录,保存数据.

2 试验结果与分析

依据实验结果,黄土崩解曲线可以分为三个阶段(图 3 所示):OA 段为水与试样接触后开始进入试样孔隙,慢慢充满孔隙的过程,为浸水逐渐饱和阶段;AB 段试样孔隙逐渐被水充满,试样内的孔隙、裂隙等贯通联结,胶结物被溶解,试样表层土颗粒逐渐裂开、崩落,崩解率与时间基本成线性关系,为稳定崩解阶段;BC 段试样大部分已经崩解,剩余内部土体经过浸泡软化,其内摩擦角和黏聚力变小使其呈现黏流态或黏塑态留在托盘上,此时孔隙完全被水充填,内外气压相等,而后逐渐崩解直到完全崩落,为崩解的最后阶段.由于 AB 段为崩解的主要阶段且崩解较稳定,含水率和干密度较高试样的分段界限不明显,为便于统一崩解时间段,本试验以该 AB 段的平均崩解速率进行分析比较.

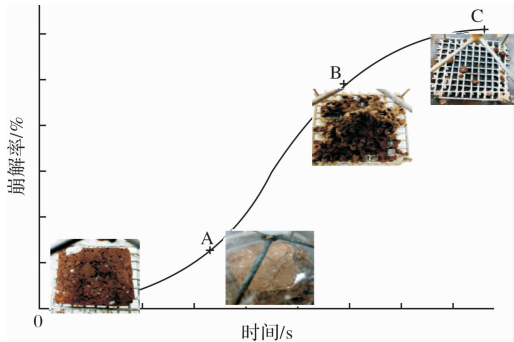


图 3 典型黄土崩解曲线

Fig. 3 Typical loess disintegration process curve

2.1 崩解体形态变化特征

试样浸水后, 周围开始产生大量气泡, 水压驱替孔隙气体逃逸, 外层及棱角处的土颗粒最先开始脱落, 试样平面缓慢出现环向裂缝, 扩展到一定宽度脱落母体发生崩落, 外形逐渐呈现出棱角形状. 而后随着试样饱和, 气泡逐步减少, 土体呈软黏流塑状, 缓慢滑落托盘, 直至崩解完毕或稳定不再崩解为止. 含水率低的试样崩解过程中气泡特点是小而密集, 而含水率高的试样则相反.

崩解过程中, 含水率相对较低的试样成散粒状崩落, 崩落粒度均匀且崩解进行稳定, 最终崩解率基本达到 100%; 随着含水率的增加, 开始有部分土体以集粒、凝块等形态崩落, 其崩落带有一定程度的随机性, 崩解率逐渐降低, 当含水率达到 20% 时崩解率基本降为零.

最终崩解率主要受含水率、干密度控制, 随着干密度和含水率增加崩解率减小; 当含水率小于 16% 时, 干密度对崩解率的影响不太显著, 基本都能达到 100%; 当含水率大于 16% 时, 干密度对崩解率的影响显著增强, 且随着干密度的增加崩解率逐渐减小.

2.2 未污染土的崩解速率变化

黄土主要由碎屑矿物(石英、长石、方解石、白云石)和黏土矿物(水云母、高岭石、蒙脱石)组成, 主要化学成分有: SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 等. 胶结物主要由易溶盐(Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 的氯盐、碳酸盐和硫酸盐)、中溶盐(CaSO_4)和难溶盐(CaCO_3)组成^[1]. 当试样遇水后, 土体胶结物中的易溶盐被水溶解, 胶结力迅速降低, 随着水的渗入, 基质吸力逐渐减小. 由于基质吸力作用, 水沿着孔隙等进入土体, 同时随着基质吸力的减小, 水分吸附在土颗粒表面形成水膜, 由于孔隙分布不均匀, 水先进入基质吸力较大的小孔隙内, 随后进入孔隙次大一级的孔隙; 在水进入土体的同时部分孔隙内空气还未来得及排出, 导致孔隙气

压增加, 在孔隙内形成局部高压的集中力. 如图 4 所示, 当斥力大于吸力时土体开始崩解.

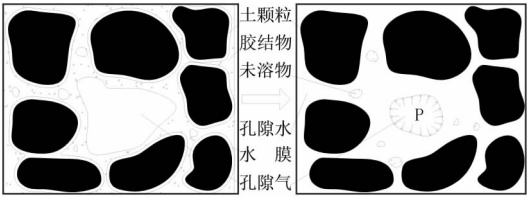


图 4 土体浸水示意图

Fig. 4 Diagram of soil submerging

通过室内崩解试验, 可分析得出未污染试样在不同干密度和含水率条件下稳定崩解阶段的平均崩解速率见表 3.

表 3 未污染土的平均崩解速率

Tab. 3 Average disintegration velocity of uncontaminated soil

含水率/%	干密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$			
	1.4	1.5	1.6	1.7
8	0.63	0.60	0.46	/
10	0.68	0.63	0.53	0.48
12	0.81	0.57	0.45	0.37
14	0.98	0.75	0.38	0.21
16	2.09	1.04	0.88	0.14
18	1.62	0.76	0.09	0.04
20	0.1	0.04	0.008	0.005

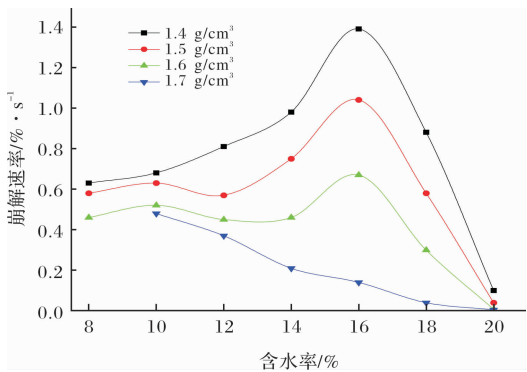


图 5 未污染试样含水率-平均崩解率曲线

Fig. 5 Moisture content-average disintegration velocity curve of uncontaminated samples

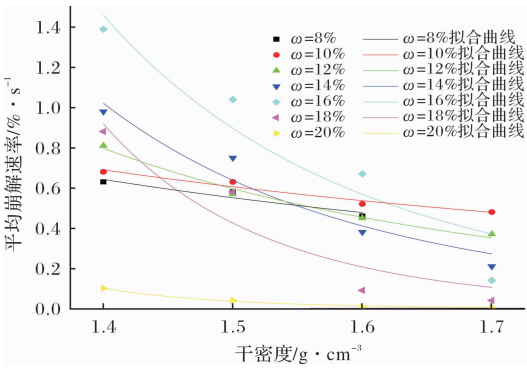


图 6 未污染试样干密度-平均崩解率曲线

Fig. 6 Dry density-average disintegration velocity curve of uncontaminated samples

图 5、图 6 为不同干密度和含水率条件下平均崩解速率的变化曲线图. 如图所示, 相同干密度条件下, 平均崩解速率随着含水率的增加总体呈现先增加后减小趋势, 当干密度达到一定值时, 平均崩解速率随含水率增加而减小; 相同含水率条件下, 平均崩解速率随着干密度的增加而减小.

随着初始含水率的增加, 土颗粒间水膜厚度增加导致吸力减小, 由基质吸力的作用, 水快速进入试样内部, 将土颗粒间可溶性胶结物溶解降低其结构吸力, 总吸力减小, 在水进入土体的同时部分孔隙内空气还未来得及排出, 当吸力小于斥力时, 土体开始崩解. 当初始含水率继续增加时, 土体中一部分孔隙被封闭, 致使孔隙连通性、渗透性降低, 部分土颗粒以集粒和凝块等形式存在, 从而崩解速率降低. 崩解速率随含水率增加呈现先增加后下降的趋势, 含水率继续增加到 20% 时, 试样基本不发生崩解.

黄土在干密度较低状态时, 土体结构松散, 多架空孔隙结构, 随着试样干密度增加, 土颗粒排列紧密孔隙被填充, 当试样压实度达到 95% 左右时, 架空孔隙基本消失, 土体微观结构形式转变为镶嵌结构, 孔隙减少, 渗透性降低, 崩解性降低^[16]. 随着干密度增加, 孔隙总体积和尺寸减小, 吸水量减小, 孔隙内由气压升高引起的集中应力减小. 当干密度达到 1.7 g/cm³ (压实度 95.5%) 时, 随着初始含水率的增加, 土的渗透性减弱使水很难进入土样内部, 崩解速率随着干密度的增加而逐渐减小. 如图 6 所示, 以干密度 ρ_d 为横坐标, 崩解速率 v 为纵坐标, 对不同条件下的崩解速率进行拟合, 满足下式:

$$v = a\rho_d^b \tag{6}$$

式中, a 、 b 为拟合参数, 不同含水率条件下的 a 、 b 值列于表 4.

表 4 不同含水率时 a 、 b 数值

Tab. 4 Values of parameters a and b at different moisture content

含水率/%	a	b	R^2
8	1.355	-2.220	0.915
10	1.301	-1.885	0.963
12	3.297	-4.220	0.989
14	10.138	-6.822	0.948
16	15.695	-7.060	0.896
18	39.319	-11.166	0.911
20	15.797	-15.023	0.991

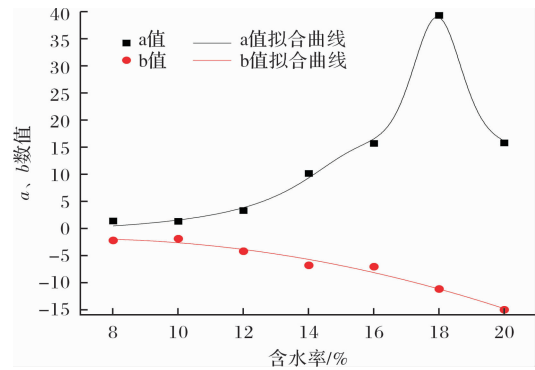


图 7 参数 a 、 b 拟合曲线

Fig. 7 Fitting curves of parameters a and b

以 a 、 b 值为纵坐标, 含水率为横坐标, 分别按照公式(7)、(8)进行拟合:

$$a = a_0 + D \left[m_u \frac{2}{\pi} \frac{q}{4(\omega - E)^2 + q^2} + \right. \tag{7}$$

$$\left. (1 - m_u) e^{-\frac{\sqrt{4 \ln 2}}{q^2} (\omega - E)^2} \right] \tag{8}$$
$$b = A\omega^2 + B\omega + C$$

式中: A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 a_0 、 q 、 m_u 为拟合参数, 参数值列于下表 5、6.

表 5 a 值拟合参数

Tab. 5 Fitting parameters of a value

a_0	q	m_u	D	E	R^2
-1.548	3.068	1.562	266.838	17.939	0.997

表 6 b 值拟合参数

Tab. 6 Fitting parameters of b value

A	B	C	R^2
-0.075	1.022	-5.4	0.977

可以看出拟合效果较理想, 由此可根据试样初始含水率利用公式(7)(8)计算出 a 、 b 值, 然后将 a 、 b 值代入公式(6)算出平均崩解速率.

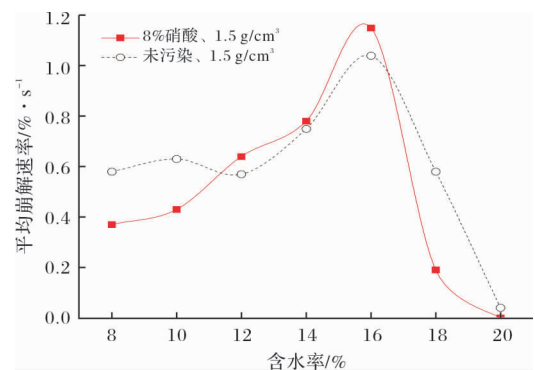


图 8 污染试样含水率-平均崩解率曲线

Fig. 8 Moisture content-average disintegration velocity curve of contaminated samples

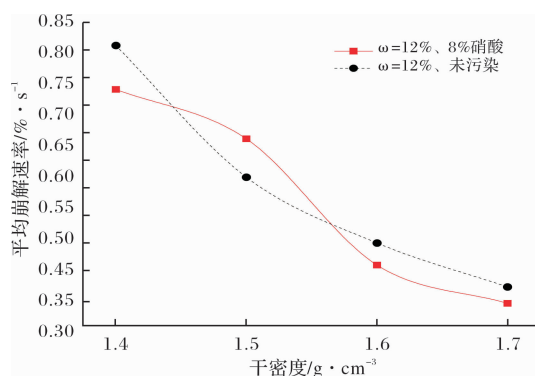


图9 污染试样干密度-平均崩解率曲线

Fig. 9 Dry density-average disintegration velocity curve of contaminated samples

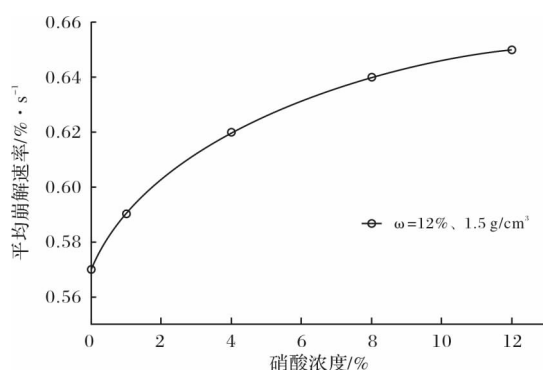


图10 污染试样硝酸浓度-平均崩解率曲线

Fig. 10 Concentration of nitric acid-average disintegration velocity curve of contaminated samples

2.3 硝酸污染土的崩解速率变化

有研究^[17]表明, 土体受到污染时, 由于原生矿物、次生矿物中的黏土矿物的性质均较稳定, 因而暂不考虑其与酸的反应, 主要考虑土颗粒间的胶结物、可溶性盐和游离氧化物等物质与酸的反应。

黄土中孔隙水被硝酸溶液污染后, 主要可能发生的化学反应如下式:

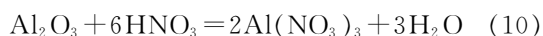
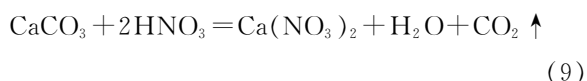


图8为干密度为1.5 g/cm³、硝酸溶液质量浓度为8%情况下的含水率-崩解速率曲线, 随着含水率的增加, 崩解速率呈现先增加后减小趋势, 含水率达到16%时, 崩解速率达到最大。硝酸污染试样与未污染试样的含水率与崩解速率的变化趋势总体相似, 都呈现先增加后减小, 变化幅度较小, 且均在含水率为16%达到峰值崩解速率。受含水率的增加影响, 土颗粒间水膜厚度增加导致吸力减小, 水进入试样内部将可溶性胶结物溶

解降而低其结构吸力, 同时由于水的进入形成部分高压孔隙区, 当吸力小于斥力时, 土体开始崩解。含水率继续增加, 土体结构由散粒状逐渐变为集粒和凝块等结构, 渗透性降低, 从而崩解速率降低。含水率继续增加到一定程度(20%)时, 基本不发生崩解。对比相同条件下的未污染试样, 硝酸溶液的加入使孔隙水内的离子数增加, 土颗粒表面的电荷数增加, 扩散层中的部分离子被吸入固定层, 双重作用下颗粒间的吸力增加。吸力的增加抵消一部分胶结物被溶解造成的吸力降低, 因此硝酸溶液的加入未造成试样崩解速率的大幅度增加。

图9为含水率为12%、硝酸浓度为8%情况下的干密度-崩解速率曲线, 崩解速率随着干密度的增加而减小, 干密度对崩解速率影响较大。随着干密度的增加, 土体内的架空孔隙结构逐渐被充填消失, 土体微观结构转变为镶嵌结构, 孔隙减少, 渗透性降低, 水不能自由进入土体内部, 因此崩解速率随着干密度的增加而逐渐减小。对比相同条件下的未污染试样, 试样在硝酸污染前后崩解速率变化趋势相同, 且变化幅度较小。

图10为干密度为1.5 g/cm³、含水率为12%情况下的硝酸浓度-崩解速率曲线, 崩解速率随着硝酸浓度的增加而增加, 增加趋势逐渐变缓且变化幅度较小。硝酸与黄土反应得主要产物Ca(NO₃)₂和Al(NO₃)₃均易溶于水, 反应后产物部分留在土体孔隙内, 被硝酸污染后土体内部结构重新分布, 被硝酸侵蚀后形成孔隙等通道, 为水进入土体内部创造条件。土体内胶结物与硝酸反应后使颗粒间联结强度减弱。随着酸浓度的增加, 其腐蚀性增强, 结构吸力减弱, 污染土渗透系数降低, 孔隙水中H⁺和NO₃⁻浓度增加, 土体中黏粒的热力学电位愈大, 电动电位也愈大, 使得部分黏土颗粒表面带正电荷, 部分颗粒表面带负电荷, 在带负电荷的土颗粒表面的扩散层中含有较多的H⁺离子, 带正电荷的土颗粒表面的扩散层中含有较多的NO₃⁻离子, 使扩散层中的离子进入固定层, 扩散层水膜变薄^[18]。因此, 随着硝酸浓度增加, 土颗粒间联结强度、渗透性降低, 黏土颗粒表面的正负电荷之间产生的引力和土颗粒间的吸力增加。当硝酸浓度继续增加, 胶结物联结强度的减小幅度变缓, 吸力增加幅度变大, 合力逐渐减小, 表现为随着硝酸浓度的变化对崩解

速率的影响逐渐减小. 含水率和干密度对崩解速率影响较大, 硝酸浓度对崩解速率影响相对较小. 在含水率 ω 为 12%、干密度 ρ_d 为 1.5 g/cm³ 时, 硝酸浓度 η 与崩解速率 v 可拟合成指数函数关系式:

$$v = P + Qe^{-\frac{\eta}{R}} \quad (11)$$

式中: P 、 Q 和 R 为拟合参数; η 为硝酸浓度. 采用最小二乘法拟合得 $P = 0.655$, $Q = -0.084$, $R = 4.492$, 相关系数 $R^2 = 0.998$, 相关性较好.

3 结论

本文通过室内崩解试验, 探讨了不同干密度、含水率和硝酸浓度的黄土试样崩解速率的基本变化规律和结果, 得到了以下结论:

(1) 原状黄土的崩解速率主要受含水率和干密度两个因素控制, 平均崩解速率随着干密度的增加而减小, 随着含水率的增加呈现先增加后减小趋势, 在含水率为 16% 附近达到最大值;

(2) 根据室内试验数据分析, 建立了重塑污染黄土的崩解速率与干密度、含水率和硝酸浓度之间的函数关系表达式;

(3) 硝酸污染黄土的含水率、干密度与平均崩解速率的变化趋势与未污染黄土的规律基本一致, 即平均崩解速率随着干密度增加而减小, 随着含水率的增加呈先增加后减小趋势; 黄土被硝酸污染以后, 土体内部胶结物被溶解, 硝酸浓度的增加平均崩解速率有所增加.

参考文献 References

- [1] 刘东生, 张宗祜. 中国的黄土[J]. 地质学报, 1962, 42(1): 1-14, 16-19.
LIU Dongsheng, ZHANG Zonghu. Chinese loess[J]. Acta Geologica Sinica, 1962, 42(1): 1-14, 16-19.
- [2] 巴金. 中国地区酸雨的长期演变及时空分布特征分析[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2008.
BA Jin. Study on the long-term trend and spatio-temporal distribution of acid rain over China[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2008.
- [3] 蒋定生, 李新华, 范兴科. 黄土高原土壤崩解速率变化规律及影响因素研究[J]. 水土保持通报, 1995, 15(3): 20-27.
JIANG Dingsheng, LI Xinhua, FAN Xingke. Research on the law of soil disintegration rate change and its effect factors on the loess plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1995, 15(3): 20-27.
- [4] LYLES L, DISRUD L A, WOODRUFF N P. Effects of soil physical properties, rainfall characteristics and wind velocity on clod disintegration by simulated rainfall[J]. Soil Science Society of America, 1969, 33: 302-306.
- [5] GRABER E R, FING P, LEVY G J. Soil stabilization in semiarid and arid land agriculture[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2006, 18(2): 190-205.
- [6] GOEBEL M, BACHMANN J, WOCHE S K, et al. Soil wettability aggregate stability and the decomposition of soil organic matter[J]. Geoderma, 2005, 128: 80-93.
- [7] 李家春, 田伟平. 工程压实黄土崩解试验研究[J]. 重庆交通学院学报, 2005, 24(5): 74-77.
LI Jiachun, TIAN Weiping. Experiment of compacted loess disintegration[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2005, 24(5): 74-77.
- [8] 袁亮, 谷天峰, 胡炜. 不同地区黄土崩解特性的试验研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(20): 93-100.
YUAN Liang, GU Tianfeng, HU Wei. Experimental study on disintegration of loess in different regions[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(20): 93-100.
- [9] 谷天峰, 袁亮, 胡炜. 黑方台黄土崩解性试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(4): 62-70.
GU Tianfeng, YUAN Liang, HU Wei. Experimental research on disintegration of the Heifangtai loess[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(4): 62-70.
- [10] 李喜安, 黄润秋, 彭建兵. 黄土崩解性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S1): 3207-3213.
LI Xi'an, HUANG Runqiu, PENG Jianbing. Experimental research on disintegration of loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S1): 3207-3213.
- [11] 曾庆建, 刘宝臣, 张炳晖等. 红黏土崩解特性试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(3): 93-97.
ZENG Qingjian, LIU Baochen, ZHANG Binghui, et al. An experimental study of the disintegration characteristics of red clay[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(3): 93-97.
- [12] 王菁莪, 项伟, 毕仁能. 基质吸力对非饱和和重塑黄土崩解性影响试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3258-3262.
WANG Jinge, XIANG Wei, BI Renneng. Experimental study of influence of matric suction on disintegration of unsaturated remolded loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(11): 3258-3262.

- [13] 张抒,唐辉明. 非饱和花岗岩残积土崩解机制试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1668-1674.
ZHANG Shu, TANG Huiming. Experimental study of disintegration mechanism for unsaturated granite residual soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6): 1668-1674.
- [14] 金旭,熊传祥,钟富林. 酸污染条件下花岗岩残积土崩解特性试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(6): 194-198.
JIN Xu, XIONG Chuanxiang, ZHONG Fulin. Experimental study on disintegration characteristics of granite residual soil under acid pollution[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2017, 15(6): 194-198.
- [15] 陈东,王道杰,陈晓艳. 一种测定土壤崩解动态的方法[J]. 土壤, 2013, 45(6): 1137-1141.
CHEN Dong, WANG Daojie, CHEN Xiaoyan. Method to show dynamic process of soil disintegration[J]. Soils, 2013, 45(6): 1137-1141.
- [16] WANG N Q, WANG Q T, XUE Q, et al. Experimental study of static disintegration on unsaturated soil [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 580-583: 68-72.
- [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 Chunpeng, LIU Hanlong, ZHANG Xiaolu. Laboratory tests on compression characteristics of soil polluted by acid and alkali [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(10): 1477-1483.
- [18] 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 Hanlong, ZHU Chunpeng, ZHANG Xiaolu. Laboratory test research on the basic physical properties of acid-base contaminated soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(8): 1213-1217.

(编辑 桂智刚)

(上接第 177 页)

- WANG Qiyao, LU Ganggang, ZHANG Yaguo, et al. Study on the deformation and force characteristics of utility tunnel crossing ground fissure with the large angle[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech., (Natural Science Edition), 2019, 51(6): 825-832.
- [12] ZHANG Z, HUANG M, WANG W. Evaluation of deformation response for adjacent tunnels due to soil unloading in excavation engineering [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 38(9): 244-253.
- [13] 梁荣柱,林存刚,夏唐代,等. 考虑隧道剪切效应的基坑开挖对邻近隧道纵向变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(1): 223-233.
LIANG Rongzhu, LIN Cungang, XIA Tangdai, et al. Analysis on the longitudinal deformation of tunnels due to pit excavation considering the tunnel shearing effect [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(1): 223-233.
- [14] ZHANG Junfeng, CHEN Jinjian, WANG Jianhua, et al. Prediction of tunnel displacement induced by adjacent excavation in soft soil [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 36: 24-33.
- [15] 周顺华,何超,肖军华. 环间错台效应下基坑开挖引起临近地铁盾构隧道变形的能量计算法[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(3): 53-60.
ZHOU Shunhua, HE Chao, XIAO Junhua. Energy calculation method for deformation of shield tunnels near metro due to foundation pit excavation under staggered platform effect [J]. China Railway Science, 2016, 37(3): 53-60.

(编辑 桂智刚)