

黄土的未饱和湿陷、剩余湿陷和多次湿陷*

On unsaturated collapse, remnant collapse and multiple collapse of the loess

孙建中 刘健民

(中国科学院西安黄土及第四纪地质国家重点实验室, 西安工程学院, 西安, 710054)

中图法分类号 TU 444

文献标识码 A

文章编号 1000-4548(2000)03-0365-03

作者简介 孙建中, 男, 1931 年生, 1956 年毕业于东北地质学院苏联专家研究生班。教授。多年从事工程地质、水文地质、第四纪地质、环境地质和黄土学的教学与研究。

1 未饱和湿陷和剩余湿陷

50 年代, 我们曾作了一个试验^[1], 其原状土样取自河南嵩县伊河二级阶地上的马兰黄土。用环刀从大样取若干试样, 用蒸馏水分别饱和之。然后置 CaCl_2 干燥器中, 按不同时间取出而得不同湿度(含水量)的试样, 最后作压缩试验。试样共 7 个, No. 1 为天然湿度, No. 6 为饱和湿度, No. 2~5 为以上两种湿度之间的一些中间湿度样品, 而 No. 7 为饱和后复经风干的试样。试验分 9 个压力档次: 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 MPa。

90 年代初为了进一步验证上述研究, 我们又作了一些实验^[2], 从西安大雁塔以南马兰黄土中取一大样。为了考察可溶盐对湿陷性的影响, 用盐酸处理黄土试样, 以消除其中所有的可溶盐类。实践中发现要去掉黄土样中的可溶盐并非易事。经长期探索才发现用盐酸缓慢滴定(3~5 d)并反复风干六、七次, 一般持续一个月以上。在湿陷试验之后打碎样品, 用气量法检查证明已无碳酸盐存在。然后, 用蒸馏水冲洗至滤液呈中性为止, 并将饱和的试样置空气中风干, 再作湿陷试验。按不同时间取之, 得不同湿度的试样, 置入固结仪, 仍按前述 9 个压力档次作压缩试验, 并于 0.8 MPa 压力下加水饱和使之湿陷。将土样压缩值(Δh)与土样高(h)之比叫做变形系数(i), $i = \frac{\Delta h}{h}$ 。而后绘制 $i-p$ (压力) 关系曲线于图 1。

图 1 中曲线 8 与 9 为未经盐酸处理的天然湿度和饱和样的压缩曲线。图中 1~7 号样为经盐酸处理后的试样。由图不难看出, 在任一压力下, 饱和压缩曲线(第 7 线)与风干压缩曲线(第 1 线)之间的变形系数差就是该土样在该压力下的饱和湿陷系数或最大湿陷系

数。而这两者之间的中间湿度下的湿陷系数称为“未饱和湿陷系数”。饱和湿陷系数(δ_s)与未饱和湿陷系数(δ'_s)之差称为“剩余湿陷系数”(δ''_s)

$$\delta''_s = \delta_s - \delta'_s$$

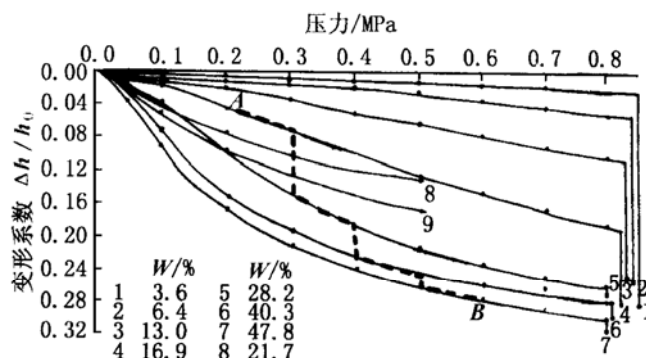


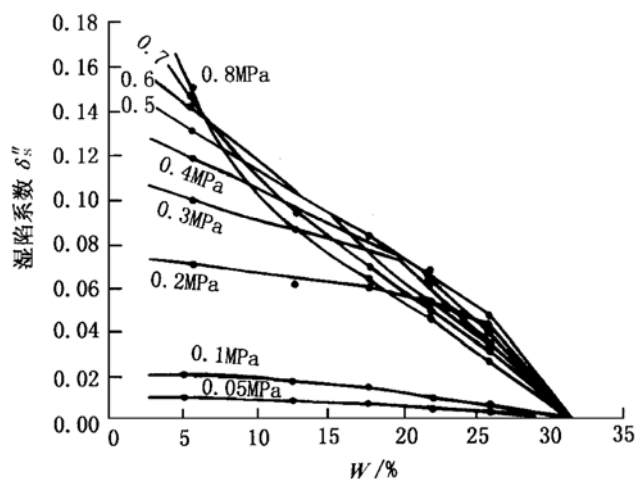
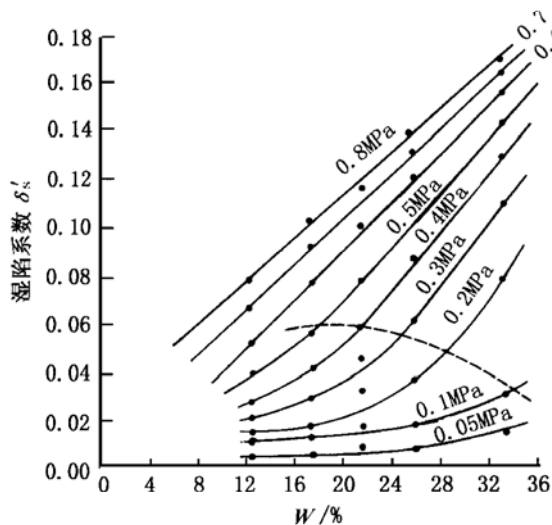
图 1 西安盐酸处理黄土不同湿度状况下的压缩曲线

Fig. 1 Compression curves under different moisture conditions of the Xi'an loess samples treated by hydrochloric acid

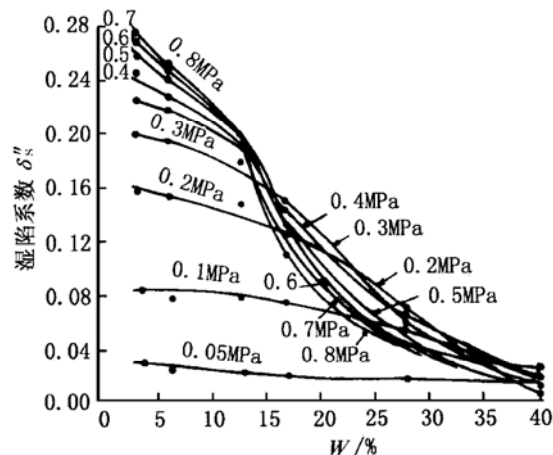
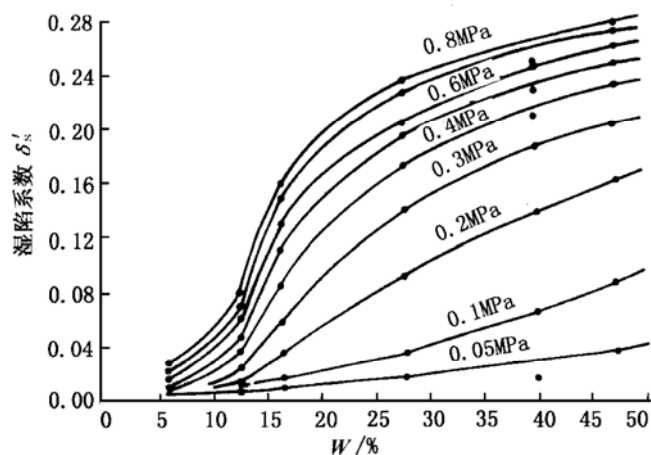
将两次实验结果绘制成图 2 的曲线族。

由图 2 可知, 不管用盐酸处理的样品还是天然土样, 其规律是共同的。即未饱和湿陷系数与湿度是正相关, 剩余湿陷系数与湿度是负相关。二者的差别除曲线形态稍有差别外, 主要是加酸处理的样品, 湿陷性大的多。嵩县样 0.8 MPa 时最大湿陷系数为 0.175 而西安样为 0.274 5。在地面向下渗水带饱和带外围, 在地下水面上的毛细带中, 以及由空气中向土中凝聚水分时, 都可能产生未饱和的情况, 造成未饱和湿陷。此时可以用未饱和湿陷系数来估计其湿陷量。同样剩余湿陷系数可用于估计第一次浸水未达饱和时, 进一步可能发生的湿陷量。

由图 2 的图形特点还可看出, 饱和湿陷系数(δ_s)、未饱和湿陷系数(δ'_s)和剩余湿陷系数(δ''_s)是湿度(W)和压力(p)的二元非线性回归模型。设它们的回归方程



(a) 嵩县黄土(天然)



(b) 西安黄土(经盐酸处理样)

图 2 未饱和湿陷系数(δ'_s), 饱和湿陷系数(δ_s) 和剩余湿陷系数(δ''_s) 与湿度(W) 的关系曲线Fig. 2 The relationship between the coefficient of unsaturated collapse (δ'_s), coefficient of saturated collapse (δ_s), coefficient of remnant collapse (δ''_s) and the moisture(W)

$$\delta_s(\delta'_s, \delta''_s) = a_0 + a_1 W + a_2 p + a_3 W^2 + a_4 p^2 + a_5 Wp \quad (1)$$

令 $X_1 = W$, $X_2 = p$, $X_3 = W^2$, $X_4 = p^2$, $X_5 = Wp$, 则式(1)可化为五元线性回归模型:

$$\delta_s(\delta'_s, \delta''_s) = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_4 + a_5 X_5 \quad (2)$$

通过在计算机上使用逐步回归程序, 利用前述实验所得数据算得嵩县天然黄土样的未饱和湿陷系数和剩余湿陷系数与湿度和压力的回归方程为

$$\delta'_s = -0.0361 + 0.2075W + 0.0276p^2 + 0.4414Wp$$

相关系数 $R_1 = 0.9450$

$$\delta''_s = -0.0095 + 0.5425p - 0.3133p^2 - 1.0859Wp$$

相关系数 $R_2 = 0.9203$

经过进一步研究, 在将来, 可能只需作少量试验, 就可求出一个土样的上述关系或列线图, 用以评价该黄土的湿陷特征。黄土的湿度状况在黄土地基评价中至关重要。例如西宁一个场地在同一深度处, 不同季节黄土湿度由 14.8% 增加到 20.5%, 增量 5.7%, 而湿陷系数由 0.113 锐减至 0.005, 由强湿陷性变为非湿陷性地基(涂光祉, 1984 年)。可见黄土湿度状况对黄土地基湿陷性的评价影响很大, 也说明现行的评价方法有待改进。本文所提出的情况或许对于如何全面的、可靠的评价黄土地基的湿陷性有所启迪。

2 多次湿陷

原来以为黄土一旦浸水发生湿陷后, 就不会再湿陷了。前几年人们已有关于“二次湿陷”的传说, 觉得

不可思议。其实从上述的实验已经可以解释这种现象。而且,黄土何止是“二次湿陷”,而是可以多次湿陷。如在图1上任取A点,交替增压与增湿,呈折线到达B点,便实现了多次湿陷。实际上,从A点可以有无限多个途径到达B点,也就是有多种多样的多次湿陷。1993年笔者在甘肃榆中县金崖、永丰两村,在黄土厚度分别为50 m和20 m的三级和二级阶地上,各作了一个大型(10 mm × 10 mm)现场湿陷试验。该两地自1972年建成灌区后,每年要灌水7~8次,即已灌水150次以上。然而,在浸水40 d后,还分别得到了22.85 cm和42.5 cm的自重湿陷量。在金崖试验点附近挖了一个深15 m的探井,在井中采样,经实验室测试,算得可能的湿陷量为96.25 cm。借鉴兰州钢厂K = 野外实测湿陷量/室内计算湿陷量 = 1.72,来估算金崖原未灌溉土地上的可能自重湿陷量为165.55 cm。

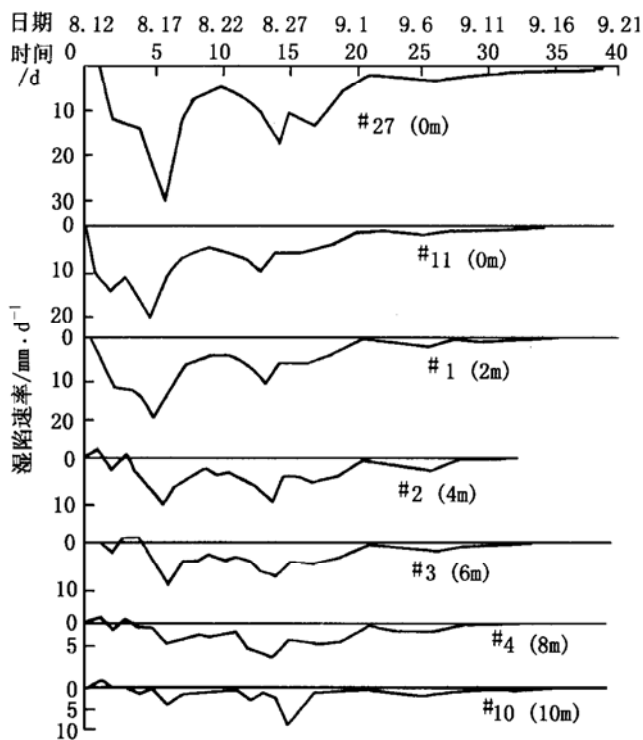


图3 金崖试验点不同深度上的湿陷速度曲线

Fig. 3 Curves of the velocity of collapse in different depth at Jinya test site

也就是说多年灌溉的结果使金崖的湿陷量已损失了86.2%。

此外,在金崖试验点,由于在8月20~24日间,有几天因机械事故而断水,使湿陷速度变慢。恢复供水后,湿陷又加速,在曲线上出现了双峰态(见图3)。这可以看作是两次湿陷。反之,在永丰试验点,供水没有间断,则湿陷速度曲线只有一高峰。可见,只要有剩余湿陷量存在就会继续湿陷,直至湿陷潜力全部消耗殆尽。因此,笔者这次试验是多次湿陷的直接证据。

3 结 论

通过两次不同湿度黄土的湿陷试验,证明了未饱和湿陷和剩余湿陷的存在。这些试验且证明了多次湿陷的可能性。在多年浇灌过的黄土地上进行了大型现场湿陷试验,为多次湿陷提供了直接的证据。饱和湿陷系数(δ_s)、未饱和湿陷系数(δ_s')和剩余湿陷系数(δ_s'')3个系数与湿度(W)和压力(p)的关系属于二元非线性模型,可化为五元线性模型。将来可能只作少量测试即可求得表述黄土湿陷特征的回归模型与曲线族。

西安黄土样含碳酸盐14.5%; CaSO_4 0.18%; Na_2SO_4 0.16%; NaCl 0.035%。其中易溶盐共0.195%,而天然含水量为21.7%,足以将之全部溶解,所以易溶盐在湿陷发生中不起作用,但通过对粘土表面薄膜水厚度的影响,对湿陷量可能有一定影响。碳酸盐用酸淋去后加大了黄土的孔隙度,削弱了黄土的粒间胶结,所以0.2 MPa下的湿陷系数由0.0246变为0.1582,增加了6倍多,所以碳酸盐是减小和延缓湿陷的一个阻滞因素。

参 考 文 献

- 1 孙建中. 黄土的湿陷性及其与湿度的关系. 水文地质工程地质, 1957(11): 18~21
- 2 孙建中, 赵景波等. 黄土高原第四纪. 北京: 科学出版社, 1991. 215~228