

黄土湿陷性的水石膏耦合效应

张晓龙, 崔自治, 杨宁宁

(宁夏大学 土木与水利工程学院, 银川 750021)

摘要: 为了探索水和石膏耦合对黄土湿陷性的作用规律, 以黄土的含水量和石膏含量为因素, 设计混合均匀试验方案, 进行了黄土湿陷性的水石膏耦合效应研究, 应用最小二乘拟合, 建立了湿陷系数与石膏含量、含水量的非线性回归数学模型。结果表明, 石膏含量对黄土的湿陷性有显著影响, 黄土湿陷系数与石膏含量、含水量均呈递减的指数关系, 水和石膏耦合有利于降低黄土的湿陷性。

关键词: 黄土; 湿陷性; 石膏; 耦合效应

中图分类号: TU43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672 1683(2015) 05-0915-03

Coupling effect of water and gypsum on loess collapsibility

ZHANG Xiaolong, CUI Zizhi, YANG Ningning

(College of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: In order to explore the coupling effect of water and gypsum on loess collapsibility a uniformly mixing test scheme was carried out to study the coupling effect based on the factors of moisture content and gypsum content of loess. The nonlinear regression mathematical model between the collapsibility coefficient and gypsum content and moisture content was developed by the least squares fitting method. The results showed that gypsum content has significant effects on loess collapsibility, the loess collapsibility coefficient has a decreasing exponential relationship with gypsum content and moisture content, and the coupling of water and gypsum can decrease the collapsibility of loess.

Key words: loess; collapsibility; gypsum; coupling effect

宁夏南部为黄土高原的一部分, 黄土层厚达 100 多 $m^{[1]}$, 含有大量白色粉末状的可溶盐^[2], 主要为钠盐、钾盐、钙盐、氯盐、硫酸盐和重碳酸盐, 以硫酸盐最多^[3]。可溶盐是影响黄土湿陷性的重要因素, 石膏是黄土中溶盐的典型代表, 作为黄土颗粒间的主要胶结物质, 对黄土的结构强度和湿陷性将会产生不容忽视的影响^[4-5]。然而追溯前人的研究成果, 关于易溶盐对黄土湿陷性效应的定性研究居多, 涉及到中溶盐对黄土湿陷性效应的定量研究相对较少, 且中溶盐对黄土湿陷性的影响存在不同的观点。陈开圣、樊怀仁^[6]等人认为中溶盐是影响黄土湿陷性的重要因素, 钱鸿绪^[8]等认为中溶盐对土粒既无胶结作用, 受水也不易溶解, 对湿陷基本无贡献。文献[9]指出石膏含量在 10% 以上黄土不再具有湿陷性, 文献[10]则得出中溶盐含量越多黄土的湿陷性越大。为此, 进行了黄土湿陷性的水石膏耦合效应研究, 得出一些有益的结论, 为黄土地基的评价提供理论和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验黄土取自宁夏同心下马关, 密度 $\rho = 1.56 g/cm^3$, 含水量 $w = 7.9\%$, 土粒比重 $d_s = 2.72$, 十字板剪切强度 $\tau_f = 90 kPa$, 压缩系数 $\alpha_{1-2} = 0.18 MPa^{-1}$, 湿陷系数 $\delta_s = 0.084$, 颗粒组成见表 1, 主要为 0.075~0.005 的粉粒, 占 83.9%。

表 1 同心下马关黄土的颗粒组成

项目	粒径/mm				
	> 0.075	0.075~0.050	0.05~0.01	0.01~0.005	< 0.005
含量(%)	5.9	58.5	20.3	5.1	10.2

为了尽量减小黄土中盐分的影响, 对黄土进行了洗盐处理。将试样碾散, 放入装有蒸馏水的容器中, 水面高出土面的高度不小于土的厚度, 搅拌 5 min, 使土充分分散于水中,

收稿日期: 2014-12-05 修回日期: 2015-07-10 网络出版时间: 2015-09-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150924.2028.006.html>

基金项目: 教育部“长江学者和创新团队发展计划”创新团队项目(IRT1067)

作者简介: 张晓龙(1989-), 男, 山东青岛人, 主要从事岩土工程方面研究。E-mail: 313705297@qq.com

通讯作者: 崔自治(1963-), 男, 河南永城人, 教授, 主要从事岩土工程方面研究。E-mail: czz2062428@qq.com

静置时间不少于 24 h,待水澄清后,将清水用虹吸法排去,如此多次直到土中可溶盐含量不大于 0.1% 为止。将洗盐后的黄土风干,碾散,过 1.0 mm 的筛,取筛下试样,测初始含水量。

石膏为市售建筑石膏,半水石膏的含量 58.4%,抗折强度 1.6 MPa,抗压强度 3.2 MPa,0.2 mm 筛上的筛余 9.3%,初凝时间 8 min,终凝时间 24 min,膨胀率为 0.06%。

1.2 试验方案

分别设计了单因素和 $U_{12}(6 \times 4)$ 混合均匀试验方案,单因素试验方案固定土样的干密度为 1.4 g/cm^3 ,含水量为 10%,石膏含量为因子,设 0、1.2%、2.4%、3.6%、4.8%、6% 等 6 个水平,着重研究石膏含量对黄土湿陷性的影响,并用以模型建立和验证。 $U_{12}(6 \times 4)$ 混合均匀试验方案,固定土样的干密度为 1.4 g/cm^3 ,含水量 w 和石膏含量 G 为因子,试验研究水石膏耦合对黄土湿陷性的作用规律。石膏含量设 0、1.2%、2.4%、3.6%、4.8%、6% 等 6 个水平,含水量设 8%、10%、12%、14% 等 4 个水平。

1.3 试验方法

(1) 试样制备。按设计方案称取蒸馏水和土样,将蒸馏水加入土样后拌均,静置不少于 24 h。称取所需石膏质量与已加水拌均的土样混合,拌均。采用双向压样法每组成型 2 个试样,放入密封的保湿器内养护 28 d。

(2) 湿陷系数测定。依据《湿陷性黄土地区建筑规范》GB50025-2004^[11],应用全自动气压固结仪进行湿陷性试验,测定试样在 200 kPa 荷载作用下的湿陷系数。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

单因素试验方案及结果列于表 2,石膏含量和湿陷系数的关系曲线见图 1。

表 2 黄土单因素试验方案及结果

Tab. 2 Single factor test scheme and results

组别	$G(\%)$	δ_z
G1	0	0.212
G2	1.2	0.198
G3	2.4	0.187
G4	3.6	0.177
G5	4.8	0.165
G6	6.0	0.156

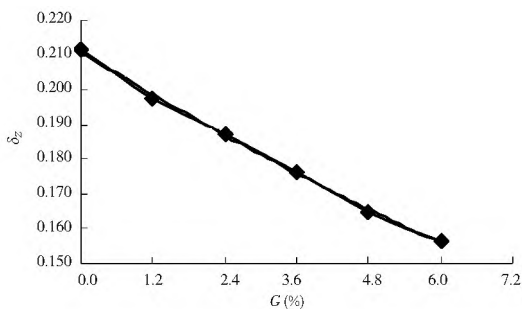


图 1 单因素试验结果

Fig. 1 Single factor test results

由图 1 可知,黄土的湿陷系数随着石膏含量的增加而逐

渐递减,两者呈负相关。利用最小二乘回归拟合进而得出湿陷系数与石膏含量的关系 $\delta_z = 0.2114e^{-0.0508G}$, 相关系数 $R^2 = 0.9989$, 方程拟合性很好。

2.2 混合均匀试验

2.2.1 模型建立

$U_{12}(6 \times 4)$ 混合均匀试验方案及试验结果见表 3。

表 3 混合均匀试验方案及试验结果

Tab. 3 Uniformly mixing experiment scheme and results

组别	$G(\%)$	$w(\%)$	δ_z
G1	2.4	12	0.180
G2	6.0	10	0.151
G3	2.4	8	0.200
G4	6.0	14	0.138
G5	1.2	10	0.198
G6	4.8	8	0.177
G7	1.2	14	0.183
G8	4.8	12	0.154
G9	0	8	0.213
G10	3.6	14	0.164
G11	0	12	0.196
G12	3.6	10	0.177

文献[12]对西安地区黄土的湿陷系数进行统计分析,得出湿陷系数与饱和度呈指数关系 $\delta_z = 0.0003e^{251.6748/s_r}$, 前述单因素试验得湿陷系数与石膏含量呈指数关系。因此,黄土的湿陷系数与含水量、石膏含量用指数关系拟合。应用最小二乘回归拟合,通过尝试和优化得出湿陷系数与石膏、含水量的多元非线性回归数学模型。

$$\delta_z = 0.06198 + 0.13308e^{-0.1G} + 0.6186e^{-0.3w} - 0.379e^{0.1G}e^{-0.3w}$$

对回归方程的显著性进行 F 检验, $F = 84.75$, 远远大于其临界值 ($F_{0.95}(3, 8) = 4.07, F_{0.99}(3, 8) = 7.59$), 说明石膏、含水量与湿陷系数间的回归关系达到极显著水平。相关系数 $R^2 = 0.9695$, 方程拟合性很好。

为了直观分析石膏含量和含水量对湿陷系数影响的程度,将湿陷系数与石膏含量、含水量的关系见图 2,由图 2 可以看出,图形在石膏含量方向的曲率大,在含水量方向的曲率较小,说明石膏含量对湿陷系数的作用居于首位,其次是含水量,石膏是影响黄土湿陷性的重要因素。

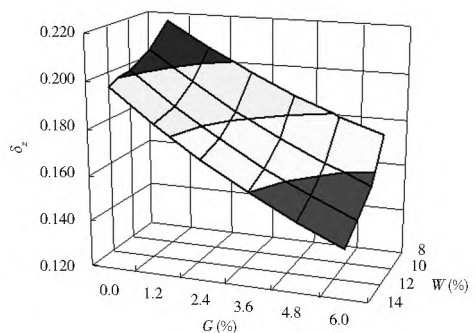


图 2 湿陷系数与石膏含量、含水量的关系

Fig. 2 Relationship between collapsibility coefficient and gypsum content and water content

2.2.2 单因素效应

对回归模型进行降维处理,即将二因素中任意一个因素的作用效应设为 0, 则可得其中一个因素的一元子模型

$$\text{石膏含量: } \delta_2 = 0.06198 + 0.13308e^{-0.1G}$$

$$\text{含水量: } \delta_2 = 0.06198 + 0.61862e^{-0.3w}$$

在试验设计的水平值范围内, 各因素对黄土湿陷系数的作用效应见图 3。从图 3 可以看出, 石膏含量为负效应, 湿陷系数随石膏含量的增大而减小。石膏含量越多, 土颗粒间胶结作用越强, 黄土的强度增大。石膏为中溶盐, 溶解度小, 土样浸水后仅有少量的石膏溶解, 土颗粒间仍保留着较强胶结作用, 因此湿陷性减小。含水量为负效应, 湿陷系数随含水量的增加而减小, 但含水量的作用效应随石膏含量的增大而减小。

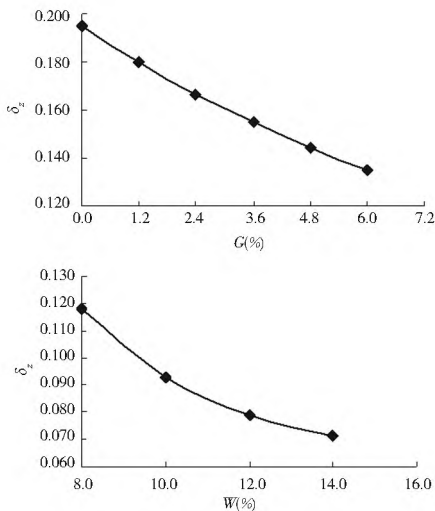


图 3 单因素效应

Fig. 3 Effect of single factor

2.2.3 边际效应

边际效应可反映各因素的一些特征值, 如湿陷系数取得极值时各因素对应的值, 以及单位水平变化对湿陷系数增减速率的影响。对回归子模型分别求一阶偏导, 得石膏含量、含水量的边际效应方程。

$$\text{石膏含量: } \delta_2' = -0.0133e^{-0.1G}$$

$$\text{含水量: } \delta_2' = -0.1856e^{-0.3w}$$

各因素的边际效应见图 4。石膏含量边际效应为负值, 对湿陷系数的作用效应为负效应。含水量的边际效应也为负值, 对湿陷系数的作用效应也为负效应。各因素的边际效应绝对值均呈递减趋势, 说明各因素的作用效应逐渐减小。

2.2.4 耦合效应

回归模型中石膏含量和含水量的积的二次项, 反映了二者的耦合效应。模型中二次项的系数为负值, 说明二者耦合有利于降低黄土的湿陷性。

2.2.5 模型验证

为了验证模型的可靠性, 利用单因素的试验结果对回归模型进行验证, 湿陷系数的实测值和预测值列于表 4, 关系见图 5。由表 4 和图 5 可知湿陷系数实测值略大于预测值, 二者趋势相近, 说明模型比较可靠。

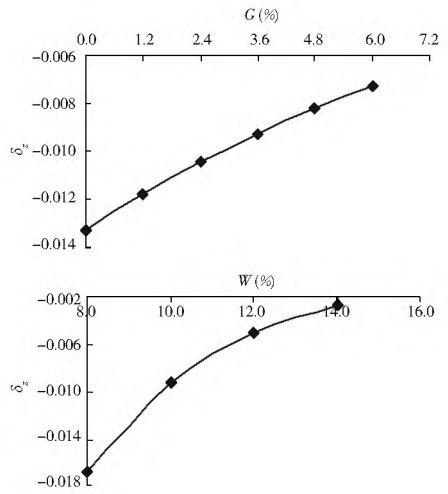


图 4 单因素边际效应

Fig. 4 Marginal effect of single factor

表 4 湿陷系数预测

Tab. 4 Prediction of the collapsibility coefficient

组别	G (%)	实测值	预测值
G1	0	0.212	0.207
G2	1.2	0.198	0.194
G3	2.4	0.187	0.183
G4	3.6	0.177	0.172
G5	4.8	0.165	0.163
G6	6.0	0.156	0.155

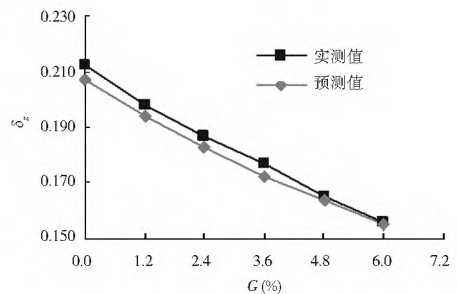


图 5 湿陷系数预测

Fig. 5 Prediction of the collapsibility coefficient

3 结论

(1) 中溶盐石膏对黄土的湿陷性有显著影响, 黄土湿陷系数与石膏含量、含水量均呈递减的指数关系。

(2) 水石膏耦合对黄土的湿陷性呈负效应, 二者耦合有利于降低黄土的湿陷性。

参考文献(References):

- [1] 罗生宏. 宁夏公路湿陷性黄土地基处治及沉降预测研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009. (LU O Sheng hong. Treatment technology on the collapsibility loess foundation and settlement prediction of Ningxia road[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2009. (in Chinese))
- [2] 邓洪亮, 尹金宽, 谢向文, 等. 宁夏非饱和黄土浸水后变形特性研究[J]. 岩土力学, 2005(S2): 98-102. (DENG Hong liang, YIN Jir kuan, XIE Xiang-dong, et al. Study on distortion characteristics of unsaturated loess in Ningxia when inundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005(S2): 98-102. (in Chinese))

(下转第 930 页)

- (in Chinese)
- [9] 戴前伟, 张彬, 冯德山, 等. 水库渗漏通道的伪随机流场法与双频激电法综合探查[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(4): 1453-1458. (DAI Qian wei, ZHANG Bin, FENG De shan et al. Integrated detection of leakage paths in reservoirs by the pseudorandom flow-field method and dual frequency induced polarization method[J]. Progress and Geophysics, 2005, 20(3): 854-858. (in Chinese))
- [10] 刘国辉, 李恩鹤, 张献民, 等. 综合物探方法在瀑河水库工程勘察中的应用[J]. 物探与化探, 2004, 28(2): 177-180. (LIU Guo hui, LI En he, ZHANG Xian min, et al. The application of the integrated geophysical method to the engineering investigation of baohe reservoir[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2004, 28(2): 177-180. (in Chinese))
- [11] 王传雷, 董浩斌, 刘占永. 物探技术在监测堤坝隐患上的应用[J]. 物探与化探, 2001, 25(4): 294-299. (WANG Chuan lei, DONG Hao bin, LIU Zhan yong. An investigation into the monitoring and forewarning technique for dyke ridden trouble under the condition of high water level[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2001, 25(4): 294-299. (in Chinese))
- [12] 房纯纲, 葛怀光, 贾永梅, 等. 瞬变电磁法用于堤防渗漏隐患探测的技术问题[J]. 大坝观测与土工测试, 2001, 25(5): 21-24. (FANG Chun gang, GE Huai guang, JIA Yong mei, et al. Techniques of transient electromagnetic sounding in detection of hidden defects in levees[J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 2001, 25(5): 21-24. (in Chinese))
- [13] 胡雄武, 张平松, 江晓益. 并行电法在快速检测水坝渗漏通道中的应用[J]. 水利水电技术, 2012, 43(11): 51-54. (HU Xiong wu, ZHANG Ping song, JIANG Xiao yi. Application of parallel electric survey to quick detection of seepage passage through reservoir dam[J]. Water Conservancy and Hydropower Technology, 2012, 43(11): 51-54. (in Chinese))
- [14] 江晓益, 陈兴海, 陈星, 等. 小型水库渗漏病害并行电法测试应用[J]. 工程地球物理学报, 2013, 10(6): 752-756. (JIANG Xiao yi, CHEN Xing hai, CHEN Xing, et al. Application of parallel resistivity method exploration for the dam body leakage in small reservoirs[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2013, 10(6): 752-756. (in Chinese))
- [15] 郭秀军, 刘涛, 贾永刚, 等. 土的工程力学性质与其电阻率关系实验研究[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(1): 151-155. (GUO Xiu jun, LIU Tao, JIA Yong gang, et al. The study of the relationship between engineering mechanical properties and resistivity of soils[J]. Progress in Geophysics, 2003, 18(1): 151-155. (in Chinese))
- [16] 王兴泰. 工程与环境物探新方法新技术[M]. 北京: 地质出版社, 1996. (WANG Xing tai. Engineering and environmental geophysical exploration new methods of new technology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996. (in Chinese))
- [17] 金聪, 刘江平. 二维高密度电阻率法数值模拟与应用[J]. 地质与勘探, 2014, 50(5): 984-990. (JIN Cong, LIU Jiang ping. Two dimensional numerical simulation and application of the high density resistivity method[J]. Geology and Exploration, 2014, 50(5): 984-990. (in Chinese))
- [18] 赵奎, 伍跃胜, 高忠, 等. 超高密度电阻率法在尾矿库水位探测中的应用[J]. 金属矿山, 2013(11): 100-102. (ZHAO Kui, WU Yue sheng, GAO Zhong, et al. Application of ultrahigh density resistivity method in detection of water level of tailings reservoir[J]. Metal Mine, 2013(11): 100-102. (in Chinese))

(上接第 917 页)

- [3] 崔自治, 张群, 王晓芸. 氯化钙对宁夏湿陷性黄土结构性影响的研究[J]. 工业建筑, 2013(7): 65-67, 75. (CUI Zhi zhi, ZHANG Qun, WANG Xiao yun. Influence of CaCl₂ on structural property of collapsible loess in Ningxia[J]. Industrial Construction, 2013(7): 65-67, 75. (in Chinese))
- [4] 卢雪清. 盐分变化对黄土强度特性影响的试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012. (LU Xue qing. Study on the effect of salinity changes on strength character of loess[D]. Yang Ling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2012. (in Chinese))
- [5] 张宁宁, 骆亚生. 易溶盐对黄土强度特性的影响[J]. 人民黄河, 2014, 36(8): 103-105. (ZHANG Ning ning, LUO Ya sheng. Influence of Soluble Salt on the Strength Characteristics of Loess[J]. Yellow River, 2014, 36(8): 103-105. (in Chinese))
- [6] 陈开圣, 彭小平. 关中地区黄土的湿陷特性研究[J]. 水文地质工程地质, 2005(1): 37-40. (CHEN Kai sheng, PENG Xiao ping. Study on loess's collapsibility in the Guanzhong area[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2005(1): 37-40. (in Chinese))
- [7] 樊怀仁, 郭睿. 关中地区黄土湿陷性影响因素分析[J]. 西安科技学院学报, 2003, 23(2): 160-163. (FAN Huai ren, GUO Rui. Influencing factors of water collapsible loess of Guanzhong area[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2003, 23(2): 160-163. (in Chinese))
- [8] 钱鸿绪, 王继唐, 罗宇生等. 湿陷性黄土地基[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985. (QIAN Hong xu, WANG Ji tang, LUO Yu sheng, et al. Collapsible Loess Foundation[M]. Beijing: Chinese Building Industry Press, 1985. (in Chinese))
- [9] 吴雪婷. 黄土中石膏含量测定新方法—快速滴定法[J]. 路基工程, 2008, 1: 52-53. (WU Xue ting. New method for determination of gypsum content of loess—Rapid titration method[J]. Subgrade engineering, 2008, 1: 52-53. (in Chinese))
- [10] 杨天亮, 叶观宝. 高能级强夯法在湿陷性黄土地基处理中的应用研究[J]. 长江科学院院报, 2008, 25(2): 54-57. (YANG Tian liang, YE Guan bao. Application Research for Dynamically High Energy Level Compaction in Collapsed Loess Foundation Treatment[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute. (in Chinese))
- [11] 中华人民共和国国家标准. GB 50025-2004 湿陷性黄土地区建筑规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004. (People's Republic of China National Standard. GB 50025-2004 Code for building construction in collapsible loess area[S]. Beijing: Chinese Building Industry Press, 2004. (in Chinese))
- [12] 秦建平. 西安地区黄土湿陷系数相关性分析[J]. 公路交通科技, 2008, 45(9): 65-68. (QIN Jian ping. The correlation analysis of loess collapsibility coefficient in Xi'an area[J]. Highway traffic science and technology, 2008, 45(9): 65-68. (in Chinese))