

# 水溶液对砧土剪切强度力学效应的实验研究<sup>\*</sup>

汤连生, 张鹏程, 王 洋, 张泳雄, 廖化荣

(中山大学地球科学系, 广东 广州 510275)

**摘 要:** 利用室内土工直剪实验设备, 在常温常压下, 对不同水化学溶液、作用不同时间后的砧块进行了剪切实验, 结果表明: ①水—砧块相互作用之力学效应包括物理和化学两方面, 其表现为水化学作用后砧块剪切面上的剪切强度增大或减小; ②水—砧块化学作用之剪切强度力学效应具有显著的时间效应; ③水—砧块相互作用前后砧块剪切面上的抗剪强度及因水化学作用而导致剪切面上的抗剪强度的增量均较好地满足摩尔—库仑强度准则; 文中最后从摩尔—库仑定律出发, 推导并给出了水砧(岩土体)化学作用对砧(岩土体)正、负力学效应的判别公式。

**关键词:** 水溶液; 砧块; 水化学作用; 剪切强度; 力学效应

**中图分类号:** TU458.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2002) 02-0089-04

水—岩土化学作用之宏观力学效应<sup>[1]</sup>、断裂力学效应<sup>[2-4]</sup>、声发射效应<sup>[5]</sup>等实验的研究结果均表明, 水—岩土体之间的化学作用不仅存在, 且具有显著的力学效应。开展水—砧化学作用之摩擦实验及其力学效应研究将对岩质边坡稳定分析中滑动带力学参数的选取<sup>[6]</sup>、压应力或压剪应力作用下闭合裂纹面的扩展贯通规律的研究、软土或软岩体的加固规律研究都有着重要的指导意义, 同时也将对岩土体剪切面上的抗剪强度公式, 即摩尔—库仑定律产生新的认识。

## 1 实验材料和方法

### 1.1 实验材料及制作

实验采用工业与民用建筑用的标号 425 水泥作为砧块材料。为了利用土的室内直剪实验设备, 砧块制作时, 在土工实验用的标准环刀下放置一块透水石, 透水石上再放一块滤纸, 水泥稀释并充分搅拌均匀后注入环刀内的透水石及滤纸上, 在水泥未固结前, 对试件表面进行平滑, 继续固结一段时间后, 将试件从环刀内退出并让其自然变干固结, 共制作了 5 组试件。这样制作出来的试件不仅大小尺寸完全相同(试样底面的半径等于环刀的内径, 高度为环刀高度的一半), 且试件的物质组成成分均一, 保证了实验的可对比性。

### 1.2 溶液的配制

实验共配置了 5 种溶液: 纯净水、自来水、酸性水溶液( $\text{H}_2\text{SO}_4$  + 纯净水,  $\text{pH}=0.44$ )、中性水溶液(分析纯  $\text{NaCl}$  + 纯净水, 其中,  $c(\text{Na}^+) =$

$c(\text{Cl}^-) = 6.83 \text{ mol/L}$ )、90 号柴油。

### 1.3 实验方法

以上述配置的 5 种水溶液分别作用于 5 组试件, 利用室内直剪实验的设备及加载方式, 分别对自然状态下的试件、浸泡 4 h 后表层充分饱和(以下称为“饱和状态”)的试件以及与溶液相互作用一段时间后的试件进行直剪实验。

## 2 实验结果及分析

利用室内土工实验的直剪仪, 将天然状态(自然干燥), 不同的水化学溶液的饱和状态, 以及水化学溶液作用下 10、20 d 后的试件, 在 5 种不同的荷载下进行直剪实验, 测试结果见表 1。并将表 1 中的测试结果进行最小二乘法曲线拟合, 得到在不同的水化学溶液作用下, 不同的水化学作用时间后, 在不同的垂直荷载下, 剪切面(摩擦面)上的抗剪强度变化规律, 如图 1 所示。根据拟合的直线方程的斜率求得各状态下砧块的摩擦角  $\varphi$  及内聚力  $c$  值, 见表 1。由表 1 及图 1 可以看出:

(1) 纯净水作用下的砧块, 由初始状态→饱和状态(浸泡 4 h)→浸泡 10 d→浸泡 20 d, 其摩擦角  $\varphi$  及内聚力  $c$  值均有降低的趋势。

(2) 工业自来水作用下的砧块, 饱和状态相对于初始状态, 摩擦角减小, 而内聚力值增大; 由饱和状态→浸泡 10 d→浸泡 20 d, 摩擦角有增大趋势, 内聚力依次增大。

(3)  $\text{NaCl}$  水溶液作用下的砧块, 饱和状态相对于初始状态, 摩擦角增大, 而内聚力值减小; 由饱

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2001-06-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59779019); 广东省自然科学基金资助项目(970127)

作者简介: 汤连生(1963—), 男, 副教授; E-mail: cestls@zsu.edu.cn

表 1 水溶液作用前后砼块剪切实验测试结果

Tab 1 The shear strength of concrete tested under different chemical conditions

| 浸泡溶液    | 浸泡时间 | 剪切面上的正应力 $\sigma$ /kPa |       |       |       |       | $\varphi$<br>( $^{\circ}$ ) | $c$<br>Pa | $\Delta\varphi$<br>( $^{\circ}$ ) | $\Delta c$<br>Pa |
|---------|------|------------------------|-------|-------|-------|-------|-----------------------------|-----------|-----------------------------------|------------------|
|         |      | 150                    | 250   | 350   | 450   | 550   |                             |           |                                   |                  |
| 纯净水     | 初态   | 218.4                  | 291.2 | 345.8 | 564.2 | 600.6 | 46.05                       | 40.95     | —                                 | —                |
|         | 4 h  | 218.4                  | 273   | 327.6 | 546   | 600.6 | 46.05                       | 30.03     | 0                                 | —10.92           |
|         | 10 d | 218.4                  | 254.8 | 327.6 | 546   | 582.4 | 45.54                       | 29.12     | —0.51                             | —11.83           |
|         | 20 d | 200.2                  | 236.6 | 309.4 | 527.8 | 582.4 | 46.55                       | 1.82      | 0.50                              | —39.13           |
| 自来水     | 初态   | 254.8                  | 291.2 | 382.2 | 455   | 600.6 | 40.54                       | 97.37     | —                                 | —                |
|         | 4 h  | 254.8                  | 273   | 364   | 436.8 | 564.2 | 38.04                       | 104.65    | —2.50                             | 7.28             |
|         | 10 d | 291.2                  | 309.4 | 400.4 | 473.2 | 618.8 | 39.32                       | 131.95    | —1.22                             | 34.58            |
|         | 20 d | 309.4                  | 364   | 418.6 | 491.4 | 655.2 | 39.32                       | 161.07    | —1.22                             | 63.70            |
| NaCl 溶液 | 初态   | 273                    | 309.4 | 382.2 | 455   | 618.8 | 39.94                       | 114.66    | —                                 | —                |
|         | 4 h  | 254.8                  | 273   | 327.6 | 455   | 600.6 | 41.14                       | 76.44     | 1.20                              | —38.22           |
|         | 10 d | 327.6                  | 364   | 400.4 | 509.6 | 637   | 37.39                       | 180.18    | —2.55                             | 65.52            |
|         | 20 d | 382.2                  | 418.6 | 455   | 546   | 673.4 | 35.37                       | 246.41    | —4.57                             | 135.75           |
| 硫酸溶液    | 初态   | 254.8                  | 327.6 | 364   | 473.2 | 600.6 | 39.34                       | 111.02    | —                                 | —                |
|         | 4 h  | 218.4                  | 309.4 | 364   | 436.8 | 582.4 | 40.54                       | 82.81     | 1.20                              | —18.21           |
|         | 10 d | 327.6                  | 436.8 | 473.2 | 527.8 | 691.6 | 39.32                       | 204.75    | —0.02                             | 93.73            |
|         | 20 d | 400.4                  | 491.4 | 509.6 | 564.2 | 746.2 | 37.39                       | 274.82    | —1.95                             | 163.80           |
| 柴油      | 初态   | 254.8                  | 309.4 | 382.2 | 473.2 | 582.4 | 39.32                       | 113.75    | —                                 | —                |
|         | 4 h  | 0                      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0                           | 0         | —39.32                            | —113.7           |
|         | 10 d | 0                      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0                           | 0         | —39.32                            | —113.7           |
|         | 20 d | 0                      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0                           | 0         | —39.32                            | —113.7           |

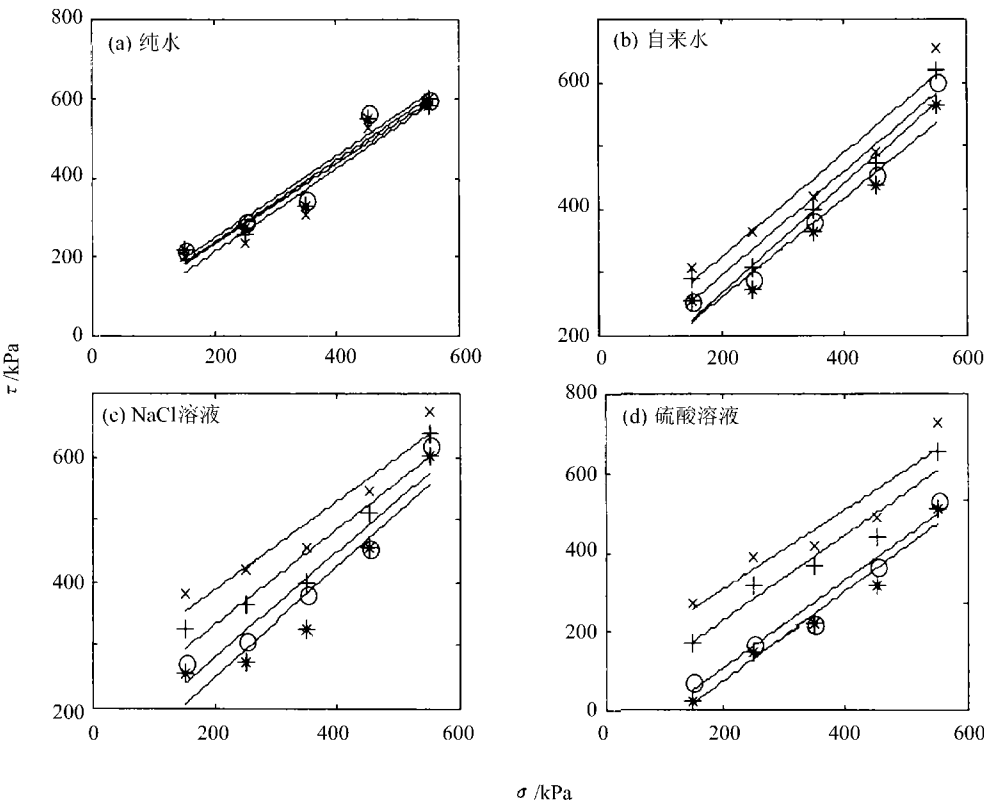


图 1 不同水溶液化学作用下砼土剪切强度及其拟合曲线

Fig 1 The shear strength and its fitting curves of concrete under different aquatic chemical condition

○—初始状态; ＊—水化学作用 4 h; ＋—水化学作用 10 d; ×—水化学作用 20 d

和状态→浸泡 10 d→浸泡 20 d, 摩擦角减小, 内聚力依次增大, 且增幅较大, 仅次于硫酸水溶液作用下的。

(4) 硫酸水溶液作用下的砧块, 摩擦角及内聚力值的变化规律与 NaCl 水溶液作用下的雷同, 不同的是, 由饱和状态→浸泡 10 d→浸泡 20 d, 砧块的内聚力值增幅最大。

(5) 柴油溶液作用下的砧块, 无论是饱和状态、浸泡 10 和 20 d, 摩擦角和内聚力的值均为 0。

根据实验结果, 作如下分析:

(1) 无论何种溶液浸泡 4 h 后饱和状态的砧块试件, 其剪切面上的抗剪强度都比自然状态下的要小。这表明只浸泡数小时的饱和状态的试件, 水溶液与试件之间发生的主要是纯物理作用, 水溶液渗入到试件表面, 作为一层水膜, 起润滑作用, 有效地降低了剪切面上的强度, 其中柴油作用下饱和状态的砧块的剪切强度减小到零, 根据摩擦学成因的凹凸说, 这是因为作为有机物的柴油, 油膜将试件凹凸面的凹部填埋而减少了凹凸所致。

(2) 自来水、NaCl 水溶液以及硫酸水溶液作用下的砧块, 由初始状态→浸泡 10d→浸泡 20d, 其剪切面上的强度逐渐增大, 其中硫酸浸泡的> NaCl 溶液浸泡的> 自来水浸泡的> 纯净水浸泡的, 其中纯净水的作用已较小。这表明随着作用时间的增加, 水—砧块之间的水化学作用逐渐代替了单纯的物理作用, 且水化学作用所产生的力学效应与水—砧作用时间相关。

(3) 除柴油作用外, 其它水化学溶液作用前后的砧块, 摩擦角变化不大, 而主要表现在内聚力的变化上。

(4) 关于摩擦的成因, 历史上曾有凹凸说和粘合说的争论<sup>[7,8]</sup>, 凹凸说认为摩擦力的大小与材料形状有关, 与材料的性质无关; 而粘合说则认为摩擦力的大小与材料形状无关, 与材料的性质有关。随着近代分子运动论学说的提出以及现代科学测试技术的突飞猛进, 目前关于摩擦的成因, 这两种学说已逐渐得到统一<sup>[9]</sup>。根据本文的实验结果, 我们认为水溶液与砧块之间的相互作用 (包括物理作用和水化学作用) 的摩擦力学效应是这两种学说能和谐统一的具体表现, 水—砧之间的物理作用侧重于摩擦成因的凹凸说, 而水化学作用则偏向于摩擦成因的粘合说, 不同性质的水溶液、不同的材料, 水化学作用后的力学效应是不同的。

(5) 水化学作用主要是对内聚力有作用, 并与作用时间有关;

(6) 根据表 1 的数据 (柴油浸泡的除外), 将水化学作用前、后剪切面在不同正压力下的剪切强

度进行曲线拟合分析 (图 1), 可以看出实验结果均较好地满足摩尔—库仑定律。

(7) 水化学作用后较短时间内其作用为负效应损伤, 而后为正效应。

### 3 水溶液作用下剪切强度的变化及其分析

微观上, 水—砧间的化学作用改变了摩擦面上的物质组分及表面微观结构, 其宏观上的表现为砧块摩擦面上的剪切强度发生了改变, 而剪切强度的改变正是因为砧块内摩擦角  $\varphi$  及凝聚力  $c$  直接改变的结果。为定量研究这一关系, 不妨设因水化学作用后  $\varphi$ 、 $c$  的改变量分别为  $\Delta\varphi$  和  $\Delta c$ , 相应地剪切强度的增量为  $\Delta\tau$ 。根据实验结果表 1 中的数据 (柴油浸泡的除外), 将水化学作用前、后剪切面在不同正压力下的剪切强度进行曲线拟合, 可以看出, 图中的各条直线均较好地满足摩尔—库仑定律。

根据摩尔—库仑定律, 水化学作用前砧土某一剪切面上的剪切强度为:

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c \tag{3}$$

水化学作用后砧土同一剪切面上的剪切强度为:

$$\tau + \Delta\tau = \sigma \tan(\varphi + \Delta\varphi) + c + \Delta c \tag{4}$$

由式(4)减去式(3)可得到, 因水化学作用导致剪切面上的剪切强度的增量为:

$$\Delta\tau = \sigma [\tan(\varphi + \Delta\varphi) - \tan \varphi] + [c + \Delta c - c] \tag{5}$$

整理式 (5) 得,

$$\Delta\tau = \sigma \tan \Delta\varphi [1 + \tan(\varphi + \Delta\varphi) \tan \varphi] + \Delta c \tag{6}$$

$k = 1 + \tan(\varphi + \Delta\varphi) \tan \varphi$ , 化简 (6) 式得:

$$\Delta\tau = k \sigma \tan \Delta\varphi + \Delta c \tag{7}$$

根据本文的实验结果, 可以看出, 内摩擦角的增量  $\Delta\varphi$  均较小 (柴油浸泡的砧块除外), 当满足  $\Delta\varphi/\varphi \ll 1$  时, 则  $k = 1 + \tan 2\varphi > 0$ , 即  $k$  为一常数, 这时(7)式仍为摩尔—库仑定律的形式。这表明, 当  $\Delta\varphi/\varphi$  较小时, 岩土体剪切面上因水化学作用而导致的抗剪强度的增量依然满足摩尔—库仑定律, 与本文的实验结果相吻合。当  $\Delta\tau > 0$ , 即  $\Delta\tau = k\sigma \tan \Delta\varphi + \Delta c > 0$  时, 有  $\Delta\varphi > \pi - \cot(\Delta c/k\sigma)$ , 此时水化学作用的力学效应为正效应; 而当  $\Delta\tau < 0$ , 即  $\Delta\tau = k\sigma \tan \Delta\varphi + \Delta c < 0$  时, 有  $\Delta\varphi < \pi - \cot(\Delta c/k\sigma)$ , 此时水化学作用的力学效应为负效应。而单纯地  $\Delta\varphi > 0$  或  $\Delta c > 0$ , 以及  $\Delta\varphi < 0$  或  $\Delta c < 0$  均不能表明水化学作用的正或负效应。

### 4 结 论

根据实验结果及分析, 得出如下结论:

(1) 水化学作用后的岩 (砧) 土体剪切面上的抗剪强度以及因水化学作用后剪切面上的抗剪强度

增量均满足摩尔—库仑定律。

(2) 水化学溶液与码 ( 岩土体 ) 之间作用有物理作用, 也有化学作用, 相应地, 水溶液对码 ( 岩土体 ) 的力学效应有物理力学效应和化学力学效应。其中物理力学效应在时间上不连续, 而水化学作用的力学效应则具明显的时间效应, 但当水化学反应达到平衡时, 其力学效应也逐渐趋于一定值。

(3) 不同的水化学溶液, 与码块相互作用后所产生的力学效应明显不同, 宏观上表现在摩擦面上的剪切强度差异性变化。

(4) 码块在同一水化学溶液, 相同的垂直荷载作用下, 其摩擦面上的剪切强度, 随水—码块相互作用的时间不同而不同。

(5) 水溶液与码 ( 岩土体 ) 之间的化学作用所产生的力学效应有正效应, 也有负效应。水化学作用后较短时间内其作用为负效应损伤, 而后为正效应, 由此表明, 从水—岩化学作用力学效应角度, 在防治降水导致的岩土滑坡灾害时, 尤其要注意分析降水后短时间段内岩土边坡的稳定性。本文从摩尔—库仑定律出发, 推导并给出了正、负效应的定量判断公式。

参考文献:

[ 1 ] 汤连生. 水—岩土反应的力学与环境效应研究[ J ]. 岩

石力学与工程学报, 2000, 19( 5 ): 681— 682.

[ 2 ] FEUCH L J, LOGAN J M Effects of chemically active solution on shearing behavior of a sandstone[ J ]. Tectonophysics, 1990, 175: 159— 176.  
[ 3 ] FREIMAN S W. Effects of chemical environments on slow crack growth in glasses and ceramics[ J ]. J Geophys Res, 1984, 89( B6 ): 4072— 4076.  
[ 4 ] DUNNUNG B J, MILLER D M, McDONLD S. The role of the chemical environment in Frictional deformation: Stress corrosion cracking and comminution[ J ]. Pure Appl Geophys, 1994, 143( 1/3 ): 151— 178  
[ 5 ] 冯夏庭, 赖户政宏. 化学环境下的岩石破裂特性[ J ]. 岩石力学与工程学报, 2000, 4: 403— 407.  
[ 6 ] MAIO C D The influence of pore fluid composition on the residual shear strength of some natural clay soil[ C ]. proceedings of 7th inter congress of landslides 1996.  
[ 7 ] SAITO M. Reverse calculation method to obtain  $c$  and  $\varphi$  a slip surface //Landslide[ C ]. New Delhi, 1980  
[ 8 ] BOWDEN F P, TABOR D. Friction an introduction to tribology [ M ]. Heine, Heine Mann Educational Books Ltd 1974  
[ 9 ] 曾田范宗. 摩擦[ M ]. 丁一, 译. 北京: 科学出版社, 1978: 140— 147.

An Experimental Study of Frictional Effect  
of the Chemical Action of Water on Concrete

TANG Lian sheng, ZHANG Peng cheng, WANG Yang  
ZHANF Yong xiong, LIAO Hua rong

( Department of Earth Sciences, SUN Yan set ( Zhongshan ) University, Guangzhou 510275, China )

**Abstract:** The shear strength effects of chemical kinetics of concrete are tested after reacting with different aqueous chemical solutions at normal temperature and atmospheric pressure. The results show: ①The shear strength effect of water on concrete is not only related to the physical action, but also to the chemical action; ②The shear strength effect of the chemical action of water on concrete is time dependent; ③The shear strength and the strength increments of concrete are both obeying to Mohr Coulomb rule before and after the water concrete action. Finally, the quantitative formula to determine the plus or minus effects of water concrete is derived based on the Mohr Coulomb rule.

**Key words:** water solution; concrete; water chemical action; shear strength; mechanical effect