

入占湿土重量的 10% 的水泥制成), 恰好是各土中的固体物质量的多少顺序是土 1 < 土 2 < 土 3 ~ 土 4。如果我们以原文表 2 中各土样对  $\text{OH}^-$ ,  $\text{CaO}$  的吸收量乘以水泥土中各原湿土的干容重  $\gamma_d$ , 则得到表 1 所示各水泥土的总吸收量。

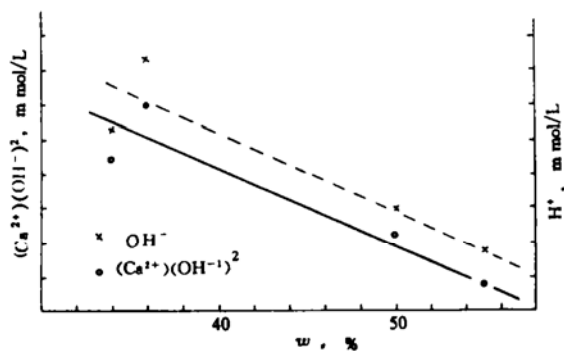


图 2  $(\text{Ca}^{2+})(\text{OH}^-)^2$ ,  $\text{OH}^-$  与  $w$  的关系 (龄期为 10 天)

上述讨论中, 笔者采用的都是原文中的数据, 而不是经过换算后的数据, 如含水量  $w$ , 干容重  $\gamma_d$  等。虽然这是不严密的, 但由于换算与不换算仅差一常数, 不影响讨论问题的本质, 为方便计, 采用了原始数据, 笔者在此致歉。

## 再谈水泥加固硬化机理<sup>①</sup>

——兼答谭罗荣先生

黄 新          周 国 钧

(冶金部建筑研究总院地基及地下工程研究所, 北京, 100088)

### 1 水泥土强度的构成及土样对水泥土强度的影响方式

如何认识水泥土强度的构成及土样对水泥土强度的影响方式, 是进行水泥土硬化机理研究首要解决的问题。

水泥土强度增长的基本原理是基于水泥和软土间的物理-化学反应, 不仅存在水泥的水化硬化, 而且伴随着土体与水泥水化物的相互作用。水泥土强度的构成主要为图 1 所示 4 个层次: 土的固有结构, 物理改良, 水泥硬化, 硬凝反应。其中水泥硬化对强度的贡献最大。

土样中影响水泥土强度发展的因素很多, 诸如  $\gamma$ ,  $w$ ,  $e$ ,  $I_p$ ,  $w_p$ , 粒径, 有机质种类及含量, 土样的阳离子交换容量, 土中可溶盐的种类及含量, 土样 pH 值, 粘土矿物种类和非晶质含量, 以及非晶质的铝硅比, 等等。土样各种因素的影响过程是复杂的, 水泥土强度的一个构成层次可能受到土样几种不同因素的影响; 土样一个因素又可能对几个强度构成层次产生影响。应特别注意: 很多化学性因素都可能参与或影响水泥水化硬化的反应过程, 并对水泥土强度产生很大影响。

以上概略叙述了目前国内外研究成果, 从中可以得到这样的概念: 水泥土强度的构成是多层次的; 土样中影响水泥土强度的因素是多样的。

水泥土强度构成的多层次性和土样对水泥土强度的影响因素的多样性, 决定了对水泥土硬化机理的研究应当是多角度、多层次的。不仅要研究土样的物理力学性质对水泥土强度的影响, 更应研究土样化学性因素的影响。不仅要研究单一因素的影响更应注重多种因素的综合影响。不仅要研究“土的固有结构”层

① 到稿日期: 1994-10-25.

次的反应过程,更应研究“水泥硬化”这一层次的反应过程。不仅要从事土质学角度研究水泥土的硬化过程,还应从水泥化学角度进行研究,等等。只有这样,才可能全面地认识水泥土强度增长机理,才可能正确地描述土样因素与水泥土强度的关系。

## 2 与谭罗荣先生商榷

对水泥土硬化机理的研究,在我国几乎是一片未开垦的处女地。笔者仅作了初步的探索性的试验。提出了一些新的思想和观点。谭罗荣先生对原文的观点(即“水泥加固硬化机理初探”一文)提出了不同意见(以下称讨论稿),笔者非常感谢,并借此机会就有关问题进行答复。

(1) 讨论稿根据原文给出的  $\text{OH}^-$  或  $[\text{Ca}^{2+}] \cdot [\text{OH}^-]^2$  与  $w$  呈线性关系的现象推断:“孔隙水中  $\text{OH}^-$  等的浓度及  $[\text{Ca}^{2+}] \cdot [\text{OH}^-]^2$  的差异,主要不是土样对  $\text{OH}^-$ 、 $\text{CaO}$  的吸收差异造成,而是因含水量的差异所造成”。并据此进一步提出:“认为水泥土强度的高低是由于不同土样中水泥水化物生成量不同造成的,不同土样将水泥水化物的生成过程有明显的影响的认识,在原文研究的条件下是成问题的。”

土样  $w$  变化影响水泥土孔隙水浓度,这是不言而喻的。但“原文”数据中  $w$  与浓度表面上的线性关系并不表明水泥土中  $\text{OH}^-$  等浓度的变化仅是  $w$  差异所致。

以试样1和试样4为例,与其相对应的土样1和土样4的含水量和干容重分别为  $w_1 = 55\%$ ,  $\gamma_{d1} = 10.97$ ,  $w_4 = 36\%$ ,  $\gamma_{d4} = 13.31$ 。试样中的水量总重  $W_w = (w \cdot \gamma_d \cdot v) / 100\%$ 。由此算得试样1与试样4中水量之比  $W_{w1} / W_{w4} = 1.26$ 。若试样孔隙水中浓度仅受土样  $w$  的影响,则两试样中溶质应相等,设溶质(如  $\text{OH}^-$ )量为  $x$ ,应有下式成立:

$$\frac{[\text{OH}^-]_1}{[\text{OH}^-]_4} = \frac{x / W_{w1}}{x / W_{w4}} = \frac{1}{1.26}, \text{即} [\text{OH}^-]_4 = 1.26 [\text{OH}^-]_1$$

然而,根据试验结果,在2d龄期时,试样1和试样4的  $\text{OH}^-$  浓度分别为  $[\text{OH}^-]_1 = 18.33 \text{ mmol/l}$ ,  $[\text{OH}^-]_4 = 75.29 \text{ mmol/l}$ , 即  $[\text{OH}^-]_4 = 4.13 [\text{OH}^-]_1$ , 这远大于土样  $w$  带来的浓度差异。由此可以确认,水泥土中  $[\text{OH}^-]$  等浓度的差异除因  $w$  不同带来一定影响外,主要是因各土样对  $\text{OH}^-$ 、 $\text{CaO}$  的吸收量不同所致。

基于这一试验事实,根据“原文”所引述的水化硅酸钙(CSH)生成的热力学平衡式可知,CSH是由  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{OH}^-$  等离子化合而成,水泥土试样孔隙水中的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{OH}^-$  浓度不同,其中的CSH生成量必然不同。“原文”中扫描电镜的观察也清楚地证实:随着孔隙水中  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{OH}^-$  浓度的增加,水泥土中的水化物明显增多。“原文”所提出的:“在水泥土  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  不饱和的条件下,土质对  $\text{OH}^-$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  吸收量的不同使得水泥土中CSH等水化物的生成量不同,进而导致水泥土强度产生差异”的论点,显然是成立的。“原文”中测量土的吸收量的试验方法不够理想,只能给出粗略的定性结果,其数据只能作为辅助证据。没有它也可以得到同样的结论。

(2) “讨论稿”以原文提供的土样数据推算出  $\gamma_d$ , 以此作为横坐标,以水泥土抗压强度  $q_u$  为纵坐标,得出“原文”给出的数据中  $q_u$  与  $\gamma_d$  成线性关系,并再次根据现象上的线性关系推断:“如果各土样的  $\gamma_d$  一样,则它们的水泥土强度也会大致一样”。“造成水泥土  $q_u$  的巨大差异的主要原因是土中能与水泥起作用的固体物质的多少,而非其它因素。”并提出“原文”中所述水泥土的硬化过程不同于砼,并认为它们之间有质的区别的论断是值得商榷的。”

笔者之一早已指出<sup>[1]</sup>:水泥土  $q_u$  随着土样  $w$  的降低而增大。然而随着实践和研究的深入,发现实际情况并非如此简单。表1列出部分文献给出的数据。这些数据表明:天然土样  $w$ ,  $\gamma_d$  与水泥土  $q_u$  之间并不存在相关关系,这说明在土样的各因素中除了  $w$  (或  $\gamma_d$ ) 外,还有其它的因素对水泥土  $q_u$  有影响,

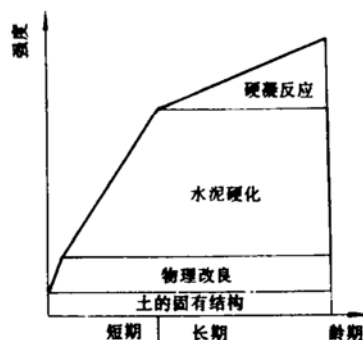


图1

而且其影响远比  $w$  为大。

表 1 土样物理力学指标与水泥土强度

| 编号 | 试验土样        | $\gamma$<br>( $\text{kN/m}^3$ ) | $w$<br>(%) | $\gamma_d$<br>( $\text{kN/m}^3$ ) | $e$  | $a_w$<br>(%) | 水泥标<br>(#) | $q_u$<br>( $\text{kPa}$ ) | 备 注           |
|----|-------------|---------------------------------|------------|-----------------------------------|------|--------------|------------|---------------------------|---------------|
| 1  |             |                                 | 47         |                                   |      |              |            | 2320                      | 文献 [1]        |
| 2  |             |                                 | 62         |                                   |      |              |            | 2120                      | 文献 [1]        |
| 3  | 粉土          | 18.9                            | 28.5       | 14.7                              | 0.84 | 13.5         | 425        | 1976                      | 文献 [2]        |
| 4  | 淤泥质<br>粉质粘土 | 17.9                            | 36.1       | 13.1                              | 1.06 | 13.5         | 425        | 1179                      | 文献 [2]        |
| 5  | 淤泥质<br>粉质粘土 | 17.9                            | 37.2       | 13.0                              | 1.08 | 13.5         | 425        | 2390                      | 文献 [2]        |
| 7  |             | 16.0                            | 60         | 10.0                              | 1.55 | 10           | 325        | 1155                      | pH=7.6 文献 [3] |
| 8  |             | 17.0                            | 40         | 12.1                              | 1.20 | 10           | 325        | 450                       | pH=6.7 文献 [3] |
| 9  |             | 17.0                            | 40         | 12.1                              | 1.20 | 10           | 425        | 900                       | pH=6.7 文献 [3] |
| 10 |             | 18.0                            | 30         | 13.8                              | 0.80 | 16           | 425        | 750                       | pH=5.4 文献 [3] |

在砂中惰性的粗骨料不与水泥发生反应，硬化过程只是水泥的水化硬化。使用同质同量的水泥在砂中必然产生同量的水化物。因此，影响砂强度的仅是砂的密实度。而在水泥土中，由于土样对  $\text{CaO}$ 、 $\text{OH}^-$  的吸收作用，影响了水泥水化物的生成量，使得同质同量水泥在不同土样中水化物生成量不同。因此与砂不同，土样对水泥土强度的影响至少发生在“土的固有结构”（密度）和“水泥硬化”（水化物生成量）两个层次上，而且在一定的  $w$  和水泥掺入量内，后者常常是主要的。“原文”的试验数据也是如此。

土样 1、土样 4 的  $\gamma_d$  分别  $\gamma_{d1}=10.97$ ， $\gamma_{d4}=13.31$ ；试样 1、试样 4 的  $q_u$  分别为  $q_{u1}=818\text{KPa}$ 、 $q_{u4}=1574\text{KPa}$ 。 $\gamma_{d4}/\gamma_{d1}=1.21$ ， $q_{u4}/q_{u1}=1.92$ 。即使仅以密度决定强度的砂中， $\gamma_d$  仅提高 20%，也不可能使  $q_u$  增长一倍<sup>[4]</sup>。因此，虽然在现象上  $\gamma_d$  与  $q_u$  成线性关系，但强度差异决不仅是  $\gamma_d$  的差异造成，水泥水化物生成量的差异起很大的作用。根据扫描电镜的观察可以明显地看到水泥土各试样中水化物生成量与相应的水泥土强度具有明显的相关性。

综上所述，虽然“原文”在土样选择以及测定土样吸收量的试验方法上有所欠缺，评论对  $q_u$  的影响因素时，省略了对  $w$ ， $\gamma_d$  作用的评述，但是“原文”提出的论点基本是正确的。

如前节所述，树立“水泥土强度构成的多层次性，土样对水泥土强度影响因素的多样性”的基本认识，对研究水泥土硬化机理是很重要的。缺乏这样的认识，片面强调土样某一因素或某一强度构成层次的作用，轻易地否定或忽视其他因素、其他层次的影响和作用，就可能得出片面的甚至错误结果。

参 考 文 献

[1] 《地基处理手册》编写委员会，地基处理手册，北京：中国建筑工业出版社，1988. 408.

[2] 胡同安等，水泥－磷石膏固化剂的试验研究，见：第七届全国土力学及基础工程学术会议论文集，北京：中国建筑工业出版社，1994.

[3] 黄新等，土质条件对深层搅拌法地基加固效果的影响，见：深层搅拌法设计施工经验交流会议论文集，1993. 11.

[4] 《胶凝材料科学》编写组，胶凝材料学，北京：中国建筑工业出版社，1980. 126.