氢氧化铝——水泥土添加剂试验研究

童小东　　龚晓南
（东南大学土木工程学院，南京，210096）（浙江大学土木工程学系，杭州，310027）

提　要　本文通过一系列室内试验，揭示了将氢氧化铝作为一种添加剂在提高水泥土强度方面所起到的显著作用，并依据水泥加固土以及水泥水化、硬化的原理分析了它的作用机理。

一　前　言

水泥系深层搅拌法由于具有众多优点，近十几年来在我国分布有较多软土的地区得到广泛应用，发展很快。在目前的规范和水泥系深层搅拌桩的施工中，常规的添加剂为石膏、三乙醇胺。本文通过一系列试验，表明掺加氢氧化铝对水泥土强度的提高有显著作用而且不会对施工带来不便，并分析了其作用机理。

二　室内试验

1. 试验准备

采集土样，确定试验所用试剂。

(1)土样：

试验所用土样取自深圳某工地，为海相沉积的亚粘土，深灰色，有臭味，软塑状，含有碎贝壳。土样的主要物理力学性质指标见表 1。

表 1　土样的主要物理力学性质指标

含水量 ω (%)	重　度 γ (kN/m³)	孔隙比 e	液　限 w_L (%)	塑性指数 I_p (%)	液性指数 I_l	压缩系数 a_{1-2} (MPa⁻¹)	粘聚力 c (kPa)	内摩擦角 φ (°)	无侧限抗压强度 q_u (kPa)
33.2	18.9	0.88	34.8	13.0	0.88	0.46	22.0	4.2	58.1

(2)试剂：

①水泥：姬堂牌 425#普通硅酸盐水泥（广州市姬堂水泥厂制造）

②$Al(OH)_3$：分析纯

③木钙（木质素磺酸钙）

2. 试验方案

由于全面试验的工作量太大，故试验方法采用正交设计。正交设计可以把试验安排和数据处理两者紧密地结合起来，既能减少试验次数，又可以提供丰富的试验数据，还能得到全面、正确的结论，因此是一种科学地安排试验方案和分析试验结果的好方法。

设计出正交设计因素水平表，见表2。

表2 正交设计因素水平表

因素 / 水平	A 水泥掺入比（占土重，%）	B 氢氧化铝掺入比（占土重，%）	C 水灰比（水重/水泥重）	D 木钙掺入比（占水泥重，%）
1	10	0.5	0.5	0.2
2	12	1.0	0.6	0.4
3	14	2.0	0.7	0.6

对因素水平可列出正交表，按正交表需做9组试样。考虑到7天、30天和90天三个龄期，每组试样又分为3个小组，每个小组做3个平行试样，共计81个试样。

为了对比试验效果，做了水泥掺入比（占土重）分别为10%，12%，14%，16%，18%和20%，水灰比均为0.5，木钙掺入比（占水泥重）均为0.2%的6组共18个小组的试样。还做了水泥掺入比（占土重）为14%，木钙掺入比（占水泥重）为0.2%，水灰比分别为0.6，0.7和0.8的3组共9个小组的试样。

3. 试样的制备

试模采用 70.7mm×70.7mm×70.7mm 规格。按配方配制水泥浆液，然后加入对应量的土样人工揉和均匀。试样采用手工压注成型。静置 24 小时后脱模编号，为了保证其湿度，进行水下养护。

4. 无侧限抗压强度试验

(1)设备：采用压力试验机，其量程可根据需要调节，分为 0.5 吨，1 吨，2 吨，5 吨和 10 吨 5 个档次。量程的选用依照应能使试样的预计破坏荷载不小于全量程的 20%，也不大于全量程的 80%的标准。

(2)测定养护龄期分别为 7 天、30 天和 90 天的试样的无侧限抗压强度。

(3)把试样放在试验机下压板中心，试样的承压面与成型时的顶面垂直。使承压面与压板接触均衡，避免使试样发生应力集中。

(4)以空载速率为 4±0.3mm / min 的速度连续而均匀地加荷，直至试样破坏，记录破坏荷载。试验时应绝对禁止使试样受冲击荷载。

5. X 射线衍射试验和扫描电子显微镜试验

做以下两组试样在 7 天、30 天和 90 天的 X 射线衍射试验和扫描电子显微镜试验：

(1)水泥掺入比（占土重）为 14%，水灰比为 0.7，木钙掺入比（占水泥重）为 0.2%；

(2)水泥掺入比（占土重）为 14%，水灰比为 0.7，氢氧化铝掺入比（占土重）为 0.5%，木钙掺入比（占水泥重）为 0.4%。

三 试验结果计算与整理

1.水泥土无侧限抗压强度按下式计算

$$q_u = \frac{P}{A}$$

式中 q_u——试验龄期下的水泥土无侧限抗压强度（kPa）；

P——破坏荷载（kN）；

A——试样承压面积（m^2）。

2.取 3 个平行试样测值的算术平均值作为该小组试样的无侧限抗压强度值。当单个试样的测值与平均值之差超过平均值的±15%时，该试样的测值应剔除，按余下试样的测值计算平均值。如一组试样不足 2 个，则该组试验结果无效，须重做。

3.试验结果及分析：根据无侧限抗压强度试验结果，结合 X 射线衍射试验和扫描电子显微镜试验（由于篇幅所限，略去部分试验结果表格及扫描电子显微镜照片），对不同龄期掺氢氧化铝水泥土无侧限抗压强度的试验结果作出分析。

表 3 单掺水泥试样的无侧限抗压强度 q_u

水泥掺入比（占土重）（%）	木钙掺入比（占水泥重）（%）	水灰比（水重/水泥重）	q_u（MPa）		
			7d	30d	90d
10	0.2	0.5	0.644	1.526	2.267
12	0.2	0.5	0.752	1.728	2.635
14	0.2	0.5	0.860	1.883	2.853
14	0.2	0.6	0.833	1.825	2.808
14	0.2	0.7	0.805	1.779	2.770
14	0.2	0.8	0.739	1.713	2.707
16	0.2	0.5	0.955	2.140	3.143
18	0.2	0.5	1.069	2.298	3.365
20	0.2	0.5	1.182	2.406	3.647

（1）7 天龄期的试验结果分析

由试验结果知，影响抗压强度的主要因素是水泥掺入比，次要因素是木钙掺入比，最佳组合条件是 A_3D_2。强度值普遍高于相同水泥掺入比、单掺水泥试样同龄期的强度值。如采用最佳组合条件，强度值可比相同水泥掺入比试样提高 39%以上，可节省水泥 22%以上。主要原因是由于掺入氢氧化铝后，降低了溶液的碱度，从而促进了水泥组份的水解水化，并生成了一些新的产物，使得强度得到了提高。

（2）30 天龄期的试验结果分析

由试验结果知，影响抗压强度的主要因素是水泥掺入比，次要因素分别是氢氧化铝掺入比、水灰比和木钙掺入比，最佳组合条件是 $A_3B_3C_1D_1$。强度值普遍高于相同水泥掺入比、单掺水泥试样同龄期的强度值。如采用最佳组合条件，强度值可比相同水泥掺入比试样提高 37%以上，水泥掺入比 a_w=20%的单掺水泥试样的强度值尚不能达到其强度值，故至少可节省水泥 30%以上。主要原因是由于掺入氢氧化铝后，降低了溶液的碱度，从而促进了水泥组份的水解水化。另外，氢氧化铝还与水泥的水化产物及土中有关成分生成了一些复杂的化合物，从而提高了强度。

（3）90 天龄期的试验结果分析

由试验结果知，影响抗压强度的主要因素是水泥掺入比，次要因素是水灰比，最佳组合条件是 A_3C_1。强度值普遍高于相同水泥掺入比、单掺水泥试样同龄期的强度值。如采用最佳组合条件，强度值可比相同水泥掺入比试样提高19%以上，可节省水泥22%以上。主要原因是氢氧化铝与水泥水化产物和土中有关成分反应生成一些复杂的化合物，填充了水泥土的孔隙，形成较致密的结构，从而提高了强度。但由于水化铝酸钙系列产物不及水化硅酸钙系列产物的强度高，所以氢氧化铝掺入水平的变化不是影响标准强度的主要因素。

四 结 论

通过对以上试验结果的分析可以得知，在水泥土中掺加适量的氢氧化铝，可使水泥土的早期、中期和后期强度都得到提高，尤其是可大幅度地提高早期、中期强度，节省水泥，从而达到增效节材的目的。另外，试验过程表明，在水泥中掺加氢氧化铝，对水泥浆液的流动性不会产生不利影响。

由此可知，将氢氧化铝应用于水泥系深层搅拌法中，既可达到提高水泥土强度的效果，又不会增加施工难度，因此可作为一种较好的添加剂，值得进一步深入研究。

参考文献

[1] 董小东：《水泥土添加剂及其损伤模型试验研究》，见《浙江大学博士学位论文》，1998。

[2] 龚晓南：《地基处理新技术》，西安，陕西科学技术出版社，1997。