

文章编号:1001-4888(2020)02-355-10

掺膨胀剂水泥石承载力及抬升效应试验研究*

涂保林^{1,2}, 雷进生^{1,2}, 马波², 戴康², 武增琳²

(1. 防灾减灾湖北省重点实验室(三峡大学), 湖北宜昌 443002; 2. 三峡大学 土木与建筑学院, 湖北宜昌 443002)

摘要: 利用膨胀剂遇水反应体积膨胀、受约束条件下压强增大的材料特性,探究掺膨胀剂水泥石加固与抬升效应。对掺膨胀剂水泥石进行承载力和膨胀率试验,得到了水泥石抗压强度和体积随不同因素变化的相关曲线。试验结果表明:水泥石中加入膨胀剂后,其承载力和膨胀率有明显提高,验证了利用膨胀性注浆材料加固地基与基础抬升效果的可行性,通过函数拟合得到水泥石位移与反应时间之间呈现良好的指数关系。

关键词: 膨胀剂; 膨胀率; 承载力; 地基加固; 基础抬升

中图分类号: TU431 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-18-211

0 引言

目前国内外多采用平移法、顶升法、注浆法、迫降法、桩基托换法等方法对地表建筑物进行加固、保护和纠偏^[1]。注浆是土木工程防渗、堵漏、加固和纠偏的重要方法^[2,3],浆液在地层中的作用有 4 种方式:渗透、填充、挤密和劈裂^[4-7]。补偿注浆以填充挤密为主,抬升注浆以劈裂为主^[8,9]。

为提高工程的安全性或者减小施工难度,注浆技术被应用于既有地下结构的沉降恢复,即通过注浆抬升技术恢复既有结构沉降和差异沉降^[10-12]。侯艳娟等^[13]研究了注浆抬升机制和四阶段作用模式,并总结了建筑物稳定抬升的施工技术要点。殷跃平等^[14]对松散堆积体建筑物地基进行注浆加固试验证明,地基注浆加固后,采用箱形或条形基础,可大大降低基础处理造价,满足 7~8 层楼房地基承载力要求。易小明等^[15]对下穿隧道的密集建筑群现场房屋的抬升实践和监测分析发现,注浆地层抬升与房屋抬升是不一致的,只有较大范围、稳定的、均匀的、不消散的地表抬升,才能形成安全有效的房屋抬升。

现有注浆材料大多以水泥浆为主。但水泥浆存在硬化时析水和固相体积收缩问题,这导致硬化结石与被灌基体的粘结强度降低,形成新的渗水、窜气通道,影响地基加固质量。

膨胀剂是一种通过理化反应引起体积膨胀的材料,已广泛应用于材料生产、无声爆破、采矿接顶、石材切割等方面^[16]。结构工程中膨胀剂主要用于补偿混凝土材料硬化过程中的体积收缩,增加密实性,防止混凝土开裂^[17,18]。

本研究利用膨胀剂遇水反应体积膨胀、受约束条件下压强增大的材料特性,尝试将其推广应用到注浆抬升加固方面。考虑在水泥浆中掺入膨胀剂来改善水泥浆液性能,研究在补偿水泥浆体积收缩、增加硬化结石密实度的同时,通过提高硬化结石强度和承载力,分析利用膨胀性注浆材料抬升基础和纠偏结构的可行性。

* 收稿日期: 2018-09-18; 修回日期: 2018-11-04

基金项目: 国家自然科学基金(51709155, 51279092)

通讯作者: 雷进生(1970-),男,博士,教授。主要从事基础工程加固方法与计算理论、结构安全监测与评估等方面的工作。

Email: lei-jinsheng@163.com

1 试验材料及设备

1.1 试验材料

(1) 试验用水泥为湖北省宜昌市三峡牌水泥, P. O42.5。水泥的基本性能指标见表1。

表1 普通硅酸盐水泥性能指标及化学成分

Tab.1 Performance index and chemical composition of ordinary portland cement

检测项目	密度	容重	三氧化硫	氧化镁	氯离子	烧失量	比表面积	初凝时间	终凝时间	强度/MPa	
	/(g/cm ³)	/(kg/L)	/%	/%	/%	/%	/(m ² /kg)	/min	/min	3d	28d
实测	2.9	1.4	<3.5	<5.0	<0.06	<5.0	312	221	304	22.4	43.2

(2) 试验土壤取自三峡库区施工场地, 主要的物理指标如表2所示。收集原状土, 将其风干、粉碎, 通过2.4mm方孔筛制备土样进行试验, 密封储存。

表2 试验用土的物理性质指标

Tab.2 Physical properties index of soil for test

密度/(g/cm ³)	含水率/%	粘聚力 c/MPa	内摩擦角 φ	弹性模量 E/MPa
2.394	15	0.02	22°5'50"	3.48

(3) 膨胀剂按其膨胀源的化学组成可以分为硫铝酸钙类膨胀剂、氧化钙类膨胀剂和复合膨胀剂等。硫铝酸钙遇水生成水化产物硫铝酸钙, 其体积为水化前化合物体积的2.5倍, 使水泥体积稍有膨胀。氧化钙与水反应生成氢氧化钙, 固相体积增加。本研究将硫铝酸钙和氧化钙按合适的比例配成复合膨胀剂, 其膨胀效果更好。基本参数如表3所示。

表3 膨胀剂的基本参数

Tab.3 Basic parameters of expansive agent

比表面积 /(cm ² /g)	细度		含水率 /%	氧化镁 /%	总碱量 /%	增强剂 /%	聚丙烯 纤维/%	氯离子 /%	凝结时间	
	0.08mm 筛筛余/%	1.25mm 筛筛余/%							初凝 /(min)	终凝 /(min)
≥2500	≤7.2	≤0	≤2.92	≤1.8	≤0.478	0.3	0.2	≤0.009	≥155	≤245

1.2 试验设备

试验用设备有水泥砂浆搅拌机、水泥胶砂振动台、压力机、千分表、磁性表座、电子天平等。水泥土装入150mm×150mm×150mm金属试模完成膨胀性试验, 上部布置承压板和规定荷载。

2 水泥土承载力试验

2.1 试验内容

以水灰比、土体含水率、水泥掺入比、膨胀剂掺量和龄期5个因素为控制条件, 各取5个水平。选用L₂₅(5⁶)正交表进行正交试验, 设计25组试验配方, 每组制备3个平行样品, 试验指标为水泥土的无侧限抗压强度, 为推算试验误差和评定试验的可靠性设置了一个空列。试验方案详见表4。

表4 水泥土承载力试验因素水平

Tab.4 Cement soil bearing capacity test factor level

因素	A 水灰比	B 土体含水率	C 水泥掺入比	D 膨胀剂掺量	E 龄期	e 空列
水平1	0.4:1	30%	15%	0	7	
水平2	0.5:1	35%	20%	4%	14	
水平3	0.6:1	40%	25%	6%	21	
水平4	0.7:1	45%	30%	8%	28	
水平5	0.8:1	50%	35%	10%	60	

2.2 承载力试验结果与分析

水泥土承载力试验结果如表5和图1所示。

表5 水泥土抗压强度试验及结果
Tab.5 Compressive strength test and results of cement soil

试验号	列号						试验指标 抗压强度 /MPa
	A	B	C	D	E	e	
	1	2	3	4	5	6	
1	1	1	1	1	1	1	2.5
2	1	2	2	2	2	2	3.8
3	1	3	3	3	3	3	4.4
4	1	4	4	4	4	4	5.0
5	1	5	5	5	5	5	5.3
6	2	1	2	3	4	5	6.8
7	2	2	3	4	5	1	6.8
8	2	3	4	5	1	2	3.8
9	2	4	5	1	2	3	2.4
10	2	5	1	2	3	4	0.78
11	3	1	3	5	2	4	5.1
12	3	2	4	1	3	5	4.6
13	3	3	5	2	4	1	5.0
14	3	4	1	3	5	2	1.1
15	3	5	2	4	1	3	1.03
16	4	1	4	2	5	3	7.3
17	4	2	5	3	1	4	3.6
18	4	3	1	4	2	5	2.1
19	4	4	2	5	3	1	2.4
20	4	5	3	1	4	2	1.68
21	5	1	5	4	3	2	6.1
22	5	2	1	5	4	3	3.3
23	5	3	2	1	5	4	2.3
24	5	4	3	2	1	5	1.22
25	5	5	4	3	2	1	2.3

分析图1可知：

(1) 随着水灰比增大,水泥土抗压强度逐渐减小。分析原因为,水灰比的增大导致水泥土孔隙率变大,内部变得疏松,抗压强度减小。水泥土无侧限抗压强度随着含水率增大而逐渐变小。含水率低时,水泥土强度降幅较大,含水率高时,水泥土强度降幅较小。这是由于含水率提高,水泥和膨胀剂颗粒扩散速率加快,未发生反应就在孔隙中沉淀,使其强度减小^[19]。

(2) 随水泥掺入比的增大,水泥土抗压强度先增大后略减小,当水泥掺入比为30%时,水泥土抗压强度最大,继续增大水泥掺入比,水泥土强度稍降低。这与宁宝宽等^[20]的结论一致。

(3) 随膨胀剂掺量的增加,水泥土抗压强度显著提高,当膨胀剂掺量为8%时,水泥土抗压强度最大,较0%时提高了1.51MPa。继续增加膨胀剂掺量,水泥土强度略下降。

(4) 水泥土抗压强度随龄期的增大而增大,前期增长幅度较大,近似直线增长,28d后,强度增长缓慢并趋于稳定。这是因为固化时间越长,水泥土内部理化反应就越充分,渐渐形成胶结物,使水泥土内部的孔隙和裂缝减少,整体的密实度和稳定性提高^[19]。

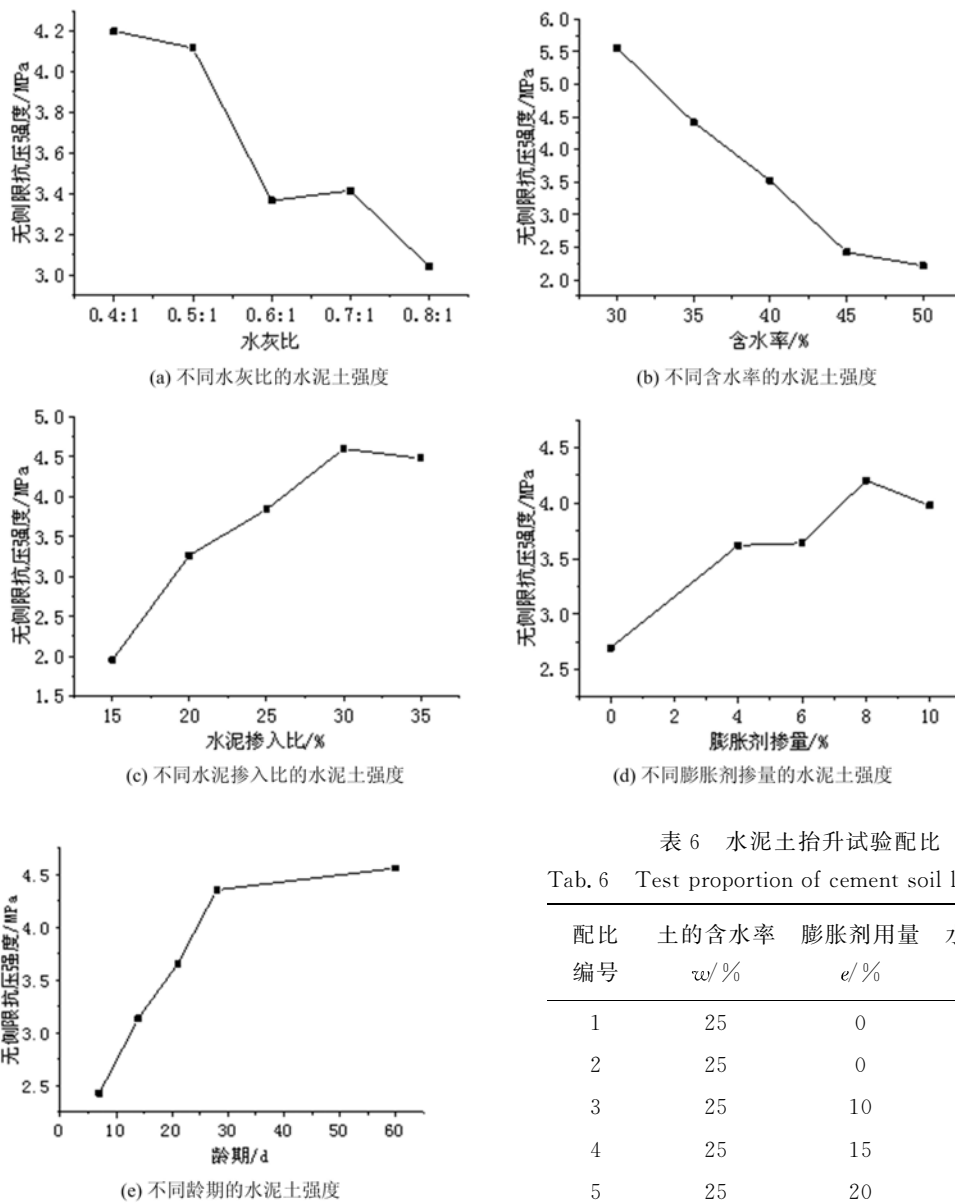


图1 各因素水平与指标平均值的关系
Fig.1 Relationship between level of each factor and average value of index

表6 水泥土抬升试验配比

Tab.6 Test proportion of cement soil lifting test

配比 编号	土的含水率 $w/\%$	膨胀剂用量 $e/\%$	水泥用量 $c/\%$
1	25	0	0
2	25	0	20
3	25	10	20
4	25	15	20
5	25	20	20
6	30	10	20
7	30	15	20
8	30	20	20
9	35	10	20
10	35	15	20
11	35	20	20

3 水泥土膨胀率试验

3.1 试验内容

试验测定土体的不同含水率和不同膨胀剂掺量下水泥土试块的位移。纯土样和不加膨胀剂的两组试验为对照组。具体试验组别如表6所示,表中水泥和膨胀剂用量均按土质量的百分比计算。

3.2 试验原理及装置

将配制好的水泥土装入金属模具,把略小于模具内截面积的薄承压板放在掺膨胀水泥土样的表面,在承压板上施加重物,千分表垂直固定于重物上表面,千分表量杆测头与重物上表面接触。重物的自重荷载通过传力柱和承压板向下均匀传递至水泥土试块,固定于支架上的千分表即可测出恒定荷载下水

泥土样上表面位移与时间的关系。试验得到的水泥土试块位移既体现了水泥土的体积变化,即膨胀率,又反映了水泥土的抬升能力。试验装置如图 2 所示。

3.3 试验步骤

(1) 取密封储存的土样,分别配制含水率 25%、30%、35%的试验土各 3 组,浸润 24h 后备用。

(2) 按表 6 所示的配合比称取水泥和膨胀剂,搅拌均匀。用 150mm×150mm×150mm 标准试模浇筑、振实、成型。成型前,试模内壁涂抹一层矿物油或其他不与水泥和膨胀剂反应的脱模剂。试模固定在振动台上振实,振实时间不低于 2min,振实后拌合物应高出试模上沿口,然后用抹刀抹平。

(3) 浇筑成型后,在试块上表面放置薄承压钢板。再轻轻地把刚性棱柱体放到薄承压钢板上,上部施加载荷为 133.5N 的恒荷载^[21],用千分表测量承压钢板表面位移随时间的变化量。为避免薄承压板偏斜而卡住金属模具内壁,设计的薄承压钢板宜略小于模具内截面积。

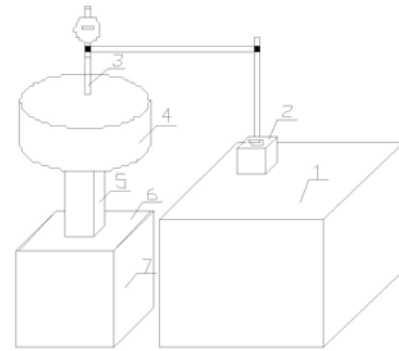
3.4 膨胀率试验结果与分析

水泥土膨胀率试验结果如表 7 和图 3、图 4 所示。

表 7 水泥土膨胀率试验结果

Tab. 7 Test results of swelling rate of cement soil

时间 /h	位移/mm										
	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#	11#
3	-0.13	-0.071	0.294	0.873	0.500	0.168	0.660	0.346	0.089	1.115	0.964
4	-0.14	-0.08	0.359	1.298	1.070	0.233	1.287	0.542	0.198	1.701	1.161
9	-0.17	-0.106	2.013	2.358	1.906	1.938	3.345	2.225	1.687	3.056	2.992
12	-0.20	-0.112	3.507	3.398	2.320	2.604	4.485	3.050	2.802	4.791	3.892
19	-0.238	-0.186	3.772	3.659	2.501	3.935	5.376	3.461	3.357	5.092	5.440
26	-0.306	-0.214	4.110	3.928	2.610	4.343	5.715	3.702	3.771	5.383	6.178
29	-0.315	-0.215	4.206	4.007	2.707	4.533	6.028	3.876	3.859	5.490	6.547
33	-0.324	-0.218	4.381	4.116	2.704	4.769	6.327	3.957	3.972	5.673	6.823
38	-0.335	-0.220	4.541	4.225	2.786	4.910	6.775	4.029	4.099	5.857	7.128
43	-0.341	-0.228	4.664	4.318	2.825	5.050	6.818	4.101	4.228	5.991	7.430
50	-0.355	-0.241	4.829	4.409	2.826	5.126	6.874	4.302	4.434	6.142	7.561
56	-0.364	-0.242	4.963	4.479	2.828	5.185	7.034	4.277	4.460	6.264	7.685
62	-0.384	-0.245	5.072	4.548	2.841	5.250	7.246	4.284	4.375	6.385	7.775
69	-0.398	-0.252	5.157	4.588	2.855	5.307	7.330	4.291	4.719	6.457	7.853
86	-0.423	-0.258	5.374	4.688	2.886	5.413	7.498	4.303	4.820	6.651	8.011
93	-0.435	-0.259	5.419	4.703	2.920	5.499	7.549	4.314	4.920	6.689	8.128
110	-0.460	-0.260	5.562	4.764	2.924	5.557	7.651	4.328	4.970	6.801	8.241
117	-0.482	-0.280	5.587	4.777	2.925	5.582	7.687	4.342	5.019	6.829	8.295
134	-0.512	-0.246	5.674	4.819	2.873	5.614	7.678	4.333	5.049	6.912	8.463
141	-0.526	-0.243	5.691	4.829	2.859	5.626	7.715	4.323	5.077	6.929	8.445
158	-0.551	-0.239	5.752	4.857	2.835	5.641	7.789	4.258	5.107	6.991	8.438
165	-0.548	-0.246	5.786	4.870	2.784	5.648	7.867	4.196	5.135	7.001	8.422
182	-0.545	-0.255	5.827	4.881	2.843	5.674	8.024	4.264	5.154	7.039	8.423
189	-0.550	-0.261	5.871	4.898	2.871	5.684	8.027	4.330	5.172	7.050	8.423



1—台座;2—磁性表座;3—千分表;
4—荷载;5—传力柱;6—承压钢板;7—模具
图 2 水泥土承载力试验装置

Fig. 2 Cement soil bearing capacity test device

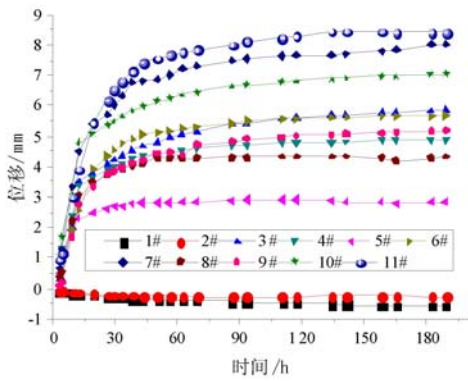


图3 不同配合比水泥土抬升试验曲线
Fig. 3 Cement soil uplift test curves with different mix proportion

分析图3和图4可以看出：

(1) 未掺加水泥和膨胀剂的1#试块沉降最大,掺加了水泥的2#试块沉降量较1#试块减小,说明土中加入水泥可以提高土体承载能力。掺加膨胀剂的试块在相同的荷载作用下,不但没有发生沉降,反而表现出不同程度的抬升效果。这说明水泥土中加入膨胀剂后,既提高了水泥土的承载能力,又使水泥土产生固相体积的增大,不仅能够弥补水泥土因受荷载作用而产生的收缩变形,而且可以向上抬升一定的位移,受力结构由被动受力转变为主动支撑。

(2) 竖向荷载作用下1#试块上部最大竖向位移为-0.551mm,表现为向下沉降。2#试块上部最大沉降量为-0.280mm,相比1#减少49.18%。这是

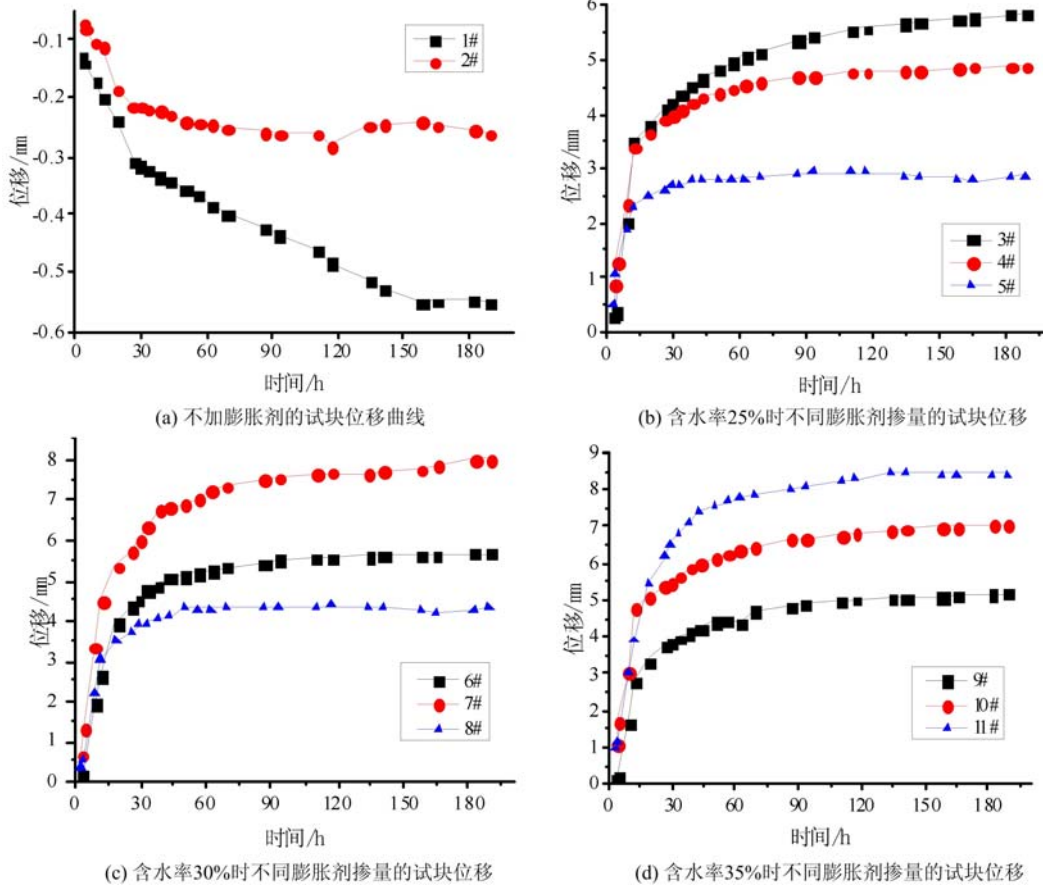


图4 不同配比水泥土试块位移

Fig. 4 Cement soil block displacement with different proportions

因为掺入水泥水化产生的微凝胶体和土粒粘结包裹并相互作用,形成密实骨架,改良了原状土,提高了土体强度。

(3) 在土体含水率均为25%时,竖向荷载作用下水泥土位移随着膨胀剂掺量的增加而减小。在膨胀剂掺量10%时,位移最大,达到5.871mm,表现为向上抬升。当膨胀剂掺量增加到15%时,水泥土试件上表面位移减小了0.973mm,继续增大膨胀剂掺量至20%,位移相对于15%时减小了1.973mm,减小幅度达40.28%。

当土体含水率为30%时,膨胀剂掺量为15%的7#试块位移最大,为8.027mm。膨胀剂掺量为

10%和 20%的 6# 和 8# 试块的位移均比 7# 有不同程度地减小。其中膨胀剂掺量为 20%的 8# 位移量差值最大,达 45.91%。同样地,土体含水率为 35%时,膨胀剂掺量 20%的 11# 试块位移最大,达 8.463mm,而膨胀剂掺量为 10%和 15%的 9# 和 10# 试块的位移量相对有不同程度的差值。其中膨胀剂掺量为 15%的 10# 试块位移差值较小,而膨胀剂掺量为 10%的 9# 试块相对于 11# 试块位移量差值达 38.89%。

(4) 土体含水率不同时,有膨胀剂的最佳掺量,膨胀剂掺量增加或者减少都会导致水泥土位移值或膨胀率的下降。这是因为膨胀剂反应与水有密切关系。当土体含水率较小时,水泥土难以以为膨胀剂的水化反应供应必要的水分,抑制了膨胀剂作用,使得膨胀剂不能充分发生水化反应发挥其膨胀特性。当土体含水率过大时,膨胀剂水化离子的扩散速率增加,还未开始膨胀就在孔隙中沉淀,从而使水泥土的膨胀率降低。水泥土中存在多余的未参加水泥和膨胀剂水化反应的游离水分子,这些游离水分子填充了水泥土中的孔隙,使得水泥土承载力下降,抬升量减小。因此,只有含水率和膨胀剂掺量相匹配时,膨胀剂才能充分发挥作用。

3.5 水泥土位移和反应时间的拟合

建立水泥土抬升位移 Δ 与水化时间 t 的函数关系:

$$\Delta = \Delta_0 + A_1 e^{-t/a_1} + A_2 e^{-t/a_2} \quad (1)$$

式中, Δ 为水泥土位移量(mm); t 为时间(h); Δ_0 、 A_1 、 A_2 、 a_1 、 a_2 为拟合参数。

拟合参数值和相关系数 R 见表 8。由表 8 可知,水泥土位移 Δ 与水化反应时间 t 的拟合相关系数 R 在 0.984~1.000 之间,拟合吻合程度很高,说明掺膨胀剂水泥土位移与水化反应时间之间呈指数关系。

试块表面位移与时间拟合曲线如图 5 所示,可以看出,水泥土竖向位移值与膨胀剂水化反应时间之间能较好地满足指数关系,掺膨胀剂水泥土抬升位移值随着时间的推移而增大,并趋于稳定。

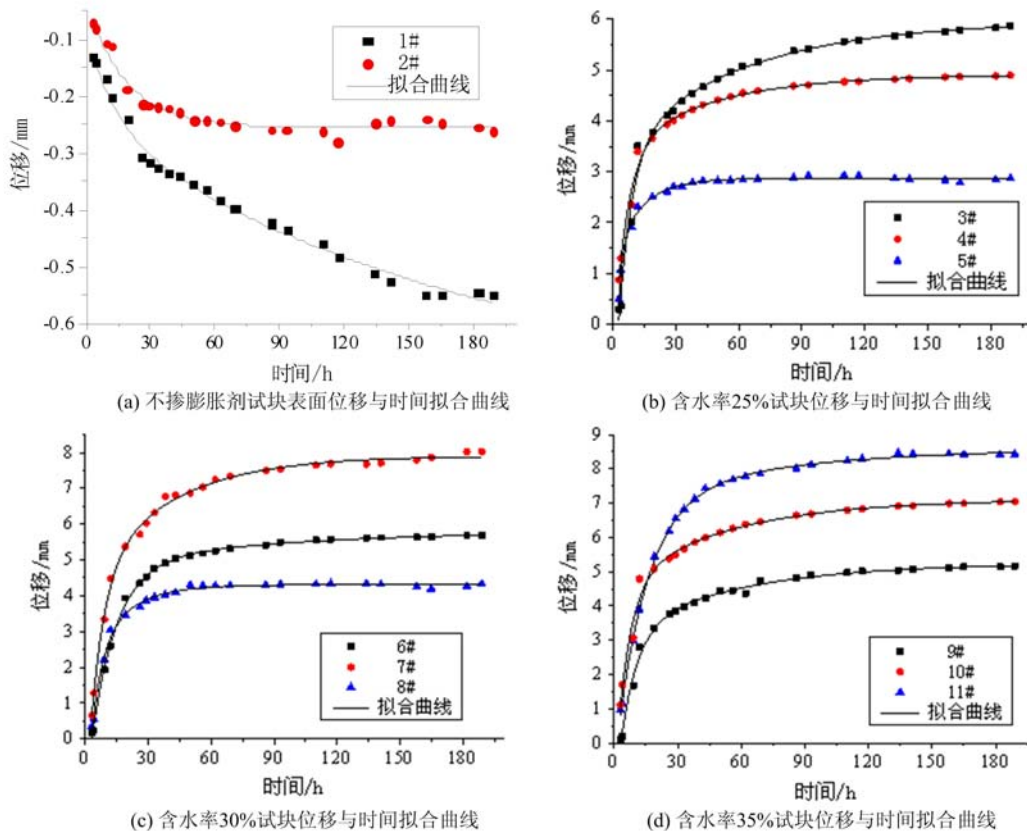


图 5 水泥土位移与时间拟合曲线

Fig. 5 Displacement and time fitting curve of cement soil

表8 水泥土位移与时间拟合相关系数及参数值

Tab. 8 Correlation coefficient and parameter between displacement and time of cement soil

编号	R	Δ_0	A_1	A_2	a_1	a_2	拟合效果
1	0.996	-0.740	0.492	0.165	183.660	14.181	良好
2	0.984	-0.255	0.113	0.113	18.562	18.563	良好
3	0.995	5.954	-5.423	-2.621	6.400	59.080	良好
4	0.997	4.903	-1.565	-4.139	44.125	6.339	良好
5	0.997	2.868	-1.635	-5.091	12.957	1.909	良好
6	0.999	5.811	-1.013	-6.238	86.309	11.795	良好
7	0.999	7.910	-6.211	-3.601	6.546	38.792	良好
8	0.997	4.312	-2.031	-4.171	17.915	5.347	良好
9	0.997	5.251	-2.121	-4.909	55.902	7.663	良好
10	0.995	7.111	-2.571	-5.825	51.573	6.242	良好
11	1.000	8.611	-1.567	-7.740	75.657	14.364	良好

将试模视为侧面和底面不可变形的约束刚体,试验结束时1#试块没有掺加水泥和膨胀剂,体积膨胀率为-0.37%,体积收缩;5#试块体积膨胀率为3.91%,11#试块体积膨胀率为5.62%。这些都为掺膨胀剂水泥进行抬升纠偏的设计控制提供了思路。

由于土体的类型差异及非均质性、物理力学参数空间分布的随机性、浆液的流变特性,注浆浆液运动过程及结石增强体的空间分布具有随机不确定性。水泥土的承载力和抬升效应,并不完全等同于对结构物的作用,而是体现在土与结石增强体的相互作用,以及土-结石增强体对结构的共同作用。相关内容详见雷进生等^[22,23]的研究。

4 结论

通过对掺膨胀剂的水泥土进行承载力试验和膨胀率试验,可以得到如下结论:

(1) 随着水泥土养护时间增加,抗压强度逐渐增大并趋于稳定,同时含水率和水泥掺入比对水泥抗压强度影响较为显著,而膨胀剂掺量以及水灰比的影响不明显。水灰比0.4:1、含水率30%、水泥掺入比30%、膨胀剂掺量8%、龄期60d的试验组合为水泥土承载力试验的最优方案。

(2) 通过改善材料特性完成地基注浆抬升和结构纠偏的过程是持续和稳定的,相比于注浆压力抬升过程,可以分析出其优势,有可能作为注浆压力抬升的替代方法,或作为其补偿措施简化注浆抬升施工方案。

(3) 水泥土中加入膨胀剂后,其承载力和膨胀率有明显提高,且水泥土位移与反应时间之间呈现良好的指数关系。当水泥掺量为20%,土体含水率为某一值时,比该值小15%的膨胀剂掺量在试验中表现效果最好,膨胀剂掺量增加或减少都会导致水泥土位移下降。这是因为膨胀剂的反应与水密切相关。

(4) 研究将膨胀剂掺入水泥进行试验,可为掺膨胀剂水泥材料用于加固地基、抬升基础、结构纠偏提供依据,试验也可作为专用复合膨胀水泥的工厂化生产和配方设计提供参考。

参考文献:

- [1] Kuo C J, Lin Y K, Shieh S C. Case study of using the low-pressure grouting method to uplift a tilted building[J]. Geotechnical Hazards from Large Earthquake and Heavy Rainfalls, 2017, 20(5):431-439.
- [2] Yi J Z, Li J H, Gui L H. Study on shear properties of rock structural plane by grouting reinforcement[J]. Advanced Materials Research, 2011, 250(1):1520-1526.
- [3] Byung Sik Chun, Yong Jae Lee, Ha Ik Chung. Effectiveness of leakage control after application of permeation

- grouting to earth fill dam[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2006, 10(6):405-414.
- [4] 吴顺川, 金爱兵, 高永涛. 袖阀管注浆技术改性土体研究及效果评价[J]. 岩土力学, 2007, 28(7):1353-1358 (WU Shunchuan, JIN Aibing, GAO Yongtao. Research and effect evaluation of modified soil by sleeve valve tube grouting technology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(7):1353-1358 (in Chinese))
- [5] Warner J. Practical handbook of grouting: soil, rock, and structures[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2004.
- [6] Lombardi G. The role of the cohesion on cement grouting of rock[C]//Proceedings of the 15th Congress on Large Dams, 1985:235-261.
- [7] 王杰, 杜嘉鸿. 岩土注浆技术的理论探讨[J]. 长江科学院院报, 2000, 17(6):82-86 (WANG Jie, DU Jiahong. Theoretical discussion on geotechnical grouting technology[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2000, 17(6):82-86 (in Chinese))
- [8] 张晓丽. 注浆抬升既有地铁机制研究[D]. 北京交通大学, 2007 (ZHANG Xiaoli. Research on the mechanism of grouting lifting existing subway[D]. Beijing Jiaotong University, 2007 (in Chinese))
- [9] 余佳力. 城市隧道建设对地表建筑物的影响研究[D]. 武汉大学, 2012 (YU Jiali. Research on the impact of urban tunnel construction on surface buildings[D]. Wuhan University, 2012 (in Chinese))
- [10] 张晓丽, 张顶立, 王梦恕. 既有地铁注浆抬升合理位置的确定[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(5):712-717 (ZHANG Xiaoli, ZHANG Dingli, WANG Mengnu. Determination of proper position of grouting during lifting the existing subway[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 10(6):405-414 (in Chinese))
- [11] 李杰, 郑新国, 刘竞. 沉降区无砟轨道结构注浆抬升原理与工艺[J]. 施工技术, 2014, 43(21):102-104, 109 (LI Jie, ZHENG Xinguo, LIU Jin. Grouting uplift mechanism and technology for ballastless track structure in settlement zone[J]. Construction Technique, 2014, 43(21):102-104, 109 (in Chinese))
- [12] 汤文岗, 李晓昭, 黄慷. 注浆沉降法建筑物纠偏加固机理与关键技术研究[J]. 工程地质学报, 2005, 13(4):551-556 (TANG Wengang, LI Xiaozhao, HUANG Kang. Mechanisms and key technology of rectification and reinforcement of structure by grouting[J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(4):551-556 (in Chinese))
- [13] 侯艳娟, 张顶立, 陈峰宾. 隧道施工下穿建筑物注浆抬升机制及预测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(12):2407-2415 (HOU Yanjuan, ZHANG Dingli, CHEN Fengbin. Study of mechanism and prediction of grouting uplift in tunnel construction undercrossing buildings[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(12):2407-2415 (in Chinese))
- [14] 殷跃平, 于文贞, 陈宝荪, 等. 三峡移民安置区松散堆积体灌浆加固试验研究[J]. 土木工程学报, 2000, 33(4):101-104 (YIN Yueping, YU Wenzhen, CHEN Baosun, et al. Experimental study on grouting consolidation of loose accumulation body in Three Gorges resettlement area[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(4):101-104 (in Chinese))
- [15] 易小明, 张顶立, 逢铁铮, 等. 房屋注浆抬升实践与监测分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(12):3776-3781 (YI Xiaoming, ZHANG Dingli, PANG Tiezheng, et al. House grouting lifting practice and monitoring analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12):3776-3781 (in Chinese))
- [16] 牟善彬, 孙振亚, 苏小萍. 高游离氧化钙水泥的显微结构与膨胀机理研究[J]. 武汉理工大学学报, 2001, 23(11):27-29 (MOU Shanbin, SUN Zhenya, SU Xiaoping. A Study on the microstructure and expanding mechanism of highly free-calcium oxide cements[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2001, 23(11):27-29 (in Chinese))
- [17] 李承木. 氧化镁混凝土自生体积变形的长期试验研究成果[J]. 水力发电学报, 1999(2):11-20 (LI Chengmu. An experimental study of the autogenous volume deformation of the MgO concrete [J]. Journal of Hydroelectric Power Generation, 1999(2):11-20 (in Chinese))
- [18] Peiwei Gao, Xiaolin Lu, Mingshu Tang. Shrinkage and expansive strain of concrete with fly ash and expansive agent[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 24(1):150-153.
- [19] 鲁文浩, 马波, 戴康. 掺膨胀剂的水泥土无侧限抗压强度试验研究[J]. 山西建筑, 2017, 43(36):101-102 (LU Wenhao, MA Bo, DAI Kang. Experimental study on unconfined compressive strength of cement soil[J]. Shanxi Architecture, 2017, 43(36):101-102 (in Chinese))
- [20] 宁宝宽, 陈四利, 丁梧秀, 等. 水泥土细观破裂过程的实时观测试验[J]. 实验力学, 2008, 23(1):53-58

- (NING Baokuan, CHEN Sili, DING Wuxiu, et al. Real-time observation on the meso-fracture process testing of cemented soil[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2008, 23(1):53–58 (in Chinese))
- [21] GB50007–2011, 建筑地基基础设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011 (GB50007–2001 code for design of building foundation foundation[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011 (in Chinese))
- [22] 雷进生, 鲁文浩, 程爽, 等. 基于非均质地层模型的桩基注浆数值模拟[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(5):79–84 (LEI Jinsheng, LU Wenhao, CHENG Shuang, et al. Numerical simulation of pile foundation grouting based on inhomogeneous formation model[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, 35(5):79–84 (in Chinese))
- [23] 雷进生, 刘非, 王乾峰, 等. 非均质土层的注浆扩散特性与加固力学行为研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(12):2245–2253 (LEI Jinsheng, LIU Fei, WANG Qianfeng, et al. Diffusion characteristics and reinforcement mechanics of grouting in non-homogeneous soil strata[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(12):2245–2253 (in Chinese))

Experimental study on bearing capacity and uplifting effect of cement soil with expansive agent

TU Bao-lin^{1,2}, LEI Jin-sheng^{1,2}, MA Bo², DAI Kang², WU Zeng-lin²

(1. Hubei Key Laboratory of Disaster Prevention and Reduction, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: The reinforcement and uplifting effect of cement soil with expansive agent are explored based on the fact that the expansive agent reacts with water to form volumetric expansion and the pressure increases under the constraint conditions. The bearing capacity and expansion rate of cement soil mixed with expansive agent are tested, and the correlation curves of compressive strength and volume of cement soil changing with different factors are obtained. The results show that the bearing capacity and the expansion rate are improved obviously after adding expansive agent into cement soil, and the feasibility of foundation reinforcement and uplifting based on expansive grouting materials is verified. The exponential relationship between the cement soil displacement and the reaction time is obtained by function fitting method.

Keywords: expansive agent; expansion rate; bearing capacity; foundation reinforcement; foundation uplifting