固化土结构形成及强度增长机理试验

宁建国 黄 新

(北京航空航天大学 土木工程系, 北京 100083)

摘 要: 根据固化土实际固化过程,提出一个新的固化土结构模型,即固化土结构形成主要由固化剂胶结土颗粒和填充孔隙两部分构成. 根据这一结构模型,以粉砂土作为研究对象,用水泥作为固化剂,由理论计算得出的固化土中胶结土颗粒和填充孔隙所对应的固化剂用量与由试验得出的相应固化剂掺量相当吻合,且基于该固化土结构模型,可以对固化土抗压强度增长规律与固化剂掺量相互关系等试验现象给予较好的解释. 另外,通过用膨胀剂代替上述固化剂中用于填充孔隙的水泥掺量,以及减少和增加固化剂中水泥掺量,验证了土颗粒胶结和孔隙填充对固化土结构形成及强度增长的作用,并指出孔隙填充对固化土抗压强度提高起重要作用.

关 键 词: 固化土; 结构模型; 胶结; 孔隙填充

中图分类号: TU 528.042

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)01-0097-06

Experiment on structural formation and mechanism of strength increasing of stabilized soil

Ning Jianguo Huang Xin

(Dept. of Civil Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: For the hardening process of the stabilized soil, a new structural model of stabilized soil was proposed that the structure formation of stabilized soil included soil particle cementing and pore filling. Based on the new structural model, when silt was used for soil sample and cement for hardening agent, the results show that the theoretical calculations of hardening agent contents used for cementing soil particle and filling pore are identical with those derived from experiment in the structure formation of stabilized soil. Some experimental results can be interpreted by the new structural model, such as the relationship between the mechanism of the strength increase and hardening agent contents of the stabilized soils. Through substituting expansive material for the cement contents used for filling pore in the above-mentioned hardening agent and increasing/decreasing the cement content, the role of soil particle cementing and pore filling to the structure formation was validated. And it was proposed that pore filling was critical to the strength increase of the stabilized soil.

Key words: stabilized soil; structural model; cementing; pore filling

深层搅拌法、高压旋喷法、水泥拌合土等软土地基加固方法,一般是以水泥作为固化剂,利用水泥与软粘土之间发生的一系列物理、物理化学或化学反应,使软粘土硬结为具有一定强度和水稳定性的水泥固化土[1].

水泥固化土抗压强度增长的基本原理是基于以下 4 方面[1~3]:原状土的强度;水泥自身水化反应产生的胶凝性物质胶结土颗粒使其连接成一体;粘土颗粒的团粒化运动;水泥水化生成的 $Ca(OH)_2$ 与土颗粒中活性矿物成分生成的胶凝性

收稿日期: 2005-02-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50278007)

作者简介: 宁建国(1975-),男, 黑龙江鹤岗人, 博士生, ningjianguo@sohu.com.

物质进一步胶结土颗粒. S. Saitoh 等人[4]提出了水泥固化土结构模型,认为土样与水泥搅拌后,土团粒被水泥浆液包裹,水泥水化生成的胶凝性物质逐渐形成水泥硬化体,同时水化产生的 $Ca(OH)_2$ 与粘土矿物成分发生硬凝反应,使粘土颗粒与硬凝反应生成物形成土硬化体,固化土的强度即依赖于这2种硬化体的强度.

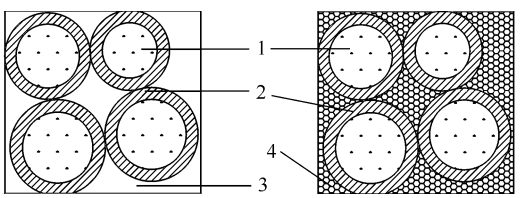
然而这些固化土结构模型存在着明显的不完全性,例如没有涉及土的孔隙率对固化土抗压强度的影响[5~6]. 软土固化的实践表明[7]:在某些土体中若以水泥和石膏作为固化剂,水泥-石膏固化土的抗压强度远高于水泥固化土,这主要是由于产生钙矾石膨胀填充固化土孔隙的作用.

目前对固化土结构形成及优化的研究不多,对于固化土应该具有什么样的结构,以及如何形成这种结构尚不明确,而明确这点对于指导高效固化剂设计具有重要意义.

为了避免土样对固化剂水化物生成量的影响,本文以粉砂土为研究对象,通过理论计算、分析及试验验证,提出新的固化土结构模型.

1 固化土结构模型的提出

固化土的形成一般是以一定的方式将固化剂浆液与天然土样搅拌均匀,经固化而成. 固化剂掺量不同,对固化土结构形成所起的作用也不同. 土样与固化剂浆液搅拌后,固化剂掺量达到某一程度时,固化剂将在土颗粒表面形成固化剂浆膜包裹土颗粒,被固化剂浆膜完全包裹的土颗粒相互接触,使松散的土颗粒胶结为一体,形成一定的强度,如图1a所示;随着固化剂掺量的增加,多余的固化剂浆液将填充于土颗粒之间的孔隙,直至充满孔隙,如图1b所示;只有当固化剂浆液充分包裹土颗粒,同时又能够填满土颗粒之间孔隙时,才能得到密实的固化土结构.



a 包裹固化剂浆膜的土颗粒堆积 b 固化剂浆填充孔隙

1—土颗粒;2—固化剂浆膜;3—孔隙;4—填充孔隙的固化剂浆

图1 固化土结构模型形成示意图

2 固化土中固化剂掺量理论计算

依据上述固化土结构模型假设,设自然土颗粒为球形,将土颗粒与包裹其表面的固化剂浆膜视为一个复合球形固体土颗粒,相互接触的复合土颗粒构成假想的颗粒堆积体系,可建立包裹固化剂浆膜的土颗粒堆积密度计算公式,计算固化土结构形成过程中固化剂浆液完全包裹土颗粒以及填满孔隙所分别对应的固化剂量.

2.1 复合土颗粒系统堆积密度计算公式的建立

Stovall 等人推导了理想球状颗粒体系相互接触的堆积密度[8]:

$$\rho = \min_{1\leqslant i\leqslant n}\left(\alpha_i/\{1-(1-\alpha_i)[\eta_1 g(i,1)+\cdots+\eta_{i-1}g(i,i-1)]-[\eta_{i+1}f(i,i+1)+\cdots+\eta_n f(i,n)]\}\right) \tag{1}$$

在土颗粒被固化剂浆膜完全包裹的情况下(图1a),设自然土样由 n 个粒径组土颗粒组成,其中 i 粒径组平均尺寸为 d'_i,i 粒径组与所有粒径组的体积百分比为 η'_i,等粒径堆积密度为 $\alpha'_i(i=1,2,\cdots,n)$;复合土颗粒系统同样由 n 个粒径组复合土颗粒组成,其中 i 粒径组平均尺寸为 d_i,i 粒径组与所有粒径组的体积百分比为 η_i,等粒径堆积密度为 $\alpha_i(i=1,2,\cdots,n)$,各土颗粒表面固化剂浆膜厚度为 h. 显然若能确定自然土样与复合土颗粒系统中 d'_i-d_i,η'_i-η_i,α'_i-α_i 之间关系以及 $f(i,k)$ 和 $g(i,k)$ 表达式,即可直接引用式(1)计算复合土颗粒系统堆积密度.

① d_i 与 d'_i 之间关系

由于复合土颗粒是由自然土样中相应粒径土颗粒包裹固化剂浆膜形成,因此

$$\frac{d_i}{2}=\frac{d'_i}{2}+h \qquad i=1,2,\cdots,n \tag{2}$$

② η_i 与 η'_i 之间关系

此处取单位固体体积的自然土样进行分析,根据球体表面积、体积公式和水泥浆膜厚度 h,可得到 η_i 与 η'_i 之间满足下列关系式

$$\eta_i=\frac{\left(1+\frac{6h}{d'_i}\right)\eta'_i}{\sum_{i=1}^{n}\left(1+\frac{6h}{d'_i}\right)\eta'_i} \qquad i=1,2,\cdots,n \tag{3}$$

③ α'_i 与 α_i 之间关系

由于复合土颗粒和自然土颗粒均为球形固体颗粒,且等粒径堆积密度与直径无关,因此复合颗粒系统与自然土样中各个粒径组的等粒径堆积密度应相同,即 $\alpha'_i=\alpha_i=\alpha(i=1,2,\cdots,n)$,$\alpha$ 取值为0.56[8,9].

④ $f(i,k)$ 和 $g(i,k)$ 表达式

参考文献[9],$f(i,k)$ 和 $g(i,k)$ 取下列表达式

$$\left.\begin{aligned} g(i,k) &= (1 - d_i/d_k)^{1.3} \quad k = 1,\cdots,i-1 \\ f(i,k) &= 0.7(1 - d_k/d_i) + 0.3(1 - d_k/d_i)^{12} \\ & k = i+1,\cdots,n \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

其中 d_i 可由(2)式求出.

2.2　包裹土颗粒固化剂用量理论计算

在土颗粒被固化剂浆膜完全包裹的情况下,如图 1a 所示,由复合土颗粒系统中 i 粒径组平均尺寸 d_i 及其体积百分比 η_i,参考式(2),可得复合土颗粒系统中单位固体体积内固化剂浆膜体积 V_m 与土颗粒体积 V_t 为

$$V_m = \sum_{i=1}^{n} \frac{\eta_i(6d'^2_i h + 12dh^2 d'_i f + 8h^3)}{(dd'_i f + 2h)^3} \tag{5}$$

$$V_t = 1 - V_m \tag{6}$$

其中 η_i 可根据(3)式关系求出.

由于在实际工程中,固化土中固化剂掺量一般用固化剂与土样质量百分比表示,因此复合土颗粒系统内土颗粒被固化剂浆膜完全包裹时所对应的固化剂掺量 a_{w1} 可表示为

$$a_{w1} = \frac{V_m \rho_m}{(\mu + 1) V_t G_t} \tag{7}$$

其中,ρ_m 为固化剂浆密度;G_t 为土颗粒比重;μ 为水灰比.

2.3　填充孔隙固化剂用量理论计算

假设复合土颗粒系统孔隙完全由固化剂浆填充(图 1b),则复合土颗粒系统单位体积内孔隙被固化剂浆完全填充所对应的固化剂掺量 a_{w2} 为

$$a_{w2} = \frac{(1 - \rho)\rho_m}{(1 + \mu)\rho G_t V_t} \tag{8}$$

其中 ρ 与 V_t 可由式(1)和式(6)求出.

2.4　实例计算

土样选用同种粉砂土,用标准筛筛分出各颗粒粒径组,再人工配置成 3 种土样 1,2,3,其物理性质指标如表 1 所示. 颗粒粒径级配分布曲线如图 2 所示,使用水泥作为固化剂.

表 1　土样物理性质指标

土样序号	密度 ρ/(g·cm^{-3})	孔隙度 e/%	含水率 w/%	比表面积 A_s/(cm^2·g^{-1})
1	1.91	30.76	3.05	281.95
2	1.79	35.24	3.72	540.86
3	1.69	38.74	4.05	821.51

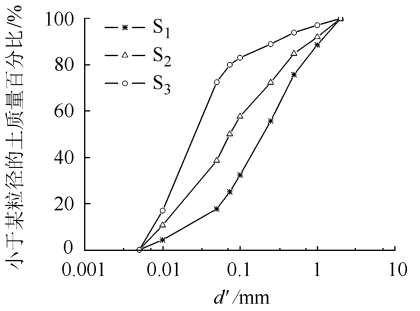


图 2　土样颗粒粒径级配分布曲线

由土样颗粒分析试验确定自然土样 1,2,3 中各粒径组平均尺寸 d' 及其体积百分比 η',如表 2 所示,取 μ 为 0.5,测定 ρ_m 为 3.04 g/cm^3,G_t 为 2.67 g/cm^3,根据 F. de Larrard 等人的研究[9],设复合土颗粒系统中土颗粒表面水泥浆膜厚度 h 为 23 μm,由式(1)、式(7)、式(8)可计算土样 1,2,3 中土颗粒被水泥浆完全包裹时系统堆积密度 ρ、水泥浆完全包裹土颗粒以及填满孔隙所分别对应的水泥掺量 a_{w1} 与 a_{w2},如表 2 所示.

表 2　固化剂用量理论计算结果　%

土样序号	η' 1.5	0.75	0.375	0.175	0.087 5	0.05	0.01	ρ	a_{w1}	a_{w2}
1	11.4	12.89	20.02	23.45	7.24	20.77	4.23	70.53	11.92	8.2
2	8.06	7.13	12.51	14.66	7.65	39.43	10.56	68.26	13.84	10.7
3	2.85	3.22	5.01	5.86	3.06	63.1	16.9	65.91	15.96	12.58

3　实验研究

3.1　试验材料及方法

北京强力水泥厂出产的奥达牌 32.5 矿渣硅酸盐水泥、自来水、分析纯 $Ca(OH)_2$ 锻烧而成的膨胀剂、粉砂土 1,2,3(同上述土样 1,2,3).

试样置备用 SJ-160 型静浆搅拌机,将搅拌均匀的试样分 3 层装入 50×50×50 mm^3 试模中,在 ZT-1×1 型振实台上各振动 1 分钟. 试件成型 1 天后拆模,将脱了模的试块送入标准养护箱内,于 30 天龄期测定试块无侧限抗压强度.

压汞法测定固化土孔隙:将 90 天龄期的固化土用无水乙醇浸泡终止水化,1 天后取出,60℃烘至恒重,送样检测. 压汞仪型号为 MACROPORES UNIT MOD. 12O.

3.2　固化土结构形成与强度发展相互关系试验

在自然风干土样 1,2,3 中均分别掺加 8%,10%,12%,14%,16%,18%,20%,22%,24%,26%,28%,30% 的水泥(占风干土样质量百分比,下文用 a_w 表示),水灰比为 0.5.

3.2.1　试验结果

令土样1,2,3掺入水泥后形成的固化土称为固化土 S_1,S_2,S_3. 固化土 S_1,S_2,S_3 无侧限抗压强度如图3所示,可见固化土抗压强度 q_u 随水泥掺量 a_w 的增加而增长.

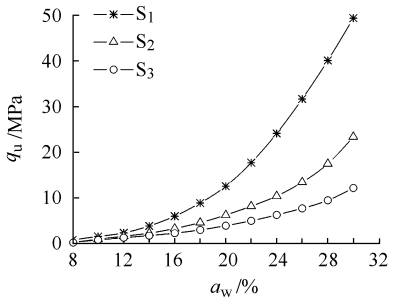


图3 水泥含量与固化土抗压强度关系

令水泥掺量由 a_w-2 增加到 a_w 时固化土抗压强度增量为 $\Delta q_{u,a_w}$,则

$$\Delta q_{u,a_w} = q_{u,a_w} - q_{u,a_w-2}$$

$$a_w = 10,12,\cdots,28,30$$

其中,q_{u,a_w} 为水泥掺量等于 a_w 时固化土抗压强度;q_{u,a_w-2} 为水泥掺量等于 a_w-2 时固化土抗压强度.

水泥掺量 a_w 与固化土抗压强度增量 $\Delta q_{u,a_w}$ 关系如图4所示,可明显看出随水泥掺量增加固化土抗压强度增量呈不同增长规律. 在所试验的范围内,大致可分为3个区间,在第一区间内,区间界点设为Ⅰ,随水泥掺量逐渐增加,固化土抗压强度增量基本相同,固化土 S_1,S_2,S_3 在第一区间界点Ⅰ所对应的水泥掺量 $a_{w,\mathrm{I}}$ 分别为12%,14%,16%;在第二区间内,区间界点设为Ⅱ,随水泥掺量逐渐增加,固化土抗压强度增量呈近线性增加,固化土 S_1,S_2,S_3 在第二区间界点Ⅱ所对应的水泥掺量 $a_{w,\mathrm{II}}$ 分别为20%,24%,28%.

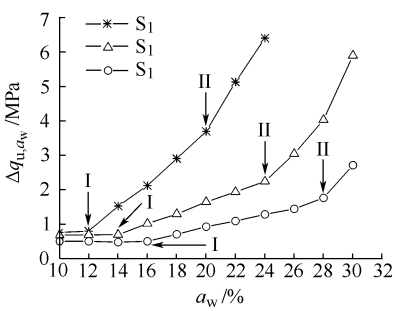


图4 水泥掺量与固化土抗压强度增量关系

3.2.2 试验结果分析

图4各区间界点所对应的水泥掺量与表2理论计算结果对比如表3所示,可发现固化土 S_1,S_2,S_3 结构形成过程中土颗粒被水泥浆液完全包裹时所对应的水泥掺量理论计算值 a_w 与图4各固化土抗压强度增量第一区间界点所对应的水泥掺量 $a_{w,\mathrm{I}}$ 基本相同;固化土 S_1,S_2,S_3 孔隙被水泥浆液完全填充时所对应的水泥掺量理论计算值 a_{w2} 与图4各固化土抗压强度增量第一、二区间界点所对应的水泥掺量差值 $a_{w,\mathrm{II}}-a_{w,\mathrm{I}}$ 基本相同. 由此可见上述固化土结构模型能比较好地反映实际情况.

表3 理论计算结果与试验结果对比 %

固化土	理论计算结果		试验结果	
	a_{w1}	a_{w2}	$a_{w,\mathrm{I}}$	$a_{w,\mathrm{II}}-a_{w,\mathrm{I}}$
S_1	11.92	8.2	12	8
S_2	13.84	10.7	14	10
S_3	15.96	12.58	16	12

根据上述结构模型也可以比较好的解释图4水泥掺量与固化土抗压强度增量关系. 土样与水泥浆搅拌后,当水泥掺量达到一定程度时,水泥浆包裹土颗粒表面,水泥水化生成的胶凝性物质主要用于胶结土颗粒,固化土抗压强度取决于土颗粒胶结点数量与胶结程度,因此固化土抗压强度与水泥掺量基本呈线性相关. 不同土样中土颗粒粒径分布范围及各粒径组质量百分比不同,因此胶结土颗粒所需水泥掺量也不同,如土样1,2,3中土颗粒比表面积分别为281.95 cm^2/g,540.86 cm^2/g,821.51 cm^2/g,即土样1<土样2<土样3,相应的固化土 S_1,S_2,S_3 中土颗粒达到完全胶结时所对应的水泥掺量 a_{w1} 分别为12%,14%,16%,即 $S_1<S_2<S_3$,称此时固化土为固化土 S_1',S_2',S_3'.

当水泥掺量大于土颗粒完全胶结所对应的水泥量后,进一步掺加的水泥主要用于填充固化土孔隙. 与水泥石相仿,固化土抗压强度与胶空比(水泥水化物在固化土体积中对孔隙填充程度)呈正指数相关,即 $f=f_0X^n$(f_0 表示毛细孔隙为零时水泥石强度,n 为大于1的试验常数)[5]. 因此,在此区间随水泥掺量的增加,固化土抗压强度增长比第一区间快,固化土抗压强度增长速率取决于固化土孔隙填充率. 由表1可知土样1,2,3孔隙率分别为30.76%,35.24%,38.74%,即土样1<土样2<土样3,在水泥掺量增量相同的情况下,固化土中孔隙填充率 $S_1>S_2>S_3$,因此固化土抗压强度增长速度 $S_1>S_2>S_3$,用于填充固化土孔隙的水泥量 $S_1<S_2<S_3$,如图4第二区间所示,固化土 S_1,S_2,S_3 中土颗粒被水泥水化物完全胶结且孔隙被充分填充时所对应的水泥掺量分别为20%,24%,28%,其中用于孔隙填充的水泥掺量 a_{w2} 分

别为 8%,10%,12%,称此时固化土为 $\bar{S}_1$,$\bar{S}_2$,$\bar{S}_3$ 固化土.

3.3 固化土结构中固化剂填孔作用的进一步论证

上述研究表明:固化土结构形成由土颗粒胶结与孔隙填充 2 个部分构成,其中孔隙填充对固化土抗压强度提高起重要作用. 为验证上述固化土结构形成机理,将用于填充固化土孔隙的水泥用膨胀剂代替,以进行试验验证.

使土样 1,2,3 中水泥掺量 a_w 等于土颗粒完全胶结所需的水泥量 a_{w1},在此基础上逐渐增加膨胀剂掺量(用 C_w 表示),固化剂配比如表 4 所示,各试验中固化剂的水灰比为 0.5.

表 4　固化剂配比与固化土抗压强度

G_1		G_2		G_3	
固化剂配比	q_u/MPa	固化剂配比	q_u/MPa	固化剂配比	q_u/MPa
C12H5	8.63	C14H7	8.16	C16H8	7.99
C12H6	10.71	C14H8	9.54	C16H9	9.32
C12H7	12.88	C14H9	10.98	C16H10	10.69
C12H8	8.06	C14H10	9.24	C16H11	9.47

注:C 表示水泥占干土样质量百分比;H 表示膨胀剂占干土样质量百分比

令土样 1,2,3 在含有膨胀剂的固化剂作用下形成的固化土称为固化土 G_1,G_2,G_3. 30 天龄期固化土 G_1,G_2,G_3 抗压强度如表 4 所示,由试验结果可知:在固化土中土颗粒被固化剂中水泥水化生成的胶凝性物质完全胶结为一体的基础之上,膨胀剂水化生成的膨胀性物质填充固化土孔隙,可继续提高固化土抗压强度,随固化剂中膨胀剂掺量增加,固化土抗压强度增大,但当膨胀剂掺量达到一定程度后继续增加,固化土抗压强度反而减小,这主要是由于固化土结构中膨胀性物质过量膨胀,破坏了胶凝性物质对土颗粒的胶结作用. 固化土 G_1,G_2,G_3 达到最大抗压强度,所对应的膨胀剂掺量分别为 7%,9%,10%,称此时固化土为固化土 $\bar{G}_i^j$ 固化土, 其中 i 表示固化土 G_1,G_2,G_3,j 表示固化土中胶凝性物质掺量.

固化土 S_i',$\bar{S}_i$,$\bar{G}_i^j$,(i = 1,2,3) 的固化剂配比、抗压强度及孔隙率如表 5 所示. 与固化土 S_i' 抗压强度相比,固化土 $\bar{S}_i$ 和 $\bar{G}_i^j$ 孔隙率减小,抗压强度均有较大幅度提高.

由上述试验结果可以进一步证实:固化土结构可以表述为由胶凝性物质和膨胀性物质组成,固化土抗压强度增长部分来源于固化剂对土颗粒的胶结,部分来源于固化剂对固化土孔隙的填充,且孔隙填充对固化土抗压强度提高起重要作用.

表 5　固化土抗压强度与孔隙率

固化土	固化剂配比	q_u/MPa	e/%
S_1'	$C12$	2.36	29.01
$\bar{S}_1$	$C20$	12.34	17.54
$\bar{G}_1^{12}$	$C12H7$	12.88	17.11
S_2'	$C14$	2.31	34.01
$\bar{S}_2$	$C24$	10.13	19.33
$\bar{G}_2^{14}$	$C14H9$	10.98	19.28
S_3'	$C16$	2.30	37.14
$\bar{S}_3$	$C28$	9.49	19.78
$\bar{G}_3^{16}$	$C16H10$	10.69	18.82

3.4 固化土结构中固化剂胶结作用的进一步论证

固化土结构形成来源于固化剂对土颗粒的胶结和孔隙填充,并且可用膨胀性物质取代固化剂中用于填孔的胶凝性物质,本节进一步验证在固化土结构形成中固化剂中胶凝性物质作用.

以土样 3 为研究对象,调整固化剂中水泥掺量 a_w,使其分别等于 14%,16%,18%,其中水泥掺量 16% 为土样 3 中土颗粒完全胶结所对应的水泥掺量 a_{w1},在此基础上逐渐增加膨胀剂掺量 c_w,固化剂配比如表 6 所示,固化剂水灰比为 0.5.

固化土 30 天龄期抗压强度如表 6 所示,当固化剂中水泥掺量分别为 14%,16%,18% 时,固化土抗压强度达到最大值时所对应的膨胀剂掺量分别为 7%,10%,12%,称此时固化土为 $\bar{G}_3^{14}$,$\bar{G}_3^{16}$,$\bar{G}_3^{18}$ 固化土,由此可见随固化土中胶凝性物质增加,固化土中膨胀性物质也有所增加,即固化土中膨胀性物质与胶凝性物质掺量呈正相相关.

表 6　固化剂配比与固化土抗压强度

固化剂配比	q_u/MPa	固化剂配比	q_u/MPa	固化剂配比	q_u/MPa
$C14H6$	1.78	$C16$	2.3	$C18$	3.0
$C14H6$	2.99	$C16H9$	9.32	$C18H11$	8.12
$C14H7$	3.83	$C16H10$	10.69	$C18H12$	9.84
$C14H8$	1.58	$C16H11$	9.47	$C18H13$	7.53

与水泥土 S_3 相比,固化土 $\bar{G}_3^j$(j = 14、16、18)抗压强度增量百分比 Δq_u 如表 7 所示. 当固化剂中水泥掺量为 14% 时,固化土 $\bar{G}_3^{14}$ 抗压强度增量百分比 Δq_u 小于 0. 这主要是由于固化剂中水泥掺量小于 a_{w1} 时,固化土中胶凝性物质较少,不能充分包裹土颗粒使其连接为一体,在此基础上添加膨胀剂,较少的膨胀性物质即可破坏胶凝性物质对土颗粒的胶结作用,致使固化土抗压强度减小;当固化剂中水泥掺量为 18% 时,固化土 $\bar{G}_3^{18}$ 抗压强度增量百分比 Δq_u 为 3.79%,与固化土 $\bar{G}_3^{16}$ 相比,

其抗压强度增量较小.

表7 固化土抗压强度对比

固化土	固化剂配比	q_u/MPa	Δq_u/%
$\bar{S}_3$	*C*28	9.49	
$\bar{G}_3^{14}$	*C*14*H*7	3.83	-59.64
$\bar{G}_3^{16}$	*C*16*H*10	10.69	12.64
$\bar{G}_3^{18}$	*C*18*H*12	9.84	3.79

由上述分析可知:固化土结构形成过程中,固化剂中胶凝性物质主要用于土颗粒胶结,使其连接为一体,增加或减少都不利于固化土结构性能的提高.

4 结 论

1) 固化土结构形成来源于固化剂对土颗粒的胶结和孔隙填充. 基于本文提出的结构模型,由理论计算得到的水泥浆包裹土颗粒和填满孔隙所对应的水泥掺量与试验得到的水泥土抗压强度增量2个界点所对应的水泥掺量相吻合,并可对水泥土抗压强度增长规律与水泥掺量关系进行较好地解释;

2) 固化土抗压强度来源于固化剂对土颗粒的胶结和对固化土孔隙的填充,且孔隙填充对固化土抗压强度提高起重要作用;

3) 通过用膨胀剂代替固化剂中用于填充孔隙的水泥掺量试验,以及减少与增加固化剂中水泥掺量试验,进一步证实了该固化土结构模型的正确性,试验表明固化剂中用于填孔的胶凝性物质可用膨胀性物质取代.

参考文献 (References)

[1]《地基处理手册》(第二版)编写委员会. 地基处理手册[M]. 第二版. 北京:中国建筑工业出版社, 2000. 110~112
The compiling committee of the foundation treatment handbook. The foundation treatment handbook[M]. Second Edition. Beijing: China Architecture and Building Press, 2000. 110~112 (in Chinese)

[2] Bell F G. Cement stabilization and clay soils, with examples [J]. Environmental & Engineering Geoscience, 1995, 1(2): 139~151

[3] Mohamed A M O. The role of clay minerals in marly soils on its stability[J]. Engineering Geology, 2000, 57(2):193~203

[4] Saitoh S, Suzuki Y, Shirai K. Hardening of soil improved by deep mixing method[A]. In: Proceedings of 11th International Conference of Soil Merhanics and Foundation Engineering[C]. Yokohama: Balkema and Rotterdam Press,1985. 1745~1748

[5] 袁润章. 胶凝材料学[M]. 第二版. 武汉:武汉工业出版社, 1996. 142
Yuan Runzhang. Cement materials[M]. Second Edition. Wuhan: Wuhan Industrial Press, 1996. 142(in Chinese)

[6] Hayashi Y, Suzuki A. Influence of the void ratio in soils treated with air foam and cement[A]. In: International Symposium on Coastal Geotechnical Engineering in Practice[C]. Yokohama: Balkema and Rotterdam Press, 2000. 453~457(in Japanese)

[7] 黄 新,胡同安. 水泥-废石膏加固软土的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1998,20(5):72~76
Huang Xin, Hu Tong'an. On stabilization of soft soil with waste gypsum and cement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(5): 72~76(in Chinese)

[8] Stovall T, De Larrard F, Bull M. Linear packing density model of grain mixtures[J]. Powder Technology,1986(48):1~12

[9] De Larrard F, Sedran T. Optimazation of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model[J]. Cement and Concrete Research, 1994,24(6):997~1009