

河道淤泥的流动化处理及其工程性质的试验研究

Engineering properties of river sludge and its stabilization

顾欢达, 陈 甦

(苏州城建环保学院 城建系, 江苏 苏州 215011)

中图分类号: TU 447

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2002)01-0108-04

作者简介: 顾欢达(1958-), 男, 江苏无锡人。1982年毕业于河海大学水港系, 1998年获日本京都大学工学博士学位。现主要从事岩土工程的教学及环境岩土工程方面的科研工作。

1 前 言*

在江南地区, 遍布各种大小河道。过去, 都是将河道内淤泥作为农田的有机肥料加以利用, 客观上对河道进行了定期的清淤, 从而保持了这些河道有一定的蓄水能力和通航能力。现在由于农村耕作方式的变化, 已很少利用这些天然的有机肥料, 从而使这些河道的淤积越来越严重。最近, 基于环境保护的意识, 开始实施对这些河道进行清淤, 但清淤出来的淤泥处理问题并没有很好地解决。与此同时, 在这些地区实施道路、桥梁、河堤、护岸等工程时, 经常会遇到构筑物填筑材料短缺和软弱地基的问题。因此, 如能将河道淤泥进行再生资源化利用并将它作为河堤、路堤等构筑物或软基换土处理的填筑材料使用, 不仅可以降低工程成本, 提高工程效益, 而且对解决淤泥的处理问题和对保护环境也有良好的效果。

通常, 淤泥或淤泥质土具有含水率高、强度低、腐植质含量高等特点, 不进行处理则很难直接作为填筑材料加以利用。如采用干燥脱水或混合生石灰等方法, 不仅费时, 而且需要占用大量的场地。因此, 利用淤泥或淤泥质土高含水的特点, 进一步调整它的含水率, 形成具有流动性的浆液材料, 同时混合固化材料使它具有一定的自硬能力, 在达到一定龄期后, 使它具有与一般土同等程度或更好的工程性质, 这样, 就可以将淤泥或淤泥质土进行再生资源化并作为填筑材料加以综合利用^[1]。

流动化处理技术在地基基础工程中已有比较广泛的应用。如用水泥砂浆对地下裂隙、空洞等进行填充, 对地基进行加固处理, 向地下注浆防止渗流等。在此, 是利用流动化处理技术, 将高含水的淤泥或淤泥质土按所定的含水比进行调整以满足流动性要求, 从而可以用泥浆泵等施工机具进行施工, 不仅可以提高施工效率, 而且可以充分利用它的流动性、自硬性等特点, 特别适合于在狭窄区域的填充而不需要碾压和击

实^[2]。利用淤泥或淤泥质土进行流动化处理和施工可按图1所示程序进行。

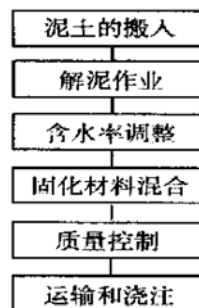


图1 流动化处理土的制造及施工过程^[1]

Fig. 1 Method of stabilization for liquefied soil

2 流动化处理土的技术指标

作为大量使用的材料, 根据工程的实际使用情况和施工条件, 除了要求被处理土需要具有一定的强度, 满足承载力或沉降量等要求外, 还要考虑地基土的再开挖等要求, 为兼顾两方面的要求, 应选择一个接近一般土的强度指标作为流动化处理土的质量要求。否则, 当选择过高强度时, 既增加生产成本, 又增加再开挖的难度。在采用泥浆泵等设备进行施工时, 还要求处理土满足一定的流动性指标(流动指标值指在直径8 cm、高8 cm的圆筒中装满流动状处理土后迅速提起圆筒, 测出其摊开后的直径即为流动指标值)。流动指标值可以根据以往的施工实践采用^[3]。根据以上诸要求, 可确定流动化处理土的目标值如下:

- a) 28 d龄期的无侧限抗压强度 80~100 kPa;
- b) 流动指标值 180 ± 20 mm。

3 配比试验与强度特性

为考察经流动化处理后的淤泥或淤泥质土作为填筑材料时的适用性, 笔者通过室内试验的方法对流动

表 1 试验土样的基本物理性质
Table 1 Physical properties of soil

天然密度 /(g·cm ⁻³)	土粒密度 /(g·cm ⁻³)	天然含水率 /%	液限 /%	塑限 /%	强热减量(750℃) /%	土样的粒度分布/%		
						砂粒	粉粒	粘粒
1.420	2.609	100.6	100.0	48.2	8.83	3.4	26.9	69.7

表 2 无侧限压缩试验结果(龄期 7d)
Table 2 Results of unconfined compression test (7 days aging)

试样 编号	水泥掺入量 /(kg·cm ⁻³)	流动指标值 /mm	泥浆密度 /(g·cm ⁻³)	无侧限压缩强度 q_u /kPa	破坏时的应变 ϵ_p /%	变形模量 E_{50} /MPa	含水率 w /%
①	100	175	1.281	51	3.51	11.56	159.2
②	100	175	1.288	54	2.26	10.92	156.0
③	100	175	1.285	48	1.76	22.11	157.7
①	150	173	1.315	135	2.92	25.07	141.2
②	150	173	1.314	136	1.87	24.73	140.4
③	150	173	1.311	131	1.83	21.13	140.7
①	200	167	1.340	236	1.81	60.04	127.3
②	200	167	1.337	257	2.01	51.93	127.0
③	200	167	1.336	257	1.67	57.38	126.9

化处理土的工程性质进行了试验研究。室内试验所使用土样的基本物理性质如表 1 所示。试验用土样处于流塑状态。粉粒加粘粒的细颗粒成分占土重的 90% 以上,天然密度小于 1.5 g/cm³,天然孔隙比 $e = 2.685$,饱和度 $S_r = 97.75\%$ 。因此,该土为未经固结的不具抗剪强度的软粘土。对于这样的软粘土,按图 2 所示程序进行配比试验并对处理土的物理力学指标进行测试。在加入固化材料以前,先对土的含水率进行调整,使之成为泥浆并满足流动指标要求。取调整前的土样重量 8470 g,加水 4190 g,使调整后土的含水率达到 200% 左右,密度约为 1.247 g/cm³。此时,测得调整后泥浆的流动指标值为 190 mm。



图 2 室内试验流程
Fig. 2 The flow chart of laboratory test

在本次试验中,使用普通水泥作为固化材料。在调整含水率后的每立方米泥浆中,分别掺入 100, 150, 200 kg 的普通水泥(相应的百分含量分别为 24%, 36%, 48%),搅拌后装入模具,硬化后拆模养护。表 2 为龄期 7 d 时流动化处理土的无侧限强度试验结果。结果显示,处理土的强度和变形模量都随水泥掺入量的增加而增大。同时,由于水泥的颗粒细、密度大,在

泥浆中掺入水泥后,使处理土的密度增加,含水率相应降低,处理土的流动指标值也相应地降低了,但仍然处于 180±20 mm 的范围以内。根据图 3 可知,在 7 d 龄期时,满足设定强度条件的水泥掺入量约在 120~ 130 kg/m³ 的范围内。事实上,在使用水泥作为固化材料时,固化处理土的强度增长一般要持续一个较长的时间,考虑到 7 d 以后处理土的强度随着龄期的延长还要持续增长,因此,如果取水泥掺入量为 120 kg/m³,应可以满足流动化处理土的强度要求。在采用该水泥掺入比的条件下,处理土随龄期的增长情况如图 4 所示。结果显示,处理土的强度与刚度都随龄期的增长而增大,而且初期的增长较快,后期的增长则相对缓慢一些。龄期 28 d 时的强度基本上可以达到 100 kPa 左右。

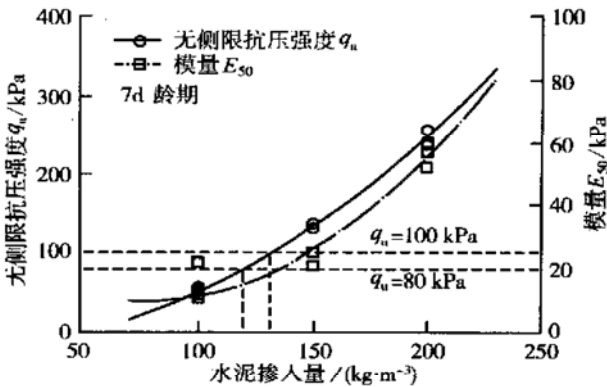


图 3 压缩强度和变形系数与水泥混合量的关系
Fig. 3 Variation of compressive strength and modulus of stabilized soil with cement content

根据对水泥掺入量为 120 kg/m³、龄期为 28 d 的流动化处理土实施不固结不排水三轴压缩试验,得到在

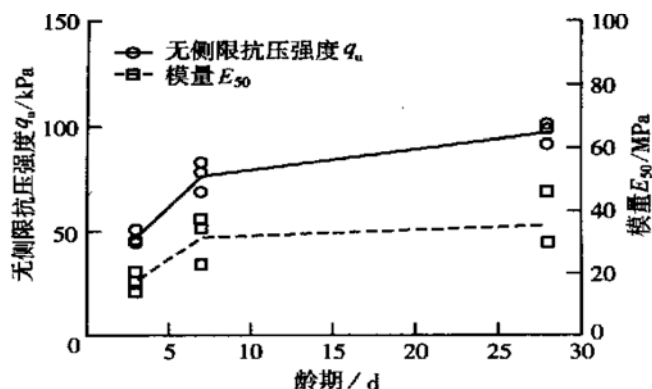


图4 压缩强度和变形系数与龄期的关系

Fig. 4 Variation of compressive strength and modulus of stabilized soil with curing time

围压 $\sigma_3 = 50, 100, 200$ kPa 时的三轴试验结果如图 5 所示。根据该试验的结果, 处理土在不固结不排水条件下的抗剪强度指标分别为粘聚力 $c = 33$ kPa、内摩擦角 $\varphi = 9.1^\circ$ 。虽然淤泥本身为未固结的饱和软粘土, 但经掺入水泥成为处理土后, 它的剪切破坏举动并不与饱和软粘土相同, 这主要是由于流动化处理土在硬化过程中, 水泥与土中水发生水化反应并形成多种水化物, 大量的水分子被结合进水化物中成为结合水, 使得流动化处理土的抗剪强度性质不同于一般饱和软粘土的性质。

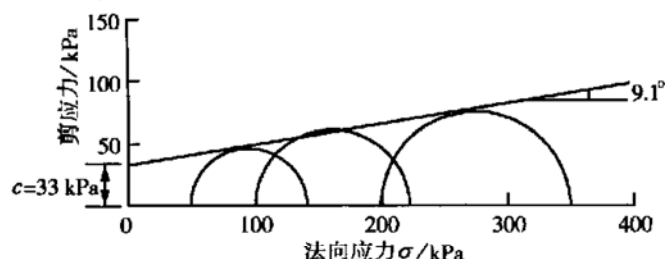


图5 不固结不排水三轴压缩试验结果

Fig. 5 Result of triaxial test (UU)

4 处理土的透水特性

将经流动化处理后的河道淤泥作为一般的填筑材料使用, 在某些情况下, 不仅要求满足一定的强度和刚度要求, 还需满足一定的透水性要求。例如, 将处理土作为河道两侧的筑堤材料使用时即要求所用土工材料具有较低的渗透系数。为此, 对水泥掺入量 120 kg/m^3 , 龄期 28 d 的处理土实施变水位透水试验。根据施工工艺, 一般在浇注过程中需要对一次浇注的厚度有一定的限制, 而且在硬化过程中没有碾压的工序。因此, 根据施工方法及工程规模的不同, 一般可能要采用分层浇筑的方式。这样, 在分层的交界面上由于硬化的程度不同等原因而产生浇筑缝。考虑到这样的情况, 在试验时分两种情况实施, 一种是没有浇筑缝的透水

试验, 另一种是有浇筑缝的透水试验。在制作有浇筑缝的试样时, 先在圆筒型模具中注入一半的试料, 待它硬化一周后再注入另一半试料, 在试样中间形成浇筑缝, 试验结果如表 3 所示。透水试验结果表明, 无浇筑缝的流动化处理土的渗透系数 k 在 $2.45 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 左右。可以将它作为一般的筑填材料加以利用。同时, 若在堤体中存在由于浇筑而出现的浇筑缝时, 处理土的渗透系数会增大, 但仍可控制在 10^{-6} cm/s 数量级的范围以内。为减少浇筑缝对处理土渗透系数的影响, 可以对一次浇筑的表面进行粗化处理后再进行二次浇筑, 结果显示, 浇筑缝表面经粗化处理后可以比较显著地减少浇筑缝对处理土渗透系数的影响。

表3 流动化处理土的透水试验结果

Table 3 Test results of permeability

试样编号	渗透系数 $k / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$		
	无浇筑缝	有浇筑缝 (不处理)	有浇筑缝 (粗化处理)
①	2.46×10^{-6}	9.70×10^{-6}	4.32×10^{-6}
②	2.43×10^{-6}	7.43×10^{-6}	3.24×10^{-6}
平均值	2.45×10^{-6}	8.57×10^{-6}	3.78×10^{-6}

5 长期变形特性

对于一般的土木工程建筑还要求地基基础具有一定的耐久性能以保持建筑物具有长期稳定性。通常, 这种持久能力包括地基基础材料本身的强度和变形方面的稳定性。对于掺入水泥的流动化处理土, 由于水泥与粘土矿物间的化学反应一般会持续较长的时间, 通常情况下, 处理土的强度会随时间的延长而有所增加, 因此流动化处理土具有较好的强度持久能力。但是另一个方面, 由于使用高含水的淤泥作为原料土, 形成的处理土同样具有较高的含水量。因此, 如果随着时间的增加, 土体内的水分逐渐减少引起土体发生较大的体积收缩时, 将会对其上的建筑物的沉降产生较大的影响。为此, 对处理土的长期变形进行了观察。通过对 $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 16 \text{ cm}$ 的立方柱体的长度随时间的变化来观察处理土的长期变形特性。为了模拟处理土的实际使用条件, 将试验分成下列两种情况进行。一种是假定处理土没有暴露, 因此对成型后的处理土的 6 面进行密封处理; 另一种是假定处理土的一面暴露于空气中, 而对其他 5 面进行密封处理。试验过程中, 在试样上面相距 140 mm 的两点上设置测点, 定时测定两点间长度以及试样重量的变化。测定结果如表 4 所示。

根据图 6 所示结果, 与龄期 7 d 时的长度相比, 龄期 14 d 时的长度略有缩短, 以后转为伸长的趋势。至

表 4 长度变化观测结果
Table 4 Test results of variation of length

项目	7 d		14 d		28 d		90 d		180 d	
	①	②	①	②	①	②	①	②	①	②
5 长度/mm	140.234	140.109	140.008	140.070	140.070	140.151	140.125	140.230	140.213	140.311
面 长度变化率/%			- 0.161	- 0.028	- 0.117	0.030	- 0.078	0.086	- 0.015	0.144
密 重量/g	334.1	332.8	331.8	330.7	331.0	329.8	327.9	324	323.8	320.1
封 重量变化率/%			0.993	0.994	0.991	0.991	0.981	0.974	0.969	0.962
6 长度/mm	140.190	140.158	140.008	140.013	140.048	140.030	140.031	140.085	140.094	140.122
面 长度变化率/%			- 0.130	- 0.103	- 0.101	- 0.091	- 0.113	- 0.052	- 0.068	- 0.026
密 重量/g	334.3	335.1	332.7	333.5	332.6	333.3	331.4	332.9	326.8	328.6
封 重量变化率/%			0.995	0.995	0.995	0.995	0.991	0.993	0.978	0.981

180 d 时,基本上可恢复到原有长度。但总的来看,试样的长度随时间的变化并不明显,基本上在 $\pm 0.2\%$ 范围以内。因此,可以认为流动化处理土随时间的增长并不会发生太大的体积变形,不会由此变形而引起建筑物的明显沉降。另一方面,试样的重量则由于表面水分的逐渐消失,而使重量逐渐减小,显然,5 面密封的试样比 6 面密封的试样更为明显。据此,为防止由于表面干燥等原因引起表面开裂,应尽量避免使处理土的表面直接暴露在空气中而需要采取适当的覆盖措施。

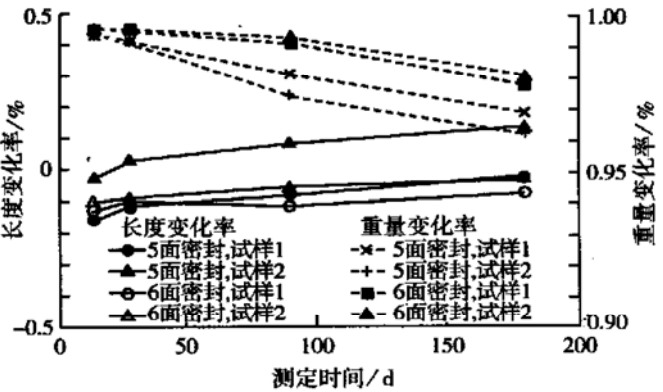


图 6 变形量和重量随时间的变化

Fig. 6 Variation of deformation and weight with time

6 结 论

以上试验结果显示, 经过流动化处理后的河道淤泥具有一定的强度和刚度, 而且处理土的强度可以根据工程的实际要求进行调整。由于处理土具有流动性和自硬性等特点, 施工时可以利用泥浆泵等施工机具进行施工, 对于狭窄区域、地下空洞等无法碾压部位的施工具有一般施工方法所没有的优点。对于一般地面上的施工, 可以采用立模的方法, 从而提高施工的速度和效率。根据透水试验和长期变形性的试验, 流动化处理土具有较低的渗透系数, 因而处理土具有较强的止水能力, 同时, 作为填筑材料使用时, 长期的变形量较小, 对保持构筑件的稳定是有利的。

参考文献:

[1] 三木博史. 土の流动化处理工法の各种用途への利用技术 [J]. 土木技术资料, 1995, 37(9): 32- 37.
[2] 胜田力, 小菅字一郎, 泽口文彦. 流动化埋戻し工法の适用事例—空间充填埋戻し [J]. 地盘工学研究发表会发表讲演集, 1997, 32(2- 2): 2455- 2456.
[3] 大下角治. 流动化处理土を用いた埋戻し工法 [J]. 道路, 1994, (636): 61- 64.