一例超出沉降速率规范限值的软基处理工程——兼议沉降速率限值

李友兴
（深圳南油集团有限公司建设管理部，深圳，518054）

提　要　对于采用加载预压排水固结法的软基处理工程，规范要求在加载预压过程中，竖向变形不应大于 10mm/d。本文提供一个竖向变形的日观测值(即沉降速率)超过规范要求却取得良好加固效果的工程实例，同时对沉降速率限值进行讨论。

一　工程概况

南油嘉实多项目造地工程位于深圳南油前海 314 地块西北角。314 地块原为滨海淤泥滩涂，四周被抛石挤淤后形成的围堤所包围，面积约为 27 万 m^2。后为了利用建港废弃淤泥作为造地用料，又在地块内吹填了约 2.7m 厚的淤泥，经晾晒，其表面已形成硬壳层。314 地块作为一个填海造地软基处理的工程，已完成设计，工期为 18 个月，后因引进外资项目的需要，须在 314 地块中先行完成 4 万 m^2 的造地，此即为南油嘉实多项目造地工程，工期缩短为 8 个月，造地工程的验收技术指标仍同于 314 造地工程。在这种情况下，我们仍然采用在深圳南油地区有成功经验、方法成熟的加载预压排水固结法，将 314 造地工程的设计做必要的修改和补充，并对因缩短工期必然要加快施工速度包括加载速度引起沉降速率较大而可能出现的不利后果采取充分的措施，保证施工安全。

1.场地条件

场地地层上部为淤泥层，下部为花岗岩风化后的残积粘性土。淤泥层是本工程软基处理的对象，它从上到下又可分为：①吹填淤泥硬壳层，厚约 0.3m，呈龟裂状，硬塑一可塑；②吹填淤泥层，超饱和，稀软，可流动，平均厚度 2.4m；③原状海相淤泥，饱和，流塑一软塑，平均厚度 9.85m。淤泥层的物理力学性质指标见表 1。

2.工程设计

本工程仍然采用 314 造地工程所用的方法，即堆载预压排水固结法，以中粗砂为水平排水垫层，打插塑料排水板作为竖向排水体。该方法已在南油前海地区多个造地工程中成功应用，工程管理人员和施工人员均有丰富的经验。其主要工序为：铺填中粗砂垫层→插设塑料排水板→埋设监测仪器及观测→填土碾压→堆放预压砂→卸载→效果检验→验收。淤泥层经加固处理后需满足：①固结度≥80%；②其顶面处承载力≥80kg；③剩余沉降量小于 200mm。

表1　加固土层的土性指标

土层	天然含水量	天然密度	干密度	孔隙比	液限	塑限	塑指	液性指数	压缩系数	压缩模量	无侧限抗压强度		固结系数 C_V			渗透系数
											(kg/cm²)		50kPa	100kPa	200kPa	
	ω	γ	γ_d	e	W	w_p	I_p	I_L	$a_{1\cdot2}$ (MPa⁻¹)	E_s (MPa)	原状	重塑	10^{-4} (cm²/s)			k 10^{-6} (cm/s)
	(%)	(g/cm³)			(%)	(%)										
吹淤硬壳层	63.2	1.63	1.00	1.736	51.7	31.8	19.9	1.30	1.438	2.538	0.023	0.017	22.4	12.33	11.99	1.897
吹填淤泥	104.6	1.41	0.72	2.842	50	32.7	17.3	3.79	1.915	2.084	0.035	0.022	3.86	4.56	5.19	1.987
原状海相淤泥	80.0	1.55		2.06	51.3	28.8	22.5	2.61	1.701	1.80						4.0×10^3

二　为保证软基处理效果而采取的措施

与 314 地块造地工程相比，本工程在三个方面发生了变化：①工期缩短 10 个月；②只有一面边界有侧限（西面围堤）；③排水系统改变。314 造地工程的排水系统为：塑料排水板→中粗砂垫层→块石围堤→大海，而本工程只有西面与块石围堤相连，变四面排水为单面排水。要保证造地质量，满足交工要求，关键是要保证有良好的排水条件和足够的堆载预压时间，同时不能使淤泥软基产生滑动破坏。为此，须在 314 造地工程的设计基础上做必要的修改和补充，并在施工过程中采取一些必要的保证措施。

1. 经过重新计算，对设计作必要的修改和补充

(1)扩大加固区面积。嘉实多项目用地红线区北、东及南面均无围堤包围，因淤泥层顶部为吹填淤泥，堆载预压稍有不慎会引起边界滑移，为此，设计将加固区东面及南面各向外扩展 20m，考虑到以后用地方便，将北面扩展至围堤(80～100m)，并将这个范围的东、南两面的填砂插板区向外扩展 30m(扩展部分只填砂插板不预压)，以确保边界稳定；(2)缩小插板间距。原设计排水板间距为 1.1m，为确保排水效果，改为 1.0m，仍为正三角形布置；(3)增设集水井排水。加固区两面(扩大前为三面)是淤泥，不能通水，本工程工期短，加载速度快，加载期间孔隙水压力会急剧增加，为此增设集水井不间断排水，加快超孔隙水压力的消散和淤泥中孔隙水的排出，从而加快固结速度；(4)增设测斜管监测东、南两面边界的位移情况，防止产生边界滑移失稳。

2. 施工中的保证措施

针对本工程的特点，我们安排施工的原则是保证在施工期间边界和地基稳定的前提下，尽可能缩短各前期工序的施工时间，以增加满载后的排水固结时间，以最大限度发挥满载条件下的排水固结作用，加快固结沉降。为达到这个目的，在施工中采取了以下保证措施：(1)集中人力、物力加快铺填砂垫层、插板和集水井的施工，缩短施工时间；(2)通过监测资料严格控制填土碾压和堆载预压砂的加载速度，在确保地基稳定和安全的前提下，适当加快加载速度。本工程由于工期大大缩短，施工速度与地基稳定这一矛盾尤其突出，因此监测工作是成功的有力保证；(3)通过集水井不断抽排水，确保排水通道的畅通，

使超孔隙水压力尽快消散。

三　软基加固处理效果

工程卸载后，要通过效果检验工作结合监测结果综合分析评价软基加固处理的效果。表 2 和表 3 清楚表明，经堆载预压加固处理后，整个加固土层的物理力学性质明显改善，部分淤泥已变成淤泥质土，根据标贯、静探及室内试验指标结合监测结果和同一地区同类工程经验，确定加固土层承载力大于 80kg，达到了设计要求。

根据沉降观测资料，计算在现在荷载下，各沉降观测点(共设 13 个浅层沉降观测点)淤泥的固结度和剩余沉降量，结果为固结度最大值 99.8%，最小值 88.6%，平均值 96.9%；剩余沉降量最大值为 155mm，最小值为 4mm，均小于 200mm。淤泥层经处理后的固结度和剩余沉降量均满足设计要求。

软基加固处理的结果达到了设计的要求，这说明设计所采用的方法是正确的，施工方法也是妥当的，取得的效果是良好的。

表 2　处理后加固土层的物理力学性质统计表

指标名称	天然含水量 ω	重力密度 γ	干重度 γ_d	孔隙比 e	饱和度	液限 W_L	塑限 Wp	塑性指数 Ip	液性指数 I_L	压缩模量 Es	压缩系数 a	内聚力 c	内摩擦角 Φ
单位	%	kN/m³	kN/m³		%	%	%			kPa	kPa⁻¹	kPa	°
最大值	76.1	17.9	12.40	2.110	101.9	60.5	33.6	29.2	3.40	33.3	2.440	17.0	19.8
最小值	44.4	15.7	8.97	1.218	91.8	32.0	23.0	9.0	0.71	1.75	0.630	2.0	0.8
平均值	55.0	16.7	10.81	1.554	97.2	50.0	29.7	20.3	1.36	2.27	1.076	7.3	10.3

表 3　软基处理前后加固土层静力触探试验数据统计表

项目指标		锥头阻力 q_c(kPa)	侧壁阻力 f_s(kPa)	f_s/q_c (%)
处理前	吹填淤泥	96	2.51	2.64
	海相淤泥	195	3	1.65
处理后	淤泥层	520	6.57	1.26
	统计孔数	6	4	

四　对沉降速率的分析与讨论

区内共设 13 个浅层沉降观测点，观测结果最大沉降量为 2716mm，最小沉降量为 1661mm，平均沉降量为 2170mm。造成沉降差异的主要原因是淤泥厚度及加荷和观测的起始时间的差异造成的。图 1 为典型的荷载——浅层沉降时间——关系曲线，图 2 为加载

期间沉降速率——时间的关系曲线，从图中曲线看出，每一次加载，沉降速率明显加大，加载间隙期沉降速率逐渐减小，但沉降曲线连续平顺无突变现象，最终的加固效果也是良好的，这说明在堆载预压中出现较大的沉降速率是正常的。

对于加载预压工程，规范要求应分级逐渐加载，并根据观测资料控制加载速率，使每天的竖向变形不超过一个限值，亦即规定了一个沉降速率限值，《建筑地基处理技术规范》(JGJ79－91)的限值为10mm/d,《深圳地基处理技术规范》(SJG04－96)的限值为 15mm/d 。从图 2 可知，加载期间沉降速率>15mm/d，最大达到 27mm/d，即使在加载间隙期，仍有相当长的一段时间,沉降速率仍大于15mm/d，但最终工程却能取得预期的加固效果，施工期间也并未出现地基失稳的现象。

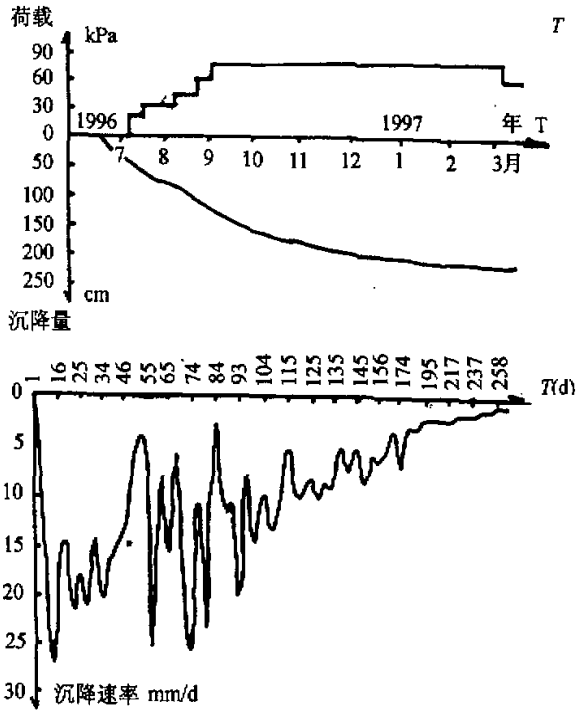


图2 沉降速率-时间关系曲线

超过规范要求的沉降速率限值却未出现地基破坏的加载预压工程，并非只有本工程一例，在深圳地区还有一些例子。为什么会出现这种现象呢？笔者认为这与规范以一个固定不变的值作为不同软土条件和工程条件下的沉降速率限值存在不合理之处有关。正常的地基沉降应该是由固结沉降引起，固结沉降快则观测到的沉降速率也大，若实际的沉降大于正常的固结沉降时，地基会出现失稳，是不容许的。因此针对特定的工程，经过详细计算，给出一个指导施工的沉降速率限值是可取的，应该的，但不同的工程，软土的条件和加固条件不同，这个限值也应不同。因固结沉降的大小和快慢，除与加载速度有关外，还与软土的性状和工程条件有关，如软土厚度、固结系数、排水条件及加载量等。本工程有 12m 多厚的淤泥层，且顶部为 2.7m 厚的吹填淤泥，其含水量大，具高压缩性，上部为中粗砂垫层覆盖，排水条件非常好，加载后附加应力大，孔隙水压力消散快，非常有利于固结压缩，因此沉降速率较大，事实上在加载间隙期沉降速率仍有大于 15mm/d 的情况，说明并非因加载引起，而是正常的固结沉降使然。还有一种

值得注意的情况是：正常的固结沉降很小，加载中实际沉降速率可能已大大超过固结沉降，但因未达限值而未能引起注意而留下不安全的隐患。这种情况尤其可能出现在软土层很薄的加固工程中。

因此，笔者认为，针对不同的加载预压工程，应在设计中给出不同的沉降速率限值，而不是由规范规定一个固定不变的限值以指导施工。

五　结束语

本文提供了一个沉降速率超出规范限值但仍然取得预期效果的加载预压软基处理工程实例。根据笔者掌握的情况，深圳地区还有其它的加载预压工程存在同样的现象。影响沉降速率的因素除加载速率外，还有软土的性状、厚度及工程加固条件等诸多因素。因此，由规范给出一个以不变应万变的沉降速率限值来控制加载速率的做法有不够科学之处，笔者建议对于某个特定的加载预压工程，应在设计中给出一个沉降速率限值作为控制加载速率和指导施工的依据。

参考文献

[1] 杜焯芳等：《超载预压快速加固吹填淤泥》，见《第五届地基处理学术讨论会论文集》，中国建筑工业出版社，1997。

[2] 林本义：《对预压加固中沉降速率限值的看法》，见《第四届塑料板排水法加固软基技术研讨会论文集》，河海大学出版社，1999。