$5\times10^4m^3$ 油罐基础纠偏

贾庆山
(上海高桥石油化工设计院，上海，201208)

提　要　本文介绍在上海软土地基上，国内首次采用振冲挤密法校正 5 万 m^3 油罐基础倾斜的成功经验，并列举了工程实例。

一　概　述

近年来，在沿海软土地基上，新建或已建的各类储罐基础不均匀沉降和倾斜问题时而发生，如不及时采取措施会危及储罐的安全使用。为此，对这种倾斜储罐基础必须采取纠偏加固措施，以恢复其正常生产使用功能。大型储罐基础纠偏加固难度较大，我们多年来通过对储罐纠偏技术研究和工程实践，积累了大量数据，取得了成功的经验。纠偏的方法有多种，其中挖沟排挤法和顶升平差法等方法曾在有关专业刊物上作过介绍，这里不再赘述。本文介绍采用振冲挤密法校正 5 万 m^3 油罐基础倾斜的成功经验。该项工程已投产使用 3 年多，情况良好，满足生产使用要求。

二　工程概况

由于市政工程建设的要求，上海某油库罐区总平面位置需要较大变动，为此，对该罐区 2#罐进行了补充工程地质勘察工作。根据该罐补充工程地质勘察报告，复合地基静载荷试验及原位测试对比报告，进一步证实了油罐补充工程地质勘察报告，试验及原位测试对比报告，进一步证实了油罐地基东部比西部软弱，且地基压缩模量西部高，东部低。

详勘和补充勘察各层土主要物理力学性质对比见表 1。4#(油罐西部)和 1#～3#(油罐东部水塘内)孔各层主要物理力学性质对比，综合分析本次勘察和详勘资料表明：油罐地基在打了碎石桩和塑料插板后，④层土原为淤泥质粘土，经处理后，其含水量孔隙比减少，改定为粘土。而⑤1～⑦2 层地基土未进行处理，且受上部地基处理施工影响，其强度有所降低。油罐西部的 4#孔和油罐东部水塘内的 1#、2#、3#孔各层地基土相比，天然含水量、密度、孔隙比相差不大。③2 层压缩模量相差 43%，③3 层相差 19.1%，⑤3 层相差 24.6%。在野外钻控过程中，也发现水塘内的 1#、2#、3#孔回填地基土的强度较低。

按补充地质资料指标进行计算，油罐基础整体倾斜值为 3.7‰，国家行业标准规定，对 5 万 m^3 浮顶油罐整体倾斜容许值为 4‰，此时油罐环墙基础刚刚施工完，油罐上部结构还没有施工，主要使用荷载还没有上去，油罐基础倾斜值已经接近规范容许值，这显然

是不能满足生产使用要求，必须对该罐基础倾斜进行纠偏。

表 1　详勘和补充勘察各层土主要力学性质对比表

层号	含水量 ω（%）			密度 ρ(g/cm³)			孔隙比 e			压缩系数 a_{1-2}(MPa⁻¹)			压缩模量 E_s (MPa)			标贯击数 N (击)		
	详勘	补充	减少 (%)	详勘	补充	减少 (%)	详勘	补充	减少 (%)	详勘	补充	减少 (%)	详勘	补充	减少 (%)	详勘	补充	减少 (%)
①	323			188			0850			014			133			11		
①₁	350	359	-26	181			1030			068			29				40	
②	357	331	73	188	188	-26	0509	0943	-26		040			49		38		
③₂	329	293	109	188	189	25	0506	0883	25	025	021	160	76	97	226	34	82	1412
③₂*		261			190			0800			027			71			80	
③	326	300	80	185	186	42	0537	0898	42	033	032	30	59	62	51	34	68	1000
④	458	426	60	175	178	72	1270	1179	72	681	070	136	28	33	178			
⑤₁	391	422	-79	181	175	-122	1090	1223	-122	051	077	-509	41	30				
⑤₂	320	350	-94	181	182	-44	0654	0696	-44	027	030	-111	72	67	69	206	145	-275
⑤₃	323	331	-25	182	180	-45	0656	0699	-45	028	037	-123	70	55	-214	104	120	154
⑦₂	297	330	-111	183	180	-96	6917	1005	-96	026	035	-346	74	62	-162	325	213	-345

注：表内指标均为平均值，详勘指标选自详勘报告（档案号 09224/1-10）。

三　储罐基础纠偏方案的选择

在软土地基上建造大型储罐，通常在充水预压过程中或生产使用过程中出现基础差异沉降，使储罐产生不同程度的倾斜。储罐基础纠偏方法有多种，通常一般行之有效的方法如挖沟排挤法、顶升平差法等显然不能采用。经过方案比较，结合本工程 2#罐基础倾斜的特点，罐体还没有施工的情况，采用振冲挤密碎石桩法在环墙外侧进行半圆周加固处理。2#罐基础倾斜纠偏碎石桩加固布置见图 1。

根据补充勘察报告和原设计地基加固早已施工结束的具体情况，在 2#罐基础外东侧半圆周布置，补打碎石桩为 5 排，最外一排为桩径 Φ600，桩长为 15m，43 根；其余四排桩径为 Φ450，桩长为 23m，264 根。

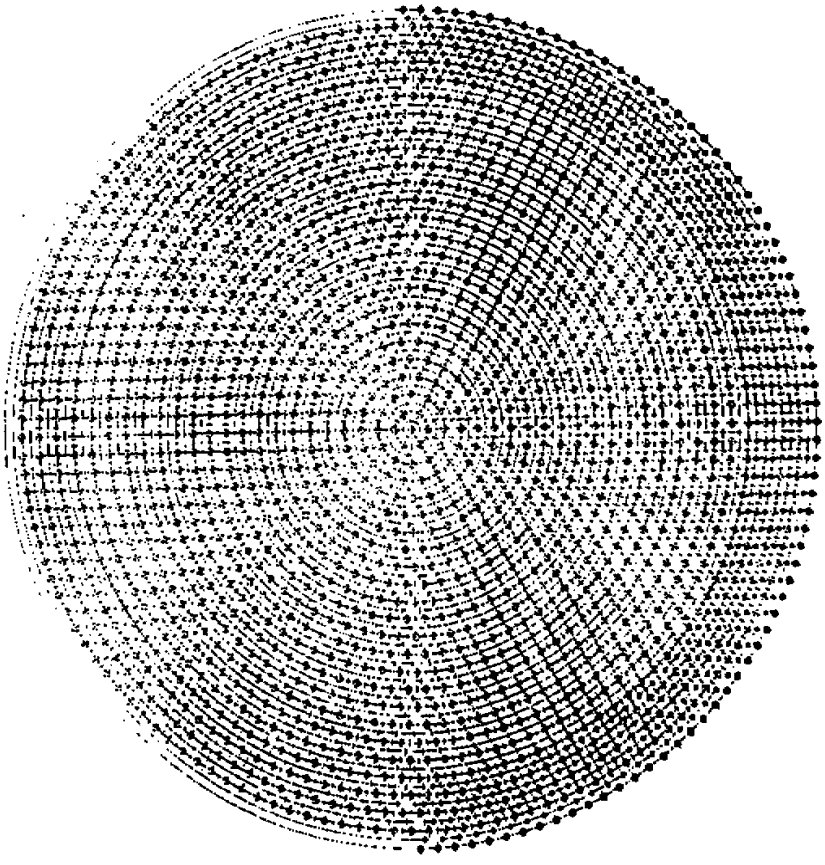
四　储罐地基充水预压现场监测

为了对 2#罐基础处理和监测纠偏加固效果作出有效的评价，在油罐地基内埋设了应力与应变观测仪器，其观测项目有：(1)罐基础边缘沉降；(2)基础周边地表土变形；(3)油罐底板变形；(4)地基孔隙土压力；(5)地基深层土变形；(6)地基深层土侧向位移等。

1. 储罐地基深层土的侧向位移

2#罐在充水预压期间，分级荷载下深层土的侧向位移实测成果，以深层土沿深度(Z)方向的位移变化，绘制深层土的侧向位移曲线，详见图 2。

由图 2 分析表明，可看出 2#罐地基深层土的侧向位移变化规律：



注：● 补桩-1型　　• 补桩-2型　　○ 原设计桩
ϕ600　l=15m　　ϕ450　l=23m

图 1　储罐基础纠偏加固平面图

(1)深层土的侧向位移随充水荷载的增加而增大。

(2)充水荷载小于 150kPa 时，施工加充水荷载瞬时深层土的侧向位移且随恒压时间的延长有减小的趋势，随荷载作用时间(35d)的延长增大。说明土体在初始不排水与排水情况下，侧向位移的弹塑性变化规律。

(3)最大侧向位移发生在 Z=16.5m 处，即④层淤泥粘土层。考虑到振冲挤密碎石桩加固处理到 Z=15m，说明碎石桩—散体材料桩是依靠周围土体的侧限阻力保持其形状，加固区由桩体和增强体材料组成，且共同承担荷载的作用，从图可以看出加固区的复合地基是非均质的，各向异性的。在荷载作用下，散体材料桩具有垫层作用。起到均匀应力、增大压力扩散角，使土体从原来主要受竖向受力状态改变为主要受水平向受力状态，桩底区域应力扩散最为明显，即为最大侧向位移点，同时也与该处软土地层有关系。加固区以下

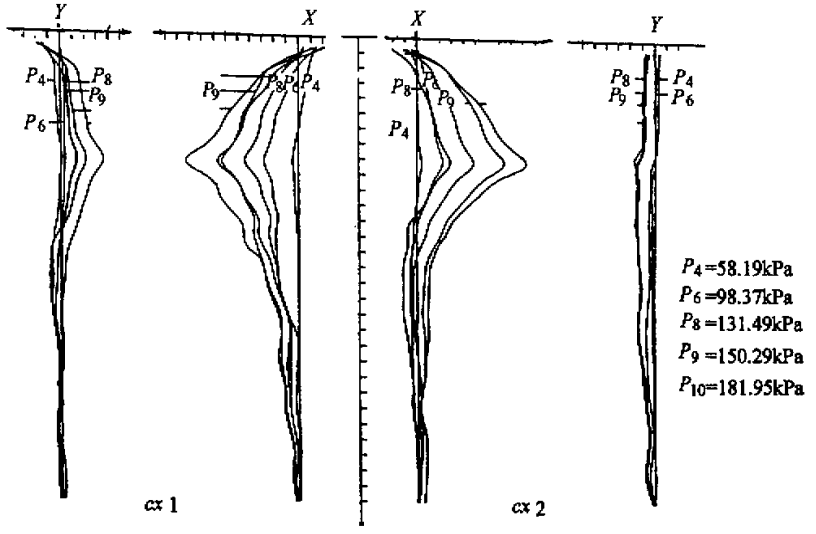


图 2　2#罐地基深层土的侧向位移实测成果图

侧向变形曲线表明天然地基的土层较为均匀。

(4)由于在 2#罐东面减小了护桩加密施工，土体受施工扰动影响，cx1 测斜孔实测位移相对于初值向罐中心偏移，随充水荷载的增大向罐外偏移。

(5)2#罐地基的侧向位移影响深度约为 36.0m。

2. 储罐地基深层土变形

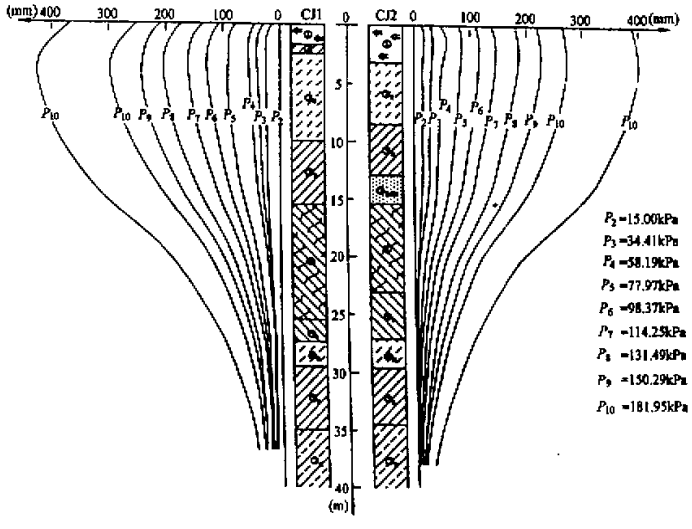


图 3　2#罐深层土变形实测曲线

以深层土实测变形(S)为横坐标，分层标埋设深度(Z)为纵坐标，绘制 2#罐充水预压期间，各级充水荷载下的实测分层沉降曲线，即 $P-S-Z$ 曲线。(见图 3)

根据深层土变形实测曲线分析可见，其沉降规律如下：

(1)深层土变形随荷载的增加而增大，随深度的增大而减少；

(2)同级荷载下，深层土变形随荷载作用时间的延长而增大；

(3)深层土的最大变形发生在深度 3.0 m 左右，而不是发生在地表，这与油罐基础沉降量大(约 94cm)，上部吹土填土受拉应力、侧向受挤压力有关，该区域应力分布复杂，0.0～3.0m 深度土层的应力及变形有待于进一步研究。在深度 3.0m 以下的深层土符合一般土体固结的规律，可以认为罐基础的沉降是正常的；

(4)CJ1 沉降孔深层土变形最大值比 CJ2 沉降孔大 23mm，与之相对应的罐基础边缘沉降差为 5mm，说明油罐钢筋混凝土环基协调变形的能力较强。

3. 储罐地基变形特征分析

地基变形特征可分为罐基础沉降量、罐基整体倾斜(平面倾斜)、罐基周边不均匀沉降(非平面倾斜)及罐中心与周边的沉降(罐基础锥面坡度)。

从 2#罐在充水预压期间，分级荷载下罐基础边缘沉降、基础周边地表土变形、油罐底板变形、地基深层土变形和地基深层土侧向位移等现场实测成果分析来看，2#罐经统计分析得非平面倾斜值：$\delta max=0.71\times10^{-3}$，远小于 2.5×10^{-3}(国家行业标准)；平面倾斜为 $K=0.22\times10^{-3}$，也小于 4×10^{-3}(国家行标控制标准)。详见表 2 及表 3。

表 2　2#罐分级加荷下的平面倾斜值和非平面倾斜值

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	放完水
$\triangle S_{max}$(mm)	27.9	28.2	26.7	23.5	20.0	18.6	17.1	16.2	14.3	13.2	13.3
$K(\times10^{-3})$	0.46	0.47	0.44	0.39	0.33	0.31	0.29	0.27	0.24	0.22	0.22
$\delta_{max}(\times10^{-3})$	0.56	0.59	0.51	0.44	0.46	0.53	0.62	0.70	0.72	0.77	0.71

注：单位：mm

表 3　1#、2#油罐基础沉降量

罐　号	最大平均沉降量	放水后平均回弹	最终平均沉降量	测点最终最大/小沉降量	对径上最大差异沉降	相邻点最大差异沉降
1#罐	985.1	30.4	954.7	996.6/910.8	85.8	19.5
2#罐	904.4	24.1	916.3	925.0/907.5	12.6	8.1

注：1#罐为相邻未倾斜罐

从以上储罐地基变形实测成果分析表明，2#罐地基沉降量、径向最大差异沉降和相邻点最大差异沉降量均小于 1#罐(相邻的未产生倾斜的同类型 50000m³ 油罐)各项指标。

五　储罐基础纠偏加固效果检验

为检验 2#罐基础纠偏加固效果，在现场做了标准贯入、静力触探和十字板剪切强度等原位试验，详见表 4。

表 4　2#罐地基加固现场原位试验对比表

层 号	层底埋深（m）	标惯 $N_{63.5}$ 加固前	击数 加固后	静力触探 P_s(MPa) 加固前	加固后	现场十字板 C_u(kPa) 加固前	加固后
①	2.0~2.6	7-0/3 3.0	7-5/3 6.0	0.4~1.4 (最小) (最大)	0.5~7.0 (最小) (最大)	26.3/3	67/3
②	3.6~3.8	5-3/3 4.0	9-4/3 6.3	1.1	1.8	42/4	63/4
③砂粉	15.1~15.2	15-8/5 10.8	20-10/13 13.5	1.5	2.5	75/3	>140
③粘粉		7-2/17 4.0	8-2/5 5.2	1.4	2.1	63.8/13	>75
④	24.024.5	3-2/5 2.8	4-0/14 2.0	0.7	0.5	29.5/6	20/16
⑤$_2$	27.1~28.0	4/1 4.0	6.5-4/4 5.0	0.8	0.7		24/7
⑤$_3$	30（未揭穿）	23-9/3 17	16-11/4 73				>100

1. 标准贯入试验

由三级标准贯入试验成果表明埋深 15 米以上地基土中标贯击数($N_{63.5}$)平均在 5 击以上，其中③层土中砂质粉土夹砂层中可达 20 击，平均 13.5 击，密度程度可达中密。

按上海地基基础设计规范中(7.2.1)分式分别计算了各层土的临界击数均小于实际击数($N_{63.5}$)，为不液化土层。而加固前则判定为中—严重液化。埋深 15m~25m 第④层土，其则略小于加固前，这是因为塑料插板插入过程中，使土层扰动，强度有所降低造成的。

2. 静力触探

由三级静力触探试验成果 P_s 值统计分析表明表层填土 P_s 值水平方向较大。西北侧 1 段 P_s 值 7.0～1.6kPa，平均为 4.9kPa。③层砂质粉土 P_s 值为 1.2～4.0kPa。粘质粉土 P_s 为 1～3kPa，平均值为 2.1kPa。其层内粉砂夹层 P_s 值 3.3～7.8kPa，平均值为 5kPa。各层土 P_s 值均明显高于加固前 P_s 值。而埋深 15 米以下各层土 P_s 值，加固前后无明显变化。

3. 现场十字板剪切强度

现场十字板剪切试验没能达到设计要求，是因场内埋深 15 米以上的粉性土经加固后，强度明显提高，导致十字板试验多处受阻(板头损坏)，故当试验值上升到一定值就中止测定。综合试验成果可知①、②层(埋深约 4 米以上)其不排水抗剪强度 C_u 值测至 75～80kPa 就中止(以免仪器损坏)。埋深 15 米以下的④、⑤1 层 C_u 值在 10～60kPa 之间，平均值为 20～24kPa，⑤2 层 C_u 值剧升至 100kPa 以上。详见图 4、图 5 及表 5。

表 5　2#罐地基土加固后西部（4#）和东部（1#~3#）各层土主要物理力学性质表

层号	含水量 W (%) 4#	1#～3#	相 率 4# (%)	密 度 ρ(g/cm³) 1#～3#	相 率 4# (%)	孔隙比 e 1#～3#	相 率 4# (%)	压缩系数 a1~12(MPa⁻¹) 1#～3#	相 率 4# (%)	压缩模量 E_s (MPa) 1#～3#	相 率 (%)
①	27.5										
①$_1$		35.9									
②	33.3		1.8 8		0.943		0.4		4.9		
③$_2$	30.5	28.7	-5.9	1.89	1.88	0.5	0.872	0.900	3.4	0.13	0.27	107.7	14.2	8.1	-43.0
③$_夹$		26.1			1.90			0.800			0.27			7.1	
③	30.4	29.9	1.6	1.87	1.86	-0.5	0.895	0.900	0.4	0.22	0.36	63.6	6.8	5.5	-19.1
④	44.1	41.9	-5.0	1.77	1.80	1.7	1.233	1.13	-8.4	0.68	0.73	7.4	3.6	2.9	-19.4
⑤$_1$		42.2	1.7		1.75			1.233			0.77		3.0		
⑤$_2$	35.0	35.1		1.82	1.81	-0.5	1.003	0.988	-1.5	0.30	0.30	0.00	6.7	6.6	-1.5
⑤$_3$	33.0	33.1	-0.5	1.82	1.80	-1.1	0.983	1.004	2.1	0.29	0.29	31.0	6.9	5.2	-24.6
⑦	33.3	33.0	-1.1		1.79			1.018						6.7	

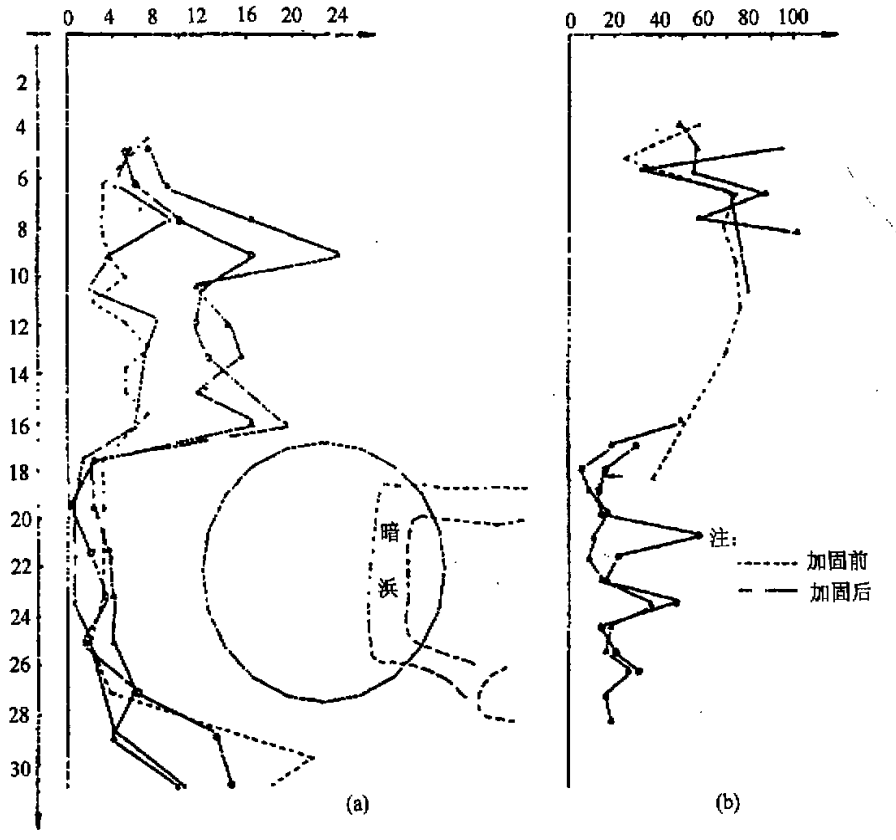


图 4　2#罐基础纠偏加固前后现场原位测试指标对比

六　结　语

(1)储罐基础纠偏方法的选择应根据储罐型式与容量大小、工程地质情况、施工方法及产生罐基倾斜原因等条件，选择储罐基础倾斜纠偏与修复方法。对中小型储罐基础(一般指小于 10^3m^3)以下的储罐，在储罐地基充水预压或生产使用过程中，当发生基础倾斜或地基变形超过规范容许值时，应根据具体情况，采用顶升平差法或挖沟排挤法等进行校正与修复。对大型储罐，比如本工程 $5\times10^4m^3$ 油罐基础，由于罐区平面位移，在基础施工中产生倾斜，是实属罕见的，因此基础倾斜校正难度较大，纠偏经验与方法也不多。经多种方案比较，采用挤密碎石桩半圆周加固法校正 $5\times10^4m^3$ 油罐基础倾斜成功，确保施工建设进度，该储罐工程投产 3 年多满足生产使用要求。

(2)从储罐地基变形现场多种项目实测成果分析来看，罐基整体倾斜值：$K=0.22\times10^{-3}<4\times10^{-3}$(现行国家行业标准中 $5\times10^4m^3$ 浮顶油罐基础变形允许值)，罐基周边不均匀沉降(非平面倾斜) $\delta max=0.71\times10^{-3}<2.5\times10^{-3}$(现行国家行标规定地基变形允许

值)。充水预压结束后罐基础锥面坡度也满足设计要求。

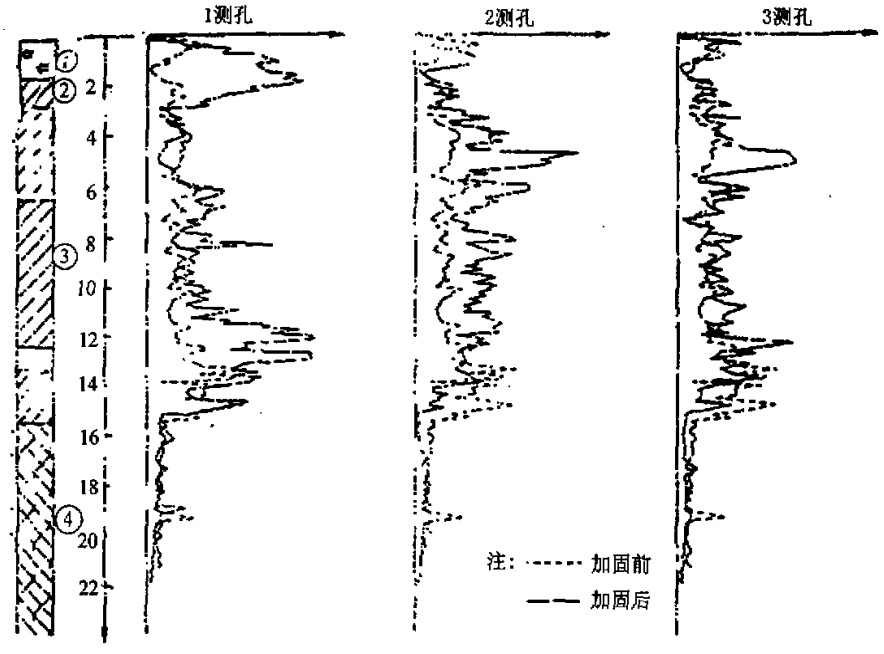


图 5　2#罐加固前后现场原位测度对比图

参考文献

[1] 贾庆山编著：《大型油罐地基处理》，中国石化出版社，1993。

[2] 贾庆山：《大型油罐纠偏技术研究与工程应用》，载《地基基础工程》，Vol.3　No.4，1993。

[3] 贾庆山：《储罐基础纠偏技术》，载《岩土工程师》Vol.11　No.3，1999。

[4] 贾庆山：《油罐基础工程事故分析与处理》，载《特种结构》，Vol.8　No.2，1995。

[5] 中华人民共和国行业标准：《建筑桩基技术规范》(JGJ94—94)，1995。