真空联合堆载加固超软弱地基

王盛源　周春儿　　关锦荷　李根祥
(广东省航务工程总公司，广州，510230) (京珠高速公路广珠段有限公司，广州，510230)

提　要　珠江三角洲的软土为高水量、低强度、高压缩性的超软弱土，在这样软的厚数十米的地基上建造高速公路难度很大。许多技术问题集中到两个方面：地基稳定和工后沉降的控制。以往用了“薄层轮加法”技术、水泥粉喷桩和碎石桩复合地基、加筋土技术等。这些技术对满足稳定、工后沉降、工期及经济方面均不够满意。自 1998 年开始应用真空联合堆载技术，至今已使用 30 多万平方米，有的已投入营运，目前看来尚比较理想。本文讨论真空预压堆载加固珠江三角洲深厚超软弱地基的一些技术问题。

一　概　述

珠江三角洲淤泥为高含水量、高压缩性、低强度的空架结构饱和粘土，在由这种淤泥组成的数十米深厚的超软弱地基上建造高速公路，技术难度较大。从近十年工程经验来分析，主要存在问题是两个：(1)地基的稳定控制。珠江三角洲一带超软弱地基的极限填土高度为 1.5m(台山、新会)至 2.5m(中山、珠海)，而高速公路设计填土高度均在 5～6m，桥头区为 7～8m；(2)工后沉降控制。从工程实践中已总结出在 5～6m 填土高度下，淤泥的压缩量约为淤泥厚度的 10%～13%，珠江三角洲地区淤泥厚度为 20～30m，因此总沉降量为 2～3m，规范要求工后沉降小于 30cm。单纯用排水固结法，一年期固结度仅能达到约 80%，因此难于满足规范要求。

以往用排水固结法为主体的加固方法，适当配以加筋土，填土用薄层轮加法填筑技术，二年施工期。十年来较好地解决了深汕、广珠、佛开、广佛等高速公路的建造。由于工程要求缩短工期，加快建设速度，为此，用真空预压联合堆载来处理深厚超软弱地基。过去的真空联合堆载的堆载量不大，真空期较长，这里所用的是根据工程要求，首先在砂井和砂垫层等排水通道设置后，立即施加真空，经 7～10d 后真空度就可达到 70kPa 左右，就可准备填土，再经 40～50d 可填至 6～7m 以后在真空和堆载作用下经 90d 就能完成加固任务，一般此时的沉降量可达到淤泥厚度的 10%～12%。

由于真空是在土中产生负压作用，因此软基发生侧向收缩，所以填土时不发生或很少发生地基侧向挤出，故填土速率几乎不受限制，地基稳定性受到很好的控制。当填土结束后，地基除受路堤荷重作用外，尚受 80～90kPa 的真空超载作用，在这种的荷载条件下，加快了固结期，工后沉降量已能满足规范和工程要求，可见真空联合堆载加固方法能较好地解决珠江三角洲超软弱地基的加固。

二　真空联合堆载法加固原理

真空预压是将不透气的薄膜覆盖在地面上，在薄膜下通过管道抽吸水气，造成薄膜下土体中产生真空负压。众所周知，大气压力为每平方米 10t，薄膜下如果完全达到真空，则薄膜上就有 10t/m²，这个压力变类似于堆载 10t/m² 的加固地基。太沙基的固结理论认为饱和粘土内的应力平衡方程为：

$$a = u + a \tag{1}$$

式中 a 为总应力，u 为孔隙应力，a 为有效应力。三者在整个固结过程中服从式(1)的关系。当地面施加荷重时，地基内产生附加应力，即总应力，对饱和粘土地基它由两部分组成，即孔隙应力和有效应力。在施加荷重的瞬间，即 $t = 0$ 时，附加应力全部由上体内孔隙水承受，如下式：

$$\left.\begin{aligned} a' &= 0 \\ a &= u \end{aligned}\right\} t = 0 \tag{2}$$

孔隙水受力后发生流动，被排出受力区之外，随着排水过程，u 逐渐减小，a' 逐渐增大，也就是孔隙应力逐渐向骨架有效应力转移，土骨架在有效应力作用下被压缩。在整个转移过程中始终服从公式(1)规律，当 $t=\infty$ 时，则

$$\left.\begin{aligned} a &= a' \\ a &= u \end{aligned}\right\} t = \infty \tag{3}$$

此时土体完成固结，这就是太沙基固结理论的基本概念。真空预压加固也服从太沙基的固结原理，当薄膜下抽水汽时，土中产生真空负压，原来的平衡状态被破坏，造成一个压力差。设抽真空在某单元体上产生一个负压，这个负压首先作用在孔隙水上，孔隙水在负压作用下发生流动，其结果是孔隙水体被吸出，负孔隙应力逐渐消散，收缩有效应力增加，土骨架在收缩有效应力作用下被收缩，土体发生收缩固结。这个过程也可以用类似式(1)来表示。

$$a_1 = u + a_1' \tag{4}$$

式中 a_1 为真空产生负的孔隙应力绝对值，a_1 和 a_1' 为真空产生的总应力和骨架收缩有效应力的绝对值。

真空联合堆载为先施加真空，地基内产生负的孔隙应力 u_1，然后堆载产生正孔隙应力 u，当 $u_2 < u_1$ 时，总的孔隙应力仪上量出的孔隙应力值为负值，当堆载产生的 $u_2 > u_1$ 时，孔隙应力仪上测出的为正孔隙应力值。此时用公式表示为：

$$a_1 + a_2 = u_1 + u_2 + a_1' + a_2' \tag{5}$$

式中 a_1、a_2 分别为真空和堆载产生的总有效应力绝对值，a_1'、a_2' 分别为土骨压缩和收缩有效应力绝对值，u_1 为真空产生的孔隙应力绝对值，u_2 为堆载产生的孔隙应力。这两部分孔隙应力均在促进孔隙水排出，土骨架缩小，土体固结。如果用 β 表示，则应为：

$$\bar{\beta} = \frac{u_1 + u_2}{p_1 + p_2} \tag{6}$$

式中 P_1 为真空压力，P_2 为堆载压力。

用同样的道理可以分析侧向位移。在真空作用下产生侧向收缩 ΔS_1，加载后产生侧向

挤出 ΔS_2，当 $\Delta S_2 < \Delta S_1$ 时地基土尚处于收缩状态，地基不会失稳，只有当 $\Delta S_2 > \Delta S_1$，且达到一定程度时才会发生失稳。

地面沉降总的量会比单纯堆载产生的沉降量小一些，因为无侧向挤出产生的沉降量，只有当 $\Delta S_2 > \Delta S_1$ 时，才会有部分侧向挤出量产生的沉降。

三　真空联合堆载的施工工艺

施工步骤是首先设置排水通道，这是按常规方法先铺砂垫层，接着打砂井(塑料板)，长度和间距按排水固结法要求，一般间距不大于 1.5m，长度以打穿淤泥层或不少于 20m 为宜。其次是布置真空排水(气)管道(PVC 管)。在高速公路中因路堤为长条形，按此特点，设主管和滤管两种，主管直径 10cm，沿纵向间隔 30m 布置两条。在主管上每间隔 6m 两侧设两条直径 6cm 的滤管，在管上开有孔洞。主管和滤管呈鱼骨状控制加固体顶部，两者用软管连接并埋入砂垫层中。从主管上接出抽真空管路，经密封由出膜器通出，将出膜器与射流泵联接。每台 7.5kW 泵控制 600～800m^2 的加固区，按此标准设计泵站。管道铺设后接着铺盖密封膜，在加固区四周开挖密封沟，深度必须进入淤泥层 50cm 以上，将膜埋入泥中，再在沟内覆土压实。当二层密封膜盖好后可以开始抽真空，并检查漏气。正常情况下约 7～10d 真空度可达 70kPa 以上，经稳定 2～3d 后开始堆载。

四　工程实录

1. 工程概况

1998 年首先开始在广珠高速公路第十三、十四标段采用真空联合堆载法加固 2.3 万平方米。淤泥深度约 40m，砂井长 20m，间距 1.3m。在取得一定效果后，又在第三标段加固 1.5 万平方米。同时在西部沿海高速公路第三标段加固 1 万平方米，此处淤泥厚 20m。1999 年在西部沿海高速公路第二标段及镇海湾大桥头等处共加固约 11 万平方米，在新台高速公路加固约 11 万平方米，广肇高速公路加固 1.5 万平方米，此外，将在广惠高速公路准备用此法加固桥头过渡段。至今在珠江三角洲一带高速公路超软弱地基中用真空联合堆载法加固了约 30 万平方米，已取得了良好的工程和社会效益，现将这一带的工程概况统计入表 1 中。

2. 观测资料分析

(1)真空传递：刚抽真空二天内，在广肇高速公路录得如表 2 中的资料。

48 小时内砂垫层中真空度平均已达 50kPa，且传递到 1.4m 深以下。从表中资料可以看出：

①真空压力几天内传递到 13m 的收缩孔隙压力为 7.84kPa；

②除 4m 处孔隙传递有些阻力，它的传递程度仅为 28%，而 5m 和 6m 的传递能力达到 60%以上，9m、11m 和 13m 的只能传递 20%左右，可见上部加固效果会比下部更好一些。

(2)真空联合堆载的孔隙应力变化过程线表示于图 1 中，图中资料为广珠东线Ⅰ，在 3～15m 深度内共埋设 7 只孔压测头，加载是五级。从图中曲线可以看出，9m 深度以内，

表 1　珠江三角洲高速公路真空联合堆载加固工程概况统计表

工程名称	淤泥厚度(m)	砂井		淤泥含水量(%)		孔隙比		a_v (MPa^{-1})		Cv ($10^{-3}cm/s$)		十字板强度(kPa)		静力触探 Ps(kPa)		加固效果			备注
高速公路		长度(m)	间距(m)	加固前	加固后	加固前	加固后	加固前	加固后	加固前	加固后	加固前	加固后	加固前	加固后	加固时间	填土高度	沉降量	括号中数字包括沉降量的填土高度
广珠Ⅰ		20	1.3	83.8	60.0	2.11	1.54	2.61	1.66	2.81	25.9	17	63.9	319.2	801.4	285	7.2 (10.21)	301.0	
广珠Ⅱ	40	20	1.3	64.8	54.1	1.63	1.48	1.77	1.51	1.45		10.8	24.9			264	6.4 (9.11)	271.0	
西部沿海	40	21.5	1.2	79.7	63.1	2.15	1.73	2.76	1.52	4.07	0.7					326	6.55 (10.08)	353.9	
新台Ⅰ	20	20	1.2	74.7				2.55		4.2							6.422	2.822	
新台Ⅱ	22.40	17.8	1.0	69.3				2.69		3.0							10.06	3.355	
新台Ⅲ	20.30	17	1.0	65.4				2.09		3.0									
广肇	17	18	1.2	96.2		2.54						8	474						

表 2　抽真空时膜下真空度向下传递

膜下平均真空度(kPa)	孔隙应力（kPa） U_1(4m)	U_2(5m)	U_3(6m)	U_4(9m)	U_5(11m)	U_6(13m)	备注
0	29.97	37.58	47.52	80.53	95.24	114.64	地下水位处于地面下 1m 左右
26	27.9	18.2	31.9	76.5	89.1	109.8	
41	22.1	3.8	27.7	75.4	87.8	110.3	
42	2.2	12.3	25.9	75.4	87.3	108.3	
44	21.6	9.9	23.2	74.4	86.1	108.1	
50	16.1	4.0	17.2	70.5	82.7	106.8	

陆续出现加载产生的孔压大于真空产生的收缩孔隙应力，土体开始产生侧向膨胀。

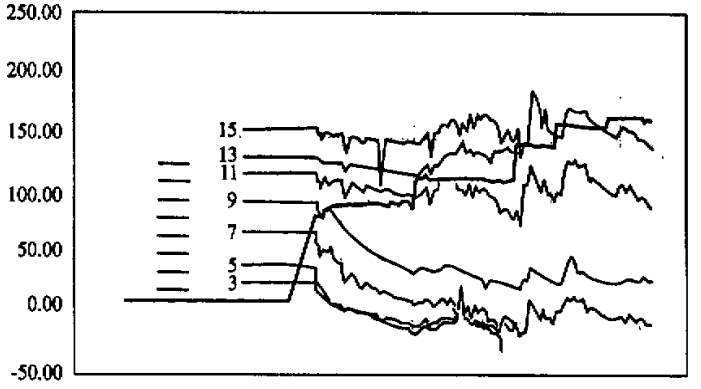


图1 真空联合堆载的孔隙应力过程线（广珠东线）

(3)侧向位移

图 2 为广珠东线Ⅱ的侧向位移测录的 4 条曲线，图中①为 1998 年 10 月 14 日；②为 1998 年 10 月 29 日；③为 1999 年 1 月 22 日；④为 1999 年 5 月 13 日。

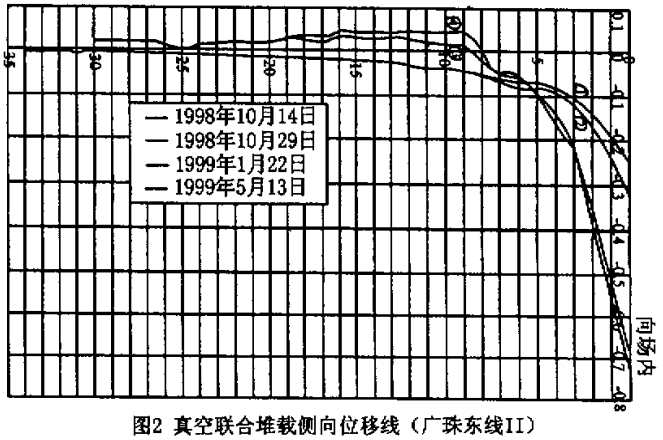


图2 真空联合堆载侧向位移线（广珠东线II）

曲线①为开始堆载，地基土在 30m 范围内均处于收缩状态，四周地表出现数条裂缝；曲线②为加二级荷载，地基仍处于收缩状态，地基内应力状态仍然由真空收缩应力控制；曲线③为五级荷载已加完，地面 8m 以下土体开始侧向挤出，但地表侧向收缩加大，地面裂缝加宽，这是由于真空作用时间较长，上部仍受真空收缩控制，下部已受堆载挤出控制；曲线④为加至六级，堆载控制区加大，真空控制区缩小到地面下 6m 左右，此时堆载已达 195kPa，其中路堤高约 5m，沉降已超过 3m，超填土 1.5m，总计已接近 10m。

(4)真空联合堆载沉降过程线示于图 3 中，该图为广珠东线Ⅰ，由曲线过程见路中间沉降板于 1999 年 7 月 6 日沉降达 301cm，它的沉降量比同等条件下单纯堆载的沉降量少 8%～10%，这是由于减少侧向挤出量，在广珠东线同样情况的沉降量为 3.2～3.4m。

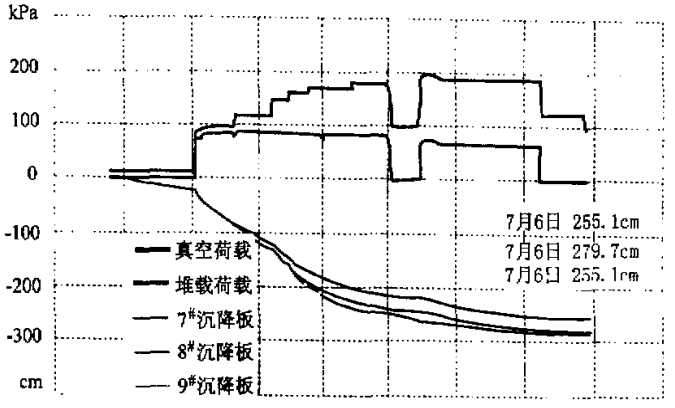


图3 真空联合堆载沉降过程线（广珠东线Ⅰ）

(5)加固前后土质资料和十字板强度统计入表 3。

表 3 加固前后土质资料统计（广珠东线 1）

试验		基本物理指标				抗剪指标 Q		抗剪指标 C_U		压缩试验				十字板强度 试验	
项目		含水量	天然密度	孔隙比	饱和度	凝聚力	磨擦力	凝聚力	磨擦角	固结系数	渗透系数	压缩系数	压缩模量	十字板强度 原状	十字板强度 重塑
代号		ω		e	S_r	C	Φ	C	Φ	C_{vmax}	K_{max}	A_{vmax}	E_{smax}	S_t	S_t
单位		(%)	(g/cm)		(%)	(kPa)		(kPa)		(10^3cm/s)	(10^{-3}cm/s)	(1/MPa)	(MPa)	(kPa)	(kPa)
加固前	大值	83.3	1.85	2.11	100	12	11.6	19	30.2	2.81	1.87	2.61	2.21	32.2	30.2
	小值	56.3	1.48	1.41	94.3	1	1.4	4	21.5	0.58	0.38	1.06	1.19	4.8	1.2
	平均	65.5	1.60	1.76	98.5	8.17	3.12	10.3	28.4	1.10	0.94	1.73	1.55	17.0	6.9
加固后	大值	60.0	2.00	1.54	100	31.7	19.3	61.0	26.6	25.9	6.59	1.66	4.20	118.4	33.9
	小值	38.6	1.63	0.84	85.3	14.5	8.5	39.0	15.6	0.49	0.18	0.48	1.76	33.0	8.2
	平均	54.0	1.72	1.45	98.5	20.5	12.3	45.0	21.0	1.75	1.12	1.04	2.67	63.9	20.8

从表中可见：①十字板强度平均从 17kPa 增长到 63.9kPa；②重塑土的十字板强度加固前为 6.9kPa，加固后为 20.8kPa，这个增长量说明土粒骨架已非常紧密，土体密实，因此孔隙比也从 1.76 降到 1.45；③土的天然含水量从平均 65.5%降到 54%已接近液限，说明土中自由水已剩下不多，以后的沉降主要是骨架蠕变产生的次固结沉降。

4. 工程的加固效果

表 1 中所列工程均已填筑至设计标高，等待修筑路面交付使用，只有广珠东线于 1999 年 12 月 8 日交付使用，并于 2000 年 3 月 5 日设立长期标点进行长期监测，现将 K46+930、K47+060、K47+010 左、K47+010 中和 K47+010 右五个标点的五次观测结果列入表 4 中。

表 4　广珠东线工后观测

桩号	第一次 (5/3)		第二次 (21/3)		第三次 (4/4)		第四次 (21/4)		第五次 (8/5)		累计沉降	
	沉降 (mm)	速率 (mm/d)	沉降 (mm)	速率 (mm/d)	沉降 (mm)	速率 (mm/d)	沉降 (mm)	速率 (mm/d)	沉降 (mm)	速率 (mm/d)	沉降 (mm)	速率 (mm/d)
K46+930	4	0.24	/	/	1	0.07	5	0.29	2	0.12	15	0.22
K47+060	2	0.12	/	/	6	0.40	4	0.24	4	0.24	16	0.23
K47+010 左	2	0.12	4	0.25	5	0.33	/	/	/	/	10	0.15
K47+010 中	5	0.29	/	/	7	0.47	7	0.41	6	0.35	25	0.36
K47+010 右	7	0.41	/	/	/	/	/	/	2	0.12	9	0.13

从表中资料可见，68 天观测到沉降为 10～25mm，沉降速率为 0.15～0.36mm/d，这个沉降主要是土骨架蠕变发生的次固结沉降，珠江三角洲一带从以往工程中测得次固结沉降约占总沉降的 13%～15%。可见用真空联合堆载的方法加固后所产生的工后沉降能满足规范要求。

五　结　语

通过珠江三角洲一带 30 万 m^2 工程实践，证实用真空联合堆载法加固这一地区的高含水量深厚超软弱地基是成功的。目前大部分工程已加固完成，部分工程已交付使用半年多，情况良好。通过本次初步总结，可以认为：

(1)由于真空是在地基中产生抽吸水气，使地基发生收缩固结，因此当堆载产生的地基侧向挤出不大于真空产生的收缩时，地基始终处于稳定状态。由此很好地解决了这个地区填筑 6～7m 高的高速公路的稳定问题，同时争取了固结时间。

(2)当路堤填筑至设计高程时，地基内还保持着足够的真空度，相当于 80kPa 的超载，这个超载是不断抽吸隙水气，它优于一般超载的固结速度，因此经三个月后已能完成主固结，剩余的地基沉降主要是骨架蠕变发生的次固结沉降。从工程角度来分析，已能满足规范要求的工后沉降并满足工程使用要求。