

15-24

高层建筑液化地基处理的研究

朱金荣 戴荣良[✓] 曹惠宾

TU472.33

(上海勘察院)

提 要 本文主要介绍拟建于严重液化场区内高层建筑地基处理的研究成果。研究表明：采用袋装砂井处理，能够收到防液化效果，但应注意时间效应；当地震烈度为7°时，对桩基础的高层建筑，只需利用沉桩作用，即可获得较好的抗震加固效果；若袋装砂井与沉桩共同作用进行处理，其抗震加固效果尤为理想，即使当地震烈度达到8°时，也不会产生液化现象。

关键词： 地基处理，液化，袋装砂井，沉桩作用

上海地区高层建筑的基础，大多采用箱基加桩基，当桩身周围为液化土层时，在水平地震力的作用以及桩周土液化下，桩的侧向支承力将大为削弱，桩身因承受弯矩过大而折损。为了保证建筑物在地震时不致因地基失效而破坏，就应对地基的土质条件进行处理。如所周知，利用袋装砂井的排渗作用；桩基的挤密作用以及袋装砂井与桩基的复合作用，均可改善土层的液化性能，但在实际工程中处理效果究竟怎样？工程界同仁对此极为关注。

位于吴淞江古河道内杨浦区大连西路某工程，拟建造二幢高层，层数为18层。经钻探揭露在地表下3~15米深度内的第③层土，系由饱和轻亚粘土和粉砂组成，其物理力学性质指标见表3的原始场地栏。按1984年城乡建设环境保护部颁发的《饱和轻亚粘土液化判别暂行规定》(试行)判定(以下称暂行规定)，其液化指数 P_L 为22.13，属严重液化(Ⅲ级)。应用西特(Seed)液化判别式：

$$\gamma_e = \frac{0.65 \cdot a_{\max} \cdot Z}{V_s^2 (G/G_{\max}) \gamma_e} \gamma_d$$

对场地进行判别，经计算得出的动剪应变 γ_e 分别为0.041%和0.033%，已全部超过液化门限值 γ_i (0.026%~0.030%)，属液化层。吴淞江古河道是上海地区最主要液化层分布区，故选本工程作液化地基处理的试验研究。

一、地基处理概况

本次处理采用三种方式进行，在1*楼作袋装砂井与沉桩复合处理(下称一区)；在2*楼作沉桩处理(二区)；在1*与2*楼之间空地作袋装砂井处理(三区)。整个检验工作分二个阶段实施，第一阶段是探索经袋装砂井处理后，液化层性能的改善效果；第二阶段是研究沉桩处理后，袋装砂井与沉桩复合处理后，液化层性能的改善程度。

根据固结理论，土层固结所需时间与排水距离平方成正比。袋装砂井具有缩短排水距离，

加快土层固结的功效，故在工程上得到广泛运用。处理要求袋装砂井应穿过整个液化层，其长度为15米，直径选用7厘米，埋设间距在一区结合桩位布置，采用网度为 180×200 平方厘米，呈长方形；三区网度为 300×300 平方厘米，呈正方形，如图1所示。井径比为25~45。砂袋选具有良好透水性和足够抗拉强度的聚丙烯编织；砂料用含泥量低于3%、井阻较小的中粗砂；砂井间挖掘纵横排水砂沟予以贯通，以利疏导土层中排入砂井的渗流水。

在一区、二区打入钢筋混凝土预制桩，桩距为 1.8×2.0 米，桩规格为 $0.45 \times 0.45 \times 27$ 米(分二节预制)，送桩深度4米，桩穿过液化层③_a、③_b及下卧④淤质粘土、⑤亚粘土、⑥亚粘土(俗称硬土层)，进入⑦轻亚粘土。首先在一区使用K 35锤打桩机进行沉桩，后期因沉桩困难改用K 45锤打桩机施工，二区全由K 45锤打桩机施工。

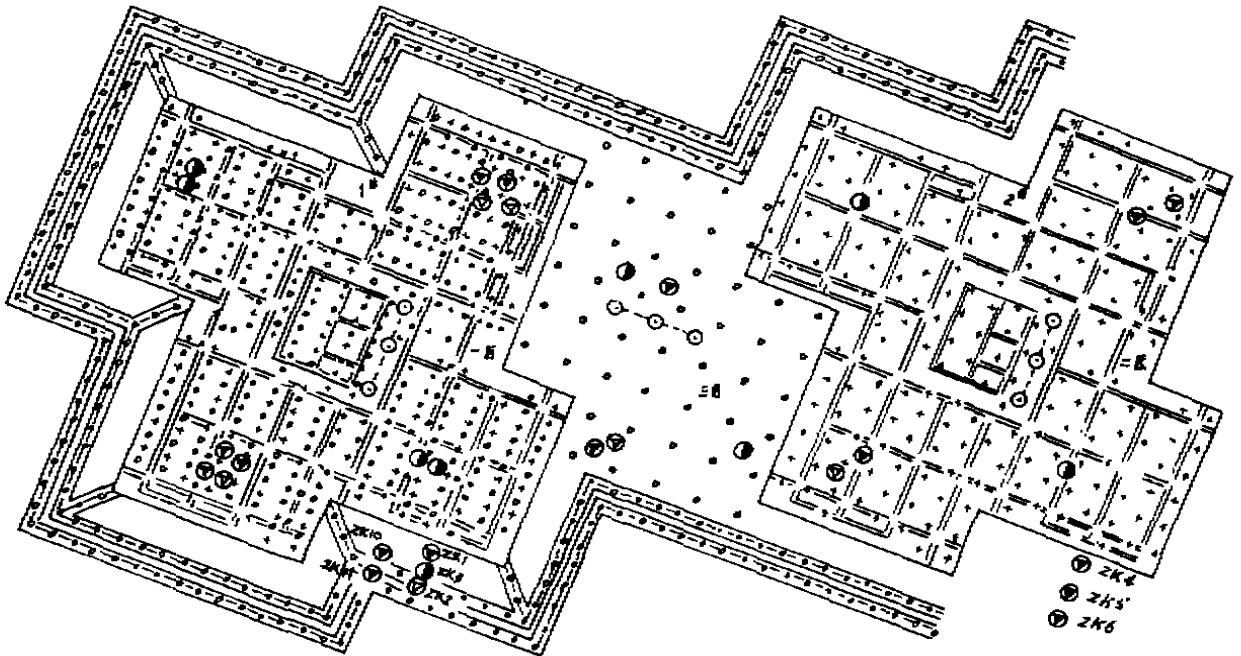


图1 液化地基处理试验平面布置图

●取土孔 ◄标贯孔 ◑静探孔 ◒跨孔法孔 ○袋装砂井 +桩位

二、处理效果的检验

(一) 一、三区袋装砂井处理后，液化性能改善效果:

经过20天休置后，在一区测得静力触探比贯入阻力 P_s 曲线与天然状态时 P_s 曲线对比见图2；标准贯入试验对比见图3；按各深度点标贯击数及粘粒含量进行液化指数 P_L 计算得25.0。上述结果均表明液化层经袋装砂井处理，受扰后强度有所下降。波速试验：在一区、三区测得的剪切波速度 V_s 见表1，计算得出的动剪应变 γ_e ，如图4所示，也同样说明袋装砂井处理后未能控制土层液化。但随着时间的增长，袋装砂井的“排水效应”逐渐得到发挥，经过六个月时效后，再次对三区进行测定，其结果 V_s 值由 125.4 m/s 增至 161.7 m/s ，提高

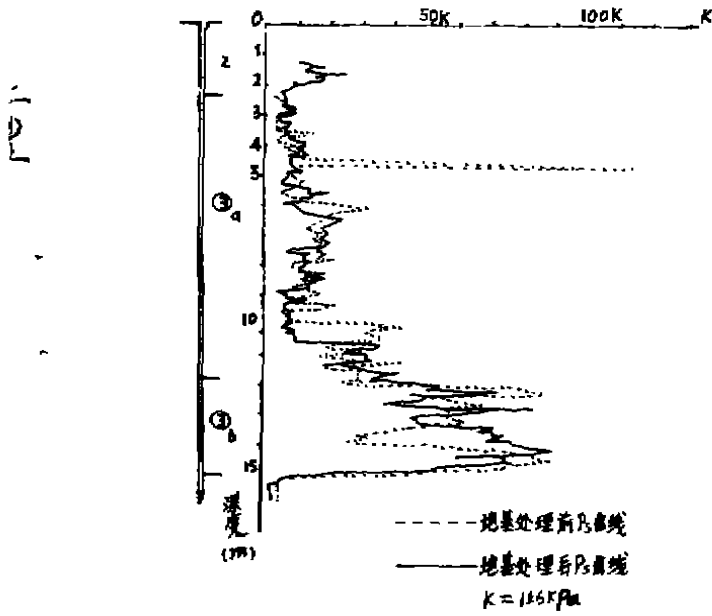


图2 一区袋装砂井处理前后比贯入阻力 P_s 曲线对比

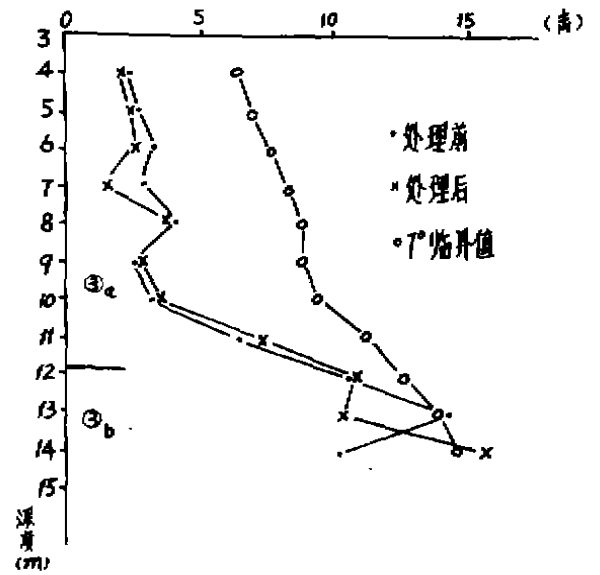


图3 一区袋装砂井处理前后标贯击数对比

表 1

深度 (m)	一区袋装砂井		三区袋装砂井	
	处理前 $V_{s(m/s)}$	处理后 $V_{s(m/s)}$	处理前 $V_{s(m/s)}$	处理后 $V_{s(m/s)}$
3	108.7	111.8	108.7	112.1
4	126.2	117.7	126.2	114.6
5	107.2	130.4	107.2	125.1
6	110.2	139.7	110.2	137.7
7	105.0	150.5	105.0	136.5
8	120.4	153.4	120.4	137.7
9	126.2	150.5	126.2	141.4
10	127.2	153.4	127.2	151.0
11	142.3	156.5	142.3	159.3
12	138.5	172.0	138.5	168.2
13	151.2	177.8	151.2	170.1

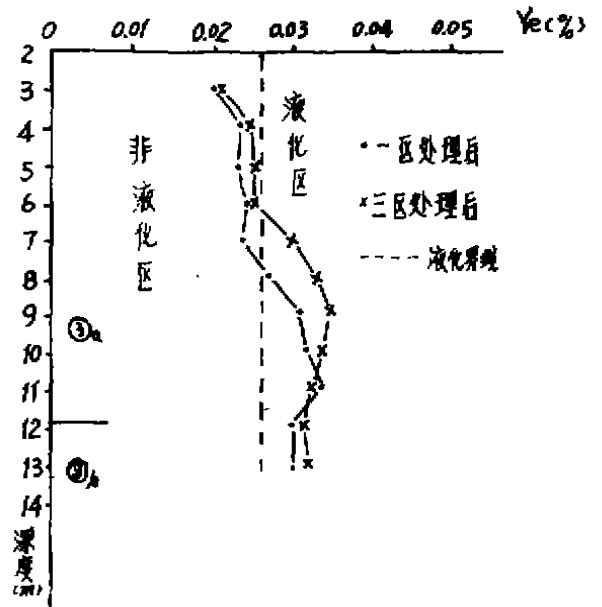


图4 一、三区袋装砂井处理后的动剪应变变量 γ_e

了 29%，原先超过液化门槛值的动剪应变量 γ_e 由 0.043% 降至 0.021%，表明场地液化受到了控制，见图 5—(a)、(b)。

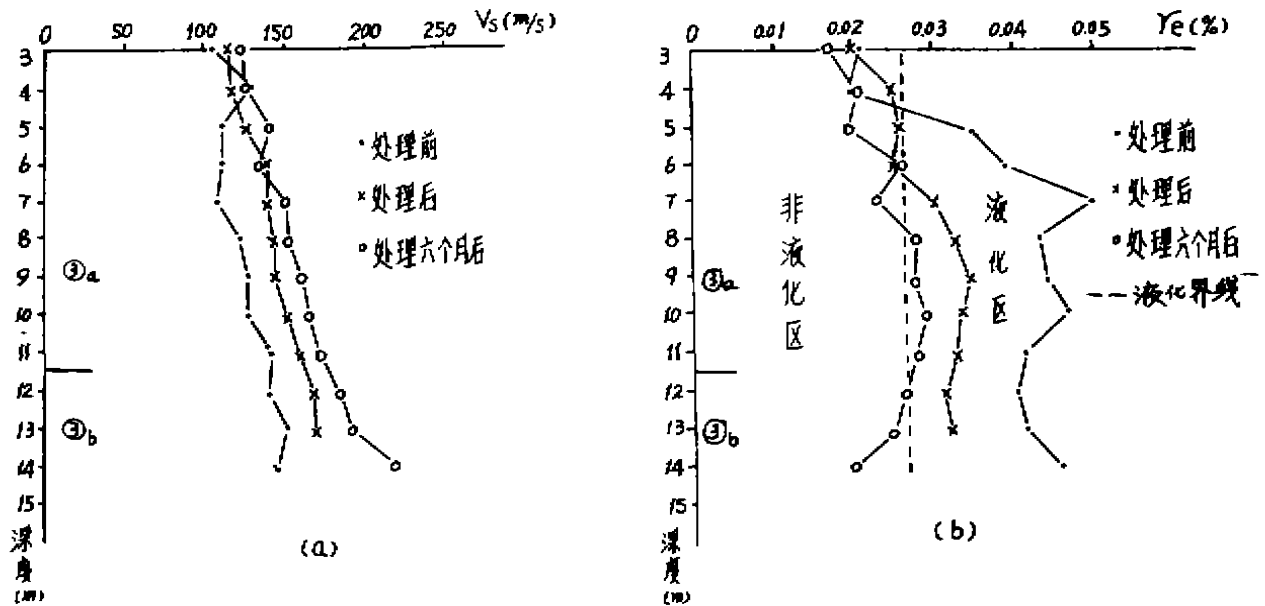


图 5 三区袋装砂井处理六个月后剪切波速度 V_s 、动剪应变量 γ_e 对比

(二) 沉桩效果的检验:

1. 沉桩效果的宏观反映:

沉桩作用对一般地基土来说，挤压作用是土层性质改变的主要因素，沉桩往往引起地面隆起。但对易产生液化的地基土，从施工现场调查发现，挤压和振动同时起着重要作用。在沉桩过程中常可看到这种情景，锤击下节桩时，锤击数少、贯入度大，因而，桩身很快穿过液化层，地面开始出现沉陷，但沉陷变形小。当锤击上节桩时，桩身进入较硬土层，尤其是⑥硬土层以后，锤击数增多，贯入度越来越小，此时，地面受震动感觉越来越剧烈，地面出现较大震陷，如图 6 所示，系沉桩竣工后，分别于一区、二区测到的地面沉陷变形曲线。在一区最大沉陷量为 59 厘米；二区最大沉陷量为 44 厘米。每当单根沉桩贯入后，常伴随喷水冒砂，但这种喷冒现象在不同处理区反映是不一致的。在二区表现强烈，约有 70% 的桩孔喷水冒砂，使地面出现大小不同的砂锥，形似火山口；而一区相对表现较弱，仅有 15% 的桩孔喷水冒砂，且集中于场地中部。一区、二区的喷冒物其颗粒分析结果见表 2。

表 2

取 样 位 置	颗 粒 组 成 (%)				
	0.25 ~ 0.1 (mm)	0.1 ~ 0.05 (mm)	0.05 ~ 0.001 (mm)	0.001 ~ 0.005 (mm)	< 0.005 (mm)
一区桩孔上部(地表)	0.2	21.8	71.0	4.6	2.4
一区桩孔下部(深 0.6 米)	0.2	17.8	74.4	4.2	3.4
二区桩孔上部(地表)	0.2	20.8	72.6	4.0	2.4
二区桩孔下部(深 0.6 米)	3.0	15.0	67.8	3.6	10.6

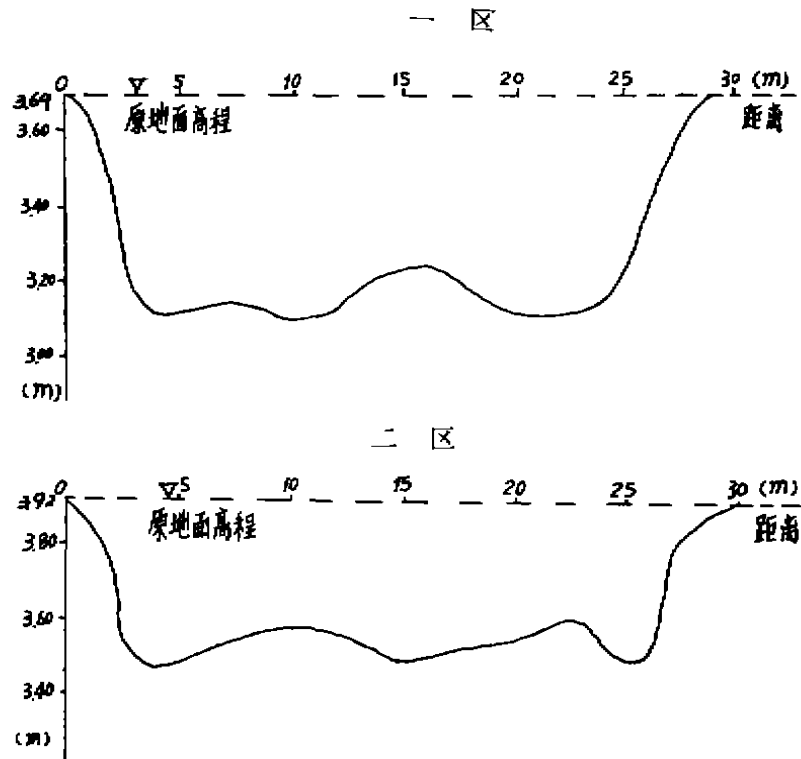


图6 沉桩处理后地面沉陷变形曲线

2. 二区沉桩处理后, 液化性能改善程度:

经20天休置后检验, 液化层在沉桩挤压、振动作用下, 其物理力学性质有较好改善, 见表3。

表3 不同方法处理后液化层物理力学性质对比

层序	地层名称	处理方法	含水量 $W(\%)$		容重 $\gamma(\text{KN}/\text{m}^3)$		孔隙比 e		压缩系数 $a_{1-2}(\text{MPa}^{-1})$		压缩模量 $E_{1-2}(\text{MPa})$	
			最小	一般	最小	一般	最小	一般	最小	一般	最小	一般
			最大		最大		最大		最大		最大	
③a	轻亚粘土	原始场地	27.3	37.7	17.2	18.2	0.78	1.02	0.12	0.28	4.95	8.31
			50.8		18.9		1.38		0.45		14.43	
		沉桩	28.4	34.0	16.8	18.2	0.79	0.99	0.09	0.21	5.49	11.14
			42.8		19.3		1.30		0.40		19.44	
		袋装砂井加沉桩	28.0	30.1	18.6	18.8	0.82	0.87	0.12	0.14	11.04	12.90
			32.7		19.0		0.93		0.17		15.24	
③b	粉砂	原始场地	26.8	28.7	18.5	19.0	0.77	0.83	0.11	0.13	8.45	14.31
			32.4		19.4		0.93		0.24		16.30	
		沉桩	26.3	27.3	18.9	19.0	0.80	0.80	0.08	0.10	15.11	18.00
			28.3		19.2		0.80		0.12		20.90	
		袋装砂井加沉桩	26.2	27.7	18.8	19.0	0.78	0.81	0.10	0.11	12.70	16.06
			28.3		19.1		0.85		0.14		17.80	

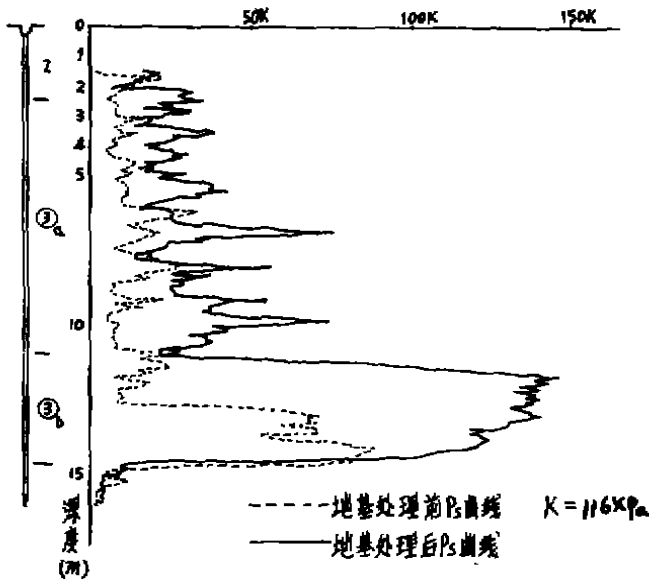


图 7. 二区沉桩处理前后比贯入阻力 P_s 曲线对比

含水量 w : ③_a轻亚粘土由37.7%降至34%, ③_b粉砂由28.7%降至27.3%; 孔隙比 e : ③_a由1.02减小至0.99, ③_b由0.83减小至0.80; 比贯入阻力 P_s 值与天然状态下土层对比(图7): ③_a由1.53MPa增大为3.67MPa提高1.4倍, ③_b由7.57MPa增大为14.25MPa, 提高0.9倍; 剪切波速度 V_s 平均值由142.0m/s增至175.0m/s, 提高23.2%; 动剪应变变量 γ_e 由0.033%减至0.022%, 下降33%, 此值已在液化门槛值之内, 说明液化已受到控制, 见图8-(a)、(b)。标准贯入试验对比, 如图9所示, 处理后③_a由3.1击增加至9.7击,

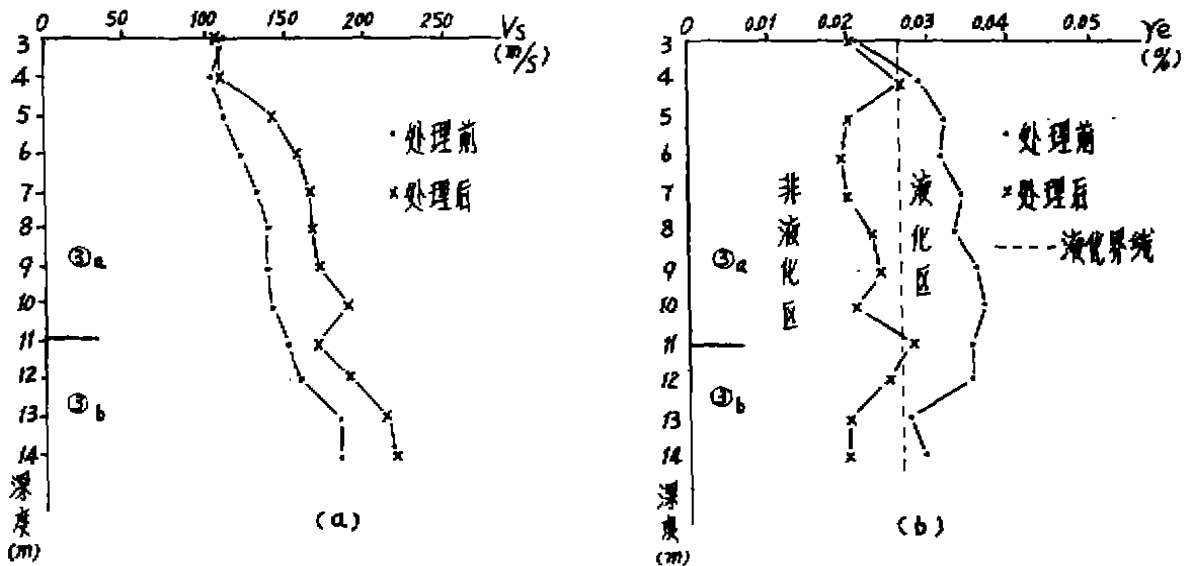


图 8 二区沉桩处理前后剪切波速度 V_s 、动剪应变变量 γ_e 对比

提高2.1倍；③_b由10.3击增加至18击，提高1.7倍。各深度点的平均值最小为4击，最大为39.3击，除深度4米、5米外，均超过“暂行规定”在7°地震烈度时所要求临界击数。对深度4米、5米液化点进行计算，其液化指数 P_L 为1.56，属轻微液化（1级）。

3. 一区袋装砂井与沉桩复合处理后，液化性能改善程度：

经50天休置后，液化层在沉桩的挤压振动、袋装砂井快速排水共同作用下，检测表明其物理力学性质得到极明显改善，表3反映含水量 w ：③_a由37.7%降低至30.1%，③_b由28.7%降至27.7%；孔隙比 e ：③_a由1.02减少至0.87、③_b由0.83减至0.81。比贯入阻力 P_s 值与天然状态下土层对比（图10）：③_a由1.64 MPa增加至5.28 MPa，提高2.2倍；

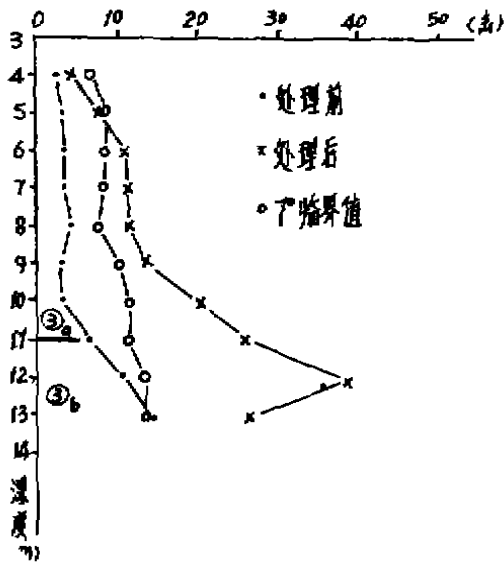


图9 二区沉桩处理前后标贯击数对比

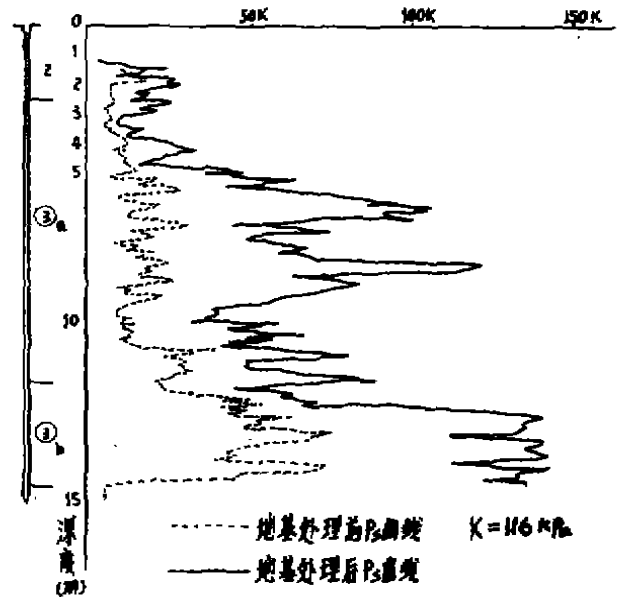


图10 一区袋装砂井与沉桩共同作用处理前后比贯入阻力 P_s 曲线对比

③_b由5.99 MPa增至11.18 MPa，提高0.9倍。剪切波速度 V_s 平均值由125.8 m/s增至199.3 m/s，提高58%；动剪应变量 γ_d 由0.041%减至0.017%，下降59%，表明土层液化得到极好控制，见图11—(a)、(b)。标准贯入试验对比，如图12所示，处理后③_a由3.1击增至16.4击，提高4.3倍；③_b由10.3击增至28.9击，提高1.8倍；各深度点的平均值最小为12击，最大为33击，除深度9米外，均超过“暂行规定”在8°地震烈度时的临界击数。

4. 边桩外围液化性能改善的效果：

边桩外围受沉桩挤压振动作用后，经标准贯入试验进行测定，在一区距边桩2米的ZK 1孔，除深度10米处外，在7°地震烈度下已不液化（表4），但距边桩3米处ZK 3孔仍为液化，表明其液化加固范围在2~3米半径圈内。在二区距边桩2米的ZK 4孔，仅③_b不会液化，③_a仍为液化（表5），说明液化加固范围仅为1~2米半径圈内。

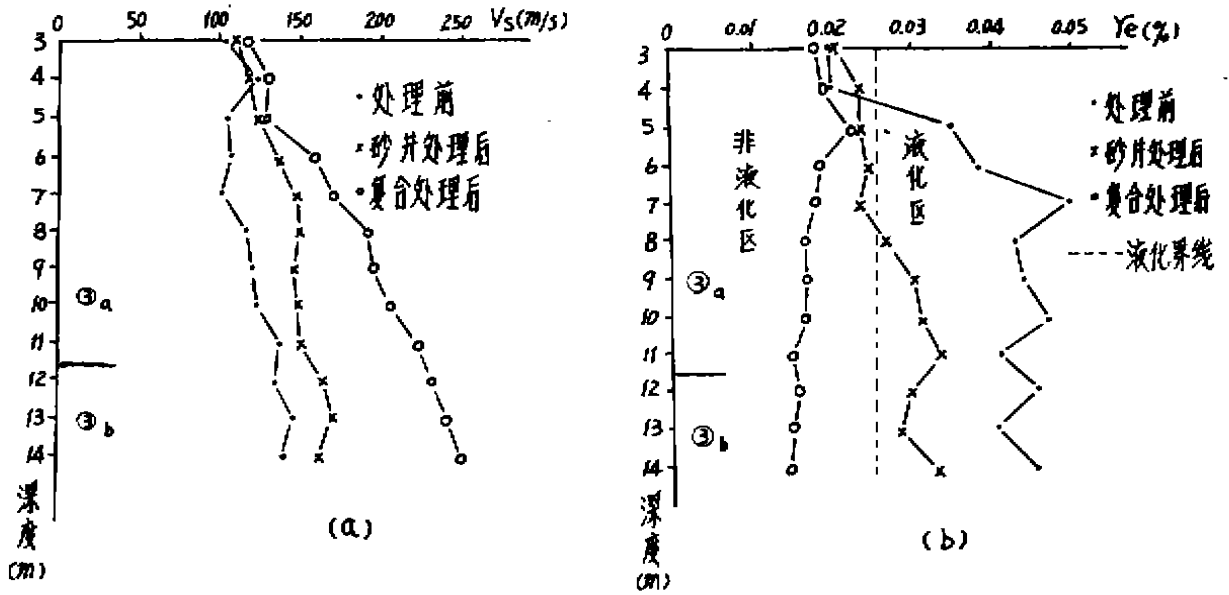


图 11 一区袋装砂井与沉桩共同作用处理前后剪切波速度 V_s 动剪应变量 γ_e 对比

表 4 ZK I 孔液化判别:

深度 (M)	5	6	7	8	9
N' (击)	6.2	8.7	8.6	10.2	9.5
N (击)	8	10	11	15	14
F_L	> 1	> 1	> 1	> 1	> 1
液化判别	不液化	不液化	不液化	不液化	不液化
深度 (M)	10	11	12	13	14
N' (击)	10.5	11.3	13.2	13.1	14.7
N (击)	10	23	27	17	30
F_L	< 1	> 1	> 1	> 1	> 1
液化判别	液化	不液化	不液化	不液化	不液化

• F_L —抗液化系数 $F_L < 1$ 为液化 $F_L > 1$ 为不液化

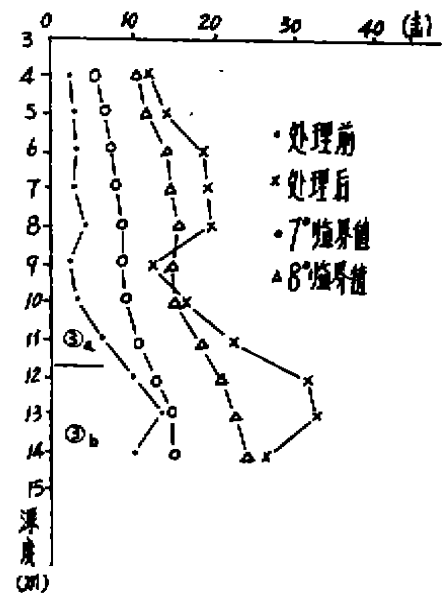


图 12 一区袋装砂井与沉桩共同作用处理前后标贯击数对比

表5 ZK4孔液化判别:

深度(M)	5	6	7	8	8	10	11	12	13
N' (击)	7.1	8.7	9.5	7.8	10.7	9.6	10.4	12	14
N (击)	4	5	5	5	4	9	13	25	32
F _L	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	> 1	> 1	> 1
液化判别	液化	液化	液化	液化	液化	液化	不液化	不液化	不液化

三、作用原理分析

(一) 排水作用:

在没有外荷载作用下,布设袋装砂井,也能导致土体中应力状态的改变,使之产生水头压力差。根据达西定律,孔隙水压力由压力较大向压力较小方向传递,袋装砂井作为排水边界,该处压力最低,因而,孔隙水由土体逐渐向砂井方向渗流。孔隙水压力的这种不断消散,导致孔隙体积变小,土体发生固结。但因水头压力差较小,上述固结作用进行得相当缓慢。

沉桩时产生的巨大挤压力和振动冲击力,均使液化土层遭受剪切破坏,并引起很高残余孔隙水压力,袋装砂井的密集布设,大大缩短排水途径,十分有利于孔隙水压力迅速消散,从而,加速了土体的固结。

(二) 挤压振动作用:

在沉桩过程中,桩尖楔入土内,其能量几乎全部通过桩体的侧面传递给桩周围土体。桩体贯入就将同体积的土体挤向桩侧,当桩体附近土颗粒受到巨大挤压后,土颗粒间彼此紧密相靠,颗粒间孔隙减小,土体的密实度得到增大。当桩尖打入硬土层时,锤击数增多,锤击时震动力逐渐增强,震动力与贯入度大小成反比,贯入度越小,震动力就越大。振动一方面使土体内土颗粒间孔隙减小而密实;另一方面产生附加孔隙水压力,在没有良好排水通道(袋装砂井)消散情况下,孔隙水压力就会不断积聚,当其值等于土粒间有效应力时,土体开始液化。强烈振动也会导致桩周土产生裂隙,一旦裂隙扩大并能形成良好排水通道时,孔隙水就会迅速逸出,即出现喷水冒砂。在液化层内上述振动作用有时比挤压作用更易于使土体密实、固结,同时,导致桩周围地面产生大幅度沉降。

(三) 群桩效应:

沉桩施加的巨大冲击能量,均通过桩体转化为挤压力和振动力传递给桩周土体,从而,在桩周围形成一个挤密区,紧靠桩侧土体密度增加最大,远离桩侧的密度增加较小。根据边桩挤密范围测定,单桩有效挤密范围在一区水平挤密的范围约为桩径的4~6倍;在二区水平挤密的范围约为2~4倍。但两桩挤密区的交界处,其挤密效果将产生叠合效应,因此,在密集桩群叠加作用下,整个场区可获得良好抗震加固效果。

四、结 语

通过上述三种液化地基处理试验的研究表明:运用袋装砂井处理,在没有外荷载作用下,需经过一段较长时间,才能发挥改善液化层的性能;只采用桩基,不采取其他措施进行处理,也能消除液化层的影响;若用袋装砂井与沉桩共同作用处理,效果更好,可以达到完全消除

液化层的影响。因而,处理液化地基时,常可根据建筑物的性质、类别、重要性等,考虑采用不同的处理措施。对于桩在液化层中的侧摩阻力计算,当液化层得到处理后,应考虑充分发挥其效用。

本项试验研究承姚天强高级工程师的帮助和指导,借此深表谢意。

参考文献 (略)

TREATMENT OF LIQUEFACTIVE FOUNDATION FOR HIGH BUILDINGS

Zhu Jinrong Dai Rongliang Cao Huibin
(Shanghai Institute of Geotechnical Investigation & Surveying)

Abstract

This paper mainly presents the achievement of foundation treatment for high buildings on a seriously liquefactive site. It shows that the disposing of sand wick can avoid liquefactive effect, but attention must be paid to time effect. For high buildings where pile foundations are adopted, the action of the sinking of the pile can be used to stabilize aseismic strengthening, when the earthquake intensity reaches 7. If both sand wick and the sinking of the pile for the treatment of the foundation, the aseismic strengthening will be more ideal. Even if the earthquake intensity reaches 8, the foundation will not come into liquefaction.

Key Words: foundation treatment, liquefaction, sand wick, action of the sinking of the pile

(上接第29页)

liquefaction by shear velocity. Based on the idea of seed's simplified method, a formula for earthquake shear stress and shear strength for liquefaction is put forth, and a computation algorithm for evaluating liquefaction is programmed. The liquefacted and unliquefacted events are evaluated by this programme. The results of these evaluations are in good agreement with the observed ones.

Key Words: Liquefaction, Shear velocity
