

砂石桩与低强度混凝土桩组合型 复合地基在软土地基中的应用 (一)

王步云 赵秀芹

(煤炭工业部太原设计研究院 太原市 030001)

【提要】本文通过试验与工程实践,介绍采用碎(砂)石桩及低强度混凝土桩组合构成复合地基的试验成果、计算方法及应用检测成果。组合型复合地基可发挥两种不同刚度加固体在复合地基中各自的特点,经济技术效益明显,应用效果良好。

【关键词】 组合型复合地基 低强度混凝土桩复合地基 碎(砂)石桩复合地基

【Abstract】 This paper introduces the test results and calculative method by using the composite foundation of sand-stone pile and concrete pile with low strength. This composite foundation can develop the properties of two kinds rigidity stabilized body. It has obvious economical and technical benefit and good applicable results.

【Keywords】 Composite foundation, Composite foundation of concrete with low strength, Composite foundation of sand-stone pile

1 概述

复合地基是60年代早期,日本应用砂桩加固软土地基取得良好效果,提出以砂桩与天然土共同作用,在砂桩抵抗地基滑动的计算模型中采用了“复合地基”概念。至今,复合地基在国内外得到迅速发展与广泛应用。它已不仅仅是指一种地基计算模型,而被用来泛指多种深层地基加固工法。复合地基是指天然地基在地基处理过程中部分土体得到加强,或被置换,或在天然地基中设置加筋材料,加固区由基体(天然地基土体)和加强体(主要指桩体)两部分组成的地基。同时,复合地基的构成中尚需包括基底的垫层,即由基体、加强体与垫层组成复合地基。垫层在复合地基中具有保证桩土共同作用,减少基底应力集中、调整桩土荷载分担和减少桩顶水平应力集中的重要作用。

根据桩体强度或刚度,工作机制及置换能力的大小,复合地基可分为四个类型:一为散体桩复合地基(如砂桩、砂石桩等);

二为低粘结强度桩复合地基(如石灰桩、搅拌桩等);三为中等粘结强度桩复合地基(如旋喷水泥土桩等);四为高粘结强度桩复合地基(如水泥粉煤灰砂石桩,净浆裹石砾桩等)。

从80年代以来,在山西地区,采用砂石桩构成的复合地基已成为处理饱和黄土、松散砂土等的主要手段之一。它具有下列特点:通过振密与挤密作用,提高桩间土的密度与强度;通过高渗透性桩体,改善地基的排水条件,达到缩短排水路径,加速超静孔隙水压消散,抑止液化发展,加速地基固结的作用;当采用震动沉桩工艺时,地基受到一定时间与一定程度的多次重复预液化作用,可提高地基土的抗液化能力等。其技术经济效益均是显著的。以山西省财政厅办公楼(8层)地基为例。地基为厚度6~9m的粉细砂层, $N=1.5\sim 8$ 击,属严重液化场地土。采用振密砂桩复合地基处理,桩径 $\phi 340$ mm,桩距为6倍桩径。经处理后,砂桩施

作者简介:王步云,男,教授,勘察大师。1952年毕业于唐山交通大学。现主要从事煤炭岩土工程设计与勘察,研究深基础、复合地基及深基坑支护,包括土钉墙柔性支挡结构。

工期间场地的地面沉降分别为: 东部0.37~0.48m, 中部0.54~0.67m, 西部0.50~0.06m。经检验 N 值达到12~18击, 复合地基承载力达到200~240kPa(载荷试验成果), 液化已消除。但对于以软塑粉质粘土为主的软地基, 由于土中粘粒含量高, 渗透系数低, 采用砂石桩构成的复合地基, 则是以强制置换为主要作用。当置换率低时, 复合地基承载力难以提高很多。提高置换率, 将使地基土面产生较大隆起。同时在成桩过程中对桩间土产生一定程度的挤压扰动, 往往使其强度在一定时间内有一定程度的降低。由于散体桩的工作主要由桩间土体的被动约束所制约, 特别是在桩顶2~4倍桩径范围内, 桩间土将承受很大的径向应力, 容易使桩体产生膨胀破坏(见图1)。因而在软弱粘性土中的砂石桩复合地基, 特别是在山西汾河低阶地上广泛赋存有高灵敏度($S_r=5\sim 12$)的软土中, 该类复合地基承载力难以提得较高, 据太原地区的试验证明, 一般只能比天然地基提高20%~50%。基于此, 近年来我院开始试验组合型复合地基。即对散体桩复合地基中的部分砂石桩进行桩体增强, 在砂石桩中增加一定量的I、II级粉煤灰与少量水泥, 成为一种具有粘结强度较高的半刚性桩, 称之为低强度砼桩, 中国建筑研究院称之为水泥粉煤灰碎石桩, 简称CFG桩。由此构成部分散体砂石桩与部分低强度砼桩组合型复合地基。既能发挥砂石桩的优点, 又由于低强度砼桩的插入而使砂石桩的侧限约束作用得

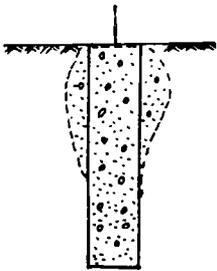


图1 桩体的鼓胀破坏型图

到增强, 从而减少散体桩顶部分的压胀变形, 避免产生膨胀破坏的可能。同时发挥半刚性桩能向深部传递荷载的作用, 使复合地基的承载力可大幅提高, 地基变形得以降低, 提高复合地基的整体安全度。为了解决两种不同刚度桩体的共同工作与变形协调, 在桩顶设置一定厚度的砂石料垫层是很重要的。通过它的流动补偿作用使之较为均匀地分布基底应力, 并能使桩间土与基础有良好的接触, 保证不同刚度桩体与土共同承担荷载。本文通过试验与工程实践阐述其特点。实践表明, 组合型复合地基具有良好的技术经济效果, 在本工程试验成功的基础上, 在山西针纺织品进出口公司办公楼(地上十层、地下一层, 框架结构, 筏基, 基础埋深-4.4m), 建筑基础面积为 $49.6\text{m}\times 17.3\text{m}$, 采用组合型复合地基, 较之CFG桩复合地基处理费节省33%。太原子午胎厂主厂房(建筑面积为 $700\text{m}\times 140\text{m}$, 排架结构、独立桩基, 设有100/300kN桥式吊车, 基础埋深-2.0m), 要求地基承载力为200kPa, 采用组合型复合地基方案较钻孔灌注桩方案节省地基处理费用数百万元。上述工程均已建成近两年, 沉降量小而均匀, 不足20mm。表明组合型复合地基在地基处理方法中具有良好的前景。

2 工程结构特征及地基条件

山西煤炭机械施工公司的新建工程, 包括一、二号大型设备库, 机修车间, 六层综合楼及六层住宅(设有半地下室)。综合楼及住宅楼为砖混结构, 长高比3.0~3.3。筏式基础, 埋深2.0m, 工业建筑为排架结构, 跨度为20m及24m, 柱距6~8m。独立柱基, 埋深1.5m。设有100kN的梁式吊车。设计要求地基承载力标准值 f_k 为160~180kPa, 建筑物占地面积为13500 m^2 。

建筑场地位于汾河一级阶地。地表常年积水, 形成湖沼相地貌景观。

场地地层分布见工程地质剖面图(图

表1 地基土物理力学指标表

层号	指标数值	土层名称	含水量 w /%	重度 γ / $kN \cdot m^{-3}$	孔隙比 e	饱和度 S_r /%	液限 w_L /%	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	压缩系数 a_{1-2} / MPa^{-1}	压缩模量 E_{s1-2} / MPa	抗剪强度 (u.u)		标贯(修正) N /击	锥尖阻力 q_c / MPa	侧壁摩阻力 q_s / kPa	粘粒含量 $\times 100$	承载力		
												c / kPa	φ / $(^\circ)$					标准值 f_k / kPa	S_t	
①		杂填土	31.5	17.7	1.01	100	29.9	11.8	1.10	0.43	4.2	25	18	2	0.76	15			80	
②		粉质粘土	27.6	18.0	0.94	100	25.7	9.0	1.21	0.42	4.4	28	13		0.40	10	11		70	15.0
③		粉土	25.4	18.3	0.85	100	24.6	8.2	1.10	0.38	4.8	30	15	3	0.26	10			60	13.0
④		粉质粘土	26.8	18.7	0.84	97	30.0	11.9	0.73	0.49	3.1	20	18	5	1.10	17	9		105	27.6
⑤		粘土	28.7	19.6	0.80	100	43.8	23.7	0.25	0.21	8.4			7	0.72	18			120	
⑥		粉质粘土	24.3	19.2	0.67	100	28.1	17.4	0.55	0.18	9.0			10	1.60	74			190	
⑦ ₁		粉土	22.5	20.3	0.63	99	23.7	16.2	0.84	0.17	8.5			11	2.10	49			220	
⑦ ₂		粉质粘土	25.6	20.2	0.71	99	32.4	19.1	0.49	0.26	7.6			10	4.50	80			250	
⑦ ₃		粉质粘土	19.9	19.8	0.62	87								10	2.10	47			220	
⑧		粉细砂												16					230	

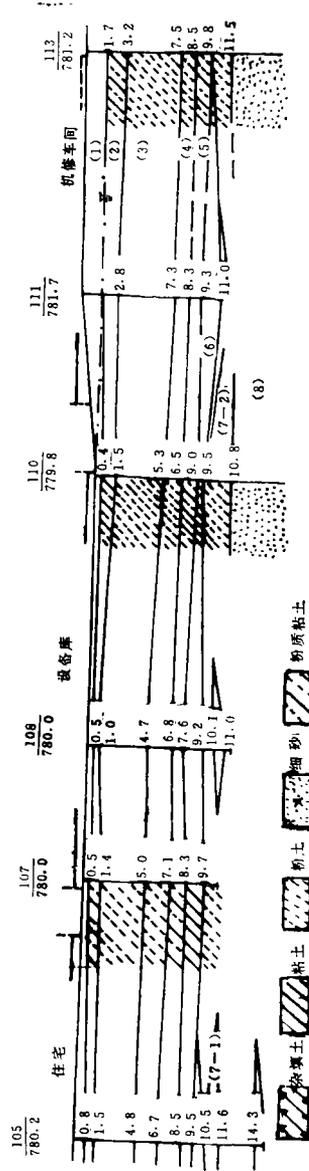


图2 工程地质剖面图

2), 土的性状列于表1。由于场地低洼, 平场标高定为781.20m, 在场区西半部填筑1.0~1.5m。

地基持力层主要为②层粉质粘土, 承载力标准值仅有70kPa。下卧层③、④层又属极高灵敏度土。特别是③层为承载力极低的软土, 层顶埋深在现地面下1.0~1.5m, ③、④层厚度达到5.1~6.3m。上述几层土的物理力学性质差异甚小, 而且总厚度一般达到7.5m。处于软塑状态, 一经扰动则呈流塑状态。

场区地震烈度为8度, 西半部场地的液化指数达到37.9, 属严重液化场地。可液化层深度达到7.5m。

据此土性条件, 天然地基远不能满足设计要求。

3 地基处理方案选择

(1) 钢筋混凝土钻孔灌注桩: 由于液化层对桩基侧阻力的折减, 需采用 $\phi 600\text{mm}$, 桩长14~15m的灌注桩基。由于场地地基土的高灵敏度, 给成孔带来很大的困难。施工稍有不慎, 将会出现单桩竖向承载力不稳定的情况, 上述问题在本地区已出现多次。另外, 施工时排污工作量大, 导致施工费用加大。工程总造价过高, 建设单位难以承受。

(2) 粉喷搅拌桩复合地基: 本区已有多项工程应用该法。试验表明, 当水泥掺入比 α_w 为15%~20%时, 水泥土立方体抗压强度一般为1.5~1.8MPa。据此布桩, 对 $\phi 500\text{mm}$ 搅拌桩, 桩径为0.9~1.0m, 经济上仍不尽合理, 对液化层也难以消除。

(3) 砂石桩与低强度混凝土桩组合复合地基: 据我们在本地区的试验表明, 砂石桩可消除该类地基的可液化性, 降低其灵敏度。同时, 设置了高透水性砂石桩, 解决了因低强度混凝土桩施工时引起的土中超静孔隙压力难以消散, 恢复周期长的矛盾。另外, 低强度混凝土桩对砂石桩可起侧限作用, 有效地增加荷载传递深度, 充分发挥复合地基

的作用。在经济上、技术上均明显地优于上述两种方案。此方案的工程造价为第②方案的50%~60%。

综上比选, 本工程采用组合型复合地基方案进行地基处理。

4 组合型复合地基试验

为适应本场地土的条件, 在工程开始前, 选择场地两端进行了试验。

砂石桩桩身材料: 粒径20~50mm碎石75%, 中粗砂或石屑25%, 二者拌石均匀成混合料。

低强度砼桩身材料: 碎石: 粉煤灰: 中粗砂=1:0.25:0.5(体积比), 混合料中掺入一定量的普通硅酸盐325^{*}水泥, 水灰比为0.6。以上材料配置成的混凝土强度平均值为9.0MPa。碎石及混凝土的干重度大于20.0kN/m³。

施工机具: 对该类具有高灵敏度及严重液化的软弱地基, 选择合理的施工机具及工艺尤为重要。结合本地实际情况, 我们采用了两种机具。对砂石桩采用HB型锤击沉管桩机, 外管径为 $\phi 400\text{mm}$, 内有 $\phi 250\text{mm}$ 的圆柱型内击锤, 锤重15~23kN。对低强度混凝土桩采用DZ-40型振动沉管桩机。

试验点采用三角形布桩, 桩距为2.5~3.0倍桩径, 即1.0~1.2m。根据工程荷载条件, 砂石桩长为6.0~8.0m, 即加密②至④层地基土。低强度混凝土桩长为9.0~10.5m。桩端多置于土性较好的⑥层顶部或⑤层底。两类桩相间布置, 先用锤击法施工砂石桩, 后用振沉法施工低强度混凝土桩。桩的充盈系数前者为1.6, 后者为2.0。

分别进行了天然地基、砂石桩单桩复合地基、低强度混凝土桩单桩复合地基、双桩复合地基及组合型复合地基的静力载荷试验。天然地基及单桩复合地基的部分试验成果分别见图3、图4及图5, 并汇总列于表2。承载力取值, 按照结构允许变形及地区有关规定, 以相对沉降 $s/b = 0.015 \sim 0.02$ 确定承载力

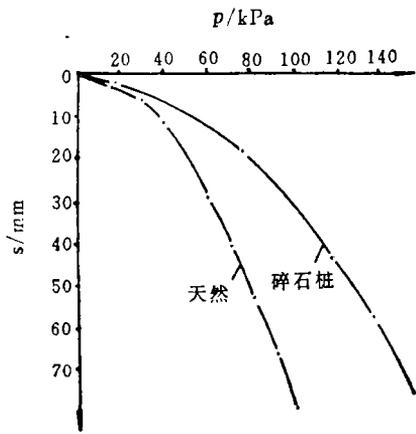


图3 天然地基、碎石桩单桩复合地基荷载试验 $p-s$ 曲线

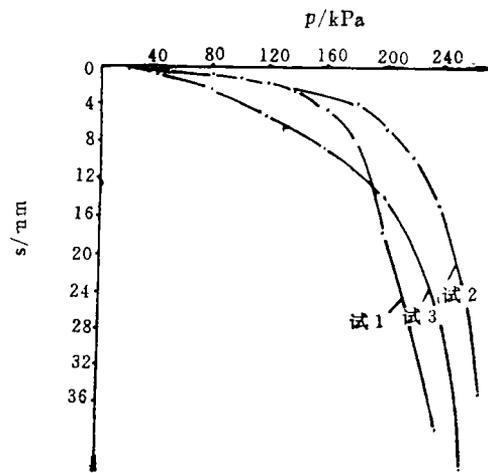


图4 CFG桩单桩荷载试验 $p-s$ 曲线

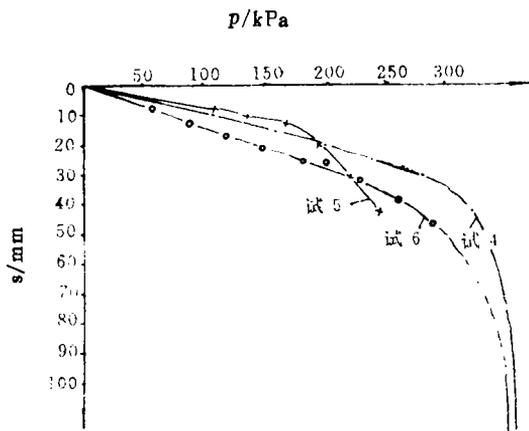


图5 CFG桩复合地基荷载试验 $p-s$ 曲线

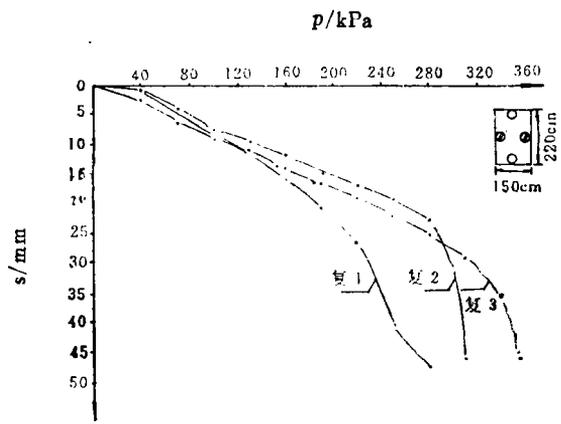


图6 组合型复合地基荷载试验 $p-s$ 曲线

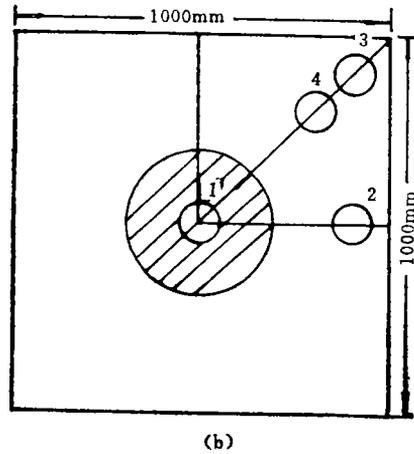
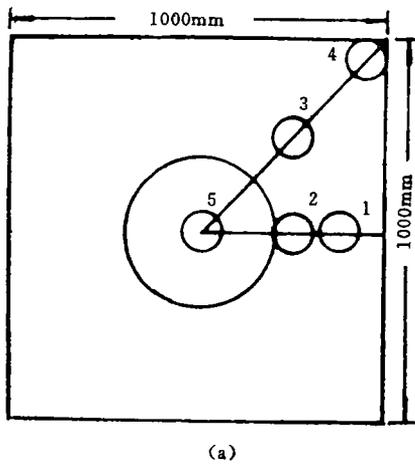


图7 压力盒平面布置图
(a) 碎石桩; (b) CFG桩^{4*}

(s 为载荷板沉降值, b 为板宽)。

组合型双桩复合地基试验成果见图6及表3(由于地基表层有3.0~4.5m的杂填土,故桩长增加到13m)。

桩土应力比:为了解复合地基的工作性

状,在垫层与桩土接触面处理设了压力盒,压力盒埋设平面位置见图7。测得的桩土应力比 n 值见表4及表5。

从表4可以看出,无论是碎石桩或低强度混凝土桩,在复合地基的工作中,桩顶应

表2 静载荷试验内容及设计参数

试验编号	试验类型	载荷板尺寸 /cm	桩长 /m	桩径 /mm	垫层厚度/mm		置换率 ×100	承载力	
					桩头以上	桩头以下			
天然地基	天然地基	70.7×70.7						60kPa	
碎石桩	单桩复合	100×100	6.0	φ400	150		12.6	80kPa	
CFG桩	试1	单桩	φ37.7	9.2	φ377			140kN	
	试2	单桩	φ37.7	9.4	φ377			170kN	
	试3	单桩	φ37.7	10.5	φ377			150kN	
	试4*	单桩复合	100×100	9.2	φ377	300	300	11.2	220kPa
	试5*	双桩复合	110×120	9.0	φ377	250		10.8	190kPa
	试6	单桩复合	100×100	10.5	φ377	200	200	11.2	162.5kPa

* 埋设压力盒。

表3 静载荷试验内容及设计参数

试验编号	载荷板尺寸 /cm	桩长 /m	桩径 /mm	垫层厚度 /mm	面积置换率×100		承载力 /kPa	
					碎石桩	CFG桩		
复合地基	复1	150×220	13.0	φ400	200	7.6	7.6	190
	复2	150×220	13.0	φ400	200	7.6	7.6	228
	复3*	150×220	13.0	φ400	350	7.6	7.6	238

* 埋设压力盒。

表4 桩土应力比 n

荷载/kPa	20	40	60	80	100	120	140	
碎石桩试		2.6	3.7	4.6	3.4	3.5	3.4	
荷载/kPa	120	160	200	240	280	320	360	
CFG桩试4	4.7	6.4	7.4	7.3	9.0	9.5	5.9	
荷载/kPa	54	81	107	134	161	188	215	261
CFG桩试5	8.0	8.6	11.1	11.8	12.6	11.3	9.9	9.1

表5 桩土应力比 n

荷载/kPa	100	130	160	190	220	250	280	340
碎石桩与桩间土		1.3	1.5	1.9	1.9	2.3	2.3	2.5
CFG桩与碎石桩复合地基	3.6	3.6	3.8	4.0	4.1	4.1	4.1	4.1

力均产生显著集中现象,表5数据表明在组合型复合地基中,由于砂石桩对软地基土的加密作用,使复合地基中桩顶应力集中现象有所减弱,应力分布更趋均匀。证明组合型复合地基的适宜性与合理性。

载荷试验还表明,由于低强度混凝土桩端未置于强度较高的坚硬土层上,在荷载较大时,桩端出现了一定的刺入变形,因而在 $p-s$ 曲线尾部出现了陡降,结合试验成果,对低强度混凝土桩单桩复合地基作了有限元分析,垂直应力等值线图见图8,垂直位移见图9,并列出張雁等得出的群桩复合地基垂

直应力等值线图及垂直位移等值线图,与上述成果一致(见图10及图11)。亦证明低强度混凝土能够有效地传递上部荷载,浅层应力向桩体集中,并通过桩体向深层扩散,位移等值线在桩底密集,桩底下卧土层的强度与变形性状分析是很重要的,对相对较软的下卧层,组合型复合地基中的碎石桩长宜等于低强度混凝土桩;而对于硬塑下卧层,砂石桩的桩长则可短于低强度混凝土桩。总之,宜根据基底荷载大小、地基土层结构、建筑结构类型与允许变形值综合选择两类桩的桩长。

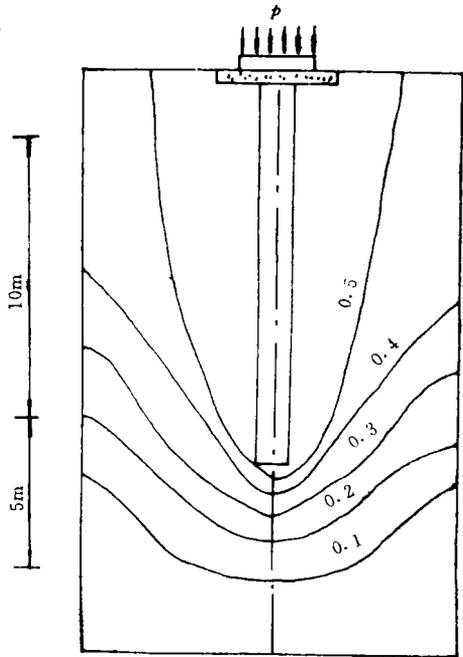
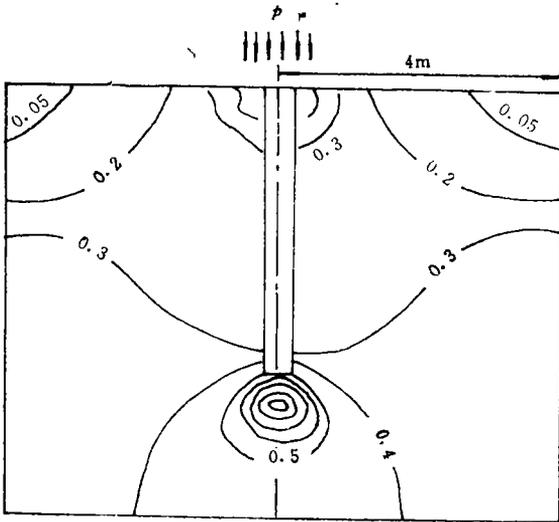


图8 CFG单桩复合地基垂直应力等值线图

图9 CFG桩垂直位移等值线图
图中数字表示地表沉降的倍数

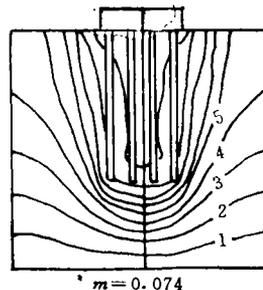
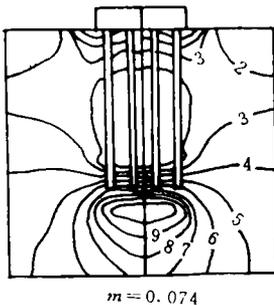


图10 CFG桩复合地基 σ_2 等值线

图11 CFG桩复合地基垂直位移等值线图

图中1,2,...,9等值线表示0.1,0.2,...,0.9倍最大桩间土应力

图中1,2,...,9表示0.1,0.2,...,0.9倍地表面沉降

收稿日期:1996-08-05 (未完待续)