

岩土工程

复合地基垫层调节作用研究分析

李小青,贾海艳,黄 丹

(华中科技大学土木工程与力学学院,武汉 430074)

[摘 要] 垫层对复合地基工作性状有很大影响,在复合地基中有着重要作用。本文通过理论分析、现场试验及数值分析,根据复合地基的形成条件及桩土共同作用机理,探讨复合地基垫层设置的必要性及其调节作用,并利用 Vesic 小孔扩张理论分析计算桩体向上刺入垫层量,从而确定垫层的设置厚度,得出了一些有益的结论:砂土和炉渣均是较为理想的垫层材料;垫层的设置为桩体向上刺入提供了空间,可以改变桩与桩间土的应力分布,调整桩土应力比,充分发挥桩间土的承载能力,减小桩顶的应力集中和基础底面的应力集中。一般情况下,垫层设置厚度为 20~40 cm。

[关键词] 复合地基 垫层 调节作用 刺入量 垫层厚度

[中图分类号] TU472 [文献标识码] A [文章编号] 0495-5331(2008)01-0102-07

1 桩土协同工作分析

所谓复合地基,就是由桩体和桩间土两种模量不同的材料组成的,在相对刚性基础下两者共同分担上部荷载并协调变形的人工地基。桩体和桩间土形成复合地基是有条件的:在荷载作用下,桩体和桩间土应能共同承担上部荷载^[1-8]。

图 1 为桩土协同工作分析示意图,图(a)中 P 点表示桩位点, S 点表示紧靠 P 点的基础下桩间土面上的点。桩体与桩间土协同工作的条件是基础与其下地基土保持接触。假设基础是绝对刚性的,则桩顶沉降与基础下桩间土面的沉降相等:

$$S_p = S_s \tag{1}$$

桩顶沉降 S_p 由桩身压缩量 S_{p1} 、桩尖下土层压缩量 S_{p2} 和桩尖刺入量 S_{p3} 三部分组成。

$$S_p = S_{p1} + S_{p2} + S_{p3} \tag{2}$$

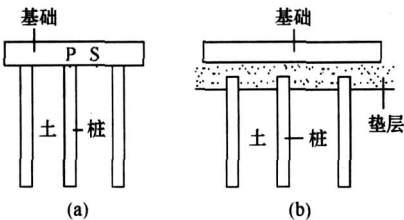


图 1 桩土协同工作分析图

而基础下桩间土的沉降 S_s 由桩尖平面以下土层压缩量 S_{s1} 和桩尖平面以上桩间土压缩量 S_{s2} 两部分组成:

$$S_s = S_{s1} + S_{s2} \tag{3}$$

由于 S 点紧靠 P 点, $S_{s1} = S_{p2}$ 于是可得桩体与桩间土共同工作的条件:

$$S_{p1} + S_{p3} = S_{s2} \tag{4}$$

如忽略桩身压缩量,上式可改为:

$$S_{p3} = S_{s2} \tag{5}$$

上式表明只有当桩尖刺入量等于桩间土压缩量时,才能保证桩体和桩间土共同承载。所谓桩尖刺入量,是指桩尖附近土体在桩尖力作用下,产生局部压缩或塑性变形而使桩尖相对于周围土体发生剪切位移。一般情况下,软土地基中的摩擦桩,当桩顶荷载小于单桩容许荷载时,桩上荷载通常主要由桩侧摩阻力承担,桩顶沉降主要表现为桩身的压缩。当桩上荷载继续增加时,桩顶沉降中开始出现刺入沉降,之后,随外荷增加,刺入沉降逐渐增大,达到极限荷载时,桩顶沉降主要表现为刺入沉降。

在常规设计中,单桩荷载小于或等于极限荷载的一半,其桩尖刺入量很小,或者桩尖下卧土层为不可压缩层,桩尖较难刺入,条件(5)较难满足。同时,在一些饱和软粘土中,由于土体的高压缩性和低渗透性,桩尖土将挤开与桩体积相同的土体,导致土体

[收稿日期] 2007-03-02; [修订日期] 2007-10-15。

[第一作者简介] 李小青 (1965 年—),男,1999 年毕业于中国地质大学,获工学博士学位,副教授,现主要从事岩土工程、道路工程方面的教学与科研工作。

结构严重扰动及大面积土体隆起和侧向位移。其后随着孔压的消散,桩间土产生附加压缩量。这会使基础与桩间土出现脱空,桩间土不再承载。因此,为保证桩体与桩间土共同承载,满足复合地基的形成条件,在基础与桩体之间设置垫层,如图 1(b)所示,给桩体提供向上刺入的条件,保证桩间土始终参与工作,达到桩土共同作用的目的,这是复合地基中为什么要设置垫层的原因。

2 复合地基垫层的试验研究

2.1 不同材料垫层的试验研究

为研究不同材料垫层的变形特性,寻找理想的垫层材料,本课题特进行了土夹石垫层、粘土垫层、粗砂垫层、炉渣垫层四种不同材料的垫层的变形特

性试验研究^[1]。试验场区地层主要为黄色残积粘土,垫层厚度为 50cm,试坑尺寸为 2×3m²,试验深度为 3m,方形荷载板尺寸 0.5m²。试验分 7 组进行试验,垫层的质量控制指标如表 1 所示,试验结果如表 2 所示。

表 1 垫层的质量指标

序号	名称	土石比	垫层含水量 (%)	夯填度
1	土夹石垫层	6 4	14. 4	0. 65
2		5 5	15. 6	0. 70
3		4 6	19. 5	0. 75
4	粘土垫层	-	26. 4	0. 65
5		-	34. 5	0. 65
6	粗砂垫层	-	-	0. 85
7	炉渣垫层	-	-	0. 80

表 2 不同材料垫层的荷载试验结果

荷载 /kPa	相对变形 /mm /m						
	1	2	3	4	5	6	7
50	1. 5	3. 0	3. 7	3. 3	5. 8	1. 7	3. 0
100	2. 6	4. 6	6. 4	5. 1	8. 7	2. 9	4. 6
150	3. 3	6. 0	9. 0	6. 8	11. 0	3. 5	6. 3
200	4. 0	7. 7	11. 2	8. 3	13. 1	4. 0	7. 7
250	4. 7	9. 0	13	9. 5	14. 9	4. 3	9. 0
300	5. 3	10. 1	14. 7	10. 5	16. 6	4. 9	10. 5
350	6. 1	11. 0	16. 3	11. 4	18. 4	5. 4	11. 9
400	7. 0	11. 5	17. 8	12. 5	20. 5	6. 2	13. 5

将试验结果点绘曲线,如图 2 所示,从中可以看出:

1) 材料不同,垫层的相对变形不同,粗砂垫层的相对变形最小(曲线 6),炉渣垫层、土夹石垫层次之,粘土垫层最大(曲线 5)。由于砂土的压缩性低,粗砂垫层在各级压力下的相对变形较小,是一种较为理想的垫层材料。这是工程应用中广泛采用粗砂作为垫层材料的原因之一。

2) 材料相同,垫层的相对变形受含水量的影响较大。如曲线 4、5 所示,含水量由 26. 4%增大至 34. 5%,各级荷载作用下的变形明显增大。曲线 1、2、3 同样说明垫层材料的含水量是影响垫层变形的重要因素之一。

3) 在土夹石垫层中,随着土石比的减小,碎石含量增加,粗粒含量的增加,垫层的压缩性降低,变形减小。

4) 炉渣垫层,颗粒级配相当于角砾,如图 2 中曲线 7 所示,各级荷载作用下的相对变形较粗砂垫层为大。但由于炉渣垫层不受含水量的影响,性质稳定,并且来源广,成本费用低,因此炉渣也是一种

较好的垫层材料。

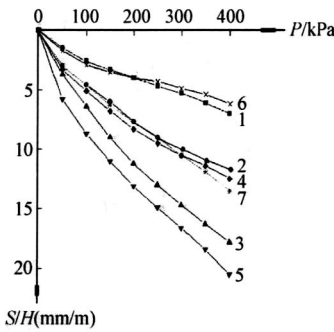


图 2 垫层相对变形 P - S/H 试验曲线

2.2 复合地基垫层效应研究

为研究复合地基的垫层效应,本课题选定一水泥土桩复合地基工程进行现场荷载试验^[1]。该工程水泥搅拌桩为矩形布置,桩径为 Φ 500mm,桩长为 11. 5m,水泥掺入比为 15%,面积置换率为 0. 28,试验采用 2m×2m 的刚性板,板下覆盖 4 根搅拌桩,垫层均为 1:1 的砂石层,碎石直径 2~3cm。

试验一的垫层厚度为 15cm,碎石直径 1~2cm,试验二的垫层厚度为 25cm。

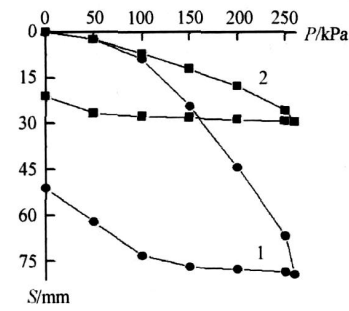


图 3 复合地基荷载沉降 P - S 曲线

图 3、4、5 为两种不同厚度的垫层的载荷试验结果。图 3 中曲线 1、2 分别为试验一、二的荷载 P - S 曲线；图 4 中曲线 1、2 分别为试验一、二的桩土应力比随荷载变化的曲线；图 5 中曲线 1、2、3、4 分别表示试验一、二的桩顶应力和桩间土应力随着荷载变化的曲线。

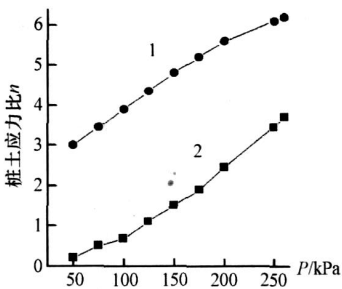


图 4 桩土应力比随荷载变化曲线

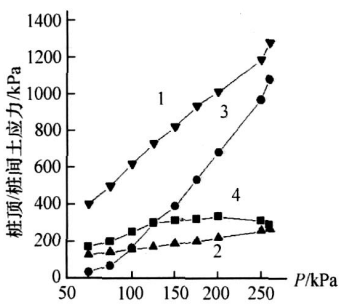


图 5 桩顶应力和桩间土应力随着荷载变化的曲线

从图示的试验结果看出：

- 1) 试验一、二的变形存在明显差异，垫层厚者曲线舒缓，总沉降量小，且随着荷载增大沉降差别增大，当达到设计荷载 260kPa 时，两者总沉降量差别达 2.7 倍。
- 2) 桩顶应力和桩间土应力随着荷载的增大而增大，桩顶应力的增加幅度较桩间土为大，即桩土应力比随荷载的增大而增大，且试验一较试验二的增加幅度为大。这说明垫层越薄，桩体的应力集中现象越明显，桩土应力比越大。

3) 试验二中的桩间土应力在每级荷载下总比试验一中大，这说明垫层越厚，对桩间土承载力的发挥越有利，在桩体承载力得到充分发挥的前提下，提高了复合地基的强度。

试验一由于垫层厚度小，垫层作用小，加荷之初，荷载就传递给复合地基并产生向桩体的应力集中，随着荷载的增大，应力集中不断加强，桩顶应力增大，桩土应力比逐渐趋于稳定（图 4 中曲线 1）。试验二由于垫层厚度大，荷载通过垫层后产生了应力扩散且较均匀地将应力传递给桩和桩间土。加荷之初，由于应力水平低，垫层与桩间土紧密结合，使得桩间土应力大于桩顶应力，这时复合地基类似于天然地基，桩土应力比小于 1（图 4 中曲线 2），随着荷载的增大，应力向桩体转移，桩土应力比增大。同样由于厚垫层分散应力的作用大，就导致了试验二中的荷载转移至桩间土的部分较试验一为大，充分发挥了桩间土的作用，因而提高了复合地基的整体强度，其整体变形减小（图 3 中曲线 2）。

3 垫层调节作用的数值分析

本文以群桩复合地基为对象，将桩 - 土 - 垫层 - 承台视为一个相互作用的有机体系，通过考虑桩土界面接触摩擦作用^[9-11]、土体的非线性特性^[12-15]及系统各个部分的主要作用及其相互影响，采用三维有限元法模拟分析复合地基中桩、土的应力场和位移场，进而研究分析垫层的调节作用。

为了方便起见，在模拟分析过程中，按散体材料桩、柔性桩和刚性桩 3 种不同桩体刚度的复合地基，进行碎石垫层调节作用的数值分析。各种方案的计算参数如下：群桩复合地基桩数 9 根、桩径 0.5m、桩长 10m、置换率 25%、承台厚度 0.5m、地下水位 1.0m、下卧层计算深度 10m、垫层厚度 0.01~1.2m，工作荷载为 200kPa，数值模拟计算参数如表 3 所示，计算结果见表 4、5 所示。

表 3 复合地基数值模拟计算指标

名称	C/kPa	$\varphi/^{\circ}$	k	n	Rf	μ
桩间土、下卧土层	15.0	25.0	350	0.7	0.85	0.35
砂砾(碎石)垫层	1.0	38.0	900	0.7	0.85	0.30
砼承台	-	-	30000	0.0	0.0	0.20
桩体	1.0	38.0	1000	0.7	0.85	0.30
散体材料桩	-	-	3000	0.0	0.0	0.35
柔性桩	-	-	3000	0.0	0.0	0.35
刚性桩	-	-	30000	0.0	0.0	0.20

表 4 复合地基承台应力、垫层应力及桩土应力比随垫层厚度的变化计算结果

桩体	H/m	σ_{JP} /kPa	σ_{JS} /kPa	K	σ_{RP} /kPa	σ_{RS} /kPa	M	n
散体材料桩	0.01	254.5	176.5	1.44	392.0	140.1	2.80	6.64
	0.05	232.3	190.9	1.22	303.9	175.2	1.73	2.25
	0.1	224.7	192.3	1.17	279.6	179.7	1.56	2.22
	0.2	214.6	194.6	1.10	249.6	185.2	1.35	2.22
	0.3	209.0	196.2	1.07	234.6	188.5	1.24	2.24
	0.4	208.8	197.3	1.05	220.0	190.9	1.15	2.24
	0.5	208.7	198.2	1.05	221.4	192.7	1.15	2.25
	0.8	207.7	197.0	1.05	213.6	196.0	1.11	2.27
柔性桩	1.0	206.8	196.3	1.06	211.2	193.3	1.09	2.27
	1.2	205.9	195.9	1.06	210.2	198.2	1.06	2.28
	0.01	290.9	168.7	1.72	546.5	112.9	4.84	8.26
	0.05	273.5	172.3	1.59	448.3	126.8	3.54	7.17
	0.1	254.5	176.5	1.44	392.0	140.1	2.80	6.64
	0.2	230.2	183.0	1.26	315.9	155.7	2.03	6.31
	0.3	220.6	187.5	1.18	279.4	165.4	1.69	6.18
	0.4	220.9	191.1	1.16	259.2	172.4	1.50	6.07
刚性桩	0.5	220.4	194.0	1.14	246.8	177.9	1.39	5.96
	0.8	217.1	192.0	1.13	227.4	188.1	1.21	5.54
	1.0	214.7	189.6	1.13	221.0	192.0	1.15	5.28
	1.2	212.6	188.0	1.13	218.4	194.6	1.12	5.04
	0.01	316.7	146.4	2.16	689.9	61.9	11.15	46.5
	0.05	301.9	152.6	1.98	592.4	81.3	7.29	27.2
	0.1	277.0	159.6	1.74	486.4	101.0	4.82	22.2
	0.2	243.7	169.6	1.44	369.6	124.4	2.97	21.1
	0.3	230.3	176.7	1.30	317.6	139.0	2.29	22.5
	0.4	230.1	182.4	1.26	290.3	149.7	1.94	24.1
	0.5	230.0	187.0	1.23	273.3	158.0	1.73	25.4
	0.8	226.2	190.2	1.19	246.5	174.3	1.41	27.7
	1.0	223.6	184.8	1.21	236.8	180.8	1.31	28.2
	1.2	221.3	180.7	1.23	230.1	185.3	1.24	29.1

表 5 复合地基变形随垫层厚度变化的计算结果

桩体	H/m	S/cm	S_1 /cm	S_2 /cm	S_3 /cm	$\Delta S_1 = S_1 - S_2$	$\Delta S_2 = S_2 - S_3$	$\Delta S_1 / H$
散体材料桩	0.01	8.10	8.10	7.82	4.16	0.28	3.66	2.80
	0.05	10.22	10.22	10.10	4.14	0.12	5.96	2.40
	0.1	10.15	10.14	9.94	4.11	0.20	5.83	2.00
	0.2	9.99	9.99	9.65	4.05	0.34	5.60	1.70
	0.3	9.85	9.85	9.41	4.00	0.44	5.41	1.47
	0.4	9.72	9.72	9.19	3.95	0.53	5.24	1.33
	0.5	9.60	9.60	8.98	3.90	0.62	5.08	1.24
	0.8	9.26	9.26	8.45	3.76	0.81	4.69	1.01
柔性桩	1.0	9.07	9.06	8.14	3.68	0.92	4.46	0.92
	1.2	8.89	8.89	7.86	3.59	1.03	4.27	0.86
	0.01	8.02	8.02	7.97	4.21	0.05	3.76	5.00
	0.05	8.11	8.11	7.91	4.19	0.20	3.72	4.00
	0.1	8.10	8.10	7.82	4.16	0.28	3.66	2.80
	0.2	8.10	8.09	7.68	4.10	0.41	3.58	2.05
	0.3	8.09	8.08	7.57	4.05	0.51	3.52	1.70
	0.4	8.07	8.07	7.46	4.00	0.61	3.46	1.53
刚性桩	0.5	8.05	8.04	7.36	3.94	0.68	3.42	1.36
	0.8	7.98	7.96	7.09	3.80	0.87	3.29	1.09
	1.0	7.91	7.91	6.92	3.71	0.99	3.21	0.99
	1.2	7.85	7.85	6.77	3.62	1.08	3.15	0.90
	0.01	4.29	4.28	4.24	3.65	0.04	0.59	4.00
	0.05	4.40	4.40	4.23	3.63	0.17	0.60	3.40
	0.1	4.48	4.48	4.19	3.60	0.29	0.59	2.90
	0.2	4.56	4.55	4.13	3.55	0.42	0.58	2.10
	0.3	4.60	4.60	4.07	3.50	0.53	0.57	1.77
	0.4	4.64	4.64	4.02	3.46	0.62	0.56	1.55
	0.5	4.67	4.67	3.98	3.42	0.69	0.56	1.38
	0.8	4.73	4.72	3.84	3.29	0.88	0.55	1.10
	1.0	4.75	4.75	3.76	3.21	0.99	0.55	0.99
	1.2	4.77	4.77	3.68	3.14	1.09	0.54	0.91

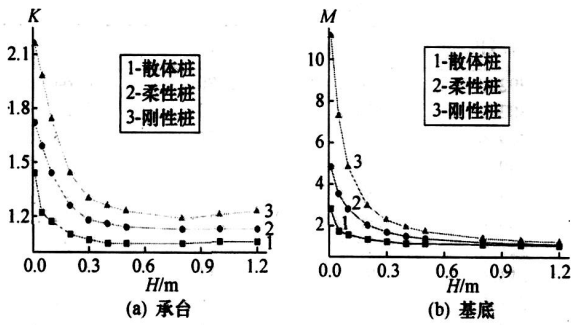


图6 竖向应力不均匀系数与垫层厚度的关系

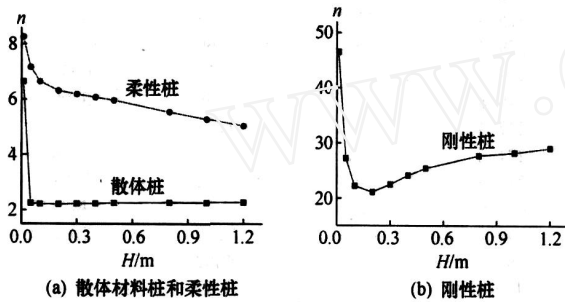


图7 复合地基桩土应力比 n 与垫层厚度 H 的关系曲线

表中： H —垫层厚度； σ_{JP} 、 σ_{RP} —分别表示在桩轴线上的承台最大竖向应力和垫层最大竖向应力； σ_{JS} 、 σ_{RS} —分别表示与桩间土对应的承台最小竖向应力和垫层最小竖向应力； K —承台竖向应力不均匀系数， $K = \sigma_{JP} / \sigma_{JS}$ ； M —基底竖向反力不均匀系数， $M = \sigma_{RP} / \sigma_{RS}$ ； n —复合地基的桩土应力比（以中心桩相应的数值表示）； S —承台顶面沉降变形； S_1 、 S_2 、 S_3 —分别为垫层顶面沉降变形、桩顶沉降变形、桩端下卧层沉降变形； ΔS_1 —垫层压缩变形， $\Delta S_1 = S_1 - S_2$ ； $\Delta S_1 / H$ —垫层相对变形； ΔS_2 —复合土体压缩变形， $\Delta S_2 = S_2 - S_3$ 。

将 K 、 M 、 n 与 H 的关系点绘成曲线如图 6、7 所示。由上述图表所示结果可看出复合地基垫层具有明显的调节作用。

3.1 调节承台竖向应力和基底竖向反力分布

由图 6(a)所示，承台竖向应力不均匀系数 K 随着垫层厚度 H 的增加而下降，即随垫层的加厚，承台竖向应力分布越来越均匀。如散体材料桩复合地基，当工作荷为 200kPa 时， H 由 0.01m 增至 0.3m 时， K 值由 1.44 降至 1.07，最大应力由 254.5kPa 降至 209kPa，而最小应力则由 176.5kPa 增至 196.2kPa，应力分布极为均匀，垫层起着明显的调节作用。柔性桩、刚性桩也是如此。由图 6(b)所示，基底竖向反力不均匀系数 M 随着 H 的增加而下降，即基底反随垫层的加厚越来越均匀。

但当垫层超过一定厚度后， K 值、 M 值趋于稳定，其调节作用不再明显。从调节作用来讲，垫层存在一合理厚度。

3.2 调节垫层竖向应力的分布

由表 4 所示结果可明显的看出，垫层能起到调节垫层应力的作用。随着 H 的增大，垫层内力分布越均匀。如刚性桩复合地基，在垫层厚度 $H = 0.01m$ 时，垫层的最大应力为 689.9kPa，而最小应力只有 61.9kPa。相差极为悬殊，即应力分布极不均匀，不均匀系数达 11.15，并且最大应力超过了垫层材料的承载力。通过增大垫层厚度可改善垫层的应力分布，如 $H = 0.5m$ 时，最大应力为 273kPa，最小应力为 158kPa。垫层调节垫层应力的作用对于垫层来讲尤为重要，因为垫层的竖向应力过大，满足不了垫层材料承载力的要求^[1]。对于桩体刚度较大的复合地基，其垫层应力相差较大，对于选定材料的垫层，惟有通过调整垫层厚度来满足其承载的要求。

3.3 调整桩土应力比

垫层有明显的调整桩土应力比的作用，如图 7 所示，桩土应力比 n 随垫层厚度 H 的变化而变化，对于不同刚度的复合地基，其变化规律不同。散体材料桩复合地基桩土应力比 n 值随 H 的增大而迅速降低并很快趋于稳定；柔性桩复合地基的 n 值随 H 的增大而减小；刚性桩复合地基 n 值在一定范围内，随 H 的增大而减小，但 H 超过一定值后又随 H 的增大而增大。这是由于桩体的刚度不同，其承载特性不同造成的。

3.4 调节复合地基变形

复合地基变形 $S(S_1)$ 由垫层压缩变形 ΔS_1 、复合土体压缩变形 ΔS_2 和下卧层压缩变形 S_3 组成。由表 5 所示可看出：随着垫层厚度 H 值的增大， ΔS_2 和 S_3 减小， ΔS_1 增大。对于散体材料桩和柔性桩复合地基，其沉降变形随 H 值的增大而减小，这是由于 ΔS_2 和 S_3 的减幅较 ΔS_1 增幅为大。而刚性桩复合地基的沉降变形则随 H 值的增大而略有增大，这是由于复合土体刚度较大，压缩变形 ΔS_2 甚小，致使 ΔS_2 和 S_3 的减幅较 ΔS_1 的增幅为小，其沉降变形反而略有增大。但总的来说，复合地基的变形随垫层厚度变化的变幅较小，不超过 3%，因而可以认为，垫层对复合地基的沉降变形影响不大。

3.5 桩体刚度的影响

对于相同厚度 H 的垫层，承台竖向应力不均匀系数 K 、基底竖向反力不均匀系数 M 及桩土应力 n 值随着桩体刚度的增加而增加，复合地基的沉降变

形 $S(S_1)$ 随着桩体刚度的增加而减小,这是因为随着桩体刚度的增大,桩体作用增强,桩土应力比增大,复合地基强度得以提高。这也说明垫层的调节作用是有限的,随桩体类型不同而有不同程度的调节作用。

4 垫层厚度的确定

垫层在复合地基中起着明显的调节作用,其厚度对复合地基工作性状有很大影响。垫层厚度过小,垫层越薄,桩体应力集中的现象越严重,桩土应力比越大,桩体对基础产生很显著的应力集中,尤其是刚度较大的桩体。同时垫层厚度过小,桩间土承载力不能充分发挥,势必增加桩的数量或桩长。反之,垫层厚度过大,尽管对桩间土承载力发挥有利,但桩的承载力却不能有效发挥,对于刚度较小的碎石桩等,会导致桩土应力比接近或等于 1,此时桩承担的荷载太少,不能充分发挥桩体作用。适当厚度的垫层设置既要有利于合理的发挥桩体和桩间土的承载能力,又保证基础不产生过大的应力集中。

垫层厚度 H 可按式计算确定:

$$H = H_1 + H_2 \tag{6}$$

其中 H_2 为垫层调节厚度, H_2 的设置是为了保证垫层的调节作用,综合上述现场试验及数值分析结果,垫层调节厚度 H_2 可取 10~30cm。

H_1 为桩体刺入垫层的向上刺入量,刺入变形的大小显然与桩、土、垫层模量及桩径等有关。

桩体向上刺入量 H_1 可利用 Vesic 小孔扩张理论分析计算,如图 8(a)所示,计算过程中假设:桩间土和垫层都是理想弹性材料,并服从 Mohr - Coulomb 准则;下卧层不可压缩,即桩体没有向下的刺入量;桩头为半球形,初始状态是一均布的内压力 p 向周围垫层材料扩张刺入。

随着荷载的增加,扩张压力增大,球形孔周围区域由弹性状态逐步进入塑性状态,并不断发展至极限状态。参见文献 [2],根据弹性理论,计算轴对称条件下弹性变形阶段的径向位移,从而可计算出桩体向上刺入量:

$$H_1 = r_0 \left(\frac{1 + \mu_d}{E_d} \cdot \frac{1}{2q\phi_d} \right)^{1/2} \sigma_p \tag{7}$$

其中 E_d 、 μ_d 、 q 分别为垫层的变形模量、泊松比、初始应力; r_0 为桩体半径。

复合地基中桩体工作时主要是侧摩阻的发挥,因此在分析计算时需考虑桩侧摩阻力。假设无负摩阻力,且侧摩阻力 τ 沿桩长均布,如图 8(b)所示:

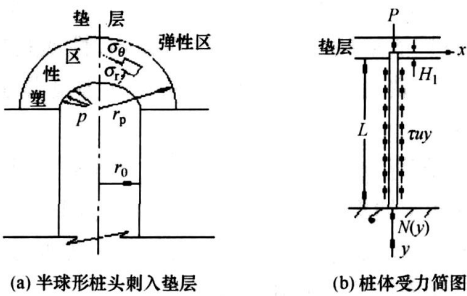


图 8 桩体刺入垫层的上刺入量的计算示意图

ΔL 为桩受压后的变形量,圆柱周长 $u = 2\pi r_0$,则由平衡方程得:

$$N(y) = P - \tau uy \tag{8}$$

$$\Delta L = \int_0^L N(y) / (E_p A_p) dy = (PL - \tau \cdot \pi r_0 L^2) / (E_p A_p) \tag{9}$$

由于 $P = \sigma_p \cdot A_p \cdot \epsilon_p = \Delta L / L \cdot \epsilon_p + H_1 / L = \epsilon_s$,从而可得:

$$\sigma_p = E_p \epsilon_p + \tau L / r_0 = E_p (\epsilon_s - H_1 / L) + \tau L / r_0 \tag{10}$$

式中 E_p 为桩体变形模量, ϵ_p 、 ϵ_s 分别为桩、土竖向应变, L 为桩长。

将式 (10) 代入式 (7) 并整理得:

$$H_1 = \frac{r_0 (1 + \mu_d)^{1/2} (E_p \epsilon_s + \tau L / r_0)}{(2qE_d \phi_d)^{1/2} + r_0 (1 + \mu_d)^{1/2} \cdot E_p} \cdot L \tag{11}$$

对于桩径为 0.5m 的水泥土桩复合地基,当桩长在 8~12m,而土层提供的侧摩阻力 $\tau = 8 \sim 10 \text{ kPa}$ 时,桩体的向上刺入量 H_1 一般在 5~10cm。

综合前述试验研究和数值分析结果,一般情况下,垫层厚度 H 可设置在 20~40cm。这样在荷载作用下,复合地基既可充分发挥桩间土的作用,同时又使基底竖向反力不均匀程度显著降低、承台和垫层竖向应力均匀程度提高。

5 结论与建议

1) 垫层在复合地基中有着重要作用,复合地基与桩基明显不同,通常桩基不设置垫层,即桩与承台刚性联结,在上部结构荷载作用下,承台下桩间土承担的荷载微乎其微,几乎都由桩承担。对于复合地基,为保证桩体和桩间土的共同作用,在桩顶与基础之间必须设置垫层,给桩体提供向上刺入的条件,确保桩间土自始至终地参与承载,保证桩体和桩间土的共同作用,满足复合地基的形成条件。

2) 在复合地基的设计、施工过程中应重视垫层

材料的选用,砂土的压缩性低,是一种较为理想的垫层材料;炉渣垫层不受含水量的影响,性质稳定,并且来源广、费用低,因此炉渣也可以作为复合地基垫层材料。

3) 在荷载作用下垫层发生侧向挤密变形,使桩体与桩间土协调变形,垫层的设置有利于充分发挥桩间土承载力,使基底竖向反力的均匀程度提高,避免基础底面的应力集中现象发生。

4) 垫层在复合地基中起着明显的调节作用,垫层的存在为桩体向上刺入提供了空间,从而改变桩与桩间土的应力分布,调整桩土应力比,减小桩顶的应力集中。但复合地基的变形随垫层厚度变化的变幅较小,垫层对复合地基的沉降变形影响不大。

5) 垫层厚度对复合地基工作性状有很大影响,垫层越薄,桩体应力集中的现象越严重,桩土应力比越大,桩体对基础产生很显著的应力集中,尤其是刚度较大的桩体。同时垫层厚度过小,桩间土承载力不能充分发挥,势必增加桩的数量或桩长。反之,垫层厚度过大,尽管对桩间土承载力发挥有利,但桩的承载力却不能有效发挥。因此,合理的垫层厚度,既要保证基础不产生过大的应力集中,又要有利于合理地发挥桩体和桩间土的承载能力,减小桩顶的应力集中。一般情况下,垫层设置厚度为 20 ~ 40 cm。

[参考文献]

[1] 李小青. 三维状态下复合地基承载特性的研究 [R]. 哈尔滨:

哈尔滨工业大学, 2001.

- [2] 李小青. 复合地基的研究分析 [R]. 中国地质大学, 1999. 5.
- [3] 龚晓南主编. 复合地基理论与实践. 浙江大学出版社, 1996.
- [4] 潘纪顺, 吕芝全, 刘长春. 喷粉桩复合地基的群桩效应的探讨及其荷载试验研究 [J]. 地质与勘探, 2002, 45 (2): 85 - 87.
- [5] 张 雁, 黄 强. 半刚性桩复合地基的性状分析. 岩土工程学报, 1993, 15 (2): 86 - 93.
- [6] 潘纪顺, 刘志伟, 姬计法, 等. CFG桩复合地基承载性状的试验研究 [J]. 地质与勘探, 2001, 238 (4): 92 - 94.
- [7] 金宗川, 等. 垫层作用下石灰桩复合地基工作性状. 岩土工程学报, 1998, 20 (2): 37 - 40.
- [8] 周德泉, 刘宏利, 张可能, 等. 粉喷桩处理软弱路基的设计与沉降分析 [J]. 地质与勘探, 2001, 135 (2): 91 - 94.
- [9] GOODMAN R E, TAYLOR R L, BERKKE T L. A model for the mechanics of jointed rock [J]. ASCE, 1968, 94 (SM3): 637 - 659.
- [10] DESAI C S, et al. Thin - layer element for interfaces and Joints [J]. Int J Numer Anal Meth Engrg, 1984, (8): 19 - 43.
- [11] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理及计算 [M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1996.
- [12] Duncan, J. M. and Chang C. Y., Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils, J. SMFD, ASCE, Vol 96, No. SM5, 1970.
- [13] 殷宗泽, 钱玉林. 邓肯双曲线模型的参数及其近似确定 [A]. 第二届华东地区岩土力学学术讨论会论文集 [C], 九江, 1992.
- [14] 韩 煊, 李 宁. 复合地基中群桩相互作用机理的数值试验研究. 土木工程学报, 1999, 32 (4): 75 - 80.
- [15] 范 云, 汪英珍. CFG复合地基桩材特性的试验分析 [J]. 地质与勘探, 2002, 38 (4): 94 - 96.

STUDY AND ANALYZING ON THE ADJUSTING FUNCTION OF THE CUSHION OF THE COMPOSITE FOUNDATION

L I Xiao - qing, J A Hai - yan, HUANG dan

(School of Civil Eng. & Mechanics, HUST, Wuhan 430074)

Abstract: The cushion is importance influence on the operational character of the composite foundation. It is one of the importance theory study content of the composite foundation. Through the theoretical analysis and field test and numerical analysis, the necessary and adjusting function of setting the cushion are studied according to the forming condition of the composite foundation and the operational mechanism of the soil and pile in this paper. And taking use of Vesic's small hole expansive theory to analyze and calculate the upper stab quantity of pile, then working out the thickness of the cushion. And some availability conclusions are obtained from the paper, and it would be helpful and provides the basis of science and technology for the design and construction of the composite foundation. Sand and slag are ideal materials of the cushion. The set of the cushion offer the space to the pile to stab upper. The cushion may change the stress distribution of the soil and piles, and it may adjust the stress ratio of the soil and piles, and exert sufficiency the bearing load of the soil, and decrease the concentrating of the stress of the top of pile and the foundation. Commonly the thickness of the cushion may be set 20 to 40 cm.

Key words: the composite foundation, cushion, adjusting faction, upper stab quantity, the thickness of cushion