

水泥搅拌桩复合地基的工程特性探讨

邵蔚霞¹, 陶有强², 曹永琅¹

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 南京市公路建设处, 江苏 南京 210008)

摘要 通过对某工程水泥搅拌桩复合地基试验, 分析室内水泥土强度随龄期、掺入比、含水量及外掺剂等变化的发展规律, 探讨复合地基桩土共同作用下的承载情况和地基对承台的反力模式. 分析表明, 不同水泥土随掺入比和龄期的变化, 其强度差异较大, 水泥土破坏应变仅为 1% ~ 2%, 基本属脆性破坏, 复合地基的承载力基本值随确定方法的不同而有不同结果. 桩顶存在较大的集中反力, 桩土应力分担比在不同荷重下有很大的变化, 在上部荷重为 120 ~ 380 kPa 时应力分担比在 10 左右.

关键词 搅拌桩; 复合地基; 承载力; 应力分担比

中图分类号: TU753

文献标识码: A

文章编号: 1000-1980(2001)05-0073-06

水泥搅拌桩复合地基与目前的其他地基处理方法相比, 具有施工设备简单、操作方便, 施工时噪音小、无振动、不污染环境、造价低、时效快, 加固后地基具有较高承载力, 变形也大大减小, 因此在工程中的应用越来越广泛. 但由于水泥土系由水泥和土强制拌合而成, 其强度受土的性质和水泥掺入比的影响, 以致水泥搅拌桩的刚度介于刚性桩和柔性桩之间, 因而水泥搅拌桩在作为复合地基进行设计时, 既有桩的特性, 又有天然地基之性状, 在运用与计算刚性桩相似的公式估算搅拌桩承载力时, 对桩身强度有一定要求, 同时必须考虑搅拌桩桩顶应力集中对复合地基承台的影响. 本文根据水泥土室内强度试验和现场静载试验资料, 初步探讨水泥土强度的基本特性, 讨论搅拌桩复合地基承载力的确定方法和分析桩土应力传递与分布.

1 水泥土的特性

水泥与软粘土搅拌加固后形成的加固土为水泥土, 其物理和化学特性主要通过室内试验获得. 加固土的特性可从其强度增长和变形模量的改善这两方面与加固前的土作比较.

1.1 无侧限抗压强度

无侧限抗压强度通常用来判定加固土的效果. 由试验获得无侧限抗压强度 q_u , 再根据 q_u 推导水泥土凝聚力和变形模量等. 图 1 为不同水泥掺入比时水泥土 q_u 与龄期 t 的关系^①.

从图 1 可明显看出 q_u 随水泥含量与龄期变化的增长过程, 而 q_u 的增长率主要还取决于土中水泥含量. 很明显, 不同龄期时水泥土 q_u 之间大致有以下关系:

$$q_{u28} = (0.47 \sim 0.68)q_{u90} \approx 0.54q_{u90} \quad (1)$$

$$q_{u7} = (0.23 \sim 0.35)q_{u90} \approx 0.29q_{u90} \quad (2)$$

$$q_{u7} = (0.49 \sim 0.60)q_{u28} \approx 0.53q_{u28} \quad (3)$$

图 2 为不同水泥掺入比的水泥土掺入一定量(加固土重的 15%) 粉煤灰后, 由 28 d 测得的无侧限抗压强度关系曲线^②. 可见, 在 $a_w > 12\%$ 时, 掺粉煤灰的水泥土 q_u 比不掺粉煤灰时能提高 15% ~ 60%. 但在低水泥掺入比($a_w < 11\%$) 时掺入含量大于 a_w 的粉煤灰, 则会适得其反.

软土的含水量对 q_u 的影响也不可忽视, 在相同水泥掺入比的情况下, 水泥土的无侧限抗压强度 q_u 随着土体含水量的增加而降低, 图 3 示出了软土含水量与 q_u 的关系.

收稿日期: 2000-10-16

作者简介: 邵蔚霞(1957—), 女, 江苏淮安人, 高级工程师, 主要从事岩土工程和房屋结构研究.

①中港振华黄骅港一期工程项目经理部. 复合地基试验总结报告, 2000.

②曹永琅. 水泥土室内配比试验研究总报告. 南京水利科学研究院, 1992.

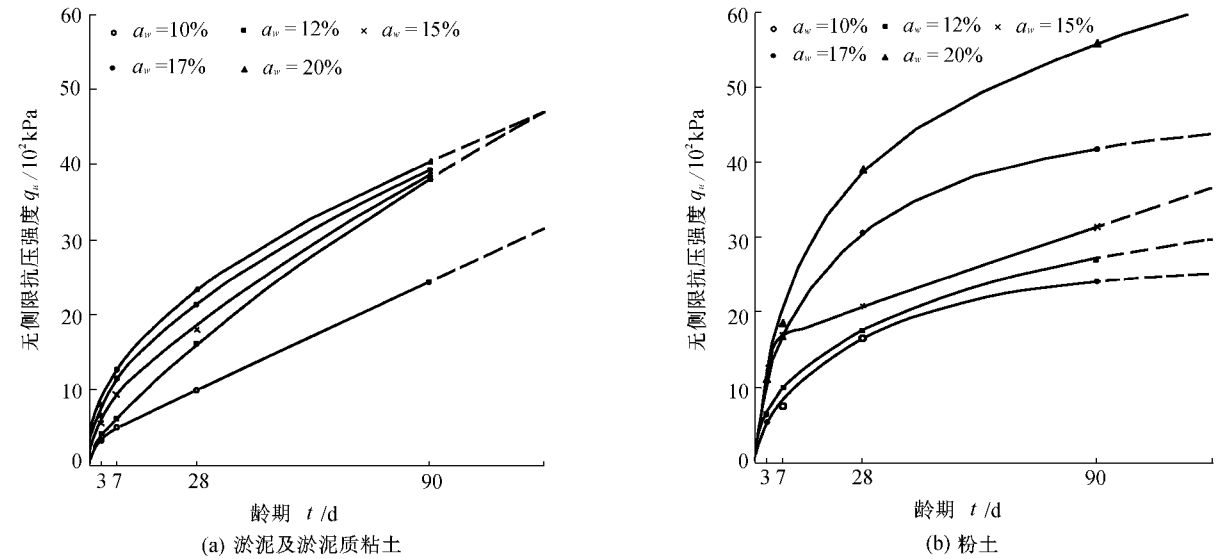


图 1 龄期与抗压强度的关系

Fig.1 Relationship between age and compressive strength

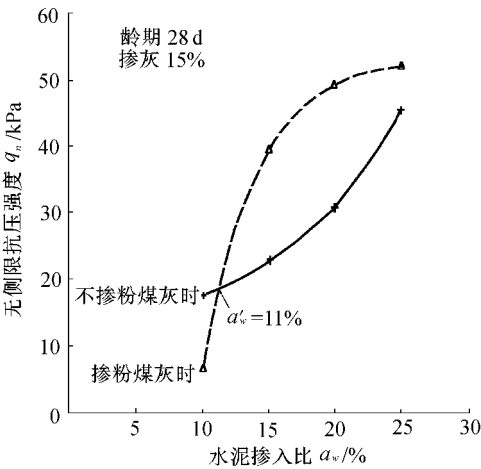


图 2 粉煤灰对抗压强度的影响

Fig.2 Influence of flyash on compressive strength

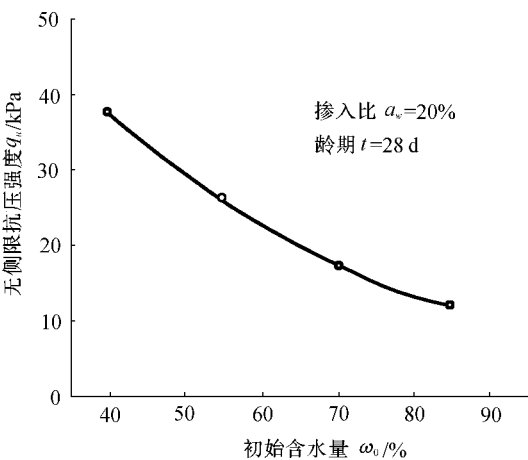


图 3 含水量与抗压强度的关系

Fig.3 Relationship between water content and compressive strength

1.2 抗剪强度

为了确定地基的加固效果和进行抗滑计算,常需了解加固土的抗剪强度.由图 4 可见,不同掺入比的水泥土随着龄期的增长其抗剪强度有不同程度的变化. c_{cu} 、 φ_{cu} 均在一周龄期内增长速度最快,一周后除 φ_{cu} 已基本达到稳定外, c_{cu} 的增长从趋势上判断到 90 d 时尚未趋向稳定.

图 5 为水泥掺入比相同情况下,以不同含水量软土制备的水泥土在 28 d 时测定的抗剪强度成果.由图可知,随着软土含水量的增加,水泥土 c_{cu} 、 φ_{cu} 均成线性递减.可见,对同一种土而言,在一定掺入比时,含水量对强度的影响是不可忽视的.

若对同龄期的 q_u 和 c_{cu} 进行相关分析,则水泥土凝聚力 c_{cu} 与 q_u 之间有

$$c_{cu28} = (0.23 \sim 0.27) q_{u28} \tag{4}$$

$$c_{cu90} = (0.25 \sim 0.50) q_{u90} \tag{5}$$

的关系,而水泥土内摩擦角的变化,则仅在 $20^\circ \sim 30^\circ$ 之间.

1.3 水泥土的压缩性和变形模量

水泥土的压缩系数并不因水泥掺入比的变化而发生过的改变,通常在 $0.01 \sim 0.06 \text{ MPa}^{-1}$ 左右,但尚能看出水泥土的压缩变形随 q_u 的增加而减少的规律(见表 1).

表 2 为不同 a_w 水泥土在不同龄期测定的变形模量试验结果.可见,当 $q_u = 0.58 \sim 4.5 \text{ MPa}$ 时,其 E_{50} 通常

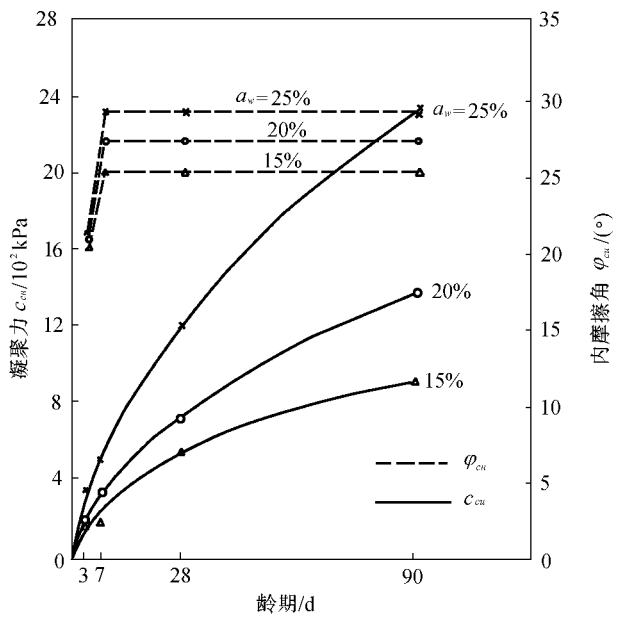


图 4 龄期与抗剪强度的关系

Fig.4 Relationship between age and shear strength

表 1 水泥土的压缩试验结果

Table 1 Compression test results of cement soil				
龄期 /d	水泥掺入比 $a_w/\%$	压缩系数 $a_{0.1 \sim 0.4}/\text{MPa}^{-1}$	压缩模量 E_s/MPa	
28	15	6.1×10^{-2}	37.5	
	20	2.35×10^{-2}	101.4	
90	10	1.36×10^{-2}	158.9	
	15	1.26×10^{-2}	183.7	
	20	1.16×10^{-2}	202.8	
	25	1.02×10^{-2}	226.2	
原状土		$a_{0.1 \sim 0.2} = 1.52$	1.57	

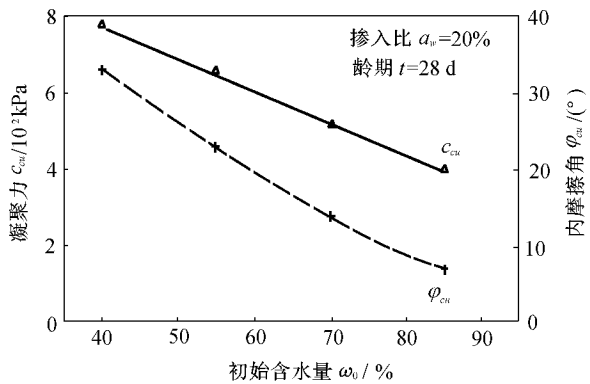


图 5 含水量与抗剪强度的关系

Fig.5 Relationship between water content and shear strength

表 2 水泥土的变形模量试验结果

Table 2 Unconfined compression test results of cement soil					
龄期/d	水泥掺入比 $a_w/\%$	无侧限抗压强度 q_u/kPa	破坏应变 $\epsilon_f/\%$	变形模量 E_{50}/MPa	E_{50}/q_u
7	10	587.1	2.25	28.6	48.7
	15	753.4	1.75	43.5	57.7
	20	1094.7	1.38	70.4	64.3
28	10	1904.3	1.50	154.9	81.3
	15	2277.3	1.13	176.2	77.4
	20	3247.7	1.38	178.7	55.0
90	10	2227.8	1.25	122.5	55.0
	15	3633.9	0.88	313.1	86.2
	20	4536.7	1.00	360.7	79.5

为 38 ~ 230 MPa. 由试验资料可得 $E_{50} = (45 \sim 90) q_u$ (6)

由表 2 还可看出,与加固前软土相比,水泥土强度显著增大,而破坏时的应变却变得很小(通常 $\epsilon_f = 1\% \sim 2\%$),加固土已变成了脆性材料.随着人们对加固土和未加固土组成的复合地基的重视,这一点也变得更加重要.

2 复合地基的承载特性

现场加固土具有不均匀性,而室内试验虽然可以模拟现场加固土的各部分特点,但是因为大面积试样的收集和试验的困难,现场加固土的性质作为一种材料也很难彻底弄清楚.所以对水泥搅拌桩地基,有必要进行现场加固试验和效果检测.

2.1 搅拌桩复合地基的承载力确定

某工程水泥搅拌桩复合地基中有不同桩径的单桩和双桩,图 6 为复合地基的现场静载 $P \sim s$ 曲线.搅拌桩桩径分别为 $\varnothing 500$ mm 和 $\varnothing 600$ mm,桩长 13.5 m,水泥掺入比平均在 20% 左右,水灰比 0.50.复合地基置换率: $\varnothing 600$ 桩为 0.308, $\varnothing 500$ 桩为 0.267.

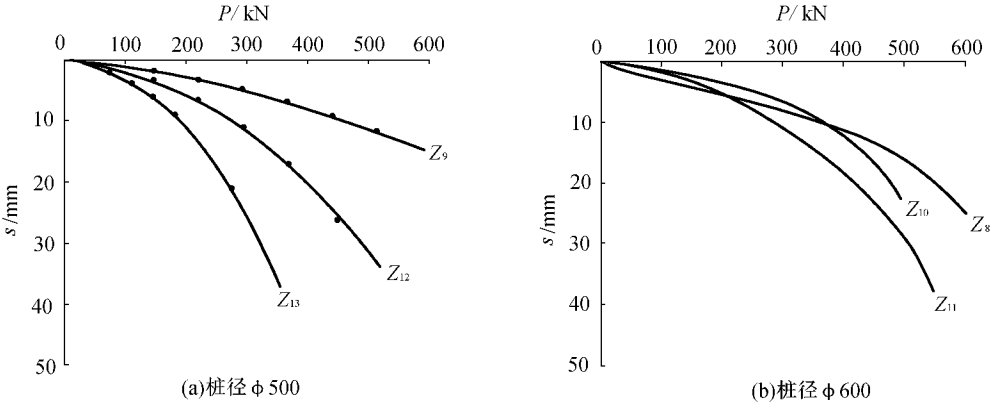


图 6 搅拌桩复合地基 $P \sim s$ 曲线
Fig.6 $P \sim s$ curves of composite foundation

由图可以看出 $P \sim s$ 关系曲线基本是一条比较平缓的光滑曲线,一般看不出有明显的拐点.相邻两级压力所对应的沉降量之比亦无一定规律.根据这种特性,参照国外的天然地基土载荷试验,多数按控制变形方法确定承载力基本值的趋向,所以 JGJ79-91 规定^[1],主要按给定的沉降比(压板平均沉降量 s 与压板宽度或等效影响圆直径 d 之比)确定复合地基的承载力基本值.但规范所给定的沉降比有一定的范围,即“深层搅拌桩或旋喷桩复合地基,可取 s/b 或 $s/d = 0.004 \sim 0.010$ 所对应的荷载”.可见,选用不同的沉降比,就会得出不同的地基承载力指标.

搅拌桩复合地基采用多大的沉降比合适,若从安全的角度考虑宜取低值,但从经济角度考虑应取高值.如果能使桩身强度略大于由地基承载力所需的桩身强度,即规范的 $\eta f_{cu} \cdot k A_p \geq \bar{q}_s U_p L + \alpha A_p q_p$,就可以使桩身强度与承载力相协调,使桩身强度充分发挥作用(经济角度).搅拌桩是一种介于刚性桩和柔性桩之间,具有一定压缩性的桩.桩身强度越高,其特性接近于刚性桩;反之则接近柔性桩.而被加固土又基本上是软土,无论从地基本身还是上部结构的允许,都会产生一定的地基沉降.既然桩间土会产生压缩变形,若要使桩与土共同作用,则应允许桩本身也产生与桩间土相同的变形量.只有这样,才能充分发挥桩本身潜力,也可适当降低桩身强度.从这个角度分析,沉降比应取上限,即 $s/d = 0.010$.通过大量的工程实践证明,以 $s/d = 0.010$ 所对应的压力来确定水泥搅拌桩复合地基的承载力,是符合既安全又经济之原则的.从已有的工程资料统计,国内大部分工程也是这么做的.

按以上方法确定的单桩或双桩复合地基的承载力指标见表 3.可见,复合地基承载力基本值在 208.6 ~ 392 kPa 之间,其中 $\varnothing 600$ 桩径的平均值为 290.7 kPa, $\varnothing 500$ 桩径的平均值为 285.3 kPa.均已满足设计要求的 250 kPa 的承载力.值得注意的是,试验时桩的龄期不足 60 d,可以肯定,90 d 时复合地基承载力将大于试验结果.

表 3 单桩及复合地基静载试验结果

Table 3 Static load test results of composite foundation and single pile

组别	序号	桩号	桩径 /mm	置换 率 m /%	最大 荷载 /kN	最大 沉降 /mm	龄期 /d	承载力指标			承压板 面积/ m^2
								$s/d=0.01$ 沉降/mm	$s/d=0.01$ [P_{sp}]/kN	$s/d=0.01$ $f_{sp,k}$ /kPa	
双桩 复合	Z_8	$C_1-5.7^\#$	600	0.308	558.0	19.7	52	15.3	500	272.1	1.7×1.081
	Z_{11}	$C_2-1.5^\#$	600	0.308	520.0	31.1	59	15.3	383.3	208.6	1.7×1.081
	Z_9	$B_1-6.9^\#$	500	0.267	556.2	13.9	52	13.7	554	377.2	1.5×0.979
	Z_{12}	$B_2-5.0^\#$	500	0.267	483.5	29.9	58	13.7	322	226.0	1.5×0.979
单桩 复合	Z_{10}	$C_1-6^\#$	600	0.308	480.0	16.5	56	11.3	392.0	392.0	1.0×1.0
	Z_{13}	$A_2-6^\#$	500	0.267	270.9	21.3	56	10.8	195.0	270.0	0.85×0.85
单桩		C_2-7	600		300.0	14.6	56	6.0	228	805.6	

2.2 搅拌桩复合地基的承载特性

水泥搅拌桩复合地基具有两大特点 (a) 加固区由桩体和未加固土组成,是不均质的 (b) 在荷载作用下桩与土共同承受外荷. 前一特征使它区别于匀质地基, 后一特征又使它区别于桩基. 而人们在水泥搅拌桩复合地基的设计中, 通常是将水泥搅拌桩和桩周土视为一个假想的实体基础, 将桩和桩间土的承载力根据一定原理叠加而得到复合地基承载力的. 但实际上, 桩顶应力的集中和随着荷载的增加, 桩土应力在相互转移和调整, 桩土应力比不是常数, 已是不争的事实.

图 7 为实测双桩复合地基静载试验得到的桩顶应力和桩间土应力随荷载增加而变化的 $P \sim \sigma_p, \sigma_s$ 曲线. 由图 7 可明显看出, 随着荷载的增加, 桩顶应力 σ_p 和桩间土应力 σ_s 也随之增加, 但到一定值后, 桩间土处于或接近极限状态, 其应力不随荷载增加再增加, 此时荷载增量大多由桩体所承担. 在最后阶段, 沉降量不断增加, 桩间土挤出, 导致桩间土应力下降, 更多的荷重由桩来承担. 图 7 的 $P \sim \sigma_s$ 曲线是下降趋势, $P \sim \sigma_p$ 曲线则较陡.

图 8 所示荷载和应力分担比的 $P \sim n$ 曲线, 曲线上升、走平、再上升的过程说明了桩与桩间土不是同时达到屈服状态的, 首先达到屈服极限破坏的应该是桩间土, 然后才是桩. 荷重在 120 ~ 380 kPa 范围内, 相应的桩土应力比 n 在 10 ~ 11 之间.

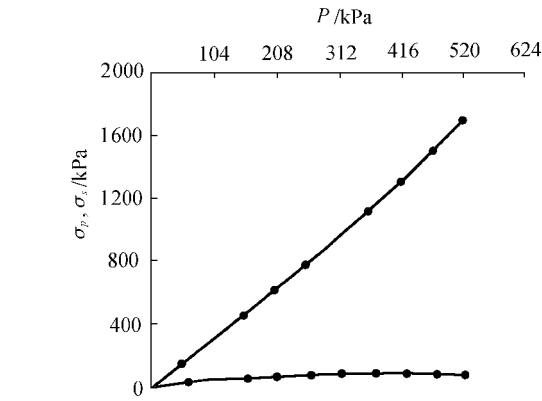


图 7 $P \sim \sigma_p, \sigma_s$ 曲线
Fig.7 $P \sim \sigma_p, \sigma_s$ curves

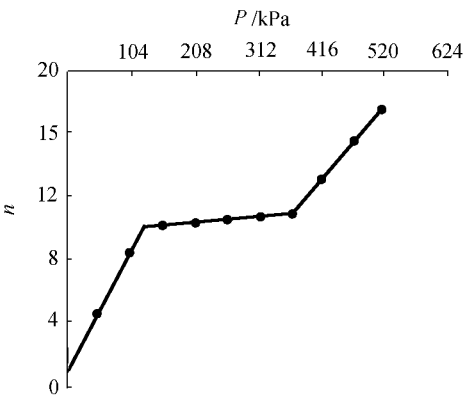


图 8 $P \sim n$ 曲线
Fig.8 $P \sim n$ curve

为了达到均担应力(减小应力分担比)的目的, 在设计中常在桩顶与基础之间设置褥垫层, 以有效地调节复合地基(对承台)的反力分布状况. 但在基础或承台设计时仍必须考虑桩顶应力集中的问题. 地基对承台的反力模式应是均布荷载和桩顶反力共同作用的模式.

3 结 语

通过对水泥搅拌桩复合地基某些工程特性的分析, 认为:
a. 水泥土的强度变化主要与土中的水泥含量、土性及含水量、外掺剂及龄期等因素有关. 水泥土 7d 无

侧限抗压强度大约为 90 d 无侧限抗压强度的 30% ,28 d 强度为 90 d 强度的 50% ,28 d 水泥土凝聚力 C_{cu} 大约是同龄期抗压强度 q_u 的 25% ,内摩擦角在 $25^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 之间 ;变形模量 $E_{50}=(45 \sim 90)q_u$,水泥土破坏应变在 1% ~ 2% 左右 ,属脆性破坏.

b. 搅拌桩复合地基的承载力标准值拟用控制变形的方 法确定 ,沉降比 s/d 拟取 0.01(d 宜取承载板等效面积圆的直径).由此确定的承载力指标既安全又经济.

c. 搅拌桩复合地基的承载反力模式应该是均布反力和桩顶集中应力共存的模式.在 $\varnothing 500$ 或 $\varnothing 600$ 桩径 ,桩长 13.5 m ,置换率 $m=0.267 \sim 0.308$ 时 ,桩土应力分担比在 10 ~ 11 之间.桩顶设置褥垫层将能有效改善和均担复合地基的反力.

参考文献 :

[1] JGJ79-91 建筑地基处理技术规范 [S].北京 :中国计划出版社 ,1992.

Engineering Behavior of Composite Foundation Improved with Cement Mixing Piles

SHAO Wei-xia¹ , TAO You-qiang² , CAO Yong-lang¹

(1. *Nanjing Hydraulic Research Institute , Nanjing 210029 , China ;*

2. *Nanjing Highway Construction Department , Nanjing 210008 , China)*

Abstract : A test on the composite foundation improved with cement mixing piles in a practical engineering project is performed . The regularity of variation of the laboratory cement soil strength with its age , cement ratio , water content , and additive is analyzed . The bearing capacity and reaction pattern of the foundation on the bearing cap under the pile-soil interaction are studied . It is indicated that the cement soil strength is evidently influenced by the cement ratio and the age . The strain of cement soil at failure is 1% ~ 2% , showing that the cement soil is in a brittle failure state . The basic value of the bearing capacity of the composite foundation varies with the method with which the capacity is determined . There is a large concentrated reacting force on the top of the pile , and the stress ratio of pile and soil is remarkably influenced by the load . If the load is 120 ~ 380kPa , the stress ratio is about 10 .

Key words : mixing pile ; composite foundation ; bearing capacity ; stress ratio