

第9章 碎石桩法

9.1 概论

在地基中设置由碎石组成的竖向增强体(或称桩体)形成复合地基达到地基处理的目的,均称为碎石桩法。

碎石桩法加固地基原理是在地基中设置碎石桩体,形成复合地基以提高地基承载力和减少沉降。碎石桩桩体具有很好的透水性,有利于超静孔隙水压力消散,碎石桩复合地基具有较好的抗液化性能。

按施工方法的不同,碎石桩法可分为(1)振冲碎石桩法;(2)干振挤密碎石桩法;(3)沉管碎石桩法;(4)沉管夯扩碎石桩法;(5)袋装碎石桩法;(6)强夯置换碎石桩法。

9.2 振冲碎石桩法

9.2.1 振冲法的发展

在20世纪50年代末、60年代初,联邦德国和英国相继把原先只适用于挤密砂体的振冲技术用来处理粘性土地基。1959年联邦德国Johann Keller地基公司在Nurembreg的一项地基工程中用振冲器在粘性土中造2m深的孔,填入块石,再用振冲器使块石密实,经这样处理后,地基承载力有很大的提高。1960年英国Cementation地基工程公司在尼日利亚首都拉各斯建造一幢六层房屋,在开挖基槽时意外地发现地基中有一层厚2m的有机粉土,强度很低。最后采用振冲造孔,回填碎石的办法处理,效果很好。后来,这两家公司有意识地把这一方法用于加固软弱粘土地基,逐渐演变出一种新的加固方法——振冲置换法。

我国应用振冲置换法始于1977年,首次应用的工程是南京船舶修造厂船体车间软土地基加固。

振冲碎石桩法适用于处理不排水抗剪强度不小于20kPa的粘土、粉土、砂土、饱和黄土和人工填土地基。在制桩过程中,填料在振冲器的水平向振动力作用下挤向孔壁的软土中,从而桩体直径扩大。当这一挤入力与土的约束力平衡时,桩径不再扩大。显然,原土强度越低,也就是抵抗填料挤入的约束力越小,形成的桩体就越粗。如果原土的强度过低(例如淤泥),以致土的约束力始终不能平衡使填料挤入孔壁的力,那就始终不能形成桩体,这种方法就不再适用。

9.2.2 振冲法原理

按照一定间距和分布打设了许多桩体的土层叫做复合土层,由复合土层组成的地基叫做复合地基。如果软弱层不太厚,桩体可以贯穿整个软弱土层,直达相对硬层。如果软弱土层比较厚,桩体也可以不贯穿整个软弱土层,这样,软弱土层只有部分厚度转变为复合土层,其余部分仍处于天然状态。对桩体打到相对硬层,亦即复合土层与相对硬层接触的情况,复合土层中的桩体在荷载作用下主要起应力集中的作用。由于桩体的压缩模量远比软弱土大,故而通过基础传给复合地基的压力随着桩、土的等量变形会逐渐集中到桩上去,从而使软土负担的压力相应减小。结果,与原地基相比,复合地基的承载力有所提高,压缩性也有所降低。这就是应力集中作用,也称为置换作用。就这点来说,复合地基有如钢筋混凝土,地基中的桩体有如混凝土中的钢筋。对桩体不打到相对硬层,亦即复合土层与相对硬层不接触的情况,复合土层主要起垫层的作用。垫层能将荷载引起的应力向周围横向扩散。使应力分布

趋于均匀,从而可提高地基整体的承载力,减少沉降量。这就是垫层的应力扩散和均布作用。

如果作用于桩顶的荷载足够大,桩体发生破坏。可能出现的破坏形式有三种:鼓出破坏、刺入破坏和剪切破坏,见图9-1。只要桩长大于临界长度(约为桩直径的4倍),就不会发生刺入破坏。除那些不打到相对硬层而长度又很短的桩外,一般可不考虑刺入破坏形式。关于剪切破坏形式,只要基础底面不太小或者桩周围的土面上有足够大的边载,便不会发生这种形式的破坏。因此,桩体绝大多数发生鼓出破坏。一方面由于组成桩体的材料是无粘性的,桩体本身强度随深度而增大,故而随深度增大产生塑性鼓出的可能性变小;另一方面由于桩间土抵抗桩体鼓出的阻力亦随深度增大,可见最易产生鼓出破坏的部位是桩的上端。

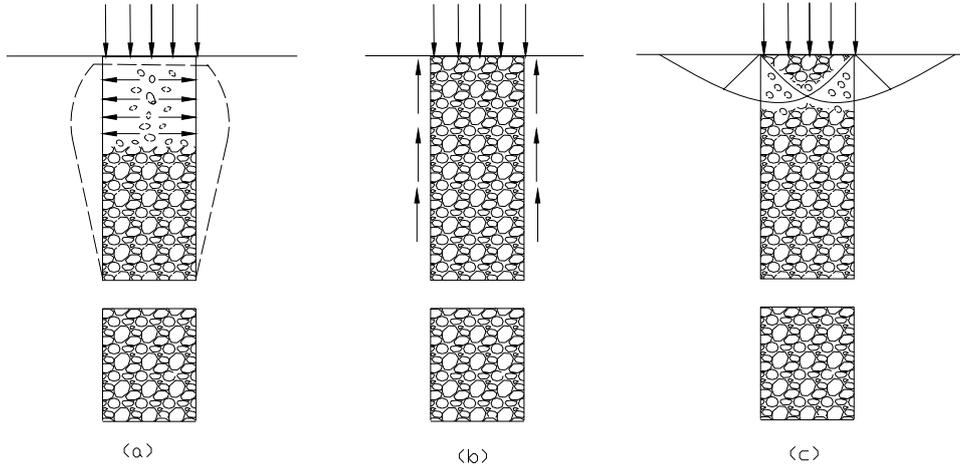


图9-1 桩体破坏形式

a) 鼓出破坏 b) 刺入破坏 c) 剪切破坏

9.2.3 复合地基承载力特征值

振冲碎石桩复合地基承载力特征值应通过现场复合地基载荷试验确定,初步设计时也可用单桩和处理后桩间土承载力特征值按下式估算:

$$f_{spk} = mf_{pk} + (1-m)f_{sk} \quad (9-1)$$

$$m = d^2 / d_e^2 \quad (9-2)$$

式中 f_{spk} ——振冲桩复合地基承载力特征值(kPa);

f_{pk} ——桩体承载力特征值(kPa),宜通过单桩载荷试验确定;

f_{sk} ——处理后桩间土承载力特征值(kPa),宜按当地经验取值,如无经验时,可取天然地基承载力特征值;

m ——桩土面积置换率;

d ——桩身平均直径(m);

d_e ——一根桩分担的处理地基面积的等效圆直径(m);

等边三角形布桩 $d_e = 1.05 s$ (9-3)

正方形布桩 $d_e = 1.13 s$ (9-4)

矩形布桩 $d_e = 1.13\sqrt{s_1 s_2}$ (9-5)

s 为等边三角形布桩和正方形布桩时的桩间距, s_1 、 s_2 分别为矩形布桩时的纵向桩间距和横向桩间距。

对小型工程的粘性土地基如无现场载荷试验资料,初步设计时复合地基的承载力特征值

也可按下式估算

$$f_{spk} = [1 + m(n-1)]f_{sk} \quad (9-6)$$

式中 n 为桩土应力比, 在无实测资料时, 可取 2~4, 原土强度低取大值, 原土强度高取小值。

碎石桩复合土层的压缩模量可按下式计算

$$E_{sp} = [1 + m(n-1)]E_s \quad (9-7)$$

式中 E_{sp} ——复合土层压缩模量 (MPa);

E_s ——桩间土压缩模量 (MPa), 宜按经验取值, 可取天然地基压缩模量。

n 值当无实测资料时, 对粘性土可取 2~4, 对粉土和砂土可取 1.5~3, 原土强度低取大值, 原土强度高取小值。

9.2.4 施工工艺

(一) 施工机具

主要机具是振冲器、吊机或施工专用平车和水泵。

振冲器是利用一个偏心体的旋转产生一定频率和振幅的水平向振力进行振冲置换施工的一种专用机械。我国用于振冲置换施工的振冲器主要有 ZCQ-30 和 ZCQ-55 二种。起吊机械有履带或轮胎吊机、自行井架式专用平车或抗扭胶管式专用汽车。水泵的规格为出口水压 400~600kPa, 流量 20~30m³/h。每台振冲器配一台水泵。

其他设备有运料工具、泥浆泵、配电板等。

施工所用的专用平车台数随桩数、工期决定, 有时还受到场地大小、交叉施工、水电供应、泥水处理等条件的限制。

(二) 施工准备工作

1、三通一平

施工现场的三通一平指的是水通、电通、料通和场地平整, 这是施工能否顺利进行的重要保证。

2、施工场地布置

对场地中的供水管、电路、运输道路、排泥水沟、料场、沉淀池、清水池、照明设施等都要事先妥善布置。对有多台施工车同时作业的大型加固工程, 应划出各台施工车的包干作业区。配电房、机修房、工人休息室等亦应一一作出安排。显然, 这些布置随具体工程而定, 不可能有一个统一的平面布置方案。

3、桩的定位

平整场地后, 测量地面高程。加固区的高程宜为设计桩顶高程以上 1m。如果这一高程低于地下水位, 需配备降水设施或者适当提高地面高程。最后按桩位设计图在现场用小木桩标出桩位, 桩位偏差不得大于 3cm。

(三) 振冲置换桩的制作

1、填料方式

在地基内成孔后, 接着要往孔内加填料。方法为先把振冲器提出孔口, 往孔内倒入约 1m 堆高的填料, 然后下降振冲器使填料振实。

对较软的土层, 宜采用“先护壁, 后制桩”的办法施工。即成孔时, 不要一下达到设计

深度，而先达到软土层上部 1~2m 范围内，将振冲器提出孔口加一批填料，下降振冲器使这批填料挤入孔壁。把这段孔壁加强以防塌孔。然后使振冲器下降至下一段软土中，用同样方法加料护壁。如此重复进行，直至达到设计深度。孔壁护好后，就可以按常规步骤制桩了。

2、桩的施工顺序

桩的施工顺序一般采用“由里向外”（图 9-2a）或“一边推向另一边”（图 9-2b）的方式，因为这种方式有利于挤走部分软土。如果“由外向里”制桩，中心区的桩很难振挤开来。对抗剪强度很低的软粘土地基，为减少制桩时对地基土的扰动，宜用间隔跳打的方式施工（图 9-2c）。当加固区毗邻其他建筑物时，为减少对邻近建筑物的振动影响，宜按图 8-2d 所示的顺序进行施工。必要时可用振动力较小的振冲器制紧靠建筑物的一排桩。

3、制桩操作步骤

(1) 将振冲器对准桩位，开水通电。

(2) 启动施工车或吊机的卷扬机，使振冲器以 1~2min 的速度在土层中徐徐下沉。注意振冲器在下沉过程中的电流值不得超过电机的额定值。

(3) 当振冲器达到设计加固深度以上 30~50cm 时，开始将振冲器往上提，直至孔口。提升速率可增至 5~6m/min。

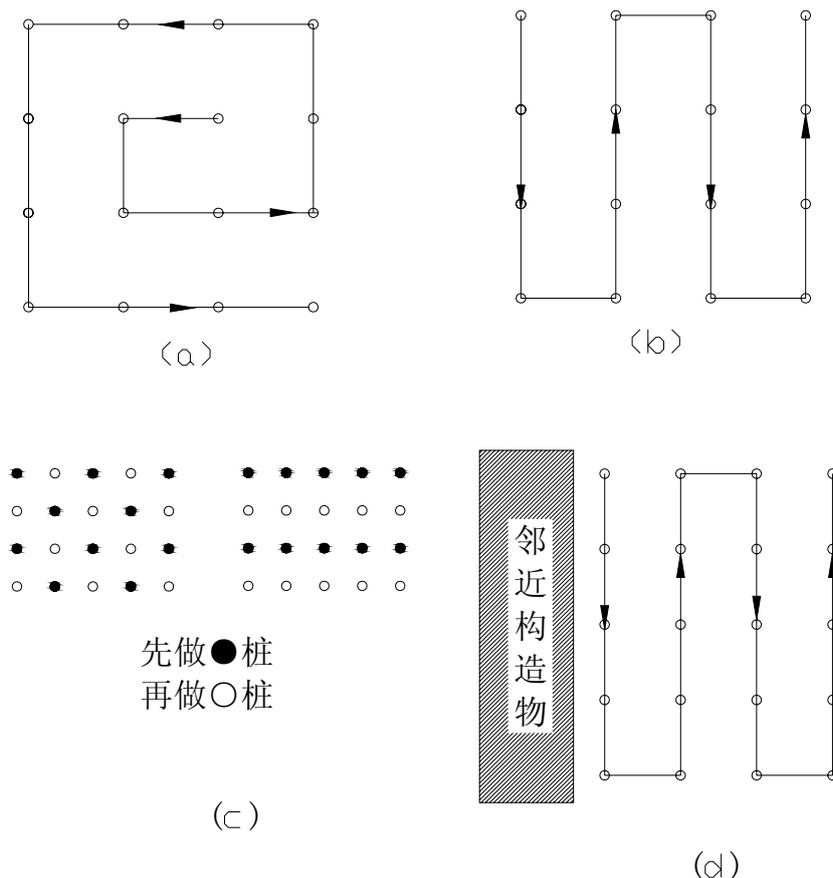


图 9-2 桩的施工顺序

a) 由里向外方式 b) 一边推向加一边方式

c) 间隔跳打方式 d) 减少对邻近建筑物振动影响的施工顺序

(4) 重复步骤(2)、(3)一至二次。如果孔口有泥块堵住，应将它挖去。最后，将振冲器停留在设计加固深度以上 30~50cm 处，借循环水使孔内泥浆变稀，这一步骤叫清孔。清

孔时间 1~2 min, 然后将振冲器提出孔口, 准备加填料。

(5) 往孔内倒 0.15~0.5m³填料。将振冲器沉至填料中进行振实。这时, 振冲器不仅使填料振密, 并且使填料挤入孔壁的土中, 从而使桩径扩大。由于填料的不断挤入, 孔壁土的约束力逐渐增大, 一旦约束力与振冲器产生的振力相等, 桩径不再扩大, 这时振冲器电机的电流值迅速增大。当电流达到规定值时, 认为该深度的桩体已经振密。如果电流达不到规定值, 则需提起振冲器继续往孔内倒一批填料, 然后再下降振冲器继续进行振密。如此重复操作, 直至该深度的电流达到规定值为止。每倒一批填料进行振密, 都必须记录深度、填料量、振密时间和电流量。电流的规定值称为密实电流。密实电流由现场制桩试验确定或根据经验选定。

(6) 重复上一步骤, 自下而上地制作桩体, 直至孔口。这样一根桩就做成了。

(7) 关振冲器, 关水, 移位, 在另一加固点上施工。

4、表层处理

桩顶部约 1m 范围内, 由于该处地基土的上覆压力小, 施工时桩体的密实程度很难达到要求, 为此必须另行处理。处理的办法是或者将该段桩体挖去, 或者用振动碾使之压实。如果采用挖除的办法, 对施工前的地面高程和桩顶高程要事先计划好。

一般, 经过表层处理后的复合地基上面要铺厚 30~50cm 的碎石垫层。垫层本身也要压实。在垫层上面再做基础。

(四) 施工质量控制

振冲置换桩的施工质量控制实质上就是对施工中所用的水、电、料三者的控制。这些都与工程的地基土质的具体条件、建筑物的具体设计要求有关。具体应用时, 还得靠实践经验。因此, 对大型工程, 现场制桩试验几乎是必不可少的。

关于水, 要控制两个参数, 一个是水量, 另一个是水压。水量要充足, 使孔内充满着水, 这样可防止塌孔, 使制桩工作得以顺利进行。反之, 水量亦不宜过多, 过多时易把填料回出带走。关于水压, 视土质及其强度而定。一般说, 对强度较低的软土, 水压要小些; 对强度较高的土, 水压宜大。成孔过程中, 水压和水量要尽可能大; 当接近设计加固深度时, 要降低水压, 以免破坏桩底以下的土。加料振密过程中, 水压和水量均宜小。

关于电, 主要控制加料振密过程中的密实电流。密实电流规定值根据现场制桩试验定出, 一般为振冲器潜水电动机的空载电流加上 10~15A。在制桩时, 值得注意的是不能把振冲器刚接触填料的一瞬间的电流值作为密实电流。瞬时电流值有时可高达 100~120A, 但只要把振冲器停住不下降, 电流值立即变小。只有振冲器在固定深度上振动一定时间而电流稳定在某一数值, 这一稳定电流才能代表填料的密实程度。要求稳定电流值超过规定的密实电流值, 该段桩体才算制作完毕。

关于料, 要注意加填料不宜过猛, 原则上要“少吃多餐”, 即要勤加料, 但每批料不宜加得太多。值得注意的是在制作最深处桩体时, 为达到规定密实电流所需的填料远比制作其他部分桩体多。有时这段桩体的填料可占整根桩总填料的 1/4~1/3。

9.3 其他碎石桩法

9.3.1 干振挤密碎石桩法

干振挤密碎石桩法加固地基是形成复合地基, 在成孔和挤密碎石桩的过程中, 土体在水

平激振力作用下产生径向位移，在碎石桩周围形成密实度很高的挤密区，该挤密区对碎石桩起约束作用。桩间土密实度不均匀，靠近碎石桩周围，密实度增大。桩间土强度比原天然地基土强度高得多。经干振挤密碎石桩加固的地基，承载力提高 1 倍左右。

它与振冲挤密碎石桩的不同之处是不用高压水冲。主要适用于地下水位较低的非饱和粘性土、素填土、杂填土和二级以上非自重湿陷性黄土。干振挤密碎石桩复合地基承载力和沉降的确定方法基本上与振冲碎石桩复合地基相同。

9.3.2 沉管碎石桩法

按施工方法可分为三种：管内投料重锤夯实法、管内投料振动密实法、先拔管后投料复打密实法。

管内投料重锤夯实法工艺为：首先将桩管立于桩位，管内填 1m 左右碎石，然后用吊锤夯击桩位，靠碎石和桩管间的摩擦力将桩管带到设计深度，最后分段向管内投料和夯实填料，同时向上提拔桩管，直至拔出桩管，形成碎石桩。

管内投料振动密实法通常采用振动沉拔管打桩机制桩，依靠沉管振动密实，但要控制拔管速度，注意填料量，达不到要求时应复打。

先拔管后投料复打密实法通常采用常规沉管打桩机沉管桩，然后将桩管拔出，再向孔中投料，利用复打的方式密实桩体填料，形成碎石桩复合地基。对于容易发生缩孔的地基，该法不能采用。

沉管碎石桩复合地基承载力可通过载荷试验确定，也可利用散体材料复合地基理论计算，计算式同振冲碎石桩复合地基。沉降计算也与振冲碎石桩复合地基相同。

9.3.3 夯扩碎石桩法

夯扩碎石桩法是沉管碎石桩法中先拔管后投料复打密实法的发展。施工工艺如下：先将沉管沉至设计深度；边投料边拔管，一次投料数量和一次拔管高度应根据夯扩试验确定；将投料夯扩成设计直径，如 $\phi 377\text{mm}$ 的沉管可将碎石桩夯扩到直径 600mm；然后再边投料边拔管，再夯扩，直至制成一根夯扩碎石桩。在成桩过程中桩间土得到挤密，强度提高。夯扩碎石桩桩体直径大，且密实度高，桩体承载力大。

夯扩碎石桩法适用于非饱和土地基，对杂填土、素填土地基加固效果很好。若地基中各土层强度不同，在相同夯击能作用下，低强度土层中碎石桩桩径较大，高强度土层中碎石桩桩径较小，形成葫芦状，有利于提高加固效果。

夯扩碎石桩复合地基承载力可通过复合地基载荷试验确定，也可通过碎石桩和桩间土载荷试验确定桩体承载力和桩间土承载力，计算式同振冲碎石桩复合地基。沉降计算也与振冲碎石桩复合地基相同。

9.3.4 袋装碎石桩法

由于碎石桩属散体材料桩，它需要桩间土提供一定的侧限压力，才能形成桩体，具有一定的承载力。当天然地基土的侧限压力过小时，可采用土工织物将碎石桩包上，形成袋装碎石桩。国外也有采用竹笼、钢丝网包裹的竹笼碎石桩的报道。

浙江大学岩土工程研究所（原土工教研室）于 1987 年提出了用冲抓法成孔并用土工织物袋围护碎石的加固方法，成孔直径为 80cm。但未在实际工程中应用。福州大学岩土工程教研室采用自制的简易射水器射水成孔深度可达 12~13m，直径为 40cm 或 45cm，放入土工织

物袋后,采用小直径的插捣棒,这样就可以边填料边捣实,而上段部分则采用插入式混凝土振动器振实,使施工效果大大提高。通过试验,这种碎石桩已在福州大学两幢住宅工程与泉州市某综合楼工程中应用。

袋装碎石桩复合地基的承载力可由复合地基试验确定。

福州大学的袋装碎石复合地基的载荷试验表明,当置换率为 0.15 时,复合地基承载力由天然地基承载力 63kPa 提高到 117~141kPa。与一般的振冲碎石桩比较,它具有填料用量少,易于控制填料数量,桩身密实度较高,受力性能较好的优点,且土工织物袋能起到隔离、过滤保证排水固结并防止软粘土受压后挤入碎石孔隙的作用,特别适合于在高含水量、低强度的软粘土中应用。这种新型碎石桩的提出,有助于降低工程造价,促进碎石桩在软土地基工程中的推广应用。

9.3.5 强夯置换碎石桩(墩)法

该法为在地基中设置碎石墩,并对地基进行挤密,碎石墩与墩间土形成复合地基以提高地基承载力,减小沉降。

强夯置换碎石桩法是为了将强夯法应用于加固饱和粘性土地基而开发的地基处理技术。强夯置换碎石桩法从强夯法发展而来,但加固机理并不相同。它利用重锤落差产生的高冲击能将碎石、矿渣等物理性能较好的材料强力挤入地基,在地基中形成一个个碎石墩。地强夯置换过程中,土体结构破坏,地基土体中产生超孔隙水压力。随着时间发展结构强度会得到恢复。碎石墩一般具有较好的透水性,有利于土中超静孔隙水压力消散,产生固结。

强夯置换法质量检验除应了解墩间土性状外,更需要了解复合地基的性状。复合地基承载力可采用复合地基载荷试验确定。

了解碎石墩的直径和深度,可采用雷达和斜钻检测。

关于强夯置换法可参见第 5 章。

9.4 碎石桩复合地基设计

各类碎石桩复合地基设计主要包括下述几个方面:碎石桩桩体尺寸、桩位布置和布桩范围。桩体尺寸包括桩径和桩长,桩位布置包括布桩形式和桩距的确定,桩位布置形式主要有等边三角形、等腰三角形、正方形和矩形布置等。

(一) 桩径

可按每根桩所用的填料量计算,常为 0.8~1.2m。桩径与成桩方法、成桩机械以及土质条件有关。

(二) 桩长

桩长应根据软弱土层的性能、厚度或工程要求按下列原则确定:

- (1) 当软土层不厚时,应穿透软土层;
- (2) 当软土层较厚时,对按变形控制的工程,加固深度应满足砂桩复合地基变形不超过地基容许变形值的要求;
- (3) 对按稳定性控制的工程,桩长应不小于最危险滑动面的深度;
- (4) 在可液化地基中,桩长应按要求的抗震处理深度确定;
- (5) 桩长不宜小于 4m。

(三) 布桩范围

应根据建筑物的重要性和场地条件及基础形式而定。对一般基础,在基础外应扩大1~3排;对可液化地基,在基础外缘扩大宽度不应小于可液化土层厚度的1/2,并不应小于5m。

(四) 桩间距

应根据荷载大小和原土的抗剪强度确定,可用1.5~2.5m。荷载大或原土强度低时,宜取较小的间距;反之,宜取较大的间距。

碎石桩面积置换率可通过下式计算

$$m = d^2 / d_e^2 \quad (9-8)$$

式中 m ——桩土面积置换率;

d ——桩身平均直径;

d_e ——一根桩分担的处理地基面积的等效圆直径;

$$\text{等边三角形布桩} \quad d_e = 1.05 s \quad (9-9)$$

$$\text{正方形布桩} \quad d_e = 1.13 s \quad (9-10)$$

$$\text{矩形布桩} \quad d_e = 1.13 \sqrt{s_1 s_2} \quad (9-11)$$

s 为等边三角形布桩和正方形布桩时的桩间距, s_1 、 s_2 分别为矩形布桩时的纵向桩间距和横向桩间距。

(五) 桩体材料

可用碎石、卵石、角砾、圆砾等硬质材料,含泥量不得大于5%,最大粒径不宜大于50mm。

9.5 质量检验

各类碎石桩法质量检验均应重视检查施工记录。如振冲碎石桩法要检查成桩各段密实电流、留振时间和填料是否符合设计要求。沉管碎石桩法要检查各段填料量以及提升和挤压时间是否符合设计要求。

对碎石桩与桩间土可采用标准贯入、静力触探或动力触探等方法进行检测。

考虑到成桩过程对桩间土的扰动和挤压作用,质量检验除砂土地基外,都应在施工结束后间隔一段时间进行,原则上应待桩间土超静孔隙水压力得到消散,土体结构强度得到恢复时进行质量检测。对粉质粘土地基间隔时间可取21~28d,对粉土地基可取14~21d。

桩的施工质量可采用单桩载荷试验,检验数量为总桩数的0.5%,且不少于三根。桩体检验可用重型动力触探进行随机检验。对桩间土可用标准贯入、静力触探等进行检验。

复合地基竣工验收,应采用复合地基载荷试验,数量不应少于总桩数的0.5%,且每个单体工程不应少于3点。

9.6 工程实例

9.6.1 福州市马尾交通路工业区厂房建筑群地基处理

1、工程概况

福州经济技术开发区交通路工业区建筑群由6座通用厂房、7座连接体组成,建设面积38000m²。厂房有进深18m和24m两种,最长132m,4或5层,钢筋混凝土框架结构。本工程位于马尾地区近代冲积的砂和淤泥的交互层上,属7度烈度地震区,其间砂层有液化问题,而淤泥层强度低、压缩性高。经地基处理方案比较后,最后采用振冲置换法加固,并且减少

填土荷载，采用薄壁高梁整体架空的基础，藉以提高上部结构刚度，减少厂房的弯曲变形。

设计要求地基承载力由原来的 50~60kPa 提高到 95kPa 以上；总沉降量不超过 30cm，倾斜小于 3‰。

加固施工历时三个月，加固面积 13000m²，共施工碎石桩 4983 根。

2、土层分布

厂区地面以下为砂和淤泥的交互层，厚约 15m。其中淤泥厚 2~4m，天然含水量平均值为 56.2%，十字板抗剪强度为 17.4~31.6kPa，夹砂层与饱和细砂，松散状态，标准贯入击数 5~9 击，比贯入阻力 3.2~4.1MPa，经判别在 7 度烈度下可液化。其下为淤泥层，天然含水量平均值为 57.5%，厚 22~45m。该层土的先期固结压力随深度而增大：深 16m 处，先期固结压力为 173.6kPa；深 35m 处，为 449.1kPa。加固对象主要是上部 15m 砂和淤泥互层，并使经加固形成的复合土层传到下面淤泥层的附加应力小于土层的先期固结压力，藉以减少总沉降量。

3、施工概况

碎石桩在建筑物基底范围内按三角形满堂布置，间距 1.64~1.70m。桩长 13.3m 的有 4203 根，桩长 10m 的 780 根，总共打设碎石桩 4983 根。用 ZCQ-30 型振冲器制桩；填料为粒径 2~8cm 的碎石。碎石桩桩径在砂层和淤泥层中是不一样的。根据不同深度的填料量来推算，在砂层内桩径约为 80cm，在淤泥层内约为 100cm。碎石桩施工完毕后，挖去顶端 0.8~1.0m，再用 25t 振动碾碾压多遍，直至桩顶填料质量达到密实为止。

4、效果评价

为了检验加固效果，在砂土层中进行了标准贯入试验和静力触探试验，在淤泥层中进行了十字板剪切试验。比较加固前后的试验资料表明，砂土层中的标贯击数提高 1.33~1.92 倍，比贯入阻力提高 1.45~1.88 倍，满足了抗液化的要求；淤泥层中的十字板抗剪强度从原先的平均值 24.7kPa 提高到 45.3kPa，增加了 83%。

在 2 号和 4 号厂区还进行了覆盖三根桩的复合地基载荷试验各一组，在桩上和土上分别埋设了土压力计，藉以估算桩土应力比。试验得出：2 号厂区复合地基承载力标准值为 133kPa，桩土应力比为 2.0~2.3；4 号厂区复合地基承载力标准值为 96.6kPa，桩土应力比为 3.7~3.8，满足了对地基承载力的设计要求。

在厂房结构完成后立即开始观测沉降，观测点共设 76 个。观测历时 458 天，此时 6 座厂房的沉降量见表 9-1。

表 9-1 厂房沉降量表

	1 号楼	2 号楼	3 号楼	4 号楼	5 号楼	6 号楼
测点数	10	8	10	8	5	9
平均沉降量 (mm)	165.6	154.6	130.9	185.9	173.8	159.6

9.6.2 徐州镀锌焊管厂扩建工程地基处理

1、工程概况

徐州镀锌焊管厂位于徐州市东郊，京杭大运河南约 2 km 处。扩建工程主要有原料库主

轧车间、精整车间、变电所和车间办公室等，其中主轧车间和精整车间长 216m，跨度分别为 24m 和 18m。原料库长 90m，跨度 21m，库内将有大面积堆载。车间为单层工业厂房，排

表 9-2 土的物理力学性质

编 号 项 目	①	②	③	③ _a	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
土层名称	粉土	淤泥质粉 质粘土	粘土	粉土	粉土	粘土	粘土	细砂	粘土	粉质 粘土
一般厚度 (m)	2.0~ 2.6	0.1~0.5	2.2~ 3.1		2.5~ 3.8	0.7~ 1.4	1.6~ 2.4	1.1~ 2.7		
天然含水量 $w(\%)$	26.2	46.7	34.9	28.8	26.2	31.4	25.9		27.2	39.8
重度 γ (kN/m^3)	19.1	17.5	17.9	18.9	18.9	17.9	18.8		18.9	17.3
天然孔隙比 e_0	0.77	1.28	1.08	0.83	0.84	1.06	0.83		0.89	1.28
塑性指数 I_P	8.9	15.2	23.2	7.6	8.7	22.7	19.6		22.0	18.1
液性指数 I_L	0.50	1.64	0.63	0.85	0.57	0.35	0.40		0.16	0.58
内摩擦角 φ (度)	19.0	5.0	9.9	17.4		8.8	11.1		15.6	18.3
粘聚力 c (kPa)	23	9	22	17		27	27		32	22
压缩系数 a_{1-2} (MPa^{-1})	0.14	1.00	0.72	0.25	0.21	0.60	0.53		0.31	0.39
压缩模量 E_s (MPa)	7.0	2.1	2.8	7.0	8.1	3.0	4.1		6.8	5.4
标准贯入 $N_{63.5}$ (击)	3.6				3.3	6.0	6.8	18.0	17.5	
静力触探 锥尖阻力 q_c (kPa)	1900		4100	2100	1700	1200				
承载力标准 值 [R] (kPa)	130	78	98	128	114	134	184	190	217	161

架结构，柱距 6m。总建筑面积 10746m²。由于场地位于古黄河泛滥区，地基土软弱并且存在振动液化，为了满足厂房设计要求，节省投资，通过对钢筋混凝土预制桩、灌注桩和挤密碎石桩几种地基基础方案的比较，采用了挤密碎石桩地基处理方案。

2、土层分布

场地地层自上而下依次分为 9 层，其物理力学性质见表 8-2。

- ①层：粉土，局部夹粘土，软塑，饱和厚度 2.0~2.6m；
- ②层：淤泥质粉质粘土，局部缺失，厚度 0.1~0.5m；流塑，很湿，高压缩性土；
- ③层：粘土夹粉土薄层(③_a)，厚度 2.2~3.1m，软，很湿，高压缩性土；
- ④层：粉土，软塑，饱和，厚度 2.5~2.8m；
- ⑤层：粘土，可塑，很湿，中高压缩性土，厚 0.7~1.4m；
- ⑥层：粘土，可塑，很湿，厚 1.6~2.4m；
- ⑦层：细砂，饱和，中密，厚 1.1~2.7m；
- ⑧层：粘土，硬塑，很湿，粘性较强；
- ⑨层：粉质粘土，硬塑，很湿。

场区地下水埋深 0.2 m，对混凝土有结晶性侵蚀。场地地震烈度 7 度，①层和④层粉土液化等级 III 级。⑤层及其以上土层为第四纪新近沉积的软弱土，压缩性高，其下则土的工程性质较好，因此，①~⑤层为碎石桩法地基处理主要对象，以便消除液化，提高地基强度。

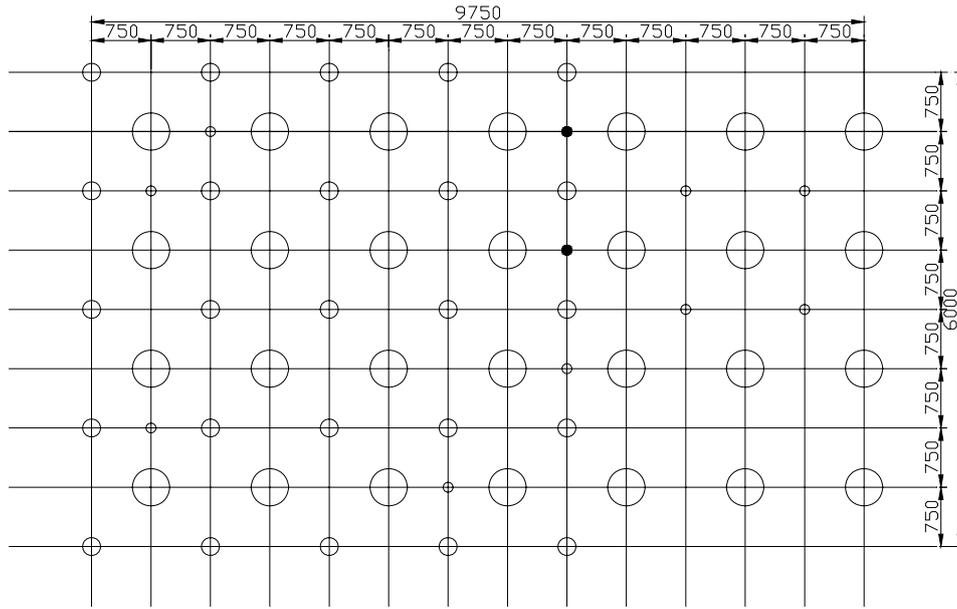
3、施工概况

施工之前在原料库分两区(3[#]和 4[#])进行了试验，每区各布桩 53 根，分基桩和插桩两种。基桩按正方形布桩，间距 1.5 m，桩长 9.0 m，桩径 0.5 m。插桩布在 4 个基桩的正方形中心，桩长 6m，桩径 0.4m。制桩结束 2 周后开始静力触探、标准贯入试验和复合地基载荷试验，载荷试验压板为正方形，面积 3m×3m。试验情况见图 9-3、图 9-4 和表 9-3。

表 9-3 荷载试验技术条件

试验位置	见图 9-2	加荷方式	分 8 级加荷，每级 50kPa
试验土层	粉土、粘土	观测仪器	位移传感器
试验深度	3 [#] 点 0.68m	稳定标准	连续 2 小时，每小时下沉量 0.25mm
	4 [#] 点 0.85m		
压板面积	3m×3m	试验日期	1988.11.27~1989.1.1
压板形状	正方形	地下水位	0.60m

监测结果表明，处理后地基土的性质得到显著改善。标贯击数 $N_{63.5}$ 和静力触探锥尖阻力 q_c 均提高 2 倍以上，①层和④层土的地震液化已经消除。③层粘性土因制桩扰动后恢复



- 基桩 $\Phi 500\text{mm}$ 桩长 9.0m ● 静力触探孔
- 插桩 $\Phi 400\text{mm}$ 桩长 6.0m ○ 标准贯入孔

图 9-3 干振碎石桩桩位及测试点平面布置图

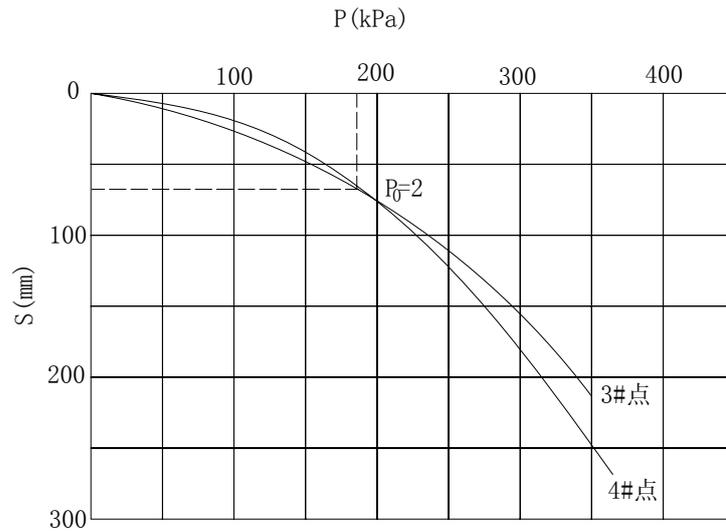


图 9-4 $p-s$ 曲线

期较短，性质变化不大，但制桩后随着时间的增长会逐步提高其强度。两组载荷试验分别加荷至 $342\sim 350\text{kPa}$ 时，地基未出现破坏现象， $p-s$ 曲线较圆滑，无明显拐点（见图 9-4），取 $s/b=0.02$ 时复合地基的承载力标准值为 170kPa ，压缩模量 E_s 为 7.0MPa 。

根据上述试验结果，大面积施工时，除将插桩桩径改为 0.5m 以增加粘性土的置换率外，其他参数与试验时的相同，基础范围以外布置 2 排护桩，宽度 3m 。

施工机械使用 DZ-30Y 型和 DZ-50Y 型振动沉拔桩机，电动机功率分别为 30kW 和 50kW 。激振力分别为 180kN 和 230kN ，静压力 $100\sim 150\text{kN}$ ，桩管直径 377mm ，长度 11m ，活页式平底桩靴。制桩采用振动沉拔管法，反复压拔以达到设计桩径，碎石的平均充盈系数为 1.28 。施

工中先打基桩，后打插桩，碎石为石灰岩，粒径配比为：粒径1~4cm的碎石占65%~70%，粒径0.5~1cm的碎石占30%~35%，含泥量<3%，施工完成基桩2857根，插桩2510根。地基处理后地面隆起约0.20m。

4、效果与评价

施工结束20天后，对成桩质量和处理效果进行抽样检验，抽样数量为每300根桩抽1点。检测结果表明：桩体在粉土层段的动探击数 $N_{(63.5)} > 15$ 击，粘土层段 $N_{(63.5)} > 8$ 击。桩间土：粉土标贯击数 $N_{63.5} > 8$ 击，静力触探锥尖阻力 $q_c > 7000\text{kPa}$ ；粘土的 $N_{63.5} > 2.5$ 击， $q_c > 450\text{kPa}$ ，因此地基处理达到了预期的目的，取得了良好的加固效果。沉降观测在厂房主体工程结束时平均沉降量为9.5mm，吊车安装完成后平均沉降量为12mm。

采用振动沉管挤密碎石桩法地基处理方案还取得了显著的经济效益，比钢筋混凝土预制桩基方案节省费用约40万元。