

编号	90-2581-5
卷	
归卷日期	

建筑科学研究报告

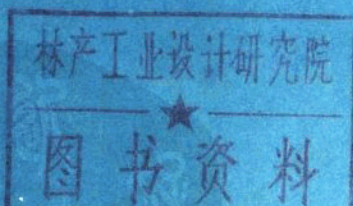
REPORT OF BUILDING RESEARCH

1984

No. 2-3

振冲法处理可液化砂土地基的 试验研究

Treatment of Liquescent Sandy Soil
Foundations by Vibroflotation Method



中国建筑科学研究院
CHINA ACADEMY OF BUILDING RESEARCH

建筑科学研究报告

编辑出版：中国建筑科学研究院科技处
印刷：水电总局服务公司印刷厂
发行：中国建筑科学研究院劳动服务公司
北京市安外小黄庄路9号

提 要

本文介绍采用振冲法处理九度地震烈度区可液化砂土地基的野外试验、工程实践以及在振动台上进行的室内试验研究概况，并提出了碎石桩设计施工问题的若干建议。

目 录

一、前言	(2)
二、振冲碎石桩法的加固效果	(2)
三、振冲碎石桩地基抗液化设计中的几个问题	(8)
四、振密法的加固效果	(17)
五、振冲法施工中的几个问题	(21)
六、结语	(21)
参考文献	

Treatment of Liquescent Sandy Soil Foundations by Vibroflotation Method

Institute of Foundation Engineering

Zhang Yongjun Cai Zilin Yan Guangjian

Abstract

It is intended in this paper to introduce the general aspects of field test, engineering practice and indoor test on shaking table in treatment of liquescent sandy soil foundation by vibroflotation method in seismic areas of 9 degree intensity. Besides, some proposals for design and construction of stone columns will be put forth in this paper.

振冲法处理可液化砂土地基的 试验研究

中国建筑科学研究院地基基础研究所 张永钧 蔡梓林 杨广鉴*

一、前言

振动水冲法(简称振冲法)最初由德国施图曼(S. Steuermann)提出,1937年以后在工程中得到了应用。1944年后传入美国、英国和法国,并在工程中得到了推广应用。日本于1954年引进该法,1956年进行试验性的施工,1957年开始大规模施工。目前该法已在各国得到广泛应用,加固的地基为砂性土和粘性土。

国内1977年南京水利科学研究所和交通部水运规划设计院协作采用此法加固南京船厂船体车间淤泥质软弱地基。

本文介绍自1978年开始我院和开滦煤矿土建工程处协作在唐山进行的采用振冲法处理九度地震烈度区可液化砂土地基的野外试验、工程实践,以及在振动台上进行的室内试验研究概况。

二、振冲碎石桩法的加固效果

振冲法所采用的主要设备是振冲器,它是由潜水电动机和一组偏心块所组成,其下端

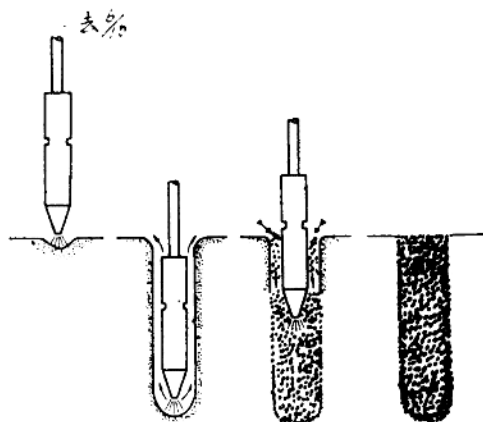


图1 振冲碎石桩的施工顺序

设有喷水口,使用时,高压水由下喷水口喷出,振冲器在振动作用和自重作用下,沉入土中,待到达所需加固深度后,自地表沿振冲器导管附近向孔中不断添加碎石填料,边振动,边逐步提起振冲器,碎石填料就不断沉入孔底,如此,由下而上形成一根碎石桩,其施工顺序如图1所示。此外,还采用不加回填料,仅依靠振冲器将土体振密的加固方法,为便于区别,将前法称为振冲碎石桩法。而将后者称为振冲密实法(简称振密法)。

采用振冲碎石桩法加固砂土地基,其

* 参加本题试验工作的尚有邹联升、师家智、吕仁义、陈士平、金谦、李穗莹、刘秀英、王希玲、杨宁、张红旗、魏厚涌、殷亚力等同志。

加固原理主要是振动加密，饱和砂土在振冲器强烈振动下发生液化，继而土颗粒得到重新排列而趋密实。其次，由于碎石桩的形成，而使地基的强度得到提高。若从饱和砂土抗液化的角度来分析，振冲碎石桩法大致具有加密和排水等加固效应。

(一) 加密效应

振冲碎石桩法的加密效应可分为振密和挤密两种情况，为研究振冲器的振密效果，曾在现场进行了如下野外试验，即用振冲器分别振冲单孔和双孔，孔内不灌任何填料，然后在孔心和离孔心距离分别为1米、2米和3米处进行标贯试验，振冲孔和标贯孔位置见图2。振密前和振密后离振冲孔不同距离处的标贯值如表1所示。

从表1和图2可见经振冲振密后，砂土的标贯值 $N_{63.5}$ 较振密前提高，除孔心外其提高值随离振冲孔距离增加而减少。

与此同时，在上述单孔和双孔振密孔周围布置了变形观测点，观测地面竖向变形，观测结果如图3所示，从图中可见，单孔的水平有效影响距离约为2米，距孔心3米处影响已甚微，距孔心4米处几乎没有影响，双孔的水平有效影响距离比单孔略大，但距孔心4米处，同样几乎没有影响。

根据上述标贯和地面竖向变形的实测资料，可以认为国内常用的电机功率为30千瓦的振冲器，其水平有效影响距离约为2至3米。

振冲碎石桩法的挤密作用，是分两步形成的，首先是当振冲器插入砂土开始，到沉入孔底止，此时，振冲器对周围砂土形成初步的挤密，然后，当碎石填料灌入土中形成碎石桩时，则对周围砂土形成进一步的挤密。我国常用的外径为355毫米的振冲器，在砂土中可筑成直径大约为80~100厘米的碎石桩，若在稍密的细砂地基中，按桩间距2米呈三角形布置碎石桩，振冲前假定细砂的孔隙比 e 为0.90，通过振冲碎石桩的挤密作用，并考虑地表隆起量为2.5%，则振冲后砂土的孔隙比 e' 为0.67，成为密实细砂。

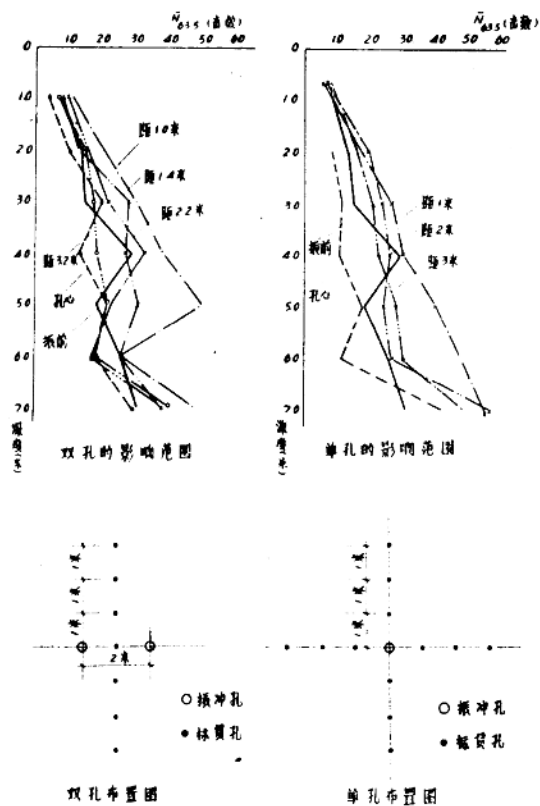


图2 单孔和双孔的影响范围

振密前和振密后标贯值对比

表 1

深度 (米)	平均标贯值 N_{60}									
	振密前	单孔的影响范围					双孔的影响范围			
		孔心	距1米	距2米	距3米	孔心	距1米	距1.4米	距2.2米	距3.2米
1.0	7.5	—	6.1	7.0	8.3	4.0	11.0	8.0	9.5	7.0
2.0	13.5	8.5	17.3	19.5	16.3	10.0	20.0	13.0	15.5	15.0
3.0	15.0	11.5	26.5	23.6	20.8	19.5	30.0	28.0	22.0	17.5
4.0	29.0	11.0	29.8	25.9	22.8	13.0	38.0	27.0	33.0	18.5
5.0	18.5	18.0	40.2	24.0	28.0	21.5	50.0	31.0	23.0	22.0
6.0	25.5	11.5	47.5	26.5	29.8	18.0	26.0	26.0	17.0	18.0
7.0	31.0	42.0	54.8	57.2	48.0	30.0	48.0	38.0	46.0	40.0

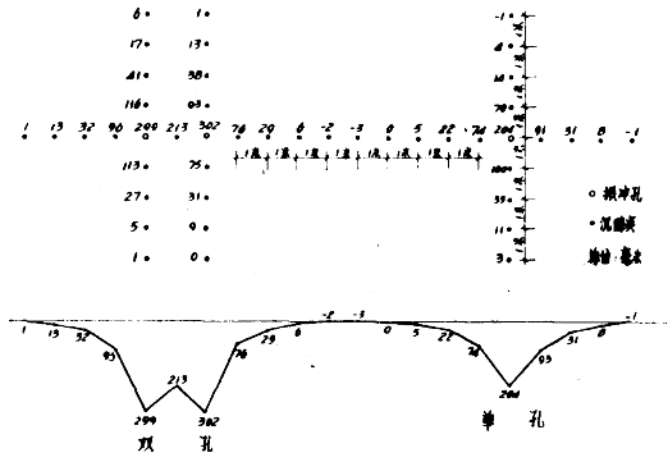


图 3 地面竖向变形分布曲线

(二) 排水效应

饱和砂土在不排水条件下, 由于地震荷载的作用, 产生体积收缩的趋势, 从而导致孔隙水压力增加, 当孔隙水压力等于有效应力时, 砂土就完全丧失强度而达到液化状态。如果地震荷载作用时土中有排水的通道使产生的孔隙水压力能够及时消散掉, 则液化的危险也就可以消除。经碎石桩处理后的复合地基中, 因碎石桩的渗透性远比砂层的渗透性大, 故在砂层中设置的碎石桩起排水作用而使孔隙水压力消散。为检验碎石桩消散孔隙水压力的作用, 曾结合野外试验在现场埋设了孔隙水压力传感器, 用动态应变仪进行测定, 用光线记录示波器进行记录。以振冲器作为震源, 分别对设有碎石桩和无碎石桩两种情况下离振冲器不同距离处的孔隙水压力进行测定, 测点布置如图 4 所示, 测定结果如图 5 所示, 由图 5 可知, 孔隙水压力值随距震源的距离增加而减小, 振冲碎石桩加密区内砂层中的孔隙水压力值较碎石桩振冲加密区外的为小。若以距震源相同距离处, 设置和未设置碎石桩的

砂层中的孔隙水压力增长和消散情况进行比较,见图6,从图中可见,设置碎石桩的最大孔隙水压力值仅为未设置碎石桩的一半,且其孔压消散亦较未设置碎石桩者为快,由此可见,碎石桩的排水效应是很明显的。为进一步验证碎石桩排水效应,曾在室内振动台上进行了碎石桩的模拟试验,振动台为日本液伺服水平向振动台,台面尺寸为 1.5×1.0 米,试验砂箱长170厘米,宽110厘米,高80厘米,试样高度为15厘米,试验时量测孔隙水压力值和砂样的竖向变形,砂料采用通县细砂和唐山中砂,其颗粒级配及物理特性如表2所示,砂件采用砂雨沉积法成型,以便使砂件的结构与天然沉积条件相似。桩材料采用3~5毫米粒径的砾石,桩径 d 为32毫米,桩距 b 分别为 $2.5d$ 、 $3.0d$ 、 $3.5d$ 、 $4.0d$ 、 $4.5d$ 和 $5.0d$,呈等边三角形布置。试验时输入频率为2赫兹的正弦波,开始振动加速度为50伽,振动时间为1分钟,以后每级增加加速度25伽,每次振动时间均为1分钟,如此逐级加载直至液化为止。这里所说的液化,主要指土层表面冒气泡或从测壁观察到土层原有层理发生混乱以及孔压接近有效压力的情况。

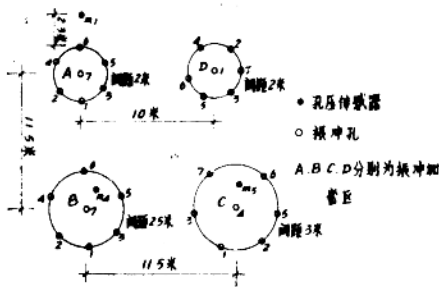


图4 孔压传感器和振冲孔的布置

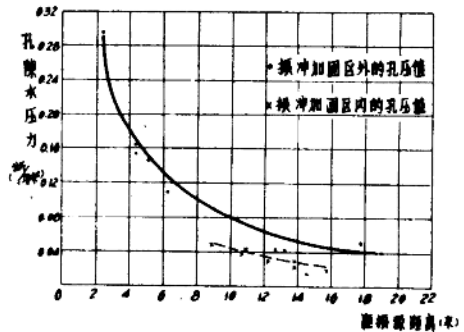


图5 孔隙水压力与振源距离的关系

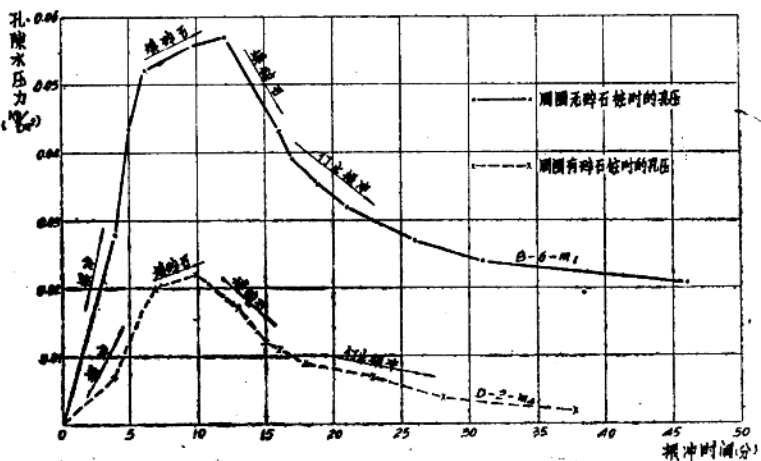


图6 孔压的增长和消散

砂样的颗粒级配和物理特性

表 2

名称	颗粒级配(mm)					d ₅₀ (mm)	不均匀 系数	最大 孔隙比 e _{max}	最小 孔隙比 e _{min}	比重 G
	1~0.5	0.5~0.25	0.25~0.1	0.1~0.05	<0.05					
通县细砂	0.23	15.90	65.61	12.60	5.66	0.18	2.36	1.000	0.570	2.684
唐山中砂	11.4	55.6	32.0	1.0	—	0.27	1.91	0.794	0.478	2.661

根据纯砂和不同间距砾石桩的振动台模拟试验，可以看出振动加速度与孔隙压力的增长情况(见图7)，图中曲线右测端点为发生液化时的加速度与孔压值。从图中可以看出，总的来说孔隙压力是随着加速度的增加而增加，当加速度由零增加到50伽时，对于各种不同桩距情况的孔隙水压力值大致都由零增至0.005kg/cm²左右。以后随着加速度的增加，情况就不完全相同，以纯砂来说，当加速度值由50伽增大到75伽时，孔隙水压力值增加甚微，曲线近水平状，但当加速度值由75伽增加至100伽时，孔压突然大幅度上升，并接近有效压力，致使砂土发生液化；对于桩距为5.0d和4.5d的砾石桩来说，情况与纯砂相似，加速度值由50伽增大至125伽时，孔隙水压力值增大不多，当加速度值由125伽增至150伽时孔压突然增大而液化，当

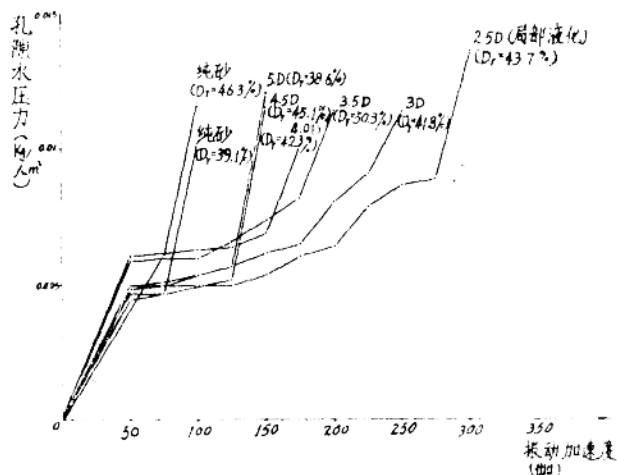


图 7 不同桩距时孔压与振动加速度的关系

桩距减少到3.5d、3.0d和2.5d时，情况就有所不同，当加速度值超过100伽时，孔压值随着加速度值的增加而逐步增大，曲线斜率也逐步增大，直至孔压接近有效压力而液化。根据上述现象，可以看出桩距较大的砾石桩和纯砂相似，对于消散孔隙水压力的作用是不明显的，而桩距较小的砾石桩，能在孔隙水压力值增长的同时，逐渐消散一部分孔隙水压力值，致使孔压值不出现突然升高的现象，从而推迟了液化现象的出现，也就是增大了砂土的抗液化能力。

综上所述，从野外试验和室内试验都证明了碎石桩的排水效应是较明显的。

为研究振冲碎石桩的加固效果，结合唐山某工地的新建工程，在现场进行了碎石桩的野外试验研究工作，该场地地表至7米左右深度内为稍密至中密状态的中细砂层，上部以中砂为主，下部以细砂为主，地下水位为地表下1米左右，中细砂层下为3米左右厚度的粘土层，再下为粉细砂层。1976年7月28日唐山、丰南一带发生7.8级强烈地震时场地遭受了宏观9度的震害，7米深度以上的饱和砂土严重液化，建筑物全部倒塌。为探讨新建工程

抗9度地震烈度的地基基础方案，在现场进行了振冲碎石桩的野外试验，探讨用振冲碎石桩法处理9度地震烈度区可液化砂土地基的可能性，以及确定振冲碎石桩的合理桩距。

现场施工采用的振冲器由潜水电机和振动器组成，电机功率为30千瓦，转速1450转/分，振动器频率1450次/分，振幅4~5毫米，振动力10吨，振冲器的外径为355毫米；高压水泵压力为4~8公斤/厘米²，流量20~30米³/小时；吊车采用15吨履带吊车。

施工过程中用电流值作为密实度控制的指标，当电流值达到50安培时，表明该深度处已经振密，振冲器可以向上提起50厘米，继续振密。

碎石桩的加固效果取决于工程的地质条件、振冲器的各项参数和施工方法，以及碎石桩的间距等。对于选用一定型号的振冲器和一定的施工方法来加固某种地基时，碎石桩的间距大小将直接影响加固效果，所以根据具体工程的地质条件来确定碎石桩间距，将是地基抗震设计中的重要环节。由于目前常用的确定碎石桩间距的方法都存在一定的缺陷（此问题将在后面讨论），故采用通过现场试验确定桩距的方法，其具体做法是在现场有代表性的场地上施工若干组包含不同桩距的实体碎石桩，分别测得经不同桩距碎石桩加固后砂层中的标准贯入锤击数N值，用此实测N值与砂土液化临界N'值进行比较，采用符合N≥N'时的桩距为设计桩距。砂土液化临界标贯N'值可由我国《工业与民用建筑抗震设计规范》（TJ11—78）所建议的方法确定即：

$$N' = N' [1 + 0.125 (d_s - 3) - 0.05 (d_w - 2)]$$

式中：N'——饱和砂土所处深度为d_s，室外地面到地下水位距离为d_w时，砂土液化临界贯入锤击数；

N'——当d_s = 3米，d_w = 2米时，砂土液化临界贯入锤击数；设计烈度为7度、8度、9度时，其数值分别为6、10、16；

d_s——饱和砂土所处深度（米）；

d_w——室外地面到地下水位距离（米）。

在现场共施工五组不同桩距的碎石桩，其桩距分别为2.0、2.5、3.0、3.5和4.0米，每组分别由7根碎石桩组成，呈等边三角形布置，如图8所示。碎石桩的加固效果通过加固前后的标准贯入锤击数N值的对比来评价，试验结果如表3所示。如将地震烈度为9度时的砂土液化临界标准贯入锤击数作为评价的依据，则从图9可见，碎石桩的间距为2米、2.5米和3米时，加固后砂层中的标贯值较加固前有较大幅度的提高，而且均大于9度临界标贯值。桩距为3.5米和4米时，加固效果不太显著。因此选用2.5米作为设计桩距，并已在该工程中采用。由此可见，采用一定桩距的振冲碎石桩处理可液化砂土地基，能够满

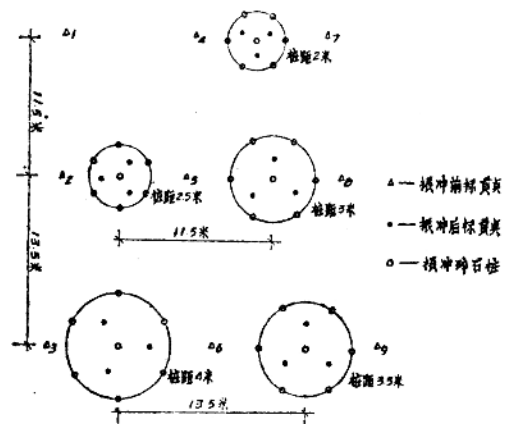


图8 碎石桩的的布置

足9度地震烈度区的抗液化要求，并具有显著的加固效果。

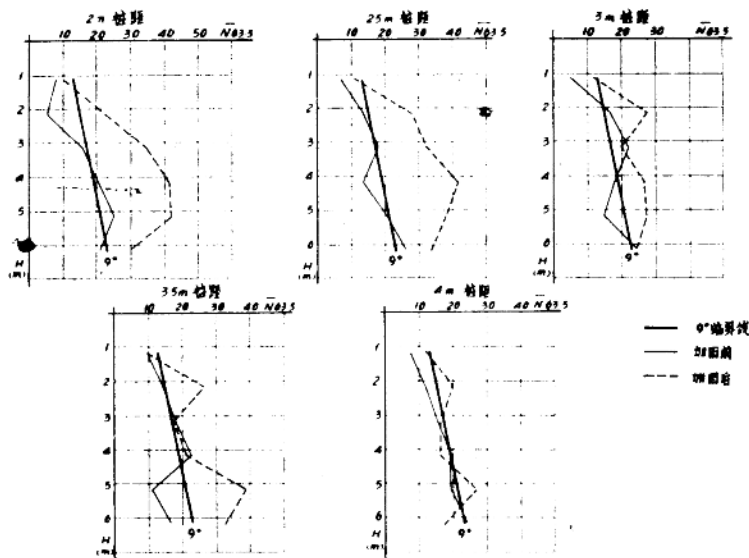


图9 不同桩距碎石桩地基加固前后标贯值对比

加固前和加固后标贯值对比

表3

深度(米)	2.0		2.5		3.0		3.5		4.0	
	加固前	加固后	加固前	加固后	加固前	加固后	加固前	加固后	加固前	加固后
0.85~1.30	8.0	10.0	7.0	11.5	5.0	12.0	9.5	9.5	7.5	12.5
1.85~2.30	5.5	—	13.5	28.0	17.0	27.5	14.5	26.5	12.0	20.0
2.85~3.30	16.0	34.5	18.0	32.5	22.0	20.0	18.0	17.5	15.5	16.5
3.85~4.30	20.5	41.5	13.5	41.5	18.0	26.5	22.5	21.5	19.0	16.5
4.85~5.30	25.0	42.0	20.5	38.0	15.0	27.5	11.0	39.0	19.5	27.0
5.85~6.30	21.0	29.5	26.0	33.5	24.5	24.5	16.5	32.5	24.0	17.5

三、振冲碎石桩地基抗液化设计中的几个问题

(一) 回填料的选用

碎石桩填料的选择是振冲碎石桩设计中的重要环节。填料选择是否恰当，不仅与碎石桩的质量和加固效果有紧密的联系，而且直接影响工程造价。为保证碎石桩的质量和加固效果，填料的选择一般应满足下列要求：(1) 应尽可能选择比重较大、颗粒较粗的材料，根据目前我国常用振冲器的机型和功率，填料的粒径一般不宜超过50毫米，填料比重太小或颗粒太细，施工时因喷射水向上流的影响，填料不易下沉；(2) 填料比较纯净，含细粒杂质较少，以保证碎石桩的良好透水性；(3) 填料颗粒有足够的强度，在外

荷载作用下不致压碎；(4)填料应有较好的水稳性和抗腐蚀性，长期浸泡在地下水中不致软化或崩解。在满足上述要求的情况下，填料的选择应尽量做到就地取材，以减少运输费用和劳力。采用原地基的砂料作为填料，可以节省运输费用，但往往因颗粒过细，施工时难于下沉。一般来说，粗砂、砾砂、碎石、卵石、以及矿碴等工业废料均是良好的填料。

为解决大量废弃的煤干石用作碎石桩填料的可能性问题，曾在现场进行了试验，所用的煤干石经过筛洗。图 10a 为用碎石作为填料，桩距 2 米的碎石桩地基加固前和加固后的标贯值随深度的分布曲线；图 10b 为用煤干石作填料的相同桩距的加固前和加固后的标贯值分布曲线，从两者对比中不难看出，用煤干石作填料与用碎石作填料的碎石桩其加固效果大致相同。至于图 10b 中深度为 2 米以上的部位加固后的标贯值反而较加固前为低的原因，主要是因试验场地地表覆有 1 米多厚的煤干石层，施工前曾在振冲点周围将地表煤干石层挖除，形成一个小坑，施工时，当振冲器通过煤干石层附近时，为避免因振动造成大块煤干石塌落卡住振冲器，故当接近煤干石层时，振冲器提升速度过快，因而砂层未能振密。选用废弃材料或工业废料作为碎石桩的填料，无疑将使振冲碎石桩法的成本降低，并为废料的利用找到了新途径，无论从经济角度或环境保护角度来看都是有重要意义的。

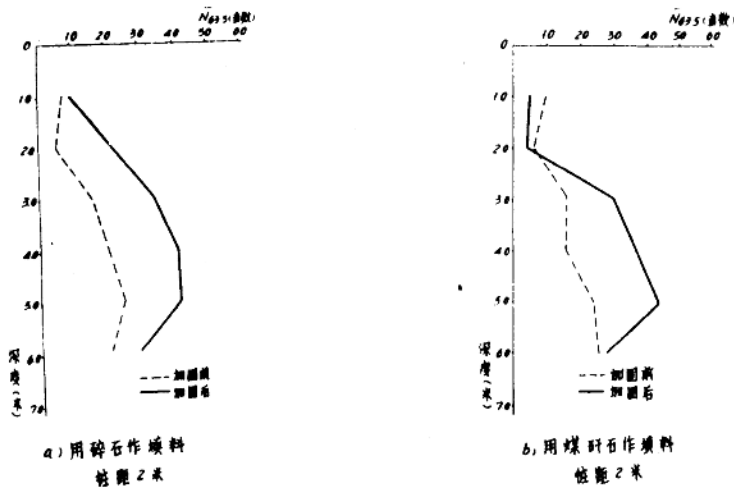


图10 用碎石和煤干石作填料的对比

从碎石桩抗液化能力来分析，要求碎石填料具有良好的透水性，以保证在地震荷载作用下，砂层内产生的孔隙水压力能及时消散。西特等⁽¹⁾曾对填料渗透性作了理论分析，认为假若排水桩的渗透性为砂的200倍，则排水桩能理想地起作用，并认为对大多数砂来说，自中到细的砾石将为排水桩提供满足要求的填料。贾斯廷等⁽²⁾提出土的 D_{20} 与渗透系数 K 之间可以表示为下述经验关系：

$$K (\text{厘米/秒}) = 77 (D_{20})^{2.32}$$

此处 D_{20} 是累积百分数为20%时的粒径以厘米计。

另一经验关系是由哈曾所提出

$$K (\text{厘米/秒}) = 100 \sim 150 (D_{10})^2$$

此处 D_{10} 是累积百分数为10%时的粒径，以厘米计。

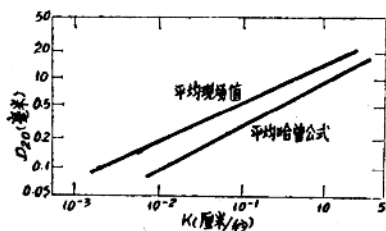


图11 砂粒大小与渗透系数的关系

假定均匀系数 $C_u = 1.5$ ，则 D_{20} 约比 D_{10} 大10%上式就可改写为：

$$K (\text{厘米/秒}) = 85 \sim 130 (D_{20})^2$$

由贾斯廷公式表示的现场平均值的关系和由均匀松砂资料获得的计算关系（改写后的哈曾公式）均示于图11中。

在缺乏现场资料的情况下，上述经验公式可以作为估算砂层和填料渗透性的参考。

(二) 碎石桩间距的确定

对于砂性土地基来说，确定碎石桩间距大致有下列几种方法：

1. 控制孔隙比的方法：

(1) 根据加固前三角形ABC中土颗粒所占的体积等于加固后三角形ABC中阴影部分土颗粒所占的体积（见图12）得出，即：

$$\frac{\sqrt{3} L^2}{4} \frac{1}{1+e_0} = \left(\frac{\sqrt{3} L^2}{4} - \frac{\pi d^2}{8} \right) \frac{1}{1+e'}$$

由此得间距L

$$L = 0.952d \sqrt{\frac{1+e_0}{e_0-e'}}$$

式中：d——桩径；

e_0 ——土的天然孔隙比；

e' ——加固后土的孔隙比。

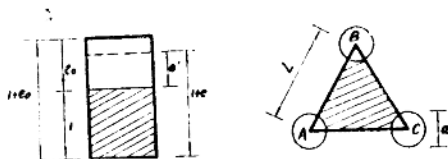


图12 控制孔隙比方法的示意

(2) 根据地基加固后所要求达到的孔隙比与地基每单位体积所需的回填料数量之间的关系确定桩距(3)：

$$V = \frac{(1+e_1)(e_0-e')}{(1+e_0)(1+e')}$$

式中：V——原地基单位体积所需填料的数量（米³/米³），

e_0 ——原地基的孔隙比；

- e_1 ——回填料的孔隙比；
- e' ——地基加固后要求的孔隙比。

则桩距L可按式确定：

$$L = \alpha \sqrt{\frac{S}{V}}$$

式中： α ——系数，正方形布置时为1，三角形布置时为1.075。

S——桩体单位长度可能回填的填料量（米³/米）。

V——原地基单位体积所需的填料数量（米³/米）。

2. 经验的方法：

(1) 影响系数法 达阿波罗尼亚采用30马力型振冲器进行了现场试验^[4]，提出了振冲器对周围土的加密效果随距离不同可用一影响系数来表示，并认为几个振冲点对同一点的影响系数可以叠加，影响系数与距振冲点距离和相对密度的关系如图13所示。

(2) 桑尔伯提出了三角形布置振冲点的中心处砂土的相对密度与振冲点间距之间的经验关系，如图14所示^[5]。

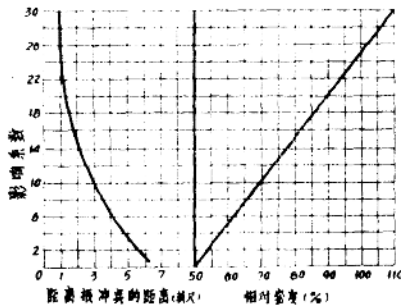


图13 达阿波罗尼亚的影响系数

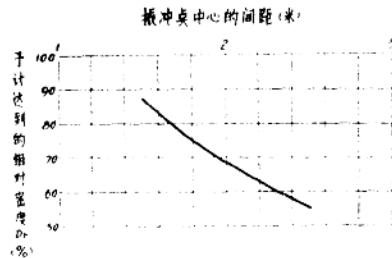


图14 砂土相对密度与振冲点间距的关系

(3) 习惯用法 日本习惯采用碎石桩间距为1.2~1.5米（其常用振冲器功率为15马力，振冲器外径为319毫米）饭田康幸认为如果基底压力是10吨/米²，碎石桩间距可采用1.5米，如基底压力是15吨/米²时，可采用1.0~1.2米^[6]。国内不少单位习惯采用碎石桩间距为1.5~2.0米（常用振冲器电动机功率为30千瓦）。

3. 考虑孔隙水压力消散的方法

西特等推导出的一维竖向排水孔压消散的方法推广到三维排水的情况，根据达赛定律，并假定渗透系数和压缩系数都是常数，问题就变成径向对称。另外考虑砂层的水平渗透性往往大于竖向渗透性，故只考虑单纯的径向排水时，三维情况下的基本方程就简化为：

$$K_h \gamma_w m_{vs} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) = \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial u_s}{\partial N} \frac{\partial N}{\partial t}$$

上式中 K_h 为水平向渗透系数，由现场抽水试验确定； γ_w 为水的容重； m_{vs} 为体积压缩

系数，由三轴试验确定； $\frac{\partial u_e}{\partial N}$ 由不排水试验确定； $\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{N_{e.g}}{t_d}$ （其中 $N_{e.g}$ 为等效循环数， t_d 为地震历时）。为实用目的，给出了一系列关系曲线⁽¹⁾。

上述各种方法是从不同角度出发来考虑桩距的，因而都有各自的适用范围，在选择这些方法来确定振冲碎石桩的间距时，除了其现实可能性外，还必须从振冲碎石桩的抗液化机理来进行分析。控制孔隙比的方法，考虑了碎石桩的挤密作用，但是没有考虑振冲器的振密作用，另外此法以孔隙比作为主要参数，由于采取饱和和原状砂样的问题至今尚未得到圆满解决，所以此法在实用上存在一定的困难。

经验的方法，大多是根据现场经验而来的，故对于某种特定型号的振冲器来说，是考虑了振冲器的某些参数（如振动力、振动频率等）对加固效果的影响。但是由于地质条件的差异，土的原始相对密度的不同或施工方法的差别，加固效果就会不同。这些因素在经验方法中都没有加以考虑。再者桑尔伯提出的相对密度与振冲点间距之间的经验关系，其中相对密度的确定同样依赖于现场孔隙比的准确测定，故在实用上同样存在着一定的困难。

考虑孔隙水压力消散的方法，虽然考虑了碎石桩的排水作用，但是没有考虑振冲器的振密作用；其次此法所用的计算参数，如渗透系数 K 、体积压缩系数 m_{v3} 等的确定均需专门试验设备；再者，此法计算结果尚有待工程实践的检验。

本报告上节中提出的采用现场试验确定桩距的方法，由于试验是在施工现场有代表性的场地上进行的，因而试验结果能够反映地质条件、振冲器的各项参数和施工方法等对加固效果的影响。另外由于采用标准贯入锤击数 N 值作为评价加固效果的指标，这样就能使影响液化的主要因素，如砂的相对密度、砂层结构、有效复盖压力、静止侧压力系数等均能通过标准贯入锤击数 N 值反映出来，特别是目前我国在采取原状砂样技术还未得到圆满解决的情况下，标准贯入试验是能反映砂土天然状态的一种较好的方法。而且这与目前国内采用标贯值来评价砂土液化的方法取得了一致。所以在目前缺少适用计算方法的情况下，通过现场试验确定桩距的方法是比较实用和可靠的。另外从经济上进行分析，如以前述工程为例，通过现场试验确定的桩距为 2.5 米，而按照目前国内习惯用法桩距为 1.5~

2.0 米，前者与后者相比，桩的数量至少节省了近三分之一。

必须指出，在采用现场试验方法确定桩距，或对振冲碎石桩地基的加固效果进行评价时，以加固后碎石桩之间砂土的实测标贯值 N' 必须大于或等于砂土液化临界标贯值 N'_l 作为选择桩距或进行评价的依据，看来是不够合理的。因为正如前述，振冲碎石桩的加固效应，主要是加密（包括挤密和振密）效应和排水效应，采用

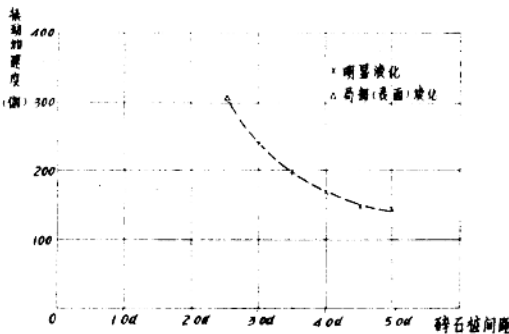


图15 振动加速度与碎石桩间距的关系

$N \geq N'$ 作为选择桩距和进行评价的依据, 只考虑了振冲碎石桩的加密效应, 而忽略了碎石桩的排水效应, 因而是偏于过分安全的。

为探讨不同桩距碎石桩的排水效应, 曾采用前述方法在振动台上进行了不同桩距比碎石桩的模拟试验, 试料采用通县细砂, 各个试验所用砂样的初始相对密度和液化时振动加速度值如表 4 所列, 试验结果如图 15 所示:

不同桩距砾石桩液化时振动加速度值

表 4

试 验 类 别	纯 砂	砾 石 桩 桩 距					
		5.0d	4.5d	4.0d	3.5d	3.0d	2.5d
砂样初始相对密度 D_r (%)	46.3	38.6	45.1	42.3	50.4	41.8	43.7
液化时台加速度值(伽)	100	150	150	175	200	250	300*

* 局部液化

从表 4 和图 15 可见, 各个试验砂样的相对密度相差不多, 但液化时的振动加速度值却相差甚大, 纯砂的液化加速度值为 100 伽, 桩距为 5.0d 和 4.0d 砾石桩的液化加速度值为 150 伽, 而桩距为 2.5d 的砾石桩, 当加速度值达到 300 伽时, 仅在表面约 3~4 厘米深度处发生局部液化, 当加速度值达到 400 伽时, 局部液化的深度约为 5 厘米, 当加速度值达到 500 伽时局部液化区的深度并没有发展。桩距大于 4.0d 的砾石桩其液化加速度值虽比纯砂为高, 但增加的幅度并不大; 桩距为 3.5d 和 3.0d 时液化加速度值增加的幅度就较明显; 当桩距为 2.5d, 液化加速度值增加的幅度就更大了。由此可见, 保持一定桩距的砾石桩的排水效应是很显著的。

柳堀义彦等⁽⁷⁾在振动砂箱中进行了山砂与砾石桩组成的复合地基(桩的面积占 17%)与纯山砂地基液化特性的对比试验, 试验结果显示, 当加速度为 250 伽时, 复合地基的临界相对密度 D_r 为 46%, 对应的纯山砂的临界相对密度 D_r 为 66%, 复合地基与纯山砂相比其临界相对密度 D_r 可以降低 43%, 这同样说明砾石桩的加固效果较为显著。

综上所述, 在采用现场试验决定桩距的方法时, 有必要考虑碎石桩的排水效应来修正单纯考虑加密效应所获得的桩距, 以便使工程设计能做到在保证安全的前提下, 更趋经济和合理。

(三) 碎石桩的布置

碎石桩常采用等边三角形或正方形布置, 由于振冲器在上中传播的振动能量与距离的平方成反比, 加固效果是随距离增加而逐渐衰减的, 为了与邻近振冲点的加密效果重合, 一般采用等边三角形布置较好, 如采用前述达阿波罗尼亚影响系数法来估算, 则在获得相同加密影响系数的情况下, 按等边三角形布置的桩数将比正方形布置的桩数少。

关于建筑物基础外碎石桩的布置, 国外有些资料提到建筑物外的加固宽度约为加固深度之半。国内不少工程也按此设计加固宽度。这样对于建筑物面积较小, 而地基需要加固的深度较大的情况, 则建筑物基础范围外碎石桩的数量将超过基础范围内碎石桩的数量, 对于一般房屋来说, 基础范围外碎石桩的数量也相当可观, 如以 40 米长 10 米宽的住宅建筑为

例，若加固深度为8米，碎石桩呈正三角形布置，桩距为2米，则建筑物范围内的碎石桩数为144根而建筑物基础范围外的桩数却达126根，占建筑物范围内桩数的87.5%，由此可见，讨论和研究建筑物范围外碎石桩的布置问题，则将有很大的实际意义。

为此曾在前述振动砂箱中进行了模拟试验，砂样采用唐山中砂，厚度为31厘米，在砂箱中部设置桩径为32毫米，间距8厘米、长31厘米的碎石桩，桩呈正方形布置，桩数分别为16根、36根、64根、和无碎石桩等四种情况，桩上设置24×24厘米的压板，压板底面的压力为0.013公斤/厘米²。试验开始时输入频率为2赫兹的正弦波，振动加速度75伽，振动时间为半分钟，以后每级增加加速度25伽，当桩周砂样发生液化时，暂停加载，待砂样沉

