

编号	90-2583-5
张数	
归档日期	

建筑科学研究报告

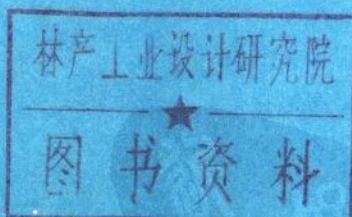
REPORT OF BUILDING RESEARCH

1984

No. 2-2

强夯法处理可液化砂土地基的 试验研究

Treatment of Liquescent Sandy Soil
Foundations by Dynamic Consolidation 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

本文介绍采用强夯法处理可液化砂土地基的试验研究工作概况,提出了强夯法是处理可液化砂土地基的一项有效加固方法,可以推广应用。

文中还对强夯法加固的有效影响深度、夯击次数和夯击遍数、夯点布置、夯锤型式以及质量检验等问题进行了探讨并提出了建议。

目 录

一、前言	(2)
二、强夯法处理可液化砂土地基的加固效果	(2)
三、有效影响深度问题	(9)
四、夯击次数和夯击遍数问题	(11)
五、夯点布置问题	(15)
六、锤型问题	(19)
七、质量检验问题	(19)
八、结语	(20)
参考文献	(20)

Treatment of Liquefactive Sandy Soil Foundations by Dynamic Consolidation Method

Institute of Foundation Engineering

Zhang Yongjun Yan Guangjian Cai Zilin

Abstract

The paper introduces the general situation of experimental research work on the processing of the liquefiable sandy soil foundation with the Dynamic Consolidation Method. It has put forward an effective consolidating method in processing the liquefiable sandy soil foundation which can be popularized and applied.

In addition, the problems of the efficient effected depth, the times and cycles of ramming, the arrangement of rammed positions, the type of rammer, and the quality check have been studied and suggested here.

强夯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 杨广鉴 蔡祥林

一、前 言

强夯法自70年代由法国开发以后,目前已在很多国家获得推广应用。我国于1979年首次在河北廊坊本院机械化研究所宿舍工程中采用强夯法处理可液化砂土地基并获得成功。由于该法具有效果显著、设备简单、施工方便、适用范围广、经济易行和节省材料等优点,近几年来已在许多工程中应用。并获得较好的技术经济效果。

我院地基所自1979年开始与唐山市第一建筑工程公司、北京市机械施工公司和开滦土建工程处等单位协作,开展了强夯法处理地基的试验研究和工程实践,现将采用此法处理可液化砂土和轻亚粘土地基的试验研究概况作一总结和归纳。

二、强夯法处理可液化砂土地基的加固效果

强夯法主要是通过重锤夯击地面而产生的冲击波,使在夯锤周围一定范围内的地基土产生塑性变形,用强夯法处理可液化砂土地基,就是利用这种塑性变形,而使砂土的孔隙比减小,相对密度提高,从而增强其抗液化的能力。从以下几个工程实例中可以证实强夯法处理可液化砂土地基的加固效果。

1. 河北廊坊我院机械化研究所宿舍工程,位于9度地震区,场地地形平坦,自地表往下9米范围内大致可分为三层土:第一层为黄褐色轻亚粘土层,厚度为3.5米左右,标贯击数约4~5击,第二层为灰色亚粘土层,厚度为2~2.5米,呈软塑到可塑状态;第三层为粉细砂层,厚度大于3米,此层上部以黄色粉砂为主,下部以灰色细砂为主,标贯击数平均为13击,属稍密状态。地下水位深度约为地表下2米。根据标准贯入试验结果判定,场地在地震烈度为9度的地震荷载作用下,轻亚粘土及粉细砂层将会发生液化。为此采用强夯法进行地基处理,选用夯锤重10吨,落距9.3米,其中6号楼夯前与夯后的标准贯入试

*参加本题试验工作的尚有吕仁义、钟亮、段亚力、金谦、魏厚福、李德堂等同志。

验、轻便触探试验以及室内土分析试验结果的对比见图1和图2。从图中不难看出强夯法的加固效果是很明显的，加固效果是随着深度增加而逐渐减小。夯后地面平均下沉53.4厘米。

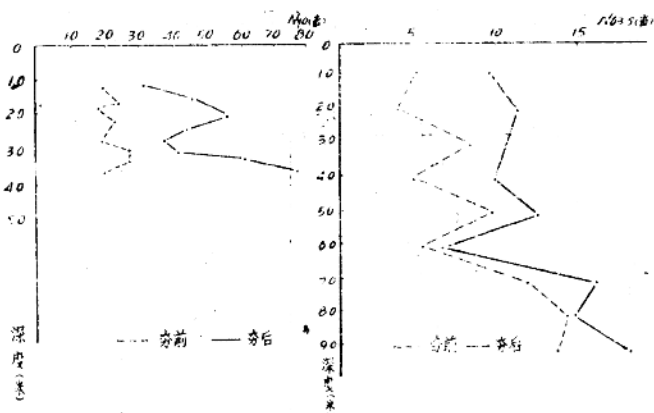


图1 廊坊住宅工程强夯前后轻便触探和标准贯入击数的对比

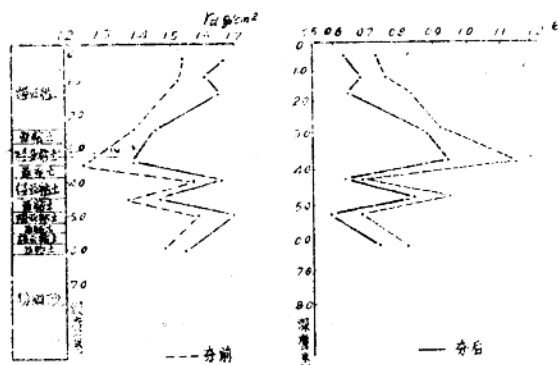


图2 廊坊住宅工程强夯前后干容重和孔隙比值的对比

2. 唐山河北小区住宅工程，位于八度地震区。其中3号小区地表下第一层为褐黄色轻亚粘土，呈可塑到软塑状态，厚度约6米；第二层为浅灰色亚粘土，呈可塑到软塑状态，厚度约1.5米；第三层为浅黄色饱和细砂，呈中密状态，厚度约1.5米。地下水位约为地表下3米。4号小区地表下第一层为黄褐色亚粘土，呈可塑到软塑状态，厚度约5米；第二层为黄褐色轻亚粘土，呈软塑到可塑状态，厚度约1.5米；第三层为黄褐色细砂，呈中密状态，厚度约1米；第四层为黄褐色中砂，呈中密到密实状态，厚度约3米，地下水位约在地表下5米。1976年7月28日唐山、丰南一带发生强烈地震时，场地范围内零星地分布着喷砂冒水点，砂堆高出地面0.30~0.50米左右，在沿陡河岸边曾发现地裂缝及局部下

陷，为此采用强夯法进行地基处理。夯锤重为10吨，落距10米。其中3号小区B31号楼和4号小区B69号楼夯前与夯后的标贯试验、室内土的物理力学性试验和轻便触探试验结果如图3、图4和图5所示。从上述图中可见强夯的加固效果是显著的，细砂和中砂层加固后的标贯值均已超过工业与民用建筑抗震设计规范(TJ 11—78)抗8度地震烈度的砂土液化临界贯入锤击数。强夯后的地面总下沉量，B31号楼为49.1厘米，B69号楼为56.5厘米。

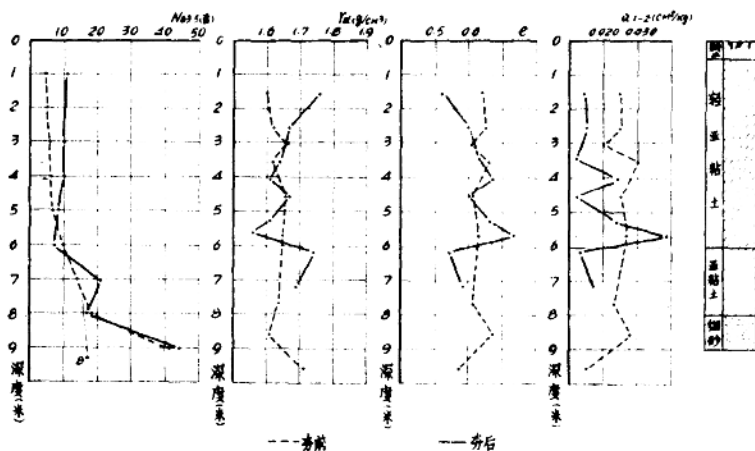


图3 唐山B31住宅工程强夯前后标准贯入、干容重、孔隙比和压缩系数值的对比

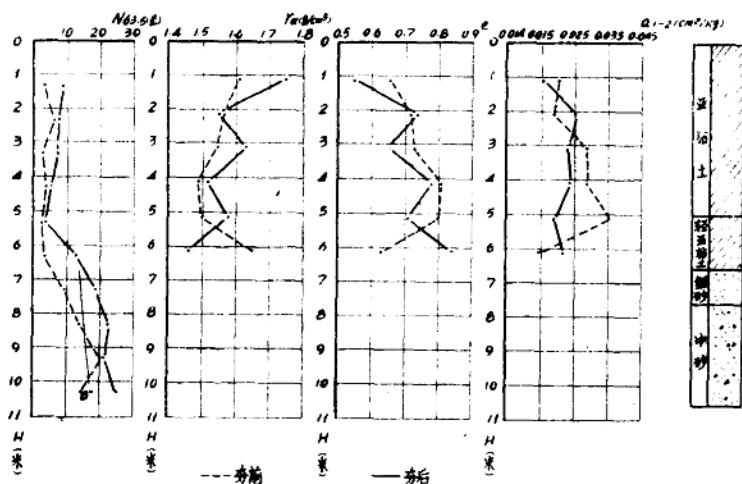


图4 唐山B69住宅工程强夯前后标准贯入、干容重、孔隙比和压缩系数值的对比

3. 北京大兴化纤厂住宅工程，位于八度地震区，场地地层自上而下可分成：第一层为风积粉砂，厚度约1米；第二层为新近代轻亚粘土，层底深度约为2.2~3.5米，呈可塑

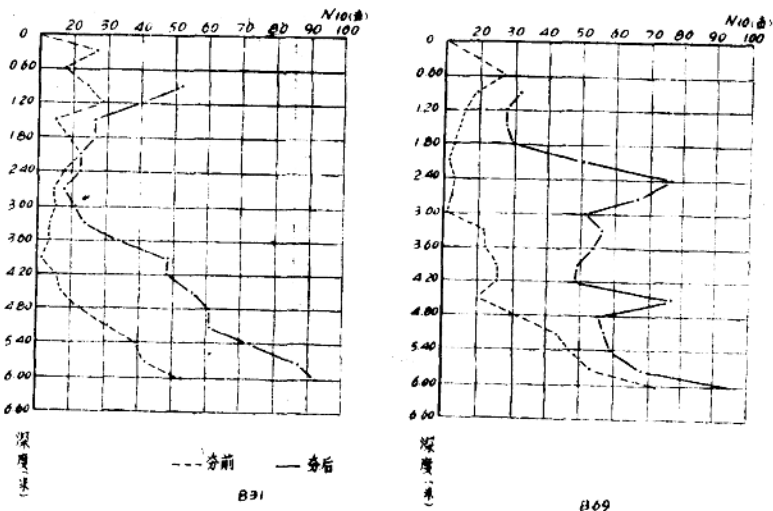


图5 唐山B31和B69住宅工程夯前后轻便触探击数对比

到软塑状态，容许承载力为11吨/米²；第三层为新近代亚粘土，层底深度约为3.5~4.5米，呈可塑到软塑状态，容许承载力为10~11吨/米²；第四层为轻亚粘土，层底深度为7.2~8.5米，呈可塑状态，容许承载力为16~18吨/米²；第五层为细、中砂，层底埋深为11.2~12.5米，呈中密状态，容许承载力为25~30吨/米²，第六层为轻亚粘土及亚粘土互层，厚度较大，容许承载力约20吨/米²。

根据标准贯入试验，静力触探试验、土的颗粒组成，埋深及地下水位等资料，判定浅层轻亚粘土有地震液化的可能，为此采用强夯法对生活区住宅工程地基进行加固，夯锤重为11吨，落距9米，其中3号楼和4号楼地基夯前与夯后室内土分析试验、静力触探试验、标准贯入试验和轻便触探试验的结果如图6~图11所示。从图6和图7可见强夯后的干容重在一定深度范围内比强夯前有明显增加，而孔隙比在一定深度范围内比强夯前有所减小。从图8~图11都说明强夯加固效果较显著。3号楼强夯后地表总下沉量为38.2厘米，4号楼为33.5厘米。

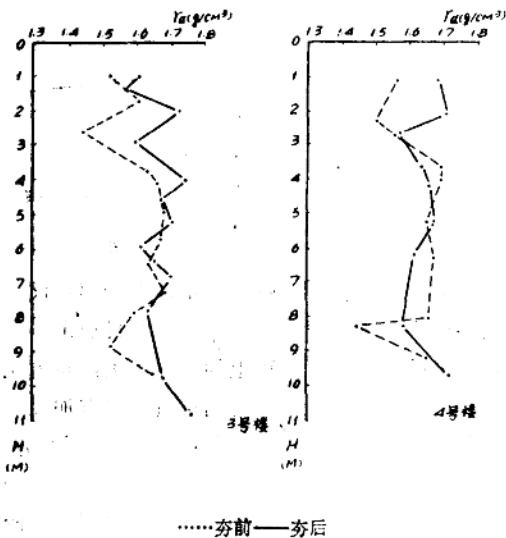


图6 大兴3号和4号住宅工程夯前后干容重值的对比

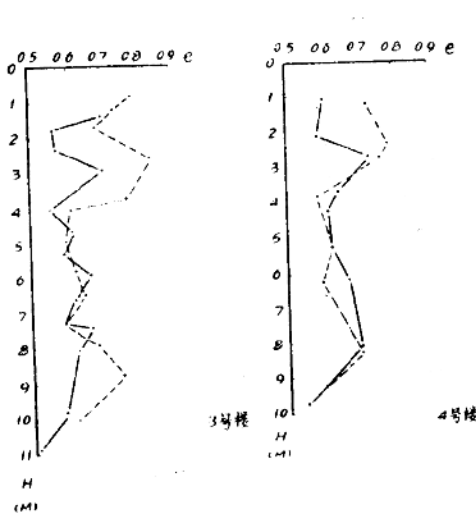


图 7 大兴3号和4号住宅工程强夯前后孔隙比值的对比

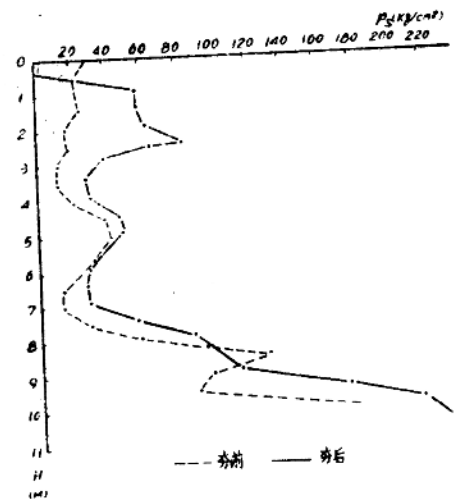


图 8 大兴3号住宅工程强夯前后静力触探击数的对比

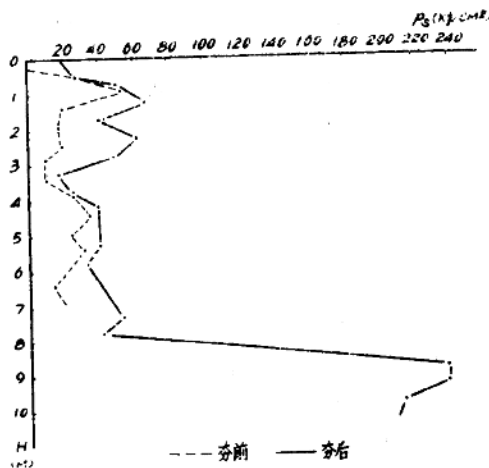


图 9 大兴4号住宅工程强夯前后静力触探击数的对比

4. 唐山 钱家营煤矿工地，位于强震区，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。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米以上的饱和砂土严重液化，建筑物倒塌，为探讨新建工程采用强夯法处理地基的可能性，在现场进行了强夯加固的野外试验，试验场地地表往下10米范围内大致可分为四层：第一层为黄色细砂层，厚度为2米；第二层为灰白色中砂层，厚度约4米；第三层为灰色细砂层，厚度为1米；第四层为轻亚粘土层，厚度为3米。地下水位约为地表下0.8米。试验分两组进行，一组采用井点降水，先将地下水位降至地表下1.5米，再进行强夯，另一组没有降水，直接在地表进行强夯。夯锤重8.25吨，落距13米。降水组强夯前

后标贯值和轻便触探值的对比如图12和图13所示，未降水组如图14和图15所示。从图中可以看出强夯的加固效果是很显著的，除了地表1米深度范围外，均满足了工业与民用建筑抗震设计规范(TJ11—78)抗8度地震烈度的要求，其中降水组还满足了抗9度地震烈度的要求。地面平均下沉量：降水组为25.3厘米；未降水组为25.8厘米。

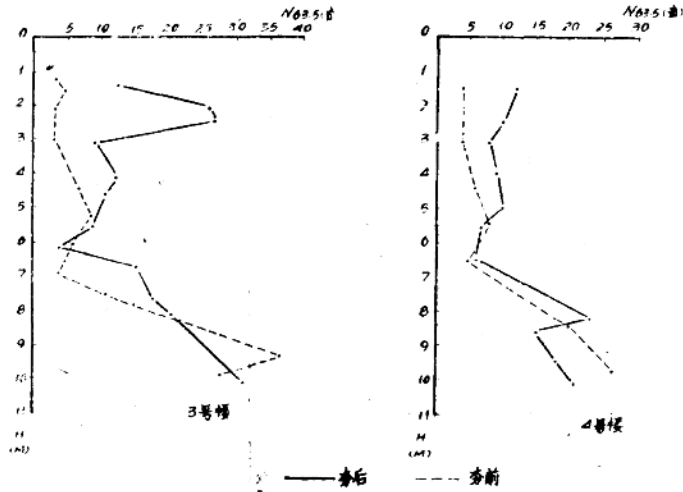


图 10 大兴3号4号住宅工程强夯前后标准贯入击数的对比

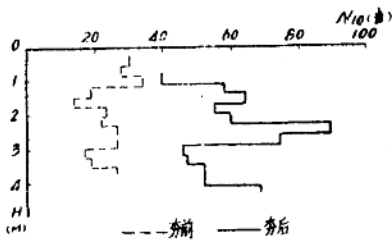


图 11 大兴3号住宅工程强夯前后轻便触探击数的对比

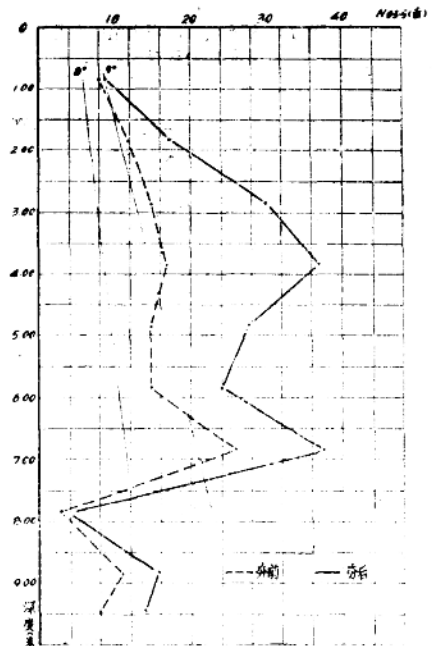


图 12 钱家营工地降水组强夯前后标准贯入击数的对比

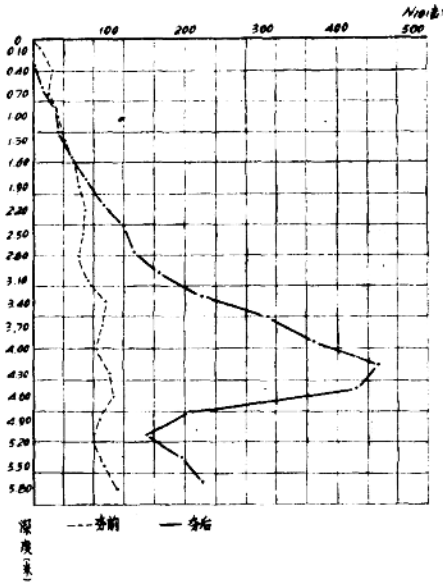


图 13 钱家营工地降水组强夯前后
轻便触击数对比

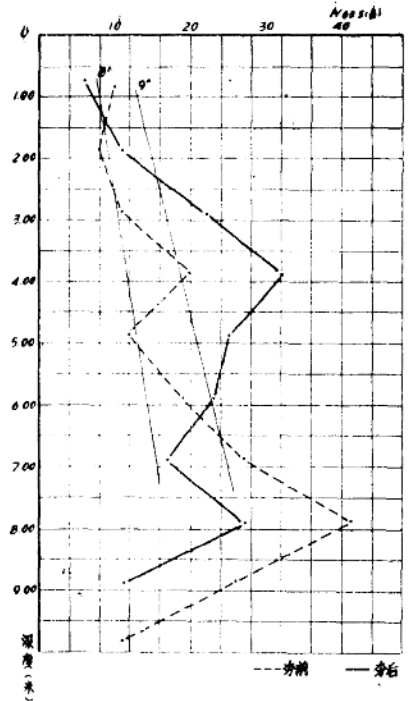


图 14 钱家营工地未降水组强夯前后
标准贯入击数的对比

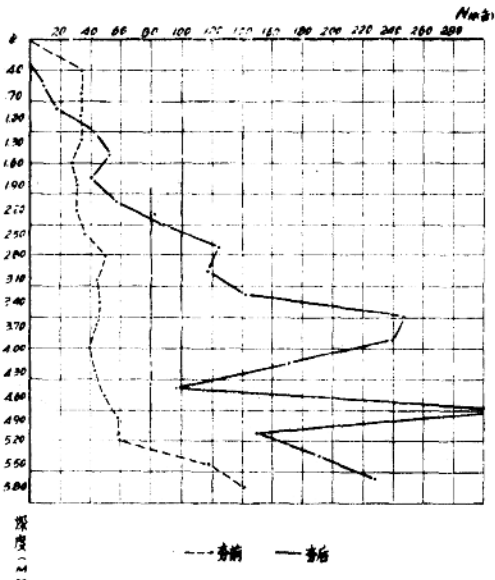


图 15 钱家营工地未降水组强夯前后轻便触击数对比

三、有效影响深度问题

在工程实践中，有效加固深度是选择地基加固方法的重要依据。对于强夯法来说，强力夯实的有效影响深度则是反应加固效果的首要参数。目前工程中普遍采用梅那公式（即 $H \approx \sqrt{Mh}$ ）⁽¹⁾来估算影响深度。关于梅那公式的适用性问题，我们曾在《强夯法加固地基中几个问题的探讨（1980年）》一文中作了初步论述。为检验梅那公式的准确性，通常采用室内土分析试验或野外标准贯入试验、静力触探试验、旁压试验等方法，对夯击前后的土性进行测定，从而确定其影响深度。但由于地基土的不均匀性，有时夯前和夯后的结果缺少可比性，为此曾采用在土体内埋设深标点的方法，分别在唐山砂土和轻亚粘土地基上进行了野外实测，其结果如图16和图17所示。上述实测结果与梅那公式估算值对比如表1所示。

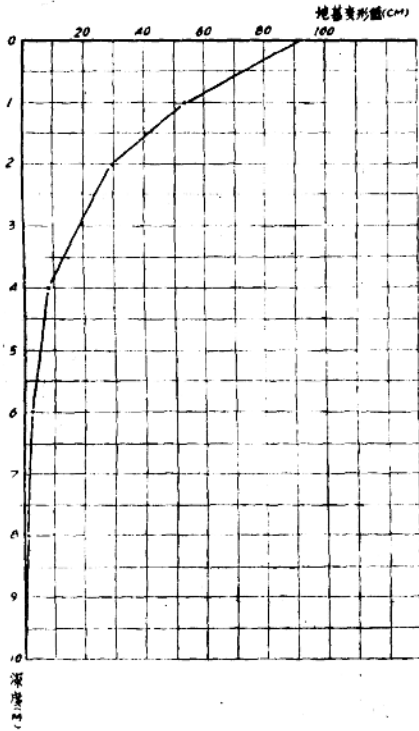


图 16 唐山住宅工程夯后地基变形分布曲线

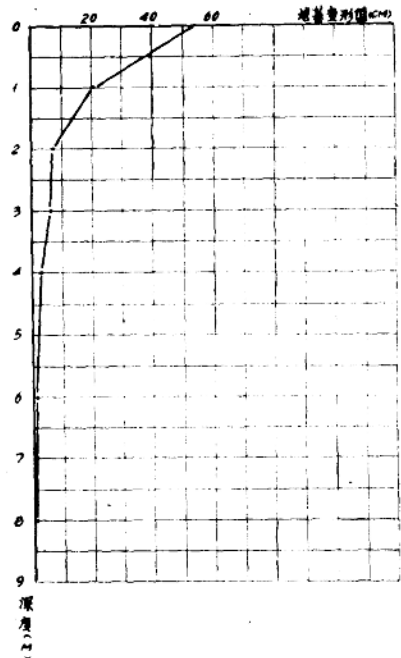


图 17 钱家营工地夯后地基变形分布曲线

从上表可知，采用梅那公式估算影响深度将会得出偏大的结果，这在工程中应予以注意。

日本坂口旭等人⁽²⁾利用能量守恒定律，假定重量为 W 的锤，从高度为 H 处落下，在土

实测值与估算值的比较

表 1

地基土类别	锤重M(吨)	落距h(米)	影响深度(米)	
			梅那估算值 $H \approx \sqrt{Mh}$	实测值
砂土	8.25	13	10.4	6
轻亚粘土	10	10	10	6

中陷入 Δh , 冲击能量为 E_0 , 效率为 η (包括振动、回弹等损耗), 则

$$E_0 = \eta WH$$

设地基的吸收能量为 E , 冲击压力为 P_0 , 锤底面积为 A , 则

$$E = 1/2 P_0 \cdot A \Delta h$$

令

$$E = E_0$$

则

$$P_0 = 2\eta WH / \Delta h \cdot A$$

将 P_0 值看作静荷载, 利用长方形荷载作用下弹性半无限体中应力与影响深度的关系, 并用旁压试验获得地基屈服强度, 由此得到影响深度。

由于此法将冲击压力看作静荷载来考虑, 与实际情况有较大的出入, 加之效率系数 η 的确定具有很大的任意性, 故此法在实用上尚存在一些问题。

近二、三年来国外有人建议对梅那公式计算值乘以 0.5 的修正系数⁽³⁾, 国内也有一些文章建议将梅那公式计算值乘以小于 1.0 的系数。从梅那公式中不难看出, 影响深度仅与锤重和落距有关, 实际上影响有效影响深度的因素很多, 除了锤重和落距以外, 地基土性质、不同土层的厚度和埋藏顺序, 地下水位以及其他强夯参数如锤底单位压力、夯击次数等等都与影响深度有着密切的关系, 其中锤底单位压力、夯击次数和地基土性质等因素尤为不可忽视。为探索不同锤底单位压力对影响深度和夯击效果的影响, 曾在唐山相同地基上进行对比试验, 具体试验情况见表 2, 试验结果如图 18 所示。

混凝土夯锤与铸铁夯锤对比试验结果

表 2

名	形 状	锤重(吨)	锤底面积(米 ²)	锤底单位压力(吨/米 ²)	落距(米)	夯击次数(次)	夯击能(吨·米)
混凝土夯锤	方 形	10	4	2.5	10	5	500
铸铁夯锤	圆 形	10	2	5	8	3	240

从图 18 中可见, 尽管铸铁夯锤的夯击能还不到混凝土夯锤的一半, 然而其有效影响深度却大于混凝土夯锤。从图 19 竖向压缩应变沿深度的分布曲线来看, 铸铁夯锤夯击后各个不同深度上的竖向压缩应变值均比混凝土夯锤的相应值为大, 故可以认为铸铁夯锤的夯击效果比混凝土夯锤为好。针对我国施工现场缺乏起吊能力大的起重机械的现状, 在某些情况下, 采用铸铁夯锤代替混凝土夯锤, 可以在不加大起重量与起吊高度的条件下, 提高夯击效果与增大影响深度, 这对于强夯法的进一步扩大使用, 将有一定的现实意义。

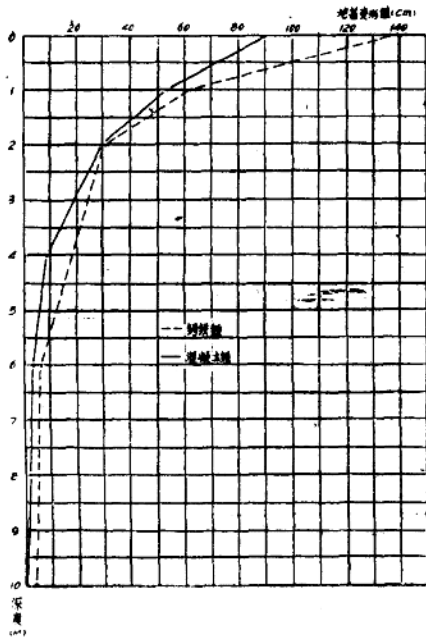


图 18 两种夯锤的地基变形分布曲线

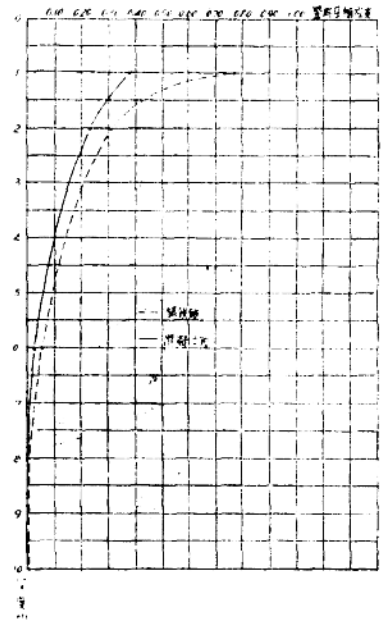


图 19 竖向压缩应力分布曲线

综上所述，有效影响深度与强夯施工工艺有密切的关系，也就是说在地质条件、锤重和落距均相同的情况下，采用不同的锤底压力或不同的夯击次数，将会得到不同的有效影响深度。所以在研究有效影响深度问题时，有必要考虑：（1）了解地质条件和各种强夯参数对有效影响深度的影响程度；（2）研究能获得最大有效影响深度的各种最佳强夯参数；（3）确定有效影响深度的确切含义及其定量指标；（4）根据不同土性分别确定有效影响深度的估算方法。

四、夯击次数和夯击遍数问题

确定夯击次数和夯击遍数是强夯施工中的重要环节。对于不同地基来说需要不同的夯击次数。夯击次数过少将会影响夯实效果，夯击次数过多，不仅会增加施工费用和延长工期，对于某些地基土来说，有时还会产生不良后果。由于目前尚缺少估算夯击次数的方法，所以一般常通过现场试夯来确定适宜的夯击次数。根据唐山、廊坊、钱家营等地砂土和轻亚粘土地基的试夯结果，夯击次数与压缩量和膨胀量之间显示出图20的关系，图中V为夯坑的体积；V'为周围地表隆起(膨胀)的体积，从图中曲线可以看到，随着夯击次数的增加，夯坑体积与压缩体积也随之增大，而膨胀体积随土性而异，有的增加，有的基本不变。

为了描述夯实效果，这里引进了有效夯实系数的概念，现以 α 表示有效夯实系数，即

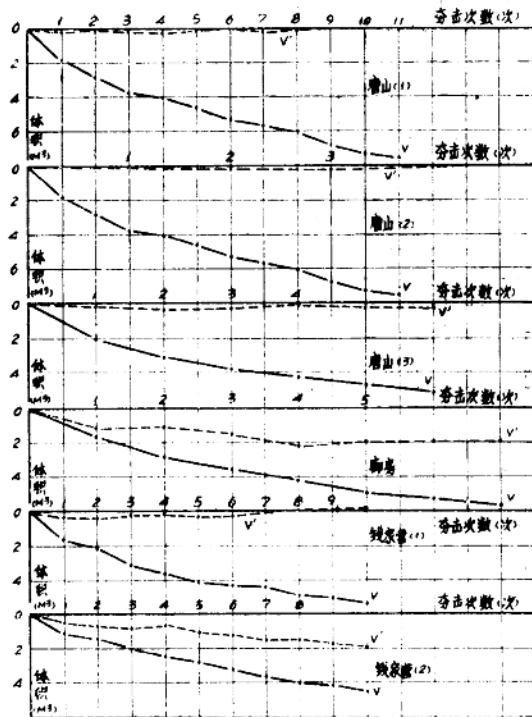


图 20 夯击次数与压缩量和膨胀量的关系

$$\alpha = \frac{V - V'}{V} = \frac{V_0}{V}$$

式中

V ——夯坑体积(米³);

V' ——膨胀体积(米³);

V_0 ——压缩体积(米³);

有效夯实系数表示地基上在某种夯击能作用下的夯实效率,有效夯实系数高,说明夯实效果好,反之,有效夯实系数低,说明夯实效果差。

上述各项工程的有效夯实系数与夯击次数的关系如图21所示,图中曲线显示有效夯实系数随着夯击次数的增加,不仅没有降低,反而略有提高。

为进一步研究夯击次数与夯实效果的关系,曾在唐山比较均匀的场地上对图22所示的五个试坑进行了不同次数的夯击,其夯击次数分别为一、三、五、七和九击。夯前和夯后的轻便触探试验结果如图23所示。由图可见,夯一击的影响深度约为2.1米,夯三击的影响深度约为2.7米,夯五击、七击和九击的影响深度约为6米,随着夯击次数的增加,夯后轻便触探击数也相应提高。

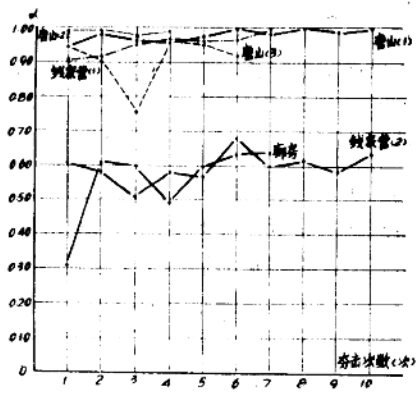


图 21 有效夯实系数与夯击次数的关系

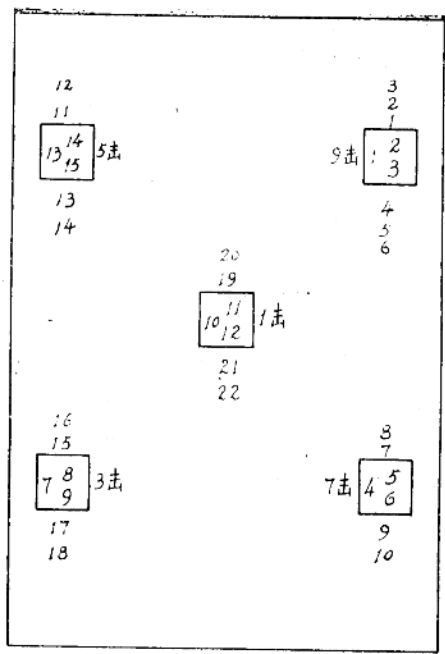


图 22 夯坑位置和轻便触探布置

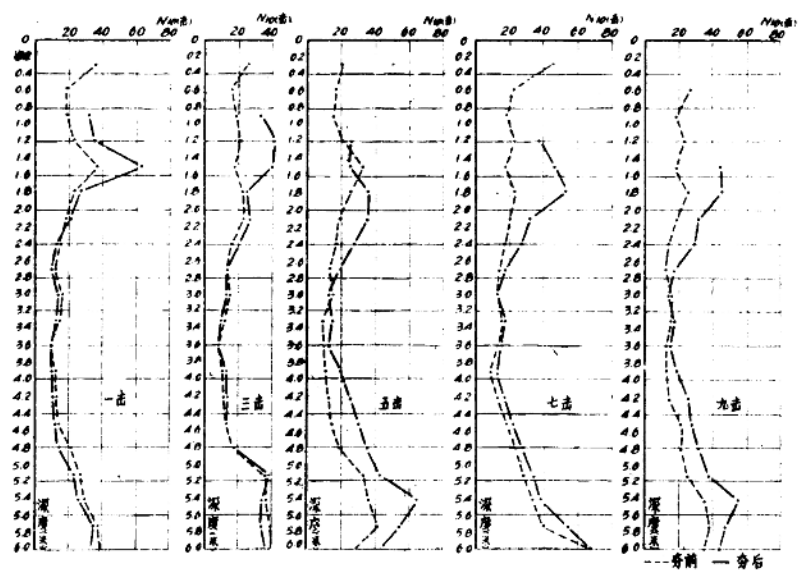


图23 不同夯击次数强夯前后轻便触探击数对比

综上所述，在工程实践中，可以采用增加夯击次数的办法来提高夯实效果。当然，在

确定实际夯击次数时，除了考虑有效夯实系数外，还应考虑施工的可能性，当出现因夯坑太深而起锤困难时，夯击次数只能视起重机的起重能力而定。

必须指出，国内有些工程，为便于施工，不采取连续夯击的方法而将已确定的夯击次数，分成二次或三次夯完，即先夯若干击后，在夯坑内铺填一定厚度的砂或砂卵石垫层，接着再夯若干击，再铺一定厚度的垫层，然后再夯剩余的击数。这种分次夯击的方法，随着垫层铺填次数增加，消耗在垫层夯密过程中的能量就越多，传到下层土上的能量就相应减少，所以其夯实效果不如一次夯成的夯击方法为好。

关于夯击遍数问题，目前国内常采用的夯击遍数，一般为三、四遍，其中前二、三遍为“间夯”，最后一遍为低能量的“满夯”。采用这样的夯击遍数一般都能取得较好的夯击效果，但从强夯法的施工实践来看，应尽可能减少夯击遍数，因为两遍之间都需要有一定的间歇时间，以利孔隙水压力的消散，所以夯击遍数越多，工期越长，占用机械的时间也越长，施工费用就相应提高，这在只有一项单体工程施工的情况下尤为突出。为达到减少夯击遍数的目的。应根据地基土的性质适当加大每遍的夯击能，亦即增加每夯点的夯击次数，以便在减少夯击遍数的情况下能获得相同的夯击效果。根据前述几个工程的实践来看，在一般情况下，夯击三遍已经足够了，在某些情况下，夯击二遍也未尝不可。如唐山某锅炉房工程，采用了一遍间夯和一遍满夯，夯后用轻便触探进行检验，效果尚好，如图24所示。

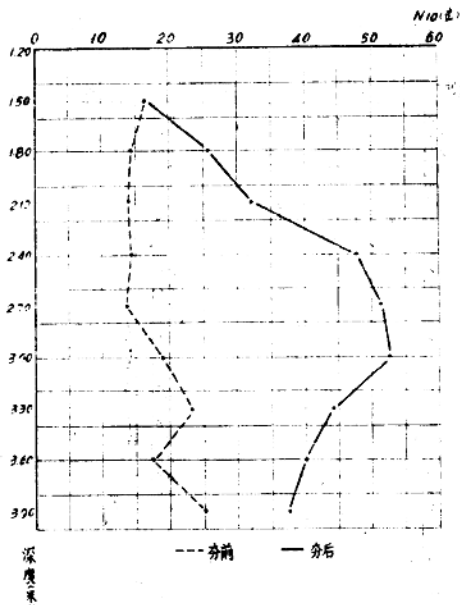


图 24 某锅炉房工程强夯前后轻便触探击数的对比

至于两遍之间的间隔时间，应随地基土的性质和排水条件不同而异，一般可根据现场试夯决定。对于超孔隙水压力容易消散的砂土地基来说，两遍之间的间隔时间可以缩短，