

# 对砂垫层地基强度和沉降的评定分析

张聚山

宋雅涵

(土建系)

## 提 要

本文针对砂垫层回填施工质量控制,提供了简易可行之现场测试手段,并就砂垫层设计方法作了理论分析和工程实践;文中所推荐之砂垫层地基强度和变形的计算方法和公式,明确、简单且概念清楚;不采用单一指标,而采用多种指标,综合评价地基土加固后之承载力,为本工程鉴定砂垫层质量标准之特点。

**关键词** 地基处理 砂垫层 强度和变形

当建筑场地内遇到局部软弱土层及暗塘、暗沟、古河道、古墓、人防工事及地下构筑物时,中、小型工程较普遍地采用砂垫层地基。

某校教学楼场地,由于拆除人防工事和柱基结构物,地基土扰动深达四米之多。该楼房上部结构为七层框架结构,选用柱下钢筋混凝土条形基础,对此,拟定采用中砂垫层回填。其压实机械为200公斤硅夯和平板震动物。依据本文观点,经现场测试,确定砂垫层容许承载力14吨/米<sup>2</sup>左右,予估基础沉降量约2.61厘米,基本上满足设计要求。

有关砂垫层压实质量之现场控制、软弱下卧层强度验算及地基变形计算等问题,目前尚无统一方法及系统的文献资料,针对本工程结合一些局部换填工程经验,进行调查研究,现场实施,经分析探讨结果如下:

## 一、砂垫层压实质量的控制

“地基和基础工程施工及验收规范”GBJ17—66,对砂垫层质量要求标准提出:垫层材料宜选择颗粒级配良好、质地坚硬的中砂、粗砂、砾砂、卵石或碎石(直径不大于5厘米),其含泥量不宜超过3%,含粉砂量不大于25%,而且要求垫层材料内不得含有草根、垃圾和杂物等。砂垫层的密实度应达到中密状态,其干容重对于中砂要求在1.6吨/米<sup>3</sup>以上,而对粗砂则适当提高。压缩后孔隙比 $e \geq 0.65$ 或压实系数 $D_y \geq 0.90 \sim 0.93$ ,相应之压缩模量为240~300公斤/厘米<sup>2</sup>。

为鉴定本工程砂垫层回填质量能否达到上述标准,建议采用下述检查方法进行现场测试:

- 1.炒干法测定含水量,灌砂法测定干容重。
- 2.用容积不小于200立方厘米的环刀取样,测定其湿容重和干容重。
- 3.用小型锤击贯入器(如图1所示)测定锤击数或用直径16毫米、长1950毫米的平头钢

筋, 自由下落50厘米的贯入深度来检查。

4. 经工程地质勘察部门作标准贯入试验 $N_{63.5}$ , 轻便触探试验 $N_{10}$ 或静力触探试验作质量鉴定。

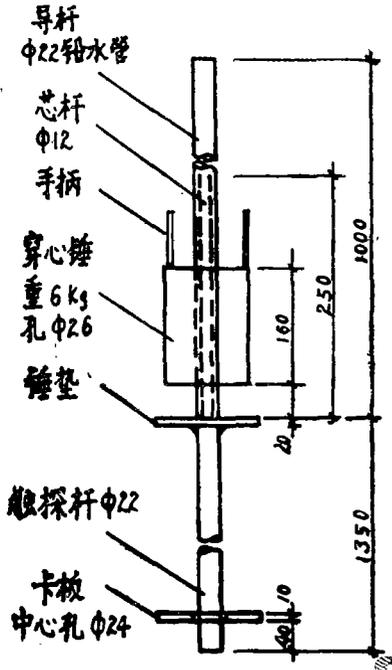


图1 小型锤击贯入器(单位mm)

5. 现场载荷试验, 采用压重法, 荷载板为0.5米×0.5米之方形板, 人工加载。

由于本工程砂垫层回填面积较大, 采用灌砂法检查干容重时, 其试验工作量大, 不能适应速度施工之要求, 又因该工程属中型且砂垫层厚度不太大, 作触探试验鉴定要请勘察部门测试, 且不便随时指导现场施工, 所以决定选用环刀取样, 钢筋贯入, 小型锤击贯入器, 静载荷试验检查评定。其测定结果为: 湿容重 $r$ 为1.8~1.9吨/米<sup>3</sup>, 干容重 $r_d$ 为1.55~1.75吨/米<sup>3</sup>, 若最大干容重 $r_{dmax}$ 取1.85吨/米<sup>3</sup>, 含水量 $W$ 控制在13~15%时, 其压实系数 $D_y$ 为0.86~0.94, 压实后孔隙比 $e$ 在0.65左右; 钢筋贯入深度约6厘米左右, 小型锤击贯入器贯入10厘米时, 第一层7—10击, 第二层9—14击, 第三层10—12击, 根据上述测定结果, 按经验确定砂垫层容许承载力多在14吨/米<sup>2</sup>左右, 压缩模量为240公斤/厘米<sup>2</sup>。

## 二、砂垫层地基应力分布研究

砂垫层地基建造成败, 应严格控制两方面, 一方面是砂垫层本身的强度和变形, 这主要应控制回填压实质量达到设计要求, 施工时切不可疏忽大意, 认真把关。另一方面是下卧层强度和沉降的验算, 常常是设计时之控制条件。为进行砂垫层地基强度和变形的计算, 首先要确定垫层底面处的应力分布值, 有关应力计算方法有:

方法 I: 砂垫层地基属于局部换填的双层地基, 如在岩层上做褥垫, 荷载作用下将发生

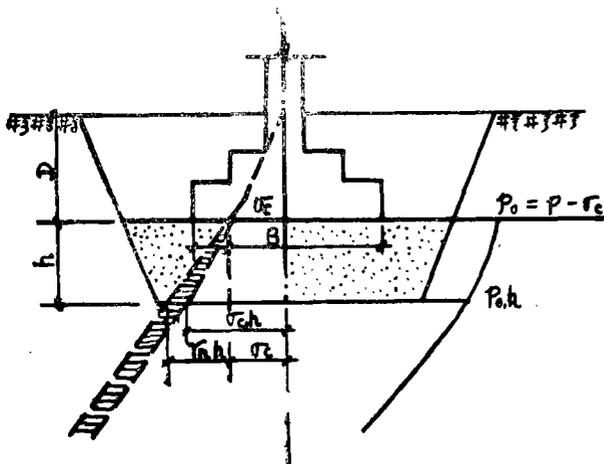


图2 附加应力与自重应力曲线

应力集中现象; 或软弱土层上作砂垫层时则发生应力扩散现象。目前尚无较严密的理论计算方法, 一般说来, 软弱土层上的砂垫层的应力扩散程度与砂垫层厚度, 双层地基的变形模量和泊松比有关, 其附加应力分布见图2。

方法 II: 不考虑砂垫层对土中应力分布之影响, 按均质弹性地基考虑, 采用弹性理论导出之公式计算附加应力, 一般由“地基及基础”教科书中所载表格可查。

方法 III: 为了简化起见, 实用上

常采用应力扩散角之概念来计算，即根据扩散前后总压力相等之条件可求得软弱层顶面处的应力。设计垫层时有两种假定，一种假定垫层是地基的一部分，即由基底附加压力  $P_0$  扩散至垫层底面处（方法Ⅲ<sub>a</sub>）；另一种是假定垫层为基础的一部分，把垫层底面作为建筑物的“新基础”底面，即由基底压力  $P$  扩散（方法Ⅲ<sub>b</sub>），见图3所示。

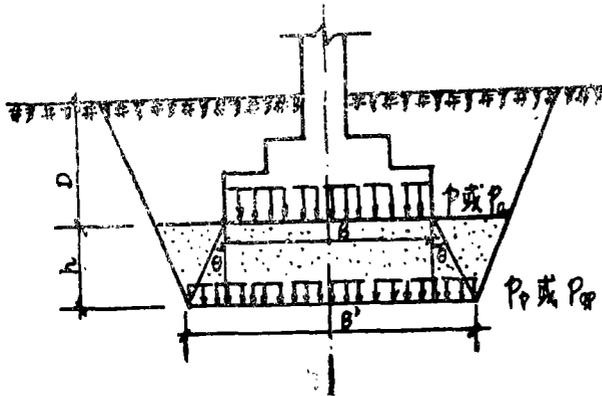


图3 应力扩散计算图

两种假定计算结果有所差异，以条形基础为例，将计算公式说明如下：

设基底压力（垫层顶实际压力）为  $P$ ，则基底附加压力（垫层顶处附加压力）为  $P_0$ ，那么按垫层为地基的一部分之假定时，其应力分布计算公式为：

$$P_{0,h} = \frac{P_0 B}{B'} = (P - \sigma_c) \frac{B}{B'} \dots\dots\dots (1)$$

$$P' = \sigma_c + r_a h + (P - \sigma_c) \frac{B}{B'} \dots\dots\dots (2)$$

$$P_{0,h} = (P - \sigma_c) \frac{B}{B'} + (r_a - r) h \dots\dots\dots (3)$$

式中： $P_{0,h}$ ——基底附加压力  $P_0$  扩散至垫层底面处时的扩散后压力。

$P'$ ——垫层底面处之实际压力。

$P_{0,h}$ ——垫层底面处之附加应力。

$B$ ——条形基础之宽度。

$B'$ ——扩散后之宽度，其  $B' = B + 2htg\theta$

$h$ ——砂垫层之厚度。

$r_a$ ——砂垫层之容重。

$r$ ——砂垫层厚度范围内相应之天然土层容重。

$\theta$ ——压力扩散角。当垫层材料为碎石、粗砂，中砂时  $\theta = 30^\circ$ ，其它比较细的材料可取  $\theta = 22^\circ$ 。

$\sigma_c$ ——基础底面处的土自重应力。

对于矩形基础，应同时考虑矩形基础长边  $A$  和短边  $B$  二者方向的扩散，其扩散后之面积  $F'$  为：

$$F' = (A + 2htg\theta) (B + 2htg\theta)$$

对于垫层假定为基础的一部分时，计算公式如下：

$$P_p = \frac{PB}{B'} \dots\dots\dots (4)$$

$$P' = \frac{PB}{B'} + r_n h \dots\dots\dots (5)$$

$$P_{0,h} = \frac{PB}{B'} + r_n h - \sigma_{c,h} \dots\dots\dots (6)$$

式中：P<sub>p</sub>——基底压力P扩散至垫层底处时的扩散后之压力。

σ<sub>c,h</sub>——垫层底处原天然土层的自重应力。其它符号同上。

现将四种方法计算结果汇总于表1进行分析评价。

表1 应力计算结果表

计算方法	方法I	方法II	方法Ⅲa	方法Ⅳb
应力种类				
P'(T/m <sup>2</sup> )	16.51	14.56	12.80	11.49
P <sub>0,h</sub> (T/m <sup>2</sup> )	9.9	7.96	6.26	4.94

按双层地基计算附加应力时，其计算参数难测定，难取值，且参数变动范围较大，所以计算结果差别显著，同时计算也繁，因此仅在垫层厚度较大，且下卧层土质软硬程度相差甚大时，采用此法计算意义较大。对二者土层指标相近时，宜按均质地基采用方法Ⅱ计算，而工程上为计算简单起见，常采用方法Ⅲ，针对分析问题的性质，其方法Ⅲa、Ⅲb都有采用，通过下面强度和变形之问题分析即可了解。

### 三、软弱下卧层强度的验算

砂垫层的厚度应满足作用在砂垫层底面处（软弱下卧层顶面处）的自重应力与附加应力之和不大于软弱土层的容许承载力。

按双层地基计算（方法I）为：

$$P' = \sigma_c + r_n h + P_{0,h} = 16.50 \text{ 吨/米}^2 \leq R_{D+h}$$

按均质地基计算（方法II）为：

$$P' = \sigma_c + r_n h + P_{0,h} = 14.50 \text{ 吨/米}^2 \leq R_{D+h}$$

按基底附加压力扩散计算（方法Ⅲa）为：

$$P' = \sigma_c + r_n h + \frac{P_0 B}{B'} = 12.80 \text{ 吨/米}^2 \leq R_{D+h}$$

上述三种方法是从地基中应力分布之观点出发，保证软弱层顶面处的实际应力值不超过土的强度，并有一定的安全贮备。

按基底压力扩散计算（方法Ⅳb）为：

$$P' = \frac{PB}{B'} + r_n h = 11.49 \text{ 吨/米}^2 \leq R_{D+h} \text{ 或 } P1/4 \text{ 式中：} R_{D+h} \text{ 为软弱下卧层地基土的容许承}$$

载力, 但需经深度修正, 本工程之轻用粘土I之 $R_{D+b}$ 值为16.50吨/米<sup>2</sup>。

P1/4为塑性区开展之界限荷载。

方法Ⅲ<sub>b</sub>是保证“新基础”底面处(垫层底面处)塑性变形区开展深度不超过基础宽度的四分之一。

从上述四法强度验算数值大小分析, 方法Ⅲ<sub>a</sub>计算简单, 概念清楚, 数值适中, 所以已列入地基基础规范中, 而且工程上常采用此法。

### 四、砂垫层地基沉降计算

砂垫层地基的沉降量S的计算, 可分为两个部分组成, 一部分为砂垫层本身的压缩量 $S_a$ , 另一部分为下卧土层的沉降量 $S_v$ 。即:

$$S = S_a + S_v \quad \dots\dots\dots (7)$$

其中砂垫层本身压缩量 $S_a$ 的计算, 目前尚无统一方法, 因砂性土透水性强, 在不长的时间内即可完成压缩, 所以砂性土地基的初始沉降与固结沉降已混在一起分不开来, 多数主张采用弹性理论公式计算, 但弹性模量值确定较困难, 工程上常采用静力触探和标准贯入试验换算之压缩模量, 用经验半经验方法进行估算, 见于此情况, 砂垫层本身的压缩量计算, 应以室内侧限压缩试验的压缩量基本公式为依据的计算公式, 即:

$$S_a = \frac{\bar{P}_a}{E_s} h \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中:  $E_s$ ——砂垫层之压缩模量, Kg/cm<sup>2</sup>。

$h$ ——砂垫层厚度, cm。

$\bar{P}_a$ ——砂垫层内的平均压力, Kg/cm<sup>2</sup>。

依据上述观点, 应力数值采用方法Ⅲ<sub>b</sub>结果为好,

$$\text{所以 } \bar{P}_a = \frac{1}{2} (P + P') = \frac{1}{2} (P + \frac{PB}{B'} + r_a h)$$

第二部分下卧层的沉降量 $S_v$ 的计算, 采用“工业与民用建筑地基基础设计规范”TJ7-74所推荐之方法, 根据正常固结土产生沉降之原因为附加应力所引起, 应力数值采用方法Ⅲ<sub>a</sub>结果为好, 故:

$$S = m_s S' = m_s \sum_{i=1}^n \frac{P_0}{E_{si}} (Z_i C_i - Z_{i-1} C_{i-1}) \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中:  $m_s$ ——沉降计算经验系数。

$n$ ——地基压缩层范围内所划分之土层数目。

$P_0$ ——垫层底面处的附加应力 (kg/cm<sup>2</sup>)。

$$P_0 = (P - \sigma_c) \frac{B}{B'} + (r_a - r) h$$

$E_{si}$ ——垫层底面下第 $i$ 层土的压缩模量 (kg/cm<sup>2</sup>)

$Z_i, Z_{i-1}$ ——分别为垫层底面至第 $i$ 层, 第 $i-1$ 层底面的距离。(cm)

$c_i, c_{i-1}$ ——分别为垫层底面第*i*层和第*i-1*层底面范围内的平均附加压力系数，由扩散后宽度*B'*和深度*Z<sub>i</sub>*确定。

本工程土层分布情况及计算指标；基础及垫层尺寸；应力分布数值见表2及图4。

表2 计算指标采用值

土层 指标	I轻亚粘土	II轻亚粘土	III轻亚粘土	IV细砂
压缩模量 $E_s$ ( $kg/cm^2$ )	140	68	154	204
容许承载力[R] ( $kg/cm^2$ )	1.4	1.2	1.5	1.6

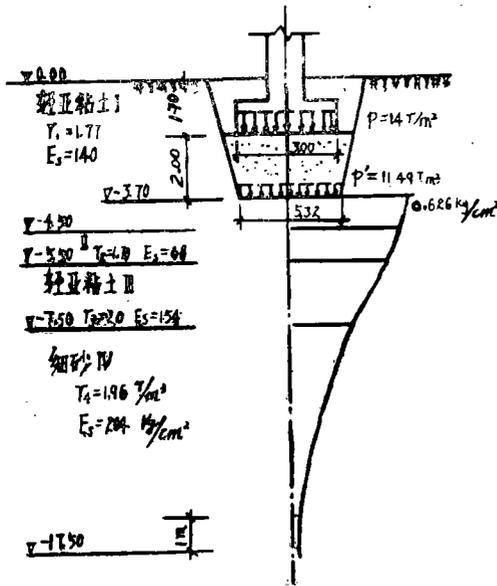


图4 沉降量计算图

按上述方法，计算结果为：砂垫层本身压缩量 $S_n$ 为1.06厘米，软弱下卧层沉降量为1.55厘米，压缩层厚度为13.8米，其砂垫层地基的总沉降量为2.61厘米。由上面计算结果和压缩层厚度进行分析，无异常现象，且压缩层厚度接近条形荷载主要受力区范围（15米左右）。其变形分开计算，符合实际应力分布情况，而下述方形载荷板应力影响范围仅在砂垫层内部，用其分析砂垫层地基沉降，与实际情况差别较大，故仅用来控制砂垫层质量鉴定为好。

### 五、砂垫层变形模量 $E_0$ 的测定

由于砂垫层原状砂样难取易扰动，故采用现场简易静载荷试验测定其变形模量。载荷板选用方形板近2500平方厘米，荷重选用1、2、

3、4、5吨几个等级，由于加载台仅有0.5米高，所以用人工可自由加载（铁锭），采用百分表量测位移，其结果还是令人满意的，而计算公式为：

$$E_0 = (1 - \mu^2) \frac{P}{S \cdot d} \dots\dots\dots (10)$$

式中： $E_0$ ——变形模量 $kg/cm^2$ 。

$P$ ——承压板上总荷载， $kg$ 。

$S$ ——与荷载 $P$ 相应之沉降量， $cm$ 。

$d$ ——承压板的面积换算成相应的园面积的直径。

$$d = 2\sqrt{\frac{F}{\pi}}$$

，本试验取 $d = 55.78cm$

$F$ ——承压板的面积，本试验 $F = 2444cm^2$

$\mu$ ——砂垫层的泊松比，取 $\mu = 0.3$

试验成果见表3及图5。

表 3 变形模量E<sub>0</sub>测定成果表

荷重 (kg)	1000	2000	3000	4000	5000	备注
压力 (kg/cm <sup>2</sup> )	0.409	0.818	1.227	1.636	2.046	
压板沉降量 (cm)	0.0985	0.1585	0.2285	0.2745		①处
	0.0520	0.1338	0.1740	0.2280		②处
	0.0540	0.0760	0.1230	0.1400	0.1840	③处
变形模量E <sub>0</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	165.6	205.8	214.2	237.7		①处
	376.5	243.8	281.3	286.2		②处
	362.5	429.1	397.9	466.7	443.3	③处

注：第三次试验E<sub>0</sub>值偏大，其原因在于仅在试验处反复夯打结果所致，无代表性，应删掉。

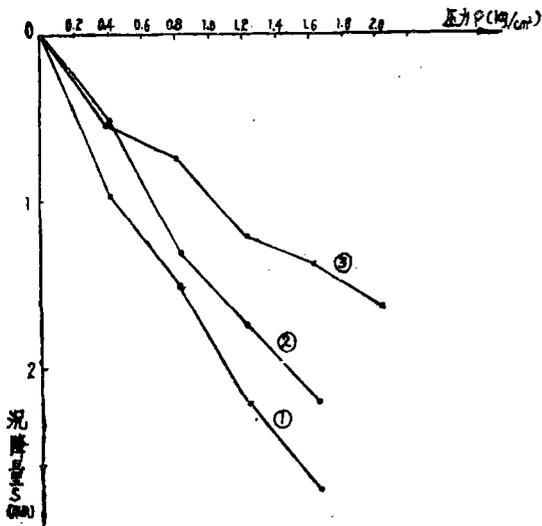


图5 P-S曲线

沉降计算中所需砂垫层压缩模量E<sub>s</sub>值可根据变形模量E<sub>0</sub>选择，但二者之间相关系数变动范围很大，选择时应慎重考虑。

按理论公式推导结果为： $\beta = \frac{E_0}{E_s}, \beta \leq 1, E_0 \geq E_s$ 。

其结论说明在侧限条件下，压缩量小。而按静力触与E<sub>0</sub> (E<sub>s</sub>)相关分析的经验关系为： $K = \frac{E_0}{E_s}, K = 0.93 \sim 10$ ，

多数E<sub>0</sub> > E<sub>s</sub>。上述二者相互矛盾，其原因解释不一，前者理论上合理，而后者已经工程实践，笔者认为问题存在于搞清相关机理之差别，特别应研究静力触探机理，室内与现场试验的准确程度，才会得出统一的解释及经验相关系数。

多数E<sub>0</sub> > E<sub>s</sub>。上述二者相互矛盾，其原因解释不一，前者理论上合理，而后者已经工程实践，笔者认为问题存在于搞清相关机理之差别，特别应研究静力触探机理，室内与现场试验的准确程度，才会得出统一的解释及经验相关系数。

### 结 论

现在该楼房主体工程已完工，其现场测试鉴定成果和上述设计原理之理论分析，基本得到工程实践，比较其它局部砂垫层工程，可得出下面结论：

- 1.本工程对砂垫层压实质量采用之检查手段，能有效地控制施工质量，并建议今后应采用灌砂法测定干容重配合环刀法测定，提高量测数据之准确性。笔者现已试图改制灌砂法测量设备，已达加快量测速度之目的，同时对粗砂、砾砂，卵石或碎石垫层，着手于塑料薄膜

袋装水之现场坑测。故本文所提供之检查方法,在工程上是切实可行的,并可节约现场测试之费用,其设备简单易筹备。同时建议用含水量指导现场施工,合理选定虚铺砂土厚度、压实遍数、压实机械设备。

2. 本文提出的砂垫层地基强度验算及沉降计算公式,部分是引用基础设计之原理而来,其结果符合理论分析,而且概念清楚,计算简便,可供设计者选用。

3. 简易现场载荷板试验测定变形模量及选择压缩模量之指标数据,有一定的工程参考价值,可用来鉴定砂垫层容许承载力和进行变形分析。对重要工程还要进一步用载荷板沉降估算地基沉降,并通过荷载和沉降量关系曲线,来确定砂垫层之承载力,对工程和理论研究具有重要意义。

由于时间和力量之不足,试验数据较少,应用于工程实践之局限性等情况所致,会有不足和错误之处,希望给予指正。

### 参 考 文 献

- (1) 华南工学院等四院校编“地基及基础”,1981年。
- (2) 天津大学等四院编“地基与基础”,1978年。
- (3) 《工程地质手册》编写组“工程地质手册”,1982年。
- (4) 《建筑施工手册》编写组“建筑施工手册”,1981年。
- (5) R. Whitlow “Basic Soil Mechanics”, 1983年。

## STUDIES ON STRENGTH AND SETTLEMENT OF SAND CUSHION

Zhang Ju-Shan Song Ya-Han

### Abstract

The paper not only discusses the construction quality control of backfill of sand cushion, but also provides the simple in-situ test method and deals with the theoretical analysis for its design. The calculating method and the concerning formulas for sand cushion design which is recommended in the article are very simple and clear, at the same time their concept is distinct. The authors adopt more parameters which can be evaluated the bearing capacity after stabilization.

### Key Words:

Ground Treatment; Sand Cushion; Strength and Dformation;