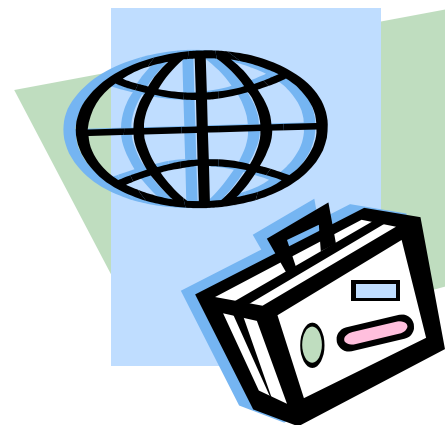


# 软土地基沉降计算



# 主要内容

- § 1 天然地基沉降计算
- § 2 复合地基沉降计算
- § 3 桩基沉降计算
- § 4 排水固结沉降计算

- 地基沉降是土力学中的重要研究课题之一。自从Terzaghi (1923年) 的一维固结理论问世以来，地基沉降的理论研究已取得了长足的进展，并且在工程建设中发挥了巨大的指导作用。然而，从工程建设的发展与要求来看，还需对现有的地基沉降计算理论作进一步的研究和改进。

- 由于软土地基的压缩性高，渗透性低，固结变形持续时间长，所以，软基沉降量及其速率的预估就成了工程设计中的主要问题。随着我国基本建设的发展，在软土地区兴建公路、铁路、水利、建筑、机场以及码头等项目将会日益增多，并对地基沉降估算要求也不断提高。因此，革新或改进估算地基沉降的计算方法具有重大学术价值与社会效益。

## § 1 天然地基沉降计算

- ✓ 分层总和法：
  - 土层不均匀
  - 应力不均匀
  - 天然地基土一般都是不均匀的，性质不同的土层，成层地相互重叠着。就是遇到均一土层，随着深度的变化，土的某些物理力学指标也在改变。要计算地基沉降，最好把土层分成许多薄层，分别计算每个薄层的压缩变形量，最后叠加而成总沉降。这是一种近似算法，叫分层总和法。

## (1) 基本假设

地基是均质、各向同性的半无限线性变形体，可按弹性理论计算土中应力；在压力作用下，地基土不产生侧向变形，可采用侧限条件下的压缩性指标；在一定均匀厚度土层上施加连续均布荷载，竖向应力增加，孔隙比相应减小，土层产生压缩变形，没有侧向变形。**-对于路基中心下土层，较为接近。**

为了弥补假定所引起误差，取基底中心点下的附加应力进行计算，以基底中点的沉降代表基础的平均沉降。

## (2) 计算步骤

1) 根据地层剖面图把地基分成薄层，每薄层的厚度不超过 $0.4b$ ， $b$ 为基础宽。如有不同性质的土层（包括重度、压缩性质有变化者），不论多薄，也要单独分层。

2) 计算各薄层分界面上的原存压力（土自重压力），按下式计算：

$$q_{zi} = \gamma h + \sum_{j=1}^i \gamma_j h_j$$

- 
- 3) 计算基底净压力。按基底平均接触压力，  
式中， $\gamma$ 为基底以上土平均重度；H为基础埋深； $p_0 = p - \gamma H$ 为基础总荷载。
- 4) 计算基础中心垂线上各薄层分界处的附加应力。按布辛纳斯克公式求解。



## 5) 确定地基沉降计算深度：

一般取附加应力与自重应力的比值为20%处，即 $\sigma_z=0.2\sigma_c$ 处的深度作为沉降计算深度的下限；对于软土，可取 $\sigma_z=0.1\sigma_c$ 处，若沉降深度范围内存在基岩时，计算至基岩表面为止。

## 6) 计算深度以上各薄层的平均原存压力和平均附加压力，得土层总应力平均值：

$$\bar{\sigma}_{zi} = \frac{1}{2}(\sigma_{z(i-1)} + \sigma_{zi})$$

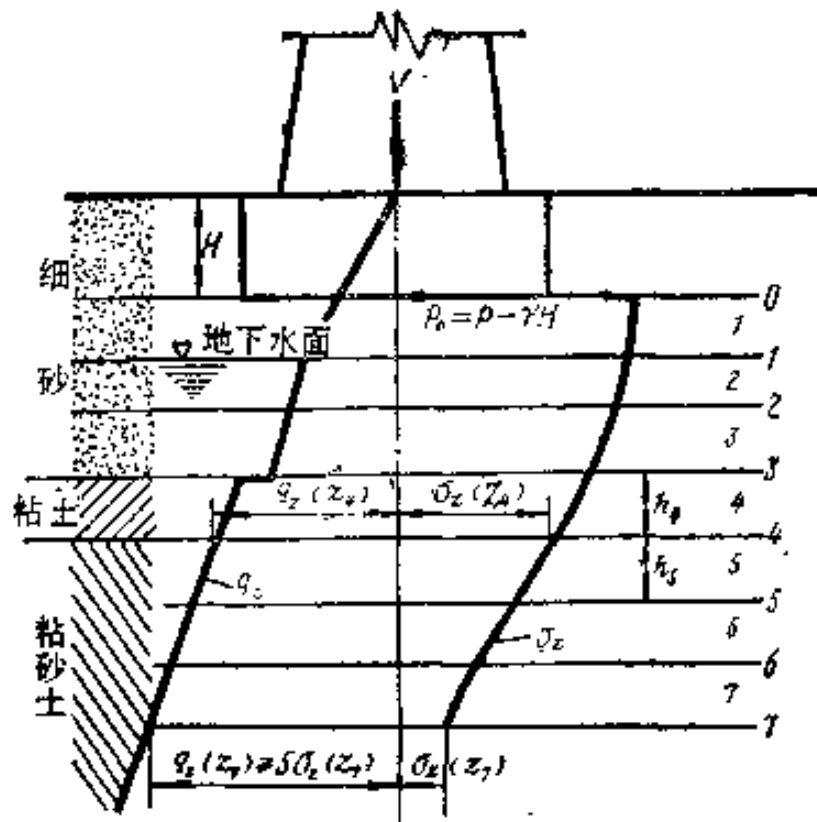
## 7) 计算各分层沉降量:

根据自重应力、附加应力曲线、e-p压缩曲线计算任一分层沉降量:

$$\Delta s_i = \frac{e_{1i} - e_{2i}}{1 + e_{1i}} h_i$$

## 8) 计算基础最终沉降量:

$$s = \sum_{i=1}^n \Delta s_i$$



## 分层总和法计算地基沉降

## § 2 复合地基沉降计算

复合地基是指在地基处理过程中，部分土体得到增强或被置换，或在地基中设置加筋材料，**加固区**是由基体和增强体两个部分组成的人工地基；在荷载作用下，基体与增强体共同承担荷载的作用。因此，复合地基既不同于天然地基，也不同于桩基。绝大多数地基处理方法形成的人工地基属复合地基。

## 加固区的沉降计算

沉降量的计算包括**加固区沉降**的计算和**下卧层沉降**计算两个部分，复合地基总沉降量是以上两种沉降量的和。复合地基沉降量的计算对于复合地基设计具有十分重要的意义，沉降量分析的可靠程度不仅取决于计算方法的好坏，还取决于复合地基参数的准确性。

加固区的沉降计算一般有复合模量法、应力修正法和桩身压缩量法。计算下卧层沉降一般采用分层总和法进行，其附加荷载的计算有应力扩散法、等效实体法和改进Geddes法。

复合模量法的原理是将复合地基加固区的增强体和基体两个部分视为一个复合体，采用复合压缩模量 $E_c$ 表征复合土体的压缩性，采用分层总和法计算其复合地基加固区压缩量。计其时，按照地基的地质分层情况，将地基分成若干层，用下式计算地基加固区的沉降量(也称压缩量)：

$$S_1 = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta p_i}{E_{cs}} h_i \quad E_{cs} = mE_{ps} + (1-m)E_{ss}$$

式中， $S_1$  —加固区的沉降量；

$\Delta p_i$  —附加应力增量；

$h_i$  —分层厚度；

$E_{ps}$  —桩体压缩模量；

$E_{ss}$  —桩间土压缩模量；

$m$  —复合地基置换率；

$n$  —分层总数。

复合地基置换率： $m = \frac{A_p}{A}$

式中： $A_p$  —单桩面积；

$A$  —桩周复合土体单元面积。

## 应力修正法

应力修正法的基本思路是，认为桩体和桩间土体压缩量相等，计算出桩间土的压缩量则可以得到复合地基的压缩量。在计算桩间土的压缩量时，忽略桩体的作用，根据桩间土分担的荷载，以桩间土的压缩模量，按分层总和法计算。其公式如下：

$$S_1 = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta p_{si}}{E_i} h_i = \mu_s \sum_{i=1}^n \frac{\Delta p_i}{E_{si}} h_i \quad \mu_s = 1/[1 + m(n-1)]$$



式中， $\Delta p_i$  —天然地基在荷载  $p$  作用下第  $i$  层土上的附加应力增量；

$\Delta p_{si}$  —复合地基中第  $i$  层桩间土的附加应力增量；

$u_s$  —应力修正系数（反映桩间土分担应力比例的系数）；

$n$  —桩土应力比；

$E_{si}$  —第  $i$  层桩间土的压缩模量。

## 桩身压缩量法

桩身压缩量法的基本思路是：计算出桩身的压缩量和桩身刺入下卧层的量就可以得到地基整体的压缩量。用公式表示为：

$$S_1 = S_p + S_c$$

式中： $S_1$  —加固区的沉降量；

$S_p$  —桩身压缩量；

$S_c$  —桩身刺入下卧层的量。

桩身压缩量由作用在桩身上的荷载和桩身的变形模量来计算，即

$$S_1 = \int_0^l \frac{p_p(z)}{E_p(z, p)} dz + S_c$$

式中， $l$  为桩长。

只要通过桩上荷载、桩身摩阻力和桩端端承力就可以得到桩身应力，从而可以得到复合地基沉降量计算的公式。

桩身压缩量法需要计算桩身的应力，但是桩身应力计算牵涉到摩阻力的分布、端承力的大小以及桩顶应力等极难获得的量值，即使在最为简单的情况下，如假设摩阻力均匀分布和端承力为零的情况，也要牵涉到计算桩土应力比 $n$ 值， $n$ 值也不易获得。应力修正法计算简单，但存在三个缺点：一是计算时需要桩土应力比 $n$ ，而该值很难确定；二是计算中忽略了桩体的存在，无法反映桩体对桩间土的约束作用，因此计算出的压缩量值比实际偏大；三是认为桩身与桩间土压缩量相等，这实际隐含有一个假定，即基础为刚性，在桩顶面桩土变形协调。因此在实际工程中加固区的沉降量一般用复合模量法来计算。

## 下卧层的沉降计算

下卧层的沉降量通常采用分层总和法计算：

$$S_2 = \sum_{i=1}^n \frac{\overline{\sigma_{zi}}}{E_{si}} h_i$$

式中， $S_1$  — 下卧层的沉降量；

$\overline{\sigma_{zi}}$  — 第  $i$  层土的平均附加应力；

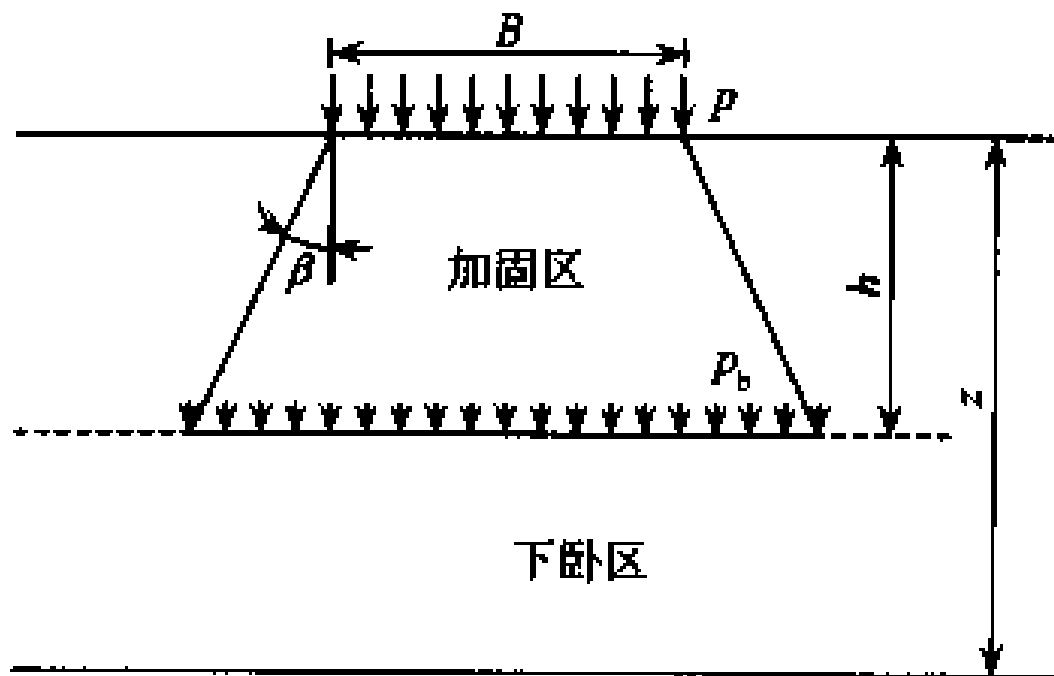
$E_{si}$  — 第  $i$  层土的压缩模量；

$h_i$  — 第  $i$  层土的厚度。

其附加荷载的计算有应力扩散法、等效实体法和改进Geddes法。

## 应力扩散法

按照弹性理论地基附加应力按一定的扩散角向地基深度扩散，如下图所示。



对于矩形基础计算公式如下：

$$p_b = \frac{BDp}{(B + 2h \tan \beta)(D + 2h \tan \beta)}$$

式中， $B$ —复合地基上荷载作用的宽度；

$D$ —复合地基荷载作用的长度；

$h$ —复合地基加固的厚度；

$\beta$ —应力扩散角。

对于条形基础而言，有  $p_b = \frac{Bp}{(B + 2h \tan \beta)}$   
式中的符号意义同上。

## 等效实体法

等效实体法的基本思路为将复合地基加固区视为一个等效的实体基础，作用在下卧层的荷载面与作用在复合地基上的一致，在等效实体四周有摩阻力分布，由弹性理论计算出下卧层的附加应力。这种方法的缺点是需要计算实体四周摩阻力的大小与分布，一般不易计算准确，这里不再介绍其计算方法。

## 改进的Geddes方法

改进的Geddes方法的计算思路为将下卧层应力计算分为桩间土引起的和桩体引起的两个部分，桩间土引起的下卧层的附加应力用Boussinesq方法计算。桩体引起的应力按照Geddes方法计算。两者的合成就得到下卧层所受到的附加应力值。

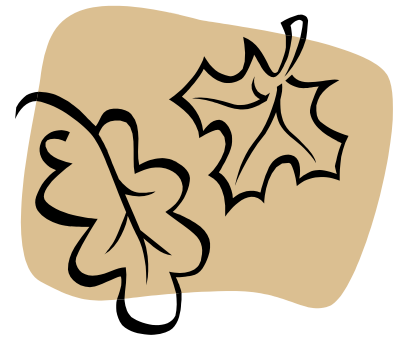
J. D. Geddes认为，长度为 $L$ 的单桩在荷载 $Q$ 作用下，对地基土产生的应力可以近似地简化成桩端端承力、均匀的摩阻力和随深度线性增长的分布摩阻力二种形式的荷载组合(图2—7)，用Mindlin应力解积分可以分别导出以上三种荷载在地基中产生的应力的计算公式，采用应力叠加的方法就可以得到地基中的附加应力，从而可以得到下卧层的附加荷载值：



$$p_b = \frac{Q_p K_p}{L^2} + \frac{Q_r K_r}{L^2} + \frac{Q_t K_t}{L^2} = \frac{1}{L^2} (Q_p K_p + Q_r K_r + Q_t K_t)$$

式中,  $Q_p, Q_r, Q_t$  —端承力、均匀摩阻力和三角形摩阻力值;

$K_p, K_r, K_t$  —相应的计算参数(其表达式较为复杂, 此处不赘述)。



## § 3 桩基沉降计算

桩基的沉降是受多种复杂的因素影响而产生的，它涉及到桩和地基所受到的应力和弹塑性变形、地基的固结沉降、桩的型式和布置、施工或地基条件的变化等多种因素。除单桩的弹、塑性变形可以用桩的静载试验方法准确确定以外，其它因素只能根据建筑经验和部分研究成果综合确定。对于桩基内、桩基下的应力分布以及桩基沉降的计算有各种各样的假设，以下将介绍目前国内外常用的计算方法并进行一些讨论。

## 推荐的方法

国家行业标准《建筑桩基技术规范》(JGJ94--94) (以下简称“桩基规范”)推荐的方法指出,“对于桩中心距小于或等于6倍桩径的桩基,其最终沉降量计算可采用等效作用分层总和法”。桩基规范实际上是一种等代实体基础法,只是没有考虑桩基侧面应力的扩散作用,并采用了如下假定:

- 1) 等效作用面位于桩端平面;
- 2) 等效作用面积为桩承台投影面积;
- 3) 等效作用附加应力近似取承台底平均附加压力;
- 4) 应力分布采用各向同性均质直线变形体理论。

桩基内任意点的最终沉降量可用角点法按下式计算：

$$s = \psi \psi_e \sum_{i=1}^n s_i = \psi \psi_e \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zi}}{E_{si}} h_i$$

式中， $s$  ——地基最终沉降量；

$s'$  ——分层总和计算地基最终沉降量；

$\psi$  ——桩基沉降计算经验系数，一般取1.0；

$\psi_e$  ——桩基等效沉降系数；

$\sigma_{zi}$  ——第*i*层土的平均附加应力。

$\sigma_{zi}$

≤铁路桥涵地基和基础设计规范≥TB10002.5—99（以下简称铁路桥规）在我国的具体应用有如下特点：

- 1) 计算时假设群桩基础为实体基础；
- 2) 假想实体基础底面在桩端平面处(不考虑桩间土的压缩变形)，荷载面积大小为假想的实体基础底面积；
- 3) 一般均不考虑加固区侧阻力的应力扩散，若考虑，则按 $\varphi/4$ 的应力扩散角向下扩散；
- 4) 桩端以下地基土附加应力按Boussinesq解确定，如同计算明挖浅基的沉降方法那样计算群桩的沉降。压缩层的下界定在某层压缩量与总的压缩量之比为0.025处；
- 5) 没有考虑桩间土的压缩引起的桩基沉降。

铁路桥规规定，对于端承桩或者桩基础各桩中心距大于6倍桩径时的摩擦桩，桩基的总沉降可以采用单桩静载试验的沉降量，这实质上就是不考虑群桩效应的影响。从而对于这类桩基础可以用其它的方法在初步设计时估算桩基的沉降，但对于各桩中心距小于6倍桩径的摩擦桩，需要将桩基作为实体基础进行沉降计算。计算公式为：

$$S = m_s \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{z(0)}}{E_{si}} (z_i C_i - z_{i-1} C_{i-1})$$

式中各符号的意义详见铁路桥规。

**2002推荐的方法**

≤建筑地基基础设计规范≥GB50007—  
2002(以下简称地基规范)规定, 计算地基  
变形时, 地基内的应力分布, 可采用各  
向同性均质线性形体理论, 地基沉降计  
算公式如下:

$$S = \psi_s \sum_{i=1}^n \frac{p_0}{E_{si}} [z_i \bar{\alpha}_i - z_{(i-1)} \bar{\alpha}_{i-1}]$$

式中， $S$ —地基最终变形量；

$n$ —地基变形计算深度范围内所划分的土层数；

$p_0$ —基底面附加压力；

$E_{si}$ —基底以下第层土的压缩模量；

$z_i, z_{i-1}$ —基底以下的第 $i$ 和第 $i-1$ 层底面至基底的距离；

$\bar{\alpha}_i, \bar{\alpha}_{i-1}$ —基底面计算点至第 $i$ 和第 $i-1$ 层底面范围内平均附加应力系数；

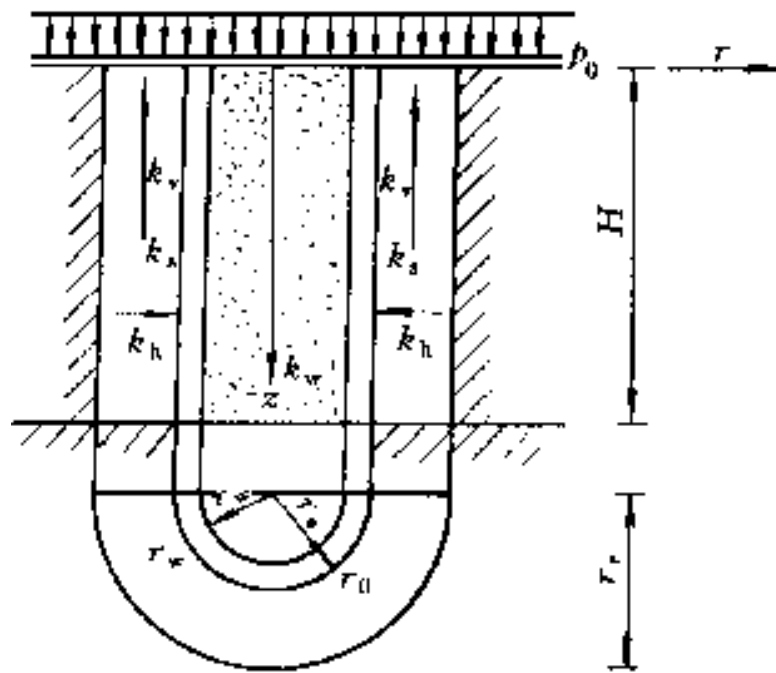
$\psi_s$ —沉降经验修正系数，根据地区沉降观测资料及经验确定。



## § 4 排水固结沉降计算

砂井、塑料排水带属于排水固结法，其沉降与固结度有关，不同于上述地基沉降计算，故此处将排水固结的沉降计算单独列出。由于砂井未打穿固结土层的固结度计算公式比较复杂，砂井打穿固结土层的固结度计算。

理论分析时可取一单井，其排水固结条件简化如下图所示。



砂井固结理论分析图

图中： $H$ 为软土层的厚度，单面排水时为最大的排水距离，打穿软土的砂井为砂井的长度； $k_h, k_v$ 为土层的水平向和竖向渗透系数； $k_s, k_w$ 分别为涂抹区和砂井井料的渗透系数； $r_w, r_s, r_e$ 分别为砂井，涂抹区，砂井有效影响的半径； $p_0$ 为均布荷载； $r, z$ 分别为径向和竖向坐标。

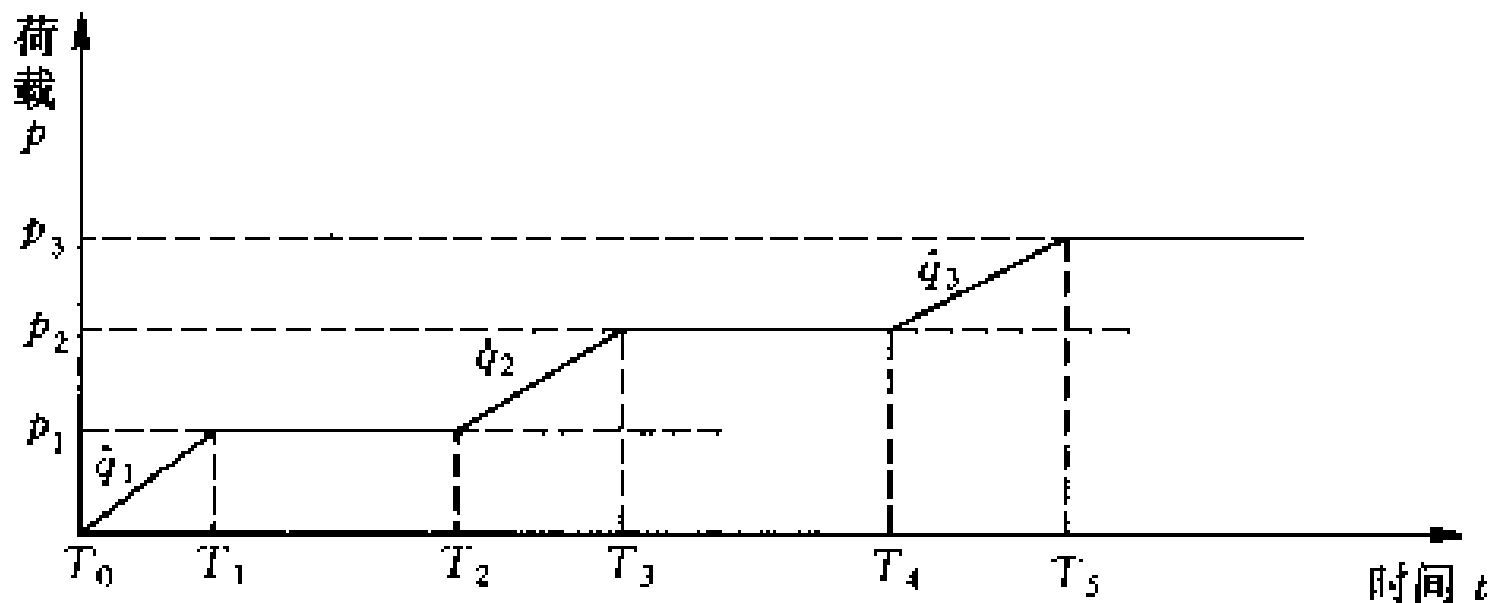
分析时，先作如下假定：

- 1) 等应变条件成立，即砂井地基中无侧向变形，同一水平面上任一点的垂直变形相等；
- 2) 每根砂井影响范围内的渗流路径，既有竖向分量，也有径向分量，两者分别单独考虑，考虑竖向渗流时，按太沙基一维固结理论求解；考虑径向渗流时，令 $k_v = 0$ 求解；径向和竖向组合渗流时可按卡理罗（Carrilo）定理考虑，即：任意点的孔隙水压力 $\mu_{rz}$ 与径向 $\mu_r$ 和竖向 $\mu_z$ 孔隙水压力和有下列关系：

$$\frac{\mu_{rz}}{\mu_0} = \frac{\mu_r}{\mu_0} \bullet \frac{\mu_z}{\mu_0}$$

- 3) 砂井内孔隙水压力沿径向变化很小，可以不计；任一深度 $z$ 处从土体中沿周边流入砂井的水量等于砂井向上流出的增量；
- 4) 除渗透系数外，井料和涂抹区内的其他性质与天然地基的相同；
- 5) 荷载一次瞬时施加。

实际工程多为分级逐渐施加的，对于一级或多级等速加荷情况，如下图所示：



理论解的平均固结度的简化式为：

$$\overline{U}_{rz} = \sum \frac{q_n}{p_t} \left[ (T_n - T_{n-1}) - \frac{8}{\beta_{rz} \pi^2} e^{-\beta_{rz} t} (e^{\beta_{rz} T_n} - e^{\beta_{rz} T_{n-1}}) \right]$$

式中， $p_t$  ——与多级加荷历时对应的荷

载， $p_t = \sum \Delta p$  ；

$q_n$  ——第 $n$ 级荷载的加荷速率，

$$q_n = \frac{\Delta p_n}{T_n - T_{n-1}}$$

$T_n, T_{n-1}$ —第 $n$ 级荷载的加荷终点和始点的历时（从零点计起）；

$t$ —所求固结度的历时，所求的固结度是对该时刻对应荷载而言， $t$ 应大于，当  $T_{n-1} < t$  时， $T_n$  则式中的  $T_n$  应改为  $T_{n-1}$ ；

$n$ —加荷的分级数。

$n$