强夯法加固填土地基有关计算问题探讨

傅志斌　汪　稔
(中国科学院武汉岩土力学研究所，武汉，430071)

提　要　考虑夯击期间填土情况，引入极限孔隙比的概念，归并两类模型，建立了土体实际夯沉量计算公式及实用土方计算公式。提出强夯沉降换算系数，用以确定夯坑沉降与地面平均沉降间的关系，对极限孔隙比与沉降换算系数的意义进行了探讨。

一　前　言

强夯法具有工期短、施工简便、经济节省等突出优点，在砂土、回填土、碎石类土、粘性土及湿陷性黄土等软弱地基加固中得到广泛的应用，尤其是应用于回填土，设计及施工工艺均较成熟[1]。一般来讲，在无深厚饱和软粘土下卧层，要求加固深度小于 15m 的情况下，强夯法是加固松软回填土的首选方法。

夯锤的冲切压实作用在地面形成深达 1m 以上的夯坑，平整后势必造成场地地面标高大为降低，继续填土后再次进行夯击，于是出现又填土又夯沉的重复叠加作用，使强夯施工全过程实际夯沉量的计算造成困难。正确计算土体夯沉量，对正确估计后继填土高度和测算实际地面夯沉量，从而制定经济合理的土方计划及对强夯后基础标高确定，有现实意义。

二　计算模型及公式

1. 计算模型

基本模型设定为两类：Ⅰ类和Ⅱ类。如图 1 和图 2。

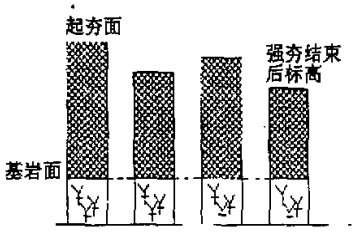


图1 单一压缩层模型（I型）

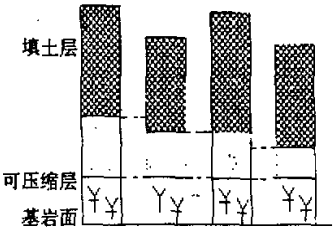


图2 多层压缩模型（II型）

Ⅰ类模型是指回填土层下面无其他可压缩层，填土层直接与硬层接触，硬层视为不发生压缩变形。Ⅱ类模型是指回填土层下卧其他可压缩土层，每次夯击都使填土层和下卧层产生沉降。无论是Ⅰ类模型还是Ⅱ类模型，在强夯过程中都只有填土层的厚度发生反复变化，而其他层处于不压缩或单一压缩（指不回填使标高再上升）条件下，因此，可将Ⅰ、Ⅱ类模型归并起来，只考虑填土层的标高变化和其压缩特性，分析填土压实、夯坑沉降与地面沉降的关系。

很明显，造成真实夯沉量难以确定的原因是施工中间多次回填土层压缩量的计算。为确定该部分土的压缩量，对计算模型作如下设定：

(1)强夯的有效加固深度每次不小于上部填土层的总厚度，并按最佳施工参数将土层充分夯实，填土层得到最大限度压密。

(2)强夯施工顺序得当，加固后场地土性均一。

2. 计算公式

(1)强夯的实际总夯沉量可按下式计算：

$$S_n=H_0-H_n+\sum_{i=1}^{n}\frac{e_0-e_{if}}{1+e_0}h_i \tag{1}$$

式中 S_n 为 n 遍夯击后的实际总夯沉量；H_0 为起夯面高程；H_n 为 n 遍夯击后的场地高程；e_{if} 为第 i 遍夯击后填土层的孔隙比；e_0 为填土层的初始孔隙比；h_i 为第 i 遍夯击前新填土厚度。

(2)由夯前高程和夯后设计高程计算填土土方量

由(1)、(2)设定，视全场地为均匀等程度密实，可将各次填土量总量等代视为一次填完，在多次夯击下，达夯后高程 H_n，如图 3：

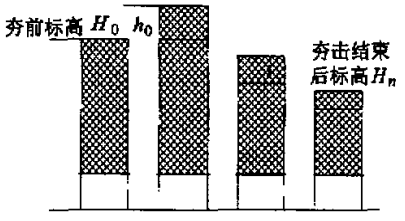


图3　一次等代填土夯实模型

若高程为 H_0 的场地，强夯后场地高程为 H_n，所需填土厚度为 h_0，对图 3 模型可有：

$$(H_0+h_0)-(H_0-h_0)\cdot\frac{e_0-e_{nf}}{1+e_0}=H_n \tag{2}$$

得出：

$$h_0=\frac{1+e_0}{1+e_n}H_n-H_0 \tag{3}$$

$$V=h_0A=(\frac{1+e_0}{1+e_n}H_n-H_0)A \tag{4}$$

式中 H_0、H_n 为夯前、夯后场地地面高程；e_0、e_{nf} 为夯前、夯后填土层孔隙比；h_0 为需新填土厚度；A 为加固区面积；V 为需填土方量。

(3)单遍夯击地面沉降计算

单遍夯击夯坑沉降量与场地平均沉降量按如下公式计算：

$$\bar{s}=\alpha\cdot\overline{H}\cdot m \tag{5}$$

式中$\bar{s}$ 为场地平均沉降量；$\overline{H}$为夯坑沉降平均值。

$$\overline{H}=\frac{\sum_{i=1}^{n}H_i}{n} \tag{6}$$

H_i 为第 i 个夯坑深度；m 为夯坑覆盖率，矩形布点时，$m=\frac{A_h}{l_1\times l_2}$，梅花型布点时，$m=\frac{2A_h}{l_1\times l_2}$；$n$ 为夯坑个数；l_1、l_2 为夯点行距和列距；α 为强夯沉降换算系数；A_h 为夯锤底面积。

三 计算参数确定

1. 填土夯实极限孔隙比

由 2.2 可知，式(1)、(3)中都涉及到夯后填土孔隙比 e_n 的取值。强夯对填土层主要起压密作用，即土体在冲击荷载作用下发生土粒靠拢、孔隙体积减小的变形，它有别于饱和土体受压后孔隙水渗流的固结过程[2]。对填土强夯，我们关注的是强夯后填土的压密程度，其表现指标之一就是填土层的夯后孔隙比。夯实过程从整体上说是被夯实土层的孔隙比随施工进程逐步减小。文献[2]提出夯实是一种包括排气固结、排水固结和均一化进程在内的综合过程。经过合理的强夯施工，夯后土体的密实度将趋于一极限值，这一极限值可从孔隙比的量值表现出来。文献[3]对饱和土与非饱和土的夯实极限从孔隙比变化角度进行了讨论，郭见扬利用土的三相方图分析后认为[2]，无论是饱和土（超软的淤泥和淤泥质土类除外）还是非饱和土，在充分夯实后都存在一极限孔隙比$\bar{e}$，其含义是强夯后土体所能达到的最小孔隙比。文献[3]对大量强夯资料进行了统计分析，建议夯后土体极限孔隙比取$\bar{e}=0.4\pm0.05$。根据提供的资料,对回填土可取 $\bar{e}=0.43\sim0.44$ 作为夯后最终孔隙比理论值 e_{nf}，即 $e_{nf}=\bar{e}=0.43\sim0.44$。

2. 强夯沉降换算系数

一般情况下，强夯夯区地面沉降量及由此推算的土方量都是直接由施工时夯坑实际深度总和全场地平均而得，而实际上夯后地面平均沉降量$\bar{s}$ 与场地平均夯坑沉降量$\overline{H}/A$ 之间并不是相等关系。目前只有文献[4]针对特定的工程对此进行了分析，但其给出的计算公式值得商榷。

笔者根据西南某露天堆场回填强风化碎石土的强夯施工实测数据得表 1。

由表 1 实测数据反分析可知，α 值范围是 0.75~0.92 ,平均$\bar{\alpha}=0.85$ 。必须强调，本文使用的 α 值是建立在加固深度范围内回填土已“充分夯实”的基础上的，即该土层的孔隙比已至最小的 e 值。很明显，若土层夯实未达最大密实度或夯实程度不均，都会导致 α 值的变化或起伏波动，因此，从一定意义上讲，一定夯击情况下的 α 值与该类土“充分夯实”

情况下的 α 值比较可用以评价该区强夯效果。

表 1　堆场区强夯沉降数据

场区名称	夯坑覆盖率 m(%)	夯坑平均深度 $\overline{H}$ (cm)	理论值 $\overline{H}\cdot$cm	地面平均沉降 $\overline{s}$ (cm)	沉降系数 α	
A	32.1	49.7	16.0	14.5	0.906	
B	32.1	48.8	15.7	13.6	0.866	
C	34.7	56.8	19.7	14.9	0.756	平均沉降系数 $\overline{\alpha}$ =0.849
D	41.4	32.4	13.4	11.7	0.873	
E	33.7	11.7	3.9	3.3	0.846	

将 $e=\overline{e}$ =0.43~0.44, $\alpha=\overline{\alpha}$ =0.85 代入式(1)、(3)、(5)即可用以计算土体实际总夯沉量 s_m 土方量 V 和进行夯坑深与地面沉降的换算。也可从实测值反分析 α 值，进而对强夯效果进行评价。

四　结　语

(1)引入土体极限孔隙比 $\overline{e}$ 的概念，从而可根据填土夯前孔隙比 e_0 与夯前、夯后标高计算多层填土的实际夯沉量。反之，可由标高需要制定合适的填土方量计划。计算的精确度受到施工质量的制约，土体夯实越充分，压密效果越好，计算越精确。

(2)引入强夯沉降换算系数 α，建立夯坑沉降与地面平均沉降的定量关系。由实测数据反分析所得 α 值可作为评价强夯夯击效果的一个参数。它以土类压实特性为基础，从沉降变形的角度对强夯效果进行评价。与压实系数相比，它更易与现场实际相结合，对施工质量进行直接评价。

参考文献

[1] 《地基处理手册》编委会：《地基处理手册》，北京，中国建筑工业出版社，1985。

[2] 郭见扬：《土层夯实过程模型与极限孔隙比》，载《土工基础》，1997, 11(1)。

[3] 张利军, 万来玉：《关于强夯的夯击效果问题》，见《国际滑坡与岩土工程学术会论文集Ⅱ》，武汉，华中理工大学出版社, 1991。

[4] 陈永启, 吴骏元：《强夯软基加固锥坑深度与夯区地面沉降量关系》，见《港工技术与管理》，1991(2)。