

DOI:10.3963/j.issn.1671-4431.2009.23.018

# 基于灰色系统的抛石强夯加固地基夯沉量估算

王协群,楼杰

(武汉理工大学土木工程与建筑学院,武汉 430070)

**摘要:** 运用灰色系统理论对影响强夯夯沉量的各因素进行研究,并利用工程实测数据进行分析计算。分析表明各影响因素对抛石强夯加固地基累计夯沉量的影响程度为:落距>夯击能>夯击次数>锤径>锤重。进一步利用实测数据对强夯的夯沉量进行拟合,提出可用于抛石强夯夯沉量估算的经验公式。

**关键词:** 强夯; 抛石地基; 夯沉量; 灰色系统理论

中图分类号: TU 470

文献标识码: A

文章编号: 1671-4431(2009)23-0077-04

## Estimation of Settlement of Enrockment Ground Improved by Dynamic Compaction Based on the Gray System Theory

WANG Xie-qun, LOU Jie

(School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Dynamic compaction is a very effective method of ground improvement, but the research of the deformation rules of the ground settlement improved by dynamic compaction is still not enough. The grey system theory then is deployed to analyse the various factors that affect the settlement of dynamic compaction, and also the field data is analysed and the results indicate that concerning to the influences all the factors imposed on accumulated settlement sequence in the order of influential power is as follows: drop height of hammer > energy of tamping > times of tamping > diameter of hammer > weight of hammer. An empirical formula of dynamic compaction accumulated settlement of enrockment ground can then be presented by comparing the actual results of further real on-site dynamic compaction with simulated results derived from former data.

**Key words:** dynamic compaction; enrockment ground; settlement of dynamic compaction; grey system theory

目前国内外已对强夯加固地基方法进行了较多的相关研究,但对抛石强夯的地面变形规律及夯沉量估算尚缺乏研究。作者运用灰色系统理论,结合现场实测数据对影响抛石强夯夯沉量的各主要因素的不同影响程度进行研究,并对抛石强夯的夯沉量进行拟合,提出可用于抛石强夯夯沉量估算的经验公式。

### 1 工程概况

星河龙岗项目位于深圳市龙岗区爱联村,场地原为深圳市龙岗区爱联村水泥厂,水塘为该水泥厂人工开采卵石形成。水塘面积约4万多 $m^2$ ,最深处约30 m。根据工程地质和规划要求综合分析,决定对水塘进行回填加固后作为建房地基。要求经加固处理后交工面(41.0 m 高程)的地基承载力特征值 $f_{ak} \geq 180$  kPa、变形模量( $E_0$ ) $\geq 15$  MPa。结合水塘形成历史过程及水塘周边场地地质条件,原设计水塘填筑采用部分抽水填筑方案,即抽水至22 m 高程后,此高程以下至水塘底约10 m 深度,采用水下抛石强夯加固;22 m 高程至交工面41 m 高程全部采用分层填土强夯加固。

## 2 基于灰色系统理论的夯沉量影响因素分析

灰色关联分析是基于行为因子序列的微观或宏观接近,以分析确定因子间的影响程度或因子对主行为的贡献程度而进行的一种分析方法<sup>[1]</sup>。这种方法通过一定的数据处理,可在随机的因素序列间找到它们的关联性,并找出主要的影响因素<sup>[2]</sup>。工程实践中遇到的系统常包含有许多因素,采用灰色关联分析对样本量的大小没有太高的要求,也不要求样本必须服从某种概率分布,而且计算量小,十分简便。因此,采用灰色关联分析对强夯夯沉量的影响因素进行研究。

强夯系统具有多种影响因素,如填土成分、粒度、天然容重、天然孔隙比、含水量、液限、塑限、内摩擦角、粘聚力等土性指标以及夯锤重量、夯锤直径、落距、夯击击数等施工指标<sup>[3]</sup>。这里选取夯锤重量、夯锤直径、落距、夯击击数、单击夯击能作为影响夯沉量的因素进行灰色关联分析,并将夯沉量定位为参考数列  $X_0(k)$ ,将落距、夯锤重量、单击夯击能、夯锤直径、夯击击数定位为比较数列  $X_i(k)$  ( $k=1,2,\dots,n$ ;  $i=1,2,\dots,m$ ,其中,  $n=8, m=5$ )

设  $X_0 = \{X_0(k) | k=1,2,\dots,n\}$  为参考数列;  $X_i = \{X_i(k) | k=1,2,\dots,n\}$  ( $i=1,2,\dots,m$ ) 为比较数列。采用初值化的方法对数据进行无量纲化处理,其计算公式为  $X'_i(k) = X_i(k)/X_i(1)$  (1)  $X_i(k)$  和  $X_0(k)$  的关联系数为

$$\xi_i(k) = \frac{\text{Min}_i \text{Min}_k \Delta_i(k) + \rho \text{Max}_i \text{Max}_k \Delta_i(k)}{\Delta_i(k) + \rho \text{Max}_i \text{Max}_k \Delta_i(k)} \quad (2)$$

关联度为

表1 累计夯沉量与影响因素的原始数据

序号	累计夯沉量/cm	落距/m	锤重/kg	单击夯击能/(kN·m)	锤径/m	夯击次数
1	197	22.0	2 361	5 000	2.4	9
2	130	22.0	2 361	5 000	2.4	7
3	126	22.0	2 361	5 000	2.4	10
4	130	22.0	2 361	5 000	2.4	8
5	215	25.0	2 031	5 000	2.2	8
6	221	25.0	2 031	5 000	2.2	14
7	139	15.0	2 031	3 000	2.2	9
8	1 151	21.5	2 330	5 000	2.4	25

表2 累计夯沉量与影响因素无量纲化后的数据

序号	$X'_0(k)$	$X'_1(k)$	$X'_2(k)$	$X'_3(k)$	$X'_4(k)$	$X'_5(k)$
1	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
2	0.659 9	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.777 8
3	0.639 6	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.111 1
4	0.659 9	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.888 9
5	1.091 4	1.136 4	0.860 2	1.000 0	0.916 7	0.888 9
6	1.121 8	1.136 4	0.860 2	1.000 0	0.916 7	1.555 6
7	0.705 6	0.681 8	0.860 2	0.600 0	0.916 7	1.000 0
8	5.842 6	0.977 3	0.986 9	1.000 0	1.000 0	2.777 8

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (3)$$

当  $\rho=0.5$  时,  $\gamma_i > 0.8$  表示关联性很好;  $\gamma_i = 0.6 \sim 0.8$ , 表示关联性好;  $\gamma_i = 0.5 \sim 0.6$ , 表示关联性一般;  $\gamma_i < 0.5$ , 表示关联性差。

表3 各因素对参考数列的绝对差

序号	$\Delta_1(k)$	$\Delta_2(k)$	$\Delta_3(k)$	$\Delta_4(k)$	$\Delta_5(k)$
1	0	0	0	0	0
2	0.340 1	0.340 1	0.340 1	0.340 1	0.117 9
3	0.360 4	0.360 4	0.360 4	0.360 4	0.471 5
4	0.340 1	0.340 1	0.340 1	0.340 1	0.229 0
5	0.045 0	0.231 2	0.091 4	0.174 7	0.202 5
6	0.014 6	0.261 6	0.121 8	0.205 1	0.433 8
7	0.023 8	0.154 6	0.105 6	0.211 1	0.294 4
8	4.865 3	4.855 7	4.842 6	4.842 6	3.064 8

表4 各因素对累计夯沉量影响的关联系数

序号	$\xi_1(k)$	$\xi_2(k)$	$\xi_3(k)$	$\xi_4(k)$	$\xi_5(k)$
1	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
2	0.877 3	0.877 3	0.877 3	0.877 3	0.953 8
3	0.871 0	0.871 0	0.871 0	0.871 0	0.837 6
4	0.877 3	0.877 3	0.877 3	0.877 3	0.914 0
5	0.981 8	0.913 2	0.963 8	0.933 0	0.923 2
6	0.994 0	0.902 9	0.952 3	0.922 2	0.848 7
7	0.990 3	0.940 2	0.958 4	0.920 2	0.892 0
8	0.333 3	0.333 8	0.334 4	0.334 4	0.442 5

表1是累计夯沉量与影响因素的实测数据,对实测数据无量纲化后的结果见表2,表3是各因素对参考数列的绝对差。各因素对累计夯沉量影响的关联系数见表4。

取分辨系数  $\rho=0.5$ ,得到相应影响因素的关联度为  $\gamma_1=0.8656$ ;  $\gamma_2=0.8395$ ;  $\gamma_3=0.8543$ ;  $\gamma_4=0.8419$ ;  $\gamma_5=0.8515$ 。可见各影响因素的关联度均大于 0.8,表明这些因素与累计夯沉量都有较好的相关性。

关联度序列为:  $\gamma_1 > \gamma_3 > \gamma_5 > \gamma_4 > \gamma_2$ ,即各影响因素对累计夯沉量的影响的程度为:落距>夯击能>夯击次数>锤径>锤重。

上述分析可对类似场地强夯加固的设计和施工起一定的指导作用,以便重点控制主要因素。

### 3 抛石强夯夯沉量的变化规律

#### 3.1 夯击地面变形的一般特征

根据试验和工程实践对夯坑深度和夯坑周围地面变形的观测结果,夯击时地面的变形特点可以区分为 2 类:1)发生在以粗粒土、低饱和度填土与黄土为代表的土类中,其特点是夯坑深度的增幅随着夯击击数的增大有明显的减小,夯坑深陷,但夯坑周围基本无隆起或早期有少量隆起。因此,总体的土层压密量接近或等于甚至略大于夯坑体积,夯坑体积基本上直接代表了夯点影响范围内夯击对土体的总体压密的效果,其有效夯实系数  $A$  (即夯坑体积与隆起体积之差除以夯坑体积)可达 0.9 以上。在贵州某地填土中测得的  $A$  为 1.064~1.350;2)发生在高饱和细粒土中,其特点是夯坑深度随击数增大持续增大明显,增速减缓不明显,甚至加大,夯坑深度大,但周围地表产生明显的隆起,因此压密体积明显不同于夯坑的体积<sup>[4]</sup>。

从多次夯击时地面变形的总体特征看,上述 2 类土的总体变形迹象分别与地基静力作用下的冲剪破坏和整体剪切破坏类似。但分析 2 类土中不同夯次下单次夯击时的土体反应,则在前一类土中从初期的大范围破坏转向后期的小范围破坏乃至最终以弹性变形为主,反映土的性质随夯击次数的增加而明显改善;在后一类土中,整个夯击过程中的每次夯击均产生一次地基土体的整体剪切破坏,反映土的性质随夯击次数的增加改善不明显<sup>[5]</sup>。

#### 3.2 抛石强夯夯沉量估算的经验公式

夯沉量 ( $S$ ) 随击数 ( $N$ ) 的变化 根据几类土 (包括陆地及海上填石、砂土、湿陷性土、饱和软粘性土) 中强夯时测到的夯沉量  $S$  与夯击数  $N$  关系的典型曲线,可以得出以下结论:夯沉量随击数而增大,但变化规律因土性而异。粗粒土、含水量较低的黄土及粘性填土中的单击夯沉量随击数而逐渐减小至最低值;含水量较高的黄土夯沉量减速缓慢;而在饱和软粘土中,单击夯沉量随击数增大的速度基本稳定。在采用的击数范围内二者基本上呈直线。

图 1 和图 2 分别是该工程抛石强夯实测的  $N/S \sim N$  关系曲线及  $\lg S \sim \lg N$  关系曲线。

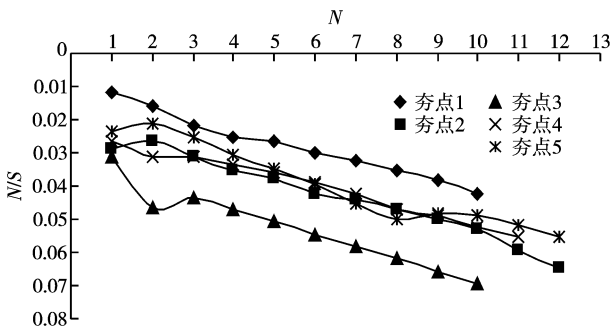


图1  $N/S \sim N$  曲线

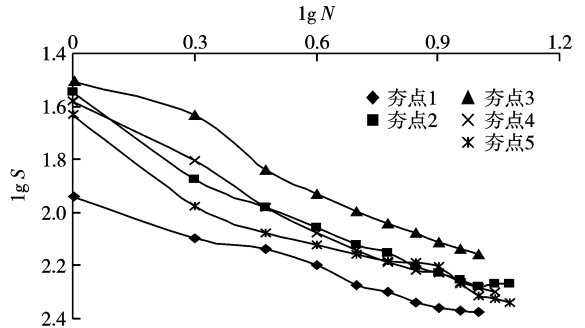


图2  $\lg S \sim \lg N$  曲线

$S \sim N$  关系的一般方程可用式(4)或式(5)来拟合<sup>[5]</sup>。

$$S = \frac{N}{a + bN} \quad (4)$$

$$S = aN^b \quad (5)$$

式中,  $S$  为总的夯沉量;  $N$  为击数;  $a$  和  $b$  为待定参数。

观察可发现,  $N/S \sim N$  曲线在采用的击数范

表 5 强夯施工实测值和经验公式计算值的比较

夯点	$N$	$E/(kN \cdot m)$	$S_{\text{计算}}/cm$	$S_{\text{实测}}/cm$
1	11	5 000	189.8	184
2	10	5 000	183.2	191
3	14	5 000	205.8	221
4	12	5 000	195.7	190
5	9	3 000	136.1	139

围内基本上呈线性关系,考虑采用式(4)进行拟合。通过前文灰色系统理论分析可知落距和单击夯击能  $E$  对夯坑深度影响巨大,考虑这二者对夯沉量的影响,可用 $\sqrt{E}$ 进行归一化处理,即采用方程 $\frac{S}{\sqrt{E}} = \frac{N}{a + bN}$ ,运用最小二乘法进行拟合。先分别求得实测5组  $N \sim S$  曲线的  $a, b$  取值,取平均值后再用 $\sqrt{E}$ 进行归一化处理,可得  $a=1.479, b=0.238$ 。

所以夯沉量估算的经验公式可写成

$$\frac{S}{\sqrt{E}} = \frac{N}{1.479 + 0.238N} \quad (6)$$

通过表5一组强夯施工实测数据对夯沉量估算的经验公式进行验证。

通过计算值和实测值的对比可以看出该经验公式能较准确的估算出抛石强夯加固基地的夯沉量。

## 4 结 论

a.通过灰色关联分析,得出强夯系统中各影响因素对夯沉量的影响。采用抛石强夯的实测数据分析表明,各影响因素对夯沉量的影响大小排序为:落距>夯击能>夯击次数>锤径>锤重。这对类似场地的设计和施工可以起一定的指导作用。

b.上述分析采用的是抛石强夯的实测数据,随土性的改变,夯沉量与各影响因素的关联度和关联顺序可能会随之改变,有待进一步研究。

c.强夯时夯坑的变形特点与土类和土性有关,夯沉量与击数的关系可用双曲线或指数型式表达(即文中式(4)或式(5));同种土的关系可用单击夯击能的平方根进行归一化。

d.通过对  $N/S \sim N$  曲线进行数据拟合,得到抛石强夯地基夯沉量估算的经验公式 $\frac{S}{\sqrt{E}} = \frac{N}{1.479 + 0.238N}$ 。通过一组夯点夯沉量计算值与实测值的对比,表明该公式对于抛石强夯地基加固的夯沉量估算具有一定的适用性。

## 参考文献

- [1] 刘思峰,郭天榜.灰色系统理论及其应用[M].河南:河南大学出版社,1991.
- [2] 傅立.灰色系统理论及其应用[M].北京:科学技术文献出版社,1992.
- [3] 陈伟军,海燕.强夯效果影响参数及其回归分析[J].工程勘察,1998(6):19-22
- [4] 王铁宏.全国重大工程项目地基处理工程实录[M].北京:中国建筑工业出版社,1998.
- [5] 罗嗣海,杨泽平,龚晓南.强夯的地面变形规律初探[J].地质科技情报,2000(19):92-96.