高原湖相沉积软土地基沉降计算经验系数的推算*

王晓楠① 郭一鹏② 刘江涛① 赖正发①②
(①中国有色金属工业昆明勘察设计研究院 昆明 650051)
(②昆明理工大学建筑工程学院 昆明 650500)

摘 要 高原湖相沉积软土压缩模量偏低,地基沉降计算深度范围内压缩模量当量值有时会小于2.5MPa,超出了规范沉降计算经验系数计算依据的取值范围,且具有沉降量偏大的特点。本文根据昆明地区某软土地基实测沉降资料,分别运用了三点法、双曲线法、Asaoko 法拟合了最终沉降量,并与规范分层总和法的地基沉降量相比得到了6个沉降计算经验系数值,据此分析给出了压缩模量当量值2.05~4.15MPa时沉降计算经验系数的拟合曲线方程,提出了压缩模量当量值1.5~2.0MPa时沉降计算经验系数的建议值,弥补了在高原湖相软土地区沉降计算经验系数取值范围不足的问题。

关键词 高原湖相沉积软土 三点法 双曲线法 Asaoka 法 推算 沉降计算经验系数
中图分类号:TU4 **文献标识码:**A

PREDICTION OF EMPIRICAL SETTLEMENT COEFFICIENT FOR SOFT CLAY GROUND OF PLATEAU LACUSTRINE-DEPOSITS

WANG Xiaonan① GUO Yipeng② LIU Jiangtao① LAI Zhengfa①②
(①*Kunming Prospecting Design Institute of China National Non-Ferrous Metals Industry*, *Kunming* 650051)
(②*Architecture and Engineering Faculty*, *Kunming University of Technology*, *Kunming* 650500)

Abstract In plateau lacustrine, the modulus of compression of soft clay is low. Sometimes, equivalent compression modulus in the range of the effective depth of foundation settlement analysis can be less than 2.5MPa. The empirical settlement coefficient exceeds the range of standard. The settlement is too large. This paper uses the three-point method, the hyperbolic curve, the Asaoka method to fit final settlement. The results are compared with the foundation settlement calculated with the layer-wise summation method. Six empirical settlement coefficients are obtained. The paper analyzes the equivalent compression modulus and points out the fitting curve equation. The range of equivalent compression modulus is 2.05~4.15MPa. Meanwhile, this paper points out the suggested value for the empirical settlement coefficient They are in the range of equivalent compression modulus 1.5~4.15MPa. It makes up the weaknesses of empirical settlement coefficient that in plateau lacustrine.

Key words Soft clay, Plateau lacustrine-deposits, Prediction, Empirical settlement coefficient, Foundation engineering

* 收稿日期:2011-10-25;收到修改稿日期:2012-03-01.
第一作者简介:王晓楠,主要从事结构工程设计工作. Email:77808580@qq.com

1　引　言

软土地基工后沉降一直是工程界关注的焦点问题之一，由于存在地层条件的复杂性、勘察取样的代表性和计算理论的偏差等问题，导致沉降理论计算与实际情况相比偏差较大[1,2]。基于实测沉降历时曲线进行沉降推算是工程中常用的计算方法，目前，沉降与时间的关系的预测方法有 3 大类，第一类为采用经典的分层总和法或规范推荐的方法计算最终沉降量；第二类为数值计算方法，即根据固结理论，结合各种土的本构模型，计算最终沉降量；第三类方法为通过现场实测资料来推算沉降与时间的关系（本方法既有一定的理论基础，又有简单易行的操作方法，如图解法[3]）。

昆明盆地阳光充足，温度适宜，又有湖泊、河流、洼地等地貌条件，利于水生、湿生植物的生长蔓延[4]，软塑到流塑状态的泥炭质土分布较为广泛，称其为高原湖相沉积软土[5]。此类软土孔隙比大、含水量高、承载力低，压缩模量低，在荷载作用下侧向变形和次固结沉降较大[4~6]。由于不同地区软土的形成历史及分布的区域性导致其物理、力学性质存在一定的差异，规范中关于沉降计算经验系数的取值依据存在一定的局限性，本文根据昆明某软土地基沉降实测资料进行分析，对此取值范围进行延伸，以便运用于工程实践。

2　工程实例

2.1　工程概况

昆明市政府综合服务中心搬迁项目位于呈贡吴家营乡白龙潭村北侧，处于昆明盆地东部边缘的剥蚀台地上。场地东北部有 1 条近南北走向的河道，河道穿过的局部地段表部地层存在厚度高达 7.1m 的（软塑、流塑状态）、压缩模量及承载力均较低的泥炭质土、黏土。按照规划，场地东北角填方高度达 6 ~9m，为减少工后沉降，确保场地在建成后能够正常使用，采用碎石桩排水固结法对该软土地基进行处理。

2.2　工程地质条件

场地地层可分为 4 个大层：新近抛填土及耕土层、第四系全新统冲沟洼地中的湖沼沉积层、第四系更新统坡积层、第四系更新统湖相地层。场地主要地层自上而下简述如下：

①$_1$ 素填土：黄、褐黄、黄红、浅红、褐红等色，稍湿，可塑状态，结构松散，该层为近新堆填土方，以黏性土为主，局部含建筑垃圾、碎石、碎砖，其厚度变化大，在 0 ~1.0m 之间。

①$_2$ 耕土：褐、褐红、浅红、黑褐等色，稍湿，可塑状态，结构松散，含植物根系，局部地段底部为老素填土，孔隙比大（不宜利用），厚度在 0.30 ~0.60m 之间。

②$_1$ 泥炭质土：深灰、黑灰等色，饱和，软塑（局部流塑）状态，高压缩性，有机质含量最高达 89.5%，其力学强度较低，此层土具丝绢光泽，干强度、韧性差，摇动会析水，在冲沟中低洼处沉积，厚度在 0 ~4.0m 之间。

②$_2$ 黏土：褐灰、灰白等色，湿，软塑（局部可塑）状态，高压缩性（局部为中压缩性），局部含有机质，分布于冲沟中低洼处，干强度、韧性低，切面光滑，稍具光泽，其力学性质较差，厚度 0 ~3.0m 之间。

③$_1$ 粉质黏土：黄、褐黄、褐黄夹灰、褐黄灰等色，湿，硬塑（局部为坚硬或可塑）状态，中压缩性，局部为高压缩性，干强度、韧性中等，切面粗糙，无光泽，无摇震反应，层间含强风化砂、泥岩角砾，力学性质一般。

③$_2$ 黏土：黄、褐黄灰、黄夹灰等色，湿，硬塑（局部坚硬）状态，中压缩性，干强度、韧性高，切面光滑，具光泽反应，力学性质较好，局部含全风化泥岩角砾。

土层主要物理力学性质指标见表 1。

表 1　主要土层物理力学性质指标

Table 1　Physical and mechanical properties of the soil

土层	γ/kN·m^{-3}	e	W/(%)	I_L	E_{s1-2}
②$_1$ 泥炭质土	13.5	1.70	60.79	0.75	1.11
②$_2$ 黏土	16.5	1.16	42.09	0.46	2.27
③$_1$ 粉质黏土	17.3	1.35	40	0.17	4.54
③$_2$ 黏土	17.6	1.21	45	0.39	3.14

2.3　监测结果[7]

根据现场软土层（泥炭质土和黏土）的分布和厚度情况布置监测方案（图 1）。对 6 个观测点进行了持续了 282d 的观测，由于软土层比较厚，在土层分界处设置了沉降环（图例中 CJH2-1 表示 2# 观测孔第一个环的沉降曲线），观测结果如下（图 2 ~图 7）：

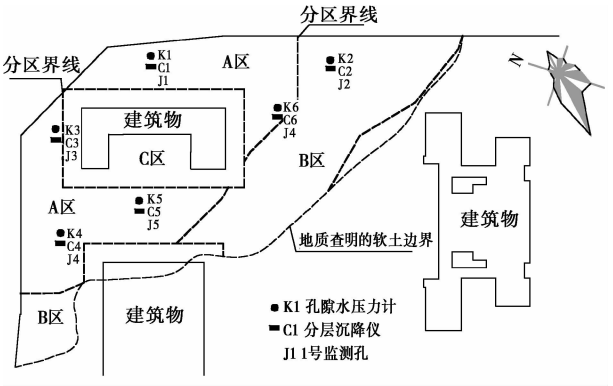

图 1 软土处理范围分区及观测点平面布置图

Fig. 1 Range of soft soil treatment and observation points'chart

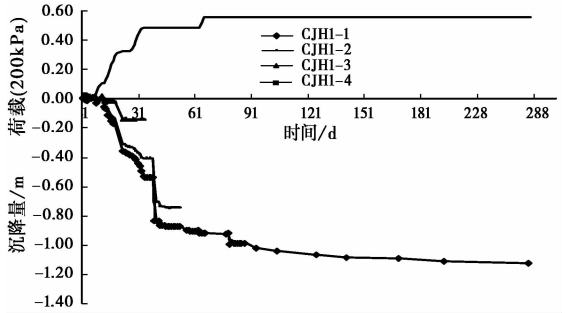

图 2 J1 荷载 & 沉降量与时间曲线

Fig. 2 J1 load & settlement-time curves

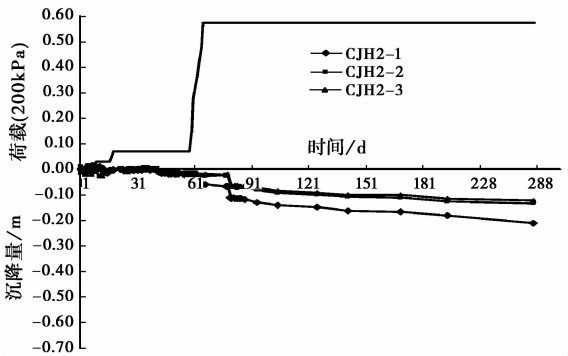

图 3 J2 荷载 & 沉降量与时间曲线

Fig. 3 J2 load & settlement-time curves

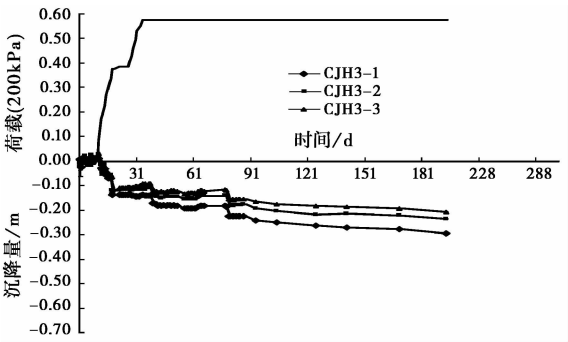

图 4 J3 荷载 & 沉降量与时间曲线

Fig. 4 J3 load & settlement-time curves

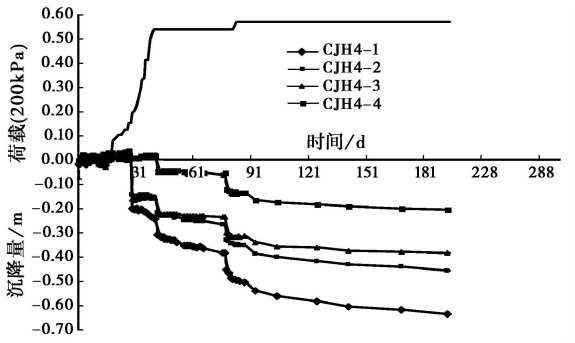

图 5 J4 荷载 & 沉降量与时间曲线

Fig. 5 J4 load & settlement-time curves

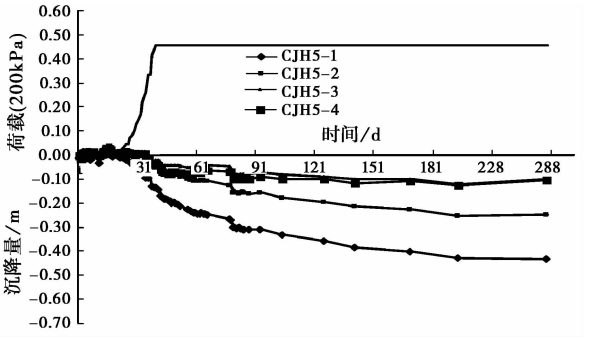

图 6 J5 荷载 & 沉降量与时间曲线

Fig. 6 J5 load & settlement-time curves

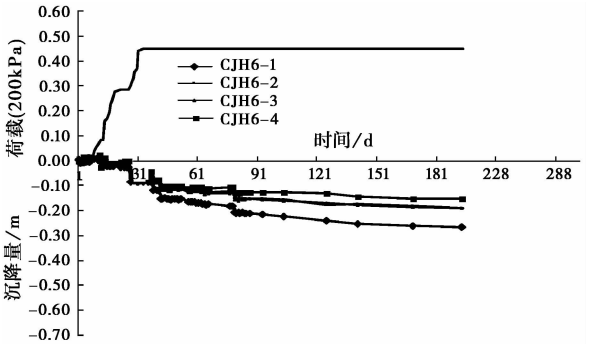

图 7 J6 荷载 & 沉降量与时间曲线

Fig. 7 J6 load & settlement-time curves

3 沉降理论计算

采用《建筑地基基础设计规范》中的 5.3.5 公式进行地基沉降计算[8]：

$$S = \psi_s S' = \psi_s \sum_{i=1}^{n} \frac{p_c}{E_{si}} \left(z_i \bar{a}_i - z_{i-1} \bar{a}_{i-1} \right) \quad (1)$$

式中，S 为地基最终变形量(mm)；S' 为按分层总和法出的计算的地基变形量(mm)；ψ_s 为沉降计算经验系数；n 为地基变形计算深度范围内所划分的土层数；p_c 为对应于荷载效应准永久组合时的基础底面处的附加压力(kPa)；E_{si} 为基础底面下第 i 层土

的压缩模量(MPa)。

本文中运用分层总和法计算工程状态下的沉降量，当荷载范围较大时(1)式可改写成：

$$S' = \sum_{i=1}^{n} \frac{p}{E_{si}} H_i \qquad (2)$$

式中，p 为填土荷载(kPa)，填土 γ 为 $18kN \cdot m^{-13}$；E_{si} 为软弱土层压缩模量(MPa)；H_i 为软弱土层厚度(m)。

表 2　沉降理论计算值

Table 2　the theoretical value of settlement calculation

孔号	J1	J2	J3	J4	J5	J6
泥炭质土厚度/m	4.5	1.5	0.9	2.0	1.5	1.8
黏土厚度/m	2.6	1.4	3.9	3.5	2.5	1.6
填方高度/m	8.10	4.76	7.20	8.30	8.45	5.43
理论变形量/mm	758	170	328	500	373	227
实测变形量/mm	1124	209	370	634	431	268

4　根据实测资料推算沉降量

本文采用三点法、双曲线法、Asaoka 法进行沉降预测。

4.1　三点法

本文中选择 3 组沉降稳定后的 (t,s) 值进行拟合，J1 沉降随时间变化曲线见图 8：

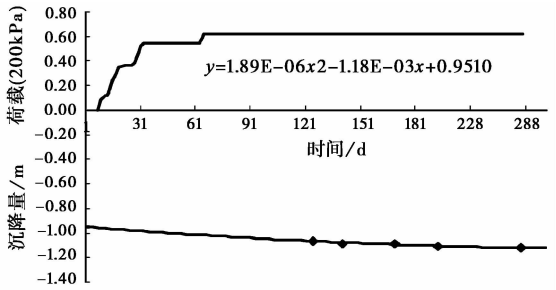

图 8　J1 孔沉降随时间变化拟合曲线

Fig. 8　J1 settlement curves fitting to time

从 $s-t$ 曲线中选择 3 组沉降稳定后的 (t,s) 值进行计算，其余孔号沉降结果的平均值见表 3。

表 3　三次计算结果平均值　(单位 mm)

Table 3　the average of three times' calculation

孔号	J1	J2	J3	J4	J5	J6
S_∞	1150	250	435	660	510	276

4.2　双曲线法[9]

此法近似认为地基沉降量与时间成双曲线函数关系，其表示式如下：

$$\lim_{x\to\infty} S_t = S_0 + \frac{1}{b} \qquad (3)$$

式中，S_0 为观测沉降量；$S_t - t = \infty$ 时的沉降量；b 为 $\frac{t-t_0}{S_t - S_0} - (t - t_0)$ 曲线的斜率。

根据实测的沉降数据，对 J-1 号孔选取 $t = 38d$ 时为曲线的拐点，进行沉降预测，绘制 $\frac{t-t_0}{S_t - S_0} - (t - t_0)$ 图（图 9）。

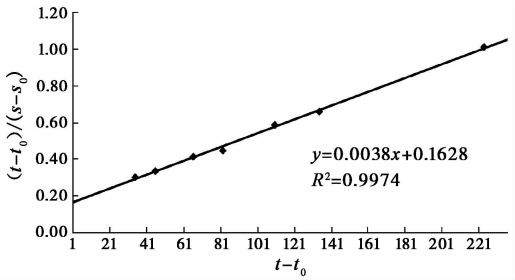

图 9　双曲线法预测曲线

Fig. 9　The curve of yperbolic'Prediction

从下图中曲线方程可以得出 $b = 0.0038$，选取不同拐点进行线性拟合，双曲线法预测结果平均值见表 4。

表 4　双曲线法预测结果平均值　(单位 mm)

Table 4　the average of yperbolic'Prediction

孔号	J1	J2	J3	J4	J5	J6
S_∞	1164	267	385	673	503	329

4.3　Asaoka 法[9]

根据实测的沉降数据，对 J1 号孔选取 $\Delta t = 20d$ 进行沉降预测，绘制 $S_i - S_{i-1}$ 图（图 10）。

从图 10 中 $(S_i、S_{i-1})$ 的点回归的直线与 45° 直线($S_i = S_{i-1}$) 的交点可知最终沉降 $S_\infty = 1178mm$。由于 Δt 选取的不同，预测出来的结果将会存在差异，所以对各个观测孔采用不同时间段的沉降值进行沉降预测，预测结果平均值见表 5。

4.4　各种预测结果对比

采用 3 种不同的预测方法对最终沉降量进行拟合，然后计算三者的平均值 ($S_{平}$) 与理论变形量

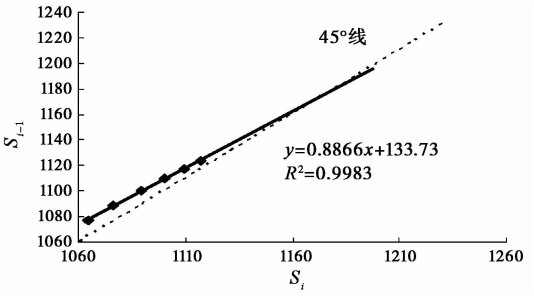

图 10 Asaoka 法沉降预测图

Fig. 10 The chart of Asaoka's prediction

表 5 Asaoka 法预测结果平均值(单位 mm)

Table 5 Tthe average of Asaoka's Prediction

孔号	J1	J2	J3	J4	J5	J6
S_∞	1166	270	428	658	504	322

表 6 各种沉降预测结果对比

Table 6 Comparison of settlement's prediction

孔号	三点法/mm	双曲线法/mm	Asaoka 法/mm	S'/mm	$S_{平}/S'$
J-1	1150	1164	1166	758	1.53
J-2	250	267	270	170	1.54
J-3	435	385	428	328	1.27
J-4	660	673	658	500	1.33
J-5	510	503	504	373	1.35
J-6	276	329	322	227	1.36

(S')之间的关系(表6)。

5 沉降计算经验系数的推算

《建筑地基基础设计规范》中给出了沉降经验系数 ψ_s 的建议值,由于 $\overline{E_s}$ 范围具有局限性,即当 $\overline{E_s}$ <2.5MPa 时,表中没有给出沉降经验系数 ψ_s 的建议值,因此笔者在本工程实例的基础上对沉降经验系数 ψ_s 的取值进行推算。

$\overline{E_s}$ 按下式计算[8]:

$$\overline{E_S} = \frac{\sum A_i}{\sum \frac{A_i}{E_{si}}} \tag{4}$$

式中,A_i 为第 i 层土附加应力面积;$A_i = p_o = (z_i\overline{\alpha_i} - z_{i-1}\overline{\alpha_{i-1}})$,$E_{si}$ 为第 i 分层对应于 $p_{1i} \sim p_{2i}$ 段的压缩模量,各孔号 $S_{平}/S'$ 与压缩模量当量值($\overline{E_s}$)的关系见表7:

《建筑地基基础设计规范》中当基底附加压力 $p_o \geqslant f_{ak}$,$\overline{E_s}$ =2.5MPa 时,ψ_s =1.4,此实例中 J1、J2

表 7 各孔号 $S_{平}/S'$ 与 $\overline{E_s}$ 之间的关系

Table 7 Relationship between $S_{平}/S'$ and $\overline{E_s}$ of holes

孔号	J1	J2	J3	J4	J5	J6
$\overline{E_s}$/MPa	2.09	2.05	4.15	3.45	3.07	3.02
$S_{平}/S'$	1.53	1.54	1.27	1.33	1.35	1.36

孔 $\overline{E_s}$ 均小于 2.5MPa,结合本工程实例对 $S_{平}/S'$ 与 $\overline{E_s}$ 进行拟合(图11),可以看出拟合结果较好。

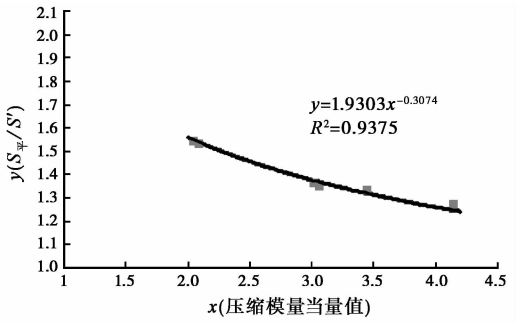

图 11 压缩模量当量值($\overline{E_s}$)与 $S_{平}/S'$ 的关系

Fig. 11 Relationship between equivalent compression modulus ($\overline{E_s}$) and $S_{平}/S'$

由于图11中 $S_{平}$ 为3种方法拟合的最终沉降量平均值,可视为最终沉降量 S_∞,因此 $S_{平}/S' = S_\infty/S'$,即为沉降计算经验系数 ψ_s,则拟合方程即为:

$$\psi_s = 1.9303\,\overline{E_s}^{-0.3074} \quad (2.05 \leqslant \overline{E_s} \leqslant 4.15) \tag{5}$$

根据拟合方程,当 $\overline{E_s} \leqslant$ 2.5MPa 时,建议 ψ_s 取值见表8:

表 8 沉降计算经验系数 ψ_s

Table 8 Empirical settlement coefficient

$\overline{E_s}$/MPa	1.5	2.0	2.5
$p_o \geqslant f_{ak}$	1.71	1.56	1.46

6 结 论

(1)根据沉降资料,给出了当压缩模量当量值在2.05~4.15MPa 时的沉降计算经验系数拟合曲线方程。

(2)推算出了高原湖相软土地区压缩模量当量值在1.5~2.0MPa 时的沉降计算经验系数建议值。

(3)在预测软土地基的沉降时,有必要采用多种方法进行对比,从而提高预测的准确性。本文中

通过三点法、双曲线法、Asaoka 法进行沉降预测，发现双曲线法和 Asaoka 法预测结果比较接近。

(4)由于实测资料较少，本文给出的沉降计算经验系数建议值的不足之处将在后续工程实践中再研究弥补。

参 考 文 献

[1] 王志亮，黄景中，李永池. 沉降预测中的 Asaoka 法应用研究[J]. 岩土力学，2006，**27**(11)：25～30.
Wang Zhiliang，Haung Jingzhong，Li Yongchi. Study on application of Asaoka's method to settlement prediction. Rock and Soil Mechanics，2006，**27**(11)：25～30.

[2] 龚晓南. 高等土力学[M]. 杭州：浙江大学出版社，1996.
Gong Xiaonan. Advanced Soil Mechanics. Hangzhou：Zhejiang University Press，1996.

[3] 潘林有，谢新宇. 用曲线拟合的方法预测软土地基沉降[J]. 岩土力学，2004，**25**(7)：1053～1057..
Pan Linyou，Xie Xinyu. Observational settlement prediction by curve fitting methods. Rock and Soil Mechanics，2004，**25**(7)：1053～1057.

[4] 张璐，詹长久，等. 滇池泥炭质土的某些特性[J]. 土工基础，2006，**20**(2)：93～94.
Zhang Lu，Zhan Changjiu，et al. The characteristic of peaty soil in Dianchi Kunming. Soil Engineering and Foundation，2006，**20**(2)：93～94.

[5] 赖正发，徐则民，董柱. 高原湖相沉积软土边坡的治理[C]. 中国土木工程学会第十届土力学及岩土工程学术会议论文集. 重庆：重庆大学出版社，2007，362～366.
Lai Zhengfa，Xu Zemin，Dong Zhu. Treatment of plateau lacustrine' Slope. Development of Ground Improvement Theory and Technology. Chongqing：Chongqing University Press，2007，362～366.

[6] 阮永芬，刘岳东，等. 昆明泥炭与泥炭质土对建筑地基的影响[J]. 昆明理工大学学报(理工版)，2003，**28**(3)：121～124.
Ruan Yongfen，Liu Yuedong，et al. Effect of Kunming's peat & peaty soil on the building foundation. Journal of Kunming University of Science and Technology(Science and Technology)，2003，**28**(3)：121～124.

[7] 中国有色金属工业昆明勘察设计研究院. 昆明市市级党政机关办公用房搬迁建设项目超厚回填土、泥炭化软土层地基处理工程沉降观测报告[R]. 昆明，2006.
Kunming Prospecting Design Institute of China National Non-Ferrous Metals Industry. The settlement observation reports of Super thick backfilling and peat soil of soft foundation treatment which Kunming municipal party and government organs' project. Kunming，2006.

[8] 中华人民共和国国家标准. 建筑地基基础设计规范(GB50007-2002)[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2002.
The National Standard of PRC. Code for Design of Building Foundation(GB50007-2002). Beijing：China Architecture and Building Press，2006.

[9] 黄绍铭，高大钊. 软土地基与地下工程[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2005.
Huang Shaoming，Gao Dazhao. Foundation and Underground engineering in Soft Ground. Beijing：China Architecture and Building Press，2006.