

文章编号: 1000-6869(2008)05-0135-06

# 对花岗岩残积土变形模量的分析研究

戴 继<sup>1</sup>, 高广运<sup>1</sup>, 水伟厚<sup>2</sup>, 刘小敏<sup>3</sup>

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092

2. 上海现代建筑设计集团申元岩土工程有限公司, 上海 200011; 3. 深圳市勘察研究院, 广东深圳 518100)

摘要: 花岗岩残积土变形模量的取值对广东、福建等地区部分建筑物的沉降分析至关重要。针对现有部分地区花岗岩残积土变形模量取值方法没有考虑土质特性的不足, 选取花岗岩残积土天然地基上的载荷试验和标准贯入试验数据, 结合统计分析原理, 提出了在广东地区按照残积土的三种不同土质分别计算其变形模量  $E_0$  的分析方法, 并考虑了土体固结的影响, 与实测沉降结果进行对比分析, 给出了新的修正系数。通过对实际工程的计算, 验证了此方法的合理性, 为国家和地区性规范关于残积土变形模量取值部分的发展提供了参数依据。

关键词: 花岗岩残积土; 载荷试验; 变形模量

中图分类号: TU433 文献标识码: A

## Analysis of deformation modulus for granitic residual soil

DAI Ji, GAO Guangyun, SHUI Weihou, LIU Xiaomin

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education of China, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Modern Architectural Design Group Shen Yuan Geotechnical Engineering Co., Ltd. Shanghai 200011, China; 3. Shenzhen Investigation and Research Institute, Shenzhen 518100, China)

Abstract: Determination of deformation modulus of granitic residual soil is very important to analysis of settlement of some buildings in regions like Guangdong, Fujian, etc. In view of the insufficiency in considering the character of soil in determination of deformation modulus for granitic residual soil in some areas, the paper presented a type of experiential method which can calculate the deformation modulus  $E_0$  for three different granitic residual soils based on the statistic analyses of the parameters of plate loading test (PLT) and standard penetration test (SPT) from the natural subgrade examples in Guangdong area. New correction coefficient was developed with considering the hardening effect of soil and correlation of actual settlement data. The proposed method is validated to be reasonable for practical design and useful in future development of rational design guidelines.

Keywords: granitic residual soil; plate loading test; deformation modulus

## 0 引言

在我国东南沿海地区, 如广东、福建等省广泛分布着燕山期花岗岩残积土。残积土与沉积土的成因不同, 因而它具有与沉积土不同的工程特性, 诸如其灵敏性、软化性、不均匀性及各向异性和崩解等特殊性质。正因为这些特殊性质, 花岗岩残积土的沉降计算和计算参数的选取成为工程界最突出的问题之一。

本文主要针对广东地区花岗岩残积土的变形模量取值问题, 考虑到现有取值方法没有考虑土体特性, 根

据载荷试验、标贯试验及实际工程地基沉降实测数据, 提出更适合花岗岩残积土沉降计算的变形模量取值方法, 可供设计人员直接使用和参考, 以期在实际应用中更加准确和经济。

## 1 问题的提出

我国现行地基基础规范和目前工程界主要是以室

作者简介: 戴继 (1976— ) 男, 回族, 辽宁阜新人, 博士研究生。

收稿日期: 2008 年 4 月

内压缩试验得到的压缩模量作为变形计算参数或根据《工程地质手册》<sup>[1]</sup> (以下简称“《手册》”)查表计算得到地基土变形模量,但由于在取样等方面对土样产生扰动而使所得压缩模量与原状土有很大差别,而《手册》表格分散,虽同为残积土,但各工程土质差异较大,设计人员难以掌握,这些均导致计算沉降与实测沉降相差较大,造成经济浪费或工程隐患。与之相比,变形模量则是根据载荷试验测得,更能反应土体特性,因此,采用变形模量作为计算参数更加合理。在残积土变形模量的取值方面,东南沿海地区的一些地区性规范<sup>[2]</sup>及《手册》一般采用变形模量  $E_0$  和标准贯入击数  $N$  的统计关系得到不同深度土的  $E_0$ 。其统计关系如式(1)所示。

$$E_0 = 2.2N \quad (10 < N < 30) \quad (1)$$

但如后文的工程实例所示,采用式(1)所得的地基沉降计算结果与实测沉降差异较大,这样不仅可能影响到结构美观和使用功能,而且在设计上对于确定预留沉降的接口、底板厚度及配筋等都会产生至关重要的影响,甚至还会影响到设计方案的比选。如可采用天然地基的建筑采用了桩基或桩基数量过多,都会造成严重的经济浪费。同时式(1)提出的  $E_0$  过于粗略,并没有考虑残积土的土质差别。不同土质的残积土,当标贯击数相同时,由式(1)得到的变形模量的计算值与载荷试验所得的变形模量值有时会相差很大,如表1所示,式(1)算法与载荷试验测得的深圳市某工程2的变形模量的相对误差达到了-65%,而具有同样标贯击数的华南理工大学某宿舍的工程土样,式(1)算法与载荷试验测得的变形模量的相对误差只有15.9%,若二者都采用式(1)计算变形模量,则所得地基沉降结果的误差将会大大增加。因此必须寻求一种适合于花岗岩残积土变形模量的全面、实用的取值方法。

## 2 实用花岗岩残积土变形模量的推演分析

《建筑地基基础设计规范》(DBJ15-31-2003)<sup>[3]</sup>规定,花岗岩残积土中,当大于2mm颗粒含量超过总质

表1 不同土质残积土在标贯击数相同的条件下载荷试验所得变形模量值与式(1)的计算值之间的相对误差  
Table 1 Relative error between deformation modulus by PLT and formula (1) on different qualitative residual soil under same SPT blow counts

| 工程名称      | 土质    | 标贯击数取值<br>N/次 | 变形模量<br>$E_0$ /MPa | $E_0 = 2.2N$<br>MPa | 相对误差<br>% |
|-----------|-------|---------------|--------------------|---------------------|-----------|
| 广州石化总厂某工程 | 砾质粘性土 | 14            | 44.80              | 30.8                | 31.3      |
| 东莞东泰花园小区2 | 粘性土   | 14            | 34.75              | 30.8                | 12.0      |
| 华南理工大学某宿舍 | 砂质粘性土 | 15            | 39.04              | 33.0                | 15.5      |
| 深圳市某工程2   | 粘性土   | 15            | 20.00              | 33.0                | -65.0     |

量20%者为砾质粘性土,不超过20%者为砂质粘性土,不含者为粘性土。针对这三种不同的花岗岩残积土类型,本文将建立计算变形模量的实用经验公式。通过残积土载荷试验得出的地基承载力特征值  $f_{kk}$  及由此导算出的变形模量  $E_0$ ,并根据在载荷试验点附近进行的标准贯入试验得到该残积土相应的标贯击数  $N$  再用统计方法建立三者之间的联系,最后经过修正得出变形模量  $E_0$  与标贯击数  $N$  之间的经验关系。

表2给出了26例实际工程在花岗岩残积土天然地基上进行的80次载荷试验及在其附近相应进行的标贯试验工程数据,它们按砾质粘性土、砂质粘性土及粘性土三种残积土类型分类。其中,变形模量  $E_0$  是根据载荷试验结果由式(2)导算得到。

$$E_0 = \omega \left( 1 - \nu \right) \frac{Pb}{s} \quad (2)$$

式中,  $E_0$  为变形模量;  $\omega$  为刚性承压板形状换算系数,圆形承压板取0.79,方形承压板取0.88;  $\nu$  为土的泊松比;  $b$  为承压板的边长或直径;  $P$  为地基承载力特征值所对应的均布荷载;  $s$  为与承载力特征值对应的沉降。

首先,根据表格中给出的花岗岩残积土地基承载力特征值  $f_{kk}$  与相应变形模量  $E_0$  建立二者之间的统计关系,其散点图及回归曲线如图1、图2及图3所示。由图可知,它们都近似于指数曲线分布,这三条曲线回归方程分别为

$$E_0 = 13.398 e^{0.034 f_{kk}} \quad (\text{砾质粘性土}) \quad (3)$$

$$E_0 = 12.287 e^{0.044 f_{kk}} \quad (\text{砂质粘性土}) \quad (4)$$

$$E_0 = 12.167 e^{0.044 f_{kk}} \quad (\text{粘性土}) \quad (5)$$

其中,  $E_0$  为残积土的变形模量, MPa;  $f_{kk}$  为残积土的地基承载力特征值, kPa

式(3)~(5)的相关系数分别为0.94、0.88、0.90,可见,变形模量  $E_0$  与地基承载力特征值  $f_{kk}$  有着较好的相关性。

然后,根据表格中给出的花岗岩残积土标贯击数  $N$  与地基承载力特征值  $f_{kk}$ ,建立二者之间的统计关系,散点图及回归曲线如图4、图5及图6所示。由图可知,它们近似于直线分布,这三条直线的回归方程分别为

$$f_{kk} = 20.431N + 62.803 \quad (\text{砾质粘性土}) \quad (6)$$

$$f_{kk} = 15.049N + 62.920 \quad (\text{砂质粘性土}) \quad (7)$$

$$f_{kk} = 13.462N + 69.47 \quad (\text{粘性土}) \quad (8)$$

其中,  $f_{kk}$  为残积土地基承载力特征值, kPa;  $N$  为标准贯入击数。

式(6)、(7)、(8)的相关系数分别为0.92、0.87、0.91。

表 2 载荷试验相关资料统计表

Table 2 Statistics of correlative data on PLT

| 编号 | 工程名称        | 载荷板<br>试验点数 | 土质特性  | $f_{tk}$ /kPa | N/次          | $E_0$ /MPa    |
|----|-------------|-------------|-------|---------------|--------------|---------------|
|    |             |             |       | (由载荷<br>试验得到) | (实测<br>标贯击数) | (由载荷<br>试验推算) |
| 1  | 广州石化总厂某工程   | 2           | 砾质粘性土 | 450           | 15           | 44.80         |
| 2  | 四会市某工程      | 4           | 砾质粘性土 | 210           | 7            | 23.42         |
| 3  | 深圳市某工程 1    | 5           | 砾质粘性土 | 267           | 11           | 27.71         |
| 4  | 深圳华联某工程     | 3           | 砾质粘性土 | 150           | 4            | 23.60         |
| 5  | 深圳工贸中心 1    | 6           | 砾质粘性土 | 336           | 17           | 29.10         |
| 6  | 电子工业部某工程    | 3           | 砾质粘性土 | 300           | 15           | 23.20         |
| 7  | 广州市港口某工程    | 3           | 砾质粘性土 | 463           | 19           | 40.50         |
| 8  | 中山市某厂房 1    | 3           | 砾质粘性土 | 474           | 17           | 53.00         |
| 9  | 中山市某厂房 2    | 3           | 砾质粘性土 | 510           | 22           | 57.50         |
| 10 | 中山市南区某厂房 1  | 2           | 砂质粘性土 | 220           | 16           | 40.36         |
| 11 | 中山市南区某厂房 2  | 2           | 砂质粘性土 | 190           | 8            | 19.73         |
| 12 | 中山市南区某厂房 3  | 3           | 砂质粘性土 | 200           | 13           | 23.48         |
| 13 | 中山市南区某厂房 4  | 3           | 砂质粘性土 | 130           | 3            | 16.10         |
| 14 | 中山市某厂房 3    | 3           | 砂质粘性土 | 240           | 13           | 25.80         |
| 15 | 东莞市东泰花园小区 1 | 1           | 砂质粘性土 | 420           | 19           | 48.10         |
| 16 | 华南理工大学某宿舍   | 3           | 砂质粘性土 | 366           | 15           | 39.04         |
| 17 | 广州市审计局某工程   | 2           | 砂质粘性土 | 288           | 14           | 35.50         |
| 18 | 深圳工贸中心 2    | 4           | 砂质粘性土 | 273           | 16           | 45.20         |
| 19 | 深圳市某宿舍      | 6           | 粘性土   | 124           | 4            | 21.90         |
| 20 | 深圳市某厂房      | 1           | 粘性土   | 258           | 15           | 35.30         |
| 21 | 广州军区某宿舍     | 2           | 粘性土   | 180           | 8            | 17.54         |
| 22 | 深圳市某工程 2    | 3           | 粘性土   | 210           | 15           | 21.91         |
| 23 | 东莞东泰花园小区 2  | 1           | 粘性土   | 240           | 13           | 24.75         |
| 24 | 广州市某仓库      | 6           | 粘性土   | 270           | 13           | 36.80         |
| 25 | 广州市科学城某工程   | 3           | 粘性土   | 220           | 11           | 27.90         |
| 26 | 广州地区某工程     | 3           | 粘性土   | 350           | 18           | 37.90         |

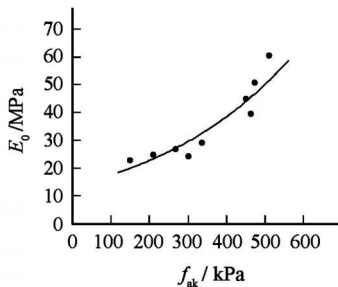


图 1 砾质粘性土  $E_0 - f_{tk}$  回归曲线

Fig 1  $E_0 - f_{tk}$  regression curve of gravelly clay

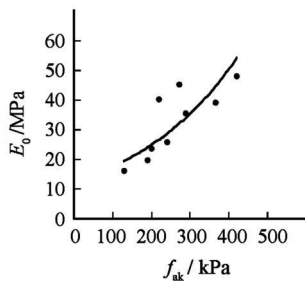


图 2 砂质粘性土  $E_0 - f_{tk}$  回归曲线

Fig 2  $E_0 - f_{tk}$  regression curve of sandy clay

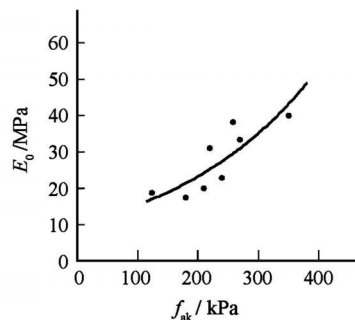


图 3 粘性土  $E_0 - f_{tk}$  回归曲线

Fig 3  $E_0 - f_{tk}$  regression curve of clay

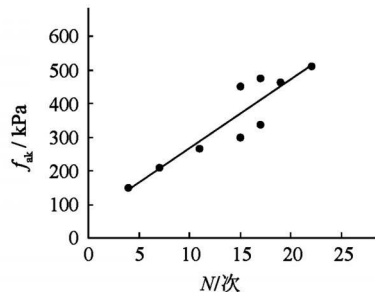


图 4 砾质粘性土  $f_{tk} - N$  回归曲线

Fig 4  $f_{tk} - N$  regression curve of gravelly clay

将式 (6) ~ (8) 分别代入式 (3) ~ (5) 中, 即可得到花岗岩残积土三种不同土质的变形模量, 如式 (9) ~ (11) 所示。

$$E_0 = 13.398 e^{0.061N+0.189} \quad (\text{砾质粘性土}) \quad (9)$$

$$E_0 = 12.287 e^{0.060N+0.252} \quad (\text{砂质粘性土}) \quad (10)$$

$$E_0 = 12.167 e^{0.055N+0.278} \quad (\text{粘性土}) \quad (11)$$

由于式 (9) ~ (11) 的边界条件与实际情况不符 (当  $N=0$  时,  $E_0$  应接近于 0), 且计算烦琐, 为便于工程应用, 将指数关系简化为线性关系。以砾质粘性土为例, 令转化后的线性关系式为  $E_0 = a_1 N$ , 为了计算更加精确, 这里  $N$  的范围取为 4 ~ 30 次, 则有

$$\int_4^{30} 13.398 e^{0.061N+0.189} dN = \int_4^{30} a_1 N dN = 442 a_1$$

这时可得出  $a_1 = 3.0$ 。以此类推, 可得出砂质粘性土与粘性土的线性关系曲线, 三种土质线性转化后的关系曲线分别列于式 (12) ~ (14)。

$$E_0 = a_1 N = 3.0 N \quad (\text{砾质粘性土}) \quad (12)$$

$$E_0 = a_2 N = 2.9 N \quad (\text{砂质粘性土}) \quad (13)$$

$$E_0 = a_3 N = 2.6 N \quad (\text{粘性土}) \quad (14)$$

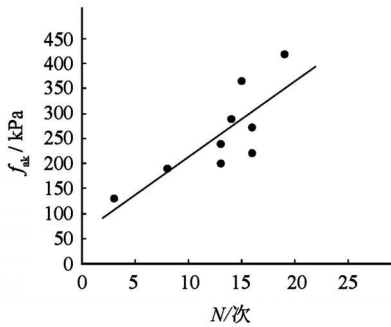


图 5 砂质粘性土  $f_{uk}$ - $N$ 回归曲线

Fig 5  $f_{uk}$ - $N$  regression curve of sandy clay

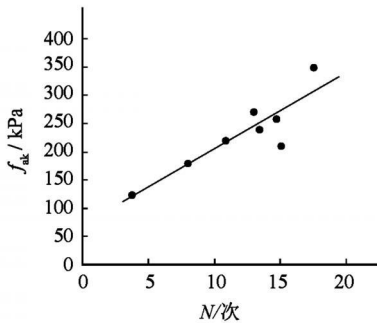


图 6 粘性土  $f_{uk}$ - $N$ 回归曲线

Fig 6  $f_{uk}$ - $N$  regression curve of clay

图 7给出了式 (12) ~ (14) 的线性关系。

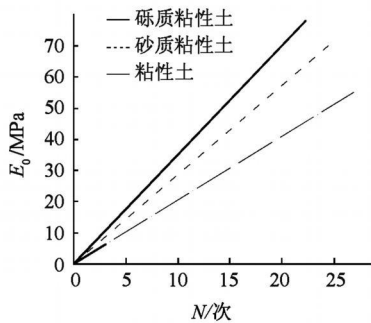


图 7 花岗岩残积土  $E_0$ - $N$ 的线性关系

Fig 7 Linear relation of  $E_0$ - $N$  for granitic residual soil

最后,考虑到土体固结的影响,根据 9例实际工程的地基 1~3年的实测沉降数据与通过式 (12)~(14) 计算得到的沉降数据进行对比分析,如图 8所示。依此结果,通过实测沉降值与计算沉降值的误差对比,对变形模量的取值进行修正,得出的修正系数  $\alpha$ 如表 3所示。其区间值与土的孔隙比及含水量等指标有关,可按表 3 通过线性插值确定。表 3即为本文给出的残积土变形模量取值的经验公式。图 9给出了经修正后的变形模量取值方法计算得到的沉降值与实测沉降值的对比,可以看出,经修正后的沉降计算值与实测沉降值吻合较好。

### 3 实例分析

实例 1: 东莞市某商住楼,地上 20层,地下一层,基

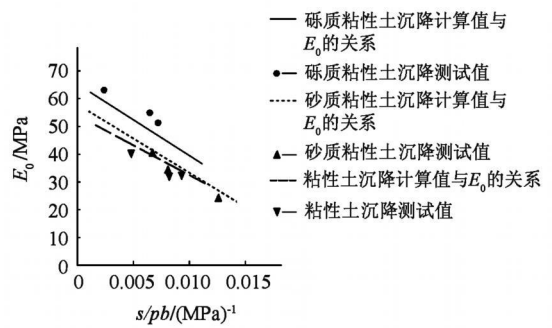


图 8 花岗岩残积土未经修正的  $E_0$  与计算沉降值、沉降测试值的关系

Fig 8 Relation of calculation and actual settlement of granitic residual soil without correction of  $E_0$

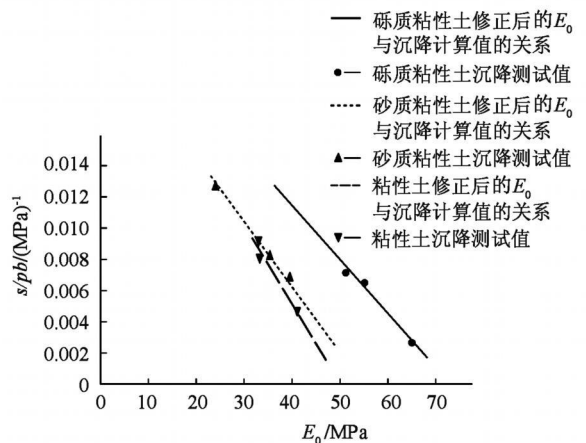


图 9 花岗岩残积土经修正后的  $E_0$  与计算沉降值、沉降测试值的关系

Fig 9 Relation of calculation and actual settlement of granitic residual soil through correction of  $E_0$

表 3 花岗岩残积土变形模量的修正系数及经验公式  
Table 3 Correction coefficient and experiential formula of deformation modulus of granitic residual soil

| 土质名称  | 修正系数 $\alpha$ | $E_0$ - $N$             |
|-------|---------------|-------------------------|
| 砾质粘性土 | 1.1~1.3       | $E_0 = (3.3 \sim 3.9)N$ |
| 砂质粘性土 | 0.9~1.1       | $E_0 = (2.6 \sim 3.2)N$ |
| 粘性土   | 0.85~1.0      | $E_0 = (2.2 \sim 2.6)N$ |

础埋深为 4m 采用天然地基,基础持力层为砂质粘性土,由燕山期花岗岩风化而成,基础长  $L=54m$  宽  $B=30m$  残积土层的标贯击数  $N=7$ 次,各土层简图如图 10 所示。将标贯击数  $N$ 代入砂质粘性土  $E_0$ - $N$ 关系式,修正系数  $\alpha$ 取为 0.97 可得计算土层的变形模量  $E_0 = 19.6MPa$  基底的平均压力为 265 kPa 该建筑在投入使用两年后得到的实测地基沉降值为 10mm 若按式 (1) 取变形模量值,则持力层变形模量为 15.4MPa 通过沉降计算,所得的地基沉降值为 15.5mm 计算值高出实测值 55%,而按本文提供的取值方法,可得结构的沉降值为 12.5mm 计算值高出实测值 25%,基本与实测值相当,与

式(1)相比更加合理。

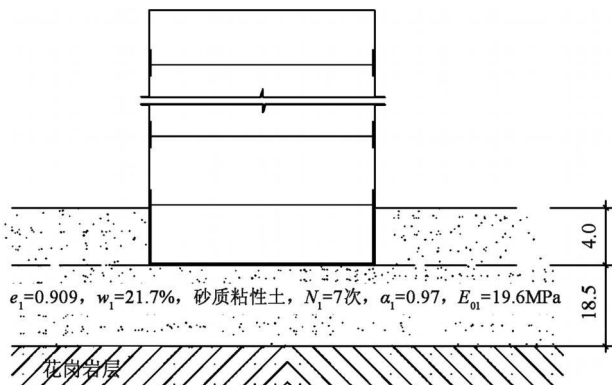


图 10 东莞市某商住楼各土层简图

Fig 10 Sketch of soil layer of a building in Dongguan City

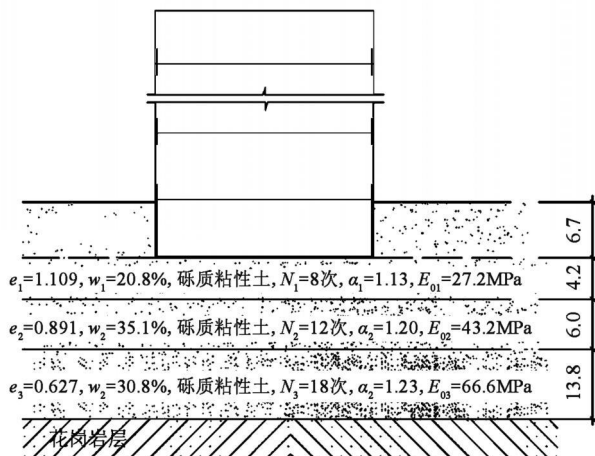


图 11 怡然天地居各土层简图

Fig 11 Sketch of each soil layer of Yiran Tiandi residence project

实例 2 深圳市怡然天地居住宅工程 2 号楼, 基础长  $L=85.1\text{m}$  宽  $B=18.8\text{m}$  基础持力层为砾质粘性土, 分三层, 各土层的标贯击数从上到下依次为  $N_1=8$  次、 $N_2=12$  次和  $N_3=18$  次。其基底各土层简图如图 11 所示。本工程竣工一年后的实测沉降值为  $4.8\text{mm}$ 。若按式(1)取值, 得到的结构沉降值为  $11.1\text{mm}$ , 高出实测值大约 1.3 倍。若按本文算法取值, 根据各层土含水量及孔隙比的不同, 计算层变形模量取值的修正系数从上至下依次取为  $\alpha_1=1.13$ 、 $\alpha_2=1.20$ 、 $\alpha_3=1.23$  变形模量  $E_{01}=27.2\text{MPa}$ 、 $E_{02}=43.2\text{MPa}$  及  $E_{03}=66.6\text{MPa}$ , 则得到结构的沉降值为  $6.8\text{mm}$ , 高出实测值大约 42%, 与式(1)计算结果比较, 更加经济。图 12 给出了在该工程中采用本文算法所得计算沉降值及式(1)所得计算沉降值与沉降测试值随时间的变化。从图中可以看到, 从 A 段到 B 段, 即从开始观测的第 3 个月到第 4 个月的一个月左右的时间, 是结构沉降最显著的时期, 由 B 段到 C 段, 沉降开始趋于平缓, 由 C 段到 D 段已基本趋于直线, 而本文算法所得的沉降结果与上述变化过程基本相符。

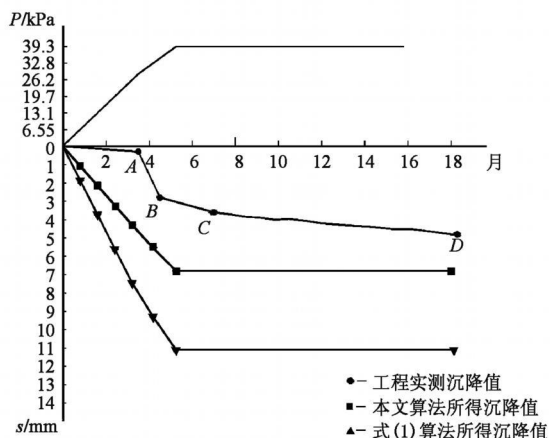


图 12 两种算法所得沉降值与实测沉降值随时间的变化

Fig 12 Variation of computational settlement data of two methods and actual settlement data with time

实例 3 深圳市金海花园 2 楼, 基础长  $L=20.6\text{m}$  宽  $B=12.4\text{m}$  基础持力层为粘性土, 分为两层, 各土层的标贯击数从上到下依次为  $N_1=10$  次和  $N_2=16$  次, 其基础各土层简图如图 13 所示。本工程竣工并投入使用一年后, 测得的沉降值为  $20\text{mm}$ 。若按式(1)取值, 得到的结构沉降值为  $28.7\text{mm}$ , 高出实测值 44%。若按本文算法取值, 根据各层土含水量及孔隙比的不同, 计算层修正系数  $\alpha_1=0.95$  和  $\alpha_2=0.98$  计算层变形模量为  $E_{01}=24.7\text{MPa}$  和  $E_{02}=40.8\text{MPa}$ , 则得到结构的沉降值为  $24.9\text{mm}$ , 高于实测值 24.3%。与式(1)计算结果比较, 更加经济。

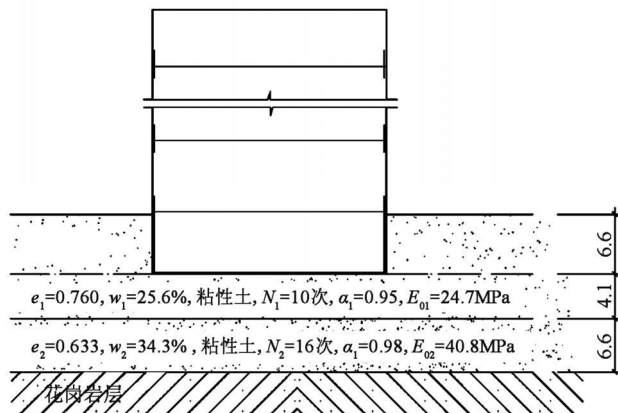


图 13 金海花园各土层简图

Fig 13 Sketch of each soil layer of Ji Hai Garden

## 4 结论

花岗岩残积土地基设计计算的关键在于沉降计算,

沉降计算参数的选取是否准确合理是计算的核心。目前所使用的方法在计算沉降时常常导致计算结果与实测值相差较大, 或造成经济浪费或产生工程隐患。本文

总结了大量的工程实测资料, 基于统计分析, 对花岗岩残积土沉降计算参数进行了深入探讨, 得到以下结论:

(1) 基于载荷试验与标贯击数实测资料的统计分析及与实测沉降资料的对比分析, 针对现有部分地区花岗岩残积土变形模量取值方法的不足, 考虑了花岗岩残积土的三种典型土质对变形模量计算的影响, 采用统计分析的方法, 提出了变形模量  $E_0$  与标贯击数  $N$  之间新的经验公式。

(2) 通过三种不同土质残积土的变形模量与实测沉降结果的对比分析可以看出, 砾质粘性土的变形模量  $E_0$  与计算沉降值的关系曲线略低于实测沉降结果的分布图, 而砂质粘性土及粘性土的变形模量  $E_0$  与计算沉降值的关系曲线均高于实测沉降结果的分布图, 依此提出变形模量  $E_0$  与标贯击数  $N$  之间的修正系数。经修正后, 得出最终变形模量  $E_0$  的经验公式, 经对实际工程的沉降计算, 计算沉降结果与实测沉降结果较为吻合。

(3) 通过与三种不同土质地基持力层的实际工程的地基沉降实测数据的比较, 使用本文算法得出的计算沉降值与实测沉降值的相对误差为 24.3%~42%, 而使用式(1)算法得出的计算沉降值与实测沉降值的相对误差为 44%~130%。

(4) 从工程实例中可以看出, 砾质粘性土和砂质粘性土采用本文方法得到的地基沉降值与实测值的相对误差要远优于式(1)等的取值方法, 大大提高了经济效率并保证了安全性, 而粘性土采用本文方法与采用式(1)等方法得到的地基沉降值与实测值相对误差在 20%以内。因为变形模量修正系数  $\alpha$  的影响因素较复

杂, 除了固结时间的影响, 还与土质的粗颗粒含量、孔隙比、含水量等因素有关, 有待进一步研究。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册 [ M ]. 第四版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007 ( Engineering and Geotechnics Handbook Committee Engineering and geotechnics handbook [ M ]. The 4<sup>th</sup> Edition. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007. ( in Chinese ) )
- [ 2 ] DBJ15—31—2003 建筑地基基础设计规范 [ S ]. ( DBJ 15—31—2003 Code for design of building foundation [ S ]. ( in Chinese ) )
- [ 3 ] 王铁宏. 全国重大工程项目地处理工程实录 [ M ]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998 ( WANG Tiehong Case histories in ground treatment of great engineering of China [ M ]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1998. ( in Chinese ) )
- [ 4 ] 张永波, 殷密英, 陈戈等. 花岗岩残积土浅层地基承载力评价方法探讨 [ J ]. 工程地质学报, 1997, 5(3): 251-256 ( Zhang Yongbo Yin Miying Chen Ge et al. A discussion assessment method for foundation bearing capacity of shallow residual soil on granite [ J ]. Journal of Engineering Geology, 1997, 5(3): 251-256. ( in Chinese ) )
- [ 5 ] Brakaja W, Pula W. A Probabilistic analysis of foundation settlement [ J ]. Computers and Geotechnics, 1976, 18(4): 291-309.
- [ 6 ] Nour A, Slimani A, Laouami N. Foundation settlement statistics via finite element analysis [ J ]. Computers and Geotechnics, 2002, 29(8): 641-672.