

# 考虑模量变化与三维应力影响的地基沉降分析方法<sup>\*</sup>

曹文贵<sup>1†</sup>,李鹏<sup>1,2</sup>,许烜<sup>1</sup>,贺敏<sup>1</sup>

(1. 湖南大学 岩土工程研究所,湖南 长沙 410082;2. 湖南省高速公路管理局,湖南 长沙 410001)

**摘要:** 鉴于三维应力作用下土变形模量变化的根本原因在于体积变化,首先视地基土是由孔隙与土颗粒骨架组成的两相介质,将地基土单元抽象为空心球壳单元,利用 Walsh 公式及体积应力作用下的球壳位移计算公式,导出了地基土变形模量、土颗粒骨架变形模量与地基土孔隙率之间的关系模型,在此基础上,考虑地基土变形模量变化的非线性特征,引进分级加载思想,建立了增量体积应力作用的地基土变形模量变化的递推关系模型,然后,考虑三维应力影响,联合引进分层总和与分级加载的思想,利用前述地基土增量体积应力作用的地基土变形模量变化的递推关系模型,建立了新的地基沉降分析方法. 该方法不仅能反映三维应力及变形模量变化对地基沉降分析的影响,还能有效避免地基土压缩试验曲线或地基静载试验曲线的使用. 通过工程实例计算,并与现有同类分析方法进行比较分析,表明了本文模型与方法的合理性与优越性.

**关键词:** 地基;沉降;三维应力;变形模量变化;分层总和;分级加载

**中图分类号:** TU472.1

**文献标志码:** A

## An Analytical Method of Ground Foundation Settlement Influenced by Modulus Change and Three-dimensional Stress

CAO Wengui<sup>1†</sup>, LI Peng<sup>1,2</sup>, XU Xuan<sup>1</sup>, HE Min<sup>1</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Hunan Expressway Administration Bureau, Changsha 410001, China)

**Abstract:** Since the primary cause of the variation of soil deformation modulus lies in the change of soil volume under three-dimensional stress, firstly, a ground foundation soil was regarded as a two-phase medium composed of hole and soil grain skeleton. A unit of ground foundation soil was abstracted into a unit of hollow spherical shell. An analytical model on the relationship among deformation modulus of ground foundation soils and soil grain skeleton as well as soil porosity was deduced by the Walsh formula and the displacement formula of spherical shell under volume stress. On this basis, the nonlinear characteristics of deformation modulus change of ground foundation soils was considered and the thought of step-loading was introduced, and then an iteration relation model of deformation modulus of ground foundation soils under incremental volume stress was developed. Afterwards, the effect of three-dimensional stress was taken in-

\* 收稿日期:2017-01-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51378198,51508039), National Natural Science Foundation of China(51378198,51508039);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20130161110017), Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China(20130161110017)

作者简介:曹文贵(1963-),男,湖南南县人,湖南大学教授,博士生导师

† 通讯联系人, E-mail: cwglyp@21cn.com

to account, and another thought of layer-wise summation combined with step-loading was adopted. A new ground foundation settlement analysis method was then proposed by using the above-mentioned iteration relationship model for deformation modulus variation of ground foundation soils. It can not only reflect the influences of three-dimensional stress and deformation modulus variation of ground foundation soils on the analysis of ground foundation settlement, but also avoid the use of the compression curve of ground foundation soils or the static load test curves of ground foundation. Finally, the computation and analysis of practical engineering examples as well as the comparisons between the measured and calculated settlement results by the other existing methods show that the model and method proposed are more reasonable and feasible.

**Key words:** foundations; settlement; three-dimensional stress; variation of deformation modulus; layer-wise summation method; step-loading

地基沉降分析是地基处理与设计的重要依据,因此,地基沉降分析方法成为土力学的重要研究内容。为此,国内外众多学者<sup>[1-10]</sup>对此进行了广泛而深入的研究,使地基沉降分析方法研究取得了长足的进步。然而,现有研究表明,目前已有沉降分析方法均与工程实际存在较大差距,究其原因在于进行地基沉降分析方法研究时考虑在三维应力(包括初始地应力和附加应力)作用下的地基土力学参数变化对地基沉降分析影响的合理性存在缺陷与不足,因此,如何考虑地基三维应力作用引起的地基土变形力学参数变化对地基沉降分析的影响成为发展更为合理的地基沉降分析方法的关键,这正是本文研究的出发点。

目前,地基沉降分析方法众多,基本上可分为分层总和法<sup>[1-9]</sup>、数值分析方法<sup>[10]</sup>和弹性力学<sup>[11]</sup>法三大类,其中,分层总和法是最为实用而被广泛应用于工程实践的地基沉降分析法。实际上,地基沉降分层总和法也有许多种,主要又可分为基于土压缩曲线或地基静载试验曲线<sup>[1-4]</sup>和地基土本构模型<sup>[5-9]</sup>的地基沉降分析法两个小类。基于土压缩曲线或地基静载试验曲线的地基沉降分层总和法虽然可较好地反映因初始地应力(或埋深)和附加应力变化而引起地基土变形力学参数变化对地基沉降分析的影响,但许多工程往往缺乏地基土压缩曲线或地基静载试验曲线,此时采用该方法进行地基沉降分析无法实施,故该方法的应用受到限制;由于该方法一般按侧限条件下各压缩分层的单向压缩的思想计算变形,没有考虑地基土三维应力对地基沉降分析的影响;再者,也由于基于试验曲线进行计算时必须人为插值,分析计算时既不方便也会产生因插值而引起的人为误差;因此,该方法也存在明显的局限性与不足。于是,基于地基土本构模型的地基沉降分层总和法就应运而生,该方法应用的关键

在于选取合理的本构模型,其突出的优越性在于它可以充分反映地基土三维应力对地基沉降分析的影响,可是,由于地基土的孔隙性与体积可压缩性,致使地基土变形力学参数发生变化,这就使采用基于土体本构模型的地基沉降分层总和法分析地基沉降必须考虑地基土变形力学参数变化的影响。然而,不同本构模型考虑这种变化的思路与方法是不同的,沉降计算的复杂程度也是不一样的。尽管采用较复杂的本构模型<sup>[5]</sup>(如弹塑性模型、剑桥模型等)进行地基沉降分析能够得到较好的计算效果,但由于模型参数众多,合理参数的确定困难和求解方法与过程复杂,使基于复杂本构模型的地基沉降分析方法难以作为一般工程技术人员所采用。因此,基于简单的线弹性广义虎克定律和分级加载思想发展起来的地基沉降分析方法受到广大工程技术人员特别青睐。

为此,黄文熙<sup>[6]</sup>考虑三维应力对地基沉降分析的影响,采用广义虎克定律首先提出了地基沉降的分层总和法,取得了良好的效果。但是,该方法为了反映在应力作用下地基土变形力学参数变化的特点仍然需要采用地基土压缩试验曲线,使其应用于缺乏土压缩试验曲线工程的地基沉降分析受到限制。因此,曹文贵等<sup>[7-8]</sup>基于广义虎克定律和分级加载思想发展了新的地基沉降分层总和法,该方法为了反映地基土变形力学参数变化特点,采用宏观与微观相结合的分析方法,建立了受应力历史和附加应力影响的地基土变形力学参数变化关系,使该方法不仅能同时反映三维应力和地基土变形力学参数变化对地基沉降分析的影响,而且还能避免地基沉降分析采用压缩试验曲线所带来的诸多缺陷。虽然其较黄文熙<sup>[6]</sup>建立的地基沉降分析方法有着明显的优越性,可是,由于该方法在建立地基土变形力学参数变化关系时认为地基土颗粒变形与地

基土体宏观变形协调(即两者相同),无法反映地基土的不连续性变形特点,而且,这种思路与方法不能准确反映地基土变形力学参数变化机理即不能反映地基土变形力学参数变化主要是由于地基土体积变化而引起的本质特点,因此该方法仍然存在缺陷。为此,曹文贵等<sup>[9]</sup>在此基础上考虑地基土不连续性特点,采用散体介质力学理论发展了反映地基土颗粒变形与地基土体变形不协调特点的地基土变形力学参数变化关系,改进了地基沉降分析方法,但其仍然无法反映地基土变形力学参数变化的本质,因此,据此建立的地基沉降分层总和法仍然存在不足。

综合上面所述,现有地基沉降分层总和与分析方法均存在缺陷与不足,有必要对此进行更进一步研究。理想的地基沉降分层总和与分析方法既要求所采用的本构模型简单,又要能反映三维应力和地基土变形力学参数变化对地基沉降计算的影响,而且还要求其能反映地基土体变形力学参数变化的力学机理和本质特点,这正是本文研究的核心内容。

本文在现有研究的基础上,引进分层总和与分级加载的思想,通过深入探讨反映地基土体变形力学参数变化力学本质机理(即变形力学参数变化主要是因地基土体积变化所致),采用广义虎克定律提出简单而实用的地基沉降分析新方法,以期完善地基沉降分析理论。

## 1 地基土体变形力学参数变化规律

作为孔隙介质的地基土体变形模量变化的最主要原因在于地基土体在应力作用下引起的孔隙率或孔隙比的变化(即地基土体体积变化),因此,国内外众多学者从此出发,探讨了孔隙介质体积模量与孔隙介质孔隙率的关系,其研究方法主要有两类<sup>[12-14]</sup>,即等效介质理论(如 Voigt 和 Reuss 等效公式)和基于多孔介质本构方程而推导出相应关系的方法。这为地基土体变形模量变化规律研究奠定了坚实基础,而且,其能充分反映地基土体变形模量变化的本质力学机理,故本文仍沿用该思路研究地基土体变形模量变化规律。

如果将孔隙土体视为两相介质,即基质(由土颗粒组成)和孔隙,设基质体积柔度为  $\beta_s$ ,孔隙土体的宏观体积柔度为  $\beta$ ,并令孔隙土体的体积为  $V$ ,其包含的孔隙体积为  $V_c$ 。它在球应力即体积应力  $\Theta$  作用下引起的孔隙体积变化为  $\Delta V_c$ ,于是,文献<sup>[15-16]</sup>依据功的互等定理得到孔隙土体体积柔度与基质体积柔度的关系为:

$$\beta = \beta_s + \frac{\Delta V_c}{V\Theta} \quad (1)$$

这便是 Walsh 公式。尽管 Walsh 公式反映了孔隙介质体积柔度的变化规律,但要将其引用于基于广义虎克定律的地基沉降分层总和与分析,必须解决相应分析方法问题。为此,如果设孔隙土体及其基质体积模量分别为  $K$  和  $K_s$ ,相应的变形模量分别为  $E$  和  $E_s$ ,相应的泊松比分别为  $\mu$  和  $\mu_s$ ,则

$$K = \frac{1}{\beta} \quad (2)$$

$$K_s = \frac{1}{\beta_s} \quad (3)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)} \quad (4)$$

$$K_s = \frac{E_s}{3(1-2\mu_s)} \quad (5)$$

于是,如果忽略材料泊松比变化的影响(即认为  $\mu = \mu_s$ ),并将式(2)~(5)代入式(1)得:

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{E_s} + \frac{\Delta V_c}{3(1-2\mu)V\Theta} \quad (6)$$

由此可以看出,为了利用式(6)分析土体在球形应力即体积应力  $\Theta$  作用下的变形模量  $E$ ,必须解决体积为  $V$  的地基土体在体积应力作用下的孔隙体积变化量  $\Delta V_c$  的分析方法问题。为此,取一代表性土体单元,并为了研究方便,首先作如下假定:

1)代表性土体单元为一球壳,其内外径分别为  $a$  和  $b$ ,内球代表土体的孔隙部分,球壳则代表土体的骨架。

2)球壳即土体骨架为线弹性体。于是,依据假定 1)可将地基土体孔隙率表示为:

$$n = \frac{V_c}{V} = \frac{4}{3}\pi a^3 / \frac{4}{3}\pi b^3 = \frac{a^3}{b^3} \quad (7)$$

根据弹性力学<sup>[17]</sup>中球壳受外表面均布压力作用的计算公式,可得球壳内表面径向位移  $u_a$ (即球壳的内半径变化  $\Delta a$ )

$$\Delta a = -u_a = \frac{3a(1-\mu)}{2E_s(1-n)}\Theta \quad (8)$$

再依据球壳内球体积计算公式,即  $V_c = 4\pi a^3/3$ ,并对此进行微分,得

$$\Delta V_c = 4\pi a^2 \Delta a \quad (9)$$

于是,将式(8)代入式(9)得:

$$\Delta V_c = \frac{6(1-\mu)\Theta\pi a^3}{E_s(1-n)} \quad (10)$$

因此

$$\frac{\Delta V_c}{V_c} = \frac{9(1-\mu)\Theta}{2E_s(1-n)} \quad (11)$$

将式(11)代入式(6),并利用式(7)可得:

$$E = \frac{1-n}{1+na} E_s \quad (12)$$

其中:

$$\alpha = \frac{1 + \mu}{2(1 - 2\mu)} \quad (13)$$

式(12)为地基孔隙土体变形模量与土体骨架变形模量之间的关系. 但是, 由于土体骨架变形模量  $E_s$  无法采用常规试验方法测得, 而且, 土体孔隙  $n$  也是一个不确定的量, 若将式(12)直接应用于地基沉降分层总和法分析中则缺乏可操作性. 因此, 本文仍然需要在此基础上就地基土体变形模量的变化规律进行更深入的研究, 以获得能为地基沉降分层总和法分析方法直接采用的地基土体变形模量变化规律.

考虑到本文提出的地基沉降分层总和法分析方法是引进分级加载思想来解决地基沉降的非线性分析问题. 因此, 只要能建立起地基土体在增量体积应力作用前后的变形模量之间的关系则问题便可得到解决. 为此, 将地基土体所受总体积应力  $\Theta$  划分为  $m$  级加载, 每级增量体积应力为  $\Delta\Theta_k$ , 则

$$\Theta = \sum_{k=1}^m \Delta\Theta_k \quad (14)$$

并设地基土体在增量体积应力  $\Delta\Theta_k$  作用前后的变形模量分别为  $E_{k-1}$  和  $E_k$ , 其相应的孔隙率分别为  $n_{k-1}$  和  $n_k$ , 则由式(12)可得:

$$E_k = \frac{1 - n_k}{1 + n_k \alpha} E_s \quad (15)$$

$$E_{k-1} = \frac{1 - n_{k-1}}{1 + n_{k-1} \alpha} E_s \quad (16)$$

于是, 根据式(15)和(16)可得:

$$E_k = \frac{(1 - n_k)(1 + n_{k-1} \alpha)}{(1 + n_k \alpha)(1 - n_{k-1})} E_{k-1} \quad (17)$$

由于式(17)中  $n_{k-1}$  和  $n_k$  分别为地基土体在增量体积应力  $\Delta\Theta_k$  作用前后的孔隙率, 为了得到  $n_{k-1}$  与  $n_k$  之间的关系, 再利用前述代表性球壳单元进行分析. 设在  $\Delta\Theta_k$  作用前后球壳内外径分别为  $a_{k-1}$  与  $a_k$  和  $b_{k-1}$  与  $b_k$ , 相应内外径变化量为  $\Delta a_k$  与  $\Delta b_k$ , 则由式(7)可得:

$$n_{k-1} = a_{k-1}^3 / b_{k-1}^3 \quad (18)$$

$$n_k = a_k^3 / b_k^3 \quad (19)$$

又由于

$$a_k = a_{k-1} + \Delta a_k \quad (20)$$

$$b_k = b_{k-1} + \Delta b_k \quad (21)$$

而且,  $\Delta a_k$  与  $\Delta b_k$  可依据式(8)的方法进行分析, 即

$$\Delta a_k = \frac{3a_{k-1}(1 - \mu)\Delta\Theta_k}{2E_s(1 - n_{k-1})} \quad (22)$$

$$\Delta b_k = \frac{b_{k-1}[n_{k-1}(1 - \mu) + 2(1 - 2\mu)]\Delta\Theta_k}{2E_s(1 - n_{k-1})} \quad (23)$$

因此, 将式(22)与(23)分别代入式(20)与(21), 再将其代入式(19), 并利用式(16), 且忽略高阶微量, 得

$$n_k = \frac{2E_{k-1}(1 + n_{k-1}\alpha)n_{k-1} - 9(1 - \mu)n_{k-1}\Delta\Theta_k}{2E_{k-1}(1 + n_{k-1}\alpha) - 3[n_{k-1}(1 - \mu) + 2(1 - 2\mu)]\Delta\Theta_k} \quad (24)$$

利用式(17)和(24)即可得到地基土体在增量体积应力  $\Delta\Theta_k$  作用前后的变形模量的递推变化关系, 其为地基沉降分层总和法分析方法研究奠定了基础.

## 2 地基沉降分析方法

首先设地基沉降的计算压缩层厚度为  $H$ , 将其分为  $N_1$  层, 每层厚度分别为  $d_i$ , 则

$$H = \sum_{i=1}^{N_1} d_i \quad (25)$$

并设第  $i$  地基压缩层在附加应力作用下产生的竖向变形为  $S_i$ , 则地基沉降  $S$  为各压缩土层竖向变形量之和, 即

$$S = \sum_{i=1}^{N_1} S_i \quad (26)$$

同时, 将由基底附加压力引起的第  $i$  地基压缩分层附加应力划分为  $N_{2i}$  级, 并取基础中心线下土体单元进行分析, 而且设第  $i$  地基压缩分层的第  $j$  级增量附加应力为  $\sigma_{zij}$ , 两个水平向增量附加应力分别为  $\sigma_{xij}$  和  $\sigma_{yij}$ , 相应的应变增量分别为  $\epsilon_{zij}$ 、 $\epsilon_{xij}$  和  $\epsilon_{yij}$ , 利用增量广义虎克定律可得:

$$\epsilon_{zij} = \frac{1}{E_{ij}} [\sigma_{zij} - \mu(\sigma_{xij} + \sigma_{yij})] \quad (27)$$

$$\epsilon_{yij} = \frac{1}{E_{ij}} [\sigma_{yij} - \mu(\sigma_{zij} + \sigma_{xij})] \quad (28)$$

$$\epsilon_{xij} = \frac{1}{E_{ij}} [\sigma_{xij} - \mu(\sigma_{zij} + \sigma_{yij})] \quad (29)$$

式中:  $E_{ij}$  为第  $i$  地基压缩层在第  $j$  级竖向附加增量应力作用前变形模量. 其中  $\sigma_{zij}$ 、 $\sigma_{yij}$  和  $\sigma_{xij}$  可由分层总和法附加应力一般计算方法确定<sup>[11]</sup>. 于是, 第  $i$  地基压缩分层在第  $j$  级竖向附加增量应力作用引起的竖向增量变形  $S_{ij}$  可表示为:

$$S_{ij} = \epsilon_{zij} d_i \quad (30)$$

因此, 第  $i$  地基压缩分层在附加应力作用下引起的竖向变形  $S_i$  可表示为:

$$S_i = \sum_{j=1}^{N_{2i}} S_{ij} = \sum_{j=1}^{N_{2i}} \epsilon_{zij} d_i \quad (31)$$

将式(31)代入式(26)可得地基沉降计算表达式, 即

$$S = \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_{2i}} \epsilon_{zij} d_i \quad (32)$$

由此可以看出, 上述基于分层总和与分级加载思想建立的地基沉降分析方法实施的关键在于地基土体变形模量变化规律, 其主要包括各地基压缩分层

由于埋深和附加应力变化引起的变形模量变化规律分析方法,下面将进一步进行探讨.

## 2.1 埋深引起地基土变形模量的变化规律

地基压缩分层由于埋深不同,其初始地应力不同,在附加应力作用之前的固结程度不同,致使其初始变形模量不同,即所谓的深度效应.于是,本文提出下述地基压缩分层土体初始变形力学参数的确定方法.

首先,仍采用分级加载的思想,将第  $i$  地基压缩分层初始地应力分为  $N_{3i}$  级荷载分级加载,逐步固结,变形力学参数随之发生变化,直至初始地应力全部加载完毕.第  $i$  地基压缩分层所受第  $j$  级竖向初始地应力增量  $\sigma_{zij}^c$  可表示为:

$$\sigma_{zij}^c = \left( \sum_{n=1}^{i-1} \gamma_n d_n + \gamma_i d_i / 2 \right) / N_{3i} \quad (33)$$

式中:  $\gamma_n$  及  $d_n$  分别表示各分层土体重度与厚度.相应两个水平向初始地应力增量  $\sigma_{xij}^c$  与  $\sigma_{yij}^c$  可表示为:

$$\sigma_{xij}^c = \sigma_{yij}^c = k_0 \sigma_{zij}^c \quad (34)$$

式中:  $k_0$  为静止土压力系数.可表示为:

$$k_0 = \mu / (1 - \mu) \quad (35)$$

第  $i$  地基压缩分层在第  $j$  级增量自重应力作用下的增量球应力  $\Delta\theta_{ij}^c$  可表示为:

$$\Delta\theta_{ij}^c = \frac{\sigma_{xij}^c + \sigma_{yij}^c + \sigma_{zij}^c}{3} \quad (36)$$

设在附加应力作用之前,第  $i$  地基压缩层在第  $j$  级和第  $j-1$  级增量初始地应力作用下的变形模量分别为  $E_{ij}^c$  和  $E_{i(j-1)}^c$ ,其相应的孔隙率分别为  $n_{ij}^c$  和  $n_{i(j-1)}^c$ ,类似式(17)和(24),可知第  $i$  地基压缩分层在增量初始地应力作用前后的地基土变形模量的变化规律为:

$$E_{ij}^c = \frac{(1 - n_{ij}^c)(1 + n_{i(j-1)}^c \alpha)}{(1 + n_{ij}^c \alpha)(1 - n_{i(j-1)}^c \alpha)} E_{i(j-1)}^c \quad (37)$$

同样可得到在增量初始地应力作用前后地基土孔隙率的变化关系为:

$$n_{ij}^c = \frac{2E_{i(j-1)}^c (1 + n_{i(j-1)}^c \alpha) n_{i(j-1)}^c - 9(1 - \mu) n_{i(j-1)}^c \Delta\theta_{ij}^c}{2E_{i(j-1)}^c (1 + n_{i(j-1)}^c \alpha) - 3[n_{i(j-1)}^c (1 - \mu) + 2(1 - 2\mu)] \Delta\theta_{ij}^c} \quad (38)$$

通过上述递推分析,当第  $i$  地基压缩分层最后一级初始地应力加载完毕后,递推到的变形模量和孔隙率即可视为第  $i$  地基压缩分层土体在附加应力作用之前的初始变形模量  $E_{i0}$  和初始孔隙率  $n_{i0}$ ,即

$$E_{i0} = E_{iN_{3i}}^c \quad (39)$$

$$n_{i0} = n_{iN_{3i}}^c \quad (40)$$

值得注意的是在利用式(39)和(40)获得不同深度分层的模量和孔隙率时,必须要首先获得相应土层在零应力水平时对应的模量和孔隙率,即初始模

量和初始孔隙率.为此,本文采用室内土工试验确定这 2 个参数.

## 2.2 附加应力引起地基土变形模量的变化规律

前面讨论了在初始地应力作用下不同深度土层的初始变形力学参数的确定方法.在附加应力作用下,地基土因为可压缩性,其孔隙率不断变化,相应的变形模量也会不断变化.因此,设第  $i$  地基压缩层在第  $j$  级和第  $j-1$  级竖向附加应力增量作用下变形模量分别为  $E_{ij}$  和  $E_{i(j-1)}$ ,其相应的孔隙率分别为  $n_{ij}$  和  $n_{i(j-1)}$ ,类似于式(17)和式(24),可得第  $i$  地基压缩分层在增量附加应力作用前后地基土变形模量与孔隙率的变化关系:

$$E_{ij} = \frac{(1 - n_{ij})(1 + n_{i(j-1)} \alpha)}{(1 + n_{ij} \alpha)(1 - n_{i(j-1)} \alpha)} E_{i(j-1)} \quad (41)$$

$$n_{ij} = \frac{2E_{i(j-1)} (1 + n_{i(j-1)} \alpha) n_{i(j-1)} - 9(1 - \mu) n_{i(j-1)} \Delta\theta_{ij}}{2E_{i(j-1)} (1 + n_{i(j-1)} \alpha) - 3[n_{i(j-1)} (1 - \mu) + 2(1 - 2\mu)] \Delta\theta_{ij}} \quad (42)$$

式中:  $\Delta\theta_{ij}$  为第  $i$  地基压缩层在第  $j$  级增量附加应力作用下的球应力增量,且有

$$\Delta\theta_{ij} = \frac{\sigma_{xij} + \sigma_{yij} + \sigma_{zij}}{3} \quad (43)$$

可见式(41)和(42)为一个递推关系式,其需要第  $i$  地基压缩分层土体在附加应力作用之前的初始变形力学参数  $E_{i0}$  和  $n_{i0}$ ,这在 2.1 节中已经给出具体的分析方法.

## 2.3 地基沉降分析过程

为了建立考虑三维应力和变形力学参数变化影响地基沉降分析方法,须对其具体的计算方法和步骤进行归纳和总结.具体情况如下:

1) 地基沉降计算深度或压缩层厚度的确定.可按一般地基分层总和分析方法的地基沉降计算深度或压缩层厚度确定原则进行.

2) 地基压缩层分层厚度的划分.在满足  $d_i \leq 0.4b$  ( $b$  为基础宽度)条件下,为了提高计算精度,可使分层厚度  $d_i$  尽可能小一些.

3) 地基各压缩分层在附加应力作用之前初始力学参数  $E_{i0}$  和  $n_{i0}$  按本文 2.1 节方法确定.

4) 地基各压缩分层变形  $S_i$  的确定.首先,采用布辛奈斯克解<sup>[11]</sup>计算出地基各分层附加应力,再将第  $i$  地基压缩分层附加应力划分为  $N_{2i}$  级增量应力  $\sigma_{zij}$  和  $\Delta\theta_{ij}$ ,然后以  $E_{i0}$  和  $n_{i0}$  作为各地基压缩分层的初始变形力学参数,再按 2.2 节的方法计算出第  $i$  地基压缩分层在第  $j$  级附加增量应力作用后的变形力学参数  $E_{ij}$ ,并根据式(27)计算出第  $i$  地基压缩分层在第  $j$  级增量附加应力作用下的增量应变  $\epsilon_{zij}$ ,再利用式(31)计算出第  $i$  地基压缩分层在地基附加应

力作用后的压缩变形  $S_i$ .

5)地基最终沉降  $S$  的确定. 利用式(32)将各地基压缩分层的压缩变形  $S_i$  进行累加, 即可得到地基最终沉降  $S$ .

### 3 工程实例分析

#### 3.1 工程实例 1

东莞某工程<sup>[18]</sup>, 在场区内进行了 3 个点的压板载荷试验, 现选取 1<sup>#</sup> 试验点的结果进行分析. 试验板的压板直径为 80 cm, 试验点地基土物理力学指标见表 1, 压板试验数据见表 2, 压板试验的  $p-s$  曲线见图 1.

表 1 地基土物理力学指标

Tab. 1 Mechanics index of foundation soil

土类	重度 $\gamma$ /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	泊松比 $\mu$	压缩模量 /MPa	初始孔隙率 $n$
地基土	20	0.3	5.71	0.517

表 2 压板试验数据

Tab. 2 Record of plate load test

荷载 $p$ /kPa	100	200	300	400	500	600	700	800
沉降 $s$ /mm	1.01	2.58	4.51	8.03	14.25	23.44	36.71	54.56

为了进行分析比较, 分别用本文方法(变形模量由它与压缩模量之间的关系获得)和规范法(沉降计算经验系数  $\psi_s = 1.129$ )<sup>[19-20]</sup> 计算在各级荷载作用下的地基沉降量, 计算结果见图 1.

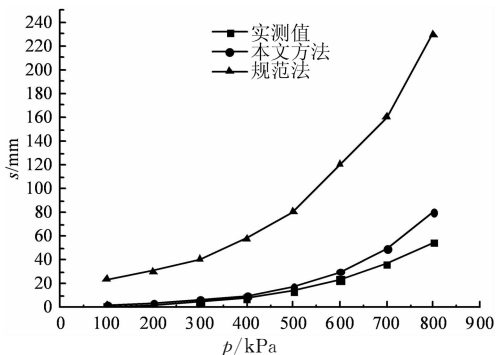


图 1 理论和试验沉降曲线的比较

Fig. 1 Comparison between the theoretical and test settlement curves

#### 3.2 工程实例 2

厦门嘉益大厦<sup>[21]</sup>由 2 栋对称布置的 30 层住宅组成, 建筑物总高度为 94 m, 基础埋深为 9.4 m. 建筑物封顶后主楼基地平均压力为 140 kPa. 本工程

地下室基坑开挖深度之内的地层至上而下为: 人工填土、新近冲积土、海积土、冲积粉质黏土、花岗岩残积砂质黏土、花岗岩. 覆盖在花岗岩残积砂质黏土上的各层土均较薄, 合在一起约为 1.2~9.1 m, 其中花岗岩残积砂质黏土可分为 A、B 和 C 3 个亚层, 其性质自上而下逐渐变硬, 厚度分别为 10 m、15 m 和 15 m, 该工程做了大量的工程勘察和现场测试, 其主要受力土层的基本物理力学指标如表 3 所示. 取 1 栋主楼进行计算, 其基础长宽比  $l/b=1$ , 基础宽度  $b=40$  m.

表 3 地基土物理力学指标

Tab. 3 Mechanics index of foundation soil

土类	重度 $\gamma$ /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	泊松比 $\mu$	变形模量 /MPa	初始孔隙率 $n$
A 亚层	18.5	0.38	12.0	0.35
B 亚层	19.4	0.38	25.0	0.35
C 亚层	19.9	0.38	38.0	0.35

为了进行对比分析, 分别采用文献[2,19]和本文方法分析计算地基沉降, 这些方法所需计算参数是不同的, 下面做简要介绍:

1) 压缩分层的划分: 对于本文采用的 3 种沉降计算方法, 根据分层总和法中计算深度的确定原则可确定计算深度为基底以下 30.6 m; 每层厚度按  $d_i \leq 0.4b$  ( $b$  为基础宽度) 确定, 于是, 将地基压缩层分为 21 层, 除第 1 层为 0.6 m 外, 其他各层均为 1.5 m.

2) 应力分级: 由于本文方法是基于增量分析的地基沉降分层总和分析方法, 因此, 需给出初始地应力和附加应力的增量分级方法. 对于这种沉降计算方法, 每个压缩分层的初始地应力和附加应力均等分成 20 级增量应力.

3) 根据计算深度内模量当量值, 查表内插取规范法沉降计算经验系数  $\psi_s = 0.382$ .

根据上述确定的计算参数, 采用文献[2,19]和本文方法可计算出地基最终沉降, 如表 4 所示.

表 4 沉降分析结果比较

Tab. 4 Comparison among settlement computation results

计算方法	计算沉降 /mm	实测平均沉降 /mmmm	相对误差 /%
文献[19]方法	151.1		490.0
文献[2]方法	60.4	25.6	135.9
本文方法	30.8		20.3

由上述 2 个工程实例分析可以看出, 采用本文方法得到的地基沉降分析结果均较现有同类方法更接近于工程实测值, 说明了本文地基沉降分析方法更具可行性与合理性.

## 4 结 论

1)采用宏观与微观相结合的分析方法,建立了地基土变形模量、土颗粒骨架变形模量与孔隙率之间的关系模型。

2)在体积应力增量作用前后地基土变形模量的递推变化关系模型研究基础上,引进分级加载思想,提出了考虑初始地应力(或埋深)和附加应力作用下地基土变形模量变化的分析方法。

3)在上述基础上,引进分层总和与分级加载思想以及增量广义虎克定律,建立了能反映三维应力及变形模量变化影响的新型地基沉降分析方法,该方法能有效避免地基土压缩试验曲线或地基静载试验曲线的使用。

4)通过工程实例分析,并与现有同类分析方法进行比较,表明了本文模型及方法的合理性与优越性。

## 参考文献

- [1] 焦五一. 地基变形计算的新参数—弦线模量的原理和应用[J]. 水文地质工程地质, 1982, 9(1): 30—33.  
JIAO W Y. The principle of the chord modulus method and its application—a new parameter for computing the foundation settlement[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1982, 9(1): 30—33. (In Chinese)
- [2] 杨光华. 地基沉降计算新方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 779—786.  
YANG G H. New computation method for soil foundation settlements[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 779—786. (In Chinese)
- [3] 李仁平. 用双曲线切线模量方程计算地基非线性沉降[J]. 岩土力学, 2007, 29(7): 1987—1992.  
LI R P. Nonlinear ground settlement calculated by hyperbolic curve tangent modulus equation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 29(7): 1987—1992. (In Chinese)
- [4] 李仁平. 上硬下软双层地基的非线性沉降分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2008, 30(1): 72—83.  
LI R P. Nonlinear settlement analysis of two-layer foundation with firm bearing stratum and soft sublayer[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2008, 30(1): 72—83. (In Chinese)
- [5] 何思明. 基于弹塑性理论的修正分层总和法[J]. 岩土力学, 2003, 24(1): 88—92.  
HE S M. Modified layer-summation based on elastoplastic theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(1): 88—92. (In Chinese)
- [6] 黄文熙. 水工建设中的结构力学与岩土力学问题[M]. 北京: 水利电力出版社, 1982: 149—218.  
HUANG W X. Some structural and geotechnical problems in hydraulic constructions[M]. Beijing: Water Resource and Electric Power Press, 1982: 149—218. (In Chinese)
- [7] 曹文贵, 田小娟, 刘海涛, 等. 条形基础下地基非线性沉降的改进计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(11): 2262—2272.  
CAO W G, TIAN X J, LIU H T, et al. Improved method for calculating nonlinear settlements of strip foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(11): 2262—2272. (In Chinese)
- [8] 曹文贵, 张超, 徐赞. 考虑扰动影响的非线性沉降分层总和和分析方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(3): 113—119.  
CAO W G, ZHANG C, XU Z. Layer-wise summation method for nonlinear settlements of ground foundation considering disturbance effect[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(3): 113—119. (In Chinese)
- [9] 曹文贵, 唐旖旎, 王江营. 基于孔隙介质模型的散体材料桩复合地基沉降分层总和和分析方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(11): 87—98.  
CAO W G, TANG Y N, WANG J Y. A layer-wise summation analysis method for the settlement of composite ground with friable material piles based on porous medium model[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2014, 41(11): 87—98. (In Chinese)
- [10] 贾强, 张鑫, 应惠清. 桩基础托换开发地下空间不均匀沉降的数值分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 2053—2057.  
JIA Q, ZHANG X, YING H Q. Numerical analysis of settlement difference for pile foundation underpinning for constructing underground space[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(7): 2053—2057. (In Chinese)
- [11] 赵明华, 俞晓, 王贻荪. 土力学与基础工程[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2003: 83—86.  
ZHAO M H, YU X, WANG Y S. Soil mechanics and foundation engineering[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2003: 83—86. (In Chinese)
- [12] STEVENS R. Porosity-dependence of elastic modulus and hardness of 3Y-TZP ceramics[J]. Ceramics International, 1999, 25: 281—286.
- [13] HRENS T J. Rock & physics phase relations: A handbook of physical constants[M]. Washington DC: [s. n.], 1995: 205—227.
- [14] MACKENSIE J K. The elastic constants of a solid containing spherical hole[C]//Proceedings of the Physical Society. [s. l.]: [s. n.], 1950, 63: 2—11.
- [15] 陈颐. 岩石物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2001: 75—78.  
CHEN Y. Petrophysics[M]. Beijing: Beijing University Press, 2001: 75—78. (In Chinese)
- [16] WALSH J B. The effect of cracks on the compressibility of rock[J]. Journal of Geophysical Research-atmospheres, 1965, 70(2): 381—388.
- [17] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 197—204.  
XU Z L. Elastic mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 197—204. (In Chinese)
- [18] 杨光华, 姜燕, 张玉成, 等. 确定地基承载力的新方法[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(4): 597—603.  
YANG G H, JIANG Y, ZHANG Y C, et al. New method for determination of bearing capacity of soil foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(4): 597—603. (In Chinese)
- [19] 中华人民共和国国家标准编写组. GBJ 50007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 25—30.  
The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GBJ 50007—2002 Code for design of building foundations[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002: 25—30. (In Chinese)
- [20] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 65—66.  
The Compilation Committee of Engineering Geology Handbook. Engineering geology handbook[M]. 4th ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2007: 65—66. (In Chinese)
- [21] 林树枝. 高层建筑结构工程实践[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2006: 27—45.  
LIN S Z. Engineering practice of tall building structure[M]. Beijing: China Building Materials Press, 2006: 27—45. (In Chinese)