

文章编号: 1000-7598-(2008) 07-1987-06

用双曲线切线模量方程计算地基非线性沉降

李仁平

(三峡大学 土木水电学院, 宜昌 443002)

摘 要: 提出了一种利用原位试验成果求解非均质非线性弹性地基最终沉降的新方法。对分层原状土载荷试验或螺旋板试验成果进行双曲线拟合, 建立分层原状土切线模量与竖向附加应力的关系方程; 在沉降计算公式中引入附加应力修正系数, 以考虑基础埋深、地基非均质非线性特征等因素对应力分布的影响; 利用双曲线切线模量方程及附加应力弹性解, 可准确求解地基的总沉降。通过对几个压板载荷试验成果的拟合分析, 得出了各土类的双曲线切线模量方程, 用于求解地基在各级荷载下的沉降。计算结果表明, 计算值与实测值吻合得很好。该方法原理简单、参数可靠、结果准确, 为地基沉降计算开辟了一条新途径。

关 键 词: 地基沉降; 载荷试验; 双曲线切线模量方程; 附加应力修正系数; 附加应力

中图分类号: TU 470

文献标识码: A

Nonlinear ground settlement calculated by hyperbolic curve tangent modulus equation

LI Ren-ping

(College of Civil & Hydropower Engineering, Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: A new technique is proposed to calculate final settlement for non-isotropic, nonlinear elastic subsoils by using the data of in-situ tests. Firstly, hyperbolic curves are fitted out from the data of load tests or screw plate tests on stratified, undisturbed soils. Secondly, the relationships between additional stresses and tangent modulus of the soils are established; and additional stress factor is added to consider the influences of foundation depth, non-isotropic and nonlinear elastic character. Finally, the total final settlement is calculated by using hyperbolic curve tangent modulus equation and additional stresses. After fitting hyperbolic curves from the data of load tests, different equations of hyperbolic curve tangent modulus for soils are obtained to find the settlements under different loads. The calculated results show that, the predicted settlements are well in agreement with those from load tests. This technique may be potential to calculate settlements with its simple principle, reliable parameters and accurate results.

Key words: ground settlement; load test; hyperbolic curve tangent modulus equation; additional stress level factor; additional stresses

1 引 言

地基沉降计算是整个地基基础工程中的三大难题之一, 至今还没有完全解决^[1]。我国习惯于用压缩模量指标采用分层总和法计算地基最终沉降量, 但计算结果往往和实际沉降差别较大。1974 年颁布的《工业与民用建筑地基基础设计规范》(TJ-74) 在分层总和法的基础上提出了一个较为简便的计算公式, 根据我国多年建筑经验, 在公式前加了一个沉降经验系数 ψ , 以修正理论计算误差。 ψ 的变化范围很大, 可以从 0.2 变化到 1.4, 即 7 倍, 这样的

沉降计算会让人觉得不可思议。尽管如此, 经过修正的计算结果其精度仍然不能令人满意, 对软土地基实测结果有时会达到计算值的 2~3 倍。

图 1 反映了试验模式对沉降变形的影响。曲线 1 为现场载荷试验曲线, 曲线 2 为压缩试验曲线。随着压力的增加, 两曲线之间出现了一些差异, 其偏差程度随着压力的增加而增加, 说明采用压缩模量作为计算指标难以得到符合实际情况的理想结果。其原因在于压缩模量是在完全侧限的试验条件下得到的, 不能考虑土体三向应力或侧向变形对沉降的影响, 也难以准确反映土体复杂的非线性变形

收稿日期: 2006-08-07

作者简介: 李仁平, 男, 1965 年生, 工学博士, 副教授、高级工程师, 主要从事岩土工程的教学和研究工作。E-mail: l.r.p@163.com

特征。

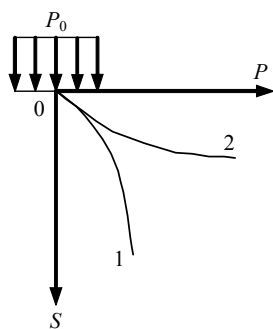


图 1 试验模式对沉降曲线的影响

Fig.1 Influence of test type on settlement curve

有学者针对规范法的不足之处提出了改进意见,如徐金明、汤永净^[2]提出附加应力计算采取原始积分形式,压缩曲线采用双曲线进行拟合,但变形指标仍然局限于采用压缩模量。

为了考虑土体的非线性变形特征,Duncan 和 Chang^[3]、应永法^[4]、何思明^[5]等分别采用 Duncan-Chang 弹性非线性模型、Drucker 弹塑性模型、修正剑桥模型等土体的本构关系模型,借助有限单元法计算地基沉降变形。采用有限元法需要根据研究对象选择合适的本构模型及相应的计算参数,采用不同的本构模型会有不同的计算结果,而试验条件的限制及土样扰动也会导致模型参数难以准确确定,这些都限制了有限元法在实际工程中的应用。

直接利用原位测试成果,特别是载荷试验成果计算地基的变形比根据室内试验得出的压缩模量计算更接近于实际。前苏联规定,用载荷试验确定的变形模量计算地基变形量;日本用 $p-s$ 曲线先计算出基床系数,然后计算沉降量;欧美国家有类似情况;我国也把用变形模量进行沉降计算的方法列入规范^[6]。说明利用变形模量计算地基沉降变形的的方法已经得到国内外工程界和学术界的普遍认可。但变形模量是根据载荷试验曲线起始直线段计算得到的,所以只适用于基底接触压力较小的情况。在地基非线性变形阶段,采用变形模量法不能得到理想结果。

采用能够反映地基非线性变形特征的非线性模量计算地基沉降会更加符合实际情况。焦五一^[7]依据大量黄土地基的载荷试验资料,总结出不同含水率、孔隙比的黄土在不同附加应力下的弦线模量,按分层总和法计算出黄土地基的沉降变形。该方法应用于黄土地基的沉降计算,能够得到比较可靠的结果。但对于其他的各类地基土,如何获得可靠的变形参数,仍然是需要进一步研究的问题。

现有的地基沉降计算方法包括弦线模量法,在确定地基的应力分布时,均是按弹性介质考虑,而地基是非弹性介质,因此,理论附加应力与实际应力有偏差。一般认为,根据 Boussinesq 弹性应力解计算得到的应力分布是偏大的,因此,采用弹性应力解计算得到的沉降将会偏大,弦线模量法为了得到比较准确的沉降结果,在计算地基沉降时,采用的是前一级荷载稍稍偏大的模量值。

本文依据载荷试验曲线对附加应力进行修正,确定出新的变形参数——双曲线切线模量(又称修正切线模量)来计算地基的沉降,能够得到与试验值完全吻合的结果,该方法计算原理简单,适用于各类地基土,将为地基沉降预测开辟出一条新途径。

2 切线模量方程及沉降计算公式

2.1 双曲线切线模量方程及沉降计算

假定地基为非均质非线性的弹性体,而各分层土则看作是各向同性弹性体,分段加载过程中每段加载均可视为线性弹性体。

原位土体的变形模量 E_0 可根据载荷试验曲线起始直线段某压力点 p_1 对应的沉降量 s_1 利用下列公式计算得到:

$$E_0 = I_0(1 - \mu^2) p_1 / s_1 \quad (1)$$

式中: $I_0 = \omega d$, ω 为刚性承压板的形状系数,圆形承压板取 0.79; 方形承压板取 0.88; d 为承压板的直径或边长; μ 为土的泊松比。

类似地土体的非线性变形模量 E_t 的计算公式有以下形式:

$$E_t = I_0(1 - \mu^2) \partial p / \partial s \quad (2)$$

式中: $\partial p / \partial s = 1 / K_t$, K_t 为对应于压力点 p 沉降为 s 点的切线基床系数; E_t 称之为切线模量。

一般的载荷 $p-s$ 试验曲线可以用双曲线来拟合^[8],其拟合方程为

$$p = s / (a + bs) \quad (3)$$

式中: a 、 b 为曲线拟合参数。

将式(3)改写成 $p/s = 1/(a + bs)$, 当 $s \rightarrow 0$ 时,得到 $a = 1/K_i$, K_i 为初始切线基床系数。由式(3)求得:

$$\partial p / \partial s = (1 - bp)^2 / a \quad (4)$$

故:

$$E_t = I_0(1 - \mu^2) \partial p / \partial s = I_0(1 - \mu^2)(1 - bp)^2 / a \quad (5)$$

当 $p \rightarrow 0$ 时, $E_t = E_i = I_0(1 - \mu^2) / a$, 称为初始

切线模量; 而当 $s \rightarrow \infty$ 时, 由式 (3) 可得到附加破坏应力的定义式为: $p_f = 1/b$ 。故 $bp = p/p_f$ 为附加应力 p 与附加破坏应力 p_f 之比。

$$E_t = E_i(1 - bp_z)^2 \quad (6)$$

式 (6) 称为切线模量方程, 式中 bp_z 称为附加应力水平。式 (6) 表明, 地基中任一点土体的切线模量都是其附加应力水平的函数, 随附加应力水平的提高而降低。

若地基深度 z 处计算得到的地基附加应力为 p_z , 相应的切线模量为 E_t , 在 z 处上下各取分层土厚度 Δh 的一半, 则该分层土在附加应力作用下产生的压缩变形 Δs 为

$$\Delta s = p_z \Delta h / E_t \quad (8)$$

理论研究表明^[9], 基础埋深对附加应力分布有影响。由于基础底面平面上存在剪切摩擦力, 导致地基内荷载作用中心下地基内的竖向附加应力 p_z 减少 10% 左右, 按照弹性理论计算得到的附加应力是偏大的; 而土体的非线性非均质特征也会对附加应力分布产生一定影响。为了考虑这些影响, 在 (8) 式中引入一个附加应力修正系数 β 对 p_z 进行修正。

$$\Delta s = \beta p_z \Delta h / E_i(1 - \beta bp_z)^2 = p_z \Delta h / E'_t \quad (9)$$

式中: $E'_t = E_i(1 - \beta bp_z)^2 / \beta$ 称为双曲线切线模量方程 (又称为修正切线模量方程)。

假设地基压缩层共分 n 层, 各分层厚度为 Δh_i , 双曲线切线模量方程为 $E'_u = E_i(1 - \beta b_i p_{zi})^2 / \beta$, 则地基总的沉降为

$$s = \sum_{i=1}^n \Delta s_i = \sum_{i=1}^n \frac{p_i \Delta h_i}{E'_u} \quad (10)$$

对于大型筏板基础或大面积堆载情况, 由于附加应力分布范围深厚, 对不同的土层 (或厚度较大的同一土层的分段土层) 需做深层的螺旋板载荷试验或旁压试验以确定各层土的切线模量方程。旁压试验实际上是一种侧向载荷试验, 分预钻式和自钻式 2 种。自钻式旁压试验虽然成果更加可靠, 但仪器操作复杂、价格高, 故预钻式旁压试验应用较多。

采用预钻式旁压试验时, 在式 (6) 和式 (9) 中:

$$I_0 = r^2 m = (0.195 s_0 + 6.25)^2 m$$

式中: m 为旁压系数 (cm^{-1}); r 为试验钻孔半径 (cm), s_0 为旁压曲线 p - s 直线段延长与纵坐标轴的交点坐标 (cm); s 为与 p 对应的测管水位下降值。

需要指出的是, 并不是所有的沉降曲线都能用双曲线很好地拟合, 对于沉降曲线不规则的情况, 可分段进行双曲线拟合。方法如下:

假定一组加载沉降观测数据为

$$(p_1, s_1), (p_2, s_2), (p_3, s_3), \dots, (p_n, s_n)。$$

则地基土体在各附加应力段的双曲线切线模量方程为

$$0 < p_{zi} < p_2 \text{ 段, } E_2 = E_{i2}(1 - \beta b_2 p_{zi})^2 / \beta ;$$

$$p_2 < p_{zi} < p_3 \text{ 段, } E_3 = E_{i3}(1 - \beta b_3 p_{zi})^2 / \beta ;$$

.....

$$p_{n-1} < p_{zi} < p_n \text{ 段, } E_n = E_{in}(1 - \beta b_n p_{zi})^2 / \beta 。$$

p_{zi} 为地基中的附加应力, 参数 β 根据计算沉降值与末级荷载实测沉降值相等拟合确定, $a_2, b_2, \dots, a_{n-1}, b_{n-1}, a_n, b_n$ 根据双曲线二点拟合法由以下公式计算得到:

$$a_n = \frac{p_{n-1}^{-1} - p_n^{-1}}{s_{n-1}^{-1} - s_n^{-1}}, b_n = p_n^{-1} - a_n s_n^{-1}, n = 2, 3, \dots, n-1, n。$$

对各附加应力段土体沉降分层求和, 得到地基的总沉降公式为

$$s = \sum_{i=1}^{n_2} \frac{p_{zi} \Delta h_i}{E_2} + \sum_{i=n_2+1}^{n_3} \frac{p_{zi} \Delta h_i}{E_3} + \dots + \sum_{i=n_k+1}^n \frac{p_{zi} \Delta h_i}{E_n} \quad (11)$$

2.2 计算参数的确定

双曲线切线模量方程 (6) 中的参数 a 、 b 根据载荷试验数据按最小二乘法进行双曲线拟合得到, 当某土层缺少载荷试验资料时, 可通过下列方法估算。

假定地基的附加极限应力 p_u 取为附加破坏应力 p_f 的 0.8 倍, 有

$$b = 1/p_f = 0.8/p_u \quad (12)$$

附加极限应力 p_u 是地基的极限承载力 p_u 扣除基底土体标高以上原有自重应力后的那部分应力, 根据 Prandtl (1920 年) 地基极限承载力的理论公式 $P_u = cN_c + \gamma DN_q$, 有 $p_u = cN_c + \gamma D(N_q - 1)$ 。式中: N_c 、 N_q 为与抗剪强度指标有关的承载力系数; c 为土的凝聚力; γ 为基底以上土的加权重度; D 为基底埋深。

地基的极限承载力 p_u 还可依据 p_u 与静力触探指标或标贯试验指标等原位测试指标间的经验相关公式计算得到。

当应力水平较低时 ($p \rightarrow 0$), 土体载荷试验的起始段接近直线, 故土体的切线模量近似等于变形

模量, 由式 (5) 得到:

$$a = I_0(1 - \mu^2)(1 - bp)^2 / E_t = I_0(1 - \mu^2) / E_0 \quad (13)$$

若土体的变形模量已知, 则附加应力 p_{zi} 下地基土体的修正切线模量方程为

$$E_t = E_0(1 - 0.8\beta p_{zi} / p_{ui})^2 / \beta \quad (14)$$

将式 (12) ~ (14) 代入式 (9) 有:

$$s = \sum_{i=1}^n \Delta s_i = \sum_{i=1}^n \frac{\beta p_{zi} \Delta h_i}{E_{0i}(1 - 0.8\beta p_{zi} / p_{ui})^2} \quad (15)$$

变形模量 E_0 与压缩模量 E_s 理论上有下列关系:

$$E_0 = E_s \left(1 - \frac{2\mu^2}{1 - \mu} \right) \quad (16)$$

式中: μ 为土体泊松比, 式 (16) 一般只适用于软土, 对于较硬的土, E_0 可能是压缩模量 E_s 的几倍, 土愈硬倍数越大。取 $E_0 = \lambda E_s$ 并设 $\alpha_i = 0.8\beta p_{zi} / p_{ui}$, 表示第 i 土层的附加应力水平。代入式 (15), 得到:

$$s = \sum_{i=1}^n \Delta s_i = \sum_{i=1}^n \frac{\beta p_{zi} \Delta h_i}{(1 - \alpha_i)^2 \lambda_i E_{si}} = \psi(\lambda, \alpha) \sum_{i=1}^n \frac{\beta p_{zi} \Delta h_i}{E_{si}} \quad (17)$$

式 (17) 与沉降计算规范中的公式形式一致, 规范中将 ψ 称作沉降计算经验系数, 式 (17) 表明, 该系数与土体的附加应力水平有关。对于附加应力大于地基承载力特征值的情况, 规范公式中的 ψ 是依据压缩模量当量值的大小查表取定值, 并未考虑应力水平的影响, 显然是不合理的, 这也是造成计算误差大的主要原因。对于软土, 非线性特征明显, 采用规范公式计算沉降, 其误差自然也会更大。

式 (14)、式 (15) 和式 (17) 可用于无载荷试验资料条件下非线性地基沉降的计算, 公式中 E_{0i} 、 p_{ui} 分别为第 i 土层的变形模量及附加应力极限荷载; λ 为经验系数。附加应力修正系数 β 值可依据式 (11) 和式 (12) 式所确定的 a 、 b 代表的双曲线拟合得到。

当有载荷试验资料时, β 值的确定方法可以通过假定末级荷载下的计算沉降与载荷试验沉降值相等计算得到。

此外, 算例分析表明, 分层厚度 Δh_i 对计算结果影响较大, 计算沉降随分层厚度 Δh_i 的减小而增加并趋向稳定, 在分层厚度小于 0.5 m 时, 取值大小对计算结果影响不大, 以下算例取 $\Delta h_i = 0.1$ m。

3 地基附加应力的计算

由于考虑地基非均质非线性的应力分布计算极

为困难, 所以地基附加应力一般按均质弹性半空间地基考虑。推求均质弹性半空间地基附加应力的基本公式是 Boussinesq 在 1885 年得到的垂直集中力 Q 作用下半无限弹性体内的应力解 σ_z :

$$\sigma_z = \frac{3Qz^3}{2\pi [x^2 + y^2 + z^2]^{5/2}} \quad (18)$$

若基础底面范围内作用一分布荷载 $p(x, y)$, 在荷载面积范围内取一微元面积 $d\xi d\eta$, 则作用在微元面积内的分布荷载为 $p(x, y)d\xi d\eta$, 因此, 土中某点 $M(x, y, z)$ 的竖向附加应力可以通过积分获得:

$$\sigma_z = \iint_A d\sigma_z = \frac{3z^3}{2\pi} \iint_A \frac{p(x, y)d\xi d\eta}{[(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + z^2]^{5/2}} \quad (19)$$

根据不同的荷载分布函数 $p(x, y)$ 和基础形式 F 使用式 (19) 进行积分, 即可计算出 $M(x, y, z)$ 处的附加应力 σ_z 。

在地基规范的附加应力计算中, 需要查许多表格并进行双线性内插, 这一过程非常繁琐且容易造成误差, 为避免此种情况, 本文使用原始积分公式编制应用程序直接计算, 并引入附加应力修正系数对其进行修正, 以考虑基础埋深、地基非均质非线性特征等因素对应力分布的影响。

4 程序实现及算法验证

4.1 程序实现

笔者应用 MATLAB7.0 实现了上述算法的计算机编程, 计算步骤为:

(1) 输入各土层载荷试验各级荷载下的实测数据 (p_i , s_i), 应用最小二乘法对数据进行双曲线拟合;

(2) 输出拟合参数 a 、 b ;

(3) 计算各级荷载下地基中的附加应力分布;

(4) 选择附加应力修正系数 β 收敛步长为 0.001, 应用地基沉降公式 (8) 和式 (9) 自动迭代求解各级荷载下的地基沉降, 直至末级荷载下地基的计算沉降与载荷试验沉降值二者差值绝对值小于 0.2 mm, 输出 β ;

(5) 计算地基总沉降并绘计算成果图。

4.2 算法验证

为了考察计算程序的可靠性, 选择文献[1]中各类土的载荷试验资料进行分析, 土类资料说明见表 1, 双曲线拟合及沉降计算结果见图 2。各曲线的拟合参数及切线模量方程见表 2。

表 1 各类型曲线试验资料说明

Table 1 Data explanation of various load test curves

曲线	土类	地点	压板尺寸/ $m \times m$
①	硬塑粉质黏土	武汉	0.5×0.5
②	风化砂质页岩	贵阳	0.5×0.5
③	松散中砂	福州	0.5×0.5
④	松散卵石	德阳	1.0×1.0
⑤	可塑黏土	上海	0.707×0.707
⑥	淤泥质黏土	天津	0.707×0.707

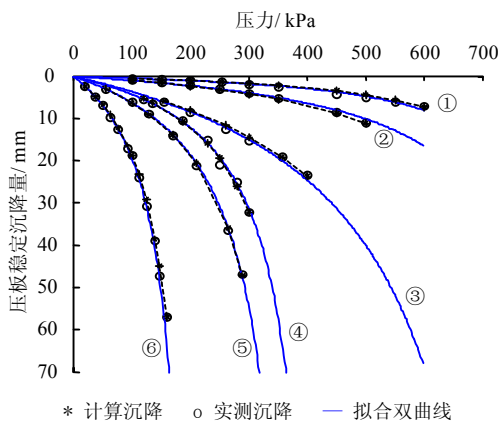


图 2 压板试验观测数据双曲线拟合及沉降预测
Fig.2 Hyperbolic curve fitting of load test data and calculated settlements

表 2 各曲线的拟合参数及切线模量方程

Table 2 Curve fitting parameters and tangent modulus equation

曲线	a	b	β	双曲线切线模量 E_t / MPa
①	0.003 8	0.001 2	0.873	$124.1 \times (1 - 0.001 0 P_z)^2$
②	0.008 6	0.001 1	0.951	$51.5 \times (1 - 0.001 0 P_z)^2$
③	0.031 9	0.001 2	0.888	$14.6 \times (1 - 0.001 0 P_z)^2$
④	0.032 8	0.002 3	0.921	$28.0 \times (1 - 0.002 1 P_z)^2$
⑤	0.046 8	0.002 5	0.881	$13.2 \times (1 - 0.002 2 P_z)^2$
⑥	0.104 7	0.004 6	0.860	$5.7 \times (1 - 0.004 0 P_z)^2$

从图 2 可以看出，除少数异常点外，各载荷试验的数据用双曲线都能够拟合得很好，不同地点、不同土类及不同压板尺寸的各级荷载的实测沉降数据和计算值几乎完全吻合。图 3 是土类⑤可塑黏土在各级荷载下切线模量随深度的变化情况，其规律是荷载越大、深度越浅，切线模量越小。

表 2 中附加应力修正系数 β 值的变化范围在 0.85~0.96 间，表明采用弹性理论计算得到的附加应力分布与实际应力之间的误差一般不超过 15%。

图 4 是某圆形板载荷试验结果。圆形板为直径 2.0 m 的素混凝土板，厚度 0.5 m，埋深 0.8 m，加载历时 20 天，分 10 级施加，每级 10 kPa，加到 110 kPa。由于实测数据用双曲线拟合相关性不高，本文采用上述分段双曲线拟合法进行计算，各附加

应力段地基土体的拟合参数及相应的切线模量方程见表 3；将结果与应永法^[4]等利用有限元法的计算得到的结果及实测值进行比较，可以看出，本文方法计算的结果与实测结果更加吻合。

进一步的研究表明，对于小尺寸圆形压板载荷试验以及深层螺旋板载荷试验，其初始切线模量 E_i 取 $E_i = I_0(1 + \mu^2)/a$ 能得到更加精确的结果，本文限于篇幅，不再赘述。

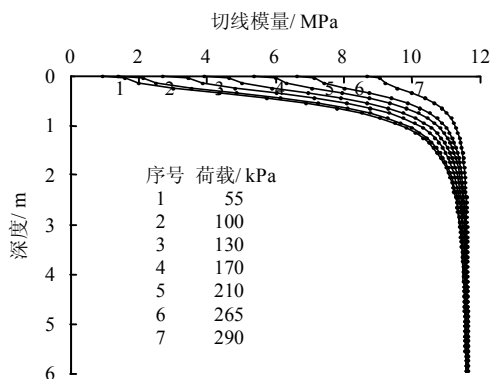


图 3 各级荷载下土⑤切线模量随深度的变化
Fig.3 Soil tangent modulus of ⑤ varied with depth under different loadings

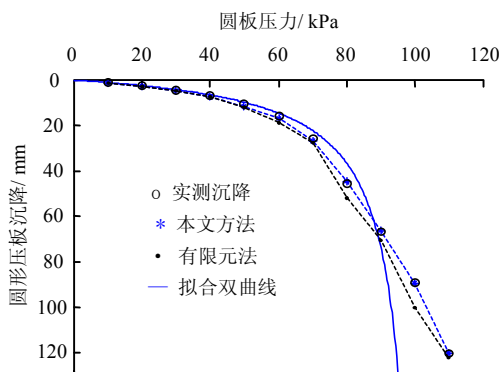


图 4 各级荷载下圆形压板沉降 $p-s$ 沉降曲线
Fig.4 Curves of circular plank under different loadings

表 3 圆形压板试验曲线的拟合参数及切线模量方程

Table 3 Curve fitting parameters and tangent modulus equation for circular plank test curve

P_z / kPa	a	b	β	双曲线切线模量 E_t / MPa
0~20	0.104 1	0.009 4	0.870	$16.8 \times (1 - 0.008 2 P_z)^2$
20~30	0.099 5	0.010 2	0.870	$17.1 \times (1 - 0.008 9 P_z)^2$
30~40	0.099 0	0.010 3	0.870	$17.2 \times (1 - 0.009 0 P_z)^2$
40~50	0.090 3	0.011 1	0.870	$18.1 \times (1 - 0.009 6 P_z)^2$
50~60	0.103 6	0.010 1	0.870	$16.4 \times (1 - 0.008 8 P_z)^2$
60~70	0.098 5	0.010 5	0.870	$17.3 \times (1 - 0.009 1 P_z)^2$
70~80	0.106 1	0.010 2	0.870	$16.0 \times (1 - 0.008 8 P_z)^2$
80~90	0.199 0	0.008 1	0.870	$8.6 \times (1 - 0.007 1 P_z)^2$
90~100	0.294 9	0.006 7	0.870	$5.8 \times (1 - 0.005 8 P_z)^2$
100~110	0.311 8	0.006 5	0.870	$5.5 \times (1 - 0.005 7 P_z)^2$

5 结 论

(1) 对于几个不同地点、不同土类型、不同平板形状尺寸的载荷试验, 采用双曲线切线模量计算得到的地基沉降, 与实测曲线吻合得很好, 说明双曲线切线模量是能够准确计算地基沉降的理想参数;

(2) 切线模量方程包含了载荷试验及沉降计算参数的全部信息, 且形式简单, 物理意义明确, 能够反映地基的非线性变形特征, 可用于载荷试验成果的整理、分析, 并为地基非线性沉降计算提供附加应力之外的充分必要之依据;

(3) 切线模量的大小与附加应力水平有关, 附加应力修正系数 β 值一般在 0.85~1.0 之间, 说明附加应力分布采用弹性理论公式进行计算其误差一般在 15% 以内; β 值用载荷试验数据进行双曲线拟合后自动求解, 计算过程不受人工因素干预影响; 压缩层计算深度与分层厚度可以不受限制;

(4) 与其他计算方法相比, 本方法计算原理简单, 计算结果准确, 计算参数全部来自原状土测试资料, 较为可靠。分段双曲线拟合法能够求解载荷试验曲线与双曲线相关性不高的情况。

(5) 目前规范法中的沉降计算经验系数 ψ 未充分考虑附加应力水平的影响, 是造成计算结果误差偏大的主要原因。

鉴于承载机制的相似性, 本方法对于小面积基础(如独立基础、条形基础)的沉降计算无疑是适用的。对于应用双曲线切线模量求解大尺寸基础(如筏板基础)或大面积堆载以及复合地基情况下地基沉降问题的准确性还有待进一步的验证, 此外, 导出能够考虑时间因素的双曲线切线模量方程也是值得进一步研究的课题。

参 考 文 献

- [1] 陈祥富. 沉降计算理论及工程实例[M]. 科学出版社, 2004.
- [2] 徐金明, 汤永净. 分层总和计算沉降的几点改进[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 518—521.
XU Jing-ming, TANG Yong-jing. Several promotions on layerwise summation method to calculate foundation settlements[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(4): 518—521.
- [3] DUNCAN J M, CHANG C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. ASCE.*, 1970, 96(SM5): 1 629—1 653.
- [4] 应永法, 潘威风. 圆形板基础下地基强度和变形非线性状研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(2): 250—526.
YING Yong-fa, PAN Wei-feng. Nonlinear finite element analysis of strength and settlement of soft soil foundation under circular plank[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(2): 250—526.
- [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 Si-ming. Modified layer-summation based on elastoplastic theory[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(1): 88—92.
- [6] JGJ6—99 高层建筑箱形与筏形基础技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [7] 焦五一. 地基变形的参数——弦线模量的原理和应用[J]. 水文地质与工程地质, 1982, (1): 30—33.
JIAO Wu-yi. The principle of the chord modulus method and its application—a new parameter for computing the foundation settlement[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 1982, (1): 30—33.
- [8] 谢树彬, 姬安宁, 廖胜贤. 用双曲线模拟载荷试验曲线方法探讨[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 707—710.
XIE Shu-bin, JI An-ning, LIAO Sheng-xian. Discussion on the curve fitting method for PLT with hyperbola[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, 21(6): 707—710.
- [9] 王杰光. 基础埋深对地基中附加应力分布的影响[J]. 桂林工学院学报, 1995, 15(4): 352—358.
WANG Ji-guang. The influence of depth of foundation on the additional stress in subgrade[J]. *Journal of Guilin Institute of Technology*, 1995, 15(4): 352—358.