

应用现场载荷试验计算压缩模量的方法

顾强康¹,张仁义¹,屈 波¹,李 玉²,梁 磊³

(1. 空军工程大学 机场建筑工程系,陕西 西安 710038; 2. 空军工程设计局 成都设计室,四川 成都 610000;
3. 94865 部队,浙江 杭州 310021)

摘 要:为了将原位载荷试验应用于地基沉降计算,以延安地区黄土填土工程为实例依托,采用弹性理论中的应变影响系数和完全侧限点的应力应变关系理论,推导了利用载荷试验结果计算地基压缩模量的方法。研究表明:符合完全侧限应力状态的点位于载荷板中心点下 0.834 倍载荷板半径 R 处;将载荷试验结果中荷载 P 乘以 0.737、载荷板沉降 S 乘以 0.522 与载荷板半径 R 的比值,可将载荷试验的 P - S 曲线转化成单向压缩的应力-应变曲线,进而可以计算出压缩模量;由该文方法计算的压缩模量均值与室内试验测试结果均值一致,两者平均值的差异仅为 5.53%;由于原位测试避免了对土样的扰动,所以得到的压缩模量的离散性低于室内试验测试结果,方差减小了 57.2%。研究成果可为压缩模量的测试方法和地基沉降计算方法的拓展提供参考。

关键词:道路工程;地基沉降;沉降计算;分层总和法;压缩模量;载荷试验

中图分类号:TU433 **文献标志码:**A

Method on the calculation of compressive modulus based on loading test

GU Qiang-kang¹, ZHANG Ren-yi¹, QU Bo¹, LI Yu², LIANG Lei³

(1. Department of Airdrome Construction Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, Shaanxi, China; 2. Design Academy of Chengdu, Air Force Engineering Design and Research Institute, Chengdu 610000, Sichuan, China; 3. 94865 Troops, Hangzhou 310021, Zhejiang, China)

Abstract: In order to apply the situ loading test to the calculation of foundation settlement, this paper adopted theoretical derivation to calculate the compressive modulus of the loess foundation in Yan'an based on the test data. The results show that the point that conforms to complete confining stress state is located in 0.834 times of the radius under the center of loading plate. The P - S curves of the loading test can be transformed into uniaxial compressive stress-strain curves through multiplying the load (P) by 0.737 and multiplying the settlement (S) by the ratio between 0.522 and the radius of loading plate (R). And then, the compressive modulus is obtained. The average of the compressive modulus obtained from the present method is in agreement with the laboratory test results, and the difference between them is only 5.53%. Due to the prevention of the soil disturbance, the dispersion of the compressive modulus from the present method is lower than the laboratory test results, with variance reduction of 57.2%. The result of the present paper provides reference for the improvement of the test method of compressive modulus and the calculation of the foundation. 3 tabs, 4 figs, 16 refs.

Key words: road engineering; foundation settlement; settlement calculation; layer-wise summation method; compressive modulus; loading test

0 引 言

地基变形参数是沉降计算中的关键参数,其测试方法受到工程技术人员的高度重视。目前地基沉降计算方法有分层总和法与弹性理论法以及在二者基础上的各种改进方法^[1]。尽管分层总和法不能充分考虑地基土体复杂的非线性变形特征,但其具有参数意义明确、计算方法简便的特点,分层总和法仍然是规范推荐的地基沉降计算方法^[2-4]。用分层总和法计算地基沉降,规范要求地基变形参数采用压缩模量,拓展压缩模量的测试方法对地基沉降计算具有重要的理论和现实意义。

用于压缩模量测试的土样一般需要经过钻探取样、运输、制样等几道工序,机械和人工作业会扰动甚至破坏土体的原有结构,进而影响压缩模量的测试结果^[5-6]。对于结构性强的地基土体,扰动对压缩模量测试结果的影响尤为明显^[7]。从理论上讲压缩模量应大于变形模量,但多个工程实践发现广东地区残积土的变形模量达到压缩模量的 6~10 倍,扰动破坏土体结构是造成这种现象的原因之一^[8]。原位测试可以有效避免扰动土样,能够提高土工参数测试的准确度^[9]。目前,原位载荷试验主要用于测定地基的承载力,同时也被用于地基的沉降计算。前苏联出现了用变形模量计算地基沉降的做法。日本和一些欧美国家则将由载荷试验测得的基床系数引入地基沉降计算^[10-11];北京地区已经将用载荷试验结果计算地基沉降列入建筑地基规范^[12];杨光华假设载荷试验 P - S 曲线为双曲线,得到了原位测定土体双曲线切线和割线模量的方法^[13];焦五一等以弦线模量为核心,将载荷试验引入到地基沉降的非线性计算中,取得不错的结果^[14-16]。

载荷试验属于原位测试试验,分层总和法是地基沉降计算的主流方法,如何利用载荷试验测定压缩模量成为集中二者优势的关键点。目前关于用载荷试验测定压缩模量的研究鲜见报道。为此,本文将在弹性理论的框架内,先以理论推导的方式得出利用载荷试验结果求解压缩模量的方法,然后依托延安地区的工程实例对理论方法进行检验。

1 试验概况

试验场区位于延安市某填方工程,粉土填料的塑

限在 15.7%~17.6%之间,液限在 24.2%~27.4%之间,塑性指数在 8.8~10.0 之间。击实试验得到填料的 最大干密度为 1.85 g/cm³,最优含水量为 13.5%。填土采用振动碾压工艺压实,按照 95%控制压实施工质量。载荷试验承载板为圆形,面积为 0.5 cm²,反力装置为 80 T 自行式强夯机,试验荷载用液压千斤顶施加,灵敏度为 10 N 的压力传感器用于控制加载量。共进行 3 组现场载荷试验,结果如图 1 所示。

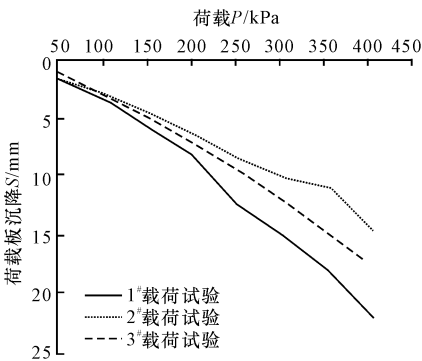


图 1 载荷试验 P - S 曲线

Fig. 1 P - S curve of loading test

由图 1 可以看出,3 组载荷试验的 P - S 曲线平缓变化,未出现变形突变现象。当试验加载到 400 kPa,沉降稳定后,荷载板周围土体未出现开裂和隆起现象。在相同荷载作用下,1# 载荷试验的沉降大于 2# 和 3# 载荷试验,这是由于 1# 载荷试验开始前延安地区持续了大约 7 d 的阴雨天气,导致载荷试验影响深度范围内的地基因含水量增大而变软。

在载荷试验场区附近人工挖孔取样,室内试验测定土样的 100~200 kPa 压力段的压缩模量,结果如表 1 所示。

表 1 压缩模量 E_s 的试验值

Tab. 1 Test value of compressive modulus E_s

取样深度/m	1# 探坑(载荷试验)/MPa	2# 探坑(载荷试验)/MPa	3# 探坑(载荷试验)/MPa
1.00~1.15	8.36	6.64	7.95
2.00~2.15	13.25	17.92	16.24
3.00~3.15	19.73	14.54	7.86
4.00~4.15	5.37	9.48	15.88

从表 1 可以看出,由于取土扰动和室内试验误差影响,室内压缩试验测得在压力 100~200 kPa 段的压缩模量 E_s 离散型很大,8 组土样压缩模量

在 5.37~19.73 MPa 之间,均值约为 11.94 MPa,方差为 21.8。

2 载荷试验 P - S 曲线与压缩模量之间的关系

载荷板下土体处于三向受力状态,应力场自上而下、自载荷板向四周呈衰减状态,板下土体的应力状态与其空间位置有关。首先在半径为 R 圆形均布荷载 P 作用中心线上寻找处于完全侧限应力状态的点,然后推导利用载荷试验 P - S 曲线求解该点的单向压缩应力-应变的方法,最后依据应力-应变曲线计算压缩模量。

2.1 完全侧限应力状态点的位置求解

半径为 R 的圆形均布荷载 P 作用于土体表面,根据弹性力学解答,荷载中心点下深度 z 处土体的竖向应变为

$$\epsilon_z = \frac{\sigma_1 - 2\mu\sigma_2}{E} \tag{1}$$

式中: ϵ_z 为竖向应变; σ_1 为第一主应力; σ_2 为第二主应力; E 为土体弹性模量; μ 为泊松比。

由弹性理论, σ_1 和 σ_2 可以写成关于载荷板直径 R 、深度 z 、均布荷载 P 的函数

$$\sigma_1 = Pf_1(R,z), \sigma_2 = Pf_2(R,z) \tag{2}$$

薛迈脱曼定义了圆形均布荷载中心线上土体的应变影响系数 I_z ,如图 2 所示^[16], b 为载荷板直径。

$$I_z = \frac{\epsilon_z E}{P} \tag{3}$$

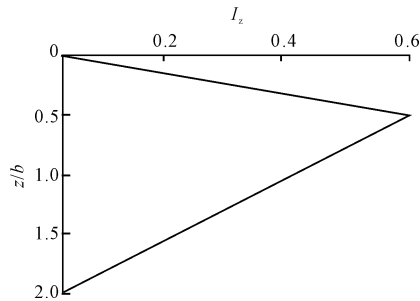


图 2 应变影响系数
Fig. 2 Stress influence coefficient

薛迈脱曼根据有限元计算和试验给出应变影响系数的简化计算方法,如下式

$$\begin{aligned} \text{当 } \frac{z}{R} \leq 1 \text{ 时, } I_z &= 0.6 \frac{z}{R} \\ \text{当 } 1 < \frac{z}{R} \leq 4 \text{ 时, } I_z &= 0.8 - 0.2 \frac{z}{R} \\ \text{当 } 4 < \frac{z}{R} \text{ 时, } I_z &= 0 \end{aligned} \tag{4}$$

综合式(1)~式(3),可知 I_z 、 $f_1(R,z)$ 、 $f_2(R,z)$ 满足如下关系

$$I_z = f_1(R,z) - 2\mu f_2(R,z) \tag{5}$$

由完全侧限应力状态特点可知,完全侧限点的 $f_1(R,z)$ 、 $f_2(R,z)$ 满足。

$$f_2(R,z) = \mu f_1(R,z) \tag{6}$$

故完全侧限点的应变影响系数 I_z 为

$$I_z = f_1(R,z)(1 - 2\mu^2) \tag{7}$$

文献[16]给出了圆形均布荷载中心点下土体的竖向应力系数 a_c ,如表 2 所示。表 2 中竖向应力系数 a_c 即为函数 $f_1(R,z)$ 。

表 2 竖向应力系数
Tab. 2 Vertical stress coefficient

z/R	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6
a_c	0.949	0.864	0.756	0.646	0.547	0.461	0.390

黄土的泊松比为 0.35~0.45,取 $\mu=0.40$ 。由式(4)和式(7)分别计算在不同深度 z 处的 I_z 值,如图 3 所示。

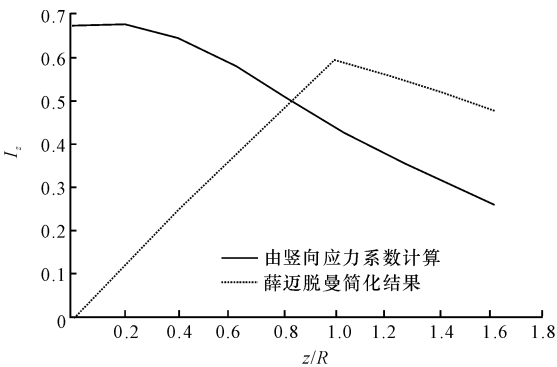


图 3 不同方法计算的 I_z 对比
Fig. 3 Comparison of I_z by different methods

用线性插值的方法可得 2 条曲线的交点,该点处的土体处于完全侧限应力状态,可得完全侧限点位于载荷板中心点下深度 H 为

$$H = 0.834R \tag{8}$$

2.2 用 P - S 曲线求解压缩模量理论方法

由式(4)可知载荷板下沉降计算深度为载荷板半径的 4 倍,根据式(1)~式(4)可知圆形均布荷载中心下总沉降 S_0 为

$$S_0 = \int_0^{4R} \frac{RI_z}{E} dz = \frac{1.2PR}{E} \tag{9}$$

刚性荷载板沉降为整个荷载板下土体变形协调的结果,文献[11]指出刚性圆形荷载板沉降约为柔性圆形均布荷载中心点沉降的 0.8 倍。所以刚性圆形均布荷载板沉降 S 满足下式

$$S=\frac{0.96PR}{E}$$

(10)

当已知荷载大小 P 、荷载板半径 R 与加载对应的沉降 S ,由式(10)可求得载荷影响深度范围内土体的弹性模量 E

$$E=\frac{0.96PR}{S}$$

(11)

由表 2 和式(4),可求得完全侧限点的第一主应力 σ_1 、第二主应力 σ_2 为

$$\sigma_1=0.737P,\sigma_2=0.295P$$

(12)

将式(11)、式(12)代入式(1),可得完全侧限点的应变与载荷试验 P - S 曲线的关系

$$\epsilon_z=\frac{0.522S}{R}$$

(13)

荷载板半径 R ,由载荷试验 P - S 曲线可以读取每级荷载 P 对应的荷载板沉降 S 。将 P - S 曲线转化成单向压缩应力-应变曲线的方法是:荷载板平均压力 P 乘以 0.737 得到等效的单向压缩试验中竖向压力;对应的竖向应变可由荷载板沉降按照式(13)计算得到。

2.3 实例检验

按照本文方法,将延安地区某工程现场载荷试验实测的 P - S 曲线转换成单向压缩中的应力-应变曲线,如图 4 所示。

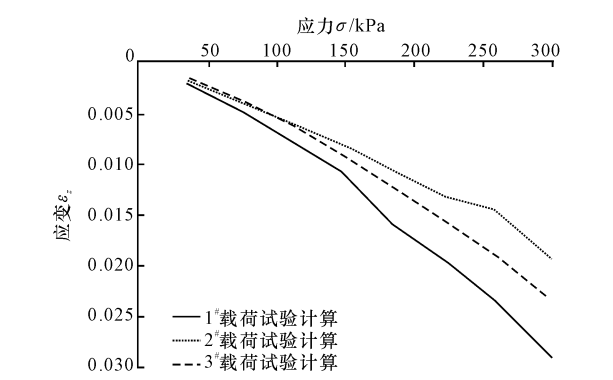


图 4 单向压缩的应力-应变曲线
Fig. 4 Stress-strain curve of uniaxial compression

由等效单向压缩应力-应变曲线可计算出压缩模量,如表 3 所示。

表 3 压缩模量 E_s 的计算值

Tab. 3 Compressive modulus E_s by calculation

压力段/kPa	1# 载荷试验/MPa	2# 载荷试验/MPa	3# 载荷试验/MPa
50~150	12.7	17.9	14.1
100~200	9.4	15.8	12.3
150~250	8.7	17.2	11.4
200~300	8.5	12.9	10.1

根据荷载试验 P - S 曲线计算得到压力在 50~300 kPa 间的压缩模量为 8.5~17.2 MPa,均值为 12.6 MPa,方差为 9.32。室内试验实测的压缩模量在 5.37~19.73 MPa 之间,均值为 11.94 MPa,方差为 21.8。本文方法得到压缩模量与室内试验测试值均值基本相等,有效降低了数据的离散性。延安地区工程实例检验说明,本文方法具有良好的合理性和准确性。

3 结 语

(1)压缩模量是分层总和法中的重要参数,依托延安地区的填土工程,本文不仅得到在高密度黄土工程中用载荷试验 P - S 曲线计算压缩模量的具体方法,还为在其他土类地基中将载荷试验应用于沉降计算提供了推导方法。

(2)以半无限空间体上作用荷载大小为 P 、半径为 R 的圆形均布荷载为物理问题,将薛迈脱曼提出的变形影响系数引入弹性理论计算,处于完全侧限应力状态的点位于荷载板中心点下 0.834 R 处,得到了将载荷试验 P - S 曲线中的荷载 P 乘以 0.737、荷载板沉降 S 乘以 0.522 后除以荷载板半径 R 可转化成单向压缩应力-应变曲线的理论方法。

(3)延安地区工程实例计算结果表明,由本文方法计算得到的压缩模量均值与室内试验结果基本一致,数据的离散性得到有效减小,取得了很好的实例检验结果。本文方法拓展了载荷试验结果在地基沉降计算中的应用,丰富了压缩模量的测试方法和地基沉降计算方法。

(4)本文用载荷试验 P - S 曲线计算地基压缩模量的方法需要已知泊松比,而泊松比对测试精度的影响有待进一步的研究。

参考文献:

References:

[1] 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 Jin-ming, TANG Yong-jing. Several promotions on layer wise summation method to calculate foundation settlements[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(4):518-521. (in Chinese)

[2] 岳鹏飞,申爱琴,祁秀林. 桥台背路基沉降理论计算[J]. 长安大学学报:自然科学版,2006,26(5):30-34.
YUE Peng-fei, SHEN Ai-qin, QI Xiu-lin. Calculating theory of settlement of bridge approach embankment [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science

- Edition, 2006, 26(5): 30-34. (in Chinese)
- [3] 李潘武, 夏正中. 采用粘弹塑性模型计算单桩沉降[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2003, 23(3): 1-4.
LI Pan-wu, XIA Zheng-zhong. Calculation of settlement of single pile by using cohesive-elastic-plastic model[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2003, 23(3): 1-4. (in Chinese)
- [4] 王乐凡, 余承华, 顾强康, 等. 不同含盐量饱和盐渍土电阻率试验研究[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2014, 4(15): 91-94.
WANG Le-fan, YU Cheng-hua, GU Qiang-kang, et al. Experimental study on resistivity of the saturated saline soil with different salinity[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2014, 4(15): 91-94. (in Chinese)
- [5] 应永法, 泮威风. 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): 250-256.
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): 250-256. (in Chinese)
- [6] 屈波, 邹晖, 顾强康, 等. 地震荷载作用下加筋高边坡的稳定性分析[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2014, 15(2): 81-85.
QU Bo, ZOU Hui, GU Qiang-kang, et al. Analysis of stability on reinforced soil slope under the action of earthquake load[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2014, 15(2): 81-85. (in Chinese)
- [7] 邵生俊, 郑文, 王正泓, 等. 黄土的构度指标及其试验方法[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 15-19.
SHAO Sheng-jun, ZHENG Wen, WANG Zheng-hong, et al. Structural index of loess and its testing method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 15-19. (in Chinese)
- [8] 柴春林, 丁波, 李智艺. 花岗岩残积土低级沉降计算的新方法[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(4): 717-722.
CHAI Chun-lin, DING Bo, LI Zhi-yi. A new method of settlement calculation on granitic residual soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(4): 717-722. (in Chinese)
- [9] 杨光华. 地基沉降计算的新方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 679-686.
YANG Guang-hua. New computation method for soil foundation settlements[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 679-686. (in Chinese)
- [10] Sakal A, Samang L, Miura N. Partially-drained cyclic behavior and its application to the settlement of a low embankment road on silty-clay[J]. Soils and Foundations, 2003, 43(1): 33-46.
- [11] Wang Y H, Tham L G, Tsui Y et al. Plate on layered foundation analyzed by a semi-analytical and semi-numerical method[J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30(5): 409-418.
- [12] JGJ 6-99, 高层建筑箱形与筏形基础技术规范[S].
JGJ 6-99, Technical code for tall building raft foundation and box foundations[S]. (in Chinese)
- [13] 杨光华. 地基非线性沉降计算的原状土切线模量法[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1927-1931.
YANG Guang-hua. Nonlinear settlement computation of the soil foundation with the undisturbed soil tangent modulus method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(11): 1927-1931. (in Chinese)
- [14] 焦五一. 地基变形的新参数-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. (in Chinese)
- [15] 焦五一, 赵树德, 郭志恭, 等. 美国技术标准用弦线模量对我国技术更新的启示[J]. 岩土力学, 2009, 30(增2): 105-109.
JIAO Wu-yi, ZHAO Shu-de, GUO Zhi-gong, et al. Inspiration for China's technology update drawn from chord modulus being introduced in USA's technical standards[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(S2): 105-109. (in Chinese)
- [16] 殷宗泽. 土工计算原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
YIN Zong-ze. Earthwork calculation principle[M]. Beijing: China Water Power Press, 2007. (in Chinese)