

陶虎,邵生俊,王正泓,等.结构性参数在黄土地基沉降计算中的应用研究[J].地震工程学报,2020,42(6):1604-1608.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1604
TAO Hu, SHAO Shengjun, WANG Zhenhong, et al. Application of Structural Parameters in Calculation of Loess Foundation Settlement[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(6): 1604-1608. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1604

结构性参数在黄土地基沉降计算中的应用研究

陶 虎¹, 邵生俊^{2,3}, 王正泓², 张少英¹, 石 喜¹

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048;
3. 陕西黄土力学与工程重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要:弦线模量法建立了考虑黄土基本物性指标及附加应力综合影响的弦线模量函数,应用分层总和法计算黄土地基的变形量,并在陕西关中黄土地区工程实践中获得良好的预测结果,而在分析兰州等其他黄土地区地基沉降时,结果出现偏差,究其原因,与计算中忽视了天然状态下黄土的结构性特征有关。以弦线模量法为基础,通过西安近郊4处土样试验和大量载荷试验资料,分析黄土的构度指标与压缩模量、孔隙比、含水量的关系,并将构度指标引入弦线模量表,深化结构性参数在地基沉降变形计算中的理论。

关键词: 构度; 三层法; 弦线模量; 地基沉降

中图分类号: TU444

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)06-1604-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1604

Application of Structural Parameters in Calculation of Loess Foundation Settlement

TAO Hu¹, SHAO Shengjun^{2,3}, WANG Zhenhong², ZHANG Shaoying¹, SHI Xi¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China;

3. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Loess Mechanics and Engineering, Xi'an 710048, Shaanxi, China)

Abstract: Chord modulus method is used to establish chord modulus function considering the basic physical properties of loess and the combined effects of additional stress. Layer-wise summation method is applied to calculate the deformation of the loess foundation. Good prediction results are obtained in the engineering practice of the Guanzhong loess area in Shaanxi Province. However, a different result is obtained when analyzing the settlement of foundations in other loess areas, such as Lanzhou. The contradicting results could be due to the neglect of the structural characteristics of loess under natural conditions. Using chord modulus method, this study evaluates the relationship between the structural index of loess and the compressive modulus, void ratio, and water content. Four soil samples were collected in the urban area of Xi'an, and a large amount of load test data was employed in the analysis. The results validate the theory of structural param-

收稿日期: 2019-01-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51469012); 国家自然科学基金资助项目(51668036); 大学生创新创业训练计划项目(201810732012)

第一作者简介: 陶 虎(1975-), 男, 博士, 副教授, 主要从事黄土力学及工程应用的研究。E-mail: taohu01@126.com。

ters in the settlement calculation of foundation settlement.

Keywords: structural index; three-layer method; chord modulus; foundation settlement

0 引言

地基沉降是土力学中古老而目前没有很好解决的问题之一,关于土的强度与变形的本构模型成为现代土力学研究的核心和关键^[1]。计算地基沉降的方法有很多^[2-4],但计算结果与实际沉降往往出入较大,究其原因,一方面与计算方法的假定有关,另一方面则是难以合理、准确的确定地基土的变形模量。黄土是具有特殊结构的土,其湿度、密度、粒度和构度等物理指标与黄土的强度和变形密切相关,其中构度指标综合反映了黄土的初始结构性^[5]。

从土力学研究途径出发,谢定义等^[6]在土的结构可稳性和可变性分析的基础上,基于压缩试验提出了用原状土、重塑土和饱和土的强度或变形描述结构性参数的定量化公式,首次提出了综合结构势思想,此后在这一思想的指导下,先后将结构性参数用于黄土边坡稳定分析及黄土地区隧道围岩压力计算^[7-8],崔军等^[9]研究了变荷载下结构性对软土固结变形的影响,使得结构性参数在工程中有了新的发

展。在现有各类规范中,多采用分层总和法计算地基沉降,计算的主要参数从实验室直接取得,不能反映真实状态下土的力学性状,特别是天然状态下黄土具有较强的结构性,力学特性受震动^[10]和增湿的影响大,因此,对相关计算参数进行修正^[11-13],各种不利因素叠加后用一个值来代替,其变化范围在 0.2~1.4 之间,受黄土性质和基础形式等的影响,计算的沉降量和沉降差就非常敏感^[14]。

基于焦五一弦线模量法^[15]理论,在弦线模量表中引入构度^[16]指标,从而反映结构性对黄土地基变形的影响。

1 地基沉降的算法

1.1 弦线模量法计算地基沉降的原理及方法

弦线模量是焦五一收集大量的原位载荷试验提出的,以实测的 p-s 曲线上某一压力点上的荷载增量和沉降增量,按照 Businessg 解,反算这个压力点的变形模量即持力层的弦线模量。它是将几何学上的“弦线”和力学上的“模量”这两个概念结合起来。持力层的弦线模量依据 Businessg 解,得

$$E_{cj} = (1 - \mu^2)\omega b \frac{\Delta p_i}{\Delta S_i}$$

(1)

式中: μ 为泊松比; ω 为形状系数; b 为荷载板的直径, Δp_i 为荷载增量; ΔS_i 为变形增量。

焦五一统计了关中平原地区大量黄土地基的物性指标,并在荷载板试验基础上建立了与液限、孔隙比、含水量和附加应力有关的弦线模量表,通过该表可以查取对应附加应力的模量,采用分层法总和法计算最终沉降量,分析兰州等其他地区的黄土地基沉降问题时,却不是那么理想,其原因为不同地区黄土具有粒度和结构的差异性。为了反映粒度和结构性的影响,最终采用液限修正的方法,在地基沉降计算中用一个修正系数修正

$$\xi = \left(\frac{31}{w_L}\right)^n$$

(2)

式中: n 值随地区变化。兰州地区黄土 $n=2$;关中地区黄土 $n=1$;软土 $n=5$ 。

1.2 三层法及沉降计算

通过三层法确定各层的压缩模量,把土体看作弹性体,其应变随应力变化,绘出 $p(j-1)$ 及 $p(j)$ 压力下的附加应力分布如图 1 所示。确定最大影响深度 $z(\max)$,将其等分为三层,每层高度 $h = z(\max)/3$,确定每一层面的附加应力,并求出相邻面上的平均值。每一层的平均附加应力确定之后,依据地基土弦线模量三层法^[12] 计算的划分假定查取模量值。分别将相邻两级压力的附加应力在各层的曲边面积等效为矩形面积,各层内的平均面积为

$$\Delta A_i = h[\sigma_i(j) - \sigma_i(j-1)]$$

(3)

式中: $i=1,2,3$ 。

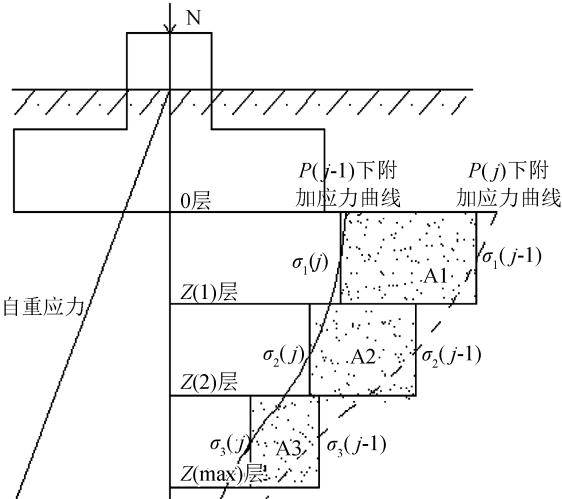


图 1 附加应力分布面积变化

Fig.1 Change of distribution area of additional stress

附加应力面积的变化之和则是沉降由 $S(j-1)$ 增加至 $S(j)$ 的根本原因。根据地基载荷试验成果 p - s 曲线,载荷板上的压力由 $P(j-1)$ 增加到 $P(j)$ 时,相应的沉降量由 $S(j-1)$ 增加到 $S(j)$,确定每一层的平均附加应力,然后在表 1 中查取对应的模量。

表 1 地基土弦线模量三层法计算的划分假定
Table 1 Assumption of the chord modulus calculated by the three-layer method

σ_{zi}/kPa	0~25	25~50	50~75	75~100	100~125
E_i	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5

按地基三层法的假定,在 $P(j)$ 下的各层平均附加应力的范围内,地基土的模量看作一个常数。第一级压力 $P(1)=25\text{ kPa}$ 时,由附加应力的分布随着载荷板下深度的增大反而减小的规律可知,三层内的附加应力都小于 25 kPa ,此时各层模量相等,由沉降的基本公式可得

$$S = \frac{\Delta A_1}{E_1} + \frac{\Delta A_2}{E_1} + \frac{\Delta A_3}{E_1} \tag{4}$$

若 $0\sim z(1)$ 层平均附加应力处于 $25\sim 50\text{ kPa}$ 时,则该层的模量则应取为 E_2 (暂时未知),依次判断第二、三层平均附加应力仍处于 $25\sim 50\text{ kPa}$ 时,则取为 E_2 (暂时未知),如处于 $0\sim 25\text{ kPa}$ 时,则取为 E_1 (已确定),最终建立含 E_2 的方程,求出 $25\sim 50\text{ kPa}$ 下的模量 E_2 。沉降公式如式:

$$S = \frac{\Delta A_1}{E_2} + \frac{\Delta A_2}{E_2} + \frac{\Delta A_3}{E_1} \tag{5}$$

以此类推,可以得到各模量条件下的累积沉降量。

2 构度与弦线模量表的关系

2.1 构度的定义

长期以来,对于土的认识仅从粒度、密度和湿度三方面出发,而忽略了原状土具有的结构性问题。在谢定义提出综合结构势^[17]之后,通过比较原状土、重塑土和饱和土的压缩变形、剪切变形、阻抗变形等,分别建立了应变结构性参数、应力结构性参数、模量结构性参数和孔隙比结构性参数等。初始结构性^[18]是决定黄土力学特性的一个最为根本的内在因素,它和其他物理量(粒度、密度和湿度)一样将成为变形、强度等力学特性变化的依据。但是,仅仅认识到结构性对土宏观变形和力学特性影响是不够的,而应该更深入地研究复杂条件下黄土的结构性,针对黄土地区提出合理的地基改良方法^[19]。邵生俊等^[20]定义了构度指标

$$m_u = \frac{m_1}{m_2} = \frac{(q_u)_o / (q_u)_r}{(q_u)_s / (q_u)_o} = \frac{(q_u)_o^2}{(q_u)_r \cdot (q_u)_s} \tag{6}$$

式中: $(q_u)_o$ 、 $(q_u)_r$ 、 $(q_u)_s$ 分别代表原状土、重塑土、原状饱和土的无侧限抗压强度。 m_u 为构度,其中 m_1 反映了结构可稳性; m_2 反映了结构可变性。

2.2 含水量对构度的影响

黄土和白鹿原 Q_3 黄土,取土深度约 10 m 。土块在现场削制成 $30\sim 50\text{ cm}$ 的立方体,标明上下方向,试验所用土样主要物理指标如表 2 所列。

表 2 黄土物性指标
Table 2 Physical property indexes of loess

土样名称	比重 G_s	天然含水量 $w/\%$	干密度 ρ_d $/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 I_p	初始孔隙比 e_0
曲江 Q_3 黄土	2.70	18	1.35	42.0	26.0	16.0	0.956
泾河 Q_3 黄土	2.70	10.8	1.327	35.5	23.5	12.0	1.093
白鹿原 Q_3 黄土	2.70	24.65	1.46	39.0	18.5	20.5	0.843
泾河 Q_2 黄土	2.70	2.8	1.66	33.0	21.0	12.0	0.627

分别进行原状土、重塑土和饱和原状土的无侧限抗压强度试验,用公式(2-1)计算构度,并建立构度与含水量的关系,如图 2。同时建立不同含水量下的压缩模量关系,如图 3。随着含水量的增加,构度和压缩模量都在减小,当含水量小于 5% 时,黄土呈干燥状态,构度和压缩模量变幅较小,当含水量大于塑限以后,黄土构度和压缩模量随着含水量的增加而减小,因此,黄土的含水量是影响黄土构度和压缩模量的主要因素之一。

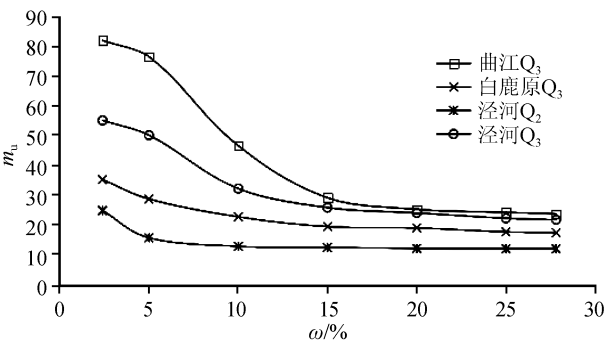


图 2 m_u 与 w 关系曲线

Fig.2 Curves between the m_u and w

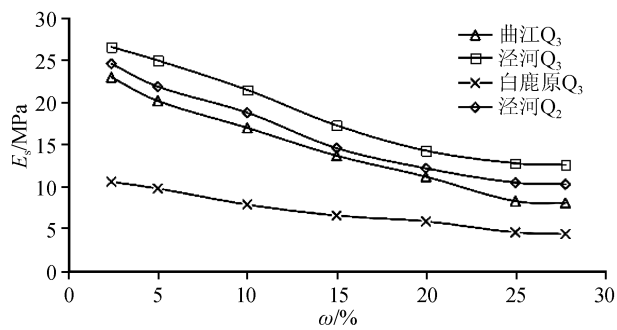


图 3 E_s 与 ω 关系曲线

Fig.3 Curves between the E_s and ω

2.3 引入结构性指标—构度的弦线模量表

探究各资料中地基土的弦线模量与其土所具有的初始结构性的关系。整理室内压缩试验确定附加应力为 50~100 kPa 范围的模量 $E_{50\sim100}$ 与构度间的关系,如图 4。

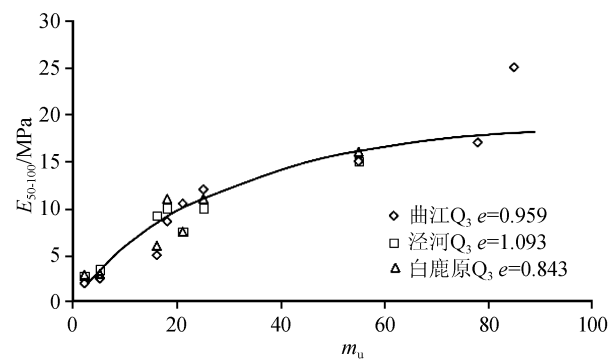


图 4 $E_{50\sim100}$ 与 m_u 的关系曲线

Fig.4 Curves between $E_{50\sim100}$ & m_u

通过搜集的 58 条现场荷载板试验资料进行对比研究,在此基础上按照相近孔隙比和含水量确定出各资料附加应力在 50~100 kPa、100~200 kPa 的模量,但部分资料基底压力小,附加应力未达到 100~200 kPa,故采用附加应力为 50~100 kPa 的模量,依据图 4 查取对应的构度。相同构度下,随着孔隙比增大,压缩模量减小,两者间的关系如图 5 所示,利用构度结合各场地的孔隙比对地基土的弦线模量表进行分类,建立构度、孔隙比、附加应力相关

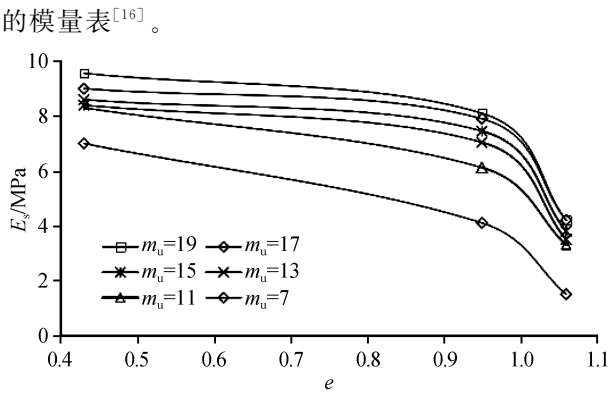


图 5 E_s 与 e 的关系曲线

Fig.5 Curves between E_s & e

3 构度引入弦线模量表的应用

大唐彬长发电厂新建工程厂址位于陕西省长武县冉店乡马屋村附近,土质为黄土状粉土,夹有黄土状粉质黏土、砂层和圆砾层,混有少量砂、圆砾等颗粒,分布于地表下 0.6~4.5 m,工程中采用 0.5 m² 的荷载板,土的物性指标及试验成果如表 3 所列。

表 3 大唐彬长发电厂新建厂区土的物理性质参数

Table 3 Physical property parameters of the new plant soil in Binchang Power Plant

天然容重 /(kN·m ⁻³)	天然含水量 /%	比重 G	孔隙比 e	液限 /%	塑限 /%
14.9	10.1	2.71	1.003	27.7	18

该工程未进行无侧限抗压试验,故目前仅能将该工程的物性指标与室内四个场地的物性指标进行对比分析,确定构度。该场地与曲江场地的物性指标接近,则查取曲江取土地点在 10% 含水量下的构度为 $m_u=55.17$ 。在假定该场地地基土构度也为 55.17 时,利用孔隙比 $e=1.003$ 的相近弦线模量,查构度、孔隙比、附加应力相关的模量表得到不同附加应力下的模量,如表 4 所列。

现按工程中的加荷等级进行逐级加载,利用查取的模量,求取各级压力下的沉降量,最大荷载 225 kPa 时,计算值比实测值偏小 10 mm。计算结果如图 6 所示。

表 4 该场地土的弦线模量

Table 4 Chord modulus of the site soil

附加应力/kPa	0~25	25~50	50~75	75~100	100~125	125~150
土的模量/MPa	12.1	12.1	11.2	10.2	7.7	6.9

4 结语

弦线模量法地基沉降通过确定土的三个物性指标及附加应力建立了计算变形的实用表格,实现了

关中黄土地区地基沉降计算值和实测值的一致性。然而黄土是具有特殊结构的土,其结构性是影响黄土强度与变形的的重要因素,基于焦五一的弦线模量地基沉降计算方法,在三个物性指标的基础上增加

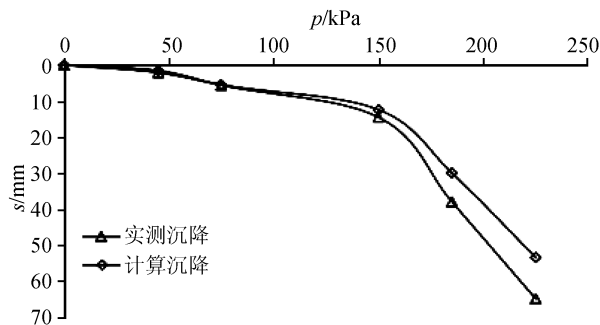


图 6 实测及计算的载荷试验曲线

Fig.6 Measured and calculated load test curve

了构度指标,从而反映了结构性对地基变形特性的影响。

参考文献(References)

- [1] 杨光华.土的现代本构理论的发展回顾与展望[J].岩土工程学报,2018,40(8):1363-1372.
YANG Guanghua.Review of Progress and Prospect of Modern Constitutive Theories for Soils[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2018,40(8):1363-1372.
- [2] 李广信.高等土力学[M].北京:清华大学出版社,2004.
LI Guangxin.Advanced Soil Mechanics[M].Beijing:Tsinghua University Press,2004.
- [3] 杨光华,王鹏华,乔有梁.地基非线性沉降计算的原状土割线模量法[J].土木工程学报,2007,40(5):49-52.
YANG Guanghua,WANG Penghua,QIAO Youliang.An Undisturbed-soil Secant Modulus Method for Calculation of Non-linear Settlement of Soil Foundations[J].China Civil Engineering Journal,2007,40(5):49-52.
- [4] 杨光华,李俊,贾恺,等.改进的地基沉降计算的工程方法[J].岩石力学与工程学报,2017,36(A02):4229-4234.
YANG Guanghua,LI Jun,JIA Kai,et al.Improved Settlement Calculation Method for Engineering Practice[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2017,36(A02):4229-4234.
- [5] 邵生俊,王丽琴,陶虎,等.黄土的构度及其与粒度、密度、湿度之间的关系[J].岩土工程学报,2014,36(8):1387-1393.
SHAO Shengjun,WANG Liqin,TAO Hu,et al.Structural Index of Loess and Its Relation with Granularity, Density and Humidity[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2014,36(8):1387-1393.
- [6] 谢定义,齐吉琳,张振中.考虑土结构性的本构关系[J].土木工程学报,2000,33(4):35-41.
XIE Dingyi,QI Jilin,ZHANG Zhenzhong.A Constitutive Laws Considering Soil Structural Properties[J].China Civil Engineering Journal,2000,33(4):35-41.
- [7] 陈昌禄,邵生俊,邓国华.土的结构性参数与强度的关系及其在边坡稳定分析中的应用[J].中南大学学报(自然科学版),

2010,41(1):328-334.

- CHEN Changlu,SHAO Shengjun,DENG Guohua.Relationship between Soil Structural Parameters and Strength and Its Application in Slope Stability Analysis[J].Journal of Central South University(Science and Technology),2010,41(1):328-334.
- [8] 陶虎,邵生俊,王强,等.甘肃兰州大青山 Q_2 黄土构度指标及结构性参数变化规律分析[J].中国地质灾害与防治学报,2015,26(4):130-137.
TAO Hu,SHAOSHengjun,WANG Qiang,et al.Relation of Structural Index to Changes of Structural Parameters for Q_2 -loess from Daqing Mountain[J].The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2015,26(4):130-137.
- [9] 崔军,谢康和,夏长青,等.变荷载下考虑结构性的双层地基一维非线性固结分析[J].中南大学学报(自然科学版),2018,49(7):1710-1717.
CUI Jun,XIE Kanghe,XIA Changqing,et al.One-dimensional Nonlinear Consolidation Analysis of Double Layered Structured Soils under Time-dependent Loading[J].Journal of Central South University(Science and Technology),2018,49(7):1710-1717.
- [10] 安亮,邓津,王兰民.黄土液化微细观特性试验研究[J].地震工程学报,2018,40(4):752-758.
AN Liang,DENG Jin,WANG Lanmin.Experimental Investigation of Micro-mesoscopic Features of Loess Liquefaction [J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(4):752-758.
- [11] 刘祖典.黄土地力学与工程[M].陕西科学技术出版社,1997,6-37.
LIU Zudian.Soil Mechanics and Engineering[M].Shaanxi Science and Technology Press,1997,6-37.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑地基基础设计规范:GB5007-2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
People's Republic of China Ministry of Housing and Urban-Rural Development.Code for Design of Building Foundation: GB5007-2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2011.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部.湿陷性黄土地区建筑规范:(GB50025-2004)[S].北京:中国建筑工业出版社,2004.
People's Republic of China Ministry of Housing and Urban-Rural Development.Code for Building Construction in Collapsible Loess Regions: (GB50025-2004) [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2004.
- [14] 张在明.等效变形模量的非线性特性分析[J].岩土工程学报,1997,19(5):56-59.
ZHANG Zaiming.Analysis of Nonlinear Behavior of Equivalent Deformation Modulus[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1997,19(5):56-59.
- [15] 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,(1).30-33. (下转第 1631 页)

nal,2014,36(3):421-428.

[9] LI X B,CAI Y Q,GU C.Influence of Cyclic Loading History on Small Strain Shear Modulus of Saturated Clays[C]//International Efforts in Lifeline Earthquake Engineering.ASCE,2014: 648-655.

[10] ZHOU J,GONG X N.Strain Degradation of Saturated Clay under Cyclic Loading[J].Canadian Geotechnical Journal, 2001,38(1):208-212.

[11] 陈章毅,宋金良,刘文程,等.珠江口海洋软土动三轴试验分析 [J].华南地震,2014,34(B04):204-207.

CHEN Zhangyi, SONG Jinliang, LIU Wencheng, et al.Dynamic Triaxial Test Analysis of Marine Soft Soil of the Pearl River Estuary[J].South China Journal of Seismology,2014,34 (B04):204-207.

[12] 杨腾,王建华,姚海慧. k_0 固结饱和和黏土的动剪切模量与阻尼 比试验研究[J].中国港湾建设,2018,38(1):39-43.

YANG Teng,WANG Jianhua,YAO Haihui,et al.Experimental Study on Dynamic Shear Modulus and Damping Ratio of K_0 Consolidated Saturated Clay[J].China Harbour Engineering,2018,38(1):39-43.



(上接第 1608 页)

JIAO Wuyi.The Principle and Application of New Parameter-String Modulus for Foundation Deformation Calculation[J].Hydrogeology & Engineering Geology,1982,(1).30-33.

[16] 王正泓.黄土地基变形的弦线模量分析方法研究[D].西安:西安理工大学,2010.

WANG Zhenghong.Research on Settlement Deformation Analysis Method of Loess Foundation Based on the Chord Modulus[D].Xi'an:Xi'an University of Technology,2010.

[17] 谢定义.试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J].岩土工程学报,2001,23(1):3-13.

XIE Dingyi.Exploration of some New Tendencies in Research of Loess Soil Mechanics[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2001,23(1):3-13.

[18] 王丽琴,邵生俊,赵聪,等.黄土初始结构性对其压缩屈服的影响[J].岩土力学,2018,39(9):3223-3228,3236.

WANG Liqin,SHAO Shengjun,ZHAO Cong,et al.Effect of Initial Structural Property of Loess on Its Compressive Yield [J].Rock and Soil Mechanics,2018,39(9):3223-3228,3236.

[19] 许书雅,王平,王峻,等.强震作用下不同处理方式黄土地基抗震陷性能评价[J].地震工程学报,2018,40(6):1198-1205.

XU Shuya,WANG Ping,WANG Jun,et al.Evaluation of Aseismic Subsidence of Loess Foundation with Different Ground Treatments under Strong Earthquake [J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(6):1198-1205.