

文章编号: 1000-7598-(2008) 01-0023-05

饱和场地土动力特性试验研究

尚守平, 熊 伟, 杜运兴, 刘方成

(湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082)

摘 要: 在工程实际中认为饱和度超过 80 % 即为饱和土, 但在室内土工试验中制作的土样饱和度达 95 % 以上, 后者经过试验测定, 动力参数与前者实际上有一定差异。在 50, 100, 200 kPa 三种固结压力下分别对饱和度为 95 %, 92 %, 88 %, 83 % 的饱和土样进行了循环单剪试验, 得到了 4 种土样在 3 种固结压力下的最大动剪模量 G_{dmax} 和最大阻尼比 D_{max} , 以及动剪模量比 $G/G_{dmax}-\gamma$ 和阻尼比 $D/D_{max}-\gamma$ 归一化数值, 并进行了对比分析。结果表明: 在同一固结压力下, 土样的 G_{dmax} , D_{max} , G/G_{dmax} 随着饱和度增大有相对递减的趋势, 而阻尼比 D/D_{max} 数值随着饱和度加大而逐渐增加; 随着固结压力的增大, 4 种土样的 G_{dmax} , D_{max} 以及 $G/G_{dmax}-\gamma$ (γ 为动剪应变) 数值上差异逐渐减小。最后对此种现象进行了讨论并分析其产生的原因。

关 键 词: 动剪模量; 阻尼比; 饱和土; 循环单剪; 试验研究

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Experimental study on dynamic characteristics of saturated soils

SHANG Shou-ping, XIONG Wei, DU Yun-xing, LIU Fang-cheng

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In project it is thought that the soil with saturation over 80% is called saturated soil. But the saturation of the sample produced in the indoor experiment reached over 95 %. In fact the dynamic parameter of the latter attained through the test is different from that of the former. In this paper, the cyclic simple shear tests of the saturated soil of saturation 95 %, 92 %, 88 % and 83 % were carried out under the consolidation pressure of 50 kPa, 100 kPa and 200 kPa respectively. Of four different sorts of soil sample under three different consolidation pressures, the maximum dynamic shear modulus G_{dmax} , the maximum damping ratio D_{max} and the dynamic modulus ratio $G/G_{dmax}-\gamma$, the damping ratio $D/D_{max}-\gamma$ generalized curve were attained and analyzed comparatively. The results show that under the same consolidation pressure, the value of the G_{dmax} , D_{max} , G/G_{dmax} shrink according to the growth of saturation; but the damping ratio D/D_{max} , quite on the contrary, becomes larger with the raise of saturation, with the increasing of the consolidation pressure, the differences among the G_{dmax} , D_{max} and $G/G_{dmax}-\gamma$ decrease gradually. Finally, this kind of phenomenon and its causes are discussed and analyzed.

Key words: dynamic shear modulus; damping ratio; saturated soil; cyclic simple shear; laboratory experiments

1 引 言

土的动剪切模量 G_d 和阻尼比 D_d 是土动力学研究的首要参数, 是抗震分析的重要依据, 也是场地地震安全性能评价中不可或缺的内容^[1]。为了确定土的动剪模量和阻尼比, 很多学者做了大量的工作, 获得了许多很有意义的研究成果^[2-8]。笔者经研究发现, 在测定饱和砂土地的动力参数时, 室内土工试验一般采用饱和度为 95 % 以上的试样进行测定, 而在工程中土体并没有达到如此高的饱和度, 而是认为饱和土达到 80 % 以上就认为饱和, 所以室

内测定的土动力参数和实际参数有一定差异。为了弄清饱和度的变化对于此差异的影响程度, 本文在循环单剪仪上对 4 种不同饱和度的饱和土进行单剪试验, 以期更好地研究场地土在饱和情况下的动力性质。

2 试验仪器和方法

2.1 试样

试验所用土样取自湖南大学上下部结构试验室内 2 m 深处土。土样主要为中砂, 基本物理性质指标为: 土粒比重为 $G_s = 2.609 9$; 最大与最小干密度

收稿日期: 2006-04-24

基金项目: 国家自然科学基金(No.50278033、50578062); 教育部重点项目基金(重点 03122); 湖南省科学技术厅科技计划重点项目(No. 06SK4057)。

作者简介: 尚守平, 男, 1953 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事结构工程研究与教学工作。E-mail: sps@hnu.cn

分别为 $\rho_{d\max} = 1.7369 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{d\min} = 1.4420 \text{ g/cm}^3$; 最大与最小孔隙比为 $e_{\max} = 0.835$, $e_{\min} = 0.520$; 粒径组成特性参数为: 平均粒径 $d_{50} = 0.339 \text{ mm}$, 不均匀系数 $C_u = 1.534$, 曲率系数 $C_c = 1.102$ 。试样尺寸: 直径 $D = 7.05 \text{ cm}$, 高 $H = 2.0 \text{ cm}$, 试样均为重塑土。制备方法为: 饱和度为 95 % 的土 (土样 S-95), 在原场地取一定质量的土, 放入烘干箱烘干 10 h, 过 2 mm 的筛, 按照土干密度相等原则在电子天平称重, 分成 9 份, 然后放入烧杯加蒸馏水煮沸排气后, 静置 12 h; 饱和度为 88 % 的土 (土样 S-88), 在原场地取土, 根据原状土密度和试样制备盒体积计算试件所需质量, 将称出土放入试样制备盒内分层击实, 保证重塑土与原状土的含水率和密度一致; 饱和度为 92 % 和 83 % 的土 (分别指定为土样 S-92 和 S-83), 原场地取土后放入烘箱烘干 10 h, 根据换算含水率分别加入一定质量蒸馏水搅拌均匀后, 放入试模内分层击实后, 静置 24 h 使水分充分浸润均匀。

2.2 试验仪器和试验方法

循环单剪试验仪器为英国 WFi 生产的 WF25735 循环单剪试验系统, 如图 1 所示。该循环单剪系统由单剪仪、传感器和计算机系统组成, 其中单剪仪包括双伺服控制制动器、控制与数据采集系统、压缩机和试样制备设备。传感器包括竖向力传感器 ($\pm 5.0 \text{ kN}$)、压力传感器 (1000 kPa)、水平力传感器 ($\pm 5.0 \text{ kN}$) 和位移传感器 ($\pm 25 \text{ mm}$),

PC 与数据采集系统连接。循环单剪系统能够双向气动加载, 最高试验频率为 70 Hz, 用户可自定义波形, 能够进行平面应变量测、常高度剪切、常应力剪切以及常应变速率剪切。测量数据在每个循环周期中从 50 个测点测得, 位移精度可达 $1 \mu\text{m}$ ^[9]。

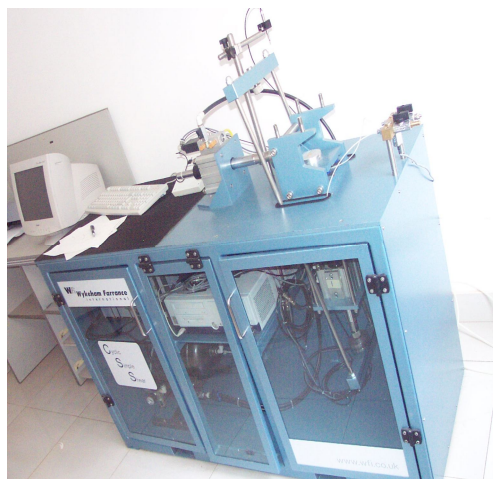


图 1 循环单剪系统

Fig.1 The cyclic simple shear system

为了研究场地土的动剪模量及阻尼比的变化情况设计了 3 组试验, 荷载分级见表 1, 试验条件见表 2, 试验按分级循环加载, 应变幅值的变化范围为 $10^{-4} \sim 10^{-2}$, 每级应变幅值下循环若干次。

表 1 荷载分级 (以应变控制) (单位: 10^{-4} m/m)

Table 1 Grading of load (Controlled by shear strain)

级别	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
荷载分级	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

表 2 试验条件

Table 2 Conditions of test

固结压力 /kPa	土样	荷载形式	振动频率 /Hz	排水 条件	加载控制 方式
50, 100, 200	4 种饱和度和不同的土样	等幅正弦	1	固结排水	应变控制式

3 试验结果及分析

在目前的土动力分析中, 多数采用的是“等效线性模型 (Hardin-Drnevich 模型)”^[10]。等效线性模型就是将土视为黏弹性体, 采用等效剪切模量 G 和阻尼比 λ 来反映土体动应力-动应变关系的非线性与滞后性。

在循环单剪试验中, 把每一周期的振动波形按

照同一时刻的 τ_d 与 γ 值一一对应描绘到 $G_d - \gamma$ 坐标上, 即可得到图 2 所示的滞回曲线。

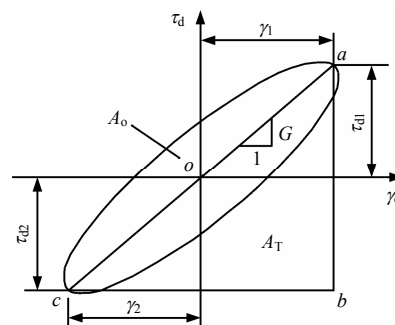


图 2 理想的动应力-应变曲线

Fig.2 The ideal hysteretic loop produced by cyclic loading

定义滞回环的平均斜率为 G_d , 则最大动剪模量 $G_{dmax} = \tau_{dmax} / \gamma_{max}$ 。如果改变了给定的 γ 值, 将得到另一套数据及滞回曲线族。在多个应变加载作用下, 可得到对应的动应变 $(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \dots, \gamma_n)$ 和相应的动剪切模量 $(G_{d1}, G_{d2}, G_{d3}, \dots, G_{dn})$ 。由这些数据可以得到 $\tau_d - \gamma$, $G_d - \gamma$ 以及 $D_d - \gamma$ 曲线。

3.1 最大动剪切模量 G_{dmax} 以及最大阻尼比 D_{max}

对比 4 种不同饱和度土样在 3 种固结压力下所得 G_{dmax} 和 D_{max} , 如表 3 所示。

表 3 G_{dmax} 和 D_{max} 试验值
Table 3 Experimental results of G_{dmax} and D_{max}

固结压力 / kPa	土样的 G_{dmax} 值 / MPa				土样的 D_{max} 值			
	S-95	S-92	S-88	S-83	S-95	S-92	S-88	S-83
50	7.142	9.573	13.868	16.628	0.149	0.165	0.18	0.191
100	9.230	11.647	14.229	17.275	0.161	0.176	0.192	0.203
200	11.429	13.223	15.420	18.072	0.190	0.207	0.21	0.231

由图 3 和图 4 可知, 4 种土样的动剪切模量和阻尼比都有随固结压力 N_c 的增大而线性增大的趋势; 在同一固结压力下, 把 4 种土样的 G_{dmax} 与 D_{max} 分别进行对比, 发现随着饱和度的增大数值相应递减, 而且随着固结压力的增加, 其相差的幅度越来越小。

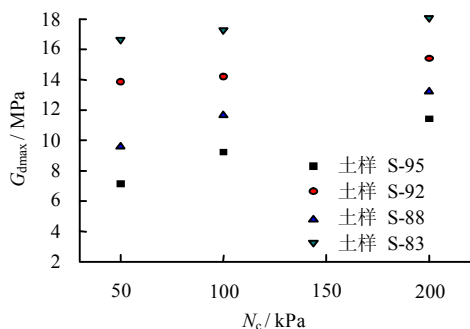


图 3 最大动剪切模量 G_{dmax} 对比

Fig.3 The comparison of maximum dynamic shear modulus G_{dmax}

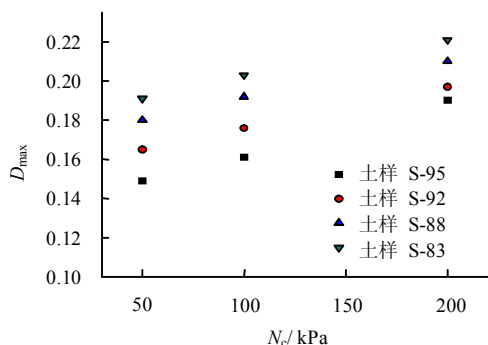


图 4 最大阻尼比 D_{max} 对比

Fig.4 The comparison of maximum damping ratio D_{max}

3.2 $G/G_{dmax} - \gamma$ 关系及其对比

假定循环单剪法测定曲线在动载作用下土的动剪应力 τ 和动剪应变 γ 间的关系符合双曲线规律, 公式为^[9]

$$\tau_d = \frac{\gamma}{\frac{1}{G_0} + \frac{\gamma}{\tau_y}} \quad (1)$$

式中: G_0 为初始动剪模量; τ_y 为最大动剪应力。

若将 G_0 坡度线与 τ_d 水平线的交点横坐标定义为参考应变 γ_r , 则 $\gamma_r = \tau_y / G_0$, 可得

$$\frac{G_d}{G_0} = \frac{1}{1 + \tau_d / \gamma_r} = \frac{1}{1 + A\gamma} \quad (2)$$

由 4 种土样的循环单剪试验得到的数据如图 5~7 所示。

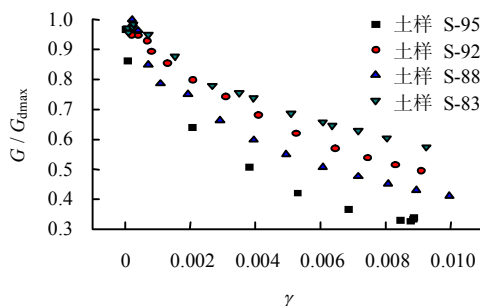


图 5 50 kPa 固结压力下 $G/G_{dmax} - \gamma$ 散点图

Fig.5 $G/G_{dmax} - \gamma$ curve under consolidation pressure of 50 kPa

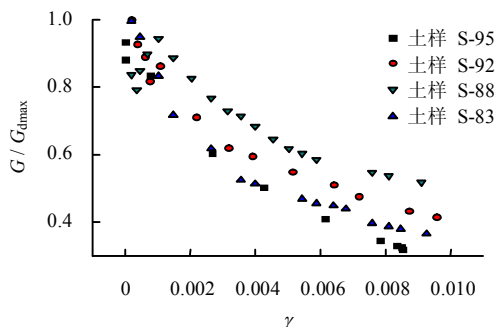


图 6 100 kPa 固结压力下 $G/G_{dmax} - \gamma$ 散点图

Fig.6 $G/G_{dmax} - \gamma$ under consolidation pressure of 100 kPa

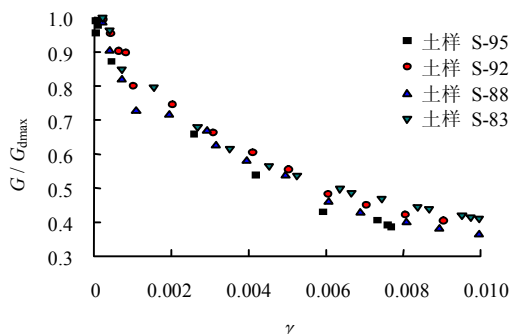


图 7 200 kPa 固结压力下 $G/G_{dmax} - \gamma$ 散点图

Fig.7 $G/G_{dmax} - \gamma$ under consolidation pressure of 200 kPa

比较图 5~7, 可以得到动剪模量的变化趋势一致, 与已有研究成果^[1-7]基本相同。在动弹塑性变形阶段 ($10^{-5} \leq \gamma \leq 10^{-4}$), 动剪切模量随动剪应变 γ 增加而降低; 在动塑性变形阶段 ($\gamma \geq 10^{-4}$), 随动剪应变的增加, 动剪切模量降低得更快。在本次试验中发现: 在 3 个固结压力下, 随着土样饱和度的增大, 其动剪模量归一化量逐渐降低; 说明随着饱和度的增大, 土样的动剪模量减小。随着固结压力的增大, 4 种土样的模量值变化有逐渐靠拢的趋势, 说明随着剪应变的增大, 其动剪模量差异逐渐减小。

表 4 模量比拟合参考数值

Table 4 The fitting parameters of modulus ratio

固结压力 / kPa	土样拟合的 A 值			
	S-95	S-92	S-88	S-83
50	247.29	161.44	115.82	86.28
100	243.47	208.97	164.57	115.48
200	190.76	182.20	167.53	157.35

3.3 $D/D_{\max} - \gamma$ 关系及其对比

在 50, 100, 200 kPa 共 3 种固结压力下, 分别进行了 4 种不同饱和度土样循环单剪试验, 得到了阻尼比随应变变化的归一化比值 $D/D_{\max} - \gamma$ 关系如图 8~10 所示。

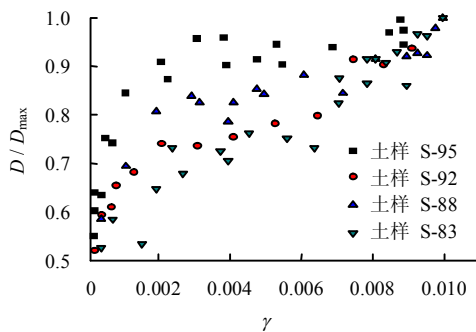


图 8 50 kPa 固结压力下 $D/D_{\max} - \gamma$ 散点图
Fig.8 $D/D_{\max} - \gamma$ under consolidation pressure of 50 kPa

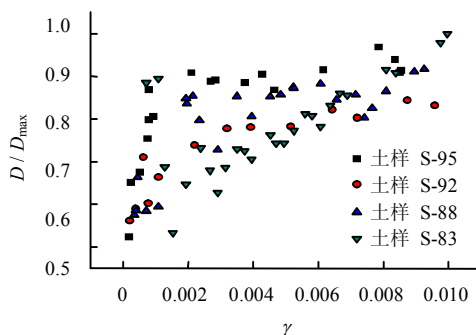


图 9 100 kPa 固结压力下 $D/D_{\max} - \gamma$ 散点图
Fig.9 $D/D_{\max} - \gamma$ under consolidation pressure of 100 kPa

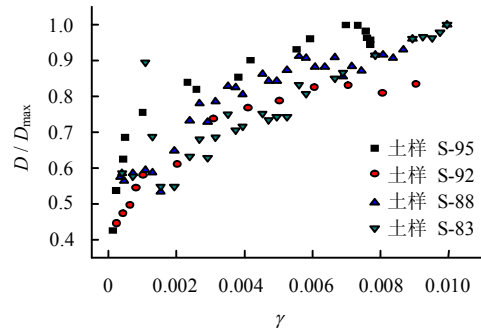


图 10 200 kPa 固结压力下 $D/D_{\max} - \gamma$ 散点图
Fig.10 $D/D_{\max} - \gamma$ under consolidation pressure of 200 kPa

由图可以看出, 阻尼比的离散性比较大, 但是仍然可以进行定性的分析。随着 γ 的增大, 阻尼比 D 也逐渐增大。在小应变情况下 ($10^{-4} \leq \gamma \leq 10^{-3}$), 阻尼比 D 随应变 γ 增加很快; 进入中等应变后 ($10^{-3} \leq \gamma \leq 10^{-2}$), 阻尼比增大趋缓, 且逼近一个定值 $D_{\max}$ 。在 3 个固结压力下, 土样的饱和度越大, $D/D_{\max}$ 数值在坐标上的位置越高, 表明在同等固结压力、同等应变下, 饱和度越大, 土样的耗能能力就越强, 阻尼比越大; 4 种土样的阻尼比数值差异较大。

4 两种试验结果差异的原因分析

由 4 种饱和土样的 $G/G_{d\max} - \gamma$ 关系对比可知, 在同等固结压力和同等应变下, 随着饱和度的增大, 动剪模量减小; 而在固结压力增大的情况下, 4 条数值有逐渐靠拢的趋势。土样在小应变 ($10^{-4} \leq \gamma \leq 10^{-3}$) 情况下属于振动压密状态, 此时孔隙水压力上升较小; 当进入中等应变状态 ($10^{-3} \leq \gamma \leq 10^{-2}$) 动荷强度超过临界动力强度, 孔压明显增大, 饱和度大的土样孔压增长较快, 有效应力减小, 使其动剪模量数值比饱和度低的土样小; 随着固结压力的增加, 动孔压随着动变形的增大而减小^[11], 饱和度小的土样产生振密剪缩, 饱和度相应增大, 两者的动剪模量差异减小。在同等应变和固结压力下随着土样饱和度的升高, 其阻尼比数值增大, 其原因在于饱和度越高, 其孔隙水压力增长越快, 孔隙水的张力随之升高, 土中累积损耗的能量随孔压的升高而有规律的增长; 试样颗粒之间的接触疏松, 波的传播路径也随之减少, 在土粒和水的界面上发生波的反射, 因而波在传播过程中能量损耗增大, 表现土体变软动剪模量减小, 而表征能量损耗多少的阻尼比却增大。

5 结 论

通过试验和计算分析, 可得到如下结论。

(1) 在同种固结压力下, 饱和度大土样的 $G/G_{dmax} - \gamma$ 数值在饱和度小土样的下方, 表明应变一致的情况下, 随着饱和度的增大, 动剪模量减小; 在固结压力增大的情况下, 4 种土样动剪模量变化逐渐靠拢, 动剪模量差异减小;

(2) 在应变为 $(10^{-4} \leq \gamma \leq 10^{-3})$ 的情况下, 阻尼比 D 随应变 γ 增加很快; 随着应变逐渐增大 $(10^{-3} \leq \gamma \leq 10^{-2})$, 阻尼比增大趋缓, 且逼近一个定值, 即最大阻尼比 D_{max} 。固结应力相同的情况下, 饱和度大土样的 $D/D_{max} - \gamma$ 数值高于饱和度小土样的数值, 说明在同等应变下土样的阻尼比随着饱和度的增大而增大, 且 4 种土样数值上差异较大。

虽然本文通过对 4 种不同饱和度下的土样进行了一些研究, 得出了一部分成果, 但是考虑到客观情况要复杂得多, 而本文只考虑了一种情况的对比, 文中的结论有待进一步的研究, 特别是更多实际地震记录和土工试验的检验。

参 考 文 献

- [1] 孙静, 袁晓铭, 孙锐. 土动剪切模量和阻尼比的推荐值和规范值的合理性比较[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(2): 125—133.
SUN Jing, YUAN Xiao-ming, SUN Rui. Reasonability comparison between recommended and code values of dynamic shear modulus and damping ratio of soils[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2004, 24(2): 125—133.
- [2] 王海东, 尚守平, 卢华喜, 等. 场地土动剪模量的试验对比研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2005, 32(3): 33—37.
WANG Hai-dong, SHANG Shou-ping, LU Hua-xi, et al. Comparative study of dynamic shear modulus through laboratory experiments[J]. **Journal of Hunan University (Natural Sciences)**, 2005, 32(3): 33—37.
- [3] HADHIAN A H, TSENG W S, XIE J F. The learning from the large scale Lotung soil-structure interaction experiments[J]. **World Earthquake Engineering**, 1993, (4): 49—59.
- [4] YANG J, SATO T, SAVIDIS S, et al. Horizontal and vertical components of earthquake ground motion at liquefiable sites[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2002, (22): 229—240.
- [5] 姬美秀, 陈云敏. 不排水循环荷载作用过程中累积孔压对细砂弹性剪切模量 G_{max} 的影响[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 884—888.
JI Mei-xiu, CHEN Yun-min. Effect of accumulated pore pressure on shear modulus G_{max} of saturated fine sand during undrained cyclic loading [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(6): 884—888.
- [6] TOWHATA I, ISHIHARA K. Undrained strength of sand undergoing cyclic rotation of principal stress axes[J]. **Soils and Foundations, JSSMFE**, 1985, 25(2): 135—147.
- [7] 南京水利科学研究院土工研究所. 土工试验技术手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [8] BORDEN R H, SHAO L, GUPTA A. Dynamic properties of piedmont residual soils[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, 1996, 122(10): 813—821.
- [9] 任慧. 场地动力反应的理论分析与场地土动力特性试验研究[硕士学位论文 D]. 长沙: 湖南大学, 2004.
- [10] 吴世明. 土动力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [11] 谢定义. 土动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.