

文章编号: 1000-7598-(2006) 05-0730-05

非饱和膨胀土 SWCC 研究

李志清¹, 胡瑞林¹, 王立朝², 李志祥³

(1.中国科学院工程地质力学重点实验室, 北京 100029; 2.中国地质环境监测院, 北京 100081; 3.铁道第四勘察设计院, 武汉 430063)

摘 要: 研究土体吸力与含水量关系, 对于非饱和土的变形和强度问题, 有重要的应用价值。利用非饱和土三轴仪对膨胀土进行试验研究, 比较系统地分析了矿物成分、孔隙结构、土体应力状态、应力历史等因素对土-水特征曲线的影响。尤其土的矿物成分和孔隙结构是主要的影响因素。综合考虑各种因素的影响, 通过室内和野外吸力量测, 对土-水特征曲线进行拟合、比较, 建立了幂函数模型。由土-水特征曲线可知, 室内干湿循环土-水特征曲线具有明显的差异性, 野外土-水特征曲线的差异性不明显, 并与室内浸湿曲线相似。将野外曲线和浸湿曲线结合起来, 推算非饱和状态下土的渗透性、抗剪强度等指标, 可以较好地解决岩土力学问题。

关 键 词: 非饱和膨胀土; 土-水特征曲线; 基质吸力; 含水量; 干湿循环

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Study on SWCC of unsaturated expansive soil

LI Zhi-qing¹, HU Rui-lin¹, WANG Li-chao², LI Zhi-xiang³

(1.Key laboratory of Engineering Geomechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2.China Institute for Geo-Environmental Monitoring, Beijing 100081, China; 3.The Forth Survey & Design Institute of China Railway, Wuhan 430063, China)

Abstract: It has great important application value to study the relations between suction and moisture of unsaturated soil for its deformation and intensity. With the unsaturated triaxial equipment for expansive soil test, we analyze systematically the multi-factors such as the components of mineral, the structure of hole, the stress state of soil and the stress history etc., which affect soil-water characteristic curve (SWCC). Especially the components of mineral and the structure of hole are primary influential factors. Based on the measurement of matric suction indoor and outdoor, we think over synthetically the effect of multi-factors to fit and compare SWCC, also we build the model of power function. And according to SWCC, the otherness is obvious in the curve of dry-damp circulation indoor and not obvious in the curve outdoor, which is similar to the wetter curve indoor. The permeability and shear strength etc. of unsaturated expansive soil can be calculated by combining the curve outdoor with wetter curve, which has great superiority in solving problems of geotechnical mechanics.

Key words: unsaturated expansive soil; SWCC; matric suction; moisture; dry-damp circulation

1 引 言

土壤-水分特征曲线(SWCC)是土壤基质势随土壤含水率变化的曲线, 它表示了土壤水的能量与数量之间的关系。从工程观点看, 土的吸力是土中含水量的函数, 是土中液相上各种压力的补偿。土体吸力不但表示土中水的能态高低, 揭示土中水运动的方向, 还表明土中水和土颗粒相互作用的强烈程度以及非饱和土水、气界面的曲率状态, 它能从更深层次揭示土中水、气运动的规律和土的体变、强度变化的物理本质。膨胀土的含水量-吸力随环境变

化而变化, 同时引起土体的体积变形和强度的改变。因此, 研究土体吸力与含水量关系曲线, 对于非饱和土的变形和强度问题, 如天然土坡、路堤的稳定性、膨胀土地基变形破坏等问题, 有着重要的应用价值。

2 土-水特征曲线影响因素分析

在孝一襄高速公路膨胀土试验段进行了吸力-含水量监测^[1], 监测仪器布置如图 1 所示。该试验段土质为第四纪中、上更新统残坡积黏性土, 其厚度较大, 勘探深度内未见基岩。试样分别取自湖北

收稿日期: 2004-08-16

修改稿收到日期: 2004-12-10

基金项目: 中科院创新项目 (No.KZCX3-SW-134) 和 973 项目 (No.2002CB412702) 资助。

作者简介: 李志清, 男, 1981年生, 硕士研究生, 主要从事非饱和和特殊土方面的研究。E-mail:lizhiq-2002@sohu.com。

襄樊和枣阳两处, 为膨胀性原状样或击实样, 主要物理力学性质如表 1 所示, 矿物成分如表 2 所示。

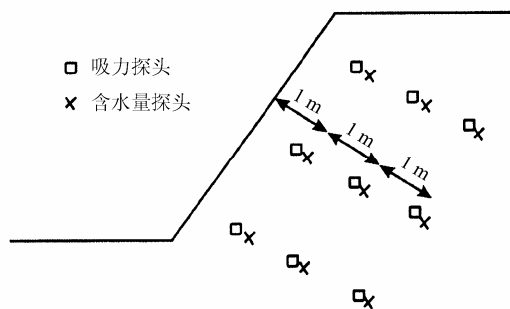


图 1 野外监测仪器布置图

Fig.1 Arrangement of observation instruments outdoor

表 1 孝—襄膨胀土的物理力学性质
Table 1 Physico-mechanical property of Xiao-Xiang expansive soil

地点	干密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	天然 含水量 /%	塑限 /%	液限 /%	塑性 指数	黏粒 含量 /%	自由 膨胀率 /%	凝聚 力 / kPa	内摩 擦角 / $^{\circ}$
襄樊	1.57	23	25.8	51.5	25.7	49~57	65~75	33	22.1
枣阳	1.48	24	26.0	75.0	49.0	42~53	60~85	30	25

表 2 孝—襄膨胀土的矿物成分(单位: %)
Table 2 The mineral composition of Xiao-Xiang expansive soil(unit: %)

地点	蒙脱石	伊利石	高岭石	长石	水云母
襄樊	14	10	5	2	1
枣阳	19	9	4.5	3	1

2.1 土质的影响

低塑限指数的襄樊膨胀土和高塑限指数的枣阳膨胀土土-水特征曲线比较如图 2 所示。开始时, 枣阳膨胀土含水量随吸力变化大, 但当吸力超过一定数值后, 襄樊膨胀土表现出较大的变化趋势, 并出现曲线交叉的情况, 而枣阳膨胀土曲线变化较平缓。由图可以看出两曲线的变化趋势, 随着含水量的减小, 可塑状态范围较小的襄樊膨胀土吸力变化较小, 已接近其进气值。而枣阳膨胀土还有一定的变化范围。出现曲线差别的原因可能是, 塑性指数的大小与土中结合水的可能含量有关, 即与土的颗粒组成、土粒的矿物成分及土中水的离子成分和浓度等因素有关。一般情况下, 黏粒含量越高, 在相同饱和度下的吸力越大。从土的颗粒来说, I_p 越大, 说明土粒越细、且细颗粒(黏粒)的含量越高, 其比表面和可能的结合水含量越高, 持水性越好, 脱水速度越慢。另外, 蒙脱石含量越高, 土的持水性能越好。所以不同塑性土的进气值和储水系数有较大差别^[2]。

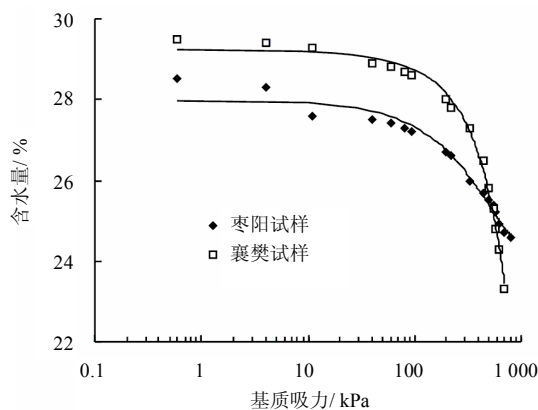


图 2 不同土质的土-水特征曲线比较

Fig.2 Comparison between SWCC of different soils

2.2 孔隙比 e 的影响

取枣阳击实土制成两种不同孔隙比 e 的试样, 试验结果如图 3 所示。孔隙比对土-水特征曲线的进气值和储水能力有较大影响。孔隙比较大的土体进气值较小, 孔隙比较小的土体含水量变化较小, 表现出较好的持水能力。随着吸力的增加, 曲线出现交叉, 孔隙比大的土体, 曲线斜率较大。当吸力较小时, 孔隙比的影响较大; 当吸力达到一定值后, 孔隙比的影响变得较小。可能的原因是, 初始孔隙比较小的土体随着水分的排出, 土体密度增大, 单位体积中细小孔隙增加更快, 持水能力更强。在含水量较低时, 两试样的孔隙比较接近, 其负孔隙水压力相当。对于土体持水性, 可能存在临界基质吸力(如图 3 中 P_e)。当吸力小于 P_e 时, e 的影响较大; 而大于 P_e 时, e 的影响将明显变弱。对于这一现象及其机理尚需进一步研究。相同土样击实前后的土-水特征曲线的差别就在于孔隙比的变化, 击实前孔隙比较大, 击实后孔隙比较小, 所以击实土的持水能力较好, 土壤水含量变化较小。对于膨胀土路基, 土碾压击实后可以有效地防止其发生胀缩循环, 减小回弹量, 满足路基设计要求。

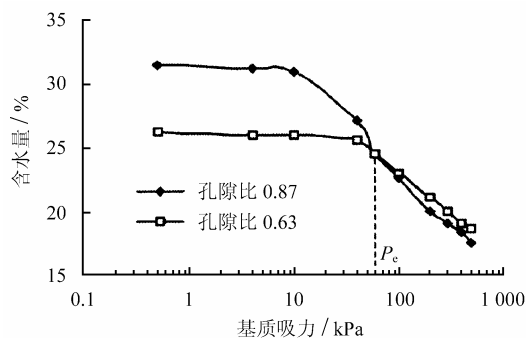


图 3 不同孔隙比的土-水特征曲线比较

Fig.3 Comparison between SWCC of different pore ratios

2.3 固结的影响

将试样置于固结仪中加载,经固结后逐级卸载,土样压密,孔隙比减小。如图4所示,在相同吸力下,固结后的含水量降低;在相同含水量条件下,固结前的基质势较高。但两曲线的差别随吸力的增加而减小,说明了在较大吸力时,应力作用对土-水特征曲线的影响较小。并且从曲线的斜率上可以看出固结后的土样持水能力较强。这一点从实践中可以得到证明,膨胀土经碾压压实后可达到最佳压实度,

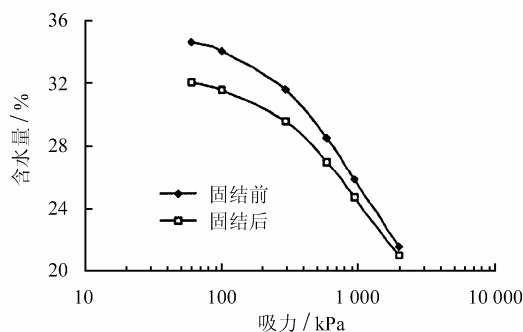


图4 固结对土水特征曲线的影响

Fig.4 The influence of consolidation on SWCC

可以减少含水量的变化,降低膨胀土渗透系数,减少土质的裂隙性,增强土体强度,有利于土体边坡稳定。密实膨胀土的胀缩变形不象疏松时反应那么快,其具有明显的滞后效应。从一定意义上讲,应力固结的作用是通过影响土体孔隙结构而起作用的。

2.4 气象条件的影响

湖北省襄樊市气候干燥,如表3(由襄樊市气象局提供)所示,年降雨量不足1 000 mm,全年平均气温在15℃左右,月平均日照在120 h左右。其中6~8月份降雨量较大,对膨胀土施工有较大影响。图5为2003年4~12月降雨量和坡顶2 m处吸力监测数据情况。经监测显示气候对吸力的影响较大,每到降雨量较大的时期,吸力读数较低,甚至降到零。2003年4月22日~5月6日,6月22日~7月4日出现两次较大的降雨,累计雨量分别达102 mm和142 mm,土体吸力下降较明显。从图上可以观察到土体吸力随降雨量的变化有明显的滞后性。土体吸力-含水量的剧烈变化,必然引起土体应力重分布,从而导致土体失稳。所以,做好边坡排水工作对于保障边坡稳定有重要意义。

表3 2003年月降雨量和月平均气温

Table 3 Monthly rainfall and average air temperature of 2003 year

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	合计	平均
降雨/mm	9.3	38.4	42.6	108.1	87.1	122.8	104.3	129.4	68.3	82.9	58.7	33.9	893.3	
气温/℃	4.0	5.2	9.2	15.5	21.4	26.6	26.4	25.6	22.7	16.2	9.8	4.7		15.6
日照/h	142.4	69.2	128.2	116.1	143.1	180.2	127.6	50.6	137.6	150.8	115.7	75.9		119.8

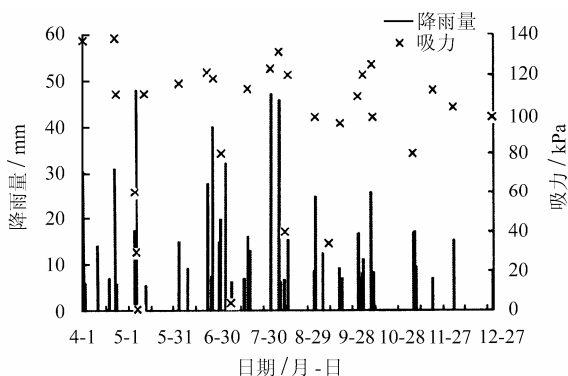


图5 2003年坡顶土体降雨量、吸力变化

Fig.5 Variations of soil matrix suctions and rainfall at crest of 2003 year

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = p - q \lg(u_a - u_w) \quad (1)$$

式中 θ 为含水量; θ_r 为残余含水量; θ_s 为饱和含水量; p, q 均为参数。试验结果如图6所示,在笛卡尔坐标系上用幂函数拟合曲线,其中 θ_w 为体积含水量:

$$u_a - u_w = 0.523 \theta_w^{-0.1215} \quad (2)$$

在对数图上可以看出,数据点基本上在一条直线上,呈线性关系,这些点应该在进气值点与残余含水量点之间。利用式(1)对曲线进行拟合,得到体积含水量与基质吸力的关系为

$$\theta = 0.3593 - 0.0004 \lg(u_a - u_w) \quad (3)$$

3 土-水特征曲线

3.1 室内土-水特征曲线

取襄樊原状土样,利用高进气值陶瓷板系统进行吸力量测。将土-水特征曲线的进气值点与残余含水量点之间的曲线近似用对数直线表示为^[3]:

3.2 室外土-水特征曲线

现场实测吸力与含水量关系曲线更具实际意义。图7为试验段填方路堤边坡1.5 m范围内吸力-含水量、吸力-饱和度关系曲线,吸力与含水量、吸力与饱和度呈幂函数关系。从图中可以看出,当吸力较小时,含水量呈上升趋势,趋近于一个极大值;

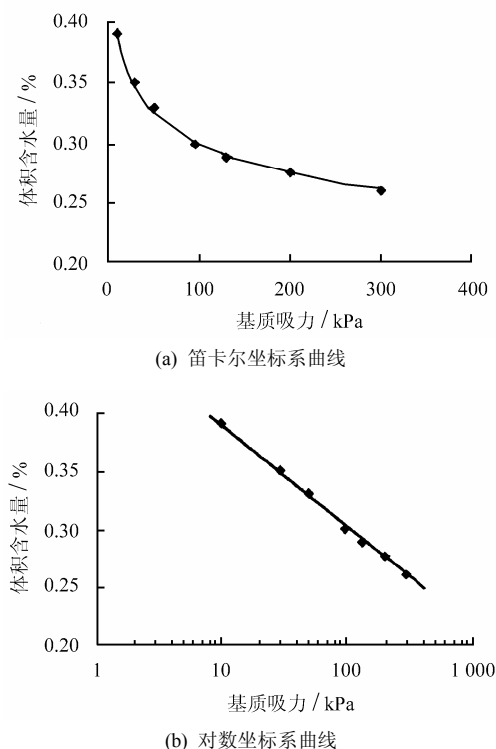


图6 基质吸力与体积含水量关系曲线

Fig.6 The relation curves of matrix suction and volumetric water content

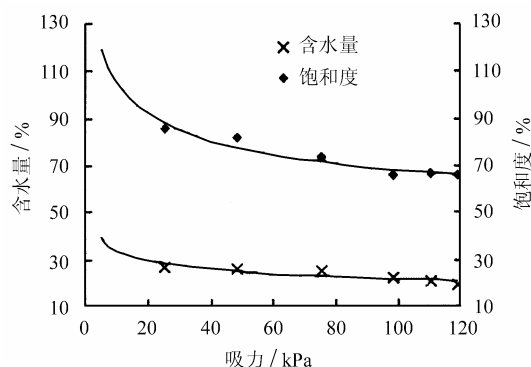


图7 实测土-水特征曲线

Fig.7 The actual SWCC by measurement

随着吸力的增大,含水量变化越来越小,趋于一个定值。土体的土-水特征曲线受多种因素影响,不同土的土-水曲线形式基本相同,位置不同,这与土的膨胀特性有关。室内外土-水曲线均可用通用幂函数 $u = A\omega^\alpha$ 进行拟合,由于土体性质的复杂性,寻求幂函数的通用公式在工程实践应用中有重要作用。

吸力-含水量 ω 拟合幂函数为

$$u_a - u_w = 54.334\omega^{-0.2009} \quad (4)$$

吸力-饱和度拟合幂函数为

$$u_a - u_w = 161.67\theta^{-0.187} \quad (5)$$

3.3 边坡土体室内外土-水特征曲线比较

图8为试验段路堑边坡坡中2 m处土体室内干燥和浸湿曲线与野外监测曲线比较。从图上可以看出,由体积压力板仪得出的室内干湿循环曲线间有明显的差异,即曲线的干燥段与浸湿段不相同。干燥段体积含水量随吸力的变化速度高于浸湿段曲线,当吸力继续增大到一定程度,曲线出现交叉,其差异基本可忽略不计。野外土-水曲线的差异可以忽略,即曲线干燥段与浸湿段基本重合,而且更接近室内浸湿曲线。可能是因为在室内浸湿试验中瞬时流动时含水量和吸力之间有非平衡效应^[4],这与野外土体中的非平衡效应相似。另外,野外土体不断经受降雨入渗和蒸发,可以达到一种动态的平衡效应,接近浸湿曲线的试验要求。野外土-水特征曲线更符合实际的外在环境,更适合应用于非饱和土力学问题。若应用室内土-水特征曲线,则宜采用浸湿曲线,或将室内浸湿曲线和野外曲线二者结合使用。

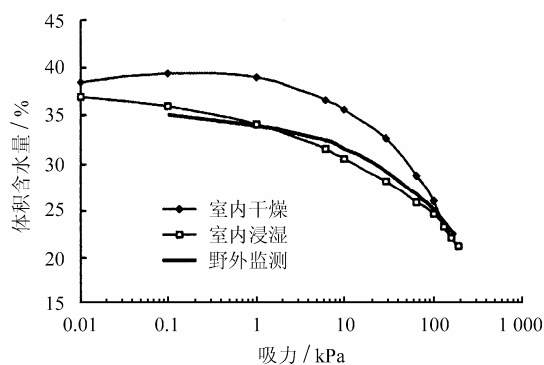


图8 室内和野外土-水特征曲线比较

Fig.8 Comparison between SWCC indoor and outdoor

4 土-水特征曲线的工程意义

研究土体与含水量关系曲线,对于非饱和土的变形和强度问题、预测降雨入渗、蒸发过程中非饱和和地下水流及与非饱和土有关的水土保持、农田灌溉、气象预测等方面^[5],有重要的应用价值。

流动定律应用于工程问题需要将土的水力特性量化,非饱和土中的流动通常也用 Darcy 定律来表达。但是,在非饱和土中用于表示的水力特性的渗透系数是一个变数,可以表示为非饱和土含水量或基质吸力的函数。体积压力板仪得出的土-水特征曲线可用于计算渗透系数函数 $k_w(\theta_w)$,如式(1)所示。对于干湿曲线,两者的计算都应按从低基质吸力到高基质吸力的程序进行^[6]:

$$k_w(\theta_w)_i = \frac{k_s}{k_{sc}} A_d \sum_{j=i}^m \left\{ (2j+1-2i)(u_a - u_w)_j^{-2} \right\} \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (6)$$

式中 A_d 为调整常数 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \text{ kPa}$)， $A_d = \frac{T_s^2 \rho_w g \theta_s^p}{2\mu_w N^2}$ 。

膨胀土的强度受含水量影响较大,如图9所示。而含水量的变化与土体吸力密切相关。非饱和土的强度随含水量变化而变化,也就是随吸力变化而变化,土体中的含水量不同对应的吸力就不同。即使含水量相同,应力状态不同,或水分迁移的过程不同,土体中的吸力也不同,也就是说吸力与含水量的关系不是唯一的。Fredlund 认为,抗剪强度与基质吸力之间存在非线性关系。在非线性基质吸力破坏包线上,在低基质吸力下,与基质吸力相关的 ϕ^b 角约等于有效内摩擦角 ϕ' 。但在高基质吸力下 ϕ^b 有所降低, ϕ^b 角是基质吸力 $u_a - u_w$ 的函数。

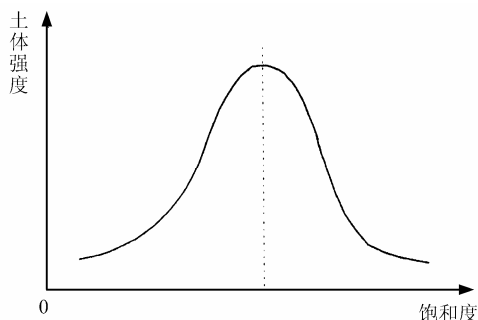


图9 土体强度和饱和度关系

Fig.9 The relation between shear strength and saturation of soil

5 结论

(1) 土-水特征曲线受多种因素影响,如土的矿物成分、孔隙结构、土体的收缩性、土的应力历史、应力状态、含水状态和温度,另外还受降水、日照等影响。土的矿物成分和孔隙结构是基本因素,其他因素往往是通过影响这两个基本因素而起作用的。

(2) 室内外土-水曲线可以用幂函数模型拟合,由于膨胀土土性差异较大,影响因素较多,不同土的土-水特征曲线形式基本相同,但位置不同。

(3) 室内干湿循环土-水特征曲线具有明显的差异,野外土-水特征曲线的差异性不明显,并与室内浸湿曲线相似,所以将野外曲线和浸湿曲线结合起来可以较好地解决岩土力学问题。

(4) 应用土-水特征曲线及饱和状态下的土性指标,可以较好地推算非饱和状态下的渗透性、抗剪强度等指标,所以在工程实践中有较大的应用价值^[7]。

参考文献

- [1] 李志清, 胡瑞林, 吴礼舟, 等. 生态防护在高速公路护坡中的应用研究[J]. 工程地质学报, 2005, 13(2): 280—284.
LI Zhi-qing, HU Rui-lin, WU Li-zhou, et al. Protection of ecological system in the application of expressway revetment[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2005, 13(2): 280—284.
- [2] 刘艳华, 龚壁卫, 苏鸿. 非饱和土的土水特征曲线研究[J]. 工程勘察, 2002, (3): 8—11.
LIU Yan-hua, GONG Bi-wei, SU Hong. Research on SWCC of unsaturated soil[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2002, (3): 8—11.
- [3] 詹良通, 包承钢. 土水特征曲线及其在非饱和土力学中的应用[A]. 南水北调膨胀土渠坡稳定和滑动早期预报研究论文集[C]. 武汉: 长江科学院, 1998. 79—90.
- [4] Schultze B, Ippisch O, Huwe B, et al. Dynamic non-equilibrium during unsaturated water[A]. In: Van Genuchten M Th, Leij F J, Wu L ed. *Proceedings of the International Workshop on Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media*[C]. Riverside C A: University of California, 1999, 713—724.
- [5] 李爱国, 岳中琦, 谭国焕, 等. 野外土-水特征及其工程意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(6): 969—973.
LI Ai-guo, YUE Zhong-qi, TAN Guo-huan, et al. Field of SWCC and its engineering implication[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(6): 969—973.
- [6] Fredlund D C, Rahardjo. 非饱和土力学[M]. 陈仲颐, 张在明, 陈愈炯, 等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. 129—137.
- [7] 杨位洸. 地基及基础[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.