

文章编号: 1000-7598(2010)增刊2-0164-06

红黏土地基承载力和变形参数的空间分布特征分析

柏巍¹, 孔令伟¹, 郭爱国¹, 万智²

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 2. 湖南省交通科学研究院, 长沙 410015)

摘要: 为了获得红黏土地基承载力和变形参数在横向和垂向上的定量数据及分析它们的变化规律, 选取厦门至成都高速公路湖南省郴州段典型横纵断面上的红黏土地层作为试验点, 采用平板载荷试验、旁压试验等技术手段进行了原位测试。试验结果表明: 红黏土地基承载力和变形模量在横向较小的范围内呈现较大幅度的变化, 在垂向上则呈现先增大再减小的变化趋势, 与红黏土赋存厚度、地形地貌、含水率等相关; 旁压试验所测得的承载力特征值和平板载荷试验测得的承载力特征值之间存在一定的差异性; 旁压模量与变形模量可以通过结构性系数联系起来, 所得的结构性系数与 Menard 根据大量黏土试验资料对比所得到的结论较为一致。

关键词: 红黏土; 承载力; 载荷试验; 旁压试验; 变形模量; 旁压模量

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Research on distribution characteristics of bearing capacities and deformation parameters of laterite ground

BAI Wei¹, KONG Ling-wei¹, GUO Ai-guo¹, WAN Zhi²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Hunan Communications Research Institute, Changsha 410015, China)

Abstract: A number of different in-situ soil tests, such as plate loading test and pressuremeter test, have been carried out to get the regularity of bearing capacities and deformation parameters on horizontal and vertical variations of the laterite ground. The experimental results indicate that the horizontal and vertical foundation bearing capacity and deformation modulus of the laterite ground variate with the changes of depth, thickness, topography, water content and other factors; and vertical bearing capacity and deformation modulus were increased first and then decreased. The bearing capacities measured by pressuremeter test and by the plate loading test had shown some differences. The pressuremeter modulus and the deformation modulus could be associated with soil structural coefficient; and they were consistent with the Menard's conclusion which based on a large number of clay test data.

Key words: laterite; bearing capacity; plate loading test; pressuremeter test; deformation modulus; pressuremeter modulus

1 引言

红黏土是一种棕红或褐黄色, 一般覆盖于碳酸盐系之上的特殊性土类, 具有高液限、高塑指、高孔隙比等基本特征, 在我国的贵州、广西、云南、湖南等省(区)分布最为广泛和典型^[1-2]。由于红黏土主要为残积和坡积类型, 一般分布在山坡、山麓、盆地或洼地中, 横向厚度变化很大, 与原始的地貌和下伏基岩的起伏变化相关性极强, 其表现出的工程性质也存在较大的差异, 常有在咫尺之隔厚度相

差超过十米的独特现象, 造成了地基严重的不均匀性。当构筑物跨越布置在上述地段中时, 地基会产生不均匀沉降, 从而导致构筑物开裂或更严重的病害。因此, 定量地评价红黏土地区地基的承载力和变形参数空间分布的规律就显得尤为重要。

本文在厦门至成都高速公路湖南省郴州段红黏土地段典型的横纵断面上选取试验点, 采用平板载荷试验、旁压试验等手段对该地段的红黏土地基承载力进行原位测试, 从而获得了红黏土地基在不同桩号和深度范围内的承载力和变形参数的定量数

收稿日期: 2010-07-28

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目(No. 2006G31878530); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(No. kzcx2-yw-150); 岩土力学与工程国家重点实验室重点项目(No. SKLZ0803)。

第一作者简介: 柏巍, 男, 1982年生, 博士研究生, 主要从事特殊岩土力学及其工程应用方面的研究。E-mail: william_bai@yeah.net

据，并探讨了其在横向和垂向上的变化规律。

2 试验概况

2.1 试验点分布

本次原位试验所选取的试验点的平面布置如图 1 所示，所处的深度位置如图 2 所示。

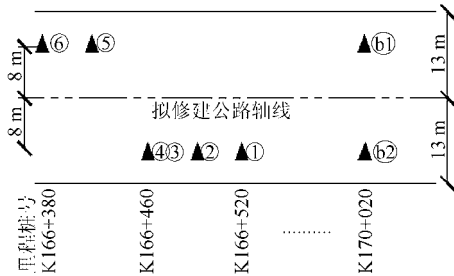


图 1 试验点平面布置图

Fig.1 Layout of the plate loading and pressuremeter test

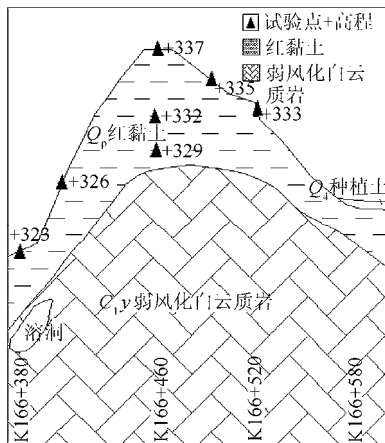


图 2 试验点沿垂向布置图

Fig.2 Vertical layout of plate loading and pressuremeter test

2.2 平板载荷试验

平板载荷试验是用面积不小于 0.25 m² 的刚性承压板逐级加荷，以测定天然埋藏条件下地基沉降随荷载而变化的现场试验，用以评价承压板下应力影响范围内土体的强度和变形特性^[3-5]。

本次平板载荷试验设备是由承压板、加荷装置以及沉降观测装置 3 部分组成。承压板为正方形板，边长为 0.55 m，面积为 0.30 m²，厚度为 30 mm，面积和刚度皆满足规范^[4]要求。加荷装置采用经过标定的液压式千斤顶和刚性反力构架组成，千斤顶出力为 300 kN，刚性反力构架由地锚、拉杆、横梁、立柱组成，采用 8 个地锚提供反力，并通过联接件连接横梁、拉杆和立柱，以保证牢固稳定。沉降观测装置由百分表及固定百分表支杆组成，百分表量程为 10 mm，精度为 0.01 mm。

荷载按等量分级施加，每级荷载增量为预估极

限荷载的 1/8~1/10。每次加载之后，间隔 10、10、10、15、15 min 测读沉降一次，后为 30 min 测读 1 次。稳定标准采用《岩土工程勘察规范》(GB 50021-2001)^[4]中的相对稳定法，即连续 2 h 内每小时观测的沉降 ≤ 0.1 mm，则可认为沉降已达稳定标准。终止试验的条件为荷载-沉降 (P-S) 曲线出现明显的陡降段，或承压板周围土体出现明显侧向挤出隆起或径向裂缝持续发展。

2.3 旁压试验

旁压试验 (PMT) 是通过旁压器在竖直的孔内加压使旁压膜膨胀，旁压膜将压力传给孔周的土体，使土体产生变形直至破坏，并通过量测装置测出施加的压力和土体变形 (或钻孔体积增量) 之间的关系，进而对孔周所测土体的承载力、变形性质等进行评价^[6-8]。

本次采用的试验仪器为 MENADED(G-Am 型) 预钻式旁压仪，由控制单元、管路系统和旁压器 3 部分组成。其中旁压器型号为 BX，总长为 650 mm，测试腔长度为 200 mm、外径为 58 mm、固有腔体积为 535 cm³。由高压氮气瓶联接减压阀等组成加压系统，由水箱、量管、压力表等组成量测系统。

试验前，先对旁压仪进行弹性膜的约束力校准和仪器综合变形校准，然后将旁压器放置于孔内的试验深度，试验加载采用应力控制式，加压等级为 8~12 级，每级压力下稳定 3 min，当试验加压到接近仪器容许变形量时终止试验。

2.4 动力触探试验

动力触探试验采用的是轻型圆锥动力触探仪，落锤质量为 10 kg，落距为 50 cm，探头直径为 40 mm，锥角为 60°，各探杆直径均为 25 mm，记录每贯入 30 cm 的锤击数 N₁₀。

3 试验结果整理

3.1 平板载荷试验结果整理

在平板载荷试验过程中，由于各种因素的影响，会使 P-S 曲线偏离坐标原点，因此，需要对 P-S 曲线的沉降量观测值进行校正。采用工程地质手册^[5]中相应的方法进行计算校正，得到修正后的 P-S 曲线 (如图 3 所示)。

根据修正后各试验点荷载-沉降曲线的实际情况，采用相对变形控制法来确定典型横纵断面上各试验点的平板载荷试验的地基承载力特征值，即取 s/d = 0.01~0.015 所对应的值为地基土承载力特征值，此法适用于浅层平板载荷试验平板面积为 0.25~0.50 m² 时的情况^[3]，本文选取 s/d = 0.012 所

对应的值作为地基土承载力特征值，各试验点的位置及承载力特征值如表 1 所示。

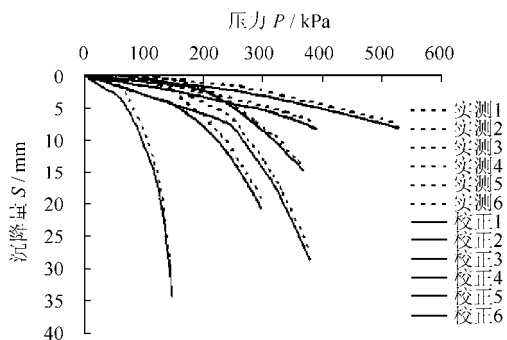


图 3 平板载荷试验原始 P-S 曲线及修正后 P-S 曲线
Fig.3 P-S curves of the plate loading test

土是弹塑性体，其变形包括弹性变形和塑性变形，变形模量根据 P-S 曲线按弹性理论公式求出：

$$E_0 = I_0(1 - \mu^2) \frac{Pd}{S} \quad (1)$$

式中： E_0 为载荷试验的变形模量； I_0 为刚性承压板形状系数； μ 为土体泊松比； d 为承压板边长； P 和 S 分别是修正曲线上的压力和沉降量。

各个试验点所得到的红黏土地基变形模量值列于表 1。

3.2 旁压试验结果整理

旁压试验所得到的主要成果是压力-体积曲线，即 P-V 曲线，再从曲线中求出土体的各相关参数。因旁压试验受到弹性膜约束力、仪器综合变形以及

表 1 各平板载荷试验点的红黏土地基的承载力特征值和变形模量
Table 1 Bearing capacity characteristics and deformation moduli of laterite

试验点	桩号	位置描述	承载力特征值 / kPa	变形模量 / MPa
1	K166+520	距路中线-8 m, 高程+333 m, 坡脚处, 清表土后	204.2	9.98
2	K166+495	距路中线-8 m, 高程+335 m, 坡中处, 清表土后	296.2	14.48
3	K166+420	距路中线+8 m, 高程+326 m, 坡脚处, 清表土后	251.9	12.31
4	K166+380	距路中线+8 m, 高程+323 m, 坡谷, 清表土后	97.1	4.76
5	K166+460	距路中线-8 m, 高程+332 m, 开挖 4.5 m 后	416.5	20.36
6	K166+460	距路中线-8 m, 高程+329 m, 开挖 7.5 m 后	375.0	18.33
b1	K170+020	距路中线+8 m, 高程+283 m, 清表土后	197.0	9.63
b2	K170+020	距路中线-8 m, 高程+283 m, 清表土后	260.1	12.71

注：距路中线+8 m 或 -8 m 中，“+”表示左，“-”表示右。

静水压力等的影响，所以在绘制 P-V 之前需对压力和变形量进行校正。压力校正如式 (2) 所示。

$$P = P_m + P_w - P_i \quad (2)$$

式中： P 为校正后的压力； P_m 为压力表读数； P_w 为静水压力； P_i 为弹性膜约束力曲线上与测管水位下降值对应的弹性膜约束力。

测管水位下降值的校正公式为

$$V = V_m - (P_m + P_w) \times \alpha' \quad (3)$$

式中： V 为校正后测管水位的下降值； V_m 为实测测管水位的下降值； α' 为仪器综合变形校正系数。

根据校正后的体积和压力绘制旁压曲线 P-V，其中 P 表示孔壁径向压力； V 为校正后的体积变化量，(cm³)。红黏土各试验点预钻式旁压试验曲线如图 4 所示。

由红黏土各试验点预钻式旁压试验曲线中可看出，旁压器在逐级荷载施加的情况下，预钻孔壁相应地经历了 3 个变形阶段，在旁压曲线上可以划分为 3 个区域^[9]。

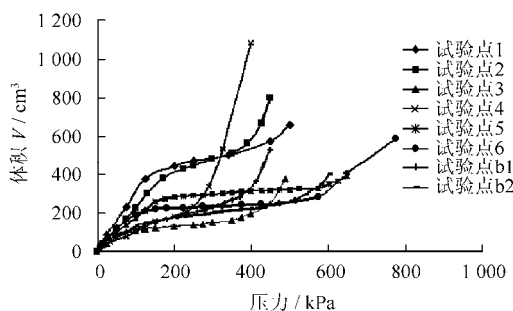


图 4 红黏土各试验点预钻式旁压试验曲线
Fig.4 Curves of the pressuremeter test

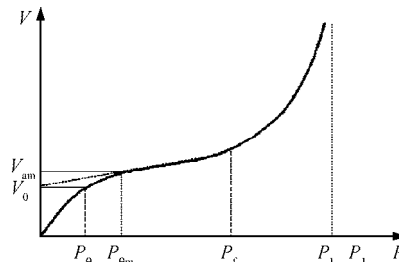


图 5 旁压曲线确定各特征参数图
Fig.5 Calculated intensity parameters according to the curve of the pressuremeter test

如图 5 中的 $0-P_{0m}$ 区，此段是由旁压器弹性膜的膨胀先填充弹性膜与孔壁之间的空隙，再将成孔后应力释放而向孔内土体挤压回原始位置的过程。

Baguelin 等^[10]比较了测试深度静止侧压力 P_0 与 P_{0m} 随深度变化的关系，发现 P_0 始终小于 P_{0m} ，且其差值接近于常数值，这主要是由于孔壁土体受到预先钻孔扰动等的影响。为了考虑成孔扰动的影响，本文采用作图修正法来确定静止侧压力 P_0 ，其方法是将旁压曲线直线段延长与 V 轴相交，再由交点作 P 轴平行线与旁压曲线相交，其交点对应的压力值即为静止侧压力，亦为旁压试验初始压力 P_0 ，如图 5 所示，各试验点的初始压力 P_0 列于表 2。

旁压曲线上的 $P_{0m}-P_f$ 之间近似为直线段，可以认为是土体变形的似弹性区，直线段的终点即为临

塑压力 P_f ，各试验点的临塑压力 P_f 如表 2 所示。

在孔壁压力大于临塑压力 P_f 之后，土体塑性区范围不断发展，在旁压 $P-V$ 曲线表现为曲线下凹，斜率快速变大，当 P 不变而 V 还在持续变大时对应的压力即为极限压力 P_L ，但由于测量水管容量限制， P_L 比较难以测出，一般采用体积增量达到或超过某一界限值所对应的名义极限压力 P_L 。

旁压试验的变形模量简称为旁压模量，由下式进行计算。

$$E_M=2(1+\mu)(V_c+V_m)\frac{\Delta P}{\Delta S} \quad (4)$$

式中： V_c 为旁压器腔体积，本试验中为 535 cm^3 ； V_m 为平均体积增量，取旁压曲线 $P_0、P_f$ 对应体积增量的平均值； $\Delta P/\Delta S$ 为旁压曲线直线段的斜率。各试验点旁压模量如表 2 所示。

表 2 红黏土地基各旁压试验点的承载力与旁压模量

Table 2 Bearing capacity characteristics and pressuremeter deformation modulus of laterite

试验点	桩号	深度/m	初始压力 P_0 /kPa	临塑压力 P_f /kPa	地基承载力 /kPa	旁压模量 /MPa
1	K166+520	0.4~0.8	95	345	250	5.73
2	K166+495	0.4~0.8	43	335	292	8.57
3	K166+420	0.4~0.8	33	340	282	8.29
4	K166+380	0.5~0.9	69	180	111	1.96
5	K166+460	4.9~5.3	93	558	465	18.38
6	K166+460	7.9~8.3	92	514	422	18.24
b1	K170+020	0.4~0.8	55	285	230	3.47
b2	K170+020	0.4~0.8	90	404	314	7.40

4 试验结果分析

4.1 红黏土承载力和模量空间分布特征

采用平板载荷试验、旁压试验以及轻型动力触探试验，选取红黏土地区横向和垂向上的较典型的地层作为试验点，对所得结果进行分析，发现红黏土的地基承载力、模量和轻型动力触探击数在横向较小的距离内呈现较大幅度的变化，如图 6、7 所示。

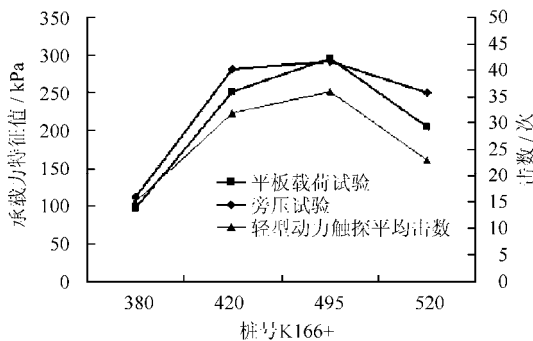


图 6 红黏土所测区域横向承载力变化情况

Fig.6 Bearing capacities on horizontal variations of the laterite ground

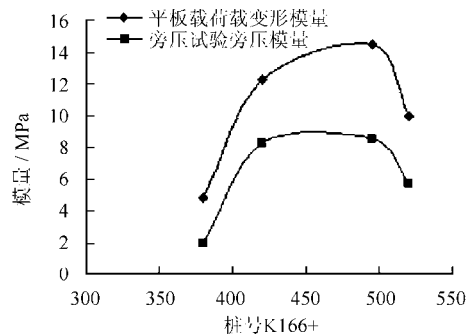


图 7 红黏土所测区域横向模量变化情况

Fig.7 Deformation parameters on horizontal variations of the laterite soil areas

K166+380 处试验点的承载力特征值只有 97.1 kPa，承载力较差，结合勘探资料可以发现，此试验点处红黏土分布厚度较薄，下卧弱风化白云质灰岩，并有溶洞分布，含水率较大，从而导致承载力较差。随着桩号的增大，红黏土层厚度逐渐变厚，承载力有增大的趋势，如 K166+420 和 K166+495 试验点平板载荷所得到的承载力就要比 K166+380 处的承

承载力要大 159%和 205%。而后在桩号为 K166+520 处红黏土层厚度减小，承载力特征值和模量也有较大幅度的降低。这说明红黏土地层横向不均性对红黏土地基的承载力变化影响较大。

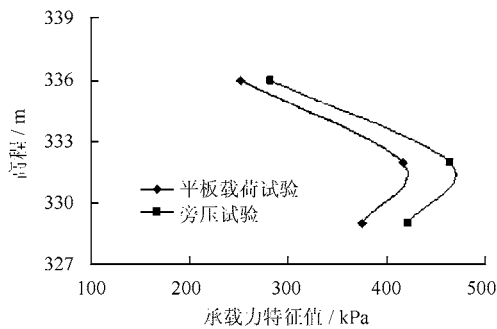


图 8 红黏土所测区域垂向承载力变化情况

Fig.8 Bearing capacities on vertical variations of the laterite soil areas

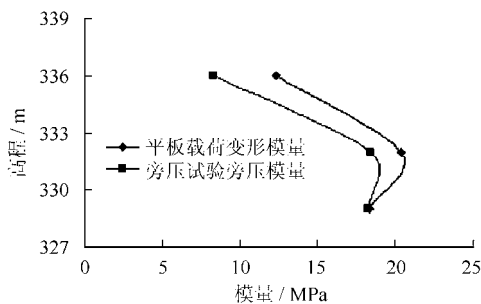


图 9 红黏土所测区域垂向模量变化情况

Fig.9 Deformation parameters on vertical variations of the laterite soil areas

如图 8、9 所示，垂向的承载力和模量则呈现先增大再减小的趋势，如 K166+460 附近在清表、开挖 4.5 m、7.5 m 后的承载力和模量就呈现这种趋势，究其主要原因，是在一定深度范围内红黏土地层中，由于有上覆土的荷载的作用，土体应力较大，固结较好，从而导致地基承载力的提高，而接近下卧弱风化白云质灰岩的红黏土地层时，土体含水率增加，抗剪强度降低，从而导致地基承载力有所下降。

4.2 不同试验相互比较分析

从表 1、2 的承载力值中可以看出，旁压试验所得到的承载力比平板载荷试验所得到的承载力大，除了第 2 试验点结果相近以外，其他试验点旁压所得到的承载力分别比平板载荷的承载力增加了 16.8、20.7、22.4、11.9、14.3、11.6、12.5%这可能是加荷方式和加荷速率的不同导致了其差异性，旁压试验每级加荷时间为 3 min，而平板载荷为 2 h 或更长，土体的排水等试验条件也有所不同。

本次试验的旁压模量比平板载荷的变形模量小，土体扰动情况与其存在一定的相关性，Menard^[9]用土的结构系数将旁压模量与变形模量联系起

来，如下式所示：

$$E_M = \alpha E_0 \tag{5}$$

式中： α 为土的结构系数。

本文采用式 (5) 进行计算，所得到的结构系数规律与 Menard 根据大量黏土试验资料对比所得到的结论较为一致，如表 3 所示。

表 3 土的结构系数 α
Table 3 Structural parameter α of soil

试验项目	试验点	E_M / P_L	α
Menard	1	>16.00	1.000
	2	9~16.00	0.670
	3	7~9.00	0.500
本次试验	1	11.02	0.574
	2	15.93	0.592
	3	15.79	0.673
	4	4.45	0.412
	5	26.26	0.903
	6	23.38	0.995
	b1	7.23	0.360
	b2	12.33	0.582

另外，以平板载荷试验所得到的承载力为参照，可以得到此红黏土地区轻型动力触探的经验公式，如图 10 所示，平板载荷试验所得承载力特征值与轻型动力触探击数之间体现出较好的相关性，在实践工程中采用了式 (6) 所示的简便公式，取得了良好的效果。

$$f_k = 8.9 \times N - 15.0 \tag{6}$$

式中： f_k 为承载力特征值； N 为轻型动力触探击数。

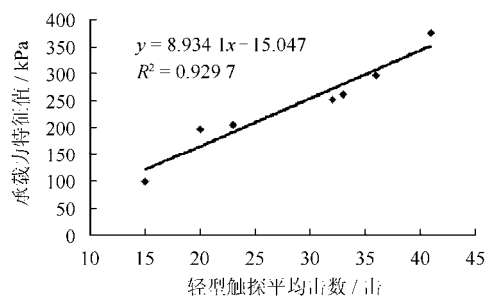


图 10 动力触探平均击数与平板载荷承载力特征值相关关系
Fig.10 Relation between dynamic penetration test N_{10} and bearing capacities of plate loading test

值得说明的是当遇致密硬土层时轻型动力触探击数有可能贯入 15 cm 锤击数大于 50，此时不宜采用上述经验公式计算承载力，需结合平板载荷等试验来综合确定。

5 结论

(1) 采用平板载荷试验和旁压试验相结合，选

取红黏土地区横向和垂向上的较典型地层的多个试验点作为研究对象, 分析了红黏土地基承载力和模量的空间分布特征, 发现红黏土地基承载力和模量在横向较小的范围内呈现较大幅度的变化, 而在垂向的承载力和模量则呈现先增大再减小的趋势。

(2) 由于加荷方式和加荷速率的不同导致了旁压试验所测得的承载力和平板载荷试验测得的承载力之间的存在一定的差异性。可以将旁压模量与变形模量通过结构性系数联系起来, 所得的结构性系数与 Menard 根据大量黏土试验资料对比所得到的结论较为一致。

(3) 根据轻型动力触探试验和平板载荷试验的结果, 提出了较简便的计算公式, 并在实践工程中进行了运用, 取得了一定的社会效益。

(4) 红黏土地层具有比较明显的垂直分带性和水平不均匀性等特征, 所测的地基承载力在较小的范围内有较大程度的变化, 因此, 在红黏土地区筑路应特别注意红黏土这种地基承载力的空间分布特征对工程造成的影响。

参 考 文 献

- [1] 谭罗荣, 孔令伟. 特殊岩土工程土质学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [2] 赵颖文, 孔令伟, 郭爱国, 等. 广西原状红粘土力学性状与水敏性特征[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 568—572.
ZHAO Ying-wen, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Mechanical behaviors and water-sensitive properties of intact Guangxi laterite[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(4): 568—572.
- [3] 林宗元. 岩土工程试验监测手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [4] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50021-2001 岩土工程勘察规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [5] 常士骠, 张苏民.工程地质手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [6] 汪稔, 胡建华. 旁压试验在苏通大桥地质勘察工程中的应用[J]. 岩土力学, 2003, 24(6): 887—891.
WANG Ren, HU Jian-hua. Application of pressuremeter test to estimating intensity parameters in geological exploration for Sutong Bridge[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(6): 887—891.
- [7] YU Wen-bing, LAI Yuan-ming, ZHU Yuan-lin, et al. In situ determination of mechanical properties of frozen soils with the pressuremeter[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2002, 34(3): 179—189 .
- [8] LADANYI B, MELOUKI M. Determination of creep properties of frozen soils by means of the borehole stress relation test[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1993, 30: 170—186 .
- [9] 孟高头. 土体原位测试机理、方法及其工程应用[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- [10] BAGUELIN F, JEZEQUEL J F, SHIELDS D H. The pressuremeter and foundation engineering (Rock and Soil Mechanics Series)[M]. [S. l.]: **Trans Tech Publications Ltd.**, 1978.