

武广客运专线非饱和红粘土 动三轴试验成果及分析

杨果林, 黄向京

(中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙 410075)

摘要: 从武广客专线有代表性的红粘土地段——泉口、咸宁钻孔取样, 并对其进行了动三轴试验及分析, 获得了这2个工点的非饱和红粘土在不同固结比、不同围压条件下的动剪应力—破坏震次的关系曲线、动应力、动剪强度指标、动弹性模量及相关试验常数, 这对武广客专线非饱和红粘土地段的设计具有参考作用。

关键词: 非饱和红粘土; 动三轴试验; 应力; 动强度; 动弹性模量

中图分类号: TU446

文献标识码: A

文章编号: 1008-2611(2007)01-0016-04

The Achievement and Analysis on the Dynamic Triaxial Test of Unsaturated Red Clay for Wuhan-Guangzhou Special Passenger Railway

Yang Guolin · Huang Xiangjing

(School of Civil Engineering and Architecture of Central South University, changsha 410075, China)

Abstract: Samples are taken from Quankou and Xianning City by drilling which is a representative red clay of Wu Guang special passenger railway. After the analysis dynamic triaxial test on these samples, it get different concretion ratio of unsaturation red clay from 2 labor spots, relation curve of different surround pressure condition lower move shear stress destroy, dynamic stresses, scissors intensity index, dynamic elastic modulus and relevance experiment constant item, which have the reference effect to the design for unsaturation red clay section of Wu Guang special passenger railway.

Key words: unsaturated red clay; dynamic triaxial test; dynamic stresses; dynamic strength; dynamic elastic modulus

武广客运专线武汉至韶关段分布近100 km的灰岩残积层非饱和红黏土地基, 对一般铁路来说, 将非饱和红黏土视为饱和土进行沉降估算是可以满足设计精度要求的, 但对于高速客专线铁路无碴轨道路基, 由于对工后沉降要求很严(要求工后沉降量不大于20 mm), 将非饱和红黏土视为饱和土进行沉降估算显然很难满足设计精度要求, 并有可能造成非饱和红黏性土地基处理费用的不必要增加。由于客专线受列车动荷载的影响, 将非饱和红粘土地基视为静荷载已不能满足设计精度的要求, 必须进行原状土样的动三轴试验, 获得动三轴试验指标, 为本线施工图设计提出验证修订沉降估算的可靠指标。

1 动三轴试验简介

1.1 试验仪器、试验标准

1.1.1 试验仪器

本次试验采用北京市新技术应用研究所生产的DDS-70型微机控制电磁式振动三轴试验系统。试样采用直径为39.1 mm, 高为80 mm的圆柱体, 试验振动频率为10 Hz。

1.1.2 试验标准

本次试验采用的标准为中华人民共和国水利部发布的《土工试验规程》(SL237-1999)^[1,2]。

1) 固结稳定标准

收稿日期: 2006-11-23

作者简介: 杨果林(1963-), 男, 湖南桃江人, 中南大学教授, 博士生导师, 主要从事道路与铁道工程, 岩土工程和结构工程的教学和科研工作。

等向固结时, 关闭排水阀后 5 min 孔隙水压力不上升; 不等向固结时, 5 min 内轴向变形不大于 0.005 mm。

2) 破坏标准

均等固结压力 ($K_c=1.0$) 时, 采用全幅值应变 5%, 非均等固结压力 ($K_c>1.0$) 时采用综合应变 5%。

1.2 试样制备及饱和

用削样器把原状土试件加工成 39.1 cm × 8.0 cm 的圆柱体试件。根据课题的要求, 全部采用天然状态的含水量进行试验。由于所取土样的时间、地点不同, 密封的效果也不一样。试验时, 发现土样的软硬程度不尽相同, 各个土样的土质、结构也不尽相同, 故试验结果有一定的离散性, 资料整理时进行了部分处理^[3-6]。

2 动强度试验

2.1 动剪应力计算

$$\tau_d = \frac{1}{2} \sigma_d$$

式中 σ_d 为应变达到 5% 时所对应的轴向动应力值。

2.2 粘土的动剪应力曲线

- 1) 泉口工点的动剪应力曲线见图 1;
- 2) 咸宁工点的动剪应力曲线见图 2;
- 3) 从以上曲线上查得破坏震次为 10 周, 100 周, 500 周的动剪应力 τ_d , 见动应力试验值表 1。

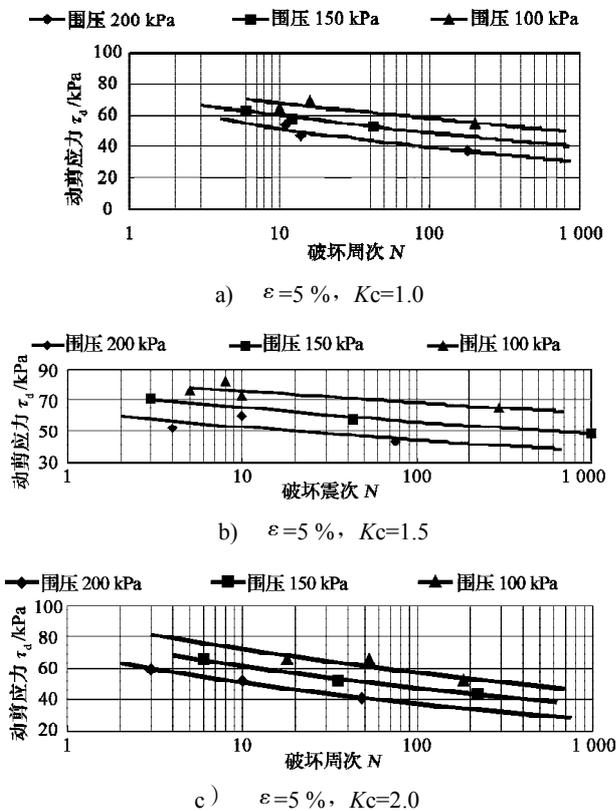


图 1 泉口样动剪应力 ~ 破坏震次曲线

Fig. 1 Correlation curve of the dynamic shear stresses–failure vibrate frequency of the sample of Quankou

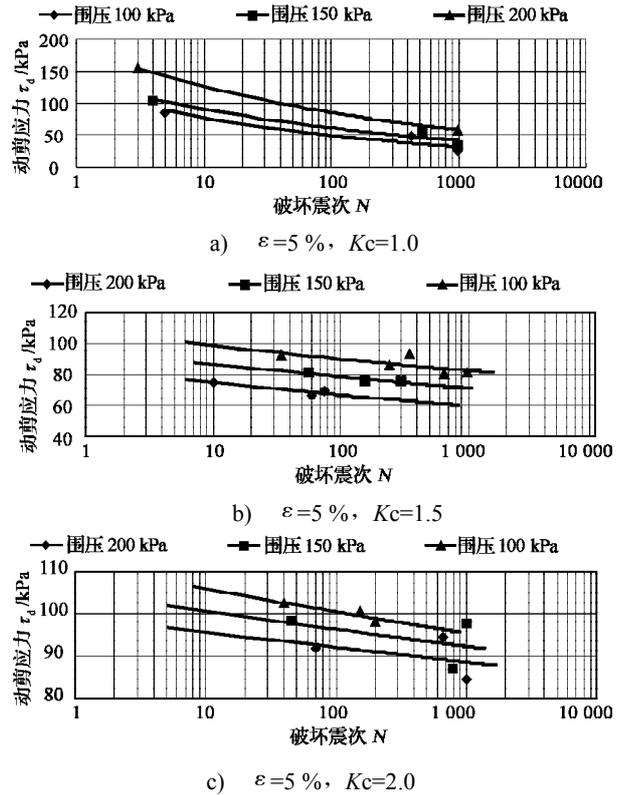


图 2 咸宁样动剪应力 ~ 破坏震次曲线

Fig. 2 Correlation curve of the dynamic shear stresses–failure vibrate frequency of the sample of Xianning

表 1 动应力试验值

Table 1 Dynamic stresses test value

取样地点	固结比 K_c	围压 /kPa	不同周次动应力试验值 /kPa					
			10 周		100 周		500 周	
			τ_d	σ_d	τ_d	σ_d	τ_d	σ_d
泉	1.0	100	51.8	103.6	39.2	79.2	33.0	66.0
		150	59.4	118.8	49.0	98.0	42.5	85.0
		200	67.9	135.8	58.0	116.0	51.8	103.6
	1.5	100	52.6	105.2	44.0	88.0	39.0	78.0
		150	65.2	130.4	56.0	112.0	50.8	101.6
		200	75.8	151.6	68.0	156.0	63.4	126.8
2.0	100	48.2	96.4	32.8	65.6	24.9	49.8	
	150	91.7	123.4	47.6	95.2	39.6	79.2	
	200	72.8	145.6	60.3	120.6	53.0	106.0	
咸	1.0	100	90.0	80.0	60.8	121.6	46.5	93.0
		150	105.5	211.0	73.0	146.0	55.0	110.0
		200	125.0	250.0	85.5	171.0	65.5	131.0
	1.5	100	74.8	149.6	66.8	133.6	62.0	124.0
		150	86.5	173.0	78.8	157.6	73.6	147.2
		200	98.5	197.0	90.2	180.4	85.0	170.0
2.0	100	95.7	191.4	92.2	184.4	89.7	179.4	
	150	100.6	201.2	96.4	192.8	93.5	187.0	
	200	105.8	211.6	100.4	200.8	96.9	193.8	

2.3 土的动强度指标 C_d, ϕ_d

土的动强度是指土在一定的应力循环次数作用下产生某一指定应变所需的动应力。摩尔-库仑抗剪强

度理论仍适用于振动情况。试验的目的是求出动抗剪强度参数，即动内摩擦角 φ_d 和动凝聚力 C_d ，它们之间的关系为 $\tau_d = \sigma \tan \varphi_d + C_d$ 。

在同一个固结比的动剪应力 τ_d 与破坏震次关系曲线上，截取 3 个不同围压作用下破坏震次等于 10 次，100 次和 500 次相对应的动剪应力 τ_d ，并以总剪应力 τ_{sd} ($\tau_{sd} = \frac{\sigma_{1c} - \sigma_{3c} + \sigma_d}{2}$) 为纵坐标，以主应力 σ 为横坐标，以 $(\frac{\sigma_{1c} + \sigma_{3c}}{2} + \tau_d)$ 为圆心，以 $(\frac{\sigma_{1c} - \sigma_{3c}}{2} + \tau_d)$ 为半径，绘制总应力剪切强度包线，求得不同破坏震次下动内摩擦角 φ_d 和动凝聚力 C_d 。

红粘土的动内摩擦角和动凝聚力见表 2。

表 2 动强度参数

Table 2 Dynamic strength parameter

取样地点	固结比 Kc	动强度参数					
		10 周		100 周		500 周	
		C_d/kPa	$\varphi_d/^\circ$	C_d/kPa	$\varphi_d/^\circ$	C_d/kPa	$\varphi_d/^\circ$
泉口	1.0	31	8.0	22	7.9	18	7.7
	1.5	21	19.0	17	18.8	14	18.7
	2.0	16	25.3	9	25.1	4	25.0
咸宁	1.0	42	15.1	30	11.4	23	9.2
	1.5	37	19.1	32	18.9	30	18.5
	2.0	58	22.1	57	21.6	57	21.4

3 孔隙水压力发展规律

孔隙水压力发展规律是指一次试验从施加动荷载开始至试样破坏的过程中，孔隙水压力随震动次数的变化规律。孔隙水压力变化用孔隙水压力比 u_d/σ_{3c} 表示，震次比用震动次数与破坏震次的比值 N/N_f 表示，故孔隙水压力变化规律用孔隙水压力比 u_d/σ_{3c} 与震次比 N/N_f 的关系曲线表示。

非饱和红粘土的孔隙水压力接近零。

4 动模量阻尼比试验

4.1 试验条件和方法

1) 试样在围压分别为 $\sigma_3=100, 150, 200$ kPa 的条件下进行固结。

2) 固结后的试样在不排水条件下逐级加大动应力进行震动试验，记录其每级动荷载作用下的动应力和动应变，每组动荷载为 5~6 级。

3) 每组试验采取在一个试样上进行分级施加动荷载的方法。为了消除前一级动荷载产生的孔压对后一级的影响，在每级动荷载后快速开关排水阀门一次，以消除孔压增量。

4) 每级动荷载震动 10 次。

4.2 试验数据及曲线

1) 动弹性模量

由于土的应力-应变关系具有明显的非线性特征，在周期荷载作用下，应变幅值与应力的关系可近似作为双曲线，即： $\sigma_d = \frac{\varepsilon_d}{a+b \cdot \varepsilon_d}$ ，或改写为：

$$E_d = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_d} = \frac{1}{a+b \cdot \varepsilon_d}$$

式中： E_d 为动弹性模量； ε_d 为轴向应变幅值； σ_d 为相应 ε_d 时的动应力。

当 $\varepsilon_d \rightarrow 0$ 时， $E_d \rightarrow E_{dmax}$ ，则：

$$E_{dmax} = \lim_{\varepsilon_d \rightarrow 0} \frac{1}{a+b \cdot \varepsilon_d} = \frac{1}{a}$$

绘制 $\frac{1}{E_d} \sim \varepsilon_d$ 关系曲线，取其在纵坐标上的截距为 a ，其倒数为最大动弹模量 E_{dmax} ，具体数据见表 3。

表 3 最大动弹性模量

Table 3 Biggest dynamic elastic modulu

取样地点	固结比 Kc	围压 /kPa	截距 a	E_{dmax} /MPa	G_{dmax} /MPa
泉口	1.0	100	0.005 3	188.7	72.6
		150	0.003 9	256.4	98.6
		200	0.002 9	344.8	132.6
	1.5	100	0.004 3	232.6	89.5
		150	0.003 4	294.1	113.1
		200	0.002 8	267.1	197.3
咸宁	2.0	100	0.003 8	263.2	101.2
		150	0.003 2	312.2	120.2
		200	0.002 7	370.4	142.5
	1.0	100	0.004 3	232.6	89.4
		150	0.003 4	294.2	113.1
		200	0.002 4	416.7	160.3
1.5	100	0.005 2	192.3	74.0	
	150	0.004 4	227.3	87.4	
	200	0.002 3	434.3	167.0	
2.0	100	0.001 4	714.3	274.7	
	150	0.001 2	833.3	320.5	
		200	0.001 1	909.1	349.5

根据材料力学原理，其剪切弹性模量 G 为：

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}$$

式中 μ 为土的泊松比，根据静三轴试验结果， $\mu=0.3$ 。

剪切应变 γ_d 为： $\gamma_d = (1+\mu) \varepsilon_d$ 。

2) 粘土的动弹模量与动应变关系曲线如图 3、4。

3) 最大动弹模量 E_{dmax} 可近似表示为：

$$E_{dmax} = k \times Pa \left(\frac{\sigma_{3c}}{Pa} \right)^n$$

式中： Pa 为大气压强，可近似取为 100 kPa； k, n 为与土质有关的试验常数，具体见表 4。

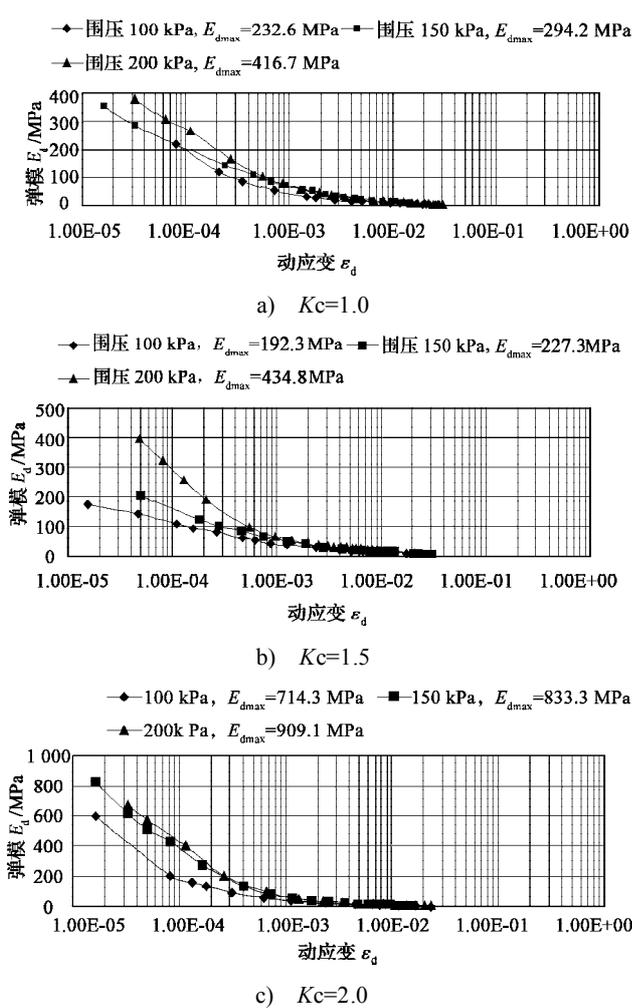


图3 咸宁样 $E_d - \varepsilon_d$ 关系曲线

Fig.3 Relational curve of $E_d - \varepsilon_d$ of the sample of Xianning

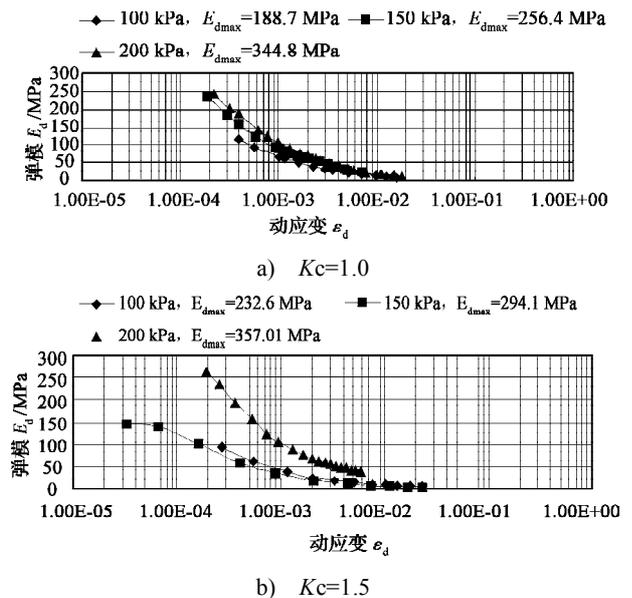


图4 泉口样 $E_d - \varepsilon_d$ 关系曲线

Fig.4 Relational curve of $E_d - \varepsilon_d$ of the sample of Quankou

表4 试验常数 k, n 取值

Table 4 Value of k, n

取样地点	固结比 Kc	试验常数取值		
		k_E	k_G	n
泉口	1.0	1 887	726	0.811
	1.5	2 326	895	0.638
	2.0	2 632	1 012	0.541
咸宁	1.0	2 326	893	0.798
	1.5	1 923	740	1.105
	2.0	7 143	2 747	0.351

5 结论

从武广客专线有代表性的红粘土地段——泉口、咸宁钻孔取样, 并对其进行了动三轴试验及分析, 获得了这2个工点的非饱和红粘土在不同固结比、不同围压条件下的动剪应力-破坏震次的关系曲线(如图1、2)和动应力试验值(如表1), 动剪强度指标(如表2), 动弹性模量及相关试验常数(如表3、4), 这对武广客运专线非饱和红粘土地段的设计具有重要参考作用。

参考文献:

- [1] 南京水利科学研究所. 土工试验规程(SL237-1999)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [2] 中华人民共和国铁道部. 铁路工程地质原位测试规程(TB10018-2003)[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003.
- [3] Fredlund, Xing D G, Huang S. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve[J]. Canada Geotech.J., 1994, 31: 533-546.
- [4] 杨庆, 贺洁. 非饱和红粘土和膨胀土抗剪强度的比较研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(1):15-18.
- [5] 刘春, 吴绪春. 非饱和红粘土强度特性的三轴试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2003, 29(2):66-67.
- [6] Fredlund D G, Rahardjo H. 非饱和土土力学[M]. 陈仲颐译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.