

长平高速公路典型原状粉质粘土静动力学特性

张 锋^{1,2}, 冯德成¹, 凌贤长², 李琼林², 王加辉²

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 150090 哈尔滨; 2. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 150090 哈尔滨)

摘 要: 为了研究长(春) - (四)平高速公路路基典型原状粉质粘土静、动力学特性, 分别进行了不同围压条件下固结不排水静三轴试验和共振柱试验. 结果表明: 长期运营后, 公路路基原状粉质粘土的静、动力学性能与其先期固结状态有关; 随着围压的增加, 土体静强度增加, 最大弹性模量增大; 最大动剪切模量、参考剪应变幅值与固结围压呈线性增加关系; 而最大阻尼比和阻尼比拟合参数随围压的升高而变化甚微. 据此, 给出了长平高速公路路基不同断面原状粉质粘土修改后的邓肯 - 张模型参数, 以及最大动剪切模量、参考剪应变幅值最大阻尼比和阻尼比拟合参数的推荐值.

关键词: 原状粉质粘土; 力学特性; 固结不排水三轴试验; 共振柱试验; 长(春) - (四)平高速公路
中图分类号: TU411 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367 - 6234(2012)08 - 0011 - 06

Static and dynamic mechanics properties of undisturbed silty clay of Changchun-Siping Highway

ZHANG Feng^{1,2}, FENG De-cheng¹, LING Xian-zhang², LI Qiong-lin², WANG Jia-hui²

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China;
2 School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China)

Abstract: To investigate the static and dynamic mechanics properties of undisturbed silty clay sampled from the subgrade of Changchun-Siping highway, the consolidation undrained triaxial test and resonant column test were carried out under different confine pressures. Test results show that the properties of undisturbed silty clay are relate to the pre-consolidation condition. With the increasing of confine pressure, the static strength and the maximum elastic modulus increase. The relationship between maximum dynamic shear modulus, reference shear strain amplitude and confine pressure display a linear formulation. The confine pressure plays a little influence on the maximum damping ratio and the fitting parameters of damping ratio. Based on these, Duncan-Chang model parameters, maximum dynamic shear modulus and reference shear strain amplitude with the confine pressure were quantified.

Key words: undisturbed silty clay; mechanics properties; consolidation undrained triaxial test; resonant column test; Chanchun-Siping highway

目前,我国高等级公路建设发展迅速,截止2011年底,高速公路通车里程达 8.5×10^4 km,全年新增 1.1×10^4 km.公路作为一种线性构筑物,

路基是必不可少的一部分,它一方面长期经受季节性温湿循环变化的影响,另一方面承受线路上部结构的静荷载和重载汽车动荷载的重复作用,其物理、力学性能较竣工时大有不同^[1-3].而且,当前高速公路的建设多以旧路改建和扩建为主,若老路基物理力学性能过差,加之新老路基拼接处理不当,势必产生不均匀沉降而最终导致路面纵向开裂,影响道路正常使用功能.

长(春) - (四)平高速公路全长约133 km,于1996年建成通车,是联结东北三省交通运输的

收稿日期: 2011 - 09 - 09.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2012CB026104);
高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20092302110053);
国家自然科学基金资助项目(51078111,51174261).

作者简介: 张 锋(1981—),男,博士,讲师;
冯德成(1968—),男,教授,博士生导师;
凌贤长(1963—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 张 锋, fzhang_hit@163.com.

重要干线公路,为了适应新形势下区域经济的发展,有必要对其进行拓宽改造.通过对全线老路基进行现场钻孔勘察,发现公路沿线地基和路基中广泛存在黄褐色和紫红色粉质粘土,为了定量评价拓宽扩建后新、老路基的稳定性,有必要研究全线典型粉质粘土的力学性能.迄今为止,国内外关于粉质粘土静力和动力荷载作用下的力学性能研究较多^[4-16].以粉质粘土动力特性研究为例,文献[4-8]对粘土在周期荷载作用下的性状进行系统研究;尚守平等^[9]针对原状粉质粘土分别进行的循环单剪试验和扰动土样的动三轴试验,得到了其最大剪切模量和模量比与剪应变之间的关系;袁晓铭等^[10]基于共振柱试验给出了国内常规土类动剪切模量比、阻尼比随动剪应变变化的平均曲线、推荐值和包线;陈国兴等^[11]给出了南京 6 类新近沉积土的动剪切模量比和阻尼比随剪应变幅值变化的平均曲线的拟合曲线及其参数的推荐值;蔡辉腾等^[12]对福州地区 6 种典型土进行了共振柱试验,探讨了围压和土的性质对其动剪切模量和阻尼比的影响;吕小飞等^[13]研究了杭州湾浅层粉质粘土的动力学性质,发现其与黄河三角洲地区的粉质粘土归一化应力应变曲线相似,而阻尼比相差较大;高志兵等^[14]对比了 463 组饱和黏性土原状样和同一位置现场原位试验确定的最大动剪切模量,发现室内试验结果基本小于现场试验结果,埋藏深的土样相差更大;蒋通等^[15]提出了针对砂土和黏性土的考虑围压影响的模量比和剪应变关系简化计算公式.可以看出,现有关于

原状、扰动粉质粘土动力特性的研究多以场地地震安全评价为工程背景,得出的结果因为区域性特征而不尽相同.然而,与普通场地地基不同,考虑运营期长期公路交通荷载作用和季节性温湿循环作用后,公路路基原状粉质粘土的动力学性能的试验研究鲜有定量资料可查.

本文依托长平高速公路拓宽工程,针对老路基原状粉质粘土,考虑其运营期交通荷载和冻融循环作用的影响,采用室内固结不排水三轴压缩试验和共振柱试验,研究其静、动力学特性,并提出不同路基断面邓肯-张模型和等效线性化模型相应参数确定方法和推荐值.

1 试验概况

1.1 试验仪器

试验在哈尔滨工业大学岩土与地下工程实验室完成.固结不排水静三轴试验采用应变控制式三轴仪;动力学参数试验采用中国地震局工程力学研究所研制的 GZ-1 型共振柱试验仪,该设备可在试样小应变范围内($10^{-6} \sim 10^{-4}$)研究土的动力性能.

1.2 试件采集与制备

试验土样采自长平高速公路沿线路基.现场勘察和取样在春融期进行.取样时,为尽量避免扰动土样,采用直径 100 mm,高度 200 mm 的取土器静压取样;试样取出后,用取土筒包裹并采用石蜡密封.各试件的取样地点、取样深度和重度指标见表 1.

表 1 试样取样地点、取样深度和重度指标

序号	取样断面	颜色	取土深度/m	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	上覆压力 [*] /kPa
1	K218 + 130	黄褐色	1.60 ~ 1.80	1.96	31
2	K219 + 770 (1)	黄褐色	3.40 ~ 3.60	1.98	67
3	K229 + 770 (2)	黄褐色	3.00 ~ 3.20	1.96	59
4	K250 + 820	黄褐色	2.00 ~ 2.20	1.95	39
5	K254 + 550	紫红色	2.00 ~ 2.20	2.04	41
6	K277 + 440	黄褐色	4.20 ~ 4.40	2.03	81

注:※为与平均取土深度相应的上覆压力.

依据三轴压缩试验规程(SL237-017-1999)所提原状试样制备方法制备试样.试件统一直径 39.1 mm,高度 80 mm,共制备试件 23 个,试件制备完成后置于保湿器中,以备试验.

1.3 试验方法

固结不排水静三轴试验(CU)依据三轴压缩试验规程(SL237-017-1999)完成.每个试件分别在围压 100、200 和 300 kPa 下等向固结排气 12 h 后逐级加载,控制加载速率为 $0.1\% \cdot \text{min}^{-1}$,试件每产生 0.25% (即 0.2 mm) 的轴向应变,记录一次测

力计读数和轴向位移.当测力计读数出现峰值后,应再继续剪切 3% ~ 5%;若测力计读数无明显减少,则剪切至轴向应变 15% 左右结束.

共振柱试验依据规程(SL237-033-1999)按采用自由振动方法完成.试件先在围压 80 kPa 下等向固结排气 12 h 后,在每一级激振力振动下试验后,逐次增大激振力,继续进行试验得到在试样应变幅值增大后测试的模量和阻尼比.在一级固结压力试验结束后,分别增加固结压力至 160 和 240 kPa 排水固结后完成试验.

2 静三轴试验结果分析

图 1 为不同路基断面不同围压 (100、200 和 300 kPa) 条件下原状粉质粘土主应力差与轴向应变之间的关系曲线。随着轴向应变的增加, 主应力差逐渐增大, 且增加趋势逐渐减缓; 不同围压下原状粉质粘土的主应力差与轴向应变均呈双曲线型; 随着围压增加, 试件破坏时主应力差增加, 破

坏强度增大。其原因在于试件在围压作用下, 土颗粒紧密排列, 以致开放孔隙率减小, 微裂隙部分闭合, 土颗粒之间粘着力和咬合力增加, 试件强度增加。特别对于 K219 + 770 (1) 断面和 K254 + 550 断面试件, 可能由于原状试件在取样或制作过程中造成内部损伤, 因此造成部分围压条件下对试件的强度影响不明显, 但整体而言, 围压越大, 试件静强度越大。

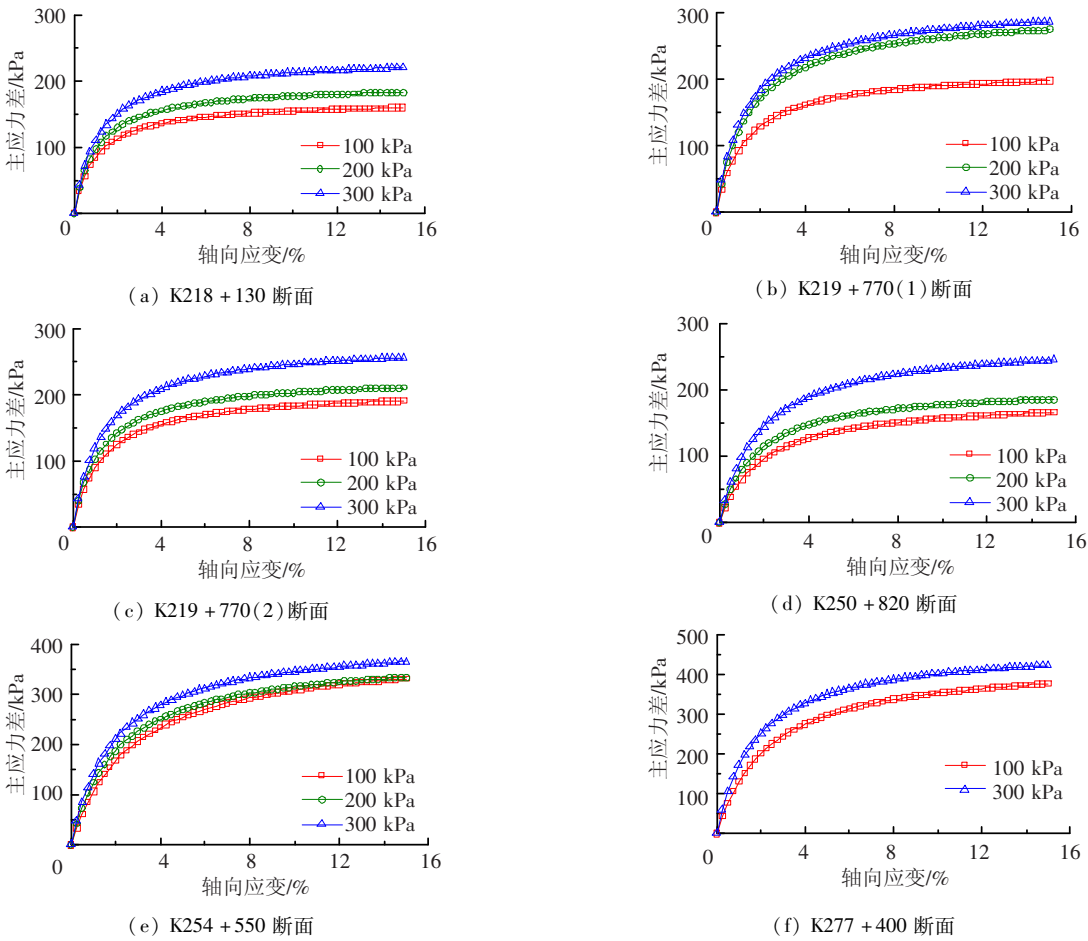


图 1 不同路基断面原状粉质粘土主应力差与轴向应变关系曲线

取轴向应变达到 15% 时对应的主应力差值作为试件破坏强度, 据此, 对同一试件绘制不同围压条件下试件破坏莫尔圆, 可以得出不同路基断面原状粉质粘土的粘聚力 c 和内摩擦角 φ , 见表 2。

R_f 为不同围压条件下试件破坏比率 R_f 的算术平均值, R_f 可由式 (1) 确定。

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad (1)$$

式中: $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 为破坏时的主应力差; $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 为主应力差的极限值。

根据邓肯 - 张模型, 最大弹性模量 E_{max} 为

$$E_{max} = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (2)$$

式中: p_a 为大气压; K 和 n 为试验常数。

按此式, 当 $\sigma_3 = 0$ 时, $E_{max} = 0$ 。但由于试验所采用试样为密实的粘性土, 当 $\sigma_3 = 0$ 时, $E_{max} \neq 0$ 。故将式 (2) 改写成式 (3) 形式

$$E_{max} = \left[K_0 + K \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \right] p_a \quad (3)$$

令 $E_{max,0}$ 为 $\sigma_3 = 0$ 时的 E_{max} , 则

$$E_{max,0} = K_0 p_a \quad (4)$$

式中 K_0 为试验常数, 与土性质有关。

表 2 为不同路基断面原状粉质粘土修改后的邓肯 - 张模型参数。据表 2 各参数, 并结合邓肯 - 张模型, 即可得到不同路基断面不同围压条件下原状粉质粘土主应力差与轴向应变的关系和最大弹性模量值。

表 2 不同路基断面原状粉质粘土邓肯-张模型参数

取样断面	K_0	K	n	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	$\overline{R_f}$
K218+130	70	97	0.3	60	8.5	0.97
K219+770(1)	35	125	0.36	70	10.0	0.87
K219+770(2)	50	105	0.36	75	8.0	0.92
K250+820	20	78	0.47	60	7.5	0.88
K254+550	30	115	0.42	100	8.0	0.78
K277+400	50	135	0.43	110	13.0	0.86

3 共振柱试验结果分析

3.1 数据处理方法

采用等效线性化模型^[16]描述土的动力性能. 假定土的动剪应力幅值 τ_d 与动剪应变幅值 γ_d 之间的关系符合双曲线规律, 见式(5).

$$\tau_d = \frac{\gamma_d}{a + b\gamma_d} \tag{5}$$

式中 a 和 b 均为试验参数.

根据动剪切模量定义, 可得到动剪切模量比 G_d/G_{dmax} 和阻尼比 λ 的计算公式为

$$\frac{G_d}{G_{dmax}} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}} \tag{6}$$

$$\lambda = \lambda_{max} \left(1 - \frac{G_d}{G_{dmax}}\right)^{n_\lambda} \tag{7}$$

式中: G_d 为动剪切模量, $G_d = \tau_d/\gamma_d$; G_{dmax} 为最大动剪切模量, $G_{dmax} = 1/a$; γ_r 为参考剪应变幅值, $\gamma_r = a/b$.

3.2 试验结果

图 2 为不同路基断面不同围压(80、160 和 240 kPa)条件下原状粉质粘土的动剪切模量比、阻尼比与动剪应变幅值之间的关系曲线. 由图可见, 随着动剪应变幅值的增加, 动剪切模量比逐渐减小, 且减小幅度逐渐增加; 阻尼比逐渐增加, 且增加幅度逐渐增大; 围压对原状粉质粘土的变形特性和耗能特性影响较大, 随着围压的增加, 土体刚度增加, 耗能降低, 同一动剪应变幅值对应的模量比增加, 阻尼比减小.

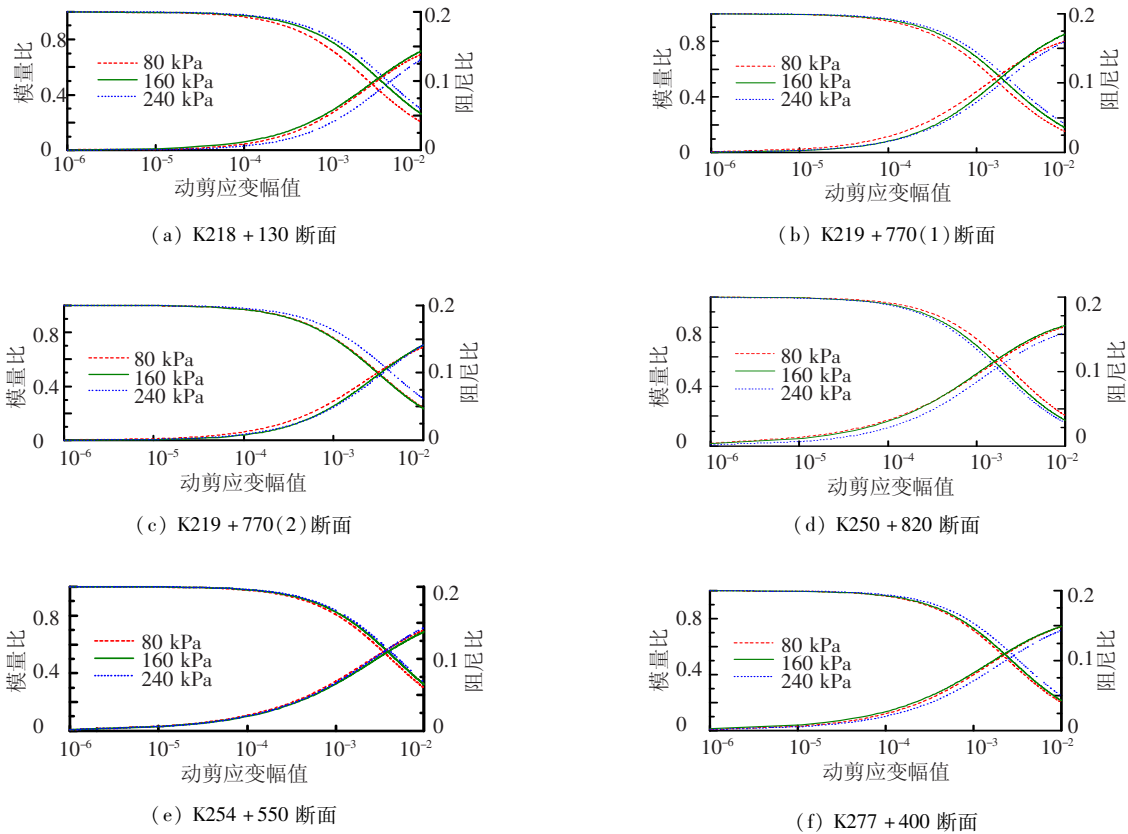


图 2 不同路基断面原状粉质粘土模量比、阻尼比与动剪应变幅值的关系曲线

表3 为原状粉质粘土在不同路基断面不同围压条件下的最大剪切模量 G_{dmax} 、参考剪应变幅值 γ_r 、最大阻尼比 λ_{max} 和阻尼比拟合参数 n_λ . 不同路基断面上原状粉质粘土最大剪切模量和参考剪应

变幅值不尽相同, 这与土样的原始上覆压力、固结状态和应力历史有关. 随着围压的增加, 最大剪切模量和参考剪应变幅值增加; 此外, 最大阻尼比 λ_{max} 和阻尼比拟合参数 n_λ 变化不明显.

表 3 不同路基断面不同围压条件下原状粉质粘土的 G_{dmax} 、 γ_r 、 λ_{max} 和 n_λ

取样断面	$\sigma_3 = 0.08 \text{ MPa}$				$\sigma_3 = 0.16 \text{ MPa}$				$\sigma_3 = 0.24 \text{ kPa}$			
	G_{dmax}/MPa	$\gamma_r/10^{-3}$	λ_{max}	n_λ	G_{dmax}/MPa	$\gamma_r/10^{-3}$	λ_{max}	n_λ	G_{dmax}/MPa	$\gamma_r/10^{-3}$	λ_{max}	n_λ
K218 + 130	46.5	2.56	0.17	0.90	58.8	3.54	0.18	0.75	72.5	4.23	0.18	0.90
K219 + 770(1)	39.2	1.78	0.18	0.70	54.1	2.20	0.20	0.80	64.5	2.59	0.19	0.75
K219 + 770(2)	52.6	3.17	0.17	0.75	70.4	3.08	0.18	0.90	87.0	4.43	0.19	0.80
K250 + 820	69.4	2.58	0.18	0.50	96.1	2.08	0.18	0.55	116.3	1.87	0.17	0.65
K254 + 550	69.9	4.21	0.17	0.55	78.1	4.74	0.17	0.55	69.9	5.11	0.18	0.55
K277 + 440	129.9	2.53	0.17	0.60	142.9	2.74	0.17	0.55	163.9	3.31	0.17	0.60

图 3 为本文动剪切模量比、阻尼比和动剪应变幅值曲线范围与文献[10-11]推荐曲线对比. 文献[10]推荐关系曲线适用于埋藏深度 < 10 m 的粉质粘土, 文献[11]推荐的关系曲线适用于硬塑态原状粉质粘土. 可以看出, 与文献曲线相比, 在相同的动剪应变幅值下, 本文原状粉质粘土的模量比较大, 相应地, 阻尼比较小. 主要原因在于土样的赋存条件不同, 文献[10-11]中土赋存于自然环境中, 而本文中土除受自然环境的影响外, 还经受长期的交通荷载产生的压密作用.

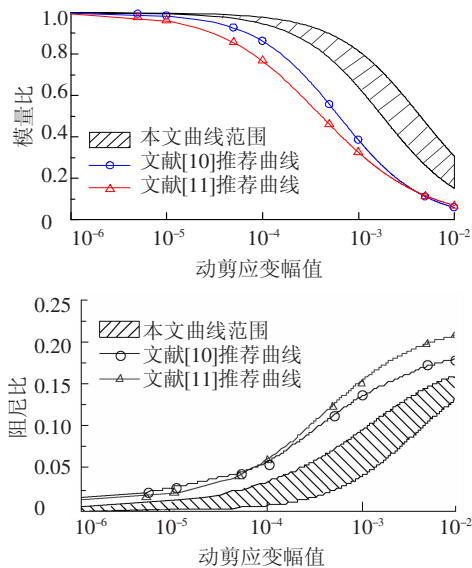


图 3 模量比、阻尼比与动剪应变幅值关系曲线对比

3.3 G_{dmax} 、 γ_r 与围压的关系

3.3.1 G_{dmax} 与围压的关系

图 4 为不同路基断面原状粉质粘土的最大动剪切模量与围压的关系曲线. 可以看出, 在试验围压范围内, 原状粉质粘土最大动剪切模量与固结围压之间呈线性关系. 而且, 除 K254 + 550 断面异常外, 随着围压的增加, 土的最大动剪切模量增加, 这与文献[12]和文献[14]认识相同. 主要在于围压的增加, 使得土颗粒发生良性的剪切位移, 开放孔隙减小, 微裂隙部分闭合.

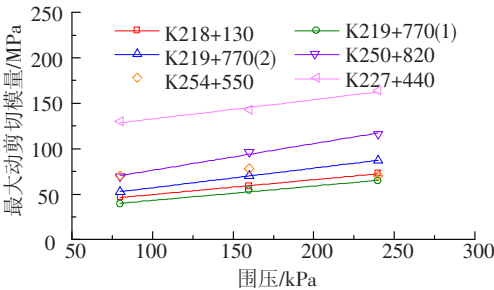


图 4 原状粉质粘土最大动剪切模量与围压的关系曲线
不同路基断面原状粉质粘土最大动剪切模量与围压的拟合关系分别为

对于 K218 + 130 断面

$G_{dmax} = 0.163\sigma_3 + 33.267 \quad (R^2 = 0.999)$,

对于 K219 + 770(1) 断面

$G_{dmax} = 0.158\sigma_3 + 27.300 \quad (R^2 = 0.900)$,

对于 K219 + 770(2) 断面

$G_{dmax} = 0.215\sigma_3 + 35.600 \quad (R^2 = 1.000)$,

对于 K250 + 820 断面

$G_{dmax} = 0.293\sigma_3 + 47.033 \quad (R^2 = 0.994)$,

对于 K277 + 440 断面

$G_{dmax} = 0.212\sigma_3 + 111.567 \quad (R^2 = 0.982)$.

3.3.2 γ_r 与围压的关系

图 5 为不同路基断面原状粉质粘土的参考剪应变幅值与围压的拟合关系曲线. 可以看出, 在一定围压范围内, 原状粉质粘土参考剪应变幅值与围压之间呈线性关系. 不同路基断面原状粉质粘土的参考剪应变幅值拟合关系分别为

对于 K218 + 130 断面

$\gamma_r = \frac{(0.010\sigma_3 + 1.773)}{1\,000} \quad (R^2 = 0.990)$,

对于 K219 + 770(1) 断面

$\gamma_r = \frac{(0.005\sigma_3 + 1.380)}{1\,000} \quad (R^2 = 1.000)$,

对于 K219 + 770(2) 断面

$\gamma_r = \frac{(0.080\sigma_3 + 2.300)}{1\,000} \quad (R^2 = 0.697)$,

对于 K250 + 820 断面

$$\gamma_r = \frac{(-0.004\sigma_3 + 2.887)}{1\ 000} (R^2 = 0.947),$$

对于 K254+550 断面

$$\gamma_r = \frac{(0.006\sigma_3 + 3.787)}{1\ 000} (R^2 = 0.990),$$

对于 K277+440 断面

$$\gamma_r = \frac{(0.005\sigma_3 + 2.080)}{1\ 000} (R^2 = 0.934).$$

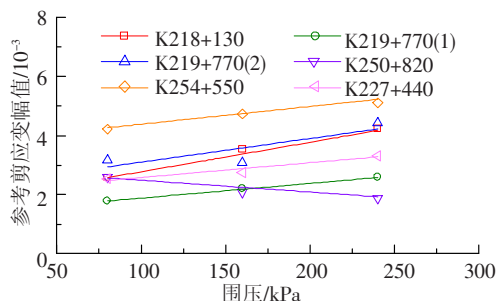


图5 原状粉质粘土参考剪应变幅值与围压的关系曲线

此外,由表3可见,围压对最大阻尼比 $\lambda_{\max}$ 和阻尼比拟合参数 n_λ 的影响较小且规律不明显,可以通过取其平均值来确定。

4 结 论

1)随着围压的增加,原状粉质粘土静强度增加,最大弹性模量增大;当围压为0时,最大弹性模量存在初始值。最大动剪切模量、动剪应变幅值与固结围压呈线性增加关系,最大阻尼比和阻尼比拟合参数随固结围压的升高而变化甚微。

2)不同路基断面原状粉质粘土的静态力学特性可采用邓肯-张模型描述,相关模型参数可参考表2获得。

3)采用等效线性化模型描述不同路基断面原状粉质粘土动力性能,并得到其动剪切模量 G_d 和动剪应变幅值 γ_d 以及阻尼比 λ 和动剪应变幅值 γ_d 的关系曲线。

4)与现有粉质粘土的动剪切模量比、阻尼比和动剪应变幅值曲线相比,经历运营期交通荷载和冻融循环作用后,同一剪应变幅值下,土的模量比大,而阻尼比小。

由于不同地区原状粉质粘土土性不尽相同,且影响土的动剪切模量和阻尼比的因素较多,因此,所给出的推荐值对实际工程只起借鉴作用。

致谢 本文研究工作得到吉林省公路勘测设计院栾海高级工程师、哈尔滨工业大学张克绪教授和张尔其工程师的热情支持与帮助,在此表示衷心感谢!

参考文献:

[1] ALKIRE B D, MRRSION J M. Change in soil structure

due to freeze-thaw and repeated loading[J]. Transportation Research Record, 1983, 918: 15-22.

- [2] SIMONSEN E, JANOO V C, ISACSSON U. Resilient properties of unbound road materials during seasonal frost conditions[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2002, 16(1): 28-50.
- [3] 齐吉琳,程国栋,PIETER P A. 冻融作用对土工程性质影响的研究现状分析[J]. 地球科学进展, 2005, 20(8): 887-894.
- [4] ANDERSEN K H, ROSENBRAND W F, BROWN S F, et al. Cyclic and static laboratory tests on Drammen clay[J]. Journal of the Geotechnical Engineering, 1980, 106(5): 499-529.
- [5] HYODO M, YASUARA K, HIRAO K. Prediction of clay behavior in undrained and partially cyclic triaxial tests[J]. Soils and Foundations, 1992, 32(4): 117-127.
- [6] ROMO M P, JAIME A. Dynamic characteristics of some clays of Mexico Valley and seismic response of the ground[R]. Mexico City: Instituto de Ingenieria, 1986.
- [7] THEIRS G R, SEED H B. Cyclic stress strain characteristics of clay[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, 1968, 94(2): 555-569.
- [8] TEACHAVORASINSKUN S, THONGCHIM P, LUKKUNAPPASIT P. Shear modulus and damping ratio of a clay during undrained cyclic loading[J]. Geotechnique, 2001, 51(5): 467-470.
- [9] 尚守平,卢华喜,任慧,等. 粉质粘土动剪切模量的试验对比研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 410-414.
- [10] 袁晓铭,孙锐,孙静,等. 常规土类动剪切模量比和阻尼比试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(4): 133-139.
- [11] 陈国兴,刘雪珠,朱定华,等. 南京新近沉积土动剪切模量比与阻尼比的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(8): 1023-1027.
- [12] 蔡辉腾,李英民,欧秉松. 福州地区典型土动剪切模量与阻尼比的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 361-365.
- [13] 吕小飞,陈培雄,杨义菊,等. 海洋粉质粘土共振柱试验研究[J]. 世界地震工程, 2010, 26(sup): 1-5.
- [14] 高志兵,高玉峰,谭慧明. 饱和黏性土最大动剪切模量的室内和原位试验对比研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(5): 731-735.
- [15] 蒋通,邢海灵. 围压对土动剪模量和阻尼比影响的简化计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1432-1437.
- [16] 张克绪,谢君斐. 土动力学[M]. 北京:地震出版社, 1989.

(编辑 赵丽莹)