

岩土动力学参数 测试技术与应用

孙 静 著



黑龙江大学出版社
HEILONGJIANG UNIVERSITY PRESS

岩土动力学参数 测试技术与应用

孙 静 著



黑龙江大学出版社
HEILONGJIANG UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

岩土动力学参数测试技术与应用 / 孙静著. —哈尔滨:
黑龙江大学出版社, 2007. 12
(黑龙江大学学术文库)
ISBN 978-7-81129-032-5

I. 岩… II. 孙… III. 岩土动力学-参数测试 IV. TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 200483 号

岩土动力学参数测试技术与应用

YANTU DONGLIXUE CANSHU CESHI JISHU YU YINGYONG

孙 静 著

出版发行 黑龙江大学出版社

地 址 哈尔滨市南岗区学府路 74 号 邮编 150080

电 话 0451-86608666

经 销 新华书店

印 刷 黑龙江省委党校印刷厂

版 次 2007 年 12 月第 1 版

印 次 2007 年 12 月第 1 次印刷

开 本 880×1230 毫米 1/32

印 张 6.75

字 数 170 千

书 号 ISBN 978-7-81129-032-5/T·2

定 价 23.00 元

凡购买黑龙江大学出版社图书,如有质量问题请与本社发行部联系调换
版权所有 侵权必究

前 言

岩土介质动力学性质一直是岩土地震工程中最重要研究课题,在设计、施工或工程整治方面,要想合理地解决岩土地震工程,首先必须了解岩土的动力学参数,并能正确地测试出各参数数值。在地震工程中,只有土的动力学参数确定之后才能进行地基、天然土坡和土工构筑物的地震反应分析。岩土动力学参数有很多,本书重点研究岩土动力学特性中的两个重要参数——岩土动剪切模量和阻尼。从测试技术、试验研究和应用角度,采用试验、理论分析和数值模拟等多种手段,对与岩土的动剪切模量和阻尼有关的几个重要问题进行深入研究,研究内容主要包括三个方面:试验技术和试验可靠性分析方法,土动剪切模量理论,土动剪切模量和阻尼应用在土体地震反应分析中涉及的几个重要问题。

在测试技术和可靠性分析方法方面,着重研究有关共振柱试验机的两个重要问题:一是固定-自由型共振柱常规试验可靠性分析技术方法;二是新共振柱试验机测试刚性试件新功能的实现技术及试验可靠性分析方法。在土动剪切模量理论方面,着重研究固结比对土动剪切模量的影响这一非常重要但争议较大的问题。利用新共振柱试验机和动三轴仪进行了大量系统试验,提出了一个非均等固结下土最大动剪切模量新的增长模式和新的公式,并对 Hardin 公式进行了修正。同时通过新共振柱试验机大量系统的试验,得到了不同固结比对土动剪切模量与剪应变非线性关系的影响规律。

在土动剪切模量和阻尼应用方面,主要研究三个重要问题:一

是对以往规范中不合理的土动剪切模量和阻尼值进行纠正;二是研究实际非均等固结下土的动剪切模量对土层地震反应的影响;三是建立竖向地震动与土动力学特性变化之间的简化关系,供抗震规范和工程上简化分析使用。

本书主要内容是作者在攻读博士学位期间完成的,在此向我的恩师、中国地震局工程力学研究所袁晓铭教授表示衷心感谢!在本书完成过程中,承蒙哈尔滨工业大学土木工程学院陶夏新教授指导,在此表示衷心感谢!感谢黑龙江大学建筑工程学院丁琳教授、席国强副教授、赵文军副教授,中国地震局工程力学研究所孙锐副研究员和公茂盛副研究员,黑龙江工程大学孟上九教授,河北工业大学李雨润博士和河海大学蔡晓光博士等对作者在本书写作过程中的大力支持和帮助,他们为本书内容提出许多宝贵意见和建议。最后,感谢黑龙江大学重点学科基金对本书出版的资助,感谢黑龙江大学出版社的责任编辑同志!

限于作者的水平和经验,书中的缺点和错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

2007年10月

目 录

1	动剪切模量和阻尼的研究与应用	1
1.1	土的动力学参数测试	3
1.2	动剪切模量和阻尼比的研究现状	6
1.3	土层非线性对地震动的影响	15
	小结	19
2	共振柱试验机常规试验的可靠性分析	21
2.1	试验仪器和可靠性分析方法	22
2.2	试验误差分析	26
2.3	试验定量考核	32
2.4	土工试验	34
	小结	38
3	多功能共振柱试验机刚性试件试验功能的 实现和可靠性分析	40
3.1	试验原理和可靠性分析方法	41
3.2	修正方法	43
3.3	试验误差分析	43
3.4	试验结果及分析	47
3.5	试验修正曲线	54
3.6	刚性试件试验验证	58
	小结	61

4	非均等固结下土的动剪切模量和阻尼比的	
	试验研究	63
4.1	试验仪器和试样	65
4.2	非均等固结下最大动剪切模量的增长模型	67
4.3	对 Hardin 公式的修正	95
4.4	非均等固结对非线性的影响	100
4.5	动三轴试验验证	105
4.6	哈尔滨砂的偏压试验	108
	小结	114
5	土的动剪切模量和阻尼比及对土层	
	地震反应的影响	117
5.1	土的动力学特性国内外研究对比	119
5.2	新推荐值和原规范值对土层地震反应的影响	125
5.3	非均等固结下土的动剪切模量对土层	
	地震反应的影响	145
	小结	165
6	竖向地震动对土动力学性能影响的简化	
	分析方法	172
6.1	计算方法和原理	174
6.2	竖向地震动对地表土体最大剪应变的影响	175
6.3	竖向地震动对动剪切模量比和阻尼比的影响	197
	小结	202
	参考文献	204

1 动剪切模量和阻尼的研究与应用

岩土的动力剪切模量和阻尼是岩土动力学特性的首要参数,是土层和地基地震反应分析中必备的动力学参数,也是场地地震安全性评价中必不可少的内容。为了确定土的动力剪切模量和阻尼比,国内外学者进行了广泛研究,并取得了许多有价值的研究成果。土的动力剪切模量和阻尼比分析虽然十分重要,但是由于土本身的多变性及仪器设备水平等原因,使对这一问题的研究变得很复杂。其中,考虑到地震这类动荷载作用下土体的变形和破坏特点,研究动力剪切模量和阻尼具有特殊重要的意义。

岩土动力剪切模量和阻尼主要通过试验获得。测试方法一般有两种,一种是现场测试,另一种是实验室测试,二者相互补充,各有所长,有时可以相互验证。现场测试的重要物理量之一是土的波速,从中可以得到土的最大动力剪切模量,但其主要适用于小应变的情况。通过室内试验,可测定土的动力剪切模量和阻尼比,这方面的研究成果已有很多,一些技术手段也较为成熟。对于土的非线性的情况,目前主要仍由室内试验测定。相对来说,这方面实验室的研究理论比较扎实,某些参数(如阻尼比)更容易在实验室测定。从具体的工程设计角度,应更注重现场测试技术。从研究工作的角度来看,实验室可设定和控制试验条件,进行参数分析,使理论得到发展,现场测试结果也需要实验室结果进行解释和对比。但是,实验室的测试结果在应用时,应该考虑与现场条件的差异,对实验室条件下的理论进行修正。另外,对某些现场的工况条件,有

些实验室还不能模拟。同时,研制出的各类仪器试验的可靠性分析技术和方法也是应引起充分重视的问题,而以往这方面的研究工作较为薄弱,一般只是给出试验结果或同其他结果进行类比,很少对试验误差的来源和影响因素等进行理论上的系统分析。

岩土动剪切模量和阻尼的重要应用之一是土体地震反应分析,其合理性和可靠程度对土层地震动的分析结果将产生显著的影响。其中,土的非线性是影响土层反应分析结果的主要因素之一。对一些工程,岩土动剪切模量和阻尼需通过试验获得,无试验资料时,也可通过规范中提供的参考值得到。国内的一些规程、规范和论文给出了各类土的动剪切模量和阻尼比与剪应变的推荐关系,从曲线形状到定量上存在较大差别,而这些差别对土层反应分析中地表加速度和反应谱的计算结果有很大影响,有些甚至不可接受,给工作造成了误导。因此,必须对目前国内外试验结果进行更系统地分析和更深入地研究,给出符合客观实际情况的合理的土动力学参数,供无试验资料和修订规范时使用。另外,地震中土动剪切模量和阻尼等动力学性能的表现受地震大小和作用方式的影响很大,二者关系复杂,研究这种关系,不仅对深入认识地震动与土体动力学性质之间的联系有帮助,还可以给出一些简化估计方法,供工程参考和使用。

总之,动剪切模量和阻尼作为岩土最基本的动力学参数,工程上有着广泛的应用。试验技术作为主要研究手段,虽有很大发展但在试验理论、技术和试验可靠性分析方法等方面还有待提高和完善。规范中作为无试验资料时参考使用的参考值,是动剪切模量和阻尼研究成果的重要应用,考虑到以往出现的问题,当务之急是进行更深入系统的分析研究,提出合理的新推荐值。同时,建立地震动与土体动力学性质之间的一些简单关系也是工程上有应用前景的研究工作。

1.1 土的动力学参数测试

土动力学参数的测试方法一般有两种,一种是现场测试,另一种是实验室测试。

1.1.1 现场测试

现场测试的优点是避免了在取样和运输过程中所产生的扰动对试验结果的影响,现场测试的主要物理量是土的波速,从中可以得到土的最大动剪切模量。现场测试波速的方法有孔中逐层检测法、地表振动法及跨孔法等。

国外很多学者研究了现场测试和分析剪切波速的方法。Nazarian 和 Stokoe^[1]研究了由表面波的谱分析来决定现场剪切波速的方法,它具有快速、经济、非破坏性以及不需要钻孔的特点,通过四个例子对该方法的计算结果和钻孔地震测试中测得的剪切波速进行对比,表明了该方法的可靠性。但是在理论上这种方法不能测得深层土的波速,对不均匀土层的分析结果可能也存在很大误差。Bodare 和 Massarsch^[2]研究了采用冲击激振、稳态正弦波激振和随机激振三种不同类型的激振来产生剪切波,利用交叉孔法决定剪切波速,结果表明,采用稳态正弦波和随机激振所测得的剪切波速可以很好地吻合。Pitilakis 和 Anastassiadis^[3]对 Greece 天然沉积土进行了现场和实验室试验,测定剪切波速、动剪切模量和阻尼比,测试结果表明,现场测试的剪切波速和标准贯入值相当吻合,但实验室测定的剪切波速值总是比现场要低。推测是由于实验室没有考虑时间效应或试样的扰动,另外还可能是由于十字板提供的应变比实验室测定的要小,或由于实际土的不均匀性和各向异性的影响。

一些学者采用井下台阵记录,利用反演分析方法来研究土层

的动力学参数。Toshikazu 等^[4]借助井下台阵记录,运用遗传算法提出了一种反演方法,推测得到包括剪切波速、土层厚度和阻尼比等在内的土层动力学参数,并应用到一两层土模型中,反演的结果和实际接近。但对复杂的情况,此方法是否有效,还有待进一步讨论。Liu 和 Boore 等^[5]比较了由台阵测量脉动和从孔下剪切波速剖面计算的相速度,结果表明,非扰动方法得到的结果和钻孔测得的结果吻合较好。但这个利用脉动计算的方法,必须预先知道土层剖面结构,才能计算剪切波速,如果能从脉动记录中,直接反演出土层结构和波速度,这将成为一种非常有应用价值的方法。Toshimi Satoh 等^[6]采用日本三个钻孔测得的弱震和强震记录来反演与应变有关的土的非线性,反演出粘土和砾石与剪应变相关的动剪切模量比,结果与实验室所测得的经验关系值一致,但与剪应变相关的阻尼因素并不像动剪切模量比反演的结果那样好。对反演的结果和实验室的结果进行比较,讨论了运用实验室结果在理论上模拟和预测强震运动的可行性。但该方法必须有强震和弱震记录,同时还要有钻孔资料和土层剖面,才能反演出剪切波速和阻尼因素,进而反演土的动力学特性,即动剪切模量比和阻尼比随剪应变的变化曲线。

我国一些学者也利用反演分析方法来研究土层的动力学参数。崔建文^[7]利用面波资料提出了反演波速剖面的全局优化方法,测试结果显示该方法较已有的其他算法在计算效率和应用简便性上具有一定的优点。郭明珠^[8]研究了地脉动波场分析及其在场地动力学特性测试中的应用,指出利用地脉动测定场地动力学特性的 Nakamura 方法中存在的问题,并提出了合理的解决方法。师黎静^[9]利用地脉动观测反演工程场地剪切波速度结构,指出利用地脉动台阵观测数据推算瑞利波频散曲线,进而反演浅层速度结构的技术途径是可行的。郭迅^[10]利用地脉动来估计场地的阻尼比,利用回归分析方法,表明在 Nakamura 谱上应用半功率

点法得到的阻尼比和用共振柱方法测得的阻尼比之间有很强的相关性。

运用井下台阵记录反演土的非线性,为土的非线性研究提供了一条新的方式和途径,其分析结果可与实验室的方法和结果做对比,但这一方法不能作为工程上测定土动力学参数的方法。因为它既要有井下台阵记录又要已知土层钻孔剖面资料,同时需要各土层的强震和弱震记录,不但造价昂贵,而且强震记录很难获得,另外其原理和方法本身还需深入地研究。

1.1.2 实验室测试

不同的地区土质不同,影响土的动剪切模量和阻尼比的因素也有很多,因此不可简单地直接使用经验公式,必须采用实验方法确定模型参数,尤其对于一些重大工程必须采用实验方法进行分析^[11-12]。实验室测定土的动剪切模量和阻尼比已有很多研究成果,已成为较成熟的技术手段。确定土动力学参数的仪器主要有四种:共振柱仪、扭剪仪、剪切仪和三轴剪切仪。不同的仪器有不同的应变范围和不同的测量结果。共振柱仪可直接测定在小应变范围内($10^{-6} \sim 10^{-4}$)的动剪切模量和阻尼比,其他三种实验仪器适用于确定中等到大应变范围内的参数,它们的主要区别在于试样成型方式、施加动荷载方式和分析方法的不同。

三轴剪切仪是实验室测定压缩模量和阻尼比常用的仪器,可根据动应力和动应变关系的滞回曲线,求出各项参数指标,但要给出动剪切模量,需在假定泊松比不变的情况下进行转换,这与实际情况不符,因此还有待于进一步研究。使用剪切仪可采用应力应变法测定土的动剪切模量和阻尼,但其在竖向和水平面上剪力分布不均匀,在地震荷载作用下不排水条件难以满足,目前主要用于测量动强度。振动扭剪试验也是采用应力应变法测定土的动剪切模量,但试样成型较困难,土体中非线性应力应变分布还不十分清

楚,试验技术和分析方法还有待于进一步研究。以一维波动理论为基础的共振柱仪试验,是中小应变条件下测定土动力学特性参数较为理想的方法,由于它具有原理简单、操作方便、边界条件清晰、结果离散小等优点,已成为土动力学特性测试很重要的试验手段。

1.1.3 现场和实验室测试比较

土的动力学参数测试方法随需要测定的动剪应变幅值变化而不同。目前,现场测试主要适用于小应变的情况,这方面可能得到比实验室更可靠的结果,原因是现场的工况更真实,现场的测试技术(如单孔法和跨孔法)也已很成熟。而对于非线性的情况,特别是大应变下土的参数,主要仍由实验室测定,因为相对来说,实验室的理论较扎实,技术也已达到要求,某些参数,如阻尼比更容易在实验室测定。但是,实验室的结果和现场结果对比时,应该考虑与现场条件的差异,对实验室的理论进行修正。同时,对某些现场的工况条件,有些实验室还不能模拟,实验室的仪器功能也还需要大力发展。

1.2 动剪切模量和阻尼比的研究现状

土的动剪切模量和阻尼比是土动力学特性首要的两个参数,鉴于土的动剪切模量和阻尼比在土层和土体地震反应分析中的重要性,国内外许多学者利用实验室手段进行了较广泛的研究,取得了许多有价值的研究成果,对土动力学和地震工程学的发展起到了很大的推动作用^[13-15]。

1.2.1 国外的研究成果

国外的很多学者早在 20 世纪 70 年代就对土的动剪切模量和

阻尼比进行了较为广泛的试验研究,提出了一些研究成果供参考使用^[16-17],这里仅给出一些典型结果。

对砂土动剪切模量和阻尼比的研究较早,Seed 和 Idriss^[18]建立了砂土最大动剪切模量 $G_{\max}$ 的经验公式:

$$G_{\max} = 21.7 k_{\max} p (\sigma_0 / p)^{0.5} \quad (1-1)$$

式中, $k_{\max}$ 为土性参数; p 为大气压力; σ_0 为有效平均主应力。他们还对土的非线性衰减规律做了研究,砂土的动剪切模量与静力平均正应力可以表示为 $G = 1000 k_2 \sigma_c^{0.5}$, 式中, k_2 为参数,与应变幅值有关; σ_c 为静力平均正应力。砂土的动剪切模量与静力平均正应力的平方根成正比,有效摩擦角和孔隙比等对动剪切模量均有影响,动剪切模量随有效摩擦角增大而增大,随孔隙比的增大而减小,随相对密度的增大而增大。对砂土的阻尼比试验研究发现,砂土的有效摩擦角、孔隙比和饱和度等对阻尼比与剪应变幅值关系的影响较小。

Hardin 和 Black^[19-20] 给出适合各类土的最大动剪切模量 $G_{\max}$ 经验表达式:

$$G_{\max} = 1230 OCR^k \frac{(2.978 - e)^2}{1 + e} \sigma_0^{0.5} \quad (1-2)$$

式中, σ_0 为有效平均主应力,可以表示为 $\sigma_0 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3$; OCR 为超固结比; e 为孔隙比。由公式可知,对于同一种土,若保持其他参数不变,其最大动剪切模量只与有效平均主应力的平方根有关,计算可知,固结比 k_c 为 1.5, 2.0 和 2.5 时,最大动剪切模量分别是 k_c 为 1.0 时最大动剪切模量的 1.08, 1.15 和 1.22 倍,这个结果显然不符合土的实际情况。由此可见,Hardin 公式不适合土的非均等应力状态^[21]。Hardin 和 Drnevich^[22] 试验研究发现,应力幅值和应变幅值之间的关系可用双曲线表示。

陈国兴等^[23] 对国外现有的土的动应力-应变关系试验成果进行了分析和总结,推荐了用不同物性指标估算最大动剪切模量

的经验公式,用塑性指数描述动剪切模量比和阻尼比与剪应变的经验曲线,并给出了用塑性指数 I_p 为参数的 $G_{\max}$, $G/G_{\max} - \gamma$ 和 $\lambda - \gamma$ 曲线的经验公式。这一公式工程上应用十分方便,但是用单一指标塑性指数描述动剪切模量比和阻尼比衰减关系曲线,某些情况下得出的结果会产生很大偏差。例如对于密实砂土,其 $G/G_{\max} - \gamma$ 曲线实际衰减较小,而按公式计算,它比所有的粘土和粉质粘土衰减的都快;按公式计算,粘土的 $G/G_{\max} - \gamma$ 曲线都位于所有的粉质粘土之上,这与实际相矛盾。从理论上讲,至少应增加土的当前状态,如相对稠度和密实程度等指标,才能合理地估计土的非线性衰减关系。

1.2.2 国内的研究成果

采用不同类型的仪器设备,可对土的动剪切模量和阻尼比进行测试和研究。我国一些研究人员,应用共振柱仪、动三轴仪、扭剪仪以及联合测试等方法,研究土的动弹性模量、动剪切模量、阻尼比、临界剪应变与孔隙比、固结压力、应变大小之间的关系,并得到了一些较有价值的研究成果。中国地震局工程力学研究所*早在1982年首先研制成了固定-自由端类型的共振柱仪,利用这台GZ—1型共振柱实验机,进行了较多研究。国内其他一些科研单位,也利用自行研制和引进的设备进行了不少研究工作^[24-28]。

1.2.2.1 砂土的研究成果

祝龙根等^[29]用Drnevich共振柱仪对低幅剪应变条件下砂土的动力学特性进行了研究,提出了确定最大动弹性模量、最大动剪切模量、动弹性模量和动剪切模量的经验公式。应用Drnevich共振柱仪既可测定动弹性模量,又可测定动剪切模量的特点,提供了计算参数动泊松比。用福建饱和标准砂样,对Hardin公式进行了

* 后文简称“工程力学研究所”。

修正,提出了一个确定最大动剪切模量 $G_{\max}$ 的经验公式:

$$G_{\max} = 580 \frac{(2.17 - e)^{2.2}}{1 + e} \sigma_a \quad (1-3)$$

公式中考虑了孔隙比 e 和有效围压 σ_a 的影响,但没有考虑固结比 k_c 的作用。他们提出,在低幅剪应变条件下,砂土的应力应变关系符合双曲线的数学模型。同时还指出,采用归一化的表达式后, $E/E_{\max} - \varepsilon$ 及 $G/G_{\max} - \gamma$ 曲线的变化率与有效围压密切相关,而与试样的密度关系不大。尤其值得指出的是,他们发现 $1/E - \varepsilon$ 和 $1/G - \gamma$ 关系图均呈折线型,存在转折点,尤以疏松试样在小围压作用下折线的转折更为明显,转折点与门槛应变十分接近。根据第二折线来推求最大动弹性模量和最大动剪切模量,则将得到偏大数值,对小围压作用下的疏松试样,甚至可偏大近 1 倍,所以根据动三轴仪和动直剪仪试验资料所得到的最大动弹性模量和最大动剪切模量是偏大的。

徐存森等^[30]用 Stokoe 型扭转单剪和共振柱仪,对某核电站场地钻孔取出原状砂样进行地基土的动力学试验。只用一个圆柱体试样同时进行共振柱和扭转单剪两种试验,测得原状砂样动剪切模量值和剪应变值,绘制动剪切模量与剪应变关系曲线,曲线衔接良好。这次试验在 10 ~ 140 m 范围内取出原状砂样,测定动剪切模量值随土层深度的变化规律。但是没有明确进入强非线性以后,扭转单剪土样中应力应变的分析方法,而不同的分析方法对结果影响较大。

1.2.2.2 粘土的研究成果

我国学者对粘土的动剪切模量和阻尼比进行了大量的试验研究。谢君斐等^[31]研究了原状饱和粘土动力学性能,对京津沪地区的原状饱和粘土动力学特性进行了比较系统的试验,给出了表示动弹性模量和应变之间关系的经验公式:

$$E/E_{\max} = 1/(1 + \varepsilon/\varepsilon_r) \quad (1-4)$$

其中 $\varepsilon_r = a/b$, 常数 a 和 b 与孔隙比和有效平均主应力有关, 通常由实验室直接测得。由于当时动三轴尚未获得普遍应用, 为了满足生产需要, 提出了用静力试验估计动弹性模量的方法, 经过比较发现静力试验能够得到满意的结果。同时指出, 在一定的动应变范围内 ($\varepsilon_d < 10^{-2}$), 动弹性模量与动应力的循环次数无关。

石兆吉等^[32-33]利用共振柱研究了周压力、土壤密度和含水量等因素对土动压缩模量的影响, 认为最大动压缩模量与周压力在双对数坐标上存在着线性关系, 周压力越大, 动压缩模量越大; 密度越大, 动压缩模量也越大; 含水量对动压缩模量也有明显影响, 含水量越高动压缩模量越低。通过共振柱法和动三轴应力应变法获得的动压缩模量比较表明, 两者相差颇大, 造成这种差别的原因可能是试验原理和方法的不同, 同时两种仪器在实验过程中的振动方式和振动次数对结果也有影响。

童华炜等^[34]研究了增湿对黄土动剪切模量及阻尼比的影响。用 DTC—158 型共振柱对西安黄土在增湿以后的动剪切模量和阻尼比进行了试验分析, 表明增湿黄土与原状黄土的动剪切模量试验曲线有相同的变化趋势, 增湿黄土动剪切模量的变化与饱和度和有效固结压力有关。在一般固结压力下 ($\sigma_0 = 100 \text{ kPa}, 200 \text{ kPa}$) 增湿黄土的动剪切模量随饱和度的增大而明显下降, 而当固结压力较大时 ($\sigma_0 = 400 \text{ kPa}$), 动剪切模量受饱和度的影响并不明显。在小应变范围内, 增湿黄土的阻尼比与原状黄土的阻尼比相比较, 受饱和度的影响较小。但研究中饱和度对动剪切模量和阻尼比的影响仅是定性结果, 而且只适合于黄土的情况。

其他一些学者对各地土的动力学特性也分别进行了研究。费涵昌等^[35]利用 Drnevich 共振柱仪对黄浦江大桥桥址土层的 $G-\gamma$ 及 $\lambda-\gamma$ 关系进行了研究, 反映了上海地区土层的动应力应变本构关系, 其基本形式与双曲线方程近似。阮元成^[36]用 DTC—158 型共振柱仪, 对漳武水库坝体原状土动力学变形特性进行了研究,