



土的动剪切模量、阻尼比和泊松比研究进展^①

贺为民, 李德庆, 杨 杰, 李怡青

(中国地震局地球物理勘探中心, 河南 郑州 450002)

摘要:介绍了现场测试与实验室测试土的最大动剪切模量的差别、动剪切模量和阻尼比与剪应变关系的表达式及其地区经验成果、固结比对最大动剪切模量影响、动泊松比研究、实验误差及其对地震动的影响等方面的主要成果。提出应加强动泊松比研究, 加强共振柱和动三轴试验土动力学参数统一的数学模型研究, 加强土动力学参数在均等固结与非均等固结条件下关系研究, 加强土动力学参数与土的常规物理力学性质指标关系研究和土动力学参数实验误差研究。

关键词: 动剪切模量; 阻尼比; 泊松比; 土动力学; 地震安全性评价

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2016)02-0309-09

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2016.02.0309

Recent Progress in Research on Dynamic Shear Modulus, Damping Ratio, and Poisson Ratio of Soils

HE Wei-min, LI De-qing, YANG Jie, LI Yi-qing

(Geophysical Exploration Center, China Earthquake Administration, Zhengzhou 450002, Henan, China)

Abstract: This paper presents the main research accomplishments that relate to the differences in the maximum dynamic shear modulus between laboratory and field test soils, the relationship expressions of the dynamic shear modulus and damping ratio versus shear strain and its local experiences, the effects of consolidation ratios on the maximum dynamic shear modulus, results from dynamic Poisson ratio studies, and experimental errors and their effects on seismic motion results. The factors affecting the maximum dynamic shear modulus difference in field and laboratory tests are mainly the soil specimen stress state, the consolidation ratio, the size effect, the degree of disturbance, the time effect, the secondary consolidation effect, and the soil mass inhomogeneity and anisotropy. The maximum dynamic shear modulus obtained from the anisotropic consolidation test method that considers the real consolidation ratio is closer to that of the in-situ wave velocity test method. Experimental results of the soil's dynamic shear modulus and damping ratio show uneven geographical distribution, rough soils classification, distant connection with the physicommechanical indices of soils, disunity among the experimental apparatus, the experimental method, and the data processing model, and few studies on experimental errors. Studies on the dynamic Poisson ratio of the soils are comparatively weak. We suggest a number of studies be carried out that concentrate on the dynamic Poisson ratio, a unified mathematical model of the dynamic parameters of the resonant column and cyclic triaxial test soils, the relationship between soil dynamic parameters under isotropic and anisotropic consolidation conditions, the relationship between soil dynamic parameters and the conventional physicommechanical index, and the experimental errors of soil dynamic parameters.

Key words: dynamic shear modulus; damping ratio; Poisson ratio; soil dynamics; seismic safety evaluation

① 收稿日期: 2015-03-13

基金项目: 中国地震局地震科技星火计划项目(XH15058)

作者简介: 贺为民(1965—), 男, 博士, 高级工程师, 注册岩土工程师, 主要从事地震工程与岩土工程研究。

E-mail: wmhe65@163.com。

0 引言

目前在工程场地土层地震反应分析和土工构筑物的地震稳定性评价中,常常采用等效线性化方法。该方法考虑土的非线性时必须用到的土动力学参数有:最大动剪切模量、动剪切模量比与剪应变关系曲线、阻尼比与剪应变关系曲线。陈国兴等^[1]、孙静等^[2]曾对土的动模量、阻尼比的研究成果进行了总结或述评。《工程场地地震安全性评价 GB17741-2005》^[3]的颁布和实施,促进了土动力学参数相关测试、试验和研究工作,取得了一批新的成果。本文主要对近年来土的动剪切模量、阻尼比、泊松比的研究成果进行梳理和总结,从地震反应分析应用角度提出今后的工作建议。

1 现场测试与实验室测试比较

土动力学参数的现场测试(原位测试)方法主要是波速测试法,即通过测试(钻孔内)土层剪切波速、P波波速和取土原状样测试土的密度,利用弹性波理论公式计算获得不同深度处的土层动剪切模量、动弹性模量以及动泊松比。该方法主要适用于小应变的情况,获得的动剪切模量、动弹性模量分别为土的初始动剪切模量(最大动剪切模量)、初始动弹性模量(最大动弹性模量)。现场波速测试法常用的有单孔法(检层法)、跨孔法,其主要优点是原位测试能较好地代表土的原状工况,避免了在取样和运输等过程中对土原状样的扰动和土样的尺寸效应。

目前土的非线性(特别是较大应变下)土动力学参数仍然主要通过实验室测试获得。用于土的动力学参数测试的仪器主要有^[2]:共振柱仪、动三轴剪切仪、扭剪仪和剪切仪等。共振柱仪以一维波动理论为基础,可直接确定土在较小应变($10^{-6} \sim 10^{-4}$)范围内的动剪切模量和阻尼比,是小应变条件下测定土动力特性参数较为理想的方法。由于它具有实验结果离散性小、操作方便等优点,已成为土动力学特性测试很重要的实验手段。其他三种实验仪器适用于确定中等到大应变($10^{-4} \sim 10^{-2}$)范围内的参数。动三轴试验是实验室测定压缩模量和阻尼比的常用方法,是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,这个假定与实际情况不符,因此还有待于进一步研究。目前现场波速测试法、共振柱试验和动三轴试验已成为现行地震安全性评价规范中指定的土动力学参数测试方法^[3]。

汪云龙等^[4]报道了中国地震局工程力学研究所与英国GDS公司合作研发的新型共振柱试验机 GDS-RCA,它通过低频扭剪模式将土体应变测试范围扩大到 $10^{-6} \sim 10^{-2}$,较好地衔接了从小应变到大应变下试验结果,它与 GZ-1 型共振柱试验机平行试验的结果表明,两者在应变重叠测试范围内剪切模量比试验结果有很好的一致性;但目前 GDS-RCA 的系统组成、控制和试验方法较为复杂,使得试验效率较低。

蒋寿田等^[5]等通过对现场波速测试法和室内共振柱试验的实际数据对比,指出现场测得的最大动剪切模量比实验室的试验结果要大,80%~170%;Pitilakis 等^[6]研究结果也表明现场测得的最大动剪切模量总是要比实验室测得的最

大动剪切模量大很多。影响现场测试与实验室测试最大动剪切模量差异的因素有很多,包括土样的扰动、室内人工制备土样与原状结构的差异(土样尺寸效应等)、时间效应以及次固结效应、实际土体的不均匀性、土的各向异性等。

袁晓铭等^[7]基于福建标准砂非均等固结下共振柱试验结果,建立了非均等固结下最大动剪切模量与均等固结下最大动剪切模量的关系式。孙静等^[8-9]基于砂土、原状粉土和粉质黏土的非均等固结下共振柱试验结果,建立了非均等固结下与均等固结下土的最大动剪切模量的关系式,结果表明,固结比对砂土、粉土、粉质黏土最大动剪切模量有不可忽视的影响;与砂土相比,固结比对黏性土最大动剪切模量影响程度更大。孙静等^[10]通过共振柱试验法和现场波速法研究认为,与室内均等固结试验结果相比,考虑实际固结比的非均等固结试验结果和现场波速法得到的最大动剪切模量更为接近;以往研究中没有很好地考虑实际固结比的作用是造成室内试验法和现场波速法测定最大动剪切模量之间显著差异的重要原因之一;在实际工作中应使室内和现场应力状态基本保持一致,室内试验应考虑实际固结比的影响,从而改进土动力试验在小应变阶段的精度。

2 动剪切模量和阻尼比的常用表达式

土的动剪切模量随动力作用水平的提高而降低,阻尼比则随动力作用水平的提高而增大^[11-13]。土动力作用水平通常以剪应变幅值表示,土的动剪切模量的退化通常以动剪切模量比与动剪应变幅值之间的关系来表示,土的阻尼比的变化通常以阻尼比与动剪应变幅值之间的关系表示。Seed 等^[14]首先给出了砂土和黏性土的动剪切模量比与动剪应变幅值和阻尼比与动剪应变幅值关系曲线。应指出的是,Seed 等给出的动剪切模量比与动剪应变幅值关系曲线离散性很大,特别是在动剪应变幅值为 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 范围内,而这个范围正是中等以上强度地震在土体中引起的剪应变幅值范围。Hardin 等^[12]给出的动剪切模量比与动剪应变的关系(即 Hardin-Drnevich 双曲线模型)为:

$$G/G_{\max} = 1/(1 + \gamma/\gamma_r) \quad (1)$$

阻尼比与动剪切模量比的关系为:

$$\lambda = \lambda_{\max}(1 - G/G_{\max}) \quad (2)$$

式中: G 、 $G_{\max}$ 分别为动剪切模量、最大动剪切模量; γ 为动剪应变; γ_r 为参考剪应变,是一个土性参数; λ 为阻尼比; $\lambda_{\max}$ 为最大阻尼比,是另一个土性参数。

式(1)也是目前地震安全性评价土层地震反应分析中采用的剪切模量比与剪应变幅值关系曲线的标准形式^[15]。

根据试验数据,在循环荷载作用下可假设土体动应力-应变关系为^[15-16]:

$$\tau = \gamma/(a + b\gamma) \quad (3)$$

由式(3)可得试验数据处理时常用的动剪切模量倒数与剪应变幅值关系的直线方程:

$$1/G = a + b\gamma \quad (4)$$

比较式(1)、式(4)可得:

$$\alpha = 1/G_{\max} \quad (5)$$

$$\gamma_r = b/a = \tau_{\max}/G_{\max} \quad (6)$$

式中: τ 、 $\tau_{\max}$ 分别为动剪应力、最大动剪应力; a 、 b 为双曲线参数,常常通过试验数据拟合获得^[15]。

根据式(1), $(G_{\max}/G-1) \sim \gamma$ 关系线应为直线,但试验测得的 $(G_{\max}/G-1) \sim \gamma$ 关系线通常为曲线;为了改进,Hardin 等^[17]提出了如下修改关系:

$$G_{\max}/G-1 = \gamma \left[1 + a \exp(-b\gamma/\gamma_r) \right] \gamma_r \quad (7)$$

式(7)的参数较多,确定比较麻烦^[18]。另外,试验资料显示,只有当 $(1-G_{\max}/G)$ 大于一定数值时,在双对数坐标中 $\lambda \sim (1-G_{\max}/G)$ 关系线才是条直线;当小于该数值时,式(2)低估了阻尼比值。

Hardin-Drnevich 模型具有形式简单、参数物理意义明确、应用方便等优点,可较好地模拟砂土、软黏土等强度较低的土体的剪切模量变化规律,但对于硬土的拟合效果较差。Martin 等^[19]在 Hardin-Drnevich 模型基础上,对式(1)和式(2)进行了改进,提出了 3 参数的 Davidenkov 模型和具有幂次形式的阻尼比拟合公式:

$$\frac{G}{G_{\max}} = 1 - \left[\frac{(\gamma/\gamma_0)^{2B}}{1 + (\gamma/\gamma_0)^{2B}} \right]^A \quad (8)$$

$$\lambda = \lambda_{\max} \left\{ \left[\frac{(\gamma/\gamma_0)^{2B}}{1 + (\gamma/\gamma_0)^{2B}} \right]^A \right\}^n \quad (9)$$

式中: A 、 B 、 $\lambda_{\max}$ 、 n 、 γ_0 均为拟合参数。

Davidenkov 模型的优点在于可通过调整参数更好地拟合试验数据,因此可较好地对动剪切模量进行预测;但其缺点在于:将 Hardin-Drnevich 模型中具有明确物理意义的参考剪应变 γ_r 替换成了没有实质物理意义的拟合参数 γ_0 ,其取值没有一定标准,难于把握;由于拟合参数过多,拟合参数不能更多地从试验中获取,应用较为复杂;并且拟合参数取值没有标准,在试验数据较多时就会造成拟合数据杂乱、无规律性的问题。

试验表明,土的阻尼比随剪应变变化规律比较复杂,用 Hardin-Drnevich 模型和 Davidenkov 模型描述均有困难。根据试验结果可用以下经验公式^[1]:

$$\lambda = \lambda_{\max} (1 - G/G_{\max})^\beta \quad (10)$$

式中: $\lambda_{\max}$ 为最大阻尼比; β 为 $\lambda \sim \gamma$ 关系曲线形状系数(阻尼比参数),对于大多数土, β 数值范围为 0.2~1.2。

在双对数坐标系上,式(10)可写成如下直线形式^[15]:

$$\lg \lambda = \lg \lambda_{\max} + \beta \lg(1 - G/G_{\max}) \quad (11)$$

对式(11)通过实测数据拟合可得 $\lambda_{\max}$ 和 β 。

将式(1)代入式(10)可得:

$$\lambda/\lambda_{\max} = \left[\gamma/(\gamma_r + \gamma) \right]^\beta \quad (12)$$

利用式(12)可绘出目前地震安全性评价土层地震反应分析中采用的阻尼比与剪应变关系曲线^[15]。

陈国兴等^[20]对南京新近沉积土建议的阻尼比经验公式为:

$$\lambda = \lambda_{\min} + \lambda_0 (1 - G/G_{\max})^n \quad (13)$$

式中: n 、 λ_0 是与土性有关的拟合参数; $\lambda_{\min}$ 是与初始动剪切模量 $G_{\max}$ 相对应的最小阻尼比。由于现有的测试技术、仪器精度与试验条件很难精确测量对应于初始动剪切模量 $G_{\max}$ 的最小阻尼比 $\lambda_{\min}$, 因此 $\lambda_{\min}$ 可以看作是与土性有关的拟合参数。

3 动泊松比研究进展

Kokusho 等^[21]利用排水动三轴和不排水动三轴平行试验研究 Toyoura 砂的泊松比,结果表明剪应变幅值在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 范围时排水条件下的泊松比在 0.2~0.3 间,且随着剪应变幅值的增大而增大。王炳辉等^[22]通过南京细砂的自振柱和动三轴试验,在假定试样在动三轴试验得到的动弹性模量通过弹性理论推算的特定剪应变下动剪切模量值与自振柱试验得到的特定剪应变下动剪切模量值相等的前提下,认为在排水条件下泊松比随剪应变幅值的增大而增大,剪应变幅值在 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 范围时泊松比增大的趋势更加明显。

王建华等^[23]利用非接触式位移传感器研制了一套测量动三轴试样径向变形的装置,并针对试样两端透水石对试样径向变形的约束,推导出对实测径向变形的修正公式,从而利用径向与轴向变形测量装置实测动三轴试样的轴向与径向变形可以确定试样的泊松比;对橡胶、饱和细砂、饱和软黏土试样固结不排水动三轴试验表明,固结后的饱和三轴土样在不排水条件下受振动应力作用时,当其轴向动应变从 10^{-5} 增大至 10^{-3} 时,泊松比的变化基本为一常数,且与固结压力的大小无关,将其取为接近 0.5,并据此得出由动三轴试验结果确定动剪切模量是合理的。潘华等^[24]利用英国 GDS 空心圆柱扭剪(HCA)仪,针对原状海洋粉质黏土,通过循环三轴及循环扭剪试验获得了相应的杨氏模量、剪切模量和动泊松比;试验结果表明,土体的动泊松比随广义剪应变的增大而增大,随有效固结围压、固结应力比的增大而逐渐减少;随着广义剪应变的增大,有效固结围压、固结应力比对动泊松比的影响减小,当广义剪应变增大到 1.8×10^{-2} 左右时试验终止,土体动泊松比约为 0.48;试验中未出现动泊松比大于 0.5 的现象,说明土体未出现剪胀现象,试验所采用的粉质黏土在循环荷载作用下具有较好的稳定性。

吴世明等^[25]根据自己对饱和土中弹性波特性的研究的结果,给出了由波速法确定饱和土层有效泊松比和总泊松比的公式;认为有效泊松比与饱和土中的波速及孔隙率有关,其值低于总泊松比;总泊松比随土剪切模量的增大而有所减小,含气量的增多会使它急剧降低且以有效泊松比下限。Wichtmann 等^[26]通过共振柱试验以及波速试验,研究了颗粒分布级配曲线对石英砂泊松比的影响,结果表明,泊松比与平均粒径 d_{50} 无关,但随均匀系数 $C_u = d_{60}/d_{10}$ 的增大而增大。Kumar 等^[27]通过波速试验,研究了不同粒径干砂的泊松比与相对密度和有效围压之间的关系,结果表明,泊松比随相对密度和有效围压的增大而减少,有效围压对细砂泊松比的影响比粗砂更为显著;有效围压不变时,砂土的泊松比随最大剪切模量的增大几乎呈线性关系减小。高武平等^[28]依据天津地区原位波速测井资料对浅部土层泊松比进

行了研究,结果表明:泊松比随深度的增加大致呈三段式变化,0~5 m(人工填土盖层)的泊松比随深度增加而逐渐增加,泊松比值范围为0.42~0.495;5~20 m(软流塑淤泥质层)泊松比随深度增加而相对稳定,泊松比值范围为0.49~0.495;20~200 m 土层岩性差异大,泊松比离散性较强,但显示了一定的线性特征,泊松比随深度增加而缓慢减少,泊松比值范围为0.495~0.435。

4 动剪切模量和阻尼比地区经验成果

本文对搜集到的国内动剪切模量和阻尼比地区经验主要成果进行了汇总(表1)。由表1可见,成果的总体数量较少,地域分布不均衡,对土的分类总体上不够细致,在实验仪器、实验方法以及数据处理采用的模型、方法等方面各有特色,并不统一。

5 实验误差及其对地震动参数的影响分析

周加林^[44]在分析双向动三轴实验应力状况的基础上,提出了在经过逐步重复试验后将最后的误差用实验常数消除的新方法。孙静等^[45]建立了固定-自由型共振柱仪自身可靠性分析方法,采用均方根法给出了共振柱的动剪切模量误差、应变误差和阻尼比误差的分析公式,并进行误差分析,发现它对固定-自由式的共振柱都适用;并指出:(1)导致动剪切模量值误差的主要因素有扭转振动频率、试件质量密度、频率方程的根和试件高度四个因素,动剪切模量相对误差与扭转振动频率、试件质量密度、高度、直径和驱动板极惯性矩的相对误差有关,其中试件直径相对误差对最终的误差影响最大,但其比较容易控制,扭转振动频率和试件高度相对误差对最终误差影响较大且不容易控制,因此在试验时应该严格控制扭转振动频率和试件高度的相对误差,以保证试验结果的误差在允许范围内;(2)导致应变值误差的主要因素有驱动板加速度、试件高度、扭转振动频率等三个因素,其中扭转振动频率相对误差的影响较其他参数的影响大两倍;(3)阻尼比相对误差不仅与衰减率相对误差有关,而且和对数衰减率有关,并且与对数衰减率成反比,其中后两点决定了阻尼比易出现较大相对误差(特别是小应变情况),因为衰减率相对误差一般是一个很难控制的参数,误差较大。即使衰减率较小,比如说不超过10%,由于从小应变到大应变对数衰减率一般在0.6~1.9之间,其倒数在1.7~0.5之间,则阻尼比相对误差在小应变时会被放大70%,大应变时被减少一半。由此可见,阻尼比的相对误差是个很敏感的参数,小应变阻尼比的试验误差更难控制,这也从一个侧面解释了目前土类阻尼比试验结果比剪切模量离散大的原因。

王绍博等^[46]使用中国地震局鉴定通过的程序进行土层地震反应分析,土层的厚度、土介质的密度和波速由钻孔资料得到,而土壤动力特性参数分别取DB001-94规范^[29]典型值(方案1)、文献[30]试验结果(方案2)及实测值(方案3)。从计算结果看,对于小震,三种方案的差别不大;但对于中震和大震,差别很明显,特别是大震作用下第一种方案的结果明显有别于另两种方案;方案2的结果与方案3相差不大;方案1计算结果的缺陷主要源于文献[29]中土壤的动剪切

模量偏小,特别是在大应变时衰减太快,而文献[30]中的数据与当前国内外各种资料相接近。楼梦麟等^[47]应用模态摄动法求解水平分层均匀土层的地震反应,通过大量数值计算,讨论上海软土土性变化对土层基本周期和表面地震加速度反应的影响,结果表明:准确获取土层的动力参数对土层地震反应计算有重要影响,在现场实测获得较为翔实的土样动力特性参数的基础上,土层土性动力参数变异性所产生的计算误差是有限的。陈国兴等^[48]基于南京新近沉积土的平均关系曲线代表值及其标准差,利用一维波传法及SHAKE91软件计算水平成层场地的地震反应,研究了土的动剪切模量比和阻尼比与剪应变幅值的关系曲线、土层剪切波速的变异性对深软场地地表峰值加速度及其反应谱的影响,结果表明:(1)土的动剪切模量比平均曲线加1倍标准差与阻尼比平均曲线减1倍标准差、动剪切模量比平均曲线减1倍标准差与阻尼比平均曲线加1倍标准差的变异性组合对地表峰值加速度的影响最为显著;土的动剪切模量比和阻尼比变异性的其余组合对地表峰值加速度的影响规律不明显,但其地表峰值加速度的增、减幅度介于上述两种变异性组合的地表峰值加速度变化幅度之间,其变化幅度一般小于10%;小震和中震时,土动剪切模量比和阻尼比的变异性对地表峰值加速度反应谱形状的影响不大;大震时有一定影响;(2)场地剪切波速15%的变异性对地表加速度反应谱的形状有较大影响;相比较而言,场地剪切波速减小对地表加速度反应谱的影响较场地剪切波速增大的影响要大一些;(3)场地剪切波速的变异性对地表加速度及其反应谱的影响比土的动剪切模量比和阻尼比变异性的影响更为显著。

袁晓铭等^[49]基于我国17个省份的42个城市或地区的588组土样(其中黏性土450个,无黏性土138个)的共振柱试验,研究了不同概率水平下常规土类动剪切模量比和阻尼比非线性曲线上限和下限变化范围,提出了典型剪应变下黏性土和无黏性土动剪切模量比和阻尼比落在不同区间概率大小的计算方法和计算公式;该计算方法形成的基本思路为:将试验资料整理成标准结果,利用频数分布图、概率纸法检验图和SAS软件得到典型剪应变下两个动力参数变异性分布形态,根据不同分布形态采用两种不同方法计算典型剪应变下两个动力参数上、下限概率参考值;结果表明:不同剪应变下动剪切模量比和阻尼比上、下限值随概率水准的变化具有规律性,不同剪应变下两个动力参数的上限和下限与其出现的概率之间均满足 Boltzmann 方程,但方程中参数随剪应变和土类而变化;所有概率水平下不同剪应变的动剪切模量比上、下限区间大小均有明显差异,剪应变在 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 范围的动剪切模量比上、下限范围最大;同一概率水平下阻尼比上、下限区间大小随剪应变增大而明显增大;认为动剪切模量和阻尼比的变异性主要来源于土性本身及地区差异。孙锐等^[50]将上述588组土样分为黏土(112组)、粉质黏土(209组)、粉土(95组)、砂土(138组)、淤泥质土(34组)进行研究,对八个典型剪应变对应的动剪切模量比及阻尼比不确定性的概率进行分析,结果表明:常规土类动剪切模量比和

表 1 土的动剪切模量和阻尼比地区经验主要成果
Table1 The main achievements of local experiences in dynamic shear modulus and damping ratio of soils

第一作者及时间	地区及土的分类	试验仪器、方法及结果
DB001-94 ^[29] 1994	淤泥、淤泥质黏土、黏土、粉质黏土、黏质粉土(密)、黏质粉土(松)、砂(密实、中密)、轻砂、砂砾石、回填土、基岩	上世纪 80 年代少量试验结果
袁晓铭 ^[30] 2000	北京、上海等十几个地区黏土、粉质黏土、粉土(密)、粉土(中密)、粉土(松)、密实砂、中密砂、松砂、淤泥、淤泥质土	工力所 GZ-1 共振柱、自振法、72 组 144 次试验、折线双曲线拟合、对不同试验得到的结果进行平均化处理,结合经验给出了动剪切模量比、阻尼比随剪应变变化的的推荐值(分为埋深<10 m(固结压力 98 kPa)、10 m<埋深<20 m(固结压力 196 kPa))
吕悦军 ^[31] 2003	渤海海底黏土(软、坚硬)、砂质粉土(中密、密实)、粉砂质细砂(密实)、粉砂(密实)、粉质黏土(稍硬、非常硬、坚硬)、细砂(密实)、	用 HX-100 控制振动三轴试验装置、58 个土样、据土样所代表土层的上覆有效压力确定试验土样施加的等向固结压力、采用折线曲线拟合动剪切模量比、阻尼比随动剪应变的变化关系,给出各类土的动剪切模量比和阻尼比的推荐值。
陈国兴 ^[32] 2004	南京及其邻近地区河漫滩相成因的黏土、粉质黏土、淤泥质粉质黏土、粉质黏土与粉砂互层土、粉土、粉细砂	南工大 GZZ-1 型自(共)振柱、98 个土样、等压固结(100、200、300 kPa、试样原位土层的三分之二竖向有效应力值)剪切模量比与剪应变曲线采用 Davidenkov 模型、阻尼比与剪应变曲线采用经验公式(10)、给出了动剪切模量比、阻尼比随剪应变变化的的平均曲线、包络线及其参数的推荐值
陈国兴 ^[33] 2005	苏南地区淤泥质粉质黏土、黏土、粉质黏土、粉质黏土与粉细砂互层土、粉土、粉砂、细砂和中粗砂	南工大 GZZ-1 型自(共)振柱、155 个土样,剪切模量比与剪应变曲线采用 Davidenkov 模型、阻尼比与剪应变曲线采用经验公式(13)、给出了动剪切模量比、阻尼比与剪应变平均曲线的拟合曲线及拟合参数
陈国兴 ^[17] 2006	南京淤泥质粉质黏土(软塑)、粉质黏土(软塑、可塑、硬塑)、粉质黏土与粉砂互层土(可塑)、粉土(可塑)、粉砂(中密)和细砂(稍密)	南工大 GZZ-1 型自(共)振柱、120 个土样,剪切模量比与剪应变曲线采用 Davidenkov 模型、阻尼比与剪应变曲线采用经验公式(13)、给出了动剪切模量比、阻尼比与剪应变平均曲线的拟合曲线及拟合参数,以及动剪切模量比、阻尼比与剪应变曲线的典型值
施春花 ^[34] 2009	北京地区粉质黏土(深度分为 0~5 m、5~10 m、10~15 m、15~20 m、20~25 m、25~30 m、30~40 m、40~50 m、50~60 m、60~80 m、>80 m)	地震安全性评价报告中以动三轴为主的试验数据 185 组,统计分析实测土动力学参数随深度的变化关系,给出了粉质黏土在不同深度下的动剪切模量比和阻尼比平均值
张亚军 ^[35] 2010	上海滨海平原地区 100 m 深度内标准层按深度及土性分为②~⑨层及其亚层,共分为 15 工程地质单元层	同济大学共振柱试验 352 组、动三轴试验 221 组、剪切模量比与剪应变曲线采用 Davidenkov 模型、阻尼比与剪应变曲线采用经验公式(13)、给出了动剪切模量比、阻尼比与剪应变平均曲线的拟合曲线及拟合参数,以及动剪切模量比、阻尼比与剪应变曲线的典型值
连玉平 ^[36] 2010	福建漳州地区淤泥、粉质黏土、粉质黏土与粉砂互层土、残积土	工力所 GZ-1 共振柱、30 个土样,各向等压固结(100、200、300 kPa)、剪切模量比与剪应变曲线采用双曲线(Hardin 模型)、阻尼比与剪应变曲线经验公式(10)、给出了不同围压下的动剪切模量比、阻尼比与剪应变变化的平均曲线及其参数的推荐值
蔡辉腾 ^[37] 2010	福州地区淤泥、淤泥质土、粉质黏土、粉质黏土与粉砂互层土、粉砂、残积土	工力所 GZ-1 共振柱、21 个土样,各向等压固结(100、200、300 kPa)、剪切模量比与剪应变曲线采用双曲线(Hardin 模型)、阻尼比与剪应变曲线经验公式(10)、给出了不同围压下的动剪切模量比、阻尼比与剪应变变化的平均曲线及其参数的推荐值
杨传成 ^[38] 2011	山东东营新北油田粉砂、粉土、淤泥质黏性土、粉质黏土	DDS-70 动三轴、28 个原状样、固结压力按土层实际应力状态进行模拟、剪切模量比、阻尼比与剪应变曲线采用双曲线(Hardin 模型)时对同种土样得到的结果进行平均化处理,给出了剪切模量比、阻尼比与剪应变变化的推荐值
史丙新 ^[39] 2010	天津滨海地区为淤泥质黏土、淤泥质粉质黏土、粉土、粉质黏土、黏土、粉砂、细砂(多深度区间)	194 个钻孔实测 579 组动三轴数据,统计采用取平均值的方法,给出了各类土在不同深度区间剪切模量比、阻尼比与剪应变变化的平均统计值
张小平 ^[40] 2011	大连地区粉质黏土、淤泥质粉质黏土、黏土、中砂、碎石、回填土、全风化板岩	工力所实测的动三轴数据 94 组参与统计,给出了各类土剪切模量比、阻尼比与剪应变变化的平均值及标准差最大值
荣棉水 ^[41] 2013	成都盆地杂填土、粉土(5 m 以内、5 m 以下)、粉质黏土、黏土、粉细砂、细砂、中砂、卵石(稍密、中密、密实)、泥岩	98 个钻孔土样的动三轴试验、给出了推荐的土类的动剪切模量比、阻尼比与剪应变的关系
孔宇阳 ^[42] 2014	武汉地区不同埋深的粉质黏土、黏土、粉土、粉砂、粉细砂、细砂、中粗砂	DGZ-1 共振柱试验仪,1 403 组试验,由土层的上覆有效压力确定等向固结压力,利用最小二乘法进行回归分析,给出了不同深度的剪切模量比、阻尼比与剪应变变化的统计平均值
夏峰 ^[43] 2015	天津地区淤泥质土、粉土、粉质黏土、黏土、砂土(深度分为 0~10 m、10~20 m、20~30 m、30~40 m、40~50 m、50~60 m、60~70 m、70~90 m、90~120 m)	动三轴数据 1 480 组,按不同岩性、不同深度区间进行统计,给出了各类土各深度区间剪切模量比、阻尼比与剪应变变化的平均值及标准差最大值

阻尼比的变异性以偏态分布为主,其概率统计指标呈现良好规律;各种土类动剪切模量比及阻尼比的标准差和变异系数都很大(这里所说的很大,并不是指其标准差和变异系数的值本身,而是指此差别对地震动的影响显著,只有以影响大为标准才能对差异的大小做出恰当的评价;例如,按该文中的统计结果,黏土的动剪切模量比在应变 10^{-4} 、 5×10^{-3} 和 10^{-3} 三点处其变异系数分别约为 9%、23%和 31%,而中强地震作用下动剪切模量比 6%误差就已经不可忽视;也就是

说,模量比的上限和下限差别将对土层地震动产生相当显著的影响,当然也就说明土性的不确定性相当大),而标准差最大值恰出现在土层地震反应计算的敏感区内;各种土类动剪切模量比及阻尼比的外包线与其 95% 参考值都有较大差别,体现了实验结果显著的离散性;动剪切模量比的变异系数随剪应变的增大而明显增大,阻尼比的变异系数随剪应变的增大而显著减小;大应变时动剪切模量比不确定性大,而小应变时阻尼比离散显著;阻尼比的变异系数要明显大于动剪切模量比的变异系数,表明阻尼比具有更大的不确定性。孙锐等^[51]基于我国 41 个城市或地区的 554 组土样(其中黏土 112 组、粉质黏土 209 组、粉土 95 组和砂土 138 组)共振柱实测数据,研究了考虑动剪切模量比和阻尼比变异性下其超越概率的计算方法,并分别给出了黏土、粉质黏土、粉土、砂土这四种常规土类动剪切模量比和阻尼比超越概率的计算公式及其拟合参数,也认为这两个动力参数的变异性主要来源于土性本身及地区差异;指出对于指定地区动剪切模量比和阻尼比非线性超越概率的计算,需要依据地区性土的专门试验。

6 存在的一些问题与建议

(1) 土的动泊松比是一个重要参数,特别是在目前动三轴试验中,由动弹性模量和动轴向应变换算动剪切模量和动剪应变过程中,必须用到动泊松比。但目前相对于其他动土力学参数,它的研究程度较低,研究成果较少。今后应加强动泊松比试验仪器方法、影响因素(土性、饱和度、固结围压、固结应力比等)、非线性变化规律及其对地震动参数影响等方面的研究工作。

(2) 共振柱试验和动三轴试验是目前测定动剪切模量、阻尼比等土动力学参数的主要方法,但两者的实验原理和实验成果数据精度不同,如何将两者的实验成果数据联合使用、建立共振柱试验和动三轴试验实测的土动力学参数间的关联性、采用统一的数学模型进行定量描述需要进一步研究。

(3) 目前在均等固结条件下的动剪切模量、阻尼比的研究成果较多,而非均等固结条件下的研究成果较少。由于侧压力系数和泊松比的作用,实际工程场地中土层固结比为 1 的状态基本不存在,土层均处于非均等固结状态,而此种条件下的实验结果更接近于原位测试结果^[10]。应进一步开展动剪切模量、阻尼比在均等固结与非均等固结条件下之间的相互关系对比研究,在实际工程场地土层地震反应分析中尽量采用非均等固结下的土动力学参数;当采用均等固结下的土动力学参数时应应对这些参数利用对比研究成果进行适当修正。

(4) 从已报道的国内动剪切模量和阻尼比地区经验成果看,存在总体数量较少、地域分布不均衡、对土的分类总体上不够细致、实验仪器方法和数据处理模型方法不一致、数据成果与土的物理力学性质指标联系不紧密等问题。建议今后在进行土动力学参数实验的同时,也要进行土的常规物理力学性质指标试验以积累数据,研究和建立具有地域特色

的土动力学参数与常规物理力学性质指标之间的经验关系(类似于地基承载力与常规物理力学性质指标之间的经验关系),从而使土动力学参数地区经验成果更具有针对性和实用性;努力创造条件,早日构建统一的实验标准和数据处理方法,从而增强不同实验成果可比性。

(5) 土动力学参数实验误差方面的研究成果较少,与常规土工实验误差方面的研究成果差距较大。在常规土工实验的岩土参数统计中,对每个主要工程地质单元层至少要求 6 个实测数据,并统计出每层中各个岩土参数的平均值、标准值、标准差、变异系数,而在岩土计算和评价中视具体岩土参数特性采用其平均值或标准值。由于共振柱试验和动三轴试验单个试样需要的实验时间较长,具体到单个工程场地由于工期等因素的限制完成的试样数量较少,所以对试样实验结果的精度应具有更高的要求。因此,应加强土动力学参数实验误差和提高实验成果数据精度等方面的研究。

参考文献(References)

- [1] 陈国兴,谢君斐,张克绪.土的动模量和阻尼比的经验估计[J].地震工程与工程振动,1995,15(1):73-84.
CHEN Guo-xing, XIE Jun-fei, ZHANG Ke-xu. The Empirical Evaluation of Soil Modulus and Damping Ratio for Dynamic Analysis[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1995, 15(1): 73-84. (in Chinese)
- [2] 孙静,袁晓铭.土的动模量和阻尼比研究述评[J].世界地震工程,2003,19(1):88-95.
SUN Jing, YUAN Xiao-ming. A State-of-art of Research on Dynamic Modulus and Damping Ratio of Soil[J]. World Earthquake Engineering, 2003, 19(1): 88-95. (in Chinese)
- [3] 中国地震局.GB17741-2005,工程场地地震安全性评价[S].北京:中国标准出版社,2005:1-9.
China Earthquake Administration. GB17741-2005, Evaluation of Seismic Safety for Engineering Sites[S]. Beijing: China Standard Press, 2005: 1-9. (in Chinese)
- [4] 汪云龙,袁晓铭,李晓飞.GDS-RCA 型共振柱仪常规实验可靠性研究[J].地震工程与工程振动,2014,34(1):95-99.
WANG Yun-long, YUAN Xiao-ming, LI Xiao-fei. Reliability Analysis of the Tests by GDS-RCA Resonant Column Apparatus[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2014, 34(1): 95-99. (in Chinese)
- [5] 蒋寿田,王幸辛.郑州地区地基原状土动模量和阻尼比[C]//第三届全国土动力学学术会议.1990:151-155.
JIANG Shou-tian, WANG Xing-xin. Dynamic Shear Modulus and Damping Ratio of Undisturbed Soil in Zhengzhou[C]//The 3rd National Conference on Soil Dynamics. 1990: 151-155. (in Chinese)
- [6] Pitilakis K D, Anastassiadias A, Rapatakis D. Field and Laboratory Determination of Dynamic Properties of Natural Soil Deposits[C]// Proceedings of the 10th WCEE. Balkema, Rotterdam, 1992:1275-1280.
- [7] 袁晓铭,孙静.非等向固结下砂土最大动剪切模量增长模式及 Hardin 公式修正[J].岩土工程学报,2005,27(3):264-269.

- YUAN Xiao-ming, SUN Jing. Model of Maximum Dynamic Shear Modulus of Sand Under Anisotropic Consolidation and Revision of Hardin's Formula[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(3): 264-269. (in Chinese)
- [8] SUN Jing, YUAN Xiao-ming. The Effect of the Consolidation Ratio of Sands on Dynamic Shear Modulus and Response Spectrum of Soil Layer[J]. Geotechnical Special Publication, ASCE, 2006(150): 437-443.
- [9] 孙静, 袁晓铭. 固结比对黏性土动剪切模量影响的研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1457-1462.
- SUN Jing, YUAN Xiao-ming. The Effect of Consolidation Ratios on Dynamic Shear Modulus of Undisturbed Cohesive Soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1457-1462. (in Chinese)
- [10] 孙静, 袁晓铭, 陶夏新. 室内和现场测试最大动剪切模量差别的试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(增刊 1): 258-262.
- SUN Jing, YUAN Xiao-ming, TAO Xia-xin. Comparative Study on Laboratory and Field Test of Maximum Dynamic Shear Modulus[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45 (Supp 1): 258-262. (in Chinese)
- [11] Hardin B O, Drnevich V P. Shear Modulus and Damping in Soils: Measurement and Parameter Effects (Terzaghi Lecture) [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1972, 98(SM6): 603-624.
- [12] Hardin B O, Drnevich V P. Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1972, 98(SM7): 667-692.
- [13] 张克绪, 谢君斐. 土动力学[M]. 北京: 地震出版社, 1989.
- ZHANG Ke-xu, XIE Jun-fei. Soil Dynamics[M]. Beijing: Seismological Press, 1989. (in Chinese)
- [14] Seed H B, Idriss I M. Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses, Report No. EERC70-10[R]. [S. l.]: Earthquake Engineering Research Center, University of California Berkeley, 1970.
- [15] 胡聿贤. 地震安全性评价技术教程[M]. 北京: 地震出版社, 1999.
- HU Yu-xian. Seismic Safety Evaluation Technology Tutorials [M]. Beijing: Seismological Press, 1999. (in Chinese)
- [16] 谢定义. 土动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
- XIE Ding-yi. Soil Dynamics[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1988. (in Chinese)
- [17] Hardin B O, Drnevich V P. Shear modulus and Damping in Soils: Designing Equations and Curves[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1972, 98: 667-692.
- [18] 李咸亨, 吴志明, 罗胜元, 等. 台北盆地动态参数之最佳化分析与验证[J]. 岩土工程学报, 2001(6): 559-663.
- Shannon H LEE, WU Zhi-mong, LOU Sheng-yuan, et al. Optimization of Dynamic Parameters of Taipei Basin[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001(6): 559-663. (in Chinese)
- [19] Martin P P, Seed H B. One-dimensional Dynamic Ground Response Analyses[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1982, 108(7): 935-952.
- [20] 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.
- CHEN Guo-xing, LIU Xue-zhu, ZHU Ding-hua, et al. Experimental Studies on Dynamic Shear Modulus Ratio and Damping Ratio of Recently Deposited Soils in Nanjing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(8): 1023-1027. (in Chinese)
- [21] Kokusho T. Cyclic Triaxial Test of Dynamic Soil Properties for Wide Strain Range[J]. Soils and Foundations, 1980, 20(2): 45-60.
- [22] 王炳辉, 陈国兴, 胡庆兴. 南京细砂动剪切模量和阻尼比的试验研究[J]. 世界地震工程, 2010, 26(3): 7-15.
- WANG Bing-hui, CHEN Guo-xing, HU Qing-xing. Experiment of Dynamic Shear Modulus and Damping of Nanjing Fine Sand[J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(3): 7-15. (in Chinese)
- [23] 王建华, 周扬锐, 张群. 一种测试动三轴试样泊松比的方法[J]. 世界地震工程, 2010, 26(增刊 1): 23-27.
- WANG Jian-hua, ZHOU Yang-rui, ZHANG Qun. Measuring Method for Poisson Ratio of Cyclic Triaxial Specimens[J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(Supp 1): 23-27. (in Chinese)
- [24] 潘华, 陈国兴, 孙田. 原状海洋土动泊松比的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 1): 346-350.
- PAN Hua, CHEN Guo-xing, SUN Tian. Experimental Research on Dynamic Poisson's Ratio of Undisturbed Marine Soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Supp 1): 346-350. (in Chinese)
- [25] 吴世明, 陈龙珠. 饱和土的泊松比及含气量对它的影响[J]. 水利学报, 1989(1): 37-43.
- WU Shi-ming, CHEN Long-zhu. Poisson's Ratio of Saturated and Highly-saturated Soils[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1989(1): 37-43. (in Chinese)
- [26] Wichtmann T, Triantafyllidis T. On the Influence of the Grain Size Distribution Curve on P-wave Velocity, Constrained Elastic Modulus M_{max} and Poisson's Ratio of Quartz Sands [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010(30): 757-766.
- [27] Kumar J, Madhusudhan B N. Effect of Relative Density and Confining Pressure on Poisson Ratio from Bender and Extender Elements Tests[J]. Geotechnique, 2010, 60(7): 561-567.
- [28] 高武平, 陈宇坤, 刘芳. 天津浅部地层的泊松比特征初步分析[J]. 地震工程学报, 2014, 36(1): 47-53.
- GAO Wu-ping, CHEN Yu-kun, LIU Fang. Preliminary Analysis of Poisson's Ratio of Shallow Stratum in Tianjin[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(1): 47-53. (in Chinese)

- [29] 中国地震局.DB001-94,工程场地地震安全性评价工作规范[S].北京:地震出版社,1994:1-50.
China Earthquake Administration.DB001-94,Code for Seismic Safety Evaluation of Engineering Site[S].Beijing: Seismological Press,1994:1-50. (in Chinese)
- [30] 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.
YUAN Xiao-ming,SUN Rui,SUN Jing,et al.Laboratory Experimental Study on Dynamic Shear Modulus Ratio and Damping Ratio of Soils[J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2000,20(4):133-139.(in Chinese)
- [31] 吕悦军,唐荣余,沙海军.渤海海底土类动剪切模量比和阻尼比试验研究[J].防灾减灾工程学报,2003,23(2):35-42.
LV Yue-jun,TANG Rong-yu,SHA Hai-jun.Expermental Study on Dynamic Shear Modulus Ratio of she Soil of Bohai Seafloor[J].Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2003,23(2):35-42. (in Chinese)
- [32] 陈国兴,刘雪珠.南京及邻近地区新近沉积土的动剪切模量和阻尼比的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(8):1403-1410.
CHEN Guo-xing,LIU Xue-zhu.Testing Study on Ratio of Dynamic Shear Moduli and Ratio of Damping for Recently Deposited Soils in Nanjing and Its Neighboring Areas[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(8):1403-1410. (in Chinese)
- [33] 陈国兴,刘雪珠,朱定华.苏南地区新近沉积土的动力特性研究[J].地下空间与工程学报,2005,1(7):1139-1142.
CHEN Guo-xing,LIU Xue-zhu,ZHU Ding-hua.Study on Dynamic Characteristics of Recently Deposited Soils in Southern Area of Jiangsu Province[J].Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2005,1(7):1139-1142. (in Chinese)
- [34] 施春花,吕悦军,彭艳菊.北京地区粉质粘土土动力学参数的统计分析[J].震灾防御技术,2009,4(1):69-74.
SHI Chun-hua,LY Yue-jun,PENG Yan-ju.Statistical Analysis of Dynamic Parameters of Silty Clay in Beijing Area[J].Technology for Earthquake Disaster Prevention,2009,4(1):69-74. (in Chinese)
- [35] 张亚军,兰宏亮,崔永高.上海地区土动剪切模量比和阻尼比的统计研究[J].世界地震工程,2010,26(2):171-175.
ZHANG Ya-jun,LAN Hong-liang,CUI Yong-gao.Statistical Studies on Shear Modulus Ratios and Damping Ratios of Soil in Shanghai Area[J].World Earthquake Engineering,2010,26(2):171-175.(in Chinese)
- [36] 连玉平,张颖,蔡辉腾,等.福建漳州地区典型土动力特性的试验研究[J].西北地震学报,2010,32(4):363-366.
LIAN Yu-ping,ZHANG Ying,CAI Hui-teng,et al.Testing Study on the Dynamic Properties of Typical Soils in Zhangzhou Area, Fujian Province[J].Northwestern Seismological Journal,2010,32(4):363-366. (in Chinese)
- [37] 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.
CAI Hui-teng,LI Ying-min,OU Bing-song.Testing Study of Dynamic Shear Modulus and Damping Ratio of Typical Soils in Fuzhou Area[J].Rock and Soil Mechanics,2010,31(2):361-365. (in Chinese)
- [38] 杨传成,蔡文霞,蔡连友.东营新北油田海底土类动力特性的试验研究[J].防灾科技学院学报,2011,13(3):9-13.
YANG Chuan-cheng,CAI Wen-xia,CAI Lian-you.Experimental Study on Dynamic Parameters of Seafloor Soil in the Dongying Xinbei Oil Field[J].Journal of Institute of Disaster Prevention,2011,13(3):9-13. (in Chinese)
- [39] 史丙新,张力方,吕悦军,等.天津滨海场地土动力学参数研究[J].震灾防御技术,2010,5(3):288-298.
SHI Bing-xin,ZHANG Li-fang,LU Yue-jun,et al.Research on Dynamic Parameters of Soil Site in Tianjin Coastal Area[J].Technology for Earthquake Disaster Prevention,2010,5(3):288-298.(in Chinese)
- [40] 张小平,牛雪,赵安生,等.大连地区场地土动力学参数初步研究[J].中国地震,2011,27(3):280-289.
ZHANG Xiao-ping,NIU Xue,ZHAO An-sheng,et al.Research on Dynamic Parameters of Soil Site in Dalian Area[J].Earthquake Research in China,2011,27(3):280-289. (in Chinese)
- [41] 荣棉水,王世元,李小军,等.成都盆地不同工程地质分区内场地地震动参数的计算分析[J].地震学报,2013,35(4):543-552.
RONG Mian-shui,WANG Shi-yuan,LI Xiao-jun,et al.Calculation and Analysis of Seismic Ground Motion Parameters for Different Engineering Geological Divisions of Chengdu Basin[J].Acta Seismologica Sinica,2013,35(4):543-552. (in Chinese)
- [42] 孔宇阳,廉超,李井冈,等.武汉地区典型土类动力非线性参数的统计分析[J].地震工程学报,2014,36(4):832-837.
KONG Yu-yang,LIAN Chao,LI Jing-gang,et al.Statistical Analysis of Dynamic Nonlinear Parameters of Typical Soils in Wuhan Area[J].China Earthquake Engineering Journal,2014,36(4):832-837.(in Chinese)
- [43] 夏峰,宋成科,孟庆筱,等.天津地区覆盖层土动力学参数统计分析[J].地震工程学报,2015,37(1):48-54.
XIA Feng,SONG Cheng-ke,MENG Qing-xiao,et al.Analysis of Soil Dynamic Parameters of Overburden in the Tianjin Area[J].China Earthquake Engineering Journal,2015,37(1):48-54.(in Chinese)
- [44] 周加林.双向动三轴实验误差的分析与校正[J].大坝观测与土工测试,1995,19(6):37-40.
ZHOU Jia-lin.Analysis and Rectification of the Error of the Two-way Dynamic Triaxial Test[J].Dam Observation and Geotechnical Tests,1995,19(6):37-40. (in Chinese)
- [45] 孙静,袁晓铭.DGZ-1 多功能共振柱常规试验可靠性分析[J].地震工程与工程振动,2006,26(5):258-263.
SUN Jing,YUAN Xiao-ming.Reliability Analysis for Routine Tests of Multi-purpose Resonant Column Device[J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2006,26(5):258-263. (in Chinese)
- [46] 王绍博,丁海平.土动力参数对土层动力反应的影响[J].地震工程与工程振动,2001,21(1):105-108.
WANG Shao-bo,DING Hai-ping.Effect of Soil Dynamic Pa-

rameters on Seismic Responses of Soil Layers[J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2001,21(1):105-108. (in Chinese)

[47] 楼梦麟,严国香,沈建文,等.上海软土动力参数变异性对土层地震反应的影响[J].岩土力学,2004,25(9):1368-1372. LOU Meng-lin,YAN Guo-xiang,SHEN Jian-wen,et al.Effect of Variability of Dynamic Parameters of Soft Soil in Shanghai Region on Seismic Response of Layered Soil[J].Rock and Soil Mechanics,2014,25(9):1368-1372. (in Chinese)

[48] 陈国兴,刘雪珠,王炳辉.土动力参数变异性对深软场地表地震动参数的影响[J].防灾减灾工程学报,2007,27(1):1-10. CHEN Guo-xing,LIU Xue-zhu,WANG Bing-hui. Effect of Variability of Soil Dynamic Parameters on Ground Motion Parameters for Deep Soft Sites[J].Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2007,27(1):1-10. (in Chinese)

[49] 袁晓铭,孙锐,陈红娟.不同概率水准下动剪切模量比与阻尼比上、下限的计算[J].岩石力学与工程学报,2010,29(增刊 2):3931-3940. YUAN Xiao-ming,SUN Rui,CHEN Hong-juan. Calculation for Upper and Lower Limits of Dynamic Shear Modulus Ratio and Damping Ratio Under Different Probabilities[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(Supp 2):3931-3940. (in Chinese)

[50] 孙锐,陈红娟,袁晓铭.土的非线性动剪切模量比和阻尼比不确定性分析[J].岩土工程学报,2010,32(8):1228-1235. SUN Rui,CHEN Hong-juan,YUAN Xiao-ming. Uncertainty of Non-linear Dynamic Shear Modular Ratio and Damping Ratio of Soils[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2010,32(8):1228-1235. (in Chinese)

[51] 孙锐,袁晓铭,陈红娟.常规土类动剪切模量阻尼比超越概率计算方法[J].西北地震学报,2010,32(3):209-214. SUN Rui,YUAN Xiao-ming,CHEN Hong-juan. Calculation Method for the Exceedance Probabilities of Dynamic Shear Modulus Ratio and Damping Ratio of Conventional Soils[J].Northwestern Seismological Journal,2010,32(3):209-214. (in Chinese)

(上接 291 页)

[13] 李家彪.中国边缘海形成演化与资源效应[M].北京:海洋出版社,2005. LI Jia-biao.Evolution and Resources Effect of Chinese Marginal Seas[M].Beijing:China Ocean Press,2005.(in Chinese)

[14] Subarya C,Chlieh M,Prawtrodirdjo L,et al.Plate-boundary Deformation Associated with the Great Sumatra—Andaman Earthquake[J].Nature,2006,440(2):46-51.

[15] Satake K,Tanioka Y.Sources of Tsunami and Tsunamigenic Earthquakes in Subduction Zones[J].Pure appl Geophys,1999,154:467-483.

[16] Mansinha L,Smylie D E.The Displacement Fields of Inclined Faults[J].Bull Seism Soc Amer,1971,61:1433-1440.

[17] Geist E L,Bilek S L,Arcas D,et al.Differences in Tsunami Generation between the December 26,2004 and March 28,2005 Sumatra Earthquakes[J].Earth Planets Space,2006,58:185-193.

[18] Simon M D,Mcneill L C,Henstock T J,et al.Contrasting Décollement and Prism Properties over the Sumatra 2004—2005 Earthquake Rupture Boundary[J].Science,2010,329:207-210.

[19] Wang X M,Liu P L-F.An Analysis of 2004 Sumatra Earthquake Fault Plane Mechanisms and Indian Ocean Tsunami[J].Journal of Hydraulic Research,2006,44(2):147-154.

[20] 陈锋.我国滨海核电厂厂坪标高的确定[J].核安全,2006(2):44-48. CHEN Feng.How to Determine the Platform Elevation of Nuclear Power Plants on Coastal Sites in China[J].Nuclear Safety,2006(2):44-48.(in Chinese)

[21] 张爱玲.对滨海核电厂防洪评价中海啸影响的一些认识[J].核安全,2008(4):28-32. ZHANG Ai-ling.Discussion of Tsunami Impact in Flooding Assessment of Nuclear Power Plant on Coastal Site[J].Nuclear Safety,2008(4):28-32.(in Chinese)