

动三轴试验确定土样动强度指标中的两个问题

陈龙珠¹, 顾晓强²

(1. 上海交通大学 船建学院土木工程系, 上海 200240; 2. 同济大学 土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 动三轴试验是目前研究土的动力特性与测定土的动变形和动强度指标的常用方法。具有不规则性的地震等动力作用, 在动三轴试验中通常被简化为周期荷载, 对初始静力固结的试样, 半个周期的动荷载与轴向固结压力同向而增大试样的轴向压力, 在另一个半周期内则彼此反向而减少试样的轴向压力。本文通过理论推导, 初步论证了目前相关的国家标准和高校教材中给出的试样动强度指标的确定方法仅适用于无黏性土, 并给出了该类土试样是动力压缩还是动力拉伸破坏的判断方法和动摩擦角的算式。

关键词: 土动力学; 动三轴试验; 动强度指标; 破坏类型

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2021)05-0447-04

On determination of dynamic soil strength parameters using cyclic triaxial test

CHEN Long-zhu¹, GU Xiao-qiang²

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The cyclic triaxial test is the most widely used test to determine the soil dynamic properties, the dynamic deformation and strength parameters. The irregular seismic load is usually simplified by a periodical load in the cyclic triaxial test. In the half cycle, the dynamic load is applied in the same direction of the axial stress in consolidation, resulting in an increase of total axial stress. In the other half cycle, the dynamic load is applied in the opposite direction of the axial stress in consolidation, resulting in a decrease of total axial stress. In this study, the results of theoretical analyses indicate that the method for determining the soil dynamic strength parameters in relation to national standard and textbooks is only suitable for cohesionless soils. Meanwhile, the criterion for determining whether the failure occurs in compression or tension, and also the formula for calculating the dynamic friction angle are proposed.

Key words: soil dynamics; cyclic triaxial test; soil dynamic strength parameters; soil failure pattern

0 引言

土质地基、边坡及工程建(构)筑物, 在地震和其它动荷载作用下的动力反应分析和安全评估, 需要土的动力特性及其力学模型, 其中包括土的动变形和动强度等方面的特性参数。土在动力作用下的特性, 与土的类型、初始物理和力学状态、约束条件以及动力作用特性等内外因素密切相关。在实验室内测试地基土动力性质的方法有很多种, 包括动三轴、动单剪、动扭剪、共振柱和超声波速测试等方法。由于在测试时试样的初始力学状态、约束条件和

施加的动荷载形式及其强弱有所不同, 这些方法各有其适用范围和优缺点, 其中动三轴试验目前应用得最为广泛, 我国国家标准《地基动力特性测试规范》(GB/T 50269—2015)^[1]、《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[2]等先后已涵盖了这个方法。

动三轴试验早期主要用于土在地震作用下的动力特性, 包括土的动模量、阻尼比以及动强度和液化指标等。地震作用具有不规则性, 但在动三轴试验中, 通常将其等效成周期荷载施加到试样之上。如图1所示, 类似于常见的静三轴试验, 动三轴试验的试样也是一个圆柱体, 装入压力室内, 先

收稿日期: 2021-08-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41772283)。

作者简介: 陈龙珠(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土动力学及地基基础、建筑振动与综合防灾等领域的教学与科研工作。E-mail: lzchen@sjtu.edu.cn。

施加侧向应力 σ_{3c} 和轴向应力 σ_{1c} 进行静力固结 (定义固结应力比为 $K_c = \sigma_{1c} / \sigma_{3c}$), 然后再施加轴向的周期应力 $\sigma_d = \sigma_{d0} \sin(\omega t)$, 其中 σ_{d0} 为动应力幅, $\omega = 2\pi f$ 为圆频率 (f 为频率), t 为时间。在动应力作用过程中, 量测试样的动应力、动应变和孔隙水压力变化的时程曲线, 然后对此根据采用的破坏标准, 确定在这种动应力幅下的破坏振次 N_f 等参数。

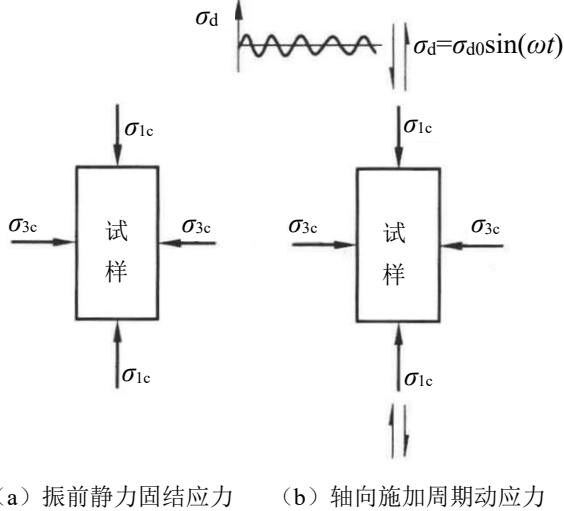


图1 动三轴试验试样的受力状态^[3]

Fig. 1 Stress state of dynamic triaxial test specimen^[3]

为确定试样的动强度, 目前可供选用的常见破坏准则有三种: (1) 试样轴向应变幅增大到一定的限值 (应变标准); (2) 饱和砂土试样的超静孔隙水压力升高到了初始静力固结围压而出现液化 (孔压标准); (3) 试样应力状态达到了极限平衡条件 (极限平衡标准)。《地基动力特性测试规范》(GB/T 50269—2015) 规定, 试样动强度的破坏标准, 可在动应变幅 2.5%~10.0% 范围内确定, 而对可液化土则可采用初始液化或 2.5% 的动应变幅。

当试样振动达到破坏标准时, 其 45° 面上的动强度比 R_f 由下式计算:

$$R_f = \frac{\sigma_{d0}}{2\sigma_c} \quad (1)$$

式中: σ_c 为试样平均固结应力, 二维问题时取 $\sigma_c = (\sigma_{1c} + \sigma_{3c}) / 2$, 三维问题时取 $\sigma_c = (\sigma_{1c} + 2\sigma_{3c}) / 3$ 。也有用 σ_{3c} 替代式(1)中的 σ_c , 相对更便于应用。

对固结应力比 K_c 和所用破坏标准相同的一组试样, 可绘制 $R_f - N_f$ 关系曲线 (如图 2), 它实际上是对土的动强度采用固结应力进行归一化处理, 其中横坐标通常选用对数。应用时, 根据工程要求的固结应力比和等效破坏振次 N_{eq} , 在该曲线上确定

相应的动强度比 R_{ff} 。

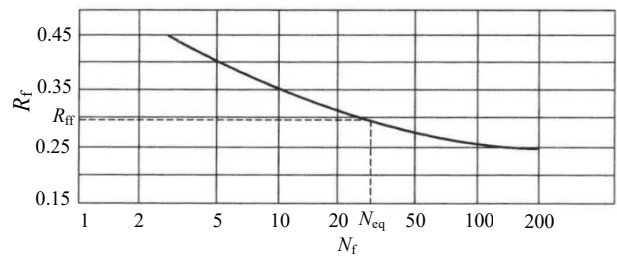


图2 动强度比与破坏振次的关系曲线示意图^[3]

Fig. 2 Schematic diagram of relation between dynamic strength ratio and number of cycles to failure^[3]

在进行地基整体动力稳定分析时, 需要用到土的固结不排水动强度指标 c_d (动凝聚力) 和 ϕ_d (动摩擦角)。文献[2]、[5]这两本国内和国际试验标准未包含与此相关的条款, 而文献[1]、[3]和[4]说明的确定方法基本相同: 对密度、破坏准则类型、固结应力比相同但固结应力不同的一组试样, 由 R_{ff} 和固结应力确定破坏时的动应力幅, 将其与固结应力 σ_{1c} 叠加, 再由此绘制一组应力圆 (如图 3), 其公共切线就是土的动强度包线:

$$\tau_f = c_d + \sigma_f \tan \phi_d \quad (2)$$

式中: τ_f 是土的动抗剪强度; σ_f 为潜在破坏面上的法向应力。

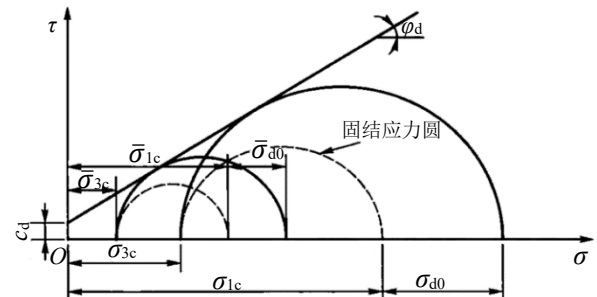


图3 受压试样动强度的总应力圆分析^[4]

Fig. 3 Total stress circle analysis for dynamic strength of specimens under compression^[4]

针对文献[1]、[3]和[4]说明的动三轴试验确定试样动强度指标的方法, 经研读后, 发现有两个问题值得讨论和作出澄清。本文对此抛砖引玉, 欢迎同行专家指正。

1 动强度比与破坏振次关系曲线的归一化问题

按上述求土的动强度指标的做法, 对图 3 所示的两个应力圆, 一般来说 $\phi_d \neq 0$, 根据几何关系分别可得:

$$\sin \varphi_d = \frac{(\sigma_{1c} + \sigma_{d0}) - \sigma_{3c}}{2} / \left[\frac{(\sigma_{1c} + \sigma_{d0}) + \sigma_{3c}}{2} + \frac{c_d}{\tan \varphi_d} \right] \quad (3)$$

$$\sin \varphi_d = \frac{(\bar{\sigma}_{1c} + \bar{\sigma}_{d0}) - \bar{\sigma}_{3c}}{2} / \left[\frac{(\bar{\sigma}_{1c} + \bar{\sigma}_{d0}) + \bar{\sigma}_{3c}}{2} + \frac{c_d}{\tan \varphi_d} \right] \quad (4)$$

将 $K_c = \sigma_{1c} / \sigma_{3c} = \bar{\sigma}_{1c} / \bar{\sigma}_{3c}$, $\sigma_{d0} = 2R_{ff} \sigma_{3c}$, $\bar{\sigma}_{d0} = 2R_{ff} \bar{\sigma}_{3c}$ 代入以上两式, 并将两式相减, 整理得:

$$c_d(\sigma_{3c} - \bar{\sigma}_{3c}) = 0 \quad (5)$$

由于 $\sigma_{3c} \neq \bar{\sigma}_{3c}$, 所以 $c_d = 0$ 。可见, 目前对动三轴试验数据整理试样动强度指标的做法, 局限适用于无黏性土, 且其 φ_d 可由下式直接求出:

$$\sin \varphi_d = \begin{cases} 1 - \frac{2}{K_c + 1 + 2R_{ff}}, \sigma_c = \sigma_{3c} \\ 1 - \frac{2}{(K_c + 1)(1 + R_{ff})}, \sigma_c = (\sigma_{1c} + \sigma_{3c}) / 2 \end{cases} \quad (6)$$

该式表明, 动摩擦角 φ_d 会随着固结应力比 K_c 的增大而有所增大, 但会随着动强度比的减小或破坏振次的增大而有所减小。

对黏性土来说, 一般 $c_d \neq 0$ 。从上述推导来看, 即使是具有相同的固结应力比和破坏振次, 对 σ_{3c} 不同的一组黏性土试样, 其相应的动强度比 R_{ff} 将会彼此有所不同。也就是说, 对图3中的两个破坏应力圆, $\sigma_{d0} = 2R_{ff} \sigma_{3c}$, $\bar{\sigma}_{d0} = 2\bar{R}_{ff} \bar{\sigma}_{3c}$, $R_{ff} \neq \bar{R}_{ff}$, 否则将不能得到 $c_d \neq 0$ 的计算结果。由此可作进一步推论, 对黏性土, 由于 $c_d \neq 0$, 将不能像无黏性土那样, 去谋求获得如图3所示的比较理想的归一化曲线。

2 试样动力破坏类型的判别问题

对无黏性土, $c_d = 0$, 在求其动摩擦角 φ_d 时, 当固结应力比 K_c 较小时, 涉及到破坏时的动应力幅 σ_{d0} , 是与轴向固结应力 σ_{1c} 相加(动力压缩)还是相减(动力拉伸)的选择问题。如同现有的书刊, 本文上面的分析, 隐含着是将两者相加的。对轴向周期荷载 σ_d 来说, 在每个周期(振次)里, 半个周期与 σ_{1c} 同向, 半个周期则与 σ_{1c} 反向: 当固结应力比 K_c 较小时, 就会出现 $0 < \sigma_{1c} - \sigma_{d0} < \sigma_{3c}$ 的情况。以等向固结为例, $K_c = 1.0$, 若认为试样是在动力压缩半周期内达到破坏, 则 $\sin \varphi_{d1} = \sigma_{d0} / (2\sigma_{3c} + \sigma_{d0}) = R_{ff} / (1 + R_{ff})$, 但若认为试样是动力拉伸半周期内达到破坏, 则 $\sin \varphi_{d2} = \sigma_{d0} / (2\sigma_{3c} - \sigma_{d0}) = R_{ff} / (1 - R_{ff})$ 。显然, 在

$R_{ff} / (1 - R_{ff}) < 1$ 条件下, $\varphi_{d2} > \varphi_{d1}$ 。可见, 认为试样是动力受压破坏而得出的动摩擦角数值偏小, 对地基土的整体稳定分析结果将偏于保守。

在周期荷载作用下, 假设试样在受压和受拉半周期内到达的潜在破坏面对应于同一条强度包线, 则对于任意的固结应力比 K_c , 由应力圆图上的几何关系得:

$$\sin \varphi_d = \frac{(\sigma_{1c} + \sigma_{d0}) - \sigma_{3c}}{2} / \frac{(\sigma_{1c} + \sigma_{d0}) + \sigma_{3c}}{2}, \text{ 压缩} \quad (7)$$

$$\sin \varphi_d = \frac{\sigma_{3c} - (\sigma_{1c} - \sigma_{d0})}{2} / \frac{\sigma_{3c} + (\sigma_{1c} - \sigma_{d0})}{2}, \text{ 拉伸} \quad (8)$$

将两式联立求解, 则可以得到试样在压缩和拉伸两个相邻的半周期内均到达强度包线时的临界动应力幅 σ_{d0}^{cr} :

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{d0}^{cr} &= (\sigma_{1c} - \sigma_{3c}) / \sin \varphi_d \\ \sigma_{d0}^{cr} &= (\sigma_{1c} + \sigma_{3c}) \sin \varphi_d \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

上式第一个公式的右边, 与《地基动力特性测试规范》(GB/T 50269—2015)^[1] 中的第9.4.9条所列算式形式相同。

由于动摩擦角是待求的无黏性土的动强度指标, 上面两种形式的算式均不便于应用。因此, 将两式两边分别相乘, 得到一个与动摩擦角无关的新算式:

$$\sigma_{d0}^{cr} = \sqrt{\sigma_{1c}^2 - \sigma_{3c}^2} \quad (10a)$$

或:

$$R_{ff}^{cr} = \begin{cases} 0.5\sqrt{K_c^2 - 1}, \sigma_c = \sigma_{3c} \\ \sqrt{(K_c - 1) / (K_c + 1)}, \sigma_c = 0.5(\sigma_{1c} + \sigma_{3c}) \end{cases} \quad (10b)$$

由实测试样破坏时的动应力幅或动强度比和式(10), 可以判断出试样破坏的类型:

(1) 当 $\sigma_{d0} \leq \sigma_{d0}^{cr}$ 或 $R_{ff} \leq R_{ff}^{cr}$ 时, 试样为动力压缩破坏, φ_d 由式(7)或式(6)计算;

(2) 当 $\sigma_{d0} > \sigma_{d0}^{cr}$ 或 $R_{ff} > R_{ff}^{cr}$ 时, 试样为动力拉伸破坏, φ_d 由式(8)或式(11)计算:

$$\sin \varphi_d = \begin{cases} \frac{2}{K_c + 1 - 2R_{ff}} - 1, \sigma_c = \sigma_{3c} \\ \frac{2}{(K_c + 1)(1 - R_{ff})} - 1, \sigma_c = (\sigma_{1c} + \sigma_{3c}) / 2 \end{cases} \quad (11)$$

再看等向固结 ($K_c = 1.0$) 的无黏性土试样, 由式(10b)容易得到 $R_{ff}^{cr} = 0$, $R_{ff} > R_{ff}^{cr}$ 。因此, 应对

其以拉伸破坏对应的计算公式来确定动摩擦角:由式(11),当取 $\sigma_c = \sigma_{3c}$ 时, $\sin \varphi_d = R_{ff} / (1 - R_{ff})$,与上一节推导的相应结果一致。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 地基动力特性测试规范: GB/T 50269—2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [3] 李广信, 张丙印, 于玉贞. 土力学[M]. 第二版. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [4] 谢定义. 土动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [5] D5311/D5311M. Standard test method for load controlled cyclic triaxial strength of soil[S]. ASTM, 2013.

第八届土木工程国际学术会议 (ICCE2021)

会议简介:

为共同探讨土木工程理论和实践问题, 增进土木工程界同行间的相互了解与交流, 南昌工程学院、江西省土木建筑学会和湖北省众科地质与环境技术服务中心将于2021年12月4—5日在中国南昌举办“第八届土木工程国际学术会议”(ICCE 2021)。本次会议将邀请相关领域的国内外著名专家学者参会, 以主题报告、口头报告和墙报等形式开展多领域同行间的学术交流。诚邀国际和国内相关学科科技工作者与工程技术人员撰稿和参会。

论文评审及出版:

ICCE 2020 会议论文集已全部被 EI 检索, 检索证明请登录官网查看。

征文范围:

- (1) 岩土工程
- (2) 结构工程
- (3) 地质工程
- (4) 地震工程
- (5) 铁路工程
- (6) 公路工程
- (7) 水利与水电工程
- (8) 河流与海岸工程
- (9) 港口与航道工程
- (10) 隧道与桥梁工程
- (11) 施工技术

- (12) 土木工程设计理论与
- (13) 土木工程管理
- (14) 土木工程材料
- (15) 土木工程机械与设备
- (16) 计算机仿真与
- (17) 计算力学
- (18) 防灾减灾
- (19) 建筑设计及其理论
- (20) 绿色建筑
- (21) 其它相关主题

投稿方式:

邮箱投稿: 请将排版好的论文全文发送到官方邮箱: iccecn@163.com。

在线投稿: 请通过知网在线投稿。

投稿须知:

- (1) 请务必用英文撰写论文(对中文稿件, 大会秘书处也提供英文翻译)
- (2) 论文应包含: Abstract (摘要)、Keywords (关键词)、Instruction (引言)、Text (正文)、Conclusion (结论)、References (参考文献); 引言中请解析国内外同类研究的现状及存在的问题。

联系方式:

大会官网: <http://www.icceconf.net/>

电话: 027-87332517

QQ: 2121933132