

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2021.05.002

岩土工程测试技术研究新进展

秦鹏飞, 齐悦, 杨光, 梁一星

(郑州铁路职业技术学院 铁道工程学院, 河南 郑州 450010)

摘要: 土工参数是工程设计、施工的重要依据, 准确可靠的土工参数有利于节约工期, 降低造价、保证质量, 并大幅提高经济和社会效益。由于岩土介质复杂的多相性、碎散性和自然性特征, 岩土工程测试技术对科学认知岩土各项物理力学指标, 深入理解其工程力学性质起着极其重要的作用。从三轴压缩试验、离心模型试验、共振柱试验及热物性参数试验等方面, 对室内土工测试技术研究新进展进行了阐释, 并从静载荷试验、触探试验、旁压试验和十字板剪切试验等方面, 对岩土原位测试技术及其应用研究进行了分析。伴随着岩土工程测试技术自动化、智能化、精细化水平的提高, 岩土项目建设的质量和效益必将得以全面提升。

关键词: 土工测试; 三轴压缩; 离心模型; 共振柱; 光纤监测

中图分类号: TU4

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2021)05—0008—06

Geotechnical Testing Technology and Its Research Progress

QIN Pengfei, QI Yue, YANG Guang, LIANG Yixing

(School of Railway Engineering, Zhengzhou University of Railway Vocational Technology, Zhengzhou, He'nan 450010, China)

Abstract: Geotechnical parameters are an important basis for engineering design and construction. Accurate and reliable geotechnical parameters are conducive to saving construction period, reducing cost, ensuring quality, and greatly improving economic and social benefits. Due to the complex multiphase, fragmentation and naturalness of geotechnical media, geotechnical engineering testing technology plays an extremely important role in scientifically understanding various physical and mechanical indexes of geotechnical and deeply understanding its engineering mechanical properties. The new progress of indoor geotechnical testing technology is summarized from the aspects of triaxial compression test, centrifugal model test, resonance column test and thermophysical parameter test. The original testing technology and its application are analyzed from the aspects of static load test, penetration test, side pressure test and vane shear test. The improvement of automation, intelligence and refinement of geotechnical engineering testing technology will comprehensively improve the quality and benefit of geotechnical project construction.

Keywords: geotechnical tests; triaxial compression; centrifugal model; resonance column; optical fiber monitoring

岩土是历经千百万年地质作用形成的, 物理力学性状极其复杂的工程介质。岩土工程测试是科学认知岩土各项物理力学指标, 准确进行工程设计、分析计算的重要方式, 也是深入理解岩土工程力学性质, 助推学科蓬勃发展的重要动力^[1-2]。伴随着“一带一路”战略的纵深推入, 高土石坝、超高层建筑、深海采油平台等工程项目不断出新, 超大粒径堆石料、高寒冰冻土、天然气水合物土等复杂土工介质相继涌

现, 对岩土工程测试技术提出了新的、更高的要求。

与工程建设的大规模开展相对应, 近年来岩土工程测试技术取得了巨大发展进步。新型电子、光纤设备不断被研发, 声波、电磁、物探方法不断涌现, 岩土工程测试技术的自动化、智能化和精细化水平得到了大幅提升^[3]。本文对岩土工程测试技术研究新进展进行阐释述评, 以为工程建设提供有益参考和借鉴。

收稿日期: 2021-07-16

修稿日期: 2021-08-24

基金项目: 河南省自然科学基金面上项目(2021KJ19); 2021年河南省水利厅科技攻关项目(2021077); 武汉大学水文水资源与水电工程科学国家重点实验室开放基金(2021K0023)

作者简介: 秦鹏飞(1984—), 男, 副教授, 主要从事地基处理方面的工作。E-mail: qinpengfei@emails.bjut.edu.cn

1 实验室测试技术

在土工实验室内开展、完成的试验,主要有土的基本物理性质试验、液塑限联合测定试验、击实试验、直剪试验、三轴压缩试验、无侧限抗压强度试验、空心圆柱扭剪试验、离心模型试验、共振柱试验及热物性参数测试试验等。

1.1 三轴试验

三轴压缩试验可以严格控制排水条件,测量软黏土试样的孔隙水压力和体积变形,还可以进行不同应力路径、不同应力状态的组合试验^[4-5]。常规三轴试验中试样处于轴对称应力状态($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$),无法考虑中主应力的影响,与实际受力状况存在一定差异。真三轴试验能实现三向独立加载($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$),真实反映土体在三向受力状态下的应力应变特性(见图1),且可以考虑复杂应力条件下土体的初始各向异性及诱发各向异性。

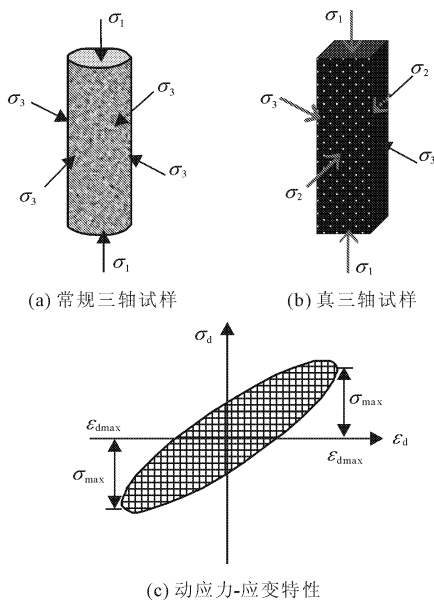


图1 三轴试验分析

真三轴仪按荷载施加方式主要分3种:刚性加载型、柔性加载型和混合型加载型。清华大学研发了岩土大型静动真三轴试验机(THU-SDTTA),该试验机采用异形乳胶膜和椭圆形试样帽封样,具有密封性好、量测精度高、操作便捷等优势,适宜于混合加载方式下的各项参数测试^[6];重庆大学自主研发的多功能真三轴流固耦合试验系统,能保证真三轴条件下气液的自由渗流控制与精准监测,可以实现复杂状态下岩体的应力-应变-渗流耦合性能测试^[7];中科院武汉岩土力学研究所研制的RTX-3000非饱和土真三轴试验系统,位移量测精度达

0.01 mm,可进行拉压、松弛、蠕变、循环等多种应力路径的力学特性试验^[8]。

动三轴试验(DTT)可用于测试土的动剪切模量和阻尼比,在分析交通、波浪或地震荷载下土的动力学特性方面用途极广。美国 Geocomp、英国 GDS 动三轴测试仪位移精度 0.7‰~1.0‰,轴向力精度 1‰,在揭示粗粒砂的动应力-应变、孔隙水压力消散规律特性,及液化机理分析方面功能强大。与常规动三轴相比,变围压动三轴能同时提供循环变化的偏应力与循环变化的围压,可以模拟动荷载下循环剪应力与循环正应力的耦合作用,广泛应用在考虑纵波影响的地震荷载、考虑水平应力循环变化的交通荷载设计计算中。

1.2 离心模型试验

土工离心试验借助离心机产生离心力,通过将小尺寸土工模型置于 ng (g 为重力加速度) 的重力加速度场内,实现对复杂岩土工程问题的模拟分析。离心机高速旋转产生离心力,能使离心模型产生与实际结构相同的应力场,通过对离心模型的受力、变形分析,可以推测实际结构的力学性能、变形破坏机制。离心模拟测试技术具有“缩尺”与“缩时”效应,目前已广泛应用在土石坝、边坡、挡土墙、深基坑等工程领域,成为人们进行土工建筑物结构设计、探索岩土基本原理的重要技术手段^[9]。

同济大学较早开展了土工离心机的研发,其研制的 TLJ-150 复合型试验机最大荷载能力 $150g \cdot t$,最大离心加速度 $200g$,为地铁隧道等项目建设的顺利实施提供了科技支撑^[10];大连理工大学土工鼓式离心机 GT450 环形槽直径 1.4 m,在数据处理精度、电机自动化程度及作动器加载模式方面已达到国际先进水平^[11];中国水利水电科学研究院建成的 LXJ-4.450 土工离心机振动台,可实现水平和垂直双向耦合振动,能模拟不同能级的地震波动效应^[12];浙江大学的 CHIEF (Centrifugal Hypergravity & Interdisciplinary Experiment Facility, CHIEF) 离心模拟设备,可以开展高坝与边坡、深海深地工程、岩土地震工程等重大项目的研究,建成后将成为世界领先、应用范围最广的超重力多学科综合实验平台^[13]。

在海工结构、冻土路基及环境岩土力学等非传统领域,土工离心模型试验技术也具有其独特、重要的科研价值。蔡正银等^[14]研发了一种土工离心造波装置,该装置可在 $120g$ 离心加速度条件下模拟 60 m 水深产生的波浪,正常运作时能精确控制波浪的频率、波长和幅值;陈湘生等^[15]采用半导体制冷技术开发了一套寒区超重力试验系统,该系统可模

拟 $\pm 30^\circ\text{C}$ 极端条件下, 高铁冻土路基冻胀 - 融沉耦合作用的循环过程; 詹良通等^[16] 以垃圾填埋场中的生化反应 - 溶质迁移 - 骨架变形模型为研究对象, 通过离心试验分析了污染离子在不同土层中的长期迁移规律等。

1.3 共振柱试验

共振柱试验 (RCT) 是利用激振力使试样产生振动, 测出土样共振频率以确定弹性波的传播速度, 进而计算土动剪切模量和阻尼比的测试方法。共振柱试验以一维波动理论为基础, 是小应变 ($1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$) 条件下测定土体动力特性参数理想的技术手段。其基本原理是在圆柱或圆筒形试样上, 以不同频率施加纵向激振或扭转激振, 使土样产生纵向振动或扭转振动, 根据共振频率及土样的几何尺寸, 计算土体的动剪切模量 G_d (见式(1))、动弹性模量 E_d (见式(2)), 根据衰减曲线计算土体的阻尼比 λ (见式(3))。共振柱试验操作方便, 测试结果离散性小, 是现行地震安全性评价规范推荐的指定测试方法。

$$G_d = \left(\frac{2\pi f_n h_c}{\beta_s} \right)^2 \rho_0 \quad (1)$$

$$E_d = \left(\frac{2\pi f_n h_c}{\beta_L} \right)^2 \rho_0 \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{1}{2\pi N} \ln \frac{A_1}{A_{N+1}} \quad (3)$$

式中: G_d 为土的动剪切模量, kPa ; f_n 为实测的共振频率, Hz ; h_c 为土样固结后的高度, cm ; ρ_0 为土样质量密度, g/cm^3 ; β_s 、 β_L 为无量纲频率因数; λ 为土的阻尼比; N 为计算所取的振动次数; A_1 为停止激振后第 1 周振动的振幅, mm ; A_{N+1} 为停止激振后第 $N+1$ 周振动的振幅, mm 。

陈国兴等^[17] 发现共振柱试验测出的动剪切模量和阻尼比, 在精度上与动三轴测试结果略有差异, 重大工程项目应联合利用这两种测试方法, 取长补短优势互补, 进行场地安全性评价和抗震设计; 贺为民等^[18] 指出均等固结条件下土的动力学研究较为丰硕, 而非均等固结条件下土的动剪切模量、阻尼比等相关研究较少, 亟需开展均等与非均等固结下土的动力特性参数转换关系研究; 杨文保等^[19] 研究表明, 相同应变水平下原状粉土动剪切模量随土层深度增加而增加, 动剪切模量比 G/G_{\max} 随剪应变 γ 增加则迅速衰减; 李剑等^[20] 通过对红黏土的共振柱测试发现, 弹性变形范围内 (剪应变小于 1×10^{-4}), 重塑红黏土的动剪切模量衰减较一般原状土慢, 当应变超过 1×10^{-4} 后, 红黏土动剪切模量的衰减速度较其它土体快。

1.4 水 - 热 - 力多场耦合测试试验

热量交换、温度变化对岩土物理力学性质具有很大影响, 随着地热资源开发利用、核废料填埋处置及高寒冻土路基等项目建设的进展, 水 - 热 - 力耦合作用下岩土力学特性研究越来越受到科研人员的关注。中科院苏天明等^[21] 通过 TC Probe 热导仪测试发现, 水体的热导率比岩土介质的热导率小, 随含水率增加岩土体的热导率呈非线性下降趋势 (见式(4)), 岩土孔隙结构、尺寸及其分布规律对热导率也有一定影响;

$$K = -0.504 \ln w + 3.09 \quad (4)$$

式中: K 为热导率, $\text{W/m} \cdot \text{K}$; w 为岩土介质含水率。姚仰平等^[22] 通过温控三轴仪, 对非饱和黏土试样孔隙水压力、体积变形进行了精确量测, 发现土的压缩模量、前期固结压力等参数随温度升高而呈现明显改变; 陈卫忠等^[23] 通过构建应力与温度耦合的屈服面模型分析黏性土本构关系, 试验表明随温度升高土体会产生显著的塑性变形 (见式(5))。

$$d\varepsilon_{vpT}^p = d\varepsilon_{vT}^p = \alpha_p [\exp(\alpha_p \Delta T) - a] dT \quad (5)$$

式中: α_p 、 a 为土体屈服模型参数; ΔT 为温度变化量。

2 原位测试技术

原位测试技术是指在工程建设、施工现场, 通过轻微扰动或基本不扰动的方式对原位土层进行测试, 以确定岩土物理力学参数、性质的方法。原位测试可避免室内试验取样、运输过程中, 土体原状结构的破坏及水分损失, 准确探明地基各土层的厚度、分布状态及力学特性, 测试结果具有很高的可靠性和代表性。

2.1 静载荷试验

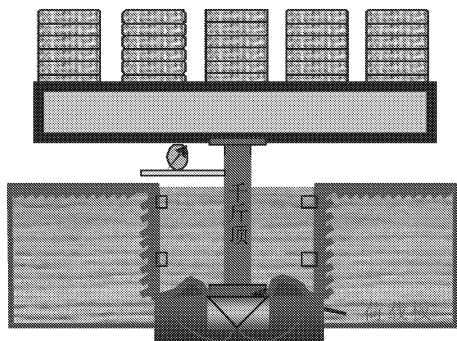
静载荷试验通过液压千斤顶、刚性承压板逐级施加荷载, 根据荷载 - 沉降 ($p-s$) 曲线确定地基承载力和变形模量 (见图 2)。浅层平板载荷试验适宜于浅层地基 ($< 5 \text{ m}$) 的检测分析 (见式(6)), 深层平板载荷试验、螺旋板载荷试验适宜于深层地基 ($> 5 \text{ m}$)、大直径桩和地下水位下土的检测分析 (见式(7))。

$$E_0 = I_0 (1 - \mu^2) \frac{pd}{s} \quad (6)$$

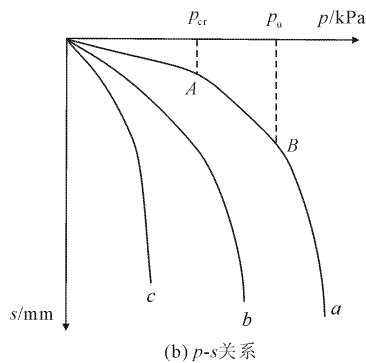
$$E_0 = \omega \frac{pd}{s} \quad (7)$$

式中: I_0 为刚性承压板的形状系数; μ 为土的泊松比; d 为承压板直径或边长, m ; p 为荷载 - 沉降曲线线性段压力, kPa ; s 为与压力对应的沉降, mm ; ω 为与试验深度和土类有关的参数。赖夏蕾等^[24] 指出未加载充分的静载荷试验无法准确反映地基承载力

的极限值,可考虑通过灰色理论、神经网络等方法对极限承载力值进行预估;周同等和等^[25]认为静荷载试验,对于分析刚-柔性桩、CFG-PHC 组合桩复合地基的荷载分配与传递机理、承载力发挥系数大小及应力扩散特征等具有重要意义,能有效促进复合地基理论研究的发展进步。



(a) 静荷载试验



(b) $p-s$ 关系

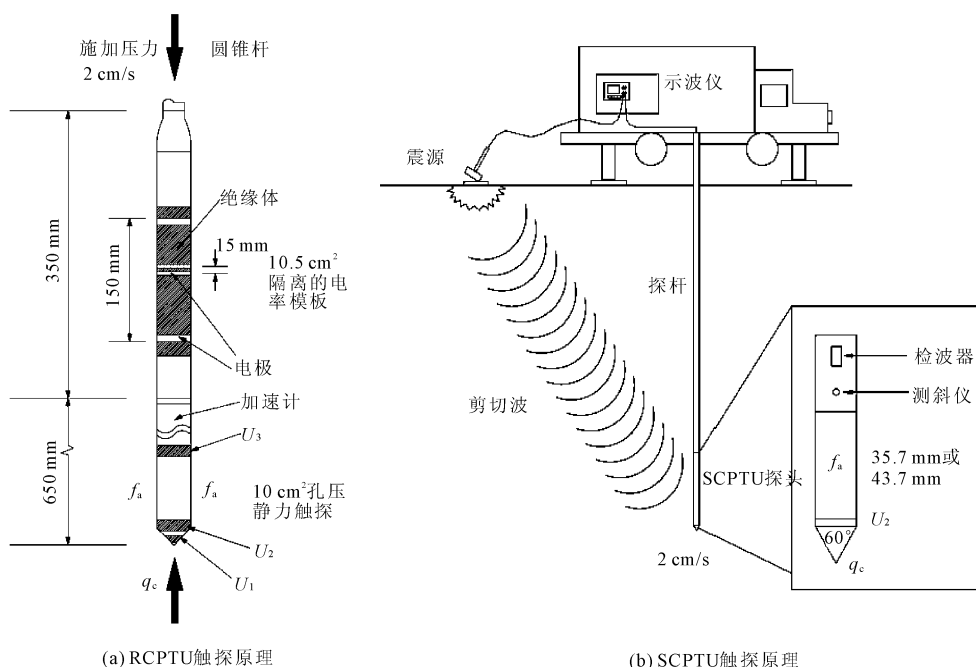
图 2 静荷载试验与荷载 p -沉降 s 曲线

2.2 触探试验

圆锥静力触探(CPT)是通过准静力将标准规格的金属探头垂直均匀压入土中,以测定土层阻力和地基承载力的原位测试技术。孔压静力触探(CPTU)则在 CPT 的探头上安装透水滤器及量测元件,能同时测得探头锥尖阻力、侧壁摩阻力及地下水压力等参数信息。随着环境岩土工程等领域研究的兴起和探测技术的发展,CPTU 涌现出许多新型传感测试方式,促使 CPTU 朝着多功能和数字化方向迈进。

刘松玉等^[26]在 CPTU 的探头上增加电阻率测试通道,研发了可用于测试土体电阻率的 RCPTU 系统,已广泛应用于污染场地评价、液化分析及地基处理效果检测(见图 3);沈小克等^[27]通过安置波速检测设备研发了地震波孔压静力触探(SCPTU)系统,该系统可根据剪切波传播时间测算土层的剪切波速,适宜于无黏性土相对密实度和液化势的判别;蔡国军等^[28]通过数码摄录技术实现了 CPT 的可视化,能现场观测到探孔中的薄夹层、透镜体及裂隙等复杂结构;陈仁朋等^[29]研发的荧光探头 LIF 技术,可用于探测地下水的烃污染状况和石油、木馏油等有害成分的含量。

轻型动力触探(DPT)是利用锤击能量将一定规格的探头打入土中,以确定地基土密实度、压缩性和承载力的原位测试技术。现场经验表明 DPT 锤击能量传递率可达 80% 以上,性能稳定效率高,考虑钻杆直径、锤重与落距等因素的影响,可根据需要对 DPT 测试数据进行适当修正。



(a) RCPTU触探原理

(b) SCPTU触探原理

图 3 新型 CPTU 触探测试技术分析

2.3 旁压试验

旁压试验 (PMT) 是通过圆柱形探头在钻孔中对孔壁施压, 使土体产生径向变形的原位测试方法。根据测得的膨胀压力与土体变形, 可以绘制应力 - 体变、径向压力 - 位移关系曲线, 进而计算土层的旁压模量、地基承载力及沉降变形等参数 (见图 4)。旁压试验最大测试深度可达 20 m ~ 30 m, 与深层平板载荷试验相比, 旁压试验操作简单, 且能得到较大范围内土的应力应变关系曲线。旁压试验可避开地下水的不利影响, 测试结果准确可靠。

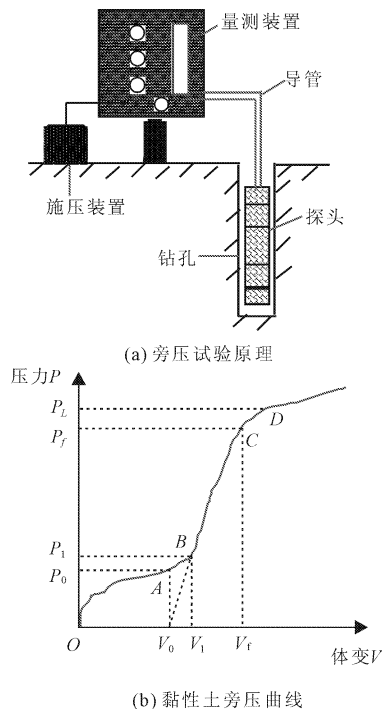


图 4 旁压试验分析

李广信^[30]指出试验钻孔是旁压测试分析的关键环节, 为获得高质量的钻孔旁压钻头直径 D_b 、探头直径 D_s 和钻孔直径 D_w 需满足 $D_s < D_b < 1.07D_s$, $1.03D_s < D_w < 1.18D_s$; 孔令伟等^[31]发现分级加载速率、加载稳定间隔对测试结果也有较大影响, 现场实测表明分级加载速率宜控制在 3 kPa/s ~ 5 kPa/s, 加载稳定时间间隔宜控制在 2 min ~ 5 min 之间; 杨光华等^[32]将旁压模量转化为初始切线模量, 进行黏性土地基的稳定性评价和沉降计算 (见式 (8)、式 (9))。

$$E_M = 2(1 + \nu) \left(V_s + \frac{V_1 + V_f}{2} \right) \frac{\Delta P}{\Delta V} \quad (8)$$

$$E_{00} = \frac{P_L}{P_L - P_1} E_m \quad (9)$$

式中: E_M 、 E_{00} 分别为土的旁压模量和初始切线模量, MPa; ν 为泊松比; V_s 为旁压探头测量腔初始体积,

cm^3 ; V_1 、 V_f 为旁压曲线直线段起始点和终点对应的体变值, cm^3 ; $\Delta P / \Delta V$ 为旁压曲线直线段的斜率; P_1 、 P_L 分别为起始压力和极限压力, kPa。

2.4 十字板剪切试验

十字板剪切试验 (Field Vane Shear Test) 是利用十字板剪切仪, 测定软黏土不排水抗剪强度 (见式 (10))、灵敏度的原位测试技术, 测试结果可用以评定土层的固结历史和地基承载力。

$$\tau = \frac{2M}{\pi D^2 (H + D/3)} \quad (10)$$

式中: τ 为土的抗剪强度, kPa; M 为土层抵抗力矩, $\text{kN} \cdot \text{m}$; D 为旋转圆柱直径, m; H 为旋转圆柱高度, m。陈祖煜等^[33]发现十字板剪切试验能使软土保持天然应力状态和原状结构 (见图 5), 其测试结果普遍高于三轴压缩和无侧限抗压的试验结果, 高幅平均 10% ~ 30%; 路德春等^[34]研究表明十字板剪切试验适宜于灵敏度 $S_l \leq 10$ 、固结系数 $c_v \leq 100 \text{ m}^2/\text{a}$ 的均质饱和和软黏土强度测定, 对夹有薄层细砂的非均质土测试时, 需作误差分析处理。

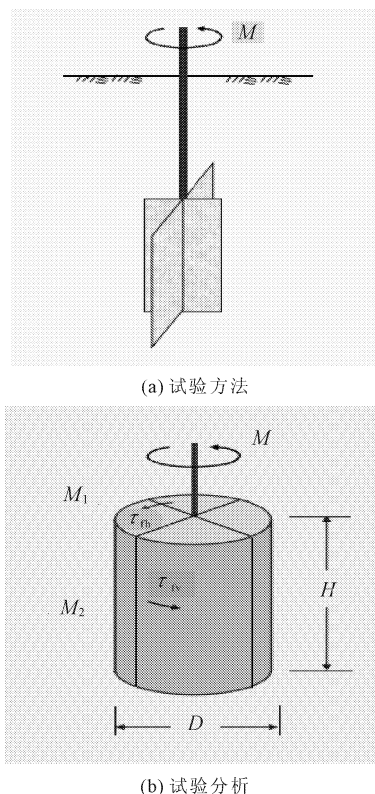


图 5 十字板剪切试验

3 结 语

岩土介质是复杂的自然产物, 岩土工程测试技术是深刻揭示岩土工程力学性质的正确方式, 也是论证土力学理论、优化岩土项目设计的有效手段。

岩土工程测试技术与岩土学科发展、项目建设休戚与共,始终紧密相连。随着信息技术、电子技术、传感技术的发展,岩土工程测试技术日新月异,取得了长足进步。本文系统分析了三轴压缩试验、离心模型试验、共振柱试验及热物性参数测试试验的研究进展,并全面阐释了载荷试验、触探试验、旁压试验和十字板剪切试验的工程应用,期望能为岩土项目建设的高质量发展作出贡献。

参考文献:

- [1] 李广信. 高等土力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2004:143-155.
- [2] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 2版. 北京:中国水利水电出版社,2000.
- [3] 蔡正银,张晨,黄英豪. 冻土离心模拟技术研究进展[J]. 水利学报,2017,48(4):398-407.
- [4] 余凯,姚鑫,张永双,等. 基于面积和应力修正的直剪试验数据分析[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(7):675-680.
- [5] 李广信. 实用主义与土力学[J]. 岩土工程学报,2018,40(10):1897-1904.
- [6] 刘松玉,蔡正银. 土工测试技术发展综述[J]. 土木工程学报,2012,45(3):151-165.
- [7] 陈生水. 土石坝试验新技术研究与应用[J]. 岩土工程学报,2015,37(1):1-28.
- [8] 沈小克,蔡正银,蔡国军. 原位测试技术与工程勘察应用[J]. 土木工程学报,2016,49(2):98-120.
- [9] Kitazume M, Maruyama K. Collapse failure of group column type deep mixing improved ground under embankment[C]//Proceedings of the International Conference on Deep Mixing 2005. US: ASCE,2005: 245-254.
- [10] 于玉贞,张向韬,王远,等. 堆石料真三轴条件下力学特性试验研究进展[J]. 工程力学,2020,37(4):1-21,29.
- [11] 秦鹏飞. 不同应力路径下饱和粉土强度与变形特性试验研究与现场监测分析[D]. 北京:北京工业大学,2010.
- [12] Kitazume M, Okano K, Miyajima S. Centrifuge model tests on failure envelope of column type mixing method improved ground[J]. Soils and Foundations, 2000, 40(4):43-55.
- [13] 许成顺. 复杂应力条件下饱和砂土剪切特性及本构模型的试验研究[D]. 大连:大连理工大学,2006.
- [14] 蔡正银,周宏磊,蔡国军,等. 土工测试与勘察技术研究进展[J]. 土木工程学报,2020,53(5):100-117.
- [15] 陈湘生,濮家骝,罗小刚,等. 土壤冻胀离心模拟试验[J]. 煤炭学报,2009,34(6):615-619.
- [16] 詹良通,曾兴,李育超,等. 高水头条件下氯离子击穿高岭土衬垫的离心模型试验研究[J]. 长江科学院院报,2012,29(2):83-89.
- [17] 陈国兴,王炳辉,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,2014,26(3):7-15.
- [18] 贺为民,李德庆,杨杰,等. 土的动剪切模量、阻尼比和泊松比研究进展[J]. 地震工程学报,2016,38(2):309-317.
- [19] 杨文保,吴琪,陈国兴. 长江入海口原状土动剪切模量预测方法探究[J]. 岩土力学,2019,40(10):3889-3896.
- [20] 李剑,陈善雄,姜领发,等. 重塑红黏土动剪切模量与阻尼比的共振柱试验[J]. 四川大学学报(工程科学版),2013,45(4):62-68.
- [21] 苏天明,刘彤,李晓昭,等. 南京地区土体热物理性质测试与分析[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(6):1278-1283.
- [22] 姚仰平,张丙印,朱俊高. 土的基本特性、本构关系及数值模拟研究综述[J]. 土木工程学报,2012,45(3):127-150.
- [23] 陈卫忠,龚哲,于洪丹,等. 黏土岩温度-渗流-应力耦合特性试验与本构模型研究进展[J]. 岩土力学,2015,36(5):1217-1238.
- [24] 赖夏蕾,简文彬. 静载荷试验确定复合地基承载力的安全储备研究[J]. 长江科学院院报,2017,34(11):66-71.
- [25] 周同和,王非,赵宏,等. 多桩型刚性承台下刚性长短桩复合地基载荷试验分析[J]. 岩土工程学报,2015,37(1):105-111.
- [26] 刘松玉,蔡正银. 土工测试技术发展综述[J]. 土木工程学报,2012,45(3):151-165.
- [27] 沈小克,蔡正银,蔡国军. 原位测试技术与工程勘察应用[J]. 土木工程学报,2016,49(2):98-120.
- [28] 蔡国军,刘路路,龚申,等. 基于CPTU测试的海相软土刚性桩复合地基承载特性研究[J]. 隧道与地下工程灾害防治,2019,1(3):46-56.
- [29] 陈仁朋,陈卓,陆明,等. 基于频率步进原理的TDR研制及在土体含水率测试中的应用[J]. 岩土工程学报,2019,41(7):1191-1199.
- [30] 李广信. 实用主义与土力学[J]. 岩土工程学报,2018,40(10):1897-1905.
- [31] 孔令伟,张先伟,尹松,等. 基于自钻式旁压仪的残积土原位力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2016,38(4):688-696.
- [32] 杨光华,张玉成,胡海英,等. 基于旁压试验获得计算参数的非线性沉降计算方法[J]. 岩土工程学报,2020,42(S1):38-44.
- [33] 陈祖煜,姚桂喜,陆希,等. 特高土石坝坝坡抗滑稳定安全判据和标准研究[J]. 水利学报,2019,50(1):12-24.
- [34] 路德春,罗磊,王欣,等. 土与结构接触面土体软/硬化本构模型及数值实现[J]. 工程力学,2017,32(8):1151-1157.