一种改进的勘察取土质量评价方法

任世锋，殷进宏，王萧寒
（中交水运规划设计院有限公司，北京 100007）

摘要：勘察取样扰动一直是困扰工程界的重要问题，特别是如何评价取土扰动程度，以及评价取土器取土质量，更是工程实际中的棘手问题。针对取土扰动因素众多、扰动评价指数不能体现人为扰动情况，从取土扰动因素分析着手，将不可避免的扰动因素卸荷扰动从总体扰动评价中分离出来，提出卸荷扰动理论公式，并通过多种取土器取样试验验证该公式的合理性，最终给出一种改进的扰动评价方法，可更好地评价取土技术水平。

关键词：土样扰动；取土质量；扰动因素；取土器
中图分类号：U652.2　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2025)05-0200-07

Improved evaluation method for quality of soil samples in geological survey

REN Shifeng, YIN Jinhong, WANG Xiaohan
(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: Soil disturbance has long been a significant challenge in the engineering field, particularly when it comes to evaluating the degree of soil disturbance and the quality of samples taken by soil sampling equipment. These situations are more difficult problems in engineering practice. Due to numerous factors that contribute to soil disturbance, traditional disturbance evaluation indices fail to adequately reflect the effects of human-induced disturbance, factors that contribute to soil disturbance are analyzed in this paper, and the unavoidable unloading disturbance is separated from the overall disturbance evaluation. A theoretical formula for unloading disturbance is proposed and validated through multiple sampling tests with different soil samplers. Finally, an improved method for evaluating soil disturbance is presented, and can better evaluate the technical level of soil sampling.

Keywords: soil sample disturbance; soil sampling quality; disturbance factors; soil sampler

勘察取样是确定工程设计参数的基本手段，土性参数的准确性直接关系到工程的可靠性和经济性。虽然原位测试技术可以大幅减弱土体的取样扰动，但原位测试不同于室内简单应力条件下的试验，不能从试验结果直接求出某一参数，而是通过反馈分析的办法间接求出参数。

当前国内最常用的取土器是敞口厚壁取土器，一般认为该取土器取得的土样扰动较大，但标准的薄壁取土器在国内很少被使用。通过对比试验可知，固定活塞薄壁取土器与国内常用的敞口厚壁取土器所取的土样相比，可使快剪强度提高40%~60%，固结快剪角度减少 10%~15%[1]。由此可知，取土时的扰动对土强度的影响不容忽视，这种影响反映在土的多项物理力学指标[2-5]，对强度、变形和渗透指标等影响最为明显，而对有些土性指标影响很小，甚至没有影响，比如密度、液塑限等指标，这就涉及取土影响程度的评价问题，以及取土扰动因素分析。

本文基于大连新机场工程实例，对取土扰动评价方法进行研究，并提出一种改进的评价方法，可为类似勘察项目提供有益参考。

1　引起土样扰动的原因

土样扰动可按不同的扰动情况，分为应力释放扰动、钻探取样扰动、土样运输和储存扰动、制样和试验过程扰动等 4 个环节，见表 1。其中应

收稿日期：2024-07-04
作者简介：任世锋（1981—），男，高级工程师，从事工程地质勘察。

水运工程

力释放扰动是因为土样在地下受周围土水压力作用，取出后该部分应力卸除，土体会产生回弹变形，改变原有孔隙结构，一般认为，该部分扰动是不可避免的；钻探取样扰动是指在钻探和取样过程中，钻具和取土器对土样的扰动，一般认为该部分扰动是最大的，也是可通过技术提高等手段降低扰动的最为有效的部分；土样运输和储存扰动涉及运输条件、试验室环境、存储时间等因素，这部分扰动常通过规范的程序管理来降低对土样的扰动；制样和试验过程扰动主要是试样安装过程、试验设备、试验室的湿度和温度对土样的扰动，产生的土样吸湿、膨胀、水分蒸发、结构破坏等扰动。

表 1　扰动类别分析

Tab. 1　Disturbance category analysis

扰动类型	扰动因素
应力释放	土样从地下取出瞬间,因卸荷产生的回弹、孔隙水压力变化等扰动
钻探取样	钻探扰动是钻具对下方土层的扰动;取样扰动是在取土过程中,因外力作用对土样产生挤压、扭曲等作用,导致土样状态和结构的扰动
土样运输和储存	运输扰动是运输过程中,产生的震动对土样结构、状态的扰动;储存扰动是土中生长或活动的生物对土体的扰动
制样和试验过程	制样扰动是土样制备过程中,对试样的扰动;试验过程扰动是试样安装过程、试验设备、试验室的湿度、温度对土样的扰动,产生的土样吸湿、膨胀、水分蒸发等扰动

由于土样扰动因素很多，目前各评价方法还做不到准确和全面，且测试过程繁琐。工程实际中，也只是尽量规范取土各环节以减少取土扰动，但缺少明确的判别标准。比如尽量采用静压取土、尽量减小取土器的面积比、软土采用薄壁取土器等措施。工程中一般多是通过对土样外观检查判断取土质量，因此改进取土质量评价方法非常重要。

2　土体扰动评价

随着土力学建立，很早学者们就开始了取土评价研究工作，但研究成果比较有限[6]。除了扰动因素较多外，还有土体本身的不均匀性，给测试和评价带来很大干扰，使该方面研究进展缓慢。目前权威的土体扰动评价方法主要有以下两种。

1）根据应力-应变关系评定[7-8]，特别是根据三轴试验的破坏时应变值 ε_f 判断土体扰动程度。当土试样受到扰动后，破坏应变 ε 值会增加，应力峰值 σ_f 降低，应力-应变关系曲线趋于平缓。根据国际土力学基础工程学会取样分会汇集的资料[9]，不同地区对不扰动土试样做不排水压缩试验得出的破坏应变 ε_f 分别为：加拿大黏土 1%；南斯拉夫黏土 1.5%；日本海相黏土 6%；法国黏性土 3%~8%；新加坡海相黏土 2%~5%。如果测得的破坏应变值大于上述特征值，该土样即可认为是受扰动的。

该方法在一定程度上可以反映土样的扰动性，但存在明显的不足。首先没有明确的统一标准，不同地区 ε_f 不同，即使同一地区该值分布范围也是较大的。事实上，该值与土的固结历史、结构状态、颗粒成分有很大关系，因此简单地按地域划分分布范围不能反映指标特性。其次因土而异，测试过程繁琐，测定时需要完全不扰动土试样的 ε_f，而理论上不扰动土样是不存在的。该方法在实际工程中很少使用。

2）体积压缩法(扰动指数法)。该方法是根据室内压缩试验测定，用 e-lg$p$(e 为孔隙比，p 为压力)曲线获得特征指标——扰动指数，见图 1。图中曲线 ABC 为原位土样压缩曲线，曲线 AFC 为完全重塑土的压缩曲线，曲线 ADC 为测试土样压缩曲线。测试曲线 ADC 位于原状土与重塑土曲线之间，扰动程度越轻微，曲线越靠近原位土样压缩曲线。

Schmertmann[10] 于 1955 年提出确定扰动程度的简易方法和基本概念，扰动指数 I_D 的公式为：

$$I_D = \Delta e/\Delta e_0 = (e_0 - e_d)/(e_0 - e_f) \qquad (1)$$

式中：e_0 为土样在原位时初始孔隙比；e_d 为测试土样在 p_c 时的孔隙比，其中 p_c 为前期固结压力；e_f 为完全重塑土样在 p_c 时的孔隙比；Δe 为在同一压力(p_c)下土样孔隙比与完全未扰动样孔隙比差值，即 e_0-e_d；Δe_0 为在同一压力(p_c)下重塑土孔隙比与完全未扰动样孔隙比差值，即 e_0-e_f。

水运工程

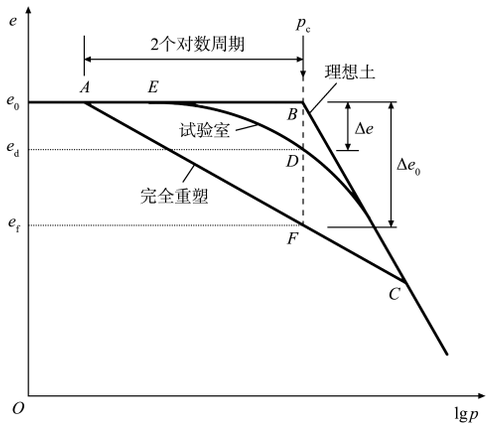


图 1　Schmertmann 体积压缩法曲线

Fig. 1　Curve of Schmertmann's volumetric compression method

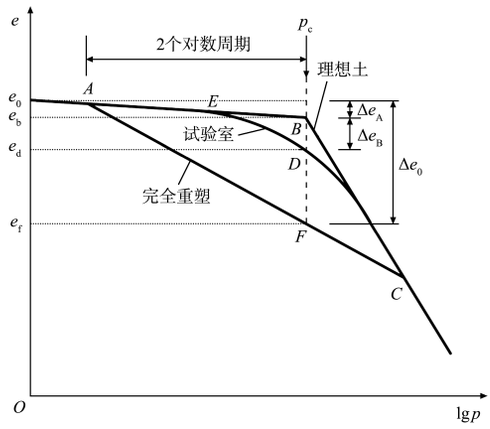


图 2　改进的 Schmertmann 体积压缩法曲线

Fig. 2　Curve of improved Schmertmann's volumetric compression method

土的压缩曲线 *AFC* 可以通过室内完全重塑土试验得到，还可以按经验方法获得。经验方法是在测试土样压缩曲线上取点 *C*，该点对应的孔隙比 $e = 0.42e_0$。在 e_0 水平线上从 *B* 点（即 p_c 对应点）向左截取 2 个对数周期长得到 *A* 点，连接两点得到 *AFC*。

与第 1 种方法相比，该方法给出明确的扰动指标，测试方法也相对简单。但依然存在不足：首先扰动指数 I_D 不仅同土样的扰动程度相关，也与土的自身特性有关（初始孔隙比 e_0），其次完全不扰动样在前期固结压力前，土样也存在卸荷回弹，再加载压缩的问题，即图中 *AB* 段不是水平段，而是下降曲线。

3　改进的 Schmertmann 法

根据 Schmertmann 方法，将 *AB* 水平直线段改为下降曲线，土样 Δe 由两部分组成 $\Delta e = \Delta e_A + \Delta e_B$，其中 Δe_A 为土样应力卸荷回弹部分 $\Delta e_A = e_0 - e_b$，Δe_B 在前期固结压力下刨除卸荷回弹部分的孔隙比变化 $\Delta e_B = e_b - e_d$，该部分非卸荷引起的土样扰动部分，见图 2。即：

$$I_D = \Delta e/\Delta e_0 = \Delta e_A/\Delta e_0 + \Delta e_B/\Delta e_0 \tag{2}$$

令 $\Delta e_A/\Delta e_0 = I_A$、$\Delta e_B/\Delta e_0 = I_B$，则有：

$$I_D = I_A + I_B \tag{3}$$

式中：I_A 为应力卸除产生的扰动指数；I_B 为非应力卸除产生的扰动指数，包括人为扰动、环境扰动等。

通过扰动因素分析，将扰动指数分解成 2 个部分，即应力卸除部分和非应力卸除部分。应力卸除导致的扰动是因为土体从原位取出时，外力的改变导致的体积回弹，该部分扰动是不可避免的，与取样技术水平无关。应力卸除导致的扰动可通过室内试验测得，采用 Schmertmann 方法，进行固结试验，在自重压力下（对于正常固结土或超固结土）卸荷，求得回弹量 Δe_A。对于欠固结土，则在前期固结压力下进行回弹试验，测得回弹量 Δe_A。实际上，对于扰动的 Δe_A 部分，当试验压力大于自重压力后，该部分扰动对土体指标基本可以抵消，对附加压力段的变形和强度影响很小。当试验测得 Δe_A 后，就可根据式（2）、（3）计算 I_A 和 I_B。

通过上述方法，就可以求得以人为扰动因素为主的扰动指数 I_B，用以判断取土技术对土体的扰动。

4　试验验证

为了检验本文的取土评价方法，选取大连新机场工程，该工程存在深厚软土及粉质黏土层。因需要大面积填海造地和地基处理，以及对工后沉降的严格标准，对原状样取样要求严格。该场地黏性土厚度大、岩性较均匀，呈可塑到硬塑状态。本文共采用 4 种取土器进行取样分析，取土器规格型号分别为：Ⅰ-敞口薄壁取土器（TB100A）、Ⅱ-双管单动回转取土器（TD108×75×300）、Ⅲ-厚壁取土器（TH108）、Ⅳ-岩芯管。

水运工程

为了便于比较不同取土器取土质量，需要保证不同取土器取得同一层位土样。由于部分取土器(双管单动回转取土器)存在掉样现象以及土层不均匀性，最后获得有效样本 6 组，各样本组物理性质指标见表 2。从现场取得试样的外观看，敞口薄壁取土器和双管单动回转取土器取样质量较高，但双管单动回转取土器取样成功率较低。

表 2　土样物理性质指标

Tab. 2　Physical property indexes of soil samples

样本组号	岩性	土样深度范围/m	平均含水率/%	平均液限值/%
①	黏土	13.5~14.5	40.5	48.7
②	粉质黏土	18.8~23.1	27.0	33.6
③	粉质黏土	30.4~31.5	24.2	33.4
④	黏土	38.1~41.9	27.6	40.1
⑤	粉质黏土	48.0~48.9	25.1	35.8
⑥	黏土	58.7	25.9	38.4

试样取出后，避免土样二次扰动送至现场试验室，对每个试样进行常规物理指标测试，用测试组内的土样物理性质。再对每个试样进行标准高压固结试验以及回弹再压缩试验。根据这两个试验数据测得不同压力状态时的孔隙比，数值见表 3。

表 3　不同取土器取样参数

Tab. 3　Sampling parameters of different soil samplers

取土器	试样深度/m	不同压力状态时的孔隙比			
		试样初始 e_0	前期固结压力下理想土 e_b	前期固结压力下试验室原状 e_d	前期固结压力下重塑土 e_f
Ⅰ-敞口薄壁取土器	13.50	0.747	0.736	0.695	0.501
	22.00	0.801	0.779	0.729	0.506
	30.40	0.813	0.789	0.731	0.525
	39.70	0.592	0.580	0.535	0.365
	48.00	0.787	0.751	0.719	0.531
Ⅱ-双管单动回转取土器	18.80	0.678	0.667	0.639	0.480
	31.50	0.672	0.652	0.615	0.455
	38.10	0.603	0.585	0.545	0.405
Ⅲ-厚壁取土器	14.50	0.882	0.845	0.768	0.500
	22.50	0.816	0.791	0.701	0.502
	38.10	0.609	0.585	0.528	0.366
	48.60	0.818	0.788	0.706	0.550
	58.70	0.784	0.741	0.688	0.521
Ⅳ-岩芯管	14.10	1.142	1.130	0.969	0.687
	23.10	0.716	0.694	0.597	0.460
	30.10	0.802	0.770	0.708	0.520
	41.90	0.686	0.669	0.572	0.445
	48.90	0.819	0.773	0.696	0.501

根据式(1)~(3)分别计算 Schmertmann 方法和本文的改进取土质量评价方法。Schmertmann 方法相当于总扰动指数，本文将该指数划分成两个部分卸荷扰动指数 I_A 和人为扰动指数 I_B，计算结果见表 4。

表 4　取土质量评价

Tab. 4　Soil sampling quality evaluation

取土器	试样深度/m	卸荷扰动指数 I_A	人为扰动指数 I_B	总扰动指数 I_D	$\frac{I_A}{I_D}$/%
Ⅰ-敞口薄壁取土器	13.50	0.05	0.17	0.22	23
	22.00	0.08	0.18	0.26	31
	30.40	0.09	0.22	0.31	29
	39.70	0.06	0.21	0.27	22
	48.00	0.16	0.15	0.31	52
Ⅱ-双管单动回转取土器	18.80	0.06	0.15	0.21	29
	31.50	0.10	0.19	0.29	34
	38.10	0.10	0.22	0.32	31
Ⅲ-厚壁取土器	14.50	0.11	0.22	0.33	33
	22.50	0.09	0.31	0.40	23
	38.70	0.11	0.26	0.37	30
	48.60	0.13	0.34	0.47	28
	58.70	0.20	0.24	0.44	45
Ⅳ-岩芯管	14.10	0.03	0.36	0.39	8
	23.10	0.09	0.41	0.51	18
	30.10	0.13	0.25	0.38	34
	41.90	0.08	0.43	0.51	16
	48.90	0.17	0.28	0.45	38

5　试验分析

5.1　不同取土器对土样的扰动情况

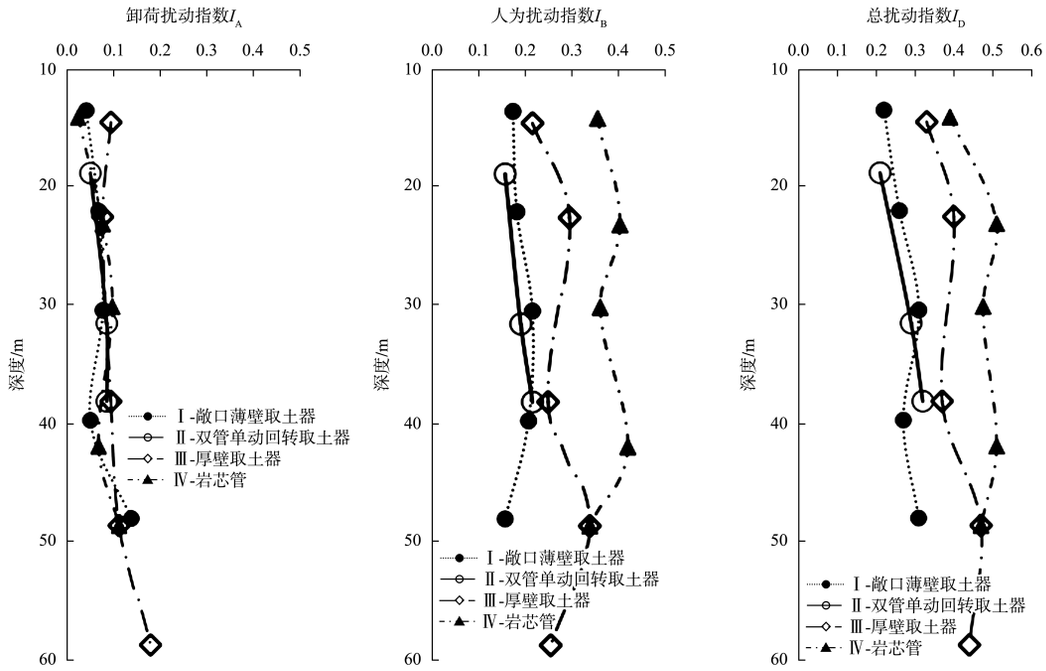
将上述 6 组样本的扰动测试结果绘制成扰动指数与深度的关系曲线，见图 3。

结合图 3a)和表 4 可知，对于因荷载卸除产生的扰动，各取土器情况差异不大，卸荷扰动指数 I_A 范围为 0.05~0.20，与取土器型号相关性不大；其占总扰动指数 8%~52%，变化幅度较大，且不同取土器差异很大。

由图 3b)可知，不同取土器土样的人为扰动指数差异较大，其中敞口薄壁取土器取样质量较好，人为扰动指数 I_B 为 0.15~0.22；双管单动回转取土器质量也较好，人为扰动指数 I_B 为 0.15~0.22，但取样容易掉样；厚壁取土器是目前勘察市场最常用取土器，取土质量一般，人为扰动指数 I_B 为 0.22~0.34；岩芯管取样质量最差，人为

扰动指数 I_B 为 0.25~0.43。

由图 3c)可知，敞口薄壁取土器取样质量较好，总扰动指数 I_D 为 0.22~0.31；双管单动回转取土器质量也较好，总扰动指数 I_D 为 0.21~0.32，但取样容易掉样；厚壁取土器是目前勘察市场最常用取土器，取土质量一般，总扰动指数 I_D 为 0.33~0.47；岩芯管取样质量最差，总扰动指数 I_D 为 0.38~0.51。



a) 卸荷扰动指数沿深度分布　b) 人为扰动指数沿深度分布　c) 总扰动指数沿深度分布

图 3　扰动指数随深度变化

Fig. 3　Variation of disturbance index with depth

5.2　取土卸荷扰动规律

根据指数定义及图 2 中 *AFC* 线斜率，可计算土样回弹指数 C_s、完全重塑土压缩指数 C'_c，公式为：

$$C_s = \Delta e_A / (\lg p_c - \lg p_0) \tag{4}$$

$$C'_c = \Delta e_0 / 2 \tag{5}$$

则有：

$$I_A = \Delta e_A / \Delta e_0 = 0.5 C_s \lg p_c / C'_c \tag{6}$$

对于均匀正常固结土有：

$$p_c = \gamma h \tag{7}$$

故有：

$$I_A = 0.5 (C_s / C'_c) \lg (\gamma h / p_0) \tag{8}$$

式中：γ 为土的有效重力密度，h 为取样深度，p_0 为回弹试验卸荷剩余荷载。

由式(8)可以看出，影响卸荷扰动指数主要有 3 个因素：回弹指数、取样深度(或前期固结压力)以及重塑土压缩指数。即该指数与卸荷大小以及土的回弹和压缩指数相关，回弹指数越大、压缩指数越小、卸荷量越大，产生的卸荷回弹扰动也就越大。回弹指数和重塑土压缩指数，是与土本身颗粒成分、大小以及土体结构相关的参数，即土的种类有关。

为了验证式(8)，绘制卸荷扰动指数随与深度的拟合曲线，见图 4。本场地卸荷扰动指数随深度增大的规律明显，但分布较离散，因场地沿深度不是单一均匀地层，不同地层的 C_s、C'_c 以及 γ 不同，回归公式为：

$$I_A = 0.142 \lg h - 0.109\,3 \tag{9}$$

式(9)与(8)形式一致，公式中的系数与场地土试验参数吻合，说明式(8)是合理的，以及卸荷扰动概念的合理性。

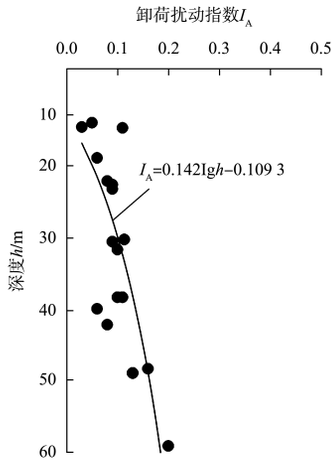


图 4　卸荷扰动指数 I_A 拟合曲线

Fig. 4　Fitted curve of unloading disturbance index I_A

5.3　人为扰动情况

由图 3b) 可以看出，人为扰动主要受取土器影响，对于同一种取土器，人为扰动随深度变化不大，甚至部分深度较大的土样，呈现较小的扰动现象，特别是深度 40 m 的土样，不论哪种取土器，人为扰动指数均较小。这应该与土体本身性质有关，本文第①、④、⑥组样本均为黏土，其他样本为粉质黏土，黏土的扰动指数较小。因样本有限，还需要进一步研究。从实际经验上看，塑性指数越高、液性指数越低的土更不容易扰动。

6　结论

1）本文基于 Schmertmann 体积压缩法的改进方法，引入了卸荷扰动指数 I_A 和人为扰动指数 I_B 的分解思路，更加清晰地区分了不可避免的自然扰动和可通过技术改进减少的扰动影响，为工程实践提供了更科学的取土质量评估标准。

2）试验结果表明，不同取土器对土样的扰动程度存在显著差异。总体而言，敞口薄壁取土器和双管单动回转取土器的取样质量较好，而厚壁取土器和岩芯管取样的扰动较大。因此，在高精度工程勘察中，应优先选用取样扰动指数较低的取土器，并优化取样工艺，以减少对土体结构的破坏。

3）卸荷扰动在总扰动中占比 8% ~ 52%，取样深度、土体特性及前期固结压力均对其影响显著。当卸荷扰动占比超过 50%时，单纯提高取土器性能的效果有限。因此，在深厚软土或高应力区的取样过程中，应结合卸荷扰动特性，采用适当的卸荷补偿技术或改进的加压取样方法，以减小扰动对土力学指标的影响。

4）人为扰动不仅与取土技术有关，还与岩土性质密切相关。本文发现，塑性指数较高、液性指数较低的黏土更不易受扰动，而粉质黏土在取样过程中更易受影响。这个结论对不同类型土体的取样工艺优化具有重要指导意义，但仍需要进一步扩大样本规模进行深入研究。通过开展更多现场试验，扩大研究区域和土样类型，并对不同工程环境下的取样扰动规律进行深入分析，以完善取土质量评价体系，为岩土工程设计和施工提供更可靠的技术支持。

参考文献：

[1]　王年香, 魏汝龙. 沿海软粘土取土质量的对比分析[J]. 工程地质学报, 1994, 2(2): 67-75.
WANG N X, WEI R L. Comparative analysis of sampling quality for coastal soft clay [J]. Journal of engineering geology, 1994, 2(2): 67-75.

[2]　高大钊, 张少钦, 姜安龙, 等. 取样扰动对土的工程性质指标影响的试验研究[J]. 工程勘察, 2006(3): 6-10.
GAO D Z, ZHANG S Q, JIANG A L, et al. Experimental study on effect of sampling disturbance onengineering properties of soil [J]. Geotechnical investigation & surveying, 2006(3): 6-10.

[3]　徐晓宇. 取土器及取样方法对测试土体抗剪强度指标的影响研究[J]. 广东土木与建筑, 2017, 24(6): 54-56.
XU X Y. Effect of soil sampler and sampling method shear strength index of soil test [J]. Guangdong civil and architectural engineering, 2017, 24(6): 54-56.

[4]　袁聚云. 土工试验与原理[M]. 上海: 同济大学出版社, 2003.
YUAN J Y. Geotechnical testing and principles [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2003.

[5]　田伟, 肖雄丙, 张宏明. 取土方式对取土质量差异研究[J]. 港工技术, 2016, 53(6): 99-101.
TIAN W, XIAO X B, ZHANG H M. Impact of different

soil sampling modes on soil quality[J]. Port engineering technology, 2016, 53(6): 99-101.

[6] ANDRESEN A. The NGI 54-mm samplers for undisturbed sampling of clays and representative sampling of coarser materials[C]//Proceedings of The International Symposium of Soil Sampling, State of the Art on Current Practice of Soil Sampling. Singapore: [s. n.], 1979: 17-23.

[7] TERZAGHI K R, PECK B, MESRI G. Soil Mechanics in engineering practice[M]. 3rd ed. New York: Wiley, 1996.

[8] LUNNE T, BERRE T, STRANDVIK S L. Sample disturbance effects in soft low plastic Norwegian clay[C]// Symposium on Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics. Oslo: Norges Geotekniske Institutt, 1997: 81-102.

[9] 岩土工程勘察规范: GB 50021—2001[S]. 2009 版, 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
Code for investigation of geotechnical engineering: GB 50021-2001[S]. 2009 ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.

[10] SCHMERTMANN J H. The undisturbed consolidation behavior of clay[J]. Engineering, geology transactions of the American Society of Civil Engineers, 1955, 120: 1201-1227.

(本文编辑 王璁)

(上接第 176 页)

[10] 刘勇, 李兴, 郭鑫辉, 等. 围压条件下粒子冲击破岩裂隙扩展机理研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(8): 1-10.
LIU Y, LI X, GUO X H, et al. Research on crack propagation mechanism of rock impacted by particles under confining pressure[J]. Journal of vibration and shock, 2024, 43(8): 1-10.

[11] 王智德, 钱梦凡, 李杰, 等. 高应变率冲击荷载下节理花岗岩损伤机制研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(7): 1917-1928.
WANG Z D, QIAN M F, LI J, et al. Damage mechanism of jointed granite under high strain rate impact loading[J]. Rock and soil mechanics, 2024, 45(7): 1917-1928.

[12] 顾思远. 冲击荷载下贯通节理花岗岩动力特性及能量演化规律试验研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2022.
GU S Y. Experimental research on dynamic properties and energy evolution of persistent jointed granite under impact loading[D]. Wuhan: Wuhan University, 2022.

[13] LI H Z, XU J T, ZHANG Z L, et al. A generalized unified strength theory for rocks[J]. Rock mechanics and rock engineering, 2023, 56(11): 7759-7776.

[14] 尤明庆. 围压对岩石试样强度的影响及离散性[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(5): 929-937.
YOU M Q. Effect of confining pressure on strength scattering of rock specimen[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2014, 33(5): 929-937.

(本文编辑 王璁)

(上接第 193 页)

[7] 窦建强. “电天牛” 系列绞吸船挖岩施工工艺[J]. 水运工程, 2019(6): 212-214.
DOU J Q. Construction technology for rock dredging by “Electricity-Tianniu” series cutter suction dredger[J]. Port & waterway engineering, 2019(6): 212-214.

[8] 张克非, 刘超, 厉金. 绞吸船挖岩施工工艺探讨[J]. 中国水运(下半月), 2018, 18(5): 123-124, 164.
ZHANG K F, LIU C, LI J. Discussion on construction technology of rock excavation by cutter suction dredger[J]. China water transport (the second half of the month), 2018, 18(5): 123-124, 164.

[9] 中交第二航务工程勘察设计有限公司. 西部陆海新通道(平陆)运河入海口近海段航道工程岩土工程勘察报告[R]. 武汉: 中交第二航务工程勘察设计有限公司, 2022.
CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd. Geotechnical engineering survey report on the offshore section of the Western Land-Sea New Corridor (Pinglu) Canal[R]. Wuhan: CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., 2022.

[10] 疏浚与吹填工程设计规范: JTS 181-5—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
Design code for dredging and reclamation works: JTS 181-5 - 2012[S]. Beijing: China Communications Press, 2013.

(本文编辑 王传瑜)

水运工程