

DOI: 10.11779/CJGE202006007

# 不同类型 DPT 试验锤击能量稳定性及锤击数转化关系探讨

陈龙伟<sup>1</sup>, 王云龙<sup>1</sup>, 陈玉祥<sup>2</sup>

(1. 中国地震局工程力学研究所 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 成都基准方中建筑设计有限公司贵阳分公司, 贵州 贵阳 550080)

**摘要:** 采用现场能量标定和试验的方法研究不同类型 DPT 锤击数之间的相关性, 探讨 DPT 试验锤击能量的稳定性。分析结果显示:DPT 试验是一种锤击能量稳定且锤击效率较好的现场测试方法, 不同类型的 DPT 锤击能量传递率(ETR)均值均能超过 80%, 且落锤越重, 探杆直径尺寸越大, 能量传递率越高。通过能量传递率标定锤击数和现场试验的方法, 分别获取了不同类型 DPT 锤击数之间的转化关系, 且二者得到的不同类型 DPT 锤击数之间的转化系数较一致, 重型 DPT 试验得到的锤击数约为超重型 DPT 试验锤击数 2.5 倍。能量测试仪获取的 ETR 实为锤击有效能量的传入率, 经过探杆的能量损耗才是贯入的实际有效能量, 而探头贯入能量测试是一项尚需解决的技术。

**关键词:** 动力触探; 能量测试; 锤击数; 转化系数

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)06-1041-09

作者简介: 陈龙伟(1983—), 男, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事岩土地震工程、土动力学等方面的研究。E-mail: chenlw@iem.ac.cn。

## Stability of DPT hammer efficiency and relationships of blow-counts obtained by different DPT apparatuses

CHEN Long-wei<sup>1</sup>, WANG Yun-long<sup>1</sup>, CHEN Yu-xiang<sup>2</sup>

(1. Institution of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering

Vibration of China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 2. Guizhou Branch of Chengdu Jizhun Fangzhong Building Design

Co., Ltd., Guiyang 550080, China)

**Abstract:** The blow counts of different DPT apparatuses and their relationships are analyzed by means of the energy-calibration method which uses a pile dynamic analyzer (PDA) energy measurement and the in-situ DPT tests. The stability of energy transmitted into penetration tips is discussed. The analytical results demonstrate that the DPT is a reliable site testing technique with good hammering efficiency. The energy transfer ratios (ETR) of different types of DPT are high with the average values more than 80%. The relationships of blow counts calibrated by ETR values are consistent well with those obtained by the in-situ tests. The blow counts of heavy DPT tests with a hammer of 63.5 kg is in average 2.5 times those obtained by super-heavy DPT with a hammer of 120 kg, and the influence of rod diameters can be neglected. The ETR values measure the energy transmitted into the rod through hammer drops, i.e., hammering efficiency. However, the actual energy transmitted into soil usually reduces due to the energy consuming of rods and should be measured at the tip. The technique is expected to be solved in the future.

**Key words:** dynamic penetration test; energy measurement; blow count; converting coefficient

## 0 引言

地基工程原位测试技术是岩土工程一个重要组成部分, 动力触探(DPT)和标准贯入试验(SPT)是工程上常用的原位测试方法, 其原理均是利用一定质量的重锤, 将装有一定规格的探头打入土中, 通过贯入的锤击数, 估算地基承载力等土体力学参数, 定性

描述土的工程性质。动力触探试验是岩土工程勘察中非常重要的现场测试手段, 尤其是在无黏性土地层的

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目  
(2020B01); 国家重点研发计划政府间国际科技合作重点专项  
(2016YFE0105500)

收稿日期: 2019-09-18

勘察中, 它是现场确定土的压缩性指标和地基土承载力有效的方法之一<sup>[1-2]</sup>。重型和超重型动力触探主要适用于砂土、圆砾、卵石等碎石土, 以及风化岩石等土类。针对粒径较大的土层, SPT 和 CPT 不适用, 而动力触探则能发挥其优越性。动力触探在以下方面存在明显优势: 设备及操作方法简单, 且坚固耐用, 快速, 经济, 应用历史悠久, 积累的经验丰富, 建立了锤击数与土层力学性质之间的多种相关关系和图表, 使用方便, 最主要的一点是能连续测试, 不易错过薄的夹层<sup>[3]</sup>。动力触探 20 世纪 50 年代引入中国, 并迅速得到普及, 许多单位做了有价值的试验研究, 特别是针对四川省成都平原砂砾层的岩土工程勘察, 当地普遍采用超重型动力触探试验并已积累了丰富的经验, 在评价地基承载力时主要依靠超重型动力触探锤击数, 已经纳入到地方规范<sup>[4]</sup>。

采用重锤锤击的原位测试技术, 受测试设备、操作人员、探杆、重锤重量与落距等的影响较大, 需要进行相应的修正和标定, 才能进行相应的工程应用。不同类型动探试验锤击数之间存在一定的转化关系, 已有学者尝试建立重型 DPT 锤击数与 SPT 锤击数之间的转化关系<sup>[5-8]</sup>。成晓伟<sup>[9]</sup>根据德阳黄许镇工程场地的试验结果统计给出不同砂砾石层重型和超重型动力触探锤击数之间的拟合关系, 但其仅分析了一个场地的工况。近年来亦有国内学者采用室内试验的方式进行 DPT 锤击数的杆长修正<sup>[10-12]</sup>。规范中只是对锤击数进行了杆长修正<sup>[8, 13]</sup>, 而国际上还较常采用锤击能量进行修正, 国外能量修正锤击数已经用于基于 SPT 锤击数液化判别方法中<sup>[14-15]</sup>, 但国内对 DPT 或 SPT 锤击数进行能量标定的相关研究甚少。Seed 等<sup>[16]</sup>进行国内外液化判别方法对比研究中, 指出中国采用的穿心锤自由脱落或者拉绳式锤击方式进行 SPT 试验, 其能量传递率约 50%~60%, SPT 锤击数能量修正系数取 1.0。曹振中等<sup>[17-18]</sup>针对其提出的基于超重型 DPT 锤击数的砾性土液化判别公式, 采用能量标定的方法对美国及国外其它地区的 DPT 试验锤击数进行了能量修正, 以验证砾性土液化判别公式的通用性, 但其未采用能量标定的方法对 DPT 锤击效率及不同类型 DPT 试验锤击数进行系统的对比研究。

虽然, DPT 技术在国内已经得到普及, 但针对目前常用的 DPT 方法的锤击效率及不同类型 DPT 锤击数之间的关联性研究较少, 主要原因是能量标定技术及设备欠缺。鉴于此, 本文选取成都平原典型砾性土场地进行了不同类型落锤和探杆尺寸的现场 DPT 试验, 采用最新的能量测试仪 (Pile Dynamics Analyzer, 即 PDA) 测量 DPT 锤击能量, 研究 DPT 试验锤击效率以及不同类型 DPT 试验锤击数之间的相关性。

## 1 现场试验

现场试验选取成都平原地区 6 个试验场地, 试验点的分布见图 1。6 个试验场地的近地表均覆盖 1~3 m 厚度的黏土层, 其下卧为厚度几米至几百米的砾性土层, 且砾性土层中常夹杂含有粒径较大的漂石。该类型的场地, 传统的 SPT 和 CPT 试验技术均不可用, 而 DPT 则能展现其独特的优势。图 2 展示本次现场试验测试的装置布置。动力触探试验采用的穿心锤包括 63.5, 120 kg 两种, 探杆尺寸分别为 42, 60 mm 直径的探杆 (图 3)。

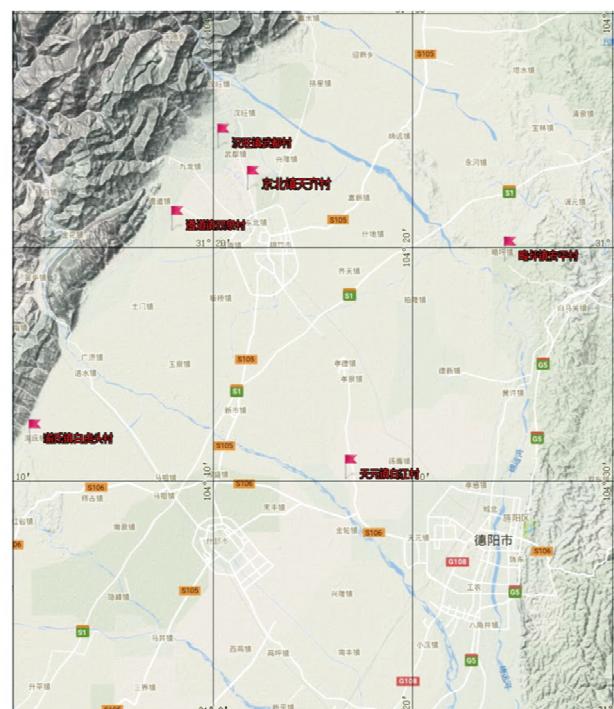


图 1 成都平原现场动力触探试验点分布

Fig. 1 Distribution map of selected sites with DPT tests conducted in Chengdu plains

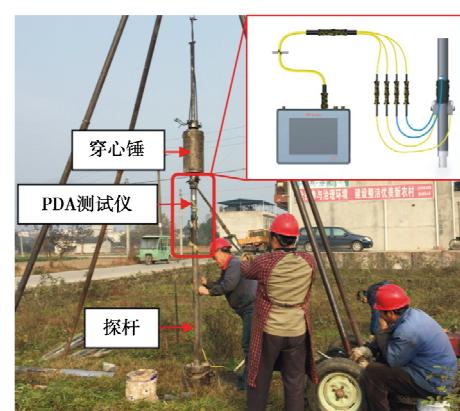


图 2 现场超重型动力触探试验

Fig. 2 In-situ DPT apparatus with a donut hammer of 120 kg falling to anvil above PDA energy measurement



图3 现场 DPT 试验采用的穿心锤 (63.5, 120 kg)、探头和探杆 (直径为 42, 60 mm)

Fig. 3 Donut hammers (63.5 and 120 kg), tips and rods (42 and 60 mm in diameter) used in DPT tests

一般工程勘察的动力触探, 63.5 kg 穿心锤配套的探杆直径为 42 mm, 而 120 kg 穿心锤配套 60 mm 直径探杆。便于对比研究, 此次试验分别采用了两套设备, 以及 63.5 kg 穿心锤配 60 mm 探杆的交叉试验。现场试验时, 利用卷扬机将穿心锤提升一定高度, 采用自动脱钩自由落体的方式锤击探杆上的砧板, 进而带动探杆、触探头对土层进行贯入。

DPT 试验中, 120 kg 穿心锤的落距为 1 m, 理论锤击能量(势能)为  $1.176 \text{ kN}\cdot\text{m}$ , 这里重力加速度取值  $9.8 \text{ m/s}^2$ ; 而 63.5 kg 穿心锤的落距为 0.76 m, 理论锤击能量为  $0.473 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。现场试验, 采用能量测量仪 PDA 对每次锤击贯入的能量进行实测(图 2)。PDA 测试仪安装有两个加速度传感器和两个应变传感器, 通过测量标定杆件在锤击荷载下的加速度和应变, 转化成动能和应变能的形式, 进而换算成锤击能量传递率(Energy Transfer Ratio, 简称 ETR), 即传递给探杆的能量与穿心锤的理论总能量之比。通过读取 ETR 值, 即可测量每次锤击贯入过程中, 传入探杆的有效能量。同时采用 ETR 修正 DPT 试验的锤击数, 就可以得到标准化的锤击数, 研究不同类型 DPT 试验锤击数的转化关系。下文将根据 DPT 锤击贯入能量探讨 DPT 试验的稳定性, 并研究不同 DPT 试验工况下锤击数之间的相关性。

## 2 DPT 试验结果分析

### 2.1 锤击能量稳定性

DPT 试验贯入过程中, 通过 PDA 测量每次锤击的 ETR, 则可得到 ETR 随着深度的试验数据。图 4~6 显示 ETR 的实测结果随着深度的散点图, 图中黑实线表示试验数据的均值。由图 4 可见, 120 kg 穿心锤、60 mm 探杆试验的 ETR 测试结果随着深度略有增加的趋势, 但趋势不显著, 平均值为 90%~95%。63.5 kg 穿心锤、60 mm 探杆试验的 ETR 测试数据离散性相对较大, ETR 均值随着深度趋于增大(图 5)。图 6 中显

示 63.5 kg 穿心锤、42 mm 探杆试验的 ETR 数据, 数据的离散性及随深度的发展趋势与图 5 差不多; 但深度大于 8 m 时, ETR 基本稳定在 80%, 离散性也较小。深度大于 8 m 的数据均为武都村的试验结果, 是否具有普遍意义尚不能确定。

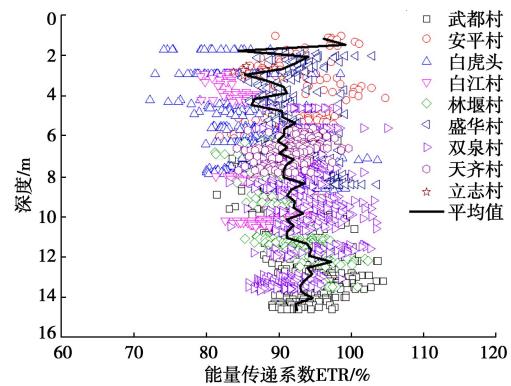


图4 60 mm 探杆和 120 kg 穿心锤现场试验实测 ETR 数据随深度的分布

Fig. 4 Test data of ETR values varying with depth using a hammer of 120 kg and rods of 60 mm in diameter

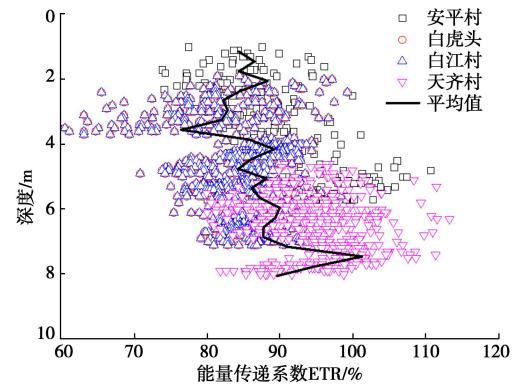


图5 60 mm 探杆和 63.5 kg 穿心锤现场试验实测 ETR 数据随深度的分布

Fig. 5 Test data of ETR values varying with depth using a hammer of 63.5 kg and rods of 60 mm in diameter

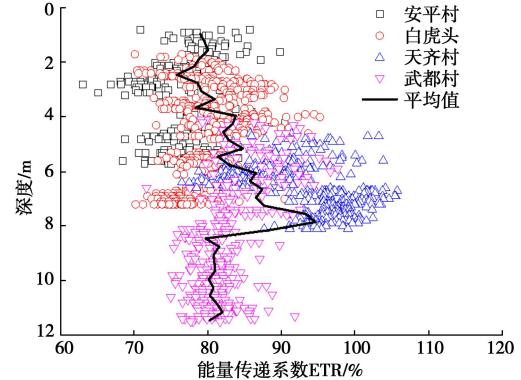


图6 42 mm 探杆和 63.5 kg 穿心锤现场试验实测 ETR 数据随深度的分布

Fig. 6 Test data of ETR values varying with depth using a hammer of 63.5 kg and rods of 42 mm in diameter

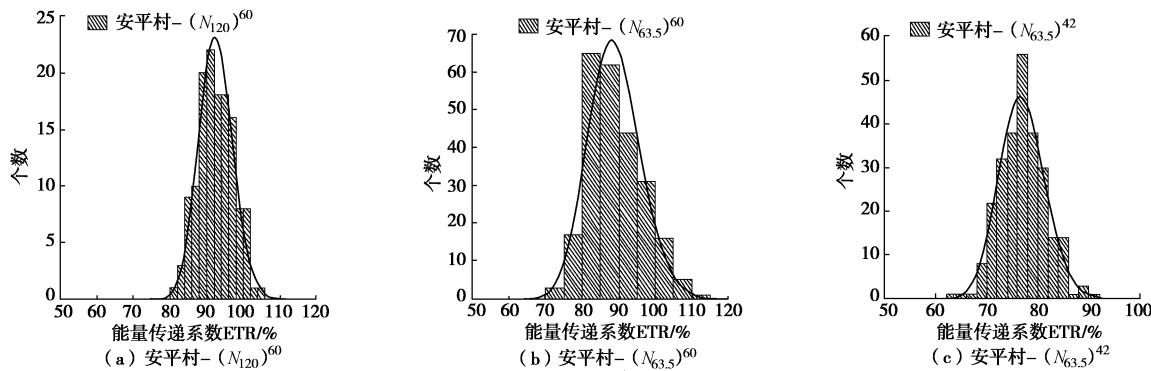


图 7 略平镇安平村 DPT 能量试验锤击数与能量传递率统计图

Fig. 7 Histograms of numbers of hammer drops and ETR values conducted at Anping Village

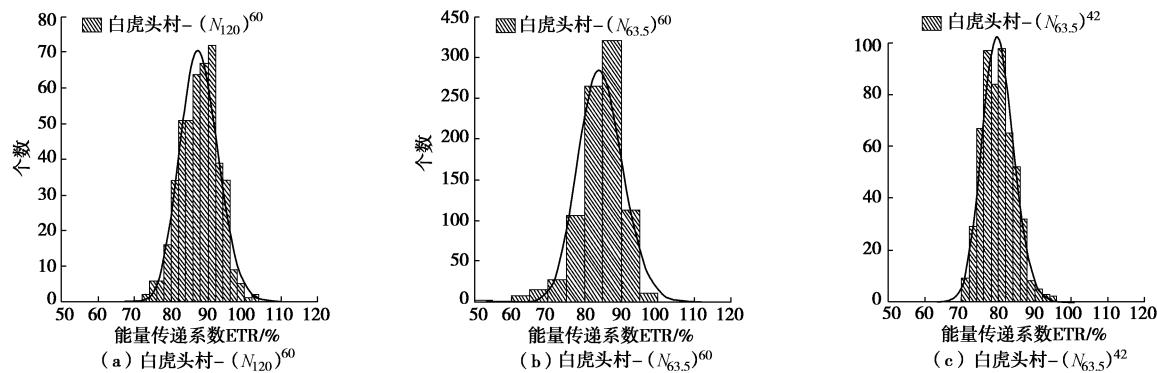


图 8 淳氏镇白虎头村 DPT 能量测试锤击数与能量传递率统计图

Fig. 8 Histograms of numbers of hammer drops with ETR values conducted at Baihutou Village

从实测 ETR 数据与深度的相关性趋势来看, 随着深度的增加, ETR 均值稍微增加, 但增幅不明显, 基本增大 5%~10%。所以, 简化起见, 通过 ETR 修正 DPT 锤击数, 可不考虑 ETR 随深度的变化, 将试验数据进行统一分析。

就单个试验点而言, ETR 数据的分布则可以反映 DPT 试验锤击能量的稳定性。图 7, 8 分别给出了略坪镇安平村和淳氏镇白虎头村不同类型 DPT 试验实测 ETR 统计条状图, 图中黑线为采用正态分布对数据进行拟合的曲线。两个试验点均进行了 3 种类型 DPT 测试, 采用 120, 63.5 kg 穿心锤, 探杆尺寸分别为 60, 42 mm。由图 7, 8 可见, DPT 试验贯入过程中每次锤击能量传递率基本服从正态分布, 其它测试点的结果类似。表 1~3 列出了试验的 DPT 测试点能量传递率均值及一倍标准差范围。由表 1~3 中数据可以看出, DPT 试验采用的自动脱钩锤击方式, 能量传递率均值基本上都超过 80%, 一倍标准差 3%~8%, 且较稳定。采用 120 kg 穿心锤、60 mm 探杆试验时, 能量传递率最高, 保持在 90% 左右。而采用 63.5 kg 穿心锤、60 mm 探杆试验时, 能量传递率 ETR 也在 80%~90%。采用 63.5 kg 穿心锤、42 mm 探杆试验时, 能量传递率 ETR 稍有降低, 但也能维持 80% 左右。3 种 DPT 试验, 每次贯入锤击能量的标准差基本一致。这也说明了, DPT

试验是一个比较可靠稳定的现场勘察测试方法。需要说明的是, 试验过程中, 出现了能量传递率超过 100% 的情况。原因主要是锤击的过程中, 土层非常坚硬或遇到尺寸较大的石块, 导致落锤反弹, 实测的 ETR 出现了大于 100% 的结果。

表 1 采用 120 kg 穿心锤、60 mm 探杆 DPT 试验实测能量传递率统计值

Table 1 ETR statistics of DPT tests with a hammer of 120 kg and rods of 60 mm in diameter (%)

试验点	能量传递率 (ETR)			
	均值	均值+标准差	均值-标准差	标准差
安平村	92.53	97.20	87.86	4.67
白虎头	87.65	92.82	82.48	5.17
天齐村	91.78	94.86	88.70	3.08
白江村	88.90	92.69	85.11	3.79
武都村	92.91	96.97	88.85	4.06

表 2 采用 63.5 kg 穿心锤、60 mm 探杆 DPT 试验实测能量传递率统计值

Table 2 ETR statistics of DPT tests with a hammer of 63.5 kg and rods of 60 mm in diameter (%)

试验点	能量传递率 (ETR)			
	均值	均值+标准差	均值-标准差	标准差
安平村	88.88	96.16	81.60	7.28
白虎头	84.43	90.27	78.59	5.84
天齐村	94.51	100.80	88.22	6.29
白江村	89.32	93.64	85.00	4.32

表 3 采用 63.5 kg 穿心锤、42 mm 探杆 DPT 试验实测能量传递率统计值

Table 3 ETR statistics of DPT tests with a hammer of 63.5 kg and rods of 42 mm in diameter (%)

试验点	能量传递率(ETR)			
	均值	均值+标准差	均值-标准差	标准差
安平村	76.96	81.45	72.47	4.49
白虎头	79.94	84.28	75.60	4.34
天齐村	92.94	99.30	86.58	6.36
武都村	82.52	86.76	78.28	4.24

## 2.2 不同类型 DPT 锤击数的转化关系

规范中常用 DPT 试验贯入一定深度的锤击数  $N_m$  作为评价工程场地承载力及土层密实度等力学特性的指标, 如(超)重型 DPT 取 10 cm 贯入深度, 其中  $m$  可代表穿心锤的质量。鉴于 DPT 试验设备的差异, 实测锤击数需要进行标准化或归一化, 便于比较。下面从能量传递效率标定以及现场试验锤击实测数据两个方面, 探讨不同类型 DPT 锤击数之间的转化关系, 以期为不同 DPT 评价指标建立标准化方法提供依据。

### (1) 能量传递率

DPT 锤击效率可以通过能量传递率来表示, 所以不同类型的 DPT 试验锤击数可以通过能量传递率进行标定。假定同一类探头贯穿土层所需能量是一定的, 采用不同的穿心锤和落距, DPT 锤击数之间的转化关系可通过下式转化:

$$N_{m1} = \frac{m_2 g h_2}{m_1 g h_1} \cdot \frac{\text{ETR}_2}{\text{ETR}_1} \cdot N_{m2} \quad (1)$$

式中 ETR 为能量传递系数 (%);  $N_m$  为动力触探标准探头现场实测每贯入 30 cm 的锤击数, 规范上对重型、超重型 DPT 锤击数取值为每贯入 10 cm 的锤击数, 本文中便于比较, 统取贯入 30 cm 的锤击数, 因为现场试验时, 常遇到较松散土层, 贯入 10 cm 锤击数为 1 击, 甚至小于 1 击;  $h$  为落锤的高度;  $mgh$  为落锤的理论总势能。下面就通过式(1)的转化关系, 来讨论

不同落锤锤击数之间的关系。

以 120 kg 穿心锤、60 mm 探杆得到的锤击数  $(N_{120})^{60}$  作为基准值, 按照式(1)得到其它 DPT 的锤击数  $N$  相对于  $(N_{120})^{60}$  值的比值列于表 4。这里的 ETR 采用的是表 1~3 中的均值。由表 4 可以看出, 所有试验场地进行的不同类型的 DPT 得到的锤击数比值基本一致。采用 60 mm 探杆时, 63.5 kg 穿心锤得到锤击数平均约为 120 kg 锤击数的 2.44 倍~2.63 倍, 平均 2.53 倍; 而采用 42 mm 探杆时, 63.5 kg 穿心锤的锤击数平均约为 120 kg 锤击数的 2.44 倍~3.03 倍, 平均 2.74 倍, 比 60 mm 探杆增大 10%。同样 63.5 kg 穿心锤, 60 mm 的探杆得到的锤击数比 42 mm 探杆得到的锤击数平均小 7%。从数据角度看, 这样的差别显基本可以忽略, 数据本身的离散性掩盖了这样的差别。

### 表 4 基于 ETR 标定的不同类型 DPT 试验锤击数比值

Table 4 ETR-calibrated blow-count ratios of different DPT tests with respect to  $(N_{120})^{60}$

试验点	DPT 锤击数转化系数		
	$(N_{63.5})^{60}/(N_{120})^{60}$	$(N_{63.5})^{42}/(N_{120})^{60}$	$(N_{63.5})^{42}/(N_{63.5})^{60}$
安平村	2.63	3.03	1.15
白虎头	2.56	2.78	1.05
天齐村	2.44	2.44	1.02
白江村	2.50	—	—
武都村	—	2.70	—
平均值	2.53	2.74	1.07

### (2) 现场实测 DPT 锤击数

前一节中, 通过能量传递率标定得到了不同类型 DPT 试验锤击数之间的转化关系。本节则通过实测锤击数对比来探讨不同种类 DPT 试验中锤击数的相关性。图 9, 10 分别给出了略坪镇安平村和渝氏镇白虎头村实测锤击数随着深度的试验曲线。实际现场试验过程中, 每贯入 10 cm 读数, 所以图 9, 10 是每贯入 10 cm 锤击数的实测曲线。数据处理时, 将每贯入 10 cm 的锤击数要转化成每贯入 30 cm 的锤击数。现场试验数据分析时, 常会遇到锤击数明显增大的“尖刺”,

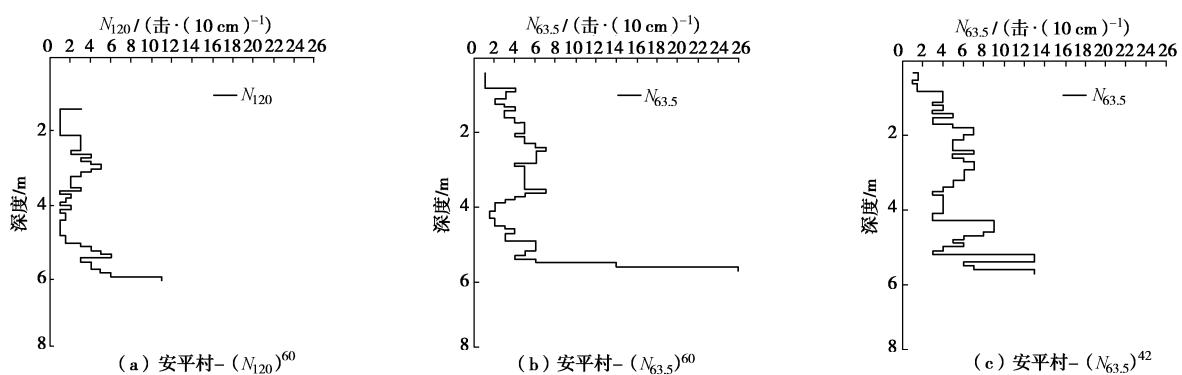


图 9 略坪镇安平村 DPT 锤击数随深度的试验曲线

Fig. 9 Curves of different DPT test blows varying with depth conducted at Anping Village

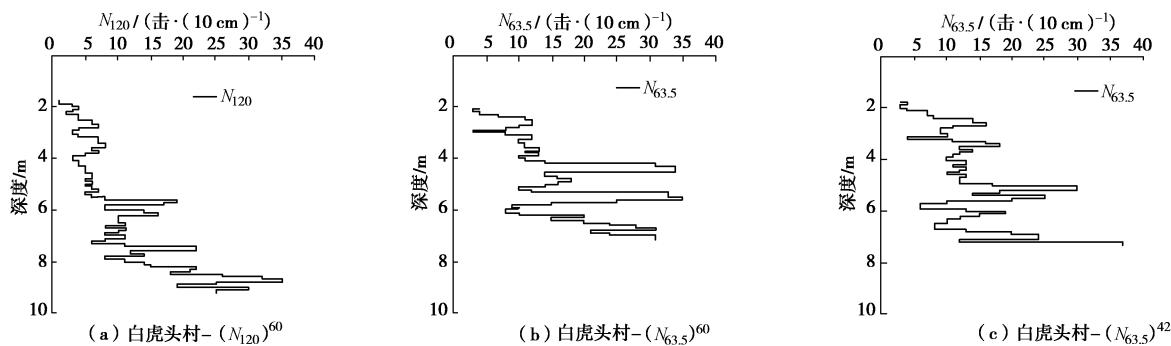


图 10 潼氏镇白虎头村 DPT 锤击数随深度的试验曲线

Fig. 10 Curves of different DPT test blows varying with depth conducted at Baihutou Village

特别是 63.5 kg 穿心锤工况下, 如图 10 (b)。这样的数据一般视为奇异点, 需要从试验曲线中去除。主要原因在于锤击过程中, 探头遇到了直径较大的漂石, 锤击数不能正确反映土层沉积的密实情况。图 11 展示白虎头村钻孔取样, 从图中看出, 从 5.4~11.9 m, 直径较大的漂石分布非常多, 所以白虎头村试验点 DPT 试验曲线的尖刺较多。在 120 kg 穿心锤锤击下, 探头较容易贯穿(打碎)漂石块, 而 63.5 kg 穿心锤则需要更多次锤击。从图 10 的白虎头村 DPT 试验锤击曲线看出, 4~8 m 深度 63.5 kg 穿心锤锤击出现的“尖刺”(图 10 (b)、(c)) 明显比 120 kg 的穿心锤多, 而且深度大于 8 m 时, 由于漂石的尺寸过大, 63.5 kg 穿心锤的 DPT 试验已无法实施。



图 11 白虎头村钻孔取样

Fig. 11 Soil sampling extracted from a bore hole at Baihutou Village

从图 12, 13 分别给出了略坪镇安平村和潼氏镇白虎头村在不同落锤和不同探杆下, 不同类型 DPT 实测锤击数之间的结果统计条状图, 其中的黑线为采用对数正态分布拟合的曲线。

同样, 以 120 kg 穿心锤、60 mm 探杆得到的锤击数( $N_{120}$ )<sup>60</sup>作为基准值, 表 5 列出试验点其它类型 DPT 锤击数与( $N_{120}$ )<sup>60</sup>的比值。需要说明, 同一试验点不同类型 DPT 试验相距在直径 1 m 范围内, 以忽略同一深度沉积土层结构分布差异性的影响。由表 5 看出, 同为 60 mm 探杆贯入 30 cm, 63.5 kg 穿心锤的锤击数

( $N_{63.5}$ )<sup>60</sup> 为 120 kg 穿心锤的锤击数( $N_{120}$ )<sup>60</sup> 的 2.03 倍~2.91 倍, 平均为 2.47 倍; 采用 42 mm 直径探杆, 63.5 kg 穿心锤的锤击数( $N_{63.5}$ )<sup>42</sup> 为 120 kg 穿心锤的锤击数( $N_{120}$ )<sup>60</sup> 的 1.80 倍~3.29 倍, 平均 2.49 倍; 采用相同 63.5 kg 穿心锤, 42 mm 探杆得到的锤击数与 60 mm 相比, 安平村的结果为二者比值为 1.44, 而在白虎头和天齐村二者的测试结果相当, 分别为 0.99 和 0.98, 这样的差异性可能源于试验误差以及数据的离散性。

表 5 现场实测不同类型 DPT 锤击数比值

Table 5 Blow-count ratios of different DPT with respect to ( $N_{120}$ )<sup>60</sup>

试验点	试验锤击数的比值		
	$(N_{63.5})^{60}/(N_{120})^{60}$	$(N_{63.5})^{42}/(N_{120})^{60}$	$(N_{63.5})^{42}/(N_{63.5})^{60}$
安平村	2.33	3.29	1.44
白虎头	2.60	2.18	0.99
天齐村	2.91	2.67	0.98
白江村	2.03	—	—
武都村	—	1.80	—
平均值	2.47	2.49	1.14

前文探讨了不同类型 DPT 锤击数之间的相关性。由分析结果可以看出, DPT 试验的稳定性较好, 且不同试验点的结果基本一致。所以把所有试验数据进行统一分析。图 14~16 给出所有试验数据的分布。图 14 显示( $N_{120}$ )<sup>60</sup> 与( $N_{63.5}$ )<sup>60</sup> 数据的散点图, 可以看出, 当( $N_{120}$ )<sup>60</sup><20 时, 二者线性相关性较好。图 15 展示( $N_{120}$ )<sup>60</sup> 与( $N_{63.5}$ )<sup>42</sup> 数据的散点图, 同样, ( $N_{120}$ )<sup>60</sup><20 时, 二者保持较好的线性相关性, 但离散性较图 14 稍大。图 16 中, ( $N_{63.5}$ )<sup>60</sup> 与( $N_{63.5}$ )<sup>42</sup> 数据呈线性增长的趋势, 但二者相关性离散较大。图 14~16 中显示一个共同的特征, 锤击数大的情况下离散性较大。其中原因可能由于锤击过程中, 遇到了粒径较大的漂石, 此时的锤击数具有很大的不确定性, 且不能反映土层的“真实”密实度。所以, 对这些数据的处理需要进一步深入探究。

图 14~16 中的直线为采用过零点的直线对数据进行拟合, 直线的斜率分别为 2.56, 2.17, 0.96, 与表 4, 5 的不同类型 DPT 锤击数比值的平均值基本一致。

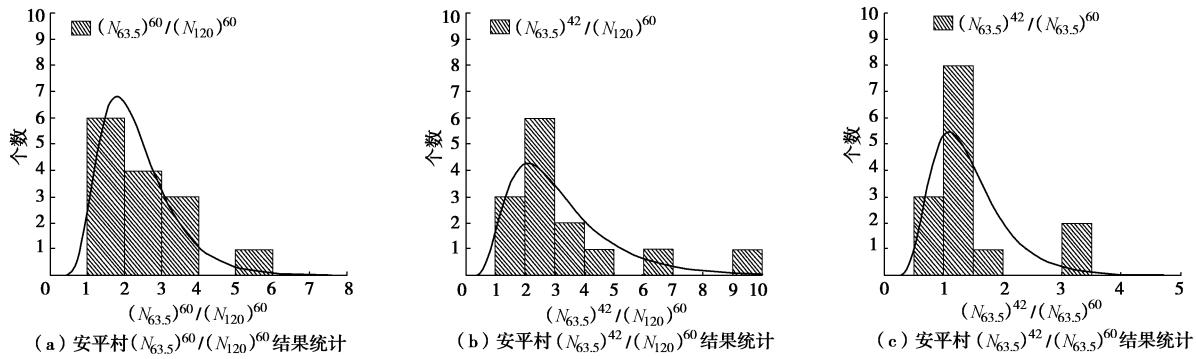


图 12 略平镇安平村不同类型 DPT 锤击数比值统计柱状图

Fig. 12 Histograms of ERT ratios of different types of DPT tests conducted at Anping Village

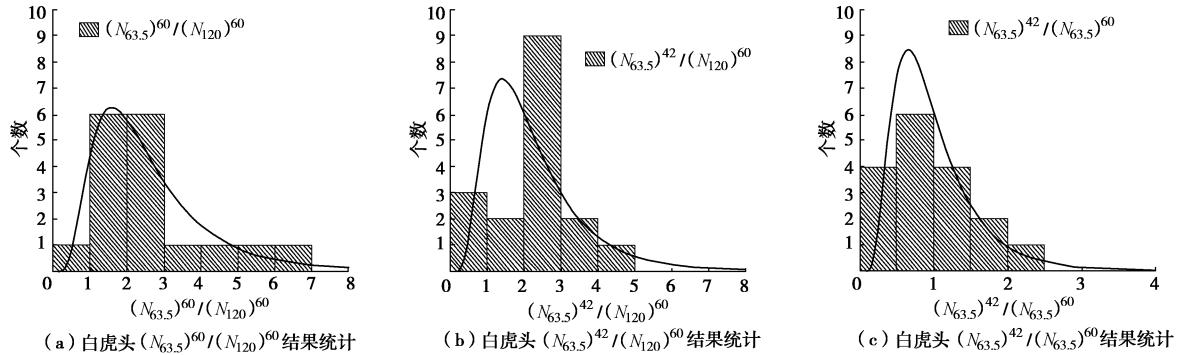
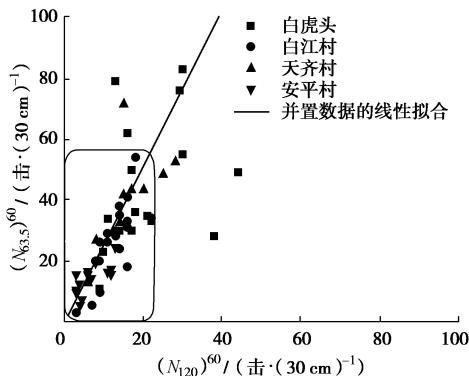
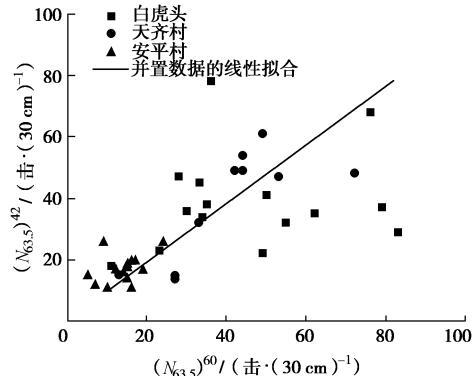
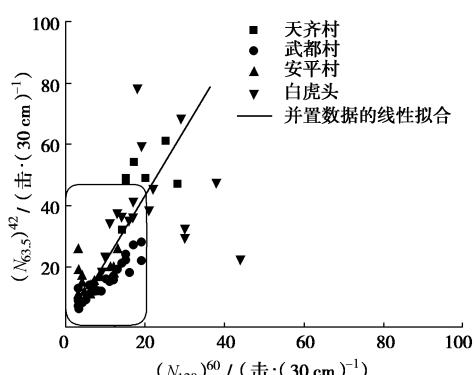


图 13 淳氏镇白虎头村不同类型 DPT 锤击数比值统计柱状图

Fig. 13 Histograms of ERT ratios of different types of DPT tests conducted at Baihutou Village

图 14  $(N_{120})^{60}$  与  $(N_{63.5})^{60}$  的试验数据散点图Fig. 14 Scattering diagram of  $(N_{120})^{60}$  and  $(N_{63.5})^{60}$  data图 16  $(N_{63.5})^{60}$  与  $(N_{63.5})^{42}$  的试验数据散点图Fig. 16 Scattering diagram of  $(N_{63.5})^{60}$  and  $(N_{63.5})^{42}$  data图 15  $(N_{120})^{60}$  与  $(N_{63.5})^{42}$  的试验数据散点图Fig. 15 Scattering diagram of  $(N_{120})^{60}$  and  $(N_{63.5})^{42}$  data

### 3 结论及讨论

本文主要通过能量传递率和现场 DPT 试验途径, 探讨了 DPT 试验的稳定性, 分析不同穿心锤和探杆直径下 DPT 试验锤击数之间的转化关系。

(1) 现场 DPT 试验是一种可靠稳定的现场测试方法, 每次贯入锤击能量基本都能在 80% 以上, 但不同 DPT 试验的 ETR 离散性存在差异, 穿心锤越重, 探杆直径尺寸越大, 离散性越小。针对本文试验采用的不同类型 DPT 试验, 其锤击的能量传递率均值基本上都能超过 80%, 特别是超重型 DPT, 其 ETR 超过

90%，所以现场 DPT 试验锤击效率高，稳定性好。

(2) 从能量传递的角度，60 mm 探杆比 42 mm 探杆的锤击效率略高，ETR 值平均高 5%~10%； $(N_{63.5})^{60}$  和  $(N_{63.5})^{42}$  数据分析显示二者差别不明显，平均比值介于 0.96~1.14，所以探杆直径对 DPT 锤击数的影响从工程意义上可以忽略。

(3) 采用能量标定仪和现场试验的方法，获取了不同穿心锤的锤击数之间的转化关系，即重型 63.5 kg 穿心锤的锤击数  $(N_{63.5})^{60}$  为超重型 120 kg 穿心锤锤击数  $(N_{120})^{60}$  约 2.5 倍，两种方法得到的不同 DPT 锤击数之间的转化系数基本一致。

(4) 实际贯入土层的能量是动探技术反应土层密实度的本质物理量，其测量需要在探头安装能量测试装备，而本文采用 PDA 测量的 ETR 则为锤击的有效能量传入率，经过探杆的损耗才是贯入的实际有效能量，在探头测试能量是一项尚需解决的技术。

(5) 在采用相同探头的情况下，不同类型的 DPT 试验得到的锤击数之间存在一定的相关性，是否存在 DPT 和 SPT 锤击数之间的转化关系是一个值得研究的课题，这样基于 SPT 的工程应用方法，如 SPT 液化判别方法，即可扩展到基于 DPT 的方法，以发挥 DPT 试验技术的优越性。此外，本文仅仅从能量传递的角度对 DPT 锤击数进行了标定，而国际上对于锤击数还需进行上覆土层压力的修正，这也是未来工作需要考虑的一个方面。

**致 谢：**感谢东华理工大学侯龙清教授、桂林理工大学曹振中教授以及四川德阳金阳岩土工程有限公司对现场勘查工作提供的支持和帮助。

## 参 考 文 献：

- [1] 张 平, 田红花. 有关动力触探影响因素修正问题的探讨[J]. 沈阳大学学报, 1999(2): 80~83. (ZHANG Ping, TIAN Hong-hua. The study on amendment of dynamic sounding impact factors[J]. Journal of Shenyang University, 1999(2): 80~83. (in Chinese))
- [2] 工程地质手册编委会. 工程地质手册[M]. 4 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. (Editing Committee of Handbook of Engineering Geology. Handbook of Engineering Geology[M]. 4 ed. Beijing: China Architecture Press, 2012. (in Chinese))
- [3] 邢皓枫, 徐 超, 石振明, 等. 岩土工程原位测试[M]. 上海: 同济大学出版社, 2015. (XING Hao-feng, XU Chao, SHI Zhen-ming, et al. Geotechnical Engineering In-situ Test[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2015. (in Chinese))
- [4] 成都地区建筑地基基础设计规范: DB51/T5026—2001[S]. 2001. (Design Code for Building Foundations of Chengdu Region: DB51/T5026—2001[S]. 2001. (in Chinese))
- [5] 牛建光, 孙成科, 蒯志要, 等. 动力触探试验和标准贯入试验指标相关性研究[J]. 港工技术, 2013, 50(5): 52~54. (NIU Jian-guang, SUN Cheng-ke, KUAI Zhi-yao, et al. Correlation study of dynamic penetration test index and standard penetration test index[J]. Port Engineering Technology, 2013, 50(5): 52~54. (in Chinese))
- [6] 郑 伟, 肖雄丙, 张宏明. 动探与标贯试验在地基液化检测中的相关性研究[J]. 港工技术, 2015, 52(6): 105~107. (ZHENG Wei, XIAO Xiong-bing, ZHANG Hong-ming. Correlation study of dynamic sounding and standard penetration test applied in foundation liquefaction detection[J]. Port Engineering Technology, 2015, 52(6): 105~107. (in Chinese))
- [7] 刘 旭, 张海东, 葛宝玉, 等. 粉细砂层标贯指标与重型动力触探指标换算的探讨[J]. 土工基础, 2014, 27(6): 126~128. (LIU Xu, ZHANG Hai-dong, GE Bao-yu, et al. Correlations between SPT and heavy dynamic penetration testing in silty fine sands[J]. Soil Engineering and Foundation, 2014, 27(6): 126~128. (in Chinese))
- [8] 铁路工程地质原位测试规程: TB 10018—2018[S]. 2018. (Code for In-Situ Testing of Railway Engineering Geology: TB 10018—2018[S]. 2018. (in Chinese))
- [9] 成晓伟. 圆锥动力触探试验在德阳砂砾石层中的应用[J]. 土工基础, 2012, 26(2): 99~100, 104. (CHENG Xiao-wei. Application of dynamic cone penetrometer tests in gravelly soils in Deyang area[J]. Soil Engineering and Foundation, 2012, 26(2): 99~100, 104. (in Chinese))
- [10] 左永振, 程展林, 丁红顺, 等. 动力触探杆长修正系数试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(5): 1284~1288. (ZUO Yong-zhen, CHENG Zhan-lin, DING Hong-shun, et al. Study of modified coefficient of dynamic penetration rod length[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(5): 1284~1288. (in Chinese))
- [11] 石 磊, 傅少君, 袁稳沉, 等. 重型动力触探轴向冲击力与锤击能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(1): 201~208. (SHI Lei, FU Shao-jun, YUAN Wen-chen, et al. Experimental study on axial impacting force and hammer impacting energy in rod of heavy dynamic penetration test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(1): 201~208. (in Chinese))

- [12] 左永振, 赵 娜. 基于模型试验的重型动力触探杆长修正系数研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增刊 2): 178 - 183.  
(ZUO Yong-zhen, ZHAO Na. Model tests on modified coefficient of heavy dynamic penetration rod length[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(S2): 178 - 183. (in Chinese))
- [13] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 2010. (Code for Seismic Design Of Buildings: GB 50011—2010[S]. 2010. (in Chinese))
- [14] YOUD T L, IDRIS I M, RONALD D A, et al. Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(10): 817 - 833.
- [15] IDRIS I M, BOULANGER R W. SPT-based liquefaction triggering procedures[R]. Davis: University of California at Davis, 2010.
- [16] SEED H, TOKIMATSU K, HARDER L, et al. Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluation[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111: 1425 - 1445.
- [17] CAO Z Z, YOUD T L, YUAN X M. Chinese dynamic penetration test for liquefaction evaluation in gravelly soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(8): 1320 - 1333.
- [18] 曹振中, 刘荟达, 袁晓铭, 等. 基于动力触探的砾性土液化判别方法通用性研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(1): 163 - 169. (CAO Zhen-zhong, LIU Hui-da, YUAN Xiao-ming, et al. Reliability of Chinese dynamic penetration test for liquefaction evaluation of gravelly soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(1): 163 - 169. (in Chinese))

## 第 29 届全国土工测试学术研讨会通知 (2020 年 7 月 18, 19 日, 呼和浩特) 第 1 号通知

**主办单位:** 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会, 中国水利学会岩土力学专业委员会。

**承办单位:** 内蒙古工业大学等。

**协办单位:** 《岩土工程学报》编委会等。

**大会邀请及主题:** 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会, 中国水利学会岩土力学专业委员会拟定于 2020 年 7 月在呼和浩特召开“第 29 届全国土工测试学术研讨会”, 会议主题: “岩土工程勘察技术及土工测试新技术、新方法”。中国土木工程学会土力学及岩土工程分会, 中国水利学会岩土力学专业委员会邀请全国相关学科的专家、学者、科技工作者与工程技术人员, 特别是青年岩土工程工作者踊跃撰稿, 集聚呼和浩特, 围绕会议主题探讨与交流土工测试最新研究成果与实践经验。

**会议要点:** 本次学术研讨会组织委员会、学术委员会由承办、协办单位, 学会专委会专家组成。会议将邀请国内著名土工测试专家进行特邀报告和主题报告, 并进行新编《土工试验方法标准》(GB/T50123—2019) 宣贯。

**会议专题:** ①岩土工程勘察技术; ②土基本性质测试; ③

土工物理模型试验; ④土工原测试技术; ⑤现场土工监测技术; ⑥环境土工测试技术; ⑦特殊土性质测试技术; ⑧土工微观测试新技术; ⑨土工测试新型技术设备。

**会议论文与出版:** 会议投稿论文要求为原创、未公开发表的内容, 论文篇幅一般在 5 页以内, 格式请参考《岩土工程学报》。会议期间将通过投票遴选优秀论文推荐到《岩土工程学报》(增刊)(EI 收录)、《地下空间与工程学报》、《内蒙古农业大学学报》、《内蒙古科技大学学报》、《内蒙古工业大学学报》其他论文将在论文集中刊出。

**投稿邮箱:** geotest2020@163.com。

**重要日期:** ①2019 年 12 月 30 日前提交论文全文; ②2020 年 2 月 15 日前返回论文录用通知; ③2020 年 3 月 15 日前返回修改后论文。

**会议联系方式:** 地址: 内蒙古呼和浩特市新城区爱民街 49 号内蒙古工业大学土木工程学院, 邮政编码: 010051, 联系人: 刘俊芳: 18647964316; 杜强: 15560924010; 马建国: 18847187706。

(大会组委会 供稿)