

对比分析标贯与重型圆锥动力触探成果

王建恩

广州开发区建设工程检测中心有限公司

摘要:为研究标准贯入试验与重型动力触探试验成果之间的相互关系,通过针对两种现场试验方法的基本原理、现场操作流程与适用范围进行对比,整合典型工程案例进行两种试验方法对应试验击数的比较分析,引入回归分析方法初步判定标贯试验击数为重型圆锥动力试验击数的2倍,且该试验参数将直接影响地基承载力特征值,在工程实践环节可直接利用换算公式进行测试成果检验与校核,更好地为同类岩土工程勘察及生产活动提供参考依据。

关键词:标准贯入;动力触探;锤击数;对比分析;适用范围;相互关系

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.10.011

引言

标准贯入试验与重型动力触探试验均为岩土工程勘察中的常用原位测试方法,二者在适用范围上存在一定差异,标贯试验法适用于砂土、粉土、黏性土花岗岩残积土、全风化及强风化花岗岩等地层,重型圆锥动力法适用于黏性土、粉土、砂土、碎石土、极软岩等天然地基及其处理土地基。在现场测试环节,应用两种方法均可实现对土层性质、土壤状态与地基承载力的判断,但现有工程实践中受制于钻杆长度、钻孔深度等参数的影响,在试验操作过程中常涉及一定的能量损失现象,将削弱两种方法贯入击数实测结果的准确性,对此还需引入修正方法进行地基承载力评价,为提高原位测试结果准确性及指导岩土工程勘察实践提供现实借鉴意义。

一、现场试验方法

(一) 标准贯入方法

参考DBJ/T 15-60-2019《建筑地基基础检测规范》,试验设备包含落锤(质量 63.5 ± 0.5 kg、落距 76 ± 2 cm),贯入器由对开管(长 >500 mm、外径为 51 ± 5 mm、内径为 35 ± 1 mm)和管靴(长 $50 \sim 76$ mm、刃口角度 $18 \sim 20^\circ$ 、刃口单刃厚度 1.6 mm)组成,钻杆(直径 $42/50$ mm、相对弯曲 $<5/1000$),穿心锤导向杆(相对弯曲 $<1/1000$)。在工程现场采用回转钻进试验孔,利用重 63.5 ± 0.5 kg的锤从 76 ± 2 cm高处自动脱钩自由落锤方式,将标准规格的贯入器打入钻孔底部的土体内部,锤击速率 <30 击/min,预打 15 cm后,开始记录每打入 10 cm的锤击数,累计打入 30 cm的锤击数为标准贯入试验实测锤击数,对贯入器中的土样进行岩土性状鉴别,

根据标准贯入修正锤击数推定地基承载力^[1]。

(二) 重型动力触探

采用自动脱钩的自由落锤方式进行试验,利用 63.5 ± 0.5 kg落锤以 $15 \sim 30$ 击/min速率将规格、尺寸、形状一定的触探头击入土中,重型动力触探锤落距为 76 mm,根据贯入锤击数 $N_{63.5}$ 判定土层特征、工程性质等信息^[2]。基于能量平衡法原理建立试验模型,将穿心锤下落能量记为 E_m ,贯入器贯入土中克服杆侧壁摩擦阻力所消耗的能量为 E_f ,锤与触探器碰撞产生的能量损耗为 E_k ,触探器、土体塑性变形以及土体弹性变形所消耗能量分别为 E_c 、 E_p 和 E_e ,则一次锤击作用下的能量转换关系表示为:

$$E_m = E_f + E_k + E_c + E_p + E_e$$

在贯入指标分析上,主要取决于触探头贯入地基土内一定深度所耗的锤击数 $N_{63.5}$ 或动贯入阻力 q_d 及贯入深度 D ^[3]。基于牛顿撞击理论中的非弹性碰撞情境,假定在绝对非弹性碰撞情况下将弹性变形所消耗的能量忽略不计,已知落锤质量为 M ,锤下落高度为 H ,触探头及杆件质量为 m ,圆锥探头截面积为 A ,贯入度为 e ($e=D/N_{63.5}$),重力加速度 g (取值为 9.81m/s^2),则动贯入阻力的计算公式为:

$$q_d = \frac{M}{M+m} \cdot \frac{M \cdot g \cdot H}{A \cdot e}$$

其中 M 、 m 、 A 、 h 均为常数,在一定贯入深度 Δs 范围内, q_d 与 $N_{63.5}$ 成正比,用于衡量试验区域土体的工程性质,由此确认在一定贯入深度条件下,选取一定质量的落锤以规定落距自由下落,将探头贯入土中,则锤击数可直接反映出试验土层的密实度、物理力学性质等参数^[4]。但在应用上述计算公式时需注意一定限制条件,包含将圆锥动力触探杆倾斜度控制在 2% 以内,每贯入 10 cm记录试验点深度和锤击数,当连续三次锤击数 >50 击时即可终止试验等。

二、两种方法适用范围与测试结果比较

(一) 适用范围

标准贯入试验法与重型动力触探法同属于工程勘察领域的常用原位测试方法,其中标准贯入试验法适用于黏性土、砂类土的原位测试,重型动力触探法常用于对砂类土、碎石土进行测试,两种方法均以贯入锤击数作为评价指标,用于对测试地层性质、物理力学特征、土层密实度、土壤状态等指标进行定性分析。同时,两种

方法同样满足量化评价需求，例如在标准贯入试验中获取标准贯入击数，结合相关技术规程计算出黏性土、粉土、粉/细/中/粗砂对应的地基承载力特征值，用于判断不同地层的地震液化等特性；在重型动力触探试验中获取锤击数，根据相应规范获得砂土、碎石土的地基承载力特征值、弹塑性变形模量、内摩擦角等关键参数，并完成桩端承载力检验，判断地基处理效果等^[5]。从实际应用角度出发，两种测试方法的主要区别在于标贯法适用于颗粒粒径小、硬度小的地层，重型圆锥动力法适用于颗粒粒径大、硬度偏大的地层。重型圆锥动力触探相对于标准贯入试验，试验设备轻巧，测试速度快、费

用较低。

(二) 工程实例分析

为研究标准贯入试验与重型动力触探试验之间的相关性，拟整合工程实例与岩土勘察实践经验，选定4个有代表性的工程案例作为研究背景，在不同工程建设区域尽量选择同一土层、相邻近深度的同一钻孔内2个试验位进行两种试验方法的测试结果比较分析，当遇到2个试验深度重合的情况，则以原孔位为基准在邻近处重新开孔，用于在地面开展连续性重型动力触探试验（测试结果如表1所示）。

(三) 测试结果比较

表1 两种试验方法的工程实例数据

工程地点	地层特征	标贯试验击数				重型圆锥动力击数			
		深度/m	平均值	修正值N'	f' _{ak} (kPa)	深度/m	平均值	修正值	f' _{ak1} (kPa)
YLSL	粉细砂	17.20~17.50	12.0	8.6	121	19.70~20.20	7.4	5.2	130
	中粗砂	整层统计	12.3	8.8	159	整层统计	7.1	5.1	202
GSGL	填土	整层统计	6.2	5.95	174	整层统计	3.0	2.9	147
PBL	填土	整层统计	9.3	9.09	241	整层统计	5.4	5.2	216
YJKSL	杂填土	整层统计	10.0	9.3	246	整层统计	4.2	4.1	183
	中粗砂	3.55~3.85	12.0	11.1	188	2.10~5.50	3.5	3.4	132
		7.75~8.05	17.0	14.4	210	6.60~8.50	8.9	7.5	300
		11.65~14.35	26.0	20.25	252	9.00~12.70	14.4	10.4	>400
		6.55~6.85	11.0	9.5	171	5.90~8.70	7.6	6.6	264
	砾砂	12.00~13.70	25.33	20.2	252	7.90~13.30	12.1	9.2	368
可塑粉质黏土	6.35~6.65	12.0	10.4	248	3.80~7.90	5.3	4.8	204	

注：表中“整层统计”指对土层标贯击数/重型圆锥动力击数取平均值。

1. N与N_{63.5}测试击数

整合上述工程实例中应用两种方法获取的测试结果进行线性回归分析，如图1、图2所示，其中X轴为重型圆锥动力击数实测值、Y轴为标贯击数实测值。

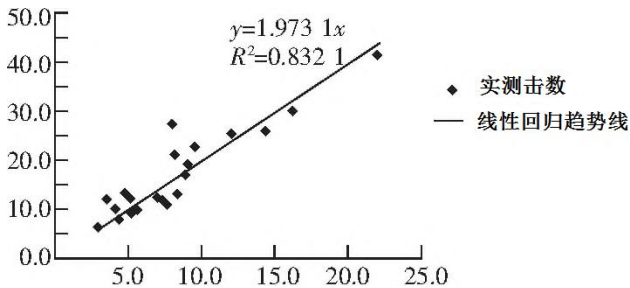


图1 标贯击数与重型圆锥动力击数实测值的回归分析结果

从中可以发现，标贯击数实测值约为重型圆锥动力击数实测值的1.973倍，经修正后两种试验方法的击数相差倍数调整为2.089倍，由此生成以下结论：（1）整合实测结果与修正值进行比较分析，得出标准贯入试验击数约为重型动力触探试验击数的2倍；（2）受样本数据量的限制，观察回归分析结果可知试验数据均具有一

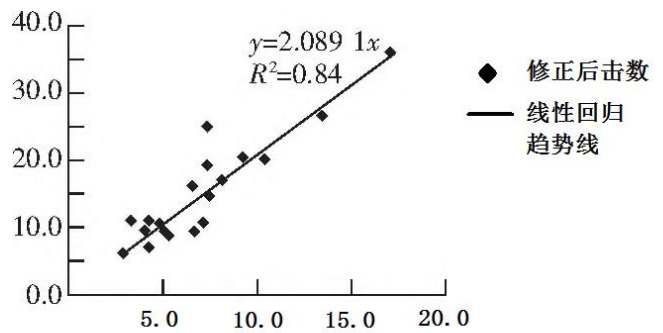


图2 修正后标贯击数与重型圆锥动力击数实测值的回归分析结果

定离散性特征，但所研究的两个变量之间的关系存在适应性，由此建立 $N=2N_{63.5}$ 的关系式。

2. 地基承载力特征值

根据表1所示的标准贯入试验击数与重型动力触探试验击数统计结果与两参数之间的换算关系式，确认不同地层对应的地基承载力特征值，并将数值进行比较分析。以粉细砂地层为例，已知标贯试验击数N对应的地基承载力特征值为 f_{ak} ，重型动力触探试验击数 $N_{63.5}$ 对应

的地基承载力特征值为 f_{ak1} ，观察 f_{ak1}/f_{ak} 的比值波动规律可知， f_{ak1}/f_{ak} 最大值为161%、最小值为81%，造成该现象的原因为地层性质、自然分布特征存在差异性，使得分布在不同区域的地层性质影响两种测试方法对应的测试结果准确度，并且由于两种原位测试方法在实际操作过程中存在人为因素干扰，加之试验设备、试验场地等变量条件，进一步增加测试结果的差值。

考虑到标贯试验击数与重型圆锥动力试验击数均会影响到地基承载力特征值，根据修正后的标贯试验击数 N' 与重型动力触探试验击数 $N'_{63.5}$ ，计算修正后两种试验方法的地基承载力特征值比值 f'_{ak1}/f'_{ak} 。整合试验结果可以看出，相较于 f_{ak1}/f_{ak} 其波动幅度明显减小，其中在重型动力触探试验击数 ≤ 10 次的条件下，整体变化稳定；待重型动力触探试验击数 > 10 次后， f'_{ak1}/f'_{ak} 的比值始终低于100%；根据现行规范中利用重型动力触探试验击数确认地基承载力特征值的规定，其中并未注明 $N_{63.5} > 10$ 次情况下的地基承载力限值取值范围要求，因此在 $N_{63.5} > 10$ 次时粉细砂地层的承载力特征值拟取上限300kPa，由此推断出在重型动力触探试验击数超出10次时，原以承载力特征值为基准进行两试验击数换算的关系式不成立； $N'_{63.5}/N_{63.5}$ 的比值同样保持稳定变化关系。

三、标贯与重型圆锥动力击数的相互关系

(一) 建立公式

将上述变量关系的推导过程进行总结，正式建立标贯试验击数与重型圆锥动力试验击数之间的换算关系式。将修正后标贯击数实测值记为 N' ，重型圆锥动力击数实测值记为 $N'_{63.5}$ ，建立如下关系式：

$$N'_{63.5} = \frac{1.5N'}{3}$$

其中以标贯击数为参考，记录标贯击数测试结果除以3，再取贯入深度每达到10cm所耗击数的平均值乘以1.5倍，最终获得修正后重型圆锥动力击数的实测值，即 $N' = 2N'_{63.5}$ 。

(二) 相互关系分析

根据工程实践参数检验结果可知，标贯试验击数约为重型动力触探试验击数的2倍，二者之间具有一定比例关系，但两种方法适用范围同样存在明显差别，在试验方法实际应用环节还需明确以下要点：

其一，常规岩土工程所在场地的地层多由黏性土、粉/细/中/粗砂、砾砂、圆砾组成，地层分布带有一定规律，在不同地层开始钻孔时，对于由黏性土到砾砂的地层宜采用标贯试验方法，对于另一部分砾砂层、圆砾层以及少部分杂填土层则适用于重型圆锥动力试验方

法，可获取相对更优的测试结果。

其二，由于本区范围内不同地区的地层性质、土壤分布类型存在明显差异，因此还需结合实际区域特征进行两种测试方法的选择与应用，并建立击数、地基承载力特征值之间的可靠换算关系。

其三，重型圆锥动力试验方法常采用分段贯入模式，在连续贯入试验过程中各段贯入深度无明确要求，但根据工程案例实测结果可知，由于圆锥形探头在贯入土层过程中将对砂土层产生一定压密与摩擦力，通常贯入深度每增加10cm、锤击次数呈同步增加趋势，由此推断出贯入深度越大则地基承载力越高。在实际开展贯入试验环节，还需明确不同贯入试验方法的贯入深度与地基承载力数值间的相关性，在黏性土、杂填土中重型动弹法与标贯法对应的承载力比值约为0.2~0.3，平均值为0.25；在砂土、碎石土中比值介于1.3~3.7范围内，平均值为2.1，通过选择适应土层的测试方法保证测试结果的准确度。

结论

通过整合理论分析与工程实例结果进行标准贯入试验、重型动力触探试验两种方法测试结果的比较分析，从中推断出标贯试验击数约为重型圆锥动力试验击数2倍的关系式，并经由实际数据计算实现对经验公式的检验，证明上述公式及变量关系成立。在此基础上，未来在实际工程勘察与生产作业环节，还需结合实际地层类型、人工操作及外界环境等干扰因素进行测试结果的对比分析，在现场测试条件不允许的情况下根据换算关系式进行试验击数的有效换算，为生产实践提供可靠辅助工具，进一步提高原位测试结果的准确度，为同类工程勘察、地基承载力估算等项目实施提供有效示范经验。

参考文献

- [1] 宋国文, 李大华, 韩孟君. 粉土的工程特性与标贯击数分析[J]. 佳木斯大学学报: 自然科学版, 2022, (02): 6-9+82.
- [2] 陈靖. 浅谈重型动力触探在填土、卵石土地基勘察中的应用[J]. 西部资源, 2020, (03): 146-148.
- [3] 张旭明, 王观. 重型动力触探检测地基承载力技术[J]. 中国航班, 2020, (09): 156.
- [4] 童伟. 土岩复合盾构机在无水高标贯击数粉土和黏土地层中的施工技术研究[J]. 施工技术, 2020, (19): 83-86+92.
- [5] 罗珍珍. 某工程场地花岗岩残积土抗剪强度与标贯试验校正击数线性相关分析探讨[J]. 西部资源, 2020, (01): 89-91.