

文章编号: 1674—8247(2017)06—0084—05

## 厦门残积土力学性质与标贯 $N$ 值相关性分析

刘 毅 李建强 邹广明

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘 要:**文章以厦门地铁 1 号线残积砂质黏性土为研究对象,通过标贯试验和室内土工试验,对残积砂质黏性土标贯试验指标  $N$  值与部分物理力学参数之间的相关性进行了研究,并给出了线性拟合关系式及其相关系数。研究表明:(1)厦门地铁 1 号线残积砂质黏性土内聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$ 、压缩模量  $E_{s(1-2 \text{ kPa})}$ 、地基承载力  $f_k$ 、无侧限抗压强度  $q_u$  与标贯  $N$  值成正比关系;(2)厦门地铁 1 号线残积砂质黏性土液性指数  $I_L$ 、压缩系数  $\alpha_{(1-2 \text{ kPa})}$  与标贯  $N$  值成反比关系。

**关键词:**厦门轨道交通; 残积土; 物理力学参数; 标贯  $N$  值; 相关性

中图分类号:P642. 11<sup>+</sup>4

文献标志码:A

## Correlation Analysis between Mechanical Property and SPT Value $N$ of Residual Soil in Xiamen

LIU Yi LI Jianqiang ZOU Guangming

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Taking the residual sandy cohesive soil of Xiamen Metro Line 1 as the research object, the correlation between Standard Penetration Test (SPT) index value  $N$  and some physical and partial physico-mechanical parameters of residual sandy cohesive soil is studied by Standard Penetration Test (SPT) and Indoor Soil Test and the linear fitting relations and the relevant coefficient are also deduced from the study. The result of the study shows that for the Xiamen Metro Line 1 the value of  $N$  for SPT is in direct proportion to the cohesion  $c$ , angle of internal friction  $\varphi$ , modulus of compressibility  $E_{s(1-2 \text{ kPa})}$ , ground bearing capacity  $f_k$ , and the unconfined compressive strength  $q_u$  of the residual soil, while it is inversely proportional to the liquidity index  $I_L$  and coefficient of compressibility  $\alpha_{(1-2 \text{ kPa})}$ .

**Key words:** Xiamen rail transit; residual soil; physico-mechanical parameters; SPT Value  $N$ ; correlation

残积砂质黏性土在厦门地铁 1 号线工程勘察范围内均有分布,厚度 5 ~ 40 m,是一种特殊性土,根据现场勘察情况显示,土芯手捏易散碎,遇水软化,易崩解,不均匀性及各向异性。其工程特点具有较高的孔隙比,压缩系数偏高,压缩模量偏低,扰动后强度降低等特点。获取较准确的残积土物理力学参数是厦门轨道交通岩土工程勘察重要的工作内容。为了获得较准确的残积土的物理力学参数指标,勘察过程中多采用原位测试的方法获得。本文尝试将厦门地区地铁 1 号线

中的大量的标准贯入  $N$  值与残积土室内试验测试数据进行相关性分析,找出它们之间的内在联系,并建立相应的线性关系式。对厦门地区地铁后续工程及周边地区的岩土体参数研究提供借鉴。

### 1 厦门地铁 1 号线工程概况

厦门轨道交通 1 号线一期工程起于中山路西端,终止于岩内综合维修基地,线路整体呈“东—北—西—北”长度约为 32.64 km。沿线主要出露地层为上

收稿日期:2017-03-27

作者简介:刘毅(1978-),男,工程师。

引文格式:刘毅,李建强,邹广明. 厦门残积土力学性质与标贯  $N$  值相关性分析[J]. 高速铁路技术,2017,8(6):84-88.

LIU Yi, LI Jianqiang, ZOU Guangming. Correlation Analysis between Mechanical Property and SPT Value  $N$  of Residual Soil in Xiamen [J]. High Speed Railway Technology, 2017, 8(6): 84-88.

覆人工填筑土(素填土、杂填土、抛填石等)、海积层(淤泥、砂层)、冲洪积层(黏性土、砂层)、残积黏性土层,下伏基岩主要为花岗岩、凝灰熔岩、凝灰岩、辉绿岩等。其中花岗岩残积土主要为燕山期花岗岩残积砂质黏性土层,其风化残积砂质黏性土厚度可达70 m,是厦门地铁工程的主要岩土层。

2 研究对象

本文依厦门轨道交通1号线为研究内容,该段属亚热带海洋性气候,地形较为平缓,局部稍有起伏,以坡残积台地为主。根据区域地质资料及本工程岩土工程勘察资料,并结合本次室内试验统计结果进行综合分析,勘察区内上覆地层按沉积年代先后及工程性质、塑性状态,主要分为一般性黏性土、残积土、砂土3类。由于残积土分布广泛,厚度、埋深变化较大,且是一种特殊类土,本文选取残积土中的可塑状残积砂质黏性土和硬塑状残积砂质黏性土为研究对象。

3 数据选取依据

残积土含有大量粗颗粒,不均匀性和各向异性,压缩性大,结构性强,受扰动后强度降幅大,因此通过原位测试获得残积土的物理力学参数指标尤为重要<sup>[2]</sup>。

岩土工程勘察过程中,主要采用的原位测试试验有标准贯入试验、动力触探及旁压试验等,其中标准贯入试验操作简单,快捷,数据整理具有普遍性。但是关于实测标贯击数的杆长修正问题,目前国内外尚无一致意见。根据GB 50307-2012《城市轨道交通岩土工程勘察规范》规定,标准贯入试验成果,采用修正值,按数理统计方法进行统计<sup>[3]</sup>。

厦门地铁1号线详勘阶段共实施钻孔1150个,进尺45265 m,标贯试验共3440次。钻探过程中,进行SPT前先取原状土样(共取1596组),用来进行土工试验。整个地基土除表层的人工填土外,主要分为6个地层,分别为软塑状粉质黏土、可塑状粉质黏土、硬塑状粉质黏土、中砂、可塑状残积砂质黏性土、硬塑状残积砂质黏性土。本文仅选取可塑状残积砂质黏性土、硬塑状残积砂质黏性土为研究对象,将标准贯入修正值与标贯测试前取的原状土样进行室内试验获得的物理力学参数进行线性相关性分析。将室内试验获得的液性指数、内聚力( $C$ ),内摩擦角( $\varphi$ ),压缩系数 $\alpha_{(1-2\text{ kPa})}$ ,压缩模量 $E_{s(1-2\text{ kPa})}$ ,地基承载力( $f_k$ ),无侧限抗压强度( $q_u$ )与标贯N值按层进行数理统计,其统计结果如表1所示。

表1 地基土物理力学与标贯击数(N值)统计表

土层名称	土工试验	样品个数	统计值				
			平均值	最大值	最小值	标准差	变异系数
可塑状残积砂质黏性土	液性指数 $I_L$	90	0.53	0.94	0.10	0.16	0.31
	内聚力 $C$	64	28.16	41.10	17.00	4.29	0.15
	内摩擦角 $\varphi$	63	18.60	24.70	11.60	2.67	0.14
	压缩系数 $\alpha_{(1-2\text{ kPa})}$	69	0.41	0.78	0.18	0.11	0.26
	压缩模量 $E_{s(1-2\text{ kPa})}$	70	4.81	8.64	2.17	1.11	0.23
	地基承载力 $f_k$	29	161.6	440.00	185.00	80.90	0.26
	无侧限抗压强度 $q_u$	29	349.0	321.44	188.86	32.36	0.13
	标贯 $N$ 值	132	15.59	25.00	9.00	24.60	0.22
硬塑状残积砂质黏性土	液性指数 $I_L$	60	0.48	0.79	0.08	0.18	0.38
	粘聚力 $C$	68	29.57	54.00	15.00	8.25	0.28
	内摩擦角 $\varphi$	67	17.31	25.70	12.10	3.24	0.19
	压缩系数 $\alpha_{(1-2\text{ kPa})}$	64	0.43	0.70	0.11	0.14	0.32
	压缩模量 $E_{s(1-2\text{ kPa})}$	73	4.52	13.68	1.98	1.85	0.41
	地基承载力 $f_k$	43	547.30	400.00	640.00	66.94	0.12
	无侧限抗压强度 $q_u$	89	246.43	188.86	321.44	32.36	0.13
	标贯 $N$ 值	171	23.82	47.00	17.00	4.98	0.21

4 残积土部分物理及力学参数与标贯N值相关性分析

4.1 液性指数与标贯N值相关关系

液性指数是黏性土,一项重要的物理参数,是判断土的软硬状态,表示天然含水率与界限含水率相对关系的指标。同一种土,含水量越大则液性指数越大,土

质越软,但仅有含水率的绝对值却不能确切地说明土处于什么状态。含水率相同的土样,若液限不同,那么土体所处的状态可能不同。因此,需要有一个能表示含水率与界限含水率相对关系的指标——液性指数。根据GB 50307-2012《城市轨道交通岩土工程勘察规范》规定,黏性土状态应根据塑性指数 $I_L$ 划分为坚硬、硬塑、可塑、软塑和流塑。 $I_L$ 越小,土体越硬。 $0 < I_L <$

0.25 为硬塑状,  $0.25 < I_L < 0.75$  为可塑状。

$$I_L = \frac{\omega - \omega_p}{\omega_L - \omega_p} \quad (1)$$

式中:  $\omega$ 、 $\omega_p$ 、 $\omega_L$ ——分别为土的含水率、塑限、液限。

研究残积土液性指数与标贯  $N$  值之间的关系,如图1所示,可以利用标贯试验  $N$  值判断残积土的状态。

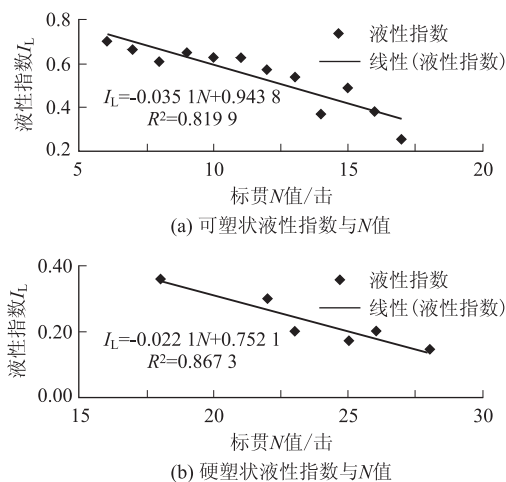


图1 液性指数  $I_L$  与标贯  $N$  值相关关系图

由图1(a)可见,  $0.25 < I_L < 0.75$  范围内可塑状残积砂质黏粘土,修正标贯击数  $N$  值 ( $5 \leq N \leq 17.5$ ) 范围内,可塑状残积砂质黏性土液性指数与标贯  $N$  值成反比关系,线性相关性很好,  $I_L = -0.0351N + 0.9438$ ,  $R^2$  为 0.82。由图1(b)可见,  $0 < I_L < 0.30$  范围硬塑状残积砂质黏粘土,修正标贯击数  $N$  值 ( $17.5 \leq N \leq 30$ ) 范围内,硬塑状残积砂质黏性土液性指数与标贯  $N$  值成反比关系,线性相关性很好,  $I_L = -0.0221N + 0.7521$ ,  $R^2$  为 0.87。

#### 4.2 内聚力 $C$ 、内摩擦角 $\varphi$ 与标贯 $N$ 值相关关系

内聚力主要是由于土颗粒间水膜受到相邻土颗粒之间的电分子引力而形成的,当土被压密时,土颗粒间的距离减小,内聚力随之增大。内摩擦角反应了残积土的摩擦性,一般分为土颗粒的表面摩擦力、颗粒间的嵌入和联锁作用产生的咬合力。内聚力、内摩擦角是地铁工法勘察中(明挖法、矿山法、盾构法)均需要提供的两个力学参数指标,是边坡、基坑支护设计中两个重要的力学参数指标。研究内聚力  $C$ 、内摩擦角  $\varphi$  与标贯  $N$  值之间的相关关系,能很好的为工法选择,支护方式选择提供力学参数指标。内聚力与标贯  $N$  值之间的相关关系如图2所示,内摩擦角与标贯  $N$  值之间的相关关系如图3所示。

由图2(a)可见,  $25 \text{ kPa} < C < 35 \text{ kPa}$  范围内可塑

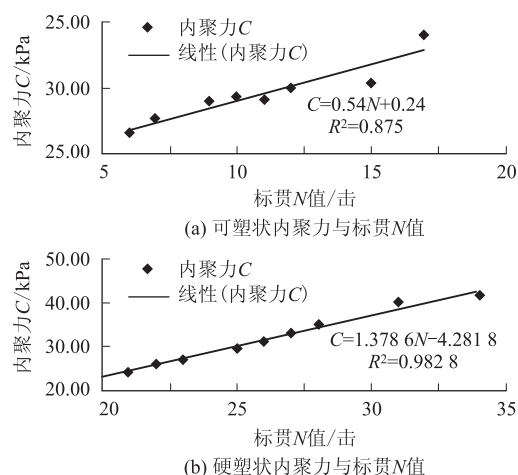


图2 内聚力与标贯  $N$  值相关关系图

状残积砂质黏粘土,修正标贯击数  $N$  值 ( $5 \leq N \leq 17.5$ ) 范围内,可塑状残积砂质黏性土内聚力与标贯  $N$  值成正比关系,线性相关性很好,  $C = 0.54N + 0.24$ ,  $R^2$  为 0.88。由图2(b)可见,  $25 \text{ kPa} < C < 45 \text{ kPa}$  范围内硬塑状残积砂质黏粘土,修正标贯击数  $N$  值 ( $20 \leq N \leq 35$ ) 范围内,硬塑状残积砂质黏性土内聚力与标贯  $N$  值成正比关系,线性相关性很好,  $C = 1.3786N - 4.2818$ ,  $R^2$  为 0.98。

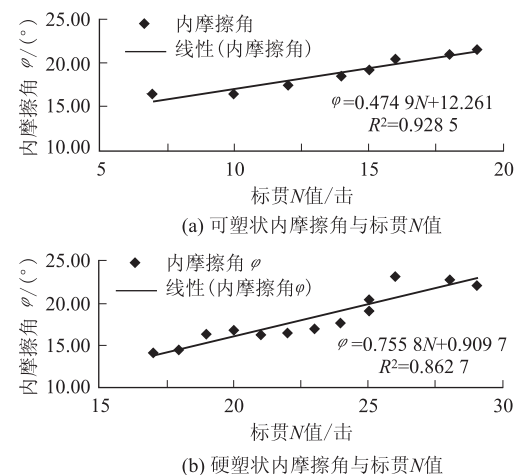


图3 内摩擦角与标贯  $N$  值相关关系图

由图3(a)可见,  $15^\circ < \varphi < 22.5^\circ$  范围内可塑状残积砂质黏粘土,修正标贯击数  $N$  值 ( $5 \leq N \leq 20$ ) 范围内,可塑状残积砂质黏性土内摩擦角与标贯  $N$  值成正比关系,线性相关性很好,  $\varphi = 0.4749N + 12.261$ ,  $R^2$  为 0.93。由图3(b)可见,  $12.5^\circ < \varphi < 22.5^\circ$  范围内硬塑状残积砂质黏粘土,修正标贯击数  $N$  值 ( $15 \leq N \leq 30$ ) 范围内,硬塑状残积砂质黏性土内摩擦角与标贯  $N$  值成正比关系,线性相关性很好,  $\varphi = 0.7558N + 0.9097$ ,  $R^2$  为 0.86。

#### 4.3 压缩模量 $E_{s(1-2\text{ kPa})}$ 、压缩系数 $\alpha_{(1-2\text{ kPa})}$ 与标贯 $N$ 值相关关系

土的压缩模量又称侧限变形模量,或侧限压缩模量,是土在无侧向变形下竖向变形条件下竖向应力与竖向应变二者的比值。压缩模量越大,表明土在同一压力变化范围内的压缩变形越小,则土的压缩性越低。压缩系数是  $e-p$  曲线中某一压力区段的割线斜率。压缩系数越大,表明在同一压力变化范围内土的孔隙比减少的多,则土的压缩性越高。压缩模量与压缩系数是评价土的压缩性和计算地基变形的重要指标,是进行地基和建筑物沉降计算时需要确定的一个重要土性参数,也是盾构法勘察需要提供的一项重要力学参数。研究压缩模量、压缩系数与标贯  $N$  值之间的关系,能为计算工程沉降,盾构法合理性等提供更合理的力学参数指标。压缩模量与标贯  $N$  值之间的相关关系如图4所示。压缩系数与标贯  $N$  值之间的相关关系如图5所示。

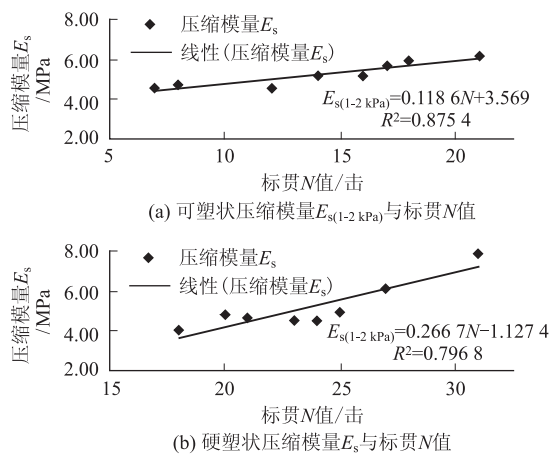


图4 压缩模量  $E_s$  与标贯  $N$  值相关关系图

由图4(a)可见,可塑状残积砂质黏粘土,修正标贯击数  $N$  值( $5 \leq N \leq 20$ )范围内,可塑状残积砂质黏性土压缩模量  $E_{s(1-2\text{ kPa})}$  与标贯  $N$  值成正比关系,线性相关性很好,  $E_{s(1-2\text{ kPa})} = 0.1186N + 3.569$ ,  $R^2$  为 0.88; 由图4(b)可见,硬塑状残积砂质黏粘土,修正标贯击数  $N$  值( $15 \leq N \leq 35$ )范围内,硬塑状残积砂质黏性土压缩模量  $E_{s(1-2\text{ kPa})}$  与标贯  $N$  值成正比关系,线性相关性很好,  $E_{s(1-2\text{ kPa})} = 0.2667N - 1.1274$ ,  $R^2$  为 0.80。

由图5(a)可见,可塑状残积砂质黏粘土,修正标贯击数  $N$  值( $5 \leq N \leq 20$ )范围内,可塑状残积砂质黏性土压缩系数  $\alpha_{(1-2\text{ kPa})}$  与标贯  $N$  值成反比关系,线性相关性很好,  $\alpha_{(1-2\text{ kPa})} = -0.0112N + 0.5415$ ,  $R^2$  为 0.87; 由图5(b)可见,硬塑状残积砂质黏粘土,修正标贯击数  $N$  值( $15 \leq N \leq 35$ )范围内,硬塑状残积砂质黏

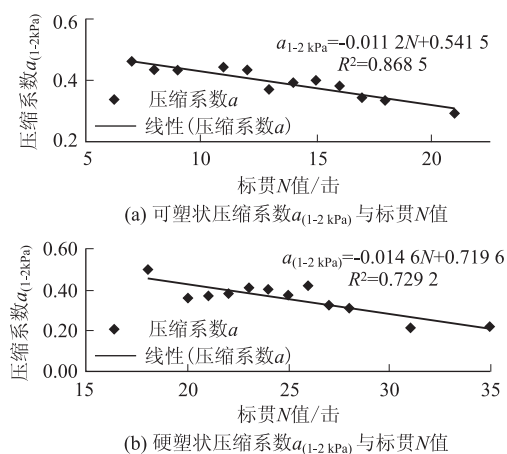


图5 压缩系数  $\alpha$  与标贯  $N$  值相关关系图

性土压缩系数  $\alpha_{(1-2\text{ kPa})}$  与标贯  $N$  值成反比关系,线性相关性很好,  $\alpha_{(1-2\text{ kPa})} = -0.0146N + 0.7196$ ,  $R^2$  为 0.73。

#### 4.4 地基承载力 $f_k$ 与标贯 $N$ 值相关关系

地基承载力指地基所能承受载荷的能力。地基承载力  $f_k$  一般可由载荷试验或其他原位测试获得,并结合工程实践经验等综合确定。地基承载力是岩土工程设计基础类型、基础宽度、基础深度等方面重要的参数。研究地基承载力  $f_k$  与标贯  $N$  值相关关系,为岩土工程基础设计提供更准确的地基承载力参数,合理确定基础类型。地基承载力  $f_k$  与标贯  $N$  值相关关系如图6示。

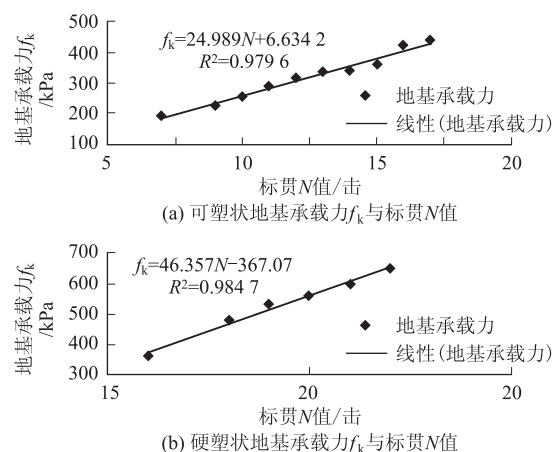


图6 地基承载力与标贯  $N$  值相关关系图

由图6(a)可见,可塑状残积砂质黏粘土,修正标贯击数  $N$  值( $5 \leq N \leq 20$ )范围内,可塑状残积砂质黏性土地基承载力  $f_k$  与标贯  $N$  值成正比关系,线性相关性很好,  $f_k = 24.989N + 6.6342$ ,  $R^2$  为 0.98; 由图6(b)可见,硬塑状残积砂质黏粘土,修正标贯击数  $N$  值( $15 \leq N \leq 25$ )范围内,硬塑状残积砂质黏性土地基承载力  $f_k$

与标贯  $N$  值成正比关系,线性相关性很好,  $f_k = 46.357N - 367.07$ ,  $R^2$  为 0.98。

#### 4.5 无侧限抗压强度 $q_u$ 与标贯 $N$ 值相关关系

无侧限抗压强度是土在侧面不受限制条件下,抵抗垂直压力的极限强度。无侧限抗压强度是地铁工法勘察中(明挖法、矿山法、盾构法)均需要提供的力学参数指标,也是边坡、基坑支护设计中一项重要的力学参数指标。研究无侧限抗压强度  $q_u$  与标贯  $N$  值之间的相关关系,能很好的为工法选择,支护方式选择提供力学参数指标。无侧限抗压强度  $q_u$  与标贯  $N$  值之间的相关关系如图 7 所示。

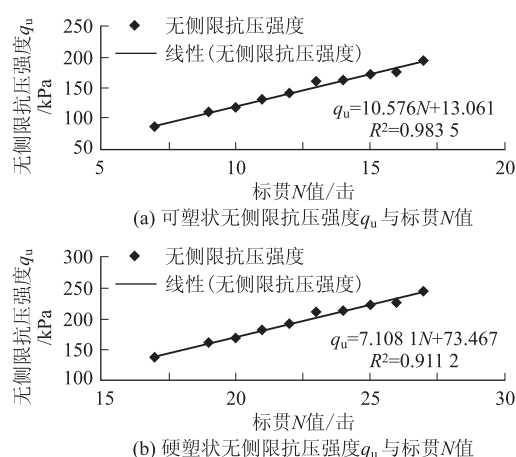


图 7 无侧限抗压强度  $q_u$  与标贯  $N$  值相关关系图

由图 7(a) 可见,可塑状残积砂质黏粘土,修正标贯击数  $N$  值( $5 \leq N \leq 20$ ) 范围内,可塑状残积砂质黏性土无侧限抗压强度  $q_u$  与标贯  $N$  值成正比关系,线性相关性很好,  $q_u = 10.576N + 13.061$ ,  $R^2$  为 0.98; 由图 7(b) 可见,硬塑状残积砂质黏粘土,修正标贯击数  $N$  值( $15 \leq N \leq 25$ ) 范围内,硬塑状残积砂质黏性土无侧限抗压强度  $q_u$  与标贯  $N$  值成正比关系,线性相关性很好,  $q_u = 7.108N + 73.467$ ,  $R^2$  为 0.91。

## 5 结论

(1) 实际工程勘察过程中, SPT 作为主要原位测试方法,测试残积土的承载力、密室程度等物理力学参数指标,在本文涉及的厦门地铁勘察中也不例外。但实际上,我们也可以根据标贯试验  $N$  值的相关性,间接地判定残积土的物理力学参数。

(2) 对厦门地铁残积土大量标贯  $N$  值和物理力学参数进行分析,找出它们之间的线性关系。残积砂质

黏粘土内聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$ 、压缩模量  $E_{s(1-2 \text{ kPa})}$ 、地基承载力  $f_k$ 、无侧限抗压强度  $q_u$  与标贯  $N$  值成正比关系;液性指数  $I_L$ 、压缩系数  $\alpha$  与标贯  $N$  值成反比关系。这对厦门地区后续工程岩土参数分析选取具有重要的借鉴作用。

(3) 本文研究的标贯  $N$  值与残积土的部分物理力学参数的相关关系主要为一元线性相关性分析,这种相关性尽管简捷实用,但其拟合精度不高。由于 SPT 设备、人员操作及取样、运输等原因导致部分物理力学参数拟合精度不高。实际工程勘察过程中,可结合本文统计的方法,对工程所在区域的地基土的物理力学参数,可以根据标贯  $N$  值进行辅助判定。该关系式也可作为评价厦门地区残积砂质黏性土物理力学参数的依据和残积土参数研究的资料积累,积累了依据标贯试验  $N$  值判定残积土物理力学参数指标的经验。

## 参考文献:

- [1] 郑勇. 厦门地区花岗岩残积土强度与变形特性研究[J]. 福建建设科技, 2012, 37(6): 17-19.  
ZHENG Yong. Granite Residual Soil Strength and Deformation Characteristics of Xiamen [J]. Fujian Construction Science & Technology, 2012, 37(6): 17-19.
- [2] 刘俊龙. 残积土工程特性的试验分析[J]. 工程勘察, 2005, 33(1): 40-42.  
LIU Junlong. Experimental Analysis on Engineering Characteristics of Residual Soil [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2005, 33(1): 40-42.
- [3] GB 50307-2012 城市轨道交通岩土工程勘察规范[S].  
GB 50307-2012 Code for Investigation of Geotechnical Engineering of Urban Rail Transit[S].
- [4] 常士骝, 张苏民, 王笃礼, 等. 工程地质手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.  
CHANG Shipiao, ZHANG Sumin, WANG Duli, et al. Engineering Geology Handbook [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.
- [5] 王钟琦, 孙广忠, 刘双光, 等. 岩土工程测试技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986.  
WANG Zhongqi, SUN Guangzhong, LIU Shuangguang, et al. Geotechnical Engineering Testing Technology [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1986.
- [6] 李智毅, 杨裕云. 工程地质学基础[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1983.  
LI Zhiyi, YANG Yuyun. Fundamentals of Engineering Geology [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1983.

(编辑: 赵立红 张红英)