



CPT 土分类方法在地基检测中的应用对比

梁小丛¹, 陈 胜¹, 谢小明²

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 中交交通基础工程环保与安全重点实验室, 广东 广州 510230 ;
2. 中交四航局第二工程有限公司, 广东 广州 510300)

摘要: 在地基处理设计中, 针对相应的工程场地, 采用合理的 CPT 土分类法进行砂性土和黏性土的准确划分对地基处理检测验收极为重要。通过搜集卡塔尔多哈地区 200 个 CPT 原位测试孔和邻近位置的 SPT 钻孔取样与室内土工试验, 对比分析 4 种基于 CPT 的土分类方法, 发现不同的土层分类法在颗粒级配上具有较为明显的分区, 但在区分砂性土和黏性土上, Robertson (1990) 最为准确, Robertson (1986) 次之; 而 Schmertmann 法和 Douglas 法砂性土划分范围较宽, 均将细颗粒含量高达 35% ~ 55% 黏性土划分为砂性土。

关键词: 地基处理检测; CPT; 土分类划分; 验收标准

中图分类号: U 652. 2 文献标志码: A 文章编号: 1002-4972 (2015) 03-0041-06

Comparative analysis of soil classifications based on CPT in ground improvement

LIANG Xiao-cong¹, CHEN Sheng¹, XIE Xiao-ming²

(1. CCCC Key Lab of Environment Protection & Safety in Foundation Engineering of Transportation,
CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;
2. The Second Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510300, China)

Abstract: The different acceptance criteria of ground improvement should be proposed for different stratum, especially for granular soil and cohesive soil. Therefore, it is important to use suitable soil classification method to classify the granular soil and cohesive soil. There are 200 CPT tests, SPT boreholes and laboratory tests carrying out in new Doha port project. Then the data will be analyzed and compared among four different soil classifications. It is shown that the different zone from four methods can reveal an apparent grain size distribution. But for the distinction of granular soil and cohesive soil, the Robertson (1990) method can give the best result and the Robertson (1986) takes second place. The Schmertmann and Douglas method give the worst result which will classify the cohesive soil with fine contents between 35% and 55% as granular soil.

Keywords: ground improvement verification; cone penetration test (CPT); soil classification; acceptant criteria

土层分类作为岩土工程勘察重要的部分, 其划分结果可以直接为岩土工程咨询、设计与施工提供基本的参考资料, 而结果的准确性则是关系到工程是否可靠的重要因素。土层分类的划分最准确和最直观的方式是采用传统的钻孔取样和室内土工试验的方法, 但采用传统的钻探方法, 往往由于工期的限制, 昂贵的工程费用以及场地的限制, 并不能广泛布置钻孔进行取样, 得到的地

层剖面具有一定的限制性。而静力触探 (CPT) 作为一种简单、快速连续、经济且可重复性高的原位测试, 通过贯入圆锥形探头获得不同土层锥尖贯入阻力 q_c 和侧壁摩阻力 f_s 参数来识别土体和划分土层, 已得到国内外工程界的广泛应用。20 世纪 80 年代前, 限于 CPT 探头技术发展, 大部分土层分类划分主要基于锥尖阻力 q_c 和摩阻比 R_f , 具有代表性的有 Schmertmann^[1] 法、Douglas 和

Olsen^[2]法。20 世纪 80 年代后,随着多功能 CPTU 测试技术的发展,发现锥尖阻力 q_c 在一定程度容易受到孔隙水压力的影响,因此利用孔隙水压力系数修正锥尖阻力能更好地获得土性参数,具有代表性的有 Robertson^[3]法、Robertson^[4]基于地层应力归一化后土分类方法。Jefferies 等^[5]为了简化应用 Robertson 方法,提出土类指数 I_c 指划分土层的分界。另外还有学者 Zhang Z 等^[6]基于概率模糊提出了新的土分类划分法。

1 CPT 土分类方法

基于静力触探原位测试试验进行土层的划分基本分为两大类,一类直接划分方法,根据不同土层锥尖阻力 q_c 和摩阻比 R_f 呈现出的不同趋势直接进行土层划分;另一大类间接划分法,则是根据 CPT 得到基本参数,同时还需要根据测试 CPTU 得到孔隙水压力,同时结合上覆地层有效应力进行修正和归一化处理后进行划分。尽管根据修正和归一化处理后能提供更可靠的土层划分方式,但由 Robertson^[7]分析得出,在检测深度较浅、上覆地层有效应力在 50 ~ 150 kPa 时,两大土层分类方法差别不大,但是间接处理方式需要在测试完之后才能进行处理,还同时需要得到土体的密度和地下水位条件。而直接分类方法,则可以直接在测试现场利用测试得到锥尖 q_c 和摩阻比 R_f 进行实时处理并划分土层,具有快速便捷性,因此本文主要分析对比直接划分法。

1.1 Schmertmann 土层分类法

Schmertmann 最初提出的土层划分见图 1,方法较为简单,且由于统计数据的有限性,土层划分存在一定的误差性。由 Tumay 根据 CPT 测试数据和钻孔取样进行对比修正,得到图 2 所示的土层划分图。

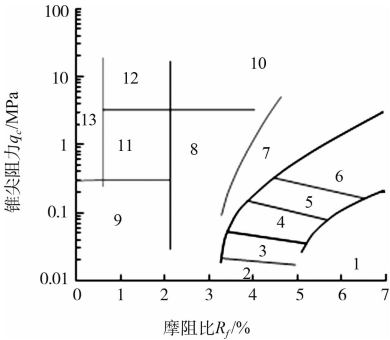
1.2 Douglas 土层分类法

Douglas 和 Olsen 在 1981 年提出的基于 CPT 土层分类法见图 3。相比 1981 年版本,图 4 的土层划分更为细致。此分类方法对应的锥尖阻力 q_{cn} 为根据上覆地层有效应力进行归一化后的锥尖阻力,

采用如下方程:

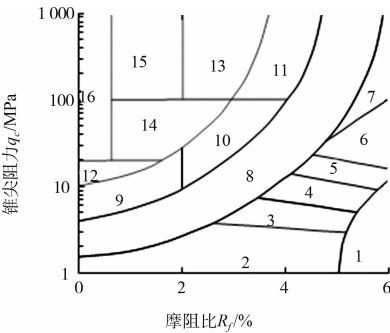
$$q_{cn}=0.096q_c(1-1.25\lg p'_o)$$
 (1)

式中: p'_o 为有效地层应力 (MPa); q_c 为锥尖阻力 (MPa)。



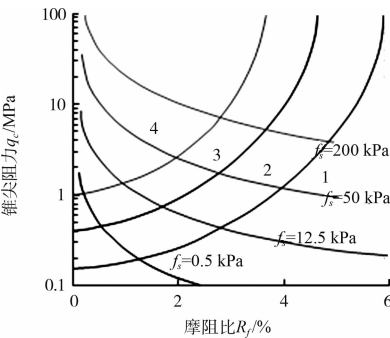
注: 1. 有机黏土和混合土, 2. 极软有机黏土, 3. 软有机黏土, 4. 硬塑有机黏土, 5. 坚硬有机黏土, 6. 敏感性、无裂隙无机黏土, 7. 砂质和粉质黏土, 8. 黏质砂和粉土, 9. 松散砂, 10. 粉土和砂混合物, 11. 砂, 12. 密实或胶结性砂, 13. 含贝壳碎屑砂或石灰石。

图 1 Schmertmann 初始土层分类



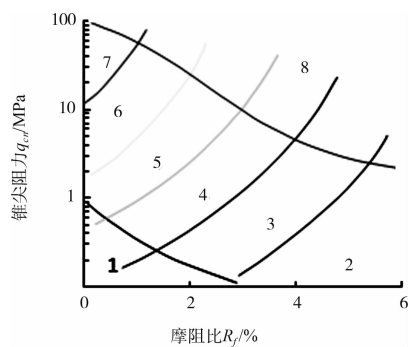
注: 1. 有机黏土, 2. 极软无机黏土, 3. 软塑无机黏土, 4. 硬塑无机黏土, 5. 坚硬无机黏土, 6. 极坚硬无机黏土, 7. 粉质黏土, 8. 砂质黏土, 9. 黏质砂, 10. 黏质砂和砂, 11. 黏质粉质砂, 12. 松散砂, 13. 粉质砂, 14. 砂, 15. 密实或胶结性砂, 16. 含贝壳碎屑砂或石灰石。

图 2 Schmertmann 修正土层分类



注: 1. 黏性细颗粒土, 2. 黏性和无黏性细颗粒土, 3. 无黏性粗颗粒和细颗粒土, 4. 无黏性粗颗粒土。

图 3 Douglas 和 Olsen (1981) 土层分类法

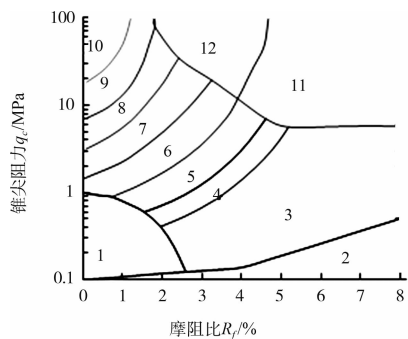


注: 1. 高敏感性土, 2. 黏土-有机黏土, 3. 黏质粉土-粉质黏土-黏土, 4. 砂质粉土-黏质粉土, 5. 粉质砂土-砂质粉土, 6. 砂-粉质砂, 7. 砂砾-砾砂-砂, 8. 超固结土或胶结性土。

图 4 Douglas(1984) 土层分类法

1.3 Robertson (1986) 直接土分类法

Robertson 在 1986 年根据修正锥尖阻力 q_t 和摩阻比 R_f 提出的土分类方法见图 5。尽管根据原图是基于修正后的锥尖阻力 q_t 进行土层分类, 但在砂土类地层修正后锥尖阻力和未修正前区别较小。因此 Robertson 建议在砂土地层可直接采用 q_c 和 f_s 划分土层, 共划分为 12 类。



注: 1. 灵敏性土, 2. 有机质土, 3. 黏土, 4. 粉质黏土-黏土, 5. 黏质粉土-粉质黏土, 6. 砂质粉土-黏质粉土, 7. 粉质砂-砂质粉土, 8. 砂-粉质砂, 9. 砂, 10. 砾砂-砂, 11. 极坚硬细粒土, 12. 砂-黏土质砂。

图 5 Robertson(1986) 土分类方法

1.4 Robertson (1990) 未归一化指数土分类法

Roberson 在 1986 年提出土层分类图标得到广泛认可应用后, 逐渐出现一个显著的问题, 伴随着检测深度增加, 同一土层在不同的检测深度划分到不同区域, 这主要是由于 CPT 检测参数 q_c 和 f_s 会伴随上覆地层有效应力的增加而相应地有所提高, 导致基于原有 q_c 和 R_f 的土层分类图进行划分土层会出现一定的误差, 因此国外许多学

对有效地层应力提出相应的修正公式。

Robertson 在 1990 提出基于 Wroth (1984) 归一化后参数锥尖阻力 Q_t 和摩阻比 F_r 的土层分类图, 并针对土层界限可以用一系列同心圆曲线进行拟合, 定义同心圆曲线为土类指数 I_c :

$$I_c = [(3.47 - \lg Q_t)^2 + (\lg F_r + 1.22)^2]^{0.5} \quad (2)$$

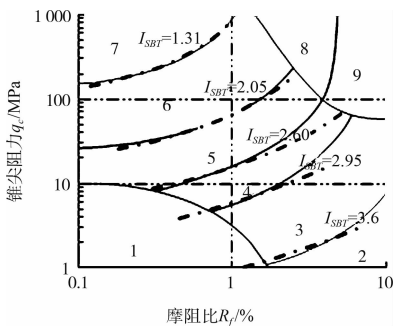
式中: Q_t 、 F_r 为锥尖阻力和摩阻比归一化参数^[6]。

由于此土层分类图应用还需要额外获得不同深度土层孔隙水压力和土体密度, 且只能原位测试后才能进行数据处理, 不能做到实时判断土层分类。因此 Roberson^[7] 保留了采用基本锥尖阻力 q_c 和摩阻比 f_s 进行判断优势, 同时结合了 Robertson (1990) 整合成 9 类土划分方式 (图 6), 得到对应的未归一化土类指数 I_{SBT} 定义:

$$I_{SBT} = \{ [3.47 - \lg(q_c/p_a)]^2 + (\lg R_f + 1.22)^2 \}^{0.5} \quad (3)$$

式中: q_c 为锥尖阻力; p_a 为大气压强; R_f 为摩阻比。

由公式可知, 未归一化土类指数和原来归一化指数公式本质上是一样的, 但参数却转变成 CPT 原位测试基本参数。由 Robertson 统计分析得出, 采用未归一化的土类指数和归一化土类指数在上覆有效地层压力为 50 ~ 150 kPa 时用来判断土层分类结果相差不大。



注: 1. 敏感性细粒土, 2. 有机质土, 3. 黏土: 黏土-粉质黏土, 4. 粉土混合: 黏质粉土-粉质黏土, 5. 砂土混合: 粉砂-砂质粉土, 6. 砂: 纯净砂-粉质砂, 7. 砾砂-砂, 8. 极密砂-极密黏质砂, 9. 极硬细粒土。

图 6 基于 Robertson(1990) 更新土分类法

2 卡塔尔多哈地区工程应用

2.1 工程概况

卡塔尔多哈新港地处卡塔尔 MASAEED 工业

区内,地基处理面积约 630 万 m²。多哈新港所在区域表层主要以沉积土为主,底层为强风化到微风化灰岩地层。上部沉积层主要为粉土质砂或砂质黏土,含约 5% ~ 10% 细颗粒,局部高达 70% ~ 80%。根据 worley parsons 设计方对地基检测要求:砂类土层要达到中密到密实状态,黏性土层则应达到硬塑到坚硬状态,并采用 CPT 作为地基检测主要验收方式。黏性土和砂类土划分主要根据 BS 5930 标准,以细颗粒含量(即粒径小于 0.063 mm 颗粒) 35% 作为分界线。

由于砂类土层和黏性土层验收标准不同,根据文献 [8] 可得到黏性土层验收标准相对砂类土层低即可满足要求,因此在地基处理检测设计过程,不仅仅需要提供相应的 CPT 锥尖阻力验收曲线,还应提供相应的 CPT 土层划分方法。尤其是能较为准确区分细颗粒含量较高黏性土层,并采用合理的标准进行验收,这对于超大面积地基项目成本控制而言,能起到关键性作用。

2.2 不同 CPT 土分类方法结果对比

卡塔尔多哈新港按照 2 万 m²划分一个区,每个区选取一个点进行 CPT 原位测试,并在 CPT 原位测试点 1.5 m 范围附近选取一点进行补充勘探钻孔和取样分析。勘探钻孔采用标准贯入试验 SPT 进行取样,由于每个钻探取样长度为 45 cm,因此 CPT 点位的锥尖阻力 q_c 和摩阻比 f_s 选取 SPT 对应深度范围内平均值作为钻孔取样的对比点。现场选取 250 个 SPT 孔位,每个孔位选取 3 个试样进行对比,共收集 750 个土试样。

由图 5 可知,砂类土和黏性土划分主要是以 5 类和 6 类作为分界线。整理现场试验结果,并将不同深度 SPT 试样对应的锥尖阻力 q_c 和摩阻比 f_s 输入图 5 Robertson (1986) 土分类中,得到相对应的土类别。不同土分类对应的细颗粒土含量结果见表 1,由表 1 可知 Robertson (1986) 中 6 类土有 90 个黏性土样细颗粒含量在 35% ~ 45%,根据 BS 5930^[9],对于细颗粒含量大于 35% 土层划分为黏性土。因此在卡塔尔多哈新港地区采用 Robertson (1986) 土分类法平均判错率为 90/750 = 6%。

表 1 Robertson (1986) 直接法细颗粒土含量

Robertson (1986) 土分类	土样数量	细颗粒土含量/%
10 区	23	0 ~ 10
9 区	150	0 ~ 10
8 区	124	0 ~ 10
7 区	148	10 ~ 26
6 区	50	20 ~ 35
6 区	90	35 ~ 45
5 区	67	40 ~ 50
4 ~ 3 区	36	50 ~ 80
1 区	65	35 ~ 50

注:此处颗粒划分根据英标 BS 5930: 1999,其中细颗粒为粒径小于 0.063 mm 颗粒。

在地基检测过程中,将黏性土判别为砂类土,并以较高的砂类土标准进行验收,会额外增加项目的成本。因此选择与英标相匹配的土分类划分方法,对项目成本控制极为重要。

为了对比以上介绍的 4 种 CPT 土分类法与 BS 5930^[9]对黏性土和砂类土划分的优劣性,分别将现场应用的 Robertson (1986) 与 Douglas 法、Schmertmann 和 Robertson (1990) 指数法进行对比。为了方便比较,统一将 Robertson (1986) 方法中土分类后面加上 R 以示区分,即 Robertson (1986) 方法中 12 种土类,分别为 1R、2R、3R、4R、5R、6R、7R、8R、9R、10R、11R、12R。

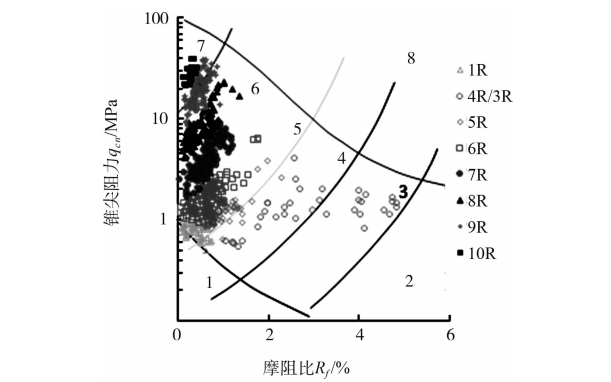
2.2.1 Robertson (1986) 与 Douglas 法对比

由图 4 中 Douglas 法划分土类可知,砂性土和黏性土划分主要以 5 类和 4 类作为界限。整理统计 Robertson (1986) 每类分区土,并将 Robertson (1986) 每类分区土输入 Douglas 土分类中进行对比(图 7)。同时表 2 给出了细颗粒土含量。由图 7 分析可知,两种土分类方法具有清晰的对应关系,且 Dougals 分别将 Robertson (1986) 的 8R 和 9R 类土合并对应 Dougals 的 5 类土,Robertson (1986) 7R 和 6R 类合并与 Douglas 的 4 类土对应,且整个 6R 类全部包含在内。但唯一存在差异的是高敏感性土的划分,显然 Douglas 高敏感性土划分范围偏小。

由室内土试样颗分试验可知,Robertson (1986) 划分的高敏感性 1R 土颗粒级配主要为细

颗粒含量 35% ~ 50% 砂质粉土。Douglas 法则将此
类敏感性划分为 4 类和 5 类砂土。另外 Douglas 法
还将 Robertson (1986) 中过渡性土 6R 类均划分
为砂性土, 因此 Douglas 法在划分的砂性土中细颗
粒含量范围更广, 由表 2 中统计可知, 共有 136 个
黏性土试样被划分为 5 区砂类土, 平均误判率较
高, 约为 $136/750 = 18\%$ 。

表 2 Douglas 法细颗粒土含量		
Douglas (1984)	土样数量	细颗粒土含量/%
7 区	23	0 ~ 10
6 区	274	0 ~ 10
5 区	175	10 ~ 35
5 区	136	35 ~ 45
4 区	106	40 ~ 50
3 区	36	50 ~ 80



注: 1. 高敏感性土, 2. 黏土-有机黏土, 3. 黏质粉土-粉质黏土-黏土, 4. 砂质粉土-黏质粉土, 5. 粉质砂土-砂质粉土, 6. 砂-粉质砂, 7. 砂砾-砾砂-砂。

图 7 Douglas 土类分布

2.2.2 Robertson (1986) 与 Schmertmann 法对比
Schmertmann 土分类法见表 3 和图 8, 由图 8
可知 Schmertmann 法对于砂性土划分更为细致, 针
对不同颗粒级配还划分土层密实状态

表 3 Schmertmann 法细颗粒土含量		
Schmertmann 分类法	土样数量	细颗粒土含量/%
16 区	153	0 ~ 10
15 区	140	0 ~ 10
14 区	171	10 ~ 26
12 区	30	20 ~ 35
12 区	90	35 ~ 45
9 区	130	40 ~ 50
8 区	28	50 ~ 80
5 区	8	50 ~ 80

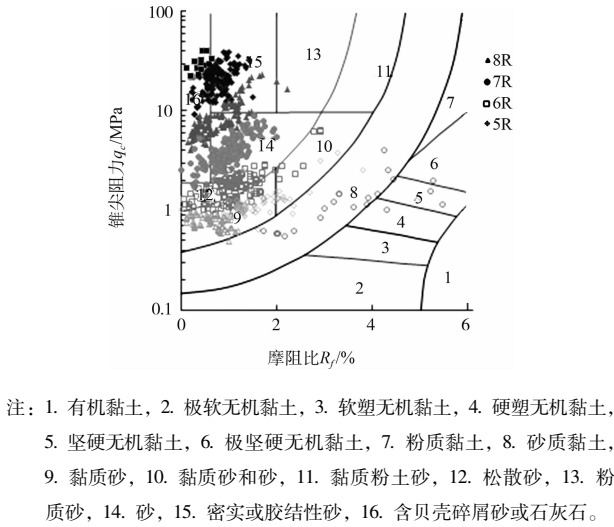
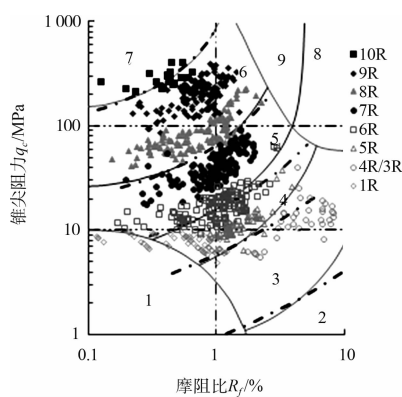


图 8 Schmertmann 土类分布

Robertson (1986) 的 10R ~ 8R 区均有部分划分
密实性或胶结性砂, 对应钻孔 SPT 击数为 10 ~ 20;
6R 区则划分松散性砂土, 对应钻孔 SPT 击数小于
10; 5R 和 1R 对应黏性土则划分黏质砂土, 即砂
性土, 可见 Schmertmann 在划分黏性土和砂性土界
限上更为宽泛, 即将 Robertson (1986) 中 6R、
5R 和 1R 类土均划分为砂性土, 细颗粒含量高达
50%。由表 3 统计可知, Schmertmann 中 9 类黏质
砂和部分 12 类松散砂土中均有细颗粒含量大于
35% 土样, 由统计结果可知共有 120 个黏性土试样
被划分为砂类土, 平均误判率为 $210/750 = 28\%$ 。

2.2.3 Robertson 直接法与指数法对比

Robertson (1986) 直接法与指数法土分类对
比见图 9, 同时表 4 给出了两种不同分类方法对
比。由表 4 可看出, 指数法将 Robertson 直接法中
的 9R 和 8R 合并成 6 区, 7R 和 6R 合并成 5 区。
但由图 9 可看出, 直接法 6R 并没有完全分布在指
数法中砂性土 5 区, 有部分分布在黏性土 4 区。这
主要是由于直接法 6R 对应的细颗粒含量有部分处
于大于 35% 状态。进一步统计指数分类法中细颗
粒含量见表 4, 可见 5 区中有 20 个土试样被划分
为黏性土, 4 区中有 10 个土样错划分为砂类土。
因此采用土类指数 $I_{SBT} = 2.6$ 进行划分黏性土和砂
类土, 判错率约为 $30/750 = 4\%$ 。因此综合考虑分
析, 采用土性指数 I_{SB} 能很好区分出黏性土和砂性
土, 错判率较低。



注：1. 敏感性细粒土，2. 有机质土，3. 黏土：黏土-粉质黏土，4. 粉土混合：黏质粉土-粉质黏土，5. 砂土混合：粉砂-砂质粉土，6. 砂：纯净砂-粉质砂，7. 砾砂-砂，8. 极密砂-极密黏质砂，9. 极硬细粒土。

图9 Robertson (1990) 土类分布

表4 Robertson 指数法细颗粒土含量

Robertson 指数法	土样数量	细颗粒土含量/%
7 区 ($I_{SBT} \leq 1.31$)	18	0 ~ 10
6 区 ($1.31 < I_{SBT} \leq 2.05$)	278	0 ~ 10
5 区 ($2.05 < I_{SBT} \leq 2.60$)	195	10 ~ 35
5 区 ($2.05 < I_{SBT} \leq 2.60$)	10	35 ~ 40
4 区 ($2.60 < I_{SBT} \leq 2.95$)	20	30 ~ 35
4 区 ($2.60 < I_{SBT} \leq 2.95$)	185	35 ~ 50
3 区 ($2.95 < I_{SBT} \leq 3.60$)	36	50 ~ 80
1 区	8	35 ~ 50

由上述 Robertson 直接法与其余 3 种土分类方法对比结果分析可得知，不同的土分类方法判错率由上文分析可知，Robertson 指数法准确性最高，判错率最低，仅为 4%；其次为 Robertson 直接法，判错率为 6%；而 Douglas 法和 Schmertmann 法准确性较低。

3 结语

本文主要通过针对卡塔尔多哈新港地基处理对黏性土和砂性土验收标准不同，共收集现场约 250 个 CPT 静力触探孔，选取了基于 CPT 基本参数锥尖阻力 q_c 和 f_s 土分类方法在区分黏性土和砂性土方面的差异性，并和相对应的 SPT 钻孔取样对比。得到以下结论：

1) Robertson (1986) 土分类法不同的分区具有明显的颗粒级配，且大部分分区能很好区分黏

性土和砂性土。但对于过渡区 6R 类土，对比室内颗分试验，不能很好区分黏性土和砂类土。

2) 不同的土分类方法在砂性土和黏性土划分准确性上，Robertson (1990) 指数法最为精确，判错率约为 4%；其次为 Robertson 直接法，判错率约为 6%。

3) 采用 Robertson (1990) 基于 CPT 基本参数锥尖阻力 q_c 和 f_s 土层划法，能很好满足多哈新港参照 BS 5930^[9] 以细颗粒含量 35% 作为黏性土和砂性土分界线标准要求，从而为大面积地基检测成本控制起到重要作用。

参考文献：

[1] Schmertmann J H. Guidelines for Cone Penetration Test, Performance and Design, Report No. FHWA-TS-78-209[R]. Washington D C: U S Department of Transportation, 1978: 145.

[2] Douglas J B, Olsen R S. Soil classification using electric cone penetrometer, symposium on cone penetration testing and experience [J]. Geotechnical Engineering Division: ASCE, 1981: 209-227.

[3] Robertson P K, Campanella R G, Gillespie D, et al. Use of Piezometer Cone data [C]// Use of In-situ testing in Geotechnical Engineering, 1986: 1 263-1 280.

[4] Robertson P K. Soil classification using the cone penetration test [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990(1): 151-158.

[5] Jefferies M G, Davies M P. Use of CPTU to estimate equivalent SPT N60 [J]. Geotechnical Testing Journal: ASTM, 1993, 16(4): 458-468.

[6] Zhang Z, Tumay M T. Statistical to fuzzy approach toward CPT soil classification [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering: ASCE, 1999, 125 (3): 179-186.

[7] Robertson P K. Soil behaviour type from the CPT: an update[R]. USA: Gregg Drilling & Testing Inc, 1990.

[8] 叶锋, 陈小利, 贺迎春, 等. 基于 CPT 判别土类及状态在地基检测中的应用[J]. 水运工程, 2013(9): 161-163.

[9] BS 5930: 1999, Code of Practice for Site Investigation[S].

(本文编辑 武亚庆)