静力触探在滨海场地岩土工程评价中的应用

赵栋辉[1,2,3]，曹晓航[1,2,3]
（1. 中交天津港湾工程研究院有限公司；2. 天津市港口岩土工程技术重点实验室；3. 中交集团岩土工程重点实验室）

摘　要：为解决滨海地区填海软土层序复杂、取样扰动大导致岩土工程参数获取困难的问题，研究静力触探在该类场地中的工程适用性。依托天津南港工业区某大型工业项目的勘察成果，基于 206 个静力触探孔的实测数据，对滨海填海软土场地静力触探参数特征及其工程应用进行了系统分析。通过对不同工程地质层锥尖阻力、侧摩阻力及摩阻比等参数的变化规律与统计特征的研究，并结合钻探、十字板剪切试验及室内土工试验成果，对静力触探在工程分层识别及岩土工程评价中的适用性进行了验证。研究结果表明，静力触探参数能够较好地反映填海软土场地的工程分层特征，与原位及室内试验结果在变化趋势上具有较好一致性，可为类似滨海工业场地的岩土工程勘察与设计提供参考。

关键词：滨海填海；软土；静力触探；工程分层；岩土工程评价

0　引言

随着沿海地区开发强度的不断提高，大量工业园区和基础设施建设选址于填海形成的滨海地区。滨海人工回填区是港口建设、土地开发等形成的新陆地[1]。该类场地通常经历多期吹填、回填及地基处理过程，土体成因复杂、结构性强，软弱夹层和透镜体分布不均，给岩土工程勘察与设计带来一定难度。如何在保证工程安全的前提下，高效、准确地获取场地岩土工程参数，是滨海填海工程面临的关键问题之一。

静力触探试验（Cone Penetration Test，CPT）因其测试过程连续、结果直观、受人为因素影响小，在软土地区工程勘察中得到广泛应用[2]。已有研究表明，静力触探参数在软土分层识别、强度与变形特性评价以及地基承载力分析等方面具有较好的工程适用性[3]。秦皎[4]建立了长江口近岸水域软弱黏性土层孔压静力触探试验指标与土性的关系公式，为长江口其他水域物理性质相近的黏性土提供一定的解译依据。丁梦薇等[5]通过分析开挖前后深厚粉细砂地层静力触探统计值的变化规律，创新性提出了基于静探统计值的承载力深度修正方法，为长江中下游冲积地层的地基基础选型及研究提供了全新范式。周冬冬等[6]提出了完全只依赖孔压静力触探测试数据即可进行液化评价的新方法，为孔压静力触探在液化评价方面的应用提供了可供借鉴的方向。姜记冰等[7]采用静力触探试验评价了南通某强夯地基处理工程中砂土密实度的变化。段伟等[8]综合分析了国内外近年来在尾矿生态脆弱区场地测试技术的最新研究进展，认为孔压静力触探原位测试技术能够反映连续的岩土参数，在尾矿料性能评价方面具有独特的优势和较大的应用潜力。邵帅[9]将静力触探试验应用于某滨海回填区的勘察中进行地层划分、土性评价、天然地基承载力估算及砂土液化判别，证明静力触探试验在滨海回填区岩土工程勘察中具有较高的准确性和可靠性。余颂等[10]依托海门至太仓段过江隧道工程，采用统计和回归分析方法，探讨了长江下游两岸的 SPT 和 CPT 之间的关联性，提出了可靠度更高的 SPT-CPT 相关性模型。马鹏程等[11]采用经过铁路工程实测数据验证的大变形数值模拟方法分析成层土中静力触探超前滞后效应，研究静力触探的超前滞后深度判别方法，并将其应用于铁路工程触探数据分析中。李浩等[12]依托某海上风电项目开展了原状海洋细粒土的原位孔压静力触探试验和室内固结不排水三轴试验，提出了基于原位孔压静力触探试验数据确定海洋细粒土不排水抗剪强度的新相关性公式。刘中杰等[13]建立了黄河流域（河南段）黄土状粉质黏土土体物理力学特性指标与静力触探测试结果之间的经验关系式，为黄河流域（河南段）能源项目在前期勘察设计阶段对黄土状粉质黏土指标的准确评估提供了参考。

然而，现有研究多基于试验场地或中小规模工程项目，针对大面积工业场地、尤其是经历多期填海和地基处理的复杂软土场地，系统的工程应用研究仍相对较少。

基于此，本文依托天津南港工业区一大型工业项目，依托数量充足、分布均匀的静力触探数据，结合现场钻探、十字板剪切试验及室内土工试验结果，对滨海地区经吹填、地基加固处理后的软土场地的静力触探参数特征进行分析，总结其在工程分层识别及岩土工程评价中的应用效果，以期为类似工程提供参考。

1　工程概况

1.1　项目概述

研究场地位于天津市滨海新区南港工业区，为典型滨海填海形成的工业建设用地，规划建设内容包括工业生产装置、储罐区及配套设施等，工程规模大、结构类型复杂，对地基条件要求较高。场地原始地貌为潮间带及浅海沉积环境，后经吹填造陆形成陆域，并先后实施过地基处理措施。受填海方式及处理工艺影响，场地浅部土层以人工填土和软弱海相沉积土为主，层序变化频繁，工程性质差异明显。

本次研究所采用的数据来源于该项目勘察阶段成果，勘察内容涵盖钻探取样、原位测试及室内试验等多种方法，为开展静力触探在滨海大型工业场地岩土工程评价中的应用提供了良好基础。

1.2　勘察工作布置

本次勘察按不超过 30 m 间距的方格网形式布置勘探孔，共布置钻探孔共 357 个，包括原状取土孔 119 个，孔深 55 m；静力触探测试孔 206 个，孔深 35 m；十字板剪切试验孔 32 个，在测试孔上部黏性土层内进行。

静力触探测试孔位与钻探孔合理配合，平面分布较为均匀，能够反映场地岩土条件的整体特征。静力触探试验采用履带式静力触探设备，使用双桥探头，测试过程中保持匀速连续贯入，实时记录锥尖阻力 q_c、侧摩阻力 f_s 等参数，并计算摩阻比 R_f。

静力触探测试成果以贯入深度为纵坐标，静力触探参数为横坐标绘制曲线，并结合相邻钻孔揭露的地层信息进行综合分析。通过对静力触探参数与室内试验成果的统计与对比研究，为后续地层识别及工程评价提供依据。

1.3　工程地质条件

静力触探深度范围内的场地地层自上而下依次为：

1）全新统人工堆积层（Qml）

①$_2$ 层素填土：灰黄—灰褐色，局部杂色，主要由黏性土组成，夹粉土和少量粉细砂，土质不均，松散—稍密，含碎贝壳，偶见碎砖块、植物根茎等。①$_3$ 层冲填土：灰黄—褐灰色，主要由黏性土组成，夹粉土和少量粉细砂，松软，含植物根系及少量贝壳碎片。

2）全新统中组浅海相沉积层（Q_4^2m）

⑥$_1$ 层粉土：灰色，湿，松散—稍密，局部中密，夹粉质黏土薄层，含少量贝壳碎片，摇振反应迅速，无光泽，干强度低，韧性低。⑥$_{21}$ 层粉质黏土：灰色，软塑—可塑，含有机质、贝壳碎片，夹粉土薄层，局部相变为黏土，切面稍光滑，干强度高，韧性高。⑥$_{22}$ 层黏土：灰色，软塑，局部为粉质黏土，夹粉土薄层，含少量贝壳碎片，切面稍光滑，干强度高，韧性高。⑥$_3$ 层粉土：灰色，湿，稍密—中密，摇振反应迅速，无光泽，干强度低、韧性低。

3）全新统下组沼泽相沉积层（Q_4^1h）

⑦层粉质黏土：灰—灰黑色，软塑—可塑，局部流塑，顶部含泥炭薄层，含有机质、腐植物，切面稍光滑，干强度中等，韧性中等。

4）全新统下组河床—河漫滩相沉积层（Q_4^1al）

⑧$_1$ 层粉质黏土：黄灰—灰黄色，软塑—可塑，局部硬塑，夹粉土薄层，局部夹黏土，含铁质及姜石，切面稍光滑，干强度中等，韧性中等。⑧$_2$ 层粉土：个别钻孔揭露有粉砂分布，灰黄—褐黄色，湿，中密—密实，含铁质，摇振反应迅速，无光泽，干强度低，韧性低。

5）上更新统五组河床—河漫滩相沉积层（Q_3^eal）

⑨$_1$ 层粉质黏土：黄褐色，可塑，局部软塑，无层理，具锈斑，含铁质及姜石，夹粉土薄层，切面稍光滑，干强度中等，韧性中等。

6）上更新统四组滨海—潮汐相沉积层（Q_3^dmc）

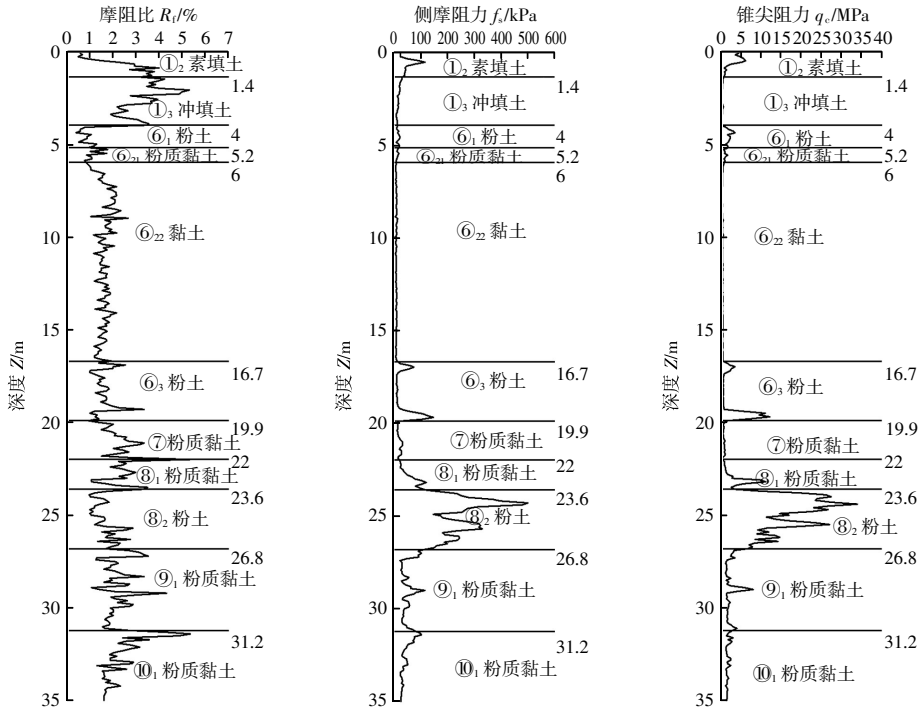
⑩$_1$ 层粉质黏土：黄灰—灰色，软塑—可塑，局部为黏土，含少量有机质及贝壳碎片，切面光滑，干强度中等，韧性中等。⑩$_2$ 层粉土：灰—黄灰色，湿，密实，夹粉砂薄层，部分钻孔处相变为粉砂，局部与粉质黏土互层，摇振反应迅速，无光泽，干强度低、韧性低。

2　静力触探参数特征分析

静力触探试验能够连续反映土体随深度变化的工程特性，是填海软土场地工程分层与参数分析的重要依据。基于本工程场地 206 个静力触探孔的实测成果，静力触探曲线特征及主要参数的统计规律，揭示不同地层的工程响应特征。

2.1　静力触探曲线特征分析

通过分析本场地各个土层的静力触探曲线特征，绘制了典型静力触探测试孔的测试结果曲线，如图 1 所示。



(a) R_f–Z 曲线　(b) f_s–Z 曲线　(c) q_c–Z 曲线

图 1　双桥静力触探划分土层结果

典型静力触探成果表明，场地内 q_c、f_s 及 R_f 随深度 Z 变化规律较为清晰，与钻探揭露的地层分布具有较好对应关系。

在浅部人工填土层内，q_c 值整体偏低且波动较大，局部深度范围内可见突增或突降现象，曲线无明显规律，反映了填土成分不均及压实程度差异的影响。该类土层中 f_s 值变化幅度较大，R_f 值整体偏高，体现出回填土结构松散、均匀性较差的工程特征。

在全新统海相软黏性土层中，q_c 值普遍较低，曲线变化平缓，随深度缓慢增大，f_s 值与 q_c 变化趋势基本一致，R_f 值相对稳定，表明该类土层结构较为均一，工程性质以低强度、高压缩性为主。局部夹粉土位置，q_c 值和 f_s 值出现明显突增，曲线形态变化清晰，有利于在工程勘察中识别软弱夹层与相对较硬土层。

在中深部河床—河漫滩相沉积土层中，q_c 值整体呈阶梯状上升趋势，曲线起伏相对减小，f_s 值随深度稳步增大，R_f 值逐渐降低，反映出土体密实度和强度随埋深增加而提高的工程特征。

总体来看，不同成因土层在静力触探曲线形态上具有较为明显的差异，静力触探成果能够较好反映填海软土场地的工程分层特征。此结果与高颂东[14]的结果基本相同。此外，结合图 1 的分层界面分析可见，静力触探在穿越软硬土层界面时存在明显的“超前”和“滞后”现象[11]。当探头由软土层进入硬土层时，q_c 往往在到达分界面之前即开始增大(超前效应)；反之，由硬土层进入软土层时，阻力降低存在一定的滞后性。在进行精细化分层时，应充分考虑这一贯入机理产生的界面效应，结合 R_f 的变化特征综合确定分层界线，以提高分层的准确度。

2.2　主要土层静力触探参数统计特征

为进一步分析静力触探参数在工程评价中的适用性，结合钻孔分层成果，对场地内主要工程地质层的静力触探参数进行统计分析。统计内容

包括 q_c 和 f_s 的取值范围、平均值及离散程度等，统计结果见表 1—表 2。

表 1　静力触探试验成果 q_c 统计表

地层编号	统计数量/个	最大值/MPa	最小值/MPa	平均值/MPa	变异系数	标准值/MPa
①$_2$	2 840	5.13	0.01	1.83	0.599	1.80
①$_3$	4 847	1.60	0.13	0.71	0.042	0.70
⑥$_1$	2 819	9.10	0.21	2.99	0.687	2.92
⑥$_{21}$	2 326	2.70	0.30	1.19	0.421	1.18
⑥$_{22}$	20 104	0.97	0.27	0.62	0.188	0.62
⑥$_3$	3 920	1.42	0.24	0.82	0.244	0.82
⑦	4 113	1.43	0.26	0.84	0.232	0.84
⑧$_1$	4 332	3.30	0.31	1.54	0.384	1.52
⑧$_2$	5 007	30.82	1.94	13.52	0.427	13.38
⑨$_1$	8 087	3.69	0.74	2.00	0.282	1.99
⑩$_1$	7 268	2.61	0.84	1.65	0.193	1.65
⑩$_2$	16	5.55	2.63	4.21	0.258	3.73

表 2　静力触探试验成果 f_s 统计表

地层编号	统计数量/个	最大值/kPa	最小值/kPa	平均值/kPa	变异系数	标准值/kPa
①$_2$	2 840	5.13	0.10	33.30	0.448	32.80
①$_3$	4 847	56.20	0.30	24.50	0.431	24.20
⑥$_1$	2 819	97.90	2.00	41.20	0.460	40.60
⑥$_{21}$	2 326	44.80	3.20	19.70	0.424	19.40
⑥$_{22}$	20 104	20.50	4.20	12.30	0.222	12.30
⑥$_3$	3 920	26.80	1.40	13.80	0.314	13.70
⑦	4 113	31.10	3.70	15.70	0.328	15.50
⑧$_1$	4 332	110.50	6.20	41.20	0.562	40.60
⑧$_2$	5 007	383.50	3.90	184.30	0.361	182.60
⑨$_1$	8 087	104.40	10.30	46.60	0.414	46.20
⑩$_1$	7 268	70.40	8.20	33.20	0.374	33.00
⑩$_2$	16	49.40	36.40	44.30	0.088	42.60

统计结果表明：人工填土层 q_c 取值范围较宽，参数离散性明显，反映出填海回填过程中材料来源复杂、压实条件不均的特点。在工程应用中，该层土的静力触探参数宜结合钻探揭露情况综合判断，不宜单独作为地基评价依据。

海相软黏性土层的静力触探参数分布相对集中，q_c 和 f_s 的变异系数较小，显示出该类土层在大尺度范围内工程性质相对稳定。该特征为静力触探参数用于软土工程分层及力学性质评价提供了有利条件。

河床—河漫滩相沉积土层的静力触探参数整体水平明显高于浅部软土层，且随深度增加呈现逐步增大的趋势，但在分析变异系数时发现，⑧$_1$ 层粉质黏土的 q_c 和 f_s 变异系数分别为 0.384 和 0.562，相对较大。结合工程地质条件可知，该层土“夹粉土薄层，局部夹黏土”，这种软硬互层的沉积结构导致触探阻力在垂直方向上波动剧烈，从而增大了统计数据的离散性。因此在对此类互层土进行承载力评价时，应关注土层不均匀性带来的影响。

从整体统计结果来看，随着埋深增加，各土层静力触探参数的离散性呈减小趋势，反映出深部土体受后期扰动影响较小，结构相对稳定。

2.3　静力触探对特殊地层的识别能力分析

填海软土场地中常发育粉土、粉砂透镜体及局部扰动层，这类地层在工程上往往对地基稳定性和变形特性产生不利影响。通过对静力触探成果的综合分析发现，静力触探参数对该类特殊地层具有较好的识别能力。

在部分静力触探曲线中，q_c 随深度变化过程中出现局部突增现象。结合相邻钻孔揭露资料分析，该深度范围内对应粉土透镜体分布（如图 2 所示）。该类土层在静力触探参数上具有较为明显的响应特征，有利于在工程勘察中识别对地基工程性质产生影响的局部夹层。

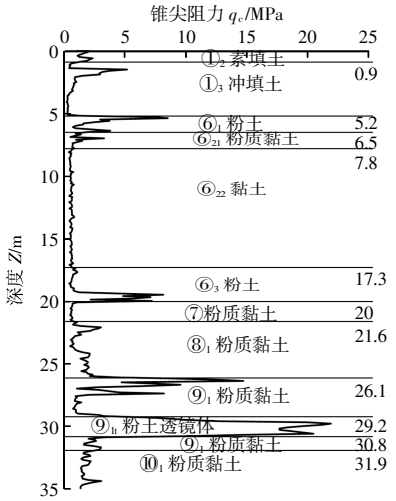


图 2　静力触探识别特殊地层示意图

在局部存在填海残留碎石或扰动回填物的区域，静力触探曲线中常出现异常高值或短距离剧烈波动。通过与相邻钻孔资料对比分析，可判定该类异常多与回填不均或局部硬质夹杂物有关，在工程应用中需引起足够重视。

分析表明：在填海软土场地中，静力触探不仅能够反映整体地层的变化规律，还对局部不良地质条件和工程不利土层具有较好的识别效果。

3　静力触探成果的工程验证分析

为验证静力触探参数在填海软土场地岩土工程评价中的适用性，结合本次勘察中获取的十字板剪切试验及室内土工试验成果，对静力触探测试结果进行对比分析，从工程角度评估其可靠性和应用价值。

3.1　静力触探参数与十字板剪切强度的对比分析

十字板剪切试验作为评价软黏性土不排水抗剪强度的常用原位测试方法，其成果在工程设计中具有较高的参考价值。通过对静力触探孔与相邻十字板试验点的对比分析发现，两者在反映软土强度随深度变化趋势方面具有较好的一致性。

对于 q_c 与十字板剪切强度 C_u 的数量关系，已提出了多种经验公式，如 C_u=32.536q_c+8.060 4[15]。如图 3 所示，在浅部海相软黏性土层中，q_c 随 Z 缓慢增加，与 C_u 的增长趋势吻合度较高；但需注意的是，在深度 8.5 m 以下的土层中，两者相关性有所降低，这可能与深部土层中粉粒含量增加及土体结构性变化有关。在浅部扰动较大的填土层中，静力触探参数与十字板试验结果的对应关系相对离散，主要受填土不均匀性及试验扰动影响，因此，在该类土层中应用静力触探参数进行强度评价时，应结合钻探和其他原位测试成果综合判断。

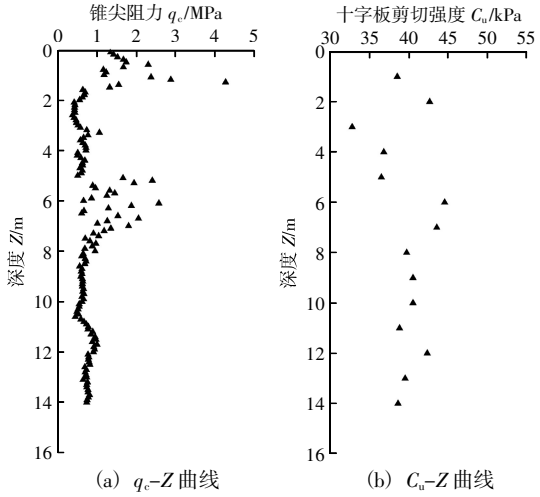


图 3　q_c 与 C_u 对比关系

总体来看，q_c 能够较好反映海相软黏性土的不排水抗剪强度变化趋势，其成果在软土强度分级和工程评价中具有一定适用性。

3.2　静力触探参数与室内试验成果的对比分析

室内土工试验能够较为全面地反映土体的物理力学性质，是工程设计的重要依据。选取具有代表性的钻孔，对静力触探参数与室内试验成果进行对比分析，以验证静力触探成果在工程应用中的合理性。

由图 4 所示，随着埋深增加，q_c 逐渐增大，室内试验所得压缩模量 E_s 总体呈增大趋势，二者在变化趋势上具有较好的一致性。这表明，在本场地相应土层中，静力触探参数能够在一定程度上反映土体压缩特性的变化。由图 5 所示，对于同一类海相软黏性土，q_c 较低的层段通常对应较高的天然含水率 w，二者呈现一定的负相关关系。这反映出软土强度与土体状态之间存在一定联系。但这种相关性具有显著的土类依赖性，不能一概而论。例如，同一含水率下的粉土和黏土，由于颗粒级配和胶结状态不同，其 q_c 值可能存在较大差异。因此，图 5 所示规律主要适用于本场地⑥层海相黏性土的性质评价，反映出该类土体强度相对较低、含水率较高的工程特征。

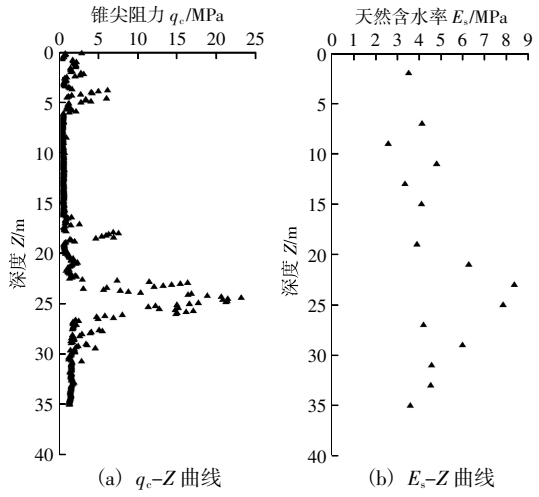


图 4　q_c 与 E_s 对比关系

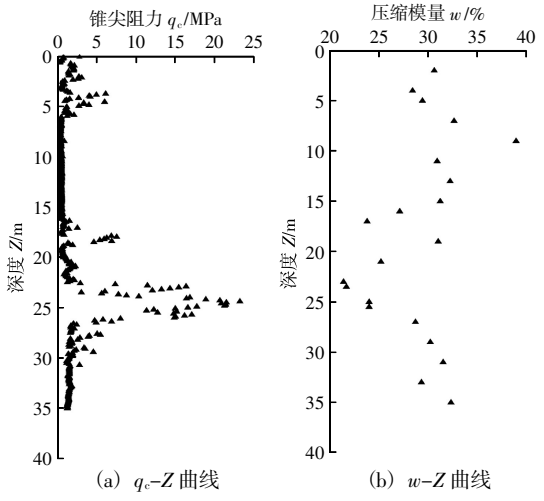


图 5　q_c 与 w 对比关系

在夹粉土或粉砂透镜体层段，静力触探参数明显高于相邻软黏性土层，室内试验中相应表现为塑性指数降低、强度指标提高。这表明静力触探成果能够较为灵敏地反映土体工程性质的变化，为工程分层和不良地质条件识别提供依据。

由于室内试验样品在取样、运输及制样过程中不可避免地受到扰动，其试验结果与原位状态存在一定差异，因此本文侧重于对比静力触探参数与室内试验指标的变化趋势，而不追求两者之间的精确对应关系。

3.3　静力触探参数在工程设计中的应用

在工程设计阶段，静力触探成果常用于地基承载力判断、桩基参数选取及地层稳定性分析等方面。结合本工程特点，对静力触探参数在设计中的应用进行讨论。

对于浅基础或地基处理效果评价，静力触探参数可用于识别软弱土层分布范围和厚度，为地基处理方案的确定提供依据。在本场地中，静力触探成果能够清晰反映处理前后土体强度变化，对地基处理效果评价具有一定工程意义。

在桩基础设计中，静力触探锥尖阻力和侧摩阻力参数可用于定性分析桩侧阻力分布特征及持力层位置。通过与钻孔揭露结果对比，可较为可靠地确定桩端持力层埋深范围，为桩基参数的合理选取提供参考。

在填海软土场地中，静力触探参数的工程应用应充分考虑填土成因复杂、土体扰动程度不一等因素，避免简单套用经验公式或规范推荐值。静力触探成果宜与钻探、原位测试及室内试验结果结合使用，以提高工程评价的可靠性。

4　静力触探成果的工程验证分析

基于本工程大量静力触探试验成果，并结合钻探、原位测试及室内试验资料，对静力触探在滨海填海软土场地岩土工程勘察与评价中的应用效果进行总结，可归纳出以下工程经验。

静力触探适用于滨海填海软土场地的工程分层识别。在本场地中，不同成因和工程性质的土层在静力触探曲线形态和参数水平上表现出较为明显的差异。通过综合分析 q_c、f_s 及 R_f 等参数，可较为准确地识别人工填土、海相软黏性土及夹粉土层，为工程分层提供可靠依据。

大规模静力触探数据有助于提高场地岩土工程评价的整体可靠性。与单点或少量测试相比，密集布置的静力触探试验能够更全面地反映场地土体工程性质的空间变化特征，有利于识别局部软弱区及工程不利地段，减少因地层变化引起的设计不确定性。

静力触探参数可作为软土工程评价的重要补充方法。对比分析表明，静力触探参数与十字板剪切强度及室内试验成果在变化趋势上具有较好一致性，在软土强度分级、地基稳定性分析及地基处理效果评价中具有一定工程适用性。

静力触探成果在工程设计中宜与其他勘察方法综合使用。由于填海软土成因复杂、局部扰动较大，单一测试方法难以全面反映土体工程特性。在工程应用中，应将静力触探成果与钻探取样、原位测试及室内试验结果相互印证，以提高工程判断的可靠性和合理性。

5　结语

结合天津南港工业区某大型工业项目的勘察成果，对滨海填海软土场地静力触探参数特征及工程应用进行了研究，主要结论如下：

1）本场地静力触探参数随地层变化规律清晰，不同成因土层在锥尖阻力、侧摩阻力及摩阻比等参数上具有明显差异，静力触探成果能够较好反映滨海填海软土的工程分层特征。

2）在海相软黏性土层中，静力触探锥尖阻力与十字板剪切强度及室内试验指标在变化趋势上具有较好一致性，表明静力触探参数在软土工程性质评价中具有一定适用性。

3）静力触探对夹粉土透镜体及局部扰动层具有较好的识别能力，有利于在工程勘察中发现对地基稳定性不利的土层条件。

4）在滨海大型工业场地岩土工程评价与设计中，静力触探可作为重要的原位测试方法之一，其成果对地基处理方案选择和桩基础设计具有较好的工程参考价值。

5）静力触探成果在工程应用中仍需结合钻探及其他试验方法综合分析，以充分考虑填海软土场地土体成因复杂和工程性质差异的影响。

参考文献：

[1] 郭静. 潮汐作用对滨海人工回填区地下水环境的影响[D]. 大连：大连海事大学，2024.

[2] 徐海波，宋新江，钱财富. 静力触探法研究综述[J]. 南水北调与水利科技，2013，11(5)：78–81，135.

[3] 叶启民，刘永超，孟庆文. 铁路静力触探四十年的成就[J]. 铁道工程学报，2005(增刊 1)：419–424.

[4] 秦皎. 基于海床式静力触探的长江口近岸水域黏性土强度解译[J]. 水运工程,2025(10):195–202,248.

[5] 丁梦薇,孙金山,宋丁豹,等. 天然深厚粉细砂层的承载力修正计算:以武汉长江中心项目为例[J]. 科学技术与工程,2025,25(29):12623–12630.

[6] 周冬冬,余文平,吴彩虹,等. 基于孔压静力触探的液化概率和液化等级评价方法[J]. 工程抗震与加固改造,2025,47(4):174–180.

[7] 姜记冰,雷胜全,白云鹏,等. 基于静力触探试验(CPT)浅析夯实过程中砂土的密实度变化[J]. 地基处理,2025,7(4):411–418.

[8] 段伟,赵泽宁,蔡国军,等. 尾矿生态脆弱区场地测试技术与土工参数评价方法研究进展[J]. 东南大学学报(自然科学版),2025,55(4):1001–1016.

[9] 邵帅. 静力触探试验在某滨海回填区的实践应用[J]. 广州建筑,2025,53(6):18–21.

[10] 余颂,刘峰,刘薛宁,等. 长江下游两岸 SPT–CPT 参数相关性分析及液化判别研究:以海门至太仓段为例[J]. 南京工业大学学报(自然科学版),2025,47(3):271–278.

[11] 马鹏程,陈则连,刘润,等. 静力触探贯入成层土界面效应研究及工程应用[J]. 铁道标准设计,2025,69(5):57–64.

[12] 李浩,吴琪,陈国兴,等. 基于孔压静力触探的海洋细粒土不排水抗剪强度的评价方法[J]. 哈尔滨工程大学学报,2025,46(3):428–437.

[13] 刘中杰,张明,陈震,等. 黄河流域(河南段)黄土状粉质黏土物理力学性质与静探指标相关性分析[J]. 能源与环保,2025,47(3):157–161.

[14] 高颂东. 静力触探技术在天津软土地区的应用研究[D]. 天津:天津大学,2007.

[15] 赵阳,周伟,周欣. 连云港地区软土静力触探参数相关性分析[J]. 公路交通科技(应用技术版),2010,6(10):151–154.