

上海深古河道地层特性及对地铁车站基坑影响

王建国¹, 沈亮¹, 李祥坤¹, 杨兴¹, 高彦斌², 王靖策²

¹上海隧道工程有限公司, 上海

²同济大学土木工程学院, 上海

收稿日期: 2024年5月4日; 录用日期: 2024年5月24日; 发布日期: 2024年5月31日

摘要

长江口在第四纪晚更新世末期形成的“深古河道”内沉积了厚度较大的以饱和黏性土为主的沉积物, 对地铁工程有重要的影响。本文以上海轨道交通18号线建设为背景, 结合各车站的地层结构特征, 划分了四类地层单元, 结合现场实测资料, 分析了古河道地层对地铁车站基坑变形的影响。统计分析了典型深古河道地层(⑤₃粉质粘土)的基本物理力学特性, 并通过静力触探法给出了不排水抗剪强度随深度的变化规律。

关键词

深古河道, 地铁车站, 基坑变形, 软土

Properties of Shanghai Deep Paleochannel Strata and Impact on Metro Station Excavation

Jianguo Wang¹, Liang Shen¹, Xiangkun Li¹, Xing Yang¹, Yanbin Gao², Jingce Wang²

¹Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai

²College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai

Received: May 4th, 2024; accepted: May 24th, 2024; published: May 31st, 2024

Abstract

The “deep paleochannel” formed in the late Pleistocene of the Quaternary at the mouth of the Yangtze River deposited thick saturated clay, which had a significant impact on subway projects. In this paper, taking the construction of Shanghai Metro Line 18 as the background, considering the geological structure characteristics of each station, four types of geological units were proposed. Based on on-site measurements, the influence of paleochannel strata on the deformation of subway station excavation was analyzed. The basic physical and mechanical properties of typical paleochannel strata (⑤₃ silty

clay) were statistically analyzed, and the variation of undrained shear strength with depth was obtained by cone penetration method.

Keywords

Deep Paleochannel, Metro Station, Excavation Deformation, Soft Clay

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 绪言

在第四纪时期,长江口由于受古气候、古环境和地质构造的影响,经历了6次海侵、海退,在江、湖、海的交替作用下,经历了沉积、冲刷或切割、再沉积的反复作用,在不同时期沉积了不同的古河道地层[1] [2] [3]。其中,分布范围较广、埋深较大、厚度较大的要数距今约1.3~1.1万年的晚更新世末期的古河道,为了区别于后来其他时期形成的古河道,这里将上海地区晚更新世末期的古河道称为“深古河道”,地质上又被称之为“上海古溺谷”。这个时期的古河道切割深度较大,一般为10~30 m,导致早期形成的⑥层、⑦₁层沉积物缺失,形成了总厚度达30 m的⑤₂层粉土、⑤₃层粉质黏土夹粉砂和⑤₄层细砂,其中厚度最大的⑤₃层粉质黏土的力学特性介于④层淤泥质土和⑥层黏土之间,具有较高的压缩性、较低的强度。因此,在深古河道区,深部土层具有与正常地层差别较大的土质特征,由此造成特殊的工程地质特征和复杂的水文地质特征。

深厚软土深基坑工程的高风险特性已经被人们所认识,其中坑底隆起失稳是最为突出的一个问题,并可能引发重大工程事故[4] [5]。典型案例有2004年4月20日下午3点30分新加坡地铁环线C824标段发生了严重的基坑倒塌事故,史称“The Collapse of Nicoll Highway”,对软土基坑的认识影响深远[6];另外一个2008年11月15日15时15分杭州地铁1号线湘湖车站的基坑倒塌事故,造成21人死亡,损失惨重[7]。十几年来上海地铁工程建设的实践表明,深古河道区的基坑施工中围护结构会表现出与正常地层的基坑所不同的一些特征,如地下连续墙侧向位移和立柱隆起较大,威胁着基坑安全和周边环境安全。但是在深基坑变形特征的统计研究中,缺乏结合地质条件开展的对比分析[8] [9] [10] [11],对该类地质单元土层特性的认识以及对地铁车站基坑工程影响的讨论还较为缺乏。另外,沿海地区深切古河道星罗密布(例如规模最大的钱塘江深切古河道)[12],关于这类地层的研究对这些地区高速发展的城市轨道交通建设也有重要的意义。本文以上海轨道交通18号线(一期)为依托工程,对上海地区深古河道地层的力学特性进行了进一步的研究,分析了车站基坑变形特性与地层结构的相关性,为沿海深古河道区地铁车站基坑的设计施工提供技术支撑。

2. 地层单元分区以及基坑变形特征

2.1. 地质单元分区

根据相关研究成果[1] [2] [3],距今约2.0~1.1万年的晚更新世晚期,上海地区古气候变为凉冷干燥,海面急剧下降。原来局限于上海西北部发育的泛滥平原-湖泊已扩展到除现河口区外的上海整个陆域,广泛沉积了上更新统顶部的具有特征的暗绿-褐黄色黏性土层(工程地质⑥层),至距今约1.5~1.1万年,随着海平面的持续下降,暗绿-褐黄色黏性土逐渐脱水成陆,成为硬土层。在距今约1.3~1.1万年的晚冰

阶末期，由于海平面的持续下降，已形成的广泛分布的暗绿 - 褐黄色硬土地受到频繁变迁、分合河网的侵蚀切割，形成了晚更新世末期的古河道，崇明三岛地区亦均被侵蚀殆尽。古河道基本呈网状分布，将陆地分割成块状，除崇明三岛外，东西向河道最大，从西北部的嘉定至中心城区再到浦东新区外高桥地区。南北向河道则从宝山区黄浦江入海口穿越市中心至金山地区。古河道切割深度一般为 10~30 m，崇明三岛地区、浦东新区川杨河南侧切割深度最大，一般均在 20~30 m，局部地区大于 30 m，金山地区切割深度相对较浅，一般小于 20 m。深古河道切割地层导致先前沉积的第⑥层暗绿色黏性土缺失，从上至下沉积了三个单元地层。

第一单元层即⑤₂层，主要由粉性土组成，其上覆层为 Q₄¹⁻²滨海沼泽相⑤₁层灰色粘性土层，顶板埋深 20~30 m，层厚不一，一般为 5~10 m，局部地段底板可达 40~50 m，甚至更深。该层大致可分为上、下两部分，上部以灰色粘质粉土层为主；下部以灰色砂质粉土层为主，其中往往夹有薄层状软粘性土，并含有天然气和植物碎片。

第二单元层即⑤₃层主要由灰色粘性土组成，为典型的古河道溺谷遗迹，顶板埋深 25~32 m，底板埋深不一，最深处可超过 50 m。该层可分为上、中、下三段，上段主要为灰色粘土层，具层理构造，含有机质，偶见大块钙质结构，与上覆⑤₁层极为相似；中段为灰色粘性土夹薄层状粉砂层；下段为灰色粘性土与粉砂互层，从上至下总的趋势是含砂量逐渐增大，底部富集泥炭质土。各分段土层均呈渐变过渡。

第三单元即⑤₄层，灰绿 - 灰蓝色，出露于古河床边缘，一般为粘性土，厚度较薄，仅 1~3 m 左右，较厚处可达 7~8 m。

上海轨道交通 18 号线沟通宝山、杨浦、浦东三区。一期工程全长约 36 公里，建设 26 座车站，大多数为两层岛式地下车站，采用顺挖法施工。车站与古河道区域的位置关系如图 1 所示。18 号线的各地铁车站总体上由北往南逐渐由正常地层区进入深古河道区。根据地层结构特征，大致可以分为如图 2 所示的四类地质单元。

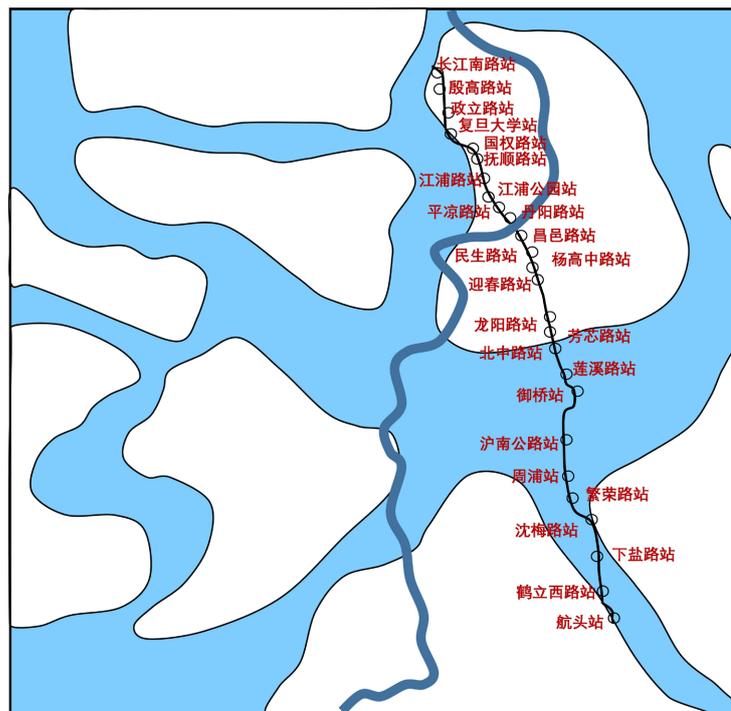
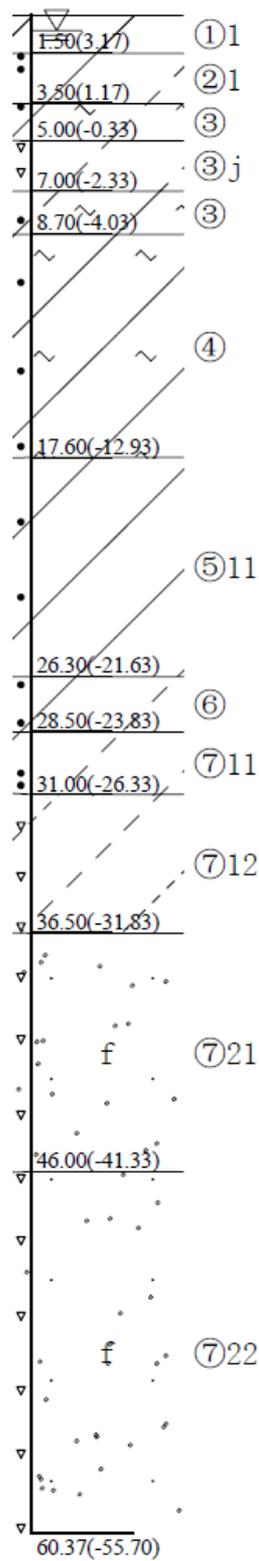


Figure 1. Deep paleochannel and Metro Line 18 station
图 1. 深古河道与 18 号线车站

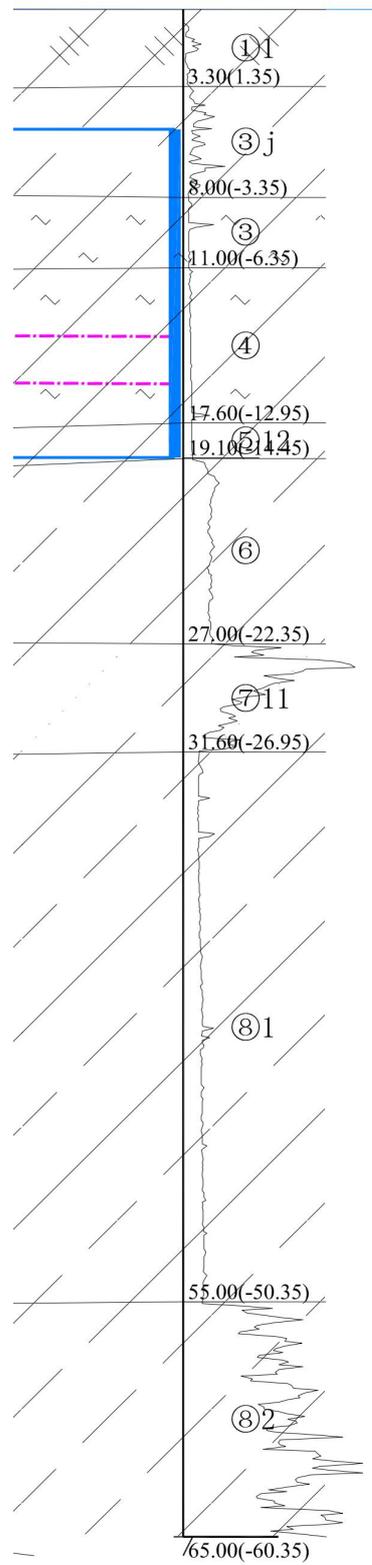
XZ10

. 67

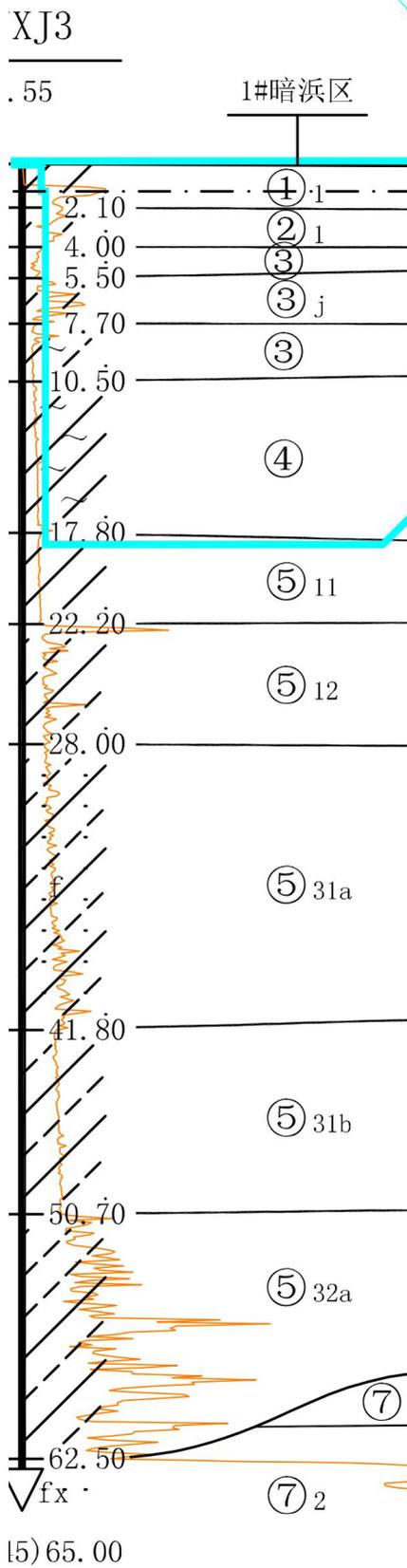


(a) 典型正常地层区

S26XJ1
4.65



(b) 正常地层区 - 薄⑦



(c) 典型深古河道区

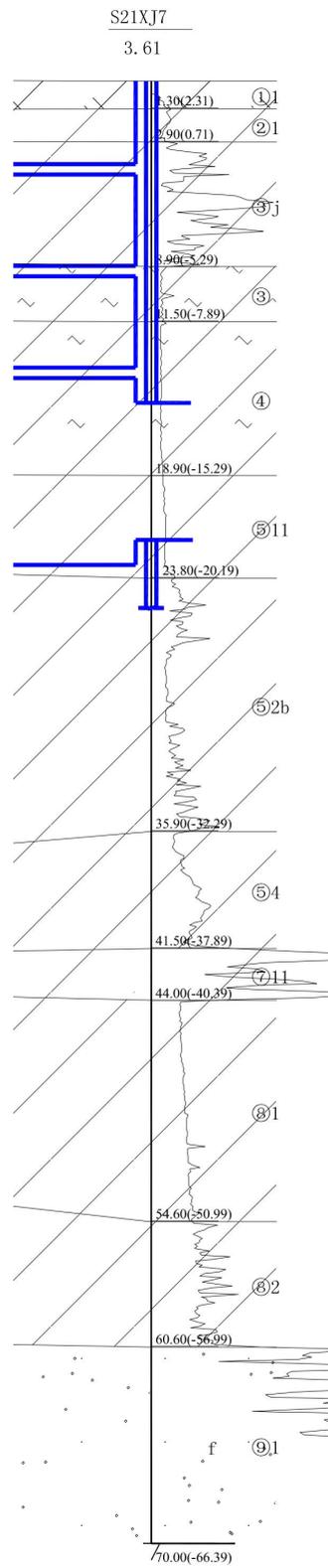


Figure 2. Four kinds of geological units in Metro Line 18 station
图 2. 18 号线车站的四类地质单元

1) 典型正常地层区。无古河道地层分布,坑底软土层以⑤₁₋₁和⑤₁₋₂粘性土为主。软土层层底埋深在 25 m 以内。下覆⑥粘性土和厚度较大的⑦粉砂层。

2) 正常地层区 - 薄⑦。无古河道地层分布,坑底软土层以⑤₁₋₁和⑤₁₋₂黏性土为主。软土层层底埋深在 25 m 以内。下覆⑥粘性土,⑦粉砂层厚度较小甚至缺失,再下为厚度较大的⑧黏性土。杨浦区长江南路站、殷高路站、政立路站、复旦大学站共 4 个车站位于该类地质单元。

3) 典型深古河道区。坑底以下软土层除了以⑤₁₋₁和⑤₁₋₂以外,分布有厚度较大的以⑤₃黏性土为主的古河道地层。深古河道地层层底埋深在 35~50 m 左右。下覆土层中⑥粘性土缺失,主要为⑦粉砂层。杨浦区的江浦路站,浦东新区的芳芯路站、北中路站、莲溪路站、御桥站、沪南公路站、周浦站、繁荣路站、沈梅路站,共 9 个车站处于该地质单元。

4) 深古河道区 - 薄⑦。坑底以下软土层除了以⑤₁₋₁和⑤₁₋₂以外,分布有厚度较大的以⑤₃黏性土为主的古河道地层。深古河道地层层底埋深在 40 m 左右。下覆土层中⑥粘性土缺失,⑦粉砂层较薄或缺失,其下为厚度较大的⑧黏性土。杨浦区复旦大学站、国权路站、抚顺路站共 3 个车站处于该地质单元。

2.2. 两种地质条件下的基坑变形对比

在上海轨道交通 18 号线的地铁车站标准段基坑深度大多在 18~26 m 之间,基坑宽度约 20 m,采用地下连续墙 - 内支撑的支护方式。地下连续墙的厚度有 600 mm、800 mm、1000 mm、1200 mm,插入比在 0.6~0.8。立柱桩为直径 800 mm 的钻孔灌注桩,桩长在 25~35 m。正常地层区的软土层的总厚度较小,层底埋深在 25 m 左右,下覆为厚度较大的硬土层。在该类地质条件下,地下连续墙和立柱桩通常可以插入到下覆硬土层中,因而坑底隆起稳定性安全性较大,基坑侧向变形以及立柱隆起较小,立柱隆起量大多在 30 mm 以内。深古河道地层厚度大,软土层的总厚度较大,软土层层底埋深在 40~53 m。在该类地质条件下,地下连续墙通常不能插入到下覆硬土层中,立柱桩大部分位于深古河道地层中。该地质条件下的坑底隆起稳定性安全性较小,基坑侧向变形以及立柱隆起量较大,立柱隆起量大多在 45~80 mm,远超出上海市地方标准规定的允许值 2 cm [13]。因此,这些地铁车站基坑表现出来的变形特征与地质条件有较好的相关性。其中沈梅路站基坑北侧正好处于正常地层区,南侧正好位于典型的深古河道区,古河道地层的埋深达到 53 m。因此,选取这个车站作为研究对象,对比两种地质条件下的基坑变形特征。该基坑最大开挖深度为 18.84 m,采用 4 道支撑,第一道为混凝土支撑,其余三道为钢支撑,地下连续墙的宽度为 600 mm,深度为 32 m;立柱桩桩长 25 m,桩径 800 mm。开挖至坑底时现场监测到的基坑变形如表 1 所示。可以看出,尽管基坑南北两侧的地下连续墙最大侧向位移的差别不是太大,但立柱隆起的差别显著,南侧古河道地层内的立柱隆起为北侧正常地层区的 1.8 倍。另外还发现,立柱隆起量与地下连续墙的厚度和深度也具有一定的相关性,增加地下连续墙的厚度和长度可以在一定程度上减小立柱桩的隆起。根据以上现象可以判断,坑底厚度较大、强度较低的深古河道地层的在坑内卸载情况下产生的较大侧向变形可能是造成坑底土体以及立柱隆起的一个重要原因,这个机理与卸载造成的坑底土体的回弹不同,前者是不排水剪切导致的塑性流动,而后者是竖向有效应力减小造成的回弹。

Table 1. Deformation of excavation in Shengmei station

表 1. 沈梅路站基坑变形

位置	最大开挖深度 (m)	支撑道数	地下连续墙深 (m)	地下连续墙宽度 (mm)	立柱桩长 (m)	立柱桩直径 (mm)	开挖至坑底时标准段变形最大值			
							地表最大沉降	地表最大沉降距坑边距离	地下连续墙最大侧向位移	立柱隆起
北侧 - 正常地层	18.24	4	32	600	25	800	-50.1 mm	7 m	74.41 mm	38.80 mm
南侧 - 深古河道	18.24	4	32	600	25	800	-62.17 mm	7 m	79.34 mm	69.12 mm

3. 深古河道地层力学特性

3.1. 基本物理力学特性

表 2 给出了典型深古河道区的三个车站(沈梅路站、周浦路站和沪南公路站)的勘察报告中给出的深古河道地层物理力学指标的统计结果。图 3 则给出了天然含水率随深度的变化规律。可以看出, ⑤₁₋₁ 黏土、⑤₁₋₂ 粉质黏土、⑤_{3-1a} 粉质黏土夹粉砂、⑤_{3-1b} 黏土普遍表现出高含水率(35%以上)、高孔隙比(大于 1.0)、高液性指数(接近或略大于 1.0), 处于软塑 - 流塑状态。对于由软塑 - 流塑状态的⑤₃层为主的典型的古河道地层区, 埋深 50 m 范围内均处于软塑 - 流塑状态, 比正常地质区的软土的厚度要大 25 m 左右。另外, 深古河道地层的平均比贯入阻力 Ps 在 1.5 MPa 以上, 远大于上部的典型的软土层④淤泥质黏土, 但不能因此认为其强度就会大很多。因为从静力触探力学机理上讲, 比贯入阻力还会受到埋深的影响。

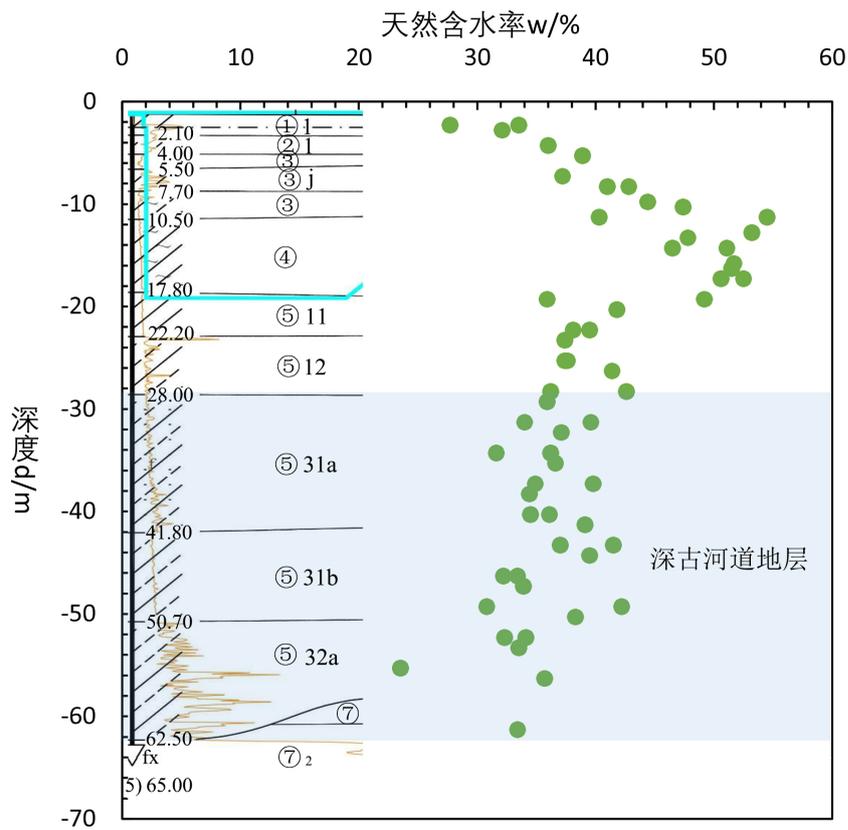


Figure 3. Natural water content of deep paleochannel strata
图 3. 深古河道地层的天然含水率

Table 2. Statistics of physical and mechanical parameters of deep paleochannel strata
表 2. 深古河道地层物理力学指标统计

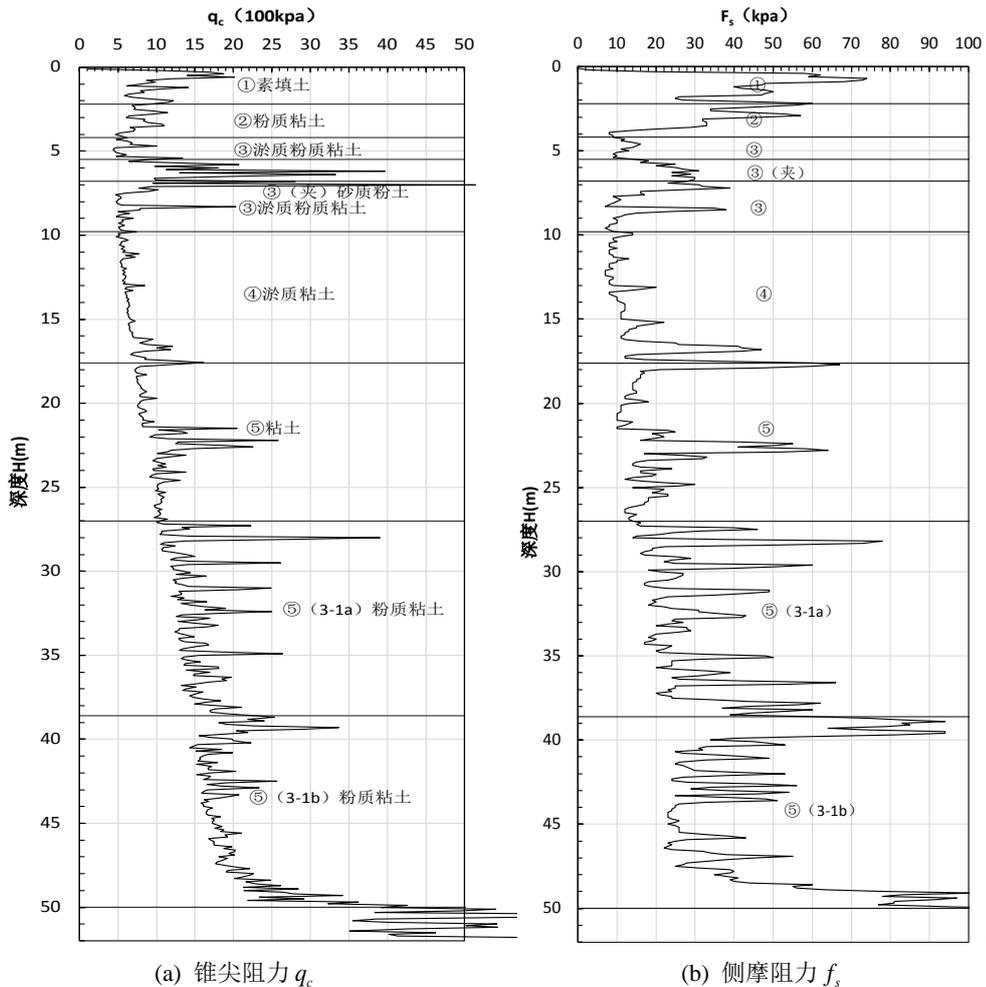
工程名称	土层名称	孔隙比 e	含水率 W%	饱和度 Sr%	液限 W _L %	塑限 W _p %	塑性指数 I _p	液性指数 I _L	比贯入阻力 Ps, MPa
沈梅路站	④淤泥质黏土	1.501	52.0	95	44.2	23.9	20.3	1.40	0.70
	⑤11黏土	1.205	43.0	93	41.0	22.4	18.6	1.01	1.04
	⑤31b粉质黏土	1.065	36.0	93	37.8	21.4	16.4	0.90	1.83

续表

周浦路站	④淤泥质黏土	1.423	50.2	97	44.2	23.7	20.5	1.30	0.657
	⑤11黏土	1.154	40.0	95	40.7	22	18.6	0.98	0.837
	⑤12粉质黏土	1.126	38.4	93	37.8	21.3	16.5	0.99	1.681
	⑤31a粉质黏土夹粉砂	1.011	33.8	91	34.2	21.2	13.1	0.98	1.639
	⑤31b黏土	1.131	38.0	92	40.6	22.3	18.3	0.86	1.545
	⑤4粉质黏土	0.718	24.4	94	35.3	19.5	16.4	0.37	2.554
沪南公路站	④淤泥质黏土	1.434	50.7	97	44.4	24.2	20.2	1.31	0.688
	⑤11黏土	1.176	41.2	96	41.6	22.2	19.3	1.0	0.843
	⑤12粉质黏土	1.099	37.8	94	38	21.2	16.8	0.99	1.283
	⑤31a粉质黏土夹粉砂	1.048	35.5	92	35	20.8	14.3	1.04	1.806
	⑤31b黏土	1.043	35.4	93	36.5	20.8	15.7	0.94	1.769

3.2. 双桥静力触探试验

在沪南公路站进行了双桥静力触探试验，对双桥静力触探试验数据进行分析，获得古河道地层的侧壁摩阻力 f_s 和锥尖阻力 q_c ，并计算得到不排水抗剪强度 c_u 和强度比 c_u/p'_v ，其中 p'_v 为竖向有效固结压力。由双桥静力触探计算不排水抗剪强度 c_u 的计算方法如下：



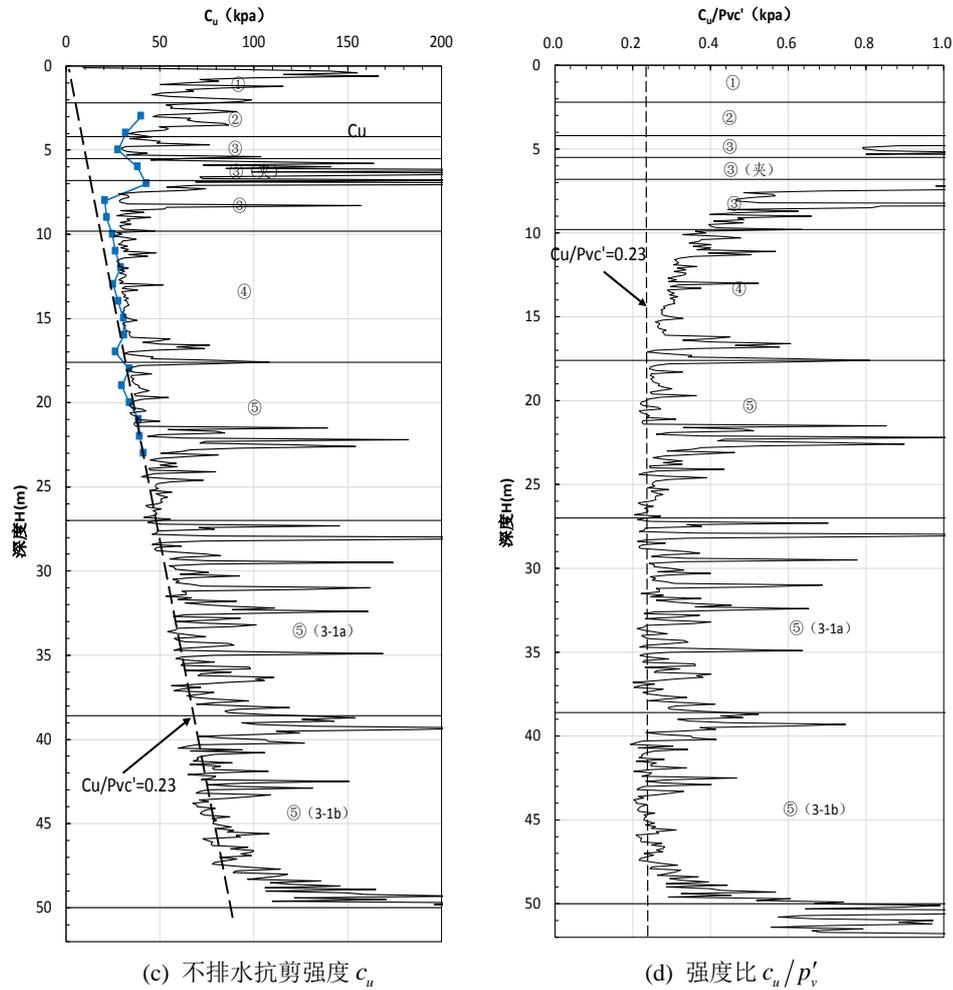


Figure 4. Undrained shear strength obtained by CPT
 图 4. 双桥静力触探得到的不排水抗剪强度

$$c_u = (q_c - \sigma_v) / N_c$$

其中： q_c 为锥尖阻力； σ_v 为总的上覆应力； N_c 为一个系数，对于大多数正常固结软黏土，一般取 10 左右。当 $N_c = 12$ 时，发现和沪南公路站现场十字板试验结果拟合得较好。图 4 给出了静力触探试验成果图，包括锥尖阻力 q_c 、侧摩阻力 f_s 、不排水抗剪强度 c_u 、强度比 c_u/p'_v 随深度的变化曲线。由静力触探试验得到的不排水抗剪强度与现场进行的十字板试验结果的一致性较高。深古河道地层的不排水抗剪强度 c_u 随深度的增大大致呈线性增大的趋势，这样强度比 c_u/p'_v 稳定在 0.23 左右。利用这个关系，通过竖向有效固结压力，可以预估其强度。根据相关研究成果[14]，这个强度比与正常固结粘性土的强度比(0.22)较为接近，因此可以认为深古河道典型地层⑤₃₋₁粉质粘土为正常固结黏性土，超固结特性不明显。

4. 结论

- 1) 深古河道区地铁车站基坑的变形总体上较正常地层区大一些，立柱隆起量大多在 45~80 mm，远超出规定的允许值 20 mm。在卸载情况下，坑底厚度较大的深古河道地层产生的向坑内的侧向变形可能是造成坑底土体以及立柱隆起的主要原因，而非卸载导致的土体回弹。
- 2) 深古河道地层的含水率和孔隙比总体上随深度的增加而减小，这个规律既与自重应力下的压密有

关,也与随深度的增加而减小的塑性指数有关。尽管由于埋深较大贯入阻力超过 1.0 MPa,但液性指数接近 1.0,处于软塑 - 流塑状态,深厚的软塑 - 流塑深古河道土层在深基坑开挖卸载情况下容易产生侧向流动。

3) 典型深古河道地层 $\textcircled{5}_{3-1}$ 粉质粘土的强度比 c_u/p'_v 稳定在 0.23 左右,与上部覆盖的 $\textcircled{5}_1$ 粘土的强度比一致,均可以看作为正常固结地层。软塑 - 流塑深古河道土层所具有的较低的强度比是深基坑开挖卸载下容易产生塑性流动的主要原因。

参考文献

- [1] 孙永福. 上海及长江口第四纪沉积层中埋盖的古河道[J]. 上海国土资源, 1988(4): 9-16.
- [2] 高大铭, 陈振荣, 吕全荣. 上海陆域地区古河道溺谷相沉积层工程地质特征研究[J]. 上海国土资源, 1998, 19(4): 11-21.
- [3] 史玉金. 上海陆域古河道分布及对工程建设影响研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(2): 277-283.
- [4] 孙更生. 软土地基与地下工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1984.
- [5] 侯学渊, 夏明耀, 李桂华. 软土深基坑的稳定与隆起研究[M]//软土地基理论与实践. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992: 69-83.
- [6] Shirlaw, J.N, Tan, T.S. and Wong, K.S. (2006) Deep Excavations in Singapore Marine Clay. *5th International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Taylor & Francis Group, London, 13-28.
- [7] Chen, R.P., Li, Z.C., Chen, Y.M., et al. (2015) Failure Investigation at a Collapsed Deep Excavation in Very Sensitive Organic Soft Clay. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, **29**, Article ID: 04014078. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000557](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000557)
- [8] 王建华, 徐中华, 陈锦剑, 等. 上海软土地区深基坑连续墙的变形特性浅析[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(4): 485-489.
- [9] 卢俊义, 杨敏. 上海地区深基坑工程连续墙和墙后地表土体的变形特点[J]. 岩土工程学报, 2008(S1): 369-375.
- [10] 王卫东, 徐中华, 王建华. 上海地区深基坑周边地表变形性状实测统计分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(11): 1659-1666.
- [11] 徐中华, 王建华, 王卫东. 上海地区深基坑工程中地下连续墙的变形性状[J]. 土木工程学报, 2008, 41(8): 81-86.
- [12] 晁浩, 骆佳樑, 钱谨伟, 等. 江苏省太仓市的软土分布及力学特征[J]. 土木工程, 2022, 11(1): 62-70. <https://doi.org/10.12677/HJCE.2022.111008>
- [13] 上海市勘察设计行业协会. DG/TJ 08-61-2018 基坑工程技术规范[S]. 上海: 上海市城乡建设和交通委员会, 2010.
- [14] 布兰德, 布伦纳. 软黏土工程学[M]. 叶书麟, 等, 译校. 北京: 出版中国铁道出版社, 1991.