

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

苏通大桥地基中敏感优势层工程地质问题分析

刘军熙^{1,2)}, 阎长虹¹⁾, 许宝田¹⁾

1) 南京大学地球科学系, 210093; 2) 山东岩土工程勘察总公司, 济南, 250014

内容提要:根据优势面理论,采用优势指标法将敏感优势层分为3级,并确定了苏通大桥地基中的1粉砂层和7粉细砂层为敏感优势层。苏通大桥采用超长灌注桩基础,桩身全部置于土层中,敏感优势层的工程地质问题主要包括桩基承载力问题、软土流变问题及砂土液化问题。本文研究认为,敏感优势层将导致桩基承载力的降低,敏感优势层的流变将影响基坑的稳定性,通过试验得到了土的流变模型参数。此外,敏感优势层皆为砂土层,在震动荷载作用下会发生液化而丧失承载力。

关键词:苏通大桥;地基;敏感优势层;工程地质问题

土体优势层划分和优势层观点是罗国煜教授在苏州—南通(苏通)大桥和南京地铁研究中具有创造性和富有特色的成果,是优势面理论(罗国煜等,1991,2000;罗国煜,1992,1993;倪宏革,罗国煜,2000)的重要组成部分。优势层是指依据一定的优势指标划分出的特殊工程地质层,包括持力优势层和敏感优势层,敏感优势层是指力学性质软弱、易液化、承载力小、厚度稳定的地层(软土层、液化层等)。在建的苏通大桥采用超长灌注桩基础,由于基岩埋深大(300 m以下),桩身全部置于土层中,敏感优势层对基础承载力和基础变形有着重大的影响,因此,有必要对敏感优势层的工程特性进行分析。

1 工程地质概况

在建的苏通长江公路大桥位于长江河口地段,初步设计方案是全桥由主桥、港区专用桥和引桥组成,全长7600 m(最终实际长度5500 m),主桥采用特大跨度双塔斜拉桥方案。场区内基岩仅零星分布于长江两岸的剥蚀残丘地带,第四系地层广泛分布,由一套砂—粘土交替沉积序列构成,剖面图见图1,第四系覆盖层厚达300 m左右,部分土层力学性质差,力学指标见表1,给地基稳定性带来了隐患。本文试图通过

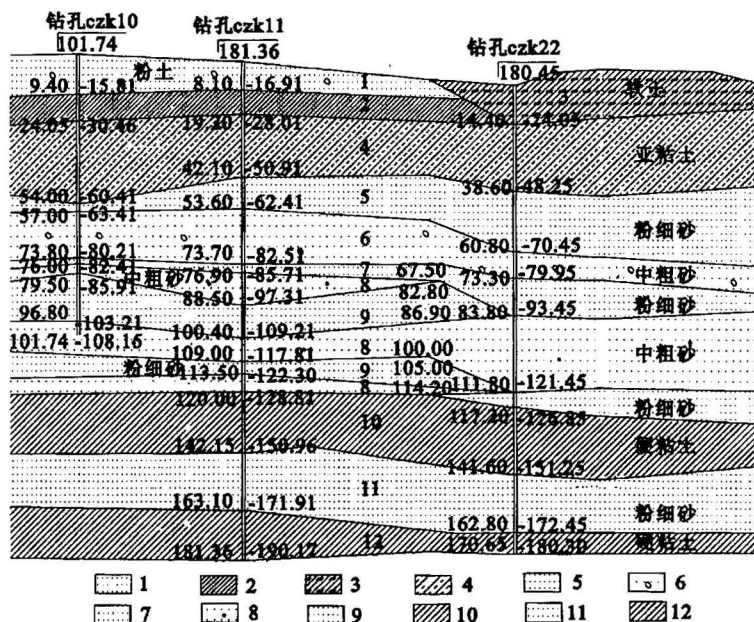


图1 苏通大桥工程地质综合剖面图

Fig. 1 Geotechnical composite section of Suzhou—Nantong highway bridge

- 1—粉砂;2—硬亚粘土;3—软土;4—亚粘土;5—粉细砂;6—中粗砂;7—粉细砂;
8—中粗砂;9—粉细砂;10—硬粘土;11—粉细砂;12—硬粘土
1—Fine silt sand;2—hard loam;3—soft soil;4—loam;5—silt and fine sand;
6—medium—coarse sand;7—silt and fine sand;8—medium—coarse sand;9—silt
and fine sand;10—hard clay;11—silt and fine sand;12—hard clay

对大桥地基中众多土层的工程性质分析,找出对工程稳定性起不良作用的敏感优势层,研究结果可以对工程设计和施工有重大的参考价值。

2 敏感优势层的确定

蒋建平(2002)给出了确定优势持力层的综合优

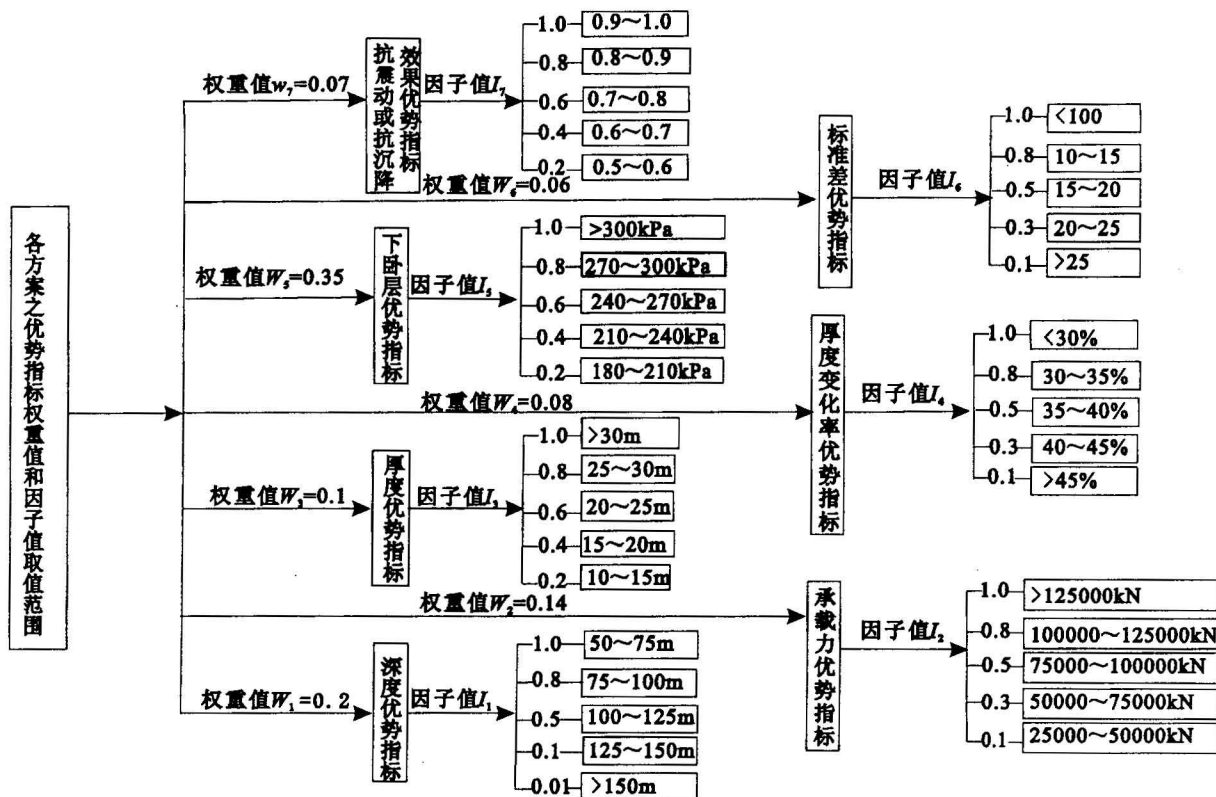


图 2 优势指标权重值(W)和因子值(I)取值范围

Fig. 2 Weight(W) and factor result(I) of preferred indices

势指标法。敏感优势层的确定方法与优势持力层的确定方法基本一致,也是通过对土体综合分析建立了反映土体力学特性的7项指标,即:①深度(成本)优势指标;②承载力大小优势指标;③厚度优势指标;④厚度变化率优势指标;⑤下卧层性质优势指标;⑥N(N为标贯击数)标准差优势指标;

⑦抗震动或抗沉降效果优势指标,根据优势指标的因子值和权重值(取值方法如图2),得到综合优势指标值:

$$R_i = I_{1i} \cdot W_1 + I_{2i} \cdot W_2 + I_{3i} \cdot W_3 + I_{4i} \cdot W_4 + I_{5i} \cdot W_5 + I_{6i} \cdot W_6 + I_{7i} \cdot W_7 \quad (1)$$

其中 R_i 为第 i 层土层的综合指标值; $W_1 \sim W_7$ 为权重值,根据专家经验取值; $I_{1i} \sim I_{7i}$ 为因子值,根据各指标取值范围确定。指标值和权重值取值方法如图2。

根据 R_i 的取值范围本文将敏感优势层分为3级如表2。

根据表1、2及综合指标计算方法,得到,敏感层——1粉砂层($R=0.374$)和7粉细砂层($R=0.35$)为敏感优势层,优势等级均为Ⅲ。

3 敏感优势层工程地质问题分析

敏感优势层力学性质软弱的特性必然给工程的稳定性带来不良影响。对苏通大桥来说,采用超长灌注桩基础,桩身全部置于土层中,桩身承载能力将主

表 1 地层优势指标原始值

Table 1 Original result of preferred indices of the stratum

序号	土层	优势指标值						
		承载力大小(kN)	厚度(m)	厚度变化率(%)	下卧层性质极限端阻力(kPa)	深度(m)	抗震动或抗沉降效果	N标准差
1	1粉砂	18920	8.1	52	200	8.1	0.41	10.0
2	2硬亚粘土	33650	10.3	35	120	19.2	0.68	7.0
3	3软土	10250	18.2	40	170	18.2	0.50	2.13
4	4亚粘土	36589	20.1	37	180	42.1	0.61	8.18
5	5粉细砂	35624	11.5	42	340	53.6	0.63	14.62
6	6中粗砂	45986	12.0	38	200	73.4	0.66	19.79
7	7粉细砂	33625	10.5	36	190	83.5	0.61	20.3
8	8-1中粗砂	56510	22.0	50	250	90.8	0.65	14.91
9	8-2粉细砂	42103	11.9	46	170	100.4	0.66	24.25
10	9硬粘土	89659	22.1	33	210	142.2	0.68	18.8
11	10粉细砂	45320	21.0	32	200	163.0	0.72	20.06
12	11硬粘土	94444	13.9	46	250	170.6	0.75	20.4

注: N 为标贯击数。

要通过桩侧摩擦力发挥,不同土层所能提供的侧摩擦力是不同的。在基坑开挖过程中敏感优势层发生流变,将影响基坑的稳定性;敏感优势层皆为砂土层,在震动荷载作用下会发生液化丧失承载力。所以,对苏通大桥来说,敏感优势层的工程地质问题主要包括承载力问题、软土流变问题及砂土液化问题等。

表 2 敏感优势层等级划分表

Table 2 Classification of sensitive preferred stratum

综合指标值(R_i)	敏感优势层等级
$R < 0.3$	I
$0.3 \leq R \leq 0.35$	II
$0.35 \leq R \leq 0.4$	III
$R > 0.4$	非敏感优势层

3.1 敏感优势层对桩基承载力的影响

苏通大桥拟采用大直径超长桩基础,桩长达 120m 以上,桩径 2m。大直径超长桩有许多优越性,如可承受很大荷载,有良好的抗震、抗风稳定性和具有较强的抵御冲击能力,故安全可靠,且能减少承台工作量,因而总造价相应会低。所以,大型灌注桩在大型桥梁中得到了非常广泛的应用,它对桥梁建设具有特殊重要的意义。但由于桩长较大,桩顶荷载的大部分将由桩身侧摩阻力提供,即荷载由各土层共同承担。因此,由于敏感优势层不但力学性质软弱,而且还有稳定的厚度,它的存在必定弱化了桩基的承载能力。

本文运用有限元数值分析方法,对存在敏感优势层和没有敏感优势层的情形下的单桩承载力进行了计算。计算时将桩简化为轴对称问题,桩身采用线弹性模型,桩周土体采用弹塑性模型,采用 Drucker-Prager 屈服准则,通过沉降控制来施加荷载。分别计

算桩入敏感优势层和不入敏感优势层时的桩基承载力,在计算桩不入敏感优势层时的承载力时,敏感层①不予考虑,即桩顶从 2 硬亚粘土层顶面算起,敏感层②的力学参数取相邻土层力学参数的平均值,计算所用力学参数如表 3。计算结果如图 3,可见,桩入敏感优势层时,其承载力远远低于不入敏感优势层时的承载力。因此,在成桩时,如遇到敏感优势层,需对地基进行加固处理,以保证承载力的要求。

表 3 桩土力学参数

Table 3 Mechanics parameters of pile and soils

序号	土层	力学参数					桩侧摩擦系数
		C (kPa)	φ (°)	E (kPa)	μ	γ (kN/m ³)	
1	1 粉砂	8	20	4250	0.42	17.9	0.33
2	2 硬亚粘土	32	30	14620	0.31	18.6	0.41
3	3 软土	9	23	14510	0.32	18.2	0.45
4	4 亚粘土	32	25.3	10760	0.33	18.6	0.32
5	5 粉细砂	15	20.1	9490	0.34	18.0	0.31
6	6 中粗砂	9	28	18520	0.28	18.6	0.35
7	7 粉细砂	7	21	5190	0.37	17.6	0.31
8	8-1 中粗砂	18	24	14740	0.28	18.7	0.39
9	8-2 粉细砂	19	26	18620	0.25	18.3	0.38
10	9 硬粘土	35	22	29860	0.30	19.0	0.42
11	10 粉细砂	10	26	20130	0.24	18.6	0.32
12	11 硬粘土	40	20	26340	0.22	19.2	0.50
13	桩			30000000	0.20		25.0

3.2 软土流变问题

沿海地区的土木工程大多处在软土地基之上或埋置于软弱地层之中。因此,认真研究岩土尤其是软弱土层的工程特性,显得特别重要。其中,岩土的流变性质越来越引起人们的重视(郑榕明,1996)。

苏通大桥桥址区内第四系分布广泛,为一套河湖滨海相松散沉积物。其中的敏感优势层①、②为软弱层,它的流变特性,势必对地基稳定性、地基承载力和工程施工带来不良影响。取敏感优势层中的土体进行流变试验,假设其流变特性服从 Kelvin 模型。在不变应力用下,其流变方程为:

$$\epsilon = \frac{\sigma_0}{E} (1 - e^{-\frac{E}{k}t}) \tag{2}$$

σ_0 —有效应力; ϵ —应变; E —虎克弹簧常数; k —牛顿粘壶的粘滞系数; t —时间。试验围压 $\sigma_3 = 50$ kPa,施加轴向压力 $\sigma_1 = 100$ kPa。根据粘弹性理论的相似原理,可用 $S_0 = \sigma_1 - 2\mu\sigma_3$ 代替单轴流变方程中的 σ_0 ,并设泊松比 $\mu = 0.3$,采用回归反演法(杨志法,2002),可求得 $\sigma_1 = 100$ kPa 时的模型参数如表 4。

将参数反演结果带入式(2),所得本构方程与试

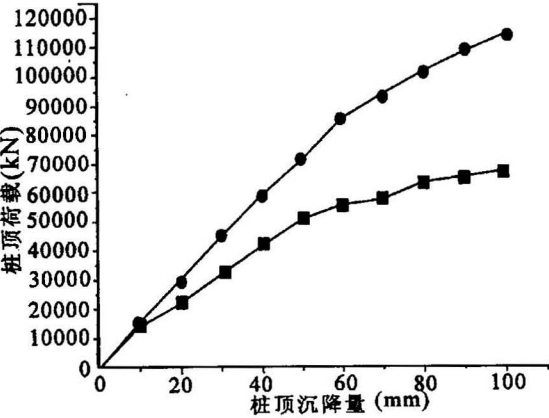


图 3 桩荷载—沉降量曲线

Fig. 3 load—subsidence curve of pile

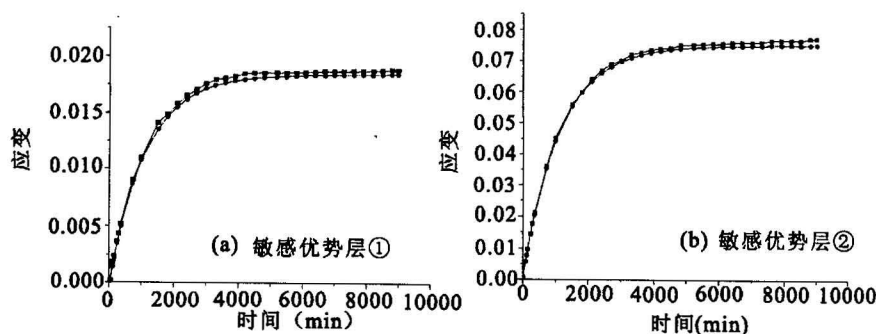


图 4 试验数据与反演结果对比

Fig. 4 The comparison between the calculated results and test data

表 4 模型参数反演结果

Table 4 Regressive inverse result of the model parameters

土层	σ_1 (kPa)	E(MPa)	k(GPa·min)
敏感层①	100	5.456	6.106
敏感层②	100	2.000	2.847

验数据比较如图4,可以看出根据反演结果所得到的时间—应变关系与试验数据比较接近。用传统的弹性理论和弹塑性理论分析岩土变位时,得到的是土的瞬时变形。而事实上土的变形发展具有时间性。考虑土体流变的分析方法能较为准确地反映围护结构和土体内力变化和位移发展的时间性。这比弹性理论分析方法更接近工程实际。同时,考虑到土的流变特性也是保证施工顺利进行的重要前提。

3.3 砂土液化问题

液化问题可能导致大面积的地面变形、滑坡、侧

移和喷砂等危害(汪明武, 1999),饱和砂土的流动破坏发生突然,危害性大(陈春霖, 2000)。由于苏通大桥地基中的两个敏感优势层均为砂土层,本文结合标贯和剪切波速测试结果,按三个规范进行判定。表5为砂土液化的判定结果的对比表。可以看出,敏感层①为液化层。

对砂土液化这一问题,国内外一直存在较多争议。代表性的观点有三种:将液化层全部扣除、不考虑液化影响、根据液化危险性进行折减。国

标《构筑物抗震设计规范》(GB50191-93)即认为,对于液化地基上的低承台桩基可采用后一种作法,进行折减。考虑到苏通大桥为特大型跨江桥梁,将采用超长型桩,可不进行液化折减。

4 结论

综上所述,苏通大桥地基中敏感优势层工程地质问题包括承载力问题、软土流变问题及砂土液化问题。研究表明,敏感优势层的存在将会造成桩基承载力的下降;考虑土体流变的分析方法能更为准确地反映围护结构和土体内力变化和位移发展的时间性,软土的流变特性必将影响到地下结构施工的顺利进行和对地基变形的控制;砂土液化问题也将给地基稳定性带来隐患。因此,必须对敏感优势层做相应的处理,以满足工程建设的需要。

表 5 砂土液化判定结果

Table 5 Result of sand liquefaction

层组	标贯法						剪切波速法 《岩土工程勘察规范》 (GB50021-94)					
	地下水位 (m)	标贯中点 深度 (m)	实测击数 $N_{63.5}$ (击)	《公路工程抗震设计规范》 (JTJ004-89)			《建筑抗震设计规范》 (GBJ11-89)					
				修正击数 N_l (击)	临界击数 N_c (击)	液化判定	临界击数 (击)	液化判定	测点深度 (m)	实测波速 (m/s)	临界波速 (m/s)	液化判定
敏感层①	1.0	1.5	3	5.35	8.81	液化	6.1	液化	4	110	122.6	液化
		3.2	7	10.20	11.98	液化	7.32	液化	5	134	136.1	液化
		4.5	4	5.41	9.80	液化	7.84	液化	6	143	148	液化
		6.6	10	12.07	13.31	液化	9.36	不液化	7	167	158.7	不液化
		7.6	7	8.03	8.91	液化	7.64	液化	8	159	168.4	液化
敏感层②	0	1.3	8	14.60	12.36	不液化	6.18	不液化	2	106	87.9	不液化
		3.4	11	17.28	9.19	不液化	4.8	不液化	3	118	106.9	不液化
		5.4	13	18.01	7.95	不液化	4.86	不液化	4	156	122.6	不液化

参 考 文 献

- 陈春霖,张惠明. 2000. 饱和砂土三轴试验中的若干问题. 岩土工程学报, 22(6): 659~663.
- 罗国煜,吴浩. 1991. 工程勘察中的新构造—优势面分析原理. 北京:地质出版社.
- 罗国煜. 1992. 区域稳定性优势面分析理论与方法. 岩土工程学报, 14(6): 10~18.
- 罗国煜. 1993. 岩坡优势面分析及其专家系统研究. 科学通报, 38(21): 1979~1982.
- 罗国煜,陈新民,李晓昭,等. 2000. 城市环境岩土工程. 南京大学出版社, 13~19.
- 蒋建平,高广运,罗国煜. 2002. 苏通大桥超长灌注桩基持力层分析. 土工基础, 16(4): 43~45.
- 蒋建平. 2002. 水下大直径超长桩理论分析与工程应用. 南京:南京大学出版社.
- 倪宏革,罗国煜. 2000. 地下开采中优势面控灾机理分析. 地质论评, 46(1): 71~78.
- 汪明武,罗国煜. 1999. 最优化方法在砂土液化势评价中的应用. 岩土工程学报, 21(6): 704~706.
- 许宏发. 2000. 桩的抗拔承载力与非线性计算理论研究. 南京:中国人民解放军大学工程兵工程学院出版社.
- 杨志法,王思敬,冯紫良,等. 2002. 岩土工程反分析原理及应用. 北京:地震出版社.
- 郑榕明,陆浩亮,孙钧. 1996. 软土工程中的非线性流变分析. 岩土工程学报, 18(5): 2~13.
- 郑铤鑫,武强,侯艳声. 2002. 城市地面沉降研究进展及其发展趋势. 地质论评, 48(6): 612~618.

References

- Chen Chunlin, Zhang Huiming. 2000. Some problems in triaxial tests on saturated sands. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 22(6): 659~663 (in Chinese with English abstract).

- Flugge W. 1975. Viscoelasticity (second edition). New York: Apring Verlag Heideberg Berlin.
- Luo Guoyu, Wu Hao. 1991. Principle of Neotectonic—preferred Plane Analysis on Geotechnical Investigation. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Luo Guoyu. 1992. Analysis of regional stability by theory of preferred plane. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 14(16): 10~18(in Chinese with English abstract).
- Luo Guoyu. 1993. Analysis of preferred plane and expert system of rock slope. Chinese Science Bulletin, 38(21): 1979~1982(in Chinese).
- Luo Guoyu, Chen Xinmin, Li Xiaozhao, et al. 2000. Environment Geotechnical Engineering. Nanjing University Publishing House, 13~19(in Chinese).
- Jiang Jianping, Gao Guangyun, Luo Guoyu. 2002. Analysis of bearing layer for piles in Suzhou—Nantong highway bridge. Soil Eng. And Foundation, 16(4): 43~45 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Jianping. 2002. Theory Study and Engineering Application of Large Dimeter and Super-long Pile under Water. Nanjing University Publishing House, (in Chinese).
- Ni Hongge, Luo Guoyu. 2000. A study of the mechanism of hazards controlled by preferred plane in underground mining. Geological Review, 46(1): 71~78(in Chinese with English abstract).
- Wang Mingwu, Luo Guoyu. 1999. Application of optimization method to assessment of sand liquefaction potential. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 21(6): 704~706 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Rongming, Lu Haoliang, Sun Jun. 1996. Nonlinear creep analysis for soft soil engineering. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 18(5): 1~13(in Chinese with English abstract).
- Zheng Xianxin, Wu Qiang, Hou Yansheng, Wu Mengjie, Ying Yufei. 2002. Advances and trends in research on urban land subsidence. Geological Review, 48(6): 612~618 (in Chinese with English abstract).

Analysis of Engineering Geology Problem of Sensitive Preferred Stratum for the Foundation of Suzhou—Nantong Bridge

LIU Junxi^{1),2)}, YAN Changhong¹⁾, XU Baotian¹⁾

1) Department of Geoscience, Nanjing University, 210093; 2) Shandong Geotechnical Investigation Corporation, Jinan, 250014

Abstract

Based on the preferred plane theory, the sensitive preferred stratum is classified into 3 grades, from which the stratum of fine silt-1 and silt—fine-sand-7 in the foundation of Suzhou—Nantong (Sutong) bridge are verified to be the sensitive preferred stratum. To Suzhou—Nantong bridge, the super long piles will be used, and the body of the piles will be all in the soils. So the engineering geology problems of the sensitive preferred stratum include: bearing capacity of the piles, rheology of the soft soil and sand liquefaction. The study results indicate that because of the sensitive preferred stratum, the bearing capacity of piles will be reduced, the rheology of the soft soil will affect the stability of the pits, by the experiments the parameters of the rheology model are gotten. Under the effect of the quaky loads, the sands is easy to be liqueficated, then the stratum will lose bearing capacity.

Key words: Suzhou—Nantong (Sutong) Bridge; foundation; sensitive preferred stratum; engineering geology