

## 江苏沿海高速公路软土路基问题的工程地质分析

陈艺南 刘松玉

(东南大学岩土工程研究所, 南京 210096)

**摘要:** 根据江苏徐州~连云港高速公路软土地基工程地质问题的出现,就该地区的水文工程地质条件、软土分布规律、分布特点、典型路段软土的力学指标进行了深入的分析、探讨,认为我国沿海地区高速公路软土地基出现的地质灾害多是因为软土层纵横断面厚薄分布不均、勘测过程中现场及室内试验提供的设计指标与实际差异过大等综合因素造成。经综合对比,指出高速公路软土地基勘测应选用合理的手段,提出勘测设计指标的确定应以十字板、静力触探(CPT)现场试验为准。

**关键词:** 软土层; 十字板试验; CPT

**中图分类号:** TU447

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1007-7081(2001)06-0507-05

连云港市位于江苏省东北部,东临黄海,该区位于鲁中南丘陵与淮北平原的结合部,整个地势自西北向东南倾斜,平均海拔高度3~4 m。徐州~连云港高速公路连云港软土段部分路基在施工过程中于2000年4月6日~2000年5月20日相继出现了路堤开裂、路基滑移等问题,详见表1。

表1 徐州~连云港高速公路路堤开裂、路基滑移统计表

| 破坏位置                   | 概 况  | 破坏类型   |
|------------------------|--|--|
| A4标段 K14+671.6~K14+713 | 该段属鱼塘路基,设计要求筑围堰、抽水、清淤、再打搅拌桩                        | 滑移段。路基上有3条纵向裂缝,裂缝宽度2~30 cm,滑移时裂缝最大宽度70~80 cm |
| A5标段 K18+877~K19+022   | 地基采用砂砾石垫层处理,予压期180 d,予压高度4.12~4.33 m,开裂时路基填高2.50 m | 开裂段。裂缝多为纵向开裂,宽度由路中心向路肩为2~9 cm                |
| K19+565~K19+641.5      | 地基采用粉喷桩处理,桩长10.50 m,桩距1.40~1.60 m,予压期60 d          | 开裂段。裂缝多为纵向开裂,宽度由路中心向路肩为2~8 cm                |
| K19+753.5~K19+873      | 地基采用粉喷桩处理,桩长10.50 m,桩距1.4 m,予压期60 d                | 开裂段。裂缝多为纵向开裂,宽度由路中心向路肩为2~8 cm                |
| K20+000~K20+170        | 地基采用粉喷桩处理,桩长11~12 m,桩距1.40 m,予压期60 d天              | 开裂段。裂缝多为纵向开裂,宽度由路中心向路肩为4~8 cm                |

开裂段、滑移段主要位于大岛山一线,图1为失稳软土层纵断面分布示意图。

## 1 工程地质条件

该区的工程地质资料显示,连云港软土为滨海相沉积的淤泥~淤泥质土,软土在土体结构未被破坏时具固态特征,但一经扰动,即转变为稀释流动状态,由于软土具一定的结构强度,加上海水中沉积等,该区的软土属欠固结土,具有高压缩性,触变性,流变性和低透水性等特点。其主要特征见表2。

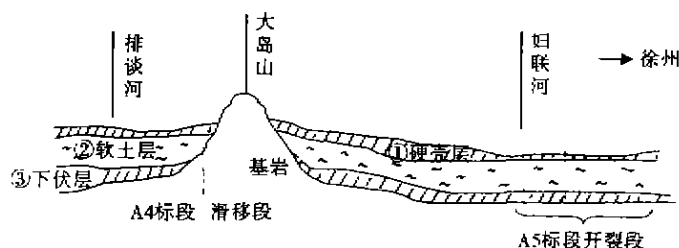


图1 徐州~连云港高速公路失稳段软土层工程地质纵断面

收稿日期:2001-06-15.

作者简介:陈艺南(1964—),男,讲师,工程师。

表2 徐州~连云港高速公路土层分布特征表

| 层号名称 | 成因时代         | 厚度/m       | 岩性及分布特征               |
|------|--------------|------------|-----------------------|
| ①硬壳层 | $Q_1^{pl+m}$ | 0~4.00     | 高液限粘土,浅灰黄色,软~可塑,全段分布  |
| ②软土层 | $Q_1^n$      | 5.60~13.30 | 淤泥,淤泥质高液限粘土,流塑,厚度变化大  |
| ③下伏层 | $Q_1^{pl}$   |            | 细砂混高液限粘土及砾砂,青灰色,透镜状分布 |

各土层物理力学指标统计见表3,②层软土层淤泥~淤泥质粘土典型断面物理力学性质指标见表4.

表3 徐州~连云港高速公路土层物理力学指标统计表

| 指标   | $\omega/\%$ | $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$ | $e$  | $\omega_L/\%$ | $\omega_P/\%$ | $I_P$ | $I_L$ | $E_s/\text{MPa}$ | 快剪             |               | 固快             |               |
|------|-------------|--|------|---------------|---------------|-------|-------|------------------|----------------|---------------|----------------|---------------|
|      |             |  |      |               |               |       |       |                  | $C/\text{kPa}$ | $\phi/^\circ$ | $C/\text{kPa}$ | $\phi/^\circ$ |
| ①硬壳层 | 35.5        | 18.6                                   | 1.05 | 56.1          | 24.3          | 33.4  | 0.51  | 3.24             | 16             | 11.4          | 25             | 15.5          |
| ②软土层 | 75.6        | 17.4                                   | 1.81 | 69.6          | 24.8          | 42.7  | 1.41  | 1.01             | 12.5           | 2.3           | 3              | 8.4           |
| ③下伏层 | 30.2        | 18.9                                   |      |               |               |       |       | 5.10             | 42             | 24.2          |                |               |

| 指标   | 砂/%  | 粉/%  | 粘/%  | $C_s/(\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1})$ | N击  | 十字板              |                  |      | $P_z/\text{kPa}$ | 静力触深             |                  |
|------|------|------|------|---------------------------------------|-----|------------------|------------------|------|------------------|------------------|------------------|
|      |      |      |      |                                       |     | $C_u/\text{kPa}$ | $C_v/\text{kPa}$ | $St$ |                  | $q_c/\text{MPa}$ | $f_c/\text{MPa}$ |
| ①硬壳层 | 15.4 | 46.9 | 37.7 |                                       | 2.8 |                  |                  |      |                  | 0.61             | 0.0322           |
| ②软土层 | 9.8  | 37.2 | 53.0 | 4.53                                  | 1.0 | 13.1             | 3.2              | 4.4  | 65               | 0.26             | 0.0056           |
| ③下伏层 |      |      |      |                                       | 4.0 |                  |                  |      |                  |                  |                  |

表4 ②层软土层淤泥~淤泥质粘土典型断面物理力学性质指标表

| 指标                  | $\omega/\%$ | $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$ | $e$   | $\omega_L/\%$ | $\omega_P/\%$ | $St$ | $I_L$ | $E_s/\text{MPa}$ | $C_s/(\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1})$ |
|---------------------|-------------|--|-------|---------------|---------------|------|-------|------------------|---------------------------------------|
| (1)K1+276~L2+050    | 63.1        | 15.8                                   | 1.92  | 63.4          | 23.4          | 4.2  | 0.98  | 1.00             | 4.09                                  |
| (2)K4+825~KL5-353   | 66.2        | 16.0                                   | 1.84  | 60.6          | 26.3          | 4.9  | 1.32  | 1.20             | 3.81                                  |
| (3)K14+535~K14+553  | 61.4        | 15.3                                   | 1.73  | 43.7          | 25.9          | 5.6  | 1.69  | 1.36             | 4.21                                  |
| (4)K15+913~K16+644  | 66.3        | 15.9                                   | 1.87  | 45.5          | 26.0          | 3.9  | 1.93  | 1.44             | 0.52                                  |
| (5)K16+954~K16+982  | 70.1        | 15.9                                   | 1.92  | 45.6          | 23.3          | 6.1  | 1.47  | 1.07             | 2.05                                  |
| (6)K17-381~K17-409  | 67.5        | 16.0                                   | 1.85  | 41.5          | 21.6          | 5.7  | 1.51  | 1.21             | 1.22                                  |
| (7)K18-791~K19-220  | 71.0        | 15.8                                   | 2.00  | 50.2          | 26.9          | 4.6  | 1.30  | 1.30             | 0.68                                  |
| (8)K19-530~K20+629  | 74.2        | 15.8                                   | 2.058 | 51.3          | 27.3          | 6.8  | 1.43  | 1.30             | 2.16                                  |
| (9)K20-629~K21+262  | 71.2        | 15.6                                   | 2.10  | 49.3          | 29.5          | 5.0  | 1.90  | 1.30             | 0.61                                  |
| (10)K23+114~K23+154 | 67.9        | 15.8                                   | 1.90  | 48.8          | 32.1          | 5.4  | 1.50  | 1.29             | 3.77                                  |

## 2 软土的基本特征

(1)具有高含水量、高液限、低密度、低强度、高压缩性、低透水性、高等灵敏度的特点. 即:  $\omega=45\%\sim 85\%$ ,  $\omega_L=40.1\%\sim 65.1\%$ ,  $e=1.0\sim 2.56$ ,  $I_P=16\sim 37.8$ ,  $\alpha_r=0.5\sim 1.0\text{MPa}^{-1}$ , 固结系数  $C_v=10^{-1}\sim 10^{-4}\text{cm}^2/\text{s}^{-1}$ ,  $St=4\sim 8$ , 因此该类土压缩沉降量大, 排水固结缓慢, 地基稳定性差.

(2)具有一定的结构性, 其表现为力学特性, 与应力水平密切相关, 应力水平较低时, 土体呈现较好的力学特性, 应力水平超过某临界值后, 土的结构性破坏, 力学性质明显恶化, 短期内很难恢复.

(3)②层软土层上多分布有①层硬壳层, 力学指标见表2.

表5 我国几条典型软土段高速公路的主要物理力学指标对比表

| 地点        | 土层   | $\omega/\%$ | $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$ | $E_s/\text{MPa}$ | $\omega_L/\%$ | $I_p$     | $C_s/(\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1})$ | $C/\text{kPa}$ | $\phi/^\circ$ |            |
|-----------|------|-------------|--|------------------|---------------|-----------|---------------------------------------|----------------|---------------|------------|
| 沪宁高速公路昆山段 | 硬壳层  | 27          | 19.0                                   | 0.85             | 35.1          | 14.4      | 1.5                                   |                |               |            |
|           | 淤泥质土 | 40~60       | 17~19                                  | 1.04~1.6         | 35~43         | 12~19     | 0.3~0.6                               |                |               |            |
| 沪嘉高速公路    | 硬壳层  | 26.5~38     | 18.6                                   | 0.9~1.06         | 39~45         | 15~19     |                                       | 15.5           | 14.5          |            |
|           | 淤泥质土 | 40~60       | 17.3                                   | 1~1.45           | 40~46         | 18~27     | 3.9~4.1                               | 8.3~10.3       | 7~8.5         |            |
| 杭甬高速公路昆山段 | 淤泥质土 | 40~65       | 16.2~18.5                              | 1.3~1.7          | 36~46         | 12~24     | 0.4~4.7                               | 16~18          | 9~15          |            |
| 连云港市区     | 淤泥质土 | 45~75       | 15.5~17.5                              | 1.0~2.0          | 43~55         | 20~30     |                                       | 11~16          | 6~12.00       |            |
|           | 硬壳层  | 硬壳层         | 34.8                                   | 18.1             | 3.1           | 50        | 20                                    | 18             | 11.3          |            |
|           | 淤泥质土 | 淤泥质土        | 46.5~55.0                              | 15.4~17.5        | 0.62~1.60     | 40.1~65.1 | 16.0~37.3                             | 0.20~5.71      | 7~12          | 5.70~12.40 |

### 3 路基失稳工程地质问题分析

表 4 为以钻探为主结合静探划分的 10 个断面的物理力学指标统计表,结合软土层路基纵断面分布图可知:

(1)从地形地貌上看,开裂区段软土层较厚,厚度为 8.00~10.50 m,硬壳层厚度多在 1 m(多有 0.30~0.60 m 松散表层土、耕植土),属软土层较厚、硬壳层薄的地段,且地表多有水塘。

滑移段位于水塘与丘岗坡地之间,地形起伏大,无硬壳层,软土层厚 1.40~3.80 m,③层下伏土层顶面倾向水塘且坡度相对较大,有利于倾向水塘的开裂滑移。

(2)从软土层岩土组成条件来看,几乎所有钻孔描述均说明②层软土层分布有薄层 0.2~0.5 m 的粉砂、粉土,而全面复查的静探资料反映出的粉砂、粉土薄层力学性质接近于淤泥~淤质泥土,说明该薄层粉砂、粉土力学性质差,而标贯(SPT) $N=0.8\sim 1$  击,判断为液化土,钻孔资料说明该层砂在水平和竖直方向上分布不均,在对该类土施工(施工振动、粉喷桩振动成桩)时,极有可能形成局部软土层的整体失稳,出现开裂滑移。

(3)从力学指标看,开裂段滑移段软土与其他未开裂段软土相比,无明显特别差异,但静力触探资料在两段失稳处  $q_c$ 、 $f_s$  较小,即  $q_c=0.19\sim 0.24$  MPa,说明危险断多发生于  $q_c=0.19\sim 0.24$  MPa,该区段未滑移段的  $q_c$  均大于 0.3 MPa。表 6 为  $q_c=0.19\sim 0.24$  MPa 的里程区段。基本处于滑移段、开裂段位置。

表 6 徐连高速公路  $q_c=0.19\sim 0.24$  MPa 的里程区段

| 里程      | 孔号    | 软土层        |            |
|---------|-------|------------|------------|
|         |       | $q_c$ /MPa | $f_s$ /MPa |
| K14+500 | fj31  | 0.19       | 0.0045     |
| K14+550 | fj32  | 0.23       | 0.0073     |
| K19+000 | fj95  | 0.22       | 0.0064     |
| K19+050 | fj96  | 0.24       | 0.007      |
| K19+100 | fj97  | 0.22       | 0.0064     |
| K19+510 | JK16  | 0.20       | 0.003      |
| K19+700 | Jf107 | 0.24       | 0.0057     |
| K19+950 | fj110 | 0.23       | 0.0058     |

(4)10 个断面的物理力学指标统计表,即由 2 个失稳和 8 个未破坏段对比可看出,土工试验测得的物理力学指标因多家单位提供,试验方法有所不同,失稳段和破坏段没有明显区别,但静力触探判断,滑移、破坏段多发生于  $q_c=0.19\sim 0.24$  MPa 的区段,但用静力触探确定  $q_c<0.25$  MPa 的软土的工程特性的研究成果在该地区有待进一步研究。

(5)由静力触探指标统计总表,我国工程地质及岩土工程行业规范手册,经验中对  $p_s<0.3$  MPa 的中、高灵敏度度软土的有关力学指标的确定还处于研究发展阶段,特别是现场原位测试手段方面,目前较成熟的一种新型原位测试技术是孔压静力触探(CPTU),该试验采用实测曲线与理论曲线拟合的方法推求固结系数,较好的反映了土体固结情况,为变形沉降提供较符合实际的变形参数。

某高速公路 A1~A7 标段  $P_s<0.3$  MPa(特别  $P_s<0.2$  MPa)即  $q_c<0.24$  MPa 主要分布见表 7。

表 7 徐连高速公路 A1~A7 标段  $q_c<0.24$  MPa 区段表

| 孔号        | 里程号             | $q_c$ /MPa | $P_s$ /MPa |
|-----------|-----------------|------------|------------|
| fj18~fj12 | K13+850~K14+500 | 0.17~0.20  | 0.19~0.22  |
| fj42      | K15+500         | 0.18       | 0.20       |
| fj61      | K16+700         | 0.18       | 0.19       |
| JK12      | K16+950         | 0.20       | 0.23       |
| fj71      | K17+400         | 0.16       | 0.17       |
| fj71      | K17+850         | 0.20       | 0.23       |
| JK15      | K18+770         | 0.16       | 0.17       |
| fj93      | K18+850         | 0.16       | 0.17       |

(6)由该区高速公路软土层十字板剪切试验统计图 2(K16+950~K20+620)可知软土中  $C_u$  随深度的增加而增加

$$C_u=5.50+1.571S(\text{kPa})$$

图 3 为连云港地区地层土工力学参数随深度的分布规律图。

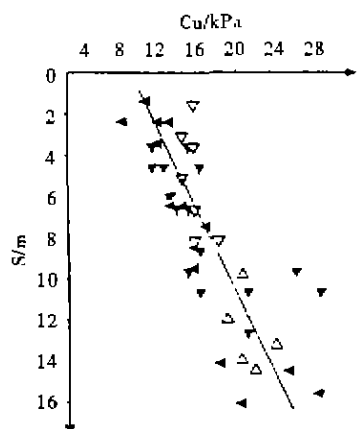
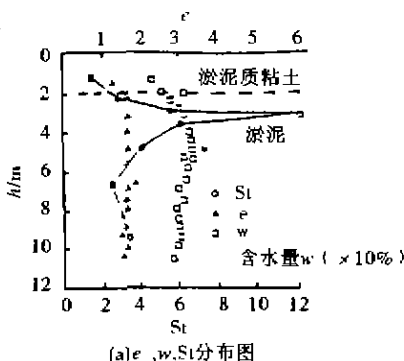
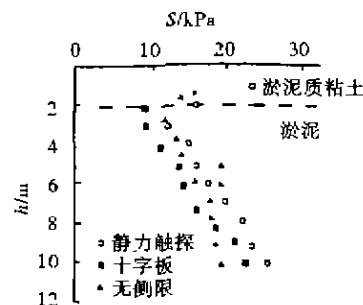


图2 徐连高速公路软土十字板剪切试验统计图



(a)  $e, w, St$  分布图



(b) 综合强度分布图

图3 连云港地区地层土工力学参数随深度的分布规律图(据 赵九斋)

(7)由该高速公路填方路堤填方前后软土层压缩指标表,滑移段桩号 K14+690、K14+750 填方前后孔隙比发生明显变化,孔隙比填方后比填方前分别增加了 20.1%、6.07%,说明土体结构已明显破坏,该两桩号处的软土体设计采用指标按原勘察设计文件明显偏大。开裂段桩号 K19+840、K30+600 填方后压缩模量比压缩前分别下降了 19.44%、11.32%说明该两桩号处的予压固结未达到设计效果。

某高速公路填方路堤填方前后钻探软土层压缩指标统计见表 8。

表8 徐连高速公路填方路堤填方前后钻探软土层压缩指标统计表

| 里程                  | 软土厚度/m         | 填方前   |            | 填方后   |            | 填方前后变化率 |          |
|---------------------|----------------|-------|------------|-------|------------|---------|----------|
|                     |                | $e$   | $E_s$ /MPa | $e$   | $E_s$ /MPa | $e/\%$  | $E_s/\%$ |
| K14+600             | 3.80           |       |            | 1.551 | 1.65       | 9.40    | 30.33    |
| K14+690             | 2.80           | 1.712 | 1.266      | 2.056 | 1.29       | -20.1   | 1.89     |
| K14+750             | 1.45           |       |            | 1.816 | 1.26       | -6.07   | 0        |
| K19+840             | 11.00          |       | 1.80       | 2.240 | 1.45       |         | -19.44   |
| K19+830             | 8.20           | 2.093 | 0.95       | 1.943 | 1.49       | 7.17    | 56.8     |
| K23+600             | 5.50           | 1.937 | 1.4025     | 1.521 | 1.59       | 21.5    | 13.4     |
| K23+700             | 5.00           | 1.856 | 1.235      | 1.683 | 1.69       | 9.3     | 36.3     |
| K27+000             | 2.70           |       |            | 1.671 | 1.25       |         |          |
| K30+600             | 8.00           | 1.690 | 1.938      | 1.671 | 1.63       | 1.20    | -11.32   |
| K47+000             | 11.60          |       |            | 1.605 | 1.45       |         |          |
| K14+600<br>~K47+000 | 1.45<br>~11.60 | 1.850 | 1.415      | 1.810 | 1.475      | 2.16    | 4.24     |

(8)徐连高速公路软土层补勘钻探剖面图(钻孔多位于连云港方向距中心线左侧 6.00~26.00 m 的路肩下)从图 4 中软土层厚度的原钻孔资料和补勘资料可见:

包含滑移段的 K14+120~K17+450 路肩处的软土分别比对应路中心处软土厚 1.10~6.20 m。包含开裂段的 K19+580~K20+120 路肩处的软土分别比对应路中心处软土厚 1.10~3.30 m。另从静探全面复查资料也说明同样问题。

由该软土层纵断面图对比全面静探复查资料及补勘的徐连软土层纵断面图可知,徐连滑移段,开裂段在横断面上路中心线处软土厚度比路

肩软土厚度大 1.10~6.20 m,如果在相同予压荷载条件下,路肩带软土层固结变形大于相应路中心处,即形成横断面上向路肩方向软土带的较大差异沉降和横断面上向路肩方向的较大侧向变形,从而导致

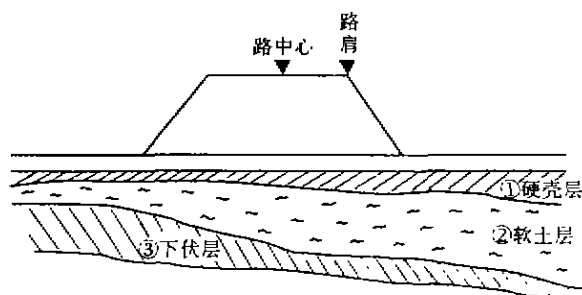


图4 徐连高速公路横断面软土层分布图

路基的开裂、滑移。

#### 4 结论

(1)徐连高速公路软土层具有高含水量、高液限、低密度、低强度、高压缩性、低透水性、高灵敏度的特点。该类土压缩沉降量大,排水固结缓慢,地基稳定性差;

(2)由图 2 和图 3 可见连云港地区软土力学性质随深度变化较明显。物理力学指标随深度逐渐增加;

(3)路基开裂段滑移段多发生在山前软土地段和厚软土地段。路肩处软土厚度大于相应路中心软土厚度 2.00 m 以上的位置易导致路基失稳;

(4)失稳段和破坏段没有明显区别,但静力触探判断,滑移、破坏段多发生于  $q_c = 0.19 \sim 0.24 \text{ MPa}$  的区段,但用静力触探确定  $q_c < 0.25 \text{ MPa}$  的软土的工程特性的研究成果在该地区有待进一步探讨;

(5)总结出了软土层不利断面的具体位置和物理力学性质指标;

(6)路基填筑后,通过预压、固结作用,软土物理力学性质得到改善;

(7)十字板剪切试验、静力触探(CPT)指标是软土路基稳定设计最重要的试验指标,勘测设计以十字板剪切试验、静力触探(CPT)指标为依据对减少软土路基地质灾害有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] 蒋振雄,刘松玉,方 磊.论我国高等级公路建设的主要岩土工程地质问题[J].东南大学学报,2000,6.
- [2] GBJ7-89,建筑地基基础设计规范[S].
- [3] GB50021-94,岩土工程勘察规范[S].
- [4] DB32/112-95,南京地区地基基础设计规范[S].

[责任编辑 周文凯]

### Engineering Geological Analysis of Problems of Soft-Soil Foundation for Expressway in Coastal Area of Jiangsu Province

Chen Yinan Liu Songyu

(Institute of Geo-technical Engineering, Southeast Univ., Nanjing 210096, China)

**Abstract** Based on problems arising in the geological engineering of the soft-soil foundation for Xuzhou-to-Lianyungang expressway construction in Jiangsu Province, a profound analysis for and inquiry into the geological condition of hydrology engineering in the area, soft-soil distributing regularity, the property of its distribution and mechanical behaviors of soft-soil layers on some typical parts of the expressway construction are given. A summary of the causes of uneven distribution of thick and thin soft-soil layers of vertical section, the great differences between the designed targets which have brought about the problems of engineering geology with soft-soil foundation for expressway construction is also offered. By comparing comprehensively with the problem of engineering geology with soft-soil foundation for expressway construction in the coastal area and summing up application of feasible means in prospecting soft-soil foundation for expressway construction, the target designing of prospecting suggested can be determined according to the vane shear test and CPT in-situ test.

**Keywords** soft-soil layer; vane shear test; CPT