

1-62
① 沪宁高速公路软土地基综合处理技术研究和实践98.18(2)
1-4.8
蔡家范 许道化

柯弘生

(江苏宁沪高速公路股份有限公司 南京 210049) (江苏省高速公路建设指挥部 南京 210001)

徐泽中 殷宗泽 方涤华

张诚厚

(河海大学 南京 210098)

(南京水利科学研究院 南京 210024)

摘要 运用更切实际的沉降计算方法,优化软基处理,优化路基施工,用动态控制法确定铺筑路面的时间,科学安排施工,有效地减少工后沉降,使全线软基路段满足设计稳定要求,达到了缩短工期,提高工程质量的目的,为全线一次建成和提前通车提供了保证,并取得节省工程费 5000 多万元的经济效益。

关键词 软土地基 沉降 压缩 超固结 高速公路

地基施工, 综合处理

沪宁高速公路横贯经济发达的长江三角洲地区,连接南京、镇江、常州、无锡、苏州和上海六个大中城市,全长 274 km,江苏段 248 km,属国家重点工程,江苏省列为“第一位工程”。沿线大部分地区为河相、海相冲积平原,分布有大量的淤泥质粘土。地质情况复杂,有软土地段长约 92.29 km,主要分布在苏州至丹阳地区内(A 至 E 五个大标段)。沿线软土层厚薄不均,最大厚度大于 30 m,一般在 6~15 m,占 A 至 E 标段长度的 48%,占江苏段全长的 37.2%,是目前全国建成的高速公路中,软土地基线路最长的一条。全线平均填土高度 3.7 m,最高在 10 m 以上,设计估算最大沉降量达 150 cm,一般在 35~60 cm。

高速公路对地基要求甚高,国内外一般规定使用年限内路面的工后沉降量应控制小于 30 cm,桥头路堤应小于 10 cm。80 年代,中日合作对沪宁高速公路进行可行性研究,所提出的报告指出全线软基分布广、路堤高给工程带来的问题将是沉降及固结速度问题,建议对路面实施分期铺筑,以实现最后铺筑正式路面时,能满足允许工后沉降量的要求。

为此,江苏省高速公路建设指挥部为了使路面一次铺筑成功,特委托河海大学等在原有工程设计基础上,用统一的评判标准和试验方法,对工程勘察成果和沉降估算进行分析研究,以便对设计成果中软基处理范围和处理方案做出评估,以达到验证、完善设计,指导施工,提高工程质量的目的。

1 全线软土的工程特性

全线土层主要由亚粘土层、淤泥质粘性土层、亚砂土分层、粘土层和粉砂层等组成。图 1 为 A 至 E 五个大标段代表性土层分层钻孔资料,从图中可见各标段软土位置及厚度变化规律:① A 标段的最大含水量超过 50%,淤泥质土层出现在表层 30 m 左右深度内;② B 标段的含水量大多小于 35%,几乎没有淤泥质土;③ C 标段最大含水量达 60%~70%,淤泥质土大多在表层 2 m 以下 20 m 范围内;④ D 标段含水量大多小于 45%,淤泥质土在表层 5~12 m 深度内;⑤ E 标段土层中含多层粉土间夹薄淤泥质土层,其中薄层淤泥质土含水量一般在 30%~40%。

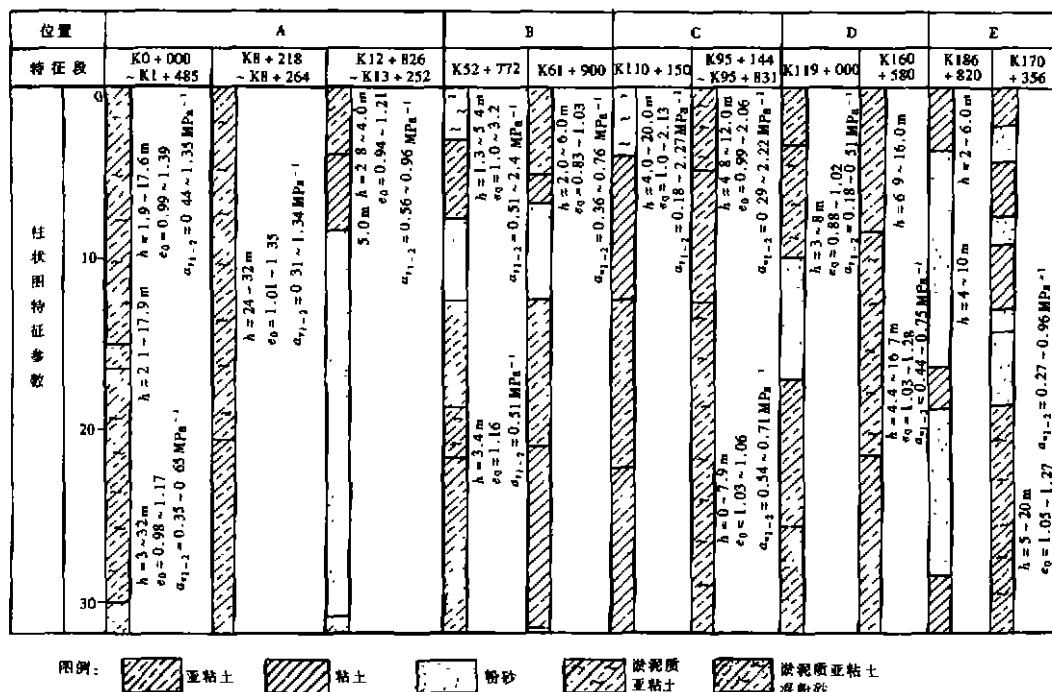


图1 A至E标段软土位置及厚度变化类型

1.1 软土分类

根据沪宁高速公路软土段1400多个测度资料分析,以孔隙比大于1.0的淤泥质粘土层为多,孔隙比大于1.3的软土极少。按塑性图分类定性判别,大多数属中压缩性土;若采用碟式仪测定液限时,则有一些淤泥质土属一般粘土;若按压缩系数分类,大部分是中等压缩性, a_{v1-2} 小于 $5 \times 10^{-4} \text{ kPa}^{-1}$ 。A, C标段有少数土样为高压缩性土, a_{v1-2} 大于 $5 \times 10^{-4} \text{ kPa}^{-1}$, D标段有少量土样为高压缩性土。

1.2 地基上部土层的超固结特性

在评估工作中,通过对设计单位钻探试验成果的再分析,并在A, B, C, D四大标段又选择8个断面补充钻探孔和室内试验,发现沿线地基土上部土层中的先期固结压力 p_c 值大于覆盖压力,处于超固结状态,其程度由东向西逐渐增强,深度从7~20m。超固结比的总趋势是由上向下逐渐减小。A, B, C, D四个标段的 $OCR > 1$ 的深度分别为20m, 20m, 10~20m和15m。

根据原位十字板剪力试验和室内触探试

验所测不排水强度 c_u 与有效上覆土重应力

p_0 的比值,即 $\frac{c_u}{p_0} > 0.2$ 的深度判别,再次证明,上部土层都具有超固结特性,深度与室内高压固结试验确定的相近。

1.3 软土固结特性

沪宁高速公路沿线的土层,呈成层地基,且大部分存在粉质土层,厚度从数厘米至十几米,特别是B, D, E三段粉质土层分布广且厚。计算分析表明,透水性强的砂性土不但自身压缩量小,且压缩稳定快,即使是薄砂层也是较好的排水层。具体设计中,对 $I_p < 7$, 颗粒级配中粘粒含量又小于10%的土层视为相对排水层。

2 路基的沉降估算

2.1 最终沉降量估算

通过全线软土地基的特征段,用 a_{v1-2} , $e \sim \lg p'$ 及非线性有限元引入比奥固结理论三种不同方法对比发现,单纯从理论上去估算沉降量,难以满足工程精度要求。为此,我们在不同标段,选择了不同软土特征断面与不同填

筑高度,用等载土模拟填筑荷载,实测其沉降过程线,并推算最终总沉降量与估算值之比,得到合适的经验修正系数 m_s (见表 1),即

$$m_s = s_{\text{总}} / s'_{\text{总}} \quad (1)$$

式中 $s_{\text{总}}$ 为实测最终沉降量; $s'_{\text{总}}$ 为应用 $a_{v_{1-2}}$ 参数估得的最终沉降量。堤高 2.9~4.0 m 时, m_s 取 0.8~1.0; 堤高 4.0 m 以上 m_s 取 0.75~1.40。

至于压缩层厚度 Z_n , 考虑到沪宁高速公路沿线土层属成层地基, 软弱土层又分布在不同深度, 且大都夹有砂质土层, 为安全计, 建议按地基附加应力小于 0.2 倍自重应力确定压缩层 Z_n 的深度。若计算深度 Z_n 以下还存在软土时, 应继续计算直至地基附加应力小于 0.1 倍的自重应力为止。

表 1 经砂垫层处理的估算沉降量与实测沉降量关系

标段	位置	堤高/m	处理方法	超固结深度/m	$s'_{\text{总}}/\text{mm}$	$s_{\text{总}}/\text{mm}$	m_s
A	K4+450	2.9	沙垫层	7	450	362.0	0.80
	K2+900	4.4	沙垫层	5	510	689.0	1.35
B	K48+400	3.7	预压法	15	284	284.5	1.00
	K67+310	4.6	预压法	15	321	379.2	1.18
C	K110+300	6.5	沙垫层	20	710	914.0	1.29
	K104+460	4.8	预压法	20	290	295.0	1.02
D	K119+800	4.2	沙垫层	22	405	305.0	0.75
	K150+200	7.3	沙垫层	22	318	436.0	1.37
E	K177+680	6.3	沙垫层	20	420	284.0	0.68

2.2 固结计算

软土层承受荷载后, 随时间逐渐固结, 而固结计算的目的, 是为确定任一时刻土体的固结度和该时刻的沉降量。对不作处理的地基, 其固结度的计算根据太沙基的单向固结理论假定土为均质的。实践证明计算值与实测值误差较大, 目前还只能依靠现场观测来修正确定。

3 软基处理方案的优化

3.1 软基处理判断方法的改进

a. 在复核软基沉降时采用了以钻孔为单位, 孔隙比为基本参数的统计计算指标方法取代以土层为单位, 沿公路纵向分段统计计算指标的方法, 缩小了计算误差及软基处理的规模。

b. 在复核沉降量时用能考虑超固结土压缩特性和估计软土中侧向变形对垂直沉降影响的分层总和法取代 100~200 kPa 压力范围的压缩系数法, 使沉降量估算更符合实际。

c. 原设计是根据总沉降量大小作为选择地基处理方法的依据, 这样做的结果, 忽略了沪宁高速公路沿线土层属成层地基, 尤其粉质土层对加速软土固结的影响, 因此, 改为以工后沉降量为标准, 来判定软基是否需要进行处理, 或采用何种处理措施。

3.2 软基处理方案的优化

a. 以 30 cm 厚砂性垫层材料和一层有纺土工布取代 50 cm 厚砂垫层。

b. 观测成果表明, 排水板间距的减小对固结度的增长影响甚微。因此, 若有半年以上的预压期, 排水板间距可由 1.0 m 适当加大至 2.0 m, 不会明显影响施工后沉降量, 也可减少施工扰动。

c. 对桥头遇到桥台施工与台后填土的安排发生矛盾时, 为保证工期, 在一些软土路基的高填土部分改用粉体搅拌桩处理, 以减小软土侧向变形对桥台的影响。

优化变更后的软基处理方案, 已简化为以堆载预压法为主 (约占软基段总长的 72%), 辅以砂垫层和等、超载配以少量塑料排水板预压及极少数桥头部位的粉喷桩处理方案。通过施工实施证明, 变更优化的软基处理方案, 更符合沪宁高速公路软基沉降与稳定的实际变化规律, 技术上更趋可行, 经济上更趋合理, 同时也考虑到工期、工艺的配合与衔接。

4 铺筑路面时间的动态控制

确定路面施工后的工后沉降必须准确掌握“最终沉降量”和已发生的沉降量。由于最终沉降量估算值的误差很大, 而且包括路面全荷载在内的实测沉降过程线, 要在路面铺筑完成以后才能测出, 因此, 难以在路面全荷载发生前准确预估。如不能正确预估路面施工后的工后沉降, 结果不是把路基预压时间拖得过长, 延误工期, 就是在路基未及稳定时

铺设路面,路面下沉后,再用昂贵的路面材料,加大面层厚度,弥补过大的沉降。为确保工后沉降的标准、确定填筑路面的时间和制定施工控制条件,我们选择了不同软土特征断面和不同填筑高度的路段,用等载土模拟路面荷载,实测其沉降过程线,并与一般堆载路线规律对比。在分析了大量的现场实测沉降曲线基础上,推算出满足工后沉降时对应的沉降速率值,将其作为施工控制条件。在考虑了荷载、地质条件和处理方法的不同所带来的复杂影响后,选定路床顶面按 0.5 cm/月,路面结构各特征层按 0.3 cm/月实施动态控制。

上述沉降稳定动态控制法,其实质是用已发生并实测到的沉降速率来判断路堤沉降的稳定状况,控制路面铺筑时间,使路面完工后,其工后沉降达到高速公路质量标准(见表 2)。

表 2 建成后各标段实测不同沉降速率观测点数

标段	观测点 总数	沉降速率/mm·月 ⁻¹						
		0~3	3~5	5~7	7~10	10~14	14~18	
A	225	216	4	0	1	3	1	
B	159	156	3	0	0	0	0	
C	114	109	3	1	1	0	0	
D	127	120	7	0	0	0	0	
E	75	72	3	0	0	0	0	
Σ	700	673	20	1	2	3	1	

5 结 语

a. 沪宁高速公路软土地基主要由一般粘性土和粉土组成,天然含水量大多在 20%~40%之间,少数高于 40%,为淤泥质粘土,按国家标准分类为低液限粘土或低液限粉土。压缩性中等,只有少数属高压缩性。

b. 沪宁高速公路东段软粘土层处于超固结状态,其程度由东向西逐渐增强。此经高压固结试验测得的先期固结压力和原位十字板剪力试验、室内触探试验测得的不排水强度与有效覆土重应力的比值判别所证实。超固结比由上向下减小,深度达 10~20 m。

c. 截止 1996 年 8 月路面施工完成后,全线 96% 以上的软基路段实测沉降速率在 0~3 mm/月。

d. 在不同的地质条件、外荷条件下因地制宜采用经优化的软基处理方法取得了良好效果:①利用路堤堆载或等载预压是最经济的处理方案,对中、低路堤的加固效果好,消除工后沉降作用明显。②排水固结辅以等载或超载预压法对高含水量、高压缩性、低强度软土是经济合理的有效加固措施,可取得良好效果。在有薄砂层的条件下,塑料排水板可适当加大间距至 2 m。③粉体搅拌桩加固法具有能减少桩身范围的沉降量、抗侧向变形能力强和加快工期等优点,但价格较高。在未能穿透软土层或软土层含水量超过 65% 的条件下,其加固效果尚须进一步论证。④结合土工织物的砂垫层不仅能起到排水固结界面作用,还能有助于减少总沉降量,防止泥污染,使沉降较均匀。采用土工布的砂垫层厚度可由 50 cm 减薄至 30 cm;砂料可用渗透系数大于地基土 2 个数量级的透水性材料替代。

e. 施工沉降观测实测资料和非线性有限元计算成果都表明,以太沙基一维固结理论为基础的固结计算时间所确定的预压期偏保守,应通过施工现场观测加以修正后,再决定路面铺设时间。

f. 通过现场观测资料分析可知,桥头沉降速率按 3 mm/月标准进行控制,路段按 5 mm/月标准进行控制,可使工后沉降量小,得到高标准的稳定路基和平整的路面。

g. 在沪宁高速公路软基研究与实施中,探索出一整套从典型路段试验、软基设计评估、优化与改进软基处理,到施工沉降观测、采用动态控制法确定铺筑路面时间的沉降控制的方法,是科学试验与工程实施密切结合的结果,达到了解决工程重大技术难关的目的。

h. 通过 5 年多来的实施和现场观测判断,全线的软基路段和桥头部位均能满足设计规定的允许工后沉降量的要求,达到了加快和简化施工、节省投资和提高工程质量、实现路面铺筑一次成功的目的,为缩短施工周期和确保提前竣工提供了保证。按初步分析计算,取得了节省 5187 万余元工程费用的直接经济效益。

(下转第 8 页)

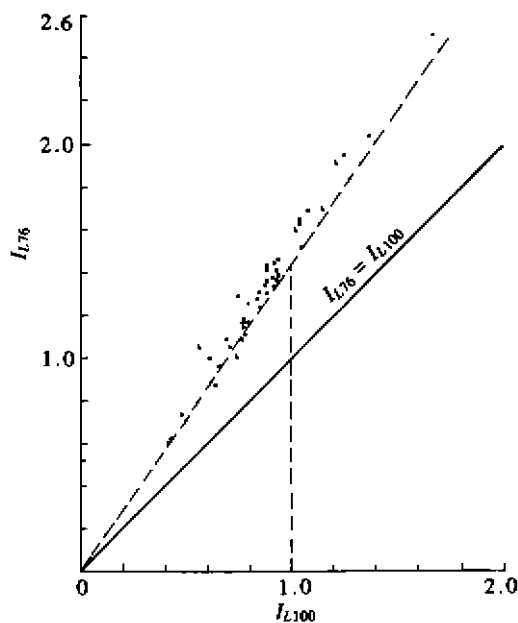


图6 C标段软土的 $I_{L76} \sim I_{L100}$ 散点图

为淤泥质土的 I_{L76} 与 I_{L100} 散点图。由图可见,大多数淤泥质土的 I_{L100} 小于 1.0。这意味着,当采用碟式仪液限时,大多数淤泥质土可定名为一般粘性土。

引起淤泥质土定名变化的 I_{L76} 界限值可根据图4中试验点的下包线与 $I_{L100} = 1.0$ 竖线的交点保守地估计。A, B 标段 I_{L76} 的界限值为 1.35, C 标段为 1.45。而目前判定的淤泥质土,当采用 100 g 圆锥液限时,多为 I_{L100} 大于 0.7 的土。

4 结 语

在沪宁高速公路的软土地基处理中衡量软土地基的主要依据是地基中是否存在淤泥质土和淤泥。但不论是淤泥质土,还是淤泥,它们的液性指数都要大于 1。在国内,土的液限目前有两种,一种是 76 g 圆锥,入土深度为 10 mm 的液限;另一种是 76 g 圆锥,入土深度为 17 mm 的液限,或 100 g 圆锥,入土深度为 20 mm 的液限(当量碟式仪液限)。沪宁高速公路地质报告中地基土的液限属前一种液限,它一般小于后一种液限。不同的液限将有不同的塑性指数和液性指数。本文分析了沪宁高速公路 A, B, C 三个标段 1400 多个淤

泥质土的稠度资料,按卡氏塑性图确定了它们的属类,并探讨了两种液限对淤泥质土定的名的影响。现总结如下:

A, B, C 标段的绝大多数淤泥质土落在塑性图上的 CI 区,属中液限粘土,且多数 w_{L100} 小于 40%。高液限土 ($w_{L100} > 50\%$) 为数极少,都是淤泥和孔隙比大于 1.3 的淤泥质粘土。也就是说,若按塑性图定性地评估淤泥质土的压缩性,则绝大多数属中压缩性土。

再者,若采用碟式仪测定的液限时,至少有一半的淤泥质土样属一般性粘土。淤泥质土定名发生变化的 I_{L76} 界限值为 1.35 ~ 1.45, 即 I_{L76} 大于该界限值的土才是淤泥质土。

总之,以 76 g 圆锥,入土深度 10 mm 测定的液限不是土的真正液限。采用这种液限,将使一部分本来属于可塑状态的土被误定为处在流动状态,并导致对土的能力偏保守的估计。这也就是为什么一些外国专家在评价沪宁高速公路的地基土时,认为不属典型软土的原因之一。

参考文献

- 1 土的分类标准(GBJ145—90). 北京:中国计划出版社,1991
- 2 交通部公路科学研究所. 公路土工试验规程(JTGJ051—85). 北京:人民交通出版社,1993

(收稿日期:1997-12-15 编辑:熊水斌)

(上接第4页)

参考文献

- 1 钱家欢等. 土工原理与计算. 北京:中国水利水电出版社,1996. 44 ~ 237
- 2 《地基处理手册》编写委员会. 地基处理手册. 北京:中国建筑工业出版社,1988
- 3 日本材料学会,土质安全材料委员会编. 地盘改良工法便览. 日刊工业新闻社,1991

(收稿日期:1997-12-15 编辑:熊水斌)