

文章编号:1001-4810(2003)04-0276-06

浙江台州高速公路一期工程软土地地基 综合处理效果分析 ——以浙江台州黄岩软土地地基试验路段为例^①

方含辉

(内蒙地质矿产勘查开发局,内蒙 呼和浩特 010010)

摘 要:浙江台州高速公路为主要由淤泥、淤泥质粘土、淤泥质亚粘土组成的软土地基,经过预压法、轻质路堤法、土工合成材料加筋垫层等方法的综合处理,效果明显。在填筑过程中,使路堤保持稳定;在预压阶段,加速了地基的沉降,缩短了预压期;在路堤与桥头衔接部位,减少了两者之间的差异沉降;在高速公路建设的全过程中,增强了路堤的整体性能,提高了软土地基的力学强度,保证了全路段投入运营后的稳定和安全。

关键词:高速公路;软土地基;综合处理效果;浙江台州

中图分类号:TU472

文献标识码:A

1 概 述

台州高速公路一期工程纵贯浙江省台州市中东部,呈南北向穿越滨海平原,公路全长 40km(图 1)。区内软土地基占一期公路全长的 56.9%,其物理力学性质很差,给公路的修筑带来了许多困难。为了保证在路堤填筑和长期使用过程中的稳定性,最大程度地减少地基的不均匀沉降和过大的工后沉降,台州高速公路在修建过程中,对软土地基进行了综合处理。现主要以黄岩软土地基试验路段为例,对台州高速公路软土地基综合处理的效果分析如下。

浙江台州高速公路黄岩软土地基试验路段选择在软土分布最广的黄岩平原,里程桩号为 K15+600 至 K15+960,长度共计 360m。试验路段共设有 4 个断面,里程桩号分别为 K15+652.5、K15+736、K15+856、K15+923.5,自北向南编号依次为 I、II、III、IV(图 2)。各断面均埋设有地面沉降板、测斜管、孔隙水压力计、侧向位移边桩、单孔出水量井、地下水水位井等仪标,用以在路堤施工的全过程中监测软基的沉降、位移与孔压等的变化,检验综合处理措施的效果。

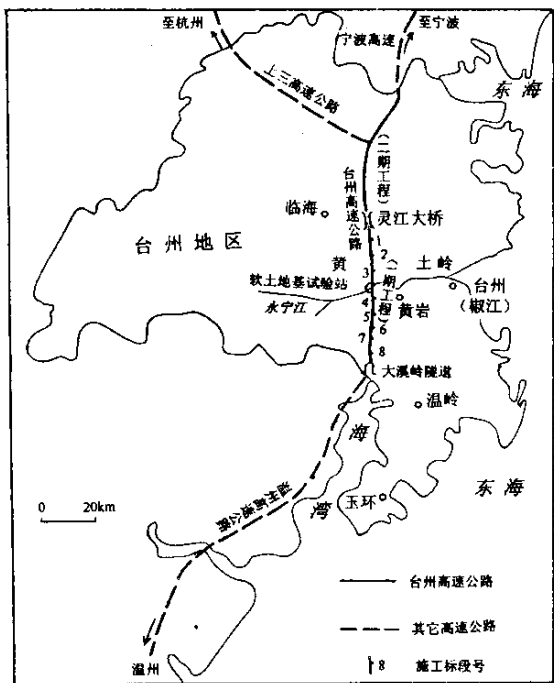


图 1 台州高速公路位置示意图

Fig. 1 Sketch map for the location of Taizhou superhighway

^① 作者简介:方含辉(1940—),女,高级工程师,1961年毕业于长春地质学院水文工程地质系,现在浙江台州高速公路指挥部从事软土地基试验研究。

区内软土主要由淤泥、淤泥质粘土、淤泥质亚粘土组成,其埋藏浅(地表下 0.8~1.8m)、厚度大(20~37m)。

黄岩试验路段自 1995 年 11 月开始施工至 2002

年 7 月,历经填筑、预压、运行期,共计进行了 81 个月的多项观测。从沉降资料看来,其幅度是很大的,尤其是Ⅲ、Ⅳ两断面,81 个月的累计沉降量已分别达到 2.563m 与 2.019m(表 1)。

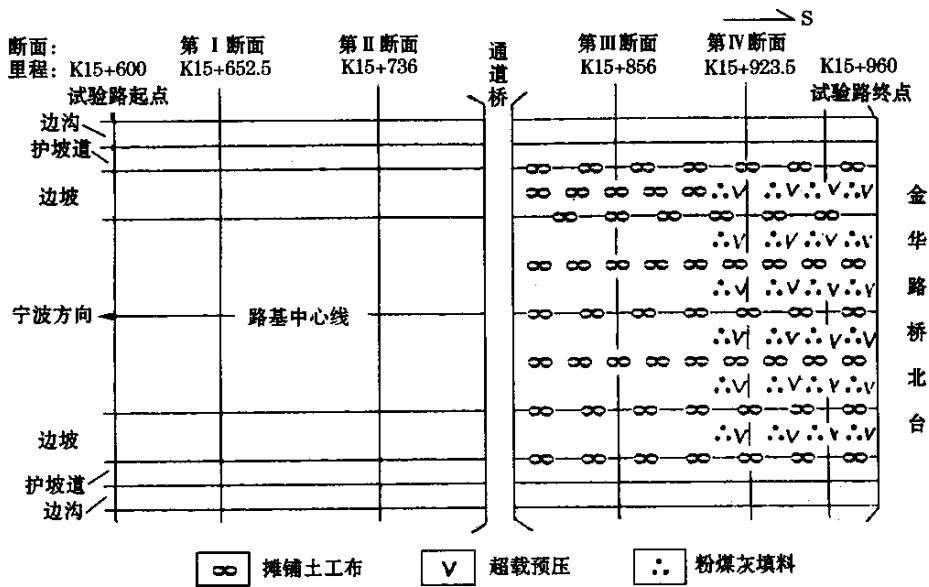


图 2 黄岩试验路段软基处理工程布置示意图

Fig. 2 Sketch map for the distribution of the soft ground foundation treatment project in Huangyan tested part
注:试验路段全部打插塑料排水板和普遍摊铺砂质砾垫层

表 1 黄岩软土地基试验路段不同时期各断面实测沉降量汇总表

Tab. 1 Collecting data for actual measurement settlement volume of each section in Huangyan tested part of soft ground foundation during various periods

断面 编号	填筑期末		预压期末		路面施工至通车		至 2002. 7 月 累计沉降量 (cm)
	填筑期延续时间	沉降量(cm)	预压期延续时间	沉降量(cm)	延续时间	沉降量(cm)	
I	95. 11—96. 12	51. 2	96. 12—98. 9	76. 5	98. 9—99. 9	81. 5	103. 6
Ⅱ	95. 11—97. 1	65. 7	97. 1—98. 9	101. 4	98. 9—99. 9	105. 9	128. 9
Ⅲ	95. 11—97. 10	163. 7	97. 10—98. 10	211. 4	98. 10—99. 9	215. 9	256. 3
Ⅳ	95. 11—97. 11	88. 3	97. 11—98. 10	148. 6	98. 10—99. 9	154. 3	201. 9

注:2002 年 7 月是试验路段最后一次实测沉降的时间,此时通车已 34 个月。

2 软基处理的主要方法

台州高速公路对软土地基采用的处理方法主要有预压法、轻质路堤法、土工合成材料加筋垫层法等。其中以施工简便易行,经济实用的预压法为主。现将几种主要方法简介如下:

2.1 预压法

在路堤填筑阶段,利用砂砾排水层和塑料排水板,在路堤荷载的作用下,加速地基软土的垂向排水固结,提高地基的强度;在预压阶段,利用路堤的荷载和超载,力争在较短期间内使地基软土基本完成压缩固结,以缩短预压期并消除过大的工后沉降。预压法

的荷载包括等载和超载。

2.1.1 砂砾排水层

其作用是让地基软土层中的地下水和土壤中的饱和水,通过塑料排水板向上排入两侧边沟的通道。台州高速公路软基分布路段在两侧边沟之间路基的底部,普遍摊铺了砂砾排水层,厚度一般为 30~50cm,并在基底设置有一定坡度的土拱坡。

2.1.2 塑料排水板

主要由芯板和滤套组成。芯板是由聚乙烯或聚丙烯加工而成的多孔管道(板带),厚度一般为 6mm,宽度一般在 100mm,要求有足够的抗拉强度和垂直排水能力,插入地基土层后,地下水可沿芯板的管道向

上排出。滤套一般由无纺布制成,是芯板的外套,具有一定的隔离土层颗粒和渗透功能。塑料排水板的打插深度和间距视软土层厚度与物性而定。当软土层厚度超过 20m 时,一般打插深度为 20m;其间距多为 1.2~1.8m(图 3)。

2.1.3 等载预压

利用路堤的预压高度产生的荷载进行预压。预压高度系路堤的设计高度与预压期内的沉降量(相当于设计的预抛高)之和。对于路堤填高较小的大部分软土路段,等载预压可基本满足设计要求。

2.1.4 超载预压

当等载预压不能达到设计要求时,还应采取超载预压,即在预压高度的基础上,再增加填筑高度,以此部分的超载量继续进行预压,以加大软基的沉降速度和沉降量。

2.2 加筋垫层(土工布)法

土工布是由聚丙烯或涤纶加工而成的有纺、复合土工织物或非织型的土工纤维,要求抗拉强度高。其作用是可以均化地基应力,减少不均匀沉降和侧向变形,多摊铺于路堤的底部(图 3)。

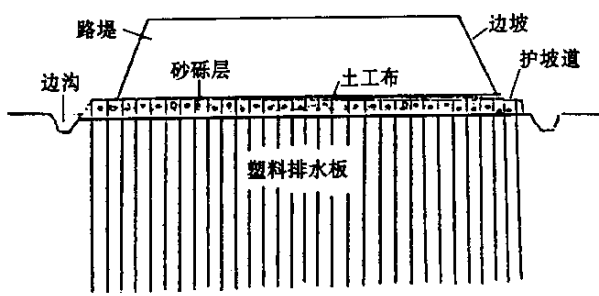


图 3 地基处理断面示意图

Fig. 3 Sketch profile of ground foundation treatment

2.3 轻质路堤法

利用电厂废料粉煤灰作为路堤的填料,其质轻,可减小路堤的重量,尤其在与桥梁相接的软基路段,可缩小与桥台的差异沉降。台州高速公路在软基分布最广泛的第四、五标段,与桥头相衔接的软基路段,多以粉煤灰作填料,长度一般为 30~60m。

台州高速公路的大部分软土地基路段,都采用了以预压法为主的综合处理措施。黄岩软土地基试验路段即为典型代表,其软基处理的方法及主要工程技术数据详见表 2。

从表 2 可见,对软土地基所采用的综合处理方法主要有:

(1) 对于软土层厚度相对较小、路堤填高较低(3m 左右)、稳定性较好的路段,例如包括 I、Ⅱ两断面在内的 K15+600~K15+800 两百米范围内的试验路段,采用了砂砾排水层+塑料排水板+等载预压等方法处理软基;

(2) 对于软土层较厚、物理力学性能很差、路堤填筑较高、稳定性不足、沉降量大的路段,例如试验路段的Ⅲ、Ⅳ断面所在的 K15+800~K15+966 路段,在上述处理措施的基础上,增加了超载预压和摊铺两层土工布等的综合措施;

(3) 对与桥梁两端相接的软基路段,例如试验路段南段与金华路桥相衔接的 K15+900~K15+966 路段,除上述措施外,路堤的填料采用了轻质粉煤灰。

此外,在路堤较高、基底倾斜、地基两侧岩性和承载力相差悬殊的沿山路段,如马宗岭隧道北 K5+200~250、水洋镇西 K6+830 左线一带,为了加强路堤的稳定性,增加了反压护道。在青岭一、二两期工程衔接路段,还采用了泡沫塑料轻质路堤(EPS 路堤)。

表 2 黄岩试验路段软土地基处理工程数据表

Tab. 2 Table for soft ground foundation treatment project in Huangyan tested part

观测断面 里程桩号	断面 编号	软土层 厚度(m)	处理方式	砂砾 层厚 (m)	预抛 高(m)	超载预压层		塑料排水板		路堤填 筑高度 (m)	预压期实际 延续时间 (月)	路堤 填筑物
						层数	厚度 (m)	处理深度 (m)	间距 (m)	土工布 层数		
K15+652.5	I	25.5	塑料排水板(塑)	0.5	0.44			14	1.8	0	2.91	黄土+宕渣
K15+736	Ⅱ	28.3	砂砾排水层(砂)	0.5	0.63			20	1.8	0	3.15	黄土+宕渣
K15+856	Ⅲ	32.9	塑+砂+土工布(布)+超载	0.4	1.7			20	1.8	2	4.56	黄土+宕渣
K15+923.5	Ⅳ	37.4	塑+砂+布+超载+粉煤灰	0.3	1.6	2	0.6	20	1.8	2	4.75	黄土+粉煤灰
金华路桥 K15+966.3	北台	36	塑+砂+布+超载+粉煤灰	0.3	1.6	2	0.6	20	1.8	2	5.64	

从开放交通三年多看来,运行平稳,但这种路堤造价较高,不宜大量采用。

3 在路堤填筑阶段,软基处理对稳定与沉降的作用

台州高速公路一期工程中的软土地基路段,在施工的全过程中,由于采用了各种综合处理措施,除少数路段出现局部不稳定现象外,大部分路段是稳定的。

试验路段的监测资料表明,在填筑过程中,由于路堤高、填筑厚度大、软土层厚,且物理力学性能差,Ⅲ断面在 646 天的填筑期内,沉降总量就达 1.637m,分别是 I、Ⅱ断面同期总沉降量的 3.2 倍和 2.5 倍(见表 1),侧向位移量最大的已超过 42cm。Ⅲ、Ⅳ两断面在路堤填筑至 3.5m 时,曾经出现了日沉降速率与侧向位移速率分别超过 10mm 和 5mm、孔隙水压力和荷载增量曲线出现非线性转折、地基左侧地面局部隆起的不稳定现象,表明该处地基已面临剪切破坏。由于软基经过综合处理,增强了物理力学性能和地基的强度,在及时采取了停止加载的措施后,地基恢复正常。

此外,在路堤填筑阶段,试验路段单孔出水量井(单根塑料排水板),在路堤荷载的作用下,自 1996 年 8 月到 1997 年 10 月底,历经 448 天,地基内就已排出水量 1677kg。进入预压期后,水量逐渐减少。到 1999 年 12 月 27 日(计 1239 天),单根塑料排水板的总出水量达 2430kg。说明利用砂砾排水层和塑料排水板,加速了软土层的排水固结,在预压恒载期和通车后,塑料排水板的排水固结作用仍在持续。

4 预压阶段,超载预压对加速地基沉降,缩短预压期的作用

由于台州高速公路一期工程全线原定于 1998 年年底通车,但到了 1998 年 2~3 月,进入预压期仅 4~5 个月的试验路段Ⅲ、Ⅳ断面以及与桥台连接的四、五标段(参见图 1)大多数软基路段,沉降速率依然很大,当时的月沉降速率多在 50~90mm。由于工期相当紧迫,为了缩短预压期,争取在预定的时间内,使软土地基的沉降能达到要求的月沉降速率标准,在保证路堤安全稳定的前提下,及时地运用了预压法,采取了超加载的处理措施,上述与桥台连接的路段,于 1998 年 2 月下旬至 3 月中旬,一般超加载两层,合计 50~60cm 左右,部分路段超载厚度近 1m。超载

后,跟踪监测的结果是,在 3 个月中,平均每个月的沉降量增加了 16~32mm,共计增加 50~100mm。

以上实施超载预压的路段,其超载部分的填筑高度均超过预压荷载作用下的沉降值,亦即超过了路堤的设计高度。因此在预压期结束时,需卸除大部分预压荷载。第四标段的金华路桥南北台和长潭路桥北台卸载时,跟踪监测的结果是,在卸载 0.72~1.78m 后的第一个月,月沉降速率比卸载前一个月减少了 17~28mm,较卸载前每月间之递减值增加两倍以上;长潭路桥北台在第二次卸载 1.18m 后,当月的月沉降速率就由上月的 22mm 降至 10mm;金华路桥北台在再次卸载 1m 后,1998 年 9 月的月沉降速率已降至 9mm,提前达到了结束预压期时要求的月沉降速率标准($<10\text{mm}$)。可见,台州高速公路软基路段实施超载预压,取得了良好的效果,加速了地基的沉降,缩短了预压期。

5 加筋垫层(土工布)的铺设对增强路堤整体性能效果的分析

台州高速公路一期工程部分软基路段铺设有一~2 层土工布。以试验路段为例,包括Ⅲ、Ⅳ断面在内的 K15+800~K15+966 路段,铺设有两层土工布。实测资料表明,软基性能很差、荷载最重的Ⅲ断面,自填筑以来,左右肩的沉降差较小,虽然随时间逐渐增大,但增幅不大,其沉降差为荷载量较小、未铺土工布的Ⅱ断面的 38%~83.6%。

Ⅳ断面由于左路肩的底面为原水塘的淤泥层,基底十分软弱,从填筑开始,左路肩的沉降量不但较右路肩大,而且大于路中心。直到填筑高度至 3.2m,历时 513 天后,路中心的沉降幅度方超过左路肩。由此可见,在路堤填筑过程中,土工布对调整地基的不均匀沉降和均化应力方面,有明显的效果。

纵观各断面路中心与路肩的沉降差,从填筑期—预压期—通车前期—通车期,是随着时间的延长而增大的,但其增大的幅度却是逐渐减小的。Ⅲ、Ⅳ断面沉降差的增幅到预压后期能与 I、Ⅱ断面相近,这和两层土工布的铺设不无关系。

6 软土地基综合处理措施对提高软基力学强度的作用分析

为了验证运用综合措施处理软土地基的效果,黄岩软土地基试验路段在路堤填筑到位后,实施了

检验工程。检验工程是在四个断面分别施工钻探孔，分层采取土样，进行土的物理力学性质实验，并在野外进行了原位测试。软基处理前后实验资料的对比结果表明，地基软土的天然含水量、孔隙比，处理后较处理前有所降低，密度增大；饱和度与比重变化不大。在力学性质方面，经处理后软基压缩系数(a_{1-2})减小，压缩模量(E_s)、固结系数(Cv_{1-2})增大，抗剪强度、抗压强度与容许承载力等均有不同程度的提高(表 3)。

另据检验工程中所做的十字板剪切原位测试曲线分析，路堤填筑完成后的地基软土，在地面以下 14m 深度内，固结状况较好，淤泥及淤泥质土的不排水抗剪强度平均值为 14. 31kPa。室内剪切试验结果亦表明，抗剪强度和无侧限抗压强度(qu)均有增大的趋势，灵敏度在处理深度(20m)以内降低，地基软土的容许承载力也有了相应提高(表 3、表 4)。由此说明，经处理后的地基软土，物理力学性质得到了改善。

表 3 黄岩试验路段软基处理和路堤填筑前后地基土层物理力学性质指标对比表

Tab. 3 Contrast table for the mechanical feature of soft ground layer before and after the soft ground foundation treatment and embankment construction in Huangyan tested part

深度 (m)	土层名称	处 理 前 (ZK50)											处 理 后 (ZK1)										
		ω	ρ	e	a_{1-2}	E_s	Cv_{1-2}	c	φ	qu	kc	σ	ω	ρ	e	a_{1-2}	E_s	Cv_{1-2}	c	φ	qu	kc	σ
2	粘土	25.9	1.95	0.74	0.69	3.89	6.4×10^{-2}	9	21			100	35	1.71	1.07	0.5	4.15	1.3×10^{-3}	76	28	12.5	1.9	100
6~8	淤泥	62.6	1.69	1.77	1.47	1.42	5.2×10^{-4}	10	2	19	4.5	45	56.1	1.67	1.57	1.28	2.01	2.9×10^{-4}	18	14.5	28.3	4.3	60
9~19	淤泥质	44.5		1.22	1.62	2.41	4.7×10^{-3}						40.7	1.80	1.12	0.50	4.25	1.3×10^{-2}	12~	29~	28~		
	粉质粘土	44.3	1.70	1.24	1.08	2.05	4.1×10^{-3}	10	8.3	34	6.8	70	39.4	1.77	1.13	0.45	4.76	6.5×10^{-2}	18	30	39	6.3	70
19~24	淤泥	54.9	1.68	1.71	1.58	1.56	0.8×10^{-4}	16	4			40	54	1.68	1.52	1.33	1.90	4.3×10^{-4}	17.0	16.5	30.2	4.3	55
24~30	淤泥质	41.4				2.69							47.3	1.74	1.32	0.85	2.74	6.3×10^{-4}	27~	14.5			
	粘土	43.5	1.81	1.05	0.72	3.12	7.0×10^{-4}	22	11	51	3.0	55	48.8	1.72	1.37	0.71	3.32	6.0×10^{-4}	30	~16	68.6	7.5	65
30~34	淤泥				1.01	2.48	4.21×10^{-4}	16	4				55.5	1.66	1.56	0.86	2.98	5.2×10^{-4}	26.0	16.5	50.7	8.3	55
35	粘土	53.7	1.71	1.43	1.07	2.39	0.5×10^{-2}	17	18	48	4	70	45.3	1.74	1.29	0.76	3.02	7.8×10^{-3}	38	14	75	6	70

注:表中 ω —天然含水量(%); ρ —天然湿密度(g/cm³); e —孔隙比; a_{1-2} —压缩系数(MPa⁻¹); E_s —压缩模量(MPa); Cv_{1-2} —固结系数(cm⁻²/s); C —固结快剪内聚力(kPa); φ —固结快剪内摩擦角(度); qu —原状土的无侧限抗压强度(kPa); kc —灵敏度(kPa); σ —容许承载力(kPa)。

表 4 黄岩试验路段软基处理和路堤填筑前后静力触探参数对比表

Tab. 4 Contrast table for static sounding parameter before and after the soft ground foundation treatment and embankment construction in Huangyan tested part

深度 (m)	软土名称	锥头阻力 qc (MPa)		侧壁摩阻力 fs (kPa)		压缩模量 E_s (MPa)		容许承载力 σ (kPa)	
		JT1	JKs5	JT1	JKs5	JT1	JKs5	JT1	JKs5
2	粘土	0.94	0.4	22.6	25.8	4.93	3.42	100	45
9	淤泥	0.43	0.22	7.2	3.6	2.02	1.5	60	40
19	淤泥质粉质粘土	0.65	0.54	8.7~10.2	5~7	4.21	2.7	70	55
25	淤泥	0.74	0.27	5.7	4.4			55	40
30	淤泥质粘土	0.84	0.66	9.4	7.6	2.6	3.0	65	60
35	粘土	1.21	0.89~1.13	10.7	10.8	3.31	3.2	70	60

注:JKs5—软基处理与路堤填筑前施工的静力触探;JT1—路堤填筑完成后检验工程施工的静力触探。

7 粉煤灰填料在减轻路堤对软土地基压缩沉降中的作用分析

台州高速公路在软土地基与桥台相接的路段，路堤多利用粉煤灰做为填料。以试验路段的第Ⅳ断面至金华路桥一段路堤为例，在长约 90m 的路段内，除

四周及底层为黄土护坡(或护壁)外，其余路堤填料全为粉煤灰。经测试，其容重为 1.3g/cm³，填筑厚度约为 4.75m，相当于荷载重 75.98kPa。与未用粉煤灰做填料的Ⅲ断面相比，Ⅳ断面的填筑厚度为Ⅲ断面的 104.2%，但荷载重仅为后者的 82.8%。

试验路段的Ⅲ、Ⅳ两断面工程地质条件相近，但

因Ⅳ断面为轻质路堤,从施工期到预压期乃至通车后的各项实测指标看来,与Ⅲ断面相比较,其沉降量、侧向位移量、孔隙水压力等均较小(表 5)。由此可见,粉煤灰路堤对减轻软土地基的压缩沉降是十分有效的。

表 5 黄岩软土地基试验路段Ⅲ、Ⅳ断面各项参数对比表

Tab. 5 Various parameter contrast of section Ⅲ and Ⅳ in the Huangyan tested part

断面	填筑高度 (m)	荷载重量 (kPa)	路堤填料	沉降量(mm)			路中心与路肩最大沉降差(mm)			最大侧向位移量(mm)		
				填筑期末	预压期末	通车 15 个月	填筑期末	预压期末	通车 15 个月	填筑期末	预压期末	通车 15 个月
Ⅲ	4.56	91.75	宕渣+黄土	1637	2114	2477	77~553	584~620	650~676	381.27	>423.37	>423.37
Ⅳ	4.75	75.98	粉煤灰	883	1486	1926	52~266	313~381	395~405	205.01	318.21	334.21

8 结束语

台州高速公路一期工程软土地基经过综合处理,效果是明显的,保证了路堤在施工和预压过程中的稳定和安全,为高速公路尽早投入使用奠定了基础。经过几年来的运行,情况良好。本文是作者对台州高速公路黄岩软土地基试验路段的试验研究实践所做的初步总结。由于水平所限,谬误之处在所难免,敬请指正。

参考文献

- [1] 王振民,王铁儒,徐立,等. 杭甬高速公路试验路堤软土地基处理试验研究[M]. 杭州出版社,1998.
- [2] 汪银华,等. 杭甬高速公路软土地基处理设计与试验研究[M]. 杭州出版社,1998.
- [3] 交通部. 公路软土地基路堤设计与施工技术规范(JTJ017—96)[S]. 1996.
- [4] 方含辉. 浙江台州高速公路一期工程软土地基工程地质特征[J]. 中国岩溶,2003,22(3).

ANALYSIS ON COMPREHENSIVE TREATMENT EFFECT OF
SOFT GROUND FOUNDATION IN PERIOD 1 TAIZHOU
SUPERHIGHWAY PROJECT,ZHEJIANG
——A case study for the Tested Part of the Way in
Taizhou’Huangyan, Zhejiang Soft Ground Foundation

FANG Han-hui

(Inner Mongolian Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Huhehaote, Neimeng 010010,China)

Abstract: The soft ground foundation is mainly marine or lacustrine silt and silty caly in Taizhou superhighway, Zhejiang. Through application of the pre-compression method, light-weight embankment method and reinforced earth cushioning with geo-synthetics method etc., the project treatment achieves obvious results. During the embankment construction, the embankment preserves a stabilizing at the pre-compression phase, but the subsidence of ground foundation gets fast and the pre-compression period is shortened. The difference on subsidence is reduced at the linkage between the embankment and the bridge. Consequently, in the whole course of the construction and working of the superhighway, the whole properties of embankment is enhanced and the mechanics strength of the soft ground foundation is strengthened, and the stability and safety is ensured for the future running of the whole superhighway.

Key words: Superhighway; Soft ground foundation; Comprehensive treatment effect; Taizhou, Zhejiang