

国道 G105 线番禺段软土特征及处理措施

徐利成

(广州市公路勘察设计院, 广东广州 510500)

摘 要: 该文介绍了国道 G105 线番禺段软土的特征、软土地基稳定和沉降简单计算, 从而得出其处理方案。

关键词: 软土特征; 砂土液化; 稳定沉降; 处理措施

中图分类号: TU472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-7716(2005)02-0022-04

1 概述

国道 G105 线番禺段全长约 7.9 km, 其中路线部分软土段约 2.0 km, 约占路线总长的四分之一, 软土分布范围广, 厚度大, 需做软土地基处理。

1.1 自然地理条件

国道 G105 线番禺段起于番禺钟村飘峰, 终点于碧江大桥, 路线位于广州市番禺区(原番禺市)西部, 地貌单元属珠江三角洲冲积平原, 地处南亚热带, 属南亚热带典型的季风海洋气候, 具有温暖多雨, 光热充足, 温差较小, 夏季长, 霜期短等特征。年平均气温为 $21.4^{\circ}\text{C} \sim 21.8^{\circ}\text{C}$, 雨量充沛, 年降水量为 $1689.3 \sim 1876.5 \text{ mm}$, 雨季(4~9 月)降水量占全年 85% 左右。

1.2 地层岩性

据钻孔资料揭示, 沿线分布地层主要为人工填层(Q^{me})、冲积层(Q^{al})、残积层(Q^{el})等, 基岩为侏罗系沉积岩(J)和震旦系蚀变花岗岩(Z)。

由于河流、潮汐水动力的长期作用, 全线形成了较为复杂的第四系沉积层, 其中以淤泥、淤泥质土为主, 其次为淤泥质细砂, 砂层继续以长条状或巨厚层状分布, 这些沉积层成为导致路基不均匀沉降的主要因素。现将第四系地层分述如下。

1.2.1 人工填土层(Q^{me})

沿线绝大部分地区钻孔揭示有人工填土层分布。由于路基较宽, 为 36 m, 因而钻孔资料不能完全客观反映整个路线横断面范围内的地质情况, 但人工填土层以下地质情况却大同小异, 有共同性。

人工填土层(Q^{me})按成分差异主要划分为素填土及杂填土。素填土主要由粘性土、砂砾等组成, 结构松散。杂填土以灰色为主, 由碎砖、碎石、砂砾及

粘性土等组成, 结构松散, 层厚 $0.8 \sim 5.0 \text{ m}$, 平均厚度约 1.9 m , 此层为软土层的上覆层, 对上部荷载有应力分散作用, 因而其分布范围、密实度及厚度对下部软土地基处理影响较大。

1.2.2 淤泥、淤泥质土

全线除个别钻孔揭露到淤泥质细砂外, 多以淤泥及淤泥质土为主。深灰色~灰黑色, 饱和, 软塑~流塑, 天然含水量 $W = 40.1\% \sim 79.1\%$, 平均值 $W = 57.5\%$, 天然孔隙比 $e = 1.03 \sim 2.375$, 标准值 $e = 1.33$, 压缩系数 $a_{1-2} = 0.42 \sim 3.06 \text{ MPa}^{-1}$, 标准值 $a_{1-2} = 0.86 \text{ MPa}^{-1}$, 固结系数 $C_v = 6.2\text{E-}4 \sim 4.38\text{E-}3 \text{ cm}^2/\text{s}$, 平均固结系数 $C_v = 1.55\text{E-}3 \text{ cm}^2/\text{s}$; 直接快剪凝聚力 $c = 3.3 \sim 13.9$, 内摩擦角 $\varphi = 3.3 \sim 20.1$, 固结快剪凝聚力 $c = 5.2 \sim 19.4$, 内摩擦角 $\varphi = 8.7 \sim 27.4$, 层厚 $2.4 \sim 16.5 \text{ m}$ 。埋深 $0.8 \sim 5.5 \text{ m}$ 。

软土分布情况详见图 1。

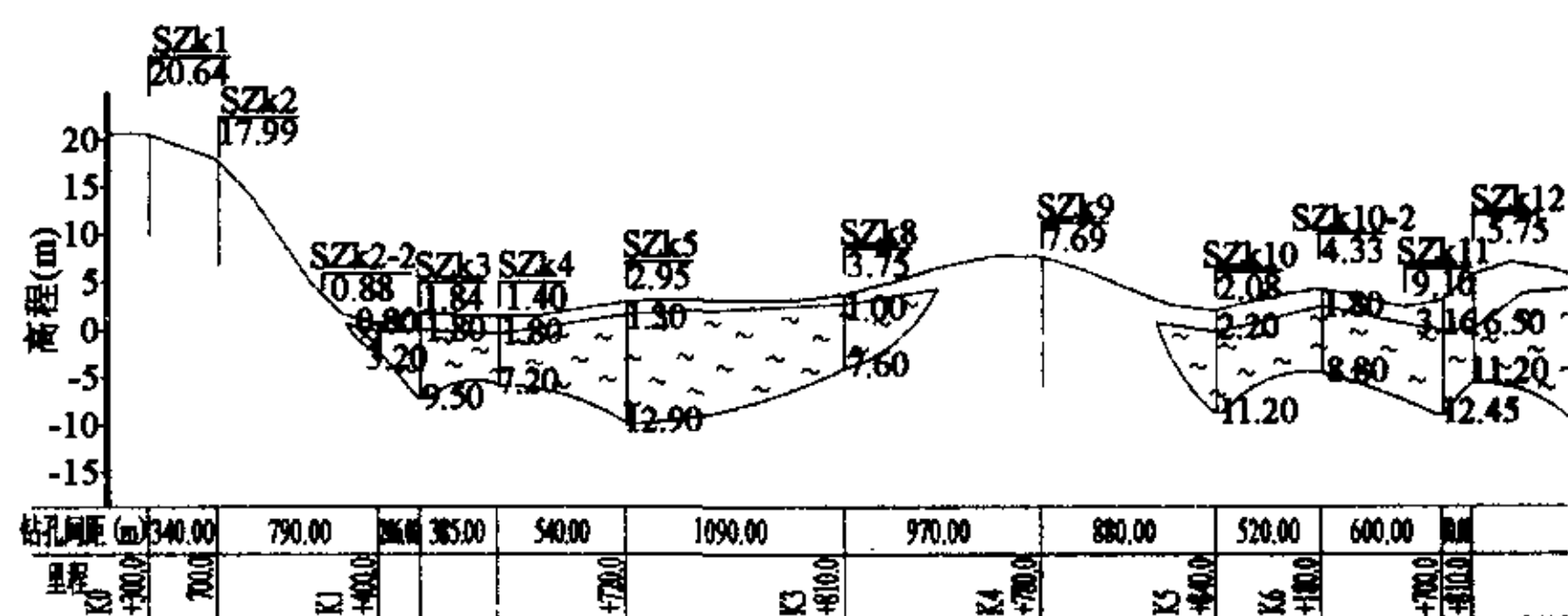


图 1 软土分布情况

1.2.3 砂层

以淤泥质细砂为主, 呈灰黑色, 饱和、松散, 间夹薄层淤泥。层厚 $2.4 \sim 9.0 \text{ m}$, 平均 6.15 m , 多为软土的下卧层, 由于其具有较好的透水性, 因而是较好的地下透水层, 不利因素就是存在砂土液化隐患, 对全线, 尤其是屏山大桥东桥头即 $K5+740 \sim K5+803.6$ 段, 由于淤泥质细砂层较厚, 达 9.0 m , 我们对其进行了砂土液化计算, 具体计算过程如下:

(1) 对实测标贯击数 $N_{63.5}$ 进行修正, 采用公式:

$$N_1 = C_n \cdot N_{63.5}$$

收稿日期: 2004-04-15

作者简介: 徐利成(1974-), 男, 广东人, 工程师, 从事公路勘察设计工作。

式中： C_n ——标准贯入技术修正系数，按有关规范取用

(2)计算临界标贯击数 N_c ，采用公式：

$$N_c = [11.8(1 + 13.06\sigma_0 K_h / C_v)^{1/2} - 8.09]\xi$$

式中： σ_0 、 σ_e ——分别为标贯点处土的总覆压力和有效压力，单位为 kPa

$$\sigma_0 = \gamma_u d_w + \gamma_d (d_s - d_w)$$

$$\sigma_e = \gamma_u d_w + (\gamma_d - 10)(d_s - d_w)$$

γ_u ——地下水位以上土容重(kN/m³)

γ_d ——地下水位以下土容重(kN/m³)

d_s ——标准贯入点深度(m)

d_w ——地下水位深度(m)

K_h ——水平抗震系数

ξ ——粘粒含量修正系数， $\xi = 1 - 0.17(P_c)^{1/2}$

P_c ——粘粒含量百分率(%)

(3) $N_1 < N_c$ ，液化； $N_1 > N_c$ ，非液化。

经计算、判断，该段淤泥质细砂为液化砂土，需进行处理。

1.2.4 粘性土

分为冲积层和残积层两种。冲积层以亚粘土为主，呈灰黄色，潮湿，可塑，局部软塑状。残积层粘性

土以亚粘土为主，局部亚砂土，紫红色，黄色，硬塑状为主，亚砂土以中密状为主。

2 软土分布及特征

由于番禺地处珠江三角洲冲积平原地带，第四纪以来，经过海进和海退作用，形成了本地区软土层较厚的特点，地质情况较差。据试验资料反映，该项目所在路段软土具有天然含水量大、孔隙比大、固结系数小、抗剪能力低、承载能力低等特点。具体见表 1。

固结系数统计个数为 15 个，由于其变异性较大，其中有 6 个达到 $n \times E-4$ 级，其他为 $n \times E-3$ 级，变异系数 δ 达到 1.03，因此我们就去掉差异性较大的特殊值，求得淤泥质亚粘土平均值 $C_v = 2.73E-3$ cm²/s，淤泥平均值 $C_v = 1.23E-3$ cm²/s。

2.1 天然含水量大、孔隙比大

从表 1 中可以看出，该路线大部分路段淤泥天然含水量 $W > 60\%$ ，淤泥质亚粘土天然含水量 $W > 40\%$ ，孔隙比：淤泥 $e = 1.591 \sim 2.375$ ，淤泥质亚粘土 $e = 1.013 \sim 1.466$ ，这样的含水量和孔隙比，造就了该路线软土有较大的沉降和变形。

表 1 软土层物理力学指标统计表

土名	统计个数	取样位置	含水率	液性指数	孔隙比	压缩系数	直接快剪		固结快剪	
			ω_0 (%)	L_L	e_0	a_{1-2} (MPa ⁻¹)	c (kPa)	φ (度)	c (kPa)	φ (度)
淤泥质亚粘土	15	SZK3-1	44.6	1.24	1.215	0.81	13.9	11.6	11.4	19.7
		SZK3-2-2	54.2	1.08	1.456	1.20	9.8	3.6		
		SZK4-1	54.6	1.47	1.392	0.77	10.2	6.9		
		SZK5-2	55.3	2.02	1.440	0.86	5.9	8.1	8.6	17.5
		SZK8-1	38.8	1.06	1.090	0.73	3.7	4.1	5.2	8.7
		SZK10-2	42.8	1.41	1.231	0.70	5.5	9.4		
		SZK10-2-1	49.9	1.51	1.283	0.84	5.6	4.9		
		SZK11-2	41.9	1.22	1.097	0.55	13.9	11.6	17.9	20.4
		SZK11-3	38.3	1.19	1.271	0.97	10.7	6.7	16.9	20.9
		SZK12-2-1	42.0	2.44	1.102	0.47	13.9	11.6	19.4	24.6
		SZK12-2-2	45.2	1.72	1.466	1.30	5.5	6.5	14.7	27.0
		SZK12-2-3	40.4	1.92	1.193	0.64	8.3	8.9	18.5	27.4
		SZK12-2-4	49.7	2.51	1.463	1.07	4.8	16.1	14.8	24.5
		SZK12-2-5	45.1	2.25	1.403	1.81	5.8	12.4	17.3	23.3
		SZK12-2-6	35.2	2.09	1.013	0.42	11.8	20.1	19.3	27.4
淤泥	6	最大值	55.3	2.51	1.466	1.81	13.9	20.1	19.4	27.4
		最小值	35.2	1.06	1.013	0.42	3.7	3.6	5.2	8.7
		平均值	45.2	1.675	1.274	0.876	8.62	9.5	14.91	21.95
		变异系数	δ	0.139	0.297	0.410	0.421	0.478	0.313	0.251
		标准值	φ_K	42.31	1.446	1.203	0.710	6.946	7.408	18.899
		SZK3-2-1	59.3	1.33	1.591	1.27	7.9	3.6	15.6	19.4
		SZK3-2-3	66.3	2.51	1.8	1.69	10.1	11.4		
		SZK4-2	63.5	3.17	1.833	1.42	7.5	4.9	5.7	17.5
		SZK5-1	73.3	1.8	1.907	1.27	4.1	5.7	8.7	16
		SZK5-3	84.9	2.76	2.375	3.06	3.3	8.1	9.7	13.9
		SZK10-2-2	61.7	2.11	1.747	1.27	7.9	3.3		
		最大值	84.9	3.17	2.375	3.06	10.1	11.4	15.6	19.4
		最小值	59.3	1.33	1.591	1.27	3.3	3.3	5.7	3.9
		平均值	68.17	2.28	1.876	1.663	6.8	6.17	9.93	16.7
		变异系数	δ	0.139	0.293	0.423	0.380	0.501		
		标准值	φ_K	60.32	1.728	1.655	4.67	3.62		

2.2 压缩系数大、可压缩性高

从表 1 中不难看出,对淤泥,其压缩系数 $a_{1-2} = 1.27 \sim 3.06 \text{ MPa}^{-1}$,而对淤泥质亚粘土,压缩系数 $a_{1-2} = 0.42 \sim 1.81 \text{ MPa}^{-1}$,压缩性相对较高,因此,该路线路基在有一定填土高度以后,势必会有较大沉降。

2.3 固结系数相对较小

因结系数 40% 为 $n \times E-4$,60% 为 $n \times E-3$,其中淤泥质亚粘土平均值 $C_v = 2.73E-3$,淤泥平均值 $C_v = 1.23E-3$,固结系数相对较小,这就决定了该路线软土地基处理的固结时间相对较长,而且在加载初期,地基中将出现较高的孔隙水压力,因而要严格控制加载节奏,如果控制不好,就会降低地基强度,可能会引起地基失稳。

2.4 天然凝聚力、内摩擦角小

从表 1 中可看出,淤泥天然土直接快剪的凝聚力 $c = 3.3 \sim 10.1$,内摩擦角 $\varphi = 3.3 \sim 11.4$,淤泥质亚粘土天然土直接快剪的凝聚力 $c = 3.7 \sim 13.9$,内摩擦角 $\varphi = 3.6 \sim 20.1$,这么低的凝聚力和内摩擦角,在受到荷载作用以后,就很容易剪切破坏,引起地基失稳,而淤泥固结快剪凝聚力 $c = 5.7 \sim 15.6$,内摩擦角 $\varphi = 13.9 \sim 19.44$,淤泥质亚粘土固结快剪凝聚力 $c = 5.2 \sim 19.4$,内摩擦角 $\varphi = 8.7 \sim 27.4$ 比相对应的凝聚力和内摩擦角有所提高,要求施工时要严格控制加荷速度,以防止地基失稳,造成不必要的工程事故。

2.5 承载力相对较小

从表 1 可以看出,软土物理力学指标相对较为集中,离散性不大,只有个别相差较大,除去特殊值,可得淤泥、淤泥质亚粘土物理、力学指标参数,按照以上统计的物理力学指标,软土承载力一般为 $30 \sim 50 \text{ kPa}$ 。远远达不到路基要求的承载力,需要做软土地基处理。

3 软土地基处理措施

从统计资料不难看出,全长 7.9 km 的路线,软土地段约 2.0 km ,占路线总长 25.3% ,各路段软土厚度相对较大,最薄处为 2.4 m ,最厚处为 16.5 m ,埋深 $0.8 \sim 5.5 \text{ m}$,由于是旧路改造,因而大部分路段在横断面分布上是旧路部分有硬壳层,另一部分则无硬壳层。旧路部分由于经过多年的荷载压实作用,其孔隙比已经较小,因而在设计中可不予以考虑,而只考虑新路基部分,即沿线水沟、农田等部分。综合软土厚度及填土高度等各种因素,我们将 8 个

大段分成 17 个小段,全长约 1.55 km ,约占总路线的 19.6% ,只对这些路段进行处理,现将处理原则及方法简述如下。

3.1 处理原则

3.1.1 安全稳定方面

在用有效固结应力法计算时,基本计算原理为:将地基土分为若干土条,按土条底部滑裂面处地基土层天然十字板抗剪强度和直接快剪指标 c, φ 来计算,运营期稳定安全系数 $F \geq 1.2$ 即可。具体计算公式为:

$$F = \frac{\sum S_i + \sum (S_j + P_j)}{P_r}$$

式中:分子为抗剪(滑)力之和,而分母为各土条下滑力总和。

3.1.2 沉降方面

沉降计算采用分层总和法,它假定地基土为直线变形体,在外荷载作用下变形只发生在有限厚度的范围内,将压缩层厚度内的地基土分层,分别求出各分层的应力,然后用土的应力应变关系求出各分层的变形量,其和即为地基的总沉降量。设各分层的压缩变形量为:

$$\Delta S_i = \frac{e_{i1} - e_{i2}}{1 + e_{i1}} h_i$$

总沉降量:

$$S = \sum_{i=1}^n \Delta S_i = \sum_{i=1}^n \frac{e_{i1} - e_{i2}}{1 + e_{i1}} h_i$$

式中: e_{i1}, e_{i2} 为对应于各土层平均自重应力 P_{i1} 、平均自重应力和附加应力 P_{i2} 作用下的孔隙比(可由 $e-P$ 曲线图查出)。

在保证路基安全稳定的前提下,保证路基在使用年限内(该项目定为 30 a)一般路段和涵洞或箱形通道 30 m 内容许工后沉降满足《公路软土地基与路堤设计与施工技术规范》(JTJ 017—96),新旧路结合处及桥台附近 $30 \sim 50 \text{ m}$ 范围内容许工后沉降 $S \leq 10 \text{ cm}$ 。

3.1.3 固结沉降期

该项目所定固结沉降期定为至少 6 个月。

3.1.4 沉降和稳定观测

为了严格控制地基稳定及沉降,须进行沉降观测和水平位移观测,即埋置沉降板和测斜管。具体埋置办法见有关规范。在填土期间观测,如发现沉降速率 $\geq 1.0 \text{ cm/d}$,或侧向位移 $\geq 0.5 \text{ cm/d}$,证明土体已处于不稳定状态,应立即停止加载,必要时卸载,直到其稳定后再加载。由于现阶段我国软土地

基处理尚处于探索阶段,由于各种因素的干扰或与理论值相差太大,会引起理论计算稳定安全系数或沉降量与实际情况不符,在这种情况下,按以往施工经验,如果最后 2 个月内月平均沉降量 ≤ 0.8 cm,证明施工沉降已基本完成,可进行下一步施工程序。

3.2 处理方法

大量实践已总结出很多软土地基处理方法。针对不同的填土高度、不同的软土厚度、不同的物理力学性质指标等有相应的处理方法,即使对同一工程项目,为了提高工程质量,尽量减少工程造价,也可能选用几种处理方法。目前来说,常用的处理方法有:超载(真空)预压、浅层处治、袋装砂井(或塑料排水板)、CFG 桩和碎石桩等。加固土桩由于造价高,比较少用。碎石桩在市政建设等受很多限制的项目中用得较多,也取得了较为成功的经验。

3.2.1 超载(真空)预压

对于软土厚度不大(≤ 4 m),物理力学性质相对较好,固结系数较大的地方用得比较多。具体方法就是:在填土前先铺设 0.6~1.0 m 厚的粗砂垫层以利排水,铺设砂垫层的另外一个作用就是对上部荷载起到应力分散作用。该方法的优点就是工程造价相对较低,但固结时间较长。有的路段也在砂垫层上面加一层土工布、土工格栅(抗拉强度 ≥ 50 kN),也会对保证路基安全稳定有很好的作用,但工程造价相应就提高了。由于项目所在地取土及弃土较为困难,故而不采用此方案。

3.2.2 袋装砂井

这是该路段用得最多的方法。它适用于软土厚度较大的地方,其上部也铺设 0.5 m 厚的砂砾垫层和一层土工布,有的路段,比如桥头等有较大填土的

路段则再增加一层土工格栅(抗拉强度 ≥ 50 kN),以增强路基稳定性。袋装砂井间距 $D=1.0\sim 2.0$ m,砂井直径 $d=0.07$ m,按梅花桩形式布置。塑料排水板和袋装砂井使用效果差不多,两者相比各有利弊。虽然塑料排水板具有工厂化生产、施工速度快、效率高,施工机械轻便,对软土扰动小、造价相对较低等特点,但袋装砂井在广东很多地区施工已取得了比较成功的经验,施工技术比较熟练,而且容易控制施工质量,因而该工程基本以采用此方法为主。

3.2.3 振冲碎石桩

本方法的作用机理就是对部分软土进行置换,形成复合地基,从而提高地基承载力。对该工程而言,由于屏山大桥东桥头,即 K5+740~K5+803.6 段,由于淤泥质细砂层较厚,达 9.0 m,为防止砂土液化和减少工后沉降,防止桥头跳车,选用碎石桩,采用振冲法施工,以期改变地基土结构,达到提高地基承载力的目的。

4 结语

软基处理技术在我国起步时间不长,因而很多计算模式还不是很成熟,加之从工程地质勘察、取样、试验到选用试验资料进行计算,其间不可避免有误差存在,在施工中也发现存在实际与理论计算的差异,因而需进一步完善。珠江三角洲属冲积平原,其间沟渠、鱼塘纵横交错,软土分布范围十分广泛,所以软土地基处理在该地区的发展既有潜力,又有压力,只能通过大量实践取得大量的工程试验数据,从理论到实践再从实践到理论,再以理论指导实践。只有这样,软土地基处理才能更上一个新台阶,也才能更好地为公路建设服务。

用自己的方式做中国景观设计

我们的前辈一直在用自己的语言和方式设计景观。为此,我们有引以为荣的中国古典园林,有引以为自豪的东方山水。后来我们开始接触到外面的世界,于是我们的景观设计师们开始不顾一切地去模仿西式建筑风格,在不到 20 a 的时间里,全中国到处都是“欧陆风格”、“美洲风格”的景观,连居民小区的名字都变成了外文版,如“加州阳光”、“巴黎春天”等。

对西方设计的非常性模仿已经让中国现代设计陷入了不尴不尬的境地,模仿西方建筑的大气,却把居住者封闭在自家的深墙之内;中国传统文明崇尚的“其乐融融”的邻里关系消失了,取而代之的是人际关系的冷漠。

我国的景观设计师应清醒地认识到,只有理解了西方的文化,了解不同的“祈祷方式”,才能设计出属于本土特色的景观来。而现在在我们的本土上没有特色、千篇一律的城市景观,是对城市旅游资源的浪费。