

文章编号: 1002-0268 (2004) 03-0018-04

CFG 桩在高速公路滑塌路段 软基处理中的应用

洪宝宁¹, 陈析²

(1. 河海大学, 江苏 南京 210024; 2 广东新台高速公路有限公司, 广东 广州 529200)

摘要: 根据高速公路软基处理特点, 本文针对具体工程实例, 从 CFG 桩复合地基的设计理论、施工控制和现场试验等几方面, 系统的介绍了 CFG 桩复合地基在高速公路软基滑塌加固中的应用, 提出了桩长、桩径、桩间距、桩体强度, 以及垫层厚度和垫层材料的确定方法, 给出了施工质量控制方法, 并通过现场试验进行了可靠性论证, 为这种软基处理方法的推广应用提供借鉴依据。

关键词: CFG 桩; 高速公路; 软基加固

中图分类号: U472 **文献标识码:** A

The Application of CFG Pile in Disposal of Soft Foundation of Expressway Sliding Road-Section

HONG Bao-ning¹, CHEN Xi²

(1. Hohai University, Jiangsu, Nanjing 210024, China;
2 Guangdong Xintai Expressway Ltd., Guangdong Guangzhou 529200 China)

Abstract: Based on the characteristics of disposal of soft foundation of expressway, this paper aimed at special engineering items, from theory of composite foundation design, construction control, site experimentation and so forth systematically introduced the application of CFG pile in disposal of soft foundation of expressway sliding road-section, provided with the determination method of pile length, pile diameter, pile spacing, pile strength, cushion thickness and cushion material, gave method of construction quality control and provided with useful warranty to the application of this soft foundation disposal method form reasoning reliability of site experimentation.

Key words: CFG pile; Expressway; Soft foundation consolidation

CFG 桩复合地基是我国 20 世纪 80 年代末开发的一项新的地基加固技术, 1992 年由建设部组织鉴定, 1994 年被建设部和国家科委列为国家级全国重点推广项目。通过 10 余年的科研和工程实践, CFG 桩复合地基技术在建筑物基础处理方面取得了令人瞩目的成就。然而, 将 CFG 桩复合地基作为一种高速公路软基处理的方法, 国内外尚未见报道。为了探索 CFG 桩复合地基处理技术在高速公路软基加固方面的应用和施工工艺, 广东新台高速公路有限公司与河海大学岩土工程研究所合作, 最先在新台高速公路软基处理上进行系统试验和研究, 取得了许多有益的成果, 为

这种地基处理方法在高速公路软基加固方面的推广应用提供了借鉴依据。本文作为系统试验和研究成果之一, 将着重介绍笔者们在利用 CFG 桩复合地基处理滑塌路段软基的一些工作和研究情况。

1 工程背景

新台高速公路某段软基路基宽 46.6m、长近 100m, 由于整个路堤斜交座落在一条古河道(约 60m 宽)上, 河道与附近的淤泥厚度变化极不均匀(两者厚度相差约 10m), 再加之路堤填土高(7.4m)等原因, 2000 年 8 月 27 日发生滑塌。滑塌后进行了详细

的地质勘察工作,从地质勘察资料看,在河道范围内地表下至 4.0m 左右为杂填土和耕植土,淤泥层有 16.6m 厚,以下为强风化泥质粉砂岩,土层主要物理力学指标如下:

(1) 杂填土和耕植土:天然含水量 $w=31.7\%$,液性指数 $I_L=0.80$,天然密度 $\rho=2.06\text{g}/\text{cm}^3$,比重 $G_s=2.68$,压缩系数 $a_{1-2}=0.27\text{MPa}^{-1}$,固结系数 $C_v=1.48\times 10^{-3}\text{cm}^2/\text{s}$,直接快剪 $C=6.9\text{kPa}$, $\phi=3.80$,容许承载力 85kPa 。

(2) 淤泥:主要物理力学指标(平均值),天然含水量 $w=93.1\%$,液性指数 $I_L=1.86$,天然密度 $\rho=1.57\text{g}/\text{cm}^3$,比重 $G_s=2.64$,压缩系数 $a_{1-2}=1.49\text{MPa}^{-1}$,固结系数 $C_v=8.45\times 10^{-4}\text{cm}^2/\text{s}$,直接快剪 $C=5.75\text{kPa}$, $\phi=3.00$,固结快剪 $C=18.9\text{kPa}$, $\phi=15.00$,渗透系数 $K_0=0.94\times 10^{-6}\text{cm}/\text{s}$,容许承载力 45kPa 。

(3) 强风化泥质粉砂岩:硬塑,标贯击数 $13\sim 24$ 击。

为了保证能在 2000 年 12 月 31 日前通车,在已对 CFG 桩复合地基处理试验和研究的基础上,经广泛征求专家意见,确定采用 CFG 桩复合地基处理该滑塌段。采用 CFG 桩处理方案一方面可满足工期要求,另一方面也为正在进行的 CFG 桩复合地基处理高速公路软基系统试验和研究丰富内容。

2 设计理论和方案

CFG 桩复合地基设计主要确定 5 个设计参数,即桩长、桩径、桩间距、桩体强度、垫层厚度及材料。

2.1 桩长的确定

一般根据地质资料,该路段 20.6m 左右以下为强风化泥质粉砂岩,桩长取 21.6m。

2.2 桩径、桩间距、桩体强度的确定

一般要考虑路堤填土高度、路面结构层厚度、车辆动载以及适当的安全贮备,需要进行复合地基承载力的计算。根据 CFG 桩复合地基的特点,承载力的估算采用如下方法

$$f_{sp,k}=m\frac{R_k}{A_p}+\alpha\beta(1-m)f_k \quad (1)$$

$$\text{或} \quad f_{sp,k}=[1+m(n-1)]\alpha\beta f_k \quad (2)$$

式中, $f_{sp,k}$ 为复合地基承载力标准值; f_k 为天然地基承载力标准值; m 为面积置换率; n 为桩土应力比; A_p 为 CFG 单桩截面积; $\alpha=f_{sk}/f_k$, f_{sk} 为加固后桩间土承载力标准值; $\beta=0.75\sim 0.95$; R_k 为 CFG 单桩承

载力标准值。在已知天然地基承载力标准值、单桩承载力标准值和复合地基承载力标准值的条件下,按(1)式求得置换率 m 。根据高速公路软基处理特点,以及笔者们进行的大量试验和理论研究,建议在高速公路软基处理中,桩径取 500mm,桩体强度取 $C_{12}\sim C_{15}$,在计算 m 时取桩间土发挥系数 $\beta=0.9$,桩间土强度提高系数 $\alpha=1.5$ 。采用正方形布桩时,桩间距 S 可用下式估算

$$S=\sqrt{\frac{A_p}{m}} \quad (3)$$

根据滑塌段路堤填土高度、路面结构层厚度、车辆动载以及适当的安全贮备等情况,复合地基承载力标准值 $f_{sp,k}$ 取 250kPa ,天然地基承载力标准值 $f_k=45\text{kPa}$ 。经计算 $m=0.0687$, $A_p=0.19625\text{m}^2$,代入(3)式可得桩距 $S=1.69\text{m}$ 。

2.3 沉降估算

CFG 桩复合地基的最终累计沉降量可按下式进行估算

$$S_c=\Psi\left[\sum_{i=1}^{n_1}\frac{p_0}{E_{si}}(z_i\bar{\eta}_i-z_{i-1}\bar{\eta}_{i-1})+\sum_{i=n_1+1}^{n_2}\frac{p_0}{E_{si}}(z_i\bar{\eta}_i-z_{i-1}\bar{\eta}_{i-1})\right] \quad (4)$$

式中, n_1 为加固范围内土分层数; n_2 为沉降计算深度范围内总的分层数; p_0 为对应荷载的附加压力; E_{si} 为第 i 层土的压缩模量; z_i 、 z_{i-1} 为处理地面至第 i 层、第 $i-1$ 层土底面的距离; $\bar{\eta}_i$ 、 $\bar{\eta}_{i-1}$ 为处理地面至第 i 层、第 $i-1$ 层土底面范围内平均附加应力系数; ζ 为加固区土的模量提高系数; Ψ 为沉降计算修正系数。

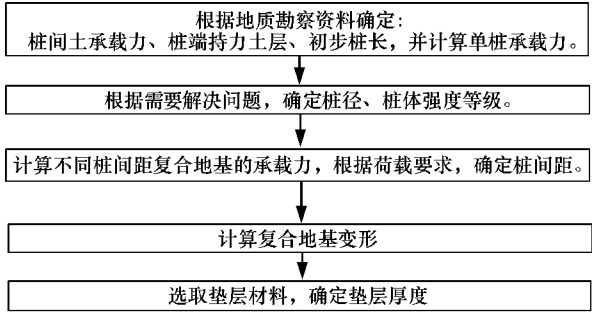
2.4 垫层厚度及材料的确定

在高速公路软基处理中一般需根据桩距进行估算,通过试验和理论研究笔者得到如下公式

$$\Delta H=\lambda m\times S\times\frac{f_{p,k}}{f_k} \quad (5)$$

式中, ΔH 为垫层厚度; λ 为修正系数,取值范围 $0.5\sim 0.6$ 。滑塌段 λ 取 0.526,垫层估算厚度为 $\Delta H=0.301\text{m}$ 。

根据上面的设计理论和计算,滑塌段软基处理的设计方案为平均桩长 21.6m,桩径 500mm,桩体强度 C_{15} (材料配合比为水泥:碎石:沙子:粉煤灰=1:6.35:3.34:0.87),桩距 1.5m,采用正方形布置,垫层厚 0.3m,采用 2~4 级配碎石。根据设计院图纸,2000 年 10 月 9 日 CFG 桩开始施工,11 月 11 日 CFG 桩施工完



CFG 桩复合地基设计流程图

注：1. 桩间距一般在 $S=(3\sim5)d_2$ 。2. 桩体试块抗压强度 f_{cu} 应满足 $f_{cu}\geq 3(R_k/A_p)$ ， R_k 为单桩承载力标准值， A_p 为桩截面积。3. 垫层材料一般选用 2~4 级配碎石。4. 布桩形式采用梅花形或四边形。

成；7. 4m 高的路堤 10 天完成填筑，保证了通车工期。

3 施工控制

由于 CFG 桩的施工工艺和沉管方式容易造成桩体的缩径、吊脚、断桩等现象，其中桩身完整性是最主要的，如何避免出现断桩是 CFG 桩施工中要解决的重点问题。

桩身的完整性由施工过程中桩头与套管的垂直程度、提升套管的高度、拔管速度等因素决定。所以在施工时要特别注意以下三点。

(1) 在沉管前，一定要调平桩机，使桩头垂直套入套管，防止因套管与桩头接触不紧密而使淤泥挤入套管中。在沉管时锤头落距不能过大（不大于 1.5m），防止因冲量太大而造成套管与桩头分离。

(2) 在沉管过程中混合料停放时间不能太长，以免出现离析现象。当达到设计深度后，在桩管内灌入一定的混合料（约占套管二分之一），先锤击 5~10s，再开始边锤击边拔管，以防桩底出现吊脚现象。每次拔管高度宜控制在 0.5~1.0m，每拔管一次后锤击 5~10s 或者反插深度 0.3~0.5m（两者应视现场施工情况而定）；拔管过程中，应分段添加混合料，桩管内混合料始终高于拔管高度 1.5m，以保证桩身的完整性。

(3) 拔管速度控制在 1.5m/min 以内，当拔管通过淤泥夹层时，应适当放慢拔管速度，以防止桩身出现缩径现象。

总之，施工时应严格注意须适当地添加混合料和保证适当的拔管高度、速度。

在施工过程中根据实际情况采用按序跳打的工艺，即在加固桥头时应从台背向路堤方向施工；加固路堤应从路堤中部向路堤外施工。同一排桩向一个方向逐渐跳打推进，以防止地冒。在已成桩的桩顶埋设

标尺，观察施工对已成桩的挤压情况，防止已成桩受挤压而断裂并了解地面地冒情况。

4 现场试验

为了探索 CFG 桩复合地基处理技术在高速公路软基加固方面的应用和施工工艺，在滑塌段软基处理中进行了一系列的现场试验研究，现场试验包括：两根桩的静载试验，以检验桩体的承载力；1%的比例随机抽芯试验，以检验桩体的完整性和桩体质量；9 个点的沉降观测。

静载试验是检验桩的承载力，用在一定荷载下桩体的下沉量来反映。根据计算分别施加 60t 和 50t 荷载，试验结果在 60t 荷载下，总沉降量为 49.68mm，卸载后回弹变形 7.65mm，回弹系数 15.11%；在 50t 荷载下，总沉降量为 45.53mm，卸载后回弹变形 16.20mm，回弹系数 35.58%，符合设计要求，两根桩静载试验的 $Q\sim S$ 曲线参见图 1。抽芯主要目的是查明桩身粗细骨料组成、桩体强度及均匀情况、有无断桩现象、效核桩长、检查桩尖是否进入持力层等。从 16 根抽芯结果显示桩体的连续性良好，未出现断桩现象；桩芯抗压强度代表值（取每根抗压试件组中最小值）在 15.6~21.3MPa 之间。这些都说明按上述施工方法控制，桩体的承载力和完整性良好。但是，在抽芯试验发现，由于场地的不平整、桩机施工时未调平、以及钻机抽芯时的钻杆未必与桩体垂直等造成往往取不到桩底，这就给桩长的检测带来了不便。

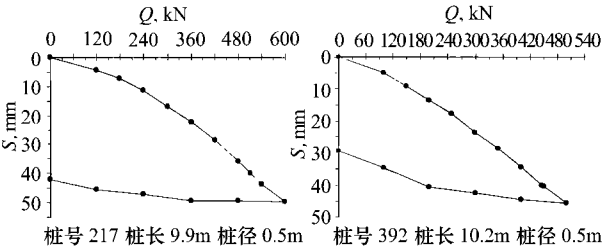


图 1 静载试验的 $Q\sim S$ 曲线

现场沉降观测分为两个阶段进行，施工期和工后。观测的数据反映，路堤填筑过程中软基的沉降量很小，在软基淤泥厚度约 16.5m、路堤填土 7.4m，10d 填筑施工完成，累积沉降量 11.4cm；淤泥厚度约 12.1m、路堤填土 7.2m，10d 填筑施工完成，累积沉降量 6.7cm；工后两个月除个别断面外，一般累积沉降在 1~3cm，这些实测数据与理论计算基本吻合。

5 结论

CFG 桩加固后形成的复合地基，不仅可获得较高

的承载力，同时由于压缩模量增大而显著降低了荷载作用下的变形，使沉降在短期趋向稳定。其主要特点如下：

(1) 显著的桩体作用

据CFG桩复合地基荷载试验结果，CFG桩单桩复合地基的桩土应力比 $n=24.3\sim29.4$ ；四桩复合地基桩土应力比 $n=31.4\sim35.2$ ；而碎石桩复合地基的桩土应力比 $n=2.2\sim4.1$ 。在复合地基中CFG桩应力集中现象明显，桩体作用显著。

由于CFG桩可全桩长发挥侧阻，桩端落在持力层可很好发挥端阻，在复合地基增强体（桩体）系列中，它的置换作用最强。复合地基承载力提高幅度大，承载力标准值可达600kPa以上。复合模量高，地基变形小。

(2) 明显的挤密作用

CFG桩采用锤击或振动沉管法施工，由于锤击的振动和挤压作用使桩间土得到挤密，经加固后地基土的含水量、孔隙比、压缩系数均有所减小，容重、压缩模量均有所增加，说明经加固后桩间土已挤密。

(3) 复合地基承载力提高幅度大

据地基处理试验结果，CFG桩取桩径为500mm，桩长10m，桩体强度等级为C₁₂。试验桩施工完毕28d后进行荷载试验，根据 $P\sim S$ 曲线，对CFG桩复合地基，按 $s/d=0.01$ 取值，其承载能力为190kPa；按 $s/b=0.01s$ 取值，承载能力为220kPa，其承载力比天然地基（承载能力87kPa）提高2~3倍，可见CFG桩复合地基承载力提高幅度大，加固效果显著。

(4) CFG桩复合地基变形小，沉降稳定快

据5个CFG桩荷载试验数据统计分析，发现CFG桩复合地基10级荷载的总时间不超过24h，这时的总沉降在20mm左右，且每级荷载加荷后第一小时的沉降量均占本级荷载总沉降的90%以上。说明采用CFG桩可提高加载速度、减少沉降量（沉降土方少），缩短施工工期。

参考文献:

[1] 阎明礼, 张国安. 地基处理设计施工的质量控制 [J]. 工程质量, 1999 (4).
[2] 龚晓南. 复合桩基与复合地基理论 [J]. 地基处理, 1999(3).
[3] 毛前, 龚晓南. 桩体复合地基柔性垫层的效果研究 [J]. 岩土力学, 1998 (6).

(上接第8页) 80%左右，小于0.005mm的颗粒约为14%，即碱渣颗粒中粉粒占大多数，这为碱渣作为矿粉使用提供了物质基础。

其次，改性沥青与矿料之间不仅存在着物理吸附作用，它们之间的粘附性，在一定程度上主要靠化学吸附，碱渣的主要成分为碱金属氧化物，沥青中的酸性成份能与碱渣表面的碱性活性中心发生反应，所以碱渣与沥青的粘附性较好。碱渣在沥青与酸性矿料表面之间起到了桥梁作用，使沥青与酸性矿料的粘附性提高。

从经济和环境的角度考虑，用碱渣作为沥青混合料填料也是可行的。用碱渣代替石灰石不仅可以解决碱渣的去向问题，还可以提高经济效益，减低公路投资和养护成本。碱渣中含有多种植物所必须的微量元素，如Mn、Zn等，可以促进绿化植物的生长。重金属Ni、Cu、Pb、Cr、Zn、Cd、Hg等的含量均能达到国标1~2级标准，在公路上的使用时不会对沿线环境造成破坏。

5 结论

(1) 碱渣作为填料时，4%SEBS改性沥青和花岗岩骨料制成的混合料试件残留马歇尔稳定度比可以达到89%，符合国家标准规定的改性沥青混合料的大于80%的要求。

(2) 碱渣作为填料时，4%SEBS改性沥青和花岗岩

骨料制成的混合料试件剩余强度比（稳定度、回弹模量和劈裂抗拉强度）均在0.90左右，大于0.75，是一种优良的抗剥落性材料。

(3) 碱渣作为一种难以处理的工业废渣，公路建设中替代石灰石作为填料使用，具有重要的环境效益，还可以减少公路建设投资和降低养护成本，具有良好的综合效益。

参考文献:

[1] 张万钧, 郭育文, 等. 三种固体废弃物综合利用的初步研究 [J]. 自然资源学报, 2001, 16: 283—287.
[2] 赵洪亮. 工业废料碱渣土工程特性的试验研究 [J]. 港口技术, 2001, 4: 49—50.
[3] 张庆宇. GIS公司的SEBS特性与应用 [J]. 化工新型材料, 2001, 29: 52.
[4] 戴长华. SEBS新型弹性体和茂金属催化剂 [J]. 化工科技, 1999, 7 (3): 8—12.
[5] Ho R M, Adedeji A, Giles D W. Micro-Struture of Triblock Copolymers in Asphalt Oligomers [J]. J. polym. Sci. B: Polym. phys. 1997, 35: 2857.
[6] R P Lottman Predicting Moisture-induced Damage to Asphaltic Concrete-field Evaluation [R]. TRB NCHRP Report 246, 1982.
[7] F A Bdghunain. Improving Adhesion Characteristic of Bituminous Mixes by Washing Dusting-contaminated Coarse Aggregates [C]. Transportation Research Record 1523, 1988, 134—142.