

论公路工程软基处治水泥粉煤灰碎石桩方案的优化

李红光

长沙市公路桥梁建设有限责任公司

摘要：利用沉降板实时观测并采集路基沉降量是目前主流的沉降观测技术，通过分析一段周期内的路基横向沉降变化情况，能够为路基横向沉降处治提供基础数据资料；以水泥粉煤灰碎石桩处治技术为例，沉降数据有助于计算碎石桩在不同布置形式下的对应地基承载力，进而能够快速制定针对性极强的软土路基CFG桩加固处治方案。通过本文分析可知，当路基标高介于3m~8m范围内时，路肩位置的沉降值仅达到路基中心沉降值的62.5%~81.4%，填方路堤坡脚位置的沉降值仅达到路基中心沉降值的4.8%~14.6%；若使用CFG桩加固软土路基，在保证路基承载能力的前提下，为了降低工程处治造价，可适当增加路肩和坡脚位置的加固桩间距。

关键词：公路；水泥粉煤灰碎石桩；软土路基；方案优化

一、横断面方向路基沉降规律分析

(1) 分别选取标高为3m、5m和8m的路基断面作为监测横断面，并在对应断面布设沉降板，主要目的是分析不同标高位置沿横断面方向的沉降变化情况。

(2) 单个监测断面布置9个沉降板，同一标高至少选取3处沉降观测截面，具体布置形式详见下图1：

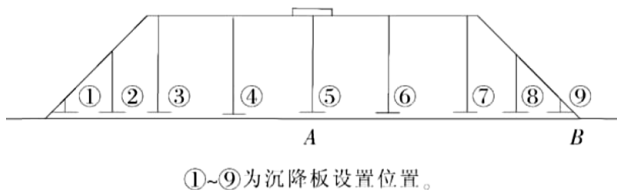


图1 路基沉降板布置

(3) 沉降量观测时间节点以沉降板埋设且能够正常工作起算，观测频率以路基分层填筑为准，每填筑2层观测1次，沉降观测工作应贯穿项目始末，直至路基分项工程交工验收通过为止；

(4) 下图2~4展示了路基顶面标高为别为3m、5m、8m时对应的横断面沉降量变化情况。考虑到路基横截面沿中心竖轴对称，故同时采集对称点数据并求平均后得到对应的沉降结果。

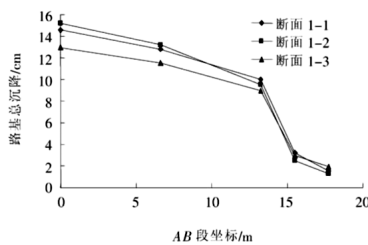


图2 填土高度为3m时A B段沉降曲线

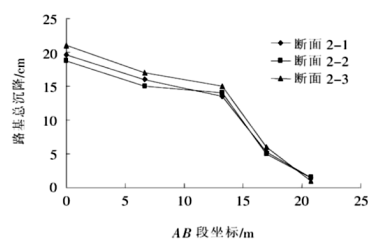


图3 填土高度为5m时A B段沉降曲线

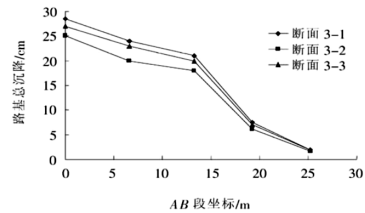


图4 填土高度为8m时A B段沉降曲线

(5) 总结上述监测数据后发现：

- 1) 当路基顶面标高为3m时，路基中心位置的沉降极值介于13.0cm~15.2cm之间，其中路肩位置的沉降值约达到中心最大沉降值的62.5%~69.2%，坡脚位置的沉降值约达到中心最大沉降值的8.6%~14.6%；
- 2) 当路基顶面标高为5m时，路基中心位置的沉降极值介于18.8cm~21.0cm，其中路肩位置的沉降值约为中心最大沉降值的68.8~74.4%，坡脚位置的沉降值约为中心最大沉降值的4.8%~8.0%；
- 3) 当路基顶面标高为8m时，路基中心位置的沉降极值介于25.0cm~28.5cm，其中路肩位置的沉降值约达到中心最大沉降值的72.0%~81.4%，坡脚位置的沉降值约达到中心最大沉降值的6.4%~7.0%；

二、复合地基承载力计算

为了解决因地基土体差异造成的不均匀沉陷问题，工程上采用过渡段的形式连接不同地基段，过渡段设计长度一般介于20m~40m之间。譬如，在路桥衔接段多采用“桥头段+过渡段”的组合形式。其中桥头段的加固桩间距略低于过渡段，且过渡段内的加固桩间距保持恒定；为了突出沉降控制的精细化水平，部分工程将过渡段又细分为两段，并分别选用不同的桩间距，以提高路段内沉降变形的协调性。

(一) CFG桩布置方案面积置换率计算

1. 桥头段方案

(1) 设计方案一：碎石桩直径0.5m，布设方式为三角形，桩间距为1.5m。换填率 m_1 求解：连接相邻桩圆心形成三角形，计算三角形面积 A ， $A = \sqrt{3}/4 \times 1.5^2 = 0.97m^2$ ；三角形边界内的扇形总面积即为CFG桩面积 A_p ， $A_p = 1/2 \times \pi \times (0.5)^2/4 = 0.098m^2$ ； A_p 与 A 比值为CFG桩对应的换填率 m_1 ， $m_1 = A_p/A = 10.1\%$ 。

(2) 方案优化设计：碎石桩直径为0.5m，路肩以内部分呈三角形分布的碎石桩间距为1.5m，边坡位置的碎石桩间距为2.0m（详见下图5）。换填率 m_2 求解：根据长度差异将路基内侧的换填率 m_f 与边坡位置的换填率 m_p 加权平均，得到施工路段的总体换填率 m_2 。 m_f 为10.1%， m_p 为5.7%，加权平均后有 $m_2 = 14.25/24.25 \times m_f + 10/24.25 \times m_p = 8.3\%$ 。

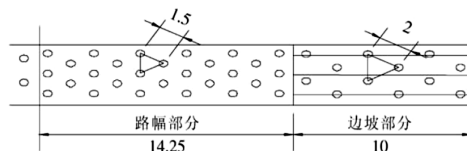


图5 改进CFG桩布置方案（单位：m）

2. 桥头过渡段一方案（15m）

(1) 设计方案二：碎石桩直径为0.5m，且布置形式为三角形，碎石桩桩间距为2m，对应的换填率 m_3 为5.7%。

(2) 优化设计方案：碎石桩直径为0.5m；路基内部分的碎石桩

间距为2m, 边坡位置的碎石桩间距为2.5m; 对应的换填率 m_1 为4.7%。

3. 桥头过渡段二方案 (10m)

(1) 设计方案三: 碎石桩直径为0.5m, 也呈三角形布设, 碎石桩间距为2m, 对应的换填率为5.7%。

(2) 优化设计方案: 碎石桩直径为0.5m, 也呈三角形布

设, 碎石桩间距为2.5m, 对应的换填率为3.6%

(二) 单桩承载力标准值计算

(1) 本文以某高速桥头过渡段处治项目为研究案例, 过渡段CFG桩总长为15m, 对应的土体分层情况和力学指标如下表1所示。

(2) CFG桩单体承载力特征值 R_a :

表1 软基土层参数指标

土层	厚度/m	桩侧阻力 q_{si} /KPa	压缩模量 E_s /MPa	桩径/m	桩端阻力特征值 q_p /KPa	桩间距/m		处理后桩间土承载力特征值 f_{sk} /KPa
						路基	边坡	
1	1.60	30.0	0.90					
2	3.0	45.0	8.91					
3	4.0	50.0	6.30	0.50	220.0	1.50	2.0	140.0
4	2.70	50.0	10.81					
5	3.70	60.0	7.60					

$$R_a = u_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_i + q_p A_p = 1205.0 \text{ kPa}$$

上式中: u_p 表示CFG桩外围周长; n 表示CFG桩设计长度范围内的地基层数; l_i 表示第 i 层土体的对应厚度(m)。

(三) CFG桩复合承载力分析

(1) CFG桩土复合地基承载力特征值 f_{spk} :

$$f_{spk} = m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1-m)f_{sk}$$

上式中: β 表示碎石桩间土体承载力折算系数。不同设计方案对应的复合桩承载强度参数详见下表2:

(2) 分析上表2数据可知:

1) 改进后的设计方案与原方案相比, CFG桩对应的换填率从

表2 不同方案CFG桩复合地基承载力

位置	处理方案	m/%	A_p/m^2	R_a/KPa	β	f_{sk}/Pa	f_{spk}/Pa
桥头段	方案一	10.0	0.195	1206	0.86	140.0	727.20
	改进方案	8.2	0.195	1206	0.86	140.0	618.60
过渡段一	方案二	5.5	0.195	1206	0.86	140.0	456.10
	改进方案	4.6	0.195	1206	0.86	140.0	4.2.10
过渡段二	方案三	5.5	0.195	1206	0.86	140.0	456.10
	改进方案	3.5	0.195	1206	0.86	140.0	335.90

10.1%降低至8.3%, 碎石桩-土复合地基的承载强度由727.1KPa降低至618.7KPa, 边坡位置的碎石桩间距从1.5m扩大至2.0m, 碎石桩-土复合地基承载强度下降了14.9%;

2) 桥梁桥头过渡段一改进设计方案与原方案相比, CFG桩对应的换填率从5.7%下降至4.7%, 碎石桩-土复合地基承载强度从456.2KPa降低至402.0KPa, 边坡位置的碎石桩间距从2.0m扩大至2.5m, 碎石桩-土复合地基承载能力下降了11.9%;

3) 桥梁桥头过渡段二改进方案与原方案相比, CFG桩对应的换填率从5.7%下降至3.6%, 碎石桩-土复合地基承载强度从456.2KPa降低至335.8KPa, 边坡位置的碎石桩间距从2.0m扩大至2.5m, 碎石桩-土复合地基承载能力下降了26.4%;

(3) 优化后的CFG桩布设方案, 对桥头过渡段的复合地基承载力影响有限, 下降幅度不超过14.9%; 但对桥头过渡段二的复合地基承载力影响显著, 下降幅度达到26.4%。本路段内的复合地基容许承载强度设计值为300KPa。综上, 经优化后的设计方案对应的复合地基承载强度依旧满足设计要求。

三、 CFG桩优化方案及经济性分析

经计算可知, 路肩至边坡区域内的路基填方对地基的附加应力呈渐变趋势, 且附加应力值与坡脚位置间距呈正相关关系, 但总体的附加应力规模较低, 对路基沉降的影响程度较小。综上, 可适当扩大路肩至坡脚区域内的CFG桩间距。CFG桩布设方案如下:

(1) 在桥头位置使用CFG桩加固时, 沿路基横向的碎石桩间距应为1.5m, 路肩至坡脚区域的碎石桩间距可放宽至2.0m, 布置形式仍为三角形;

(2) 过渡段一使用CFG桩加固时, 沿路基横向的碎石桩间距应为2.0m, 路肩至坡脚区域的碎石桩间距可放宽至2.5m, 布置形

式仍为三角形;

(3) 过渡段二使用CFG桩加固时, 沿路基横向的碎石桩间距应为2.5m, 路肩至坡脚区域的碎石桩间距可放宽至2.5m, 布置形式仍为三角形。

(4) 经对碎石桩-土复合地基承载强度验算后, 优化后的加固设计方案满足承载要求。

四、 结论

(1) 对标高介于3m~8m范围内的路基而言, 路肩沉降值仅达到路基中心位置沉降值的62.5%~81.4%, 坡脚位置的沉降值仅为路基中心位置沉降值的4.8%~14.6%, 路肩与坡脚范围内的路基填方对地基的附加应力较小。故可适当放宽路肩与坡脚范围内的碎石桩间距。

(2) 通过验算碎石桩-土复合地基承载强度, 优化后的桥头过渡段碎石桩布设方案满足承载要求, 充分证明了增大碎石桩布设间距的可行性, 对于控制加固成本作用显著。

(3) 为了兼顾加固可靠性和工程经济性, 在桥头路段内, 路肩至坡脚区域内的碎石桩间距可放宽至2.0m; 在桥头过渡路段内, 路肩至坡脚区域内的碎石桩间距可放宽至2.5m;

(4) 进一步细化桥头过渡段, 分别选用不同的间距参数, 能够提高路基荷载沉降的连续性和协调性, 从而提高特殊路段内的行车平顺性和舒适性。

参考文献

[1] 王伟. 塑料排水板联合CFG桩在处理公路路基中的应用[J]. 北方交通. 2015 (11).
 [2] 孔令车. 高速公路软土地基处理中CFG桩的施工技术[J]. 工程技术研究. 2019 (23).