

文章编号: 1005-0523(2008)01-0032-05

高速铁路 CFG 桩复合地基处理方案数值模拟

元翔, 宫全美, 王炳龙

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 采用有限元分析软件对 CFG 桩复合地基特性进行了研究, 分析了不同的复合地基处理方案, 如水泥土、桩帽网、和桩板方案对沉降规律和桩土应力比的影响。研究表明: 复合地基处理方案为水泥土方案时路基沉降量最大、桩土应力比最小, 地基面有明显沉降盆; 桩板方案时路基沉降量最小、桩土应力比最大、地基面沉降更加均匀。

关键词: 铁路路基; 复合地基; CFG 桩; 有限元; 高速铁路

中图分类号: TU472

文献标识码: A

随着地基处理技术的发展, 复合地基技术在工程中得到了广泛应用。特别是 CFG 桩复合地基因其费用低、施工方便、承载力高和适应性强等优点而得到广泛的推广和应用^[1]。

我国对有渣轨道的沉降制定了严格的控制标准^[2-3], 许多学者采用不同的方法对 CFG 桩复合地基进行了深入的研究^[4-10]。但目前 CFG 桩复合地基的设计、施工和监测方面都存在着一些问题, 对 CFG 桩的沉降规律、桩土应力比、长短桩设计以及垫层效应的研究有待于进一步的深入, 关于 CFG 桩复合地基的设计也还需要进行优化。

文章运用有限元软件针对京沪高速铁路京徐段 CFG 桩网结构对不同的复合地基处理方案进行了计算研究, 验证 CFG 桩复合地基设计采用的参数, 希望为建立 CFG 桩复合地基设计理论提供依据。

1 数值模拟断面及计算方案

计算断面取自京沪高速铁路京徐段代表性工点 DK190+100~DK190+350(李窑铺轨基地)。

1) 断面 DK190+165(水泥土方案) 见图 1: CFG 桩加固深度 30.0 m, 1.6×1.6 矩形布桩, 桩顶碎石垫层 0.2 m + 掺水泥 A、B 组土 2.0 m。

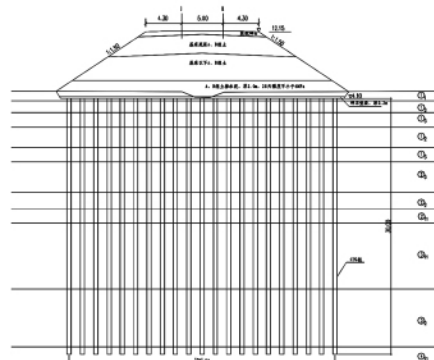


图1 断面 DK190+165

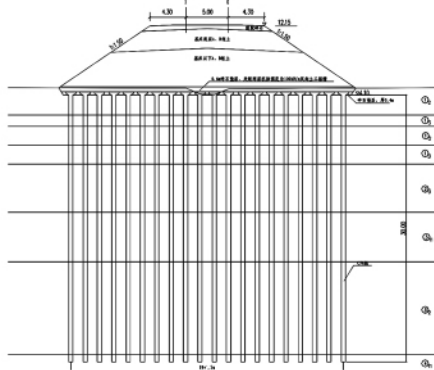


图2 断面 DK190+210

2) 断面 DK190+210(桩帽网方案) 见图 2: CFG 桩加固深度 30.0 m, 1.7×1.7 矩形布桩, 桩顶

收稿日期: 2007-10-29

作者简介: 元翔(1984-), 男, 浙江富阳人, 同济大学交通运输工程学院硕士研究生, 从事城市轨道交通和地下工程研究工作。

1.2 m×0.4 m 桩帽 + 碎石垫层 0.6 m 夹铺两层土工格栅。

3) 断面 DK190 + 254(桩板方案 1) 见图 3: CFG 桩加固深度 30.0 m + 17.0 m,1.6 × 1.6 矩形布桩, 桩顶碎石垫层 0.15 m + 钢筋混凝土板 0.5 m。

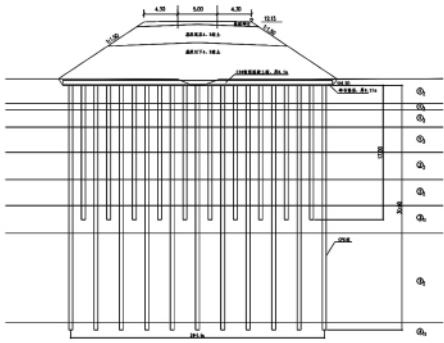


图 3 断面 DK190 + 254

4) 断面 DK190 + 310(桩板方案 2) 见图 4: CFG 桩加固深度 30.0 m,2.0 × 2.0 矩形布桩,桩顶碎石垫层 0.15 m + 钢筋混凝土板 0.5 m。

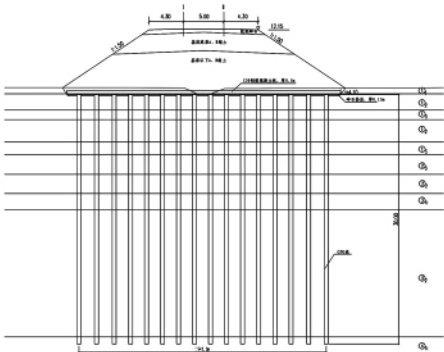


图 4 断面 DK190 + 310

2 计算理论及计算参数

数值模拟采用 Geo - Slope 有限元计算程序。

2.1 计算假定

1) 按平面应变问题考虑

在平面应变计算中,将桩简化成桩墙。因此,将空间问题化成平面问题来计算时,采用对桩身弹性模量进行折减的方法模拟桩。

$$E_{sp} = \frac{\pi D}{4l} E_p + \left(1 - \frac{\pi D}{4l} \right) E_s$$

式中: E_{sp} —桩墙的弹性模量; E_p —桩体弹性模量; E_s —土体弹性模量; l —桩间距; D —直径。

2) 地基土体本构模型为理想弹塑性模型,屈服准则采用莫尔—库仑准则; 桩、桩帽、钢筋混凝土板等采用结构单元模拟。路基填土和垫层采用线弹性

模型模拟。

3) 轨道列车荷载简化为换算土柱,土柱宽 3.4 m,高 2.9 m,容重 19 kN/m³。

2.2 计算参数

按地质报告及参考已有经验,确定的地基土层计算参数如表 1 所示,路基与垫层计算参数如表 2。

表 1 地基土层计算参数

土层	土层名称	天然容重 γ	摩擦角 φ	粘聚力 C (Kpa)	弹性模量 E (Mpa)	泊松比 μ
①1	黏土	18.7	22.3	62	18.3	0.32
①2	粉质黏土	20.0	25	42	12.3	0.31
①3	粉土	20.0	33.5	29	46.5	0.3
②3	粉土	19.7	29	30	19.5	0.3
③2	粉质黏土	20	18.5	45	15.0	0.31
④1	黏土	19.3	20.0	40	16	0.32
④2	粉质黏土	20	17.5	40	17.0	0.31
④3	粉土	20.5	38	18	46.5	0.3
④11	粉砂	20.5	40	10	54	0.28

表 2 垫层计算参数

	容重 $\gamma / (kN \cdot m^{-3})$	弹性模量 E / MPa	泊松比
级配碎石(基床表层)	20	120	0.15
AB 填料(基床底层)	20	60	0.15
基床下部土体	19.5	45	0.2
碎石垫层	20	120	0.15
钢筋砼板	24	30 000	0.1
碎石掺水泥	21	1 000	0.15
桩、桩帽	23	20 000	0.1
AB 填料掺水泥	21	500	0.15

2.3 有限元网格及边界条件

因路基横断面沿路基中心是对称的,有限元模型按半断面建立。地基土的计算宽度为半路基底部宽度的 3 倍,深度为最大桩长的 2 倍。

土体采用四节点实体单元,模型上表面为自由边界,左右两侧水平位移约束,底部为横向和竖向位移约束。

有限元计算网格见图 5。

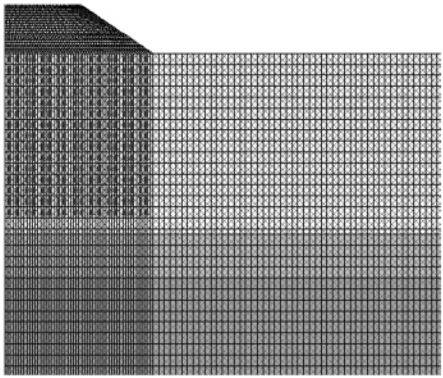


图 5 有限元模型网格

3 设计的地基处理方案对比分析

DK190 + 165、DK190 + 210、DK190 + 254、DK190 + 310 四断面在现有地基处理方案的情况下, 7 米高的路基填土、轨道和列车荷载(后仅称列车荷载)引起的地基面、路基面总沉降的计算结果见表 3。计算结果表明, 水泥土方案的路基沉降量最大, 桩板方案最小。

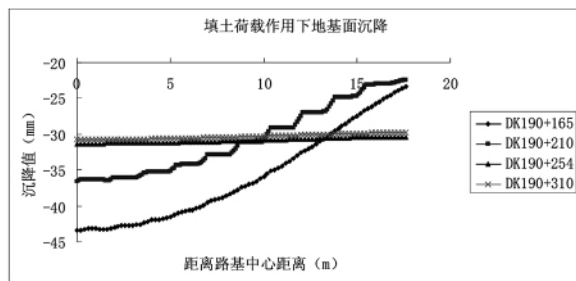
表 3 总沉降计算结果

序号	断面里程	填土引起的地基面沉降 (mm)	列车荷载引起的地基面沉降 (mm)	列车荷载引起的路基面沉降 (mm)
1	DK190 + 165	43.4	5.8	9.4
2	DK190 + 210	36.5	5.3	9.3
3	DK190 + 254	31.3	3.9	8.6
4	DK190 + 310	30.7	3.8	8.5

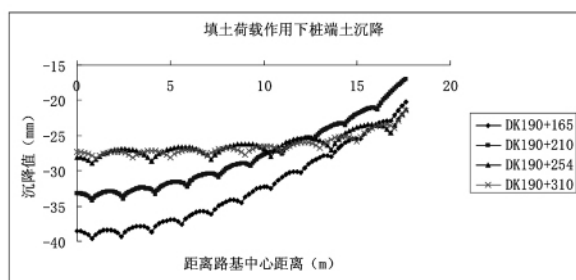
3.1 沉降规律

1) 填土荷载作用下的沉降

图 6 为填土荷载作用下四种不同地基处理方案的地基沉降沿横向的分布规律。结果表明:



(a) 地基面沉降沿横向的分布规律



(b) 桩端土沉降沿横向的分布规律

图 6 地基沉降沿横向的分布规律

(1) 水泥土、桩帽网方案的地基面有一较明显的沉降盆, 桩板方案沉降盆不明显, 基本为均匀沉降。

(2) 桩板方案的路基沉降明显小于水泥土、桩帽网方案, 但两种桩板方案相差不大。与桩板方案相比, 水泥土方案的地基面沉降最大可增加 40%, 桩帽网方案增加 18%。

(3) 水泥土、桩帽网两种方案的路基中心沉降差异大于边坡, 说明桩帽网方案对路基沉降盆的调节作用大于水泥土方案。

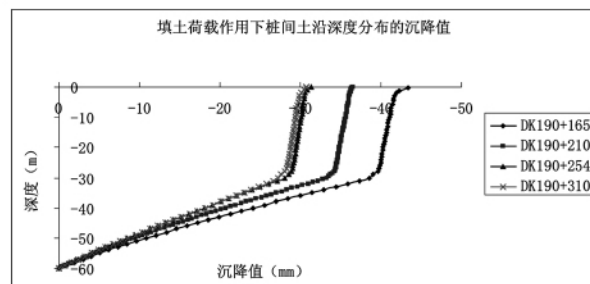
(4) 从桩帽网的地基沉降形式可见, 桩帽的作用很明显。

(5) 路基中心桩端土沉降占总沉降的 88% 左右, 坡角处比例减小。

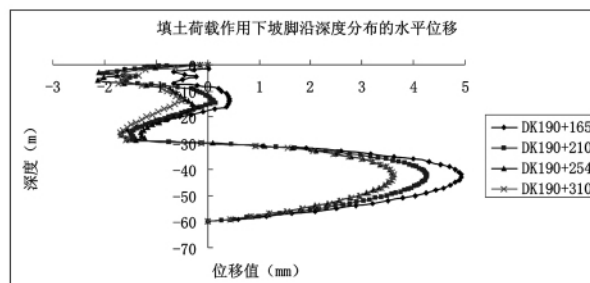
图 7 为路基中心、坡脚处的桩间土沉降沿深度的变化规律。可见:

① 路基中心处, 桩长范围内桩间土的沉降变化较小, 桩端土沉降变化较大, 说明桩长范围内桩间土的沉降很小。

② 由于土层、受力的复杂性, 坡脚处桩间土的水平位移分布形式多变, 由于桩端土附加应力的作用, 桩端土水平位移在某一深度处最大, 最大水平位移可达 5 mm。



(a) 路基中心



(b) 坡角处

图 7 桩间土沉降沿深度的变化规律

2) 列车荷载作用下的沉降

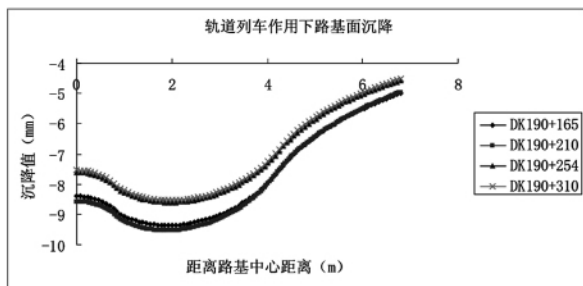
图 8 为列车荷载作用下路基面、地基面及桩端沉降沿路基宽度方向的变化规律, 可见:

(1) 四种方案的路基面变形规律基本一致, 说明在 7 米高路基填筑高度情况下, 列车荷载作用下的路基面变形规律基本不受基础结构形式的影响; 变形的量值上有所差异, 但差异不大, 最大差异仅为 1 mm; 水泥土、桩帽网方案基本一致, 且小于桩板方案; 由于桩板方案对不均匀沉降的调整作用大于水泥土、桩帽网方案, 因此, 四种方案在路基中心的差

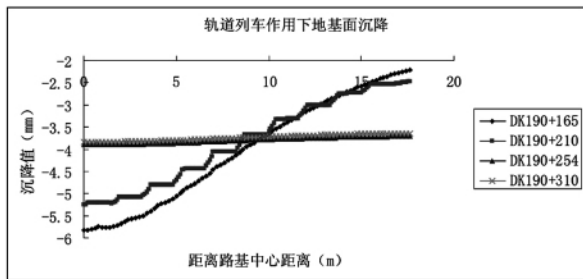
异沉降大于坡角。

(2) 基础结构刚度对地基面沉降形式影响较大,桩板方案的地基面沉降沿路基宽度方向变化不大,但水泥土、桩帽网方案仍成沉降盆的形式,且桩帽网方案对沉降的调整作用大于水泥土方案。

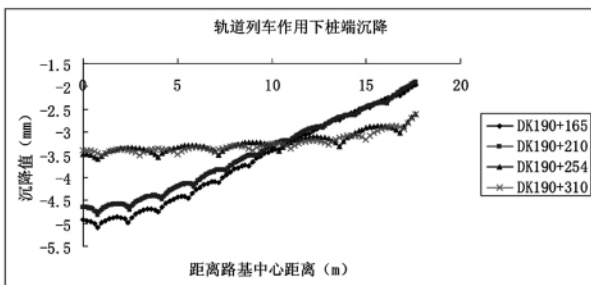
(3) 与填土荷载引起的沉降规律相同,列车荷载引起的地基沉降主要表现为桩端土沉降,占地基总沉降的80%以上。



(a) 路基面沉降



(b) 地基面沉降



(c) 桩端沉降

图8 列车荷载作用下路基沉降

3.2 桩土应力比

1) 填土荷载作用下的桩土应力比

图9为四种方案的桩土应力比。可见：

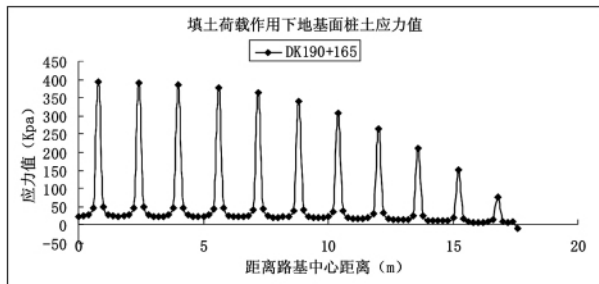
(1) 随着基础刚度的增大,桩土应力比增大,如路基中心处:水泥土方案为12.7,桩帽网方案为19.5,桩板方案1为36.6,桩板方案为30,说明基础刚度增大,桩的作用越加明显。

(2) 水泥土及桩帽网方案的路基坡脚处桩土应力比减小,约为7~10;但桩板方案中由于基础刚度较大,路基中心与坡脚处的桩土应力比基本相同。

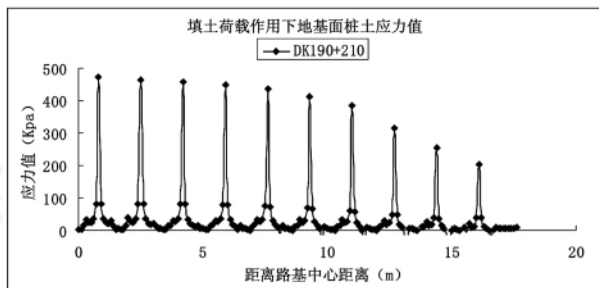
(3) 桩板方案1中的桩土应力比呈现跳跃趋

势,其中长桩处为36.6、短桩处为30.5,说明长桩发挥的作用更大一些。

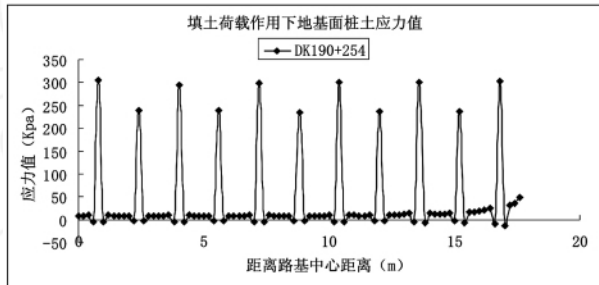
(4) 由于桩长差异,桩板方案1中的桩端土最大应力值为68.27 kPa,桩板方案2为55.20 kPa,这也是造成沉降差异的主要原因。



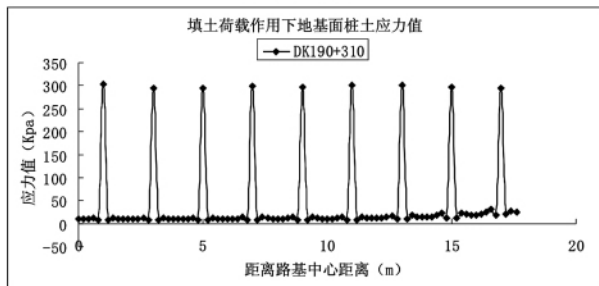
(a) 水泥土方案



(b) 桩帽网方案



(c) 桩板方案1



(d) 桩板方案2

图9 四种方案的桩土应力比

图10为路基中心桩间土应力沿深度的变化规律。桩长范围内的桩间土应力较小,但桩端土应力较大;四种方案相比,水泥土方案的桩端土应力最大,这主要是由于其对变形均匀性的调整作用较差,路基中心的应力水平较高引起的。

2) 列车荷载作用下的桩土应力比

列车荷载作用下的桩土应力比其变化规律与填

土荷载作用下的基本相同,只是量值上有所差别.

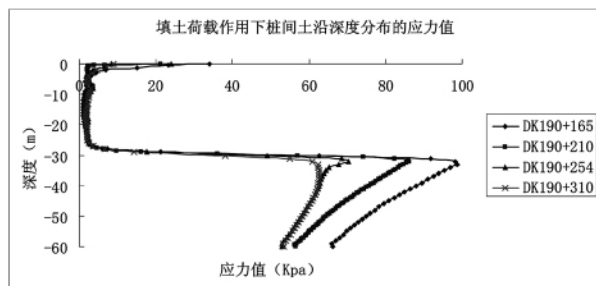


图 10 桩间土应力沿深度的变化规律

4 结论

针对 DK190 + 165、DK190 + 210、DK190 + 254、DK190 + 310 四断面的现有地基处理方案所作的分析模拟表明:

(1) 四断面的路基沉降量按从大到小的顺序排列为: DK190 + 165 的水泥土方案、DK190 + 210 的桩帽网方案、DK190 + 254 的桩板方案 1、DK190 + 310 桩板方案 2; 其中水泥土与桩帽网方案相差较小,桩板方案 1 与 2 差别不大.

(2) 水泥土、桩帽网方案的地基面有一较明显的沉降盆,桩板方案沉降盆不明显,基本为均匀沉降.

(3) 桩板方案的桩土应力比最大,水泥土方案最小,且由于基础刚度的调整作用,桩板方案中路基

中心与坡脚处的桩土应力比基本相同.

(4) 桩板方案 1 中的长桩处的桩土应力比大于短桩处,说明混合桩型时长桩发挥的作用更大一些.

(5) 地基的沉降主要由桩端土沉降引起的,基础刚度越小,桩端土沉降占总沉降的比例越小.

为控制工后沉降及施工期,建议采用桩板方案.

参考文献:

- [1] 周晖,曹宝山,李伟. CFG 桩复合地基工作机理有限元分析 [J]. 矿业工程,2006,(4):15-17.
- [2] JGJ 79-2002,建筑地基处理技术规范 [S].
- [3] 铁建设 [2003] 13 号.京沪高速铁路设计暂行规定 [S].
- [4] 姜蓉,李昌宁.软土地基 CFG 桩加固技术 [J]. 交通运输工程学报,2004,(4):4-7.
- [5] 李少和,易发成,王殿刚.垫层对 CFG 桩复合地基影响的分析 [J]. 岩土工程技术,2005,(1):50-52.
- [6] 李昌宁,王炳龙,周顺华. CFG 桩一网复合结构软基加固技术及其实际应用 [J]. 铁道工程学报,2006,(1):27-31.
- [7] 邢仲星,陈晓平.复合地基力学特性研究及有限元分析 [J]. 土工基础,2000,(2):1-4.
- [8] 李棕京,化建新. CFG 桩复合地基问题 [J]. 岩土工程技术,2004,(6):271-274.
- [9] 王瑞芳,雷学文. CFG 桩复合地基沉降数值分析 [J]. 建筑科学,2003,(2):38-41.
- [10] 姜国充,冯涛. CFG 桩复合地基有限元分析 [J]. 路基工程,2000,(3):6-9.

Numerical Simulation of Composite Ground Treatment Methods with CFG Piles on High-speed Railway

YUAN Xiang,GONG Quan-mei,WANG Bing-long

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The characteristics of composite foundation with CFG piles are studied by finite element analyzing software, and various ground treatment methods are analyzed, such as cement-soil, pile-hat-net and pile-plank, to compare the differences of the rules of settlement and the ratio of the stress of pile and soil. It is indicated by study that the settlement of subgrade is the most but the ratio of the stress of pile and soil is the least and there will be a basin of settlement on the surface of subgrade when the subgrade is treated with cement-soil; while the settlement of subgrade is the least but the ratio of the stress of pile and soil is the most and the settlement on the surface of subgrade will be more regular when the subgrade is treated with pile-plank.

Key words: railway subgrade; composite ground; CFG piles; finite element; high-speed railway

(责任编辑:李萍)