

Design and Application Results Analysis of PVD-DMM Composite Foundation Method in Bridgehead Transition Section

Jianjun Li

China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610031, China

Abstract

Starting from the theory of PVD-DMM composite foundation method, combined with the current specifications, this paper introduces the design ideas and methods of soft foundation using PVD-DMM composite foundation method in the bridgehead transition section of Nansha District, Guangzhou, China. Finally, by analysing the comparison between the settlement monitoring and the design value, it is pointed out that PVD-DMM composite foundation method is suitable for the soft foundation treatment of the bridgehead transition section, but some of the design parameters need to be adjusted in combination with the monitoring results to guide the subsequent design.

Keywords

PVD-DMM composite foundation method; soft soil; bridgehead transition section

桥头过渡段长板 - 短桩设计及应用成果分析

李建军

中铁二院工程集团有限责任公司, 中国 · 四川 成都 610031

摘 要

论文从长板-短桩的理论出发, 结合现行规范, 介绍了中国广州南沙区桥头过渡段软基利用长板-短桩处理的设计思路与方法。最后通过沉降监测与设计值的对比, 指出长板-短桩适用于桥头过渡段的软基处理, 但对于部分设计参数需结合监测结果进行调整, 以指导后续设计。

关键词

长板-短桩; 软土; 桥头过渡段

1 引言

在长期的河流冲积和海潮的进退作用下, 中国广州南沙区沉积了深厚的海陆交互软土, 厚度通常约 20~40m, 深厚的淤泥、淤泥质软土层给南沙区的工程建设造成了巨大的影响。南沙地区的饱和软土属高含水量、低强度、高压缩性的超软弱黏土, 在这类软土上直接修筑路基容易导致较大的沉降和不均匀沉降, 影响后期运营安全。由于桥梁对沉降和承载力要求较高, 一般采用桩基础; 一般的软基路基地段受造价影响, 一般采用排水固结法。如桥头过渡段处置不当, 极易产生跳车问题。因此, 桥头过渡段需要采取特殊设计, 以保证刚柔过渡段的平顺性, 增强行车的舒适性, 减少后期的维护。

2 长板 - 短桩研究现状

常用的软基处理措施有换填法、排水固结法和复合地基处理法。根据南沙片区的自然地质条件, 常用的排水固结法有塑料排水板 + 堆载预压、真空联合堆载预压; 复合地基处理采用水泥搅拌桩、碎石桩及管桩等。

排水固结法处理软基成本较低但预压固结期较长, 规范建议预压期不低于 6 个月, 而具体预压时间应根据沉降观测结果, 待沉降固结达到要求后才能开始卸载。水泥搅拌桩、碎石桩等复合地基能够较短时间内处理软基但造价偏高。因此, 2005 年, 东南大学的刘松玉教授结合淮盐高速公路项目的实际情况, 首先提出了粉喷桩与排水固结法相结合的新型工法 (2D 工法) 并进行了试验研究^[1]。

2006 年, 同济大学的叶观宝等人提出了塑料排水板与水泥搅拌桩联合处理软基的长板 - 短桩工法^[2,3]: 该工法中短的水泥搅拌桩可与桩间土形成复合地基, 提高浅层的地基

【作者简介】李建军 (1990-), 男, 中国四川资阳人, 硕士, 工程师, 从事路基研究。

综合模量和承载力，减少软土总的沉降量。同时，水泥搅拌桩复合层的形成可满足稳定要求，从而加快填土效率；长的塑料排水板可为深层软土提供排水路径，在填土相对较快的情况下能较快增大附加应力，从而加快孔隙水压力的释放，达到固结要求和工后沉降量的要求。

2007—2008 年，铁道部分别在甬台温客运专线和京沪高速铁路上海虹桥段上进行了长板 - 短桩处理深厚软基的试验研究，验证了长板 - 短桩的经济性和处理效果。

随着学者们研究的深入，长板 - 短桩处理软基的理论及施工技术也得到了长足的进步。理论上，离心模型的使用缩短了实际长时间的预压期，室内试验变得高效而准确；利用 FLAC3D、PLAXIS 及有限元等进行数值模拟使长板 - 短桩工法的荷载变化、沉降固结等特性分析变得清晰。广泛的现场试验也对理论模型、数值模拟结果进行了佐证。

3 南沙某项目桥头过渡段长板 - 短桩设计实例

某项目位于广州南沙区大岗镇，道路全长 1.33km，道路设计宽度 60m，道路等级为城市主干路。路基全为填方工程，填高 1.5~4.2m。桥梁一座。

3.1 地质情况

地勘揭示地层如表 1 所示。

3.2 设计方案

本项目桥梁范围为 K0+612~ K0+696，设计在桥头一端 K0+671~K0+711 利用长板 - 短桩进行地基处理，其余区域采用塑料排水板处理。本工程根据处理区域的不同划分为一般路段、桥头路基段、桥头过渡段。

3.2.1 一般路段

本次软基设计路堤高度小于 6m，一般路段采用塑料排水板 + 堆载预压处理，设置 50cm 中粗砂垫层并配合使用单向土工格栅。塑料排水板正三角形布置，间距 1.2m；排水板处理深度以打穿淤泥层为准。

3.2.2 桥头路基段

为了减少路桥过渡段的工后沉降差值，桥台前 10m，台后 15m 采用长板 - 短桩处理。水泥搅拌桩正三角形布置，设置 50cm 碎石垫层并配合使用一层双向土工格栅，桥台前 10m 段水泥搅拌桩长 10m，间距 1.4m，塑料排水板长 25m，间距 1.4m；台后 15m 段水泥搅拌桩长 10m，间距 1.2m，塑料排水板长 25m，间距 1.2m。

表 1 地基土物理力学性质参数表

土层名称	层厚 /m	天然密度 ρ_0 (g/cm ³)	压缩模量 E_s (MPa)	粘聚力 C(kPa)	内摩擦角 $\phi(^{\circ})$	承载力基本容许 值 f_{a0} (kPa)	桩侧土摩阻力 标准值 q (kPa)
<1-1><1-2> 填土（松散）	1.1 ~ 3.9	1.85	—	—	10	—	—
<2-1-1> 淤泥（流塑）	1.8 ~ 7.6	1.30	1.9	7	2	40	20
<2-1-2> 淤泥质土 （流塑~软塑）	1.7 ~ 29.4	1.70	2.4	8	3	80	30
<2-2-2> 粉质粘土（可塑）	1.5 ~ 5.8	1.8	5.0	20	13	140	50
<2-4> 淤泥质砂（松散~稍密）	1.4 ~ 3.2	1.75	3.2	4.5	12	80	40
<2-5> 粉细砂 （松散~稍密）	19.5 ~ 34.8	1.8	—	—	18	100	—
<2-6> 中粗砂 （松散~稍密）	2.5 ~ 6.2	1.9	—	—	20	160	—
<3-1> 砂质粘性土	2.0 ~ 2.3	18.5		18	20	200	60
<3-2> 砾质粘性土		19		20	25	250	70
<4-1> 全风化 花岗岩	1.2	20		25	25	280	80

3.2.3 桥头过渡段

桥头过渡段采用长板-短桩方案处理,过渡段长度为15m。过渡段15m范围内水泥搅拌桩长10m,间距1.4m,塑料排水板长25m,间距1.4m。

本项目一般路段、桥头路基段和桥头过渡段软基处理的纵断面布置图和平面布置图详见图1和图2。

4 控制指标

4.1 稳定控制标准

道路稳定性包括道路施工期稳定性和运营期稳定性。《城市道路路基设计规范》《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》《公路路基设计规范》规定的稳定控制标准见表2。

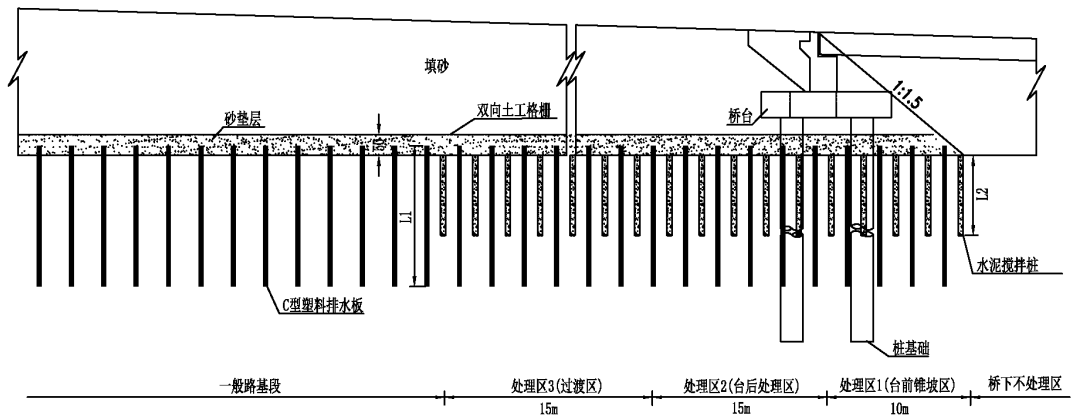


图1 软基处理纵断面图

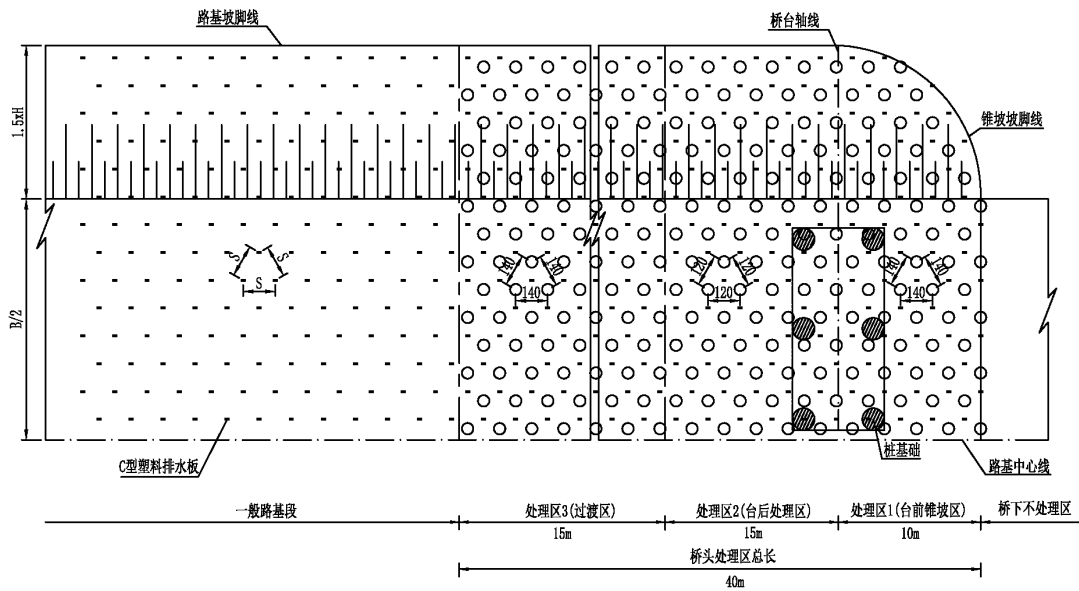


图2 软基处理平面图

表2 稳定安全系数容许值

指标	有效固结应力法		改进总强度法		简化 Bishop 法、Janbu 普遍条分法
	不考虑固结	考虑固结	不考虑固结	考虑固结	
直接快剪	1.1	1.2	—	—	—
静力触探、十字板剪切	—	—	1.2	1.3	—
三轴有效剪切指标	—	—	—	—	1.4

本次道路软基设计计算采用有效固结应力法,采用排水固结法处理时稳定控制标准为:运营期稳定安全系数大于等于 1.2,考虑地震力稳定安全系数大于等于 1.1,施工期稳定安全系数可适当降低,取值大于等于 1.05。

采用复合地基处理时,采用容许承载力控制。

4.2 沉降控制标准

《城市道路路基设计规范》规定的沉降控制指标见表 3。

表 3 路基容许工后变形 (m)

公路等级	工程位置		
	桥头与路堤相邻处	涵洞、通道处	一般路段
快速路、主干路	≤ 0.10	≤ 0.20	≤ 0.30
次干路、支路	≤ 0.20	≤ 0.30	≤ 0.50

《公路路基设计规范》《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》规定的沉降控制指标见表 4。

表 4 容许工后沉降 (m)

公路等级	工程位置		
	桥头与路堤相邻处	涵洞、箱涵、通道处	一般路段
高速公路、一级公路	≤ 0.10	≤ 0.20	≤ 0.30
作为干线公路的二级公路	≤ 0.20	≤ 0.30	≤ 0.50

本项目是区块开发的一部分,区块开发项目定位较高,区块内主干路、次干路和支路纵横交错,为避免不同等级道路出现较大的工后沉降差,结合各规范,本次设计按照表 5 的沉降控制指标控制。

表 5 沉降控制指标

指标名称	桥头与路堤相邻处	涵洞或者通道处	一般路段
工后沉降	≤ 10cm	≤ 20cm	≤ 30cm

5 设计计算方法

5.1 稳定计算方法

本次软基设计一般路段采用塑料排水板排水固结法处理,稳定计算采用圆弧滑动法中的有效固结应力法,考虑固结;桥头过渡段采用长板-短桩处理,稳定计算采用圆弧滑动法,水泥搅拌桩处理范围内采用桩土综合强度参数计算;水泥搅拌桩处理范围以下部分采用软土强度参数计算。

5.2 沉降计算方法

道路沉降计算如下:

①总沉降量计算。

总沉降计算采用经验系数法,总沉降计算公式:

$$S = m_s S_c \quad (1)$$

其中, S_c 为主固结沉降; m_s 为沉降系数,与地基条件、荷载强度、加荷速率等因素有关,取值范围 1.1~1.7。软土地基沉降计算的压缩层深度以其底面附加应力与自重应力之比值不大于 15% 确定。

采用长板-短桩处理时,总沉降量按短桩处理区的沉降量和短桩处理区以下部分的沉降量两部分来计算。短桩处理区的沉降量采用复合地基压缩模量法计算,短桩处理区以下部分的沉降量采用分层总和法中的 e-p 曲线法计算。

②施工期沉降量计算。

施工期沉降量,考虑主固结随时间的变化过程。施工期的沉降量 S_t 按下式计算:

$$S_t = (m_s - 1 + U_t) S_c \quad (2)$$

其中, m_s 为沉降系数; S_c 为主固结沉降; U_t 为施工期结束时地基的平均固结度。

长板-短桩施工采用先施工水泥搅拌桩后施工塑料排水板的方式,这就导致后插板的塑料排水板的竖向排水通道会受到已施工的水泥搅拌桩的影响。本项目软土厚度在 30m,塑料排水板排水路径较长。《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》和《水运工程塑料排水板应用技术规程》对此情况有相似的规定:竖向排水路径较长时或地基土灵敏度较高易受到扰动时,地基土的固结需考虑井阻与涂抹效应的影响。这与王宏贵^[4]的研究结论相同。

本次设计计算时考虑涂抹效应和井阻影响,相应的系数采用《广东省软土地基设计与施工技术规定》的推荐值:涂抹区直径取竖向排水体直径的 3 倍,渗透系数取原状土的 0.2~0.33 倍。

③工后沉降量计算。

工后沉降量等于总沉降量减去施工期的沉降量。

6 监测方法

为了保证工程质量和控制预压期时间,软基处理施工及运营期间进行动态监测。监测断面结合地质资料、填筑高度和路段特征确定。监测内容根据实际需求确定,主要包含沉降监测、位移监测和孔隙水压力监测等,典型监测断面布置如图 3 所示。

7 监测结果分析

项目于 2019 年 8 月开始施工,2020 年 3 月 17 日路基填筑完成。因项目调整,业主单位取消了边桩水平位移和边桩竖向位移、分层沉降、孔隙水压力监测项目,仅对软基沉降进行了监测。

为了检验路堤软基预压、加固的效果能否满足容许工后沉降的要求,利用现场实测沉降的资料,采用双曲线法推算路基的最终沉降量。沉降观测实测值详见表 6。

实测沉降观测沉降量与时间的关系图 S-T 曲线如图 4~图 8 所示。

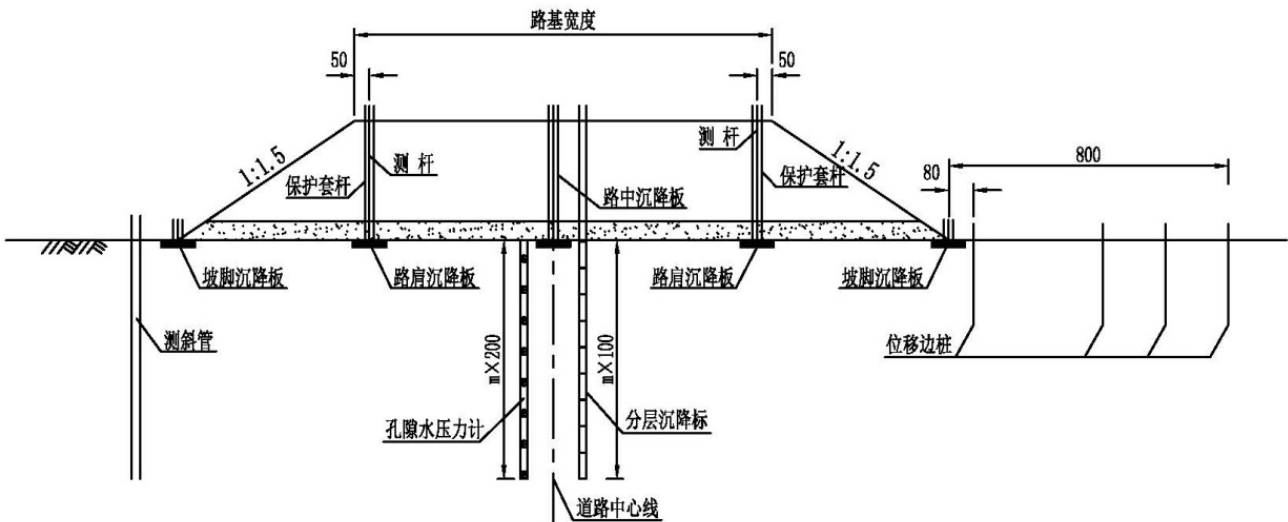


图 3 软基监测示意图

表 6 沉降设计与实测值对比表

里 程	沉降量（mm）		推算工后沉降量（mm）	设计推算工后沉降量（mm）	工程位置	处理方式
	设计值	实测值				
K0+690	1076	1701	156	178	桥头段	长板 - 短桩
K0+700	1100	1747	103	69	桥头过渡段	长板 - 短桩
K0+750	2676	2426	223	264	一般路基	塑料排水板
K0+900	2011	2358	248	195	一般路基	塑料排水板
K0+950	2126	2213	215	247	一般路基	塑料排水板

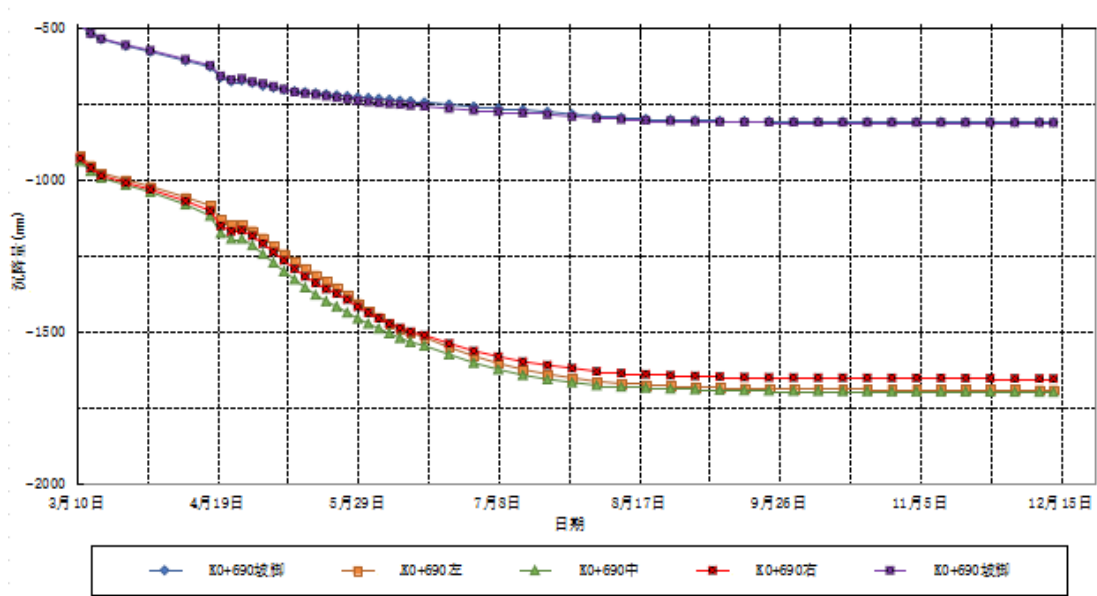


图 4 K0+690 沉降量 S-T 曲线图

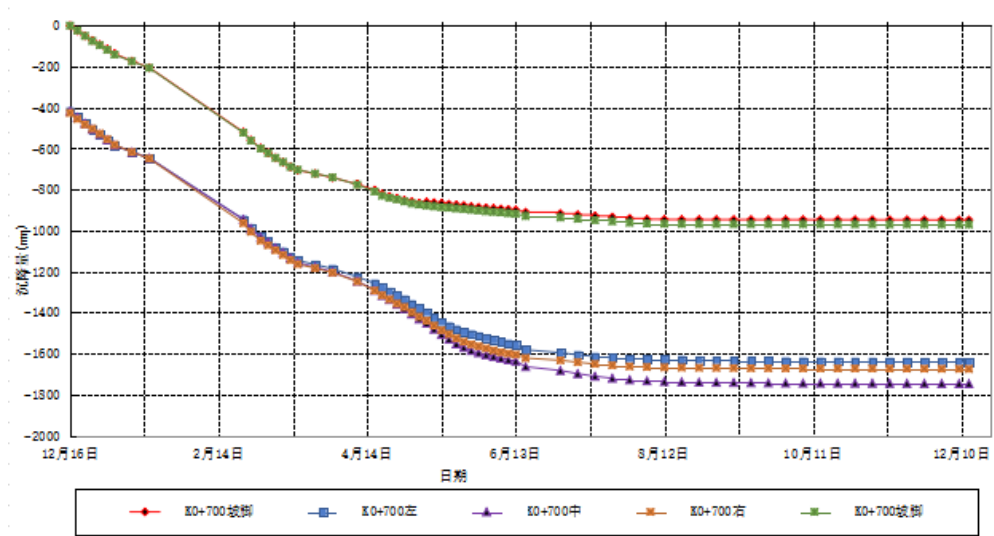


图 5 K0+700 沉降量 S-T 曲线图

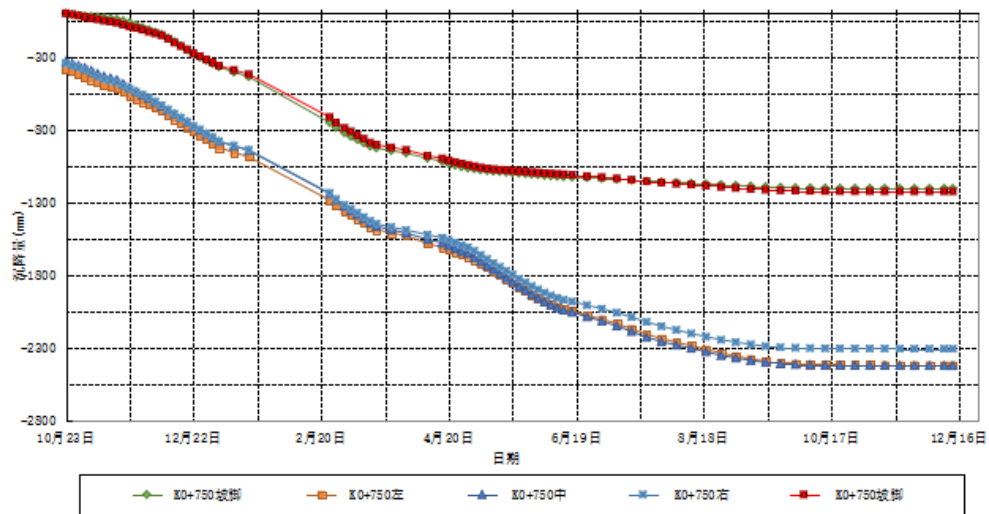


图 6 K0+750 沉降量 S-T 曲线图

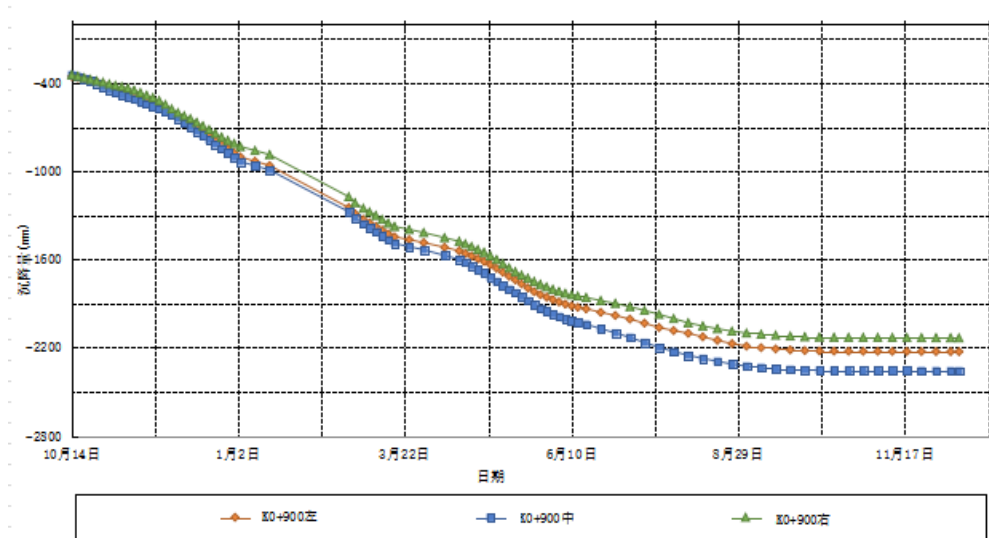


图 7 K0+900 沉降量 S-T 曲线图

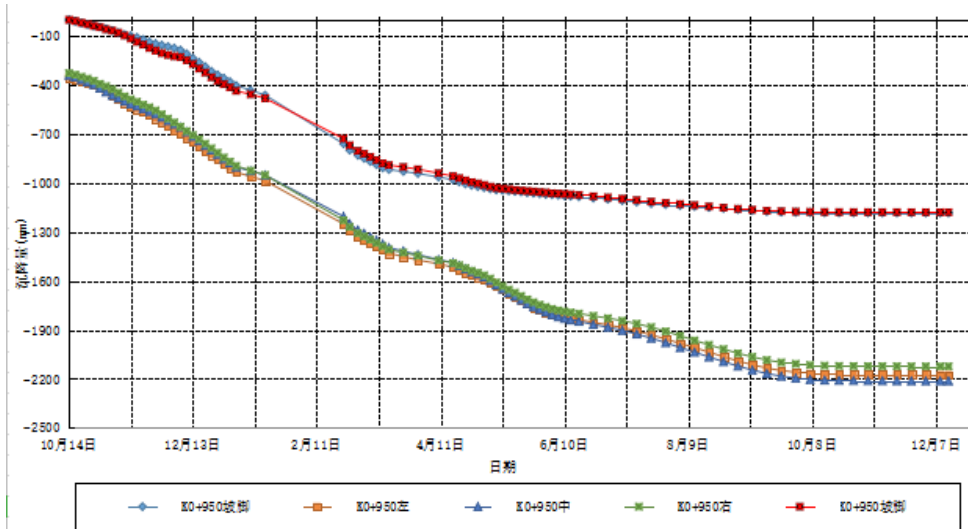


图 8 K0+950 沉降量 S-T 曲线图

由表 6 和图 4~ 图 8 监测结果可知:

①不论是采用长板 - 短桩还是塑料排水板,在软基处理初期,软基沉降速率较快,几乎按照直线速率沉降。随着时间推移沉降速率逐渐变慢并趋于稳定。这是因为软基由于塑料排水板排水通道的形成,软基逐渐固结并趋于完全固结。

②对比各监测点路中、路肩及坡脚沉降可知,路中、路肩(左)和路肩(右)几乎相同且远大于两侧坡脚沉降值,这是因为路中和路肩有路堤填土,额外比坡脚产生了多的附加应力。

③对比两种处理方式总的沉降量,长板 - 短桩处理后的沉降量远小于塑料排水板处理方式。这是由于长板 - 短桩处理时水泥搅拌桩和桩间土形成复合地基,桩间土较单纯使用塑料排水板时沉降减少。

④对比两种处理方式的工后沉降量,长板 - 短桩处理后的沉降量远小于塑料排水板处理方式。设计推算的工后沉降量和实测结果推算的工后沉降量相差不大。

⑤对比施工阶段设计沉降量和实测沉降量可知,塑料排水板的设计值与实测值相差不大,波动范围在 -9.3%~17.3%;长板 - 短桩沉降量设计值与实测值相差较大,分析认为这是由于施工短桩后桩身给下层塑料排水板处理的土层增加了额外的附加应力,先施工的水泥搅拌桩也会对原状土产生扰动,使得沉降量增大。通过修正长板 - 短桩软基计算参数,

使得施工期计算沉降与实测沉降差异减小。

⑥对比沉降稳定时间可知,长板 - 短桩在施工完成后约 6 个月沉降趋于稳定;塑料排水板在施工完成后约 12 个月沉降趋于稳定。

8 结论

①通过长板 - 短桩与塑料排水板的沉降监测对比,长板 - 短桩不仅能加快软基的固结速率,也能减少软基处理后的工后沉降量。

②长板 - 短桩处理软基后的工后沉降值能满足要求,可用于一般路段与桥头桩基间的过渡段软基处理。

③长板 - 短桩设计过程中应加强监测,利用监测结果调整后续的设计,减少设计误差。

参考文献

- [1] 刘松玉,杜广印,洪振舜,等.排水粉喷桩加固软土地基(2D工法)的试验研究[J].岩土工程学报,2005,27(8):869-875.
- [2] 叶观宝,徐超,王艳.长板-短桩工法处理高速公路深厚软基的理论与方法[J].岩土工程师,2003,14(4):3-6.
- [3] 叶观宝,王艳,徐超.长板短桩工法加固机理数值研究[J].水文地质工程地质,2006(4):120-123.
- [4] 王宏贵.长板-短桩复合地基加固机理与工程应用研究[D].长沙:中南大学,2011.