

高速公路通道软基低强度混凝土桩处理试验研究

Field test on LSC piles to improve soft clay ground under the expressway

曾开华, 俞建霖, 龚晓南
(浙江大学 岩土工程研究所, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 在国内首次采用低强度混凝土桩复合地基加固高速公路通道深厚软土地基, 解决通道地基处理中的二次开挖、桥头跳车等问题。介绍了在杭宁高速公路通道地基低强度混凝土桩处理中进行的桩土应力、桩土表面沉降、分层沉降、侧向变形等项目的现场测试成果, 并以此对路堤荷载作用下低强度混凝土桩复合地基的性状及其处理效果进行分析。

关键词: 软土地基; 低强度混凝土桩; 路堤; 通道; 现场试验

中图分类号: TU 471. 8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000- 4548(2003) 06- 0715- 05

作者简介: 曾开华(1968-), 男, 江西人, 工学博士, 主要从事岩土力学、地基处理和土工原位测试等方面的科研工作。

ZENG Kai-hua, YU Jian-lin, GONG Xiao-nan

(Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: To avoid the secondary excavation in construction and to solve the problem of the vehicles jumping at bridge approaches, the low strength concrete (LSC) pile is firstly used to improve deep soft clay ground under the expressway in China. In this paper, the field test results including the stresses, settlements, and movements are presented. The performance and feasibility of the LSC pile composite foundation under the embankment are discussed in detail.

Key words: soft clay ground; LSC pile; embankment; passage; field test

0 前 言*

低强度混凝土桩是由水泥、石子及其他掺合料(砂、粉煤灰、石灰等)加水拌和, 用各种成桩机械在地基中制成的强度等级为 C5~ C25 的桩, 如水泥粉煤灰碎石桩(CFG 桩)^[1,2]、低强度水泥砂石桩及二灰混凝土桩^[3,4]等。近年来, 低强度混凝土桩复合地基技术在一般民用住宅、高层建筑、堆场等土木工程地基处理中得到了广泛应用。该技术用于加固高速公路通道软基, 在杭(杭州)宁(南京)高速公路 K101+ 960 通道作为试验段首次施工实施, 为解决通道地基处理中二次开挖、村民交通问题以及路基不均匀沉降、桥头跳车等质量通病提供了一种较新、较好的处理方法。

高速公路沿线常设有多处人行或车行通道, 以便公路两侧的交通来往。当通道处于软基上时, 为满足高速公路技术标准要求, 需对通道地基进行处理。目前常采用的处理方法主要是堆载预压排水固结法和水泥搅拌桩复合地基法^[5,6]。前者较经济, 但工期长, 工后沉降较大, 且需进行二次开挖, 施工期严重影响公路两侧村民交通; 后者工期短, 工后沉降和不均匀沉降较小, 无须二次开挖, 但处理费用较高, 施工质量不易控制, 适用的处理深度有限, 一般在 10~ 15 m, 当软土层厚度较大时, 往往无法满足工后沉降要求。显然此两种方法都有不足, 某些特殊条件下, 如路基填土较高、软土深

厚时, 还存在不少问题, 影响工程的质量和进度。

针对以往处理方法的不足, 杭宁高速公路浙江段采用了低强度混凝土桩处理通道软基, 并进行试验课题研究。低强度混凝土桩复合地基技术综合了上述两种方法的优点—采用振动沉管成桩工艺施工速度快, 工期短, 工后沉降和不均匀沉降较小, 地基处理深度大, 而且桩身强度比水泥搅拌桩高得多, 单桩承载力和桩身模量大, 因而置换率远小于水泥搅拌桩复合地基。

1 地质条件及设计参数

杭宁高速公路浙江段全长 98. 8 km, 软基 48 km。沿线多为河湖相沉积, 软土分布广, 层厚变化大, 具有含水率大、有机质含量高、抗剪强度低、高压缩等不良特性。K101+ 960 通道为软土地基, 软土层厚 19. 3 m, 场地地基土的物理力学性质指标见表 1。

通道原地基处理方案为塑料排水板+ 超载预压, 现改用低强度混凝土桩复合地基处理。考虑到低强度混凝土桩复合地基沉降量小, 而相邻路段仍是排水固结法处理, 两交接处将存在一定的沉降差。为减缓此沉降差异, 在低强度混凝土桩处理和塑料排水板处理之间设置过渡段, 过渡段仍采用低强度混凝土桩复合

* 基金项目: 浙江省交通厅科研课题资助项目(2002205)

收稿日期: 2002- 11- 11

表 1 场地地基土物理力学性质指标

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil layers

编号	土层名称	层厚 /m	w /%	γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	e_0	E_s /MPa	k_h /($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	k_v /($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	C_c
I ₁	(亚)黏土	3.4	32.7	18.8	0.948	4.98	0.69×10^{-7}	1.10×10^{-7}	0.161
II	淤泥质(亚)黏土	6.6	47.3	17.5	1.315	2.17	1.68×10^{-7}	1.29×10^{-7}	0.42
III _b	淤泥质亚黏土	12.7	42.4	17.8	1.192	2.77	2.29×10^{-7}	1.40×10^{-7}	0.41
IV ₁	亚黏土	13.1	28.3	19.4	0.794	8.42	1.02×10^{-7}	3.32×10^{-8}	0.18
V ₂	亚黏土黏土	12.4	25.6	19.8	0.734	8.65	—	—	—
V ₄	含砂亚黏土	3.3	—	—	—	—	—	—	—

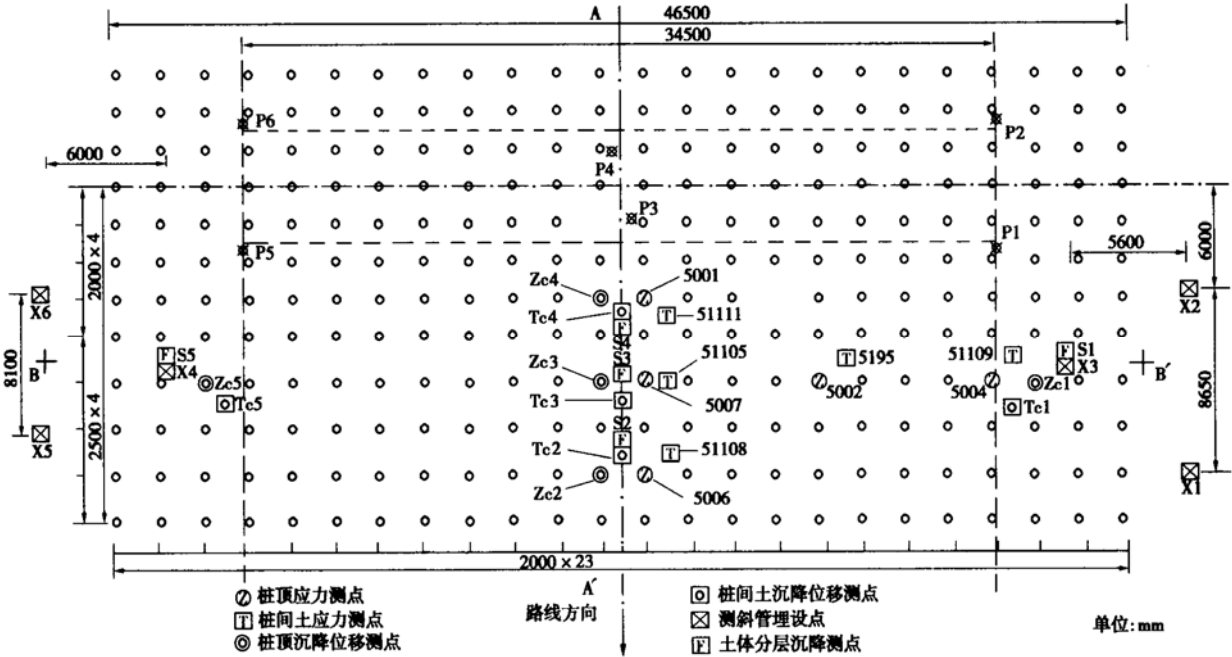


图 1 观测仪器平面布置图

Fig. 1 Layout of measuring instruments

地基, 通过改变桩长和置换率来调整不同区域的工后沉降。根据沿线工后沉降差不大于 60 mm 及纵坡率不大于 0.4% 的要求, 确定过渡段长度为 15 m。

试验段具体设计参数为: 低强度混凝土桩桩身材料采用 C10 低标号混凝土, 桩径 377 mm, 桩长 15.5~ 18.0 m(通道 18.0 m, 过渡段 15.5~ 17.5 m), 桩间距 2.0~ 2.5 m, 褥垫层为 50 cm 厚碎石垫层, 碎石粒径 4~ 6 cm。

2 施工与仪器埋设

低强度混凝土桩桩身强度等级 C10, 混凝土拌和料采用 425[#] 普硅水泥、中砂、碎石(最大粒径 < 40 mm)加水拌和而成, 成桩方法为振动沉管法, 采用沉管灌注桩施工工艺, 其施工程序为: 桩位放样→桩靴埋设→桩机就位→沉管至设计深度→管内灌注混凝土→留振→桩管振拔至地表面→超灌成桩、封桩顶→桩机移位。施工中以单打法成桩, 采用纵向隔排跳打的次序。试验段低强度混凝土桩施工从 2000 年 11 月 20 日开始,

12 月 30 日结束, 历时仅 41 d。

路堤填筑施工前, 先进行桩头和表土清理、场地平整等准备工作, 再进行隔水土工膜敷设和碎石垫层铺设, 以后路堤填筑按原设计方案(一层土工布)。填筑施工从 2001 年 7 月 11 日开始, 材料为石矿宕渣, 分 7 层填筑完成, 历时共 17 d。

现场测试元件从 2001 年 5 月 22 日开始埋设, 6 月 2 日结束, 6 月 7 日开始观测。埋设元件包括: 土压力盒和(桩顶)压力计、深层沉降管及磁环、测斜管、沉降盘及标杆等, 其具体布设见图 1、2。

3 测试成果及分析

3.1 桩土应力比与荷载分担比

桩土应力大小反映了复合地基的受力工作状态, 其比值大小用桩土应力比 n 表示, 也可换算为桩土荷载分担比 N (桩体承担的荷载与桩间土承担的荷载之比)来表示桩与土分担的荷载比例。图 3 为桩土应力

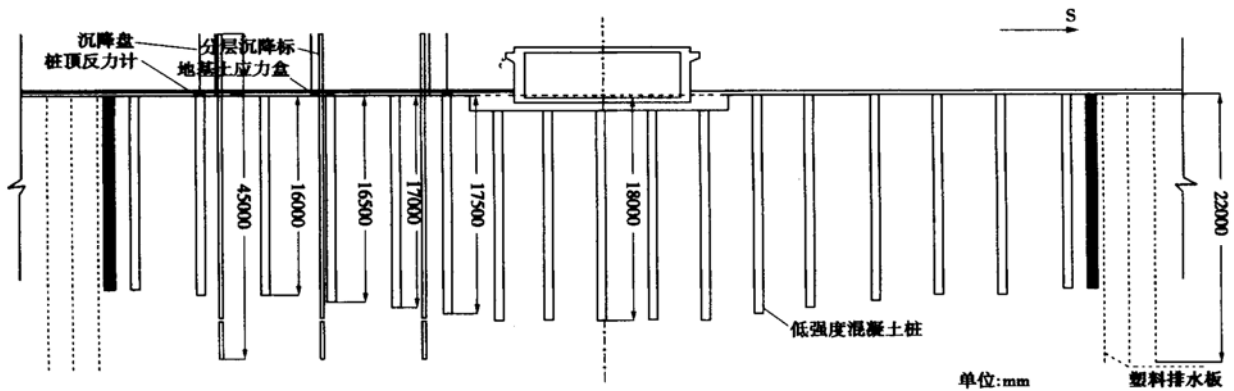
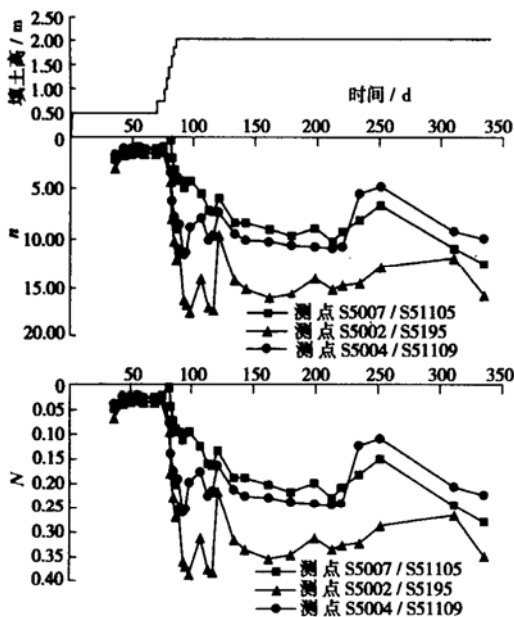
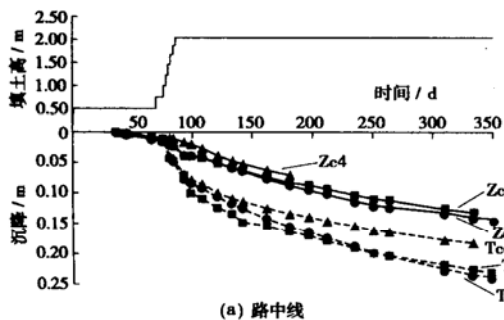


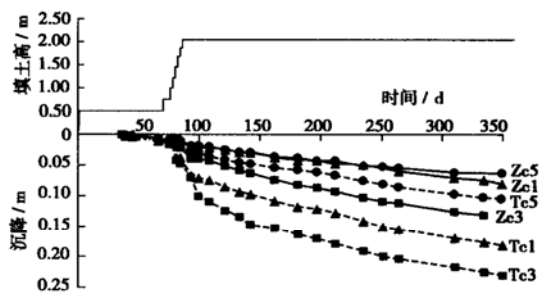
图2 观测仪器埋设剖面图(A-A'剖面)

Fig. 2 Profile of measuring instruments(section A-A')

比 n 和荷载分担比 N 的变化曲线。由图3可知, 桩土应力比 n 和荷载分担比 N 随时间的变化基本相似, 加荷前 n 值与 N 值都很小, 加荷后都快速增长。恒载后, n 值和 N 值都有一定波动变化。

图3 桩土应力比 n 及荷载分担比 N 变化曲线Fig. 3 Variation of pile-soil stress ratio n and shared load ratio N 

(a) 路中线



(b) 断面K101+970.5

图4 桩顶沉降与桩间土表面沉降

Fig. 4 Settlement of pile and soil surface

目前所测 n 值为9.87~15.47, 比值较高, 桩顶应力集中明显, 说明低强度混凝土桩桩体置换效用显著。测得 N 值为0.22~0.35, 桩间土承担的荷载占总荷载的74.1%~82.0%, 而桩体承担的荷载只有18.0%~25.9%, 大部分荷载由桩间土承担, 这说明低强度混凝土桩复合地基充分发挥了桩间土的承载能力。

3.2 桩土表面沉降

图4为桩顶和桩间土沉降随时间的变化曲线。由图4(a)知, 路中线离通道越近, 桩顶和桩间土沉降量越小, 表明桩长与置换率对桩土沉降有重要影响, 离通道越近, 复合地基桩长越长, 置换率越高, 桩顶和桩间土沉降越小。由图4(b)知, 路中的桩顶与桩间土表面沉降量均比路两侧的大。此外, 加荷对桩土沉降也有较大影响, 加荷期桩土沉降速率较大, 需恒载约5个月沉降趋于稳定, 存在一定的影响期。

目前所测桩顶与桩间土沉降都较小, 桩顶最大沉降量6.3~14.1 cm, 桩间土最大沉降量10.5~23.8 cm, 显然桩间土沉降比桩顶沉降大, 说明桩顶某一深度范围内存在一负摩擦区, 桩间土对桩壁产生的负摩擦阻力将使桩体承担的路堤荷载增加, 桩间土承担的荷载相应减少, 这对减少加固区土的沉降起到一定作用。

K101+960 通道相邻排水固结处理路段的施工和观测自 2000 年 3 月 29 日开始, 截止 2002 年 3 月 26 日, 桩号 K102+085 累计沉降量达 1.73 m, 历时 2 年多沉降才趋稳定, 其沉降曲线如图 5 所示。可见采用排水固结法处理地基沉降大、工期长, 而低强度混凝土桩复合地基法处理地基沉降小、工期短。

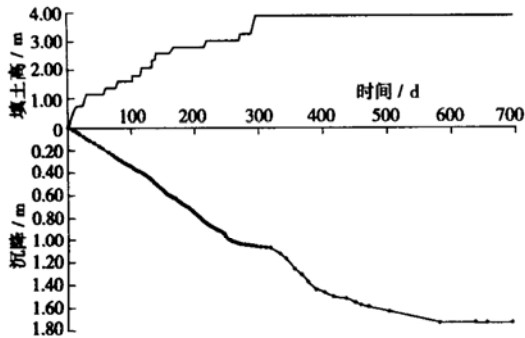


图 5 K102+085 地表沉降

Fig. 5 Surface settlement at K102+085

3.3 地基深层沉降

地基深层沉降观测结果见图 6。由图 6 可知, 浅层沉降速率较快, 沉降随时间的发展是浅层比深层大, 沉降影响深度范围大致为 19 m。19 m 以下路侧沉降量为 1.5~4.0 cm, 占总沉降量的 14.3%~22.1%, 路中沉降量为 4.5~7.0 cm, 占总沉降量的 24.7%~30.4%。

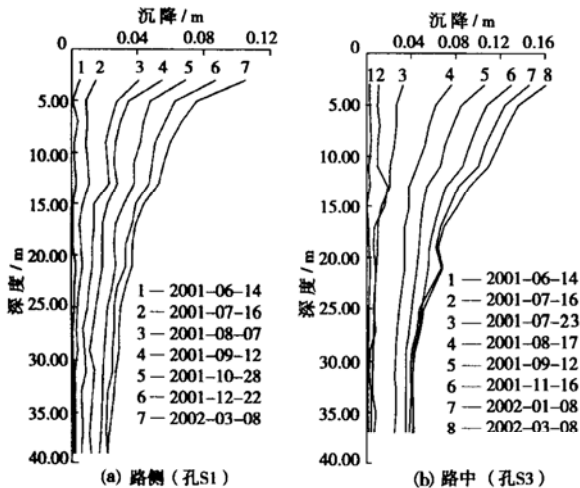


图 6 地基深层沉降

Fig. 6 Settlement of soil at various depth

由观测资料可得, 加固区土压缩量为 6.3~14.7 cm, 占总沉降量的 60.2%~71.7%; 桩底土压缩量为 4.0~8.8 cm, 占总沉降量的 22.3%~42.7%。显然前者所占比例较大, 而目前观测的桩底土沉降已稳定, 表明前者对工后沉降的影响较大, 而后者的影响较小。因此, 试验段的工后沉降将主要来自于深度 19 m 以上加固区土的工后进一步压缩。

3.4 地基侧向变形

图 7 为试验段侧向变形观测结果。由图 7 及现场观测结果可知, 低强度混凝土桩加固后地基侧向变形具有以下特点:

(1) 变形速率及水平位移深度上的递减。

加荷初期变形速率较快, 达 2.01 mm/d, 恒载 3 个月后将降为 0.20 mm/d, 恒载 6 个月后将降为 0.10 mm/d, 变形速率随时间推移呈递减趋势, 且稳定较快。深度上, 浅层水平位移较深层大, 深度 25 m 以上的水平位移及其变化较大, 而 25 m 以下很小, 表明侧向变形的深度范围有限, 且向深部呈递减趋势。

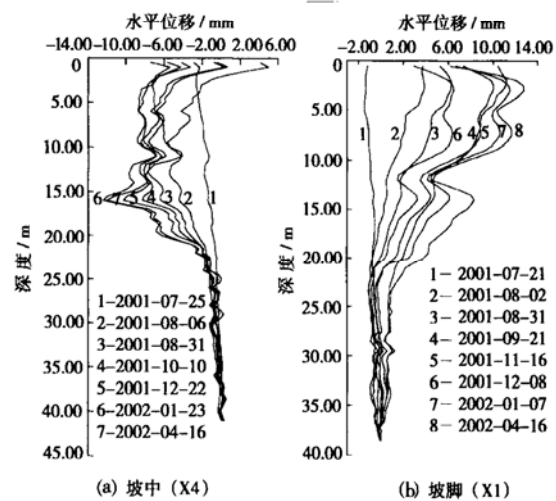


图 7 地基水平位移

Fig. 7 Horizontal displacement of soil at various depth

(2) 侧向变形量小, 桩体遮拦效用明显。

地基侧向变形量很小, 所测最大水平位移仅 1.7 cm, 说明低强度混凝土桩复合地基的桩体遮拦效用明显。由于桩体对桩间土产生的约束作用, 限制了地基土体的侧向变形, 使得地基处于更加稳固的状态。

(3) 具有变形回缩的现象。

加荷后某段时间上水平位移量有所减小, 发生变形回缩。这可看成是桩土荷载调整的结果。加荷初期, 桩间土承担荷载较大, 地基变形增大; 恒载后, 桩体承担荷载增加, 桩间土承担荷载减小, 变形随之减小。侧向变形的回缩也可能因处理前已打设的塑料排水板引发的土体固结所致, 其原因尚需进一步研究。

3.5 沉降分析

试验段路中三测点 TC2、TC3 和 TC4 沉降实测值 (截止至 2002 年 4 月 16 日)、设计计算值及推算值汇于表 2。其中推算值按双曲线法推得, 相关系数 0.987 以上。设计计算值中, 下卧层沉降量按分层总和法计算, 加固区压缩量取为 3.0 cm。

由表 2 可知, 总沉降量计算值小于实测值及推算值, 加固区压缩量取值偏小。设计中加固区压缩量按

表 2 测点 TC2 TC3 和 TC4 的沉降比较
Table 2 Comparison of settlements at the point TC2, TC3 and TC4

测点	桩长 /m	置换率 /%	当前实测值			设计计算值				推算值	
			总沉 降量	加固区 压缩量	下卧层 沉降量	总沉 降量	加固区 压缩量	下卧层 沉降量	工后 沉降	最终 沉降	工后 沉降
			/cm	/cm	/cm	/cm	/cm	/cm	/cm	/cm	/cm
TC2	16.0	2.2	23.8	15.0	8.8	20.3	3.0	17.3	13.8	39.5	15.7
TC3	16.5	2.2	23.0	14.7	7.0	17.8	3.0	14.8	11.8	31.7	8.6
TC4	17.5	2.8	18.2	12.4	5.3	15.5	3.0	12.5	10.0	23.9	5.8

桩端贯入变形量 Δ 为 3.0 cm 考虑, 而实测加固区压缩量比设计取用的 Δ 大, 故计算的总沉降较小。因此, 计算加固区压缩量 S_1 时应在原考虑的桩端贯入变形量基础上适当提高, 如乘以一个倍数 k (试验段在 4.0 以上), 即 $S_1 = k\Delta$ 。加固区压缩量较大的原因主要有 ①试验段地基原已打设塑料排水板, 后虽进行了浅部拔除, 但仍有可能发生桩间土的排水固结; ②邻近路段较大沉降对过渡段产生的连带影响; ③过渡段复合地基垫层刚度较小, 桩顶更易产生上刺。

另外, 实测下卧层沉降稳定较快, 已不再变化, 由表 2 知下卧层实测沉降量比计算值小, 可见加固区应力扩散较大, 实际下卧层附加应力较小。因此, 计算下卧层沉降时加固区的应力扩散角应适当扩大。

表 2 中三测点工后沉降小于 20 cm, 离通道越近, 工后沉降越小, 基本满足设计要求。相邻排水固结路段桩号 K102+ 085 双曲线法推算的工后沉降为 16.5 cm, 与测点 TC2 推算的工后沉降接近, 说明两种不同处理路段拼接处的工后沉降差异较小, 过渡段起了较好的平稳过渡作用, 缓解了此两种处理路段的沉降差异。

4 结 语

(1) 桩土应力比高, 桩顶应力集中明显, 但大部分路堤荷载由桩间土承担, 低强度混凝土桩复合地基发挥了桩间土的承载能力。

(2) 桩土总沉降小, 桩间土沉降比桩顶沉降大。桩

长与置换率对桩土沉降有重要影响, 桩长越长, 置换率越高, 沉降越小。相比相邻排水固结处理, 采用低强度混凝土桩处理可大大缩短工期、减少地基沉降。

(3) 地基浅层沉降及沉降速率比深层大, 沉降影响深度约 19 m。加固区压缩量占总沉降量的比例较大, 其进一步的压缩对工后沉降影响较大。

(4) 地基侧向变形小, 变形速率在时间及深度上都呈递减趋势, 有变形回缩的现象。

(5) 过渡段的设置可使两种不同处理路段的工后沉降得以平稳过渡, 达到了缓解沉降差异的目的。

(6) 试验研究表明, 采用低强度混凝土桩复合地基的处理效果良好, 能有效解决通道地基处理中的二次开挖、村民交通以及桥头跳车等问题。

参考文献:

[1] 阎明礼. CFG 桩加固技术[A]. 第四届地基处理学术讨论会论文集[C]. 杭州: 浙江大学出版社, 1995.
[2] 阎明礼, 张东刚. CFG 桩复合地基技术及工程实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
[3] 龚晓南. 地基处理新技术[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997.
[4] 龚晓南, 温晓贵. 二灰混凝土试验研究[J]. 混凝土, 1998, (1): 37- 41.
[5] 张诚厚. 高速公路软基处理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
[6] 龚晓南, 等. 高速公路软弱地基处理理论与实践[M]. 上海: 上海大学出版社, 1998.