

文章编号: 1000-7598-(2006)10-1856-05

高速铁路软土地基处理方法对比试验

董 亮¹, 叶阳升², 蔡德钧², 吴 波³, 杨年华²

(1. 北京交通大学 土建学院, 北京 100081; 2. 铁道科学研究院铁建所, 北京 100081; 3. 中铁 12 局, 太原 030024)

摘 要: 为探索高速铁路较薄软土地基的加固处理方法, 在中国江苏省某铁路试验段进行了针对淤泥质黏土厚度为 2~5 m 的软土地基现场填筑试验, 包括袋装砂井加爆炸、塑料排水板加等载预压、两种间距粉喷桩及砂垫层处理共 5 个区段。通过为期 14 个月的原位测试, 得到较薄软土地基的沉降变形特性; 并通过加固方案效果对比, 研究了工后沉降控制效果和工程经济性, 其成果对高速铁路软土地基加固处理方案、设计参数的选有一定的参考价值。

关 键 词: 高速铁路; 软土地基处理; 沉降变形特性; 工后沉降

中图分类号: TU 447

文献标识码: A

Contrast test on soft ground improvement of high-speed rails

DONG Liang¹, YE Yang-sheng², CAI De-gou², WU Bo³, YANG Nian-hua²

(1. School of Civil & Architecture Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Railway Engineering Research Institute, China Academy of RailWay Science, Beijing 100081, China;

3. The 12th Bureau Group of China Railway Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to explore the processing method of foundation stabilization. Large-scale field tests on a soft ground composed of a 2-5 m thick mucky soil were conducted in Jiangsu province, involving five ground improvement methods, on a soft ground composed of a 2-5 m thick mucky soil. These tests included packed-drain with explosion, plastic-drain with surcharge, cement-jet-pilling at different spacing, and sand mat. During 14 months' in situ testing, the deformation behavior of the improved soft ground was investigated, and by comparing with the reinforcement scheme, the settlement after completion and economical efficiency of project are also studied. These results are expected to provide the reference value for the selecting of soft ground treatment methods and design parameters of high-speed rails.

Key words: high-speed rails; deformation property; the settlement after completion; packed-drain with explosion

1 引 言

由于软土有含水量高、压缩性大、强度低等特点, 需要对软土地基进行处理。通过置换、排水固结、贯入固化物、振密及挤密、加筋及冷热处理等方法处理后, 地基稳定性得到了很好的解决, 且能控制软土地基一定变形^[1]。我国东部地区软土地基分布广泛, 随着客运专线的即将兴建, 控制软土地基稳定性和变形量是非常突出的工程问题。大部分软土地基采用以桥代路处理后, 仍有大量的较薄软土地基。以往这些地基不处理或经过一定的处理后能够满足普通铁路对稳定的要求, 但在高速铁路对沉降变形的高标准^[2]要求下很难满足变形要求, 因此, 需要通过试验研究采用不同处理方法处理较薄

软土地基的变形特性及处理效果, 确定合理、经济的处理方法。笔者等对某铁路全线作了系统分析^[3], 选择某铁路 Dk171+900~Dk172+300 为试验段, 进行了加固方案的对比试验, 其结果为今后该地区高标准铁路的修建提供参考。

2 试验方案

试验段地基地层自上而下岩性依次为: ①表层 al+I_{Q4} 为黏砂土, 厚 1.5~3.0 m; ②淤泥质砂黏土, 流塑, 厚 3.0~5.0 m, 含水量 $W=38.6\%$, 孔隙比 $e=1.25$, 重度 $\gamma=18\text{ kN/m}^3$, 压缩模量 $E_s=2.54\text{ MPa}$, 压缩系数 $a_{1-2}=0.75\text{ MPa}^{-1}$, 比贯入阻力 $p_s=460\text{ kPa}$, 径向固结系数 $C_r=1.09\times 10^{-3}\text{ cm}^2/\text{s}$, 竖向固结系数 $C_v=1.59\times 10^{-3}\text{ cm}^2/\text{s}$ 。③砂黏土、粉砂, 厚度大于

收稿日期: 2005-01-10

修改稿收到日期: 2005-05-31

项目: 铁路部科技研究开发计划资助 (No. 2002G002)。

作者简介: 董亮, 女, 1979 年生, 博士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: dongliang@163.com

5.0 m。为了探索较薄软土地基是否满足高标准的工后沉降要求，根据软土地基处理方法的适用性，选择排水固结法和复合地基方法，采用的工程措施见表 1。根据试验不同处理方法并结合现场施工条件，共设置了 10 个观测断面，并在每个断面进行了各种观测元件的埋设。

其他方法较为常见，如袋装砂井+爆炸固结方法是地基处理的新方法，即在软基中钻凿深孔，将炸药置于需加固处理的深度进行爆炸，利用爆炸产生的巨大能量形成较高孔压，并在上覆压力和较好的排水条件(袋装砂井)下，使孔压尽快消散，地基水排出，承载力提高。具体的施工顺序是：先铺设 50 cm 砂垫层再打设袋装砂井，间距为 3 m，正方形间隔布置，原地面以下深度 9 m，再按图 1 堆载不同高度虚土，进行 5 次成孔爆炸，爆炸孔采用袋装砂井机成孔，间距为 3 m，深度为原地面下 9 m，爆炸完卸土继续路基填筑。5 次爆炸试验的爆炸参数见表 2。

表 1 软土地基加固处理方案表
Table 1 Ground improvement methods

里程范围	长度 /m	加固措施
Dk171+900~Dk172+000	100	地基表面铺 40 cm 砂垫层袋装砂井+爆炸固结处理。袋装砂井间距为 1.5 m，爆炸孔间距为 3.0~6.0 m，正方形布置。
Dk172+000~ Dk172+100	100	塑料排水板+等载预压，排水板间距为 1.2 m，正三角形布置，预压中粗砂高 1.8 m。
Dk172+100~ Dk172+200	100	粉喷桩加固，桩间距为 1.2 m，正方形布置。
Dk172+200~ Dk172+250	50	粉喷桩加固，桩间距为 1.5 m，正方形布置。
Dk172+270~ Dk172+300	50	粉喷桩加固，桩间距为 1.5 m，正方形布置。

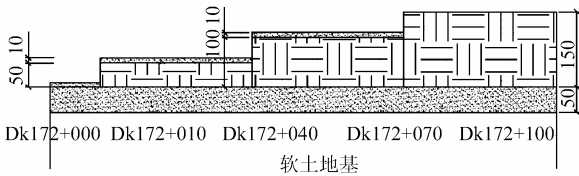


图 1 软基爆炸处理填土设计纵向剖面图 (单位: cm)
Fig.1 Schematic diagram of the heights of the filled soil (unit: cm)

表 2 爆炸基本参数
Table 2 Explosion parameters

序号	时间/年-月-日	里程	炮孔间距/m	每孔药量/kg
1	2002-9-5	Dk172+000—010	4.3	2.4
2	2002-9-9	Dk172+010—040	3	3.0
3	2002-9-22	Dk172+040—100	6	2.4
4	2002-9-23	Dk172+080—100	6	2.4
5	2002-9-24	DK172+075—100	6	1.5

3 现场试验结果与分析

3.1 袋装砂井加爆炸固结处理区

(1) 地表沉降 爆炸区段观测断面典型的地表沉降曲线见图 2，有明显的共同特征：经过瞬间爆炸后地表急剧沉降；其后为缓慢沉降持续较长时间，沉降量并不大；继续大量填土再次出现较大的地表沉降，整个曲线呈现明显的楼梯踏步形状。

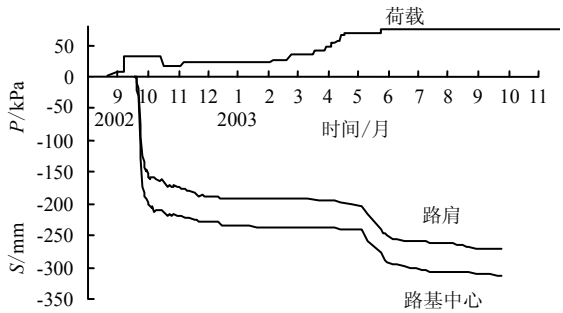


图 2 Dk172+080 填土荷载-地表沉降曲线
Fig.2 The filled load and settlement curve of Dk172+080

(2) 全断面沉降 以 Dk172+080 断面为例，见图 3。2002 年 9 月 22 日和 23~24 日的两次爆炸第二天均使土体地表发生明显的瞬时竖向沉降。第二次爆炸产生瞬时沉降后约一周时间内，土体地表沉降明显减少且有所波动，而后地表沉降随着路基填筑再次开始缓慢的增大，但 9 月 27 日至 10 月 13 日的半个月时间里沉降量在与爆炸后一周的沉降量已经很小。

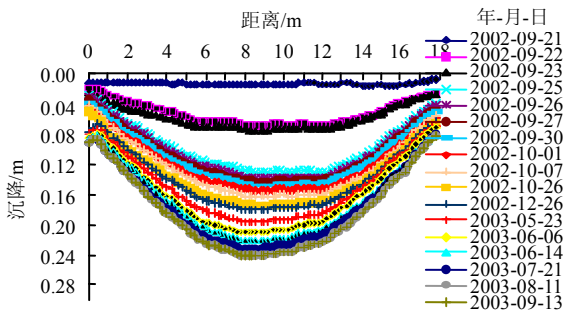


图 3 Dk172+080 全断面沉降
Fig.3 Distribution of surface settlement in section Dk172+080

(3) 侧向位移 侧向位移也有两种现象（以 Dk172+080 为例，见图 4）：其一，爆炸瞬时均使土体发生很大侧向移动，如 22 日的爆炸使深为 9 m 的软土层在 1~7 m 的位置发生最大为 25 mm 的侧向位移，24 日的爆炸继续使土体发生较大侧向移动；其二，爆炸后的一周内土体侧向移动虽增加但较缓慢，约一周后，土体侧向位移逐渐回缩，约 20

d 后回缩基本稳定。随着路基填筑进行,侧移继续增大。

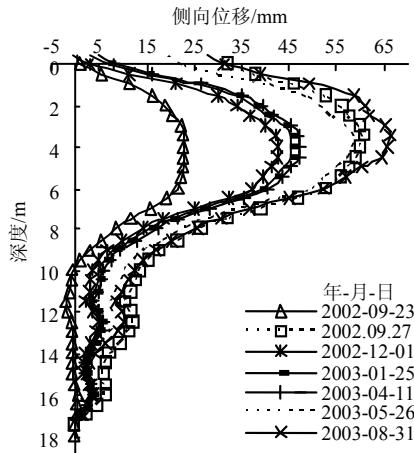


图4 Dk172+080 坡脚侧向位移
Fig.4 Lateral displacement of Dk172+080

3.2 排水板加等载预压处理区

(1) 地表沉降 铺轨后利用在路肩上设置的铁板继续观测,典型的沉降与路堤荷载曲线见图5。路基填筑时间比较集中在2003年4~6月期间,故从2003年4月开始产生明显的地表沉降,在5~6月间就发生了10 cm的沉降。

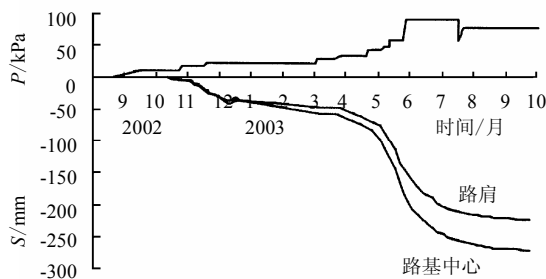


图5 Dk172+172 填土荷载-地表沉降曲线
Fig.5 The surcharge and settlement curve of Dk172+172

(2) 全断面沉降 地基沿整个断面呈锅底型变化,中间沉降较大,两边较小,至2003年10月Dk172+134路基中心沉降量为20.2 cm, Dk172+172路基中心沉降为22.8 cm。

(3) 侧向位移 侧向位移变化分为路基填筑堆载期和堆载卸载后两个阶段:在第一阶段土体侧向水平位移随荷载增加而增加呈现很好的规律,第二阶段是7月15日堆载卸载后,测斜管开始有所回缩,并于8月基本稳定。典型侧移如图6所示,土体侧向位移主要发生在8 m以内,最大侧移速率为3.2 mm/d。

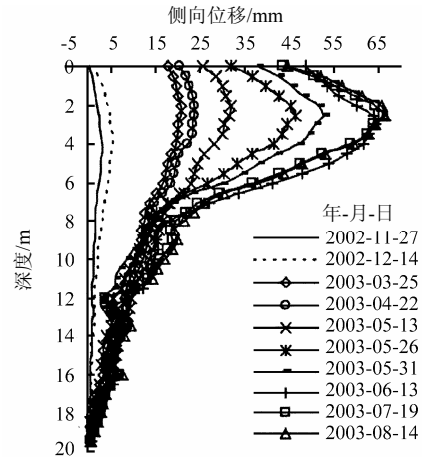


图6 Dk172+172 排水板处理断面坡脚侧移
Fig.6 Lateral displacement of Dk172+172

(4) 分层沉降 2003年4月以前应变较小,5~6月发生较大压缩,应变随填筑荷载增加较快;主要压缩发生在9 m深度范围之内,占测试厚度压缩量的60%~80%。

3.3 粉喷桩处理区

(1) 地表沉降 不同间距粉喷桩处理后地基的地表沉降(图7)均在10 cm之内;2003年3~6月,4个月内填筑了60~62 kPa,地表沉降约占总沉降的70%以上。

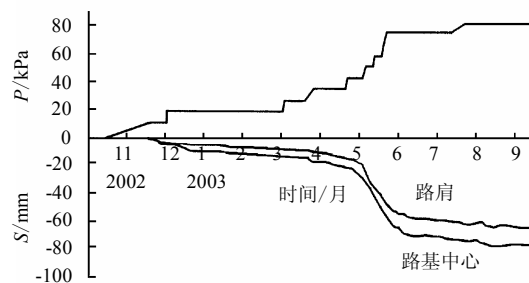


图7 Dk172+215 填土荷载-地表沉降曲线
Fig.7 The surcharge and settlement curve of Dk172+215

(2) 全断面沉降 路基全断面沉降呈锅底型。至2003年10月Dk172+215, Dk172+280观测断面路基中心最大沉降分别为4.8, 6.4 cm。

(3) 侧向位移 土体的侧向位移较小,最大值在40 mm以内,最大侧移速率为1.1 mm/d。

(4) 分层沉降 分层应变在5%以内,主要沉降压缩发生在8 m范围之内,粉喷桩以下土层仍有一定压缩。

(5) 土压力 对格栅上下的压力测试表明,在格栅上部桩顶和桩间土应力差异较小,格栅下部差异较大,地基上部荷载经过土工格栅后,促使桩体

和桩间土承担压力重新合理分布，至路基填筑完桩顶土压力为 350~360 kPa。

3.4 砂垫层处理区

该区段地基在原地面下 2.2 m 左右夹有 40 cm 的泥炭层，在 5.5 m 深度夹有一层约 1.5 m 左右的淤泥质黏土，软土层厚度最薄。

(1) 地表沉降 填筑前期沉降量较小，2003 年 5 月路基填筑高度超过 2 m，随着填筑速率加快，地表沉降速度开始逐渐加快，使沉降曲线形成一个大拐点，说明地基硬壳层在填土高度低于 2 m 时减缓沉降作用明显。

(2) 其他变形 全断面沉降趋势与排水板处理区较为一致，整个断面呈锅底型，中间沉降较大，2003 年 5~10 月路基中心沉降为 8.1 cm。坡脚处在 2~6 m 深度产生较大侧移，最大侧移有 38 mm，最大侧移速率为 1.9 mm/d。土体在填筑期间的主要压

缩发生在 8.9 m 以内，压缩量超过 70 %。

4 不同处理方法的对比分析

本次试验中加固方法可分为不处理、排水固结法和复合地基法，排水固结可作为中间方法与其他两种进行对比。

4.1 塑料排水板加等载预压处理与不处理

塑料排水板处理区段的淤泥质黏土厚度约为 5 m，砂垫层处理区段的淤泥质软土较薄，为进行有效对比，对砂垫层处理区 Dk171+980 断面采用在其他条件不变的前提下假设在原地面下 3.5~8.5 m 深度为软土层时的计算结果。结果表明，地基只进行砂垫层处理的工后沉降是较大的，比通过塑料排水板加等载预压处理的大 22~27 cm。表 3 为不同方法处理后剩余沉降达到 10, 5 cm 需要的时间对比，结果表明排水板处理非常合理而必要。

表 3 不同处理方法达到 10 cm 和 5 cm 剩余沉降需要的时间

Table 3 Required time of residual settlement reaching 10 cm and 5 cm respectively in different treatment methods				
序号	里程	剩余沉降 10 cm 需时间 /d	剩余沉降 5 cm 需时间 /d	按试验段工期工后一年沉降 /cm
排水板(深度 9 m)等载预压处理实测	Dk172+134	预压 7	预压 41	1.6
	Dk172+172	预压 11	预压 38	1.7
排水板(深度 9 m)等载预压处理计算	Dk172+134	预压 15	预压 55	0.9
	Dk172+172	预压 17	预压 62	1.2
排水板(深度 9 m)不预压计算	Dk172+134	填筑完后 54	填筑完后 180	2.7
	3.5~8.5 m 为淤泥	填筑完后 57	填筑完后 150	3.1
不处理计算	3.5~8.5 m 为淤泥	填筑完后 4.8×365	填筑完后 8.0×365	6.4

4.2 塑料排水板加等载预压处理与袋装砂井加爆炸固结处理

同为排水固结方法的塑料排水板加等载预压法区 (Dk172+100~200) 和袋装砂井加爆炸法区 (Dk172+000~100) 的地质条件较相似，路基填筑时间基本一致，地表沉降特性、工后沉降等具有较好的可比性。

4.2.1 地基变形特性

各观测断面的路基填筑和地表沉降曲线如图 8 所示。由于地基硬壳层的存在，塑料排水板处理的地基地表沉降在路基填筑前期沉降较小，路基填筑高度超过 2~2.5 m，填筑加荷比较集中，沉降增长较快，地表沉降曲线呈现一个台阶型式。爆炸处理断面形成了两个台阶型式，即爆炸使地表一周之内产生较大沉降，由于爆炸使土体结构发生破坏并重新固结，振动使地基产生侧向变形显著，地表沉降较大，推算最终沉降比塑料排水板处理的大 4~5 cm。

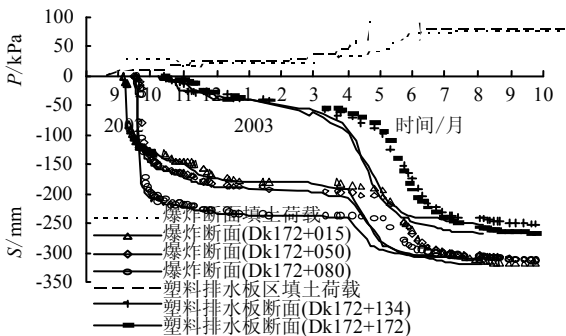


图 8 塑料排水板和爆炸法处理的路基填筑和地表沉降曲线
Fig.8 The surcharge and settlement curve of plastic-drain and explosion section

图 5 和图 7 分别为路基填筑过程中爆炸处理区和排水板处理区典型的坡脚侧向位移变化情况。两个分区侧移都形成“勺子”形，在 9 m 深度范围内侧移较大，对坡脚最终侧移沿深度方向进行积分可知，两种处理方法产生的侧移总量极为接近，但是侧移的发展过程区别明显。排水板处理区侧移随着

路基填筑荷载的增长,侧移不断增长,路基填筑完后侧移趋于稳定。爆炸处理区经过爆炸后短时间内产生较大侧移,先回缩趋于稳定,随着路基填筑的正式进行,继续增长,增长幅度比排水板处理的幅度小。

4.2.2 工后沉降

两种方法处理下的工后沉降统计结果见表 4,可见 6 个观测断面的工后沉降比较接近,均在 5 cm 范围之内,表明这两种方法工后沉降的控制是比较有效的。

表 4 各断面的工后沉降 (cm)

Table 4 Settlement after completion of each section (cm)						
里程及 计算 方法	处理方法					
	袋装砂井加爆炸固结			塑料排水板 加等载预压		
里程	Dk172+005	Dk172+015	Dk172+050	Dk172+080	Dk172+134	Dk172+172
图解						
双曲线	2.9	3.4	1.9	3.3	2.4	4.2
对数法	2.5	3	1.9	2.3	4.3	4.6

注: Dk172+005 断面为路基中心右侧 3 m 工后沉降。

4.3 塑料排水板加等载预压处理与粉喷桩复合地基处理

两种方法处理区段的地基淤泥质黏土厚度较为接近,路基高度接近 4 m,填筑荷载时间较为一致。结果表明两种方法处理较薄软土地基效果明显。

4.3.1 沉降速率

图 9 为排水板加等载预压处理和粉喷桩复合地基处理区段的填筑速率和沉降速率对比结果,两区段的填筑速率基本一致,在两个阶段的填筑过程中,沉降速率相差较大,第一阶段沉降速率较为接近,排水板区段偏大,第二阶段粉喷桩区段的速率保持在 2 mm/d 以内,而较为缓和,而排水板处理区段的沉降速率增加较大,最大值达到 5 mm/d。

4.3.2 工后沉降

表 5 为两种处理方法的工后沉降统计,粉喷桩处理区段工后沉降不超过 2.2 cm,塑料排水板区段经过 51 d 的预压,工后沉降已经不足 5 cm。2003 年 5 月底,路基填筑完成时,粉喷桩区段的剩余沉降不足 4 cm,排水板区段的剩余沉降超过 10 cm,因此进行预压是必要的。

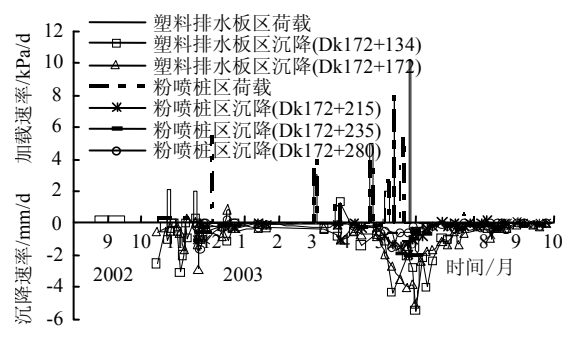


图 9 排水板加堆载处理与粉喷桩复合地基处理区段的填筑速率和沉降速率
Fig.9 The loading and settlement rate of the plastic-drain and cement-jet-piling sections

表 5 各断面的工后沉降 (单位: cm)

Table 5 Settlement after completion of each section(unit: cm)					
里程及		处理方法			
计算方法	塑料排水板加等载预压			粉喷桩复合地基	
里程	Dk172+134	Dk172+172	Dk172+215	Dk172+235	Dk172+280
图解的					
双曲线	2.4	4.2	0.6	0.9	2.2
对数法	4.3	4.6	0.9	1.2	2.1

5 结 论

通过对较薄软土地基处理、填筑试验和现场沉降观测分析,得到了如下结论:

- (1) 袋装砂井加爆炸固结法处理软土地基加快了排水固结速度,产生了相对较快的初期沉降。
- (2) 试验段的现场实测和计算表明,对于该 5 m 厚度的淤泥质黏土地基,必须进行地基处理才满足高速铁路路基工后沉降不大于 5 cm 的要求。
- (3) 从处理效果、工期、工艺、造价综合对比可知,对地基条件为淤泥质黏土厚度为 5 m 的情况,路桥过渡段及有沉降差要求严或工期要求紧的情况下可采用粉喷桩处理,而大量软土路堤处理,在工期允许情况下可采用排水固结法结合填土预压。
- (4) 较薄软土地基下卧层的后期沉降应进一步深入研究。

参 考 文 献

[1] 《地基处理手册》编写委员会. 地基处理手册[M]. (第二版). 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.

[2] 铁道部. 京沪高速铁路设计暂行规定[M]. (铁建设[2003]13 号). 北京: 中国铁道出版社, 2003.

[3] 李子春. 高速铁路软土地基沉降变形特性及典型处理方法比较试验研究报告[R]. 北京: 铁科院铁建所, 2004.