

文章编号: 1000-7598-(2008) 07-1981-06

深层软基加固处理方案试验研究

杨建民

(湖南城市学院 土木工程学院, 益阳 413000)

摘 要: 在软土地区既有铁路线旁修建复线时, 为控制施工期沉降与工后沉降, 保证既有线路与新建线路的稳定性, 对新建复线的深层软基加固区, 通过现场试验采用 6 种方法分 7 个观察项目进行了对比研究。试验结果表明: 无论是沉降分析、稳定分析或是对既有线的分析, 用粉喷桩加固地基比用砂井、插塑板及土工布加固地基均有着显而易见的优越性, 相对来说短而密的粉喷桩较长而疏的粉喷桩加固效果更好。

关 键 词: 软基加固方法; 现场试验; 对比研究

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Experimental research on consolidation of deep soft foundations

YANG Jian-min

(School of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, China)

Abstract: When a new railway line will be constructed along the existing one, in order to control settlements of construction period and post-construction period, and to ensure stability of existing line and the new one, comparative analysis is performed in seven projects with six methods in in-situ test. The results of settlement analysis, stability analysis and consequence analysis of existing line show that dry jet mixing piles are superior to sand well, prefabrication drains and geotextiles in consolidating foundation. Relatively, dry jet mixing pile with short length and small interval has better consolidation effect than the longer length and larger interval one.

Key words: consolidation methods of soft foundations; in-situ test; comparative study

1 前 言

某铁路路基地表广泛分布较厚的第四系海积淤泥黏土, 由于其沉积年代较晚, 受上部土体压密影响较小, 故其工程地质情况较差。通过试验数据可知, 其工程地质情况可归纳为四高三低: 高含水率、高液限、高孔隙比、高压缩性; 低强度、低渗透性、低固结系数。同时, 该线既有铁路路基因填料较差且修建时软土地基未做任何处理, 故既有路基的地质条件也仍然较差。根据这种状况, 新增复线修建时需要解决以下几个问题: (1) 如何合理确定增建线路与既有线路间最合理的线间距及如何合理选用软土地基加固方式; (2) 新建线路时必须保证既有路基的稳定; (3) 必须严格控制新老路基的后期沉降。经过大量的理论分析检算, 拟采用 6 m 线间距和采用粉喷桩加固软基的方案, 但考虑到在软土地区大规模使用粉喷桩加固地基在国内并不多

见, 且实施时投资巨大。因此, 为寻求增建复线软土地基加固的最佳方案及施工方法, 为研究新老地基的强度及变形规律, 确保既有线路及新增建复线路基在施工及运营中的稳定, 经研究决定, 对该线试验段新建路基采用 6 种不同的地基加固方案进行现场筑堤试验。

2 试验情况简介

2.1 试验分区

试验段总长为 600 m, 以 100 m 为一个试验段, 共采用 6 种加固方案, 如表 1 所示。

2.2 仪器布置

根据观测项目的监测要求, 试验仪器共布置在 12 个断面上, 每个加固方案设置 2 个观测断面。为了节省篇幅, 本文只给出水泥粉喷桩的一个典型观测断面上的仪器布置图(图 1), 其他断面上观测仪器的布置与此基本一致。

表 1 各种加固方案分段表
Table 1 Sections of different consolidation methods

试验分区	加固类型	桩长 / m	桩间距 / m	布置型式	附注
试验1区	粉喷水泥桩	11.5	1.25	正方形	打至坡脚处
试验2区	粉喷水泥桩	11.5	1.35	长方形	排距1.25 m打至坡脚处
试验3区	塑料插板	11.5	1.4	等边三角形	打至坡脚处
试验4区	袋装砂井	11.5	1.5	等边三角形	打至坡脚处
试验5区	土工布				护坡道分别为6 m、10 m
试验6区	粉喷水泥桩	5	1.0	正方形	分别打至坡脚处4 m、8 m

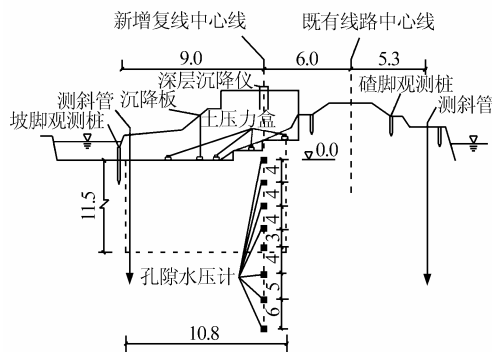


图 1 试验仪器布置横断面图 (单位: m)
Fig.1 Cross-section of test apparatus arrangement.

2.3 观测项目

- (1) 每一断面均在新老路堤坡脚, 既有线路脚两侧设置观测桩, 采用光电测距仪进行位移观测来判断新老路基的变形情况; 通过对轨顶及既有线路脚观测桩的沉降观测来判断既有线的下沉情况。
- (2) 沉降板: 用于观测地面沉降值。埋设在增建第二线路基坡脚与路肩之间, 分布于 6 个断面。
- (3) 深层沉降仪: 用于测试地面下不同深度地基的沉降情况, 一方面可以了解加载过程中软土地基的沉降; 另一方面还可确定增建第二线所产生的附加荷载对软土路基的影响深度。
- (4) 深层测斜仪: 用于测试地基深层的侧向位移, 实测结果不仅可以用来判断路基的稳定性, 还可以用于估算软土路基由于侧向位移所产生的沉降。埋设于新老路基两侧边坡外, 分布于 6 个断面。
- (5) 孔隙水压力计: 测试不同深度处孔隙水压力在加载过程中的变化情况, 了解地基的固结情况, 从而推断出土体强度随时间的变化规律, 确定合理的施工速率。埋设于增建第二线路基中心, 分布于 6 个断面。
- (6) 土压力盒: 用于测试路堤基底土压力的分布情况及粉喷桩桩土应力的分担情况, 埋设于粉喷桩段, 分布于 3 个断面。
- (7) 柔性传感器: 埋设于土工织物断面, 测试

土工织物在不同的填土高度位置上受到的拉力。

3 加固效果分析

3.1 不同加固方案对沉降的影响分析

从图 2、图 3 和表 2 可看出, 6 种不同的加固措施对地基沉降的影响存在一定的差别, 归纳下来有以下几点:

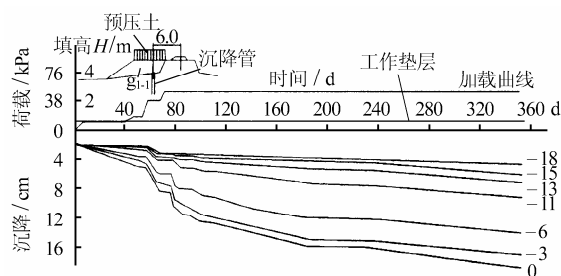
- (1) 无论是地表沉降还是深层沉降均随荷载和时间的增加而增大, 在预压土填筑阶段, 曲线变化明显, 沉降速率明显比其他阶段大。
- (2) 从图 3 中可以看出: 至 2004 年 1 月 24 日止, 土工布、塑料插板、砂井地段的地表沉降速率为 0.40 mm/d, 虽然较以前有所变缓, 但仍较大; 而粉喷桩地段沉降速率为 0.10 mm/d, 沉降已基本趋于稳定。
- (3) 插板、砂井地段的地基沉降 90 %发生在插板及砂井施工深度范围内, 特别是在靠近地表 4 m 左右, 固结沉降最大。在密的粉喷短桩加固区, 有桩区段压缩变形小; 在疏的粉喷长桩加固区, 有桩区段地基变形相对大。表明桩间距越小, 硬壳效应愈明显, 加固效果也较好。
- (4) 按实测沉降所经历的时间推算, 砂井及插塑板加固区固结度为 31 %, 土工布加固区固结度为 21 %, 两者的固结度都较小。究其原因有以下两点: 一是砂井与插板的布置间距偏大; 二是由于淤泥质软土的渗透系数很小, 在 10^{-8} 数量级内。
- (5) 粉喷桩地段无论是施工期沉降还是后期沉降均小于砂井、插塑板、土工布加固地段的沉降, 而且密间距的粉喷短桩的沉降最小, 说明这种方法的加固效果也最好。
- (6) 从深层沉降曲线可以看出, 从施工开始至观测结束, 各种加固方法所加固地基的沉降主要集中在 15 m 范围内, 即 $3.5 H$ 范围以内 (H 为含预压荷载的填土高), 说明在软基处理中, 各种加固措施所能处理的深度基本一致。
- (7) 本次沉降测试的结果与以往同等填土高度的单线路基相比偏小^[1, 2]。究其原因主要有以下几点: ①由于增建复线紧靠既有线路, 而既有线路附近地基土经过多年固结, 强度及变形模量均有较大提高, 致使增建复线填筑后沉降较小; ②由于既有路堤的存在, 阻止了增建复线地基土的侧向位移, 导致增建复线地基土单侧移动, 从而减小地基由侧向变形引起的沉降; ③由于增建复线向单侧移动使得测试的深层沉降管向单侧移动, 从而测斜管产生弯曲致使测试误差偏大, 测试结果偏小。

3.2 不同加固方案对侧向位移的影响分析

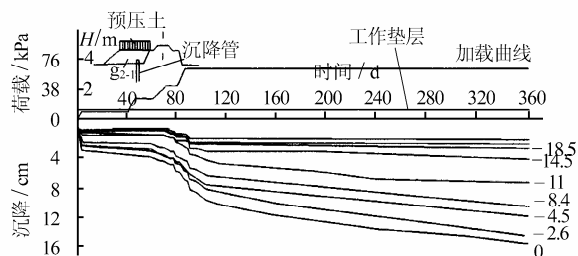
从表 3、图 4、图 5 中可以看出,在不同的加固方案下,路堤的侧向位移具有以下特征:

(1) 地基的侧向位移主要发生在 0~8 m 深度。在砂井与插板区,既有线靠近增建复线一侧碴脚侧

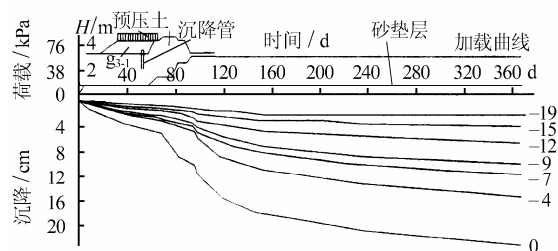
向位移较大,分别为 122 mm 和 93 mm,地基土也随之侧移,随着荷载和时间增加,侧向位移变大,这样的水平位移,足以使砂井及插板弯曲或剪断,致使“井阻效应”加强、“涂沫作用”^[3,4]增大,随着时间的增加,排水效果降低,其加固效果也会大



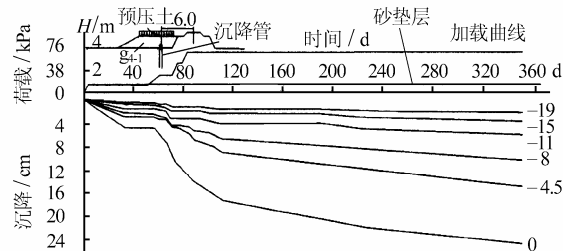
(a) 桩间距为 1.25 m 粉喷桩处治地层的不同深度沉降曲线



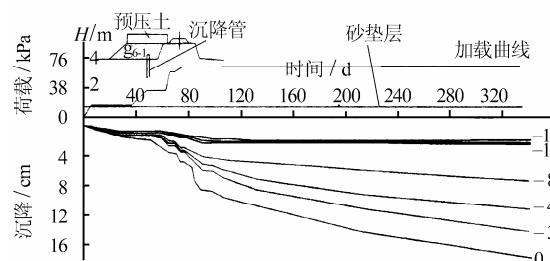
(b) 桩间距为 1.35 m 粉喷桩处治地层的不同深度沉降曲线



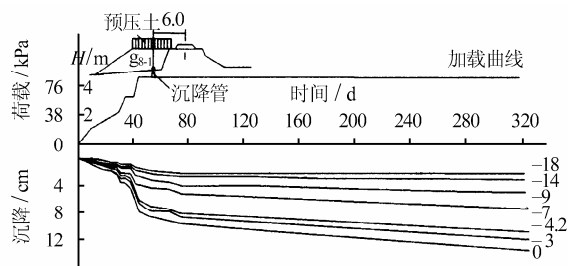
(c) 插塑板处治地层的不同深度沉降曲线



(d) 袋装砂井处治地层的不同深度沉降曲线



(e) 土工布处治地层的不同深度沉降曲线



(f) 短粉喷桩处治地层的不同深度沉降曲线

图 2 地基中心沉降的 $p-t-s$ 曲线
Fig.2 The $p-t-s$ curves of the center of foundation

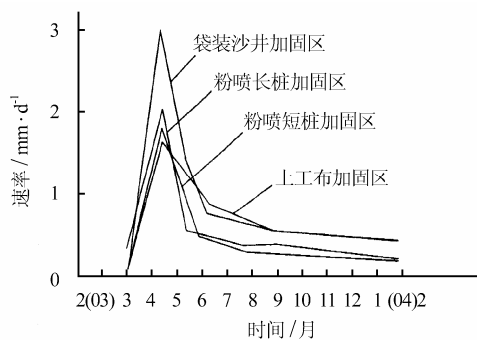


图 3 不同地基沉降速率图
Fig.3 Settlement rates of different foundations

表 2 沉降分析表
Table 2 Analysis of settlements

处理措施	填高		中心实测 沉降值 / mm	计算最终 沉降值 / mm	剩余沉降 / mm
	路基本体 / m	预压土 / m			
粉喷桩 1.25 m	1.815	1.77	156	265	109
粉喷桩 1.35 m	1.947	1.972	157	284	127
塑料插板	2.06	1.759	240	750	516
袋装砂井	2.185	1.934	247	784	541
土工布	2.346	1.531	190	734	544
粉喷短桩	2.274	2.432	132	297	165

附注: ①沉降计算总厚度按 26 m 计。②粉喷桩地段沉降计算按复合模量法计算。③最终沉降量的计算方法按单向分层总和法计算^[6,7]。④实测地表中心沉降以 2004 年 1 月 24 日最后一次测量为准。⑤计算荷载均按实际荷载计算。

打折扣。既有线远离增建复线一侧的侧向位移很小，基本可以忽略，因此，原设计中既有线一侧的反压护道可以取消。

(2) 在预压土填筑阶段，侧向位移速率较大。在砂井区第二级预压荷载加载期，最大达到了 3 mm/d。预压土填筑阶段侧向位移速率的明显加大，表明了荷载作用下地基土体正从弹性变形阶段向塑性变形阶段转化^[5-8]，因此，预压土填筑阶段应当控制填筑的速度。

(3) 侧向位移随荷载与时间的增加而增大。从实测中发现，粉喷桩加固地段的侧向位移只有砂井、插板、土工布加固区侧向位移的 1/3 左右，以上数据表明，粉喷桩的加固对地基的强度及变形模量都有较大的提高。

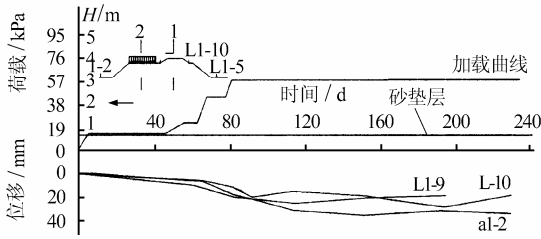
(4) 从图 5 中可以看出，随着时间的增加侧向

位移速率逐渐变小，位移渐趋稳定，既有线两侧碴脚及坡脚侧向位移出现回弹趋势，这表明新老路堤已日趋稳定。在粉喷桩加固地段，这种现象更加明显。

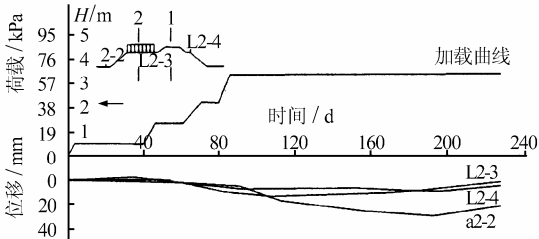
表 3 侧向位移表
Table 3 Lateral displacements

加固措施	路堤填高 / m	水沟挖深 / m	坡脚观测桩侧向位移 / mm
粉喷桩 1.25 m	1.585	1.5	24
粉喷桩 1.35 m	3.919	1.5	33
塑料插板	3.819	1.5	141
袋装砂井	4.119	1.5	124
土工布 窄护道	3.877	1.5	106
土工布 宽护道			88
粉喷短桩	4.706	1.5	7

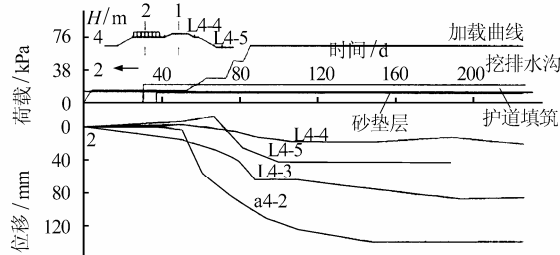
附注：①实测值系 2004 年 9 月 16 日测试的最后结果。②由于坡脚观测桩埋设在路基排水沟附近，挖除排水沟时对侧向位移影响较大。



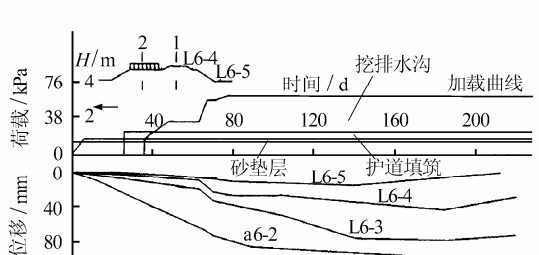
(a) 桩间距为 1.25m 粉喷桩处治地层的测点侧向位移曲线



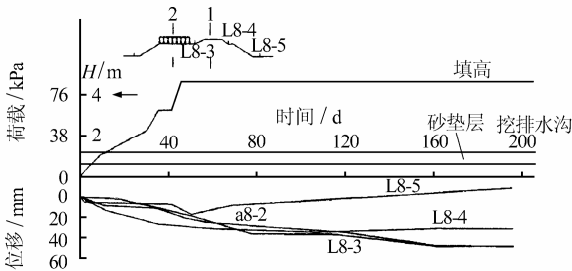
(b) 桩间距为 1.35m 粉喷桩处治地层的测点侧向位移曲线



(c) 袋装砂井处治地层的测点侧向位移曲线



(d) 土工布处治地层的测点侧向位移曲线



(e) 短粉喷桩处治地层的测点侧向位移曲线

图 4 坡脚与碴脚 $p-t-\delta$ (位移) 曲线 (图中的 a_x-x 指示坡脚观测桩, L_x-x 指示碴脚观测桩)

Fig.4 The $p-t-\delta$ curves of toe of slope and road

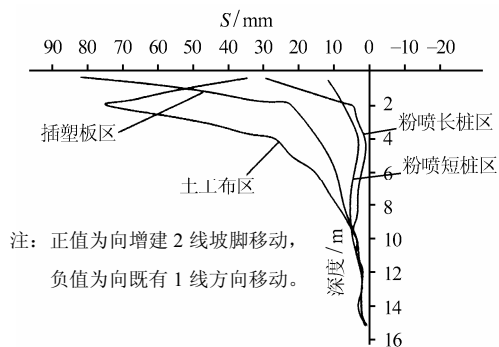


图 5 侧向位移随深度变化曲线

Fig.5 Variation curves of lateral displacements with depths

图 5 中深度单位为 m，侧向位移 S 单位为 mm

3.3 不同加固方案对既有线的的影响分析

从表 4 和图 4 可以看出：

(1) 既有线远离增建复线一侧碴脚的沉降及位移均较小，侧向位移均表现出向增建复线一侧移动的趋势，总位移最大为 22 mm。以上表明，新建复线对既有线的的影响主要集中在靠新建复线一侧，而远离新建复线一侧的影响则较小。

(2) 既有线靠近增建复线一侧碴脚的沉降及位移与各不同的加固方案密切相关。砂井与插板加固区由于排水固结作用致使其沉降及位移大于其他加固区一倍以上，砂井区对既有路基的影响尤为明显。

(3) 既有线抬道特点：从 2003 年 1 月至 2004 年 1 月，在粉喷桩加固区无论是长桩还是短桩区，无论是施工期还是施工后期，抬道次数均很少，在砂井及插板加固地段，由于沉降及位移较大，轨面变化严重，砂井加固区抬道次数最多达 13 次，其中施工期抬道频率大于施工后期抬道频率，最大一次抬道达 17 mm 之多；在土工布加固区，施工完成后抬道频率略大于施工期的抬道频率，表明土工布加固区对既有线后期影响较大。

表 4 既有线沉降及位移表

Table 4 Settlements and displacements of existing road

加固方法	填土高度 含预压土 / m	碴脚沉降 / mm		碴脚侧向 位移 / mm		抬道 次数 / 次
		右	左	右	左	
粉喷桩 1.25 m	3.585	24	97	14.5	61	5
粉喷桩 1.35 m	3.919	18	87	4	47	6
塑料插板	3.819	23	136	10	122	12
袋装砂井	4.119	22	162	7.5	93	13
土工布	3.877	22	90	16	62	8
粉喷短桩	4.706	18	70	22	55	4

附注：①抬道系非常规养护次数，从填土开始计。②由于工务段抬道规律性不强，抬道与落道交叉进行，致使轨顶沉降无法准确测量。③抬道次数的数据测试日期至 2004 年元月 24 日。其余数据均以 2003 年 9 月 16 日测试为准。

3.4 不同加固方案中孔隙水压力的变化特征分析

(1) 由于粉喷桩与桩周土构成的复合地基，桩土弹性模量之比 $E_p/E_s > 1$ ，桩体上存在应力集中现象，使桩周土的固结特性发生变化，主要表现在：①孔隙水压力的变化幅度较小，主要是由于在粉喷桩上产生应力集中，使得作用在桩周土体中的总应力较小，因而相应的有效应力及孔隙水压力也变小所致；②虽然桩体为排水性能很差的水泥土，但孔隙水压力的消散仍然较明显，这是因为地基土仍分担了相当一部分荷载所致。

(2) 砂井与插板加固区孔隙水压力对加荷的反应较为敏感，其孔隙水压力值的消散远比土工布加固区快。

(3) 由于总的应力水平低，致使孔隙水压力量值较小，因此，施工过程中各断面均未见孔隙水压力持续上升的趋势。

3.5 其他因素对地基加固的影响分析

(1) 在土工布区，从柔性传感器的实测值来看，无论是路基中心，还是反压护道，柔性传感器伸缩量均为负值，即土工布处于受压状态。产生这种现象的主要原因有：①土工布的铺设呈台阶形，路基范围内所铺土工布标高高于坡脚处土工布标高 0.6 m 左右，在加荷过程中，地基下沉，台阶上土工布松弛，使得土工布不仅未受拉力，反而呈挤压状态。②从测点的侧向位移曲线可以看出，各测点均向同一方向移动，即向增建复线一侧移动，且其位移量随着荷载增加、随时间延长而变大，因此，地基所铺土工布均向一侧移动，致使土工布受压。③仪器的制作铺设的方式及测量误差也是产生这一现象的原因。尽管如此，从中长期来看，土工布对路堤稳定仍有所帮助。

(2) 从施工情况看，砂井施工离既有线中心的距离至少为 4.6 m，即第一排砂井施工离既有线的最小距离为 4.6 m。因此，新建复线路基的排水效果不能满足要求，反之若减小第一排砂井离既有线的距离势必由于过量的排水固结而对既有线造成危害。从这一点上说，用排水固结的方法进行增建复线的地基加固是不合适的。

4 结 论

通过对几种软基加固方法的现场实测分析可以得出如下几点结论：

(1) 各种软基加固方法处理地基最理想的深度基本一致, 即为 $3.5H$ 。但不同处理方法所造成地基的最终沉降量及地基稳定时间的差别则较大。相对来说, 砂井加固区施工期内沉降最大, 土工布加固区后期沉降最大。而粉喷桩地段无论是施工期沉降还是加固后期沉降均小于其他加固方法。

(2) 地基的侧向位移主要发生在 $0 \sim 8 \text{ m}$ 深度范围内, 新建线路对既有线侧向位移的影响主要集中在靠近新建线路的一侧, 远离新建线路的一侧的影响基本可以忽略。粉喷桩加固地段的侧向位移只有砂井、插板、土工布加固区侧向位移的 $1/3$ 左右, 数据表明, 粉喷桩的加固对地基的强度及变形模量都有较大的提高。

(3) 各种软基加固方法都会造成既有线路抬道, 其中砂井加固区抬道次数最多, 插塑板加固区次之, 粉喷桩加固区最少。

综上所述, 在试验段的地基加固方案中, 无论是沉降分析、稳定分析或是对既有线的分析均表明: 用粉喷桩加固地基比用砂井、插塑板及土工布加固地基有着显而易见的优越性。因此, 增建复线的软土地基加固方案首选粉喷桩加固方案。相对来说, 短而密的粉喷桩加固方案较长而疏的粉喷桩加固方案为好。

参考文献

- [1] 孟庆山, 王吉利, 汪稔. 采用不同加固方案处理软土地基的对比研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(3): 375—378.
MENG Qing-shan, WANG Ji-li, WANG Ren. Contrast study on consolidation of soft clay foundation with different methods[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(3): 375—378.
- [2] 林彤. 粉喷桩加固软基的试验研究[J]. 岩土力学, 2000, 21(2): 134—137.
LIN Tong. An experimental study on DJM piles improving soft foundation [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2000, 21(2): 134—137.
- [3] 王祥. 粉喷桩在深厚软基处理中的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 513—515.
WANG Qiang. Experimental study on treating deep-soft soil with dry jet mixing piles[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(4): 513—515.
- [4] 汪建刚, 王星华, 王曰国. 秦沈客运专线 A14 试验段软土路基加固技术研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1 284—1 287.
WANG Jian-gang, WANG Xing-hua, WANG Yue-guo. Study on consolidation technique for A14 testing section of soft soil roadbed at Qinhuandao-Shenyang passenger transport special railway line[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(8): 1 284—1 287.
- [5] 谢洪涛, 杨春和. 软基侧向变形对邻近桥台及桩基的影响和防治[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 742—746.
XIE Hong-tao, YANG Chun-he. Discussion on the influence of lateral deformation of soft foundation on nearby bridge-pier and piled foundation and its countermeasures[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(6): 742—746.
- [6] 何思明. 基于弹塑性理论的修正分层总和法[J]. 岩土力学, 2003, 24 (1): 88—92.
HE Si-ming. Modified layer-summation based on elastoplastic theory[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(1): 88—92.
- [7] 王星华. 地基处理与加固[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2002.
- [8] 陈小丹, 赵维炳. 考虑井阻和涂抹的砂井地基平面应变等效方法分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 567—571.
CHEN Xiao-dan, ZHAO Wei-bing. Equivalent analyzing method of plane strain of drain pile ground considering well resistance and smearing[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(4): 567—571.