

文章编号:1006-2106(2008)12-0045-05

真空联合堆载预压处理高速铁路软土地基效果检验*

王 祥^{1**} 李小和¹ 周顺华²

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430063; 2. 同济大学道路与铁道工程教育部
重点实验室, 上海 200331)

摘要:研究目的:在软土地基上修建高速铁路时,由于高速铁路的工后沉降要求严格,不进行软土地基处理往往不能满足高速铁路工后沉降的控制要求。软土地基处理的方法较多,不同处理方法的适用范围、处理费用、处理效果、工期是不同的。如何经济合理地进行高速铁路软土地基处理,是高速铁路建设中面临的重大课题,通过本研究,拟找到一种适合高速铁路软土地基处理的方法。

研究结论:采用真空联合堆载预压处理高速铁路软土地基具有经济性好、工期较短、充分利用路堤荷载等优点,适合在铁路软土地基处理中推广应用。采用该方法处理后,土体的物理力学指标得到了明显的改善,加固效果明显。应注意真空联合堆载预压对周围土体的影响,防止因侧向位移而开裂以及产生附加的不均匀沉降。由于真空预压工艺较复杂,选择合理的设计和施工参数是至关重要的。

关键词:铁路工程;真空联合堆载预压;软土地基处理;效果检验

中图分类号:TU413.6+2 文献标识码:A

Effect of Treating Soft Soil Foundation of High-speed Railway with Vacuum-mound Preloading Method

WANG Xiang¹, LI Xiao-He¹, ZHOU Shun-Hua²

(1. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd, Wuhan, Hubei 430063, China; 2. Tongji University, Shanghai 200331, China)

Abstract: Research purposes: In order to meet the high standard of post construction settlement of high-speed railway, soft soil foundation must be treated. There are many methods to treat soft soil foundation with different applicable scopes, engineering costs, effects and construction period, so it is necessary to do researches on these methods for the purpose of finding out a suitable method for treating the soft soil foundation of high-speed railway.

Research conclusions: Vacuum-mound preloading is a suitable method for treating soft soil foundation of high-speed railway with the characteristics of low cost, short construction period and making full use of embankment load, etc.. The physical-mechanical properties of soft soil are improved much after consolidation with this method. However, when using this method, the attention should be paid to the influence of vacuum-mound preloading on the soft soil around, and to preventing the crack caused by the displacement and additional differential settlement. It is important to choose reasonable design and construction parameters while using this method because of its complex techniques.

Key words: railway engineering; vacuum-mound preloading method; soft soil foundation treatment; effect inspection

真空预压法是利用抽真空来加固软土地基的一种地基加固方法。1952年,瑞典皇家地质学院的杰尔曼

* 收稿日期:2008-06-27

** 作者简介:王祥,1970年出生,男,高级工程师,国家注册土木工程师。

教授提出了真空排水预压法加固软土地基的原理^[1],但当时受材料、机械和施工工艺等原因的影响,这一技术发展较慢。

20 世纪 70 年代,日本东北地区新干线在第 7 号谷地的软基处理采用真空预压法,把真空预压法的加固技术向前推进了一大步。国内在 20 世纪 80 年代,以交通部第一航务工程局为主,天津大学、南京水利科学院土工所联合组成攻关小组,对该项技术又重新进行了探索、研究。解决了机械、材料等方面的关键问题,从而使该项技术的施工工艺有了突破性进展,能满足大面积施工要求^[2]。

真空联合堆载预压法是近些年来在真空预压与堆载预压基础上发展起来的一种软土地基加固新技术,具有真空预压和堆载预压的双重加固效果,均属于排水固结法,通过真空压力(负压)和堆载(正压)使土体中的孔隙水排出,从而使土体产生固结变形。

真空联合堆载预压法在港口、公路、机场、高速公路软基处理中得到广泛的应用^[3-7],但在铁路软基处理中应用很少。为了探讨真空联合堆载预压处理铁路软基的加固效果,铁道第四勘察设计院等单位进行了真空联合堆载预压法处理软基的试验研究。

1 试验概况^[8]

试验工点地处太湖湖积平原,地形平坦,地面标高 2.5 m 左右。线路为双线,路基面宽 14.2 m,线间距 5.0 m。路堤填土高 6.09~6.25 m(含施工过程中的沉降),路堤边坡坡率为 1:1.5。试验里程为 0+276.51~+515,分 0+276.51~0+456、0+476~0+515 2 个区段,预压区面积分别为 7 673 m²、1 365 m²。采用塑料排水板真空联合堆载预压处理,塑料排水板长 14.5~18.5 m,间距 1.2 m,梅花形布置,塑料排水板均打穿软土层。

地层岩性自上而下分述如下:(1)黏土,灰黄色,软~硬塑,夹有少量铁锰结核,表层 0.2~0.5 m 为种植土,层厚 2.1~2.4 m,属中等压缩性土;(2)淤泥质粉质黏土,深灰色,流塑,含少量腐植物,局部夹有薄层粉砂,大多数灵敏度超过 16,层厚 11.5~16.6 m;(3)-1,淤泥质粉质黏土夹薄层粉砂,绿灰色,软塑,厚 0~4.1 m,具中等压缩性;(4)-1,粉砂,褐黄色,中密,饱和,厚 0~6.7 m,不均匀夹有薄层黏土,其 N_{63.5} 算术平均值 21.5 击;(4)-2,粉砂,褐黄色,深灰色,中密~密实,饱和,厚大于 10 m,其 N_{63.5} 算术平均值 24.4 击。

水平排水系统采用砂垫层作为排水路径,厚度为 80 cm,其中膜下为 50 cm,膜上为 30 cm。密封系统采

用二布二膜,上、下层土工布均采用 250 g/m² 无纺土工布,两布之间设 2 层密封膜,每层厚度 0.14 mm,并分次逐层铺设,加固区四周挖密封沟,沟深 1.5~2 m。

0+276.51~0+456 地段于 2003 年 4 月 26 日开始抽真空,抽真空约 2 个月后进行路堤的填筑;0+476~0+515 地段于 2003 年 6 月 12 日开始抽真空,1 周后进行路堤的填筑。在路堤的填筑过程中,最大沉降速率达到 60 mm/d,不需要控制填筑速率。2003 年 10 月 31 日停止抽真空,开始级配碎石的填筑。在抽真空期间膜下真空压力一般均超过 80 kPa。

2 处理前后的效果检验

2.1 塑料排水板打设前后强度对比

试验段第 2 层为淤泥质粉质黏土层,大多数灵敏度超过 16,为了研究塑料排水板打设对该层土产生扰动所引起的强度降低,在软基处理前、塑料排水板打设后对地基土进行了十字板抗剪强度试验,结果如图 1 所示。

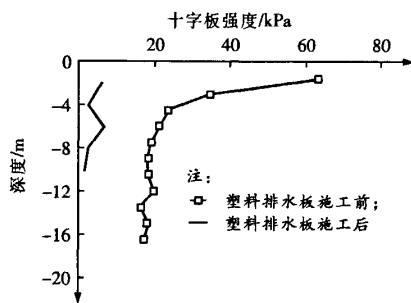


图1 十字板强度变化曲线

由图 1 可知,塑料排水板打设后,地基土体的十字板强度明显降低,这说明软土的灵敏度较大。经塑料排水板施工扰动后,强度降低明显。

2.2 真空联合堆载预压处理前后的物理力学指标变化

为了检验真空联合堆载预压加固效果,在加固区的同一地点,于加固前后钻孔取样,在室内对土样进行化验分析,以测定土体物理力学指标的变化。加固后的钻孔位置为 0+350 断面线路中心和左侧路肩。结果见表 1、表 2 所示。

从表 1 可知,加固后真空联合堆载预压地基土的天然含水量、天然孔隙比、压缩系数得到了明显的减小,压缩模量有了明显的提高。其中,加固区内天然含水量平均降低了 22.4%,下卧层天然含水量平均降低了 21.2%;加固区内孔隙比平均降低了 25.5%,下卧层孔隙比平均降低了 24.1%;加固区内压缩系数平均减小了 44.9%,下卧层压缩系数平均降低了 31.0%,

淤泥质粉质黏土层由高压缩性土成为中等压缩性土;淤泥质粉质黏土压缩模量提高了 1.99 倍。按照规范规定,经过真空联合堆载预压加固后,地基土仍属“松软土地基”范畴。

表 1 加固前后地基土物理力学指标比较

地层	天然含水量/%	孔隙比	压缩模量 /MPa	饱和度 /%	压缩系数 /MPa ⁻¹
第 1 层	32.5/25.8	0.90/0.69	-/5.28	100/99.3	0.392/0.321
第 2 层	50.5/38.3	1.41/1.02	1.403/4.189	99.5/98.1	1.66/0.471
第 3 层	49.2/38.5	1.37/1.04	-/3.405	99.4/100	0.881/0.608

注:“a/b”中 a 表示加固前的值,b 表示加固后的值。

表 2 加固后线路中心及路肩地基土物理力学指标比较

地层	天然含水量/%	孔隙比	压缩模量 /MPa	饱和度 /%	压缩系数 /MPa ⁻¹
第 1 层	25.2/26.4	0.671/0.717	5.09/5.47	100/100	0.328/0.313
第 2 层	37.76/38.84	1.301/1.040	3.96/4.417	99.9/99.1	0.468/0.474
第 3 层	38.7/38.2	1.050/1.038	2.95/3.86	100/98.8	0.678/0.538

注:“a/b”中 a 表示线路中心地基土加固后值,b 表示路肩地基土加固后值。

经过真空联合预压后,软土的含水量下降,但其饱和度基本不变,仍然为饱和土,这与其它试验的结果是一致的^[3]。

加固区与下卧层的物理力学指标均得到了改善,表明真空联合堆载预压处理方法对加固区和下卧层均有较为明显的加固效果。

从表 2 可知,线路中心的物理力学指标与左侧路肩的指标变化基本相同,说明真空联合堆载预压处理地基土体物理力学指标的改善比较均匀,真空预压的边界效应不明显。这是真空联合堆载预压优于其它加固方法的优点之一。

2.3 工后沉降分析

2.3.1 沉降变化规律

真空联合堆载预压地基沉降-荷载-时间变化曲线如图 2 所示。

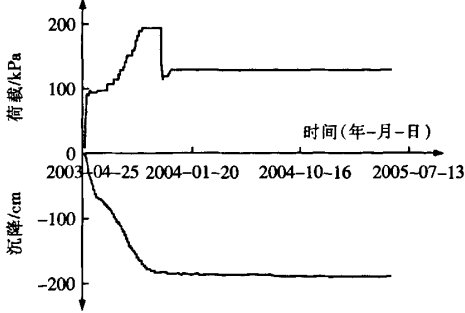


图 2 真空联合堆载预压地基沉降-荷载-时间变化曲线

其沉降规律可分为 3 个阶段来分析:

(1) 真空预压阶段。在 2003 年 4 月 26 日开始抽真空,到 2003 年 6 月 20 日路堤填筑正式开始期间,属于真空预压阶段。此阶段地基沉降与膜下真空度相对应,开始抽真空后 8 h 内膜下真空度就达到了设计 80 kPa 的要求。最初 5 d,沉降速率很快,最大可达 40~60 mm/d,随着时间推移,沉降速率逐渐变小。期间在膜下真空度下降时,沉降速率明显减小;膜下真空度重新达到 80 kPa 后,沉降速率又变大。至 2003 年 6 月 20 日正式开始路堤填筑前,即真空预压时间约 2 个月后,沉降速率已减小至 2~5 mm/d。表明真空预压阶段的土体主固结变化速率是渐变收敛的过程,与堆载预压规律基本一致。填筑前总沉降达到 42.9~85.0 cm (包括路基底部砂垫层引起的沉降,约 6~8 cm)。

(2) 真空联合堆载预压阶段。2003 年 6 月 20 日正式开始填筑后,沉降速率又变大,其大小与填土速率密切相关。如 2003 年 8 月 1—6 日填土速率较快时,其沉降速率大于 10 mm/d。真空联合堆载约 40 d 后,沉降速率已减小到约 1.0~1.8 mm/d。卸载前,沉降量为 94.2~185.4 cm。

(3) 真空卸载后阶段(2003 年 10 月 31 日以后)。真空卸荷标准采用地表沉降速率连续 10 d≤2 mm/d 标准,即可卸除真空荷载。真空卸载后地基土发生回弹,回弹量约为 0.3~0.5 cm,随着 2005 年 1 月基床表层级配碎石的填筑,又发生沉降,但沉降速率较小。

2.3.2 由轨道列车等后期荷载产生的工后沉降

真空联合堆载预压地基产生的路基工后沉降由两部分组成。一是在路基荷载作用下至铺轨时仍未完成的沉降,由于采用了真空联合堆载预压,在联合阶段的荷载比使用荷载要大约 60 kPa,因此这部分工后沉降不会太大,与施工完成后至铺轨的时间有关;二是由轨道和列车等后期荷载产生的工后沉降。

根据《新建时速 300~350 公里客运专线铁路设计暂行规定》的规定,轨道和列车荷载对地基沉降的影响可等效成分布在路基面中心的一土柱:按照分层总和法计算,压缩资料采用回弹指数进行计算,沉降量为 0.8~1.1 cm。

2.3.3 路基本体荷载下的工后沉降

由于路基本体荷载作用而产生的工后沉降与真空卸载后基床表层完成时至铺轨时间有关。由于联合荷载大于使用荷载,这部分沉降较小,其推算方法采用双曲线法进行。

2.3.4 工后沉降与预压期

计入工后沉降的后期荷载产生沉降为 0.8~1.1 cm。真空联合堆载预压地基工后沉降如表 3 所示。

表3 真空联合堆载预压地基后沉降表

(单位:mm)

断面里程	0+342	0+448
真空卸载、基床表层填筑到后	93.1	100.9
真空卸载、基床表层填筑到后3个月	64.0	80.9
真空卸载、基床表层填筑到后6个月	55.1	75.7
真空卸载、基床表层填筑到后12个月	38.7	58.7
真空卸载、基床表层填筑到后18个月	31.3	49.5

注:最终沉降采用双曲线法进行推算,工后沉降已经包括轨道和列车荷载产生的沉降。

根据上述分析,真空联合堆载试验段在真空卸载、基床表层填筑完成后放置18个月,可满足工后沉降5 cm及年沉降速率的要求。

因此,对于高速铁路有砟轨道路基工后沉降5 cm的标准,如果有2~3年的工期,采用真空联合堆载预压处理15 m左右以内的软土地基,是可行的。

2.4 真空预压对周围结构物的影响^[8]

2.4.1 真空预压对地下水的影响

图3为水位随时间变化的曲线。由图3可看出,抽真空后,各测点水位均有不同程度的下降。随着时间的增长、出水量的减小,各测点水位线有回升的趋势。靠路基坡脚处水位下降值最大,约0.8 m,但抽真空水位影响范围可达到坡脚外20 m。地下水位的下降可能产生附加不均匀沉降,造成邻近建(构)筑物的开裂和倾斜。

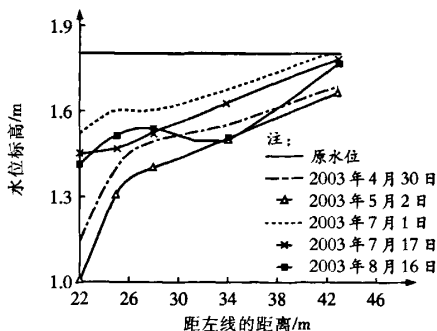


图3 真空联合堆载预压地基水位随时间变化曲线

2.4.2 真空联合堆载预压对周围结构物的影响

图4为真空联合堆载预压试验段路基坡脚外12 m范围内地表的垂直位移和水平位移变化曲线。

由图4可看出,垂直位移从路基坡脚2 m处的38.4 cm减小到距路基坡脚12 m处的2.7 cm,水平位移相应由34.3 cm减小到4.8 cm。

从本次试验来看,对于双线路堤,真空预压的主要影响范围约为坡脚外20 m左右。当然,真空预压的影响范围与工程地质等情况有关,地基土体力学指标越差,影响范围越宽。

抽真空后,路基外一定范围内的地基土产生向路基内侧较大的侧向变形,最大向内位移达到近50 cm。因此,在采用真空预压加固软土地基方案前,必须考虑真空预压可能对周围结构物产生的影响。从现场的观察也可发现,抽真空后,路基坡脚外地表和真空预压段的涵洞沉降缝均出现有裂缝,说明抽真空对周围结构物有一定的影响。因此,在临近结构物的软土地基,采用真空预压处理时,对此应有充分的重视。

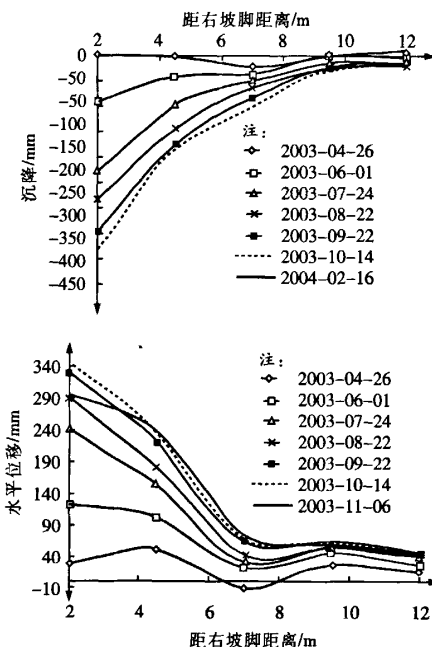


图4 真空联合堆载预压地基路基坡脚外地表变形

为防止真空预压对周围结构物的影响,可采取以下措施:

(1) 凡遇到加固区以外有重要结构物时,加固区外首先应考虑埋设深层测斜仪及布置地面沉降观测点,以确保相邻区域内设施安全运行;

(2) 挖隔离沟,开挖深度可控制在2.5~5.0 m,并对构筑物进行适当抗变形处理。断开的位置可以是敞开的,也可以回填中粗砂;

(3) 打设隔离桩,如钢板桩或水泥搅拌桩等,减小土体水平位移。

另外,采用真空预压设计前,应特别注意查明土体有无透土层、透水层的位置及范围、地下水的状况等,从而决定真空预压方法的适用性或采取附加的密封措施以及垂直排水通道的打设深度。

3 工程经济性评价

表4 为真空联合堆载预压地基处理与软土地基处

理中常用的搅拌桩、塑料排水板堆载预压、砂桩处理地基的经济性比较。由表 4 可知,就地基处理而言,塑料排水板堆载预压地基处理造价最低,其次为砂桩,真空联合堆载预压处理地基,造价最高的为采用搅拌桩处理。

表 4 各种地基处理经济性比较

工程名称	加固深度/m	地基加固措施 (万元/路基延米)
搅拌桩	12.5~18.5	0.86~1.09
真空预压	14.5~18.5	0.45
塑料排水板堆载预压	7.0~15.0	0.08~0.11
振动式砂桩	15、25.5	0.29~0.36

注:未考虑工期的影响。

如果仅采用塑料排水板堆载预压处理,虽然加固费用较低,但往往需要的预压时间很长,影响工期,在高速铁路软土地基处理中应用必然受到限制。而真空联合堆载预压具有造价较低,充分利用铁路路堤本体荷载、在路堤的填筑施工中稳定性不受到控制等优点,是铁路软土地基处理中较好的地基处理方法之一,值得推广使用。

4 结论

通过真空联合堆载预压法处理软基的现场试验研究,得出以下结论:

- (1) 采用真空联合堆载预压处理铁路软基是可行的,与搅拌桩等处理方法相比,具有经济合理等优点。
- (2) 真空联合堆载预压对加固区、下卧层土体的物理力学指标有较大的改善,加固效果明显。
- (3) 与塑料排水板堆载预压相比,大大缩短了工期,且路堤填筑过程中不受稳定性控制。
- (4) 该工法可以充分利用铁路路堤本体荷载作为堆载,特别适合在铁路软土地基处理中应用。
- (5) 由于真空预压时,加固范围内的土体产生向路堤中心为主的收缩变形,周围土体因侧向位移而开

裂,且周围土体地下水位降低,产生附加不均匀沉降,可能造成邻近结构物的开裂和倾斜。在临近结构物的软土地基,采用真空预压处理时对此应有充分的重视。

(6) 采用真空预压设计前,应特别注意查明土体有无透水层、透水层的位置及范围、地下水的状况等,从而决定真空预压方法的适用性或采取附加的密封措施以及垂直排水通道的打设深度。

(7) 由于真空预压工艺较复杂,选择合理的设计和施工参数也是至关重要的。

参考文献:

[1] Kjellman, W. Consolidation of clay by mean of atmospheric pressure, Conference on soil stabilization[C]. MIT, 1952.

[2] 娄炎. 真空排水预压加固软土技术[M]. 北京:人民交通出版社,2002

[3] 张海霞,王保田. 真空堆载联合预压效果检验[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(12):1873-1876

[4] 陈兰云,朱建才. 真空-堆载联合预压加固高等级公路软基的工程实例分析[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(z1):4628-4633.


[5] 朱建才,陈兰云,龚晓南. 高等级公路桥头软基真空联合堆载预压加固试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(12):2160-2165.

[6] Tang M, Shang J Q. Vacuum preloading consolidation of YaoQiang airport runway[J]. Geotechnique, 2000,50(6):613-623.

[7] 彭劼,刘汉龙,陈永辉,等. 真空-堆载联合预压法软基加固对周围环境的影响[J]. 岩土工程学报,2002,24(5):656-659.

[8] 铁道第四勘察设计院. 软土地基沉降估算方法及不同地基处理加固效果研究[R]. 武汉:铁道第四勘察设计院,2005.

(编辑 梅志山)

作者: [王祥](#), [李小和](#), [周顺华](#), [WANG Xiang](#), [LI Xiao-He](#), [ZHOU Shun-Hua](#)
作者单位: [王祥, 李小和, WANG Xiang, LI Xiao-He\(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉, 430063\)](#),
[周顺华, ZHOU Shun-Hua\(同济大学道路与铁道工程教育部重点实验室, 上海, 200331\)](#)
刊名: [铁道工程学报](#) 
英文刊名: [JOURNAL OF RAILWAY ENGINEERING SOCIETY](#)
年, 卷(期): 2008, 25(12)
被引用次数: 3次

参考文献(8条)

1. [Kjellman, W Consolidation of clay by mean of atmospheric pressure](#) 1952
2. [娄炎 真空排水预压加固软土技术](#) 2002
3. [张海霞; 王保田 真空堆载联合预压效果检验](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2002(12)
4. [陈兰云; 朱建才 真空-堆载联合预压加固高等级公路软基的工程实例分析](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2004(z1)
5. [朱建才; 陈兰云; 龚晓南 高等级公路桥头软基真空联合堆载预压加固试验研究](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2005(12)
6. [Tang M; Shang J Q Vacuum preloading consolidation of YaoQiang airport runway](#)[外文期刊] 2000(06)
7. [彭劫; 刘汉龙; 陈永辉 真空-堆载联合预压法软基加固对周围环境的影响](#)[期刊论文]-[岩土工程学报](#) 2002(05)
8. [铁道第四勘察设计院 软土地基沉降估算方法及不同地基处理加固效果研究](#) 2005

本文读者也读过(10条)

1. [程军, 杨新安, CHENG Jun, YANG Xin-an 高速铁路软土地基处理对策及效果分析](#)[期刊论文]-[上海铁道大学学报\(理工辑\)](#) 2000, 21(10)
2. [王增兵, WANG Zeng-bing 高速铁路软土地基处理中CFG桩的应用研究](#)[期刊论文]-[山西建筑](#) 2009, 35(5)
3. [刘昭 秦沈高速铁路软土路基施工观测](#)[期刊论文]-[西部探矿工程](#) 2004, 16(6)
4. [刘卫东 高速铁路软土地基处理工艺探讨](#)[期刊论文]-[西部探矿工程](#) 2002, 14(6)
5. [刘志东, LIU Zhi-dong 浅谈CFG桩在高速铁路软土地基处理中的应用](#)[期刊论文]-[山西建筑](#) 2009, 35(7)
6. [王拥军 铁路软土地基处理与施工管理](#)[期刊论文]-[中国科技纵横](#) 2010(6)
7. [刘宏伟, 翟征秋 直排式真空预压技术在软土地基处理中应用](#)[期刊论文]-[交通科技](#) 2011(2)
8. [刘宇锋 从软土地基处理浅谈高压喷射注浆法的设计与施工](#)[期刊论文]-[中小企业管理与科技](#) 2009(24)
9. [高晓亮, GAO Xiao-liang 杭甬高速铁路软土工程特性研究](#)[期刊论文]-[浙江建筑](#) 2010, 27(5)
10. [张钦城 浅谈水泥搅拌桩在新客站软土地基处理中的应用](#)[期刊论文]-[城市建设理论研究\(电子版\)](#) 2011(26)

引证文献(3条)

1. [徐林荣, 王宏贵, 左琚, 刘维正 高速铁路沉降控制复合桩基的性状试验研究](#)[期刊论文]-[岩土力学](#) 2012(9)
2. [任文峰, 王星华, 韩晓飞 高速铁路软土路基沉降试验研究](#)[期刊论文]-[水利与建筑工程学报](#) 2010(4)
3. [朱群峰, 汪漳淳, 高长胜, 张凌, 杨守华 新吹填淤泥地基加固试验研究](#)[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2011(11)

引用本文格式: [王祥, 李小和, 周顺华, WANG Xiang, LI Xiao-He, ZHOU Shun-Hua 真空联合堆载预压处理高速铁路软土地基效果检验](#)[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2008(12)