

文章编号:1006 - 2106(2013)07 - 0015 - 05

# 郑西客专湿陷性黄土地基处理技术研究\*

姚裕春\*\* 李安洪 罗照新 孙 莺

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘要:**研究目的:郑西客专沿线黄土分布广泛,其中黄土的60%为易对工程造成严重影响的湿陷性黄土地基,郑西客专为国内外首次在湿陷性黄土地基上修建的无砟轨道高速铁路,有效解决黄土地基的湿陷性和工后沉降是高速铁路路基修建的关键。

**研究结论:**根据郑西客专湿陷性黄土的具体特征,通过理论分析、离心模型试验、现场试验等方法研究了路基桩板结构、水泥土柱锤冲扩桩、水泥土挤密桩和 CFG 桩处理湿陷性黄土地基的适应性和效果,得出:(1)分幅顶置式路基桩板结构对深层湿陷性黄土地基和桥隧间短路基具有明显的优势;(2)水泥土柱锤冲扩桩适宜于处理浅层和中厚层湿陷性黄土;(3)水泥土挤密桩可用于处理浅层湿陷性黄土,但应充分考虑其适用条件限制;(4)CFG 桩处理湿陷性黄土宜采用小直径小间距方案;(5)研究成果可为湿陷性黄土地基加固提供重要参考。

**关键词:**郑西客专;湿陷性黄土;沉降控制;地基处理

中图分类号:TU475 文献标识码:A

## Study on Techniques for Collapsible Loess Foundation Treatment of Zhengzhou - Xi'an Passenger Dedicated Line

YAO Yu - chun, LI An - hong, LUO Zhao - xin, SUN Ying

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

**Abstract: Research purposes:** The loess is widely distributed along the Zhengzhou - Xi'an Passenger Dedicated Line and about 60 percent of the loess is the collapsible loess that has a strong impact on the railway construction. The Zhengzhou - Xi'an Passenger Dedicated Line is the first ballastless high - speed railway built on the collapsible loess foundation at home and broad. How to solve the problems of the collapsibility and post - construction settlement of the loess foundation was the key point in building the collapsible foundation.

**Research conclusions:** According to the characteristics of the collapsible loess of the Zhengzhou - Xi'an Passenger Dedicated Line, by making the theoretical analysis and doing the centrifugal model tests and field tests, the research was done on the adaptability and effect of reinforcing the collapsible loess foundation with the pile - board structure of subgrade, cement soil column hammer impact - expand pile, cement soil compaction pile and CFG pile. From the results it is concluded: (1) The overhead and framing pile - board structure has a distinct advantage to reinforce the deep collapsible loess foundation or short collapsible loess foundation between bridge and tunnel. (2) The cement soil column hammer impact - expand pile is available for reinforcing the medium deep collapsible loess foundation. (3) The cement soil compaction pile is available for reinforcing the shallow collapsible loess foundation according to the limited conditions. (4) The cement - flyash - gravel pile (CFG pile) is available for reinforcing the collapsible loess foundation with small diameter and distance. (5) The research results can provide the reference to the reinforcement of the collapsible loess foundation.

\* 收稿日期:2013 - 03 - 15

\*\* 作者简介:姚裕春,1974 年出生,男,高级工程师。

**Key words:** Zhengzhou – Xi ‘an Passenger Dedicated Line; collapsible loess; settlement control; foundation treatment

郑州至西安客运专线为设计时速 350 km 的无砟轨道高速铁路,该线黄土分布广泛,黄土约占线路总长 90%,其中 60% 为易对工程造成严重影响的湿陷性黄土。郑西客专为国内外首次在湿陷性黄土地基上修建无砟轨道高速铁路,为保证在黄土地区建成高标准的客运专线,满足无砟轨道结构的技术条件,必须结合黄土地基的具体特征,研究选择合适的地基加固措施。针对郑西客运专线进行了“郑西客运专线湿陷性黄土地基处理技术研究”科研立项,通过理论分析、离心模型试验、现场试验等方法研究了路基石板结构、水泥土柱锤冲扩桩、水泥土挤密桩和 CFG 桩处理湿陷性黄土的适应性和效果,并提出了郑西客专湿陷性黄土地基处理原则,使郑西客专湿陷性黄土地基加固措施更加有效和经济合理。

## 1 湿陷性黄土的工程特性

课题研究的黄土地基自重湿陷性黄土厚度在 5 ~ 30 m,压缩模量  $E_s$  为 2.0 ~ 5.0 MPa,黄土自重湿陷系数  $\delta_{zs}$  (200 kPa) 平均为 0.033,15 m 内的自重湿陷量为 34.65 cm;由于黄土具有多孔性,孔隙比较大,一般在 1.0 左右,压缩模量较小,且具有湿陷性等特性,使得黄土地基上的路建成建后不仅沉降量大,而且延续时间较长。

### 1.1 室内原状土基本物理力学性质

通过黄土的原状土室内试验,得出了郑西客专黄土的物理力学性质:黄土的天然含水量在 8.91% ~ 22.30% 之间;天然密度在 1.65 ~ 2.14 g/cm<sup>3</sup> 之间;压缩系数在 0.150 ~ 0.555 MPa<sup>-1</sup> 之间;无侧限抗压强度在 77.59 ~ 85.38 kPa 之间;内摩擦角为 25.15°,黏聚力为 46.95 kPa。

### 1.2 扰动土基本物理力学性质

室内试验所用土样为线路通过地典型断面所取黄土的扰动土样,扰动土的物理力学性质:土颗粒比重平均值为 2.7;平均液限为 28.08%,平均塑限为 20.18%,塑性指数  $I_p$  = 7.9;压缩系数在 0.114 ~ 0.242 MPa<sup>-1</sup> 之间;无侧限抗压强度平均值为 65.87 kPa;内摩擦角为 31°,黏聚力为 27.25 kPa。

## 2 湿陷性黄土地基加固措施

湿陷性黄土地基的常用处理方法包括灰土桩、水泥土桩、CFG 桩、强夯等措施<sup>[1-5]</sup>。灰土桩挤密法能有效地消除黄土的湿陷性,处理深度一般在 5 ~ 15 m,但

要求所处理土层在地下水位以上,同时含水率在 14% ~ 23% 之间;CFG 桩法在房屋建筑工程黄土地基处理中运用较多,但大多数针对的是非湿陷性黄土地基;强夯法处理湿陷性黄土地基时被广泛采用,但其影响深度一般在 10 m 以内。本文重点分析路基石板结构 and 水泥土柱锤冲扩桩加固措施。

### 2.1 路基石板结构

路基石板结构是研究提出的一种处理深厚松软黄土及湿陷性地基的新型结构<sup>[6]</sup>,主要由钢筋混凝土桩基、桩周土体、托梁和承台板四大部分组成。承台板为现浇钢筋混凝土板,托梁为现浇钢筋混凝土梁,桩基为钻孔灌注桩,桩与托梁均固接,2<sup>#</sup>和 3<sup>#</sup>托梁与承台板固接,为通过构造措施减小收缩徐变、温度应力的影响,1<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>托梁与承台板搭接,其结构如图 1 所示。

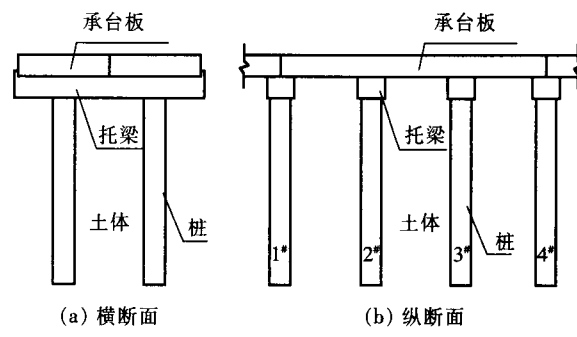


图 1 路基石板结构示意图

#### 2.1.1 桩板结构计算模型

桩板结构为超静定结构,结构形式复杂,对其进行受力分析时,不仅要考虑桩土之间的相互作用,而且要考虑温度应力以及桩基不均匀沉降等影响,分析过程较复杂,为此提出简化计算模型。

路基石板结构计算模型如图 2 所示,图中: $x$  为列车驶入距离, $q_2$  和  $q'_2$  为列车活载, $q_1$  为作用在承台板上的恒载, $q$  为作用在托梁上的均布荷载(包括恒载、列车活载)。水平荷载对承台板托梁受力影响较小,故只在计算桩的内力和变形中考虑。另外考虑到桩板结构在使用阶段,随着地基土由于湿陷而产生沉降,以及桩板结构在列车活载作用下而产生的振动作用,承台板底部土体将与承台板体脱离,所以计算中不考虑土对托梁以及承台板的支撑作用。

#### 2.1.2 桩板结构荷载分析

桩板结构设计应根据结构自身的特性,依据表 1 所列的荷载,按不利组合情况进行设计。

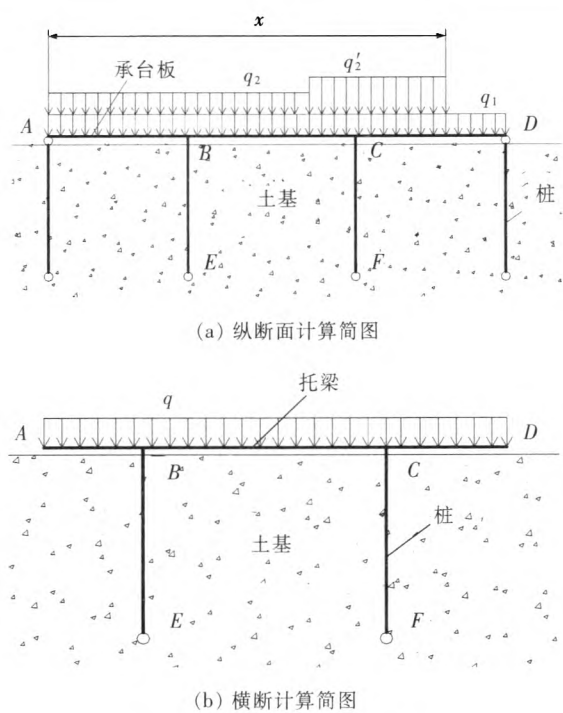


图2 路基桩板结构计算模型

表1 桩板结构荷载

主 力	恒载	结构构件及轨道结构自重;混凝土收缩和徐变的影响;基础变位的影响	附加力	制动力或牵引力;温度变化的影响
	活载	列车竖向静活载;列车竖向动力作用;长钢轨纵向水平力;离心力;横向摇摆力	特殊力	列车脱轨荷载地震力;施工临时荷载长钢轨断轨力

2.1.3 桩板结构几何尺寸选择

采用正交优选法对双线托梁式桩板结构优化确定承台板跨度  $L$ 、承台板高度  $T$  和托梁高度  $h$ ,桩径和桩长可按常规经验及实际土层厚度确定,表2为各影响因素极差次序排列情况。

表2 各影响因素极差次序排列

	编号	目标函数	因素次序		
技术 指标	1	承台板负弯矩	$L$ (大)	$T$ (小)	$h$ (小)
	2	承台板正弯矩	$L$ (大)	$T$ (中)	$h$ (小)
	3	托梁负弯矩	$L$ (大)	$T$ (中)	$h$ (小)
	4	托梁正弯矩	$L$ (大)	$T$ (中)	$h$ (小)
经济 指标	5	混凝土用量	$T$ (大)	$L$ (小)	$h$ (小)
	6	钢筋用量	$L$ (大)	$T$ (中)	$h$ (小)
	7	总造价	$L$ (大)	$h$ (小)	$T$ (小)

经过综合比较分析得出:承台板跨度  $L$  宜为 5 ~ 10 m,承台板高度  $T$  宜为 0.6 ~ 1.0 m,托梁高度  $h$  宜

为 0.6 ~ 1.0 m。  
2.1.4 桩板结构模型试验及工程试验  
针对桩板结构不同跨度、不同下卧层进行了 5 组室内模型试验,模型试验设计如图 3 所示;同时选择了两个试验工点进行现场工程试验,测试托梁和承台板的内应力、内应变。

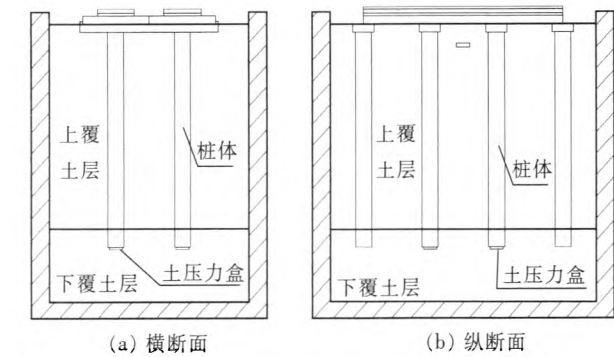


图3 室内模型试验示意图

模型试验及现场试验表明:试验结果与理论计算结果相比较,桩板结构受力与变形特性及规律一致,结果较为接近,理论分析结果比试验结果略偏于安全,采用理论分析结果进行桩板结构设计是安全可靠的。

2.2 水泥土柱锤冲扩桩

水泥土柱锤冲扩桩综合了重锤夯实、强力夯实、灰土桩、钻孔灌注桩等地基处理技术的长处,是集高压强、强挤密效应于一体的地基处理技术。其先成孔,然后在桩孔内对水泥土填料进行强夯挤压,使填料向孔底和周围挤密压缩,形成桩体,以达到提高地基承载力的目的。

2.2.1 水泥土柱锤冲扩桩沉降计算理论

地基处理后的路基沉降按复合地基理论进行计算,地基总沉降分成两部分:(1)桩土加固区的沉降  $S_1$ ;(2)复合地基下部土体的沉降  $S_2$ 。总沉降  $S = S_1 + S_2$ 。

桩土加固区的沉降:采用复合地基压缩模量( $E_{cs}$ )法计算桩土加固区的沉降量  $S_1$ 。

$$S_1 = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta p_i}{E_{cs}} h_i \tag{1}$$

式中  $\Delta p_i$ ——附加应力(kPa);  
 $h_i$ ——分层厚度(m);  
 $E_{cs}$ ——复合地基压缩模量(MPa);  
 $n$ ——分层总数。

复合地基下部土体的沉降:采用分层总和法计算复合地基下部土体的沉降  $S_2$ 。

$$S_2 = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zi}}{E_{si}} h_i \tag{2}$$

式中  $\sigma_{zi}$ ——第  $i$  层土的平均附加应力(kPa);

$E_{si}$ ——第  $i$  层土的压缩模量 (MPa);  
 $h_i$ ——第  $i$  层土的厚度 (m)。

2.2.2 水泥土柱锤冲扩桩离心模型试验

为验证水泥土柱锤冲扩桩复合地基总沉降和工后沉降的计算分析成果及预测湿陷性黄土地基的填筑沉降和长期沉降(竣工 3~5 年后的沉降),采用离心模型试验进行了分析。

离心模型试验结果表明,模拟路基放置时间的前 6 个月沉降较快,模拟通车运营时间里的前 8 个月的沉降较快,到第 25 个月时地基沉降基本完成;从路基修建完成到运行 3 年,地基的总沉降为 4.3 mm,小于理论计算结果。

2.2.3 水泥土柱锤冲扩桩数值分析

为了分析柱锤冲扩桩加固湿陷性黄土地基的效果,建立了天然地基模型和柱锤冲扩桩复合地基模型进行分析对比。有限元仿真模型按离心模型试验原型的尺寸和地质参数来建立,模型为全断面模型,由上至下分别是基床表层、基床底层、加筋垫层、加固区、下卧层。图 4 为天然地基总沉降云图,地基第一、二层的沉降较大,第三、四层的沉降较小;图 5 为复合地基总沉降云图,路基总沉降显著减少(天然地基 67.67 mm,复合地基 14.28 mm),加固区压缩量显著减少。

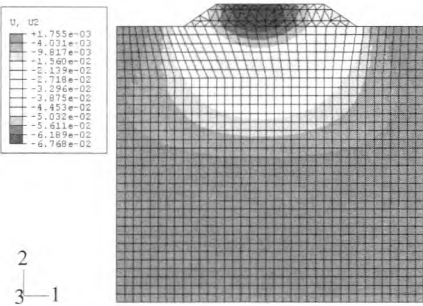


图 4 天然地基总沉降云图

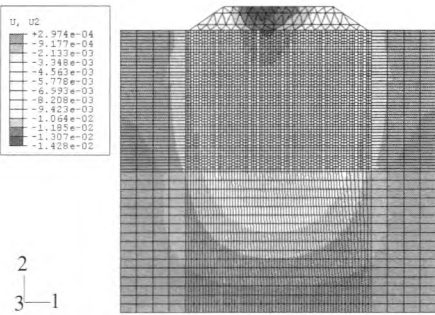


图 5 复合地基总沉降云图

2.2.4 水泥土柱锤冲扩桩现场试验

现场试验进行了水泥土柱锤冲扩桩复合地基承载力特征值、桩体承载力特征值、桩间土的平均挤密系

数、中心挤密系数、湿陷性消除情况以及路基沉降变形观测、应力测试。图 6 为水泥土柱锤冲扩桩现场观测布置图。

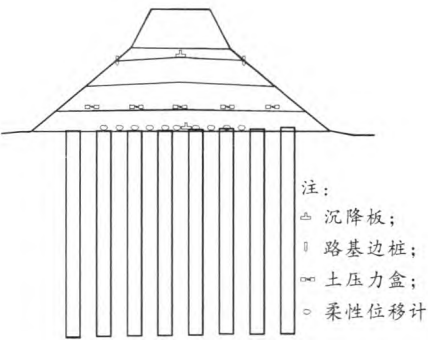


图 6 现场观测布置图

郑西客专水泥土柱锤冲扩桩经过现场试验分析,得出柱锤冲扩桩采用开孔直径 0.35 m,成孔直径 0.6 m,桩间距 0.95 m,能有效消除黄土的湿陷性和满足路基工后沉降要求。

2.3 其它加固处理措施

2.3.1 水泥土挤密桩

水泥土挤密桩与一般灰土桩相同,而强度较高,采用沉拔管法、爆扩法、冲击法和人工挖孔法等成孔。然后将水泥土灌入孔内,分层锤击挤密,把部分原土置换出来形成水泥土挤密桩复合地基,以达到提高地基承载力、消除黄土湿陷性和减少沉降的目的。

郑西客专水泥土挤密桩主要用于浅层湿陷性黄土的路堑地基加固中,设计桩径 0.46 m,桩间距 0.8 m,现场试验及沉降观测表明满足无砟轨道路基工后沉降要求,其沉降计算方法参见文献[7]。

2.3.2 CFG 桩

CFG 桩法在房屋建筑工程黄土地基处理中运用较多,但大多数针对的是非湿陷性黄土地基,计算中所采用的一些经验系数和相关公式大都取自于非黄土地区的工程实践,其结果一般都误差较大。经过大量资料的分析计算和对比,认为主要在于黄土与一般黏性土的变形性质存在本质的区别,一般黏性土地基在上部荷载作用下,仅存在压缩变形,而黄土地基则不仅有压缩变形,还存在湿陷变形,将这两种机理完全不同的变形绑在一起用压缩变形的计算方法计算,显然是不符合实际情况的,因而得不到理想的结果。

针对湿陷性黄土地基的特殊性,研究认为当采用 CFG 桩时宜采用小桩径和小间距进行地基加固,郑西客专现场 DK 293+000~DK 293+600 试验段设计采用 0.4 m 桩径、1.1 m 桩间距、桩长 15 m,沉降观测表明满足无砟轨道路基工后沉降要求,其沉降计算方法参见文献[7]。

3 湿陷性黄土地基处理原则

3.1 湿陷性黄土地基处理方法经济比较

不同地基处理方法有不同的处理深度适应范围,为了获得试验段的各地基处理的经济性比较,选择了两段里程范围进行比较,其中 DK 294 + 880 ~ DK 294 + 930 段属于浅层黄土地基,其湿陷性厚度为 8 ~ 10 m, DK 302 + 612. 7 ~ DK 302 + 708. 62 属于深层黄土地基,其湿陷性厚度为 25 ~ 30 m。比较中采用替代方案进行对比分析,即:为达到相近的地基处理效果目的,完全用另一种地基处理方案代替。表 4 说明浅层湿陷性黄土地基采用的四种加固措施经济性较为接近,可根据施工条件等进行选择,对于深层湿陷性黄土地基采用路基桩板结构有明显的经济优势。

表 4 地基处理经济性比较

浅层黄土地基处理总投资/万元			
桩板结构	水泥土柱 锤冲扩桩	CFG 桩	水泥土 挤密桩
183.2	172.97	185.6	178.1
深层黄土地基处理总投资/万元			
桩板结构	水泥土柱 锤冲扩桩	CFG 桩 + 灰土挤密桩	桥梁方案
339.6	699.2	586.7	663.5

3.2 湿陷性黄土地基处理原则

原则上应全部消除黄土的湿陷性,并满足沉降控制要求,一般情况下按以下方法再加 1.0 m 厚的灰土垫层处理湿陷性黄土地基;

- (1) 湿陷性黄土厚度 ≤ 3 m 地段,采用挖除换填或冲击碾压法加固地基;
- (2) 饱和度  $S_r \leq 60\%$  的湿陷性黄土,当厚度  $3\text{ m} < h \leq 6\text{ m}$  时,采用强夯加垫层法或水泥土挤密桩加固地基;
- (3) 饱和度  $S_r \leq 65\%$  的湿陷性黄土,当厚度  $6\text{ m} < h \leq 15\text{ m}$  时,采用灰土或水泥土挤密桩加固地基;
- (4) 当湿陷性黄土厚度  $> 15\text{ m}$  或湿陷性黄土饱和度和  $S_r > 65\%$  时,采用柱锤冲扩桩加固地基;
- (5) 当湿陷性黄土厚度超过 20 m 时,可采用水泥土柱锤冲扩桩或桩基础加固地基,当为过渡段时宜采用桩基础加固。

4 结论

郑西客专湿陷性黄土地基自重湿陷性压缩模量较低,修建高速铁路路基不仅沉降量大,而且延续时间较长,须采取有效措施消除黄土的湿陷性和满足工后沉降的要求,经研究分析得出:

- (1) 首次提出的分幅顶置式路基桩板结构对加固湿陷性黄土地基具有良好的效果和经济性,特别是针

对深层湿陷性黄土地基和桥隧间黄土短路基具有明显的优势;

- (2) 水泥土柱锤冲扩桩适宜于处理浅层和中厚层湿陷性黄土;水泥土挤密桩可用于处理浅层湿陷性黄土,但应充分考虑其适用条件限制;CFG 桩处理湿陷性黄土宜采用小直径小间距方案,设计计算宜通过现场试验进行验证后推广。

参考文献:

[1] 孙莺,罗照新. 郑西铁路客运专线黄土地基沉降控制技术[J]. 路基工程,2006(4):100-102.  
Sun Ying, Luo Zhaoxin. Settlement Control of Loess Foundation for Zheng - Xi Special line for Passenger Transportation[J]. Subgrade Engineering, 2006(4): 100-102.

[2] 苏谦,刘昌清,李安洪,等. 郑西客运专线深厚湿陷性黄土地基 DDC 桩法分析及沉降计算研究[J]. 铁道标准设计,2006(5):23-25.  
Su Qian, Liu Changqing, Li Anhong, etc. DDC Pile and Its Settlement Calculation for Collapsible Loess of Zhengzhou to Xi' an Passenger Dedicated Line[J]. Railway Standard Design, 2006(5):23-25.

[3] 董忠级,王建智. CFG 桩在湿陷性黄土地基中的应用[J]. 工程勘察,1998(4):29-31.  
Dong Zhongji, Wang Jianzhi. CFG Pile Application of Loess Foundation[J]. Engineering Survey, 1998(4): 29-31.

[4] 安鹏,张爱军,郭敏霞. 强夯消除黄土湿陷性的有效加固深度研究[J]. 人民长江,2011(5):66-69.  
An Peng, Zhang Aijun, Guo Minxia. Effective Reinforcement Depth Research of Dynamic Compaction for Loess Foundation[J]. The Yangtze River, 2011(5): 66-69.

[5] 李华明,张忠,赵如意,等. 郑西客运专线灰土桩桩网结构加固湿陷性黄土地基设计初探[J]. 铁道工程学报,2007(S1):97-101.  
Li Huaming, Zhang Zhong, Zhao Ruyi, etc. Primary Exploration on the Design of Reinforcing Collapsible Loess Foundation of Zhengzhou - Xi an Railway Passenger Dedicated Line with Lime - soil Pile - net Structure[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2007(S1):97-101.

[6] 苏谦,李安洪,丁兆锋,等. 郑西客运专线深厚湿陷性黄土地基桩板结构设计分析[J]. 铁道建筑技术,2007(2):1-4.  
Su Qian, Li Anhong, Ding Zhaofeng, etc. Subgrade Plate Structure Design of Zheng - Xi Special Line for Passenger Transportation for Deep Loess Foundation[J]. Railway Construction Technology, 2007(2):1-4.

[7] TB 10106—2010, 铁路工程地基处理技术规程[S].  
TB 10106—2010, Technical Code for Ground Treatment of Railway Engineering[S].

# 郑西客专湿陷性黄土地基处理技术研究

作者：姚裕春, 李安洪, 罗照新, 孙莺, YAO Yu-chun, LI An-hong, LUO Zhao-xin, SUN Ying

作者单位：中铁二院工程集团有限责任公司, 成都, 610031

刊名：铁道工程学报 

ISTIC PKU

英文刊名：Journal of Railway Engineering Society

年, 卷(期)：2013(9)

## 参考文献(7条)

1. 孙莺;罗照新 郑西铁路客运专线黄土地基沉降控制技术研究[期刊论文]-路基工程 2006(04)
2. 苏谦;刘昌清;李安洪 郑西客运专线深厚湿陷性黄土地基DDC桩法分析及沉降计算研究[期刊论文]-铁道标准设计 2006(05)
3. 董忠级;王建智 CFG桩在湿陷性黄土地基中的应用[期刊论文]-工程勘察 1998(04)
4. 安鹏;张爱军;郭敏霞 强夯消除黄土湿陷性的有效加固深度研究[期刊论文]-人民长江 2011(05)
5. 李华明;张忠;赵如意 郑西客运专线灰土桩桩网结构加固湿陷性黄土地基设计初探[期刊论文]-铁道工程学报 2007(z1)
6. 苏谦;李安洪;丁兆锋 郑西客运专线深厚湿陷性黄土地基桩板结构设计分析[期刊论文]-铁道建筑技术 2007(02)
7. 铁路工程地基处理技术规程

引用本文格式：姚裕春, 李安洪, 罗照新, 孙莺, YAO Yu-chun, LI An-hong, LUO Zhao-xin, SUN Ying 郑西客专湿陷性黄土地基处理技术研究[期刊论文]-铁道工程学报 2013(9)