

文章编号: 1674—8247(2018)05—0069—05

## 湿陷性黄土路基沉降变形综合控制技术研究

王亚宁<sup>1</sup> 周子豪<sup>2</sup>

(1. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 西安 710043, 2. 西安工业大学, 西安 710021)

**摘要:**为确保高速铁路路基工程在深厚湿陷性黄土纵深地区的沉降变形得到有效控制,文章通过大量理论计算、经验总结及试验研究,提出了有砟轨道高速铁路路基工程在湿陷性黄土地基中的沉降变形综合控制技术,具体通过地基处理挤密地基土,消除全部或部分湿陷性,配合严格的防排水设计,提高复合地基承载力,控制工后沉降量、剩余湿陷量和路基本体预留沉降量的总和满足规范要求,从路基沉降变形三源头控制其沉降变形总量,对湿陷性黄土地区类似工程设计具有指导意义。

**关键词:**湿陷性黄土; 工后沉降量; 剩余湿陷量; 路基本体; 预留沉降量; 综合控制技术

**中图分类号:**U213.1<sup>+</sup>5

**文献标志码:**A

## Study on Integrated Control Technology of Settlement and Deformation of Collapsible Loess Subgrade

WANG Yaning<sup>1</sup> ZHOU Zihao<sup>2</sup>

(1. China Railway First Survey & Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China;

2. Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** To ensure the settlement and deformation of high-speed railway subgrade can be effectively controlled in deep collapsible loess region, through a large number of theoretical calculations, experience summary and experimental study, integrated control technology of settlement and deformation of high-speed railway subgrade in collapsible loess region is put forward. Specifically through ground treatment compacted foundation soil, eliminating all or part of the collapsibility, with strict anti-drainage design, improving the capacity of composite foundation, by controlling the settlement sum of post-construction settlement, remnant collapse and subgrade body reserve settlement to fulfil the requirements of the code. Controlling the total amount of settlement and deformation from 3 sources has a guiding significance for similar projects in collapsible loess region.

**Key words:** collapsible loess; post-construction settlement; remnant collapse; subgrade body; reserve settlement; integrated control technology

我国幅员辽阔,地质条件千变万化,黄土广泛分布在我国的中西部地区。随着国家高速铁路路网的不断延伸,郑西、大西、西宝等高速铁路的建成通车,在湿陷性黄土地区已经初步形成了建设高速铁路的成套技术,积累了不少成功经验。银川至西安高速铁路采用有砟轨道,设计速度为 250 km/h。有砟轨道一般地段

路基工后沉降 $\leq 10$  cm,桥台台尾过渡段 $\leq 5$  cm,沉降速率 $\leq 3$  cm/年<sup>[1]</sup>。银川至西安高速铁路向更加深厚的湿陷性黄土地区纵深发展,对湿陷性黄土地区高速铁路修建技术提出了新的要求。因此,本文通过大量理论计算、经验总结及试验研究,提出了湿陷性黄土地基中的沉降变形综合控制技术。

收稿日期:2017-08-29

作者简介:王亚宁(1986-),男,工程师。

引文格式:王亚宁,周子豪. 银西高铁湿陷性黄土路基沉降变形综合控制技术研究[J]. 高速铁路技术,2018,9(5):69-73.

WANG Yaning, ZHOU Zihao. Study on Integrated Control Technology of Settlement and Deformation of Collapsible Loess Subgrade in Yinchuan-Xi'an High Speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(5): 69-73.

# 1 黄土的特性

## 1.1 黄土的结构特点

黄土的结构强度包括颗粒排列特征强度和颗粒联结特征强度两个方面。颗粒排列强度主要由各接触面的摩擦产生,宏观表现为内摩擦角。联结强度主要由黄土形成期各种物理化学作用、结构骨架胶结作用以及颗粒间分子引力等形成的原始黏聚力,胶结物质、胶体颗粒、腐殖质以及可溶盐等综合作用形成的加固黏聚力,以及土颗粒变细、颗粒比表面积增大、孔隙变小而后形成的毛细管力所产生的吸附黏聚力构成<sup>[2]</sup>,宏观表现为黄土的黏聚力。

## 1.2 黄土的湿陷性

黄土的点式接触造成的多孔性结构形态是黄土在水、力共同作用下产生湿陷的必要条件,而随含水量变化的粒间吸力作用为湿陷变形提供了驱动力。黄土湿陷的发生主要来自于土中非水稳胶结力的破坏和吸力的减小以及由此而引起的对水稳性胶结力和摩擦阻力的超载<sup>[2]</sup>。

## 1.3 黄土的承载力

我国黄土地区分布广,地形、地质条件复杂,分布区气候、水文、土质条件多变,决定了黄土地区承载力的复杂性和变异性。银西高速铁路所经区域,位于地表的黄土( $Q_4 \sim Q_3$ )承载力一般在80~150 kPa。

黄土地区,高速铁路要求基床范围内的天然地基静力触探贯入阻力 $p_s < 1.5$  MPa或地基基本承载力 $\sigma_0 < 0.18$  MPa。根据试验资料,黄土地区天然地基一般都达不到这一要求,属于松软土,需进行地基加固处理。

# 2 湿陷性黄土地基处理常用方法

消除黄土的湿陷性需对地基进行处理,常用的方法主要有垫层法、强夯法、挤密法、预浸水法等<sup>[3]</sup>。强夯根据夯击能的大小及黄土类别,消除湿陷性的有效深度一般为4~10 m,但其适用性易受线路附近的居民点、厂房等分布的限制。因此,工程中大量采用挤密法进行地基处理,主要有水泥土挤密桩、柱锤冲扩桩等桩型;当由于路基填土较高、湿陷土层较厚或松软土层厚度大等导致沉降变形难以控制时,通常采用堆载预压、长短桩、桩板结构或组合方式等进行处理。

# 3 湿陷性黄土沉降变形综合控制方法

## 3.1 沉降变形综合控制计算

湿陷性黄土地基处理的三个控制标准:一是消除全部或部分湿陷性;二是提高地基承载力;三是控制工

后沉降量。为控制湿陷性黄土地基的沉降变形,通过地基处理挤密地基,缩小孔隙比,消除或部分消除黄土湿陷性,提高复合地基承载力和抗变形能力,同时配合严格的防排水设施,避免黄土地基发生湿陷。

湿陷性黄土地基的沉降变形计算:

$$S = S_1 + S_2 + S_3 \tag{1}$$

式中: $S$ ——湿陷性黄土地区路基沉降变形总量(mm);

$S_1$ ——地基沉降量(mm);

$S_2$ ——剩余湿陷量(mm);

$S_3$ ——路基本体沉降量(mm)。

其中地基沉降量 $S_1$ 分为加固区沉降量和下卧层沉降量,计算方法按照TB 10106-2010《铁路工程地基处理技术规程》附录D<sup>[4]</sup>进行,但应对变形计算深度范围内土层的压缩模量进行经验修正,采用压缩模量修正后的当量值进行计算。

$$\bar{E}_s = \frac{\sum A_i}{\sum \frac{A_i}{E_{si}}} \tag{2}$$

式中: $A_i$ ——第 $i$ 层土附加应力系数曲线沿土层厚度的积分值;

$E_{si}$ ——第 $i$ 层土的压缩模量值(MPa)。

修正经验系数如表1所示。

表1 沉降计算经验系数<sup>[5]</sup>

$\bar{E}_s/\text{MPa}$	3.30	5.00	7.50	10.00	12.5	15	17.5	30
$\Phi_s$	1.80	1.22	0.82	0.62	0.50	0.40	0.35	0.30

剩余湿陷量是指全部湿陷性黄土层的湿陷量减去被处理湿陷性黄土层的湿陷量<sup>[6]</sup>。剩余湿陷量的计算应根据湿陷性黄土计算判定表试验数据累加未挤密处理区域的湿陷量。

路基本体沉降量是指路堤原地面以上填土部分或路堑挖除换填部分在列车荷载及自身重力作用下填土颗粒逐渐紧密导致的沉降量。一般改良土每米沉降量为2~5 mm,A、B组填料每米沉降量为1~3 mm。

## 3.2 防排水措施

黄土的湿陷是在外荷载或自重的作用下受水浸湿后产生的湿陷变形,发生湿陷的必要条件是地表水进入地基土层中,因此采取封闭防水、拦截、分散处理的原则,做好路基范围内地表防水和排水措施对控制湿陷性黄土沉降变形十分重要。

对于湿陷性黄土地区的低路堤工程( $0.7\text{ m} < H \leq 3.0\text{ m}$ ),应于基床表层底面下铺设一层隔水层,隔水层由0.1 m厚中粗砂夹一层PVC毛细防排水板,如图1所示。

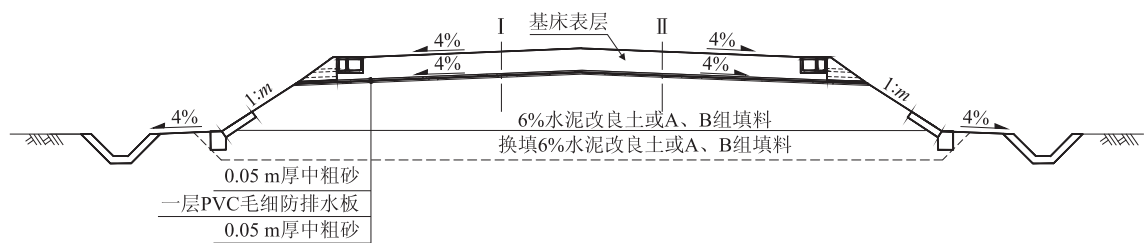


图 1 湿陷性黄土地区低路堤(0.7 m < H ≤ 3.0 m)工程路基防排水设计示意图

对于湿陷性黄土地区低路堤( $H \leq 0.7$  m)及路堑工程,应于基床表层及侧沟和侧沟平台以下铺设一层隔水层。隔水层由 0.1 m 厚中粗砂夹一层 PVC 毛细防水板组成,如图 2 所示。

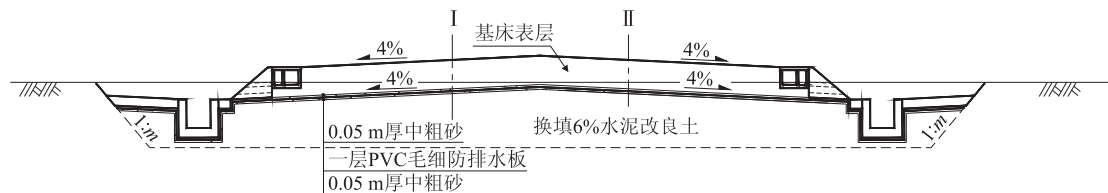


图 2 湿陷性黄土地区低路堤( $H \leq 0.7$  m)及路堑工程路基防排水设计示意图

4 湿陷性黄土沉降变形综合控制在银西高速铁路中的应用

银西高速铁路穿越了渭河高阶地及渭北黄土塬区、黄土台塬区、环江宽谷及黄土梁峁沟壑区等黄土区域。沿线黄土主要为黏质黄土、砂质黄土,结构疏松,多孔隙。黄土台塬区是银西高速铁路最具代表性的黄土地貌。银西高速铁路自南向北纵贯被誉为“天下第一塬”的董志塬,董志塬地区黄土的工程特性成为了银西高速铁路建设的重点控制因素。

董志塬地区原生黄土层分布厚度达 150 ~ 200 m,其中表层湿陷性黄土厚 15 ~ 23 m,具有 II ~ IV 自重湿陷性。表层黄土结构疏松,孔隙发育,均为自重湿陷性黄土地。黄土的物理力学性质存在明显的南北差异

及垂直差异,整体呈现为北部厚度大、等级高,向南部厚度变小、等级变低,越靠近北部,黄土的天然含水量越低,塑性指数越小,湿陷性越敏感,湿陷等级越高,深度越大,黄土的孔隙比越小,天然密度越大的特征<sup>[7]</sup>。

4.1 代表性工点 1 沉降变形控制实例

(1) 地层概况及参数

地表为第四系上更新统黏质黄土( $Q_3^{col3}$ ),厚度约 22 m,硬塑,承载力 150 kPa,Ⅱ级普通土。其下为第四系中更新统黏质黄土( $Q_2^{col3}$ ),厚度约 17 m,硬塑为主,承载力 180 kPa,Ⅲ级硬土。工点范围内场地为湿陷性黄土地。湿陷类型为自重,湿陷等级为Ⅳ级(非常严重),湿陷土层厚约 10 m。该段路基填土高度约 6.5 m。代表性工点 1 的详细地层参数如表 2 所示,湿陷性判定如表 3 所示。

表 2 代表性工点 1 地层参数表

取样深度 /m	天然含水率 /%	天然密度 g/cm <sup>3</sup>	干密度 g/cm <sup>3</sup>	颗粒密度 g/cm <sup>3</sup>	天然 孔隙比	饱和度 /%	液限 /%	塑限 /%	塑性指数	液性指数
3.50 ~ 3.90	12.6	1.42	1.26	2.71	1.149	29.7	29.0	18.6	10.4	-0.58
5.50 ~ 5.90	11.5	1.46	1.31	2.71	1.070	29.1	28.6	18.0	10.6	-0.61
7.50 ~ 7.90	11.1	1.40	1.26	2.71	1.151	26.1	29.8	18.5	11.3	-0.65
9.50 ~ 9.90	11.0	1.42	1.28	2.71	1.118	26.7	29.7	18.8	10.9	-0.72
11.50 ~ 11.90	14.3	2.00	1.75	2.72	0.554	70.1	32.8	20.2	12.6	-0.47
13.50 ~ 13.90	10.9	1.98	1.79	2.71	0.518	57.0	29.6	18.4	11.2	-0.67
15.50 ~ 15.90	16.1	1.81	1.56	2.71	0.738	59.1	29.0	18.4	10.6	-0.22
17.50 ~ 17.90	21.1	1.78	1.47	2.71	0.844	67.8	29.3	18.4	10.9	0.25
19.50 ~ 19.90	14.3	1.78	1.56	2.71	0.740	52.4	28.5	18.0	10.5	-0.35
21.50 ~ 21.90	17.7	1.93	1.64	2.71	0.653	73.5	31.0	19.1	11.9	-0.12
23.50 ~ 23.90	16.4	1.94	1.67	2.71	0.626	71.0	29.3	18.6	10.7	-0.21
28.00 ~ 28.40	20.0	1.92	1.60	2.71	0.694	78.1	31.4	19.6	11.8	0.03
31.00 ~ 31.40	17.2	1.85	1.58	2.71	0.717	65.0	28.5	18.0	10.5	-0.08
35.00 ~ 35.40	22.1	1.94	1.59	2.72	0.712	84.4	33.3	20.2	13.1	0.15
38.00 ~ 38.40	16.8	1.74	1.49	2.71	0.819	55.6	29.5	18.6	10.9	-0.17

表 3 代表性工点 1 湿陷性黄土计算判定表

取样深度 /m	代表深度 /m	自重湿陷 系数 $\delta_{ZS}$	修正系数 $\beta_0$	自重湿陷 代表层厚 /mm	分级自重 湿陷量 $\Delta ZS/mm$	湿陷系数 $\delta_s$	湿陷代表 层厚 /mm	分级湿陷 量 $\Delta S$ /mm	自重湿 陷量 /mm	总湿陷量 /mm	湿陷 类型	湿陷 等级
3.50~3.90	4.70	0.017	1.20	4 700	95.88	0.082	3 200	393.60	451.08	968.60	自重	Ⅳ
5.50~5.90	6.70	0.031	1.20	2 000	74.40	0.089	2 000	267.00				
7.50~7.90	8.70	0.077	1.20	2 000	184.80	0.103	2 000	206.00				
9.50~9.90	10.70	0.040	1.20	2 000	96.00	0.051	2 000	102.00				

(2)地基采用水泥土挤密桩进行处理,设计参数如表 4 所示。

表 4 水泥土挤密桩地基处理参数表

桩径 /m	桩间距 /m	桩长 /m	桩体 强度 /m	桩的压缩 模量 /MPa	单桩 承载力 /kN	复合地基承 载力特征值 /kPa
0.4	1.00	8.00	2.50	50.00	103.67	215.89

(3)湿陷性黄土地基的沉降变形控制计算  
无列车荷载时,压缩模量当量值 18.54 MPa,沉降折减经验系数为 0.329,地层总沉降为 50.42 mm。有列车荷载时,压缩模量当量值为 18.47 MPa,沉降折减经验系数为 0.331,地层总沉降为 58.08 mm。铺轨前地基沉降固结度为 70.00 % ,路基工后沉降为 22.78 mm,剩余

湿陷量为 61.2 mm,路堤填料预留沉降值为 13 mm。  
根据湿陷性黄土地基的沉降变形控制方法,总沉降变形量为 96.98 mm < 100 mm,满足规范要求。

4.2 代表性工点 2 沉降变形控制实例

(1)地层概况及参数

地表为第四系上更新统黏质黄土( $Q_3^{col3}$ ),层厚约 7.5 m,硬塑,具湿陷性,Ⅱ级普通土,承载力为 150 kPa。其下为第四系中更新统黏质黄土( $Q_2^{col3}$ ),厚度大于 40 m,坚硬~硬塑,Ⅲ级硬土,承载力为 180 kPa。工点范围内场地为湿陷性黄土场地,湿陷类型为自重,湿陷等级为Ⅲ级(严重),湿陷土层厚约 20 m。该段路基填土高度约为 3.5 m。代表性工点 2 的详细地层参数如表 5 所示,湿陷性判定如表 6 所示。

表 5 代表性工点 2 地层参数表

取样深度 /m	天然含水率 /%	天然密度 g/cm <sup>3</sup>	干密度 g/cm <sup>3</sup>	颗粒密度 g/cm <sup>3</sup>	天然 孔隙比	饱和度 /%	液限 /%	塑限 /%	塑性指数	液性指数
3.00~3.20	20.8	1.53	1.27	2.71	1.140	49	29.0	17.3	11.7	0.30
5.00~5.40	21.3	1.51	1.24	2.71	1.177	49	28.1	16.9	11.2	0.39
7.00~7.40	17.7	1.54	1.31	2.71	1.071	45	27.8	16.7	11.1	0.09
9.00~9.40	16.2	1.51	1.30	2.71	1.085	41	27.0	16.4	10.6	-0.02
11.00~11.40	21.4	1.57	1.29	2.71	1.096	53	27.6	16.6	11.0	0.44
13.00~13.40	21.9	1.57	1.29	2.71	1.104	54	28.5	17.0	11.5	0.43
15.00~15.40	22.5	1.65	1.35	2.72	1.019	60	29.6	17.5	12.1	0.41
16.60~17.00	18.2	1.73	1.46	2.71	0.852	58	29.0	17.3	11.7	0.08
18.00~18.40	19.6	1.62	1.35	2.72	1.008	53	29.4	17.4	12.0	0.18
20.00~20.40	24.8	1.75	1.40	2.72	0.940	72	31.9	18.5	13.4	0.47
22.00~22.40	20.3	1.86	1.55	2.72	0.759	73	31.5	18.4	13.1	0.15
25.00~25.40	17.7	1.76	1.50	2.72	0.819	59	30.0	17.7	12.3	-
28.00~28.40	19.7	1.78	1.49	2.72	0.829	65	30.4	17.9	12.5	0.14
31.00~31.40	19.0	1.75	1.47	2.72	0.850	61	31.8	18.5	13.3	0.04
34.00~34.40	22.9	1.81	1.47	2.72	0.847	74	32.3	18.7	13.6	0.31
37.00~37.40	24.8	1.86	1.49	2.72	0.825	82	32.0	18.6	13.4	0.46
41.00~41.40	23.9	1.87	1.51	2.73	0.809	81	32.7	18.9	13.8	0.36
44.00~44.40	24.6	1.85	1.48	2.73	0.839	80	32.9	19.0	13.9	0.40

(2)地基采用柱锤冲扩桩进行处理,设计参数如表 7 所示。

(3)湿陷性黄土地基的沉降变形控制计算  
无列车荷载时,压缩模量当量值 8.59 MPa,沉降折减经验系数为 0.733,地层总沉降为 98.02 mm。有列车荷载时,压缩模量当量值为 8.70 MPa,沉降折减

经验系数为 0.733,地层总沉降为 116.40 mm。铺轨前地基沉降固结度为 80.00%,路堤填料预留沉降为 7.00 mm,路基工后沉降为 44.98 mm,剩余湿陷量为 40.80 mm,路堤填料预留沉降值为 7 mm。

因此,根据湿陷性黄土地基的沉降变形控制方法,总沉降变形量为 92.78 mm < 100 mm,满足规范要求。

表 6 代表性工点 2 湿陷性黄土计算判定表

取样深度 /m	代表深度 /m	自重湿陷 系数 $\delta_{ZS}$	修正系数 $\beta_0$	自重湿陷 代表层厚 /mm	分级自重 湿陷量 $\Delta ZS/mm$	湿陷系数 $\delta_S$	湿陷代表 层厚 /mm	分级湿陷 量 $\Delta S$ /mm	自重湿 陷量 /mm	总湿陷量 /mm	湿陷 类型	湿陷 等级
3.00~3.20	4.10	0.009	1.20	4 100	—	0.063	2 600	245.70	248.64	1 108.67	自重	Ⅲ
5.00~5.40	6.60	0.024	1.20	2 500	72.00	0.065	2 500	243.75				
7.00~7.40	8.20	0.037	1.20	1 600	71.04	0.064	1 600	102.40				
9.00~9.40	10.20	0.044	1.20	2 000	105.60	0.059	2 000	118.00				
11.00~11.40	12.20	—	1.20	2 000	—	0.027	2 000	57.78				
13.00~13.40	14.20	—	1.20	2 000	—	0.036	2 000	86.40				
15.00~15.40	16.00	—	1.20	1 800	—	0.030	1 800	64.80				
16.60~17.00	17.50	—	1.20	1 500	—	0.021	1 500	37.80				
18.00~18.40	19.20	—	1.20	1 700	—	0.051	1 700	104.04				
20.00~20.40	21.20	—	1.20	2 000	—	0.020	2 000	48.00				

表 7 柱锤冲扩桩地基处理参数表

桩径 /m	桩间距 /m	桩长 /m	桩体 强度 /m	桩的压缩 模量 /MPa	单桩 承载力 /kN	复合地基承 载力特征值 /kPa
0.6	1.30	18.00	2.50	50.00	233.26	250.14

经过现场路基填筑过程中的沉降变形观测数据可以看出,代表性工点 1 铺轨前发生的沉降量为 20.6 mm;代表性工点 2 铺轨前发生的沉降量为 39.4 mm;而剩余湿陷量为极端情况下路基基底浸水时发生的状况,作为沉降储备值。实测数据说明,沉降计算结果与观测结果较为接近,综合控制计算方法合理全面。

5 结论

- (1)对于湿陷厚度较小的地段,应通过挤密地基尽可能全部消除其湿陷性。
- (2)对于湿陷厚度较大,超出常用挤密类桩型可施工长度范围的地段,可消除部分厚度范围内黄土的湿陷性,并应通过总沉降变形计算将路基工后沉降量、剩余湿陷量及路堤填料预留沉降值的总和控制在规定范围内。对于总沉降变形量超过规定值的,在加强地基挤密处理的同时,应进一步做好路基范围的防排水措施,确保地表路基范围的水不进入湿陷土层范围。通过地基处理、基床防排水处理、排水系统综合设计共同确保湿陷性黄土地基的沉降变形。

参考文献:

[1] TB 10621-2014 高速铁路设计规范[S].  
TB 10621-2014 Code for Design of High Speed Railway [S].

[2] 高凌霞. 黄土湿陷性的微结构效应及其评价方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.  
GAO Lingxia. Study on Microstructural Effects on Collapsibility of Loess and Its Evaluation Methods [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.

[3] 喻新宇. 大西铁路客运专线湿陷性黄土地基处理技术应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.  
YU Xinyu. Applied Research on Collapsible Loess Foundation Processing in Passenger Dedicated Line from Datong to Xi'an [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.

[4] 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].

[5] GB 50025-2004 湿陷性黄土地区建筑规范[S].  
GB 50025-2004 Code for Building Construction in Collapsible Loess Regions [S].

[6] 钱鸿缙,王继唐,罗宇生,等. 湿陷性黄土地基[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985.  
QIAN Hongjin, WANG Jitang, LUO Yusheng, et al. Collapsed Loess Foundation [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1985.

[7] 孟祥连,夏万云,周福军,等. 银西高铁董志塬地区黄土工程特性分析研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 12 (219): 24-28.  
MENG Xianglian, XIA Wanyun, ZHOU Fujun, et al. Analysis and Study of Loess Engineering Characteristics of Dongzhiyuan on Xi'an-Yinchuan High-speed Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 12( 219):24-28.

(编辑:赵立红 白雪)