

兰渝铁路上第三系弱胶结砂岩软化与变形机理探究*

王建军

(铁一院地质路基处 西安 710043)

摘要 兰渝铁路上第三系砂岩成岩作用极差,具有泥质弱胶结、未胶结、石质极软的主要特点,在施工中表现出十分复杂的水稳特性,随洞室开挖含水率明显增大,易发生塑性变形或流变,围岩稳定性迅速变差,引起砂岩结构破坏,产生涌水、涌砂工程地质问题。本文采用岩石试验、电镜扫描及物探松动圈测试等方法,探究地下水渗流条件与围岩应力状态变化引起岩石微观结构的改变是其软化与变形的机理。

关键词 弱胶结砂岩 岩石特征 水稳特性 渗流条件 微观结构 软化与变形机理

中图分类号:P642 **文献标识码**:A

SOFTENING AND DEFORMATION MECHANISM OF TERTIARY WEAKLY CEMENTED SANDSTONE ON LAN-YU RAILWAY

WANG Jianjun

(Geology and Subgrade Department, China Railway First Survey and Design Institute Group Ltd., Xi'an 710043)

Abstract Lan-Yu railway line has the Tertiary sandstone as the subgrade foundation. The sandstone has the characteristics of muddy weak cementation, unbound, low intensity, and shows water instability properties. It is very complicated in construction. Water content can increase significantly with the excavation of underground chamber. Plastic deformation and rheology, and stability of surrounding rock mass can rapidly vary, which can cause the sandstone structure damage, the inflows of water and sand, and other engineering geological problems. This paper uses the rock test, SEM and exploration of loose circle testing methods. It explores the groundwater seepage conditions and stress state of surrounding rock. The change due to rock microstructure change is the main mechanism of the softening and deformation.

Key words Weakly cemented sandstone, Rock characteristics, Characteristics of water-stability, Flow conditions, Microstructure, Softening and deformation mechanism

1 引言

上第三系泥质弱胶结砂岩遇水软化和变形问题是新建兰渝铁路兰州至广元段隧道施工中遇见的特

殊复杂的岩土工程问题之一。该类砂岩分布在桃树坪隧道 DK3+430~DK6+655 段和胡麻岭隧道 DK76+350~DK79+600 段,总长 6475m,其显著特征为成岩作用极差,石质极软,开挖后在水的渗流作用下工程性质迅速恶化、软化,甚至发生涌水、涌砂现象,施

* 收稿日期:2012-10-10;收到修改稿日期:2013-05-20.

第一作者简介:王建军,从事铁路工程地质工作.Email:695679140@qq.com

工非常困难,工程进展缓慢。

关于第三系泥质弱胶结砂岩的工程特性研究,目前国内主要通过岩石取样以及原位载荷板试验,研究岩石强度、承载力高低以及基坑与边坡稳定性的问题,如董兰凤进行了关于兰州第三系砂岩工程特性研究^[1]。在隧道和地下结构工程实践中,关于第三系泥质弱胶结砂岩的均质岩石工程特性研究尚少。目前西南交通大学黄涛和彭道平对兰渝线桃树坪、胡麻岭隧道第三系含水砂岩水文地质条件与围岩稳定性关系进行了研究^[2],根据现场采样和测定的相关力学参数,利用 ANSYS 建立数学模型,模拟隧道开挖过程中以及开挖支护后围岩的应力-应变情况,并对围岩含水率随施工进展时间的变化规律和含水率、黏粒含量等与围岩稳定性关系进行分析。研究中存在的问题在于,降水在一定程度上可以提高围岩稳定性,但同时也改变了地下水渗流条件,导致岩石微观结构的破坏,反而降低了围岩稳定性,未能找到完全有效的施工方法。

本文通过岩石力学试验、电镜扫描的研究,获取上第三系砂岩的物理力学指标及岩石微观结构特征,在此基础上深入探讨了此类砂岩软化与变形机理,提出减少扰动砂岩或不改变地下水渗流条件的施工方法。

2 上第三系砂岩形成背景、分布及性质

2.1 形成背景和分布

根据甘肃省区域地质志,区内上第三系地层划分为陇东区、陇西盆地的甘肃群,在兰州盆地和定西盆地分布范围较广,沉积厚度较大。兰州除新城盆地(河口、新城一带)基底为白垩系地层外,榆中(定远)、城关、七里河、安宁堡及西固盆地,下伏基岩均为第三系红色砂岩或碎屑岩类^[3],在地貌上多表现为黄土梁峁和河谷阶地,上覆风积和冲洪积黄土,下伏第三系泥岩、砂岩及砾岩。第三系地层总体上为一套桔黄色、浅棕黄色泥质砂岩、或砂岩与泥岩互层,属陆相湖盆及山间凹地沉积^[4],厚度小于 296m,沉积地质时代距今约 $2.4 \times 10^3 \sim 2.5 \times 10^6$ a。

2.2 岩石学特征

第三系砂岩为黄褐色,细粒结构,泥质弱胶结、未胶结,巨厚层近水平状构造,局部夹薄层-中厚层钙质胶结层或透镜体,成岩作用差,但结构较紧密。

岩石的矿物颗粒成分以石英、长石、云母为主,含量占 85%~90%;胶结物成分为蒙脱石、伊利石、高岭石和绿泥石,含量占 0.53%~8.52%。在地质学概念中,成岩时代为第三纪形成,定名为砂岩^[5],但其工程性质更接近于具压密作用的粉细砂层,岩土体纵波波速平均 $V_p = 1600 \sim 2200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.3 物理力学性质

2.3.1 主要物理性质

根据钻孔及隧道内取样的颗粒分析成果,第三系砂岩的颗粒组成以粉细粒为主,粒径主要集中于 0.075~0.25mm;桃树坪隧道黏粒含量为 0.53%~2.03%、胡麻岭隧道黏粒含量为 5.21%~8.52%。根据各筛的累计筛余百分率或通过百分率,绘制级配曲线(图 1)。

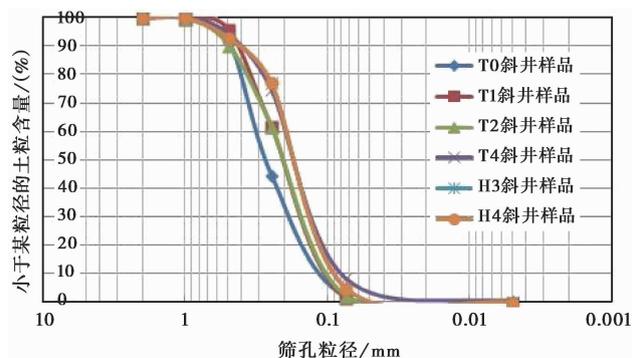


图 1 各个斜井的土样级配曲线

Fig. 1 Various soil gradation curves of inclined shafts

第三系砂岩的天然含水率为 4%~10%,天然密度为 $1.882 \sim 2.133 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,颗粒密度为 $2.599 \sim 2.648 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,比重为 2.64~2.67,孔隙比为 0.363~0.442;桃树坪隧道砂岩渗透系数为 $1.19 \times 10^{-4} \sim 7.58 \times 10^{-5}$,胡麻岭隧道砂岩渗透系数为 $1.86 \times 10^{-5} \sim 4.38 \times 10^{-5}$,两隧道砂岩整体的渗透能力较差,而胡麻岭砂岩渗透性要更差一些^[6]。

2.3.2 主要力学性质

2.3.2.1 抗压强度

第三系砂岩受沉积环境的影响,形成过程中多以泥质弱胶结^[7]为主,且成岩性差,天然抗压强度很低,一般小于 1MPa;遇水浸润或扰动后极易软化,其饱和抗压强度无法通过室内试验测得;局部夹有钙质胶结薄层或结核,天然抗压强度平均为 2.46~7.58MPa,饱和抗压强度约为 0.8~2.67MPa。

2.3.2.2 抗剪强度

根据两隧道砂岩直接剪切试验,砂岩黏聚力值

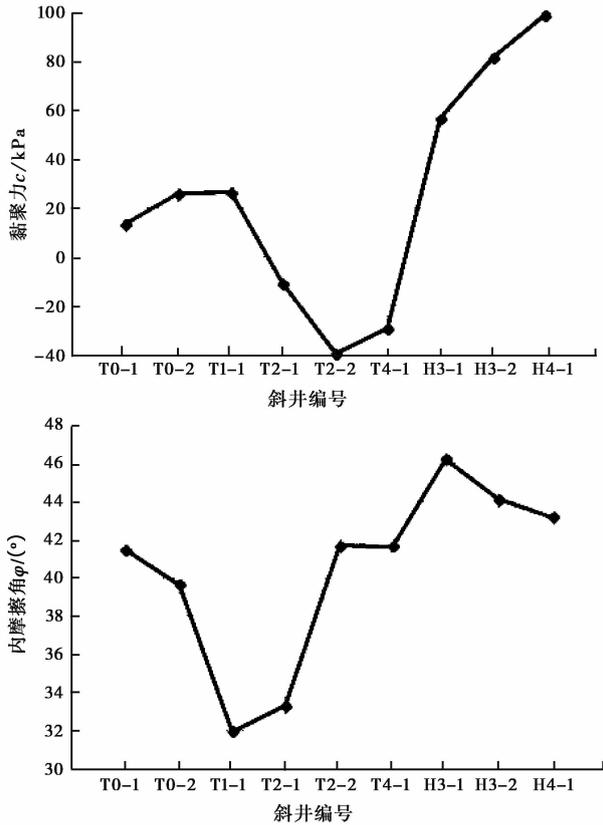


图2 各个斜井的黏聚力和内摩擦角曲线图

Fig. 2 Various curves of cohesions and internal friction angles of inclined shafts

为 14.21~99.38kPa, 平均为 56.79kPa, 内摩擦角为 31.96°~46.29°(图2)。

T2、T4 斜井取到的岩样整体含水率较低, 比较松散。该两斜井的砂岩样的抗剪强度曲线与纵坐标轴交于负值区, 说明岩样比较松散破碎, 在没有施加

压力的时候就已经是破碎的^[8]。施加竖向压力后会对岩样进行压实, 故而产生了一定的抗剪强度。两座隧道同属于砂岩, 但是由于各个斜井的含水率与密度的不同, 抗剪强度体现出不同的特点。胡麻岭的 H3、H4 斜井的岩样黏聚力明显较桃树坪的各个斜井的岩样都大, 最大将近 100kPa。从定性的方面来看, 胡麻岭的砂岩胶结程度要大于桃树坪。

3 工程地质特性

上第三系砂岩具有软硬不均、水稳性极差、涌水涌砂、黏粒含量不均以及现有的勘察方法和手段难以查明其工程特性的特点。

3.1 以极软岩为主, 软硬不均

砂岩以弱胶结未成岩砂岩为主, 石质极软, 但偶夹钙质胶结薄层、中厚层及其透镜体, 石质较硬, 甚至需爆破才能开挖。区域内研究表明砂岩中黏粒含量高低不均, 且对降水效果影响较大, 胡麻岭隧道砂岩黏粒含量较高, 渗透系数较小, 相对桃树坪隧道存在降水效果较差的现象。

3.2 水稳性极差(砂岩强度与含水率的关系)

在天然状态下砂岩含水率相对较低, 结构紧密, 颗粒受力平衡, 处于稳定状态。当开挖后随渗流作用含水率会逐渐升高, 此时易发生塑性变形或流变, 围岩稳定性迅速变差, 甚至砂岩结构发生破坏, 具有十分复杂的水稳特性, 其稳定性随含水率变化和时间延续具有显著变化的特点。经分析研究, 3~5h

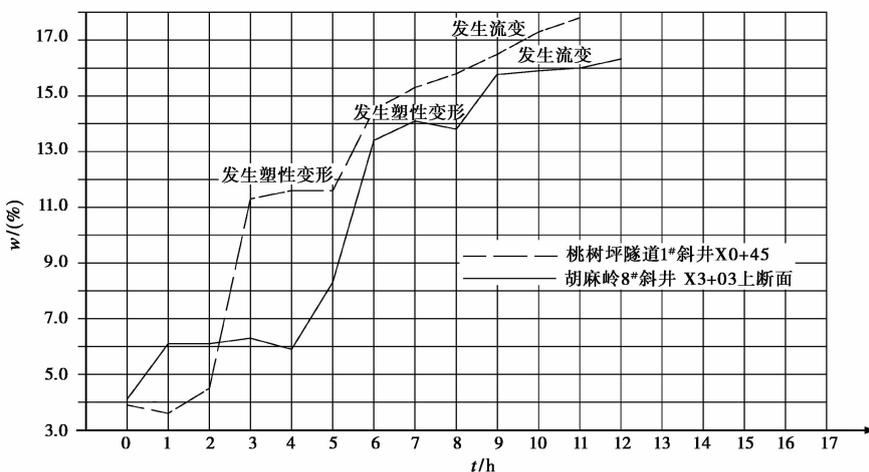


图3 开挖过程砂岩含水率变化曲线

Fig. 3 Excavation sand water content curves

为围岩开始塑性变形的临界时间点, 7~10h 为围岩开始流变的临界时间点。砂岩发生塑性变形的含水率为 12%~16%, 发生流变的含水率为 18%~19%。当砂岩含水率达到上述极限时, 其稳定性大大降低, 围岩将发生变形, 并导致失稳。超前降水能够控制围岩含水率在 5%~9%, 低于围岩塑性变形的含水率, 围岩基本稳定(图 3)。

3.3 涌水、涌砂

弱胶结砂岩在施工过程中出现不同程度的涌砂、涌水现象。涌砂、涌水绝大多数出现在隧道的拱部, 仅有少部分在两侧边墙的拱腰附近, 而且涌水涌砂处地表或临近地段多有沟谷分布, 为地下水相对富集或补给充分的区段。一般来说, 掌子面及拱墙围岩发生变形, 加之超前支护扰动围岩, 使得岩石结构发生破坏, 形成囊状、腔状的松散体, 很快渗流达到饱水状态, 并被封堵在掌子面前方。当压力过大或掌子面再次开挖时, 就会出现涌砂、涌水现象(图 4)。



a



b

图 4 胡麻岭 3[#]涌砂、涌水现象

Fig.4 Sand boil and water burst of Flax Ridge 3[#]

a. 胡麻岭 3[#]右侧拱腰涌水、涌砂; b. 胡麻岭 3[#]右侧边墙涌水

3.4 钻探勘察不易揭示其水稳特性

岩层露头石质较硬, 直立性与稳定性好(图 5), 钻孔岩性呈柱状(图 6), 现有的勘察方法和手段(钻探、物探、测试)难以查明其在水的作用下开挖后工程性质迅速恶化的特性。



图 5 桃树坪出口附近出露的砂岩

Fig.5 The exit of outcrops of sandstone near Peach tree outlet



图 6 胡麻岭钻孔砂岩岩心

Fig.6 Core-drill sandstone rocks at Flax Ridge

3.5 水文地质特征

隧道通过区为弱富水区, 第四系孔隙潜水主要为季节性或间歇性的暂时性潜水。砂岩裂隙水赋存于砂岩孔隙(裂)中, 受大气降水补给, 通过沟谷及第四系孔隙潜水垂向渗入补给深层基岩孔(裂)隙或沿基岩面径流。砂岩的富水性及含水量在空间上存在一定的差异性, 分布不均, 表现为沟谷局部地段砂岩含水偏高或地下水相对富集。根据降水入渗法计算^[9], 预测单位涌水量为 $230\sim 340\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

4 砂岩软化与变形机理

桃树坪以及胡麻岭隧道开挖后岩石试验、扫描电镜、变形监测以及变形过程分析研究表明,上第三系弱胶结砂岩软化与变形主要是地下水的渗流条件与围岩应力状态变化引起的岩石微观结构变化,包括地下水渗流与黏土矿物流失、颗粒骨架松脱变形以及岩石剪切变形 3 个部分。

4.1 地下水渗流与黏土矿物流失

由于洞室开挖,天然状态下砂岩中地下水的渗流条件与水压力平衡状态发生变化,产生水压力差及水力梯度,促使孔隙水向洞内渗透,形成渗流作用^[10]。除孔隙静水压力外,由于水力梯度变化增大了动水压力,加剧了地下水的渗流。

黏土矿物流失导致孔隙与含水率增大。分别取天然状态与开挖后渗流作用过的砂岩岩样,通过扫描电镜放大 200 倍观察砂岩结构(图 7、图 8)发现,开挖初期接近天然状态的砂粒表面粗糙,胶结物呈蜂窝状,典型的蒙脱石具卷边的弯曲薄片状晶型,并常叠置成花朵状,而开挖后渗流作用过的颗粒表面光滑,颗粒间以黏土矿物为主的胶结物含量明显减少,孔隙率与含水率增大,砂岩结构趋于疏松,岩石强度与稳定性等工程性质显著变差,极易发生塑性变形或流变,具有十分复杂的水稳特性。

4.2 颗粒骨架松动变形

洞室开挖后破坏了原岩的初始应力状态^[11],围岩自重应力的调整引起初期支护与围岩变形,形成



图 7 天然状态的砂岩结构($\times 200SE$)
Fig. 7 Natural sandstone structures($\times 200SE$)



图 8 开挖渗流作用后砂岩结构($\times 200SE$)
Fig. 8 Seepage sandstone structures after excavation($\times 200SE$)

了松动圈^[12]。松动圈测试成果显示(图 9),拱腰

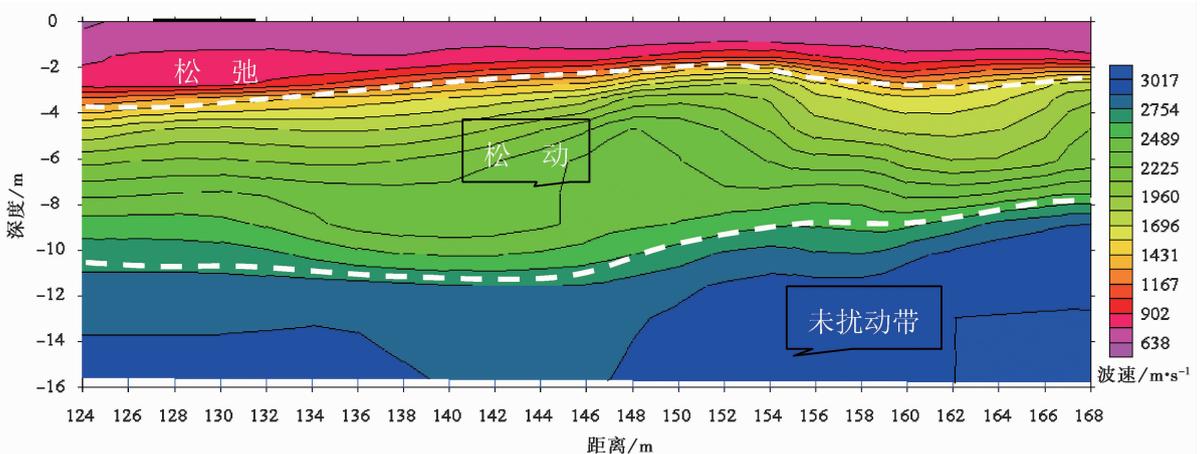


图 9 左拱腰断面波速分布及解释成果图

Fig. 9 Velocity distribution and interpretation of results at the left haunch cross-section

至边墙范围松弛带的厚度在 1~4m,松动圈最大厚度为 6~8m。松动圈内围岩变形除了渗流作用导致的孔隙率增大,主要是砂岩中颗粒骨架松动变形、膨胀扩容,致使岩石结构破坏,岩体纵波速度大大降低,含水率增大,岩石强度降低。

4.3 岩石剪切变形

天然状态的砂岩呈巨厚层状,多呈整体状结构,偶见层理,节理裂隙不发育。而通过边墙拆换拱段以及侧壁洞室的地质素描观察,含水率较低的砂岩在洞室边墙部位往往产生一系列平行的中陡或陡倾剪切裂隙,即劈裂现象较多,是结构型扩容的一种,也是低含水率砂岩破坏与变形的机理之一。

5 结 论

(1)上第三系砂岩具有泥质弱胶结、未胶结、低强度的主要特点。隧道开挖前围岩整体性较好,承载力高,且相对稳定,但洞室开挖改变了原有的地下水渗流条件,引起岩体的含水率明显增大,使围岩稳定性迅速变差,产生涌水、涌砂等工程地质问题。

(2)通过电镜扫描岩石微观结构,表明地下水渗流条件与围岩应力状态变化会引起岩石微观结构的改变,具体表现为砂岩孔隙率增大以及颗粒骨架松动变形而富水,进而导致砂岩软化与变形。

(3)上第三系砂岩属于极软岩,围岩应力调整往往在边墙部位产生一系列平行的中陡或陡倾剪切裂隙,即劈裂现象较多,是结构型扩容的一种,也是低含水率砂岩破坏与变形的机理之一。

(4)上述砂岩软化与变形机理的认识表明,大断面富水极软砂岩隧道支护设计应以减少扰动砂岩或不改变地下水渗流条件为主导思想。因此作者认为冷冻法施工是阻止地下水渗流以及岩石微观结构变化的理想支护方案。

参 考 文 献

[1] 董兰凤. 兰州第三系砂岩工程特性研究[J]. 兰州大学学报, 2003, (11): 90~93.
Dong Lanfeng. Study on the engineering properties of tertiary sandstone in Lanzhou. Journal of Lanzhou University, 2003, (11): 90~93.

[2] 黄涛, 彭道平. 兰渝线桃树坪、胡麻岭隧道第三系含水砂岩水文地质条件与围岩稳定性关系研究报告[R]. 成都: 西南交通

大学, 2013. 1.

Huang Tao, Peng Daoping. Study of the Relationship between Hydrogeological Condition and Stability of Surrounding Rock of Tertiary System Water-Bearing Stone of Peach Tree Outlet, Flax Ridge Tunnel. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013. 1.

- [3] 程强, 寇小兵, 黄绍槟, 等. 中国红层的分布及地质环境特征[J]. 工程地质学报, 2004, 12(1): 34~40.
Cheng Qiang, Kou Xiaobing, Huang Shaobin, et al. The distributes and geologic environment characteristics of red beds in China. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(1): 34~40.
- [4] 彭华, 吴志才. 关于红层特点及分布规律的初步探讨[J]. 中山大学学报, 2003, (5): 109~112.
Peng Hua, Wu Zhicai. Preliminary discussion on the characteristics and distribution of red beds. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2003, (5): 109~112.
- [5] 赵澄林, 朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 北京: 中国石油工业出版社, 2001.
Zhao Chenglin, Zhu Xiaomin. Sedimentary Petrology. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001.
- [6] 甄秉国. 第三系砂岩复杂的水稳特性地质专题研究报告[R]. 西安: 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 2011, 12.
Zhen Bingguo. Tertiary Sandstone Complex Geological Study of the Characteristic of the Water Stability Report. China Railway First Survey and Design Institute Co., Ltd., 2011, 12.
- [7] 陈斌斌. 兰州市区红层砂岩地基承载力探讨[J]. 甘肃科技, 2003, 19(11): 141~142.
Chen Binbin. Discussion on the bearing capacity of red sandstone foundation in Lanzhou city. Gansu Science and Technology, 2003, 19(11): 141~142.
- [8] 曾祥勇, 邓安福. 红层软岩强度特征的研究[A]. 全国第 8 次岩石力学与工程学术大会论文集[C]. 2002, 8: 198~201.
Zeng Xiangyong, Deng Anfu. Study on strength characteristics of red-bed soft rock. Proceedings of the Eighth National Symposium of Rock Mechanics and Engineering. 2002, 8: 198~201.
- [9] 蒋爵光. 铁路工程地质学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1997.
Jiang Jueguang. Railway Engineering Geology. Beijing: China Railway Publishing House, 1997.
- [10] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1981.
Zhang Zhuoyuan, Wang Shitian, Wang Lansheng. Principles of Engineering Geology Analysis. Beijing: Geological Publishing House, 1981.
- [11] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
Cai Meifeng. Rock Mechanics and Engineering. Beijing: Science Press, 2002.
- [12] 铁道第一勘察设计院. 铁路工程地质手册[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999.
China Railway First Survey and Design Institute. Manual of Railway Engineering Geology. Beijing: China Railway Publishing House, 1999.