

Summary of the Present Research for the Engineering Characteristics of Gypsum-Bearing Stratum and Its Impact to Tunnel Engineering

Chaojun Wu, Yongli Hu, Jiahai Liu, Xiaopeng Qin, Zhongyong Zhang

Ji'nan Rail Transit Group Co. Ltd., Ji'nan Shandong
Email: chjun0228@126.com

Received: Mar. 25th, 2020; accepted: Apr. 8th, 2020; published: Apr. 16th, 2020

Abstract

Under the long-term dynamic effect of groundwater, the gypsum-bearing stratum will have complex damage (e.g. swelling damage and erosion damage) to underground structures and especially to tunnel engineering. Several long tunnels of Jinan-Laiwu high-speed railway in the central mountain area of Shandong Province, will suffer a lot of damage by the gypsum-bearing stratum widely distributed along the railway line. In order to fully recognize the gypsum-bearing stratum, and prevent its damage to the project, the geological causes and engineering characteristics of the gypsum-bearing stratum are investigated and analyzed. Afterward, the damage and controlling measures of the gypsum-bearing stratum on the tunnel structure are summarized. Finally, several suggestions are put forward for further research on the engineering characteristics of gypsum-bearing stratum, improving the safety and durability of tunnel engineering in gypsum-bearing stratum.

Keywords

Gypsum-Bearing Stratum, Tunnel Engineering, Geological Causes, Engineering Characteristics

含膏盐地层的工程特性研究现状及其对隧道工程的影响

武朝军, 胡永利, 刘家海, 秦晓鹏, 张中勇

济南轨道交通集团有限公司, 山东 济南
Email: chjun0228@126.com

收稿日期: 2020年3月25日; 录用日期: 2020年4月8日; 发布日期: 2020年4月16日

摘要

含膏盐层在地下水的长期作用下,对周边的隧道结构等地下结构产生膨胀力、溶蚀损伤等复杂的破坏作用。新建济莱高铁有多个长大隧道穿越鲁中山区,沿线广泛分布的含膏盐层,为了对含膏盐地层有充分的认识以采取适当措施防止工程建设和运营维护过程中含膏盐地层对隧道结构的损伤,在充分探明沿线含膏盐地层分布规律的基础上,调研分析了含膏盐层的地质成因、工程特性,总结了含膏盐层对隧道结构的病害和防治措施,并针对今后对含膏盐层的工程特性的进一步研究和含膏盐地层隧道工程的安全措施提出了建议。

关键词

含膏盐层, 隧道工程, 地质成因, 工程特性

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

含膏盐地层的概念常见于油气地质领域的相关文献中,该类地层塑性较好,具有较强的毛细管封闭能力,是大众型油气田很好的盖层,在区域分布上与已经探明的大油气田相关性较高[1]。含膏盐地层通常系指含有石膏或硬石膏的一套蒸发沉积岩地层,形成于海盆或湖盆水体遭受蒸发、浓缩之后的盐类结晶物[2]。硬石膏水化生成石膏,石膏在一定的条件下脱水又能生成硬石膏。膏盐岩的造岩矿物以硬石膏、石膏为主,同时还含有少量的白云石、方解石、滑石等其他矿物。在不同区域,由于含膏盐地层的氯化物(如钾盐)、硫酸盐(如石膏等)组分的不同,具有不同的物理化学性质。

含膏盐岩在整个地质沉积历史中均有广泛分布。全球范围内膏盐岩在陆地上的分布面积能够达到百分之五十[3]。在我国北方地区,石膏质岩主要存在于寒武系-奥陶系中,在南方则主要存在于中-下寒武系、石炭系、中-下三叠系及白垩系-古近系[1]。可见,从古生代的寒武纪一直到新生代的第三纪,几乎每个地质时代都有膏盐岩的沉积。

在工程建设中对含膏岩地层研究也由来已久,在我国较早可追溯至对1970年建成通车的成昆铁路的运营维护工作。成昆铁路穿越含膏岩地层区域的隧道结构工后损伤严重,很多学者对含膏盐地层的工程地质特性及隧道结构损伤机理进行了研究[4]。但是,在之后的很多铁路隧道建设过程中,含膏盐地层对隧道衬砌结构的病害一直未得到根本解决。2007年建成的石太客运专线太行山隧道[5]、2013年建成的瓦日铁路南吕梁山隧道[6]都由于这类含有硬石膏、石膏的特殊岩体的特殊的工程性质而造成了许多的病害。

在新建济南至莱芜高速铁路工程沿线,勘察揭露了广泛分布的含膏盐地层,而且全线共计24座隧道,总长超过40公里,因此,有必要对含膏盐地层的分布特点、成因、工程特性的研究进行系统总结,汲取既有的理论研究成果、实践经验,并分析研究现状中的不足之处,以进一步警示工程实践并采取必要措施。

2. 工程概况

新建济南至莱芜高速铁路线路是规划山东省“三纵三横”快速铁路网的重要组成部分,穿越鲁中隆起和泰莱凹陷区域,全长117.503 km。工程地质勘察资料揭示沿线分布的奥陶系马家沟群阁庄段(O_2m^6)、

五阳山组(O_1m^m)、土峪组(O_1m^l)、寒武奥陶系九龙群三山子组($C_3-O_1j^s$)、寒武系下统长清群朱砂洞组丁家庄段(C_1c^{2d})均有含膏溶角砾岩及石膏结晶的分布,在此统称为含膏盐地层。在区域研究成果中,沿线下寒武朱砂洞组亦有含膏盐层分布[7]。济莱高铁沿线含膏盐层分布规律如图1所示,里程总长约20 km,其中隧道通过长度为6.401 km。

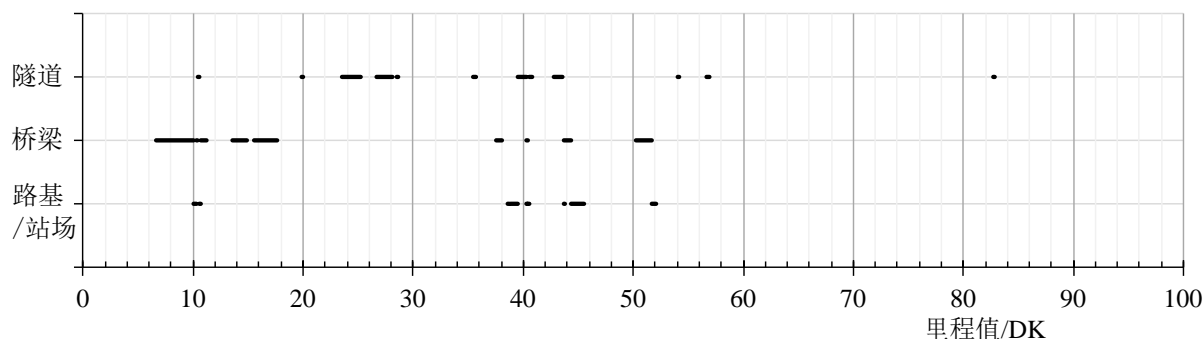


Figure 1. Distribution of gypsum-bearing stratum
图 1. 济莱高铁沿线含膏盐层分布示意图

通过对含膏盐地层区域的地表水、地下水进行侵蚀程度分析,发现在 DK60 里程之前均无侵蚀性,在 DK80~DK83 里程之间 SO_4^{2-} 测试结果显示为弱腐蚀性。根据研究资料分析,隧道开挖等工程建设活动会改变局部的地下水环境,使得原本含膏盐地层中的石膏吸水膨胀,并且析出更多 SO_4^{2-} 离子,使得工程建成后较长的一段时间内,周围水环境中的 SO_4^{2-} 离子含量持续增高,对工程结构形成膨胀力和腐蚀性双重侵害。因此,工程勘察过程中对水环境的监测结果,不能降低对含膏盐层危害的警惕作用。

3. 含膏盐层的历史成因

含膏盐层具有特定的沉积环境,主要发育于构造沉降速率小于岩层沉积速率的盆地或断裂凹陷区域,此时的水环境由海洋岸边半封闭性的潟湖逐渐转化为内陆封闭性的盐水湖,水体的含盐量急剧增高,此时大量膏盐岩开始沉积。地层中的膏盐岩的主要是石膏和白云质石膏,其次还有膏质白云岩。在浅部地表,由于含膏盐地层长期受到淡水的淋滤溶蚀作用,原本成层分布的膏盐岩出现挤压和塌陷,形成了工程上危害性比较大的膏溶角砾岩,先后有多位学者就膏盐岩坍塌及膏化过程进行了研究。

张凤岐和韩行瑞[8]在分析华北地区寒武-奥陶灰岩岩溶发育规律时指出,区域内中奥陶系普遍分布有石膏夹层,受现代岩溶作用影响,在地表及浅层部位的石膏已经少见,常见的是大量层次不清的膏溶角砾岩,该岩层既非原生沉积,又非构造作用,而是膏溶作用的产物。王兆升和沙庆安[9]经过进一步研究,详细介绍了中奥陶系膏溶角砾岩的形成过程:含膏盐层原生沉积构造破坏并部分角砾化;含膏盐层开始溶解流失直到发生大规模沉陷形成角砾状含膏盐岩,随后角砾状岩层进一步受地下水、地表水的溶解,使残存的膏盐溶解流失掉,白云岩角砾失去支撑,随即产生压实作用,部分孔隙则充填有方解石胶结物,形成典型的膏溶角砾岩,如图2所示。这类关于膏溶角砾岩的成因描述称为膏溶坍塌成因说。

胡文寿和于俊清[10]通过对山西晋中祁临段高速公路工程中遇到的膏溶角砾岩的工程特性的研究,认为该区域膏溶角砾岩的特性符合膏溶坍塌成因说:由白云质灰岩或白云岩组成;由原岩崩塌堆积而成,棱角明显,大小悬殊。另外,由于胶结物是在地下水流动条件下生成的,故胶结物往往围绕角砾形成典型的角砾状、条带状联合构造,致使岩石外观呈铁丝网状花斑,学者称为“鸡丝网笼”构造,这是膏溶角砾岩的典型标志。

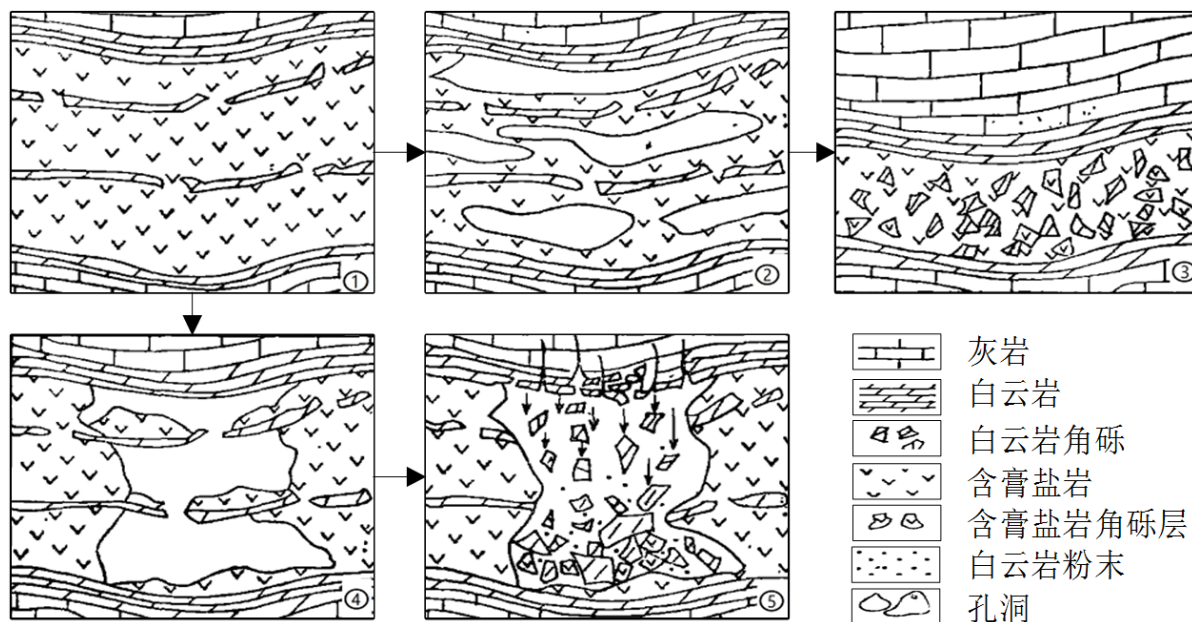


Figure 2. The forming process of gypsum karst breccia

图 2. 含膏盐岩溶蚀膏化过程示意图

4. 含膏盐地层的工程特性研究

自然界中含膏盐地层的存在形式各异, 不同学者根据矿石构造特征以及成因不同将膏盐岩分为了很多种, 其中最典型的、在工程中最常被提及的就是膏溶角砾岩, 先后有很多学者基于含膏盐层以混凝土的腐蚀性和膨胀性为出发点对膏溶角砾岩的工程特性进行了研究。

刘艳敏等[11]对硬石膏的重塑样进行了室内土工试验, 研究发现硬石膏岩水化膨胀过程十分缓慢, 72 h 膨胀力仅为 2.24 kPa, 并且膨胀力缓慢的增长, 预计最终膨胀力可达 584~840 kPa。因此, 含膏盐层对于建成后地下结构的破坏是长期的。

孟丽苹[12]通过对膏溶角砾岩进行的扫描电镜、能谱分析、X 射线衍射分析及热分析等一系列室内试验, 指出含膏角砾岩主要矿物成分以白云石和方解石为主, 次要矿物主要有蒙脱石、伊利石、绿泥石及其混层矿物等黏土矿物。彭结兵[13]通过对不同含水率下膏溶角砾岩的单轴和三轴压缩试验, 得到了膏溶角砾岩强度、弹性模量、泊松比与含水量的关系, 研究认为, 含膏盐层初始含水量对于其膨胀力以及变形特性均有较大影响, 含水率越大, 其膨胀力越大, 而强度和弹性模量则越小。

邓建华[14]研究得到了膏溶角砾岩的水岩作用的损伤机理, 吸水时的岩石中微缺陷附近的粘土矿物发生物理化学作用, 使得水进入晶层之间形成水分子层, 造成粘土矿物的膨胀而产生膨胀应力, 产生微观裂纹, 导致岩石强度下降, 失水时则发生收缩, 同样产生微观裂纹, 为岩层再次吸水提供了通道, 加速含膏盐层的损伤破坏。李尤嘉[15]通过细观观测试验发现膏溶角砾岩的损伤微裂纹的发展和演化规律在不同阶段具有明显的特征, 得到不同含水率下含膏盐岩的三种破坏形式: (a) 张拉劈裂破坏、(b) 张拉和剪切混合破坏、(c) 剪切滑移破坏, 如图 3 所示。

含膏岩层的腐蚀性主要是因为遇水析出的 SO_4^{2-} 离子。硫酸盐对混凝土侵蚀性的研究取得了很多成果。梁咏宁等[16]和刘亚辉等[17]研究了硫酸盐溶液的阳离子类型、浓度、PH 值等因素对于混凝土侵蚀作用的影响规律。张磊等[18]研究了硫酸盐对硬化混凝土的侵蚀破坏机理, SO_4^{2-} 离子对骨料的影响很小, 对水泥浆体的破坏是主要原因。

综上，既有研究从含膏岩层的基本物理力学特性的研究为出发点，开展了大量室内试验，且取得了一定的研究成果，但由于含膏盐层分布及成因不明、结构多变、成分复杂等特点，其工程地质特征无法统一定义。含膏岩层膨胀性及腐蚀性涉及物理破坏和化学反应等复杂影响，而且需要漫长的时间才能起到作用，导致这方面虽然有较多的研究成果，但距离直接指导工程应用尚有一定的距离。

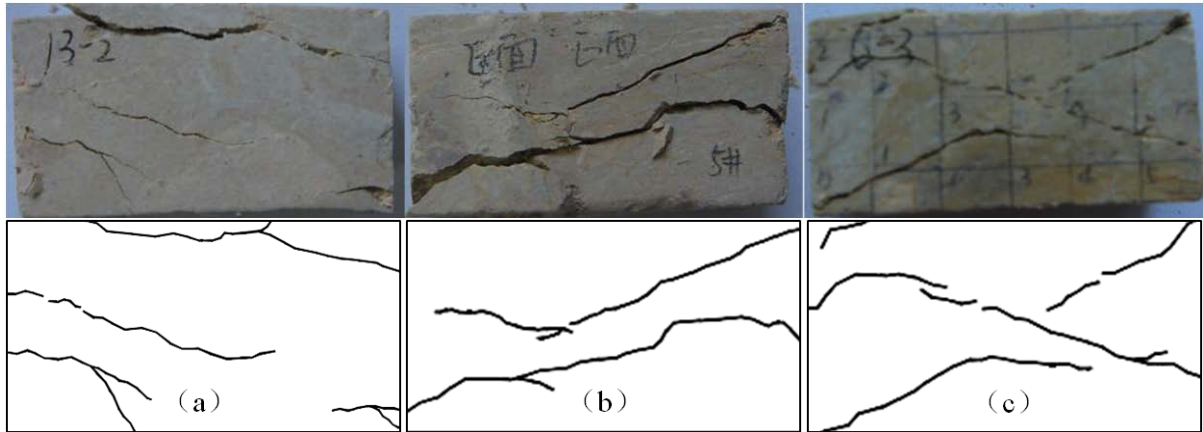


Figure 3. Three collapse mode of gypsum-bearing stratum
图 3. 含膏盐岩的三种破坏形式

5. 含膏盐层中隧道的病害及防治措施

膏岩对隧道工程的影响，主要表现为对混凝土的化学腐蚀和膨胀变形破坏两方面。渗滤过膏岩的地下水，由于含有相当数量的硫酸根离子，因而具有硫酸盐侵蚀。膏岩中含有的黏土矿物(如伊利石、绿泥石与蒙脱石混层等)以及硬石膏、无水芒硝等膨胀性盐类，遇水后会迅速产生明显的膨胀变形，对混凝土结构产生物理损伤破坏。

以 1966 年建成的成昆铁路百家岭隧道为例。在建成 11 年后的 1977 年，隧道混凝土结构物在遭受硫酸盐侵蚀作用的情况下强度降低，未危及线路的正常运营，但局部混凝土骨料误用含膏盐层造成混凝土严重腐蚀[4]。在近 40 年后，隧道内凡是含膏盐层的地段渗水严重，局部围岩严重侵蚀，出现溶洞并有泥浆状流体[19]。经过分析，病害产生的原因大部分是围岩膨胀与地下水侵蚀共同作用的结果，导致拱部、边墙部严重开裂、掉块，整体道床开裂、翻浆。成昆铁路的教训在最新建成的南吕梁山隧道再次出现，根据铁总对隧道病害的调查通报，与百家岭隧道病害原因基本一致，详情见表 1。由此可见，含膏盐层的性质比较复杂，病害难以防治。

Table 1. The engineering properties of typical tunnels in gypsum-bearing stratum
表 1. 各典型含膏岩层隧道的工程性质

项目	水柏铁路银山隧道	南吕梁山隧道	成昆铁路	济莱高铁
地层年代	三叠系中统	奥陶系中统	白垩系上统	寒武-奥陶系
主要岩性	白云岩、泥质白云岩，含数层石膏	膏溶角砾岩夹泥灰岩，含石膏及膨胀性黏土矿物	砂质泥岩为主，含约 5%~40% 的石膏、钙芒硝等	含膏溶角砾岩及石膏结晶
水文地质	碳酸盐岩裂隙溶隙水和基岩裂隙水，含大量 SO_4^{2-} 、 HCO_3^-	同前，侵蚀等级 H1、Y1~Y2	基岩裂隙水，侵蚀等级 H3、Y4、L2	地下水具硫酸盐侵蚀，局部侵蚀等级为 H2、Y2
主要侵蚀类型	隧道二衬混凝土腐蚀形成砂石混合物	岩层膨胀结晶，挤压二衬致其开裂变形	大部为岩层膨胀挤压二衬致使开裂变形，局部侵蚀破坏	/

李建华和焦瑞虎[20]以及吴银亮[21]总结了含膏盐地层在工程实践中的经验教训,对隧道在含膏盐层围岩中的施工和运营提出了建议,指出以下几点:

1) 施工期间不宜改变隧道周边围岩的稳定和水环境,宜采用无爆破掘进法(如掘进机、风镐、液压镐等)进行开挖;

2) 在开挖过程中宜不分部或少分部,多采用正台阶法、侧壁导坑法和“眼镜法”;

3) 施工过程持续检验地下水中有硫酸根离子的含量,正确选择抗侵蚀性好的水泥、外加剂和掺合料技术,配制高抗渗的混凝土。

综上所述,现有实践经验对含膏盐破坏防治的工程措施的主要体现在两个方面,一是减小对围岩的破坏,二是保持既有水环境。但是,围岩的稳定性往往涉及到很多的方面,涵盖的项目也比较多,需要结合现场围岩稳定性观测、膨胀应力测量,以及围岩的膨胀变形及溶蚀情况、地下水离子含量及浓度情况的动态监测,综合各种因素以实时掌握工程地质的实际特性。因此,在工程实践中,应对含膏盐层中隧道支护结构变形及应力情况进行长期量测和监测,结合室内试验及理论分析成果,以更加准确的掌握含膏盐地层的工程性质。

6. 总结

在交通强国的国家战略指引下,越来越多的高速铁路穿过崇山峻岭,因此对于分布在山区丘陵地带的含膏盐岩这种特殊岩层,其工程性质越来越受到关注。本文基于济莱高铁沿线含膏盐地层的广泛分布及含膏盐地层中隧道病害防治难度为背景,调研了含膏盐地层的成因、工程特性、工程病害机理和防治措施,既有研究成果可以有效提升对济莱高铁沿线含膏盐地层的认识和工程建设过程中的安全性。但是,对于含膏盐的研究基本上还处于初期的探索阶段,要最终形成成熟的应用技术,还需要更具创新性的研究和大量细致的试验工作。

7. 建议

在下一步工作中,应立足于区域地质构造历史并与周围岩石矿物组成相结合进行研究,以明确区域含膏盐地层的成因,并针对工程中揭露的典型含膏盐层补充开展大量实验研究,明确其各项力学指标,并结合施工中的不同情况,采取相应的工程措施,并辅助以相应的室内模型试验,形成理论数据与现场经验相结合的系统成果,以直接指导含膏盐层隧道工程的勘察设计、工程建设和运营维护工作。

基金项目

山东省自然科学基金(ZR2017MEE065)、住房城乡建设部科学技术项目(2016-K4-053; 2016-S3-008)、山东省住建厅科学技术项目(2019-K7-12; FW-20161001: A7)、济南市社会民生重大专项(201704140)。

参考文献

- [1] 金之钧,龙胜祥,周雁,等. 中国南方膏盐岩分布特征[J]. 石油与天然气地质, 2006(5): 571-583+593.
- [2] 张晓峰. 四川盆地寒武系膏盐岩特征与成藏条件研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2011.
- [3] Ford, D.C. and Williams, P.W. (2007) *Karst Geomorphology and Hydrology*. John Wiley & Sons Ltd., Chichester.
- [4] 罗健. 含膏岩系及其对隧道工程的影响[J]. 西南交通大学学报, 1978(1): 63-72.
- [5] 熊江陵,李建华. 太行山隧道膏溶角砾岩工程特性试验研究[J]. 铁道标准设计, 2007(4): 25-28.
- [6] 刘高金,张广泽,冯涛. 不同岩性的含盐地层隧道工程侵蚀成因探讨[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(10): 15-19.
- [7] 王淑丽,郑绵平. 我国寒武系膏盐岩分布特征及其对找钾指示[J]. 矿床地质, 2012, 31(S1): 487-488.
- [8] 张凤岐,韩行瑞. 华北地区寒武奥陶系可溶岩与岩溶[J]. 勘察科学技术, 1986(1): 32-38.

- [9] 王兆升, 沙庆安. 华北地区中奥陶统蒸发盐岩溶解坍塌角砾岩化作用[J]. 地质科学, 1991(3): 246-253+306.
- [10] 胡文寿, 于俊清. 特殊性岩土膏溶角砾岩的工程特性研究[J]. 长安大学学报(地球科学版), 2003, 25(1): 37-41.
- [11] 刘艳敏, 余宏明, 汪灿, 等. 白云岩层中硬石膏岩对隧道结构危害机制研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2704-2708+2752.
- [12] 孟丽苹. 华北地区特殊性岩土含膏角砾岩的膨胀性及腐蚀性研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [13] 彭结兵. 膏溶角砾岩增湿变形特性试验研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [14] 邓建华. 膏溶角砾岩力学特性及水损伤模型研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- [15] 李尤嘉. 膏溶角砾岩水损伤特性和机理的细观力学试验研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [16] 梁咏宁, 袁迎曙. 硫酸盐侵蚀环境因素对混凝土性能退化的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(4): 452-457.
- [17] 刘亚辉, 申春妮, 方祥位, 等. 溶液浓度和温度对混凝土硫酸盐侵蚀速度影响[J]. 重庆建筑大学学报, 2008, 30(1): 129-135.
- [18] 张磊, 杨鼎宜. 混凝土硫酸盐侵蚀过程及主要产物研究进展[J]. 混凝土与水泥制品, 2006, 12(6): 19-22.
- [19] 石有才. 既有线膨胀围岩隧道病害整治施工技术[J]. 现代隧道技术, 2005, 42(1): 61-67.
- [20] 李建华, 焦瑞虎. 膏溶角砾岩的工程特性及其隧道施工技术[J]. 隧道建设, 2009, 29(S2): 92-96.
- [21] 吴银亮. 石膏质岩工程地质特性及其对隧道混凝土结构危害机制研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 中国地质大学, 2013.