

文章编号:1006-2106(2008)06-0056-05

函谷关隧道砂质黄土地层支护受力测试分析*

杨建民**

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要:研究目的:针对郑西客专函谷关大断面砂质黄土隧道,隧道开挖过程中初期支护受力及变形特点,进行砂质黄土隧道支护合理性的研究,提出有效的支护措施。

研究结论:结合函谷关隧道设计施工及科研测试,通过现场支护变形、内力量测,分析总结浅、深埋条件下大断面砂质黄土隧道围岩压力及支护受力特性后得知:对于大断面砂质黄土隧道,采用大刚度型钢钢架,结合网喷微纤维混凝土等初期支护措施,是控制土体变形、保证施工安全的有效措施。

关键词:函谷关隧道;砂质黄土;支护;测试分析

中图分类号:U45 **文献标识码:**A

Test and Analyses of Bracing Stress on Sand Loess Stratum for Hanguguan Tunnel

YANG Jian-min

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

Abstract: Research purposes: Based on the characteristics of primary bracing stress and its deformation during the excavation of tunnel, the researches are done on the bracing rationality for sand loess tunnel and the rational bracing measures are presented for the purpose of overcoming the problem in construction of large sectional sand loess Hanguguan Tunnel.

Research conclusions: The tests and analyses of the bracing deformation, inner force, bracing stress characteristics of deep-buried large sectional sand loess tunnel show adopting large section steel frame along with the primary bracing of fiber concrete is an effective way for control of soil deformation and ensuring the construction safety to the large sectional sand loess tunnel.

Key words: Hanguguan Tunnel; sand loess; bracing; test analysis

郑州至西安铁路客运专线,线路全长 458 km,是我国在黄土地区新建设计时速为 200 km/h 以上的第一条客运专线。全线隧道共计 38 座,总长约 77 km,其中黄土隧道总长 50 km。全线黄土隧道工程地质特点主要分为 2 种,三门峡市以东为粘质黄土、以西为砂质黄土。砂质黄土隧道由于土质较松散、稳定性差、承载力低的特点,成为全线隧道施工的难点。笔者通过

函谷关隧道的设计、施工、科研等工程实践,对砂质黄土隧道支护结构受力进行了分析。

1 工程概况

函谷关隧道全长 7 851 m,最大埋深 224 m,开挖面积 157 ~ 164 m²,是目前世界上最长、断面最大的黄土隧道。该隧道进出口位于第四系上更新统(Q₃)砂

* 收稿日期:2008-04-08

** 作者简介:杨建民,1968 年出生,男,高级工程师。

质黄土地层中,隧道中段位于第四系中更新统(Q_2)以砂质黄土为主夹黏质黄土地层中。其中砂质黄土天然含水量为11.8%,隧道洞身位于地下水位以上。围岩级别为IV级围岩4350 m,V级围岩3501 m。隧道3次下穿连霍高速公路,下穿段覆土厚40~70 m。如

此大断面砂质黄土隧道的修建,在我国尚无工程可借鉴,通过函谷关隧道近3年来的施工和现场测试表明,该隧道结构设计是安全合理的。函谷关隧道纵断面情况如图1所示。

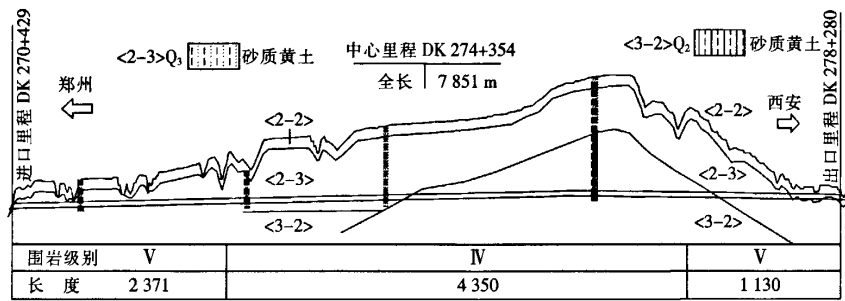


图1 函谷关隧道洞身纵断面示意图(单位:m)

2 结构设计

函谷关隧道结构设计:锚网喷+型钢钢架组成初期支护,钢筋混凝土二次衬砌。结合围岩级别,衬砌分为IV级黄土、V级黄土2种形式。拱墙初期支护喷射

混凝土掺加合成纤维,掺量为 1.2 kg/m^3 ;二次衬砌为钢筋混凝土,主筋采用每延米5根 $\phi 22$ 钢筋。施工方法V级围岩CRD法、IV级围岩弧形导坑法。CRD法施工之临时竖撑和横撑均采用工18工字钢架,竖撑喷射混凝土厚度20 cm。函谷关隧道支护参数如表1所示。

表1 函谷关黄土隧道支护参数表

衬砌类型	初期支护										超前 φ50 导管 长度 /m	二次 衬砌 厚度 /m	
	喷层 /cm	系统锚杆(间距 1.0 m×1.0 m)						钢架		φ8 钢筋 网间距 /cm			预留 变形 量/cm
		位置 拱部	锚杆 类型	长度 /m	位置 边墙	锚杆 类型	长度 /m	钢架 类型	间距 /m				
Ⅳ级黄土	30		药包	2.5		砂浆	3.5	I22a	0.8	20×20	12	3.5	50
Ⅴ级黄土	35		药包	2.5		砂浆	4.0	I25a	0.6	20×20	15	3.5	60

3 支护受力测试分析

开展现场测试的目的,在于通过测试数据分析,确定深、浅埋隧道围岩、初支、二衬压力大小及分布规律,初支变形规律,研究设计支护系统的受力性状,评价结构稳定性,验证、优化支护参数。并结合施工对CRD法拆除临时支撑过程的荷载转移,进行拆撑安全分析。测试断面分为进口4个浅埋断面,洞身2个深埋内力测试断面。测试内容包括:初期支护净空周边变形(拱顶沉降、拱脚沉降及收敛)、围岩压力、型钢钢架应力、初支与二衬接触压力、锚杆轴力、衬砌混凝土应力。函谷关隧道测试断面布置如表2所示。

3.1 围岩压力

采用振弦式压力盒进行量测,测试中采取跟踪测量,分部开挖分部测试,直至压力基本稳定为止。

表2 函谷关隧道测试断面布置情况

试验段地质	Q3新黄土覆盖层30 m				Q3新黄土覆盖层110 m	
施工方法	CRD工法六步开挖				短台阶弧形导坑开挖	
试验段长度	50 m				35 m	
断面里程	DK 270+504	DK 270+515	DK 270+525	DK 270+535	DK 273+005	DK 273+015

3.1.1 浅埋段围岩压力

隧道进口浅埋测试断面处拱顶覆土30 m,洞内采用CRD法施工,地表出现多道纵横向裂缝,裂缝随掌子面掘进而向前发展。浅埋围岩压力共有3个测试断面,每个断面共有10个测点。测试时间共历时160 d。测试结果表明围岩压力普遍较小,一般不足100 kPa,拱顶及左侧拱腰的围岩压力较大。时态曲线变化较为

平稳,无明显起伏波动,在仰拱开挖后有部分测点压力增大。最终围岩压力分布如图 2 所示。

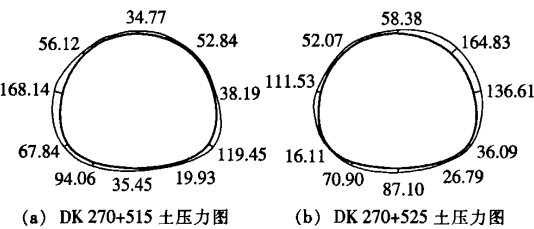


图 2 围岩 - 初期支护接触压力分布图(单位:kPa)

3.1.2 深埋段围岩压力

深埋段 DK 273 + 005 处覆土厚度 110 m, 围岩 - 初期支护接触压力的最大值为 246.9 kPa, 接触压力分布不均匀。从围岩 - 初支接触压力时程曲线来看, 各台阶的开挖都会引起接触压力调整, 而且初期支护封闭后各点的压力值仍然有一定的增长。围岩压力分布如图 3 所示。

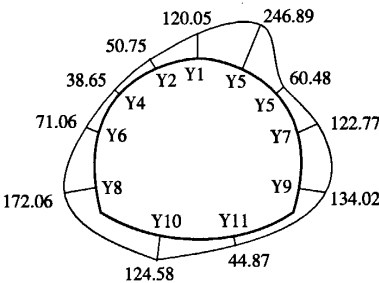


图 3 DK 273 + 005 围岩压力图(Y 指压力盒,单位:kPa)

3.2 型钢钢架应力

每个测点设 2 个表面应变计(工字钢两翼缘内侧)。函谷关隧道进口段采用的是 CRD 法施工, 横撑和边墙的钢架也焊接表面应变计。元件焊接在安装后的钢架上, 并安装保护罩。

3.2.1 浅埋段钢架应力

测试结果以受压为主, 其中中隔壁最大达 -52 MPa, 横撑最大达 -68 MPa, 拱部最大达 -83 MPa, 边墙最大达 -60 MPa, 仰拱最大达 50 MPa。浅埋段钢架外环应力分布如图 4 所示。

3.2.2 深埋段钢架应力

监测了两个断面, 分别为 DK 273 + 005、DK 273 + 015 断面。测试结果表明, 钢架应力分布不均匀, 除个别点的拉应力较大外(达到约 360 MPa), 其余大部分测点均为压应力。钢架外侧压应力最大值为 -167.5 MPa, 内侧最大值为 -221.6 MPa; 外侧最大拉应力为 335.6 MPa, 内侧最大拉应力为 24.3 MPa。均小于相关规范要求。

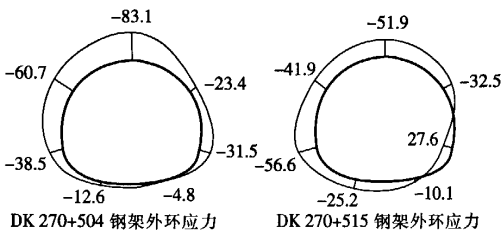


图 4 钢架外环应力分布图(单位:MPa)

3.3 初期支护变形量测

采用非接触观测方法, 该系统由高精度的全站仪, 便携式微机和回复式反光测点(徕卡反射膜片)组成。通过精密测角和测距的方式求得净空三维位移的变化值, 根据变形数据分析净空位移的变化发展规律。

3.3.1 浅埋段量测情况

DK 270 + 504 断面的拱顶沉降测点, 在历时 134 d 的监测中累计沉降 210 mm, 最大沉降速率 9.0 mm/d, 仰拱封闭后平均沉降速率 0.40 mm/d, 拱顶沉降变化比较缓慢, 趋近稳定。两边墙处最大收敛达 119 mm, 最大收敛速度达 19 mm/d; 左侧导坑最大收敛达 51 mm, 最大收敛速度达 12 mm/d; 右侧导坑最大收敛达 27 mm, 最大收敛速度达 6 mm/d。

3.3.2 深埋段量测情况

初期支护的拱顶沉降在 -143 ~ -147 mm。各断面的拱顶沉降在封闭时的比例为基本稳定后总沉降的 93%, 封闭后的沉降比例为 7%, 说明初期支护的沉降在封闭后变化量小。拱顶拱脚的最终差异沉降范围在 15 ~ 22 mm, 占隧道拱顶总沉降的 10% ~ 15%, 说明初支主要以整体下沉为主。各断面差异沉降分析如表 3 所示。

表 3 各断面差异沉降分析表(以左拱脚为基准)

(单位:mm)

研究断面	总的差异沉降	断面封闭后差异沉降	封闭后差异沉降与总差异沉降比值	总差异沉降与断面总沉降比值
DK 273 + 005	22.0	3.0	14%	15%
DK 273 + 015	15.0	7.0	47%	10%
DK 273 + 020	15.0	2.0	13%	10%

3.4 初支与二衬的接触压力

初支与二衬的接触压力有 1 个测试断面, 为 DK 270 + 515, 测试时间历时 85 d, 于 06 年 9 月 30 日开始, 至 06 年 12 月结束。该断面共有 10 个测点。测试结果表明接触压力普遍较小, 除一点大于 100 kPa 以外, 其它测点均小于 100 kPa, 而且接触压力的分布

比较均匀。初支与二衬最终接触压力的分布如图 5 所示。

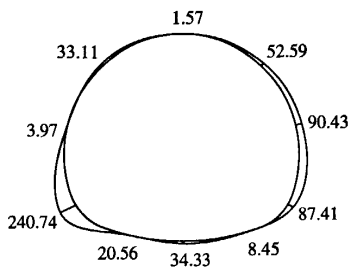


图 5 DK 270 + 515 断面接触压力图(单位:kPa)

3.5 衬砌混凝土及钢筋应力

在函谷关隧道砂质黄土地层不同埋深地段,开展了二次衬砌混凝土应力及衬砌内钢筋受力的测试。测试的目的在于分析大断面砂质黄土隧道,不同埋深情况下二次衬砌的受力状态。

3.5.1 衬砌混凝土应力

衬砌混凝土应力测试断面为 DK 270 + 515,该断面测试时间从 2006 年 9 月 30 日开始,截至时间为 2006 年 12 月 13 日。应变计在埋设后,应变值在缓慢增加,增加一定时间后(约 12 d)应变值均快速降低。稳定后,仰拱部位:外侧最大值为 5.4 MPa(拉),内侧最大值为 0.6 MPa(拉);边墙部位:外侧最大值为 1.8 MPa(拉),内侧最大值为 1.2 MPa(压);拱部:外侧最大值为 0.9 MPa(拉),内侧最大值为 -2.4 MPa(压)。

3.5.2 衬砌钢筋应力

断面 DK 273 + 005 的二衬钢筋应力测试结果表明:二衬断面钢筋大部分受压,压力比较小,仰拱部位压力值比其它部位要大,最大值在 6 MPa 左右,其余部位压力值比较小,大部分点的压力小于 2 MPa。二衬断面钢筋应力测试一周后基本稳定。

3.6 锚杆轴力

采用由钢筋测力计组装的锚杆轴力计,测试锚杆的锚固采用药包全长锚固方式。每断面布置 5 根测试锚杆,3.5 m 长锚杆设 4 个应力测点。测试结果为两侧墙锚杆均受拉(个别点除外),两侧拱肩锚杆基本都受压,拱顶锚杆部分点受拉,但量值较小。锚杆轴力值压力最大 -18.73 kN,拉力最大 17.79 kN。每根锚杆的最大轴力大部分都出现在第一个测点,距离隧道开挖面 40 cm。各锚杆轴力分布如图 6 所示。

3.7 CRD 法施工拆除临时支护测试分析

在函谷关隧道进口 CRD 法施工段开展了拆除临时竖横撑时,初期支护内力与变形测试分析。在施工过程中,当初期支护仰拱闭合成环后,即可以拆除中间

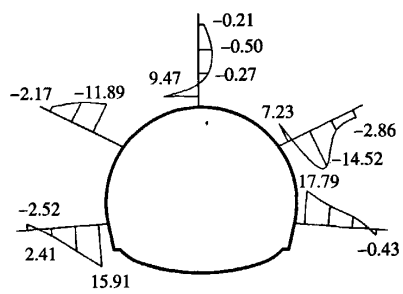


图 6 DK 273 + 015 断面锚杆轴力分布图(单位:kN)

的临时中隔壁了。从现场量测的钢架应力来看,在拆撑前后,各部位的应力虽然有一定的波动,但是基本保持稳定,且处于同一个应力状态,没有应力的转变(拉压应力的相互转变),基本稳定后为全断面受压。从量值上看,在 -123 ~ 23 MPa 之间,远小于钢架极限强度。在 10 月 27 号拆撑以后,各部应力发生了一定的变化,就目前量测的钢架最大拉压应力来看,远小于《铁路隧道设计规范》要求的抗拉极限强度 380 MPa,抗压计算强度 260 MPa。拆撑前初期支护的轴力均为压力,弯矩值较小,而且波动很小,安全系数满足要求。在 10 月 27 号拆撑后,轴力除左侧测点有小幅度的增大外,增幅在 -36.1 ~ -137.8 kN,其余测点均减小,减小幅度在 10% ~ 38%,量值减幅在 39.5 ~ 185.1 kN。弯矩值在拆撑后增减幅度在 -0.15 ~ 2.9 kN·m。弯矩值变化很小,安全系数能够满足要求。DK 270 + 504 断面在 10-27 拆撑前后,初期支护的内力及安全系数如表 4 所示。

表 4 DK 270 + 504 断面拆撑前后内力及安全系数

日期	轴力/kN	弯矩/(kN·m)	安全系数	控制标准
10-8	-2 696.4	24.7	1.9	受压控制
10-15	-2 721.4	22.4	1.9	受压控制
10-20	-2 793.3	22.9	1.8	受压控制
10-27	-2 750.9	23.8	1.8	受压控制
10-29	-2 888.5	23.9	1.8	受压控制
10-31	-2 882.7	23.7	1.8	受压控制

拆撑使初期支护的拱顶下沉几乎没有变化,而水平收敛的变化很小,幅度在 -1 ~ 2 mm 的范围,所以拆撑对于初期支护的变形影响是很小的,结构变形是稳定的。

4 结论

(1) 设计采用的型钢钢架 + 网喷微纤维混凝土及二次衬砌等支护参数,能满足施工及运营安全。

(2) 函谷关隧道进口浅埋段施工时地表开裂严重,但浅埋段围岩压力及型钢钢架受力并不比深埋段

大,结合郑西线其它砂质黄土隧道洞顶普遍开裂,而初期支护无异常的情况。说明浅埋黄土隧道即使地表产生大量裂缝,也并不是全部重量而只是小部分荷载作用在初期支护上。初期支护能保证施工安全。

(3) 黄土隧道在施工过程中初期支护下沉较大,主要是因为黄土拱脚、墙脚土质承载力低引起的。CRD 法施工的浅埋砂质黄土隧道,较台阶法施工的深埋砂质黄土隧道下沉大,当初期支护仰拱闭合后,下沉即趋于稳定。初期支护仰拱及时闭合是黄土隧道施工的关键工序,实际施工中,函谷关隧道初期支护闭合距掌子面距离控制在 25~30 m 以内。

(4) 从目前的量测数据来看,不论是浅埋段还是深埋段,二次衬砌在大断面砂质黄土隧道复合衬砌中受力较小,结构的安全储备较多。随时间延长,二次衬砌受力可能会有所变化,应进行长期观测。

(5) 系统锚杆在砂质黄土隧道中作用不明显,特别是拱部锚杆多受压,在喷网钢架支护能保证施工安

全的前提下,建议取消拱部系统锚杆,减少施工工序,使初期支护尽快封闭成环。

(6) CRD 法施工在初期支护仰拱闭合后,拆除中间临时支护过程前后,初期支护能满足安全要求。

参考文献:

- [1] 梁文灏,等. 郑西客运专线大断面黄土隧道设计与施工技术要点[C]//2006 年中国高速铁路隧道国际技术交流会论文集. 2006:147~161.
- [2] 中铁二院工程集团有限责任公司. 郑西客专黄土隧道合理支护参数科研报告中间成果[R]. 成都:中铁二院工程集团有限责任公司,2007.
- [3] 赵占厂,谢永利,杨晓华. 黄土公路隧道围岩压力测试分析[J]. 现代隧道技术,2003(4):58~61.
- [4] 原郭兵,王庆林,等. 砂质黄土大断面隧道 CRD 法施工技术[J]. 铁道标准设计,2007(增1):102~105.

(编辑 赵立兰)

(上接第 38 页)

归入边坡排水槽。

(2) 边坡设置排水槽(设骨架护坡时为截水主骨架,未设骨架护坡地段间隔 15m 左右在边坡上单独设置排水槽),将路基面以及边坡地表水引入排水沟。

(3) 路堤边坡设置灌草护坡,边坡高度大于 3 m,增设人字形浆砌片石截水骨架。

(4) 路堤坡脚平台上设置横向排水沟,连接边坡截水主骨架(排水槽)与坡脚纵向排水沟,防止边坡水冲刷路堤坡脚。

通过以上防排水工程,使路堤地段路基面、路堤边坡及边坡平台、路堤坡脚排水建筑相互衔接,形成完善的排水系统,防止或最大程度减小雨水对路基变形稳定的影响。

5.2 路堑边坡防排水

路堑边坡平台应设置平台截水沟。

根据路堑边坡岩土情况,可选择浆砌片石截水骨架内灌草护坡或锚杆钢筋混凝土框架梁内灌草护坡,防止雨水冲刷边坡。

5.3 地面排水及与边坡排水设施的衔接

地面排水包括:天沟、侧沟、排水沟。

天沟、侧沟、排水沟应与边坡排水设施等排水沟、槽、管相互衔接,保证排水通畅,并与过水涵洞、自然沟渠相连接,形成完整的排水系统。

6 结论

总之,客运专线无砟轨道铁路路基防排水十分重要,必须引起高度的重视,并开展进一步深入研究解决好以下关键技术问题:

(1) 建立路基填料水稳性检测标准,严格限制非良质填料的使用;

(2) 制定路基面沥青混凝土防水层技术条件,严格沥青混凝土防水层施工工艺;

(3) 重视地下排水设备的可维修性,进一步强化地下水发育地段低路堤和路堑基床底部地下排水泄结构设计;

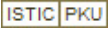
(4) 进一步做好路基防排水工程的系统优化工作。

参考文献:

- [1] 铁建设函[2005]754,客运专线无砟轨道铁路设计指南[S].
- [2] 魏永幸,等. 客运专线无砟轨道路基关键技术探讨——以遂渝线无砟轨道综合试验段为例[J]. 铁道工程学报,2006(5):39~44.
- [3] 魏永幸,等. 高导水率复合防排水板及其在铁路工程中的应用[J]. 铁道勘察,2007(3):62~64.

(编辑 赵立兰)

函谷关隧道砂质黄土地层支护受力测试分析

作者：[杨建民](#), [YANG Jian-min](#)
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](#) 
英文刊名：[JOURNAL OF RAILWAY ENGINEERING SOCIETY](#)
年, 卷(期)：2008 (6)
被引用次数：2次

参考文献(4条)

1. [梁文灏](#) [郑西客运专线大断面黄土隧道设计与施工技术要点](#) 2006
2. [中铁二院工程集团有限责任公司](#) [郑西客专黄土隧道合理支护参数科研报告中间成果](#) 2007
3. [赵占厂](#); [谢永利](#); [杨晓华](#) [黄土公路隧道围岩压力测试分析](#) [期刊论文]-[现代隧道技术](#) 2003 (04)
4. [原郭兵](#); [王庆林](#) [砂质黄土大断面隧道CRD法施工技术](#) [期刊论文]-[铁道标准设计](#) 2007 (z1)

本文读者也读过(10条)

1. [孙西濤](#). [高文学](#). [李志星](#). [邓洪亮](#). [叶春琳](#). [魏鹏巍](#). [Sun Ximeng](#). [Gao Woxue](#). [Li Zhixing](#). [Deng Hongliang](#). [Ye Chunlin](#). [Wei Pengwei](#) [浅埋偏压隧道开挖爆破振动与控制技术](#) [期刊论文]-[施工技术](#)2011, 40 (3)
2. [张金锋](#). [ZHANG Jin-feng](#) [张茅隧道1号斜井进正洞挑顶施工技术](#) [期刊论文]-[山西建筑](#)2006, 32 (8)
3. [王石光](#). [黄林冲](#). [彭立敏](#). [张运良](#). [WANG Shi-guang](#). [HUANG Lin-chong](#). [PENG Li-min](#). [ZHANG Yun-liang](#) [软弱泥质页岩隧道衬砌受力特征探讨](#) [期刊论文]-[铁道科学与工程学报](#)2005, 2 (3)
4. [金祥义](#) [富水黄土隧道坍塌体处理](#) [期刊论文]-[山西建筑](#)2009, 35 (36)
5. [王立军](#). [吴江](#). [韩桂武](#). [刘斌](#). [WANG Li-jun](#). [WU Jiang](#). [HAN Gui-wu](#). [LIU Bin](#) [监控量测技术在隧道工程中的应用](#) [期刊论文]-[有色矿冶](#)2007, 23 (2)
6. [袁海清](#). [Yuan Hai-qing](#) [泥质页岩隧道初期支护和二次衬砌结构的受力状态分析及其对隧道结构稳定性的影响](#) [期刊论文]-[湖南交通科技](#)2005, 31 (4)
7. [夏元友](#). [张冰](#). [陈向阳](#) [现场监控量测在双侧壁导坑施工中的应用](#) [期刊论文]-[中外公路](#)2008, 28 (5)
8. [陈建勋](#). [杨忠](#). [袁雪戡](#). [CHEN Jian-xun](#). [YANG Zhong](#). [YUAN Xue-kan](#) [秦岭终南山特长公路隧道大埋深段施工监测及分析](#) [期刊论文]-[建筑科学与工程学报](#)2006, 23 (3)
9. [孟庆明](#). [杨林浩](#) [函谷关隧道下穿连霍高速公路施工技术](#) [期刊论文]-[铁道标准设计](#)2007 (z1)
10. [姜久纯](#) [黄土隧道初期支护结构受力特性研究](#) [期刊论文]-[岩土工程界](#)2008, 11 (12)

引证文献(2条)

1. [辛振省](#) [砂质黄土大断面隧道施工方法优化研究](#) [期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2011 (1)
2. [鲁建邦](#) [大断面隧道挑顶施工三维数值计算分析](#) [期刊论文]-[铁道标准设计](#) 2012 (1)

引用本文格式：[杨建民](#). [YANG Jian-min](#) [函谷关隧道砂质黄土地层支护受力测试分析](#) [期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2008 (6)