

# 基于拱顶沉降控制的卵砾石地层 浅埋隧道施工优化

喻 军<sup>1,2</sup>, 刘松玉<sup>3</sup>, 龚晓南<sup>2</sup>

(1. 浙江工业大学建筑工程学院, 杭州 310014; 2. 浙江大学建筑工程学院, 杭州 310029;

3. 东南大学交通学院, 南京 210096)

**[摘要]** 某卵砾石地层浅埋公路隧道施工开挖, 围岩的稳定性与拱顶沉降存在密切的关系, 因此采用仿真分析法以拱顶沉降为控制目标, 确保围岩的稳定, 分析不同的施工方案得到拱顶沉降规律, 达到优化施工的目的; 同时, 分析了不同的开挖路径和台阶长度, 提出了一种最佳的施工方案。结果表明: 在浅埋隧道开挖时容易引起拱顶沉降, 并且随着施工方案的不同, 拱顶沉降有较大的差异。在几种施工方法中, 发现CRD法(交叉中隔墙法)比较适合, 原因是拱顶沉降最小, 应力释放较慢, 在渐近的过程中有效地实现了应力的转移, 较台阶法和CD法(中隔墙法)有大的优势, 并与现场监测进行了对比分析, 结果较为吻合。得到的结论可为类似工程提供参考。

**[关键词]** 卵砾石; 隧道围岩; 数值分析; 施工优化; 拱顶沉降; 现场监测

**[中图分类号]** TU461 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)10-0097-06

## 1 前言

随着隧道数目和规模的增加, 遇到的地质条件越来越复杂, 如高应力、软弱破碎、黄土等围岩随之出现, 其中卵砾石地层分布较广, 在隧道施工中时常遇到。如台湾的八卦山隧道、林口隧道, 大陆的小曼萨河隧道、茅山隧道等皆为卵砾石地层隧道, 该地层具有粘结力弱, 稳定性差, 砾石分布不均匀, 抗剪强度低等特点, 难以形成塌落拱, 在顶部和侧壁以及掌子面容易产生破坏, 甚至产生较大的地面沉降等工程事故。而《公路隧道设计规范》(JT-GD70—2004)尚未对卵砾石地层隧道的设计施工提出明确的规定, 因此有必要对该类地层进行施工力学研究。

这些事故的发生不但跟卵砾石的力学性质有关, 而且与施工方法、支护参数有关, 本文针对某隧道的特殊地质条件, 以控制拱顶沉降为目标, 进行

施工优化。如文献[1]针对卵砾石地层进行了支护参数的优化, 以拱顶沉降为控制目标, 优化初衬厚度和支护时机。文献[2~4]以地面沉降为控制目标进行了反分析, 达到优化施工参数的目的。

以上施工优化只是针对某一种开挖方案, 本文针对几种开挖方案, 结合支护参数进行优化设计。由于在浅埋隧道施工时, 拱顶沉降与围岩稳定存在着一定的关系, 可以研究通过控制拱顶沉降就能较好地控制围岩稳定, 优化施工方案, 保证施工安全。

## 2 卵砾石地层物理力学性质特点

### 2.1 一般卵砾石地层的特点

根据成因及产状形态, 大致可将卵砾石土分成四类: 河谷型、平地型、山地型、海岸型, 其中河谷型为间歇性洪流携带泥砂堆积在河床之上或河床抬升形成的阶地, 胶结程度差异大; 平地型为碎屑物、岩块经搬运, 在平原或山谷出口沉积而成, 胶结较

**[收稿日期]** 2012-09-30

**[基金项目]** 浙江省科技厅资助项目(2012C21074); 浙江省交通厅资助项目(2012H66); 浙江工业大学自然科学基金项目(2011XY024)

**[作者简介]** 喻 军(1978—), 男, 湖南邵阳市人, 博士后, 讲师, 主要从事隧道及地下工程的教学与科研工作; E-mail: yujunsunny@163.com

好,强度较高;山地型为河流搬运砾石至平地,结构松散,胶结不好;海岸型为海浪拍打海滨岩壁造成岩块堆积而成,磨圆度高、分选好,胶结不好。通过卵砾石地层成因及分布的全面了解,有益于判断隧道通过不同卵砾石层时可能遇到的塌方、失稳等事故。

## 2.2 本工程卵砾石地层的特点

厚层卵砾石层分布在155高地西坡,上覆下蜀组黄土,为山地型卵砾石地层。该层砾石呈次棱角状或次圆状,粒径可达60~80 cm,如图1所示。全层自上而下,砾石粒径渐大,含量增多,密实度增加。从其出露位置、地貌特征及沉积特点看,是以残积相为主的残坡积层,其形成时代属Q1-20,该层厚度大,砾石成分单一,主要为茅山组灰紫色岩屑石英砂岩。



图1 卵砾石地层照片

Fig.1 Photograph of gravel strata

为了研究不同类型的卵砾石地层围岩的稳定性,综合考虑粗细料含量比、细料料性质、粗粒料粒径、形状及排列、胶结程度、夹层情况及位置、连续性、地下水情况、地应力及覆土深度等因素,建立定量的关系,便于判断隧道围岩的稳定性,优化施工参数,节省投资,并保证施工安全。在此领域,我国台湾在八卦山隧道、观音山隧道、林口隧道等<sup>[9]</sup>进行了较多的研究,并提出了卵砾石隧道岩体分类的合理建议表及相应的支撑设计参数、辅助工法等,值得研究借鉴,而在实际设计施工时,应针对具体工程的具体地质条件进行适当调整。

## 3 卵砾石地层隧道的破坏形式及防治对策

### 3.1 卵砾石地层隧道破坏形式

不同部位卵砾石层中隧道开挖的坍塌规模、形式受夹层情况及地下水发育情况影响显著,破坏模式基本上可以分成4种情况:类型I——顶拱及其附近部位坍塌;类型II——顶拱持续向上抽坍,呈圆穹

状;类型III——侧壁两帮坍塌;类型IV——上半部开挖面土心坍塌且向前或向上抽坍,如图2所示。一般情况下,以隧道顶拱及其附近部位坍塌为主,且主要局限于开挖面附近,隧道无水段坍塌规模数量都较小,而随着水量增大,坍塌规模及数量都将增大,特别应注意在瞬间大量涌水情况下,将会造成大规模坍塌,且往往无法及时处理。

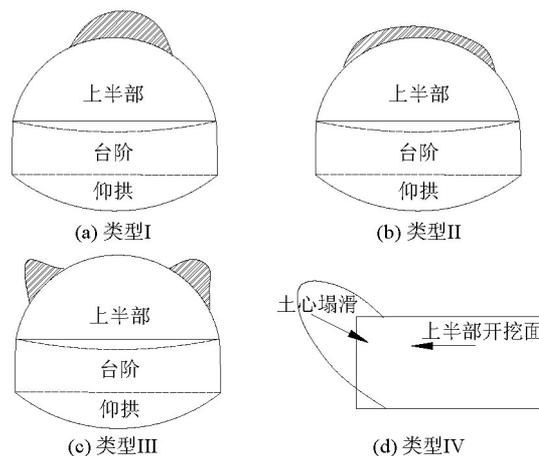


图2 卵砾石层中隧道破坏模式示意图

Fig.2 Sketch of failure mode of gravel strata tunnel

### 3.2 防治对策分析

1) 强预支护理论<sup>[5-11]</sup>。当卵砾石层遭遇涌(渗)水或遭遇厚层砂、泥层或断层破碎带等不良地质条件,有可能发生开挖面坍塌、大变形、较大规模塌方时,不仅仅在施工时采用常规新奥法的锚喷支护,同时采用超前大管棚、超前小导管(或插板)、钢拱架,形成一种联合支护体系;情况特别恶劣时,考虑采用超前注浆等地层改良的支护方法(见图2)。

2) 局部弱支护理论<sup>[12,13]</sup>。由于卵砾石层地质条件恶劣,预支护形式往往不尽符合围岩变形特点,需要在工程中发现其薄弱部分,并加以适当改进。如局部欠支护所诱发的岩体从弱支护部位坍出,到一定程度则诱发牢固支撑部位支架破坏,顶拱下沉不均匀,发展过程呈缓慢-急剧形式,如图2c所示。卵砾石层等破碎软岩隧道容易出现局部失稳,治理原则是清除原来支护结构的薄弱部分,着重加强弱支护部位,提高支护抗力。

### 3.3 卵砾石层隧道开挖方案的选择

卵砾石层隧道可选择的开挖施工方案如表1所示,具体的方法根据具体地质条件来定。但由于卵砾石层胶结不佳,易受振动影响而松动塌落,所以

钻爆工法并不太适用,但砾石层自立型一般并不差,所以开挖方式多选择机械式的开挖机具,如挖掘机、机械手、削掘机等最为适宜。对于大断面隧道工程应该采用分台阶开挖、侧导坑工法、交叉中隔墙(CRD)法等方式开挖,上下分部开挖时多设置

临时仰拱,以尽早闭合隧道开挖面,减少沉陷、收敛变形的发生。因卵砾石层隧道顶拱与侧壁、开挖壁面相比,易发生塌落,故选用辅助工法时,优选稳固前方地层的方法,如注浆锚杆、超前小导管、预注浆法、水平喷射灌浆法、插钢(护)板法等。

表1 卵砾石层隧道施工方案的对比

Table 1 Contrast with tunnel construction methods in gravel strata

开挖方式	概要	使用范围	优点	缺点	评估
钻炸开挖	巨大卵砾石以钻爆方式开挖,夹层及填充物以挖土机及破岩机并用开挖。	巨大卵砾石比例在50%以上,或卵砾石层胶结非常紧密	施工速度快,工程费用较低	爆炸振动使卵砾石松动,底层松动圈范围较大	×
自由断面钻掘机	Road header 或 boom cutter 为主进行开挖,再以破岩机破碎卵砾石	适用于地质以砂岩、泥岩为主,且巨大卵砾石比例较低时(10%以下)	对地层影响最小,开挖面均匀且超挖少	钻头磨损严重	△
机械开挖	全断面钻掘机(TBM)	以全断面掘进机开挖,开放型或密闭型	开挖速度快,施工环境好	初期投资大,钻头磨损严重,开挖面为圆形断面	△
	破岩机(Breaker)	巨大卵砾石以破岩机破碎,再以挖土机挖掘	巨大卵砾石分割破碎极为有效	卵砾石比例大时,开挖时间长	○
	挖土机	以挖土机直接挖掘,再辅以破岩机进行修挖	开挖速度快,经济性佳	巨大卵砾石存在时,开挖困难	○

注:×表示不宜采用;△表示可采用;○表示多采用

## 4 数值分析与施工监测对比

### 4.1 工程特点

本工程为浅埋隧道,采用单洞分离式行车,左右洞行车道中心线相距51 m,左洞长452 m,右洞长582 m,建筑限界宽14.75 m,高5.0 m,最大开挖跨度17.33 m,最大开挖高11.98 m,50%埋深在50 m以下,最浅不到2 m,具有扁平、浅埋、大跨、软弱等特点。

地质特点:IV、V级围岩占65.7%,残积坡成因的卵砾石地层,粘质胶结,胶结强度低,遇水易软化,卵砾石占50%~70%,粒径5~20 cm,呈次棱角~次圆状,大小混杂,稳定性差。

地下水特点:偶遇小股泉水,来源以雨水为主,地下常水位位于隧道开挖底部以下20 m,雨季施工易导致掌子面及围岩失稳。

支护结构特点:依据新奥法原理采用复合式衬砌,CRD法施工,初衬采用锚喷法+型钢钢架,二衬采用模筑钢筋混凝土,设置EVA(聚乙烯-醋酸乙烯)防水卷材。

### 4.2 模型建立

根据隧道地质条件及特点,模型上边界到地表

(20 m),左右边界到隧道中心距离为5倍隧道开挖跨度(75 m),下部边界到隧道中心的距离为5倍隧道开挖跨度(75 m),在隧道的纵向沿开挖方向取20 m,有限元模拟网格图见图3。

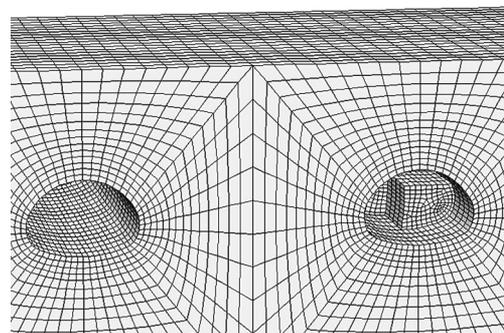


图3 有限元模拟网格图

Fig.3 Net of finite element method FEM

考虑到边界条件的影响,以及隧道开挖时的空间效应,在隧道的纵向沿开挖方向取20 m处所在断面为重点研究断面,对计算结果进行分析。由于是山岭隧道,在对计算结果进行分析时,主要考虑围岩的应力分布、位移变化、围岩塑性区的大小以及支护结构的受力状况。模型物理力学参数见表2。

表2 围岩及支护参数的物理力学参数

Table 2 Physical and mechanics parameters of surrounding rock and lining

材料名称	弹性模量/MPa	泊松比	容重/(kN/m <sup>3</sup> )	凝聚力/kPa	摩擦角/(°)	横截面积/m <sup>2</sup>
围岩	200	0.35	24	50	35	
仰拱回填C20	28 000	0.35	24	50	38	
初衬C25	39 300	0.25	23	5 000	42	
二衬C30	31 000	0.2	25	5 000	55	
锚杆	210 000	—	77	—	—	0.000 63

### 4.3 拱顶下沉分析

从图4可以看出,对8种隧道施工方法进行了模拟,发现有如下规律:初期支护系统能够及时封闭的几种开挖方案,包括全断面法、中隔墙(CD)法和CRD法,拱顶下沉小,最大为4.3 mm,最小为1.5 mm;不能及时封闭的上下台阶法、四分部法、上半断面设置临时中隔墙四分部法和下半断面左右分部台阶法的拱顶下沉值大,最大为10 mm,最小为7 mm,其中台阶法施工时上台阶开挖引起的拱顶下沉占累计沉降量的55.7%,下半断面开挖引起的拱顶下沉占总下沉量的12.4%。因此支护系统及时封闭成环,可以有效控制施工对围岩的扰动,减小拱顶下沉,其中CRD法最小,因为中间支护体系有效地控制了拱顶下沉。同时,得到相应的应力分布图,见图5。

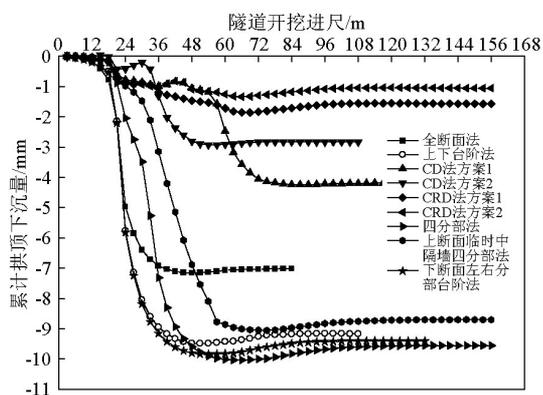


图4 拱部下沉量随开挖步变化示意图

Fig.4 The curve of crown settlement and excavation stage

图5所示为各种开挖方案在隧道开挖完成以后,研究断面的最小主应力分布示意图。图5中最小主应力基本为压应力,并且集中在隧道两侧边墙的中部靠近拱部区域,分布深度大约在1 m范围内。初期支护系统能够及时封闭的几种开挖方案,

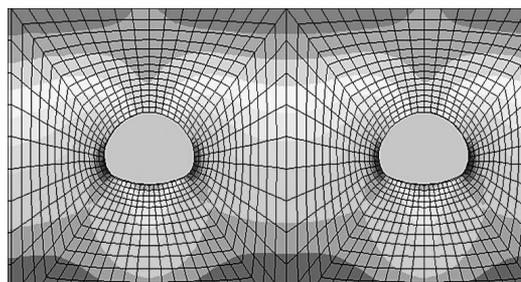


图5 开挖完成时小主应力分布图

Fig.5 Sketch of small main stress during excavation

包括全断面法、CD法和CRD法,围岩的最小主应力的最小值不超过1.15 MPa(压应力),均大于支护系统;不能及时封闭的上下台阶法、四分部法、上半断面设置临时中隔墙四分部法和下半断面左右分部台阶法的最小主应力,其最小主应力的最小值均小于1.26 MPa。可见,支护系统及时封闭成环,可以有效控制施工对围岩的扰动,减小围岩的应力集中程度。最小主应力的这种分布特征与上面围岩变形的分布特征是一致的,围岩的变形越小,应力集中程度越低,说明施工对围岩的控制越好。较大应力分布区在两侧边墙,仰拱存在一定的拉应力,应及时支护,确保安全。

当CRD法施工时无论是拱顶沉降还是小主应力值都是较小的,因此该施工方法适合卵砾石地层隧道的开挖,为了得到合适的开挖长度,选取5种步长进行分析,选取拱顶沉降较小及合理工期的开挖长度为实际的施工方案,得到开挖长度为1.2 m,如图6所示。跟某隧道施工方案一致,并对其进行现场监测,结果如3.3分析所述。

### 4.4 拱顶沉降现场监测分析

某隧道以每步长1.2 m的进尺开挖,得到拱顶沉降曲线,如图7所示。

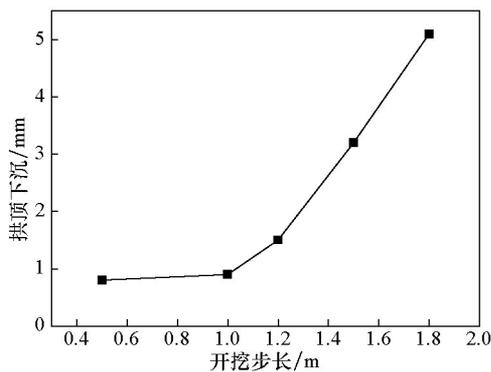


图6 CRD法开挖步长与拱顶下沉的关系曲线  
Fig.6 The curve of crown settlement and excavation stage length of CRD method

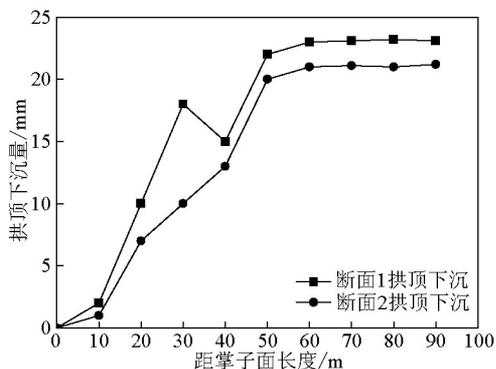


图7 拱顶沉降随时间变化曲线示意图  
Fig.7 The curve of crown settlement and excavation length

图7显示,30 m处为掌子面,在掌子面前后30 m处,拱顶下沉变化值趋于0,选取两个断面进行了监测,得到随着开挖掌子面的推进,拱顶沉降逐渐增大,通过掌子面10 m以后,规律是先增加速率大,后增加速率变小,然后逐渐趋于稳定,最大值分别为23 mm和21 mm,都在允许范围内,因此采用CRD法,步长的合理选择为1.2 m。此外,从监测中发现,对地面沉降的影响区域约为30 m。

同时,发现数值模拟的结果与现场监测值相差较大,主要是由于有限元计算把卵砾石地层当作均匀地质,没有考虑砾石大小的影响,大的砾石对拱顶下沉贡献较大;实际的砾石胶结对拱顶下沉的影响较大,计算时对胶结强度取值偏小。

## 5 结语

1)围岩位移主要发生在隧道开挖面的附近,并且以竖向位移为主,上台阶开挖引起的拱顶下沉较大,占累计沉降量的55.7%;而下半断面开挖引起的拱顶下沉占总下沉量的12.4%。因此,应该注意加强隧道拱部围岩的支护,保证在拱部开挖时不发生较大的位移甚至塌方。

2)从隧道开挖的全过程分析来看,最小主应力主要集中在靠近拱部区域,分布深度大约在1 m范围内,注意加强拱部两边支护,确保隧道围岩稳定。

3)当隧道完全贯通以后,围岩应力分布基本对称,围岩塑性区主要出现在仰拱部位,主要是由于卸荷回弹所引起的拉应力破坏。

4)CRD法适合卵砾石地层隧道施工,而且最优步长控制在1.2 m,这样拱顶沉降量较小,工期合理。

## 参考文献

- [1] 沈才华,童立元,刘松玉. 卵砾石层浅埋公路隧道支护方案的优化研究[J]. 土木工程学报,2008,41(7):71-75.
- [2] 陈尧中,游步上,余俊贤. 卵砾石层隧道变形参数之最佳化回馈分析[J]. 地下空间与工程学报,2008,4(4):676-685.
- [3] 高广运,冯世进,李鸿博. 卵砾石层中隧道考虑松动圈的位移反分析应用[J]. 地下空间与工程学报,2008,4(1):57-62.
- [4] 牛学中,杨仁树,孙忠辉. 卵砾石层大断面斜井井筒支护方法现场试验研究[J]. 岩土力学,2009,30(增刊):72-78.
- [5] 王梦恕,张梅. 铁路隧道建设理念和设计原则[J]. 中国工程科学,2009,11(2):3-8.
- [6] 肖智旺,钟登华. 基于RBF神经网络算法的连拱隧道围岩变形预测方法研究[J]. 中国工程科学,2008,10(7):76-81.
- [7] 王发明. 电气化铁路二线隧道爆破掘进安全快速施工技术[J]. 中国工程科学,2008,10(5):58-62.
- [8] 任少强. 大跨度双连拱公路隧道数值模拟与围岩稳定分析[J]. 中国工程科学,2009,11(8):58-63.
- [9] 皇甫明,谭忠盛,王梦恕. 暗挖海底隧道渗流量的解析解及其应用[J]. 中国工程科学,2009,11(7):66-70.
- [10] 苗德海,莫阳春,王伟. 隧道穿越淤泥质充填溶洞施工力学行为研究[J]. 中国工程科学,2009,11(12):41-46.
- [11] 郑爱元,谭忠盛,李治国. 沉管隧道基础灌砂模拟试验[J]. 中国工程科学,2009,11(7):81-85.
- [12] 陈亮,黄宏伟,王如路. 近距离上部穿越对原有隧道沉降的影响分析[J]. 土木工程学报,2006,39(6):83-87.
- [13] 李术才,朱维申,陈卫忠,等. 弹塑性大位移有限元方法在软岩隧道变形预估系统研究中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(4):466-470.

# Construction optimization of shallow-buried tunnel in gravel strata based on controlling settlement of the crown

Yu Jun<sup>1,2</sup>, Liu Songyu<sup>3</sup>, Gong Xiaonan<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310034, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China;

3. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**[Abstract]** The stability of surrounding rock is closely connected with the settlement of the crown during construction of shallow-buried road tunnel in gravel strata. Therefore, simulation analysis of different construction methods was used to get the settlement law of the crown to optimize the project as a goal controlling settlement of the crown and stability of surrounding rock. At the same time, the better method of construction was put forward to analyze different excavation path and stage length. The result showed that the crown settlement easily took place during excavation of shallow tunnel and with different construction methods, the difference of crown settlement was great. It is found that CRD method is the most appropriate for gravel strata tunnel because the crown settlement is least and the stress releasing is slow and gradual and the stress transfer is more effective than CD method. Compared with site monitoring, the result is more identical. The conclusion can provide the reference for similar engineering.

**[Key words]** gravel; surrounding rock of tunnel; numerical analysis; construction optimization; crown settlement; site monitoring

(上接70页)

# Optimization of horizontal wells development of Mawu<sub>1+2</sub> Reservoir of Shan100 Well area in Jingbian Gas Field

Zhao jinsheng<sup>1</sup>, Gao Jianying<sup>2</sup>, Xiao Zengli<sup>1</sup>

(1. College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

2. Extra-low Permeability Oil Reservoir Research Institute Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710018, China)

**[Abstract]** According to the practical reservoir characteristics of the study area, the feasibility of horizontal wells development was analyzed, and the result showed that the reservoir characteristics of study area were suit to develop horizontal wells. Based on the establishment of three-dimensional fine geological modeling of study area, using numerical simulation, the well network pattern, length of the horizontal section, well spacing, row spacing and development indicators were predicted. The simulation result showed that the optimal well network was the symmetrical horizontal section, and the horizontal well had echelonment horizontal sections traversing the two layers of Mawu<sub>1</sub><sup>2</sup> and Mawu<sub>1</sub><sup>3</sup>, and the well spacing and row spacing were both 2 100 m. The result of development indicators prediction showed that, after 10 years, the recovery percentage was 48.78 %, which was 16.6 % higher than that of vertical wells. The study result can guide the study area to develop efficiently.

**[Key words]** Jingbian Gas Field; horizontal well; development indicator; well network; optimization