

文章编号:1672-058X(2013)07-0082-07

# 新疆高震区隧道浅埋段结构受力研究

罗君<sup>1</sup>, 谭利华<sup>2</sup>, 吴楚钢<sup>3</sup>

(1.重庆交通大学土木建筑学院,重庆 400074;2.中交一公局第三工程有限公司,北京 101102;  
3.新疆维吾尔自治区交通规划勘察设计研究院,新疆乌鲁木齐 830006)

**摘要:**喀什至伊尔克什坦公路线上的康苏隧道位于9度设防区,在国内没有多少类似地质条件的工程可以参考,通过对位于高震区的浅埋隧道的结构受力分析计算,为以后在新疆高震区设计和修建隧道做一定的探讨及参考,从而使高震区隧道设计上更加安全实用、经济合理。

**关键词:**新疆;隧道;高震区;衬砌

**中图分类号:**U451+.4

**文献标志码:**A

## 1 工程概况

康苏隧道位于一山脊,长度为0.84 km,高程变幅为2 260~2 320 m,高差60 m,进出口边坡较陡,洞身顶部地势较平缓,隧道前半部分基岩裸露,后半部分为圆砾(Q3~Q4)覆盖,基岩岩层为中-缓倾,其中进口岩体中倾,隧道处无大的断层通过,洞身总体受构造运动影响不大。地震动峰值加速度 $PGA>0.40 g$ 。地层主要为砂岩,夹少量泥岩、砾岩,中厚层-块状,中-弱风化,属于白垩系软岩,隧道后半段表层为圆砾(Q3~Q4)覆盖。春季天气多变、浮尘、大风多,夏季凉爽,降雨集中,是雷暴冰雹集中出现区,秋季云淡气爽,降水减少,冬季晴朗严寒,风小雪少。覆土主要为季节性冻土,冻结深度为150 cm。

康苏隧道设计行车速度80 km/h,隧道建筑限界宽10.25 m,高5.00 m,隧道内轮廓净宽10.86 m,净高7.03 m。设计计算路面荷载为公路-I级,计算对象为喀什-伊尔克什坦口岸公路康苏隧道,隧道采用C30喷射混凝土。

## 2 浅埋隧道衬砌内力计算

### 2.1 深埋、浅埋隧道分界深度

按照《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)<sup>[1]</sup>计算

$$H_p = (2 \sim 2.5)h_p = 2.5 \times 12.24 = 30.6 \text{ m}$$

其中V级围岩系数取2.5;且 $h_p = \frac{q}{\gamma} = 12.24$ 。

式中: $H_p$ 为深埋、浅埋隧道分界深度,m; $h_p$ 为荷载等效高度,m; $q$ 为计算深埋隧道垂直压力, $\text{kN/m}^2$ ; $\gamma$

收稿日期:2013-01-27;修回日期:2013-02-28.

作者简介:罗君(1987-),女,四川广安人,硕士研究生,从事桥梁与隧道工程方面的研究.

为围岩重度,  $\text{kN/m}^3$ , 取 18;

$$q = \gamma h = \gamma \times 0.45 \times 2^{s-1} \omega = \gamma \times 0.45 \times 2^{s-1} [1 + i(B_t - 5)] = 18 \times 0.45 \times 2^4 \times [1 + 0.1 \times (12 - 5)] = 18 \times 6.12 = 220.32 \text{ kN/m}^2$$

$s$  为围岩级别,  $\text{kN/m}^3$ , V 级围岩取 5;  $\omega$  为宽度影响系数;  $B_t$  为隧道最大开挖宽度, 取 12 m;  $i$  为  $B_t$  每增减 1 m 时的围岩压力增减率, 取 0.1。

## 2.2 浅埋隧道的围岩压力

### 2.2.1 埋深 $H$ 小于或等于 $h_p$

(1) 垂直压力。

$$q = \gamma H$$

式中,  $H$  为隧道埋深, 即隧道拱部至地面的垂直距离, m;  $q$  为垂直均布压力,  $\text{kN/m}^2$ ;  $\gamma$  为隧道上覆围岩重度,  $\text{kN/m}^3$ , 取 18。

(2) 侧向压力。

$$e = \gamma \left( H + \frac{H_t}{2} \right) \tan^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi_c}{2} \right)$$

式中,  $e$  为侧向均布压力,  $\text{kN/m}^2$ ;  $\varphi_c$  为围岩计算摩擦角 ( $^\circ$ ), 取  $44^\circ$ ;  $H_t$  为隧道开挖高度, m, 取 9.0 m。

### 2.2.2 埋深 $H$ 大于 $h_p$ 或小于等于 $H_p$

(1) 垂直压力。

$$q = \gamma H \left( 1 - \frac{\lambda H \tan \theta}{B_t} \right)$$

式中,  $B_t$  为隧道开挖宽度, m, 取 12.0 m;  $\theta$  为顶板土柱两侧破裂面摩擦角 ( $^\circ$ ), 取  $0.8\varphi_c = 0.5 \times 44 = 22^\circ$ ;  $\lambda$  为侧压

力系数,  $\lambda = \frac{\tan \beta - \tan \varphi_c}{\tan \beta [1 + \tan \beta (\tan \varphi_c - \tan \theta) + \tan \varphi_c \tan \theta]}$ ;  $\beta$  为产生最大推力的破裂角 ( $^\circ$ ),  $\tan \beta = \tan \varphi_c +$

$$\sqrt{\frac{(\tan^2 \varphi_c + 1) \tan \varphi_c}{\tan \varphi_c - \tan \theta}}.$$

(2) 侧向压力。

$$e_i = \gamma h_i \lambda$$

式中,  $h_i$  为内外侧任意点到地面的距离, m。

对于浅埋隧道, 取埋深  $H = 20$  m 进行计算, 代入参数:

$$\text{垂直压力 } q = \gamma H \left( 1 - \frac{\lambda H \tan \theta}{B_t} \right) = 306.40 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{拱顶侧向压力 } e_1 = \gamma h_1 \lambda = 79.60 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{墙趾侧向压力 } e_2 = \gamma h_2 \lambda = 115.42 \text{ kN/m}^2$$

## 2.3 正常使用极限状态下衬砌内力

在正常使用极限状态下, 不计地震作用, 埋深 20 m 时, 衬砌的内力采用 MIDAS/GTS 计算, 计算结果见图 1:

## 2.4 地震作用下衬砌内力

康苏隧道主体设防烈度为 9 度, 验算隧道结构的抗震强度和稳定性, 地震作用要与结构重力和土压力组合<sup>[2]</sup>, 隧道衬砌结构强度安全系数应符合《公路隧道设计细则》(JTG/T D70—2010)<sup>[3]</sup> 第 15.1.7 条规定。

(1) 隧道衬砌结构自重产生的地震力。

$$\text{水平地震力: } E_{ih} = C_i C_z K_h G_{is}$$

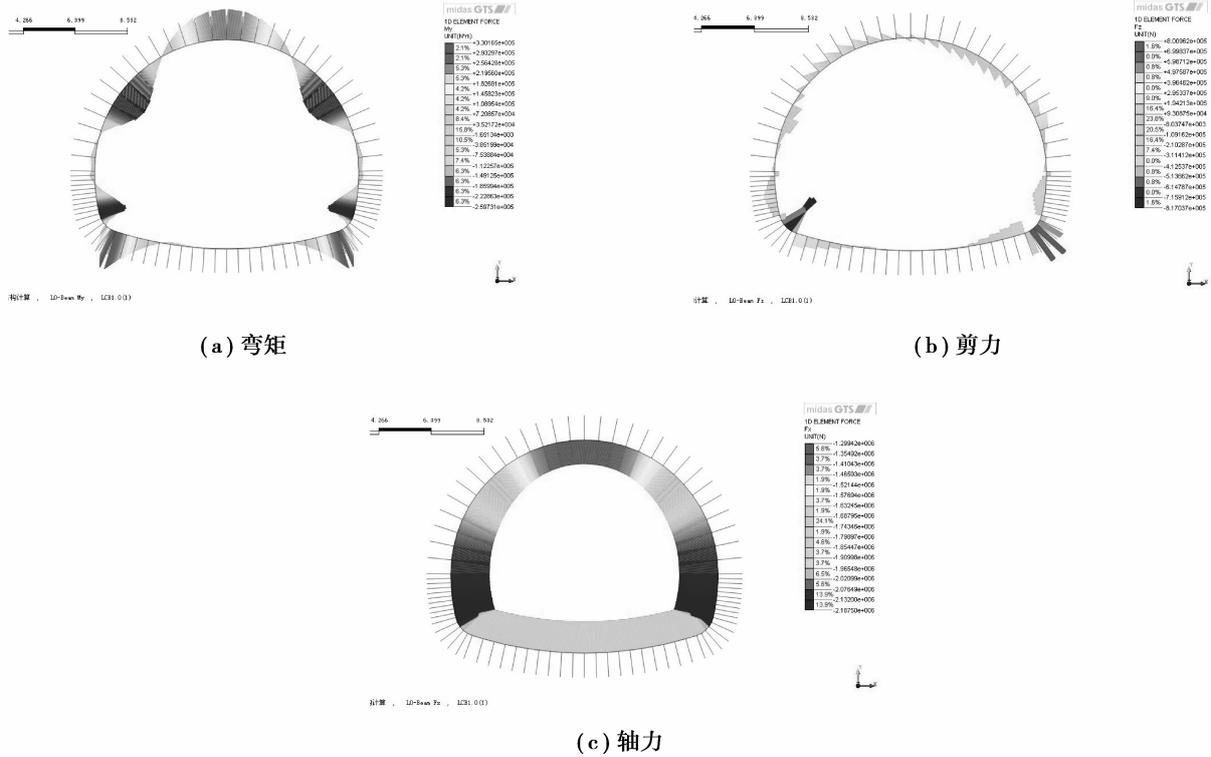


图 1 正常使用状态下衬砌内力

竖向地震力:  $E_{iv} = C_i C_z K_v G_{is}$

式中,  $E_{ih}$  为作用于隧道衬砌上任一质点的自重水平地震力, kN;  $E_{iv}$  为用于隧道衬砌上任一质点的自重竖向地震力, kN;  $K_h$  为水平地震力系数;  $K_v$  为竖向地震力系数;  $C_i$  为重要性修正系数;  $C_z$  为场地影响系数;  $G_{is}$  为隧道衬砌计算点的结构重力, kN。

注:项目验收拟采用结构安全等级为二级,保证在地震作用下不坍塌,经临时加固后可供维持应急通行<sup>[4]</sup>。

(2) 作用于隧道上的垂直土压力总值。

$$Q = \frac{\gamma}{2} [(h_1 + h_2)B - (\lambda_1 h_1^2 + \lambda_2 h_2^2) \tan \theta_0]$$

$$\lambda_1 = \frac{(\tan \beta_1 - \tan \varphi_1)(1 - \tan \theta_1 \tan \theta)}{(\tan \beta_1 - \tan \alpha) [1 + \tan \beta_1 (\tan \varphi_1 - \tan \theta_1) + \tan \varphi_1 \tan \theta]}$$

$$\lambda_2 = \frac{(\tan \beta_2 - \tan \varphi_2)(1 + \tan \theta_2 \tan \theta)}{(\tan \beta_2 + \tan \alpha) [1 + \tan \beta_2 (\tan \varphi_2 - \tan \theta_2) + \tan \varphi_2 \tan \theta]}$$

$$\tan \beta_1 = \tan \varphi_1 + \sqrt{\frac{(\tan^2 \varphi_1 + 1)(\tan \varphi_1 - \tan \alpha)}{\tan \varphi_1 - \tan \theta_1}}$$

$$\tan \beta_2 = \tan \varphi_2 + \sqrt{\frac{(\tan^2 \varphi_2 + 1)(\tan \varphi_2 + \tan \alpha)}{\tan \varphi_2 - \tan \theta_2}}$$

$$\varphi_1 = \varphi_c - \theta = 44 - 6 = 38;$$

$$\varphi_2 = \varphi_c + \theta = 44 + 6 = 50;$$

$$\theta_1 = \theta_0 - \theta = 22 - 6 = 16;$$

$$\theta_2 = \theta_0 + \theta = 22 + 6 = 28。$$

式中,  $\theta_0$  为土柱两侧摩擦角( $^\circ$ );取  $22^\circ$ ;  $\alpha$  为地面坡度( $^\circ$ );取  $0^\circ$ ;  $h_1$ 、 $h_2$  为内、外侧拱顶水平线至地面的高度, m;取  $h_1 = h_2 = 20$  m;  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  为地震时内外侧侧压力系数;  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  为地震时修正后的内外围岩计算摩擦角;  $\theta$  为地震角( $^\circ$ );取  $6^\circ$ 。

(3) 洞顶土柱产生的水平地震力。

$$F_{hi} = C_i C_z K_h Q$$

(4) 洞顶土柱产生的竖直地震力。

$$F_{vi} = C_i C_z K_v Q$$

(5) 内、外侧土体产生的地震荷载增量。

$$\Delta e_{1i} = C_i C_z q_{1i} (\lambda_1 - \lambda'_1);$$

$$\Delta e_{2i} = C_i C_z q_{2i} (\lambda_2 - \lambda'_2);$$

$$\lambda_1 = \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi_c}{2}), \lambda'_1 = \tan^2(45^\circ - \frac{\omega_c - \theta}{2});$$

$$\lambda_2 = \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi_c}{2}), \lambda'_2 = \tan^2(45^\circ - \frac{\omega_c + \theta}{2});$$

式中,  $\Delta e_{1i}$ 、 $\Delta e_{2i}$  为内外侧衬砌上任意点的侧压力增量, kPa;  $q_{1i}$ 、 $q_{2i}$  为内外侧边计算点对应的竖向荷载, kPa;  $\lambda_1$ 、 $\lambda'_1$  为内侧土体非地震及地震条件下的侧压力系数;  $\lambda_2$ 、 $\lambda'_2$  为外侧土体非地震及地震条件下的侧压力系数。

康苏隧道按照 9 级设防, 则  $C_i = 1.3$ ,  $C_z = 1.0$ ,  $K_h = 0.4$ ,  $K_v = 0.25$ 。

代入参数可以计算出以下结果:

康苏隧道衬砌结构自重产生的单位水平地震力:

$$e_{ih} = C_i C_z K_h g_{is} = 1.3 \times 1.0 \times 0.4 \times 25 = 13.0 \text{ kN/m}^2$$

康苏隧道衬砌结构自重产生的单位竖向地震力:

$$e_{iv} = C_i C_z K_v g_{is} = 1.3 \times 1.0 \times 0.25 \times 25 = 8.125 \text{ kN/m}^2$$

#### 2.4.1 埋深 20 m 时, MIDAS/GTS 计算的结构内力

作用于隧道上的垂直土压力总值:  $Q = -973.80$  kN

洞顶土柱产生的水平地震力:  $F_{ih} = -506.38$  kN

洞顶土柱产生的竖直地震力:  $F_{iv} = -316.49$  kN

内、外侧土体产生的地震荷载增量:

$$\Delta e_{1i} = C_i C_z q_{1i} (\lambda_1 - \lambda'_1) = (-5.97, -8.66) \text{ kPa}$$

$$\Delta e_{2i} = C_i C_z q_{2i} (\lambda_2 - \lambda'_2) = (4.94, 7.16) \text{ kPa}$$

埋深 20 m 时, GTS 计算的结构内力如图 2。

#### 2.4.2 埋深 10 m 时, MIDAS/GTS 计算的结构内力

作用于隧道上的垂直土压力总值:  $Q = 836.55$  kN

洞顶土柱产生的水平地震力:  $F_{ih} = 435.01$  kN

洞顶土柱产生的竖直地震力:  $F_{iv} = 271.88$  kN

内、外侧土体产生的地震荷载增量:

$$\Delta e_{1i} = C_i C_z q_{1i} (\lambda_1 - \lambda'_1) = (-4.48, -7.17) \text{ kPa}$$

$$\Delta e_{2i} = C_i C_z q_{2i} (\lambda_2 - \lambda'_2) = (3.70, 5.92) \text{ kPa}$$

埋深 10 m 时, GTS 计算的结构内力如图 3。

### 2.5 关键点内力与裂缝宽度

各关键点的内力与裂缝宽度计算结果, 如表 1、表 2、表 3 所示。关键点位置标识图如图 4 所示。

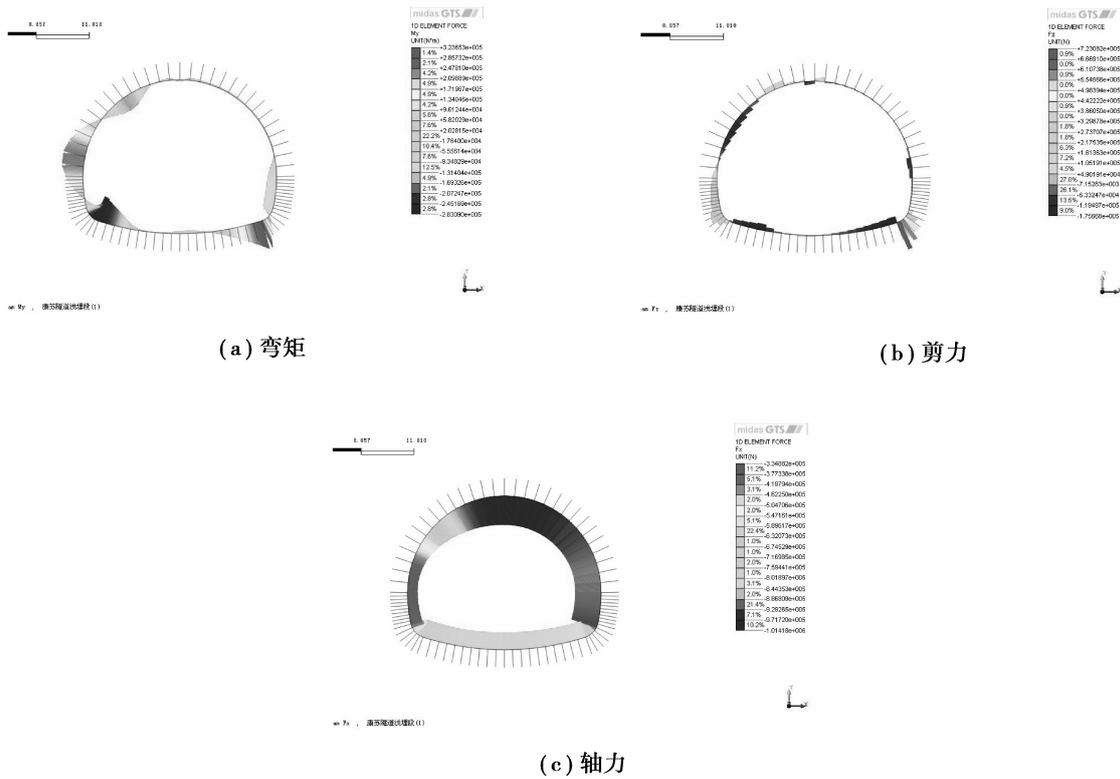


图 2 埋深 20 m 地震作用下衬砌内力图

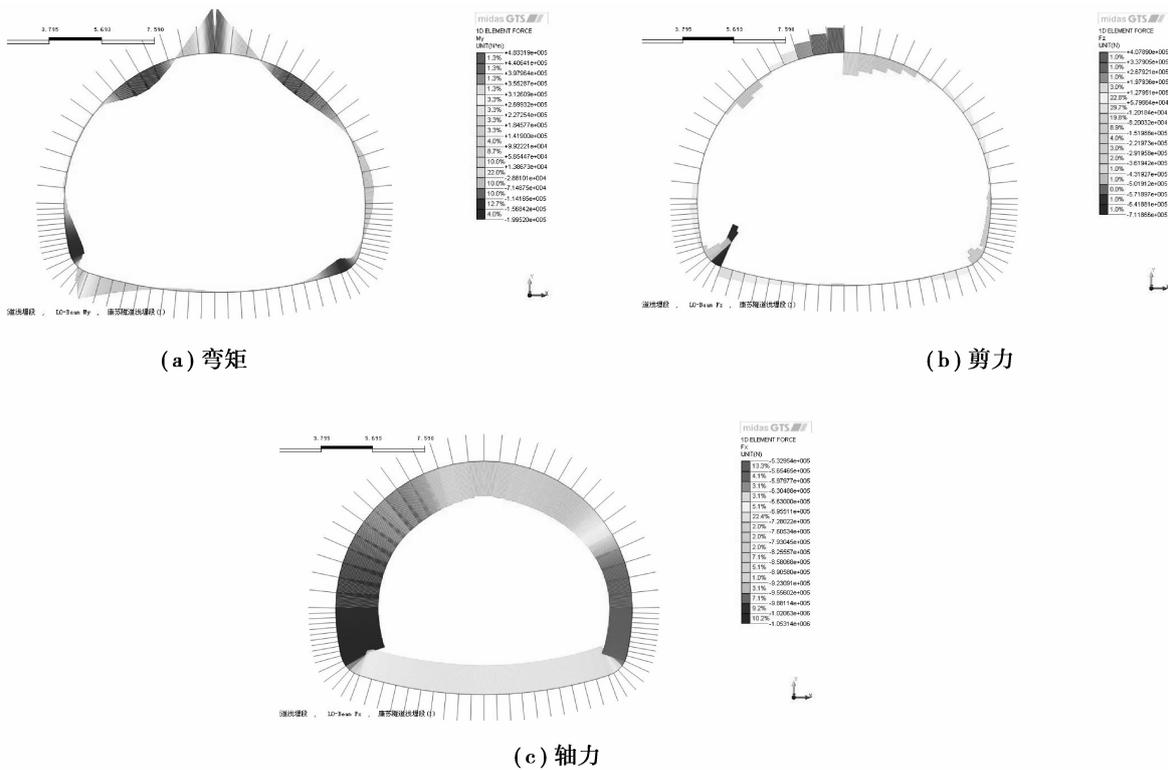


图 3 埋深 10 m 地震作用下衬砌内力

表 1 正常使用状态下衬砌关键点受力及配筋计算表

位置	$M/kN \cdot m$	$N/kN$	$Q/kN$	承载力最小配筋/ $mm^2$
拱 顶	183	1 299	194	4B25
左拱脚	330	2 187	817	6B25
右拱脚	330	2 187	817	6B25
左墙脚	39	2 076	311	1B25
右墙脚	39	2 076	295	1B25
仰 拱	35	1 743	80	1B25

表 2 埋深 20 m 地震作用下衬砌关键点受力及配筋计算表

位置	$M/kN \cdot m$	$N/kN$	$Q/kN$	承载力最小配筋/ $mm^2$
拱 顶	58	1 014	175	1B25
左拱脚	283	505	274	5B25
右拱脚	324	886	732	6B25
左墙脚	248	335	119	5B25
右墙脚	20	844	175	1B25
仰 拱	96	632	49	2B25

表 3 埋深 10 m 地震作用下衬砌关键点受力及配筋计算表

位置	$M/kN \cdot m$	$N/kN$	$Q/kN$	承载力最小配筋/ $mm^2$
拱 顶	483	533	408	9B25
左拱脚	355	1 053	712	7B25
右拱脚	200	696	292	4B25
左墙脚	29	965	82	1B25
右墙脚	56	630	58	1B25
仰 拱	71	728	221	2B25

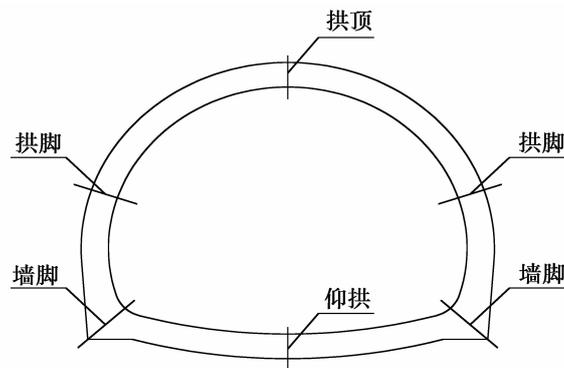


图 4 关键点位置标识图

### 3 结论与建议

(1) 建议受拉区每延米主筋均采用 10B25, 全环拉通布置; 衬砌厚度采用 80 cm。根据汶川地震后隧道的调研<sup>[5]</sup>及《汶川地震灾后公路恢复重建技术指南》<sup>[6]</sup>, 认为暗洞施工有利于隧道抗震。同时计算也表明这点, 地震作用下, 20 m 埋深隧道受力比 10 m 埋深隧道受力条件好。

(2) 用柔性支护体系的复合式衬砌, 即以喷、锚、网、拱架等为初期支护, 以钢筋混凝土或素混凝土为二次衬砌; 并视地层、地质条件增加超前小导管注浆等超前预支护措施的设计可以满足施工时候围岩稳定要求, 但也需要在施工中严格执行“管超前、短开挖、弱爆破、强支护、勤量测、紧衬砌”。

#### 参考文献:

- [1] 重庆交通科研设计院. 公路隧道设计规范 JTG D70-2004 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2004
- [2] 吴国栋 谭明 唐丽华. 新疆尼勒克、巩留交界 MS6.0 地震烈度划分与震害现象 [J]. 内陆地震, 2012, 26(3): 203-208
- [3] 中华人民共和国交通运输部. 公路隧道设计细则 JTG/T D70-2010 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2010
- [4] 倪开伟. 高速公路隧道地震破坏的形式及预防措施 [J]. 黑龙江交通科技, 2012, 10: 97-98
- [5] 陈红进, 孙少楠, 张先起. “5.12 地震”中房屋震害调查及损坏机理研究 [J]. 中州大学学报, 2008, 25(6): 113-118
- [6] 中华人民共和国交通运输部. 汶川地震灾后公路恢复重建技术指南 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2008

## Research on Structure Stress in Shallow Tunnel Section in Xinjiang High Seismic Area

**LUO Jun<sup>1</sup>, TAN Li-hua<sup>2</sup>, WU Chu-gang<sup>3</sup>**

- (1. School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. The Third Engineering Co., Ltd, China First Highway Engineering Bureau, Beijing 101102, China;
3. Xinjiang Transportation Planning Survey Design and Research Institute, Urumqi 830006, China)

**Abstract:** Kangsu Tunnel is located at 9 degree fortified area in the road from Kashi to Irkeshtam, and there are few references of similar geological conditions at home. This paper analyzes and calculates structural stress in shallow tunnel section of high seismic area and provides reference for future design and construction of the tunnels at high seismic areas in Xinjiang so that the design of tunnels at high seismic areas is safer, more economical and rational.

**Key words:** Xinjiang; tunnel; high seismic area; lining

责任编辑: 田 静