

中国公路学会隧道工程学会成立大会
暨首届全国公路隧道学术交流会
论 文 集

中国公路学会隧道工程学会
交通部重庆公路科学研究所

1991年11月

前 言

我国是一个多山的国家，三分之二的国土为山岭和丘陵。长期以来，由于公路等级低，我国山区公路多是盘山绕线，或是高填深挖，很少考虑隧道方案，以致通行能力很低，并常发生坍方、滑坡等病害，不能适应公路交通发展的需要。自改革开放以来，公路交通事业有了迅猛的发展，高等级公路建设已在祖国大地上蓬勃兴起。由于公路隧道具有能缩短路线，保护自然环境和根除道路病害等突出优点，已在山丘地区高等级公路建设中受到高度重视。公路隧道建设技术复杂，并具有其自身特点，因此，加速研究开发公路隧道修建和营运方面的现代技术，已是当务之急。

成立公路隧道工程学会，积极开展学术交流，对促进我国公路隧道技术的发展非常必要。1989年4月，在杭州交通部工程管理司主持召开的“公路隧道设计规范”审定会上，来自全国公路设计、科研、教学单位的各位代表一致呼吁尽快成立公路隧道专业学会，并将该意见写入会议纪要。根据这个会议纪要精神，1990年12月交通部重庆公路科学研究所等26个单位联合向中国公路学会提出申请成立隧道工程学会。1991年2月21日，公路学会批复同意成立隧道分科学会，并定名为“中国公路学会隧道工程学会”。挂靠单位为交通部重庆公路科学研究所。

在上级学会的领导下，积极开展了学会的筹备工作，于1991年3月成立了学会筹备委员会。筹委会定于1991年11月在重庆市召开学会成立大会暨首届学术交流会，并向全国从事公路隧道建设、科研、管理的技术人员征集公路隧道论文。这些活动受到有关单位和专家的热情关注和支持。

“论文集”收集19篇论文，内容包括公路隧道的设计、施工、衬砌；围岩稳定性分析；隧道地质；公路隧道防、排水技术；公路隧道营运通风、照明、消防；公路隧道交通监控以及土工合成材料在隧道工程中的应用等。

对这些论文编者都作了详细的审编，对不符合论文标准格式之处作了修改，对未作摘要、未提关键词的论文作了补充。尽管作了不少努力，但由于水平有限，本“论文集”一定还有许多审编不当的地方，欢迎同志们提出批评指正。

编者

1991年10月

首届全国公路隧道学术交流会

论文集

目 录

隧道复合衬砌可靠度分析·····	孙钧 金丰年	(1)
公路隧道的总体设计理论与方法·····	王毅才	(8)
开洛高速公路黄土隧道设计·····	严长卿	(13)
运用矿山法修建公路隧道·····	王尚志	(22)
龙泉山隧道洞口 施工·····	李宁军	(29)
略论重庆市城市交通隧道和地下工程衬砌结构设计和施工·····	李良佐	(33)
龙泉隧道工程地质条件特点及对施工的影响分析·····	杲凤荣	(38)
岩体流变性对围岩稳定性的影响·····	陈德坤	(41)
六盘山公路隧道工程地质及水文地质·····	甘肃省交通规划设计院	(51)
射流风机纵向通风在公路隧道中应用·····	杨思勤	(57)
延安东路隧道通风系统评价·····	胡维擷	(68)
土工合成材料在隧道工程中的应用·····	熊有言	(72)
公路隧道防排水技术·····	刘 伟	(78)
公路隧道火灾防治对策·····	缪怀甫 韩常领	(83)
重庆公路隧道的发展趋势·····	杨宏波	(86)
公路隧道射流通风中CO允许浓度的合理取值·····	郑汉璋	(90)
公路隧道的交通安全与管理系統·····	姬为宇	(96)
上海延安东路隧道交通监控总体设计·····	罗赞文	(100)
用扩张卡尔曼滤波器有限元法反分析地下洞室围岩参数的初步研究··	蒋树屏 孙钧	(106)

隧道复合衬砌可靠度分析

孙钧 金丰年

(同济大学)

摘要: 本文在对隧道围岩及其支衬结构进行非确定性分析的基础上,应用改进的蒙特卡罗方法分别导演了用以评价围岩稳定、锚喷支护与二次衬砌安全的可靠度分析,并在微机上得到实现。所建议的方法可为隧道围岩稳定判别及其复合衬砌的设计与校核提供理论依据和一种新的分析手段。本文还就位于弹塑性围岩中,某深埋圆形隧道复合衬砌的工程实例作了探讨,具体论证了本文所述方法的有效性和合理性。

本文的研究表明,就隧道围岩一支衬系统的设计言,可靠度分析方法考虑了岩性指标和结构参数的变异性,其各个子系统能以达到基本上相同的安全度指标,使围岩稳定与支衬设计具有经济、可靠的特点,且十分有利于进一步的优化设计。本文采用改进的蒙特卡罗方法,计算简便,精度较高,能够自然满足诸参量间的相关性,同时不受各随机变量分布类型的限制。

关键词: 隧道,复合衬砌,围岩稳定,锚喷支护,可靠度

研究并发展隧道和地下结构物的可靠度计算理论,有助于解决此类工程中的大量随机性与模糊性问题,进一步确立工程结构优化设计的理论构思及其原则依据,具有可喜的应用前景。

1 所建议方法的计算步序与程序框图

a. 在勘察和试验的基础上,对岩土参数进行统计分析,以获得隧道围岩所处地层的介质特性,包括:岩土参数的分布、均值、方差及其变异情况等。

b. 利用本文建议的对围岩稳定可靠度分析方法,求算隧道毛洞围岩稳定的安全概率,并结合工程经验判断围岩能否持续自稳。

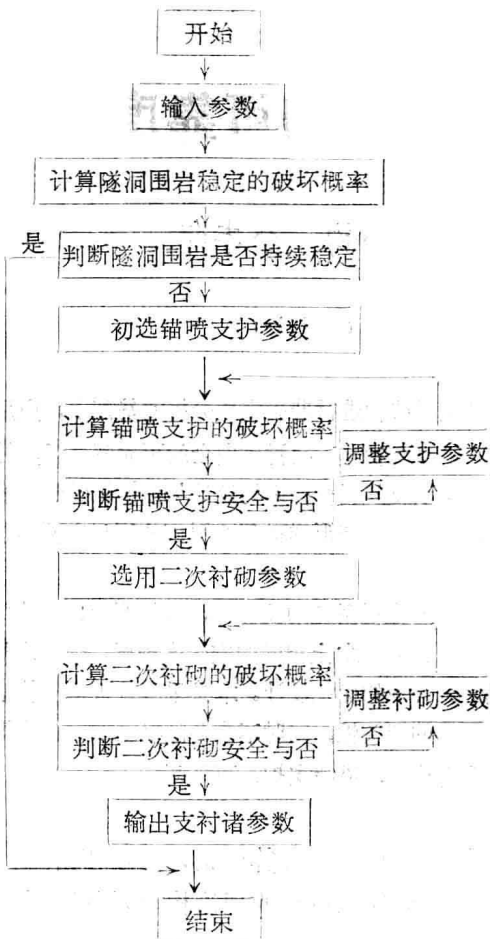
c. 如隧洞围岩只能在某一定时间内(指锚喷支护起作用之前的一段时间)自承和自稳,则可初选锚喷支护参数,对其进行可靠度计算;如初选支护仍达不到安全要求,则可相应地调整原先的支护诸参数。然后,重新求算锚喷支护的安全概率,直至满足可靠度要求。

d. 进一步对二次整筑式衬砌进行可靠度计算,此时考虑岩体流变时效产生围岩形变压力对二次衬砌相互作用的影响。能以通过计算选择合理的二次衬砌厚度及其最佳施筑时间。

该方法可用以进行隧道支衬结构的设计,也可对已有的设计作可靠度校核。具有可喜的工程实用价值。

综上所述的计算方法和步序,可绘制程序框图如表1所示。

表 1 可靠度计算程序框图



2 隧洞围岩稳定的可靠度分析

2.1 隧洞围岩稳定的弹塑性分析

深埋隧洞围岩的计算范围取 $\geq 10R_0$ ，侧压力系数 ξ 取 $= 1.0$ 。从弹塑性力学可知洞周围岩的等效八面体塑性剪应变 $\bar{\varepsilon}_P$ 为

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_P &= \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_{1P} - \varepsilon_{2P})^2 + (\varepsilon_{2P} - \varepsilon_{3P})^2 + (\varepsilon_{3P} - \varepsilon_{1P})^2} \\ &= \frac{\sqrt{12(1+\mu)}}{3E} \cdot \frac{R_P^2}{r^2} \left[P_0 + c \cdot \operatorname{ctg}\varphi - c \cdot \operatorname{ctg}\varphi \left(\frac{R_P}{R_0} \right)^{F_c} \right] \end{aligned} \quad (1)$$

式中， ε_{1P} ， ε_{2P} ， ε_{3P} ，分别为洞周围岩的三向主塑应变； $P_0 = \gamma H$ 为初始地应力，按重力场计算（ γ 为岩体容重， H 为洞顶埋深）； c ， φ ，分别为岩体粘聚力和内摩擦角； E ， μ ，分别为岩体弹模和泊松比； R_0 ，隧道毛洞半径； r ，围岩内计算点距隧洞中心的距离； R_P 洞周围岩塑性区半径；符号 $F_c = \frac{2\sin\varphi}{1-\sin\varphi}$ 。

2.2 隧洞围岩稳定的可靠度分析

根据极限应变准则, 围岩稳定的极限状态方程可写为

$$g(\varepsilon_0, \bar{\varepsilon}_p) = \varepsilon_0 - \bar{\varepsilon}_p = 0 \quad (2)$$

式中, ε_0 , 围岩的极限剪应变值, 由试验测定。

将式(1)的 $\bar{\varepsilon}_p$ 值代入式(2), 化简后可得

$$E - g'(P_0, c, \varphi, \mu, \varepsilon_0, R_0) = 0 \quad (3)$$

此处, $P_0, c, \varphi, E, \mu, \varepsilon_0, R_0$ 均为随机变量, 而

$$\begin{aligned} &g'(P_0, c, \varphi, \mu, \varepsilon_0, R_0) \\ &= \frac{\sqrt{12}(1+\mu)}{3\varepsilon_0} \cdot \frac{R_p^2}{r^2} \left[P_0 + c \cdot \text{ctg}\varphi - c \cdot \text{ctg}\varphi \left(\frac{R_p}{R_0} \right)^{F_c} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{式中, } \left(\frac{R_p}{R_0} \right)^{F_c} = \frac{(P_0 + c \cdot \text{ctg}\varphi)(1 - \sin\varphi)}{c \cdot \text{ctg}\varphi}$$

应用改进的蒙特卡罗模拟方法^[1], 可求得隧洞围岩的失稳概率:

$$P_f = P[E < g'(P_0, c, \varphi, \mu, \varepsilon_0, R_0)] \quad (5)$$

3 锚喷支护的可靠度分析

3.1 锚喷支护的基本破坏模式拟定为:

- 喷层压应力大于喷混凝土材料的抗压强度 ($\sigma_c > R_c$);
- 锚杆拉应力超过钢材的抗拉强度 ($\sigma_t > R_t$);
- 锚杆与围岩间砂浆的粘结破坏, 此时的实际剪切力大于其锚固粘结力 ($Q > \bar{Q}$)。

3.2 锚喷支护的可靠度计算

在对锚喷支护进行力学分析的基础上, 可分别得出:

3.2.1 喷层的极限状态方程

$$g_1(R_c, \sigma_c) = R_c - \sigma_c = 0 \quad (6)$$

将喷层压应力 σ_c 的表达式代入上式并改写, 可得

$$R_c - g'_1(P_0, c_1, \varphi_1, G, G_c, u_0, R_0, R_c) = 0 \quad (7)$$

式中, $P_0, c_1, \varphi_1, G, G_c, u_0, R_0, R_c$ 均为随机变量。此处, c_1, φ_1 为分别对应于混凝土喷层材料的相应值; G, G_c 分别为围岩和混凝土的剪切模量; u_0 , 支护前的洞周初始径向位移。

而 $g'_1(P_0, c_1, \varphi_1, G, G_c, u_0, R_0, R_c)$

$$\begin{aligned} &= \frac{2R_0^2}{R_0^2 + R_1^2} \left[1 + \frac{E_0 \cdot A}{K_c \cdot ab \cdot (R_0 + l)} \right] \cdot \left\{ -c_1 \cdot \text{ctg}\varphi_1 + (P_0 + c_1 \cdot \text{ctg}\varphi_1) \right. \\ &\quad \left. \cdot (1 - \sin\varphi_1) \left[\frac{(P_0 \sin\varphi_1 + c_1 \cos\varphi_1) R_0}{2G \left\{ \frac{(R_0^2 + R_1^2) R_c}{2R_0^2 K_c} + u_0 \right\}} \right] \frac{\sin\varphi_1}{1 - \sin\varphi_1} \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

$$K_c = \frac{2G_c(R_0^2 - R_1^2)}{R_0[(1 - 2\mu_c)R_0^2 + 2R_1^2]}$$

式中, R_1 , 喷混凝土以后的洞室内半径; E_s , 钢材弹模; a, b , 分别为沿洞周径向和沿洞室轴向的锚杆间距; A, l , 分别为锚杆的截面积和杆长; u_0 , 喷层材料泊松比。

3.2.2 锚杆的极限状态方程

$$g_2(R_1, \sigma_s) = R_1 - \sigma_s = 0 \quad (9)$$

将锚杆拉应力 σ_s 的表达式代入上式并改写, 可得

$$R_1 - g'_2(P_0, c_1, \varphi_1, G, G_c, u_0, R_0, R_1) = 0 \quad (10)$$

式中, R_1 亦为随机变量, 而

$$\begin{aligned} & g'_2(P_0, c_1, \varphi_1, G, G_c, u_0, R_0, R_1) \\ &= \frac{ab}{A} \left[1 + \frac{K_c ab(R_0 + l)}{E_s A} \right] \left[-c_1 \text{ctg} \varphi_1 + (P_0 + c_1 \text{ctg} \varphi_1) \right. \\ & \quad \left. \cdot (1 - \sin \varphi_1) \left[\frac{(P_0 \sin \varphi_1 + c_1 \cos \varphi_1) R_0}{2G \left\{ \frac{R_1(R_0 + l)}{E_s} + u_0 \right\}} \right] \frac{\sin \varphi_1}{1 - \sin \varphi_1} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

3.2.3 锚杆与围岩间粘结锚固的极限状态方程

$$g_3(\bar{Q}, Q) = \bar{Q} - Q = 0 \quad (12)$$

将计算所得的粘结力 Q 的表达式代入上式并改写, 可得

$$\bar{Q} - g'_3(P_0, c_1, \varphi_1, G, G_c, u_0, R_0, \bar{Q}) = 0 \quad (13)$$

式中, \bar{Q} 亦为随机变量, 而

$$\begin{aligned} & g'_3(P_0, c_1, \varphi_1, G, G_c, u_0, R_0, \bar{Q}) \\ &= ab \left[1 + \frac{K_c ab(R_0 + l)}{E_s \cdot A} \right] \left[-c_1 \text{ctg} \varphi_1 + (P_0 + c_1 \text{ctg} \varphi_1) \right. \\ & \quad \left. \cdot (1 - \sin \varphi_1) \cdot \left[\frac{(P_0 \sin \varphi_1 + c_1 \cos \varphi_1) R_0}{2G \left\{ \frac{\bar{Q}(R_0 + l)}{E_s A} + u_0 \right\}} \right] \frac{\sin \varphi_1}{1 - \sin \varphi_1} \right] \end{aligned} \quad (14)$$

应用改进的蒙特卡罗模拟方法, 可分别求得;

a. 喷层的破坏概率

$$P_f = P[R_c < g'_1(P_0, c_1, \varphi_1, G, G_c, u_0, R_0, R_c)] \quad (15)$$

b. 锚杆的破坏概率

$$P_f = P[R_1 < g'_2(P_0, c_1, \varphi_1, G, G_c, u_0, R_0, R_1)] \quad (16)$$

c. 粘结锚固的破坏概率

$$P_f = P[\bar{Q} < g'_3(P_0, c_1, \varphi_1, G, G_c, U_0, R_0, \bar{Q})] \quad (17)$$

4. 二次衬砌的可靠度分析

从文献^[2]可知二次衬砌承受的径向地层压力为

$$\sigma_{r_0} = \left(\frac{G^* e^{-\frac{t_0}{\tau'}}}{K^*} \left[P_0 \left[\left(\frac{\lambda}{R_2} \right)^2 - 1 \right] - \frac{K_4}{K_3} \left(\frac{\lambda}{R_2} \right)^2 \left[\left(\frac{\lambda}{R_2} \right)^{K_3} - 1 \right] \right] + \frac{1}{2} s_1 e^{-\frac{t_0}{\tau'}} \left(\frac{\lambda}{R_2} \right)^2 \right) / \left[\frac{G^*}{G} \left(2 \frac{G}{E_h} \cdot \frac{d_h}{R_2} + 1 \right) + 1 \right] \quad (18)$$

式中, $\frac{\lambda}{R_2} = \sqrt[3]{\frac{K_3(2P_0 - K_4)}{K_4(2 + K_3)}} + 1$; $s_1 = \frac{2(P_0 K_3 + K_4)}{2 + K_3}$;

$$K_3 = \frac{\sqrt{6} \operatorname{tg} \varphi_1}{1 - \frac{\sqrt{6}}{2} \operatorname{tg} \varphi_1}; \quad K_4 = \frac{\sqrt{6} c_1}{1 - \frac{\sqrt{6}}{2} \operatorname{tg} \varphi_1}.$$

式中, λ , 隧洞围岩松动圈的半径; M^* , G^* , 分别为围岩介质材料的体积模量和长期剪切模量; E_h , 衬砌混凝土材料的变形模量; R_2 , 洞室二次衬砌后的洞室内半径; $d_h = R_1 - R_2$, 为二次衬砌的厚度; t_0 , 二次衬砌开始承载的时间; τ , τ' , 延滞时间。

二次衬砌的极限状态方程写为

$$g_4(R_h - \sigma_h) = R_h - \sigma_h = 0 \quad (19)$$

式中, σ_h , R_h , 分别为二次衬砌的计算应力和混凝土衬砌材料的抗压强度, 而

$$c_h = \sigma_{r_0} \cdot \frac{2R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \quad (20)$$

将式(18)代入式(20), 则式(19)可写成

$$R_h - g_4(P_0, c_1, \varphi_1, G, G^*, K^*, E_h, d_h) = 0 \quad (21)$$

式中, K^* , G^* , E_h , d_h 亦均为随机变量。

同样, 应用改进的蒙特卡罗方法可以求得二次衬砌的破坏概率, 写为

$$P_f = P[R_h < g_4(P_0, c_1, \varphi_1, G, G^*, K^*, E_h, d_h)] \quad (22)$$

5 工程实例计算分析

5.1 现考虑一深埋隧道圆形洞室, 毛洞半径为5米, 侧压力系数为1, 其余参数见表2所示

表2 隧道围岩稳定分析数据

参数	均值	方差
围岩地应力 p (MPa)	3.0	0.55
内聚力 c (MPa)	0.3	0.03
内摩擦角 φ	30°	3.50
泊松比 μ	0.35	0.03
弹性模量 E (MPa)	15000	300
岩体极限应变 ε_0	0.0067	0.0005
毛洞半径 R (m)	5.0	0.3

用改进的蒙特卡罗法进行计算, 得到的破坏概率及其精度统计估计如表3所示。

表3 围岩稳定的安全概率和破坏概率

计算次数 M	安全概率 P_s	破坏概率 P_f	变异系数 $\operatorname{Var}(P_f)$
100	0.5691	0.4309	2.580×10^{-2}
300	0.5706	0.4294	2.696×10^{-3}
500	0.5654	0.4346	9.349×10^{-4}
700	0.5692	0.4308	4.482×10^{-4}
1000	0.5643	0.4357	2.019×10^{-4}

5.2 在例一中由计算得知，隧道毛洞围岩不能自稳。现对其施作锚喷支护，初选的诸参数见表4所示

表 4 锚喷支护可靠度计算数据 (I)

类别	参 数	均值	方差
随 机 变 量	围岩地应力 p (MPa)	3.0	0.55
	围岩内粘聚力 c (MPa)	0.3	0.03
	围岩内摩擦角 φ	30°	3.50
	围岩剪切模量 G (MPa)	3500	42
	喷混凝土剪切模量 G_c (MPa)	7500	63
	支护前洞周位移 U_0 (cm)	3.0	0.2
	喷层外半径 R_0 (m)	5.0	0.3
	喷混凝土抗压强度 R_c (MPa)	19.6	3.3
	锚杆抗拉强度 R_1 (MPa)	387	3.5
	锚杆粘结力 \bar{Q} (KN)	147	29
非 随 机 变 量	喷混凝土泊松比 μ_c	0.17	
	喷层内半径 R_1 (m)	4.85	
	锚杆钢材弹性模量 E_s (MPa)	196000	
	锚杆截面积 A (cm ²)	3.801	
	锚杆长度 l (m)	2.0	
	锚杆环向间距 a (m)	1.0	
	锚杆纵向间距 b (m)	1.0	

应用改进的蒙特卡罗法进行计算，其结果见表5所示。

根据国外的一些研究资料报导，基础工程的失效概率为 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ ，而土工构筑物则为 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 。若现以 10^{-2} 为允许的失效概率，则由上述计算可知，上面初选的锚喷支护亦不满足安全要求，需调整支护参数。

5.3 对例二中的支护参数进行调整，调整后的诸参数见表6所示。

再次进行计算的结果如表7所示。

此时，支护系统的破坏概率 P_f 介于 $0.0060 \sim 0.0123$ 之间，如前述标准，基本上可以满足安全要求。

表 5 锚喷支护的安全概率和破坏概率

计算次数 M	破坏模 式 i	安全概 率 P_s	破坏概 率 P_f	变异系数 Var (P_f)
500	(1)	0.9712	0.0288	5.124×10^{-5}
	(2)	0.8343	0.1657	2.542×10^{-4}
	(3)	0.8407	0.1593	2.142×10^{-4}
1000	(1)	0.9709	0.0291	2.574×10^{-5}
	(2)	0.8211	0.1789	1.385×10^{-4}
	(3)	0.8231	0.1769	1.176×10^{-4}
锚喷支护系统的破坏概 率 P_f			$0.1789 \leq P_f \leq 0.3438$	

表中：(1)为喷层压碎；(2)为锚杆屈服；(3)为粘结锚固失效。

表 6 经调整参数后锚喷支护的可靠性计算数据 (I)

类别	参 数	均值	方差
随 机 变 量	围岩地应力 p (MPa)	3.0	0.55
	内粘聚力 c (MPa)	0.3	0.03
	内摩擦角 φ	30°	3.50
	围岩剪切模量 G (MPa)	350	42
	喷混凝土剪切模量 G_c (MPa)	750	63
	支护前洞周位移 U_0 (cm)	3.0	0.2
	喷层外半径 R_0 (m)	5.0	0.3
	喷混凝土抗压强度 R_c (MPa)	19.6	3.3
	锚杆抗拉强度 R_1 (MPa)	561	3.9
	锚杆粘结力 \bar{Q} (KN)	747	77
非 随 机 变 量	喷混凝土泊松比 U_c	0.17	
	喷层内半径 R_1 (m)	4.80	
	锚杆弹性模量 E_s (MPa)	196000	
	锚杆截面积 A (cm ²)	8.042	
	锚杆长度 l (m)	3.0	
	锚杆环向间距 a (m)	0.8	
	锚杆纵向间距 b (m)	0.8	

表 7 经调整参数后锚喷支护的安全概率和破坏概率

计算次数 M	破坏模式 i	安全概率 P_s	破坏概率 P_f	变异系数 $Var(P_f)$
500	(1)	0.9957	0.0043	6.716×10^{-6}
	(2)	0.9920	0.0080	1.581×10^{-5}
	(3)	0.9900	0.0040	7.667×10^{-6}
1,000	(1)	0.9966	0.0034	2.444×10^{-6}
	(2)	0.9940	0.0060	5.940×10^{-6}
	(3)	0.9970	0.0030	2.988×10^{-6}
锚喷支护系统的破坏概率 P_f			$0.0060 \leq P_f \leq 0.0123$	

表 8 二次衬砌可靠性计算数据

参 数	均值	方差
围岩地应力 p (MPa)	3.0	0.55
内粘聚力 c_1 (MPa)	0.3	0.03
内摩擦角 φ_1	30°	3.5
围岩剪切模量 G (MPa)	755	230
长期剪切模量 G^* (MPa)	1500	450
围岩体积模量 K^* (MPa)	4500	640
衬砌变形模量 E_h (MPa)	18400	38
衬砌厚度 d_h (m)	0.4	0.06
混凝土抗压强度 R_h (MPa)	21.5	7.4

$t_0=1$ (天), $\tau'=10$ (天), $\tau=20$ (天)

c. 本文所采用的改进蒙特卡罗方法, 计算简便, 精度较高, 能够自然满足诸参数间的相关性, 并且不受随机变量分布类型的限制。

d. 有待进一步研究的问题, 包括: 岩土和支护结构诸参数的统计性质; 岩土介质与支护结构间的概率相互作用; 围岩、结构的失稳和破坏标准与设计判据及其最优允许可靠度等。

参考文献

[1] Wu Xin and Xu Chao Jin. Applying the Improved Monte-Carlo's Method to Failure Probability Calculation of Reinforced Concrete Doorframe. Proc. of the 7th Chinese Bridge and Structure Engineering Society Symposium on Reliability of Engineering Structure, Beijing, China, (1987)

[2] 孙 钧、侯学渊编著. «地下结构»上册. 科学出版社, 1987年

[3] 高大钊编著. «土力学可靠性原理». 中国建筑工业出版社, 1989年

5.4 对该深埋隧道圆形洞室, 其二次混凝土衬砌的可靠性计算. 各参数见表 8 所示。

用改进的蒙特卡罗法进行计算, 其结果见表 9 所示。可以满足安全要求。

表 9 二次衬砌的安全概率和破坏概率

计算次数 M	安全概率 P_s	破坏概率 P_f	变异系数 $Var(P_f)$
100	0.9999	0.0001	1.480×10^{-10}
300	0.9999	0.0001	1.030×10^{-10}
500	0.9999	0.0001	5.439×10^{-11}
700	0.9999	0.0001	4.249×10^{-11}
1000	0.9999	0.0001	2.800×10^{-11}

结 语

a. 岩土工程的现行设计采用确定性的方法不能考虑岩土特性指标和结构参数的随机变异。本文对隧道复合衬砌提出的可靠度计算分析可以评价围岩稳定及其支护的安全, 是比较合理的。对于隧道复合支护系统的设计计算, 可使各子系统达到基本相同的可靠度, 将十分有利于进一步的优化设计。

b. 本文的示例计算表明, 对于一组随机参数, 其方差越大, 破坏概率 P_f 也越大; 但对于不同的参数, 其方差大小对 P_f 值的影响程度则是不同的。

公路隧道的总体设计理论与方法

王毅才

(西安公路学院)

摘要: 本文是作者对公路隧道勘测设计系统介绍的重要部分。总体设计是整个设计的核心,一个好的总体设计能给分项设计提供最可靠的依据,并保证各个分项设计之间的合理衔接。文中系统阐述了反映公路隧道总体设计特点的主要部分,并介绍应考虑的各种问题。

关键词: 公路隧道,选线,定位,横断面规划,设计

公路隧道设计中的最重要设计环节就是总体设计。固然,所有工程的总体设计都是极其重要的,例如设计一段公路,如果总体设计不当,自然会引起返工,甚至需要重新选线。但与公路隧道总体设计相比,其可选性较大。由于影响公路隧道总体设计的因素较多。如路线等级、用途、工程地质与水文地质条件、地形条件、气象条件、自然环境、地物情况、生活环境、施工条件等,都会直接或间接影响到公路隧道的总体设计。所以,适于选作公路隧道的位置不多,有时甚至是绝无仅有的,尤其对高等级公路中的长大隧道更是如此。在实际设计中,不仅需要考虑上述内容,而且还要顾及到长期运营效果。如果能恰当、灵活地考虑上述条件,那么就一定能设计出一条技术上合理、经济适用的隧道。下面对公路隧道的总体设计理论与方法作系统而扼要的叙述。

1 公路隧道的选线与定位

概括地讲,设置公路隧道大体上出于以下目的,即为了克服高程障碍或地形障碍、改善线形和提高车速、缩短里程和节省时间等。这就要求线型在满足路线等级的同时,尽量平直。即使是隧道专家,也会主张尽量少设或不设隧道。这是因为隧道毕竟是造价昂贵的构造物,一次投资颇大。另外,隧道段是遮蔽区间,给运营和养护带来诸多危险和困难。所以,选线时宜尽量采用明线方案。不过在放线过程中,如果高程障碍难以用明线渡过,或遇不良地质地段(如落石等),有时不得不采用隧道方式穿越时,还是应该果断地采用隧道方案,以确保路线的安全可靠。

既然隧道是一种不能排除的选择方式,而且存在许多具体问题,往往给运营和养护带来许多困扰,就不得不对这些问题加以了解、分析和解决。这些问题将直接影响到隧道的使用特性以及养护管理方式。概括地说,主要是几何特性和安全设施水平,它们之间具有密切的联系。公路隧道在运营和管理上存在的最突出问题,简捷地讲就是运营通风、运营照明和安全设施的优劣,它们将直接影响到运营安全。

1.1 坡度控制

影响通风的主要因素是隧道及其引线的纵坡。确切地讲是行车速度影响汽车的排污量,而坡度是影响车速的主要因素。当然,在其它条件相同时(如海拔标高、交通量及交通流组成等),坡度就是主要因素。在标准状态(海拔400m以下,卡车速度40~50km/h)下,汽

车的CO产生量 Q° 为:

$$Q^{\circ} = \Sigma M \cdot G \cdot q^{\circ} \cdot f_i \cdot f_h \cdot f_r \quad (\text{Nm}^3/\text{km} \cdot \text{h})$$

式中: M ——交通量 (辆/h), G ——车辆重量 (t/辆), q° ——标准状态下每t—km的CO产生量 ($\text{Nm}^3/\text{t} \cdot \text{km}$), f_i ——坡度修正系数, f_h ——海拔标高修正系数, f_r ——备用系数。

其中: f_i 值可参考下表 (卡车, 车速为40~50km/h)

坡度(%)	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
f_i	0.6	0.65	0.8	1	1.5	2.1	3.0

不同车速, 又影响到 f_i 值, 其修正系数 k (卡车) 为:

由上述公式及表格可以看出, 在计算 Q° 时, 首先隧道内的纵坡极为重要。纵坡由0增加1%时, 排污量可增加50%, 纵坡为2%时增加110%, 所以, 必须认真对待和控制纵坡。其次, 车速极为重要, 当车速降低到10km/h

卡车速度 (km/h)	5	10	30	40~50
修正系数 k	3.5	2.0	1.05	1.0

时, 排污量增加100%, 车速为20km/h时增加10%, 车速为30km/h时排污量也要增加5%。这里是指稳定车速, 如果加速, 排污量还要增加。除纵坡外, 平曲线型也会影响车速, 所以, 把平曲半径控制在不影响车速的范围就非常必要。对卡车来说, 曲线半径大于100m, 就不会影响车速。在公路隧道设计中, 一般均要求不设曲线隧道, 不得已时其半径应采用不设超高的曲线半径, 该半径远不会影响车速。所以, 只要进行纵坡控制即可保证车速。隧道设计工作者的设计路段, 不应该仅仅是隧道进出口之间的遮蔽路段, 还应包括引线在内。目前许多设计单位把引线段和隧道段分别交给不同的设计者设计的做法欠妥。引线段应由隧道设计者设计, 至少也应该由隧道设计者提出规划要求, 再由路线设计者做具体工作。

入口引线控制: 隧道入口引线的任务是保证驶入隧道的车辆能达到设计车速。因此引线的长度及纵坡应按加速车道计算。不是任何纵坡都能保证驶入隧道的车辆皆能达到设计车速, 例如在纵坡大于3.5%的上坡路段上, 不管怎样载重卡车也无法达到40km/h以上的设计车速。强调设计车速, 除交通工程方面的要求外, 还有隧道通风方面的考虑。通常的做法是把长期运营费用限制在最低水平上。由上述纵坡对车辆排污量的影响可以看到, 任何过低设计车速的行车速度都会导致排污量增加。即使是少量的增加, 在长期运营中也要付出很大代价。另外, 过大纵坡往往因通风标准难以达到, 而限制了交通流量。要解决这些问题, 只要隧道设计者在进行总体设计时, 充分注意就能办到。这里说明一点, 过去很多资料介绍过, 隧道引线的长度应当是不小于30m, 有的说不小于40m等, 都缺少根据。

1.2 平曲线控制

平曲线控制主要用来解决隧道运营照明中司机的视觉适应问题。在入口一侧, 平曲线的设置, 要保证司机有足够的注视时间, 要保证注视点到入口之间可以通视。通视段长度, 在最困难条件下也要保证大于或等于停车视距加10米的总和。在出口一侧, 要保证司机的亮适应过程所通过的路段都在直线段上, 在困难条件下也要保证在可通视段上。亮适应时间与出口外的环境有密切关系, 植被好, 顺光条件下1~3秒即可适应; 无植被, 逆光时一般应大于3秒。

出口引线控制: 由上述可知, 出口引线任务是保证驶出隧道的司机, 有足够的亮适应时

间。在亮适应所需时间内，车辆所通过的路段应位于直线段上，其纵坡应保持与隧道纵坡一致，在困难条件下，也要保证位于可通视路段上，以此确定出口引线的平曲线、纵坡和长度。

综上所述，引线的设计要领是：入口引线要保证设计车速，出口引线要保证满足司机的亮适应需要。

总之，在进行隧道定位时，除必须满足隧道结构稳定和洞门稳定之外，还应满足包括隧道和引线在内的整个路段的几何特性。

1.3 安全设施

安全设施主要包括报警设施、紧急警报设施、消防设施、监控设施、信号设施等。

报警设施包括报警按钮、应急电话。报警按钮和应急电话通常只设置在洞内，其设置密度根据实际需要确定。报警按钮可在50~100m范围内选择，应急电话可在100~200m范围内选择。

闭路电视属监视设施。如果设置闭路电视系统，则可以考虑不再设置报警设施。不过在重要隧道内，也有重复设置的先例。紧急警报设施包括电动警笛（或电动警报器）、闪光灯（或叫点灭灯）、灯光标志牌等，通常都设置在洞外引线路段上。以设计车速60km/h为例从距洞门82~92m处开始设置。闪光灯（一般均为红色）及灯光标志牌，一般应保证在视认距离80~90m处可以判读。如果判读路段刚好在反弯路段上，则应增设一只闪光灯，其位置应在判读距离起点以外的明显位置上。灯光标志牌的字迹或符号大小，以保证在判读距离上能看清楚为尺度。

消防设施包括灭火器及消火栓。灭火器要保证有足够供初期灭火使用的数量，其间距以取用方便为标准，其性能以扑灭油料火灾为选择依据，并要求轻便和易于使用。消火栓主要供消防专业人员取水和使用，间距以消防车常用水带长度为准，保证消防作业时能边取水边灭火。

监控设施包括CO检测计、烟雾透过率计和交通检测器。在对向交通条件（二级以下公路）下，CO检测计和烟雾透过率计在进出口内150~200m处各安装一部，在长大隧道的中间适当增设一至数部。交通检测器在进出口洞外50~100m处各设一部，在长大隧道的中间适当增设一部。单向交通条件（一级以上公路）下，与对向交通时基本相同。但考虑到污染物浓度沿隧道纵向呈三角形分布的实际情况，在进口处的CO检测计和烟雾透过率计可以内移或取消。

有闭路电视系统时，烟雾透过率计可以少设或不设。

信号设施包括红绿色信号灯和指示通过横通道带箭头符号的闪光标志灯。交通信号设施是管理交通的神经，宁可把交通信号加密些以确保交通指挥的灵敏度。原则上要求在正常交通密度条件下，司机在任何位置上都能不被遮挡地看到一组交通信号，即前一组信号刚刚超出视野范围时，后一组信号已经进入视野。这样，可以保证即使前方发生交通事故，只要交通信号给出停车指令，后续车就不会盲目靠近事发点和拥进隧道，给救援工作和疏导工作造成困难。当然，也可以避免发生再生性灾害。

2 横断面规划与设计

公路隧道在横断面规划与设计上的显著特点是，它不仅仅以结构受力合理为唯一依据。

在考虑建筑限界的同时，还要考虑通风所需的附加空间。由于公路隧道是长期使用的构造物；而且在使用过程中，试图再扩大断面极其困难，有时甚至几乎是不可能。所以，隧道路段的交通量计算应该考虑远期发展前景。在规划隧道通风时，宜将交通量取足，有发展前景和可能提高路线等级的隧道，应将远景交通量预测在内。这样，就可以避免发生隧道刚刚修建好，就满足不了实际需要的情况。

根据计算经验，长度在700~800米以下的公路隧道，包络建筑限界的曲墙式断面，在满足通风要求方面一般不会遇到困难，无须另外附加通风断面。但长度大于1000m的隧道，往往要求附加通风断面。附加断面面积，一般可按以下方法计算：

$$A = A_0 - A_j$$

式中： A_0 ——隧道净空断面面积，

A_j ——隧道建筑限界范围面积。

隧道净空断面面积，即过风断面面积。从实用上看，净空断面范围内还有各种设施所占的位置。这些宏观上看来类似毛状结构的内部设施，对纵向通风来说，其阻力不可忽视，有时阻力可增大25~35%。如果内部设施都能嵌入衬砌内部，则可认为不影响通风阻抗。如按通风计算，得到所需新风量为 Q ，则隧道内纵向风速 V 为：

$$V = \frac{Q}{A_0}$$

隧道内纵向风速 V 对交通安全有一定影响，单向交通时以8~10m/s为宜。不过近年来国外有增大的趋势，有的主张可以取到10~12m/s的程度。这主要是出于对通风机运转费用的考虑，运转费与通风管道断面面积 A_0 的平方成反比。但 A_0 的增加会导致建筑结构费用的增加，所以要通过试算对二者进行比较，决定最佳通风断面。有时甚至需要考虑在长大隧道中间设置通风竖井，对通风区间进行分段，以求减少 A_0 ，不过这需要综合判断。当 A_0 算定之后，即可在满足建筑限界的条件下，寻求断面的合理形态。

横断面规划与设计是一项十分繁琐的工作，有时要耗费很多时间，这一点设计者要有足够的思想准备。

上面论述的进行新风量计算，是一项不可缺少的工作环节。这里不具体介绍新风量的计算过程，但是设计者必须做实际的计算，而不是估算。为了得到最经济的设计成果，可能要做若干次反复计算。

3 其它问题

公路隧道总体设计内容，上面介绍了最能反映公路隧道特点的部分，实际设计中远不止考虑这些问题，要考虑的问题还很多。例如洞内外排水系统的规划，就极为重要。如果洞外的排水系统规划不当，不能把降水或地表水（河川、小溪、堰塘等）充分考虑在内，必然有大量水经过透水层，节理裂隙渗入地下，给衬砌防排水增加难度。边、仰坡的选择和防护也很重要，没有稳定的边、仰坡就没有交通安全，有时甚至连正常的交通都难以维持，当然更谈不上舒适性。选择洞门时，设计者应当亲自到工地反复查看，并与地质工程师共同商量，是一项必须慎之又慎的工作。对衬砌类型和施工方法也要根据各个阶段的地质调查结果进行合乎实际的规划。洞门形式要结合隧道所在地、自然环境、地形地物等考虑。不论隧道洞身属于哪个档次，最能引人注目的莫过于隧道洞门。洞门是隧道脸面，设计者应当实事求是的

设计一个美观合用的建筑形式。对于运营和施工期间的水电供给也要在总体规划中充分考虑。还有其它附属工程，如管理所的建筑位置、形式、规模、设施水平和人员编制等，都要规划在内。还有环境保护和绿化工作，弃碴场规划，建筑材料规划等，都要根据实际情况考虑。

开洛高速公路黄土隧道设计

严长卿

(河南省交通规划勘察设计院)

摘要: 开洛(开封至洛阳)高速公路路线的中段和两段穿越邙岭黄土塬,分布了五座黄土公路隧道。本文论述这五座隧道所处的地形、地质、水文及路线概况,黄土隧道断面形式的选定,计算荷载的考虑,计算方法和计算图式,最后简论隧道的通风和照明。

关键词: 黄土隧道,设计,断面,荷载,计算

河南省开封至洛阳高速公路全长201.4公里,路线的中段和西段穿行于邙岭之中,有五座中隧道。在同类地质情况下的公路或铁路隧道中,这几座隧道的开挖宽度是较大的。设计前我们调查了国内一些黄土隧道,结合现场的实际情况进行了设计。由于缺乏设计黄土隧道的经验,在设计中遇到些具体问题只好摸索着解决,有些不成熟的体会粗略地总结一下,仅起抛砖引玉的作用。

1 隧道所处的地形、地质、水文及路线概况

开洛高速公路介于黄河和陇海铁路之间,基本走向为东西向。路线走完了东段及中段一部分平原地区以后,即进入邙岑山系在黄土上穿行(图1)。接近巩县东庄镇一带地形起伏较大,沟壑纵横,地形复杂,其地势基本是南高北低向黄河倾斜。路线平行于黄河在黄土塬北缘截沟而过,在路线里程k149+920至k152+170的2.5Km范围内,就分布了长度分别为519m、432m、435m、和130m的四座隧道。路线下到黄河Ⅱ级阶地后,继续前行跨过黄河支流伊洛河后,又上到另一段Ⅲ级阶地前缘地带。此区阶地亦为黄土塬,塬边冲沟发育,多呈“U”型沟谷,边坡基本稳定。路线比较了几个上塬方案,唯有通过康店隧道(全长530m)顺沟而进较理想。这五座隧道所处地质条件基本相同,洞身均通过老黄土(Q_2)地层。土质为黄褐、棕褐色亚粘土,为致密块状结构多呈半坚硬状,天然含水量低,强度高,透水性弱属无湿陷性黄土,垂直及斜节理,裂隙均不发育,土体的整体性较好,基本是稳定的。

在隧道洞顶以上的土层中间或夹有数层厚度不等(一般1.5~5m)的棕红色古土壤层,含姜状钙质结核,与黄土接触面形成相对软弱面呈“假整合层”。在设计时充分考虑其影响,避免隧道拱部穿过。

本区地震强度小、频率低属六度烈度区,可不设防。地下水埋藏较深,一般距地表60至80米。

路线设计时注意到隧道布设的要求。隧道均在单向纵坡大于0.4%小于3%的坡段上。尽量使隧道位于直线,为施工及运营创造好的条件。并且为减小衬砌结构的内力便于设计和施工,隧道分成上下行分离式独立隧道,两隧道之间的净距为35~40米以上,基本满足《公路隧道设计规范》(公路隧规)中定的最小净距要求。

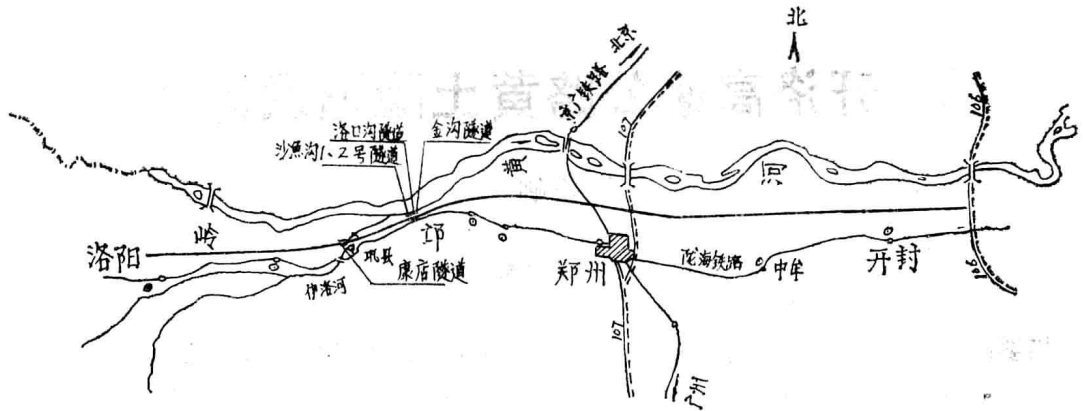


图1 开洛高速公路平面图

金沟隧道至沙鱼沟2号隧道的进出口条件较好。从平面上看洞轴线与沟槽接近正交，基本是垂直于等高线进出洞，很少有地形偏压。但康店隧道的东进口地形条件较复杂。在初步设计及施工图定测阶段，在这一条沟内曾作了好几个方案进行综合比较。由于黄土高原地区年降雨量不大，黄土塬上的地面径流相对不太集中，沟槽支离破碎而往往形成台阶状或成土塄。当地居民常在沟边或有时在沟中挖窑洞或修建房屋，路线经过时将遇到大量的拆迁问题，给公路建设增加了很大一笔费用。因此在路线基本走向及隧道越岭垭口选定以后，具体进洞口的的位置就要细致进行比较才能决定。当黄土冲沟较宽阔，塬上汇水面积不大水量不多时，两座隧道均放在沟内，这样可大大缩短隧道长度和减少拆迁量，同时边、仰坡的刷方量也最少。不过这种条件也不总是具备，康店隧道东入口沟槽不太宽阔，不具备把两座隧道都置于沟内的条件，只好将北线隧道置于两沟中之土梁中，将南线隧道置于沟侧，既要满足两隧道间净距的要求，还要兼顾隧道前分离式路基的接线条件。60年代初期就总结出了修建隧道“早进晚出”的经验，主要立足于运营阶段的安全性，不留隐患减少维护检修费用，但必须以洞口围岩完整，边仰坡稳定为前提。康店隧道北半幅由于地形较破碎，山梁两侧还有窑洞院落，要提前暗进是不可能的，只能以较深的路堑和明洞接长。

2 断面型式的选定

隧道的断面型式除了满足运营时车辆行人的限界等条件外，主要根据结构的受力状况来选用。对于通行车辆的隧道，就其拱部常采用以下几种内轮廓型式（图2）：

（一）尖拱型（三心圆拱）；（二）接近割圆的尖拱型（三心圆拱）；（三）割圆拱型（单心圆拱）；（四）平坦拱型（三心圆拱）。边墙主要有直墙式和曲墙式两种。通过分析计算可得出初步结论：对于垂直均布荷载相对较大，侧压力相对较小的荷载情况，尖拱型衬砌较好。相反，对侧压力相对较大，同时为了获得较大的净空利用率，采用平坦拱是合适的，例如某些地下洞室工程，铁路多线隧道可采用。这种型式在拱中部有较大的局部垂直荷载时受力较差，而接近割圆的尖拱型和割圆单心拱，对各种荷载的适应程度介于以上两种之间，新的铁路隧道标准设计即采用接近割圆的三心拱。一些资料表明，按七十年代以前铁路隧道标准设计施工的隧道，有些在拱腰部位出现纵向裂纹。分析其原因是作用在拱部的垂直荷载并非均布，施工中拱顶回填不密实，垂直荷载呈马鞍形分布，拱尖两侧或有集中荷