

公路隧道火灾损伤评估

FIRE DAMAGE ASSESSEMENT METHODS FOR ROAD TUNNEL

汇报人:周仁强

Speaker: Zhou Ren-qiang



内容提纲

- 一 概述 (Summary)
- 二 高温对钢筋和混凝土的力学性能的影响
(Effects of high temperature on mechanical properties of reinforce steel bar and concrete)
- 三 隧道火灾损伤评估
(Fire damage assessment methods for tunnel)
- 四 结论 (Conclusion)

一 概述 Summary

一、概述

国内外隧道火灾事故的大量实例表明,火灾过后,隧道结构均会产生不同程度的损坏。这主要是高温导致衬砌结构材料以及一定范围内围岩的物理性能和力学性能的改变。尽管这些改变不一定会使衬砌结构完全丧失承载能力,但却大大降低了隧道使用的安全性和使用寿命,所以火灾事故后,及时对衬砌结构的受损状态进行快速有效的检测、合理判断其损伤等级并提出相应的加固补强措施,对保证隧道运营的安全具有十分重要的现实意义。

一、概述

国外发展现状

current development abroad

美国 (American) 混凝土学会 (American concrete institute, ACI) 于1958年成立火灾研究室, 进行火灾后结构物损伤研究。其研究室配备一栋大型中央自动控制系统的实验室, 实验室内设置延烧梁、楼板及墙等构件的专用瓦斯高温炉, 对混凝土结构的耐火性能研究的成果丰硕。

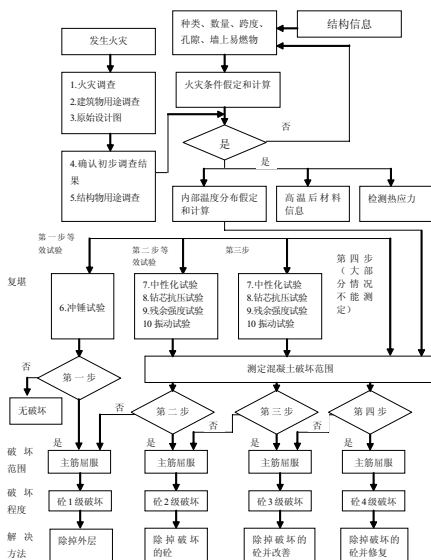
一、概述

日本 (Japan) 防火研究开始于20世纪30年代, 目前设有研究及检测机构9个。

日本评估共分为2次调查, 在1次调查中确定受损区域相关外观上的损伤情况。根据1次调查结果, 依受损规模和经济性及测试效果的考虑拟定2次调查的内容。其中2次调查中采用的手段主要有: test hammer混凝土强度测试; 中性化测试; 混凝土钻心试件抗压测试等。流程见下图。

日本钢筋混凝土建筑物火灾调查流程

Fire research procedure of reinforced concrete buildings in Japan



日本火灾鉴定外观调查基准表

(Inspection process of damage to Japanese steel concrete structure)

种类	外观状态						破坏等级
	颜色	破碎	爆裂	隆起	变形	其它	
柱子	被浓烟熏成黑色	无	无	部分破坏层	无		一级破坏
板	被浓烟熏成黑色	轻微	无	无	无		
梁	被浓烟熏成黑色	轻微	无	无	无		二级破坏
柱子	粉红色	轻微	微小	保护层破坏	无		
板	黑色和棕色	部分钢筋裸露	无	无	无		
梁	被浓烟熏成黑色	大部分端部破坏钢筋裸露	表面微小爆裂	下侧端部破坏	无	钢筋和混凝土之间的粘结力未降低	

日本火灾鉴定外观调查基准表

(Inspection process of damage to Japanese steel concrete structure)

种类	外观状态						破坏等级
	颜色	破碎	爆裂	隆起	变形	其它	
柱子	淡黄色	部分钢筋裸露	表面微小爆裂	保护层完全破坏	钢筋未屈服		三级破坏
板	粉红和残留的浓烟熏成黑色	10%主筋暴露	表面微小爆裂	保护层完全破坏	部分钢筋屈服	箍筋暴露, 粘结力未降低	
梁	淡黄色	下侧爆裂 50%主筋暴露	表面微小爆裂	保护层完全破坏	大部分主筋屈服, 产生一定的挠度		

日本火灾鉴定外观调查基准表

(Inspection process of damage to Japanese steel concrete structure)

种类	外观状态						破坏等级
	颜色	破碎	爆裂	隆起	变形	其它	
柱子	淡黄	大范围爆裂	表面微小爆裂	保护层完全破坏			四级破坏
板	粉红	严重破碎	表面微小爆裂	保护层完全破坏		粘结力完全丧失	
梁	淡黄	大部分主筋暴露	表面微小爆裂		挠度过大结构破坏, 大部分主筋屈服		

一、概述

英国 (England) 混凝土学会 (the British Concrete Institute, BCI) 于1978年在其技术性报告中提出了火灾后结构物评估程序及混凝土构件火灾程度目测分级表。1986年, Tovey提出分成定性评估、定量评估及修补技术3部分。定量评估中以混凝土颜色判定、冲锤试验及钻心试验为主, 超声波, 温莎探测针 (Windsorprobe) 等为辅。

一、概述

澳大利亚 (Australia) 火灾评估首先进行调查, 主要的调查内容为现场调查 (site inspection) 及情况调查 (condition survey)。火灾损伤采用如下分级表:

一、概述

澳大利亚火灾损伤分级表

级数	等级	表面	表面颜色	裂缝	疏松	钢筋暴露
1	轻微	有破碎	未变色	轻微	轻微	无
2	中等	部分破碎	浅红	较大	部分	10%~25%
3	重度	完全破碎	浅黄	宽而深	严重	25%~50%
4	严重	完全破碎	浅黄	宽而深	严重	超过50%

Classification of fire damage in Australia

Series	Grade	Coating	Surfacial colour	Cracking	Fragment	Steel exposure
1	Light	Some spalling	Normal colour	Slight	Slight	None
2	Middle	Part spalling	Light red	Significant	Partial	10%~25% no bending
3	Severe	Spalling completely	Light yellow	Expand and extend	Expand and extend	25%~50% less than one steel bar bending
4	Very severe	Spalling completely	Light yellow	Expand and extend	Expand and extend	50% more than one steel bar bending

一、概述

国内发展现状

国内研究火灾损伤评估起步较晚，1990年底公安部四川消防所完成了“钢筋混凝土建筑结构火灾烧损程度鉴定技术的研究”，1991年底江苏省建筑科学研究院完成了“建筑物火灾后结构受损鉴定及修复加固方法”。清华大学、同济大学、西南交大、铁科院等单位进行了有关混凝土结构火灾性能方面的研究，取得了一定的科研成果。

二 高温对钢筋和混凝土的力学性能的影响

Effects of high temperature on mechanical properties of reinforce steel bar and concrete

二、高温对钢筋和混凝土的力学性能的影响

高温下钢筋和混凝土的力学性能总体上呈现随温度升高逐渐劣化的趋势，主要表现为随温度升高，钢筋和混凝土的强度和弹性模量逐渐降低，混凝土的峰值应变逐渐增大，混凝土的单轴应力-应变曲线越来越扁平，钢筋和混凝土的粘结强度下降，极限滑移量增加混凝土的徐变明显加快。

(一) 高温对混凝土力学性能的影响

影响火灾后钢筋混凝土结构力学性能的五個主要因素

Five main factors affecting the mechanical properties of reinforced concrete structure after fire

混凝土强度等级

Strength Grade of reinforced concrete

骨料类型

Type of aggregate

受灾温度

Temperature of disaster

预加荷载

Prestressed Load

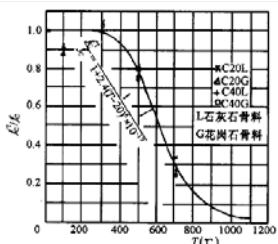
火灾持续时间

Duration of fire

(一) 高温对混凝土力学性能的影响

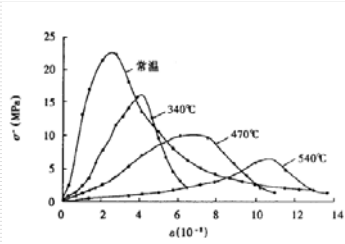
混凝土受灾温度低于 300℃时，强度损失甚微；火灾温度在300~400℃时强度降低 10%~20%；**400℃**以上混凝土强度下降很快，表面开始出现裂缝；600℃左右表面裂缝贯通，构件混凝土保护层的粘结力遭到破坏，强度大幅度下降；800~900℃则强度几乎完全丧失。

(一) 高温对混凝土力学性能的影响



高温下棱柱体抗压强度

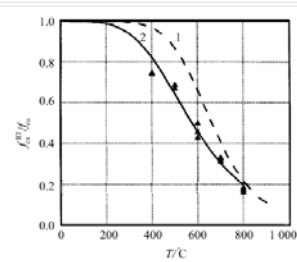
Compression strength of prism in high temperature



高温后棱柱体应力—应变曲线

Stress-strain curve of prism after high temperature

(一) 高温对混凝土力学性能的影响



1 - C30 理论曲线; 2 - C80 理论曲线; ▲ - C80 实测值

不同强度混凝土升温后的立方体残余强度比

Intensity comparison of different concrete cube remains after temperature increased or decreased

(一) 高温对混凝土力学性能的影响

混凝土强度随温度变化的表达式为

$$R(T) = Ra \quad T \leq 400^{\circ}\text{C}$$

$$R(T)/Ra = 1.6 - 0.0015T \quad 400^{\circ}\text{C} < T \leq 800^{\circ}\text{C}$$

混凝土的弹性模量随温度变化规律表达式为:

$$Ec(T)/Ec = 1.00 - 0.00175T \quad T \leq 200^{\circ}\text{C}$$

$$Ec(T)/Ec = 0.92 - 0.000923T \quad 200^{\circ}\text{C} < T \leq 700^{\circ}\text{C}$$

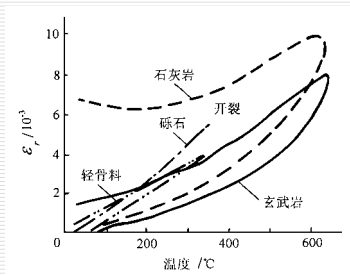
$$Ec(T)/Ec = 0.25 \quad 700^{\circ}\text{C} < T$$

(一) 高温对混凝土力学性能的影响

高温下首先是水泥石中水化产物发生急剧变化。

水泥石在升温及冷却过程中均为收缩变形，而硅质、钙质等骨料为膨胀变形，因此混凝土在经受火灾过程中水泥石——骨料界面及表面的开裂导致强度降低，特别是温度高于450~500℃时最为明显。

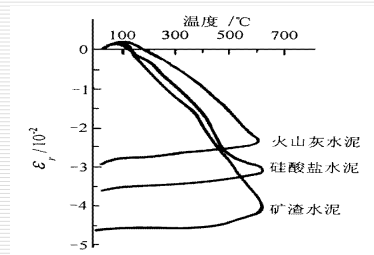
(一) 高温对混凝土力学性能的影响



骨料的热变形（加热至600℃）

thermal deformation of aggregates
(heated to 600 °C)

(一) 高温对混凝土力学性能的影响



水泥石热变形（加热至600℃）

thermal deformation of hardened
cement paste (heated to 600 °C)

(二) 高温对钢筋力学性能的影响

钢筋的屈服应变随温度的升高变化不大，高于200℃时稍有降低。屈服强度随温度升高呈下降趋势，非预应力钢筋在550~600℃时，强度下降50%左右，而预应力钢筋在400℃左右时，其强度损伤达50%。

(二) 高温对钢筋力学性能的影响

高温后钢筋屈服强度随温度变化的模拟方程为：

$$R_y(T) / R_y = 1 \quad T \leq 200^\circ\text{C}$$

$$R_y(T) / R_y = 1.25 - 0.00167T \quad 200^\circ\text{C} < T \leq 700^\circ\text{C}$$

经受高温后冷拔低碳钢丝的屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 随温度变化的模拟方程为：

$$\sigma_{0.2}^T / \sigma_{0.2} = (101.99 - 0.0377T) \times 10^{-2} \quad 20^\circ\text{C} < T \leq 400^\circ\text{C}$$

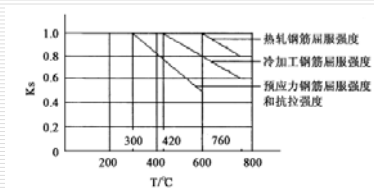
$$\sigma_{0.2}^T / \sigma_{0.2} = (139.10 - 0.144T) \times 10^{-2} \quad 400^\circ\text{C} < T \leq 900^\circ\text{C}$$

钢筋的弹性模量随温度变化的模拟方程为：

$$Es(T) / Es = 1 - 4.86 \times 10^{-4}T \quad 0^\circ\text{C} < T < 330^\circ\text{C}$$

$$Es(T) / Es = 1.515 - 1.879 \times 10^{-3}T \quad 330^\circ\text{C} \leq T \leq 700^\circ\text{C}$$

(二) 高温对钢筋力学性能的影响



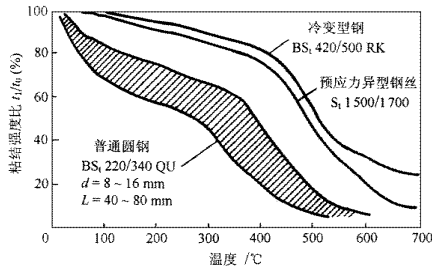
钢筋冷却后强度折减系数

Reduction Factor of reinforcing
steel bar after cooling

(三) 高温对钢筋与混凝土粘结力的影响

火灾后钢筋与混凝土的粘结力的变化取决于**温度、钢筋种类**。螺纹钢在350℃左右时与混凝土的粘结力几乎没有降低；到450℃左右时约降低25%；700℃时降低80%。光圆钢筋与混凝土的粘结力在100℃左右降低约25%；到450℃时则完全丧失粘结力。

(三) 高温对钢筋与混凝土粘结力的影响



不同温度下钢筋与混凝土得粘结强度比

bonding strength comparison of reinforcing steel bar and concrete in different temperature

三 隧道火灾损伤评估

Fire damage assessment methods for tunnel

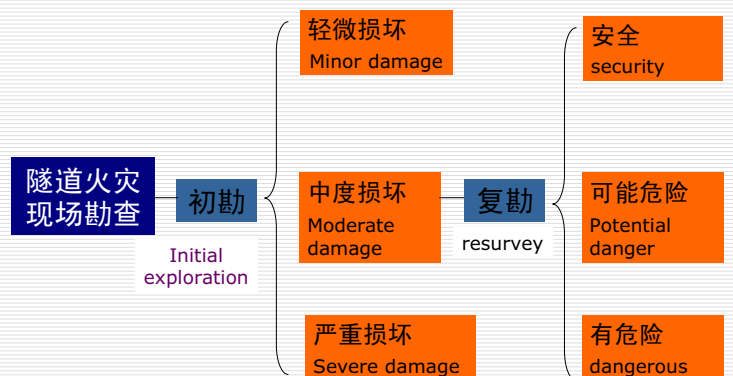
三、隧道火灾损伤评估

隧道火灾后衬砌破坏情况:

隧道损坏主要是烧坏衬砌拱部及边墙，拱部较边墙严重，一般损坏厚度在10~20cm，主要表现为：

- ➔ 衬砌结构严重变形、开裂；
- ➔ 衬砌混凝土爆裂剥落；
- ➔ 衬砌混凝土强度降低；
- ➔ 衬砌结构整体性受到破坏。

三、隧道火灾损伤评估



三、隧道火灾损伤评估

初勘主要工作 The major work in Initial exploration

1、收集并建立受火结构的基本资料

- 隧道结构资料。
- 火灾燃烧情况。
- 受火部位的位置。
- 隧道内装饰方式及材料等影响火场温度的资料。
- 各部位燃烧残留物的调查。

三、隧道火灾损伤评估

混凝土颜色与温度关系

Relation between concrete color and temperature

温度/℃	表面颜色变化
100~300	灰色基本不变（实际火灾现场混凝土表面有黑色烟灰），无裂纹
400	浅粉红色，基本无裂纹
500~600	浅粉红色至棕色火浅紫色，少量裂纹
700	浅紫色至灰色，有龟裂纹
800	浅灰色至灰白色，棱角处有少量石灰石爆裂，较多龟裂纹，且有2~3cm酥松层
900	浅灰白色，棱角处有较多的石灰石爆裂，很多龟裂纹，且有2~3cm剥落层和4~5cm酥松层

三、隧道火灾损伤评估

2、构件受火情况调查

- 划定勘察区域。
- 构件受损情况调查。

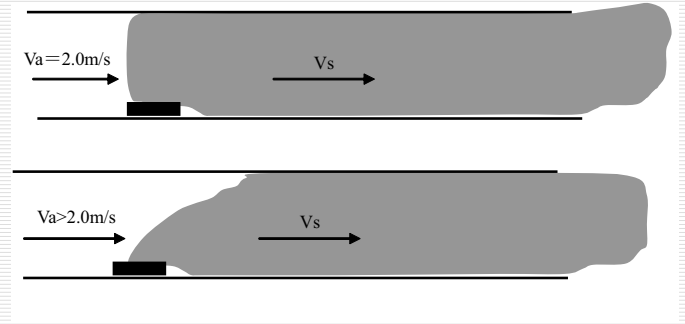
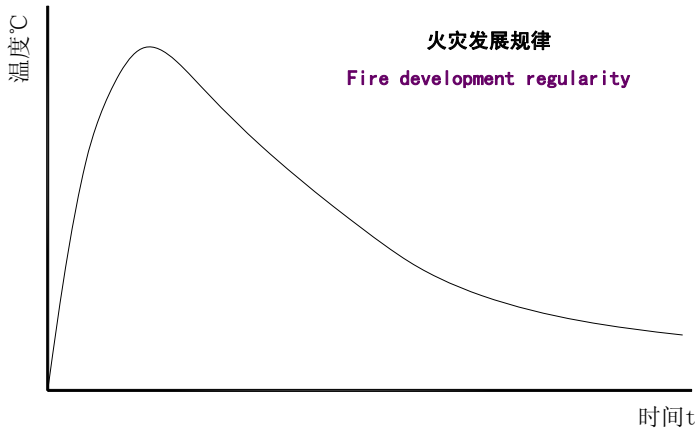
3、构件初勘结果的分析评定

三、隧道火灾损伤评估

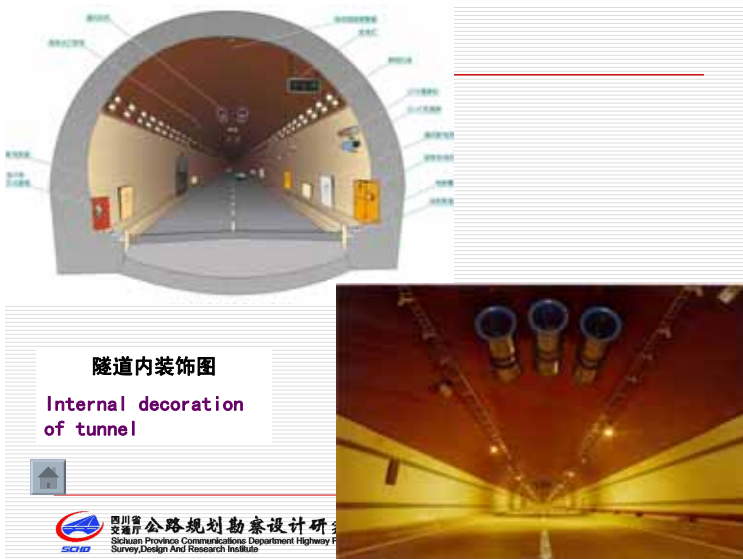
1 辆小客车	2.5MW
1 辆大客车	5MW
2-3 辆客车	8MW
1 辆货车	15MW
1 辆公共汽车	20MW
1 辆有货物的客车	20-30MW

火灾规模

Fire scale



隧道火灾通风示意图
Tunnel ventilation on fire

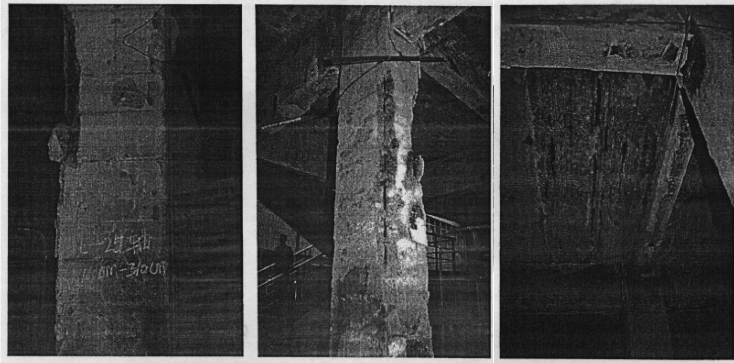


三、隧道火灾损伤评估

复勘主要工作 The major work in resurvey

1、构件损坏情况的量测

- 裂纹数量与分布的描绘
- 裂纹宽度与深度的量测
- 混凝土剥落部位与范围量测
- 混凝土爆裂部位与范围量测
- 钢筋外露情况的量测
- 构件挠度量测



钢筋混凝土结构火灾损伤情况

Fire damage of RC concrete structure

三、隧道火灾损伤评估

2、确定构件内部遭受最高温度

复勘主要任务是**确定混凝土的最高受火温度**，而要确定火灾后混凝土曾经经历的最高温度主要有三条途径：

→利用数值计算进行求解；

Solve problems with numerical calculation

•利用构件内部温度场简化计算模型进行求解；

Solve problems with simplified model of component internal temperature field

•利用火灾现场试验进行求解；

Solve problems with tests at the fire scene

三、隧道火灾损伤评估

火灾现场试验主要有两类方法

无损检测 (Nondestructive Test) :

超声波探测仪法 (Ultrasonic detector technology) 、

红外热像技术 (Infrared thermal imaging technology) ;

破损检测 (Destructive test) :

混凝土烧失量试验 (RC loss on ignition test (LOI)) ,

取芯法 (Core boring) 。

三、隧道火灾损伤评估

目前推估混凝土最高受火温度较准确的方法是混凝土烧失量试验，因此在复勘中应**以烧失量试验为主超声波法及钻芯取样法为辅**。

超声波法：对混凝土损伤酥松层比较敏感，混凝土温度较低时可以用此法来检测，但该法对混凝土表层的损伤状况依赖性较大，温度高于800℃时误差较大。

三、隧道火灾损伤评估

红外热像技术：具有非接触，大面积扫描，灵敏快速的特点，但是**比较偏于定性测量**，在定量方面还有待进一步研究。

取芯法：是一种比较直观和较精确的方法，能够提供火灾混凝土内部受损的详细资料，但**当衬砌结构受损严重时（混凝土强度低于10MPa）时，钻取完整的芯样比较困难。**

混凝土烧失量试验 RC loss on ignition test

试验原理 Test Theory

根据高温下水泥水化物及其衍生物分解失去结晶水，同时混凝土中的 CaCO_3 分解产生 CO_2 ，从而减轻其重量的原理，首先测定不同温度所对应的烧失量，得到相应的回归关系，然后由实际过火混凝土的烧失量大小来判断该混凝土的最高受火温度

混凝土烧失量试验 RC loss on ignition test

主要步骤 Major steps

- (1) 现场取样
分别在过火构件表面和未过火构件表面凿取少量混凝土
- (2) 未过火混凝土对应不同预处理温度的烧失量。
$$IL_1 = (W_{105} - W_{1007}) / W_{1007}$$
- (3) 预处理温度预烧失量之间的回归关系。

混凝土烧失量试验 RC loss on ignition test

- (4) 过火混凝土的烧失量
$$IL' = (W'_{105} - W'_{1007}) / W'_{1007}$$
- (5) 构件表面最高受火温度
$$T = 1000 - 1000 \times IL' / IL_0$$

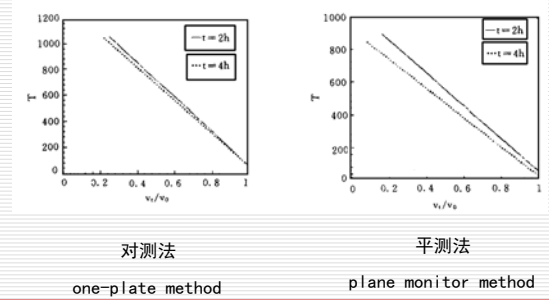
超声波检测隧道火灾损伤

用超声波技术进行隧道衬砌火灾损伤检测也是一种有效的手段，主要可以用来检测衬砌结构如下内容：

- (1) 衬砌混凝土温度场；
- (2) 衬砌混凝土剩余抗压强度；
- (3) 衬砌混凝土剩余抗拉强度。
- (4) 衬砌混凝土损伤层厚度。

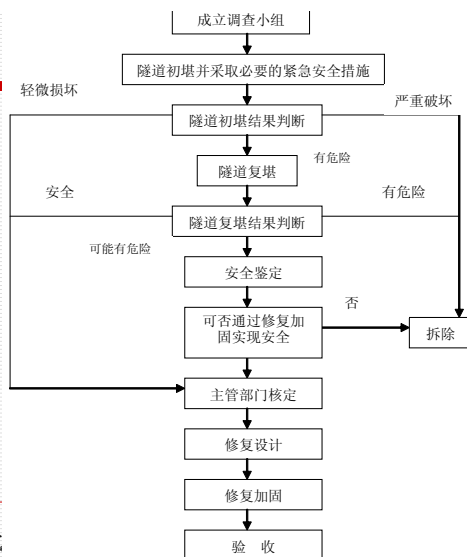
超声波检测隧道火灾损伤

(一) 超声波检测方式



火灾评估程序

Fire assessment procedure



损伤等级确定

在总结国内外大量隧道火灾实例的基础上，并参考地面建筑物火灾损失评估标准及损伤程度分类，建立了以损伤深度、酥松深度、剥落深度、衬砌砼残余强度比、结构残余支撑能力、砼衬砌超声波速比、火灾温度、混凝土表面颜色、烧伤区混凝土特征等为分级指标。

火灾损伤评定分级建议 分为五级：轻度损伤 (Minor damage)、中度损伤 (Moderate damage)、严重损伤 (Severe damage)、极度损伤 (Extreme damage)、破坏 (Damage)。见下表

衬砌结构损伤分级表 Lining damages classification

损伤程度	损伤指标特征							表面特征	
	损伤深度 (cm)	酥松深度 (cm)	剥落深度 (cm)	衬砌砼残余强度比	结构残余支撑能力%	砼衬砌超声波速比	火灾温度 (°C)	混凝土表面颜色	烧伤区混凝土特征
	轻度损伤 (I)	3~6	2~4	基本无	>0.7	>85	>0.8	400 500 600	烟熏黑色
中度损伤 (II)	6~12	4~7	0~3	0.5~0.7	70~85	0.5~0.8	600 700 800 900	混凝土烟熏黑色, 略带浅红色	表层混凝土剥落和烧酥, 烧损的混凝土组织结构发生变化, 呈赭红色, 结构表面有局部0.5~2mm 裂纹

衬砌结构损伤分级表 Lining damages classification

损伤程度	损伤指标特征							表面特征	
	损伤深度 (cm)	酥松深度 (cm)	剥落深度 (cm)	衬砌砼残余强度比	结构残余支撑能力%	砼衬砌超声波速比	火灾温度 (°C)	混凝土表面颜色	烧伤区混凝土特征
	严重损伤 (III)	12~20	7~12	3~7	0.36~0.5	55~70	0.3~0.5	900 1000 1100 1200	灰白色略带浅红色
极度损伤 (IV)	20~30	12~30	7~15	0.2~0.36	40~55	0.1~0.3	1200 1300 1400 1500	灰白色	表层混凝土剥落和烧酥极为严重, 烧酥层厚度大于4cm, 混凝土组织结构发生了变质, 结构表面部分>2mm 裂纹

衬砌结构损伤分级表 Lining damages classification

损伤程度	损伤指标特征							表面特征	
	损伤深度 (cm)	酥松深度 (cm)	剥落深度 (cm)	衬砌砼残余强度比	结构残余支撑能力%	砼衬砌超声波速比	火灾温度 (°C)	混凝土表面颜色	烧伤区混凝土特征
	破坏 (V)	>30	>30	>15	<0.2	<40	<0.1	1200 1300 1400 1500	灰白色

四 结论 Conclusion

四、结论

- (1) 影响隧道衬砌结构火灾损伤程度最主要的因素是温度，不同温度量级下衬砌结构的损坏差异明显。石油产品在隧道内起火燃烧，火势极为猛烈，温度上升速度快，最高温度容易超过1300℃，甚至高达1500℃~1600℃。高温下隧道结构损坏严重，混凝土强度损失大，甚至可能完全丧失。
- (2) 衬砌结构损伤等级的评定一个关键的因素是衬砌结构所经历的最高温度，最高温度的确定主要有两种方法：数值计算方法和现场勘测。

四、结论

- (3) 火灾后对隧道衬砌结构评估主要经过初勘和复勘。初勘主要搜集火灾现场资料以确定火灾衬砌经历的最高温度，初步确定衬砌结构的损伤级别。复勘的主要任务是对初勘评定为中度损坏的构件作更详细的检查和评估，以确定其严重性。
- (4) 某些技术方法和技术参数的选用，拟在工程实践中作进一步研究和检验，以期待更完善，便于操作应用。

四、结论

- (5) 由国外文献可知，目前英、美、日等国所采用的混凝土结构火灾诊断均以英国混凝土学会所提出的诊断表及评估程序为主体，而其所采用的评估方法确偏向定性而不够定量。本文的比较量化的评估方法，尚未涉及二次火灾的探讨，因此，火灾混凝土的二次火灾的探讨，将是后续研究的工作。

欢迎各位领导、专家指正
谢谢大家！

