

文章编号: 1005—0523(2009)01—0019—06

公路盖板涵洞混凝土火灾损伤特征分析

龙华春, 丁杰栋, 杨晓娟, 邓江维

(江西省公路管理局, 江西 南昌 330000)

摘要:国道主干线南昌绕城公路乐化至温家圳段一盖板涵洞混凝土的火灾持续时间约 10 h 最高温度近 1 000 ℃. 混凝土的损伤是不均匀的, 根据残留受火混凝土的颜色、裂隙发育特征及疏松程度, 将其损伤程度划分为轻度损伤、中等损伤、严重损伤和破坏 4 个等级, 依此判别其残余强度. 混凝土的局部损伤特征受火灾发生时的火源、燃料供给、受火区段的地形、通风等因素的影响.

关 键 词: 盖板涵洞混凝土; 火灾; 损伤特征; 残余强度检测

中图分类号: U449.7

文献标识码: A

国道主干线南昌绕城公路乐化至温家圳段, 桩号为 K561+900 的盖板涵洞通道于 2005 年 11 月竣工, 长度 33.5 m. 涵洞跨径组成为 4.0 m+4.0 m, 高度 4.5 m. 盖板混凝土 C30, 台身混凝土为 C25. 2007 年 12 月 4 日, 一孔通道由于当地村民堆放稻草意外引发火灾, 致使该孔通道盖板、墩、台身混凝土严重受损, 蔓延范围达 25 m. 火灾使该孔盖板和墩身受到严重损伤. 其中, 盖板混凝土的损伤最为严重, 对其损伤特征予以分析.

1 混凝土的损伤形式

1.1 剥落

根据现场观测, 被烧孔盖板中部约有 24 m 长的范围受火灾影响, 盖板受损严重, 受损面积约 60 m², 受拉区钢筋完全裸露. 混凝土墩、台身有多处存在不同程度的损伤, 混凝土剥落严重, 剥落面积达 48.2 m². 局部出现两层或两层以上的剥落. 单层剥落的深度一般为 1~2 cm; 对于有配筋的部位, 混凝土剥落层底面一般沿配筋位置出现, 混凝土剥落之后, 钢筋外露图 1(a) 中, 配筋处混凝土发生 1~2 层剥落, 剥落深度 3 cm~7 cm. 钢筋外露并出现损伤; 残留层局部被火灾晚期的烟火熏黑; 局部有混凝土表层残余, 但变色为乳白—白色微红色, 损伤层结构松散, 变酥层厚 2~5 cm; 损伤层混凝土强度降低, 内部裂隙发育, 骨料与水泥浆之间胶结作用消失外, 外露钢筋表面未发现有熔融现象, 但表层有 2~3 mm 的损伤.

剥落两层以上者, 主要出现在北侧的墙部和盖板顶部. 图 1(b) 中, 混凝土发生多层剥落, 剥落深度超过 5 cm. 残留层部分被火灾晚期的烟火熏黑; 局部有混凝土表层残余, 但变色为乳白—白色微红色, 损伤层结构松散, 变酥层厚 2~5 cm; 损伤层混凝土强度降低, 内部裂隙发育.

1.2 变色

未发生剥落的残留表层混凝土全部变色, 混凝土在火灾后呈现的颜色有: 黑色、微红—浅红色、乳黄色—乳白色等. 混凝土呈现的颜色与火灾对其的损伤程度有关. 火灾后, 现浇混凝土局部呈黑色, 仅出现在混凝土

的表面,只是沿局部裂隙有向混凝土内部延伸的痕迹.现浇混凝土所呈现的黑色属于火势减弱之时烟熏所致.清除表面烟熏黑色之后,其下混凝土的颜色为微红色、乳黄色和白色中的某一种.呈微红—浅红色者约占总面积的一半,主要出现在墩身部分.损伤层混凝土骨料与水泥浆之间出现微小裂缝,损伤层与其余混凝土的界限不清晰.呈乳白—乳黄色者,损伤层裂缝发育,开裂甚至变酥,损伤层厚度较大.



(a) 受损通道盖板钢筋暴露



(b) 混凝土发生多层剥落

图 1 盖板涵洞火灾后受损情况

1.3 开裂变酥

火灾后表层混凝土普遍出现开裂、变酥.凿开受火表层后观测,损伤层略呈微红色,高温引起的内部损伤深度一般为 3~7 cm,骨料与水泥砂浆体之间产生细小裂缝,用锤敲击,声音低沉,容易产生痕迹;损伤层呈乳白—乳黄色者,高温引起的内部损伤深度一般为 4~8 cm,损伤层混凝土骨料与水泥浆体之间普遍产生裂缝,混凝土变酥,用锤敲击,声音低沉、混浊,极易产生痕迹,在棱角处用手可以掰动.

另外,损伤层呈乳白—乳黄色者,一般损伤层与内层混凝土之间产生较明显的界限,用锤重击,容易剥落.损伤层与内层混凝土之间产生了不连续的裂缝,如果进一步恶化,即发生剥落.

2 火灾特征分析

已有研究表明,混凝土在火灾中的损伤程度与其遭受火灾的温度持续时间、发生火灾的环境条件(风速、风向及湿度等)等因素有关,并最终混凝土的损伤特征体现出来,其中温度和持续时间是主导因素.

2.1 温度

对于火灾后评估,一般采用间接方法推断混凝土的受火温度,主要根据混凝土受火后的颜色、裂隙发育特征、锤击声音、混凝土的残余强度和受损混凝土的厚度等判别.

受火后混凝土表面颜色通常会随火灾温度不同而变化.在高温下,混凝土可能发生爆裂,混凝土的临界爆裂温度大致为 350~500℃,一般升温越快,爆裂温度越高.混凝土的爆裂会加速混凝土内部裂隙的产生,根据在显微镜下对受损混凝土的显微裂隙观察,混凝土剥落面附近存在网状显微裂隙,混凝土的开裂表现为近于各向均等,且被微裂隙切割出的混凝土小颗粒近于呈等粒状(直径 0.08~0.2 mm),表明爆裂作用是存在的.因此,可以根据混凝土裂隙的发育与否,判别受火温度是否超过 500℃.由前述可知,现浇混凝土受火面的温度是不同的,根据参考文献[1~9],温度对混凝土的损伤作用大致可以分为四档:

(1) 受火温度不高于 400℃,混凝土受火面呈黑色,为烟熏所致,锤击声音清脆,从凿除处看损伤层呈微红色,混凝土组织结构基本完好,损伤深度小于 3.0 cm

(2) 受火温度在 400~600℃之间,混凝土受火面呈微红色,锤击声音低沉混浊,从凿除处看,损伤层呈微红色,混凝土骨料与水泥浆之间出现较多的微小裂隙,混凝土结构部分破坏,损伤深度大于 3.0 cm.

(3) 受火温度达到 800℃,混凝土的受火面呈乳黄色,受火面有厚 1.3~2.0 cm 的疏松层,损伤层呈浅黄微红—浅红色,用锤敲击,声音混浊,极易产生砸痕,且混凝土骨料与水泥浆之间普遍出现裂缝,混凝土中的 $Ca(OH)_2$ 脱水分解, C—S—H 胶结结构已极不完整,出现子孔洞和裂缝,部分骨料出现微裂隙,损伤深度大于 5.0 cm.沿损伤层底面产生不连续裂隙.

(4) 受火温度达到 1 000℃,混凝土的受火面呈乳白色乳黄色,受火面有约厚 5~6 cm 的疏松层,损伤层呈浅黄浅红色,骨料与水泥浆体之间完全脱节,水泥水化物消失,用手可以掰动,部分骨料变色,损伤深度大于 7.0 cm,沿损伤层底面产生连续裂隙,或损伤层剥落。

火灾温度主要取决于可燃烧物的种类及氧气的供给情况,该涵洞的长度 33.5 m,主要起通道作用,氧气的供给是充足的。由于堆积的量很大,干稻草着火后,燃烧持续时间长、范围大、温度上升速度快的特点,火焰中心的最高温度往往接近 800℃,局部甚至高达 800~1 000℃^[1]。因此,混凝土遭受 1 000℃作用高温,不同部位或不同火灾阶段处于不同温度是完全可能的。

2.2 火灾持续时间

混凝土的最大损伤程度可用来判别火灾的持续时间。从前述可知,衬砌混凝土内表面残留的,部分已经变色为乳白—乳黄色,受火面温度达到 1 000℃,且混凝土的剥落一般是在此基础上进一步发展的结果。根据文献[8],要使混凝土内部一定深度处(20 mm左右)的温度达到 1 000℃,需要的时间约为 100 min。而在近 1 000℃的高温下,持续作用 100 min产生的混凝土中性化层厚度仅为 19 mm。由前述可知,混凝土的最大损伤厚度约为 8 cm,剥落的层数为 3层,加上已经发生严重损伤的残余层,共计 4层。如果按每层 100 min考虑,则所需时间为 400 min。已有的试验结果表明,在小跨径的混凝土结构内发生火灾时,温度的升高并不是按照标准温度—时间曲线逐渐上升,而是有一个急剧增加的过程,一般在起火后的 4~10 min内,温度即达到最高^[10],该时间显然是相对较短的。

考虑到现场火灾的可燃物为稻草,燃料供应集中,结构物的长度和跨度均不大,有利于火灾快速升温 and 高温的持续作用,但与实验室升温相比,还是存在一定差异。因此,火灾持续的时间应按文献[8]规律得出的时间 400 min更长一些。据火灾现场目击者(不是当事人)所述,火灾持续约 10 h,直至稻草燃尽火灭,这从另一个角度说明火灾持续 10 h或更长是可信的。

3 混凝土损伤特征讨论

3.1 损伤部位及其均一性

现场观测表明,混凝土在火灾中的损伤是不均匀的,主要表现在两个方面:损伤程度在横向和纵向上均存在差异;局部损伤的程度不同。

纵向上的损伤差异表现为中间墩身一侧较台一侧严重,这一点在洞中间段的混凝土的损伤表现的最为明显。中间墩身侧混凝土表层有厚 2~5 cm 的严重损伤层,该厚度内混凝土为微红—乳白—白色、内部裂隙发育、强度降低,底面出现近乎整体贯通的裂缝,锤击数下即可脱落(见图 2)。盖板混凝土损伤较墩身、台身严重,从盖板暴露的钢筋可以看出其混凝土剥落的厚度接近两倍钢筋保护层厚度。

混凝土的差异性损伤还表现在损伤深度上,大致可以分为:未剥落处 1~2 cm,剥落一层处 2~3 cm,剥落两层处 3~4 cm,剥落两层以上处 4~5 cm。

3.2 损伤的主要影响因素

在实验室中进行一定类型的混凝土构件火灾损伤研究,其损伤程度主要取决于温度及火灾持续时间。但是,一个实体工程中发生的火灾,其损伤主要与火灾高温区燃烧物放出的热量、火区的风速火焰与混凝土的距离等因素有关^[10]。另外,混凝土所处的环境,尤其是混凝土的湿度,对混凝土在火灾作用下的损伤特征也有显著影响^[8]。这些因素在该工程中则表现为具体的地形、通风条件、燃料供应、流水等因素对混凝土损伤的影响。

首先涵洞具有通道作用,通风好,稻草燃烧后直接堆放稻草的一孔涵洞首先受到火灾的侵害。涵洞中间墩身另一侧未直接受到火灾影响,温度较低,造成温差大,出现爆裂的几率会显著增加,从而发生多层剥落。同时,盖板受到高温的持续作用,因此其混凝土损伤的也严重。



图 2 墩台身受损情况

堆放的稻草燃烧较缓慢,导致火灾持续时间较长,且火灾区远离城区,火势迅猛,消防救援困难,几乎是稻草烧失殆尽才被熄灭,导致现浇混凝土严重损伤.

3.3 残余强度

受损伤混凝土的残余强度是根据颜色、裂隙发育情况、敲击声音和凿除难易程度综合判别的.结合前人的试验研究结果,对本次火灾不同区域混凝土残余强度评价如下.

受火温度低于 300℃ 区域,整体结构基本完好,微裂隙不发育,混凝土未变色或仅在表面有烟熏黑色,锤击声音清脆,混凝土强度基本没有降低,例如涵洞的洞口及底部等没有火焰直接灼烧的区域,遭受 400℃~600℃ 高温烧伤区混凝土结构变化明显,表面混凝土烧酥深度小于 2 cm,烧酥部分可见宽 0.5~2 mm 的细小裂纹,锤击声音沉闷,混凝土呈微红色.此类受火混凝土的整体损伤属于中等程度,抗压强度损失约为原强度的 30%~40%,例如着火点周围的涵洞台身及墩身混凝土火灾后测定强度为 13.6~16.9 MPa(原混凝土强度为 25 MPa),约为原混凝土强度的 54.4%~67.6%.受火温度 600~800℃,混凝土强度损伤严重,烧伤区混凝土结构发生显著变化,裂隙发育,表面普遍有 0.5~2 mm 裂纹.表面混凝土烧酥深度 2~3 cm,在烧酥层底部往往出现平行受火面的裂隙,裂隙宽度一般大于周围的其它裂隙,受火混凝土呈灰白色略带浅红色,锤击后混凝土容易剥落,此类受火混凝土的抗压强度降低约 50%,例如涵洞顶板直接受火焰灼烧的地方(如图 1 所示)火灾后混凝土测定强度为 17.5 MPa(原混凝土强度为 30 MPa).

欧洲混凝土协会根据各国的试验研究结果认为,温度大于 600℃ 时,受火混凝土的抗压强度 $f_m(T)$ 的关系可用下式描述:

$$f_m(T)=[0.45-0.00112(T-600)]f_m$$

按此公式,当温度达到 1 000℃ 时,火灾导致受火混凝土的抗压强度完全损失.

3.4 混凝土火灾后强度恢复的可能性

高温后混凝土能否随时间的推移得到部分恢复,直接关系到火灾后混凝土结构损伤范围的确定和修复对策的制定.已有的试验结果表明,对于温度低于 500℃ 的高温作用下,混凝土的损伤主要是氢氧化钙分解变为氧化钙,高温后一段时间内氧化钙可以再度水化,但是伴随体积膨胀,导致混凝土的力学性能恶化.文[10]对混凝土在高温下的物理、化学过程做了总结(见图 3).利用图 3 所概括的混凝土损伤过程中的化学变化规律,结合上述遭受不同高温作用的现浇混凝土的裂隙发育及强度损伤特征可以得出结论:遭受高于 500℃ 高温的混凝土,其强度的自然恢复是不可能的.

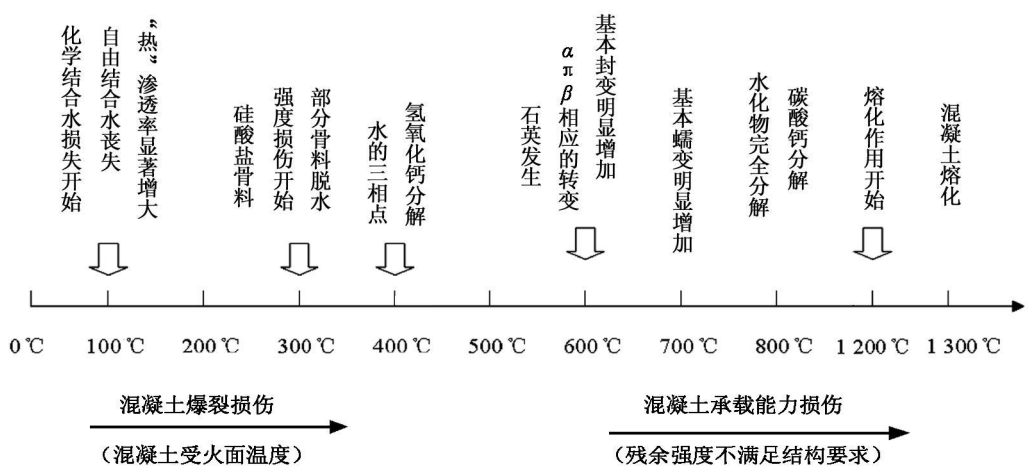


图 3 高温下混凝土的物理化学过程(据文[10]修改)

3.5 衬砌混凝土损伤程度判别依据

根据上述讨论,基于现浇混凝土受火后对其强度和耐久性的影响,将受火面残留混凝土的损伤分为 4 个等级,各损伤等级的判别依据归纳于表 1 中.

表 1 衬砌混凝土火灾损伤程度判别指标

损伤程度	损伤深度/mm	疏松深度/mm	剥落深度/mm	承载能力残余/m	火灾温度/℃	混凝土表面颜色	烧伤区混凝土特征
轻度损伤	3~6	2~4	基本无	>70	<400	烟熏黑色	表面混凝土有轻微损伤,整体结构基本完好,烧区混凝土结构保留
中等损伤	6~12	4~7	0~3	60~70	400~600	烟熏黑色 略带红色	表面混凝土剥落烧酥,烧酥程度<2 cm,烧伤区混凝土结构发生变化,表面有 0.5~2 mm 的裂纹
严重烧伤	12~20	7~12	3~7	约 50	600~800	灰白色略 带浅红	表面混凝土剥落烧酥,烧酥深度 2~3 cm,烧伤区混凝土结构发生显著变化表面普遍有 0.5~2 mm 的裂纹
破坏	20~30	12~30	7~15	<25	>1 000	灰白色	表面混凝土剥落烧酥,碳酥深度>4 cm,烧伤区混凝土结构发生显著变化,表面有宽度>2 mm 的裂纹

4 混凝土补强措施

由于混凝土的局部损伤严重,简单修补难以恢复其承载能力,需要加固.根据道路的交通现状,采取不中断交通的加固措施.基于该通道的通行要求不高,且基础未受影响,对于墩台身静止裂缝采用环氧树脂浆液或水泥浆液进行表面封闭,大面积缺损、蜂窝、孔洞等采用 1:1 水泥砂浆或不低于 C20 的细石混凝土进行修补;对于活动裂缝应在裂缝稳定后用上述办法进行补强,如裂缝开展不能控制,则应根据结构的变形,采用柔性材料进行封闭处理.对于盖板先对板底有裂缝的部位用环氧树脂浆液进行封闭处理,然后在盖板底部采用高强不锈钢绞线网—渗透性聚合砂浆进行加固.不锈钢绞线选用 Φ3.2 mm,间距 30 mm.施工时用固定钉将高强不锈钢绞线网固定在盖板的下表面,用紧线器拉紧钢绞线网对其进行预紧,并用高压水枪清洗施工面,避免因灰尘存在而降低灰浆粘结力.再喷涂一层约 2 mm 厚、用于加强粘结的粘结剂,然后采用喷射器进行渗透性聚合物砂浆施工,厚度为 30 mm.粘结剂和渗透性聚合物砂浆都是无机材料.

5 结论

- (1) 混凝土普遍遭受了 800~1 000℃的高温,表层 1~5 cm 深度范围内强度完全丧失,表现为混凝土剥落或骨料水泥浆粘结强度完全丧失.
- (2) 受损混凝土的残余强度明显降低,颜色呈微红—浅红、乳白—乳黄色,其中,内部裂隙发育者的强度在后期自然恢复的可能性是不存在的.
- (3) 根据受火混凝土的颜色、裂隙发育特征及疏松程度,可以将其损伤程度划分为轻度损伤、中等损伤、严重损伤和破坏等 4 个等级.
- (4) 现浇混凝土的损伤程度在纵向和横向均存在较大差异,局部最大损伤深度达到 25 cm,这种差异性损伤与火灾发生时的火源、燃料供给、受火区段的地形通风等因素有关.
- (5) 密切关注火损通道的安全运行,积极安排施工队伍按照“安全可靠,不留隐患”的原则尽快科学组织实施加固.

参考文献:

[1] 彭立敏,刘小兵,王 薇,等.隧道衬砌的火灾损伤程度试验与检测方法研究[J].实验力学,1999, 14(3): 395—401.
[2] 玛 雅,陈启高,王尔其.钢筋混凝土火灾下热湿耦合热过程研究[J].重庆建筑大学学报,1999, 21(3): 41—44.
[3] 李 敏,钱春香,孙 伟.高强混凝土火灾后性能变化规律研究[J].工业建筑,2002, 32(10): 34—36.
[4] 王 珩,钱春香,李 敏,等.高强混凝土湿扩散与火灾爆裂关系研究[J].东南大学学报(自然科学版),2003, 33(4): 454—457.
[5] 韩继红,张 雄.构筑物混凝土火灾损伤红外热像—电化学检测[J].同济大学学报,2000, 28(4): 422—425.
[6] 杜红秀,张 雄,韩继红.混凝土的火灾危害与损伤评估[J].建筑材料学报,1998(2): 175—179.
[7] 杜红秀,张 雄,乔俊莲.红外热像用于水泥砂浆火灾损伤的检测与评定[J].同济大学学报,1999, 27(4): 499—502.

[8] 康怀宇. 矿井火灾对混凝土建筑的破坏及识别 [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 2000, 19(6): 576—579.
[9] 金贤玉, 钱在兹. 混凝土受高温作用的破坏机理 [J]. 工程力学 (增刊), 1994: 580—583.
[10] 王明年, 杨其新, 袁雪裁, 等. 公路隧道火灾温度场的分布规律研究 [J]. 地下空间, 2003, 23(3): 317—412.

Dam age Feature Analysis of the H ighway Culvert Concrete in C onflagration

LONG Hua -chun, DING Jie-dong, YANG X iao -juan, LONG Jia -chun, DEN Jiang -wei

(Jiangxi Highway Administration Bureau, Nanchang 330000, China)

Abstract: Based upon the damage features of the highway culvert concrete in conflagration, we find that the conflagration had lasted ten hours and its highest temperature exceeded 1 000℃. Damage of the concrete was uneven. According to the colors and fractural features, the extent of their damage can be classified into four grades such as mild damage, moderately damage, serious damage and destruction. The extent can be used to identify the residual strength of the concrete after conflagration. Local damage characteristics of concrete can be influenced by such factors as the fire source, fuel supply, the terrain of the fire section, and ventilation in the conflagration.

Key words: cover board culvert concrete; conflagration; damage feature

(责任编辑:王全金)

简 讯

《华东交通大学学报》第六届编委会第一次会议纪要

2008年《华东交通大学学报》编委会工作会议于 2008年 12月 26日在校综合楼 9楼会议室召开。会议由科研处处长陈梦成主持,校党委书记、学报编委会主任张安哥、校长雷晓燕、副校长高海生以及其他编委委员共 22人参加了会议。学报编辑部的全体工作人员也参加了会议。会议的主要任务是:总结工作、找出差距、制定规划、展望未来。

学报编辑部主任王全金教授对 2008年一年来学报编辑部的工作进行了认真的总结;2008年进一步规范了各项内部管理制度,完善了学报网站和评审专家库,学报的基金论文比和编校质量有了大幅提高,差错率大大降低,“土木工程栏目”先后荣获江西省高校学报评比和江西省期刊评比“优秀栏目”称号。王全金主编还就如何进一步提高学报质量和办刊层次、如何加大对外宣传、支持学科建设、开发学报网络版以及争取新的刊号等今后发展规划作了重点发言。

党委书记张安哥在会上做了重要讲话,他在首先肯定了学报编辑部一年来取得的成绩,指出提高学报质量要在论文质量上下工夫,要选择好的审稿人,全体编委委员和编辑部人员都要积极组稿,吸引优秀稿源。编委审稿可按专业群进行,提高评审质量和效率。学报质量和学校的科研息息相关,加强学科建设和科研实力是根本。编委在认真审稿的同时还要积极投稿,并介绍优秀的同行专家投稿,坚持每年推荐 1—2篇优秀稿件,为提高学报质量献计出力。对学报的发展可设个专题进行讨论,学报编辑部提个方案,研究认证后,学校可以在政策上进行扶持。

校长雷晓燕着重强调了学报的两个作用,即宣传本校教学、科研成果和培养年轻人才。提高学报质量要在提高稿源质量上下工夫,全体编委要共同努力,支持关心学报、主动投稿,积极推荐好的稿源,学报要主动向优秀专家约稿。此外还要努力提高学报的编校和装帧质量。文理合刊对我校学报发展存在一定的制约作用,学报编辑部要努力工作,提高质量,做好准备,等时机成熟时争取文理分刊,把我校学报做大做强。

会上各位委员发言踊跃,就如何继续提高学报的影响因子和被引频次、提高基金论文比、积极申报新的刊号、尽快解决文理科分开问题、提高本校老师在我校学报上发表论文的待遇、留住本校教师的优秀稿件、吸纳社会上的优秀稿源、在政策上扶持学报的发展等方面的事情各抒己见,畅所欲言,为学报建设和发展献言荐策。