

火灾高温下隧道衬砌管片力学性能试验

闫治国^{1,2}, 朱合华^{1,2}, 梁利^{1,2}

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 为了获得隧道衬砌管片在火灾高温时的力学性能与响应,对钢筋混凝土及钢纤维混凝土两种管片开展了不同温度-荷载工况下的火灾试验研究. 试验中升温曲线采用碳氢(HC)曲线. 试验结果表明,在火灾高温作用下,衬砌管片的内力状态发生显著变化,相当于经历了加卸载作用,加重了损伤. 初始预加荷载显著影响衬砌管片高温后承载力的大小,初始预加荷载越大,高温后的承载力越小,且钢筋混凝土管片高温后的承载力要大于钢纤维混凝土管片. 对于钢筋混凝土管片,最高温度显著影响管片高温承载力的大小,最高温度越高,高温承载力越小;而对于钢纤维混凝土管片,最高温度的影响相对较小.

关键词: 火灾高温; 隧道衬砌; 力学性能; 钢纤维混凝土

中图分类号: U459.2

文献标识码: A

Experimental Study on Mechanical Performance of Lining Segments in Fire Accidents

YAN Zhiguo^{1,2}, ZHU Hehua^{1,2}, LIANG Li^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To investigate the mechanical performance of the tunnel lining segments, a series of fire experiments on the reinforced concrete (RC) and the steel fiber reinforced concrete (SFRC) segments under different load cases were conducted. The HC curve was employed in the experiments. The results indicate that the internal force of the segments varies significantly, which is equal to a loading and unloading action on the segments and aggravate their damages. The initial load presents a great effect on the ultimate load of the segments after high temperature, and the greater the initial load, the smaller the ultimate load. Furthermore, the ultimate load of the RC segments is larger than the ones of the SFRC segments. The maximum temperature has lesser influence on the ultimate load of the SFRC segments under

high temperature, while it exerts a significant effect on the RC segments. And the higher the maximum temperature, the smaller the ultimate load of the RC segments under high temperature.

Key words: high temperature; tunnel lining; mechanical performance; steel fiber reinforced concrete

由于具有升温速度快(具有热冲击的特点)、达到的最高温度高(1000 °C 以上)以及持续时间长的特点,隧道火灾除了造成隧道内人员伤亡和设备损毁外,还会对隧道衬砌结构产生严重的损伤,降低衬砌结构的安全性. 1994 年,在在丹麦大海峡隧道火灾中,40 cm 厚混凝土衬砌管片的烧损深度达到 27 cm; 2002 年,在法国巴黎在建的 A86 双层隧道火灾中,80 m 范围内的混凝土剥落,衬砌管片受损深度达到 12 cm^[1]; 1996 年,在英法海峡隧道火灾中,损害最严重的地方,原有的 45 cm 厚的衬砌管片只剩下了 4 cm 厚^[2]. 火灾对隧道衬砌结构的损伤严重降低了衬砌结构的安全性,甚至会由于衬砌混凝土力学性能劣化、爆裂引起的衬砌截面厚度减少以及地层压力的作用而造成隧道垮塌^[3]. 特别是对于处于高水压、软弱地层的盾构隧道,火灾高温还可能导导致隧道密封及防水失效,使得隧道发生渗漏、涌水^[4],对隧道造成毁灭性的灾害.

针对隧道衬砌结构的火灾安全性,国内外学者从火灾高温对衬砌结构的损伤、衬砌结构耐火措施以及衬砌结构高温力学行为等方面开展了研究. Caner A 和 Böncü A^[5]对圆形铁路隧道混凝土衬砌结构的火灾安全性进行了数值计算分析. Savov K^[6]等通过对梁-弹簧模型的扩展,建立了可以考虑衬砌混凝土爆裂的分层梁模型,并利用该模型对不同荷载工况下浅埋公路隧道结构的变形、安全性进行了数值分析. Park S Y 等^[7]对火灾后大邱地铁箱型衬

收稿日期: 2011-04-18

基金项目: 国家自然科学基金(50808137, 50978197); 光华同济土木学院基金及长江学者和创新团队发展计划(IRT1029)

第一作者: 闫治国(1977—),男,讲师,工学博士,主要研究方向为隧道及地下空间防灾. E-mail: yanzguo@tongji.edu.cn

砌结构的损伤和安全性进行了 2D 有限元分析^[7]. 张孟喜等^[8]对上海外环线越江沉管隧道火灾荷载作用下的温度场及应力场进行了数值分析. 然而, 目前针对盾构隧道这类装配式衬砌结构体系火灾高温力学行为的研究成果, 特别是火灾试验方面的研究成果尚不多见. 为了深刻掌握盾构隧道这类装配式衬砌结构体系的火灾特性及其安全性, 有必要先从其基本组成部分——衬砌管片着手, 分析研究其火灾高温下的力学特性与响应.

本文借助火灾试验, 对钢筋混凝土(RC)及钢纤维混凝土(SFRC)衬砌管片在不同温度-荷载工况下的力学性能进行研究.

1 衬砌管片火灾高温力学性能试验方法

1.1 衬砌管片的形状及尺寸

试验采用的衬砌管片参照目前地铁盾构隧道中常用的管片形式设计(图 1~3), 管片宽 30 cm, 厚 12 cm, 外弧半径 1.05 m.

鉴于钢纤维混凝土良好的抗裂性能^[9-10], 近年来其在隧道工程中得到了广泛的应用. 为了研究钢纤维混凝土衬砌管片的高温性能, 试验中同时考虑了普通钢筋混凝土(RC)及钢纤维混凝土(SFRC)两种类型的衬砌管片. 其中, 混凝土等级为 C50, 配合比为: 42.5 水泥 441 kg · m⁻³, 水 160 kg · m⁻³, 中砂 638 kg · m⁻³, 碎石 1 135 kg · m⁻³, II 级低钙灰 88 kg · m⁻³, 高效减水剂(早强型) 5.29 kg · m⁻³. 试验采用的钢纤维为冷拔钢丝型钢纤维, 直径 0.9 mm, 长径比 $L/d = 55$, 掺量为 60 kg · m⁻³. RC 管片的配筋如图 2 所示.

为保证衬砌管片的制作质量, 试验中管片钢筋笼制作、混凝土配合比设计、混凝土搅拌、管片浇筑及养护均由专业盾构管片生产单位生产, 同时, 在生产中同批管片采用同批搅拌的混凝土、同样条件进行成型和养护.

1.2 测试量及测试方法

试验中的测试量包括衬砌管片内温度场分布、管片位移、竖向荷载及支座水平向约束反力. 管片内温度场分布通过 K 型热电偶测量, 如图 1 所示. 管片位移通过位移计测量. 为避免高温对位移计的影响, 通过具有足够刚度的钢支架将位移引到常温区进行量测, 如图 4 所示. 施加到管片上的竖向荷载及管片支座处的水平向约束反力通过测力计测得. 管片内力由测得的竖向荷载及支座水平向约束反力计算得

到. 所有测试数据通过 Datataker 数据采集系统采集并传输到上位计算机.

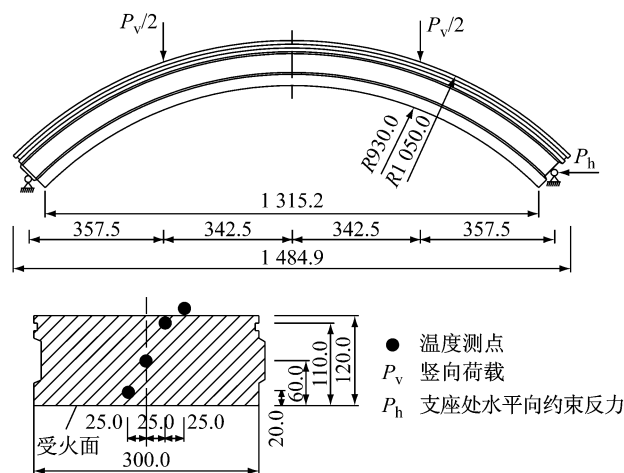
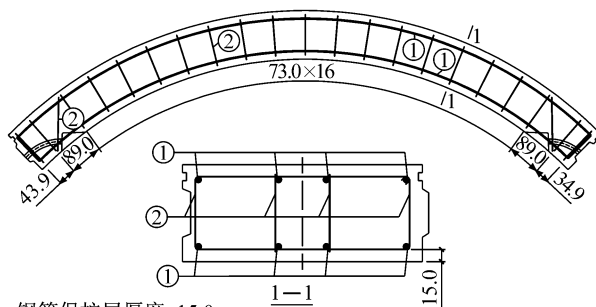


图 1 衬砌管片形状及尺寸(单位: mm)

Fig. 1 The form and dimension of the lining segments(unit: mm)



钢筋保护层厚度: 15.0 mm

钢筋类型

① HRB335, 热轧带肋钢盘, 直径 10.0 mm

② HRB335, 热轧盘条钢盘, 直径 6.5 mm

图 2 RC 管片配筋图(单位: mm)

Fig. 2 The reinforcement of the RC segments (unit: mm)



图 3 试验用衬砌管片

Fig. 3 The photograph of the RC and the SFRC segments

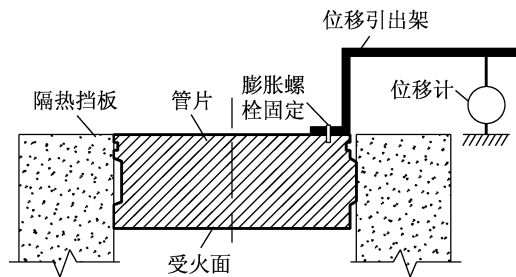


图4 管片位移测量方法

Fig.4 The measuring method of the displacement of the lining segments

1.3 试验工况及边界条件

试验基准升温曲线采用 HC 曲线(最高温度为 1100 °C)^[11],升温及恒温阶段持续时间约为 60 min.为了对比火灾最高温度对衬砌管片高温承载力的影响,同时开展了最高温度为 650 °C 的试验。

考虑到隧道衬砌管片在实际火灾中可能经历的热-力耦合历程,试验设定了两种温度-荷载工况。

(1) 工况 LC1:根据设定的升温曲线,衬砌管片在无初始预加荷载的情况下自由升温,达到预定温度及恒温时间后,对管片进行加载直到管片破坏。

(2) 工况 LC2:升温前,对管片施加初始预加荷载;然后,保持初始预加荷载不变,根据设定的火灾曲线升温,达到预定温度及恒温时间后,停止加热,管片自然冷却;待管片完全冷却后,重新加载直到管片破坏。

试验中,RC 及 SFRC 管片的火灾试验工况如表 1 所示。

表1 火灾试验工况

Tab.1 Load cases in the fire experiments

序号	最高温度 $T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	初始预加荷载 P_v/P_{u0}	工况
1	650	0	LC1
2	1100	0	LC1
3	1100	0.15	LC2
4	1100	0.55	LC2

注: P_{u0} 为常温下管片试验得到的竖向极限荷载值。

考虑到隧道衬砌管片在结构体系中往往为压弯构件,且主要承受压应力,故在试验中,为管片两端施加了固定铰支座位移边界条件(图 1)。同时,在管片外侧施加了一定厚度的覆土以模拟衬砌管片和岩土介质的热接触(图 5)。

1.4 衬砌管片火灾试验设备

试验在同济大学自主研发的隧道衬砌构件高温力学性能试验装置中进行(图 5),该装置采用工业级燃烧器和程序自动控制升温,能够达到的最高温度为 1 200 °C,最大升温速度约为 250 °C · min⁻¹,可较

好模拟隧道火灾升温速度快、达到的最高温度高的特点,并可模拟不同的温度-荷载工况^[12]。

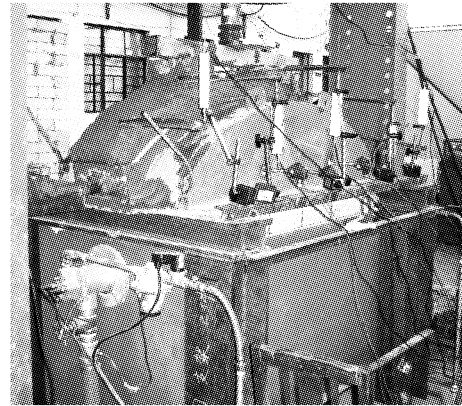


图5 隧道衬砌构件高温力学性能试验装置

Fig.5 The testing system on the mechanical behavior of the segments under high temperatures

2 试验结果及分析

2.1 火灾高温下衬砌管片的宏观表现

经历火灾高温后,衬砌管片受火面混凝土出现了开裂、掉皮及轻微的爆裂。受火面表面的混凝土已相当疏松,轻敲即碎,且经历的温度越高,混凝土的爆裂等损伤越明显。同时,对于 SFRC 管片,受火面表面处的钢纤维由于持续高温的作用,由常温时的灰白色变为了黑色。

2.2 火灾高温时衬砌管片内力的变化规律

以 RC 管片为例,图 6 给出了不同初始荷载下,升温、恒温阶段跨中轴力 N_m 随时间的变化规律。可以看到,当无初始预加荷载($P_v/P_{u0} = 0$)升温时,随着管片混凝土温度的升高,由于不均匀热膨胀导致管片发生变形,其中,在支座处,管片有伸长的趋势,但是由于支座的约束,管片无法伸长,在支座处产生水平向约束反力 P_b (在数值上与管片跨中轴力 N_m 相等),并随着温度的升高逐渐增大,但增加的速率在减小,且趋于平缓。其原因主要是当温度较高时,混凝土的热膨胀变缓,接近停滞。

当对管片施加了初始预加荷载($P_v/P_{u0} = 0.15, 0.55$)后,在支座处即产生初始的约束反力。开始升温后,由于混凝土热膨胀和管片材料力学性能的劣化,在初始预加荷载保持不变的情况下,支座处的水平向约束反力及跨中轴力均在原有基础上逐渐增大,使得管片由初始预加荷载和自重产生的正弯矩逐渐减小。

初始预加荷载对管片支座处的水平向约束反

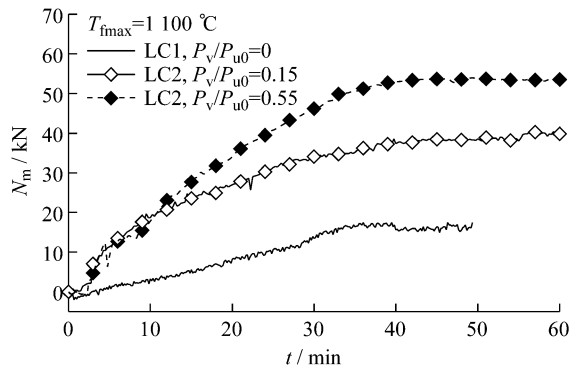


图 6 升温、恒温阶段, RC 管片跨中轴力随时间的变化

Fig. 6 The variation of N_m of the RC segments in the growing and the constant temperature phases

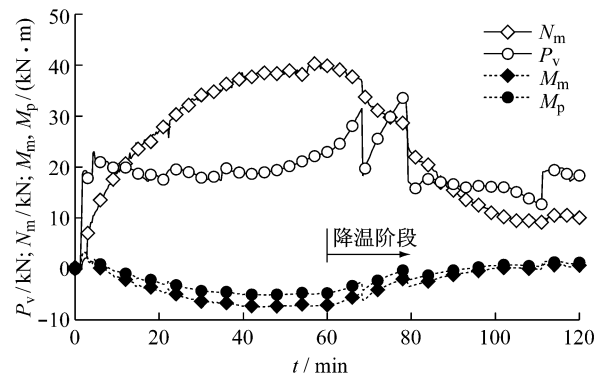
力、跨中轴力的大小具有明显的影响。当无预加荷载时,由于升温而引起的水平向约束反力、跨中轴力增量最小,而当有初始预加荷载时,由于升温而引起的该增量均大于无初始预加荷载的情形,且初始预加荷载越大,水平向约束反力、跨中轴力的增量越大。由于实际衬砌结构体系是由相互连接的管片组成的一个超静定体系,每一块管片的变形都会受到相邻管片的约束(包括纵向约束及环向约束),因此,由于升温而引起的内力增量不仅加重了受火管片自身的负担,而且会传递给相邻管片,改变相邻管片的受力状态。此外,相对于本试验中管片的受力状态而言,支座处水平向约束反力的增加,减小了管片正弯矩,对管片受力有利;但是对于初始承受负弯矩的管片(例如盾构隧道处于拱腰处的管片)而言,支座处水平向约束反力的增加却加大了管片所承受的负弯矩,恶化了管片的受力状态。

以 RC 管片为例,图 7 给出了不同初始预加荷载时,RC 管片在试验全过程中(升温→恒温→降温)内力的变化规律。图中 M_m 为管片跨中弯矩, M_p 为竖向荷载作用点弯矩。

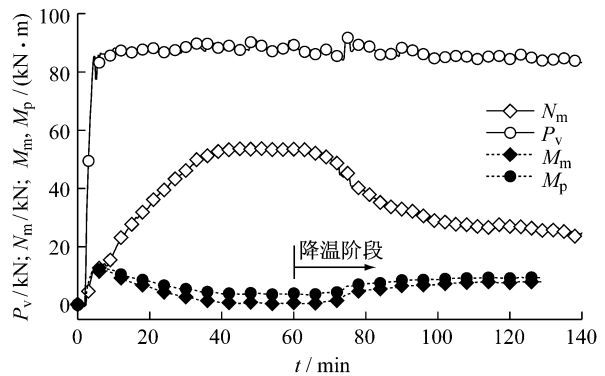
可以看到,对管片施加恒定的初始预加荷载后,在整个试验过程中,随着管片经历升温、恒温阶段,管片跨中轴力 N_m 不断增大,分别在大约 57 min ($P_v/P_{u0} = 0.15$)、39 min ($P_v/P_{u0} = 0.55$) 后达到最大值,并维持平缓的变化,之后,开始逐渐减小,并趋于初始值。值得注意的是,管片跨中轴力 N_m 开始减小的时间要滞后于管片开始降温的时间。

同时,初始预加荷载对于管片跨中轴力 N_m 的大小具有明显的影响。当初始预加荷载较小时,随着管片温度的升高,跨中轴力 N_m 不断增大,并在大约升温 10 min 时超过了竖向荷载 P_v ,最大值达到了 40.3 kN;而当初始预加荷载较大时,升温过程中跨中轴力 N_m

始终小于竖向荷载 P_v ,最大值为 54.0 kN。



a $P_v/P_{u0} = 0.15$



b $P_v/P_{u0} = 0.55$

图 7 工况 LC2, RC 管片竖向荷载、弯矩及跨中轴力随时间的变化

Fig. 7 Variation of P_v , M_m , M_p and N_m of the RC segments in load case LC2

与跨中轴力 N_m 一样,在升温→恒温→降温全过程中,管片的弯矩也发生了明显的变化。如图 7 所示,当初始预加荷载较小时,管片跨中弯矩 M_m 、加载点弯矩 M_p 随着时间的持续,初始荷载(以及自重)逐渐减小,并从正弯矩转化为负弯矩,绝对值不断增大,之后,与跨中轴力 N_m 的变化同步,随着跨中轴力 N_m 逐渐减小,跨中弯矩 M_m 、加载点弯矩 M_p 也逐渐从负弯矩向正弯矩过渡,并趋于初始值。而当初始预加荷载较大时,跨中弯矩 M_m 、加载点弯矩 M_p 也随着管片的升温,从初始正弯矩不断减小,但是,由于跨中轴力 N_m 增量引起的负弯矩尚不能完全抵消初始正弯矩,在整个升温→恒温过程中,管片弯矩仍保持为正值,但与初始值相比,降低幅度可观。之后,在降温阶段,随着管片温度逐渐降低,跨中轴力 N_m 逐渐减小,跨中弯矩 M_m 、加载点弯矩 M_p 逐渐增大,并趋于初始值。

在升温→恒温→降温全过程中,衬砌管片轴力的先增大后减小,以及管片弯矩的先减小后增大(或

者先减小并发生变号,后又恢复到初始值)的现象,相当于经历了加卸载作用,加剧了管片的损伤.特别是当弯矩发生变号时,对于非对称设计的衬砌管片,将极大地降低其火灾安全性.

2.3 火灾高温时和高温后衬砌管片的承载力

图 8 给出了火灾高温时(对应图中 $P_v/P_{u0}=0$)及火灾高温后(对应图中 $P_v/P_{u0}=0.15, 0.55$),不同加载工况下,RC, SFRC 管片竖向荷载 P_v 与跨中截面轴力 N_m 的关系曲线.

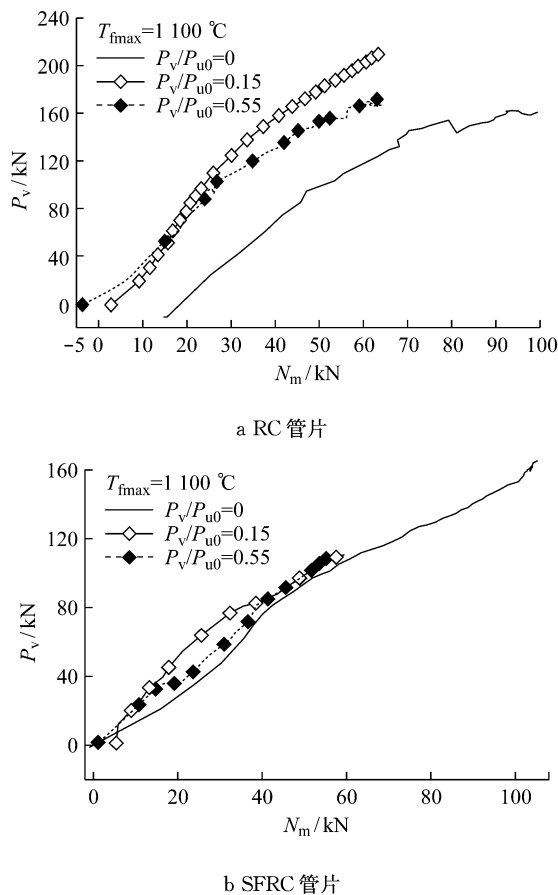


图 8 不同荷载工况下加载时,RC,SFRC 管片竖向荷载与跨中截面轴力的关系

Fig.8 The relationship between P_v and N_m of the RC and the SFRC segments loaded in different load cases

(1) 对于 RC 管片而言,高温后加载的极限荷载要高于高温时加载的值;而对于 SFRC 管片,高温后加载的极限荷载却低于高温时加载的值.这可能是尽管降温过程使得 RC 管片混凝土产生了新的损伤,但是由于高温后钢筋强度、弹模的恢复,明显提高了其高温后的承载力.而对于 SFRC 管片,升温、恒温过程中,高温作用已使得其内部裂缝发展,混凝土力学性能降低,同时削弱了钢纤维与混凝土间的

粘结.冷却后固然可以恢复钢纤维的力学性能(以及部分混凝土的力学性能),但是降温过程又进一步加剧了混凝土的损伤.因此,SFRC 管片高温后的承载力低于高温时的相应值.

(2) 高温后加载,管片破坏时跨中截面的弯矩均大于高温时加载的值(RC 管片最为明显),而轴力却小于高温时加载的相应值.这说明,高温时加载,由于管片刚度下降明显,在同样的竖向荷载作用下,管片的挠曲变形明显超过高温后加载的值,变形的增加使得支座处的水平约束反力也不断增大.

此外,初始预加荷载对于高温后管片的承载力也有明显的影响.初始预加荷载越大,高温后的承载力越小(图 8).这是由于,初始预加荷载越大,升温→恒温→降温全过程中混凝土的热损伤也越大.这表明承受水土压力越大的隧道(如深埋隧道),其衬砌结构火灾后承载力下降的幅度越大,结构越趋于不安全.

同时,综合对比 RC,SFRC 管片高温时、高温后的力学性能可以发现,尽管高温时两种管片的极限荷载 P_v 相差不大(由于 RC 管片受拉区钢筋软化,刚度、强度下降显著),但是,经历高温后,由于钢筋力学性能的恢复,RC 管片的极限荷载 P_v 明显大于 SFRC 管片.这初步表明,RC 管片的抗火性能要优于 SFRC 管片.

2.4 最高温度对衬砌管片高温承载力的影响

图 9 给出了不同高温下加载时,RC,SFRC 管片竖向荷载 P_v 与跨中截面轴力 N_m 的关系.可以看到,对于 RC 管片,其经受的炉内最高温度 T_{\max} 明显影响管片高温加载时承载力的大小,且最高温度越高,承载力越小.而对于 SFRC 管片,当最高温度超过一定值后,其对于 SFRC 管片高温加载时的承载力的影响相对较小.

RC,SFRC 管片高温加载时竖向荷载与跨中轴力关系曲线的差异可以解释为:钢筋的力学性能对 RC 管片高温时的承载力起控制作用,而最高温度会明显影响钢筋高温时的力学性能,进而影响到 RC 管片高温时的力学性能.从这一点考虑,通过采取措施(如施加隔热层、抑制保护层混凝土爆裂或加厚保护层等),降低传递到钢筋的热量,是改善 RC 管片高温耐火能力的一个方向.而对于 SFRC 管片,钢纤维与混凝土间的粘结性能是主要控制因素,当经受一定高温时,可能钢纤维和混凝土间的粘结已发生了显著削弱,因而,当再升高受火温度时,尽管高温对其粘结的削弱会进一步增大,但相对不明显.

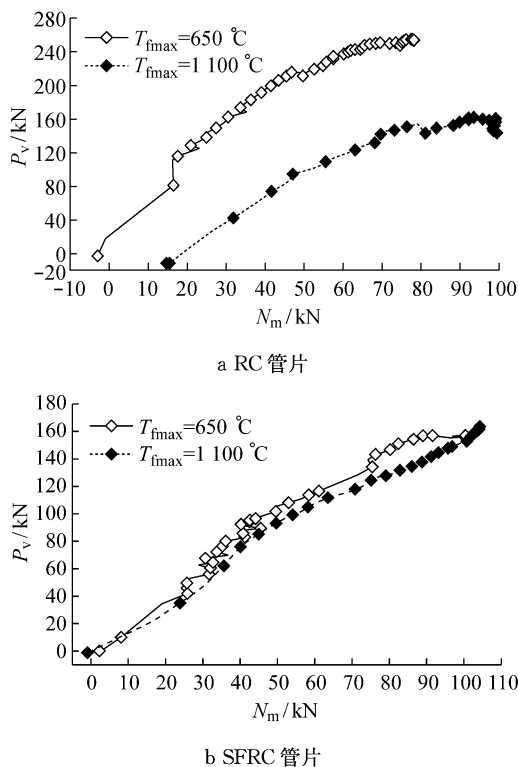


图 9 高温加载时,RC,SFRC 管片竖向荷载与跨中轴力的关系

Fig.9 The relationship between P_v and N_m of the RC and the SFRC segments loaded at high temperatures

3 结论

(1) 火灾过程中,由于高温导致的不均匀热膨胀和材料力学性能的劣化,衬砌管片的内力状态会发生显著变化.内力状态的变化对于衬砌管片而言,相当于经历了加卸载作用,加剧了管片自身的损伤,特别是当弯矩发生变号时,对于非对称设计的衬砌管片,将显著影响其火灾安全性.

(2) 管片高温后加载时,其破坏时的弯矩均大于高温加载时的值,但是轴力却小于高温加载时的值.同时,RC 管片高温后的承载力要高于 SFRC 管片.

(3) 初始预加荷载对于管片高温后的承载力具有明显的影响.且初始预加荷载越大,高温后的承载力越小.这表明对于承受水土压力越大的隧道,火灾后其衬砌结构承载力下降的幅度越大,结构越趋于不安全.

(4) 对于 RC 管片,经受的最高温度明显影响管片高温承载力的大小,且最高温度越高,承载力越小.而对于 SFRC 管片,最高温度对于高温承载力的影响相对较小.

需要说明的是,本文是从构件的层次对衬砌结

构体系的基本组成部分——RC 及 SFRC 两种衬砌管片在不同温度-荷载工况下的力学性能进行研究.考虑到隧道衬砌结构体系是由多个相互连接的管片组成的一个超静定体系,由于管片间的相互作用、不均匀热膨胀以及不均匀材料性能劣化,火灾高温会导致衬砌结构体系内产生显著的内力重分布和不同的性能表现.为了全面掌握隧道衬砌结构体系火灾高温时的力学性能以及综合评判 RC 及 SFRC 衬砌结构的优劣,在今后的研究中尚需从结构体系的层次开展进一步的试验研究.

参考文献:

- [1] Baumelou X. The A86 underground west loop-safety in the tunnel reserved for light vehicles [C]//Proceedings of ITA World Tunnel Congress 2003. Amsterdam: Balkema Press, 2003: 93-97.
- [2] Kirkland C J. The fire in the channel tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2002, 17(2): 129.
- [3] Mashimo H. State of the road tunnel safety technology in Japan [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2002, 17(2): 145.
- [4] Lönnemark A. On the characteristics of fires in tunnels[D]. Lund: Lund University, 2005.
- [5] Caner A, Böncü A. Structural fire safety of circular concrete railroad tunnel linings[J]. Journal of Structure Engineering—ASCE, 2009, 9: 1081.
- [6] Savov K, Lackner R, Mang H A. Stability assessment of shallow tunnels subjected to fire load[J]. Fire Safety Journal, 2005, 40: 745.
- [7] Park S Y, Oh H K, Shin Y S, et al. A case study on the fire damage of the underground box structures and its repair works [C]//Proceeding of ITA World Tunnel Congress and 32nd ITA Assembly. Seoul: Elsevier Press, 2006: 328.
- [8] 张孟喜, 黄瑾, 贺小强. 火荷载下沉管隧道结构的热-力耦合分析[J]. 土木工程学报, 2007, 40(3): 84. ZHANG Mengxi, HUANG Jin, HE Xiaoqiang. Coupling analysis of thermal field and stress field for immersed tunnels under fire load [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(3): 84.
- [9] Caratelli A, Meda A, Rinaldi Z, et al. Structural behaviour of precast tunnel segments in fiber reinforced concrete[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011, 26: 284.
- [10] Lau A, Anson M. Effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36: 1698.
- [11] European Committee for Standardization. EN 1991-1-2 Eurocode 1: actions on structures [S]. [S. l.]: European Committee for Standardization, 2002.
- [12] 闫治国. 隧道衬砌结构火灾高温力学行为及耐火方法研究 [D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2007. YAN Zhiguo. A study on mechanical behaviors and fireproof methods of tunnel lining structure during and after fire scenarios [D]. Shanghai: Tongji University. College of Civil Engineering, 2007.