

经历高温后花岗岩与混凝土力学性质的试验研究

Experimental research on the mechanical properties of granite rock and concrete after high-temperature

杜守继¹, 职洪涛²

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200030; 2. 上海市市政工程设计研究院, 上海 200092)

摘要: 对经历高温后的花岗岩和高强混凝土的力学性能进行了试验研究。比较分析了经历不同温度作用后花岗岩和混凝土的应力-应变全过程曲线、峰值应力、峰值应变和弹性模量的变化情况。研究表明: 随受热温度的升高, 花岗岩和高强混凝土的强度、弹性模量逐渐下降, 峰值应变逐渐增大。高温后花岗岩具有明显不同于高强混凝土的特点, 受热温度低于 400 ℃, 花岗岩的力学性质变化很小, 而混凝土的力学性质迅速劣化。高温对混凝土力学性质的影响程度比对花岗岩要明显。

关键词: 高温; 花岗岩; 力学性质; 混凝土

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2004)04-0482-04

作者简介: 杜守继 (1963-), 男, 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院副教授, 目前主要从事地下结构和岩石力学的科研工作。

DU Shou-ji¹, ZHI Hong-tao²

(1. School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China; 2. Shanghai Municipal Engineering Design & Research Institute, Shanghai 200092, China)

Abstract: The experimental research on the mechanical properties of granite rock and concrete after different high temperatures was conducted. The mechanical properties include stress-strain curve, peak stress, peak strain and Young's modulus of granite rock and concrete. The results showed that the temperature did not obviously affect the mechanical properties of granite rock in the range from room temperature to 400 ℃. The mechanical properties of granite rock deteriorated rapidly with the increase of temperature when the temperature was above 400 ℃. The peak stress (or the strength) and Young's modulus decreased rapidly, while the peak strain increased rapidly. However, the high temperature obviously affected the mechanical properties of concrete. With the increase of temperature, the peak stress (or the strength) and Young's modulus of concrete decreased rapidly.

Key words: high temperature; granite rock; mechanical properties; concrete

0 前言*

建设在岩石基础上的混凝土结构, 在火灾产生的高温后岩石基础和混凝土结构的力学性能发生劣化, 混凝土结构和岩石介质同时作用的安全性问题成为人们关注的焦点, 需要对这类结构进行高温后的损伤评估, 以制定合理的鉴定、加固、修复及评价方案。为了进行结构的损伤评估, 首先需要了解混凝土和岩石材料在遭受不同温度作用后的力学性能, 这对于火灾损伤结构的全过程分析和提高岩体结构的安全性具有重要意义。

目前, 对岩石在常温、高温高压下的物理力学性能和混凝土材料在高温后的力学性能的研究较多^[1~5], 而对高温后岩石的物理力学性能研究极少, 尤其对高温后岩石和混凝土材料的力学性能的比较几乎未见报告。因此, 本文将对花岗岩和高强混凝土材料经历不同高温后的力学特性进行试验研究, 分析高温后花岗岩和高强混凝土的变形特性和强度特性变化规律, 为预测和评估经历高温后建设在岩石基础上的混凝土结

构工程的长期稳定性和安全性, 以及火灾后岩体工程结构的损伤评估及其加固提供科学依据。

1 试验方法

1.1 试验所用试件

本试验用岩石试样为 25 块花岗岩, 试样采自河南焦作地区某矿区 73[#]、77[#]、78[#] 3 个钻孔中, 花岗岩呈灰色新鲜细粒状, 主要成分有石英、长石、角闪石及少量胶结物等, 加工成直径 50 mm, 高度 100 mm 的圆柱体, 此种花岗岩常温下平均密度为 2.53 g/cm³, 平均单轴抗压强度为 162 MPa。本试验共分常温 (20 ℃)、200 ℃、400 ℃、600 ℃、800 ℃ 下 5 个温度段, 每个温度段为一组, 每组 5 块试样。

本试验用混凝土试件为 13 块, 其中常温 (20 ℃) 1 块、200 ℃ 2 块、400 ℃ 3 块、500 ℃ 2 块、600 ℃ 2 块、800

* 基金课题: 国家自然科学基金资助项目 (50079012); 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目

收稿日期: 2003-12-02

C3块试样。混凝土的强度等级为C50, 常温下立方体抗压强度平均为55 MPa。混凝土中材料采用525#普通硅酸盐水泥, 细集料为河砂中砂, 粗集料为碎石, 粒径10~30 mm, 自来水钢模浇注, 室内自然养护, 试件尺寸为100 mm×100 mm×300 mm长方体试件。

1.2 加温设备及加温过程

本试验所用加温设备为高温电炉和电炉温度控制器组成的高温箱。电炉型号是SX2-12-12, 功率为12 kW, 最高温度可达1200 °C。该加温设备是一套可以自动控温、升温的多功能电炉设备。把升温范围分为200 °C 400 °C 600 °C 800 °C四个等级, 将试样分次放入内壁尺寸为500 mm×300 mm×200 mm的电加热炉膛内, 以电炉的最大功率升温, 其速率为每3 min升温10 °C, 分别加热到相应的温度等级并保持恒温3 h, 然后在炉内冷却, 制成高温后花岗岩和混凝土试样。

1.3 试验设备及试验方法

花岗岩和高强混凝土试样的单轴压缩试验在上海交通大学岩土力学与工程研究所RMT-150B型岩石试验机上完成。该系统是专为岩石或混凝土类的工程材料进行力学性能试验而设计的, 试验功能齐全、操作方便、自动化程度高, 试验可完全在计算机控制下进行。该试验机采用电液伺服位移控制方式, 位移速率为0.0005 mm/s。试验方法是将经历高温后的试样放置在试验机上, 以不变的位移速率沿轴向施加荷载, 直至试样破坏, 同时测量试样的轴向位移, 这样可以得出高温后单轴压缩试验的轴向荷载—轴向位移全过程曲线。

2 试验结果及分析

根据花岗岩和混凝土单轴压缩试验的轴向荷载—位移全过程曲线, 进一步计算可以得出高温后花岗岩和混凝土单轴压缩试验的应力—应变全过程曲线(见图1, 2), 同时获得两种材料在经历不同温度后的峰值应力 σ_p 和峰值应变 ϵ_p ; 应用应力—应变全过程曲线上达到峰值应力前的近似直线段数据, 进行线性拟合, 计算得出两种材料在经历不同温度后的弹性模量 E_t 。

2.1 经历不同高温后两种材料应力—应变全过程曲线变化规律

从图1观察出, 经历不同高温后花岗岩的轴向应力—应变曲线变化规律大致经历三个阶段: 首先为第一阶段即压密阶段, 其曲线呈上凹型, 随应力的增加, 变形发展较快, 这主要是由于岩石内的微裂隙在外力作用下发生闭合所致; 接着进入第二阶段即弹性阶段, 这一阶段的曲线基本呈直线状态, 应力与应变呈比例

关系; 在第二阶段的末端应力达到峰值, 随后进入第三阶段即应变软化阶段, 虽然此时已超出了峰值应力, 但岩石仍具有一定的承载能力, 这一承载力将随着应变的增大而很快减小, 直到破坏, 表现出软化现象。

本次试验结果说明经历的温度在400 °C以内时, 花岗岩轴向应力—应变曲线变化规律经历的三个阶段基本类似, 花岗岩强度和变形的变化均较小。经历的温度超过400 °C后, 花岗岩应力—应变全过程曲线形态开始发生较大变化, 主要体现在应力—应变关系曲线的压密阶段迅速变长, 这是由于加热温度超过400 °C, 试样内部水分在大量蒸发过程中寻求裂隙向岩体外面渗透溢出, 从而使孔隙加宽加长, 同时高温的作用使得试样内颗粒体积膨胀, 也使得试样内部裂隙的增多。结果造成在相同的应力下, 应变增加得很大。同时花岗岩强度逐渐降低, 峰值应变迅速增大。花岗岩属于坚硬的岩石, 随着经历的温度升高, 延性变化不很明显, 表现为在达到峰值应力后的应变软化阶段, 花岗岩应力迅速减小而应变则变化不大。

从图2观察出, 高温后混凝土的应力—应变全过程曲线形态与花岗岩相比, 经历的温度在400 °C以内时, 几乎不存在第一阶段即压密阶段, 直接开始弹性变形阶段, 应力—应变关系曲线的上升段几乎是线性的。而超过400 °C后, 才出现增加的压密阶段; 另外随着经历温度的增加, 混凝土材料的峰值应力(强度)大幅度下降, 峰值应变逐渐增加, 达到峰值后的延性也逐渐增大, 而且远大于花岗岩的变形。图1和图2比较得知, 高温对混凝土的强度、变形的影响要比对花岗岩的影响明显。这说明人造材料的内部在常温下微裂纹少于天然的花岗岩材料, 而在高温下混凝土中所含自由水、吸附水及化学结合水逐渐散失, 造成高温后混凝土内部形成大量的孔洞和裂缝, 在宏观上就表现为强度的损失和延性变形的增加。

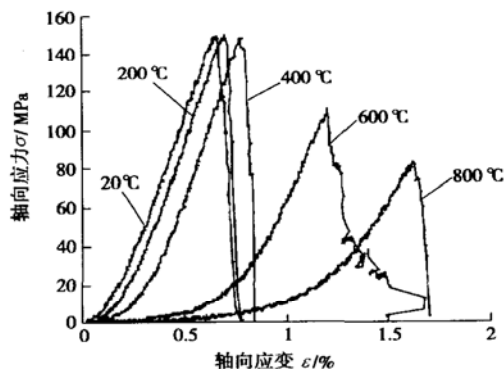


图1 高温后花岗岩轴向应力—应变曲线

Fig. 1 Relationship between axial stress and axial strain of granite rock after high temperature

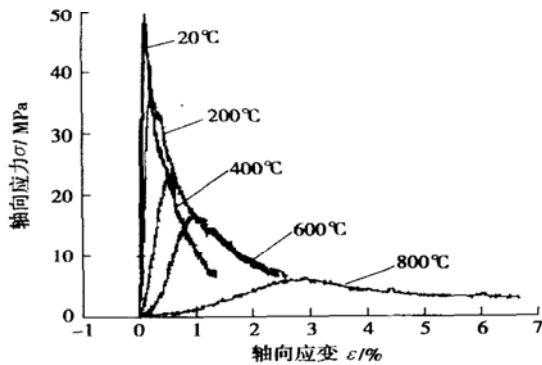


图2 高温后混凝土轴向应力—应变曲线

Fig. 2 Relationship between axial stress and axial strain of concrete after high temperature

2.2 峰值应力

由于花岗岩和混凝土是两种不同的材料,具有不同的性质,因此首先表示了花岗岩和混凝土峰值应力随温度的变化规律性(见图3),而后将所有试件峰值应力作归一化处理,即用不同高温后花岗岩和混凝土峰值应力分别除以常温下花岗岩和混凝土峰值应力,得出高温后花岗岩、混凝土相对峰值应力的变化情况(见图4)。从图中可以清楚地看出,随着温度的升高,花岗岩峰值应力总体呈现逐渐减小的趋势。但在400℃以前,花岗岩峰值应力随受热温度升高几乎没有什么变化,而混凝土的峰值应力却急剧下降。当温度超过400℃以后,花岗岩峰值应力迅速下降,降低幅度已经赶上甚至超过混凝土的峰值应力下降速度。混凝土在温度超过500℃时,峰值应力的下降速度与受热温度400℃以前变化的速度几乎一致。这说明当加热温度低于400℃时,花岗岩强度受温度的影响较小,而这时温度对混凝土的强度影响却非常明显。受热温度为800℃时,花岗岩和混凝土的平均强度损失分别为30%和89%。可见不同高温对混凝土峰值应力的影响要大于对花岗岩峰值应力的影响。

2.3 峰值应变

高温后花岗岩和混凝土峰值应变随加热温度的变化情况见图5,图6给出了归一化处理后所有试件高温后相对峰值应变的变化规律。相对峰值应变是根据不同高温后花岗岩和混凝土峰值应变分别除以常温下花岗岩和混凝土峰值应变得出的。从图中可以看出:受热温度低于400℃时,花岗岩的峰值应变有所增加,但是变化不大;混凝土的峰值应变也随温度升高逐渐增加。而当温度超过400℃以后,随着温度的升高,花岗岩峰值应变急剧增长。而混凝土峰值应变也迅速增加。混凝土峰值应变随温度的升高呈指数规律增长。受热温度为800℃时,花岗岩和混凝土的峰值应变分

别是常温下的2.2倍和14.1倍。这说明高温对混凝土延性的影响比花岗岩延性的影响更大。

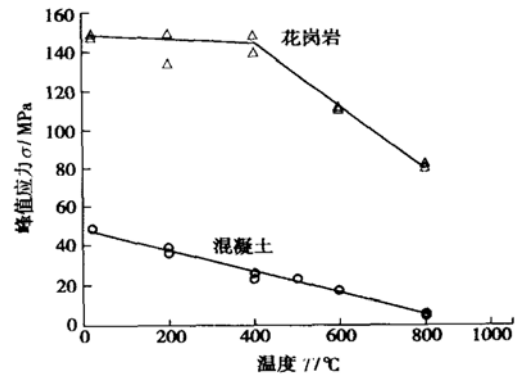


图3 高温后花岗岩与混凝土峰值应力与温度的关系

Fig. 3 Relationship between the peak stress and temperature of granite and concrete after high temperature

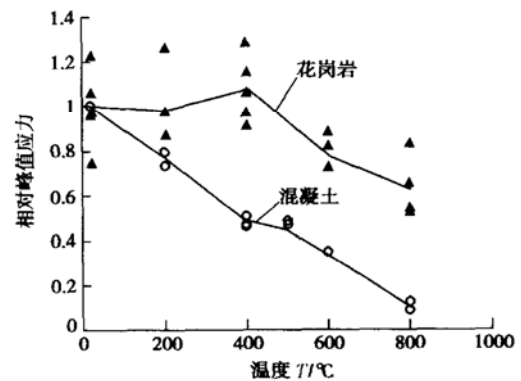


图4 花岗岩和混凝土峰值应力相对值与温度的关系

Fig. 4 Relationship between the relative peak stress and temperature of granite and concrete after high temperature

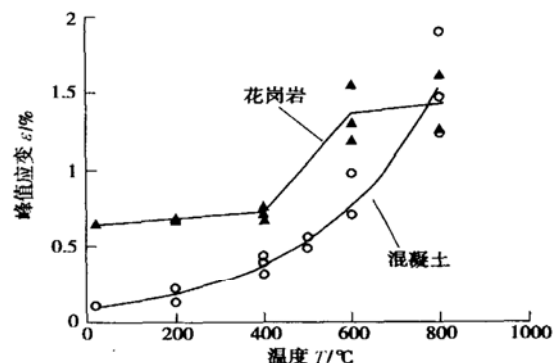


图5 高温后花岗岩与混凝土峰值应变与温度的关系

Fig. 5 Relationship between the peak strain and temperature of granite and concrete after high temperature

2.4 弹性模量

高温后花岗岩和混凝土弹性模量随温度的变化情况分别见图7,图8给出了归一化处理后所有试件高温后相对弹性模量的变化规律。相对弹性模量应变是根据不同高温后花岗岩和混凝土弹性模量分别除以常温下花岗岩和混凝土弹性模量得出的。从图中可以看

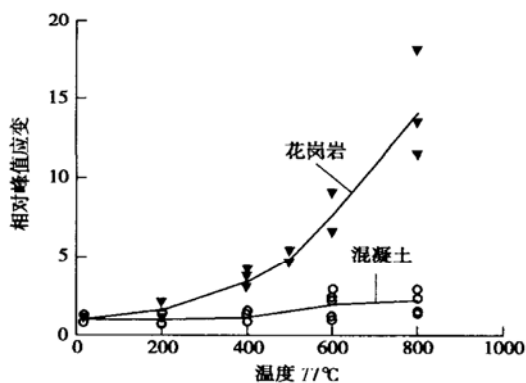


图6 花岗岩和混凝土峰值应变相对值与温度的关系

Fig. 6 Relationship between the relative peak strain of granite and concrete and temperature after high temperature

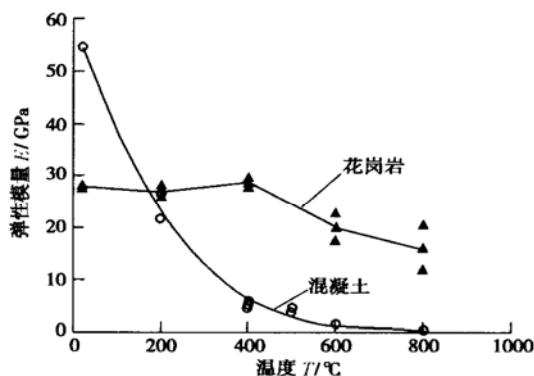


图7 高温后花岗岩和混凝土的弹性模量与温度的关系

Fig. 7 Relationship between the Young's modulus of granite and concrete and temperature after high temperature

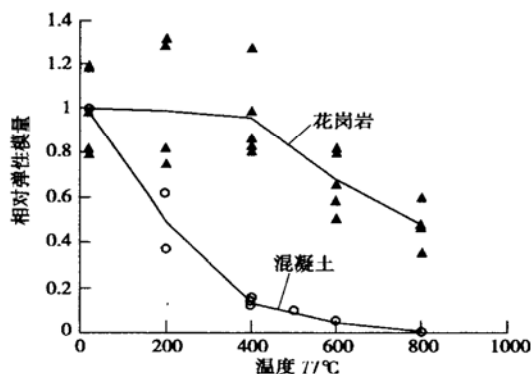


图8 高温后花岗岩和混凝土的相对弹性模量与温度的关系

Fig. 8 Relationship between the relative Young's modulus of granite and concrete and temperature after high temperature

出: 高温后花岗岩和混凝土弹性模量随温度总的变化规律同峰值应力相类似, 即在温度低于 400 °C 时, 花岗岩弹性模量变化不大; 混凝土的弹性模量急剧下降, 且降低速度比峰值应力的下降速度要快。温度超过 400 °C 以后, 花岗岩弹性模量迅速下降, 混凝土弹性模量继

续降低, 但降低速度比同阶段混凝土峰值应力的下降速度要慢。经历的受热温度为 400 °C 后, 混凝土弹性模量比常温下降了 90.7%, 而花岗岩仅降低了 4.0%, 由此可见, 温度低于 400 °C 时, 高温后混凝土的力学性能迅速劣化, 而花岗岩力学性能变化不大。这说明了 400 °C 前, 混凝土对温度要敏感得多。总体上混凝土弹性模量随温度的降低幅度要远大于花岗岩弹性模量的降低幅度。受热温度为 800 °C 时花岗岩和混凝土的弹性模量分别比常温下降了 40.9% 和 99.5%, 这表明经历 800 °C 高温后混凝土几乎散失了全部刚度和强度。

3 结 论

本文通过对 3 个孔号共 25 块花岗岩试件和 13 块 C50 高强混凝土试件进行在经历不同高温后的单轴压缩试验, 得出这两种材料的应力—应变全过程曲线、峰值应力、峰值应变和弹性模量。分析比较了不同温度后试件上述力学性质的变化情况。得出如下结论。

(1) 高温后花岗岩和混凝土应力—应变全过程曲线的形态变化主要体现在随受热温度的升高, 压密阶段变长, 延性增加, 而且曲线在应力峰值后的软化阶段随温度的升高变长。

(2) 经历高温后花岗岩和混凝土, 随受热温度的升高, 峰值应力、弹性模量降低, 峰值应变增大。且温度低于 400 °C 时, 花岗岩力学性质的变化不大, 而混凝土的变化较大。

(3) 经历高温对混凝土力学性能的影响要远大于对花岗岩力学性能的影响。

致谢: 本研究中高强混凝土的制备和加温得到了同济大学土木工程学院肖建庄教授的指导和帮助, 试验工作得到了研究生刘华、王宏、陈浩华等同学的协助, 在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 沈明荣. 岩体力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1999.
- [2] 谢鸿森, 周文戈, 赵志丹, 等. 高温高压条件下岩石弹性波速测量[J]. 地质前缘, 1998, 5(4): 329–337.
- [3] 许锡昌, 刘泉声. 高温下花岗岩基本力学性质初步研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 332–335.
- [4] 吴波, 袁杰, 王关远. 高温后高强混凝土力学性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2000, 33(2): 8–13.
- [5] 吴波, 马忠诚, 欧进萍. 高温后混凝土变形特性及本构关系的试验研究[J]. 建筑结构学报, 1999, 20(5): 42–49.