

退役核燃料干式贮存混凝土护箱受 高温作用之效应研究

黄伟庆 吴瑞贤 郑裕宽
(中央大学土木系 台湾桃园 32001)

摘要 退役核燃料干式贮存设施主体由混凝土构成,混凝土得在长时期内承受残余核燃料释出的衰变热,加上台湾地区特殊的环境气候条件,混凝土材料可能产生劣化。依据核能安全混凝土结构物的材料规定的配比,我们制作了混凝土试样,用实验室模拟法研究干式贮存混凝土护箱在高温环境作用下可能出现的损害或劣化,甚至耐久性变差等。利用非破坏性检测方法(超音波试验、动弹性模数试验及反弹锤试验等),观察混凝土受持续高温作用下的结构致密性及内部是否产生裂缝,而影响混凝土的质量及耐久性安全。研究结果表明,混凝土干式贮存设施在高温(94℃)长期作用下,其抗压强度所受影响有限,不致损及混凝土结构承载之能力;其超音波波速及动弹性模数在初期会略有降低,而后趋于稳定;混凝土受热环境作用后体积产生收缩,且温度越高收缩量越大,但不随受热历时增加而再有明显收缩;就抵抗高温作用而言,添加卜作岚材料的混凝土优于纯水泥混凝土。

关键词 用过核子燃料干式贮存,混凝土劣化,非破坏检测,高温效应

中图分类号 TU375

退役核燃料干式贮存护箱设施主体由混凝土材料构成,其用途不同于常规混凝土结构物。干式贮存设施受残余核燃料衰变热的作用,长期处于高温环境下,期限长达数十年,若考虑贮存护箱的重复使用,则其服务年限更长。本文针对干式贮存设施使用的混凝土材料在长期持续高温作用条件下,进行实验室模拟,利用非破坏检测方法考察该衰变热影响能否造成混凝土屏蔽的劣化或受损,并对混凝土材料受持续高温效应作用产生的劣化机制及其对耐久性的影响进行分析评估,以提供干式贮存设施的设计参考,提高退役核燃料贮存的安全性。

混凝土受高温作用的性质影响主要与混凝土初始性质及温度条件有关。初始性质包括含水量、水灰比、粗细骨材的用量、种类、形状、大小及水泥浆体界面结合状况等;温度条件则包括升温速率、最高作用温度、最高作用温度延时及降温速率等。Young等^[2]认为混凝土的强度通常可支持到300℃,除非温度产生巨变,强度才会显著下降。在室温至300℃范围内,常规混凝土的残余强度有增加或轻微损失的现象。强度增加是由于高温作用后混凝土产生干燥而磨擦力增加,使水泥浆体与骨材间产生互锁效应,而凡得瓦尔力(van der Waals' forces)增加,因此混凝土强度增加^[2-4]。Malhotra等^[5]认为影响混

凝土动弹性模数的因素为强度及密度,强度变化亦会改变动弹性模数,但密度是主要影响因素。混凝土受热后,骨材与水泥浆体变形不一致,使水泥浆体与骨材界面产生微裂缝,导致混凝土波速降低,且混凝土内部中孔隙及微裂缝对混凝土波速的影响比抗压强度更为敏感。

非破坏性检测(Non-destructive Testing),是在不破坏材料、构件或成品原有的组织、性能、质量和可用性的原则下,用各种物理方法检测它们的表面或内部缺陷,并分析检测数据以决定它们的完整性及使用可靠性。本文利用超音波试验、动弹性模数试验及反弹锤试验进行混凝土非破坏性检测。混凝土非破坏检测之影响因素为:

(1) 骨材的种类、形状与含量。由于抗压强度是骨材与胶结材料之弱面上的破坏强度,波速是混凝土内部波在其最短路径上的传递速度,则对于同一配比与抗压强度的混凝土,亦可能会因粗骨材不同而造成波速差异。

(2) 水泥种类。水泥的种类对于混凝土波速并无明显的直接影响,但各种水泥的水化速率不同会造成影响。以速强型水泥为例,其速硬特性加速水化作用反应,使混凝土加速早期抗压强度发展,亦增加混凝土波速与动弹性模数^[5,6]。

(3) 水灰比。当水灰比增加时，混凝土的密度、抗压强度、挠曲强度均随着下降，混凝土波速与动弹性模数也呈下降趋势。

(4) 养护条件。在水中养护的混凝土，其波速与动弹性模数有异于空气中养护的同一混凝土^[7]。

(5) 含水状况。含水状况对饱和混凝土的波速及动弹性模数影响高于干燥混凝土，但差异不大；对于低强度及高强度混凝土，该差异则较明显。

(6) 龄期。在相同的养护状态下，混凝土早期的波速及动弹性模数发展较为迅速，而晚期则成长趋势缓慢。当混凝土养护完成后，混凝土的波速及动弹性模数会因龄期增加而降低。

1 设备与方法

1.1 实验设备

本实验主要对长期受高温作用的混凝土材料进行其耐久性研究。基于 ACI 349-97^[1]中有关核能安全混凝土结构物规定，考虑各种不同配料比例，进行混凝土试样制作(试样编号以所用混凝土配比或胶结材料为依据)，分别使用纯水泥(OPC)及以卜作岚(Pozzolanic)替代水泥的配比，后者的水泥替代量为 10% (F10)、20% (F20)的飞灰，或 30% (S30)、50% (S50)的高炉渣(blast furnace slag)。各试样的混凝土配比见表 1。

表 1 混凝土配比*
Table 1 Proportion of concrete (kg/m³)

配比编号 Mix ID	胶结材 Cementitious material			细骨材 Fine aggregates
	II 型水泥 Type II cement	飞灰 Fly ash	炉石 Slag	
OPC	420	0	0	607
F10	378	42	0	592
F20	336	84	0	577
S30	294	0	126	602
S50	210	0	210	597

* 试样的其他配料 Other material contents of the specimens: 粗骨材 Coarse, 1091 kg/m³; 水 Water, 210 kg/m³(水胶比 w/b: 0.5); 减水剂 Water-reducing agent, 4.2 kg/m³.
OPC, 纯水泥试样 Specimen of Portland cement, without any substitutes;
F10, F20, S30 and S50, 卜作岚替代水泥试样，水泥替代量分别为 飞灰 10%、20%，或高炉渣 30%、50%。
F10, F20, S30 and S50 denote specimens with partial pozzolanic material substitutes, in cement replacement levels of fly ash of 10% and 20%, or blast furnace slag of 30% and 50%, respectively.

混凝土试样长期受高温影响后，进行力学及非破坏性检测试验，并评估干式贮存混凝土护箱所用混凝土材料的安全性。试验研究流程如图 1 所示。

试验设备使用抗压试验机、数字式比长计、超音波量测仪、共振量测仪、反弹锤及烘箱。

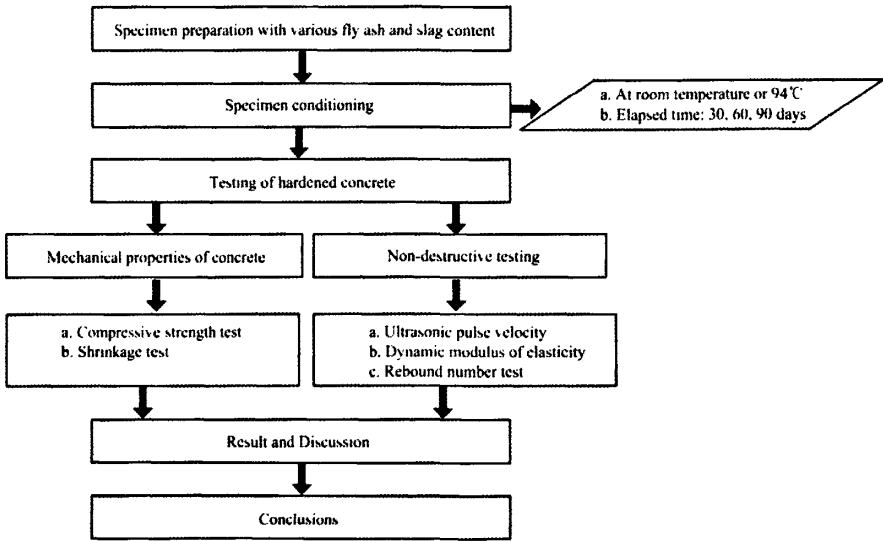


图 1 研究流程图
Fig.1 Work flow diagram.

1.2 试验方法

考虑到干式贮存设施与常规混凝土结构物的用途不同,混凝土护箱的设计应符合 ACI349-97 规定,混凝土护箱及外加屏蔽结构体混凝土之局部和整体最高温度应分别小于 93.3℃ 与 65.5℃。本研究设计模拟混凝土长期处于局部最高温度,进行长期处于约 94℃ 温度环境与常温下的试样作比对。在环境温度仿真前,所有试样置于相对湿度 100% 的养护室养护 42 d 后立即置于仿真温度中,进行环境温度及历时时间的仿真,再进行各项试验。

2 结果与讨论

2.1 抗压强度

不同配比的混凝土养护 42 d 成熟后,在常温下的抗压强度如图 2(a)所示。混凝土试样成熟后,置于模拟高温中(94℃),于不同历时时间进行抗压强度试验(图 2b)。纯水泥混凝土(OPC)及飞灰混凝土(F10)的抗压强度值较高。这是由于添加减水剂或适量的飞灰混凝土,对于混凝土增加其流动性及致密性,使强度增加。而添加较多的高炉渣(S30、S50),

因卜作炭反应较慢,强度尚未发展成熟,且混凝土在高温下使水分丧失,无法再继续产生水化反应,导致强度发展终止,造成较低的强度值。整体而言,曝露在退役核燃料干式贮存设施的高温(94℃)中,对于混凝土抗压强度,无论添加卜作炭材料与否,其直接影响效应有限,不致损及混凝土结构承载能力。

2.2 体积变化

混凝土组成材料的水化反应及温度、湿度及时间等改变均会造成混凝土体积变化。尤其是温度升高与湿度下降会使混凝土的水分蒸发增加,导致混凝土收缩进而产生裂缝而影响其耐久性^[2]。图 3(a)为常温下各历时时间的混凝土试样的体积测量值,试样体积均随着龄期增加而收缩,且五种试样的收缩量差异并不显著。五种混凝土试样在长期高温(94℃)下的体积变化如图 3(b)所示,高温环境确实使各混凝土配比的收缩量增加,飞灰混凝土与纯水泥(OPC)混凝土的体积收缩量相近;而高炉渣混凝土的体积收缩量略大,这应与高量卜作炭材料替代而致的收缩量增加有关。

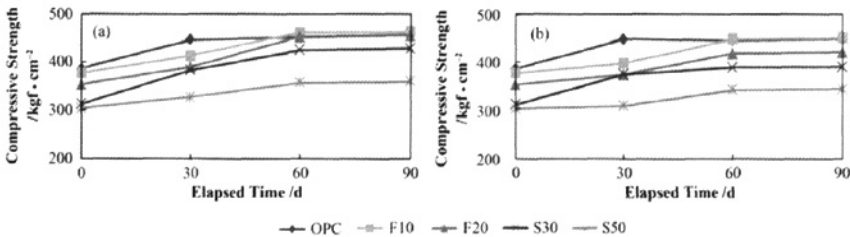


图 2 在常温(a)和 94℃ 温度(b)环境下各混凝土配比抗压强度
Fig.2 Compressive strength of concrete specimens at room temperature (a) and 94℃ (b).

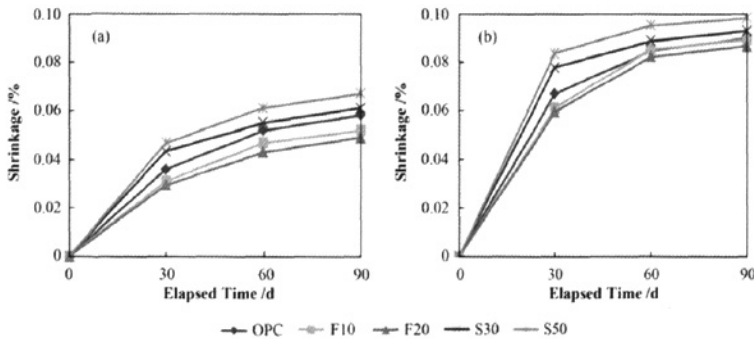


图 3 在常温(a)和 94℃ 温度(b)环境下各混凝土配比之体积变化
Fig.3 Shrinkage(%) of concrete specimens at room temperature (a) and 94℃(b).

2.3 超音波波速

超音波测量利用音波在不同物质中的传递速度

差异测量物体内部状况,评估混凝土整体内部有否孔隙或裂缝而影响混凝土质量。图 4 为各配比混凝土分别在常温及高温环境下音波速度与历时时间关

系。在常温或 94℃ 温度环境下，五种试样的超音波波速皆以纯水泥(OPC)混凝土为最大。在 94℃ 环境下，不论卜作岚材料种类，替代水泥比例越多，混凝土脉冲波速损失越严重。其原因为：(1) 混凝土中添加卜作岚材料越多，其水化热降低愈甚，水化反应进行越慢，早期强度较低，当卜作岚材料未达较佳强度时，高温作用而致的混凝土水分迅速蒸发会造成胶结材料失水，水化反应难以为继，使骨材与水泥浆体键结能力降低；(2) 高温下骨材与水泥浆体的变形不一致导致微裂缝增生，故混凝土超音波波速降低。

2.4 动弹性模数及反弹锤试验

弹性模数的测量基于混凝土试样的自然振动频率，一般而言，动弹性模数与骨材水泥浆体的键结

力有很大关系。反弹数测量，是用反弹锤撞击混凝土并测定其反弹数，反弹数可用于评估混凝土的均匀性，并粗略评估其强度。试验结果如图 5、图 6。在 94℃ 环境中，各混凝土试样的动弹性模数值及反弹数值皆低于常温环境。OPC 混凝土的动弹性模数值及反弹数值最高，而 S50 混凝土则最低，且替代水泥比例越高，则混凝土动弹性模数降低越严重。混凝土配比中添加卜作岚材料，水化反应就较慢，使混凝土内部结构强度需要更长时间才能发展完全，这样的混凝土受高温作用后，其内部水分散失呈无水状态，造成混凝土无法进行水化反应，导致内部结构较不致密。内部结构尚未发展完全的混凝土受高温作用后，也造成孔隙及缝裂增加，从而降低混凝土密度，使混凝土动弹性模数降低。

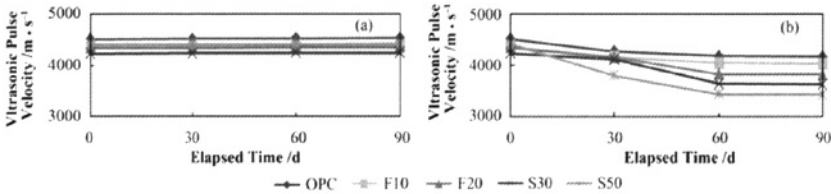


图 4 在常温(a)和 94℃ 温度(b)环境下各混凝土配比之脉波波速
Fig.4 Ultrasonic pulse velocity of concrete specimens at room temperature (a) and 94°C(b).

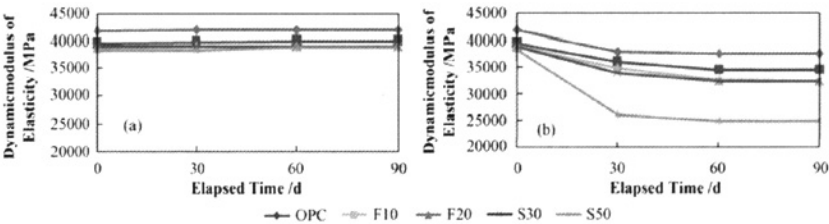


图 5 在常温(a)和 94℃ 温度(b)环境下各混凝土配比之动弹性模数
Fig.5 Dynamic modulus of elasticity of concrete specimens at room temperature (a) and 94°C(b).

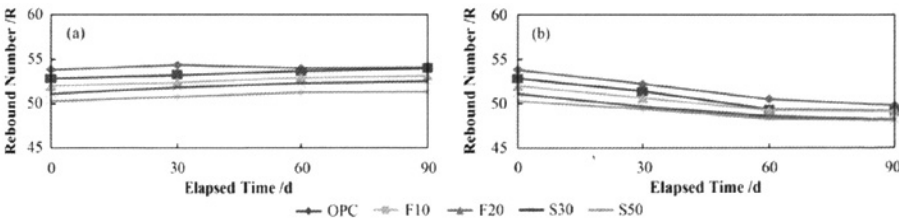


图 6 在常温(a)和 94℃ 温度(b)环境下各混凝土配比之反弹数
Fig.6 Rebound number of concrete specimens at room temperature (a) and 94°C(b).

3 结论

五种混凝土配比的试样在养护 42 d 后进行的为期三月的 94℃ 高温环境持续作用试验，结果表明，

混凝土抗压强度略低于常温下，所受影响甚微；但由于混凝土内部孔隙水及层间水蒸发，混凝土体积产生收缩现象甚于常温环境。

由五种试样的非破坏性试验结果表明，混凝土

持续受热后的超音波波速、动弹性模数值和反弹数均在高温作用的初期会降低，但随历时时间的延长而渐趋稳定。

本工作也表明，利用超音波波速、动弹性模数和反弹数等非破坏检测方法，可掌握混凝土在高温环境作用下的性能变化趋势。在退役核燃料干式贮存混凝土护箱制作完成和放置退役核燃料后，可利用这些非破坏检测法测量基准数据，为后续定期检测护箱、判断混凝土质量状况提供依据。

参考文献

- 1 ACI Committee 349-97 (1997), "Code requirements for nuclear safety related concrete structures," ACI Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- 2 Young J F, Mindess S, Darwin D. Concrete, Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, U.S.A. 2002
- 3 Castillo C, Durrani A J. ACI Materials Journal, 1990, 87(1): 47-53
- 4 Dias W P S, Khoury G A, Sullivan P J E. ACI Materials Journal, 1990, 87(2): 160-166
- 5 Malhotra V M, Carino N J. Handbook on nondestructive testing of concrete. CRC Press LLC, U.S.A. 2004
- 6 叶佩娟. 应用四种不同超音波仪器于混凝土波速与裂缝之研究. 硕士论文. 中华大学土木工程研究所, 2004
- 7 Yeh Pei-Chuan. Application of ultrasonic instruments in four different velocity and crack of concrete. Master's degree dissertation. Hsinchu, Taiwan: Chung Hua University, Department of Civil Engineering (in Chinese), 2004
- 8 Ravindrarajah R S, Lopez R, Reslan H. Effect of Elevated Temperature on the Properties of High-Strength Concrete containing Cement Supplementary Materials. 9th International Conference on Durability of Building Materials and Components, Brisbane, Australia, 2002

Effects of temperature on concrete cask in a dry storage facility for spent nuclear fuels

HUANG Weihsing WU Rayshyan CHENG Yukuan

(Department of Civil Engineering, Central University, No.300, Chung-da Rd, Chung-Li City, Taoyuan County 320, Taiwan)

Abstract In the dry storage of spent nuclear fuels, concrete cask serves both as a shielding and a structural containment. The concrete in the storage facility is expected to endure the decay heat of the spent nuclear fuel during its service life. Thus, effects of the sustaining high temperature on concrete material need be evaluated for safety of the dry storage facility. In this paper, we report an experimental program aimed at investigating possible high temperature effects on properties of concrete, with emphasis on the mechanical stability, porosity, and crack-resisting ability of concrete mixes prepared using various amounts of Portland cement, fly ash, and blast furnace slag. The experimental results obtained from concrete specimens exposed to a temperature of 94°C for 90 days indicate that: (1) compressive strength of the concrete remains practically unchanged; (2) the ultrasonic pulse velocity, and dynamic modulus of elasticity of the concrete decrease in early stage of the high-temperature exposure, and gradually become stable with continuing exposure; (3) shrinkage of concrete mixes exhibits an increase in early stage of the exposure and does not decrease further with time; (4) concrete mixes containing pozzolanic materials, including fly ash and blast furnace slag, show better temperature-resisting characteristics than those using only Portland cement.

Key words Dry storage of spent nuclear fuel, Concrete degradation, Non-destructive testing, High temperature
CLC TU375