

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

核燃料乾式貯存護箱運用不同密度混凝土之研究 研究成果報告(完整版)

計畫類別：個別型
計畫編號：NSC 95-NU-7-002-003-
執行期間：95年01月01日至95年12月31日
執行單位：國立臺灣大學土木工程學系暨研究所

計畫主持人：詹穎雯

計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理：楊泓斌
共同研究人員：鄭瑞濱、邱暉仁

處理方式：本計畫涉及專利或其他智慧財產權，1年後可公開查詢

中華民國 96年05月17日

核燃料乾式貯存護箱運用不同密度混凝土之研究

The study of heavy-weight concrete applied in HIC

(計畫編號：95-NU-7-002-003-94WFA0100564)

詹穎雯¹ 鄭瑞濱² 邱暉仁² 楊泓斌¹

¹國立臺灣大學土木系

²財團法人臺灣營建研究院

摘要

重質混凝土為具備阻絕輻射之效能，其組成成分不同於一般混凝土，主要是由金屬骨材與水、水泥其他特殊膠結料所組成，並藉由金屬骨材來吸收游離輻射。國際間各主要先進國家對於重質混凝土材料的檢驗均具有多項規定，以確保其應用上的功能性與安全性，以法國為例，其重質混凝土製作核廢料貯存桶的研究已有多年基礎，以他們的結論顯示：與傳統混凝土（OPC）及高性能混凝土（HPC）相比較，透過設計後之重質混凝土的緻密性相當優異，故相當適合於被用來製作HIC。

但由於混凝土結構本身之抗拉性非常脆弱，如果遭遇地震或撞擊將產生許多裂縫甚至破壞，將導致核能輻射外洩並引起環境安全的問題；因此，本研究特以具韌性之RPC為主要漿體，針對不同之金屬骨材探討重質RPC於核燃料儲存容器應用之相關議題。

在配比部分，以RPC漿體配合不同密度之骨材，包括鑄鐵砂、氧化鋁、氧化鋯等金屬骨材，並在使粗骨材不分離的前提下，調整配比以灌製各種骨材之重質RPC試體，進行本研究之基本性質試驗。

在力學性質部分，不同金屬骨材之RPC重質混凝土，其在抗壓強

度、抗剪強度、劈裂強度等力學性質上的表現，因受骨材顆粒形狀的影響，而有些微增減，但差異不大，整體抗壓強度約介於140~180MPa、劈裂強度約介於14~18MPa、抗剪強度約介於212~260kN，其性能與一般RPC相似。

在耐久性能部分，透過硫酸之浸蝕後，各金屬骨材之RPC重質混凝土在不同力學性質上的劣化現象不顯著，3個月試驗齡期下力學性質至多折減10%之性能，故其屬於耐久能力佳之材料。

在超音波非破壞檢測部分，以氧化鋁RPC重質混凝土具較高之動彈性模數78.051Gpa，鐵鑄砂與氧化鋇RPC重質混凝土之動彈性模數則略低，約介於60.020~66.042 Gpa；此外本研究亦透過惡劣溫度之模擬(100°C)，建立各種金屬骨材RPC重質混凝土彈性模數之變化，以作為未來應用時，結構設計之考量。

除上述量化之分析外，本研究亦透過電子顯微鏡觀測(SEM)進行微觀分析，了解RPC重質混凝土在硫酸鹽之浸蝕下，其結晶物與空洞之差異。

最後，藉由本研究RPC重質混凝土之配比研究與耐久性測試得知，透過RPC漿體與金屬骨材之結合，已可產製出具抗環境化學侵蝕與抗溫差變化之高耐久性材料，而此成果將可提供核燃料乾式貯存護箱建造材料上之一種選擇。

關鍵詞：重質混凝土、活性粉混凝土、耐久性、核燃料乾式貯存護箱

Concrete, heavy-weight, is a kind of concrete consists of metal aggregate, water, cement and some cementing materials. Because this kind of concrete consists of metal aggregate, it could absorb and separate the radiations produced by some apparatus. In some advanced countries, heavy-weight concrete had be researched through many years, and made many standards for designing. And the research also suggested that heavy-weight concrete was a suitable material for producing HIC.

But concrete is a kind of brittleness material. This material will occur many cracks after earthquake or hit, and the radiations leak out from the cracks will pollute the environment. To solve this problem, we use a kind of toughness material, RPC and some metal aggregate in the study. And in the study, we made some experiments to test the mechanics of the RPC-heavy-weight concrete.

In the research, we made RPC-heavy-weight concrete with emery, Aulminum oxidation, and Zirconium oxidation. And through tests, we find that the compression strength of RPC-heavy-weight concrete are between 140 MPa to 180 MPa. The flexural strength of RPC-heavy-weight concrete are between 27 MPa to 40 MPa. The split strength of RPC-heavy-weight concrete are between 14 MPa to 18 MPa. Beside, we also know the RPC-heavy-weight concrete is stable in durable experiments and set up non-destructive test for check RPC-heavy-weight concrete easily after the research. So we suggest that RPC-heavy-weight concrete is also a suitable material for producing HIC.

Keywords : heavy-weight concrete, RPC, durable test, HIC

一、緒論

重質混凝土為具備阻絕輻射之效能，其組成成分不同於一般混凝土，主要是由金屬骨材與水、水泥其他特殊膠結料所組成，並藉由金屬骨材來吸收游離輻射，但由於混凝土結構本身之抗拉性非常脆弱，如果遭遇地震或撞擊將產生許多裂縫甚至破壞，將導致核能輻射外洩並引起環境安全的問題；因此，國際間各主要先進國家對於重質混凝土材料的檢驗均具有多項規定，以確保其應用上的功能性與安全性，以法國為例，其重質混凝土製作核廢料貯存桶的研究已有多年基礎，Matte[1]等人所發表的關於測試混凝土材料對於核廢料貯藏桶（High Integrity Container, HIC）的適用性實驗算是較為完整的公開文獻，文中詳述了各個試驗的測試歷程以及其實驗結果。他們的結論顯示：與傳統混凝土（OPC）及高性能混凝土（HPC）相比較，透過設計後之重質混凝土的緻密性相當優異，故它相當適合於被用來製作HIC。

目前法國對於HIC的材料設計標準雖尚未定案，但亦建議有下列數項的材料標準：

1. 孔隙率（MIP Porosity） 小於 $5 \pm 1\%$
2. 滲透率（ N_2 Permeability） 小於 $10^{-20} m^2$
3. 氚氣擴散係數（Tritium Diffusion Coefficient） ... 小於 $6 \times 10^{-14} m^2/s$
4. 抗輻射性（Irradiation） 36 360 Gy/hr（總共105 106Gy）
5. 抗壓強度（Compressive Strength） 大於80 MPa
6. 劈裂抗張強度（Splitting Tensile Strength） 大於5 MPa
7. 墜落抵抗能力（Drop-resistance Limitation） 大於5 m

此外，該委員會亦針對以RPC為主要材質之重質混凝土之抗輻射能力，進行了基本的試驗，試驗的目的主要是在測試是否可能由於水泥質材料中的水分可因輻射的影響崩解而釋放出氫氣，進而改變了混凝土材料的性質。其試驗時以36與360Gy/hr強度的 γ 射線進行重質混凝土的輻射照射，並比較未照射與照射後之重質混凝土的劈裂抗張強度；而依據此試驗之結果顯示：無論是飽和或未飽和試體，輻射線對於重質RPC的強度試驗影響並不顯著，使得其非常適合於製作HIC[2]。

在國內核能同樣是一項重要的電力來源，因此利用重質混凝土來儲存核燃料之論題，亦應是一項屬於國家環境安全之研究重點，依行政院「放射性廢料盛裝容器規範」及「放射性物質安全運送規則草案」的規範中，規定核廢料盛裝容器放射物質的釋出須低於一定的劑量，因此放射廢料輻射線源穿透重質混凝土障壁所造成輻射線衰減涉及儲存筒厚度設計等問題便有待進一步的瞭解，而本研究之重點即朝此目標發展，希望藉由國內RPC已發展成熟之技術，配合重金屬骨材之使用，以驗證重質RPC使用時之耐久性問題；藉由此計畫之成果，以發展國內重質混凝土於核燃料儲存箱之應用，並提出相關測試標準與結構物製程，供後續量產時品質管理之使用。

二、文獻回顧

近幾十年來，隨著混凝土技術的發展，材料科學的進步，使得傳統混凝土得到相當大的改善，在1990年代有所謂高性能混凝土（HPC）的產生，高性能混凝土可具有高強度、高流動性、高勁度、高耐候性、高耐酸鹼及化學侵蝕性等優點，這些優點使得HPC成為營建工程的新寵；在高性能混凝土還沒有普及化的時候，歐美先進國家又推出了抗壓強度可達800MPa（116,000psi）的鋼纖高性能混凝土（Reactive Powder

Concrete，簡稱RPC)，為國內常用3000psi級混凝土抗壓強度之38倍，為鋼鐵強度30,000psi之兩倍。這種新材料除了抗壓强度高之外，韌性也極佳，可製成無鋼筋預力構件，而且在耐久性方面也遠超過高性能混凝土；混凝土之抗壓強度首次超過鋼筋之強度，在混凝土歷史上是一重大創舉[2]。

活性粉混凝土本為一種軍事用途的特殊材料，1994年由法國布依格(Bouygues)集團研發成功並首度公開發表[5]，隨後美國及加拿大亦加入此種材料的研發，至今已有相當好的研究成果；而活性粉混凝土於力學性質中會有如此大的突破，實可歸納出下列幾個因素：

(1)改善材料均勻性：

藉由最大粒徑600 μm 取代粗骨材，以使微裂縫的尺寸變小，並經由粒徑的減小增加界面的黏滯力以提升材料整體的強度。另降低漿體與骨材之間特性差異所造成的非均質性，也可以減少RPC材料的收縮量，由圖 2-3 [5]中可看出，RPC於28天齡期時其自體收縮量約為170 $\mu\text{m}/\text{m}$ ，相較於HPC減少甚多。

(2)提高實密性：

利用砂顆粒、水泥顆粒及粉料等不同粒徑所搭配的骨材級配最佳化，以提升混凝土充填效果，增加力學強度。

(3)採用高溫蒸氣養護：

利用高溫蒸氣養護，提高材料早期力學性質，節省時間成本，並能形成緻密微結構，增加耐久性，藉由核磁共振 $^{29}\text{SiNMR}$ 的SPE/MAS(Single Pulse Excitation/Magic Angle Spinning)技術，研究RPC水化反應與養生溫度歷時之間的關係[15]，由文獻中可知溫度的提升對於促進波索蘭反應有正面的幫助。

(4)添加鋼纖維以增加韌性：

藉由密實材料與鋼纖維介面間緊密的握裹強度，使得RPC於開裂之後仍可藉由纖維的橋接作用而傳遞應力進而提高RPC材料的韌性。此外，即使是在開裂前，也會因一連串的弱帶應力轉移，而使抗彎及抗壓特性有強化的效果[16、17]。

在實際的工程應用上，由於活性粉混凝土的高強度及低孔隙率，因此可以製作斷面較小且具備良好耐久性[9]的地下預力水管[10](美國)，輕巧的人行／自行車預力桁架橋[11](加拿大)，以減少材料費用及延長使用壽命；另外也可製造與等斷面鋼梁力學性質不相上下的預力RPC梁[12,13]，及利用其極佳的材料穩定性和低滲透性的特點，來作為儲存具放射性核廢料容器的材料[14](法國)。

對於混凝土應用於放射性核廢料容器方面，法國原子能委員會（CEA，French Atomic Energy Commission）所測試之RPC、HPC與OPC的實驗結果如表1所示：

表1、CEA之實驗結果

材料種類 實驗變數	RPC	HPC	OPC
MIP 孔隙率	4±78kg/m ³	9%	-
N ₂ 滲透率 (m ²)	5×10 ⁻²⁰	7×10 ⁻¹⁵	-
氬氣擴散係數 (m ² /s)	1.0 1.2×10 ⁻¹⁴	1.2 5.4×10 ⁻¹³	-
抗壓強度 (MPa)	216	76 105	54
劈裂抗張強度 (MPa)	24	5 6	4
彈性模數 (GPa)	62	48 53	36
破壞能 (J/m ²)	23,900	135 152	130

註：1 MPa=10.2 kg/cm²

由上表可看出，RPC除了在N₂滲透率略高於規定值之外，其它皆符

合標準。CEA將於最近重新審視其所初定之N₂滲透率的標準是否太嚴苛。

在抗輻射方面，主要是在測試是否可能由於水泥質材料中的水分可因輻射的影響崩解而釋放出氫氣，進而改變了混凝土材料的性質，故以36與360Gy/hr強度的 γ 射線進行RPC的輻射照射實驗（總輻射量為105 106Gy），並比較未照射與照射後之RPC的劈裂抗張強度（MPa）如表2所示。

表2、未照射與照射輻射後之RPC的劈裂抗張強度試驗結果〔10,11〕

	未受輻射照射 (MPa)	受36 Gy/hr照射 (MPa)	受360 Gy/hr照射 (MPa)
飽和RPC	17.1	16.5	18.5
未飽和RPC	18.7	20.0	16.6

前述結果顯示：無論是飽和或未飽和試體，輻射線對於RPC的影響似乎不顯著。綜觀實驗結果的評估，Matte等人認為RPC相當適合於被用來製造HIC。

RPC於國內之發展已近十年，目前已開發完成抗壓強度RPC200MPa等級之鋼纖高性能混凝土，其性能〔16,17,18,19,20〕在6天齡期時具有高於186MPa（27,000psi）之抗壓強度，以及24MPa（3500psi）以上之抗彎強度，其值符合法國CEA所定抗壓強度大於80MPa的規定。以抗彎強度24MPa來推估，其劈裂抗張強度應遠大於CEA所制定之5MPa。而MIP實驗結果顯示，本土RPC的累計孔隙量為2.3% ml/g，亦低於法國CEA所定之5±1%。因此，本計畫將利用此開發完成之RPC漿體，配合金屬骨材之應用，研究本土重質RPC用以製作低階核廢料貯存桶時之相關力學性質與耐久性表現，並藉由研究成果提供相關單位利用。

三、試驗計畫

本研究以RPC為對象，探討重質RPC於核燃料儲存容器應用之相關

議題，將進行下列之工作內容：

- (1) 發展不同密度 (比重2.3或更高)之RPC配比，並進行基本性質試驗，探討添加不同金屬骨材或鋼纖維、摻料(強塑劑、減水劑)等之最佳化配比。
- (2) 探討各種配比之抗壓強度、抗剪強度、劈裂強度等力學性質。
- (3) 探討各種配比之RPC在室溫及200°F貯存溫度下之各項性質比較。
- (4) 探討高密度RPC在200°F貯存溫度下之耐久性研究，利用硫酸鹽侵蝕方式進行，並以X光繞射分析(XRD)、熱重分析(TGA)、電子顯微鏡觀測(SEM)進行微觀分析。
- (5) 運用超音波等非破壞檢測方式探討不同密度RPC之彈性模數。

本研究除上述之工作內容外，亦將與先前之研究成果進行比較，探討重質RPC與常重RPC之差異，供給後續應用參考。

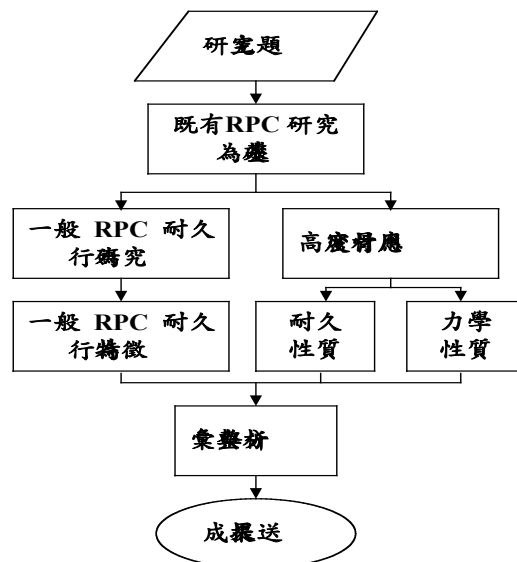


圖1、本研究試驗流程圖

四、結果與討論

A 不同密度RPC配比之研發

在一般RPC配比部分，本研究利用石英砂、矽灰、石英粉、二型水泥、強塑劑及水，搭配不同體積之鋼纖維(0%、1%、2%)，拌製本土之活性粉混凝土作為試驗之對照組，其配比如下表3所示。

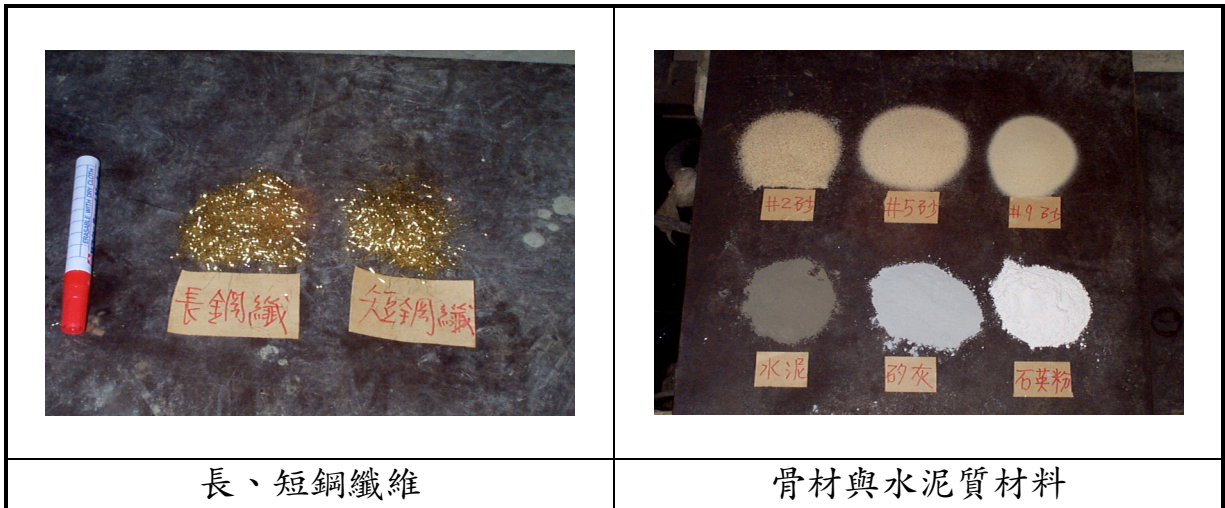
在重質RPC之試驗配比方面，為發展不同密度 (比重2.3或更高)之RPC配比，以進行重質RPC之力學與耐久性相關試驗，本研究先以不同比重之金屬骨材取代RPC中之矽砂進行配比之比重測試，並選擇其漿體流動性不受影響，且金屬骨材於漿體中不產生析離的組別，作為後續重質RPC之配比，試驗中使用之金屬骨材基本資料與篩分析如表圖2，而試驗之結果如表6。

從試驗之結果顯示，藉由金屬骨材之取代，RPC混凝土之比重已可達到3.65~3.90，遠超過一般RPC之比重2.57，驗證金屬骨材之添加對於重質RPC之產製實為可行；但此類重質之材料是否會因骨材之改變，而產生基本性質之變化，將於後續各節進行討論。

表3、RPC基本試驗配比表

水泥	矽灰	石英砂	石英粉	強塑劑	水	水灰比 (W/C)	水膠比 (W/B)
723	217	904	253	10.8	205	0.28	0.22
鋼纖佔RPC總體積%比				2.0 (156kg/m ³),			

表4、RPC使用材料



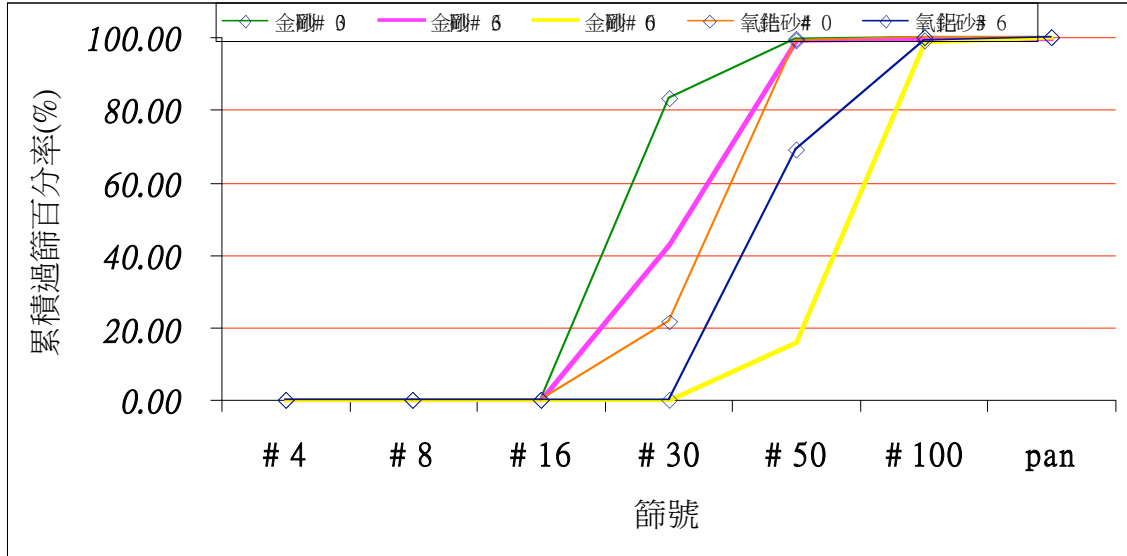


圖2、重質RPC使用金屬骨材之粒徑分析

表5、重質RPC使用金屬骨材資料

金屬骨材名稱	金鋼砂	氧化鋁	氧化鋯
粒徑(μ)	250~710	600-425	425-200
典型成份(%)	Al ₂ O ₃ : 80.8 TiO ₂ : 1.1 SiO ₂ : 11.3 Ca,etc : 0.3 Fe ₂ O ₃ : 6.8	Al ₂ O ₃ : 96.0 TiO ₂ : 2.6 SiO ₂ : 0.89 CaO : 0.25 MgO : 0.15 Fe ₂ O ₃ : 0.11	ZrO ₂ : 68 SiO ₂ : 31 Other : 1
形狀	多角形	多角形	圓球形
顏色	黑色	棕色	米白
莫氏硬度	8	9	7

表6、不同金屬骨材之RPC試驗比重

型號	金剛砂			氧化鋯砂	氧化鋁砂	砂砂
	E30#	E36#	E60#	BZ40#	A36#	# 3
比重	3.65			3.85	3.9	2.57

B 重質RPC材料力學性質之探討

為探討RPC與金屬骨材之複合後，其材料力學性質是否產生變異或劣化，本研究規劃一系列之破壞試驗，針對上述配比性能優異之重質RPC進行探討，其中主要包含有抗壓試驗、抗剪試驗、劈裂試驗等基本力學性質之測試，而各項試驗之結果討論如下：

(1) 混凝土抗壓試驗

混凝土抗壓試驗之目的主要是求得混凝土之抗壓強度，在工程界中，混凝土抗壓強度經常被用作品質管制的標的，亦為混凝土結構物設計之重要依據，本試驗參考 CNS 1232 「混凝土圓柱試體抗壓強度之檢驗法」施行。

抗壓試體尺寸方面，考慮萬能試驗機之性能(100t)，本抗壓試驗之試體尺寸為直徑5公分、高10公分之圓柱試體，試驗前先以混凝土試體研磨機將抗壓試體兩面磨平，以避免試驗過程應力集中之現象，試驗之結果如表7所示。

從試驗結果比較可知，RPC在金屬骨材之取代後，抗壓強度約界於140~180MPa，其中以氧化鋯取代之強度最低，約為一般RPC(200 MPa)之70%，氧化鋁為一般RPC之75%，而金鋼砂則最高，約為一般RPC之80%；觀察此現象，推測其抗壓強度高低取決於骨材之顆粒形狀，由於金鋼砂與氧化鋯同屬於多角形之骨材，故其骨材與漿體之握裹良好，容易提高RPC結構之組成，進而產生所需之強度，但級配仍不若石英砂均布，故強度成長尚不如一般RPC；而氧化鋁骨材呈光滑圓球形，握裹性最差，強度亦最弱；但此三類重質RPC之強度仍遠遠超過一般混凝土之強度(30~80 MPa)，故在使用上仍符合設計需求，

皆具有利用之價值性。

(2) 混凝土劈裂強度試驗

本研究係採用混凝土劈裂抗張試驗，藉由抗張強度間接反應至混凝土抗張強度。試驗主要是依據ASTM C 469-96，將 $\Phi 5 \times 10$ cm 之混凝土圓柱試體依齡期將試體由水中取出，於空氣中靜置一天後置於油壓試驗機中，以每分鐘 $7 \sim 14 \text{ kgf/cm}^2$ 之加載速率加壓，並以二條狹窄支承條於圓柱試體兩側加載，當其達到混凝土劈裂強度時，圓柱試體將破裂為兩半，進而求得混凝土之劈裂強度。

從試驗結果比較可知(表7)，重質RPC之劈裂強度仍以金鋼砂取代矽砂之強度最佳，其次則為氧化鋯與氧化鋁，但此重質RPC之劈裂強度仍界於文獻中之試驗強度範圍內 $16 \sim 20 \text{ MPa}$ ，故金屬骨材對於重質RPC之劈裂強度影響不顯著。

(3) 混凝土抗剪強度試驗

混凝土抗剪強度亦是鋼筋混凝土設計時所需考慮之材料特性之一，剪力在梁內的傳遞通常發生四種機制：(a)通過未開裂的混凝土受壓區直接傳遞；(b)骨材的互鎖作用；(c)主要撓曲鋼筋的插接作用(dowel action)以及 (d) 腹筋的直接受拉；而若應用於深梁，大部份的載重則是從載重作用點到支承由斜壓桿直接傳遞的，大約平行於載重作用點至支承連線方向形成的斜裂縫分割出斜向壓桿，它與混凝土的水平壓力和主筋拉力共同作用來平衡載重；故亦應配合材料應用的型式，對重質混凝土進行剪力之測試。

從試驗結果比較可知(表7)，重質RPC之剪力強度以金鋼砂取代矽砂之強度最佳，其次則為氧化鋯與氧化鋁，整個重質RPC之剪力強度

變化與抗壓強度之大小相關。

表7、各配比重質RPC之基本力學性質比較

材料	金剛砂 #30	金剛砂 #36	金剛砂 #60	氧化鋁砂	氧化鋇砂
抗壓強度 (Mpa)	165.27	167.18	173.41	155.69	145.89
劈裂強度 (Mpa)	18.34	18.21	15.97	15.33	15.89
抗剪強度 (kN)	241.85	248.95	259.88	213.64	212.04

C. 混凝土材料抗熱劣化性質之探討

本計畫重質RPC之最終應用目的為核燃料之儲置箱，因此為提高其安全性，亦計畫將材料置於高溫之環境，探討其材料劣化的行為。

測試溫度方面，由於研究對象之重質RPC在應用上不考慮火害之侵襲，所以本計畫之測試高溫以100°C為主，來進行各配比重質混凝土之力學性質劣化測試，包括高溫環境下，重質RPC抗壓強度、劈裂強度、抗剪強度等性質之變化，試驗結果整理如下表8~10，表中衰減強度與劣化百分比為正時，代表熱劣化後之強度大於原始數值。

表8、重質RPC熱劣化後之抗壓強度變化

材料	金剛砂 #30	金剛砂 #36	金剛砂 #60	氧化鋁砂	氧化鋇砂
原始數據	165.28	167.18	173.42	155.69	145.90
熱劣化數據	173.74	160.84	168.87	150.09	137.39
衰減強度	8.46	-6.35	-4.55	-5.60	-8.51
劣化百分比	5.12%	-3.80%	-2.62%	-3.60%	-5.83%

單位：MPa

表9、重質RPC熱劣化後之劈裂強度變化

材料	金剛砂 #30	金剛砂 #36	金剛砂 #60	氧化鋁砂	氧化鋇砂
原始數據	18.35	18.21	15.97	15.34	15.90
熱劣化數據	14.26	20.32	17.68	16.35	17.44
衰減強度	-4.09	2.11	1.71	1.01	1.54
劣化百分比	-22.27%	11.57%	10.71%	6.59%	9.70%

單位：MPa

表10、重質RPC熱劣化後之抗剪強度變化

材料	金剛砂 #30	金剛砂 #36	金剛砂 #60	氧化鋁砂	氧化鋇砂
原始數據	241.85	248.95	259.89	213.64	212.04
熱劣化數據	223.61	257.19	268.62	224.41	211.41
衰減強度	-18.24	8.24	8.73	10.77	-0.63
劣化百分比	-7.54%	3.31%	3.36%	5.04%	-0.30%

單位：kN

從熱劣化後重質RPC之抗壓強度、劈裂強度與抗剪強度之試驗結果整理可知，在抗壓強度比較方面，不同金屬骨材熱劣化後之重質RPC劣化百分比約介於5.12%~-5.83%；在劈裂強度比較方面，不同金屬骨材熱劣化後之重質RPC劣化百分比約介於11.57%~-22.27%；在抗剪強度比較方面，不同金屬骨材熱劣化後之重質RPC劣化百分比約介於5.04%~-7.54%；上述試驗結果除使用金剛砂#30之配比有較大之劈裂強度折減外，其餘配比之劣化百分比皆低於10%，尚在試驗的誤差範圍內，因此可知，在高溫養護後之重質RPC，若處於一般環境產生之高溫狀態下(< 100°C)，其材料之基本力學性質將不會有明顯之劣化現象產生，非常有利於應用在安全性要求較高之核廢料儲存桶中。

D. 重質RPC非破壞之檢測

在重質RPC結構物建置後或於使用一段時間後，在不破壞結構物前提下，評估結構物是否安全，可利用非破壞方式對受損的結構物加以檢測；本計畫利用超音波測試不同配比重質RPC於各種環境下之彈性模數，藉由超音波之非破壞檢測，建立重質RPC於不同試驗條件下之彈性模數資料，並藉此建議核料儲置箱未來之性能檢測方式。

本超音波測試參照ASTM C 215-91方式進行，其所需要的實驗設備包括：(1) 頻率在100~10000 Hz變頻振動器 (2) 振動接收器 (3) 振幅顯

示器，其試驗結果如下表11。

表11、重質RPC熱劣化之動彈性模數變化

材料	金剛砂 #30	金剛砂 #36	金剛砂 #60	氧化鋁砂	氧化鋇砂
原始 Data	62.70	66.04	60.72	78.05	60.02
熱劣化	50.22	58.71	56.28	67.69	57.20
劣化差距	-12.49	-7.33	-4.44	-10.36	-2.82
劣化百分比	-19.91%	-11.10%	-7.31%	-13.28%	-4.69%

單位：Gpa

由試驗結果比較可知，在熱劣化後之動彈性模數折減數值與基本力學之變化相似，除金剛砂#30配比有較大之折減外，其餘配比之劣化百分比皆低於15%，折減情況仍不明顯。

E. 混凝土材料耐久性行為與微觀特性之探討

本計畫亦透過硫酸鹽腐蝕試驗探討數種重質RPC之耐久性，以檢驗其材料之長期安全性，並透過微觀研究方式，了解重質RPC耐久測試後之材料組成及分子架構破壞模式。

(1) 硫酸鹽腐蝕試驗

以硫酸鹽浸泡進行重質RPC耐久性試驗，其測試環境溫度為23°C，並以重量百分率濃度27.3%的硫酸鈉濃度浸泡。測試試體以砂漿棒之型式進行浸泡，並於各齡期測試其重質RPC動彈性模數與抗壓強度之變化。

由試驗結果比較可知(表12~13)，在硫酸鹽浸泡試驗後之動彈性模數折減數值與抗壓強度之變化亦與熱劣化之趨勢相似，其折減率皆低於10%；以硫酸鹽試驗對動彈性模數之影響可知，其折減率約介於1.18%~-6.94%；而對抗壓強度之影響，除氧化鋁配比外，其餘配比之折減率約介於3.91%~-2.59%，顯示以RPC為漿體配合金屬骨材所灌製之重質RPC，其材料之性能同樣保有原始RPC之高耐久性，與一般重質混凝

土容易受環境影響而產生耐久性能之劣化現象不同，因此本計畫所研發出之重質RPC在核廢料儲存槽之應用，更有其適用性。

表12、硫酸鹽試驗對重質RPC之動彈性模數影響

材料	金剛砂 #30	金剛砂 #36	金剛砂 #60	氧化鋁砂	氧化鋇砂
原始	62.7	66.04	60.72	78.05	60.02
第一個月	62.41	64.25	59.13	76.38	60.38
第二個月	62.44	61.63	59.23	75.42	61.38
第三個月	61.81	61.46	59.87	75.21	60.73
折減率	-1.42%	-6.94%	-1.40%	-3.64%	1.18%

單位：Gpa

表13、硫酸鹽試驗對重質RPC之抗壓強度影響

材料	金剛砂 #30	金剛砂 #36	金剛砂 #60	氧化鋁砂	氧化鋇砂
原始	161.18	160.91	157.18	151.4	141.89
第一個月	163.84	147.87	166.82	144.44	135.75
第二個月	128.95	152.97	137.56	134.53	148.84
第三個月	167.48	156.74	157.07	123.94	145
折減率	3.91%	-2.59%	-0.07%	-18.14%	2.19%

單位：MPa

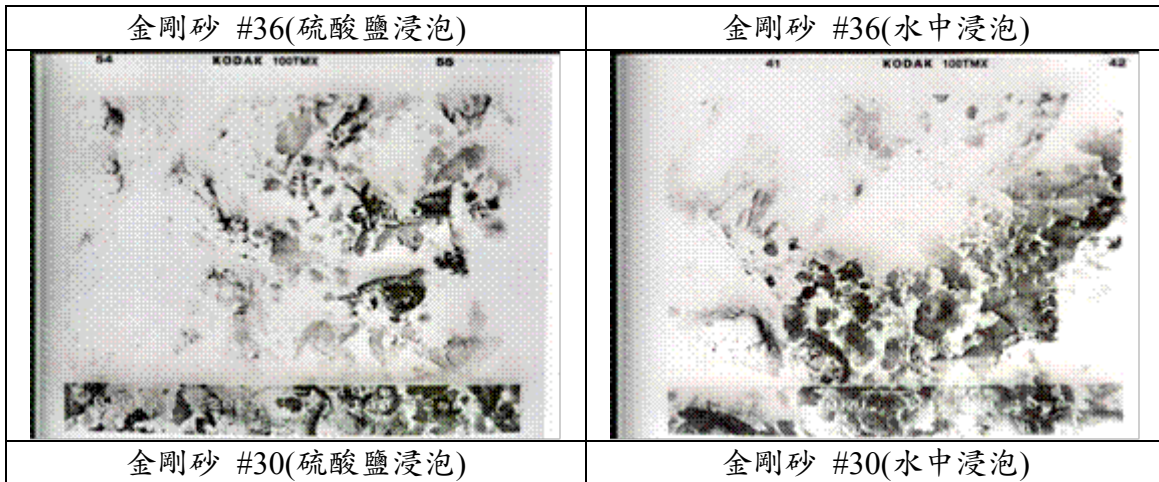
(2) 微觀分析試驗

本計畫亦以電子顯微鏡觀測(SEM)進行微觀分析，以進一步了解本重質RPC其分子架構在受各溶液侵蝕後，破壞機制產生之原因。

從下列SEM觀察了解(表14)，在硫酸鹽浸後之重質RPC，其微結構之孔隙狀況與一般置於水中養護之重質RPC相同，是為結構連續性良好，孔隙率低之材料，故其於硫酸鹽浸置後之試體，仍保有極佳之力學特性，亦即說明此重質RPC具有良好之耐久性。

表14、各重質RPC配比在不同溶液中浸泡後之SEM微觀狀況(10 μm)

<p>氧化鋯砂(硫酸鹽浸泡)</p>	<p>氧化鋯砂(水中浸泡)</p>
<p>氧化鋁砂(硫酸鹽浸泡)</p>	<p>氧化鋁砂(水中浸泡)</p>
<p>金剛砂 #60(硫酸鹽浸泡)</p>	<p>金剛砂 #60(水中浸泡)</p>



五、結論

本計畫藉由超高性能RPC配合不同密度之骨材，包括鑄鐵砂、氧化鋁、氧化鋯等金屬骨材之使用，在使粗骨材不分離的前提下，成功調整配比以灌製各種骨材之重質RPC試體，並為確認此重質RPC在金屬骨材之使用下，其於基本力學性質、熱劣化表現與耐久性能方面，是否仍保有RPC之高性能，逐規劃相關試驗予以驗證。

在力學性質部分，不同金屬骨材之RPC重質混凝土，其在抗壓強度、抗剪強度、劈裂強度等力學性質上的表現，因受骨材顆粒形狀的影響，而有些微增減，但差異不大，整體抗壓強度約介於140~180MPa、劈裂強度約介於14~18MPa、抗剪強度約介於212~260kN，其性能與一般RPC相似。

在耐久性能部分，透過硫酸之浸蝕後，各金屬骨材之RPC重質混凝土在不同力學性質上的劣化現象不顯著，3個月試驗齡期下力學性質至多折減10%之性能，故其屬於耐久能力佳之材料。

在超音波非破壞檢測部分，以氧化鋁RPC重質混凝土具較高之動彈性模數78.051Gpa，鐵鑄砂與氧化鋯RPC重質混凝土之動彈性模數則略

低，約介於60.020~66.042 Gpa；此外本研究亦透過惡劣溫度之模擬(100°C)，建立各種金屬骨材RPC重質混凝土彈性模數之變化，以作為未來應用時，結構設計之考量。

除上述量化之分析外，本研究亦透過電子顯微鏡觀測(SEM)進行微觀分析，了解RPC重質混凝土在硫酸鹽之浸蝕下，其結晶物與空洞之差異。從SEM觀察了解，在硫酸鹽浸後之重質RPC，其微結構之孔隙狀況與一般置於水中養護之重質RPC相同，是為結構連續性良好，孔隙率低之材料，故其於硫酸鹽浸置後之試體，仍保有極佳之力學特性，亦即說明此重質RPC具有良好之耐久性。

最後，藉由本研究RPC重質混凝土之配比研究與耐久性測試得知，透過RPC漿體與金屬骨材之結合，已可產製出具抗環境化學侵蝕與抗溫差變化之高耐久性材料，而此成果將可提供核燃料乾式貯存護箱建造材料上之一種選擇。

六、參考文獻

1. 苗柏霖, "新型高性能超高強建築材料-活性粉混凝土," 營建知訊第162期, 台灣營建研究院, July 1996。
2. Richard P. & Cheyrezy M., "Composition of Reactive Powder Concrete," *Cement Concrete Research*, Vol.25 No.7, pp.1501-1511, 1995.
3. Richard P. & Cheyrezy M., "Reactive Powder Concrete with High Ductility and 200-800 MPa Compressive Strength," *ACI SP144-24* pp.507-518, 1994.
4. Richard P., "Reactive Powder Concrete: A New Ultra-High-Strength Cementitious Material," 4th Int. Symposium on Utilization of HPC, Paris pp.1343-1357, 1996.
5. Adeline R. & Behloul M., "Ductile Pretensioned Beams without Passive Reinforcement," 4th Int. Symposium on Utilization of HPC, Paris pp.1383-1390, 1996.
6. Dowd W. & O'Neil E., "Development of Reactive Powder Concrete (RPC) precast products for the USA market," 4th Int. Symposium on Utilization of HPC, Paris. pp.1391-1398, 1996.
7. J. Dugat, N. Roux, G. Bemier, "Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete," *Materials and Structures*, Vol.29, pp.233-240, 1996.
8. Cheyrezy M., Maret V. & Frouin L., "Microstructural Analysis of RPC (Reactive Powder Concrete)," *Cement and Concrete Research*, Vol.25, No 7, pp.1491-1500, 1995.

9. Roux N., Andrade C.& Sanjuan M., "Experiment Study of Durability of Reactive Powder Concretes", *Journal of Materials in Civil Engineering*, pp.1-6, 1996.
10. V. Matte, C. Richet, and M. Moranville, "Characterization of Reactive Powder Concrete as a Candidate for the Storage of Nuclear Wastes", *International Symposium on High-Performance and Reactive Powder Concrete*, Sherbrooke, Canada, pp.75-88, August 16-20, 1998.
11. J.M. Torrenti, V. Maret, and C. Richet, "High integrity Containers for Interim Storage of Nuclear Wastes Using Reactive Powder Concrete", *4th International Symposium on Utilization of High-Performance Concrete*, pp.1407-1413, Paris, May 29-31, 1996.
12. 李騰芳、姚錫齡、徐力平、廖淑萍, "以活性粉混凝土 (RPC) 製造低階核廢料貯藏桶包封容器之研究", 榮民工程公司, 2000。
13. "低放射性廢料混凝土容器之研製", 電力綜合研究所, 1995。
14. 賴正義等, "低放射性廢料混凝土包封容器之設計、製作及試驗", 台電公司八十六年度研究發展專題, Jun. 1997。
15. "放射性物質安全運送規則", 行政院原子能委員會印行, 1990。
16. 李明君, 林佳柏, "超高強高性能混凝土配比及性質研究 (期中報告)", 台灣營建研究院, Apr. 1997。
17. 李明君, 林佳柏, "超高強高性能混凝土配比及性質研究 (期末報告)", 台灣營建研究院, Jun. 1997。
18. 李騰芳, 鄭瑞濱, "超高強高性能混凝土應用於預鑄產品 (地下水管或基樁) 之研究 (期中報告)", 台灣營建研究院, Mar. 1998.
19. 李騰芳, 鄭瑞濱, "超高強高性能混凝土應用於預鑄產品 (地下水管或基樁) 之研究 (期末報告)", 台灣營建研究院, Jun. 1998.
20. 李騰芳, 鄭瑞濱, "超高強高流動性高性能混凝土之配比剖析與工程性質", 高性能混凝土配比設計實作, 台灣營建研究院, pp.205-230, July 1998.
21. Basheer P.A.M., Long A.E., and Montgomery F.R., "The Autoclam for measuring the surface absorption and permeability of concrete on site." *Proceedings, CANMET/ACI international conference on advances in concrete technology*, Athens, Greece, 11-13 May 1992, pp.107-132.
22. A.M.Neville, *Properties of Concrete*, 3rd Edition, Longman Scientific & Technical, 1981.
23. 洪賢豪, "以有限元素法分析含裂縫之鋼筋混凝土結構", ANSYS USER CONFERENCE, pp.213-228, 1998。
24. ANSYS USER'S Manual REV. 5.3.
25. Bangash M.Y.H., "Concrete and Concrete Structure: Numerical Modeling and Application", Elsevier Applied Science, 1989