

# 應用影像分析量測輕質多孔混凝土孔隙率之探討

張朝順<sup>1</sup> 潘煌鏗<sup>2</sup> 王一新<sup>1</sup>

1台灣國立高雄第一科技大學營建工程系

2台灣國立高雄應用科技大學

## 摘要

孔隙率的大小可作為評估多孔混凝土重要指標。然而，如何有效量測多孔混凝土的孔隙，至今尚未有一套完善的技術方法與規範。再者，以往對於混凝土孔隙率的量測僅限於實驗室完成，並且受到儀器的限制，所能量測的試體尺度皆相當微小代表性不足，也是多孔混凝土孔隙率不易檢測管控的主因之一。為能有效及簡化多孔混凝土孔隙率的量測，本研究除利用影像分析法進行孔隙率的量測外，同時配合多孔混凝土實際的孔隙率進行分析，以評估影像分析法應用於現場量測孔隙率的可行性。

**關鍵詞：**孔隙率、影像分析

## 一、前言

現代營建工程中，混凝土一直是最常被使用且用量最多的材料，其優異的力學性質與材料取得容易，為人類發展帶來了莫大助益。然而隨著都市發展與進步，大量緻密而不透水的混凝土材料被使用於停車場、公園步道、廣場、球場...等面層的鋪築，因其不透水性及低孔隙率等特性，致使鋪築混凝土的地方寸草不生，夏季時混凝土的表面溫度更高達40°C以上，對都市或密集開發區域之熱島效應與生態環境帶來莫大的影響和衝擊。因此，研發新型鋪面混凝土以克服緻密不透水所導致之熱島效應與生態衝擊，已成為不可輕忽之課題。

多孔混凝土的功能和孔隙的多寡與分布狀態有著密不可分的關係。孔隙率大小為多孔混凝土的一項重要指標，但是如何有效量測多孔混凝土的孔隙，至今尚未有一套完善的技術方法與規範。況且，以往對於孔隙率的量測僅能於實驗室完成，且受到儀器限制，所能量測的試體尺度皆不大，也是多孔混凝土孔隙率不易檢測管控的主因之一。

為便於量測多孔混凝土之孔隙率，本研究採用影像量測方式作為多孔混凝土孔隙率之量測，並將該結果和多孔混凝土實際的孔隙率作一比較，以期能制訂出適用於多孔混凝土孔隙率的影像量測分析方法。就本研究中之多孔混凝土而言，試體以及孔隙尺度皆較大，現有的孔隙率量測儀皆無法完全適用。有鑒於此，本研究以自行研發之注汞試驗儀進行多孔混凝土孔隙率的量測，以符合本研究試體尺度以及高孔隙率量測的要求。

## 二、適用多孔混凝土量測方法的要求與特性

目前常用的一般混凝土孔隙率量測儀[1]具有以下特性：(1)試驗過程中儀器須加壓方能計算孔隙體積；(2)可量測試體尺寸小；(3)試驗程序繁瑣；根據上述可知：現有的量測儀器並不能適用於多孔混凝土，況且試驗的場所也被侷限於實驗室，亦有其不便之處。為期研發適用於多孔混凝土孔隙率量測分析的方法，以克服現有量測儀器的缺失，本研究研擬新的量測分析方法，其須符合下列要求：(1)試驗儀器須能在一般條件下進行試驗，即無須加壓或保持真空狀態；(2)須能量測大尺寸之試體；(3)試驗儀器構造不宜過於複雜，可適用於施工現場。有鑒於此，本研究自行研發注汞試驗儀以及影像量測法，作為本研究之試驗儀器與試驗方法。

## 三、理論推導

### 3.1 注汞法

注汞法係利用水銀高比重，內聚力強的特性，藉由其可注入孔隙中的體積，進而量化孔隙的體積。其理論推導過程如下，如圖 3-1 所示：

$$V_v = \Delta H \cdot A = \Delta H \cdot \frac{\pi d^2}{4} \quad V_0 = H_0 \cdot \frac{\pi d^2}{4} \quad V_1 = H_1 \cdot \frac{\pi d^2}{4}$$

$$V = h \cdot \frac{\pi d^2}{4}$$

$$V_s = V_1 - V_0 = (H_1 - H_0) \cdot A$$

$$V_v = V - V_s = (h - H_1 + H_0) \cdot A$$

$$\therefore n = \frac{V_v}{V} = \frac{h - H_1 + H_0}{h} = \frac{h - \Delta H}{h} = 1 - \frac{\Delta H}{h}$$

式中  $V_v$ ：孔隙體積， $V_0$ ：未放置試體的總體積， $V_1$ ：放置試體的總體積

$V_s$ ：多孔混凝土試體體積， $V$ ：試體所佔體積， $n$ ：孔隙率， $\Delta H$ ：水銀高度差

$A$ ：試體面積， $h$ ：試體高

根據理論推導結果得知，試驗時僅需量測水銀高度差以及試體高度，即可簡易的求出該多孔混凝土試體的孔隙率。

### 3.2 影像量測

影像量測所依據的試驗對象為二維影像[2]，而孔隙率為三維體積比。因此，其分析須藉由孔隙二維影像量測參數，計算平均孔隙面積，並基於試體中孔隙率均勻分布於之假設，可由二維平均孔隙面積，推估三維孔隙體積比，其推導步驟如下，如圖 3-2 所示：

$$\text{令總體積} \quad V = \pi r^2 \cdot h \quad (1)$$

假設  $V_v$  為孔隙體積 可知： $V_v < V$

$$\text{令} \quad n = \frac{V_v}{V} \quad \therefore V_v = n \cdot V \quad (2)$$

假設薄切片(原為  $dx$ )平行  $yz$  平面，則其體積為  $dv = \pi r^2 \cdot dx$ ，在此一切片上，其孔隙所佔的體積為  $\eta(x)$ ，即隨切片所在位置而改變，則切片上孔隙所佔體積為：

$$dv_v = \eta(x) \cdot dV = \pi r^2 \cdot \eta(x) \cdot dx \quad (3)$$

$$\text{計算平均比率} \quad \bar{\eta} = \frac{1}{h} \cdot \int_0^h \eta(x) \cdot dx \quad (4)$$

$$\begin{aligned} v_v &= \int dv_v = \int_0^h \pi r^2 \cdot \eta(x) \cdot dx = \pi r^2 \int_0^h \eta(x) \cdot dx = \pi r^2 \cdot h \cdot \frac{1}{h} \int_0^h \eta(x) \cdot dx \\ &= \pi r^2 \cdot h \cdot \bar{\eta} = \bar{\eta} \cdot V \end{aligned} \quad (5)$$

由(1)與(5)可得知： $n = \bar{\eta}$ ，亦即三維孔隙率等於二維平均孔隙率 $\bar{\eta}$ 。

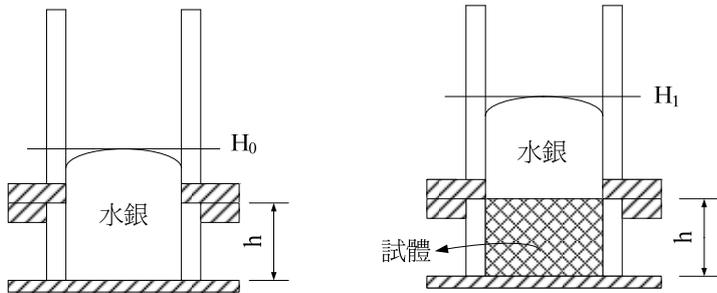


圖 3-1 注汞法量測示意圖

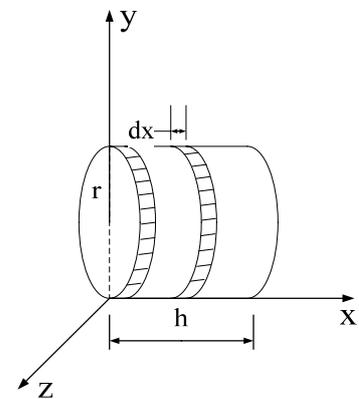


圖 3-2 二維孔隙率與三維孔隙率關係示意圖

#### 四、實驗計畫與方法

為探討組成材料、配比對於多孔混凝土孔隙率及透水性等特性的影響，依實驗計畫法規劃並進行一系列的試驗，藉由統計方法來研析多孔混凝土組成材料與配比对工程特性的影響，以作為探討多孔混凝土透水性及孔隙率的依據。

實驗計畫法(Design of Experiments)[3]係根據實驗對象特點，構思理想合適的試驗方案，合理安排試驗程序與試驗次數，以獲得最佳試驗結果的方法。其主要內涵有：一為實驗規畫，即對於實驗目的應如何進行試驗最具效果。二為實驗觀測值分析，經由實驗所得的資料應以何種方法進行分析，並研判結論。對於多因子交互作用的試驗，常用直交表(Orthogonal array)來進行實驗規畫。根據試驗因子及各因子參數水準，選擇適當直交表來安排試驗方案，採用數理統計方法處理數據，可以迅速地分析在諸多因子中對試驗特性指標有顯著影響控制因子，確定最佳特性指標的因子組合。

本研究依據多孔混凝土之水膠比、漿固比、爐石粉取代比與骨材最大粒徑等材料組成因子，研擬試驗因子與參數水準如表 4-1 所示。為進一步探討材料組成因子間之交互作用，採用三水準 13 行之 L27

直交表來配置試驗組合，並應用本研究所研發之注汞法及影像分析法進行孔隙率之量測及結果分析。  
試驗配比如表 4-2 所示。

表4-1 試驗因子與參數水準

項目		參數水準		
試驗因子	編號	1	2	3
	水膠比	0.35	0.4	0.45
	漿固比	0.4	0.5	0.6
	爐石粉取代比	30%	40%	50%
	最大骨材粒徑	1/4"	3/8"	1/4"+3/8"

表4-2 試驗配比表

編號	試體代號	水膠比	漿固比	爐石粉取代比	最大骨材粒徑
1	A431	0.35	0.4	30%	1/4"
2	A442			40%	3/8"
3	A453			50%	1/4"+3/8"
4	A532		0.5	30%	3/8"
5	A543			40%	1/4"+3/8"
6	A551			50%	1/4"
7	A633		0.6	30%	1/4"+3/8"
8	A641			40%	1/4"
9	A652			50%	3/8"
10	B431	0.4	0.4	30%	1/4"
11	B442			40%	3/8"
12	B453			50%	1/4"+3/8"
13	B532		0.5	30%	3/8"
14	B543			40%	1/4"+3/8"
15	B551			50%	1/4"
16	B633		0.6	30%	1/4"+3/8"
17	B641			40%	1/4"
18	B652			50%	3/8"
19	C431	0.45	0.4	30%	1/4"
20	C442			40%	3/8"
21	C453			50%	1/4"+3/8"
22	C532		0.5	30%	3/8"
23	C543			40%	1/4"+3/8"
24	C551			50%	1/4"
25	C633		0.6	30%	1/4"+3/8"
26	C641			40%	1/4"
27	C652			50%	3/8"

#### 4.1 材料組成與性質

本研究所使用的試驗材料包含有：水庫淤泥輕質骨材、水泥、爐石粉、拌和水等，其基本性質列述如下[4]：

- (1)水庫淤泥輕質骨材：利用石門水庫之水庫淤泥所燒結而成的輕質骨材，最大骨材粒徑為 1/4"、3/8"，比重 3/8"為 1.11、1/4"為 1.08。

(2)水泥：採用台灣水泥公司所生產之卜特蘭第 I 型水泥，其物理性質符合 CNS 61「卜特蘭水泥」Type I 之規定，比重為 3.13。

(3)爐石粉：使用符合 ASTM C898 台灣中聯公司所產製之爐石粉，比重為 2.86。

(4)拌和水：採用高雄地區之自來水。

#### 4.2 拌製程序

根據實驗規劃，本研究計有 27 組配比共 81 個試體，試驗配比如表 4-2 所示，拌製程序如下：

- (1) 將水泥及波索蘭材料置入拌和容器內，充分乾拌直至混合均勻。
- (2) 加入拌和水後允許三十秒吸水。
- (3) 拌和 3 分鐘使之呈水泥漿體。
- (4) 添加輕質骨材並以勾型攪拌器拌和至輕質骨材表面完全包裹水泥漿體為止。
- (5) 將拌合完成之輕質骨材混凝土置於搖篩機中鋪平後篩振 20 秒。
- (6) 取出輕質混凝土澆置於試體模內後，以 5kg 之重物加載夯壓成型。
- (7) 經 24 小時後拆模並將試體置入養護水槽養護。

#### 4.3 試驗方法與儀器

本研究的試驗觀測項目為多孔混凝土之孔隙率，依量測方法區分為注汞法試驗以及影像量測兩類，影像量測可分為固定閾值和自動閾值兩種。茲就試驗觀測項目列述如下：

##### (1) 注汞法

本研究利用自行研發之注汞試驗儀進行孔隙率的量測，用以確定多孔混凝土實際的孔隙率大小。注汞試驗儀如圖 4-1 及照片 4-1 示。

量測時先確定儀器密封無誤，以手動抽氣幫浦抽真空至負壓 60Kpa，再注入水銀 450c.c，靜置 180 秒後讀取滴定管讀數，利用式(4-1)計算出孔隙率。

$$n = 1 - \frac{\Delta H}{h} \times 100(\%) \quad (4-1)$$

$n$ ：孔隙率(%),  $\Delta H$ ：水銀高度差(mm),  $h$ ：試體高度(mm)

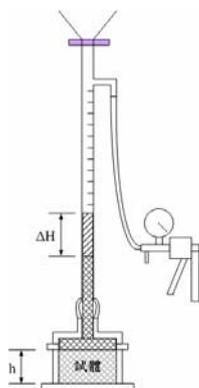
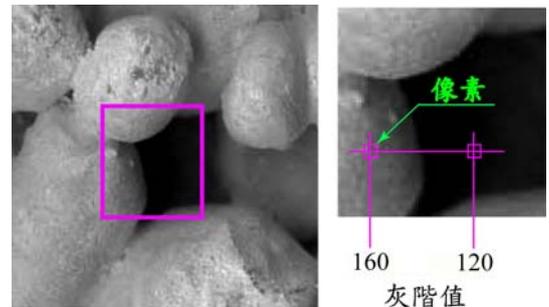


圖 4-1 注汞試驗示意圖



照片 4-1 注汞試驗儀

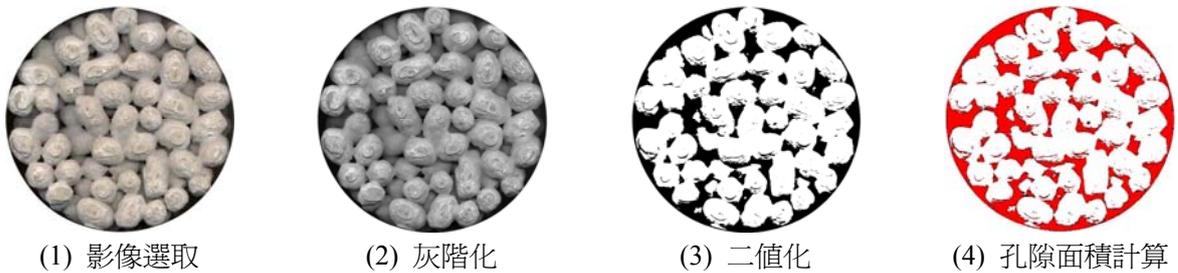


照片 4-2 孔隙與非孔隙交界區之像素灰階值

## (2) 影像量測—固定閾值

固定閾值量測方式，為選取多孔混凝土的影像後，按照影像邊緣特徵的不同選取數個閾值(如照片 4-2 所示)，將每個閾值設為最佳閾值，經由影像處理程序進行孔隙率的計算，再比較各閾值計算結果，找出最適合的閾值作為最佳閾值。

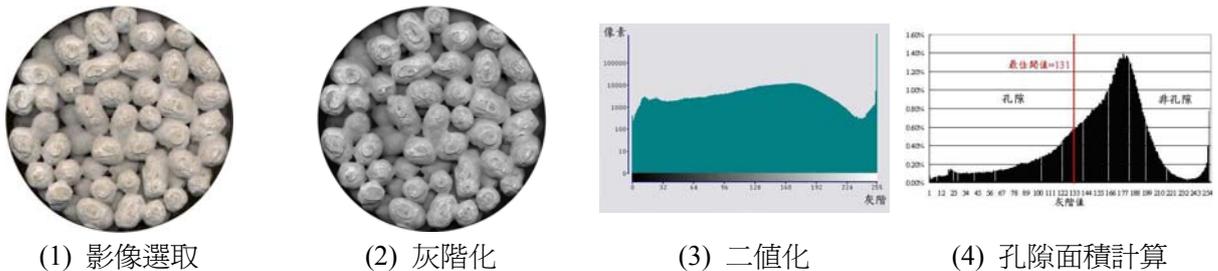
固定閾值孔隙率測量為利用多個不同的閾值計算結果，加以比較後得出一最佳閾值。選定待測影像後，先以 Photoshop 影像處理軟體將影像進行灰階化，依所選定的閾值對影像作二值化處理，分離出目標物(非孔隙)和背景(孔隙)。再以 SigmaScan 影像量測軟體量測孔隙所占面積，並計算出孔隙率。分析程序如照片 4-3 所示。



照片 4-3 固定閾值孔隙率計算

## (3) 影像量測—自動閾值

自動閾值分析程式是以最大平方差法為理論依據，利用 Excel 試算表撰寫而成。待測影像選定後，先利用影像處理軟體 Photoshop 將影像進行灰階化處理，再應用影像量測軟體 SigmaScan 擷取該影像的灰階直方圖並計算各灰階所佔的百分比，將所得結果輸入自動閾值分析程式後，即可經由程式分析計算並獲得該影像的最佳閾值與孔隙率。分析程序如照片 4-4 所示。



照片 4-4 自動閾值孔隙率計算

## 五、結果分析與討論

根據試驗規劃所進行之注汞法及影像分析孔隙率之量測，其試驗結果彙整如表 5-1 所示。為確定各材料因子對於試驗結果的影響程度，分別對試驗結果進行全距分析以及變異數分析[5]。

### 5-1 影像分析—固定閾值

以注汞法量測孔隙率為基準，分別對不同固定閾值所測之孔隙進行離差均方根(RMS)、平均值差異、t 檢定與變異數 F 檢定，來決定影像分析之最佳固定閾值。離差均方根、t 檢定與 F 檢定分析結果

彙整如表 5-2 所示。

表 5-1 孔隙率量測數據結果

項次	材料因子				孔隙率		
	水膠比	漿固比	取代比	D <sub>max</sub>	注汞法	影像分析	
						固定閾值	自動閾值
1	0.35	0.4	30%	1/4"	30.84	32.98	36.00
2			40%	3/8"	30.42	30.59	34.94
3			50%	1/4"+3/8"	28.36	28.32	33.31
4		0.5	30%	3/8"	29.04	34.71	37.14
5			40%	1/4"+3/8"	26.20	24.42	34.82
6			50%	1/4"	25.89	23.57	36.77
7		0.6	30%	1/4"+3/8"	26.53	28.14	35.21
8			40%	1/4"	25.15	26.26	33.19
9			50%	3/8"	28.27	30.96	34.92
10	0.4	0.4	30%	1/4"	25.08	24.45	30.85
11			40%	3/8"	28.45	26.18	31.60
12			50%	1/4"+3/8"	28.90	23.76	29.77
13		0.5	30%	3/8"	29.32	25.55	30.59
14			40%	1/4"+3/8"	24.16	24.41	28.51
15			50%	1/4"	25.58	23.10	30.42
16		0.6	30%	1/4"+3/8"	26.98	27.51	30.38
17			40%	1/4"	24.04	21.16	26.90
18			50%	3/8"	26.10	28.43	31.90
19	0.45	0.4	30%	1/4"	28.25	25.71	30.89
20			40%	3/8"	27.52	28.38	30.46
21			50%	1/4"+3/8"	27.25	28.01	31.91
22		0.5	30%	3/8"	27.81	36.06	37.29
23			40%	1/4"+3/8"	25.99	25.89	31.90
24			50%	1/4"	30.00	25.07	31.31
25		0.6	30%	1/4"+3/8"	28.83	25.50	29.60
26			40%	1/4"	25.31	21.19	28.12
27			50%	3/8"	27.71	33.75	36.09

表 5-2、各固定閾值離差均方根(RMS)、t 檢定與 F 檢定分析結果

閾值	平均值						
	120	130	135	140	145	150	160
RMS	7.594	4.099	3.286	4.515	7.178	10.566	18.839
t 檢定	13.933	4.910	0.193	-4.245	-8.407	-12.812	-22.356
P(T<=t)	7.2E-14	2.1E-05	0.424	1.23E-04	3.4E-09	4.8E-13	8.4E-19
t 臨界值	1.706	1.706	1.706	1.706	1.706	1.706	1.706
F 檢定	103.396	13.804	2.24E-02	11.306	45.254	107.548	343.347
P-值	5.8E-14	5.E-04	8.82E-01	1.46E-03	1.3E-08	2.9E-14	1.5E-24
F 臨界值	4.027	4.027	4.027	4.027	4.027	4.027	4.027

比較離差均方根發現：閾值為 135 時，其 RMS 等於 3.286，為所有閾值最小者。換言之，以固定閾值 135 進行影像二值化所測得之孔隙率相對於比較基準而言，總體相對誤差最小。由 t 檢定和 F 檢定皆小於臨界值，亦可判斷該閾值的試驗結果對於注汞法的試驗結果並無顯著的差異。

### 5-1.1 全距分析及變異數分析

固定閾值孔隙率試驗結果的全距分析及變異數分析如表 5-3 及表 5-4 所示。

表 5-1、固定閾值孔隙率計算結果之全距分析

影像量測固定閾值(1%) 孔隙率	主因子		水膠比	漿固比	爐石粉取代比	骨材粒徑
			A	B	C	D
	平均值	水準 1	28.396	27.716	28.574	25.209
		水準 2	25.140	27.272	25.399	30.068
		水準 3	28.008	26.557	27.571	26.267
	組全距		3.255	1.159	3.176	4.858
	全距比		13.87%	4.93%	13.53%	20.70%
	因子排序		DACB			
	水準影響		D <sub>2</sub> A <sub>1</sub> C <sub>1</sub> B <sub>1</sub>			

表 5-4、固定閾值孔隙率計算結果之變異數分析

因子		S	Φ	V	F 統計量	F 分配臨界值			顯著差異
						99%	95%	90%	
A	水膠比	56.92	2	28.46	12.21	10.925	5.143	3.463	非常顯著
AB	水膠比×漿固比	33.19	4	8.30	3.56	9.148	4.534	3.181	有影響
AC	水膠比×取代比	20.92	4	5.230	2.24	9.148	4.534	3.181	不顯著
AD	水膠比×骨材粒徑	23.57	4	5.89	2.53	9.148	4.534	3.181	不顯著
B	漿固比	6.15	2	3.08	1.32	10.925	5.143	3.463	不顯著
C	爐石粉取代比	47.43	2	23.71	10.17	10.925	5.143	3.463	顯著
D	骨材粒徑	117.5	2	58.75	25.21	10.925	5.143	3.463	非常顯著
e	誤差項	13.99	6	2.33	1.00	8.466	4.284	3.055	不顯著

註：S 為平方和，Φ 為自由度，V 為變異數。

依全距分析結果顯示：影響影像分析孔隙率的主要效果材料因子按組全距與全距比依序為骨材粒徑、水膠比、爐石粉取代比與漿固比。

變異數分析結果可知：骨材粒徑與水膠比二項 F 值統計量大於信賴水準之 F 臨界值為 10.925，達到統計意義之非常顯著。而爐石粉取代比項之 F 統計量大於信賴水準 95%之 F 臨界值，因此對影像分析之試驗結果有顯著程度的影響。至於漿固比對影像分析量測孔隙率的影響則不顯著。

## 5-2 影像分析—自動閾值

自動閾值孔隙率試驗結果如表 5-1 所示。全距分析及變異數分析如表 5-5 及表 5-6 所示。

表 5-5、自動閾值計算孔隙率計算結果之全距分析

影像量測(自動閾值) 孔隙率	主因子		水膠比	漿固比	爐石粉取代比	骨材粒徑
			A	B	C	D
	平均值	水準 1	35.144	32.192	33.104	31.605
		水準 2	30.101	33.194	31.160	33.880
		水準 3	31.952	31.812	32.933	31.712
組全距		5.043	1.383	1.944	2.275	

全距比(%)	26.29	7.21	10.14	11.86
因子排序	ADCB			
水準影響	A <sub>1</sub> D <sub>2</sub> C <sub>1</sub> B <sub>2</sub>			

表 5-6、自動閥值計算孔隙率數據之變異數分析

因子	S	$\Phi$	V	F 統計量	F 分配臨界值			顯著差異
A 水膠比	117.16	2	58.58	26.81	6.515	3.739	2.726	非常顯著
AB 水膠比×漿固比	9.09	4	2.27	1.04	5.035	3.112	2.395	不顯著
AC 水膠比×取代比	4.35	4	1.09	0.50	5.035	3.112	2.395	不顯著
AD 水膠比×骨材粒徑	13.35	4	3.34	1.53	5.035	3.112	2.395	不顯著
B 漿固比	9.18	2	4.59	2.10	6.515	3.739	2.726	不顯著
C 爐石粉取代比	20.87	2	10.43	4.77	6.515	3.739	2.726	顯著
D 骨材粒徑	29.68	2	14.84	6.79	6.515	3.739	2.726	非常顯著
e 誤差項	17.16	6	2.86	1.31	4.456	2.848	2.243	不顯著

註：S 為平方和， $\Phi$  為自由度，V 為變異數。

全距分析中，水膠比項為最主要效果影響因子。其餘材料因子則依序為骨材粒徑、爐石粉取代比與漿固比。由變異數分析數據得知：材料因子中，以水膠比、骨材粒徑最為顯著。其次為爐石粉取代比，亦即對孔隙率的影響已達顯著程度。漿固比對於試驗結果無顯著的影響。

彙整全距、變異數分析結果可發現：各主效果因子的參數水準呈現相當的一致性。換言之，不同閥值決定方式對材料因子參數水準與孔隙率變動影響，並無明顯的差異性。影響影像分析測法量測孔隙率之主要材料因子與參數水準如表 5-7。

表 5-7、影像分析法之材料因子與參數水準

主效果因子	影像分析			
	固定閥值(135)		自動閥值	
1	骨材粒徑	3/8"	水膠比	0.35
2	水膠比	0.35	骨材粒徑	3/8"
3	爐石粉取代比	30%	爐石粉取代比	30%

固定閥值最顯著因子為骨材粒徑，而自動閥值則為水膠比。造成此一差異的原因，應係閥值決定方式參考特徵不同所導致。固定閥值係以孔隙與非孔隙外觀型態邊界來決定閥值，而自動閥值則由像素灰階值自動計算而定。因此，以外觀型態邊界取閥值時，受骨材粒徑影響較為顯著。反之，若以灰階值取閥值時，成像表面之光反射、散射特性則受水膠比的影響較顯著。此推論亦可說明漿固比對影像分析法量測孔隙率，不具顯著性影響的物理意義。總而言之，顯著影響影像分析法量測結果的是二維影像成像試體表面的質性因子—水膠比、骨材粒徑，而非相對量化的漿固比。

### 5-3 應用方式評估

多孔混凝土之孔隙率實際物理意義為三維體積比，而以影像分析所量測之孔隙率係為二維面積比，依理論推導與實驗數據證明其間存在著偏差推估之誤差。此誤差理論上由對試體截取厚度甚薄之

二維平面影像，經量測面積比後積分計算其平均面積比，則可近似推估三維體積孔隙率。然而，實務應用上截取薄試片量測多組數據，有其困難處且可行性甚低。因此，須藉由二維面積比與三維體積比之正相關性，建構其函數關係作為影像分析量測孔隙率之修正參考依據。

以本研究製備之多孔混凝土試體為例：修正前後影像量測與注汞法的離差均方根分析、平均值 t 檢定與變異數 F 檢定結果如表 5-8 所示。

表 5-8、修正前後影像量測與注汞法各統計分析結果

分析項目		固定閾值(135)			自動閾值		
		上表面	下表面	平均值	上表面	下表面	平均值
t 檢定	修正前	4.798	-6.87	0.069	10.440	-0.760	9.360
P(T<=t)		2.86E-05	1.35E-07	0.473	4.30E-11	0.230	4.08E-10
t 臨界值		1.705	1.705	1.706	1.710	1.710	1.710
t 檢定	修正後	3.493	6.228	5.325	2.614	-0.679	0.583
P(T<=t)		8.64E-04	6.86E-07	7.14E-06	0.007	0.252	0.283
t 臨界值		1.706	1.706	1.706	1.706	1.706	1.706
F 檢定	修正前	16.551	37.351	0.003	100.293	0.354	58.363
P-值		1.61E-04	1.28E-07	0.956	9.88E-14	0.555	4.74E-10
F 臨界值		4.027	4.027	4.027	4.027	4.027	4.027
F 檢定	修正後	3.955	11.341	9.402	1.615	0.079	1.141
P-值		0.052	0.001	0.003	0.209	0.780	0.290
F 臨界值		4.027	4.027	4.027	4.027	4.027	4.027
RMS	修正前	7.421	6.221	3.744	11.970	2.850	5.790
	修正後	2.549	2.630	3.038	1.796	1.383	1.052
相關係數	修正前	0.512	0.265	0.483	0.126	0.438	0.368
	修正後	0.785	0.741	0.771	0.826	0.899	0.907

由表 5-8 可知：利用固定閾值影像分析法計算孔隙率時，宜取上、下表面之平均值，並對其平均值利用最小平方差法進行函數關係之修正，以有效降低其二維推估誤差。若是應用自動閾值影像分析法量測孔隙率，則宜對上、下表面二維計算之孔隙率，利用最小平方差法進行函數關係之修正。即可以上、下表面計算之孔隙率推估之，惟考量精度之提高，仍可取其平均值以代表三維孔隙率。

根據試驗結果，本研究提出迴歸方程式，整理如表 5-9 所示，便於實務工程上的應用。

表 5-9、孔隙率與影像分析之迴歸分析結果

分析項目		注汞孔隙率(%)		
		模式	迴歸方程式	R
影像分析	固定閾值(135) 孔隙率(%)	$y=ax+c$	$y = 0.446x + 16.101$	0.771
		$y=ax^2+bx+c$	$y = -0.0315x^2 + 2.03x - 3.59$	0.795
		$y=ax_1+bx_2+c$	$y = 0.456x_1 - 6.6x_2 - 15.99$	0.785
	自動閾值 孔隙率(%)	$y=ax+c$	$y = 0.701x + 8.24$	0.907
		$y=ax^2+bx+c$	$y = 0.01x^2 + 0.03x + 17.23$	0.907
		$y=ax_1+bx_2+c$	$y = 0.713x_1 - 4.2x_2 + 6.23$	0.911

註：x：孔隙率， $x_1$ ：孔隙率， $x_2$ ：水膠比。

## 六、結論與建議

影像量測為近年來快速發展的量測方法之一，它具有能夠在短時間內進行大面積量測的特性，可用以改善原有的孔隙率試驗耗時以及試體尺寸受限的缺點，而依照影像量測分析的結果，可作為施工現場簡易的品質管制方式之一。

綜合前述的試驗結果與分析討論，可歸納列述如下：

1. 影像分析法採固定閾值時以灰階值 135 最為適宜。自動閾值較能精確推估注汞法所量測之孔隙率。
2. 影響固定閾值影像分析法量測多孔混凝土孔隙率的影響程度高低依序為：骨材粒徑、水膠比、爐石粉取代比。漿固比對量測結果的影響則不具顯著性。
3. 對自動閾值影像分析法量測孔隙率而言，材料因子的影響程度依序為：水膠比、骨材粒徑、爐石粉取代比。漿固比則對孔隙率之量測結果未具顯著性之影響。
4. 利用固定閾值影像分析法計算孔隙率時，建議取上、下表面之孔隙率平均值，並利用最小平方差法進行修正。若考量精度上的要求，建議採自動閾值法，並取上、下表面分別修正後再取平均值，以提高推估孔隙率之精度。
5. 受限於試體或現場施工條件，僅能量測上或下表面時，宜採自動閾值法，並分別對其上或下表面的進行最小平方差法修正，以修正值推估孔隙率。

### 參考文獻

1. 蔡壽楨，「含飛灰混凝土之孔隙與強度關係」，碩士論文，國立中興大學土木工程研究所，台中(2005)
2. 馮信榮，「二維影像於三維輪廓重建之研究」，碩士論文，國立台灣大學機械工程研究所，台北(2001)
3. 王海山、王續琨等編，「科學方法百科」，恩楷出版社，第 115 頁(1998)
4. 李名浩，「旋窯燒製水庫淤泥輕質骨材之研究」，碩士論文，國立中興大學土木工程研究所，台中(2003)
5. 王文中，「Excel 於資料分析與統計學上的應用」，博碩文化，台北(1999)

### 第一作者簡介：

張朝順：男，1961 年 7 月生，臺灣國立高雄第一科技大學，副教授，高雄縣燕巢鄉大學路一號，郵政編碼 824，電話 07-6011000 轉 2102，電子信箱：cschang@ccms.nkfust.edu.tw