

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

混凝土耐久性指標之研究 (I) — 子計畫二：

蒸氣養護混凝土中水泥漿和顆粒骨材界面特性與耐久性之研究

The Research of Interface Characteristics and Durability from  
Paste and Aggregate within Concrete for steam curing

計畫編號：NSC 90-2211-E-009-052

執行期限：90 年 8 月 1 日至 91 年 11 月 30 日

主持人：彭耀南 國立交通大學土木工程學系

## 一、中英文摘要

本研究主要是觀測蒸氣養護混凝土在飽和石灰水養護後的過渡區，由 SEM 觀測發現，蒸氣催化之 0.45 水膠比試體於飽和石灰水養護下，水化作用仍會繼續進行，C-S-H 之生成量隨養護齡期之增加而增加，不管是 180°C 或 150°C，所生成之 C-S-H 均存在有孔隙，150°C 之 C-S-H 分佈較 180°C 緻密。在 28 天及 56 天齡期下 150°C 之 C-S-H 呈現條形分佈且 C-S-H 中之孔隙較 180°C 者少了許多。在 7 天齡期均發現有已產生卜作嵐反映之飛灰球，另外由加速腐蝕試驗之抗壓強度發展得知腐蝕後之抗壓強度均大於腐蝕前，以 150°C 在 56 天齡期最為明顯。

**關鍵詞：**高性能混凝土、加速養護、過渡區、水化產物、水化程度

**Abstract :**

This research is to investigate the Interfacial Transition Zone (ITZ) of high performance concrete for Wet Mixed Steam Injection (WMSI) with High Temperature and High Pressure after saturation lime water cured. From SEM, the specimen of W/B=0.45 which cured steam. Under saturation lime water, the hydration reaction of cement could progressed continually, so that the production volume of C-S-H was increased with curing age increased, and that, produce's C-S-H was existed a lot of pores at steam temperature of 150°C or 180°C, and C-S-H distribution of 150°C was denser than 180°C. At 28 days and 56 days, the C-S-H products of 150°C appeared strip distribution and its air pores of C-S-H was less than 180°C observably. At the curing age of 7 days, we

find the fly ash particle will have pozzolans reaction already. From compressive strength development of accelerate corrosion test, compressive strength of after accelerate corrosion test was greater than beyond accelerate corrosion test, this phenomenon at the curing age of 56 days with steam temperature of 150°C was most observably.

**Keywords:** High performance concrete, Accelerated curing, Interfacial Transition Zone, Hydration products, Degree of Hydration

## 二、緒論

混凝土的強度與骨材及漿體界面處過渡區之水化生成物與孔隙情況有莫大關係，一般來說強度好的混凝土，其耐久性亦佳，但是高溫高壓蒸氣催化混凝土，在飽和石灰水養護下是否仍具有上述之性質。因而本研究主要是探討高溫高壓蒸氣養護混凝土中水泥漿和顆粒骨材界面特性與耐久性之關係，同時做加速腐蝕試驗（採用硫酸鈉）測試，並與所作之耐久性結果互相比較，以作為混凝土耐久性評估指標之主要依據。

## 三、試驗規劃

本研究採用卜特蘭 I 型水泥、飛灰，參考 ACI 318-95 及其先導性之研究成果選定  $f'_c = 5000 \text{ psi}$ （簡稱為 TAICON 中強度）其水泥用量低於  $300 \text{ kg/m}^3$ ，初期坍度為  $22 \pm 2 \text{ cm}$ ，坍流度為  $55 \pm 5 \text{ cm}$ ，45 分鐘後坍度應大於 20cm，坍流度在 40cm 以上，56 天之電阻應大於  $30 \text{ k}\Omega\text{-cm}$  之原則，並選用 W/B=0.35、0.45、0.54 及 0.65 經過

150°C 與 180°C 之溫度及 15kg/cm<sup>2</sup> 爐壓的蒸氣催化後之試體來探討在飽和石灰水養護 1 天、7 天、14 天、28 天、56 天後之介面性質，採用加速腐蝕前後之試體觀測其水泥漿和顆粒骨材間的介面特性，並就材料內部之微觀變化對巨觀現象及耐久性的影響作一可靠的分析，俟試體達到規劃齡期後進行抗壓試驗並取樣，而後進行 TGA 燒失量量測，判定其水化程度及氫氧化鈣結晶含量；SEM 觀測晶相外觀形狀，用以分析出不同齡期下界面處過渡區之微觀結構。

#### 四、結果與討論

圖 1 為 0.45 水膠比經過 180°C 蒸氣催化後在飽和石灰水養護下加速腐蝕前後之 SEM 圖，由圖 1 之加速腐蝕前 SEM 圖可知 1 天齡期已有 C-S-H 生成，但所生成之 C-S-H 存在有許多的孔隙，但由加速腐蝕後 SEM 圖發現加速腐蝕後所生成之 C-S-H 較加速腐蝕後來得多，此現象表示加速腐蝕係在水中進行，雖然蒸氣催化可加速水泥的水化，但是並非用完所有的水泥，故未水化之水泥顆粒在加速腐蝕試驗過程中仍會繼續水化而生成 C-S-H，進而造成加速腐蝕後之 C-S-H 生成量大於加速腐蝕前。在 180°C 之催化組，於 7 天及 14 天齡期均可明顯發現飛灰顆粒覆蓋有卜作嵐反應所生成之 C-S-H，由此現象可推論在蒸氣催化下飛灰之卜作嵐反應在 7 天齡期就已產生，較常溫濕拌之 14 天提前，另由加速腐蝕後 SEM 圖發現，於 7 天及 14 天齡期，因未水化之水泥顆粒在加速腐蝕試驗過程中仍會繼續水化而使得生成之 C-S-H 逐漸形成條形分佈，在 28 天及 56 天齡期時，加速腐蝕前之 SEM 圖才發現其 C-S-H 逐漸形成條形分佈，同時由 28 天齡期加速腐蝕後之 SEM 圖可發現單硫鋁酸鈣水化物 (AFM)，與常溫濕拌飽和石灰水養護比較結果，常溫濕拌在 7 天齡期就由 CH 與 C<sub>3</sub>A 進一步作用生成 AFM 水化產物，而蒸氣催化試體則在石灰水養護 28 天後在加速腐蝕後才產生，且分佈於距骨材界面 0~30 μm 範圍內。

圖 2 為 0.45 水膠比經過 150°C 蒸氣催化後在飽和石灰水養護下加速腐蝕前後之

SEM 圖，由圖可知 150°C 之水化過程與 180°C 之水化過程類似，不過因為 150°C 之催化溫度低於 180°C，因此由於高溫催化所造成之內部微裂縫較少，不管是腐蝕前或腐蝕後均出現隨齡期之增加，150°C 之 C-S-H 生成量高於 180°C 者，並於 28 天及 56 天齡期時，腐蝕前之 C-S-H 已形成條形分佈，腐蝕後之 C-S-H 發展，均呈現腐蝕後較腐蝕前更為緻密的現象。

圖 3 為 180°C 及 150°C 蒸氣催化下腐蝕前後抗壓強度之變化，由圖 3(a)發現，180°C 之蒸氣催化試體於拆模後馬上置於飽和石灰水養護，會冒出許多的氣泡，表示試體內存在有因高溫催化所造成之裂縫，故在 1 天養護齡期下其抗壓強度僅 20kg/cm<sup>2</sup>，但是在飽和石灰水養護過程中，未反應之水泥顆粒會繼續水化並形成 C-S-H，使得 7 天齡期之抗壓強度增加，7 天以後抗壓強度之變化就改變不大了，約保持在 100~150kg/cm<sup>2</sup>，另外與圖 1 之 SEM 圖比較結果，雖然生成之 C-S-H 水化產物隨飽和石灰水養護齡期之增長而增加，至 28-56 天齡期時，C-S-H 水化產物呈現出更緻密的條形分佈，由於生長之 C-S-H 水化產物存在有大量的氣孔，因此對提高抗壓強度之貢獻不大，即使在加速腐蝕後，如圖 3(b)所示，雖然經過飽和石灰水養護及加速腐蝕之長時間在水中的水化並形成 C-S-H，也有對提高抗壓強度之貢獻不大的結果。由此試驗結果可推論蒸氣養護之預鑄構材，在空氣中其抗壓強度之衰減現象，水蒸氣之作用是造成抗壓強度衰減之一個重要因素。圖 3(a)及圖 3(b)為 150°C 之催化溫度，由於低於 180°C，其產生之裂縫少於 180°C 者，使得 1 天齡期之抗壓強度並沒有明顯的下降，任何飽和石灰水養護齡期下其抗壓強度變化不大，大約維持在 80~140 kg/cm<sup>2</sup>，唯有在 56 天齡期加速腐蝕後之抗壓強度有明顯的增加至 180~260 kg/cm<sup>2</sup>，且加速腐蝕後之抗壓強度在各種水膠比下均大於加速腐蝕前之抗壓強度，如圖 3(c)及圖 3(d)所示，此現象亦可說明在水中養護情況下並無蒸氣催化 1 天之抗壓強度可達到常溫養護 28 天抗壓強度之現象，且 150°C 之催化溫度優於 180°C 之催化溫度。

圖 4 為 180°C 及 150°C 蒸氣催化下腐蝕

前後超音波速之變化，由圖 4(a)及圖 4(b) W/B=0.35 加速腐蝕前後之超音波速變化可知，該組之飛灰用量最多為 300kg/m<sup>3</sup>，雖然在高溫蒸氣催化下 7 天就可產生卜作嵐反應，但是因為卜作嵐反應填充孔隙之速度小於水中養護時產生裂縫的速度，使得在 7~14 天之超音波速呈現下降的現象，直到 14 天以後才呈現遞增的現象，而加速腐蝕後 7~14 天之超音波速卻呈現遞增的現象(見圖 4(b))，其原因是在加速腐蝕試驗過程中仍繼續卜作嵐反應並填充孔隙，其他水膠比加速腐蝕前後之超音波速變化相似。在 150°C 之催化溫度時，因催化溫度低於 180°C，在 1~7 天飽和石灰水養護過程中，未水化之水泥顆粒繼續水化生成 C-S-H 填充孔隙之速度高於水中養護時產生裂縫的速度，使得在 1~7 天之超音波速呈現快速上升的現象，7 天以後改變成遞減的現象，如圖 4(c)所示，而加速腐蝕後之超音波速則呈現水平的現象，其原因是加速腐蝕試驗過程中因硫酸鈉之腐蝕作用使得在加速腐蝕前 1~7 天之超音波速呈現快速上升的現象消失，見圖 4(d)所示。

圖 5 為 180°C 及 150°C 蒸氣催化下腐蝕前後電阻值之變化，由圖 5(a)及圖 5(c)加速腐蝕前之電阻值可知 56 天之電阻值均小於 1 天之電阻值，即表示飽和石灰水養護齡期愈長其耐久性愈差，雖然在飽和石灰水養護過程中會繼續進行水泥水化及卜作嵐反應，即使在 28~56 天所生成之 C-S-H 更緻密且呈條形分佈，但因所生成之 C-S-H 中存在有許多氣孔，故對提高電阻值無任何助益，另外 150°C 之催化溫度，其電阻值高於 180°C 之催化溫度，尤其在 1 天齡期時，除 W/B=0.65 外，其餘之電阻值均滿足耐久性指標 30kΩ-cm 之要求。但是在 56 天齡期時均不滿足耐久性指標 30kΩ-cm 之要求。加速腐蝕後之電阻值更低，如圖 5(b)及圖 5(d)所示，幾乎無耐久性可言，由此試驗結果可說明採用蒸氣催化之構件不宜實施濕養生。

## 五、結論

1. 在 180°C 之催化組，於 7 天及 14 天齡期均可明顯發現飛灰顆粒覆蓋有卜作嵐反應所生成之 C-S-H。
2. 在 28 天及 56 天齡期時，加速腐蝕前之 SEM 圖才發現其 C-S-H 逐漸形成條

形分佈。

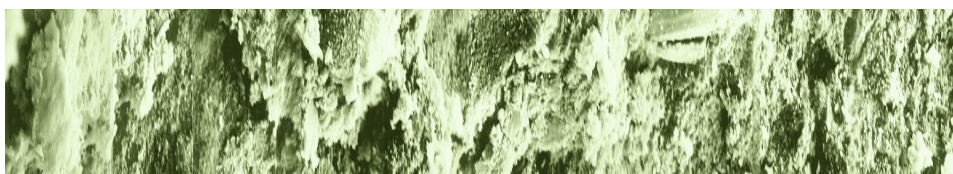
3. 由 28 天齡期加速腐蝕後之 SEM 圖可發現單硫鋁酸鈣水化物(AFM)。
4. 150°C 之 C-S-H 生成量高於 180°C 者，並於 28 天及 56 天齡期時，腐蝕前之 C-S-H 已形成條形分佈，腐蝕後之 C-S-H 發展，均呈現腐蝕後較腐蝕前更為緻密的現象。

## 六、計劃結果自評

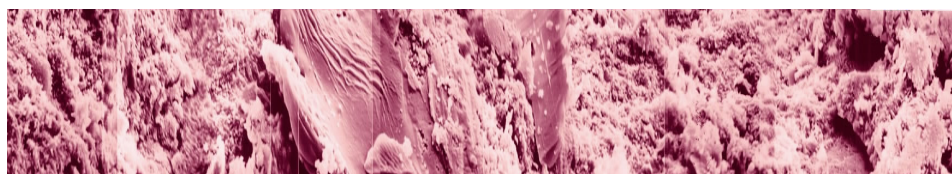
抗滲性是決定耐久性的主要因素，而過渡區則是控制抗滲性的重要指標。由研究顯示，在水中養護情況下並無蒸氣催化 1 天之抗壓強度可達到常溫養護 28 天抗壓強度之現象，且 150°C 之催化溫度優於 180°C 之催化溫度。

## 七、參考文獻

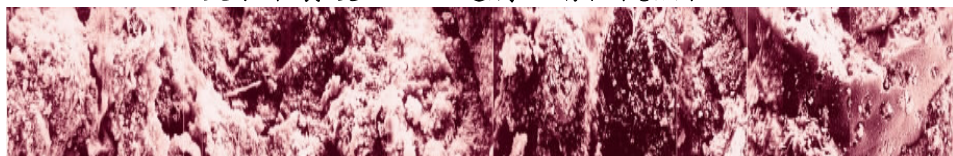
- [1]. 彭耀南，「加速養護對 TAICON 物化性質影響之研究 (I)」，國科會專題研究報告，NSC-87-0410-E-009-037，1998 年 7 月。
- [2]. 黃兆龍，「混凝土性質與行為」，詹氏書局，台北，民國 86 年。
- [3]. Phillro, Robert, "Some Physical Properties of Concrete at High Temperatures", ACI Materials Journal, Proceedings Vol. 54, No. 10, Apr. pp857-864 (1958).
- [4]. Mindess, S. and J. F. Young, "Concrete", Prentice-Hall, Englewood Cliff, N. J., pp. 521-535 (1981).
- [5]. 洪國祥，「本土化中強度高性能混凝土 (TAICON) 高溫蒸汽養護效能研究」國立交通大學，碩士論文，民國 88 年 6 月。
- [6]. Mukaddam, M. A., and Bresler, B., "Behavior of Concrete Under Variable Temperature and Loading, Concrete for Nuclear Reactors", ACI Materials Journal, American Concrete Institute, Detroit, pp771-797 (1972).



石灰水中養護 1 天加速腐蝕前微觀晶相



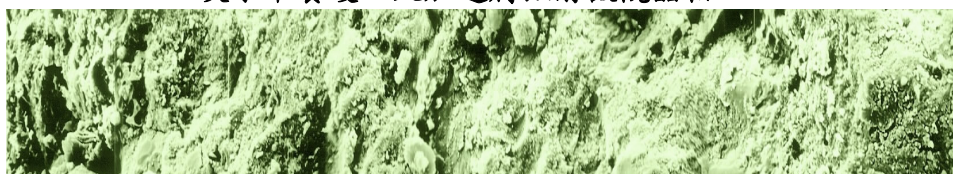
石灰水中養護 1 天加速腐蝕後微觀晶相



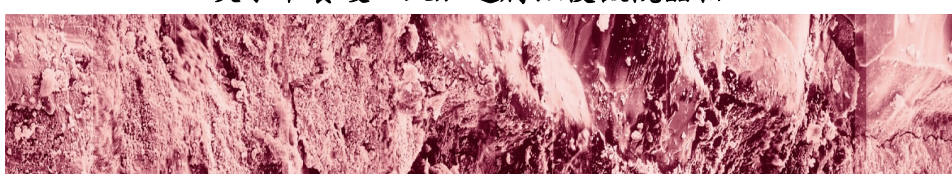
石灰水中養護 7 天加速腐蝕前微觀晶相



石灰水中養護 7 天加速腐蝕後微觀晶相



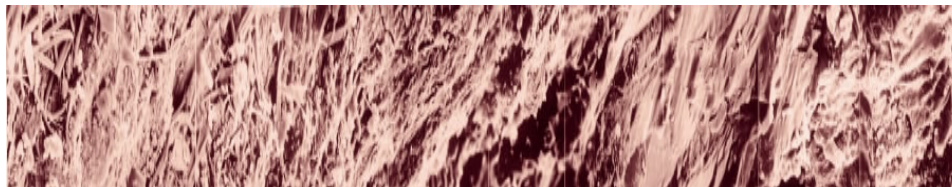
石灰水中養護 14 天加速腐蝕前微觀晶相



石灰水中養護 14 天加速腐蝕後微觀晶相



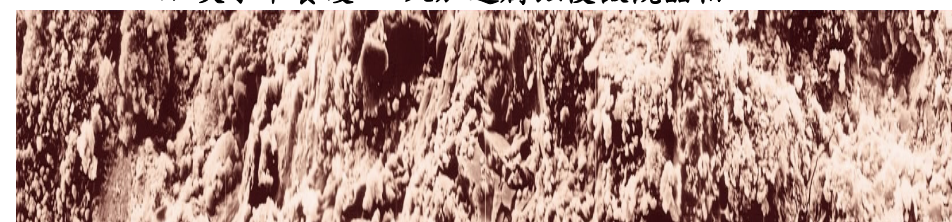
石灰水中養護 28 天加速腐蝕前微觀晶相



石灰水中養護 28 天加速腐蝕後微觀晶相

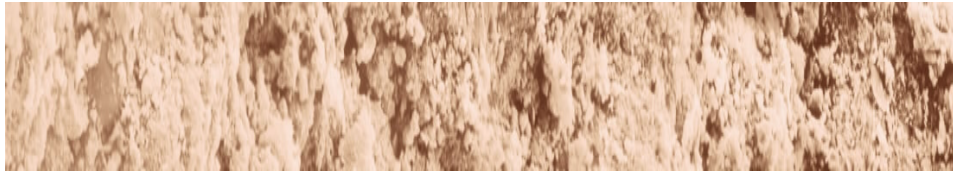


石灰水中養護 56 天加速腐蝕前微觀晶相



石灰水中養護 56 天加速腐蝕後微觀晶相

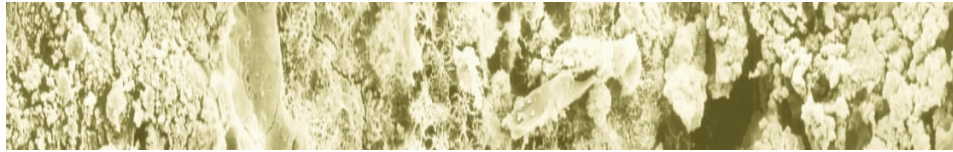
圖 1 0.45 水膠比在 180°C 蒸氣催化及飽和石灰水養護下加速腐蝕前後之微觀晶相圖



石灰水中養護 1 天加速腐蝕前微觀晶相



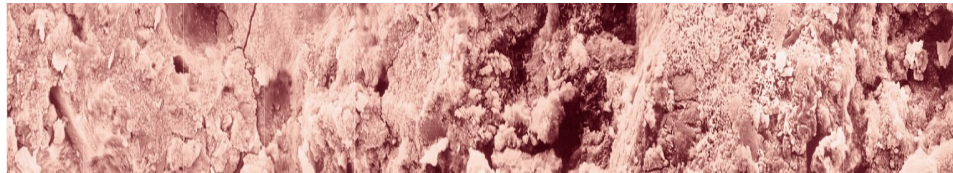
石灰水中養護 1 天加速腐蝕後微觀晶相



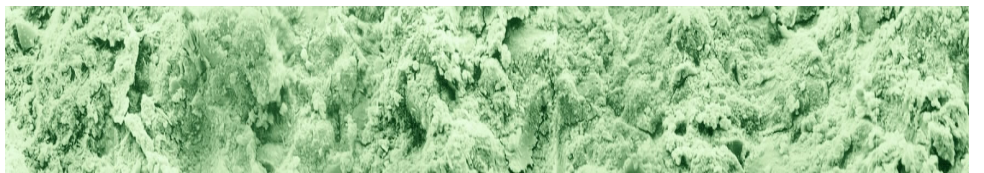
石灰水中養護 7 天加速腐蝕前微觀晶相



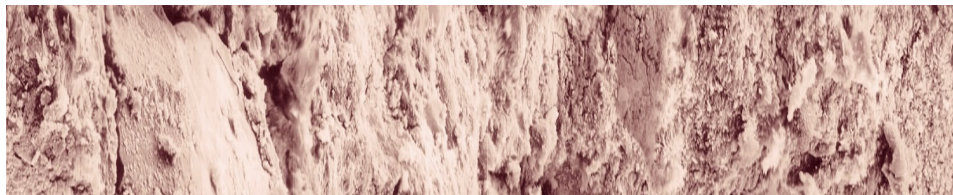
石灰水中養護 7 天加速腐蝕後微觀晶相



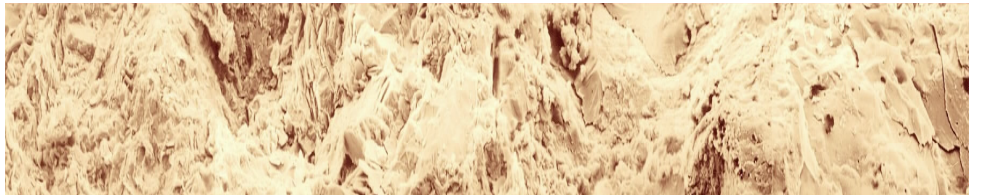
石灰水中養護 14 天加速腐蝕前微觀晶相



石灰水中養護 14 天加速腐蝕後微觀晶相



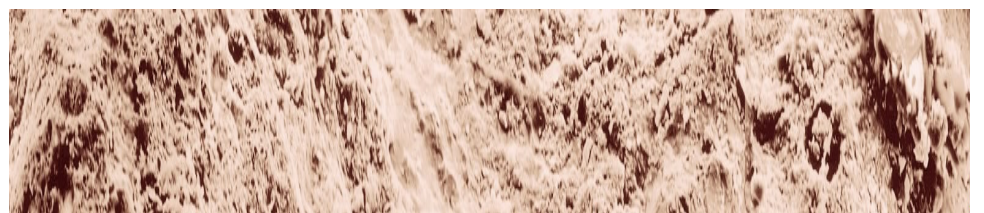
石灰水中養護 28 天加速腐蝕前微觀晶相



石灰水中養護 28 天加速腐蝕後微觀晶相



石灰水中養護 56 天加速腐蝕前微觀晶相



石灰水中養護 56 天加速腐蝕後微觀晶相

圖 2 0.45 水膠比在 150°C 蒸氣催化及飽和石灰水養護下加速腐蝕前後之微觀晶相圖

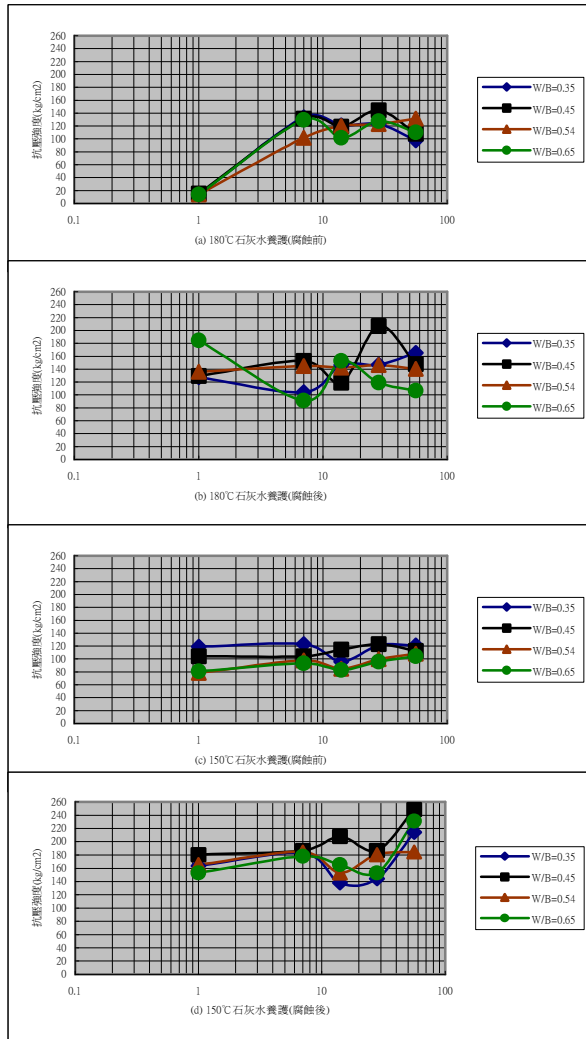


圖 3 180°C及150°C蒸氣催化下腐蝕前後抗壓強度之變化

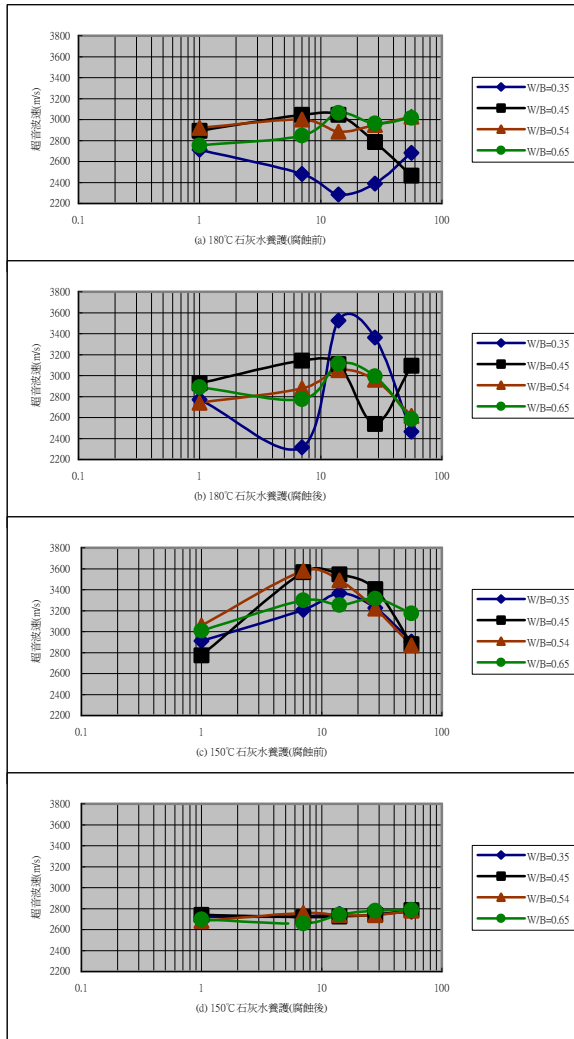


圖 4 180°C及150°C蒸氣催化下腐蝕前後超音波速之變化

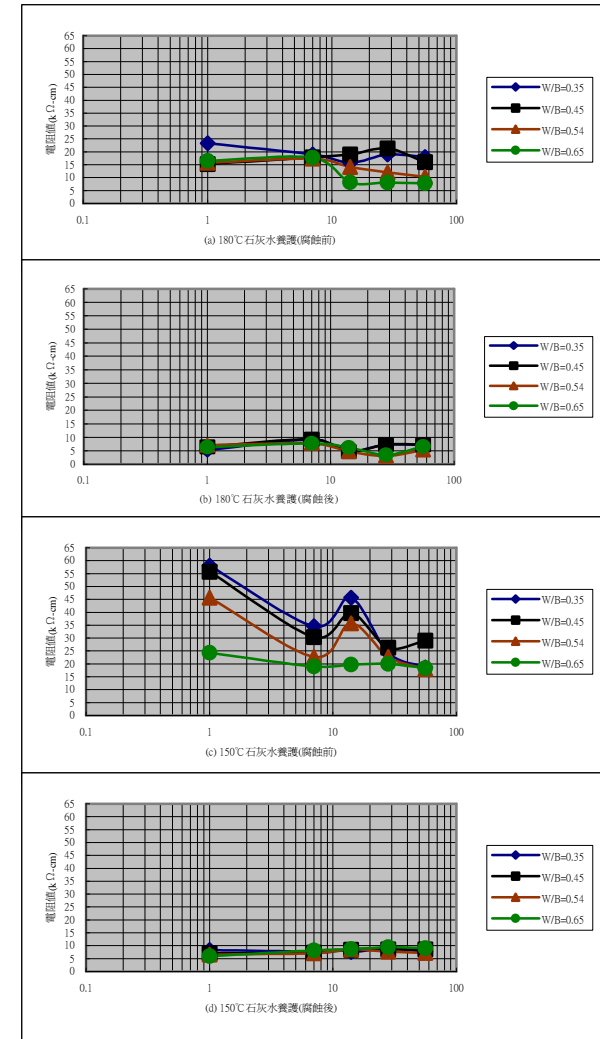


圖 5 180°C及150°C蒸氣催化下腐蝕前後電阻值之變化