

國立交通大學

土木工程學系碩士班

碩士論文

自充填混凝土體積穩定性之監測與研究

Monitoring and Research of Volume Stability
for Self-Compacting Concrete

研究生：李冠昱

指導教授：趙文成 博士

中華民國 九十七年 七月

自充填混凝土體積穩定性之監測與研究

研究生：李冠昱

Student : Guan-Yu Lee

指導教授：趙文成

Advisor : Wen-Chen Jau

國立交通大學
土木工程研究所
碩士論文

A Thesis

Submitted to Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Civil Engineering

July 2008

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十七年七月

自充填混凝土體積穩定性之監測與研究

研究生：李冠昱

指導老師：趙文成 博士

國立交通大學土木工程學系碩士班

摘要

乾縮與潛變隨著當地材料的不同、環境因素以及試體尺寸的大小而有所影響。如：結構體受環境潮溼或乾燥時而收縮，結構體承受載重力量大小，溫度變化等而造成內部基材變形。長期下來，結構體會呈現大變形而嚴重影響其使用壽命。

本實驗環境控制在 50% R. H.、23°C 之乾燥室，主要探討鋼筋用量、鋼筋號數、設計強度和養護時間對乾縮、基本潛變與乾燥潛變之影響性，並與傳統混凝土相比較。試驗發現，自充填混凝土有較強之比克作用，其乾燥潛變與乾燥狀況下之應力變形均較傳統混凝土高，此現象根據卜特蘭水泥與卜作嵐材料的水化作用之微觀機構、強度形成、緻密性及不同水化機理進行解釋。最後，期望從實驗數據所歸納出的乾縮與潛變相關函數式，能予以工程界正確地對結構體長期變形做預測。

關鍵字：自充填混凝土、乾縮、基本潛變、乾燥潛變、比克作用

Monitoring and Research of Volume Stability for Self-Compacting Concrete

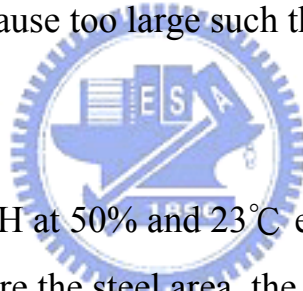
Student : Guan-Yu Lee

Advisor : Dr. Wen-Chen Jau

Department of Civil Engineering
National Chiao Tung University

ABSTRACT

The shrinkage and creep of concrete are affected by many factors, such as relative humidity, stress, temperature, constituent proportions. The deformation may be too large such that the performance may be reduced.



This study limits to RH at 50% and 23°C environments. The parameters to be studied are the steel area, the diameters of steel, compressive strength, and the curing condition. The shrinkage, basic creep and shrinkage creep were studied for both self-compacting concrete(SCC) and ordinary concrete(OC). It is found that SCC shows a higher Pickett effect and the shrinkage and creep are higher than those of OC. It can be explained based on the mechanics of hydration. Finally, a regression equation were obtained for the prediction of shrinkage and creep.

Key words: self-compacting concrete, shrinkage, basic creep, drying creep, Pickett effect.

誌謝

本論文得以順利完成，實倚賴眾人之幫忙與協助，非一己之力所能如期完成，故致上無比感激之心。

首先，必須感謝恩師 趙文成博士，於筆者研究所期間循循善誘並適時地提點謬誤，使筆者受益匪淺，特致由衷地感謝與敬意。論文口試期間承蒙海洋大學教授 黃然博士、交通大學教授 洪士林博士、交通大學教授 林昌佑博士、國工局副局長 方文志博士及國工局管理組組長 廖肇昌博士惠賜卓見，修正本文不足和錯誤之處，令本文更加充實完善，在此亦由衷感謝。

在研究所兩年期間，感謝系上諸多師長之教誨及指導，學長姐景鼎、思慧、坦祥、俊佑、坤德、益鴻、睿欽以及同窗耿豪、政偉、銘亨、欣穎、怡廷、盈瑄、躍騰與學弟沛倫、侶翔、峻閣、孟哲等協助實驗之進行與學業上的幫助，使本論文得以順利進行。

最後，感謝父母二十多年來辛勤地付出和疼愛，使筆者在求學過程中無後顧之憂，僅以本論文獻給我的家人、恩師、以及關心、幫助我一同走過的朋友，願他們與我共享這份榮耀與喜悅。

目錄

摘要.....	I
英文摘要.....	II
誌謝.....	III
目錄.....	IV
表目錄.....	VI
圖目錄.....	IX
第一章 緒論.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 研究動機.....	1
1.3 研究目的.....	2
第二章 自充填混凝土之概述.....	4
2.1 SCC之特性.....	4
2.1.1 SCC之工作性.....	4
2.2 SCC之配比概念.....	5
2.2.1 各體系SCC達到自充填性能之概念.....	5
2.2.2 SCC之用水量概念.....	6
2.2.3 SCC之粉體使用概念.....	6
2.2.4 SCC之粗粒料使用概念.....	7
2.2.5 SCC之細粒料使用概念.....	9
2.3 SCC工作性試驗.....	10
2.3.1 SCC之坍流度試驗.....	10
2.3.2 SCC之V型漏斗流出試驗.....	11
2.3.3 SCC之障礙通過性試驗.....	12
2.4 SCC之硬固後特性.....	13
2.4.1 彈性模數.....	14
2.4.2 強度發展.....	14
第三章 文獻回顧.....	19
3.1 體積穩定性.....	19
3.1.1 名詞解釋【16】.....	19
3.1.2 乾縮原理.....	21
3.1.3 潛變原理.....	22
3.1.4 比克效應原理.....	23
3.1.5 混凝土乾縮潛變預測模式.....	24
3.2 混凝土之握裹力.....	38
3.3 參考國內外文獻.....	39
3.3.1 乾縮試驗.....	39

3.3.2 潛變試驗.....	40
第四章 試驗計劃與內容.....	51
4.1 試驗計畫與流程.....	51
4.1.1 試驗計畫概述.....	51
4.1.2 試驗流程.....	51
4.2 試驗變數.....	52
4.3 試驗試體規劃.....	52
4.4 試驗設備及材料.....	52
4.4.1 試驗設備.....	52
4.4.2 試驗材料.....	53
4.5 試驗項目及方法.....	55
4.5.1 工作性試驗.....	55
4.5.2 抗壓強度試驗.....	55
4.5.3 純混凝土乾縮試驗.....	55
4.5.4 含鋼筋混凝土乾縮試驗.....	56
4.5.5 純混凝土潛變試驗.....	56
4.5.6 含鋼筋混凝土潛變試驗.....	57
4.5.7 握裹力試驗.....	57
第五章 試驗結果與討論.....	79
5.1 強度對乾縮潛變之影響.....	79
5.2 混凝土材料對乾縮潛變之影響.....	79
5.3 鋼筋用量對乾縮潛變之影響.....	80
5.4 鋼筋號數對乾縮潛變之影響.....	81
5.5 養護時間對乾縮之影響.....	82
5.6 比克效應.....	82
5.7 握裹應力.....	84
5.8 方柱試體之乾縮.....	84
5.9 迴歸分析.....	85
第六章 結論與建議.....	153
6.1 結論.....	153
6.2 建議.....	155
參考文獻.....	157

表目錄

表 2-1 SCC相關試驗參考值【1】	15
表 3-1 式(3-9)和式(3-13)的潛變和乾縮的係數【20】	42
表 3-2 構件平均厚度的潛變和乾縮的係數【20】	42
表 3-3 式(3-25)的常數A與常數B的值【20】	43
表 3-4 溼養護齡期係數 k'_5 【20】	43
表 4-1 自充填混凝土高強度試驗配比	58
表 4-2 傳統混凝土高強度試驗配比	58
表 4-3 自充填混凝土低強度試驗配比	59
表 4-4 傳統混凝土低強度試驗配比	59
表 4-5 圓柱試體之乾縮、潛變變數及目的	60
表 4-6 粗粒料粒徑分佈試驗結果	61
表 4-7 粗粒料吸水率、比重試驗結果	61
表 4-8 粗砂吸水率、比重試驗結果	62
表 4-9 粗砂粒徑分佈試驗結果	62
表 4-10 細砂吸水率、比重試驗結果	63
表 4-11 細砂粒徑分佈試驗結果	63
表 4-12 方柱試體之乾縮變數	64
表 5-1 試驗配比之抗壓強度	87
表 5-2 純混凝土之高強度與低強度的乾縮量(10^{-6})	87
表 5-3 埋置#4($\rho=0.015$)混凝土之高強度與低強度的乾縮量(10^{-6})	88
表 5-4 埋置#4($\rho=0.03$)混凝土之高強度與低強度的乾縮量(10^{-6})	88
表 5-5 埋置#7($\rho=0.015$)混凝土之高強度與低強度的乾縮量(10^{-6})	88
表 5-6 埋置#7($\rho=0.03$)混凝土之高強度與低強度的乾縮量(10^{-6})	89
表 5-7 純混凝土之高強度的乾燥潛變量(10^{-6})	89
表 5-8 純混凝土之低強度的乾燥潛變量(10^{-6})	90
表 5-9 純混凝土之高強度與低強度的乾燥潛變量(10^{-6})	90
表 5-10 埋置#4($\rho=0.015$)混凝土之高強度與低強度的乾燥潛變量(10^{-6})	91
表 5-11 埋置#4($\rho=0.03$)混凝土之高強度與低強度的乾燥潛變量(10^{-6})	91
表 5-12 埋置#7($\rho=0.015$)混凝土之高強度與低強度的乾燥潛變量(10^{-6})	92
表 5-13 埋置#7($\rho=0.03$)混凝土之高強度與低強度的乾燥潛變量(10^{-6})	92
表 5-14 純混凝土之高強度與低強度的比潛變($10^{-6}/\text{MPa}$)	93
表 5-15 埋置#4($\rho=0.015$)混凝土之高強度與低強度比潛變($10^{-6}/\text{MPa}$)	93
表 5-16 埋置#4($\rho=0.03$)混凝土之高強度與低強度比潛變($10^{-6}/\text{MPa}$)	94
表 5-17 埋置#7($\rho=0.015$)混凝土之高強度與低強度比潛變($10^{-6}/\text{MPa}$)	94
表 5-18 埋置#7($\rho=0.03$)混凝土之高強度與低強度比潛變($10^{-6}/\text{MPa}$)	95

表 5-19	埋置#2($\rho=0.0018$)混凝土之高、低強度的乾縮量(10^{-6})	95
表 5-20	埋置#3($\rho=0.0036$)混凝土之高、低強度的乾縮量(10^{-6})	96
表 5-21	埋置#4($\rho=0.0072$)混凝土之高、低強度的乾縮量(10^{-6})	96
表 5-22	埋置#4($\rho=0.015$)混凝土之高、低強度的乾縮量(10^{-6})	97
表 5-23	埋置#4($\rho=0.015$)混凝土之高、低強度的乾縮量(10^{-6})	97
表 5-24	埋置#4($\rho=0.015$)混凝土之高、低強度的乾縮量(10^{-6})	98
表 5-25	埋置#4($\rho=0.015$)混凝土之高、低強度的乾縮量(10^{-6})	98
表 5-26	埋置#4($\rho=0.03$)混凝土之高、低強度的乾縮量(10^{-6})	99
表 5-27	埋置#4($\rho=0.03$)混凝土之高、低強度的乾縮量(10^{-6})	99
表 5-28	埋置#4($\rho=0.03$)混凝土之高、低強度的乾縮量(10^{-6})	100
表 5-29	埋置#4($\rho=0.03$)混凝土之高、低強度的乾縮量(10^{-6})	100
表 5-30	埋置#7($\rho=0.015$)混凝土之高、低強度的乾縮量(10^{-6})	101
表 5-31	埋置#7($\rho=0.015$)混凝土之高、低強度的乾縮量(10^{-6})	101
表 5-32	埋置#7($\rho=0.015$)混凝土之高、低強度的乾縮量(10^{-6})	102
表 5-33	埋置#7($\rho=0.015$)混凝土之高、低強度的乾縮量(10^{-6})	102
表 5-34	埋置#7($\rho=0.03$)混凝土之高、低強度的乾縮量(10^{-6})	103
表 5-35	埋置#7($\rho=0.03$)混凝土之高、低強度的乾縮量(10^{-6})	103
表 5-36	埋置#7($\rho=0.03$)混凝土之高、低強度的乾縮量(10^{-6})	104
表 5-37	埋置#7($\rho=0.03$)混凝土之高、低強度的乾縮量(10^{-6})	104
表 5-38	純混凝土之高強度的乾縮量(空氣養護) (10^{-6})	105
表 5-39	純混凝土之低強度的乾縮量(空氣養護) (10^{-6})	105
表 5-40	純混凝土之高強度的乾縮量(養護 7 天) (10^{-6})	106
表 5-41	純混凝土之低強度的乾縮量(養護 7 天) (10^{-6})	106
表 5-42	純混凝土之高強度的乾縮量(養護 14 天) (10^{-6})	107
表 5-43	純混凝土之低強度的乾縮量(養護 14 天) (10^{-6})	107
表 5-44	純混凝土之高強度的乾縮量(養護 28 天) (10^{-6})	108
表 5-45	純混凝土之低強度的乾縮量(養護 28 天) (10^{-6})	108
表 5-46	純混凝土之高強度與低強度的基本潛變量(10^{-6})	109
表 5-47	埋置#4($\rho=0.015$)混凝土之高強度與低強度的基本潛變量(10^{-6})	109
表 5-48	埋置#4($\rho=0.03$)混凝土之高強度與低強度的基本潛變量(10^{-6})	110
表 5-49	埋置#7($\rho=0.015$)混凝土之高強度與低強度的基本潛變量(10^{-6})	110
表 5-50	埋置#7($\rho=0.03$)混凝土之高強度與低強度的基本潛變量(10^{-6})	111
表 5-51	SCC與OPC純混凝土之比克效應(10^{-6})	111
表 5-52	SCC與OPC埋置#4($\rho=0.015$)混凝土之比克效應(10^{-6})	112
表 5-53	SCC與OPC埋置#4($\rho=0.03$)混凝土之比克效應(10^{-6})	112
表 5-54	SCC與OPC埋置#7($\rho=0.015$)混凝土之比克效應(10^{-6})	112
表 5-55	SCC與OPC埋置#7($\rho=0.03$)混凝土之比克效應(10^{-6})	113
表 5-56	試驗配比中抗壓強度與握裹強度之關係	113

表 5-57	方柱試體埋置#4($\rho=0.015$)混凝土之高強度的乾縮量(10^{-6}).....	114
表 5-58	方柱試體埋置#4($\rho=0.03$)混凝土之高強度的乾縮量(10^{-6}).....	114
表 5-59	方柱試體埋置#4($\rho=0.015$)混凝土之低強度的乾縮量(10^{-6}).....	114
表 5-60	方柱試體埋置#4($\rho=0.03$)混凝土之低強度的乾縮量(10^{-6}).....	115
表 5-61	方柱試體埋置#7($\rho=0.015$)混凝土之高強度的乾縮量(10^{-6}).....	115
表 5-62	方柱試體埋置#7($\rho=0.03$)混凝土之高強度的乾縮量(10^{-6}).....	115
表 5-63	方柱試體埋置#7($\rho=0.015$)混凝土之低強度的乾縮量(10^{-6}).....	116
表 5-64	方柱試體埋置#7($\rho=0.03$)混凝土之低強度的乾縮量(10^{-6}).....	116
表 5-65	預測公式的對照與各係數的代表意義	117
表 5-66	本研究之乾縮函數式與其它乾縮預測公式的比較表(10^{-6}).....	118
表 5-67	本研究之潛變函數式與其它潛變預測公式的比較表(10^{-6}).....	119



圖目錄

圖 2-1 坍流度試驗設備	16
圖 2-2 坍流度試驗情況	16
圖 2-3 V型漏斗流出試驗設備	17
圖 2-4 V型漏斗流出試驗情況	17
圖 2-5 障礙通過性試驗設備	18
圖 2-6 障礙通過性試驗情況	18
圖 3-1 混凝土潛變乾縮與總應變趨勢【16】	44
圖 3-2(a) 為 k_1 環境影響變化【20】	44
圖 3-2(c) 為 k_3 混凝土不同配比【20】	45
圖 3-2(d) 為 k_4 厚度的影響變化【20】	46
圖 3-2(e) 為 k_5 加載下的潛變發展變化【20】	46
圖 3-2(f) 為 k_7 環境影響變化【20】	47
圖 3-2(g) 為 k_4 厚度的影響變化【20】	47
圖 3-3(a) 發展強度式(2-6)與式(2-4)之差別【20】	48
圖 3-3(b) β_d 延遲彈性發展公式【20】	48
圖 3-3(c) β_f 塑性流參數【20】	49
圖 3-3(d) $\varepsilon_{sh,0}$ 基本乾縮係數【20】	49
圖 3-3(e) β_{sh} 乾縮隨時間的發展數【20】	50
圖 3-4 鋼筋混凝土握裹力示意圖【1】	50
圖 4-1 試驗計畫	65
圖 4-2 體積穩定性分析步驟	66
圖 4-3 各式不同鋼筋比之鋼筋	67
圖 4-4 鋼筋應變計	68
圖 4-5 混凝土握裹力試驗試體	68
圖 4-6 小型重力式拌和機	69
圖 4-7 大型重力式拌和機	69
圖 4-8 圓柱試體模	70
圖 4-9 乾縮試體模	70
圖 4-10 抗壓試驗機	71
圖 4-11 潛變架	71
圖 4-12 油壓千斤頂	72

圖 4-13 荷重計	72
圖 4-14 乾縮量測儀	73
圖 4-15 萬能試驗機	73
圖 4-16 筆記型電腦	74
圖 4-17 資料擷取器	74
圖 4-18 混凝土應變	75
圖 4-19 鋼筋應變計	75
圖 4-20 純混凝土乾縮	75
圖 4-21 含鋼筋圓柱試	76
圖 4-22 方柱試體	76
圖 4-23 純混凝土潛變試體架設	77
圖 4-24 基本潛變試體	77
圖 4-25 乾燥潛變試體	78
圖 4-26 含鋼筋混凝土潛變試體架設	78
圖 5-1 SCC純混凝土乾縮	120
圖 5-2 OPC純混凝土乾縮	120
圖 5-3 SCC埋置#4($\rho=0.015$)之混凝土乾縮	121
圖 5-4 OPC埋置#4($\rho=0.015$)之混凝土乾縮	121
圖 5-5 SCC埋置#4($\rho=0.03$)之混凝土乾縮	122
圖 5-6 OPC埋置#4($\rho=0.03$)之混凝土乾縮	122
圖 5-7 SCC埋置#7($\rho=0.015$)之混凝土乾縮	123
圖 5-8 OPC埋置#7($\rho=0.015$)之混凝土乾縮	123
圖 5-9 SCC埋置#7($\rho=0.03$)之混凝土乾縮	124
圖 5-10 OPC埋置#7($\rho=0.03$)之混凝土乾縮	124
圖 5-11 SCC純混凝土乾燥潛變	125
圖 5-12 OPC純混凝土乾燥潛變	125
圖 5-13 SCC埋置#4($\rho=0.015$)之混凝土乾燥潛變	126
圖 5-14 OPC埋置#4($\rho=0.015$)之混凝土乾燥潛變	126
圖 5-15 SCC埋置#4($\rho=0.03$)之混凝土乾燥潛變	127
圖 5-16 OPC埋置#4($\rho=0.03$)之混凝土乾燥潛變	127
圖 5-17 SCC埋置#7($\rho=0.015$)之混凝土乾燥潛變	128
圖 5-18 OPC埋置#7($\rho=0.015$)之混凝土乾燥潛變	128
圖 5-19 SCC埋置#7($\rho=0.03$)之混凝土乾燥潛變	129
圖 5-20 OPC埋置#7($\rho=0.03$)之混凝土乾燥潛變	129
圖 5-21 SCC與OPC純混凝土乾縮之比較	130
圖 5-22 SCC與OPC純混凝土乾燥潛變之比較	130
圖 5-23 SCC與OPC埋置#4($\rho=0.015$)之混凝土乾縮比較	131
圖 5-24 SCC與OPC埋置#4($\rho=0.03$)之混凝土乾縮比較	131

圖 5-25 SCC與OPC埋置#7($\rho=0.015$)之混凝土乾縮比較.....	132
圖 5-26 SCC與OPC埋置#7($\rho=0.03$)之混凝土乾縮比較.....	132
圖 5-27 SCC與OPC埋置#4($\rho=0.015$)之混凝土乾燥潛變比較.....	133
圖 5-28 SCC與OPC埋置#4($\rho=0.03$)之混凝土乾燥潛變比較.....	133
圖 5-29 SCC與OPC埋置#7($\rho=0.015$)之混凝土乾燥潛變比較.....	134
圖 5-30 SCC與OPC埋置#7($\rho=0.03$)之混凝土乾燥潛變比較.....	134
圖 5-31 SCC埋置#4 鋼筋比為 0.015 與 0.03 之乾縮比較.....	135
圖 5-32 OPC埋置#4 鋼筋比為 0.015 與 0.03 之乾縮比較.....	135
圖 5-33 SCC埋置#7 鋼筋比為 0.015 與 0.03 之乾縮比較.....	136
圖 5-34 OPC埋置#7 鋼筋比為 0.015 與 0.03 之乾縮比較.....	136
圖 5-35 SCC埋置#4 鋼筋比為 0.015 與 0.03 之乾燥潛變比較.....	137
圖 5-36 OPC埋置#4 鋼筋比為 0.015 與 0.03 之乾燥潛變比較.....	137
圖 5-37 SCC埋置#7 鋼筋比為 0.015 與 0.03 之乾燥潛變比較.....	138
圖 5-38 OPC埋置#7 鋼筋比為 0.015 與 0.03 之乾燥潛變比較.....	138
圖 5-39 SCC埋置#4 與#7 ($\rho=0.015$)之乾縮比較(空氣養護).....	139
圖 5-40 OPC埋置#4 與#7 ($\rho=0.015$)之乾縮比較(空氣養護).....	139
圖 5-41 SCC埋置#4 與#7 ($\rho=0.015$)之乾縮比較(養護 7 天).....	140
圖 5-42 OPC埋置#4 與#7 ($\rho=0.015$)之乾縮比較(養護 7 天).....	140
圖 5-43 SCC埋置#4 與#7 ($\rho=0.015$)之乾縮比較(養護 14 天).....	141
圖 5-44 OPC埋置#4 與#7 ($\rho=0.015$)之乾縮比較(養護 14 天).....	141
圖 5-45 SCC埋置#4 與#7 ($\rho=0.015$)之乾縮比較(養護 28 天).....	142
圖 5-46 OPC埋置#4 與#7 ($\rho=0.015$)之乾縮比較(養護 28 天).....	142
圖 5-47 SCC埋置#4 與#7 ($\rho=0.03$)之乾縮比較(空氣養護).....	143
圖 5-48 OPC埋置#4 與#7 ($\rho=0.03$)之乾縮比較(空氣養護).....	143
圖 5-49 SCC埋置#4 與#7 ($\rho=0.03$)之乾縮比較(養護 7 天).....	144
圖 5-50 OPC埋置#4 與#7 ($\rho=0.03$)之乾縮比較(養護 7 天).....	144
圖 5-51 SCC埋置#4 與#7 ($\rho=0.03$)之乾縮比較(養護 14 天).....	145
圖 5-52 OPC埋置#4 與#7 ($\rho=0.03$)之乾縮比較(養護 14 天).....	145
圖 5-53 SCC埋置#4 與#7 ($\rho=0.03$)之乾縮比較(養護 28 天).....	146
圖 5-54 OPC埋置#4 與#7 ($\rho=0.03$)之乾縮比較(養護 28 天).....	146
圖 5-55 SCC埋置#4 與#7 ($\rho=0.015$)之乾燥潛變比較.....	147
圖 5-56 OPC埋置#4 與#7 ($\rho=0.015$)之乾燥潛變比較.....	147
圖 5-57 SCC埋置#4 與#7 ($\rho=0.03$)之乾燥潛變比較.....	148
圖 5-58 OPC埋置#4 與#7 ($\rho=0.03$)之乾燥潛變比較.....	148
圖 5-59 SCC與OPC純混凝土之比克效應.....	149
圖 5-60 SCC與OPC埋置#4($\rho=0.015$)混凝土之比克效應.....	149
圖 5-61 SCC與OPC埋置#4($\rho=0.03$)混凝土之比克效應.....	150
圖 5-62 SCC與OPC埋置#7($\rho=0.015$)混凝土之比克效應.....	150

圖 5-63 SCC與OPC埋置#7($\rho=0.03$)混凝土之比克效應.....151
圖 5-64 在載重下傳統混凝土與自充填混凝土，溼度擴散與裂縫【26】151
圖 5-65 SCC與OPC之握裹應力.....152



第一章 緒論

1.1 前言

國內各種工程未確保工程品質、避免過多的施工瑕疵、兼顧環保的需求與達成施工自動自動化的目標，一般傳統混凝土已難達到上述之要求，開發更新的土建材料技術已成為勢在必行，故發展了「施工中免振動、搗實且能自行充填」的自充填混凝土（Self-Compacting concrete，簡稱 SCC）。SCC 對工程品質有相當之助益，以台灣位處地震帶，921 地震造成整個國家、社會、人民無比的災難與痛苦，工程品質之良，可謂牽涉到每個人身家性命與安全，重要性時不可言喻。

SCC 使用於建築物後對行為之影響仍付之如闕，故而應加以監測混凝土的體積穩定性，以獲取足夠數據回饋設計，以使設計正確，保障人民生命財產之安全【1】。

1.2 研究動機

混凝土結構物之破壞除因材料強度不夠外，亦可因變形過大而引起。持續載重的應力使得硬化混凝土隨著時間，混凝土的應變增加，此為潛變，通常為其彈性變形的二至三倍。混凝土在沒有外力作用下，亦因水分逐漸去除而發生乾縮，經常會導致混凝土的破裂。當結構工程師考慮結構變形、勁度強度以及長期外載所產生之內應力時，必須同時考慮到潛變與乾縮的分析。

潛變乾縮的長期預測公式，一直以來具有挑戰性，由於當地的材料特質、環境溫度與相對溼度、混凝土配比與構件尺寸大小等變因，許多學者發展出不同的預測模式都無法滿足，隨著新的混凝土研發，舊有的預測公式變得不精確，故有待實驗數據修正。

將量測所得之數據加以分析，以了解施工中及硬固後 SCC 各種行為及對結構之影響，找出其長期趨勢，獲得結構物長期行為變化，比較與規範之相容性。

1.3 研究目的

乾縮是混凝土體積隨著時間而下降，在混凝土硬化後，由於混凝土水分改變及物理化學在無應力下改變的而使混凝土體積下降。混凝土乾縮會直接影響結構物的長期變位。

潛變含基本潛變(basic creep)和乾燥潛變(drying creep)。基本潛變是在無水分移動的情況下發生，而乾燥潛變是因為乾燥引起的，由於持續載重應變造成潛變，故潛變對混凝土的影響等同於乾縮。

經上述解釋的 SCC 特性和潛變與乾縮的微妙材料變化，除了增加研究的目的與興趣外，研究過程所蒐集的模組以及在 50% R.H.(23°C)模擬乾燥狀況下所得的數據經過歸納與分析後，一方面希望可以對 SCC 的潛變乾縮性質量化，二方面可作為日後他人研究的指標，如試驗設備及程序。最後，期望從實驗數據所歸納出的乾縮潛變修正

式能予工程界正確地對結構體長期變形預測，能提高預測的精確性。



第二章 自充填混凝土之概述

2.1 SCC 之特性

自充填混凝土 (Self-Compacting concrete, 簡稱 SCC) 顧名思義, 就是混凝土本身能夠有自我充填的能力, SCC 利用自己本身的重量, 不需要振動、搗實及可通過鋼筋得間隙, 並充填至模版個角落。而要達到 SCC 的特性, 其混凝土本身必須提升流動性及充填能力, 所以 SCC 將粗粒料用量減少, 大約為傳統混凝土之 85%~90%, 並增加強塑劑用量至臨界折離狀態, 而避免高流動性造成之析離, SCC 大量使用飛灰, 爐石粉等礦物摻料, 以增加漿體比重及稠度【1】。



2.1.1 SCC 之工作性

SCC 具有不需震動、搗實、高流動性、自己有良好的填充能力, 由於具有足夠之稠度, 在施工時可抵抗析離現象, 粒料之均勻性優於經過振動搗實之一般混凝土。同時, SCC 澆置時可減少因為需要振動而發出之噪音, 節省現場作業人員, 縮短灌漿時程【2】。


SCC 最具代表性之應用, 為日本明石海挾大橋, 其錨座之施工共須混凝土 30 萬立方公尺, 以 SCC 施作, 18 個月內順利完工, 若使用傳統混凝土, 不但現場作業人員大增, 且將因為水化熱之問題而延長澆置間隔時間, 大量增加工期及成本【1】。

在日本, 發展並增加使用 SCC 的主要原因在於減少現場技術作

業員的數量與節省建築的時間，在法國，由於 SCC 之施工噪音較低，因此在都市建築工程，可以日以繼夜的趕工。SCC 之工程效益歸納為下列五項【1】：

- 1、 用於混凝土搗實非常困難之結構體。
- 2、 混凝土充實密實，可有效提升結構之可靠性。
- 3、 用於巨積混凝土，以減少勞力，縮短工期。
- 4、 減少工地噪音，合乎環保要求。
- 5、 達到混凝土施工自動化，合理化。

2.2 SCC 之配比概念



自充填混凝土的配比設計，首先是混凝土條件之設定，依據建築物的結構條件、施工條件以及環境條件加以考慮，其中結構條件包括結構斷面形狀與尺寸、鋼筋間距及鋼筋用量，而施工條件應考量的有澆置作業所需的時間、泵送混凝土所需的距離、自由落下的距離、最大的流動距離及模版的形狀等；而依據環境條件選擇組成混凝土所有材料，並初步估計各材料使用量。最後將設計配比進行試拌與配比調整的工作，量測是否能夠達到目標性能之要求【3】。且混凝土需通過各種的充填性試驗，已能達到自行充填的性能、施工性、強度、耐久性、水密性、析離抵抗性等。

2.2.1 各體系 SCC 達到自充填性能之概念

為了能達到充填性能及材料均勻性之考量，不同體系有其不同需求【4】。粉體系利用較高之粉體量提升懸浮力，拖住細粒料，阻止細粒料下沉，再藉細粒料阻止粗粒料下沉堆積。經充分拌和後，所有材料皆懸浮於拌和水中；且粗粒料摩擦力降至最低，新拌混凝土變形能力大增，進而達到充填性。

2.2.2 SCC 之用水量概念

混凝土在硬固過程中未蒸發的游離水，在硬固後將形成孔隙，將有害於混凝土之耐久性及體積穩定性。因此，在可達到所需工作性範圍內，應儘可能減少單位用水量。對於 SCC 而言，若單位用水量過多，將造成漿體比重過小、稠度過低，降低自充填性能。且會發生混凝土之粗粒料與漿體析離，於泵送時塞管、澆置後粗粒料下沉，上下層強度差異大、硬固後混凝土之水密性不足、易產生裂縫等情形，亦成為混凝土耐久性劣化之原因【5】。

當單位用水量過少時，為達所需坍流度，將會使化學摻料需求量大增，造成混凝土混凝土之凝結時間顯著延長、成本過高、強度不穩定。原則上，單位用水量宜控制在 185 kg/m^3 以下【6、7】，但可依膠置現場的需求可將上項標準放寬至 195 kg/m^3 【8】以求得適當之工作性。

2.2.3 SCC 之粉體使用概念

SCC 在於開發之初，是針對強震區、鋼筋密集而複雜、高強度高韌性之構建而設計。因此，高粉體量、低水膠比使得抗壓強度比一般傳統混凝土高出許多。

一般 SCC 之單位膠結材用量可由水膠比單位用水量兩者計算求出，再依規定之品質基準與施工時之條件加以檢核後決定其用量，已達兼顧強度、工作性、耐久性等要求之能。遇到設計強度較高或須具良好的工作性時，單位膠結料之需求量大增，水化過程中產生之熱能將使混凝土溫度產生裂縫，一般皆採取以下 3 項對策【8】：

A、使用 VI 型水泥

B、以爐石粉及飛灰等卜作嵐材料取代部份之水泥。

C、使用石灰石細粉、碎石粉等礦物微摻料充當粉體。

此外，須特別注意，若單位膠結材料中水泥之比例較低時，將致使混凝土中性化之速度較快，且其初期強度亦較差，此時須特別檢核卜作嵐材料添加量對硬固後混凝土品質所造成之影響。根據相關研究顯示，未使用析離抑制劑，或使用生化聚合物系之析離抑制劑時，其單位粉體量在 $500\sim 600\text{ kg/m}^3$ 之範圍。

2.2.4 SCC 之粗粒料使用概念

1、粗粒料最大粒勁對 SCC 之影響

一般傳統混凝土，最大粗粒料徑可達 40mm。但 SCC 因為需要

有良好充填性，並且需要通過密集複雜的鋼筋間距，因此必須降低粗粒料粒徑。根據日本研究單位所作之研究顯示，自充填混凝土之最大粗粒料粒徑需小於 25mm【3、9】，若使用於樑柱接頭等鋼筋密集區，最粒徑不宜大於 20mm，若用於其他鋼筋間距較大之構件，則可視情況而放大。

粗粒料粒徑對 SCC 的填充與間隙通過性有很大的關係，對單向鋼筋而言，其淨間距至少為 $(2+\sqrt{3})$ 倍的粗粒料半徑，若為雙向鋼筋網，則淨間距至少為 $(2+2\sqrt{2})$ 倍的粗粒料半徑【5】。

2、粗粒料單位用量對 SCC 之影響

粗粒料之單位用量也是設計 SCC 配比之重要參數之一，對工作性具有絕對的影響力。粗粒料用量越高，導致顆粒間的接觸與碰撞情形增加，摩擦力大增之下將降低流動性與充填性，以致無法達到 SCC 要求。反之，較低之粗粒料含量，增加了粒料間的相對距離，減低摩擦產生之內應力，可有效的增加障礙通過性。

按 ACI 建議之配比設計法，建築用普通混凝土之單位粗粒料容積多在 $0.60\sim 0.63\text{m}^3/\text{m}^3$ 之範圍。根據以往試驗結果，SCC 其單位粗粒料之絕對容積多在 $0.50\sim 0.55\text{m}^3/\text{m}^3$ 之範圍【8】。

此外，各地地區的粒料性質、形狀皆有所不同，因此，粒料用量也會有所調整。以台灣地區粗粒料性質而言，碎石之扁平率較高之緣故【11】，SCC 用量約較傳統混凝土少 $100\sim 150\text{kg}/\text{m}^3$ ，略低於日本工

程用量。

3、粗粒料間摩擦力與 SCC 黏度之關係

在混凝土流經鋼筋間狹口時，所有材料均匯集流向狹口時，粗粒料間會產生相互推擠壓迫，進而擠出夾於其間之漿體，造成粗粒料間失去漿體之潤滑而摩擦力大增，使得局部粒料密度增加，而導致粒料的聚集和拱狀的架橋現象。要避免此情形發生，則需要增大黏稠度，使漿體不易被擠出。而降低水膠比或添加增黏劑都可以提供黏滯性，在增加漿體之黏稠度後使水泥砂漿不易被粗粒料排擠出來，如此可以確保粒料在流動時能保持懸浮的狀態，在遇到障礙時能均勻且質地通過鋼筋狹口進而達到自充填效果。

2.2.5 SCC 之細粒料使用概念

SCC 配比設計中所使用的細粒料 FM 值為 2.5~3.2 之間，與 ACI 所建議之傳統混凝土設計法類似。在自然狀態下細粒料之含水量，遠較粗粒料來得不穩定，但 SCC 之充填性能對於用水量之變化極為敏感，也就是說即使配比相同，亦有可能會因粒料之含水狀況改變而有不穩定的填充性能，因此對於細粒料含水量的變化需要更加注意。由於細粒料之比表面積較大，保水性及懸浮性亦優於粗粒料，當水粉比較高時，可利用細度模數較小之細粒料提升 SCC 之充填性能【12】。

細粒料使用率 (S/A) 之對 SCC 之工作性也有非常大的影響，當

細粒料率小時，無法提供有效懸浮力托住粗粒料，則會產生粒料析離現象。而當細粒料率大時雖然能提供足夠的懸浮力托住粗粒料，有助於阻止粗粒料下沉，但重力作用下相對運動之能力則遜於粗粒料，過量使用將減低澆置時充填之衝力，因此一般建議自充填混凝土之 $S/A=48\% \sim 52\%$ 之範圍【12】。

2.3 SCC 工作性試驗

新拌之 SCC 必須通過坍流試驗、V 漏斗流出試驗、箱型充填試驗，並於澆置前通過全量通過試驗才能稱為 SCC。試驗過程中，可能產生各種不合格之現象。



2.3.1 SCC 之坍流度試驗

試驗目的：測試新拌混凝土流動能力。

試驗器具：如圖 2-1，試驗情況如圖 2-2。

試驗項目：坍流度、擴散達 50cm 所需時間【14】。

試驗步驟【1】：

- 1、先將坍度錐及試驗用鋼板以溼布擦拭。
- 2、將混凝土倒入坍度錐中，一次到滿。
- 3、將坍度錐垂直向上一拉，待混凝土停止流動後使用鐵尺量測流動範圍之最大直徑及最小直徑，兩者差值大於 5cm 時須重測。

判定標準【1】：

- 1、標準值如表 2-1。
- 2、若坍流度直不符合標準值時，應重新調整配比，一般原因為粗粒料形狀不佳，細長扁平率過高，或是粗粒料用量過多，亦有可能為化學摻料量不足，應是試驗狀況而定。
- 3、檢視粗粒料是否被漿體帶至最外緣，如有粗粒料堆積、漿體析離等現象，則必須重新調整配比，一般原因為粉體量太少，用水量太多，或砂石比不佳所致。

2.3.2 SCC 之 V 型漏斗流出試驗

試驗目的：測試新拌混凝土稠度、析離性。

試驗器具：如圖 2-3，試驗情況如圖 2-4。

試驗項目：新拌混凝土完全流出 V 型漏斗下方出口所需時間【14】。

試驗步驟【1】：

- 1、先將漏斗內以溼布擦拭，再將混凝土倒滿 V 型漏斗中，到滿後將表面刮平。
- 2、靜待 10 秒後，將抵下閘門打開，量測全部流出所需要時間。

判定標準：

- 1、若流出漏斗時間愈短，則黏度愈小，標準值如表 2-1。
- 2、若阻塞於漏斗中，可能新拌混凝土黏稠度太高造成阻塞，黏稠度太低，以致粗粒料下沉，粗粒料用量太多。

- 3、若流出漏斗時間太長，表示新拌混凝土黏稠度太高，充填能力不佳，一般以增加化學摻料或減少粉體用量改善之。
- 4、若流出漏斗時間太短，則表示年稠度偏低，新拌混凝土於施工時可能容易析離，例外情況，如使用顆粒形狀及化學性質較佳之粉體，也有可能短時間內流出漏斗而不發生析離現象。

2.3.3 SCC 之障礙通過性試驗

試驗目的：測試新拌混凝土通過鋼筋間隙及自行充填至模板角落之能力。

試驗器具：鋼筋障礙共有三種，其中第三種為無障礙，如圖 2-5，試驗情況如圖 2-6。

試驗項目：新拌混凝土由 A 槽靜置 1 分鐘後流至 B 槽之高度【14】。

試驗步驟：

- 1、於充填裝置中，插入隔間門與裝妥流動障礙之隔間板。
- 2、將充填容器內表面、隔間門、隔間板及流動障礙等，以溼布擦拭潤溼之。
- 3、將新拌混凝土到入 A 槽內，不可以搗棒搗實或向皮搥敲振，應使混凝土連續第注入 A 槽至滿。
- 4、再以平直之刮刀沿充填容器之上緣，刮平混凝土頂面後，使其靜置 1 分鐘。

5、將隔間門 一氣呵成不得間斷地迅速向上拉起，混凝土便通過障礙

流向 B 槽，直至流動停止為止，量測混凝土填充 B 槽高度。

6、若想測定通過流動障礙後混凝土之粗粒料含量，在 B 槽採取 1L

左右之混凝土試樣，以水洗測定通過流動障礙後混凝土中之粗粒料含量。

判定標準：

1、標準值如表 2-1。

2、若新拌混凝土阻塞於 A 槽中，可能肇因於新拌混凝土稠度太高造

阻塞，應調整配比，一般可以增加用水量或化學摻量改善之。

3、若粗粒料下沉僅有漿體通過障礙則可能黏稠度太低、粗粒料用量

過多或粗粒料尺寸過大，一般可以增加粉體用量、提高砂石比、或降低粗粒料尺寸改善之。

以下式算出通過流動障礙後混凝土中之粗粒料含量，佔混凝土配比中單位容積混凝土所含粗粒料量之質量比【14】：

$$\text{粗粒料含量之質量比} = \frac{M_G}{M_{G0}}$$

其中： M_G = 通過流動障礙後混凝土單位容積中之粗粒料含量 (kg/m^3)。

M_{G0} = 由混凝土配比而得單位容積混凝土中所含之粗粒料量 (kg/m^3)。

2.4 SCC 之硬固後特性


以下主要討論高強度與低強度 (24~41MPa) 之 SCC 其材料硬固

後特性【15】。

2.4.1 彈性模數

SCC 澆置後 3 天、7 天之彈性模數約為 ACI 建議值之 50%~70%，而 28 天之後則約為 ACI 建議值之 70%~85%。原因在於 SCC 之粒料用量較 ACI 建議值低（按粗粒料之乾搗單位重及細粒料之細度模數值，ACI 之建議粗粒料用量約為 $0.67G/G_{lim}$ ，SCC 之用量為 $0.5\sim 0.54 G/G_{lim}$ ，為 ACI 建議值之 74%~80%），為傳統混凝土之 70%~80%【15】。

2.4.2 強度發展



由於工作性及耐久性的因素，SCC 使用了一定比例的卜作嵐材料，試驗顯示，SCC 與傳統混凝土相同，試體在 28 天時之抗壓強度發展趨於平緩，而因為卜作嵐材料使得其晚期強度發展為 28 天抗壓強度的 1.2 倍到 1.4 倍之間【15】。

表 2-1 SCC 相關試驗參考值【1】

混凝土充填能力等級		1	2	3
構造 條件	鋼筋最小間距 (mm)	30~60	60~200	200 以上
	鋼筋用量 (kg/m ³)	350 以上	100~350	100 以下
箱型試驗充填高度 (mm)		300 以上 (R1 障礙)	300 以上 (R2 障礙)	300 以上 (無障礙)
粗粒料之絕對體積 (m ³ /m ³)		0.28~0.31	0.30~0.33	0.30~0.36
粗粒料實積率 (G/G _{lim})		0.43~0.57	0.46~0.61	0.51~0.66
流動性	坍流度 (mm)	550~700		550~650
新拌混凝土抗析離性	V 型漏斗流出時間 (sec)	10~20	7~20	7~20
	坍流度達到 50cm 所需時間 (sec)	5~25	3~15	3~15

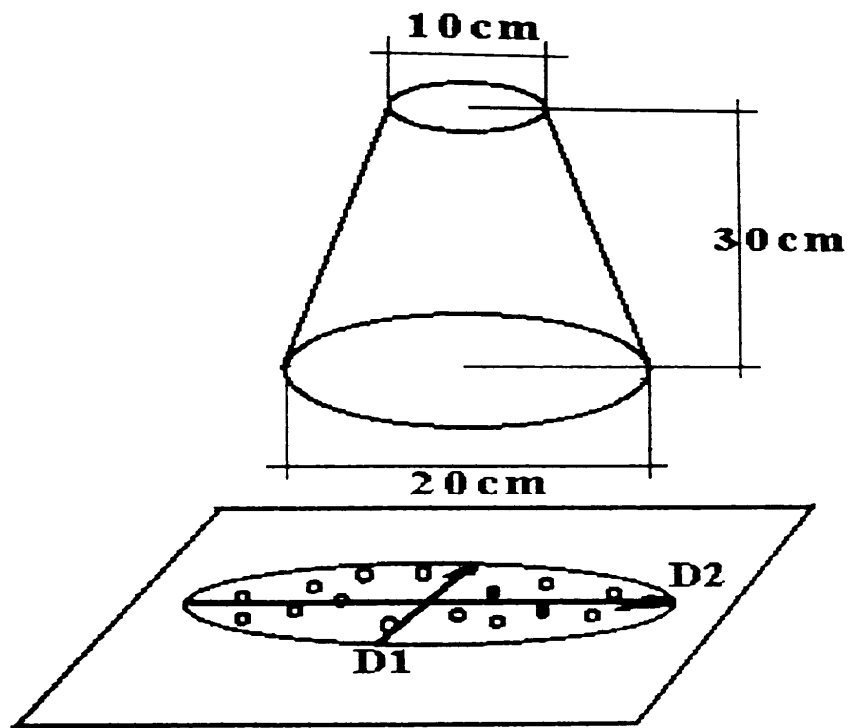


圖 2-1 坍流度試驗設備



圖 2-2 坍流度試驗情況

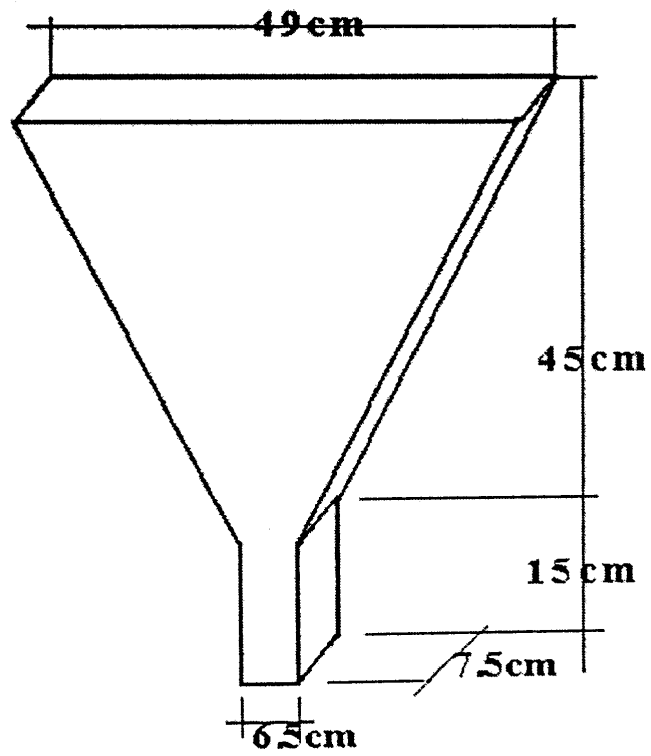


圖 2-3 V 型漏斗流出試驗設備



圖 2-4 V 型漏斗流出試驗情況

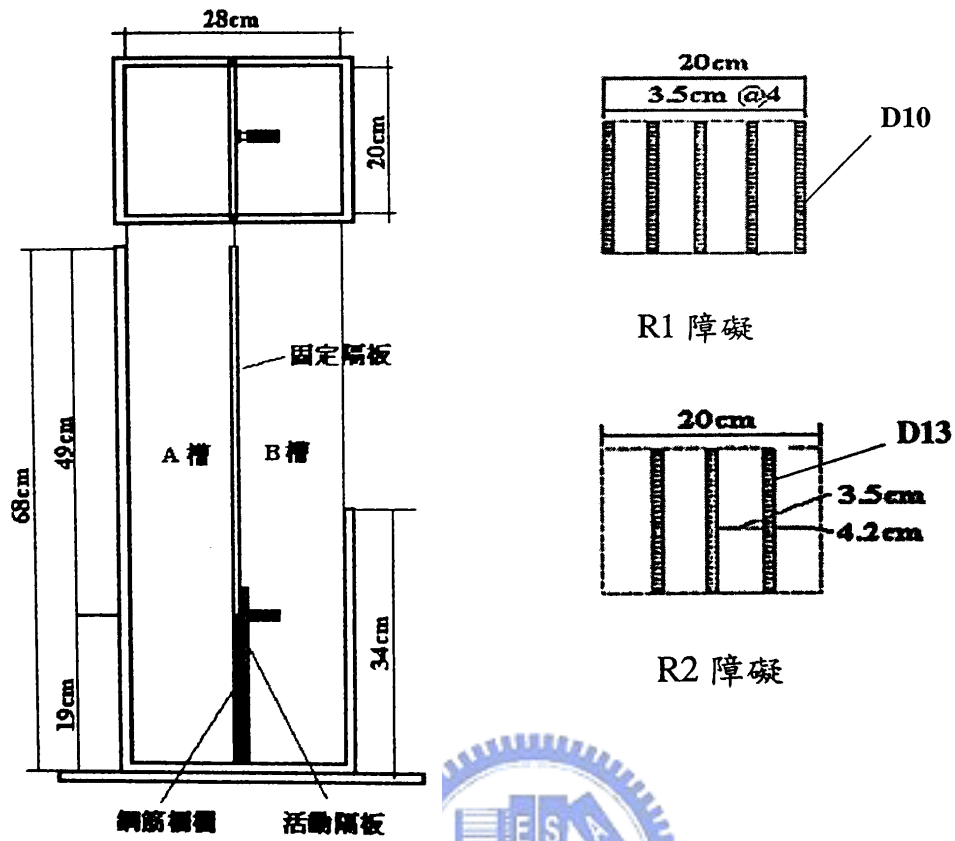


圖 2-5 障礙通過性試驗設備



圖 2-6 障礙通過性試驗情況

第三章 文獻回顧

3.1 體積穩定性

本節主要針對混凝土之乾縮及潛變來探討，介紹混凝土材料本身乾縮及潛變行為和主要潛變乾縮的模組介紹。

3.1.1 名詞解釋【16】

1、總應變量(Total strain)：每單位長度的總改變量，即總應變量，如

圖 3-1，總應變量為乾縮值加上因載重導致的應變量總和。

2、收縮(Shrinkage)：由無載載試體測得的應變量。

3、自體收縮(Autogenous shrinkage)：無水分轉移的密封狀況下發生的乾縮稱為自體收縮。

4、乾燥收縮(Drying shrinkage)：混凝土曝露在乾燥或一般環境下，由於混凝土內部水分蒸發，所造成的收縮量稱為乾燥收縮。

5、載重的初始應變或一般彈性應變(initial strain at loading or nominal elastic strain)：載重的短期應變，根據 ASTM C469 方法取得此值，即在加載下約 15 分鐘所得的應變值稱為初始應變。

6、潛變(Creep strain)：潛應變代表應變的依時增加，在常態載重下發生，可由載重引起的應變量扣除初始應變量取得，而且潛應變是初始應變的好幾倍大。潛應變分為乾與未乾部分，即乾燥潛變(Drying creep)和基本潛變(Basic creep)。

7、基本潛變(Basic creep)：混凝土在密封狀態下，即無水分移動下的

依時增加的應變量，稱為基本潛變，與試體的形狀和大小無關。

為求基本潛變，必須量測一組密封試體在固定載重下的變形量和

總應變量。若自體乾縮無法忽略，就應該會量測到試體伴隨著密

封且無荷重的狀況下的應變值。即使已量測 30 年，但仍無法求取

基本潛變的最終值。

8、乾燥潛變(Drying creep)：乾燥潛變是試體曝露在環境下且允許乾

燥的狀態下，會產生額外潛變。乾燥潛變會隨著試體的尺寸和形

狀而定，且可預估其長期的額外潛變。

9、順應性(Compliance)：順應性以 $J(t,t')$ 表示，由單位載重在混凝土

齡期 t' 開始加載之混凝土齡期 t 的依時應變。

$$J(t,t') = \frac{\text{總應變值} - \text{乾燥收縮應變} - \text{自體收縮}}{\text{應力值}}$$

10、比潛變(specific creep)：比潛變定義為單位載重下的潛應變，公

式如下：

$$\text{specific creep} = \frac{\text{潛應變}}{\text{應力值}}$$

11、潛變係數(Creep coefficient)：潛變係數定義為潛應變與初始應變

的比值或為潛變的 $J(t,t')$ 和早期獲取的 $J(t,t')$ 的比值。

12、比克效應(Pickett effect)：通常將其分為彈性變形、乾縮、基本潛

變與乾燥潛變四種變形量組成，其中乾燥潛變反應出一種極為重

要的材料性質，稱為比克效應。

(比克效應 = $\epsilon_{drying\ creep} - \epsilon_{basic\ creep} - \epsilon_{shrinkage}$ 。)

3.1.2 乾縮原理

體積不穩定為混凝土一種特殊性質，一但混凝土內外部溫度，或溼度差異過大，就會因水分蒸散而表面之裂縫。

混凝土組成主要是由水，膠結材料與粒料。強度的形成則是由水與水泥水化、卜作嵐材料與氫氧化鈣產生卜作嵐反應，再與粒料膠結而來【17】。在傳統混凝土中，水灰比對工作性有絕對影響，為了工作性的需求，在混凝土拌合時添加的水經常多餘水化作用所需，這些水在硬固混凝土中分別為【1】：

- A、化學鍵結水(Chemically combined water)：是以共價鍵形成與水化膠體結合的水，亦即是矽酸鈣水化物 (calcium silicate hydrate) 中所含之結晶水，這些水和水泥膠體之間以化學鍵結方式而非以水的形式存在，所以不具擴散或蒸散性能，只在化學作用下而分解，因此，這種水也稱為不可蒸發水。
- B、物理吸附水(Physically absorbed water)：由表面張力吸附在水泥膠體表面的水，由於水泥膠體是薄片狀，所以吸附在膠體薄片間水，亦稱為層間水(Interlayer water)、膠體水(Gel water)。吸附水在於膠體薄片間，較不易移動，但一旦移動之後，會照成膠體薄片間隙

小，即成為乾縮的主因。

C、自由水(Free capillary water)：又稱游離水，是存在於漿體毛細孔隙中的水。吸附水及自由水，皆保有水的形式，合稱為可蒸發水。

一般研究均顯示，乾縮現象的產生隨著養護方式及自然環境的不同，往往持續數年。一般而言，在硬固後二星期可達到二十年乾縮量之 20~25%，在二個月之內，約可達到二十年乾縮量之 50~60%，一年則約可收斂至 90%，隨著結構物齡期的增加，收斂的速率亦漸趨平緩【17】。

3.1.3 潛變原理



當混凝土成受小於極限應力的外力持續作用，造成晶體間相對位移或破壞而產生的體積變化稱為潛變【18】。一般均認為由下列四種物理現象合成【1】：

A、吸附水與層間水受壓力作用移動至膠體孔隙中造成體積收縮，這種現象稱為壓密作用(Consolidation)，在水化作用初期作用速率較快，待後期達到水份平衡才逐漸停止。

B、由粒料與膠體所組成的架構，因為水泥砂漿會對彈性變形產生束縛，而易形成延遲彈性(Delayed elasticity)現象。

C、層間水除了可能被擠壓滲出外，亦可能扮演潤滑的角色，使膠體分子間產生滑動，而造成水泥砂漿間的黏滯流(Viscous flow)，尤

其在加入強塑劑後，高分子量的陰離子表面活性劑（Surfactant）作用，使得潤滑現象更明顯。

D、永久變形(Permanent deformation)，由於較早的載重造成為裂縫，裂縫介面上尚未和膠結料在形成新的鍵結後造成無法復原的變形。

3.1.4 比克效應原理

為了分別考慮潛變及乾縮，並區隔不同原因所造成的潛變，混凝土支乾縮與潛變約可區分為以下幾個部分：

- (a)、乾縮(Shrinkage)：如前節所述，是在混凝土未受力的狀況下，因水分的損失，而造成體積的縮小。
- (b)、基本潛變(Basic creep)：為混凝土在常溫下無溼度交換之狀況下，因受載而產生之潛變。
- (c)、乾燥潛變(Drying creep)：若混凝土在乾燥環境下受到荷載，除瞬時應變外，其總應變會大於純乾縮(未承受載重)及純加載而未受乾燥所產生變形(基本潛變)的總和。這額外超出的部分即稱為乾燥潛變。而一般所稱的潛變是指基本潛變和乾燥潛變的總合。

乾燥潛變這種現象遠在1942年由Pickett發現，故此作用亦稱為比克效應(Pickett effect)。Bazant與Chern【31】指出比克作用係由四個

因素所造成的。

- (1)、由乾縮係數是應力的函數，導致的收縮(Stress-induced shrinkage)。
- (2)、張力所產生的裂縫。
- (3)、裂縫產生之後，材料之再荷重(Reloading)。
- (4)、水化作用齡期的影響。

除溼度外，溫度增加也會加速潛變率，其對混凝土加載過程中，溫度變化所產生的額外潛變量，即稱為轉變熱潛變(Transitional thermal creep)【38】。由於不考慮乾縮及轉換熱潛變會造成對結構物安全度的高估，故乾燥潛變之了解也就有其特別的意義。應力導致之收縮與膨脹在混凝土結構承受暫態(Transient)溫、溼度變化時，特別重要。

3.1.5 混凝土乾縮潛變預測模式

1、the recommendations of CEB-FIP (1970) 【20】

潛變：

$$\phi_{28}(t, t_0) = k_1 k_2 k_3 k_4 k_5 \quad (3-1)$$

ϕ_{28} ：潛變係數

以下是 k 係數的定義：

k_1 ：環境溼度影響因子(coefficient for ambient humidity)，當在水中時，

creep 值為 1，所以其它相對溼度對水中潛變值之比即為 k_1 。圖 3-2(a) 為 k_1 環境影響變化。

k_2 ：混凝土加載係數，當不同混凝土所受不同載重時(coefficient for age at application of load)，令一型水泥混凝土於 28 天開始加載其 k_2 為 1， k_2 測為其他種混凝土於不同齡期開始加載之潛變值，但其儲存環境為 20°C 且有措施防止水分散失。圖 3-2(b) 為 k_2 加載齡期影響變化。

k_3 ：視混凝土配比而定(coefficient for concrete composition)，水灰比及不同水泥含量，即水泥含量 500(kg/m³) 為主，不同水灰比對 k_3 之影響。圖 3-2(c) 為 k_3 混凝土配比不同。

k_4 ：厚度的影響(coefficient for theoretical thickness)，取決於理論尺寸 h'_0 ， h'_0 定義如下： $h'_0 = \frac{2A_c}{U_c}$ ，其中 A_c 和 U_c 為構件斷面(mm²)的面積和周長(mm)。圖 3-2(d) 為 k_4 厚度的影響變化。

k_5 ：加載下的潛變發展時間。圖 3-2(e) 為 k_5 潛變發展變化。

潛變公式：

$$\Phi(t, t_0) = \frac{I}{E_c(t_0)} + \frac{\phi_{28}(t, t_0)}{E_{c28}} \quad (3-2)$$

其中：

$E_c(t_0)$ ：加載齡期時的 E 值(GPa)

$$E_c(t) = 5.4 [f_{cyl}(t)]^{1/2} \quad (\text{由 secant modulus 得到})$$

CEB1970 應用於普通混凝土，對於輕質混凝土其最終潛變值可由外插方式推導，另外潛變可假設 E_{c28} 來預估，增加潛變係數 ϕ_{28} 的 1.6 倍。

乾縮：

$$\varepsilon_{sh}(t, t_{sh,0}) = k_{\bar{1}} k_3 k_{\bar{4}} k_5$$

$\varepsilon_{sh}(t, t_{sh,0})$ 乾縮變形由乾燥 $t_{sh,0}$ 開始。

$k_{\bar{1}}$ ：受外在環境溼度影響的值，見圖 3-2(f)。

k_3 ：乾縮與混凝土配比之關係，定義同潛變之 k_3 。

$k_{\bar{4}}$ ：厚度的影響，見圖 3-2(g)。

k_5 ：乾縮發展時間，定義同潛變之 k_5 。

2、the recommendations of CEB-FIP (1978) 【20】

潛變：

CEB78 將潛變分為不可逆潛變(即 plastic flow 塑性流)和可逆潛變(delayed elastic strain)，除此之外，塑性流又分為第一次載重(initial flow，初始流)和接續流(subsequence flow)。 $\phi_{28}(t, t_0)$ 由一延遲應變、初始流和延遲流的組合。

$$\phi_{28}(t, t_0) = \beta_a(t_0) + \phi_d \beta_d(t - t_0) + \phi_f [\beta_f(t) - \beta_f(t_0)] \quad (3-3)$$

$$\text{註： } \beta_a(t_0) = 0.8 \left[1 - \frac{f_c(t_0)}{f_{c\infty}} \right] \text{ 為初始流} \quad (3-4)$$

$$\frac{f_c(t_0)}{f_{c\infty}} = \frac{1}{1.276} \left(\frac{t_0}{4.2 + 0.85t_0} \right)^{3/2} \quad (3-5)$$

$$\frac{f_c(t_0)}{f_{c\infty}} : \text{強度比}$$

將(3-5)代入式(3-4)變成

$$\beta_a(t_0) = 0.8 \left[1 - \frac{1}{1.276} \left(\frac{t_0}{4.2 + 0.85t_0} \right)^{3/2} \right] \quad (3-6)$$

式(3-5)和(3-6)的強度比見圖 3-3(a)，會發現與式(3-4)的強度比有些微差異，表示在齡期 28 天加載時，兩個方法差 14%。

$$\phi_d \beta_d(t - t_0) = 0.4 \left\{ 0.73 \left[1 - e^{-0.01(t-t_0)} \right] + 0.27 \right\} \quad (3-7)$$

其中：

β_d ：延遲彈性發展公式，見圖 3-3(b)

ϕ_d ：28 天限度遲線性應變對初始應變， $\phi_d = 0.4$

式(3-3)中，含 $\phi_f = \phi_{f1} \times \phi_{f2}$ 為延遲塑性係數(delay plastic)， ϕ_{f1} 為潛變與環境因子之關係，針對混凝土坍度，當低黏稠性時， ϕ_{f1} 降低 25%；當高黏稠性時， ϕ_{f1} 增加 25%， ϕ_{f2} ：尺寸係數 h_0 。

$$h_0 = \lambda \frac{2A_c}{U_c} \quad (3-8)$$

其中：

λ ：環境溼度係數

A_c ：構件斷面面積(mm²)

U_c ：計算 A_c 截面周長(mm)

式(3-3)的塑性流參數 β_f ，見圖 3-3(c)，表示延遲的塑性應變隨時間發展式，視 h_0 而定。 $\beta_f(t_0)$ 解釋加載齡期，當 $t=t_0$ 時，利用 step-by-step 公式

$$\phi_f [\beta_f(t) - \beta_f(t_0)] = \phi_f \left[\left(\frac{t}{t + H_f} \right)^{1/3} - \left(\frac{t_0}{t_0 + H_f} \right)^{1/3} \right] \quad (3-9)$$

其中： H_f 有 h_0 的函數式

為解釋養護的外在環境，若混凝土硬化的外在溫度大於 20°C，則 t 要根據溫度和水泥型號校正，如 Δt_m 時間間隔，中間外在環境溫度為 $\theta(t_m)$ ，則混凝土齡期必須調整如下式：

$$t_e = \frac{k}{30} \sum_0^{t_M} \{ [\theta(t_M) + 10] D t_M \} \quad (3-10)$$

其中：

$k: 1$ 為一般慢硬化的水泥

$k: 2$ 為快速硬化的水泥

$k: 3$ 為快速硬化高強水泥

t_e ：調整混凝土齡期，故可由預估 t 獲得式(3-3)和(3-6)。

於單位應力下彈性應變加上潛變應變等於潛變公式(單位

$10^{-3}/\text{MPa}$)，以式(3-2)所示：

$$\Phi(t, t_0) = \frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\phi_{28}(t, t_0)}{E_{c28}} \quad (3-2)$$

$$E_c(t_0) = 9.5 [f_{cyl}(t_0)]^{1/3} \quad (3-11)$$

$$E_c(t_0) = E_{c28} \left(\frac{t_0}{4.2 + 0.85t_0} \right)^{1/2} \quad (3-12)$$

其中：

t ：潛變作用下之混凝土齡期

t_0 ：加載時之混凝土齡期

從式(3-2)、(3-11)和(3-12)， E_c 和 f_{cyl} 的單位為 GPa 和 MPa。 E 之獲得為加載時間 1~5 分鐘即可，若加載快速 30~60 秒時，則 E_c 更為精確。

乾縮

應變發生於 $t - t_{sh,0}$ 的期間

$$\varepsilon_{sh}(t, t_{sh,0}) = \varepsilon_{sh,0} [\beta_{sh}(t) - \beta_{sh}(t_{sh,0})] \quad (3-13)$$

其中：

$\varepsilon_{sh,0}$ ：基本乾縮係數 = $\varepsilon_{sh1} \times \varepsilon_{sh2}$ ， ε_{sh1} ：視環境而定見表 3-1， ε_{sh2} 視厚度

h_0 而定見圖 3-3(d)。

β_{sh} ：乾縮隨時間的發展，見圖 3-3(e)

t ：齡期，若非 20，則由式(3-10)修正。

$t_{sh,0}$ ：乾燥開始的齡期

3、ACI 209R-92 【20】

潛變

$$\phi(t, t_0) = \frac{(t - t_0)^{0.6}}{10 + (t - t_0)^{0.6}} \phi_{\infty}(t_0) \quad (3-14)$$

其中：

$\phi(t, t_0)$ ：潛變係數

$\phi_{\infty}(t_0)$ ：最終潛變係數

$$\phi_{\infty}(t_0) = 2.35k'_2k'_1k'_4k'_3k'_6k'_7 \quad (3-15)$$

加載齡期係數 k'_2 ：

$$k'_2 = 1.25t_0^{-0.118} \quad (\text{溼養護}) \quad (3-16)$$

$$k'_2 = 1.13t_0^{-0.095} \quad (\text{蒸氣養護})$$



外在環境相對溼度係數 k'_1 ：

$$k'_1 = 1.27 - 0.006h, (h \geq 40\%) \quad (3-17)$$

其中：

h ：相對溼度(%)

以下 2 種方法可求得構件厚度係數 k'_4 ：

(a) 平均構件厚度

平均構件厚度 $< 150\text{mm}$ ， k'_4 值見表 3-2。

平均構件厚度 $150 \sim 380\text{mm}$ ，

$$\left. \begin{aligned} k'_4 &= 1.14 - 0.00091d, & (t - t_0) < 1\text{year} \\ k'_4 &= 1.10 - 0.00067d, & (t - t_0) > 1\text{year} \end{aligned} \right\} \quad (3-18)$$

其中：

d ：構件平均厚度(mm)

(b) 體積/面積之比值($d > 380\text{mm}$)

$$k'_4 = \frac{2}{3} \left[1 + 1.13e^{-(0.0212(V/S))} \right] \quad (3-19)$$

其中：

V/S ：體積/面積之比值(mm)

考慮混凝土配比係數 k'_3 ， k'_6 ， k'_7 ：

$$k'_3 = 0.82 + 0.00264s_f \quad (3-20)$$

其中：

s_f ：新拌混凝土坍度(mm)

$$k'_6 = 0.88 + 0.0024 \frac{s}{a} \quad (3-21)$$

其中：

$\frac{s}{a}$ ：細粒料/總粒料之比值(%)

$$k'_7 = 0.46 + 0.09A \geq 1 \quad (3-22)$$

其中：

A ：空氣含量(%)

每單位應力的彈性應變加潛變量：

$$\Phi(t, t_0) = \frac{I}{E_c(t_0)} [1 + \phi(t, t_0)] \quad (3-23)$$

$$E_c(t_0) = 42.8 \times 10^{-6} [\rho^3 f_{cyl}(t_0)]^{1/2} \quad (3-24)$$

$$f_{cyl}(t_0) = \frac{t_0}{A + B t_0} f_{cyl28} \quad (3-25)$$

其中：

$\Phi(t, t_0)$ ：比潛變(10^{-3} / MPa)

$E_c(t_0)$ ：加載齡期時的 E 值(GPa)

f_{cyl28} ：28 天抗壓強度(MPa)

ρ ：混凝土密度(kg/m^3)

A 與 B ：見【表 3-3】



乾縮

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{sh}(t, t_{sh,0}) &= \frac{(t - t_{sh,0})}{35 + (t - t_{sh,0})} \varepsilon_{sh\infty} && \text{(溼養護)} \\ \varepsilon_{sh}(t, t_{sh,0}) &= \frac{(t - t_{sh,0})}{55 + (t - t_{sh,0})} \varepsilon_{sh\infty} && \text{(蒸氣養護)} \end{aligned} \right\} \quad (3-26)$$

其中：

ε_{sh} ：乾縮量(10^{-6})

$\varepsilon_{sh\infty}$ ：最終乾縮量(10^{-6})

$$\varepsilon_{sh\infty} = 780 \times 10^{-6} k'_5 k'_1 k'_4 k'_3 k'_6 k'_8 k'_7 \quad (3-27)$$

養護齡期係數 k'_5 :

溼養護的 k'_5 見表 3-4，蒸氣養護的 $k'_5 = 1$

外在環境相對溼度係數 k'_7 :

$$\left. \begin{aligned} k'_7 &= 1.40 - 0.010h, (40 \leq h \leq 80) \\ k'_7 &= 3.00 - 0.030h, (80 \leq h \leq 100) \end{aligned} \right\} \quad (3-28)$$

其中：

h : 相對溼度(%)

以下 2 種方法可求得構件厚度係數 k'_4 :

(a) 平均構件厚度

平均構件厚度 $< 150\text{mm}$ ， k'_4 值見表 3-2。

平均構件厚度 $150 \sim 380\text{mm}$ ，

$$\left. \begin{aligned} k'_4 &= 1.23 - 0.0015d, & (t - t_{sh,0}) \leq 1\text{year} \\ k'_4 &= 1.17 - 0.0015d, & (t - t_{sh,0}) > 1\text{year} \end{aligned} \right\} \quad (3-29)$$

其中：

d : 構件平均厚度(mm)

(b) 體積/表面積之比值($d > 380\text{mm}$)

$$k'_4 = 1.2e^{-0.00473(V/S)} \quad (3-30)$$

其中：

$\frac{V}{S}$: 體積/表面積之比值(mm)

考慮混凝土配比係數 k'_3 , k'_6 , k'_7 :

$$k'_3 = 0.89 + 0.00264s_f \quad (3-31)$$

其中：

s_f : 新拌混凝土坍度(mm)

$$\begin{aligned} k'_6 &= 0.30 + 0.014F, (F \leq 50) \\ k'_6 &= 0.90 + 0.002F, (F > 50) \end{aligned} \quad (3-32)$$

其中：

F : 細粒料/總粒料之比值(%)

$$k'_8 = 0.75 + 0.00061\gamma \quad (3-33)$$

其中：

γ : 水泥用量(kg/m^3)



$$k'_7 = 0.95 + 0.008A$$

(3-34)

其中：

A : 空氣含量 (%)

4、Bazant and Panula's model II 1978 【20】

潛變

最簡單的潛變乾縮預測方法，有點類似 CEB-FIP 和 ACI 方法，

總潛變視為基本潛變(basic creep)和乾燥潛變(drying creep)。

乾縮

$\varepsilon_{sh}(t, t_{sh,0})$ 為任意時間 t 的混凝土乾縮，從開始乾燥的時間 $t_{sh,0}$ 測量

$$\varepsilon_{sh}(t, t_{sh,0}) = k_I'' \varepsilon_{sh,\infty} \left[\frac{t - t_{sh,0}}{t_{(1/2)sh} + (t - t_{sh,0})} \right]^{1/2} \quad (3-35)$$

其中：

k_I'' ：依環境溼度 h 而定

$$k_I'' = 1 - 10^{-6} h^3, h \leq 98\% \quad (3-36)$$

$$k_I'' = -0.2, h = 100\%$$

最終 $\varepsilon_{sh,\infty}$ (10^{-6}) 與下列參數相關

$$\varepsilon_{sh,\infty} = 1330 - 970y \quad (3-37)$$

其中：

$$y = (390z^{-4} + 1)^{-1}$$

$$z = 0.381(f_{cyl,28})^{1/2} \left[1.25 \left(\frac{a}{\gamma} \right)^{1/2} + 0.5 \left(\frac{g}{s} \right)^2 \right] \times \left(\frac{1 + \frac{s}{\gamma}}{\frac{w}{\gamma}} \right)^{1/3} - 12 \quad (3-38)$$

其中：

z 必須大於 0，否則 z 等於 0

$\frac{a}{\gamma}$ ：總粒料與水泥量比

$\frac{g}{s}$ ：粗粒料與細粒料比

$\frac{s}{\gamma}$ ：細粒料與水泥含量比

$\frac{w}{\gamma}$ ：水灰比

(以上比值以重量表示)

在式(3-38)中，細粒料指的是粒徑<4.5mm，而其餘的為粗粒料。

$t_{(1/2)sh}$ 在式(3-35)中為乾縮根號 1/2 的時間，即在 $\varepsilon_{sh}^2 = 0.5$ 時的時間。 $t_{(1/2)sh}$

視構件尺寸及預測式如下：

$$t_{(1/2)sh} = 4 \left(k'' \frac{V}{S} \right)^2 \frac{1}{D(t_{sh,0})} \quad (3-39)$$

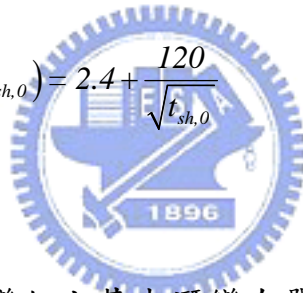
其中：

k'' ：形狀因子。版為 1.0，圓柱試體為 1.15，方柱為 1.25，球體為 1.3，立方柱為 1.55。

$\frac{V}{S}$ ：體積與表面積比

$D(t_{sh,0})$ ：乾燥發散。 $D(t_{sh,0}) = 2.4 + \frac{120}{\sqrt{t_{sh,0}}}$

基本潛變(Basic creep)



基本潛變即彈性應變加上基本潛變在單位應力下任意時間混

土加載時，其加載齡期為 t_0

$$\Phi_b(t, t_0) = \frac{1}{E'} [1 + \phi'_b(t, t_0)] \quad (3-40)$$

其中：

$\Phi_b(t, t_0)$ ：基本潛變公式(10^{-3} /MPa)，

$\phi'_b(t, t_0)$ ：基本潛變係數

$$\phi'_b(t, t_0) = B \left[(t_0)^{-m} + 0.05 \right] (t - t_0)^n \quad (3-41)$$

注意 $\phi'_b(t, t_0)$ 基於 fictitious modulus, E' ，是潛變對 $\log t$ 加載下的值。

E' ， B ， m ， n 為 28 天強度方程式：

$$\frac{1}{E'} = 0.01306 + 3.203(f_{cyl28})^{-2} (10^{-3}/\text{MPa}) \quad (3-42)$$

$$B = 0.3 + 152.2(f_{cyl28})^{-1.2} \quad (3-43)$$

$$m = 0.28 + 47.541(f_{cyl28})^{-2} \quad (3-44)$$

$$n = 0.115 + 0.183 \times 10^{-6} (f_{cyl,28})^{3.4} \quad (3-45)$$

其中：

f_{cyl28} ：28 天抗壓強度(MPa)

總潛變(total creep)

$$\Phi(t, t_0) = \varepsilon_e + \varepsilon_{basic\ creep} + \varepsilon_{drying\ creep} \quad (\text{單位 } 10^{-3}/\text{MPa})$$

$$\Phi(t, t_0) = \Phi_b(t, t_0) + \frac{\phi'_d(t, t_0, t_{sh,0})}{E'} \quad (3-46)$$

乾燥潛變係數 $\phi'_d(t, t_0, t_{sh,0})$ 由下列式子

$$\phi'_d(t, t_0, t_{sh,0}) = \bar{\beta}_d k_I''(t_0)^{-m/2} \left(1 + \frac{3t_{(1/2)sh}}{t - t_0} \right)^{-0.35} \quad (3-47)$$

$$\bar{\beta}_d = \left(1 + \frac{t_0 - t_{sh,0}}{10t_{(1/2)sh}} \right)^{-1/2} \beta_d \varepsilon_{sh, \infty} \quad (3-48)$$

$$\beta_d = 0.0056 + \frac{0.0189}{1 + 0.7r^{-1.4}} \quad (3-49)$$

$$r = 0.56 \left[\left(\frac{s}{a} \right) f_{cyl28} \right]^{0.3} \times \left(\frac{g}{s} \right)^{1.3} \left[1610 \frac{\left(\frac{w}{\gamma} \right)}{\varepsilon_{sh \infty}} \right]^{1.5} - 0.85 \quad (3-50)$$

其中：

$\frac{s}{a}$ ：細粒料與總粒料比

$\frac{w}{\gamma}$: 水灰比

若 $r > 0$ ，則 $\beta_d = 0.0056$ ，同樣在式(3-47)中， h 為相對溼度%。

$$k_I'' = 1 - 10^{-3} h^{1.5} \quad (3-51)$$

$$\phi(t, t_0) = E_c(t_0) \Phi(t, t_0) - 1 \quad (3-52)$$

總潛變係數基於 $E_c(t_0)$ 加載齡期 t_0 。

前式是用於 $t_{sh,0} > t_0$ 的總潛變公式，即當乾縮發生在加載前。此方法無法用於 $(t_{sh,0} > t_0)$ 即當乾縮發生於加載後。

Bazant 和 Panula 有進一步的解釋溫度效應和循環載重。至於預測式的精確度，他們認為使用第一個 Model，因為它含更多主要關係式自然中的複雜性。



3.2 混凝土之握裹力

鋼筋混凝土為一種複合材料，而一般載重很少直接作用於鋼筋上，所以鋼筋只有依賴其與混凝土之間的握裹力來傳遞力量，一般握裹力由下列三項抗力機構(mechanism)而得【1】【21】：

A、化學黏附力：係由水泥與水起水化作用，產生水泥膠體之化學反應其與鋼筋表面形成之黏著力稱之。當構件承受低應力時，握裹抵抗主要由化學黏附力所提供，由於此種所產生的握裹抵抗受到限制，大約在 1.37~2.06MPa(200~300psi)之間，而且當鋼筋滑動時，此種有限的抵抗隨即會消失。

B、摩擦力：鋼筋與混凝土之間因表面粗糙所產生之阻力，當黏附力喪失，而且鋼筋與混凝土之間有輕微滑動發生時，握裹力則由鋼筋粗糙表面所提供摩擦力。

C、楔形作用(Wedge Action)：作用於鋼筋突緣與混凝土所造成的互鎖效應所提供。

一般混凝土握裹應力 μ ，可由以下式子定義：以圖 3-4 說明。

$$\mu = \frac{F_{\max}}{L\pi d_b}$$

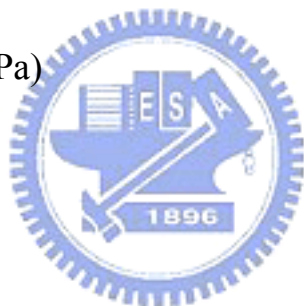
其中：

μ ：混凝土握裹應力(MPa)

F_{\max} ：最大拉力(N)

L ：鋼筋埋設深度(m)

d_b ：鋼筋直徑(m)



3.3 參考國內外文獻

3.3.1 乾縮試驗

由於 ACI 設計規範建議設計時採用多根小號鋼筋來設計【34】，理由是因為多根鋼筋可以均勻分擔力量，當鋼筋能平均受力時，就能減少混凝土裂縫的產生，因此國內外有很多文獻，在做這方面研究時都採用 ACI 的建議，可是真正應用在工程上的大型結構物上，灌漿

時就容易造成填充不均勻，結構物產生蜂窩現象，導致結構物強度與耐久性降低；根據文獻【1】的乾縮試驗內容，試體分別有埋置#3 和 #4 的鋼筋來量測乾縮量的差異性，乾縮試驗結果顯示使用#4 鋼筋的試體略小於使用#3 鋼筋的試體，如果使用大號鋼筋可以縮減乾縮量，那麼設計時就可以用少根大號鋼筋來設計，灌漿時就能避免填充不均勻與工作性不佳的情形出現，改善 ACI 建議設計時採用多根小號鋼筋所造成的施工不便，因此以此為念頭，在本研究之乾縮試驗部份，就設計試體分別埋置#4 與#7 的鋼筋來探討乾縮量的差異性，是否有助於設計上的需求。

3.3.2 潛變試驗



根據文獻【28】所提供的潛變試驗方法，潛變試驗可分為乾燥潛變試驗與基本潛變試驗兩部份，因此乾燥潛變試驗方法就參考文獻【28】所提供的方法，就是將試體在水中養護 7 天後，在將試體放置相對溼度 50%與 23°C 的環境中，等齡期達到 28 天，再施加力量以測其潛變量，由於文獻【28】所提供的基本潛變試驗方法，是使用防潮千斤頂來密封試體，以隔絕試體與空氣接觸，由於儀器上的受限，因此在本研究之基本潛變試驗部份，就採用塑膠袋來密封試體，同樣有達到隔絕試體與空氣接觸的效能，後來發現文獻【26】中的基本潛變試驗，也是用塑膠袋來密封試體，而乾燥潛變試體為未加封塑膠袋，

文獻【26】的試驗結果顯示在乾燥環境之下，含較高飛灰含量之混凝土易因水分流失，造成水化不完全以致強度折損，較長齡期飛灰之混凝土其乾縮較對彼之卜特蘭試體為低；其基本潛變量亦較卜特蘭試體為低，其乾燥潛變與乾燥狀況下之應力變形均較純卜特蘭水泥混凝土為高，因此含飛灰之混凝土具有較強之比克效應。因此也藉此來探討本研究自充填混凝土與傳統混凝土，在不同變數影響下的比克效應。



表 3-1 式 (3-9) 和式 (3-13) 的潛變和乾縮的係數【20】

外在環境	相對溼度(%)	係數對於		係數 λ
		潛變 ϕ_{ft}	乾縮 $\varepsilon_{sh1} (10^{-6})$	
水中	---	0.8	+100	30
非常潮溼	90	1.0	-130	5
室外	70	2.0	-320	1.5
非常乾燥	40	3.0	-520	1



表 3-2 構件平均厚度的潛變和乾縮的係數【20】

構件平均厚度(mm)	潛變係數 k'_4	乾縮係數 k'_4
50	1.30	1.35
75	1.17	1.25
100	1.11	1.17
125	1.04	1.08
150	1.00	1.00

表 3-3 式 (3-25) 的常數 A 與常數 B 的值【20】

水泥型號	養護條件	A	B
I	溼養護	4.00	0.85
	蒸氣養護	1.00	0.95
II	溼養護	2.30	0.92
	蒸氣養護	0.70	0.98

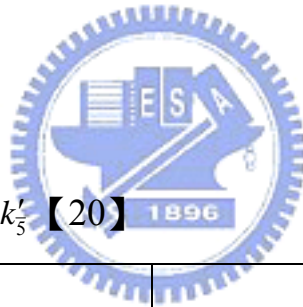


表 3-4 溼養護齡期係數 k'_5 【20】

溼養護期間	k'_5
1	1.2
3	1.1
7	1.0
14	0.93
28	0.86
90	0.75

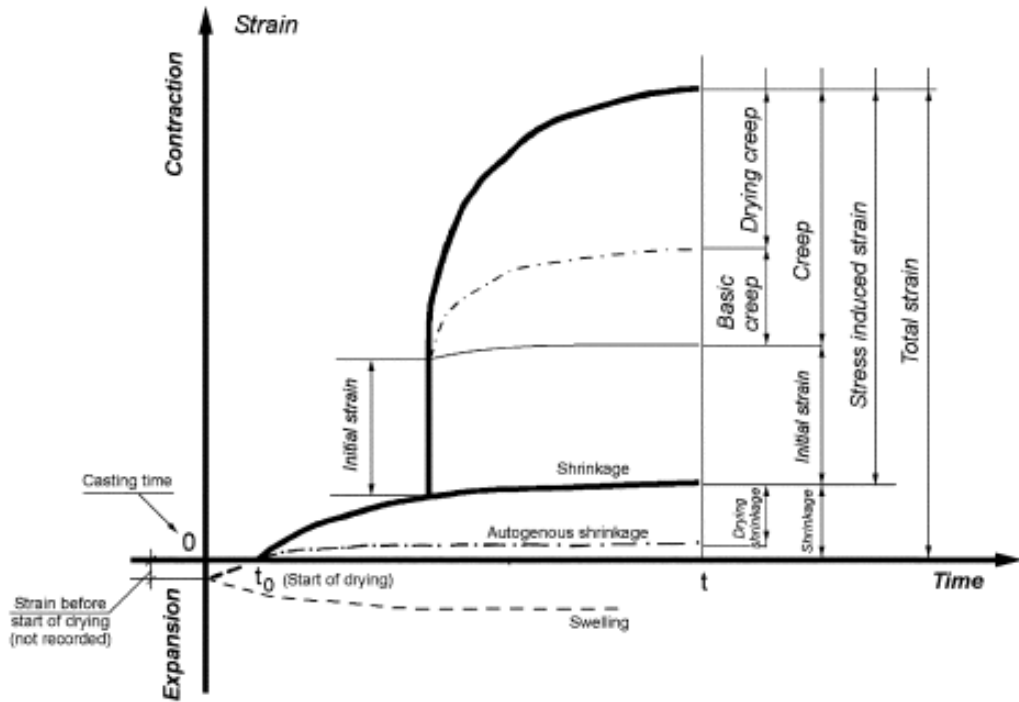


圖 3-1 混凝土潛變乾縮與總應變趨勢【16】

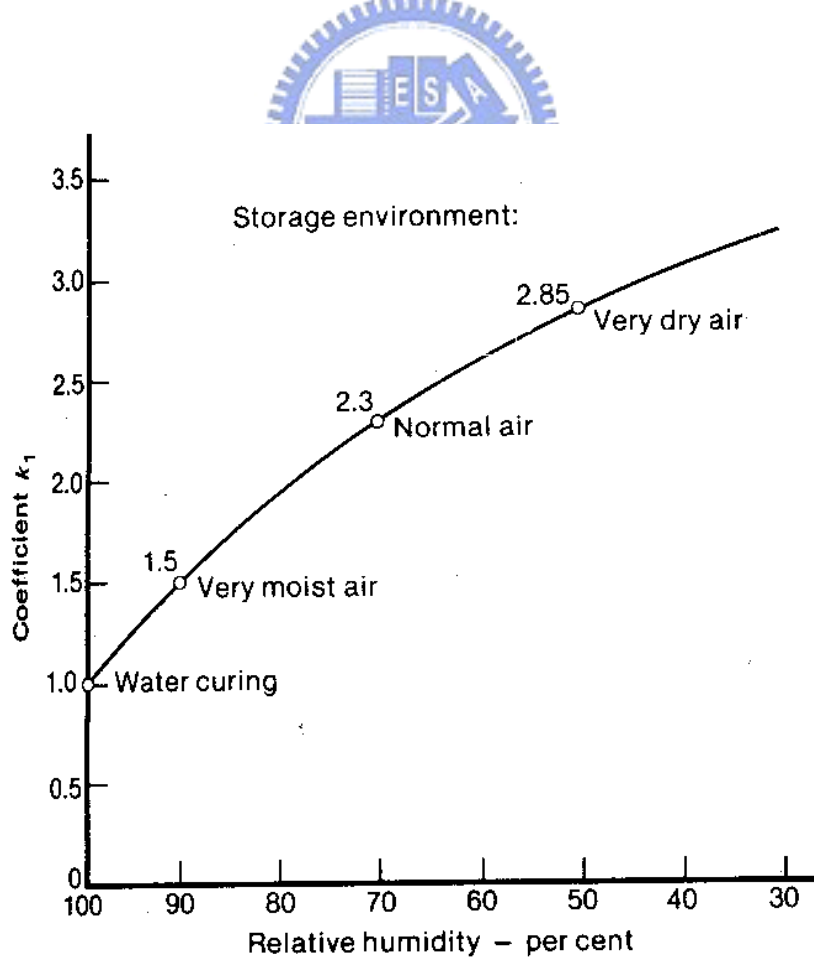


圖 3-2(a) 為 k_1 環境影響變化【20】

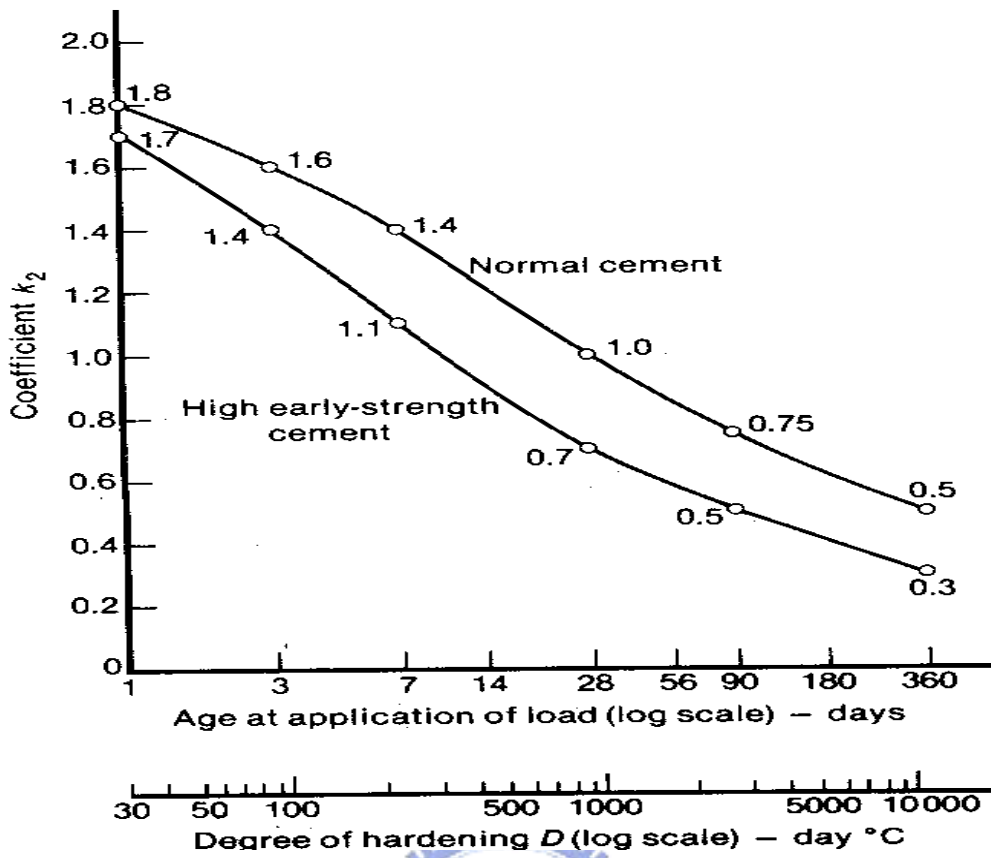


圖 3-2(b) 為 k_2 加載齡期影響變化【20】

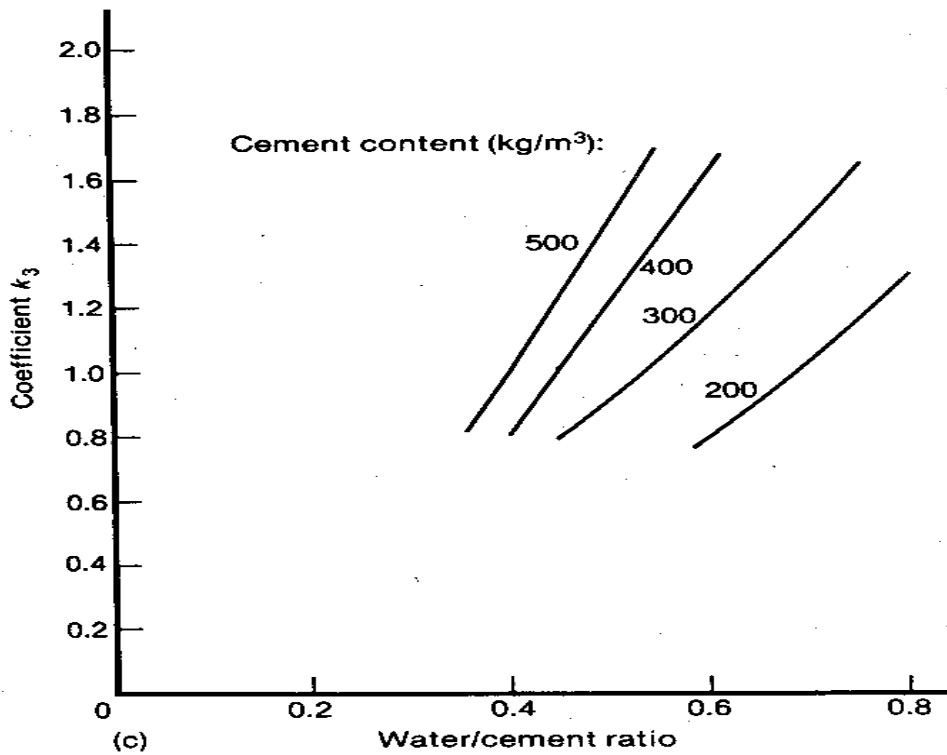


圖 3-2(c) 為 k_3 混凝土不同配比【20】

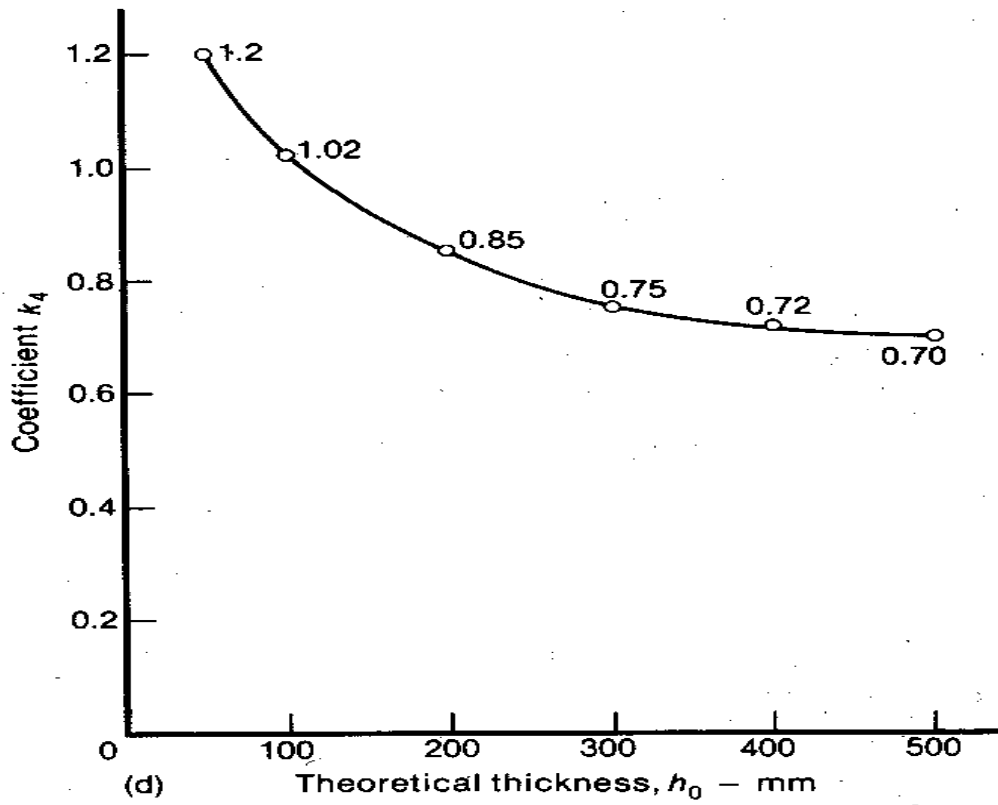


圖 3-2(d) 為 k_4 厚度的影響變化【20】

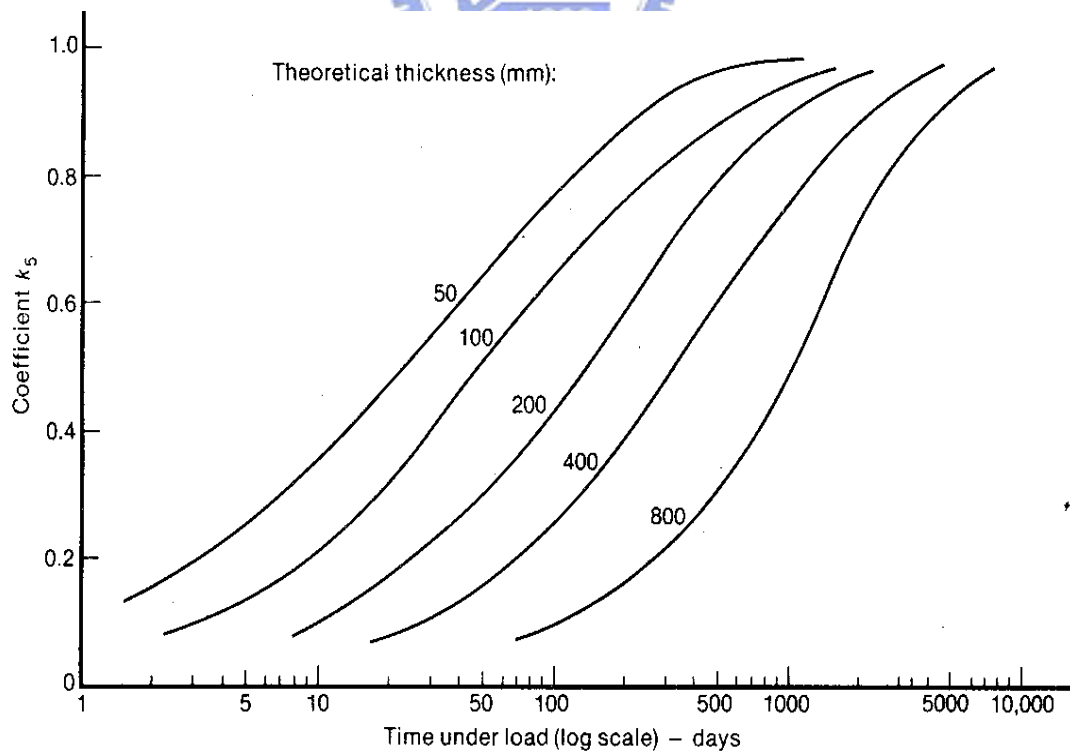


圖 3-2(e) 為 k_5 加載下的潛變發展變化【20】

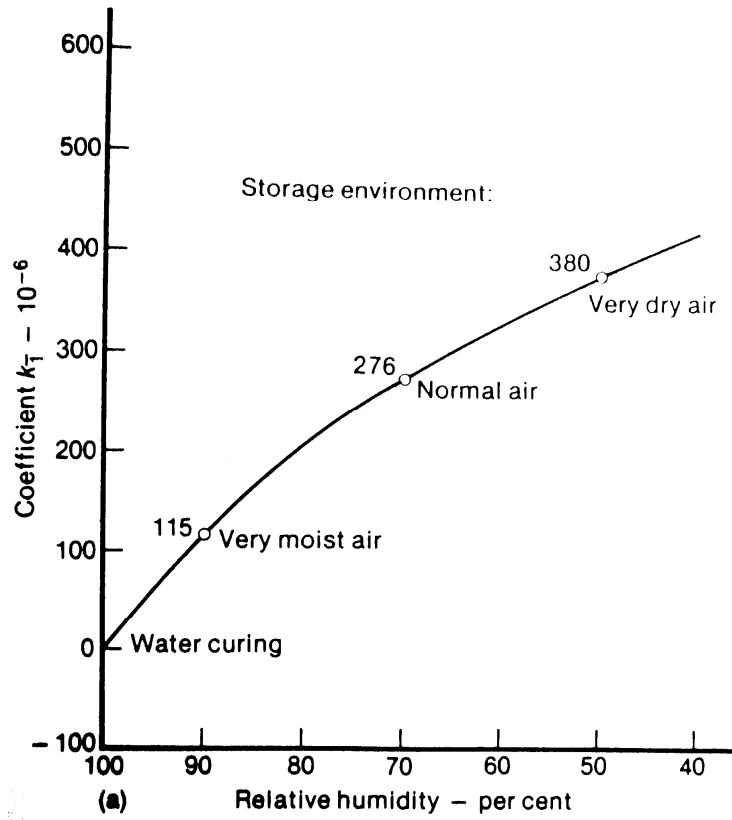


圖 3-2(f) 為 k_7 環境影響變化【20】

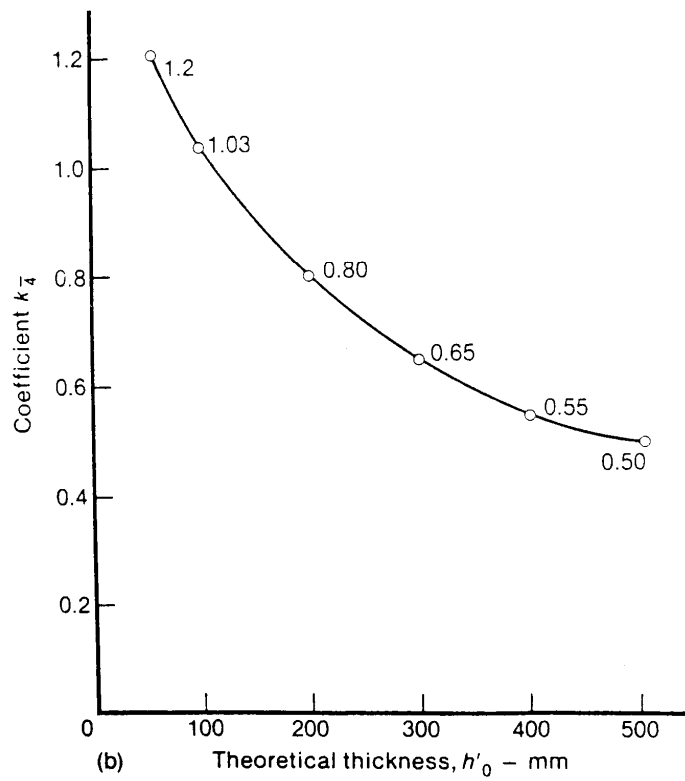


圖 3-2(g) 為 k_4 厚度的影響變化【20】

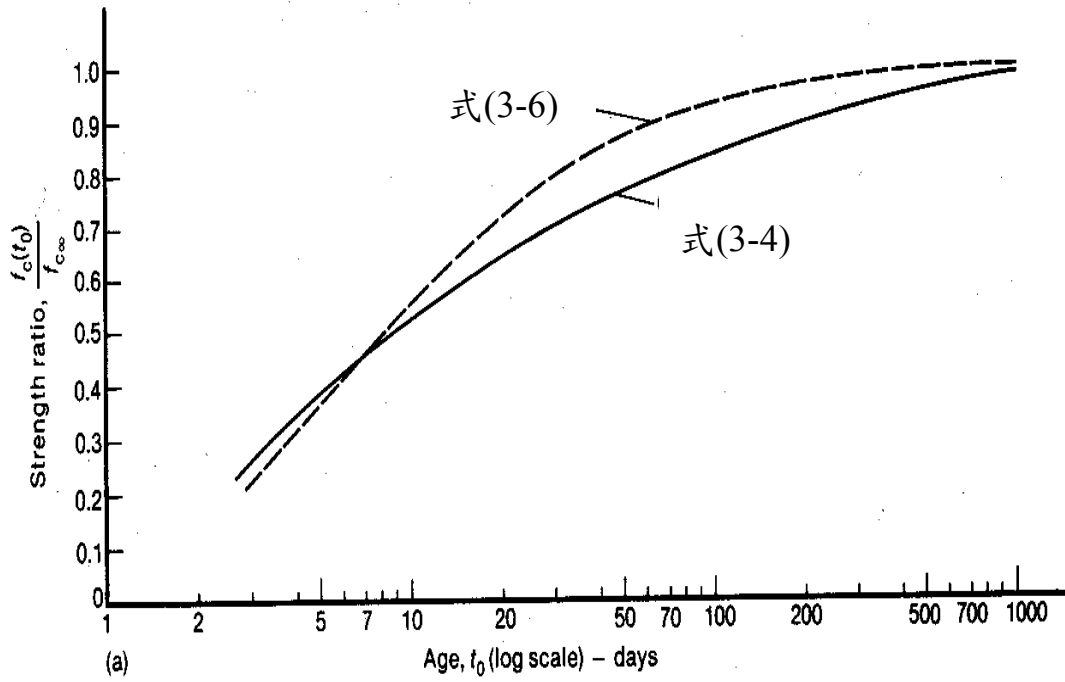


圖 3-3(a) 發展強度式(2-6)與式(2-4)之差別【20】

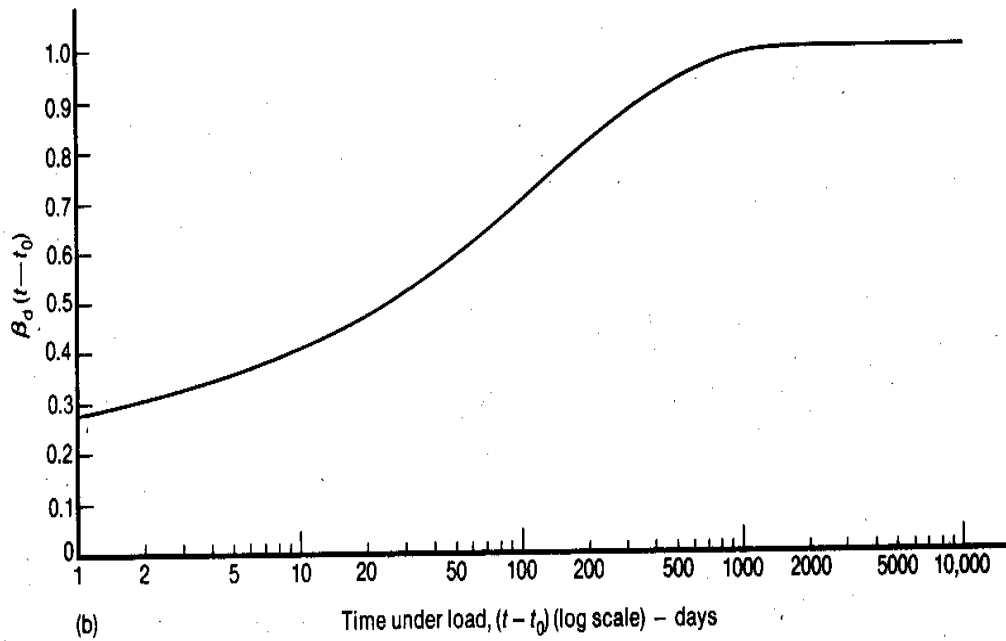


圖 3-3(b) β_d 延遲彈性發展公式【20】

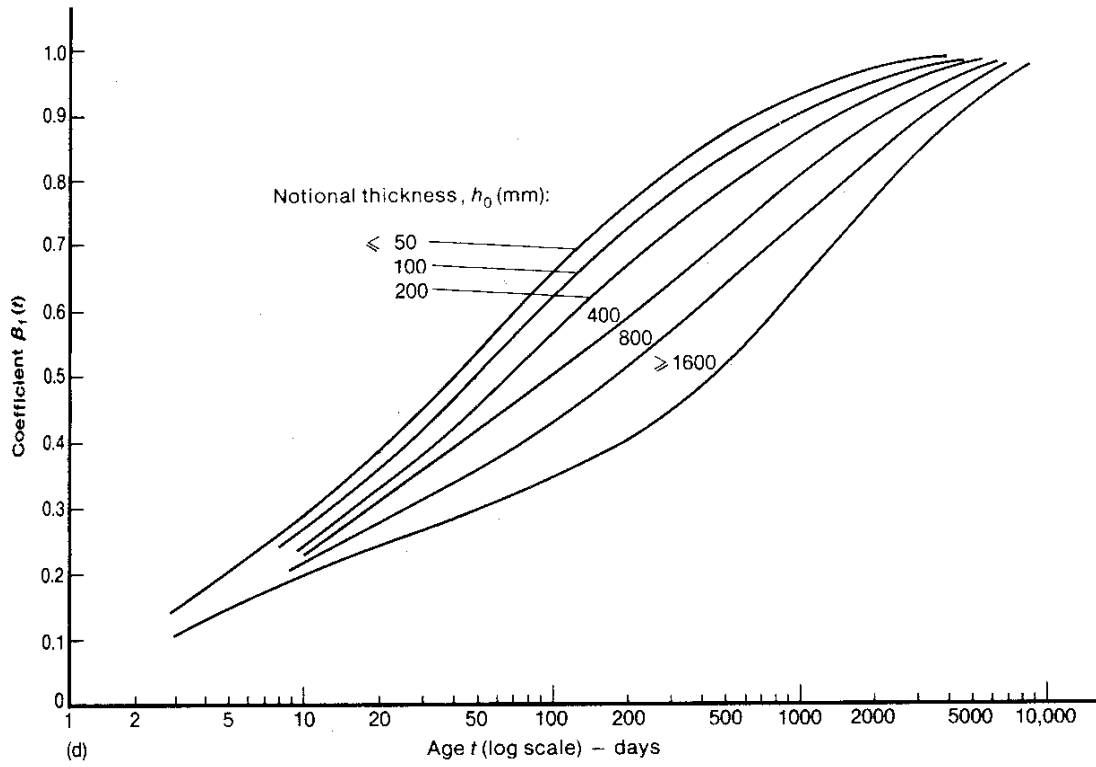


圖 3-3(c) β_f 塑性流參數【20】

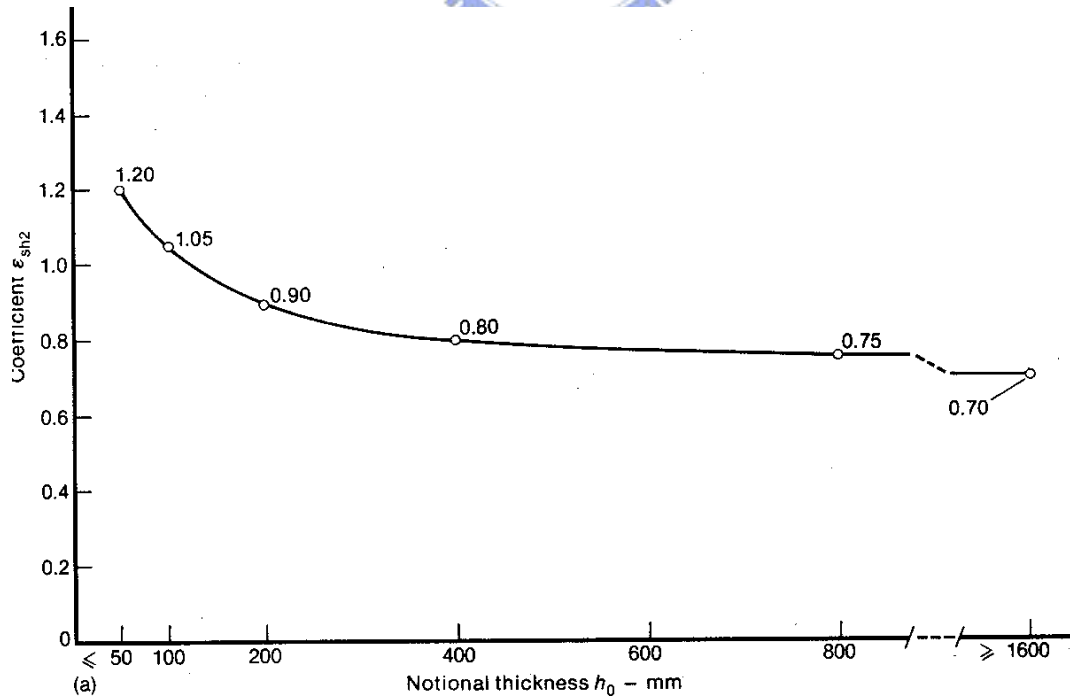


圖 3-3(d) $\epsilon_{sh,0}$ 基本乾縮係數【20】

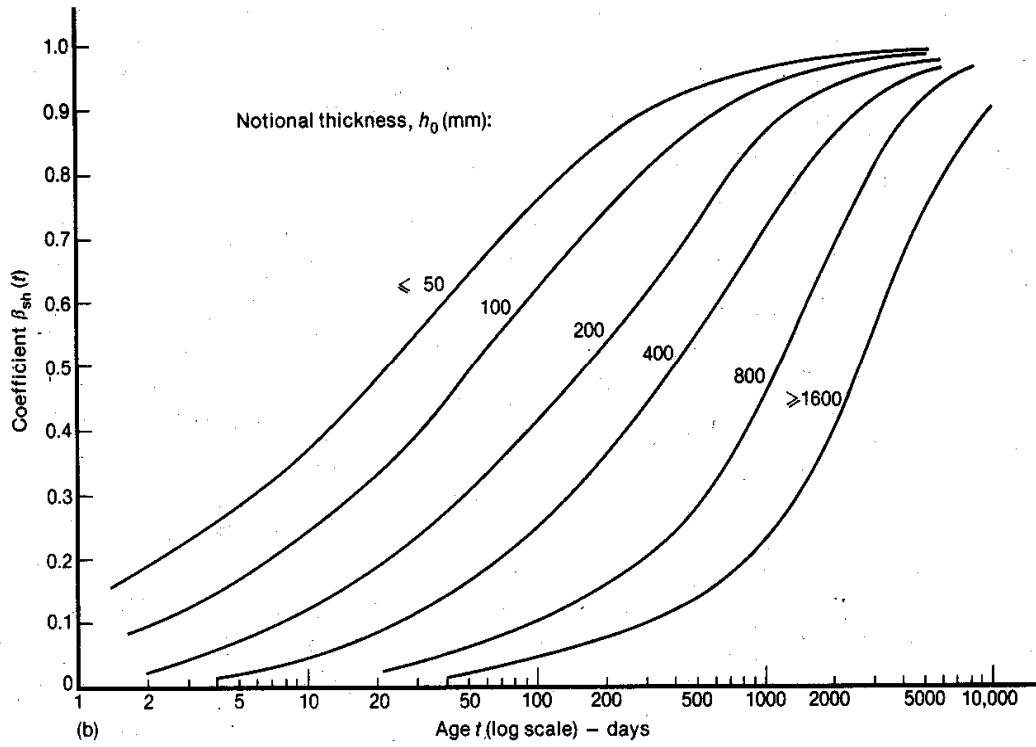


圖 3-3(e) β_{sh} 乾縮隨時間的發展數【20】

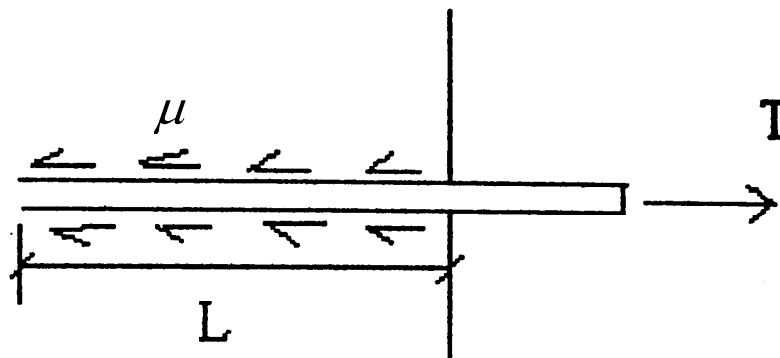


圖 3-4 鋼筋混凝土握裹力示意圖【1】

第四章 試驗計劃與內容

4.1 試驗計畫與流程

4.1.1 試驗計畫概述

首先蒐集各學者的潛變乾縮的預測模式，接著進行各變數的試驗，如分別有 4 種養護時間、不同鋼筋號數、不同種鋼筋用量等變數，搭配 2 種 SCC 配比和 2 種普通混凝土配比如表 4-1~表 4-4，利用本地的材料並持續試驗 180 天。本研究模擬乾燥環境，溫度 23°C，溼度 50% 為準，進行乾燥潛變、基本潛變與乾縮的探討。再與 ACI 209R-92 預測模式進行分析討論，最後提出建議與修正模式，期望本研究的建議公式能為工程師帶來精確又簡便的設計。



4.1.2 試驗流程

試驗流程如圖 4-1、圖 4-2 所示，主要藉由圖 4-1 所列的試驗，來了解傳統混凝土與自充填混凝土其以下結構行為：

- 1、試驗過程：分別進行混凝土的工作性，以了解兩種材料在施工上的差異性。
- 2、硬化後(長期)：由鋼筋及混凝土應變計來獲取混凝土的乾縮、潛變等結構穩定性行為和鋼筋握裹力，獲取兩種材料變形之差異性，進行比較與討論。

4.2 試驗變數

- 1、混凝土：自充填混凝土(SCC)、傳統混凝土(OPC)。
- 2、設計強度：24MPa、41MPa (3500psi、6000psi)。
- 3、鋼筋號數：#2、#3、#4、#7。
- 4、鋼筋比：0.0018、0.0036、0.0072、0.015、0.03。
- 5、養護時間：空氣養護、7天、14天、28天。

4.3 試驗試體規劃

本試驗試體規劃除純混凝土圓柱試體以外另有含鋼筋之圓柱試體，為了探討其相同鋼筋量之下，使用不同號數鋼筋之影響，分別使用#2、#3、#4、#7鋼筋，各別綁好各式不同鋼筋比之鋼筋如圖 4-3，含鋼筋混凝土潛變之鋼筋先行貼妥鋼筋應變計如圖 4-4，來進行乾縮、乾燥潛變與基本潛變試驗，了解自充填混凝土與傳統混凝土之體積穩定性，以求取鋼筋束制對於乾縮潛變之影響，主要變數及目的如表 4-5。

為了解與比較自充填混凝土與傳統混凝土之混凝土均勻性，將每種配比各做兩個試體如圖 4-5，分別量測試體其握裹力，以了解混凝土的填充均勻性。

4.4 試驗設備及材料

4.4.1 試驗設備

1、重力拌和機：

圖 4-6，最佳拌和量 20~60 公升，轉速 30 轉/分。

圖 4-7，最佳拌和量 80~180 公升，不加蓋極限拌和量 220 公升，加蓋極限拌和量 380 公升，轉速 30 轉/分。

2、坍流度試驗設備，如圖 2-2。

3、V 型漏斗流出試驗設備，如圖 2-4。

4、箱型充填試驗設備，如圖 2-6。

5、圓柱試體模，如圖 4-8。

6、乾縮試體模，如圖 4-9。

7、抗壓試驗機，如圖 4-10。

8、潛變架，如圖 4-11。

9、油壓千斤頂，如圖 4-12。

10、荷重計，如圖 4-13。

9、乾縮量測儀，如圖 4-14。

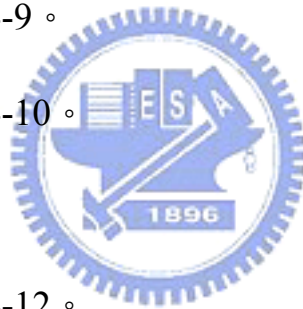
10、萬能試驗機，如圖 4-15。

13、筆記型電腦，如圖 4-16。

12、資料擷取器：用以量測鋼筋應變計與表面混凝土應變計之應變，
如圖 4-17。

4.4.2 試驗材料

1、台灣水泥公司生產之 I 型(普通)水泥。



- 2、爐石：中聯公司生產之水淬爐石，比重 2.94。
- 3、飛灰：台中興達火力發電廠生產之飛灰，比重 2.17。
- 4、碳酸鈣粉：蘭紀實業 HS-303，比重 2.7，細度 5500~6000。
- 5、粗粒料：新竹頭前溪所產之礫石，最大粒徑 20mm 如表 4-6，乾
比重 2.67、吸水率 1.07% 如表 4-7。
- 6、細粒料：
- 粗砂：新竹頭前溪所產之碎石砂，乾比重 2.65、吸水率 1.50% 如表
4-8，細度模數 3.0 如表 4-9。
- 細砂：新竹頭前溪所產之河砂，乾比重 2.65、吸水率 1.50% 如表
4-10，細度模數 1.78 如表 4-11。
- 7、強塑劑：恆美：HP-32。
- 8、拌和水：使用一般自來水。
- 9、鋼筋：採用#2、#3、#4、#7 的竹節鋼筋，品質符合 CNS 479 的規
定。
- 10、表面混凝土應變計：品牌為 TML 東京測器研究所所出之 PL-90-11
混凝土應變計，如圖 4-18。
- 11、鋼筋應變計：品牌為 TML 東京測器研究所所出之 FLA-5-11
鋼筋應變計，如圖 4-19。

4.5 試驗項目及方法

4.5.1 工作性試驗

將新拌混凝土依據 CNS14840(自充填混凝土障礙通過性試驗)、14841(自充填混凝土流下性試驗法)、14842(高流動性混凝土坍流度試驗法)進行下列測試：

- 1、障礙通過性試驗(箱型充填試驗)
- 2、流下試驗(V 型漏斗流出試驗)
- 3、坍流度試驗

4.5.2 抗壓強度試驗

依據 CNS1232(混凝土圓柱試體強度之檢測法)之規定，將圓柱試體兩端用蓋平石膏蓋平後，在齡期為 7、28、56、91 天時進行抗壓試驗。抗壓試驗機之加壓速度為 $1.41\text{kgf/cm}^2\sim 3.52\text{kgf/cm}^2$ 。

4.5.3 純混凝土乾縮試驗

依據 CNS1236(水泥砂漿及混凝土的體積變化檢驗法)規定，每組配比製作三個試體。試體為 $10\times 10\times 28\text{cm}$ 之長條矩形如圖 4-20，分別經空氣養護、養護 7 天、養護 14 天、養護 28 天，以這四種養護時間方式來量測乾縮值，並將試體置於溫度 23°C 相對溼度 50% 之環境中，依後續齡期(1~7、15、30、60、90、120、150、180 天)量測三個試體乾縮之應變量，求其數據之平均值以降低誤差。

4.5.4 含鋼筋混凝土乾縮試驗

每組配比製作 $\phi 15 \times 30$ cm 含鋼筋圓柱試體如表 4-5、圖 4-21，分別經空氣養護、養護 7 天、養護 14 天、養護 28 天，以這四種養護時間方式來量測乾縮值，每個試體於長軸方向上黏貼混凝土表面應變計，並將試體置於溫度 23°C 相對溼度 50% 之環境中，依後續齡期 (1~7、15、30、60、90、120、150、180 天) 量測乾縮之應變量。

每組配比製作 $30 \times 30 \times 60$ cm 含鋼筋之方柱試體如表 4-12、圖 4-22，並將試體置於大氣(台灣常溫環境下，以新竹為例：平均相對溼度 78%，平均氣溫最高 26°C ，最低 19°C) 之環境中，依後續齡期 (7、15、30、60、90、120、150、180 天) 量測乾縮之應變量。

4.5.5 純混凝土潛變試驗

每組配比製作 $\phi 15 \times 30$ cm 圓柱試體，乾燥潛變與基本潛變的試體經溼養護 7 天後，每個試體於長軸方向上黏貼混凝土表面應變計，將基本潛變試體加封三層塑膠袋以隔絕試體與空氣接觸，乾燥潛變的試體就不必加封塑膠袋如，再將乾燥潛變與基本潛變的試體移置溫度 23°C 相對溼度 50% 之環境中，等 28 天後進行試體架設如圖 4-23。然後推疊上彈簧基座潛變架上並施加預力，而所加載荷重為 $0.4 f'_c$ 之應力，並量測後續齡期 (1、7、14、21、28、42、56、70、84、112、140、168、180 天) 潛變之應變量。

4.5.6 含鋼筋混凝土潛變試驗

每組配比製作 $\phi 15 \times 30$ cm 含鋼筋圓柱試體如表 4-5，乾燥潛變與基本潛變的試體經溼養護 7 天後，每個試體於長軸方向上黏貼混凝土表面混凝土應變計，將基本潛變的試體加封三層塑膠袋以隔絕試體與空氣接觸如圖 4-24，乾燥潛變的試體就不必加封塑膠袋如圖 4-25，再將乾燥潛變與基本潛變的試體移置溫度 23°C 相對溼度 50% 之環境中，等 28 天後進行試體架設如圖 4-26。然後推疊上彈簧基座潛變架上並施加預力，而所加載荷重為 $0.4 f'_c$ 之應力，並量測後續齡期(1、7、14、21、28、42、56、70、84、112、140、168、180 天) 潛變之應變量。



4.5.7 握裹力試驗

以 CNS11152 之拉拔試驗來測定，其試體為 $\phi 15 \times 30$ cm 的混凝土其中埋入 D19 (#6) 竹節鋼筋如圖 4-5，試體連同已安置的鋼筋混凝土使用常用的方法澆置、搗實及養護，等待試體齡期達 28 天後，以不超過 22KN/min 的速率對鋼筋施拉，以量測混凝土之握裹力量。

表 4-1 自充填混凝土高強度試驗配比

設計強度 MPa(psi)		41(6000)
用水量(kg)		168
水泥(kg)		336
爐石粉(kg)		168
飛灰(kg)		56
粗粒料(kg)		780
細粒料(kg)	粗砂	423.85
	細砂	423.85
強塑劑(kg)		5.60



表 4-2 傳統混凝土高強度試驗配比

設計強度 MPa(psi)		41(6000)
用水量(kg)		151.80
水泥(kg)		500
粗粒料(kg)	1cm	592.40
	2cm	318.98
細粒料(kg)	粗砂	796.61
	細砂	0

表 4-3 自充填混凝土低強度試驗配比

設計強度 MPa(psi)		24(3500)
用水量(kg)		185
水泥(kg)		172
爐石粉(kg)		59
飛灰(kg)		99
碳酸鈣粉 (kg)		123
粗粒料(kg)		744
細粒料(kg)	粗砂	511.50
	細砂	511.50
強塑劑(kg)		2.97

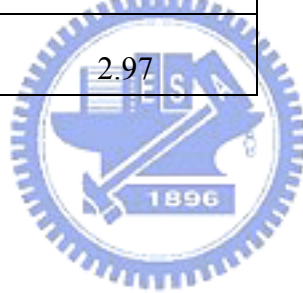


表 4-4 傳統混凝土低強度試驗配比

設計強度 MPa(psi)		24(3500)
用水量(kg)		180
水泥(kg)		300
粗粒料(kg)	1cm	651.05
	2cm	350.57
細粒料(kg)	粗砂	843.60
	細砂	0

表 4-5 圓柱試體之乾縮、潛變變數及目的

試驗內容	試驗變數			目的
圓柱試體 鋼筋比：0.0018 (SCC、OPC)	未加載	1-#2	乾縮	1、比較同鋼筋比之下 OPC 與 SCC 乾縮。
圓柱試體 鋼筋比：0.0036 (SCC、OPC)	未加載	1-#3	乾縮	1、比較同鋼筋比之下 OPC 與 SCC 乾縮。
圓柱試體 鋼筋比：0.0072 (SCC、OPC)	未加載	1-#4	乾縮	1、比較同鋼筋比之下 OPC 與 SCC 乾縮。
圓柱試體 鋼筋比：0.015 (SCC、OPC)	未加載	2-#4	乾縮	1、比較同鋼筋比之下 OPC 與 SCC 乾縮與潛變。 2、比較鋼筋束制乾縮、潛變能力。 3、不同鋼筋號數之影響。
		1-#7		
	加載	2-#4	潛變	
		1-#7		
圓柱試體 鋼筋比：0.03 (SCC、OPC)	未加載	4-#4	乾縮	1、比較同鋼筋比之下 OPC 與 SCC 乾縮與潛變。 2、比較鋼筋束制乾縮、潛變能力。 3、不同鋼筋號數之影響。
		2-#7		
	加載	4-#4	潛變	
		2-#7		

注：ACI 設計規範限制版的最小溫度鋼筋比為 0.0018 與梁的最大鋼筋比為 0.025。

表 4-6 粗粒料粒徑分佈試驗結果

篩	篩重(g)	總重(g)	留篩(g)	留篩(%)	過篩(%)
3/2	6808	6808	0	0	100
1	6522	6522	0	0	100
3/4	6517	6517	0	0	100
1/2	6968	8348	1380	19.30	80.7
3/8	6874	9140	2266	31.69	49.0
#4	9370	12173	2803	39.20	9.8
底盤	6808	7509	701	9.8	
			7150	最大粒徑 20mm	



表 4-7 粗粒料吸水率、比重試驗結果

粗粒料吸水率、比重				
乾燥(g)	SDD	體重	吸水率(%)	比重
2028.3	2050	780.7	0.0107	2.672
2028.3	2050	780.4	0.0107	2.668
2028.3	2050	780.0	0.0107	2.670
		平均	1.07%	2.67

表 4-8 粗砂吸水率、比重試驗結果

粗砂吸水率、比重				
乾燥(g)	SDD	體重	吸水率(%)	比重
200	202.9	75.5	0.0145	2.649
200	203.0	75.5	0.0150	2.649
200	203.2	75.4	0.0160	2.653
200	203.0	75.4	0.0150	2.653
200	202.9	75.5	0.0145	2.649
		平均	1.50%	2.650

表 4-9 粗砂粒徑分佈試驗結果

粗砂粒徑分佈試驗結果						
篩	篩重(g)	留篩重(g)	留篩%	累計%	累計%	累計%
#4	418	16	1.75	1.75	1.77	1.55
#8	338	217	23.72	25.47	21.37	20.31
#16	296	188	20.55	46.02	40.45	38.07
#30	288	170	18.58	64.60	59.74	56.47
#50	298	187	20.44	85.04	81.74	77.42
#100	275	96	10.49	95.53	94.25	89.53
底盤	323	41	4.48	100	100	100
				418.41	399.32	383.35
				3.18	2.99	2.83
平均 F.M.=3						

表 4-10 細砂吸水率、比重試驗結果

細砂吸水率、比重				
乾燥(g)	SDD	體重	吸水率(%)	比重
300	304.5	113.1	0.0150	2.653
300	304.5	113.2	0.0150	2.650
300	304.5	113.0	0.0150	2.655
300	304.7	113.4	0.0157	2.646
300	304.3	113.3	0.0143	2.648
		平均	1.50%	2.650

表 4-11 細砂粒徑分佈試驗結果

細砂粒徑分佈試驗結果						
篩	篩重(g)	留篩重(g)	留篩%	累計%	累計%	累計%
#4	418	1	0.12	0.12	0.32	0
#8	338	8	0.94	1.06	1.12	0.89
#16	296	31	3.64	4.70	4.72	4.54
#30	288	142	16.69	21.39	21.59	22.70
#50	298	304	35.72	57.11	61.69	54.67
#100	275	262	30.79	87.90	90.10	90.14
底盤	323	103	12.10	100	100	100
				272.28	279.54	282.94
				1.72	1.8	1.83
平均 F.M.=1.78						

表 4-12 方柱試體之乾縮變數

試驗內容	試驗變數		
方柱試體 鋼筋比：0.015 (SCC、OPC)	未加載	12-#4	乾縮試驗
		4-#7	
方柱試體 鋼筋比：0.03 (SCC、OPC)	未加載	24-#4	乾縮試驗
		8-#7	



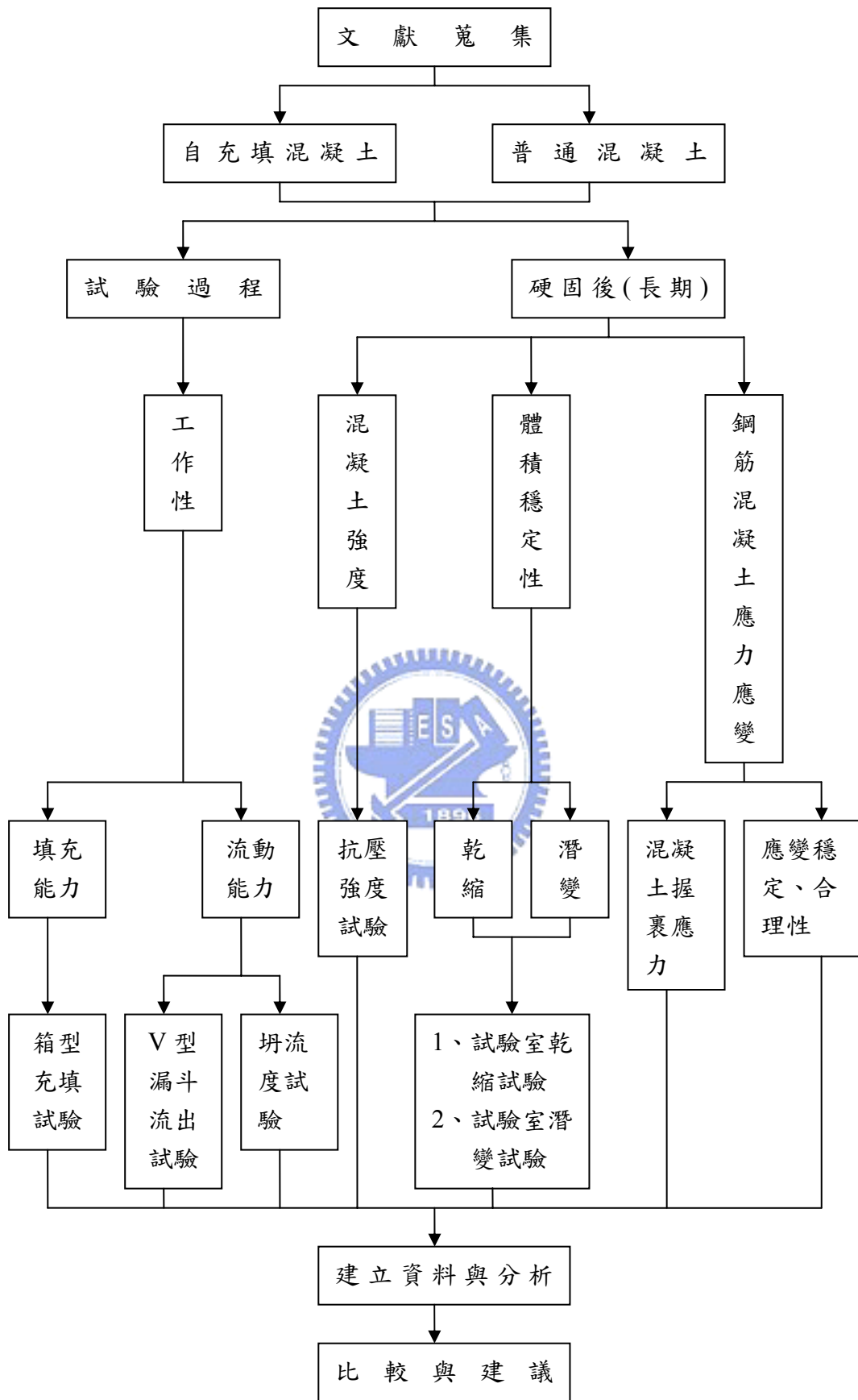


圖 4-1 試驗計畫

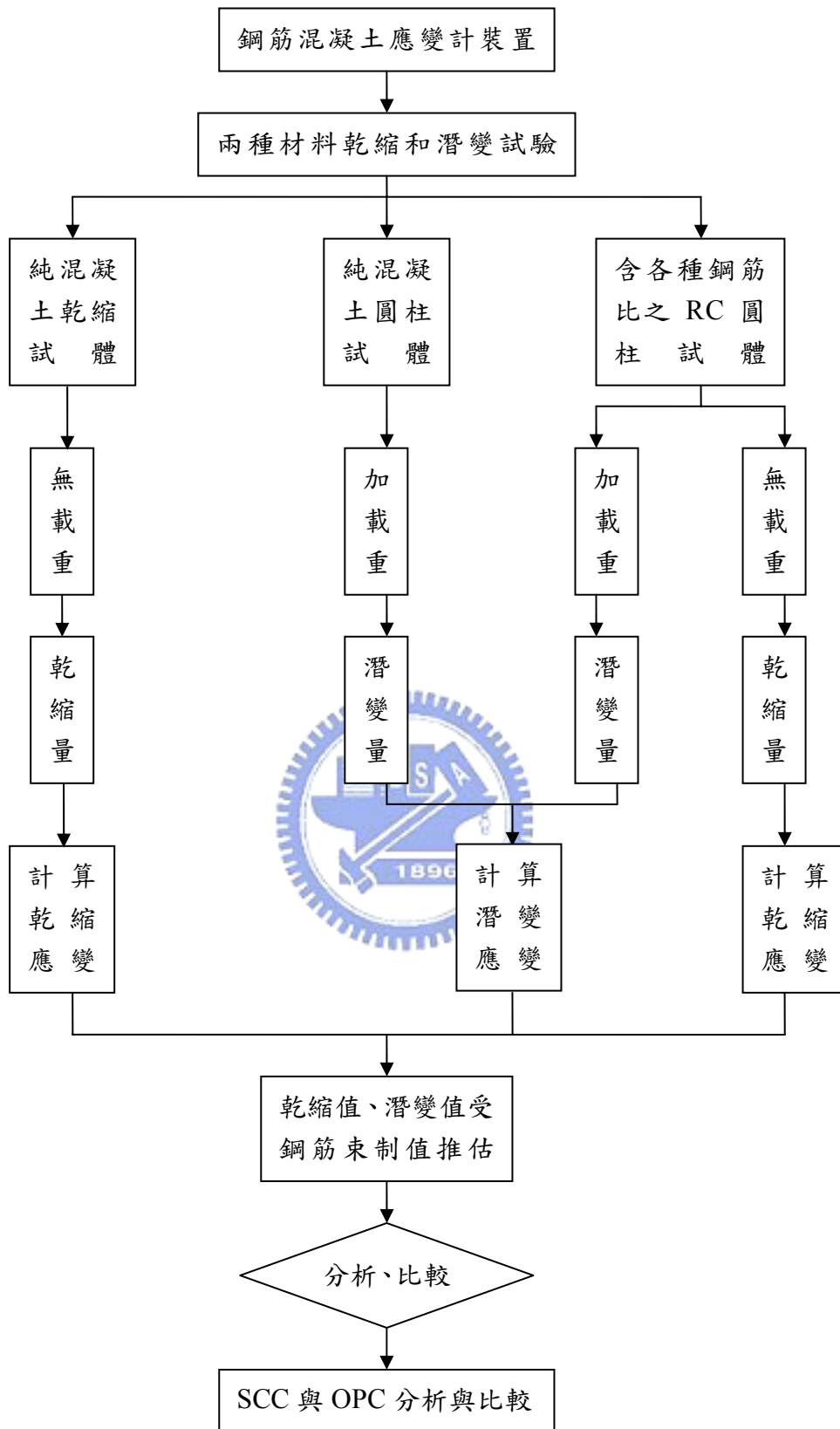


圖 4-2 體積穩定性分析步驟



圖 4-3 各式不同鋼筋比之鋼筋



圖 4-4 鋼筋應變計



圖 4-5 混凝土握裹力試驗試體



圖 4-6 小型重力式拌和機



圖 4-7 大型重力式拌和機



圖 4-8 圓柱試體模



圖 4-9 乾縮試體模



圖 4-10 抗壓試驗機



圖 4-11 潛變架



圖 4-12 油壓千斤頂



圖 4-13 荷重計



圖 4-14 乾縮量測儀



圖 4-15 萬能試驗機

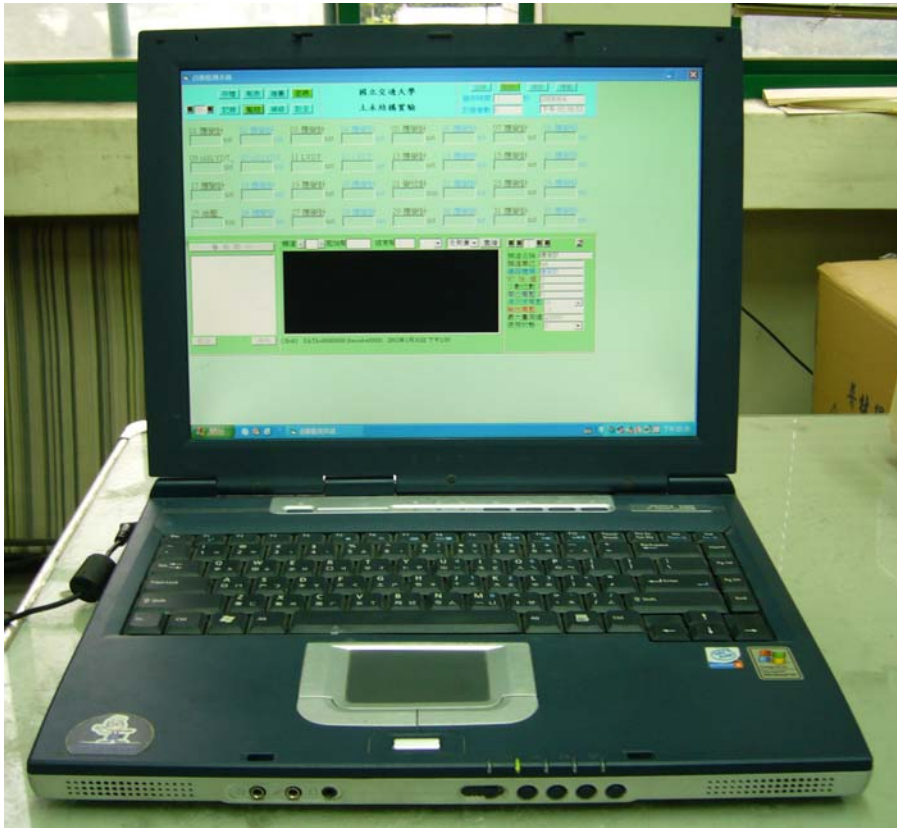


圖 4-16 筆記型電腦

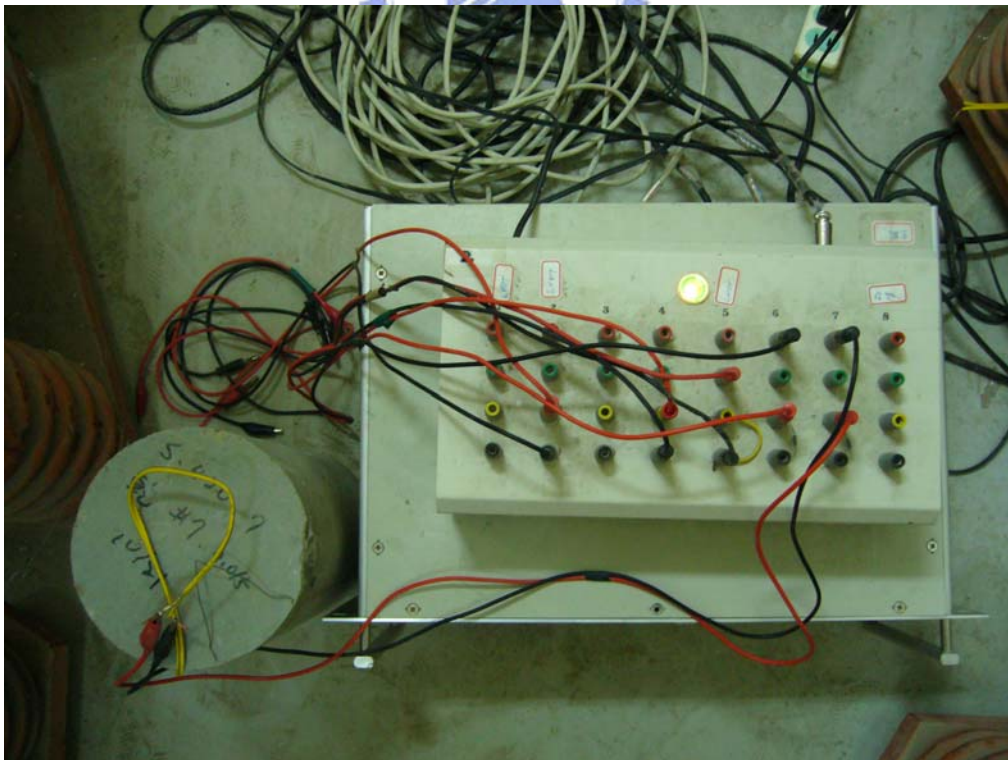


圖 4-17 資料擷取器



圖 4-18 混凝土應變

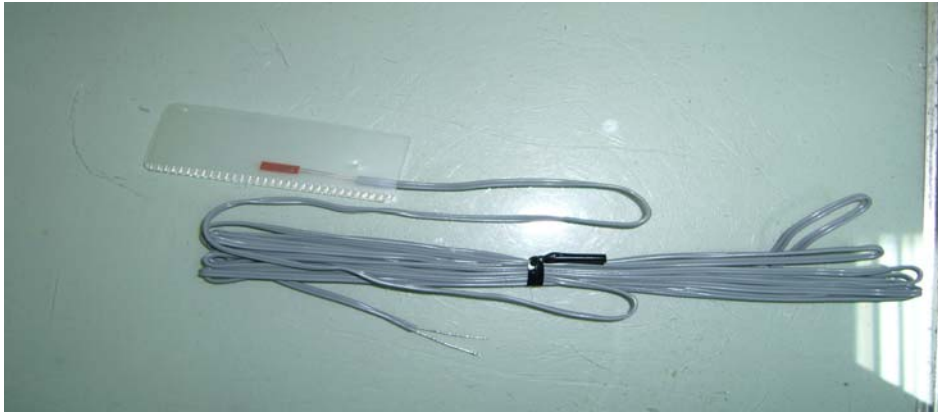


圖 4-19 鋼筋應變計

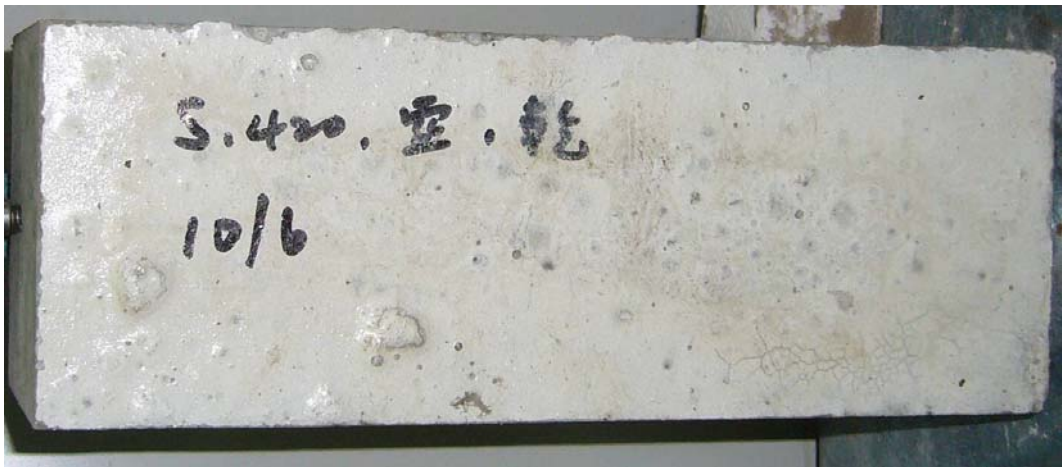


圖 4-20 純混凝土乾縮



圖 4-21 含鋼筋圓柱試



圖 4-22 方柱試體



圖 4-23 純混凝土潛變試體架設



圖 4-24 基本潛變試體



圖 4-25 乾燥潛變試體



圖 4-26 含鋼筋混凝土潛變試體架設

第五章 試驗結果與討論

5.1 強度對乾縮潛變之影響

以四組配比製作純混凝土與含鋼筋混凝土的乾縮跟潛變試體進行試驗，乾縮試驗試體為在水中養護 7 天後，置於相對溼度 50% 及溫度 23°C 之環境中，試驗所得之數據如表 5-1~表 5-6，其圖型繪於圖 5-1~圖 5-10，由圖中可以發現，無論是自充填混凝土或是傳統混凝土，強度愈高乾縮量就愈小，代表著用水量愈少乾縮量就會愈小。

潛變試體於澆置後在水中養護 7 天，置於相對溼度 50% 及溫度 23°C 之環境中至 28 天，再行加壓 $0.4 f'_c$ 。試驗所得之數據如表 5-7~表 5-13，利用潛變應變量比上加載應力可得比潛變量($10^{-6}/\text{MPa}$)如表 5-14~表 5-18，從數據中可以發現與 ACI 209R-92 的估計有所出入，主要是因為美國與台灣的材料性質有所不同，譬如美國粒料的 E 值大於台灣，所以 ACI 所計算出來的潛變量會小於本試驗所量測到的潛變量。由圖 5-11~圖 5-20 中也可以看出，無論是自充填混凝土或者是傳統混凝土，強度愈高潛變量就愈小，因此乾縮潛變與用水量及 w/b 的高低有極大的相關性。

5.2 混凝土材料對乾縮潛變之影響

以純混凝土的情形下，來探討不同混凝土材料的差異，試驗數據如表 5-2、表 5-9，其圖型繪於圖 5-21、圖 5-22，可以看出在乾

縮跟潛變自充填混凝土都來的略大，尤其是在高強度的部分較明顯。

此現象分別以粉體用量與粗粒料粒徑大小來說明：

1、為了使自充填混凝土能有良好的填充能力，所以要增加混凝土的

稠度(黏度)，因此粉體用量就會大於傳統混凝土，在水化反應時

就產生較高的熱量，使得內外溫差有差異而容易造成微小裂縫。

2、在粗粒料粒徑大小部分，傳統混凝土的粗粒料粒徑有使用到 2cm，

而自充填混凝土要求障礙通過性試驗 (R1 障礙)，所以粗粒料的

粒徑就不能採用 2cm 的石頭，因此自充填混凝土純乾縮與純潛變

就會略大於傳統混凝土。

以含鋼筋混凝土的情形下，來探討不同混凝土材料的差異，試驗所量測的數據如表 5-3~表 5-6、表 5-10~表 5-13，其圖型繪於圖

5-23~圖 5-30，雖然有些還是自充填混凝土來的略大，因為有埋置了

鋼筋，看出自充填混凝土有明顯的降低，縮短與傳統混凝土乾縮上的

差異，像純混凝土的自充填混凝土與傳統混凝土之乾縮差值為

34.6E-6，而埋置了#4、#7 鋼筋差值分別為 18.9E-6 與 9.3E-6。

5.3 鋼筋用量對乾縮潛變之影響

將各種鋼筋用量如表 4-5，製作成圓柱試體來觀察乾縮與潛變的差異，試驗數據如表 5-3~表 5-6、表 5-10~表 5-13，無論是乾縮或潛變，鋼筋用量愈多能有效的降低乾縮量和潛變量如圖 5-31~圖

5-38，由於鋼筋本身不會乾縮，限制了乾縮上的發展，所以鋼筋用量愈大乾縮和潛變就會愈小。

5.4 鋼筋號數對乾縮潛變之影響


在乾縮部份用了4種鋼筋號數而在潛變部份用了2種鋼筋號數如表 4-5，來探討在相同的鋼筋用量而使用不同鋼筋號數對乾縮潛變之影響，試驗數據如表 5-10~表 5-13、表 5-19~表 5-37，其圖型繪於圖 5-39~圖 5-58，從數據中可以比較出，使用了大號數的鋼筋能縮短自充填混凝土跟傳統混凝土之乾縮與潛變的差距，而且不管是自充填混凝土或是傳統混凝土都是在相同鋼筋用量但鋼筋號數較小的試體，乾縮量和潛變量都較大，此現象由以下兩點來說明：

- 1、因為在圓柱試體中以一支鋼筋所能抵抗乾縮變形的範圍，以4號和7號鋼筋來探討，而鋼筋應變是由混凝土乾縮使得鋼筋縮短造成的，在一隻鋼筋所涵蓋的混凝土面積來說，在相同的面積下，較大號數的鋼筋所能抵抗縮短較大變形較小。
- 2、使用了鋼筋後乾縮量與潛變量有明顯的降低，使其乾縮量及潛變量轉給鋼筋來承受，就以4號和7號鋼筋來探討，因為7號鋼筋所能承受較大的應力，因此使用鋼筋號數較大的試體，乾縮量與潛變量就會較小。

5.5 養護時間對乾縮之影響

本乾縮試驗，分別以四種養護齡期來做比較，試驗數據如表 5-38~表 5-45，從數據中可以發現，其乾縮應變量與 ACI 209R-92 所估計的相近，並沒有較大的差異。養護時間愈長所量測的乾縮量愈小，由於水泥水化需要有足夠的水分，養護時間的長短將影響水化作用的進行，這將造成強度間的差距。養護時間不足的情形下，水泥漿減緩甚至停止水化作用，致使混凝土強度低落，導致混凝土的乾縮量因此而增大。

5.6 比克效應



在溫度 23°C 及相對溼度 50% 的環境中進行潛變試驗隨時間增加所量得之變形行為稱為乾燥室總變形(total deformation)。乾燥室的潛變行為極為複雜，他是混凝土的乾縮變形與荷載下變形的耦合效應(coupling effect)。便於現象分析，通常將其分為彈性變形、乾縮、基本潛變與乾燥潛變四種變形量組成，其中乾燥潛變反應出一種極為重要的材料性質，稱為比克效應(Pickett effect)【26】。

由潛變試驗所量測到的乾燥潛變與基本潛變數據如表 5-9~表 5-13、表 5-46~表 5-50，再搭配乾縮試驗的數據如表 5-2~表 5-6，由於比克效應=乾燥潛變量-基本潛變量-乾縮量，經由計算後可得本潛變試驗的比克效應如表 5-51~表 5-55，由圖 5-59~圖 5-63 中很明

顯的看出自充填混凝土比克效應來的較高。

自充填混凝土有著較高比克效應可由下面幾種原因來說明：

- 1、從 Bazant 與 Chern 之理論解釋【31】，該理論所依據之微觀機構乃在混凝土於承受應力之狀況，當期受外界環境低溼度影響而產生暫態溼度變化時，因大孔隙(毛細孔隙，capillary pores)與小孔隙(膠體孔隙，gel pores)間之水流交換速率變化而造成孔隙膠體結構產生鍵結破壞(bond rupture)而導致混凝土巨觀體積之變化，此微觀機構並可由熱力學推導出潛變黏滯係數(viscosity)與大小孔隙之間之水流交換(micro flux)之關係，並進而解釋比克效應。自充填混凝土與傳統混凝土相異，其水化機理包括卜特蘭水泥與卜作嵐材料的水化作用，由於後者反應時間較慢，以致在膠體結構內水分(即層間水與化學鍵水，interlayered water and chemically bonded water)與卜作嵐材料作用較慢。當其承受暫態溼度變化時，大孔隙與小孔隙間的水分較易流動，造成明顯水流速率增加而破壞了形成尚未完整的膠體而導致較強之比克效應。
- 2、一般之潛變試驗之荷載選擇皆以 28 天齡期強度試體之 40% 以下之荷重進行加載，在固定之荷載與 28 天齡期強度之比值下，混凝土之水泥砂漿承受該應力而產生潛變。水泥漿體應力之大小實又與其承載之有效面積，即由完整堅實之 C-S-H 膠體結構所組成。因混凝土喪失水份，導致膠體形成較慢，造成混凝土強度降低而

易因乾縮而產生裂縫，均造成承載有效面積相對的減少。承載有效面積之減少如圖 5-64，則使水泥漿體之平均壓應力增加，從而增加其潛變量。這亦為自充填混凝土在乾燥環境下，乾燥潛變大於傳統混凝土之原因【26】。

- 3、因為基本潛變試體有用塑膠袋隔絕與空氣的接觸，因此使得自充填混凝土的孔隙膠體結構能完整形成，當進行 28 天齡期強度試體之 40% 以下之荷重加載時，自充填混凝土的孔隙膠體結構足夠承受大小孔隙之間水流速率的衝擊，而且自充填混凝土比傳統混凝土還要緻密，因此自充填混凝土孔隙膠體內的水份，不會因為荷重的加載而造成孔隙內的水份被擠出，所以自充填混凝土的基本潛變小於傳統混凝土。



5.7 握裹應力

將兩種混凝土各兩個試體平均後數據繪圖於圖 5-65，將其量測到的握裹應力除以 $\sqrt{f'_c}$ 得到兩種混凝土與 $\sqrt{f'_c}$ 的比值如表 5-56，由數據可知自充填混凝土握裹應力比傳統混凝土來的大，表示自充填混凝土有充填密實與材質均勻的特性，因此在相同外力下，自充填混凝土與鋼筋有優越的握裹能力。

5.8 方柱試體之乾縮

探討乾縮與試體尺寸的關係性，因此把原本的圓柱試體放大一

倍，所以方柱試體尺寸為 30×30×60 cm，試驗數據如表 5-57~表 5-64，再與變數相同的圓柱試體乾縮量如表 5-3~表 5-6 相比較，由數據可以發現乾縮量不會因為試體尺寸變大而變大，反而因為方柱試體的表面積/體積(S/V)比圓柱試體來的大，方柱試體內的水分不易流失，所以不論是自充填混凝土或是傳統混凝土的乾縮都來的較小。

5.9 迴歸分析

將本試驗的乾縮與潛變數據進行迴歸分析，由試驗數據配合試驗變數找出乾縮與潛變相關之函數式。表 5-65 是各預測公式的對照與各係數的代表意義，利用 3.1.5 節各種預測公式與本研究迴歸的函數式分別去計算乾縮與潛變值如表 5-66、表 5-67，可看出本研究所得的函數式比其它的方法還要準確的預測出乾縮量與潛變量，原因可能是 CEB-FIP (1970)與 CEB-FIP (1978)的預測公式，當時是從傳統混凝土的乾縮與潛變量推導求出，因此 CEB-FIP (1970)及 CEB-FIP (1978)所預測出來的數值才會與本研究自充填混凝土的乾縮與潛變值有很大差異，迴歸分析所求得分別如下列純混凝土與含鋼筋混凝土之乾縮函數與潛變函數：

純混凝土乾縮之函數式：

$$\varepsilon_{\text{shrinkage}} = 3.59 \times 10^{-4} \left(k_1^{0.271} k_2^{-0.128} k_3^{-0.101} k_4^{0.420} \right)$$

含鋼筋混凝土乾縮之函數式：

$$\varepsilon_{\text{shrinkage}} = 1.49 \times 10^{-4} \left(k_1^{0.380} k_2^{-0.135} k_3^{-0.105} k_4^{0.506} k_5^{-0.116} \right)$$

其中：

k_1 ：水膠比

k_2 ：粗粒料含量(粒徑 1cm)(kg/m³)

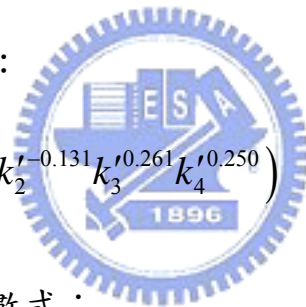
k_3 ：養護齡期(day)

k_4 ：乾縮發展時間(day)

k_5 ：鋼筋比

純混凝土潛變之函數式：

$$\varepsilon_{\text{creep}} = 9.56 \times 10^{-4} \left(k_1'^{0.581} k_2'^{-0.131} k_3'^{0.261} k_4'^{0.250} \right)$$



含鋼筋混凝土潛變之函數式：

$$\varepsilon_{\text{creep}} = 5.54 \times 10^{-4} \left(k_1'^{0.560} k_2'^{-0.125} k_3'^{0.206} k_4'^{0.270} k_5'^{-0.116} \right)$$

其中：

k_1' ：水膠比

k_2' ：粗粒料含量(粒徑 1cm)(kg)

k_3' ：28 天抗壓強度(MPa)

k_4' ：潛變發展時間(day)

k_5' ：鋼筋比

表 5-1 試驗配比之抗壓強度

抗 壓 強 度		
自充填混凝土		
齡期	41MPa (6000psi)	24MPa (3500psi)
7 天	31 (4562)	18 (2594)
28 天	49 (7160)	26 (3789)
56 天	56 (8132)	28 (4074)
91 天	60 (8717)	29 (4179)
傳統混凝土		
齡期	41MPa (6000psi)	24MPa (3500psi)
7 天	30 (4387)	17 (2461)
28 天	45 (6619)	24 (3501)
56 天	51 (7408)	27 (3862)
91 天	53 (7771)	28 (4096)

表 5-2 純混凝土之高強度與低強度的乾縮量(10^{-6})

天數	SCC(41MPa)	SCC(24MPa)	OPC(41MPa)	OPC(24MPa)
0	000.0	000.0	000.0	000.0
7	233.3	241.9	198.7	241.9
15	319.7	328.3	302.4	302.4
30	406.1	501.1	414.7	457.9
60	552.9	648.0	544.3	613.4
90	639.3	768.96	630.7	725.7
120	699.8	846.7	682.5	803.5
150	743.0	898.5	734.4	863.9
180	803.5	933.1	768.9	898.5

表 5-3 埋置#4($\rho=0.015$)混凝土之高強度與低強度的乾縮量(10^{-6})

天數	SCC(41MPa)	SCC(24MPa)	OPC(41MPa)	OPC(24MPa)
0	000.0	000.0	000.0	000.0
7	154.5	201.6	140.1	189.9
15	212.4	282.86	217.0	272.9
30	299.0	412.8	323.4	411.9
60	493.6	616.4	507.7	609.0
90	612.2	767.4	615.9	756.9
120	684.1	838.1	663.6	831.1
150	736.1	889.7	723.5	868.4
180	778.3	909.1	759.4	888.4

表 5-4 埋置#4($\rho=0.03$)混凝土之高強度與低強度的乾縮量(10^{-6})

天數	SCC(41MPa)	SCC(24MPa)	OPC(41MPa)	OPC(24MPa)
0	000.0	000.0	000.0	000.0
7	151.0	191.5	133.0	186.7
15	206.9	256.8	214.6	260.9
30	286.6	387.6	318.4	393.9
60	491.4	590.1	500.0	587.4
90	593.3	738.7	600.6	743.2
120	637.6	817.5	661.1	805.2
150	692.9	870.6	694.3	857.1
180	749.4	889.4	724.8	873.1

表 5-5 埋置#7($\rho=0.015$)混凝土之高強度與低強度的乾縮量(10^{-6})

天數	SCC(41MPa)	SCC(24MPa)	OPC(41MPa)	OPC(24MPa)
0	000.0	000.0	000.0	000.0
7	91.2	126.9	76.1	120.1
15	160.5	203.9	156.0	199.9
30	236.9	319.0	250.4	323.7
60	361.1	517.3	380.4	532.3
90	452.4	655.6	473.4	667.6
120	541.0	739.1	546.5	767.2
150	608.4	793.7	609.7	822.7
180	652.3	831.4	659.8	848.0

表 5-6 埋置#7($\rho=0.03$)混凝土之高強度與低強度的乾縮量(10^{-6})

天數	SCC(41MPa)	SCC(24MPa)	OPC(41MPa)	OPC(24MPa)
0	000.0	000.0	000.0	000.0
7	86.1	120.0	82.6	118.9
15	151.6	194.2	151.3	197.0
30	235.9	308.1	243.4	296.3
60	340.4	494.2	373.5	491.2
90	442.6	617.7	454.4	616.4
120	535.4	712.5	525.5	708.4
150	599.6	780.0	593.0	789.9
180	640.9	816.3	631.6	827.3

表 5-7 純混凝土之高強度的乾燥潛變量(10^{-6})

天數	SCC(41MPa)	ACI 209R-92	OPC(41MPa)	ACI 209R-92
0	523.8	594.5	455.1	584.0
7	728.1	759.8	732.2	750.9
14	948.4	817.1	935.2	808.8
21	1076	854.9	1091	847.0
28	1264	883.1	1249	875.5
42	1337	924.1	1373	916.8
56	1462	953.4	1478	946.4
70	1587	975.9	1584	969.2
84	1675	994.1	1674	987.5
112	1801	1022	1790	1016
140	1950	1043	1946	1037
168	2001	1059	1985	1053
180	2030	1065	2015	1059

表 5-8 純混凝土之低強度的乾燥潛變量(10^{-6})

天數	SCC(24MPa)	ACI 209R-92	OPC(24MPa)	ACI 209R-92
0	630.5	623.7	774.0	684.2
7	1014	844.1	1075	937.7
14	1299	920.5	1318	1026
21	1411	971.0	1452	1084
28	1559	1009	1580	1127
42	1686	1063	1695	1190
56	1897	1102	1893	1235
70	1925	1132	1921	1269
84	2090	1157	2088	1297
112	2215	1194	2213	1340
140	2358	1222	2349	1372
168	2401	1243	2393	1397
180	2461	1252	2453	1406

表 5-9 純混凝土之高強度與低強度的乾燥潛變量(10^{-6})

天數	SCC(41MPa)	SCC(24MPa)	OPC(41MPa)	OPC(24MPa)
0	523.8	630.5	455.1	774.0
7	728.1	1014	732.2	1075
14	948.4	1299	935.2	1318
21	1076	1411	1091	1452
28	1264	1559	1249	1580
42	1337	1686	1373	1695
56	1462	1897	1478	1893
70	1587	1925	1584	1921
84	1675	2090	1674	2088
112	1801	2215	1790	2213
140	1950	2358	1946	2349
168	2001	2401	1985	2393
180	2030	2461	2015	2453

表 5-10 埋置#4($\rho=0.015$)混凝土之高強度與低強度的乾燥潛變量(10^{-6})

天數	SCC(41MPa)	SCC(24MPa)	OPC(41MPa)	OPC(24MPa)
0	522.8	583.5	500.8	603.5
7	870.7	1010	793.2	983.2
14	1004	1303	946.2	1263
21	1100	1415	1055	1382
28	1205	1520	1160	1484
42	1311	1670	1288	1632
56	1421	1834	1424	1797
70	1532	1924	1522	1900
84	1632	2015	1620	2013
112	1751	2162	1716	2159
140	1822	2271	1781	2219
168	1892	2312	1840	2261
180	1928	2346	1890	2290



表 5-11 埋置#4($\rho=0.03$)混凝土之高強度與低強度的乾燥潛變量(10^{-6})

天數	SCC(41MPa)	SCC(24MPa)	OPC(41MPa)	OPC(24MPa)
0	533.7	641.9	519.8	589.9
7	846.1	998.1	787.4	977.1
14	968.0	1.235	936.0	1237
21	1036	1.360	1028	1355
28	1104	1.494	1120	1475
42	1240	1.650	1244	1625
56	1392	1.799	1377	1796
70	1490	1.882	1479	1887
84	1585	1.982	1566	1999
112	1682	2.151	1677	2132
140	1745	2.224	1723	2185
168	1816	2.260	1775	2220
180	1876	2.291	1811	2242

表 5-12 埋置#7($\rho=0.015$)混凝土之高強度與低強度的乾燥潛變量(10^{-6})

天數	SCC(41MPa)	SCC(24MPa)	OPC(41MPa)	OPC(24MPa)
0	410.8	513.9	511.4	555.3
7	735.0	831.6	707.8	864.8
14	863.2	987.1	840.9	1050
21	910.5	1130	909.8	1125
28	974.5	1233	979.7	1206
42	1049	1400	1047	1386
56	1136	1562	1136	1525
70	1206	1663	1207	1634
84	1273	1772	1278	1743
112	1414	1882	1388	1890
140	1536	1980	1515	1978
168	1601	2030	1583	2016
180	1644	2070	1621	2048



表 5-13 埋置#7($\rho=0.03$)混凝土之高強度與低強度的乾燥潛變量(10^{-6})

天數	SCC(41MPa)	SCC(24MPa)	OPC(41MPa)	OPC(24MPa)
0	495.5	241.2	419.5	421.5
7	673.2	702.4	701.0	694.9
14	836.5	938.9	798.2	896.0
21	909.1	1069	892.4	1045
28	969.7	1200	964.2	1175
42	1030	1370	1044	1350
56	1102	1531	1124	1530
70	1180	1610	1176	1626
84	1255	1697	1236	1710
112	1379	1834	1347	1860
140	1521	1926	1482	1922
168	1571	1988	1536	1966
180	1608	2016	1574	1996

表 5-14 純混凝土之高強度與低強度的比潛變(10^{-6} /MPa)

天數	SCC(41MPa)	SCC(24MPa)	OPC(41MPa)	OPC(24MPa)
0	33.7	75.8	29.3	93.0
7	46.9	121.9	47.1	129.2
14	61.0	156.1	60.2	158.4
21	69.2	169.6	70.2	174.5
28	81.3	187.4	80.4	189.9
42	86.0	202.6	88.4	203.7
56	94.1	228.0	95.1	227.5
70	102.1	231.4	101.9	230.9
84	107.8	251.2	107.7	251.0
112	115.9	266.2	115.2	266.0
140	125.5	283.4	125.2	282.3
168	128.8	288.6	127.7	287.6
180	130.6	295.8	129.7	294.8

表 5-15 埋置#4($\rho=0.015$)混凝土之高強度與低強度比潛變(10^{-6} /MPa)

天數	SCC(41MPa)	SCC(24MPa)	OPC(41MPa)	OPC(24MPa)
0	33.6	70.1	32.2	72.5
7	56.0	121.4	51.0	118.2
14	64.6	156.6	60.9	151.8
21	70.8	170.1	67.9	166.1
28	77.5	182.7	74.6	178.4
42	84.4	200.7	82.9	196.2
56	91.4	220.4	91.6	216.0
70	98.6	231.3	97.9	228.4
84	105.0	242.2	104.2	241.9
112	112.7	259.9	110.4	259.5
140	117.2	273.0	114.6	266.7
168	121.8	277.9	118.4	271.8
180	124.1	282.0	121.6	275.2

表 5-16 埋置#4($\rho=0.03$)混凝土之高強度與低強度比潛變($10^{-6}/\text{MPa}$)

天數	SCC(41MPa)	SCC(24MPa)	OPC(41MPa)	OPC(24MPa)
0	34.34	77.15	33.45	70.90
7	54.45	119.96	50.67	117.44
14	62.29	0.15	60.23	148.68
21	66.67	0.16	66.15	162.86
28	71.04	0.18	72.07	177.28
42	79.79	0.20	80.05	195.31
56	89.58	0.22	88.61	215.87
70	95.88	0.23	95.17	226.80
84	101.99	0.24	100.77	240.26
112	108.24	0.26	107.92	256.25
140	112.29	0.27	110.88	262.62
168	116.86	0.27	114.22	266.83
180	120.72	0.28	116.54	269.47

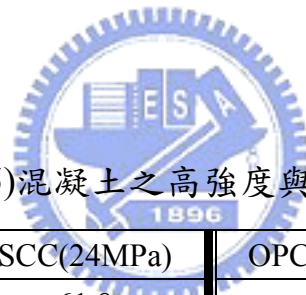


表 5-17 埋置#7($\rho=0.015$)混凝土之高強度與低強度比潛變($10^{-6}/\text{MPa}$)

天數	SCC(41MPa)	SCC(24MPa)	OPC(41MPa)	OPC(24MPa)
0	26.4	61.8	32.9	66.7
7	47.3	100.0	45.5	103.9
14	55.5	118.6	54.1	126.2
21	58.6	135.8	58.5	135.2
28	62.7	148.2	63.0	145.0
42	67.5	168.3	67.4	166.6
56	73.1	187.7	73.1	183.3
70	77.6	199.9	77.7	196.4
84	81.9	213.0	82.2	209.5
112	91.0	226.2	89.3	0.2
140	98.8	238.0	97.5	237.7
168	103.0	244.0	101.9	242.3
180	105.8	248.8	104.3	246.2

表 5-18 埋置#7($\rho=0.03$)混凝土之高強度與低強度比潛變($10^{-6}/\text{MPa}$)

天數	SCC(41MPa)	SCC(24MPa)	OPC(41MPa)	OPC(24MPa)
0	31.9	29.0	27.0	50.7
7	43.3	84.4	45.1	83.5
14	53.8	112.8	51.4	107.7
21	58.5	128.5	57.4	125.6
28	62.4	144.2	62.0	141.2
42	66.3	164.7	67.2	162.3
56	70.9	184.0	72.3	183.9
70	75.9	193.5	75.7	195.4
84	80.8	204.0	79.5	205.5
112	88.7	220.4	86.7	223.6
140	97.9	231.5	95.4	231.0
168	101.1	238.9	98.8	236.3
180	103.5	242.3	101.3	239.9



表 5-19 埋置#2($\rho=0.0018$)混凝土之高、低強度的乾縮量(10^{-6})

養護 7 天				
天數	SCC(41MPa)	SCC(24MPa)	OPC(41MPa)	OPC(24MPa)
0	000.0	000.0	000.0	000.0
1	103.5	84.6	80.2	97.2
2	120.6	118.5	110.5	139.5
3	152.3	160.1	121.3	167.3
4	163.0	187.3	155.1	187.6
5	168.7	200.7	160.1	184.4
6	211.5	212.0	188.1	211.2
7	213.2	240.3	202.8	237.1
15	309.6	330.1	294.4	299.8
30	414.0	491.6	417.4	448.4
60	542.4	640.4	536.1	612.0
90	627.8	775.1	623.3	773.2

表 5-20 埋置#3($\rho=0.0036$)混凝土之高、低強度的乾縮量(10^{-6})

養護 7 天				
天數	SCC(41MPa)	SCC(24MPa)	OPC(41MPa)	OPC(24MPa)
0	000.0	000.0	000.0	000.0
1	92.5	89.2	75.7	77.4
2	118.2	110.7	101.7	120.0
3	142.0	154.3	120.7	137.7
4	153.7	178.0	135.1	177.1
5	162.0	183.4	152.3	164.2
6	201.3	196.5	168.7	194.1
7	193.8	231.5	182.8	221.7
15	284.3	314.0	276.1	291.8
30	389.5	443.8	387.4	444.2
60	538.1	630.1	531.9	611.9
90	620.4	768.4	618.8	770.4



表 5-21 埋置#4($\rho=0.0072$)混凝土之高、低強度的乾縮量(10^{-6})

養護 7 天				
天數	SCC(41MPa)	SCC(24MPa)	OPC(41MPa)	OPC(24MPa)
0	000.0	000.0	000.0	000.0
1	62.1	88.3	66.7	88.0
2	100.4	112.4	94.6	109.7
3	121.7	134.2	118.3	141.7
4	133.1	151.7	121.9	157.1
5	151.1	172.4	152.3	165.0
6	164.9	190.7	159.2	174.1
7	173.8	220.9	167.3	211.1
15	243.0	289.4	231.7	285.2
30	355.8	438.2	342.0	433.0
60	517.7	620.9	511.7	611.4
90	613.6	767.9	616.3	763.4

表 5-22 埋置#4($\rho=0.015$)混凝土之高、低強度的乾縮量(10^{-6})

空氣養護				
天數	SCC(41MPa)	SCC(24MPa)	OPC(41MPa)	OPC(24MPa)
0	000.0	000.0	000.0	000.0
1	56.5	61.9	41.1	59.0
2	75.9	92.0	63.5	74.9
3	97.3	119.2	74.2	103.7
4	114.9	146.8	98.4	128.2
5	134.3	168.0	120.0	144.8
6	143.8	195.5	127.8	175.4
7	156.1	210.2	144.7	197.0
15	237.0	297.5	223.5	281.0
30	359.0	410.2	350.9	413.7
60	562.6	632.3	559.4	629.2
90	691.3	772.3	672.2	775.5
120	736.2	854.5	711.1	860.0
150	785.6	913.8	747.7	904.0
180	797.2	969.2	771.1	956.8

表 5-23 埋置#4($\rho=0.015$)混凝土之高、低強度的乾縮量(10^{-6})

養護 7 天				
天數	SCC(41MPa)	SCC(24MPa)	OPC(41MPa)	OPC(24MPa)
0	000.0	000.0	000.0	000.0
1	50.2	70.5	35.9	53.4
2	72.9	108.2	57.8	77.0
3	96.4	110.8	77.0	102.1
4	117.0	121.5	96.3	118.4
5	133.4	130.3	113.8	150.4
6	145.8	153.6	129.1	171.2
7	154.5	201.6	140.1	189.9
15	212.4	282.8	217.0	272.9
30	299.0	412.8	323.4	411.9
60	493.6	616.4	507.7	609.0
90	612.2	767.4	615.9	756.9
120	684.1	838.1	663.6	831.1
150	736.1	889.7	723.5	868.4
180	778.3	909.1	759.4	888.4

表 5-24 埋置#4($\rho=0.015$)混凝土之高、低強度的乾縮量(10^{-6})

養護 14 天				
天數	SCC(41MPa)	SCC(24MPa)	OPC(41MPa)	OPC(24MPa)
0	000.0	000.0	000.0	000.0
1	47.6	63.6	50.5	57.9
2	71.7	75.8	64.6	90.0
3	82.2	104.6	73.8	100.5
4	97.4	118.9	87.3	138.8
5	104.6	126.0	98.6	158.3
6	126.4	159.2	124.8	163.4
7	142.2	186.7	136.8	183.9
15	214.1	272.8	213.1	272.4
30	279.6	391.9	311.6	405.6
60	487.3	583.7	493.9	596.7
90	599.6	724.0	606.0	723.4
120	675.9	792.7	653.4	785.0
150	707.1	828.9	687.7	803.4
180	746.2	868.2	722.9	843.5

表 5-25 埋置#4($\rho=0.015$)混凝土之高、低強度的乾縮量(10^{-6})

養護 28 天				
天數	SCC(41MPa)	SCC(24MPa)	OPC(41MPa)	OPC(24MPa)
0	000.0	000.0	000.0	000.0
1	52.2	88.8	41.8	49.5
2	61.8	133.1	44.3	70.1
3	79.3	155.4	44.8	94.8
4	84.8	170.0	90.6	119.7
5	85.2	172.3	115.6	135.3
6	111.7	190.8	120.6	162.6
7	140.5	191.0	131.7	184.0
15	211.6	273.2	202.4	272.5
30	287.7	387.5	303.7	400.0
60	499.0	586.0	515.5	589.7
90	596.8	715.1	604.2	729.6
120	653.4	779.7	636.8	784.2
150	688.4	824.0	666.3	804.9
180	708.8	852.2	687.7	836.5

表 5-26 埋置#4($\rho=0.03$)混凝土之高、低強度的乾縮量(10^{-6})

空氣養護				
天數	SCC(41MPa)	SCC(24MPa)	OPC(41MPa)	OPC(24MPa)
0	000.0	000.0	000.0	000.0
1	53.6	64.5	27.5	50.3
2	74.4	102.3	46.0	77.1
3	98.6	125.8	56.9	100.2
4	110.3	141.4	83.8	134.4
5	124.1	170.2	93.0	155.5
6	147.3	183.8	121.0	187.5
7	158.6	206.5	142.9	196.2
15	234.8	285.9	218.2	272.9
30	352.6	408.2	348.3	409.9
60	551.8	603.4	531.0	618.4
90	665.5	765.4	629.7	766.9
120	700.9	843.2	679.5	834.0
150	726.0	884.1	713.9	880.5
180	764.5	957.7	735.5	930.2

表 5-27 埋置#4($\rho=0.03$)混凝土之高、低強度的乾縮量(10^{-6})

養護 7 天				
天數	SCC(41MPa)	SCC(24MPa)	OPC(41MPa)	OPC(24MPa)
0	000.0	000.0	000.0	000.0
1	50.2	77.6	30.1	53.2
2	75.8	111.0	51.5	102.1
3	112.8	137.2	75.1	110.5
4	130.8	143.2	92.3	158.8
5	136.9	151.8	103.8	167.8
6	138.6	163.0	123.4	179.9
7	151.0	191.5	133.0	186.7
15	206.9	256.8	214.6	260.9
30	286.6	387.6	318.4	393.9
60	491.4	590.1	500.0	587.4
90	593.3	738.7	600.6	743.2
120	637.6	817.5	661.1	805.2
150	692.9	870.6	694.3	857.1
180	749.4	889.4	724.8	873.1

表 5-28 埋置#4($\rho=0.03$)混凝土之高、低強度的乾縮量(10^{-6})

養護 14 天				
天數	SCC(41MPa)	SCC(24MPa)	OPC(41MPa)	OPC(24MPa)
0	000.0	000.0	000.0	000.0
1	40.3	67.3	46.7	81.7
2	72.5	95.7	66.7	127.9
3	75.5	132.3	82.9	145.2
4	105.1	145.0	95.8	156.6
5	111.6	150.5	112.3	160.3
6	129.5	181.6	117.9	164.5
7	139.7	184.6	132.7	180.1
15	207.5	248.9	207.1	249.4
30	286.1	359.6	308.9	370.2
60	483.2	564.8	487.8	560.9
90	587.0	713.7	580.6	700.3
120	603.0	786.7	640.6	763.9
150	672.3	825.3	677.7	806.0
180	713.7	841.5	703.7	827.8

表 5-29 埋置#4($\rho=0.03$)混凝土之高、低強度的乾縮量(10^{-6})

養護 28 天				
天數	SCC(41MPa)	SCC(24MPa)	OPC(41MPa)	OPC(24MPa)
0	000.0	000.0	000.0	000.0
1	48.1	42.3	22.3	10.8
2	55.8	74.2	26.7	26.2
3	80.2	101.1	27.8	33.8
4	95.4	124.2	92.9	98.3
5	113.4	142.7	109.1	130.1
6	126.2	146.2	122.7	144.8
7	137.1	179.1	136.4	176.9
15	197.4	255.1	202.2	253.6
30	282.9	357.3	301.5	368.7
60	486.3	557.7	479.5	560.8
90	572.5	703.3	592.0	702.7
120	598.0	768.9	626.9	758.5
150	662.7	818.8	664.9	809.0
180	700.3	831.1	680.8	826.9

表 5-30 埋置#7($\rho=0.015$)混凝土之高、低強度的乾縮量(10^{-6})

空氣養護				
天數	SCC(41MPa)	SCC(24MPa)	OPC(41MPa)	OPC(24MPa)
0	000.0	000.0	000.0	000.0
1	30.8	38.2	9.4	43.8
2	47.4	59.7	33.1	64.2
3	51.8	63.1	33.7	82.9
4	64.2	76.4	36.6	102.1
5	68.8	103.7	40.6	110.7
6	70.6	134.2	54.5	121.4
7	100.8	143.3	73.6	137.5
15	165.1	228.9	162.3	226.3
30	250.1	346.7	278.6	354.6
60	376.8	524.8	395.2	566.2
90	471.1	672.7	492.0	689.2
120	557.9	770.0	564.6	770.9
150	611.2	841.2	625.2	843.2
180	676.8	892.8	668.8	899.6

表 5-31 埋置#7($\rho=0.015$)混凝土之高、低強度的乾縮量(10^{-6})

養護 7 天				
天數	SCC(41MPa)	SCC(24MPa)	OPC(41MPa)	OPC(24MPa)
0	000.0	000.0	000.0	000.0
1	29.0	35.3	14.7	18.1
2	45.4	50.3	22.1	45.1
3	47.6	72.0	37.1	61.4
4	53.7	88.5	40.0	75.8
5	60.3	106.9	58.3	109.2
6	74.3	120.7	67.8	110.4
7	91.2	126.9	76.1	120.1
15	160.5	203.9	156.0	199.9
30	236.9	319.0	250.4	323.7
60	361.1	517.3	380.4	532.3
90	452.4	655.6	473.4	667.6
120	541.0	739.1	546.5	767.2
150	608.4	793.7	609.7	822.7
180	652.3	831.4	659.8	848.0

表 5-32 埋置#7($\rho=0.015$)混凝土之高、低強度的乾縮量(10^{-6})

養護 14 天				
天數	SCC(41MPa)	SCC(24MPa)	OPC(41MPa)	OPC(24MPa)
0	000.0	000.0	000.0	000.0
1	20.2	29.9	21.6	40.6
2	23.7	58.9	32.4	67.3
3	23.8	65.8	38.0	91.3
4	26.5	75.3	47.1	94.5
5	71.1	90.5	58.3	105.8
6	79.1	106.6	70.3	116.3
7	89.5	122.8	76.2	116.5
15	151.2	197.7	141.4	193.9
30	230.2	301.0	240.3	311.7
60	365.7	485.9	358.6	506.0
90	454.4	614.2	464.5	640.9
120	502.3	703.8	535.9	755.2
150	584.6	759.7	590.7	791.7
180	636.1	800.7	630.8	811.3

表 5-33 埋置#7($\rho=0.015$)混凝土之高、低強度的乾縮量(10^{-6})

養護 28 天				
天數	SCC(41MPa)	SCC(24MPa)	OPC(41MPa)	OPC(24MPa)
0	000.0	000.0	000.0	000.0
1	17.5	38.7	5.6	50.3
2	35.7	53.5	17.2	80.9
3	53.0	66.1	30.5	94.5
4	60.1	86.2	36.2	105.1
5	76.3	105.7	54.8	109.2
6	82.3	115.6	67.6	111.2
7	88.1	122.0	69.6	119.2
15	147.2	197.5	136.2	197.7
30	226.6	310.8	234.7	307.7
60	352.4	493.8	361.0	494.3
90	442.5	605.7	453.0	606.2
120	496.9	696.8	521.6	690.8
150	573.0	743.3	578.9	733.3
180	633.8	782.5	624.0	798.8

表 5-34 埋置#7($\rho=0.03$)混凝土之高、低強度的乾縮量(10^{-6})

空氣養護				
天數	SCC(41MPa)	SCC(24MPa)	OPC(41MPa)	OPC(24MPa)
0	000.0	000.0	000.0	000.0
1	29.2	23.5	22.4	33.3
2	33.8	26.7	30.1	58.3
3	42.4	42.4	46.7	71.3
4	45.2	70.1	47.3	96.1
5	57.6E-6	112.1	64.6	103.5
6	76.0	128.8	75.1	133.7
7	92.9	142.2	84.6	135.0
15	162.8	216.6	154.8	209.9
30	242.0	326.5	255.3	324.1
60	350.7	500.4	389.4	529.4
90	465.8	652.5	473.1	653.6
120	547.7	741.9	553.7	737.7
150	630.6	822.4	612.8	823.4
180	655.7	863.8	657.0	857.5

表 5-35 埋置#7($\rho=0.03$)混凝土之高、低強度的乾縮量(10^{-6})

養護 7 天				
天數	SCC(41MPa)	SCC(24MPa)	OPC(41MPa)	OPC(24MPa)
0	000.0	000.0	000.0	000.0
1	32.8	28.8	6.8	36.8
2	39.4	53.4	12.8	65.0
3	41.3	60.6	32.2	69.4
4	49.9	84.2	44.1	88.7
5	50.9	88.0	59.8	99.4
6	61.4	115.4	77.8	100.9
7	86.1	120.0	82.6	118.9
15	151.6	194.2	151.3	197.0
30	235.9	308.1	243.4	296.3
60	340.4	494.2	373.5	491.2
90	442.6	617.7	454.4	616.4
120	535.4	712.5	525.5	708.4
150	599.6	780.0	593.0	789.9
180	640.9	816.3	631.6	827.3

表 5-36 埋置#7($\rho=0.03$)混凝土之高、低強度的乾縮量(10^{-6})

養護 14 天				
天數	SCC(41MPa)	SCC(24MPa)	OPC(41MPa)	OPC(24MPa)
0	000.0	000.0	000.0	000.0
1	29.8	24.6	18.4	40.7
2	33.9	54.4	40.7	60.7
3	35.2	75.5	45.7	63.9
4	58.1	86.5	50.6	85.2
5	65.3	102.9	70.0	86.2
6	68.3	120.3	71.1	86.8
7	80.7	122.5	72.2	113.4
15	141.2	186.0	135.6	185.9
30	234.3	285.2	214.1	309.3
60	337.2	466.2	338.0	492.0
90	432.0	611.1	447.6	603.2
120	493.0	696.7	524.8	687.2
150	553.8	749.4	570.0	757.7
180	621.4	787.3	616.3	786.0

表 5-37 埋置#7($\rho=0.03$)混凝土之高、低強度的乾縮量(10^{-6})

養護 28 天				
天數	SCC(41MPa)	SCC(24MPa)	OPC(41MPa)	OPC(24MPa)
0	000.0	000.0	000.0	000.0
1	24.9	33.4	13.4	33.3
2	25.8	45.7	15.9	67.5
3	37.7	53.3	25.1	83.7
4	44.8	72.0	47.6	84.7
5	59.7	86.5	60.4	97.0
6	65.4	105.1	68.2	102.6
7	79.9	122.1	76.4	113.6
15	140.6	188.2	135.9	187.7
30	223.6	273.5	228.1	288.6
60	337.7	463.1	357.0	472.9
90	410.3	610.5	436.1	592.5
120	479.4	670.7	522.3	684.7
150	541.1	741.5	561.7	716.9
180	620.8	772.6	610.2	763.0

表 5-38 純混凝土之高強度的乾縮量(空氣養護) (10^{-6})

天數	SCC(41MPa)	ACI 209R-92	OPC(41MPa)	ACI 209R-92
0	000.0	000.0	000.0	000.0
1	112.3	33.2	103.7	29.3
2	172.8	64.6	138.2	57.0
3	198.7	94.3	164.1	83.2
4	216.0	122.5	172.8	108.1
5	224.6	149.3	190.1	131.8
6	233.3	174.8	198.7	154.3
7	241.9	199.1	207.3	175.7
15	319.7	358.4	311.0	316.2
30	406.1	551.4	406.1	486.5
60	587.5	754.5	561.6	665.8
90	682.5	860.1	665.2	759.0
120	743.0	924.9	725.7	816.1
150	786.2	968.6	760.3	854.7
180	846.7	1000	794.8	882.5

表 5-39 純混凝土之低強度的乾縮量(空氣養護) (10^{-6})

天數	SCC(24MPa)	ACI 209R-92	OPC(24MPa)	ACI 209R-92
0	000.0	000.0	000.0	000.0
1	95.0	36.0	112.3	32.5
2	138.2	70.1	172.8	63.2
3	164.1	102.3	198.7	92.3
4	207.3	132.9	216.0	119.9
5	241.9	162.0	233.3	146.1
6	276.5	189.7	241.9	171.1
7	311.0	216.0	259.2	194.9
15	423.3	388.9	388.8	350.7
30	552.9	598.2	509.7	539.6
60	699.8	818.7	673.9	738.4
90	829.4	933.3	803.5	841.8
120	907.1	1004	872.6	905.1
150	967.6	1051	924.4	947.9
180	993.5	1085	967.6	978.8

表 5-40 純混凝土之高強度的乾縮量(養護 7 天) (10^{-6})

天數	SCC(41MPa)	ACI 209R-92	OPC(41MPa)	ACI 209R-92
0	000.0	000.0	000.0	000.0
1	95.0	27.7	77.8	24.4
2	129.6	53.8	112.3	47.5
3	146.9	78.6	129.6	69.3
4	164.1	102.1	155.5	90.1
5	172.8	124.4	164.1	109.8
6	207.3	145.7	181.4	128.6
7	233.3	165.9	198.7	146.4
15	319.7	298.7	302.4	263.5
30	406.1	459.5	414.7	405.4
60	552.9	628.8	544.3	554.8
90	639.3	716.8	630.7	632.5
120	699.8	770.7	682.5	680.1
150	743.0	807.2	734.4	712.2
180	803.5	833.5	768.9	735.4

表 5-41 純混凝土之低強度的乾縮量(養護 7 天) (10^{-6})

天數	SCC(24MPa)	ACI 209R-92	OPC(24MPa)	ACI 209R-92
0	000.0	000.0	000.0	000.0
1	86.4	30.0	103.7	27.1
2	138.2	58.4	146.9	52.7
3	155.5	85.3	164.1	76.9
4	181.4	110.8	181.4	99.9
5	207.3	135.0	190.1	121.8
6	233.3	158.1	216.0	142.6
7	241.9	180.0	241.9	162.4
15	328.3	324.1	302.4	292.3
30	501.1	498.5	457.9	449.7
60	648.0	682.2	613.4	615.3
90	768.9	777.7	725.7	701.5
120	846.7	836.3	803.5	754.3
150	898.5	875.8	863.9	789.9
180	933.1	904.3	898.5	815.7

表 5-42 純混凝土之高強度的乾縮量(養護 14 天) (10^{-6})

天數	SCC(41MPa)	ACI 209R-92	OPC(41MPa)	ACI 209R-92
0	000.0	000.0	000.0	000.0
1	69.1	25.7	77.8	22.7
2	103.7	50.0	86.4	44.2
3	121.0	73.1	112.3	64.5
4	146.9	95.0	138.2	83.8
5	172.8	115.7	146.9	102.1
6	198.7	135.5	155.5	119.6
7	216.0	154.3	164.1	136.2
15	259.2	277.8	224.6	245.1
30	371.5	427.3	345.6	377.1
60	527.0	584.7	492.4	516.0
90	613.4	666.6	587.5	588.2
120	682.5	716.8	656.6	632.5
150	725.7	750.7	717.1	662.4
180	760.3	775.1	725.7	684.0

表 5-43 純混凝土之低強度的乾縮量(養護 14 天) (10^{-6})

天數	SCC(24MPa)	ACI 209R-92	OPC(24MPa)	ACI 209R-92
0	000.0	000.0	000.0	000.0
1	112.3	27.9	103.7	25.2
2	138.2	54.3	129.6	49.0
3	164.1	79.3	138.2	71.5
4	172.8	103.0	146.9	92.9
5	198.7	125.6	155.5	113.3
6	224.6	147.0	164.1	132.6
7	233.3	167.4	181.4	151.0
15	319.7	301.4	250.5	271.8
30	466.5	463.6	406.1	418.2
60	630.7	634.5	561.6	572.3
90	743.0	723.3	691.2	652.4
120	829.4	777.7	751.6	701.5
150	863.9	814.5	803.5	734.7
180	907.1	841.0	855.3	758.6

表 5-44 純混凝土之高強度的乾縮量(養護 28 天) (10^{-6})

天數	SCC(41MPa)	ACI 209R-92	OPC(41MPa)	ACI 209R-92
0	000.0	000.0	000.0	000.0
1	69.1	23.8	69.1	21.0
2	112.3	46.3	95.0	40.8
3	129.6	67.6	121.0	59.6
4	146.9	87.8	138.2	77.5
5	155.5	107.0	146.9	94.4
6	172.8	125.3	164.1	110.6
7	198.7	142.7	164.1	125.9
15	259.2	256.8	293.7	226.6
30	362.9	395.1	354.2	348.7
60	518.4	540.7	492.4	477.1
90	604.8	616.4	578.8	543.9
120	665.2	662.8	639.3	584.9
150	691.2	694.2	673.9	612.5
180	717.1	716.8	699.8	632.5

表 5-45 純混凝土之低強度的乾縮量(養護 28 天) (10^{-6})

天數	SCC(24MPa)	ACI 209R-92	OPC(24MPa)	ACI 209R-92
0	000.0	000.0	000.0	000.0
1	103.7	25.8	95.0	23.3
2	146.9	50.2	95.0	45.3
3	181.4	73.3	112.3	66.1
4	216.0	95.3	121.0	85.9
5	216.0	116.1	155.5	104.7
6	233.3	135.9	164.1	122.6
7	233.3	154.8	181.4	139.6
15	302.4	278.7	250.5	251.4
30	466.5	428.7	397.4	386.7
60	622.0	586.7	570.2	529.2
90	734.4	668.8	682.5	603.3
120	820.7	719.2	743.0	648.7
150	855.3	753.2	794.8	679.4
180	889.9	777.7	846.7	701.5

表 5-46 純混凝土之高強度與低強度的基本潛變量(10^{-6})

天數	SCC(41MPa)	SCC(24MPa)	OPC(41MPa)	OPC(24MPa)
0	519.0	679.9	411.1	782.1
7	566.2	858.7	527.2	874.4
14	605.8	972.5	628.8	965.6
21	701.1	1013	722.4	1031
28	792.7	1059	815.9	1101
42	819.5	1130	850.9	1152
56	858.7	1196	917.8	1217
70	912.6	1210	973.3	1275
84	960.6	1229	1037	1328
112	1021	1294	1093	1376
140	1078	1351	1154	1434
168	1100	1376	1169	1459
180	1132	1409	1198	1498

表 5-47 埋置#4($\rho=0.015$)混凝土之高強度與低強度的基本潛變量(10^{-6})

天數	SCC(41MPa)	SCC(24MPa)	OPC(41MPa)	OPC(24MPa)
0	500.5	492.6	516.9	565.6
7	603.9	693.3	584.3	728.1
14	683.4	904.9	659.4	931.3
21	727.6	961.5	722.9	982.5
28	770.8	1018	774.9	1032
42	791.1	1071	811.4	1083
56	821.3	1121	861.7	1132
70	863.4	1143	898.3	1162
84	918.5	1164	948.8	1203
112	970.2	1244	995.0	1267
140	989.5	1282	1007	1299
168	1031	1310	1052	1326
180	1059	1331	1085	1347

表 5-48 埋置#4($\rho=0.03$)混凝土之高強度與低強度的基本潛變量(10^{-6})

天數	SCC(41MPa)	SCC(24MPa)	OPC(41MPa)	OPC(24MPa)
0	526.8	520.1	556.1	530.8
7	582.2	665.7	583.6	702.1
14	651.7	866.6	651.9	896.4
21	688.6	936.8	688.2	958.3
28	723.2	1006	731.0	1021
42	776.5	1062	780.6	1078
56	801.3	1111	813.8	1128
70	855.3	1120	869.5	1159
84	903.4	1132	913.6	1194
112	955.2	1217	960.1	1241
140	963.5	1247	979.1	1268
168	1011	1277	1025	1292
180	1039	1301	1043	1315

表 5-49 埋置#7($\rho=0.015$)混凝土之高強度與低強度的基本潛變量(10^{-6})

天數	SCC(41MPa)	SCC(24MPa)	OPC(41MPa)	OPC(24MPa)
0	420.1	490.7	490.7	626.6
7	545.7	596.4	566.2	692.6
14	606.6	671.9	624.7	788.9
21	630.5	747.3	645.1	808.3
28	656.1	824.8	670.0	828.5
42	675.1	888.9	690.3	890.7
56	695.9	953.1	705.9	938.0
70	712.2	983.7	729.8	988.0
84	734.0	1010	747.4	1017
112	785.5	1057	798.3	1078
140	848.8	1098	856.8	1112
168	880.6	1123	892.6	1136
180	906.4	1140	919.1	1151

表 5-50 埋置#7($\rho=0.03$)混凝土之高強度與低強度的基本潛變量(10^{-6})

天數	SCC(41MPa)	SCC(24MPa)	OPC(41MPa)	OPC(24MPa)
0	483.8	196.8	444.0	356.9
7	506.5	467.9	563.9	521.9
14	595.9	632.0	607.6	632.0
21	628.9	715.2	638.5	722.0
28	648.2	793.9	668.6	810.6
42	662.6	862.0	678.0	878.9
56	683.4	926.7	691.4	940.6
70	706.9	951.2	715.1	971.5
84	725.4	976.6	732.9	1002
112	767.3	1025	780.9	1047
140	838.6	1057	841.0	1089
168	869.2	1086	883.1	1112
180	888.7	1103	903.8	1124



表 5-51 SCC 與 OPC 純混凝土之比克效應(10^{-6})

	乾燥潛變	基本潛變	乾縮量	比克效應
SCC (41MPa)	2030	1132	803.5	94.5
OPC (41MPa)	2015	1198	768.9	48.1
SCC (24MPa)	2461	1409	933.1	118.9
OPC (24MPa)	2453	1498	898.5	56.5

表 5-52 SCC 與 OPC 埋置#4($\rho=0.015$)混凝土之比克效應(10^{-6})

	乾燥潛變	基本潛變	乾縮量	比克效應
SCC (41MPa)	1928	1059	778.3	90.7
OPC (41MPa)	1890	1085	759.4	45.6
SCC (24MPa)	2346	1331	909.1	105.9
OPC (24MPa)	2290	1347	888.4	54.6

表 5-53 SCC 與 OPC 埋置#4($\rho=0.03$)混凝土之比克效應(10^{-6})

	乾燥潛變	基本潛變	乾縮量	比克效應
SCC (41MPa)	1876	1039	749.4	87.6
OPC (41MPa)	1811	1043	724.8	43.2
SCC (24MPa)	2291	1301	889.4	100.6
OPC (24MPa)	2242	1315	873.1	53.9

表 5-54 SCC 與 OPC 埋置#7($\rho=0.015$)混凝土之比克效應(10^{-6})

	乾燥潛變	基本潛變	乾縮量	比克效應
SCC (41MPa)	1644	906.4	652.3	85.3
OPC (41MPa)	1621	919.1	659.8	42.1
SCC (24MPa)	2070	1140	831.4	98.6
OPC (24MPa)	2048	1151	848.0	49.0

表 5-55 SCC 與 OPC 埋置#7($\rho=0.03$)混凝土之比克效應(10^{-6})

	乾燥潛變	基本潛變	乾縮量	比克效應
SCC (41MPa)	1608	888.7	640.9	78.4
OPC (41MPa)	1574	903.8	631.6	38.6
SCC (24MPa)	2016	1103	816.3	96.7
OPC (24MPa)	1996	1124	827.3	44.7

表 5-56 試驗配比中抗壓強度與握裹強度之關係

28 天				
	f'_c MPa (psi)	μ MPa (psi)	$\sqrt{f'_c}$	$\frac{\mu}{\sqrt{f'_c}}$
SCC (41MPa)	49 (7106)	11.10 (1610)	2.20 (319)	5.05
SCC (24MPa)	26 (3771)	5.90 (856)	1.60 (232)	3.69
OPC (41MPa)	45 (6527)	10.18 (1476)	2.11 (306)	4.82
OPC (24MPa)	24 (3481)	5.63 (817)	1.53 (222)	3.68
91 天				
SCC (41MPa)	60 (8702)	12.45 (1806)	2.42 (351)	5.14
SCC (24MPa)	29 (4206)	6.90 (1001)	1.68 (244)	4.11
OPC (41MPa)	53 (7687)	11.30 (1639)	2.29 (332)	4.93
OPC (24MPa)	28 (4061)	6.70 (972)	1.66 (241)	4.04

注：O.B.J.建議 $\frac{\mu}{\sqrt{f'_c}}$ 需大於 3.17

表 5-57 方柱試體埋置#4($\rho=0.015$)混凝土之高強度的乾縮量(10^{-6})

天數	SCC (41MPa)		OPC (41MPa)	
	中間	邊緣	中間	邊緣
0	000.0	000.0	000.0	000.0
7	145.9	51.0	106.0	95.5
15	269.5	273.6	258.0	219.8
30	404.4	418.4	415.1	410.3
60	571.7	575.8	568.2	566.9
90	641.3	644.7	640.5	639.0
120	704.6	692.2	665.1	668.7
150	741.2	739.4		

表 5-58 方柱試體埋置#4($\rho=0.03$)混凝土之高強度的乾縮量(10^{-6})

天數	SCC (41MPa)		OPC (41MPa)	
	中間	邊緣	中間	邊緣
0	000.0	000.0	000.0	000.0
7	42.4	108.6	77.5	112.3
15	227.6	267.1	192.6	214.6
30	380.6	391.6	373.1	384.5
60	561.3	568.8	548.8	547.5
90	628.0	632.3	621.1	617.7
120	660.3	656.5	646.0	647.4
150	693.2	690.3		
180	732.6	735.3		

表 5-59 方柱試體埋置#4($\rho=0.015$)混凝土之低強度的乾縮量(10^{-6})

天數	SCC (24MPa)		OPC (24MPa)	
	中間	邊緣	中間	邊緣
0	000.0	000.0	000.0	000.0
7	153.1	148.8	152.0	148.0
15	333.4	318.8	326.7	339.1
30	492.0	494.4	484.6	486.6
60	659.2	657.8	650.6	649.3
90	788.4	780.6	769.9	767.8
120	828.2	826.5	816.9	815.6

表 5-60 方柱試體埋置#4($\rho=0.03$)混凝土之低強度的乾縮量(10^{-6})

天數	SCC (24MPa)		OPC (24MPa)	
	中間	邊緣	中間	邊緣
0	000.0	000.0	000.0	000.0
7	160.5	148.6	126.3	144.3
15	312.8	310.8	315.4	314.5
30	471.3	476.4	458.8	464.8
60	628.4	631.9	616.4	628.6
90	765.6	763.4	749.3	754.8
120	804.2	809.8	799.0	800.8

表 5-61 方柱試體埋置#7($\rho=0.015$)混凝土之高強度的乾縮量(10^{-6})

天數	SCC (41MPa)		OPC (41MPa)	
	中間	邊緣	中間	邊緣
0	000.0	000.0	000.0	000.0
7	116.9	84.5	99.7	93.1
15	233.2	230.5	219.1	218.8
30	337.8	332.6	319.4	325.2
60	411.5	410.9	408.7	401.7
90	470.3	467.9	465.2	463.0
120	530.7	529.2	524.6	520.8

表 5-62 方柱試體埋置#7($\rho=0.03$)混凝土之高強度的乾縮量(10^{-6})

天數	SCC (41MPa)		OPC (41MPa)	
	中間	邊緣	中間	邊緣
0	000.0	000.0	000.0	000.0
7	106.1	81.8	94.5	78.1
15	246.5	219.6	201.7	206.8
30	324.4	323.9	314.0	309.3
60	387.5	390.7	384.6	384.3
90	461.2	456.6	438.6	438.4
120	517.3	514.4	507.5	501.4

表 5-63 方柱試體埋置#7($\rho=0.015$)混凝土之低強度的乾縮量(10^{-6})

天數	SCC (24MPa)		OPC (24MPa)	
	中間	邊緣	中間	邊緣
0	000.0	000.0	000.0	000.0
7	133.4	127.7	128.5	134.3
15	270.3	276.8	263.9	267.7
30	433.4	427.1	411.7	415.6
60	578.7	572.8	560.5	564.6
90	665.9	675.0	670.4	670.5
120	720.2	726.2	715.4	720.9

表 5-64 方柱試體埋置#7($\rho=0.03$)混凝土之低強度的乾縮量(10^{-6})

天數	SCC (24MPa)		OPC (24MPa)	
	中間	邊緣	中間	邊緣
0	000.0	000.0	000.0	000.0
7	136.4	137.3	123.7	127.8
15	255.0	257.2	255.3	253.3
30	415.5	423.4	403.3	401.7
60	551.4	559.5	541.5	544.5
90	644.7	650.9	640.4	635.9
120	710.1	707.1	701.6	699.8

表 5-65 預測公式的對照與各係數的代表意義

CEB-FIP (1970)								
	潛變			乾縮				
公式	$\Phi(t, t_0) = \frac{I}{E_c(t_0)} + \frac{I}{E_{c28}} k_1 k_2 k_3 k_4 k_5$			$\varepsilon_{sh}(t, t_{sh,0}) = k_{\bar{1}} k_3 k_{\bar{4}} k_5$				
係數	k_1 、 $k_{\bar{1}}$	k_2	k_3	k_4 、 $k_{\bar{4}}$	k_5			
意義	外在環境相對溼度係數	加載齡期係數	水灰比及水泥含量係數	構件厚度係數	潛變與乾縮發展時間係數			
ACI 209R-92								
	潛變			乾縮				
公式	$\Phi(t, t_0) = \frac{I}{E_c(t_0)} + \frac{2.35(t-t_0)^{0.6}}{E_c(t_0)[10+(t-t_0)^{0.6}]} k'_2 k'_1 k'_4 k'_3 k'_6 k'_7$			$\varepsilon_{sh}(t, t_{sh,0}) = \left[\frac{780 \times 10^{-6} \times (t-t_{sh,0})}{35+(t-t_{sh,0})} \right] k'_5 k'_7 k'_4 k'_5 k'_6 k'_8 k'_7$				
係數	k'_1 、 $k'_{\bar{1}}$	k'_2	k'_3 、 $k'_{\bar{3}}$	k'_4 、 $k'_{\bar{4}}$	k'_5	k'_7 、 $k'_{\bar{7}}$	k'_6 、 $k'_{\bar{6}}$	k'_8
意義	外在環境溼度係數	加載齡期係數	坍度係數	厚度係數	養護齡期係數	空氣含量係數	s/a 之係數	水泥含量係數
本研究迴歸之函數式								
	潛變			乾縮				
公式	$\varepsilon_{creep} = 5.54 \times 10^{-4} (k_1^{0.560} k_2^{-0.125} k_3^{0.206} k_4^{0.270} k_5^{-0.116})$			$\varepsilon_{shrinkage} = 1.49 \times 10^{-4} (k_1^{0.380} k_2^{-0.135} k_3^{-0.105} k_4^{0.506} k_5^{-0.116})$				
係數	k'_1 、 k_1	k'_2 、 k_2	k'_3 、	k_3	k'_4 、 k_4	k'_5 、 k_5		
意義	水膠比係數	粗粒料含量係數	28天抗壓強度係數	養護齡期係數	潛變與乾縮發展時間係數	鋼筋比係數		

表 5-66 本研究之乾縮函數式與其它乾縮預測公式的比較表(10^{-6})

天數	試驗之 乾縮量	本研究之 函數式	CEB-FIP (1970)	CEB-FIP (1978)	ACI 209R-92	Bazant and Panula's model II
0	000.0	000.0	000.0	000.0	000.0	000.0
1	95.0	90.8	6.3	11.1	27.7	56.0
2	129.6	121.4	12.6	24.2	53.8	76.0
3	146.9	144.0	18.9	33.4	78.6	94.0
4	164.1	162.4	25.2	44.1	102.1	106.0
5	172.8	178.4	31.5	55.7	124.4	117.0
6	207.3	192.6	37.8	67.2	145.7	127.0
7	233.3	205.5	44.0	78.0	165.9	135.0
15	319.7	283.0	84.0	125.0	298.7	180.0
30	406.1	378.7	133.0	166.0	459.5	221.0
60	552.9	506.6	200.0	218.0	628.8	256.0
90	639.3	600.7	245.0	260.0	716.8	272.0
120	699.8	677.8	267.0	301.0	770.7	281.0
150	743.0	744.4	290.0	322.0	807.2	287.0
180	803.5	803.6	333.0	360.0	833.5	291.0

表 5-67 本研究之潛變函數式與其它潛變預測公式的比較表(10^{-6})

天數	試驗之 潛變量	本研究之 函數式	CEB-FIP (1970)	CEB-FIP (1978)	ACI 209R-92	Bazant and Panula's model II
0	523.8	653.8	582.6	735.1	594.5	623.7
7	728.1	891.7	749.1	974.4	759.8	773.5
14	948.4	1060	872.8	1076	817.1	883.6
21	1076	1174	934.7	1197	854.9	953.0
28	1264	1261	1074	1293	883.1	1003
42	1337	1396	1136	1416	924.1	1072
56	1462	1500	1290	1494	953.4	1119
70	1587	1586	1337	1594	975.9	1153
84	1675	1660	1383	1690	994.1	1178
112	1801	1783	1491	1741	1022	1213
140	1950	1886	1538	1813	1043	1236
168	2001	1974	1630	1888	1059	1252
180	2030	2008	1709	1960	1065	1257

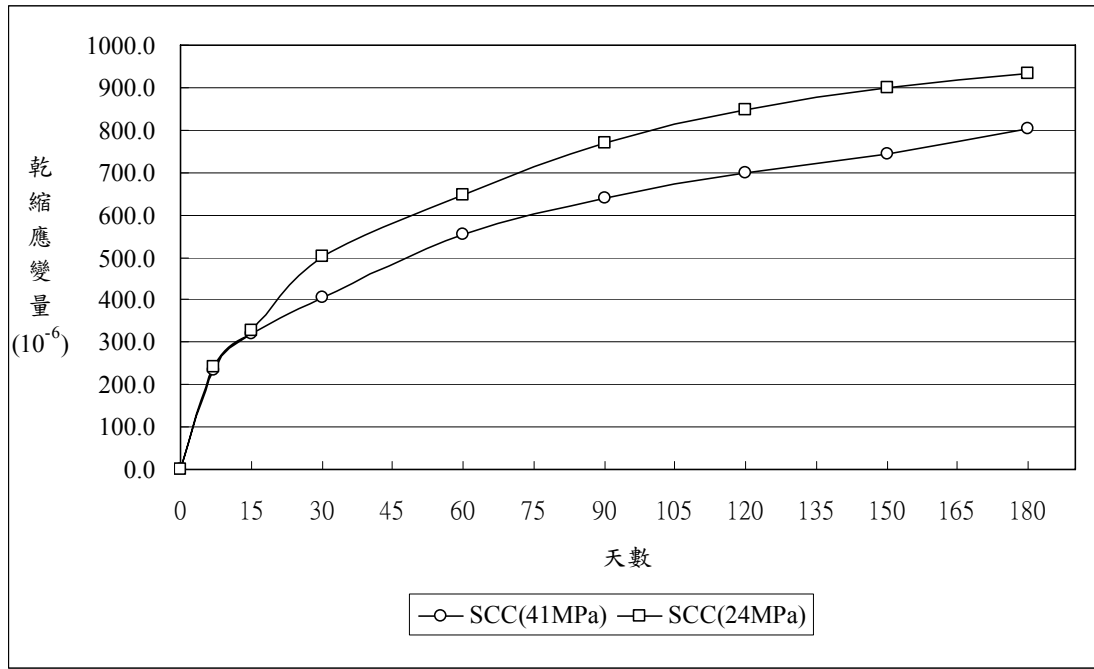


圖 5-1 SCC 純混凝土乾縮

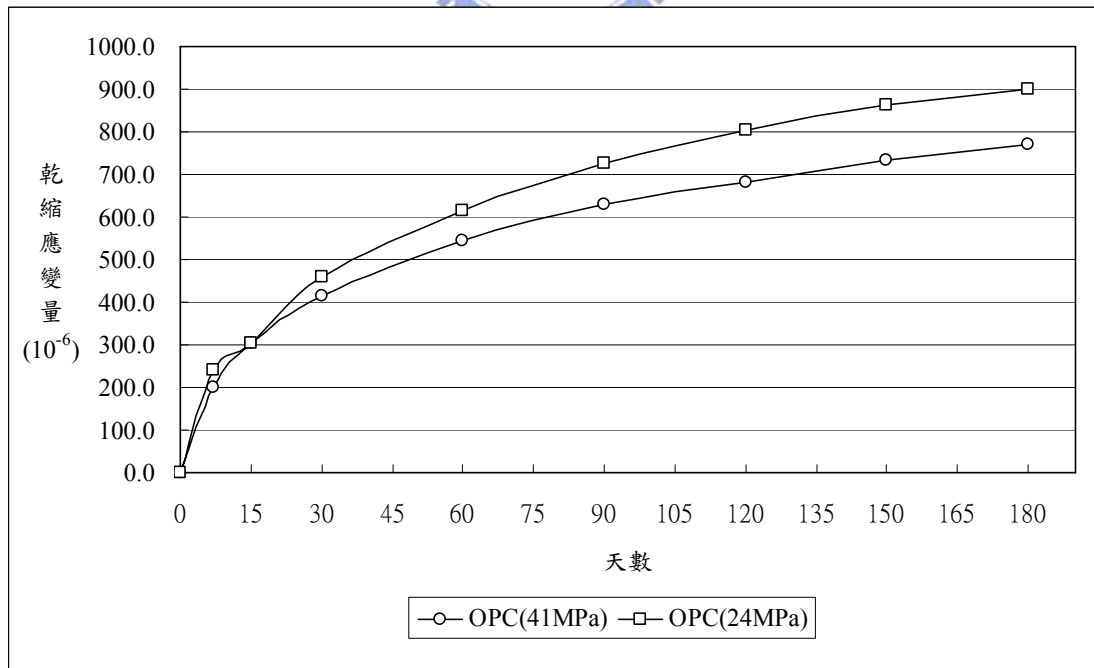


圖 5-2 OPC 純混凝土乾縮

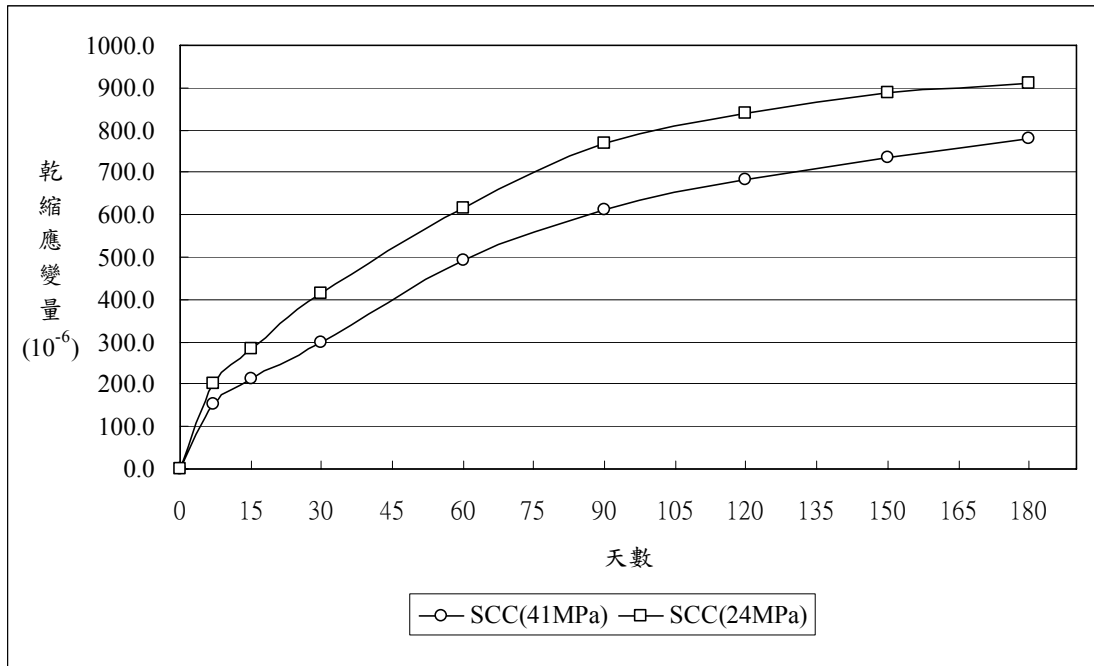


圖 5-3 SCC 埋置#4($\rho=0.015$)之混凝土乾縮

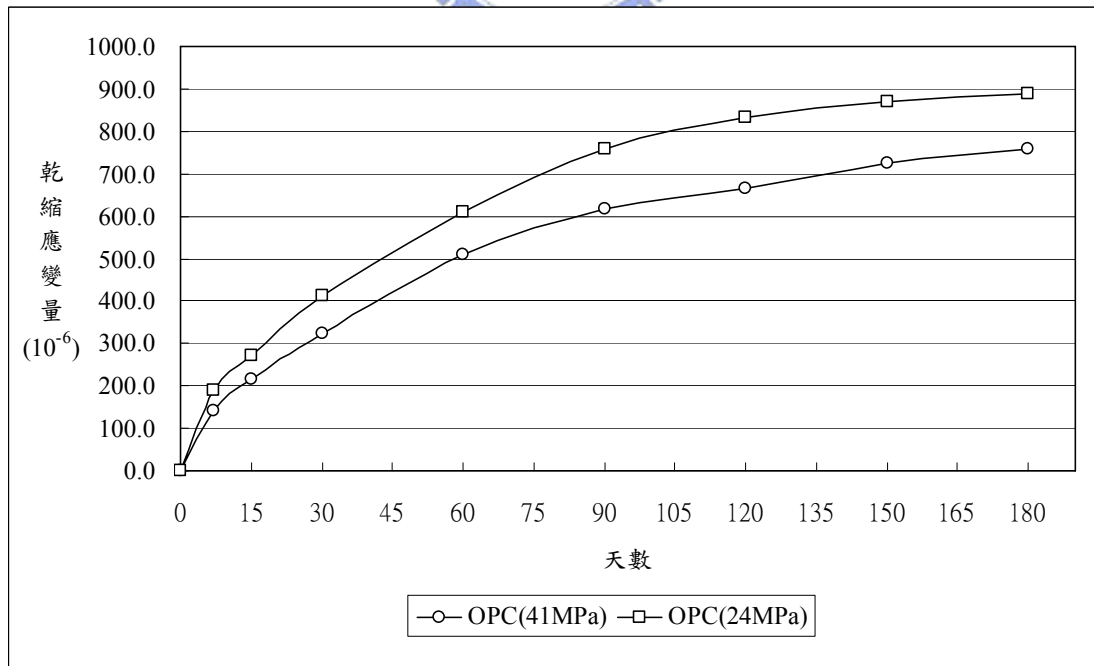


圖 5-4 OPC 埋置#4($\rho=0.015$)之混凝土乾縮

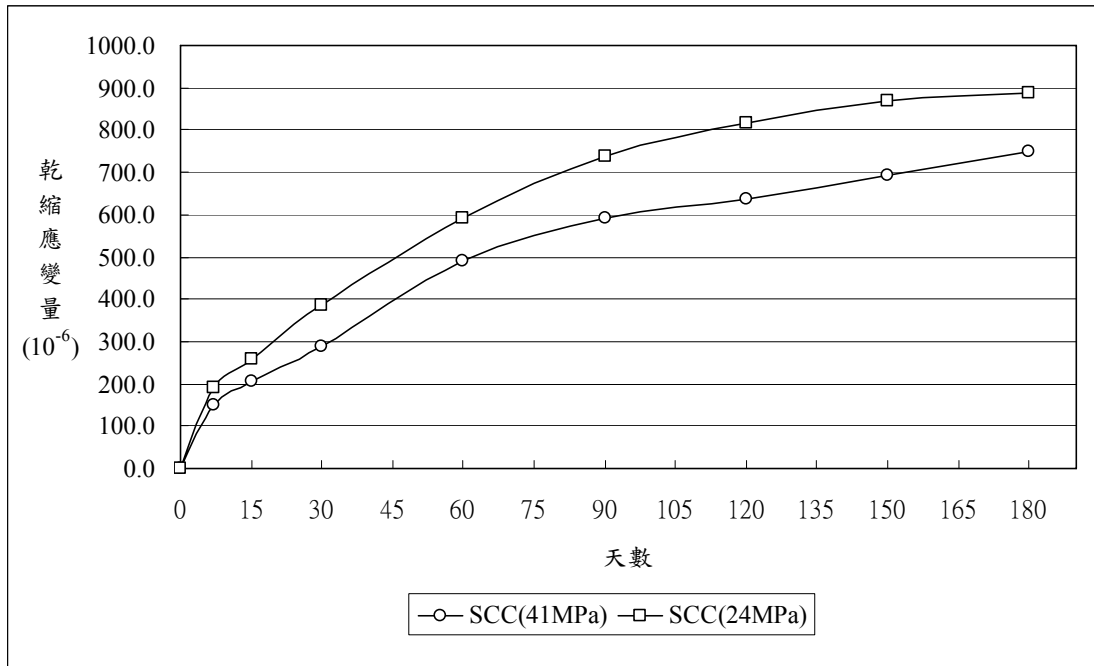


圖 5-5 SCC 埋置#4($\rho=0.03$)之混凝土乾縮

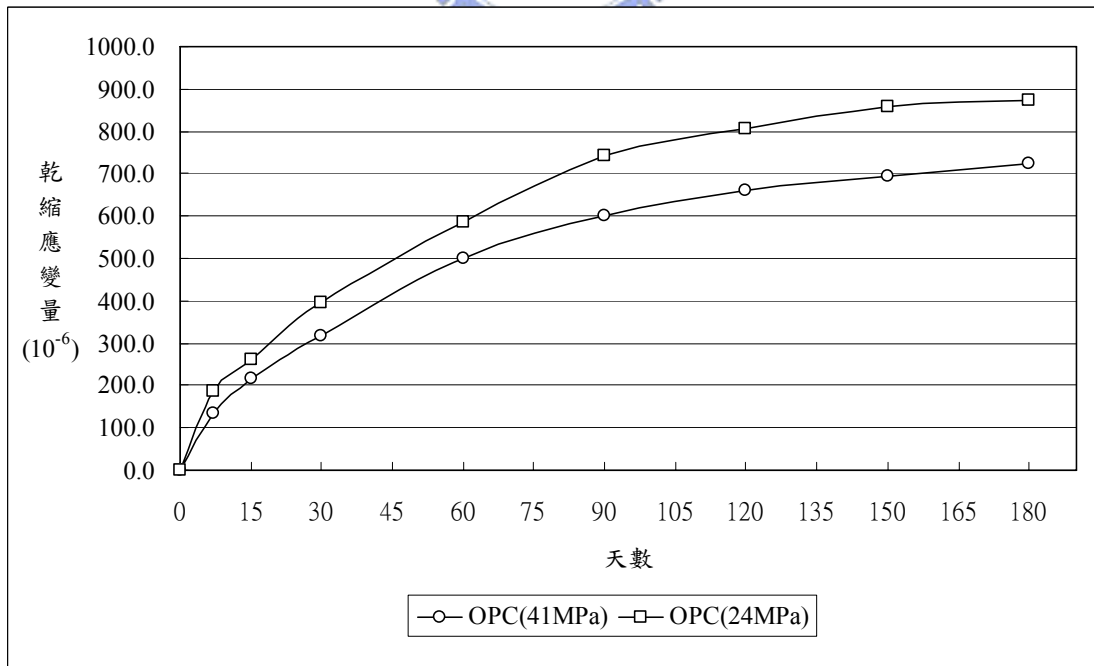


圖 5-6 OPC 埋置#4($\rho=0.03$)之混凝土乾縮

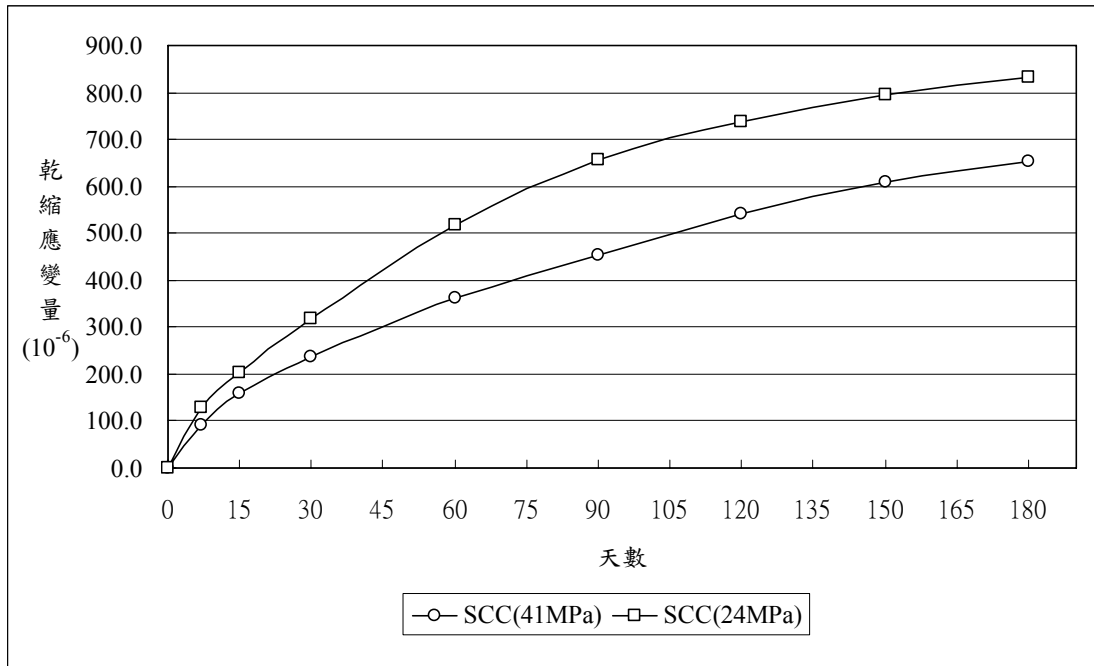


圖 5-7 SCC 埋置#7($\rho=0.015$)之混凝土乾縮

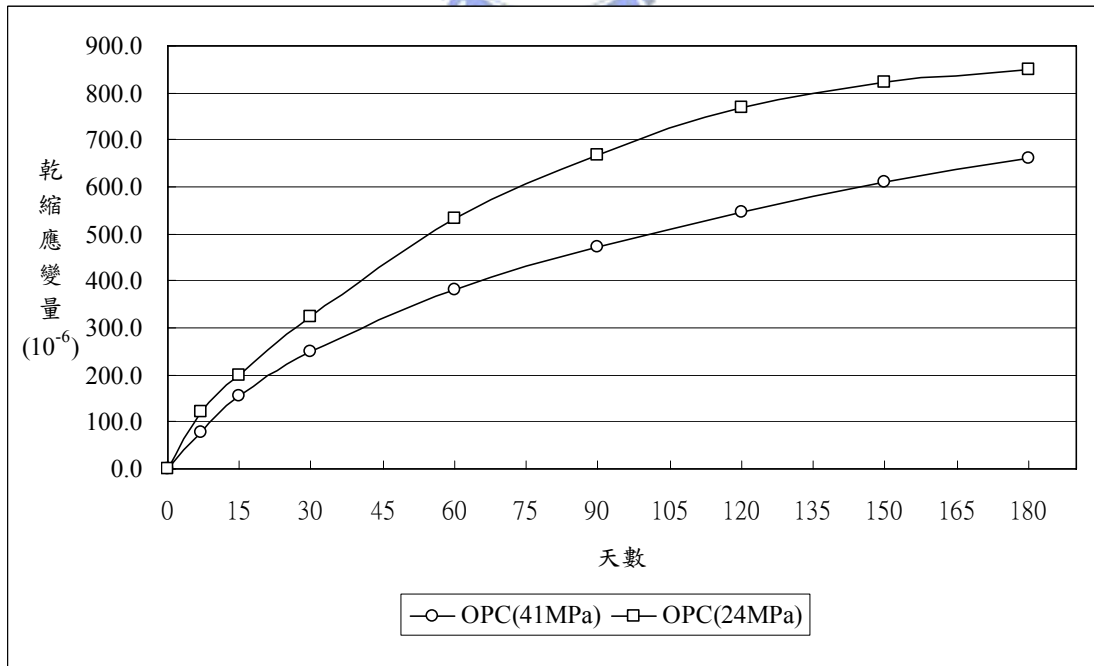


圖 5-8 OPC 埋置#7($\rho=0.015$)之混凝土乾縮

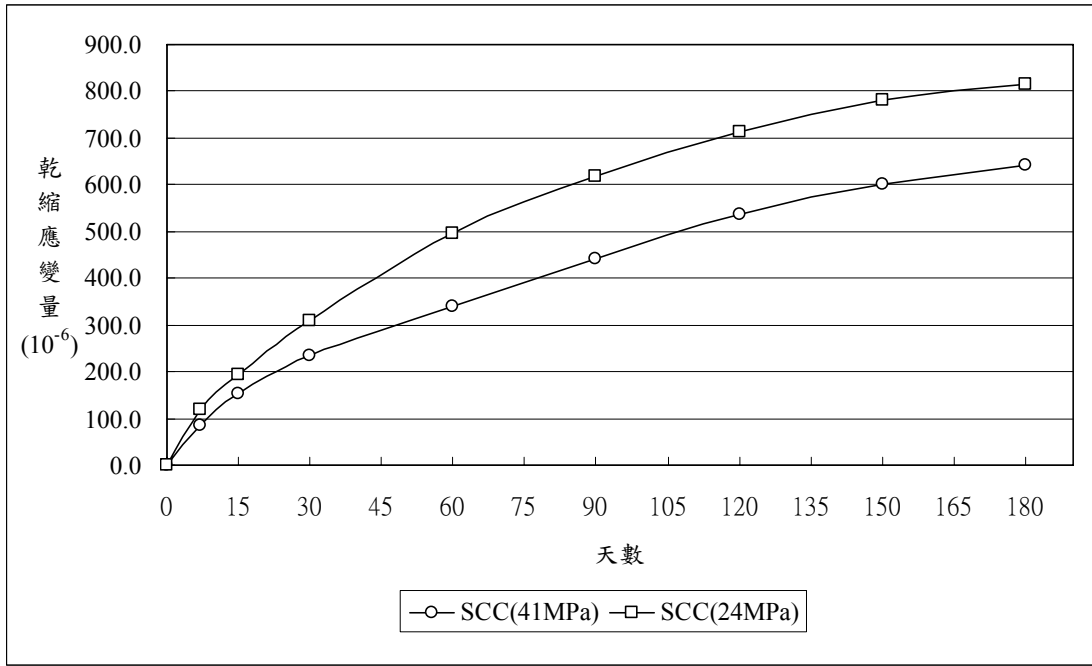


圖 5-9 SCC 埋置#7($\rho=0.03$)之混凝土乾縮

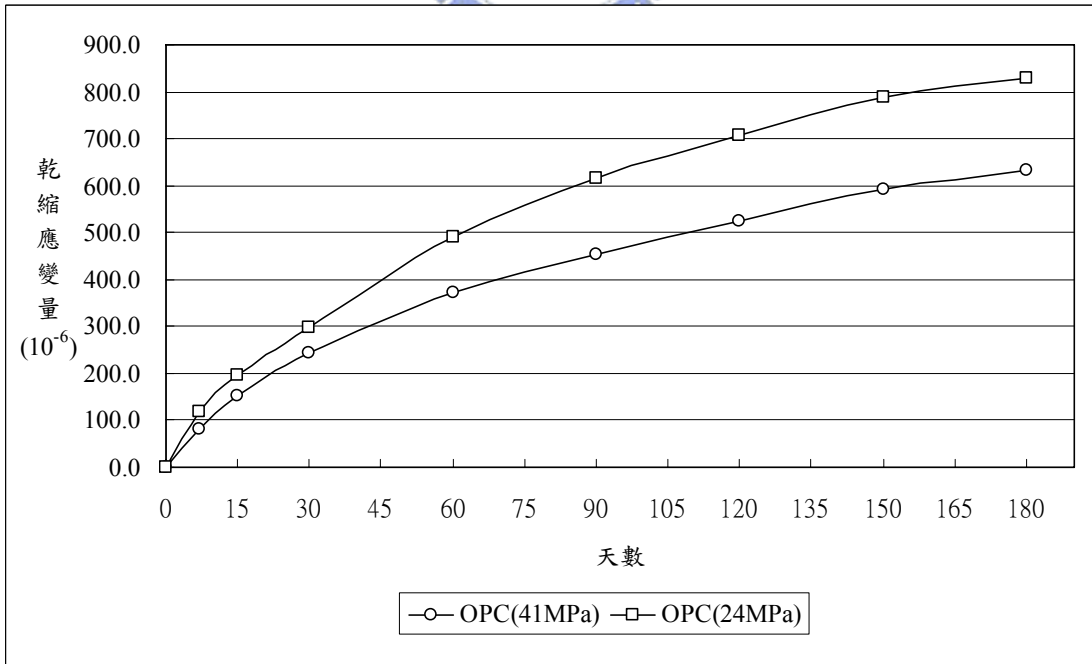


圖 5-10 OPC 埋置#7($\rho=0.03$)之混凝土乾縮

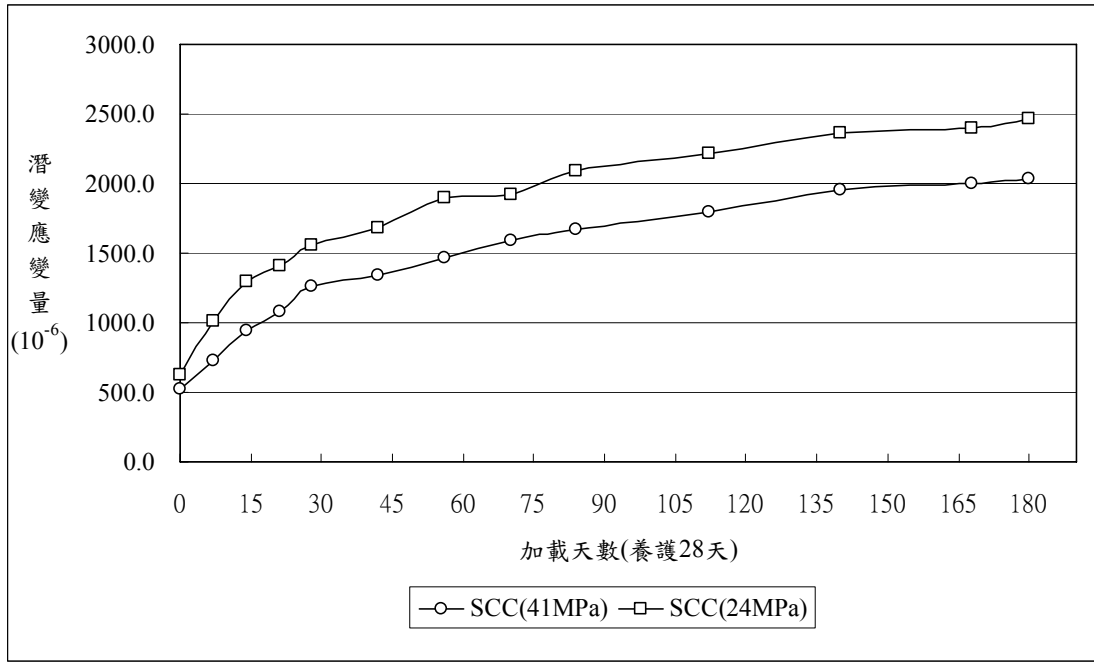


圖 5-11 SCC 純混凝土乾燥潛變

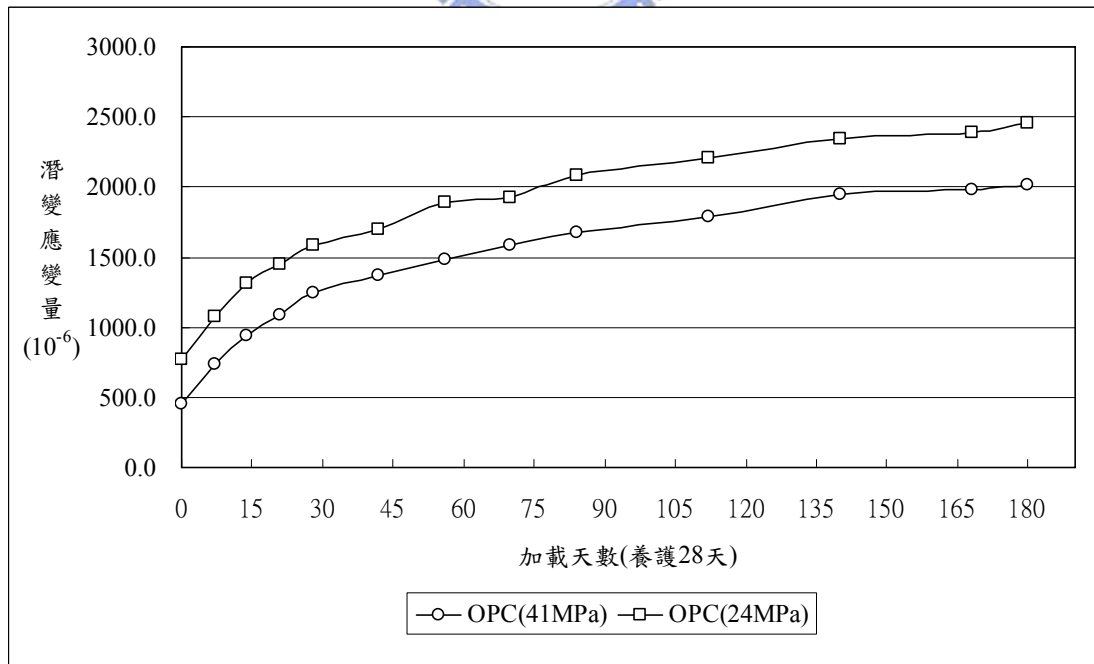


圖 5-12 OPC 純混凝土乾燥潛變

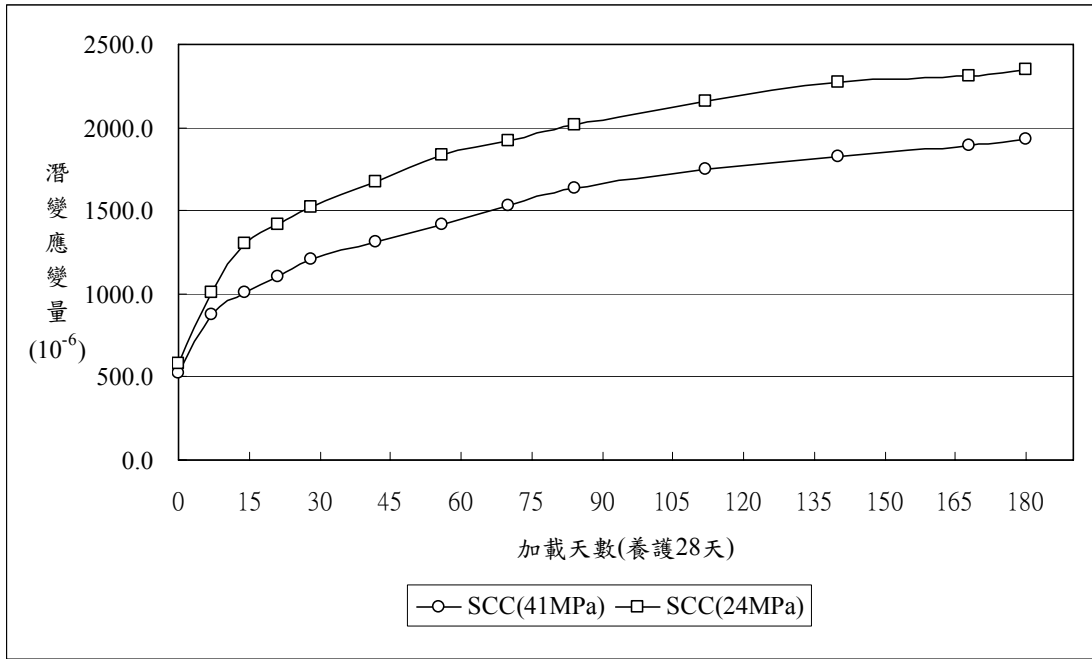


圖 5-13 SCC 埋置#4($\rho=0.015$)之混凝土乾燥潛變

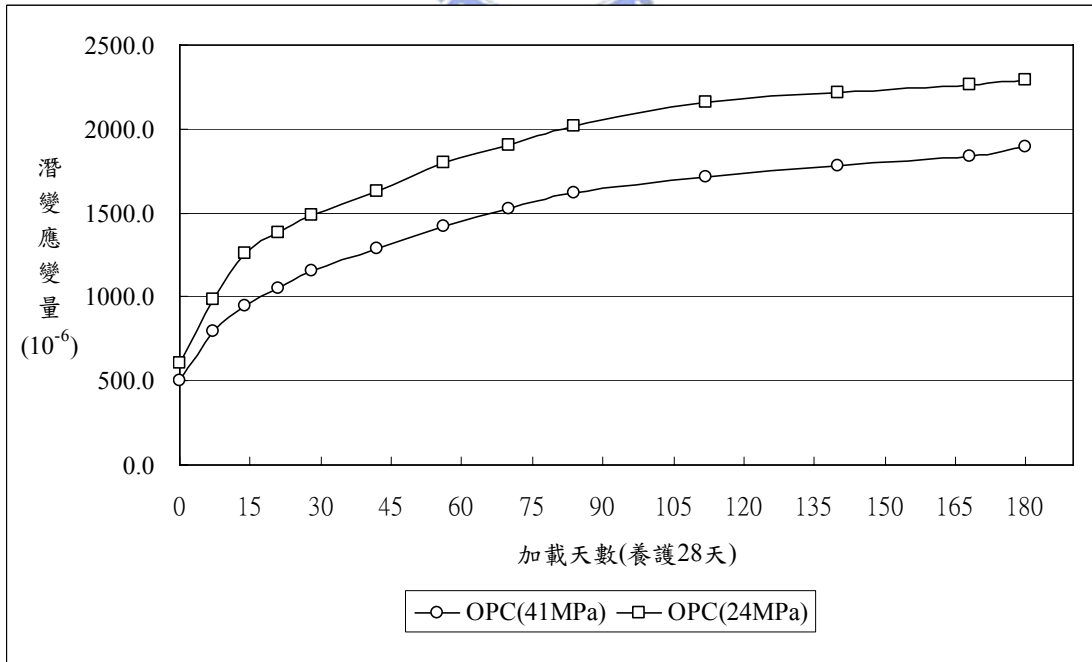


圖 5-14 OPC 埋置#4($\rho=0.015$)之混凝土乾燥潛變

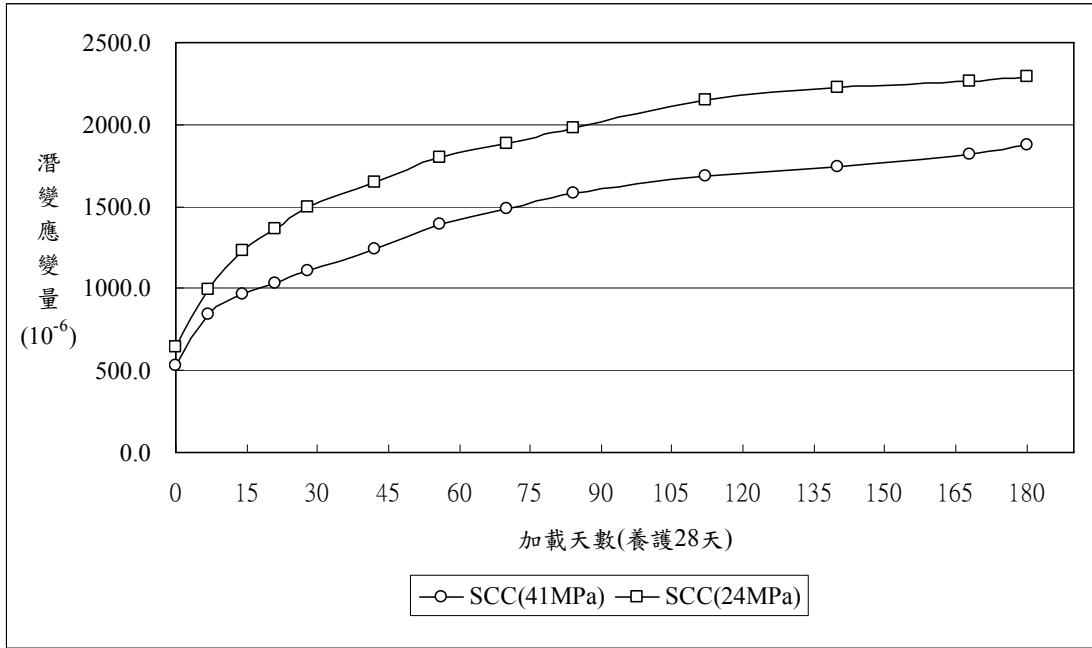


圖 5-15 SCC 埋置#4($\rho=0.03$)之混凝土乾燥潛變

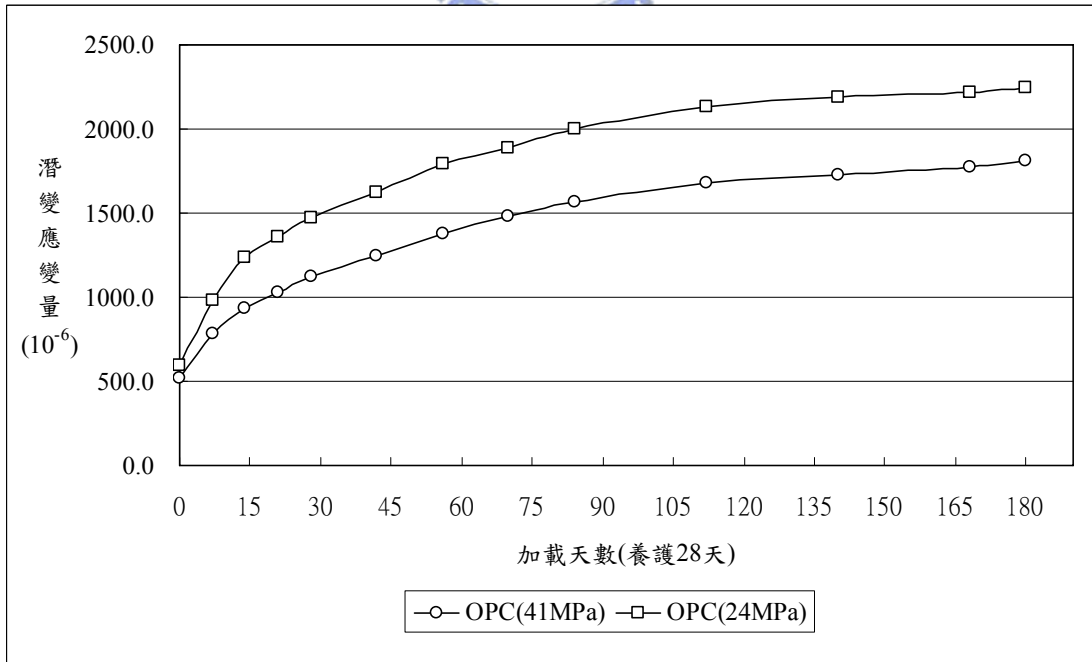


圖 5-16 OPC 埋置#4($\rho=0.03$)之混凝土乾燥潛變

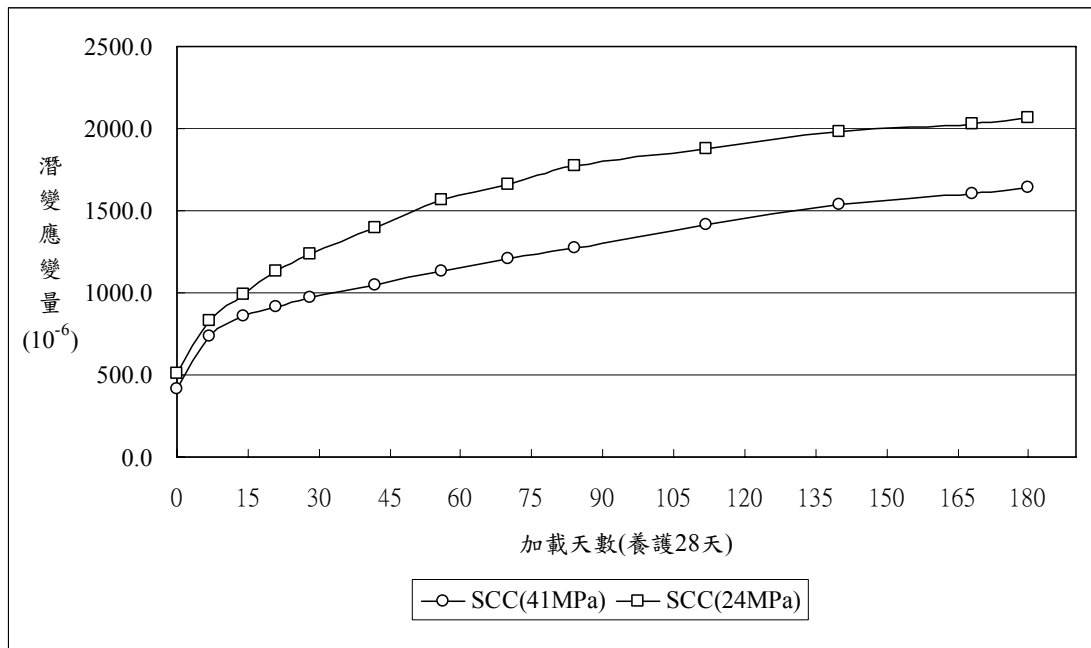


圖 5-17 SCC 埋置#7($\rho=0.015$)之混凝土乾燥潛變

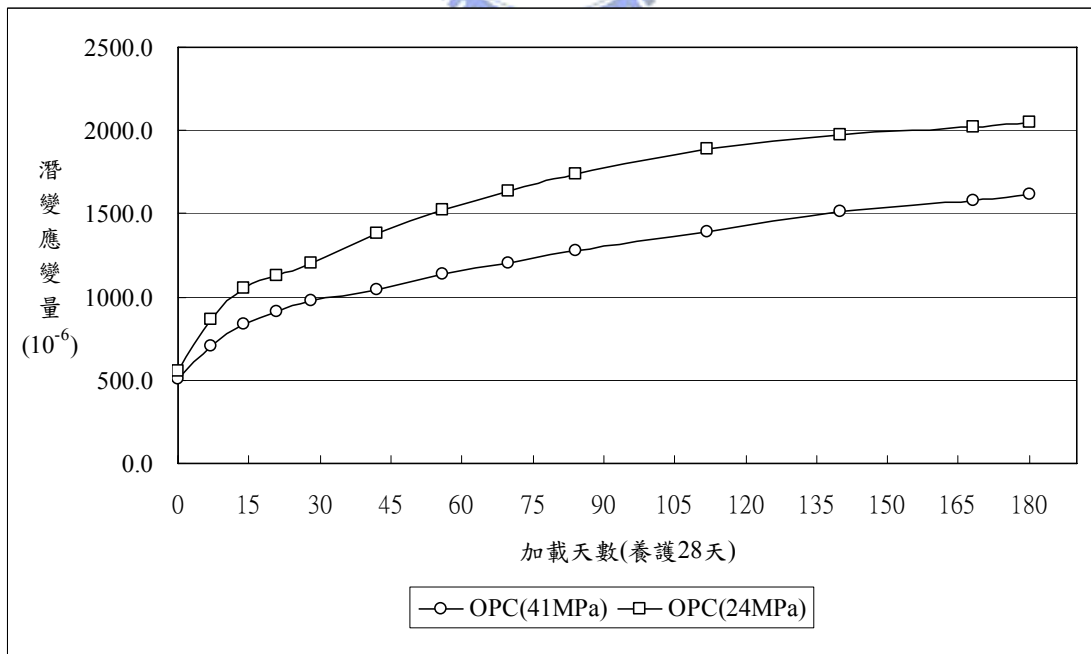


圖 5-18 OPC 埋置#7($\rho=0.015$)之混凝土乾燥潛變

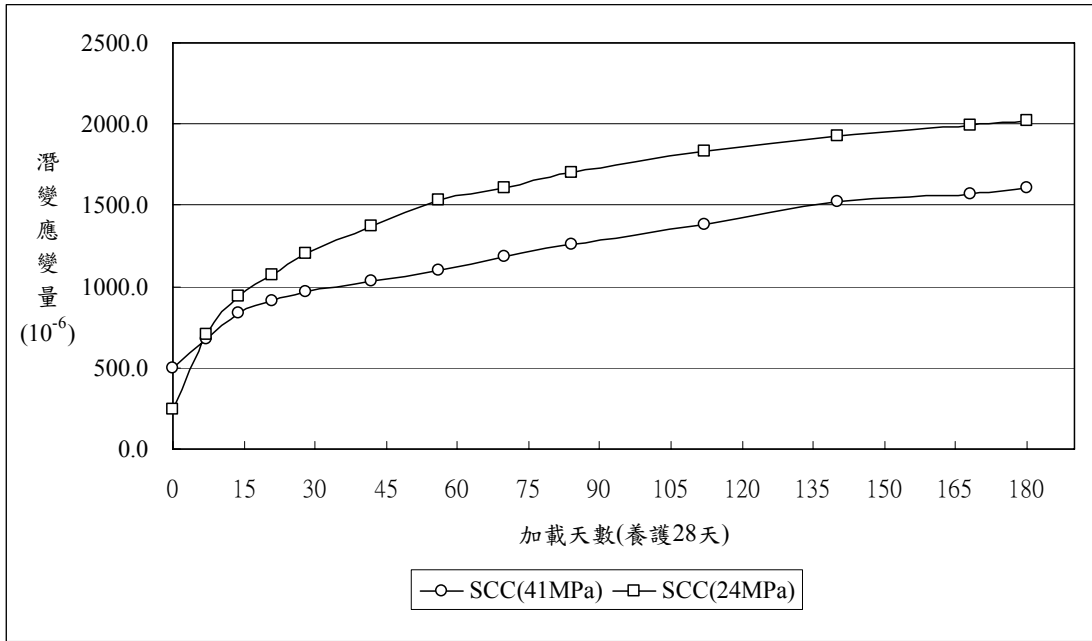


圖 5-19 SCC 埋置#7($\rho=0.03$)之混凝土乾燥潛變

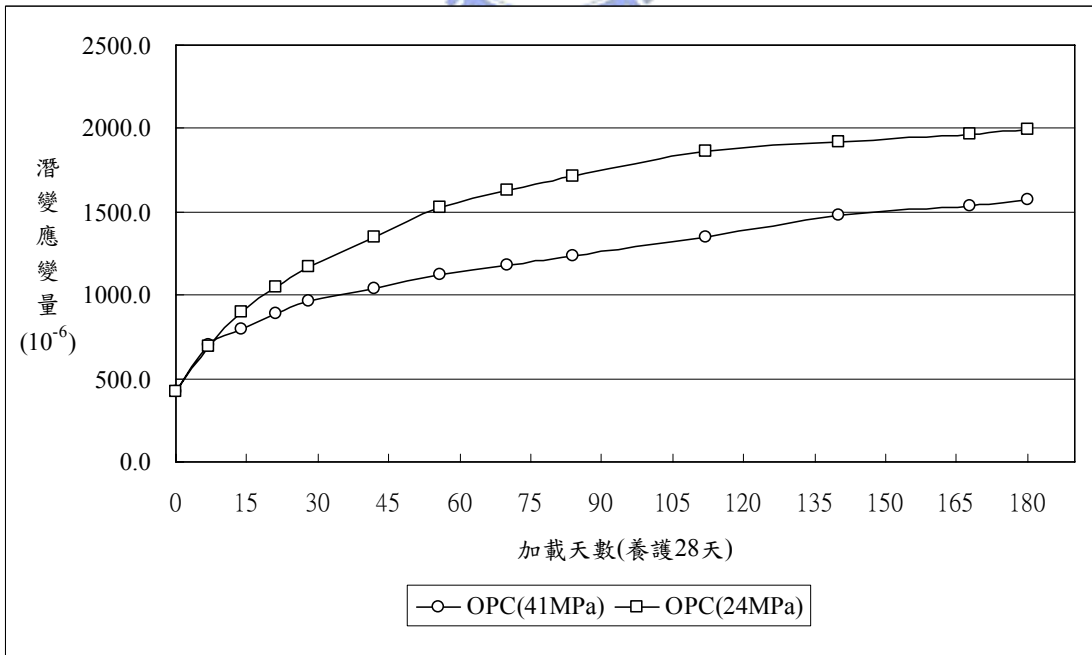


圖 5-20 OPC 埋置#7($\rho=0.03$)之混凝土乾燥潛變

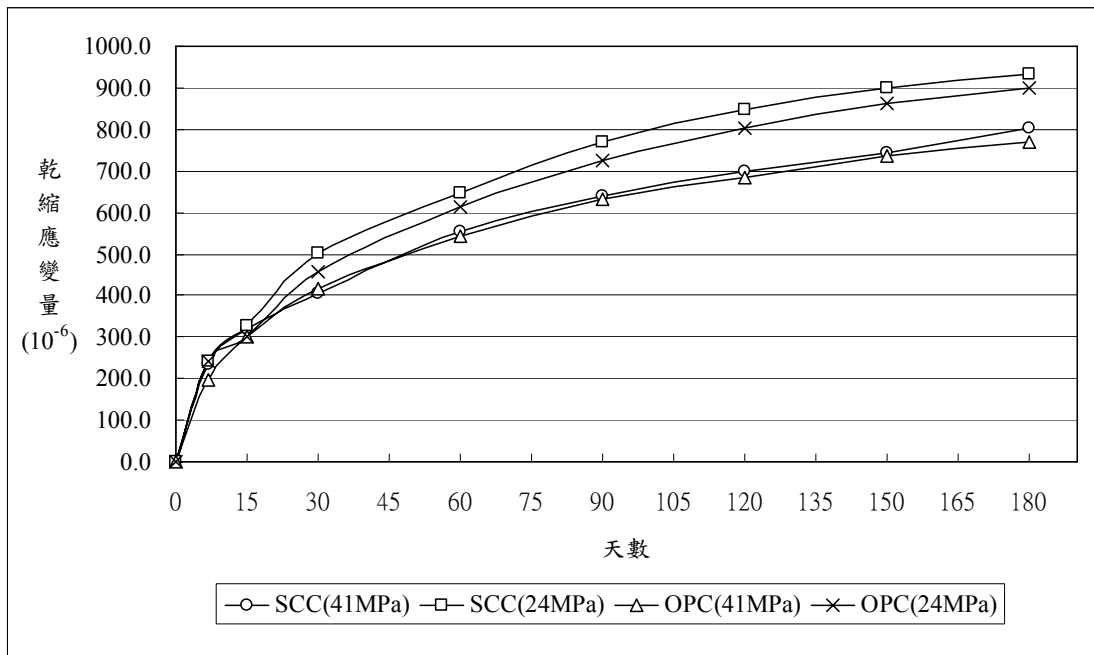


圖 5-21 SCC 與 OPC 純混凝土乾縮之比較

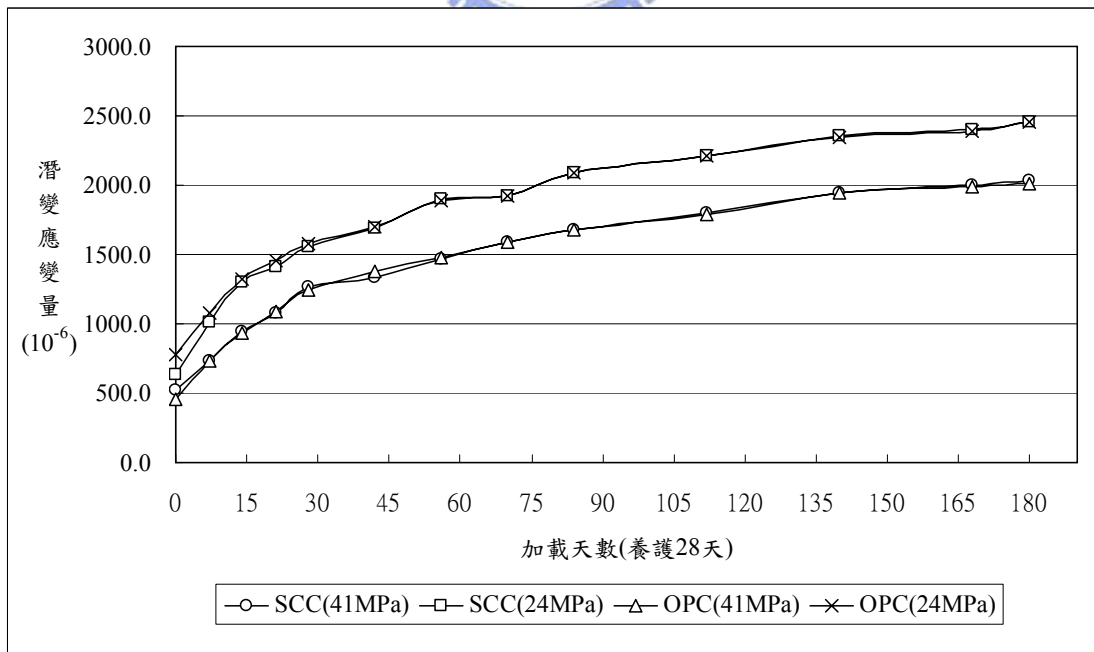


圖 5-22 SCC 與 OPC 純混凝土乾燥潛變之比較

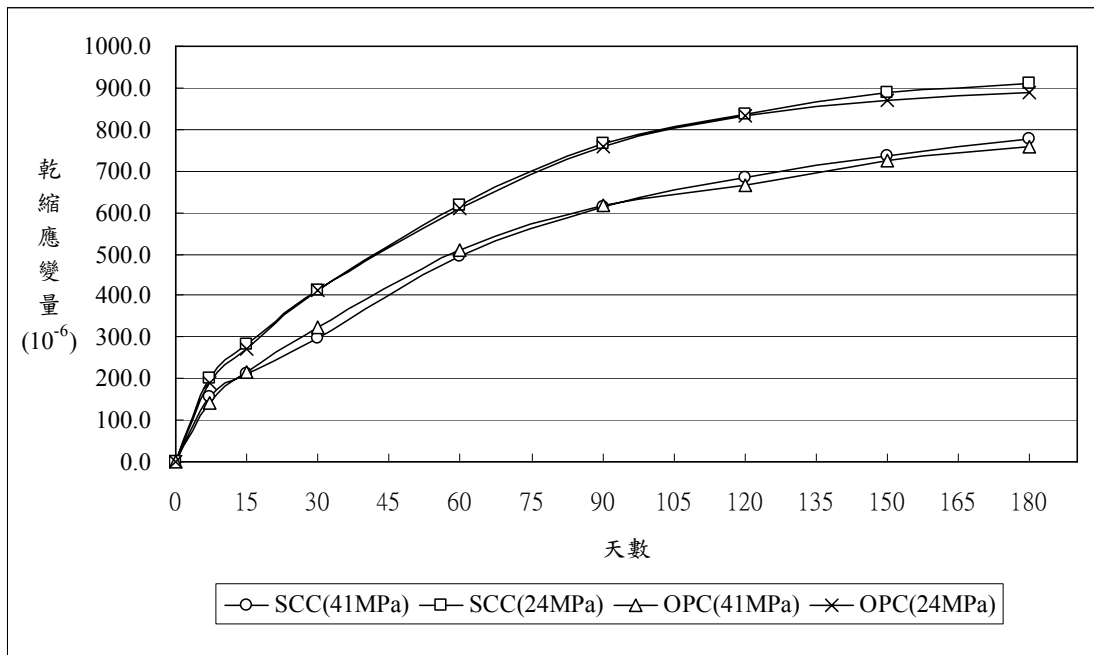


圖 5-23 SCC 與 OPC 埋置#4($\rho=0.015$)之混凝土乾縮比較

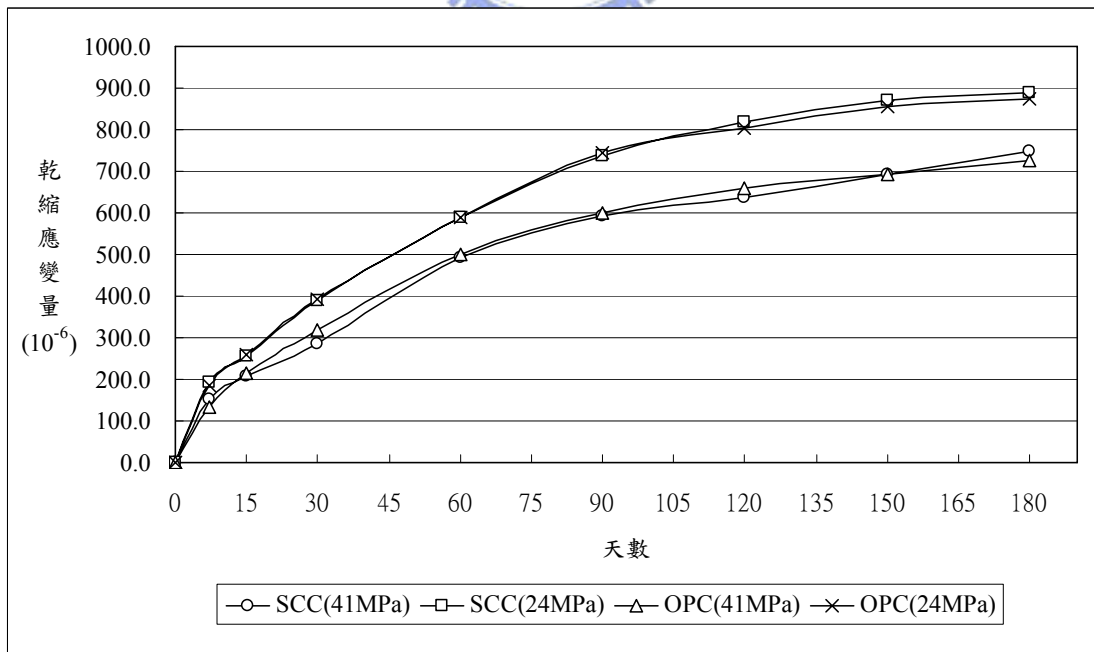


圖 5-24 SCC 與 OPC 埋置#4($\rho=0.03$)之混凝土乾縮比較

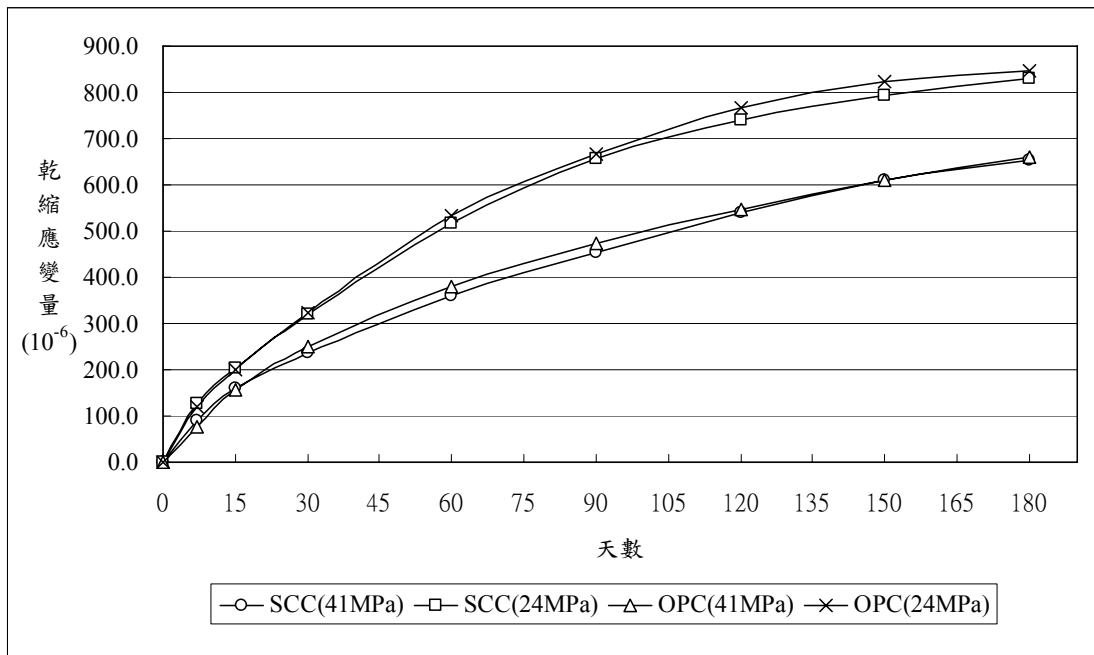


圖 5-25 SCC 與 OPC 埋置#7($\rho=0.015$)之混凝土乾縮比較

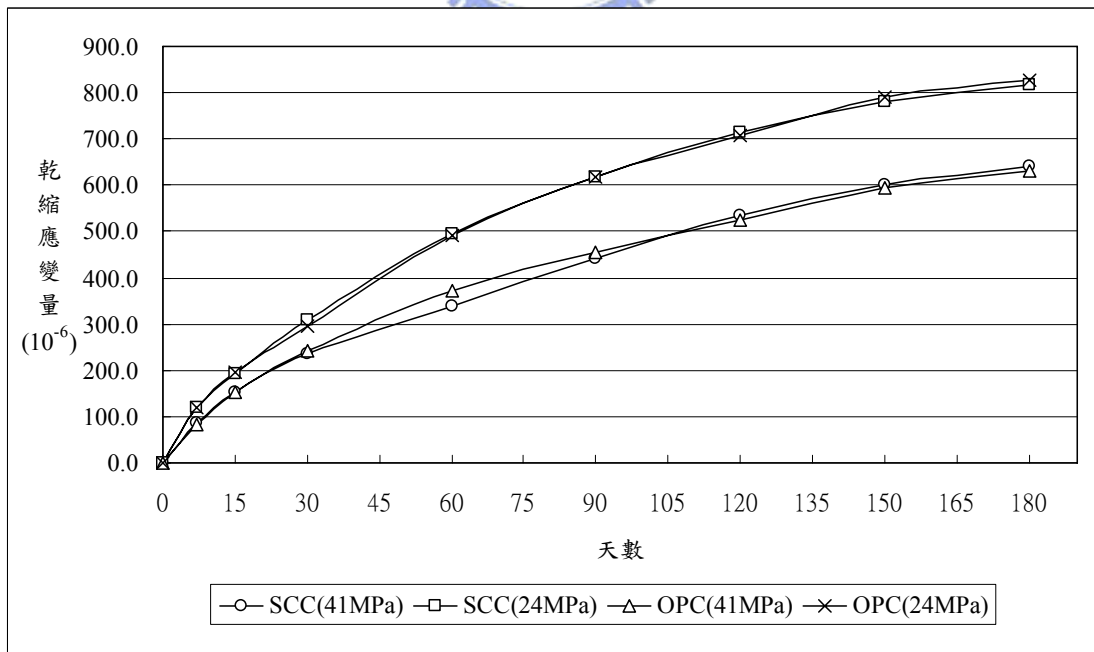


圖 5-26 SCC 與 OPC 埋置#7($\rho=0.03$)之混凝土乾縮比較

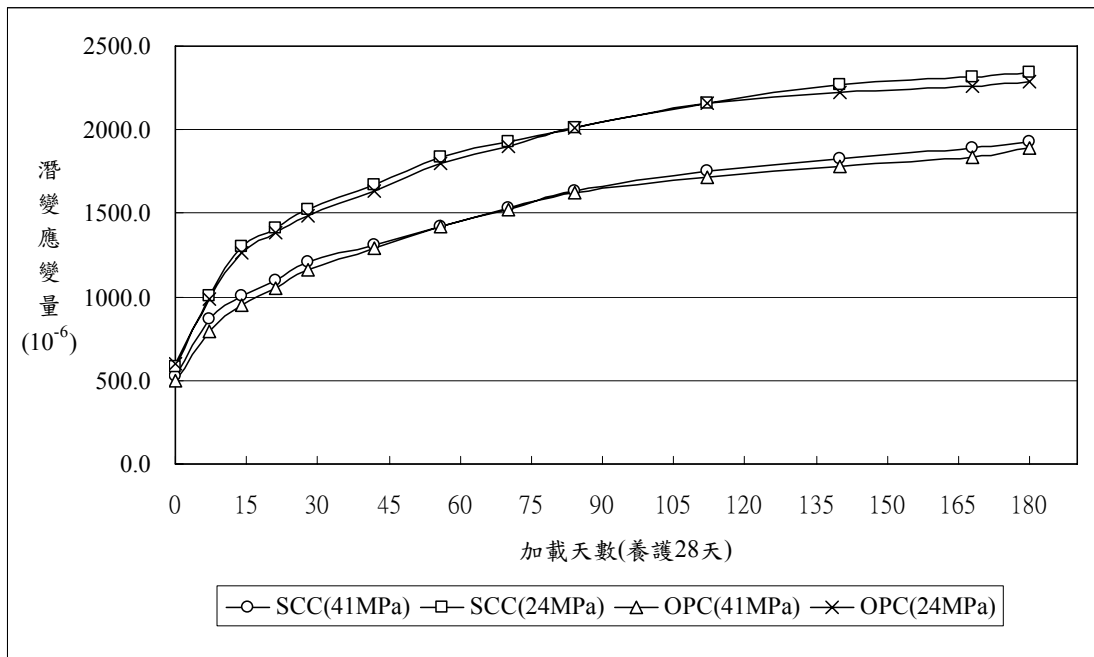


圖 5-27 SCC 與 OPC 埋置#4(ρ=0.015)之混凝土乾燥潛變比較

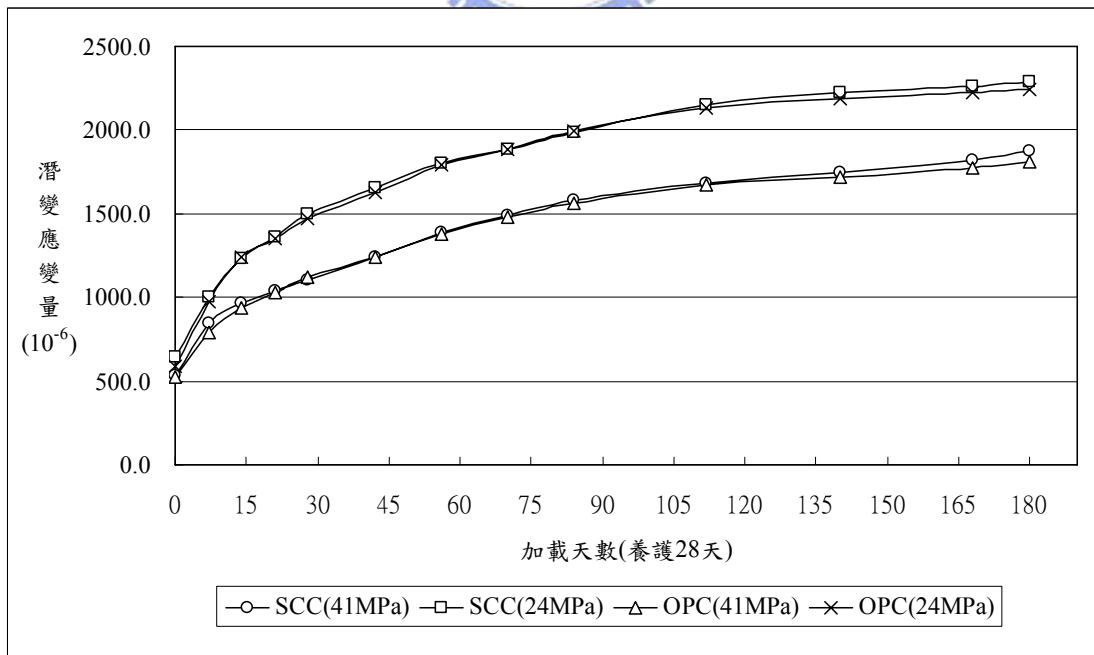


圖 5-28 SCC 與 OPC 埋置#4(ρ=0.03)之混凝土乾燥潛變比較

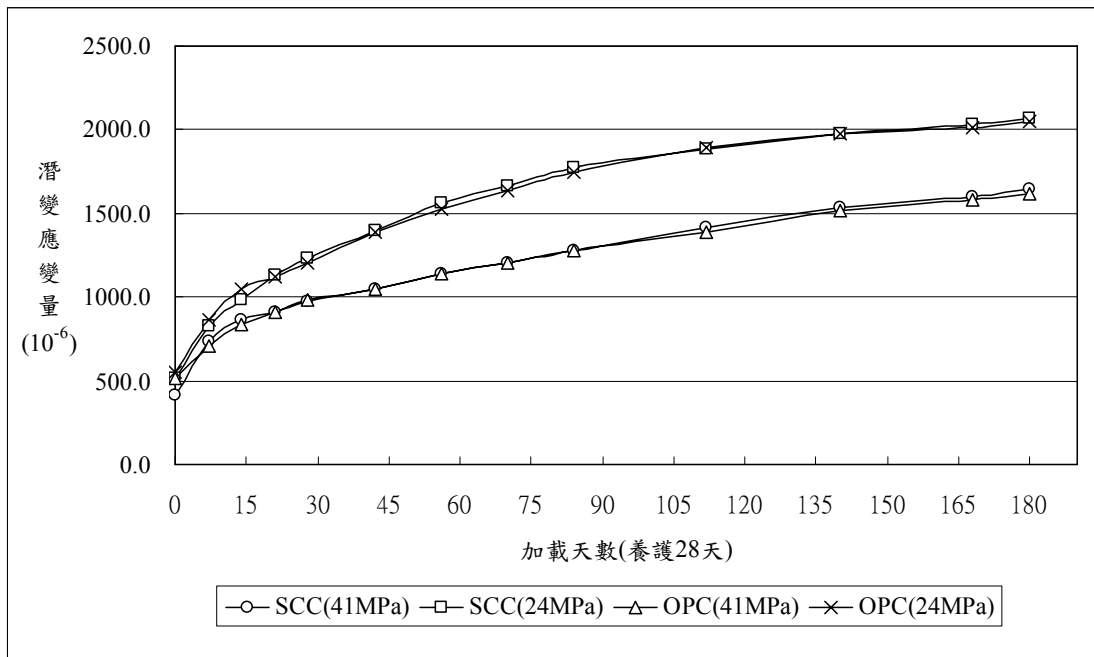


圖 5-29 SCC 與 OPC 埋置#7($\rho=0.015$)之混凝土乾燥潛變比較

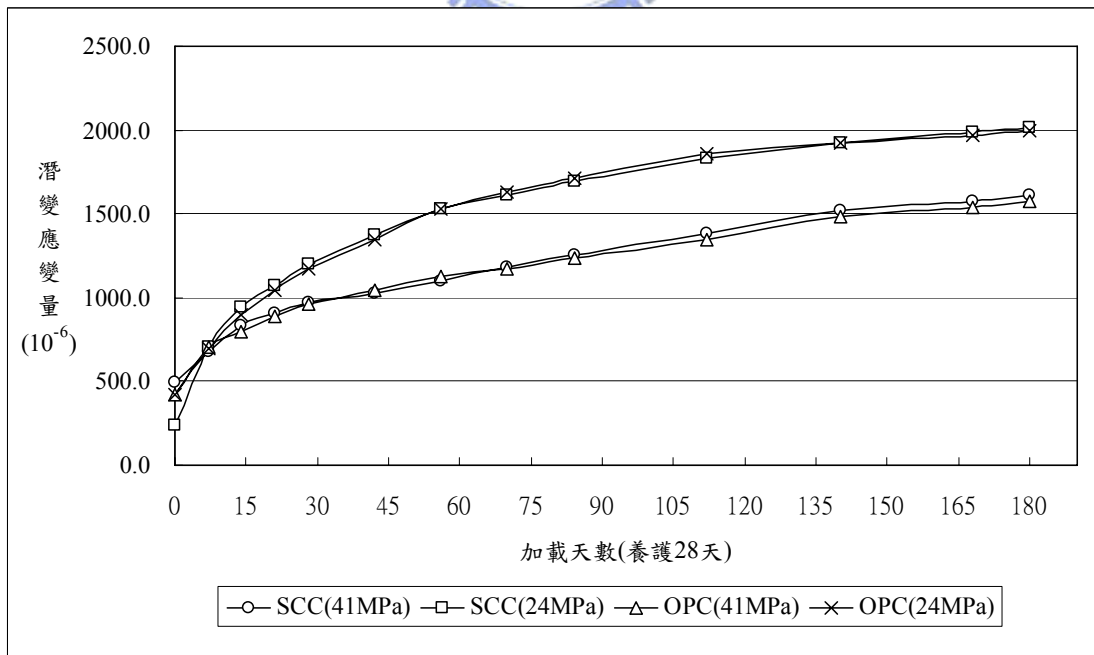


圖 5-30 SCC 與 OPC 埋置#7($\rho=0.03$)之混凝土乾燥潛變比較

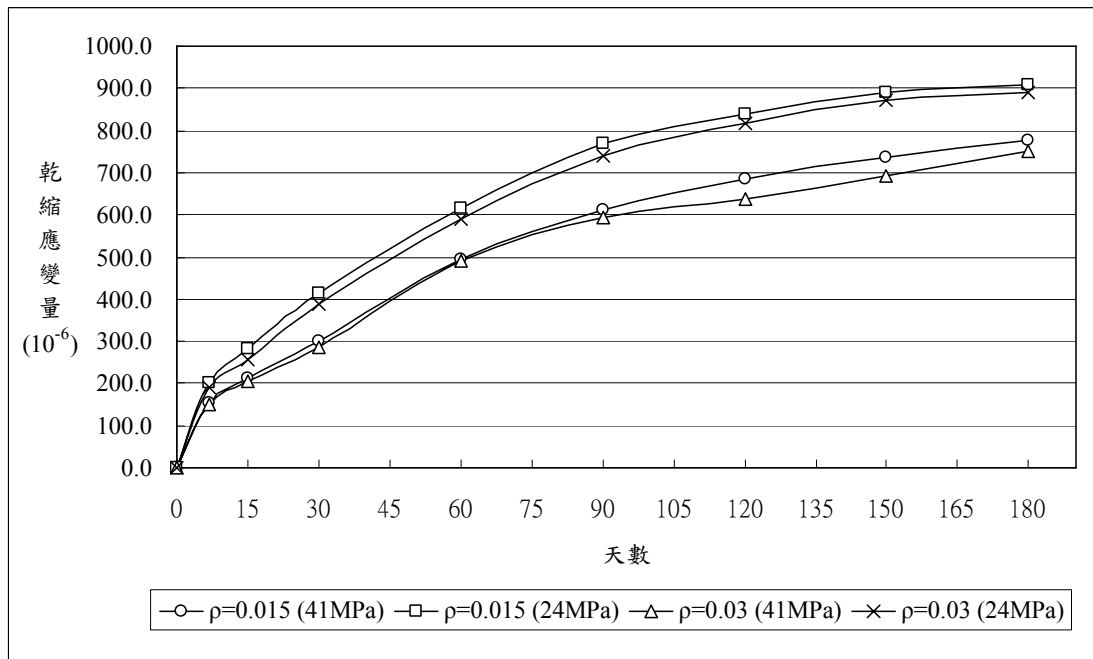


圖 5-31 SCC 埋置#4 鋼筋比為 0.015 與 0.03 之乾縮比較

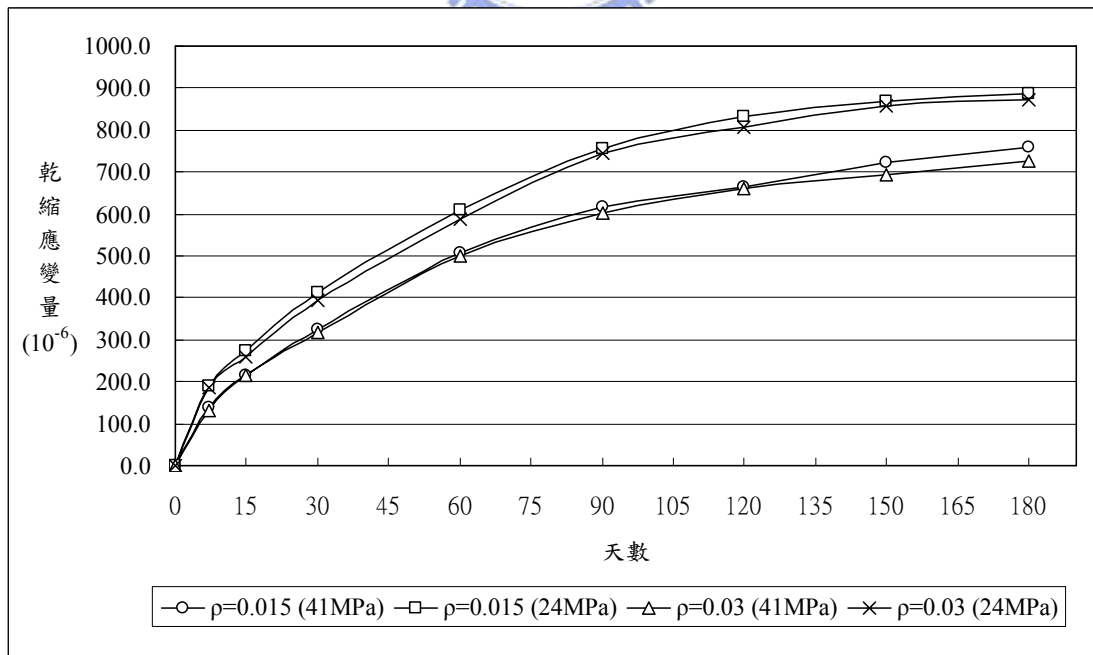


圖 5-32 OPC 埋置#4 鋼筋比為 0.015 與 0.03 之乾縮比較

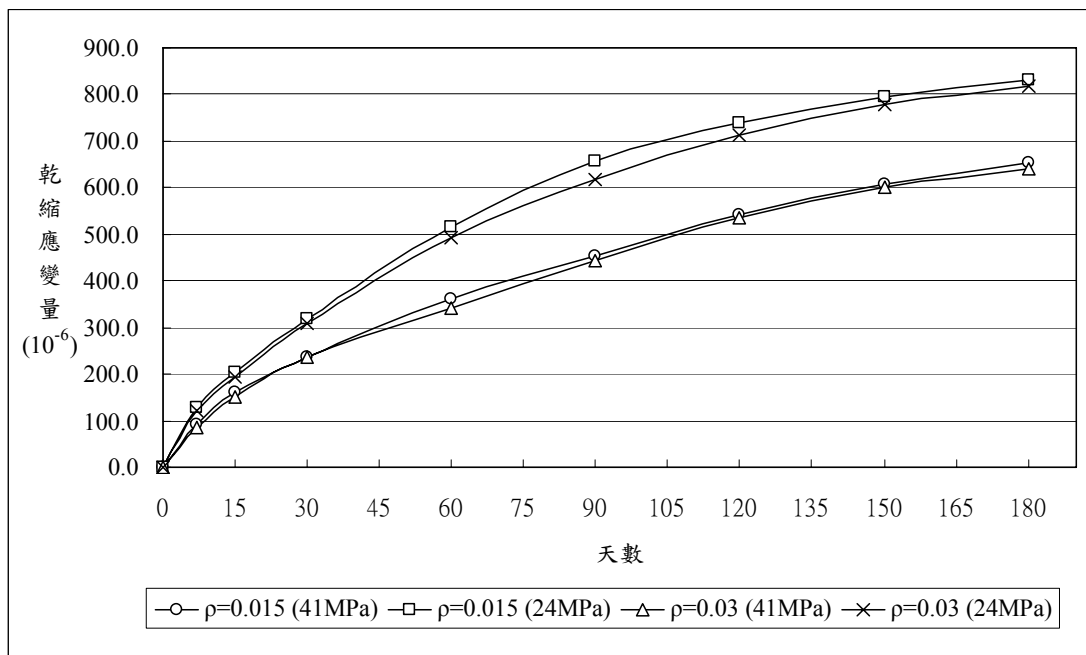


圖 5-33 SCC 埋置#7 鋼筋比為 0.015 與 0.03 之乾縮比較

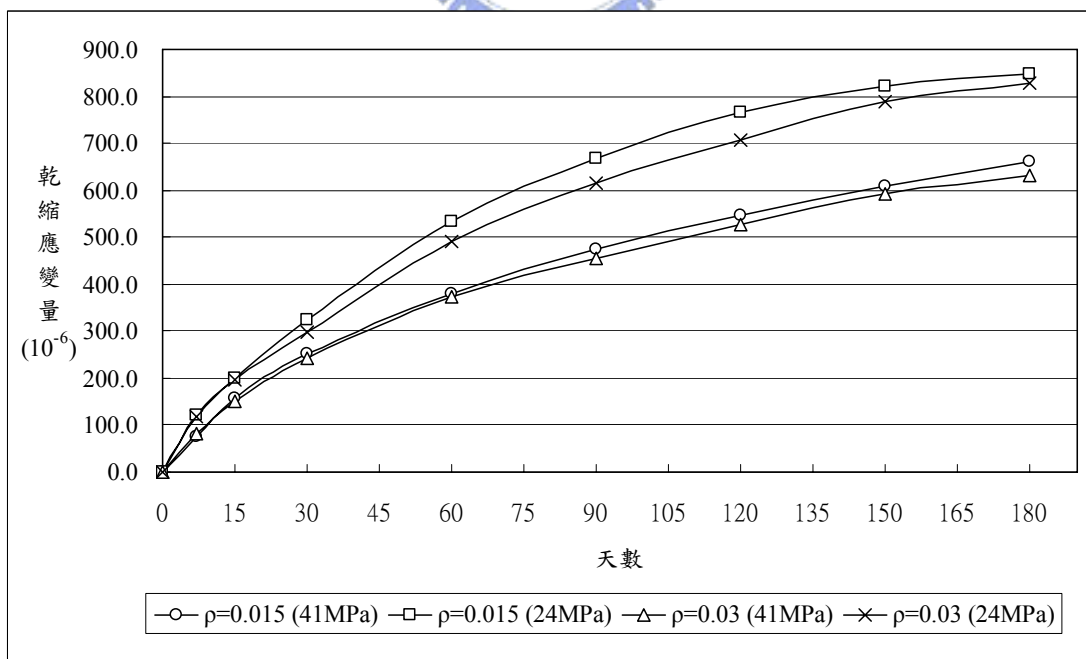


圖 5-34 OPC 埋置#7 鋼筋比為 0.015 與 0.03 之乾縮比較

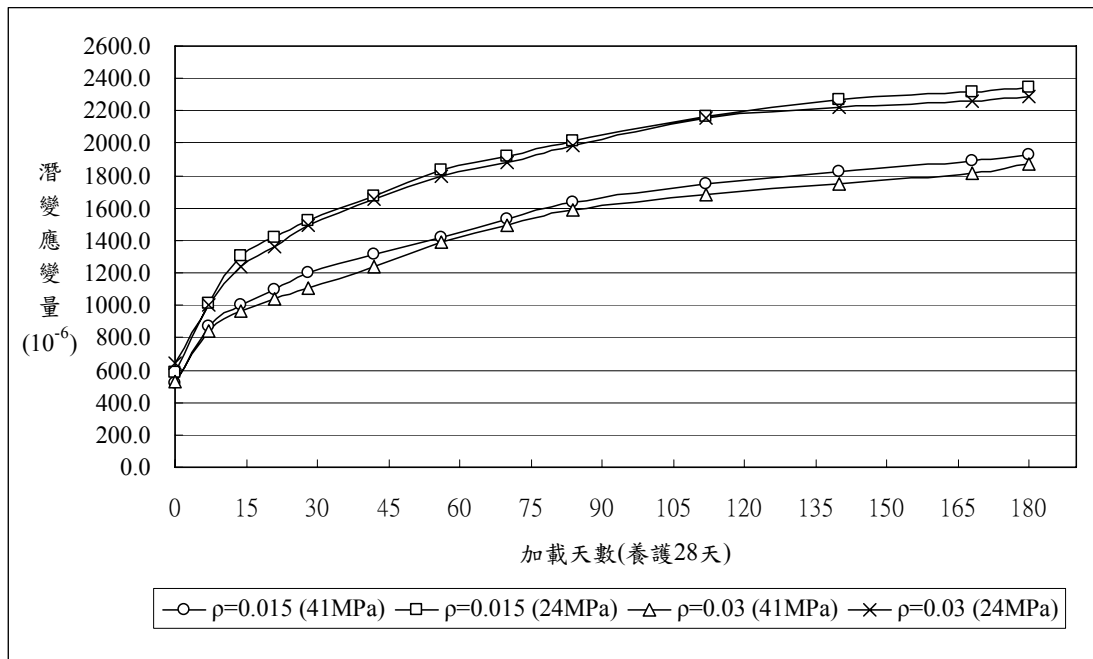


圖 5-35 SCC 埋置#4 鋼筋比為 0.015 與 0.03 之乾燥潛變比較

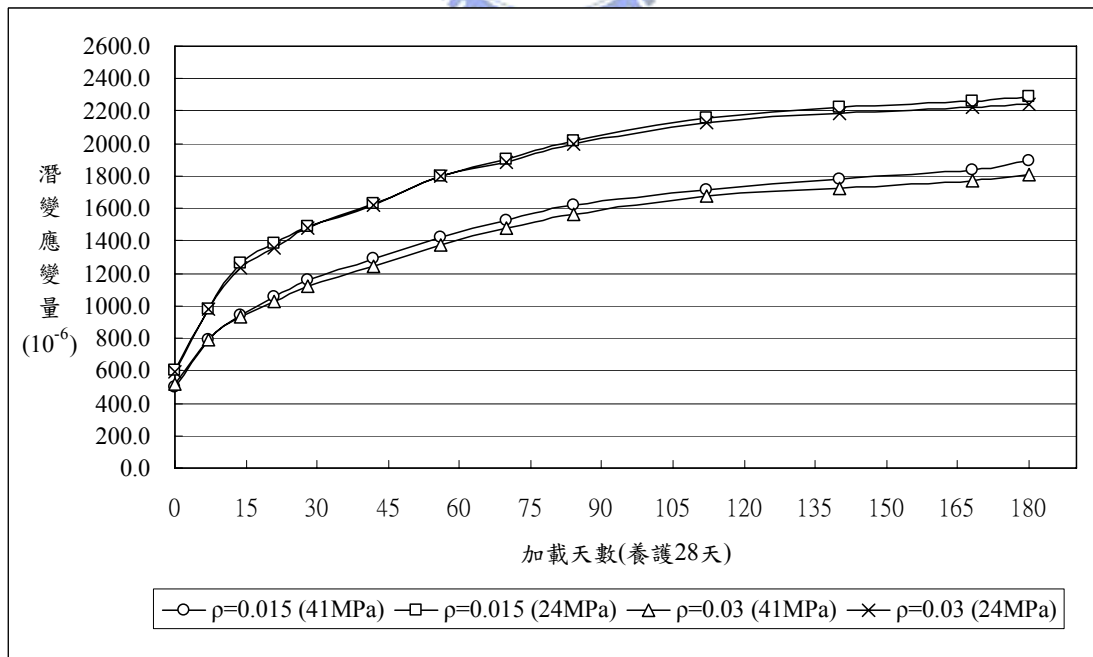


圖 5-36 OPC 埋置#4 鋼筋比為 0.015 與 0.03 之乾燥潛變比較

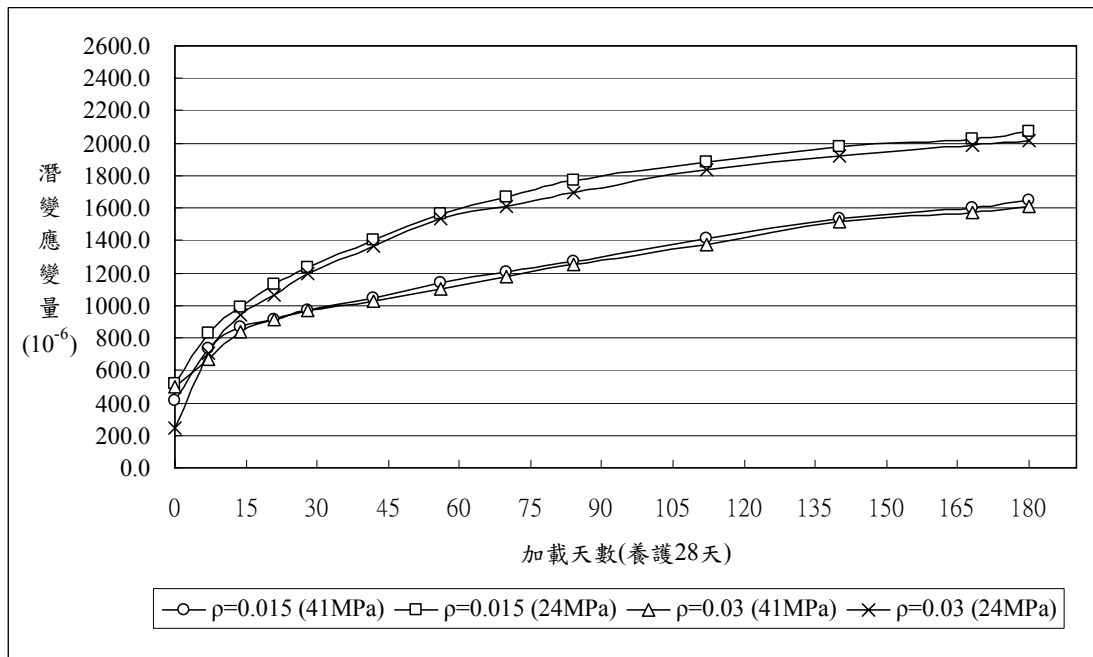


圖 5-37 SCC 埋置#7 鋼筋比為 0.015 與 0.03 之乾燥潛變比較

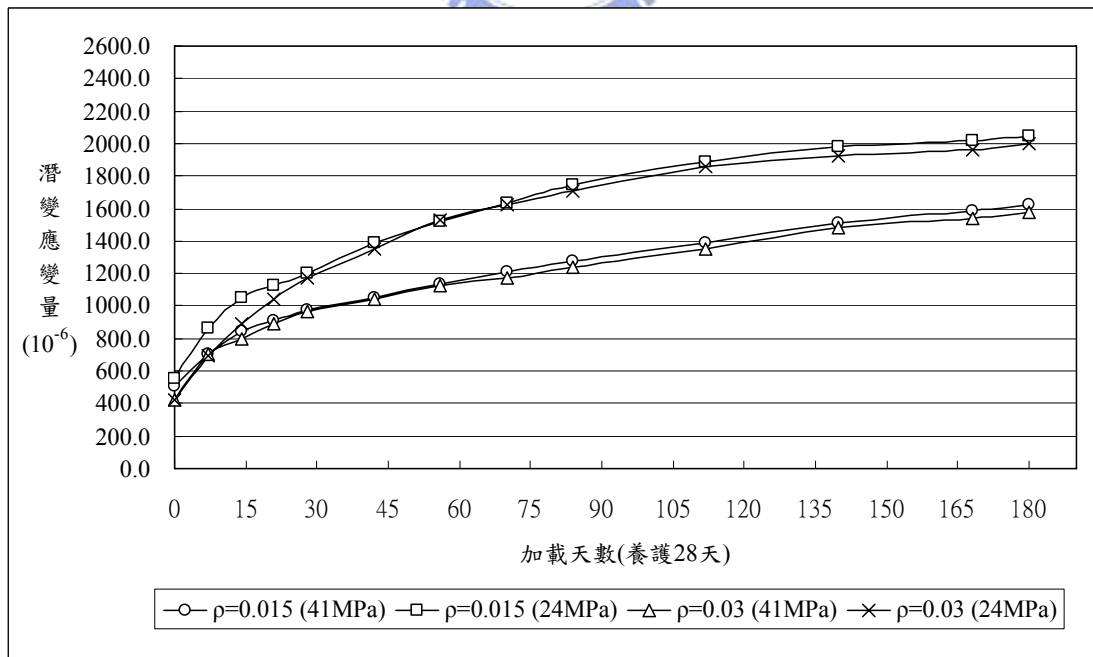


圖 5-38 OPC 埋置#7 鋼筋比為 0.015 與 0.03 之乾燥潛變比較

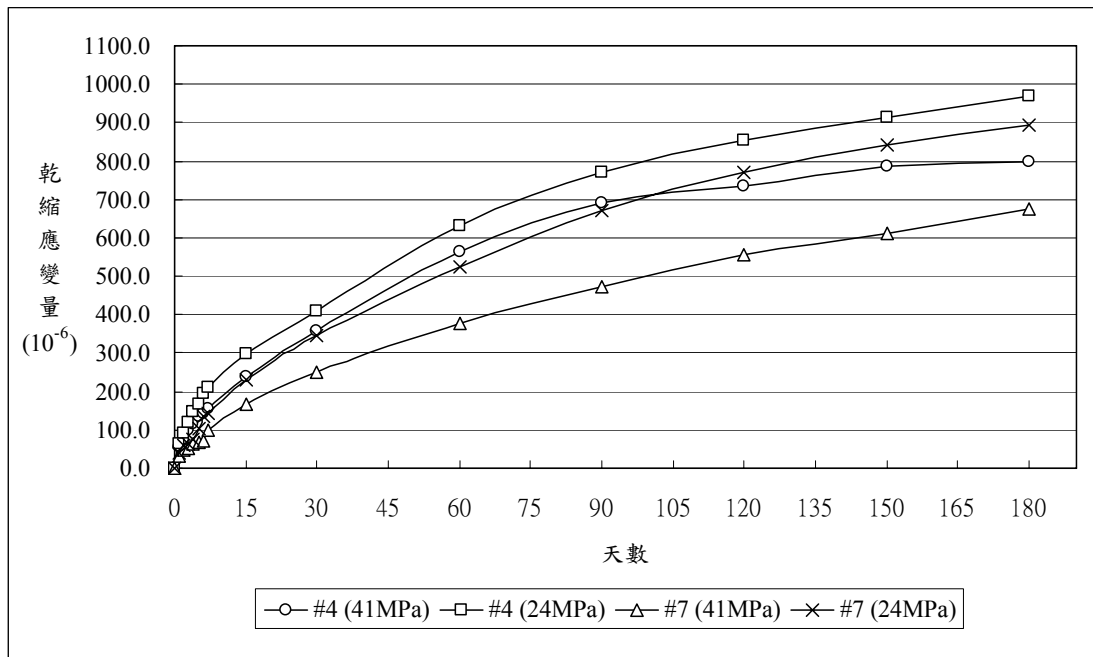


圖 5-39 SCC 埋置#4 與#7 ($\rho=0.015$)之乾縮比較(空氣養護)

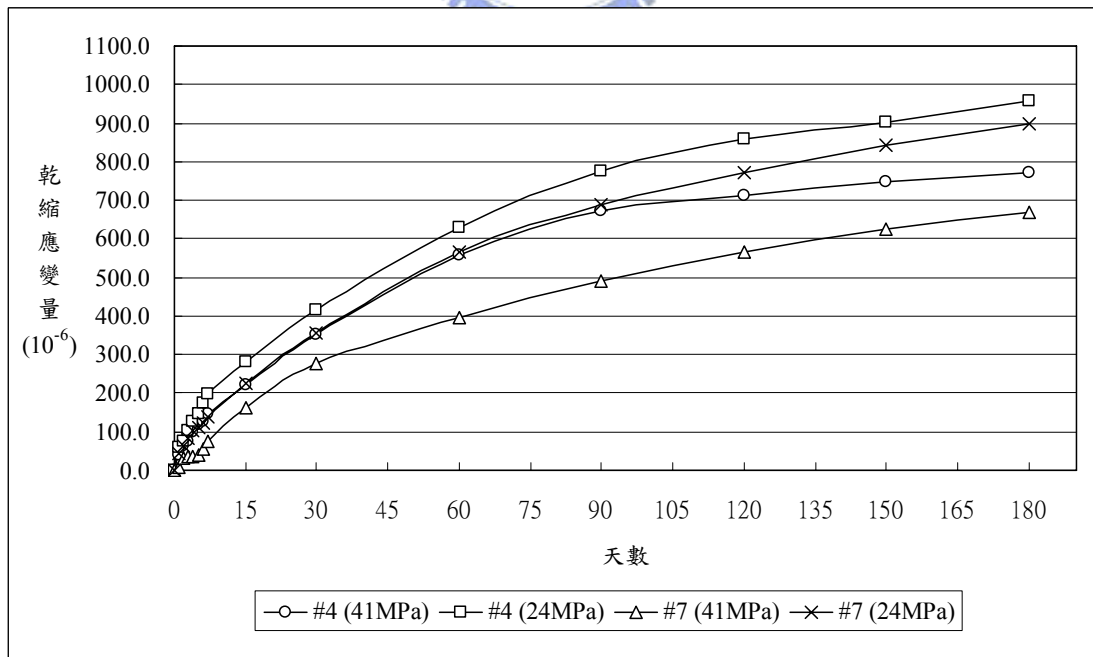


圖 5-40 OPC 埋置#4 與#7 ($\rho=0.015$)之乾縮比較(空氣養護)

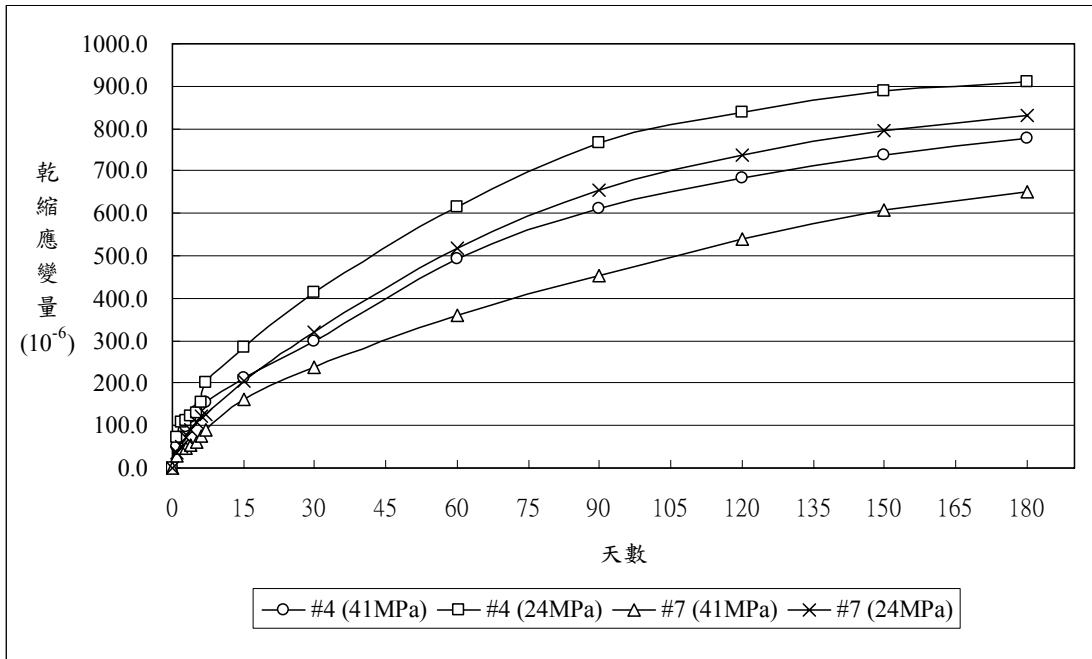


圖 5-41 SCC 埋置#4 與#7 ($\rho=0.015$)之乾縮比較(養護 7 天)

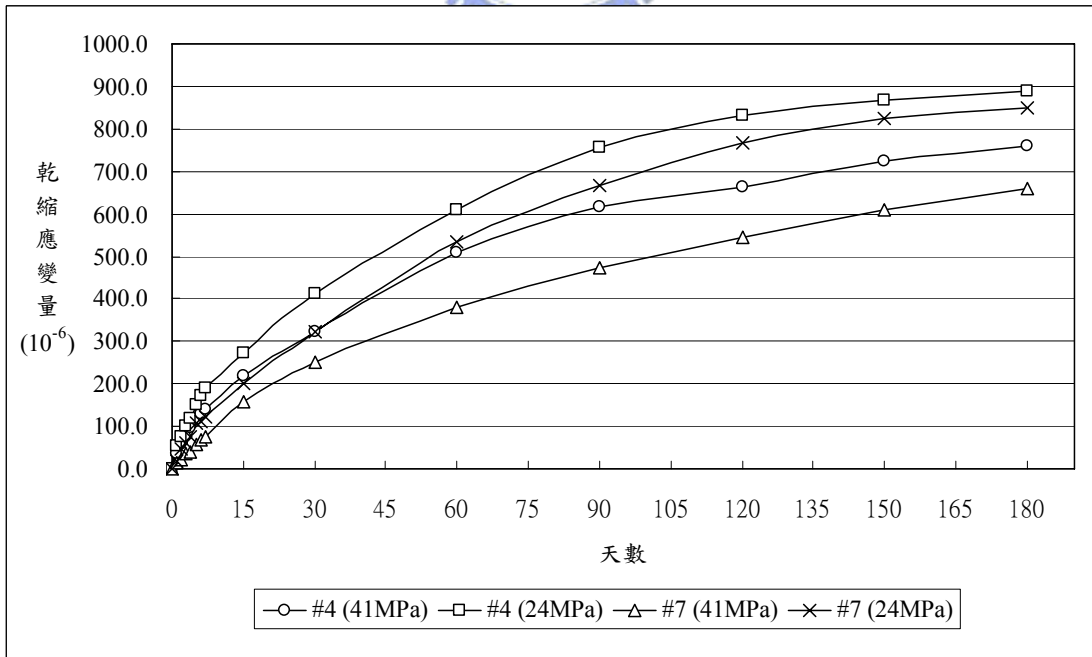


圖 5-42 OPC 埋置#4 與#7 ($\rho=0.015$)之乾縮比較(養護 7 天)

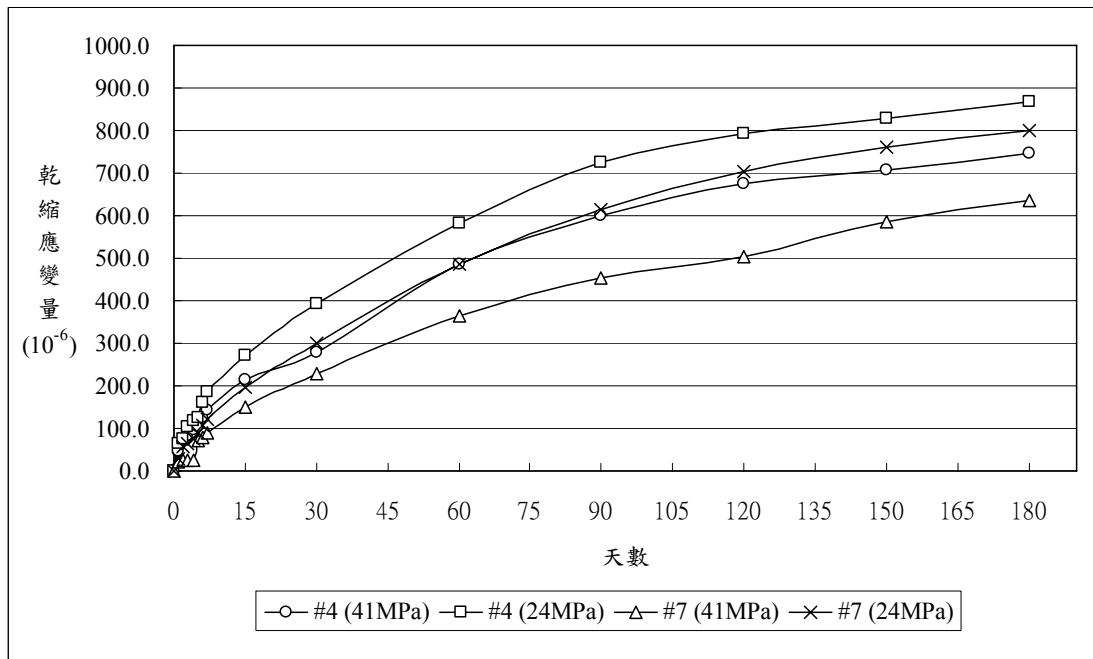


圖 5-43 SCC 埋置#4 與#7 ($\rho=0.015$)之乾縮比較(養護 14 天)

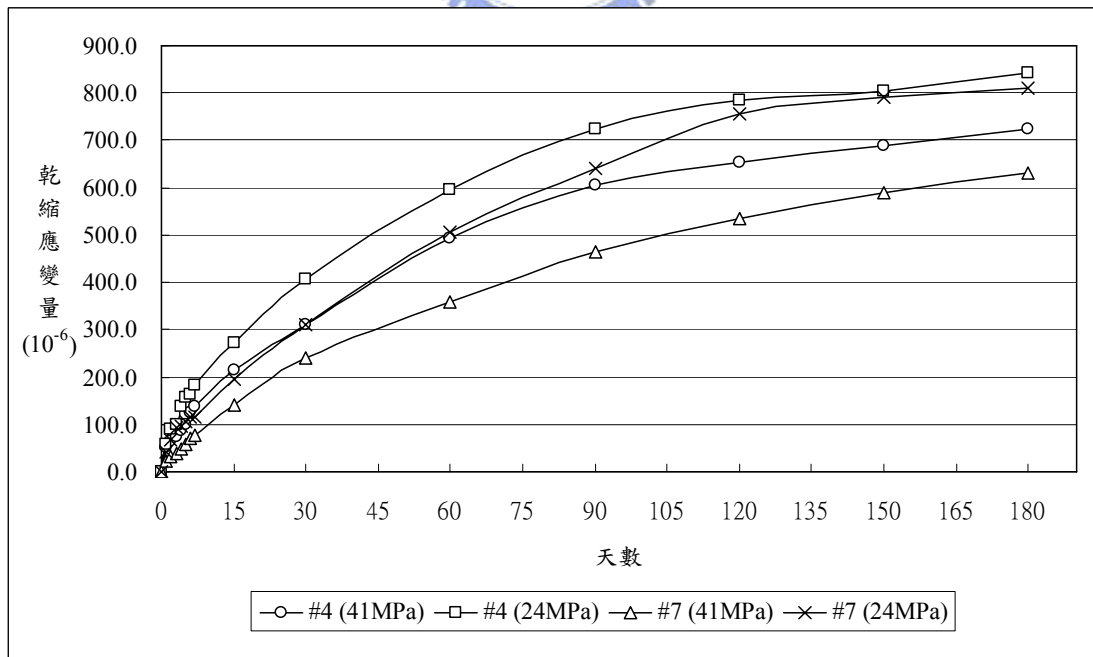


圖 5-44 OPC 埋置#4 與#7 ($\rho=0.015$)之乾縮比較(養護 14 天)

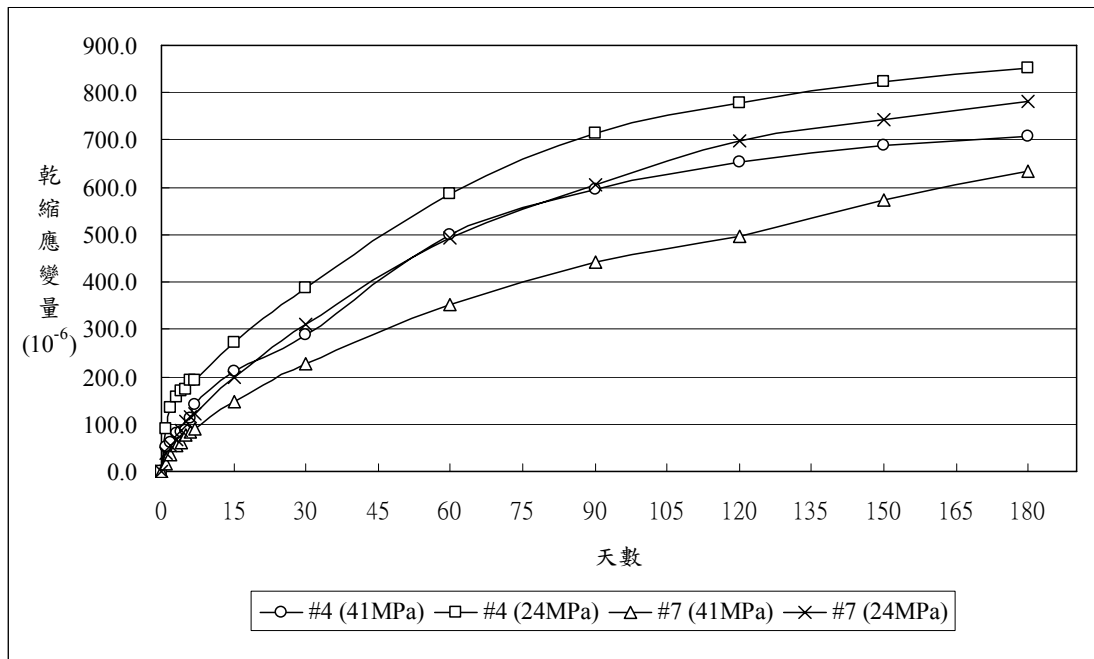


圖 5-45 SCC 埋置#4 與#7 ($\rho=0.015$)之乾縮比較(養護 28 天)

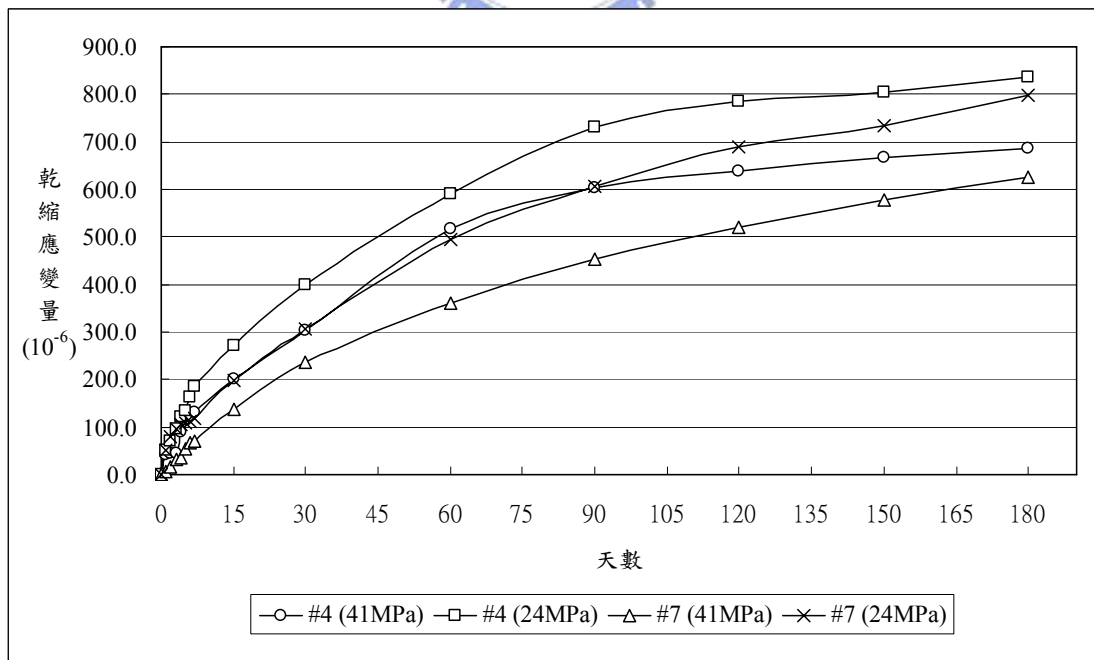


圖 5-46 OPC 埋置#4 與#7 ($\rho=0.015$)之乾縮比較(養護 28 天)

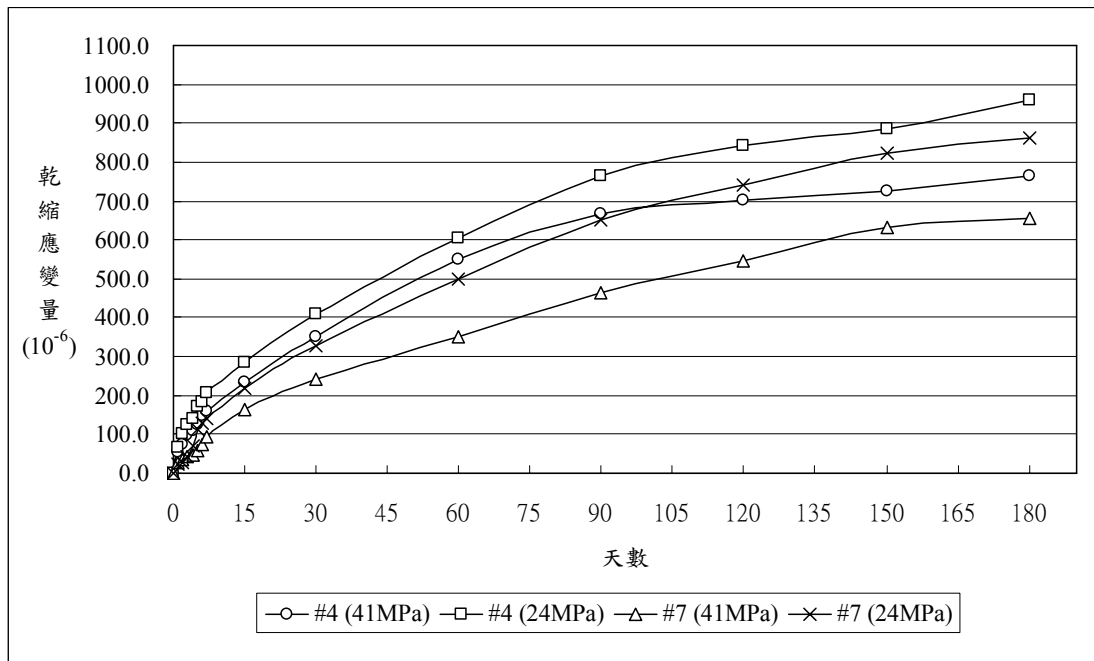


圖 5-47 SCC 埋置#4 與#7 ($\rho=0.03$)之乾縮比較(空氣養護)

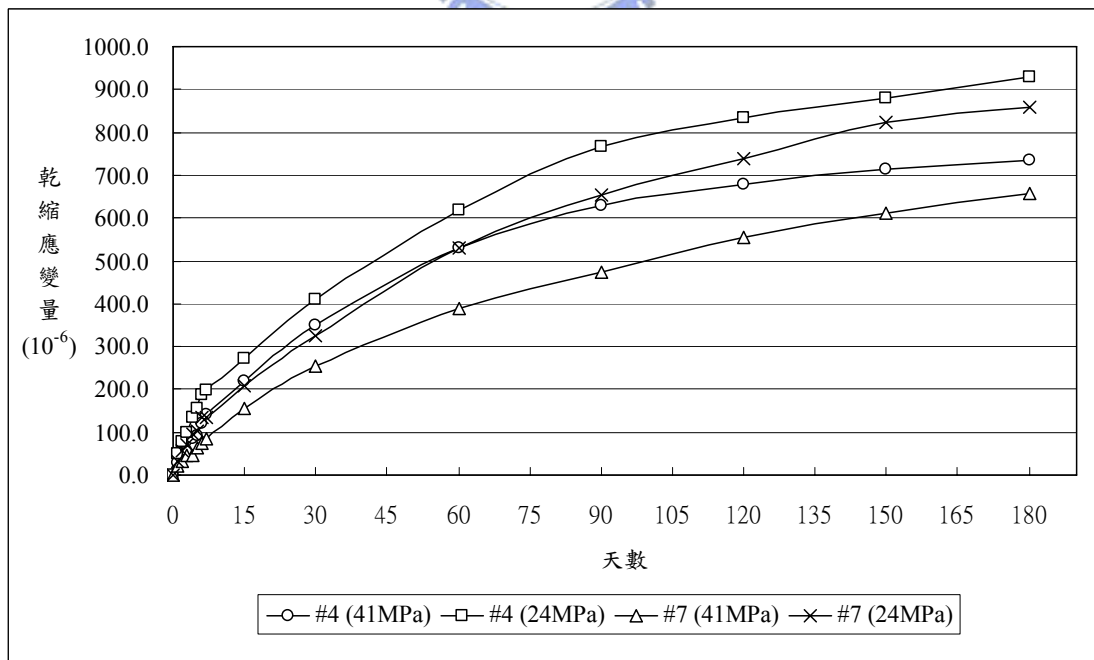


圖 5-48 OPC 埋置#4 與#7 ($\rho=0.03$)之乾縮比較(空氣養護)

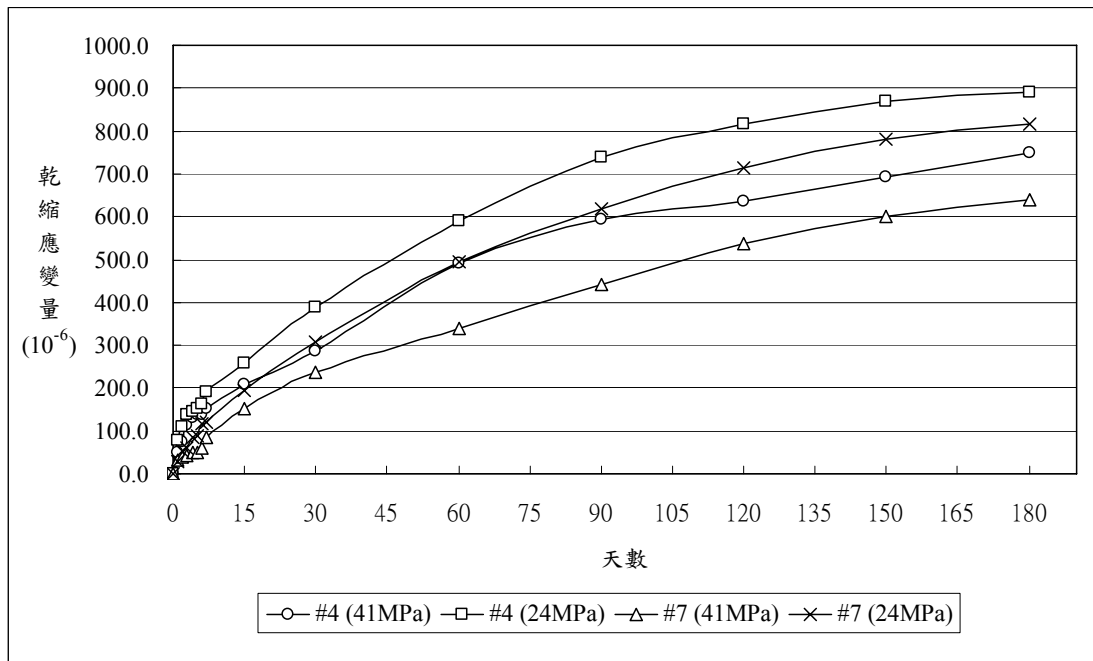


圖 5-49 SCC 埋置#4 與#7 ($\rho=0.03$)之乾縮比較(養護 7 天)

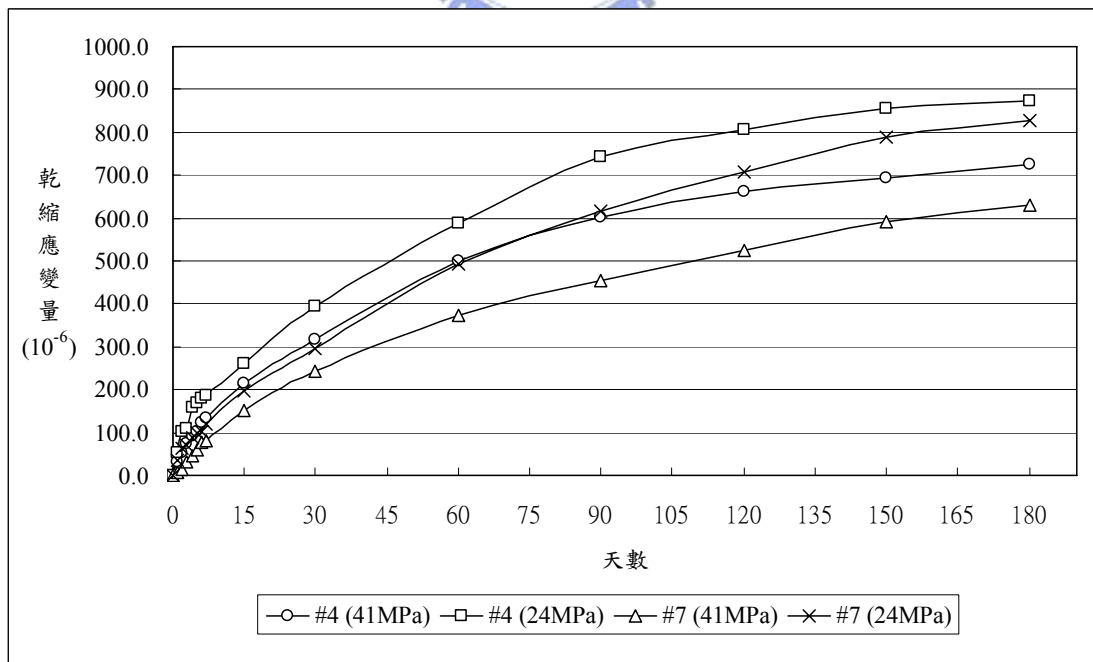


圖 5-50 OPC 埋置#4 與#7 ($\rho=0.03$)之乾縮比較(養護 7 天)

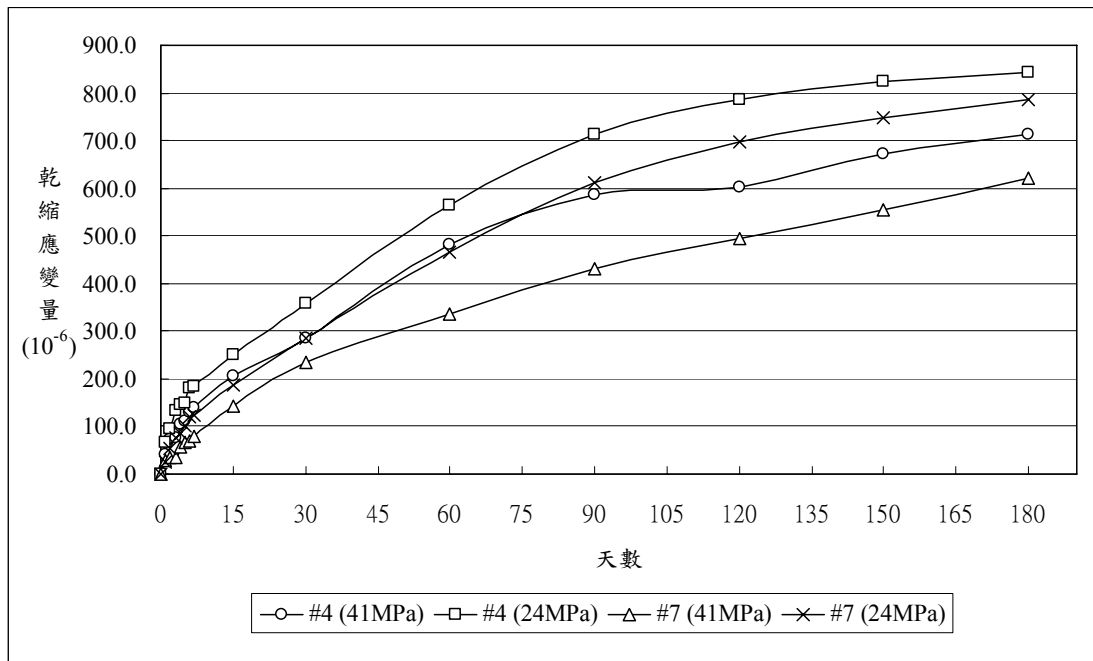


圖 5-51 SCC 埋置#4 與#7 ($\rho=0.03$)之乾縮比較(養護 14 天)

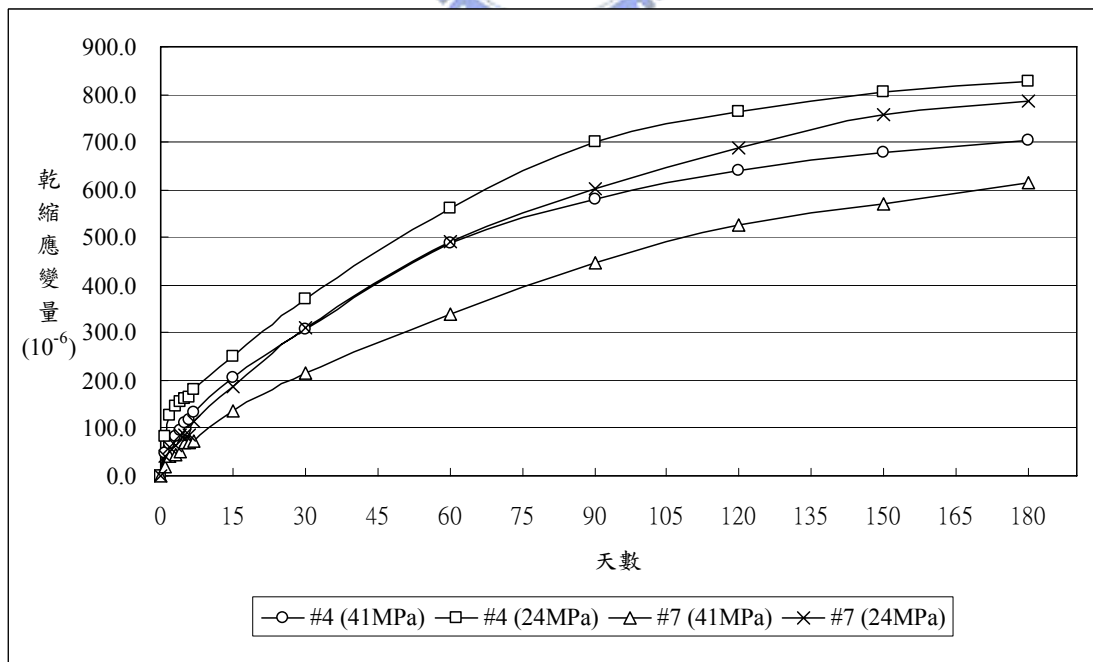


圖 5-52 OPC 埋置#4 與#7 ($\rho=0.03$)之乾縮比較(養護 14 天)

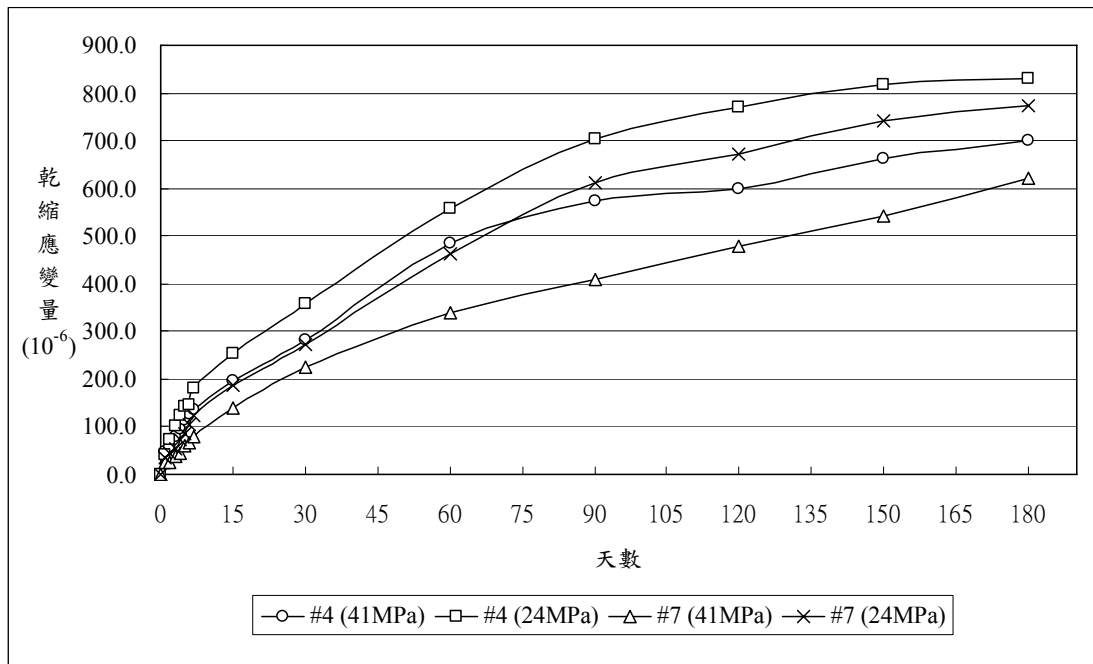


圖 5-53 SCC 埋置#4 與#7 ($\rho=0.03$)之乾縮比較(養護 28 天)

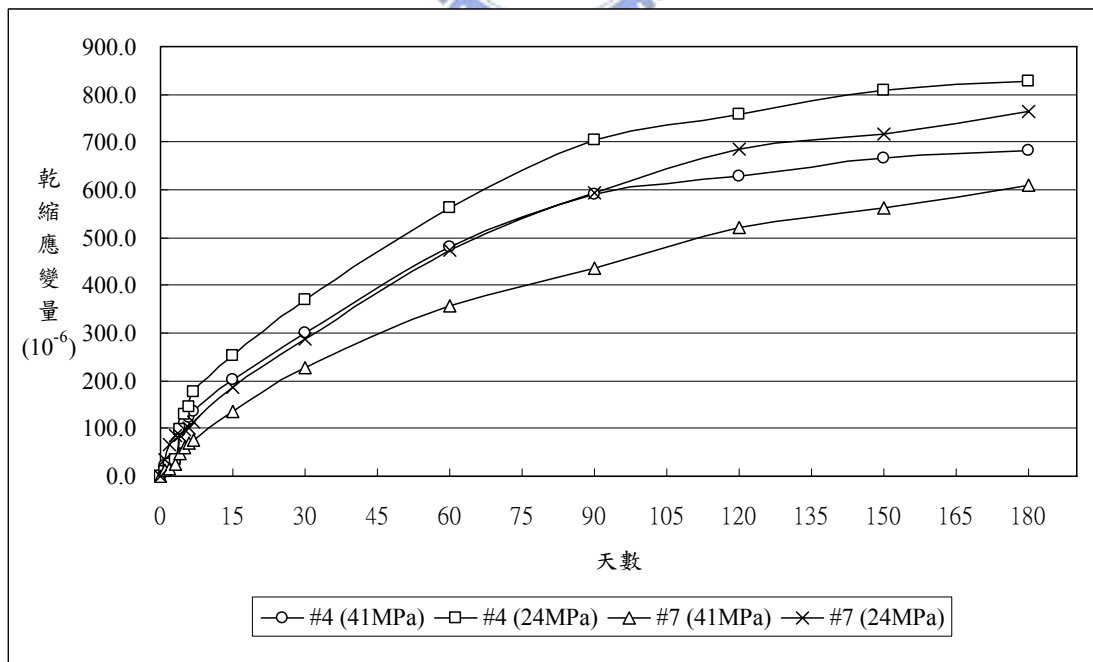


圖 5-54 OPC 埋置#4 與#7 ($\rho=0.03$)之乾縮比較(養護 28 天)

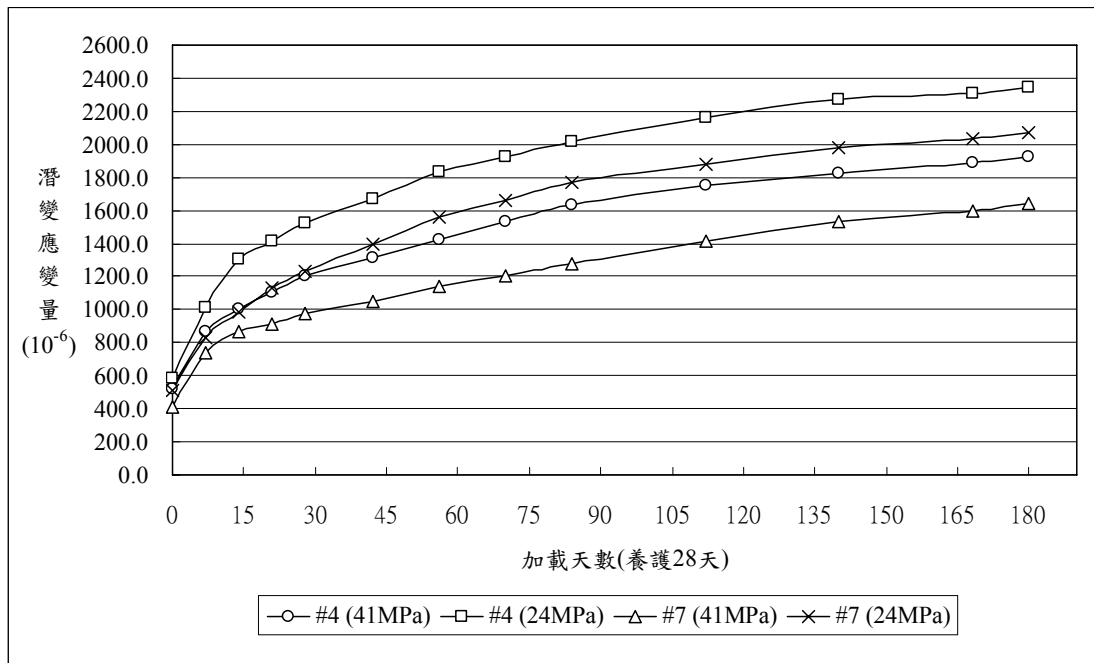


圖 5-55 SCC 埋置#4 與#7 ($\rho=0.015$)之乾燥潛變比較

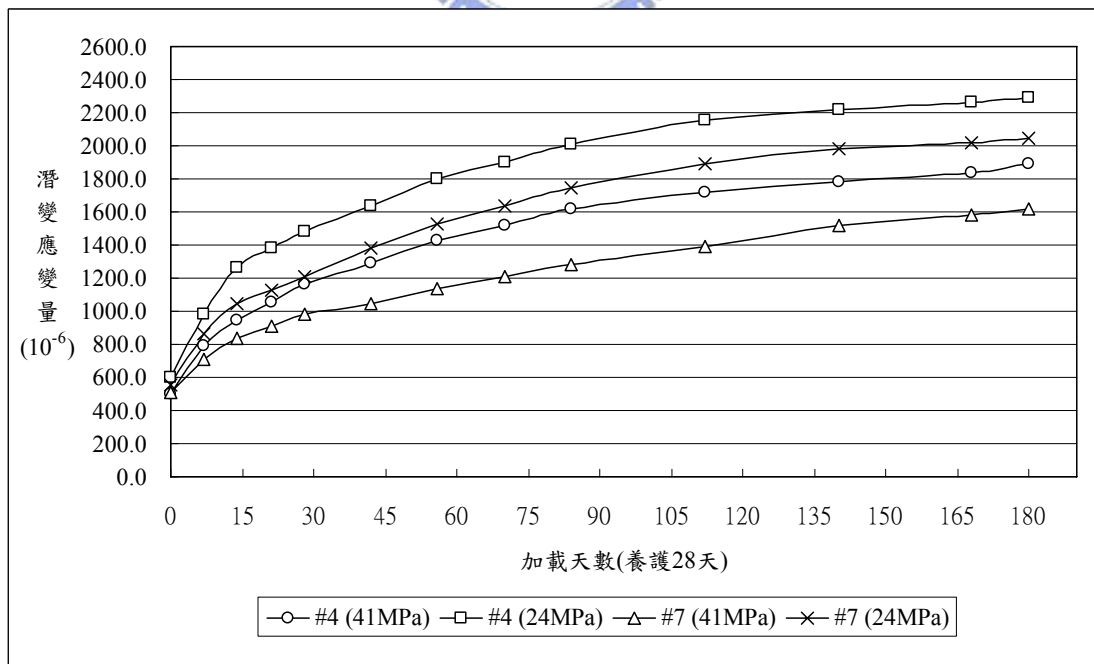


圖 5-56 OPC 埋置#4 與#7 ($\rho=0.015$)之乾燥潛變比較

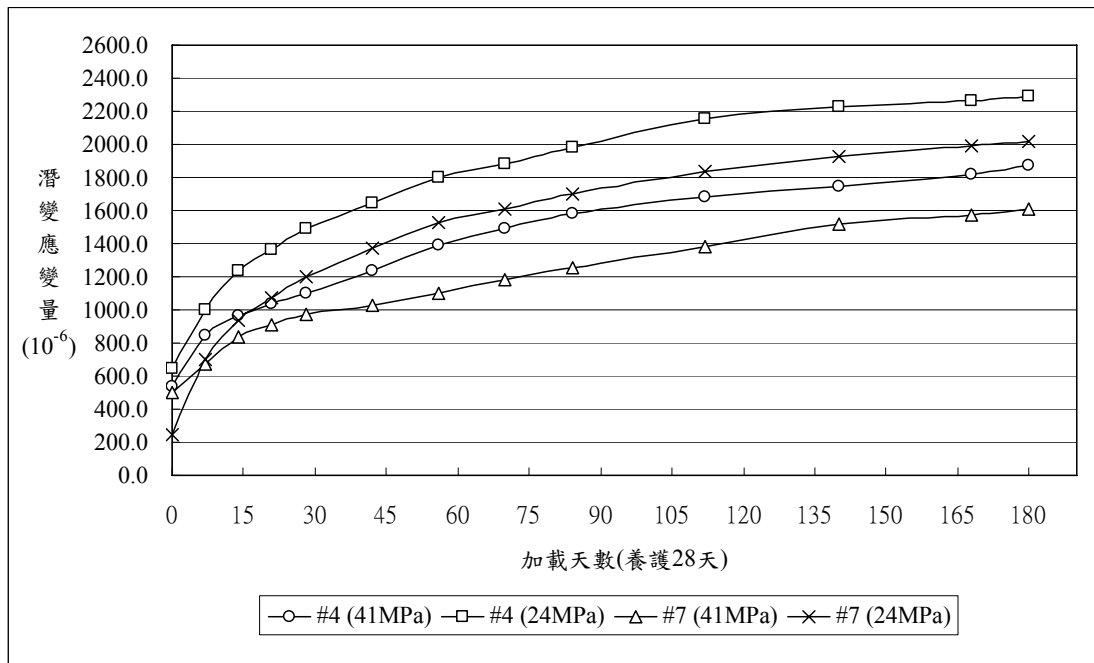


圖 5-57 SCC 埋置#4 與#7 ($\rho=0.03$)之乾燥潛變比較

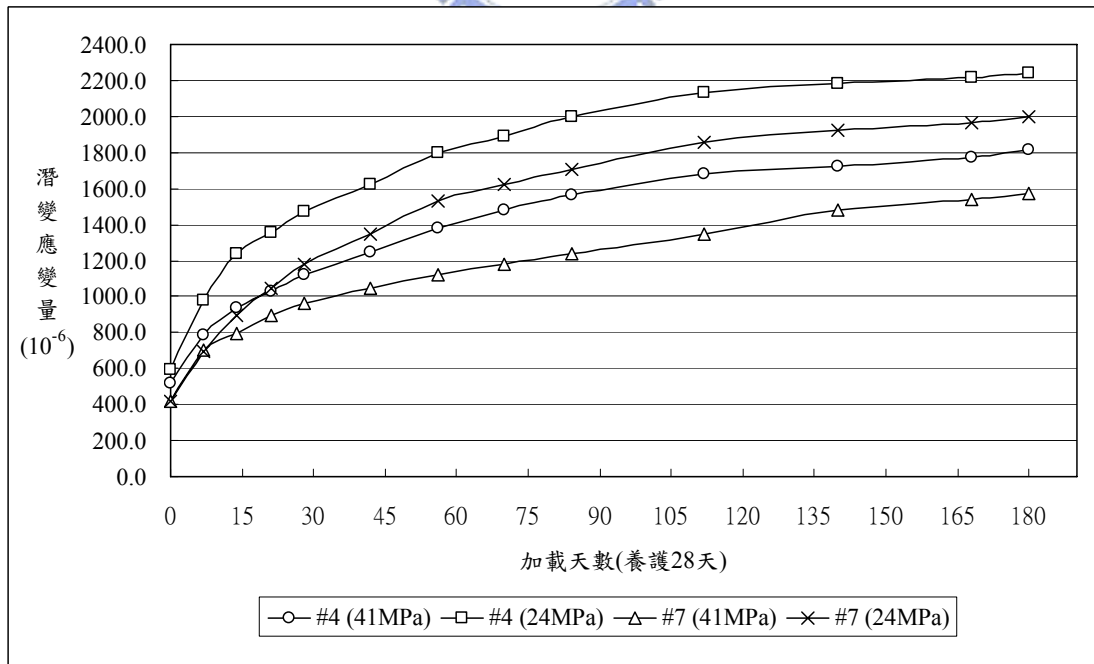


圖 5-58 OPC 埋置#4 與#7 ($\rho=0.03$)之乾燥潛變比較

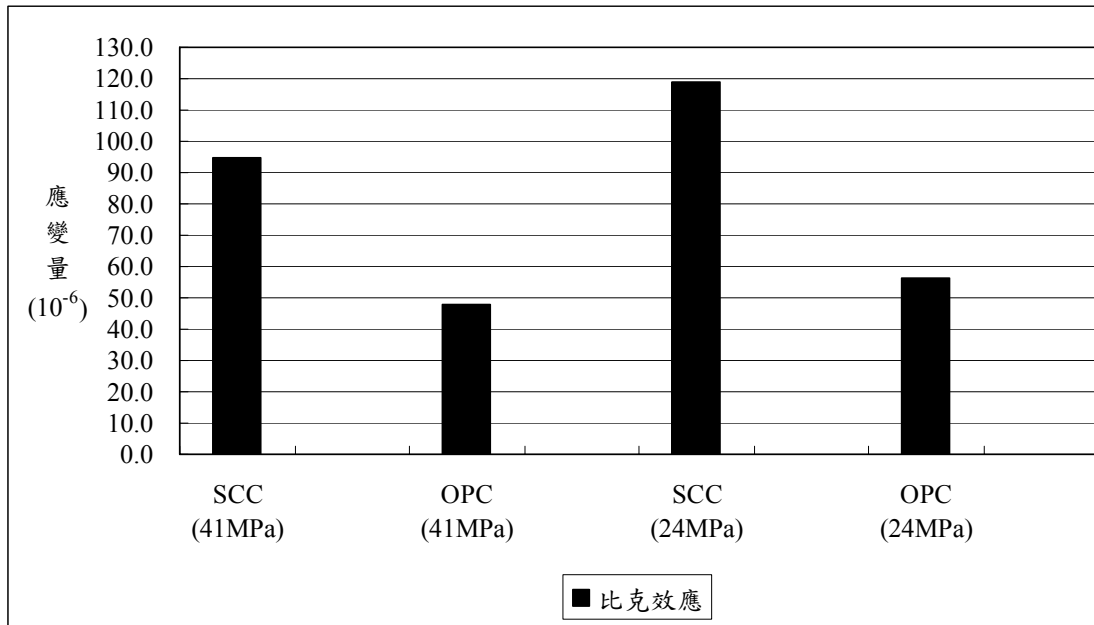


圖 5-59 SCC 與 OPC 純混凝土之比克效應

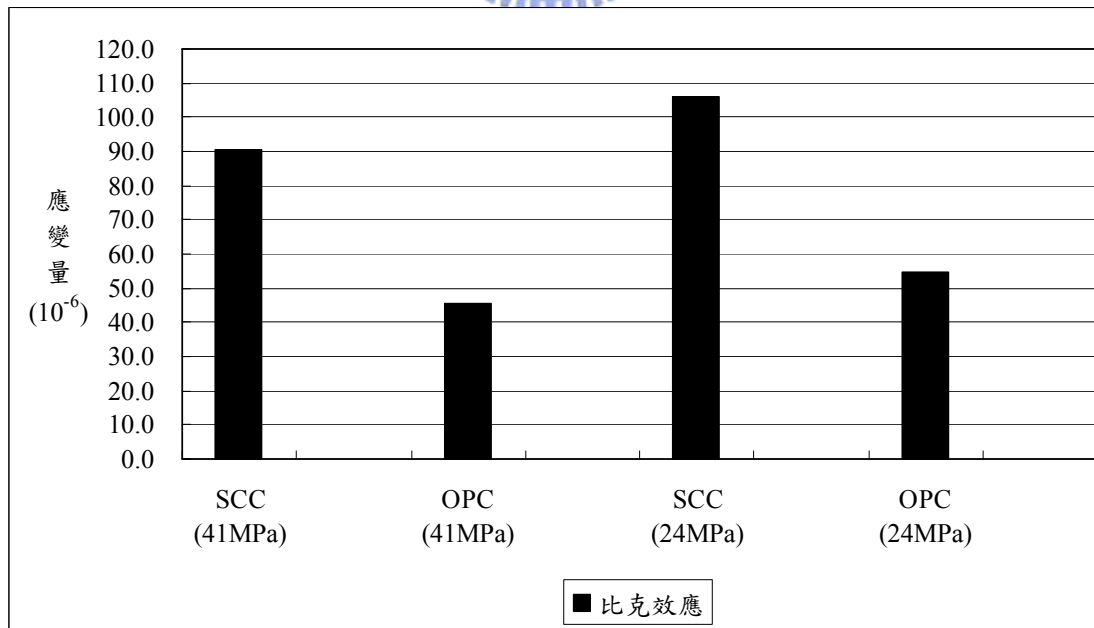


圖 5-60 SCC 與 OPC 埋置#4($\rho=0.015$)混凝土之比克效應

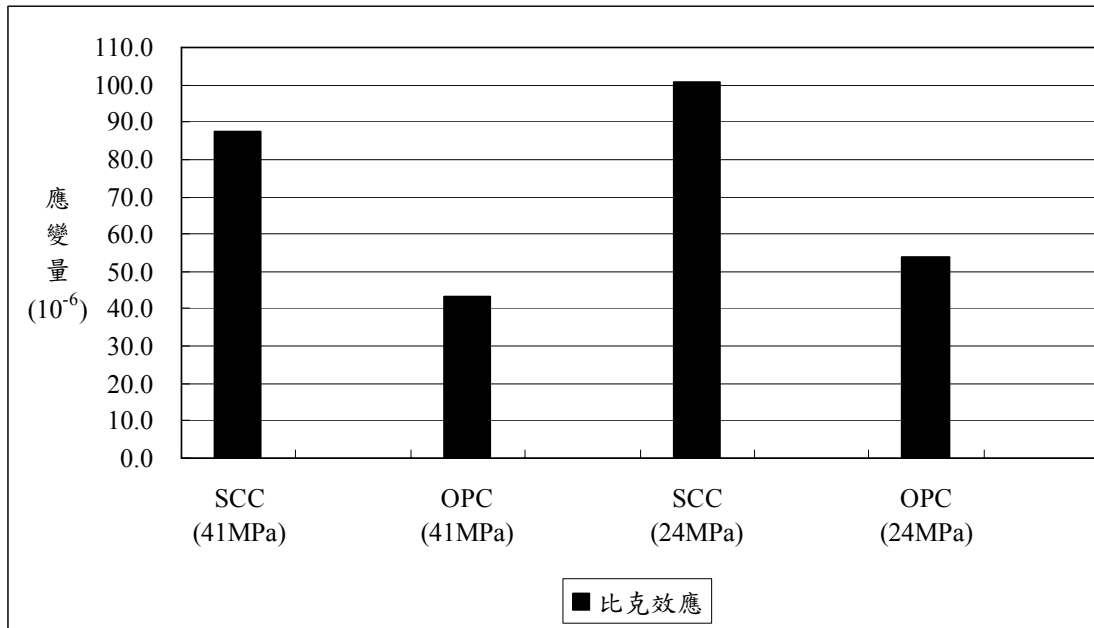


圖 5-61 SCC 與 OPC 埋置#4($\rho=0.03$)混凝土之比克效應

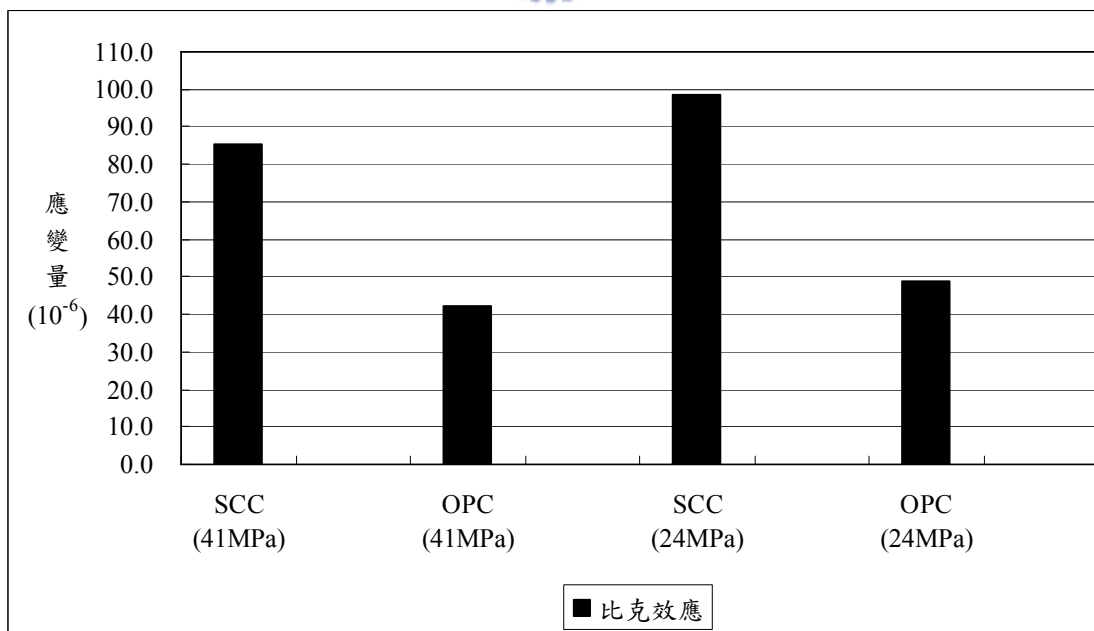


圖 5-62 SCC 與 OPC 埋置#7($\rho=0.015$)混凝土之比克效應

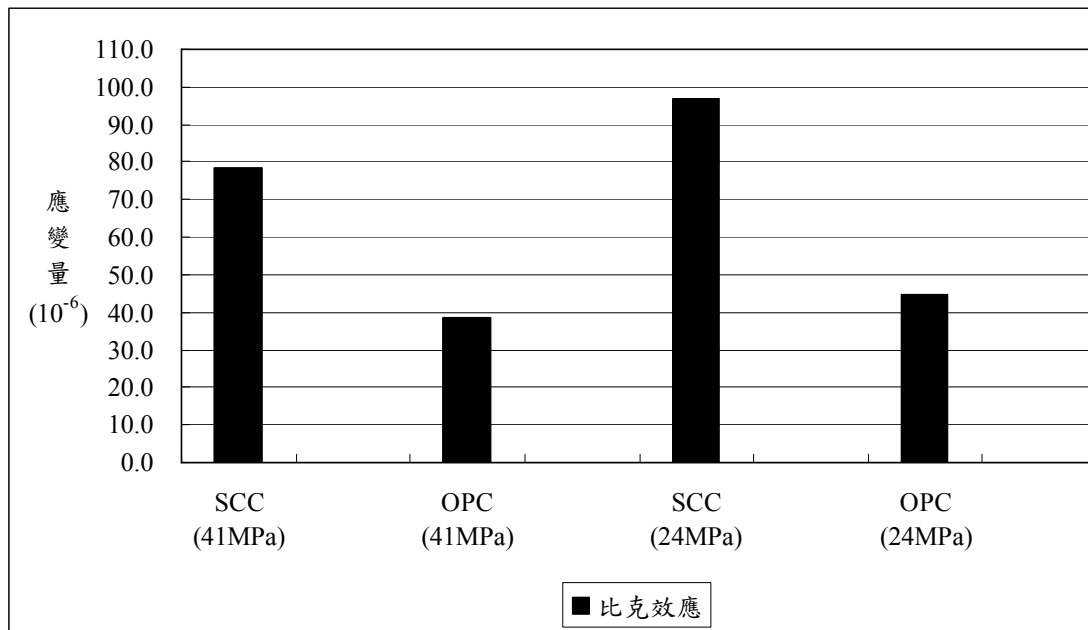


圖 5-63 SCC 與 OPC 埋置#7($\rho=0.03$)混凝土之比克效應

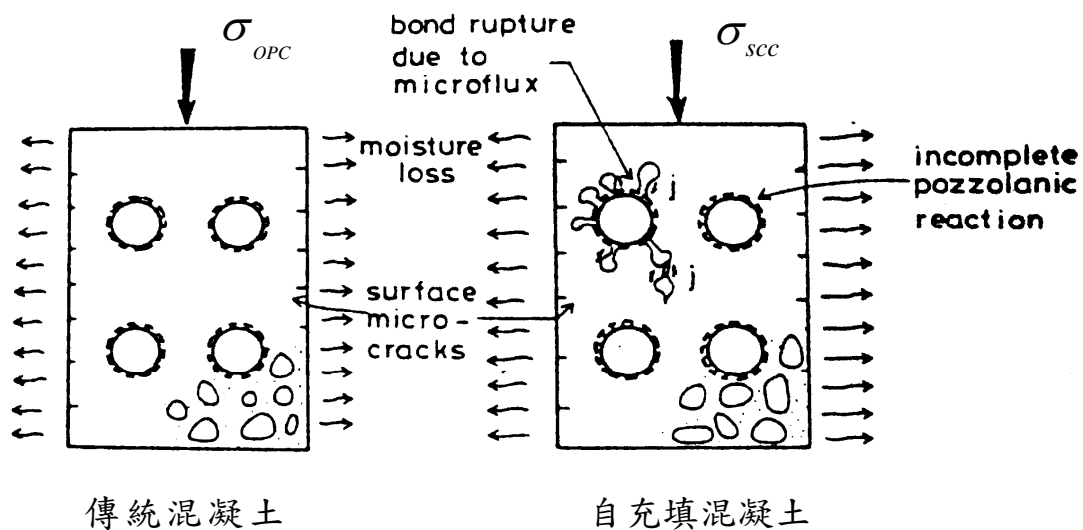


圖 5-64 在載重下傳統混凝土與自充填混凝土，溼度擴散與裂縫【26】

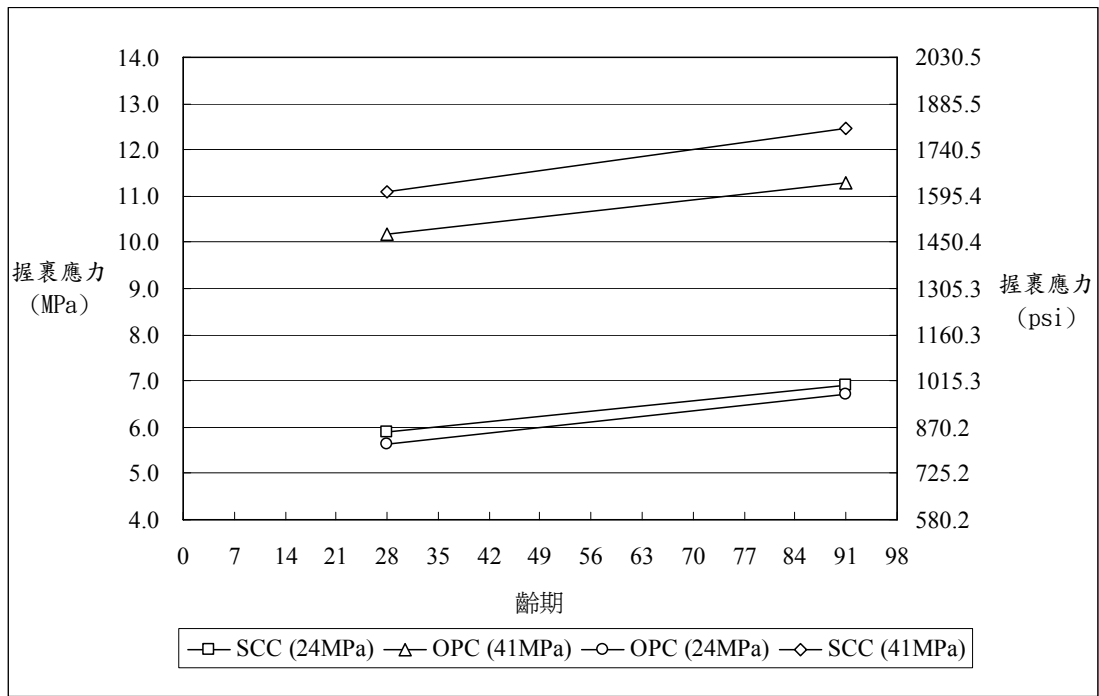


圖 5-65 SCC 與 OPC 之握裹應力



第六章 結論與建議

6.1 結論

- 1、無論是自充填混凝土或者是傳統混凝土，強度愈高乾縮量與潛變量就愈小，因此乾縮潛變與用水量及 w/b 的多寡有極大的相關性。
- 2、自充填混凝土粉體用量較多與粗粒料粒徑較小，因此在純混凝土之乾縮量與乾燥潛變量，自充填混凝土會略大於傳統混凝土。
- 3、因為試體有埋置了鋼筋，顯示出自充填混凝土在乾縮上有明顯的降低，縮短與傳統混凝土乾縮上的差異。
- 4、含鋼筋圓柱試體乾縮與乾燥潛變的表現上，自充填混凝土略大於傳統混凝土，但其值相當的小。
- 5、由於鋼筋本身不會乾縮，限制了乾縮上的發展，鋼筋用量愈多愈能有效的降低乾縮量和潛變量，所以鋼筋用量愈大乾縮和潛變就會愈小。
- 6、一般乾縮與潛變的試驗是以純混凝土來進行測試，如要實際將此值對於混凝土其結構上的表現會因為構件的形狀、尺寸、載重加載方式、主筋用量、握裹力等的影響產生不同的變化，所以純混凝土的乾縮與潛變都來的較大，而認為結構的乾縮與潛變就會較大的說法，是不一定正確。
- 7、雖然自充填混凝土使用在含鋼筋圓柱試體時乾縮與乾燥潛變皆略

大於傳統混凝土，但自充填混凝土使用在實際結構上，由於混凝土握裹能力表現更為明顯，反而較傳統混凝土來的小。


- 8、使用了大號數的鋼筋能縮短自充填混凝土跟傳統混凝土之乾縮量與潛變量的差距，而且在相同鋼筋用量但使用鋼筋號數較小的試體，乾縮量和潛變量都較大。
- 9、由於水泥水化需要有足夠的水分，養護時間的長短將影響水化作用的進行，這將造成強度間的差距，因此養護時間愈長所量測的乾縮量均較低。
- 10、卜作嵐材料因反應機理異於卜特蘭水泥，因此自充填混凝土產生的水泥膠體與孔隙結構亦不同於傳統混凝土。試驗結果顯示自充填混凝土的乾燥潛變大於傳統混凝土。
- 11、由本實驗中潛變試驗的結果得知，載重齡期大於 28 天時，在同時荷載與乾燥狀況下之基本潛變則以自充填混凝土來的較小。因此，由計算可知自充填混凝土有著高於傳統混凝土的比克效應。此現象可由本文所提之模式依微觀機構、水化機理與緻密性而解釋。
- 12、在相同外力之下，由於自充填混凝土之握裹能力佳，表示自充填混凝土有充填密實與材質均勻的特性。且自充填混凝土各個部位握裹應力較為一致，有效提升結構之可靠性。
- 13、乾縮量不會因為試體尺寸變大而增大，反而因為方柱試體的表面

積/體積(S/V)比圓柱試體來的大，方柱試體內的水分不易流失，所以不論是自充填混凝土或是傳統混凝土的乾縮都來的較小，對於柱結構上的變形考量，是有好處的。

14、自充填混凝土因其材質均勻，對於試體表面和內部應變的差異較傳統混凝土來的小。

15、自充填混凝土使用在建築結構上，長期變形並不會比傳統混凝土來的大。所以使用自充填混凝土的結構物，考量長期變形的方式可以與傳統混凝土相同。

6.2 建議

- 
- 1、製作基本潛變試體時，需注意塑膠袋是否有破洞，必須用膠帶把漏洞的地方封緊，以隔絕空氣的進入，防止基本潛變試體有乾縮量的產生。
 - 2、在使用資料擷取器量測混凝土應變計與鋼筋應變計時，一開始時應變之讀數會有跳動現象，須待其值穩定後量測紀錄之。
 - 3、變換配比中的粗粒料用量，來觀察對乾縮與潛變是否有極大的影響性，可供往後的配比設計做依據。
 - 4、以本實驗變數為依據，改變不同的溫度及溼度環境，進行乾縮與潛變試驗，在與本試驗模擬乾燥環境的乾縮與潛變數據做比較與分析。

5、自充填混凝土使用於柱及梁結構上，有於材質均勻與握裹能力佳等特性下，對於其結構行為表現皆較優於傳統混凝土，建議可對自充填混凝土的各種不同結構行為做更深入的研究，找出其與傳統混凝土的精確差異，來回饋設計。



參考文獻

- [1]、黃嘉昌，「自充填混凝土結構行為監測與研究」，國立交通大學土木工程研究所碩士論文，2002年。
- [2]、陳聖育，「自充填混凝土工程性質研究」，國立臺灣大學土木工程研究所碩士論文，2000年。
- [3]、日本土木學會，「高流動混凝土施工指針」平成10年7月20日出版。
- [4]、柴希文、謝明宏，「充填混凝土配比設計與施工」自充填混凝土產製與施工研討會論文集，台灣營建研究院，2000年。
- [5]、Cha, H.W., “ Design and Testing of Self-Compacting Concrete, ” A thesis submitted to the University of London for the degree of Doctor of Philosophy, University College Lonon , April , 1998.
- [6]、Meusel, J.W. and Rose, J.H., “ Production of GBF Slag at Sapprowos Point, and the Workability and Strength Potential of Concrete Incorporating the Slag, ” ACI SP-79 , 1983.
- [7]、潭進財，「台灣地區海沙用於混凝土結構物耐久性之研究」，國立交通大學土木工程研究所碩士論文，1992年7月。
- [8]、廖肇昌、羅財怡、游文慧，「自充填混凝土對構件行為影響之探討」，自充填混凝土產製與施工研討會論文集，台灣營建研究院，2000年。

- [9]、日本建築學會，「高流動混凝土、材料，調合、製造、施工指針同解說」，1997年4月。
- [10]、詹穎雯，「自充填混凝土簡介與相關規範」，自充填混凝土產製與施工研討會論文集，台灣營建研究院，2000年。
- [11]、趙文成，「自充填混凝土之配比設計及品質管制」，自充填混凝土在營建工程上之應用研討會，中華顧問公司、華光營建網，2001年6月。
- [12]、林建良，「礦物摻料及粒料級配對自充填混凝土新伴性質之影響」，國立台灣科技大學營建工程研究所碩士論文，2000年6月。
- [13]、中國土木工程學會，「混凝土工程設計規範與解說」，科技圖書股份有限公司，2002年12月。
- [14]、中央標準局，「CNS 14842 中國國家標準」，2004年。
- [15]、江堅銘，「中低強度自充填混凝土研發及工程性質研究」，國立交通大學土木工程研究所碩士論文，2001年。
- [16]、ACI Committee 209R, 2005, “209.1R-05 Report on Factors Affecting Shrinkage and Creep of Hardened Concrete,” *American Concrete Institute*, July 25, 2005.
- [17]、潘昌林、鄭瑞濱、盧榮林、詹穎雯，「自充填混凝土收縮與潛變試驗」，自充填混凝土產製與施工研討會論文集，台灣營建研

- 究院，2000 年。
- [18]、陳泓文，「乾縮與潛變對 RC 柱之行為影響」，中興工程顧問社，1999 年。
- [19]、陳泓文，「乾縮與潛變對 RC 版長期行為之影響」，中興工程顧問社，2000 年。
- [20]、Neville, A.M. & Dilger, W.H. & Brooks, J.J., “Creep of Plain and Structural Concrete,” New York, Longman, 1983.
- [21]、詹穎雯、陳聖育，「SCC 均勻性及握裹性質之研究」，自充填混凝土工程性質及其應用，台灣營建研究院，2000 年 9 月。
- [22]、趙文成，「高等混凝土講義」，國立交通大學土木工程研究所，1999 年。
- [23]、Gardner, N.J. and Zhao, J.W., “Creep and Shrinkage Revisited,” *ACI Materials Journal*, Vol. 90, No. 3, May-Jun, 1993, p 236-246.
- [24]、ASTM C 469-02, “Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of Concrete in Compression,” April, 2006.
- [25]、Smerda, Z. and Kristek, V., “Creep and Shrinkage of Concrete Elements and Structures,” Amsterdam, Elsevier, 1988.
- [26]、陳振川、詹穎雯，「飛灰與無飛灰混凝土之強度與變形」，中國土木水利工程學刊，第一卷，第一期，1989 年，pp.43-57。
- [27]、Bazant, Z.P., “Mathematical Modeling of Creep and

- Shrinkage of Concrete, ” *Chichester/John Wiley & Sons/c*,1988.
- [28] 、 ASTM C 512-02,“ Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression, ”.
- [29] 、 ASTM C 531-00,“ Standard Test Method for Linear Shrinkage and Coefficient of Thermal Expansion of Chemical-Resistant Mortars, Grouts, Monolithic Surfacing, and Polymer Concretes, ”.
- [30] 、 Gomez, J.F. and Landsberger, G.A.,“ Evaluation of Shrinkage Prediction Models for Self-Consolidating Concrete, ” *ACI Materials Journal*, Vol. 104, No. 05, 2007, pp. 464-473.
- [31] 、 Bazant, Z.P. and Chern, J.C.,“ Concrete Creep at Variable Humidity : Constitutive Law and Mechanism, ” *Mater and Struct, (RILEM, Paris)*, Vol. 18, No. 103, 1985, pp. 1-20.
- [32] 、 Sharma, R.K. & Maru, S. & Nagpal, A. K.,“ Simplified Procedure for Creep and Shrinkage Effects in Reinforced Concrete Frames, ” *Journal of Structural Engineering*, Vol. 130, No. 10, October 1, 2004, pp. 1545-1552.
- [33] 、 Samra, R.M.,“ New Analysis for Creep Behavior in Concrete Columns, ” *Journal of Structural Engineering*, Vol. 121, No. 03, March, 1995, pp. 399-407.
- [34] 、 Nilson, A.H. & Darwin, D. & Dolan, C.W.,“ Design of Concrete Tructures, ” The McGraw-Hill Companies, Thirteenth Edition, 2003.
- [35] 、 Nejadi, S. and Gilbert, I.,“ Shrinkage Cracking and Crack

Control in Restrained Reinforced Concrete Members, ” *ACI Structural Journal*, Vol. 101, No. 06, November-December, 2007, pp. 840-845.

[36] 、 Ziehl, P.H. & Cloyd, J.E. & Kreger, M.E., “ Investigation of Minimum Longitudinal Reinforcement Requirements for Concrete Columns Using Present-Day Construction Materials, ” *ACI Structural Journal*, Vol. 101, No. 02, March-April, 2004, pp. 165-175.

[37] 、 Gilbert, R.I., “ Time-Dependent Cracking and Crack Control in Reinforced Concrete Structures, ” Civil & Environmental Engineering at the University of New South Wales, Sydney Australia, pp. 223-240.

[38] 、 Bazant, Z.P., and Chern, J.C., “ Stress-Induced Thermal and Shrinkage Strains in Concrete, ” *Journal of Engrg. Mech. Div., ASCE*, Vo1. 113, No. 10, 1987, pp. 1493-1511.