

纖維混凝土耐久性研究

內政部建築研究所協同研究報告

(
111
年度
)

纖維混凝土耐久性研究

內政部建築研究所協同研究報告

中華民國 11 年 12 月

纖維混凝土耐久性研究

研究主持人：蔡綽芳
協同主持人：吳崇豪
研究員：林樹根、周楷峻、黃國倫、李台光
研究助理：黃中和、郭義浩
研究期程：中華民國 111 年 3 月至 111 年 12 月

內政部建築研究所協同研究報告

中華民國 111 年 12 月

目次

表次	III
圖次	V
摘要	IX
第一章 緒論	1
第一節 研究緣起	1
第二節 研究背景	1
第二章 文獻回顧	3
第一節 混凝土的耐久性	3
第二節 有害環境的影響	6
第三節 纖維混凝土	9
第四節 礦物摻料的影響	22
第五節 國外重要研究及應用案例	24
第三章 試驗規劃	29
第一節 試驗材料	29
第二節 混凝土配比	36
第三節 試體模具製作	39
第四節 混凝土拌製及澆置	41
第五節 試驗設備及試驗方法	44
第四章 試驗結果與討論	61
第一節 坍度及坍流度	61
第二節 抗壓強度	64

第三節	劈裂強度	68
第四節	抗彎強度	71
第五節	破壞行為	73
第六節	抗透水能力	82
第七節	快速氯離子滲透試驗結果	84
第八節	相關規範研修建議	86
第五章	結論與建議	87
第一節	結論	87
第二節	建議	88
附錄一	期初審查會議紀錄	89
附錄二	期中審查會議紀錄	91
附錄三	期末審查會議紀錄	99
附錄四	工作會議	109
附錄五	第1次專家學者座談會議紀錄	111
附錄六	第2次專家學者座談會議紀錄	115
附錄七	第03375章 V3.0 鋼纖維噴凝土	119
附錄八	第03241章 化學纖維混凝土	127
參考書目		131

表次

表 2-1 常見混凝土用纖維之基本性質	9
表 2-2 纖維混凝土開裂腐蝕文獻整理	12
表 3-1 水泥、爐石粉之物理性質	30
表 3-2 水泥、爐石粉之化學成分	31
表 3-3 F 級飛灰化學成分與物理性質	32
表 3-4 常重粗細骨材基本性質	33
表 3-5 試驗變數	36
表 3-6 混凝土配比($1m^3$)	37
表 3-7 氯離子穿透性與總通過電量關係	54
表 4-1 新拌混凝土坍度及坍流度	61
表 4-2 混凝土抗壓強度	62
表 4-3 混凝土劈裂強度	69
表 4-4 混凝土抗彎強度	72
表 4-5 混凝土滲透試驗結果(28 天)	83
表 4-6 混凝土快速氯離子滲透試驗結果	85

圖次

圖 1-1 本研究流程圖	2
圖 2-1 水泥水化反應過程中的養護方式	5
圖 2-2 海中混凝土結構侵蝕狀況示意圖	7
圖 2-3 纖維混凝土的破壞	10
圖 2-4 氯化物滲透試驗結果	14
圖 2-5 纖維混凝土之鹼-砂反應	17
圖 2-6 纖維混凝土的微觀結構	18
圖 2-7 纖維混凝土在不同保護層深度下的腐蝕起始時間	24
圖 2-8 三角辦公大樓(Triangle office building)的無梁版	26
圖 2-9 三角辦公大樓(Triangle office building)完工外觀	26
圖 2-10 洛克卡塔(Rocca tower)無梁版荷載試驗	27
圖 2-11 尚未完工的洛克卡塔(Rocca tower)	27
圖 3-1 爐石粉	33
圖 3-2 F 級飛灰	34
圖 3-3 鋼纖維	34
圖 3-4 聚丙烯纖維	35
圖 3-5 淡水養護試體	38
圖 3-6 鹽水養護試體	38
圖 3-7 抗壓試驗試體模具	39
圖 3-8 劈裂試驗試體模具	40
圖 3-9 抗彎試驗試體模具	40

圖 3-10 新拌混凝土坍度試驗	42
圖 3-11 新拌混凝土坍流度試驗	42
圖 3-12 澆置完成之試體	43
圖 3-13 拆完模後之試體	43
圖 3-14 混凝土單軸拌和機	45
圖 3-15 強制式水平雙軸拌和機	45
圖 3-16 萬能材料試驗機	46
圖 3-17 滲透試驗儀	46
圖 3-18 快速氯離子穿透試驗儀	47
圖 3-19 掃描式電子顯微鏡	47
圖 3-20 強微小維克氏硬度計	48
圖 3-21 混凝土抗壓強度試驗	49
圖 3-22 混凝土抗彎強度試驗	50
圖 3-23 混凝土劈裂強度試驗	51
圖 3-24 混凝土滲透試驗	52
圖 3-25 抽真空幫浦容器	55
圖 3-26 壓克力模具、電位容器與銅網	55
圖 3-27 快速氯離子穿透試驗儀試體安裝	56
圖 3-28 微硬度試驗之壓痕	60
圖 3-29 微硬度試驗量測	60
圖 4-1 混凝土 CS30P00 坍度	62
圖 4-2 混凝土 CS00P30 坍度	62

圖 4-3 混凝土 HS30P00 坍流度	63
圖 4-4 混凝土 HS00P30 坍流度	63
圖 4-5 混凝土抗壓強度(28 天)	67
圖 4-6 混凝土抗壓強度(56 天)	67
圖 4-7 混凝土劈裂強度(28 天)	70
圖 4-8 混凝土劈裂強度(56 天)	70
圖 4-9 混凝土抗彎強度(28 天)	72
圖 4-10 水泥混凝土 CS00P00 抗壓破壞	74
圖 4-11 飛灰混凝土 FS00P00 抗壓破壞	74
圖 4-12 爐石粉混凝土 SS00P00 抗壓破壞	74
圖 4-13 爐灰混凝土 MS00P00 抗壓破壞	74
圖 4-14 水泥混凝土 CS00P00 劈裂破壞	75
圖 4-15 飛灰混凝土 FS00P00 劈裂破壞	75
圖 4-16 爐石粉混凝土 SS00P00 劈裂破壞	75
圖 4-17 爐灰混凝土 MS00P00 劈裂破壞	75
圖 4-18 水泥混凝土 CS00P00 抗彎破壞	76
圖 4-19 飛灰混凝土 FS00P00 抗彎破壞	76
圖 4-20 爐石粉混凝土 SS00P00 抗彎破壞	76
圖 4-21 水泥混凝土 CS15P15 抗壓破壞	77
圖 4-22 飛灰混凝土 FS15P15 抗壓破壞	77
圖 4-23 爐石粉混凝土 SS15P15 抗壓破壞	77
圖 4-24 爐灰混凝土 MS15P15 抗壓破壞	77

圖 4-25	水泥混凝土 CS15P15	劈裂破壞	78
圖 4-26	飛灰混凝土 FS15P15	劈裂破壞	78
圖 4-27	爐石粉混凝土 SS15P15	劈裂破壞	78
圖 4-28	爐灰混凝土 MS15P15	劈裂破壞	78
圖 4-29	水泥混凝土 CS30P00	抗彎破壞	79
圖 4-30	飛灰混凝土 FS30P00	抗彎破壞	79
圖 4-31	爐石粉混凝土 SS30P00	抗彎破壞	79
圖 4-32	經鹽水養護之鋼纖維混凝土	生鏽狀況	80
圖 4-33	經淡水養護之鋼纖維混凝土	生鏽狀況	81
圖 4-34	經鹽水養護之聚丙烯纖維混凝土		81
圖 4-35	混凝土滲透率		83

摘要

關鍵詞：纖維混凝土、力學性質、耐久性、微觀性質、配比設計

一、研究緣起

混凝土是一種脆性材料，具有良好的抗壓強度，但其抗拉強度較差。傳統上，會將抗拉強度極佳的鋼筋放置於混凝土結構中的適當位置，使混凝土具有承受拉應力和剪應力的能力。然而，依據工商時報 2021 年 11 月 24 日的報導，隨著全球原物料成本增加，未來鋼鐵價格將遠高於過去 10 年的水準，往後幾年熱軋鋼平均價每公噸達 600 美元以上，甚至上千美元都有可能。此外，鋼筋外型細長、重量重，運送不易且成本高，加上工地現場尚需進行焊接及綁紮，需大量專業施工人員才能完成，隨著台灣建築施工從業人員嚴重老化及不足，此類專職人員越來越少，已成為國家整體建設發展中急待克服的問題。

過往研究指出，於混凝土中添加適量的纖維，可有效控制混凝土開裂，增加混凝土的韌性，隨著混凝土科技的進步，各式混凝土用纖維逐漸增加，含纖維高流動性混凝土的研究也逐漸被探討，使得利用此類新纖維混凝土以減少鋼筋的使用變得可行，不過混凝土的耐久性也是決定纖維混凝土是否可更加廣泛應用的重要指標，然而有關纖維混凝土耐久性的研究不多，且多為含纖維普通混凝土的探討，針對含纖維高強度、高性能混凝土的探討仍相當的少。因此，本研究即在探討具有高流動性、高強度含纖維混凝土之耐久性，以期建立本土化纖維混凝土新的產製技術。

二、研究方法及過程

本研究主題為纖維混凝土耐久性的探討，規劃試驗變數包含混凝土水膠比為 0.4，飛灰及爐石粉分別取代水泥重量之 0%、30%及 60%，鋼纖維與聚丙烯纖維添加量分別為每立方公尺混凝土體積的 0%、0.15%及 0.3%，並添加適量強塑劑改善混凝土的坍度及坍流度，使混凝土具有良好的工作性。採用淡水養護和鹽水養護兩種方式，比較對纖維混凝土抗壓強度、劈裂強度及抗彎強度等工程性質的影響，並進行混凝土透水及快速氯離子滲透等試驗，瞭解纖維混凝土的耐久性。

三、重要發現

鹽水養護之混凝土抗壓強度高於淡水養護者，纖維混凝土抗壓強度高於無纖維混凝土，隨混凝土強度的增加，纖維對混凝土強度的貢獻逐漸不明顯，其中爐石粉混凝土的抗壓強度高，飛灰混凝土的強度最低。鹽水養護之聚丙烯纖維混凝土之劈裂強度最高，混合纖維混凝土次之，飛灰混凝土的強度最小。鹽水養護對高強度纖維混凝土抗彎強度的影響不明顯，其中添加 0.3% 聚丙烯纖維混凝土之劈裂強度高於其他纖維混凝土。經鹽水養護的鋼纖維混凝土有出現生鏽的狀況，聚丙烯纖維無明顯腐蝕情形產生。爐石粉混凝土的滲透率最小鹽水養護之混凝土透水率低於淡水養護者，纖維混凝土的透水率高於無纖維混凝土。水泥混凝土通過的總電荷最多、耐久性較差，鋼纖維混凝土通過的電荷數比其他種類的纖維混凝土高，鹽水養護之混凝土通過總電荷數比淡水養護者高。

四、主要建議事項

纖維混凝土的工程性質比普通混凝土佳，若可簡化其製程、改善其工作性，將有助於實務的推廣應用，減少普通混凝土的用量，降低混凝土產製過程中的能源消耗及二氧化碳的排放量。以下分別從立即可行建議及中長期建議加以列舉。

立即可行之建議—鋼纖維混凝土耐久性的探討

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：無

現行纖維混凝土的應用以鋼纖維混凝土的數量最多，就本研究成果可知，鋼纖維混凝土有生鏽腐蝕的問題，有必要針對更多種類的鋼纖維混凝土耐久性進行研究，包含鋼纖維的整類、卜作嵐材料的類型、齡期長短及養護環境等課題的釐清，找出改善鋼纖維混凝土耐久性的對策，將有助於提升纖維混凝土技術及應用層面。

長期性建議—預鑄纖維混凝土耐久性的探討

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：無

為因應現場施工人員老化及短缺等問題，國家積極推廣預鑄混凝土工法，以簡化現場施工的程序，降低施工人員的需求，而纖維混凝土非常適合以預鑄工法進行製作，^X不過預鑄混凝土的關鍵技術為高溫蒸氣養護，該養護過程對纖維混凝土的耐久性影響值得研究，包含高溫及水分是否會造成鋼纖維腐蝕生鏽，以及高溫高壓養護方式對聚丙烯纖維等化學纖維的影響，也須深入瞭解，建置合宜的預鑄纖維混凝土養護方式，以利該類混凝土的推廣應用。

ABSTRACT

Keywords: fiber reinforced concrete, mechanical properties, durability, microstructure structure, mixture design

1. Purpose of Research

Concrete is a brittle material with good compressive strength but poor tensile strength. Traditionally, rebar with excellent tensile strength has been placed in place in the concrete structure to give the concrete the ability to withstand both tensile and shear stresses. However, according to a report by Business Times on November 24, 2021, with the increase in global raw material costs, the future steel price will be much higher than the level of the past 10 years. Even thousands of dollars are possible. In addition, steel bars are slender and heavy, which are difficult to transport and cost high. In addition, welding and tying still need to be carried out on the construction site, which requires a large number of professional construction personnel to complete. With the serious aging and shortage of construction workers in Taiwan, such full-time professionals Fewer and fewer personnel have become an urgent problem to be overcome in the overall construction and development of the country.

Previous studies have pointed out that adding an appropriate amount of fiber to concrete can effectively control cracking of concrete and increase the toughness of concrete. , making it feasible to use this new fiber reinforced concrete to reduce the use of steel bars, but the durability of concrete is also an important indicator to determine whether fiber reinforced concrete can be more widely used. However, there are not many studies on the durability of fiber reinforced concrete, and most of them contain the discussion of fiber-reinforced ordinary concrete is still relatively small. Therefore, this study is to explore the durability of fiber-reinforced concrete with high

fluidity and high strength, in order to establish a new production technology of localized fiber-reinforced concrete.

2. Methodology and Process

The subject of this research is the discussion of the durability of fiber reinforced concrete. The planned test variables include a concrete water-binder ratio of 0.4, fly ash and furnace stone powder to replace 0%, 30% and 60% of the cement weight, respectively, and the addition of steel fiber and polypropylene fiber. It is 0%, 0.15% and 0.3% of the concrete volume per cubic meter, and an appropriate amount of superplasticizer is added to improve the slump and slump flow of the concrete, so that the concrete has good workability. Two methods of fresh water curing and salt water curing were used to compare the effects on engineering properties such as compressive strength, splitting strength and flexural strength of fiber reinforced concrete, and tests such as concrete permeation and rapid chloride ion penetration were carried out to understand the durability of fiber reinforced concrete.

3. Important Findings

The compressive strength of salt water cured concrete is higher than that of fresh water curing, and the compressive strength of fiber-reinforced concrete is higher than that of non-fiber concrete. Fly ash concrete has the lowest strength. The splitting strength of the salt water cured polypropylene fiber concrete is the highest, followed by the mixed fiber concrete, and the fly ash concrete is the smallest. The effect of salt water curing on the flexural strength of high-strength fiber reinforced concrete is not obvious, and the splitting strength of 0.3% polypropylene fiber reinforced concrete is higher than that of other fiber reinforced concrete. The steel fiber reinforced concrete cured by salt water has a rust condition, and the

polypropylene fiber has no obvious corrosion. The permeability of furnace stone powder concrete is the smallest. The permeability of concrete cured by salt water is lower than that of fresh water curing, and the permeability of fiber concrete is higher than that of non-fiber concrete. Cement concrete has the most total charges and poor durability. Steel fiber concrete has higher charges than other types of fiber concrete. The total charge of salt water curing concrete is higher than that of fresh water curing.

4. Major Recommendations

Immediate implementation:

Sponsor Agency: Architecture and Building Research Institute, Ministry of the Interior

Co-sponsor Agency:

The current application of fiber reinforced concrete is the largest number of steel fiber reinforced concrete. According to the results of this study, steel fiber reinforced concrete has the problem of rust and corrosion. It is necessary to study the durability of more types of steel fiber reinforced concrete, including the types of steel fiber, Pozzom materials, test ages and curing environment, and find out the countermeasures to improve the durability of steel fiber reinforced concrete, which will help to improve the technology and application level of fiber reinforced concrete.

Long-term implementation:

Sponsor Agency: Architecture and Building Research Institute, Ministry of the Interior

Co-sponsor Agency: Architecture and Building Research Institute, Ministry of the Interior

In response to problems such as the aging and shortage of construction

workers on site, the state actively promotes the construction method of Pingxuan concrete to simplify the procedure of on-site construction and reduce the demand for construction personnel. Fiber concrete is very suitable for the production of the construction method, but the key to concrete is the construction of Pingxuan. The technology is high-temperature steam curing. The effect of this curing process on the durability of fiber reinforced concrete is worth studying, including whether high temperature and moisture will cause corrosion and rusting of steel fibers, and the impact of high-temperature and high-pressure curing methods on synthetic fibers such as polypropylene fibers. Understand and establish a suitable curing method of Pingxuan fiber concrete to facilitate the popularization and application of this type of concrete.

第一章 緒論

第一節 研究緣起

混凝土是一種脆性材料，具有良好的抗壓強度，但其抗拉強度較差。傳統上，會將抗拉強度極佳的鋼筋放置於混凝土結構中的適當位置，使混凝土具有承受拉應力和剪應力的能力。然而，依據工商時報 2021 年 11 月 24 日的報導，隨著全球原物料成本增加，未來鋼鐵價格將遠高於過去 10 年的水準，往後幾年熱軋鋼平均價每公噸達 600 美元以上，甚至上千美元都有可能。此外，鋼筋外型細長、重量重，運送不易且成本高，加上工地現場尚需進行焊接及綁紮，需大量專業施工人員才能完成，隨著台灣建築施工從業人員嚴重老化及不足，此類專職人員越來越少，已成為國家整體建設發展中急待克服的問題。

過往研究指出，於混凝土中添加適量的纖維，可有效控制混凝土開裂，增加混凝土的韌性，隨著混凝土科技的進步，各式混凝土用纖維逐漸增加，含纖維高流動性混凝土的研究也逐漸被探討，使得利用此類新纖維混凝土以減少鋼筋的使用變得可行，不過混凝土的耐久性也是決定纖維混凝土是否可更加廣泛應用的重要指標，然而有關纖維混凝土耐久性的研究不多，且多為含纖維普通混凝土的探討，針對含纖維高強度、高性能混凝土的探討仍相當的少。因此，本研究即在探討具有高流動性、高強度含纖維混凝土之耐久性，以期建立本土化纖維混凝土新的產製技術。

第二節 研究背景

混凝土結構使用壽命期間可能會暴露在各種環境條件下。因此，混凝土結構的耐久性是在不進行大修或修復的情況下承受這些暴露條件的能力來定義的。長期以來，人們一直認為混凝土是一種耐用的材料，可以持續數十年甚至數百年，無需或很少維護。然而，在大多數結構中，相對較低的抗拉強度和脆性行為需要使用鋼材(通常是鋼筋或纖維)來輔助混凝土抵抗拉力荷載。然而，隨著全球原物料成本的增加，碳鋼每公噸的價錢已漲至 2016 年的兩倍，致使鋼筋的成本不斷上漲，且預期未來鋼筋的成本仍將持續上揚。此外，鋼筋外型細長、重量重，運送不易且成本高，加上工地現

纖維混凝土耐久性研究

場尚需進行焊接及綁紮，需有大量專業的施工人員才能完成，隨著台灣建築施工從業人員嚴重老化及不足，此類專職人員越來越少，已成為國家整體建設發展中急待克服的問題。因此，研發合宜的纖維混凝土並減少鋼筋的使用成為重要的課題。

本研究流程規劃如圖 1-1 所示。

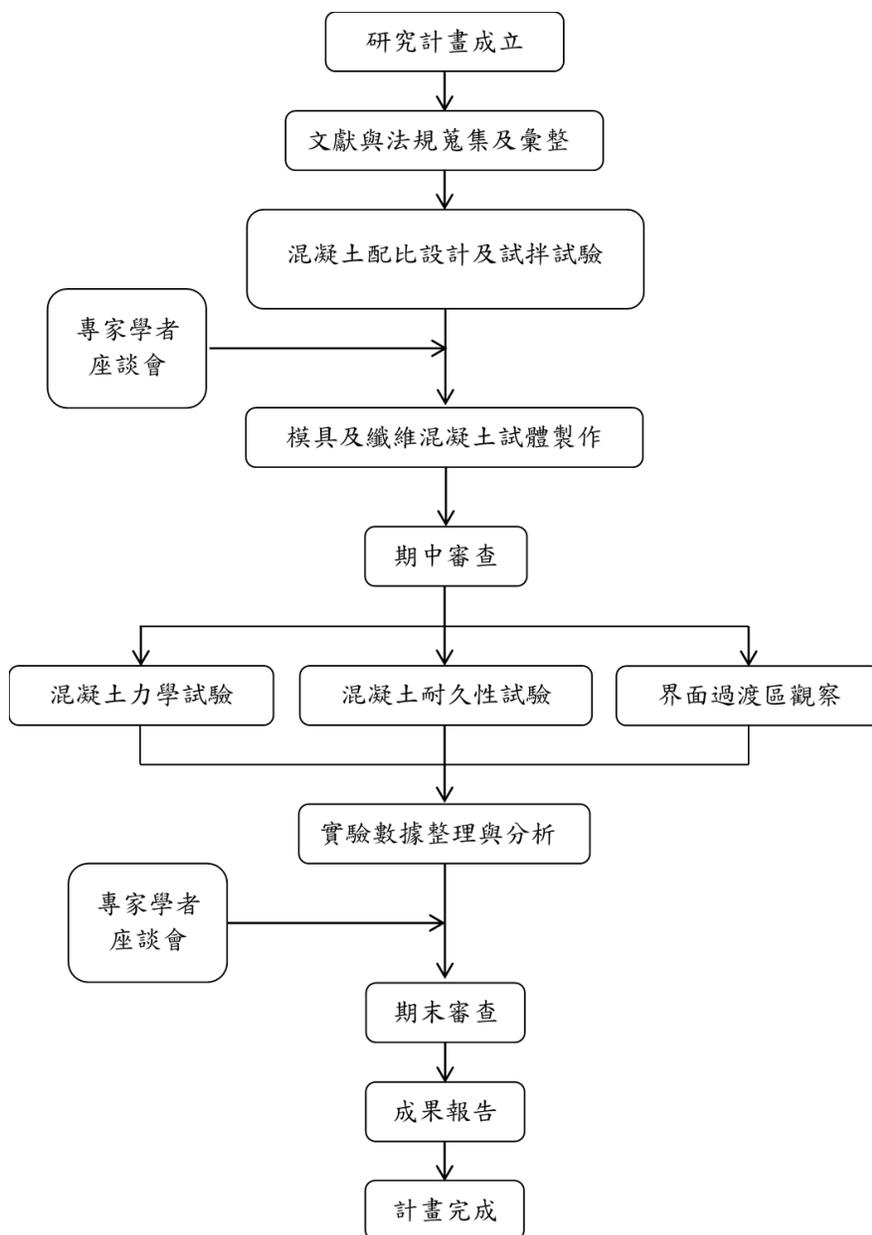


圖 1-1 本研究流程圖
(資料來源：本研究整理)

第二章 文獻回顧

第一節 混凝土的耐久性

隨著混凝土科技的進步，現代的混凝土已朝向高性能、高強度、高耐久及環保再利用等性質發展。然而，混凝土因組成材料中的水泥與水進行水化反應後體積會收縮(Shrinkage)，此體積穩定性難以避免，也是造成混凝土開裂的其中一個原因，加上混凝土在使用過程中仍有可能產生潛變(Creep)、疲勞(Fatigue)、磨損(Abrasion)等耐久性問題，嚴重者將使混凝土失去使用性。以下針對混凝土耐久性進行概略的說明：

一、體積變化

與其他材料相同，混凝土的體積會隨著溫度的變化而有熱漲冷縮現象產生，不過這並非影響混凝土體積變化唯一的原因。混凝土產生體積變化的原因眾多，本節僅就塑性收縮、自體收縮及乾燥收縮進行說明[1]。造成前述三種體積變化的原因是相同的，即在新拌混凝土階段因乾燥產生的塑性收縮(Plastic shrinkage)或硬固混凝土中產生的自體收縮(Autogenous shrinkage)及乾燥收縮(Drying shrinkage)等。自體收縮是水泥水化反應產生的化學收縮，即水泥水化反應生成物之體積小於反應前的水泥顆粒及水的體積和。此外，Le Chatelier 等發現，水化反應會產生大約 8%的空隙[2]，其細小的孔隙會將水從較大的毛細孔隙中吸出，因此隨水化反應進行持續消耗水時，較大的毛細孔隙水將被吸乾而產生乾燥收縮，此現象稱為自體乾燥(Self-desiccation)。

當混凝土在乾燥的空氣中乾燥時會發生乾燥收縮，因為混凝土會失去一些內部水分。例如，在水灰比大於 0.50 的普通混凝土中，水量超過了水泥完全水化所需的水量，使得多於的水被包含於連接良好的大毛細管中，此時因自體乾燥產生的拉伸應力非常低，約僅 40~60 microstrains，幾乎不會收縮[3]。在水灰比 0.35 或更小時，此時的水泥用量增加，用水量減少，因此水化反應形成的孔隙均為細小的毛細孔隙，當自體乾燥產生時，這些細小的毛細孔隙即會產生高拉伸應力，使水化水泥漿體產生嚴重的收縮。當自體收縮及乾燥收縮在相同直徑的毛細管中發展時，自體收縮與普通混

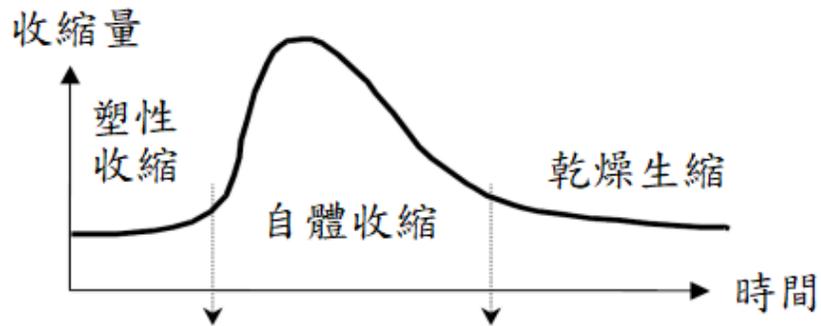
凝土中觀察到的乾燥收縮是一樣大[1]。

水泥漿體的乾燥收縮從混凝土表面開始，其乾燥速度取決於環境中的相對濕度和毛細孔隙的大小，水灰比高的混凝土其乾燥收縮發展較快，因為其毛細孔隙多為相通網絡，使得內部水分經由連通孔隙快速被蒸發；低水灰比混凝土乾燥收縮發展較慢，因為其毛細孔隙較小，且多為非聯通網絡，因此水分較不易被外在乾燥環境蒸發。此外，乾燥收縮和自體收縮有一個明顯的差異性，乾燥收縮是從混凝土表面向內發展的，而自體收縮是在水泥顆粒均勻分布於混凝土內部時，均勻且等向性產生的收縮。

儘管水泥漿體的收縮對於混凝土體積穩定性而言是一個非常重要的參數，但它並不是唯一的參數。另一個關鍵參數是骨料(Aggregate)的數量，更具體地說，是粗骨料(Coarse aggregate)的數量。骨料不僅僅是作為混凝土中的填充材料，事實上，它們在抑制水化水泥漿體收縮的同時，發揮極大的混凝土體積穩定性。增加粗骨料的含量可以很容易降低混凝土的收縮量，但水泥漿體的收縮量仍保持不變，只是受到了更多的限制。再者，每單位體積混凝土中的粗骨材用量增加，水泥的用量相對減少，也可提升混凝土的體積穩定性，從而降低各種收縮裂縫的產生。

二、養護方式

基於上述混凝土的收縮現象，隨著水灰比的降低，適當補充混凝土水分變得相當重要。圖 2-1 所示為各類收縮變形產生的時間，從圖中可發現混凝土在澆置完成後若沒有立即進行養護(即補充水分)，很容易產生嚴重的塑性收縮以及因水泥水化反應產生的自體收縮。養護關鍵期應從混凝土澆置完成開始，至少維持 2~3 天，其中最關鍵的時間點落在澆置完成後 12~36 小時間。就低水灰比的混凝土而言，若比照普通混凝土(高水比)於澆置完成 24 小時後再開始養護，時間上已太晚，此時的混凝土已產生大量的塑性和自體收縮，且此時混凝土內部毛細孔隙網絡多已不相通，混凝土的微觀結構已非常緻密，外部的水分幾乎無法進入混凝土內部進行養護。7 天齡期後可以停止養護，因為混凝土表面的大部分水泥已經水化，任何進一步的水養護對收縮的發展影響不大。



如何養護使混凝土的體積收縮量最小

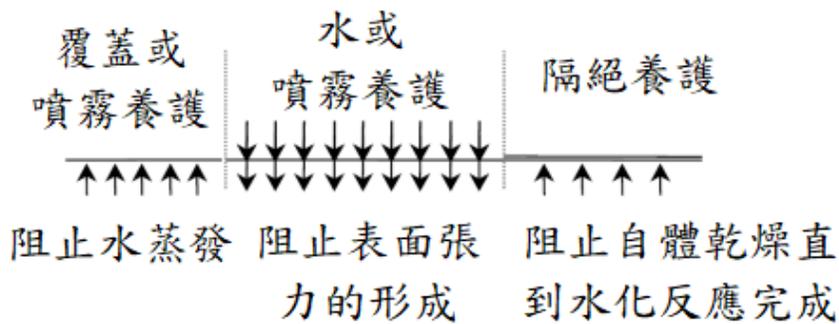


圖 2-1 水泥水化反應過程中的養護方式
(資料來源：參考文獻[4])

第二節 有害環境的影響

混凝土抵抗各類有害物質的侵蝕能力即為混凝土的耐久性，而耐久性與混凝土的強度及緻密性等有關。關於混凝土耐久性的評估，AASHTO T-277 的快速氯離子滲透試驗是相對理想的方式之一。氯離子滲透率以庫侖為單位表示，它對應於在 6 小時測試期間通過受到 50V 電位差的混凝土樣品的總電荷量，電荷量越少表示混凝土的耐久性越佳。當對低水灰比的混凝土樣品進行快速氯離子滲透試驗時，通過樣品的庫侖數顯著減少。對於含有約 10% 砂灰且水膠比(w/b)約為 0.40~0.45 的混凝土，氯離子滲透率很可低於 1000 庫侖，當水膠比低於 0.25 時，氯離子滲透率甚至可低於 150 庫侖，遠低於普通混凝土 5000~6000 庫侖[5]。隨著水灰比或水膠比的降低，水泥漿體的聯通孔隙數量降低，使得氯離子在水泥漿體中的移動變得困難，也就是說，其他有害物質要在此類混凝土中移動也變得困難，因此可藉以評估混凝土的耐久性。

一、氯離子的影響

海水本身對於純混凝土來說並不是一個特別惡劣的環境，但海洋環境可能對鋼筋混凝土非常有害[6]。在海洋環境中，混凝土結構基本上受到四種侵蝕性因素的影響：

- (1) 與溶解在海水中或在潮濕空氣中運輸的各種離子的存在有關的化學因素；
- (2) 與海平面波動(海浪、潮汐、風暴等)有關的幾何因素；
- (3) 凍融、乾濕等物理因素；
- (4) 機械因素，例如波浪的動力作用、海水中懸浮的沙子、漂浮的碎片甚至北海的浮冰造成的侵蝕。

正是這些不同因素的組合可能對鋼筋混凝土結構有害。如前所述，海水對純混凝土的危害並不特別大，幾個在不同海洋環境中暴露多年的水下純混凝土砌塊和結構仍處於相對良好的狀態。通常建議用於海洋環境的水泥的唯一化學限制與其 C3A 含量有關，該含量不應超過 8%。圖 2-2 顯示了在暴露於海水多年的混凝土結構中發現的不同的連續蝕變帶：碳化(Carbonation)、水鎂石(Brucite)和一氯鋁酸鹽

(Monochloroaluminate)的形成，以及硫酸鹽侵蝕並形成石膏(Gypsum)、鈣礬石(Ettringite)，甚至矽鋁石(Thaumasite) [2, 6-8]。然而，海水對鋼筋混凝土非常有害，因為氯離子會導致鋼筋生鏽，造成混凝土覆蓋層迅速剝落，使得氯離子更容易與混凝土內部的鋼筋反應，最終鋼筋混凝土將完全破壞，無法使用。所有侵蝕機制與有害物質侵蝕混凝土的難易度有關，因此具有非常緻密且不透水的水泥漿體可提供較佳保護。

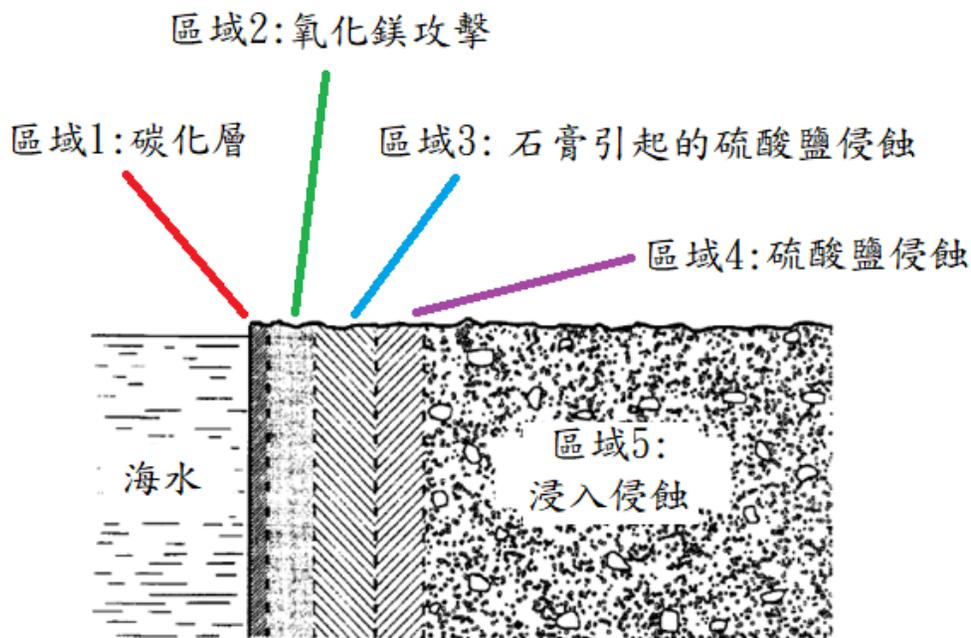


圖2-2 海中混凝土結構侵蝕狀況示意圖

(資料來源：參考文獻[4])

二、耐磨性

控制混凝土耐磨性的主要因素是混凝土的抗壓強度[9-10]。混凝土表面強度越高，混凝土的耐磨性越好。除了混凝土強度之外，還有幾個因素，例如使用水灰比小於 0.45 的混凝土、表面修整確實和充分養護，這些因素均會影響混凝土的耐磨性，因此需要加以考慮。影響混凝土強度的因素也會影響混凝土的耐磨性，例如低水灰

比、低坍落度值、良好的骨料級配和較低的空氣含量。低水灰比可確保混凝土中游離水的減少，可改善混凝土的緻密性並降低滲透性，從而提高混凝土強度及耐磨性。良好的粗、細骨料級配不但可以優化混凝土的工作性且可有效減少用水量，進而提高混凝土的強度。較高的空氣含量不僅會使混凝土強度降低，還會導致混凝土表面分層和起泡。因此，除非有特殊考慮，否則當需要考量耐磨性時，混凝土的空氣含量應越小越好。

充分、正確的養護程序也有助於提高混凝土的強度和耐磨性，其原因是適當的養護可降低混凝土的體積收縮，防止混凝土開裂，而持續性溼式養護方式被認為是較為理想的養護方法。此外，採用飛灰、爐石粉等礦物摻料取代部分水泥產製混凝土，也有助於提升混凝土的耐磨性。由於礦物摻料可與水泥水化反應生成物氫氧化鈣進行卜作嵐反應，產生具有強度的 C-S-H、C-A-H 膠體，填充混凝土內部的孔隙，使得混凝土的緻密性增加，抗壓強度和耐磨性也可提升。

三、耐火性

低水灰比或水膠比的混凝土耐火性一直相關研究的重點，有些研究指出此類混凝土的耐火性與普通混凝土一樣好，有些研究的結果則相反[11-18]。由於現場混凝土構件的變件條件、鋼筋圍束作用以及火場溫度分布及升溫速率均會影響混凝土的耐火性，目前尚無法精準預測混凝土於火害中的爆裂行為。當混凝土被加熱到極高的溫度時，極有可能產生爆裂。研究指出這種爆裂是由混凝土內部的水蒸氣蒸發引起，水在加熱時膨脹，最終壓力達到結構破碎的臨界點。低水灰比混凝土通常較為緻密，內部聯通孔隙較少，在高溫環境下，孔隙水蒸發成水蒸氣後將無多餘空間可宣洩蒸氣壓，最終造成混凝土的爆裂。為防止混凝土的爆裂，相關研究添加聚丙烯纖維於混凝土中，利用聚丙烯纖維於攝氏 160 度左右會熔融的特性，藉其熔融後產生的空間宣洩蒸氣壓，可有效降低混凝土高溫爆裂的情況。

第三節 纖維混凝土

纖維增強混凝土(Fiber reinforced concrete, FRC) 是一種特殊的混凝土(以下簡稱纖維混凝土)，主要是在混凝土中加入纖維以增強其對拉伸載荷的抵抗力。傳統上，纖維按材料分類：常用的是金屬、玻璃、化學纖維和天然纖維，根據纖維尺寸可再進一步區分為短纖維(Micro fiber)，長度短於 20mm，等效直徑(Equivalent diameter)為 5-200 μ m，以及長纖維(Macro fiber)，長度通常為 20-80mm，長徑比(Diameter ratio)為 40-120。常用纖維類型的物理特性總結在表 2-1 中。

表 2-1 常見混凝土用纖維之基本性質

纖維種類	直徑 (μ m)	長度 (mm)	比重 (g/cm ³)	抗拉強度 (MPa)	彈性模數 (GPa)	極限伸長 率(%)
鋼纖維	5-1000	10-60	7.85	200-2600	195-210	0.5-5.0
聚乙烯纖維	25-1000	-	0.96	80-600	1.4-5	12-100
高模聚丙烯纖維	20-24	6-12	0.97	2500-3000	80-120	2.5-5
亞苯基纖維	13	6	1.54	5800	180	3.5
聚丙烯纖維	10-200	5-50	0.90-0.91	310-760	3.5-14.7	6-15
聚乙烯醇纖維	9-760	6-12	1.2-2.5	800-3600	20-80	4-12
玻璃纖維	6-35	10-50	2.54-2.70	1500-4000	72-80	2.5-4.8
椰子纖維	100-400	-	1.12-1.15	120-200	19-25	10-25
黃麻纖維	100-200	-	1.02-1.04	250-350	25-32	1.5-1.9
石棉纖維	0.02-25	5-40	2.55-3.2	200-1800	164	2-3
碳纖維	7-20	3-12	1.2-2	600-4000	200-390	0.4-11

(資料來源:文獻[19])

各類纖維的發展間接導致許多創新纖維混凝土的問世，而纖維混凝土的力學行為取決於許多因素，例如纖維縱橫比(長度/直徑)、彈性模量、纖維添加量、纖維方向等，均會影響纖維混凝土的力學性質。圖 2-3 所示圖使用不同類型纖維混凝土的破壞情況[20-23]。與普通混凝土(Normal concrete)相比，纖維混凝土有著高拉伸應變和強度的能力，並在混凝土軟化之前形成應變硬化(Strain hardening)，這是纖維混凝土可吸收高能量的原因。纖維混凝土中的最佳纖維含量取決於混凝土等級、纖維類型

和縱橫比。對於聚乙烯醇(Polyvinyl alcohol, PVA)和聚乙烯(Polyethylene, PE)等纖維，其最佳含量約在 1~2%的範圍內[24-25]，鋼纖維(Steel fiber)的最佳含量約在 1.5~2.5%間[26-28]，對於長度達約 70mm 的聚丙烯纖維(Polypropylene, PP)，其最佳含量約在 0.5~1%間[29-30]。

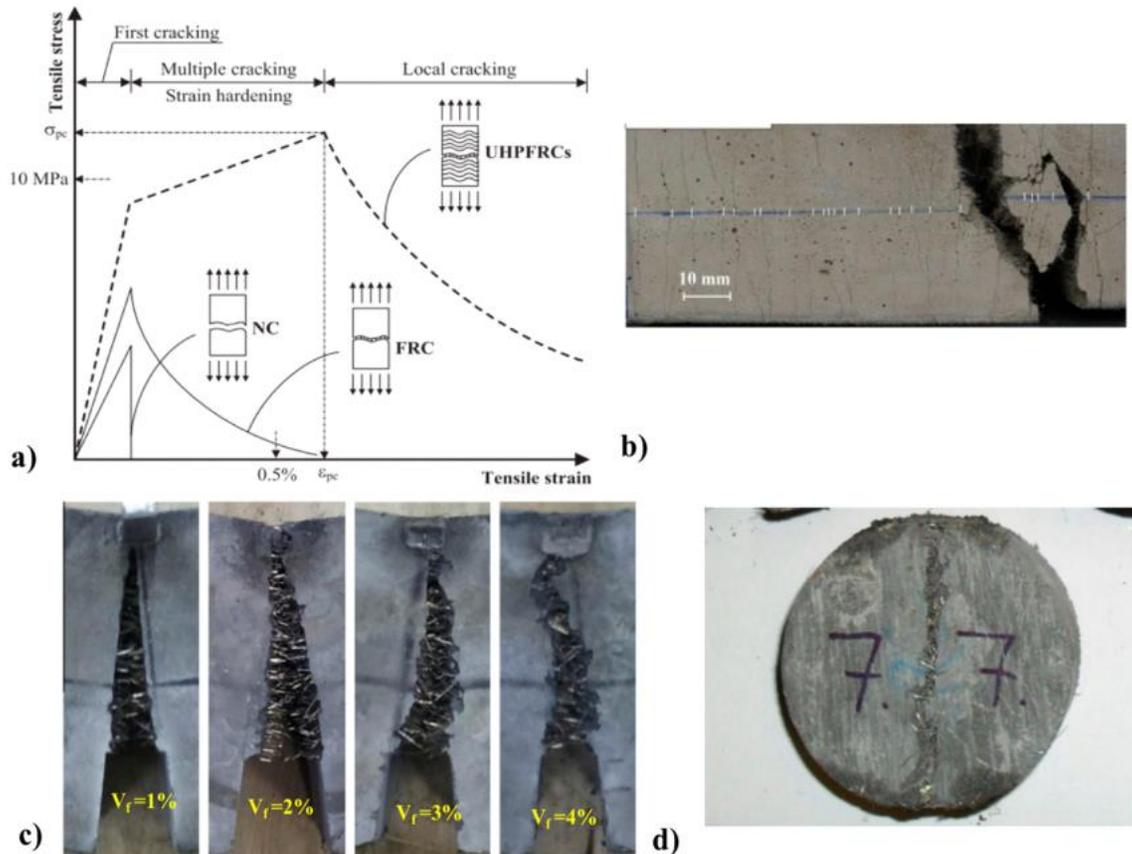


圖2-3 纖維混凝土的破壞

(a) 不同類型纖維混凝土拉伸應力和應變比較，(b) 纖維混凝土開裂情況，(c) 不同鋼纖維添加量梁試體裂縫開口比較，(d) 纖維混凝土撞擊試驗結果

(資料來源：文獻[20-23])

第二章 文獻回顧

由於纖維混凝土的眾多優點，例如良好的抗拉強度、延展性、抗疲勞性等，使得纖維混凝土已被廣泛應用於路面、工業地板、隧道襯砌、邊坡穩定和抗衝擊結構等

[31]。適當使用纖維混凝土可以增加結構元件的耐用性和使用壽命，從而減少元件在其整個生命週期內的整體環境影響。由於纖維混凝土具有高韌性和抗衝擊性，由於在運輸和處理過程中對損壞的敏感性降低，它在預鑄行業中的使用可能是有益的。此外，鋼纖維的使用已被證明可以提高鋼筋混凝土樑的抗剪破壞能力，從而減少對箍筋的需求[32-34]。在承壓混凝土構件中，傳統的鋼筋可用纖維加勁方式代替[35]。在梁單元中，纖維鋼筋混凝土也被用於混合混凝土結構中，作為裂縫寬度控制的表面層[36-37]。在美國、日本和德國，不同類型的纖維增強混凝土已成功地用作多個實際項目的修復材料，包括橋面、混凝土大壩、隧道、高層建築中的梁結構[38-39]。

為提升纖維混凝土的應用範圍，瞭解其在不同環境條件下的長期性能非常重要。與普通混凝土相比，有關纖維混凝土耐久性的研究還不夠成熟，雖然有些文獻已探討纖維混凝土的劣化機制，如氯化物和碳化引起的腐蝕、凍融循環和鹼-二氧化矽反應等，然而纖維與水泥漿體間界面過渡區的微觀結構影響纖維混凝土的耐久性明顯，此類課題尚未被完整的探討，也值得進一步研究。以下針對纖維混凝土耐久性課題進行說明。

一、影響纖維混凝土劣化的過程

一般來說，混凝土的劣化可能是由多種物理、化學或機械過程共同作用引起的[40]。影響鋼筋混凝土基礎設施的最常見劣化機制之一是鋼筋腐蝕。腐蝕是一種電化學過程，其中電荷(電子和離子)從陽極流向陰極。一般來說，在水化混凝土的鹼性環境中，鋼表面會自發形成鈍化膜[41]，保護其免受腐蝕。然而，由於氯化物進入[42-43]或碳化[44-45]，這種鈍化膜會分解，從而導致主動腐蝕[46-48]。此外，在混凝土中，腐蝕過程(包括起始期和傳播期)受到裂縫存在的強烈影響[49-50]。由於纖維混凝土中的開裂過程與普通混凝土中的開裂過程根本不同，因此可以合理地預期劣化過程也不同。表 2-2 簡要概述了有關纖維對開裂混凝土中鋼筋腐蝕的影響的現有文獻，而詳細信息將在接下來的部分中討論。

表 2-2 纖維混凝土開裂腐蝕文獻整理

文獻	纖維種類/含量	齡期 (月)	裂縫寬度(mm)	碳化深度 (mm)	氯離子 含量(%)	腐蝕情況
Vasanelli [51]	Steel, 0.6% Polyester fibers, 0.9%	17 17	$W_{cr,ave}$ 0.13 $W_{cr,ave}$ 0.13~0.16	15.11~16 14.87~17.47	- -	- -
Kobayashi [52]	Polypropylene, 1.5% Polypropylene, 1.0% Polypropylene, 0.75%	11 11 11	$W_{cr,tot}$ 0.04~0.26 $W_{cr,tot}$ 0.02~0.12 $W_{cr,tot}$ 0.04~0.08	- - -	0.38~0.6 3 0.55~0.6 2 0.55~0.6 0	Mass loss, 5% Mass loss, 8% Mass loss, 10%
Miyazato [53]	Polyethylene, 1.5%	3	$W_{cr,ave} < 0.1$	21.6(w/c=0.3) 28.8(w/c=0.6)	-	-
Micelli [54]	Steel, 0.6% Polyester fibers, 0.9%	72 72	$W_{cr,ave}$ 0.19 $W_{cr,ave}$ 0.16	39 37	- -	- -
Chen [55]	Steel, 0.5% Polyvinyl alcohol, 0.75%	36 36	$W_{cr,ave}$ 0.10~0.40 $W_{cr,ave}$ 0.10~0.40	- -	- -	Pitting area, ~17% Pitting area, ~20%

(資料來源：文獻[19])

二、氯化物的影響

如上所述，氯離子會導致混凝土中的鋼筋腐蝕。點蝕(Pitting)是氯化物誘發腐蝕的一種典型形式[47]。由於在鋼筋層需要一定量的氯化物來引發腐蝕，因此腐蝕引發所需的時間在很大程度上取決於混凝土保護層的完整性。此外，氯化物可能以游離氯化物或結合氯化物形式存在於混凝土中，只有游離氯化物會導致鋼筋腐蝕。氯化物

與水泥基體的結合是一個複雜的過程，取決於許多因素[56]。水泥的化合物如鋁酸三鈣 (C3A) 和鐵酸鋁四鈣 (C4AF) 與結合的氯離子一起形成弗里德爾鹽(Friedel's salt)，其具有較少的孔隙結構並減緩氯離子的傳輸[57]。總體而言，混凝土的氯化物結合能力取決於 C3A、C4AF、矽酸三鈣 (C3S)、水灰比，其中 C3A 的影響最大[58]。因此，纖維混凝土中的氯化物結合將主要取決於基質成分。

Abbas 研究鋼纖維混凝土和鋼筋混凝土試體的耐氯化物侵蝕能力，其試驗方式為 ASTM C1202-10 推薦的快速氯離子滲透試驗法(Rapid chloride migration test, RCPT)，發現鋼纖維混凝土的氯離子擴散係數和通過纖維混凝土電荷低於鋼筋混凝土，此結果係因纖維混凝土通過纖維(鋼纖維和聚丙烯纖維的混合物)阻止混凝土產生微裂縫所致[59-60]。一般來說，由鋼筋腐蝕引起的開裂現象會被纖維的維束作用而延遲發生[61-63]，同時含纖維的水泥砂漿也會減少鋼筋混凝土中腐蝕物質的擴展。研究指出，纖維與水泥漿體間界面過渡區比傳統鋼筋與水泥漿體間界面過渡區更加緻密，使得有害物質不容易進入纖維混凝土[64-65]。不過，也有研究指出纖維與水泥漿體間界面過渡區中的氫氧化鈣含量較高時，可能會增加氯化物的侵蝕機率，使得纖維橫截面因腐蝕而逐漸減小，進而失去纖維與漿體間的握裹力[66]。圖 2-4 所示為無纖維砂漿和含 2%PVA 纖維砂漿試體的氯化物滲透深度，試驗方式依 NT Build 492 規定進行快速氯化物遷移測試(Rapid chloride migration test)，在試體未開裂的狀態下，含纖維砂漿試體的氯化物滲透率略低。

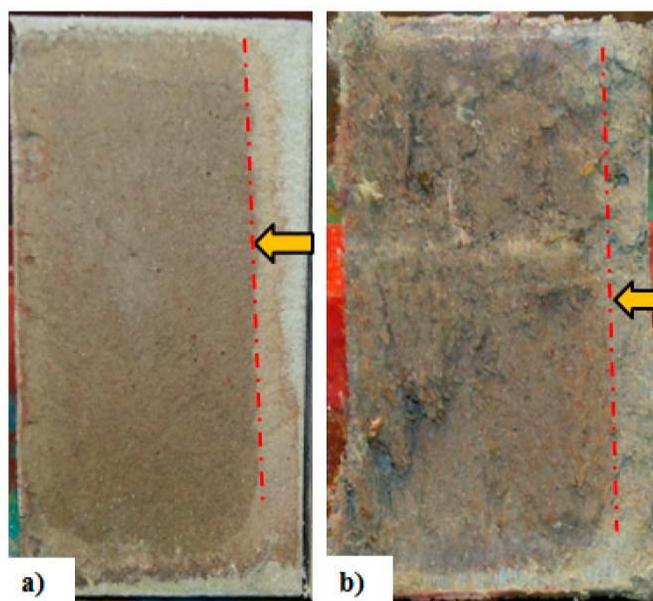


圖2-4 氯化物滲透試驗結果 (箭頭表示氯化物滲透方向)

(a) 純砂漿、(b) 含纖維砂漿

(資料來源：文獻[67])

目前對於纖維混凝土受氯化物腐蝕限制的可接受裂縫寬度尚無定見，Bernerd 的研究指出，混凝土裂縫寬度大於 0.10mm 時會導致比未開裂狀態更快的腐蝕速率[68]。Granju 的研究也得出了類似的結論，因為即使在類似海洋環境中暴露一年後，裂縫寬度低於 0.1mm 的試體也沒有出現腐蝕跡象[69]。裂縫的自我修復可以發揮作用，因為眾所周知，小裂縫具有通過所謂的自修復（即，無需任何外部干預或特殊添加劑）自主修復的能力[70-72]。Mangat 的研究則指出，纖維混凝土中允許的裂縫寬度為 0.20mm，且隨纖維混凝土中裂縫寬度的增加，可觀察到更高的腐蝕趨勢[63]。然而，Berrocal 的研究則顯示，與具有相同表面裂縫寬度的鋼筋混凝土相比，由鋼纖維和 PVA 纖維製成的纖維混凝土其腐蝕初始時間會延後，不過鋼纖維和 PVA 纖維混凝土的電阻率都降低[74]。此結果表示，較低的電阻率可能導致較高的 第二章 文獻回顧 仍須要進一步的研究探討以釐清此問題。

此外，纖維混凝土的劣化過程(氯化物侵入和腐蝕)受纖維類型的顯著影響。研究指出，雖然鋼纖維本身容易受到腐蝕，但由於表面因腐蝕而生成的氧化皮，可使鋼纖

維具有更高的耐腐蝕性[75]。文獻[68]利用鋼纖維和粗化學纖維(Macro-synthetic fiber)製作纖維混凝土，探討暴露於沿海和內陸環境的預開裂試體之耐久性，持續試驗時間從 7~24 個月不等，結果發現化學纖維本身在內陸和沿海環境中都具有出色的耐久性。在裂縫寬度為 0.20mm 的試體中，鋼纖被腐蝕的相當嚴重，纖維橫截面顯著減小，使得殘餘抗拉強度明顯降低。

三、碳化的影響

碳化(Carbonation)，又稱中性化，會引起混凝土的化學性質及機械性質變化，特別是強度、滲透性、孔徑分佈和化學性質的變化。此外，碳化也會引起混凝土收縮，從而導致混凝土開裂[44]。碳化也是導致鋼筋混凝土結構中鋼腐蝕的主要劣化因素之一[47]。從文獻中可以看出，與沒有纖維的混凝土相比，適量的纖維可以延緩混凝土中的碳化速率。由於碳化與水泥漿體的孔隙結構和滲透率有關，因此最佳纖維含量在碳化中起重要作用。Wang 研究不同添加百分比鋼纖維(0、0.5、1.0、1.5 及 2%)對未開裂纖維混凝土碳化深度的影響，結果顯示 1.5%的纖維含量可以降低碳化速度，但在 2%的纖維含量時碳化速度反而加快[76]。在另一項研究中，則發現 2%的鋼纖維含量會導致纖維混凝土的孔隙率和滲透率升高[72, 77]。必須說明的是，較高的孔隙率不一定會有較高的滲透率，要看孔隙間是否有相互連通才會導致高滲透率[44, 78]。然而，無論纖維含量如何，纖維混凝土的水滲透係數和氣體滲透係數都會增加[77]。研究指出，經過碳化處理的未開裂鋼纖維混凝土試體，其性能仍維持良好；但有些研究則指出，在橋接裂縫(Bridging crack)處的纖維產生嚴重的腐蝕損傷，導致纖維混凝土的殘餘抗拉強度顯著降低[78-79]。

在含有鋼纖維 (0.6%) 和聚酯纖維 (Polyester fiber, POL) (0.9%) 的開裂混凝土梁試體研究中，發現碳化深度比在相同情況下開裂的對照梁(無纖維混凝土)低 24~36%[51]，在相同荷載作用下，對照梁和纖維混凝土梁中的裂縫寬度不同(對照梁為 0.24mm，纖維混凝土梁為 0.10mm)，此結果證實纖維在減小裂縫寬度和降低混凝土碳化深度具有正面的助益。另有究了規劃 1.5%PE 纖維和兩種不同水灰比(0.30 和 0.60)製作砂漿試體，在開裂和未開裂狀態下探討混凝土的碳化行為，所有試體均暴露於 5% 二氧化碳及 60%相對溼度(RH)環境下 4 天，然後在 90%相對溼度的潮濕環境中 10 天，

此為一個循環試驗所需天數，在測量碳化深度之前，試體總共完成了 6.5 個循環(約 91 天)。研究結果顯示，在低水灰(0.30)、未開裂含纖維砂漿和純砂漿試體的碳化深度幾乎相同(均無明顯碳化產生)，在較高水灰比(0.6)、含纖維砂漿試體中，其碳化是純砂漿試體的兩倍多。在開裂試體的試驗卻呈現相反的結果，發現純砂漿試體的炭化深度是含纖維砂漿試體的三倍，其中純砂漿試體的裂縫寬度為 0.3~0.4mm，而含纖維砂漿試體的裂縫寬度則為 0.10mm 或更小。此外，在純砂漿試體中僅形成單一裂縫 (Single crack)，而含纖維砂漿試體則形成多個裂縫 (Multiple cracks)。因此，純砂漿試體的碳化深度較高可歸因於存在更深和更寬的裂縫所致[53]。

四、鹼-矽反應

鹼-矽反應 (Alkali-silica reaction, ASR) 是在高鹼性水泥漿和存在於骨料中的游離二氧化矽 (Amorphous silica) 間發生的膨脹反應 (Swelling reaction)[88]。ASR 產生的凝膠呈現柔軟、黏稠並具有膨脹性等特點，主要成分為矽酸鈉 (Sodium silicate)[80]。ASR 凝膠在有水分的環境下會膨脹，於矽質骨料內部和周圍產生拉應力，嚴重者將導致開裂和剝落，造成混凝土的強度和耐久性下降[81-82]。由於纖維具有修復混凝土裂縫的能力，使得研究人員針對纖維混凝土中的 ASR 現象進行研究。大多研究指出纖維混凝土中的 ASR 擴展低於沒有純混凝土，如圖 2-5 所示。

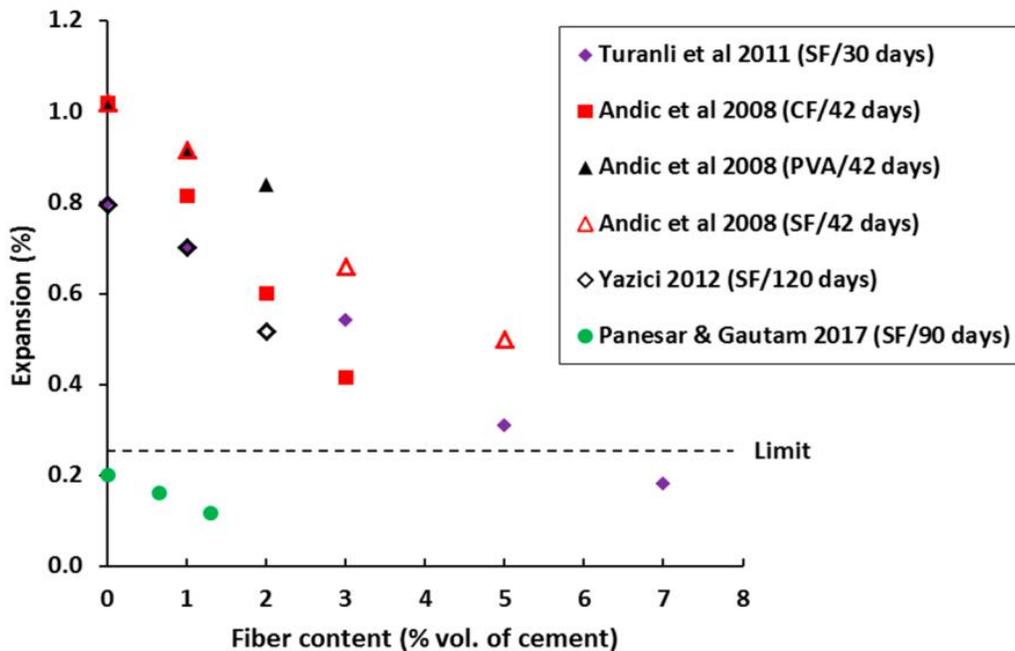


圖2-5 纖維混凝土之鹼-砂反應 (資料來源：[83-86])

從圖 2-5 可發現隨纖維含量的增加，ASR 造成的膨脹量會減少 [84, 86]。在纖維砂漿混合物中，微鋼纖維的使用量分別為水泥體積的 0、1、3、5 和 7%，並根據 ASTM C-1260 試驗方式，每 24 小時測量一次膨脹，持續 30 天。經過 30 天的測試，發現纖維含量 0%、1%、3%、5% 和 7% 試體之膨脹率分別為 0.80、0.70、0.55、0.30 和 0.19%，且隨養護時間增加，膨脹量的減少越明顯，這是由於纖維和水泥漿體間的黏結強度增加所致 [86]。Andic 的研究也得到類似的結論，即纖維混凝土進行更長時間的養護，以及採用超細纖維時，對於抑制 ASR 的膨脹行為效果良好 [84]。

此外，具有低體積含量鋼纖維 (1~2%) 的混凝土對於防止 ASR 膨脹現象也有不錯的表現 [83]。將纖維混凝土在 80°C 的 NaOH 溶液中浸泡 120 天後，與參考混凝土試體進行比較，含 1% 和 2% 的微細鋼纖維混凝土的體積膨脹率分別降低 12% 和 35%。利用掃描式電子顯微鏡 (Scanning electron microscope, SEM) 觀察纖維混凝土中 ASR 產物，如圖 2-6 所示 [83]，並藉由能量散射 X 射線分析 (Energy-dispersive X-ray spectroscopy, EDX) 發現，ASR 產物中的鈣矽比 (Ca/Si) 和鈉矽比 (Na/Si) 較高，不利

於水泥漿體的強度，不過微細鋼纖維可以有效抑制 ASR 引起的開裂及力學性質的衰減。一般來說，纖維混凝土的使用有利於延長結構的使用壽命，因為它能夠保持剩餘的機械性能和裂縫控制能力，即使發生嚴重的損壞過程仍可有效修復裂縫[87-89]。

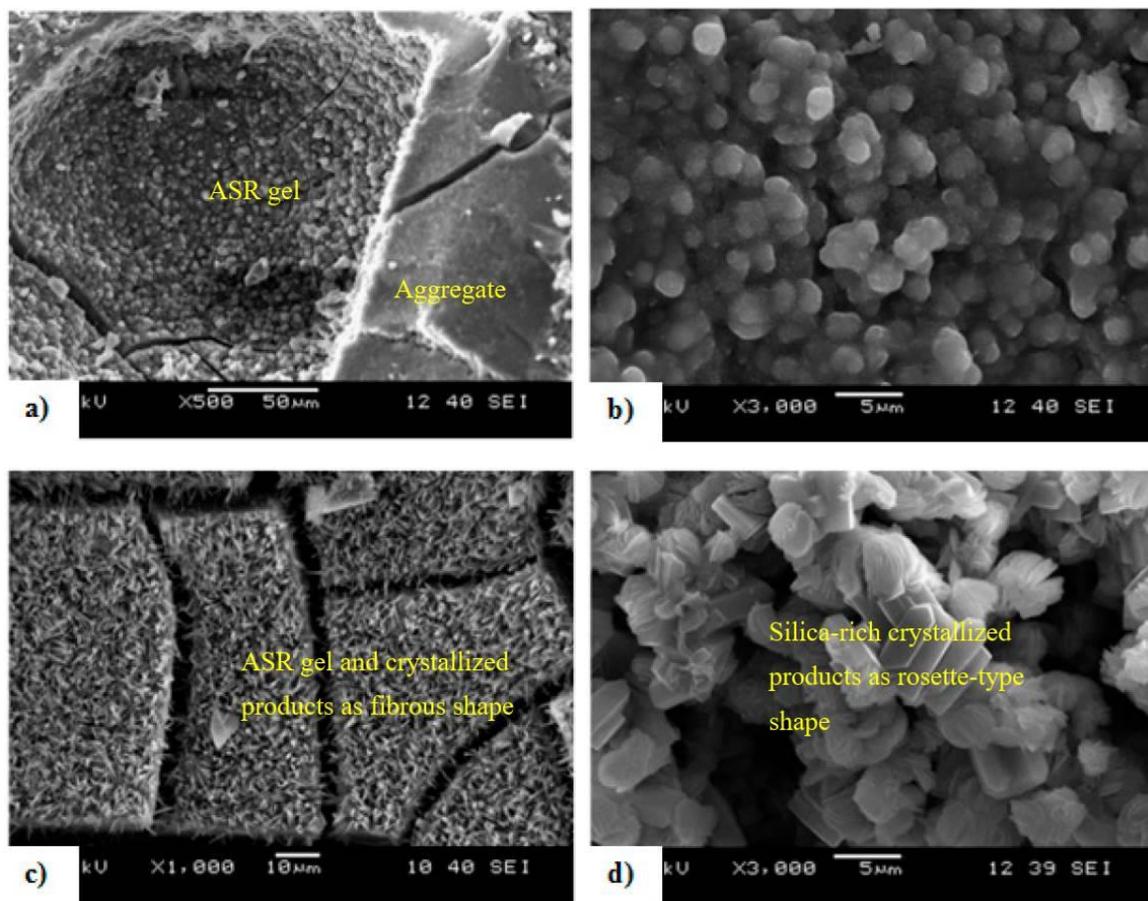


圖2-6 纖維混凝土的微觀結構

(a) ASR 凝膠、(b) ASR 微觀結構、(c) 含纖維裂縫結構、(d) 玫瑰花狀 ASR (資料來源：文獻[83])

五、高溫火害的影響

混凝土由於其不燃性和低導熱性具有不錯的耐高溫火害能力[90]。然而，混凝土長時間受高溫火害仍會改變其物理和化學性質，並影響殘餘強度[91-92]。在高溫(超過 1000°C)下，混凝土中的骨料將會膨脹、破裂，進而熔融[90]。混凝土耐火性能與組成材料的性質有關，例如骨料和水泥類型、水灰比、有無添加纖維及纖維種類、高溫暴露時間、加熱速率等[90, 93]。在高溫下(400°C 以上)，氫氧化鈣和碳酸鈣開始分解，矽酸鈣水合物(C-S-H 膠體)在溫度超過 500°C 後也會分解，並在水泥漿體結構中形成孔隙[94-95]。當矽酸鈣水合物破壞後，混凝土的強度即開始衰減，隨著溫度升高至 800°C 後，混凝土的殘餘強度約只剩原強度的 10~20%，已失去其功能性。

將含有 2%PVA 纖維的混凝土試體暴露於不同的溫度環境下(20、100、200、300、400 和 600°C)，並分別持溫 2 小時和 6 小時，觀察試體冷卻後的抗拉及抗壓強度變化，研究結果顯示即使在 600°C 下持續暴露 6 小時，纖維混凝土也沒有發生爆裂(雖然其延展性有顯著降低)，而對照組純混凝土試體則於加熱 35~70 分鐘後發生嚴重爆裂[96]。PVA 纖維混凝土未爆裂的原因主要是化學纖維(如 PP、PVA、PE 等纖維)的熔點相對較低，在暴露於高溫後會熔融形成孔隙，進而增加混凝土內部的孔隙率，有助於宣洩孔隙水蒸發形成的蒸氣壓力[97]。然而，鋼纖維具有高熔點，會影響纖維混凝土的加熱後機械性能，鋼纖維混凝土經高溫作用後仍可發揮抑制開裂和氫氧化鈣的膨脹[97]。不過鋼纖維對防止混凝土高溫爆裂的效果不如化學纖維，最高耐火溫度限制因纖維類型和混合設計而異，鋼纖維和 PP 纖維(75%+25%)的組合可表現出比(50%+50%)和(25%+75%)的組合更好的耐火性能[98]。

文獻[99]採用三種不同類型的纖維(鋼、PP 和 PE)製成纖維混凝土試體，纖維添加量分別為水泥體積的 0.5%和 1%。在彎曲試驗前，試體先依 ASTM E119-98 規定於高溫烘箱中加熱至 400、600 和 800°C。溫度 400°C 時，所有試體試驗結果均顯示具有較高的抗彎強度和韌性；含有 PP 纖維及 PE 纖維的試體，經 800°C 作用後與鋼纖維試體相比則有顯著的差異，通過超音波波速(Ultrasonic pulse velocity, UPV)量測混凝土密度發現，鋼纖維試體的質量損失低於 PP 和 PE 纖維試體[99]。Haddad 的研究則指出，暴露於 600°C 以上的鋼纖維混凝土會出現顯著的劣化[100]。楊[101]採用聚丙烯纖維、鋼纖維及混合纖維(聚丙烯及鋼纖維)，火害溫度有 500°C、700°C 及 900°C，並

量測試體溫度場、孔隙壓力場、燒失量，及於常溫、高溫後及高溫後置於室溫後 14 天後之抗壓強度、彈性模數及極限應變，觀察爆裂情形並統計爆裂機率，以釐清混凝土爆裂機理。研究結果顯示聚丙烯纖維含量在 $0.013\text{kg}/\text{m}^3$ (體積比 0.015%)，可將爆裂機率從未加纖維之 80% 降至 0%；孔隙壓力場並非試體 (直徑 100mm、高度 200mm) 中心點最大，而是中心軸 1/4 高程大於中心點及 3/4 高程 1/2 半徑處；溫度場的分布並不因纖維的種類及含量而有明顯的差異，且與中心點溫差皆有兩個極值；混凝土爆裂時間點，在孔隙壓力及內外溫差之極大值發生爐溫 350°C 至 450°C 機率分為 85.3% 及 79%，且試體發生爆裂多於此一溫度範圍內發生；殘餘強度在 500°C 時無論以何種方式添加纖維皆較未加纖維有較佳之表現，然在 900°C 之殘餘力學性質並未有明顯差異；混合纖維較單一纖維添加有較佳之耐火性能。

文獻[102]研究結果顯示，經 400°C 、 600°C 及 800°C 高溫作用後，高強度高性能纖維混凝土之平均殘餘抗壓強度分別為其室溫之 88%、69% 及 23%，並指出火害後高強度纖維混凝土的彈性模數衰減較抗壓強度明顯。當火害溫度為 400°C 時，各系列混凝土之撓曲荷重都明顯增加；尤其是添加纖維之混凝土，其火害後之殘餘撓曲荷重比均達 1.3 以上。但火害溫度為 800°C 時，各系列混凝土之撓曲荷重與韌性皆急遽衰減。另一方面，經 400°C 、 600°C 及 800°C 高溫作用後，高強度混和纖維第二章 文獻回顧強度分別為其室溫之 107%、100% 及 57%，其值高於控制組。

近年來隨著混凝土技術的進步與創新，開發出更具耐久性、拉伸延展性及韌性要求的超高性能混凝土 (Ultra-high performance concrete, UHPC)。相較於普通混凝土，UHPC 擁有出色的韌性及更好的抗衝擊性。然而在高溫作用下，UHPC 的微觀結構和力學性質可能會嚴重惡化。文獻[103]設計 28 天齡期抗壓強度為 120MPa 以上的 UHPC，並測試其 7 天齡期時的硬固力學性質 (抗壓、抗彎及劈裂強度) 與 28 天齡期的抗壓強度。除了 UHPC 的實驗組，對照組為沒有添加纖維或輔助膠結材料 (矽灰，超細矽粉) 的純混凝土，實驗組 UHPC 在 56 天齡期的試體，進行火害前後的力學性質試驗，並觀察 UHPC 於火害試驗前後的微觀結構變化。研究結果顯示，UHPC 試體暴露於 300°C 、 400°C 和 500°C 後，經測試其殘餘力學強度 (抗壓、抗彎強度及抗拉強度) 並沒有明顯降低，甚至強度由於加熱的乾燥效果而增加。然而，當暴露溫度達 600°C 時，UHPC 試體發生剝落，因此殘餘強度會迅速下降。令觀察其微觀結構發現，聚丙烯纖維在高

溫下熔融，形成網狀孔道，為蒸氣提供逸出通道，有助於降低 UHPC 的內部蒸氣壓力並保持一定的殘餘力學強度。

第四節 礦物摻料的影響

影響纖維混凝土或砂漿性能的參數取決於纖維的抗拉強度、分布狀況、形狀、材料和橋接機制(Bridging mechanism) [104-109]。適用混凝土的纖維主要包掛鋼纖維、玻璃纖維(Glass fiber)、天然纖維(Natural fiber)和化學纖維(Synthetic fiber) [110-114]。當化學纖維直徑大於 0.3mm 時稱為粗化學纖維(Microsynthetic fiber)，當直徑小於 0.3mm 時則視為細化學纖維(Macrosynthetic fiber) [115]。聚丙烯纖維、聚乙烯纖維和聚乙烯醇纖維等細化學纖維已被廣泛用於增強水泥複合材料的機械性能，因此它們既可以用作建築材料，也可以用作加固材料[116-121]。儘管所有這些纖維都具有獨特的特性，例如輕質、耐腐蝕和裂縫橋接，但聚丙烯纖維由於具有成本效益而在工業中得到更多使用[117, 119, 123-125]，最近聚丙烯纖維已被用於開發隔熱建築複合材料[126-127]。

由於生產波特蘭水泥混凝土時會排放大量的二氧化碳，對自然環境會有不利的影響[128]，因此減少二氧化碳排放和生產環保混凝土已成為重要的研究課題[126-127 129-130]，現行作法多是使用飛灰、爐石粉等礦物摻料取代部分水泥產製混凝土來降低水泥的使用量[131-136]。由於礦物摻料的微小尺寸和較大的比表面積，可加速礦物摻料進行卜作嵐反應(Pozzolan reaction)形成水合矽酸鈣(Calcium silicate hydrate, C-S-H)及水合鋁酸鈣(Calcium aluminate hydrate, C-A-H)[134-135, 137-140]，有效消耗界面過渡區中的氫氧化鈣晶體，達到填充混凝土內部的微小孔隙並改善混凝土的微觀結構[141, 135-136]，有助於提升混凝土的晚期強度和耐久性[142-143]。

Afroughsabet[144]研究混合纖維對高強度混凝土的影響，添加體積 1% 的聚丙烯纖維和鋼纖維產製纖維混凝土與普通混凝土進行比較，試驗結果顯示混合纖維試體的力學性質和耐久性有所提高，而純鋼纖維混凝土的抗壓強度低於聚丙烯纖維混凝土。Medina[145]研究天然火山灰混合水泥混凝土的

早期收縮和開裂、透水性和碳化深度，以評估聚丙烯短纖維和矽灰對混凝土耐久性的影響，研究結果指出添加 10% 的矽灰雖可提升混凝土的早期抗壓強度，但也形成明顯的體積收縮和開裂，增加滲透性和碳化深度，不過藉由添加 0.07% 體積量的聚丙烯纖維可減輕混凝土早期開裂現象，並顯著降低滲透性和碳化深度。

在混凝土中添加聚丙烯纖維可減少混凝土早期開裂，因為它們通過橋接和修復細裂縫來抑制混凝土中的體積收縮[146-149]。有些研究還指出聚丙烯纖維可提升含飛灰混凝土的透水性、吸附性和降低碳化[150]，添加大量的聚丙烯纖維(1~2%)也可以改善混凝土的機械性能[151-152]。此外，含聚丙烯纖維和矽灰的混凝土已有案例被用於改善橋梁用混凝土的表面修飾層，以獲得具有低滲透性和低氯化物擴散的混凝土耐久性[153-154]，同時利用纖維極佳的抗拉性能，使混凝土可以有效抵抗各式車輛長期的衝擊及磨損作用[155]。

第五節 國外重要研究及應用案例

Wang 的研究結果發現，在卸載條件下，纖維混凝土對鋼筋混凝土的好處並不明顯，因為結果差異不顯著。然而，在相同的載荷條件(彎曲載荷)下，纖維混凝土的腐蝕起始時間延長了約 2.2 至 3.6 倍，且隨纖維含量和覆蓋層厚度增加，腐蝕時間延後產生的現象更為明顯，圖 2-7 所示[156]。Dhinakaran 對玻璃纖維增強聚合物 (Glass fiber reinforced polymer, GFRP) 和普通鋼筋混凝土梁間的生命週期成本進行比較，得出用 GFRP 製成的梁其經濟性比鋼筋混凝土梁提高約 40%，使用壽命也延長兩倍的結論。

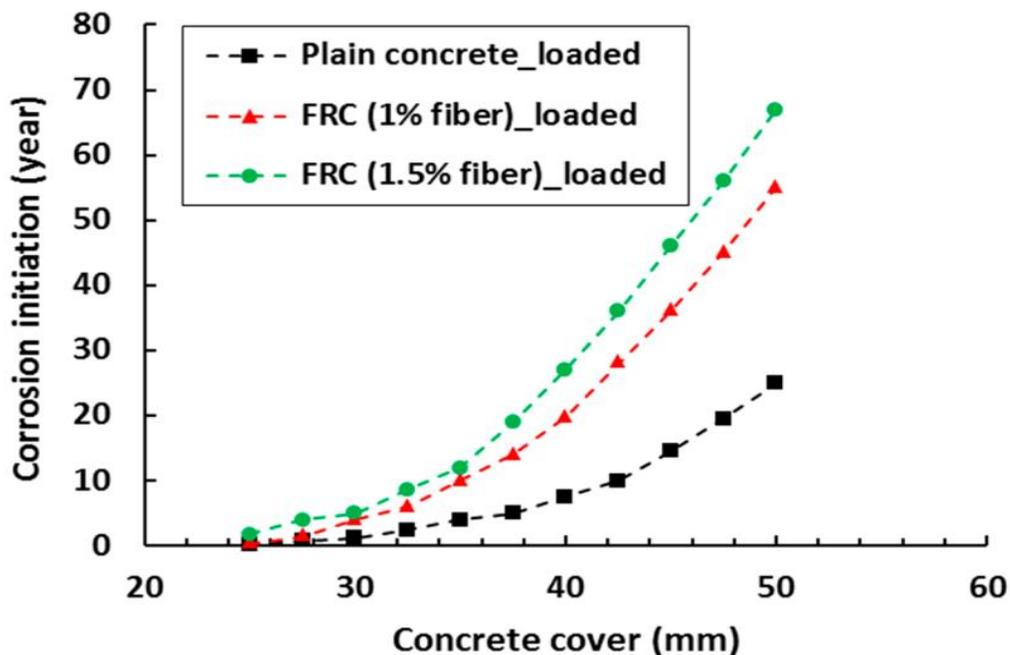


圖2-7 纖維混凝土在不同保護層深度下的腐蝕起始時間

(資料來源：文獻[156])

傳統的纖維混凝土應用已可區分使用細纖維混凝土(Micro-fiber concrete)和粗纖維混凝土(Macro-fiber concrete)間的差異性。細纖維混凝土

土廣泛應用於混凝土的收縮控制 [157-158]、抗衝擊性[159-162]和耐火性 [163-164]；粗纖維混凝土則應用於結構用混凝土構件，例如工業地板和道路路面等板狀結構[163]，少部分可應用於無梁版 (Suspended slab) [163-164]和隧道襯砌(Tunnel linings) [168-169]等。傳統纖維混凝土約 60%應用於坡地板(Slab on grade)、工業地板(Industrial floor)和道路路面(Road pavement)形式的所謂地面板(Ground slab)[170]，其中纖維的作用主要用於裂縫控制，由於車輪撞擊和地板和路面接縫處的剝落或無縫板中的收縮裂縫，這可能會通過降低維護和維修成本來顯著節省生命週期成本 [165]。

在無梁樓版中，纖維有助於減少裂縫寬度和控制裂縫間距，從而提高樓板的適用性和耐久性[171]。然而，使用纖維作為無梁樓版中唯一的承拉材料(即沒有傳統鋼筋)是受到限制，因為普遍認為可靠的結構行為需要傳統鋼筋和纖維的組合，最近有人建議，鋼筋和纖維的適當組合可能會產生最低的總配筋率[172]。然而，在波羅的海國家、歐洲大陸和英國的許多商業和住宅建築中，已經建造了僅用纖維加固的無梁版，包括一座五層辦公樓(圖 2-8~圖 2-9)和一座十六層辦公樓(圖 2-10~圖 2-11)[166-167]。

在室內環境中，纖維混凝土的主要劣化機制被認為是碳化和碳化引起的腐蝕，這是由於暴露於居住者或與空間使用類別所導致的二氧化碳排放有關，採用合宜的纖維混凝土配比設計可以降低碳化的速率，不過目前尚未有與纖維混凝土相關的劣化案例出現。



圖2-8 三角辦公大樓(Triangle office building)的無梁版
(資料來源：文獻[166])



圖2-9 三角辦公大樓(Triangle office building)完工後外觀
(資料來源：文獻[166])



圖2-10 洛克卡塔(Rocca tower)無梁版荷載試驗
(資料來源：文獻[167])



圖2-11 尚未完工的洛克卡塔(Rocca tower)
(資料來源：文獻[167])

第三章 試驗規劃

第一節 試驗材料

本研究所使用之各種試驗材料及其性質如下所列：

1. 水：一般自來水，符合 CNS 拌合水的要求。
2. 水泥：使用晉瑜企業股份有限公司生產的 Type I 卜特蘭水泥，其性質符合 CNS 61 的要求，如表 3-1 及表 3-2 所示。
3. 爐石粉：採用晉瑜企業提供之 120 級水淬高爐爐渣粉(圖 3-1)，其物性與化性詳列於表 3-1 及表 3-2。
4. 飛灰：使用晉瑜企業提供之 F 級飛灰(圖 3-2)所示，其基本性質試驗結果如表 3-3 所示。
5. 常重粗細骨材：採用天然砂石，粗、細骨材之各項基本性質試驗結果列於表 3-4 中。
6. 鋼纖維：採用長虹公司提供之鋼纖維，長度 13mm、直徑 0.2mm、比重 7.8、拉伸強度 2000MPa、彈性模數 200GPa，其外觀如圖 3-3 所示。
7. 聚丙烯纖維：採用長虹公司提供之聚丙烯纖維，長度 12mm、直徑 0.05mm、比重 0.9、拉伸強度 300MPa、熔點 165°C，其外觀如圖 3-4 所示。
8. 強塑劑：採用慶豐樹脂企業提供之化學添加劑，符合 ASTM C494-81 Type G 規定之高性能減水劑，外觀為淺褐色、比重 1.05、pH 為 5.14、含固量 18.55%，氯離子含量 19ppm。

表 3-1 水泥、爐石粉之物理性質

項目			試驗結果		規範		
			水泥 I 型	爐石	水泥 I 型	爐石	
					CNS 61、1078	CNS 12549	
1	比重		--	2.90	--	min.2.8	
2	細度(透氣儀試驗)	m ² /kg	386	439	min.280	min.330	
3	初凝	min	123	--	min.45	--	
	終凝	min	240	--	max.375	--	
4	健度(熱壓膨脹試驗)	%	0	--	max.0.80	--	
5	空氣含量(體積比)	%	7.5	5.3	max.12	max.12	
6	細度 (No.325 濕篩法停留量)	%	--	0.4	--	max.20	
7	活性指數	7 天	%	--	77.8	--	min.75(100 級)
		28 天		--	100.3	--	min.95(100 級)
8	抗壓強度	3 天	kgf/cm ²	250	--	min.123	--
		7 天		335	--	min.194	--
		28 天		446	--	min.286	--

(資料來源：本研究整理)

表 3-2 水泥、爐石粉之化學成分

化學成分						
項目		試驗結果		規範		
		水泥 I 型	爐石	水泥 I 型	爐石	
				CNS 61、1078	CNS 12549	
1	二氧化矽 (SiO ₂)		21.04	35.16	--	--
2	氧化鋁 (Al ₂ O ₃)		6.24	14.08	--	--
3	氧化鐵 (Fe ₂ O ₃)		3.06	0.29	--	--
4	氧化鈣 (CaO)		63.86	39.68	--	--
5	氧化鎂 (MgO)		2.3	7.27	Max.6.0	--
6	三氧化硫 (SO ₃)	C ₃ A ≤ 8%	2.48	0.05	Max.3.0	Max.4.0
		C ₃ A > 8%			Max.3.5	
7	燒失量 (L.O.I)		1.1	0.26	Max.3.0	--
8	不溶殘渣		0.13	--	Max.4.30	--
9	矽酸三鈣 (C ₃ S)		48	--	--	--
10	矽酸二鈣 (C ₂ S)		23.3	--	--	--
11	鋁酸三鈣 (C ₃ A)		11.4	--	--	--
12	鋁鐵酸四鈣 (C ₄ AF)		9.3	--	--	--
13	硫化物硫 (S) %		--	0.66	--	Max. 2.5
14	硫酸鹽硫(SO ₃)%		--	0.43	--	Max. 4.0

(資料來源：本研究整理)

表 3-3 F 級飛灰化學成分與物理性質

試驗項目	CNS3036 規範 (%)	試驗結果 (%)	
1. SiO ₂	Min. 70.0	50.00	85.39
2. Al ₂ O ₃		28.41	
3. Fe ₂ O ₃		6.98	
4. SO ₃	Max. 5.0	0.47	
5. 含水量	Max. 3.0	0.13	
6. 燒失量	Max. 6.0	4.62	
7. 有效鹼 (as Na ₂ O)	Max. 1.5	0.18	
8. Na ₂ O	---	0.09	
9. K ₂ O	---	0.13	
10. CaO (容量法)	---	5.99	
11. MgO (容量法)	---	1.39	
1. 密度 g/cm ³	---	2.31	
2. 細度 (No.325 濕篩法) %	Max. 34	13.24	
3. 卜特嵐活性指數 (7 天) %	Min. 75	86.78	
卜特嵐活性指數 (28 天) %	Min. 75	97.84	
4. 需水量控制 %	Max. 105	96.69	
5. 健度 (熱壓膨脹試驗) %	Max. 0.80	0.056	

(資料來源：本研究整理)

表 3-4 常重粗細骨材基本性質

基本性質 \ 骨材種類	六分石	三分石	砂
比重(SSD)	2.61	2.60	2.60
吸水率(24h)	1.05%	1.31%	1.9%
F.M.	-	-	2.20
乾搗單位重 (六分、三分各半)	1470 kg/m ³		-

(資料來源：本研究整理)



圖3-1 爐石粉

(資料來源：本研究整理)



圖3-2 F級飛灰
(資料來源：本研究整理)



圖3-3 鋼纖維
(資料來源：本研究整理)



圖3-4 聚丙烯纖維
(資料來源：本研究整理)

第二節 混凝土配比

本研究參照 ACI 211.1-91 規範建議，採用絕對體積法來計算各項材料的單位體積(1m³)用量，試驗變數包含固定混凝土水膠比為 0.4，飛灰及爐石粉分別取代水泥重量之 0%、30%及 60%，鋼纖維與聚丙烯纖維添加量分別為每立方公尺混凝土體積的 0%、0.15%及 0.3%，試驗齡期為 28 天，並添加適量強塑劑控制混凝土的坍度在 20±2cm，坍流度 50±10cm，其中鋼纖維、聚丙烯纖維及強塑劑為外加，用量不計入混凝土配比。各式混凝土配比的試驗變數如表 3-5 所示，試驗混凝土配比則如表 3-6 所示。澆置完成之試體於隔日進行拆模，並放置於標準養護池中進行水中養護(圖 3-5)，另部分試體放入鹽水中進行鹽水養護(圖 3-6)，待試驗齡期時取出進行抗壓強度及劈裂強度等試驗。

表 3-5 試驗變數

水膠比	飛灰及爐石粉取代水泥重量比例	每立方體積鋼纖維及聚丙烯纖維添加量	試驗項目	齡期
0.4	0%、30%、60%	0%、0.15%、0.3%	養護方式 抗壓強度 劈裂強度 抗彎強度 透水 氯離子滲透	28 天 56 天

(資料來源：本研究整理)

表 3-6 混凝土配比 (1m³)

組數	w/b	水	水泥	飛灰	爐石粉	細骨材	粗骨材	鋼纖維	聚丙烯纖維	強塑劑
		kg								
CS00P00	0.40	180	450	0	0	855	855	0	0	4.5
CS30P00	0.40	180	450	0	0	855	855	23.4	0	9
CS00P30	0.40	180	450	0	0	855	855	0	2.7	5.4
CS15P15	0.40	180	450	0	0	855	855	11.7	1.35	7.2
FS00P00	0.40	180	180	270	0	810	810	0	0	4.5
FS30P00	0.40	180	180	270	0	810	810	23.4	0	9
FS00P30	0.40	180	180	270	0	810	810	0	2.7	5.4
FS15P15	0.40	180	180	270	0	810	810	11.7	1.35	7.2
SS00P00	0.40	180	180	0	270	845	845	0	0	4.5
SS30P00	0.40	180	180	0	270	845	845	23.4	0	9
SS00P30	0.40	180	180	0	270	845	845	0	2.7	5.4
SS15P15	0.40	180	180	0	270	845	845	11.7	1.35	7.2
MS00P00	0.40	180	180	135	135	828	828	0	0	4.5
MS30P00	0.40	180	180	135	135	828	828	23.4	0	9
MS00P30	0.40	180	180	135	135	828	828	0	2.7	5.4
MS15P15	0.40	180	180	135	135	828	828	11.7	1.35	7.2

1. 編號說明：第一個英文字母 C 代表純水泥混凝土、F 為含飛灰混凝土、S 為含爐石粉混凝土、M 為混合飛灰及爐石粉混凝土。第一組英文及數字，如 S00 為鋼纖維添加量 0%、S30 為添加量 0.3%、S15 為鋼添加量 0.15%。第二組英文及數字，如 P30 為聚丙烯添加量 0.3%，其餘表示方式與鋼纖維添加相同。

2. 鋼纖維、聚丙烯纖維及強塑劑用量為外加，不計入配比計算。

(資料來源：本研究整理)



圖3-5 淡水養護試體
(資料來源：本研究整理)



圖3-6 鹽水養護試體
(資料來源：本研究整理)

第三節 試體模具製作

為解析纖維種類及添加量對含飛灰及爐石粉混凝土抗壓強度、劈裂強度等力學性質，以及其耐久性之影響，本研究製作各式混凝土試體，其中抗壓強度、劈裂強度及抗彎強度試體模具係以鋼材製作，抗壓試體模具尺寸為直徑 100mm×高度 200mm (圖 3-7)、劈裂試體模具尺寸為直徑 150mm×高度 300mm (圖 3-8)，以及抗彎試體模具尺寸為寬度 100mm×高度 100mm×長度 330mm(圖 3-9)；混凝土滲透試驗之試體以直徑 150mm×高度 300mm 模具(圖 3-8)製作圓柱試體後進行裁切，其試體尺寸為直徑 150mm×高度 50mm，快速氣離子穿透試驗試體則以抗壓強度試驗用圓柱試體(圖 3-7)進行裁切。



圖3-7 抗壓試驗試體模具
(資料來源：本研究整理)



圖3-8 劈裂試驗試體模具
(資料來源：本研究整理)



圖3-9 抗彎試驗試體模具
(資料來源：本研究整理)

第四節 混凝土拌製及澆置

試驗試體模具備齊後，依前述計算所得混凝土配比，利用強制式水平雙軸拌和機拌製混凝土，其拌和之方法及程序如下：

1. 將水泥及砂置入拌合容器內，充分乾拌以達均勻。
2. 加入 1/3 的纖維均勻混拌。
3. 將水(強塑劑先行與水充分攪拌均勻)倒入拌和容器內，啟動拌和機，拌和三十秒鐘。
4. 再加入 1/3 的纖維均勻混拌。
3. 停止拌和機十五秒鐘，於此時間將容器側壁可能附著之水泥漿刮入拌合容器。
5. 加入剩下 1/3 的纖維均勻混拌。
4. 啟動拌和機，拌合一分鐘。
5. 停止拌和機十五秒鐘，於此時間將粗骨材倒入拌和容器內。
6. 啟動拌和機，拌和一分鐘。

混凝土拌和完成後，取出一部分試料進行坍度試驗(圖 3-9)及坍流度試驗(圖 3-10)，其餘澆置圓柱試體，混凝土分兩層澆置並以搗棒夯實後抹平後即完成澆置，製作完成的抗壓試體如圖 3-11 所示。所有試體於隔日拆模後(圖 3-12)放置於室內進行水中養護，待試驗齡期時進行抗壓強度及劈裂強度試驗。



圖3-10 新拌混凝土坍度試驗
(資料來源：本研究整理)



圖3-11 新拌混凝土坍流度試驗
(資料來源：本研究整理)



圖3-12 澆置完成之試體
(資料來源：本研究整理)



圖3-13 拆完模後之試體
(資料來源：本研究整理)

第五節 試驗設備及試驗方法

一、試驗設備

本研究旨在探討纖維混凝土的力學性質及耐久性，規劃試驗項目有混凝土抗壓強度試驗、劈裂強度試驗、抗彎強度試驗、快速氯離子穿透試驗、滲透試驗、掃描式電子顯微鏡微觀結構觀測試驗，以及能量色散 X 射線(簡稱 EDS)分析試驗等，主要使用的試驗儀器設備說明如下：

- (1) 混凝土單軸拌合機：採用垂直單軸拌合方式，最大拌合量約 0.02m³，如圖 3-13 所示。
- (2) 強制式水平雙軸拌和機：採用水平雙軸交叉拌合方式，每軸具四支攪拌翼，最大拌合量約 0.1m³，如圖 3-14 所示。
- (3) 萬能材料試驗機：最大載重為 180 噸，可以位移控制或力量控制加載，如圖 3-15 所示。本設備主要用以進行混凝土抗壓試驗。
- (4) 加壓透水試驗儀：其水壓可控制在 0~50 kg/cm²，儀器如圖 3-16 所示。
- (5) 快速評估混凝土抵抗氯離子滲透能力試驗：試驗儀器如圖 3-17 所示，搭載 60V 直流電壓，藉由量測得到的電流值計算 6 小時內總通過電量，以混凝土導性的做為評估抗氯離子入侵能力的快速指標。
- (6) 掃描式電子顯微鏡(SEM)：試驗儀器如圖 3-18 所示，並可同時進行 EDS 分析。
- (7) 微小維克氏硬度計：用以量測纖維混凝土內部界面過渡區微硬度值，試驗儀器如圖 3-19 所示。



圖3-14 混凝土單軸拌和機（資料來源：本研究整理）



圖3-15 強制式水平雙軸拌和機（資料來源：本研究整理）



圖3-16 萬能材料試驗機 (資料來源：本研究整理)



圖3-17 滲透試驗儀
(資料來源：本研究整理)



圖3-18 快速氣離子穿透試驗儀
(資料來源：本研究整理)



圖3-19 掃描式電子顯微鏡 (資料來源：本研究整理)



圖3-20 微小維克氏硬度計
(資料來源：本研究整理)

2. 試驗方法

2.1 混凝土抗壓強度試驗

試拌混凝土試體於 28 天齡期時，依 CNS 1232 「混凝土圓柱試體抗壓強度之檢驗法」之規定進行抗壓試驗(圖 3-20)：

- (1) 將混凝土試體從養護室取出放置陰涼處風乾後在進行試驗。
- (2) 先把試體底部清理乾淨，放到蓋平桌上。
- (3) 將石膏加水拌勻，倒到試體的頂部，蓋上玻璃片並放置水準氣泡，使試體頂面維持水平。
- (4) 等大約 15 分鐘石膏乾後，將玻璃片拆除。
- (5) 將圓柱試體的軸心置於萬能試驗機上承壓軸的正中心處，加壓速率保持在 150 kg/sec，試驗至試體破壞為止，記錄所受之最大載重，該載重除以受壓面積即為該混凝土之抗壓強度。



圖3-21 混凝土抗壓強度試驗
(資料來源：本研究整理)

2.2 混凝土抗彎強度試驗

試驗前將試體取出晾乾，於試體上畫線標示支承的間距(300mm)，再將作為載重點之鋼棒(間距 100mm)以置於試體上方，以三分點載重方式加載 (ASTM C78，混凝土撓曲強度之標準試驗法)，如圖 3-21 所示。梁試體將於最大彎矩斷面處產生撓曲裂縫而破壞，得到破壞載重後再利用撓曲公式計算出抗彎強度。本項試驗將於後續驗證試驗時進行。



圖3-22 混凝土抗彎強度試驗
(資料來源：本研究整理)

2.3 混凝土劈裂強度試驗

每組配比之纖維混凝土試體於試驗齡期時取出，依 CNS 3801 混凝土圓柱試體劈裂抗張強度試驗法，進行劈裂強度試驗(如圖 3-22 所示)，試驗過程中同時觀察試體破壞模式，以解析纖維種類、卜作嵐摻料比例及齡期對混凝土劈裂強度的影響。

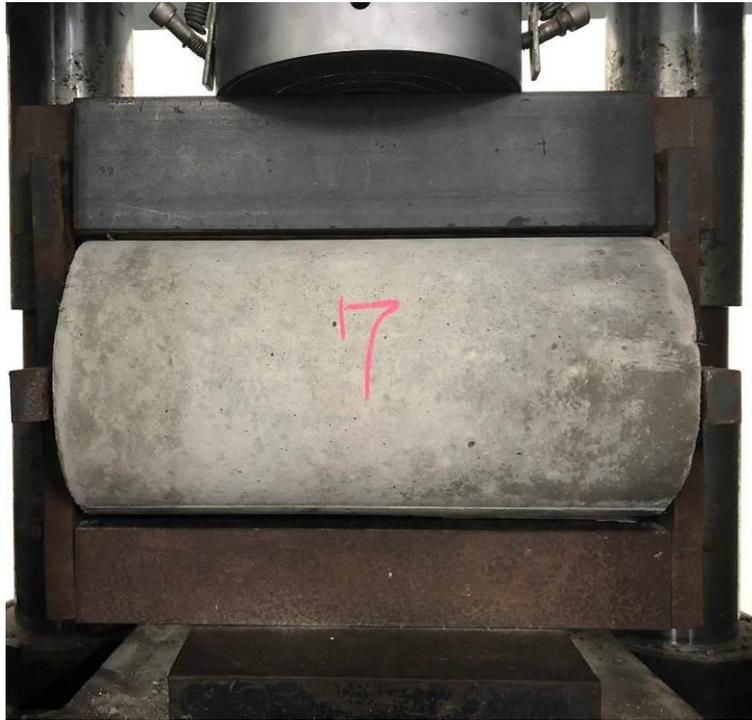


圖3-23 混凝土劈裂強度試驗
(資料來源：本研究整理)

2.4 混凝土滲透試驗

試驗前將試體取出擦乾後秤重，將試體安裝於透水試驗儀(圖 3-23)，透水試驗儀主要由上下兩鋼盤組成，鋼盤內有橡膠環墊片，用以緊密接觸混凝土試體使加壓的水不外洩，上下鋼盤配置有螺絲孔，可以螺絲鎖緊上下兩鋼片。正式試驗前，先以 6~7 kgf/cm² 水壓測試試體與上下鋼盤接觸是否密實，水有無溢出現象，再以氮氣加壓 3 kgf/cm² 水壓注入試體頂端，持續加壓 3 小時，取出試體量測經滲水試驗後之重量，再將試體放入烘箱烘乾 24 小時後秤重，將滲水試驗後重量減去乾燥重之後除以乾燥重，可得混凝土滲透率。本項試驗將於後續驗證試驗時進行。



圖3-24 混凝土滲透試驗
(資料來源：本研究整理)

2.5 快速氣離子穿透試驗

本計畫快速氣離子滲透試驗主要參照 CNS 14795 規範進行測定與計算。依 CNS 規範，試驗進行包含試體前處理、通電量測電荷、及計算與結果判讀等三步驟，詳細說明如後。

A. 試體前處理

本研究採用直徑 100mm、厚度 50mm 之試體進行快速氣離子滲透試驗，試驗前將試體置於抽真空幫浦容器中(如圖 3-24 所示)，使真空乾燥器內壓力降低至 120Pa，且維持真空狀態三小時。當真空狀態維持三小時後，將預先準備的去氣水抽入真空乾燥器內，使試體被水淹沒，並讓真空泵浦維持運轉 1 小時後關閉。真空泵浦關閉後，將試體浸漬於燒杯的水中 18 小時後始進行後續試驗。

B. 試體安裝與量測

將浸水的試體取出，擦乾後將試片安裝於試驗系統上。試驗系統包含兩個施加壓力克力材質的電位容器，分別安裝於試體的兩側，容器內並含有 1 個銅網電極（20 號篩徑），如圖 3-25 所示。試體一側容器以 0.3N 氫氧化鈉（NaOH）溶液填充，是為陽極；另一側則以 3%氯化鈉（NaCl）溶液填充，是為陰極。兩極之間施加 60 伏特直流電壓，以數據擷取器每隔 30 分鐘記錄 1 次電流值，一直到記錄 6 小時為止，試體安裝如圖 3-26 所示。

C. 計算與結果判讀

試驗記錄每 30 分鐘電流量，可將數據代入下式 (3-1) 即可獲得累積總電量。

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + 2I_{90} + \dots + 2I_t + \dots + 2I_{300} + I_{360}) \quad (3-1)$$

式中：Q 為總通過電量(coulombs)

I_0 為初始電流(amperes) t_i 為在時間 t 時的電流(amperes)。

若試體直徑不等於 95mm 時，由式 (3-1) 所獲致的總通過電量需加以修正。修正式如公式 (3-2)，將計算的總通過電荷量乘上標準試體面積與實際試體斷面積的比值，亦即：

$$Q_s = Q_x \times \left(\frac{95}{x}\right)^2 \quad (3-2)$$

式中： Q_s = 通過直徑為 95 mm 試體的總通過電量(庫倫)，

Q_x = 通過直徑為 x mm 試體的總通過電量(庫倫)，

x = 非標準試體直徑(mm)。

每個配比測試三個試體，計算平均總通過電荷量後，依 CNS 14795 規範建議，通過試片的總電荷可以評估混凝土抗氯離子穿透能力定性，如表 3-7 所示。

表 3-7 氯離子穿透性與總通過電量關係

總通過電量	氯離子穿透性
<100	可忽略
100~1000	甚低
1001~2000	低
2000~4000	中
>4000	高

參考 CNS 14795

(資料來源：本研究整理)



圖3-25 抽真空幫浦容器
(資料來源：本研究整理)

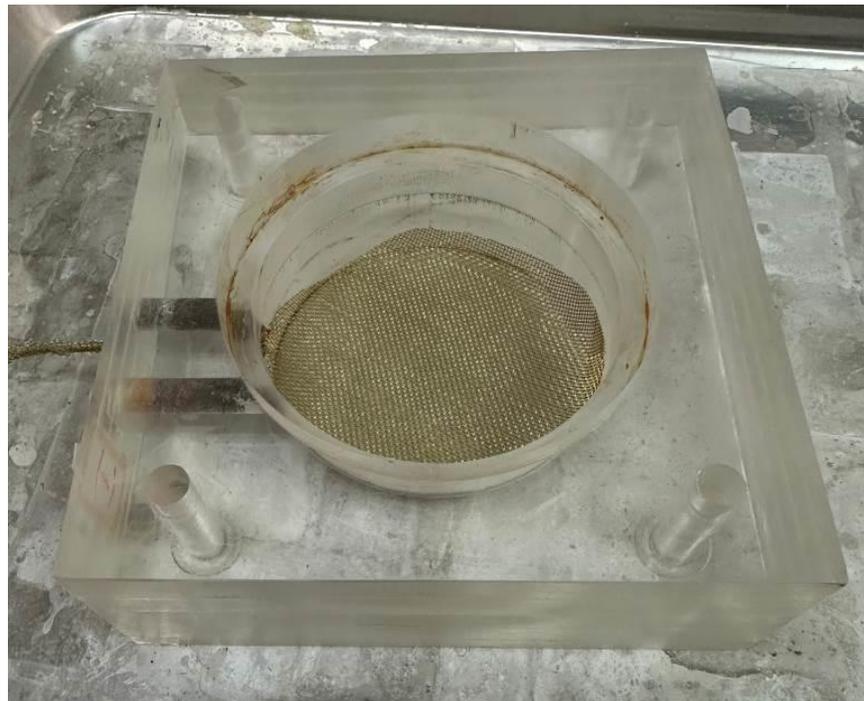


圖3-26 壓克力模具、電位容器與銅網
(資料來源：本研究整理)



圖3-27 快速氣離子穿透試驗儀試體安裝
(資料來源：本研究整理)

2.6 掃描式電子顯微鏡(SEM)觀測

A. 試驗前準備

鋼筋拉拔握裹試體經試驗後，取靠近鋼筋底層處之混凝土碎塊，進行掃描式電子顯微鏡觀測試驗，所採用之試體將先予終止水化至試驗進行時。試體終止水化依下列方式進行：

- (a) 以甲醇取代法將試體浸於甲醇溶液中，甲醇取代試體內之水分使其終止水化，為避免過速取代試體之微結構，碎裂試體先行浸至於內含10倍試體體積之低濃度甲醇中。浸泡甲醇之容器須密封使其內溶液不至

揮發為限。

- (b) 過一小時後，更換新鮮低濃度甲醇。
- (c) 隔一天，更換高濃度甲醇。
- (d) 進行各項微觀試驗前，將試體由甲醇溶液取出，並以 $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ 烘箱烘乾 24hr，並置於備有真空設備之真空乾燥皿中抽真空。
- (e) 進行微觀試驗。

B. 試體處理：

將混凝土經高速切割機切割成厚度為 0.3cm 之試體，進行研磨並拋光後進行試驗。設定研磨機之轉速(500 rpm/sec)、研磨過程中須使水及安裝砂紙轉盤。其研磨流程如下所述：

- (a) 將試樣放入研磨機，研磨所使用之砂紙為 120 番，研磨至試樣以肉眼目測平整，沒有凹凸不平之情況。
- (b) 依序使用之砂紙為 400 番，600 番，800 番，1000 番，1200 番，試體只需在每張砂紙中研磨 60 秒即可。
- (c) 換上拋光轉盤，轉速固定，拋光紙貼在轉盤上，拋光液為氧化鋁及水之混合溶液，兩者之調配 1：50，拋光時慢慢加入拋光溶液。
- (d) 每試體磨至表面光滑有反光即可。

C. SEM 觀測步驟

本試驗用之電顯微鏡 (Scanning Electron Microscope, SEM) 如圖 3-18 所示，其運作原理係將高能聚焦電子光束在試體表面掃描，由於試體表面鍍上一層薄金膜，電子束接觸後便會導電產生訊號，而由接收器接收顯像於陰極射線管(CRT)上。試驗步驟如下：

- (a) 試驗用試體之甲醇終止水化後以烘箱烘乾。
- (b) 將試體黏固於直徑 4cm 之不導磁圓盤上，用空氣噴槍清除其上的粉屑，以確保受電子束打擊時，不會污染電子顯微鏡之真空管。

纖維混凝土耐久性研究

- (c) 將真空管抽真空後，於試體上鍍上一層厚約 200\AA 的金膜。
- (d) 鍍好金膜的試體，放入電子顯微鏡中，經再一次抽真空後即可進行觀察。

2.7 微硬度量測試驗

維氏硬度是對所有固體材料的硬度測試，通過給予特定荷載使稜錐壓頭壓入測試樣品，計算壓痕之對角線長度來計算硬度，如圖 3-27，將對角線值帶入式 3-1 即可推導出相對之維氏硬度值：

$$HV = 2P \frac{\sin(\frac{\alpha}{2})}{d^2} = 18173.12 \frac{P}{d^2} = \frac{181731.2}{d^2} \quad (\text{MPa}) \quad (\text{式 3-1})$$

HV 為維氏硬度值，P 代入荷重(單位 gf，本實驗固定荷重為 10gf，因此 P=10)，A 為壓痕之表面積(μm^2)，d 為壓痕對角線長度的平均值(μm)， α 為稜錐壓頭夾角(136°)

微硬度試體在養護至齡期時，利用研磨拋光機進行研磨(使用之水磨砂紙依序為 #100、#240、#400、#800、#1200、#1500、#2500)，使得觀測面平整。進行微硬度試驗時，以低倍物鏡(10 倍目鏡、10 倍物鏡)尋找鋼筋混凝土界面，再轉至高倍物鏡(10 倍目鏡、40 倍物鏡)使用位移螺絲進行微調，待調整至量測位置後轉至壓痕器，此時壓痕器尖端與測試表面之間隔僅 0.3~0.4mm，操作機台進行試驗(圖 3-28)。本試驗固定撞擊荷重為 10gf，撞擊量測面時間 15 秒，新壓痕與舊壓痕中心之距離為壓痕之對角線長度 4 倍為佳，撞擊點由鋼筋-混凝土界面向外延伸至距離界面 100 μm 處，量測點數為 10 點，紀錄對角線長度數據並繪圖。

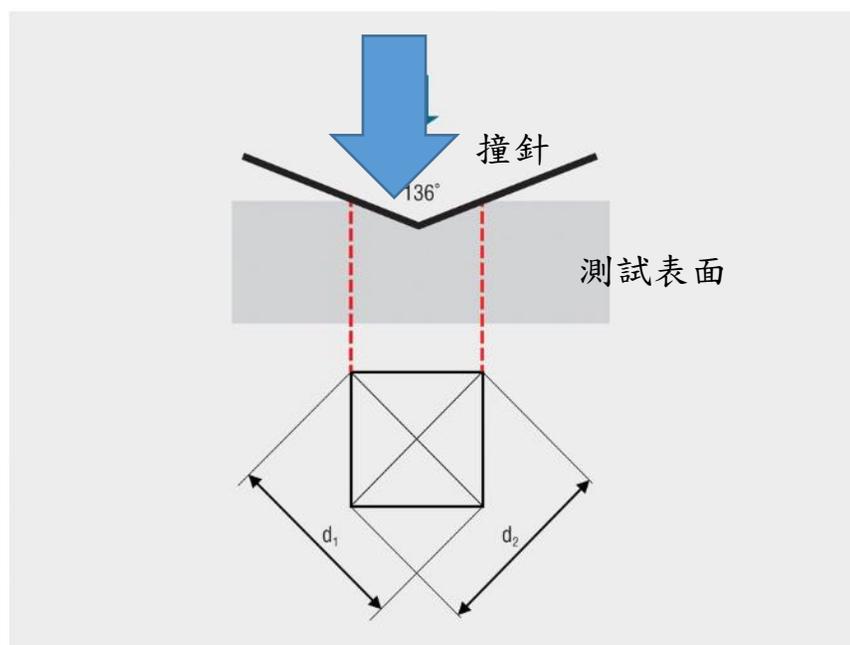


圖3-28 微硬度試驗之壓痕 (資料來源：本研究整理)

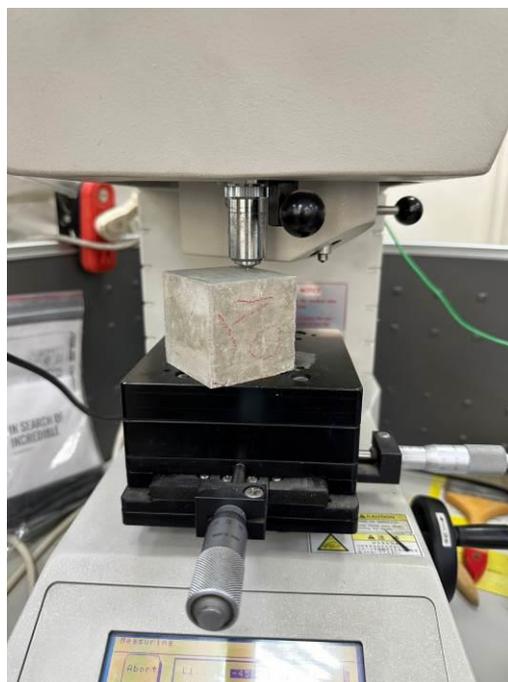


圖3-29 微硬度試驗量測
(資料來源：本研究整理)

第四章 試驗結果與討論

第一節 坍度及坍流度

從學理上而言，纖維添加量越多、分布越均勻，混凝土的抗拉能力及韌性也越好。然而，混凝土產製過程中需進行攪拌，在攪拌的過程中，纖維會產生結球現象，致使混凝土的流動性大為降低，不利於現場泵送及施工，這也是纖維混凝土至今尚無法普遍被應用的主要原因。本研究團隊利用混凝土配比設計，搭配飛灰、爐石粉等礦物摻料及混凝土用高性能減水劑的使用，進行混凝土拌和程序、時間及纖維添加方式的調整，克服纖維混凝土工作性不佳的問題。各式配比試拌混凝土坍度及坍流度試驗結果如表 4-1 所示。

由混凝土坍度試驗結果可知，混凝土坍度為 21~27cm，平均坍流度為 31~74cm。為改善鋼纖維混凝土的工作性，本研究在純鋼纖維混凝土添加最多的強塑劑(膠結材料重量的 2%)，純聚丙烯纖維混凝土則添加 1.2%的強塑劑，因此純鋼纖維混凝土的坍度多大於純聚丙烯纖維混凝土，如圖 4-1 至圖 4-4 所示。另比較添加飛灰對混凝土工作性的影響發現，在相同強塑劑及纖維添加量相同的條件下，純飛灰混凝土的坍度及坍流度大於其他種類混凝土，由於飛灰具有圓珠狀玻璃質外觀，有助於改善混凝土的流動性，因此添加飛灰的混凝土其工作性相對較佳。

表 4-1 新拌混凝土坍度及坍流度

配比	坍度	坍流度	配比	坍度	坍流度
	cm			cm	
CS00P00	22	45/46	SS00P00	24	57/58
CS30P00	23	52/53	SS30P00	25	60/63
CS00P30	21	30/32	SS00P30	25	58/60
CS15P15	21	30/34	SS15P15	24	53/55
FS00P00	27	74/74	HS00P00	22	46/48
FS30P00	26	73/73	HS30P00	26	61/63
FS00P30	25	65/68	HS00P30	23	46/48
FS15P15	25	65/66	HS15P15	24	56/58

(資料來源：本研究整理)



圖4-1 混凝土 CS30P00坍度
(資料來源：本研究整理)



圖4-2 混凝土 CS00P30坍度
(資料來源：本研究整理)



圖4-3 混凝土 HS30P00坍流度
(資料來源：本研究整理)



圖4-4 混凝土 HS00P30坍流度
(資料來源：本研究整理)

第二節 抗壓強度

各式混凝土配比於 28 天及 56 天齡期進行抗壓強度試驗，試驗結果如表 4-2 及圖 4-5 及圖 4-6 所示。從圖 4-5 及圖 4-6 可看出，鹽水養護之純水泥混凝土於 28 天之的抗壓強度高於一般淡水養護者，而有加纖維之混凝土抗壓強度高於無纖維者，由於鹽水中的氯化鈉(NaCl)有助於水泥水化反應加速進行，因此採用鹽水養護之混凝土的強度較高實屬合理，另添加纖維可提升混凝土抵抗壓力作用的能力，因此有添加纖維之混凝土的強度可高於無添加纖維者，其中添加聚丙烯纖維的混凝土 CS00P30 抗壓強度最高，其次為混合纖維混凝土 CS15P15，此結果與 Afroughsabet[105]的研究結果相同。齡期 56 天時，各式純水泥混凝土的抗壓強高於 28 天齡期的強度，三種纖維混凝土的抗壓強度接近，可知隨混凝土強度的增加，纖維對混凝土強度的貢獻逐漸不明顯。

觀察圖 4-5 及圖 4-6 中飛灰混凝土的強度發展發現，飛灰混凝土於 28 天及 56 天的抗壓強度均低於其他三種膠結材料的混凝土(純水泥、爐石粉及爐灰混凝土)，由於飛灰混凝土配比使用飛灰取代水泥重量的 60%，屬高摻量等級，因此強度發展較慢尚屬合理。另比較淡水養護和鹽水養護的影響可知，兩種養護方式的混凝土抗壓強度在 28 天齡期時相差不大，鹽水養護者的強度略高於淡水養護者；齡期 56 天時，鹽水養護者之強度明顯高於淡水養護者，由此結果可發現鹽水養護有助於高摻量飛灰混凝土水化反應及卜作嵐反應的加速進行，使其強度增長較其他種類膠結材料混凝土明顯強。此外，隨著飛灰混凝土的強度提升，添加纖維對混凝土強度的影響逐漸明顯，從鹽水養護 56 天齡期的抗壓強度成長可發現，聚丙烯纖維混凝土的強度高於其他種類的纖維混凝土，混合纖維者次之，鋼纖維及無纖維混凝土的強度接近。

由圖 4-5 及圖 4-6 分析爐石粉混凝土抗壓強度的發展得知，爐石粉混凝土為 4 種混凝土中強度最高者，由於添加之爐石粉為 120 級，細度較細，有助於提升混凝土的早期強度，使得含爐石粉混凝土 28 天及 56 齡期的抗壓強度高於其他種類的混凝土。爐石粉混凝土的強度在 28 天齡期時已高於純水泥及飛灰混凝土甚多，因此不同種類纖維混凝土的強度成長在 28 天齡期時已有明顯的差異，以聚丙烯纖維混凝土的強最高，混合纖維者的強度次之，無纖維者的強度相對最小。由於爐石粉混凝土屬高強度混凝土，養護方式對混凝土強度的影響不明顯，鹽水養護與淡水養護的混凝土強

度接近。

添加混合爐石粉及飛灰之爐灰混凝土抗壓強度發展也可從圖 4-5 及圖 4-6 中觀察到，可發現整體爐灰混凝土的抗壓強度只低於爐石粉混凝土，高於純水泥混凝土及飛灰混凝土。由於飛灰的卜作嵐反應要晚齡期才能有效進行，因此飛灰混凝土 28 天的強度較低，爐石粉細度細、活性高，有助於水泥水化反應的加速進行，因此同時添加爐石粉及飛灰之爐灰混凝土可減緩混凝土早齡期強度較低的現象。就纖維種類及添加量的影響而言，添加純聚丙烯纖維之爐灰混凝土的抗壓強度相對較高，此結果與上述其他種類的混凝土強度發展相似。另鹽水養護對爐灰混凝土強度的提升高於淡水養護者，此現象與飛灰混凝土相同，可知鹽水養護對含飛灰之混凝土的強度發展有所助益。

表 4-2 混凝土抗壓強度

試體編號	抗壓強度(MPa)			
	淡水養護		鹽水養護	
	28 天	56 天	28 天	56 天
CS00P00	51.6	63.8	60.0	66.0
CS30P00	63.1	69.5	67.2	75.1
CS00P30	71.0	74.0	76.7	75.2
CS15P15	66.2	70.3	74.2	75.3
FS00P00	37.3	44.9	40.8	53.6
FS30P00	38.0	45.1	42.5	54.3
FS00P30	41.0	47.4	45.4	60.2
FS15P15	39.6	46.3	42.6	57.8
SS00P00	59.0	67.4	61.3	72.0
SS30P00	64.7	72.6	65.2	73.3
SS00P30	77.5	78.3	79.5	83.4
SS15P15	63.0	75.0	71.1	79.6
MS00P00	48.5	57.1	59.3	71.2
MS30P00	51.0	63.8	64.1	73.7
MS00P30	54.6	63.5	67.8	75.0
MS15P15	51.9	61.0	64.4	73.9

(資料來源：本研究整理)

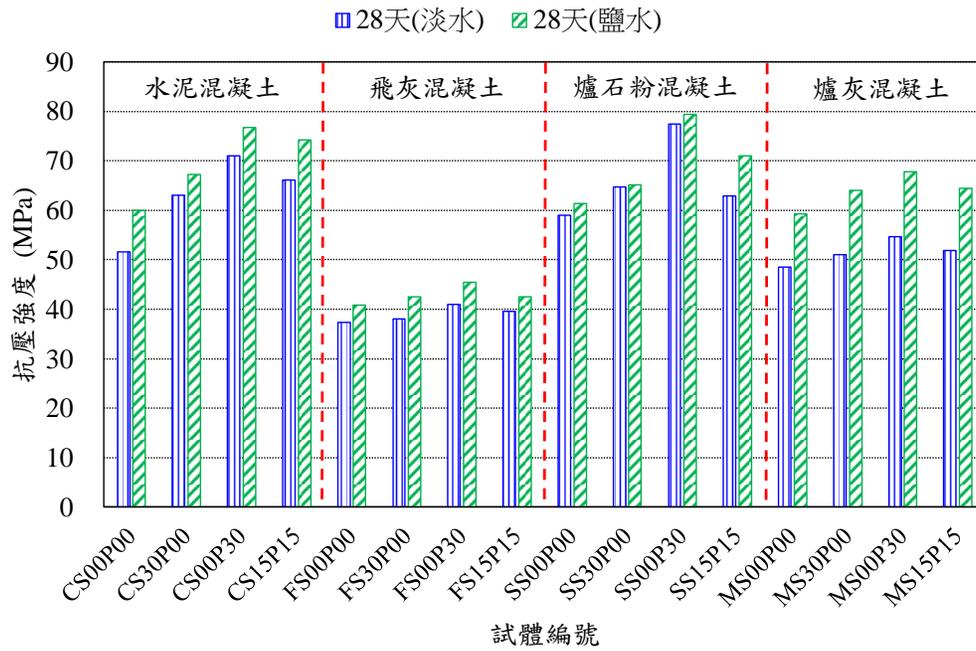


圖4-5 混凝土抗壓強度(28天)
(資料來源：本研究整理)

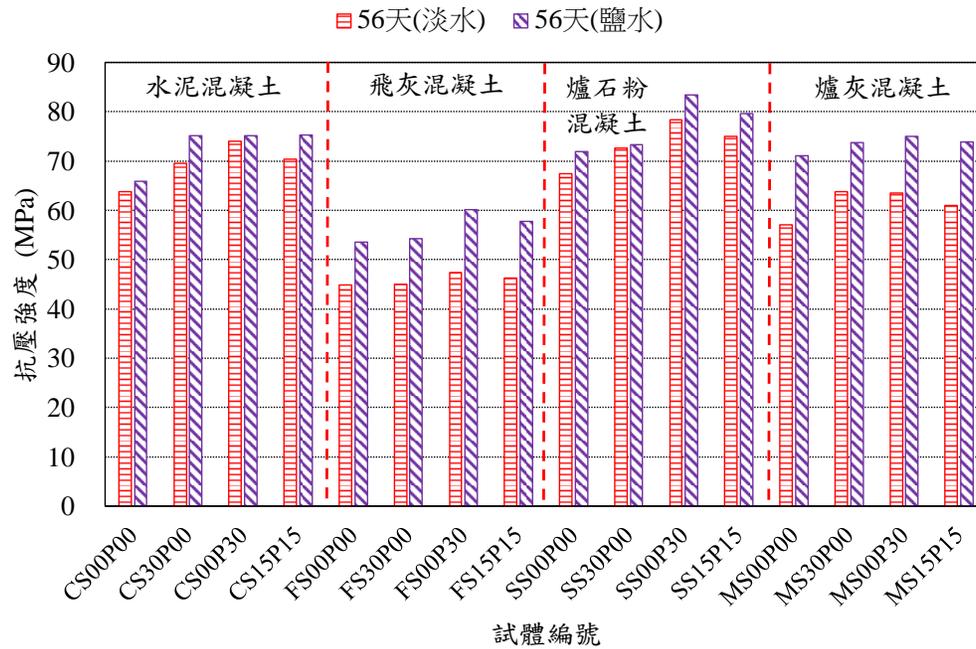


圖4-6 混凝土抗壓強度(56天)
(資料來源：本研究整理)

第三節 劈裂強度

各式混凝土配比於 28 天及 56 天齡期之劈裂強度試驗結果如表 4-3 及圖 4-7 至及圖 4-8 所示。從圖 4-7 中可觀察出，混凝土劈裂強度發展與抗壓強度相似，即整體爐石粉混凝土的劈裂強度高於水泥混凝土、飛灰混凝土及含爐灰混凝土，且有添加纖維的混凝土劈裂強度高於無添加纖維者，鹽水養護之混凝土劈裂強度高於淡水養護者。4 種混凝土以純聚丙烯纖維混凝土之劈裂強度最高，混合纖維者次之，此結果與 28 天齡期的混凝土抗壓強度發展相似。此外，無添加飛灰及爐石粉等卜作嵐材料之水泥混凝土，經淡水養護之 28 天齡期的劈裂強度有高於鹽水養護者之趨勢，此試驗結果與其他添加卜作嵐材料的混凝土相反，可知添加卜作嵐材料可讓混凝土更為緻密，有效包裹纖維不受鹽水腐蝕的影響，在混凝土因鹽水養護而強度提升的同時，仍可維持混凝土具有較高的劈裂強度。

觀察圖 4-7 中混凝土於 56 天齡期的劈裂強度發展發現，飛灰混凝土的劈裂強度低於水泥混凝土、爐石粉混凝土及爐灰混凝土，不過其 28 天到 56 天齡期之劈裂強度成展幅度大其他三種混凝土，此結果與飛灰混凝土抗壓強度的發展相同。再細究纖維種類對飛灰混凝土劈裂強度的影響發現，無添加纖維混凝土配比 FS00P00 與添加 30% 聚丙烯纖維之混凝土配比 FS00P30，經鹽水養護 56 天後之劈裂強度高於添加鋼纖維及混合纖維者，可知抗壓強度較低的飛灰混凝土，在鹽水養護的環境下不利於鋼纖維提升混凝土的劈裂強度。另比較強度較高之爐石粉混凝土之劈裂強度發展發現，鹽水養護對有添加纖維之混凝土劈裂強度的影響已不明顯，有添加纖維之混凝土配比 SS30P00、SS00P30 及 SS15P15 的劈裂強度接近，其中配比 SS15P15 的劈裂強度略高於其他兩種纖維混凝土，可知添加爐石粉之混凝土除可提升強度外，也使得混凝土變得緻密，纖維能完整包裹於混凝土內部不受鹽水的影響，因此混凝土的劈裂強度較高。

表 4-3 混凝土劈裂強度

試體編號	劈裂強度(MPa)			
	淡水養護		鹽水養護	
	28 天	56 天	28 天	56 天
CS00P00	4.6	5.3	4.9	5.5
CS30P00	5.1	5.1	5.2	5.4
CS00P30	6.0	5.8	5.7	5.7
CS15P15	5.7	6.0	5.5	5.5
FS00P00	3.0	3.8	3.8	4.9
FS30P00	3.2	4.2	3.9	4.3
FS00P30	3.6	4.1	4.5	5.0
FS15P15	3.5	4.3	4.2	4.5
SS00P00	3.9	4.5	5.1	5.6
SS30P00	4.6	5.3	5.6	5.8
SS00P30	5.5	5.5	5.9	5.6
SS15P15	5.4	5.9	5.7	5.9
MS00P00	4.0	4.4	4.5	4.8
MS30P00	4.3	4.8	4.8	5.6
MS00P30	5.1	4.6	5.4	4.8
MS15P15	4.4	5.1	5.1	5.1

(資料來源：本研究整理)

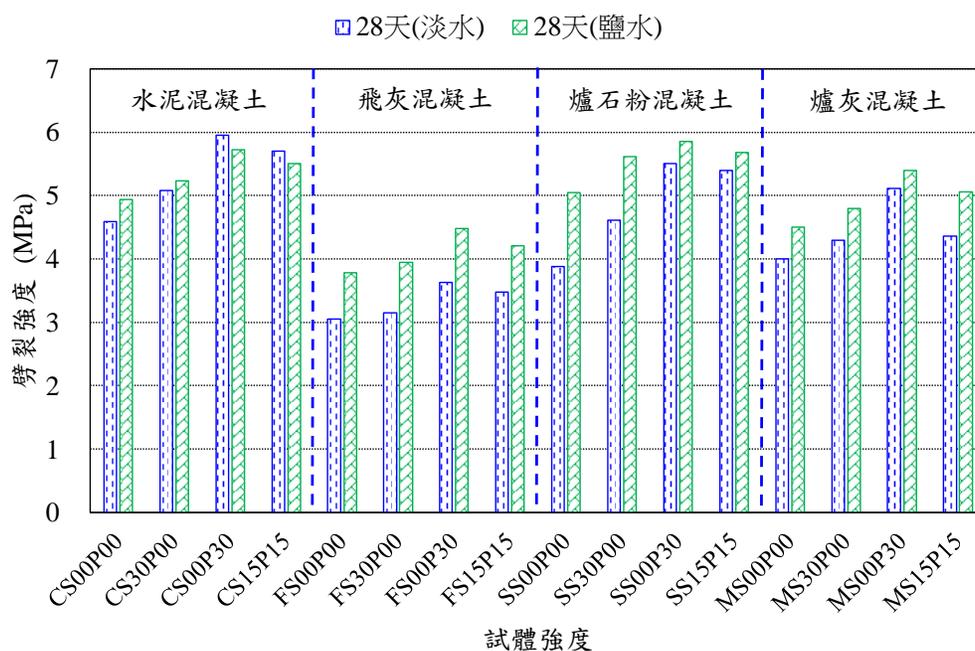


圖4-7 混凝土劈裂強度(28天)
(資料來源：本研究整理)

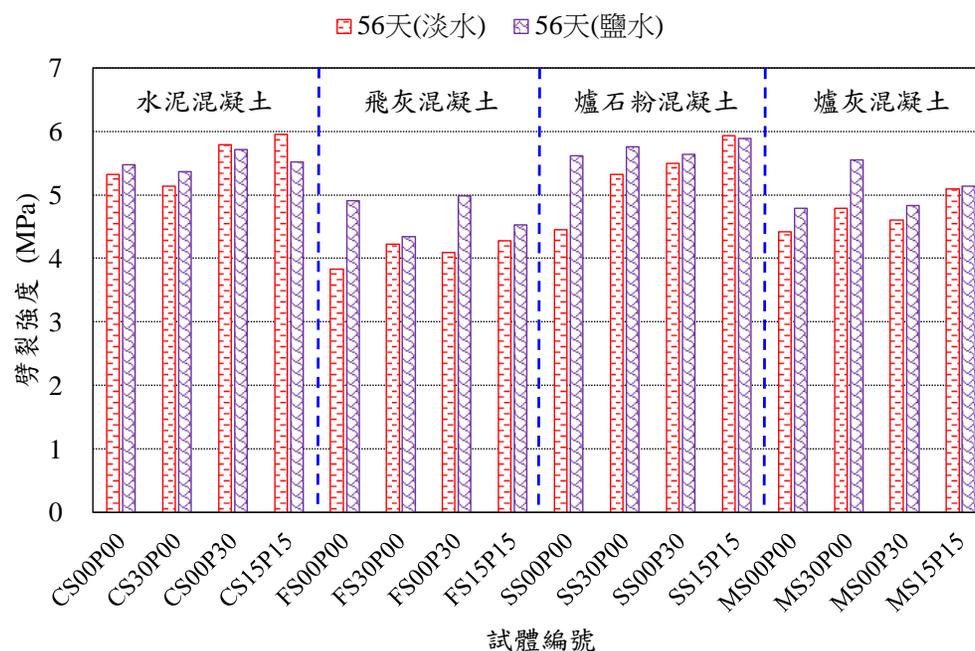


圖4-8 混凝土劈裂強度(56天)
(資料來源：本研究整理)

第四節 抗彎強度

各式混凝土配比 28 天齡期之抗彎強度試驗結果如表 4-4 及圖 4-9 所示。由圖 4-9 可知，混凝土抗彎強度的發展與劈裂強度相同，仍以飛灰混凝土的抗彎強度最低，爐石粉混凝土的抗彎強度最高。本項試驗之試驗齡期為 28 天，尚無法比較晚齡期時飛灰及爐石粉等卜作嵐材料對混凝土劈裂強度的影響，不過混凝土劈裂強度及抗彎強度均用以評估混凝土的抗拉強度，可推估其 56 天齡期的抗彎強度發展與劈裂強度相似，即隨著齡期的增加，混凝土的強度提升，鹽水養護對有添加纖維之混凝土抗彎強度的影響會變的不明顯。就各式混凝土之抗彎強度試驗結果可知，添加 0.3% 聚丙烯纖維混凝土之劈裂強度高於其種類的纖維混凝土。

由於本研究採用之鋼纖維及聚丙烯纖維添加量最多為混凝土每立方公尺體積的 0.3%，換算成重量，鋼纖維重量有 23.4kg，聚丙烯纖維有 2.7kg，就纖維廠商建議的鋼纖維添加量每立方公尺體積 20kg ~ 200kg、聚丙烯纖維每立方公尺體積 0.6kg ~ 3kg 而言，鋼纖維用量接近最低用量，聚丙烯纖維用量則接近最高用量，應是造成鋼纖維混凝土力學性質較聚丙烯纖維混凝土差的原因，不過本研究主要針對纖維混凝土的耐久性進行探討，為避免纖維用量的變數過多，造成試驗工作量增加及數據分析討論的困難度，因此控制兩種纖維均採用相同添加量(每立方公尺體積的 0.3%)的條件進行後續混凝土耐久性的研究。

表 4-4 混凝土抗彎強度

試體編號	抗彎強度(MPa)		試體編號	抗彎強度(MPa)	
	淡水養護	鹽水養護		淡水養護	鹽水養護
	28 天			28 天	
CS00P00	4.4	5.2	SS00P00	5.3	5.9
CS30P00	5.6	6.2	SS30P00	5.8	6.7
CS00P30	5.7	6.9	SS00P30	6.4	7.6
CS15P15	5.7	6.5	SS15P15	6.1	7.2
FS00P00	3.9	4.7	MS00P00	4.5	4.7
FS30P00	4.1	4.8	MS30P00	5.4	5.7
FS00P30	4.6	5.2	MS00P30	5.8	6.8
FS15P15	4.4	5.0	MS15P15	5.6	6.2

(資料來源：本研究整理)

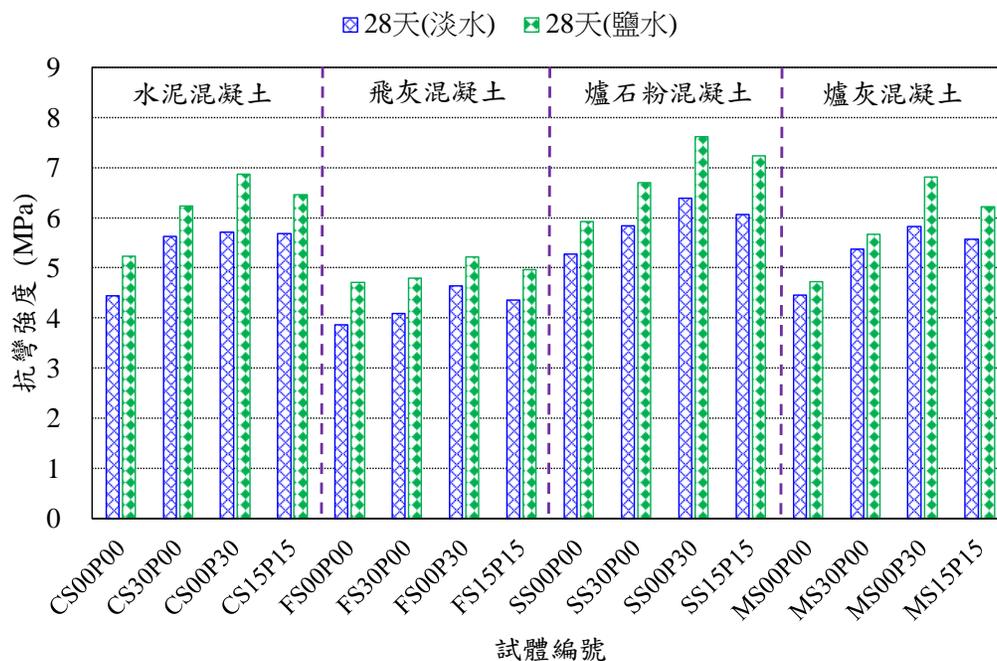


圖4-9 混凝土抗彎強度(28天)

(資料來源：本研究整理)

第五節 破壞行為

觀察混凝土抗壓強度、劈裂強度及抗彎破壞行為發現，強度較高的爐石粉混凝土及水泥混凝土，無添加纖維者經試驗後直接碎裂，抗壓破壞試體成錐體狀，強度較低之飛灰混凝土的抗壓破壞模式為緩慢產生大量裂縫後破壞(圖 4-10 至圖 4-13)；試體劈裂與抗彎破壞，因無纖維的橋接作用，則直接裂成兩塊(圖 4-14 至圖 4-20)，具有明顯的脆性破壞行為。有加纖維的混凝土破壞後雖有明顯裂縫產生，不過仍可保有較為完整的外觀，藉由纖維的橋接作用，抗壓試體無碎裂成數塊的現象(圖 4-21 及圖 4-24)，劈裂及抗彎試體仍可維持完整的外形，沒有破裂成兩塊(圖 4-25 及圖 4-31)。

觀察劈裂試體破壞後鋼纖維與聚丙烯纖維的狀況發現，經鹽水養護的鋼纖維混凝土有出現生鏽的狀況(圖 4-32)，不過鋼纖維仍可提供混凝土足夠的抗拉強度，經劈裂試驗及抗彎試驗後發揮橋接作用，固定破壞的混凝土不裂成碎塊；經淡水養護的鋼纖維混凝土，其鋼纖維較無生效的情況產生(圖 4-33)，可知鹽水養護雖能加速水泥水化反應的進行，提升混凝土早期的強度，不過對鋼纖維會有腐蝕的情形。觀察經鹽水養護之聚丙烯纖維混凝土的腐蝕狀況發現，聚丙烯纖維並無明顯腐蝕情形產生(圖 4-34)，與經淡水養護之聚丙烯纖維混凝土的狀況相同，可知聚丙烯纖維比鋼纖維抗鹽水腐蝕的能力好，有助與混凝土抵抗海水等惡劣環境的不利影響。



圖4-10 水泥混凝土 CS00P00
抗壓破壞
(資料來源：本研究整理)



圖 4-11 飛灰混凝土 FS00P00
抗壓破壞
(資料來源：本研究整理)



圖4-12 爐石粉混凝土 SS00P00
抗壓破壞
(資料來源：本研究整理)



圖4-13 爐灰混凝土 MS00P00
抗壓破壞
(資料來源：本研究整理)



圖4-14 水泥混凝土 CS00P00
劈裂破壞
(資料來源：本研究整理)



圖4-15 飛灰混凝土 FS00P00
劈裂破壞
(資料來源：本研究整理)



圖4-16 爐石粉混凝土 SS00P00
劈裂破壞
(資料來源：本研究整理)



圖4-17 爐灰混凝土 MS00P00
劈裂破壞
(資料來源：本研究整理)



圖4-18 水泥混凝土 CS00P00抗彎破壞
(資料來源：本研究整理)



圖4-19 飛灰混凝土 FS00P00抗彎破壞
(資料來源：本研究整理)



圖4-20 爐石粉混凝土 SS00P00抗彎破壞
(資料來源：本研究整理)



圖4-21 水泥混凝土 CS15P15
抗壓破壞
(資料來源：本研究整理)



圖4-22 飛灰混凝土 FS15P15
抗壓破壞
(資料來源：本研究整理)



圖4-23 爐石粉混凝土 SS15P15
抗壓破壞
(資料來源：本研究整理)



圖4-24 爐灰混凝土 MS15P15
抗壓破壞
(資料來源：本研究整理)



圖4-25 水泥混凝土 CS15P15
劈裂破壞
(資料來源：本研究整理)



圖4-26 飛灰混凝土 FS15P15
劈裂破壞
(資料來源：本研究整理)



圖4-27 爐石粉混凝土 SS15P15
劈裂破壞
(資料來源：本研究整理)



圖4-28 爐灰混凝土 MS15P15
劈裂破壞
(資料來源：本研究整理)

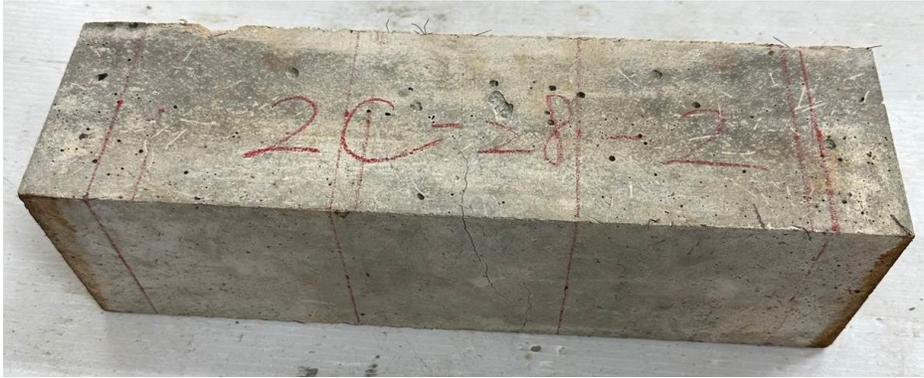


圖4-29 水泥混凝土 CS30P00抗彎破壞
(資料來源：本研究整理)



圖4-30 飛灰混凝土 FS30P00抗彎破壞
(資料來源：本研究整理)



圖4-31 爐石粉混凝土 SS30P00抗彎破壞
(資料來源：本研究整理)



圖4-32 經鹽水養護之鋼纖維混凝土生鏽狀況
(資料來源：本研究整理)



圖4-33 經淡水養護之鋼纖維混凝土生鏽狀況
(資料來源：本研究整理)



圖4-34 經鹽水養護之聚丙烯纖維混凝土
(資料來源：本研究整理)

第六節 抗透水能力

混凝土滲透途徑有經由骨材與砂漿間之界面過渡區、砂漿土體及穿越骨材等三種，其中以經由界面過渡區進行滲透為主要途徑，由於飛灰、爐石具有改善黏結界面的效果，提高骨材與砂漿間界面過渡區的緻密性，減少滲透，可增加混凝土的耐久性。為解析各式纖維混凝土的滲透性，本研究製作 $\phi 150\text{mm} \times 50\text{mm}$ 混凝土滲透試驗試體，以 3kgf/cm^2 的壓力作用於試體表面 3 小時，秤重得試體經滲透試驗後的重量，再將試體烘乾 24 小時秤重得試體的乾燥重量，將試體的滲透重量減去烘乾重量後，除以試體的烘乾重量即為試體的滲透率。

滲透試驗結果如表 4-5 及所示，從圖 4-35 可看出齡期 28 天時，爐石粉混凝土的滲透率最小，低於水泥混凝土、飛灰混凝土及爐灰混凝土。比較淡水養護與鹽水養護對混凝土透水率的影響發現，鹽水養護之混凝土透水率低於淡水養護者，由於鹽水養護會加速水泥水化反應的速度，提升混凝土的強度，因此透水率低於淡水養護者應屬合理。觀察添加纖維對混凝土耐久性的影響發現，纖維混凝土的透水率高於無纖維混凝土，四種混凝土的透水率均有此現象。由於添加纖維之混凝土進行透水試驗時，加壓的水可能經由露出在混凝土外部的纖維滲進混凝土內部，造成添加纖維的混凝土透水率高無纖維混凝土，而聚丙烯纖維混凝土的透水率有高於鋼纖維混凝土的現象，應是聚丙烯纖維的比重小，相對於比重大的鋼纖維添，聚丙烯纖維添加於混凝土中的數量要比鋼纖維多，導致其透水率較高。

表 4-5 混凝土滲透試驗結果 (28 天)

試體編號	透水率(%)		試體編號	透水率(%)	
	淡水養護	鹽水養護		淡水養護	鹽水養護
	28 天			28 天	
CS00P00	0.7	0.6	SS00P00	0.4	0.3
CS30P00	0.9	0.7	SS30P00	0.6	0.5
CS00P30	1.2	1.1	SS00P30	0.9	0.8
CS15P15	1.3	1.0	SS15P15	0.8	0.6
FS00P00	0.7	0.4	MS00P00	0.7	0.4
FS30P00	1.1	1.0	MS30P00	0.9	0.7
FS00P30	1.7	1.5	MS00P30	1.3	1.2
FS15P15	1.3	1.2	MS15P15	1.0	0.9

(資料來源：本研究整理)

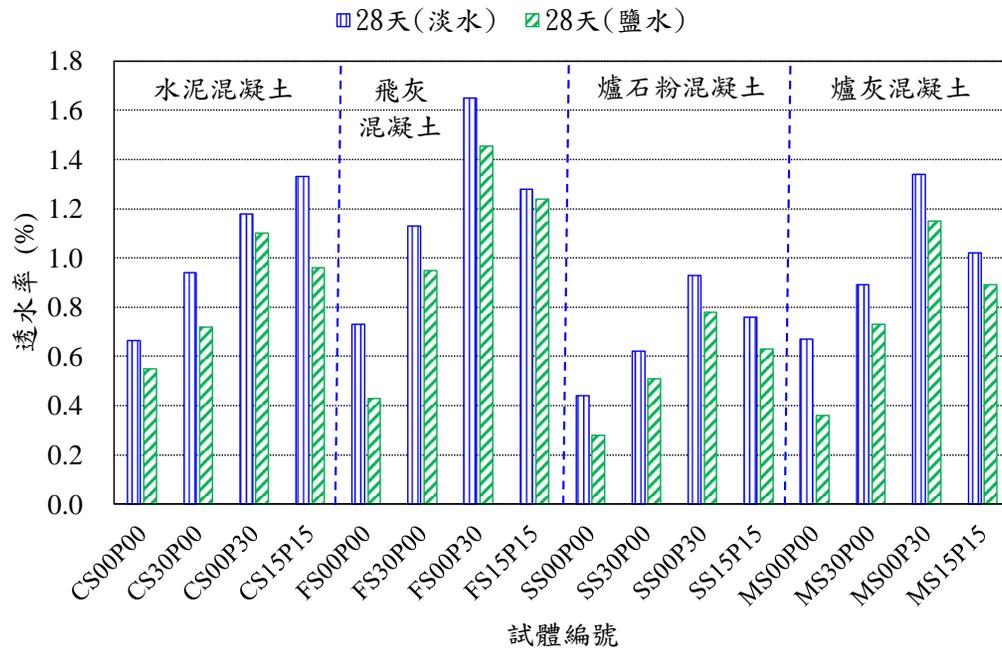


圖4-35 混凝土滲透率

(資料來源：本研究整理)

第七節 快速氯離子滲透試驗結果

快速氯離子滲透試片經量測 6 小時內通過電流量，再依照 CNS 14795 規範計算通過總電荷量，其計算結果與判定如表 4-6 所示。

從表 4-6 可看出，經快速氯離子滲透試驗(RCPT)之四種膠結材料之混凝土通過總電荷量，大致以水泥混凝土的總電荷最多，介於 3091~4620 庫倫（淡水養護）、3936~5649 庫倫（鹽水養護），就氯離子穿透性判定而言，屬於中、高滲透性，耐久性較差，其中又以鋼纖維混凝土配比 CS30P00 之電荷通過量為最高，由於鋼纖維的材質為金屬，有助於提升 RCPT 滲透率，因此鋼纖維混凝土通過的電荷數比其他種類的纖維高，此結果在飛灰混凝土、爐石粉混凝土及爐灰混凝土中也有相同的趨勢。另鹽水養護混凝土之通過總電荷數比淡水養護者高，由於鹽水養護後之試體內部具有額外的氯化鈉成分，在進行 RCPT 時，會增加氯離子的濃度，使得鹽水養護混凝土之通過總電荷數高於淡水養護者。

表 4-6 混凝土快速氯離子滲透試驗結果

試體編號	通過總電荷(Coulomb)			
	淡水養護	氯離子穿透性	鹽水養護	氯離子穿透性
	28 天		28 天	
CS00P00	3866	中	3988	中
CS30P00	4620	高	5649	高
CS00P30	3091	中	3936	中
CS15P15	3652	中	4828	高
FS00P00	1722	低	817	甚低
FS30P00	2575	中	2084	中
FS00P30	1880	低	890	甚低
FS15P15	2186	中	1422	低
SS00P00	898	甚低	1414	低
SS30P00	1279	低	1954	低
SS00P30	1064	低	1357	低
SS15P15	1176	低	1566	低
MS00P00	1058	低	1226	低
MS30P00	1820	低	2037	中
MS00P30	1428	低	1782	低
MS15P15	1646	低	1895	低

(資料來源：本研究整理)

第八節 相關規範研修建議

本研究於專家學者座談會議中，探討附件六及附件七所示之現行有關纖維混凝土使用規定是否妥適，與會專家學者認為現行混凝土科技日新月異，特別是在化學藥劑性能的提升以及混凝土適用的各類纖維研發技術越來越成熟，過往認為鋼纖維混凝土的性能優於其他種類的混凝土，不過其工作性較差，無法有效的應用，近年來已可搭配合適的化學藥劑加以改善。再者，聚丙烯纖維的力學性質也改善許多，有些纖維的抗拉強度可接近或超過一般鋼纖維，且聚丙烯纖維混凝土較鋼纖維混凝土輕、工作性較好，在現場施工較鋼纖維混凝土便利許多。基於上述，與會專家學者認為，可於附錄六「第 03375 章 V3.0 鋼纖維噴凝土」中，建議增列「若聚丙烯纖維之力學性質符合鋼纖維混凝土用纖維之需求，可以聚丙烯纖維替代鋼纖維產製纖維混凝土」等文字。

第五章 結論與建議

第一節 結論

本研究主題為纖維混凝土耐久性的探討，藉由添加鋼纖維、聚丙烯纖維等材料於混凝土中，提升普通混凝土的抗拉強度及韌性。研究規劃試驗變數包含混凝土水膠比為 0.4，飛灰及爐石粉分別取代水泥重量之 0%、30%及 60%，鋼纖維與聚丙烯纖維添加量分別為每立方公尺混凝土體積的 0%、0.15%及 0.3%，並添加適量強塑劑改善混凝土的坍度及流度，使混凝土具有良好的工作性。相關研究結論概述如下：

1. 由混凝土新拌性質試驗結果可知，在相同強塑劑及纖維添加量下，飛灰混凝土的坍度及坍流度大於純水泥混凝土、爐石粉混凝土及爐灰混凝土。
2. 鹽水養護之混凝土抗壓強度高於淡水養護者，纖維混凝土抗壓強度高於無纖維混凝土，隨混凝土強度的增加，纖維對混凝土強度的貢獻逐漸不明顯，其中爐石粉混凝土的抗壓強度最高，飛灰混凝土的強度最低。
3. 鹽水養護之混凝土劈裂強度高於淡水養護者，其中聚丙烯纖維混凝土之劈裂強度最高，混合纖維混凝土次之，飛灰混凝土的強度最小。
4. 混凝土抗彎強度的發展與劈裂強度相同，以爐石粉混凝土的抗彎強度最高、飛灰混凝土的強度最低，鹽水養護對高強度纖維混凝土抗彎強度的影響不明顯，其中添加 0.3%聚丙烯纖維混凝土之劈裂強度高於其他纖維混凝土。
5. 纖維混凝土破壞後雖有明顯裂縫產生，不過仍可保有較為完整的外觀，藉由纖維的橋接作用，試體可維持完整的外形，經鹽水養護的鋼纖維混凝土有出現生鏽的狀況，聚丙烯纖維無明顯腐蝕情形產生。
6. 爐石粉混凝土的滲透率最小，低於水泥混凝土、飛灰混凝土及爐灰混凝土，鹽水養護之混凝土透水率低於淡水養護者，纖維混凝土的透水率高於無纖維混凝土。
7. RCPT 試驗結果顯示，水泥混凝土通過的總電荷最多、耐久性較差，鋼纖維混凝土通過的電荷數比其他種類的纖維混凝土高，鹽水養護之混凝土通過總電荷數比淡水養護者高。

第二節 建議

纖維混凝土的工程性質比普通混凝土佳，若可簡化其製程、改善其工作性，將有助於實務的推廣應用，減少普通混凝土的用量，降低混凝土產製過程中的能源消耗及二氧化碳的排放量。以下分別從立即可行建議及中長期建議加以列舉。

建議一

鋼纖維混凝土耐久性的探討：立即可行之建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：無

現行纖維混凝土的應用以鋼纖維混凝土的數量最多，就本研究成果可知，鋼纖維混凝土有生鏽腐蝕的問題，有必要針對更多種類的鋼纖維混凝土耐久性進行研究，包含鋼纖維的整類、卜作嵐材料的類型、齡期長短及養護環境等課題的釐清，找出改善鋼纖維混凝土耐久性的對策，將有助於提升纖維混凝土技術及應用層面。

建議二

預鑄纖維混凝土耐久性的探討：中長期性建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：無

為因應現場施工人員老化及短缺等問題，國家積極推廣預鑄混凝土工法，以簡化現場施工的程序，降低施工人員的需求，而纖維混凝土非常適合以預鑄工法進行製作，不過預鑄混凝土的關鍵技術為高溫蒸氣養護，該養護過程對纖維混凝土的耐久性影響值得研究，包含高溫及水分是否會造成鋼纖維腐蝕生鏽，以及高溫高壓養護方式對聚丙烯纖維等化學纖維的影響，也須深入瞭解，建置合宜的預鑄纖維混凝土養護方式，以利該類混凝土的推廣應用。

附錄一、期初審查會議紀錄

項次	評選委員意見	廠商回應
1	纖維種類很多，請說明選用適合纖維之原則及方法。	本研究擬以現行普遍使用之鋼纖維及聚丙烯纖維進行研究，探討添加此些纖維對混凝土工作性、力學性質、耐久性及微觀結構之影響。
2	試驗拌合與量產拌合差異極大，需進一步試驗評估。	感謝委員的建議，將視後續研究工作需求，規劃探討纖維混凝土量產拌合研究的可行性。
3	請針對短中長期之預期成果具體說明。	本研究之短期研究成果以研發出具有優良工程性質之纖維混凝土為目標。研究成果可作為纖維混凝土推廣、相關規範研修等中期工作，以及實尺寸纖維混凝土構件研究等長期工作之參考。
4	研究緣起的說法值得再探討，鋼筋彎紮現在已經很少在工地施作，特別補充。	感謝委員的指正，將於後續研究報告修正部分文字內容，以符合現行工地現場鋼筋施工的流程。
5	混凝土的作用就在抗壓，要求它能抗彎又不減低混凝土的抗壓強度，應該有難度。	使混凝土具有足夠抗拉和抗彎能力一直是研究的重點，纖維混凝土即基於此目的所研發出之特殊混凝土，不過傳統纖維混凝土的工作性差，影響其實用性，本研究擬以混凝土配比技術及添加合適的化學藥劑等方式，開發具有良好工程性質之纖維混

		凝土。
6	通用的工程範圍。	纖維混凝土主要應用於樓版、鋪面、橋面板、飛機跑道等版狀結構中，可抑制混凝土的收縮變形，提高混凝土的抗裂能力。
7	設計方法修正。	纖維混凝土拌合時容易產生纖維團，降低混凝土的流動性，特別是鋼纖維於施工過程中容易外露，增加相關人員施工的難度，且鋼纖維也有生鏽的問題，影響混凝土耐久性。本研究將針對此些課題進行探討，研擬相關設計及產製方法的修正建議。
8	版厚另考慮使用性。	感謝委員的建議，本年度研究工作主要探討纖維混凝土的耐久性，有關纖維混凝土版等構件的研究將列入後續研究規劃參考。
9	強度不是版厚度的唯一考量因素，樓版載重才是規範建議的設計準則。	感謝委員的建議，將納入後續研究成果研擬相關纖維混凝土設計建議時之參考。

附錄二、期中審查會議紀錄

項次	審查委員意見	研究團隊回應
1	適當添加纖維改善混凝土的行為，建議參考鋼纖維混凝土相關規定，未來在 CNS、混凝土工程設計規範等規範中納入相關規定(纖維類型、纖維長度、長徑比、用量、拌合要求等)，如以落實在實務上的應用。	感謝委員的建議，將納入後續研究規劃辦理。
2	纖維混凝土在混凝土剪力抵抗上的影響是否能提供對應的公式，在設計實務上落實減少鋼筋的目標。	纖維混凝土的力學行為值得探討，本研究旨在探討纖維混凝土的耐久性，有關剪力行為擬納入後續研究規劃辦理。
3	根據第二章文獻回顧，影響混凝土耐久性的因素眾多，本研究後續預定針對哪一項進行耐久性試驗？與既有研究之差異為何？試驗方法有無國家標準或相關規範可依循？	本研究將以混凝土滲透試驗及快速氣離子穿透試驗，搭配纖維與水泥漿體間界面微觀結構的觀察，探討纖維混凝土的耐久性，實驗方式均依照相關試驗規範、規定進行。其中，纖維混凝土添加高量的卜作嵐材料(取代超過水泥用量的一半)，國內外尚無此類纖維混凝土的研究案例，屬全新低碳混凝土的研究課題。
4	建議針對鋼纖維與聚丙烯纖維，建立本土化標準配比表，並針對材料性能檢驗方法，提出相關實驗與檢測標準。	感謝委員的建議，將納入後續研究規劃參考。
5	建議蒐集與總整目前國內應用情況與	將於期末報告補充強化說明。

纖維混凝土耐久性研究

	挑戰，並提出解決策略。	
6	可研擬纖維混凝土可應用方向，以及其效能量化與設計方法。	感謝委員的建議，將納入後續研究規劃參考。
7	可總整國外纖維混凝土相關設計規範，以利後續研擬規範草案。	將於期末報告補充強化說明。
8	可研擬策略，以輔導國內相關材料、設計與施工廠商。	感謝委員的建議，將納入後續研究規劃參考。
9	玻璃纖維混凝土(GFRC)耐久性研究，台大土研所30多年前似已有研究(洪曉慧博士論文?)，請查一下；又後續情況如何？	感謝委員建議，將於期末報告彙整補充說明。
10	纖維混凝土(FRC)因製作及施工之特殊性，故未必可取代傳統鋼筋混凝土(RC)；本研究尚未討論纖維與水泥或混凝土之拌合方式(含器材)、困難點。目前研究如何製造試體，使纖維分散均勻於試體中，不致結球。適合之工程用途，請明確列出。(第三章P.31未見製作方式)。	纖維與混凝土拌和時，採用分次添加，搭配纖維混凝土用強塑劑的使用，以確認均勻拌和纖維。詳細拌和流程將於期末報告補充說明。
11	<p>耐久性項目：</p> <p>1) 有關混凝土之劣化因子</p> <p>2) 有關 RC 中鋼筋(材)之劣化因子</p>	<p>1) 混凝土劣化因子將於期末報告加強說明。</p> <p>2) 本研究旨在探討纖維混凝土的耐久性，有關鋼筋混凝土劣化因子的探討擬納入後續研究規劃辦</p>

	<p>3)PP、PE、PVA 暴露於紫外線下之劣化(在火害時不利於混凝土)</p>	<p>理。</p> <p>3) 纖維係被包覆於混凝土中，直接被太陽光(紫外線)照射的機會不大。有關纖維混凝土耐火性能的研究擬待後續研究規劃辦理。</p>
12	<p>圖 2-8、圖 2-9 之耐震(圖)核心結構(core structure)未必採用 FRC。</p>	<p>圖 2-8 及圖 2-9 所示應用案例，纖維混凝土係用以製作樓版，梁、柱等主結構仍以鋼筋混凝土製作。</p>
13	<p>圖 2-1 至圖 2-3 等應以中文方式呈現。另附錄五中未提到玻璃纖維，建議可入考慮參採。</p>	<p>相關圖示之英文原文將於期末報告修改成中文。附錄五主要說明化學纖維(俗稱塑膠纖維)，玻璃纖維不屬此範疇。</p>
14	<p>文字修正：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) P. III 及 P. 21 中圖 2-6 之(c)、(d)的原文改為中文。 2) P. III 及 P. 30 等之 Rocca tower，應為 Rocca Tower。 3) P. V 中的圖 4-15 中之編號 SS00P00 有錯。又圖 4-20 的標題有漏字。 4) P. 25 出現「合成纖維」一詞，建議統一為「化學纖維」。另粗化學纖維(Macrosynthetic fiber)應譯成長化學纖維、細化學纖維譯為 	<p>感謝委員的指正，將統一於期末報告修正。</p>

	(Microsynthetic fiber) 應譯成短化學纖維。P.12 亦有相同問題。	
15	本案第二張回顧的文獻多達 172 篇應已涵括本中期研究纖維混凝土耐久性及第五章初步結論之報告均有相同論述。	期中報告主要說明纖維混凝土的試拌試驗結果，確認纖維混凝土產製技術的可行性，後續耐久性試驗之探討將有別於文獻的研究課題， 其 試驗結果也將與文獻進行比較分析。
16	台灣自 2002 或更早各大學院所及機構也有不少篇鋼纖維、聚丙烯纖維及兩者混合的混凝土耐久性及力學性質研究報告，惜未被列入參考資料中。	感謝委員的建議，將於期末報告彙整補充說明。
17	接續之力學試驗除已進行之抗壓強度、劈裂強度及即將進行之抗彎強度外，建議後續增做單直拉力試驗、抗剪試驗及衝擊試驗用以評估比較純混凝土與鋼纖維、聚丙烯纖維及兩者混合等的混凝土軟化及應變硬化行為與開裂情況(報告 P.13，圖 2-3)、抗剪強度及韌性指數(吸收能量)。至於各種纖維含量建議參考前人建議之最佳含量，僅纖維長度及形狀予變化，此結果可提供後續耐震構材設計規範增修研究參考。	感謝委員的建議，將納入後續研究試驗變數規劃參考。
18	本報告中 P.31 「長虹」似為品牌不是公司名稱，表 3-1 第 2 列應分水泥 I	感謝委員的指正，將於期末報告更正。

	型及爐石，表 3-4 骨材種類請以學術名稱表示，以上請查明修訂。	
19	爐石粉、飛灰、鋼纖維、聚丙烯纖維、強塑劑有不同之供應商，可能影響試驗結果，本研究如何考量？	本研究採用之試驗材料符合規範相關要求，其基本性質也詳列於報告中，不會影響規劃實驗的結果分析。
20	聚丙烯纖維是否較鋼纖維便宜？本研究採用之鋼纖維及聚丙烯纖維每公斤單價？	聚丙烯纖維較鋼纖維便宜。本研究採用之鍍鋅鋼纖維單價 550 元/公斤，聚丙烯纖維單價 250 元/公斤。
21	聚丙烯纖維混凝土如何均勻拌合？	本研究採用適合纖維混凝土用強塑劑，搭配完整的混凝土拌和程序，可有效分散聚丙烯纖維。
22	針對各項試驗項目，請說明每個配比採用之試驗組數。	每組配比、每項試驗至少製作 3 顆試體，試驗結果取其平均值作代表。
23	混凝土中添加纖維，確實可提高抗拉、抗彎矩、抗裂縫等等..優點，但纖維種類很多，聚丙烯(polypropylene,簡稱 PP)是半結晶的熱塑性塑膠，是否也有缺點需要注意。	聚丙烯纖維無法耐高溫，約 160 度左右會熔融，失去功用，不過此特點有助於提高混凝土耐火能力。有關聚丙烯纖維的優缺點將於期末報告加強說明。
24	國內專家學者認為混凝土的耐久性，與拌和的「水量」和「水質」有密切關係。不僅影響施工難易度，也是水泥水化重要介質，水中如有不利之成分，更影響耐久性問題。本研究的纖維添加量，是否也與耐久性有關？	低用水量有助於提高混凝土的強度，不過會降低工作度，纖維添加量增加也會降低混凝土的工作度，現場施作人員若因工作度差而加水，纖維混凝土的強度會降低，耐久性將變差。

25	碳纖維(Carbon fiber)也是具有優點的材料，有否考慮應用在纖維混凝土中，提高其耐久性能。	每種纖維有其優缺點，碳纖維的單價較高，目前應用的案例較少，後續若有相關研究課題可規劃進行探討。
26	國外案例無鋼筋纖維混凝土，其韌性如何？	纖維混凝土的韌性優於純混凝土，與鋼筋一起使用組成鋼筋纖維混凝土，其韌性可優於鋼筋混凝土。
27	本研究計畫標題是「纖維混凝土耐久性研究」，為何在第二頁沒有說明纖維混凝土耐久性是重要的課題？反而是研發合宜的纖維混凝土並減少鋼筋的使用成為重要的課題？	感謝委員的建議，將於期末報告補充說明。
28	第 28 頁纖維混凝土應用於結構用混凝土構件，例如工業地板(鋪面)和道路路面等板狀結構，少部分可應用於無梁版和隧道襯砌。依台灣目前的結構混凝土設計規範並無法套入使用，若欲強行套入使用，是否會影響鋼筋握持長度？	會有影響。此部分課題有待後續鋼筋纖維混凝土構件力學相關試驗研究加以探討。
29	能否針對不同材料的纖維混凝土適用的位置、環境與耐久性做結論建議，以利工程界使用。	感謝委員的建議，將於期末報告補充說明。
30	研究採用之爐石粉、飛灰、鋼纖維、聚丙烯纖維、強塑劑等試驗材料，由不同供應商提供是否影響研究結果？	研究上採用之材料符合規範相關要求，其基本性質也詳列於報告中，不會影響研究的結果分析。

<p>31</p>	<p>纖維混凝土可否以預鑄工法產製？有何優點？</p>	<p>纖維混凝土非常適合以預鑄工法產製，主要原因是纖維混凝土的拌和及施工要求較普通混凝土高，以預鑄工法產製可有效控制混凝土的品質，並避免現場施工產生的問題。</p>
-----------	-----------------------------	--

附錄三、期末審查會議紀錄

項次	審查委員意見	研究團隊回應
1	<p>本計畫已依預期目標及研究方法完成，且依工作會議、專家委員等之建議修改補充期中報告，內容完備，成果合乎預期，建議通過。</p>	<p>感謝委員的建議。</p>
2	<p>問題及建議：</p> <p>1) P.29、P.30 兩案例之主要抗側力系統為何？</p> <p>2) P.42 第四節僅為一般混凝土之拌製及澆置，對於纖維如何在預鑄及現場澆置(含加入時機)宜補充。</p> <p>3) P.75 第四章、第五節，應說明試體破壞行為及現象。</p> <p>4) 預鑄或施工現場如何試驗確認，各局部所用纖維數量之多少及有否均勻分佈等。</p> <p>5) P.111 第 10 點及 P.113 第 21 點之問題及回覆要充分述明於研究報告中。</p> <p>6) 建議；文字等之增、刪：</p> <p>(1)P.5 倒一行，拉伸應變本文</p> <p>(2)P.10 倒三行，變化條件。</p>	<p>1) 側向支撐仍以普通鋼筋混凝土結構為主，細部設計將於成果報告補充說明。</p> <p>2) 感謝委員建議，將於成果報告補充說明。</p> <p>3) 感謝委員建議，將於成果報告補充說明。</p> <p>4) 感謝委員建議，將納入後續研究規劃課題進行探討。</p> <p>5) 感謝委員建議，將於成果報告補充及強化說明。</p> <p>6) 感謝委員建議，將於成果報告增刪。</p>

	<p>(3)P.21 圖 2-6(C)譯文不正確：.... 產生纖維狀裂縫。</p> <p>(4)P.25 Micro...Macro 文字對調</p> <p>(5)P.26 倒第 5 行 提升→改善</p> <p>(6)P.27 英文改為中文。P.13 等也 同樣。</p> <p>(7)P.37 60%似未採用?</p> <p>(8) P.58 C 中第一行 電子顯微鏡</p>	
3	<p>依第五章結論與建議觀之，預期成果 第 1、2 項應已達成，惟纖維混凝土 相關規範修訂內容及相關產品改善 技術等尚待補充加強。</p>	<p>感謝委員的建議，將於成果報告補充 說明。</p>
4	<p>表 3-6 混凝土配比之符號「H」似為 「M」之誤，請查明。</p>	<p>此為筆誤，將於成果報告修正。</p>
5	<p>章、節、小節的編目宜有易讀性，例 如第三章第一節為 3.1，第二節第二 小節為 3.2.2 等可一目了然屬那一章 節。</p>	<p>感謝委員建議，將於成果報告進行調 整。</p>
6	<p>原第三章§2.2 混凝土抗彎強度試驗 請將 ASTM C78 FIG.1 簡譯及計算抗 彎強度(modulus of rupture 斷裂模數 --國家教育研究院名詞)$R=PL/bd^2$ 及 $R=3Pa/bd^2$ 二公式及符號說明增列於 報告中。</p>	<p>感謝委員建議，將於成果報告補充。</p>

7	<p>查本案並未做抗拉強度及韌性衝擊試驗，因此尚難謂「藉由添加鋼纖維、聚丙烯纖維等材料於混凝土中，提升普通混凝土的抗拉強度及韌性」的第五章結論。</p>	<p>1. 感謝委員建議，將於成果報告之結論論述進行調整。</p>
8	<p>經比對表 4-2 混凝土抗壓強度及表 4-3 混凝土批列強度；爐石粉混凝土(包括加纖維)的抗壓強度雖最高，但劈裂強度明顯低於對應之水泥混凝土，亦即開裂彎矩 M_{cr} 較弱，影響構材撓度，應也是結論之一。又飛灰混凝土抗壓強度宜考量 90 天齡期始可能發展完成，不適合與水泥或爐石粉混凝土的 28 天及 56 天同齡期相比較。</p>	<p>感謝委員建議。本研究會針對 90 天齡期混凝土抗壓強度進行試驗，待後續試驗數據整理分析後將補充於成果報告。</p>
9	<p>第四章第八節相關規範研修建議，第 1 行：「探討附件四及附件五所示」應為「探討附件五及附件六所示」之誤。又專家學者建議增列於附錄四(應為五)中，並未見於成果報告中有說明。建議可修訂「附錄六、第 03241 章 化學纖維混凝土」為包括鋼纖維的「第 03241 章 纖維混凝土」，則不論化學或鋼纖維均可使用於構造物。</p>	<p>感謝委員建議。相關錯誤將於成果報告進行修正，另規範增修建議亦將彙整於成果報告中。</p>
10	<p>報告 P.88 附錄四應為附錄五。</p>	<p>將於成果報告修正。</p>

11	附錄六、第 03241 章化學纖維混凝土於報告主文何處引用？	本研究採用之聚丙烯纖維 (Polypropylene Fiber) 即為化學纖維的一種。
12	本案旨在探討纖維混凝土的耐久性，纖維混凝土的力學行為並未說明，報告第一章緒論提到可減少鋼筋用量，可能容易誤解採用纖維混凝土的力學行為有明顯提升，有關減少鋼筋用量的論述是否適合，請考量。	感謝委員建議，將於成果報告進行調整。
13	未來仍請持續研究，於設計規範或施工規範中納入相關規定(纖維類型、纖維長度、長徑比、用量、拌合要求等)，以落實在實務上的應用。	感謝委員建議，將納入後續研究課題規劃
14	表 3-6 錯字，“強速劑”應為“強塑劑”。	感謝委員的指正，將於成果報告修正。
15	試驗中鋼纖維與聚丙烯纖維規格、添加量是如何設計？	依纖維生產廠商建議之用量(混凝土單位體積之 0.3%)進行纖維混凝土配比設計。聚丙烯纖維種類繁多，本研究考量纖維取得的容易性，以及業界的實用性，決定聚丙烯纖維規格。詳細規格將於成果報告補充說明。
16	研究主軸為耐久性研究，但結論中關於耐久性的相關結論比重相對較少。	感謝委員建議，將於成果報告強化補充說明。
17	針對本計畫成果，研究結論可新增抗滲透與抗氯離子的纖維混凝土配比。	感謝委員建議，將補充於成果報告。

18	<p>所建議之規範修訂乃針對“噴凝土”，與本研究主題關係似顯薄弱？可參考既有混凝土耐久性規範內容，並加入所建議之纖維混凝土內容。</p>	<p>感謝委員建議，相關規範建議將彙整於成果報告。</p>
19	<p>本計畫預期成果之“提出纖維混凝土相關產品改善技術”未見於期末報告中，建議新增章節補充。</p>	<p>感謝委員建議，將於成果報告補充說明。</p>
20	<p>本案的試驗規劃與測試實務之作業相當完整，紀錄周詳，值得稱讚。</p>	<p>感謝委員的建議，將於期末報告彙整補充說明。</p>
21	<p>第三章何以要界定抗壓強度、...滲透性等五種試驗方法，以論證纖維混凝土耐久性，建議於第一節之前，以前言概述之。</p>	<p>感謝委員的建議，將於成果報告補充說明。</p>
22	<p>第四章各項測試結果除以桿狀圖表現外，可否以曲線圖表現；又就耐久性而言，可以就各項測試結果，予以相互交叉比對否？用以論述何者屬於較佳的耐久性配比設計。</p>	<p>感謝委員的建議，相關圖示方式將於成果報告進行調整，並加強混凝土耐久性配比設計的說明。</p>
23	<p>相關規範研修之建議尚待著力，建議將試驗較佳可用的配比設計趨向，於規範適當條文中納入技術改善之修訂草案。</p>	<p>感謝委員建議，相關規範建議將彙整於成果報告。</p>
24	<p>P.42 第三章內文倒數第 5 行之圖 3-9，應係指圖 3-10，亦即後續「內</p>	<p>感謝委員的建議，將於成果報告進行修正。</p>

	<p>文」所述的圖 3-9~3-28 等各編碼需加 1 個序號，始能與附圖編號對應。又內文有少數錯字，如 P.10 倒數第 3 行「變件」條件、P.24 倒數第 3 行，「令(另)觀察」、P.28 第 6 行「控制(制)」、P.75 倒數第 6 行「較無生效(鏽)的情況」有誤植情形，建議全文再予檢查。</p>	
25	(P.89)宜用量化數據作為結論。	感謝委員建議，將於成果報告進行調整。
26	(PP I ~VII)宜在目次、圖次及表次等之頁碼及名稱之加「..」	同 1 之回復。
27	(P I)建議使用 2.1、2.2、...3.1、3.2、...等編排格式，而不用第一節、第二節、...等編排格式。	同 1 之回復。
28	(PX)「摘要」之格式建議改為一般學位論文或期刊論文之「摘要」格式撰寫。	期末報告係依建築研究所相關規定進行撰寫，將與建築研究所討論是否有新版格式可供參考，據以於成果報告進行修正。
29	建議刪除多不必要之「本研究整理」文字。	同 4 之回復。
30	(PP.93-103)參考文獻字體略小，宜放大，如可行，建議改為以「作者姓」為排序依據(如必要，可再如流水號)。	同 4 之回復。

31	如可行，可考慮將各章使用之圖、表放在各章「本文」之後，而不必放在本文之中，避免造成編排上之困難，以及可消除為數不少之每頁空白處。	同 4 之回復。
32	針對各項試驗項目，請說明每組配比採用之試驗組數。	每組配比製作至少三顆試體進行試驗，試驗數據以三顆試體試驗結果取平均表示之。
33	建議釐清纖維摻入混凝土的目的，纖維強化混凝土 (fiber reinforced concrete) 主要為改變或改善混凝土因屬脆性材料受拉力後的破裂力學 (fracture mechanics) 的行為，與鋼筋混凝土 (reinforced concrete) 中經設計埋置之鋼筋 (reinforcing steel) 承受複合構件的張應力的力學意義完全不同。	感謝委員的建議，將於成果報告加強說明。
34	建議參考 20 多年前國際上已提出的工程水泥膠凝複合材料 (Engineered Cementitious Composites, ECC)，利用微觀力學 (micromechanics) 及破壞力學理論，闡釋添加纖維提升混凝土耐久性機理與控制參數。	感謝委員的建議，將於成果報告補充說明。
35	請說明添加礦物摻料如飛灰，水淬高爐石粉於纖維強化混凝土中，對提升混凝土耐久性意義或機理。	係利用礦物摻料與水泥水化反應物氫氧化鈣進行卜作嵐反應，產生有強度的 C-S-H 膠體或 C-A-H 膠體，提

		升混凝土強度，增加混凝土的耐久性。詳細的反應機理將於成果報告中強化說明。
36	建議敘明本研究提出的纖維強化混凝土工程性質比普通混凝土佳，如工作性如何使纖維能均勻分布於新拌混凝土中，纖維強化混凝土主要適用範圍等。	感謝委員的建議，將於成果報告補充說明。
37	表 3-6 HS30P00~HS15P15 試體(Page 38)、表 4-1 HS30P00~HS15P15 試體 (Page 63)、圖 4-3HS30P00(Page 65)、與圖 4-4HS00P30(Page 65)、試體編號是 HS 開頭，為何在 Page 68 之後 (Page 68、69、71、72、74、76、77、79、80、85、87 的表與圖內的資料全部改成 MS 開頭？是否誤植？	感謝委員指正，將於成果報告統一改為 MS 開頭之代號。
38	Page 5 倒數第二行，「...使得多於的水被包含於.....」是否改為「...使得多餘的水被包含於.....」。	感謝委員指正，將於成果報告進行修正。
39	Page 10 倒數第三行，「...混凝土構件的變件條件、鋼筋圍束...」其中「變件條件」文字是否有誤？	感謝委員指正，此處應為「邊界條件」，將於成果報告修正。
40	因內政部各類計畫之成果報告格式要求不同，請依本所提供之範本進行	將依建築研究所提供之範本撰寫成果報告。

	成果報告的撰寫。	
41	各位委員若有具體建議的研究方向，可寫入意見表中，以利本所後續研究課題規劃的參採。	無。

附錄四、工作會議

本會議已於民國 111 年 5 月 6 日採用 Google Meet 視訊會議方式辦理完成，出席人員有建築研究所蔡綽芳組長、陶其駿主任、周楷峻研究助理、李台光研究員，研究團隊吳崇豪助理教授及林樹根講師，共計 7 位。

工作會議簽到紀錄

會議主題：纖維混凝土耐久性研究

日期：111 年 5 月 6 日(星期五) 上午 10：30

地點：視訊會議

出席人員：蔡綽芳組長、陶其駿主任、周楷峻研究助理、李台光研究員、
吳崇豪助理教授、林樹根講師



附錄五、第 1 次專家學者座談會議紀錄

本會議於民國 111 年 6 月 22 日採用 Google Meet 視訊會議方式辦理完成，出席之專家學者有王和源特聘教授、林威廷教授、張銀濃理事長、李宗毅行銷經理，建築研究所團隊有蔡綽芳組長、周楷峻研究員，研究團隊則有吳崇豪助理教授、林樹根講師、黃中和副教授等，共計 9 位。出席專家之建議詳如下表所示。

審查委員	專家意見內容
王和源	<ol style="list-style-type: none"> 1. 首先很肯定本計畫之執行，「纖維混凝土耐久性研究」的確很重要且值得探討。 2. 影響纖維混凝土品質及最佳纖維含量因素甚多，如混凝土等級、工作度、摻料、粒料、纖維類型和縱橫比、纖維長短、溫度…等。本研究之範圍及條件須界定。 3. 本研究為何選用鋼纖維及聚丙烯纖維，請說明之。 4. 因纖維影響混凝土工作度很大，使用 SP 之種類等需說明之。 5. 纖維是否均勻分布，影響混凝土品質甚鉅，在相關規範研修中，建議說明如何執行之。 6. 鋼纖維噴凝土規範中...使用「方塊」抗壓強度，請說明之。 7. 預製、輕量化等纖維混凝土相關產品研發等省工省料措施值得推廣應用。
林威廷	<p>對於研究團隊規劃的纖維混凝土試驗項目與評估項目，深表佩服，預期試驗成果將有助於本土纖維混凝土耐久性研究的相關工程推動與實務發展，幾項建議供計畫團隊參考：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 關於泌水的問題，可添加矽灰或其他有助於漿體黏結性的材料，惟須考量添加矽灰時對混凝土工作性之影響。 2. 纖維長徑比(L/d)對於纖維混凝土性質有顯著關聯性，相關文獻指出 L/d 越高，對應的力學性質越佳，試驗室試驗採用的試體尺寸較一般 RC 結構物小，纖維長度對於試體尺寸的影響應以予考量。 3. 關於 RCPT 試驗，試體摻鋼纖維會增加試體的導電性，通電 60V 可能會造成電流量破表等問題，建議可將定電壓 60V 修正為 30V 或 20V，以利試驗順利進行。 4. SEM 的試片取樣不易，建議可採用 OM 或手持式光學放大鏡，來擷取纖維與漿體間的破裂面、腐蝕狀況或過渡界面區，將有利後續分析試驗成果之分析與討論。

審查委員	專家意見內容
張銀濃	<ol style="list-style-type: none"> 1. 現場纖維混凝土的流動性較差，建議纖維添加量可適當減少，以維持纖維混凝土的施工性。 2. 過往實務經驗顯示，鋼纖維混凝土的性能比其他纖維混凝土來的好，不過鋼纖維會腐蝕，在應用上仍須注意，且鋼纖維質地堅硬，容易刺傷施工人員，在應用上應小心注意。 3. 纖維混凝土的現場施工品質不易掌握，建議可朝預鑄纖維混凝土技術及製品進行探討，有助於擴大纖維混凝土的應用性。
李宗毅	<ol style="list-style-type: none"> 1. 纖維混凝土拌和、澆置、修飾、養護等相關規範研修建議。 <ol style="list-style-type: none"> (1) 纖維的選用是重要的，與不同材質纖維須注意的點不盡相同。如鋼纖維選擇：如不能在進到混凝土拌合機前，利用散佈機打散結團問題，就需選擇膠貼排纖的纖維，此類纖維利用水溶性膠將纖維連接成排狀，在進到拌合機前不易結團，進入拌合機生產攪拌時遇水膠溶及拌合剪力，就能快速拌合均勻。如使用塑膠纖維時，塑膠纖維的材質物性固然重要，但部分材質的塑膠纖維，會有靜電集附問題，如聚乙烯類的塑膠...，造成拌合時不易將其攪拌均勻。 (2) 一般纖維的添加時機，應在生產混凝土時就加入拌合；由於添加纖維後，混凝土的工作性會變差，可藉由增加外加劑用量，即可調整至原先的工作性。如使用鋼纖維或選用較長的聚丙烯纖維 55mm，混凝土的配比也須適當調整。 (3) 在修飾部分，以往在地坪使用鋼纖維或較長的聚丙烯纖維時，需藉由整體粉光面飾的工班，在墁平施工時將突出於表面的纖維檢除。所以經驗上，對於主要提升抗彎強度的纖維較有修飾上的問題。對於以抗龜裂或防火需求的細纖維添加，較無修飾上的問題。 (4) 在添加纖維的混凝土，在養護的時機與養護方法，應與一般混凝土養護規則相同即可。 2. 預製、輕量化等纖維混凝土相關產品研發、改善建議。 <ol style="list-style-type: none"> (1) 預製工法優勢就是，製程容易掌控，模具的澆置與震搗能確實，混凝土成品品質的穩定，原本就是其強項，所以這是一個好的構想。在國外許多預製混凝土，藉由混凝土設計與澆製方法的改變，利用流動性混凝土，藉由纖維混凝土取代鋼筋混凝土，能快速澆置完成預製構件，在預製混凝土方面已經捨棄使用綁紮鋼筋架構的方式。甚至使用改質 PP 聚丙烯纖維混凝土，藉由優良抗拉強度物性的 PP 聚丙烯纖維，在

審查委員	專家意見內容
	<p>單位纖維體積上調整，就可達到相同力學需求的鋼筋混凝土條件。如此的預製構建澆製施工便利，同時達到節約成本的效果。(因為 PP 聚丙烯纖維比重約 0.9~1.0，鋼纖維比重 7~7.9)</p> <p>(2) 藉由一些纖維混凝土取代傳統鋼筋混凝土，確實可達到減重與輕量化的效果。因為傳統鋼筋混凝土需考慮保護層厚度問題，所以混凝土的斷面厚度受到侷限，若是用鋼纖維或聚丙烯纖維，將有機會減少斷面厚度，將會較容易達到輕量化的目的。</p>

纖維混凝土耐久性研究

專家學者會議簽到紀錄

會議主題：纖維混凝土耐久性研究

會議次數：第 1 次專家學者會議

日期：111 年 6 月 22 日(星期三) 上午 9：30 ~ 11:00

地點：視訊會議

出席人員：王和源特聘教授、林威廷教授、彰銀濃理事長、李宗毅行銷經理、蔡綽芳組長、吳崇豪助理教授、林樹根講師、黃中和副教授、周楷峻研究員



附錄六、第 2 次專家學者座談會議紀錄

本會議於民國 111 年 10 月 28 日假國立中興大學土木工程學系 306 教室，採用實體及 Google Meet 視訊兩種方式辦理完成，出席之專家學者有張裕閔段長、蔡奇峰董事長、張智淵技師、顏聰名譽教授，建築研究所團隊有周楷峻研究員(視訊參加)，研究團隊則有吳崇豪助理教授及林樹根講師等，共計 7 位。出席專家之建議詳如下表所示。

審查委員	專家意見內容
張裕閔	<p>1. 行政院公共工程委員會頒布之「第 03375 章 V3.0 鋼纖維噴凝土」中，2.1.4 項之條文可修正為：</p> <p><u>纖維材料</u>：須符合[CNS 12892 A2247][]之規定，其型式及尺度應適於噴凝土施工及能達到加強噴凝土強度要求者，並經工程司認可後方得使用。一般而言鋼纖維之抗拉強度應大於[4,200kgf/cm²][]，<u>PP 纖維應大於 XXXkgf/cm²</u>。</p> <p>1. 意見</p> <p>1) 纖維混凝土可以大幅減少混凝土初期裂縫，可以考慮研究整體耐久性，應用在高腐蝕環境下混凝土結構保護層改善，降低呆載重。</p> <p>2) 對於施工性部分可以考慮使用質流儀了解各項流動性質</p> <p>3) 可以研究各項有害物質對於各種纖維的影響，便於後續不同施工條件選擇使用。</p> <p>2. 勘誤</p> <p>1) 表 3-6，強速劑誤植，應為強塑劑</p> <p>2) 圖 3-10 照片可能以後要注意，如果有人員入鏡要注意裝備齊全</p> <p>3) 微硬度是打在纖維與漿體過度區嗎?碳鋼腐蝕後體積膨脹 5~7 倍</p>

審查委員	專家意見內容
	<p>4) P66 寫爐石粉 120 級，P31 寫 100 級</p> <p>5) P70 「製密」應為「緻密」。</p>
蔡奇峰	<ol style="list-style-type: none"> 1. 纖維抗拉強度規定應與鋼纖維抗拉強度(4200kgf/cm²)脫勾，即其要求應有不同。 2. 如何增加纖維與漿體間鍵結力。 3. 如何改善纖維拌和的均勻性
張智淵	<ol style="list-style-type: none"> 1. 透水能力、快速氯離子滲透成果是否依抗壓強度作正規化。 2. 行政院公共工程委員會頒布之「第 03375 章 V3.0 鋼纖維噴凝土」中，2.1.4、鋼纖維：須符合[CNS 12892 A2247][]之規定，其型式及尺度應適於噴凝土施工及能達到加強噴凝土強度要求者，並經工程司認可後方得使用。一般而言鋼纖維之抗拉強度應大於[4,200kgf/cm²][]。因纖維的長度及與漿體間的握裹效果不同於鋼筋，其抗拉強度是否需要比照鋼筋的要求大於 4,200kgf/cm²，可進一步討論。
顏聰	<ol style="list-style-type: none"> 1. 摻加纖維會影響混凝土工作性，其是否均勻分布更會影響混凝土品質，宜說明摻加量對均勻分布之影響及纖維混凝土之有效拌和法。 2. 鹽水養護之混凝土強度高於淡水養護者，則宜討論鹽水養護試體之早強性質。 3. 建議對各式混凝土(纖維種類、摻加量)做耐久性之綜合優劣比較及使用上之有利與不利點。

專家學者會議簽到紀錄

會議主題：纖維混凝土耐久性研究

會議次數：第 2 次專家學者會議

日期：111 年 10 月 28 日(星期五) 下午 3：30 ~ 5:00

地點：視訊會議

出席人員：顏聰名譽教授、蔡奇峰董事長、張郁閔段長、張智淵主任技師、吳崇豪助理教授、林樹根講師、黃中和副教授、周楷峻研究員、顏依璇小姐

內政部建築研究所

111 年度協同研究案「纖維混凝土耐久性研究」

第二場專家座談會議簽到表

時間：111 年 10 月 28 日(星期五) 下午 3 時 30 分	
地點：中興大學土木環工大樓 3 樓 306 會議室(台中市南區興大路 145 號)	
主席：吳教授崇豪	
出席人員	簽到處
顏教授聰	顏聰
張段長裕閔	張裕閔
蔡董事長奇峰	蔡奇峰
張技師智淵	張智淵
周研究員楷峻	(視 訊)
吳教授崇豪	吳崇豪
林教授樹根	林樹根
顏依璇	顏依璇

附錄七、第 03375 章 V3.0 鋼纖維噴凝土

1. 通則

1.1 本章概要

說明土方工程坡面保護、地下及隧道工程結構支撐所使用之鋼纖維噴凝土材料、設備、施工及檢驗等相關規定。

1.2 工作範圍

1.2.1 鋼纖維

1.2.2 水泥

1.2.3 化學摻料

1.3 相關章節

1.3.1 第03310章--結構用混凝土

1.3.2 第03373章--矽灰混凝土

1.4 相關準則

1.4.1 中華民國國家標準 (CNS)

- | | | |
|-----|-----------------|---------------------|
| (1) | CNS 61 R2001 | 卜特蘭水泥 |
| (2) | CNS 1233 A3046 | 混凝土抗彎強度試驗法 (三分點載重法) |
| (3) | CNS 1234 A3047 | 混凝土抗彎強度試驗法 (中心點載重法) |
| (4) | CNS 1238 A3051 | 混凝土鑽心試體及鋸切長條試體取樣法 |
| (5) | CNS 3091 A2043 | 混凝土用輸氣附加劑 |
| (6) | CNS 12283 A2219 | 混凝土用化學摻料 |
| (7) | CNS 12892 A2247 | 纖維混凝土用鋼纖維 |

1.4.2 美國材料試驗協會 (ASTM)

ASTM C1018-85 纖維混凝土抗彎韌性標準試驗法

1.4.3 美國混凝土協會 (ACI)

纖維混凝土耐久性研究

ACI 506 噴凝土

- 1.5 資料送審
 - 1.5.1 品質管理計畫書
 - 1.5.2 施工計畫
 - 1.5.3 廠商資料
 - 1.5.4 材料應提送樣品[2份][]。

2. 產品

2.1 材料

- 2.1.1 水泥：須符合[CNS 61 R2001][]要求之卜特蘭水泥[第I型][]。
- 2.1.2 水：用於拌和鋼纖維噴凝土之水須符合第03310章「結構用混凝土」之規定。
- 2.1.3 粗、細粒料：用於鋼纖維噴凝土之粗、細粒料品質應分別符合第03310章「結構用混凝土」之有關規定。粗粒料之最大粒徑為[19mm][]。除工程司另有規定外，粒料級配應符合下表規定：

標準孔寬	通過重量百分比		
	級配1 (細粒料)	級配2	級配3
19.0 mm (3/4in)	—	—	100
12.5 mm (1/2in)	—	100	80~95
9.5 mm (3/8in)	100	90~100	70~90
4.75mm (4號)	95~100	70~85	50~70
2.36mm (8號)	80~100	50~70	35~55
1.18mm (16號)	50~85	35~55	20~40
0.6 mm (30號)	25~60	20~35	10~30
0.3 mm (50號)	10~30	8~20	5~17
0.15mm (100號)	2~10	2~10	2~10

粗細粒料之級配原則上應符合上表級配2或3之規定，但必要時得根據配比試驗結果予以調整。

2.1.4 鋼纖維：須符合[CNS 12892 A2247][]之規定，其型式及尺度應適於噴凝土施工及能達到加強噴凝土強度要求者，並經工程司認可後方得使用。一般而言鋼纖維之抗拉強度應大於 $[4,200\text{kgf}/\text{cm}^2][]$ 。

2.1.5 速凝劑：噴凝土如需摻入速凝劑，其性質應與所用之水泥調和一致，其品質須符合下列規定並應先經工程司認可後方可使用：

- (1) 速凝劑如含有氯化物，其含量不得超過速凝劑重量[1%][]，並不得含有可能導致噴凝土發生龜裂或破裂之物質。
- (2) 噴凝土初凝時間應在[5 分鐘][]以內，終凝時間在[20 分鐘][]以內。

2.1.6 化學摻料：包括高性能減水劑及高性能減水緩凝劑，其品質需符合[CNS 12283 A2219][]之規定。

2.1.7 輸氣劑：需符合[CNS 3091 A2043][]之規定。

2.1.8 矽灰 (Silica Fume)：鋼纖維噴凝土添加矽灰之品質需符合第03373章「矽灰混凝土」之規定。

2.2 品質管理

2.2.1 強度及配比設計

鋼纖維噴凝土之指定抗壓強度 (f_c') 依據設計圖說規定。其28天齡期之規定配比抗壓強度 (試體 $10\text{cm}\times 10\text{cm}\times 10\text{cm}$) 及抗彎強度 (試體 $10\text{cm}\times 10\text{cm}\times 36\text{cm}$) 應分別達 $[f_c'/0.85]$ 及 $[0.2f_c']$ 。承包商應於施工前提出鋼纖維噴凝土之配比，經工程司會同於試驗室試拌及工地試噴均合乎規定後始得採用。配比設計及試驗應符合下列要求：

- (1) 粒料總重量與水泥重量比不得超過[5：1][]。
- (2) 每立方公尺噴凝土之鋼纖維摻入量不得少於[60kg][]。
- (3) 矽灰之用量為水泥用量之[3%][]，承包商應依照製造廠商之說明書及施工前試驗成果，擬定其用量經工程司認可後使用。
- (4) 試驗室之試拌每一配比均應試拌3次，每次試拌應作6個試體，有關試體之製作應依[ACI 506.1R-98、506.2-95][]之規定辦理。每組試體應試驗1天、7天及28天齡期之強度，試驗方法應依[CNS 1233 A3046][CNS 1234 A3047][CNS 1238 A3051][]之規定辦理。

(5) 工地試噴壓驗應在施工前[30天]完成，每一配比應試噴於垂直、仰面及水平等三處規定大小格板上，以便取樣作7天及28天之強度試驗及韌性試驗。強度試驗及韌性試驗試體製作應依[ACI 506.1R-98、506.2-95][]之規定辦理，抗壓強度及抗彎強度試驗依[ACI 506.1R-98、506.2-95][]之規定辦理。抗彎韌性試驗（僅在工地試噴時辦理）應依[ASTM C1018-85][]之規定辦理，其最小韌性指數 I5 及 I10 以分別不小於[4.0][6.0][]為原則。

(6) 試拌或試噴完成後其3個方塊試體平均抗壓強度應合於下列規定：

A. 1天之方塊抗壓強度應達[0.3fc'] []。

B. 7天之方塊抗壓強度應達[0.7fc'] []。

C. 28天之方塊抗壓強度應達 [fc'/0.85][]；抗彎強度應達 [0.2fc'] []。

3. 施工

3.1 施工方法

3.1.1 鋼纖維噴凝土係以水泥、粗細粒料、鋼纖維、水及化學摻料等材料^{附錄六}依規定拌和後，以噴漿機具及特殊噴嘴，藉壓縮空氣噴佈於施工面之鋼纖維混凝土。

3.1.2 人工與設備

(1) 承包商應雇用對噴凝土工作有經驗之工人施工，施工期間，如工程司認為施噴工人不稱職時，得要求更換，承包商應即照辦。

(2) 應採用濕拌法施工，其噴凝土施工設備及拌和設備，需符合第 03373 章「矽灰混凝土」第 3.1.5 款「配料」及第 3.1.6 款「拌和」之相關規定辦理並應經工程司核可後方可使用。

3.1.3 拌和

拌和時間需符合第03310章「結構用混凝土」之規定辦理。速凝劑得先與水混合然後壓入噴嘴。

3.1.4 表面清理

在噴射工作開始之前，應將施工表面之鬆離碎片、污穢、油污或其他有礙噴凝土與施工面黏結之有害物徹底清除乾淨，良好岩盤面應以高壓氣水噴洗，經工程司認可後始得開始噴射。

3.1.5 噴射厚度

每層噴射厚度得根據工地試噴結果及實際施工情況提送工程司認可後採用。有關噴凝土厚度之控制、檢測及厚度未達規定之處理方式應依下列規定及工程司指示辦理。

- (1) 噴凝土層之規定厚度應依設計圖說或工程司之指示^{附錄}成之平均厚度不得小於規定之厚度，其最小厚度不得小於規定厚度之[80%][]。
- (2) 噴凝土施噴於垂直面或仰面時，每層噴射厚度不得超過[4cm][]。施噴於水平或略呈傾斜之表面，每層厚度不得超過[8cm][]，分層施噴噴凝土時每層間隔之時間應有[30~60 分鐘][]。所有鐵件之最小噴凝土覆蓋厚度應為[2cm][]。
- (3) 噴射時應以埋設測釘控制其厚度，先於噴凝土噴佈前應縱橫每隔[2m][]及經指定之其他位置埋設測釘，並經工程司核驗認可。
- (4) 已完成之噴凝土面應每[200m²][]施鑽檢查孔[4 孔][]，以供檢測實噴厚度。鑽孔以衝擊式鑽機施鑽，鑽孔位置由工程司指定。檢查結果，[4 孔]之平均厚度不得小於規定厚度。且任一孔之厚度均不得小於規定厚度之[80%][]。如未達上述要求時，應按下列規定辦理：
 - A. 平均厚度若不低於規定厚度之[80%][]，且經工程司書面同意免予補噴時，該組鑽孔所代表數量之鋼纖維噴凝土將依第4節「計量與計價」之規定辦理。
 - B. 平均厚度不低於規定厚度之[80%][]，但工程司指示須補噴，或平均厚度未達規定厚度之[80%][]時，均應依工程司指示補噴至規定厚度，且其補噴厚度不得小於[2cm][]。經補噴後已達規定厚度之噴凝土，按原規定厚度計量與計價。

3.1.6 噴射及養護工作

- (1) 隧道內噴凝土作業，原則使用長臂型自動操作式噴射機具施噴，以維人員安全並提高品質。
- (2) 噴射時噴嘴應儘可能正交噴射面，噴嘴離開噴射面之距離不得大於[1.5m][]。
- (3) 噴射中墜落之材料，絕對不能再用。
- (4) 在噴射次一層前，必須將第1層噴凝土面上之附著塵土、鬆砂或其他腐朽之外物清除乾淨，並經充足潤濕之後，用壓縮空氣將附著水完全吹乾。
- (5) 隧道壁面超挖較大處應先將凹入部分噴填後方可正式噴佈，以免噴

佈完成面不平整。

- (6) 噴射面有滲水時應以急結水泥砂漿封堵或以其他方法導開後方予施噴。
- (7) 隧道內噴凝土之噴射時機及層厚除設計圖說外依地質評估等級及工程司指示辦理，並應於下回開挖前完成，其經工程司同意者得於再下一回開挖前完成，惟不得遲於 24 小時或工程司同意之時間。
- (8) 雨天不得施行露天噴凝土工作。
- (9) 除工程司另有指示外，露天噴凝土噴射後 5 天內，噴射面必須經常保持潤濕。隧道內噴凝土可不必養護。
- (10) 依設計圖說或工程司指示，凡鋼纖維噴凝土未被混凝土覆蓋者，應再被覆[2cm][]以上之噴凝土保護之。

3.1.7 檢驗取樣及試驗

- (1) 鋼纖維噴凝土之現場取樣應依[ACI 506.1R-98、506.2-95][]及下列規定分別壓驗齡期 7 天及 28 天試體及工程司指示辦理。
 - A. 鋼纖維噴凝土現場取樣之格板（46cm×46cm）由承包商自備。試樣在工程司監督下，由承包商負責噴置。每[500m²][]取樣1次，每次至少1格板，分別壓驗齡期7天及28天試體。
 - B. 樣品製造24小時後脫模隨即養護。試驗前試樣至少浸水養護[40小時][]，然後每組每齡期切割為3個10cm 之方塊試體或3個7.5cm 直徑之圓柱試體，試體之試驗由承包商送至工程司認可之試驗室辦理。試體之製作及搬運費由承包商負擔。
- (2) 每組 3 個切割方塊試體 28 天平均抗壓強度須等於或大於 f_c' ，且無單一試體低於 $[0.85f_c']$ []；如試體鑽取直徑比高為 1：2 之圓柱體時，28 天平均抗壓強度須等於或大於 $[0.85f_c']$ []，且無單一試體低於 $[0.75f_c']$ []，但直徑比高非為 1：2 時之修正係數詳[CNS 1238 A3051][]；又每組 3 個試體之 28 天平均抗彎強度須等於或大於 $[0.2f_c']$ []，且無單一試體低於 $[0.16f_c']$ []。試體強度如未達到上述設計要求，除經工程司書面同意免予鑿除重做者外，承包商應無償鑿除重新施噴至達到規定之設計強度及厚度。
- (3) 每相當於施噴[500m²][]之噴凝土中，應做噴凝土內鋼纖維之含量試驗一組，其取樣地點依工程司指示，取樣數量及試驗方法等應依工程司指示辦理。若取樣試驗結果顯示噴凝土中鋼纖維之含量未達配比規定要

求時，其代表數量之鋼纖維噴凝土將依第 4 節「計量與計價」之規定辦理。

4. 計量與計價

4.1 計量

4.1.1 鋼纖維噴凝土之工作依不同厚度、型式個別以[平方公尺][]計量。

4.2 計價

4.2.1 土方工程邊坡之「鋼纖維噴凝土（註明厚度）」以[平方公尺][]丈量計付，該單價包括搭架、表面清理、鑽孔、鋼纖維，噴射與養護噴凝土及其他必要工作所需之一切人工、材料、機具、設備、動力、運輸及[25%][]之回彈損耗率等費用在內。

4.2.2 隧道工程之「鋼纖維噴凝土（註明厚度）」以[平方公尺][]丈量計付，該單價包括搭架、表面清理、鋼纖維以及噴置鋼纖維噴凝土所需之一切人工、材料、機具、設備、動力、運輸及[25%][]回損耗率等費用在內。

4.2.3 有條件接受且需結構計算書

若試體於規定齡期試驗之抗壓（抗彎）強度、噴射厚度檢查或噴凝土中鋼纖維含量試驗顯示下述之結果，且若根據試驗結果之計算書證明試體所代表已施噴之噴凝土結構功能足夠且安全，則已施噴之噴凝土得以有條件接受；但此有條件接受之噴凝土應予扣款：

(1) 扣減單價 20% 標準

A. 1 個或多個抗壓試體低於 fc' ，但 3 個試體之平均值不低於 $[0.8fc']$ []，並經工程司書面同意免予鑿除重做者。

B. 1 個或多個抗彎試體低於 $[0.2fc']$ []，但 3 個試體之平均值不低於 $[0.16fc']$ []，並經工程司書面同意免予鑿除重做者。

C. 鋼纖維噴凝土厚度未達規定要求，但其平均厚度不低於規定厚度之 $[80\%]$ []，並經工程司書面同意免予補噴者。

D. 噴凝土中鋼纖維之含量未達規定含量之 $[80\%]$ [] ^{附錄} 高於 $[60\%]$ []。

(2) 扣減單價 5% 標準

A. 噴凝土中鋼纖維之含量未達規定含量，但高於規定含量之 $[80\%]$ []。

纖維混凝土耐久性研究

4.2.4 噴凝土中鋼纖維之含量未達規定含量之[60%][]，其試體所代表數量之鋼纖維噴凝土不予計價。

4.2.5 若承包商未依照規定作試體之取樣及試驗，或未適當保護試體，則該部分噴凝土付款應扣減[50%][]。同時，工程司得要求鑽心取樣以證實所施噴之噴凝土功能足夠並依下述規定：

(1)以書面提出鑽心位置以及後續之修補鑽孔方法，並事先送請工程司核准。

(2)應依照[CNS 1238 A3051][]鑽取[3 個][]樣品並做試驗。

(3)若 3 個混凝土鑽心試體之平均強度等於或超過[0.85fc'] []，且任一噴凝土鑽心試體之強度均不低於[0.75fc'] []，則噴凝土得按規定扣減付款後予以驗收。若鑽心試體不符合本款之規定，則噴凝土應由承包商自費拆除重做。

(4)噴凝土驗收後，應修補鑽孔。

4.2.6 因品質或試驗未符合規範，由承包商負擔費用之項目：

(1)鑽心取樣試驗及修補鑽孔。

(2)補救措施。

(3)若承包商未能於規定期限內採取補救措施，工程司得直接代替承包商進行補救措施，所需之費用由承包商負擔。

〈本章結束〉

附錄八、第 03241 章 化學纖維混凝土

1. 通則

1.1 本章概要

說明使用於構造物之化學纖維混凝土之材料、施工及檢驗相關規定。

1.2 工作範圍

1.2.1 化學纖維混凝土配比設計、試拌及供應

1.2.2 化學纖維混凝土澆置及養護

1.2.3 化學纖維混凝土組成材料之品質試驗及檢驗

1.3 相關章節

1.3.1 第03050章--混凝土基本材料及施工一般要求

1.4 相關準則

1.4.1 中華民國國家標準 (CNS)

CNS 3090 A2042 預拌混凝土

1.4.2 美國混凝土協會 (ACI)

ACI 544 2R-89 Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete

1.4.3 美國材料試驗協會

ASTM C1018-97 Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete

1.5 資料送審

承包商於供應化學纖維混凝土前，應提供下列資料送請工程司核可。

1.5.1 工廠品質管理計畫

本計畫書至少須包括：

(1) 拌和廠位置、規模及設備描述

(2) 混凝土組成材料之試驗資料

(3) 化學纖維材料之名稱及物理與化學性質之試驗資料

(4) 配比設計

(5) 配比設計所添加化學纖維之種類、長度及數量，應注意避免於混凝土拌和時發生化學纖維結球現象。

(6) [摻料之名稱及試驗資料][]

1.5.2 施工計畫

1.5.3 樣品

纖維混凝土耐久性研究

提送化學纖維樣品、[型錄說明書][][3][]份送審。

1.6 品質保證

1.6.1 材料之檢驗須符合公共工程施工品質管理作業要點第12點規定

1.7 運送及儲存

1.7.1 化學纖維材料之運送及儲存，均須予以防潮之保護

1.7.2 混凝土組成材料之運送及儲存方式按照第03050章之相關規定。

2. 產品

2.1 材料

2.1.1 混凝土組成材料之水泥、粒料與水及化學摻料與飛灰等之品質及使用規定，須按照第03050章之相關規定，惟化學纖維混凝土各種組成材料之用量及化學纖維之添加量，應根據配比設計及試拌之結果。

2.1.2 化學纖維

化學纖維材料之種類及性質與使用化學纖維混凝土之目的有關，包括為減少混凝土裂縫、或增加混凝土韌性、或改善抗拉行為等，使用前須依據使用目的，事先訂定所需之化學纖維材料種類、規格及物理與化學性質等。承包商須提供符合規定之化學纖維材料。

2.2 品質管理

2.2.1 化學纖維混凝土若使用於包覆鋼筋或鐵件時，其水溶性氯離子含量不得超過[0.3][0.6][]kg/m³，製作時之品質管理悉照第03050章之「2.2品質管理」之規定。

3. 施工

除下列規定外，其他悉按第03050章之「3.施工」之規定：

3.1 為有效控制品質，化學纖維混凝土須由符合CNS 3090 A2042規定之預拌廠生產，不得以乾式拌和車或乾拌設備運至工地後再加水拌和。

3.2 化學纖維混凝土除須進行抗壓強度試驗外，視使用目的，進行[衝擊強度 (Impact Resistance Strength) 試驗][韌性指數 (Flexural Toughness) 試驗][無需其他試驗][]。

3.3 衝擊強度試驗依[ACI 544-2R89][]之規定，韌性指數試驗依[ASTM C1018-97][]之規定。

4. 計量與計價

4.1 計量

本章工作之計量方式按設計圖說及契約規定以[M³][]計量。

4.2 計價

4.2.1 按不同抗壓強度之化學纖維混凝土項目計價，其單價已包括完成化學纖維混

凝土材料製作、運輸、澆置、養護、試驗等工作所必須之費用。

4.2.2 化學纖維材料、品質檢驗與試驗費用，均已包含於化學纖維混凝土項目內計價，承包商不得要求另外給價。

〈本章結束〉

參考書目

1. P.C. Aïtcin, A.M. Neville, P. Acker, "Integrated view of shrinkage deformation," *Concr Int* 1997;19(9): 35-41.
2. A.M. Neville, "Properties of Concrete," 4th ed. London: Longham; 1995.
3. H.E. Davis, "Autogenous volume change of concrete," In: Proceedings of the ASTM 43rd Annual Meeting, Atlantic City, NJ, June 1940, 1103-13.
4. P.C. Aïtcin, "The durability characteristics of high performance concrete: a review," *Cement & Concrete Composites*, Vol. 25, 2003, 409-420.
5. R. Gagné, P. Lamothe, P.C. Aïtcin, "Chloride-ion permeability of different concretes," In: Proceedings of the Sixth International Conference on Durability of Building Materials Components, Omiya Japan, 1993, 1171-80.
6. R. Duval, H. Hornain, "La durabilité du béton vis-aa-vis des eaux agressives," In: Baron J, Ollivier J-P, editors. *La durabilité des bétons*, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1992, 376-85.
7. P.C. Aïtcin, "High performance concrete," London: E&F SPON; 1998.
8. P.K. Mehta, "Monteiro P. Concrete-microstructure, properties, and materials," New York: McGraw-Hill; 1993.
9. 陳韋翔, 「管狀含砂水流閘門開度對混凝土耐沖磨性之影響」, 國立嘉義大學土木與水資源工程學系研究所, 碩士論文, 2018年。
10. 黃子豪, 「管狀含砂水流沖擊對混凝土耐磨性之影響」, 國立嘉義大學土木與水資源工程學系研究所, 碩士論文, 2017年。
11. U. Diederich, J Spitzner., M. Sandvik, B. Kepp, M Gillen, "The behavior of high-strength lightweight aggregate concrete at elevated temperature," In: *High strength concrete*, 1993, 1046-53.
12. A.N. Noumowe, P. Clastres, G. Delvicki, J.L. Costaz, "Thermal stresses and water vapour pressure of high-performance concrete at high temperature," In: Proceedings of Utilization of high strength/high performance concrete, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1996, 561-70.
13. G. Sanjayan, L. J. Stocks, "Spalling of high-strength silica fume concrete in fire," *ACI Mater J* 1993;90(2): 170-3.

14. S.Y.N. Chan, G.F. Peng, J.K.W. Chan, "Comparison between high strength concrete and normal strength concrete subjected to high temperature," *Mater Struct*, 1996, 29:616-9.
15. N. Khoylou, G.L. England, "The effect of elevated temperature on the moisture migration and spalling behaviour of high strength and normal concretes," In: *High-strength concrete: an international perspective*, ACI SP-167; 1996, 263-89.
16. R. Breitenbücker, "High strength concrete C105 with increased fire resistance due to propylene fibers," In: *Proceedings of Utilization of high strength/high performance concrete*, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris. 1996, 571-8.
17. B.C. Jensen, B. Aarup, "Fire resistance of fibre reinforced silica fume based concrete," In: *Proceedings of Utilization of high strength/high performance concrete*, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1996, 551-60.
18. L.T. Phan, *Fire performance of High-Strength Concrete: A Report of the State-of-the-Art*, Res Rep NISTIR 5934, NIST, Gaithersburg, Maryland, USA, 1997.
19. S.C. Paul, P.A.G. Gideon, van Zijl, B. Šavija, "Effect of Fibers on Durability of Concrete: A Practical Review," *Materials* 2020, 13, 4562; doi:10.3390/ma13204562.
20. Bragov, Y.V. Petrov, B.L. Karihaloo, A.Y. Konstantinov, D. Lamzin, A. Lomunov, I. Smirnov, "Dynamic strengths and toughness of an ultra high performance fibre reinforced concrete," *Eng. Fract. Mech*, 2013, Vol. 110, 477-488.
21. Curosu, I.; Liebscher, M.; Alsous, G.; Muja, E.; Li, H.; Drechsler, A.; Frenzel, R.; Synytska, A.; Mechtcherine, V. Tailoring the crack-bridging behavior of strain-hardening cement-based composites (SHCC) by chemical surface modification of poly (vinyl alcohol) (PVA) fibers. *Cem. Concr. Compos.* 2020, Vol. 114, 103722.
22. Tran, N.T.; Tran, T.K.; Kim, D.J. High rate response of

- ultra-high-performance fiber-reinforced concretes under direct tension. *Cem. Concr. Res.* 2015, Vol. 69, 72-87.
23. Yoo, D.-Y. ; Shin, H. -O. ; Yang, J.-M. ; Yoon, Y. -S. Material and bond properties of ultra high performance fiber reinforced concrete with micro steel fibers. *Compos. Part B Eng.* 2014, Vol. 58, 122-133.
 24. Li, V.C. ; Horikoshi, T. ; Ogawa, A. ; Torigoe, S. ; Saito, T. Micromechanics-based durability study of polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite. *Mater. J.* 2004, Vol. 101, 242-248.
 25. Paul, S.C. ; van Zijl, G.P. Mechanically induced cracking behaviour in fine and coarse sand strain hardening cement based composites (SHCC) at different load levels. *J. Adv. Concr. Technol.* 2013, Vol. 11, 301-311.
 26. Dahake, A. ; Charkha, K. Effect of steel fibers on the strength of concrete. *J. Eng. Sci. Manag. Educ.* 2016, Vol. 9, 45-51.
 27. Wille, K. ; Kim, D. J. ; Naaman, A. E. Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents. *Mater. Struct.* 2011, Vol. 44, 583-598.
 28. Zheng, Y. ; Wu, X. ; He, G. ; Shang, Q. ; Xu, J. ; Sun, Y. Mechanical properties of steel fiber-reinforced concrete by vibratory mixing technology. *Adv. Civ. Eng.* Vol. 2018, 2018.
 29. Babafemi, A. J. ; Boshoff, W. P. Tensile creep of macro-synthetic fibre reinforced concrete (MSFRC) under uni-axial tensile loading. *Cem. Concr. Compos.* 2015, Vol. 55, 62-69.
 30. Guerini, V. ; Conforti, A. ; Plizzari, G. ; Kawashima, S. Influence of steel and macro-synthetic fibers on concrete properties. *Fibers* 2018, Vol. 6, 47.
 31. Kaur, P. ; Talwar, M. Different types of Fibres used in FRC. *Int. J. Adv. Res. Comput. Sci.* 2017, Vol. 8, 380-383.
 32. Torres, J. A. ; Lantsoght, E. O. L. Influence of fiber content on shear capacity of fiber-reinforced concrete beams. *Fibers* 2019, Vol. 7, 102.
 33. Abambres, M. ; Lantsoght, E. O. L. ANN-based shear capacity of steel fiber-reinforced concrete beams without stirrups. *Fibers* 2019, Vol. 7, 88.
 34. Lantsoght, E. O. L. How do steel fibers improve the shear capacity of

- reinforced concrete beams without stirrups? Compos. Part B Eng. 2019, Vol. 175, 107079.
35. Kohoutková, A. ; Broukalová, I. Structural Applications of fibre reinforced concrete in the czech republic. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2017, Vol. 246, 012001.
 36. Luković, M. ; Hordijk, D.A. ; Huang, Z. ; Schlangen, E. Strain hardening cementitious composite (SHCC) for crack width control in reinforced concrete beams. Heron 2019, Vol. 64, 181.
 37. Verbruggen, S. ; Remy, O. ; Wastiels, J. ; Tysmans, T. Stay-in-place formwork of TRC designed as shear reinforcement for concrete beams. Adv. Mater. Sci. Eng. Vol. 2013, 2013.
 38. Rokugo, K. ; Kanda, T. ; Yokota, H. ; Sakata, N. Applications and recommendations of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracking (HPFRCC) in Japan. Mater. Struct. 2009, Vol. 42, 1197.
 39. Li, V.C. Engineered Cementitious Composite (ECC): Bendable Concrete for Sustainable and Resilient Infrastructure; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2019.
 40. Boyd, A. ; Skalny, J. Environmental deterioration of concrete. Environ. Deterior. Mater. 2007, Vol. 28, 143-184.
 41. Örnek, C. ; Leygraf, C. ; Pan, J. Passive film characterisation of duplex stainless steel using scanning Kelvin probe force microscopy in combination with electrochemical measurements. Npj Mater. Degrad. 2019, Vol. 3, 1-8.
 42. Angst, U. ; Elsener, B. ; Larsen, C.K. ; Vennesland, O. Critical chloride content in reinforced concrete- A review. Cem. Concr. Res. 2009, Vol. 39, 1122-1138.
 43. Ann, K.Y. ; Song, H.-W. Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. Corros. Sci. 2007, Vol. 49, 4113-4133.
 44. Šavija, B. ; Luković, M. Carbonation of cement paste: Understanding, challenges, and opportunities. Constr. Build. Mater. 2016, Vol. 117,

- 285–301.
45. Stefanoni, M. ; Angst, U. ; Elsener, B. Corrosion rate of carbon steel in carbonated concrete – A critical review. *Cem. Concr. Res.* 2018, Vol. 103, 35–48.
 46. Bardal, E. *Corrosion and Protection*; Springer Science & Business Media: London, UK, 2007.
 47. Bertolini, L. ; Elsener, B. ; Pedferri, P. ; Redaelli, E. ; Polder, R. *Corrosion of Steel in Concrete*; Wiley Online Library: Hoboken, NJ, USA, 2013; Vol. 392.
 48. Küter, A. *Management of Reinforcement corrosion: A Thermodynamic Approach*; Technical University of Denmark: Lyngby, Denmark, 2009.
 49. Š avija, B. *Experimental and Numerical Investigation of Chloride Ingress in Cracked Concrete*; Delft University of Technology: Delft, The Netherlands, 2014.
 50. Blagojević, A. *The Influence of Cracks on the Durability and Service Life of Reinforced Concrete Structures in relation to Chloride-Induced Corrosion: A Look from a Different Perspective*; Delft Univeristy of Technology: Delft, The Netherlands, 2016.
 51. Vasanelli, E. ; Micelli, F. ; Aiello, M.A. ; Plizzari, G. Long term behavior of FRC flexural beams under sustained load. *Eng. Struct.* 2013, 56, 1858–1867.
 52. Kobayashi, K. ; Kojima, Y. Effect of fine crack width and water cement ratio of SHCC on chloride ingress and rebar corrosion. *Cem. Concr. Compos.* 2017, 80, 235–244.
 53. Miyazato, S. ; Hiraishi, Y. Durability against steel corrosion of HPFRCC with bending cracks. *J. Adv. Concr. Technol.* 2013, 11, 135–143.
 54. Micelli, F. ; Candido, L. ; Vasanelli, E. ; Aiello, M.A. ; Plizzari, G. Effects of short fibers on the long-term behavior of RC/FRC beams aged under service loading. *Appl. Sci.* 2019, 9, 2540.
 55. Chen, E. ; Berrocal, C.G. ; Löfgren, I. ; Lundgren, K. Correlation between concrete cracks and corrosion characteristics of steel reinforcement in

- pre-cracked plain and fibre-reinforced concrete beams. *Mater. Struct.* 2020, 53, 1-22.
56. Yuan, Q.; Shi, C.; De Schutter, G.; Audenaert, K.; Deng, D. Chloride binding of cement-based materials subjected to external chloride environment - A review. *Constr. Build. Mater.* 2009, Vol. 23, 1-13.
57. Glass, G.; Buenfeld, N. The influence of chloride binding on the chloride induced corrosion risk in reinforced concrete. *Corros. Sci.* 2000, Vol. 42, 329-344.
58. Glass, G.; Hassanein, N.; Buenfeld, N. Neural network modelling of chloride binding. *Mag. Concr. Res.* 1997, Vol. 49, 323-335.
59. Abbas, S.; Soliman, A.M.; Nehdi, M.L. Chloride ion penetration in reinforced concrete and steel fiber-reinforced concrete precast tunnel lining segments. *Mater. J.* 2014, Vol. 111, 613-622.
60. Corinaldesi, V.; Moriconi, G. Mechanical and thermal evaluation of ultra high performance fiber reinforced concretes for engineering applications. *Constr. Build. Mater.* 2012, Vol. 26, 289-294.
61. Šaviija, B.; Luković, M.; Hosseini, S.A.S.; Pacheco, J.; Schlangen, E. Corrosion induced cover cracking studied by X-ray computed tomography, nanoindentation, and energy dispersive X-ray spectrometry (EDS). *Mater. Struct.* 2015, Vol. 48, 2043-2062.
62. Luković, M.; Šaviija, B.; Ye, G.; Schlangen, E.; Van Breugel, K. Failure modes in concrete repair systems due to ongoing corrosion. *Adv. Mater. Sci. Eng.* Vol. 2017, 2017.
63. Paewchompoo, N.; Yodsudjai, W.; Chindaprasirt, P. Corrosion-Induced Cracking Time in Steel Fiber-Reinforced Concrete: Experiment and Finite Element Method. *ACI Mater. J.* 2020, Vol. 117, 3-12.
64. Michel, A.; Solgaard, A.O.S.; Pease, B.J.; Geiker, M.R.; Stang, H.; Olesen, J.F. Experimental investigation of the relation between damage at the concrete-steel interface and initiation of reinforcement corrosion in plain and fibre reinforced concrete. *Corros. Sci.* 2013, Vol. 77, 308-321.
65. Bentur, A.; Diamond, S.; Mindess, S. The microstructure of the steel

- fibre-cement interface. *J. Mater. Sci.* 1985, Vol. 20, 3610-3620.
66. Frazão, C. ; Barros, J. ; Camões, A. ; Alves, A.C. ; Rocha, L. Corrosion effects on pullout behavior of hooked steel fibers in self-compacting concrete. *Cem. Concr. Res.* 2016, Vol. 79, 112-122.
 67. Suvash Chandra Paul, Gideon P.A.G. van Zijl and Branko Šaviija, “Effect of Fibers on Durability of Concrete: A Practical Review,” *Materials* 2020, Vol. 13, 4562; doi:10.3390/ma13204562.
 68. Granju, J.-L. ; Balouch, S.U. Corrosion of steel fibre reinforced concrete from the cracks. *Cem. Concr. Res.* 2005, Vol. 35, 572-577.
 69. Huang, H. ; Ye, G. ; Qian, C. ; Schlangen, E. Self-healing in cementitious materials: Materials, methods and service conditions. *Mater. Des.* 2016, Vol. 92, 499-511.
 70. Schlangen, E. ; Ter Heide, N. ; Van Breugel, K. Crack healing of early age cracks in concrete. In *Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2006, 273-284.
 71. Huang, H. ; Ye, G. ; Damidot, D. Characterization and quantification of self-healing behaviors of microcracks due to further hydration in cement paste. *Cem. Concr. Res.* 2013, Vol. 52, 71-81.
 72. Mangat, P. ; Gurusamy, K. Permissible crack widths in steel fibre reinforced marine concrete. *Mater. Struct.* 1987, Vol. 20, 338-347.
 73. Berrocal, C.G. ; Lundgren, K. ; Löfgren, I. Experimental investigation on rebar corrosion in combination with fibres. In *Proceedings of the XXII Nordic Concrete Research Symposium, Reykjavik, Iceland, 13-15 August 2014*.
 74. Hwang, J.P. ; Jung, M.S. ; Kim, M. ; Ann, K.Y. Corrosion risk of steel fibre in concrete. *Constr. Build. Mater.* 2015, Vol. 101, 239-245.
 75. Wang, Y. ; Niu, D. ; Dong, Z. Experimental study on carbonation of steel fiber reinforced concrete. In *Proceedings of the 4th International Conference on the Durability of Concrete Structures, West Lafayette, IN, USA, 24-26 July 2014*.
 76. Miloud, B. Permeability and porosity characteristics of steel fiber

- reinforced concrete. *Asian J. Civ. Eng.* 2005, Vol. 6, 317-330.
77. Zhang, H. ; Rodriguez, C.R. ; Dong, H. ; Gan, Y. ; Schlangen, E. ; Šaviĵa, B. Elucidating the effect of accelerated carbonation on porosity and mechanical properties of hydrated portland cement paste using X-ray tomography and advanced micromechanical testing. *Micromachines* 2020, Vol. 11, 471.
78. Ferrara, L. ; Fratesi, R. ; Signorini, S. ; Sonzogni, F. Durability of steel-fibre reinforced concrete precast elements: Experiments and proposal of design recommendations. In *Proceedings of the 6th international RILEM symposium on fibre-reinforced concretes BEFIB 2004*, Varenna, Italy, 20-22 September 2004, 567-576.
79. Kaufmann, J. Durability performance of fiber reinforced shotcrete in aggressive environment. In *Proceedings of the World Tunnelling Congress*, Foz do Iguaçu, Brazil, 9-14 May 2014.
80. Bažant, Z.P. ; Steffens, A. Mathematical model for kinetics of alkali-silica reaction in concrete. *Cem. Concr. Res.* 2000, Vol. 30, 419-428.
81. Esposito, R. ; Anaç, C. ; Hendriks, M.A. ; Çopurođlu, O. Influence of the alkali-silica reaction on the mechanical degradation of concrete. *J. Mater. Civ. Eng.* 2016, Vol. 28, 04016007.
82. Esposito, R. ; Hendriks, M.A. A multiscale micromechanical approach to model the deteriorating impact of alkali-silica reaction on concrete. *Cem. Concr. Compos.* 2016, Vol. 70, 139-152.
83. Yazıcı, H. The effect of steel micro-fibers on ASR expansion and mechanical properties of mortars. *Constr. Build. Mater.* 2012, Vol. 30, 607-615.
84. Andic, Ö. ; Yardımcı, M. ; Ramyar, K. Performance of carbon, polyvinylalcohol and steel based microfibers on alkali-silica reaction expansion. *Constr. Build. Mater.* 2008, Vol. 22, 1527-1531.
85. Panesar, D.K. ; Gautam, B.P. Triaxial expansion of plain, reinforced and fibre-reinforced asr-affected concrete. In *Proceedings of the 24th Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 24)*, Busan, Korea, 20-25 August 2017.

86. Turanli, L. ; Shomglin, K. ; Ostertag, C. ; Monteiro, P. Reduction in alkali-silica expansion due to steel microfibers. *Cem. Concr. Res.* 2001, Vol. 31, 825-827.
87. Giaccio, G. ; Bossio, M. ; Torrijos, M. ; Zerbino, R. Contribution of fiber reinforcement in concrete affected by alkali-silica reaction. *Cem. Concr. Res.* 2015, Vol. 67, 310-317.
88. Beglarigale, A. ; Yazıcı, H. The effect of alkali-silica reaction on steel fiber-matrix bond characteristics of cement based mortars. *Constr. Build. Mater.* 2013, Vol. 47, 845-860.
89. Hernández-Cruz, D. ; Hargis, C. W. ; Dominowski, J. ; Radler, M. J. ; Monteiro, P. J. Fiber reinforced mortar affected by alkali-silica reaction: A study by synchrotron microtomography. *Cem. Concr. Compos.* 2016, Vol. 68, 123-130.
90. Fernandes, B. ; Gil, A.M. ; Bolina, F. ; Tutikian, B.F. Microstructure of concrete subjected to elevated temperatures: Physico-chemical changes and analysis techniques. *Rev. Ibracon De Estrut. E Mater.* 2017, Vol. 10, 838-863.
91. Xing, Z. ; Beaucour, A. -L. ; Hebert, R. ; Noumowe, A. ; Ledesert, B. Influence of the nature of aggregates on the behaviour of concrete subjected to elevated temperature. *Cem. Concr. Res.* 2011, Vol. 41, 392-402.
92. Mindeguia, J. -C. ; Pimienta, P. ; Carré, H. ; La Borderie, C. On the influence of aggregate nature on concrete behaviour at high temperature. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 2012, Vol. 16, 236-253.
93. Khoury, G.A. Effect of fire on concrete and concrete structures. *Prog. Struct. Eng. Mater.* 2000, Vol. 2, 429-447.
94. Handoo, S. ; Agarwal, S. ; Agarwal, S. Physicochemical, mineralogical, and morphological characteristics of concrete exposed to elevated temperatures. *Cem. Concr. Res.* 2002, Vol. 32, 1009-1018.
95. Peng, G. -F. ; Huang, Z. -S. Change in microstructure of hardened cement paste subjected to elevated temperatures. *Constr. Build. Mater.* 2008, Vol. 22, 593-599.

96. Bhat, P.S.; Chang, V.; Li, M. Effect of elevated temperature on strain-hardening engineered cementitious composites. *Constr. Build. Mater.* 2014, Vol. 69, 370–380.
97. Akca, A.H.; Özyurt, N. Deterioration and recovery of FRC after high temperature exposure. *Cem. Concr. Compos.* 2018, Vol. 93, 260–273.
98. Jameran, A.; Ibrahim, I.S.; Yazan, S.H.S.; Rahim, S.N.A. Mechanical properties of steel–polypropylene fibre reinforced concrete under elevated temperature. *Procedia Eng.* 2015, Vol. 125, 818–824.
99. Sukontasukkul, P.; Pomchiengpin, W.; Songpiriyakij, S. Post-crack (or post-peak) flexural response and toughness of fiber reinforced concrete after exposure to high temperature. *Constr. Build. Mater.* 2010, Vol. 24, 1967–1974.
100. Haddad, R.; Shannag, M.; Hamad, R. Repair of heat-damaged reinforced concrete T-beams using FRC jackets. *Mag. Concr. Res.* 2007, Vol. 59, 223–231.
101. 楊金龍，「高強度混合纖維混凝土於高溫下行為研究」，國立臺灣大學土木工程學系，碩士論文，2000。
102. 鄒洪朕，「混合纖維混凝土受火害之殘留力學性質」，國立中興大學土木工程學系，碩士論文，2015。
103. 游易霖，「超高性能混凝土火害後的力學行為研究」，國立中興大學土木工程學系，博士論文，2010。
104. Mousavi Mohammad Ali, Sadeghi-Nik Aref, Bahari Ali, Jin Congrui, Ahmed Ramadan, Ozbakkaloglu Togay, de Brito Jorge. Strength Optimization of Cementitious Composites Reinforced by Carbon Nanotubes and Titania Nanoparticles. *Constr Build Mater* 2021;303: 124510.
105. Afroughsabet V, Teng S. Experiments on drying shrinkage and creep of high performance hybrid-fiber-reinforced concrete. *Cem Concr Compos* 2020;106: 103481.
106. Soroushian P, Bayasi Z. Fiber type effects on the performance of steel fiber reinforced concrete. *Materials Journal* 1991; 88: 129–34.
107. Ganesan N, Shivananda KP. Strength and ductility of latex modified steel

- fibre reinforced concrete flexural members. *J Struct Eng* 2000; 27: 111-6.
108. Ramezani M, Kim YH, Sun Z. Probabilistic model for flexural strength of carbon nanotube reinforced cement-based materials. *Compos Struct* 2020; 253: 112748.
109. Mosavi SM, Sadeghi-Nik A. Strengthening of steel-concrete composite girders using carbon fibre reinforced polymer (CFRP) plates. *Sadhana* 2015; 40: 249-61.
110. [32] Chen B, Liu J. Contribution of hybrid fibers on the properties of the high-strength lightweight concrete having good workability. *Cem Concr Res* 2005; 35: 913-7.
111. Al-Attar AA, Abdulrahman MB, Hamada HM, Tayeh BA. Investigating the behaviour of hybrid fibre-reinforced reactive powder concrete beams after exposure to elevated temperatures. *J Mater Res Technol* 2020; 9: 1966-77.
112. Dabbaghi F, Nasrollahpour S, Dehestani M, Yousefpour H. Optimization of concrete mixtures containing lightweight expanded clay aggregates based on mechanical, economical, fire-resistance, and environmental considerations. *ASCE J Mater Civ Eng* 2021.
113. M. Ramezani, Y. H. Kim, and Z. Sun. Probabilistic model for flexural strength of cementitious materials containing CNTs. *International Conference on Cement-Based Materials Tailored for a Sustainable Future (CBMT 2021)*, Istanbul, Turkey, 27-29 May (2021) 181-187.
114. Abdul-Rahman M, Al-Attar AA, Hamada HM, Tayeh B. Microstructure and structural analysis of polypropylene fibre reinforced reactive powder concrete beams exposed to elevated temperature. *J Build Eng* 2020; 29: 101167.
115. ACI Committee 544, *Guide for Specifying, Proportioning, and Production of Fiber-Reinforced Concrete ACI 544. 3R-08*, American Concrete Institute, Farmington Hills (MI), (2008).
116. Dehghani A, Nateghi-Alahi F, Fischer G. Engineered cementitious composites for strengthening masonry infilled reinforced concrete frames. *Eng Struct* 2015;105: 197-208.

117. Hamidi F, Aslani F. Additive manufacturing of cementitious composites: Materials, methods, potentials, and challenges. *Constr Build Mater* 2019;218: 582-609.
118. El-Newihy A, Azarsa P, Gupta R, Biparva A. Effect of polypropylene fibers on selfhealing and dynamic modulus of elasticity recovery of fiber reinforced concrete. *Fibers* 2018; 6: 9.
119. Aslani F, Hamidi F, Valizadeh A, Dang ATN. High-performance fibre-reinforced heavyweight self-compacting concrete: Analysis of fresh and mechanical properties. *Constr Build Mater* 2020; 232: 117230.
120. Afroughsabet V, Biolzi L, Cattaneo S. Evaluation of engineering properties of calcium sulfoaluminate cement-based concretes reinforced with different types of fibers. *Materials* 2019; 12: 2151.
121. Dehghani A, Mozafari AR, Aslani F. Evaluation of the efficacy of using engineered cementitious composites in RC beam-column joints. *Structures* 2020; 27: 151-62.
122. Garg M, Azarsa P, Gupta R. Self-Healing Potential and Post-Cracking Tensile Behavior of Polypropylene Fiber-Reinforced Cementitious Composites. *Journal of Composites Science* 2021; 5: 122.
123. Banthia N, Gupta R. Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete. *Cem Concr Res* 2006;36:1263-7.
124. Alhozaimy AM, Soroushian P, Mirza F. Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete and the effects of pozzolanic materials. *Cem Concr Compos* 1996; 18 :85-92.
125. Yadegran, M. Mahoutian, M. Shekarchi, and N. A. Libre. Effect of polypropylene fibers on shrinkage of self-compacting concrete. in *Proceedings of the 5th International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete, Gent, Belgium, September (2007)* 707-713.
126. Jhatial AA, Goh WI, Sohu S, Mohamad N. Thermo-Mechanical Properties of Various Densities of Foamed Concrete Incorporating Polypropylene Fibres. *Arab J Sci Eng* 2020; 45: 8171-86.
127. Jhatial AA, Goh WI, Mohamad N, Rind TA, Sandhu AR. Development of thermal

- insulating lightweight foamed concrete reinforced with polypropylene fibres. Arab J Sci Eng 2020; 45: 4067–76.
128. Dabbaghi F, Fallahnezhad H, Nasrollahpour S, Dehestani M, Yousefpour H. Evaluation of fracture energy, toughness, brittleness, and fracture process zone properties for lightweight concrete exposed to high temperatures. Theor Appl Fract Mech 2021.
 129. Afroughsabet V, Biolzi L, Monteiro PJ, Gastaldi MM. Investigation of the mechanical and durability properties of sustainable high performance concrete based on calcium sulfoaluminate cement. J Build Eng 2021; 43: 102656.
 130. Kumar A, Bheel N, Ahmed I, Rizvi SH, Kumar R, Jhatial AA. Effect of silica fume and fly ash as cementitious material on hardened properties and embodied carbon of roller compacted concrete. Environ Sci Pollut Res 2021.
 131. Riding KA, Thomas MDA, Folliard KJ. Apparent diffusivity model for concrete containing supplementary cementitious materials. ACI Mater J 2013; 110: 705–14.
 132. Karimaei M, Dabbaghi F, Sadeghi-Nik A, Dehestani M. Mechanical performance of green concrete produced with untreated coal waste aggregates. Constr Build Mater 2020; 233: 117264.
 133. Poole JL, Riding KA, Juenger MCG, Folliard KJ, Schindler AK. Effects of supplementary cementitious materials on apparent activation energy. J ASTM Int 2010; 7: 1–16.
 134. Topcu IB, Canbaz M. Effect of different fibers on the mechanical properties of concrete containing fly ash. Constr Build Mater 2007; 21: 1486–91.
 135. Sadeghi-Nik A, Berenjian J, Alimohammadi S, Lotfi-Omran O, Sadeghi-Nik A, Karimaei M. The effect of recycled concrete aggregates and metakaolin on the mechanical properties of self-compacting concrete containing nanoparticles. Iran J Sci Technol Trans Civil Eng 2019; 43: 503–15.
 136. Burris LE, Juenger MCG. The effect of acid treatment on the reactivity of natural zeolites used as supplementary cementitious materials. Cem Concr Res 2016; 79: 185–93.

137. Bahari A, Sadeghi-Nik A, Shaikh FUA, Sadeghi-Nik A, Cerro-Prada E, Mirshafiei E, et al. Experimental studies on rheological, mechanical, and microstructure properties of self-compacting concrete containing Perovskite nanomaterial. *Struct Concr* 2021.
138. Hamada H, Tayeh B, Yahaya F, Muthusamy K, Al-Attar A. Effects of nano-palm oil fuel ash and nano-eggshell powder on concrete. *Constr Build Mater* 2020; 261: 119790.
139. Bahari A, Sadeghi-Nik A, Roodbari M, Taghavi K, Mirshafiei SE. Synthesis and strength study of cement mortars containing SiC nano particles. *Digest J Nanomater Biostruct* 2012; 7: 1427-35.
140. Nik AS, Bahari A. Nano-particles in concrete and cement mixtures. *Appl. Mech. Mater.* 2011; 110: 3853-5. [59] Abolhasani A, Nazarpour H, Dehestani M. Effects of silicate impurities on fracture behavior and microstructure of calcium aluminate cement concrete. *Eng Fract Mech* 2021; 242: 107446.
141. Amin M, Abu el-hassan Kh. Effect of using different types of nano materials on mechanical properties of high strength concrete. *Constr Build Mater* 2015 ;80: 116-24.
142. Abolhasani A, Nazarpour H, Dehestani M. Effects of silicate impurities on fracture behavior and microstructure of calcium aluminate cement concrete. *Eng Fract Mech* 2021; 242: 107446.
143. Abolhasani A, Aslani F, Samali B, Ghaffar SH, Fallahnejad H, Banihashemi S. Silicate impurities incorporation in calcium aluminate cement concrete: mechanical and microstructural assessment. *Adv Appl Ceram* 2021; 120: 104-16.
144. Afroughsabet V, Ozbakkaloglu T. Mechanical and durability properties of highstrength concrete containing steel and polypropylene fibers. *Constr Build Mater* 2015; 94: 73-82.
145. N. Flores Medina, G. Barluenga, F. Hernández-Olivares, “Combined effect of Polypropylene fibers and Silica Fume to improve the durability of concrete with natural Pozzolans blended cement,” *Construction and Building Materials* 96 (2015) 556-566.

146. N. Flores Medina, G. Barluenga, F. Hernandez-Olivares, Enhancement of durability of concrete composites containing natural pozzolans blended cement through the use of polypropylene fibers, *Composites: Part B* 61 (2014) 214–221.
147. Karahan, C.D. Atis, The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete, *Mater. Des.* 32 (2011) 1044–1049.
148. S.A. Salih, M.E. Al-Azzawee, Effect of polypropylene fibers on properties of mortar containing crushed bricks as aggregate, *Eng. Technol.* 26 (2008) 1508–1523.
149. L.-F. Liu, P.-M. Wang, X.-J. Yang, Effect of polypropylene fiber on dry-shrinkage ratio of cement of cement mortar, *Build. Mater.* 8 (2005) 373–377.
150. Karahan, C.D. Atis, The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete, *Mater. Des.* 32 (2011) 1044–1049.
151. M.D. Lepech, V.C. Li, Water permeability of engineered cementitious composites, *Cem. Concr. Compos.* 31 (2009) 744–753.
152. M.C. Nataraja, T.S. Nagaraj, S.B. Basavaraja, Reproportioning of steel fiber reinforced concrete mixes and their impact resistance, *Cem. Concr. Res.* 35 (2005) 2350–2359.
153. T. Massoud, Nahid Mohamed, Ezzat Hassan, Polypropylene fibers and Silica Fume concrete for bridge overlays, in: 82nd annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C., 2003.
154. P. Zhang, Q. Li, Effect of polypropylene fiber on durability of concrete composite containing fly ash and silica fume, *Composites: Part B* 45 (2013) 1587–1594.
155. H. Toutanji, S. McNeil, Chloride permeability and impact resistance of polypropylene-fiber-reinforced silica fume concrete, *Cem. Concr. Res.* 28 (1998) 961–968.
156. Wang, Q. ; Sun, W. ; Guo, L. ; Gu, C. ; Zong, J. Prediction of chloride ingress in steel fibre reinforced concrete under bending load. *Ceram. Silikáty* 2018, Vol. 62, 59–66.

157. Bantia, N. ; Gupta, R. Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete. *Cem. Concr. Res.* 2006, Vol. 36, 1263-1267.
158. Boshoff, W.P. ; Combrinck, R. Modelling the severity of plastic shrinkage cracking in concrete. *Cem. Concr. Res.* 2013, Vol. 48, 34-39.
159. Cadoni, E. ; Meda, A. ; Plizzari, G.A. Tensile behaviour of FRC under high strain-rate. *Mater. Struct.* 2009, Vol. 42, 1283-1294.
160. Rehacek, S. ; Hunka, P. ; Kolisko, J. ; Kratochvile, L. Two type of impact load tests, tested on fibre reinforced concrete specimens. *Procedia Eng.* 2013, Vol. 65, 278-283.
161. Ranade, R. ; Li, V.C. ; Heard, W.F. ; Williams, B.A. Impact resistance of high strength-high ductility concrete. *Cem. Concr. Res.* 2017, Vol. 98, 24-35.
162. Mohammadhosseini, H. ; Awal, A.A. ; Yatim, J.B.M. The impact resistance and mechanical properties of concrete reinforced with waste polypropylene carpet fibres. *Constr. Build. Mater.* 2017, Vol. 143, 147-157.
163. Hoff, G.C. Fire resistance of high-strength concretes for offshore concrete platforms. *Spec. Publ.* 1996, Vol. 163, 53-88.
164. Maluk, C. ; Bisby, L. ; Terrasi, G.P. Effects of polypropylene fibre type and dose on the propensity for heat-induced concrete spalling. *Eng. Struct.* 2017, Vol. 141, 584-595.
165. Bentur, A. ; Mindess, S. *Fibre Reinforced Cementitious Composites*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2006.
166. Destree, X. ; Mandl, J. Steel fibre only reinforced concrete in free suspended elevated slabs: Case studies, design assisted by testing route, comparison to the latest SFRC standard documents. In *Tailor Made Concrete Structures*; Walraven, J.C., Stoelhorst, D., Eds. ; CRC press, Taylor & Francis Group: London, UK, 2008, 437-443.
167. Destree, X. Steel-fibre-only reinforced concrete in free suspended elevated slabs. *Concr. Eng.* 2009, Vol. 13, 47-49.
168. Chiaia, B. ; Fantilli, A.P. ; Vallini, P. Designing cast-in-situ FRC tunnel linings. In *Tailor Made Concrete Structures*; Walraven, J.C., Stoelhorst,

- D., Eds.; CRC press, Taylor & Francis Group: London, UK, 2008, 193–198.
169. Briffaut, M.; Benboudjema, F.; D'aloia, L. Effect of fibres on early age cracking of concrete tunnel lining. Part I: Laboratory ring test. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2016, Vol. 59, 215–220.
170. Mindess, S.; Young, J.F.; Darwin, D. *Concrete*, 2nd ed.; Prentice-Hall: Upper Saddle River, NJ, USA, 2003.
171. *Fib Model Code 2010*; International Federation for Structural Concrete (fib): Lausanne, Switzerland, 2012.
172. Facconi, L.; Conforti, A.; Minelli, F.; Plizzari, G. Flexural design of elevated slabs made of FRC according to fib model code 2010: A case study. In *Proceedings of Italian Concrete Days 2018. ICD 2018. Lecture Notes in Civil Engineering*; di Prisco, M., Menegotto, M., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, 2018; Vol. 42.
173. 吳崇豪等，「高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度之研究」，內政部建築研究所，委託研究計畫，2018。
174. E. Denneman, E.P. Kearsley, A.T. Visser, “Splitting tensile test for fibre reinforced concrete,” *Materials and Structures*, Vol. 44, 1441–1449, 2011.
175. 吳崇豪等，「卜作嵐摻料對再生混凝土與鋼筋間界面過渡區影響之研究」，內政部建築研究所，委託研究計畫，2019。

纖維混凝土耐久性研究

出版機關：內政部建築研究所

電話：(02) 89127890

地址：新北市新店區北新路3段200號13樓

網址：<http://www.abri.gov.tw>

編者：蔡綽芳、吳崇豪、林樹根、黃中和、郭義浩、
黃國倫、周楷峻、李台光

出版年月：111年12月

版次：第1版

ISBN：978-626-7138-34-2（平裝）