



中華民國自來水協會 113 年度研究計畫

自來水工程應用鋼纖維混凝土之研究 -以潛盾工法之內襯環片為例

委託單位：中華民國自來水協會

研究單位：中華民國自來水協會技術研究委員會

計畫主持人：王傳政

研究人員：鄭格浩、張民豈、鄭宇哲

執行期間：113 年 3 月 1 日至 113 年 11 月 30 日

中華民國 113 年 11 月

摘要

鋼纖維混凝土為近年來新世代的耐震材料，具有簡化製作及節省鋼筋之優點，但台灣在應用方面較為缺少法規亦不完善，由於自來水管線洞道工程常見於管線穿管後即填滿混凝土，因此環片在只考慮施工要求下，所需之鋼筋量較少或可以鋼纖維替代，因此進行相關之探討。

本研究同時進行預鑄鋼纖維與鋼筋混凝土環片的製作，並且在環片上安裝必要的監測儀器，將環片受力後所表現的行為做比較；實驗結果顯示，鋼筋之 A 型環片抗彎試驗結果 66.9 公噸高出原設計要求 28.6 公噸許多，可考量降低鋼筋數量避免過設計及浪費材料的情況。

鋼纖維混凝土 A 型環片之單體抗彎試驗破壞強度僅 13.4 噸，雖已達到短期載重之需求 13.23 噸但數值相近，仍建議使用少量主筋提供抗彎強度；鋼纖維之 K 型環片在拉拔試驗及抗推試驗皆達到工作性能要求，故未來或可取代現行鋼筋之 K 型環片。

經計算同體積之潛盾隧道環片，使用鋼纖維混凝土環片之價格及碳排皆能降低，價格僅為原本 27.5%(A 型)及 10.46%(K 型)，碳排更是僅為原本 10.56%(A 型)及 6.79%(K 型)，若以整體環片隧道考慮，將鋼筋替換為鋼纖維整體碳排可降低 4.27%。

關鍵字:鋼纖維、潛盾、環片

誌謝

本研究能順利完成「自來水工程應用鋼纖維混凝土之研究—以潛盾工法之內襯環片為例」，離不開眾多單位與專家的協助。在此，本團隊首先要向中興大學熊彬成教授及其研究團隊致以衷心的感謝。熊教授及其團隊在實驗設計、數據分析與理論探討方面提供了寶貴的指導與支持，還全程參與了實驗的實際執行，投入大量的心力協助完成各項測試，讓本案能順利完成各項實驗及深入研究。

此外，誠摯感謝大弘水泥製品廠股份有限公司慷慨提供本研究所需的器材、場地及環片，讓實驗得以在充足的資源下順利進行；並特別感謝水利署中區水資源局及台灣世曦工程顧問股份有限公司鼎力相助，提供本案參考工程所需要之施工試驗報告及設計資料，讓本案得以完成分析研究；此外，也要感謝捷儀科技之技術團隊，協助實驗中各項儀器的架設與連接，確保測試過程中的準確性與可靠性。

最後，感謝本案的主管以及水協審查委員們，對於本研究提供的寶貴指導與建議，使論文能夠更臻完善。在眾人的支持與鼓勵下，本研究得以順利完成，謹此致謝。

目錄

第一章 計畫緣起	1
1.1 研究動機及計畫緣起	1
1.2 計畫目標及預期成果	2
1.3 預定進度	2
第二章 潛盾工法	4
2.1 潛盾工法概述	4
2.1.1 採用潛盾工法之理由	4
2.1.2 潛盾路線及工作井	5
2.1.3 工作井、潛盾洞道大小	7
2.1.4 環片設計	8
2.1.5 環片的厚度與寬度	10
2.1.6 環片的設計載重	12
2.2 環片的製造	16
2.2.1 混凝土產製	17
2.2.2 鋼筋籠之製作	21
2.2.3 環片生產	23
2.2.4 表面塗裝	27
2.2.5 環片的檢驗	27
2.4 潛盾隧道工程案例介紹	31
2.4.1 捷運潛盾工程	31
2.4.2 捷運工程環片範例	32
2.4.3 自來水潛盾工程	34
2.4.4 自來水管線工程環片案例	37
第三章 鋼纖維混凝土相關法規及作業規範	41
3.1 鋼纖維混凝土材料性質	41
3.1.1 鋼纖維混凝土簡介	41

3.1.2 SFRC 常見形狀及纖維效應	43
3.1.3 SFRC 的拉伸行為	44
3.1.4 SFRC 環片之性質	47
3.2 國內相關法規與規範	49
3.3 國外相關法規與規範	50
3.3.1 美國混凝土學會(American Concrete Institute)	50
3.3.2 國際隧道與地下空間協會(ITA)	52
3.3.3 歐洲規範 EN 14651	52
3.3.4 國際結構混凝土聯合委員會 Fib Model Code 2010 ..	53
3.3.5 美國混凝土學會 ACI 544 .3R&ACI 544 .1R	53
第四章 鋼纖維混凝土相關工程案例介紹	54
4.1 一般鋼纖維混凝土應用案例	54
4.1.1 鋼纖維噴凝土應用	54
4.1.2 鋼纖維混凝土建築應用	55
4.2 鋼纖維混凝土環片工程案例	56
4.2.1 英國 Lee Tunnel	57
4.2.2 巴黎地鐵 16 號線	57
4.2.2 日本首都高速中央環狀新宿線	58
4.2.3 其他國外鋼纖維隧道案例	61
第五章 潛盾工法之鋼纖維混凝土環片設計	62
5.1 SFRC 環片之設計(FIB Model Code)方法	62
5.2 鋼纖維環片與傳統 RC 混凝土環片之設計比較	64
5.2.1 材料性質	64
5.2.2 環片設計性質比較	64
5.3 鋼纖維混凝土之初步計算	66
5.4 鋼纖維混凝土配比設計	72
5.5 本案所使用鋼纖維之種類	73
第六章 鋼纖維混凝土環片之製造與試驗	74

6.1 鋼纖維混凝土試驗規劃.....	74
6.1.2 監測儀器.....	74
6.1.2 鋼纖維混凝土環片試驗項目	77
6.2 鋼纖維混凝土製造過程記錄.....	79
6.2.1 小試拌.....	79
6.2.2 安裝監測裝置.....	81
6.2.3 鋼纖維拌合.....	82
6.2.4 澆注過程.....	84
6.2.5 養護階段.....	87
6.3 環片試驗過程記錄.....	91
6.3.1 圓柱試體試驗.....	91
6.3.2 K 型環片灌漿孔拉拔實驗	93
6.3.3 A 型環片抗彎試驗.....	93
6.3.4 A 型環片試驗結果分析.....	97
6.3.5 K 型環片推力試驗及試驗結果	101
第七章 鋼纖維混凝土環片與鋼筋混凝土環片之經濟性探討.....	105
7.1 預鑄混凝土環片材料數量估算經濟性探討	105
7.2 鋼纖維及鋼筋之環片碳排放量.....	109
7.2.1 A 型環片及 K 型環片碳排放量比較	109
7.2.2、整體隧道環片之碳排放量比較	110
第八章 自來水工程潛盾工法導入鋼纖維混凝土環片初步評估.....	112
8.1.國外使用原因及探討.....	112
8.2.國內導入之初步評估.....	114
第九章 討論與建議.....	117
9.1 討論.....	117
9.2 建議.....	119
參考文獻	123
附錄 A. 中興工程顧問軌道工程訪談記錄.....	126

附錄 B. 台灣世曦工程顧問訪談記錄.....	130
附錄 C. 大弘水泥製品廠股份有限公司訪談記錄.....	133
附錄 D. SFRC 品質管理程序建議.....	136
附錄 E. ACI 544.3R 及 ACI 544.1R 規範簡介.....	140
附錄 F. 期中專題審查答覆及說明.....	144
附錄 G. 期末專題審查答覆及說明.....	148

圖目錄

圖 1 工作井及潛盾路線配置比較說明	5
圖 2 工作井位置	5
圖 3 隧道深度	6
圖 4 地質調查資料	6
圖 5 穿管背填與預留檢修通道	7
圖 6 管外灌漿施工範例	8
圖 7 三義潛盾隧道設維修廊道範例	8
圖 8 環片之組成	9
圖 9 A 型 RC 環片	10
圖 10 B 型 RC 環片	11
圖 11 K 型 RC 環片	11
圖 12 模型圖	12
圖 13 水平變位及垂直變位圖	12
圖 14 環片支撐軸力圖	13
圖 15 環片支撐彎矩圖	13
圖 16 載重及計算式示意圖	14
圖 17 吊掛與堆疊示意圖	15
圖 18 配筋範例圖	16
圖 19 環片生產流程圖[6]	17
圖 20 拌合設備外觀	19
圖 21 內部進料桶	19
圖 22 自動控制室	19
圖 23 混合室	20
圖 24 進料之運輸台車口	20
圖 25 剛澆鑄試體圖	20
圖 26 水中養生之試體	21
圖 27 養生之圓柱試體	21
圖 28 鋼筋加工	22
圖 29 鋼筋組立	22
圖 30 模組組立圖	23
圖 31 模具蓋板	23
圖 32 進料及振動	24

圖 33 等待進蒸氣養護.....	25
圖 34 自動控制設備.....	25
圖 35 水中養生.....	26
圖 36 堆置大氣養生.....	26
圖 37 塗裝後堆置.....	27
圖 38 組裝試驗.....	28
圖 39 單體抗彎試驗.....	28
圖 40 抗推試驗.....	29
圖 41 套梢工作載重試驗方式[7].....	30
圖 42 灌漿管拉拔試驗[7].....	30
圖 43 捷運萬大線[8].....	31
圖 44 捷運萬大線施工圖[8].....	31
圖 45 桃園捷運圖[9].....	32
圖 46 捷運範例環片.....	33
圖 47 捷運 A 型範例.....	33
圖 48 岡山至北嶺加壓站備援幹管工程潛盾機.....	35
圖 49 岡山至北嶺加壓站備援幹管工程施工照片.....	35
圖 50 三義交流道至三義減壓池 1000m/m 管線接續工程破鏡照片.....	36
圖 51 大湳系統送龜山林口複線工程施工照片.....	36
圖 52 工程位置.....	37
圖 53 縱斷面圖.....	37
圖 54 潛盾內套 1800mmDIP 管示意圖.....	38
圖 55 DIP 管外灌漿示意圖.....	38
圖 56 環片組合示意圖.....	39
圖 57 異型環片之示意圖(曲率半徑 120m 範例).....	39
圖 58 A 型環片大小.....	40
圖 59 Naaman 對於 SFRC 之拉力及變形量之圖.....	42
圖 60 鋼纖維形狀分類示意圖[11].....	43
圖 61 不同劑量的鋼纖維應力-應變圖[12].....	44
圖 62 試驗裝置示意圖(EN14651).....	46
圖 63 試驗裝置與負載-裂縫曲線之示意圖.....	46
圖 64 鋼筋混凝土與鋼纖維混凝土開裂方式之不同[13].....	47
圖 65 噴凝土影響特性.....	55

圖 66 建置中之西雅圖之家.....	56
圖 67 傳統連樑與 SFRC 連樑.....	56
圖 68 Lee Tunnel 隧道設計示意圖[21].....	57
圖 69 巴黎地鐵路線規劃示意圖[21].....	58
圖 70 隧道完成圖[22].....	59
圖 71 SFRC 鋼纖維混凝土環片[22].....	60
圖 72 鋼筋使用減少說明圖[22].....	60
圖 73 彎曲梁反向分析.....	62
圖 74 應力裂紋開口(實線和虛線表示軟化和硬化後的裂縫行為).....	63
圖 75 鋼筋混凝土預鑄環片剝落效應[24].....	65
圖 76 單軸壓縮下正常和高強度混凝土和纖維混凝土主要差異.....	66
圖 77 原設計鋼筋 1.01%.....	68
圖 78 簡化鋼筋為 0.5%時.....	69
圖 79 大安大甲第 2 標原設計 M-N 影響圖.....	70
圖 80 每立方公尺 40kg 繪製容許包絡線.....	71
圖 81 抗彎試驗需求力量計算方式.....	71
圖 82 本案所使用鋼纖維外型.....	73
圖 83 應變計支架立面圖.....	75
圖 84 應變計分布圖.....	75
圖 85 應變計出線盒.....	76
圖 86 應變計外觀(來源: Geokon 官網).....	76
圖 87 使用 Image J 的分析步驟與量化結果.....	79
圖 88 試件用混合機器.....	79
圖 89 稱重.....	80
圖 90 小試件結果.....	80
圖 91 將試件結果作為試體.....	80
圖 92 鋼筋上安裝示意圖.....	81
圖 93 無鋼筋 K 型環片安裝示意圖.....	81
圖 94 無鋼筋 A 型環片安裝示意圖.....	81
圖 95 鋼纖維投料處.....	83
圖 96 先預放鋼纖維混凝土.....	84
圖 97 再蓋上蓋板.....	85
圖 98 持續震動及灌料.....	85

圖 99 A 型環片澆注完成表面修磨	86
圖 100 K 型環片澆鑄完成表面修磨	86
圖 101 A 型普通環片(有筋)外側面	87
圖 102 A 型普通環片(有筋)內側面	87
圖 103 K 型普通環片(有筋)外側	88
圖 104 K 型普通環片(有筋)內側	88
圖 105 K 型普通環片(無筋)外側	88
圖 106 K 型普通環片(無筋)內側	88
圖 107 A 型普通環片(有筋)外側面	89
圖 108 A 型普通環片(有筋)內側面	89
圖 109 表面鑽孔尋找接線盒	90
圖 110 接線後照片，左側為正常的出線方式，右側為鑽洞之方式	90
圖 111 圓柱試體試驗	91
圖 112 第一次圓柱試驗	92
圖 113 第二次圓柱試驗	92
圖 114 第三次圓柱試驗	92
圖 115 拉拔試驗測試中	93
圖 116 測試達到 $46\text{kg}/\text{cm}^2$	93
圖 117 一般鋼筋混凝土 A 型環片壓裂照片	94
圖 118 實驗數據最大值 66.9 噸	94
圖 119 監測儀器接線	95
圖 120 鋼纖維混凝土 A 型環片壓裂狀態	96
圖 121 實驗數據最大值 13.4 噸及出現應變延長之情形	96
圖 122 原始畫面及分成上下方區域	98
圖 123 Ridge Detection 自動偵測裂縫，上方裂縫長度 184.03cm	98
圖 124 鋼纖維混凝土之裂縫放大	99
圖 125 鋼纖維及鋼筋混凝土環片之應變量比對	100
圖 126 監測器位置圖	100
圖 127 萬能試驗機(500 噸)	101
圖 128 測試過程圖	101
圖 129 鋼筋維混凝土 K 環片測試過程皆無變化	102
圖 130 鋼筋維混凝土 K 環片測試曲線圖	102
圖 131 鋼纖維混凝土測試結果	103

圖 132 鋼纖維混凝土 K 環片測試曲線圖	103
圖 133 鋼纖維及鋼筋混凝土 K 型環片之應變量比對	104
圖 134 歐盟碳稅相關政策	113
圖 135 洩洪道遭受氣穴現象圖[29]	115
圖 136 聚興 4 萬噸水池底板鋼筋	116
圖 137 國外鋼纖維混凝土應變計量測	120
圖 138 不同含量鋼纖維混凝土 A 型環片 Pn-Mn 交互影響線	121

表目錄

表 1 預定時程表.....	3
表 2 潛盾洞道.....	7
表 3 自來水公司近期辦理之潛盾工程.....	34
表 4 所需強度及控制載重的因子負荷表[15].....	51
表 5 SFRC 預鑄環片案例.....	61
表 6 大安大甲第 1 標環片需承受之設計載重.....	67
表 7 考量施工吊掛、現場堆置與背填灌漿條件下設計載重.....	67
表 8 短期載重(高水壓).....	70
表 9 SFRC 水泥基複合材料配比.....	72
表 10 鋼纖維特性.....	73
表 11 圓柱試驗結果.....	91
表 12 鋼筋混凝土 A 環片實驗結果.....	95
表 13 鋼纖維混凝土 A 環片實驗結果.....	96
表 14 下方偵測之裂縫長度.....	98
表 15 鋼纖維型裂縫長度及平均寬度.....	103
表 16 A 型環片鋼筋數量表.....	106
表 17 K 型環片鋼筋數量表.....	107
表 18 A 型環片鋼纖維數量表.....	108
表 19 K 型環片鋼纖維數量表.....	108
表 20 A 型環片碳排放計算.....	110
表 21 K 型環片碳排放計算.....	110
表 22 整體環片碳排放量.....	111

第一章 計畫緣起

1.1 研究動機及計畫緣起

鋼纖維混凝土為近年來新世代的耐震材料，依據廖文正等人研究顯示[2]，其同時擁有自充填混凝土在新拌時之自充填超高流動性，及受拉時呈現應變硬化之力學性質，且甚至可以完全不需配置橫向鋼筋，倘應用在同型號大量製造的混凝土構材上，即具有簡化製作增加產能及節省鋼筋之優點。

由於自來水管線埋設工法中，考量管線經過交通繁雜之都會區時，為地下空間做更有效利用、降低當地交通衝擊減少民怨或避免破壞都市景觀等因素考量下，會採用潛盾工法埋設自來水管線。

而潛盾工法施工過程中，將使用大量之內襯環片形成地下洞道，以利後續之自來水管線穿管，但台灣混凝土環片所使用的鋼筋量與國外相較之下，量體高出許多。近年來不論是鋼筋本身的材料價格，或者是鋼筋綁紮所需要的人工價格，都大幅度提升，而環片製造時間長、產量有限，且國內需求量又大，確實是有開始研發具同等或更佳功能，價格卻可能相對低廉且生產速度較快的預鑄環片之必要性。

有鑑於此，本研究案為探討「預鑄鋼纖維混凝土環片」替代

「預鑄鋼筋混凝土環片」之可行性，特委託中興大學進行全尺寸環片試驗[1]，並在環片上安裝必要之監測儀器進行比較及分析。

1.2 計畫目標及預期成果

本計畫目標及成果預定如下：

- (一) 設計製造實體之鋼纖維混凝土內襯環片。
- (二) 發展鋼纖維混凝土應用於潛盾工法之內襯環片設計與驗證。

1.3 預定進度

本計畫於 113 年 1 月 25 日第 20 屆技術研究委員會第 4 次委員會議審查通過並於 113 年 2 月 21 日第 20 屆理監事會第 6 次聯席會議追認通過，執行期程為 113 年 3 月 1 日至 113 年 11 月 30 日，以期中報告為界，分為上下兩期執行，整理如表 1。

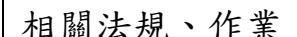
第一期:113 年 3 月至 113 年 6 月就研究重點進行資料收集，及採用

鋼纖維混凝土之內襯環片初步設計。

第二期:113 年 7 月至 113 年 11 月就鋼纖維混凝土之內襯環片製造、

試驗及結果探討。

表 1 預定時程表

時程 工作項目	113年度								
	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月
相關法規、作業 規範及案例蒐集									
進行鋼筋及鋼纖 維混凝土之潛盾 環片範例設計及 製造。									
期中報告									
鋼纖維混凝土之 強度試驗									
分析及報告撰寫									
期末報告									
總進度(%)	10	20	30	40	50	60	75	90	100

第二章 潛盾工法

2.1 潛盾工法概述

隧道潛盾施工方法約起源於十九世紀，首先應用於英國泰晤士河河底隧道工程，發明至今將近 200 年，而國內最先由臺北衛生下水道汙水幹管引進，及至 1980 年起臺北捷運開始開工，潛盾工法才開始大量在國內普及[3]。

潛盾工法之作法係於地下鑽掘前進，需要搭配前後挖井並以潛盾機挖掘前進，同時於後方放入環片做為已挖出之洞壁支撐，一般潛盾工程施工前，根據其目的均需進行路線評估，再調查地質相關情況後，確認工程規模其配套設施，進行設計潛盾大小及選用適當機具，而內襯環片的設計即為其中重要的一環。

2.1.1 採用潛盾工法之理由

於自來水管線中，因潛盾工法造價較高，常見為明挖再埋設水管之工法，施工簡單，若需地底下施工也可使用推進工法，但若須穿越山區高地或規劃管線過深時，則無法使用推進工法施工；另外就是路面下管線過多、路面寬度不足、交通流量大需要的地方，也無法使用推進工法，因為推進工法需要有數量較多之工作井如圖 1，因此實務上此等路面受限或需要轉彎之管線，使用潛盾工法為主

要選項。

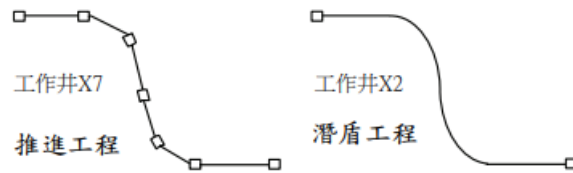


圖 1 工作井及潛盾路線配置比較說明

2.1.2 潛盾路線及工作井

隧道潛盾施工，首先必須就工程之路線確認，方能確認隧道之掘進長度以及地質情況，頭尾之工作井如能尋找平直路段且有空地處，將是最佳方案，如圖 2。



圖 2 工作井位置

當決定管線位置，則需要進行該路線下各管線資料及地質資料，各管線資料如圖 3 所示，可能有油管、電信管、既有水管，初步的設計位置必須要有足夠深度，於自來水公司中一般採最淺覆土 6m 的設計，確保無干涉其他管線。

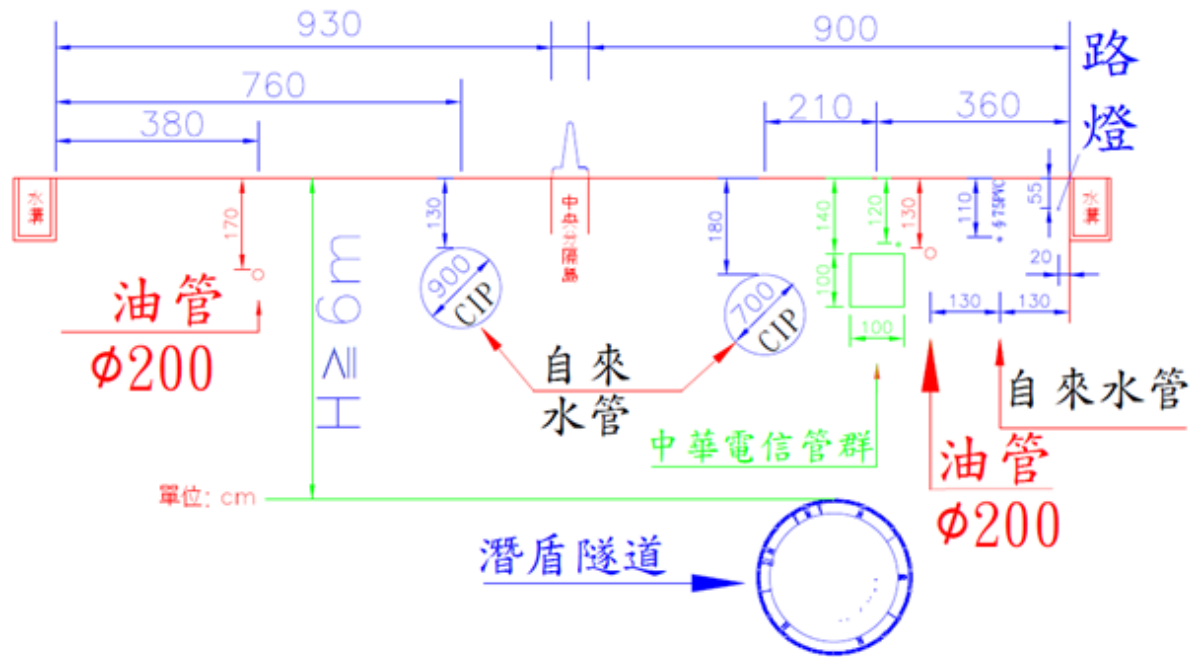


圖 3 隧道深度

當管線路線決定後，仍需要調查地質資料，如圖 4，蒐集沿線地質調查及礦業管理中心之地質資料加上經現場鑽探比對分析確認不至於施工時造成地層下陷等施工意外，亦是非常重要之環節。

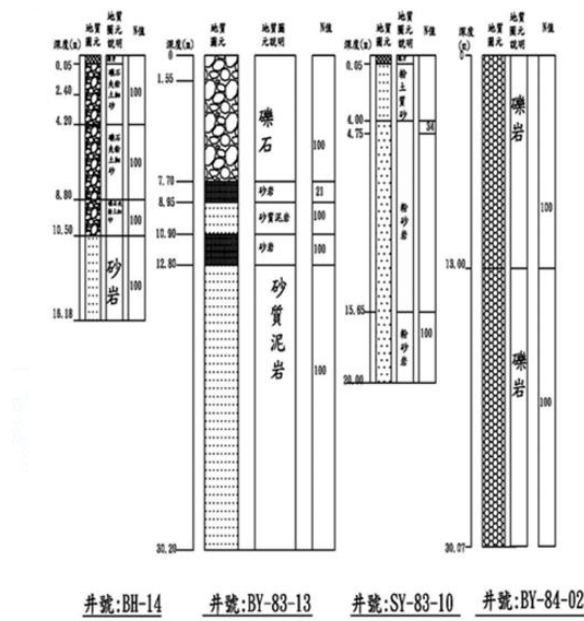


圖 4 地質調查資料

2.1.3 工作井、潛盾洞道大小

工作井位置需考慮能否避開道路而設計不同大小，以及使用的形式，一般用連續壁 RC 沉箱、鋼板樁及鋼襯板的方式，而潛盾洞道的大小影響著工作井、潛盾機、潛盾環片的設計，依據參考文獻[4]，自來水工程大多依照送水管徑來決定潛盾洞道，考量人員進入空間，建議以至 $D=1500\text{mm}$ 為分界如表 2。

表 2 潛盾洞道

送水管徑 D	潛盾洞道 D_2
$D \geq 1500$	且不設維修廊道，洞道內徑 $D_2 \geq D+900\text{ (mm)}$ ，並將管外與環片內空間灌滿混凝土如圖 6[4]。
$D < 1500$	日後如需維修，因管內空間太小，工人難以進入管內維修，故建議設計「維修廊道」， $D_2 \geq D+2000\text{ (mm)}$ ，並設計管線墩座，如圖 7。

因自來水工程主體為埋設自來水管，埋設完有兩種作法，將水管與潛盾隧道中的空間以灌漿填滿或設維修廊道的方式，如圖 5[3]，故其潛盾洞徑大小的選用與水管有關。

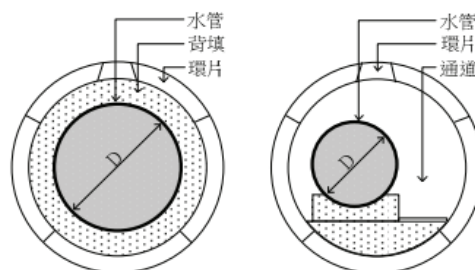


圖 5 穿管背填與預留檢修通道



圖 6 管外灌漿施工範例



圖 7 三義潛盾隧道設維修廊道範例

2.1.4 環片設計

當選定完成深度選用、潛洞大小、潛盾機形式等各種前置作業完成，即開始選擇潛盾環片的構材選擇，一般材料常見為三種，

1.RC 環片(預鑄混凝土鋼筋環片)、2.鋼環片、3.鑄鐵環片，常見的材

料為 RC 環片，因其性價比高，有特別需要支撐之處再採用鋼環片或鑄鐵環片，除此之外尚有許多新興環片，引述自[5]新環片技術多朝(1)環片組裝自動化及省力化、(2)高速施工、(3)降低製造成本、(4)省略二次襯砌、(5)因應特殊載重(內水壓、大載重)等趨勢發展，故新技術都以環片之接頭為對象，而自來水公司另有複合推進管的方式，直線段採用推進搭配 RCP 管的方式，當遇到需要潛盾的方式再換成環片。

環片的設計每環由三片 A 型、二片 B 型及一片 K 型環片，以弧形螺栓組合而成，範例圖 8。

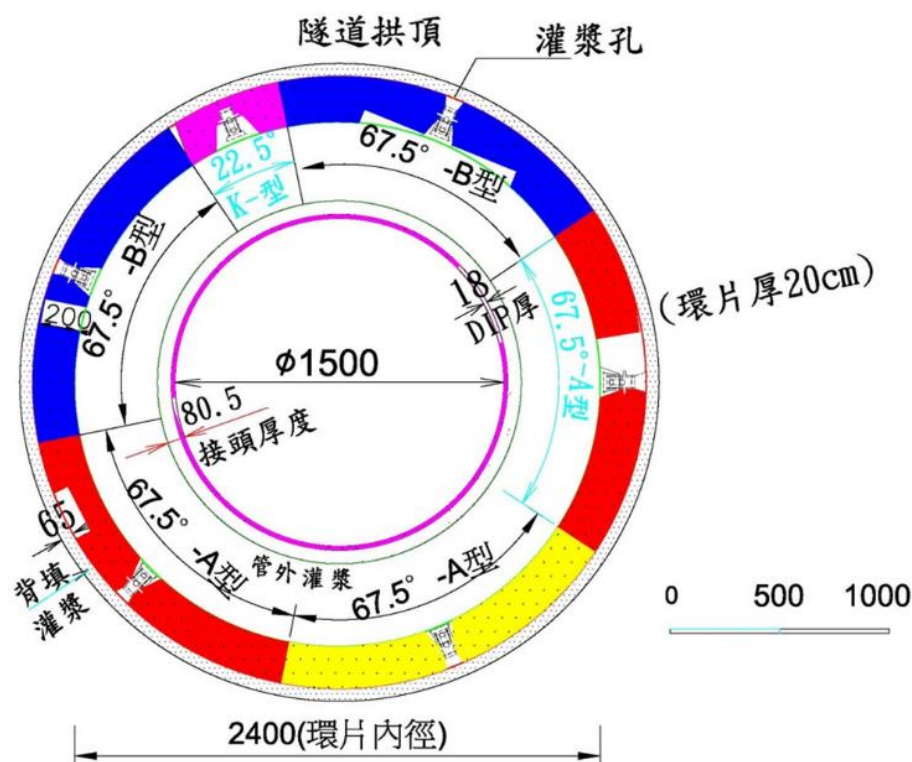


圖 8 環片之組成

2.1.5 環片的厚度與寬度

環片的厚度選用，一般捷運因外徑寬常用為 250mm 厚，自來水工程常用 200mm 厚，依據工程要求而有不同之厚度，寬度一般都在 300mm~1600mm 之間，自來水潛盾工程之範例設計如圖 9，為環片厚度 200mm 寬度 1000mm 之環片。

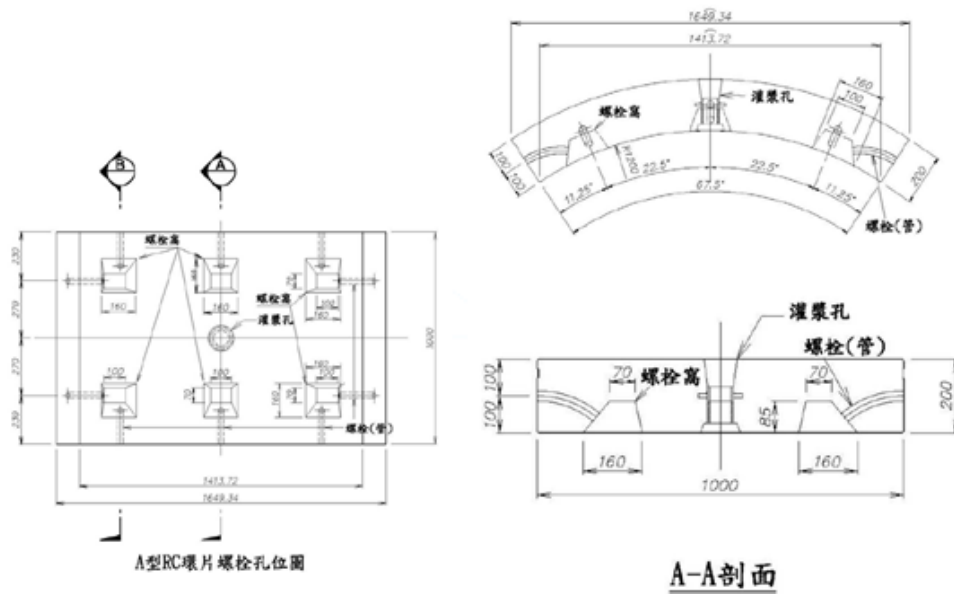


圖 9 A 型 RC 環片

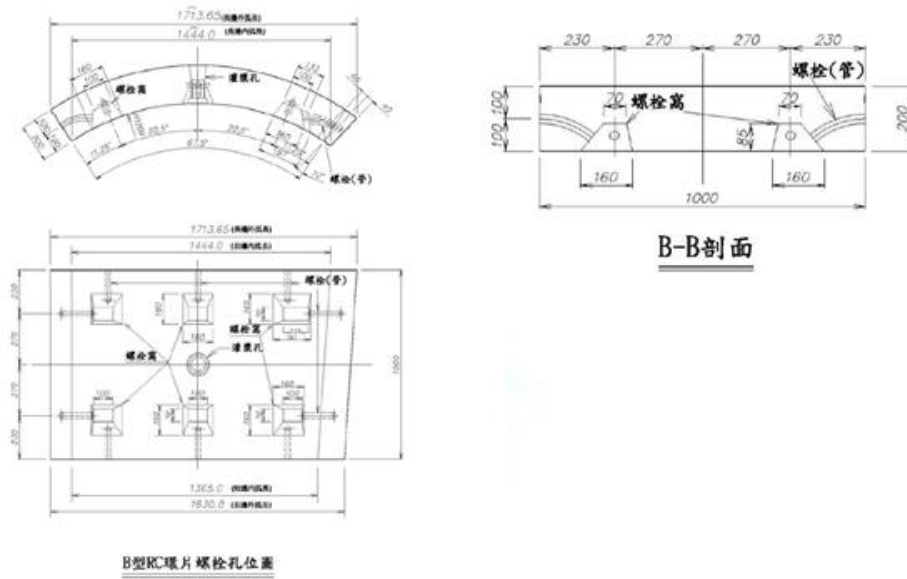


圖 10 B 型 RC 環片

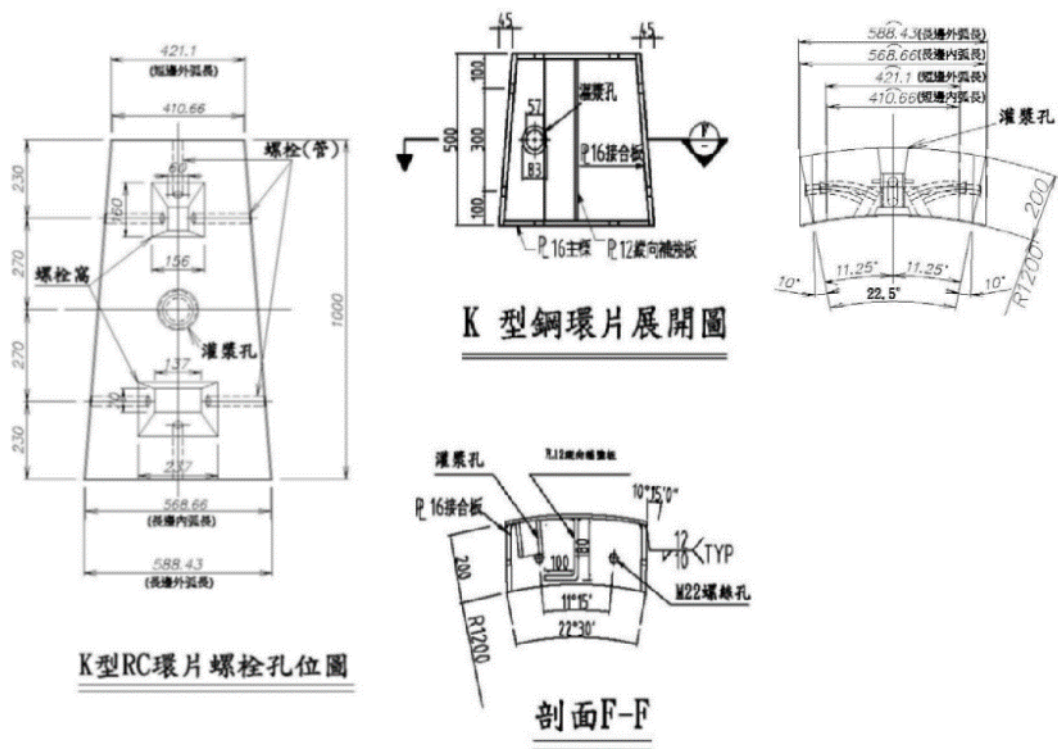


圖 11 K 型 RC 環片

2.1.6 環片的設計載重

一般環片設計除了外型外，最重要的是符合各項載重，這部分應該由專業技師進行計算，應考慮之項目如下：

1. 地面之載重、土壓力與靜水壓力：

(1).以結構分析軟體之方式

須先建立模型如圖 12，材料輸入材料參數、勁度、長短期荷重、自重等等基本數值後進行運算，運算結果如圖 13-圖 15，得到荷重組合時，可再計算各接點處之彎矩與軸力。

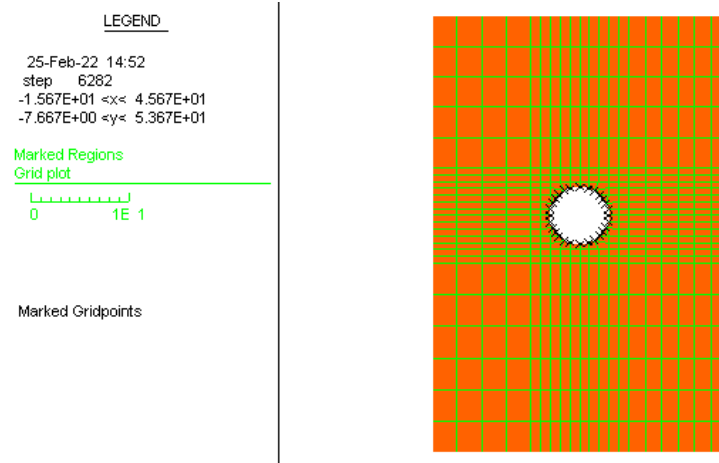


圖 12 模型圖

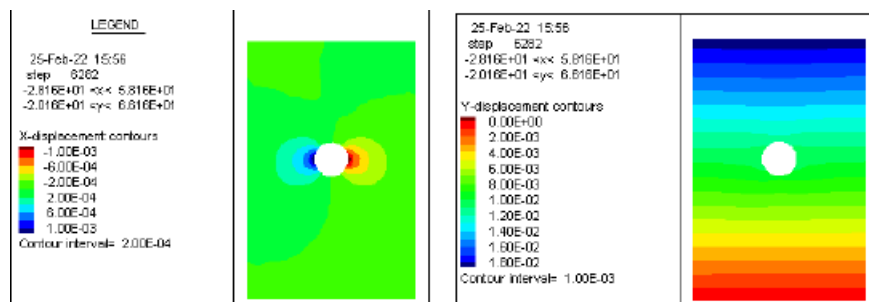


圖 13 水平變位及垂直變位圖

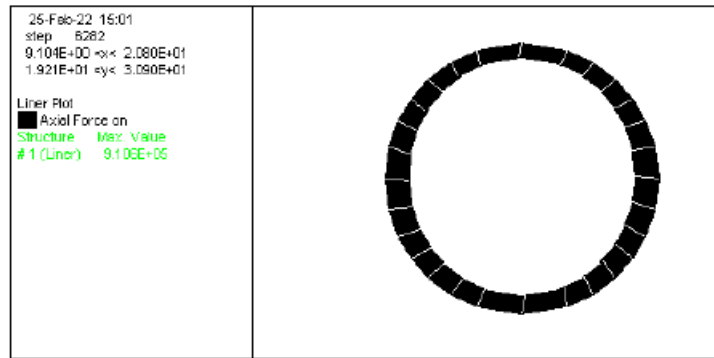


圖 14 環片支撐軸力圖

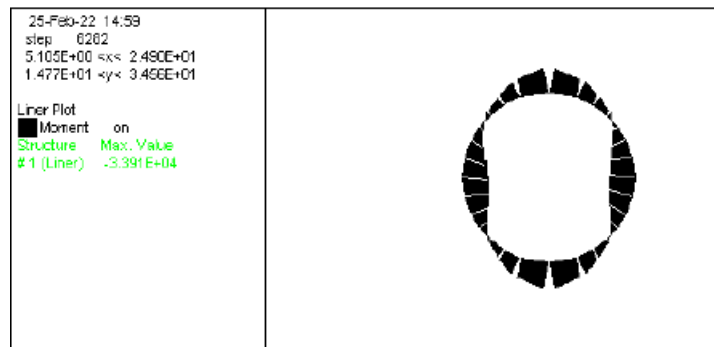


圖 15 環片支撐彎矩圖

(2).日本慣用之計算法進行各項載重計算

如圖 16，以公式計算垂直荷重、水平荷重、水平三角形荷重、
水平地盤反力、自重等對各種力的影響。

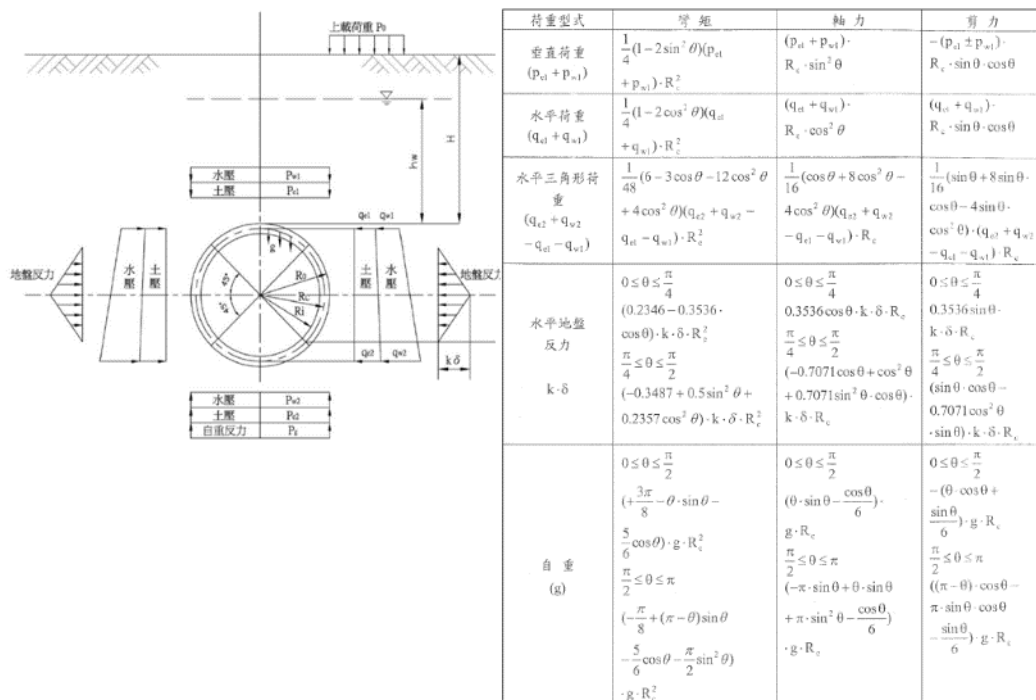


圖 16 載重及計算式示意圖

2. 地震之應變應力分析

設計時即須考慮各種地震之影響，如地震引發之縱向、扭曲應變、開挖及地震引致之應變、土壤鬆動及地震扭曲引致之應變、地震引致之扭曲應變等，此部分計算可參考參考自來水設施耐震設計指南及解說。

3. 施工時的負荷分析

(1). 需要考慮潛盾機的千斤頂推力計算

因潛盾機前進是以千斤頂之方式作用於環片上，須確保環片所

受壓力不超過混凝土容許壓應力。

(2). 吊掛荷重及堆疊荷重檢驗

在預鑄場地中儲存及移動常須吊掛與堆疊等，如圖 17，因此需考慮相對應之變形與應力。

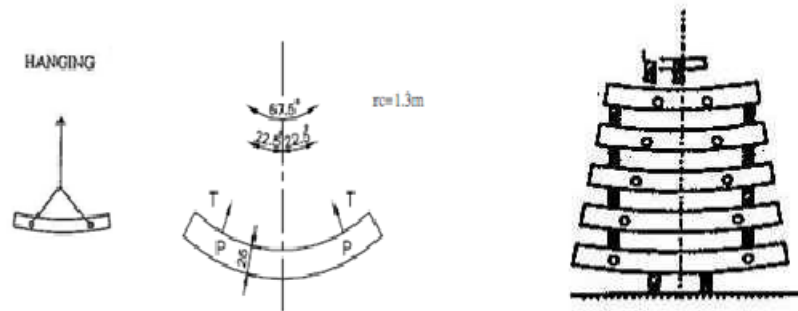


圖 17 吊掛與堆疊示意圖

(3). 背填灌漿壓力

隧道襯砌組立完成後，為填滿盾尾間隙，將由環片灌漿孔對盾尾間隙灌漿，以填滿之間的孔隙因此必須計算其環繞壓力。

(4). 環片之螺栓及接合補強筋力量

確認螺栓所受拉力不超過設計強度，以及螺栓對混凝土之壓力剪力不會造成破壞。

(5). 配筋設計

一般為將前面計算出之應力帶入程式輔助計算，得出所用最少主筋規格數量及保護層厚度等資訊，相關配筋圖如圖 18。

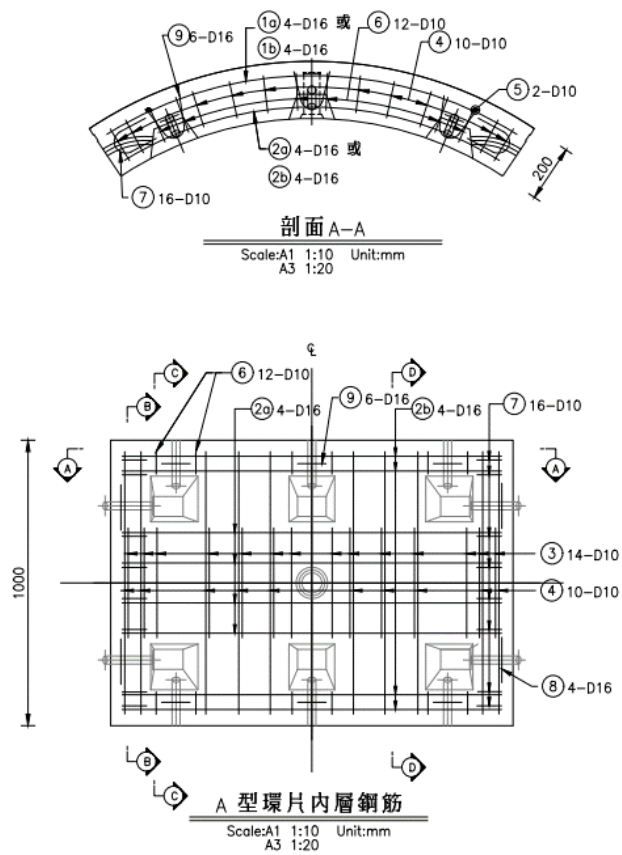


圖 18 配筋範例圖

2.2 環片的製造

參考[6]，環片的製造分為混凝土產製、鋼筋籠製作、環片鑄造、環片塗裝、成品堆置、驗證及出貨等幾個步驟，如流程圖 19。

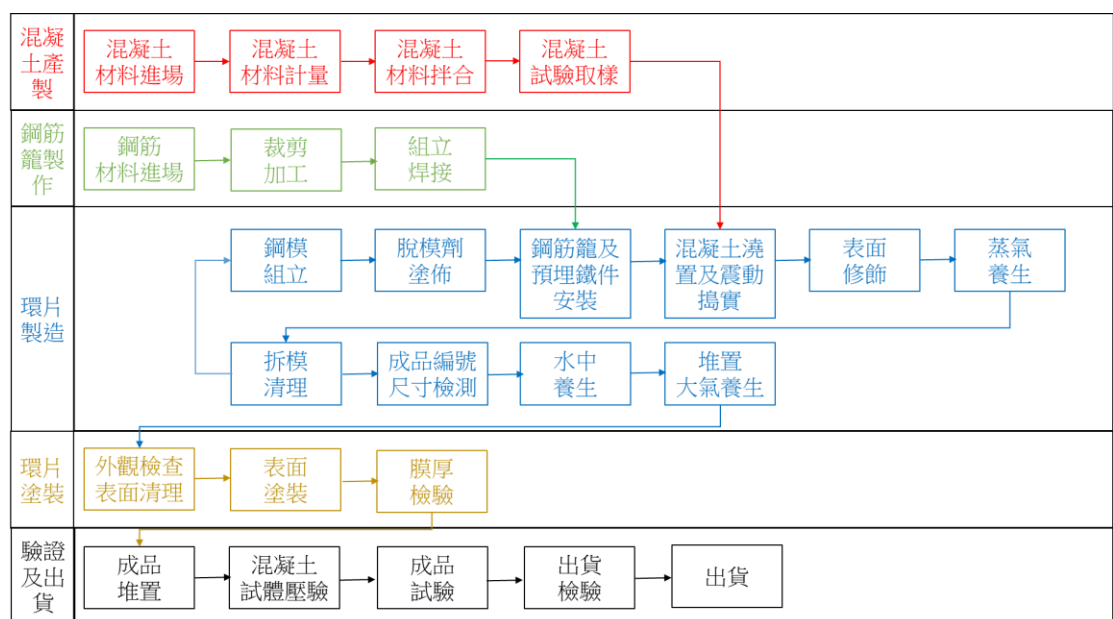


圖 19 環片生產流程圖[6]

一般混凝土依照捷運叢書選用需要符合公共工程委員會施工網要規範第 03010 章「卜特蘭水泥混凝土」及 03054 章「水泥混凝土構造物」規定，一般使用高強度混凝土 420kgf/cm³ 之等級，配比依照各材料之設計或經驗，但最終仍須符合規範要求強度，另依照捷運叢書，粒料之最大粒徑及坍度額外規定，粒料之最大粒徑為 19mm 及坍度為 2.5~5.0cm。

模板的部分，一般都須符合第 03110 章場鑄結構混凝土用模板及 CNS7334 鋼筋混凝土用金屬模板的規定。

2.2.1 混凝土產製

一、拌合設備一般有

(一) 自動計量器:拌合之量須以電腦控制。

(二) 自動拌合機:具有全自動精密控制設備，所有讀數皆以電腦控制。

(三) 散裝水泥桶:用於暫時儲存水泥粒料，但應不超過 6 個月。

二、拌合以自動生產為佳，水泥材料量控制在正負 1%，粗細骨材控制在正負 2%，減水劑控制在正負 3%，其他注意事項依照公共工程委員會施工綱要規範第 03050 章 混凝土基本材料及施工一般要求及各拌合廠之經驗與規定，拌合時間依據[6]為所有材料加入時起算 60 秒後傾出，並記錄每盤實際添加之材料用量，可依照混凝土的情況改變時間，但不超過 180 秒，相關拌合設備如圖 20 至圖 23。

三.進料一般於拌合設備完成後，再以運輸台車運送至澆斗，如圖 24。



圖 20 拌合設備外觀



圖 21 內部進料桶



圖 22 自動控制室



圖 23 混合室



圖 24 進料之運輸台車口

四、拌合之後材料取樣

每批次進料時，皆會先行製作水泥柱試體，並如同本體的製程會進行蒸氣、水中養生及大氣養生等階段，與生產之環片有相同之製程及強度，以確保進行混凝土強度試驗有相同之強度，如圖 25 到圖 27。



圖 25 剛澆鑄試體圖



圖 26 水中養生之試體

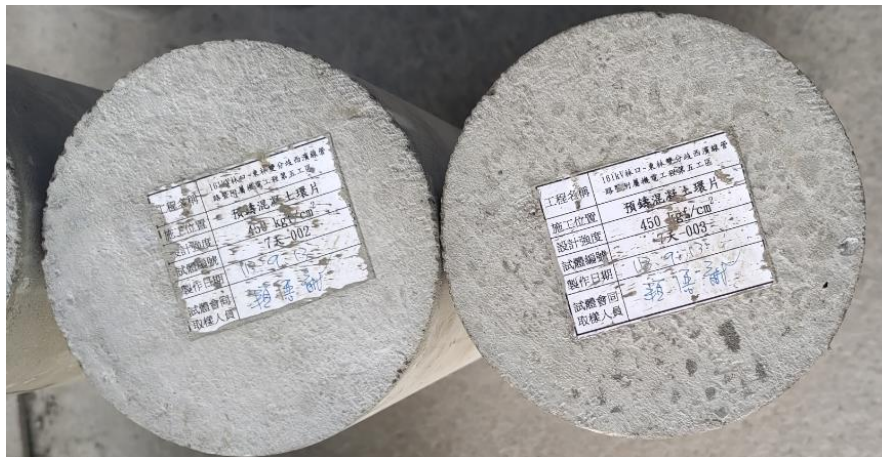


圖 27 養生之圓柱試體

2.2.2 鋼筋籠之製作

一、材料

一般鋼筋之規定依照公共工程委員會施工綱要規範第第 03210 章「鋼筋」相關規定，另須符合 CNS560 鋼筋混凝土用鋼筋中的規定。

二、加工及焊接

鋼筋進料需裁切加工，然後於組立架上進行組裝、焊接，應確保固定及焊接穩固，並注意主筋箍筋施工誤差，主要參考營建署建築物混凝土結構設計規範-5.5 鋼筋加工，相關示意圖如圖 28、圖 29。



圖 28 鋼筋加工



圖 29 鋼筋組立

2.2.3 環片生產

一、生產前準備

鋼筋籠及其他配件放入模具如圖 30、圖 31。



圖 30 模組組立圖



圖 31 模具蓋板

二、振動台

以天車進料至模具內，為了讓混凝土均勻澆置於模具內，需要振動台以設定之頻率(一般為 3000 或 7000 次/分)及時間進行震動，如果時間設定過少將導致孔洞影響強度，過長於表面將有缺陷產

生，一般視環片大小與混凝土坍度依經驗調整振動時間在 6-10 分鐘左右，示意圖如圖 32。



圖 32 進料及振動

三、蒸氣養護

(一) 當澆置混凝土完成後即靜置 2-4 小時等待凝固後如圖 33，再進行下一步蒸氣養護。

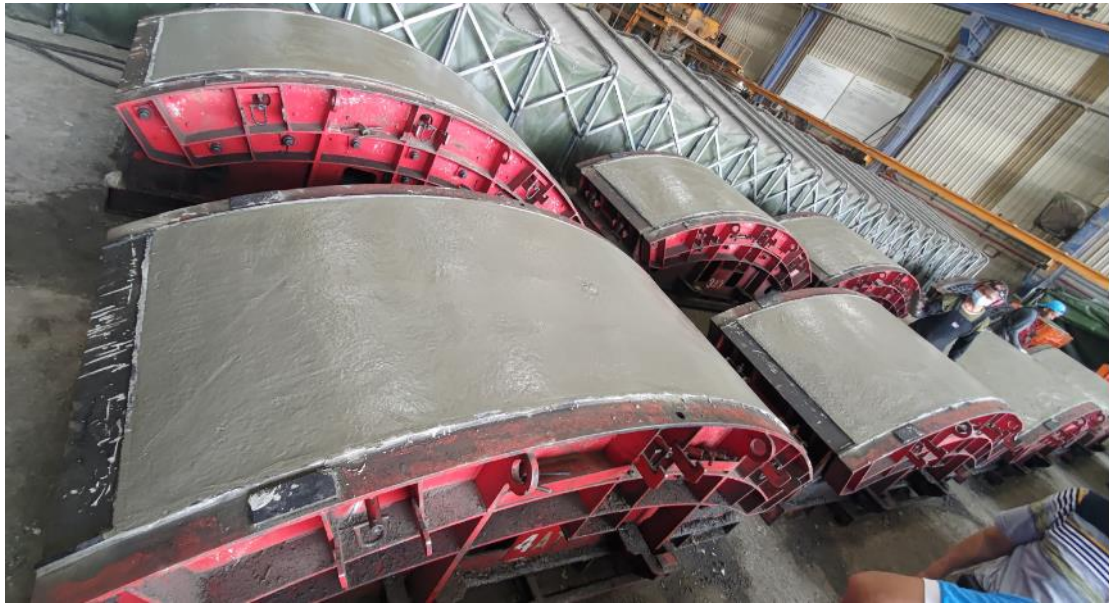


圖 33 等待進蒸氣養護

(二)當凝固後移至蒸氣養護設備中，如圖 34，其自動控制設備依照電腦自動化進行環境參數的改變，而溫度變化量應依照公共工程委員會施工綱要規範第 03390 章 混凝土養護規定執行前置、昇溫、高溫、降溫、冷卻期各階段之溫度控制，此階段一般約為 1 天左右。



圖 34 自動控制設備

四、水中養生

脫模完成後繼續靜置於水中進行養生，一般時間為 3-4 天，如

圖 34。

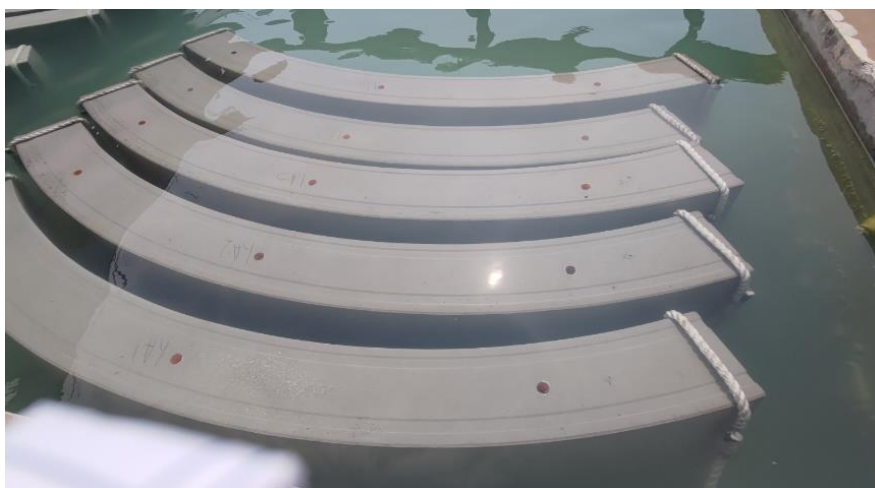


圖 35 水中養生

五、堆置大氣養生

放置於大氣中持續進行養護，以使混凝土的強度提高，示意圖

如圖 36。

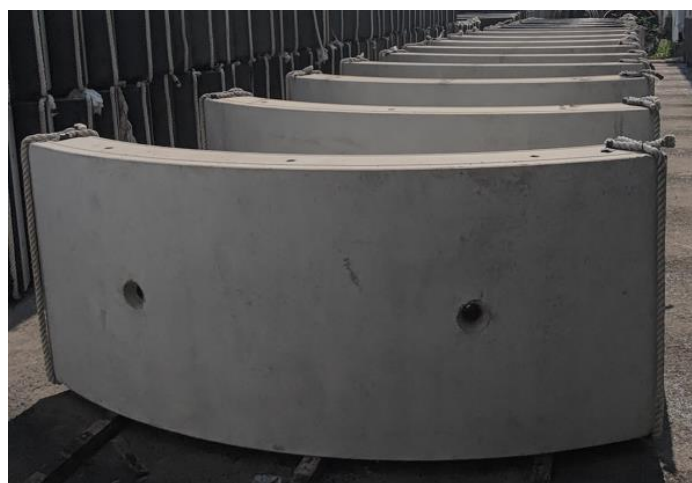


圖 36 堆置大氣養生

2.2.4 表面塗裝

表面進行清潔後進行塗裝防水層，塗裝方式使用自動化噴塗雖然速度較快但會造成大量汙染且投資較高，故大部分仍採用人工作業，膜厚一般大於 $300\mu\text{m}$ ，示意圖如圖 37。



圖 37 塗裝後堆置

2.2.5 環片的檢驗

環片檢驗方式常見有：

(1). 組裝測試

依據文獻[7]，量產後須進行組裝後量測直徑、周向及組合寬度等尺寸，如圖 38。



圖 38 組裝試驗

(2). 單體抗彎試驗

主要驗證生產之環片是否可達環片斷面之理論抗彎矩值所對應之目標載重，試驗方式如圖 39。

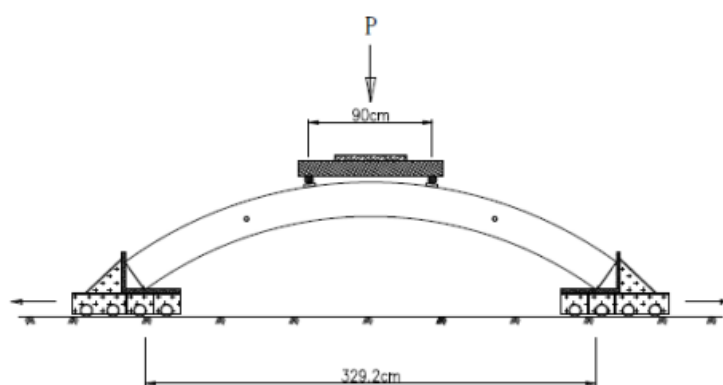


圖 39 單體抗彎試驗

(3). 單體推力測試

主要係驗證預計作用於潛盾機內之千斤頂推力不大於產生環片裂紋之載重，試驗方式為逐步加載重量至環片上，發現環片產生裂紋記載初次載重，在試驗至破壞為止，其發生裂紋之載重必須大於千斤頂之推力，如圖 40[6]。

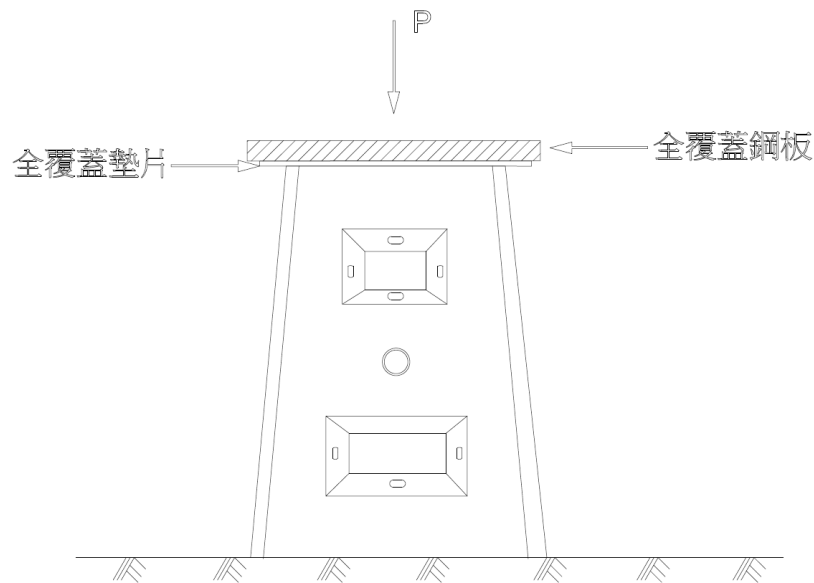


圖 40 抗推試驗

(4). 套梢工作載重試驗及灌漿管拉拔試驗

在環片組裝時，不允許發生裂縫，所以針對其套梢及灌漿管周邊必須測試不得於工作載重下發生裂紋，如圖 41 到圖 42。

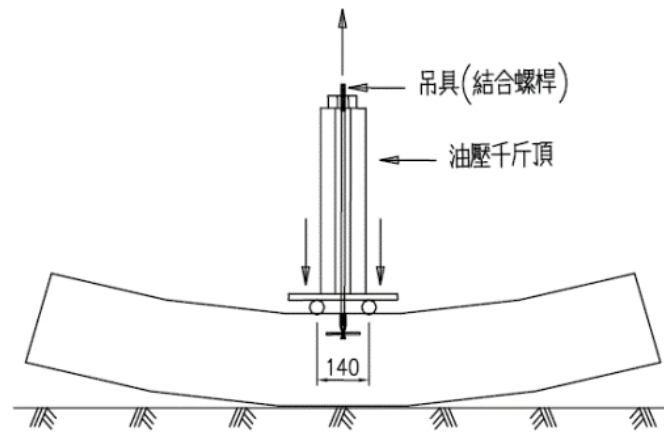


圖 41 套梢工作載重試驗方式[7]

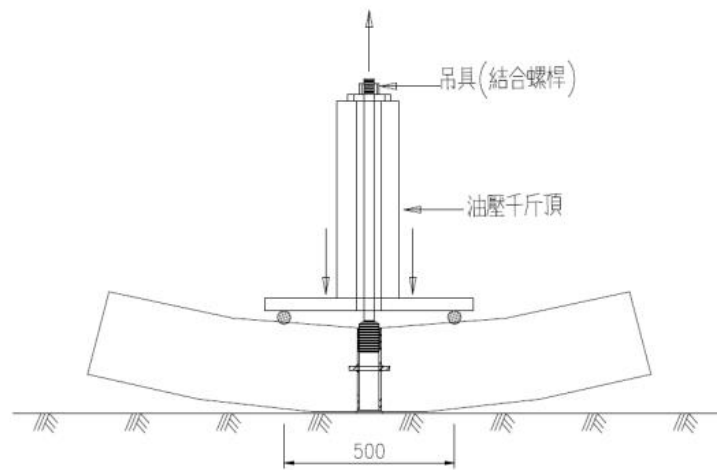


圖 42 灌漿管拉拔試驗[7]

2.4 潛盾隧道工程案例介紹

2.4.1 捷運潛盾工程

台北、桃園、高雄等各處捷運皆大量使用潛盾挖掘隧道，台北捷運範例如圖 43，為萬大中和線，施工中如圖 44，可看到潛盾機及組裝中之環片。



圖 43 捷運萬大線[8]



圖 44 捷運萬大線施工圖[8]

這幾年桃園捷運也正在進行施工，如圖 45，一直到 113 年 2 月已貫通四條隧道，隧道鑽掘工作也持續推動中，預定 115 年第一階段通車至藝文特區[9]。



圖 45 桃園捷運圖[9]

2.4.2 捷運工程環片範例

台北都會區捷運系統-萬大-中和-樹林線(第一期工程)CQ850A 區段標工程，其為台北市政府捷運工程局第二區工程處土木第四工務所負責，設計環片如圖 46、圖 47，為厚度 250mm、寬度 1000mm、外徑 6100mm，具有 A、B、C、K 四種型式組合而成，異型環片半徑為 280 公尺及 300 公尺。

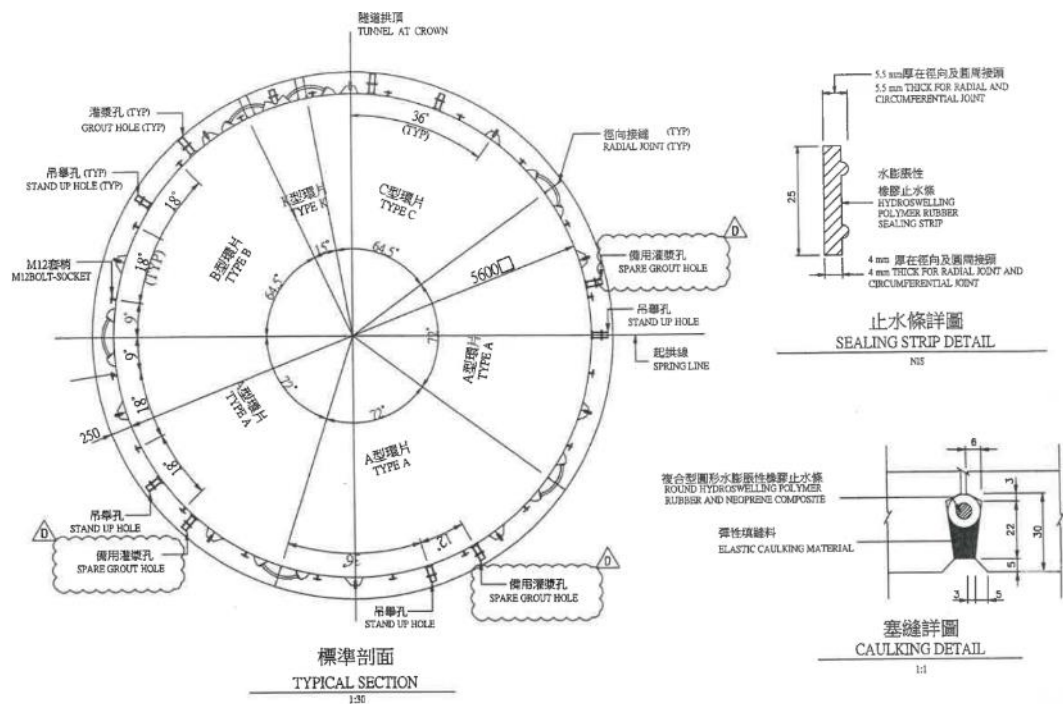


圖 46 捷運範例環片

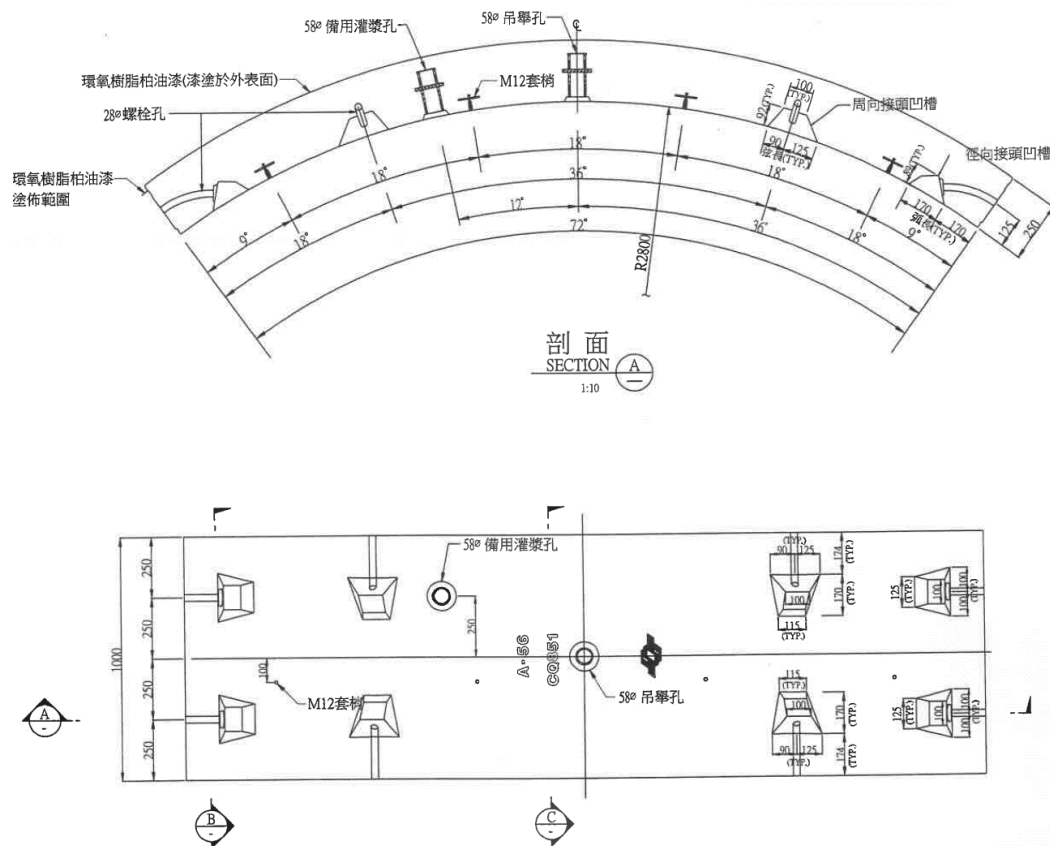


圖 47 捷運 A 型範例

2.4.3 自來水潛盾工程

潛盾工法因造價太高，對自來水公司造成財務負擔，因此主要仍使用推進工法克服施工障礙，但部分路段實在無法克服時，仍須仰賴潛盾工法，目前潛盾工程皆由自來水公司北、中、南工程處辦理，近期辦理工程如表 3，相關施工圖片可參考圖 48 至圖 51。

表 3 自來水公司近期辦理之潛盾工程

	工程名稱	隧道長	環片外徑	內套管徑	工程處
1	「岡山至北嶺加壓站備援幹管工程」	2240m	2800mm	2000mm DIP-U3 管	南
2	三義交流道至三義減壓池 1000m/m 管線接續工程(潛盾)	1,415m	3600mm	1,000mm DIP	中
3	浮洲加壓站至板新場管(七)	880m	3200mm	1800mm DIP-U3 管	北
4	大湳系統送龜山林口複線工程-(管三)	1422m	2800mm	1500mm DIP-U3	北



圖 48 岡山至北嶺加壓站備援幹管工程潛盾機



圖 49 岡山至北嶺加壓站備援幹管工程施工照片



圖 50 三義交流道至三義減壓池 1000m/m 管線接續工程破鏡照片



圖 51 大湳系統送龜山林口複線工程施工照片

2.4.4 自來水管線工程環片案例

設計範例為新北市浮洲加壓站至板新場管(七)潛盾工程，範圍如圖 52 所示，由大漢溪北岸環河路處至南岸鶯歌交流道處，縱斷面可參考圖 53。



圖 52 工程位置

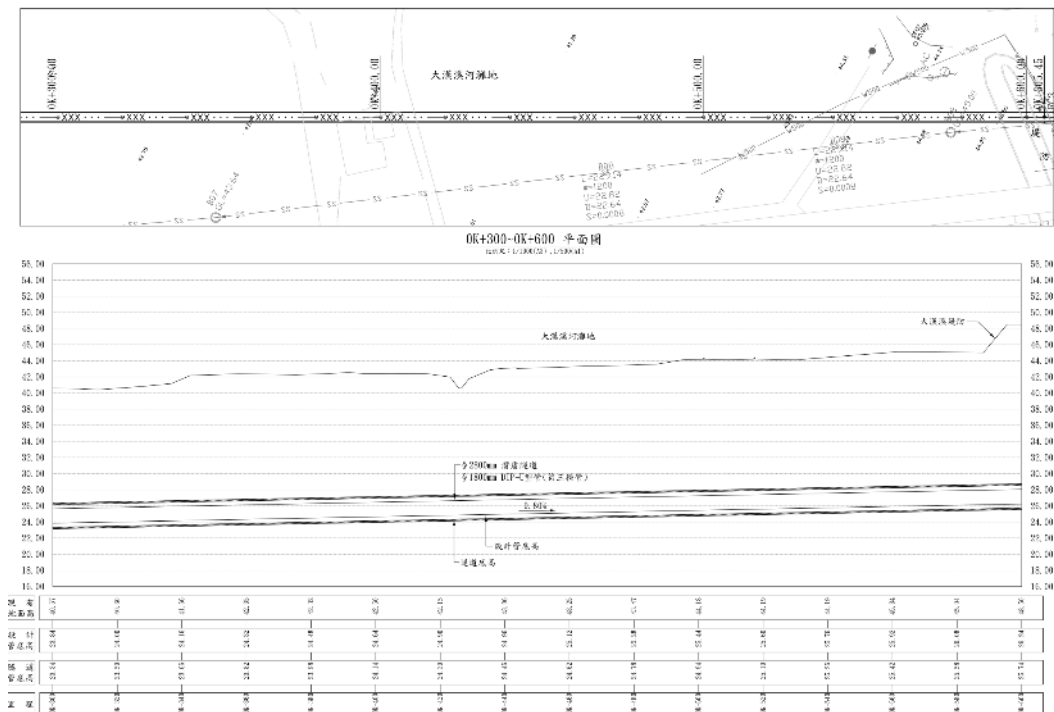


圖 53 縱斷面圖

潛盾隧道間灌漿，如圖 54、圖 55。

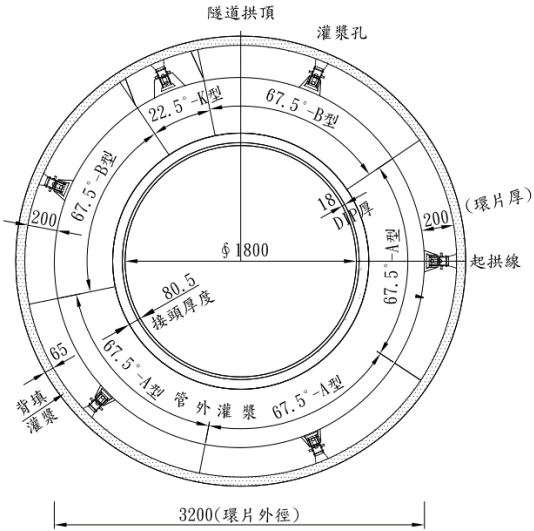


圖 54 潛盾內套 1800mmDIP 管示意圖

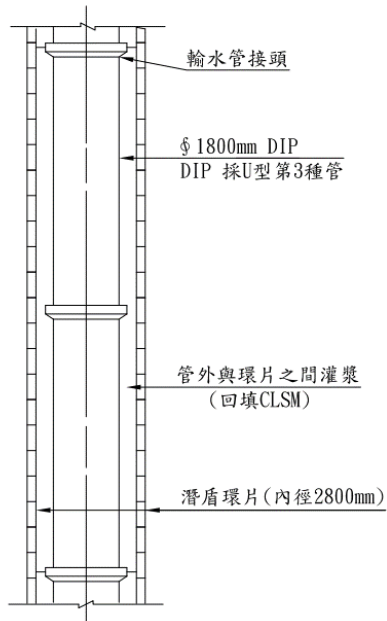


圖 55 DIP 管外灌漿示意圖

Figure 3 illustrates the theoretical layout of異型環片 (異型環片之理論佈設) for a riverbed. The diagram shows a plan view of a riverbed with a grid of rectangular cells. Above the grid, a sequence of letters (S, T, S, T, S, T, S, T, S, T, S, T, S, T, S, T, S, T, S, T, S) is placed above each column. The grid contains circles labeled 'K' and 'T'. A dimension line at the bottom indicates a distance of 120m. A legend on the right defines the symbols: (S) for standard ring, (T) for異形環 (異型環), (K) for環片 (環片), and a square symbol for直角 (直角).

39

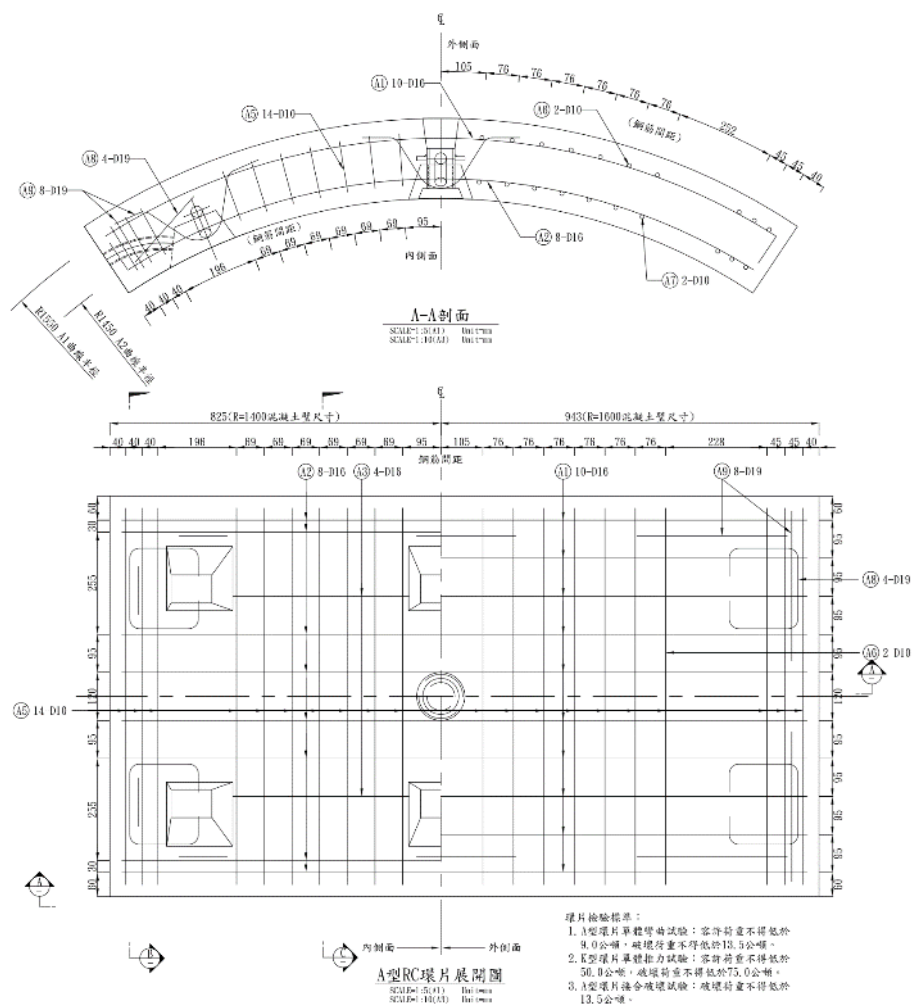


圖 58 A 型環片大小

第三章 鋼纖維混凝土相關法規及作業規範

3.1 鋼纖維混凝土材料性質

3.1.1 鋼纖維混凝土簡介

混凝土為全世界應用最多之建築材料，其具有好的抗壓、易塑、耐火及便宜好取得等特性，但卻為脆性材料，其抗拉能力極差僅為其抗壓的十分之一，所以為避免其結構物開裂及使用性，以往皆會添加入其他材料增加其抗拉能力，如鋼筋等。而近二、三十年來，除了常見的鋼筋外，還有添加纖維鋼筋的方式，並藉由研究發現添加纖維能從基本體質上改變水泥性質，最早為 1960 年初 Romualdi 與 Mandel 成功使用鋼纖維大幅改善混凝土力學性質，才讓鋼纖維混凝土開始於世界上發展。

所謂的鋼纖維混凝土(Steel Fiber Reinforced Concrete，以下簡稱 SFRC)，在混凝土內添加鋼纖維以提供抗拉能力。這些纖維是不連續的離散實體，並且隨機分布整個混凝土基體，即是在普通混凝土中摻入少量低碳鋼或不銹鋼的纖維後形成的一種比較均勻，且多向增強的高性能混凝土，鋼纖維混凝土以其優良的抗拉、抗彎、抗剪、阻裂、耐衝擊、耐疲勞、高韌性(延展性)等性能，Naaman 在 1972 年時即進行添加未經表面處理的鋼製短纖，整理出水泥複合鋼

纖維不同含量下的關係圖如圖 59，該實驗表示即使只添加 3%的鋼纖維，仍然大幅改善過去水泥質材料的脆性破壞型態，對於抗拉能力有很大的提升[10]。

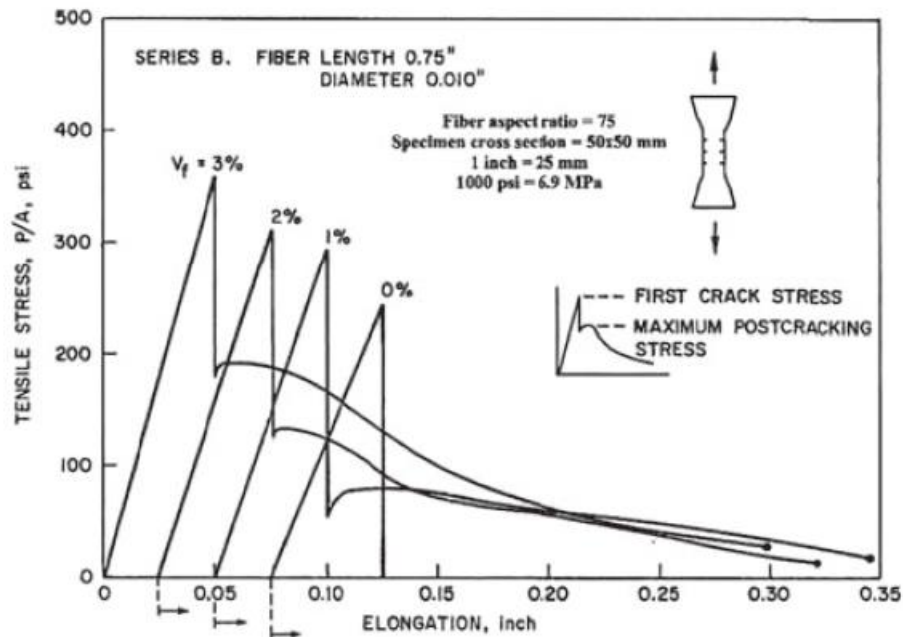


圖 59 Naaman 對於 SFRC 之拉力及變形量之圖

SFRC 元件的結構設計是因纖維增強材料所提供的後裂縫殘餘強度，關於 SFRC 的拉伸行為，可以進行彎曲試驗以確定荷載-撓度關係，藉由此關係通過反算分析可以得出應力裂縫寬度關係，對裂縫開口進行計算。

本研究一案將著重於 SFRC 環片設計，在設計過程中，材料預期的性能的定義是關鍵因素。不同的纖維增強混凝土具有不同的性能，因此以不同的成本提供。此外，必須針對所需的結構應用優化材料的設計，也必須通過考慮不同的因素來評估選擇使用 SFRC 替

代傳統強化的可持續性。

3.1.2 SFRC 常見形狀及纖維效應

以下為常見類型:按照外型分類，如圖 60:

- a.單鉤端型(single hooked-end)
- b.雙鉤端型(double hooked-end)
- c.三鉤端型(triple hooked-end)
- d.捲狀型(rolled)
- e.彎鉤型(plane hooked-end)
- f.波浪型(crimped)

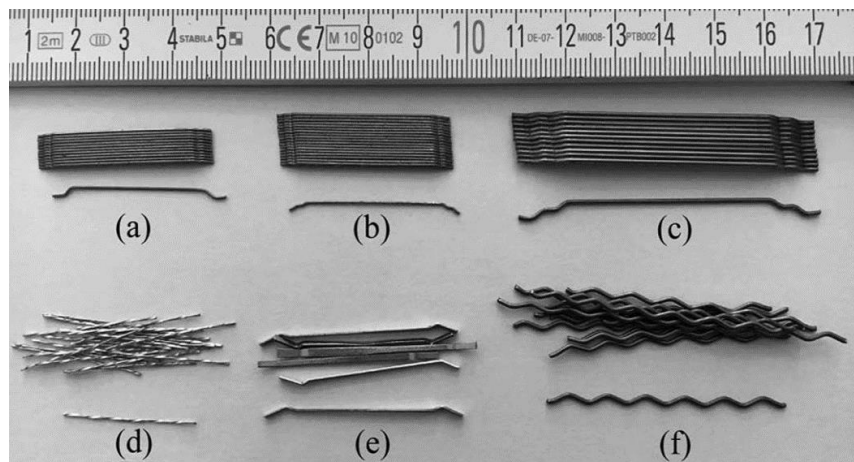


圖 60 鋼纖維形狀分類示意圖[11]

鋼纖維長度範圍通常介於 5mm 到 60mm 區間內，通常而言，纖維長度越長時，其性能會越佳。當纖維長寬比越高時，會使纖維具有高拉拔阻力，但高長寬比也會使得纖維產生成球效應(balling effect)，

導致抗彎強度下降，一般而言，混凝土所添加之鋼纖維長寬比約為 20 至 100 之間。保持高拉拔阻力的同時還要降低長寬比可以採取鋼纖維兩端呈現放大或彎鉤狀以及使纖維整體彎曲呈現波浪狀來使鋼纖維表面粗糙。

鋼纖維可以降低混凝土的壓縮脆性，特別是在高強度或超高強度混凝土中，當鋼纖維添加到混凝土中時，混凝土的彈性模數會略有下降，因纖維引入的微小空隙。而對於整體壓縮反應會增加延展性，如圖 61。

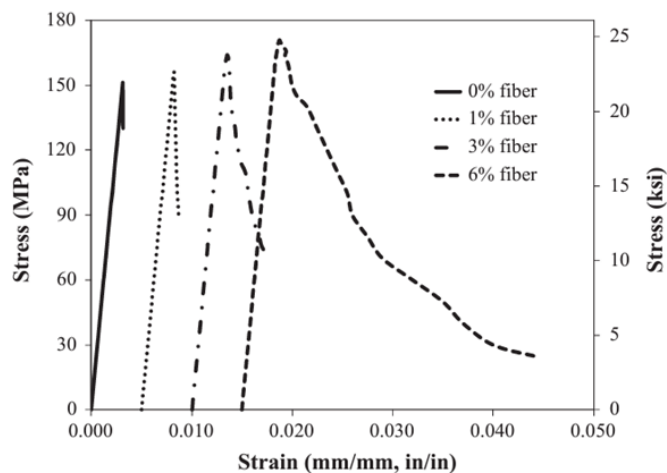


圖 61 不同劑量的鋼纖維應力-應變圖[12]

3.1.3 SFRC 的拉伸行為

一般混凝土加入鋼筋等各種材料是為了提高其延展性和拉伸性能，而添加鋼纖維材料的拉伸反應可分為三個階段

1. 彈性階段

彈性階段特徵為裂紋形成前的反應。複合材料的彈性模數和極限拉伸強度可透過式(2-1)、(2-2)得知:

$$E_c = \eta_0 \eta_l E_f V_f + E_m V_m \quad \text{式(2-1)}$$

$$f_c = f_m \left[(1 - V_f) + \eta_0 \eta_l \left(\frac{V_f E_f}{E_m} \right) \right] \quad \text{式(2-2)}$$

η_0 、 η_l :鋼纖維取向和長度有效係數

E_f 和 E_m 分別為鋼纖維和混凝土彈性模數

V_f 和 V_m 分別為鋼纖維和混凝土的體積

f_m 為混凝土的拉伸強度

2. 微裂縫階段

該階段特徵為當超過混凝土的拉伸強度及形成第一道微小裂痕時，在裂縫處混凝土承受的荷重移轉到鋼纖維材料上，與裂縫相交會的纖維透過裂縫橋接機制抵抗額外的裂縫開口。

3. 拉拔宏觀裂縫階段

此階段是鋼纖維增強複合材料拉伸反應的最後階段，透過破壞形式，可觀察到的反應有延性和脆性，前者為拉拔控制，後者為斷裂控制。

關於拉伸行為有各種不同的試驗，材料性能的標稱值可通過根據 EN14651 對結構元件進行三點彎曲試驗，如圖 62。

根據 F-CMOD 的關係，變形一般以裂縫開口位移(CMOD)參數

$f_{R,j}$ 表示殘餘彎曲拉伸強度，而 SFRC 的斷裂行為定義了單軸拉伸的應力開裂定律，如式(2)所示:

$$f_{R,j} = \frac{3F_j l}{2bh_{sp}^2} \quad \text{式(2)}$$

$f_{R,j}$:對應於 $CMOD_j$, $[j = 1, 2, 3, 4]$ 。殘餘彎曲拉伸強度 (MPa)

F_j :對應於 $CMOD = CMOD_j$ 的負載 (N)

l :跨度 (mm)

b :樣品寬度 (mm)

h_{sp} :切口尖端和樣品頂部之間的距離(125mm) (mm)

有關 F_1 、 F_2 等等負載在力-裂縫曲線上的定義，亦請參考圖 63。

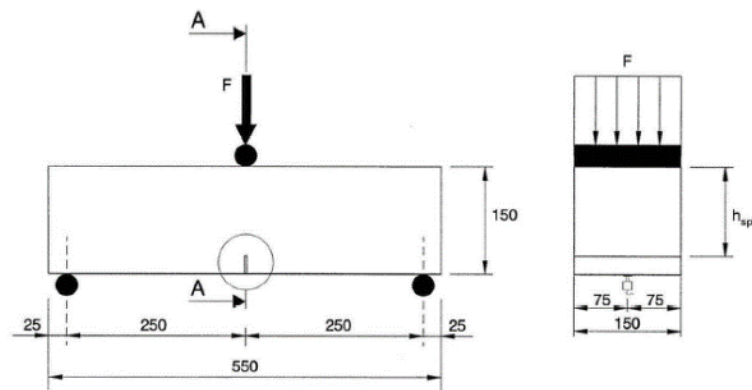


圖 62 試驗裝置示意圖(EN14651)

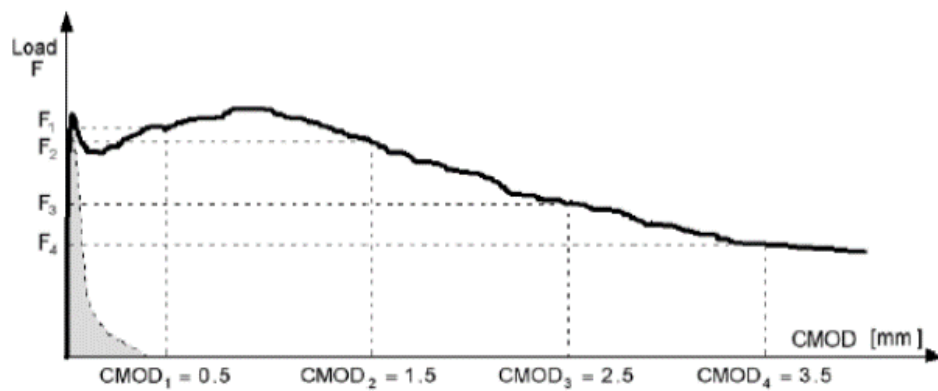


圖 63 試驗裝置與負載-裂縫曲線之示意圖

一般鋼筋混凝土受拉且到達抗拉強度後，其變形增量會突然上升直到鋼筋完全被作用至斷裂，因此一般鋼筋混凝土通常會形成一條寬度較寬之主裂縫如圖 64 左邊。而鋼纖維混凝土到達抗拉強度後，其變形量並不會瞬間增加而是緩慢且持續增加，造成此現象是由於鋼纖維被激活因此不斷的從混凝土中被拉出，且鋼纖維平均分布於混凝土當中，會使鋼纖維變形量緩慢增加並造成大量均勻分布之細微裂縫，如圖 64 右邊，因此會比一般鋼筋混凝土較晚出現貫穿整段結構之裂縫，漏水的風險也會隨之降低，鋼纖維混凝土環片便可保持隧道之水密性。

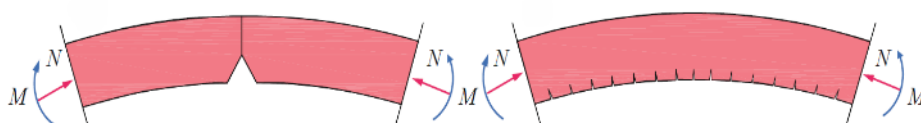


圖 64 鋼筋混凝土與鋼纖維混凝土開裂方式之不同[13]

3.1.4 SFRC 環片之性質

在使用潛盾機推進隧道的過程中，經常會遭遇到大量的地下水，地下水所含有硫酸鹽會產生化學腐蝕作用，而傳統預鑄鋼筋混凝土環片最常見的劣化形式即為遇水導致鋼筋腐蝕。而 SFRC 則具有高抗腐蝕性，由於鋼纖維在混凝土當中是分散狀態，鋼纖維之間不存在接觸，且由於長度較小，鋼纖維表面呈現出較小的陰極表

面，會限制腐蝕電流的產生進而避免產生腐蝕產物。除此之外，較小的長度導致鋼纖維以最小的擾動進入混凝土當中，鋼纖維會和混凝土緊密的結合，因此不會為腐蝕劑留下空隙或是孔洞使其傳播。

一般而言，預鑄鋼筋混凝土環片使用壽命為 100 年，然而瑞士科布倫茨鐵路隧道、美國密西根東北自來水隧道等案例都在未達到其使用壽命之前就出現了過早結構惡化的情況，其主要原因為地下水所含之氯離子引起腐蝕。當鋼筋混凝土環片以及鋼纖維混凝土環片暴露於氯離子環境下時，最初由於水的吸附以及鹽晶體填充至孔隙中，混凝土質量增加。當過一段時間後，由於鈣離子的浸出和膨脹性氯鋁酸鹽的形成，導致混凝土降解，且隨著氯離子濃度和暴露時間的增加，鋼筋的質量損失增加，因此觀察到鋼筋混凝土環片的性能大幅下降。不過在氯離子暴露下，鋼纖維混凝土環片的性能反而沒有降低，在某些情況下，由於鋼纖維限制了氯鋁酸鹽晶體的膨脹，隨著暴露時間的延長，其彎曲強度有所提高，也具備自我癒合之能力。

和傳統鋼筋混凝土相比，鋼纖維混凝土在承受重大應力時，由於鋼纖維和混凝土平均且緊密結合，因此裂縫會呈現均勻分布，具有更佳的裂紋控制特性。即便在這些裂縫當中的鋼纖維被完全腐

蝕，其餘鋼纖維還是和混凝土緊密連結，保持結構的穩定性且增加鋼纖維混凝土之韌性，故不會導致混凝土分裂。

由於金屬材料的導熱性，當遇到火或高溫時，鋼筋和鋼纖維都可能會導致混凝土快速爆裂，雖然此現象不可避免，但鋼纖維混凝土和傳統混凝土相比爆裂幅度相對較小，且可以和傳統混凝土之處理方式相同在成份當中添加聚丙烯纖維降低破碎風險。

3.2 國內相關法規與規範

國內建築方面，建築物混凝土結構設計規範[14]內已有相關之規範，第 26.4.2.1 節中，鋼纖維混凝土規定用於抵抗剪力有特別的要求，包括 26.4.1.6.1(a) 節規定之纖維要求、第 26.4.2.2(i) 節規定之最低用量要求、第 26.12.7.1(a) 節規定之允收準則且纖維通常規定纖維類型、纖維長度、長徑比和用量(ACI 544.3R)，「CNS 12892 纖維混凝土用鋼纖維」內亦有規範纖維類型、纖維長度，而規範也述及其使用鋼纖維提供剪力強度之規定，並不適用於非結構性應用。

另目前國內隧道並無 SFRC 環片等相關規範，僅有鋼纖維噴凝土(行政院公共工程委員會施工規範第 03375 章)以及隧道襯砌環片(行政院公共工程委員會施工規範第 02427 章)之規範。

依照鋼纖維噴凝土施工規範要求鋼纖維須符合 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，一般而言鋼纖維之抗拉強度應大於 $4,200\text{kgf/cm}^2$ 。配比設計及試驗應符合粒料總重量與水泥重量比不得超過 5:1 且每立方公尺噴凝土之鋼纖維摻入量不得少於 60kg。而依照隧道襯砌環片規範規定，預鑄混凝土襯砌環片之混凝土設計強度為 350kgf/cm^2 以上，且符合第 03050 章「混凝土基本材料及施工一般要求」及第 03310 章「結構用混凝土」之規定，ASTM A820-04。

3.3 國外相關法規與規範

3.3.1 美國混凝土學會(American Concrete Institute)

美國混凝土學會(American Concrete Institute)目前針對鋼纖維混凝土環片設計及施工制定其規範 Report on Design and Construction of Fiber-Reinforced Precast Concrete Tunnel Segments(ACI-544.7R-16)[15]。

此規範規定設計鋼纖維混凝土環片時須採用極限狀態設計法(LRFD)來進行設計。採極限狀態設計法進行設計時，必須考慮不同情境下的載重條件與載重組合，以環片設計為例，需要考慮運輸、儲存、吊裝、安裝時千斤頂推力、背填灌漿、二次背填灌漿、長短

期土水壓荷重、縱向節點爆裂力(螺栓檢核)、扭曲等條件下的不同載重組合 (Load Case)，如表 4：U 為要求強度、w 為自重、F 為位於上方的節段的自重、J 是 TBM 頂升力、G 為灌漿壓力、 WA_p 為地下水壓力、EV 是垂直的地面壓力、EH 為水平地面壓力、ES 為附加負載、 $M_{distortion}$ 為額外的失真係數。為考慮載重的可變性以及結構材料屬性以達到可施工性、安全性及適用性的目標。然而當環片處於彎曲或拉伸狀態時，應使用最大極限狀態(ULS)下的非彈性彎曲阻力。

表 4 所需強度及控制載重的因子負荷表[15]

Load case	Required strength(U)
Case 1: stripping	$U = 1.4w$
Case 2: storage	$U = 1.4(w + F)$
Case 3: transportation	$U = 1.4(w + F)$
Case 4: handling	$U = 1.4w$
Case 5: thrust jack forces	$U = 1.2J$
Case 6: tail skin grouting	$U = 1.25(w + G)$
Case 7: secondary grouting	$U = 1.25(w + G)$
Case 8: earth pressure and groundwater load	$U = 1.25(w + WA_p) + .135(EH + EV + 1.5ES)$
Case 9: longitudinal joint bursting	$U = 1.25(w + WA_p) + 1.35(EH + EV + 1.5ES)$
Case 10: additional distortion	$U = 1.4M_{distortion}$

3.3.2 國際隧道與地下空間協會(ITA)

國際隧道與地下空間協會(International Tunnelling and Underground Space Association)制定預鑄纖維增強混凝土環片指南(ITAtech Guidance for Precast Fibre Reinforced Concrete Segments)來針對纖維增強混凝土環片的規格和測試制定流程。

該指南要求鋼纖維混凝土環片須達到兩條件下才可用纖維完全代替鋼筋，其一為正常使用極限狀態(SLS)設計(裂縫開口位移 $CMOD=0.5mm$)的抗壓強度必須大於比例極限處彎曲阻力(第一次裂紋)的 0.4 倍；其二為最大極限狀態(ULS)設計(裂縫開口位移 $CMOD=2.5mm$)的抗壓強度須大於用於 SLS 設計的應變水平的彎曲阻力的 0.5 倍。在設計時必須考慮環片的彎曲及壓縮能力、確認徑向接頭、各段環片承受衝擊力之能力、運輸及裝載之狀況。

3.3.3 歐洲規範 EN 14651

抗彎強度試驗依據歐洲規範 EN14651(Test method for metallic fibered concrete - Measuring the flexural tensile strength)為現今較多鋼纖維混凝土環片設計依據，像是 SFRC 結構載重與裂縫開口寬度或位移(Crack Mouth Opening Displacement ;簡稱 $CMOD$)關係曲線可得特定位移的殘餘抗彎強度，例如紐西蘭霍布森灣下水道隧道

(Hobsons Bay Sewer Tunnel)以及新加坡捷運中心區線(C933)都是依據 EN 14651 作為標準。

3.3.4 國際結構混凝土聯合委員會 Fib Model Code 2010

依據 Fib Model Code 2010 規定，通過 SFRC 結構的抗彎強度實驗等物理力學性能試驗，來評估 SFRC 結構承載能力（抗彎強度，特定位移時的殘餘拉伸應力等）。

3.3.5 美國混凝土學會 ACI 544 .3R&ACI 544 .1R

美國混凝土學會 ACI 已有針對鋼纖維混凝土(SFRC)做出規範及報告，544.3R 內容包含鋼纖維混凝土材料、配比設計、鋼筋配合、配料、拌合、澆築、飾面、運送及養護等章節，有較為詳細之規定，台灣亦有相關之翻譯[16]；544.1R 則有鋼纖維詳盡特性介紹，如物理特性、理論模型、設計考慮點及應用介紹等，本文節錄此兩份規範前 2 頁介紹附於附錄 E 中。

第四章 鋼纖維混凝土相關工程案例介紹

4.1 一般鋼纖維混凝土應用案例

4.1.1 鋼纖維噴凝土應用

國內隧道最近的工程技術逐漸改進，噴凝土技術亦是其關鍵技術，鋼纖維噴凝土近幾年來已幾乎全部取代傳統的鋼線網噴凝土支撐的方式。

台灣世曦工程顧問公司陳明宏等人[17]，以蘇花改-谷風隧道為範例，當時台灣東部地區台9線蘇花公路，因受地形、地質影響，每逢颱風豪雨常造成坍方中斷，故交通部公路總局推動「台9線蘇花公路山區路段改善計畫(以下簡稱蘇花改)」，其以其中蘇花改谷風隧道(B3標)為例，探討隧道鋼纖維噴凝土材料管理及施工規範、材料試驗項目與標準、材料配比、預拌廠試拌確認及工地試噴、預拌廠料源砂石及鋼纖維混入率管理項目、工地試體噴鑽與驗收以及隧道噴凝土中有關材料規定異同處，結論對於噴凝土施作及配比有詳盡之研究，可供工程界參考。

陳東揚等人[18]，以台灣蘇花公路改線計畫和台中環線計畫為例，進行鋼纖維噴凝土技術研究，該計畫總共有10座隧道，全長31.5公里，鋼纖維噴凝土使用量超過40萬立方公尺，其文也探討

鋼纖維混凝土的主要影響因子，水泥為鋼纖維混凝土主要的構成部分，加其他砂灰、骨材、水、鋼纖維等材料，而噴凝土將另有噴灑系統及速凝劑會同步影響材料特性如圖 65，探討了兩者間的組合及配比設計案例，對於工程界有相當重要的影響。

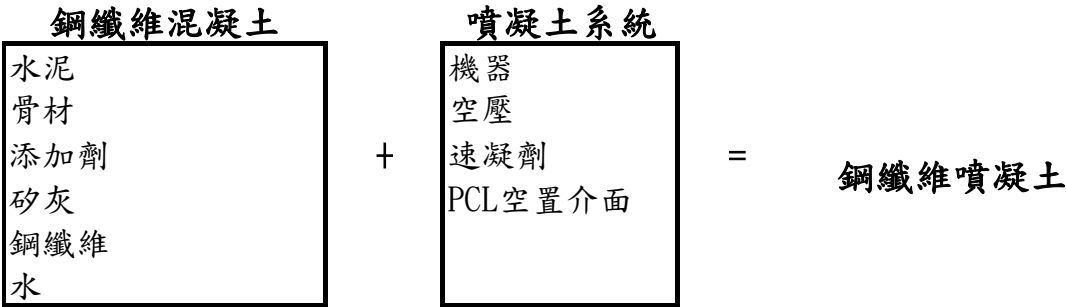


圖 65 噴凝土影響特性

4.1.2 鋼纖維混凝土建築應用

國內鋼纖維混凝土雖然營建署已於建築物混凝土結構設計規範中有所規定，但主要注重於對抗剪力的部分，國內的應用較少，國外則有美國 Cary Kopczynski & Company 建築公司已大量應用於實例中，其最新之 SEATTLE HOUSE(西雅圖之家)為由兩座 45 層樓組成之建築，至 113(2024)年 3 月 16 日為止已建置至 13 樓[19]，如圖 66，橫向系統由採用高強度鋼纖維混凝土連梁（SFRC）的剪力牆組成，其在剪力牆連接梁中使用鋼纖維混凝土 (SFRC) 可簡化施工，且不會影響抗震性能，傳統的範例如圖 67 左邊，簡化後如圖 67 右邊，將非常複雜之對角鋼筋籠簡化為縱向鋼筋配置，並使其鋼筋量

大幅減少[圖 21]。

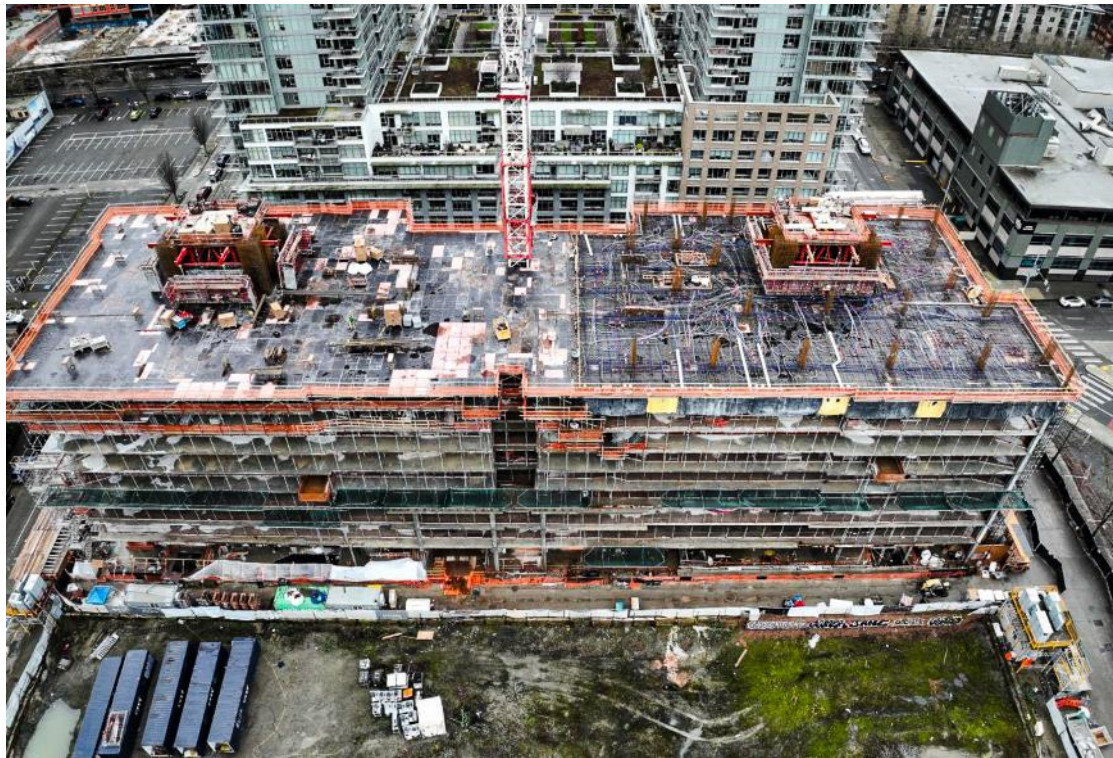


圖 66 建置中之西雅圖之家

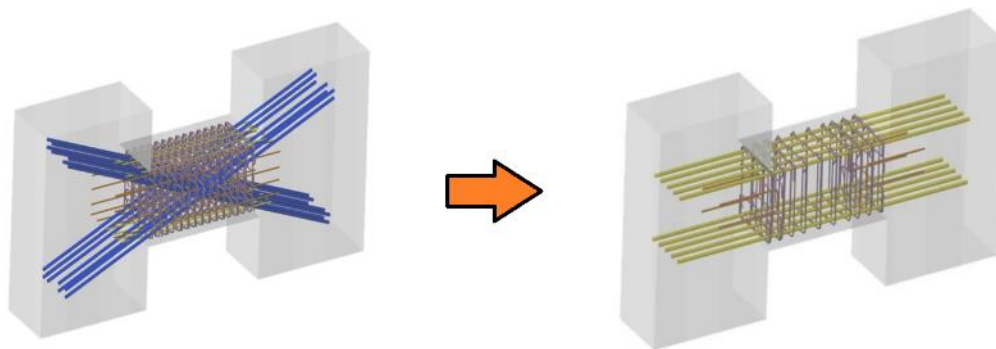


圖 67 傳統連樑與 SFRC 連樑

4.2 鋼纖維混凝土環片工程案例

國內隧道因尚未有有鋼纖維混凝土應用案例，現以蒐集國外資料供參考為主。

4.2.1 英國 Lee Tunnel

Lee Tunnel 是一條位於倫敦的溢流下水道隧道，用於儲存和輸送與雨水混合的污水，全長 6.9km，深度達 75m 以上，是倫敦最深的潛盾隧道，如圖 68。設計團隊考量到若採鋼筋混凝土環片，水壓會使環片發生潛變，且當水注滿隧道時，水壓會讓環片產生箍拉力最終使環片開裂，這會導致污水腐蝕鋼筋，使隧道的耐久性大幅降低。因 SFRC 的抗拉能力、高抗腐蝕性，遂此案例採用鋼纖維混凝土環片，不只可避免環片開裂增加其耐久性外，也減少了 17,000 噸的鋼筋量，降低施工難度和工程花費，此外也減少 6 週的工期，Lee Tunnel 在 2012 年開始進行潛盾機掘進，於 2016 年完工啟用。

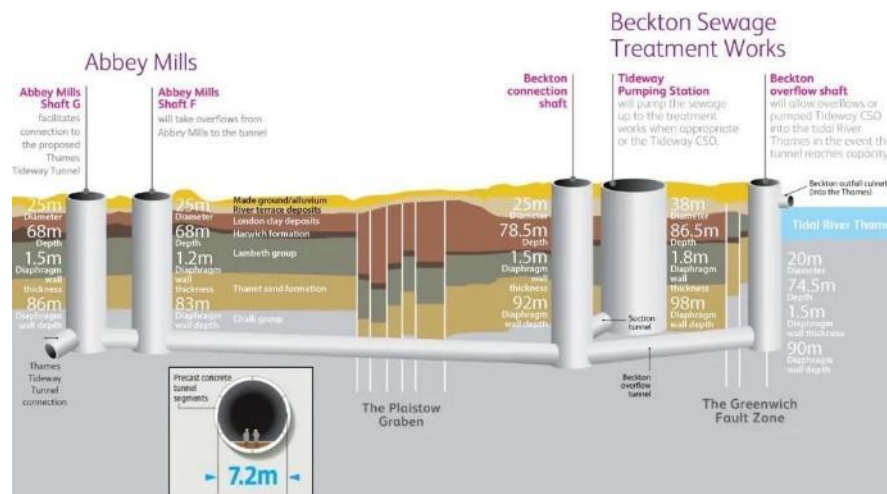


圖 68 Lee Tunnel 隧道設計示意圖[21]

4.2.2 巴黎地鐵 16 號線

巴黎地鐵 16 號線目前正在興建中，全長 27.5km，規劃路線如

圖 69 所示。預計於 2025 年開通營運，為了降低其碳排量及提升耐久性，潛盾隧道採用鋼纖維混凝土環片，相較於混凝土環片，鋼纖維混凝土環片具有較佳的延展性、可減少混凝土剝落的風險、三維方向的補強效果、避免鋼筋腐蝕問題、成本較低、裂縫寬度較小等優勢，由現場檢測的結果，環片裂紋寬度在 1mm 內，絕大部分在 0.2mm 內，每十公里約可減少 11,000 噸的 CO₂ 排放量，目前巴黎政府已同意將鋼纖維混凝土環片擴大使用至其它地鐵路線。



圖 69 巴黎地鐵路線規劃示意圖[21]

4.2.2 日本首都高速中央環狀新宿線

日本首都高速中央環路新宿線中落合盾構（外環），其為在市內環線外建造一條新的環線以分散車輛，將從豐島區千早延伸至新宿區上落合，沿山手大道（國道 6 號線）下面進行挖掘，隧道全長 2018m，開挖外徑 12.02m，是當時施工時全世界最大的採用泥水壓

力盾構法的隧道，如圖 70，並首先在首都快速路提出並採用了耐火鋼纖維高流動混凝土（SFRC）環片，如

圖 71 及圖 72 所示，而圖 72 中左側為傳統的鋼筋配置圖，使用 SFRC 後配筋可以大幅減少如右側所示，主筋亦可減少，甚至相同的彎曲試驗後，鋼纖維混凝土環片只有裂痕但是沒有任何混凝土剝落，因其邊緣及角落仍有鋼纖維可提供固定之力量，展示非常優良之性質。



圖 70 隧道完成圖[22]

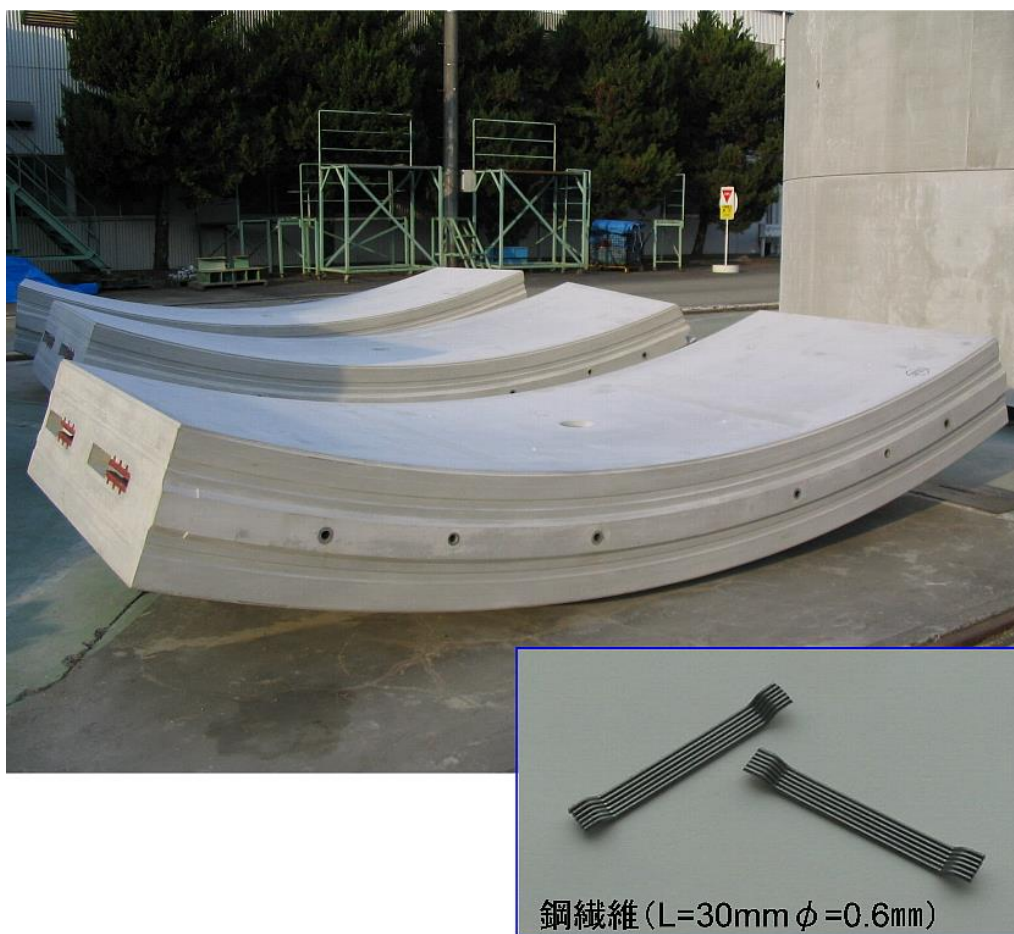


圖 71 SFRC 鋼纖維混凝土環片[22]

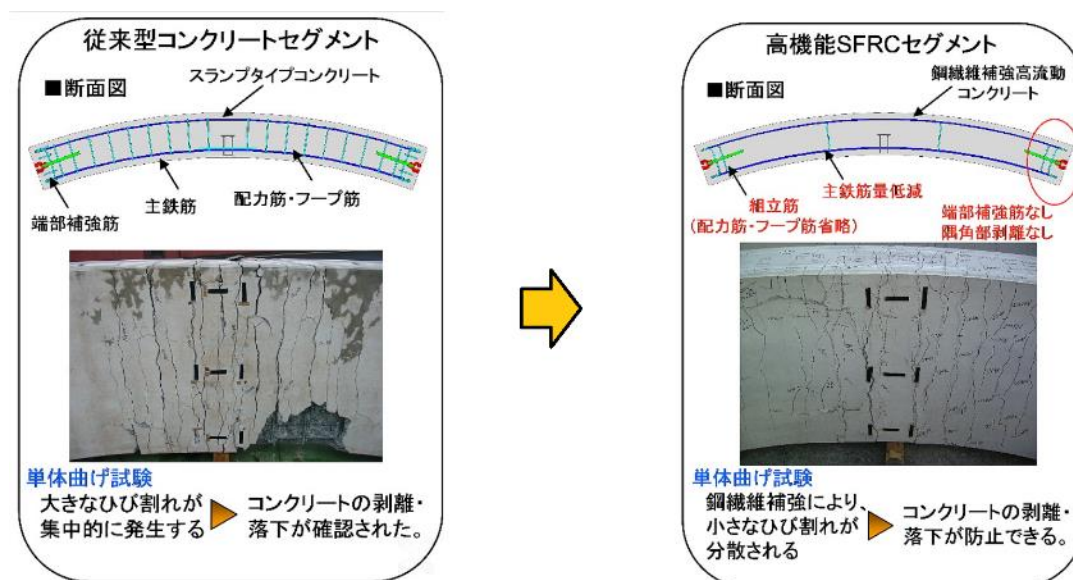


圖 72 鋼筋使用減少説明圖[22]

4.2.3 其他國外鋼纖維隧道案例

參考文獻[26]，其列出國外相當多之案例，引用 2012 年後之部分如表 5，可發現有純使用鋼纖維，也有部分使用鋼筋作為加強。

表 5 SFRC 預鑄環片案例

Tunnel name	Year	Country	Function	Di,ft(m)	h,in. (m)	Di/ h	Steel Fiber Content, lb/yd ³ (kg/m ³)	ReinForcing bars used
Brenner Base Tunnel	2032 建設中	Austria	Railway	18.4 (5.6)	8 (0.2)	28.0	NA (尚未有資料)	Yes
Lee Tunnel Sewer	2016	England	Wastewater	23.6 (7.2)	14 (0.35)	20.6	50.6-76 (30-45)	No
Blue Plains Tunnel	2015	U.S.	Wastewater	23 (7.0)	14 (0.35)	19.7	60 (36)	Yes
San Francisco Central Subway	2014	U.S	Subway	17.8 (5.4)	11 (0.28)	19.4	45 (27)	No
Grosvenor Coal Mine	2014	Australia	Mining	23 (7.0)	14 (0.35)	19.7	60(36)	No
STEP Abu Dhabi Lot T- 02	2014	UAE	Wastewater	20.7 (6.3)	11 (0.28)	22.5	67(40)	Yes
Wehrhahn	2014	Germany	Subway	27.2 (8.3)	12 (0.3)	27.7	67(40)	No
El Alto	2013	Panama	Water Supply	19 (5.8)	14 (0.35)	16.6	67(40)	No
Pando	2012	Panama	Water Supply	9.8 (3.0)	10 (0.25)	12.0	67(40)	No
Monte Lirio	2012	Panama	Water Supply	10.5 (3.2)	10 (0.25)	12.8	67(40)	No

第五章 潛盾工法之鋼纖維混凝土環片設計

5.1 SFRC 環片之設計(FIB Model Code)方法

根據 FIB MC 2010，SFRC 可作為結構的唯一鋼筋，前提是要滿足強度及延展性要求。一般多參照 FIB MC2010 進行 SFRC 結構對於正常使用服務狀態(Serviceability Limit State ,SLS)和承載能力極限狀態(Ultimate Limit State ,ULS)的條件下的設計。

一、組成律

SFRC 的斷裂行為定義了單軸拉伸的應力開裂定律，如圖 73 其分析可以透過彎曲梁的應力應變關係式。彎曲試驗結果可推導出兩個簡化應力開裂組成律:塑性剛性、線性斷裂行為(硬化或軟化)，如圖 74，其中 f_{Fts} 表示適用性殘餘強度，作為適用性開口的後裂縫強度和 f_{Ftu} 表示最終殘餘強度。

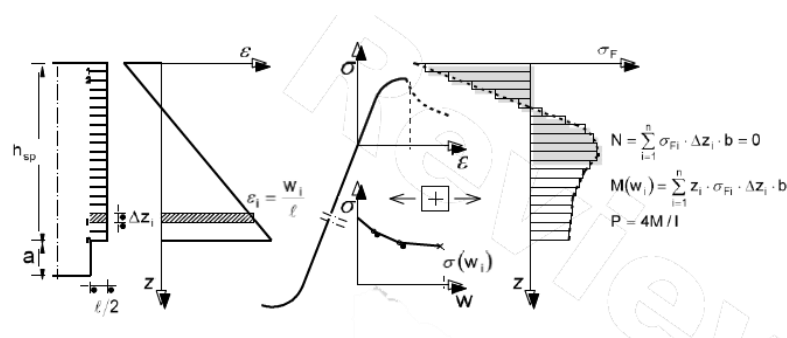


圖 73 彎曲梁反向分析

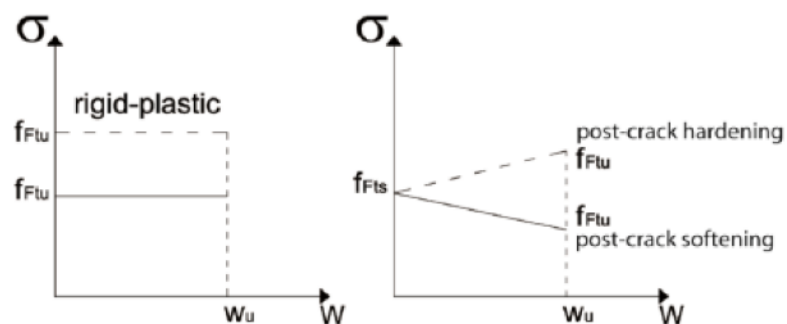


圖 74 應力裂紋開口(實線和虛線表示軟化和硬化後的裂縫行為)

二、分類

為了對 SFRC 的後裂縫強度進行分類，通過給定具特徵彎曲殘餘強度值假設線性彈性行為，運用適用性 f_{R1k} 強度間隔和最終性 f_{R3k} 兩參數，以數字及字母定義其強度間隔及剩餘強度比(f_{R3k}/f_{R1k} 比)。設計方式須指定殘餘強度及 f_{R3k}/f_{R1k} 比以及配置纖維材料。

5.2 鋼纖維環片與傳統 RC 混凝土環片之設計比較

5.2.1 材料性質

通過添加鋼纖維可以克服高強度混凝土(HSC)的低拉伸強度和應變能力的顯著脆性，提高其力學性能，包含壓縮和分裂拉伸強度、斷裂模量及韌性指數。而預鑄鋼纖維混凝土隧道環片設計與分析參考依據為國外規範為主，這些規範提出了 SFRC 的應力裂縫寬度或應力-應變組成律作為線性後裂縫行為或剛性完美塑性行為。

5.2.2 環片設計性質比較

一般混凝土環片設計均以永久性結構物辦理，環片的選擇需依使用性質決定其設計形式，因此，本研究將以自來水潛盾隧道環片為設計對象。

1. 保護層差異

一般鋼筋混凝土為了保護鋼筋避免受到腐蝕，會採取一定厚度之混凝土保護層，然而此保護層某種程度上並未獲得鋼筋加固。當應力集中在鋼筋混凝土邊緣時，容易使混凝土保護層區域發生混凝土剝落等風險。

潛盾機在推進過程時千斤頂產生之壓應力會作用在隧道環片相接縫隙產生剝落或爆裂等現象，如圖 75，或是在環片搬運期間所發

生之碰撞時，SFRC 因為鋼纖維均勻分布在混凝土當中，其混凝土邊緣衝擊抗力增加，因此鋼纖維混凝土可以大幅減少環片報廢可能性。

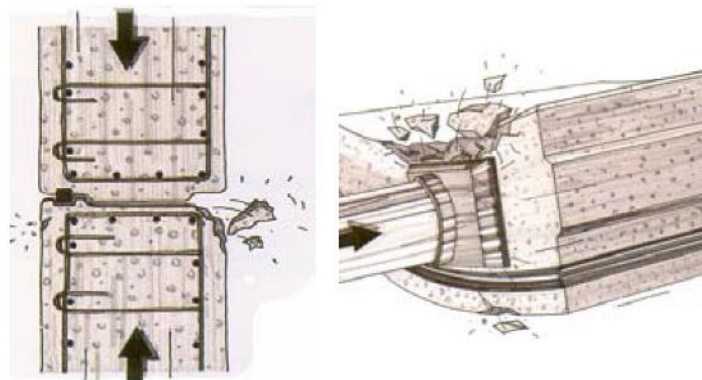


圖 75 鋼筋混凝土預鑄環片剝落效應[24]

2. 應力-應變關係

普通的混凝土抗拉強度較差與應變能力較差因此容易斷裂，而傳統預鑄鋼筋混凝土環片設計藉由分段加強鋼筋等方式來解決此缺陷，但此做法會因其複雜的結構設計以及大量的鋼筋進而導致具有組裝、澆鑄困難，施工性極差，使用鋼纖維混凝土環片預計可以減少鋼筋簡化結構設計，因此可以減少儲存空間以及使用材料還能夠減少勞力使用，另單軸壓縮下正常和高強度混凝土和纖維混凝土主要差異如圖 76，加了纖維之混凝土有延長應變之能力，防止試體瞬間破壞[23]。

鋼纖維混凝土(SFRC)雖具有提升混凝土的抗拉能力、高抗腐蝕

性等優點，但 SFRC 的缺點為抗彎曲能力較一般鋼筋混凝土差。潛盾機所挖掘出的隧道大多呈現圓形，其彎矩較低，因此鋼纖維混凝土可能較為適合製作潛盾襯砌環片之材料。

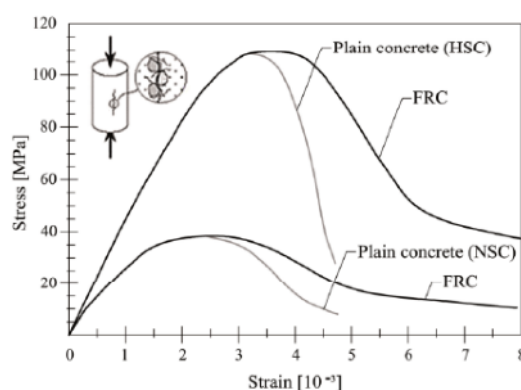


圖 76 單軸壓縮下正常和高強度混凝土和纖維混凝土主要差異

5.3 鋼纖維混凝土之初步計算

本案以水利署中部水資源分局目前興建中的大安大甲連通道計畫做研究背景，故利用該案隧道環片所需承受之設計載重來進行環片中鋼纖維用量之初步估算。參考該計畫第 1 標之設計成果，該設計是同時以有限差分軟體 FLAC 與慣用設計法進行分析，再額外考慮依台灣本地要求(如 0.33%強制變位及地震力)與計畫所在環境(如防洪載重)載重組合所分析之最大彎矩、軸力及剪力等，得到最大彎矩在 14.3~37.2 kN-m 之間、最大軸力在 1,231~1,841 kN 之間的设计載重，然採用慣用設計法進行設計，會得到相對大的最大彎矩與軸力，分別為 388.60 kN-m 與 1,887.32 kN，如表 6。

表 6 大安大甲第 1 標環片需承受之設計載重

分析模式	荷重組合	軸力 max(kN)	彎矩 max (kN-m)	剪力 max(kN)
單環	5.-長期荷重	1723.40	37.24	24.44
	6.-短期荷重	1841.00	40.21	27.18
	7.&8.防洪保護	1228.00	26.24	24.32
	9.-0.33%應變量	1504.73	14.29	-
	10.-地震荷重	1231.00	26.59	24.43
慣用計算法	5.-長期	1887.32	388.60	361.07

由於設計載重也需要考慮施工吊掛、現場堆置與背填灌漿條件下，環片所需承受之載重，下表 7 為考量施工載重後之表格，從該表中亦可明顯看出由慣用設計法所得到的長期設計載重，仍是決定配筋的主要因素。

表 7 考量施工吊掛、現場堆置與背填灌漿條件下設計載重

分析模式	荷重組合	軸力 max(kN)	彎矩 max (kN-m)	剪力 max(kN)
慣用計算法	5.-長期	1887.32	388.60	361.07
1.&3.-吊掛(hanging)		-	7.75	-
2.-現場堆置(stackings)		-	35.71	87.70
4.-背填灌漿		89	106	-

由於國內鋼筋混凝土設計規範要求柱所使用的最小鋼筋比需在 0.01(也就是 1%)以上，故取鋼筋比 1.01%來估算該鋼筋量可承受之最大設計載重(彎矩” M” 與軸力” N”)，並繪製出可承受設計載重

包絡線，並與前表所列之設計載重做比較，確認鋼筋量符合設計載重之需求，相關 M-N 影響圖如圖 77。

然倘若混凝土環片僅作為臨時結構使用，且不使用鋼筋，即可不須遵守最小鋼筋比為 1%之相關規定；又因自來水工程通常外圍的混凝土環片在完成之後，內圈會另行施作真正通水用的 DIP 管，管與環片間以低強度混凝土充填，當 DIP 管完成之後，此時會假設所有載重將加載在 DIP 管上，理論混凝土環片會被視為臨時結構，並失去其功能，根據前述說明，在不考慮長時載重與強制變位，也不需遵守最小鋼筋比至少為 1%等條件下，重新分析最大設計載重，並假設鋼筋比僅有 0.5%，重新繪製容許包絡線與 M-N 影響圖，如圖 78，相關之設計載重仍在鋼筋所能提供的容許包絡線內。

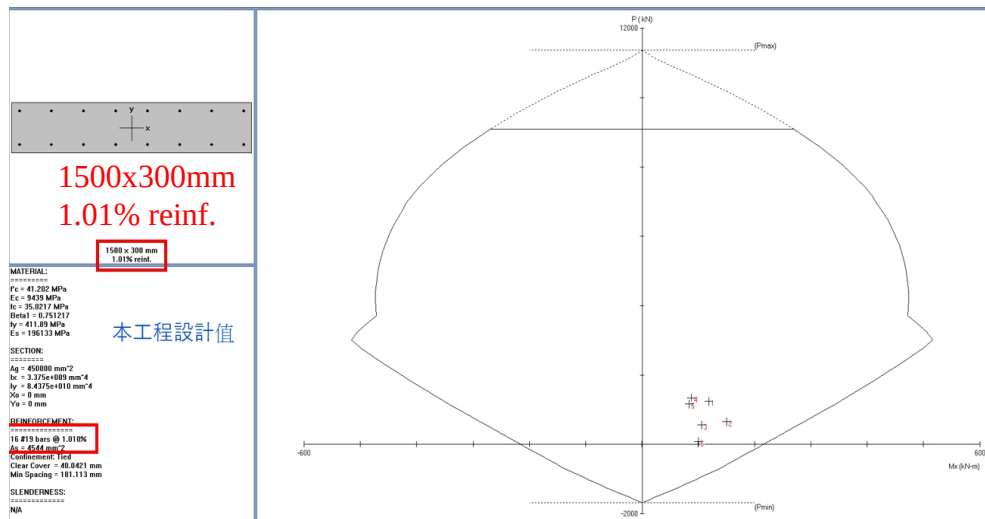


圖 77 原設計鋼筋 1.01%

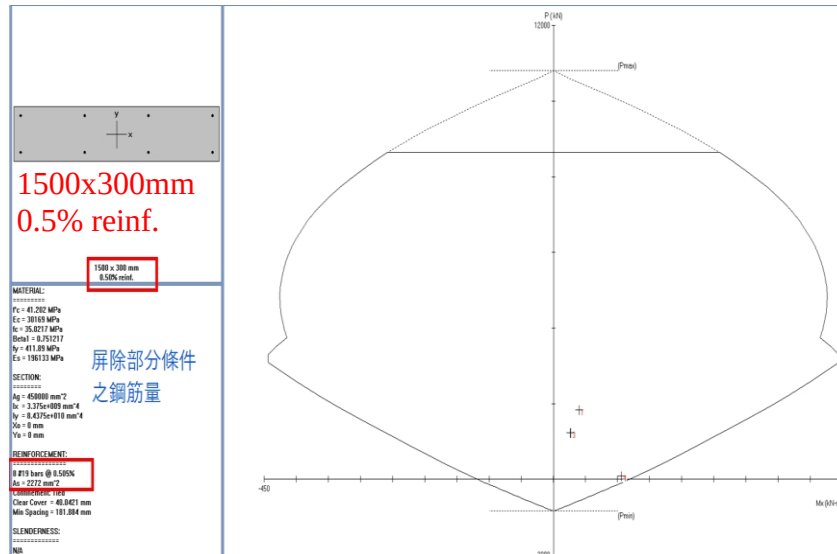


圖 78 簡化鋼筋為 0.5%時

另因為大安大甲第 1 標採用的為國內較少使用的全異形環片，本研究又參考了第 2 標(標準型環片)的設計[25]，進行研究規劃及討論。和第 1 標之設計成果相較，同樣採經驗公式設計，最大軸力大小相差無幾，但最大彎矩卻降低，這可能是因為第 1 標覆土深度較深、地下水位較高，且地層為軟岩(第 2 標地層多為礫石)所造成之差異。然第 2 標原設計之鋼筋比，為了符合規範之規定，採用略高於最小鋼筋比要求的 1.13%進行設計，相關的 M-N 圖如圖 79(單位分別為 t-m 與 t；換算為 kN-m 與 kN 需乘以"10")。

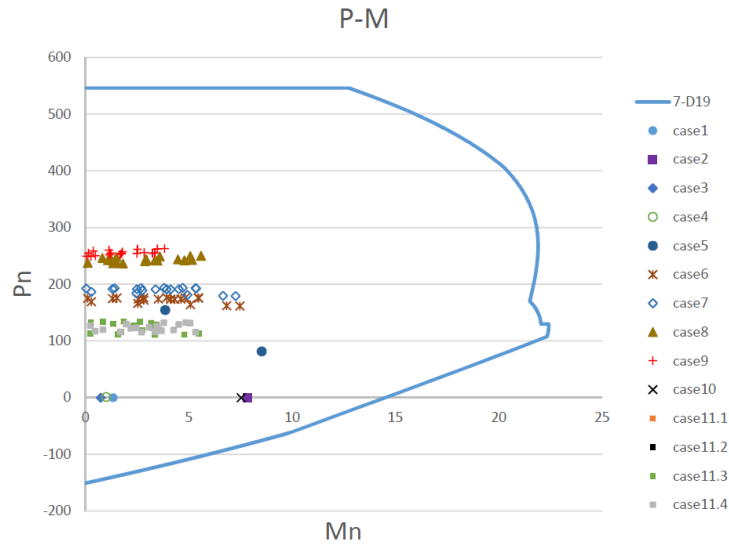


圖 79 大安大甲第 2 標原設計 M-N 影響圖

依照大安大甲第 2 標結構計算書[25]中對於短期載重的計算，如下表 8，以最大 M 為角度 0 之處，最大 P 為角度 100 之處作為控制點，假設鋼纖維量為每立方公尺 40 kg 所繪製的容許包絡線(圖 80 藍色線)，發現包絡線可涵蓋最大 M 及 P 角度的載重控制點。

表 8 短期載重(高水壓)

角度	M (t-m)	V (t)	P (t)
0	7.27	0.00	179.18
10	6.66	-2.19	179.76
20	4.94	-3.94	181.38
30	2.46	-4.91	183.77
40	0.28	-4.91	186.52
50	2.76	-3.94	189.19
60	4.51	-2.38	191.29
70	5.35	-0.69	192.64
80	5.33	0.69	193.30
90	4.71	1.44	193.55
100	3.81	1.83	193.60
110	2.69	2.20	193.42
120	1.41	2.44	193.03
130	0.04	2.51	192.50
140	1.31	2.35	191.94
150	2.49	1.91	191.52
160	3.39	1.32	191.26
170	3.94	0.67	191.13
180	4.12	0.00	191.10

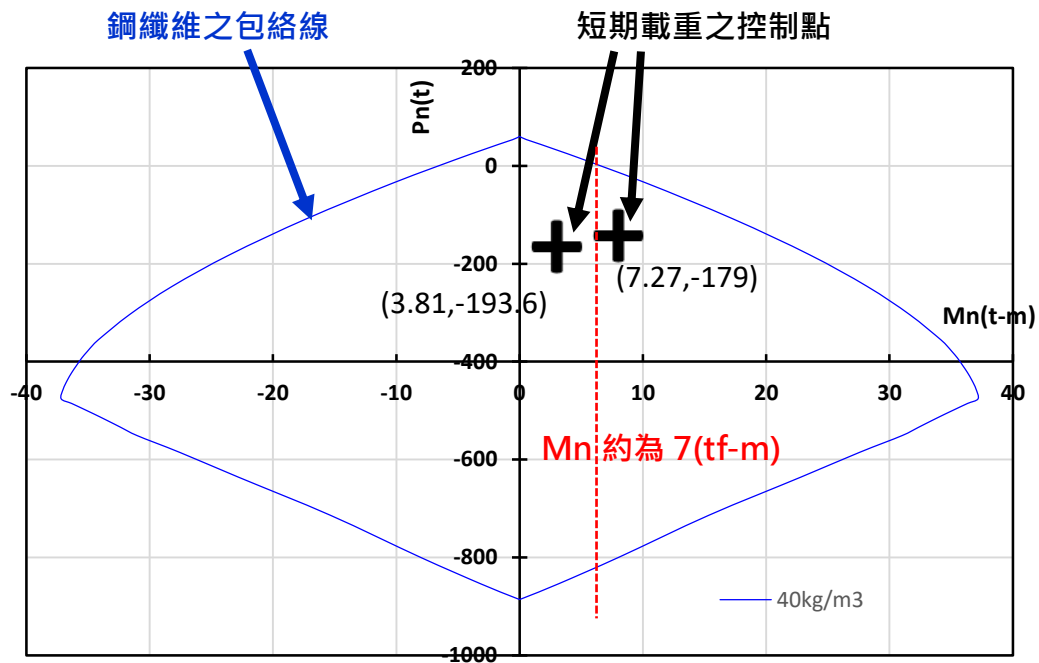


圖 80 每立方公尺 40kg 繪製容許包絡線

依據大安大甲第 2 標之計算書對於抗彎試驗之計算方式計算短期載重， M_n 為由圖 80 畫線得出約為 7 噸之力矩，得出抗彎試驗之 P 力須達到之抗彎試驗值為 13.23 噸之力量，如下圖。

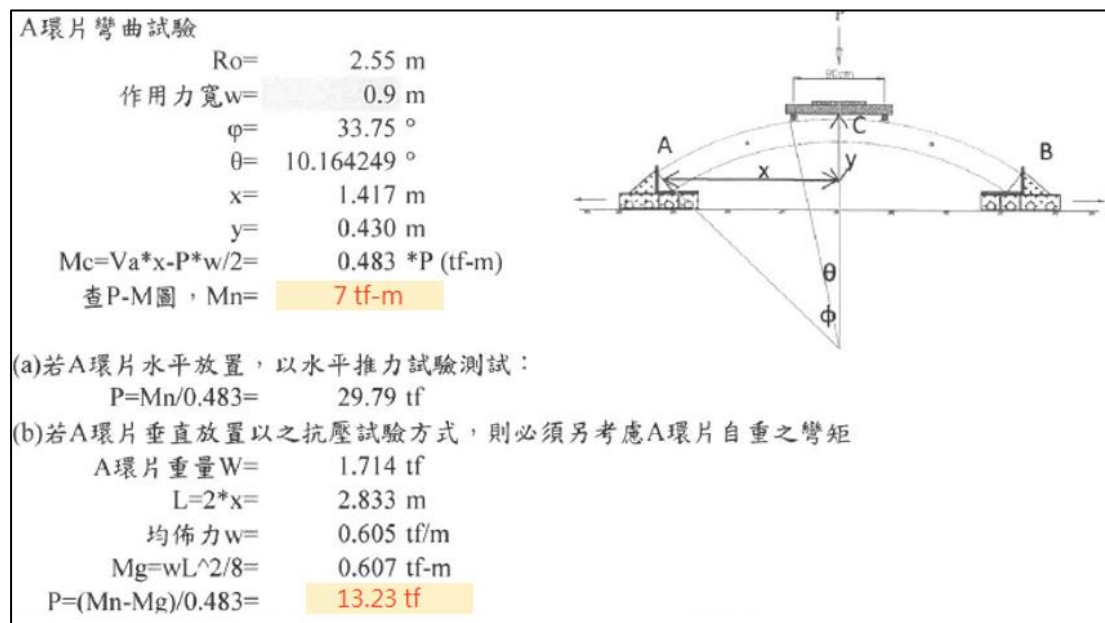


圖 81 抗彎試驗需求力量計算方式

5.4 鋼纖維混凝土配比設計

混凝土摻料、添加劑含量與配比、鋼纖維種類與用量，將依照過去經驗與實驗結果[26]，以及細部設計的軸力(N)與彎矩(M)來做決定。SFRC 配合比詳請參見表 9，其中水泥為普通矽酸鹽水泥，拌合水為一般自來水，添加劑使用 Sika 聚羧鹽類高效能減水劑。

表 9 SFRC 水泥基複合材料配比

試體材料組成	粗骨材 kg/m ³	水泥 kg/m ³	矽灰 kg/m ³	水 kg/m ³	強塑劑 kg/m ³	砂 kg/m ³	鋼纖維 kg/m ³	水灰比
設計強度 60MPa	1100	370	30	140	5	890	40	0.35

5.5 本案所使用鋼纖維之種類

鋼纖維的形狀有許多種，各種形狀會有不同特點及專利問題，單鉤端型、雙鉤端型、三鉤端型為較為常見之型式，主要差別在於尾端鉤型數量，當數量多則提供的抓握力越大但價格越高，這種型式的鋼纖維有著投入混凝土攪拌後，其之間的粘結劑很快溶於水使鋼纖維均勻分布在混凝土中之優點，本計畫為使用較為經濟高效且易取得之單鉤端型，品牌為 dramix 3d，長度 60mm 直徑 0.75mm，圖 80 亦以此鋼纖維作為計算，特性如表 10，外型如圖 82。

表 10 鋼纖維特性

材料性質	抗拉強度 (Mpa)	長度 Mm	直徑 Mm	長徑比	彈性模數 Gpa
高碳鋼	1225	60	0.75	80	210



圖 82 本案所使用鋼纖維外型

本案依據規劃鋼纖維量為 40 kg/m^3 ，A 型環片體積約為 0.8571 m^3 ，故預計鋼纖維重量 34.28 kg ，K 型環片體積約為 0.2857 m^3 ，故預計鋼纖維重量 11.43 kg ，鋼纖維體積比約 0.51% 。

第六章 鋼纖維混凝土環片之製造與試驗

6.1 鋼纖維混凝土試驗規劃

6.1.2 監測儀器

本案實驗預計搭配水利署中區水資源分局正在施作之大安大甲溪聯通管工程，參考其環片尺寸修改內部鋼筋配置及材料配置，因其環片已開模完成，於預鑄完成後提供本案再利用以節省費用，也有最新之測試數據可供參考。

為了瞭解鋼纖維混凝土環片所產生的應力應變行為，因其依過去[26]的經驗，若完全無筋的預鑄鋼纖維混凝土環片無法順利將應變計安裝到預定位置，遂須架設固定用工作筋使應變計(Strain gauge)安裝於上面，以便順利安裝與固定應變計，工作筋支架之設計如圖 83，為一井字架並於上下兩側固定應變計，並於下方用補土黏於模具上。

根據單體抗彎試驗之經驗，應變計被安裝在最內側與最外側長向主筋上，此位置為環片荷重加載處，最有可能產生較大應變處。為了對應鋼筋混凝土預鑄環片安裝應變計的位置，鋼纖維混凝土環片應變計會被安裝位於距離環片面層下等同保護層厚度之位置，等於和鋼筋混凝土環片應變計的位置一致，K 型環片則安裝於中間灌

漿孔處，位置請參考圖 84 標示，另應變計需要出線以傳輸資料，應變計出線盒置於如圖 85 之處，並以補土黏於模具上。

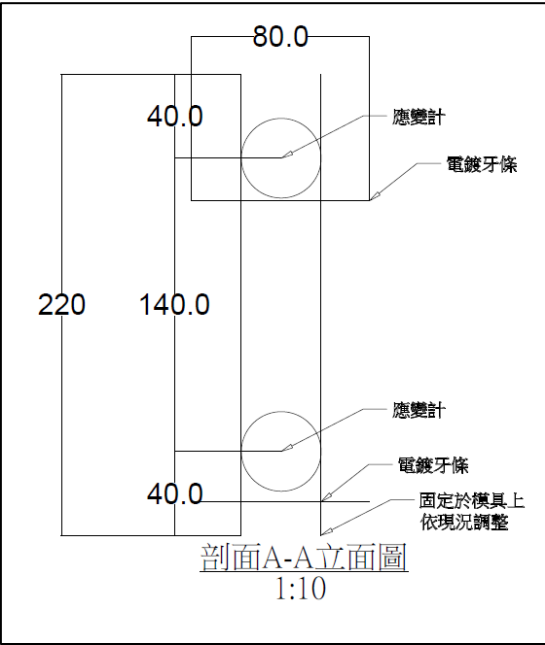


圖 83 應變計支架立面圖

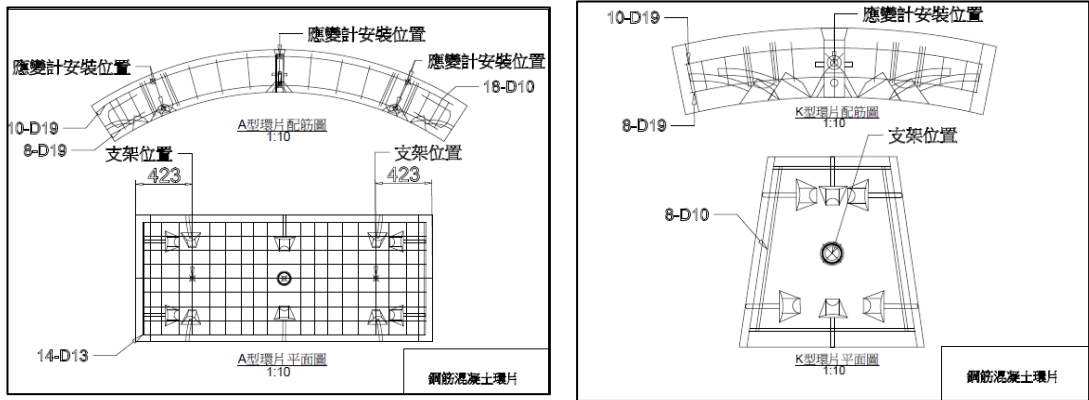


圖 84 應變計分布圖

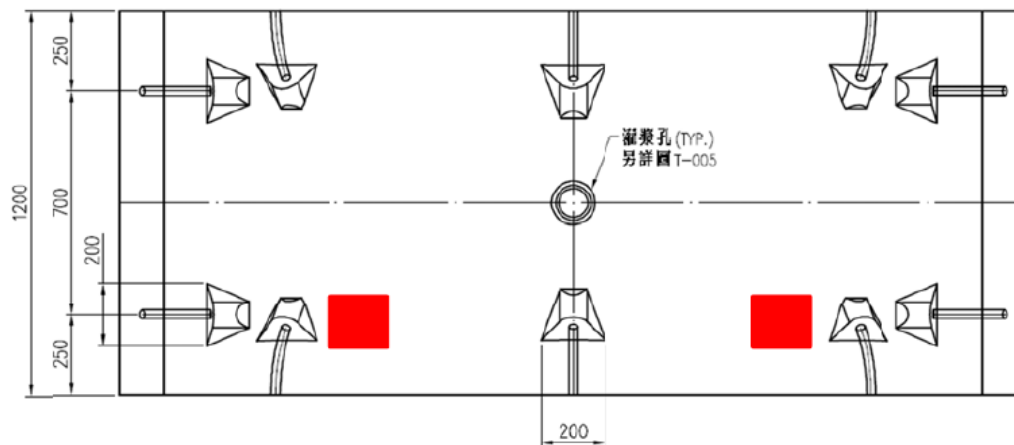


圖 85 應變計出線盒

本研究案所使用混凝土應變計型號為 Geokon 4200，長度約為 153mm，應變計如圖 86，將 Model 4200 安裝於混凝土中仍具有相當高的靈敏度，而此種應變計主要設計為長向應變量測，通常用於隧道襯砌/環片、地基及基樁，精確度可量測至 $1\mu\varepsilon$ 。

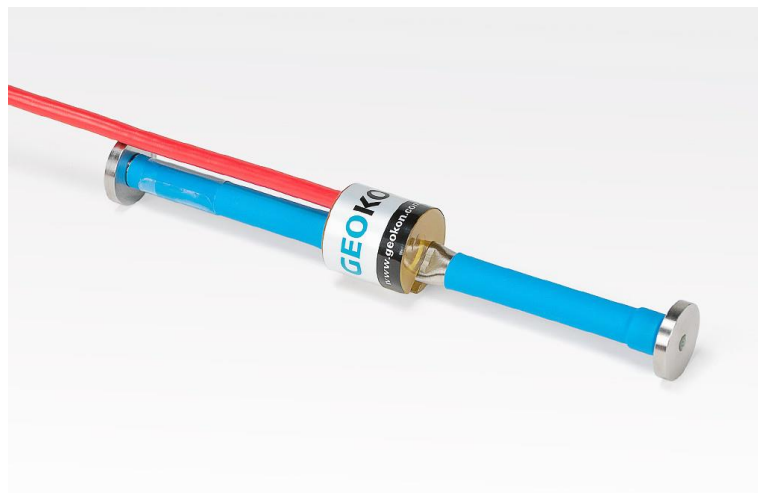


圖 86 應變計外觀(來源: Geokon 官網)

6.1.2 鋼纖維混凝土環片試驗項目

本研究之目的除了在瞭解預鑄鋼纖維混凝土環片的性質與行為外，更重要的目的在於確認預鑄鋼纖維混凝土環片之功能可以跟原本設計的預鑄鋼筋混凝土環片一致或更佳，未來才能應用台灣的輸水隧道工程上。因此，本研究除了須滿足公共工程委員會的環片生產規範之外，亦將比照環片製造廠所提送的生產計畫書內容所指定的試驗內容及試驗合格數值，利用 A 型及 K 型環片來進行抗彎、灌漿孔拉拔及推力試驗，各試驗的目的如下：

1. A 型環片抗彎試驗

抗彎試驗的目的驗證生產之環片是否可達環片斷面之理論抗彎矩值所對應之目標載重，試驗方式如圖 39，試驗過程中，必須持續觀察環片出現之裂紋，並且記錄不同裂縫度與破壞時的荷重，試驗結束後，將設計荷重、設計破壞荷重、實際荷重以及實際破壞荷重再予以比較與討論，這些數據將有助於評估環片的彎曲性能及其在實際應用中的適用性，本次目標為 28.6 噸(RC)、13.23 噸(鋼纖維)。

2. K 型環片灌漿孔拉拔實驗

通過使用吊具與螺桿結合的方式，利用千斤頂進行拉拔，

如圖 42，主要觀察灌漿孔附近由於拉力引起的裂縫情況。

這項試驗旨在比較不同環片在拉拔過程中的表現差異，並討論其對環片整體結構強度的影響，本次目標為 2.2 噸。

3. K 型環片抗推實驗

常被用來檢核環片設計厚度是否足夠，如圖 40，試驗過程中，逐步增加荷重，記錄首次裂紋出現時的荷重，並持續監測裂紋的發展。這些數據將用於評估環片的抗推性能及其在實際使用中的安全性，本次目標為 340 噸。

除了破壞強度與載重-位移曲線的比較，本研究也將利用圖像處理軟體來判斷試驗結束後的環片破裂情形，並且安裝量測儀器來量測試驗時混凝土試驗時的混凝土應力-應變曲線，並將相關結果做比較與討論。

有關圖像處理的部分，目前預計以 Image J 軟體來進行分析，如圖 87，Image J 是以 Java 為基礎之圖像處理軟體，可運作於各大作業系統之中，其基於 java 的特點，使得編寫的程式能以程式組件等的方式分配。此程式能夠顯示、編輯、處理分析 8、16、32 位元的圖片，支援多種常見的影像檔案格式。

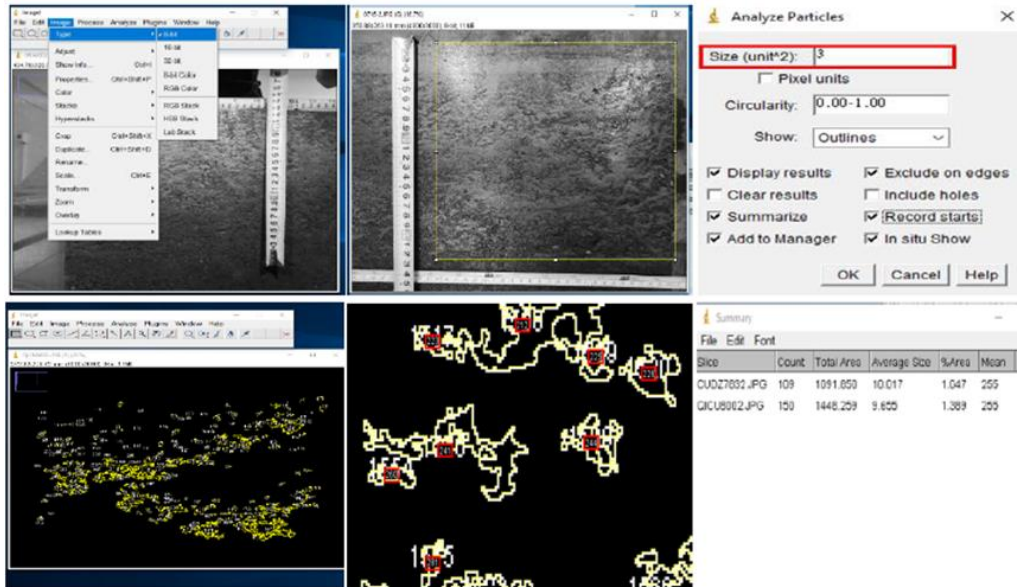


圖 87 使用 Image J 的分析步驟與量化結果

6.2 鋼纖維混凝土製造過程記錄

6.2.1 小試拌

因為首次使用鋼纖維材料，進行實驗前首先使用小型拌合機及人工秤重，來進行混凝土測試，如圖 88 到圖 91。



圖 88 試拌用混合機器



圖 89 稱重



圖 90 小試伴結果



圖 91 將試伴結果作為試體

6.2.2 安裝監測裝置

如同 6.2.1 節中設計安排，安裝監測裝置於鋼纖維環片(無鋼筋)與普通環片(有鋼筋)中，希望能探知內部應力狀態，圖 92 至圖 94 為監測裝置安裝示意圖，由於模具上平滑不好黏固，故無鋼筋環片安裝如圖 93、圖 94 加鋼筋固定，並將儀器之出線盒貼於模具上。

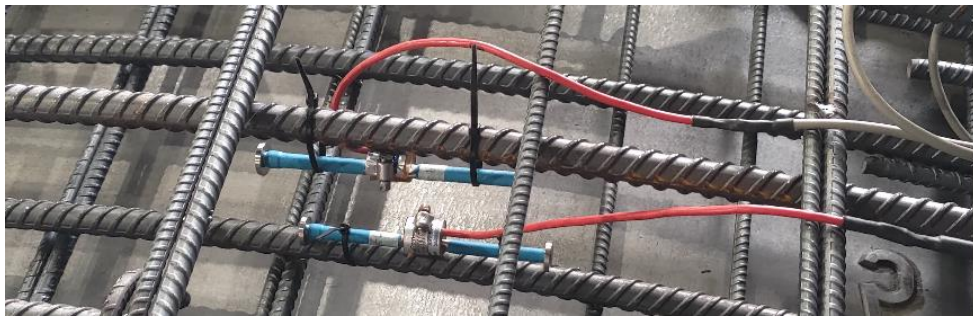


圖 92 鋼筋上安裝示意圖



圖 93 無鋼筋 K 型環片安裝示意圖



圖 94 無鋼筋 A 型環片安裝示意圖

6.2.3 鋼纖維拌合

為達到鋼纖維均勻分布於混凝土中的目的，參考 ACI544.3R 之規範第 5 章說明，或參考 ACI 544.1R 中的討論或鋼纖維生產商的經驗建議，一旦鋼纖維產生乾式或濕式結球，則不應再被使用。而本案為輸送帶尾端投料入拌合機，如圖 95，因使用的是膠合併排的鋼纖維，接觸水後膠合劑即溶解。

以拌合機拌合 SFRC 與傳統混凝土拌合方式有些許不同，其中重要的一點是鋼纖維應於濕拌狀況下添加。大部份的情況，鋼纖維可於最後一個步驟加入。ACI544.3R 提供兩個攪拌程序如下：

方法一：鋼纖維最後添加入預拌車

1.先量測未添加鋼纖維濕拌混凝土之坍度，一般介於

51~76mm，且需大於最終工作坍度要求。混凝土的配比是以水灰比為主，設計所需的工作強度。添加減水劑是有利的選擇，但也並非絕對。

2.以正常的拌合程序及轉速依下述步驟添加鋼纖維。

3.添加分散正常的鋼纖維進入拌合機。傳統上，先讓鋼纖維通過 10mm 過濾篩進入漏斗，再以輸送帶送入拌合機。於輸送完畢前需全速快轉，以達均勻分佈的目的，待鋼纖維輸送完

畢後，減至正常轉速，並繼續拌合 30~40 轉。

本方法已成功的運用在許多小規模工程的預拌混凝土上，並生產出品質良好的 SFRC。

方法二：與骨材在輸送帶上混合

此方法是讓鋼纖維在預拌廠中與骨材一起混合輸送。在輸送過程中可以人工或分散、震動機具讓鋼纖維均勻分佈於骨材中，並避免結球或堆積。此方法適用於大量鋼纖維使用的工程。



圖 95 鋼纖維投料處

6.2.4 澆注過程

本次試驗，因為坍度低且怕監測儀器被震開位置，故預先灌注鋼纖維混凝土後，再蓋板並持續震動及灌料，如圖 96 到圖 98。

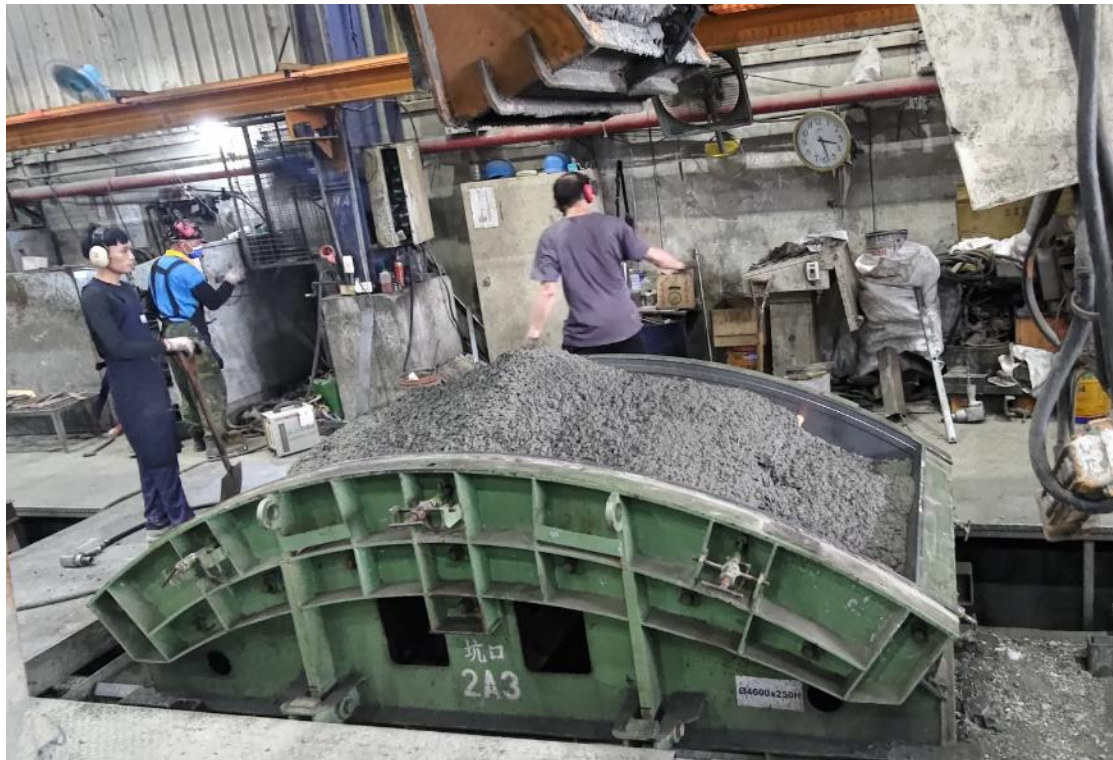


圖 96 先預放鋼纖維混凝土



圖 97 再蓋上蓋板



圖 98 持續震動及灌料

澆鑄完成後表面進行修磨，如圖 99 及圖 100。



圖 99 A 型環片澆注完成表面修磨



圖 100 K 型環片澆鑄完成表面修磨

6.2.5 養護階段

環片完成後，需進行約一天之蒸氣養護後，實驗人員至監測儀器接線以收集監測儀器資料，如圖 101 至圖 108，之再進行約 3 天水中養護，及約 13 天之大氣養護後，經圓柱試體抗壓試驗，確認已達到原設計之強度後再進行下一步實驗。



圖 101 A 型普通環片(有筋)外側面



圖 102 A 型普通環片(有筋)內側面



圖 103 K 型普通環片(有筋)外側



圖 104 K 型普通環片(有筋)內側



圖 105 K 型普通環片(無筋)外側



圖 106 K 型普通環片(無筋)內側



圖 107 A 型普通環片(有筋)外側面



圖 108 A 型普通環片(有筋)內側面

但本次實驗時，發現圖 108 的接線盒只剩下兩個圓形之圖案(如箭頭)，經推測應該是已經被震動震離模具表面，導致混凝土覆蓋，為求能有應力應變曲線數據資料，必須於此部位進行表面鑽孔，如圖 109 進行鑽孔以尋找接線盒，鑽孔後如圖 110。



圖 109 表面鑽孔尋找接線盒



圖 110 接線後照片，左側為正常的出線方式，右側為鑽洞之方式

6.3 環片試驗過程記錄

6.3.1 圓柱試體試驗

本次試驗水泥養護時間因實驗時程的關係，僅為 13 天，為確定是否達到強度故先進行圓柱試體試驗如下，將圓柱試體進行試壓以確認是否已達到所要求的設計強度 60Mpa(611.8kgf/cm²)，試驗結果如表 11，皆已達到要求強度之上，試驗過程請參考圖 111 至圖 114。

表 11 圓柱試驗結果

試體編號	強度(kgf/cm ²)
1	721
2	764
3	790



圖 111 圓柱試體試驗



圖 112 第一次圓柱試驗

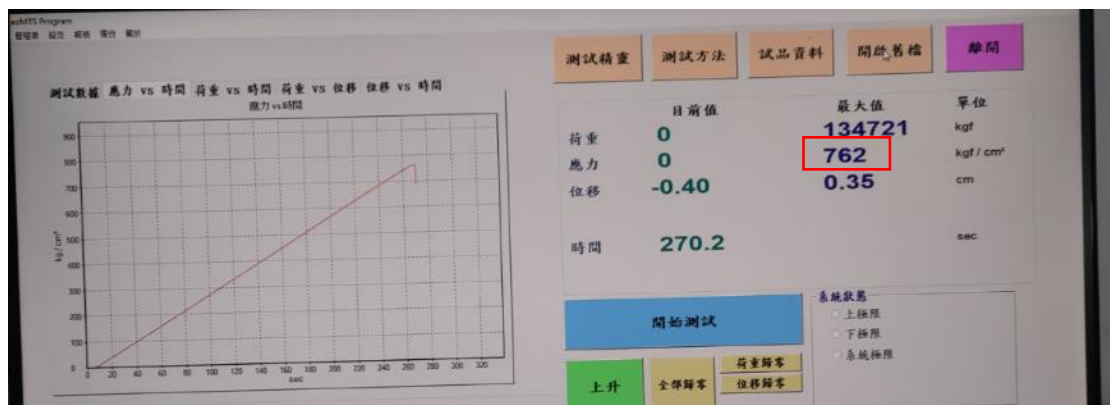


圖 113 第二次圓柱試驗



圖 114 第三次圓柱試驗

6.3.2 K 型環片灌漿孔拉拔實驗

本次參考原大安大甲第二標之設計，以超過 2.307 公噸為目標，試驗過程如圖 115，其實驗之數值如圖 116，數值達到 46kg/cm^2 ，換算為約為 2.35 公噸，已達到目標。



圖 115 拉拔試驗測試中



圖 116 測試達到 46kg/cm^2

6.3.3 A 型環片抗彎試驗

一、鋼筋混凝土 A 型環片之試驗

實驗先進行一般鋼筋混凝土 A 型環片之試驗，最終測試至斷裂如圖 117 及圖 118，試驗數值為 66.9 公噸，超過原設計要求 28.6 公噸非常多，結果如表 12。



圖 117 一般鋼筋混凝土 A 型環片壓裂照片



圖 118 實驗數據最大值 66.9 噸

實驗進行前，皆會接上環片之監測線材以收集應力應變資料，

如圖 119。

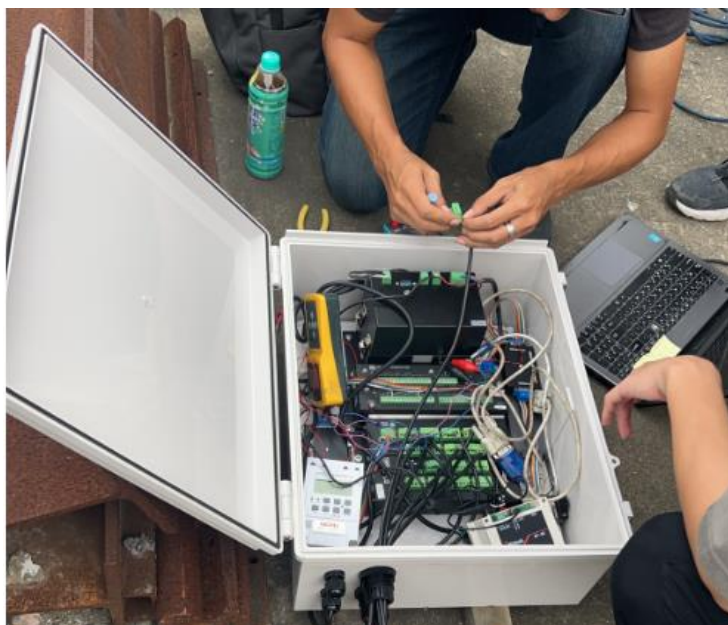


圖 119 監測儀器接線

表 12 鋼筋混凝土 A 環片實驗結果

加壓載重	試驗結果
17.4 噸(ton)	產生第一道裂紋
28.6 噸(ton)	達目標載重 28.6 噸□產生■未產生破壞現象
66.9 噸(ton)	產生破壞狀況(破壞載重)

二、鋼纖維混凝土 A 型環片之試驗

再接續進行鋼纖維混凝土 A 型環片之試驗，如圖 120，最終測試至斷裂如圖 121 及表 13，試驗數值為 13.4 噸，於曲線上有應變延長之情形。



圖 120 鋼纖維混凝土 A 型環片壓裂狀態



圖 121 實驗數據最大值 13.4 噸及出現應變延長之情形

表 13 鋼纖維混凝土 A 環片實驗結果

加壓載重	試驗結果
12.6 噸(ton)	產生第一道裂紋
13.23 噸(ton)	達目標載重 13.23 噸 ☐ 產生 ☒ 未產生破壞現象
13.4 噸(ton)	已發生破壞

6.3.4 A 型環片試驗結果分析

一、裂縫分析

先就環片表面裂縫的比對採用影像比較的方法進行，並利用 Image J 軟體進行分析。由於直接使用混凝土原始表面彩色影像進行裂縫辨識會造成困難，因此必須將彩色影像轉換為灰階影像。接著，應用過濾器去除非裂縫的雜質影像，並選取所需的裂縫測量區域。最終將影像轉換為黑白二值影像，並使用 ImageJ 的 Ridge Detection 功能自動測量裂縫的寬度和長度，量化裂縫數據，並分析不同環片之間的裂縫差異。

在鋼筋混凝土環片破壞時，混凝土瞬間爆裂並產生了一條水平長度約 1m(總長 184.03 cm)的水平裂縫，此裂縫主要沿著主筋上方無鋼筋的保護層區域產生，以此分為上下方區域分析，如圖 122 及圖 123，下方共產生了 11 條平均分布的裂縫，偵測裂縫長度如表 14，裂縫的長度範圍從 20.932 cm 至 6.312 cm。



圖 122 原始畫面及分成上下方區域

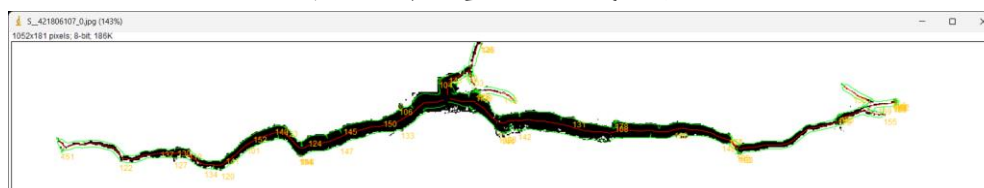


圖 123 Ridge Detection 自動偵測裂縫，上方裂縫長度 184.03cm

表 14 下方偵測之裂縫長度

主要裂縫	主要裂縫長度 (cm)
1	20.932
2	20.609
3	12.417
4	10.059
5	9.97
6	8.96
7	7.727
8	7.69
9	7.569
10	7.531
11	6.312

而在鋼纖維的試驗中，於中間出現一條總長為 33.990cm 的裂縫並發生破壞，如圖 124 所示。



圖 124 鋼纖維混凝土之裂縫放大

理論上鋼纖維混凝土預鑄環片下方將預期產生相當多的微裂縫後，會有一段應變之過程，本次實驗亦有此情況，如圖 121 所示中間有一段平整之區域，但未能與預期般有較長之區域，但可於裂縫中觀察到許多鋼纖維有拉出之現象，表示鋼纖維確實在均勻地混在混凝土中。

二、抗彎實驗之應變量變化

本案之應變量測儀器所量測出來的數值如圖 125，其放置的位置如圖 126，一般鋼筋混凝土部分，可以看出 SG4 有明顯較大的應變量，其餘應變數值相對變化不高，而 SG2、SG3、SG6 為鋼筋混凝土環片下層應變計之編號，皆有較大之應變，另 SG4 的變化較大，如圖 122，因其位於中央裂縫上層且為主要裂縫產生處；鋼纖維混凝土環片的中央下層之 SG 10 變化較大，但仍可看出約等於鋼筋混凝土環片之應變量。

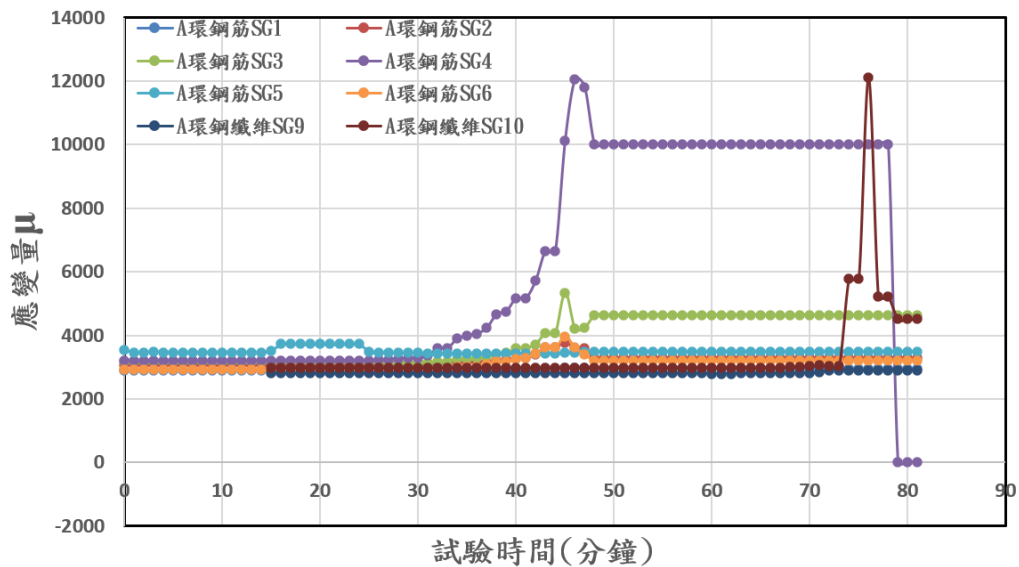


圖 125 鋼纖維及鋼筋混凝土環片之應變量比對

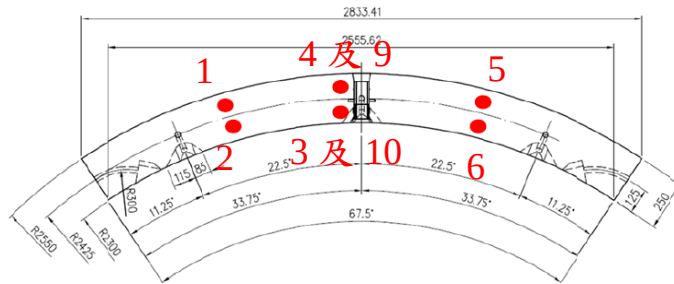


圖 126 監測器位置圖

6.3.5 K 型環片推力試驗及試驗結果

本次 K 型環片之推力試驗，原定使用中興大學之實驗設備，因臨時損壞，故改至成功大學進行試驗，使用 500 噸萬能試驗機如圖 127 及圖 128，原設計要求達到 340 噸，測試結果為一般鋼筋混凝土環片至機器最大值 480 噸時仍然無裂痕產生如圖 129，測試曲線如圖 130 無特別變化；鋼纖維 K 環片測試至 399 噸時於邊緣發生裂痕，至機器最大值 480 噸時仍然只有邊緣有裂痕，如圖 131，其測試曲線如圖 132 有突然壓力釋放之情形，隨後力量恢復線性上升，但仍然至 480 噸無明顯破壞的情形發生，裂縫長度如表 15，由於環片破壞程度相當低，這表明距離環片破壞仍有相當的安全餘裕，亦有達到設計要求。



圖 127 萬能試驗機(500 噸)



圖 128 測試過程圖



圖 129 鋼筋維混凝土 K 環片測試過程皆無變化



圖 130 鋼筋維混凝土 K 環片測試曲線圖



圖 131 鋼纖維混凝土測試結果



圖 132 鋼纖維混凝土 K 環片測試曲線圖

表 15 鋼纖維型裂縫長度及平均寬度

內環裂縫最長長度 (cm)	內環裂縫平均寬度 (cm)	側面裂縫長度 (cm)	側面裂縫平均寬度 (cm)
2.306	0.063	7.540	0.093

鋼纖維及鋼筋混凝土 K 型環片之應變量比對如圖 133，SG7 為鋼筋混凝土 K 環片，SG8 為鋼纖維混凝土 K 環片，雖然鋼纖維 K 環片表面有裂紋產生，但內部應變中反而應變較少。

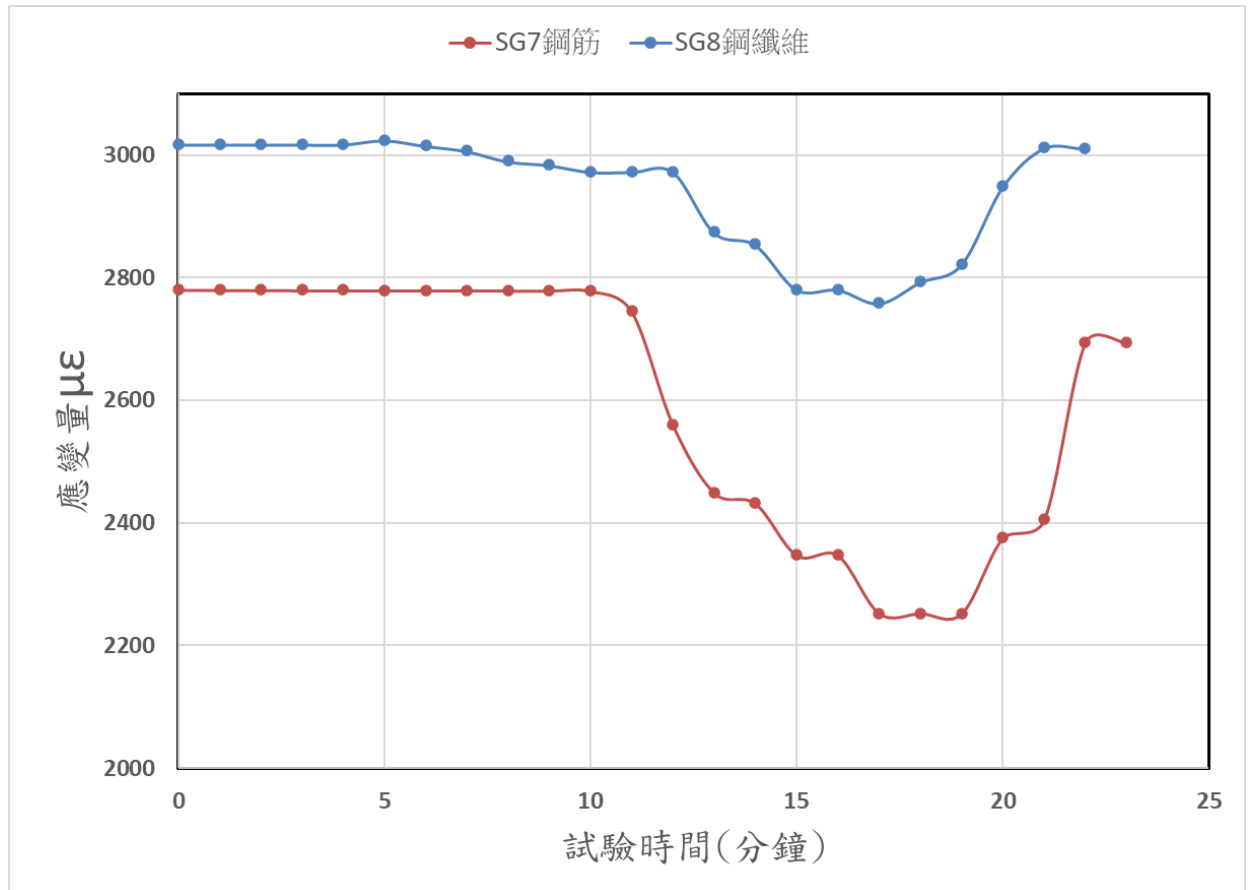


圖 133 鋼纖維及鋼筋混凝土 K 型環片之應變量比對

第七章 鋼纖維混凝土環片與鋼筋混凝土環片之經濟性探討

預鑄鋼筋混凝土環片在台灣潛盾隧道工程中被廣泛的使用，然台灣的鋼筋混凝土環片所使用的鋼筋量，因台灣地震頻繁故使用量較國外高出許多。再者，因為生產時會製造出大量的二氧化碳，以現今政府推動多項能源政策節能減碳或永續發展的角度來看，有極大的空間需要予以改善，本節將著重於鋼纖維及鋼筋兩材料進行經濟性探討及碳排放量：

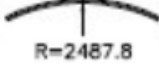
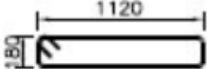
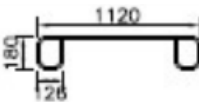
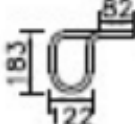
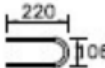
7.1 預鑄混凝土環片材料數量估算經濟性探討

本案採用 A 型環片及 K 型環片為例，進行鋼筋量及鋼纖維數量比較；本案根據已發包工程的同尺寸大小之隧道襯砌鋼筋環片設計，對 A 型與 K 型鋼筋混凝土環片的鋼筋數量進行了估算。以 A 型隧道環片所使用的 CNS 560 A2006 鋼筋為例，以今年(2024)連工帶料每公斤 33 元進行計算，得出每立方公尺混凝土 A 型環片的鋼筋計價約為 5,965 元，而每立方公尺混凝土 K 型環片的鋼筋計價約為 3,053 元。

有關人力部分，參考環片廠商之估算，每環施工作業費用(不含材料)約 4000-5000 元之間，取 4500 元，每環有 5 片 A+B 型環片及 1 片 K 型環片，因 A 環與 B 環鋼筋量大致相同及 K 型環片約 A 型之一半鋼筋量，故以 5.5 片 A 型環件計算得每片人工費用約 818 元，K 型環

片為 409 元，相關計算如表 16、表 17。

表 16 A 型環片鋼筋數量表

種類	單位重 (kg/m ³)	數量(支)	各種類總重量 (kg/m ³)	型式
A1*	2.25	10	22.5	
A2*	5.9	8	47.2	
A3*	2.86	14	40.04	
A4*	0.91	18	16.38	
A5*	1.89	2	3.78	
A6*	0.92	8	7.36	
A7*	0.92	12	11.04	
A8*	0.48	16	7.68	
A 型環片鋼筋總重(kg)**			155.98*	
每公斤價格(NTD)			33.00	
人工綁鋼筋價格			818	
A 型鋼筋環片鋼筋總價(NTD)			5,965	

*: A1 到 A8 指不同鋼筋捆紮形式所使用的鋼筋

**：指每立方公尺混凝土所需使用的鋼筋總重

表 17 K 型環片鋼筋數量表

種類	單位重(kg/m ³)	數量(支)	各種類總重量(kg/m ³)
K1*	2	10	20
K2*	1.89	8	15.12
K3*	2.86	4	11.44
K4*	0.91	8	7.28
K5*	1.89	4	7.56
K6*	0.92	8	7.36
K7*	0.92	4	3.68
K8*	0.48	16	7.68
K 型環片鋼筋總重(kg) **			80.12
每公斤價格(NTD)			33.00
人工綁鋼筋價格			409
K 型鋼筋環片鋼筋總價(NTD)			3,053

*: K1 到 K8 指不同鋼筋捆紮形式所使用的鋼筋，與 A 型類似不再圖示

**: 指每立方公尺混凝土所需使用的鋼筋總重

本案中使用的鋼纖維是單勾狀的高碳鋼絲纖維，鋼纖維混凝土的單位用量為 40 kg/m^3 ，鋼纖維每公斤造價約為 1.5 美元，依照當前匯率 31.861 計算每公斤價格約 47.79 元，且無須人力綁鋼筋之費用，這對整體工程的經濟效益分析及材料選擇至關重要，有助於優化預算並提升項目的經濟性。表 18 與表 19 均是以每立方公尺混凝土條件下，鋼纖維的用量與價格。將表 16 到表 19 做比較，在同樣體積的混凝土條件下，價格分別僅有 27.5% (A 型環片) 與 17.9% (K 行環片)，使用鋼纖維混凝土環片在價格上有絕對的優勢。

表 18 A 型環片鋼纖維數量表

項目	數量
A 型環片鋼纖維總重(kg)	34.28
每公斤價格(NTD)	47.79
A 型鋼筋環片鋼纖維總價 (NTD)	1,638

表 19 K 型環片鋼纖維數量表

項目	數量
K 型環片鋼纖維總重(kg)	11.43
每公斤價格(NTD)	47.79
K 型鋼筋環片鋼纖維總價 (NTD)	546

7.2 鋼纖維及鋼筋之環片碳排放量

由於各國對全球暖化和溫室氣體(GHG)排放日益關注，碳足跡分析都變得越來越普及在各國家之間，因此本案就現有國內的計算方式進行碳排放量之評估。

在隧道工程建設中，材料主要占比大部分的碳排放量。其中隧道襯砌中所使用的鋼筋及混凝土用量為最大的兩大項目。而材料的CO₂的計算可由下式：

$$\text{Mass}(\text{CO}_{2\text{eq}}) = \text{Factor}(\text{CO}_{2\text{eq}}) \times Q(\text{material quantities}) \quad (1)$$

$\text{Factor}(\text{CO}_{2\text{eq}})$ 為產品第三類環境宣告 (Environmental Product Declaration; EPD) 的每磅或每公斤材料所產生之二氧化碳之當量。與鋼筋相比較之下，鋼纖維加強可以顯著減少隧道環片中鋼筋所帶來的隱含碳，本案依據參考文獻[28]所使用之 EPD 的碳排放數據來進行分析。

7.2.1 A 型環片及 K 型環片碳排放量比較

本案預鑄鋼筋環片所使用單位混凝土體積內的環片鋼筋重量在 182 kg/m³~518.8 kg/m³ 之間變化。而本案的 A 型環片體積約為 0.8571m³，K 型環片體積約為 0.2857m³。

預鑄鋼筋 A 型及 K 型環片使用 EPD 的鋼鐵碳排放的 CO_{2eq} 係數為 1.85，前節計算 A 型環片鋼筋總重量為 155.98 kg，相較之

下，鋼纖維的質量為 40 kg/m^3 ， $\text{CO}_{2\text{eq}}$ 因子為 0.88，鋼纖維 A 型環片總碳排放量為 35.2 kg/m^3 ；而鋼纖維 K 型環片總碳排放量為 35.21 kg/m^3 ，這意味著使用鋼纖維混凝土環片，將使二氧化碳排放量降為原本之 10.46%(A 型環片)及 6.79%(K 型環片)，計算如表 20、表 21。

表 20 A 型環片碳排放計算

項目	鋼筋	鋼纖維
每公斤碳排係數	1.85	0.88
環片內各材料總重(kg)	155.98	34.28
環片內各材料總碳排(kg)	288.56	30.17

表 21 K 型環片碳排放計算

項目	鋼筋	鋼纖維
每公斤碳排係數	1.85	0.88
環片內各材料總重(kg)	80.12	11.43
環片內各材料總碳排(kg)	148.22	10.06

7.2.2、整體隧道環片之碳排放量比較

本案隧道段長度為 1,535m，以本案外圈半徑 2.55m 及內圈半徑 2.3m 計算，總體積為 $5,847 \text{ m}^3$ ，整體鋼筋及鋼纖維之數量計算方式如下：

1. 鋼筋以第二標斷面比 1.13%計算鋼筋體積，再以比重

$7,800(\text{kg/m}^3)$ 換算重量，並乘上 $\text{CO}_{2\text{eq}}$ 因子 1.85。

2. 鋼纖維以本案使用量 40kg/m^3 來計算重量及比重

$7,800(\text{kg/m}^3)$ 換算體積，並乘上 $\text{CO}_{2\text{eq}}$ 因子 0.88。

3. 各環片中混凝土體積為整體體積扣除鋼筋或鋼纖維之體

積，再以混凝土比重 $2400(\text{kg/m}^3)$ 換算重量並乘上 $\text{CO}_{2\text{eq}}$ 因子 0.92。

最終得出如下表 22，比較總碳排放量，可得知環片若將鋼筋改用鋼纖維，整體隧道可減少 4.86% ($13,716,828 \rightarrow 13,049,750$)之碳排放量。

表 22 整體環片碳排放量

項目	鋼筋	鋼纖維
所佔體積(m^3)	66	30
所佔總重量(kg)	514,800	233,880
所佔碳排放量(kg)	952,380	205,814
混凝土部分所佔體積(m^3)	5,781	5,817
混凝土部分所佔重量(kg)	13,874,400	13,960,800
混凝土碳排放量(kg)	12,764,448	12,853,936
總碳排放量(kg)	13,716,828	13,049,750

第八章 自來水工程潛盾工法導入鋼纖維混凝土環片初步評估

8.1.國外使用原因及探討

潛盾工法在隧道工程中之應用日益普及，國外已逐步引入鋼纖維混凝土環片技術，以提升施工效率並降低成本。此技術能減少施工品質之變異性，並具備良好經濟效益，使其逐漸成為隧道工程中的首選。以下將從經濟效益及碳稅政策兩個方面探討國外使用鋼纖維混凝土環片原因。

一、經濟效益：

鋼纖維混凝土環片在國外隧道工程中受到青睞，主要因其經濟上之優勢。相比於傳統鋼筋混凝土環片，鋼纖維混凝土環片能減少鋼筋使用量，縮短人力綁紮鋼筋時間，以及灌漿完成後之震動搗實時間。由於鋼纖維可以在混凝土拌合時直接投入拌合槽中混合，使得環片製造過程更簡單，有助於工廠提升施工效率並縮短工期。

二、碳稅政策影響：

隨著全球對碳排放之重視，許多國家如歐盟、日本、韓國和加拿大等已實施碳稅或類似政策；雖然台灣目前尚未正式實施碳稅，但已規劃設計碳費和碳排放交易機制。為配合政府政策推動，相關

工務單位開始尋求低碳建材，而鋼纖維混凝土環片正因能減少鋼筋使用量而成理想選擇。雖然不同製程在碳排放量上有所差異，但鋼纖維之生產過程通常比傳統鋼筋碳排放量低，有助於工務單位在碳稅政策下減少支出，提升市場競爭力。



圖 134 歐盟碳稅相關政策

三、提升工程穩定性與耐用性:

由國外期刊、論文發現，鋼纖維混凝土環片具備良好之抗壓性與抗裂性能，能對潛盾施工過程中地層變化與震動引起之結構應力，發揮降低裂縫發生之風險，而增加隧道安全性。

另外由於其直徑有限，纖維得以最小之擾動融入混凝土中：它們與基體緊密接觸，不會為腐蝕之傳播留下任何空間或多孔區域。此外，纖維具有較小之陰極表面，限制了腐蝕電流。根據國外文獻[28]顯示，纖維完全腐蝕不會導致混凝土破裂。

四、長期效益與環境友善:

使用鋼纖維混凝土環片不僅能降低初期建設成本，有助於節省

國家經費，並且能有效延長隧道之使用壽命，減少維護成本，從長期維護成本而言，能夠減少建設廢料，更符合近年來環保要求；另藉由導入鋼纖維混凝土環片，可有效提升潛盾工法之經濟與環境效益，未來在自來水工程中可具有良好之應用前景；如報告 4.2.1 章節介紹，最近完工之英國 Lee tunnel 即為全段鋼纖維混凝土環片隧道，因 SFRC 具有更高的耐腐蝕性和抗裂應力以及良好的衝擊韌性，並可簡化生產降低生產成本。

8.2.國內導入之初步評估

經由試驗結果顯示，在設計需求之強度範圍內，可以考慮減少鋼筋使用量，並加入部分鋼纖維，以此降低施工成本。

倘以鋼纖維混凝土應用於其他水利工程上，由於混凝土對於水錘效應和氣穴現象的抵抗效果較差，導致部分溢洪道等設施容易因上述現象而受到損害(如圖 135)，若能加入鋼纖維，預期可加強表面之耐衝擊能力，增加溢洪道使用壽命。

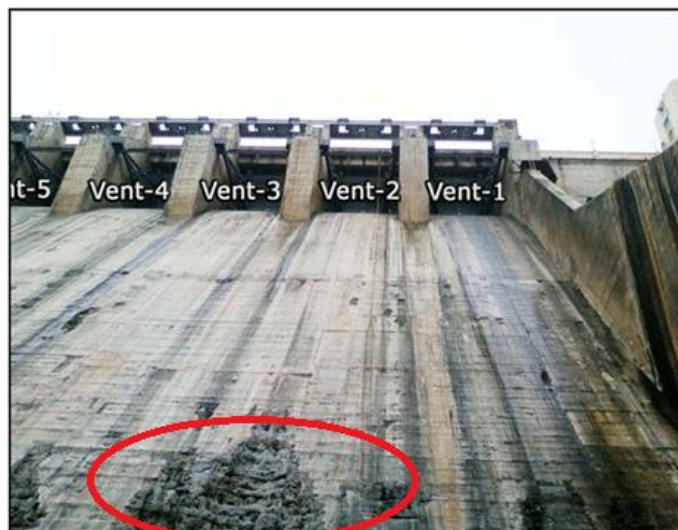


圖 135 洩洪道遭受氣穴現象圖[29]

一般潛盾施工之隧道環片，常發生環片邊緣區域易發生剝落現象(如圖 75)。故採用鋼纖維混凝土（SFRC）之環片，具有顯著提升抗機械衝擊能力，尤其在搬運和安裝過程中，可有效減少因衝擊導致環片單體損壞及報廢數量。

鋼纖維能提高混凝土材料強度，減少材料用量，使得結構物輕量化(間接降低地震力)，亦能提高混凝土材料韌性及剪力抗性，藉由減少剪力(箍)筋之需求，可放大剪力(箍)筋間距，有利於混凝土澆置時充分搗實，且能預防早期保護層剝落，抑制裂縫生長，避免發生瞬間破壞，故適合應用於大型(預力)水池結構，如下圖 136，大型預力水池有數量極多之鋼筋，如能減少鋼筋量將有利於混凝土澆置。

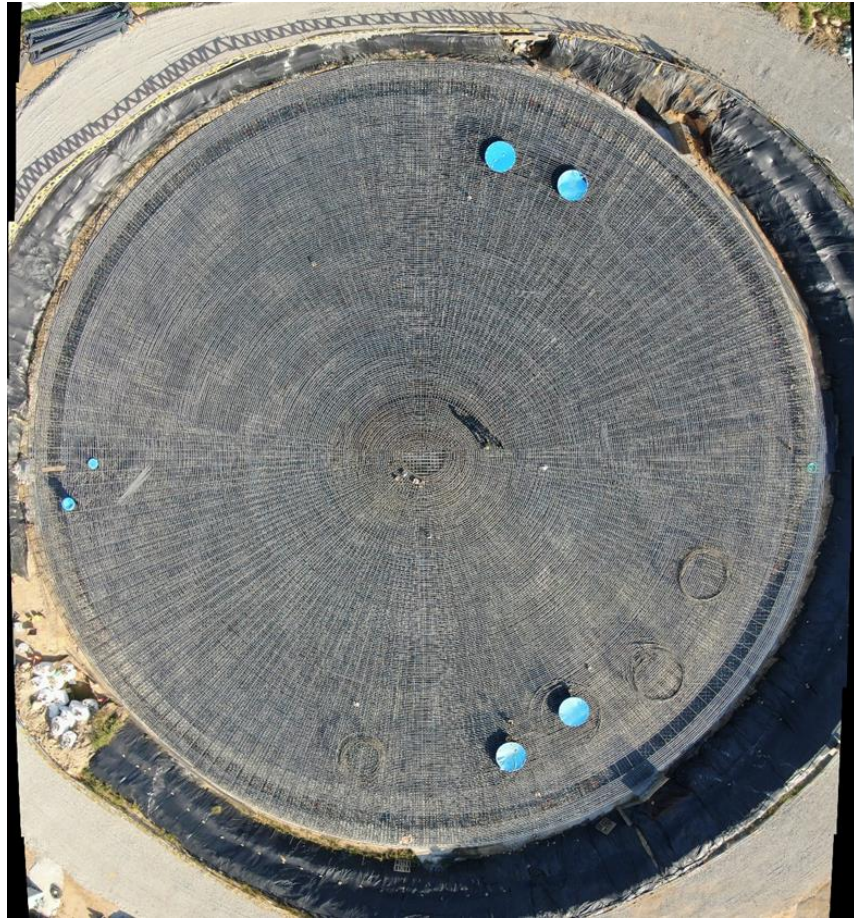


圖 136 聚興 4 萬噸水池底板鋼筋

另根據本研究小組，訪問國內各大顧問公司及環片製造商之結果(詳附錄)，國內導入最大之問題點在於規範尚未明確規定，經查目前國內只有「建築物混凝土結構設計規範」對於建築結構抗剪之鋼纖維加強材有規定。而對於鋼纖維混凝土之製程及檢驗方式，只能參考國外 ACI 規範(詳附錄)；惟各大顧問公司及環片製造商，因此材料轉換成本低，並不需要額外增加生產器具，只要調整製程及確保後續檢驗方式即可使用，皆對於鋼纖維材料有很大興趣。

第九章 討論與建議

9.1 討論

1. 本次研究中，由鋼筋混凝土 A 型環片之單體抗彎試驗結果顯示，17.4 噸出現第一條裂紋，66.9 噸才破壞，遠遠超過設計要求 28.6 噸，因此鋼筋混凝土 A 型環片存在過度設計之情況，這部分在 5.3 節中亦有分析將鋼筋比 1.0% 降為 0.5% 時也可達到設計需求；鋼纖維混凝土 A 型環片之單體抗彎試驗破壞強度僅 13.4 噸，依據鋼纖維計算出之包絡線換算，如果採用短期載重則需要達到 13.23 噸，雖然測試已達但非常接近，因此仍建議使用少量主筋提供抗彎強度，以滿足施工中臨時受力之需求；而 K 型環片經本次試驗顯示，鋼纖維混凝土可以完全替代原設計鋼筋混凝土之性能要求，故未來仍有其使用之潛力。
2. 由 A 型環片單體抗彎試驗之裂縫顯示，鋼纖維混凝土環片較鋼筋混凝土環片，其裂縫長度和平均寬度均顯著增加；表示該環片在試驗受壓過程，環片之混凝土能夠產生較大應變，進而導致破壞；而試驗之破壞曲線中亦出現平緩之區域(非一般混凝土之瞬間破壞)，與鋼纖維混凝土之特性相符，其為鋼纖維從混凝土中被拉出

前，因發生塑性變形而使試體緩慢增加變形量，故鋼纖維混凝土之容許應變量高於一般鋼筋混凝土。

3. 從圖 124 之裂縫情況可看出環片單體抗彎試驗破壞時，多處鋼纖維並無斷裂，而是被拉出破壞為主；因此，環片極限破壞時，部分鋼纖維恐因握裹能力不足，而未全部發揮極限強度，致試驗成果與原設計有些微差異。
4. 灌漿孔拉拔試驗中，K 型環片所進行之拉拔試驗結果顯示，鋼纖維及鋼筋皆能通過原始設計所要求的 2.2 噸規定；而抗推試驗中，鋼纖維在 399 噸時，邊緣開始產生裂縫但到 480 噸仍然無破壞，鋼筋之 K 型環片是直到 480 噸都無裂縫產生；這代表鋼纖維混凝土在 K 型環片在安裝、堆置或儲存上已達到工作性能要求，或可以替代鋼筋。
5. 經計算同體積之潛盾隧道環片，使用鋼纖維混凝土環片之價格分別僅為鋼筋混凝土環片之 27.5% (A 型環片)與 17.9%(K 型環片)；另評估碳排放，A 型環片可從 288.56kg 降為 30.17 kg，K 型環片從 148.22kg 降為 10.06kg，分別僅有原本之 10.46%及 6.79%，若以整體環片隧道考慮將鋼筋替換為鋼纖維，整體碳排可降低 4.27%；故鋼纖維混凝土環片未來在價格上有絕對之優勢。

6. 目前台水公司辦理自來水工程之潛盾工法，多採用 DIP 管或鋼管作為主要輸水管，當管線為大管時(1500mm 以上)，施工完成後將在管線與隧道中間充填混凝土，故從功能性考量，混凝土環片屬於臨時假設工程；可能需重新思考混凝土環片之設計強度考量。基於此次之實驗驗證，環片可考慮減少環片中之剪力筋、箍筋用量，同時加入少量之鋼纖維作為補強，而非完全以鋼纖維取代鋼筋。

9.2 建議

1. 由於本案之實尺寸鋼纖維混凝土環片試體，有別於以往縮尺寸實驗，直接由鋼筋混凝土環片製造商，以既有現場設備進行澆置、製造；由於試驗結果顯示，部分鋼纖維握裹力不足被拉出破壞，故建議未來使用製造鋼纖維混凝土環片時，應配合鋼纖維混凝土材料配比，再檢討既有製造機台之振動強度及頻率，以提昇鋼纖維握裹力。
2. 本次試體澆置後經過 13 天(蒸氣、水中、大氣)養生，經由圓柱體抗壓試驗即顯示超過所需強度；故建議未來製程，可事先以圓柱體抗壓試驗，確認強度後減少大氣養生時間，以加快製造速度。

3. 本案 A 型鋼纖維混凝土環片應變計因脫模油及振動台振動頻率較預期大，導致須臨時裁剪鋼筋以固定支架，但仍無法避免訊號線集線盒遭震開，遂建議未來使用如圖 137 之光纖光柵量測長向方向，可量測較為準確之應變計數值。

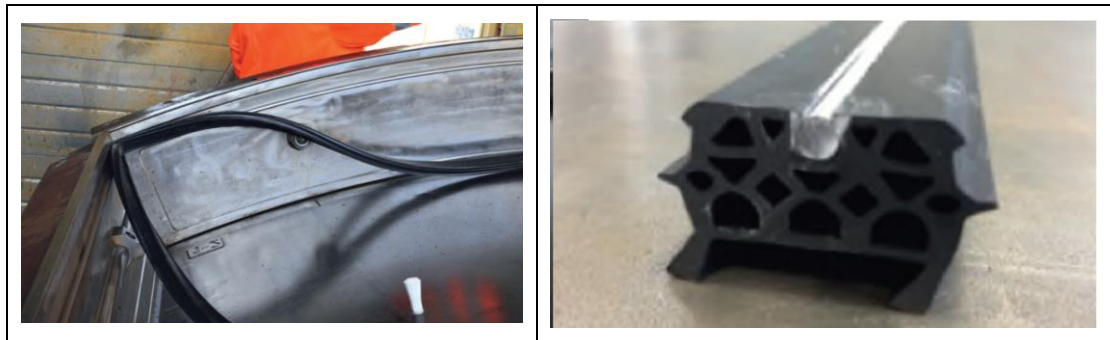


圖 137 國外鋼纖維混凝土應變計量測

4. 一般鋼筋混凝土環片之設計，存在過設計情況，建議可降低鋼筋比，以節省鋼筋費用及降低碳排放量。
5. 本研究以減少鋼材使用，簡化生產流程，降低製造成本，並在減少碳排放方面發揮作用，SFRC 為現代隧道建設提供了一個高效、經濟且環保之材料選擇。隨著技術的進一步發展和優化，日本、中國、德國、義大利和西班牙等國家已經制定了相應之國家規範，明確規範鋼纖維在結構中如何使用，建議台灣可進一步推動 SFRC 技術的標準化和規範化應用，以跟上世界潮流。
6. 鋼纖維添加至混凝土中時，會增加混凝土之延展性，依據國外 EN14651 及 Fib Model Code 2010 規範進行鋼纖維混凝土環片設

計，雖然增加倍數之鋼纖維含量， P_n - M_n 包絡線之範圍卻增加不大，本研究參考國外案例及相關研究報告使用 40kg/m^3 之鋼纖維含量，礙於經費有限，故並未進行不同鋼纖維含量之試驗，建議後續研究可考慮辦理。

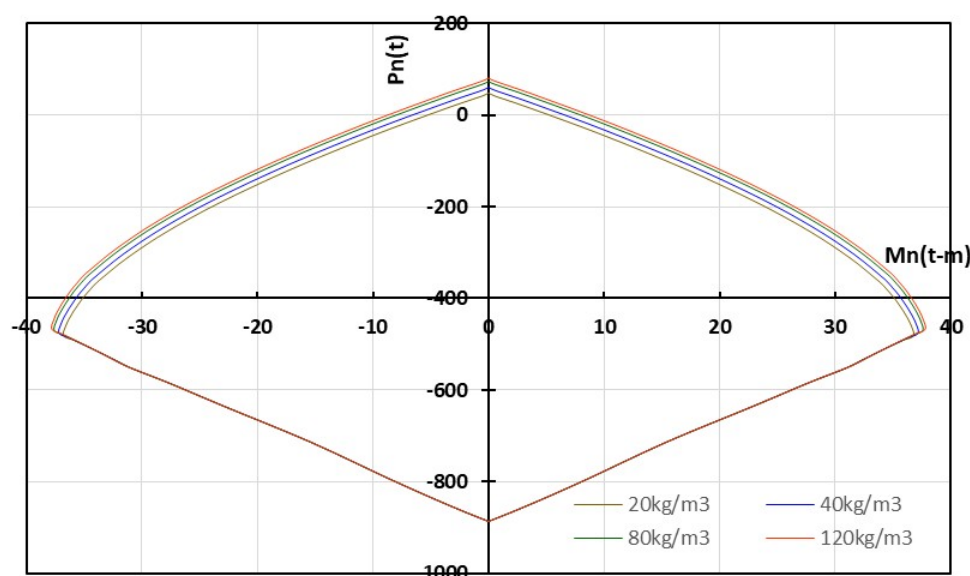


圖 138 不同含量鋼纖維混凝土 A 型環片 P_n - M_n 交互影響線

7. 鋼纖維混凝土環片應用於地鐵、捷運隧道必須採長期載重設計，考量地震力載重、隧道直徑變化 0.33% 之強制變位，考慮於台灣推廣初期，由於國內相關規範未頒布，雖僅於假設(臨時)工程試用，惟設計單位可能基於保守心態，恐不敢貿然採用短期載重設計；故建議後續研究，可需辦理長期載重之鋼纖維混凝土環片設計及試驗。
8. 台灣處地震發生頻繁之地震帶，而鋼纖維能提高混凝土材料韌性及剪力抗性，加大剪力(箍)筋間距，有利於混凝土澆置時充分搗

實，且鋼纖維亦能預防早期保護層剝落，抑制裂縫生長，避免水池發生瞬間破壞，故適合應用於大型(預力)水池結構。

參考文獻

- 1.熊彬成、何奕賢(2024)。「自來水工程應用鋼纖維混凝土之研究－以潛盾工法之內襯環片為例」委託實驗研究計畫。
- 2.廖文正(2017)。專輯-新世代耐震材料-高流動性應變硬化鋼纖維混凝土的研發及應用。土木水利，第四十四卷，第一期，52-58。
- 3.吳世紀(2020)。自來水幹管潛盾工程設計施工。自來水會刊第 39 卷第 1 期(153)，14-26。
- 4.吳平其(2023)。潛盾工法設計。自來水公司教育訓練簡報。
- 5.朱旭、李魁士、何泰源、石原金洋(2008)。潛盾隧道新技術之發展與應用。中華技術 NO. 77，118-133。
- 6.臺北市政府捷運工程局(2021)。捷運潛盾隧道環片生產實務。臺北市政府捷運工程局。
- 7.古鴻坤(2021)。潛盾監造實務。
- 8.推推，潛盾機向前進！。上網日期：2020 年 11 月 5 日，檢自：
<https://www.dorts.ntpc.gov.tw/documentary/articleInfo/PAV2nYKKmn3z>。
- 9.桃園捷運綠線克服工程困難 潛盾隧道由蘆竹區貫通至桃園藝文特區。上網日期：2024 年 3 月 3 日，檢自：
<https://www.cdns.com.tw/articles/969603>
- 10.Naaman A E, 1972, *A statistical theory of strength for fiber reinforced concrete*, Doctoral thesis,Massachusetts Institute of Technology.
- 11.SFB 837, 2018, *Numerical Investigation of Hybrid Segmental Lining Response to Mechanized Tunneling Induced Loadings*.
- 12.Moncef L. Nehdi & Ahmed M. Soliman, 2015, *Exploratory study of ultra-high performance fiber reinforced concrete tunnel lining segments with varying steel fiber lengths and dosages*.
- 13.Xiuling Wang and Jinxing Lai, 2021, *Steel fiber reinforced concrete: A*

- review of its material properties and usage in tunnel lining.*
- 14.內政部(2024)。建築物混凝土結構設計規範。
 - 15.ACI-544.7R-16,2016, *Report on Design and Construction of Fiber-Reinforced Precast Concrete Tunnel Segments.*
 16. 優異國際開發有限公司。ACI 544.3R 鋼纖維混凝土配比、拌合、澆築及飾面規範說明。現代營建第 233 期(1999.05)，17-22。
 17. 陳明宏、侯嘉松、周允文。鋼纖維噴凝土材料管理與規範探討——以蘇花改谷風隧道為例。中華技術第 104 卷(2014.10)，84-99。
 - 18.陳東陽，董賀祥(2024)。鋼纖維噴凝土技術。未出版。
 - 19.Cary Kopczynski & Company - CKC Structural Engineers。上網日期：2024 年 3 月 16 日，檢自：
<https://www.facebook.com/ckcps/posts/the-twin-45-story-towers-of-seattle-house-have-reached-level-13-this-mixed-use-m/940622368065108/>。
 - 20.Cary Kopczynski & Company - CKC Structural Engineers。上網日期：2024 年，檢自：<https://www.ckcps.com/buildable-design>。
 - 21.Charles Allen.,2014,*The Lee Tunnel Secondary Lining Innovation and a Learning Curve in High Pressure Ground Water*, [C] . Cutting Edge Conference, New York, November.
 22. 大林株式會社。首都高速中央環狀新宿線中落合シールド(外回り)。上網日期：2011 年，檢自：
<https://www.obayashi.co.jp/chronicle/works/d056.html>。
 - 23.Ernst, Sohn, 2013, *fib Model Code for Concrete Structures 2010*.
 - 24.Benoit De Rivaz(2008), *Steel fiber reinforced concrete (SFRC): The use of SFRC in precast segment for tunnel lining.*
 - 25.台灣世曦工程顧問公司(2023)。大安大甲第 2 標「潛盾隧道預鑄

混凝土環片結構計算書」。

26. 李瀚全(2017)。鋼纖維混凝土預鑄環片在台灣之混凝土設計與分析初探。未出版之碩士論文，國立高雄應用科技大學。
27. 黃价民(2007)。應用於潛盾隧道環片變形監測之可行性研。未出版之碩士論文，國立交通大學。
28. P. Jarast, M. Bakhshi, V. Nasri. (2023)., *Carbon footprint emissions of different tunneling construction.*, Expanding Underground - Knowledge and Passion to Make a Positive Impact on the World. Methods, P65-73.
29. M V S S Giridhar, Madaka Madavi, Ramaraju Anirudh, E Ramakrishna Goud, 2015, *Analysis of Pressures on Nagarjuna Sagar Spillway.*, AGRICULTURE Research Article.
30. Singapore Standard, 2021, *Fibre concrete – Design of fibre concrete structures.*, Singapore: Singapore Standard Council.

附錄 A. 中興工程顧問軌道工程訪談記錄

3/13

中興工程顧問有限公司軌道工程二部參加人員：

1. 協理兼計畫經理 賴建名。
2. 技術經理 莊志維。
3. 技術經理兼計畫經理 陳滄江。
4. 技術經理兼計畫經理曾紀緯。

自來水公司參加人員：

1. 工務處研發組組長：張民豈
2. 工務處工程員：鄭宇哲

Q1. 鋼纖維混凝土環片在國外已有多年使用之案例，請教貴公司之前規劃設計之國內捷運隧道(採潛盾施工)，是否曾有使用案例？

中興顧問：

由於國內目前沒有相關設計、施工規範，業主比較不敢第一個嘗試，故至今還沒有使用案例，但是鋼纖維噴凝土有在公路隧道使用，提供暫時性支撐的功能，但隧道之內襯環片就仍採鋼筋混凝土環片，而沒有採用鋼纖維混凝土環片了。其實就前端結構分析的觀

點來看，應該是沒有問題，因為從開始到結點產生力(載重組合)的需求是一樣的，而後面做鋼筋混凝土環片的 RC 設計有明確之規範，使用何種混凝土對應剪力強度等等都很明確，但現在鋼纖維混凝土環片的相關規範，例如多少的力量對應何種鋼纖維混凝土之配比，如果計算出來的力量比較大，鋼纖維的百分比是不是比較多等等議題，甚至鋼纖維量要如何設計等等，在國內是沒有的。因此在沒有國內規範可依據的情況下是無法設計的。

Q2. 目前本公司刻正與中興大學熊教授合作「自來水工程應用鋼纖維混凝土之研究-以潛盾工法之內襯環片為例」研究案，倘研究成果經試驗符合使用需求，未來國內採潛盾施工之捷運隧道是否有機會(意願)採用？

中興顧問：

是否採用？主要考量是沒有設計規範，如果設計規範很明確，如多少受力要使用多少比例的鋼纖維，則可以使用；另外之疑慮是不能確認在鋼纖維混凝土環片製作時，鋼纖維的分佈均勻與否，如果可以解決則可以考慮引用。

台水公司：

國內對於鋼纖維混凝土之應用比較少，經我們蒐集資料發現，國外 ACI 規範十幾年前已有鋼纖維混凝土之設計規範(ACI 544)，而 ASTM 亦有相關試驗規定；然國內只有建築物混凝土設

計規範有對鋼纖維混凝土剪力方面有稍微著墨。而國內台大土木系廖教授、興大土木系熊教授均曾做過相關之研究，而國內對於隧道之假設工程(鋼纖維噴凝土)亦已經應用很多，或許可以考慮。

Q3. 未來採潛盾施工之捷運隧道內襯環片，倘採用鋼纖維混凝土製造，您覺得可能有那些問題需克服？

中興顧問：

- (1). 目前隧道有可能遇到大量地下水、滲流水，鋼纖維混凝土可能需要克服因鋼纖維銹蝕而影響強度問題。
- (2). 由於混凝土環片會有開孔，如灌漿孔、吊裝孔之類的預留孔，配筋時都會有補強筋，然而鋼纖維混凝土環片已無鋼筋，在這些開孔處是否會有補強不足之問題？

台水公司：

1. 曾詢問過鋼纖維混凝土製造商，由於鋼纖維銹蝕僅發生在鋼纖維混凝土構造物之表面，因為鋼纖維不相連的關係，故不會造成內部全部生鏽之情況，故不因表面之鋼纖維發生銹蝕，而影響整體鋼纖維混凝土強度；且若有特殊考量，也可以將鋼纖維替換成不銹鋼纖維。
2. 一般設計開孔之補強筋是怕應力集中造成開口部分開裂，且有方向性問題；由於鋼纖維混凝土相較一般鋼筋混凝土是較均質性之材料，故較無方向性補強問題，且鋼纖維混凝土之開裂跟一般混凝土行為較不同，其有類似金屬之應變硬化情形，不會直接破壞而會有一段破壞前變形之情況，故韌性較佳。

註：中興顧問軌道工程部主要業務項目：軌道工程一部主要是鐵

道，軌道工程二部主要是捷運相關設計的專案，鐵道主要是明挖後覆蓋，而捷運對於潛盾應用較多。

附錄 B. 台灣世曦工程顧問訪談記錄

7/2

台灣世曦參加人員：

1. 防災工程技術整備中心主任：李魁士
2. 捷運工程部技術經理：譚家瑞
3. 大地工程部副理：周坤賢
4. 大地工程部工程師：劉兆洋

自來水公司參加人員：

1. 工務處研發組組長：張民豈
2. 工務處工程員：鄭宇哲

Q1. 研發組目前的方向為何？另台水最近才在進行潛盾的應用，現在是否要往鋼纖維環片的生產與應用來走。

台水研發組：

台水工程技術落後業界非常多年，如最近才在做水管橋規範，目前正在進行改善跟追上業界的腳步，以及配合政府節能減碳之政策目標，研發組目前正在朝此方向前進，並制定規範後推動幾個案子試辦。

Q2. 本次所進行之鋼纖維潛盾環片，是否有實際工程進行某幾段環片的測試呢?做完後會有個建議規範出來嗎?

台水研發組:

目前規劃為先做一個實驗測試，若未來完成後，可再正式工程進行實際運用，而目前只是對鋼纖維混凝土環片的設計配比做個建議的規範，預計未來還要在做正式工程時，還會有個先期的規範，並到時再擬定詳細的規範。

Q3. 如果我們本次新案子的研究成果完成後，找地質條件好的區段來進行試用，這樣是否可行?

台灣世曦:

基本上是可行的，但不管從英國還是日本的應用例來看，因其地層比較好比台灣的都還要好做，而環片的弱點應該再接頭，他們的分析對於接頭都忽略了，因為他們所處的地盤環境很穩定，建議可以台水要推的話，可先在好的礫石層先使用，不一定要整個標案的地層都很好，同一個標案有地質條件的好壞，可以選好的那段進行測試，另因為自來水潛盾環片主要使用在穿管前，穿管後就灌漿

填滿了沒有長期依賴環片本身的強度，所以是很好的測試工程。

目前台灣的單位體積鋼筋量遠比外國的高，外國的都是 60 公斤，台灣都是 300 公斤，因為就是地層的差異以及規範比別人嚴苛，如強制變位的設定，且外國的規範太多了，而且每個國家的規格都不太一樣可能不適合台灣使用，所以希望熊教授能夠訂出個統一規範。

另堅硬的岩盤反而比較適合鋼纖維混凝土，因為主要在潛盾機的施工載重而不是泥水壓在影響，因此加鋼筋沒有加鋼纖維這麼有效，因為鋼纖維混凝土邊緣比較不會崩塌，這是我們觀察國外馬來西亞隧道的經驗。

附錄 C. 大弘水泥製品廠股份有限公司訪談記錄

9/12

大弘水泥公司參加人員：

總經理：張惠中

自來水公司參加人員：

1. 工務處研發組組長：張民豈
2. 工務處工程員：鄭宇哲



Q1. 以前是否有嘗試過鋼纖維混凝土呢？

大弘：

大弘以前曾經有自己做過鋼纖維混凝土的環片試驗，但是一壓就裂了，強度不足，但現在有中興大學的研究團隊，可能會有新的結果，所以也想看看。

Q2. 請問實務上如果導入鋼纖維混凝土，貴公司的設備是否需要修改？

大弘：

之前進料槽測試過加入鋼纖維並無其他影響，清洗上也無問題，生產中依照傳統的環片製程即可無須較大的修改，但目前的混凝土配比可能不適用鋼纖維混凝土，需要有個規範或實驗比較好遵循。

設備大致上不用修改，但部分參數可能需要調整，如震動台的震動時間，要看坍流度情形再調整。

Q3. 鋼纖維混凝土是否有不同的澆注跟養護製程？

大弘：

澆注要試鋼纖維視做的流動情形，如果流動量足夠是可以跟傳統的一樣，蒸氣養生跟水養生的時間依據經驗，應該跟傳統製程一樣即可。

Q4. 以大安大甲的環片為例，每片環片綁鋼筋的人力成本大概算多少？

大弘：

人力目前是請外勞，每環(含 5 片 A、B 環片及 1 片 K 環片)人工成本應該大概在 4000-5000 之間，若能節省綁筋的時間確實很有幫助。

Q5. 如果本案完成後，未來若有是否能開始生產鋼纖維混凝土環片？

大弘：

主要還是鋼纖維混凝土環片尚無規範，若有規範且業主要求，應當可以生產。

附錄 D. SFRC 品質管理程序建議

台灣西卡股份有限公司，市場分析經理，林東陽

鋼纖維混凝土（SFRC）的品質管理，對於確保其在建築應用中的最佳性能至關重要。以下是有效管理 SFRC 品質的方法和建議：

1. 材料選擇與測試

鋼纖維品質：使用高品質、幾何形狀和機械性能一致的鋼纖維。

在使用前對鋼纖維性能進行測試，以確保其符合項目規範。不管是膠合併排，或是散纖；應確保鋼纖維絕不能生鏽。以往會有結團現象，大多是生鏽和毛邊導致，尚未加入混凝土以前，及已經結團。使用不對的鋼纖維，會有難以收拾的後果。

混凝土配合比設計：進行充分的配合比試驗，以確定最佳的鋼纖維含量、水泥-水比及其他外加劑，從而達到所需的強度和工作性。

2. 生產過程中的品質控制

拌合程序：實施精確的配比和混合程序，以確保鋼纖維在混凝土基質中的均勻分佈。

定期取樣：對新鮮和硬化的 SFRC 進行常規取樣和測試，以監測工作性、抗拉強度和抗彎強度等性能。

3. 現場品質控制

非破壞性檢測：使用超音波脈衝回彈測試等方法，評估 SFRC 的完整性和均勻性，而不會造成損壞。

性能監測：在澆置和固化過程中建立監測計劃，觀察 SFRC 在載荷和環境條件下的行為。

4. 標準作業程序和培訓

標準作業程序（SOPs）：制定並維護詳細的 SFRC 拌合、澆置和養護程序，以確保一致性和品質。

培訓：對工人和監督者，進行鋼纖維混凝土特定操作的培訓，以減少施工中的變異。

5. 可持續性和環境考量

使用可持續材料：在 SFRC 配合比中，加入回收材料和環保外加劑，以提高可持續性。

全生命周期評估：對 SFRC 應用進行全生命周期評估，以了解其環境影響並促進施工實踐的可持續性。

有效實施鋼纖維增強混凝土的品質管理需要材料選擇、嚴格測試(使用不對的鋼纖維，會有難以收拾的後果。)、現場監測和培訓的綜合運用。通過遵循這些建議，施工人員可以提高 SFRC 結構的耐久性、強度和整體性能。

■EN 14721 是一項歐洲標準，主要用於評估混凝土和混合材料中纖維的性能，特別是在生產和質量控制過程中。該標準涵蓋了以下幾個主要方法和內容：

測試程序: EN 14721 提供了一系列的測試程序，用於評估鋼纖維增

強混凝土（SFRC）的性能。這些測試通常包括彎曲強度、

抗壓強度、耐久性和裂縫控制能力等方面的評估。

樣品準備: 標準詳細說明了如何製作測試樣本，包括混合比例、固

化條件和樣本的尺寸，確保測試結果的一致性和可重複

性。

性能要求: EN 14721 定義了不同應用領域中對於 SFRC 的性能要

求，如道路建設、橋樑和其他基礎設施。這些要求幫助工

程師和建築商選擇合適的材料來滿足特定的工程需求。

質量控制: 標準還提出了對生產過程的質量控制建議，包括生產環境的監控、材料質量的檢測以及產品在施工前的檢查，以確保最終產品的性能達到預期標準。

報告與紀錄: EN 14721 還要求對測試結果進行詳細報告，並建議應該維護必要的紀錄，以便進行後續的質量管理和追蹤。

附錄 E. ACI 544.3R 及 ACI 544.1R 規範簡介

1. ACI 544.3R 鋼纖維混凝土配比、拌合、澆築及飾面規

範，節錄前 2 頁簡介：

ACI 544.3R-93
(Reapproved 1998)

Guide for Specifying, Proportioning, Mixing, Placing, and Finishing Steel Fiber Reinforced Concrete

Reported by ACI Committee 544

Surendra P. Shah
Chairman

James I. Daniel
Secretary

Shuaib H. Ahmad
M. Arockiasamy
P.N. Balaguru
Claire G. Ball
Hiram P. Ball, Jr.
Nemkumar Banthia
Gordon B. Batson
Amon Bentur
Dennis Casamatta
Marvin E. Criswell
Sidney Freedman
Richard E. Galer
Melvyn A. Galinat
Vellore S. Gopalaratnam

Antonio Jose Guerra
Lloyd E. Hackman*
M. Nadim Hassoun
Carol D. Hays
C.H. Henager, Sr.*
George C. Hoff*
Roop L. Jindal
Colin D. Johnson*
David R. Lankard
Mark A. Leppert
Brij M. Mago
H.N. Marsh, Jr.
Assir Melamed†
N.C. Mitchell

Henry J. Molloy
D.R. Morgan*
A.E. Naaman
Antonio Nanni
Stanley L. Paul
Seth L. Pearlman
V. Ramakrishnan
D.V. Reddy
R.C. Robinson
E.K. Schrader*
Morris Schupack
Shan Somayaji
Parviz Soroushian

J.D. Speakman
R.N. Swamy
Peter C. Tatnallt
B.L. Tilsen
George J. Venta
Gary L. Vondran
Methi Wecharatana
G.R. Williamson
Ronald E. Witthohn
George Y. Wu
Spencer T. Wu
Robert C. Zellers
Ronald F. Zollo

* Members of the subcommittee who drafted this report.
† Chairmen of the subcommittee who drafted this report.

This guide describes the current technology in specifying proportioning, mixing, placing, and finishing of steel fiber reinforced concrete (SFRC). Much of the current conventional concrete practice applies to SFRC. The emphasis in the guide is to describe the differences between conventional concrete and SFRC and how to deal with them. Guidance is provided in mixing techniques to achieve uniform mixtures, placement techniques to assure adequate compaction, and finishing techniques to assure satisfactory surface textures. Sample mix proportions are tabulated. A listing of references is provided covering proportioning, properties, refractory uses, shotcrete technology, and general information on SFRC.

Keywords: compacting; concrete construction; concrete finishing (fresh concrete); fiber reinforced concrete; metal fibers; mixing; mix proportioning; placing; specifications.

CONTENTS

Chapter 1 - General, pg. 544.3R-2

1.1 - Scope

1.2 - Steel fiber reinforced concrete-General

ACI Committee Reports, Guides, Standard Practices and Commentaries are intended for guidance in designing, planning, executing, or inspecting construction and in preparing specifications. Reference to these documents shall not be made in the Project Documents. If items found in these documents are desired to be part of the Project Documents, they should be phrased in mandatory language and incorporated into the Project Documents.

1.3 - Typical uses of steel fiber reinforced concrete

1.4 - Specifying steel fiber reinforced concrete

Chapter 2 - Materials, pg. 544.3R-3

2.1 - General

2.2 - Fibers

2.3 - Admixtures

2.4 - Storage of fibers

Chapter 3 - Mixture proportioning, pg. 544.3R-4

3.1 - General

3.2 - Workability and consistency measurements

3.3 - Proportioning methods

Chapter 4 - Formwork and reinforcing steel, pg. 544.3R-5

4.1 - Formwork

4.2 - Reinforcing steel

Chapter 5 - Batching, mixing, delivery, and sampling, pg. 544.3R-5

ACI 544.3R-93 became effective May 1, 1993.

Copyright © 1993, American Concrete Institute.

All rights reserved including rights of reproduction and use in any form or by any means, including the making of copies by any photo process, or by any electronic or mechanical device, printed, written, or oral, or recording for sound or visual reproduction or for use in any knowledge or retrieval system or device, unless permission in writing is obtained from the copyright proprietors.

- 5.1 - General
- 5.2 - Mixing
- 5.3 - Causes of fiber balling

Chapter 6 - Placing and finishing, pg. 544.3R-6

- 6.1 - General
- 6.2 - Placing
- 6.3 - Transporting and handling equipment
- 6.4 - Finishing
- 6.5 - Hot and cold weather requirements
- 6.6 - Repair of defects
- 6.7 - Contraction joints

Chapter 7 - Curing and protection, pg. 544.3R-8

- 7.1 - General

Chapter 8 - References, pg. 544.3R-8

- 8.1 - Recommended references
- 8.2 - Cited references

CHAPTER 1 -- GENERAL

1.1 -- Scope

This guide covers specifying, proportioning, mixing, placing, and finishing of steel fiber reinforced concrete (SFRC).

1.2 -- Steel fiber reinforced concrete -- General

Steel fiber reinforced concrete is a composite material made of hydraulic cements, fine and coarse aggregate, and a dispersion of discontinuous, small steel fibers. It may also contain pozzolans and admixtures commonly used with conventional concrete.

In general, fiber length varies from 0.5 in. (12.7 mm) to 2.5 in. (63.5 mm). The most common fiber diameters are in the range of 0.017 in. (0.45 mm) to 0.04 in. (1.0 mm). Modern steel fibers have shapes which include round, oval, rectangular, and crescent cross sections, depending on the manufacturing process and raw material used.

The usual amount of steel fibers ranges from 0.25 percent by volume, i.e., 33 lb/yd³ (20 kg/m³), to 2 percent by volume, i.e., 265 lb/yd³ (157 kg/m³). The low end of the range applies to lightly loaded slabs on grade, some precast applications, and composite steel deck toppings. The upper end of the range is common for security applications (safes, vaults, etc).

The addition of steel fibers significantly improves many of the engineering properties of mortar and concrete, notably impact strength and toughness. Flexural strength, fatigue strength, and the ability to resist cracking and spalling are also enhanced. The extent of improvement in the concrete properties will vary based on the type and quantity of fibers used and the quality of the concrete matrix.

More detailed information on properties may be found in references listed in [Chapter 8](#).

1.3 -- Typical uses of steel fiber reinforced concrete

Generally, when used in structural applications, steel fiber reinforced concrete should only be used in a supplementary role to inhibit cracking, to improve resistance to impact or dynamic loading, and to resist material disintegration. In structural members where flexural tensile or axial tensile stresses will occur, such as in beams, columns, suspended slabs (i.e., not slabs on grade), the reinforcing steel must be capable of resisting the tensile stresses.

A number of research documents have been published on the subject of using steel fibers for reinforcing structural members in combination with conventional reinforcing (Craig 1984; 1987; Craig et al. 1984; Jindal 1984; Batson, Terry, and Change 1984; Balaguru and Ezeldin 1987). This research shows that increased flexural strength, increased shear resistance, and fatigue endurance limits are attainable.

In applications where the presence of continuous reinforcements is not essential to the safety and integrity of the structure, e.g., pavements, overlays, and shotcrete linings, the improvements in flexural strength associated with the fibers can be used to reduce section thickness or improve performance, or both. The following are some examples of structural and nonstructural uses of SFRC:

- *Hydraulic structures* -- Dams, spillways, stilling basins, and sluiceways as new or replacement slabs or overlays to resist cavitation damage (Schrader 1989).
- *Airport and highway paving and overlays* -- Particularly where a thinner-than-normal slab is desired (Johnston 1984).
- *Industrial floors* -- For impact resistance and resistance to thermal shock (Vandenberghe and Nemegeer 1985).
- *Refractory concrete* -- Using high-alumina cement in both castable and shotcrete applications (Lankard 1978; Hackman 1980).
- *Bridge decks* -- As an overlay or topping where the primary structural support is provided by an underlying reinforced concrete deck (Melamed 1985).
- *In shotcrete linings* -- For underground support in tunnels and mines, usually with rock bolts (Morgan and McAskill 1988).
- *In shotcrete coverings* -- To stabilize aboveground rock or soil slopes, e.g., highway and railway cuts, and embankments (Henager 1981; Morgan 1988).
- *Thin shell structures* -- Shotcreted "foam domes" (Haber 1986).
- *Explosion-resistant structures* -- Usually in combination with reinforcing bars (Henager 1983).
- A possible future use in seismic-resistant structures (Henager 1977; Craig 1984).

1.4 -- Specifying steel fiber reinforced concrete

1.4.1 General -- Steel fiber reinforced concrete is usually specified by strength and fiber content. In certain applications, toughness parameters may be specified. These are defined in ASTM C 1018, and are further discussed in ACI 544.2R and in a subsequent paragraph.

2. ACI 544.1R 纖維強化混凝土報告，節錄前 2 頁簡介：

ACI 544.1R-96
(Reapproved 2009)

Report on Fiber Reinforced Concrete

Reported by ACI Committee 544

James I. Daniel* Chairman	Vellore S. Gopalaratnam Secretary	Melvyn A. Galinat Membership Secretary
Shuaib H. Ahmad	George C. Hoff	Morris Schupack
M. Arockiasamy	Roop L. Jindal	Surendra P. Shah‡‡
P. N. Balaguru**	Colin D. Johnston	George D. Smith
Hiram P. Ball, Jr.	Mark A. Leppert	Philip A. Smith
Nemkumar Banthia	Clifford N. MacDonald	Parvis Soroushian
Gordon B. Batson	Pritpal S. Mangat	James D. Speakman
M. Ziad Bayasi	Henry N. Marsh, Jr.††	David J. Stevens
Marvin E. Criswell	Nicholas C. Mitchell	R. N. Swamy
Daniel P. Dorfmueller	Henry J. Molloy‡	Peter C. Tatnall†
Marsha Feldstein	D. R. Morgan	Ben L. Tilsen
Antonio V. Fernandez	A. E. Naaman	George J. Venta§§
Sidney Freedman	Antonio Nanni	Gary L. Vondran
David M. Gale	Seth L. Pearlman*	Methi Wecharatana
Antonio J. Guerra**	Max L. Porter	Spencer T. Wu
Lloyd E. Hackman	V. Ramakrishnan	Robert C. Zellers
C. Geoffrey Hampson	Ken Rear	Ronald F. Zollo§
M. Nadim Hassoun	D. V. Reddy	
Carol D. Hays	Ernest K. Schrader	

*Cochairmen, State-of-the-Art Subcommittee; responsible for preparing Chapter 1 and coordinating the entire report.

†Chairman, Steel Fiber Reinforced Concrete Subcommittee; responsible for preparing Chapter 2.

‡Chairman, Glass Fiber Reinforced Concrete Subcommittee; responsible for preparing Chapter 3.

§Chairman, Synthetic Fiber Reinforced Concrete Subcommittee; responsible for preparing Chapter 4.

**Cochairmen, Natural Fiber Reinforced Concrete Subcommittee; responsible for preparing Chapter 5.

††Chairman, Editorial Subcommittee; responsible for reviewing and final editing the entire report.

‡‡Previous Chairman of Committee 544; responsible for overseeing the development of the majority of this State-of-the-Art Report.

§§Previous Chairman of Glass Fiber Reinforced Concrete Subcommittee; responsible for overseeing the development of much of Chapter 3.

The report prepared by ACI Committee 544 on Fiber Reinforced Concrete (FRC) is a comprehensive review of all types of FRC. It includes fundamental principles of FRC, a glossary of terms, a description of fiber types, manufacturing methods, mix proportioning and mixing methods, installation practices, physical properties, durability, design considerations, applications, and research needs. The report is broken into five chapters: Introduction, Steel FRC, Glass FRC, Synthetic FRC, and Natural FRC.

Fiber reinforced concrete (FRC) is concrete made primarily of hydraulic cements, aggregates, and discrete reinforcing fibers. Fibers suitable for reinforcing concrete have been produced from steel, glass, and organic polymers

(synthetic fibers). Naturally occurring asbestos fibers and vegetable fibers, such as sisal and jute, are also used for reinforcement. The concrete matrices may be mortars, normally proportioned mixes, or mixes specifically formulated for a particular application. Generally, the length and diameter of the fibers used for FRC do not exceed 3 in. (76 mm) and 0.04 in. (1 mm), respectively. The report is written so that the reader may gain an overview of the property enhancements of FRC and the applications for each general category of fiber type (steel, glass, synthetic, and natural fibers).

Brittle materials are considered to have no significant post-cracking ductility. Fibrous composites have been and are being developed to provide improved mechanical properties to otherwise brittle materials. When subjected to tension, these unreinforced brittle matrices initially deform elastically. The elastic response is followed by microcracking, localized macrocracking, and finally fracture. Introduction of fibers into the concrete results in post-elastic property changes that range from subtle to substantial, depending upon a number of factors, including matrix strength, fiber type, fiber modulus, fiber aspect ratio, fiber strength, fiber surface bonding char-

ACI Committee Reports, Guides, and Commentaries are intended for guidance in planning, designing, executing, and inspecting construction. This document is intended for the use of individuals who are competent to evaluate the significance and limitations of its content and recommendations and who will accept responsibility for the application of the material it contains. The American Concrete Institute disclaims any and all responsibility for the stated principles. The Institute shall not be liable for any loss or damage arising therefrom.

Reference to this document shall not be made in contract documents. If items found in this document are desired by the Architect/Engineer to be a part of the contract documents, they shall be restated in mandatory language for incorporation by the Architect/Engineer.

ACI 544.1R-96 became effective November 18, 1996. This report supersedes ACI 544.1R-82(86).

Copyright © 1997, American Concrete Institute.

All rights reserved including rights of reproduction and use in any form or by any means, including the making of copies by any photo process, or by electronic or mechanical device, printed, written, or oral, or recording for sound or visual reproduction or for use in any knowledge or retrieval system or device, unless permission in writing is obtained from the copyright proprietors.

acteristics, fiber content, fiber orientation, and aggregate size effects. For many practical applications, the matrix first-crack strength is not increased. In these cases, the most significant enhancement from the fibers is the post-cracking composite response. This is most commonly evaluated and controlled through toughness testing (such as measurement of the area under the load-deformation curve).

If properly engineered, one of the greatest benefits to be gained by using fiber reinforcement is improved long-term serviceability of the structure or product. Serviceability is the ability of the specific structure or part to maintain its strength and integrity and to provide its designed function over its intended service life.

One aspect of serviceability that can be enhanced by the use of fibers is control of cracking. Fibers can prevent the occurrence of large crack widths that are either unsightly or permit water and contaminants to enter, causing corrosion of reinforcing steel or potential deterioration of concrete [1.1]. In addition to crack control and serviceability benefits, use of fibers at high volume percentages (5 to 10 percent or higher with special production techniques) can substantially increase the matrix tensile strength [1.1].

CONTENTS

Chapter 1—Introduction, pp. 544.1R-2

- 1.1—Historical aspects
- 1.2—Fiber reinforced versus conventionally-reinforced concrete
- 1.3—Discussion of fiber types
- 1.4—Production aspects
- 1.5—Developing technologies
- 1.6—Applications
- 1.7—Glossary
- 1.8—Recommended references
- 1.9—Cited references

Chapter 2—Steel fiber reinforced concrete (SFRC), pp. 544.1R-7

- 2.1—Introduction
- 2.2—Physical properties
- 2.3—Preparation technologies
- 2.4—Theoretical modeling
- 2.5—Design considerations
- 2.6—Applications
- 2.7—Research needs
- 2.8—Cited references

Chapter 3—Glass fiber reinforced concrete (GFRC), pp. 544.1R-23

- 3.1—Introduction
- 3.2—Fabrication of GFRC material
- 3.3—Properties of GFRC
- 3.4—Long-term performance of GFRC
- 3.5—Freeze-thaw durability
- 3.6—Design procedures
- 3.7—Applications of GFRC
- 3.8—GFRC panel manufacture
- 3.9—Surface bonding
- 3.10—Research recommendations
- 3.11—Cited references

Chapter 4—Synthetic fiber reinforced concrete (SNFRC), pp. 544.1R-38

- 4.1—Introduction

- 4.2—Physical and chemical properties of commercially available synthetic fibers

- 4.3—Properties of SNFRC

- 4.4—Composite production technologies

- 4.5—Fiber parameters

- 4.6—Applications of SNFRC

- 4.7—Research needs

- 4.8—Cited references

Chapter 5—Natural fiber reinforced concrete (NFRC), pp. 544.1R-56

- 5.1—Introduction
- 5.2—Natural fibers
- 5.3—Unprocessed natural fiber reinforced concrete
- 5.4—Processed natural fiber reinforced concrete
- 5.5—Practical applications
- 5.6—Summary
- 5.7—Research needs
- 5.8—Cited references

CHAPTER 1—INTRODUCTION

1.1—Historical aspects

Since ancient times, fibers have been used to reinforce brittle materials. Straw was used to reinforce sun-baked bricks, and horsehair was used to reinforce masonry mortar and plaster. A pueblo house built around 1540, believed to be the oldest house in the U.S., is constructed of sun-baked adobe reinforced with straw. In more recent times, large scale commercial use of asbestos fibers in a cement paste matrix began with the invention of the Hatschek process in 1898. Asbestos cement construction products are widely used throughout the world today. However, primarily due to health hazards associated with asbestos fibers, alternate fiber types were introduced throughout the 1960s and 1970s.

In modern times, a wide range of engineering materials (including ceramics, plastics, cement, and gypsum products) incorporate fibers to enhance composite properties. The enhanced properties include tensile strength, compressive strength, elastic modulus, crack resistance, crack control, durability, fatigue life, resistance to impact and abrasion, shrinkage, expansion, thermal characteristics, and fire resistance.

Experimental trials and patents involving the use of discontinuous steel reinforcing elements—such as nails, wire segments, and metal chips—to improve the properties of concrete date from 1910 [1.2]. During the early 1960s in the United States, the first major investigation was made to evaluate the potential of steel fibers as a reinforcement for concrete [1.3]. Since then, a substantial amount of research, development, experimentation, and industrial application of steel fiber reinforced concrete has occurred.

Use of glass fibers in concrete was first attempted in the USSR in the late 1950s [1.4]. It was quickly established that ordinary glass fibers, such as borosilicate E-glass fibers, are attacked and eventually destroyed by the alkali in the cement paste. Considerable development work was directed towards producing a form of alkali-resistant glass fibers containing zirconia [1.5]. This led to a considerable number of commercialized products. The largest use of glass fiber reinforced

附錄 F. 期中專題審查答覆及說明

項次	委員	委員意見	答覆及說明
1	駱尚廉 主任委	期中報告通過，但請就節能減排或相關效益評估應納入研究。	經評估，本案 A 及 K 型環片鋼筋可大幅降低碳排，約只有原先之 10.46%及 6.79%，對於節能減排有相當大之效益，已納入 7.2 章節探討。
2		敬請參考各位委員之意見與建議，納入期末報告之研究探討內容。	將參考各位委員之意見與建議，納入期末報告之研究探討。
3	吳振榮 副主任 委員	本研究主要探討鋼纖維混凝土環片取代鋼筋混凝土環片之可行性，有別於傳統鋼筋依尺寸、間距有次序綁紮，鋼纖維為有序添加、隨機分佈於混凝土內，是否會因鋼纖維添加的不規範性，致使各環片的力學行為有所差異？另鋼纖維混凝土環片製程建議再補充敘述。	1. 參考國內隧道及邊坡穩定工程，常用之鋼纖維噴凝土，鋼纖維添加數量及混凝土配比相同下，經過攪拌均勻後，力學性能差異變化不大。 2. 鋼纖維混凝土環片製程於 ACI 544.3R 中有較詳盡之敘述，已補充於報告 3.3.5 節。
4		在建築結構上：樑、柱等主要構材是不單獨使用鋼纖維混凝土，主要是鋼筋屬具有連續性抗拉材料，其延伸長度、切斷點位置均有規範可遵循，而鋼纖維則不然。請補充說明 P62 為何採用軸力-彎矩交互影響曲線即可得知以鋼纖維可完全取代鋼筋？有何先行假設條件？	鋼筋混凝土構材可依據斷面之配筋，繪製軸力-彎矩交互影響曲線，評估構材之 Capacity 及可承受外力範圍(Demand)；而鋼纖維混凝土構材亦可依據斷面之鋼纖維含量(kg/m ³)，繪製軸力-彎矩交互影響曲線，評估構材之 Capacity 及 Demand；惟經本研究進行試驗驗證(報告第六章)，發現不可完全取代主筋。
5		本研究預計搭配水利署大安大甲溪聯通管工程之環片模具，環片製成後是否有套梢工作載重試驗及組裝試驗？	本案將進行拉拔試驗，以確認灌漿孔工作載重能力，組裝試驗因與強度無關，考量套梢工作載重小於拉拔試驗，及本案經費限制，故並無進行。

項次	委員	委員意見	答覆及說明
6	張添晉 委員	鋼纖維混凝土為新材料新技術工法，如欲推廣可強化說明在台灣之適用性及迫切性。	雖現今台灣已有許多工程使用鋼纖維混凝土，如隧道工程常用鋼纖維噴凝土；而鋼纖維混凝土環片於台灣之推廣，建議先於假設(臨時)工程試用，俟相關工程業管單位建立國內規範後，方有利於大規模導入使用，請詳見 8.4 節國內導入之初步評估。
7		可持續收集實務使用資料，以了解應用限制或工程效益。	本研究試驗之環片採實尺寸，且於一般環片之製造工廠，採用實際生產設備、製程以評估後續推廣之可行性。
8		各國應用法規或應用規範與國內之差異可加以說明。	國外之規範較多且完整，如美國之 ACI544 及歐洲 EN14651，而國內僅「建築物混凝土結構設計規範」中有對剪力有所規定，且不適用於隧道環片，詳如 3.2 節國內相關法規與規範內所說明。
9	徐俊雄 委員	文中圖 43 列有 6 種不同型式之鋼纖維，在使用上是否有不同之特點？本計畫使用之形式為那一種？建議列入報告說明。	本次實驗經過攪拌之程序已可均勻分布在構件中，可參考圖 124 混凝土裂縫圖，內部可見鋼纖維分布於其內，品質管制部分建議參考美國 ACI 規範內關於拌合之規定，另有附錄 D 為品管之建議。
10		實務上如何控制使用之鋼纖維平均分布在構件中，建議列入後續報告。	本次實驗經過攪拌之程序已可均勻分布在構件中，可參考圖 124 混凝土裂縫圖，內部可見鋼纖維分布於其內，品質管制部分建議參考美國 ACI 規範內關於拌合之規定，另有附錄 D 為品管之建議。
11		在預期成果上，除驗證鋼纖維混凝土環片之設計方法與假設外，未來是否提出建議那一種環境或使用目的上優先採用 SFRC 環片。	目前自來水工程之潛盾工法，多採用 DIP 管或鋼管作為主要輸水管，並在隧道加上混凝土環片作為施工保護，故從功能性考量，混凝土環片屬於臨時假設工程，較有機會優

項次	委員	委員意見	答覆及說明
			先採用。
12	朱撼湘 委員	鋼纖維混凝土取代鋼筋混凝土之目的在減少鋼筋數量，降低成本，減少碳排放量，但鋼纖混凝土供應廠商較少，成本較高，製程品管較複雜，建議以實際案例進行分析比較其效益，並訪談潛盾廠商使用意願。	本案使用大安大甲第二標工程之環片進行成本及碳排分析，價格分別僅為鋼筋混凝土環片之 27.5% (A 型環片) 與 17.9% (K 型環片)，另評估鋼筋之碳排分別僅為 10.46% 及 6.79%；本案亦訪談大弘水泥製品廠股份有限公司，其表現有設備已可生產，但仍需有業主有意願及提供相關規範。
13		鋼纖添加於混凝土會影響工作性，鋼纖於混凝土中是否均勻分布亦會影響取代鋼筋之成效，建議補充品質管控作法，以確保鋼纖混凝土品質穩定。	本次實驗經過攪拌之程序已可均勻分布在構件中，可參考圖 124 混凝土裂縫圖，內部可見鋼纖維分布於其內，品質管制部分建議參考美國 ACI 規範內關於拌合之規定，另有附錄 D 為品管之建議。
14	謝張浩 委員	本計畫日後推動「可用性」外，應評估實際廠商之製造「普及性」成本之評估，以為日後是否可「通用」之評估。	本案已有訪問環片製造商對於日後應用之可能性，請參考附錄 C。
15	范川江 委員	本研究案為引進新材料新技術作法，後續研究目標明確，製作相關環片試體，作為後續正式推動使用之重要依據及參考。	感謝委員支持。
16		有關研究案中針對台灣國內兩大顧問公司台灣世曦以及中興顧問交流拜訪，相關議題及建議事項，值得作為本研究案後續發展之參考。	感謝委員支持。
17		本研究案除了針對重要顧問公司之外，建議增加拜訪環片製造水泥製品廠實務上可行性探討。	本案於大弘水泥環片製造廠進行，皆使用該廠之生產設備製作，實務上實際使用驗證皆無問題，並訪問對於日後應用之可能性，其表示現

項次	委員	委員意見	答覆及說明
			有設備已可生產，但仍需有業主有意願及提供相關規範，請參考附錄C。

附錄 G. 期末專題審查答覆及說明

項次	委員	委員意見	答覆及說明
1	駱尚廉 主任委	參考文獻格式請修正，年代一定要註明。	遵照辦理，已修正。
2		期末報告予以通過，但仍請參考各委員的意見，予以補充、說明或修正，於限期內完成期末報告後送協會結案	遵照辦理。
3	吳振榮 副主任 委員	在有限經費及相關設計施工規範欠缺與應用案例稀少的情況下，研究團隊勇於嚐試探討並完成 A 型、K 型環片的實體製作及實驗，值得肯定。	感謝委員支持。
4		由 A 型環片單體抗彎試驗結果顯示試體發生塑性變形產生大的應變，但多處鋼纖維並無斷裂而是握裹力不足拉出破壞，惟已達預期設計強度及應變；因此，誠如多位委員在期中報告的意見，對於鋼纖維的添加及拌合，建議在 6.2 節製程中再補充資料，以供後續研究及實作參考	本案為使用現場實際生產設備，於輸送帶尾端之投料口，將鋼纖維投料入拌合機，因本案使用的是膠合併排的鋼纖維，接觸水即溶解，拌合時間依照一般製程參數，依據為所有材料加入時起算約 90 秒後傾出，已補充於 6.2.3 節。
5		本研究尚有環片接頭組裝試驗等製作與實驗，再配以實驗結果去探討設計、製作、施工規範，期望後續能再接再勵，俾為推廣為新材料新技術工法	感謝委員支持。
6	張添晉 委員	期中報告所提審查意見皆有具體的答覆及說明	感謝委員支持。
7		請增加圖目錄表目錄以及中文摘要中的關鍵字	已增加圖表目錄及摘要關鍵字。

項次	委員	委員意見	答覆及說明
8		部分圖形不清楚可否強化或修改如第六頁圖 3	已強化 P6 圖 3、P17 圖 19 等不清楚之圖。
9		107 頁開始 7.2 節所提鋼筋纖維及鋼筋之碳排放量及其經濟性，可否增加資料的來源另外有一些數量差異極大是否再檢視一下	1. 已補上本案碳排放之 EPD 資料來源係依據參考文獻[28]。 2. 已將鋼筋及鋼纖維之 A 型及 K 型環片的計算合併以方便閱讀。 3. 並將數據差異較大及較難理解之單位體積混凝土之碳排量，改成整體環片之碳排放量比較。
10		結論建議，第 118 頁第四點所提建議可降低鋼筋比是否有較具體的資料提供以便參採。	在不考慮長時載重與強制變位，也不需遵守最小鋼筋比至少為 1%等條件下，依據重新分析最大設計載重，將鋼筋比由原本 1.01%降為 0.5%，相關之設計載重仍在鋼筋所能提供的容許包絡線內，請詳見 5.3 節。
11	徐俊雄 委員	鋼纖維混凝土對於環片抗拉強度的提升甚具效益，在有限研究經費下施作環片試驗亦屬不易，惟在國內缺乏相關標準下，未來如何推動 SFRC 之使用請予說明，台水公司工程可否優先試用？	由於設計單位可能基於保守心態，恐不敢貿然採用短期載重設計，建議未來再辦理長期載重之鋼纖維混凝土環片設計及試驗，再進行討論及推動事宜。
12		表 2 以 $D \geq 1200$ 或 $D \leq 1200$ 做為設或不設維修廊道之參考，惟不設廊道下於管道內通行維修時，因道行距離長， $D=1200\text{mm}$ 時人員進入難度高，建議放大至 $D=1500\text{mm}$ 為分界。	表 2 已修正以 $D=1500\text{mm}$ 為分界。
13	朱撼湘 委員	報告中分析鋼纖維混凝土取代鋼筋混凝土減少碳排放量，僅探討鋼筋與鋼纖之減碳差異，建議以潛盾環片建置整體碳排減少量進行分析，以使減碳效益更為明確。	7.2 節已增加整體隧道環片減碳之效益說明，改用鋼纖維將減少整體隧道 4.86%之碳排放量。

項次	委員	委員意見	答覆及說明
14		本案以鋼纖維完全取代鋼筋進行實驗，惟實體試驗抗彎實驗結果無法符合設計需求，參考日本案例，加入鋼纖維並非完全取代鋼筋，而是減少鋼筋數量，建議未來可想辦法取得國外實際使用鋼纖維與鋼筋搭配設計之案例，予以參考研究。	已補充國外使用鋼纖維與鋼筋搭配的案例於 4.2.3 節，其主要來源係引用文獻[28]，另增加新加坡之設計規範參考文獻[30]供參。
15	謝張浩 委員	SFRC 係屬較新的節能減碳材料，本次探討係以潛盾工法內襯環片為研究，該類工程使用量非常有限，為擴大此類環保材料的推動效益，日後是否可評估使用範圍擴及自來水水池或淨水場地坪大數量工項推動，以有效發揮本材料的效益。	感謝委員的建議，未來有機會將爭取預算辦理相關研究後推動。
16	邱福利 委員	環境部 113 年 8 月 29 日發布「碳費收費辦法」，收費對象為年排放量達 2.5 萬公噸 CO2e 以上電力、燃氣及製造業等產業，115 年正式開始收費。為配合政府政策推動，本研究鋼纖維混凝土環片（SFRC）為自來水工程潛盾工法提供一種經濟且環保減碳的材料選擇，相當值得讚許！建議本研究可提供中央相關主管機關明確規範 SFRC 在結構中如何使用，並進一步推廣應用。	本案研究成果預計未來將先於研討會上發表，以收集集產官學者意見後，再逐步修正，以供主管機關參考。
17	范川江 委員	本研究為國內自來水隧道環片應用鋼纖維混凝土實驗研究首例，值得稱許。	感謝委員支持。
18		以本研究所蒐集的案例而言，在英國、巴黎及日本都為近年來的相關成果，顯示本項材料的應	感謝委員支持。

項次	委員	委員意見	答覆及說明
		用，目前已具前瞻性。	
19		本研究案在結論部分多次談及，混凝土環片屬於假設工程，惟國內三義交流道至三義減壓池 1000mm 管線接續工程，自來水管線內穿且備有維修廊道，是否屬於假設工程似有疑義。	後續將建議試辦以大管優先(無維修廊道)。
20		浮洲加壓站案例外徑為 3200mm 或 2800mm，請釐清。	經確認為外徑 3200、內徑 2800，將更正表 3 錯誤數值。
21		A 型鋼筋混凝土環片抗撓曲試驗破壞模式與預測不同，此部分為沿水流方向縱向剪力破壞，此部分仍請設計單位釐清。	A 型鋼筋混凝土之抗彎試驗，裂縫主要沿著主筋上方無鋼筋的保護層區域產生，依據應變計數值分析，應力為往上集中使混凝土瞬間受拉力而撥離，主筋附近之混凝土仍然完好。
22		本研究案最後結論，基於實驗的數據驗證，考慮可減少環片中剪力筋、箍筋用量，同時加入少量鋼纖混凝土補強，而並非完全以鋼纖取代鋼筋。此為逐步推動之可行辦法，另對新技術材料導入，策略面建議從概念構想、技術認證、試辦推動以致於全面採用，有階段性地推動。	感謝委員提供建議，新材料導入仍須仰賴前期的實驗，因此未來建議進行鋼纖維加少量主筋之環片型式及不同鋼纖維量之研究，再逐漸推動工程導入。
23		從訪談資料顯示，站在業主、設計者、施工者及材料供應商的立場皆有待突破之處，後續逐步建立可行做法方能實質推動。	依據訪談結果，對於新材料的導入主要還是沒有前例及規範，因此本案將進行先行研究，未來仍建議進行鋼纖維加少量主筋之環片型式及不同鋼纖維量之研究，再逐漸推動工程導入。
24	吳陽龍 委員	研究結果 A 型環片之抗彎強度不足背填灌漿需求，仍需設計少量主筋以增加抗彎強度，是否為目	據訪談結果，對於新材料的導入主要還是沒有前例及規範可循，因此本案可作為未來推動工程導入之契

項次	委員	委員意見	答覆及說明
		前潛盾工程未能應用鋼纖維混凝土環片之主因。	機。
25		就成本而言，鋼纖維混凝土環片之價格在 A 型環片僅為鋼筋混凝土環片之 27.5%，K 型環片僅 17.9%，碳排放亦可大幅下降至 10.46% 及 6.79%，理論上應該很有競爭力，為何尚未能被大幅採用，研究中可否探討說明。	依據文獻[28]及新增之 4.2.3 節，國外已使用鋼纖維製成環片許久，台灣對於新材料的導入比較保守，主要還是沒有前例及規範可循。