



臺北捷運 潛盾隧道 混凝土環片 生產精進與數位創新

陳俊宏／臺北市政府捷運工程局第二區工程處 處長
呂文儒／臺北市政府捷運工程局第二區工程處 副總工程司
蘇瑞麟／臺北市政府捷運工程局第二區工程處 主任
李建德／臺北市政府捷運工程局第二區工程處 主任
陳子涵／臺北市政府捷運工程局第二區工程處 助理規劃師

因應節能減碳的環保趨勢及結合日益進步的數位科技應用，105年起臺北捷運萬大－中和－樹林線全面動工，施工初期由業主召集設計顧問、主廠商、製造廠商蒐集過去捷運工程環片生產資料，共同詳加研究探討與分析，藉由專業經驗與大數據分析，將原來每天生產2循環（10小時脫模）調整以每天生產1循環（22小時脫模）方式生產，增加鋼模套數產能不變，從而降低混凝土配比單位水泥用量及蒸氣養護最高溫度，節能減碳且可降低生產成本，並訂定「混凝土配比最佳水泥用量」、「鋼筋籠裁切加工標準化」、「混凝土澆置振動最佳化時間」及「蒸氣養護最佳溫度歷程曲線」，以「標準化」、「自動化」、「系統化」的精進改良生產。另外，結合數位科技應用，運用電子化設備輔助，遠距監造即時管控，並首創環片生產品質履歷系統建置管理模式，將環片生產之鑄造、養護、塗裝、儲放與出貨管理以及品管檢驗資料藉由履歷系統管理，減輕人力負荷，品質公開、透明更有保障。

前言

臺北捷運系統工程大部分都是沿著都會區大馬路上興建，地下路段多半是採用潛盾隧道工法施工，利用潛盾機鑽掘前進並於後方逐環組立預鑄混凝土環片襯砌，形成堅強而穩固的隧道結構主體。預鑄混凝土環片乃鋼筋混凝土製品，在預鑄工廠以鋼模鑄造且在良好的品質管控下能生產出高品質、高精度之產品。初期路網為能加速生產，多使用較高混凝土水泥用量及較高蒸氣養護溫度以提高混凝土初期強度而提早脫模再重複使用鋼模繼續生產，每天可生產2個循環以達生產產量目標。然而使用較高的水泥用量及蒸氣養護溫度不僅增加成本，未能節能減碳，而且環片表面也因水化熱較高較容易產生微細裂紋，而蒸氣養護溫度高，也影響混凝土28天強度的表現，直接影響整體

隧道結構品質及長期耐久性。另外環片生產工廠遠在苗栗及高雄，業主無法隨時監督其生產管控情形，也間接影響環片生產品質的穩定性。

有鑑於此，臺北捷運萬大線－中和－樹林線工程施工初期結合業主、細設顧問、主廠商、製造廠商蒐集過去捷運板南線、環狀線、松山線及信義線…等工程環片生產資料，共同詳加研究、探討與分析，依人力、材料、機具與生產效能等方面研議，藉由以往專業經驗與大數據分析，從材料配比、生產製程及生產管理方面精進與改善，以標準化、規格化、系統化方式生產高品質、高效能產品。運用電子化設備輔助，遠距視訊即時監控，並首創環片生產品質履歷資料系統管理，工程完工後履歷資料移交捷運公司，將工程生命週期成功延續到維護管理階段。

降低混凝土配比水泥用量，節能減碳

混凝土環片 28 天設計強度契約規定為 450 kgf/cm²，脫模強度為 28 天設計強度的 60% 為 270 kgf/cm²。施工團隊蒐集了過去捷運板南線、環狀線、松山線及信義線... 等工程施工時環片的生產資料發現以往為了滿足 12 小時內完成一個循環生產時脫模強度的要求，混凝土的配比每 M³ 水泥用量高達 450 kg ~ 516 kg，28 天強度約在 636 kgf/cm² ~ 734 kgf/cm² 之間，既不環保又浪費成本。本案經施工團隊分析檢討、重新計算配比資料並實際進行測試，以每天生產 1 循環的方式生產，延長脫模時間（22 小時），每 M³ 水泥用量降為 420 kg 即可達脫模強度之要求，28 天強度亦可達 703 kgf/cm²（詳如表 1）。不僅節省成本，也可有效達環保節能減碳的目的。

製程精進改良

每天以 1 循環方式生產，增加鋼模套數，產能不變，並採取各項精進措施：

鋼筋籠製作規格化

鋼筋籠的製作採規格化生產，每一種尺寸形式的主筋及箍筋裁切加工時每製作 200 支需以 ± 0.5 mm 的檢驗樣規檢驗，鋼筋籠加工製造時放置於加工床安裝焊接，每片鋼筋籠主筋、箍筋位置均精準定位，焊接電流嚴格控制在 200 安培以下，避免焊蝕現象，鋼筋籠生產規格化。每片鋼筋籠生產完成經嚴格檢查合格後以掛牌標示，嚴格管制鋼筋籠生產品質（詳如圖 1 至圖 3）。



圖 1 各式箍筋檢驗樣板

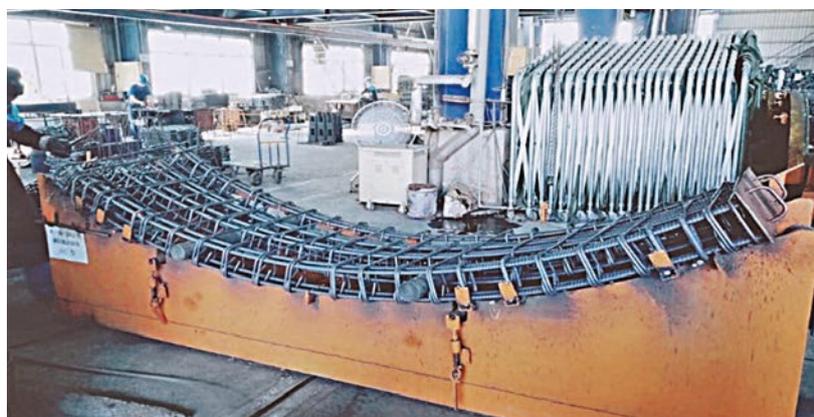


圖 2 鋼筋籠加工床鋼筋定位標準化生產

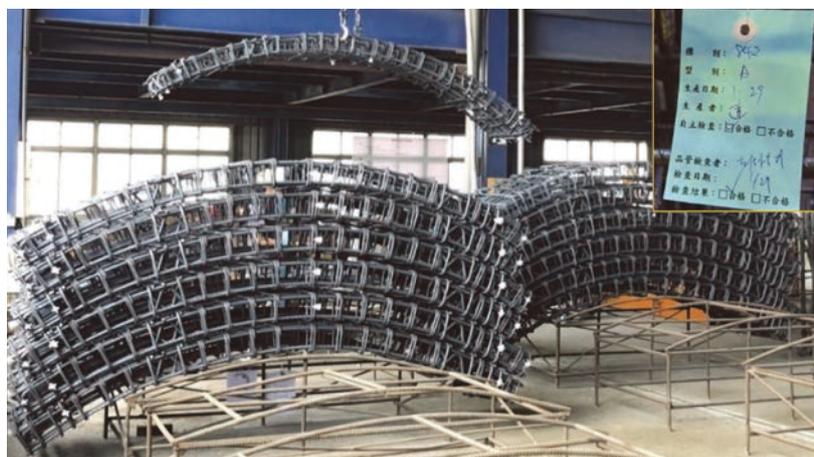


圖 3 鋼筋籠堆置及檢查合格掛牌標示

表 1 臺北捷運各線環片生產水泥用量與強度比較表

強度：kg/cm²

標別	生產時間	環片數量 (公尺)	II 型水泥量 (kg/M ³)	水灰比 (W/C)	脫模 強度	7 天 強度	28 天 強度
CD552 標 (板南線)	99/9-101/8	3054	450	0.354	399	582	720
CF640 標 (環狀線)	102/7-103/4	1061	450	0.351	402	624	734
CR580B 標 (信義線)	97/11-99/2	3782	516	0.340	404	564	663
CG590C 標 (松山線)	98/6-100/8	4744	465	0.368	399	564	636
CQ842/840/850A 標 (萬大線)	107/12-110/05	3824	420	0.355	359	581	703

環片混凝土澆置振動最佳化

環片生產採用的混凝土坍度為 2.5 ~ 5 公分之間，振動搗實對於混凝土品質至為重要，振動不足混凝土內部孔隙多強度不足，振動過度易產生表層浮漿，容易造成表層龜裂，影響品質。施工團隊實際於生產工廠分別測試於混凝土投料完再振動 2 ~ 6 分鐘的不同振動時間，並比較只用外模振動跟內、外模振動併用兩種不同振動模式，再直接於環片中間及兩側部位鑽心取樣觀察混凝土內部搗實情形與表層浮漿狀況（詳如表 2 及圖 4），發現以內、外模振動併用於混凝土投料完再振動 4 分鐘後混凝土為最佳的澆置振動效果，混凝土內部已達充分搗實且表層沒有浮漿現象。

蒸氣養護溫度及歷程最佳化

環片生產在混凝土澆置完成後為了要提高早期強度以達脫模條件，所以通常會在靜置 4 ~ 6 小時候開始蒸氣養護，利用高溫的蒸氣來加速水泥的水化反應

以提高強度進而達到提早脫模的目的。施工團隊實際於生產工廠測試，以前述每 M3 水泥用量 420 kg 的混凝土配比生產多組環片，分別以靜置 6 小時、升溫 2 小時、恆溫溫度為 45°C（3 小時）、50°C（3 小時）、55°C（3 小時）、60°C（2 小時）及降溫 2 小時的不同溫度歷程曲線模式進行蒸氣養護，再壓驗其 22 小時（脫模之用）、7 天與 28 天強度（詳如表 3、表 4 及圖 5）。發現蒸氣養護溫度越高雖然早期強度提高，但 28

表 2 環片澆置振動時間與鑽心觀察比較表

環片編號	第一階段	第二階段	鑽心結果
1	3 分鐘	2 分鐘	孔隙較多、表層無浮漿
2	3 分鐘	3 分鐘	輕微孔隙、表層無浮漿
3	3 分鐘	4 分鐘	無孔隙、表層無浮漿
4	3 分鐘	5 分鐘	無孔隙、表層輕微浮漿
5	3 分鐘	6 分鐘	無孔隙、表層較多浮漿

說明：第一階段為中間及兩側均勻投料約 2/3 之振動時間
第二階段為蓋上蓋板後繼續投料 1/3 至完成之振動時間



圖 4 環片中間及兩端鑽心觀察混凝土內部振動搗實情形

表 3 臺北捷運工程各線環片生產蒸氣養護溫度歷程與強度對照表

強度：kgf/cm²

標別	蒸氣養護		II 型水泥量 (kg/m ³)	水灰比 (W/C)	脫模 強度	7 天 強度	28 天 強度
	前置期	最高溫度					
CD552 標	4 小時	65°C (2 小時)	450	0.354	399	582	720
CF640 標	4 小時	60°C (2 小時)	450	0.351	402	624	734
CR580B 標	4 小時	65°C (2 小時)	516	0.340	404	564	663
CG590C 標	4 小時	65°C (2 小時)	465	0.368	399	564	636

表 4 臺北捷運工程萬大線實際測試蒸氣養護與強度對照表

強度：kgf/cm²

標別	蒸氣養護		II 型水泥量 (kg/m ³)	水灰比 (W/C)	脫模 強度	7 天 強度	28 天 強度
	前置期	最高溫度					
萬大線	6 小時	60°C (2 小時)	420	0.355	420	529	662
萬大線	6 小時	55°C (3 小時)	420	0.355	384	574	692
萬大線	6 小時	50°C (3 小時)	420	0.355	372	604	729
萬大線	6 小時	45°C (3 小時)	420	0.355	330	654	785

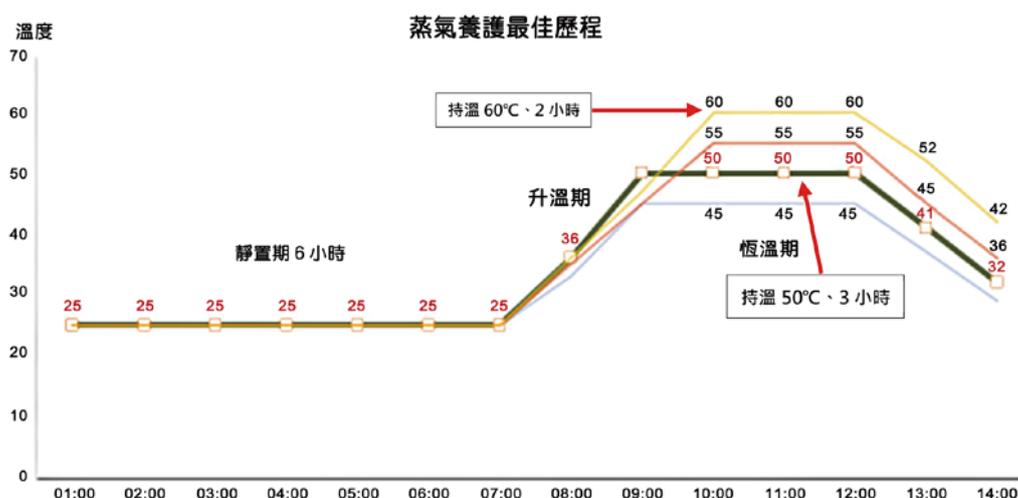


圖 5 臺北捷運萬大線環片生產蒸氣養護歷程圖

天的強度反而會降低，蒸氣養護溫度太低又怕無法滿足脫模強度要求。因此綜核評估各項性質與安全係數後採用靜置 6 小時、升溫 2 小時、恆溫 3 小時 50°C、降溫 2 小時為最佳化的蒸氣養護溫度與歷程模式。

生產管理作為

加強工廠自主品管、提高尺寸精度與品質

環片生產需以鋼模生產以控制產品精度，產品之精度控制在；周向弦長 0 ~ + 2 mm、徑向寬度 ± 2 mm、厚度 0 ~ + 5 mm 以內。製造廠商生產前業主即要求工廠內部建立更完善之自主檢查流程 SOP 與各項檢驗允

收管控標準來嚴格管控品質，相關自主檢查記錄必須詳實記載並即時電子建檔，除供主廠商與業主隨時調閱查證外亦作為建置環片履歷之資料。

主廠商派員駐廠檢驗與業主定期派員抽查

除工廠自主品管，主廠商在生產期間全程駐廠檢驗工廠製程之正確性，確保環片生產材料、過程符合規定。業主則定期派員前往抽驗整體品質管理是否符合精進目標之各項要求。

遠距視訊，即時監控

環片生產工廠遠在苗栗及高雄等其他縣市，為能

隨時了解環片生產情形，掌握生產進度與品質穩定性，特於工廠廠區及實驗室佈設置多部即時影像攝影系統，透過網站連結及手機 APP 可隨時監看環片生產作業狀況，運用電子化設備遠距視訊即時監造（詳如圖 6），減輕業主監督人力負荷。除此之外去年（110）臺灣疫情 3 級時，交通不便利，遠在臺北的監造工務所同仁可以利用遠距視訊進行品質查驗。事先做好準備遇到突發狀況可以立即派上使用。

首創環片生產品質履歷系統

施工團隊仿效現今部分食品所採用之生產履歷系統管理模式，利用 EXCEL 套裝軟體建置資料庫管理系統，運用其中之 VBA 巨集程式簡化操作步驟，落實記錄檔案管理系統化之作業模式建置了全國首創環片生產品質履歷資料系統。將環片產製過程之各項作業資料與檢查紀錄系統化建檔，經由掃描貼在環片上之條碼，環片編碼、生產日期、鋼筋籠製作、混凝土強度，塗裝塗膜厚度及成品檢查 … 等資料一覽無遺，為工廠出貨放行及業主工區進貨檢驗之最佳利器（詳

如圖 7）。除此之外，業主與主廠商對於產品品質及庫存數量等資訊亦能即時完整取得，未來工程完工後更將完整履歷系統資料移交給營運單位作為維護管理之用，將整個工程生命週期延續到維護管理階段。

成果與效益

本項環片生產製程精進與數位創新應用，可節省人力約 30%，降低製造成本約 20%。生產線自動化、數位化及履歷系統等優化措施，已跳脫傳統製造業偏重人力生產與管理的迷思，是混凝土製造業劃時代的一大革新，也是一項傳統產業與數位科技完美的結合。本案環片生產精進成果已榮獲臺北市政府 109 年創意提案精進獎季軍。臺北市捷運工程局並發行捷運工程技術叢書第 33 冊「捷運潛盾隧道混凝土環片生產實務」，可供全國其他縣市捷運工程參考採用。臺北市捷運工程局已將本項精進措施納入目前正在發包的萬大線二期及環狀線南、北環段捷運工程設計文件中，效益已擴展到全過公共工程混凝土預鑄環片生產。除此之外，製造廠商也可將製造產品從捷運工程潛盾隧

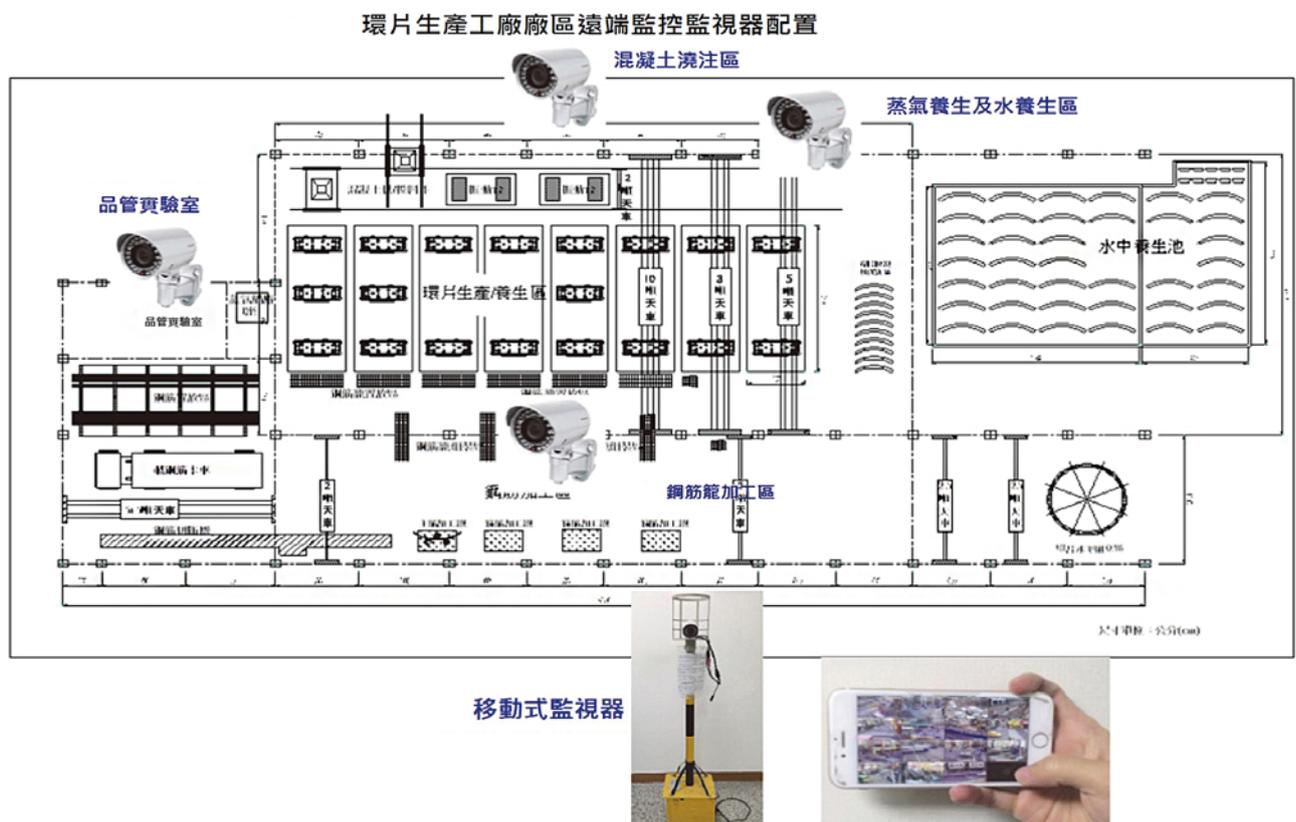


圖 6 環片工廠遠端攝影系統，手機 APP 即時監控管理

道環片的生產擴展到其他公共工程如臺電及衛工單位的小口徑環片或汙水下水道推管等生產，不僅可以提升本身競爭力，整體效益更是延伸到全國公共工程，

提升全國公共工程品質，達到高品質、高效能的新里程碑（詳如圖 8 和圖 9）。



圖 7 環片生產品質履歷系統



圖 8 環片生產全景



圖 9 環片組裝於潛盾隧道中一景