

# 捷運三鶯線電聯車半永久聯結器設計檢核與查驗工作

## Design Review and Inspection of Metro Sanying Line Rolling Stock Semi-permanent Coupler

**關鍵詞(Key Words)：**捷運 (MRT)、半永久聯結器 (Semi-Permanent Coupler)

新北市政府捷運工程局／局長／李政安 (Lee, Cheng-An) ❶

新北市政府捷運工程局／副局長／林耀長 (Lin, Yao-Chang) ❷

新北市政府捷運工程局／總工程司／鄭智銘 (Cheng, Chih-Ming) ❸

新北市政府捷運工程局／專門委員／曾國嵐 (Tzeng, Guo-Lan) ❹

新北市政府捷運工程局／機電系統科／林仁國 (Lin, Jen-Kuo) ❺

台灣世曦工程顧問股份有限公司／捷運工程部／賴嘒綾 (Lai, Huei-Ling) ❻

台灣里卡多鐵路公司／許有廷 (Hsu, Yo-Ten) ❼

中興工程顧問股份有限公司／羅群翰 (Luo, Cyun-Han) ❽

### 摘要

本文以台中捷運綠線發生聯結器軸心斷裂事件為鑑，反饋三鶯線捷運工程電聯車細部設計成果，全面檢核半永久聯結器之設計規格及首件產品測試報告，確保設計規格滿足需求。更進一步考量後續量產安裝工作，精進監造查驗工作，量化其查驗標準，確保半永久聯結器產品及安裝品質無虞。



## Abstract

Since semi-permanent coupler of Taichung Metro Rolling Stock failed during early stage of operation, this paper explains the full scale investigation of Metro San-Ying Line detail design including semi-permanent coupler specification and FAI report to ensure the design meets original and application requirements. Furthermore, the quantified criteria of supervising during mass production and installation stages have been confirmed to ensure the quality of semi-permanent coupler itself and installation.

## 壹、前言

109年11月21日台中捷運綠線第17列電聯車(編號33/34車廂)於抵達高鐵臺中站後，高鐵臺中站尾軌折返區發生異常，系統偵測到異常訊號，於尾軌折返北屯總站時無預警發生緊急剎車(EB)，中捷公司、施工單位北捷局及車輛原廠川崎重工進場檢查，確認「電聯車車廂間半永久聯結器牽引裝置軸心」斷裂，屬重大故障，為確保行車運轉安全無虞，立即宣佈暫停試營運，展開調查作業。

依據台中市政府於109年12月釋出之「臺中捷運綠線聯結器斷軸事故檢測資料及行車安全檢討專案報告」，軸心斷裂主要原因推測係當列車在運行期間，牽引裝置軸的垂直運動不平順，因而導致可能的垂直彎曲應力反覆施加於牽引裝置軸心上，並且造成牽引裝置軸心受疲勞應力。同時推測該彎曲應力係由錨座（鋼和黃銅之間）的內部摩擦所引起。另針對斷裂軸心材料檢驗結果顯示，化學成分符合聯結器供應商規格，惟強度測試之降伏強度、抗拉強度及硬度未符合規格要求。

考量三鶯線電聯車廠商為日立製作所，採用無人駕駛之中運量鋼輪鋼軌系統，以兩節車廂固定編組成營運列車，類似於台中捷運綠線之車輛型式，故實有必要將相關經驗回饋至三鶯線檢討。為避免發生相同情事，於細部設計階段針對半永久聯結器之設計、模擬分析與測試驗證進行全面檢核，於半永久聯結器量產製造階段及電聯車安裝階段精進現行查驗制度，以確保半永久聯結器完全符合三鶯線需求。本文目的即為分享上述檢核結果，精進查驗作為。

## 貳、捷運半永久聯結器相關鐵路標準及設計準則

### 一、半永久聯結器概述及三鶯線契約規範

電聯車半永久聯結器為連結車廂與車廂的裝置，使其保持一定距離，為傳遞牽引力及制動力之重要部件，承載兩車廂間相互推擠之壓縮力、相互拉扯之拉伸力及橫向剪應力等負載。另包含能量吸收功能，以緩和列車聯掛和運行時所產生的衝擊，提高電聯車運行時的平穩性和舒適性，使列車縱以較高行駛速度碰撞時，仍可保護列車和乘客安全。一般僅在維修時將半永久聯結器解聯，除依維修週期每月進行目視檢查，並於大修時分解相關組件，進行清潔、量測、調整、潤滑及目視檢查等。

設計上需考量之關鍵重點包含半永久聯結器強度、路線通過性能及緩衝吸能需求，分項說明如下：

- (一) 半永久聯結器強度：依歐洲鐵路標準 EN12663-1:2010 Railway applications - Structural requirements of railway vehicle bodies 律定規範，將載客列車分類成五種車體結構設計類別，其中捷運車輛歸屬於P-III類，根據該標準內表2及表5要求，聯結器抗壓強度至少為800kN；抗拉強度應不低於600kN，或依正常操作或緊急情況下，所產生之最大作用力酌予調整。另聯結器應評估在特定操作要求，引起聯結器附件中的循環載荷，發生疲勞損壞的可能。
- (二) 路線通過性能：所選用之聯結器規格，應能在專案各種最不利條件下，順利行駛於正線與機廠內，需綜合考量電聯車尺寸與路線條件，包含最小曲率半徑、最小豎曲線、S曲線、車廂長度與寬度、

聯結器長度及安裝位置等因素。

- (三) 緩衝吸能需求：選用的聯結器應滿足緩衝吸能要求，需綜合考量碰撞速度、車體結構強度及聯結器安裝位置等因素，車體結構強度直接限制所允許聯結器緩衝裝置所產生之最大作用力。

捷運三鶯線電聯車半永久聯結器設計規範，除前開重點，另考量該路線電聯車需求，並參考交通部「捷運軌道車輛技術標準規範—高運量鋼軌車輛規劃基準」及國內各捷運系統電聯車規範條文與精神，如臺北捷運、機場捷運等捷運系統，節錄捷運三鶯線規範，針對半永久聯結器功能需求如下：

- (一) 聯結器設計及所用材料，應考量車輛在正常運轉、維修及操作作業時，能承受車輛設計壽命期限內各種使用條件下的疲勞負荷。
- (二) 於車輛設計壽命期限內，聯結器應能承受相當於AW3 載重下，任何部分變形不應超過規定容許變形量及疲勞裂紋或其他形式的疲勞破壞。於車輛設計壽命期限內，聯結器在正常營運之牽引或煞車之動態負荷下，不得出現裂痕或疲勞破壞。
- (三) 自動聯結器與半永久式聯結器之緩衝器應包含能量吸收裝置，以吸收衝擊時產生高於正常運行條件的過度能量。聯結器緩衝器/吸能裝置之設計應能吸收車輛之間因為正常的振動和牽引而產生的移動。緩衝器應能維持兩列車聯結速度 $\geq 3\text{km/hr}$ 。緩衝器強度應確保最大速度 $8\text{km/hr}$ 的衝擊下，不發生損壞。

## 二、國際標準/區域標準/CNS

聯結器相關設計標準：

EN12663-1:2010 Railway applications - Structural requirements of railway vehicle bodies

EN16019:2014-06 Railway applications - Automatic coupler - Performance requirements, specific interface geometry and test method

EN15020:2006 Railway applications - Rescue coupler - Performance requirements, specific interface geometry and test methods

## 參、捷運三鶯線半永久聯結器設計檢核

### 一、三鶯線電聯車暨半永久聯結器設計概述

三鶯線電聯車係由株式會社日立製作所(Hitachi Consortium)承攬，列車長度約35公尺，由兩節車廂構成，可載運330人，每列車在同側配置有6具滑門，設備主要放置在地板下方及車內專用設備櫃，僅有空調模組(每車廂2組)和煞車電阻裝於車頂，列車最大營運時速為70公里，最大設計時速為80公里。係以無人駕駛中運量捷運通訊式列車控制系統(CBTC)為基礎，能夠雙向全自動行駛，並設有手動駕駛操作台，以供在緊急狀況下手動駕駛。

所選用之半永久聯結器供應商為MiiRA CAF，由剛性管(Rigid tube)、止動裝置(Stop devices)、套接器(Muff joint)、可折疊EFG3鉸接裝置(Collapsible EFG3 articulation)及纜線支架(Cables supports)所組成(如圖1)，其中套接器EFG3鉸接裝置主要由牽引桿(Traction bar)、座板(Socket plate)、上/下半法蘭(Half-flanges)、套接

法蘭(Joining flanges)、彈性環(Elastic rings)及軸承支架(Trestle)所組成(如圖2)。

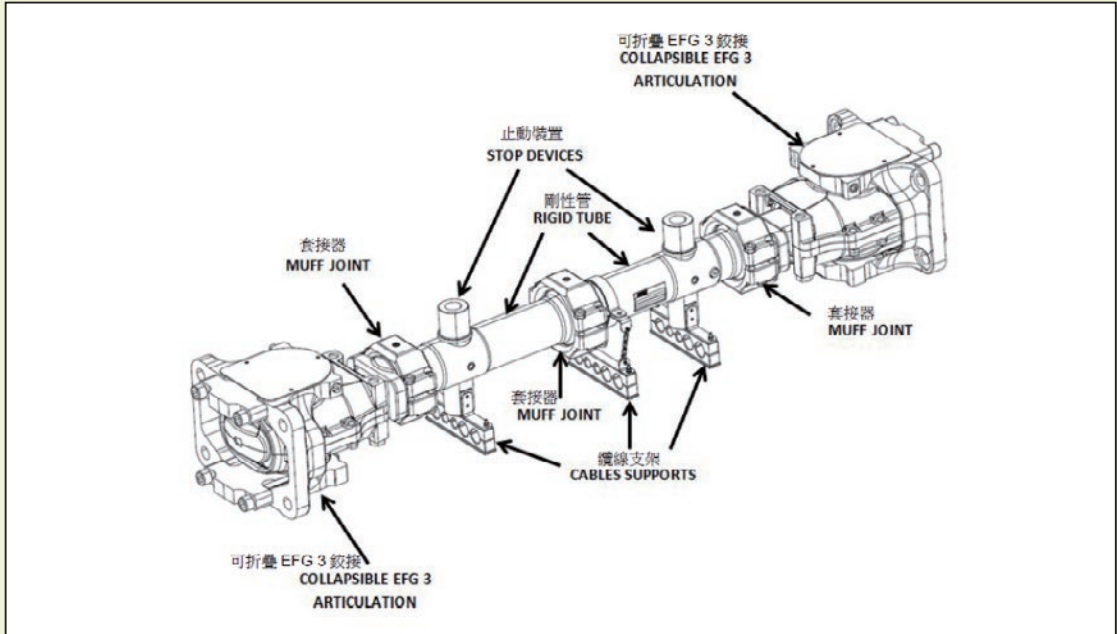


圖1 半永久聯結器構造

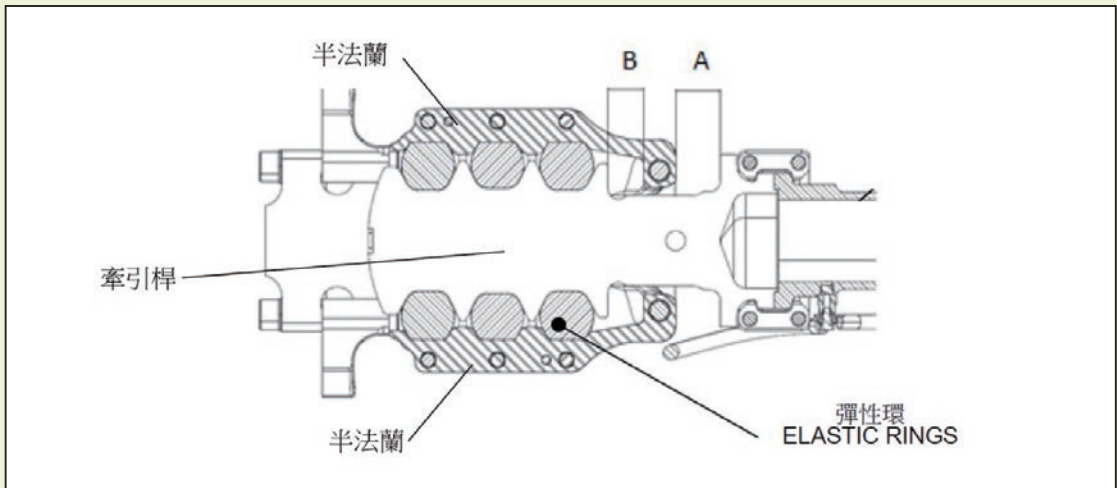


圖2 可折疊 EFG 3 鉸接裝置構造 (局部)

EFG 3 鉸接裝置係將三個彈性環包覆牽引桿，並安裝於兩個半法蘭內，並以上下平板及軸承支架進行固定，可允許組件在軸承支架上水平轉動，使列車通過彎道。另透過彈性環變形，使牽引桿可在法蘭內旋轉及前後移動，藉此吸收行駛過程中所產生之張力/壓縮負載及垂直曲線和扭力負載。

依據三鶯線相關設計文件，檢核半永久聯結器之設計規格、設計強度模擬分析結果及運動性模擬分析結果，加以確認三鶯線之半永久聯結器設計符合需求，相關重要設計規格如表 1。

表1 三鶯線半永久性聯結器重要設計規格

重量	377.3 kg
長度	1,980 mm
牽引強度	800 kN
壓縮強度	1,200 kN
水平旋轉角度	±35°
垂直旋轉角度	±6°
滾轉角度	±1.8°

## 二、設計強度模擬分析

依據EN12663-1標準，三鶯線電聯車屬於P-III類，以輸入參數牽引應力800kN及壓縮應力1,200kN進行有限元素分析，符合標準規定之基本規格。靜態強度分析結果顯示，支架模擬最大強度值為583.5MPa(如圖3)，低於其材料降伏強度700MPa；M30螺栓模擬最大強度值為375 kN，低於螺栓承受力485.5kN，檢核後確認符合靜態強度需求。聯結器之支架為固定車體與聯結器兩者之關鍵元件，因此分析重點著重於支架及其固定螺栓，其他組件則直接以型式試驗確認其靜態強度符合需求。

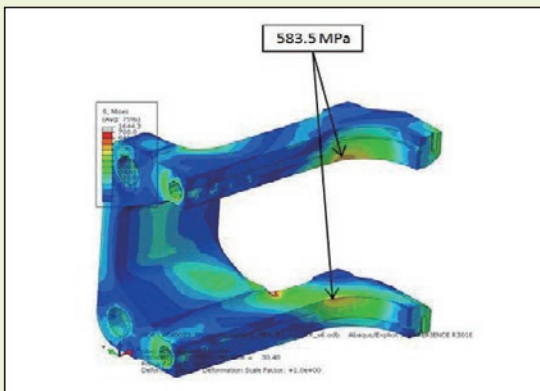


圖3 支架有限元素分析結果

動態負載強度以壓縮應力117kN、牽引應力90kN，執行有限元素分析，其中模擬輸入參數，係以一輛動力列車救援一輛無動力車之最嚴苛使用條件進行計算，相關參數包含列車加速度1m/s<sup>2</sup>、煞車減速度為1.3m/s<sup>2</sup>及AW3乘客負載。動態負載強度分析結果顯示，牽引桿、座

板、套接器及剛性管等部件之應力分析結果，皆未超過材料容許值，安全係數至少達3.39以上(如表2)，檢核後確認設計成果符合動態負載強度需求，亦即疲勞強度需求。

表2 動態負載強度分析結果

分析位置	安全係數
Traction bar軸心	4.71
Socket plate座板	5.8
Half-flanges 半法蘭	3.39
Trestle支架	3.5
Joining flanges 套接法蘭	5.55
Rigid tube 剛性管	4

## 三、運動性模擬分析

為驗證半永久聯結器設計規格符合三鶯線車輛行駛全線之情形，需分析車廂間最大連接旋轉和位移之所有可能情況，應考量路線最不利條件與附加條件的組合，並組合各式條件進行模擬分析，包括最大坡度、最小轉彎半徑、S曲線、軌道施工公差、鋼軌磨耗、軌距誤差、車輪磨耗、列車加減速之懸吊位移及空氣彈簧漏氣之最大高度變化等，列車尺寸參數如下(如圖4)。

- 車頭轉向架樞軸之間的距離：10,850mm。
- 轉向架的輪距：2,000mm。
- 半永久性聯結器旋轉中心與轉向架樞軸之間的距離：2,105mm。
- 半永久性聯結器旋轉中心距鋼軌頂部之高度：480mm。
- 側搖中心距鋼軌頂部之高度：490mm。

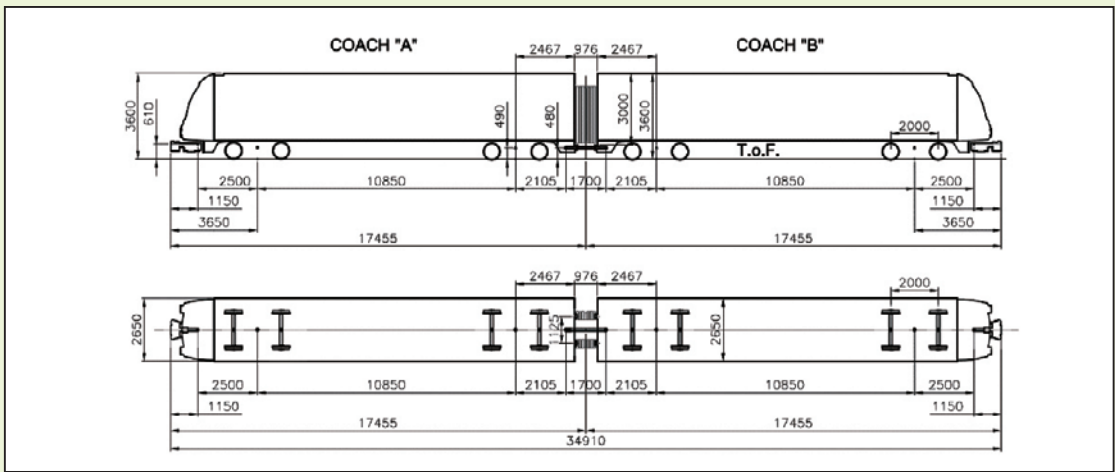


圖4 車輛與轉向架相對位置配置及基本設計尺寸

曲線軌道之組合，包含下列各式分析情境：

- 50m完整曲線軌道+1,500m垂直曲線軌道。
- 直線軌道/50m曲線軌道+1,500m垂直曲線軌道。
- 100m曲線軌道／逆曲線軌道+1,500m垂直曲線軌道。
- 50m曲線軌道/8.665m直線軌道/100m逆曲線軌道+1,500m垂直曲線軌道。

- 70m曲線軌道/12.76m直線軌道/70m逆曲線軌道+1,500m垂直曲線軌道。
- 140m曲線軌道／逆曲線軌道+1,500m垂直曲線軌道。

三鶯線最嚴苛之路段位於機廠內T23道岔附近軌道(如圖5)，路線條件係由曲線軌道(曲率半徑R50m)、直線軌道(長9.821m)和逆曲線軌道(曲率半徑R100m)所組成的S曲線，詳如圖6。

依據三鶯線全線曲線軌道配置，模擬分析由兩節車廂組成之標準車輛的水平與垂直移動性，分析全線曲線軌道配置與半永久聯結器規格相容性。

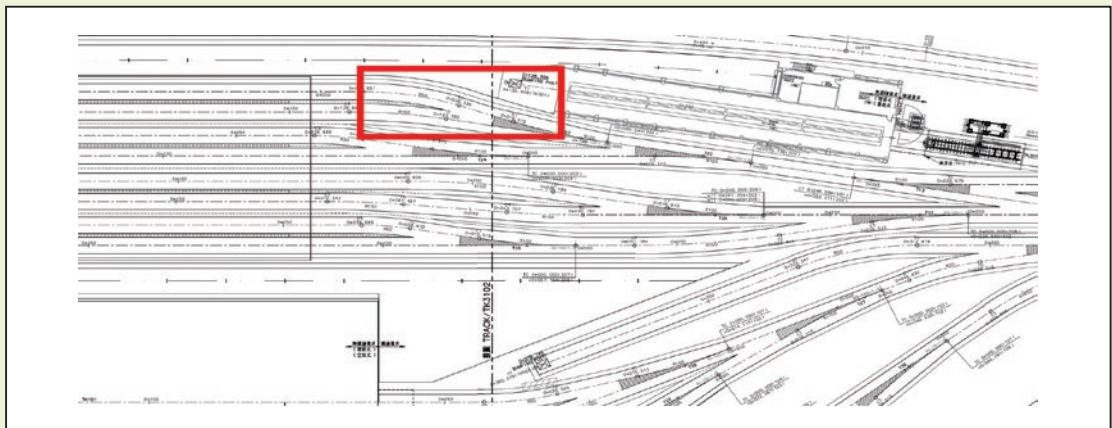


圖5 三鶯線最嚴苛之路段(位於機廠中)

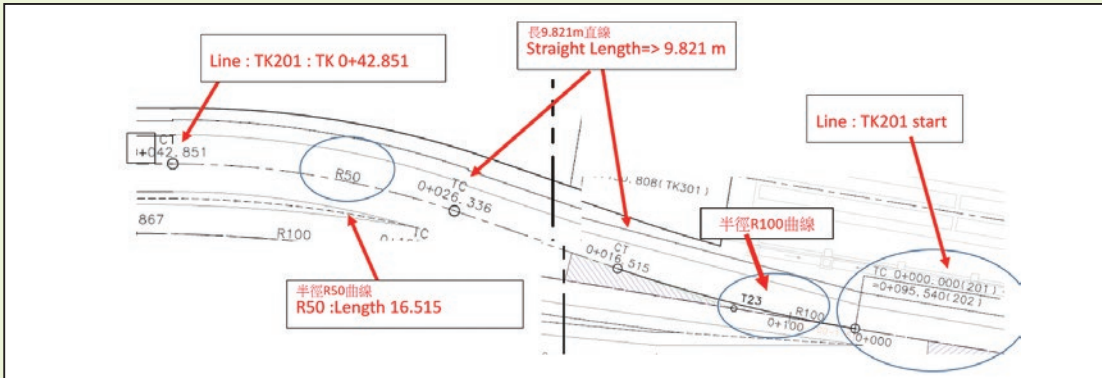


圖6 三鶯線最嚴苛之路段定線條件

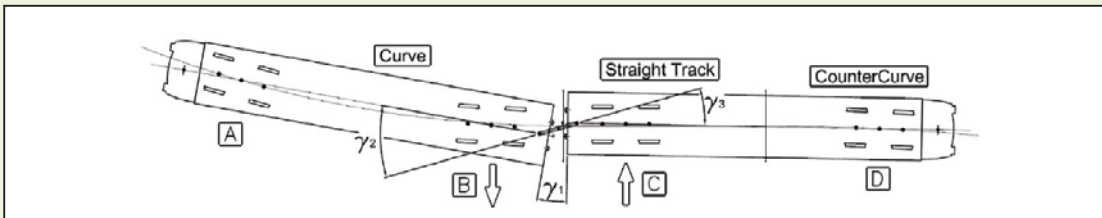


圖7 機廠線上於50m曲線軌道/8.665m直線軌道/100m逆曲線軌道上的S曲線

■ 水平旋轉角度分析結果：在路線條件為機廠線上於50m曲線軌道/8.665m直線軌道/100m逆曲線軌道上的S曲線(如圖7)，分析結果產生最大水平旋轉角度為 $\gamma = \pm 25.88^\circ$  (如圖8)。此分析情境，較前述機廠實際嚴苛S曲線(50m曲線軌道/9.821m直線軌道/100m逆曲線軌道)更加嚴格(直線段越長越寬鬆，反之越嚴格)，因此可確保車輛足以於機廠軌道實際安全運行。

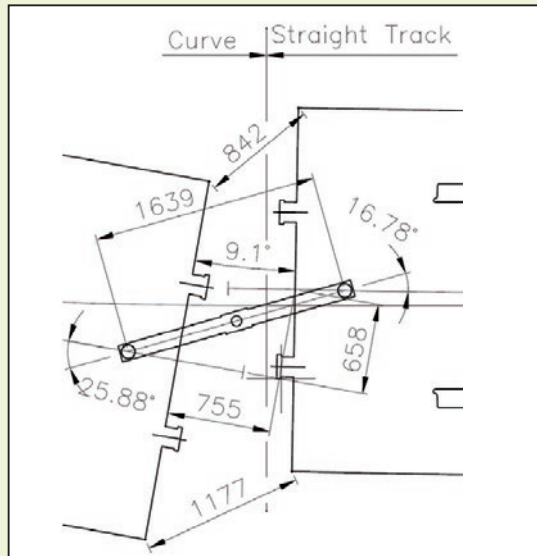


圖8 水平旋轉角度  $\gamma = \pm 25.88^\circ$

■ 垂直旋轉角度分析結果：在路線條件為機廠線和主線上於直線段/豎曲線R1500m波峰段與弛垂段的軌道(波峰段與弛垂段

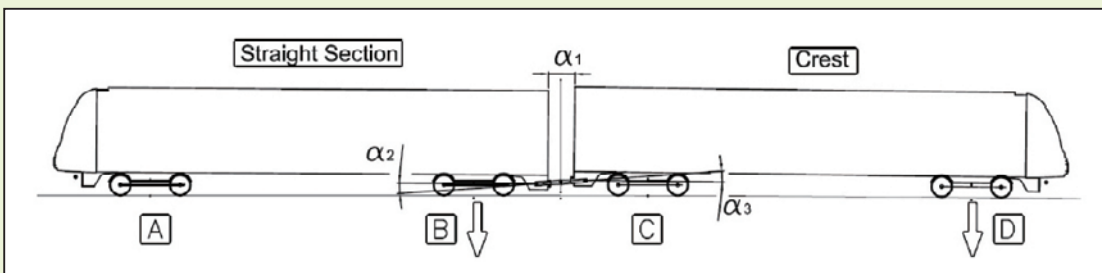


圖9 機廠線和主線上於直線段/豎曲線R1500m波峰段的軌道



兩者為對稱關係，嚴苛度相同，波峰段如圖9)，分析結果產生最大垂直旋轉角度為  $\alpha = \pm 4.66^\circ$  (如圖10)。

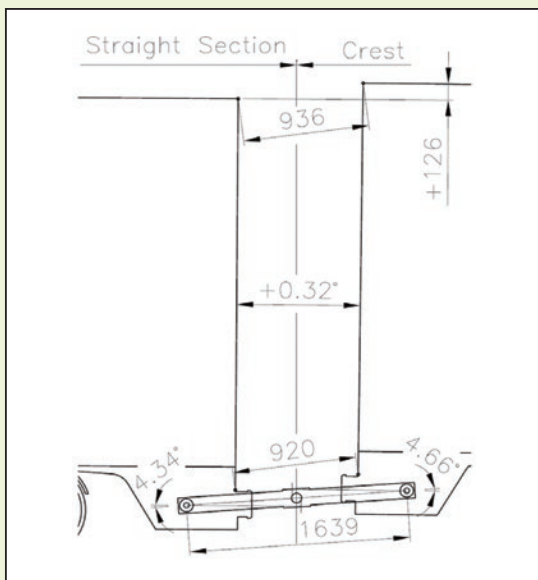


圖10 垂直旋轉角度 $\alpha = \pm 4.66^\circ$

- 滾轉角度分析結果：包含煞車情境及在最大速度時的側搖動作，分析結果產生最大滾轉角度  $\eta = \pm 3.55^\circ$ ，滾轉角度為兩車廂聯掛之分析結果值，由於單個半永久聯結器滾轉角為  $\pm 1.8^\circ$ ，因此一組半永久聯結器兩端滾轉角加總即為  $\pm 3.6^\circ$ ，因此設計選配之規格可符合使用情境。

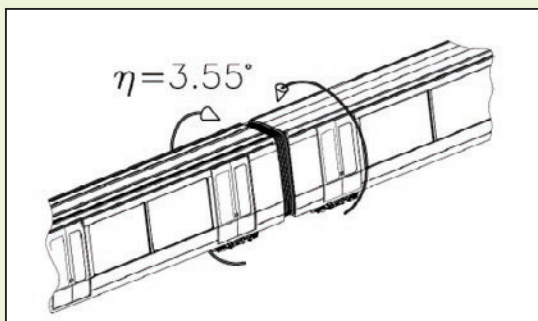


圖11 在最大速度時的側搖動作

依據模擬分析結果，最差條件之移動組合為水平旋轉角度  $\gamma = \pm 25.88^\circ$ 、垂直旋轉角度  $\alpha = \pm 4.66^\circ$ 、滾轉角度  $\eta = \pm 3.55^\circ$ ，與設計規格(水平旋轉角度  $\gamma = \pm 35^\circ$ 、垂直旋轉角度

$\alpha = \pm 6^\circ$ 、滾轉角  $\eta = \pm 3.6^\circ$ )比較，分析數值皆低於半永久聯結器設計規格，因此三鶯線軌道配置的幾何形狀與半永久聯結器相容。

#### 四、緩衝吸能需求

為滿足列車撞擊性能之規範需求，設定不同碰撞情境加以分析：

- (一) 情境1：一輛負載為AW3且未執行煞車之列車，以5km/h (1.39m/s)之速度碰撞完全剛性表面。經分析結果顯示，撞擊對於半永久聯結器產生之最大作用力為908.2kN，未超過其可吸收之最大衝擊1,120kN，安全係數達1.23，因此不會產生破壞。
- (二) 情境2：兩列負載均為AW3之相同列車，各有兩節車廂，以8km/h (2.22m/s)之速度碰撞，並假設兩列車在碰撞後順利聯結。經分析結果顯示，撞擊對於半永久聯結器產生之最大作用力為599.1kN，未超過其可吸收之最大衝擊1,120kN，安全係數達1.87，因此不會產生破壞。
- (三) 情境3：若以8km/h速度正面碰撞不可移動之完全剛性表面，自動聯結器與半永久聯結器在剪斷前均須能夠吸收至少16.4kJ。單組半永久聯結器最大壓縮行程約為60mm，在壓縮行程為30.5mm時，可吸收之能量已達8.2kJ，由於半永久聯結器有兩組鉸接，能量吸收總計可滿足16.4kJ吸能需求。

#### 肆、捷運三鶯線半永久聯結器測試驗證

相關設計文件經檢核均符合需求，接續針

對半永久聯結器首件產品進行各項實際測試，驗證其產品與設計規格相符，測試結果如表3。

於全線軌道鋪設完成後，將會實際讓列車行駛於三鶯線全線各嚴苛路段後，執行靜態

表3 半永久聯結器首件產品測試結果總表

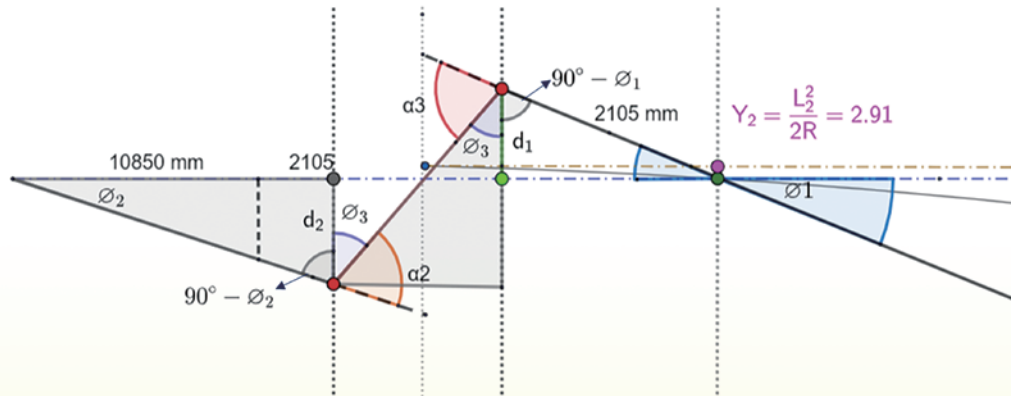
測試項目	合格標準	測試結果	分析結果
鉸接旋轉角度測試	垂直旋轉角度大於6°	垂直旋轉角度7.8° 滾轉角度11.1°	合格
拉伸及壓縮測試	應大於最小能量數值3.62kJ(拉伸)及6.59kJ(壓縮)。	鉸接吸收能量數值為5.7kJ(拉伸)及10.4kJ(壓縮)。	合格
半永久聯結器鉸接強度測試	施加800kN牽引力及1,200kN壓縮力。	所有應變規讀取之應力數值皆小於材料彈性限度。	合格
半永久聯結器剪斷螺絲測試	施加1,200kN壓縮力，剪斷螺絲應於1,160±40kN壓縮力時斷裂。	剪斷螺絲於1,196.05kN受力時斷裂。	合格
剛性管強度測試	施加800kN牽引力及1,200kN壓縮力。	所有應變規讀取之應力數值皆小於材料彈性限度800MPa。	合格
半永久性聯結器潰縮測試	施加1,200kN壓縮力，驗證EFG3鉸接吸收能量、潰縮能力及止動裝置功能。	測試結果剪斷螺絲於1,179kN受力時斷裂、聯結器潰縮366.51mm並鉸接之止動裝置承受住1,200kN之受力。	合格
IP55防塵防水測試	依據IEC 60529:2013執行測試。	測試合格。	合格
半永久性聯結器潰縮測試	施加1,200kN壓縮力，驗證EFG3鉸接吸收能量、潰縮能力及止動裝置功能。	測試結果剪斷螺絲於1,179kN受力時斷裂、聯結器潰縮366.51mm並鉸接之止動裝置承受住1,200kN之受力。	合格
IP55防塵防水測試	依據IEC 60529:2013執行測試。	測試合格。	合格

## 伍、製造、施工、安裝階段之查驗工作

經細部設計階段檢核後，確認半永久聯結器已滿足設計成果，為確保產品量產能具有相同品質，後續監造單位將於駐廠監造時，分別於施工前、中、後律定不同檢核點，檢查每組半永久聯結器安裝品質，查驗部分包含錨固座組裝品質、材料物理性質檢核報告及活動角度等，並檢核材料成分檢驗證明、熱處理證明及非破壞性檢驗證明等文件。

後續將針對半永久聯結器執行非破壞性檢測，於供應商執行一級品管作業時，隨機進行二級品管抽測及見證，抽驗比例為所有列車數量10%，以確保製造品質無虞。

檢查確認聯結器是否有因干涉撞擊問題產生脫漆或撞擊痕跡，並驗證是否符合聯結器設計規範；另針對軌道部分之施工誤差，由於每一車廂係由兩組轉向架所支撐。以前述直線段/豎曲線R1500m波峰段之聯結器垂直旋轉角最嚴苛情境為例，依據三鶯線單一車廂兩轉向架間距離10,850mm及最大軌道施工誤差值±3mm進行分析，可得左車半永久聯結器垂直擺角為 $\alpha_2=4.642^\circ$ 、右車半永久聯結器垂直擺角為 $\alpha_3=4.978^\circ$ ，相較於未考慮軌道公差之原始擺角，分別增加 $0.296^\circ$ 與 $0.312^\circ$ ，對於半永久聯結器運動性影響微小，半永久聯結器垂直擺角仍維持在最大允許值 $6^\circ$ 以內（如圖12）。然為避免相關誤差累加產生額外聯結器擺動角度需求，亦將軌道施工公差納入監造檢驗重點項目，並於軌道鋪設完成後辦理相關檢測(如表4)。



$$\phi_2 = \tan^{-1} \frac{75 + 3}{10850} = 0.412^\circ$$

$$\phi_3 = \cos^{-1} \frac{27.56 + 93.13}{1639} = 85.77^\circ$$

$$\alpha_2 = 180^\circ - \phi_3 - (90^\circ - \phi_2) = 180^\circ - 85.77^\circ - (90^\circ - 0.412^\circ) = 4.642^\circ$$

$$\alpha_3 = 180^\circ - \phi_3 - (90^\circ - \phi_1) = 180^\circ - 85.77^\circ - (90^\circ - 0.748^\circ) = 4.978^\circ$$

未納入軌道公差計算旋轉角度  
 $\alpha_2 = 4.34^\circ$   
 $\alpha_3 = 4.66^\circ$

$$\Delta\alpha_2 = 4.642 - 4.346 = 0.296^\circ$$

$$\Delta\alpha_3 = 4.978 - 4.666 = 0.312^\circ$$

圖12 最大軌道公差對半永久聯結器垂直擺角影響

表4 軌道施工精度

項目	許可差	
	與設計之誤差(mm)	偏差率(mm/1m)
高程	±3	1
水準方向	±3	1
軌距	±3	1

### 結論

半永久聯結器在台灣過往經驗，未發生過此類損壞事件，三鶯線捷運工程經全面檢核相關設計資料，於生產製造前確認設計符合三鶯

線需求，更進一步於施工安裝階段嚴格把關，精進相關查驗工作，以確保安裝製造品質無虞。

## 參考文獻

1. 臺中市政府(109年12月)臺中捷運綠線聯結器斷軸事故檢測資料及行車安全檢討專案報告
2. EN12663-1:2010 Railway applications - Structural requirements of railway vehicle bodies
3. 交通部頒布(102年11月)捷運軌道車輛技術標準規範—高運量鋼軌車輛規劃基準
4. 新北市政府捷運工程局(105年) 捷運三鶯線業主需求書(二)
5. 日立軌道交通號誌系統(股)有限公司/榮工工程股份有限公司/株式會社日立製作所共同承攬SYL-TK01-TS-ERS-0051電聯車-期中-聯結器技術說明
6. 日立軌道交通號誌系統(股)有限公司/榮工工程股份有限公司/株式會社日立製作所共同承攬SYL-TK01-TS-ERS-0594電聯車-期末-聯結器技術說明
7. 日立軌道交通號誌系統(股)有限公司/榮工工程股份有限公司/株式會社日立製作所共同承攬SYL-TK01-TR-ERS-0561聯結器首件產品檢驗報告

