

軌道測量及淨空測量檢測

蔡進雄

摘 要

軌道工程係為確保捷運系統電聯車能安全通行於軌道上，並確保鄰近軌道之設備及人員安全，因此軌道承商進場前須先整合各標之測量控制點及進行整體平差，再據以量測土建已完成結構體之斷面，並分析其是否侵入車輛淨空包絡線，以作為軌道線形設計之依據，同時將軌床上各種管線位置、陰井、伸縮縫等資料整合於設計圖說中，以利後續混凝土基座(PLINTH)之配置。

軌道承商依序完成混凝土基座、鋼軌及導電軌(第三軌)等相關作業後，須依本局規劃手冊中之相關規定製作淨空檢測車，並定義及檢核出淨空檢測車之淨空包絡線範圍與設施、設備(水電、環控及機電系統標)及結構物之間的關係及淨空，以確保電聯車後續之動態測試及營運期間不會與沿線上之設施、設備及結構物發生碰撞而產生危險。

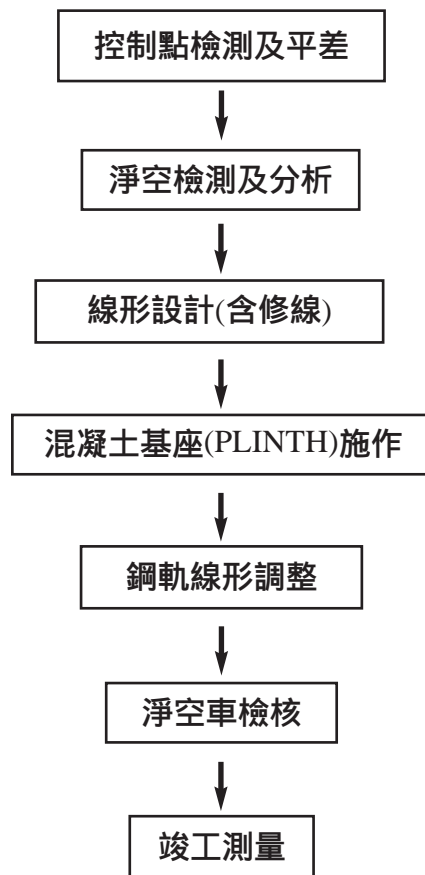
關鍵詞：車輛淨空包絡線、第三軌、混凝土基座(PLINTH)、線形調整(Realignment)

一、前言

為保證列車運轉行駛於軌道上的安全及提供旅客乘車之舒適感，軌道承商於施作軌道相關設施之前，需先提出一最佳線形及最終定線資料經工程司審查核可後，始可據以進行軌道中心點放樣、混凝土基座澆置及後續之鋼軌、導電軌鋪設。

軌道承商於最終定線資料提出之前，需將土建點移交之控制點進行檢測並整合各介面標控制點間座標系統及網形平差之問題。之後，再進場檢測土建結構物之斷面並提出淨空分析資料予工程司審核，以研判是否有結構物或裝修面侵入淨空，以利後續之線形調整及定線。

其相關之施作流程如圖一，並於後續章節中一一說明。



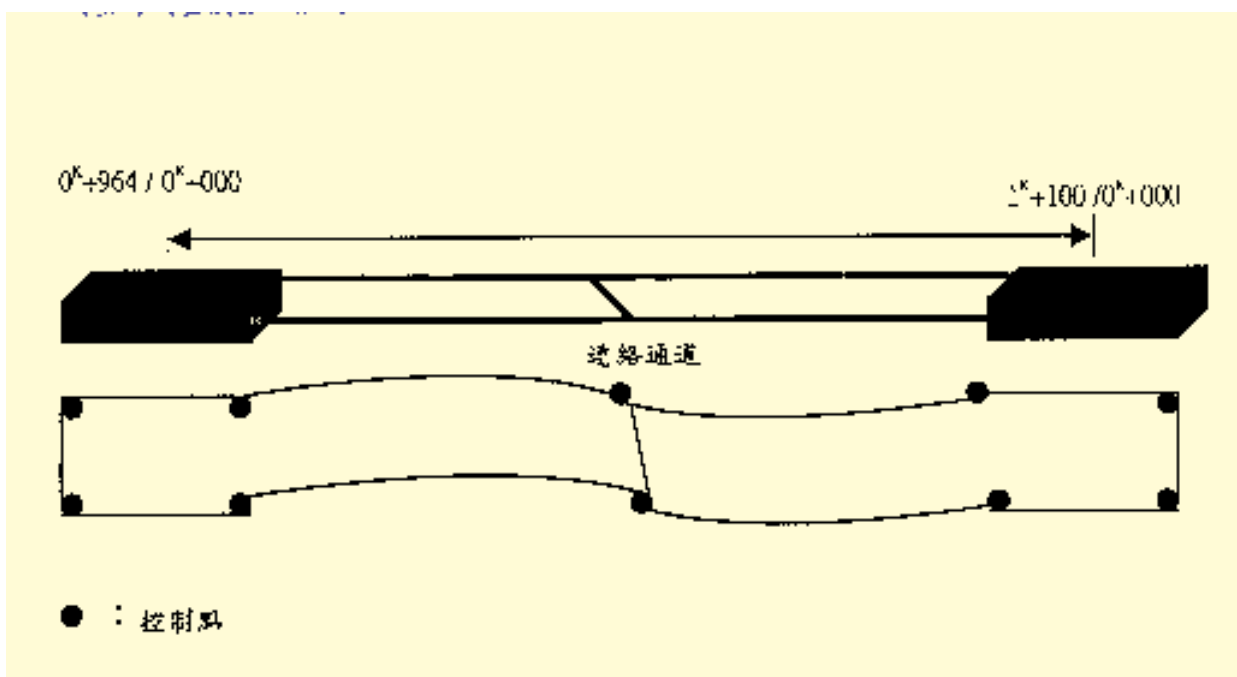
圖一 施作流程

二、控制點檢測及平差

土建標應於軌道標進場前將佈設於軌床上之測量控制點及軌道中心點等資料移點交予軌道承商且該等資料須經其審核單位(測量所)檢測無誤核備在案，除上述資料外，土建仍需將站體、明挖覆蓋段、隧道段之斷面竣工測量成果及軌床上各種管線位置、陰井、伸縮縫等資料提供軌道承商，以利其檢核土建結構物淨空分析之參考依據及後續混凝土基座配置圖設計之參考。

基於軌道標合約規範中並無規定測量控制點其測角、測距之精度要求，故承商於測量計畫書中需配合施工精度之需求自訂控制點之檢測精度，唯其標準決不可低於土建合約測角 $10''$ 、測距 $1/25000$ 之規定。另考量開放導線之平差問題，控制點間儘可能以相鄰站體為一平差區段，並以站體兩端之控制點作為約制條件。另為強化網形可將上、行單一導線於站體及隧道段之連絡通道處加以連測，其可檢核點位精度及減少誤差之累積。控制點網形平差如圖二。

為避免施工過程中因人為及機具之破壞，故控制點應妥善保護並埋設牢固，且為避免施工過程中引用錯誤，其與軌道中心點位應以標示加以區隔。在隧道段之控制點其佈設應避免與第三軌同側，否則俟第三軌組裝完成後，其點位易受第三軌遮蔽，且因剩餘空間不足，將影響後續竣工測量時測量儀器之架設。



圖二 控制點網形平差

三、淨空檢測及分析

在軌道工程中所謂淨空係考慮車輛基本尺寸、軌道施工誤差、車輛磨耗、轉彎半徑、豎曲線等因素，得到車輛運行時之軌跡範圍，稱為車輛淨空，通常以車輛淨空包絡線表示之，惟施工過程中難免因測量、施工及環境變因等因素而產生誤差，因此於站體、明挖覆蓋段及隧道段完成後仍需進行淨空分析，以確保列車於未來通車營運時，能與相鄰結構物保持安全間距，以保障鄰近軌道設施及人員安全。

淨空係以車輛淨空包絡線作為分析之依據，在曲線段須加上水平偏移量及超高(如圖三)所產生之包絡線，另土建標站體需完成裝修後再據以進行淨空檢測，方可研判其裝修面是否侵入淨空包絡線，否則需依既有軌道中心線及淨空需求進行站體的建築裝修。

有關淨空分析之斷面測量詳圖四 圖八。

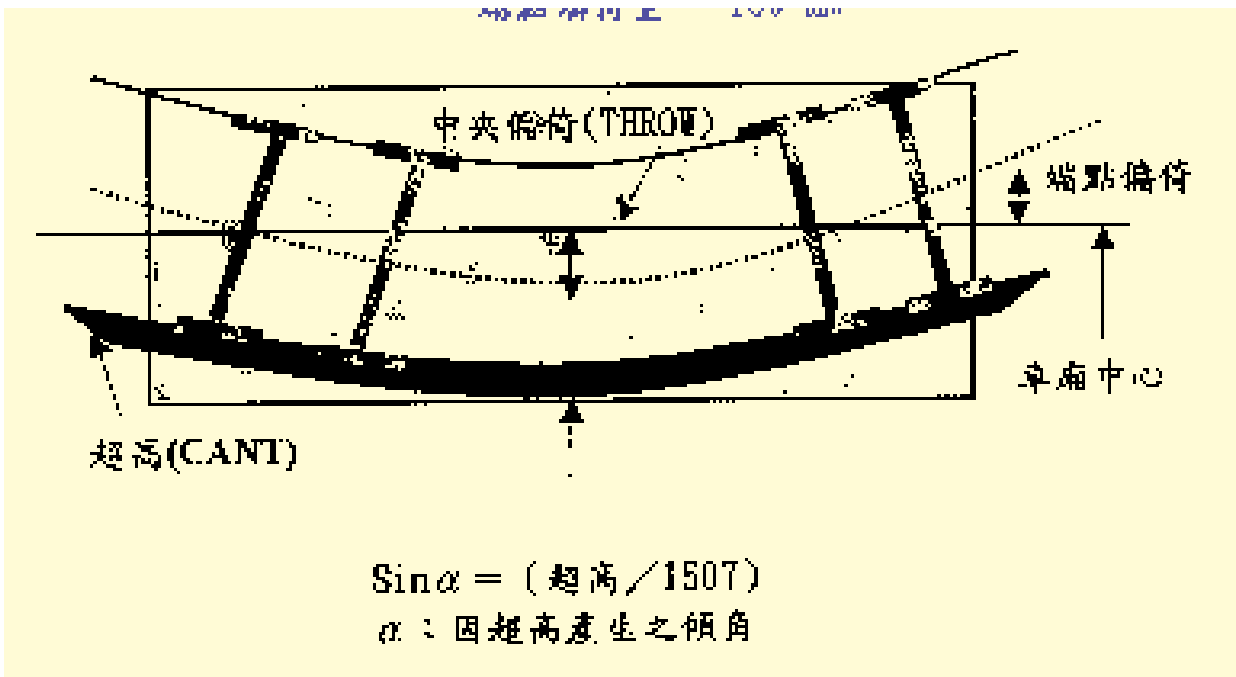
中心偏倚量(MM)= $34031/R$

端點偏倚量(MM)= $33830/R$

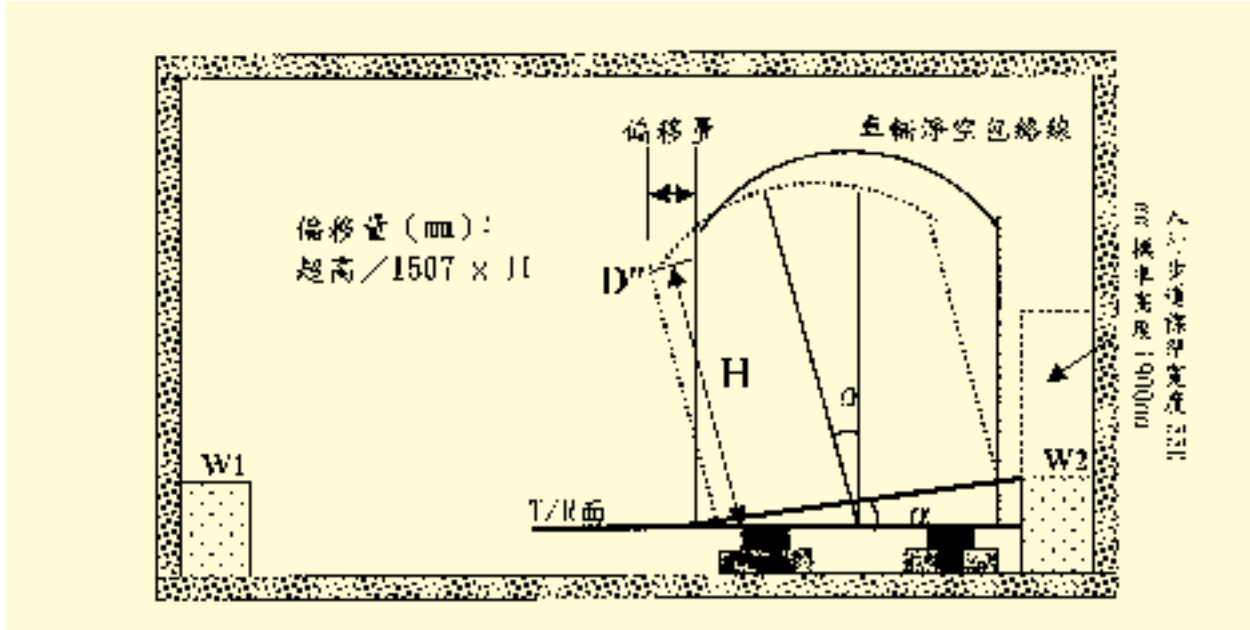
$R=200$

中心偏倚量=70mm

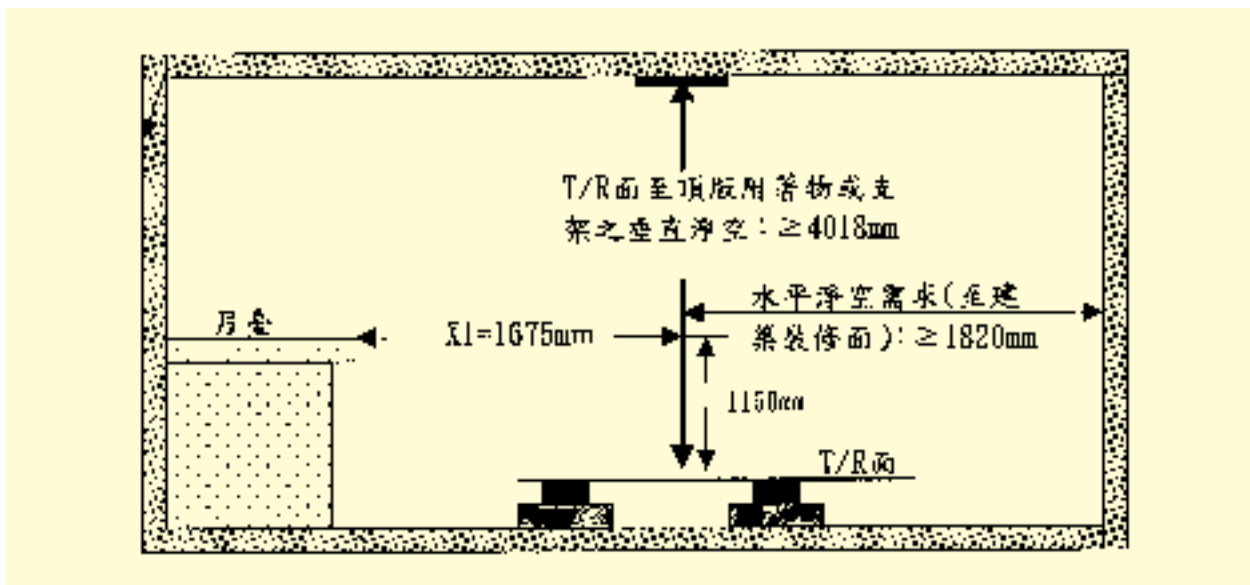
端點偏倚量=169mm



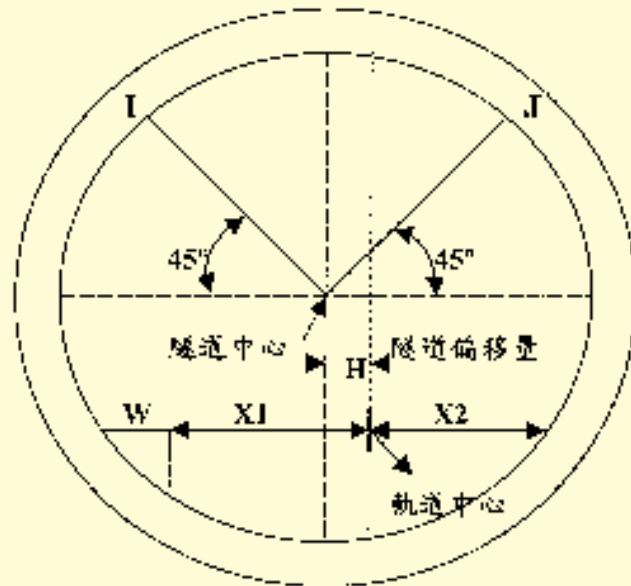
圖三 曲線段超高示意圖



圖四 明挖覆蓋隧道段斷面淨空檢核示意圖



圖五 月臺斷面淨空檢核示意圖



日期	頁次
環數	断面代號
近端軌道里程	
安全走道方向(Walkway R/L&UP/DK)	

一、座標資料

點名	實測經座標	實測橫座標	實測高程
軌道中心			
淨空1點			
淨空2點			

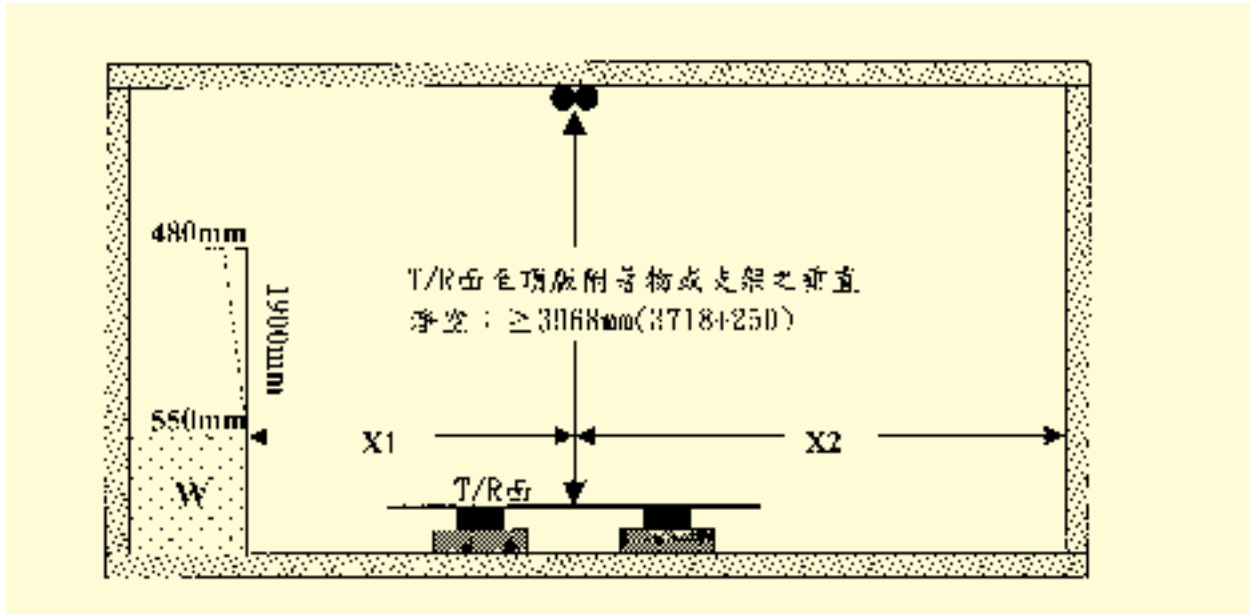
二、高程資料(較差與公差單位均為 mm)

點名	設計值	實測值	較差	合約規定公差	是否容許
中心					
走道					

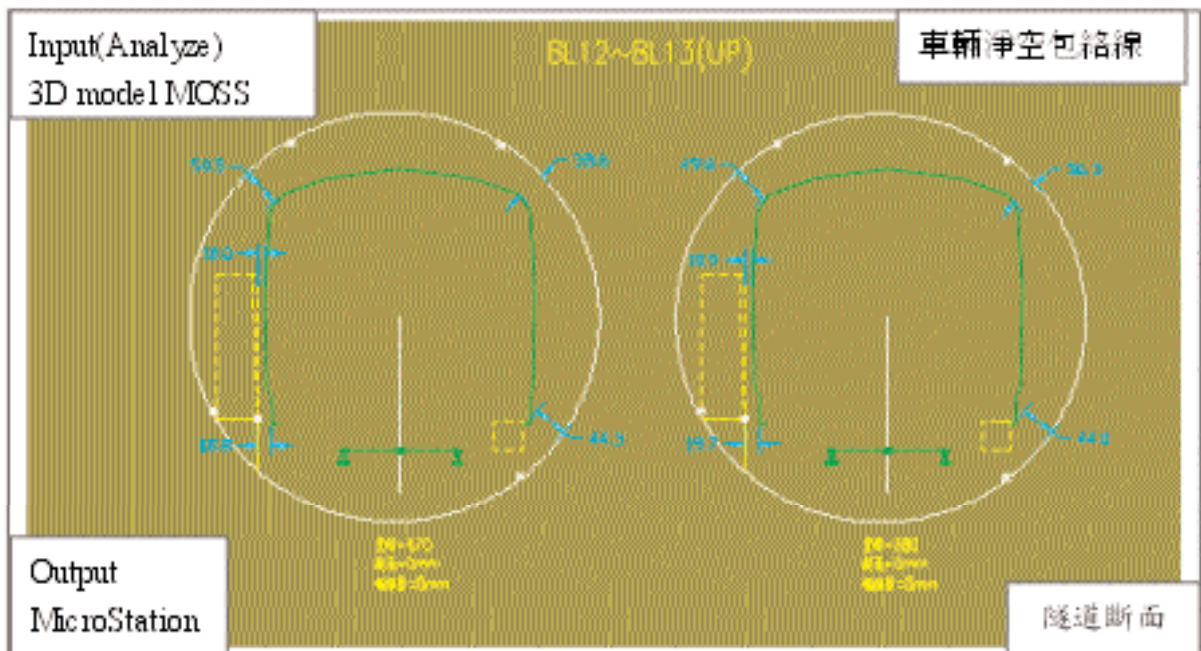
三、實測淨空間距(單位均為 mm)

點名	設計值	實測值	較差	合約規定公差	是否容許
X1					
X2					
W					

圖六 隧道断面淨空檢核及竣工測量成果表



圖七 明挖覆蓋隧道段斷面淨空檢核示意圖



圖八 淨空檢測分析圖

四、線形設計（含線型調整）

路線規畫是依原始設定之服務目的，加以評估分析，取選適當之路徑，以達其需求。一般而言，路線以直線為最佳設計，但因地形地物及其他限制條件，則以曲線克服，因此，線形係混合直線、曲線所組成之幾何配置【鄭國雄、張思,1999】。

線形設計包括平面線形及垂直線形；平面線形則以直線、圓曲線、緩和曲線為主；依規劃手冊：圓曲線之曲率半徑 R 最小為200公尺。另圓曲線分為單曲線、複曲線及反向曲線等三種；垂直線形則以豎曲線為主，依規劃手冊，豎曲線最小曲率半徑 R 為1500公尺，坡度最小為0.3%以利排水，最大縱坡不得超過3%，除現場狀況特殊及距離不長之情形下得經本局同意後佈設大於3%之縱坡(但最大不得超過4%)。

緩和曲線僅設置於主線直線軌道與圓曲線之間，係為克服列車由直線段進入圓曲線時所產生之離心力而設，並設置超高（將曲線外軌提高）且其長度至少20公尺以上，當圓曲線曲率半徑 $R \geq 2110$ 時，毋需設置緩和曲線；此種曲線之特性是曲率半徑自TS處 $r = \infty$ 漸變至SC處 $r = R$ ；其為克羅梭曲線，當緩和曲線總長 L ，離TS距離 X 處之曲率半徑為 $1/r = 1/R - X/L$ ；超高亦由TS處為零漸變至SC處為最大（超高值最大為130mm）。

（一）線形組成之種類

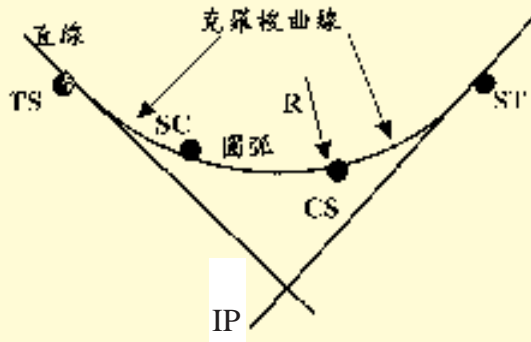
克羅梭曲線組成之種類主要有下列四大類【周森茂,1983】：

- 1.基本型：是以直線、克羅梭曲線、圓曲線、克羅梭曲線、直線之順序所組成之線形。
- 2.S型：兩個反向圓曲線間以兩組克羅梭曲線連接，其形狀似S型，故稱之。
- 3.蛋型：兩個同向之圓曲線由一克羅梭曲線連接，其形狀似蛋型，故稱之。
- 4.複合型：兩組以上同向之克羅梭曲線在曲率相同之點連接之線形稱為複合型。

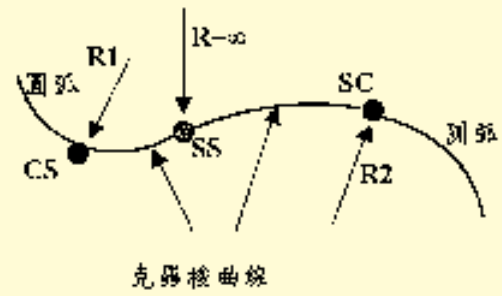
上述各類型之線形如圖九。

（二）水平線形之線形調整(Realignment)

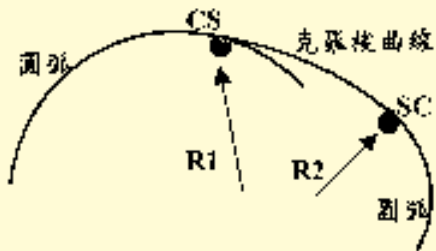
線形調整 - 依軌道技術規範規定，承商之竣工最終線形(軌道中心線)若其偏移量超過結構容許誤差，發生淨空不足時，工程司得視情況要求承商修改軌道之水平或垂直定線，並發展和建議一最佳線形予工程司審查。其基本觀念為儘可能縮小修改範圍、線形修改偏差值及變化量，且其施工方法、施工圖等，須待最終定線資料經工程司核可後，始可進行混凝土澆置及其它工作。圖十為線形調整之示意圖及其相關原則。



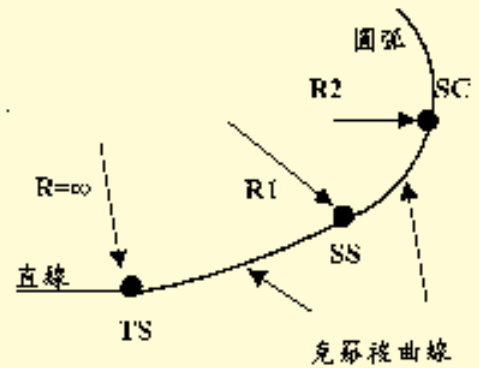
1. 基本型
(一) 基本型



2. S型(反向曲線)
(二) S型(反向曲線)

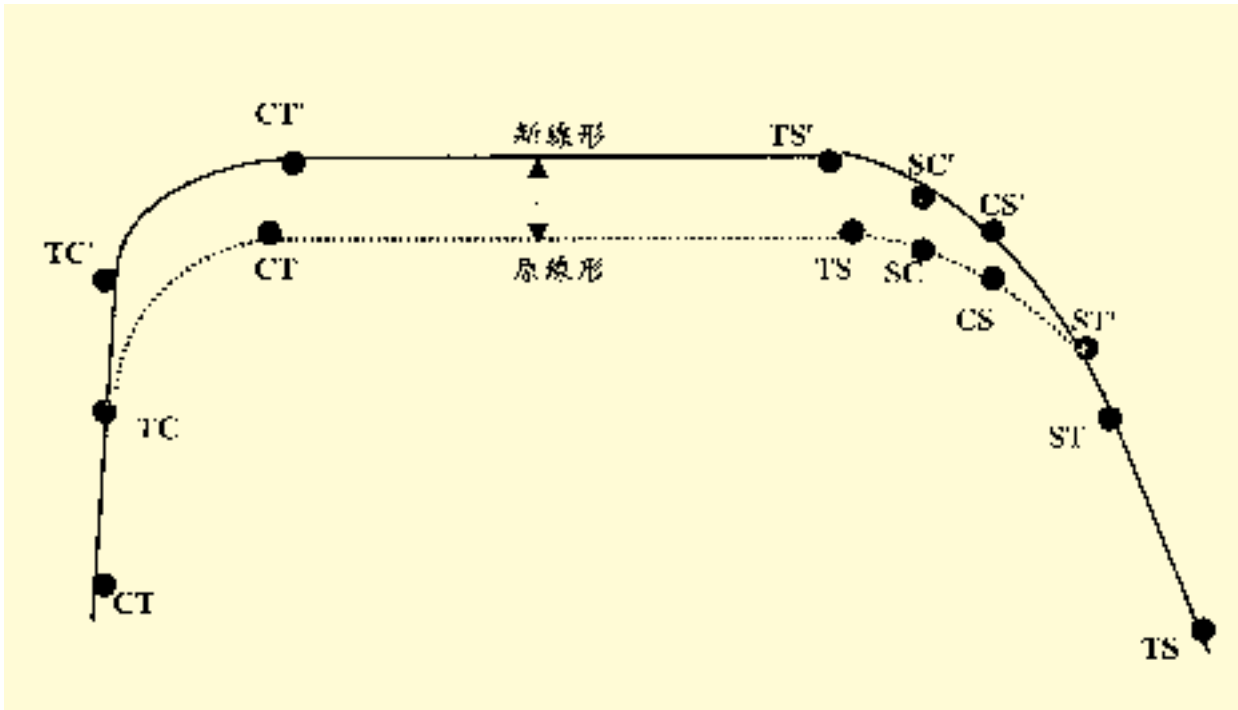


(三) 蛋型
3. 蛋型



4. 複合型

圖九 線形種類



依據所須之淨空要求，線形調整之原則如下：

1. 修改切線方位角。
2. 修改圓曲線半徑。
3. 修改緩和曲線(螺線)長度。
4. 修改圓曲線長度。
5. 修改後高程及超高亦應一併修改，且應符合規範之淨空要求。

註：分析及線形調整之軟體為MOSS。

圖十 線形調整示意圖及其原則

(三)垂直線形

垂直線形是由直線及豎曲線所組成，豎曲線係縱斷面坡度變化處所設置之曲線，豎曲線可分為圓曲線、二次拋物線及三次拋物線【劉鳴錚,1997】，在捷運設計上係選用二次拋物線為豎曲線且其近似於曲率半徑為 K 之圓曲線，如圖十一。計算豎曲線常用之數學式及其定義詳圖十二。另有關其線形調整詳圖十三之範例。

今選用豎曲線曲率半徑為3000m用以取得平緩之漸變段

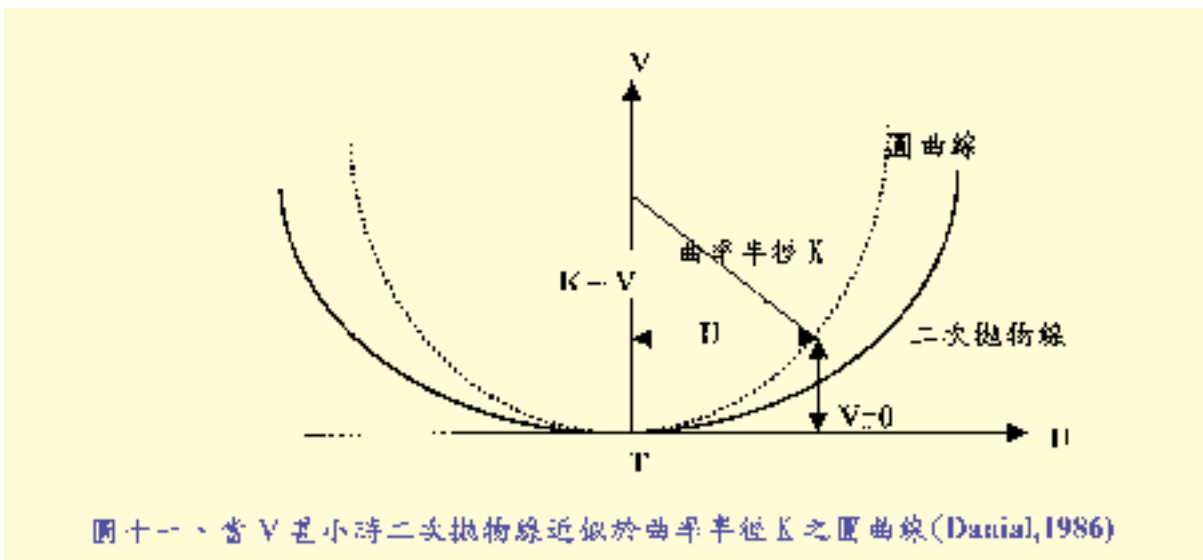
1. 坡度由0%變為0.25%，所需豎曲線長度為

$$3000\text{m} * (0.25 - 0) = 7.5\text{m}$$

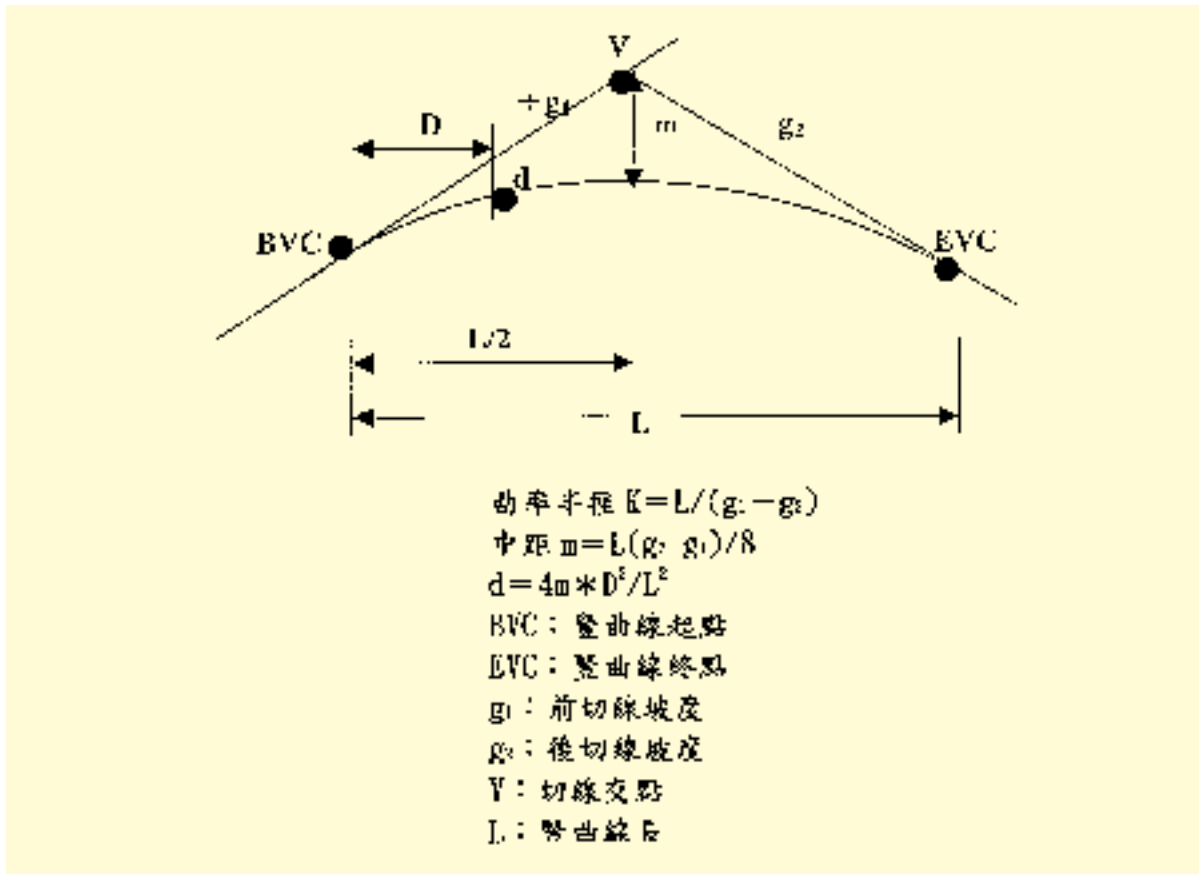
2. 坡度變化0.25%下，調高15mm所需之調整段長為

$$15\text{mm} * 100/0.25 = 6\text{m}$$

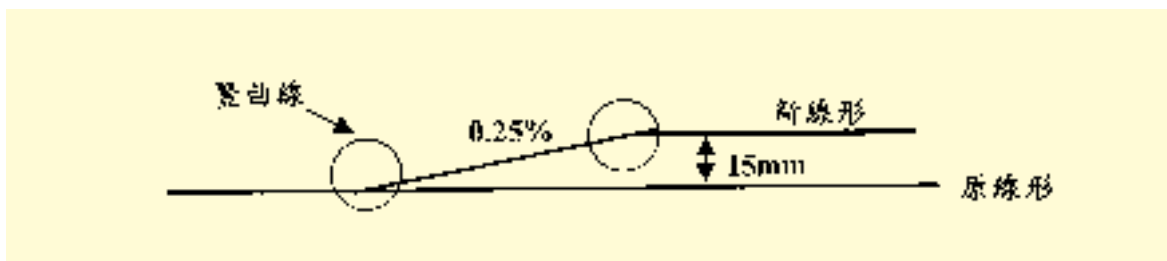
3. 全部之調整長度為： $7.5 * 2 + 6 = 21(\text{m})$



圖十一 當 V 甚小時二次拋物線近似於曲率半徑 K 之圓曲線(Danial,1986)



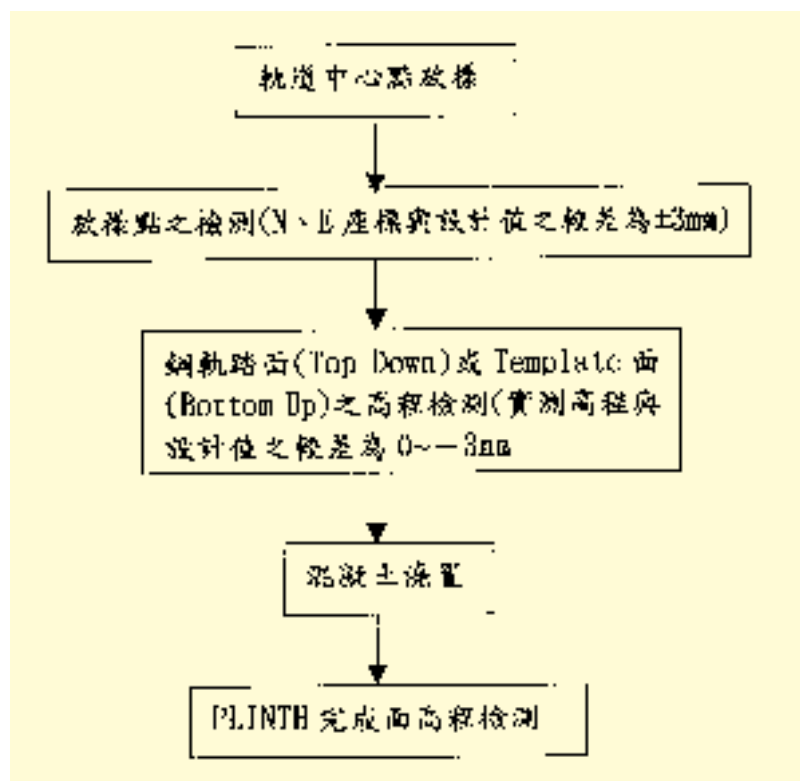
圖十二 對稱型二次拋物線豎曲線



圖十三 垂直線形調整示意圖及其計算方式

五、混凝土基座(PLINTH)施作

混凝土基座施作前軌道承商需完成控制點檢測及平差並完成淨空確認、線形設計及系統界面標之ICD圖簽認，之後再依控制點座標依直線段每隔10m，曲線段每隔5m之原則，將軌道中心點放樣於軌床上（點位需埋設牢固）並向軌道所提出申請檢測，之後再依基座配置圖分割PLINTH區塊及鋼筋、基鈹扣件、導電軌扣件等配置。有關本作業之流程及其相關檢測如圖十四。

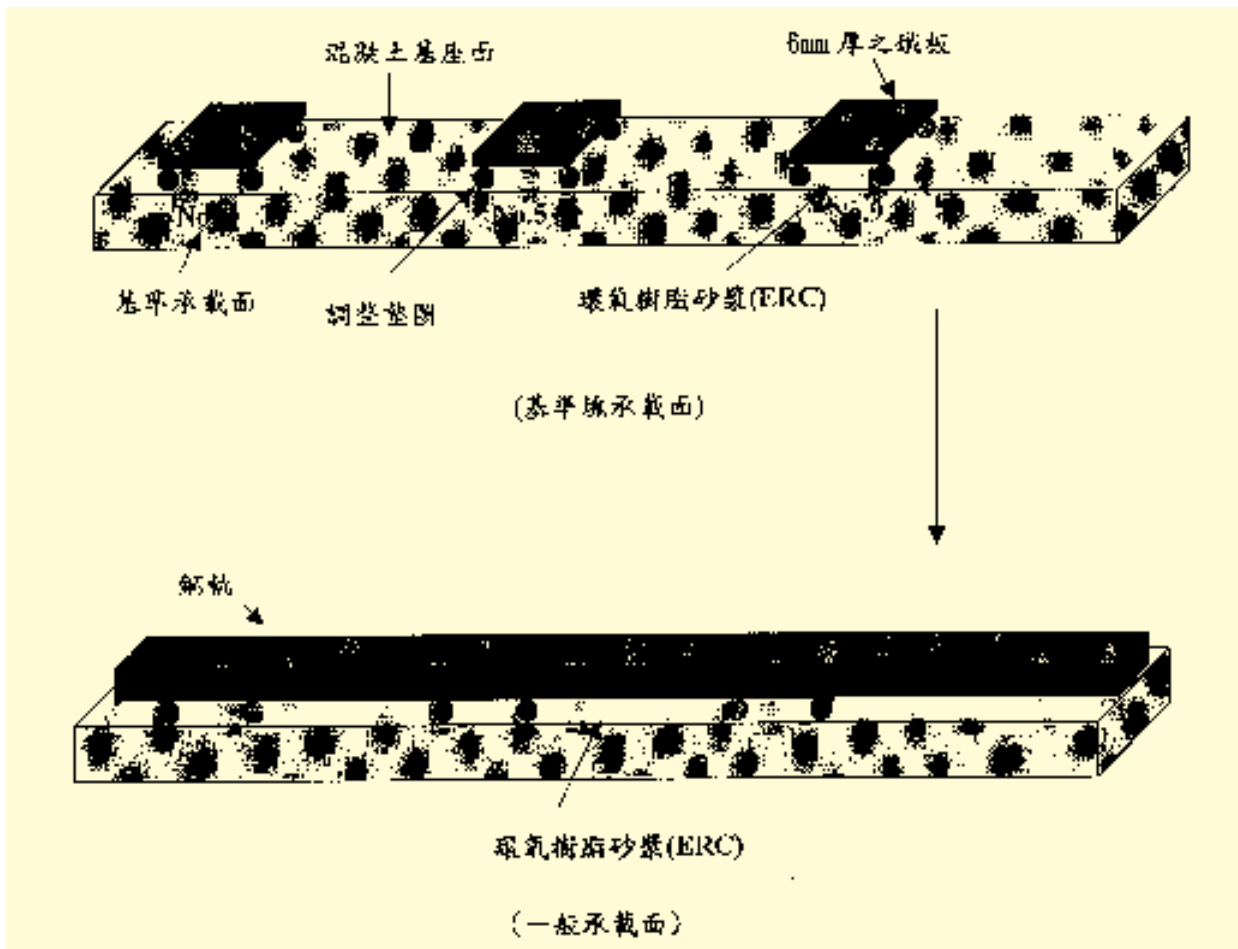


圖十四 混凝土基座施工流程圖

一、混凝土基座面高程調整

當混凝土基座面之實測高程與設計值超出規範之容許誤差時，且基座面不平整（橫向斜坡面大於1/200）及表面孔穴大於5mm甚多時，則需依設計之垂直線形資料進行混凝土基座面之修補，俟完成修補面後再進行後續之鋼軌鋪設。

本標承商採壓漿法進行混凝土基座面之修補，其施工方式係每間隔約4個基座面先測定其四個邊點之高程，再依需修補之高程量先以1mm厚之墊圈(washer)調整固定，並施作環氧樹脂砂漿(環氧樹脂+金剛砂)作為基準塊，再利用鋼軌本身重量及線性，重壓其餘基座面基鈹下方之高強度環氧樹脂砂漿，使軌道高程控制在設計高程內。其流程如圖十五。



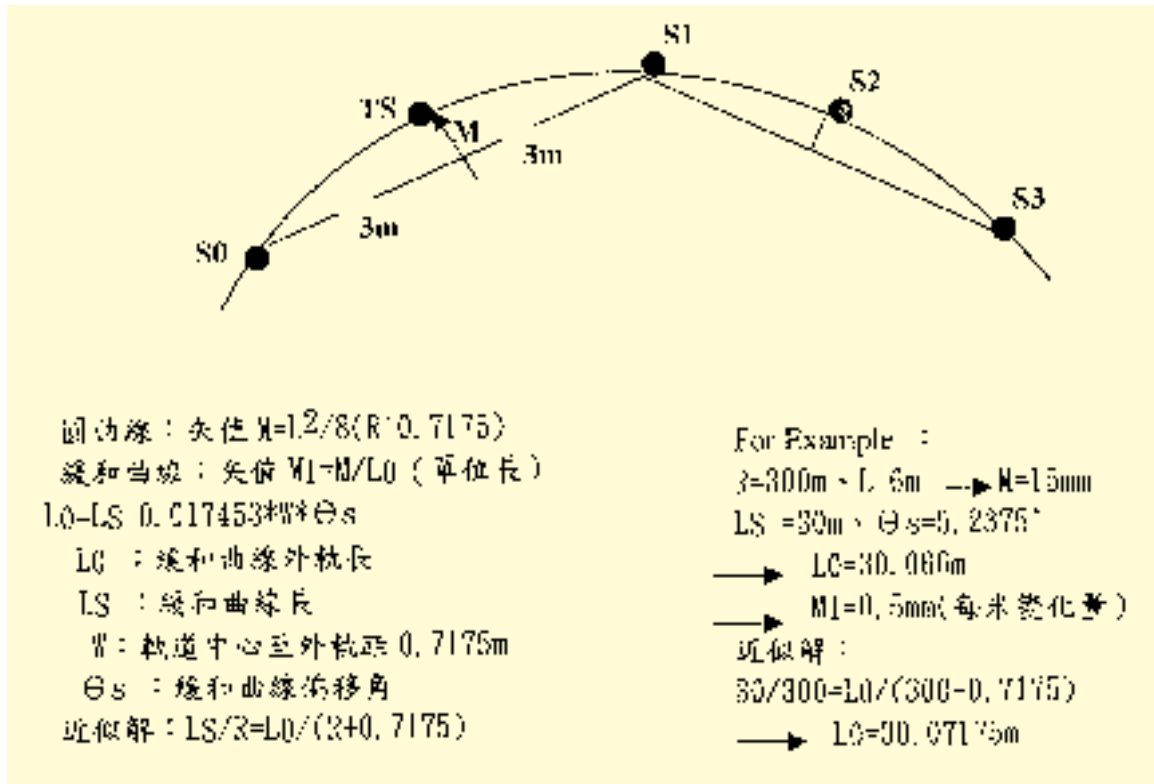
圖十五 混凝土基座面修補示意圖

六、鋼軌線形調整

(一)水平線形調整

本作業係於鋼軌鋪設完成後所進行之微調，其調整方式如下，並以圖十六示意之。

1. 依現場埋設之變化點TS、SC、CS、ST以軌道直角尺及垂球對點並將變化點相對應之里程位置標示於鋼軌踏面（外軌）外側。
2. 依不同線形區段分別將測點（直線每隔5m、圓曲線及緩和曲線每隔3m）予以編號（以T、C、S表之）並標示於鋼軌踏面外側再以測點編號為O者為線形量測及調整之起點。
3. 取長約10m之魚線或尼龍線架設於SO及S1依法線方向量測TS點之矢值是否與設計值相符，若不符則調整之。
4. 當外軌之線形已調整完後，再以軌距尺調整軌距（ $1435 \pm 1.5\text{mm}$ ），調整軌距時以調整內軌為原則。



圖十六 鋼軌水平線形微調及相關之計算

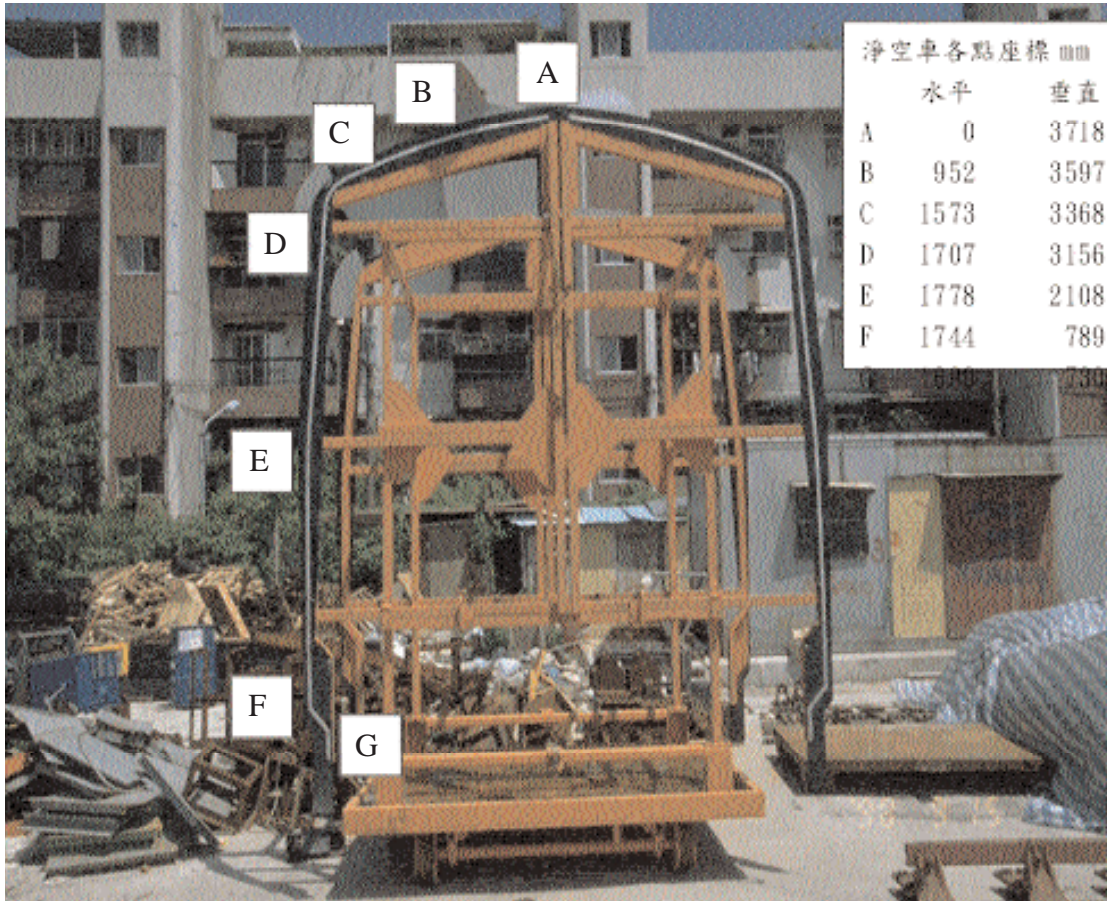
(二)垂直線形調整

本標軌道之垂直線形經前述章節之工法完成混凝土基座面高程調整後，經現場檢測鋼軌踏面高程之資料顯示，其高程控制大部份均符合約要求，僅少數與設計高程不符之區域另以加墊片方式予以調整。

七、淨空車檢核

依合約之規定，軌道承商於軌道完工時須製造或修改一行駛於軌道上之車輛為軌道淨空檢查車，以校驗車輛淨空包絡線是否侵入結構並提送淨空檢測計劃書予工程司審核，其內容包含淨空車製作細部尺寸圖說、量測方式、淨空車校正方式等說明，另每次進行淨空檢測作業前，須先將淨空車移至直線無超高之軌道上，以儀器檢校檢測車之中心線是否正確並將其框架伸展至包絡線範圍，並量測各點（如圖十七之D、E、F）之座標是否正確。

軌道承商於淨空檢核作業完成後，須依車輛淨空包絡線最小淨空需求(如表一)，將侵入淨空之結構物或設施、設備，列印成淨空明細表(如表二)並提送監管工務所，以便召開協調會確認該結構物或設施、設備由應負責之承商予以改善，並於改善後通知軌道承商進行複檢(如表三)，直至無結構物或設施、設備侵入淨空為止，以利後續電聯車進行動態測試時，可確保安全無虞。



圖十七 淨空檢查車

八、竣工測量

軌道承商於軌道完工辦理驗收之前，需提出全線之控制點最終成果、軌道最終線形資料（含線形調整資料）及竣工測量成果予監管工務所，並由工務所於辦理點移交之前轉交予捷運公司據以進行後續軌道維修之事宜。另軌道承商需將控制點之點號、座標、高程以標示牌設置於點位旁；軌道中心點每隔10m以鋼釘永久設置於軌床上並將點位之里程詳細標示於鄰近之基座上，其中變化點之點號及里程更需以噴漆明顯標示於點位旁。

軌道工務所依承商所提出之竣工測量成果進行點位之抽檢測作業，其檢測誤差分別為：軌道中心點 $\pm 3\text{mm}$ 、T/R面高程 $\pm 3\text{mm}$ 、軌距 $1435 \pm 1.5\text{mm}$ 。若不符合要求，承商應予以改善並進行複測，直至各點位均符誤差要求為止。

九、結論

(一) 土建標站體及明挖覆蓋段回填所產生結構體之壓密沈陷，常造成高程控制點之高程亦隨之改變，此增加檢測及平差作業之頻率，亦造成銜接段（明挖與隧道）軌道垂直

表一 車輛淨空包絡線最小淨空需求

表一、車輛淨空包絡線最小淨空需求

結構物種類及位置	明挖覆蓋及潛盾隧道段、站體
鄰近結構牆完成面。	100mm
鄰近之任何附着物、管線、電纜、旗竿、標誌或固定於結構牆完成面之支架。	100mm
鄰近安全步道邊緣之完成面（註：安全步道最小寬度為550mm；必要時步道包絡線頂部可減至480mm）。	50mm
月台裝修完成面。	1075mm
月台端需作截角時，列車最前/最後面門與月台間之空隙。	1113mm
月台面對面之建築裝修完成面。	50mm
非公眾月台之步道邊緣或安裝於步道上之欄杆。	50mm
車輛頂部與相對結構或固定設施之最接近面間之最小垂直淨距。	潛盾隧道：100mm 明挖覆蓋：250mm

表二 淨空檢查車檢測成果表

表二、淨空檢查車十區四段淨空

TRACK 里程	實際量測值	合約規範值	侵入淨空量	侵入物	關鍵標
BL8 DN0+082	1764mm	1794mm	30mm	步道邊緣	土邊標
BL15 UD0+759	3758mm	4018mm	262mm	排風管	燈控標
BL10 UP0+560	1776mm	1794mm	18mm	欄杆	上邊標
BL7 DN1+145	1781mm	1807mm	47mm	粉面突出之鋼筋	土建標
BL13 UP0+265	3913mm	3968mm	55mm	號線架(頂版)	通訊標

表三 淨空檢查車複測成果表

TRACK 里程	實際量測值	合約規範值	侵入淨空量	侵入物	關鍵標
BL8 DN0+082	1814mm	1794mm	已改善	無	
BL15 DN0+759	4020mm	4018mm	已改善	無	
BL10 UP0+560	1814mm	1794mm	已改善	無	
BL7 DN1+145	1820mm	1807mm	已改善	無	
BL13 UP0+265	3968mm	3968mm	已改善	無	

線形調整之困擾，更甚者，於結構伸縮縫因差異沈陷發生位移時，需重新考量 PLINTH 區塊分割，此不僅延誤施工時程亦產生界面權責不易確定之問題，因此，土建移交予軌道標進場之時機及界面權責劃分等問題均為施工過程中所需考量的。

- (二) 土建將軌床移交軌道標進場時，軌道標需完成軌床上所有控制點之檢測、平差及整合，並以整合後之座標成果作為界面間施工之依據，即土建若需進行月台邊緣裝修面施作時，需依軌道標核定之控制點進行放樣，以求座標系統之一致性，避免系統性誤差之衍生。
- (三) 為降低跨處不同標段間控制點所產生系統誤差之影響，土建標應於界面處增設輔助控制點，作為銜接不同網系間控制點之檢核及平差作業，以避免控制點誤差導致銜接處軌道線形之不一致，因而影響後續軌道標線形設計及其相關作業之進行。
- (四) 控制點為所有施工放樣之基準，其點位精度良否關係整體施工品質，因此，控制點之檢測作業需嚴加控管，另點位（含施工放樣點）亦需妥善維護以避免人為或施工時遭到破壞徒增作業上之困擾。
- (五) 淨空作業係軌道承商依合約驗證未來於營運期間電聯車不會與沿線結構物或設施、設備發生碰撞之依據，在以往，不論是土木或機電工程，在設計階段時常忽略有關淨空要求之整合，俟工程完成，淨空車進場檢核後才發現淨空不足，故於設計階段時，應確實將相關界面之淨空要求納入規範及設計中。

◇ 參考文獻 ◇

1. 台北市都會區大眾捷運系統規劃手冊(第十一版)，第四冊，固定設施需求，29-42頁，民國86年。
2. 周森茂，「公路施工測量實務」，74~77頁，民國72年。
3. 張思，鄭國雄，「軌道工程-高鐵、捷運、輕軌、傳統鐵路」，12-26頁，民國88年。
4. 劉鳴錚，「以線元素移動方法應用於受約制豎曲線定位之研究」，國立交通大學土木工程學系碩士論文，4-9頁，民國87年。