

潛盾隧道工程測量

龔昶榮¹、張正義²、趙修元³、李炳宗⁴、周添福⁵

摘要

台北市捷運工程中區工程處轄區段，大部份均為地下工程，除部份站體及明挖覆蓋段外，均以潛盾工法施築隧道，而其對測量精度又甚為嚴謹。本文係以本處十年之測量作業經驗作一概括介紹。

關鍵詞：經緯儀、潛盾機、控制點、真北儀、GPS衛星定位系統。

1臺北市政府捷運工程局中區工程處 正工程司兼主任
2臺北市政府捷運工程局中區工程處 聘用助理規劃師
3臺北市政府捷運工程局中區工程處 副工程司
4臺北市政府捷運工程局中區工程處 聘用規劃師
5臺北市政府捷運工程局中區工程處 聘用助理規劃師

一、前言

台北市捷運工程之地下工程除站體及部份明挖覆蓋段外，均以潛盾工法施築隧道。而測量在此工程中最主要的任務在於保證其在預定誤差範圍(10公分)內的貫通。

一般潛盾隧道工程測量主要可分地面控制測量、隧道控制測量、掘進管理測量及貫通後測量等階段，由於都市及工程環境之限制，在實際作業上、高程貫通誤差應用直接水準測量的方法尚易的達到所要求的精度，但橫向(平面)貫通誤差的控制則較為困難(尤其是方位角傳遞)，所以在平面的控制上就要因應不同的環境狀況，選擇適當的方法、儀器，制定合宜的技術方案加以克服。

二、地面控制測量

隧道施工控制測量要能保證隧道橫向貫通的準確性，地面控制網主要是用於確定洞口點的位置並把方向傳遞進洞，亦即地面控制測量乃在要能確實掌控隧道兩端控制點之關係，其控制點的精度需求，則以滿足隧道施工精度的要求為主，其主要考量因素有隧道長短、坑井控制點和方位引測精度、隧道內控制測量精度、以及隧道鑽掘精度的高低決定之。

傳統上的佈設形式是以三角鎖為主，捷運工程因處於都會區域，是以大部份皆以導線或導線網為主，多餘觀測數較為不足，除不易透過平差來提高精度外，在檢核條件上亦顯有不足，難以及時發現可能存在的粗差，即可靠度較差，故之必須以多次重複觀測來提高可靠度。

通常在部份地區，控制點狀況並非如想像的惡劣，尤其是短隧道、坑口控制點，是直接通視或相對位置可相當直接的予以控制，使其兩端相對方位及位置可適度控制而不受控制網平差張力所致之方位或位置影響。

近來由於GPS衛星定位技術已相當成熟普遍，借用其不受平面通視限制之利來確立兩端控制點之相對關係並建立控制基線最是方便可靠。唯在使用GPS定位測量仍應注意檢核機制的建立，除重複觀測外，更應有幾何之檢核機制，如隧道兩端控制點的佈設不僅以形成一控制邊的點對為可，而是以建立可互相通視的閉合三角形為原則，以方便在使用測距經緯儀進行細部引測時之檢測。

三、隧道控制測量

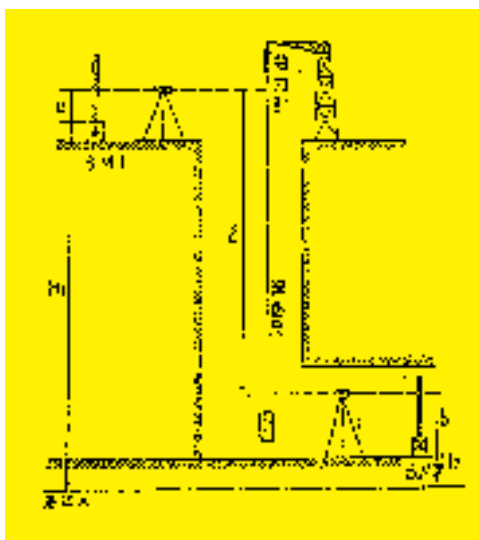
為了確保隧道能正確的貫通達到預定位置，吾人必需把地面控制測量成果中的座標、方位角和高程透過豎井傳到地下，並在隧道內道內進行精密的控制測量。

(一)工作井基準點導入測量

工作井基準點導入測量的主要的目的乃是地面點位座標引測至地下。由於捷運工程地處交通繁雜，建物密集的都會區，施工用地有限，一般可做為地上與地下控制網聯繫的工作井(豎井)寬度通常均在20米以內，深度則在10-30米不等，形成

一個極不利於引測的環境因素，而隨著現場狀況的限制、及作業配合情形的不同，而使用不同引測方法。

1. 高程控制點的引測



$$H_2 = H_1 + a - (b + l)$$

a：地表水準點BM1之標尺讀數

b：地底水準點BM2之標尺讀數

l：鋼卷尺(吊尺)上下讀數的差值

H1、H2：高程點BM1、BM2的高程

如圖以懸吊鋼尺直接引測，即以直接水準測量方法直接讀取水準標尺及懸尺的尺寸刻劃，以求取地下水準點之高程，唯為儘量避免因時間差所致之可能滑動誤差，應以地上、地下同時擺設水準儀，於同一時間同時觀測懸吊之鋼尺為宜，另鋼尺所繫之懸錘重量及觀測時之溫度，應予以記錄，並參照所附手冊進行改正。

一般而言，高程的引測是直接、單純且精度較易掌控，而要注意的是讀數上的整數讀誤，如多讀或少讀了1公分或10公分等等，尤其是吊尺的精度尤應注意，為避免此種錯誤，最好是移動水準儀位置重新整置，多觀測幾次或換手輪流觀測。

2. 平面控制點的引測

一般在捷運工程常使用的平面控制點引測方法主要有直接測設及鉛錘引測兩種引測作業方法，一為使用經緯儀於坑井旁邊觀測角度及距離，直接測定井底控制點之座標位置，另一則使用鉛垂儀或錘球來引測井底控制點。

(1) 直接引測

所謂直接引測顧名思義乃是使用經緯儀和測距儀直接於工作井旁設點擺站，後視已知控制點設定方位後，對井底點位進行角距測量，把地面控制測量之座標引測到地下。唯此作法需考量經緯儀俯仰角度的限制(一般俯仰角應控制在 35° 以內)，而且俯仰角度愈大，經緯儀之直立軸、橫軸等影響量亦隨著增大，所以在較深的豎井作業中，應分段引測或使用其他方法進行引測。

(2)鉛垂引測

鉛垂引測可以是使用重錘和吊絲的作業模式，也可以使用類似光學求心模式的鉛垂儀來作業。

①使用垂線及錘球引測

一般於型鋼上之適當位置焊一鋼片，使用儀器測出鋼片上垂點座標。由此點垂下鋼線及錘球，並於井底置一盛滿機油或水之水桶，以防止晃動。另於下方以與垂線交會角度成 60° — 120° 度角之位置設置兩部經緯儀，以交會法定出井底垂點之位置。

使用錘球，現場應避免震動等外力之影響，禁止各項機具在週圍運作(如吊車...等等)，使用錘球作業，為免吊絲受風力影響而擺動偏移，應將風機關閉。另要保證兩根吊絲自由懸掛，防止碰著井壁或其它障礙物，除阻尼液不能碰底及其他物件。若使用的是鋼絲，則鋼絲不能有折紋。因吊絲不易靜止不動，因此觀測時，至少要注視吊絲一周時間，瞄準其振幅最大時之左右兩個位置，取水平度盤的讀數平均。

②使用鉛垂儀引測

鉛垂儀的使用乃在工作井上之適當位置設一可架設儀器之工作台，於其上架設鉛垂儀，向下對視至一可調整之規標，借由無線電對講機對話指示重複對點引測。

使用鉛垂儀時，要注意擺站位置要與人員站立行走可能的影響範圍隔離，定平要求嚴謹；另鉛垂儀除引測之點位外，亦應檢核規標中心是否正確，因觀測時均以規標中心為主。作業時，可以強制對心法於引點設儀器測量角度、距離，以為檢核並提高度。

③使用鉛垂儀 + 雷射引測

此乃於鉛垂儀加上雷射光指示引測，可直接於井底規標板顯示點位中心，調整規標中心與投射點重合釘定點位。由於具有可視光點，使作業更形方便。

(二)隧道內基本方向邊引測

上節所言乃是將地面控制測量成果中的座標和高程傳到地下的方法，但為了確保隧道能正確的貫通達到預定位置，我們還必需把地面控制測量成果中的方位角透過豎井傳到地下，此方位角引測的誤差對橫向貫通的影響是控制測量最主要的誤差來源。

一般在捷運工程常使用的引測方法主要有如上節所述之直接測設及鉛錘引測兩種引測作業方法。然而不論使用上述何種引測方法，所面臨的一個最大問題，乃為短邊所致的方位、精度不足問題。其主要誤差來源，除測點本身誤差及照準誤差外，儀器定心、定平所致的誤差亦難以做有效而妥善的處理。而為儘量減少此種誤差影響，目前除加強上述作業方法之嚴密性外，亦輔之以真北儀來引測方位，茲分

述如下：

1.直接測設

為了避免對點求心的誤差，在使用經緯儀引測座標及方位時，我們使用了儀器與基座可分離的特性，即強制對心法，於井口控制點及井底和隧道內控制點以T2經緯儀先行定心，定平後、分離基座換插規標、稜鏡，在回頭逐點觀測，求得隧道起始基線的方位和座標，此種作業模式，在一般情況下方位約可控制在15"以內。若可能的話，可在工作井另一頭對向亦設點，以相同方式交差對向觀測，可得多餘觀測條件供作檢核並提高精度。唯使用本法作業應注意下列事項，以避免產生誤差或錯誤。

- (1)俯仰角不宜太大，否則直立軸誤差將有顯著之影響。儀器本身之俯仰角度觀測範圍亦有所限制，應宜注意。
- (2)強制對心施作之點位應全用同一部經緯儀定心，定平。一般規標、稜鏡、基座之水準器精度較差。
- (3)注意儀器與基座結合時之位置，是否會因結合點不同而影響到直立軸之垂直(氣泡偏移)。
- (4)經緯儀照準之位置應為稜鏡規標之旋轉軸心(即規標中心應為軸心)，且應小心將規標面正對儀器。
- (5)使用分離式測距經緯儀，因測距儀與經緯儀光軸不同軸，除正對儀器應注意稜鏡之俯仰角度。以避免測距誤差。

2.鉛錘引測

在使用鉛錘引測作業方法，為避免定點及儀器求心、定平的誤差，可考慮以聯繫三角形來傳遞隧道內控制點的座標及方位，即所謂的三角形連接法，即在工作井至少同時設置兩個鉛垂點，這些垂點僅供作座標及方位傳遞之轉點，並不一定擺設儀器，需擺設經緯儀的僅地上及隧道內之控制點。

依聯繫三角形法之特性，於布設控制點位時宜使三角形三點近似在一直線上，並使井中兩垂點距離長些，儀器至垂點之距離在場地許可的條件下盡量短些，但必須大於經緯儀望遠鏡的最小視線長度。實際作業中，為了避免錯誤及提高精度，應設法多觀測幾組成果及連成多個聯繫三角形，如更換垂點的位置、增加垂點或在地上及地下各增設測站等等。當然！這些都需要現場環作業能配合，否則很難達到理想的結果。有關精度檢討可參考【金其坤、陳龍飛編著之「工程測量」】。

3.真北儀方位引測

由於短邊傳遞方位角的誤差，在控制上有其問題。因之，使用真北儀來引測方位為最直接便利的方法。次因真北儀造價昂貴，觀測時間長，一般定向精度有限約20"，與操作熟練度有關(如WILD GAK1按榮工報導之資料精度可達5")，通常在評估使用其他方法無法達到工程要求的情況，才會使用。但其優點仍勝於

其他方法。尤其使用真北儀，尚可檢核定線方位，減少或避免長隧道觀測孔的設置(原則上，捷運隧道不容設置觀測孔)。尤其目前新近真北儀之精度已可達3"精度(如DMT Gyromat-2000)，且為自動化作業，操作簡單，操作時間在10分鐘以內，對於隧道工程作業實有莫大助益，尤其是長隧道之應用。當然價格較為昂貴。

為確保真北儀成果的正确性，使用前後均應在基線上檢核儀器常數(E)。測量時應避免陽光照射、震動或處於風力太大或地基不穩的處所。

因真北儀所定之方向仍係根據地球自轉所定之真方位，不同於方格系統之方位，因之要對所定得之方位做一子午線收斂角之修正。

(三)隧道內控制測量

地下控制測量因受環境限制，通常是以導線型式為之，其用途在於放樣隧道的中線位置，指示開挖方向，並要能保證隧道在預定的精度要求範圍內貫通。

通常地下導線是一個開放導線(支導線)，且它不可能一次測完成，因為只有在隧道掘進一段距離後才可能佈設一個新點，再進行測量，逐步前進測設。

而為了避免可能存在的誤差(或錯誤)，同時提高精度，經常進行複測是必要的。因此在埋設一個新點後，坑井起點開始全面複測，同時測定新點座標。除外重測還可以瞭解隧道環片組立完成後是否有異動、變形以及點位是否有被碰動移位等等情形。

通常為了隧道前進控制及放樣需求20~50米就須增一新點，尤其是在曲線段，常易產生短的導線邊而導線邊太短會增加橫向誤差(方位誤差)，此種短邊的影響，主要是因擺站時之照準，求心.....等誤差所致，甚難避免。唯有儘量減少測站將邊長延伸以減少誤差。因此在隧道控制點複測時，並不一定每一點均設站測角、測距。而重點是在爭取透過儘量少的測站把方位角往前傳，即組成長邊支導線，當然為檢核需要，組成網形最佳，通常邊長要求應在100m以上，視使用儀器及現場狀況而定。

至於控制點的佈設位置，則視施工狀況而定，在捷運潛盾隧道合約上雖有規定在曲線段25m，直線段100m須設一永久參考點於頂拱上，而一般承商為便利起見，則常設於側壁或底版上仰拱，合約規定須設於頂拱之點，反在貫通後再補設。然不管如何，其佈設要點主要要顧及通視，便於測量，便於保存和使用，且要儘量減少與施工的互相干擾。而以目前而言頂拱與拱底設點，兩者在方便與保存特性上是相衝突的，往往貫通後承商所設於拱底之點均已滅失、致與施工中難有一致，對於比較檢核相當之不利。

在施工時，應行檢討控制測量精度是否可達到貫通所需之精度需求，若有問題應考慮打設觀測孔或使用真北儀予檢核。至於精度的估算，則可以導線之誤差傳播模式為之。

四、掘進管理測量

推進管理測量係為掌握推進時盾構之動向而辦理之測量。因潛盾機係以千斤頂頂壓後方之環片向前推進，使兩側衝程不等形成轉向角度，配合組立寬度不同之異形環片，進行方向調整。而機頭之行進軌跡與組立環片之隧道線形未盡一致。在轉向推進時，盾尾鋼殼內組立之環片與鋼殼間會有抵觸，必需在盾尾間隙量內調整，而無法進行大幅之轉向。在修正機身走向時，需要較長的距離，且調整過程取偏離設計線的誤差有增大的情形，所以必須儘早掌握機身姿態走向及組立完成之環片對盾構之相對位置進行修正。

(一)潛盾機狀況測量

為確定掘進方向之正確，在掘進中必需隨時掌握潛盾機的位置、方向和姿勢。通常只要於機身上設置兩處基準點，自控制點分別量測與控制點之距離及該兩點中心線之水平偏位量，即可求出潛盾機位置、水平方向及高程等。而利用回轉計、傾度儀、水平測定盤等可分別測定機身之回轉(Rolling)及俯仰(pitching)。

通常潛盾機之偏離是由每組立一環後，測左、右、上、下千斤頂之頂出量的差來量測，或以經緯儀配合規標板來測量，而俯仰度及滾轉情形則以垂球配合垂球板及傾斜計來測量。另為求作業之單純化及合理化，亦常以雷射裝置配合目標板或使用小型陀螺儀(gyrocompass)利用潛盾機推進實測距離及該處潛盾行進方向和真北方向之測角來確定潛盾機位置，再與設計中心線加以比較而修正，以簡化推進管理上的測量作業。

(二)環片位置、走向測量

掌握潛盾機位置及姿態狀況外，還要確定組立完成後之環片位置及走向以計算掘進特性。一般施工中在合約上要求承商以測量環片上包括頂端、水平軸兩端及與垂直軸成45度之兩對角線兩端等點位來確認襯砌之完工斷面，並據以計算完成面的中心位置與設計中心線的偏差，繪製成圖予以控管。

由於隧道斷面為圓形設計，所以中心的計算可以三點求圓之模式計算，而較較嚴密之計算，則可以最小二乘法之計算模式求算，其式如下：

由測一圓周數點（3點以上，一般為7或8點），求圓心及半徑

解：數學模式 $F(X_a, L_a)=0$ X_a ：未知數 L_a ：觀測量

$$R^2=(X_i-X_C)^2+(Y_i-Y_C)^2 \quad i=1, \dots, n$$

式中： 圓心座標 (X_C, Y_C) 及半徑 R 為3個未知參數

圓周點座標 $(X_i, Y_i) \quad i=1, \dots, n$ 為觀測值

可列 $r=n$ 個條件方程式 $n = 2n - 3$

線性化 $F(X_a, L_a)=AX+BV+W=0$

組條件式

通常環片上點位的測量常用的方法有二：一者將測距經緯儀擺置於控制點，後視另一控制點檢測並設定方位角後，將稜鏡側緣直接靠於欲測點位上測量其角度、距離求算點位座標(注意稜鏡中心至側緣之支距化算)。另者乃於完工斷面位置設置儀器，並由已知控制點測獲相關座標、方位資料，現場求算相對路線中心里程、座標和法線方位角後，將測距經緯儀轉向法線方位施測，其通常配合使用有雷射指示之無反射稜鏡測距經緯儀作業。而兩種方法均須量測儀器高，方可由所測天頂距和距離求得高程，其儀器高之量測可將經緯儀視準軸放平正倒鏡(天頂距為90°及270°時)測讀置於臨近水準點上之標尺，直接求算視準軸高程。

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ A_1 & A_2 & A_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ A_n & A_{n+1} & A_{n+2} \end{bmatrix}$$

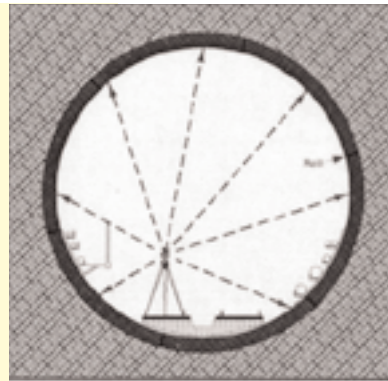
$n \times 3$

$$B = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} & \dots & B_{1n} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} & \dots & B_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ B_{m1} & B_{m2} & B_{m3} & \dots & B_{mn} \end{bmatrix}$$

$m \times 2n$

$$W = f(A, B) = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \end{bmatrix}$$

$n \times 1$



式中 $A = \begin{bmatrix} \partial L_1 / \partial x_0 & \partial L_1 / \partial y_0 & \partial L_1 / \partial R \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \partial L_n / \partial x_0 & \partial L_n / \partial y_0 & \partial L_n / \partial R \end{bmatrix} = (2(x_0 - X_0) \cdot 2(y_0 - Y_0) \cdot 2R)$

$$B = \begin{bmatrix} \partial L_1 / \partial x_1 & \partial L_1 / \partial y_1 \\ \vdots & \vdots \\ \partial L_n / \partial x_n & \partial L_n / \partial y_n \end{bmatrix} = (2(x_1 - X_1) \cdot 2(y_1 - Y_1))$$

$$W_i = (X_0 - X_1)^2 + (Y_0 - Y_1)^2 - R_0$$

X_0, Y_0, R_0 分別為未知參數 X, Y, R 之近似值

$$P = \partial a^2 / \partial L = \text{diag}(\dots)$$

$$P^{-1} = \partial a^{-2} / \partial L$$

解法方程式：

$$\begin{aligned} M &= \sum P^2 B \\ K &= A^T M A \quad L = M \\ C &= A^T M^2 W \\ X &= -A^{-1} L \\ X_0 &= X - X_0 \end{aligned}$$

串連步數 $X \ll \rightarrow \Delta$

$$\begin{aligned} \text{系統正數} \quad V &= -P^{-2} B^T M (A X + W) \\ V^T P V &= R \quad (\text{校核}) \quad K = M^T (A X + W) \end{aligned}$$

$$\text{每單位中誤差} \quad \sigma_v = V^T P V / (r-u) \rightarrow \sigma_s = (V^T P V / (r-u))^{1/2}$$

$$\begin{aligned} \text{計算未知數中誤差} \quad S &= P^{-1} B^T M^{-1} \\ CL &= \sigma_s^2 (P^{-1} S A^T A S - S A^T) \end{aligned}$$

而實際上掘進時的測量，由於測量可用的空檔時間相當有限一般概分為平面線形偏離量與高程線形偏離量測量。平面偏離量的測量係以一均質且剛性較高之長桿(橫距尺)，並在橫距尺之正中央部分標註記號、刻劃或設置稜鏡，水平架設於環片上，視橫距尺正中央即隧道實際掘進的中心。直接用經緯儀於相關中心線位置瞄讀尺上刻劃求偏離量，或以測距經緯儀量測量橫距尺中點之角度與距離，計算其座標，與原設計線形比較得隧道之水平偏離量。而高程偏離量仍以「直接水準測量」為之，將水準標尺置於仰拱或頂拱部位，以水準儀做直接水準量測即可得其高程。

五、貫通後之測量

隧道貫通後之測量旨在確定控制點之成果並據以進行隧道斷面測量，以校核隧道是否保持設計方向及坡度。此除查核推進結果外，同時可供為檢討隧道內設備施工之用。如實際中心線與設計中心線之偏差超出允許誤差值及淨空檢討有不足之情形，則需修改設計線形，以利後續仰拱及軌道之鋪設。

(一) 貫通後之控制測量

隧道貫通後應隨即辦理控制點成果的檢討，亦即將施工中之開放導線重新檢測並閉合測至隧道兩端之控制點，平差計算各控制點之座標，以供後續各項測量之用。原則上，此時之控制測量除原有控制點之檢測外，亦應適度調整佈設控制點於適當的位置，以免受後續工程作業(如仰拱施作等)之影響，且能供其放樣鋪設等測量應用。

(二) 隧道斷面測量

在完成貫通後之控制測量應即進行隧道斷面測量，其作業一如前面4.2節所述

之方法行之，唯此時隧道業已清理乾淨，按工程合約規定所測之點位至少應包括環片上垂直兩端、水平軸兩端及與垂直軸成45度之兩對角線兩端等8個點位(或更多的點位)來確認襯砌之完工斷面，並據以計算完成面的中心位置與設計中心線的偏差，並繪製成圖，以供分析檢討，並在仰拱打設前完成。

六、結論

隨著測量精度要求的提高，測量工作的時間和成本必然隨之增加。因此，在高精度的要求，適度的規劃作業方案是必要的，其除儀器精度考量外，更要注重測量方法的嚴密和作業過程的週延。近來由於科技發展迅速，測量儀器精度和自動化程度以及測量技術也日益精進。除GPS定位科技之應用外，數種可應用於隧道內測量的自動測量系統也相繼出籠(如雷射掃瞄系統等)，對於測量的精度和速度之提升有莫大的助益。然而，要注意的是控制點方位導入的精度仍是有待突破的一大瓶頸。

另外，我們在掘進中和貫通後都做了斷面測量，唯因合約僅要求概略的測量位置，所以各次測量的點位大部份均不相同(包括檢測在內)，這讓歷次測量成果間的相關性降低了，或許此對中心線偏離的分析已可滿足，但若稍加用心，要求要有明確標示的測點，就可以有效掌握歷次測量的關聯性，使其更具分析之價值，甚或可提供變形監測之參考。當然，若是使用類似3D雷射掃瞄儀(如Cyrax Laser Scanner)或近景攝影測量技術(如三維隧道影像掃瞄儀)等系統，自是可以更精簡的人力，快速的經獲取廣泛的面狀資料，此時資料計算和處理分析將是主要之課題。

◇ 參考文獻 ◇

1. 史天元，「真北方位角量測與角量測於長導線作業影響之研究」，測量工程會刊，第廿八卷，第三期，民國75年。
2. 朱紹鎔，廖慶隆，程聖民，「施工測量」，大事業出版，民國72年。
3. 金其坤，陳龍飛，「工程測量」，淑馨出版社，民國82年。
4. 蔡茂生，「潛盾施工方向控制方法概論」，榮工技術叢書。
5. 陳虞晃，陳文欣，「捷運測量之回顧與展望」，東區工程處論文集。
6. 李行，「潛盾隧道測量檢測作業」，捷運技術第19期，民國87年。