



# 以「管」窺「地」

## — 由維生管線課題研窺地下掘削機制

陳堯中／國立臺灣科技大學營建工程系教授

鄭玉鴻／加興營造工程股份有限公司工程師

黃祉萍／國立臺灣科技大學營建工程系碩士生

本文嘗試以近年來管線相關災難角度切入探討地下掘削機制之重要性，屏除輔以其他工法可以解決的項目，分別以設計及施工兩方面建立廣義式之推力評估及其適挖性指標，期能達到「大小通吃、軟硬兼施」之目的，再配合外業現場調查資蒐施工數據資料佐證之。

本研究為改善傳統設計面僅考慮整體之土水壓，加入局部貫切力的貢獻，且由傳統現地施工數據僅有單一評估值，無法適切模擬正常開挖狀況，為更能詳細探討掘進推力變化，故加入四條上、下限供現場可能產生異況範圍判識。施工面則有別傳統之工進分析僅有推力及輪進（距離）作工程進度記錄，各案例間無法比較且無異況警戒之概念，由施工面針對推力、扭矩及掘削速率之工程進度相關管控關係，利用量綱分析將 (1) 地質材料因子：楊氏模數、單拉強度、單壓強度 (2) 機械掘進因子（推力、扭矩）評估影響因子正規化，作為「正規化工進橢圓圖」之建置，並求取其特徵值，其圓心、長短軸、面積均具物理與工程意義，得以作為正常施工之適挖性與異況警戒之行動參考。

本研究蒐集所得資料，因已正規化尺度之影響，未來可由規模較大之潛盾借鏡給規模較小之管推作參考。未來在潛盾機操作面板上希望能添加本監測指標，也能在後端建置一資料庫，未來由「地下」上「雲端」，可即時跟以往案例做比對，供現場施工人員之參佐。

### 鑑古知今・繼往開來

空間資源是空間環境中能夠為人類開發利用、獲得經濟和其他效益的物質或非物質資源的總稱，隨著都市高速發展，人口急劇增加，用地取得困難，地下化自然成為空間資源中的最後一塊拼圖，雖然是最後但不是最不重要，甚至是不可或缺的一部分。近年來，台灣飽受「管線」之困，由去年的「化學管」引發高雄氣爆案，到今年自來水使用「鉛管」、高雄小港區中林路及大寮區鳳林路盾工程造成地層崩塌等，所在多有顯示地下管線安全之重要性。

依據 2015 年瑞士洛桑國際管理學院 (IMD) 國家競爭力評估報告顯示，在四個構面因素 (Main

Competitiveness Factor) 裡，汙水下水道普及率為基礎建設評分指標之一。在全球汙水下水道普及率評比中，由表 1 得知，在 48 國提供汙水處理率的評比國家中，我國用戶接管普及率僅 47.0%，排名第 44 名敬陪末座，故對全球競爭力 (2015 年台灣總排名第 11 名) 造成影響。

截至 104 年 9 月內政部營建署資料統計普及率達 50.39%，即對整體接管率而言，仍有近 49.61% 之進步空間，且 104 年度營建署推動「汙水下水道第五期建設計畫」，預計於 104 年至 109 年完成，估計 6 年內政府及民間將投入 1068 億元經費，並已列為國家重大政策「愛台十二項建設」重點執行項目之一。台灣下水道普及率排名表整理如表 2 所示。

表 1 全球 48 個國家下水道普及率排名表 (依 2013 年統計資料)  
(資料來源: IMD, The World Competitiveness YearBook 2015)

國家別或地區	新加坡	英國	以色列	荷蘭	西班牙	瑞士	德國	台灣
普及率 (%)	100.0	100.0	99.0	99.0	99.0	98.0	97.3	47.0
排名	1	1	3	3	3	6	7	44

表 2 台灣下水道普及率排名表

區域	分類	局部	整體
國內 (營建署) 依 2015 年 8 月統計資料		N/A	50.31/100%
國外 (瑞士洛桑管理學院) 依 2013 統計資料		44/48	11/60

### 困難重重・困知勉行

困難其來有自，首先是關乎政治選舉作秀，地下管線看不到就不算是政績，不受到重視；在法律方面而言，管線各單位各自為政，沒有一個統一管道共同管理，上述等非工程原因本研究雖列出但不予考量，僅針對地下掘進工程面為改善重點。首先實施調查實務困境現況發現可分為流體及固體兩大類，其中流體可採「遠排近灌」利用降水及冰凍工法等措施處理，固體則可分為天然如遇流木、樹根等，可假想為在破鏡作業時之混凝土中添加纖維筋，抗拉好但抗剪差，不敵扭矩；人工則有箱涵及基樁等基礎構造物，如圖 1 所示。

綜整以上劃定範圍及屏除輔以其他工法可以解決的項目，建立研究之推力評估及其適控性指標，再依外業現場調查資蒐施工數據資料佐證之。並以本研究風險指標阻抗關係圖及工進橢圓圖於施工層面探討掘進工程於正常順利掘進及困難發生時之推力變化情況以及適確性及開挖狀況評估建議。

### 由設到施・通盤考量

由設計面言，傳統僅考量整體之土水壓，於潛盾施工時，僅考慮潛盾機前方土壓及水壓造成的主動土壓，利用螺旋輸送機調節排土速率，以使土倉內維持接近充滿狀態及後方千斤頂的推力，使其產生被動土壓為達平

衡，而達開挖面安定之效果，如圖 2 及圖 3 所示。

由施工面言，僅依照前人文獻建議地質選切削刀刃及掘削機器，綜整國內、外掘進機種類共計超過六千多種之開挖面盤配置，如圖 4。一般工程思考皆多考慮工法與機型對應各類不同地層之「可挖性」作探討，鮮少對「適確性」作研析。

### 大小通吃・軟硬兼施

本研究適用範圍，包含大尺度全斷面隧道鑽掘機工法 (Tunnel boring machine, TBM)、潛盾工法 (Shield tunneling, ST) 及小尺度管推工法 (Pipe jacking, PJ)，和各種臺灣分區地質條件 (土、礫、岩) 皆為本研究訴求之調查項目，希冀達到「大小通吃」以及「軟硬兼施」的目的，如圖 5 及表 3 所示。

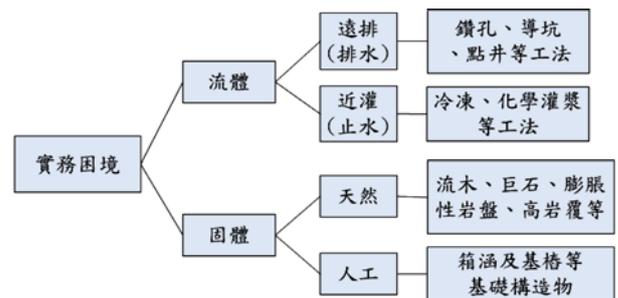


圖 1 實務困境調查



圖 2 掘進開挖面壓力平衡示意圖 (林國龍, 2010)

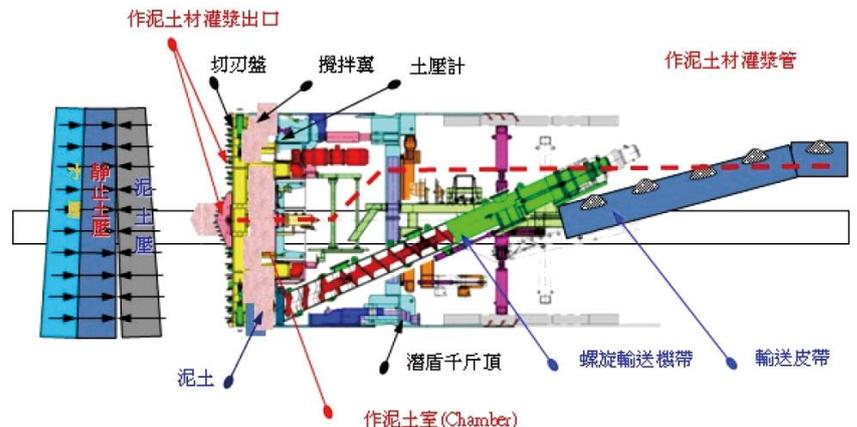


圖 3 土壓平衡式潛盾機施工原理 (資料來源: 豐順營造公司網站)



圖 4 不同地層分別適用之機械開挖面盤類型 (資料來源: 奧村機械製作股份有限公司)

施工面則有別傳統之工進分析僅有推力及輪進(距離)作工程進度記錄,各案例間無法比較且無異況警戒之概念,由施工面針對推力、扭矩及掘削速率之工程進度相關管控關係,利用量綱分析將(1)地質材料因子:單拉強度 $\sigma_c$ 、單壓強度 $\sigma_t$ 、楊氏模數 $E$ ; (2)機械掘進因子(推力 $T_h$ 、扭矩 $T_q$ )評估影響因子正規化,如式(1)~式(4)所示,作為「正規化工進橢圓圖」之

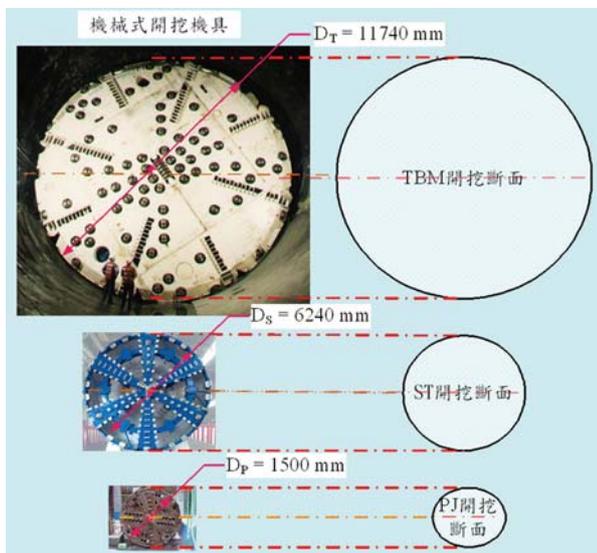


圖 5 各種尺度機械式開挖工程之斷面示意圖

表 3 廣義式掘削機制綜整分析

I. 以地質破壞特徵作分類	II. 以局部至整體切削單元作分類
<ul style="list-style-type: none"> <li>脆性類岩 (Brittle): 岩盤、孤石、地下混凝土或硬質改良地盤等</li> <li>延-脆複合材料 (Compound): 卵礫石層、橫或縱向變異之地質</li> <li>延性土壤 (Ductile): 黏性與砂性土壤</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>單刀 (Single cut): 正向與否<sup>1</sup>、楔刀或錐頭<sup>2</sup>、轉動與否<sup>3</sup>、刀角大小<sup>4</sup>、磨耗與否<sup>5</sup>、大地應力<sup>6</sup></li> <li>群刀 (Doubled-cutter): 臨界雙刀間距<sup>7</sup></li> <li>切削面盤 (Cutter-head): 整體最適化配置</li> </ul>
III. 以開挖斷面尺寸作分類	<ul style="list-style-type: none"> <li>全斷面隧道開挖 (TBM)</li> <li>潛盾工法 (Shield tunnel)</li> <li>管推工法 (Pipe jacking)</li> </ul>

本研究為改善傳統設計面僅考慮整體之土水壓,加入局部貫切力的貢獻,且由傳統現地施工數據僅有單一評估值,如圖 6,無法適切模擬正常開挖狀況,為更能詳細探討掘進推力變化,故加入四條上、下限供現場異況可能產生範圍判識,如圖 7。

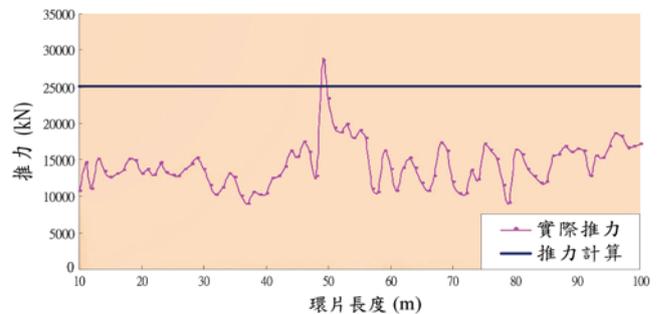


圖 6 桃園卵礫石潛盾設計與現地施工推力 (林國龍<sup>[5]</sup>)

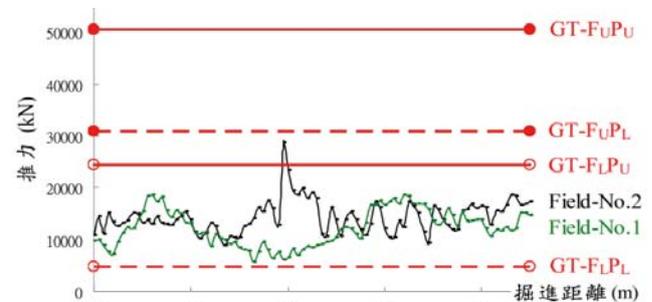


圖 7 本研究風險指標阻抗值與桃園卵礫石潛盾現地施工數據比較 (林國龍<sup>[5]</sup>)

建置,並求取其特徵值,其圓心、長短軸、面積均具物理與工程意義,得以作為正常施工之適挖性與異況警戒之行動參考,其物理場見圖 8。

$$\Pi_1 = \frac{T_h}{r^2 \sigma_c} = T_h^* \quad (1)$$

機械因子:

$$\Pi_2 = \frac{T_q}{r^3 \sigma_c} = T_q^* \quad (2)$$

$$\Pi_3 = \frac{E}{\sigma_c} = R^* \quad (3)$$

地質因子:

$$\Pi_4 = \frac{\sigma_t}{\sigma_c} = H^* \quad (4)$$

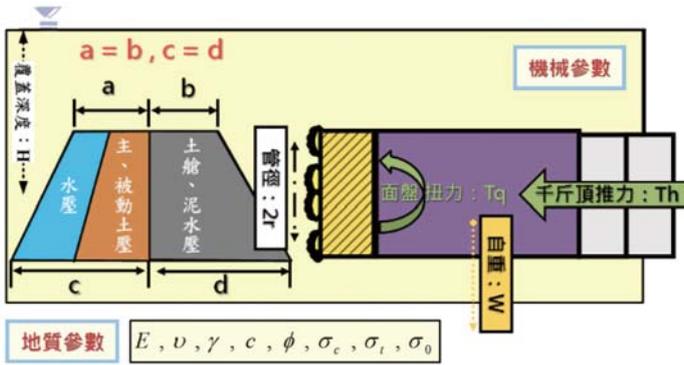


圖 8 機械式鑽掘開挖物理場示意圖

綜上所述，本研究團隊經現場實務案例驗證，經由適挖性指標的建立，不僅能針對接觸域場之掘削進度作探討，還可以將其分割成四個象限，見圖 9，針對其分佈位置進行傳統大地工程安全性之管理研析，其中機械因子相對較地質材料因子好求得，又因現場施工大多固定扭矩調整推力，所以本文先取正規化推力因子與掘進速率之關係圖作分析。日後便可依循此模式，增添多筆案例，充實資料的統計依據並將所有分析成果綜整如圖 10。

就適挖性之探討言，資料點落於各象限之優劣順序如下：(IV) > (I) > (III) > (II)，因為先以 X 軸進度管理來看，其值越大表示工進傾向順利故 (I) 和

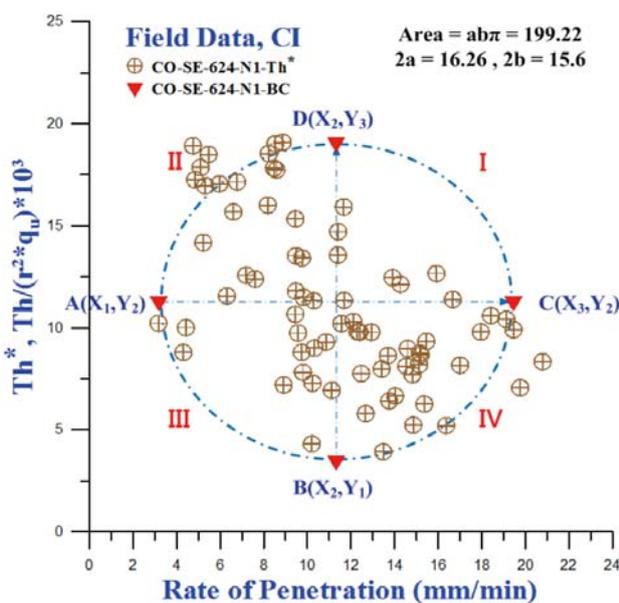


圖 9 桃園卵礫石潛盾工程分析路段之工進橢圓與座標象限分佈圖 (楊喆巽<sup>[7]</sup>)

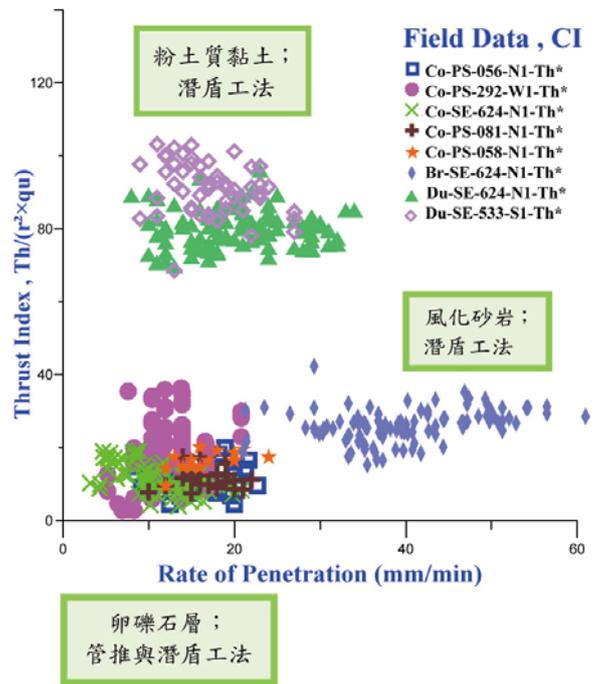


圖 10 正規化推力工進圖於不同地質材料下之特徵分佈 (鄭玉鴻<sup>[8]</sup>)

(IV) 優於 (II) 和 (III)。再者，藉由 Y 軸耗費能量角度言，其值反而需要降低，且若該值減少而掘削進度維持相同，就整體之適挖性言，是為益助。綜上言之，(IV) > (I) 且 (III) > (II)，故得其代表較佳適挖性之優先順序。

首先將本次研究之地質材料參數 (案例資蒐來源為鄭玉鴻, 2013)，彈性模數  $E$ 、單壓強度  $\sigma_c$  列於表 4，再依照相對勁度指標  $R^*$ 、掘進速率 R.O.P、正規化推力指標  $T_h^*$  三者之間相對關係，製圖如圖 11 至圖 14 所示，可發現相同地質材料群聚現象一致。雖本次單壓強度設為定值，未來如能應用前面所提之貫切力求得楊氏模數、單壓強度、單拉強度，所得結果將會更加準確。

表 4 案例剖析之地質材料無因次因子統整 (鄭玉鴻<sup>[8]</sup>)

項次	案例編號	地質材料	彈性模數 (MPa)	單壓強度 (MPa)
1	Co-SE-624-N1	卵礫石層	22.6	130
2	Co-PS-081-N1	卵礫石層	20	130
3	Br-SE-624-N1	風化砂岩	27.5	50

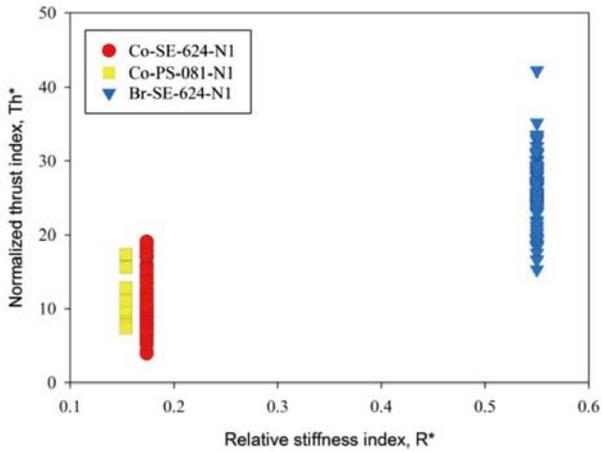


圖 11 不同地質不同工法之相對勁度與正規化推力因子關係圖

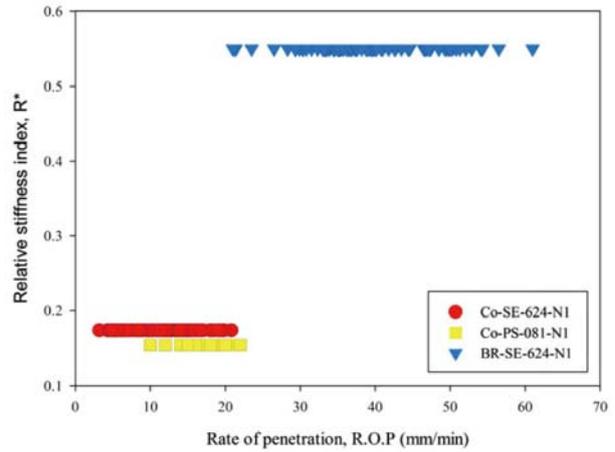


圖 13 不同地質不同工法之掘進速率與相對勁度關係圖

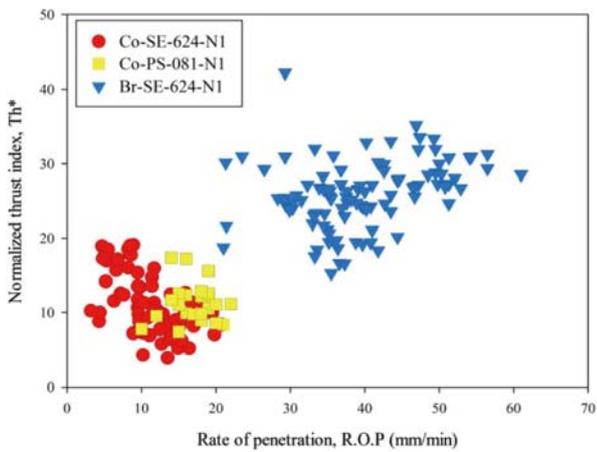


圖 12 不同地質不同工法之掘進速率與正規化推力因子關係圖

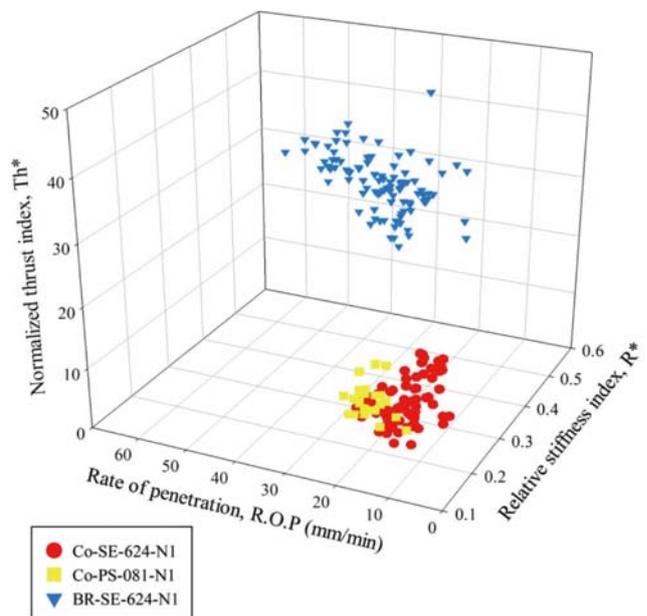


圖 14 不同地質不同工法之相對勁度、掘進速率與正規化推力因子關係圖

## 他山之石・可以攻玉

根據前人研究指出，本研究直線推力計算之卵礫石層刀頭貫切力比率最大可佔總阻抗之 28%，說明了岩、礫之接觸場貫切力宜應加入推力計算方為合理（林國龍<sup>[5]</sup>）。本研究蒐集所得資料，因已正規化尺度之影響，未來可由規模較大之潛盾借鏡給規模較小之管推作參考。未來在潛盾機操作面板上希望能添加本監測指標，也能在後端建置一資料庫，未來由「地下」上「雲端」，可即時跟以往案例做比對，供現場施工人員之參佐。

## 參考文獻

1. IMD business school, "The World Competitiveness YearBook 2015", Switzerland, 2015.
2. 內政部營建署網站「[http://www.cpami.gov.tw/chinese/index.php?option=com\\_content&view=article&id=9995&Itemid=50](http://www.cpami.gov.tw/chinese/index.php?option=com_content&view=article&id=9995&Itemid=50)」。
3. 「污水下水道第五期建設計畫（104 至 109 年度）核定本」，內政部營建署，2014 年 9 月。
4. 陳立憲、楊喆異、林國龍、林郁修、蘇億峰，「廣義式地下掘削機制及應用於卵礫石層管推工法之案例分析」，中國土木水利工程學會會刊，第 36 卷，第 6 期，2009，45~56 頁。
5. 林國龍，廣義式地下掘進之推進力係分析，碩士論文，國立台北科技大學土木工程系，台北，2010。
6. 奧村機械，「潛盾機設計概要和潛盾施工法技術資料簡報」，2009。
7. 楊喆異，隧道掘進之土（岩）—機互制與可挖指標研探，碩士論文，國立台北科技大學土木工程系，台北，2010。
8. 鄭玉鴻，地下機械開挖之廣義式掘進模型與正規化可挖指數：直線推進為例，碩士論文，國立台北科技大學土木工程系，台北，2013。