

國立臺灣大學工學院土木工程學系

碩士論文

Department of Civil Engineering

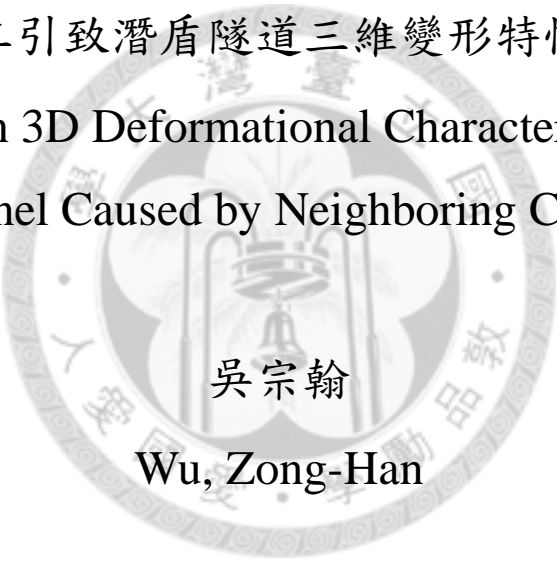
College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

近接施工引致潛盾隧道三維變形特性之研究

Study on 3D Deformational Characteristics of
Shield Tunnel Caused by Neighboring Construction



吳宗翰

Wu, Zong-Han

指導教授：黃燦輝 博士 王泰典 博士

Advisor: Huang, Tsan-Hwei, Ph.D. Wang, Tai-Tien, Ph.D.

中華民國 101 年 7 月

July, 2012

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

近接施工引致潛盾隧道三維變形特性之研究
Study on 3D Deformational Characteristics of Shield
Tunnel Caused by Neighboring Construction

本論文係吳宗翰君（R99521125）在國立臺灣大學土木工程學系
碩士班完成之碩士學位論文，於民國 101 年 7 月 16 日承下列考試委員
審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

黃燦輝

(指導教授)

趙振宇

王泰典

陳正勳

黃燦輝

趙振宇

王泰典

陳正勳

呂良正

系主任

呂良正

謝 誌

攻讀碩士兩年來，承蒙恩師 黃燦輝教授的悉心指導，老師善用簡易的譬喻蘊含深刻的道理，讓學生日後無論為學、為人皆有啟發，而您的恢宏氣度更讓學生深以黃門為榮。臺北科技大學 王泰典教授帶領學生於治學之道嚴謹前進，於人生經驗多有傳授，讓學生體悟待人應有之邏輯與處事必要之態度，終身受用無窮，謹以寥寥數語向二位老師致上最高之敬意與最深之謝忱。並感謝趙振宇教授與陳正勳博士惠賜寶貴意見，使本文更臻完善。

研究期間蒙中興工程顧問社林金成學長於分析軟體操作經驗的不吝分享及指導，每一趟自逸仙路返研究室的途中均滿載而歸，衷心感激。林銘郎教授提攜學生擔任工程地質與應用一課之助教，在無數次的野外中增添地質知識及實做經驗，銘感在心。並感謝賴彥儒學弟於隧道監測資料整理及繪圖之鼎力相助。

在學期間幸得雅筑、毓港、家吉、立偉、雨璇、佩臻、思緯等博士班學長姐多所解惑與經驗傳承。感謝地質室的偉哲學長、心凱、斯元、玟菘於碩一時光的慷慨，讓我在地質室有一席之地共同砥礪。感謝同門的卓翰及瑞慈，並肩走過苦樂參半的這兩年，並有孟維、治豪、炳勳、珺璋、宇翔、漢鑫、哲安、紹倫、開紋、家齊、志信、渝紋、威伯、育祥等大地組同窗、北科學長姐及有嘍學弟之相互扶持與鼓勵，讓研究生活多采多姿。

特別感謝淑苹的包容與陪伴、良賢、永達、宜靜、桂綿、子豪、稚堯、家齊、健豪、珮如、雅筑、季倫、瑩淳、士哲、俊佑等知己好友之聯繫與勉勵，願情誼長存。田堯彰教授於平時生活之關心與期勉，五年來的學長弟情，沒齒難忘。

最後，感謝父母養育之恩，自小至大對我的支持與信賴，這是我人生最有價值的回憶，謝謝乖巧的妹妹在臺南代我為父母分勞解憂。未來，天當棋盤星作子，地當琵琶路作弦，我將邁開大步，昂首向前。

吳宗翰 謹誌

於 杜鵑花城土木系館 112 室

中華民國 101 年 8 月 15 日

摘要

臺北捷運大部分路網為地下潛盾隧道段，隨著捷運路網之普及與土地資源之短缺，愈來愈多新興結構物之基礎開挖將緊鄰捷運隧道，對列車營運及隧道結構安全產生威脅。因此，近接施工是近年來大地工程實務上極為重視的新課題。

欲提供捷運隧道之安全預警，須仰賴合適的監測系統。目前針對近接施工，捷運隧道採用的監測方法多是沿襲真圓度檢測之概念，透過量測隧道環片橫斷面 (in-plane) 上數個測點的二維相對變形值，如內空變位、軌道沉陷等，與規範容許變形值相比，判定是否該採取行動。惟近接施工屬於複雜的三向度問題，故此法能提供之預警效果有限，實有必要深入探討隧道三維變形特性，方能發展更完善的監測系統，助於隧道安全評估。

本研究利用三維有限差分程式 FLAC^{3D} 分別建立潛盾隧道及深開挖數值模型，並依據解析解與案例監測資料與分析結果相互比對，以檢核施工程序之適用性，最後建立近接施工數值模型。藉由數值途徑可模擬潛盾隧道受近接施工擾動之力學行為，並依序由隧道全段及特定剖面之觀點，以 in-plane 及 out-of-plane 之分析角度探討隧道之變位與應力增量狀況。

研究結果顯示：近接施工對潛盾隧道的三維力學行為影響甚大。環片變形方面，隧道環片中心之偏移量普遍高於隧道徑向變形，縱向變位之存在更凸顯現有監測方法之不適。藉由臨界破壞線之發展，可明白近接施工引致的隧道破壞潛勢為一三維分佈情況。隧道應力增量方面，藉由 out-of-plane 分析可知隧道環片於縱向上之軸力會隨著接近開挖工區而產生受拉或受壓之變化，將對隧道整體結構造成不利影響。未來宜發展更完善之監測方法，進一步考量隧道縱向之受力情況，以三維概念進行評估，如此一來隧道安全方有保障。

關鍵字：近接施工、潛盾隧道、三維變形、數值分析

ABSTRACT

Most underground network of Taipei Mass Rapid Transit (MRT) System was composed of shield tunnel. As MRT lines increase and lands decrease in Taipei megalopolis, more and more constructions such as foundation-excavation approach existing shield tunnel closely, and the kind of situations is called neighboring construction. Neighboring construction might threaten the safety of MRT operation and tunnel structure, and therefore has become an issue which is emphasized gradually during these decades.

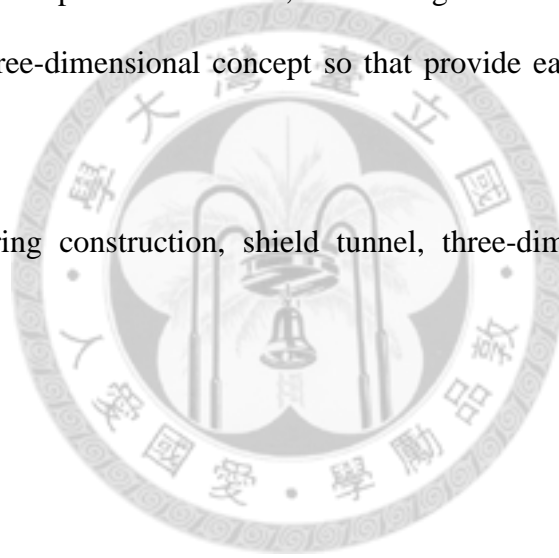
Conventional tunnel monitoring items are applied popularly in shield tunnel during neighboring construction, such as convergence deformation or railroad settlement, which neglects longitudinal mechanical properties of tunnel. These current methods are established in two-dimensional plane (in-plane). However, neighboring construction is complicated and belongs in three-dimensional phenomenon, thus current methods of tunnel monitoring are inadequate and should be improved.

First of all, this study builds up numerical models of shield tunnel and deep excavation separately by FLAC^{3D}, and the models have been verified by comparing its calculated results with existing analytical solutions and actual case data. The second, this study combines two models into one model for simulating the responses of a shield tunnel encountering neighboring construction. Based on the neighboring construction model, the three-dimensional deformation and stress increment of whole tunnel and specific profile can be discussed in the views of in-plane analysis as well as out-of-plane analysis.

Results of numerical simulation indicate that neighboring construction has a significant influence on three-dimensional deformation and stress variation of shield

tunnel. In the part of segment deformation, the deformation of segment center is more than convergence deformation generally, and there is longitudinal deformation between segments. With the distribution of critical failure line, the potential failure site of shield tunnel which is caused by neighboring construction could be a three-dimensional distribution. In the part of stress increment, as a result of out-of-plane analysis, the longitudinal force of shield tunnel would be compressed or tensile along the axial direction, and the appearance of variation may cause damage to tunnel structure which is fragile. Accordingly, this study recommends that more appropriate tunnel monitoring method should be developed in the future, and it might be a better way to evaluate shield tunnel with three-dimensional concept so that provide early warning for tunnel safety.

Keywords: neighboring construction, shield tunnel, three-dimensional deformation, numerical analysis



目 錄

口試委員會審定書	i
謝 誌	ii
摘 要	iii
ABSTRACT	iv
目 錄	vi
表目錄	ix
圖目錄	x
第一章 導論	1
1.1 研究背景與目的	1
1.2 研究方法與內容	1
第二章 文獻回顧與隧道案例整理	4
2.1 近接施工之基本觀念	4
2.1.1 種類與特性	4
2.1.2 現行監測方法	5
2.1.3 近接施工引致潛盾隧道受損案例	6
2.2 近接施工之隧道監測案例	8
2.2.1 案例簡介	8
2.2.2 隧道三維變形現象	9
2.3 混凝土之破壞準則	9
2.3.1 Mohr-Coulomb 破壞準則	9
2.3.2 Drucker-Prager 破壞準則	11

第三章 潛盾隧道與深開挖數值模型之建立與驗證	19
3.1 FLAC ^{3D} 程式概述.....	19
3.2 潛盾隧道數值模型之建立與驗證.....	19
3.2.1 分析條件之假設.....	20
3.2.2 參數選用之依據.....	20
3.2.3 模型驗證.....	21
3.3 深開挖數值模型之建立與驗證.....	22
3.3.1 工程案例之說明.....	22
3.3.2 分析條件之假設.....	23
3.3.3 參數選用之依據.....	24
3.3.4 模型驗證.....	25
第四章 近接施工數值模型之應用與潛盾隧道三維變形特性	42
4.1 近接施工數值模型之建立.....	42
4.1.1 分析條件之假設.....	42
4.1.2 參數選用之依據.....	43
4.2 隧道全段分析結果.....	44
4.2.1 隧道環片變形.....	44
4.2.2 隧道環片中心位移.....	45
4.2.3 應力比.....	46
4.2.4 綜合討論.....	48
4.3 隧道特定剖面之變位與應力分析結果.....	49
4.3.1 變位增量.....	49

4.3.2 彎矩增量	50
4.3.3 軸力增量	50
4.3.4 剪力增量	51
4.3.5 綜合討論	52
第五章 結論與建議.....	67
5.1 結論	67
5.2 建議	68
參考文獻.....	70
附錄 A 潛盾隧道監測資料.....	73
附錄 B 論文口試-問題與回覆.....	79
作者簡歷.....	82



表目錄

表 2.1 近接施工監測項目及監測儀器(修改自胡邵敏等，2009).....	12
表 2.2 捷運設施之監測管理值(修改自廖洪鈞等，2010).....	12
表 3.1 FLAC ^{3D} 組成律模型(Itasca Consulting Inc.，2005)	26
表 3.2 邊界影響分析時之輸入參數	27
表 3.3 潛盾隧道數值模型之土層參數	27
表 3.4 臺北捷運潛盾隧道工程各施工標選用設備一覽表(修改自朱旭，1997).....	28
表 3.5 支撐環片參數	29
表 3.6 國家企業中心開挖程序(歐章煜，2002).....	30
表 3.7 深開挖數值模型之土層參數	31
表 3.8 連續壁參數	31
表 3.9 開挖支撐參數	32
表 4.1 臺北盆地組成物質垂直分佈概況	54
表 4.2 近接施工數值模型之土層參數	54
表 4.3 連續壁參數	55
表 4.4 開挖支撐參數	55

圖目錄

圖 1.1 研究流程圖	3
圖 2.1 潛盾隧道常見近接施工之種類(改繪自胡邵敏等，2009).....	13
圖 2.2 捷運隧道監測儀器配置示意圖(廖洪鈞等，2010).....	13
圖 2.3 捷運設施之監測儀器佈設範圍(廖洪鈞等，2010).....	14
圖 2.4 真圓度差值計算方式(臺北市捷運工程局土建工程施工技術規範，1992)..	14
圖 2.5 潛盾隧道及鄰近工地平面位置圖(常岐德等，2001).....	15
圖 2.6 潛盾隧道內之滲水情況(松本嘉司，1994).....	15
圖 2.7 近接施工引致潛盾隧道環片漏水現象，尤以環與環之間為劇(聯合大地) .	16
圖 2.8 檢測現場相關構造物平面示意圖(潛盾隧道圓斷面檢測成果資料，2011)..	16
圖 2.9 隧道環片監測點位佈設圖(潛盾隧道圓斷面檢測成果資料，2011).....	17
圖 2.10 隧道三維變形示意圖	17
圖 2.11 破壞包絡線為直線之 Mohr-Coulomb 破壞準則(Chen，1982).....	18
圖 2.12 平面應力狀態($\sigma_3 = 0$)之 Mohr-Coulomb 破壞強度圖形(Chen，1982).....	18
圖 3.1 FLAC ^{3D} 應用顯性有限差分法之運算概念與求解架構(王泰典，2003).....	33
圖 3.2 不同支撐時機對隧道平均徑向收斂量之影響	34
圖 3.3 不同邊界範圍對隧道開挖分析結果之影響	34
圖 3.4 潛盾隧道三維數值模型分析網格	35
圖 3.5 彈性材料含圓形隧道承受雙軸應力作用示意圖(Kirsch，1898).....	36
圖 3.6 圓形隧道開挖應力分佈數值分析結果與 Kirsch 解析解之比較	36
圖 3.7 隧道頂拱沉陷之前進面效應(Brady 與 Brown，1985).....	37
圖 3.8 圓形隧道開挖頂拱沉陷之前進面效應	37

圖 3.9 臺北國家企業中心開挖基地 (a)平面圖 (b)剖面圖(歐章煜，2002)	38
圖 3.10 臺北國家企業中心開挖基地土層分佈及土壤基本資料(歐章煜，2002)....	39
圖 3.11 臺北國家企業中心基地深開挖三維數值模型分析網格	39
圖 3.12 臺北國家企業中心各開挖階段連續壁側向位移和數值分析結果	40
圖 4.1 深開挖與潛盾隧道之相對位置剖面圖	55
圖 4.2 近接施工三維數值模型分析網格	56
圖 4.3 本研究使用之三維座標系	56
圖 4.4 徑向變形之定義	57
圖 4.5 不同開挖階段引致的隧道徑向變形量分佈	57
圖 4.6 不同開挖階段引致的隧道縱向變形量分佈	58
圖 4.7 不同開挖階段引致的隧道 x 向位移量分佈	58
圖 4.8 不同開挖階段引致的隧道 z 向位移量分佈	59
圖 4.9 不同開挖階段引致的隧道 y 向位移量分佈	59
圖 4.10 不同開挖階段引致的隧道應力比 $_{,max}$ 變化	60
圖 4.11 不同開挖階段引致的隧道臨界破壞角出現位置分佈	60
圖 4.12 不同開挖階段引致的隧道位移、變形一覽圖	61
圖 4.13 不同縱深隧道斷面之 in-plane 變位增量分佈	62
圖 4.14 不同隧道縱深斷面之 out-of-plane 變位增量分佈	63
圖 4.15 不同隧道縱深斷面之 in-plane 彎矩增量分佈	64
圖 4.16 不同隧道縱深斷面之 out-of-plane 彎矩增量分佈	64
圖 4.17 不同隧道縱深斷面之 in-plane 軸力增量分佈	65
圖 4.18 不同隧道縱深斷面之 out-of-plane 軸力增量分佈	65

圖 4.19 不同隧道縱深斷面之 in-plane 剪力增量分佈	66
圖 4.20 不同隧道縱深斷面之 out-of-plane 剪力增量分佈	66
圖 a.1 檢測現場相關構造物平面示意圖(潛盾隧道圓斷面檢測成果資料, 2011)..	73
圖 a.2 隧道環片監測點位佈設圖(潛盾隧道圓斷面檢測成果資料, 2011).....	74
圖 a.3 隧道變位向量圖	75
圖 a.4 隧道 Xdisp 變位分量圖	75
圖 a.5 隧道 Ydisp 變位分量圖	76
圖 a.6 隧道 Zdisp 變位分量圖	76
圖 a.7 變位量值分佈圖	77
圖 a.8 隧道三維變形示意圖	77
圖 a.9 數據處理流程	78



第一章 導論

1.1 研究背景與目的

臺北捷運自 1996 年通車以來，路網陸續建成，迄今(2012 年)營運里程已達 110.1 公里，其中除了文湖線及淡水線有部份路段採地面及高架建設，其餘 78.3 公里為地下及潛盾隧道段。隨著捷運路網之普及與土地資源之短缺，許多新興民間建築與公共工程建設勢必緊鄰既有的捷運隧道，其所引致的捷運隧道受損案例時有耳聞，輕者環片出現裂縫，重者隧道扭曲變形，進而影響隧道結構安全與列車正常營運。因此，近接施工是近年來大地工程極為重視的新課題。

為避免近接施工行為對潛盾隧道結構體產生變形影響，危及列車行車安全，通常在相關工程施作時，須對施工影響範圍內之捷運隧道進行監測，以提供必要的安全預警。現行採用的監測方法乃是藉由安裝在環片上的收斂釘及軌道沉陷點，分別量測隧道淨空變形及軌道沉陷，來呈現剖面之變形程度，並與規範(大眾捷運系統兩側禁建限建辦法，2003)規定之容許徑向變形值 20mm 相比較，判定是否該採取行動。惟此法建立於二維座標平面系統，僅能獲得二維座標相對變形值，然近接施工引致潛盾隧道的應力變化、環片變形等實屬三維力學行為，若欲探求環片三維絕對座標之變化，則現行監測方法將存在一定的侷限性。

因此，本研究試圖由三維分析的角度，去探討近接施工引致潛盾隧道於 in-plane 及 out-of-plane 的力學行為，以供未來近接施工安全評估及發展因應新式監測技術之用。

1.2 研究方法與內容

昔日隧道分析因地質環境因素複雜且受限於數值軟體運算速度，多以二維分析簡化實際之三維問題，此假設對於單孔或雙孔隧道不考慮縱向應變之狀況尚能適用，惟近接施工對潛盾隧道產生之應力與應變行為屬複雜的三維問題，此假設將過於簡化而不全然適用。因此，本研究嘗試以三維有限差分程式 FLAC^{3D} 模擬一

潛盾隧道遭遇近接施工之情境，深入探究其力學行為。

圖 1.1 為研究流程圖。本研究首先彙整近接施工相關文獻。接下來利用三維有限差分程式 FLAC^{3D} 模擬潛盾隧道逐環開挖之程序，並與 Kirsch(1898)圓形隧道開挖解析解及 Brady & Brown(1985)前進面效應相互驗證；再藉由一實際深開挖案例(臺北國家企業中心)作為深開挖模擬程序之檢核；繼而將潛盾隧道與深開挖兩者結合成為近接施工數值模型。透過該數值模型之分析結果，依序由隧道全段及特定剖面之觀點，以 in-plane 及 out-of-plane 之分析角度探討降挖過程中引致隧道之變位情形與應力變化。

本文共分為五章，第一章為導論，介紹本研究之背景、目的、方法與內容。

第二章回顧近接施工等相關文獻，介紹國內常用的潛盾隧道監測方法，並舉數則案例及檢測結果作為近接施工引致潛盾隧道受損之佐證。並透過整理某一實際隧道監測資料，闡述近接施工引致潛盾隧道之三維變形現象。最後簡述後續分析所使用的混凝土破壞準則。

第三章說明數值分析方法，並分別建立潛盾隧道與深開挖數值模型，將分析結果與解析解及案例監測資料做一驗證檢核，以確保施工模擬程序之正確性。

第四章建立近接施工數值模型，依序由隧道全段及特定剖面之觀點，分別由 in-plane 與 out-of-plane 之角度，將數值分析所得之環片變形及應力變化做一說明與探討。

第五章總結本研究之重要結論，作一綜合敘述，並提出尚待研究發展之建議。

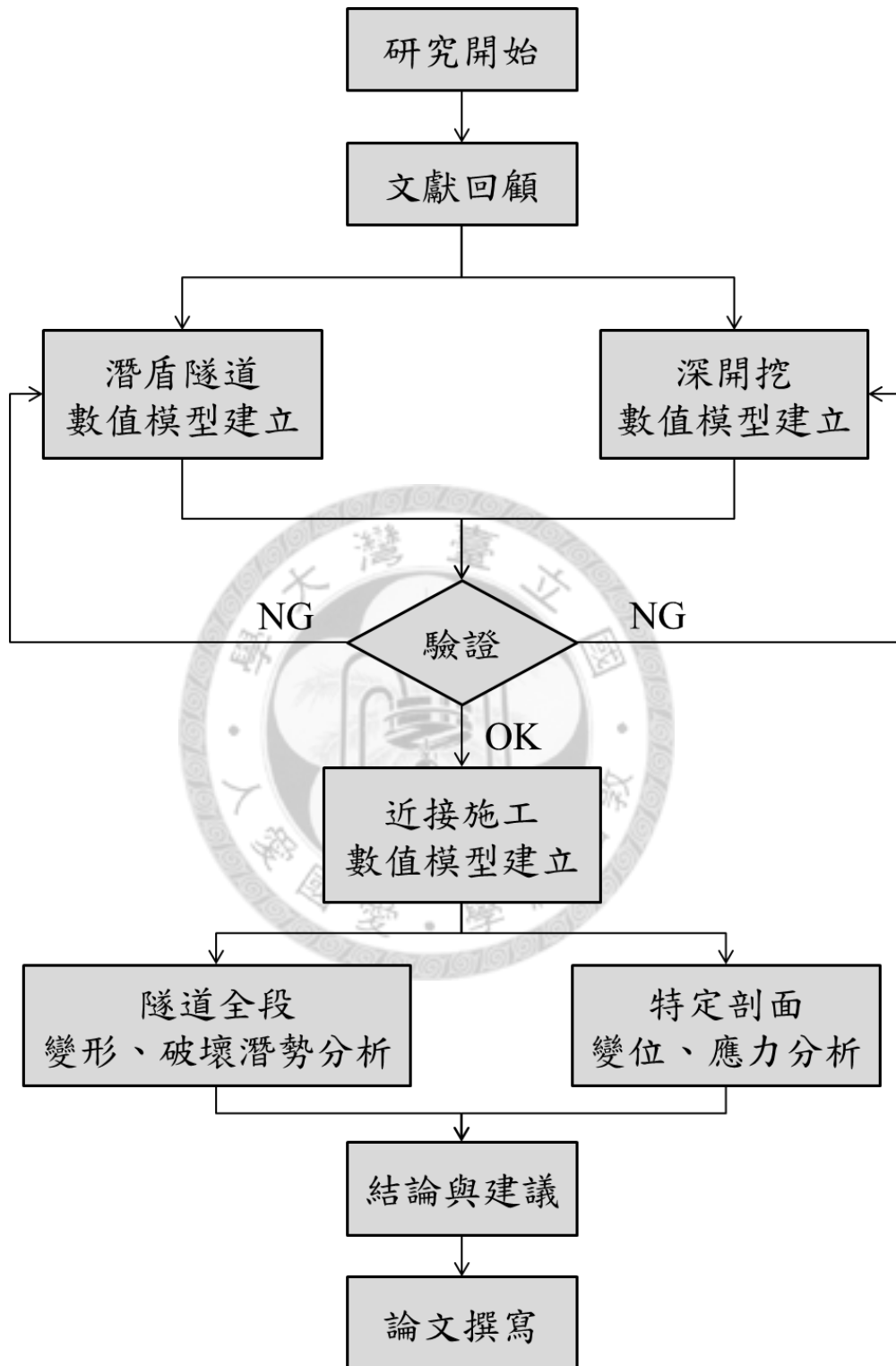


圖 1.1 研究流程圖

第二章 文獻回顧與隧道案例整理

本章第一部份以既有潛盾隧道為主，針對近接施工之主題進行一系列的說明，包括基本觀念、種類與特性等。繼而介紹規範標準及現行的隧道監測方法，並舉數則國內學者專家之研究或檢測成果，作為近接施工引致潛盾隧道受損之佐證。第二部份藉由一實際隧道監測案例，闡述近接施工引致潛盾隧道之三維變形現象。第三部份回顧相關的混凝土破壞準則，以作為後續分析之應用。

2.1 近接施工之基本觀念

「近接施工」一詞，亦可稱之為「鄰近施工」，最早出現於 1989 年日本社團法人地盤工學會(The Japanese Geotechnical Society)編輯的「近接施工」一書，意指在既有結構物之近距離範圍內施作並將影響原建物之工程。胡邵敏等人(2009)將近接施工定義為：「新建結構物施工中或完工後所引致地層變形或噪音振動等，預期對近距離之居民生活、既有建物之安全性及機能性產生不良影響時，先行施以防範措施，以降低該建物日後所受災損，達到減少建設公害及降低民怨糾紛之目標」。廖洪鈞等人(2010)於「鄰近工程之設計及施工準則與解說」一書中，定義近接施工為：「因新設構造物之施工產生周邊地盤之位移，以致有影響既有設施之安全性或功能性之虞的工程施工」。

近接施工影響一般以都會區工程較為顯著，且多為地下工程。因此，隨著臺北都會區之高度開發，可預期捷運隧道面臨的近接施工挑戰與日俱增。以下本節便以潛盾隧道為主，闡述近接施工與其之互制關係及相關監測方法，並舉數則近接施工引致潛盾隧道受損之案例進行探討。

2.1.1 種類與特性

臺北都會區地底已遍佈長達 78.3 公里的潛盾隧道，未來可能涉及近接施工之新興地下工程，諸如深開挖、潛盾隧道鑽掘、坡地填挖、基礎施作等，勢必經常處於毗鄰潛盾隧道之環境，如圖 2.1 所示。因此，近接施工對捷運隧道之營運安全實為息息相關(高宗正等，2009)，茲歸納其兩點特性說明如下：

(一) 三維力學問題

近接施工之範圍相較於潛盾隧道為一有限面積之區域，故此過程對潛盾隧道之影響屬於三維力學問題，不同隧道剖面呈現之力學行為均有差異，不宜等同視之。再加上潛盾隧道為一由襯砌環片組立之管狀結構，各襯砌環片之間僅靠螺栓連結，尤其是縱向方向上的隧道環片接頭，其抗彎曲勁度較低，一旦遭遇近接施工等額外之外力作用，潛盾隧道易於環片與環片之接頭處或螺栓孔附近產生破損，此為 in-plane 及 out-of-plane 上之複雜三維應力、應變行為。有鑑於此，使用三維模式分析方能完整呈現近接施工引致潛盾隧道之力學行為。

(二) 施工監測估要角

為於近接施工過程中，對潛盾隧道之結構安全提出預警，趙際禮與劉育志(2009)建議應考慮不同施工類型、施工影響範圍之大小及既有隧道脆弱處等因素來配置適當的監測儀器，一則掌握近接施工之影響，針對潛在危機及早修復；二則可隨時取得監測資料，作為隧道安全評估並輔助施工管理。因此，監測技術之提昇及合適監測方法之開發是維護潛盾隧道安全之不二法門。

2.1.2 現行監測方法

在施工影響範圍內之潛盾隧道須佈設適當的監測儀器，以即時掌握隧道結構之應力與變形發展，惟現場直接量測應力不易，故多以結構變形為主要量測對象。現行之變形管制標準乃依據民國 92 年 12 月 30 日修正通過之《大眾捷運系統兩側禁建限建辦法》，規定潛盾隧道之容許變形值以隧道任何方向徑向變形 20mm 為限。

隨後廖洪鈞等人(2010)於「鄰近工程之設計及施工準則與解說」一書中，建議潛盾隧道內之監測儀器可配置如圖 2.2。圖中以收斂釘(CB)及軌道沉陷點(SB)為主要監測儀器，分別量測潛盾隧道之徑向變形與軌道位移，其餘監測項目、內容及儀器詳見表 2.1。量測結果再與規範容許值進行比較，必要時須採取因應工程對策，抑制隧道變形於容許值之下，其監測管理值如表 2.2。監測儀器之建議佈設範圍如圖 2.3 所示。

上述監測方法屬於二維平面上的相對座標監測，乃簡化自隧道真圓度分析之概念。真圓度分析為台北捷運全線隧道檢測項目之一，常用於判斷潛盾隧道段之結構變形狀態或穩定程度。真圓度的數值乃依據《台北市捷運工程局土木工程施工技術規範》所訂定之標準，亦即最大半徑與最小半徑相對於標準半徑差值的計算模式，如圖 2.4，解算待測橫剖面上約 20 點之相對座標而得。橫剖面真圓度判斷標準以±0.04 公尺為界限，因此，若某橫剖面真圓度任一正負值超過 0.04 公尺，則判斷該測量橫剖面真圓度已超過限定標準狀態。

廖洪鈞等人建議之相對變形監測方法應用普及，單一剖面施作迅速效率高，可於近接施工情況下提供隧道環片受力變化分析所需的定性資料。惟近接施工引致潛盾隧道之變形實屬三維力學問題，未來值得進一步實施隧道剖面三維絕對座標高精度測量，或針對真圓度變異較大處實施三維微變監測，取得環片受力變化分析之量化資料，以掌握更有利的資訊。

2.1.3 近接施工引致潛盾隧道受損案例

近十餘年來，臺北捷運已累積許多近接施工引致捷運設施受損案例，其中影響較大者為地下潛盾隧道段。以下本小節整理國內學者專家判定潛盾隧道受開挖影響之案例，依隧道受損案例檢討、數值模擬及隧道結構安全檢測之經驗回顧等三部份，說明如下：

(一) 隧道受損案例檢討

常岐德等人(2001)探討臺北捷運板南線某段潛盾隧道受損事件發生之原因。該段潛盾隧道為兩條平行之隧道，內徑為 5.6m，其上方覆土厚度介於 11 至 21m 之間，屬松山層第四次層。襯砌採用厚 25cm、寬度 1m 之預鑄混凝土環片，環片間以螺栓相連。自 1995 年 11 月隧道完成掘進後，有兩處深開挖工程分別在距其南側 12m 和西側進行，如圖 2.5 所示。南側工地開挖區呈長方形，寬度為 46m，深度達 21m，擋土結構採用厚 1.2m、深 36m 之連續壁，1996 年 8 月開始以逆築工法施工。西側工地開挖區深度 23.5m，擋土結構為厚度 1.2m、深 35m 之連續壁，採順築工法並利用 H 型鋼內支撐開挖施工。

南側工地開挖期間為保護隧道結構安全，於隧道內、外裝設多項監測儀器，並定期加以觀測。1988年7月，上行線隧道內變位觀測點及裂縫計之觀測值突然發生明顯變化，現地勘查後發現上行線隧道內仰拱混凝土與環片有分離現象，由隧道西端起算，混凝土分離位置在第6環至第70環之間，最大縫隙約20mm。經捷運隧道承包商對環片座標進行測量，並與1996年1月隧道完成後之全段隧道檢測結果比較，顯示環片有朝向南側工地偏移數公分之現象，隨後再進行複測及詳細勘查受損情形，顯示上行隧道頂部環片自第11環至第49環亦出現裂紋情形。

經評估由相關單位提供之監測與施工資料後，常岐德等人研判潛盾隧道之位移主要受工地開挖施工影響而造成，並建議應裝設適當可靠且精度高的監測儀器，方能清楚掌握隧道本身的變形量，而確認隧道受近接施工影響的程度。

(二) 數值模擬

王慶麟、蔡榮禎(2002)蒐集臺北捷運中和線及新店線沿線5個近接施工案例，以Flac有限差分程式分析案例變形並模擬地盤改良、地中壁或加強擋土支撐等工法成效。依據監測資料所得結論為，當潛盾隧道位於開挖區下方時，設置地中壁來減少土壤變形，其效果較灌漿改良為佳。此外，開挖期間對潛盾隧道變形而言，最為危險。

王建智等人(2002)依據臺北與高雄捷運案例分析結果顯示，深開挖引致鄰近潛盾隧道的變形行為相當顯著，尤其是臺北的軟弱黏土層更為明顯。因此深開挖工程施工前必須評估開挖對潛盾隧道的影響，特別是當隧道位置處於開挖工程主要影響範圍區內的情況。

(三) 隧道結構安全檢測之經驗回顧

洪銘遠等人(2012)於《臺北捷運系統全線隧道維護檢測探討》一文中指出，臺北捷運系統於2002年、2008年二次隧道檢測結果顯示，局部路段隧道有趨近安全警戒值之慮，其隧道異狀簡述如下：

1.滲水與白華現象：透過全線隧道周壁影像掃描結果顯示，滲水與白華現象為臺北捷運系統隧道結構最普遍的異狀，常見於隧道環片區域與明挖覆蓋段、通風豎井的交接處、或是環片區段環片與環片之間及螺栓孔附近。前者研判係因明挖結構與隧道結構勁度差異大，受地震(陳正勳等,2011)或列車振動反應不同而造成龜裂，經年累月形成細微裂縫導致滲水；後者常見於特定的施工區段，推測係因隧道受近接施工偏壓影響而產生不均勻外力，導致環片與環片間原有之 2mm 厚人造橡膠襯墊因外力變化而劣化滲水，如圖 2.6 及圖 2.7 所示。

2.真圓度驟降：真圓度的變異為環片受力變化之指標，透過前後二次全線隧道檢測結果比較獲知，捷運隧道部份斷面真圓度出現變異，檢核 1500 多個斷面，有 34 處超出警戒值，但其中逾 2/3 超出量小於 1cm。真圓度超出警戒值之異常斷面常見於隧道環片區段與明挖覆蓋區段的交接段附近，約占異常斷面總數的 1/4，可能係明挖結構與隧道結構行為不同，交接段施工困難度高，加上前述結構勁度差異長期累積所致。其餘的真圓度異常斷面可能與近接施工、上部載重增加或地表沉陷有關。

2.2 近接施工之隧道監測案例

為實際瞭解潛盾隧道受近接施工之變形影響程度，本文蒐集臺北捷運松山線某段潛盾隧道之監測資料，經分析其前後兩期收方座標值，可獲致潛盾隧道之三維變形行為。詳細資料處理結果如附錄 A 所示。

2.2.1 案例簡介

臺北捷運松山線某段潛盾隧道完工後，有一深開挖工程在其側方進行，如圖 2.8 所示。依據現行法規《大眾捷運系統兩側禁建限建辦法》規定，若於潛盾隧道兩旁 50m 限建範圍內施作開挖工程，則須對既有隧道進行安全監測。圖 2.8 中藍色框線所圍區域即是深開挖工區；紅色框線為潛盾隧道，共有 70 環；綠色框線內為測區兩端佈設的加密控制點。

本案例共有兩期監測資料，分別為 99 年 6 月 7 日與 100 年 2 月 16 日(以下簡稱為 990607 及 1000216)，經歷天數為 257 日。990607 的資料為每環設置 8 個觀測點，1000216 的資料為每環設置 7 個觀測點，但具前後期座標的點位僅有 6 個點位，即圖 2.9 中的 C、D、E、F、G 及 H 點。

2.2.2 隧道三維變形現象

藉由分析此實際案例前後兩期之收方座標值，於三維空間中繪製符合這些資料的隧道剖面，可將潛盾隧道之三維變形行為繪製如圖 2.10，如此可直觀地觀察近接施工對潛盾隧道的影響。圖 2.10 中藍色隧道為 990607 之資料點，紅色隧道為將位移放大 100 倍之 1000216 資料點。該圖顯示於歷時 257 日之期間，潛盾隧道向開挖工區產生明顯側移及些許上浮之現象，且隧道縱向亦有變位分量產生，足以說明潛盾隧道的確會因近接施工之開挖解壓影響，而使環片間具拉伸及壓縮等三維錯動現象。

2.3 混凝土之破壞準則

環片為潛盾隧道之主要組成結構，當潛盾隧道受近接施工之影響而產生偏壓，導致作用載重變動時，該隧道受力將由環片承擔。環片可依材料性質分為混凝土環片、鋼環片及石墨鑄鐵環片等，一般捷運隧道多使用混凝土環片，因此隧道異狀多與混凝土劣化變形有關。以下本節針對常用之混凝土破壞準則做一簡述。

2.3.1 Mohr-Coulomb 破壞準則

Mohr(1900)假設平面上極限剪應力 τ 為同一平面上正交應力 σ 之函數，即

$$|\tau| = f(\sigma) \quad (2.1)$$

破壞包絡線 $f(\sigma)$ 是由實驗結果而定，當最大 Mohr 圓正切於包絡線時，材料達到破壞強度。因此在三維應力狀態下，材料之破壞與中間應力大小無關。最簡

單之 Mohr 包絡線為 Coulomb(1773)提出的直線方程式，如圖 2.11，其方程式為：

$$|\tau| = c - \sigma \tan \phi \quad (2.2)$$

其中 c 為材料凝聚力， ϕ 為材料內摩擦角。若假設 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ ，則式(2.2)可改寫為

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos \phi = c - \left[\frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin \phi \right] \tan \phi \quad (2.3)$$

經整理得

$$\sigma_1 \frac{1 + \sin \phi}{2c \cos \phi} - \sigma_3 \frac{1 - \sin \phi}{2c \cos \phi} = 1 \quad (2.4)$$

若定義

$$f'_c = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (2.5)$$

$$f'_t = \frac{2c \cos \phi}{1 + \sin \phi} \quad (2.6)$$

則式(2.4)可改寫成

$$\frac{\sigma_1}{f'_t} - \frac{\sigma_3}{f'_c} = 1 \quad (2.7)$$

其中 f'_c 為混凝土單壓試驗之抗壓強度， f'_t 為混凝土單拉試驗之抗張強度。圖 2.12 為平面應力狀態($\sigma_3 = 0$)之 Mohr-Coulomb 破壞強度圖形，其中 $m = f'_c / f'_t$ 。

2.3.2 Drucker-Prager 破壞準則

Drucker 與 Prager(1952)指出材料在三維應力空間($I_1 - \sqrt{J_2}$)之破壞包絡線可表示為下列線性關係。

$$f(I_1, \sqrt{J_2}) = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (2.8)$$

式中 $I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$, $J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]$, α 與 k 為強度參數。而 Drucker-Prager 破壞包絡線之 α 值與 k 值可經由 Mohr-Coulomb 破壞包絡線之 c 值與 ϕ 值轉換求得，如下二式。

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (2.9)$$

$$k = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (2.10)$$

表 2.1 近接施工監測項目及監測儀器(修改自胡邵敏等，2009)

項目	監測內容	監測儀器
潛盾隧道	沉陷上浮	水平儀、測微器、水管式沉陷計、桿式伸縮儀
	水平變位	經緯儀、測微器
	傾斜	測傾計、垂球
	應力	應力計、應變計

表 2.2 捷運設施之監測管理值(修改自廖洪鈞等，2010)

監測項目		監測儀器	監測管理值	
			警戒值	行動值
捷運設施	結構裂縫	裂縫計	肉眼看得到之裂縫 (山岳隧道除外)	0.3mm
	結構沉陷	結構物沉陷點 (量測總沉陷量)	2mm(山岳隧道)	3mm
	結構傾斜	傾斜儀或經緯儀 (量測傾斜量)	規範標準值 80% 或 設計值 80% 之小值	規範標準值 100%
	隧道內空變位	收斂釘 (量測徑向變形)		
	軌道沉陷	軌道沉陷點	垂直或水平總位移 量 8mm，5m 內有 2.5mm 之垂直或側 向扭曲	垂直或水平總位 移量 10mm，5m 內有 3mm 之垂 直或側向扭曲

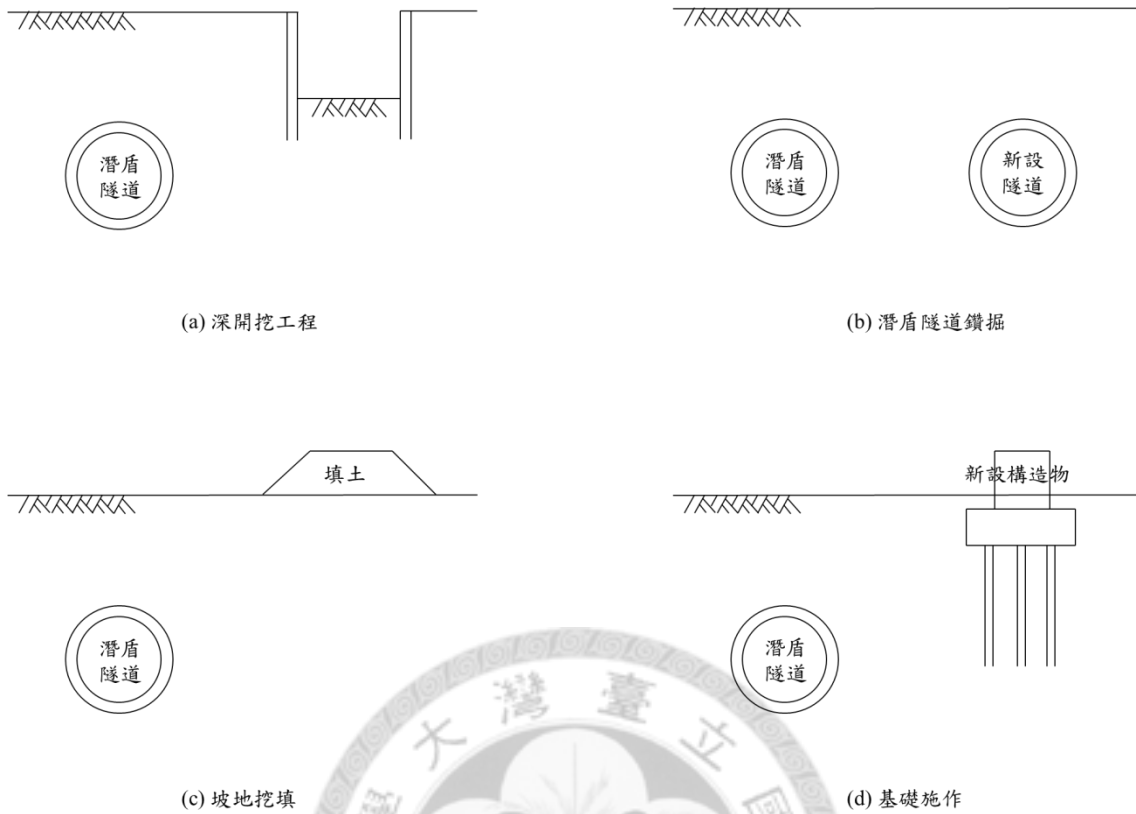


圖 2.1 潛盾隧道常見近接施工之種類(改繪自胡邵敏等，2009)

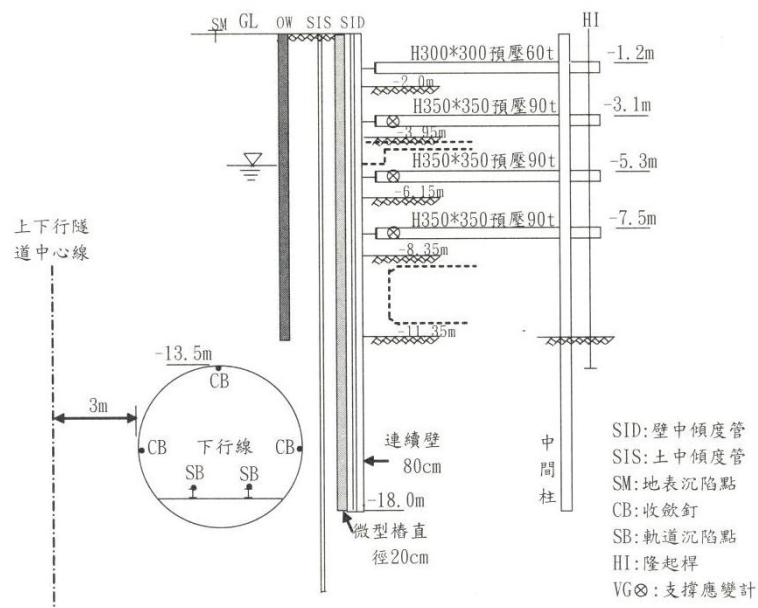


圖 2.2 捷運隧道監測儀器配置示意圖(廖洪鈞等，2010)

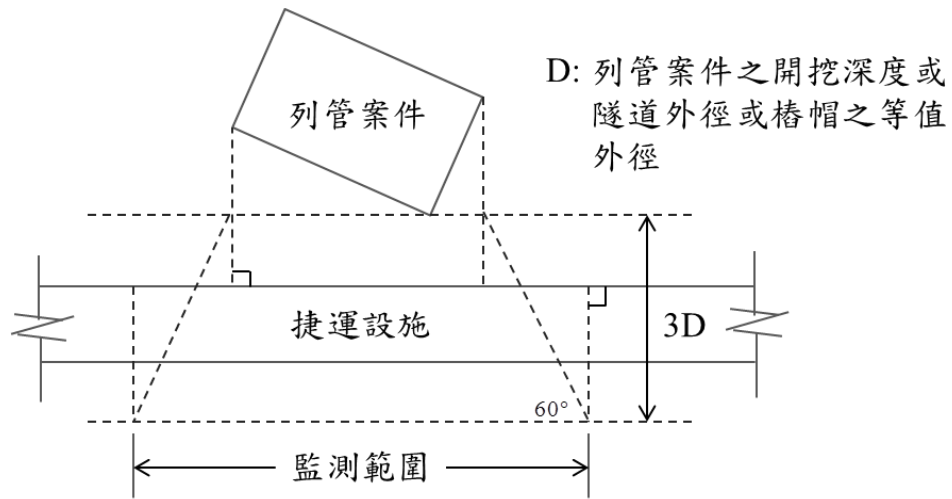


圖 2.3 捷運設施之監測儀器佈設範圍(廖洪鈞等，2010)

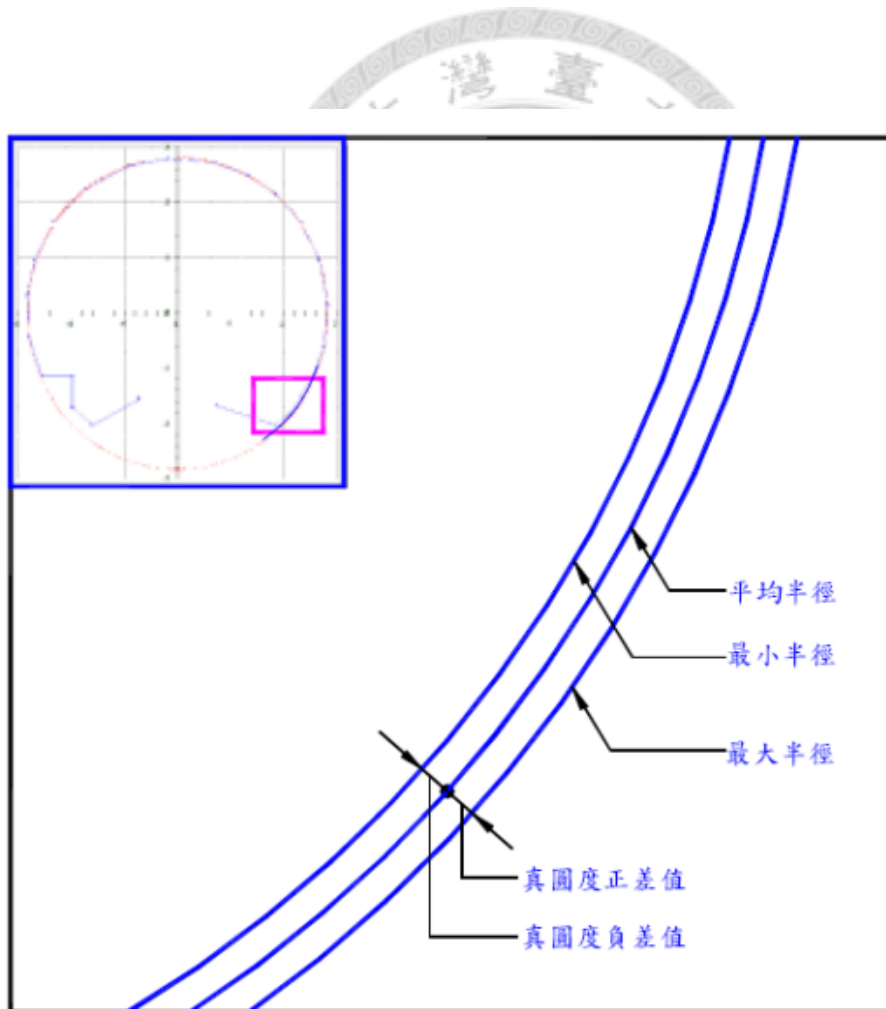


圖 2.4 真圓度差值計算方式(臺北市捷運工程局土建工程施工技術規範，1992)

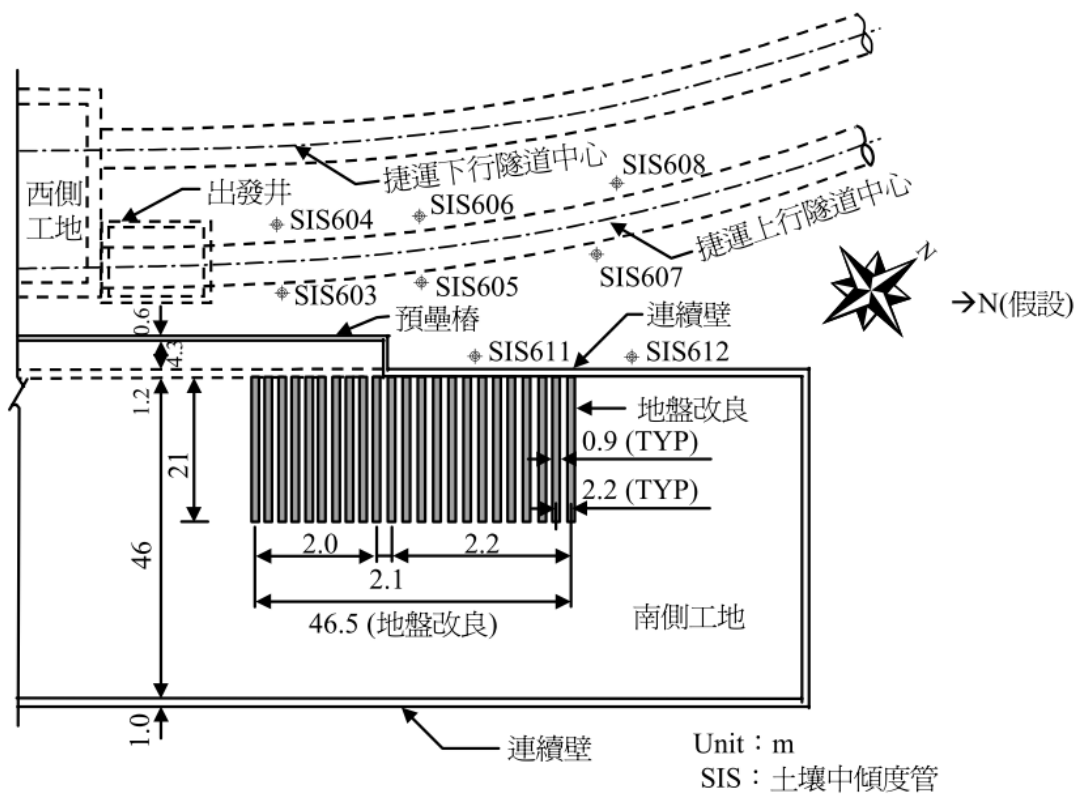


圖 2.5 潛盾隧道及鄰近工地平面位置圖(常岐德等，2001)



圖 2.6 潛盾隧道內之滲水情況(松本嘉司，1994)

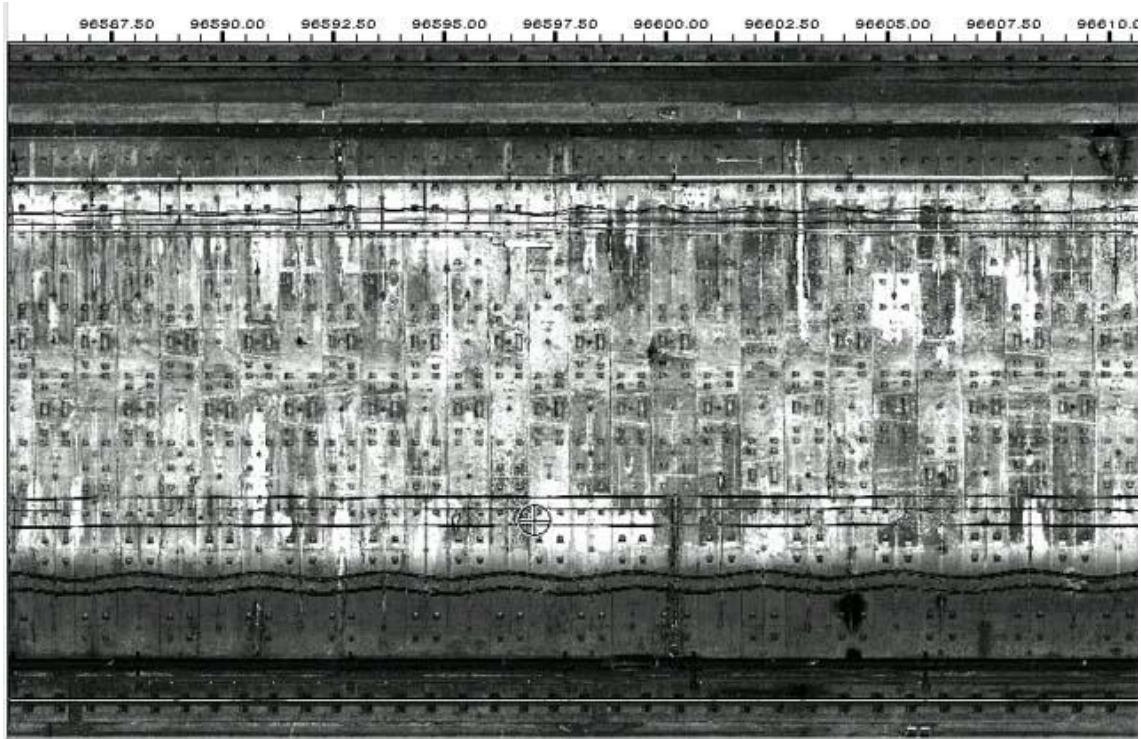


圖 2.7 近接施工引致潛盾隧道環片漏水現象，尤以環與環之間為劇(聯合大地)



圖 2.8 檢測現場相關構造物平面示意圖(潛盾隧道圓斷面檢測成果資料，2011)

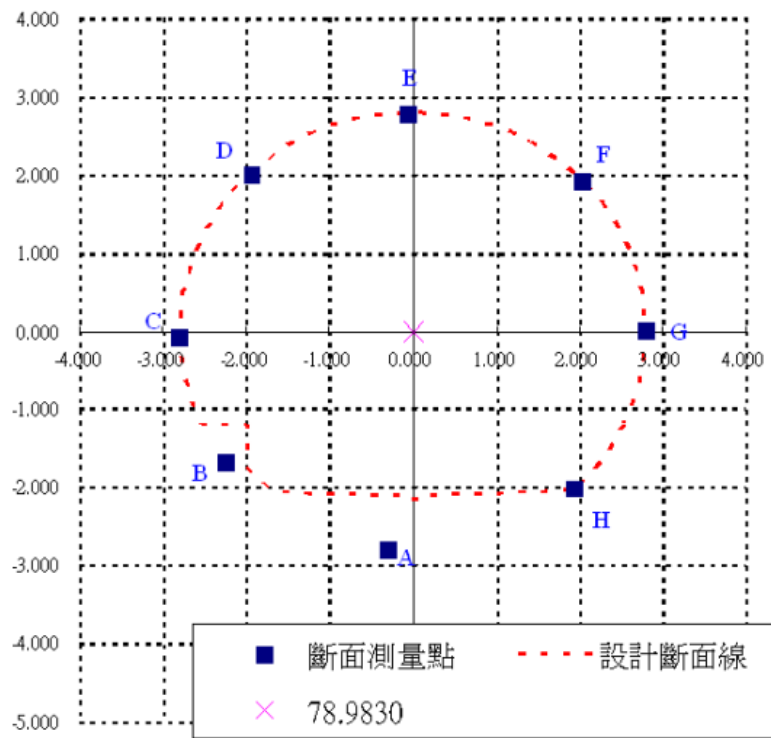


圖 2.9 隧道環片監測點位佈設圖(潛盾隧道圓斷面檢測成果資料，2011)

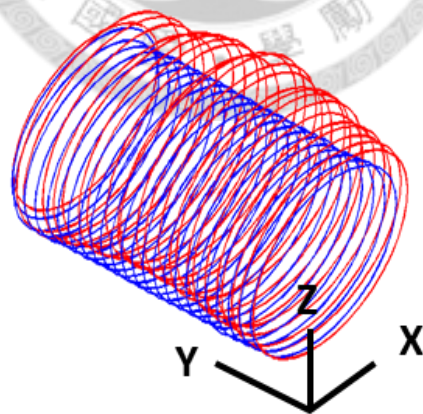


圖 2.10 隧道三維變形示意圖

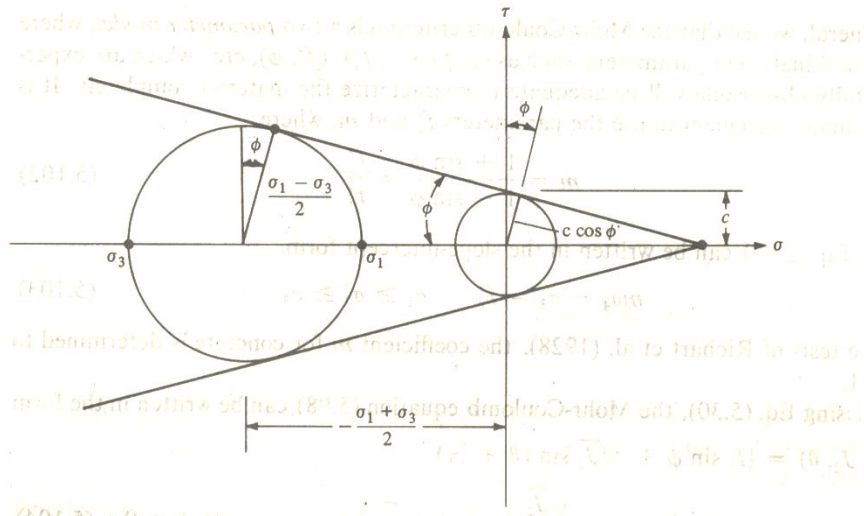


圖 2.11 破壞包絡線為直線之 Mohr-Coulomb 破壞準則(Chen, 1982)

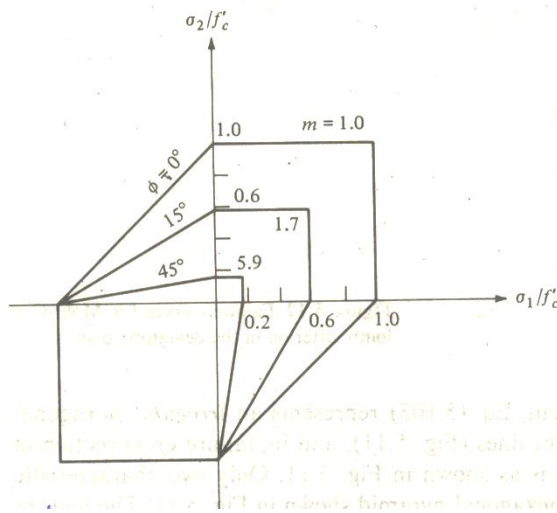


圖 2.12 平面應力狀態($\sigma_3 = 0$)之 Mohr-Coulomb 破壞強度圖形(Chen, 1982)

第三章 潛盾隧道與深開挖數值模型之建立與驗證

欲模擬近接施工毗鄰既有潛盾隧道之情況，首要之務為力求施工模擬程序之正確性。本章應用有限差分法發展的三維數值程式 FLAC^{3D} 分別建立潛盾隧道及深開挖數值模型，將分析結果與解析解、案例監測資料等相互驗證，以供第四章建立近接施工數值模型之基礎。

3.1 FLAC^{3D} 程式概述

本研究以美國 Itasca Consulting Group, Inc. 所研發之數值分析軟體 FLAC^{3D} (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions) 3.0 版程式為分析工具。該程式是利用外顯有限差分法迭代運算元素網格間的不平衡力，直至不平衡力趨近於零，即穩定狀態下求得分析域內的應力與位移，可用以模擬土壤、岩體或其它材料與結構物之間的互制行為，其運算概念與求解架構如圖 3.1 所示。

FLAC^{3D} 內建之材料組成律模式(constitutive model)共有 11 種，如零效模式(null model) 可模擬材料移除或土體開挖的行為；等向性彈性模式(elastic, isotropic model)可模擬材料為均質、等向線彈性的應力應變關係；莫爾庫倫模式(Mohr-Coulomb model)可模擬材料符合莫爾庫倫降伏準則與非諧和流動法則的應力應變關係等，其適用的代表性材料與應用範圍如表 3.1 所示。另外，FLAC^{3D} 亦提供一程式開發計算模組，即所謂的 fish，提供使用者自行定義特殊參數、方程式及組成模式於主程式中運算。

3.2 潛盾隧道數值模型之建立與驗證

本節擬於一均質等向線彈性土層中，逐環開挖圓形隧道並架設支撐環片，建立潛盾隧道數值模型。首先說明分析過程採用的假設及材料參數來源，繼而透過分析結果與解析解比較，驗證本潛盾隧道數值模型模擬程序之正確性。

3.2.1 分析條件之假設

(一) 潛盾隧道開挖與支撐時機

本文假設隧道位置於地表下 30.0m 處，隧道半徑為 3.0m，隧道長度為 60.0m，開挖過程採全斷面逐環開挖。為考慮潛盾施工過程之盾尾間隙，本文比較不同支撐時機對隧道平均徑向收斂量的影響，分析結果如圖 3.2 所示。一般工程實務上的盾尾間隙多為 5-10cm，故本文採取當隧道平均徑向收斂量達 8.2cm(即 FLAC^{3D} 中的 step100)時架設支撐環片，支撐環片寬度為 2.0m。此外，假設隧道周邊土層特性與未開挖隧道時相同，即不考慮潛盾機鑽掘過程周邊土壤受施工及應力重新調整之各種影響。最後本文假設地下水位極低，故可忽略水的影響。

(二) 數值網格與邊界條件

隧道開挖將引致隧道周圍應力與應變之重新調整，其影響程度隨距離增加而逐漸減小。為選擇適當的分析邊界，本文比較數種不同邊界範圍對隧道開挖分析的影響，分析參數及結果如表 3.2 及圖 3.3 所示。在地表面允許自由沉降，其餘五個面之法向方向為輻(roller)支承的邊界條件下，當水平(X)邊界範圍達 20 倍開挖半徑時，隧道周圍平均徑向位移的分析結果與邊界範圍為 60 倍開挖半徑時差異不及 0.1%，顯示隧道開挖的影響已可忽略。因此，本文將採取 20 倍開挖半徑為潛盾隧道數值模型之邊界範圍，網格示意圖如圖 3.4 所示。

3.2.2 參數選用之依據

(一) 土壤力學參數

為簡化分析，本隧道模型假設分析範圍內為均質等向性砂土層，採用 Elastic 模式，相關土壤參數如密度(ρ)、體積模數(K)、剪力模數(G)乃依據程式使用手冊 (Itasca Consulting Group, Inc., 2005)之建議，如表 3.3 所示。

(二) 支撐環片參數

由表 3.4 可知臺北捷運環片厚度除了新店線 CH222 標為 0.3m 外，其餘各標皆

為 0.25m(朱旭等, 1997), 故採環片厚度為 0.25m。此外, 潛盾隧道是由螺栓接頭連接數個環片而成, 並非一連續結構, 加上片間與環間接頭之抗彎勁度較低, 若採連續結構分析將高估環片之應力, 因此本研究參考張吉佐等人(1993)建議將環片彈性模數乘上一折減因子(λ)0.8。由於隧道環片在整個模擬範圍中所佔的厚度極小, 且須承受軸力、剪力及彎曲力矩, 故以 FLAC^{3D} 程式提供的殼(Shell)結構元素模擬之, 相關輸入之參數包括構材密度(ρ)、彈性模數(E)、波松比(ν)及厚度(t), 如表 3.5 所示。

3.2.3 模型驗證

由於架設支撐環片後之潛盾隧道力學行為無相關理論公式可供檢核, 以下本小節僅針對無支撐之情況下, 於均質等向線彈性材料中進行圓形隧道開挖及隧道開挖前進面效應之驗證。

(一) 圓形隧道開挖之彈性理論

Kirsch(1898)假設土壤若具均質等向線彈性之特性, 則圓形隧道開挖後周圍的徑向應力 σ_r 、切向應力 σ_θ 可參考圖 3.5 的座標系統表示如下:

$$\sigma_r = \frac{p_h + p_z}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{p_h - p_z}{2} \left(1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \quad (3.1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{p_h + p_z}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{p_h - p_z}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \quad (3.2)$$

式中 p_h 為水平初始應力, p_z 為垂直初始應力, a 為隧道半徑, r 為距隧道中心之徑向距離, θ 為自隧道頂拱順時針旋轉之角度。將本隧道模型分析所得與式 3.1 與式 3.2 解析求得的徑向應力 σ_r 、切向應力 σ_θ 比較如圖 3.6, 整體趨勢相當一致。其中, 切向應力最大誤差為 4.5%, 顯示本隧道模型在無支撐情況下分析的應力, 與均質等向線彈性土壤中圓形隧道開挖的解析解相當接近。

(二) 隧道開挖之前進面效應

Brady 與 Brown(1985)考量在材料為均質線彈性且現地應力為等向性之情況下，無支撐圓形隧道開挖引致的徑向位移量，將隨著開挖前進面推進而分佈如圖 3.7 所示。圖中 p_0 為等向現地應力， r_i 為隧道半徑， u_i 為隧道徑向位移， G 為剪力模數。無支撐情況下，本隧道模型頂拱沉陷分析結果如圖 3.8，與圖 3.7 相較可發現趨勢十分吻合，顯示本隧道模型模擬之逐環開挖程序具有正確性。

3.3 深開挖數值模型之建立與驗證

本節挑選一施工及監測品質皆相當良好之深開挖案例-臺北國家企業中心(TNEC)進行三維數值模擬，藉由連續壁體變形分析結果與監測資料進行比對，以檢核本深開挖數值模型模擬程序之適用性，並將該開挖程序作為後續近接施工數值模型之依據。

3.3.1 工程案例之說明

本深開挖數值模型採用臺北國家企業中心之基礎開挖作為驗證案例，基地平面位置及剖面如圖 3.9 所示。該基地長度大致為 60m 至 105m，寬度為 43m，略呈一梯形。基地採用厚度 0.9m、貫入深度 35.0m 之連續壁作為擋土壁，基礎採逆打式施工，開挖深度為 19.7m，分七個作業階段進行。支撐系統除了第一階段與第七階段分別以間距 8.0m 之 H300×300×10×15 及間距 3.4m 之 H400×400×13×21 型鋼支撐，其餘開挖階段皆以樓板為支撐。基礎施工歷時及步驟程序如表 3.6 所示。

(一) 土層分佈狀況

該基地具備完善的現地試驗資料，鑽孔深度均至景美礫石層，並進行標準貫入試驗(SPT)及圓錐貫入試驗(CPT)等現地與室內試驗，基地土層分佈及土壤基本資料如圖 3.10 所示，地下水位約在地表下 2.0m 處。

(二) 監測系統配置

該基地基礎施工安全監測配置如圖 3.9，項目包括：連續壁體上土水壓計、鋼筋計、傾斜觀測管等儀器；基地南側另有許多地面沉陷點、伸縮儀及土壤中傾斜觀測管。本深開挖數值模型分析結果以圖 3.9 中連續壁體內傾斜觀測管構成之主要觀測斷面為比較對象。

3.3.2 分析條件之假設

(一) 數值網格與邊界條件

分析時將該基地之幾何形狀假設為 $60\text{m} \times 40\text{m}$ 之矩形，採 1/2 對稱斷面進行分析。Woo 與 Moh(1990)曾統計臺北盆地多處地表沉陷監測資料之結果，認為深開挖引致地表沉陷之影響範圍可達 4-5 倍的開挖深度，因此本模型即以 4 倍開挖深度之距離為水平(X)與(Y)邊界範圍；垂直(Z)邊界部份，參考一般常用距連續壁底端下方數公尺之方式，採用 1.7 倍連續壁壁體深度。邊界條件設定方面，除地表面允許自由沉降，其餘五個面之法向方向為輓(roller)支承，網格示意圖如圖 3.11 所示。

(二) 施工步驟模擬

由於實際開挖的施工程序相當複雜，一般數值分析時會進行適當的簡化。本模型依據該基地監測資料及施工作業情形，將實際施工步驟加以簡化如下：

- A. 開挖前初始應力計算。
- B. 基地周圍之連續壁施作
- C. 第一階段降水並開挖 (GL-2.8m)，架設第一層支撐 $H300 \times 300 \times 10 \times 15$ (GL-2.0m)。
- D. 第二階段降水並開挖 (GL-4.9m)，拆除第一層支撐並構築地下一層之樓板 (GL-3.5m)。
- E. 第三階段降水並開挖 (GL-8.6m)，構築地下二層之樓板 (GL-7.1m)。

- F. 第四階段降水並開挖 (GL-11.8m)，構築地下三層之樓板 (GL-10.3m)。
- G. 第五階段降水並開挖 (GL-15.2m)，構築地下四層之樓板 (GL-13.7m)。
- H. 第六階段降水並開挖 (GL-17.3m)，架設第二層支撐 H400×400×13×21 (GL-16.5m)。
- I. 第七階段降水並開挖 (GL-19.7m)。

3.3.3 參數選用之依據

(一) 土壤力學參數

依據圖 3.10 可知該基地景美礫石層以上是由粉土質黏土和粉土質砂土組成的六個次層，採用 Mohr-Coulomb 模式分析；而景美層承載能力良好，故以 Elastic 模式分析，各層輸入之土壤參數如表 3.7 所示。

(二) 連續壁參數

由於連續壁須承受軸向荷重、剪力及彎曲力矩，並與周圍土壤連結，故以 FLAC^{3D} 程式提供的殼(Shell)結構元素模擬之，相關輸入之參數包括構材密度(ρ)、彈性模數(E)、波松比(ν)及厚度(t)，如表 3.8 所示。

連續壁的彈性模數取決於混凝土的抗壓強度，根據 ACI 規範的建議，混凝土的標稱彈性模數(E_c)可由下式決定。

$$E_c = 15,000\sqrt{f'_c} \quad (3.3)$$

其中 f'_c 為混凝土 28 天的抗壓強度，本研究採 210kg/cm^2 。因考慮連續壁承受較大的彎矩時會開裂，加以單元接頭品質及水中混凝土施工等因素之影響，將使壁體有效撓曲勁度較標稱值低。依據歐章煜(2002)建議將勁度(EI)折減 60% 至 80%，即折減係數(R)為 0.6 至 0.8。本研究為反應上述影響，取 R 為 0.75，將連續壁彈性模數修正為 16.3GPa。

(三) 開挖支撐參數

由於鋼支撐與樓板為直線段，且須承受軸向荷重、剪力及彎曲力矩，故均以 FLAC^{3D} 程式提供的梁(Beam)結構元素模擬之，相關輸入之參數包括彈性模數(E)、波松比(ν)、橫截面積(A)、y 軸慣性矩(I_y)、z 軸慣性矩(I_z)及極慣性矩(J)，如表 3.9 所示。

一般而言，鋼構材之標稱彈性模數(E_{st})為 2.0×10^5 MPa，為考慮鋼支撐接合之接觸緊密度及平直度等影響；樓板易受混凝土乾縮、樓板開口及施工的影響，分析時應將標稱勁度予以折減。根據 Ou(2006)研究，鋼支撐勁度約為標稱值(E_{st})之 50%至 70%，樓板勁度約為標稱值(E_c)之 80%。因此本研究分析時，鋼支撐及樓板勁度分別取 R 為 0.5 及 0.8 進行折減。

3.3.4 模型驗證

圖 3.12 為第一至第七開挖階段連續壁側向位移監測和數值分析結果之比較，圖中橫軸為側向位移量，縱軸為連續壁深度。該系列圖顯示在第一至第三開挖階段時，分析所得之整段壁體側向位移量值普遍較監測資料低；在第四至第七開挖階段，近開挖面處之壁體側移分析值均較壁體最大實測值來得大，而壁體兩端之側移分析值卻較實測值小，兩者存有量值上的誤差。推測該誤差之主要原因是土壤參數設定差異及受支撐時機影響所致。

惟第一階段至第七階段開挖的過程中，壁體兩端點位移量不高，壁體最大側向位移的位置多出現於近開挖面處，且其量值均隨著開挖深度加深而逐步上升，此分析現象與實測壁體位移之趨勢一致，顯示本深開挖模型在開挖程序之模擬仍具有合理性。

表 3.1 FLAC^{3D} 組成律模型(Itasca Consulting Inc. , 2005)

Model	Representative Material	Example Application
null	void	holes, excavation, region in which material will be added at later stage
elastic	homogeneous, isotropic continuum; linear stress-strain behavior	manufactured materials (e.g., steel) loaded below strength limit; factor-of-safety calculation
orthotropic elastic	materials with three mutually perpendicular planes of elastic symmetry	columnar basalt loaded below strength limit
transversely isotropic elastic	thinly laminated material exhibiting elastic anisotropy (e.g., slate)	laminated materials loaded below strength limit
Drucker-Prager plasticity	limited application; soft clays with low friction	common model for comparison to implicit finite-element programs
Mohr-Coulomb plasticity	loose and cemented granular materials; soils, rock, concrete	general soil or rock mechanics (e.g., slope stability and underground excavation)
Strain-hardening / softening Mohr-Coulomb	granular materials that exhibit non-linear material hardening or softening	studies in post-failure (e.g., progressive collapse, yielding pillar, caving)
Ubiquitous-joint	thinly laminated material exhibiting strength anisotropy (e.g., slate)	excavation in closely bedded strata
Bilinear strain-hardening / softening ubiquitous-joint	laminated materials that exhibit non-linear material hardening or softening	studies in post-failure of laminated materials
modified cam-clay	materials for which deformability and shear strength are a function of volume change	geotechnical construction on clay

表 3.2 邊界影響分析時之輸入參數

體積模數 K (MPa)	25.0
剪力模數 G (MPa)	5.4

表 3.3 潛盾隧道數值模型之土層參數

密度 ρ (Kg/m ³)	2000
體積模數 K (MPa)	25.0
剪力模數 G (MPa)	5.4



表 3.4 臺北捷運潛盾隧道工程各施工標選用設備一覽表(修改自朱旭，1997)

路線別	施工標	覆土深度 (m)	最小曲率半徑 (m)	最大縱坡度 (%)	選用機型	輔助工法	切刀形式	*長度 (m)	#外徑 (m)	環片內徑/外徑 (m)	環片厚度/寬度 (m)
淡水線	CT201A	9-18	450	3.0	土壓平衡	加泥型	面板式	--/--/--	--/6.09	5.42/6.12	1.00/0.25
新店線	CH218	8.5-21	380	3.0	土壓平衡	氣泡型	輪幅式	6.40/6.10/5.70	6.07/6.05	5.40/5.90	1.00/0.25
	CH219	8.5-22	700	3.0	土壓平衡	加泥型	輪幅式	7.50/6.95/6.30	--/6.04	5.40/5.90	1.00/0.25
	CH221	8-22	400	3.0	泥水加壓	--	面板式	7.10/6.95/6.52	--/6.25	5.60/6.10	1.00/0.25
	CH222	9-18	300	2.448	土壓平衡	加泥型	圓頂式	7.77/--/--	6.16/6.12	5.40/6.00	1.00/0.30
	CH223	9-15	350	0.2	土壓平衡	加泥型	輪幅式	--/7.10/6.67	6.04/6.04	5.40/5.90	0.90/0.25
	CH224	9-16	350	3.0	土壓平衡	加泥型	圓頂式	--/7.54/6.62	--/6.04	5.40/5.90	0.90/0.25
南港線	CN251	9.5-16	200	3.0	土壓平衡	加泥型	輪幅式	--/6.90/--	--/6.25	5.6	1.00/0.25
	CN253B	6-11.5	200	3.0	土壓平衡	加泥型	輪幅式	7.20/--/6.03	--/6.24	6.1	1.00/0.25
	CN253A	10-12	350	0.74	土壓平衡	加泥型	輪幅式	7.40/7.00/6.63	6.04/6.04	5.60/6.10	1.00/0.25
	CN254	11-13	900	0.353	土壓平衡	加泥型	輪幅式	7.40/7.00/6.63	6.04/6.04	5.40/5.90	1.00/0.25
	CN256	8.5-12	3,000	1.488	土壓平衡	加泥型	輪幅式	7.18/6.88/6.48	6.07/6.05	5.40/5.90	1.00/0.25
	CN257	8-10	1,300	0.759	土壓平衡	加泥型	輪幅式	7.40/7.00/6.63	6.04/6.04	5.40/5.90	1.00/0.25
	CN258	8-12	300	0.738	土壓平衡	加泥型	輪幅式	7.16/--/--	6.05/6.04	5.40/5.90	1.00/0.25
板橋線	CP261	11-25	330	2.985	土壓平衡	加泥型	輪幅式	7.22/6.92/6.52	--/6.25	5.40/5.90	1.00/0.25
	CP262	10.5-2	300	2.8	土壓平衡	加泥型	輪幅式	--/7.68/7.37	--/6.24	5.60/6.10	1.00/0.25
	CP263	9-10	1,000	3.0	土壓平衡	加泥型	輪幅式	7.45/6.95/6.50	--/6.24	5.60/6.10	1.00/0.25
	CP264	10.5-2	280	2.4	土壓平衡	加泥型	輪幅式	6.27/5.97/5.47	6.28/6.28	5.60/6.10	1.00/0.25
中和線	CC275	11-26	300	3.0	土壓平衡	加泥型	面板式	6.42/6.09/5.66	6.27/6.26	5.60/6.10	1.00/0.25
	CC276	6.5-22	300	3.5	土壓平衡	加泥型	面板式	6.42/6.09/5.66	6.27/6.26	5.60/6.10	1.00/0.25
	CC277	6-22.3	200	3.0	土壓平衡	加泥型	面板式	6.42/6.09/5.66	6.27/6.26	5.60/6.10	1.00/0.25

說明：*表示潛盾機之鼻尖至盾尾總長度/刀盤面至盾尾長度/盾身長
#表示潛盾機之刀盤外徑/盾身外徑
A：拆解、吊運、再組立
B：迴轉
C：棄殼

表 3.5 支撐環片參數

密度 ρ (Kg/m ³)	2400
彈性模數 E (GPa)	32.0
波松比 ν	0.2
厚度 t (m)	0.25



表 3.6 國家企業中心開挖程序(歐章煜，2002)

階段	時間(天)	開挖活動
	-29~	安裝開挖外側儀器，包括土壤中傾斜管、伸縮儀、水位觀測井及電子式水壓計。
	1~89	構築連續壁(並安裝壁體上土水壓計、鋼筋計及壁體中傾斜觀測管)。
	89~147	構築基樁及逆打鋼支柱。
	147~155	安裝開挖區內側之水壓計及隆起桿。
1	156~162	開挖至 GL-2.8m。
2	164~169	於 GL-2.0 處架設 H300×300×10×15 之支撐，每根支撐預力=784.8kN。
3	181~188	開挖至 GL-4.9m。
4A	217	於 GL-3.5m 處構築地下一層樓板(B1F)。
4B	222~238	拆除第一層支撐，並構築地面層樓版及開始上部結構施工。
5	233~255	開挖至 GL-8.6m。
6	279	於 GL-7.1m 處構築地下二層樓板(B2F)。
7	318~337	開挖至 GL-11.8m。
8	352	於 GL-10.3m 處構築地下三層樓板(B3F)。
9	363~378	開挖至 GL-15.2m。
10	400	於 GL-13.7m 處構築地下四層樓板(B4F)。
11A	419~423	中央區開挖至 GL-17.3m。
12A	425~429	於中央區 GL-16.5m 處架設 H400×400×13×21 之支撐，每根支撐預力=1177kN。
11B	430~436	兩側邊區開挖至 GL-17.3m。
12B	437~444	於兩側邊區 GL-16.5m 處架設 H400×400×13×21 之支撐，每根支撐預力=1177kN。
13	445~460	開挖至 GL-19.7m。
	457	完成上部結構
14	464~468	澆鑄基礎底版。
15	506~520	於 GL-17.1m 處構築地下五層樓板(B5F)。
16	528	拆除第二層支撐。

表 3.7 深開挖數值模型之土層參數

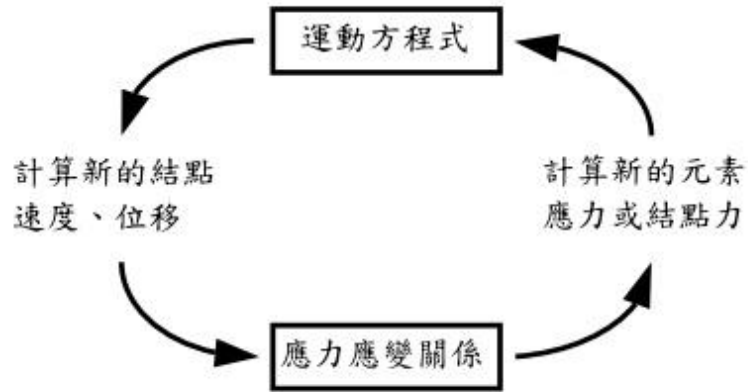
深度(m)	土壤類型	K (MPa)	G (MPa)	c (KPa)	ϕ
0-6	CL	20.0	4.3	6.0	0.0
6-16	SM	14.0	6.5	0.0	25.0
16-24	CL	24.0	5.1	8.0	0.0
24-40	SM	23.3	10.8	0.0	25.0
40-48	CL	45.0	9.6	10.0	0.0
48-56	SM	46.7	21.5	0.0	25.0
56-60	GM	95.2	87.0	-	-

表 3.8 連續壁參數

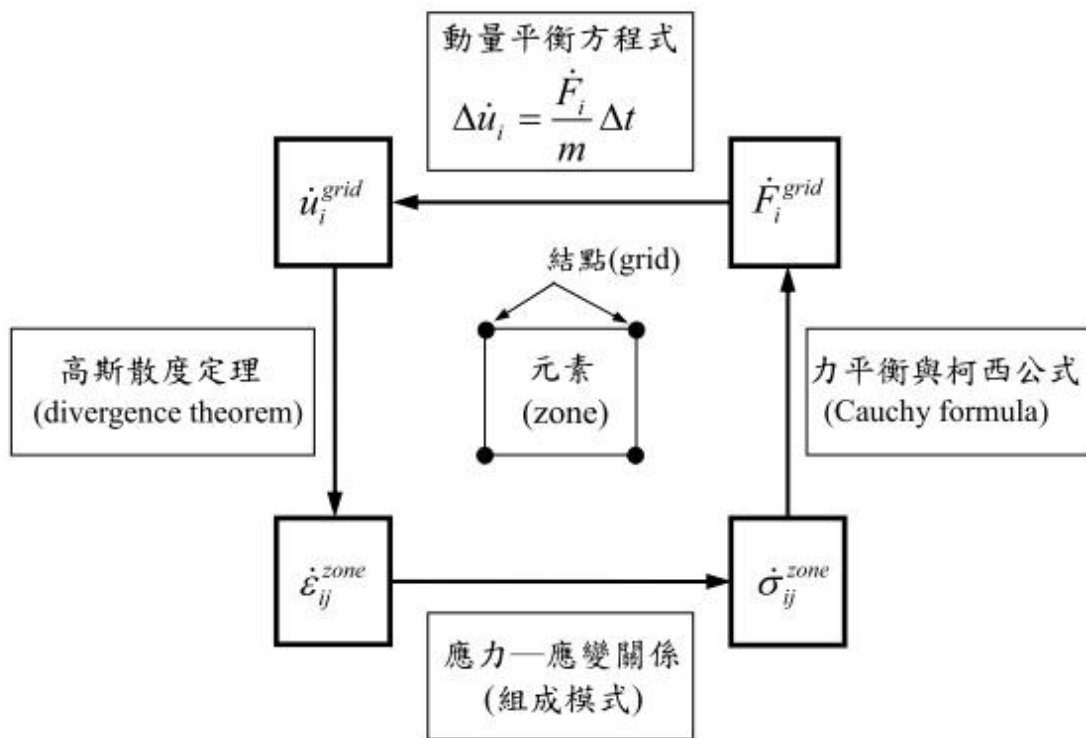
密度 ρ (Kg/m ³)	2400
彈性模數 E (GPa)	16.3
波松比 ν	0.2
厚度 t (m)	0.9

表 3.9 開挖支撐參數

第一層之鋼支撐	
彈性模數 E (GPa)	100.0
波松比 ν	0.3
橫截面積 A (m^2)	0.012
y 軸慣性矩 I_y ($10^{-4}m^4$)	2.04
z 軸慣性矩 I_z ($10^{-4}m^4$)	0.68
極慣性矩 J ($10^{-4}m^4$)	2.72
地下一層至地下四層之樓板	
彈性模數 E (GPa)	17.4
波松比 ν	0.2
橫截面積 A (m^2)	0.15
y 軸慣性矩 I_y ($10^{-4}m^4$)	2.8
z 軸慣性矩 I_z ($10^{-4}m^4$)	125
極慣性矩 J ($10^{-4}m^4$)	127.8
第二層之鋼支撐	
彈性模數 E (GPa)	100
波松比 ν	0.3
橫截面積 A (m^2)	0.022
y 軸慣性矩 I_y ($10^{-4}m^4$)	6.66
z 軸慣性矩 I_z ($10^{-4}m^4$)	2.24
極慣性矩 J ($10^{-4}m^4$)	8.9



(a) 運算循環概觀



(b) 顯性有限差分法之運算架構

圖 3.1 FLAC^{3D} 應用顯性有限差分法之運算概念與求解架構(王泰典, 2003)

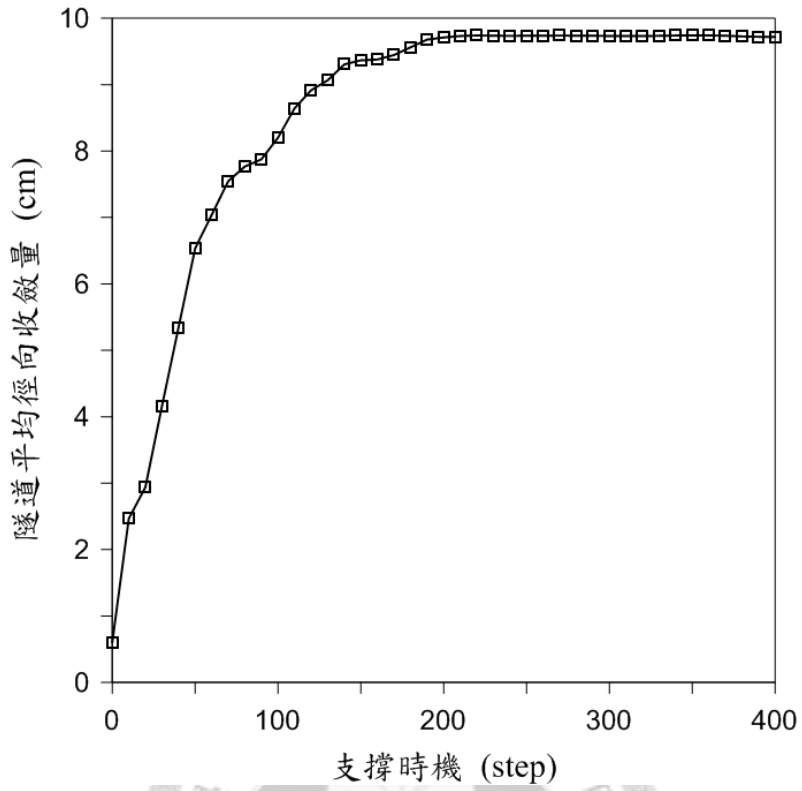


圖 3.2 不同支撐時機對隧道平均徑向收斂量之影響

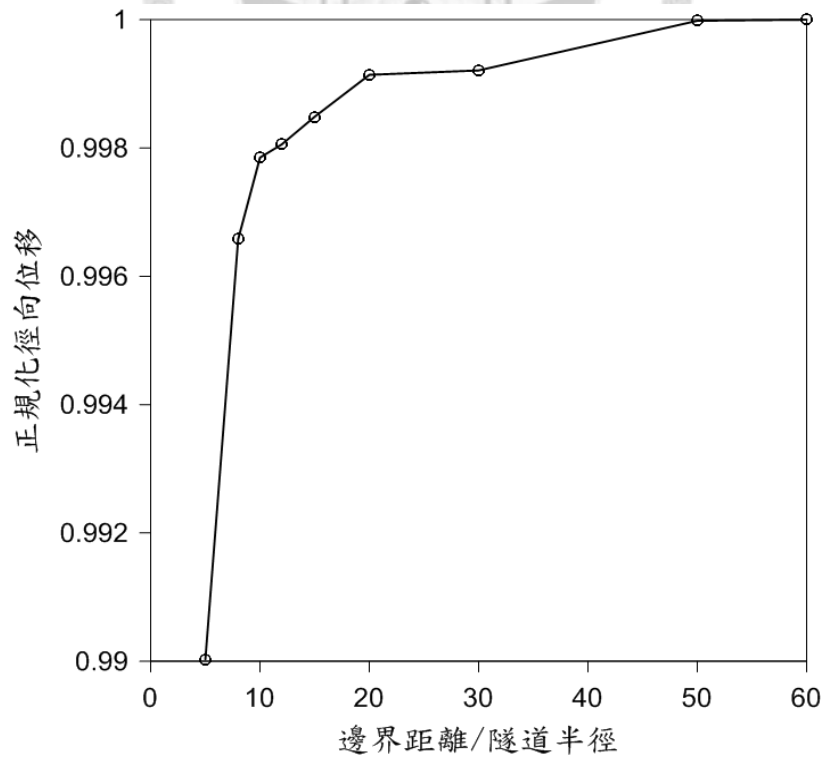


圖 3.3 不同邊界範圍對隧道開挖分析結果之影響

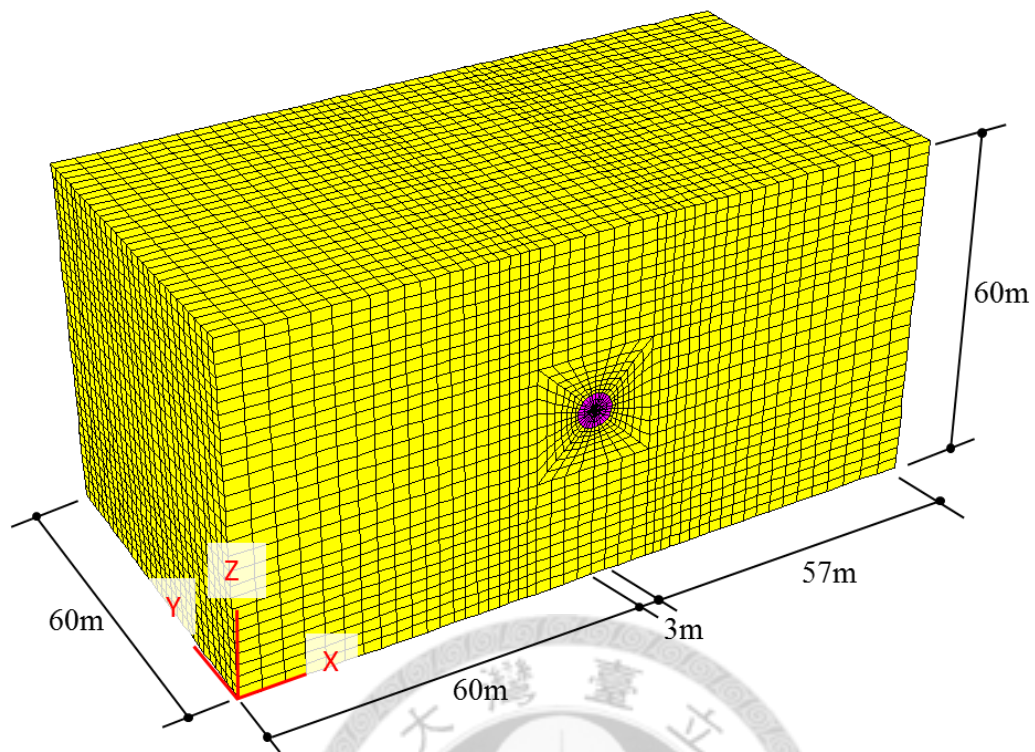
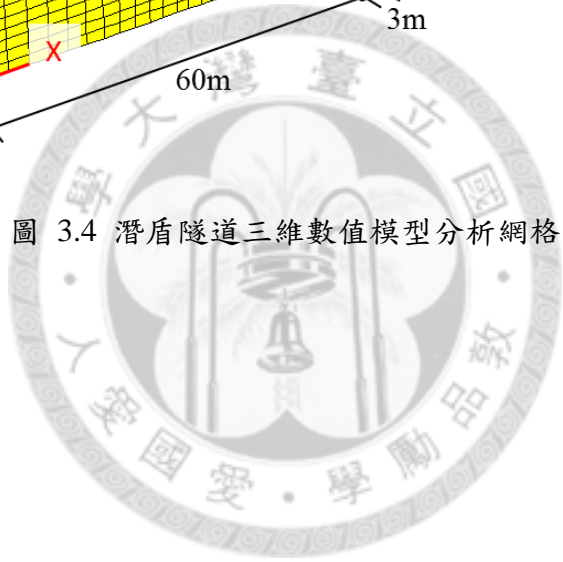


圖 3.4 潛盾隧道三維數值模型分析網格



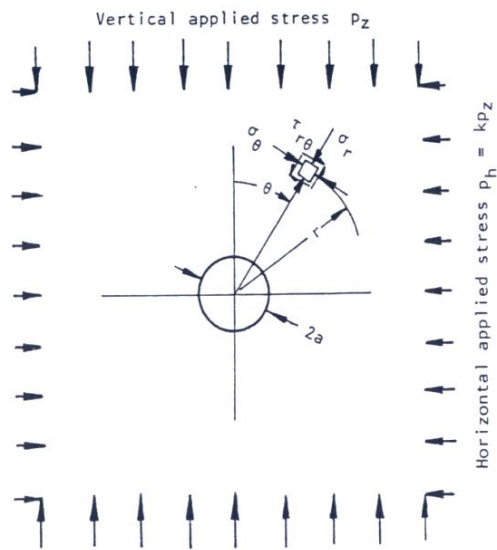


圖 3.5 彈性材料含圓形隧道承受雙軸應力作用示意圖(Kirsch, 1898)

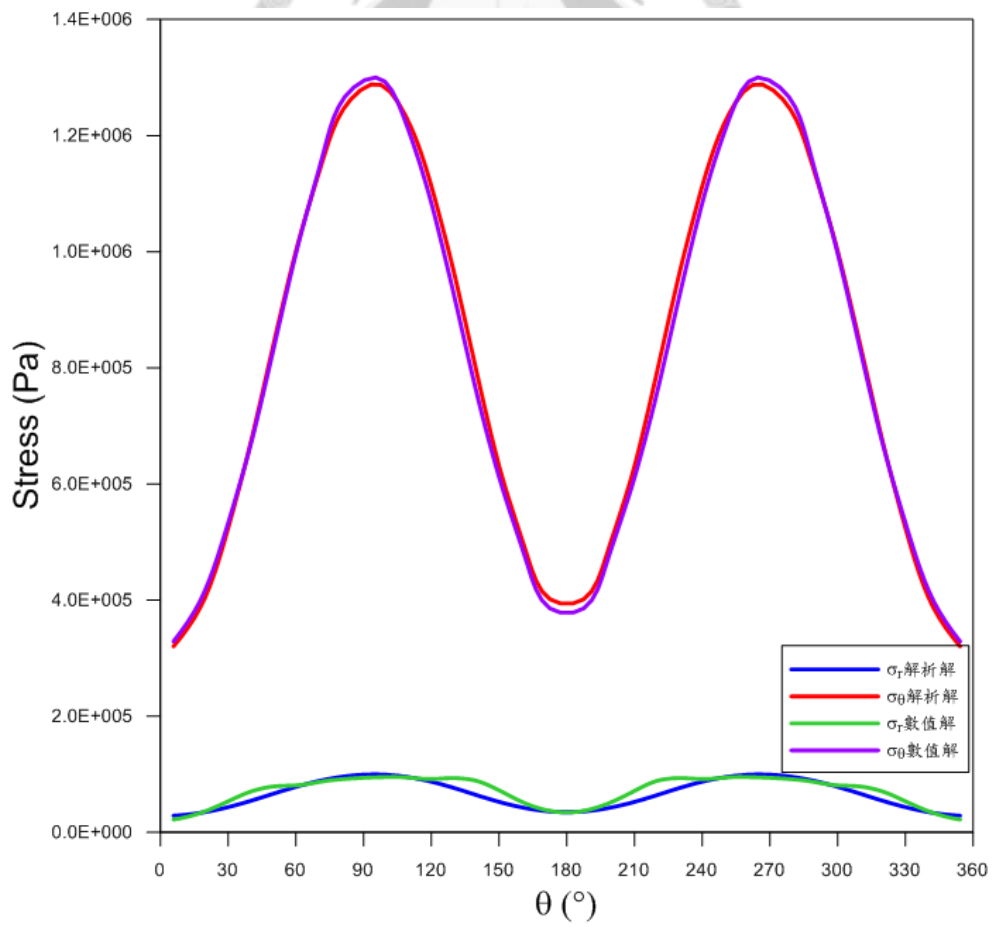


圖 3.6 圓形隧道開挖應力分佈數值分析結果與 Kirsch 解析解之比較

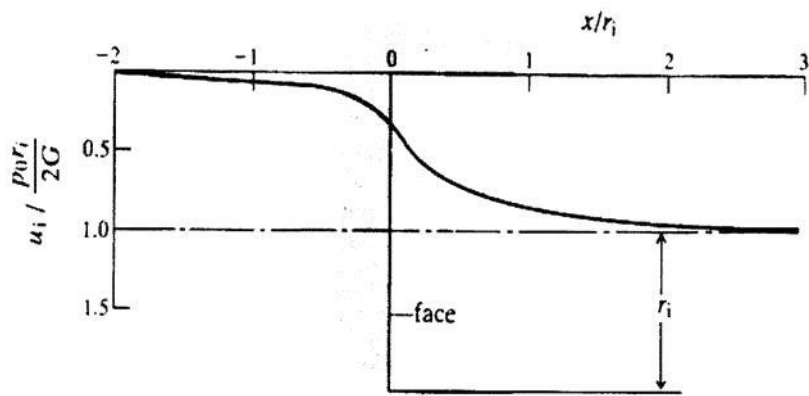


圖 3.7 隧道頂拱沉陷之前進面效應(Brady 與 Brown, 1985)

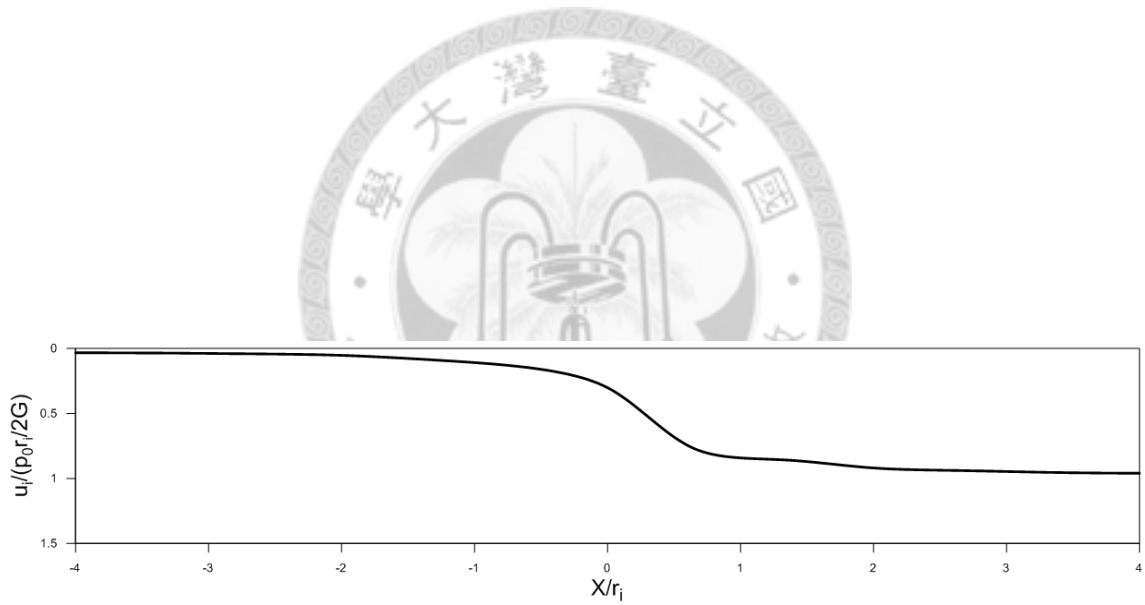
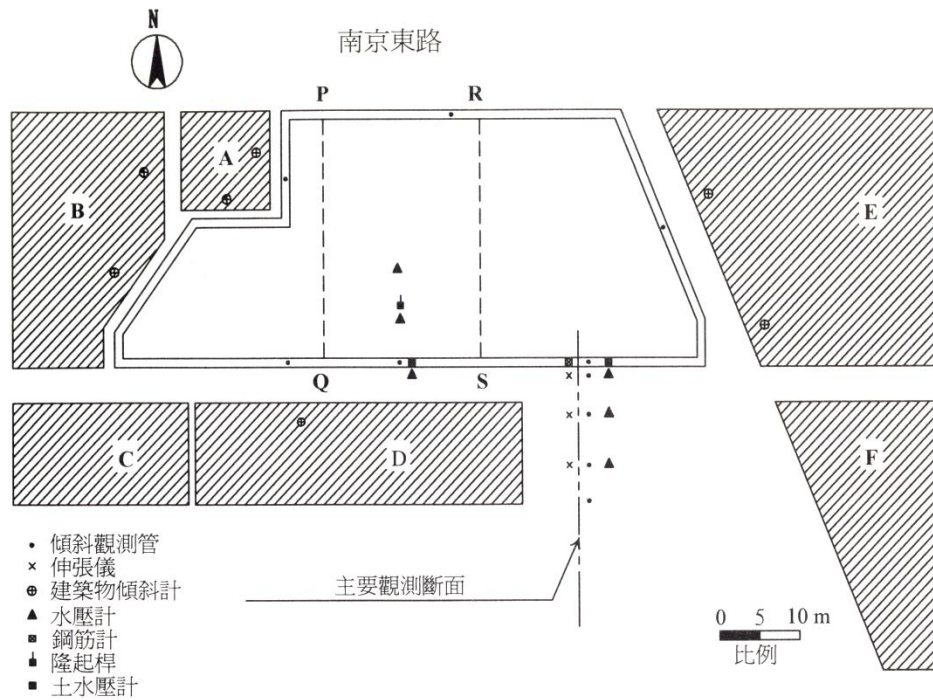
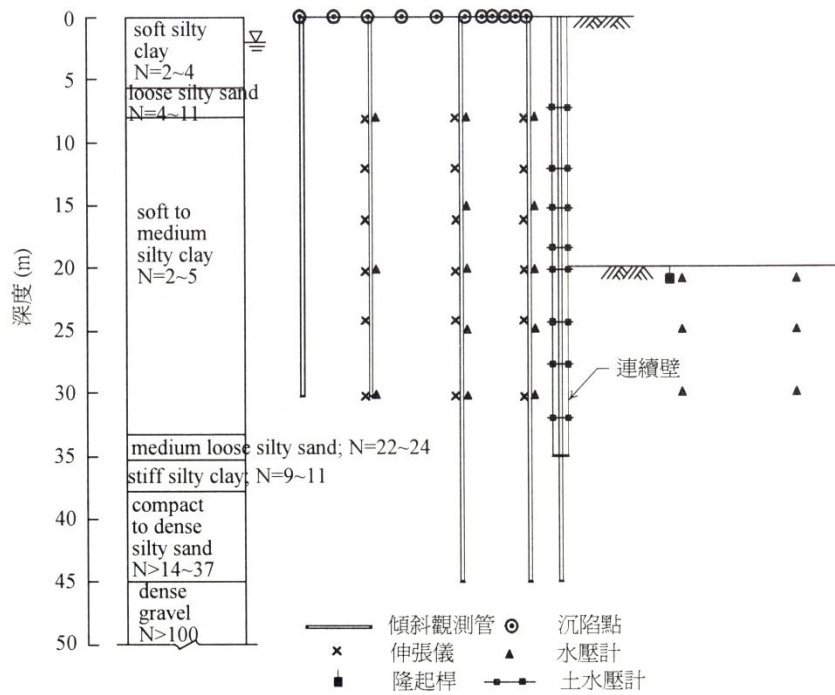


圖 3.8 圓形隧道開挖頂拱沉陷之前進面效應



(a)



(b)

圖 3.9 臺北國家企業中心開挖基地 (a)平面圖 (b)剖面圖(歐章煜，2002)

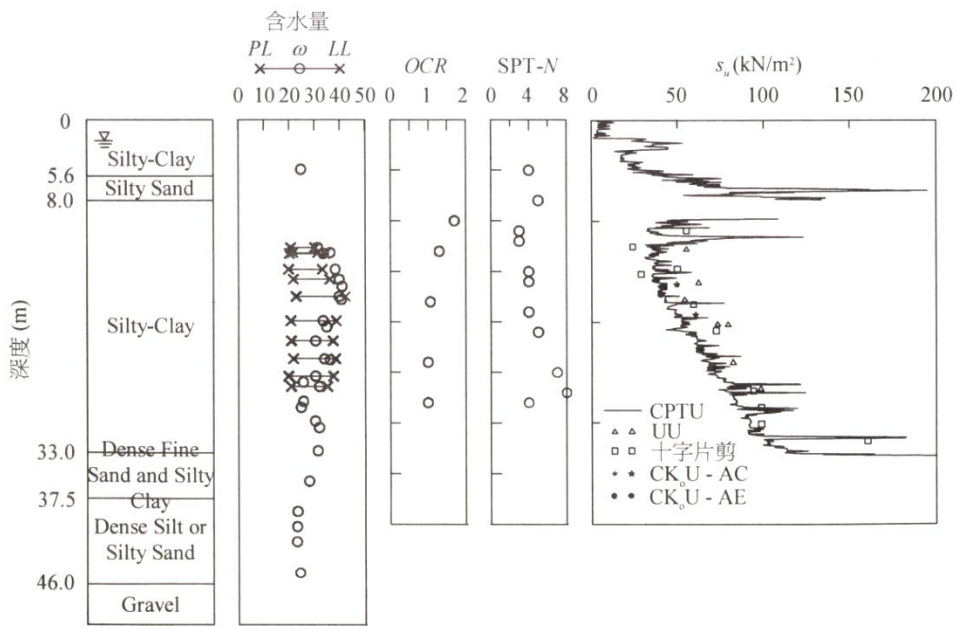


圖 3.10 臺北國家企業中心開挖基地土層分佈及土壤基本資料(歐章煜，2002)

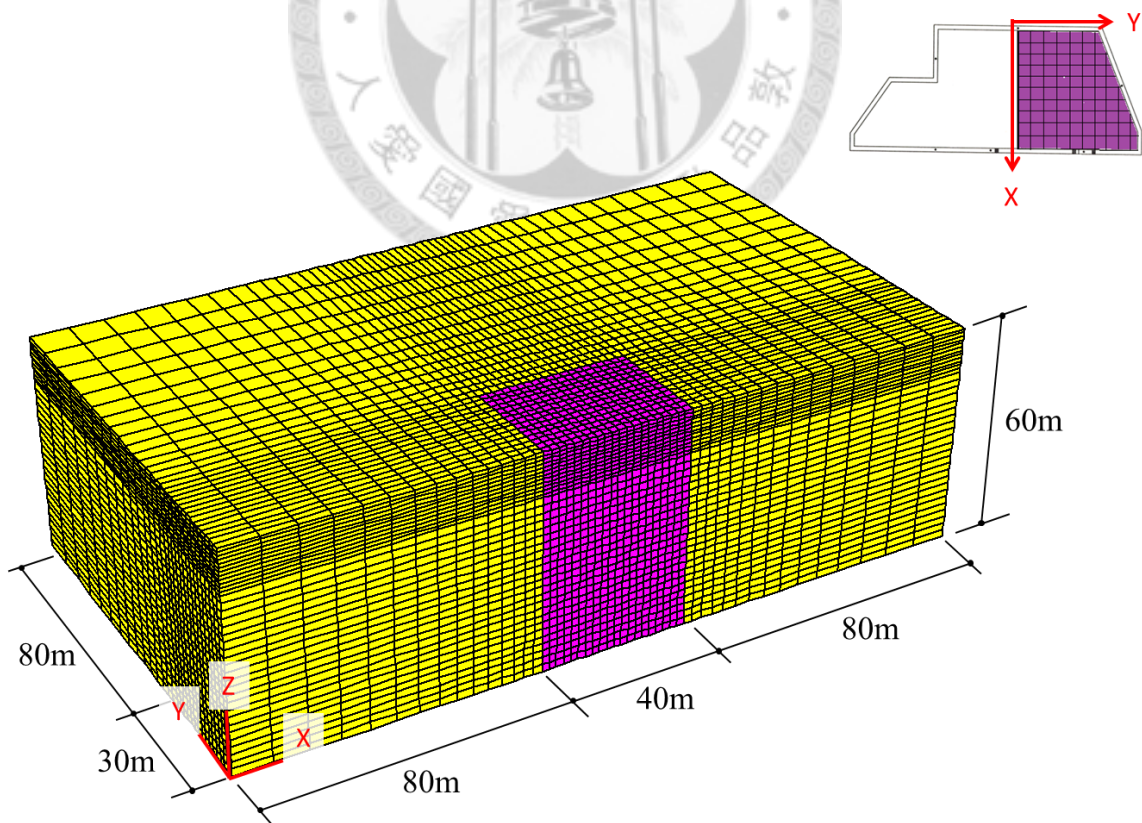


圖 3.11 臺北國家企業中心基地深開挖三維數值模型分析網格

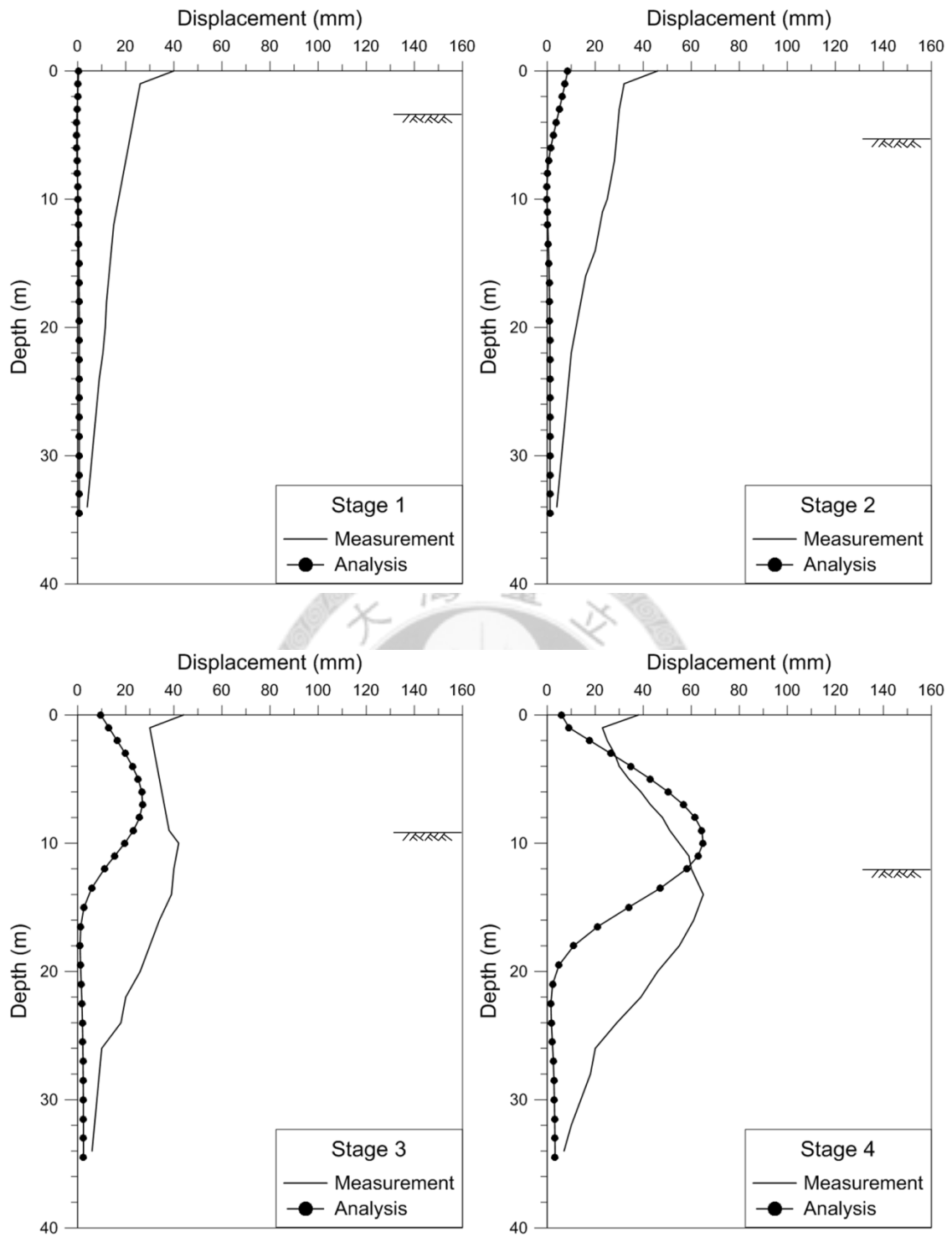


圖 3.12 臺北國家企業中心各開挖階段連續壁側向位移和數值分析結果

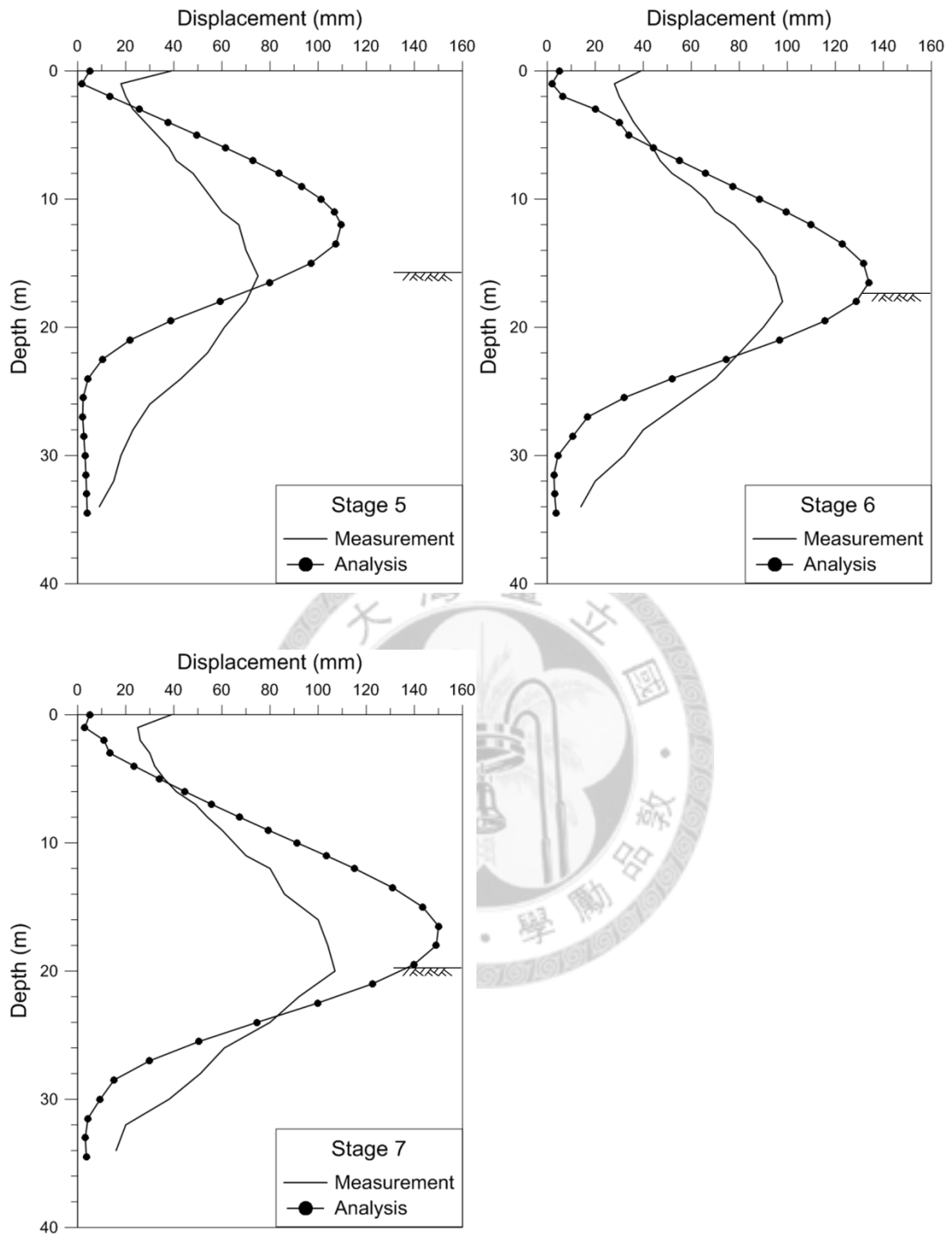


圖 3.12 臺北國家企業中心各開挖階段連續壁側向位移和數值分析結果 (續)

第四章 近接施工數值模型之應用與潛盾隧道三維變形特性

本章依據第三章所述之模擬程序，建立近接施工數值模型，以模擬潛盾隧道毗鄰近接施工擾動之情境。並將數值途徑所得之分析結果，透過隧道全段及特定剖面之觀點，以 in-plane 及 out-of-plane 之角度探討隧道之變位與應力增量狀況。

4.1 近接施工數值模型之建立

本節詳述近接施工數值模型之假設條件，包括相對位置、尺寸邊界，施工步驟等，並說明參數選取來源。

4.1.1 分析條件之假設

(一) 潛盾隧道概況

本文假設隧道位置於地表下 20.0m 處，隧道半徑為 3.0m，隧道長度為 200m。開挖過程採全斷面逐環開挖，支撐環片寬度為 4.0m。其餘假設如支撐時機及地下水位等，同 3.2.1 節所述。

(二) 深開挖概況

本文假設深開挖基地方向與隧道縱向平行，開挖尺寸為 40m×40m 呈一方形，待潛盾隧道鑽掘完成後再動工。擋土設施採厚度 0.6m，貫入深度 20.0m 之連續壁，開挖深度預計達 12.0m，分三個作業階段進行，降挖過程中均搭配型鋼支撐。深開挖連續壁與潛盾隧道外緣之淨距為 1.0 倍隧道直徑(6m)，其相對位置剖面圖如圖 4.1 所示。

(三) 數值網格與邊界條件

由前章已知邊界範圍之選定：潛盾隧道宜採 20 倍開挖半徑；深開挖可採 4 倍以上開挖深度。為降低本模型之邊界效應，水平(X)邊界以深開挖基地右側約 5 倍開挖深度、潛盾隧道左側 20 倍開挖半徑為界；水平(Y)邊界以深開挖基地前後兩側各 6.6 倍開挖深度為界；垂直(Z)邊界取 50m，整體分析模型為 170m×200m×50m，

網格示意圖如圖 4.2 所示。邊界條件設定方面，除地表面允許自由沉降，其餘五個面之法向方向為輓(roller)支承。

(四) 施工步驟模擬

進行數值分析時，本模型之施工步驟依前章所述，簡化劃分如下：

- A. 隧道開挖前初始應力計算。
- B. 逐環開挖圓形隧道(GL-20.0m)，step100(即隧道平均徑向收斂量達 8.2cm)時架設環片，直至潛盾隧道全線貫通。
- C. 將土體與隧道環片之位移歸零。
- D. 深開挖基地周圍之連續壁施作。
- E. 第一階段開挖(GL-4.0m)，架設第一層型鋼支撐(GL-2.0m)。
- F. 第二階段開挖(GL-8.0m)，架設第二層型鋼支撐(GL-6.0m)。
- G. 第三階段開挖(GL-12.0m)，架設第三層型鋼支撐(GL-10.0m)。

4.1.2 參數選用之依據

(一) 土壤力學參數

臺北捷運隧道主要分佈於臺北盆地內，臺北盆地主要由厚度 50 至 70m 之松山層，覆蓋於厚約 150m 之景美礫石層上。洪如江(1966)進一步將松山層分為六層粉質黏土及粉質砂土交錯沈積的土層，即由下往上數第一、三、五層為砂土層，第二、四、六層為黏土層，如表 4.1。松山層之分析模式採 Mohr-Coulomb 模式；底部景美層為一良好之基礎承載層，以 Elastic 模式分析，各層輸入之土壤參數如表 4.2 所示。

(二) 支撐環片參數

隧道環片之模擬與參數決定如 3.2.2 節所述，為考量電腦運算速度及記憶體容

量，本模型將 200m 長之隧道劃分成 50 個網格，因此環片寬度修正為 4.0m，相關參數同表 3.5 所示。

(三) 連續壁參數

連續壁之模擬與參數決定如 3.3.3 節所述，惟本近接施工數值模型之開挖深度為 12.0m，連續壁厚度以開挖深度的 1/20 為參考值，取 0.6m；壁體深度為 1.7 倍開挖深度，取 20.0m，相關輸入參數如表 4.3 所示。

(四) 開挖支撐參數

為簡化分析，深開挖的過程均使用平均間距 6.6m 之 H250×250×9×14 型鋼支撐，並統一設置於原開挖面下 2.0m 處，其模擬方式與參數決定如 3.3.3 節所述，相關參數整理如表 4.4 所示。

4.2 隧道全段分析結果

本節針對近接施工第一至第三開挖階段(以下簡稱 B1、B2 及 B3 階段)，引致隧道全段的變位現象包括淨空變形、位移等數值模擬結果做一探討。繼而藉由 Drucker-Prager 破壞準則分析隧道全段之破壞潛勢，並說明潛勢位置所在。

圖 4.3 為本研究使用的三維座標系，並規定座標軸均以大寫 X、Y、Z 表示，小寫 x、y、z 代表方向性，後續分析皆遵循此定義。圖中 X 軸正向指向隧道右側壁；Z 軸正向指向隧道頂拱；Y 軸正向即為隧道縱向或謂軸向。再來定義 in-plane 為 X-Z 平面，即一般二維平面分析之隧道橫剖面；out-of-plane 表示軸向面外，包含 Y 軸與 in-plane 呈垂直方向之平面。

4.2.1 隧道環片變形

(一) in-plane

現行監測方法主要量測隧道的淨空變位，即依據圖 2.2 中三點 CB 收斂釘之連線長度，來判斷隧道橫剖面之變形程度。為體現該法並簡化分析，本研究定義徑

向變形量為隧道左右側壁之 x 向位移差，如圖 4.4 所示。

圖 4.5 為近接施工不同開挖階段引致的隧道徑向變形量分佈，圖中橫軸為隧道縱深(Y)之距離，縱軸為徑向變形量。可發現徑向變形之分佈大致以 Y=100m 為軸呈左右對稱，愈接近深開挖工區其量值愈高，反之則愈低，最大值均出現於深開挖工區中心。在 B1 階段，徑向變形最大值約為 0.26mm，隨著開挖深度來到 B2 階段，徑向變形突破 1.0mm；至 B3 階段時，徑向變形最大值已達 1.97mm。

(二) out-of-plane

本研究定義縱向變形量為相鄰兩環片間之 20 個點 y 向位移平均值之差。圖 4.6 為近接施工不同開挖階段引致的隧道縱向變形量分佈，圖中橫軸為隧道縱深(Y)之距離，縱軸為縱向變形量。可發現其值極小，僅為 0.01mm 上下，推測原因是隧道環片於本模型中係採殼(Shell)元素剛性連接而成，加上隧道兩端之邊界條件為軸向束制，使得 y 向位移不易發生。

4.2.2 隧道環片中心位移

本研究定義隧道位移量為任一隧道環片上 20 個點於 x、y、z 各方向位移和之平均值，依方向性可進一步分為 x 向位移、y 向位移及 z 向位移，其值可視為該隧道環片中心之位移。其中 x 向位移、z 向位移屬於 in-plane；z 向位移屬於 out-of-plane。

(一) in-plane

圖 4.7 為近接施工不同開挖階段引致的隧道 x 向位移量，圖中橫軸為隧道縱深(Y)之距離，縱軸為隧道 x 向位移量。受深開挖解壓影響，整段隧道有朝深開挖工區側移的趨勢，愈靠近工區其 x 向位移量值愈高。B1 階段之 x 向位移最大值为 0.33mm，出現於 Y=100m，即深開挖工區中央處；至 B2 階段，x 向位移最大值升為 0.45mm，出現位置更動為 Y=108m，略往深開挖工區邊界移動；B3 階段時，x 向位移最大值略降為 0.44mm，位置變化至 Y=116m，距深開挖工區邊界 4m 處。

圖 4.8 為近接施工不同開挖階段引致的隧道 z 向位移量，圖中橫軸為隧道縱深(Y)之距離，縱軸為隧道 z 向位移量。同樣受深開挖解壓影響，鄰近工區前後之隧道段具明顯之上浮現象，B3 階段之上浮最大值達 2.80mm。其餘各階段之 z 向位移量最大值依序為 B1 之 1.32mm 及 B2 之 2.18mm，位置均出現於對稱點 Y=100m，即深開挖工區中央處。

圖中隧道兩端有愈開挖，沉陷量愈增之情況，最大沉陷量為 B3 階段 Y=180m 處之 0.33mm。推測沉陷發生之原因與數值模型結構元素設定有關，由於隧道環片在本模型中是以殼(Shell)元素剛性連接而成，並未設置接觸介面，因此當深開挖解壓造成隧道一端上浮時，另一端即呈剛體運動而下沉。

(二) out-of-plane

圖 4.9 為近接施工不同開挖階段引致的隧道 y 向位移量，圖中橫軸為隧道縱深(Y)之距離，縱軸為隧道 y 向位移量。可發現 y 向位移之分佈大致以 Y=100m 為軸呈左右反對稱，Y=0m 至 100m(稱為隧道前段)其值均為正，表示 Y 軸正向；而 Y=100m 至 200m(稱為隧道後段)其值均為負，表示 Y 軸負向。此謂隧道前、後段皆有朝向深開挖工區移動的趨勢，故其環片之縱向方向上應伴有拉伸及壓縮現象。

隧道前段之 y 向位移最大值及出現位置於各開挖階段亦有不同，如 B1 階段最大值为 0.13mm，出現於 Y=68m；B2 階段最大值为 0.20mm，出現於 Y=64m；B3 階段最大值为 0.13mm，出現於 Y=52m。至於隧道後段之 B1 階段最小值为 -0.11mm，位於 Y=136m；B2 階段最小值为 -0.17mm，位於 Y=140m；B3 階段最大值为 -0.1mm，位於 Y=152m。這顯示隨著開挖深度愈深，最大隧道 y 向位移的出現位置有逐漸遠離開挖工區中心之趨勢，其值先升後降。

4.2.3 應力比

本研究採用的隧道環片為抗壓強度 $f_c' = 450 \text{ kg/cm}^2$ 之混凝土環片，若假設混凝土抗張強度 f_t' 為抗壓強度 f_c' 之 1/10，則可透過式(2.5)、式(2.6)求出混凝土的 c 值

為 7.1(MPa)、 ϕ 值為 55° ，再藉由式(2.9)、式(2.10)可計算出 Drucker-Prager 破壞準則所需之強度參數 α 值為 -0.4337、 k 值為 6.469，其 $f(I_1, \sqrt{J_2})$ 破壞包絡線表示如下。

$$\sqrt{J_{2,f}} = -0.4337I_1 + 6.469 \quad (4.1)$$

由於本模型中之每一圈環片係由 40 個殼(Shell)元素構成，因此由 Shell 上的主應力 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 可計算出該 Shell 之應力不變量 I_1 及 $\sqrt{J_2}$ ，再依式(4.1)可求得不同 I_1 所對應之 $\sqrt{J_{2,f}}$ 。本研究遂定義 $\frac{\sqrt{J_2}}{\sqrt{J_{2,f}}}$ 為應力比，可用來評估隧道環片受近接施工影響而破壞之潛勢，其值愈高表示環片愈接近臨界破壞狀態，當應力比達 1.0 時，表示環片已破壞。

此外，每一環環片的 40 個 Shell 上均會產生一個應力比極大值(以下簡稱為應力比 $_{max}$)，其在環片上的出現角度可代表該環片最易發生破壞之處，本研究遂定義該角度為臨界破壞角。值得注意的是，若將數個環片之臨界破壞角做一連線，則可視為全段隧道最脆弱處之連線，以下稱為臨界破壞線。

圖 4.10 為近接施工不同開挖階段引致的隧道應力比 $_{max}$ 變化，圖中橫軸為隧道縱深(Y)之距離，為消除邊界效應只選擇 Y=20m 至 180m 之範圍，縱軸為隧道應力比 $_{max}$ ，圖例中的 Initial 代表潛盾隧道剛完工時的階段。可發現潛盾隧道剛完工時的應力比 $_{max}$ 普遍約為 0.33，於 B1 階段時隧道整段略升為 0.34；至 B2 階段開挖工區附近之隧道段應力比 $_{max}$ 明顯增為 0.38，而遠離開挖工區之隧道段變化甚小；當深開挖達 B3 階段時，最大應力比 $_{max}$ 約為 0.5，出現於開挖工區中心處，其值相較於 Initial 階段增幅為 51.5%，顯示開挖深度愈深，該處潛盾隧道所受之潛在破壞風險愈高。

圖 4.11 為近接施工不同開挖階段下的隧道臨界破壞角出現位置分佈，圖中橫軸為消除邊界效應後的隧道縱深(Y)之距離，縱軸為角度，角度起始自隧道頂拱，呈順時針方向旋轉。潛盾隧道剛完工時的臨界破壞角均出現於 112.5° ，隨著開挖

深度加深，鄰近開挖工區隧道段之角度變化最為劇烈，分佈情形大致以工區中心為軸左右對稱。B1 階段僅開挖工區範圍內之隧道段角度有變化，其臨界破壞角為 103.5° ，其餘隧道段皆同 Initial 階段維持 112.5° ；B2 階段時，開挖工區範圍內之隧道段，其臨界破壞角均降至 67.5° ，而開挖工區邊界附近之隧道段，其臨界破壞角由 112.5° 增為 247.5° ；至 B3 階段，工區中心處所對應隧道段之臨界破壞角為 13.5° ，且角度變化隨開挖深度持續向隧道兩端延伸。

整體而言，在開挖工區範圍內之隧道段，其環片臨界破壞角將隨著開挖深度加深，逐漸由 112.5° 降為 103.5° 、 67.5° 最終為 13.5° ，此範圍約為右側壁至頂拱，顯示此區域為開挖階段中最有可能破壞之處。

4.2.4 綜合討論

由前述的隧道全段分析結果可知，潛盾隧道受近接施工開挖影響，對應工區範圍內之隧道段上浮現象較水平側移來得明顯，隧道之淨空變位(徑向變形)亦隨著靠近開挖工區而增加，同時伴有隧道縱向位移之存在，惟其量值甚小，多發生於隧道上浮彎曲程度最高處。

於不同的開挖階段下，開挖工區範圍內之潛盾隧道變位亦有所變化，如圖 4.12 所示。隨著開挖深度加深，其值亦增的為隧道淨空變形量及上浮量，雖然本研究分析之隧道徑向變形量未超過規範所規定之 20mm ，但若再納入應力比之考量，則可看出隨著開挖深度加深，隧道全段之應力比 $_{max}$ 亦逐步上升。這說明近接施工之過程將引致環片應力漸趨於極限破壞強度，此現象尤以開挖工區範圍內之隧道段影響最高，若該段環片受力持續增加，終有環片降伏破壞之可能。

另由臨界破壞角隨開挖階段而變化之跡象顯示，環片最有可能之降伏位置是會變動的，並非一成不變。若再考慮數個環片連結而成的隧道臨界破壞線，則可說明潛盾隧道受近接施工影響引致的潛勢破壞位置係屬於三維空間分佈，並非僅為單一剖面上的特定角度。因此目前的監測方式多為二維相對座標量測，提供之預警程度有限，未來宜考慮三維絕對座標監測，方能使潛盾隧道之安全更有保障。

4.3 隧道特定剖面之變位與應力分析結果

由 4-2 節分析結果可知：深開挖工區範圍內之隧道段有較大側移量、較大上浮量，甚至具最大徑向變形。因此一般二維分析多取開挖工區中心處之隧道剖面進行探討，但該剖面所對應之應力增量是否亦最大？令人存疑。因此，在考慮對稱性的前提下，本節挑選 B3 階段，隧道變形彎折明顯之四處剖面，分別為縱深 40m、60m、80m 及 100m(以下簡稱為 Y=40m、Y=60m、Y=80m 及 Y=100m)，針對其相較於 Initial 階段之變位、軸力、剪力、彎矩等增量做一探討。

4.3.1 變位增量

(一) in-plane

圖 4.13 為不同縱深隧道斷面之 in-plane 變位增量分佈，為求視圖方便乃將變位增量放大 250 倍，圖中橫軸為水平 X 方向，縱軸為垂直 Z 方向。可發現 Y=40m 處之隧道幾無變化，仍維持近似真圓；Y=60m 處略受影響，仰拱上浮約 0.5mm，其餘變化不大；Y=80m 隧道剖面始有明顯變化，頂拱及仰拱均呈向上位移；Y=100m 隧道剖面變位增量最劇，顯示整環多處上浮並向右側偏移，略呈逆時針旋轉趨勢。整體而言，Y=80m 與 Y=100m 剖面呈現不對稱變形，推測原因係與開挖引致隧道承受偏壓有關。

(二) out-of-plane

圖 4.14 為不同隧道縱深斷面之 out-of-plane 變位增量分佈，正值代表方向為 Y 軸正向，負值方向為 Y 軸負向。Y=40m 隧道全環增量為正，表示該剖面是朝向開挖工區移動，而仰拱的移動趨勢較頂拱稍大；Y=60m 仰拱依舊朝向開挖工區移動，其值益彰，惟隧道頂拱 $\theta=342^\circ$ 至 36° 附近，略呈遠離開挖工區之勢；至 Y=80m 頂拱增量 0.33mm、仰拱增量 -0.14mm 其兩者變位增量方向不一致，應有壓縮拉伸現象產生；Y=100m 隧道增量方向恢復一致，其值均勻分佈約為 0.03mm。

4.3.2 彎矩增量

(一) in-plane

圖 4.15 為不同剖面之 in-plane 彎矩增量分佈。Y=40m 與 Y=60m 之增量極少，變化不甚明顯；Y=80m 始有對稱分佈之趨勢，正彎矩極值為 16.9kN-m 出現於 $\theta=22.5^\circ$ ，負彎矩極值為 -18.14kN-m 出現於 $\theta=67.5^\circ$ 。Y=100m 之正彎矩增量極值為 43.4kN-m 出現於 $\theta=13.5^\circ$ ，負彎矩增量極值為 -38.23kN-m 出現於 $\theta=58.5^\circ$ 。其中 Y=80m 與 Y=100m 之彎矩增量分佈情形相似，均以 $\theta=67.5^\circ$ 附近為對稱軸呈蝴蝶狀分佈，其正負彎矩交界處為 $\theta=31.5^\circ$ 、 112.5° 、 $\theta=211.5^\circ$ 及 $\theta=319.5^\circ$ 附近。

(二) out-of-plane

圖 4.16 為不同剖面之 out-of-plane 彎矩增量分佈，同樣地 Y=40m 與 Y=60m 之增量變化微乎其微；Y=80m 正彎矩極值為 3.2kN-m 出現於 $\theta=22.5^\circ$ ，負彎矩極值為 -3.4kN-m 出現於 $\theta=67.5^\circ$ 。Y=100m 之正彎矩增量極值為 8.8kN-m 出現於 $\theta=13.5^\circ$ ，負彎矩增量極值為 -8.1kN-m 出現於 $\theta=58.5^\circ$ 。而 Y=80m 及 Y=100m 具明顯對稱分佈之趨勢。整體而言，本圖之彎矩增量分佈情形相似於圖 4.15，惟量值較低。

4.3.3 軸力增量

首先說明軸力增量之物理意義：若 Shell 上之軸力增量為正，表示 Shell 軸力於開挖前後之變化量為正值，即該環片具有受張趨勢；反之，則該環片具有受壓趨勢。

(一) in-plane

圖 4.17 為不同剖面之 in-plane 軸力增量分佈。Y=40m 及 Y=60m 之軸力增量不高，普遍少於 8kN；Y=80m 之分佈情形顯示隧道大致上受壓，軸力增量極值為 $\theta=58.5^\circ$ 的 -92.05kN；Y=100m 僅於右側壁下方 $\theta=130.5^\circ$ 附近承受張力，其他部份

均受壓，軸力增量極值亦位於 $\theta=58.5^\circ$ 達 -242.05kN 。

(二) out-of-plane

圖 4.18 為不同剖面之 out-of-plane 軸力增量分佈。Y=40m 上半圓之軸力增量變化較下半圓來得小，且其值異號，表示該剖面上半圓受壓較小，而下半圓受拉甚大；Y=60m 上半圓受壓、下半圓受拉的趨勢益加顯著，承拉力最大的地方為仰拱；至 Y=80m 處時，前述的現象均消失，轉為環片全環均受壓，受壓趨勢較大的地方於 $\theta=49.5^\circ$ 與 $\theta=229.5^\circ$ 附近；Y=100m 上半圓轉而承受張力，下半圓承受的壓力漸大，軸力增量極值達 -112.5kN 。

4.3.4 剪力增量

由於實務上隧道每環是由數個 A 型環片、2 個 B 型環片及 1 個 K 型環片分割而成，因此在本模型中，剪力增量的部份，in-plane 指的是片與片之間；而 out-of-plane 代表環與環之間。

(一) in-plane

圖 4.19 為不同剖面之 in-plane 剪力增量分佈。Y=40m 增量變化偏小；Y=60m 漸有變化產生，剪力增量約以 $\theta=45^\circ$ 為軸對稱分佈；至 Y=80m 處時，剪力增量約以 $\theta=37.5^\circ$ 為軸對稱分佈，正剪力增量極值為 16kN 出現於 $\theta=112.5^\circ$ ，負剪力增量極值為 -22.2kN 出現於 $\theta=40.5^\circ$ ；Y=100m 大致以 $\theta=30^\circ$ 為軸對稱分佈，剪力增量之變化較 Y=80m 來得明顯，正剪力增量極值為 32kN 出現於 $\theta=112.5^\circ$ ，負剪力增量極值為 -63.5kN 出現於 $\theta=31.5^\circ$ 。

(二) out-of-plane

圖 4.20 為不同剖面之 out-of-plane 剪力增量分佈。Y=40m 增量變化極小，其值近似於 Initial 狀態；Y=60m 有些許變化產生，惟增量極值均未達 0.5kN ；至 Y=80m 處變化劇烈，剪力增量約以 $\theta=67.5^\circ$ 為軸對稱分佈，正剪力增量極值為 1.35kN 出現於 $\theta=13.5^\circ$ ，負剪力增量極值為 -1.52kN 出現於 $\theta=58.5^\circ$ ；Y=100m 剪力增量變

化幅度減弱，正剪力增量極值降為 0.35kN 出現於 $\theta=13.5^\circ$ ，負剪力增量極值降為 -0.36kN 出現於 $\theta=40.5^\circ$ 。

4.3.5 綜合討論

依據前述之特定剖面變位及應力分析結果可知，無論是變位、彎矩、軸力及剪力等增量，由 in-plane 或 out-of-plane 進行分析皆具有一定的差異，此差異可能反應在環片周圍的分佈情況或其量值大小方面，以下加以說明。

(一) 變位增量

就隧道剖面變位增量而言，in-plane 分析時可發現愈靠近開挖工區中心之剖面，其變位增量量值愈大，由分佈情況顯示剖面承受較大的向上及向右變形；out-of-plane 分析時，變位增量量值最高者為開挖工區邊界處之剖面，其分佈情況顯示頂拱及仰拱具有縱向位移不同步的現象，環片可能產生拉伸或壓縮。

(二) 彎矩增量

就隧道彎矩增量而言，in-plane 分析及 out-of-plane 分析僅於量值上有明顯之差異，in-plane 分析所得之彎矩增量較大，而 out-of-plane 分析所得之彎矩增量較小。彎矩增量分佈情況於兩者皆為一致，且愈靠近開挖工區中心，隧道所受彎矩增量愈高。

(三) 軸力增量

就隧道軸力增量而言，in-plane 分析時，愈靠近開挖工區中心之剖面，其軸力增量量值愈大，由分佈情況顯示隧道主要承受壓力，僅在右側壁下方受輕微的張力；out-of-plane 分析可發現，隧道剖面於縱向上的軸力增量隨著愈靠近開挖工區，其受力方向有明顯的轉折。遠離開挖工區的隧道剖面是頂拱受壓、仰拱受張；爾後頂拱受壓趨勢漸減、仰拱受張趨勢亦減弱；當隧道剖面移至開挖工區中心時，頂拱已受張、仰拱受壓。顯示近接施工的過程中，隧道縱向上的軸力變化應與縱向位移有所關聯。

(四) 剪力增量

就隧道剪力增量而言，in-plane 分析所得之剪力增量量值較大，以開挖工區中心處之隧道剖面變化最為劇烈；而 out-of-plane 分析所得之剪力增量分佈情況類似於彎矩增量，但其量值極小，惟變化劇烈處出現於開挖工區邊界之隧道剖面。

整體來說，若以 in-plane 分析，則隧道影響程度較大者多為開挖工區中心附近的隧道段，即愈接近開挖工區中心，隧道結構愈危險；若以 out-of-plane 分析，則隧道主要影響範圍將可能出現於在開挖工區前後，並非集中於開挖工區中心。



表 4.1 臺北盆地組成物質垂直分佈概況

層次		厚度(m)		土壤描述
表土沈積		1-6		黃棕色黏土
松山層	第六次層	2-8	40-70	灰黑色黏土質粉土
	第五次層	2-20		灰色粉土質細砂土
	第四次層	6-29		灰色粉土質黏土
	第三次層	0-19		灰色中等緊密粉土質細砂
	第二次層	0-19		灰色粉土質黏土
	第一次層	0-15		中等緊密至緊密砂
景美層		0-140		黃棕色卵礫石
新莊層		0-125		灰色至黃棕色砂質黏土
第三紀沈積岩				

表 4.2 近接施工數值模型之土層參數

深度(m)	土壤類型	K (MPa)	G (MPa)	c (KPa)	ϕ
0-4	CL	25.0	5.4	8.0	0.0
4-10	SM	46.7	21.5	0.0	25.0
10-14	CL	45.0	9.6	10.0	0.0
14-24	SM	70.0	32.3	0.0	25.0
24-40	CL	60.0	12.9	11.0	0.0
40-46	SM	116.7	53.9	0.0	25.0
46-50	GM	115.6	116.7	-	-

表 4.3 連續壁參數

密度 ρ (Kg/m ³)	2400
彈性模數 E (GPa)	16.3
波松比 ν	0.2
厚度 t (m)	0.6

表 4.4 開挖支撐參數

彈性模數 E (GPa)	100.0
波松比 ν	0.3
橫截面積 A (m ²)	0.0092
y 軸慣性矩 I_y (10 ⁻⁴ m ⁴)	1.08
z 軸慣性矩 I_z (10 ⁻⁴ m ⁴)	0.36
極慣性矩 J (10 ⁻⁴ m ⁴)	1.45

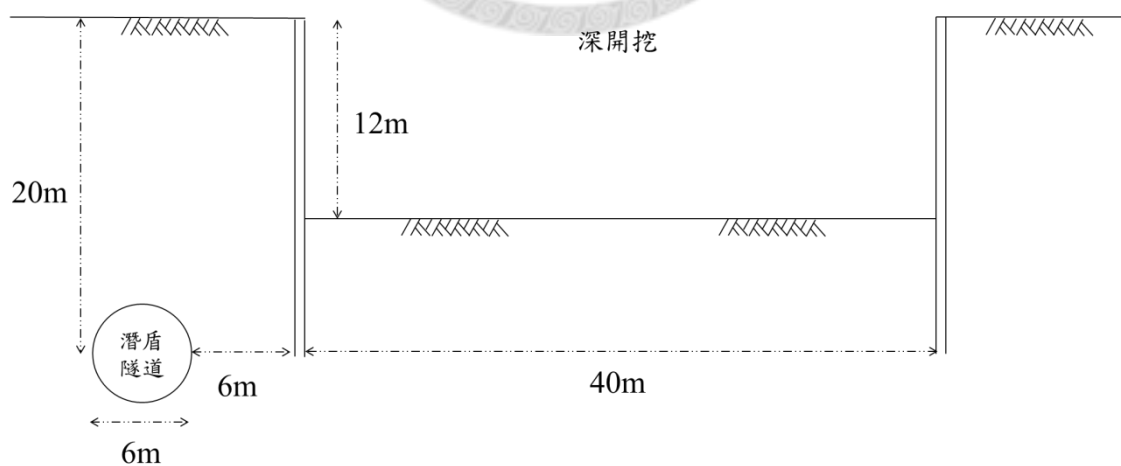


圖 4.1 深開挖與潛盾隧道之相對位置剖面圖

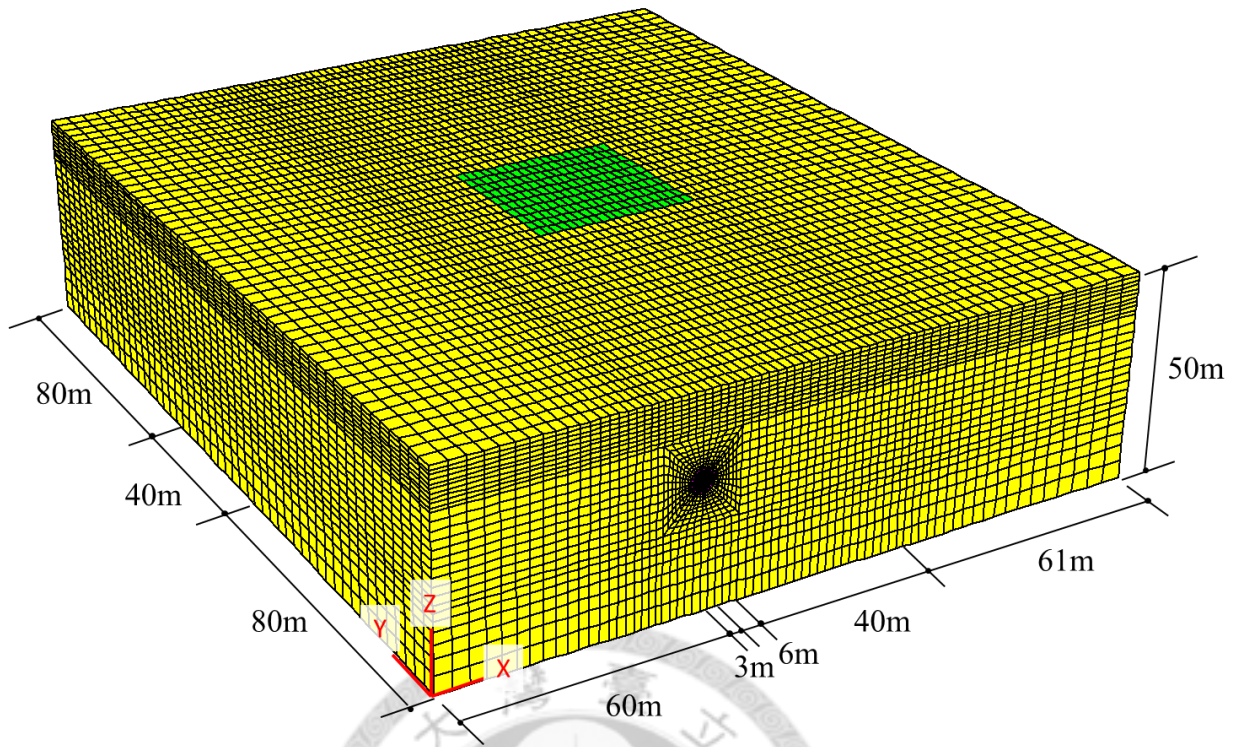


圖 4.2 近接施工三維數值模型分析網格

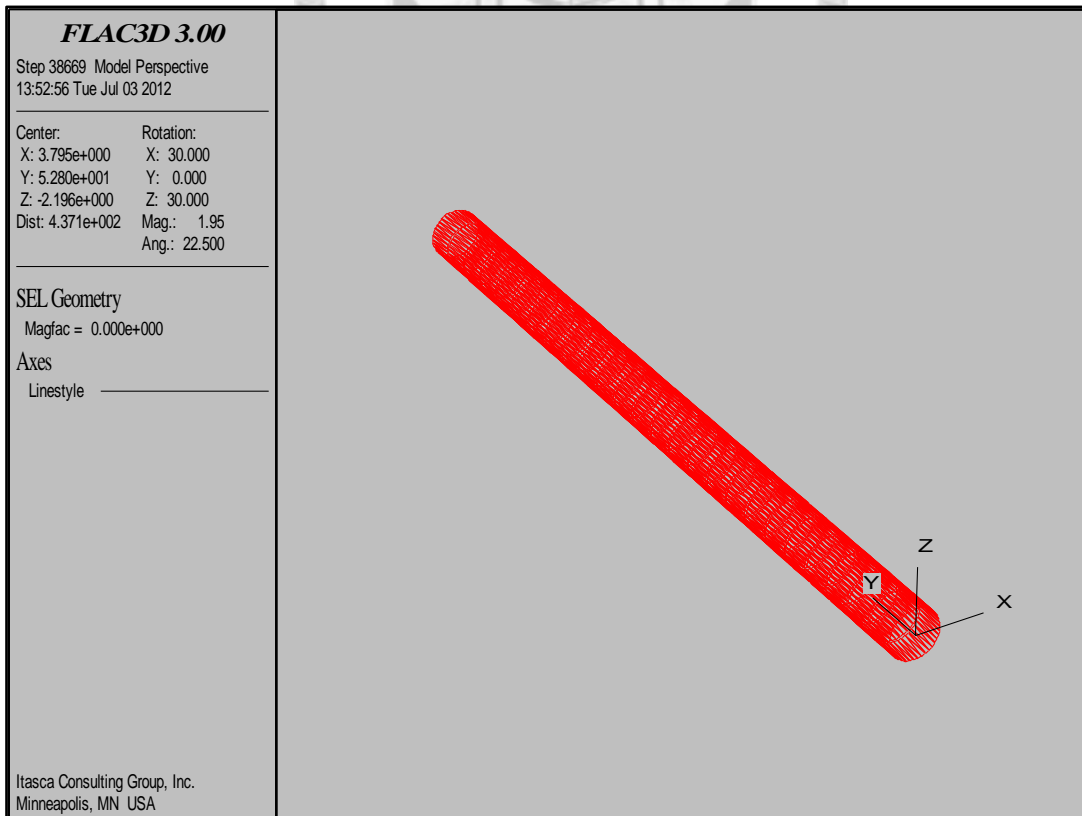


圖 4.3 本研究使用之三維座標系

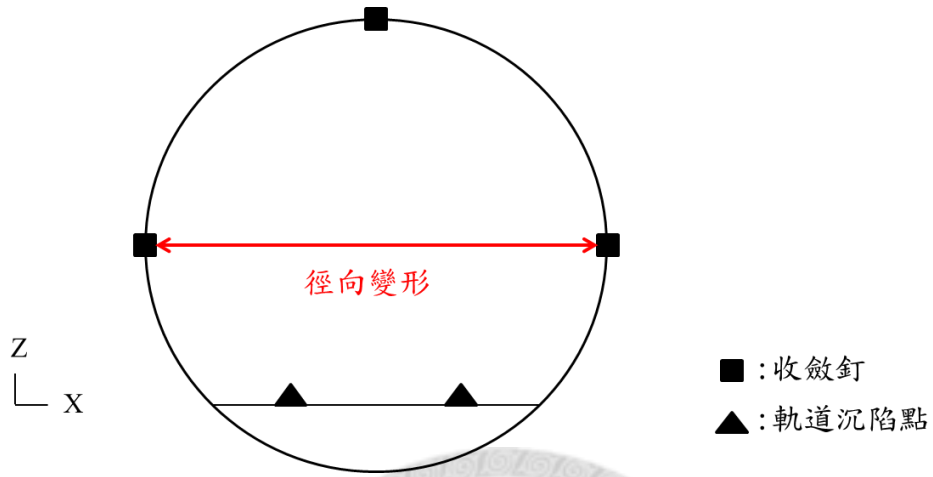


圖 4.4 徑向變形之定義

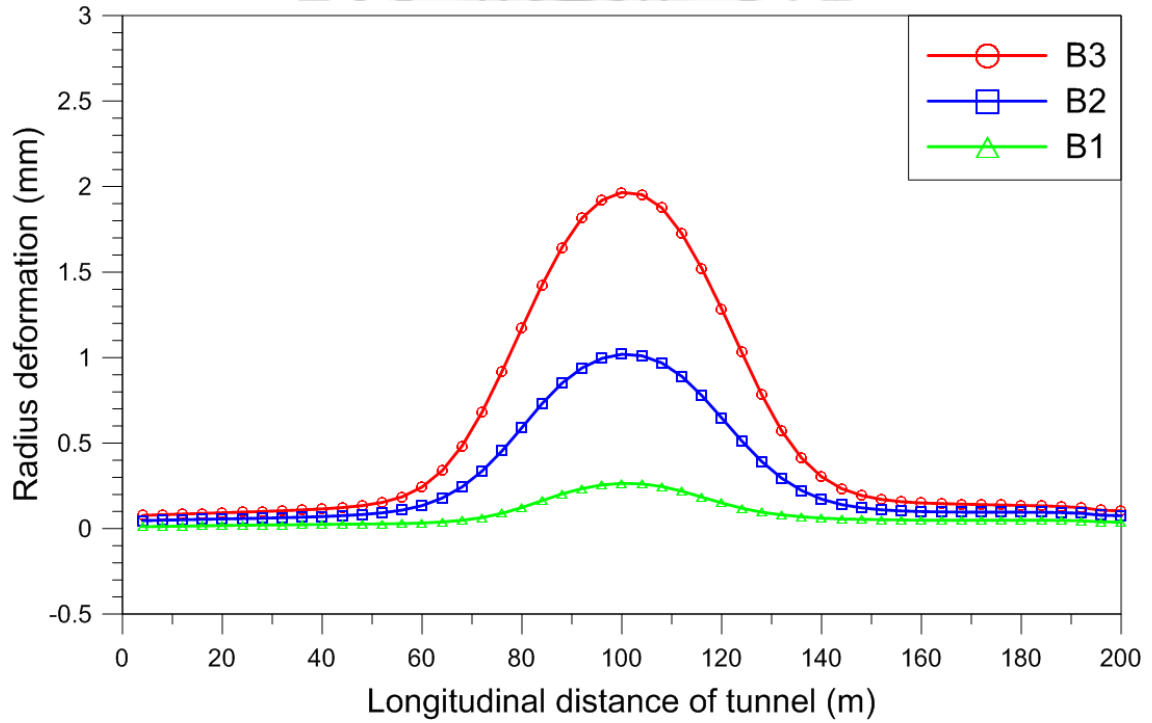


圖 4.5 不同開挖階段引致的隧道徑向變形量分佈

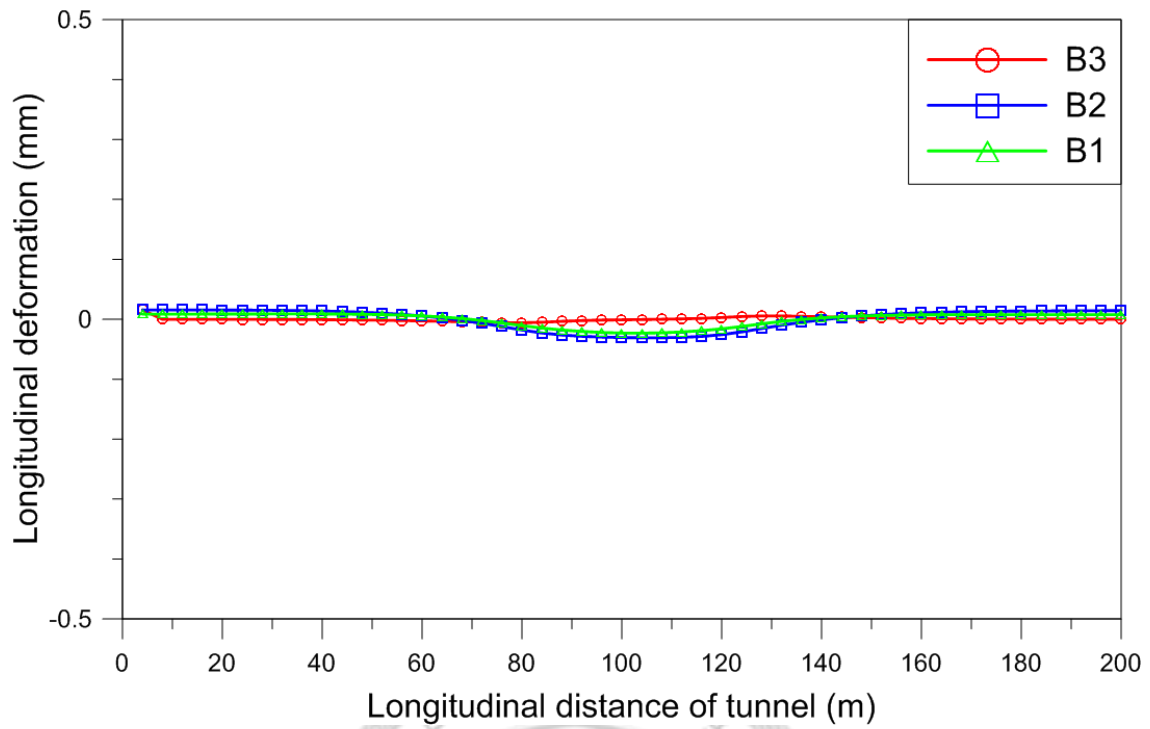


圖 4.6 不同開挖階段引致的隧道縱向變形量分佈

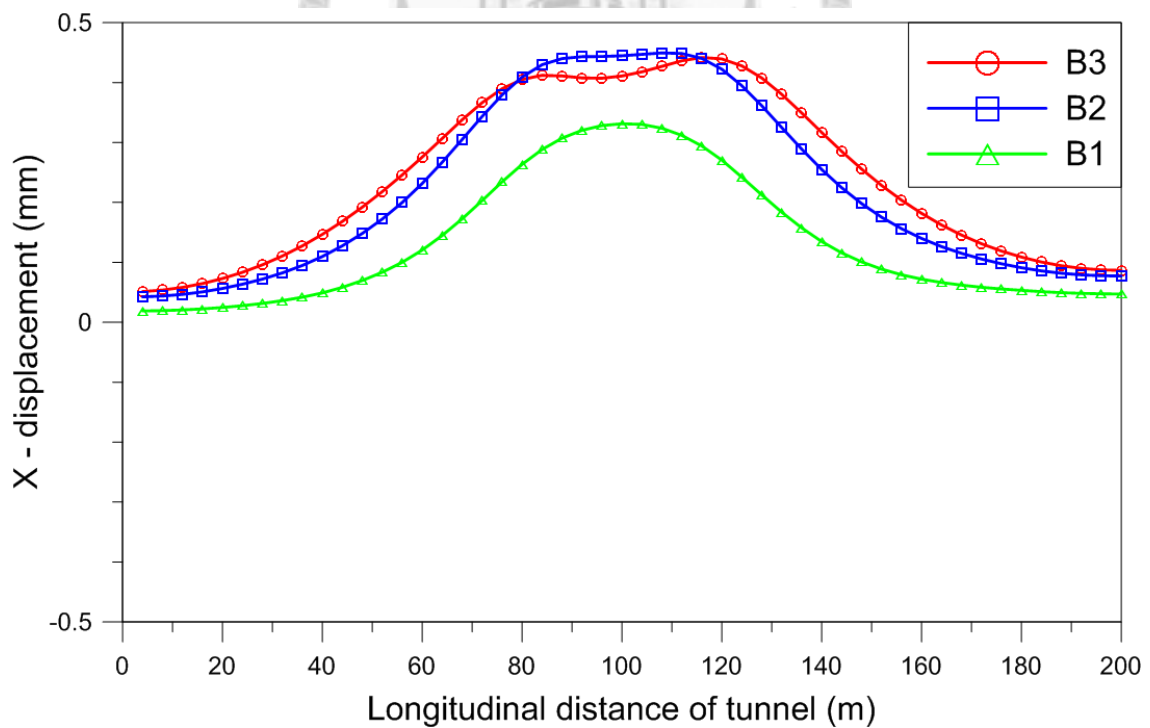


圖 4.7 不同開挖階段引致的隧道 x 向位移量分佈

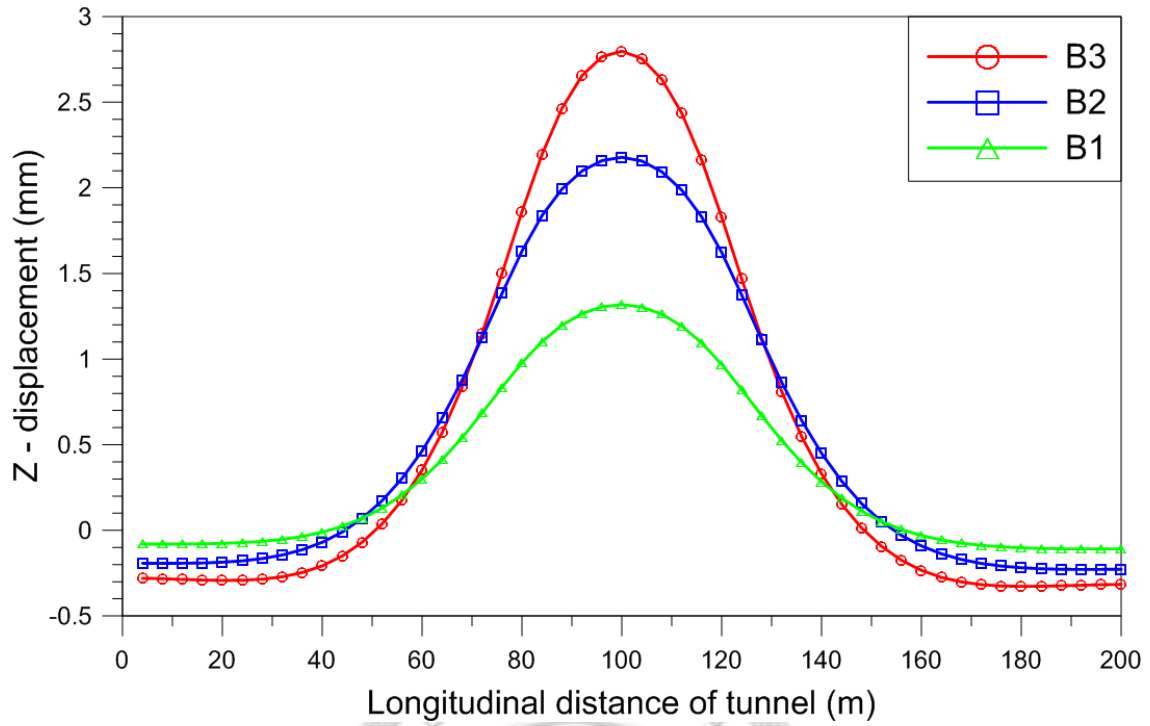


圖 4.8 不同開挖階段引致的隧道 z 向位移量分佈

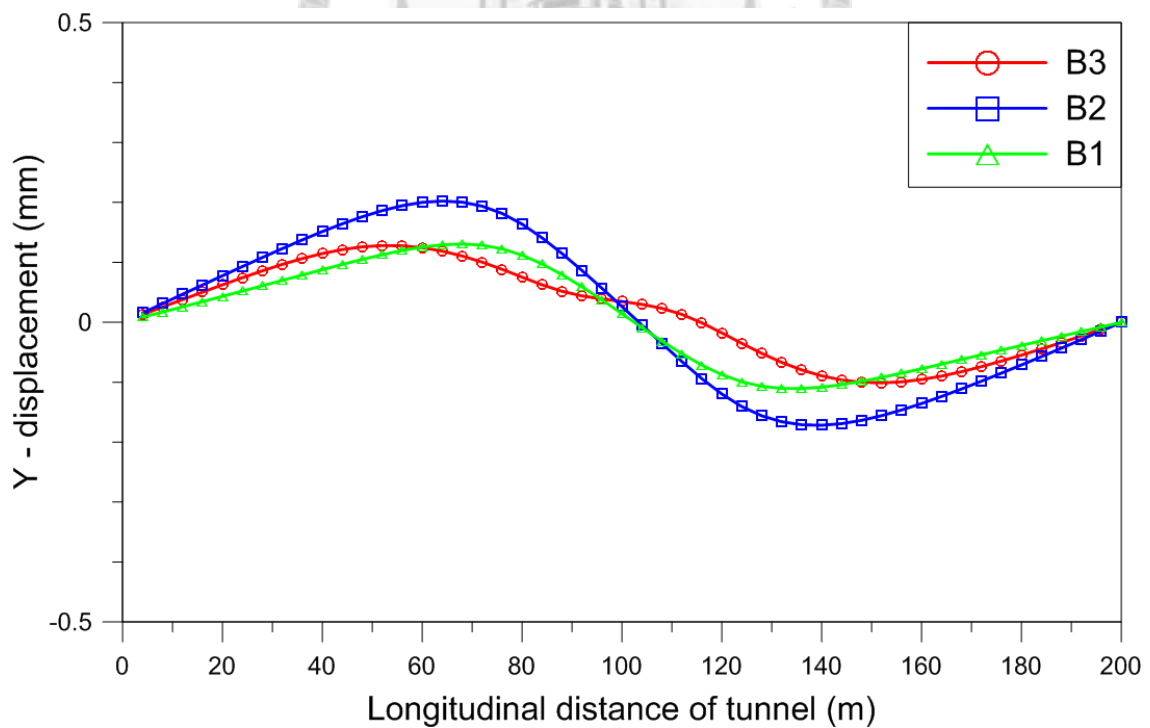


圖 4.9 不同開挖階段引致的隧道 y 向位移量分佈

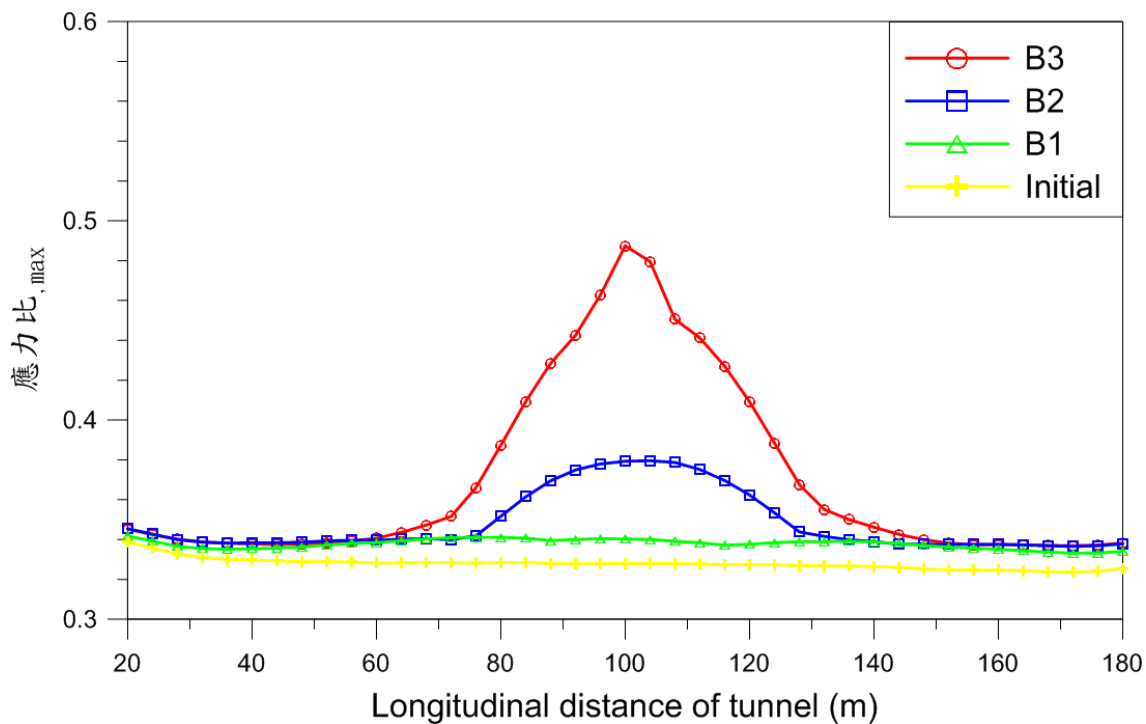


圖 4.10 不同開挖階段引致的隧道應力比, max 變化

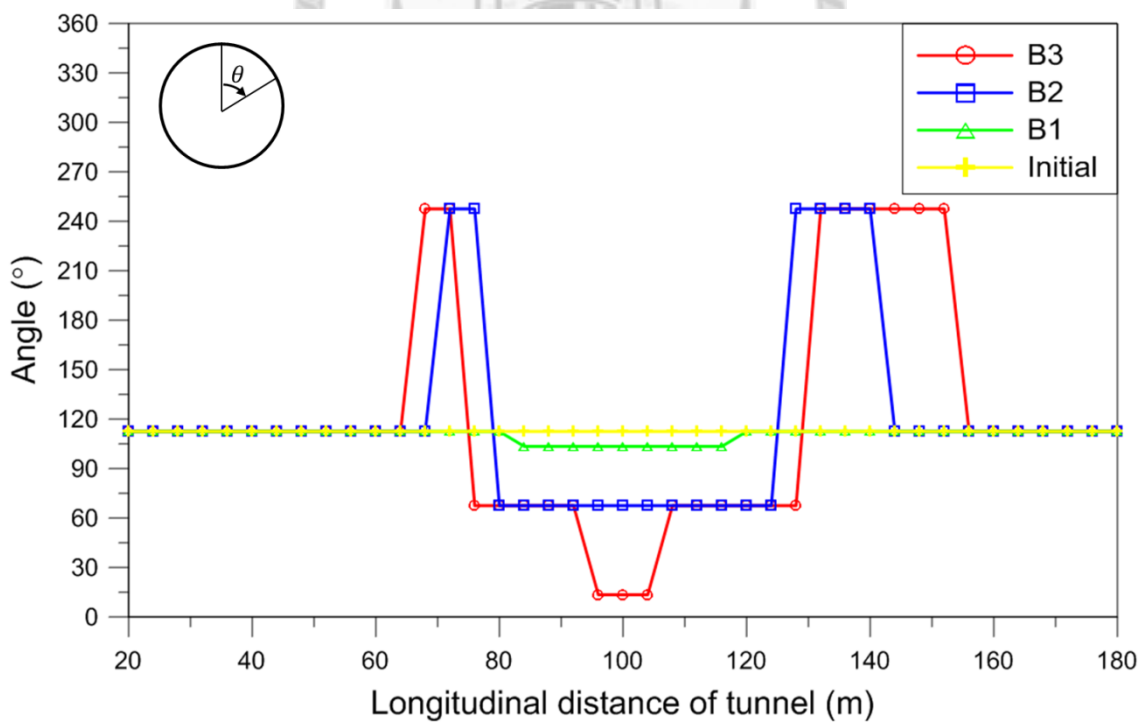


圖 4.11 不同開挖階段引致的隧道臨界破壞角出現位置分佈

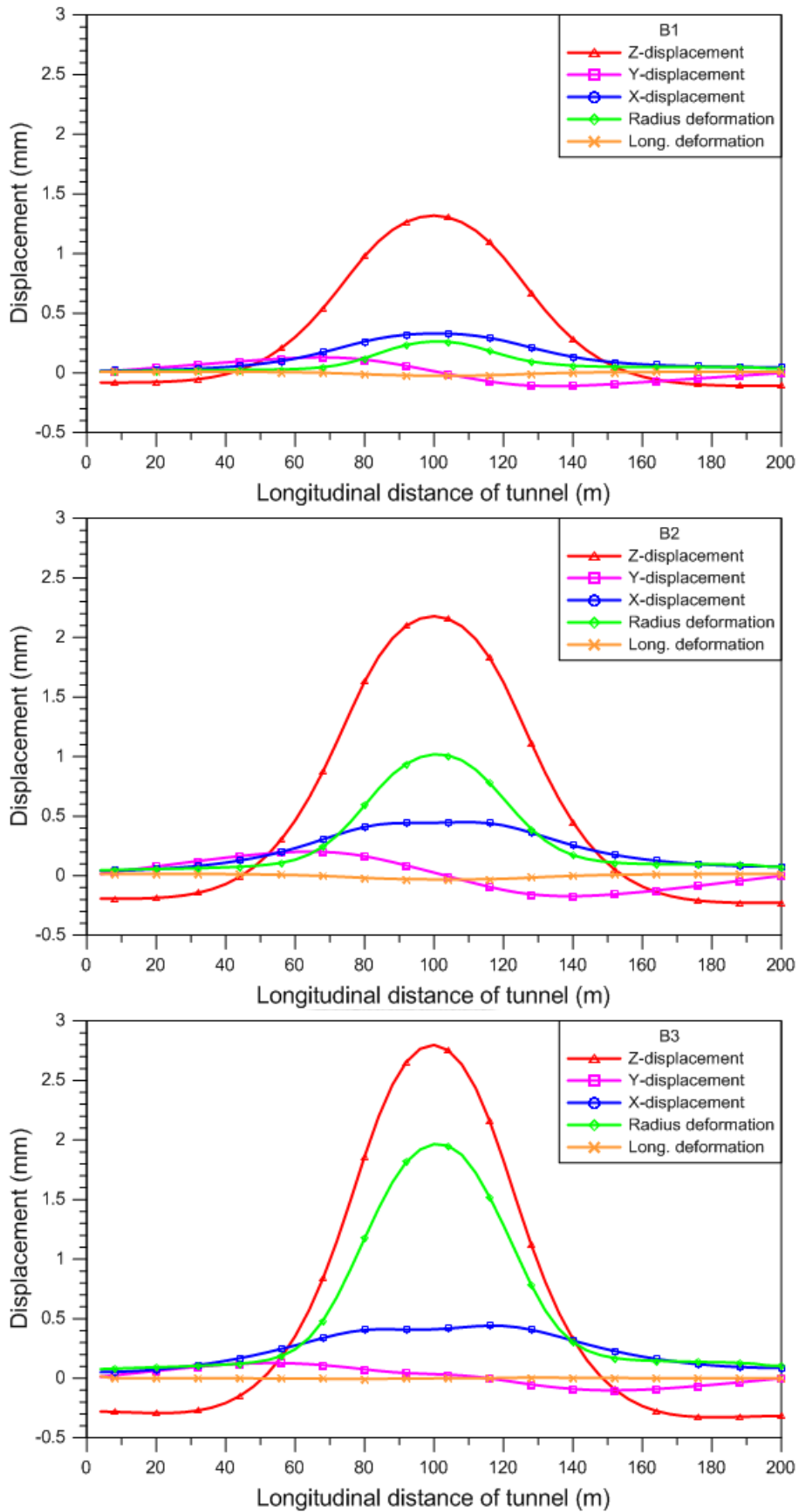


圖 4.12 不同開挖階段引致的隧道位移、變形一覽圖

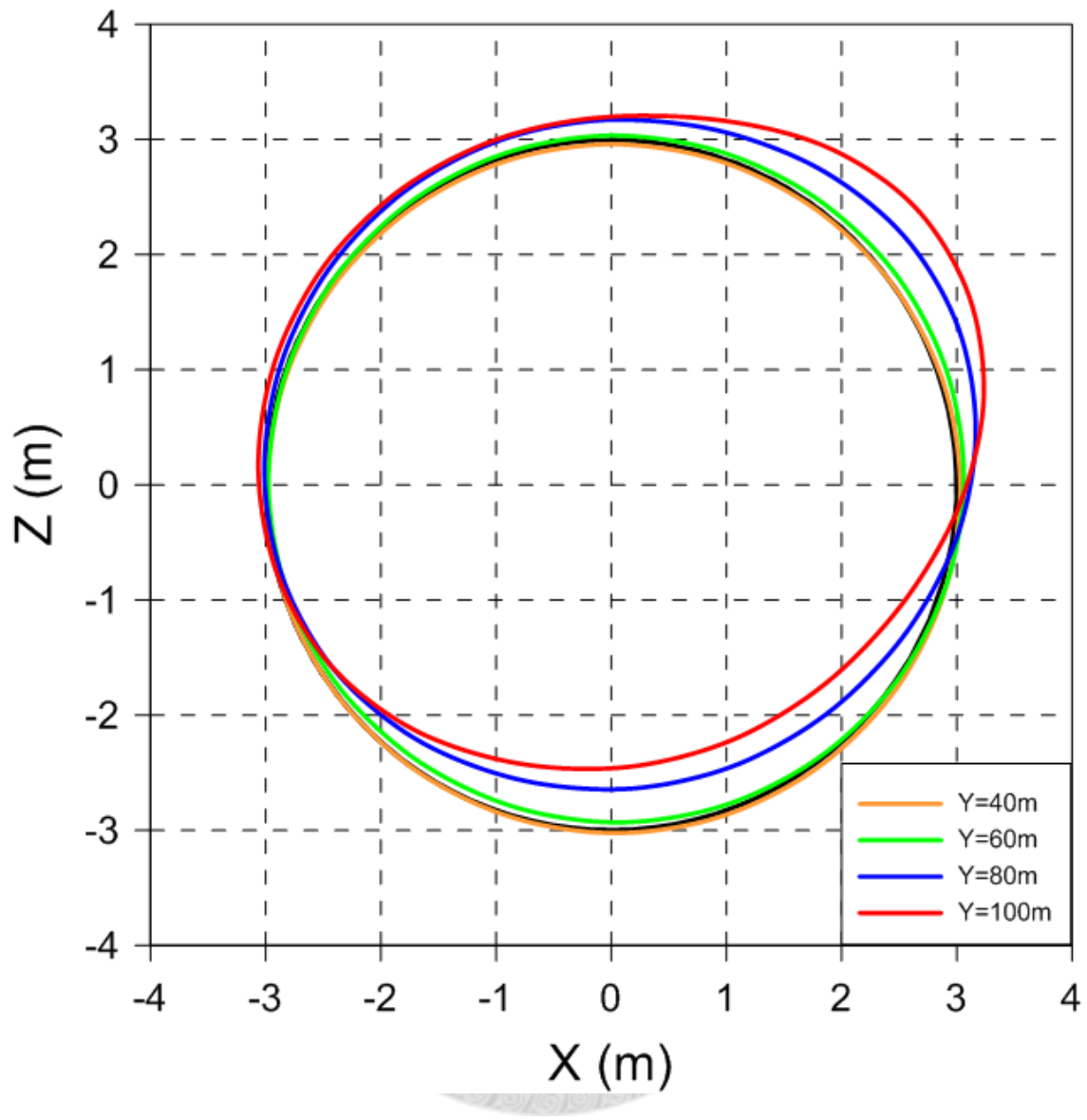


圖 4.13 不同縱深隧道斷面之 in-plane 變位增量分佈

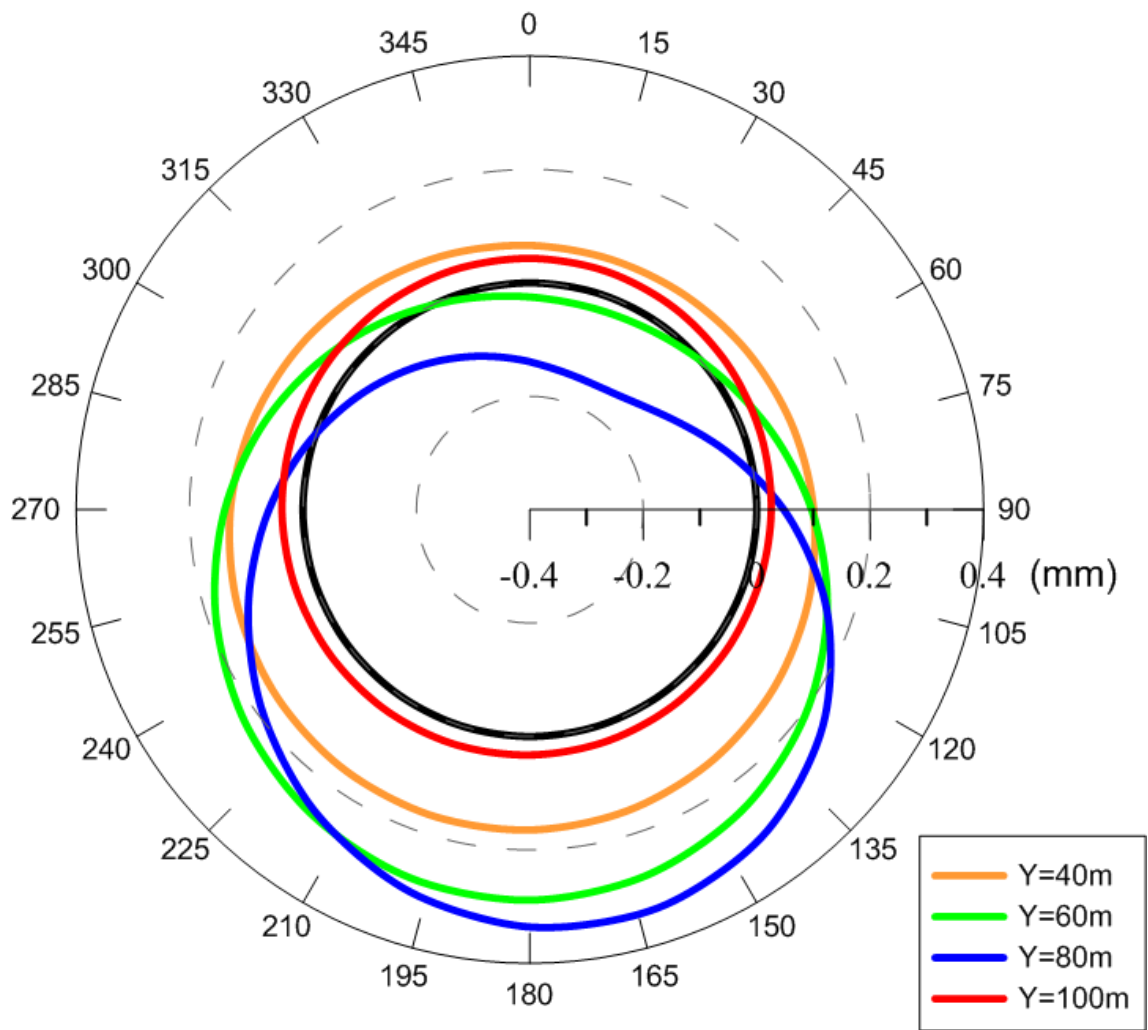


圖 4.14 不同隧道縱深斷面之 out-of-plane 變位增量分佈

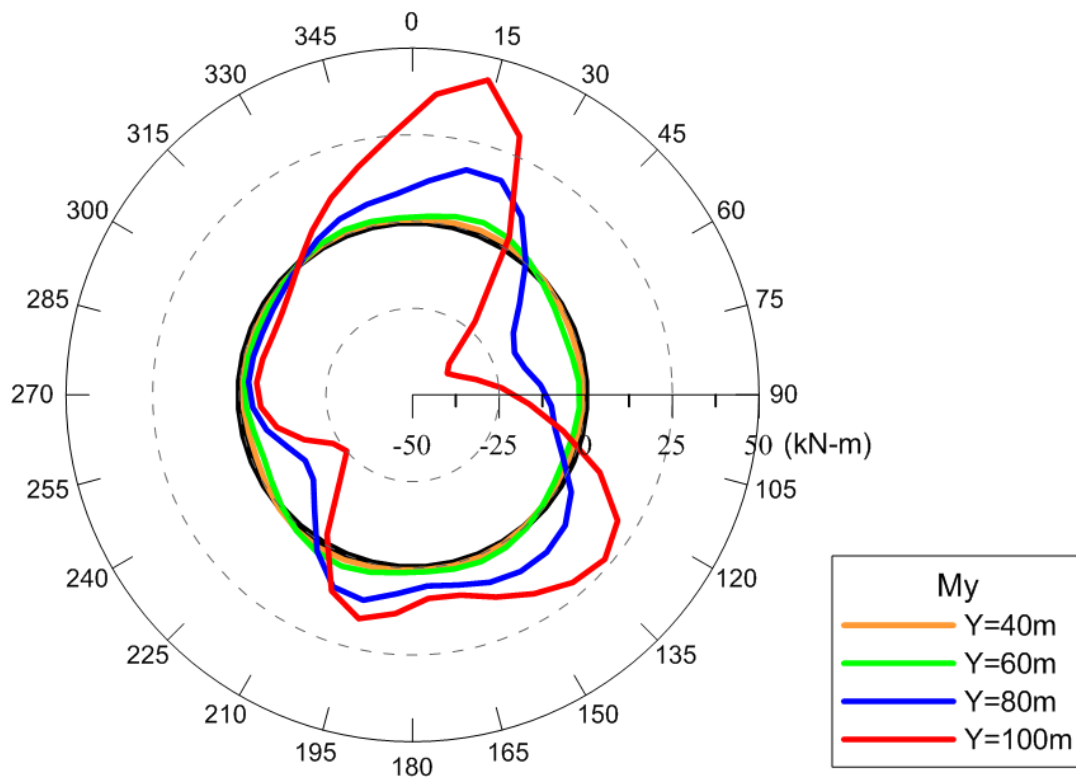


圖 4.15 不同隧道縱深斷面之 in-plane 彎矩增量分佈

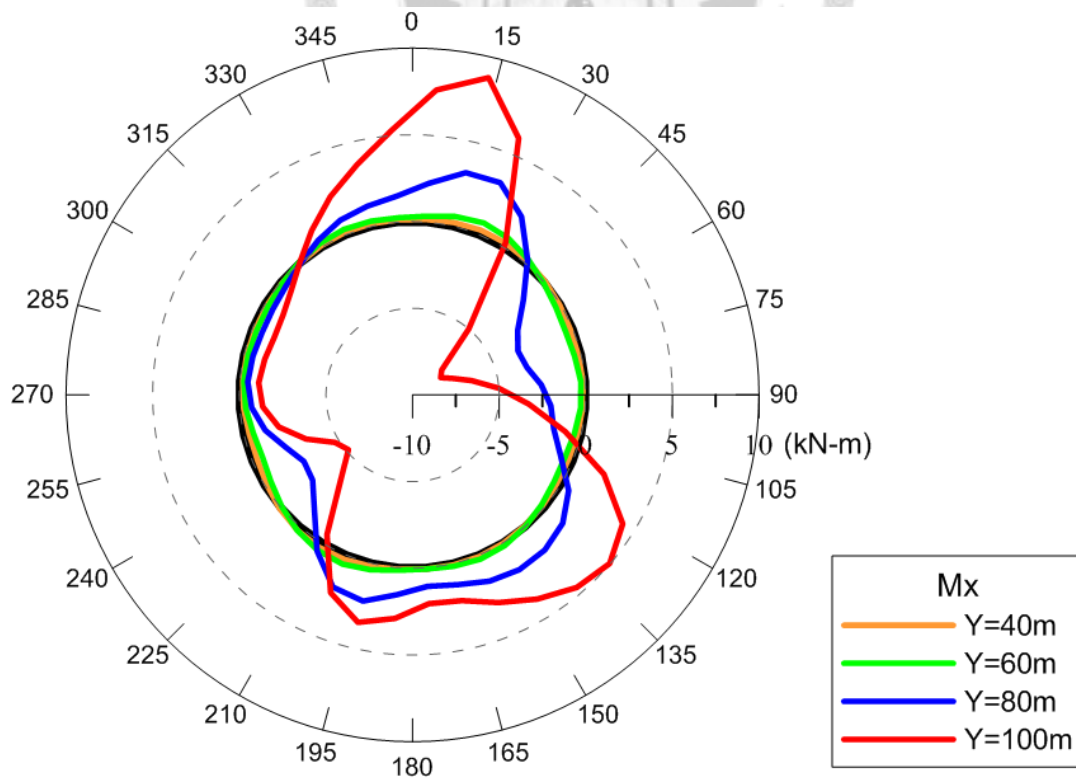


圖 4.16 不同隧道縱深斷面之 out-of-plane 彎矩增量分佈

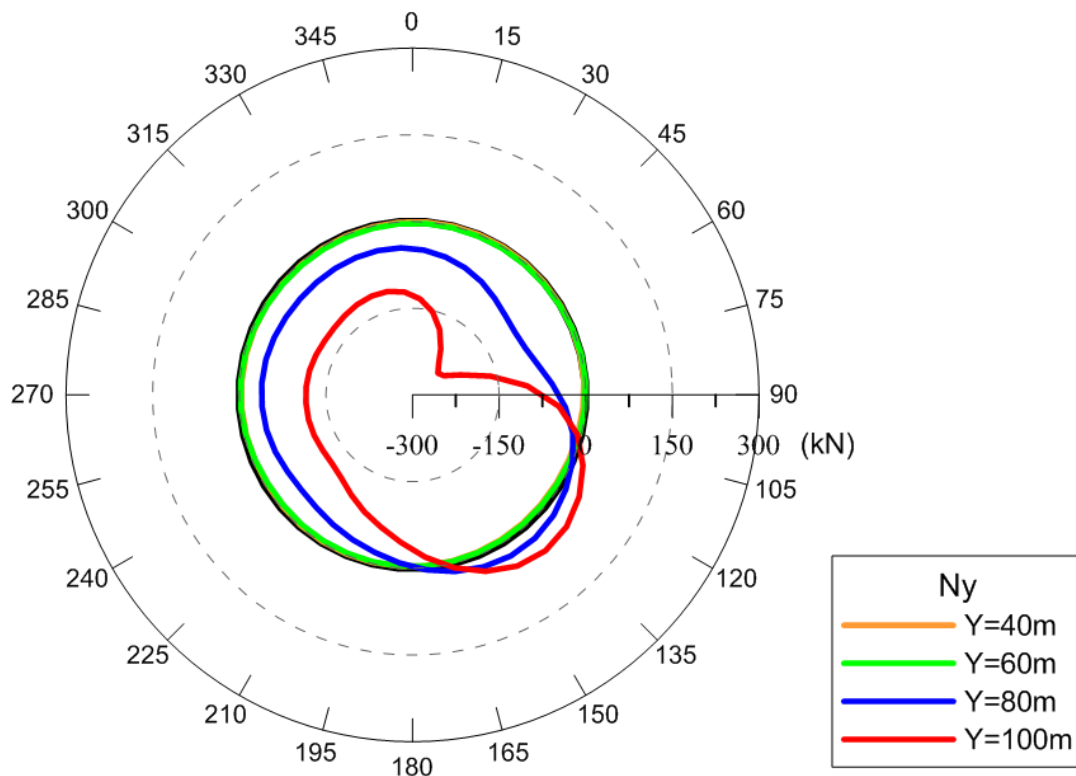


圖 4.17 不同隧道縱深斷面之 in-plane 軸力增量分佈

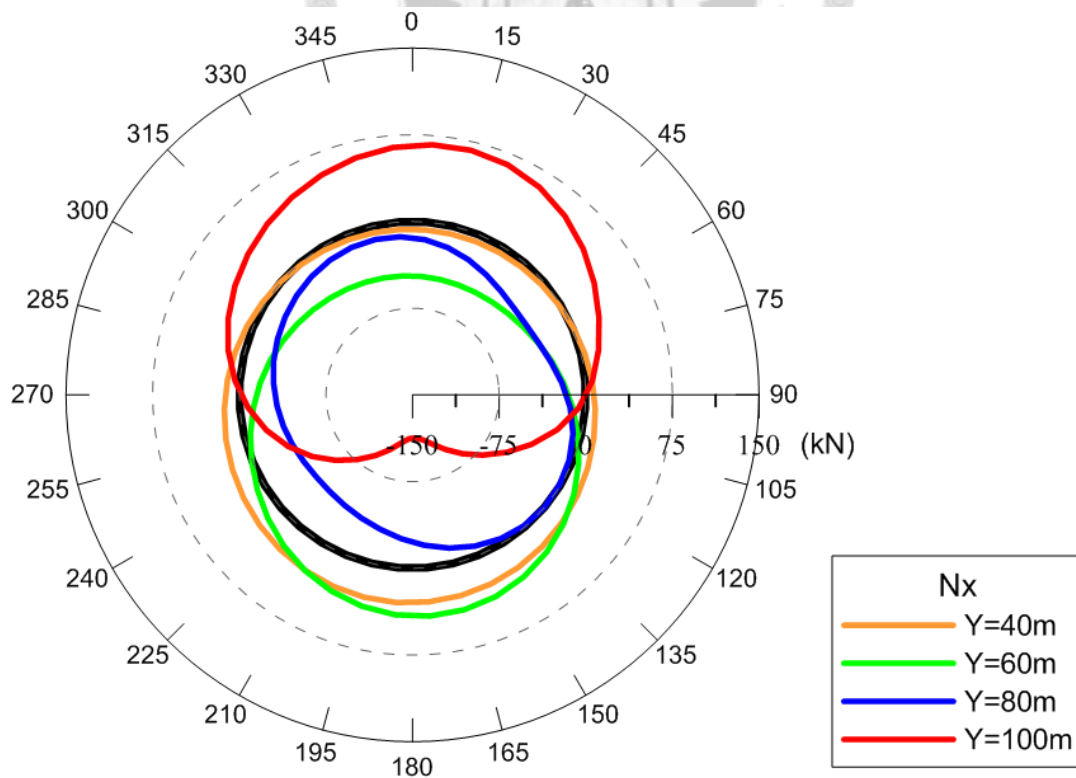


圖 4.18 不同隧道縱深斷面之 out-of-plane 軸力增量分佈

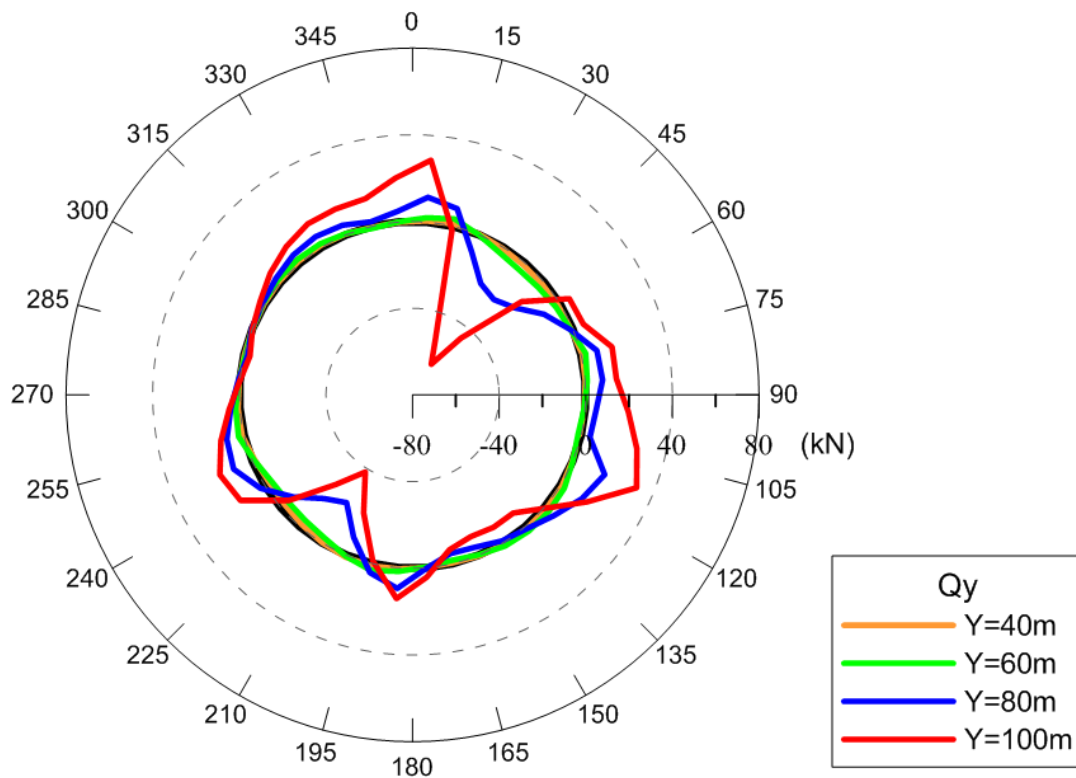


圖 4.19 不同隧道縱深斷面之 in-plane 剪力增量分佈

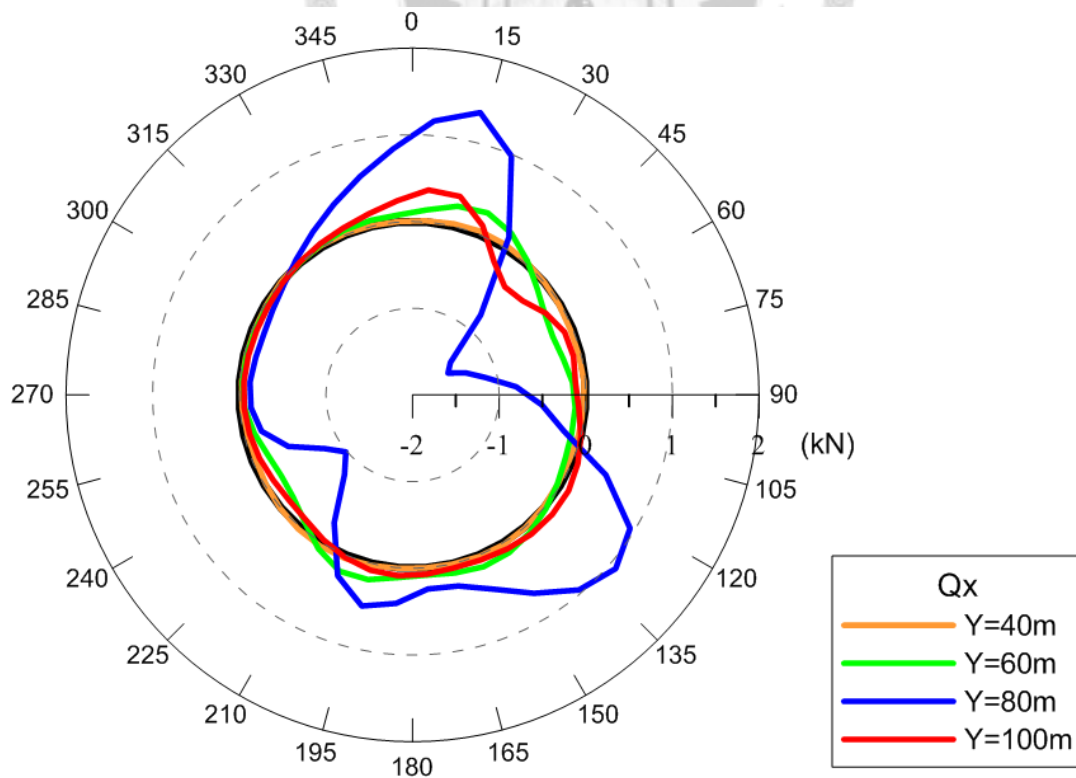


圖 4.20 不同隧道縱深斷面之 out-of-plane 剪力增量分佈

第五章 結論與建議

本研究基於一近接施工數值模型，模擬潛盾隧道受近接施工影響之情境。由隧道全段及個別剖面之角度，針對潛盾隧道之三維力學行為如變位、應力等進行深入的分析與探討，獲致以下數點結論與建議。

5.1 結論

(一) 隧道全段

1. 依據近接施工引致潛盾隧道之變位分析結果顯示，工區範圍內之隧道段，其隧道中心之垂直偏移量(上浮)較隧道徑向變形量(淨空變形)來得大，而隧道中心之水平偏移量(側移)不甚明顯。顯示一般監測若僅以隧道徑向變形，此二維座標相對變形的物理量作為監測標準，將無法確知環片的實際位移狀況，預警效果有限。因此，實有必要發展更合適的監測技術，並對現行的監測方法加以改善。
2. 近接施工亦會造成潛盾隧道產生縱向位移，多發生於隧道上浮彎曲程度最高處，雖其量值甚小，仍不宜輕忽。
3. 本研究搭配 Drucker-Prager 破壞準則，以應力包絡線 $f(I_1, \sqrt{J_2})$ 之概念自行定義應力比，其目的是用來研判隧道環片受力後是否趨於極限強度，以反應其破壞潛勢。可發現隨著近接施工開挖深度的加深，全段潛盾隧道之應力比將逐漸升高，尤以開挖工區範圍內之隧道段上升為劇。
4. 本研究將每個環片中應力比_{max} 之出現角度定義為臨界破壞角。可發現臨界破壞角出現位置將隨開挖深度而有變動。若再將全段隧道環片之臨界破壞角加以連線，定義為臨界破壞線，用以代表隧道最脆弱，極有可能發生破壞之處。可發現該線為一三維分佈之曲線，隨著開挖深度的加深，曲線的分佈亦有變化。大體上，臨界破壞線之變化劇烈處多集中於開挖工區附近。

(二) 隧道特定剖面

1. 依據特定隧道剖面變位及應力分析結果顯示，無論是變位、彎矩、軸力及剪力等增量，由 in-plane 或 out-of-plane 進行分析皆有分佈情況或量值大小方面的差異。
2. 若以 in-plane 分析，則類似一般平面二維分析，其隧道影響程度較大者多為開挖工區中心附近的隧道段，即愈接近開挖工區中心，隧道結構愈危險；若以 out-of-plane 分析，則隧道主要影響範圍將可能出現於在開挖工區前後，並非集中於開挖工區中心。
3. 近接施工易對潛盾隧道造成上浮及側移等現象，因此隧道環片局部拉伸或壓縮之現象可反應在其應力變化上。由 out-of-plane 軸力增量分析結果顯示，遠離開挖工區的隧道剖面是頂拱受壓、仰拱受張；隨著靠近開挖工區，其頂拱受壓趨勢漸減、仰拱受張趨勢亦減弱；當隧道剖面移至開挖工區中心時，頂拱已受張、仰拱受壓。顯示近接施工的過程中，確實會對隧道縱向上的軸力產生影響。

5.2 建議

本研究已建立近接施工數值模型，其分析結果雖與工程趨勢吻合，但於模擬之精細程度上仍有進展空間。以下將針對數值模擬中注意事項與未來仍須予以釐清之課題加以建議。

1. 一般而言潛盾隧道之環片寬度多為 1m，本研究限於電腦運算速度，故採環片寬度為 4m。未來可試著將環片寬度縮小，以呈現更細微之應力變化。
2. 實務上的隧道環片之間是由螺栓接合而成，為求分析之準確及模擬之真實性，未來可試著於環片及環片之間加入介面元素，以模擬連接各環片間之螺栓。並進一步透過分析環片所得之應力變化，檢核螺栓的極限強度，以助於隧道安全評估。
3. 本研究僅假設潛盾隧道與深開挖之淨距為 1 倍隧道直徑，未來可試著將淨距調整為 0.5 倍、1.5 倍或 2 倍等隧道直徑，以瞭解不同淨距對隧道造成之影響，方

可對近接施工的「近」進行量化並給予更明確之定義。



參考文獻

1. 王泰典(2003)：岩石隧道擠壓變形模式之研究，台灣大學土木工程學研究所，博士論文，台北。
2. 台北市政府捷運工程局(1992)：土建工程施工技術規範，台北。
3. 台北市政府捷運工程局(2003)：大眾捷運系統兩側禁建限建辦法，台北。
4. 台北市政府捷運工程局(2006)：捷運大地工程實務，捷運工程叢書 4。
5. 台北市政府捷運工程局(2010)：捷運工程多條隧道鄰近堆疊施工實務，捷運工程叢書 42。
6. 朱旭、楊慕泉、段紹偉(1997)：潛盾施工管理，第七屆大地工程學術研討會論文集，金山，第 1033-1044 頁。
7. 李昱瑩、吳文娟、薛月琴、曾彥鈞(2008)：隧道維護檢測-以台北捷運地下隧道為例，第七屆海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會。
8. 邱雅筑(2007)：隧道剖面量測技術及相應應力增量回溯分析，台灣大學土木工程學研究所，碩士論文，台北。
9. 邱雅筑、陳正勳、王泰典、鄭富書、黃燦輝(2012)：襯砌剖面變形特徵曲線與微變監測技術應用於營運中隧道荷載變化之評估，中國土木水利工程學刊(已接受)。
10. 林亦郎(2010)：地中壁對粘土層開挖變形影響之研究，台灣科技大學營建工程系，博士論文，台北。
11. 胡邵敏(2008)：近接施工影響簡介，地工技術，第 114 期，第 73-82 頁。
12. 洪銘遠、李順敏、侯嘉松、周永川、林志權(2012)：臺北捷運系統全線隧道維護檢測探討，中華技術，第 93 期，第 88-95 頁。

13. 洪如江(1966)：台北盆地各土層土壤之物理特性，國立台灣大學工程學刊，第 10 期，第 194-217 頁。
14. 高宗正、陳俊宏、張修碩、趙志堅(2009)：臺北捷運鄰近施工之案例回顧與省思，地工技術，第 120 期，第 35-44 頁。
15. 張吉佐、潘台生(1993)：臺北盆地土層隧道工程之設計與施工，現代營建，第 159 期，第 29-34 頁。
16. 陳育民、徐鼎平(2009)：FLAC/FLAC3D 基礎與工程實例，北京，中國水利水電出版社，第一次印刷。
17. 陳正勳(2011)：岩石隧道受震行為及襯砌破壞機制之研究，台灣大學土木工程學研究所，博士論文，台北。
18. 許志豪(2008)：雷射剖面影像法及剖面變形之成因回溯探討，台灣大學土木工程學研究所，碩士論文，台北。
19. 常岐德、孫介文、黃南輝、段紹緯(2001)：捷運潛盾隧道因鄰近工程施工受損案例探討，第二屆海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會，p.243~p.252。
20. 莫若樺(2001)：台北市捷運工程之回顧，亞新工程顧問，Publications Volume 6 (2000 - 2004)319。
21. 彭文斌(2008)：FLAC3D 實用教程，北京，機械工業出版社，第一次印刷。
22. 趙際禮、劉育志(2009)：高雄捷運潛盾隧道鄰近施工案例探討，地工技術，第 120 期，第 73-82 頁。
23. 廖洪鈞、高宗正、胡邵敏(2011)：鄰近工程之設計及施工準則與解說，科技圖書。
24. 劉波、韓彥輝(美國)(2006)：FLAC 原理、實例與應用指南，北京，人民交通出版社，第二次印刷。

25. 歐章煜(2002)：深開挖工程分析設計理論與實務，科技圖書。
26. B.H.G. Brady & E. T. Brown (1985) : *Rock Mechanics For Underground Mining*, George Allen & Unwin, London.
27. Chen, W. F. (1982) : *Plasticity in Reinforced Concrete*. First Edition, McGraw-Hill.
28. Hoek. E and E. T. Brown (1980) : *Underground Excavations in Rock*. The Institution of Mining and Metallurgy, London.
29. Itasca Consulting Group, Inc., (2005) : *FLAC3D: Fast Lagrangian Analysis of Continua. Ver.3.0*, Minnesota USA.
30. Kirsch, G. (1898) : Die Theorie der Elastizitat und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre. *Veit. Ver. Deut. Ing.*, 42, 797-807 (德文文獻, 間接引用自 Hoek. E and E. T. Brown , 1980)
31. Ou, C. Y. (2006) : *Deep Excavation: Theory and Practice*, Taylor and Francis, The Netherlands.
32. Woo, S. M. and Z. C. Moh, (1990) : Geotechnical Characteristics of Soils in Taipei Basin. *Proc. 10th Southeast Asian Geotechnical Conference*, Taipei, Taiwan.

附錄 A 潛盾隧道監測資料

A.1 案例簡介

臺北捷運松山線某段潛盾隧道完工後，有一深開挖工程在其側方進行，如圖 a.1 所示。依據現行法規《大眾捷運系統兩側禁建限建辦法》規定，若於潛盾隧道兩旁 50m 限建範圍內施作開挖工程，則須對既有隧道進行安全監測。圖 a.1 中藍色框線所圍區域即是深開挖工區；紅色框線為潛盾隧道，共有 70 環；綠色框線內為測區兩端佈設的加密控制點。

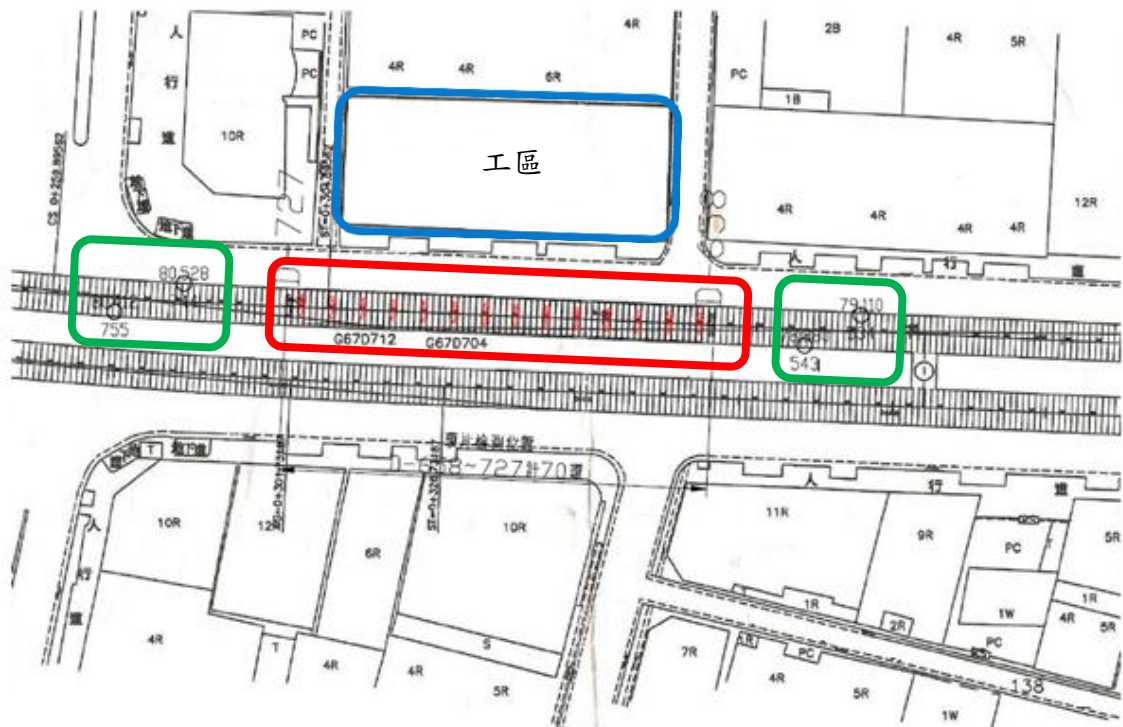


圖 a.1 檢測現場相關構造物平面示意圖(潛盾隧道圓斷面檢測成果資料，2011)

本案例共有兩期監測資料，分別為 99 年 6 月 7 日與 100 年 2 月 16 日(以下簡稱為 990607 及 1000216)，經歷天數為 257 日。990607 的資料為每環設置 8 個觀測點，1000216 的資料為每環設置 7 個觀測點，但具前後期座標的點位僅有 6 個點位，即圖 a.2 中的 C、D、E、F、G 及 H 點。

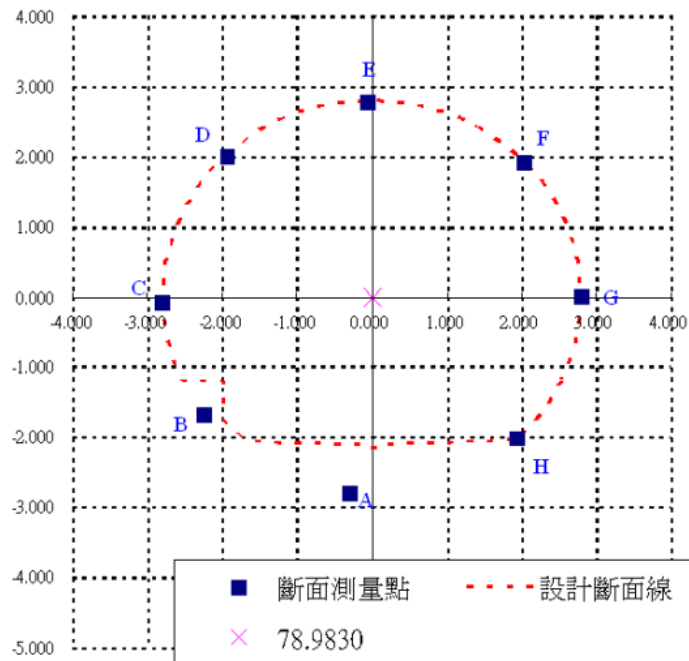


圖 a.2 隧道環片監測點位佈設圖(潛盾隧道圓斷面檢測成果資料，2011)

A.2 資料處理結果

藉由分析此實際案例前後兩期之收方座標值，可將潛盾隧道之三維變形行為，以變位向量圖、變位量值分佈圖以及隧道三維變形示意圖做一呈現。

(一) 變位向量圖

僅取具前後期收方座標值之上半環片進行資料處理，再將原座標系統轉至以隧道縱向為 Y 軸之新座標系統，即(N,E,H)→(X,Y,Z)，可繪製變位向量圖如圖 a.3 所示。由於該圖無法直觀地看出隧道變位趨勢，因此將此變位向量進一步分為 Xdisp、Ydisp 及 Zdisp 三組分量，進行繪圖與探討，如下所述。

Displacement of tunnel lining(X.Y.Z)

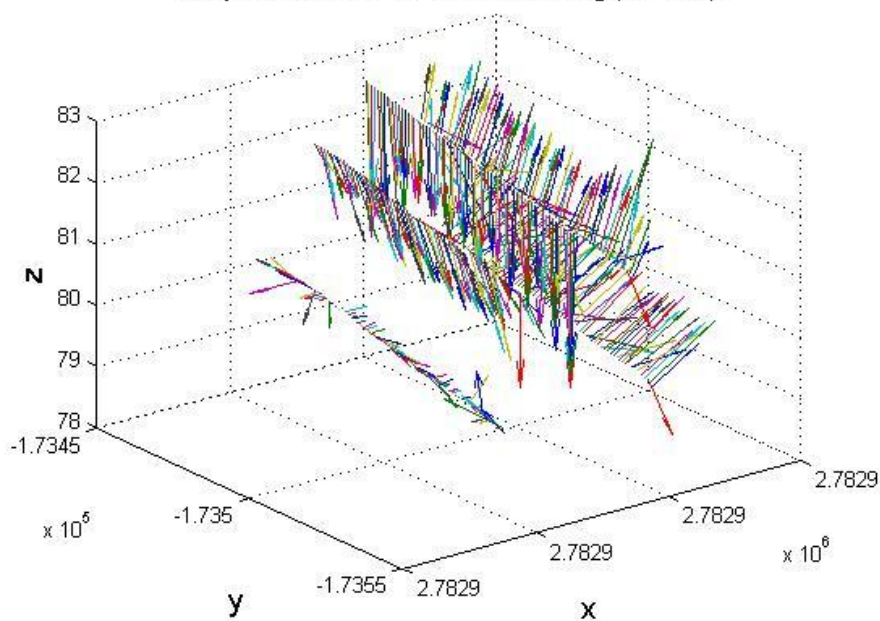


圖 a.3 隧道變位向量圖

圖 a.4 為隧道 Xdisp 變位分量圖。可發現環片 Xdisp 大致指向深開挖工區，表示潛盾隧道受深開挖解壓的影響，有朝開挖工區側移的現象，尤以右側壁為劇。

Displacement of tunnel lining(X)

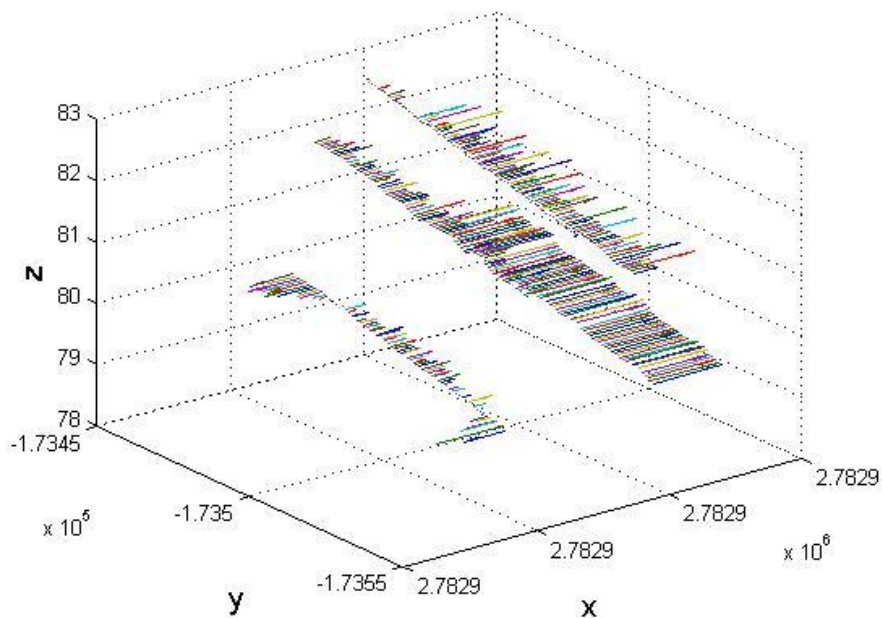


圖 a.4 隧道 Xdisp 變位分量圖

圖 a.5 為隧道 Ydisp 變位分量圖。可發現隧道環片之間具有縱向錯動行為，顯示近接施工將引致潛盾隧道產生縱向變位。

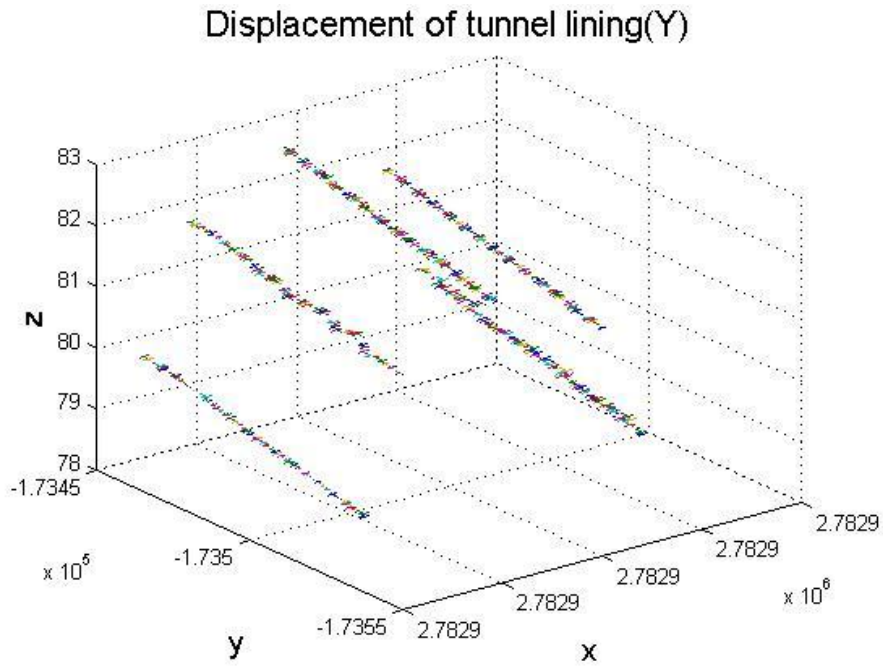


圖 a.5 隧道 Ydisp 變位分量圖

圖 a.6 為隧道 Zdisp 變位分量圖。可發現頂拱及左側壁向下沉陷，右側壁上浮，推測潛盾隧道可能受近接施工開挖解壓影響，產生逆時針旋轉的現象。

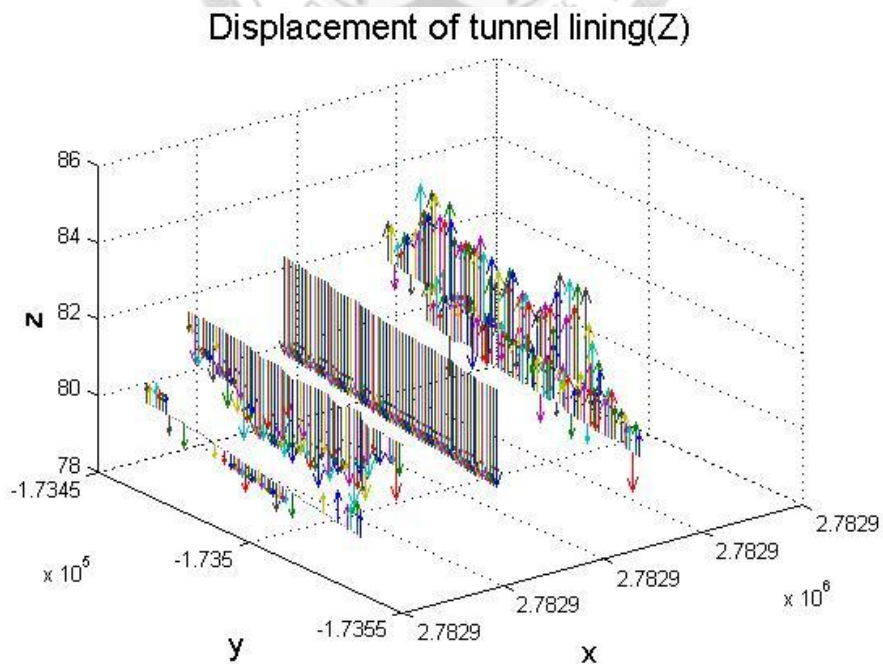


圖 a.6 隧道 Zdisp 變位分量圖

(二) 變位量值分佈圖

圖 a.7 為各隧道剖面點位(C、D、E、F 及 G 等五點)於 X、Y 及 Z 方向之變位量分佈情況，橫軸為隧道環片共 70 環，縱軸為變位量。絕對精度為 1-2mm，相對精度為 0.1-0.2mm。

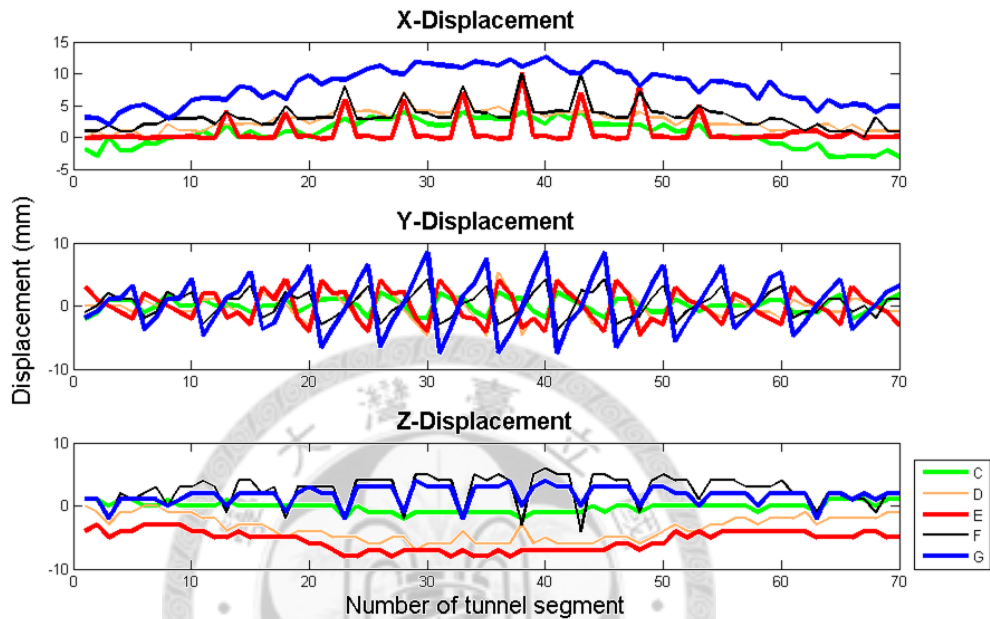


圖 a.7 變位量值分佈圖

(三) 隧道三維變形示意圖

利用前後兩期的收方座標進行處理，於三維空間中繪製符合這些資料的隧道剖面，可直觀地觀察出近接施工對潛盾隧道的影響，如圖 a.8 所示。圖中藍色隧道為 990607 之資料點，紅色隧道為將位移放大 100 倍之 1000216 資料點。該圖顯示於歷時 257 日之期間，潛盾隧道向開挖工區產生明顯側移及些許上浮之現象。

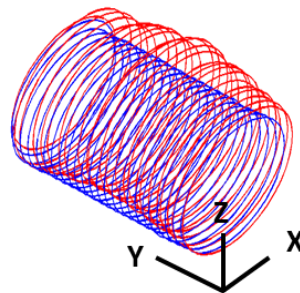


圖 a.8 隧道三維變形示意圖

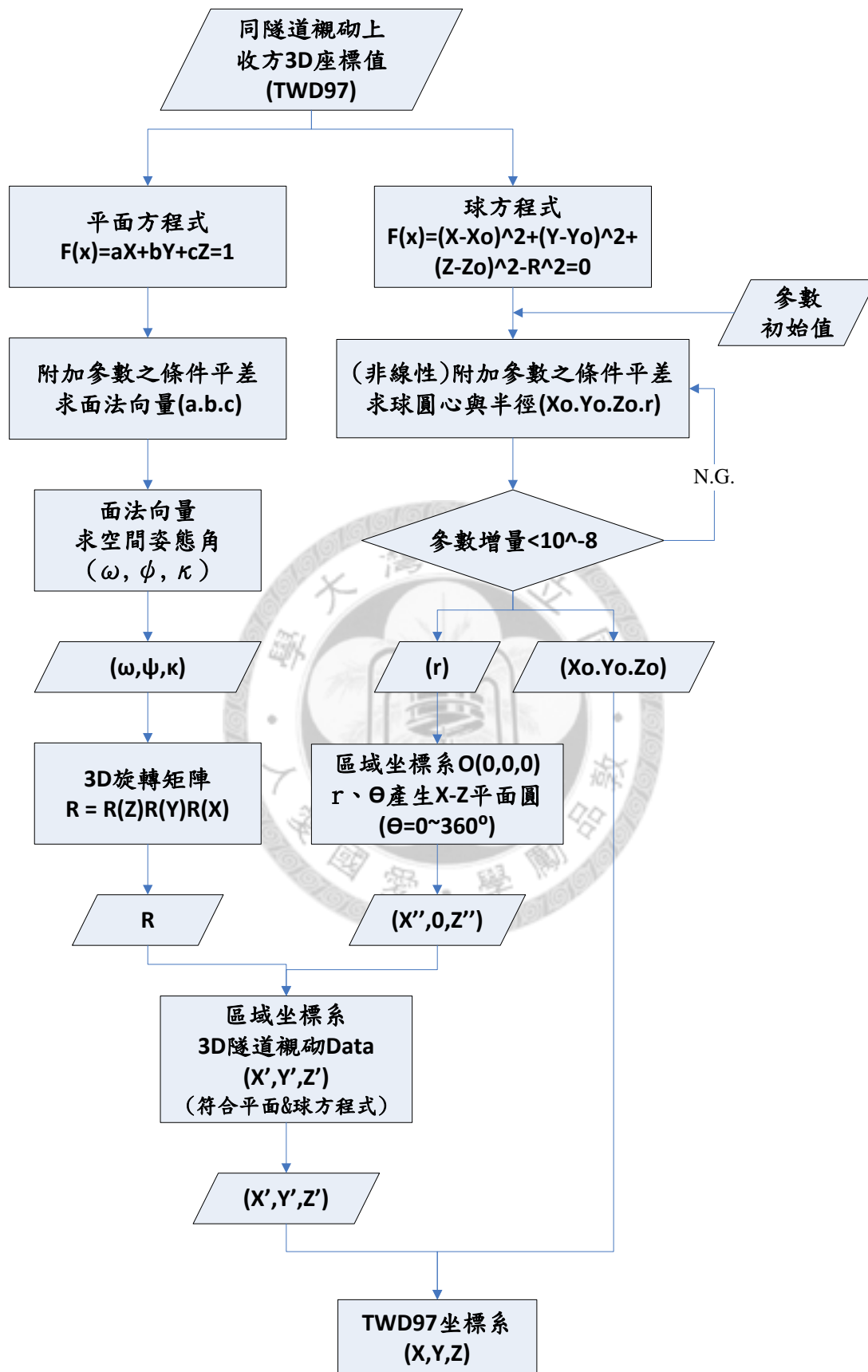


圖 a.9 數據處理流程

附錄 B 論文口試-問題與回覆

提問人	問題	回覆
陳正勳 博士	<p>為考慮螺栓接合，須對環片勁度進行折減，其折減依據為何？</p>	<p>潛盾隧道襯砌是以螺栓接頭連接預鑄混凝土環片，並非一連續結構，尤其徑向由於片間接頭之抗彎勁度較低，若採連續結構分析將高估環片之應力，因此本研究模擬分析時參考張吉佐等人(1993)之建議，將臺北捷運環片本體之彈性模數乘上一折減因子(λ)0.8。詳細說明請參考本文第 3.2.2 節。</p>
	<p>為考慮盾尾間隙所採用的 step100，是否有參考依據？須詳細說明。</p>	<p>潛盾隧道施工過程中，當環片脫離盾尾時，盾殼厚度與環片之間將存有約 5 至 10cm 之空隙，即所謂的盾尾間隙。分析時為考慮盾尾間隙，本文比較不同支撐時機對隧道平均徑向收斂量的影響，分析結果如圖 3.2 所示。一般工程實務上的盾尾間隙多為 5 至 10cm，故本文採取當隧道平均徑向收斂量達 8.2cm(即 FLAC^{3D} 中的 step100)時架設支撐環片。詳細說明請參考本文第 3.2.1 節。</p>

	<p>在深開挖驗證的部份，連續壁側移分析值與案例監測值差異過大，是什麼原因？</p>	<p>推測主要原因是本驗證並無考慮地下水位之影響，因此土壤無法因水弱化。再加上土體和連續壁之間無設定介面元素等所致。</p>
	<p>若是未考慮地下水而導致分析結果與監測資料差異偏大，應試著將地下水影響納入深開挖分析模型中，以提高驗證精度。</p>	<p>將深開挖分析模型設置地下水後，其連續壁側移分析值與監測資料比較如圖 3.12 所示。詳細說明請參考本文第 3.3.4 節。</p>
	<p>論文中 page.64 所提的 in-plane 和 out-of-plane 彎矩增量分佈圖，其差異為何？</p>	<p>圖 4.15 與圖 4.16 所呈現之彎矩增量分佈趨勢大致吻合，惟主要差異在量值大小，in-plane 彎矩增量分佈由-50 至 50(kN-m)；out-of-plane 彎矩增量分佈由-10 至 10(kN-m)，其 scale 相差 5 倍。</p>
<p>趙振宇 老師</p>	<p>白華、滲水等現象與採用 2D、3D 分析角度之關聯為何？</p>	<p>由於潛盾隧道係由環片組立而成，屬於一柔性結構，一旦遭遇近接施工等偏壓影響，易於環與環間產生拉伸或壓縮現象，進而導致該處接頭受損，產生白華、滲水等現象如圖 2.7 所示。其中環與環之關係即屬於 3D 分析角度，而片與片之關係為 2D 分析角度。</p>

	論文中數次提到 in-plane 分析和 out-of-plane 分析，這種說法的意思？	本研究透過三維有限差分程式 FLAC ^{3D} 進行分析，除了能掌握一般二維平面分析的隧道變位、應力等，另可獲知第三維度的力學行為。因此 in-plane 分析可視為一般二維平面分析，即隧道徑向之力學行為；而 out-of-plane 分析則代表隧道縱向的變化。
	針對近接施工引致潛盾隧道的變形，若欲改善現行的監測方法，有沒有更具體的作法？	由於近接施工引致的潛盾隧道變形為三維問題，尤以隧道縱向方向之變形至關重要，因此可試著於隧道彎折明顯處佈設光纖或其他可量測縱向變形之儀器，並實施能獲知隧道環片三維絕對座標之監測方法，如微變監測技術。
黃燦輝 老師	研究中的近接施工數值分析模型之條件假設，如土層性質、隧道長度、開挖形式等，是否源自你整理的近接施工案例資料？	不是，該案例資料僅是作為研究動機，用以闡明近接施工將引致潛盾隧道具三維變形之情形，如此即有深入研究探討之必要。
	論文中的文字敘述應多注意，如《不適用》宜改成《不全然適用》。	謝謝老師提醒，文中的用字遣詞會更加注意。
王泰典 老師	先前整理的近接施工案例資料應放入論文中。	已整理並納入本文第 2.2 節，詳細資料請參考附錄 A。

作者簡歷



中文姓名：吳宗翰

英文姓名：Tony Wu

籍貫：臺灣 臺南市

出生日期：1987/08/19

聯絡信箱：tonya2354@gmail.com

求學經歷：國立臺南第一高級中學(2005)

國立臺灣大學土木工程學系學士(2010)

國立臺灣大學土木工程學研究所大地工程組碩士(2012)