

捷運系統建設中大地工程科技之應用(III)

子計畫五

於軟弱地盤開挖潛盾隧道引致之地盤沉陷 Ground settlement caused by shield tunneling in soft ground

計畫編號: NSC 90-2211-E-009-070

執行期間: 90年8月1日至91年7月31日

計畫主持人: 方永壽 國立交通大學土木工程研究所教授

一、中文摘要

本研究利用以往之相關經驗公式與所蒐集到之各國案例，提出一套簡易而可靠之方法，以推估單隧道施工所引起之地表最大沉陷。Fujita (1982)曾提出以經驗方法來預估最大地表沉陷量 S_{max} 的範圍，此方法僅依潛盾機的型式及土壤的種類加以分類，並未考慮隧道深度與潛盾機直徑之影響。本研究藉由蒐集各國潛盾施工案例進行 S_{max} 的歸納分析，找出不同型式、不同直徑 D 潛盾機於各土層、不同深度 z 施工所造成地表最大沉陷量 S_{max} 之範圍。再配合Peck (1969)所建議之沉陷槽寬度參數 i 之範圍，即能更合理的預估單隧道施工造成之地表沉陷槽。

關鍵字: 沉陷、隧道、潛盾

Abstract

In this study, based on the cases collected, a simple and practical method is proposed to estimate the ground settlement due to shield tunneling. Fujita (1982) suggested an empirical method to estimate the maximum ground settlement S_{max} caused by different types of shields driven in different soils. However, the effects due to the tunnel depth z and shield diameter D were not considered. Based on the case study of this study, the range of S_{max} as a function of shield type, soil type, D and z is suggested. With the settlement trough width parameter i suggested by Peck (1969), the ground settlement caused by shield tunneling can be estimated.

Keywords: settlement, tunnel, shield

二、緣起與目的

台灣地區自民國65年引進潛盾工法以來，已完成許多案例並累積不少的施工經驗。台北捷運系統工程中，亦有不少的施工標之土質隧道採用潛盾工法施工，以穿越人口交通密集之路段。高雄捷運系統工程，亦計畫採用潛盾工法施工。其中因施工所引起之地盤變位問題可能直接對鄰近結構物及地下管線之安全構成威脅，更是值得注意及進一步探討。

隨著台北市捷運系統的開工興建，在潛盾隧道施工過程中，為使工程順利完成，對施工時可能遭遇之問題，宜事先予以了解；潛盾隧道施工中，潛盾機開挖過程，由於隧道開挖面之應力改變、盾尾間隙閉合、擾動土壤之壓密、襯砌環片變形等因素，可能造成隧道周圍土層變位，因而引致地表隆起、沉陷及土層的側向位移等，對鄰近結構物之安全構成威脅，此問題為潛盾施工最引人關注之議題。過大之土層變位若未經適當之預估及處理，可能造成巨大損害。

近年來國內外已有多位學者對潛盾機施工所造成之地盤變位進行多種經驗判斷與數值分析，其中經驗方法較少論及施工深度(Z)與潛盾機直徑($D = 2R$)對地表沉陷量之影響。一般說來，相同深度之隧道，隧道直徑較小者，其地表沉陷槽量之影響範圍將比直徑大者小；相同直徑之隧道，隧道深度較大者，其地表沉陷槽量之影響範圍將比深度小者寬而淺。

為了解不同深度之潛盾機施工對地表沉

陷所造成之影響，本研究藉由收集分析以往國外施工案例與台北市捷運施工已有之相關監測資料，和已發表之經驗公式或理論模式相互比較，建議一套簡單而實用之方法，以期能預估不同型式潛盾機，在不同直徑(D = 2R)與深度(Z)下開挖所引致之最大地表沉陷，以提供施工時對鄰近結構物保護之參考依據。

三、地表沉陷槽寬度

Peck (1969) 依據現地觀測資料之研究結果指出，潛盾機施作潛盾隧道所引致之地表沉陷槽可以用誤差函數 (error function) 或常態分佈曲線 (normal distribution curve) 來加以模擬。沉陷槽上各點的地表沉陷量可用常態分佈公式計算：

$$S(y) = S_{\max} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2i^2}\right) \dots\dots\dots(1)$$

Attewell (1981) 根據不同土層監測的結果，歸納出沉陷槽寬徑比 (i/R) 與隧道深徑比(Z/2R)之關係，表示如下：

$$i/R = k(Z/2R)^n \dots\dots\dots(2)$$

式中，k 及 n 參數依當地之地質特性而定。

Clough 與 Schmidt (1981) 針對黏土層內潛盾隧道施工造成之地表沉陷進行研究，發現沉陷槽寬徑比 (i/R) 與隧道深徑比 (Z/2R) 有下列關係。

$$\frac{i}{R} = \left(\frac{Z}{2R}\right)^{0.8} \dots\dots\dots(3)$$

O'Reilly 與 New (1982) 蒐集 19 個黏土層及 16 個砂土層潛盾施工案例的地表沉陷監測值，以沉陷槽的反曲點寬度 i 對隧道中心軸線深度 Z 進行線性回歸分析，得知砂性土層內有以下關係：

$$i = 0.28 \cdot Z - 0.12 \dots\dots\dots(4)$$

為適用於實際施工前的先期評估，O'Reilly 與 New 將上式關係式進一步簡化為：

$$i = k \cdot Z \dots\dots\dots(5)$$

Fujita 收集 1965 年以後日本國內 94 件潛盾隧道施工案例之監測資料，並依潛盾機型式，土層狀況，以統計的方法將施工引致的最大地表沉陷量製成表格，作為預估潛盾隧道施工引致最大地表沉陷量的依據。

Fang 等人 (1994) 建議以 Peck-Fujita 的經驗方法，估算在不同的機型、土質、隧道深度及隧道直徑狀況，施工所造成的地表沉陷曲

線。其方法乃是引用 Peck (1969) 所歸納之結果，根據隧道中心線深度 (Z)，隧道半徑 (R) 及土壤種類，求得沉陷槽寬度參數 (i) 的範圍。依據 Fujita (1982) 所歸納之結果，可依潛盾機的型式及土壤的種類，定出隧道中心上方的地表最大沉陷量 (S_{\max}) 之範圍，並將所求得的 i 及 S_{\max} 值代入 Peck (1969) 所提出的誤差函數中，即可估算地表的沉陷曲線。

四、預估地表最大沉陷量 (S_{\max}) 之範圍

本研究以土層性質與潛盾機型式進行分類，將各國案例實測之地表最大沉陷量 (S_{\max})、對隧道深度 (Z) 與直徑 (D) 進行歸納分析，繪成 (S_{\max}/D) 與 (Z/D) 之關係圖，以建議地表最大沉陷量 (S_{\max}) 之範圍，其各結果如下之說明。

1. 土壓平衡式潛盾機於凝聚性土壤中施工

本研究蒐集 EPB 潛盾於凝聚性土壤中施工 17 個案例。以隧道深度與直徑比值 (Z/D) 為橫軸，以地表最大沉陷量與潛盾機直徑之比值 (S_{\max}/D) 為縱軸，將各案例監測結果繪於圖 1 上。圖中顯示凝聚性土壤中，當 Z/D > 2，最大沉陷量將隨深度遞減之趨勢；但當 Z/D < 2 時，則覆土深度越淺最大沉陷量越少。

2. 土壓平衡式潛盾機於非凝聚性土壤中施工

此類型之潛盾施工共蒐集 17 個案例。各案例實測值及建議地表沉陷範圍繪如圖 2 所示，圖中顯示最大沉陷量亦隨深度 Z 之增加而略減，且發生之最大沉陷量較於凝聚性土壤內之 S_{\max} 小許多。

3. 泥水加壓式潛盾機於凝聚性土壤中施工

此類型之潛盾施工共蒐集 6 個案例。各案例實測值及建議範圍如圖 3 所示，圖中顯示最大沉陷量變化之範圍相當廣泛。

4. 泥水加壓式潛盾機於非凝聚性土壤中施工

此類型之潛盾施工共有 8 個案例，各案例實測值及最大沉陷建議範圍如圖 4 所示。由於泥水加壓式潛盾機之施工案例較少，故較難決定適當之沉陷預估範圍，日後仍需多方補充此類型案例資料，以求建議範圍更合理實用，但本研究仍嘗試建議一範圍以利討論。

五、預估地表最大沉陷量 S_{\max} 與 Fujita 建議值之比較

由各實際之隧道深度 Z 與潛盾機直徑 D，依開挖土層種類與潛盾機型式，可由上節中各

圖中查出 S_{max}/D 之比值範圍，乘上潛盾機直徑 (D) 則可得到預估之地表最大沉陷量之上下限值。圖 5 ~ 圖 8 顯示與 Fujita (1982) 提出建議值之比較，分別說明於下：

1. 土壓平衡式潛盾機凝聚性土壤中施工

Fujita (1982) 之地表最大沉陷值為 35 mm ~ 85 mm，圖 5 顯示 Fujita 之預測與本研究蒐集之監測結果有良好吻合，但有 9 個案例監測值低於 Fujita 建議之下限值。

2. 土壓平衡式潛盾機於非凝聚性土壤中施工

Fujita (1982) 建議之地表沉陷在 10 mm ~ 30 mm 之間，圖 6 顯示其本研究蒐集之案例中有 8 個地表沉陷值，超出 Fujita 建議值之上限。

3. 泥水加壓式潛盾機於凝聚性土壤中施工

圖 7 顯示依所蒐集之資料，Fujita 預估之地表沉陷量範圍 30 mm ~ 50 mm 略為狹窄。惟本研究蒐集到之此類案例亦較少，日後再繼續補充資料以調整建議更實用之範圍。

4. 非凝聚性土壤中泥水加壓式潛盾機施工

Fujita 之建議值為 15 mm ~ 65 mm，圖 8 顯示本論文所蒐集之案例資料均集中在其下限值附近，而本研究之建議值雖均能包含各案例之實測值，惟此類型施工已發表之案例較少，本研究提出之建議範圍應依後續補充資料調整。

六、結論

本研究提出以經驗方法預估單隧道潛盾施工引致之地表沉陷，研究結果顯示有以下優點。優點部分：

- (1) 結果可靠： S_{max} 與 i 值之估計均是根據實際施工案例分析歸納所得，此二者之結合，亦由許多實際案例驗證其可行性，結果相當可靠。
- (2) 分析過程簡單：僅需知道隧道施工之基本資料，如潛盾機型式、隧道直徑、開挖土層分類與隧道中心線深度，即可計算出地表沉陷槽曲線。可在潛盾施工前迅速估計出地表沉陷之影響範圍做為參考。
- (3) 可考慮不同因素之影響：無論是 i 值或 S_{max} 均可反應出潛盾機型式、隧道直徑、土層分類與隧道中心線深度對地表沉陷槽之影響。
- (4) 未來仍可使用：隨施工機械與技術之進度，潛盾施工對地表沉陷之影響將逐漸減小，日後可在蒐集更多新的實際施工資

料，將本經驗方法之建議值加以修正，以期在未來亦能應用。

- (5) 設計時，可與數值分析之結果驗證。

缺點部份：

- (1) 此經驗方法僅考慮土壤為單一土層而無詳細區分，無法預估開挖多種層次土壤之沉陷槽。
- (2) 無法考慮潛盾施工時之輔助工法對地表沉陷之影響。
- (3) 無法預估深層沉陷、水平位移與超額孔隙水壓消散之情形。
- (4) 假設地表沉陷槽為對稱之常態分佈曲線，無法模擬邊界條件為非對稱之情形。
- (5) 無法考慮與施工品質有關之各因素，如背填灌漿之時機、超挖等對地表沉陷之影響。

七、參考文獻

1. Clough, G. W. and Schmidt, B., "Design and Performance of Excavations and Tunnels in Soft Clay," A State-of-the-Art Paper, International Symposium on Soft Clays, Bangkok, 1981.
2. O'Reilly, M. P. and New, B. M., "Settlement above Tunnels in The United Kingdom-Their Magnitude and prediction," Tunneling 82, pp. 173-181, London: IMM, 1982.
3. Peck, R.B., "Deep Excavation and Tunneling in Soft Ground," (State-of-Art Report) Proc., 7th Int. Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, pp. 225-290, 1969.
4. Atkinson, J. H. and Mair, R. J., "Soil Mechanics Aspects of Soft Ground Tunneling." "Ground Engineering, Vol. 14, No. 5, pp. 20-38. 1981.
5. Fujita, K., " Prediction of Settlements by Shield Tunneling," Proc., Int. Conf. of Soil Mech., Mexico, Vol.1, pp. 239-246. 1982
6. Fang, Y. S. , Lin, J .S. and Su, C. S., "An Estimate of Ground Settlement due to Shield Tunneling by the Peck-Fujita Method," Can. Geotech. J. Vol.31, No.3, pp.431-443. 1994

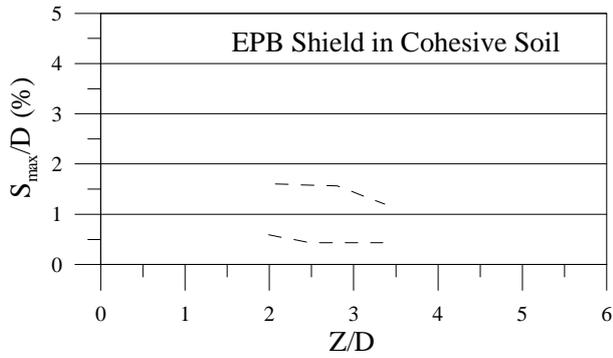


圖 1 土壓平衡式潛盾機於凝聚性土壤施工地表最大沉陷量建議範圍

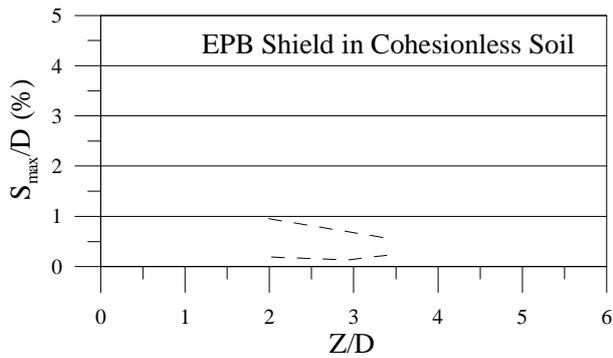


圖 2 土壓平衡式潛盾機於非凝聚性土壤施工地表最大沉陷量建議範圍

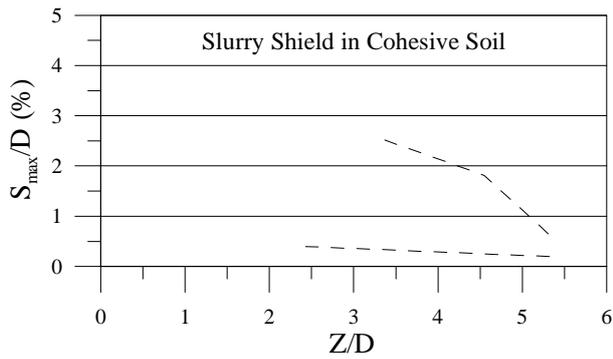


圖 3 泥水加壓式潛盾機於凝聚性土壤施工地表最大沉陷量建議範圍

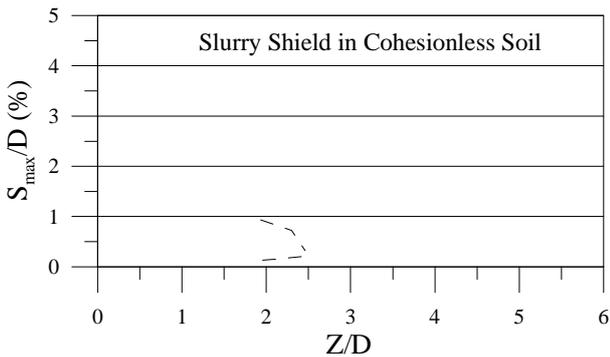


圖 4 泥水加壓式潛盾機於非凝聚性土壤施工地表最大沉陷量建議範圍

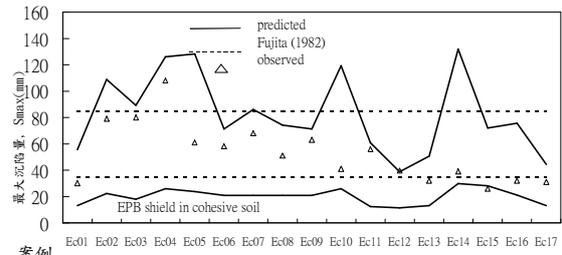


圖 5 最大沉陷量預估範圍與Fujita建議範圍之比較(一)

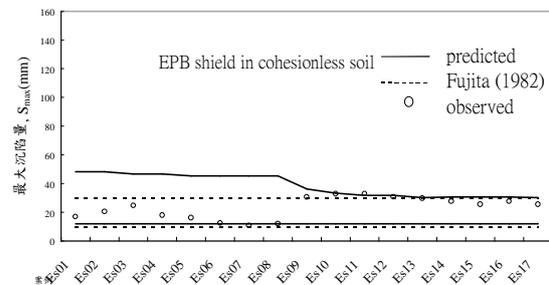


圖 6 最大沉陷量預估範圍與Fujita建議範圍之比較(二)

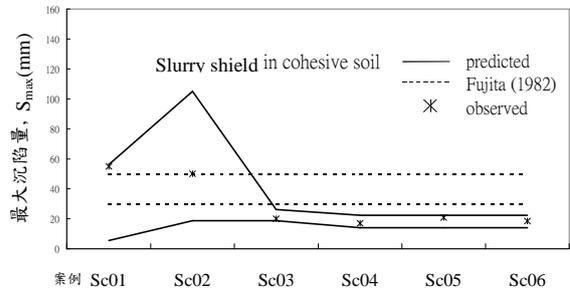


圖 7 最大沉陷量預估範圍與Fujita建議範圍之比較(三)

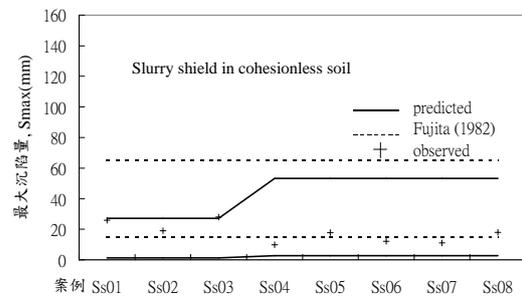


圖 8 最大沉陷量預估範圍與Fujita建議範圍之比較(四)