

地工新訊

微型隧道領域中傳統滑材和新一代滑材的比較與評估

Rick Zavitz * 著

林永光** 陳瑞禾*** 譯

一、前 言

傳統滑材的評估都是採用較為粗糙的方法。容器中的混合液體只要感覺黏稠、光滑和黏手，即可假定具有很好的管壁附著力和潤滑性。然而這種滑材雖然具有很好的“視感”和“觸感”，但一旦在不同的外力作用下很容易改變性能。在掘進過程中，這種滑材將在壓力作用下被注入掘進機機身與周圍土層所形成的環狀空間中。然後在隧道掘進機的推進力和管道的動態壓力作用下往前推進……。然而，每項工程的掘進深度、管道重量、直徑以及土層的物理化學性質都不同，它們將影響滑材性能。同時，諸如掘進速度和地下水的存在與否也將影響滑材性能。然而，在實驗室中不可能完全模擬現場工程環境。因此，傳統滑材(皂土和部分水解的聚丙烯醯胺(PHPA)聚合物)和新一代滑材(抗絮凝皂土和陰離子纖維素聚合體組成)都應採用標準的實驗室測試和現場測試兩種方法進行評估。同時，為更準確地比較各種滑材性能，滑材測試也常採用“案例分析法”。

二、皂土介紹

高嶺土是一種片狀的、具有寬廣表面與細小邊緣的晶體礦物。每一個高嶺土晶體都由類似三明治的三個不同的晶層所組成的：晶體的上下兩層都是由四面體的矽原子組成，中間一層則是由八面體的鋁原子組成。四面體的矽晶層通過與OH-共價而與八面體的鋁原子層緊緊綁在一起形成一個穩定的晶體。八面體層中的鋁陽離子和四面體層中的矽陽離子的定期同形置換將在晶體中產生一個電子，從而在晶體表面表現負電性。晶體表面的這些陰離子可強烈吸引極性分子，如水，以及

晶體中的陽離子。同時，由於破壞或晶原子鍵結不良也可在晶體邊緣產生少量的陽離子。

晶體表面所吸附的這些陽離子類型可說明定義高嶺土的物理和化學性質，從而決定皂土的物理化學性質。吸附鈉離子的黏土即為所謂的“鈉高嶺土”和“鈉皂土”。這種高嶺土在水基泥漿中具有高吸水性、高膨脹性、高黏度和高膠體強度的特點。吸附鈣離子的黏土即為“鈣高嶺土”和“鈣皂土”。這種高嶺土在水基泥漿中具有低吸水性、低膨脹性、低黏度和低膠體強度的特點。

當在一團高嶺土中加入水時，由於高嶺土表面吸收水分子促使各個黏土晶體顆粒移動進而分離。如果水量足夠的話，黏土晶體顆粒將彼此完全分離(水解)。這就是為什麼在水中加入鈉皂土時會產生懸浮液(即鑽井或隧道穩定液)。

三、滑材測試

微型隧道所使用的滑材泥漿可由可測量的物理性質來定義，如黏度、膠體強度、降伏點和泥漿漏失量。黏度可視為“流動阻力”，現場可簡便快捷地使用“馬氏漏斗”來測量：先將漏斗豎直放置，用食指堵住出口，再將試樣通過篩子倒入漏斗，直至樣品達到篩底，然後移開食指，並計算一夸脫(946 cc)樣品流完的秒數。

要更詳細地分析泥漿的特性必須使用葉片式黏度計。該測試工具可以測量在不同剪切速率下的泥漿黏度，通常使用最有代表性的600 rpm和300 rpm。它也可以測量泥漿的降伏點和膠體強度。膠體強度和降伏點是分別描述晶體和晶體間在靜態和動態條件下的相互作用。膠體強度表示皂土在水基泥漿中靜態條件下的凝膠特性和觸變特性。泥漿的膠體強度在攪動停止後將隨著時間逐漸增大。膠凝機制包括晶體間“線-面”、“線

* Wyo-Ben Inc.

** 磐碩工程股份有限公司 *** 磐富地工材料股份有限公司

-線”和“面-面”結合。在後面的案例中，晶體將通過彼此間的類水晶體間的吸引力而黏結。膠體強度在兩個不同的間隔時段中測量：10秒和10分鐘。這種隨著時間增加膠體強度迅速增強的特性稱為膠體強度發展

“降伏點”用於測量泥漿在流動環境下的電化學力。降伏點決定於泥漿固體顆粒的表面屬性、濃度和電性。首先通過第一次將600 rpm 的讀數值減去300 rpm 的讀數值來計算獲得“可塑性黏度”值，然後再將300 rpm 的讀數值減去“可塑性黏度”值，即獲得“降伏點”。

“流體漏失量”是指流體漏失到周圍土層中的水量。當水分從黏土質泥漿中漏失時，將在水分所漏失的土層中產生黏土固體顆粒，所形成的一層黏土固體顆粒被稱為“泥餅”。為形成“泥餅”，泥漿中必須含有比土層孔隙直徑略小的黏土顆粒。當較細的黏土顆粒首先被穿透到土層較深處時，這些顆粒（架橋顆粒）將在毛氣孔表面被截留下來，表面架橋區的孔隙繼續快速截留住更小的顆粒，直到（通常是幾秒鐘）水開始侵入土層。進入土層的水通常被稱為“過濾液”。API(美國石油組織)流體漏失測試法採用100 psi 的空氣壓力灌入標準測試容器中的泥漿樣品。一圓片過濾紙首先被放置於測試容器的底部——主要用來形成“泥餅”。現場標準測試法採用標準氣壓灌入測試容器中30 分鐘。在這一時間內測試容器中漏失的水量被收集並以最接近的毫升來測量。測試完成後從容器中取出過濾紙和“泥餅”用以測量厚度和完整性。諸如薄、厚、軟、糊狀、堅實等主觀屬性經常被用來描述“泥餅”的物理性質。一個理想的“泥餅”是薄、堅硬且光滑的。

四、實驗測試結果

實驗室選定兩種泥漿進行測試。第一種是在皂土滑材中使用的傳統泥漿（泥漿1）。它由“一次混合皂土”和部分水解的聚丙烯醯胺(PHPA)聚合物組成。所測得的馬氏漏斗黏度為180 秒/夸脫。第二種泥漿由一種抗絮凝皂土和陰離子纖維素聚合體組成（泥漿2），其黏度為85秒/夸脫。

採用標準的API流體漏失測試法對兩種泥漿進行測試了，並且另外還採用了比API 標準要求更長的測試時間。採用的時間分別是：30分鐘

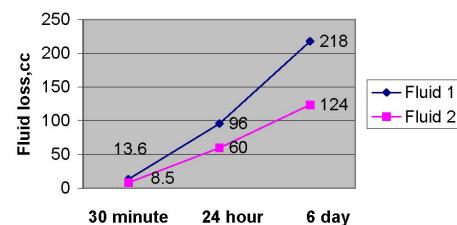
(API 標準)、24 小時和6 天。這項測試結果如表一a 和表一b 所示。從這些實驗中獲得的流體漏失資料如圖一所示，從每種泥漿測試中獲得“泥餅”的條件如圖二和三所示。

表一(a) 泥漿1 流體漏失試驗結果

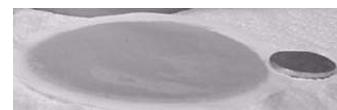
試驗時間	流體漏失量 - cc	泥餅厚度 - inch (mm)
30 minutes	13.6 cc	2.5 /32 (2 mm)
24 hours	96 cc	17/32 (13.6 mm)
6 days	218 cc	35/32 (28mm)

表一(b) 泥漿2 流體漏失試驗結果

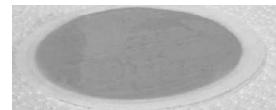
試驗時間	流體漏失量 - cc	泥餅厚度 - inch (mm)
30 minutes	8.5 cc (8.5ml)	1/32 (.8 mm)
24 hours	60cc (60ml)	3.5 /32 (2.8 mm)
6 days	124cc (124 ml)	6.5 /32 (5.2mm)



圖一 流體漏失試驗結果比較



a. 泥漿1 – 泥餅厚度2 mm



b. 泥漿2 – 泥餅厚度0.8 mm

圖二 API 流體漏失試驗(30 mins)



a. 泥漿1 – 泥餅厚度28 mm



b. 泥漿2 – 泥餅厚度5.2 mm

圖三 API 流體漏失試驗(6 days)

五、討論

傳統微型隧道滑材最初的概念是來源於水平導向鑽掘領域 (HDD)。人們也許期待我們能夠成功的將一些類似的泥漿技術同樣應用於微型隧道領域。然而事實並非如此，因為微型隧道使用的是不同的泥漿參數。一種優良的HDD泥漿可以攜帶許多鑽屑，而微型隧道中使用的皂土滑材並不需要這種功能。傳統的HDD工程以天數計算，而隧道工程則需以月計算。隧道工程的進展速度經常是一分鐘不到20 cm，而HDD工程的每分鐘進展就能夠超過一米。而且在微型隧道領域中非作業時間也較長。需要進行重新設置才能繼

續，新一節管材放置於推進機構之前需先分離部分管線(油壓、送泥、排泥等)。吊放、校準管材和重新連接已分離的管線也將消耗很多施工時間。所有這些過程都是微型隧道施工所必須的。在這些施工過程中皂土滑材都是靜態的，並受隧道壓力作用。

微型隧道泥漿產品經常是從其它類型的非開挖施工中直接引用過來。有一種“一次混合”產品經常用來加速混合，同時將PHPA 聚合物加入混合物中能夠極大地增加和調整黏度。泥漿1的測試就是這個例子。泥漿1 是一種高黏度的泥漿，它被認為具有理想的特性因為其黏度能使其附著在管壁上，儘管管壁的附著性是一項有價值的特性，但想要擁有良好的潤滑能力還需要其它特性。根據定義可知，高黏度的泥漿很難被運送至指定目的地。儘管很難證明，但高黏度潤滑劑通常都將滯留在皂土的入口處。理想上說，皂土滑材的摩擦力減輕層應當包圍著整個管道。一種具有高流動性和低黏度的泥漿（泥漿2）能夠更為容易的被攜帶到整個環形空隙。因為稀薄的泥漿容易在周圍土層中失去其整體性(逸流)，必須考慮更妥當的方法。現場測試使用抗絮凝皂土和陰離子纖維素聚合體。這項測試結果表明完美的“馬氏漏斗”黏度應在60~90 秒/夸脫之間，案例1 和案例2 很好地說明了這一點。它們分別將“馬氏漏斗”黏度從每夸脫183 和165 秒減少至每夸脫70 和85 秒。兩個例子的結果都使推進力大量減小。在所有的案例中泥漿的黏度都應根據工程中土壤環境和地下水滲透能力進行調整。

高黏性也會對皂土滑材的泵浦產生一些負面作用，增強的流體抵抗力會降低泵浦的效率。施工者必須很清楚地明白泥漿的流量，不足或過量的滑材注入將造成很大的影響，滑材注入不足會導致千斤頂負載增大。過量的滑材注入將導致表面泥漿積聚，或者有一種更糟的情況就是可能造成地表隆起。泥漿2由於其低黏度和改進的流體特性對泵浦產生的消極作用要小一些。

在水平導向鑽掘中，需要更高的膠體強度和降伏點，因其需要懸浮和運送鑽屑至孔口，但在微型隧道的皂土潤滑系統中我們不要求泥漿攜帶鑽屑。由於此類皂土滑材需要較高的泵送壓力，控制不慎易造成隧道密封失敗和泥漿溢入井

道中，導致地表破壞和沉陷。高膠體強度和高降伏點事實上也會增加千斤頂負載。既然微型隧道施工涉及太多的非作業時間，具有高膠體強度的傳統泥漿1就不太適用。因為這些泥漿在返回途中將使千斤頂負載增加，一個生動的例子就是這種情況會發生在隧道在兩天的週末時間後重新開工的時候。在所有隧道暫停然後重新開工的情況下，其中必須克服的一種力量就是膠體強度。摩擦中黏土晶體間的電化鏈必須被斷開這樣管道才能向前移動。有高黏性的泥漿（泥漿1）展現其具有較高的膠體強度。皂土和周圍土壤的混合能夠更快的加速凝膠。在這項研究中，包括清潔的泥漿，使用泥漿1所展現的膠凝現象是相當真實的。泥漿2形成的膠體強度則被（刻意設計）降至非典型泥漿所能具有的水準。案例1 就是這一例子。增加的推進力最終導致管道被擠壓破壞，後來在重新施工時採用了新一代滑材，從而產生了相當低的千斤頂負載。儘管降伏點的重要性不如膠體強度，但它也是管道在推進過程中必須克服的力量。再者，泥漿2 也已經進行改進到能夠達到較低的降伏點。必須記住一點是降伏點只是在動態環境下才起作用（當管道在移動時）。

在實驗室中測試泥漿1 和泥漿2 時可以發現在產生的濾出液的數量上有很大的差異（圖2），這種情況將隨著測試時間的延長而更加明顯。在隧道施工過程中將花費更長的施工時間，因而泥漿有大量的時間將你泥漿漏失到周圍的土層中。在這段時間內管壁增加的壓力也會造成泥漿更大漏失，大量的泥漿漏失會導致形成更厚的“泥餅”。例如6 天測試中的泥漿1，生成了一塊28mm 厚的泥餅（圖三a）。這塊泥餅非常的黏稠，為管道摩擦提供了更大的區域。隨著水分從泥餅中析出，滑材的特性也將大大降低。在對泥餅的光滑度進行的進一步測試將為這一特性提供更定性的資料。泥漿2在六天的測試中形成了一塊5.2 mm厚的泥餅。這塊泥餅較泥漿1 在同一時間段內所產生的泥餅更硬、更薄而且更為光滑。從主觀上感覺，泥漿2提供了比泥漿1更為良好的和改進的潤滑特性。擁有這些特性的泥漿是微型隧道掘進滑材的上好選擇。儘管泥漿1所表現的黏性和現行所用標準相近，但是在泥漿漏失方面還是有很大的差距。泥漿1 在30 分鐘的

測試時間內漏失了13.6 cc（表一）。現場的測試結果也充分證明其漏失了18 cc甚至更多。更厚、更黏的泥餅對推進作用具有非常大的負面作用。泥漿2的實驗室結果可以代表現場結果。

還須再加考慮的是滑材的抗地下污染特性。部分水解的聚丙烯醯胺經常被用來顯著提高其黏性。這是其高分子重量和聚合鏈長度的一項功能。然而PHPA聚合體非常易受污染而導致功能下降。高剪切環境會導致聚合體連結的破壞。土壤和地下水中的鈣質和氯離子的存在會對聚合體產生很顯著的影響。由於泥漿1的組成，高水硬度和鹽環境會導致其絮凝。這是一個滑材中泥水分離的過程。這會導致泥漿在注入結束後，壓力突然減小(部分泥漿中的水因泥水分離析出並逸流)，使得隧道施工者承受較高推進阻力，這在案例2中得到了驗證。環形空間中的滑材將與燕麥有著相似的視覺外觀。結果可能是我們想要的潤滑特性將會不復存在。泥漿2是根據使用中的增加的水硬度（通常是鈣）和氯化物的忍受能力來進行設計和展示的。陰離子纖維素聚合物的加入可大大加強該泥漿在極端環境下作用的功能。施工前就應先確定污染源，包括：水源、地下水、掘進地層和鋪設管道材質。

六、現場測試結果

6.1 案例1

- 地點：2003年美國華盛頓
- 推進管徑：外徑88 in (2,235mm) 混凝土管；管道總長：900 ft(274m)
- 推管掘進機：伊勢機（Iseki）
- 土層：高水位、內含流木的砂礫層
- 滑材：由皂土和183秒/夸脫黏度的PHPA聚合體組成的傳統泥漿。
- 問題：在隧道掘進48 ft (14.6 m) 後的推進力超過300噸時管道壓碎變形。
- 解決辦法：修復管道並配製了皂土泥漿以減小推進力。混合抗絮凝皂土和陰離子纖維素聚合體形成一種70秒/夸脫的黏度的泥漿。在接下來四個小時的推進過程中，推進力被減小到120噸以下，推進速度為18 cm/分鐘。在後面的推進過程中一直保持在這一水準。

6.2 案例2

- 地點：2004年美國加州
- 推進管徑：內徑60 in (1,524mm) 混凝土管；管道長度：890 ft(271m)
- 推管掘進機：Herrenknecht
- 土層：砂礫和大量流入發進工作井的污染水
- 滑材：由皂土和145秒/夸脫黏度的PHPA聚合物混合成的傳統泥漿。
- 問題：第一台隧道掘進機在離到達井100 ft (30.5m) 處即被黏住，土壤和水質環境雖未變，但發進井的水已被海水和鈣質污染。
- 解決辦法：使用抗絮凝皂土和陰離子纖維素聚合體混合配製成85秒/夸脫黏度的泥漿。作為安全措施，又安裝了一組中押推進系統。但最終推進力只有300噸左右，並沒有使用“中押推進系統”——管道可承受的最大負載可達540噸，當推進力達到400噸時，才需使用這套“中押推進系統”。最終，平均推進速度為17 cm/分鐘。

6.3 案例3

- 地點：2004年美國加州
- 推進管徑：內徑為48 in (1,219 mm) 的混凝土管；管道長度：860 ft (262 m)
- 推管掘進機：Herrenknecht
- 土層：沒有地下水、混合有少量黏土的砂礫層
- 滑材：由抗絮凝皂土和陰離子纖維素聚合體混合配製成的70秒/夸脫黏度的新一代泥漿。
- 結果：推進到134 m推進速度470毫米/分鐘時，推進力達到48噸，最後推進力達到90噸。推進速度為47 cm/分鐘，在440 ft (134米) 處推進力接近48噸。整個工程中推進力一直維持在90噸以下

七、結論

從其他非開挖施工方法中引用過來的傳統泥漿只是經過“改良”後應用於微型隧道現場施工作為滑材使用。其主要特點是高黏性和質地光滑。專為微型隧道和推進施工設計研製的新一代泥漿更適用於這種需要減小管周阻力的工程。實

驗室和現場測試都已證明這種滑材的泥漿漏失量、膠體強度、降伏點、黏度和抗化學污染能力等特性都很獨特的。較低的泥漿漏失量可形成很薄的泥膜而具有良好的潤滑特性。低膠體強度和低降伏點降低了管周阻力，從而保障整個推管過程的順利進行。低黏度更適用於微型隧道掘進，它可形成更為均衡有效的潤滑層。最後，具有抗化學污染能力的微型隧道專用泥漿能夠較好地保持滑材的完整性和潤滑品質。

參考文獻

- Gray, George R., "Composition and Properties of Oil Well Drilling Fluids".
 Grim, Ralph E., "Clay Mineralogy".
 Haliburton Company, "Drilling Concepts and Practices for Drilling Fluid Engineers".
 Haliburton Company, "Drilling Mud Handbook".
 Magco Company, "Drilling Fluid Engineering Manual".

譯者補充說明

說明一：

原文為未發表之內部技術文件，作者服務於美國Wyo-Ben公司，該公司於皂土相關產業中頗富盛名，故該文可反映部分美國推管業內對滑材工作原理及選擇標準的看法(低粘度及低流體漏失率)；雖部分觀點與日本廠商強調之高粘度、低逸失性並配合單環多孔注入來完成填充開挖間隙之觀念有所出入，但文中提到之各項檢驗項目及方法，對於尚無滑材標準檢驗方法的台灣而言，仍具相當的參考價值，另以下針對日本近期滑材工作原理做一簡單整理及說明。

由於早期台灣較無長距離推進施工案件，施工廠商對於相關滑材之選擇、使用及工作機制並不清楚，相關研究也不完整，但由於近年長距離、急曲線及礫石層的推進案件日漸增加，廠商對於滑材的需求也日趨急迫，但因本身對相關滑材材料認識不足，且國內對滑材缺乏有系統之研究，只能依樣畫葫蘆，照著貿易商提供之部分資料來嘗試，但因地質條件的不同，常因效果不彰而造成成本與工期的不必要損失，譯者嘗試由國外文獻中找出相關試驗方法及項目，提供同業作為判斷及調整滑材性能定量描述依據。但因滑材使用與現場

施工狀況與地質條件息息相關，故試驗標準仍需視地層、機械、施工條件及廠商施工經驗而定。

說明二：

一般造成推進作業中，管周推進阻力構成的原因依據外在因素及內在因素分別說明如下：

1. 內在因素：滑材性能(逸失性、稀釋性、針對地下水之抗化性等)
2. 外在因素：覆土壓力、黏性土層與管壁間的附著力、土拱未形成造成地層局部崩塌、掘進方向歪斜、推進管自重等，如圖四。



圖四 管周推進阻力構成示意圖

內在因素部分主要是要為維護滑材本身的工作性，避免因推管作業中對地層擾動造成滑材本身逸失、與地下水混合稀釋影響滑材品質或與污染地下水混合造成滑材劣化。外部因素的重點則是在於減低作用於管壁上之土壓力，使滑材完整填充於推進管外的超挖空間，避免土層與管壁直接接觸，以利滑材減摩效果發揮。以下分別說明之：

依據常用日本下水道協會之推力計算式，管周摩擦力的來源主要來自覆土壓與管重合成之正向力與管身與土壤間的摩擦係數組合而成，由於管重為定數，如何減低覆土壓及降低摩擦係數為高性能滑材所必須達成的目標，以下分別說明之：

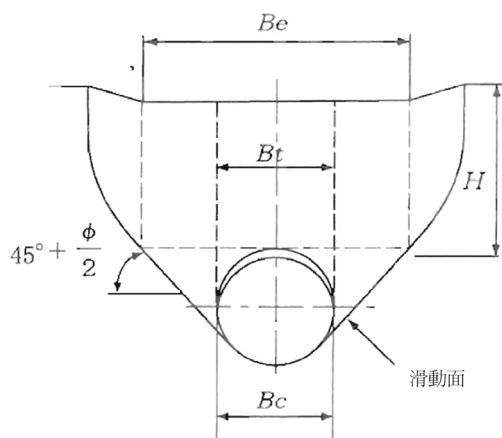
依據日本下水道協會建議公式，基本上覆土壓是採Terzaghi公式計算，並不考慮土拱效應(如下圖五)，因此所得推力計算結果應屬相對保守，此計算方法使用已久，由於計算結果偏向保守側，故於長距離推進工作中，往往需增設1組以上的中押系統，對於施工者造成較大的成本負擔。但若我們將NATM工法之觀念應用於此，參考Fenner-Pacher曲線(圖六)，於掘進完成後，及時填充管周圍的超挖空間，抑制土體變形，使之提前形成土拱，成功維持管周土體徑向的自立性，如此除可抑制地表變形之外，作用於管身上之覆土壓自然可大幅減低。基本上近年台灣常用之泥濃式推進工法即為此原理的代表工法，但由

於泥濃式工法屬專利工法，目前所有施工技術及相關耗材供應，均需由日本提供，甚至現場操作均需由日籍操作手指揮，且其施工期間產生之廢土處理困難，對成本影響甚鉅，除特殊地層及需求外，並未完全普及。

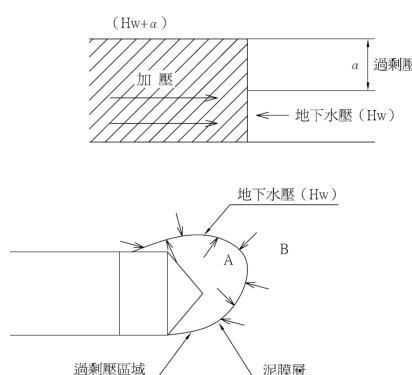
因為泥濃工法需採購專用機具，成本相對較高。故日本亦有依據NATM精神開發之各式高性能滑材，其主要特點均在於低流體漏失率及容易注入，此點與原文中提及之有異曲同工之處，但日式高性能滑材為符合NATM的觀念，特別注意其材料本身的支撐性。故其流動性無法與原文中泥漿2相提並論。參考近年日本文獻資料，採此原理設計之高性能滑材，已能有效將推力降低，換算滑材低減係數(β)已達0.055(筭喜一等，2003)，而日本下水道協會建議折減係數介於0.75~0.5之間。

影響摩擦係數的原因可分為以下幾點：

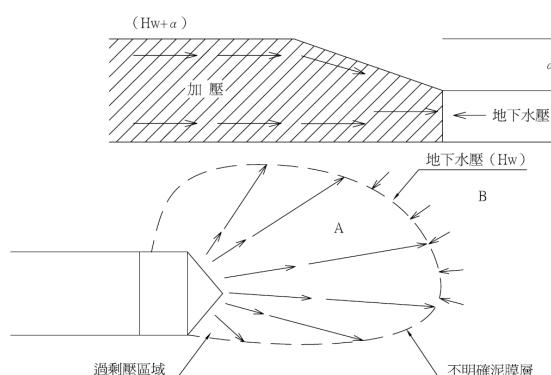
1. 粗糙的接觸面



圖五 Terzaghi 公式覆土壓計算示意圖



圖六 Fenner-Pacher 曲線示意圖

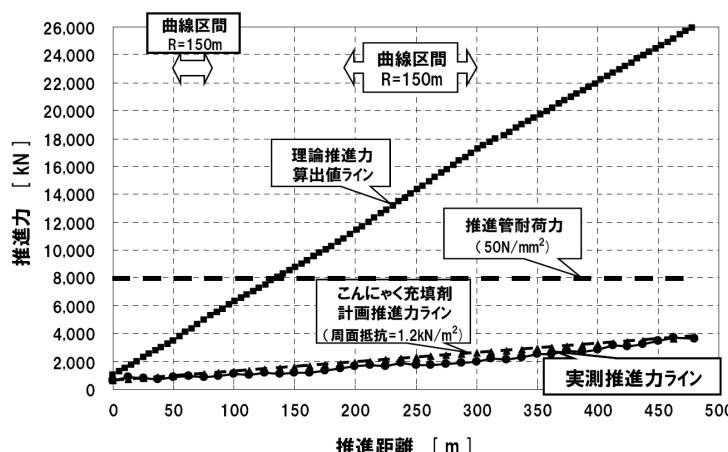


圖七 高滲透性地層泥膜形成過程(酒井榮治等，2004)

推進掘進過程中，對土體的擾動相當大，如何使掘進面保持穩定，除土壓或泥水壓控制得宜外，適當的加泥材或做泥材的選擇亦相當重要，一個穩定的掘進面，對於土拱的形成有絕對正面的幫助，本土廠商對此並不注意，不穩定的泥膜層易造成泥水逸流而壓力佚失，影響開挖面穩定(如圖七)，可能造成管周徑向土體無法形成自立狀態，導致土體於管周直接接觸，如此將大幅影響滑材功效發揮。

2. 黏滯性

一般在推進施作期間，當管周地層為自立狀態下，由於推進管材本身為光滑面，預期滑材將因與土體間的摩擦力較大而留在原處，這點或許可以解釋部分日本高性能滑材產品黏度大於前文所提之泥漿2；而推管推力所需克服的為滑材與管之間的黏滯力，而非管與土壤之間的摩擦力。參考泥濃工法(酒井榮治等，2004)及GIMSYS工法(賀卷達也等，2004)，為減少管壁的黏滯力，

圖八 $\phi 1500\text{ mm}$ 推進力管理圖(笹喜一等, 2003)

同時避免因管材向前推進造成先前支撐徑向土體的一次固結型滑材破壞，會在一次滑材與管壁間注入二次滑材，以降低的管壁的黏滯力。此觀念與原文中之低流體漏失率中泥餅厚度有關，重點在於避免滑材於管周之環狀超挖空間產生固結現象，造成黏滯力上升，如為穩定開挖壁而需採固結型滑材，則需於管壁與固結體間再次注入滑材，以避免發生黏滯力上升造成推力增加。

由於一般皂土滑材容易在管材推進期間，因與地下水結合而稀釋，影響原本設定之滑材性能；甚至因地下水中的污染物或鹽化造成滑材嚴重劣化。此狀況在台灣沿海地區甚為常見，除於施工前進行水質檢測之外，選擇具抗化性的滑材也很重要。目前已有許多皂土添加劑可克服此狀況；此外高黏度的滑材因不易與地下水混合，故具有相當的抗化性，同時也不因稀釋而造成滑材性質改變。

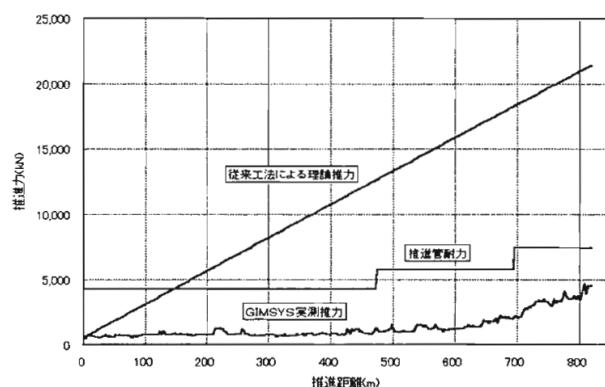
說明三：日本滑材使用案例

案例1 日本(株)ジオックス滑材系統

- 地點：日本山形縣山形市內
- 推進管徑：內徑為 1500 mm 的混凝土管；管道長度：482 m
- 推管掘進機：泥水式中押推進系統
- 土層：砂礫石、黏土互層
- 滑材：こんにゃく充填剤。
- 結果：全線最大推力僅 3620 kN，依據日本下水道協會修正式反算推進力低減係數(β)為 0.055。

案例2：日本(株)加賀田組滑材系統

- 地點：日本山形縣山形市大字南館
- 推進管徑：內徑為 1100 mm 的混凝土管；管道長度：819.9 m
- 推管掘進機：泥水式中押推進系統
- 土層：砂礫石黏土互層、細砂粉土互層
- 滑材：GIMSYS GEL滑材及液狀滑材。
- 結果：原設計最大推力為 42,330 kN，現場實側最大推力為 4,511 kN。

圖九 $\phi 1100\text{mm}$ 推進力管理圖(賀卷達也等, 2004)

參考文獻

- 笹喜一等(2003)“推進工法に使用する滑材とその特性”，月刊推進技術，Vo.17，No.6。
 賀卷達也等(2004)“長距離推進工法『GIMSYS』2液滑材被膜形成システム”，推進工事の難条件下を克服した新技術とその施工実績，第39-47頁。
 酒井榮治等(2004)“特殊線形 特殊條件下における超流セミシールドの實績と技術的課題”，日本プロジェクト・リサーチ第二十八回講習會。