

出國報告（出國類別：進修）

赴英國伯明罕大學進修

服務機關：台灣電力股份有限公司

姓名職稱：土木設計專員 邱詠兆

派赴國家：英國

出國期間：97年8月8日~98年12月13日

報告日期：99年2月10日

QP-08-00 F04

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：赴英國伯明罕大學進修

頁數 38 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話 台灣電力公司/陳德隆
/(02)23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話
邱詠兆/台灣電力公司/輸變電工程處北區施工處/線路土木設計專員
/(02)23229922

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：97.08.08~98.12.13 出國地區：英國

報告日期：99.02.10

分類號/目

關鍵詞：潛鑽、HDD、Horizontal Directional Drilling、回拉

內容摘要：(二百至三百字)

基於都市景觀日受重視，地下電纜已成為人口稠密之都會區主要高壓輸電之方式。然而輸電電纜地下化同時，又必須兼顧原有市區道路交通的服務功能，且因既有道路隨著都市發展，各管線單位經年累月的挖掘，傳統採用的明挖回填工法除了影響交通延時長，地表附近空間也因為管線密佈而不容易穿越施工，免開挖工法在此背景下，也漸為都市高壓輸電線路佈設採用之工法。免開挖工法之一潛鑽工法(HDD)雖在國內已有工程實績，也被視為一種用來穿越河川佈設電纜管線的理想工法，然而其力學機制、特別是回拉阻力計算部份並未被完全了解。

潛鑽回拉阻力基本組成包括：管材自重與浮力、摩擦力、絞盤效應、管材撓曲勁度、流體黏滯力等。目前存在多種計算此回拉阻力之模型，各有其假設及相對應之限制。諸如 ASTM、Larry Slavin、Drillpath 等方法只能適用於 PE 管材作為使用管且線形單純之工程；PRCI 法則極可能過度高估流體黏滯力之貢獻；Polak 與 Lasheen 力學模型雖考慮較為完善，但其所得預測值仍偏向下邊界，使用上應注意其低估回拉阻力之可能。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網 (<http://open.nat.gov.tw/reportwork>)

目次

壹、	進修目的.....	1
貳、	修業過程.....	1
	一、申請學校.....	1
	二、修業行程.....	2
	三、修業內容.....	2
參、	研究專題摘要：.....	7
	一、緒論.....	7
	二、工法簡介.....	8
	三、潛鑽之力學機制.....	10
	四、既有估算方法.....	10
	五、回拉阻力之基本組成.....	21
	六、結論.....	29
肆、	求學心得與感想.....	32
伍、	具體建議.....	33
陸、	致謝.....	35
柒、	參考文獻.....	35

壹、進修目的

基於都市景觀日受重視，地下電纜已成為人口稠密之都會區主要高壓輸電之方式。然而輸電電纜地下化同時，又必須兼顧原有市區道路交通的服務功能，且因既有道路隨著都市發展，各管線單位經年累月的挖掘，傳統採用的明挖回填工法除了影響交通延時長，地表附近空間也因為管線密佈而不容易穿越施工，免開挖工法在此背景下，也漸為都市高壓輸電線路佈設採用之工法。免開挖工法之一潛鑽工法(HDD)雖在國內有相當工程實績，也被視為一種用來穿越河川佈設電纜管線的理想工法，然而其力學機制、特別是計算回拉阻力部份並未被完全了解，尤其中文相關資料十分缺乏，遂有出國研修之必要。

適逢公司配合行政院「菁英留學計畫推動方案」推動「97年度『菁英留學計畫推動方案』選派人員赴國外進博、碩士學位實施方案」，便提出此出國進修計劃以期吸取西方經驗，協助公司於推動輸電工程更加順遂。

貳、修業過程

一、申請學校

通過公司內部書面進修計劃審核與口頭報告詢答方式遴選，倖得此機會出國進修，遂開始著手申請入學之手續。赴英進修所需文件包括：語言能力證明、學業成績證明、推薦函，及其他有利申請文件，如著作等。

赴英國所需之語言能力證明自是英語，主要以 IELTS(The International English

Language Testing System)之成績為證明，不過托福成績亦被承認。英國大學土木工程研究所課程所要求之英語能力一般在 IELTS 成績 6 到 6.5 之間，就讀之伯明罕大學則為 IELTS 6.5 分，聽說讀寫四個分項皆須高於 6 分。

因為研習目的為免開挖工法(Trenchless Technology)，便搜尋專精此領域之學者為師從之目標。最後決定選擇免開挖工法期刊『Tunnelling and Underground Space Technology』之前總編輯、現任編輯 CDF Rogers 教授與編輯 DN Chapman 博士所任教，且名列世界百大的英國伯明罕大學(University of Birmingham)就讀。

所幸，申請過程相當順利，經過一段忐忑不安的時間等待回復，最後順利獲得學校入學許可，踏上異國求學之旅程。

二、修業行程

時間	地點	工作概要
97年8月8日～ 8月9日	桃園中正機場→ 法蘭克福機場→伯明罕機場	往程 (台北→法蘭克福→伯明罕)
97年8月9日～ 98年12月12日	英國 伯明罕大學	攻讀大地工程碩士學位並以 「潛鑽回拉阻力估算」為專題
98年12月12日～ 12月13日	伯明罕→倫敦希斯羅機場 →桃園中正機場	回程 (伯明罕→倫敦→台北)

三、修業內容

修課內容包括工程地質 (Engineering Geology)、工址調查 (Site Investigation)、財務決策 (Financial Decision Making in Business Environment)、土壤力學(Soil

Mechanics)、地下工程 (Ground Engineering)、基礎工程 (Foundation Engineering)、邊坡與擋土結構物 (Slope and Retaining Structures)、高等土壤力學 (Geomechanics)、研究方法(Research Skill)、研究專題(Research Project)，各課程詳述如下：

工程地質 (Engineering Geology)

授課內容包括工程師應用之地質學、岩石力學、岩石邊坡穩定等等。

工址調查 (Site Investigation)

工址之土壤調查方法、採購、設置、報告撰寫與判讀、調查儀器之設置，及地球物理(Geophysics)探測方法，包括電磁場法、重力磁場法、自然放射線法、震測法、地盤穿透雷達等等。

財務決策 (Financial Decision Making in Business Environment)

由商學院教授開設之課程，以幫助大地工程師於執業時在實際商業運作過程中做出更符合公司營運成長之決策。內容主要包括：商業、財務理論、財務決策、案例探討等，並透過小組討論提出共同報告訓練溝通協調能力。

土壤力學(Soil Mechanics)

教學內容包括土壤性質、土壤分類、有效應力、滲流問題、土壤壓密、剪力強度等大地工程師在土壤裡施工可能會遇到之問題。

地下工程 (Ground Engineering)

課程包括地盤改良、降水工程之設計、土壤污壤之路徑及其防治與處理、概念模型之建立(Conceptual Model)、永續工程(Sustainability)、隧道工程、免開挖工法 (Trenchless Technology)等等。

基礎工程 (Foundation Engineering)

內容包括普通基礎、單樁基礎軸向承載力、側向支承力、群樁基礎設計、樁載重試驗、筏式基礎、沉陷抑制樁之設計、各式樁施工流程、基樁完整度檢測等，以及地震工程、土壤動力學。

邊坡與擋土結構物 (Slope and Retaining Structures)

授課內容包括邊坡穩定之理論、邊坡安全係數之計算、側向土壓力、邊坡長短期之穩定分析，擋土結構物如重力式擋土牆、蛇籠擋土牆、板樁牆、加勁擋土牆、土工織物等之設計。並至啓發各界關注邊坡長期穩定性、殘餘剪應力之著名邊坡滑動地 Jackfield 現場參觀，並據以提出邊坡穩定探勘報告。

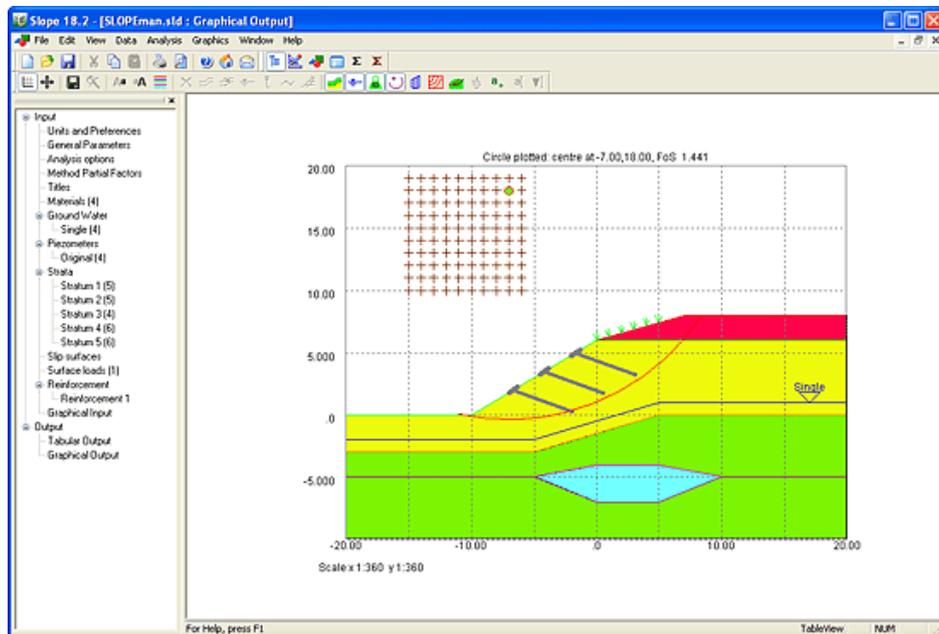
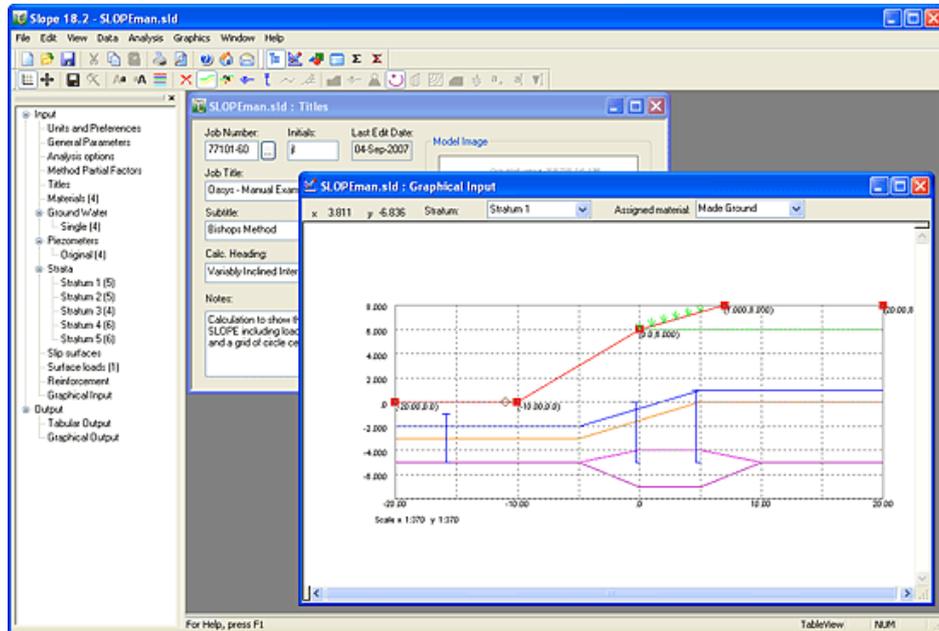


圖表 1 Jackfield現場勘查與同學合影

高等土壤力學 (Geomechanics)

研習內容包括大地工程電腦輔助設計、極限狀態土壤力學(critical state soil mechanics)、土壤力學近期發展。

電腦輔助設計使用了 OASYS 公司多套軟體，包括計算軸向沉陷之 Psisp、擋土牆計算軟體如 Frew、Stawal、Greta，邊坡穩定之軟體 Safe、Slope，並學習如何檢核電腦軟體之計算成果，以及電腦軟體可能發生誤差所在。



圖表 2軟體Slope之操作介面

研究方法(Research Skill)

參加定期舉辦之英國中部大地工程學會(The Midland Geotechnical Society)所舉辦邀請世界各地專家之演講。透過撰寫演講摘要，訓練參加學術研討會所需要之摘錄重點、提問之技巧。此外，並撰寫專題研究計畫進度表交予教授評估，教授亦提示論文資料整理與撰寫技巧。

專題研究 (Research Project)

由學生選定主題主動與系上對相關領域有專長老師討論論文方向，並經雙方同意後確定為該專題研究之師生關係。選擇後，指導教授並邀請系上研究中心具博士學位之研究學者(Research Fellow)共同擔任專題研究之指導。在完成近百頁的論文之後，除接受書面審查外，尚需進行口頭報告，並接受評審教授之詢答。通過此專題研究且修習學分數合格者，始取得畢業資格。口試中，教授嚴厲之措辭與平常堆滿笑容的慈眉善目，實天差地別，數名同學不幸在此關卡被擋下，必須繼續修改論文。

參、 專題研究摘要：

潛鑽工程回拉阻力之估算

一、緒論

由於採用傳統開挖工法不可避免的影響交通服務水準，近年採取免開挖工法佈設電力纜線之比例已逐日提高。潛鑽工法(Horizontal directional drilling 縮寫 HDD)在實務上已證明可用於長距離施工。第一個成功潛鑽施工案例於 1971 年在美國加州佈設一穿越河床底部半徑 180mm 之鋼管。潛鑽工法可利用塑膠管或鋼管來佈設不同用途之地下管線，諸如電信、電力、給排水管等等。除傳統的運用範圍外，近來離岸風力發電廠傳輸電力的需求讓潛鑽成爲一個延放長距離電纜受歡迎的選項。

氣候變遷刻正爲目前全球共同面對之問題，爲致力減低溫室氣體排放量，再生能源之發展已變成主流議題。在目前發展的科技中，風力能源爲發展較爲成熟且爲廣泛接受之再生電力來源。風力發電廠與其他發電來源如水力、火力、或核能發電廠一樣，都需要一塊大面積之土地來建置「發電廠」，然而風力發電廠另一個優勢就是其可以被建築於海面之上，且建置於海面之風力發電機其發電效率亦優於陸上發電機。是故在可以減少路地使用面積、減少用地取得成本與阻力，又能提高發電效率兩者兼顧的情況下，離岸風力發電廠的設置逐漸在歐美地區風行。除此之外，於海面上運送大型風力發電機零組件(塔身、發電機具、風葉片等)亦較陸上利用火車或卡車運送便利。因爲這些優勢，離岸發電機的設置已經成爲快速成長的產業。丹麥首先設置離岸式發電機，並在數量上多年保持領先全球的態勢，直到 2008 年 10 月英國以 590MW 的裝置容量取代丹麥而成爲全球離岸風力

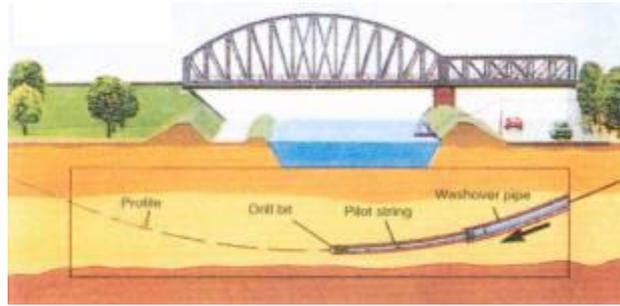
發電機組裝置容量最大之國家。英國並計劃在 2020 年前更大幅度的建設離岸風力發電，以達成單純以離岸式風力發電提供全英國家庭用戶之目標。(英國衛報 2008)。

為因應產業界目前以及未來對於長距離潛鑽工程的需求，關於潛鑽工法量化的評估分析更顯重要。過去二十年間，最被研究的兩個領域為穩定鑽掘孔壁的所需鑽掘液的配比及液壓，和回拉過程中使用管所遭遇之回拉阻力。本研究專題將聚焦於提高回拉阻力預測模型之正確度，因為回拉阻力之大小通常為長距離潛鑽工程之障礙。

在潛鑽工程不算長的歷史，目前有幾種既存的方法來評估潛鑽回拉過程之阻力，包括塑膠管協會(Plastic Pipe Institute)建議之 Larry Slavin 法、國際管線研究學會(Pipeline Research Council International)依據 Huey 等人(1996)研究而建議之 PRCI 方法、Phillips Driscopipe (1993)提出之 Driscopipe® 以及電腦軟體 Drillpath™,1996。最近 Polak & Lasheen (2002) 和 Cheng & Polak (2007)透過力學解析的方式來模擬潛鑽之力學行為。然而，既有的預測模型並未提供令人滿意之估算，因此也成為本文研究動機。

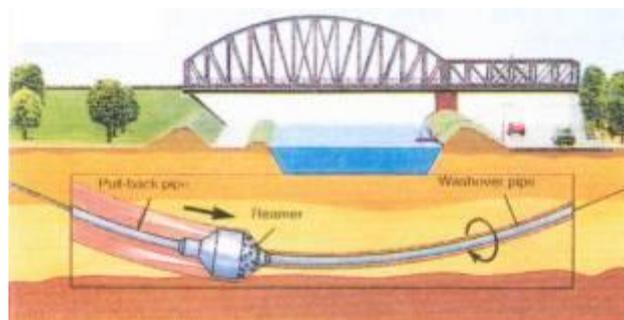
二、工法簡介

潛鑽原本應用於石油工業，因其可於土壤中佈設管狀結構物，後被衍伸運用於維生管線之鋪設。潛鑽工法的施工可以分為三個步驟：導向鑽掘、擴孔以及回拉。於導向鑽掘的階段，一直徑 50 至 100mm 的鑽孔依預定路徑由進入孔至到達孔。鑽頭的位置可於地面上透過雷達、或磁性探測等儀器監控。方向的調整可藉由傾斜之鑽頭面或不旋轉前進鑽頭來達成。



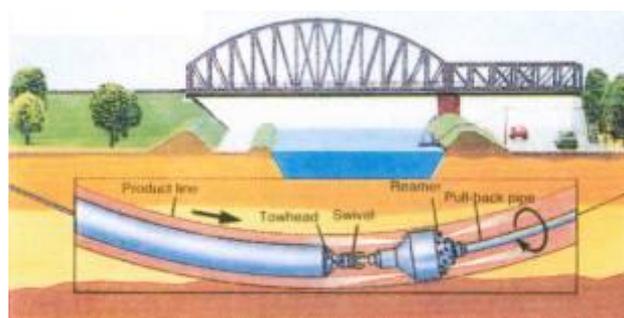
圖表 3 導鑽階段

在擴孔階段，鑽頭改以擴孔器(back-reamer)替代。擴孔器沿原路徑回拉，將孔徑擴大到預定半徑以供使用管置入。



圖表 4 擴孔階段

於回拉階段，使用管材安置於鑽掘串(drill string)、擴孔器及旋轉接頭後端。回拉開始使用管被拖曳進入鑽掘孔，鑽掘桿隨之回收。在許多工程案例，回拉作業與第二階段之擴孔合併執行。在整個安裝過程中，鑽掘液以壓力經過鑽掘串泵送入鑽掘孔。通常以皂土漿或高分子溶液為主體的鑽掘液於鑽孔壁周邊形成穩定層，減少了鑽孔內之摩擦阻力、作為運送出切削土渣之媒介，並冷卻位於鑽頭之定位探測器。



圖表 5 回拉階段

三、潛鑽之力學機制

潛鑽的力學行為包括了機具、土壤、鑽掘液與管材之間的相互影響。基於分析的理由，潛鑽安裝過程的力學機制可分解為施加於管材之張力、管材與鑽掘孔壁之間磨擦力、流體黏滯力、管材與鑽掘孔壁之間正向接觸力，以及管材自重。這些力量造成了管材軸向以及彎曲的應力及應變。軸向應力主要來自於管材、土壤以及流體之間的磨擦力。彎曲應力來自於管材受限於鑽掘孔壁線形而產生的水平及垂直方向的彎曲。其他可能造成潛鑽安裝時的張力包括了扭轉與環向的應力。若隔離管材以及擴孔器之旋轉接頭在安裝過程中並未完全作用，則扭轉應力將施加於管材上。環向應力是源自於鑽掘孔內經加壓過之鑽掘液，此壓力透過地下水施加到管材，以及鑽掘孔崩坍直接施加於管材上。(Petroff 1997; Svetlik 1993; Gelinias and Polak 2000)

四、既有估算方法

目前在業界以及學術界有諸多關於計算潛鑽回拉力之計算方法被提出，然而其預測之準確性仍無法讓人完全滿意。以下篇幅將就既有之計算方法做一簡要介紹。

Larry Slavin 法

美國塑膠管協會(Plastics Pipe Institute)建議使用由Larry Slavin提出之方法計算方法。此種方法常為台灣地區顧問公司及承攬廠商所使用，其直線段考量管材與鑽掘孔壁之皂土膜間之磨擦力，轉彎段則考量絞盤效應(capstan effect)對於回拉阻力之影響，並利用以下之公式來估算回拉阻力：

$$T_s = \mu W s L \quad \text{對於直線段} \quad \text{參-1}$$

$$T_c = \exp(\mu\alpha)(\mu W s L) \quad \text{對於轉彎段} \quad \text{參-2}$$

回拉力則為直線與曲線段分段拉力之累加，即：

$$T_{\text{total}} = \sum_1^i (T_{\text{si}} + T_{\text{ci}})$$

參-3

其中 μ =管材與土壤之摩擦係數(0.4)或管材與鑽掘液間摩擦係數(0.25); W_s 代表管材之自重、管材內容物(若有)、以及浮力的聯合作用(kN/m); α 表轉彎段之經過角度; L 表分段長度 (m)

此計算原理也被ASTM所採用，並發表於ASTM F 1962-05之設計指針。

ASTM F 1962 – 05 法

美國材料試驗協會(ASTM)提供了一個關於進入點、第一轉彎處、第二轉彎處以及管材出口處四點位置之回拉阻力之計算公式。此設計指針特別應用於使用PE管之大型潛鑽工程(Maxi-Horizontal Directional Drilling for Polyethylene Pipes or Conduit Under Obstacles, Including River Crossings)所用，經參數分析，其並不適用對於採用鋼管作為使用管之潛鑽工程。其中關於大型(maxi)的定義，依據DCA Technical Guidelines於2000年十月發表的文件，可依 表格 1分類 (Bayer, 2005)

分級	最大額定拖曳力(kN)	最大扭矩 (kN-m)	重量 (t)
Mini	150	7-13	<7
Midi	150-400	15-30	7-25
Maxi	400-2500	30-100	25-60
Mega	>2500	>100	>60

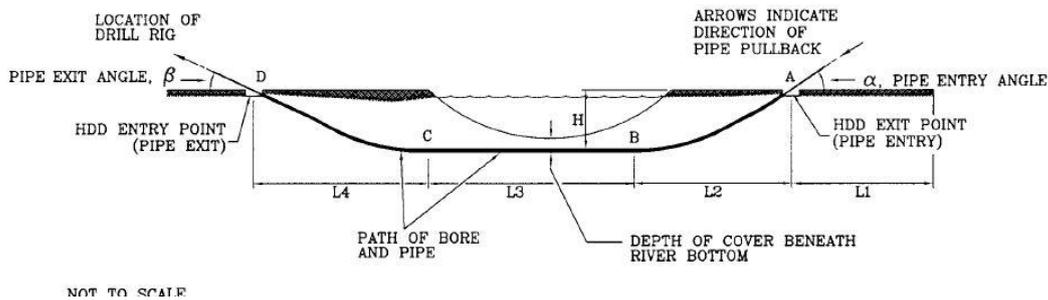
表格 2 潛鑽機分級 (DCA Technical Guidelines)

ASTM 之計算模型基於以下假設：

- 管材撓曲勁度所造成之效應可忽略。
- 進出口點高程相同，亦即地表面為水平。
- 中間段為水平。
- 鑽掘孔暢通無孔壁崩塌。

- 彎曲段為漸進，無鋸齒狀修正。
- 切削土渣幾乎完全清除。
- 泥漿為低黏滯性，且流體之循環於鑽掘過程中得到妥善控制。

回拉過程示意圖如圖表 6，該圖標示了鑽掘路徑之幾何形狀，包括深度、進出之轉彎，以及通過河流或地下障礙物之水平段。在使用管之末端所需張力會隨著管材進入長度而改變，且其值一般而言小於鑽掘設備所經歷之阻力，因為有鑽掘孔內額外的載重，或因為擴孔與回拉同時進行時造成額外的阻力。於管材上所承受的張力是源自於在浮力或重力作用下伴隨之摩擦拖曳力，經過方向變化段造成的摩擦力放大，以及管材勁度貢獻的阻力。為求得最大拉力，由以下公式計算圖表 7 ABCD 四點的張力，通常最大阻力發生於於管材出口處之 D 點。



圖表 8 HDD 穿越河川示意圖 (after ASTM F 1962 - 05)

$$T_A = \exp(\mu_g \alpha) (\mu_g W_p (L_1 + L_2 + L_3 + L_4)) \quad \text{參-4}$$

$$T_B = \exp(\mu_b \alpha) (T_A + \mu_b W_b L_2 + W_b H - \mu_g W_p \exp(\mu_g \alpha)) \quad \text{參-5}$$

$$T_C = T_B + \mu_b W_b L_3 - \exp(\mu_g \alpha) (\mu_g W_p L_3 \exp(\mu_g \alpha)) \quad \text{參-6}$$

$$T_D = \exp(\mu_b \beta) (T_C + \mu_b W_b L_4 - W_b H - \exp(\mu_g \alpha) \mu_g W_p L_4 \exp(\mu_g \alpha)) \quad \text{參-7}$$

其中 $T_{A,B,C,D}$ 為ABCD各點之回拉阻力; L_1 =基於施工性及熱脹縮所需要之額外長度, L_2 =到達所需深度之水平距離, L_3 = 潛過障礙物所需之水平距離, L_4 = 潛回地面所需之水平距離 α = 鑽掘孔進入角, β =鑽掘孔出口角, μ_g = 管材進入鑽掘孔前地面(或支持物)與管材間摩擦係數, μ_b = 鑽掘孔內經潤滑過孔壁之摩擦係數。

計算所得之回拉阻力通常小於回拉過程中實測之回拉力，乃因為本計算方法將鑽掘孔施工品質理想化。因此，需要工程判斷介入。

Driscopipe Procedure

Phillips Driscopipe (1993) 利用一簡略之方式來估算潛鑽回拉過程中可能出現之最大回拉阻力。這個計算模型乃將縱斷圖用連續的直線來模擬，並依據每一段長度以及傾斜角來計算。考慮的變數包括鑽掘孔內外之摩擦力，並計入浮力之效應。浮力與回拉方向相同時降低回拉阻力，與回拉方向相反則會增加回拉阻力。第一步先計算管材進入鑽掘孔前所需克服之阻力，接下來計算每一分段依序進入鑽掘孔時之回拉阻力，其阻力值可由以下公式計算：

$$T_{\text{total}} = \sum_1^i W_s L (\mu \cos \theta \pm \sin \theta) \quad \text{參-8}$$

其中 i =個別分段之編號; W_s =由浮力、管自重、管內容物聯合作用之淨重(kN/m); L =各分段之長度(m); $\mu=\mu_b$ 鑽掘孔內之摩擦係數; $\mu=\mu_g$ 地表之摩擦係數; θ =傾斜角度(度)。因為其為一簡略估算式，其有以下幾個限制：

- **鑽掘孔彎曲**：轉彎處用一連串直線線段來近似模擬。這個方法不考慮因鑽掘孔拘束而產生之接觸正向力，此正向力亦會增加管材軸向之拉力，亦即絞盤效應。;
- **管材撓曲**：不計管材為符合鑽掘孔線形而彎曲所增加之拉力。此計算模型專為PE管所開發，其勁度的效應相較於鋼管而言比較不明顯。
- **流體黏滯力**：管材拖曳經過具黏滯性之鑽掘液所產生之拖曳力可忽略。

(Baunert and Allouche, 2002)

Drillpath

Drillpath (1996)是一支三度空間模擬，用以設計鑽掘路徑及計算利用潛鑽法施工之塑膠管或鋼管所需之回拉力。此模型假設管材為小短分段之組合，並透過節點傳遞拉力與壓力。每一段貢獻一小部份之軸力以及重量，加總各分量則得最末端之回拉阻力。類似於Driscopipe計算以估算管材進入鑽掘孔前在地面上前進所需克服之回拉阻力，接著分段分析管材依序進入潛鑽孔時之回拉阻力。每個分段之分析時，正向力之大小 N 可以下式估算

$$N = [(T\Delta\Phi \cos \theta_N)^2 + (T\Delta\theta + W \cos \theta_N)^2]^{1/2} \quad \text{參-9}$$

張力之增量則為

$$\Delta T = e^{f(|\Delta\Phi|+|\Delta\theta|)}(-W \sin \theta_N + fN + T) - T \quad \text{參-10}$$

其中 T =軸向張力 (kN); N =正向力 (kN); W =浮力減去管材重 (kN); θ =傾斜角;
 Φ =方位角; Δ =增量; f =摩擦係數 θ_N =正向力施加點之傾斜角

總拉力可由張力增量累加而得

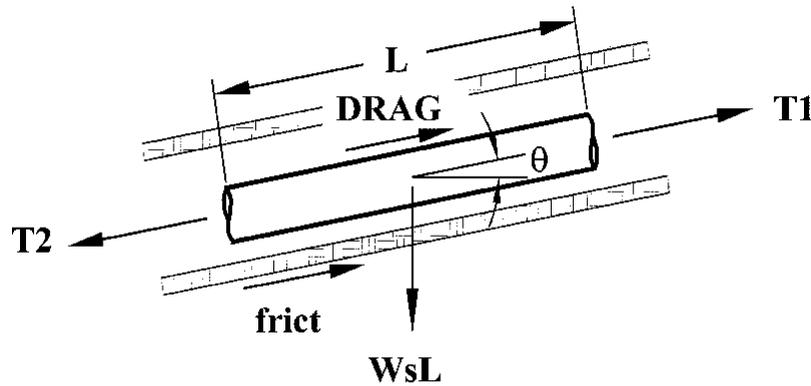
$$T_{\text{total}} = \sum_1^i \Delta T \quad \text{參-11}$$

其中 i =沿管材方向分段之標號 方程式. 參-9 與 參-10 皆適用於直線及曲線段。對於直線分段 $\Delta\Phi$ 與 $\Delta\theta$ 皆為零，大大簡化了計算。雖然Drillpath 考慮了管材的彎曲曲線段絞盤效應，然而並未考慮撓曲勁度之影響，故極可能低估採用鋼管作為使用管之潛鑽工程之回拉阻力。(Baumert and Allouche, 2002)

PRCI

國際管線研究學會(Pipeline Research Council International, PRCI) 建議使用Huey 等人(1996) 提出一個對於使用鋼管之潛鑽工程最大所需拉力的一個計算方法。此方法採用分段計算從管材進入至離開鑽掘孔期間所需要之拉力。該計算模型假

設最大回拉阻力發生於回拉過程之最後階段。最大阻力沿管方向遞減，於管材進入點達於零。累加的軸向力包括了每一分段軸向力之累加，造成回拉阻力的來源包括各分段孔壁摩擦、流體黏滯力、重力以及經過彎曲段所需要的額外拉力(即撓曲力)。基於計算的需要，管材依孔徑路線分類為直線及曲線段，並假設管材在平面上無顯著之偏移。



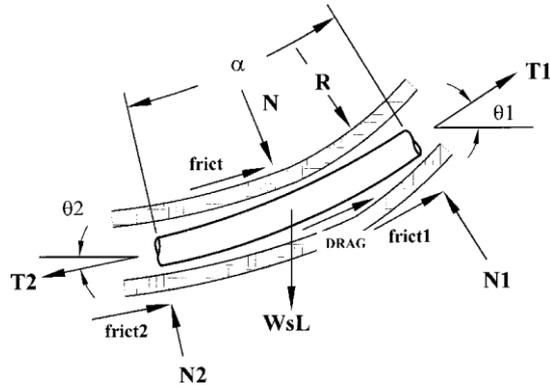
圖表 9 直線段模型 (modified after Huey et al. 1996)

直線段

所需回拉阻力由鑽掘孔線形所形成之直線段與曲線段個別所需力量的加總。計算步驟由管材側 (圖表 10 左側) 至回拉索具側 (圖表 11 右側)。每個直線段部份採用如 圖表 12 使用之變數來考量。對於任一直線段，左側拉力 T_2 可透過靜力平衡求得：

$$T_2 = T_1 + |\text{frict}| + \text{DRAG} \pm W_s \times L \times \sin\theta \quad \text{參-12}$$

其中 T_2 =片段左側克服流體黏滯力與摩擦力所需之拉力(kN); T_1 =片段右側之張力(kN); frict =土壤與管材之間的摩擦力 (kN); DRAG =管材與粘滯性流體之間的拖曳力(kN); W_s =管材及其內容物之單位長度有效(浸水)單位重(kN/m), L =片段之長度(m); θ =直線段中心軸與水平之夾角



圖表 13 曲線段模型 (modified after Huey et al. 1996)

曲線段

曲線段採用與直線段相同之參數作考量，如圖表 14，並加上額外的參數來應對彎曲段。假設管材及其內容物之均佈浸水重垂直作用於分段之中間點。為決定兩端之接觸正向力，每個彎曲段以三點受力而彎曲之梁模擬。梁承受之載重包括軸向張力 T 加上均佈浸水重 Ws 。承受三點作用力之簡支梁其變形並非單一曲率之曲線。管材為了符合曲線之鑽掘孔線形，必須產生足夠之撓度來讓其中點之變位恰等於半徑 R 圓弧之中點變位 h

$$h = R \times [1 - \cos \alpha/2] \quad \text{參-13}$$

其中 α =彎曲段經過之角度。雖然其三個接觸點之假設不十分精確，仍足夠近似來將管材為配合彎曲半徑之勁度造成的效應。Roark之彈性梁解(Roark 1965)可以用來決定正向接觸力 N 。相關細節可參照Huey等人著作 (1996)。運用下式反覆的運算求解所需之 T_2

$$T_2 = T_1 + 2 \times |\text{frict}| + \text{DRAG} \pm Ws \times L_{\text{arc}} \times \sin \theta \quad \text{參-14}$$

其中 L_{arc} =管材之弧長。所需總拉力為直線段與曲線段各分段拉力之合，即

$$T_{\text{total}} = \sum_1^i (T_2 - T_1) \quad \text{參-15}$$

其中 i = 各別變段之標號

國際管線研究協會(PRCI) 使用如上所述之方法，並未考量管材於地表摩擦所產生之拖曳力，因為其假設最大安裝回拉力必然產生於管材恰達出口時。儘管這假設在某些案例成立，然而在某些情況下最大拉力可能產生於回拉途中。因此，PRCI方法可修正為以類似Driscopipe與Drillpath分段漸進之方式來計入地表面摩擦之效應。這樣的修正可供不同方法之間所得之計算成果作直接之比較。

(Baumert and Allouche, 2002)

經驗圖表法

Baumert等人(2004) 提出了一套表格與經驗圖表以單位長度回拉阻力的方式來預估總回拉力。這個圖表是基於不同土壤種類、鑽掘孔線形、管徑以及其他各種施工因子所建立之龐大施工監測資料庫來建立。這個方法假設回拉阻力與距離成正比，可提供作施工初步參考值。(Chehab and Moore, 2007)

Polak 與 Lasheen 力學模型法

Polak 與 Lasheen (2002)發展了一個計算管材與管壁間相互作用之模型用以計算回拉阻力。此模型除考量重力、摩擦力外，尚計入了管材彎曲勁度效應以及泥漿拖曳力

管材的自重與摩擦

鑽掘孔外

回拉力用以抵抗管材於鑽掘孔外之自重摩擦力的分力 $(T_g)_i$ 於轉折點 i 可以用下式估算：

$$(T_g)_i = (w_p \mu_g \cos \alpha_o + w_p \sin \alpha_o) \left[L - \sum_{k=1}^{i-1} L_k \right] \quad \text{參-16}$$

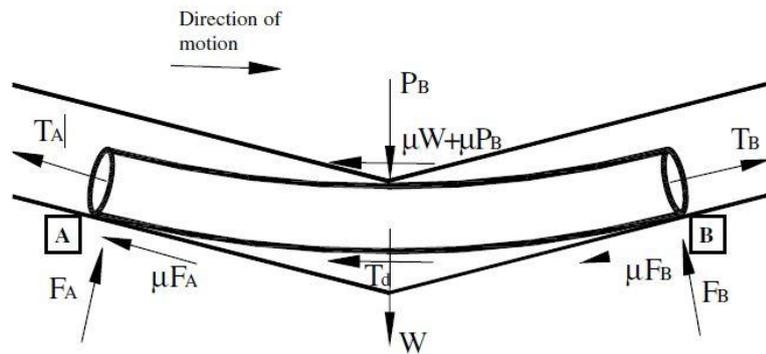
其中 w_p 為管材之單位長度重; μ_g 管材與地面間之摩擦係數; L 管材全長; L_k 進入鑽掘孔之分段 α_o 管材於進入口與水平面之交角。

鑽掘孔內

源自於管材浸水重在各轉角點造成之拉力分量 $(T_s)_i$ 可依下式估算:

$$(T_s)_i = \sum_{k=0}^{i-1} |L_k w \mu_b \cos \alpha_k| + L_k w \sin \alpha_k \quad \text{參-17}$$

其中 w 為單位長度管材之浸水重; μ_b 管材與鑽掘孔間摩擦係數; α_k 為分段管材 k 與水平夾角。



圖表 15 HDD 力學機制：管材轉彎處於之受力情況

流體拖曳摩擦

此流體拖曳摩擦之計算假設鑽掘孔內的穩定液為層流、線性流體力學行為、管材位於鑽掘孔中央。在 i 點增加之回拉阻力為：

$$(T_d)_i = \sum_{k=0}^{i-1} f_d L_k \quad \text{參-18}$$

其中 $f_d = K * 2\pi r \tau_p$ ， τ_p 為肇因於流體拖曳力施加於管材上之剪應力， r 為管材外徑， K 為考量流體效應之參數，並建議 $K = 10$ 。(Polak and Chu, 2005)

方向改變

當管材與鑽掘孔轉彎處遭遇，管材與鑽掘孔壁必產生接觸並變形以為因應。利用大撓度梁理論計算，公式細節詳見第五章。

$$\Delta T_{kf} = T_k - T_{k-1} \quad \text{參-19}$$

總回拉阻力

總拉力為各項拉力因素之總和，即：

$$T_i = (T_g)_i + (T_d)_i + (T_a)_i + \sum_{k=1}^{i-1} \Delta T_{kf}$$

參-20

小結

所有計算模型在直線段的部份都採用類似之方法來考量拉力，但對於轉彎部分則運用了不同的模型來求取拉力。Driscopipe 利用數個直線段來模擬曲線而 Drillpath及PRCI 法採用了較複雜之分階段算法來考量鑽掘孔之彎曲；PRCI法雖考慮彎曲變形，卻未將彎曲勁度列入考慮，其將流體黏滯力視為決定回拉阻力為重要分子的一個方法；Drillpath雖宣稱可用於鋼管，但其未計入管材撓曲勁度，極可能低估回拉阻力；Polak 與 Lasheen 力學模型則是惟一一個考量到流體拖曳力之方法。對於長跨距之潛鑽工法，流體黏滯力或可能扮演一重要角色。由於上述兩種方法對待流體黏滯力之重要性有截然不同的看法，值得另文深入步探討。

方法	分段	摩擦力	自重	管材撓曲	流體 拖曳力
Larry Slavin/ ASTM	直線	$T_s = \mu W_s L$	N/A	N/A	N/A
	曲線	$T_c = \exp(\mu\alpha)(\mu W_s L)$	N/A	N/A	N/A
Drisco- pipe	直線	$T_{total} = \sum_1^i W_s L (\mu \cos \theta \pm \sin \theta)$		N/A	N/A
Drill- path	曲線	$\Delta T = e^{f(\Delta\phi + \Delta\theta)} (-W \sin \theta_N + fN + T) - T$		N/A	N/A
PRCI	直線	frict	$\pm w_s L \sin \theta$	N/A	DRAG
	曲線	2x frict	$\pm w_s L \sin \theta$	N/A	DRAG
Polak & Lasheen	孔外	$(w_p \mu_g \cos \alpha_o + w_p \sin \alpha_o) \left[L - \sum_{k=1}^{i-1} L_k \right]$		N/A	N/A (No Fluid)
	孔內	$(T_s)_i = \sum_{k=0}^{i-1} [L_k w \mu_b \cos \alpha_k + L_k w \sin \alpha_k]$		$\Delta T_{kf} = T_k - T$	$(T_d)_i = \sum_{k=0}^{i-1} f_d L_k$

表格 3 各種方法之比較

五、回拉阻力之基本組成

歸納既有計算模型，於估算回拉阻力時有幾個基本的因素應列入考量，包括管材重量、土壤與管材之間的摩擦力、鑽掘孔外管材與導向滾輪(或地表土壤)之摩擦力，絞盤效應、管材之撓曲勁度，以及流體黏滯力。

1 重力與浮力

重力的大小通常是穩定液內管材重量與浮力的合力，亦即在濕式施工法時的管材浸水重，在乾式施工則僅僅是管材重。對於傾斜的分段，其作用於管材之拉力包括淨重力(亦即沿管材方向重力減去浮力)直接產生之拉力，以及垂直於管材之分力造成管材與管壁間之磨擦力。

以 Polak 與 Lasheen 力學模型(2001)為例，鑽掘孔內的回拉阻力分量為：

$$(T_s)_i = \sum_{k=0}^{i-1} |L_k w \mu_b \cos \alpha_k| + L_k w \sin \alpha_k \quad \text{參-21}$$

鑽掘孔外之回拉阻力分量為

$$(T_g)_i = (w_p \mu_g \cos \alpha_o + w_p \sin \alpha_o) \left[L - \sum_{k=1}^{i-1} L_k \right] \quad \text{參-22}$$

這些方程式皆意圖在於將重力分解為垂直與平行管材分段方向，再藉以計算由重力及磨擦力此兩獨立之分力所貢獻之回拉阻力。鑽掘孔外之管材及無使用制重物填充之管材，其重量可用下式估算：

$$w_p = \pi(r_p^2 - r_i^2)\gamma_p \quad \text{參-23}$$

因為此模型假設潛鑽以濕式方法施工，使用管為空且水密性良好，無液體滲入管材、管材接頭於施工過程中接合良好，是故管材浸水重為：

$$w = \pi(r_p^2 - r_i^2)\gamma_p - r_p^2\gamma_w$$

參-24

2 摩擦力

無論潛鑽採乾式或濕式施工，現有回拉力計算模型均十分保守的假設管材於回拉過程全程均與土壤接觸。雖然此一假設並非完全適用所有的潛鑽工程，不過在絕大部分的狀況下，因鑽掘孔縱斷線型通常為凹折之直線組成，與管材自然狀態下線型不符，故在絕大多數的工程，管材全程與土壤接觸之假設均能成立，且其假設屬保守側。

接觸點以及正向力乃摩擦力產生之充分且必要的條件。一般而言，施加於孔壁之正向力源自於管材自重、及因線路變換方向管材之撓曲勁度額外增加之張力。因為回拉程序的本質，不僅鑽掘孔內摩擦力需計入回拉力，鑽掘孔外摩擦力之貢獻亦必須記入，此兩因子皆在Polak & Lasheen力學模型被考慮。每一分段之摩擦力，在鑽掘孔內由重力以及浮力聯合作用，在鑽掘孔外則僅有重力作用，此一摩擦力可經由式參-21 及參-22估算。

若僅累加所有直線段之摩擦力將忽略正向力之貢獻，此一力學現象於多數靜力學教科書中皆有詳細說明，其乃對於觀察一個纏繞於絞盤之纜索發現。摩擦力之大小將以指數函數放大，稱之為絞盤效應。

3 絞盤效應

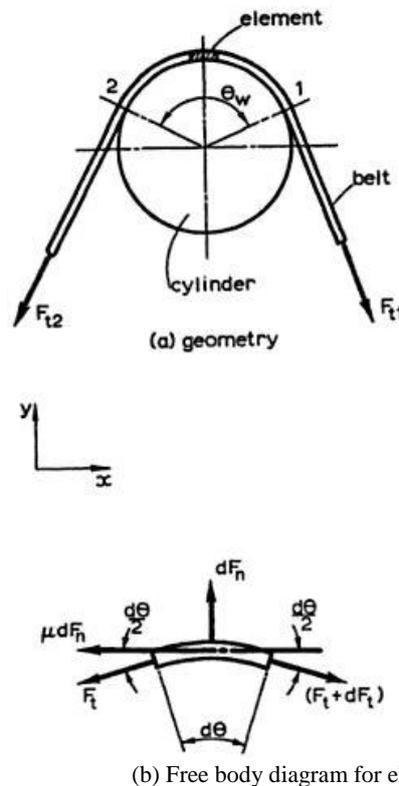
3.1 定義

當纜索緊貼旋繞一木樁，摩擦力引致之張力將隨著纜索方向變化。如果此纜索為

完全可撓，根據Amonton摩擦力法則，經過角度 θ (弧度)、摩擦係數 μ ，則於拉緊側及放鬆側張力其張力 F_{T1} 與 F_{T2} (圖表 16)可由下列方程式計算，此方程式被稱之為絞盤方程式，或尤拉拉力傳遞公式：

$$F_{T1} = F_{T2} e^{\mu\theta} \quad \text{參-25}$$

參-25 式之推導可參考工程力學教科書(McGill and King, 1989)，其皆假設纜繩為完全可撓。

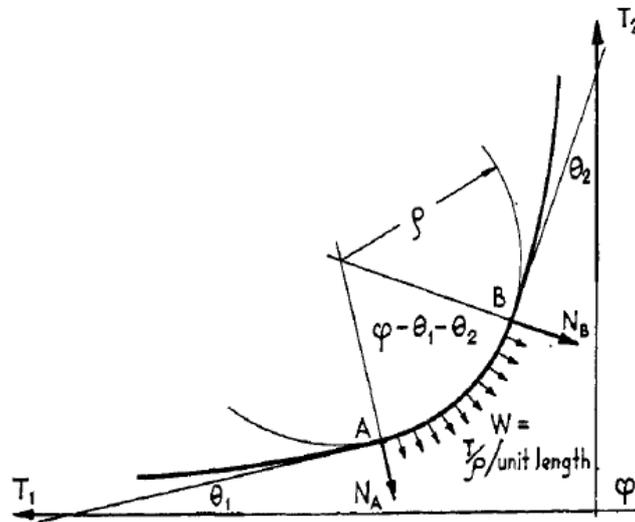


圖表 17 Flat belt coiled around a cylinder (after McGill and King 1989)

3.2 管材存在剛性之絞盤效應

式(參-25)所用之絞盤方程式乃假設管材為為全可撓，然而管材之撓曲剛度，尤其使用剛度較高的鋼管作為使用管時，是否影響該公式適用性，仍需進一步探討。研究(STUART, 1961) 顯示，在轉角小於45度且摩擦係數小於1的情況下，假設管材完全可撓與存在剛性之間的誤差小於1%。即使在弧狀接觸之情況，如果繩索兩端切線角 θ_A 與 θ_B (圖表 18) 小 6° ，摩擦係數小於1，絞盤方程式之誤差仍僅

約1%。此誤差值在潛鑽工程實務上而言，仍在可接受之範圍，因此絞盤方程式可以直接應用於估算潛鑽回拉阻力。



圖表 19 Force on a string in arc contact (after Stuart 1961)

3.3 絞盤效應應用於潛鑽回拉阻力估算

當管材於鑽掘壁角隅接觸時，其行為就如纜索纏繞於滑輪之上。回拉阻力隨著接觸經過角呈指數函數增加。此一增加「額外」拉力的效應，在許多潛鑽回拉阻力估算方法裡被採用，而絞盤方程式更是直接被Larry Slavin 法 (式 參-26)、ASTM (式 參-27~參-30) 以及Drillpath (式 參-31)直接採用。

方法	方程式	
Slavin	$T_c = \exp(\mu\alpha)(\mu W_s L)$	for Curved Section 參-26
ASTM	$T_A = \exp(\mu_g \alpha) (\mu_g W_p (L_1 + L_2 + L_3 + L_{14}))$	參-27
	$T_B = \exp(\mu_b \alpha) (T_A + \mu_b W_b L_2 + W_b H - \mu_g W_p \exp(\mu_g \alpha))$	參-28
	$T_c = T_B + \mu_b W_b L_3 - \exp(\mu_g \alpha) (\mu_g W_p L_3 \exp(\mu_g \alpha))$	參-29
	$T_D = \exp(\mu_b \beta) (T_c + \mu_b W_b L_4 - W_b H - \exp(\mu_g \alpha) \mu_g W_p L_4 \exp(\mu_g \alpha))$	參-30
Drillpath	$\Delta T = e^{f(\Delta\phi + \Delta\theta)} (-W \sin \theta_N + fN + T) - T$	參-31

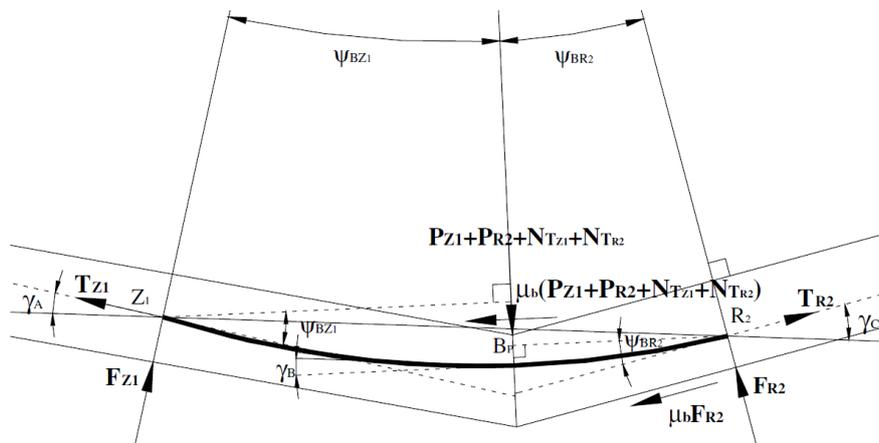
雖然Polak & Lasheen 力學模型未直接採用絞盤方程式，其後續發展之計算軟體 PipeForce 2005(Cheng and Polak, 2007)以 N_{TZ1} 與 N_{TR2} (圖表 20)來計入絞盤效應，而這兩力量由因為絞盤效應造成拉力增量之 T_{Z1} 與 T_{R2} ，反算而得。轉角處增加的回拉阻力為：

$$\Delta T = T_{R2} - T_{Z1} \tag{參-32}$$

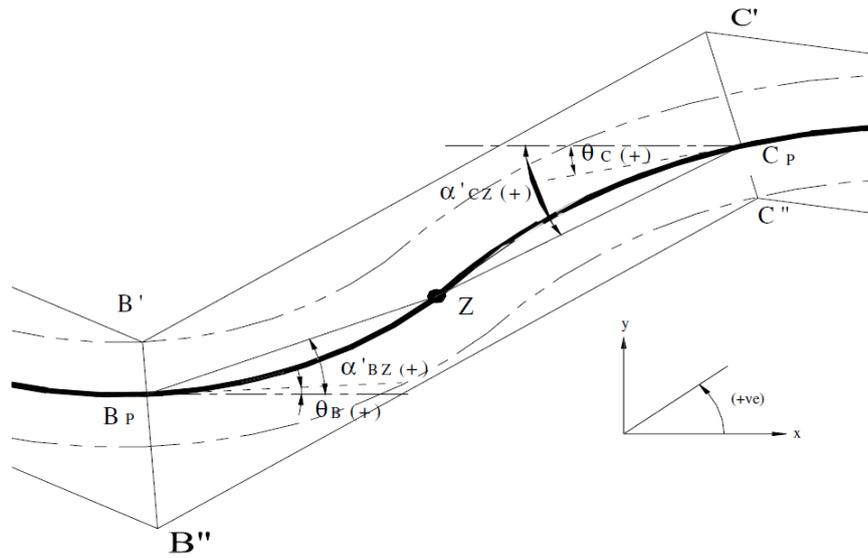
$$\Delta T = T_{Z1} \left[\frac{(\cos \gamma_A + \mu_b \sin \varphi_{BZ1} \cos \gamma_B)}{(\cos \gamma_C - \mu_b \sin \varphi_{BR2} \cos \gamma_B)} - 1 \right] + \frac{\mu_b}{(\cos \gamma_C - \mu_b \sin \varphi_{BR2} \cos \gamma_B)} \times \left[P_{Z1} + \left(\frac{\cos \gamma_C}{\cos \varphi_{BR2}} + \cos \gamma_B \right) P_{R2} \right] \tag{參-33}$$

其中 $\varphi_{BZ1} = 2 \times \text{abs}(\theta_B - \alpha_{BZ1}')$, $\varphi_{BR2} = \frac{\text{abs}(\alpha_B - \alpha_A)}{2}$, γ_A, γ_B 與 γ_C 為線 Z_1R_2 與管材切於 Z_1 、 B 與 R_2 之交角， θ_B 則為點 B 管材切線方向與水平之夾角， α_{BZ1}' 為水平與管材中心點 B 與反曲點 Z 連線之交角(圖表 21)。
 P_{Z1} 與 P_{R2} 可用式參-34 求得。(Cheng and Polak 2007 指向另一方程式，筆者認為此乃誤植。) α_A 與 α_B 為管材中心線與水平線之交角(圖表 22)。

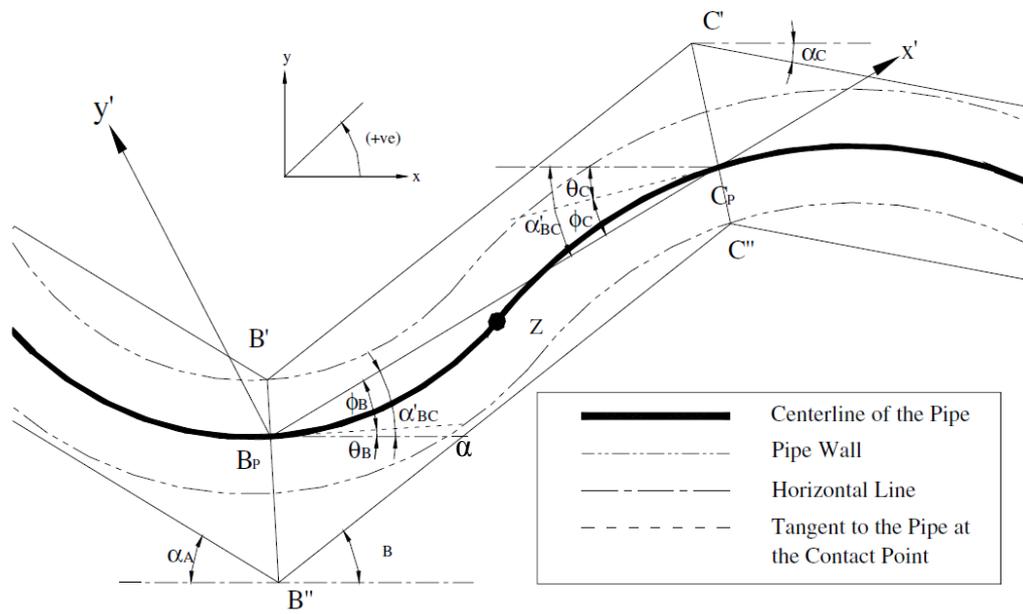
式 參-33 之第一項可被視為考慮絞盤效應，其包括了方向轉角、摩擦係數，第二項則可視為管材撓曲勁度所作之貢獻。



圖表 23 轉彎處受力情況 (after Cheng and Polak 2007)



圖表 24 Geometric details of Scenario 1a (after Cheng and Polak 2007)

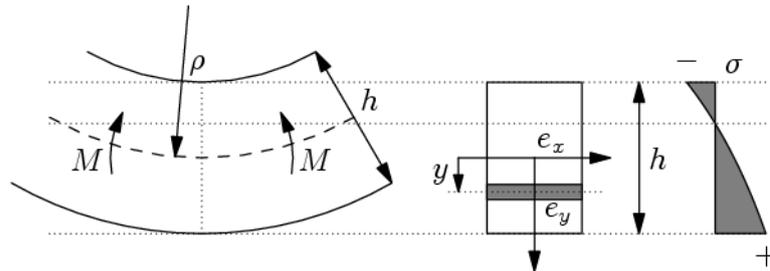


圖表 25 Geometric details of Scenario 1 (after Cheng and Polak 2007)

4 撓曲勁度

隨在鑽掘孔內方向之變化，管壁對管材施加彎矩，而此彎矩會對管材上緣造成壓

力，下緣纖維造成拉力，因為了回應此一撓曲載重，纖維將會於形成一相反方向之力量(圖表 26)，此一應力也將反映在回拉阻力上。



圖表 27 撓曲應力

雖然Drillpath宣稱考慮管材彎曲，其計算方法實際上並無任一項考慮撓曲勁度，PRCI亦同。其他的方法，如ASTM F1962-05與 Driscopipe，完全的忽略管材之撓曲勁度。僅有Polak& Lasheen 力學模型 (2001) 考慮了這項效應，其透過大撓度梁理論求得正向力P：

$$P = \frac{EI}{l^2} \cos \psi_0 [\sqrt{2} \cos \psi_0 \cos \phi_0 + \sin \psi_0 \Phi(p, \phi_0)]^2 \quad \text{參-34}$$

其中

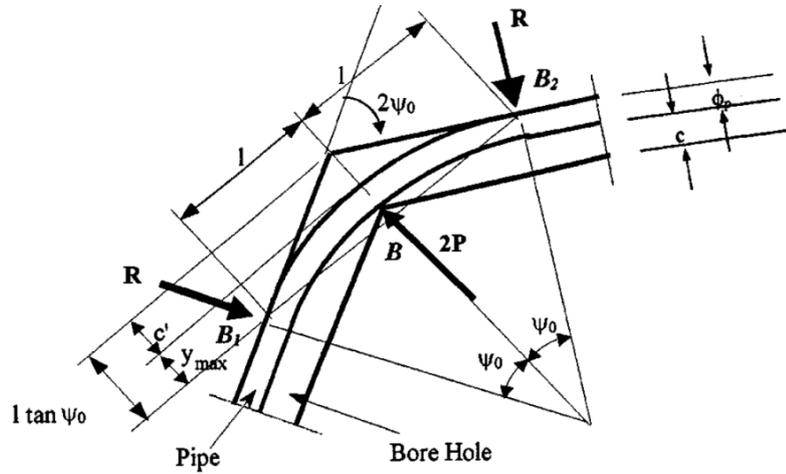
$$p = 1/\sqrt{2}, \quad \phi_0 = \cos^{-1} \sqrt{\sin \psi_0}$$

$$\Phi(p, \phi_0) = 0.8472 + F(p, \phi_0) - 2E(p, \phi_0)$$

假設管材接觸到土壤角隅對稱於一軸(圖表 28)，因為撓曲以及方向變化影響所增加之回拉阻力可由下式求得：(Polak and Chu, 2005)

$$\Delta T_{kf} = T_{k-1} [(\cos \psi_k + \mu_b \sin \psi_k) / (\cos \psi_k - \mu_b \sin \psi_k) - 1] + 4P_k \mu_b [1 / (\cos \psi_k - \mu_b \sin \psi_k)] \quad \text{參-35}$$

式 參-35第一項 $T_{k-1} [(\cos \psi_k + \mu_b \sin \psi_k) / (\cos \psi_k - \mu_b \sin \psi_k) - 1]$ 是用以計入磨擦力因為方向變化所導致之增量，即絞盤效應，第二項 $4P_k \mu_b [1 / (\cos \psi_k - \mu_b \sin \psi_k)]$ 則是計入撓曲勁度。



圖表 29 管材於轉角處對稱彎曲 (after Polak and Chu 2005)

5 流體拖曳力

在潛鑽回拉過程中，假設使用濕式施工法時，具有穩定孔壁效果之皂土液完全充滿鑽掘孔。當管材從進入點拖曳至管路出口，鑽掘液以與回拉方向相反排出，因此在管材表面產生摩擦阻力。即便沒有任何液體在回拉過程中泵送，管材在充滿穩定液的拘束空間前進，管材取代鑽掘液原本之空間，因此會造成穩定液向孔外溢流。管材與穩定液之間的相對移動，會主動或被動地在管材表面引致拖曳力。為計入此一效應，Polak & Lasheen 力學模型以下式計入流體拖曳力之貢獻：

$$(Td)i = \sum_{k=0}^{i-1} f_d L_k \quad \text{參-36}$$

其中

$$f_d = K \times 2\pi r \tau_p \quad \text{參-37}$$

其中

$$\tau_p = \frac{1}{4} \frac{dp}{dz} \left(2r_p - \frac{r_p^2 - r_h^2}{\ln r_h/r_p} \frac{1}{r_p} \right) + \frac{\mu v_p}{\ln r_h/r_p} \frac{1}{r_p} \quad \text{參-38}$$

其中

$\frac{dp}{dz}$ 為沿管材長度變化之能量梯度， μ 為流體之黏滯性， v_p 為管材前進速率， r_p 與 r_h 分別為管材與鑽掘孔之半徑。

6 牛頓流體或非牛頓流體

Polak & Lasheen 力學模型假設鑽掘路徑內之流體為層流，且為非牛頓流體，然而Chehab and Moore (2007) 假設流體為牛頓流體。Polak and Chu (2005)計入非牛頓流體，其參數K之建議值為10。對於牛頓流體，K值應等於1 (Chehab and Moore 2007)。因此，流體黏滯力貢獻於回拉阻力由 Polak& Lasheen 力學模型所計算得之值將是以Chehab & Moore 模型所計得之十倍。儘管如此，此效應事實上是次要的，由流體黏滯力貢獻之回拉阻力大約佔總回拉阻力之1% (Polak and Lasheen, 2001)，最高亦不回超過10% (Polak and Chu, 2005)。因此，不同的假設依目前計算模型的精度而言，並不會對於回拉力計算成果造成顯著之影響。

六、專題研究結論

1 現場實測資料缺乏

Polak & Lasheen 力學模型僅用三個潛鑽回拉資料作為驗證，而此可能有統計上的不足之疑慮，故仍需更多的現場實測資料來佐證，抑或證明此模型仍有修正之必要。

2 鑽掘孔外之摩擦係數

參數分析研究顯示主要的回拉阻力源自於管材自重以及摩擦力，而此摩擦力包括管材在鑽掘孔外與地面之摩擦、鑽掘孔內與孔壁間的摩擦，因此摩擦係數的選用

影響估算結果甚鉅。ASTM 建議之鑽掘孔外管材與地面摩擦係數為 0.5，在理論上固然不精確，甚至未偏向安全側。雖然此參數的選擇與實際摩擦係數的選擇並不影響施工最終階段之回拉阻力，然而不準確的選擇鑽掘孔外之摩擦係數仍會影響管材於起始階段之回拉阻力，尤其在跨距短的潛鑽工法，更會影響回拉阻力最大值之預測。

假設摩擦係數不受管材前進速率之影響是可接受的，此點假設不僅符合 Amonton 摩擦法則，也有文獻之實驗室結果支持。

因為施工的中斷造成靜摩擦與動摩擦係數之間的轉換，會造成回拉阻力相當程度之改變，造成突然之峰值。對於回拉距離較短之施工，此峰值有時會超越回拉過程結束之回拉阻力，然而對於峰值的預測因囿於時程，未能在本研究專題提出。然而，此現象值得日後進一步深入。

3 管內填充制重物有利於降低拉力

Polak 與 Lasheen 模型高估使用 PE 管時源自於摩擦以及自重的拉力，因為其假設全程管材均與孔壁接觸。於工程實務，使用管在佈設纜線前於回拉階段時填入制重物，將可減少管材與孔壁之間的接觸，故可減少由摩擦貢獻之回拉阻力。此方法亦被 ASTM 之設計指針 ASTM F1962-05 所支持。

4 管材之撓曲勁度

對於使用 PE 管，由管材撓曲勁度貢獻之回拉阻力在一般狀況下(大轉彎半徑、有限之轉彎數)可以忽略。透過參數分析也證明此一論點，每經歷過一次轉彎拉力增量小於 0.5kN。以一般跨徑 150 公尺之潛鑽工程，回拉阻力落在 30 至 80kN 之間，故由撓曲勁度貢獻的回拉阻力大約 2%，可視為可忽略。然而，若使用鋼管等高撓曲勁度之管材作為使用管之潛鑽工程，其撓曲勁度對於回拉阻力之貢獻

則不能忽略，且必須以 Polak 與 Lasheen 力學模型來計入此一效應。

5 鑽掘孔轉彎處土壤變形

所有既有之計算模型接假設管材於轉彎處是被不可變形的孔壁所支撐，事實上，土壤是具有變形性的。在回拉過程中之正向力與剪力聯合作用之下，正向力在使用 PE 管作為使用管者，造成的土壤壓縮量通常小於 1mm，的確可以忽略，但由於使用管持續在土壤表面拖曳，會造成鑽掘處土壤之變形。雖然總體來看，此切削土壤並未造成鑽掘孔彎曲半徑顯著之改變，然而造成的槽溝卻會增加絞盤效應。而且此效應之大小乃與土壤之平均粒徑有關。是故，若於沙土中進行之潛鑽工程若有多處轉折點，應相應酌予提高安全係數，避免回拉失敗。

6 管材入口處絞盤效應

Polak 與 Lasheen 模型注意到管材進入點地面坡度以及縱斷路徑形成之交角，然而在其計算模型並未計入此一效應。因此，若採用此模型計算回拉阻力，必須注意此一效應，若管材直接拖曳於土壤之上，除考慮此角度變化之外，亦應計入轉彎處土壤變形放大絞盤效應之影響。

7 絞盤效應

絞盤方程式假設管材完全可撓($EI=0$)為可以接受之假設，因在一般的工程條件下，假設完全可撓與具剛性之管材所得絞盤效應增加拉力之間的差別不到 1%，故既有計算模型可繼續適用。

肆、求學心得

1 文化、語言隔閡

雖然台灣地區提倡英語教育十分普及，與國際接軌的口號喊得震天價響，然而仍以美國使用之英語為主流，接受之英語大眾文化亦是以美國為主。故雖然英語發源地英國官方語言為英語，抑揚頓挫明顯的腔調也會讓初到英國的台灣學生需要相當時間適應，更何況英國南腔北調，各種地方人士莫不以保持自身腔調為榮。所謂標準發音(Received Pronunciation)英語，也就是台灣比較容易接觸到的 BBC 腔英語(亦稱皇室英語)，在英國居然只有 2% 人口使用。所以，在學校教室以外所聽到的腔調，實在有時有如鴨子聽雷，腔調重者就算非當地的英國人也需要請對方重覆一遍才能聽懂。除了語言需要適應外，難吃且昂貴惡名昭彰的英國食物，更是讓人為之卻步。

或許因為食物難以下嚥，英國的酒吧文化特別風行。學生下課後，上班族下班後，最常做的社交活動便是到酒吧看足球、與朋友喝上幾杯，一吐白天的苦水。拘謹的英國人，唯有在這種場合才能摘下自己的偽裝。

2 教學方式與教學資源

英國碩士班以密集式的教學雖為某些習慣寬鬆課表、教師積極管控學習進度的亞洲學生所詬病，然而這卻是對於英國教育方式的誤解。英國文化裡是尊重個人的空間，教育的基本精神是「自己學位是要學生自己去爭取來的」，因此教師並不會敦促學生的學習進度，畢竟老師無法指導一輩子，所以鼓勵學生自主學習，強調學生自主預習及複習，與自己做時間管理之重要性。

在一門課程講授開始之前一至兩週，系辦公室會發一整落數百頁沉沉的講義，以及兩位數的書單供學生參考，授課教授也會分析某些圖書的哪幾段落特別需要加強研讀，希望同學在開課之前皆能把教材至少看過一遍，授課時自然能較為深入解說，學習效果亦會較佳。於是經常面對前一門課的複習還沒結束，新一門課的預習又要開始的龐大壓力，這段求學路程因此常目不窺園，成天伏案研讀資料、撰寫報告而不知晨昏。那時才又再度體會蘇軾所云「書富如海，百貨皆有，人之精力，不能兼收盡取，但得其所欲求者耳。」這種在資訊爆炸時代所需的篩選能力。

除了利用超額的學習量來測驗出學生的極限，學校亦提供相對應的資源來讓積極的學生挑戰自我。圖書館的資源更是令我讚歎不已。除了龐大的藏書以及電子書籍、電子期刊等有如取之不盡的浩瀚書海，亦可申請英國境內圖書館館際調閱。圖書館及系館皆提供相當多的小型公共空間及硬體供學生小組討論，讓創意的火花在討論中產生。圖書館在考試期間更是 24 小時開放，讓同學們在清靜舒適的閱讀環境下挑燈夜戰。

伍、 建議事項

1 監測回拉阻力納入工程契約

潛鑽工程之回拉阻力乃為最重要之工程成本及成敗關鍵決定因子。正確的估算潛鑽回拉阻力，可據以決定工程使用管材之尺寸大小厚度、管材需求強度、回拉機具所需要的能量、評估工程之風險等。然而依現行施工規範，並無硬性規範施工承包商提供施工過程之現場實測的回拉力，僅要求在規劃階段依理論公式求得之計算書。由本研究專題摘要可得知，多數估算方法皆與實際值存在差距，故實際

回拉值應回饋本公司設計部門，以期建立本土的經驗式以更精確推估回拉阻力有效控制工程進度以及預算。且若遇履約爭議時，回拉阻力之紀錄亦可提供作為書面資料佐證。

2 建立潛鑽施工回拉阻力本土經驗圖表

透過收集潛鑽回拉阻力之實測值，結合潛鑽孔縱斷路徑與現地土壤性質，包括線型之轉彎半徑、轉彎點經過角度、各直線段之長度，與土壤之粒徑分布、土壤分類、礫石含量、標準貫入值 N 等資料，來建立起以每單位長度在不同土層之單位長回拉阻力之經驗值，以供線路採用工法初步規劃可行性及工程造價評估之參考。

3 定期選派人員出國進修

許多現今工程技術有些囿於實務經驗缺乏，發展時間亦遲於外國，工程上實務之技術與相關知識仍仰態外國的輸入。選送同仁出國進修，除能提高同仁專業素養、接受第一手資訊、同時培養外語能力之外，在先進國家的校園裡能遇到來自世界各地、不同文化背景的同學、教授，各自有各自的世界觀，在這樣的環境裡，學習到的不僅僅是某種專業，而是一個視野，而這種視野難以訴諸文字，更不容易從書本中獲得。

此外，一個人獨身處異域除了能實際感受到不同文化之間的衝擊，亦能養成對於不同文化間差異的包容與理解的思維習慣，面對全球化發展腳步日益加快，國家民族邊界日漸模糊的今日，這亦是企業亟需的調適能力，即使台電公司服務客戶僅止於國內，然客戶需求亦隨著產業型態的調整而持續改變。

文獻亦指出，選送員工進修後，員工除專業能力提昇外，對公司向心力提高，能在職場歷練一段時間後，出國進修重新調整步伐，並充實專業知識，學成後在推行公司業務上更加有效率有方向是可以期待的，故此一雙贏政策應持續實施，除能讓員工得到自我實現的滿足、公司亦獲得專業、語文能力俱進，且更具發展性的員工。

陸、致謝

感謝公司提供此寶貴進修機會，並承蒙各級長官支持與部門內同仁分攤工作始讓此出國進修計畫得以順利。需感謝的人甚多，未能一一親自致謝，在此一併致上感謝之意。

柒、參考文獻

ASCE (Ed.) (2005) *Pipeline design for installation by horizontal directional drilling*, ASCE Publications.

ASTM (2005) F 1962-05, Standard guide for use of maxi-horizontal directional drilling for placement polyethylene pipe or conduit under obstacles, including river crossings.

BAYER, H.-J. (Ed.) (2005) *HDD Practice Handbook*, Essen, Germany, Vulkan-Verlag GmbH.

BEYER, W. H. (Ed.) (1987) *CRC standard mathematical tables*, Boca Raton, CRC Press.

BRIDGEWATER, J. (1980) On the width of failure zones. *Géotechnique*, 30, 533-536.

Canadian Association of Petroleum Producers (2004) *Planning Horizontal Directional*

Drilling for Pipeline Construction. [online] Available URL: <http://www.civil.uwaterloo.ca/catt/Pdfs/capp.pdf>, dated view 10th August 2009

CHEHAB, A. G. & MOORE, I. D. (2007) One-Dimensional Calculaiton for Axial Pullback Force Distributions in Pipes during Directional Drilling Installations. *OttawaGeo*.

CHENG, E. & POLAK, M. A. (2007) Theoretical model for calculating pulling loads for pipes in horizontal directional drilling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22, 633-643.

DEJONG, J. T., WHITE, D. J. & RANDOLF, M. F. (2006) Microscale observation and modeling of soil-structure interface behavior using particle image velocimetry. *Soils and Foundations*, 46, 15-28.

DHARMA WIJEWICKREME, H. K., AND DOUGLAS HONEGGER (2009) Response of buried steel pipelines subjected to relative axial soil movement. *Canadian Geotechnical Journal*, 46, 735-752.

FRISCH-FAY, R. (1962) *Flexible bars*, London, Butterworth.

HACIISLAMOGLU, M. & LANGLINAIS, J. (1990) Non-Newtonian Flow in Eccentric Annuli. *Journal of Energy Resources Technology*, 112, 163-169.

HU, L. & PU, J. (2004) Testing and Modeling of Soil-Structure Interface. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130, 851-860.

HUEY, D. P., HAIR, J. D. & MCLEOD, K. B. (1996) Installation Loading and Stress Analysis Involved with Pipelines Installed in Horizontal Directional Drilling. *No-Dig*. New Orleans, USA

KARIMIAN, H. (2006) Response of buried steel pipelines subjected to longitudinal and transverse ground movement. *Civil Engineering*. Vancouver, B.C., The University of British Columbia.

KOCKS, H.-J. (2008) The steel pipe in trenchless technology. *3R International*.

KOERNER, R. M., MARTIN, J. P. & KOERNER, G. R. (1986) Shear strength

parameters between geomembranes and cohesive soils. *Geotextiles and Geomembranes*, 4, 21-30.

LAMBE, T. W. & WHITMAN, R. (2008) *SOIL MECHANICS SI VERSION*, Wiley-India.

MAIDLA, E. E. (1987) Borehole friction assessment and application to oil field casing design in directional wells. *Other Information: Thesis (Ph. D.)*.

MCGILL, D. & KING, W. (1989) *Engineering mechanics: statics*, Boston, PWS-Kent.

POLAK, M. A. & CHU, D. (2005) Pulling Loads for Polyethylene Pipes in Horizontal Directional Drilling: Theoretical Modeling and Parametric Study. *Journal of Infrastructure Systems*, 11, 142-150.

POLAK, M. A., DUYVESTYN, G. & KNIGHT, M. (2004) Experimental strain analysis for polyethylene pipes installed by horizontal directional drilling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 19, 205-216.

POLAK, M. A. & LASHEEN, A. (2001) Mechanical modelling for pipes in horizontal directional drilling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 16, 47-55.

POULOS, H. G. & DAVIS, E. H. (1980) *Elastic Solutions for Rock Mechanics*, New York, John Wiley & Sons.

ROSCOE, K. H. (1970) 10th Rankine Lecture: The influence of strains in soil mechanics. *Géotechnique*, 20, 129-170.

SCARPELLI, G. & WOOD, G. M. (1982) Experimental observations of shear band patterns in direct shear tests. *Deformation and failure of granular materials*. Balkema, Rotterdam, the Netherland.

STUART, I. M. (1961) Capstan equation for strings with rigidity. *British Journal of Applied Physics*, 12, 559-562.

TT-UK (2009) Grundoram Taurus comes to the rescue on the world's longest

undersea HDD recovery operation on the Berri Causeway project in Saudi Arabia

UESUGI, M., KISHIDA, H. & TSUBAKIHARA, Y. (1988) Behavior of sand particles in sand-steel friction. *Soils and Foundations*, 28, 107-118.

US Army Corps of Engineers (1990) Engineering and Design - Settlement Analysis [online] Available URL: <http://artikel-software.com/file/Settlement%20Analysis.pdf>, dated view 10th August 2009

YAMAMURO, J. & LADE, P. (1993) Effects of Strain Rate on Instability of Granular Soils. *Geotechnical Testing Journal* 16, 304-313.