地工技術，第 80 期（民國 89 年 8 月）第 113-122 頁
SINO-GEOTECHNICS, No.80 (Aug., 2000) PP.113-122

腦力激盪

序

潘國樑

國內不乏具有前瞻眼光的大地工程人士。值此二十一世紀即將來臨之際，我們應有檢視過去、策劃未來的能力。基於這個動機，地工技術研究發展基金會(以下簡稱本基金會)乃發起二十一世紀大地工程研究發展腦力激盪運動，廣開言路，以讓百家爭鳴，為二十一世紀的大地工程研究發展方向獻策，使大地工程科技更往前邁進。

緣本基金會於民國 88 年 7 月 13 日第四屆董事會第七次會議時確定與中華民國大地工程學會共同發起前項運動，並即發函且公開徵文。原訂同年 10 月 15 日截止收稿，嗣因 9 月 21 日發生集集大地震，致使幾乎所有大地工程的眼光都集中到災區，所有地工界人士都衝到現場從事震害調查；徵文截止日期因而延至民國 89 年 4 月 15 日，即順延半年的時間，結果總共收到七篇投稿。由於本基金會於 88 年年底改選董事會，本案乃交由第五屆董事會負責繼續推動。新董事會遂於 89 年 5 月 30 日組成一評選小組，並根據構思之嚴謹性、創新性、可行性及貢獻度之評選準則，選出前三名：第一名(二十一世紀的大地工程－張森源)；第二名(土壤力學理論在大地工程上之應用發展－劉泉枝、胡邵敏、歐章煜)；第三名(大地工程科技的永續發展－潘國樑)。預備將這三篇文章刊登在〈地工技術〉上，以收拋磚引玉之效。

大地工程師係以地球表層及淺層為研究對象。這一圈層的土地是人類所賴以生存及從事生產活動的基礎。不幸，人類由於過度地、無休止地向地球索取資源、破壞環境並大量遺棄廢物，以致到了地球難以承受的程度，進而環繞著人口、資源、環境及災害產生許多問題。在解決這些全球性難題中，當然少不了大地工程提供的理論與技術，更少不了大地工程師們的參與及諮詢。本基金會為了讓大地工程師們發揮自己的專長，為大地工程科技的永續發展，以及為整個社會甚至所有人類的永續生存，特別開闢一個專欄，名之為『二十一世紀大地工程發展腦力激盪』專欄；凡是對於大地工程的調查、試驗、設計、工法、材料、監測、數值模擬、理論等等產生新觀念、或加以改良、或創造新產品、新技術、新方法、新知識等都歡迎藉用這個論壇，提出來讓大家共享，並讓我們為大地工程科技在二十一世紀能夠更發揚光大而共同努力。

為了使這個論壇茁壯起來，讓我們共同遵守一些原則：

- 儘量讓每個人的思想奔放，愈新奇愈佳
- 禁止批評他人的思想
- 所產生的新思想愈多愈佳
- 可以利用別人的靈感來刺激自己的靈感
- 可將數人的思想互相結合成為更完整的構想
- 大家想出來的創意應不定期召開腦力激盪會議，加以整理評價，並加以推行。

二十一世紀的大地工程

三元

一、引言

地球的環境似乎已經在改變，究竟是自然的循環現象，還是人類活動所引起，雖然眾說紛紛，尚無定論，但是改變卻是眾人直接的感受。就拿台灣的氣候來說，至少40至50年前，還需要穿長大衣，現在卻少穿了。北部地區冬春之交的連續綿綿細雨，又冷又濕的情況，近幾年來已不常見，基隆不再是雨港。颱風也不常來，一旦來了就很兇猛，就是風不大，雨也大。老天每年給我們的雨量，原來似較平均，分散零售的給。近年給的次數少了，一給就是批發，使我們的山坡、河川與大地難以承受。造成的洪水、山崩、土石流等災害，似有愈來愈烈的趨勢，這些現象因為人類對居住環境保護的不力而更形惡化。

靜默的春天，地球只有一個，這是先進環保人士的警世語句。的確，我們需要維持保護這唯一的地球，供我們的子子孫孫繼續居住，直到太陽燒盡他的燃料，自然熄滅為止。

人類的現代科學技術，似乎是在二十世紀內一舉發展而成。從出現飛機到人類飛向太空，並沒有花多少年，從大量使用化石能源發展到利用核子燃料，也沒有很長的時間。目前人類已在基因工程上獲得若干突破，也都是二十世紀內的傑作。因此我們應可肯定的相信，人類定可在二十一世紀內達成保護我們地球居住環境的工作。

現在的地球環境已經不是人類現代文明出現以前的那種情況：乾淨的溪流海洋、翠綠的大地、清新的空氣與完整無損的大氣層。臭氧層保護著我們全體人類與所有的生物。要把現代的環境狀況，在短期內恢復到從前的樣子，似乎已經不可能，除非人類甘願毀棄一切，回到文明以前的生活方式，過著與其他動物差不多的日子。在文明與環保必須同時兼顧的需要下，我們現在的生活方式，產業結構與生產方式、使用的能源等，恐怕都要進行改造，才能達到保護環境的目的。改造工程應該是一種持續的洪流，技術逐漸形成成熟。從新近各種研究的推廣情形來看，這些逐漸成熟的技術，將繼續發展，成為二十一世紀改造工程的技術。如果說改變生活方式、改造產業並改變使用的能源確實可以達到減少污染與潔淨環境的目的，首先要考慮的工程恐怕是把人類的活動空間改到地下，把地面還給大自然，並把燃燒燃料的能源利用方式改變為燃料電池的方式，與進一步提高電力系統的效力。在這些改造工程的洪流中，大地工程技術會扮演非常重要的角色。保護地球環境人人有責，大地工程師也不例外。以下讓我們共同來幻想一下二十一世紀的人類改造工程與需要配合的大地工程技術模樣。

二、都市的地下化

因為需要淡水才能生存，人類的祖先多選擇沿河流靠湖泊的平地，集聚而居，先為部落，後為鄉鎮，有些甚至發展為大都會。另也利用附近的平地，墾為農地，闢為工業區，經營各種產業，以供維生。也利用不少土地興建配套的民生必需設

施，譬如街道、公路、鐵路、機場、堤防、水庫與休閒設施。結果是天然綠地次第消失與生態環境的變質。君若不信，請從台北乘飛機直奔高雄，看看沿途地面的天然綠地還有多少，就可瞭解絕非危言聳聽。把這些失去的綠地還給大自然，恐怕是恢復原來自然環境的第一步。除用於生產糧食的土地，因農作物需要陽光，必須仍然維持外，其餘的生活空間，部份產業以及民生必需設施都要移入地下。

大舉地下化也有其他的好處，可列舉的有：

・可以減少天然災害，包括風、水以及地震

・強迫民眾使用地下大眾運輸系統，減少能源浪費

・強迫地下化的產業使用潔淨能源

・多出的土地綠化之外，兼可生產綠色的生物能源，接替終將枯竭的化石能源

・地下溫度穩定，季節性能源消耗差異減少

・原地面設施所破壞的地面，可逐漸恢復原狀

・可以獲得乾淨的休閒環境等

相信還可列出很多。

利用地下空間的構想，早已形成，相關的技術也正在形成中。已知的資料顯示，目前已有大型的地下運動場、地下儲存場、地下發電廠、地下鐵路、地下集合場、地下醫院等出現。這些地下設施都是大地工程技術的傑作，主要由深井技術與隧道技術構成。目前最深的地下鐵路約深50公尺，地下車站稍淺。一個都市的地下化，需要的深度，估計當在200至300公尺之譜。在軟弱地層中構築深井用的地下連續壁，目前已可達到100餘公尺，誰說二十一世紀內做不到300公尺？深入地下300餘公尺的地下儲存場與長寬逾100公尺的地下運動場，在軟弱地層中興建或許並不容易，但在硬岩中目前則都有案例。地下空間的大量利用，將更促使這些打地洞的技術，進步到可應付自如的地步。

地下都市將是如蜂巢般的結構，由無數的六角形井筒組成。都市與都市間則以隧道連通。其他都市設施則有如目前狀況，縱橫貫穿蜂巢之間。或許水或其他民生供應品安排儲存於地下都市最高的層位，人住在下一層，以求出入方便。商業或工作場所位於其下，乘客交通網次之，工廠、倉儲及貨物運輸網再次之。最下層才是可以回收能源的廢棄物或污水處理廠等。整個地下系統都需要自動化，以節省能源。因為地下可不分日夜二十四小時的輪班工作生產，整個供應系統包括電力、瓦斯、通訊以及運輸等，就無所謂尖峰與離峰之別，一切均勻供應。因而生產，供應與儲存設施的裝備容量都可縮小。

利用潔淨能源於生產事業、提高電力生產的效力以及改進電器用電功率，是都市地下化的先決條件。目前使用中的能源包括：

・水力

・化石

・地熱

・原子

・太陽

・風力

・海洋

其中使用最多的就是化石，包括煤、石油與天然氣。這是一種不能循環利用的能源，有用盡的一天，必須由其他能源接替。使用化石也是污染地球生態的大罪

魁。目前的研究顯示，它可用生物能來代替，利用綠色的植物直接生產氫氣，做為燃料燃燒；或直接推動燃料電池。氫氣燃燒並不污染大氣，也不傷及臭氧層，反而可生產寶貴的水加以利用。都市廢棄物與污水以及農業廢棄物也都可用來生產氫氣，加入供應行列。植物能是可循環利用的潔淨能源，生產氫氣後，碳原素回到土壤中，循環提供下期植物生長之用。植物能也可生產沼氣，直接用於燃料電池。由植物生產潔淨的氫氣或沼氣再予利用，目前最大的問題是效率與經濟問題，繼續的研究與發展，到了二十一世紀應可達到可行的地步。

其他能源的利用，目前也已有技術的基礎。二十一世紀內將會有功率更高而經濟的風力發電與太陽能發電技術出現。雖然難於大規模化，但分散設置利用於小村落，至少可以減少大電力網中發電設施的投資與輸電的損失。海洋能的開發，如溫差發電技術、波浪發電技術與潮汐發電技術等，也將為二十一世紀的能源供應，提供化石以外的替代品。利用燃料電池供電的方式，將可應用到獨立的家庭單位。目前，空調系統幾乎已成為家庭的必要設備，多機型的系統是今後的服務模式。其熱交換機是裝在屋外，體積並不大，家家似乎都可接受。經濟可行的燃料電池，其大小將於二十一世紀縮小到與空調系統熱交換機類似甚至更小，而為家庭所接受。燃料電池的燃料是氫氣，沼氣或目前使用的天然氣。燃料電池是透過化學反應產生電力，並無二氧化碳發生，且因係用戶接收燃料自行發電，燃料輸送過程幾無輸氣損失，無疑可發揮分擔大電力系統負荷的功能，應為二十一世紀獨立用戶的供能方式。

由於能源生產不易，所費不貲，各種用電系統與電器功率的提高，也是都市地下化必須配合的措施。全面利用公共運輸系統是節省能源的措施之一。貨運尤其是粒狀的貨物，以容器管送系統運送的技術已在發展中。此一技術相信會繼續進步到利用於零星的大件貨物，一如目前的貨櫃。容器管送系統的技術符合地下化與節省能源的基本要求，相信是二十一世紀地下化都市的主要運輸方法。

三、壓氣電力儲存

電力已經是人類不可缺少的能源。它是乾淨的能源，但天地間並不自然存在，必須利用其他的能源轉換而成。如要儲存也必須轉回其他形式。這一來一往之間，因效率問題能量就會發生損失，而且損失還不少。在二十一世紀初期，電力需求尚未均勻化以前，把離峰期間的多餘電力儲存下來，供給尖峰期間使用，恐不可避免。儲存電力較成熟的方法是抽蓄水力發電系統，把剩餘電能轉換為水的位能。利用這個方法必須有特殊的地形條件，即足夠容量與相距不太遠的上下水池，還要有適當的水位差，俾有合理的系統效率。這個方法的缺點是合適地形可遇不可求，就是有，也遠離都市或其他用電中心，因而剩餘電力的輸入與生產電力的輸出，都難免有所損失，把寶貴的能量浪費掉了。

蓄電池是可以直接蓄存電力的設備，用來蓄電應是不錯的選擇。它的效率只計電池本身，不像抽蓄發電系統需要計及輸電、抽水、發電、輸電等的各種損失。雖然如此，目前蓄電的效率仍

不甚理想，有待大力提升，電池的大小也需要改進。相信二十一世紀內定有若干突破。

抽蓄水力及蓄電池之外，壓存空氣的方法也可用來儲存電力。目前發展中的技術證明它的效率要比抽蓄水力及蓄電池高。由於儲氣槽與發電設施可就近設在用電中心附近的地下，輸電損失較低，故可能成為二十一世紀地下都市的儲電方法。這個系統是把傳統所蓄的媒介由水改為空氣，另將位能改為體積能而成，儲氣槽則建立在地下。所儲存的空氣壓力可能需要高到60氣壓，因而須有高功率的空氣壓縮機與氣渦輪機，也要利用水壓式泥漿壓把壓縮空氣密封於數百公尺深處的儲氣槽內。需要的水壓可與雨水下水道系統連接運轉獲得，於大雨時協助解決低窪地區的防洪需要。也可與污水處理系統結合，利用部分壓縮空氣進行污水的曝氣處理。建造數百公尺深的儲氣槽，即井筒或隧道，將是二十一世紀大地工程師的一大挑戰。

四、容器管送運輸系統

零散的裝運貨物既費時又浪費載具的空間，於是有了貨櫃的發明。貨櫃做成標準尺寸，又把貨物提前裝入貨櫃內，集合後一氣裝上載具，除可縮短裝上載具所需時間外，裝卸效率亦可提高，而節省運輸成本。貨櫃運輸目前盛行於輪船、火車與飛機。另一方面將粒狀貨物混合於液體中，透過管路泵送的方法也行之有年。把這兩種方法合而為一的就是容器管送系統。它由管道、容器與流體泵等三大設施構成。這種運送方法用在貨物運輸已有案例可循，運送旅客則有待開發。地下都市的城際運輸，應可配用這種容器管送系統，以簡化載具種類。

容器在管內的推送媒介，可用空氣或水等流體，或直接以磁力推送容器。磁力推送者即為磁浮系統，推送速度可能較快，因在管內行進，安全度較高。地下管路的外在因素影響較低，故可成為高效率的系統。這一系統的大地工程仍然不離深挖井筒與隧道管路的興建，主要的技術問題應該是管路的尺寸精度、平順度與水密或氣密度。推送媒體，即水或空氣的加壓設施，也要有高的效率與經濟性。如容器要用於運送旅客，則容器內需有獨立的維生系統，或許其設計與目前的太空艙類似。

五、地下水庫

人類的活動離不開淡水的利用。用水中佔絕大部份比例的是灌溉用水，次為工業用水，佔最少的是飲用水。灌入農地的水，不是滲入地下就是直接或透過植物的葉面，蒸發回到大氣層。上游農地滲入地下的水，常可在下游回收利用，台灣西部海岸養殖業所抽的地下水就是。提高回收利用效率的方法之一就是在下游適當地點興建地下水庫，可直交地下水的流向建造截水牆，在其上游區域天然或人工透水層中形成地下水庫。如地面坡度足夠，地下水庫可分階興建，配以人工形成的蓄水層後，就可成為多階段地下水庫群。上游滲入地下的水量被其下游第一道截水牆攔截浮出水面，不需動力協助即可直接利用。下游各道截水牆的運作情形亦復如此。

大量用水的工業似乎是製鋼廠，在製程中用來冷卻成品。但這種水可以循環利用，只需少量補充。造紙、皮革、染整、電鍍等工業的用水，因已受到嚴重污染，回收較難。

佔最少比例的飲用水，其水質標準較高，在二十一世紀將會成立獨立的系統供應。它的儲存水地與地下都市構造一併興建，似可設於構造的最上層，俾利用重力分送各層用水點。地下水庫或蓄水池的興建，都可增加地面水庫的使用效率。

地下水庫的截水牆與人工透水層的興建，再度顯示這是大地工程的技術。興建地下截水牆時，或許可以把不必更換而只沖洗即可的過濾膜一併建入，達到蓄水與處理的雙重目的。這種過濾膜在二十一世紀或許已經進步到可以大量過濾海水，除去鹽分，增加淡水的供應。大地工程的技術應可在二十一世紀內，與其他各種技術結合，造福人類。建造人工透水層的目的，是增加地層中的孔隙，用於儲蓄存量。或許可在上述灌溉用水的循環利用過程中，在最上游的灌溉水中摻入一種無害的化學物質，進入地中後與某種礦物發生作用，發生泡沫，擠出空隙，地下自然就有無數空間蓄水了。

六、過海大橋與隧道

世界上有很多島嶼或地區，因受阻於海洋居民交往不便，造成隔閡，甚至形成政治問題。世界變成世界村的趨勢中，跨越海峽或海灣的運輸交統系統，將是二十世紀的主要工程建設。跨越海峽或海灣的運輸交通系統，有空中運輸、海上運輸與鐵公路運輸等各種方法。寬度不大的海峽或海灣，利用空中運輸，因載具容量不大，且易受天候影響並非最佳。海運也有天候問題，且轉運費時，恐亦非終久的系統。相對的，跨過海峽或海灣建造鐵、公路，直接通行現有陸上載具，應為最佳的工程建設。

跨越海峽海灣可用長橋與隧道兩種方法。兩者目前都已有成熟的技術與案例，相信將繼續發展到更寬更深、海底更軟的海峽海灣中興建。興建大橋的大地工程，是在深海中，甚至在軟弱的沉積物中建立橋台或橋墩基礎。海床的地質調查、鑽孔、取樣與現場試驗，目前是在船上遠隔進行，受到水深、海浪等的影響不知凡幾。在二十一世紀，這些工作應該會利用機器人潛在海床上，直接進行。試驗室的設備也可合理模擬海底狀況，且有可應付極軟沉積物力學試驗的技術。

海底隧道可以懸浮水中、沉埋與挖掘等方法興建。懸浮海水中的方法在有強大海流通過的海峽似不適用。興建懸浮海中的隧道，主要的大地工程問題，是拉索錨固於海床的問題，若海床軟弱層很深，困難度將更形增加。海底地質調查與錨固作業，在二十一世紀裡將都要用遙控的機器人在海底施工，方能確實。

以沉埋法興建隧道，也較適合於海水平靜且海底較淺的海峽或海灣。崎嶇不平或坡度過陡的海底，恐怕都不易採用這個方法。如海床甚軟，且軟弱層甚厚，則可能需要較大的埋入深度，增加工程的難度而不易進行。

在海床中挖掘隧道也有它的困難。首先隧道必須在海底下一個安全的深度，因此兩頭的引道很長，海愈深愈長。海床中破碎帶的位置，規模與透水性等，是決定隧道深度的主要因素。目前雖已興建數條海底隧道，但從曾經發

出大量湧水的案例來看，這些因素的調查與評估技術，在二十一世紀裡尚有發展的空間。也許調查必須利用機器人下到海床上，進行震測、鑽採樣與現場試驗。屆時對破碎帶材料性質的評估方法，應已較目前進步，也已有可模擬推算隧道出水量的有力分析工具。

海底隧道利用潛盾機或TBM挖掘，應是唯一的方法。在軟弱地層中使用潛盾機，而在硬岩中使用TBM是目前的技術。雖然兩者的挖掘機構因地質而異，但利用盾殼保護工作面，以及後續的支撐架設機構則是類同。較長的海峽或海灣海底隧道，地質必定複雜，潛盾機或TBM可能需要在地中中途，因應地質變化更換挖掘機構，或使用一種萬能隧道挖掘機，挖通所有地質。這種技術在二十一世紀應已成熟。海底隧道可能需要通過數條斷層，其中有些可能會在隧道的使用壽命內再度活動，摧毀隧道。在二十一世紀，對如何評估斷層的活動性，必須開發完成必要的技術，同時也開發因應活斷層再活動的工程措施。

長隧道的通風與安全防護，一直是有待改進的問題。如能採用氣動輸送管容器運輸系統，則因隧道中不需另外通風，且無動力電線等可能火源，在隧道內發生火災之機率可能較低。

七、萬能隧道挖掘機

隨著生活的地下化，隧道的興建可說應為家常便飯。為因應這種需要，二十一世紀必須有各種高性能甚至萬能的隧道挖掘機。首先，目前只能挖掘圓形全斷面的挖掘機，應改變為可挖掘任何斷面形狀的機種；預製襯砌構件的設計製造與架設方法也應配合改變。此種技術事實上已在發展之中，到了二十一世紀應該已經到達爐火純青、可隨心所欲的地步。

目前不論是潛盾機或是TBM，挖掘的動作都是旋轉裝有固定削刀的一個大削刀盤，全斷面同時削挖。結果是外緣的削刀負荷最重，圓心附近的負荷最小，極不平均。使用的動力也有甚大的浪費。二十一世紀的挖掘機，應改變此種方式，成為每一削刀的負荷都一致的小挖區挖掘機構。個別挖掘機構可獨立挖掘，也可連動全斷面挖掘。也只有採用這種挖掘機構，挖掘機方能挖掘任何挖掘斷面，不必為圓形。

其次，目前的挖掘機構是土壤與岩石有別。土壤用扒齒，岩石用滾輪。兩種材料被挖鬆的機制不同，不能錯用，否則根本發揮不了挖掘功能，甚至還可能傷及整個挖掘機。目前軟土潛土機碰到硬物，如卵石、巨石或軟岩而需要改變挖掘機構時，是在地質變化地點停機，從地面向下挖出一個工作井，直至潛盾機，露出削刀盤後更換整個削刀盤，此法既費時又費錢。挖井時可用擋土措施支持井壁，也可將工作井周圍地盤改良固結後不用擋土措施，以利吊放削刀壁。按潛盾機是針對軟弱地盤的隧道開挖發展而成，除挖掘扒齒外，最大的功能尚包括其水密性與控制土壓的能力。惟因潛挖途中不免有礫石或局部岩盤出現，因而現代的潛盾機，無不於需要時輔以對付這些硬質材料的設備，以應需要。也就是說潛盾機的發展是取軟趨硬的途徑。反之，TBM是從因應佳質

硬岩開始，而後逐漸發展到也可對付破碎帶的程度，也就是說由硬朝軟改進。目前的TBM所缺少的功能，只是水密性與對抗軟岩或破碎帶土壓的能力。兩種隧道挖掘機既然分別從軟硬兩端向共同的軟岩、破碎帶發展，到了二十一世紀誰說當隧道地質為軟硬兼有時不能合二為一，出現一種萬能的機種？

萬能的隧道挖掘機應為具有水密性而於更換挖掘機構時，可不需藉工作井之助，而可輕易在地中從機內更換挖掘機構的機種。此種設計的削刀盤可能是一隻球，其半球裝設軟土用的扒齒，球體內部可做為土艙或液壓艙使用，以平衡土壓。另一半球則裝置硬岩用的滾輪。由於削刀盤整個是一個球體，因而換面容易，不致引起挖掘面的崩塌。

萬能挖掘機的造價一定較高，因而它的一次潛挖長度，應較目前的長度長很多，一旦入土或入岩，非至盾殼磨輕或盾尾封制刷損壞(均為不能在地中更換者)不出土。磨損的削刀目前已可從機內偵測並更換，不過更換削刀總要停機且要時間。二十一世紀的隧道挖掘機所裝的削刀，因而需要有很高的耐磨性，以減少更換次數。

長距離的潛挖，將會使工作人員來回於工作面與洞口的時間加長，佔用寶貴的挖掘時間。二十一世紀的隧道挖掘機應在其後勤支援系統中，配備工作人員住宿生活設施，以延長出洞的時間。萬能隧道挖掘機的各種作業，在二十一世紀內應高度自動化，包括超前探查與地質研判、推力調整、削刀磨耗量偵測，各種材料器具的搬運，支撐安裝、模版裝卸，鋼筋組裝與混凝土澆置等。

八、水沒式挖掘機

地下挖掘，不論是直井或隧道，都會碰到水的問題。目前的地下挖掘作業，都是以人工配合機械進行。因為人類呼吸的需要，必須保持工作面的大氣狀態，而使隧道內外發生水壓差。其結果是隧道內常有壓力水湧入，甚至帶入大量軟弱材料，造成災害，也使隧道外地下水位下降，地盤下陷，影響環境，危害地面建物。目前對付地下水的方法甚多，基本的技術不外乎壓氣平衡、排水降壓、與阻水入滲等三法。各法均有各法獨自的採用條件與極限，因而目前多依地質狀況及經濟評價結果，將三個處理方法混合利用，以最少的經費、最短的工期，爭取最大的效果。

試想如所有地下挖掘等工作，都可以在隧道內外水壓平衡或接近平衡的狀況下施工，相信今天常常碰到的眾多水的問題，都可迎刃而解，甚至或許可降低工程成本。把所有的挖掘機具，包括潛盾機與TBM，都做成可搖控的，內部水密的，耐壓的機器人，或水沒式挖掘機，容許在水下或泥漿內作業，或許可以達到這個目的。隧道或直井內注入水或泥漿維持壓力，一如目前的地下連續壁施工法。如有必要，常用的泥漿應改用高比重泥漿，甚至將泥漿密閉加壓。在二十一世紀內，這項技術應已成熟，應用自如。

採用水沒式挖掘機或可免除井壁或隧道壁的臨時支撐，挖掘後直接在水沒狀態下澆置襯砌混凝土，應屬可能。襯砌後即可抽除內部的水或泥漿，此時外壓對襯砌

發生預壓作用，無形中增加了襯砌的強度，進而降低襯砌費用。相信這也只有採用高比重泥漿保護井壁或隧道壁，且使用水沒式挖掘機具，方易深挖。

九、高比重泥漿穩定液

在軟弱地層內做垂直深開挖，目前用泥漿或皂土穩定液，保護井壁或溝壁免於崩塌。穩定液的比重越大，對井壁的穩定作用越佳，而井深越大所需穩定液的比重要求也越高。高比重的泥漿穩定液尚在開發中。維持泥漿高比重的主要成分是鋇，其本身的比重為3.75，經過適當的比例調配於泥漿中，可獲得比重達1.4～2.0的漿液，用於保護深300～400公尺的井壁。在二十一世紀，都市地下化帶來的深挖工作將如家常便飯，高比重井壁穩定液的使用將甚為普遍。在挖井作業中，如何維持泥漿的均勻性，不致發生沉澱，以及如何回收再利用等，恐怕將是高比重泥漿使用的問題之一。

目前深開挖是先沿周圍挖建一道地下連續壁，作為內部開挖的擋土壁。二十一世紀地下都市的垂直蜂巢結構，可能也需要以這種方法興建。擋土壁內的土方以水沒式挖掘機開挖，開挖坑也充以高比重穩定液，以平衡連續壁內外的土壓差，免除架設內部支撐，縮短開挖時間。此法復可獲得井壁預力之效果。可謂一舉兩得。將來的隧道開挖也可比照直井開挖，注入高比重泥漿穩定液，以平衡地下水的湧入並穩定隧道壁。

以水沒式挖掘機在高比重泥漿中深挖，還有些問題須待克復。那就是如何在高壓環境中以及水密要求中，維持挖掘機的工作效力。相信在二十一世紀中，這些問題已不再是阻礙。

十、軟弱地層的處理與利用

大城市大都位於軟弱的地層上，因而都市地下化將帶來大量挖方的利用問題。軟弱地層材料應包括近代沉積物與細碎屑沉積岩，如砂岩、泥岩與頁岩等。此等材料經挖掘後，大都分解為極不合用的土料，不易用傳統的方法壓實。其中原因包括級配不良、含水量過高、脫水不易、一但乾燥又化為風塵等，常造成環境的污染。

在二十一世紀，這些開挖分解的土料，或可藉摻入某種綠色膠結物而予固化或粒狀化，使其適合再利用。固化或粒狀化後的抗壓強度希望能達到至少與常用混凝土強度相當的程度，如此可當混凝土骨材利用，或根本就在構築井筒蜂巢結構時不必挖出，就地固化成為井筒。

部分土料甚至於摻入特殊摻料後，改變其酸鹼度，於摻入腐植纖維等後，恢復作為表土料，覆蓋於裸露的岩盤上，成為綠化地面的基土。二十一世紀的科技應可達成此一革命性土方利用方法的開發。

在泥岩或頁岩層中挖掘直井或隧道，主要的工程問題是挖後增加的壓力，岩盤無法負擔而終至破壞崩塌。於軟岩中加入綠色膠結物並予攪拌固化的技術，也可用在挖掘直井或隧道的前處理方面。也就是把直井或隧道周圍適當範圍內的岩盤先予打碎分解，再摻入綠色膠結物，攪拌固化為硬岩，才在其中建構直井或隧道。在這種人工形成的硬

岩盤中進行挖掘工作，相信大部分的常見困難，都可不再出現。

十一、結語

大量利用地下空間，將是二十一世紀的活動之一，需要有突破性的改變與新穎的大地工程技術，方能應付這種需要。

本文提出甚多科幻小說般的奇異大地工程，預測會在二十一世紀中出現。對人類生命而言，一百年並不是一個很長的時間，但是如果回顧一下二十世紀的科技發展歷史，就可明瞭過去一世紀科技的變化與進步是何等的巨大。因而本文所做的各種預測，其實現的機率甚高。讓我們張開雙手，迎接二十一世紀的到來，並共同攜手開發未來的技術，以供需要。

作者學淺才疏，承囑撰寫二十一世紀的大地工程一文，共襄盛舉，本不應班門弄斧，詒笑四方，奈何推辭不去，只有硬著頭皮，憑日常所獵印象胡謅一番，旨在拋磚。尚祁此方專家先進，免予大笑。又不敢以真名發表，復請見諒包涵。