

中國古代之地工技術

歐晉德

李宏仁

世正開發股份有限公司

摘要

我國先民在地工許多領域都曾運用智慧，發展出優異的技術。本文蒐集古籍、文獻中的相關資料，對於先民們在鑽探、夯土、柱礎、筏基、木樁施工、臨時止水設施、滲流水控制、加勁土、隧道、地下深開挖、施工設備、地震紀錄與地震儀等方面之成就，進行探討。於探討的過程中發現日常有認係自國外引進之施工技術，實則為我先民所早已沿用者。先民們在地工技術的領域中成就斐然，吾人應繼往開來，開創更光輝燦爛的未來。

Geotechnical Achievements in Ancient China

Chin-Der Ou

Hong-Jen Lee

Century Development Corporation

Abstract

Geotechnical engineering applications have been conducted in China for very long time. After studying on the related ancient documents, it was realized that good achievements have been reached by ancient Chinese in many geotechnical aspects : boring inspection, soil compaction, column structure, raft foundation, timber pile application, temporary water-stop work, seepage control, earth reinforcement, tunneling, deep excavation, construction equipment, earthquake record and earthquake monitoring device etc.

The readers are also reminded to work hard to succeed to their ancestor's remarkable achievements.

一、前言

羅盤、火藥、指南針是我國固有的三大發明，對人類的文明曾發生深遠的影響，除此三項重大發明外，我國在多項應用科技亦有甚傑出之表現，大地工程技術即屬其一。本文搜集我國古今典籍中之相關敘述，並參酌近年來考古工作之收穫，對我國大地工程發展中之固有成就作一概要回顧，並企盼能藉之增進國人之自信心，承先啟後，開創更光輝燦爛的未來。

二、鑽探施工

2.1 鑽探重要性之認知

我國早在宋代，即已利用鑽探方式作大地

特性探測，以為渠道施工之依據，宋朝樓鑰著之「北行日錄」(西元1169年)中記述：“自洪澤湖至龜山，每一、二里(約合今尺55-110m)即鑽井一口，以調查土壤及母岩之性質”，對於基礎工程均建議先進行基址探查。宋朝李誠之「營造法式」為全世界最早的建築技術規則，完成於西元1103年^(註1)，其「築基篇」中即記述：“凡開基址須相視地脈虛實，其深不過一丈(約合今尺307cm)，淺止於五尺或四尺(約合今尺123-154cm)”(圖一)，可知當時對鑽探之重要性已有所認知。

2.2 鑽孔技術

我國自古鑽探採用之方法也極為進步，衝擊式支金屬鑽頭亦早有所應用，如於鹽井鑽孔之施工方式，在明代宋應星之「天工開物」(西

註：本文係第四屆陳斗生博士紀念講座(2016年海峽兩岸岩土工程/地工技術交流研討會)發表原稿修訂

元1637年)^(註2)一書中有諸多記述，圖二中顯示之鑿頭，距今已達四百餘年，與今日國際慣用之魚尾式鑽頭亦相差無幾，又如於孔口採用石製之套管以防止孔口崩塌(圖三)。清代羅文彬等之「四川鹽法志」(西元1882年)並記載藉灌水補助鑽孔施工之方法^(註3)

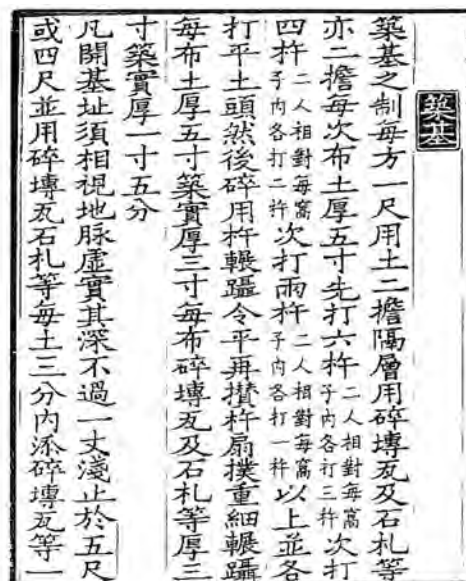
2.3 取樣技術

先民取樣觀察之方式，主要是盛取鑽孔時之泥水及岩屑而觀察，取樣之方式多藉竹筒為之。竹筒之應用，古時已十分廣泛，(其製作方式如圖四、圖五，取岩屑、泥水均曾用及(註3)，南宋蘇東坡之「東坡志林」(西元1101年)一書中尚且述及「逆止閘」一物，用於以竹筒取泥水時防止泥水流失^(註4)。

2.4 鑽探紀錄

鑽探紀錄，在昔時乃藉「井口簿」為之，「四川鹽法志」卷二載：”先於銼井時，日下幾尺或幾寸，皆簿記焉，紀錄鑽孔之進度”。清代李榕「自流井記」(西元1875年)一文中且記載鑽探所獲岩心逐一銜接之記述^(註5)。

除前述諸要項外，「川鹽紀要」中尚提及先民們對於岩盤墟縫是否相通之探知亦採用了甚聰明的方法，他們在二觀測井間以粗糠混入水中而追蹤地下水之流向，此和今日以追蹤劑進行地下水探測，實具異曲同工之妙。



圖一 營造法式築基篇對地基鑽探之規定



圖二 中國古代鑿井圖(摘自宋應星，1637)



圖三 於孔口採用石製之套管以防止孔口崩塌(摘自宋應星，1637)



圖四 下木竹孔壁以保護孔壁崩塌(摘自宋應星，1637)



圖五 製木竹(摘自宋應星，1637)

2.5 地層測試

「四川鹽法志」中指出我國古代的鑽井師老早就發明了以「泥孩兒」進行井壁岩縫漏水測試之方法。「泥孩兒」是直徑與井眼相近略小的一段三、四尺(約合今尺96-128cm)長的木頭，半段用泥塗敷，用麻繩捆紮而成，測試時將「泥孩兒」以繩懸下，”至走岩處，頓時許，取出視其濕，即知其方。濕顯者即知其腔口大，濕深者即知其水力勁，然後據以補之”。

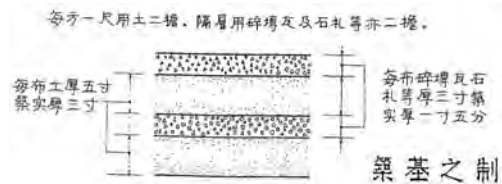
地下裂縫之分佈狀況對鑽井井位的選擇關係甚為密切，依劉昭民(1985)之記述知世界各國到1950年代才開始研究這些探測方法，而我們的祖先在一百多年之前就已進行了，自流井的「井口簿」中曾記述「見立縫」、「見豎縫」、「立縫見火」、「橫縫見水」、等，即是指裂縫生成情況、發現油氣及發現地下水之情形。

三、夯土施工

3.1 夯土技術

夯土施工在我國歷代的建築施工中均扮演甚重要角色，依「中國建築史論文選輯(一)」中「夯土技術淺談」一文之敘述：”在我國五六千年前的石器時代，已發現有夯土施工之殘跡。在陝西半坡村等處發掘之新石器時代遺址，其穴室柱洞內之墊層上即已發現了夯實的土層，間或夾雜以碎陶片^(註6)。其後在河南偃師二里頭發掘一座大夯土台基，發掘出之面積廣達 10,000m²(邊長約 100m)，台基厚約 2-3m。在殷墟小屯建築遺址之夯實土層，其於二層之間揭開後，發覺上層的下面有突出小土柱，而下層之上面則有對應之凹入小洞，已有後人稱之為「子母扣式」之夯築技術。西周建築遺址中出現了以大卵石作基然後在其上夯實的堅土。三國時，曹操興築銅雀台，其夯土層夾有陶土片瓦礫層，是為一層土，一層石札夯築法之實例”。到了宋代，李誠「營造法式」一書中已明載了夯土施工之規範：”築基之制：每方一尺(約合今尺30.7cm)，用土兩擔；隔層用碎磚瓦及石札等，亦二擔。每次布土厚

五寸(約合今尺15.4cm)，先打六杵，次打四杵，次打兩杵。…每布土厚五寸(約合今尺15.4cm)築實厚三寸(約合今尺9.2cm)，每布碎磚瓦石札等厚三寸(約合今尺9.2cm)，築實厚一寸五分(約合今尺4.6cm)”(參見圖六)。它對佈土數量，夯打程度等均作成規定，為夯土施工技术豎立了一個新里程碑。到了清代，有了更新的施工法則—「工程作法」，它對每次填土可鋪設的厚度，夯打之程序則均作成了規定^(註7)。



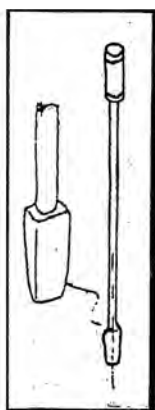
圖六 營造法式中有關夯實土層之規定 (摘自梁思成，營造法式註釋)

昔時之夯土施工，不僅應用於地基，亦應用於築牆。傅喜年(1981)記述西周建築利用模板逐步夯築牆垣之施工方式：”用版作側模，前端用堵頭封，后端敞開，用木棍卡住，夯實後打開卡木，把版前移，繼續夯築，夯完所需長度，再移上夯第二層，逐層上升，至所需高度為止”。在我國古籍「爾雅」中曾載有夯土技術應用於築牆之圖例(圖七)。劉致平於「昆明東北鄉古建築圖錄及解說」一文中則繪有夯土所用「牆杵」(圖八)之圖例。

依董鑒泓(1984)之記述知河南鄭州附近曾發現一段殷商時代殘留的城牆遺址，城牆寬約 4 - 6m，最寬處達 7 - 8m；高約 4m，最高處達 9m，經考證牆身係用 3cm 直徑之夯杵搗實。夯層之厚度約 8-10cm，亦發現經夯實之牆身土壤十分勻平堅實。該城牆係築於距今 3500 年之前，得知在甚久遠之前我國即已將夯土技術應用於築牆施工之中。



圖七 夯土技術應用於夯築城垣 (摘自爾雅)



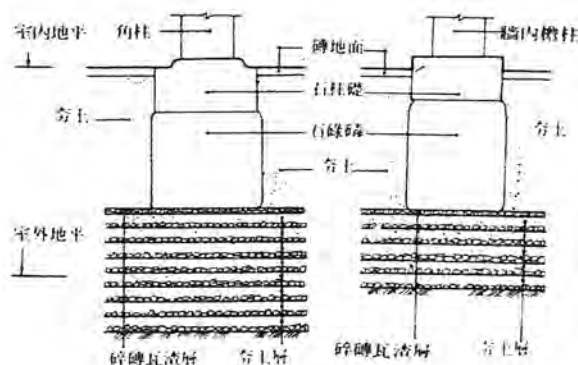
圖八 牆杵 (摘自劉致平, 昆明東北鄉古建築圖錄及解說)

3.2 土壤改良

宋朝魏泰於「東軒筆錄」中記述：”子喬曰「古有拔軸法，謂掘去抽沙，而實以炭末墁土，其上可築城，城市不復崩矣」。其所謂「拔軸法」，即為一種替換土壤之改良方法，曾有效地應用於築城施工中。

為增加建物下軟弱土層之支承力，我國甚早即曾採用在土內參雜碎磚瓦、石塊等雜物而加增強土層之支承力。宋「營造法式」對此種施工方式亦有規定：”…其深不過一丈(約合今尺307cm)，淺止於五尺或四尺(約合今尺123 - 154cm)，每布用碎磚瓦石札等，每土三分內添碎磚瓦等一分(參見圖一)。”

中國古代建築技術史編審組於其所編之「中國古代建築技術史」中根據史料所繪製得山西芮城永樂宮三清殿基礎(西元1262年)(圖九)，可見其在土內參雜碎磚瓦施工概況。



圖九 山西芮城永樂宮三清殿基礎 (摘自中國古代建築技術史)

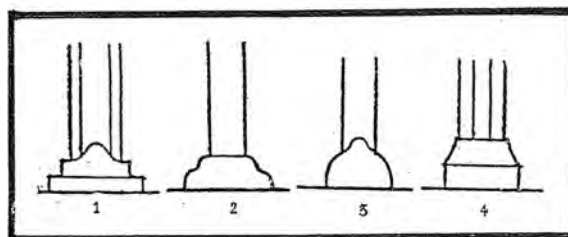
除在土壤中加入碎磚瓦、石塊外，古人亦知在土壤中加入石灰等以加強夯土之強度，楊國忠(2011)等在其「中國古代地基基礎技術研究」一文中之記述：陝西西周時期的周原宮室地面曾在土中加入石灰進行夯實，亦記述：江蘇南京西善橋的南朝墓封門前的地面亦是加了石灰進行夯實。

四、柱礎施工

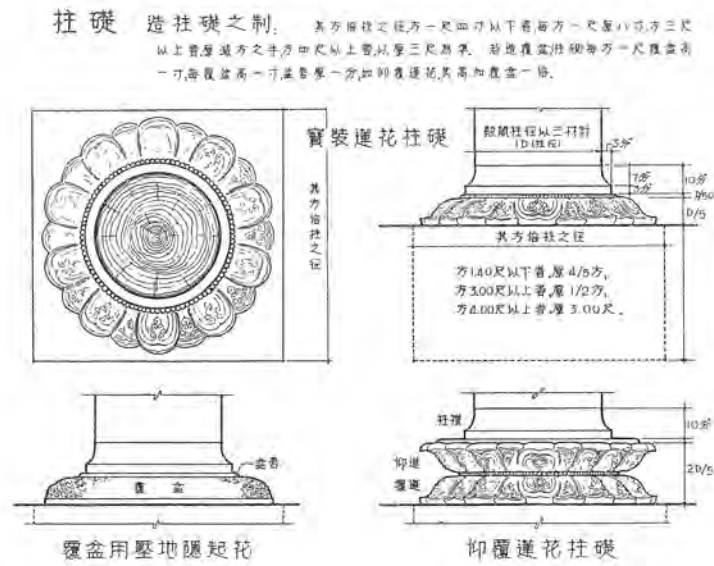
「柱礎」即「柱下的基礎」，是擴展基腳的一種，其功能主要是將柱身中的荷重傳遞至地上較大的面積。

如前節所述，在新石器時代先民穴室之柱洞內上即已發現了經夯實的土層，藉夯土而增加支柱的承載力。俞佛超(1963)記述：”到了戰國時已有了柱礎石之出現。在戰國鄴城遺跡所發現的柱礎石，其邊長約60cm，厚度約20cm，柱礎之中間有一小圓穴，供插置木柱”。陳從周(1956)又記述：”至漢代時的柱礎又開始有突出於地表之覆盒狀柱礎(如圖十)，其後更由於佛教及外來裝飾花紋之傳入，柱礎之藝術形式遂展開了長足的發展，先後出現多種藝術之造型。柱礎之發展演進至宋朝時，「營造法式」一書中對柱礎之尺度、構造開始有了具體的規定(如圖十一)。

柱礎施工技術中值得一提的是柱槓之使用(參見圖十一之右下圖)，它是柱與柱礎之間的墊物，其作用主要是防潮，防止近地面處潮濕的水分沿木柱之木紋上升，其材質可採木、銅或石材。



圖十 漢朝時起的柱礎開始有突出於地表之覆盒狀柱礎 (摘自陳從周, 1956)



圖十一 營造法式中有關柱礎之規定 (摘自梁思成，營造法式註釋)

五、筏基施工

5.1 木製筏基

明媚水都蘇州城內滿佈著渠道與水門，為使水門基礎能穩固站立於鬆軟的河床中，先民們曾使用了簡易的木製筏基，曾被發掘的蘇州水門木製筏基。依大陸蘇州博物館考古組(1983)之記述得知：該蘇州水門筏基共使用約一百餘根長約8m，直徑約28 - 35cm之圓木，分三層疊壓。底層圓木安置於原土開挖的凹槽內，圓木向上之一面經過加工刨平，其面層與開挖原土之面層齊平。在中層圓木兩側之上方各排有六根圓木，形成縱橫疊架成一整體之筏基。

5.2 石製筏基

宋代人蔡襄約於西元1053年至1059年在福建泉州洛陽江的入海口上建有洛陽橋，根據茅以昇(1973)引述近人羅英之考證，該橋石製筏基之構築步驟如下：

1. 在江底沿橋樑之中線鋪設大塊石
2. 沿中線向兩側展開至相當寬度，成一橫跨江面的整體筏式基礎。
3. 於此筏式基礎上建築橋墩
4. 續築上部結構

洛陽江水深流急，築基時之拋石易於漂失，宋朝水泥尚未發明，如何固結住這些拋石

呢？對此難題先民發揮了高度智慧，運用了在當地盛產，附石而生的牡蠣，嘗試在所拋之石塊上繁殖它，其後果然獲得不錯的效果，將拋石堆積成穩固的基座。築橋墩時以交錯疊砌長條大石塊之方式築成，在橋墩上下游之兩端俱築成尖形，以減小橋墩受水流衝擊之阻力。古籍中對這種築基之方法亦有記述，如郝玉麟等之「福建通志」：「以蠣房散置石基，益膠固焉，」又如歐陽玄等之「宋史」「蔡襄傳」：「種蠣於礎以為固至今賴焉」。洛陽橋於建築完成之後二十年，為穩固橋基，官府曾頒佈法令禁止於橋基附近捕捉牡蠣。「福建通志」中記述：「(宋)元豐初年(西元1078年)王祖道知州事，奏立法，禁取蠣房」，得知我國早在宋朝時即已注意保固橋基，明定了相關的保護法令。

六、木樁施工

我國甚早時即在工程中使用木樁，其應用之情況如下：

6.1 木樁施工之相關規定

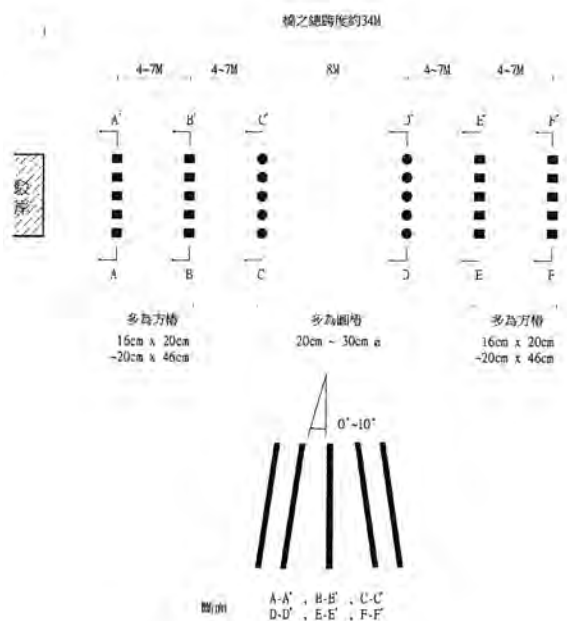
宋朝李誠之「營造法式」卷三「築臨水基」條記述：「凡開臨流岸口修築屋基之制：……每岸長五尺(約合今尺154cm)釘樁一條 [長一丈七尺(約合今尺522cm)，徑五寸至六寸(約合今尺15.4-18.4cm)皆可用] 梢上用膠土打築令實。」

6.2 木樁施工實例：

1. 揚州古木橋

我國甚早即已運用直、斜等木樁於橋樑施工，依徐良玉(1980)之記述得知，在我國江蘇揚州曾發掘出一座唐代古木橋，於橋址中發現了規劃甚完整的木樁群(圖十二)。橋樁每排約五根，最中間一根為直樁，兩側者則為斜樁，均向中心傾斜 $0^{\circ} - 10^{\circ}$ 。樁之間距為4 - 7m不等。木樁多為方型，斷面尺度自16X20cm至20X46cm，中間兩排多為圓樁，直徑為20 - 30cm。

出土的橋樁殘長約2-5.5m不等(故知樁長應有長於5.5m者)，因橋中孔之最大跨度長達8m，研判木樁具甚大之承載力。挖掘中並發現木樁之下端削尖，樁尖多打入砂土層，藉擠壓砂土而增加支承载力。



圖十二 唐代揚州古木橋之木樁佈置 (依徐良玉之記述繪製)

2. 安瀾橋

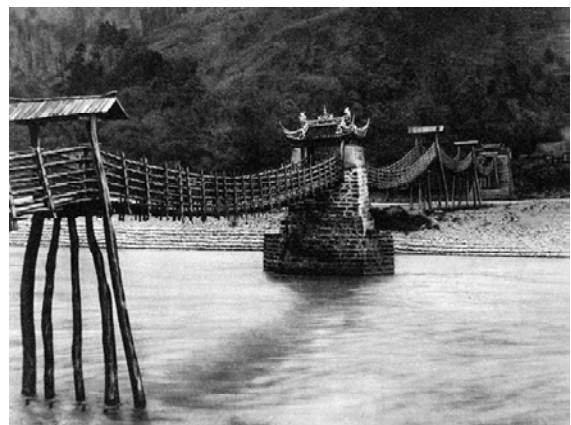
四川都江堰附近跨岷江有座安瀾橋(圖十三)，依茅以昇(1991)之記述得知此橋初築於宋朝，於明末被毀，至清嘉慶八年(西元1803年)再重新建造。安瀾橋為竹纜橋，由於竹纜太長，河中須以木排架及石墩承托。橋全長320 m，計分九孔，最長孔之跨度長達61 m。每座木排架用大木樁五根打入江底，其上端升出水面，構成橋柱，下有石塊推砌，以保護橋

樁，橋柱兩邊之木樁較長，形成斜樁。於河中另築有時橋墩一座，內有石室，石室中有大木礮，用以拉緊竹纜。

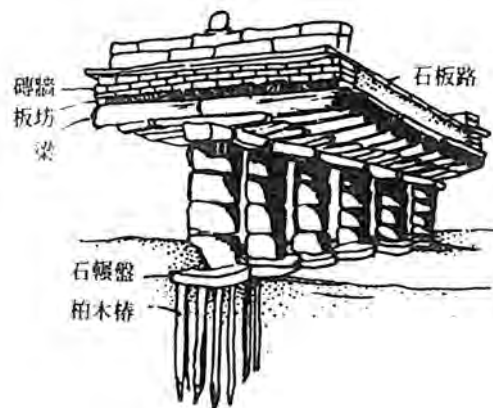
安瀾橋與前述之揚州木橋均設計有斜樁，此等斜樁使橋身得獲側向支撐，使橋身能抗拒人、車行進及風力所造成之側向水平力。

3. 壩橋

陝西西安市以東10公里的壩河上有座頗負盛名的古橋—壩橋，此橋在清道光三十三年(西元1833年)重修，以所謂「石軸柱」之橋柱配合木橋樁施工，橋基以每六個石軸柱(橋柱)並列為一排，其下各接石輾盤(擴展基腳)一個，石輾盤下再接木樁。其橋柱、基腳及樁基組成之整體結構已與今日橋樑之下部結構十分相似(參見圖十四)，此橋之橋基甚為堅固耐用，築成後已歷經百餘年。壩橋於西元1955年改建時僅改築混凝土橋面而仍沿用原橋基。我國先民在百餘年前已完成如此堅固耐用之基礎，誠足令人感佩讚服^(註8)。



圖十三 四川都江堰市安瀾橋 (改建前)



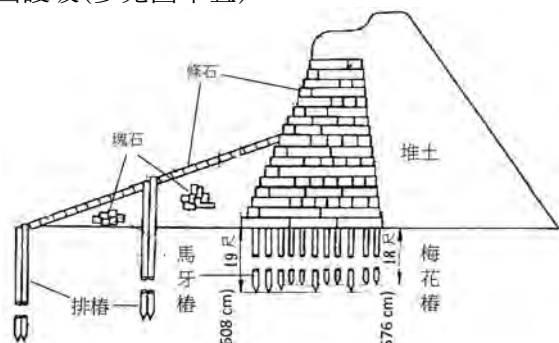
圖十四 壩橋之構造 (摘自茅以昇，中國古橋技術史)

4. 錢塘海堤

錢塘江海鹽海寧一帶的錢塘海潮特別猛烈，我國先民在甚早時即已開始興築海塘(即海堤)以阻潮水，並在海塘基礎石籠之前後打樁，以加固其基礎。

宋朝沈括於「夢溪筆談」(西元1086年)一書中記述：”「錢塘海堤」為一蛇籠石堤，在全部石堤之外，設有十行堅而粗之木樁，名為「滉柱」”該等「滉柱」後來因故拔除，一經拔除，海塘立即崩塌，證實其確曾充分發揮護堤之功能。

錢塘海堤在明代時，改以條石構築，因其狀似魚鱗，故亦稱為「魚鱗塘」。清代(西元1720年)翻修時，其廣泛地使用基樁，：採用「梅花樁」(五支一組，形如梅花之五瓣)與「馬牙樁」(三支一組，如馬齒之相錯。)以承受塘身之重，並於塘前塊石護坡中打設排樁，以穩固護坡(參見圖十五)。



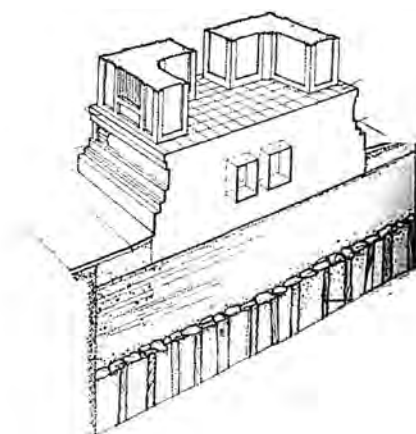
圖十五 魚鱗塘之構造

5. 殿堂與寺塔建築

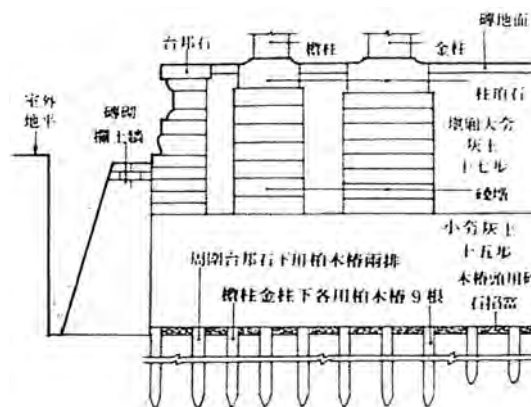
依中國古代建築技術史編審組於其所編之「中國古代建築技術史」北京科學出版社所編製「中國古代建築技術史」所蒐集得之史料獲知我國古代之下列之建物曾採用木樁以加固其基礎：

- (1) 上海龍華塔
- (2) 鄭州超化寺塔
- (3) 山西太原晉祠中的聖母殿
- (4) 江蘇太倉廣教孝寺塔
- (5) 河北易縣崇陵隆恩

以江蘇太倉廣教孝寺塔及河北易縣崇陵隆恩殿為例，其木樁施工分別如圖十六及圖十七。可見此等建物均藉全面佈置於其下之木樁以增加對建物之支承力。



圖十六 江蘇太倉廣教孝寺塔下之木樁 (摘自中國古代建築技術史)



圖十七 河北崇陵隆恩殿下之木樁 (摘自中國古代建築技術史)

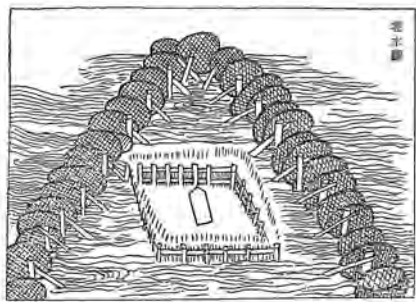
七、水中施工臨時設施

依茅以昇「中國古橋技術史」一書中之考證，古時對於橋柱、水門等需進行水中施工之情況，為求施工之便利性，採取了以下各種施工方式：

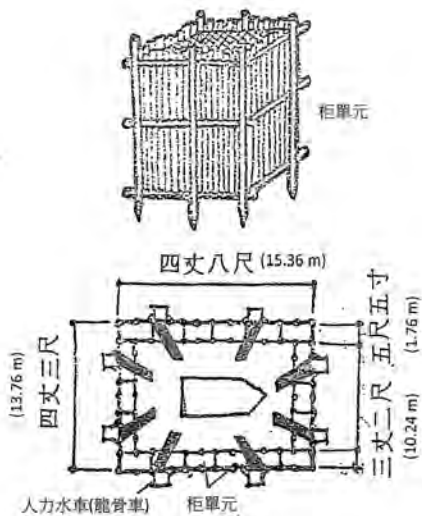
1. 河川改道(乾修法)：於施工前或施工後將河川改道(如圖十八)，便能於全乾之環境中施工。
2. 石籠圍堰：以大石堆置於竹篾中做成石籠，再疊砌石籠做成擋水牆。(如圖十九)
3. 「柜」圍堰：「柜」乃是事先以木板釘製所圍住之長方形預組單元。在施工時，將多個「柜」單元移至定位，拼成圍堰，遂可在較短之時間內完成施工。在「柜」內部以稻草包土塞其中，使湧水者入內逐包踏實，再糝土填滿。(參見圖二十)



圖十八 河川改道(乾修法)(摘自茅以昇，中國古橋技術史)



圖十九 石龍圍堰(摘自茅以昇，中國古橋技術史)

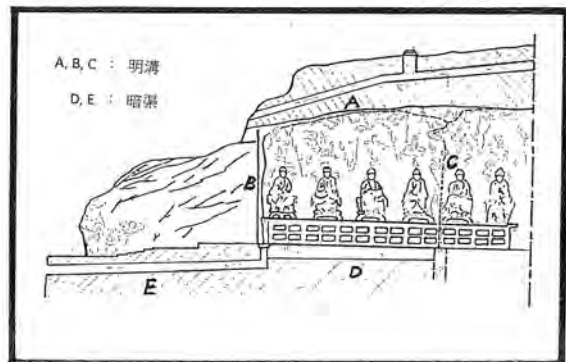


圖二十 萬年橋以柜組合而成圍堰(摘自茅以昇，中國古橋技術史)

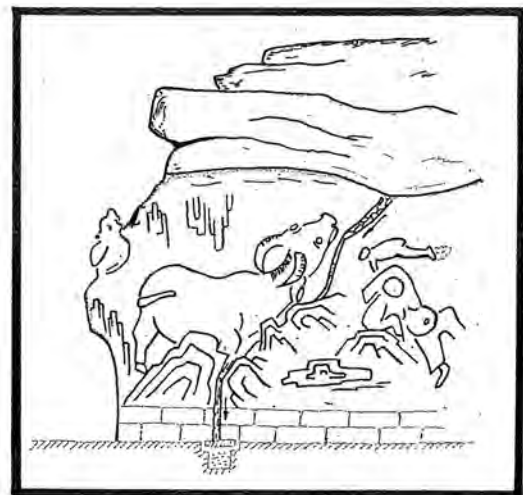
八、滲流水控制

我國壯麗的河山存在著許多築於崖壁之佛像與石窟。山崖隙縫中之滲流水若積聚不散，則可能因其靜水頭過高，造成甚大的側向水壓而使岩壁崩坍。先民們對此現象曾謀對策，於佛像、石窟構築之時即作好了排水之設施，使滲流水不致貯積，造成危害。

四川重慶大足區是我國主要摩崖石刻地區，其中以建造於南宋淳熙六年至淳佑九年(西元1179-1249年)的寶頂山大佛灣之石刻最具規模，依李顯文(1984)之記述得知：四千餘尊佛像開鑿在寶頂山和香山間U字形狹谷之岩壁上，石刻佛像區總長約350 m，刻在約20 m高處。排水之設計甚具匠心，以圓掘洞石窟為例，如圖二十一，其排水方式係在窟之頂級壁由A、B、C三條集水明溝導引岩縫流出之滲水，匯流至窟底之截水暗溝D、E，再排出岩壁之外。窟內之滲水因截出而不續沿岩縫下滲，遂可有效地增進該窟以下山岩之穩定性。先民於截、排水之施工中尚不失雅趣，於匯集滲流水之出處，配合地形構建「牧牛飲水」(圖二十二)等造形，巧妙地將工程與藝術結合成一體，其巧思、妙趣，皆令人嘆服。



圖二十一 圓覺洞石窟之滲流水排出方式(摘自李顯文，1984)



圖二十二 排出滲流水依地勢構築牧牛飲水圖(摘自李顯文，1984)

九、加勁土施工

我國古代施工中曾廣泛使用加勁材料，分述如下：

1. 「永定柱」、「夜叉木」、「紆木」

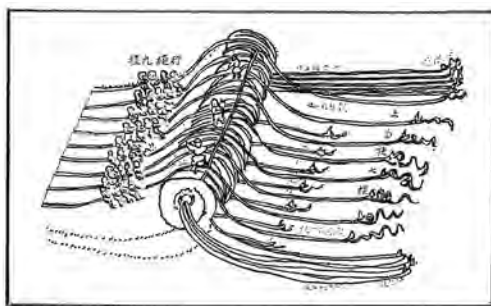
「營造法式」中記載關於築城之技術：“城基開地深五尺(約合今尺153.5cm)，其厚隨城之厚，每城身長七尺五寸(約合今尺230.3cm)栽「永定柱」〔長視城高，徑一尺至一尺二寸(約合今尺30.7-36.8cm)〕，「夜叉木」〔徑同上，其長比城高減四尺(約合今尺123cm)〕各二條，每築高五尺(約合今尺153.5cm)，橫用「紆木」一條〔長一丈至一丈二尺(約合今尺307-368.4cm)〕，徑五寸至七寸(約合今尺15.4-21.5cm)，每「膊椽」長三尺(約合今尺92.1cm)，用「草蔓」一條〔長五尺(約合今尺153.5cm)，徑一寸(約合今尺3.1cm)，重四兩(約合今0.15kg)〕，「木橛子」一枚〔頭徑一寸(約合今尺3.1cm)，長一尺(約合今尺30.7cm)〕”。另依「中國建築史論文輯(一)」中「清初太和殿重建工程」一文中記述：唐代重玄門遺址中於門墩夯土內發現有水平方向之木棍二、三層，按垂直於壁面方向排列，木棍長2-3m，直徑12-20cm，每層間隔1.3m，此等尺寸與營造法式之相關規定相近，可判斷其木棍即營造法式中所稱「紆木」。同文中亦記述：“築城用紆木在燕下都、漢長安及赫連勃勃統萬城遺址中均曾發現”，可知築城用之紆木早在戰國時代已是我國一項普遍應用之施工技術。

2. 鐵製加勁材料

李約瑟(1965)記述：“梁代(約西元第六世紀初)建淨山堰時，屢遭失敗，後以鐵條及鐵塊建入基礎，遂得順利竟其功”，是為以鐵條作為加勁材料之實例。

3. 高粱桿組成之巨型梢料埽工

清李世祿「修防瑣志」(西元1778年)書中記述我國古代修河治堤時廣鋪梢料於河床及堤防(圖二十三)，則可藉之則可加固堤防，阻止河堤之崩塌。



圖二十三 加勁梢料之施工 (摘自李世祿，1778)

十、隧道施工與地下深開挖

10.1 岩石隧道鑿挖技術

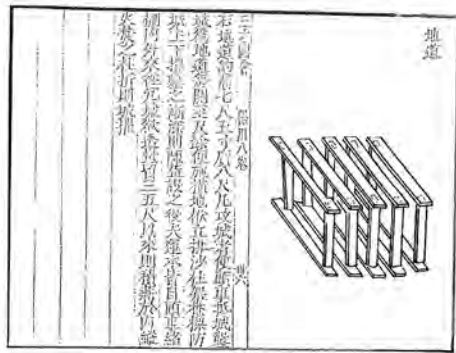
歷代古道，遇山岩阻礙，常鑿隧道穿岩而過，在當時尚無爆破技術時，如何能有效地開鑿堅硬的岩石呢？根據郭榮章(1982)之考證，先民們係運用智慧，採用了下述之方法：

1. 火燒、水激、錘擊。
2. 火燒、醋激、錘擊。
3. 以黃豆枝汁燒之，再以醋激、錘擊。

此三種方法皆是運用岩石受急遽之熱脹、冷縮易致裂縫之原理，先使岩石產生裂縫，再施錘擊，而得輕易鑿除，郭榮章(1982)並引「褒谷古蹟輯略」所載「梁清寬書賈漢復棧道歌」：“誰云天險不可移，五丁曾為施巨斧，積薪一炬石為圻，錘鑿既加如削腐”，即是當時施工情形之真實寫照。

10.2 土壤隧道支保施工

古時爭戰頻繁，曾有於城牆下挖掘隧道而攻城之記載。土壤隧道雖較岩石隧道易於挖掘，但須於挖掘之同時隨築支保，以防崩塌。圖二十四示支保施工之一例，刊於明朝王圻所著之「三才圖會」(西元1609年)，同書之說明如下：“地道高約七尺五寸(約合今尺2.33m)廣八尺(約合今尺2.49m)，凡攻城者使頭車抵城，鑿城為地道，每開至尺餘(31.1-62.2m)便施「橫地柁」，立「排沙柱」，架「罨樑」，防塵土下摧，鑿之漸深則益設之”。文中所述之「橫地柁」、「排沙柱」及「罨樑」即相當於今日隧道支保施工中之「地樑」、「側柱」及「頂橫撐」。



圖二十四 土壤隧道支保施工 (摘自王圻, 1609)

10.3 豎井支撐

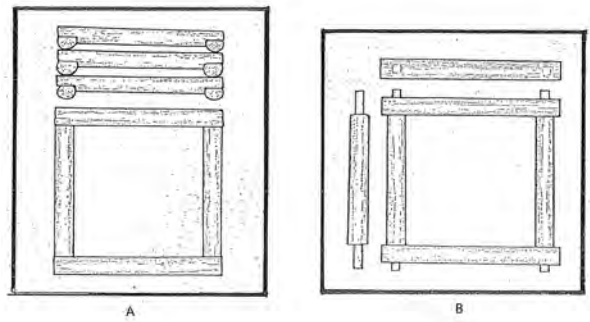
依湖北省博物館(1974)之報告得知在湖北的一座春秋戰國時代之古礦坑中發現有一豎井，其長、寬各為90cm，四周以圓木作成方形井架支撐，井架之四角以榫頭搭扣，由上至下層層交錯疊壓，(圖二十五A)。另一種支架結構採用間隔式之榫口式接頭，以二根圓木兩端削成圓形榫，另二根方木(或半圓木式厚板)兩端鑿成方孔，四根相接，穿成井架(圖二十五B)。據考古學者研判榫接之方式可能用於斜井。作井架之木材多為栗木或結實之雜木，搭口式和榫口式之支撐方法據考證當時已普遍應用，所構成之豎井並發現有深達五十餘公尺者。

漢朝約在西元前120 - 111年在陝西建有龍首渠(圖二十六)，其中有部分以隧道方式穿越商顏山。依張芳「春秋至戰國南北朝灌溉渠道工程技術」一文中之考證：各豎井之間距約為160m至260m，豎井直徑約1.26m，豎井中最深者約90m，如此深的豎井，與當時全世界的豎井深度比較，其排名亦是在前的。

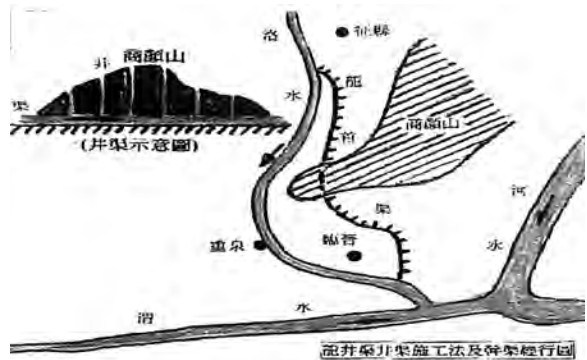
藉豎井可增加隧道施工的工作面，也可改善隧道內通風和採光，我國先民在西元前120 - 111年時，即能掌握此項隧道施工的技術，誠令人佩服。

10.4 地下深開挖

我國歷代君王之墓穴，有甚多均築於地下。已開挖之神宗地下陵墓(號稱「地下宮殿」)者，築在地下27m處，總面積達1195m²，分為前、中、後、左、右五殿，其中之後殿是地下宮殿最大的主殿，高9.5m，寬9.1m，長



圖二十五 豎井支撐 (摘自湖北省博物管, 1974)



圖二十六 採用豎井施工的龍首渠(摘自張芳, 春秋致戰國南北朝灌溉渠道工程技術)

30.1m，甚寬廣宏偉明神宗地下陵墓建成至今已近四百年，其石拱結構仍完好如初，排水與防水設施甚佳，地面能常持乾燥，其設計與施工之均甚為精良。

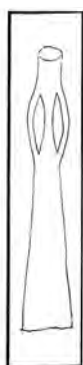
十一、施工設備

於典籍中所見先民用於地工施工之設備如下述：

1. 夯土工具

(1) 夯木：如圖二十七，見於清麟慶「河工器具圖說」(西元1836年)：“凡築室必先平地，必須加夯，大者長六、七尺(約合今尺192 - 224cm)，圓二、三尺(約合今尺64 - 96cm)不等，旁鑿兩鼻，俾有把握，又有四鼻者，形制較秀，名美人夯，然其用較遜乎”。

(2) 金錐：戰國秦始皇開築馳道，曾應用鐵製夯土工具進行施工。東漢班固「漢書」之「賈山傳」：“秦始皇為馳道於天下，厚築其上，穩以金錐”，係以鐵製夯土工具進行夯築之實例。



圖二十七 夯木 (摘自麟慶, 1836)

(3) 雜項器具：清代孫家鼐之「欽定詩經圖說」(西元1905年)中有「洺洺成位圖」(圖二十八)除可見前述之夯木外，亦得見其它多種夯土器具，如二人持繩，繫夯石夯土；二人藉挑、放夯石而夯土等。

2. 土方壓實設備

(1) 礮礮：如圖二十九，用以滾壓土壤。元王禎之「農書」(西元1313年)中敘述：“北方多以石，南人用木...其制長可三尺(約合今尺92.2cm)，大小不等，或木或石，刊木括之中，受輿軸以利旋轉，...俱用畜力輓行，以人牽旁...”

(2) 礮礮：如圖三十，元王禎之「農書」中記述：“與礮礮之制同但外有列齒，...詩云：他山有奇石，鑄鑿煩良工，制成三尺餘(約合今尺92.2cm)，輿軸旋其中，...”礮礮較礮礮多齒其功能應與現今之羊腳滾相同。

3. 打樁設備

(1) 碓：打樁藉由「碓」^(註9)，敲擊樁頭而入地。灑橋施工時採用鐵碓，係生鐵製成之厚盤，直徑一尺二、三寸(約合今尺37 - 40cm)，厚三寸(約合今尺9cm)，重約120斤，周圍預留32個孔，以生麻瓣16條穿孔繫牢，人手一瓣，拋碓擊樁。

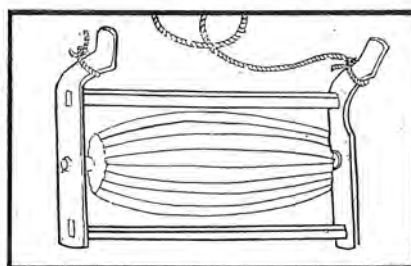
(2) 木樣板：打樁時藉「木樣板」導向，木樁通過木導向板打在正確的位置上。打樁時先打一根木樁為基準，再以木板開眼，套於樁上，按眼插樁。

4. 動力設備

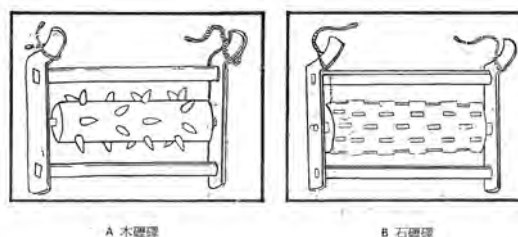
明代宋應星「天工開物」(西元1637年)一書中記載有下列與地工作業有關之動力設備：



圖二十八 古時之夯土施工 (摘自孫家鼐, 1905)



圖二十九 古時滾壓土方所用之礮礮 (摘自王禎, 1313)



圖三十 古時滾壓土方所用之礮礮 (摘自王禎, 1313)

(1) 輓轆：即人力捲揚機，如圖三十一，得以省力之方式自井或鑽孔中吊取物體。

(2) 牛轉車：如圖三十二，以獸力作為動力之來源。

(3) 水轉車：如圖三十三，以水力作為動力來源。

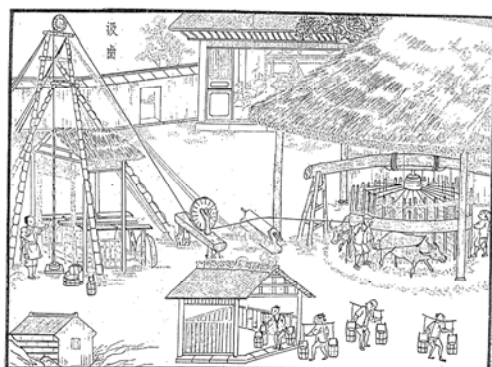
5. 隧道鑿挖工具

依湖北省博物館(1974)之報告得知：在春秋戰國時代的一個古礦坑中曾發現齊全之隧

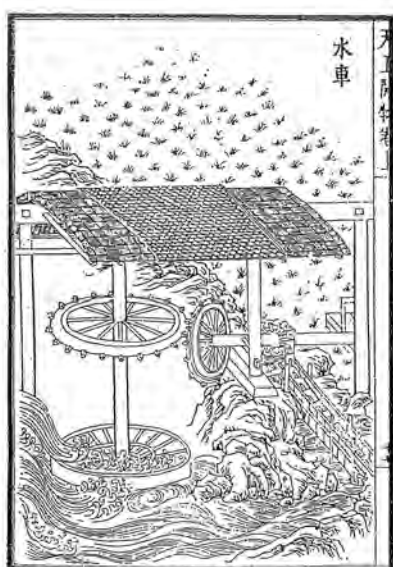
道鑿挖手工具：如大型銅斧、小型銅斧、銅鑄、銅鑿、銅鋤、鐵斧、鐵錘、鐵耙、木槌、木鏟、木鋤、木鈞、木瓢、竹籃等各項徒手開挖器具，一應俱全。



圖三十一 轆轤 (摘自宋應星，1637)



圖三十二 牛轉車 (摘自宋應星，1637)



圖三十三 水轉車 (摘自宋應星，1637)

十二、地震紀錄與地震儀

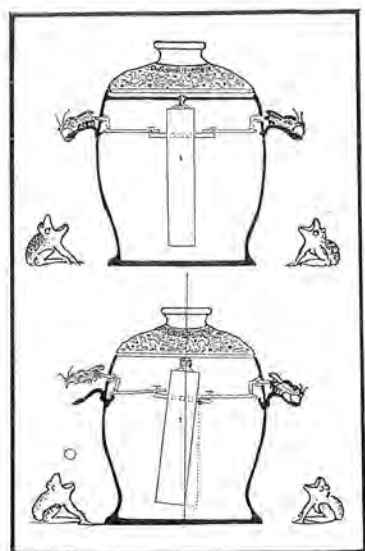
12.1 地震紀錄

李約瑟(約1965年)記述：“中國有關地震紀錄之久長及完整，冠於全球”；“據日本學者大森之研究，截至西元1644年，或曾發生908次地震，每次均有詳細記錄，而最早之紀錄則可回溯至西元前780年”；“昔時中國尚設有「天曆部」，專司地震之測定”。由前述可知我國先民在古時即已重視地震之觀測與記錄。

12.2 地震儀

偵測地震之儀器係由我國所首創，發明者為後漢時才氣洋溢之數學家、天文學家及地理學家張衡。范曄「後漢書」之「張衡傳」(西元450年)中記載：“楊嘉元年(西元132年)張衡又造候風地動儀，該儀係由精鑄之青銅所作，狀如灑壺，徑八尺(約合今尺184.3cm)，有穹蓋，外面嵌刻有古代封印、山龜、鳥獸等，中有都柱傍行八道，施關發機，外有八龍頭，各啣銅球，基圍坐八蛙，張口昂首相上呼應，猶待龍之將球墜入。牙機及巧妙機關全藏器內，蓋則吻合全周而無隙。地震時，器之龍機為之擺動，使球吐自龍口，為下蛙所捕，瞬刻銳音即響，喚人注意”。近代人王振鐸(1936)依此敘述所再造地震儀之構造如圖三十四。由圖可見地震儀之中間有一重而粗之擺柱，擺柱之上端橫伸出八個方位之擺臂，各擺臂再其端部皆有一栓釘，套入一端連著龍頭之橫柄中，一但擺柱向某方向擺動，該方向龍頭之上顎即上開，使龍口中之球鬆動墜落，橫柄外端另有一鉤，即刻鉤住內邊緣之突起處，使龍頭張開後即不再合起，而使球能確實墜落。如一龍機關開動，七龍未動，則可迫其方位而判斷地震發生之方向。

張衡之地震儀甚為靈敏，某次龍口所啣之球在無感地震情形下墜落，京畿學者為之譁然，咸認為豈有無震而球墜落之理，然數天後接獲報告云隴西曾發生地震，於是眾皆驚嘆此地震儀之奇效，爾後即有天曆部之設置，專司地震之測定。



圖三十四 王振鐸再造地震儀之構造 (王振鐸，1936)

十三、結語

以上摘要記述了我先民各項卓越的地工施工技術，由前述可知我國有多項地工技術均曾領先世界，開世界之先河。於本文之撰述過程中常深感惋惜，我國先民們未能將此卓越之技術匯集累積，持續發揚，以致今日常有認係自國外引進之施工技術，實則為我先民所早已沿用者。往事不堪回首，來者猶尚可追，今日國內之地工技術因本省地質之變異特性，及國人淬勵奮發之耕耘，目前已漸獲國際地工界肯定，期盼國內地工界的朋友們，不妄自菲薄，邁開步伐，闊步向前，開創更為光輝燦爛的未來。

註 釋

註1：

李誠的「營造法式」一書對於我國的土木施工有深遠的影響，它是我國最早的一部土木施工規範。

註2：

「天工開物」一書記述當時鑿井鑽孔之方法：“造井費工甚難，其器治鐵錐如碓嘴形，其尖使極剛利，向石上舂鑿成孔，其身破竹纏繩，夾懸此錐，每舂深入數尺，則又以竹接其

身，使引而長，...所舂石成碎粉，隨以長竹接引，懸鐵盞之而上，大抵深者半月，淺者月餘乃得一井”。

註3：

「四川鹽法志」卷二「鹽井圖記」記載：“銼井初，則灌水鑿之。及二、三丈許，泉四出，不用灌水，無論大小鑽觸處俱為泥水。每鑿一、二尺，起鑽用簡竹一，約丈餘，通節，以繩繫其梢，筒下為皮錢掩其底，操繩以縮皮，泥水翕入，涸滿提出，漸盡，復下鑽鑿焉”。

註4：

「東坡志林」卷四「筒井用水鞭法篇」記載：“又以竹之差小者出入井中，為桶無底，而窮其上。懸熟皮數寸，出入水中，氣自呼吸而啓閉之，一桶致水數斗”。

註5：

「自流井記」記載：“凡鑿井須審地中之巖井，銼初下為紅岩(紅、紫色砂質頁岩)，次瓦灰岩(淡色砂岩)，次黃姜岩(黃色結核灰質泥岩)，見油；次草白岩(灰白色砂岩)，次黃沙石(巨厚黃沙岩)，見草皮火(長石石英砂岩，有薄氣層)；次青砂岩(灰色砂岩夾灰黑色頁岩)，次白砂岩(灰白色砂岩)，見黃水(含鹽水層的砂岩)；次灰岩(黑色灰色頁岩夾煤層)，次麻籬岩(黑頁岩)，次黑煙岩(砂岩和暗色泥頁石灰煤層)，見黑水(嘉陵江石灰岩鹽水)”。

[括號中為申力生(1980)根據實際地層狀況之查驗結果]。在一百多年前我國的先民已確定了油水氣之層位，不能不說是我國古代地質學的卓越貢獻。

註6：

似藉「級配」增進夯實之效果。

註7：

「工程作法」卷四十七：“凡夯築灰土，每步虛土柒寸，築實伍寸；素土每步虛土壹尺，築實柒寸，應用步數臨期酌定。凡夯築貳拾肆把小夯土，先用大鍋排底壹遍，將灰土拌勻。凡夯築素土，每槽用夯伍把頭。凡夯築填墊小式房屋地面，每壩素土，每槽用夯伍把”。

註8：

尚值得一提的，我國的築橋技術，在甚

早時即為國外人士所讚佩，李約瑟(約1965年)記述：“西元838至847年間Ennin覺得沒有一座中國橋是不好的”；第十三世紀的最後十年Marco Polo有同樣的反應，不厭其詳地講說中國的橋樑，但他從來沒提起世界任何其他地方的橋樑”；當彼得大帝於西元1675年在中國設立大使館時，那位大使對中國所作之要求之一是派橋樑專家去俄國教他築橋之術”。先民們有如此優異之造橋技術，吾人何能不引為自豪。

註9：

打樁用礮是河工用礮的一種，據說：“礮夫用礮，聲揚則力齊，其音類「莪」，稱之為「礮」。

參考文獻

- 中國古代建築技術史編審組 (1993)，「中國古代建築技術史」，台灣博遠出版有限公司授權出版。
- 王圻，明 (1609)，「三才圖會」。
- 王振鐸 (1936)，「張衡候風地動儀造法之推測」，*燕京學報*，第20期。
- 王楨，元 (1313)，「農書」。
- 申力生 (1980)，「中國石油發展史」，石油工業出版社。
- 名不詳 (1983)，「夯土技術淺談」，中國建築史論文集(一)，台北明文出版社。
- 名不詳 (1983)，「清初太和殿重建工程」，中國建築史論文集(一)，台北明文出版社。
- 名不詳，周，「爾雅」。
- 宋應星，明 (1637)，「天工開物」。
- 李世祿，清 (1778)，「修防瑣志」。
- 李約瑟(Joseph Needham) (約1965)，「中國之科學與文明 (Science&Civilization in China)」。
- 李誠，宋 (1103)，「營造法式」。
- 李榕，清 (1875)，「自流井記」。
- 李顯文 (1984)，「四川大足寶頂山摩崖造像區的古代排水工程深探」，考古與文物(大陸出版物)。
- 沈括，宋 (1086)，「夢溪筆談」。
- 俞佛超 (1963)，「鄴城調查記」，考古(大陸出版物)。
- 范曄，宋 (450)，「後漢書」。
- 茅以昇 (1973)，「介紹五座古橋--珠浦橋、廣濟橋、洛陽橋、寶帶橋及壩橋」，文物(大陸出版物)。
- 茅以昇 (1991)，「中國古橋技術史」，台灣明文書局授權初版。

- 孫家鼎，清 (1905)，「欽定書經圖說」。
- 徐良玉 (1980)，「揚州唐代古木橋遺址清理簡報」，文物(大陸出版物)。
- 班固，東漢，「漢書」。
- 郝玉麟等，清，「福建通志」。
- 張芳 (待補上年份)「春秋至戰國南北朝灌溉渠道工程技術」，中國古代灌溉工程技術史第二篇第一章第三節。
- 梁思成 (1984)，「營造法式註釋」，台灣明文書局授權出版。
- 郭榮章 (1982)，「褒谷石門小考」，考古與文物(大陸出版物)，1982年9月。
- 陳從周 (1956)，「柱礎述要」，考古通訊(大陸出版物)，1956-3
- 傅喜年 (1981)，「陝西峽山鳳雛西周遺址初探」，文物(大陸出版物)。
- 湖北省博物館 (1974)，「湖北古礦冶遺址調查」，考古(大陸出版)。
- 楊國忠等 (2011)，「中國古代地基基礎技術研究」，第33卷，增刊2。
- 董鑑泓 (1984)，「中國城市建設發展史」，台北明文出版社。
- 劉昭民等 (1985)，「中國地質學史」，台灣商務印書館。
- 劉致平 (1983)，「昆明東北鄉古建築圖錄及解說」，中國建築史論文選輯(二)，台北明文出版社。
- 樓鑰，宋 (1169)，「北行日錄」。
- 歐陽玄等，元，1345，「宋史蔡襄傳」。
- 魏泰，宋，「東軒筆錄」。
- 羅文彬、丁寶楨等，清 (1882)，「四川鹽法志」。
- 蘇州博物館考古組，1983，「蘇州發現齊門古水門基礎」，文物(大陸出版物)，1983年5月。
- 蘇東坡，南宋 (1101)，「東坡志林」。
- 麟慶，清 (1836)，「河工器具圖說」。