

中國科學院水利科學研究院
水利部

研 究 報 告

5

軟 土 的 預 壓 加 固

水 利 出 版 社

1958年1月

軟土的預壓加固

王 正 宏

提 要

預壓加固法是加強高壓縮性軟弱地基時經濟而有效的方法，為目前世界各國應用最廣的加固方法之一。過去二、三十年，該法曾廣泛用於加強公路路基、機場跑道、房屋倉庫及碼頭等建築物地基。1953年經南京水利實驗處推薦在國內首次應用於加固某造船廠地基，1954年及1955年又相繼應用於兩項大型水閘工程。根據國內外60處工程的實施經驗，完全證明只要實施得當，地基經預壓加固後，壓縮性可以大大減低，強度亦有增加，並保證了建築物地基在施工期與運用期的穩定性與強度。同時由於預壓方法簡單易行，毋需昂貴的建築材料，特別在木材、水泥、鋼筋等建築材料昂貴的我國，推廣此種方法加固地基，在國民經濟建設上尤有實際價值。

本文總結了國內外60項加固工程的實際經驗，並就實施各階段中的若干主要問題進行了較詳細的說明，以供今後實施的參考；同時介紹了按施工期實測資料來預測穩定沉降量與沉降時間的方法，運用此法可較準確地掌握加固進度。

一、預壓加固法及其實施經驗

利用荷重及透水土柱作深層排水以加速軟土固結的方法早在十九世紀中葉（1832年）已開始在法國拜揚涅地基工程中應用⁽¹⁾；1886年俄國學者庫爾鳩莫夫曾在“地基與基礎”教程中指出以砂樁改善軟土地基的可能性⁽²⁾。但將預壓及砂井預壓方法大量應用於地基工程，則是近二、三十年來的事。據文獻記載，1934年美國加州公路局開始用此法穩定沼澤地區的公路路基⁽³⁾，其後大量推廣，至1946年該局所屬的二十餘項公路工程均曾用過此法⁽⁴⁾。近十年來，預壓砂井法在應用數量上及範圍上均獲得更廣泛的進展，在加固機場跑道、房屋地基、碼頭及堤防等方面已見顯著效果。在蘇聯，蓋爾謝萬諾夫教授曾指出⁽⁵⁽¹⁾⁾，此種方法對於解決在海岸河口軟弱淤泥土上建造建築物的困難問題是一種有效的措施。蘇聯曾在某一港池水深達10公尺，淤泥層深厚的地基上建造防波堤，事先在水下拋砂（粒徑0.2~0.4公厘）3~4公尺，促使海底軟土排水固結，然後進行建造，獲得了良好的效果。第二次世界大戰後，從1952年開始，日本曾在好幾處⁽⁶⁾碼頭、堤防及公路工程中採用了砂井預壓措施，而且多半是在水下施工的。加固成功的事實，給預壓法推廣於港灣工程的可能性

提供了实际的范例。1955年英國学者曾在巴黎召开的第五屆國際大壩會議上，提出有关以砂井加固兩座水庫土壩地基的报告⁽⁷⁾，亦認為此法經濟有效。至于我國，預压砂井技術的使用，則始于1953年某造船厂的地基加固⁽⁸⁾，系由南京水利实验处所推荐；其后在1954年及1955年⁽⁹⁾又陸續应用于兩項鋼筋混凝土水閘工程，为該法应用于大型水利工程开辟了廣闊的前途。此外，在德國、瑞典、挪威、巴西、法國等均有加固的工程实例。由此可見，預压加固法是現行各种加固方法中应用最普遍的一种。实施經驗証明，这种方法是經濟的、有效的、易行的。

过去國內外曾經用此法处理过的工程包括水利土木工程，根据搜集到的資料，計有：水工結構物如水閘、堤壩、碼頭与船閘；路基与飛機跑道工程；工業与民用建筑物等工程实例約60处。其中除美國諾福克海軍机场⁽¹⁰⁾因施工不善，地基遭到破坏以及美國伊利諾州巴林頓区公路工程外，效果均很良好。預压法適用的土質范围也很廣泛，包括各种类型的天然冲積淤土与人工淤填土，如沼澤土、軟淤土、腐泥土、泥炭土、水力淤填土以及城市房碯雜土等，其厚度自2公尺直至30公尺，这些土壤的共同特性是含水量与孔隙比很高，且含有不同程度的有机質，透水性差，压縮性大而不均匀，且承載能力極差，有的灵敏度很高，稍受攪动即呈流动状态，因而强度更小，压縮性增大。

在此类地基土壤上建筑結構物，如在設計、施工方法上不加特殊措施，則不論在施工时或完工后投入生產时，常會發生挤淤、滑动或長期的、很大的沉降及不均匀沉降，使建筑物毁坏失事、歪斜傾倒或失去正常使用价值。采用此法加固的工程地基，絕大部分是成功的，并且是經濟的。

預压加固法，就是使地基土壤，在正式修建結構物前，以荷重加速固結作用，以减低含水量与孔隙比，使压縮性减小，强度增大，以適應結構物在施工期或竣工后运用时的穩定性、地基的坚固性与許可沉降的要求。最常用的方法是堆土加重，其他尚有降低地下水位与真空法等，用來增大土壤中的应力，促使土壤發生固結作用。如透水性小，压縮層深厚，在自然排水边界条件下往往需要很長時間才能达到穩定沉降；或土層在自重下未完全固結，而存在过高的超靜水压力（如新淤填的土層），則在加固时常用人工方法改良其排水条件，如利用砂井、透水紙板等以縮短排水距离，加速土層固結。

实施此項加固工作，首先应進行工程地質与水文地質詳細調查研究，并須進行工地与室內試驗，以充分了解軟土層厚度、層次、范围、土壤物理力学特性、透水層位置与范围、地下水位的变化与流向、流速等，而后再進行設計。在設計时应确定加固范围、加荷大小、沉降量与穩定所需時間、施工速率、堆土数量以及是否需要結合采用加速固結的措施，如砂井法或降低地下水位法等問題。若用砂井，尚应决定砂井大小、井距与施工机械（如砂井机、井点設備等），并進行施工計劃等工作，最后作經費估計，而后付諸实施。

但是目前限于土力学理論、地質勘探与試驗方法的技術水平，对此种复雜的天然地層，單憑野外勘察与室內試驗成果，在預压設計階段，要正确規定施工細節（如規定所需預压荷重）或准确推算加固过程（如沉降穩定的時間問題）等等，具有一定困

難，而且并不可靠。因此最好通過實地典型試驗修訂計劃，而後全面推行。如不許可，則應在施工初期取得實測資料來預測其發展情況，必要時再修改設計。因而具有指導意義的觀測工作（如沉降、孔隙水壓力與位移等觀測）非常重要，是絕不可缺少的。它不但可以指導施工速率，而且也是檢驗加固效果的主要依據。此外，為了解土壤加固效果，可根據不同土壤性質，在預壓不同階段，如預壓終了、中間或其它階段，進行取樣測定或就地測定。就地測定常用十字板或荷重試驗等法。

為了對目前國內外預壓加固技術有一個較全面的認識，並研究預壓技術中勘察、設計、施工、觀測等方面尚存在的問題，以便進一步改進，作者搜集了國內外 60 處預壓加固工程實例，介紹了各工程地基的土質情況及施工概況（列於文末附錄一及附錄二）；並就其中有代表性的 10 項工程，特別是國內的 3 項工程（附錄三）詳為介紹分析，指出其地基土壤的特徵，工程性質，施工概況，加固效果以及施工过程中遭遇的困難和解決辦法。

根據上述約 60 項工程的實踐，茲提出以下各點經驗和成功地應用預壓加固法的主要關鍵：

1. 預壓加固方法適用的範圍十分廣泛。如上所述，適用於各種類型的天然沖積淤土和人工淤填土；適用於各種水利土木工程；並且水上或水下施工均無不可。但在採用這一方法時，必須根據條件，如許可預壓時間、實施可能性和經費多寡等，作各種加固方案比較，然後作出最後選擇。眾多的工程實例證明，預壓法加固軟弱地基在技術上是簡便的，在經濟上是合理的。

2. 預壓加固法的經濟性與效果在很大程度上決定於下列諸因素：

（1）詳盡的了解加固處理的工程地區的情況，特別是土壤的壓縮性、強度、透水性與自然排水邊界條件等。

（2）正確的設計：如加固範圍、荷重大小、沉降穩定時間與沉降量以及是否需要加速固結的措施等等。如需要用砂井法改良土壤條件時，則土壤結構或地層的自然排水條件的擾動應減至最小。

砂井與砂蓋層的透水材料的級配與厚度等應慎重選擇，以滿足排水通暢，而又起倒濾作用。

（3）施工問題：預壓土料的填筑速率不能太快。填土的上升高度，應隨堆土的高度而減低，應由工地觀測嚴格控制，否則會引起壅流，擾動地基，增大壓縮性或折斷砂井等。

砂井填砂時，應注意砂柱中斷或粗細不一的情況。

（4）加固時間問題：應使沉降達到穩定。如發現需時很長而影響工期，應採取加速固結措施，如增加超荷重。對二次固結作用大的土壤，應盡量縮短其滲壓階段，留出足夠的加固時間，來消除二次固結的影響。預壓時間一般不宜短於六個月。

（5）卸荷問題：開始卸荷與建築物正式施工的時間間距應盡量縮短。基坑暴露時間更應縮短。特別是不允許水分的浸潤，尤其是肥粘土地基，如大浦開（見附錄三）。

3. 加固處理施工期的觀測工作是不可缺少的。包括沉降觀測、位移觀測、土壤中的孔隙水壓力觀測、地下水位變化觀測等。它們是決定安全施工速率，預測加固過程

与验证加固效果等的最重要的依据。

4. 预压加固对土壤物理力学性质是有一定改善的，最显著的是含水量与压缩性的减低，其次是自重与强度的增大。但用通常取样进行直接剪切试验是难以看出的，最好用就地测定法，如十字板剪切试验与荷重板试验。自重试验应于土样取出时立即在现场测定，以免膨胀。

5. 文末附录一、二所列工程概况表，可供设计施工参考之用。

采用预压加固方法时，要在施工以前或至少在预压施工初期先预计到预压所需的实际时间是头等重要的问题。特别是在祖国社会主义建设飞跃发展的时期，时间因素更显得突出。如预压时间太久，会从根本上否定该法的实用价值。预压施工时选用适宜的预压荷重，或是在预压设计时，考虑是否尚须结合适当的加速排水措施（如砂井），也必须以预压所需时间为依据。作者考虑到用现行的一般计算方法，估算沉降与沉降速率难期精确，在本文中特别介绍了依据预压初期实测孔隙压力与沉降资料推算土层稳定沉降量的方法；同时又介绍了根据施工初期实测沉降资料推算沉降速率的三种国外的最新方法，经过作者用国内三项预压工程的资料进行核算，进一步提出了有关应用该法的注意事项的补充意见；此外复就实施中的几个主要问题，作了较详细的说明；最后指出进一步研究预压技术的方向与意见，以供读者讨论。

二、加固期沉降过程曲线的推算方法

上面已经谈到，准确估算沉降时间，无论对预压设计、施工甚至对该法的适用性都有决定性的意义。可是通过室内试验及理论计算，尚不能准确估计稳定时间，这是由于目前土力学的水平，不论在理论或在鑽探试验技术上，都不能反映复杂的天然条件中的主要方面所致。例如，因天然沉积土层的横向渗透系数 k_h 比垂直向渗透系数 k_v 大，故横向排水是影响沉降速率的主要因素，而在计算中却未予考虑；在砂井计算中虽考虑了 k_h 的作用，但 k_h 尚不能准确测定；或在粘土层中，夹有透水砂层等额外排水条件，在现有鑽探取样技术上，难以充分发现，因而实测的沉降速率常比理论计算的为快。

在最新的文献资料中有下列三种计算沉降过程的方法：第一种是尼契包洛维奇的双曲线经验公式配合法，简单方便，且有相当准确性，对于有砂井或无砂井的地基均可适用；另二种是抛物线经验公式配合法与三向固结理论公式配合法。此三法均根据已知的稳定沉降量，利用施工期的实测资料，来推算竣工后的沉降过程。

(甲)根据实测孔隙水压力及沉降量推算稳定沉降量

要应用上面所举的三种估算沉降速率的方法，首先得了解稳定沉降量的可靠数值。但通常计算沉降量比实测的要大，甚至大一倍，因此应用上法就有困难。如要较准确地推算稳定沉降量，只有从预压初期实测资料的土壤固结应力与应变关系中去寻找。而一般需要预压加固的土壤，绝大部分是饱和软粘土，因此即可根据卡沙格蘭德（A·Casagrande）的建议，即从实测沉降量与相应的孔隙水压力的资料中推算稳定

沉降量(二次固結作用略去不計,对帶砂性的粘土誤差不大)^[49],故只要求得某实测沉降量的相应的土層固結度 U ,即可求得穩定沉降量。因而应有下列二項假定:

- (1) 天然土層的穩定沉降量,假定完全由主要固結所產生;
- (2) 土層壓縮时無側向膨脹發生,即相当于側限情况下的壓縮。

根据飽和土壤固結度的定义:

土層中深度 z 处某一点的固結度 U_z :

$$U_z = \frac{e_1 - e}{e_1 - e_2} = 1 - \frac{u}{u_i} \quad (1)$$

(1) 式說明求算土壤固結度(即沉降百分数)除可用沉降量表示外,尚可以超靜水压力計算。且整个土層的平均固結度 U 以下式表示:

$$U = 1 - \frac{\int_0^H u dz}{\int_0^H u_i dz} \quad (2)$$

因此滲压穩定沉降:

$$S_{\infty} = S_t / U \quad (3)$$

上列各式中, e_1 、 e_2 、 e 分别为 z 深度处土層的开始孔隙比、受附加应力(相当于 u_i 值)后完全固結时的孔隙比及固結度为 U_z 时的孔隙比(其骨架应力为 $u_i - u$); u 为某時間土層中 z 深度处的超靜水压力; u_i 为开始加荷重时的超靜水压力,即等于該点的預压应力; H 为壓縮土層的厚度; S_t 为相当于平均固結度 U 时的实测沉降量(填土竣工后)。

用(2)式計算时,可將土層中不同時間不同深度的实测超靜水压力 u 繪成变化曲綫如第十六圖(丁),再將面積求出代入(2)、(3)式,即可求得平均固結度 U 与滲压穩定沉降 S_{∞} 。如除有整个土層的总实测沉降量 S_t 外,尚有不同深度处的实测沉降量,則可求得各土層的穩定沉降量 $S_{\infty 1}$, $S_{\infty 2}$ ……,特别是用超荷重法加速固結时,这种深層观测更为必要。

茲以杜家台分洪閘(見附錄三)整个預压加固第一期工程的实测沉降量与孔隙水压力資料为例,用上述方法進行推算,并与实测近似穩定沉降量比較,見第十六圖(戊)。用此法演算时,需假定在預压固結進行时期,地下水位是平穩的,即不考慮因地下水位漲落而產生的附加下沉。根据实测地下水位曲綫可作如此假定。同时因实测孔隙压力資料太少,同一垂直綫附近不同高程上最多只有三个測压点,而且粘土層中夾有透水的薄砂層,因此,在繪制超靜水压力变化曲綫时,曾有下列几个假定:

1. 上、下二砂層排水条件相似;
2. 上粘性土層与地下水面(标高 26.5 公尺)为自由排水面;
3. 土層中超靜水压力呈对称折綫变化。

第十六圖(戊)是根据圖(丁)計算的土層固結度变化与实测沉降的比較。可以看出,二曲綫相当接近。1955年7月下旬,測点附近堆土速度过大,土層發生了部分側向壟流,因此相应的沉降曲綫段与計算曲綫偏离較大。由于杜家台閘基土壤層次复

雜，性質不一，相距僅 1.3 公尺的二測杆（1—2，1—3），測得之沉降量即相差 3~4 公分，再因繪制計算曲線時，曾依據某些簡單假定，故圖（戊）中曲線後段亦有少許差距，但偏差不大。根據各個時間的計算土層平均固結度與實際測得之相應壓縮量，求得整個土層的平均穩定沉降量為 84 公分，與實測之 80 公分（尚未完全穩定）相比，差誤不及 5%。但以普通分層計算法計算，則穩定沉降量約 110 公分，遠較實測值為大。

此種計算方法用於一般粘性土壤，特別是含粉土很多的粘土，如杜家台土，應該是相當可靠的；遇肥粘土或泥炭土因二次固結作用影響很大，如此推算的結果，可能較實際的為小。

（乙）沉降時間的推算

按以上方法或其他可靠計算法求得預壓荷重下地基的穩定沉降後，就不同情況遵照下列三法計算沉降時間：

1. A. A. 尼契包洛維奇雙曲線經驗公式^[11] 尼氏根據蘇聯伏爾加河、斯維爾河、莫斯科運河與以列寧命名的伏爾加-頓河運河上的 16 個建築物的實測沉降資料綜合研究，發現校正了施工期影響後的沉降量與時間關係曲線均為雙曲線，乃提出了各個時間 t 與沉降量的關係 $S_t = f(t)$ 的經驗公式。這個方法是以前施工時與剛竣工時的實測沉降資料為依據的。設預壓堆土時間（自開始到竣工）的一半為 t_1 ，再令自堆土開始起算的時間扣除 t_1 為 t ，則任何時間 t 的沉降量 S_t 應為：

$$S_t = S_{\infty} \frac{t}{a+t},$$

式中 S_{∞} ——穩定沉降量；

a ——待定係數，它綜合性地反映了地基固結性能，並隨 $\frac{h}{b}$ 而變化（ h ——壓縮層厚， b ——底寬）。

知道了 S_t 與 t ，又由實測孔隙水壓力計算得 S_{∞} 〔見本節（甲）〕或根據理論計算得 S_{∞} ，即可定出 a 值，填土竣工後的沉降過程乃可推算。尼契包洛維奇著文中所舉 5 個工程的資料比較都非常準確，根據國內 3 項預壓工程實測的 32 根沉降曲線（砂井地基 16 根，無砂井地基 16 根），分別用此經驗公式加以推算，計算與實測沉降曲線相當吻合，說明該法準確可靠。

第二十三至二十六圖是計算與實測沉降曲線比較的舉例。

利用本式計算時，應注意 t_1 及 a 值的擇取。根據我們的計算經驗認為：在選擇 t_1 時可考慮兩種不同的荷重情況，第一種是填土速率大致均勻，且填土延續時間較長，因而填土期荷重時間關係曲線為一坡度不大的直線時（如第二十五圖），則 t_1 可取用填土延續時間的一半；第二種是填土速率不一致，因而荷重時間關係曲線為不規則之折線（第二十三、二十四圖），或填土速率極快，因而荷重與時間關係曲線為陡綫時（第二十六圖），則 t_1 應根據實測沉降曲線來選定，即依據沉降曲線上陡降綫段之趨勢作一切綫或一平滑曲綫與時間軸相交，交點與堆土起始點間即為 t_1 （第二十三至第二十四圖）。

在实测曲线上决定 α 值的条件:

(1) 所选用的时间必须在填土竣工后; (2) 其沉降量不得小于最终沉降量的 50%。

然后在附近取实测曲线上数点(例如三点), 算其 α 值, 再求其平均值, 以进行推算。一般在第一种加荷情况下, 如满足了第(1)条件, 则第(2)条件即无问题。第二种加荷情况或加荷时间很短者, 必须同时满足上述两条件。

2. 单向固结理论法^[12] W.G. 修克萊 (W.G. Shockley) 假设天然土层的沉降时间关系曲线与理论固结曲线相似, 推荐用下式计算沉降过程:

$$t = \frac{H^2}{C_v} T_v$$

式中 t ——为荷重一次加上后的固结时间(可按第1法中的方法求得);

H ——土层排水最大距离;

C_v ——固结系数;

T_v ——时间因素。 T_v 与固结百分数的关系可由泰士奇理论曲线或表格求得。某

一具体条件下, 如重量、排水条件相同时, 在固结过程中可假定 $\frac{H^2}{C_v}$ 不变, 故 $t = K T_v$ 。

一般用室内试验测定的 C_v 来估计沉降时间往往出入很大, 最好由施工期实测资料中求 K 值。根据施工期实测资料可定出 t_1 与 U_1 (所用稳定沉降量同1), 再根据 U_1 及单向固结理论求得相应的 T_{v1} , 于是 K 即求得。而后就可求得竣工后不同时间的沉降百分数, 即 U 。

当压缩层中夹有很透水的可压缩砂层时, 用此法就较繁。这时可假定砂层压缩与时间无关, 亦即当荷重施加后立刻完成压缩。计算 U 时将砂层压缩量减去, 待算沉降量时, 再加上砂层压缩量。

根据第1法中所用32根实测沉降曲线, 复以此法进行核算, 发现计算曲线常在实测曲线之下, 即计算沉降速率较实际速率稍快, 因而与实测曲线稍有偏离。计算结果分别见第二十三、二十五图及第二十六图。

3. 三向固结理论公式配合法^[13] 在计算有砂井地基的沉降速率时, 测定辐射向固结系数 C_r 与垂直向固结系数 C_v 的准确数值是最感困难的。其次尚有二次固结影响以及其他因素均难以准确考虑, 终致影响计算成果。本方法由 E.A. 亨德生 (E. A. Henderson) 所提出, 主要是利用室内测出的 C_v (如各层不同, 应用加权平均), 根据实测资料求 C_r (亦即确定 C_r 与 C_v 的比值)。

计算运用三向固结理论公式:

$$T_v = \frac{C_v}{H^2} t, \quad T_r = \frac{C_r}{D^2} t,$$

$$1 - U = (1 - U_v)(1 - U_r),$$

式中 T_r ——辐射向的时间因数, 无因次;

U_r ——辐射向固结百分数;

D ——向砂井排水的最长有效直径(约等于砂井间距);

其他符号同前。

U 与 T_v , T_r 的理論关系曲线或表格, 見南京水利实验处 1954 年試驗研究 报告第 106 頁第三表, 第 108 頁第五表。

在实测沉降曲綫上选定某一沉降量 S_t (預压荷重全部堆上后) 与相应的時間, 再根据已定数值如 H 、 D 計算穩定沉降量 S_∞ 、垂直向固結系数 C_v 等(此数选用压力为压缩層中点地層重量与預压荷重所引起的附加压力总和时的数值), 并假定不同的 n 值(即 C_v 的不同倍数), 用上述三公式進行运算, 直至算得的沉降与 S_t 相等为止。如此即可决定出 C_r 与 C_v 的比值 n 。以后的沉降曲綫即按此最后 $C_r (=nC_v)$ 值計算。

需特別指出, 实测沉降曲綫上各点的沉降量是在荷重有規則或無規則地逐漸增加上去的情况下產生的, 而理論公式中却假定了荷重 P 是一次加足的, 因此計算时必须校正。如填土連續上升很有規律, 可假定沉降時間等于真正時間 t 减去施工期一半時間的数值。不过, 这样是太粗糙了, 最好用亨德生建議的分層計算法^[13] :

將預压总荷重 P 分成 $P_1, P_2, \dots$ 等几个部分。分得愈細, 計算愈准。每部分荷重假设是在堆土起迄時間的中点一次堆上的。并假定每一部分荷重產生的部分沉降与其它增加的荷重無关。

在預压荷重下, 砂井地基的沉降系数由垂直向与水平向排水固結所引起。假设在任何時間 t , 由于 P_1 作用, 上述两种固結度分别为 $(U_v)_{1t}$ 及 $(U_r)_{1t}$, 則对于总荷重 P 而言, P_1 下完成的两种固結度顯然相当于地基总固結度的 $\frac{P_1}{P}$ 倍。同理, 在 $P_2, P_3, \dots$ 下的固結度分别为总固結度的 $\frac{P_2}{P}, \frac{P_3}{P}, \dots$ 倍。分別求出某一時間 t 时的垂直向与水平向固結度的总和:

$$\Sigma(U_v)_{1t} \frac{P_1}{P} = (U_v)_t \quad \text{及} \quad \Sigma(U_r)_{1t} \frac{P_1}{P} = (U_r)_t,$$

然后用下列公式計算 t 时的总固結度 U_t :

$$1 - U_t = [1 - (U_v)_t][1 - (U_r)_t].$$

任意時間 t 的地基沉降量应为 $S_t = S_\infty \cdot U_t$ 。以上計算進行至計算的 S_t 与实测的 S_t 相等为止。如此即定出 C_r 与 C_v 之比值 n 。

第二十六、二十七圖是大浦閘与某船厂(詳見附錄三)地基砂井預压推算与实测沉降曲綫的比較。大浦閘的沉降速率計算詳見附錄四。

以上介紹的三种方法可供推算預压填土竣工后沉降速率之用。經以 32 根实测曲綫計算比較, 可知經驗公式可同时应用于無砂井之地基。比較結果指出, 三种方法中以双曲綫經驗公式法的計算曲綫与实测曲綫最相吻合, 單向固結理論法計算得之沉降速率常比实际的为快, 而三向固結理論配合法, 在計算中过分繁瑣, 且計算所依据之固結系数值 C_v 在試驗中往往难以准确測定, 故实际預压施工时, 建議首先用双曲綫經驗公式推算預压期沉降速率, 然后以其他两种方法進行核算。如發現地基在預压荷重下不能于預定時間內达到穩定, 应考虑加大預压荷重, 或其他加速固結的措施。

三、实施中的几个問題

(甲) 勘 測 試 驗

預压加固处理必須先通过勘測試驗，取得必要的地質与水文地質詳細資料，而后進行設計施工。同时在加固过程中亦需進行观测，取样試驗，以了解其加固效果。因此，勘測試驗工作，应根据不同階段，不同要求來進行。一般可分成初步的和詳細的勘測試驗（包括驗證試驗等）二个階段，其要求分述如下：

1. 初步勘測試驗 与一般的水工建筑物地基的初步設計階段所進行的工作相仿。

工程地質勘探 可先用标准貫入器或其它簡便的触探器在較大範圍內普遍勘探，了解整个建筑物地区的土層分布情况。其深度必須达到硬層，如深厚的緊密砂層或硬粘土層（如美國紐吉賽公路加固工程^[14]鑽探深达 50 公尺，詳見附錄三）。特別应注意軟土層及透水砂層的相对位置、厚度与範圍。

在有代表性的地点，采取不擾动土样進行含水量、流塑性、比重、比重、顆粒分析、固結、滲透、剪力（無側限抗压强度、三軸压力或直接剪切）等試驗，然后即繪制地質剖面圖与土壤指标柱狀圖，包括貫入击数圖。一般勘探工作量比較大，如紐吉賽公路加固段長 32 公里，鑽孔达 152 孔，总長度 2,200 公尺，室內各項物理性試驗計 2,070 次，力学性 318 次，其中包括含水量試驗 1,290 次，固結試驗 116 个，無側限抗压强度試驗 185 个；我國某造船厂預压面積 4,463 平方公尺，計鑽有 6 孔，总長度 100 公尺，物理性試驗 305 次，力学性試驗 98 次；大浦閘預压面積 5,200 平方公尺，鑽 6 孔，总長度 116 公尺，物理力学性試驗土样 325 个。

水文地質勘探 了解預压地基各土層中地下水位，如軟土層中有無剩余超靜水压力（在新沉積土中常有）、地下水流向、流速等，特別是歷年最低地下水位（可調查附近井水歷年的变化）、透水砂層的滲透系数及其地下水位变化規律与附近江河湖泊等天然水体的水位变化的关系。

其他調查研究 調查此区域内过去有無建筑物，如老的堤防等；調查最近时期内地形的变化情况，如新的淤積層、人工开挖或堆積物等。这些調查对研究地層的先期压缩情况，均有一定的参考价值。

根据上述資料進行建筑物地基設計，求得承载力与沉降量等数据。如用天然地基，在施工期或运用期有挤淤或長期过大沉降的危險，而危及建筑物的安全与正常使用时，乃可考慮采用此法以穩定土壤与控制沉降。

2. 詳細勘探試驗 根据初步設計，考慮了用預压加固在技術上的可能性与經濟上的合理性后，再進行詳細鑽探取样試驗与工地試驗，取得加固設計必要資料，再進行施工設計。

鑽探取样孔 土層性質与厚薄有变化处，均应有適當的鑽孔。鑽孔深度，視土層情况与建筑物压力而定。同时布置孔位时，尙应准备將來加固过程中，在其附近鑽孔取样，進行驗證測定。取样时应連續采取，仔細描述与測量各土層厚度，特別是較透水的夾層均應一一数出。如不清楚时，可用部分土样風干后看，因夾砂存在对选用砂

井間距，与許可堆土速率均有关。擇有代表性土样，進行固結試驗（并測定主压縮比，以便了解二次固結影响）、剪力試驗与滲透試驗等。自然土重应在工地測定。对于粘性很大的土，如大浦閘土嚴禁用水冲法取样。同时必須進行吸水膨脹等特殊試驗，以供設計施工決定卸荷与施工方法的參考。

詳細水文地質調查 在預压区内外透水層中，应埋設地下水位觀測井（直徑不得小于75公厘）。在粘性土層中用孔隙水压力仪進行觀測，并進行抽水或压水試驗，以便較可靠地測定透水層的滲透系数等，并測量地下水流速与流向。

工地試驗 某些有特殊結構灵敏性很高的粘土（如大浦閘土），如取样試驗，擾动很大，土样一經取出应力状态改变后，对其力学性影响很大，故建議在鑽孔中用十字板剪力仪^[15]測定土壤强度；無法在室內進行測定的城市房碓土，如某造船厂地基表土，可用荷重板進行試驗。

（乙）設計与施工

預压范围与荷重大小 根据詳細的工程地質与水文地質資料，在建筑物重量不同的各部分計算出天然地基的总沉降与沉降消失時間，同时亦須算出土層中各点的沉降量，从而繪出土層不同高程平面上的等应力綫与等沉降量綫平面圖。

依据此圖來選擇与布置預压范围、荷重大小（一般大小可等于建筑物荷重，但最大不得超过地基的極限承载力）及施工布置等。如用堆土加荷，則其頂面应大于建筑物面積，以免產生过大的不均匀沉降。同时应考慮到預压期間地下水位的情况。如有下列情况之一，則預压效果难以充分發揮，此时应考慮人工降低地下水位措施，或者使預压期經過一个枯水季節：

- （1）預压期地下水位高于常年枯水位时；
- （2）在修結構物时或建成后地下水位有可能顯著降低，且低于歷年最枯水位时。

施工速率 預压方法的成敗在很大程度上取决于施工条件，特別是有砂井的情况，施工速率尤为主要关键。因为預压处理地基通常为高灵敏性的稀軟土壤，受擾动后强度激烈降低，且發生塑流現象。因此預压填土的速率应与地基强度增長的速率相适应，且不致切断砂井，而选用的砂井直徑、間距与打入速率应使地基土壤的擾动尽可能小，且不致因打砂井过分破坏原地基的排水边界条件。

根据文献記載，諾福克海軍机場的預压工程就是由于施工不善而失敗的事例^[16]。該区地面以下60公尺內为泥砂質粘土，灵敏度高，含水量大。地基处理时，曾采用長18公尺的砂井，井徑36公分。可能由于預压填土过快，接近地表的軟土被挤跑，預压区外形成了“淤波”，地基產生滑动，連沉降觀測杆也被毀了。預压2~5月后原估計地基已完全固結，但卸荷后沉降繼續進行，含水量未見降低，而强度反較預压前为小，結果見第1表。

在这种情况下，地基虽然引起了巨大沉降，但主要是因为基土向旁側流动，而不是由正常固結所獲得。

我國杜家台閘預压堆土时，由于速率太高，地面上曾發生“淤波”現象，上升2.2

第 1 表 諾福克機場地基預壓前後強度比較

試 驗 方 法	預 壓 前	預 壓 後
環 剪 試 驗	30~195 磅/吋 ²	45~125
無 側 限 抗 壓 強 度 試 驗	25~160	

公分，此時軟土中的超靜水壓力約等於堆土重的50%，停止堆土後未見發展。美國公路局的經驗，亦認為預壓過程中地基內許可超靜水壓力應視土質而異，但通常應維持在堆土總重的50%以下^[16]。

美國紐吉賽公路施工時，填土速率初期為 1.2 公尺/周，漸減至 60 公分/周，接近頂時為 30 公分/周，亦曾發生塑流“淤波”現象，高度達 5~24 公分，水平移動 17~26 公分，但並未見填土有裂縫等滑動險象。

適當的施工速率，應該根據工地觀測來控制。堆土速率應隨填土高度而遞減，一般堆土速率約為 30 公分/日。如預壓規模很大，可由典型預壓試驗決定最適宜的堆土速率、打砂井速率、井徑及井距等。曾有人建議打砂井時用無管靴的空心管樁，空心管一面進入土中，一面用干鑽取出管中土壤^[17]，這樣對於防止破壞原地層排水條件及打井時地基的擾動，可以起一定作用。

卸荷回彈問題 在粘土地基上，卸除荷重或開挖基坑，常會引起粘土的回彈上升，這是因為土壤的彈性膨脹與吸水膨脹所致，使預壓後土壤壓縮性增大與抗剪強度減低。回彈量的大小，與土壤含礦物成分、曝露時間久暫很有關係。如大浦關肥粘土，因卸荷後曝露時間太久，且不斷受地下水浸潤，回彈量極大，而使結構物建成後仍有較大沉降。故卸荷時間與曝露時間應減至最短。同時基坑挖至設計高程後應立即鋪填底層以防工人踏踩與器械轉動的擾動。特別要防止水分的浸入。

一般回彈量占沉降量的百分數，如我國某船廠為 6~17%，平均 13%；大浦關 12.5~24%，平均 19%；杜家台在沉降穩定地區約 10%。

(丙) 工地觀測及驗證試驗

通常所稱的工地觀測是指沉降過程觀測、孔隙水壓力消長和地下水位變化過程觀測以及地基水平位移觀測。施工期及竣工後，進行連續而系統的工地觀測，在實用上與科學研究上皆有十分重要的意義。觀測資料首先是控制施工速率的依據，例如沉降速率和孔隙水压力的突然增長是施工速率過快的標志；其次，正像前節所提到的，根據實測資料，可以較為準確地估算地基的滲壓穩定沉降量；觀測到的沉降和孔隙水压力的趨向穩定，提供了可靠的卸荷期；最後，觀測可以定出基坑開挖時的回彈量。此外，實測資料又是驗證和推進土力學理論的依據。

在預壓過程中和竣工後，均應進行地基土壤的驗證試驗，以檢定預壓對於改善土壤性質的效果。

1. 工地觀測

沉降觀測 地面沉降觀測杆的平面分布應考慮堆土不同高度、土層變化，並應設在原鑽孔附近。最好在不同深度，土層有變化處擇典型斷面，于孔隙水壓力測頭附近埋設深層沉降觀測杆。在預壓前地面最好亦埋有暗標點，以供校核之用。

沉降觀測設備中淺層的較簡單，可用 5 公分 ϕ 白鐵管，外罩較大尺寸套管製成，如第二十八圖。深層觀測可在鑽孔套管中進行^[15]，準確度應讀至公厘。觀測點數量視具體情況而定。一般間距不宜大於 20 公尺。如紐吉賽公路共有 1,660 個沉降杆，我國某造船廠有 19 個，大浦閘有 22 個（深杆 7 個，地面杆 15 個），杜家台閘有 24 個。

孔隙水壓力與地下水位觀測 孔隙水壓力測頭應分布在沉降杆附近同一地點的不同深度處，參考土壤性質分布。一般在粘土層中至少有上、中、下三點。土層愈複雜，分布點應愈多。在預壓區內外均應進行透水層中的地下水位觀測，從而了解預壓期地下水位變動的影響。

孔隙水壓力僅可用南京水利實驗處設計的薄膜式測壓頭^[19]（杜家台閘曾用），或用电阻式測壓頭^[9]，其分布的水平距離不宜大於 50 公尺。砂層中地下水位觀測可用一般水文地質觀測用管。

位移觀測 借預壓土台四周木邊樁的移動以觀測地基位移。邊樁行列與土台坡趾距離一般為 15 公尺，如能在 10 及 25 公尺外各添增一排更佳。樁距視情況而定，最大不超過 20 公尺。

以上各種觀測在施工填土期應隨時進行，竣工時亦應逐日觀測，直至卸荷回彈終了時為止，並繪成沉降曲綫。如發現沉降陡增，堆土速率應減緩或暫停，以免產生壟流。此外尚應在施工期間，觀測下列資料：砂井長度、井管貫入擊數、最後 1 公尺貫入擊數及填土面升高情況等。

2. 驗證試驗

驗證試驗結果是研究預壓加固效果，並提供預壓後地基設計指標的主要依據。但直到目前，由於缺乏可靠完善的取样試驗技術和方法，因此單憑室內土樣試驗，難以檢定土壤在天然土層中的特性。最主要的原因是由於土樣從地層深處取出，應力狀態改變，隨伴有不可避免的膨脹，加之土樣在運送與製備過程中，結構擾動勢難完全消除。預壓過程一般為時短暫，土壤雖曾經改善，然一旦受擾動，其效果就會驟然喪失，例如在國內預壓工程中，發現預壓後測得的 α 重，比預壓前的似乎並無增高，強度指標亦很凌亂。如進行現場試驗，常可避免以上缺點。如某造船廠預壓前後在同一地點舉行荷重板試驗（第 12 表），證明預壓後地基壓縮性已大大降低；大浦閘利用工地十字板試驗（第三圖），檢定出預壓後強度改善的效果。此外，仍應輔以一定量的室內試驗，對土壤物理力學性質（如孔隙比、含水量、 α 重、壓縮性、抗剪強度等）的變化進行鑒定。

根據鑒定結果，結合卸荷後的回彈觀測資料，最後確定預壓後地基的承載力。

（丁）加速固結的措施

當軟弱土層深厚，土壤透水性低，自然排水條件很差或施工期緊急的工程，常需

采用加速固結的措施。二次固結效应很顯著的土壤，如含粘土成分与有机質很高的土或火山灰質土，即使經過較長时期的滲压固結，其剩余沉降仍然很大，因此亦須尽量縮短其主要固結時間，而留有較長時間來消除二次固結的沉降量。其方法可分成二类：

1. 砂井法与紙板排水法，用來改善天然排水条件；2. 超荷重法、降低地下水位法及真空抽气法等，用來加大固結压力。二者可同时配合使用。

(1) 砂井法

其功用在于縮短土壤固結时的排水距离。砂井是应用最廣的。在实施时应考慮：

(I) 适当的砂井間距、井徑及井深；(II) 井中透水填料与鋪盖層的透水材料的选用；(III) 施工时注意砂井填砂时的中断或因土層塑流而被折断等。这些都会影响到砂井預压的效果与費用。可是影响的因素是很多而又复雜的。

砂井規格 凡軟土層厚度、透水性、特別是水平向滲透系数 k_h 、天然排水条件（如有無夾砂層）以及軟粘土的灵敏度等均影响到砂井間距的决定。設計时常用三向固結理論^[20]（見第(二)節(乙)），根据預定許可預压時間來計算砂井間距。可是事实上由于 k_h 無法正确測定，大大地影响計算結果。按固結理論，井距愈小，井徑愈大，排水固結愈快，但实际情况并不如此，因井距太小，井徑太大，在打砂井时地基土擾动甚大，破坏土壤强度，破坏天然沉積土中透水薄泥沙層的連續性，因而反减低土壤排水性能，同时所需砂料太多。灵敏性特高的軟粘土，尤其以較大井距較小井徑收效更佳。

井徑往往决定于打砂井机具的規格。最常用的是 50 公分，最小的有 20 公分。井距应小于土層厚度，但不宜小于 3 公尺。井深一般須穿通軟土層，若軟土層异常深厚，欲使砂井貫穿該層，在实施上存在困难，此时，应从地基穩定和变形兩方面考慮軟土地基的必要处理深度，从而决定最小的砂井深度。因此，設計时除須用理論計算，并应参考附錄二擇定砂井規格，再通过典型試驗或施工时修改。

透水材料 砂井及其复盖層的砂料，以足够透水而細粒土又不致挟入砂料的顆粒大小为宜。因此規定用潔淨的冲洗过的砂料或礫碴等代用品。

砂料顆粒大小目前尚無統一規定。有的工程要求通 100 号篩的細料不超过 3%；亦有規定滲透系数不小于 5.3×10^{-3} 公分/秒者；在日本則建議用有效粒徑 $d_e = 0.1 \sim 0.3$ 公厘， $\eta = \frac{d_{60}}{d_{10}} = 3 \sim 4$ 的砂料^[21]。茲摘錄美國加州公路局的規定^[4]以供参考：

第2表 砂井填料的級配

篩	号	孔 徑 (公厘)	通过該号篩的百分数 (以重量計) 不大于:
	$\frac{1}{8}$ "	12.7	90~100
	8	2.38	25~100
	30	0.59	5~50
	50	0.297	0~20
	100	0.149	0~3

第3表 复盖层砂料的级配

筛	号	孔 徑 (公厘)	通过該号筛的百分数 (以重量計) 不 大 于:
	3"	9.52	80~100
	8	2.38	5~50
	30	0.59	0~20
	50	0.297	0~5

井孔中不得積有泥漿水，規定粘土与泥沙粒含量最大不得多于2%(以体積計)。

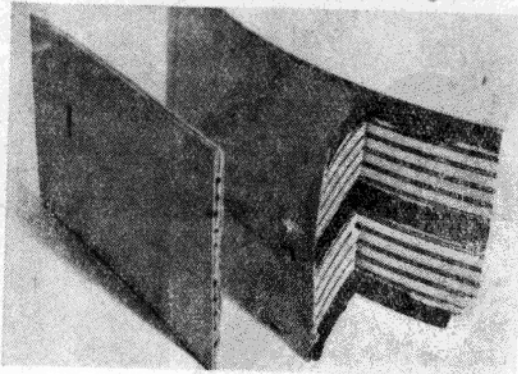
砂井施工 打入式空心管樁机是最常用的打砂井机具〔照片(四)~(六)〕，我國各預压工程皆用之。其缺点在于震动力大，地基中有砂囊时难以击入。此外，目前尚有四种打砂井机^[4]：旋轉机、旋轉水冲机、双筒水冲机及閉端双筒水冲机。

打砂井时常会遇到的困难是砂料随套管上拔，不能自由下落，或井孔中不能灌滿砂料，而成断續的粗細不均的砂柱。前者是由于砂在管筒中受拱作用，后者是由于基土太軟，拔管时四周軟土迅速拥入井孔所致。目前解决这些困难的方法有三种：(1)在管中灌飽和砂，以减少砂与管壁摩擦；(2)拔管时同时通入压縮空气，迫使砂料下降，压力一般是7公斤/平方公分；用蒸气压砂是不適宜的，因蒸气遇到砂而冷却凝固后压力消失；(3)控制拔管速率，使軟土不及拥入。通常建議速率不小于1.5~2.0公尺/分鐘^[2]我國大浦開曾用第(1)种方法克服了困难。

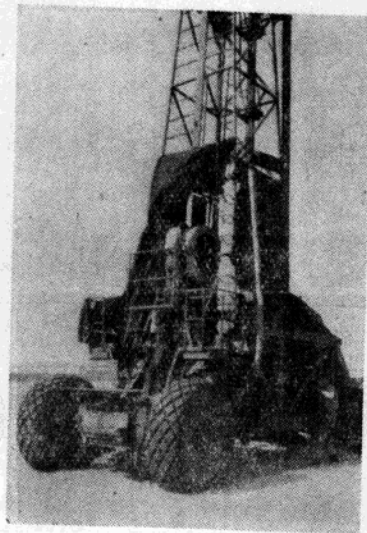
目前美國公路机构正研究以多孔混凝土管樁代替砂井，既可保証土壤排水，同时易于施工，强度較大不致为土壤塑流所剪断，对于地基总强度有所增益^[22]。

(2) 紙板排水法^[23,24]

此法于1937年首創于瑞典皇家地質学院。在欧洲如瑞典、挪威、德國有用此法以代替砂井加速深層排水的。紙板由三層浸过防腐剂的硬紙板膠合而成，中間一層有貫穿的3平方厘米的孔槽〔照片(一)〕，总厚3公厘，寬10公分，在工厂制好后繞于滾筒上，每筒長400公尺。紙板滲透系数約为 10^{-5} 公分/秒，远較肥粘土的为大。借特种机器〔第二十九圖及照片(二)〕埋入土中，土壤水滲入紙板集中孔槽中流出。



照片(一)



照片(二)

这种紙板的优点在于：材料省、体积小、重量轻（每公尺仅重 0.2 公斤），施工效率高（每日可埋設 250 塊），并且可以集中于工厂制造。論排水效率，井距 3 公尺、井徑 50 公分的砂井約相当于間距 1.87 公尺的紙板，故每一砂井的排水能力等于 2.5 根紙板。瑞典哈姆斯羣机场^[23]及德國阿森地方的堤防地基^[21, 25]均曾用此法排水。前者間距为 1.25 公尺，深度 10 公尺，后者間距 1.7 公尺，深度 4~12 公尺。費用低廉。

（3）超荷重法

所謂超荷重即預压堆土的重量超过原建筑物設計荷重。超荷重的大小一般規定应使其在填土竣工时的实测沉降量，不小于地基在建筑物設計荷重下的計算穩定沉降量的 90%。

如時間許可，建議在全面預压前先進行典型預压試驗。在試驗時以不同堆土高度，不同間距的砂井進行試驗，其中堆土的最小荷重强度等于建筑物的設計荷重。堆土期間，連續觀測沉降，看有何种堆土荷重强度下能滿足上述条件。

（4）井点降低地下水位法

有时由于缺乏土料來源，或土壤軟弱，堆土时容易產生挤淤，可用井点法來增加土壤骨架上的应力。地下水降低，亦可滿足施工的要求。如地下水位下降 ΔH ，則在下降后的地下水面上各土層上，增加的总压力均將等于高 ΔH 水柱的重量。

應該注意到利用井点抽水时，四周水位下降不同，因而引起的沉降亦不一。当軟土層深厚、水位下降幅度大时，沉降波及范围可能較大，会引起附近建筑物的沉降。

第三十圖是用井点法降低地下水的裝置示意圖（我國杜家台水閘曾用过）。但井点只适用于有效粒徑 $d_{10}=0.1\sim 1.0$ 公厘的砂土，其滲透系数大于 10^{-3} 公分/秒。

此种預压方法，早在建造下斯維尔水电站以前，就已經由苏联 M.E. 克勞賴教授提出，可惜至今未付諸实用^[5(2)]。

（5）真空抽气法^[27]

土壤中空气被抽出后，即可利用內外气压差作为預压荷重。最大真空压力实际可利用到 9 噸/平方公尺，相当于 5~6 公尺厚的砂層重量，第三十一圖是这种方法的裝置示意圖。

真空法特別适用于下列各情况：

①当地缺乏預压土料，例如在城市中進行預压工程；

②基土太軟，單純用堆土預压加重，速率受到極大限制，用真空法則不受此限制；

③加固現有土坡或存在預压土將來尚須挖除的情况；

④基土太粘， $d_{10}<0.05$ 公厘，其滲透系数为 $10^{-3}\sim 10^{-5}$ 公分/秒，重力排水有困难。

四、結論与意見

（甲）在各种类型的天然沉積淤泥上及人工淤填的軟弱土壤上，用加压或排水方法，使土壤在建筑物正式施工前，發生先期固結，减低土壤的压縮性与增强其穩定性，

以適應土木水利結構物施工期與使用期的需要，經過各國多次的實踐證明，在技術上是可能的，在經濟上是合理的，而且適合我國的具體情況，故在國民經濟建設中有推廣價值。

(乙) 實施時必須進行詳細的工程地質與水文地質的勘測試驗與理論計算，並參考實際經驗（見附錄一及二）進行初步設計，而後根據工地典型試驗或加固處理時施工初期的實測資料來修正初步設計。

(丙) 要對加固時期中沉降的發展過程作較準確的預測，目前只有根據施工期的沉降與孔隙水壓力的觀測資料，用第(二)節建議的方法分析。但此種計算方法，尚應得到更多的驗證。特別是用孔隙水壓力資料計算固結度，是有一定適用條件的，例如高塑性粘土是否可行，有待進一步研究。

(丁) 施工時應注意使此類土壤天然結構的擾動減到最小。堆土速率、砂井間距、井徑大小與鑽孔方法、開挖後的過分回彈以及各種人為的破壞等，對加固效果均有極大影響。

(戊) 為了使此種加固方法在我國得到普遍的採用與進一步的發展，應該進行：

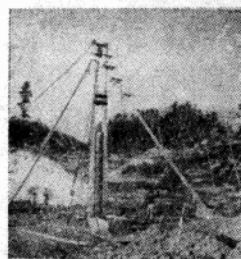
1. 試制輕便打砂井機〔可參考日本式打砂井機，見照片(三)〕。目前我國用的就地灌制混凝土樁機，重達48噸，使用不便，而且昂貴。

2. 加強工地觀測設備的研究，如電阻式孔隙水壓力儀、地基深層沉降觀測儀、就地快速測定土壤含水量變化的電阻表或中子測濕計以及其他就地測定土壤力學性的設備等的研究試制。

3. 用真空法加壓力的實際應用的研究。

4. 加強工地與室內的試驗研究工作。例如(1)有砂井的地基計算承載力時如何採用抗剪強度問題；(2)預測加固後的土壤強度及回彈量估算問題；(3)利用電滲排水加速消除殘余沉降的問題。

這次得到江蘇治淮指揮部及長江水利委員會的大力支持，及時供給了大浦閘與杜家台有關的全部資料；並獲得黃文熙院長的指示和朱維新副所長的指導；繁重的制圖與計算工作分別由本院張文正、孫明德、方家慶與成都工學院劉双官等同志擔任，均此致謝。



照片(三)