

# 行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

## 水力破裂試驗評估砂土之水平應力研究

計畫類別：\*個別型計畫

計畫編號：NSC 89 - 2211 - E - 002 - 060 -

執行期間：88年08月01日至89年07月31日

計畫主持人：左天雄

執行單位：國立臺灣大學土木工程學系

中華民國八十九年十月卅日

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 水力破裂試驗評估砂土之水平應力研究

### Preparation of NSC Project Reports

計畫編號：NSC 89 - 2211 - E - 002 - 060

執行期限：88 年 8 月 1 日至 89 年 7 月 31 日

主 持 人：左天雄

國立臺灣大學土木工程學系

計畫參與人員：鄭福和、黃紹揚

國立臺灣大學土木工程學系

#### 一、摘要

土層現地應力影響土壤之力學行為，其有效垂直覆土壓力，可經由各土層之單位重及地下水位或孔隙水壓之量測，估求得到相當可靠之值。然而水平應力之評估，目前除直接埋設儀器量測或貫入現地試驗儀器進行間接推估外，仍無法以理論求得。本研究以自行研發之室內及現地水力破裂試驗設備，可由試驗時估求其閉合壓力而評估土層現地應力。

粘土之水平應力方面，先由室內水力破裂試驗之研究成果，進而發展出現地水力破裂試驗設備。粘土層現地水力破裂試驗結果顯示其隨埋置後之時間增加而逐漸趨於穩定，而與平鈹膨脹儀試驗評估所得之結果具有一致性。

砂性土壤之水平應力方面，由於其滲透性高，加壓液體極易滲入水力破裂錐錐身周圍之土層中，因而導致不易研判水力破裂試驗之閉合壓力。針對砂性土壤，本研究提出以壓力灌入皂土液後，於水力破裂錐周圍形成低透水性之泥壁。室內水力破裂試驗結果，顯示其改良後之砂性土壤，於水力破裂階段產生垂直破裂面，此與粘土之水力破壞機制相似。現地水力破裂試驗結果發現，於砂土層灌入皂土液並形成泥壁後，短期內進行水力破裂試驗，水平應力與平鈹膨脹儀試驗評估之結果比較有偏高的趨勢。經由長期埋設後再進行水力破裂試驗，顯示其水平應力隨埋置時間增加而逐漸降低並趨於穩定，而與平鈹膨脹儀試驗結果之評估具有一致性。

關鍵詞：現地土壤應力、水力破裂試驗、貫入試驗

#### Abstract

Hydraulic fracture tests (HFT) can be used to evaluate the coefficients of lateral earth pressure at rest  $K_0$  of cohesive soils at laboratory and field test sites.

This study shows that the total horizontal stresses of cohesive soils obtained by HFT are decreasing to stable values after the embedment of hydraulic fracture cones and are consistence with those derived by flat dilatometer tests (DMT).

The closure pressures of HFT of cohesionless soils may not be assessed due to the property of high permeability. This study presents that injecting bentonite fluid to form impervious slurry wall around the shaft of hydraulic cone can decrease the permeability of cohesionless soils. Then the laboratory HFT of sands shows that vertical hydraulic planes may be developed and total horizontal stresses can be evaluated by closure pressures.

The test results of field HFT in sandy soils shows that the total horizontal stresses evaluated by HFT have consistency with those assessed by DMT and CPT.

Keywords: in-situ soil stresses, hydraulic fracture test, penetration tests.

#### 二、前言

在大地工程設計與分析中，不論是在分析變形問題或設計摩擦樁，地下開挖及擋土結構物時，大地應力狀態為一重要參考因素，其中現地土層的初始應力狀態，更需加以量測與計算。目前國內水力破裂試驗評估粘土層之側向土壓力上，台大土木系基礎工程實驗室已由室內試驗結果發展到現地試驗，並由本研究自行設計之水力破裂錐頭加以埋設，量得側向土壓力，初步奠定水力破裂試驗運用在粘土層的可行性<sup>(1,3-8,10,12)</sup>。但水力破裂錐頭埋設時間與試驗結果間存在某種關係，本研究將對此關係加以探討。反觀砂性土壤，由於其高滲透性，水力破裂試驗之加壓液體易由砂土孔隙迅速消散，無法評估水力破裂所需之破裂壓力及水力破裂面之閉合壓力。為克服水力破裂試驗在評估砂性土層水平應力之限制，本研究將分別在室內與現地進行水力破裂試驗，並利用自行研發之水力破裂錐頭進行試驗，探討水力破裂試驗在砂土層試驗之可行性。

#### 三、前人研究

1972 年 Bjerrum 等人研究指出，當土壤中的孔隙水壓力大於一臨界值時，即會在垂直最小主應力方向發生水力破裂現象。當水力破裂面發生後，持

續注入液體一段時間，使破裂縫延伸並保持張裂。若停止加壓，加壓液體將因滲入而使壓力漸漸消散，隨著壓力的消散破裂縫將逐漸閉合。當裂縫閉合時，此時加壓液體的液壓將與土層的最小主應力相等。要運用水力破裂試驗來評估土層的側向土壓力，裂縫的方向必需加以確定<sup>(1,2,9)</sup>。

1978年 Massarsch 以圓柱孔膨脹理論 (theory of expanding cylindrical cavity) 來分析在貫入水壓計後，水壓計周圍塑性區土壤的力學機制。其研究主要針對當靜止土壓力係數大於 1 時，裂縫與水壓計細長比間的關係。此推論主要假設，試驗孔的擴張是發生在無限長的彈塑性和均向性材料中，並且不考慮土壤的張力強度，推得一臨界應力比 (the ratio of the critical stress)  $C_r$ ，當臨界應力比  $C_r$  大於 1 時，裂縫將會發生在垂直面上；反之將發生在水平面上<sup>(7)</sup>。而在 1990 年，Lefebvre 等人尤其其試驗結果發現，當錐頭細長比能夠符合無限長條件 (約  $\geq 10$ )，則裂縫方向將不會受制於應力比的影響。因此，只要錐頭細長比符合無限長的條件，則此錐頭所造成的水力破裂裂縫，即使靜止土壓力係數大於 1，也將產生在垂直方向，此裂縫的閉合壓力即為土層的側向土壓力<sup>(4,5)</sup>。

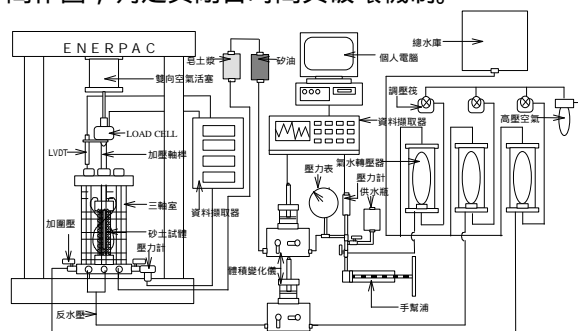
於 1993 年包萬全針對夯實粘土進行室內水力破裂試驗，其採用不同黏滯性加壓液體進行試驗發現，先於鑽孔加入黏滯性較高之砂油，再以黏滯性較低之砂由來激發水力破裂壓力，所得之試驗結果甚佳，此可克服滲透性較高之粘土層閉合壓力不易判斷之缺點。於 1995 年柳松旺根據包萬全之試驗結果，利用自行設計之加壓貫入系統於現地進行水力破裂試驗，所量得之土層側向土壓力與其他貫入試驗之分析結果頗為接近，初步奠定水力破裂試驗在粘土層試驗之可行性<sup>(10,12)</sup>。

#### 四、砂土水力破裂室內試驗設備

本研究之室內水力破裂試驗設備是由靜三軸試驗設備改裝，提供模擬現地應力狀態所需之應力狀態，並採用 1993 年包萬全自行設計之水力破裂加壓及量測系統進行試驗。室內試驗設備大致可分為 (1) 重模試體設備，包括震動台、真空抽氣機、分裂模等；(2) 加壓系統，包括加壓鋼架、雙向空氣活塞、三軸室、壓力控制系統、手幫浦以及加壓液體罐；(3) 量測擷取系統，包括壓力衡盒、電子式壓力計、壓力表、線性變位感應器、電子式體積變化儀以及資料擷取器。此三部分如圖一所示<sup>(10)</sup>。

室內水力破裂試驗步驟可分為：(1) 試驗前準備，於每次室內試驗之前，必需先做事前準備，以利試驗之進行，並提高試驗之準確性與一致性；(2) 製作重模試體，本研究之室內砂土水力破裂試驗均採用震動法來準備試驗之重模試體；(3) 砂土試體進行飽和及壓密，在重模砂土試體準備完成之後，接下來便是將砂土試體進行飽和及壓密，以模擬現地水力破裂試驗前土層之狀況；(4) 水力破裂試驗，待試體飽和壓密至所模擬現地應力之狀態後，即可進行水力破裂試驗。分別在灌入皂土液前與灌入皂土液後進行水力破裂試驗，量得加壓液體流量

與壓力隨時間變化情形，並透過資料擷取系統將資料傳至個人電腦加以紀錄；(5) 試驗分析，於試驗完成後，將資料擷取器傳至個人電腦的資料，當注入液體體積大於流出水量體積時，試體產生膨脹，並視其差值為試體膨脹體積。分別將此膨脹體積、孔隙水壓力、流出水量、加壓液體壓力及體積對時間作圖，判定其閉合時間與破壞機制。



圖一 室內砂土水力破裂試驗設備示意圖

#### 五、現地水力破裂試驗設備

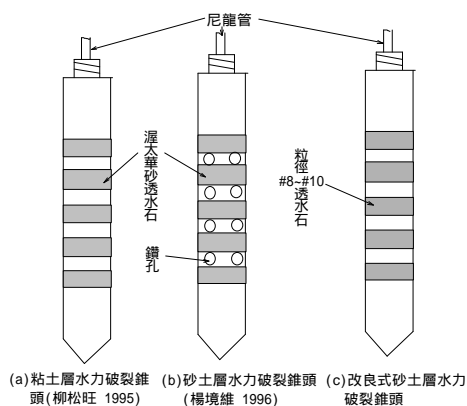
現地水力破裂試驗設備試驗設備可分為四個部份，分別為 (1) 貫入設備，為拖曳式電子錐貫入試驗車，於預定試驗位置貫入四支錨定螺旋平板，以提供貫入時之反力。並採用靜壓方式將水力破裂錐頭貫入預定深度之位置；(2) 水力破裂錐頭，本研究採用之砂土層水力破裂錐頭，由 1996 年楊境維根據柳松旺所設計之水力破裂錐頭加以改良，以利進行砂土層水力破裂試驗，並於本研究再針對砂土層水力破裂錐頭加以改良，如圖二所示<sup>(11,13)</sup>。以此錐頭進行水力破裂試驗可改進原砂土水力破裂錐頭於貫入土層中造成鑽孔堵塞的缺點；(3) 加壓系統，包括手幫浦加壓唧筒及連接加壓幫浦與錐頭間之耐壓尼龍管。此加壓系統與量測及資料擷取系統相接，其功能為提供並傳遞試驗時之加壓液體之壓力；(4) 量測與資料擷取系統，包括電子式壓力計、壓力表、電子式體積變化儀以及資料擷取器，其功能為量測並且記錄現地水力破裂試驗時，加壓液體隨時間變化之壓力以及流量 (如圖三所示)。

本研究之水力破裂試驗步驟可分為四大部分，分別為 (1) 試驗前準備，包括選擇試驗深度，調製皂土；(2) 貫入錐頭，包括安置貫入設備，埋置錐頭；(3) 水力破裂試驗，在貫入錐頭之後，依據室內試驗之試驗方法，依序進行灌入皂土漿以及水力破裂試驗；(4) 試驗分析：於水力破裂試驗進行完畢之後，將資料擷取器傳至個人電腦之試驗所得資料，進行分析土層之側向土壓力。

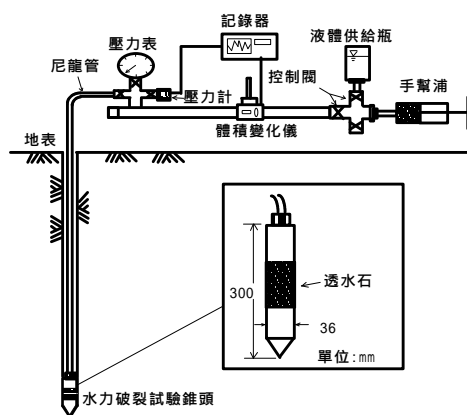
#### 六、水力破裂試驗分析土層之水平總應力

進行水力破裂試驗時施加水力破裂壓力，以定流量控制法進行加壓，當裂縫產生時，加壓液體由此裂縫迅速消散，壓力將不再持續上升，並持續加壓一段時間確保裂縫沿伸到不擾動區。當停止加壓後，由於加壓液體的滲透作用，壓力將隨時間逐漸

消散，此時藉由流量對時間分析法，於流量與時間的關係圖中先判定水力破裂縫之閉合時間，再由壓力對時間關係圖中找出閉合壓力，此閉合壓力為土層之水平總應力。



圖二 改良式水力破裂錐頭示意圖



圖三 現地水力破裂試驗設備示意圖

於粘土層中，由於滲透性較低，於水力破裂試驗時，注入加壓液體使水力破裂錐頭周圍土體產生裂縫。當破裂縫閉合時之閉合壓力即為錐頭周圍之總水平應力，此時若可得知土層之孔隙水壓力與有效垂直覆土壓力，經由簡單計算即可得到土層之靜止土壓力係數。

反之，於滲透性大砂土層中進行水力破裂試驗，在注入加壓液體之後，加壓液體極易從砂土層中滲透消散，無法順利判定水力破裂閉合壓力。故在砂性土層中灌入皂土液降低砂土層滲透性。皂土液在灌入砂土層之後以球狀分佈向外滲入砂土層中，由於皂土液之封膜機制形成泥壁與不透水膜，降低水力破裂錐周圍砂土的滲透性。在形成不透水泥壁之後進行水力破裂試驗，當加壓液體壓力大於水平總應力時，加壓液體將由泥壁所產生之裂縫滲出至未改善區域(如圖四中所示)。在停止加壓之後，由於液壓消散而使裂縫閉合，此閉合壓力即為泥壁處之水平總應力。然而不透水泥壁形成的位置可能因砂土結構與皂土顆粒大小及皂土液的膠凝強度的不同會產生極大的差異。且皂土液降低砂土透水性，主要是由於皂土顆粒堵塞砂土孔隙，其改良後並無法完全阻絕加壓液體的滲透，因此，錐頭周圍的孔

隙水壓力將由加壓液體的水頭壓力隨著與錐頭距離的增加而逐漸遞減至土層之靜水壓力，如圖四所示。而灌入皂土液所形成的泥壁位置將位於此孔隙水壓力遞減區域，即孔隙水壓力介於加壓液體水頭壓力與靜水壓力間。因此，本研究所測得之砂性土壤有效水平應力與靜止土壓力係數定義為一範圍，如下：

$$f'_{h, \max} = P_f - u_{ss} \quad f'_{h, \min} = P_f - u_p$$

$$K_o = \frac{f'_h}{f'_v}$$

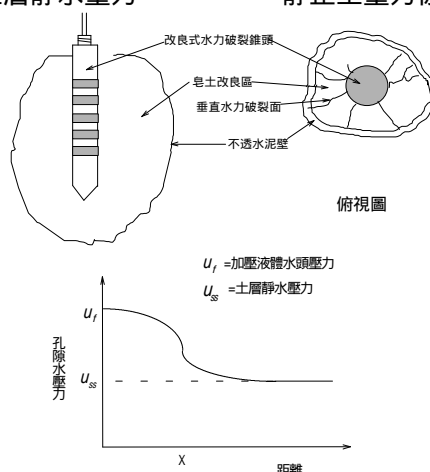
式中：

$$f'_{h, \max} = \text{最大水平有效應力} \quad f'_{h, \min} = \text{最小水平有效應力}$$

$$f'_h = \text{水平有效應力} \quad f'_v = \text{垂直有效應力}$$

$$P_f = \text{水力破裂閉合壓力} \quad u_p = \text{加壓液體水頭壓力}$$

$$u_{ss} = \text{土層靜水壓力} \quad K_o = \text{靜止土壓力係數}$$



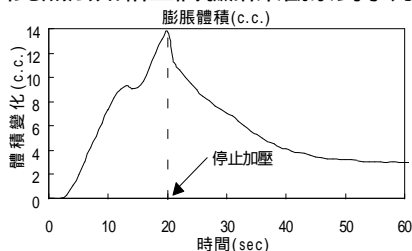
圖四 砂土層水力破裂試驗及孔隙水壓力分佈

## 七、砂土室內水力破裂試驗結果

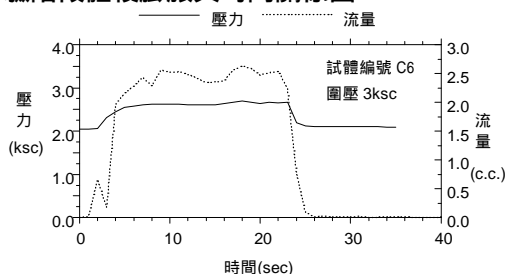
由於砂土層透水性甚高，無法量得砂土閉合壓力。因此，利用灌入皂土液降低砂土透水性，在灌入皂土液時，灌入皂土液對砂土產生擠壓，即產生體積膨脹現象。當停止加壓後，膨脹體積劇減，消散一定量後而慢慢消散。由此現象可確定砂土在灌入皂土後產生兩種現象：(1) 孔穴膨脹產生破裂縫；(2) 皂土液滲透行為。

由圖五發現，在經皂土液降低透水性後砂土中進行水力破裂試驗，在注入加壓體後，體積產生膨脹現象，其餘注入水量迅速由破裂縫消散。停止加壓後，由於水力破裂縫閉合，膨脹體積驟減，剩餘膨脹體積將由滲透作用緩緩消散。因此，可確定砂土在進行水力破裂試驗時存在兩種行為：(1) 產生水力破裂縫；(2) 加壓液體滲透消散。分別比較皂土液改良前水力破裂試驗結果(圖六及圖七)發現，再未經皂土液降低砂土透水性前，以本研究判斷閉合壓力之方法無法判斷；於皂土液改良後之試驗結果可清楚判定閉合時間，而得閉合壓力。於室內試驗完成後，將試體置入冷凍庫中進行冰凍，期能在試驗後觀察到砂土的破壞行為與皂土分佈。由觀察冰凍後試體發現，皂土分佈與預期分佈相似，即以球狀方向滲透(圖八)。由於皂土液的流變性與

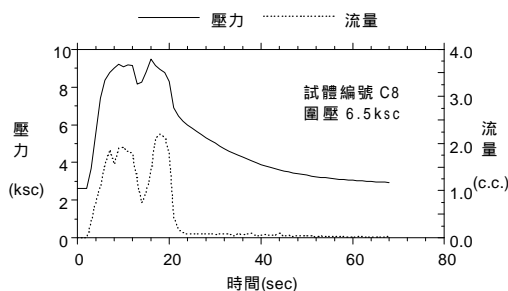
復原性，使得改良後砂土在水力破裂縫閉合後隨即復原，因此無法如粘土試驗結果觀察到水力破裂裂



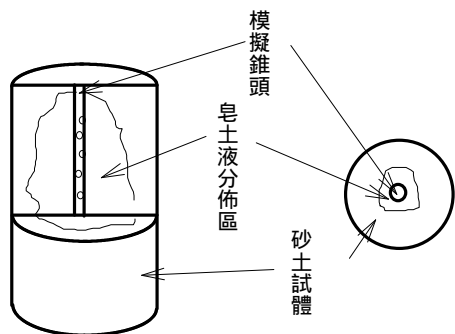
圖五 室內水力破裂試驗皂土液改良後砂土試體試驗階段體積膨脹與時間關係圖



圖六 室內水力破裂試驗未加皂土液前試驗結果



圖七 室內水力破裂試驗灌入皂土液降低砂土透水性後試驗結果



圖八 砂土試體灌入皂土液分佈示意圖

表一 砂土水力破裂試驗室內試驗結果

| 試驗編號   | 加壓液體 | 試驗偏差 (%) | 試驗編號  | 加壓液體  | 試驗偏差 (%) |
|--------|------|----------|-------|-------|----------|
| 3-8H10 | 矽油   | 1.6      | C6    | 水     | 3.1      |
| 3-14H4 | 矽油   | 4.3      | C7    | 水     | 3.99     |
| 2-7H6  | 矽油   | 2        | C8    | 水     | 1.53     |
| 2-26H1 | 矽油   | 1.8      | ***** | ***** | *****    |

縫。本研究室內試驗結果如表一所示，所得之閉合壓力與所加圍壓比較，誤差百分比都小於5%。可確定砂土在經皂土液降低透水性後進行水力破裂試驗的準確性與可行性，且不論採用水或矽油進行水

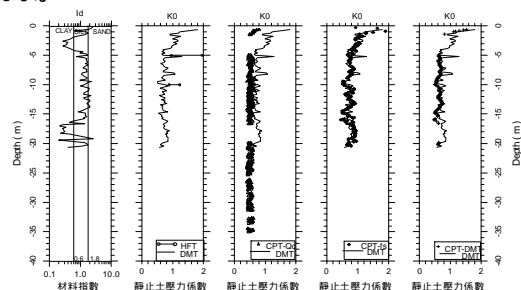
力破裂試驗，均可得到不錯之閉合壓力。因此本研究建議於降低砂土層透水性之後進行水力破裂試驗，採用水作為加壓材料，如此可避免加壓液體的黏滯性影響閉合時間判斷的困擾，並可減少試驗的複雜性。

## 八、現地水力破裂試驗結果

本研究於三重市重新橋下運動公園與台大校園進行水力破裂試驗，其試驗結果簡述如下：

### a. 三重重新橋下運動公園

其土層分佈情形地表下至約 2m 為粉土質砂或砂質粉土；其下為粉土質粘土或粘土至約 4m 處，4m-16m 為粉土質砂或砂質粉土。於本場址深度 5m 及 10m 進行砂土水力破裂試驗，由試驗結果發現，隨著試驗次數的增加，所量得之閉合壓力有下降之趨勢，造成此現象主要原因可能來自於未能灌入足量之皂土液，以至皂土液未能於砂土孔隙形成泥壁，故未能有效反映土層之側向土壓力。將水力破裂試驗結果與其他分析靜止土壓力係數結果(示於圖九中)發現，水力破裂試驗結果有偏高之趨勢，其可能原因可能來自於灌入皂土液對土層產生擠壓現象。



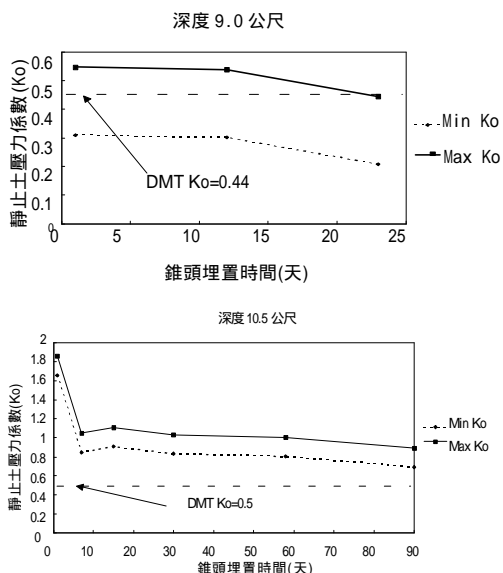
圖九 三重市重新橋貫入試驗分析靜止土壓力

### b. 台大校園

其土層分佈情形地表至 0.3m 深為回填礫石層，以下至 6.5m 為粉土質黏土或粘土，6.5m-15m 為粉土質砂夾砂質粉土。於此場址深度 7m, 7.5m, 8m, 8.3m, 9m, 9.3m, 10.5m 及 13m 埋設水力破裂錐頭，並在錐頭埋置後進行水力破裂試驗，判定土層之滲透性，於滲透性高之砂土層灌入皂土液降低砂土滲透性，試驗結果發現所量得之閉合壓力有隨時間消散之現象，此乃由於貫入皂土液對土層產生擠壓現象，而此擠壓現象將由於砂土或皂土液與砂土混合土的消散或潛變而漸漸消失，直至與土層應力相等。因此可確定本研究所提之砂土層水力破裂試驗方法之可行性。

本研究分析所得之靜止土壓力係數如圖十所示。隨著埋置時間的增加，所量得之閉合壓力有下降之趨勢，直至與大地應力平衡為止。水力破裂試驗結果在分析砂土層靜止土壓力係數時，最大之靜止土壓力係數與平鈹膨脹儀試驗分析結果較為接近(深度 8 公尺及深度 9 公尺)。此可推論，採用本研究之砂土層水力破裂試驗方法，試驗所得之孔隙水壓力與靜水壓力相近，可確定泥壁可有效達阻水效果。於砂土層中埋設改良式錐頭，經皂土液降低

錐頭週圍砂土透水性之後進行水力破裂試驗，當加壓液體壓力大於側向土壓力時，將在皂土改良區形成一垂直裂縫，加壓液體隨即由此裂縫消散。停止加壓後，加壓液體壓力消散而使得此破裂縫隨即閉合。當裂縫閉合時，加壓液體流量將產生明顯變化，此時判定為閉合時間，所對應之壓力為閉合壓力，即不透水泥壁處之總水平應力。並由以上討論結果顯示不透水泥壁處之孔隙水壓與靜水壓相近，將其量得之閉合壓力減去靜水壓，並與有效覆土壓力相除即可得土層之靜止土壓力係數。



圖十 台大校園砂土層水力破裂試驗分析靜止土壓力係數與時間關係圖

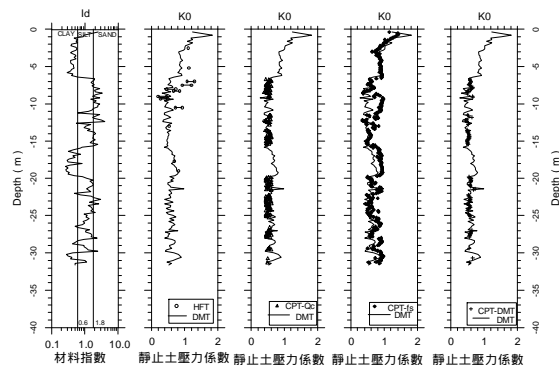
由於不同深度砂土組構及應力狀態搭不盡相同，因此降低砂土透水性之皂土液亦不同，本研究利用不同之灌入壓力及不同量之皂土液來降低砂土層透水性。灌入皂土量與試驗結果有以下關係存在：(1)灌入足量皂土量可有效形成不透水泥壁，降低錐頭周圍之透水性；(2)灌入皂土液將對土層產生擠壓現象；(3)降低砂土層透水性所需之皂土量與砂土組構，皂土顆粒大小，皂土膠結強度及土層應力狀態有密切關係，因此，不同深度之砂土層需灌入不同量之皂土量來降低砂土層之透水性。以較高之壓力灌入皂土液將對土層產生擠壓現象，即所量得之閉合壓力有偏高之趨勢。於錐頭埋置一段時間後進行水力破裂試驗結果與其他貫入試驗分析靜止土壓力係數結果頗為相近（圖十一），可作為評估土層應力之參考。

## 九，結論

1. 由室內試驗結果發現，當灌入皂土液時，由於皂土顆粒堵塞砂土孔隙，隨著滲透皂土液的增加，將逐漸形成不透水泥壁。之後，若再持續灌入皂土液將對砂土產生擠壓現象。
2. 在皂土液改良砂土透水性之後，以水作為加壓材料進行水力破裂試驗，由膨脹體積與時間關係圖

中發現，改良後砂土在進行水力破裂時，其破壞機制與粘土層同樣產生破裂縫。因此，可確定以本研究所提之方法在砂土層中進行水力破裂試驗可得土層之水平應力。

3. 由現地水力破裂分析結果發現，泥壁處之孔隙水壓力與土層靜水壓較為接近，即所分析之最大靜止土壓力係數較接進平鉸膨脹儀試驗分析結果。因此，確定泥壁能有效達到阻水效果，土層之靜止土壓力係數與砂土層水力破裂試驗分析之最大靜止土壓力係數較為接近，此與粘土層水力破裂計算方式相似。



圖十一 台大校園貫入試驗分析靜止土壓力係數

4. 由現地改良砂土層透水效果發現，皂土改良效果受砂土組構，皂土濃度，皂土膠體強度及皂土顆粒大小等種種因素影響而有所不同。過多的皂土液將對砂土層產生擠壓，而產生應力集中現象；而如未能充份改良砂土透水性，將不易判得閉合時間與閉合壓力。至於需灌入多少量皂土漿改良砂土透水性有需要進一步深入研究。
5. 灌入過量皂土液對砂土產生擠壓現象，此集中應力將隨著時間的增加而逐漸消散。由於壓力消散使得此集中應力與大地應力之應力差減小，造成消散速度趨緩。但在灌入皂土液後約1年，應力將與大地應力趨於平衡，並由試驗得到不錯之結果。造成此壓力消散的原因可能由於：(1)砂土組構重新分佈；(2)改良後砂土潛變行為；(3)未改良砂土潛變行為；(4)孔隙水壓力消散；(5)皂土液持續滲透；(6)濾過水不斷滲出等。經長期埋設後，砂土水力破裂試驗結果可提供工程設計參考之用。
6. 本研究在以皂土液改良砂土層透水性後，所進行之水力破裂試驗不需再灌入皂土液改良，直接以水作為加壓材料進行水力破裂試驗，並由本研究試驗結果發現其重複性甚高，確定砂土水力破裂試驗之可行性。
7. 於台大校園粘土層埋設改良式水力破裂錐頭，在錐頭埋設後於不同時間進行觀測，由試驗結果發現，於錐頭埋置後初期進行水力破裂試驗，所得之閉合壓力有偏高趨勢，並隨埋置時間增加而急劇下降。因此可確定，錐頭貫入土層之擠壓行為於錐頭埋置初期迅速消散，隨著擠壓應力降低，其消散逐漸趨緩，直至與大地應力平衡為止。

- 側向應力之研究”，國立台灣大學碩士論文。
14. 楊境維，1996，“水力破裂試驗評估砂性土層側向應力之研究”，國立台灣大學碩士論文。

#### 參考文獻

1. Bjereum, L., Nash, J. K. T. L., Kennard, R. M. and Gibson, R. E., 1972, "Hydraulic Fracturing in Field Permeability Testing", *Geotechnique* 22, No. 2, pp.219-332
2. Jaworski, G. W., Duncan, A. M. and Seed, H. B., 1981, "Laboratory Study of Hydraulic Fracturing" *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 107, GT6, pp.713-733.
3. Jaworski, L., and Andersen, K. H., 1972, "In-Situ Measurement of Lateral Earth Pressure in Clay", *Proceeding of the 5<sup>th</sup> European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Madrid, Spain*, Vol. 1, pp.11-20.
4. Lefebvre, G., Bozozuk, M., Philibert, A., and Hornych, P., 1990, "Fissuring from Hydraulic Fracture of Clay Soil", *Proceedings, 10<sup>th</sup> International Conference on Soils Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm*, Vol. 2, pp. 513-518.
5. Lefebvre, G., Bozozuk, M., Philibert, A., and Hornych, P., 1990, "Evaluating  $K_0$  in Compacted Clays with Hydraulic Fracture Tests", *Canadian Geotechnical Journal* 28, pp.365-377.
6. Massarsch, K. R., R.D., Holtz, B. G. Holm, and A. Fredriksson, 1975, "Measurement of horizontal In Situ Stresses", *Proceedings of the ASCE Speciality Conference on In Situ Measurements of Soil Properties*, Vol. 1, Raleigh, N.C., PP 266-286.
7. Massarsch, K. R., 1978, "New Aspects of Soils Fracturing in Clay", *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 104, GT 8, PP1109-1123.
8. Mori, A. and Tamura, H., 1987, "Hydrofracturing Pressure of Cohesive Soils", *Soils and Foundations*, Vol. 27, NO. 1, pp.14-22, .
9. Panah, A. M. and Yanagisawa, E., 1989 "Laboratory Studies on Hydraulic Fracturing Criteria In Soil", *Soils and Foundations*, Vol. 29, NO.4, pp.14-22.
10. 包萬全，1993，“夯實粘土之室內水力破裂試驗研究”，國立台灣大學碩士論文。
11. 沈永年，1987，“穩定液物性研究”，國立台灣技術學院碩士論文。
12. 林良澤，1997，“水力破裂試驗評估土層靜止土壓力係數之研究”，國立台灣大學碩士論文。
13. 柳松旺，1995，“現地水力破裂試驗評估粘土層