

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

子計劃二：膠結不良沉積岩層之淺基礎行為(3/3)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC93-2211-E-009-004-

執行期間：93年08月01日至94年07月31日

執行單位：國立交通大學土木工程學系(所)

計畫主持人：廖志中

報告類型：完整報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 10 月 28 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

膠結不良沉積岩層之大地工程行為 (III) 子計畫 (二) 膠結不良沉積岩層之淺基礎行為

Engineering Performance of Shallow Foundation in Poorly Cemented Sedimentary Rocks

計畫類別：個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 93-2211-E-009-0004

執行期間：93年8月1日至94年7月31日

計畫主持人：廖志中 國立交通大學土木工程系博士教授
計畫參與人員：張振成 國立交通大學土木工程系博士研究助理
計畫參與人員：羅木榮 國立交通大學土木工程系碩士研究助理
計畫參與人員：楊秀隆 國立交通大學土木工程系碩士研究助理

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：國立交通大學土木系

中華民國 94 年 10 月 13 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告
膠結不良沉積岩層之大地工程行為 (III) (二) 膠結不良沉積
岩層之淺基礎行為

**Engineering Performance of Shallow Foundation in Poorly
Cemented Sedimentary Rocks**

計畫編號：NSC 93-2211-E-009-004

執行期限：93年8月1日至94年7月31日

主持人：廖志中 執行機構：交通大學 職稱：教授

計畫參與人員：張振成 國立交通大學土木工程系博士研究助理

計畫參與人員：羅木榮 國立交通大學土木工程系碩士研究助理

計畫參與人員：楊秀隆 國立交通大學土木工程系碩士研究助理

一、中文摘要

台灣西部麓山帶地區出露的新世及更新世的地層組成岩石，大多由節理不發達、層理明顯、厚度不一的砂岩、頁岩、及砂頁岩互層所組成。砂岩普遍具有膠結不良、遇水極易軟化之特性，工程性質與行為甚難掌握與決定。因此，不僅分析設計時參數的選用不易，施工時常有災害發生。因此，有必要對此膠結不良沉積岩層的大地工程行為，包括工址的探勘，岩石力學性質與行為、基礎工程行為，邊坡工程行為、隧道工程開挖行為、及監測深入探討，以供未來分析、設計、及施工的參考。本研究團隊針對此類地層的大地工程行為加以探討。本計畫為其中之一子計畫，針對淺基礎的大地工程行為加以探討。

本計畫以三年時間進行淺基礎之研究，企圖提出適用且廣泛之淺基礎承載分析方法，本研究主要工作包含室內基礎模型承載試驗（含基礎內變形量測與滑動弧監測），現地基礎承載試驗（含基礎內變形量測與滑動弧監測），及等理論基礎承載分析。研究課題除考慮座落於水平地表上之淺基處外，並將探討文獻上較

被忽略之課題-淺基礎位於邊坡上及位於坡頂上之議題。

本報告為第三年度之研究成果，本年度主要完成的工作包括現地試驗場址補充調查、膠結不良砂岩力學行為探討、現地承載試驗及基礎承載力試驗結果分析，本精簡報告將提出上述主要成果。

關鍵詞：膠結不良砂岩，力學模式，人造軟岩，基礎承載力，模型承載試驗。

Abstract

The outcrops in the northern and central regions of Western Taiwan often contain very weak rocks. The rocks are composed of the poorly cemented sandstone, shale, and interbed of very thin sandstone and shale. The strengths of these young formations lie within “very weak” and “extremely weak”. The mechanical properties and behaviors of these rocks are between soils and rocks in the geotechnical spectrum. The engineering performance of geotechnical structure in these rocks is not fully understood.

This project aims to investigate the

engineering performance of shallow foundation in such rock. In this project, a synthetic soft rock will be developed as the foundation material. The mechanical behavior of the synthetic rock will be analogous to the nature weak rock. A series of loading tests will be performed on the physical foundation model. The footing will be located on a horizontal surface, a sloping ground, or at the crest of a slope. A few loading tests will also be conducted on different ground in fields. Finally, a useful analysis approach for estimating the bearing capacity of weak rock will be proposed.

This report presents the mid-term research results of the second year for the three periods project. The results include the loading test for shallow foundation model on slope and site investigation of the Bao-shan II reservoir experimental station.

Keywords: Poor cemented sandstone, Synthetic Rock, Model Loading Test, Shallow Foundation, Bearing Capacity

二、緣由與目的

台灣中北部(桃園至台中)麓山帶地區出露之甚多年輕、成岩作用不完全，膠結不良的地層，如卓蘭層、頭嵙山層、六雙層等。此等地層大多以砂頁岩互層及砂岩夾薄頁岩層組成[1]。此類岩層，砂岩孔隙大、透水性高，材料性質介乎土壤及岩石間。由於取樣不易，早期對其力學性質及行為甚難加以掌握，本研究群在國科會整合性計畫支持下，歷經近數年之努力，對於此等地層岩石之力學行為與性質已能初

步掌握[2, 3, 4, 5]。

由於此地層之邊坡常於豪雨或開挖後，於砂岩體內常產生局部之侵蝕破壞或沿頁岩面上產生各種形態之大規模岩層滑動，例如北二高關西至新竹段施工時曾產生二十多個邊坡滑動皆屬此類型態之邊坡滑動[6]，及台中大坑地區常有軟岩邊坡破壞[7]，某水庫導水隧道施工引致抽心現象等。此外，大規模之山坡地工程中常於大填方或挖方整平之基地上構築結構物，或由於夯實不良，或由於岩層受風化作用產生軟化現象，常使基礎承载力及沉陷量不易估計，而產生基礎沉陷以致造成房屋龜裂之現象(例如新竹青草湖附近某高級社區)。此外，此等地層內地下坑室開挖後之行為尚不是完全明瞭。因此，基於對膠結不良沉積岩石力學行為的了解，本研究群自89年度開始針對上述軟岩(膠結不良沉積岩層)之大地工程行為加以研究。89及90已初步完成實驗站工址初步調查，人造岩石製作及測試，模型承載試驗系統建立，現地承載試驗規劃等等。由於本整合性研究為多目標，高度挑戰之研究，自本年度開始將再進行三年期的整合性研究。

本子計畫將以三年時間進行淺基礎之研究，企圖提出適用且廣泛之淺基礎承載分析方法，本研究主要工作包含室內基礎模型承載試驗，現地基礎承載試驗，及等理論基礎承載分析。研究課題除考慮座落於水平地表上之淺基處外，並將探討文獻上較被忽略之課題-淺基礎位於邊坡上及位於坡頂上之議題。企圖提出適用且廣泛之淺基礎承載分析方法，

三、結果與討論

本計畫執行至今，皆能依預定進度執行，各個工作項目之研究成果如下：

(一) 現地試驗場址補充調查：上年度已完成相關的場址調查及現地試驗以了解該區之地質特性與力學參數。今年以交大自行研發並改良之多功能孔內試驗儀(BTD, 如圖一所示)進行該現地場址之力學性質。其BTD試驗結果得知(a)孔內千斤頂試驗：剪力模數(G_0)沿岩層走向為10~26(MPa)；垂直岩層走向為11~34(MPa)， G_0 隨深度增加而增大。(b) 孔內剪力試驗：摩擦角的範圍在 $28^\circ\sim 41^\circ$ 。(c)孔底平板載重試驗之縱向彈性模數為14~42.65(MPa)

(二) 膠結不良砂岩力學行為探討：本計畫使用適用於此類軟岩材料之三軸試驗裝置。三軸試體之變形採用三軸室內局部應變、傳統三軸室外之變形量測，可以量得微應變下試體之線彈性乃至於大應變下材料之屈服行為。於試體頂蓋及底座加裝剪力波元件以量得剪力波在試驗過程中的變化，求得在10-3%應變下之彈性模數並配合微應變所量測之彈性模數相互驗證。由研究結果顯示，軟岩在小應變下呈現線彈性之行為，並隨著有效圍壓的增加，楊氏模數會有遞增情形發生。飽和試體於應力應變行上缺乏一般硬岩所常有之脆性力學行為，試驗時引發之超額孔隙水壓，在低有效圍壓試驗條件下會顯現類似緊砂或過壓密黏土之膨脹性行為。在高有效圍壓試驗條件下，則呈現類似鬆砂或正常壓密黏土之壓縮性行為，其門檻值為有效圍壓3MPa。不同應力路徑下強度與行為有明顯的變化，所以在工程應用上，應就其不同條件考慮

個別參數分析。

(三) 基礎承载力試驗結果分析：先前已完成室內基礎模型承載試驗針對水平地表、基腳位於邊坡傾角 10° 、 20° 及 30° 之臨近坡頂，今年完成補充相關室內基礎模型承載試驗與邊坡傾角 20° 之基腳距邊坡坡頂退縮1倍與1.5倍基腳寬度之模型承載試驗，其試驗結果如圖二所示。不同試驗條件下之漸進式破壞機制，整理如圖三~如表三及圖四所示。試驗結果顯示，膠結不良砂岩之承載行為與破壞機制，不同於一般硬岩或土壤的承載行為，而是兼具脆性與塑性的特性。基腳位於水平地表上呈現對稱型之破壞型態，於基腳下方的基礎產生向下塑性變型且於應力轉折區有剪力裂縫的產生。不同邊坡角度下（10度、20度、30度），基礎破壞滑動面為靠邊坡處產生，非邊坡處無滑動面延伸至地表，當邊坡傾斜角大於 $\phi/2$ （ ϕ 為基礎材料摩擦角）時，基礎之破壞機制明顯受邊坡地形所影響。當基腳位於邊坡型態基礎時，基礎破壞行為著重於靠邊坡處之裂縫與破壞面的發展，破壞滑動面延伸的範圍且隨者退縮距離增加而擴展，但基腳右側未有破壞滑動面延伸至地表。基礎破壞模態可分為主動壓力區、應力轉折區及被動壓力區。當基腳位於邊坡型態之基礎，其破壞模態非若水平地表試驗條件下之對稱性，破壞機制仍受到邊坡的影響。被動壓力區的面積隨退縮距離增加而增加，也導致基礎極限成載能力提高。於基腳距坡頂 $2.5B$ 距離下，其基礎極限成載能力已接近水平地表者。基礎位

於邊坡傾角 10° 以下其破壞機制與傾角因子較無深切影響，破壞機制為線性階段模型基腳應力集中產生之裂縫所控制成為破壞階段之滑動破壞面；而邊坡傾角 20° 以上其破壞機制與傾角因子有深切影響，破壞機制為線性階段模型基腳應力集中產生之裂縫成為破壞階段之次要破壞面，而待其破壞面形成後則模型基腳下方迅速形成主要破壞滑動面，造成承载力急劇下降。根據觀察模型承載試驗結果，彙整其假設之破壞機制如圖五~八，經極限分析法之上限解定理，利用功能平衡原理推導各不同條件下之基礎極限承载力公式。

當基腳位於水平地表之膠結不良砂岩基礎上：

$$q = cN_c + \frac{\gamma B}{2} N_\gamma$$

$$N_c = e^{\frac{\theta}{6} \tan \psi} \frac{\sin \frac{\theta}{3} \cos(\xi - \psi)}{\cos \xi \cos\left(\frac{\theta}{6} + \psi\right)} + e^{\frac{5\theta}{6} \tan \psi} \frac{\sin \frac{\theta}{3} \cos(\xi - \psi)}{\cos \xi \cos\left(\frac{\theta}{6} + \psi\right)} + e^{\frac{3\theta}{2} \tan \psi} \frac{\sin \frac{\theta}{3} \cos(\xi - \psi)}{\cos \xi \cos\left(\frac{\theta}{6} + \psi\right)}$$

$$+ e^{\frac{11\theta}{6} \tan \psi} \frac{\sin \eta \cos(\xi - \psi)}{\sin\left(\xi + \frac{5\theta}{6}\right) \cos \xi} + \tan \xi + e^{\frac{\theta}{2} \tan \psi} \frac{\sin\left(\frac{\theta}{6}\right) \cos(\xi - \psi)}{\cos \psi \cos \xi} + e^{\frac{7\theta}{6} \tan \psi} \frac{\sin\left(\frac{\theta}{6}\right) \cos(\xi - \psi)}{\cos \psi \cos \xi}$$

$$N_\gamma = \frac{\tan \xi}{2} + \frac{1}{2} e^{\frac{\theta}{2} \tan \psi} \frac{\sin \frac{\theta}{3} \cos\left(\xi + \frac{\theta}{6}\right) \cos(\xi - \psi)}{\cos \psi \cos^2 \xi} + \frac{1}{2} e^{\frac{3\theta}{2} \tan \psi} \frac{\sin \frac{\theta}{3} \cos\left(\xi + \frac{\theta}{6}\right) \cos(\xi - \psi)}{\cos \psi \cos^2 \xi}$$

$$+ \frac{1}{2} e^{\frac{5\theta}{2} \tan \psi} \frac{\sin \frac{\theta}{3} \sin\left(\left(\xi + \frac{5\theta}{6}\right) - \frac{\pi}{2}\right) \cos(\xi - \psi)}{\cos \psi \cos^2 \xi}$$

$$+ \frac{1}{2} e^{\frac{17\theta}{6} \tan \psi} \left(\cos \eta \sin \eta + \frac{\sin^2 \eta}{\tan\left(\xi + \frac{5\theta}{6}\right) \cos\left(\frac{\pi}{2} + \psi\right)} \right) \left(\frac{\sin\left(\left(\xi + \frac{5\theta}{6}\right) - \frac{\pi}{2}\right) \cos(\xi - \psi)}{\cos \psi \cos^2 \xi} \right)$$

以本模型承載試驗結果以上述公式推導承载力之比較，如圖九所示。

當基腳位於臨近膠結不良砂岩邊坡

(坡腳小於 $45^\circ - \frac{\phi}{2}$ 度)基礎上：

$$q = cN_c + \frac{\gamma B}{2} N_\gamma$$

$$N_c = \tan \xi + \frac{\cos(\xi - \psi)}{4 \cos \xi \sin \psi} (e^{2\theta \tan \psi} - 1) + \frac{\sin \eta \cos(\xi - \psi)}{2 \cos \xi \cos(\psi + \eta)} e^{2\theta \tan \psi}$$

$$N_\gamma = \frac{\tan \xi}{2} + \frac{\cos(\xi - \psi) (3 \tan \psi \cos \xi + \sin \xi - e^{3\theta \tan \psi} (3 \tan \psi \cos(\theta + \xi) + \sin(\theta + \xi)))}{4 \cos \psi \cos^2 \xi (9 \tan^2 \psi + 1)}$$

$$+ \frac{e^{3\theta \tan \psi} \left(\cos(\xi - \psi) \sin \eta \sin\left(\left(\theta + \xi\right) - \frac{\pi}{2}\right) \right)}{4 \cos^2 \xi \cos(\eta + \psi)}$$

當基腳位於臨近膠結不良砂岩邊坡(坡腳大於 $45^\circ - \frac{\phi}{2}$ 度)基礎上：

$$q = cN_c + \frac{\gamma B}{2} N_\gamma$$

$$N_c = \tan \xi + \frac{\cos(\xi - \psi) (e^{2\theta \tan \psi} - 1)}{4 \cos \xi \sin \psi}$$

$$N_\gamma = \frac{\tan \xi}{2} + \frac{\cos(\xi - \psi) (3 \tan \psi \cos \xi + \sin \xi - e^{3\theta \tan \psi} (3 \tan \psi \cos(\theta + \xi) + \sin(\theta + \xi)))}{4 \cos \psi \cos^2 \xi (9 \tan^2 \psi + 1)}$$

上述公式推導之極限承载力與本模型承載試驗之比較結果，如圖十所示。

當基腳置於距坡頂 α 倍基腳寬度之膠結不良砂岩邊坡(坡腳小於 $45^\circ - \frac{\phi}{2}$ 度)基礎上：

$$q = cN_c + \frac{\gamma B}{2} N_\gamma$$

$$N_c = \tan \xi + \frac{\cos(\xi - \psi)}{4 \cos \xi \sin \psi} (e^{2\theta \tan \psi} - 1) + \frac{e^{2\theta \tan \psi} \cos(\xi - \psi)}{2 \cos \xi} \left(\frac{\sin \eta}{\cos(\eta + \psi)} - \frac{\cos \psi \sin \beta}{\cos(\eta + \psi) \cos(\eta + \psi - \beta)} \right) + \alpha \frac{e^{\theta \tan \psi} \sin \beta \cos(\xi - \psi)}{\cos(\eta + \psi - \beta)}$$

$$N_\gamma = \frac{\tan \xi}{2} + \frac{\cos(\xi - \psi)}{4 \cos \psi \cos^2 \xi (9 \tan^2 \psi + 1)} \left((3 \tan \psi \cos \xi + \sin \xi) - e^{3\theta \tan \psi} (3 \tan \psi \cos(\theta + \xi) + \sin(\theta + \xi)) \right)$$

$$+ \frac{e^{\theta \tan \psi} \cos(\xi + \theta) \cos(\xi - \psi)}{\cos \psi} \left(\frac{e^{2\theta \tan \psi}}{4 \cos^2 \xi} \left(\frac{\cos^2 \psi \sin \beta}{\cos(\eta + \psi) \cos(\eta + \psi - \beta)} - \frac{\cos \psi \sin \eta}{\cos(\eta + \psi)} \right) - \frac{\alpha e^{\theta \tan \psi}}{\cos \xi} \left(\frac{\cos \psi \sin \beta}{\cos(\eta + \psi - \beta)} + \frac{\alpha^2 \sin \beta \cos(\eta + \psi)}{\cos(\eta + \psi - \beta)} \right) \right)$$

公式推導與模型承載試驗結果比較

如圖十一及十二；對於本試驗之基礎材料($\phi = 45^\circ, c = 0.48 \text{ MPa}$)，不同邊坡坡角之安全退縮極限距離，如圖十三所示。

(四) 現地基礎承載試驗：現地承載試驗將於寶二水庫實驗站進行兩組試驗，分別為淺基礎模型置於水平地表及臨近邊坡坡頂(20度邊坡)，其試驗設備架設如圖十四及十五。承載試驗施作為將油壓千斤頂降下，使得基礎模型與試體輕微接觸，以手動方式調整壓力，盡量以應力控制方式進行荷重加載，直至試體破壞，承載力明顯下降或是沉陷量過大，即停止試驗。各試驗條件下之承載曲線見圖十六及十七，破壞時之照片如圖十八及十九所示。現地承載試驗之極限承載力均較室內承載試驗結果低，探究原因為除現地地質因素影響外，主要為因環境天候影響造成現地基礎之較低極限承載力結果。

四、計畫成果自評

本研究計畫為三年期之研究，延續以往的研究成果，針對台灣地區膠結不良砂岩之大地工程行為加以探究，以提供土木工程分析、設計之參考。本報告為本子計劃的第三年之研究成果，皆能依照計劃書執行，詳細成果可將見於本校本年度之碩士論文及未來之博士論文。前述研究成果，顯示具有創新性及實用性質。目前部分成果已發表，彙整如下：

1. 張振成 廖志中、潘以文、孫光東、王柏皓，『不同退縮距離對膠結不良砂岩之淺基礎承載行為之影響』，第十一屆大地工程研討會，台北、萬里，2004。(最佳論文)

2. 張振成 廖志中、潘以文、孫光東、王柏皓，『人造膠結不良砂岩之位於坡頂條件下淺基礎模型承載試驗』，第六屆岩盤工程研討會，台北、淡水，2004。第240至246頁。

3. Liao, J.J., Chang, J.C., Pan, Y.W., Huang, A.B., and Lin, C.P. (2004), "Loading Behavior of shallow foundation on poorly cemented sandstone," Proceedings of the ISRM International Symposium 3rd ARMS, Kyoto, Japan., (2), pp:807-813.

4. Chang, J.C., Liao, J.J and Pan, Y.P. (2004), "Failure mechanism and bearing capacity of shallow foundation on poorly cemented sandstone," *Canadian Geotechnical Journal*, (under review).

5. Chang, J.C., Liao, J.J and Pan, Y.P. (2004), "Loading behavior and bearing capacity of shallow foundations on the crest of a slope with poorly cemented sandstone," *Rock Mechanics and Rock Engineering*, (under review).

五、參考文獻

[1] 何春蓀，台灣西部麓山帶地質，地工技術，第二十期，第 80-98 頁，民國 76 年。

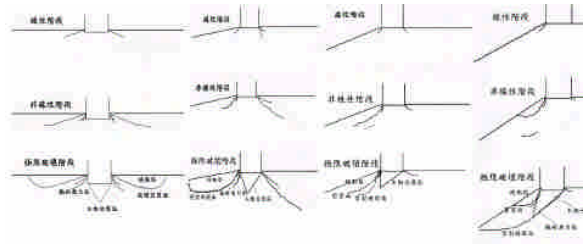
[2] 廖志中，黃安斌，潘以文，房正國，鄭孟雄，黃惠儀(1999)，"軟弱砂岩之新穎試驗設備"，土木水利，第二十六卷，第一期，第 66-77 頁。

[3] Huang, A.B., Liao, J.J., Pan, Y.-W., Cheng, M.H., Hsieh, S.Y., and Peng, J.K.(2000), "Characterization of Soft Rocks in Taiwan," Proceedings of the 4th North American Rock Mechanics Symposium, July 31-August 3, Seattle, U.S.A., pp. 83-90.

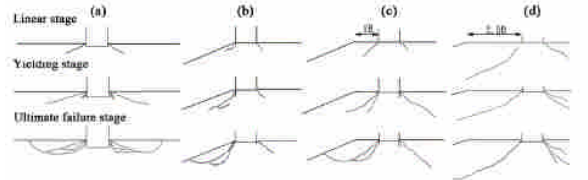
[4] Huang, A.B., Fang, C.K., Liao, J.J., and Pan, Y.W.(2002), "Development of a Multiple-Purpose Borehole Testing Device

for Soft Rock, ” Geotechnical Testing Journal, ASTM, Vol. 25, No. 3, pp. 226-232.

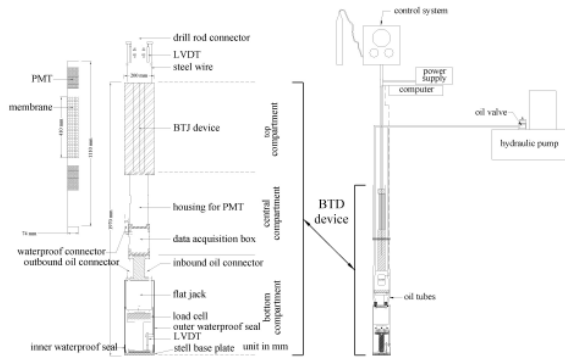
- [5] 黃安斌，林志平，廖志中，潘以文，湯士弘，簡旭君，吳政達，葉致翔，盧吉勇，楊培熙(2002)，”先進邊坡監測系統之研發，”土木水利，第二十九卷，第二期，第65-78頁
- [6] 蘇英豪，北二高關西至新竹段沿線邊坡坍塌整治方案彙集報告，國道建設技術研討會論文集，pp.69-87，民國83年。
- [7] 董家鈞、廖志中、潘以文(1999)，”臺中大坑地區軟岩邊坡崩滑型態與機制之探討”，第八屆大地工程學術研究討論會論文集，民國88年8月，屏東，1616-1627.



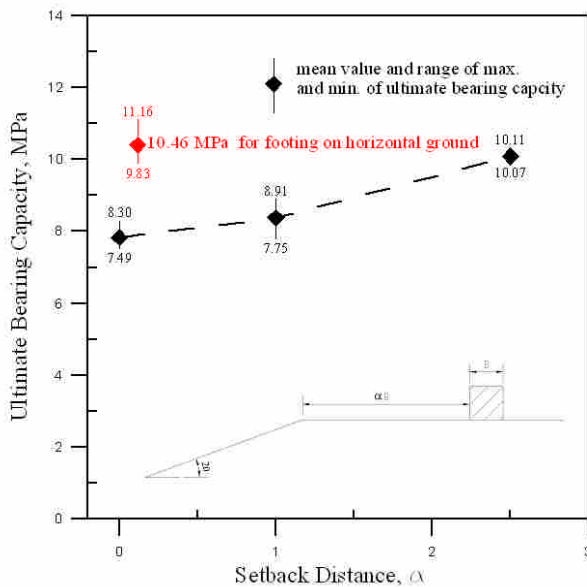
圖三、基腳位於水平地表與邊坡坡頂之漸進式破壞模式



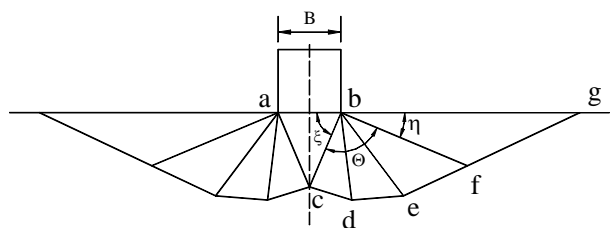
圖四、基腳位於水平地表與 20 度邊坡角且距坡頂 1 倍與 2.5 倍之漸進式破壞模式



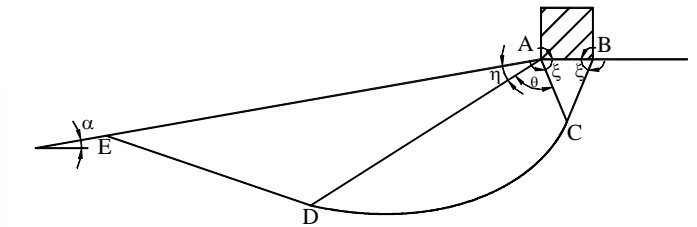
圖一、BTD 示意圖



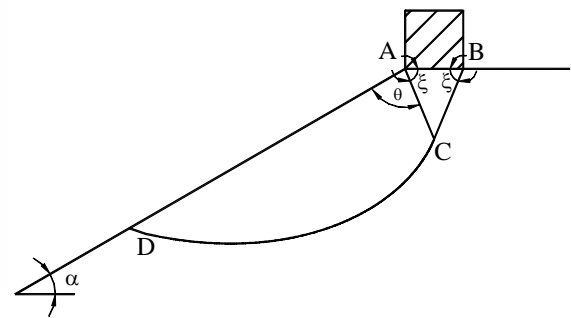
圖二、不同退縮距離條件下之極限承載力



圖五、水平地表之假設破壞機制

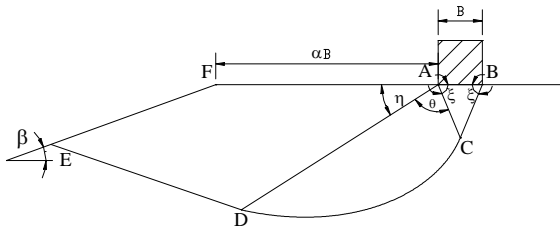


圖六、基腳位於邊坡坡頂($\alpha < \phi/2$)之假設破壞機制

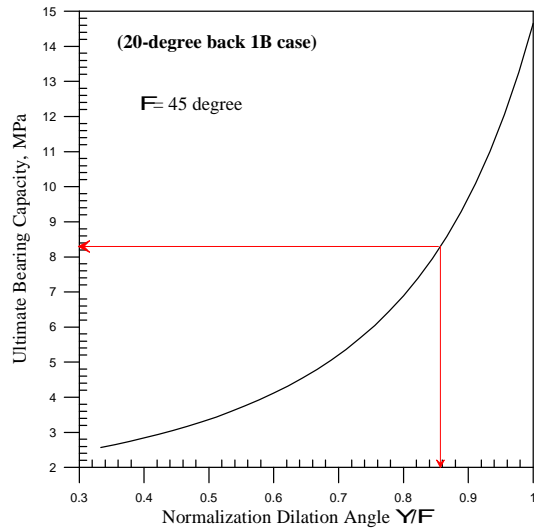


圖七、基腳位於邊坡坡頂($\alpha > \phi/2$)之假設破壞

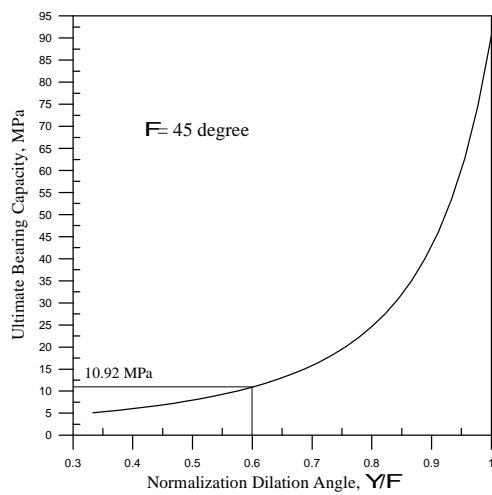
壞機制



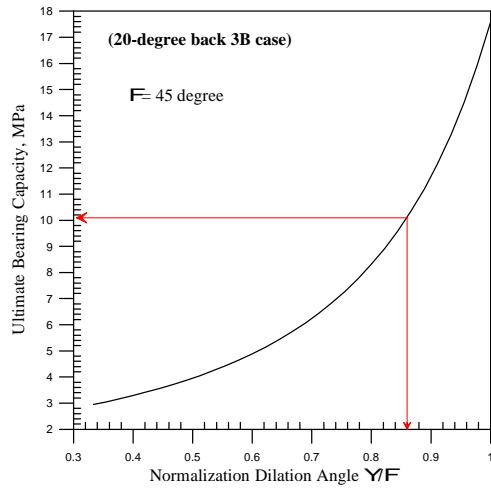
圖八、邊坡坡頂($\alpha > \phi/2$)基腳距坡頂 αB (B 為基腳寬度)之假設破壞機制



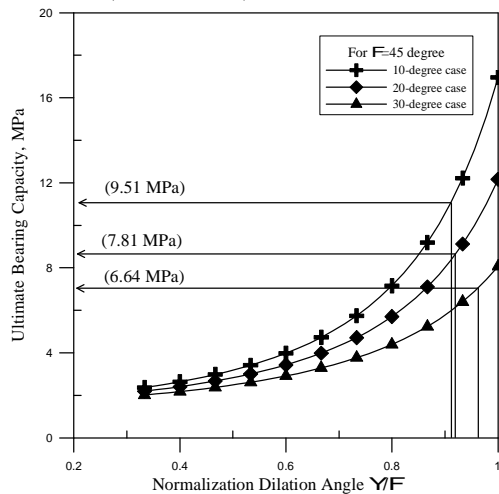
圖十一、基腳距坡頂退縮 1 倍基腳寬度(20 度邊坡)



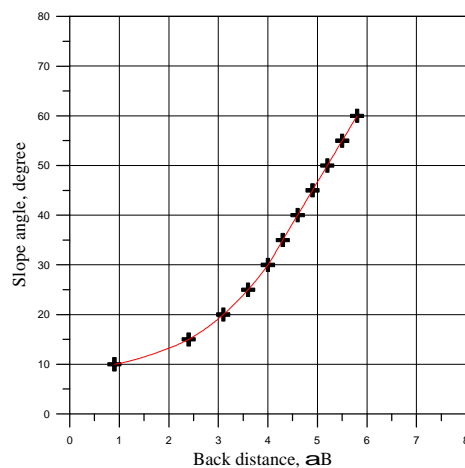
圖九、模型承載試驗結果與公式推估值之比較圖(水平地表)



圖十二、基腳距坡頂退縮 3 倍基腳寬度(20 度邊坡)



圖十、模型承載試驗結果與公式推估值之比較圖(基腳於邊坡坡頂)

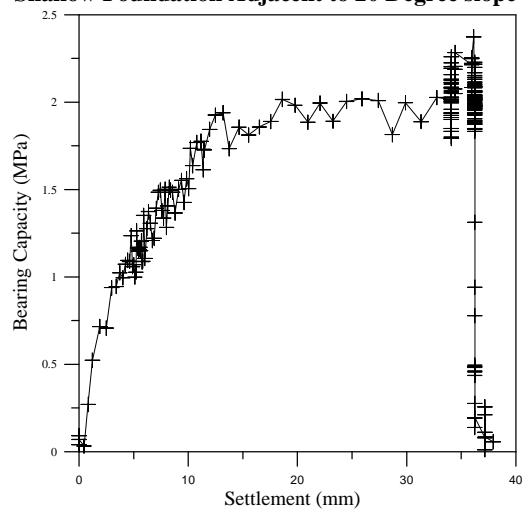


圖十三、邊坡坡腳與安全退縮距離之關係 (當基礎材料之 $\phi = 45^\circ, c = 0.48 \text{ MPa}$)



圖十四、現地承載試驗(水平地表條件)

Model Bearing Test of
Shallow Foundation Adjacent to 20 Degree slope

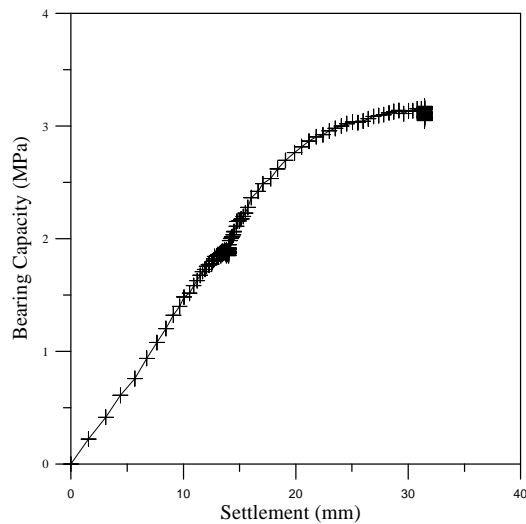


圖十七、承載曲線(臨近 20 度邊坡坡頂條件)



圖十五、現地承載試驗(臨近 20 度邊坡坡頂條件)

Model Bearing Test of
Shallow Foundation on Horizontal Ground



圖十六、承載曲線(水平地表條件)



圖十八、基礎破壞模態(水平地表條件)



圖十九、基礎破壞模態(臨近 20 度邊坡坡頂條件)