

簡介超高層大樓基礎型式選擇

蕭博元 陳書宏 蘇鼎鈞 王劍虹

亞新工程顧問公司

摘 要

近來國內高樓興建高度有逐漸增加之趨勢，建築物基礎所扮演的角色隨之日趨重要，除了地質狀況及基地施工環境的配合外，上層建築結構分佈及施工成本之考慮亦是重要的因素。本文中透過兩個國外在高樓基礎選擇之案例介紹，以作為工程界在高樓基礎型式選擇上之參考。

關鍵字：高樓建築、基樁、壁式基樁、沉箱、樁底灌漿。

INTRODUCTION OF THE SELECTION OF FOUNDATION TYPE FOR HIGH-RISE BUILDING FOUNDATION

XIAO BOR-YUNG CHEN SHU-HONG SU TING-CHIUN WANG CHIEN-HONG

MOH AND ASSOCIATES, INC.

ABSTRACT

Buildings in Taiwan are getting higher and higher recently due to the economic growth. Meanwhile, the foundations of high-rise buildings are more and more important. In addition to matching up geologic and construction environment condition, the superstructure types and cost economical considerations are important evaluation factors for high-rise building foundations. Two case studies about overseas high-rise building foundations are also introduced to provide references in selection of high-rise building foundation.

KEY WORDS : high-rise building, pile, barrette, caisson, post grouting.

一、前 言

隨著全球都會化發展的趨勢，必須提高都會地區土地利用的價值，高樓建築在都會區的興建便成為了勢在必行的趨勢。雖然目前之施工技術及機具施做的能力均與日俱進，在基礎工程，由於根據各建築之上層結構配置及荷重分佈、地質狀況及地層特性等限制條件的不同，因此基礎型式及配置情形必須因各大樓的特性進行個別

的考慮。

雖然高層建築在台灣地區亦有逐漸增多之

趨勢，但由於台灣位在亞熱帶及歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊之碰撞帶上，地震及颱風等天然因素是必須考慮的，依據目前之建築物相關法規如建築物耐震設計技術規範及解說(民國86年)及混凝土工程設計規範與解說(民國87年)均規定建築物需對地震力或風力之載重組合進行分析，另外加上建築師對建築設計之需求，往往造成基礎受局部偏心載重之影響，是基礎設計時須特別注意的事項。

本文中首先對目前高樓建築常使用之基礎型式，其工程特性，及使用上之限制進行說明，然後介紹兩棟目前世界上知名之超高樓建築在

基礎型式選擇時所遭遇之問題，藉由對地質狀況及各基礎型式力學特性之了解，如何選擇最佳解決方案，進行介紹。

二、高樓基礎型式之選擇

自基礎工程設計之觀點而言，高樓建築由於上部結構經由樑柱系統傳遞至基礎之集中荷重相當大，且為了兼具美觀及實用的價值，在高層大樓周圍常搭配著較低樓層之建築，因此在地震及風力作用情況下，所引致之偏心荷重及彎矩甚大，一般基礎型式選擇需考慮之因素包括下列各點：

1. 基礎材料之容許承載力—在深基礎中由於上部結構之荷重及彎矩分配至基礎來承受，尤其在樁頭附近所承受之彎矩軸壓力或軸拉力為最大，在設計需考慮材料之最大容許承載力。

2. 基礎承載層之容許承載力—需考慮在高荷重下建築物之整體穩定性，並且在地震時基礎也不會發生局部性承載力破壞之現象。

3. 基礎之總沈陷量及差異沉陷量—高低樓間重量差異甚大，但在功能上卻必須銜接，因此在設計時須考慮消除荷重差異所導致之差異沉陷或整體建築物之沉陷量。

4. 基礎底版所受地下水壓作用所產生上浮力之影響需檢討地下水位之變化及地下水壓力作用對結構物沉陷或隆起之影響。

5. 基礎工程施工之技術、能力、經濟性及工期等—應考慮在不同之地質條件及施工環境下，何種基礎型式具有較佳之施工性，以其縮減工期並有較佳之經濟性。

6. 基礎開挖施工之安全性—由於高樓建築大都在都市地區，基礎開挖之安全性對周圍地區之影響甚大，故適當之基礎施工方式是需要加以考量的。

基礎設計因考慮土地開發成本及避免對基地周圍地區造成影響，選擇之基礎型式可包括筏式基礎、基樁、壁式基樁及沉箱等，茲分述如后。

筏式基礎是一般高樓最先考慮採用之基礎型式，其設計主要在將結構物之荷重利用基礎版之勁度分布至較大之基礎面上，以避免局部性之

破壞，且依補償式基礎之觀念，使上部結構之荷重與基礎挖除土重平衡(理論上使基礎下方的土層所增加之淨荷重為零)使基礎沉陷量達到最小。但在部分高樓結構物中，由於上層結構型式之配置及外力等因素所造成之偏心載重，導致各柱位間產生較大之差異沉陷量，不利於整體結構之安全，因此需考慮使用深基礎以將荷重傳遞至深層承載力較佳之地層。

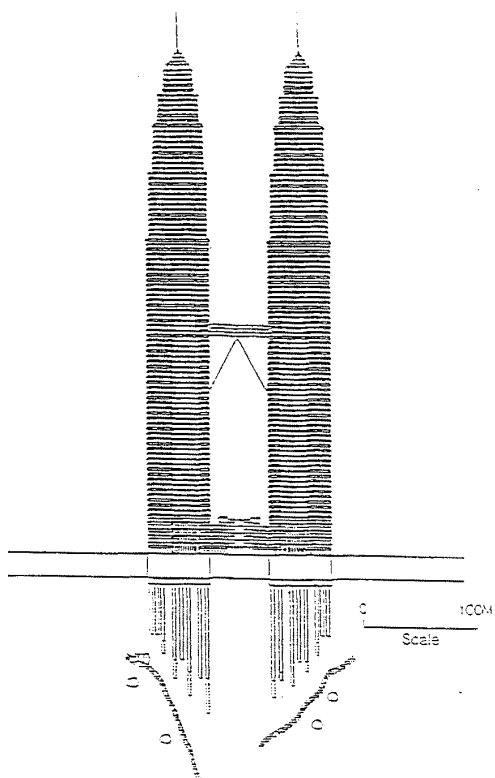
基樁之設計以發揮基樁材料容許強度者較為經濟，並考慮承載層之深度及承載力以決定適當之基樁配置、直徑及長度。在都會地區之基樁施工方式以反循環基樁及全套管基樁為主，以減少鑽鑿時震動及噪音對周圍地區之干擾；但若遇有較大之卵礫石，則可能需使用特殊之鑽鑿挖掘機具。此外，反循環基樁樁孔週壁易受到施工之擾動造成崩塌，且樁底之淤泥清理不易，將會降低地層之承載能力，但亦可輔以適當之樁周及樁底灌漿以確保承載力。有關樁周及樁底灌漿之成效，周忠仁等(2000)整理之案例說明了配合適當之樁周或樁底灌漿能夠有效的提升基樁之承載力。

壁式基樁(Barrette)之施作機具及方式與連續壁大致相同，即利用適當刀法之配置，使形成具有較大承載力之基樁，其垂直度可於施工時裝設儀器加以控制。國內常見之MASAGO機具，一般在軟弱之地層且深度在50公尺以內有較佳之功率，在較深及具有堅硬地層狀況下亦可考慮改採BW或HYDROFRAISE等機具進行施做。目前國內採用之案例包括臺北市仁愛路國泰人壽大樓(民國73年)及臺北市八德路京華城購物中心(民國88年)等，而在國外亦有世界第一高樓Petronas Twin Tower(馬來西亞)採用，如圖一及圖二所示；與反循環基樁相同，施工後樁底之淤泥處理成效亦不良，最好是配合適當之樁周或樁底灌漿以確保樁底承載力。

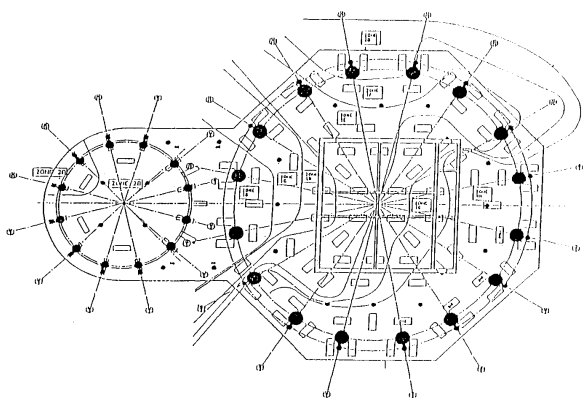
沉箱一般採用於卵礫石層或特殊條件中，由於其施工面積大，底部可以人員下去目視檢視承載層狀況，可信度較高，但若因地下水位高於開挖時工作面，易滲入地下水，常需配合抽水；若為有湧砂或伏流等現象時，必須考慮灌漿而增加費用、工期與施工之風險，另外由於面積較大，若配合底部擴座可大幅提高基礎之承載力。

三、案例說明

以下收集了國外兩知名之超高層大樓之基礎型式(分別採用基樁及沉箱)就其之考慮因素描述,以為國內爾後有超高層大樓時基礎型式選擇之參考:



圖一 Petronas Twin Tower 立面圖



圖二 Petronas Twin Tower 壁式基樁基礎配置平面圖

3.1 案例一

依據 J.M.Seitz, R.Wend, (1997) 所發表有關

Commerzbank 銀行總部興建工程一文中介紹, Commerzbank 銀行總部位於德國法蘭克福市中心區, 整座建築物之高度含高塔為 300 公尺, 不含高塔為 251 公尺, 為歐洲最高之辦公大樓, 圖三所示即為目前完成後之照片。本建築物上部結構採用鋼骨構架系統(Steel Frame with Vierendeel Frames), 至於基礎則係採用 111 支直徑 1.8m 全套管基樁。



圖三 Commerzbank 銀行總部全貌

本基地地下水位位於地表下約 5 公尺, 地層主要由砂土及礫石層、粘土層夾石灰岩層及石灰岩岩盤組成, 其中砂土及礫石層分佈於地表下 5~10 公尺, 屬於河流沖積層; 其下至地表下約 44 公尺為法蘭克福粘土層(Frankfurt clay), 主要包括粘土、砂土及石灰岩層; 法蘭克福粘土層之下為石灰岩岩盤, 同時地層中由於石灰岩分佈, 因此於地層之中存在許多孔洞。

本工程基礎採用全套管基樁, 主要考慮下列三點:

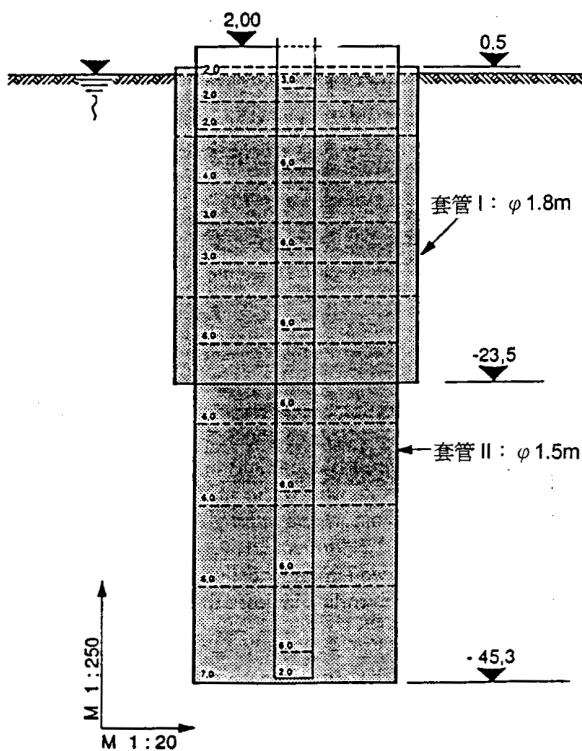
(1). 由於石灰岩層中分佈許多孔洞, 惟有採用全套管基樁方可維持基樁鑽掘後孔壁之完整; 若採用穩定液時, 穩定液流失易造成坍孔, 而無法確保基樁鑽掘後孔壁之完整。

(2). 採用穩定液維持孔壁, 會降低樁身摩擦力。

(3). 採用全套管基樁並於部分地層中配合樁周灌漿(Skin Grouting), 填補樁身四周孔洞, 可確保發揮非常可靠之樁身摩擦力。

全套管基樁挖掘時，其中直徑1.8m全套管基樁施作至地表下約23公尺，然後使用直徑1.5m全套管基樁施作至岩盤面，基樁挖掘機具配合不同地層狀況而採用抓斗及鑿子，一般以抓斗於砂土及粘土層中挖掘，而以鑿子於石灰岩層中挖掘，圖四所示為直徑1.8m及1.5m全套管基樁挖掘示意圖。由於本基地緊鄰電腦中心及具有高靈敏度之機電設備，為避免基樁挖掘振動對電腦中心及具有高靈敏度之機電設備造成不利影響，故於基樁挖掘工作開始前進行試挖，依據試驗結果，實際施工時嚴格限制抓斗及鑿子挖掘時所允許提升之最大高度，降低振動以避免損害電腦中心及具有高靈敏度之機電設備。

基樁挖掘完成後，首先採用泵浦清除樁底淤泥，並於澆灌混凝土前，利用空氣揚升系統(Air lift system)，將約三倍套管體積之清水置換套管內之污水，以確保基樁底部完全無淤泥存在。



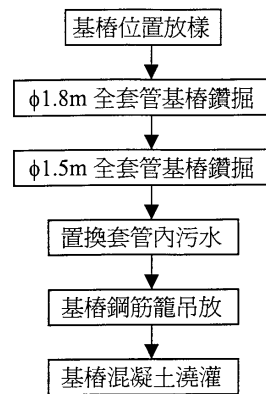
圖四 全套管基樁挖掘示意圖

雖然本基地採用直徑為1.8m及1.5m全套管

基樁，但在考量施工、超音波檢測及其他量測儀器按裝之需求下，整支基樁鋼筋籠之斷面並未因樁徑不同而改變，即採用單一之鋼筋籠斷面並分三節吊放，同時每支基樁均必須確實到達岩盤面，故每支基樁必須視樁長適當調整鋼筋籠之長度。

基樁混凝土採用特密管澆灌，若以本基地一支46m長之基樁為例，基樁混凝土量約100m³，混凝土澆灌時間需約8小時。

有關全套管基樁之施作流程如圖五所示。



圖五 全套管基樁施作流程圖

由於石灰岩層中分佈許多孔洞，當基樁混凝土完成後約30小時，施作樁周灌漿，填補樁身四周孔洞，可確保發揮非常可靠之樁身摩擦力，樁周灌漿施工方式首先以清水以80bar(kg/cm²)之壓力使混凝土開裂後，再利用水泥砂漿進行灌漿。除進行樁周灌漿外，並利用基樁內預先埋設之鋼管，從基樁底部下約10公尺範圍內進行樁底灌漿以填充石灰岩層中之孔洞，使石灰岩層形成均勻之承載體，以確保樁底承載力，圖六所示為樁底灌漿示意圖。

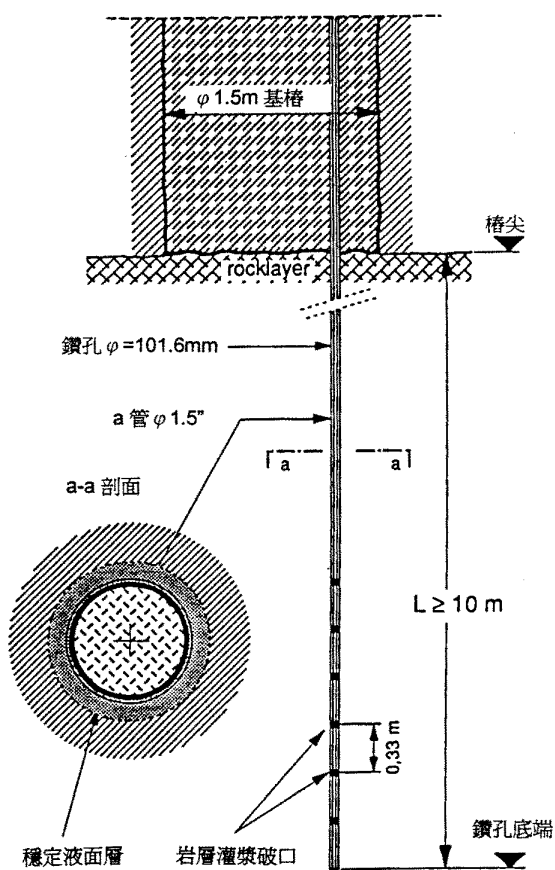
3.2 案例二

依據KURZEME, M. AND RUSH, M.C. (1985), 有關新加坡Overseas Union Bank (OUB) Centre大樓興建工程一文介紹，OUB Centre大樓高度為280公尺，由62層高之主樓區及10層高之群樓區所組成，基礎為地下四層之結構，主樓區基地面積約為2,900平方公尺，如圖七所示。由於捷運在基地旁之Raffles Place通過，且其開挖深度較

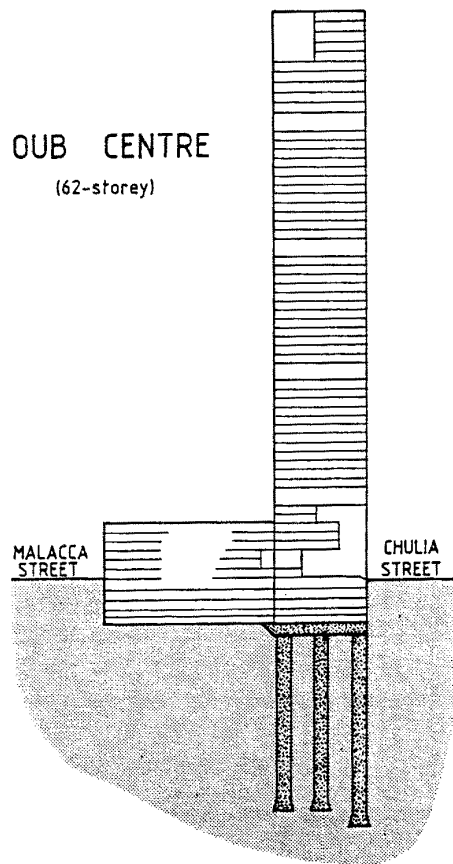
本工程深8公尺(地表下28公尺),於設計時亦需加強注意。

基地之地質狀況,根據鑽探資料顯示,基地下方100公尺內之地質狀況大致可分為四個層次:

1. 回填土層:為疏鬆至中等緊密程度之粘質細砂,約厚3.5公尺。
2. 粉質細砂層:非常疏鬆至疏鬆程度,夾帶部分木屑及貝屑,厚約4.0公尺。
3. 塊石粘土層:可能為古老之沖積層,由強度低至高之岩石及軟弱至非常軟弱之粘土所組成,具有高度風化程度,厚度約80公尺。
4. 岩盤:為中度至輕度風化之砂岩及泥岩所構成,其中部分泥岩風化而成的粉土層,有遇水軟化使強度大幅降低之現象。



圖六 全套管基樁樁底灌漿示意圖



圖七 OUB Centre 基地斷面圖

根據鑽探資料顯示,部分土層當暴露於水中時將會有軟化之現象,故實驗室之試驗結果均大幅的低估了現場土層之強度,因此根據補充鑽探所進行之現地側向壓力儀(Menard type pressuremeter)試驗結果顯示,在第三層次之塊石粘土層中,因為塊石及基質之粘土之分佈狀況不一致,使土壤強度及勁度有相當大之差異,其中粘土之不排水剪力強度平均約為 $800\text{kPa}(80\text{t}/\text{m}^2)$ 。

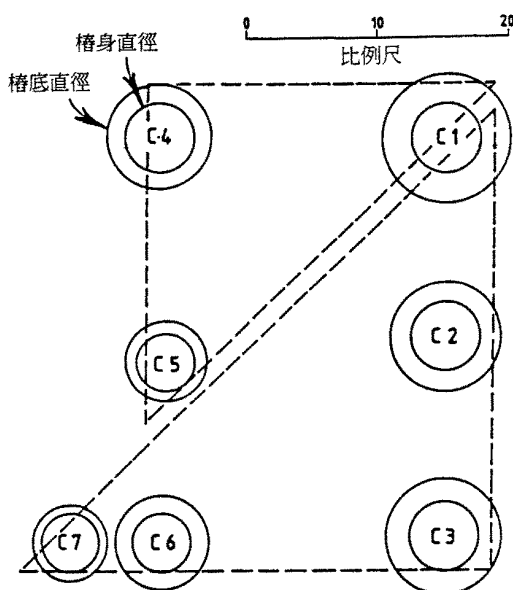
本工程之基礎型式採用大口徑沉箱之原因包括下列三點:

1. 避免主樓區及群樓區之差異沉陷:本工程基礎面位於地表下20公尺處,為塊石粘土層,由於群樓區之基礎所承受之淨荷重甚小,故沉陷量可忽略不計。主樓區平均承受淨荷重約 $870\text{kPa}(87\text{t}/\text{m}^2)$,若採用筏式基礎,將因粘土受壓所產生過大之沉陷量(約14公分),而造成兩區間過大之差異沉陷。

2. 成本及施工限制條件：採用樁筏式基礎及樁基礎雖然可以減少差異沉陷量，但分析結果各分別需要使用47支及81支直徑為1.5m之基樁，由於主樓區基地面積有限及工期因素，不能容許多部大型施工機具同時施做，另外第三層次之塊石粘土層常夾有粒徑不一之堅硬塊石，對場鑄樁之施工時將可能發生不可預期之事故進而影響工期。

3. 地質條件：根據鑽探資料顯示，塊石粘土層之滲透性甚小，其中之粘土部分遇水強度將會大幅減低，可能不能發揮設計時之承載力。而岩盤在考慮破裂性及岩心強度等因素之影響下，估計最大容許承載力可達6,000 kPa；因此選擇大口徑之沉箱基礎使荷重傳遞至岩盤，可避免基樁施工時對粘土層之擾動，且可以減少主樓區沉陷量至2公分。

本工程所使用之沉箱配置狀況如圖八所示，為增加基礎承載力並減少混凝土使用及挖方數量，分別採用直徑為5公尺及6公尺之擴座式沉箱，擴座坡度為3:1(V:H)。由於塊石粘土層之透水性甚小，沉箱開挖時地下水所將造成潛在之施工問題主要在於第二層次之粉質細砂層及岩盤之節理面間，因此決定使用傳統之豎井開挖(Open shaft mining)方法施工。



圖八 沉箱配置示意圖

地表5公尺內先開挖後，放置一45公分厚5公尺長的預鑄混凝土襯砌隔離回填土層，然後採每輪進2公尺之施工程序進行施做至岩盤。入岩後探測岩盤面之風化程度、節理面之分佈狀況，層理及岩盤間之粘土夾層分佈狀況並鑽孔至底部10公尺下之岩盤，評估岩盤之承載力並與原先設計進行比較，顯示施工完成後各沉箱基礎之容許承載力可達3500至4600 kPa(350~460t/m²)。

四、結語

俗云「他山之石可以攻錯」，如何能對高樓基礎之型式選擇出最佳之方案，是需要工程師對結構物荷重狀況、工期、地下水、施工環境及地質等條件做一全盤性之考量評估後進行分析的，另外值得注意的是，民國88年921集集地震後，基於對內陸淺層型地震之考慮，目前內政部已於同年12月29日修正了建築物耐震設計規範及解說，未來在進行結構分析時需同時考慮水平向及垂直向地震力之載重組合，勢必增加對基礎的荷重。如何提供更好的基礎型式及配置，對大地工程師來說是十分重要的課題。

參考文獻

- KATZENBACH, R., ARSIAN, U., GUTWALD, J., HOLZHAUSER, J. ET AL. (1997), Soil-Structure-Interaction of the 300m High Commerzbank in Frankfurt am Main Measurement and Numerical Studies, Proceedings Fourteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg, Vol.2, pp.1081~1084.
- KURZEME, M. AND RUSH, M.C. (1985), Deep Caisson Foundation for OUB Centre Singapore, Eighth Southeast Asian Geotechnical Conference, Kuala Lumpur, pp2-43~2-49.
- 建築物耐震設計技術規範及解說 (民國86年)，營建雜誌社。
- 混凝土工程設計規範與解說 (民國87年)，中國土木水利工程學會。
- 周忠仁、詹家賓、蘇鼎鈞(民國89年)，「樁底灌漿之回顧與探討」，土木技術第23期，第64-70頁
- 郭哲明、蔡志志、賴明雄、熊銘賢(民國74年)，「國泰人壽大樓新建工程大型H基樁施工實務簡介」，地下工程實務第3卷，第94-136頁。
- 王慶明、蔣志強、鍾建南、陳福松(民國88年)，「京華城購物休閒中心~結構設計及工法」，土木技術第15期，第73-82頁。