

H型混凝土塊擋土牆之力學行爲

黃添坤¹

關鍵詞：差異沈陷、不連續變形分析法、擋土牆、水壓力

摘要

本文提出一種以 H 型混凝土塊堆疊而成之擋土牆型式，此類擋土牆有穩定性良好、適當排水、容許大變形或差異沈陷、施工容易以及成本合宜等優點。由於 H 型混凝土塊之分離性，因此將以不連續變形分析法來分析此類型擋土牆，針對典型之 H 型混凝土塊擋土牆實例進行力學行爲之研究。結果顯示本類型擋土牆有良好之穩定性與力學行爲。另為證實分析方法於 H 型混凝土塊擋土牆之適用性，分析結果將與現地試驗及量測結果比較並加以討論。

MECHANICAL BEHAVIOR OF RETAINING WALLS WITH H-TYPE CONCRETE BLOCKS

Tien-Kuen Huang

Department of Civil Engineering
National Chung-Hsing University
Taichung, Taiwan 40227, R.O.C.

Key Words: differential settlement, discontinuous deformation analysis, retaining wall, water pressure.

ABSTRACT

A new type of retaining wall constructed with interconnected H-type concrete blocks is proposed. Advantages of this type of retaining wall include stability, proper drainage, allowance of large displacements or differential settlements, ease of constructability, and cost effectiveness. Because of the separate action of the H-type concrete blocks, a discrete element method(DDA) is used for numerical analysis of the proposed retaining wall. Some typical models of the H block retaining walls are presented to examine the mechanical behaviors of the block wall and retained soils. Calculations show that this type of retaining wall possesses desirable mechanical behavior and stability. To verify the adequacy of using DDA to analyze the H block wall, a field test has been conducted and comparisons are made between the analytical and monitoring results.

一、前 言

擋土牆是用來支撐背填土，使其不致發生滑動、翻倒甚至坍方。典型之擋土牆如重力式、鋼筋混凝土(RC)

式、加勁土式、預力地錨式以及其他方式已廣泛的使用於工程界。然而從實際經驗得知，這些現有擋土牆仍存在許多缺點。

重力式及鋼筋混凝土式屬於剛性結構，不能承受較大

¹ 國立中興大學土木工程學系副教授

之不均勻沈陷，且排水設施容易堵塞造成高水壓力及基礎土壤之飽和；加勁土壤雖容許不均勻沈陷，但欲達到良好的加勁效果，開挖及鋪築範圍須加大，且加勁材可能因長期使用而產生變質甚至斷裂；至於預力地錨式，雖然也甚具柔性，但張力構材及固定元件有腐蝕之虞，為抗拒腐蝕確保錨定效果，額外成本之支出，在所難免。

其他型式之擋土牆如漿砌卵石及蛇籠等，也常用於國內山區道路之邊坡穩定，漿砌卵石穩定邊坡之高度有限，多僅止於3公尺，且無法承受較大之變形。蛇籠雖能適應較大之變形，且排水性能良好，但鐵絲網也無法耐得長期腐蝕。

針對上述現有擋土牆之缺點，以下將提出一種以H型混凝土塊堆疊而成之擋土牆。本類型之擋土牆，其組成乃是利用兩種基本型式之H型混凝土塊交互堆疊而成，具有柔性結構優點，力學行為良好。混凝土塊以壓力及剪力方式來承受外力，可避免一般整體性混凝土擋土牆可能產生張力裂縫之困擾。在雨量充沛地區，可適當調整混凝土塊之排列空隙，以達充分排水效果，且可視實際需要，調整混凝土塊之排列方式，以求美好的外觀。

本文先就H型混凝土塊擋土牆作一介紹，接著針對混凝土塊之分離性，將利用不連續變形分析(discontinuous deformation analysis)模式來進行本類型擋土牆之力學行為研究。不連續變形分析模式能適切的模擬分離塊體之運動機制及塊體間之摩擦特性。接著針對典型的H型混凝土塊擋土牆實例進行研究分析，另為證實分析方法於H型混凝土塊擋土牆之適用性，現地測試與分析結果將相互比較並加以討論。

二、H型混凝土塊擋土牆

本類型擋土牆使用兩種基本型式(類型I及II)之混凝土塊(見圖1及圖2)，一種典型的堆疊型式如圖3所示。同一層類型II混凝土塊，與其相鄰之塊體具有兩個方向之嵌合，如圖4所示，而類型I混凝土塊之堆疊方式僅在鄰近上下層混凝土塊體有嵌合。在多雨的地區，可沿牆面之水平方向在同層類型I之混凝土塊調整排列間隙，以達充分排水效果。

本類型擋土牆為巨觀性柔性結構，能容許較大變形及不均勻沈陷，受背填土或其他外力作用下，能有效的經由壓力及剪力形式來傳遞應力，可消除一般整體性混凝土擋土牆易形成張力裂縫之困擾，因此，混凝土塊內無須設置鋼筋。由於具全面性排水效果，無須另設排水系統，且背填土材料之工程品質要求也較不嚴格。此外，混凝土塊沿著牆斷面有多種變化尺寸可加以利用，對於設計及施工之需求甚具彈性，而預留於牆面之混凝土塊凹槽，更可利用作為植生，加強景觀效果。

實際上，類似塊體連結式構造物多年來也使用於土木工程建設中，如消波塊等，但多作為河堤或海堤之穩固設施，較少應用於邊坡穩定。至於堡坎磚或人字型混凝土塊

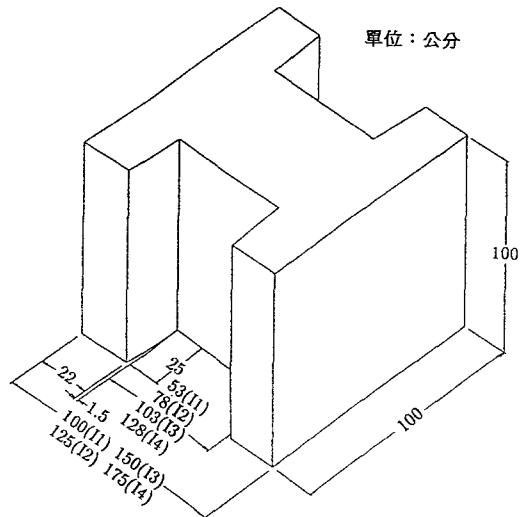


圖1 類型I混凝土塊(I 1-I 4)

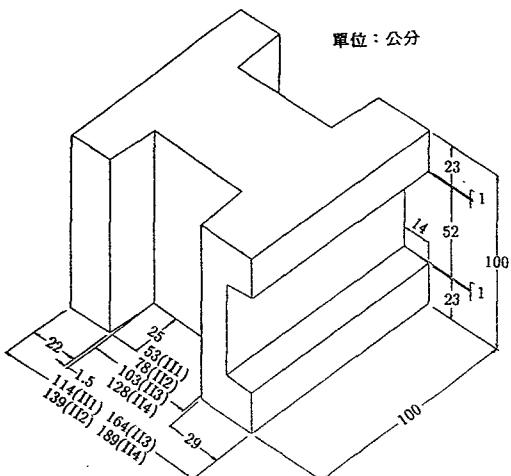


圖2 類型II混凝土塊(II 1-II 4)

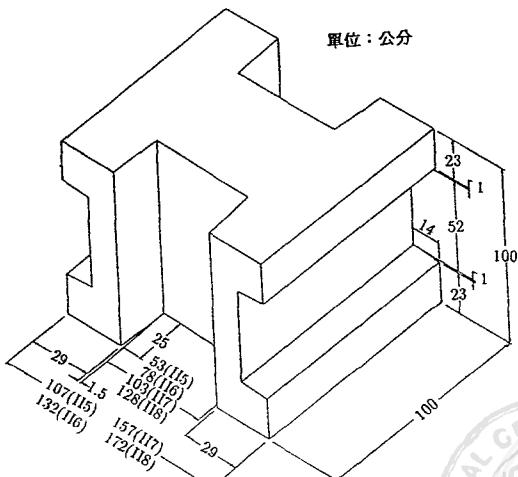


圖2 類型II混凝土塊(II 5-II 8)



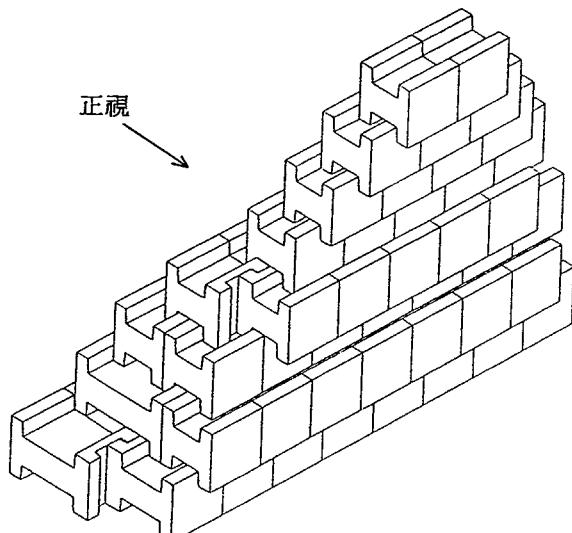


圖 3 典型 H 型混凝土塊擋土牆

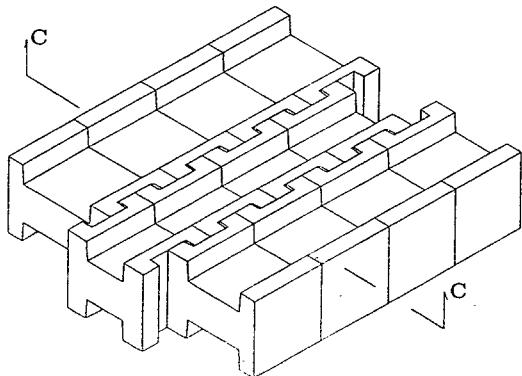


圖 4 類型 II 混凝土塊彼此嵌合方式

之護坡工程，在塊體接頭施工較為麻煩，堡坎磚護坡雖有美好之外觀，但堆高度受限且無法承受大變形及差異沈陷，人字型混凝土塊內部有埋設鋼筋，增加施作時間，且穩定邊坡效果也不甚良好。

三、不連續變形分析法

自 Cundall[1] 首先提出分離元素法以模擬塊體系統之運動以來，分離元素法即迅速發展。早期的分離元素法僅能處理剛性塊體系統，隨著後來的逐漸研究發展[2-4]，目前的分離元素法已能處理三度空間、大變形、非均質岩體、非線性岩體、節理以及岩體破裂等問題。

分離元素法係利用顯性中央差分的時段行進方式直接建立運動方程式[5]，在每一時段，由塊體接觸之侵入量及彈性接觸勁度，可求得塊體間之接觸力，將之視為外力加於運動方程式並利用數學阻尼來消除額外運動能量。發展至今的分離元素法仍無法有效處理複雜的接觸型式。此外，顯性求解方式可能無法保證在每個時段滿足系統之平衡。然而不可否認的是，分離元素法在求解岩體工程問題上有其相當的貢獻。

本文將採用不連續變形分析方法來進行 H 型混凝土塊擋土牆之力學行爲研究。不連續變形分析方法可視為分離元素法之一種，最早由石根華及 Goodman 教授[6] 所提出，用以分析塊體系統之不連續行為。雖然不連續變形分析方法及分離元素法皆用來模擬塊體系統的複雜行為，但理論上則不同，不連續變形分析方法為一隱性方法，並以各塊體變位函數作為平衡方程式之未知項。石根華博士[7] 歸納不連續變形分析方法有五大特點：(1) 完整的塊體運動機制及數值化處理，(2) 變位函數為一階，(3) 滿足內外力平衡，(4) 正確的能量損耗形式以及(5) 高計算效率。

在不連續變形分析方法中，先就實際問題進行塊體系統之建立。各相鄰塊體可容許彼此分離或滑動，但須滿足無張力及無侵入現象發生，塊體間之接觸型式可以彈簧加以模擬，並遵循莫爾—庫倫摩擦滑動準則。利用最小位能法原理可建立整體塊體系統之平衡方程式，在每一時段中，經由迭代收斂以滿足塊體間彼此無張力、侵入之要求。聯立方程之求解係基於圖解方式，這是一種非常有效的計算方法，因在求解聯立方程式之矩陣分解過程中，僅就非零元素加以儲存及運算，有別於變寬帶矩陣之求解方式，更加快速有效。此外，完整的塊體運動機制及數值方法之建立，可處理塊體間複雜的接觸行為。以下就不連續變形分析方法作一簡要敘述，細節部分可參閱相關文獻[7,8]。

3.1 塊體變形

假設塊體內部為常應力分佈，則二維度空間系統內，塊體之內部任意點 (x, y) 之水平、垂直變位， u 及 v ，可以下式表之。

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix}_i = [T]_i \{D\}_i \quad (1)$$

其中

$$[T]_i =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -(y - y_0) & (x - x_0) & 0 & (y - y_0)/2 \\ 0 & 1 & (x - x_0) & 0 & (y - y_0) & (x - x_0)/2 \end{bmatrix}_i \quad (2)$$

$$\{D\}_i^T = \{u_0 \ v_0 \ r_0 \ \epsilon_x \ \epsilon_y \ \gamma_{xy}\}_i \quad (3)$$

塊體 i 之變位函數 $\{D\}_i$ 中， (u_0, v_0) 為塊體 i 質心位置 (x_0, y_0) 之平面剛體移動量， r_0 為質心位置之平面剛體轉動量， ϵ_x, ϵ_y 及 γ_{xy} 則分別為塊體 i 之水平、垂直軸應變及剪應變分量。

3.2 塊體系統之形成

在不連續變形分析中，塊體系統可由不連續節理面切割而成，利用截取方式形成塊體系統。步驟歸納如下：



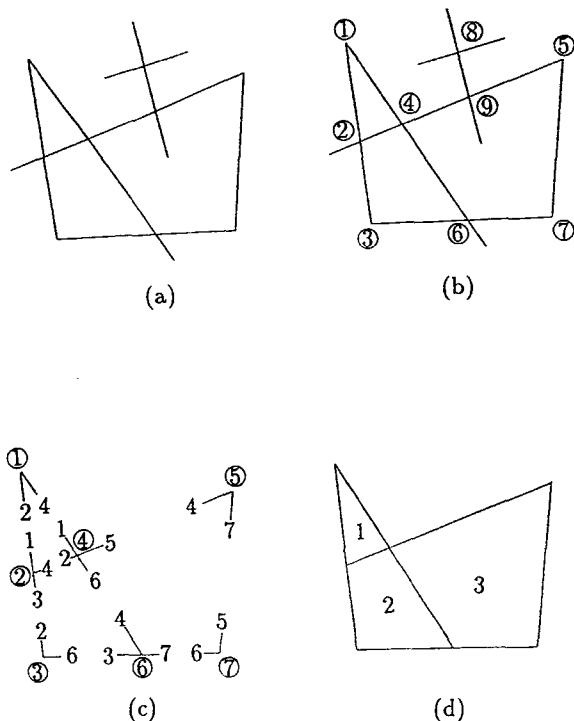


圖 5 塊體系統建立步驟實例

- (a) 輸入節理之端點座標值。
- (b) 計算節理相交位置。
- (c) 去除不可能形成獨立塊體之節理及相交點。
- (d) 進行獨立塊體之尋求，以建立整體之塊體系統。

圖 5 所示範例，即依上述步驟以形成塊體系統。

3.3 平衡方程式之建立

利用前述式(1)中變位函數 $\{D\}$ 可得知塊體之變形，針對塊體內應力、自重、外力、慣性效應、接觸面彈簧之變形以及變位束制等可求得與各塊體變位函數 $\{D\}$ 相關之總位能，再利用最小位能法原理，建立塊體系統之平衡方程式。其形式與一般有限元素分析方法類同。

$$[K]\{D\} = \{F\} \quad (4)$$

其中 $[K]$ 、 $\{D\}$ 及 $\{F\}$ 分別為塊體系統之勁度矩陣、變位函數矩陣以及等值外力矩陣。

3.4 塊體系統運動學

在不連續變形分析方法中，塊體之接觸力由接觸彈簧來模擬，每個接觸依其接觸狀態而加不同組之彈簧以符合物理束制：(1) 分離接觸—不須加任何接觸彈簧；(2) 鎖定接觸—須施加一對法向及切向接觸彈簧；(3) 滑動接觸—須施加一法向接觸彈簧及摩擦力之作用。開閉迭代為各接觸持續加減彈簧之過程，直到連續兩開閉迭代所有接觸之接觸狀態不改變為止。接觸面彈簧勁度，一般設為 $10E$ 至 $1000E$ (E 為塊體勁度) 間，以保證接觸位置之變形介於整體變形 10^{-3} 至 10^{-4} 之間。不連續變形分析方法之求解步驟如圖 6 所示[8]。

以下利用不連續變形分析方法進行 H 型混凝土塊擋土牆力學行為之研究，係依據原有不連續變形分析方法之電腦程式版本，並考慮實際工程分析之需要，進行如下之修正：

- (a) 接觸面容許不同摩擦角、凝聚力及張力強度之存在。
- (b) 限定塊體之最大轉動範圍以控制剛體轉動之線性誤差。
- (c) 改進複雜角隅接觸方式之判斷。
- (d) 增加重新啓動功能。
- (e) 結合商用繪圖系統進行資料處理。

其中 (b) 項為控制塊體大旋轉所造成自由膨脹之誤差。而 (c) 項複雜角隅接觸方式之判斷，係針對複雜接觸角隅鄰近不同節理面之摩擦、凝聚及張力效應特性加以綜合考慮，以決定適當的接觸角隅力學行為。前述係參閱葛德治博士論文[10] 加以修正，所有上述修正已完成且併入原有 DDA 程式中。

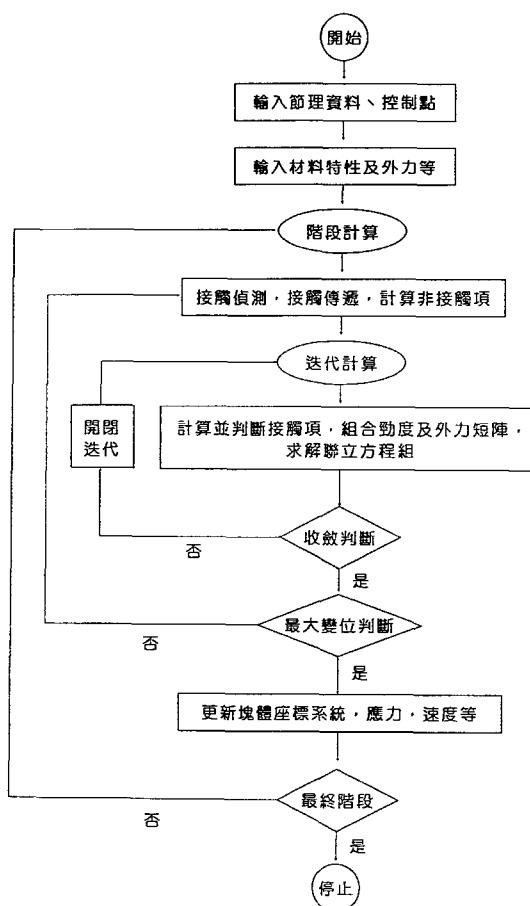


圖 6 不連續變形分析方法流程圖

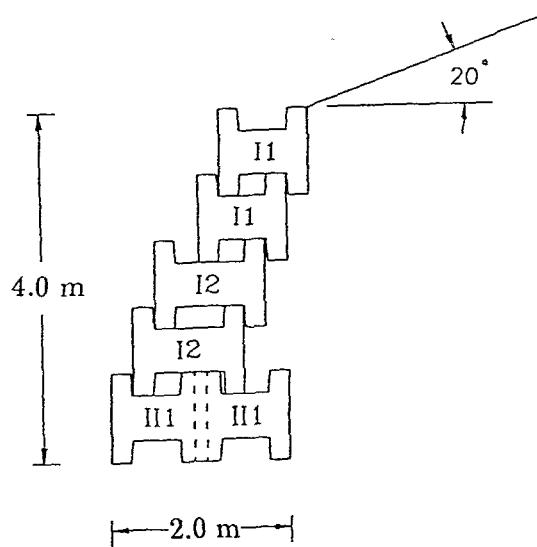


圖 7 4m 高 H 型混凝土塊擋土牆

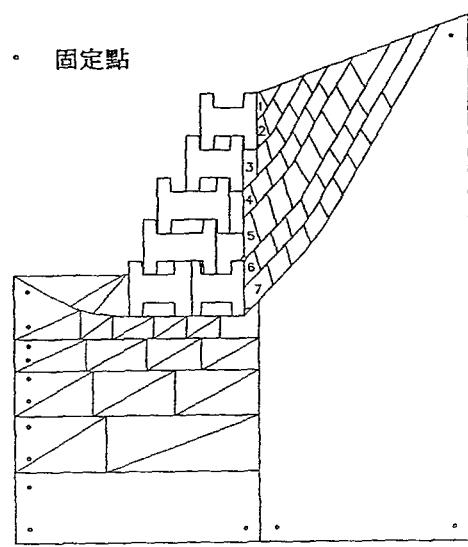


圖 10 4m 高 H 型混凝土塊擋土牆塊體系統

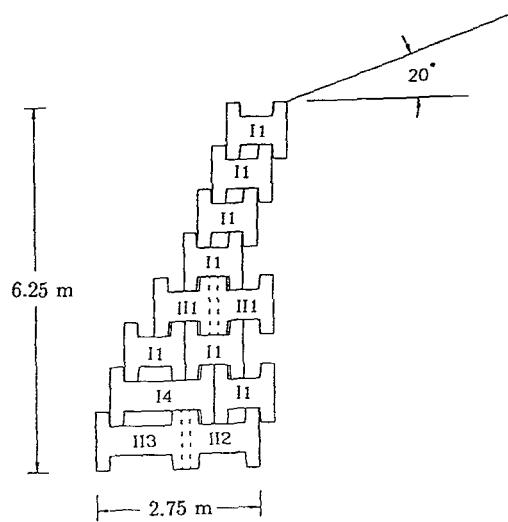


圖 8 6.25m 高 H 型混凝土塊擋土牆

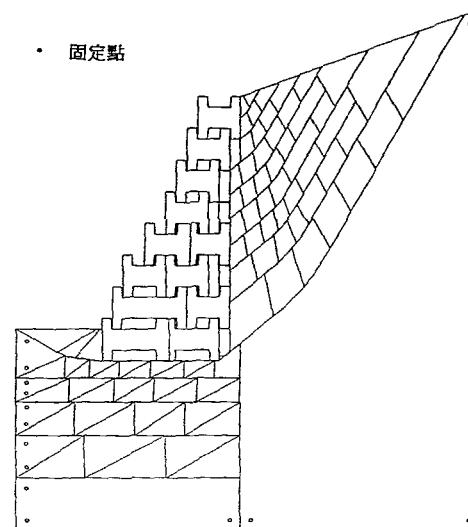


圖 11 6.25m 高 H 型混凝土塊擋土牆塊體系統

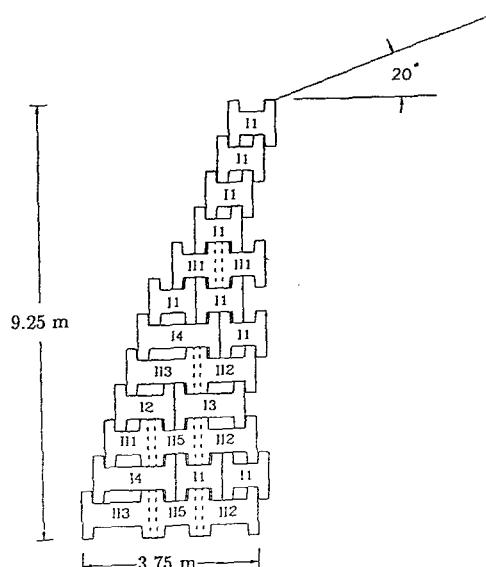


圖 9 9.25m 高 H 型混凝土塊擋土牆

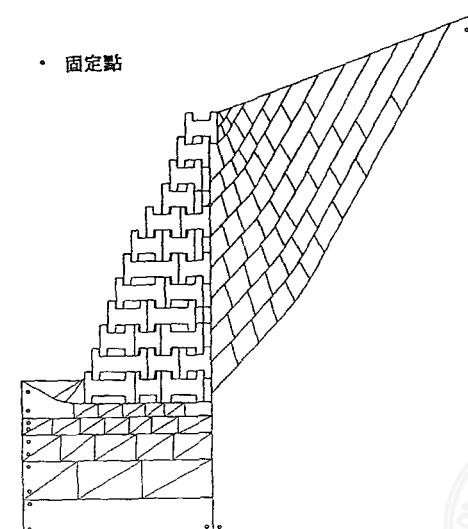


圖 12 9.25m 高 H 型混凝土塊擋土牆塊體系統



四、實例研究

為瞭解 H 型混凝土塊擋土牆之力學行為，將就高度分別為 4m、6.25m 及 9.25m 三個實例進行研究。所使用背填土及混凝土特性綜合如下：

(1) 混凝土塊

單位重	23 kN/m^3
彈性模數	$2.1 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$
包生比	0.15
抗壓強度	210 kg/cm^2

(2) 土壤

單位重	18 kN/m^3
彈性模數	$2.1 \times 10^4 \text{ kN/m}^2$
包生比	0.25
摩擦角	30°
凝聚力	0

另外混凝土塊間以及背填土與混凝土塊間摩擦角設為 20° ，而接觸彈簧勁度值為鄰近塊體彈性模數之 100 倍。圖 7-9 所示為三個 H 型混凝土塊擋土牆研究實例之斷面圖，在上層部分所選用多為塊體個數較少之類型 I 混凝土塊，而在下層位置，則以為數較多之類型 I 或 II 之混凝土塊堆疊而成，用來抵擋來自背填土下半部較大之水平推力。各層混凝土塊之堆疊方式，主要在於能夠提供較多有效的剪力抵抗能力。

有關 H 型混凝土塊擋土牆塊體系統之建立可分為兩部分。混凝土塊部分可由每一塊體幾何形狀座標以及堆疊位置來決定整體混凝土塊之塊體系統，至於背填土部分，可利用三角楔對數螺旋 (logspiral-sandwich) 破壞機制，順著破壞滑動機制之底部以分割背填土之塊體系統。有關如何誘導擋土牆背填土三角楔對數螺旋破壞機制，可參閱相關文獻 [10,11]。由於擋土牆在沿著縱向有相當的束制效應，因此可採橫斷面之平面應變方式加以分析，而在類型 II 混凝土塊之斷面選取可參閱圖 4(C-C 剖面)。

圖 10-12 所示為利用前述方式所建立三個 H 型混凝土塊擋土牆研究實例之塊體系統。部分背填土塊體在接近擋土牆位置，有進行角隅之切除，理由是塊體間尖銳角隅之接觸，將須要額外之能量以約束接觸面之相對移動，如此將高估抵抗能力 [12]。另外為瞭解分離式擋土牆體之有效性，將 H 型混凝土塊擋土牆身代之以整體式混凝土塊體，而藉著前述背填土破壞機制之假設，可求得相對三個研究實例整體式混凝土塊擋土牆之塊體系統，如圖 13-15 所示。

在擋土牆適當影響範圍之土壤加以束限並假設受力狀態為平面應變下，可分析 H 型混凝土塊或整體式混凝土塊擋土牆承受背填土及混凝土塊重量作用時之力學行為。在本研究中係利用 HP 9000-720 系列工作站進行長時段的迭代過程分析，經歷適量之移動變形，以期能在牆身及背填土產生足夠之摩擦作用，進而探討擋土牆主動狀態下之力學行為。以 4m 高之 H 型混凝土塊擋土牆為例，背填土作用於牆體之水平應力相對於牆趾水平移動之關係如圖 16

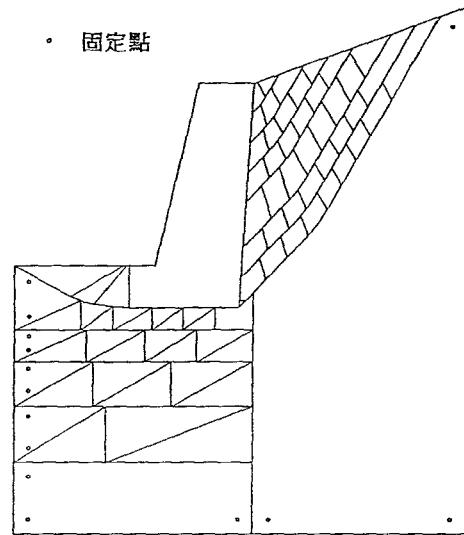


圖 13 4m 高整體式混凝土塊擋土牆塊體系統

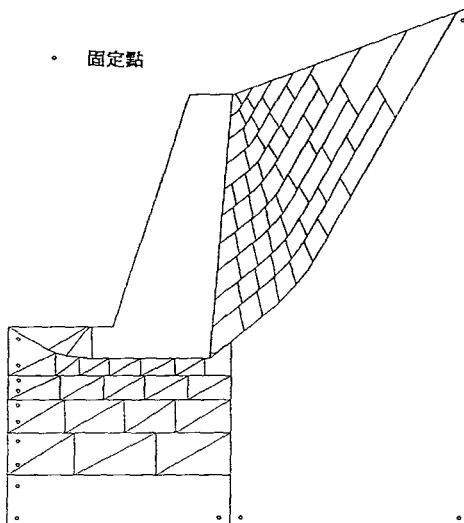


圖 14 6.25m 高整體式混凝土塊擋土牆塊體系統

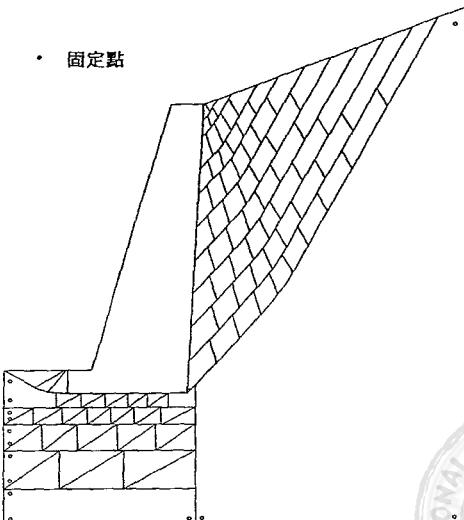


圖 15 9.25m 高整體式混凝土塊擋土牆塊體系統



表 1 混凝土塊平均最大應力值統計表

研究實例	壓應力	拉應力	剪應力
4m	47.7	0	25.4
6.25m	117.3	0	47.3
9.25m	132.2	0	52.5
設計值	9270.5	927.1	412.3

單位：kPa

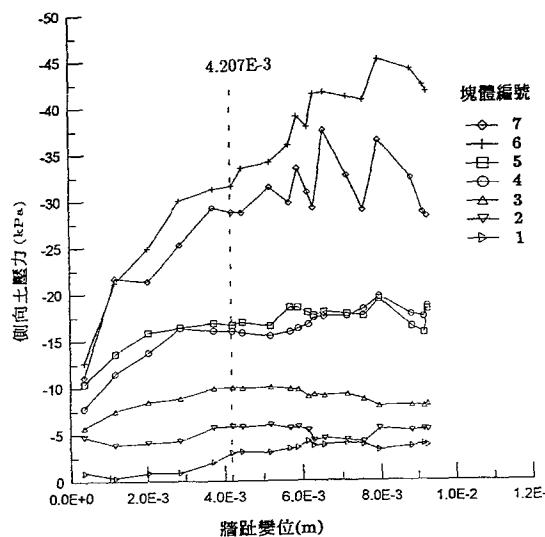


圖 16 4m 高 H 型混凝土塊擋土牆側向土壓力與牆趾變位關係圖

所示，而相應於圖 16 內所示塊體編號可參閱圖 10 之 4m 高 H 型混凝土塊擋土牆塊體系統。由圖 16 結果顯示，為達到主動狀態，擋土牆下部土壤較上部土壤有較大之移動量，而由圖 16 也可用以估算擋土牆主動狀態之到達階段以作進一步探討。其他擋土牆之主動狀態也可依類似前述背填土水平應力隨著牆趾移動之發展情形而加以評估。

針對三個擋土牆研究實例，主動狀態時背填土水平土壓力以及擋土牆底部土壓力之分佈情形分別如圖 17-19 及圖 20-22 所示。另外依庫倫主動土壓力 (K_a) 及靜止土壓力 (K_o) 理論所得結果也繪於圖 17-19 內。而有關 H 型混凝土塊擋土牆之混凝土塊受力情形，在三個研究實例中所有塊體承受平均最大應力值，其計算結果如表 1 所示，設計值亦附於表 1 內。綜合分析結果，討論如下：

- (1) 整體式混凝土塊擋土牆牆背土壓力之分佈有拱化作用現象，相同之論點及試驗結果曾被證實[13]。
- (2) H 型混凝土塊擋土牆牆背土壓力之作用並無明顯減少，但合力位置較低，有助於傾倒模式之穩定。
- (3) 整體式混凝土塊擋土牆底部土壓力之分佈，相較於 H 型混凝土塊分離式牆身，在趾部有較高之應力集中現象。
- (4) 在 H 型混凝土塊擋土牆內之混凝土塊承受平均最

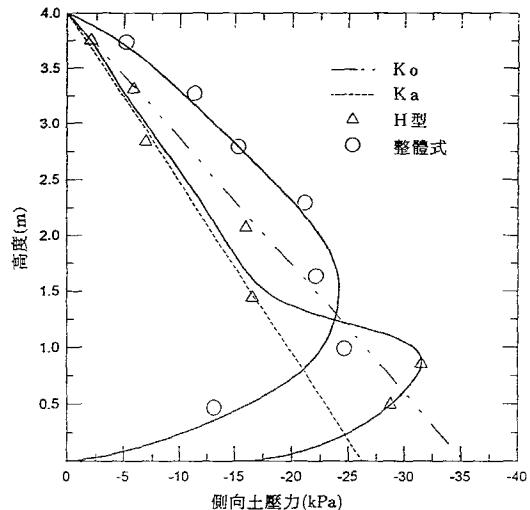


圖 17 4m 高擋土牆側向土壓力分佈

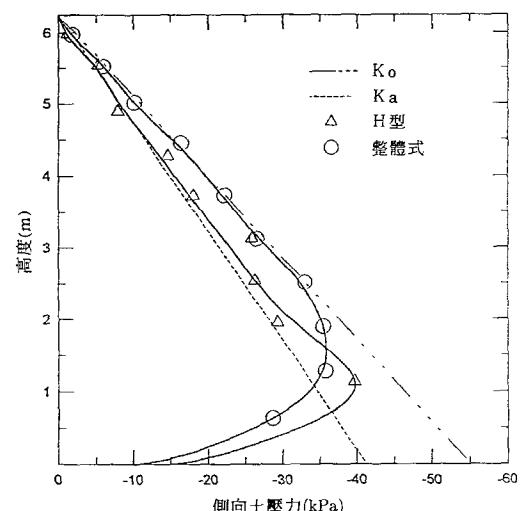


圖 18 6.25m 高擋土牆側向土壓力分佈

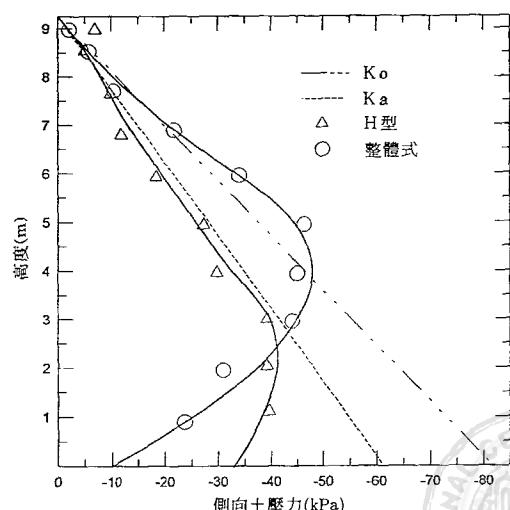
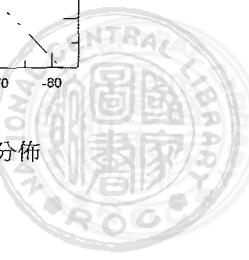


圖 19 9.25m 高擋土牆側向土壓力分佈



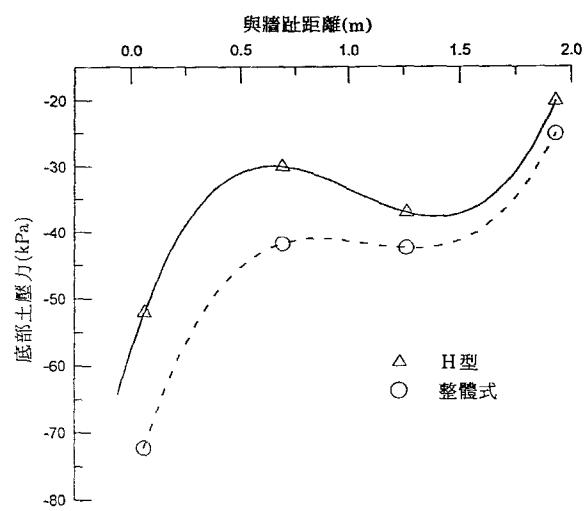


圖 20 4m 高擋土牆底部土壓力分佈

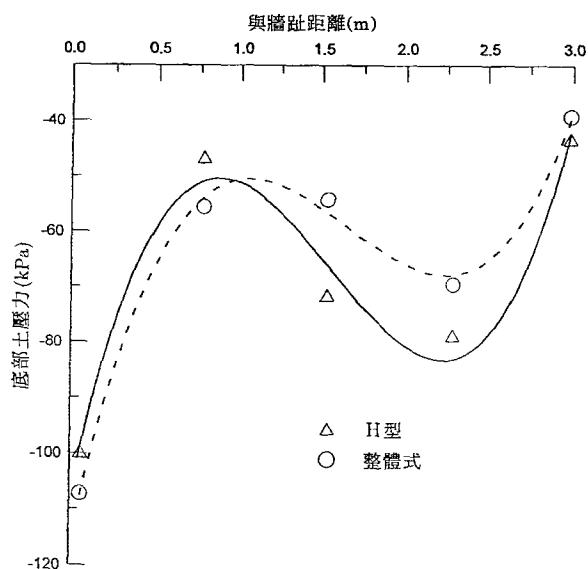


圖 21 6.25m 高擋土牆底部土壓力分佈

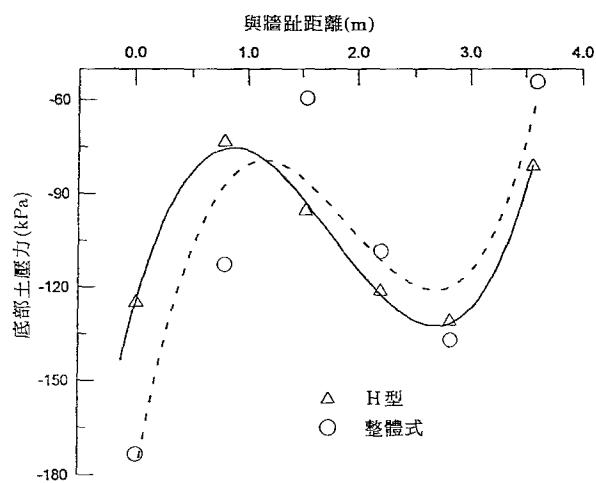


圖 22 9.25m 高擋土牆底部土壓力分佈

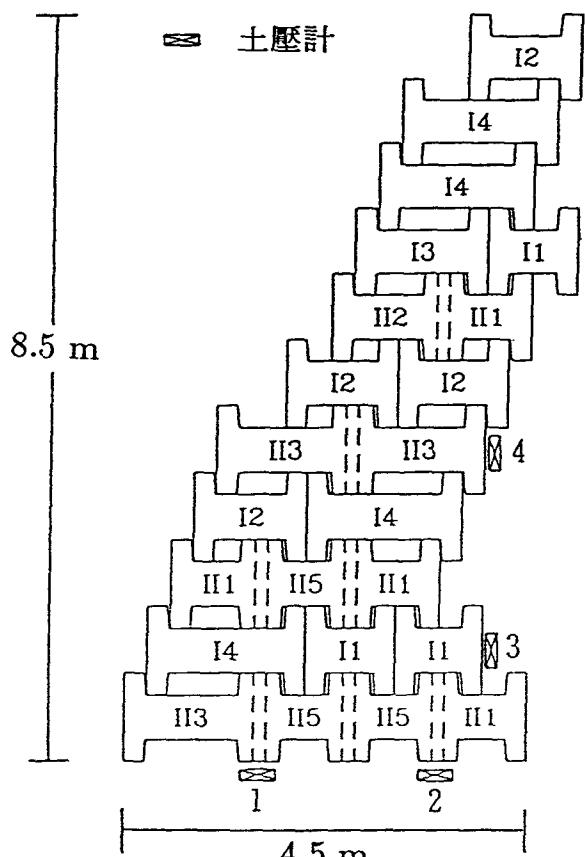


圖 23 現地測試 H 型混凝土塊擋土牆

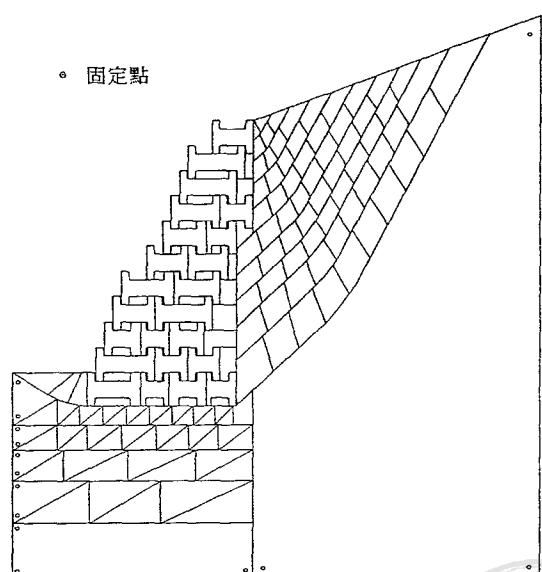


圖 24 現地測試 H 型混凝土塊擋土牆塊體系統

CENTRAL LIBRARY
NATIONAL CHIANG MING JANG UNIVERSITY

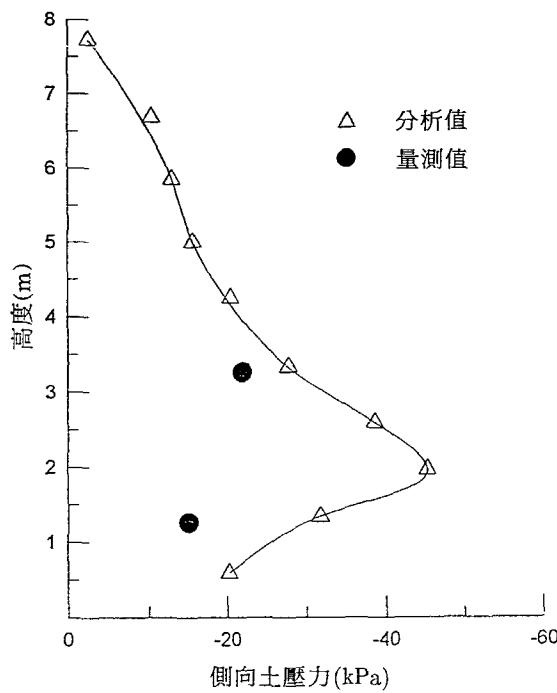


圖 25 現地測試 H 型混凝土塊擋土牆側向土壓力分佈

大應力值，並無張力現象發生，且所受剪應力、壓應力值，也遠低於設計值，足見分離式混凝土塊牆身有良好之力學行爲。

五、現地測試

為確認不連續變形分析方法於 H 型混凝土塊擋土牆之適用性，以下進行現地測試及量測作業。測試地點位於新中橫 139K+400 路段，構築長 35m 高 8.5m 之 H 型混凝土塊擋土牆，擋土牆身混凝土塊排列方式之斷面如圖 23 所示，並埋設 4 組土壓計。背填土依現地取樣加以測試結果：摩擦角 = 28° ，凝聚力 =0，單位重 = 18 kN/m^3 ，彈性模數 = $1.92 \times 10^4 \text{ kN/m}^2$ ，並假設包生比 =0.25。施工分三階段 H 型混凝土塊堆疊高度進行背填土回填壓實作業。塊體系統之分割方式如圖 24 所示，由材料特性進行主動狀態之分析，結果如圖 25-26 所示，量測結果亦示於前圖內。整體而言，不連續變形分析方法能適切地反應 H 型混凝土塊擋土牆之力學行爲，至於牆背靠近底部土壓力量測值有略微偏低趨勢，就實際工程特性而言，欲在深層位置發揮完整的土壓力作用，可能有所困難。

六、結論

本文中提出一種新型擋土牆，就其在實際工程應用及設計上之優點加以探討。此類型擋土牆提供適當的排水方式、能承受差異沈陷、發展良好的力學傳遞效應、成本合宜以及施工容易。並以不連續變形分析方法進行三種典型

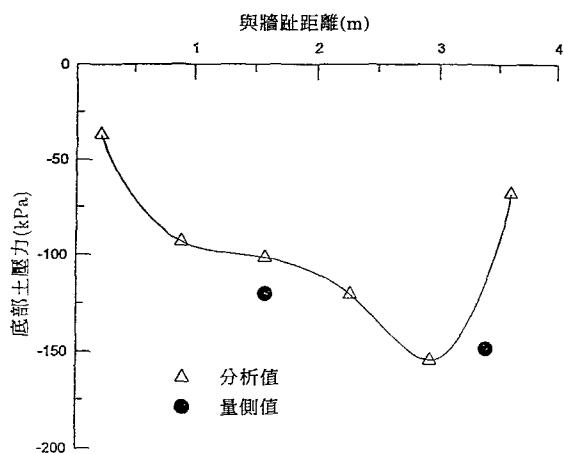


圖 26 現地測試 H 型混凝土塊擋土牆底部土壓力分佈

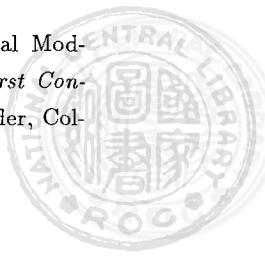
H 型混凝土塊擋土牆力學行爲之研究，結果顯示此類型擋土牆能提供良好之穩定性及力學行爲。經由現地測試及驗證，H 型混凝土塊擋土牆適合實際工程之推廣應用。

誌謝

本研究及現地測試工作，承蒙行政院國家科學委員會、中興大學支援研究經費以及台灣省公路局二區工程處第七工務段提撥工程經費，謹誌謝意。

參考文獻

- Cundall, P.A., "A Computer Model for Simulating Progressive, Large-Scale Movements in Blocky Rock Systems," *Symposium of International Society of Rock Mechanics*, Nancy, France, Vol. II-8, pp. 11-18 (1971).
- Cundall, P.A., "UDEC - A Generalized Discrete Element Program for Modelling Jointed Rock Masses," Final Technical Report to European Research Office, US Army, Contract DAJA 37-79-C-0548, NTIS order No. AD-A087 610/2 (1980).
- Cundall, P.A. and R.D. Hart, "Development of Generalized 2-D and 3-D Discrete Element Programs for Modelling Jointed Rock," Itasca Consulting Group, Misc. Paper SL-85-1, US Army Corps of Engineers (1980).
- Lemos, J.V. and L.J. Lorig, "Hydromechanical Modelling of Jointed Rock Masses Using Discrete Element Method," *Proceedings of First Conference on the Mechanics of Jointed and Faulted Rock*, Vienna, Austria, pp. 605-612 (1990).
- Cundall, P.A. and R.D. Hart, "Numerical Modelling of Discontinua," *Proceedings of First Conference on Discrete Element Method*, Bolder, Colorado, pp. 1-17 (1989).



6. Shi, G.H. and R.E. Goodman, "Two Dimensional Discontinuous Deformation Analysis," *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 9, No. 6, pp. 541-556 (1985).
7. Shi, G.H., "Discontinuous Deformation Analysis : A New Numerical Model for the Static and Dynamics of Block Systems," Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of California at Berkeley, California (1988).
8. Shi, G.H., *Block System Modelling by Discontinuous Deformation Analysis*, Computational Mechanics Publication, Southampton, UK (1993).
9. Chen, W.F., *Limit Analysis and Soil Plasticity*, Elsevier, Amsterdam (1975).
10. Ke, T.C., "Simulated Testing of Two Dimensional Heterogeneous and Discontinuous Rock Masses Using Discontinuous Deformation Analysis," Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of California at Berkeley, California (1993).
- Dissertation, Department of Civil Engineering, University of California at Berkeley, California (1993).
11. Chen, W.F. and X. Liu, *Limit Analysis in Soil Mechanics*, Elsevier, Amsterdam (1990).
12. Handy, R.L., "The Arch in Soil Arching," *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 111, No. 3, pp. 302-318 (1983).
13. Chen, W.F. and A.P. Pan, "Finite Element and Finite Block Methods in Geomechanics," Report No. CE-STR-90-20, School of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette, Indiana (1990).

84 年 10 月 9 日	收稿
85 年 1 月 31 日	修改
85 年 2 月 6 日	接受

