計算機模擬顆粒堆積方法改善策略之研究

林世洪

南亞技術學院土木與環境工程系

摘要

近年來以計算機模擬顆粒力學性質及行為，已逐漸發展出一條可行的研究探討路徑，可以針對具有粒狀特性行為的材料進行相關特性及行為之研究。由相關文獻中發現有相當多種不同的計算機模擬堆積方式被採用，各有其優缺點及適應條件，普遍的缺點是耗時過長，影響分析程式之實用價值。本文著眼於針對各種不同模擬堆積方式進行分析效能改善之研究，希能提升各種分析方法之實用價值。研究結果顯示，1.以動態方式進行之模擬堆積較符合實際，但所耗時間普遍較長，如能在初始排列部分盡可能的壓低總堆積高度，將大量節省模擬堆積時間，2.以靜態方式進行之模擬堆積耗時較動態方式少很多，但如精密度選擇過低時可能會有局部堆積不合理情形發生。建議以先靜後動方式進行模擬堆積，可以同時兼顧動態符合實際及靜態節省運算時間二項優點。

關鍵字: 顆粒、模擬堆積、堆積時間

Email:linsh@nanya.edu.tw

Tel:03-4361070-3306

The Study of Improvability Tactics on Computer Simulation of Particles Packing methods

Abstract

In recent years, using computer to simulate the property and behavior of the particles mechanics was developed gradually to be a research way, proposed a feasible discussion way, might take aimed at the granular characteristic behavior material to carry on the correlation characteristic and the behavior studies. The discovery has the quite many kinds of different computer simulation packing method by the correlation literature in to use, has its good and bad points and the adaptation condition respectively, many has not only carried on each kind of different simulation packing method potency and the limit of comparative analysis in the common literature. This paper focuses on under the same condition, uses the same computer to carry on the good and bad points comparison in view of each different simulation packing method, compared with the content including the packing time and the packing achievement, simultaneously discusses whether still had space of the improvement. The findings showed, 1.Carries on the simulation packing by the dynamic way to conform to the reality, but consumes the time to be generally long, also has the geometry multiple along with the particles number to increase, does not suit simulation packing the massive particles, 2.Carries on the simulation packing by the static way spend less time than the dynamic way, but when the accuracy has chosen lowly can have the partial packing unreasonable situation occurrence. The suggestion is use the static simulation packing method first, and use the dynamic packing method to modify the packing achievement, may simultaneously give dual attention to dynamic conforms to actual and the static state saves the operation time two merits.

Keywords: particle, computer simulation of packing, packing time

壹、前言

大自然中普遍存在著具有粒狀特性之材料，對其性質及行為之了解對於相關工程之規劃、設計及施工來說都是非常重要的，惟已發展相當成熟的傳統分析力學卻只能在大幅簡化架構下對顆粒堆積體巨觀行為作相當粗糙的估計。近幾年，相關研究人員已發展出相當多有關粒狀材料性質及行為特性之探討研究程式，開闢出一條針對具有粒狀特性之材料的可行路徑，惟相關程式普遍存在耗時過長之缺點，導致後續之研究很難進行或是無法持續進行，造成研究工作之瓶頸。因此已有部分學者開始研究是否能針對各種程式耗時過長之缺點加以改善，本文亦著眼於此，將所蒐集到相關文獻中的分析方法加以研究探討，提出改善之可行方案，並以相同條件比較改善前後之分析效率，為後續研究之基礎。

貳、堆積方法

由於在以計算機進行各種顆粒堆積體相關靜動態性質及行為之探討工作前，必須先建立顆粒堆積體中各顆粒之所有基本數值資料，例如顆粒堆積體中各中心點空間座標、顆粒粒徑參數、形狀參數等，而由相關文獻中所用的方法基本上可區分為二大類：第一大類係利用光學攝影方法擷取實際顆粒堆積成果，再將各顆粒之空間座標予以數值化，此類方式僅適用二維顆粒之堆積，由於後續處理較麻煩，相關文獻中已不復見，本文亦不採用。第二大類則直接採用電子計算機進行顆粒堆積模擬，由相關文獻中所蒐集到的各種模擬顆粒堆積方法進行比較整理，大致上有五種方式：1. 隨機散佈堆積演算法[1]，2.支援盤搜尋堆積演算法[4] ，3. 隨機霣降堆積演算法[5]， 4.隨機散佈霣降堆積演算法[6]，及 5.隨機搜尋堆積演算法[2,3]，此五種堆積演算法各有其特點，茲將各種文獻中方法之特性簡要敘述如下：

1.隨機散佈堆積法

此演算法之立論基礎為顆粒係依隨機原則散佈於堆積空間中，因此堆積方式係依序以隨機方式決定各顆粒之座標位置，若未與任何先前所堆積之顆粒重疊，則該顆粒之位置即可確定。但若與先前所堆積之任一顆粒重疊，則重新以隨機方式決定該顆粒新座標，再判斷是否與先前所堆積之顆粒重疊，依次進行，直至找到完全未與先前所堆積顆粒重疊之座標位置為止。循此隨機散佈、重疊判斷及重選座標步驟反覆持續進行，直至完成所有顆粒之堆積。

此種堆積方法可以應用在隨機散佈型式之複合材料初始顆粒位置決定之用，亦可進一步作為初始堆積，再集體向下掉落完成緊密堆積體，圖 1 為文獻上之堆積過程[1] ，圖 2 為本文模仿此法所進行之類多邊形顆粒堆積[2,3]。研究結果顯示此法較適合於顆粒分布疏鬆之複合材料之模擬堆積，優點是程式撰寫相當容易，當顆粒較少時，

所花費的時間可以很少；但當顆粒數較多且堆積較緊密時，則因尋找可放置位置困難度成倍數增加，因此所花費的堆積時間陡增；而若所提供之堆積空間較小時，常因新顆粒尋找可放置空間困難而耗費龐大的計算時間，甚至始終無法完成堆積工作，造成使用時的困擾。另外，由於此法為靜態堆積方法，並未考慮重力因素，若所需之堆積成果必須包含重力之效應，則須再以實降方式進一步處理。

2.支援盤搜尋堆積演算法

此演算法之堆積方式為當要將新顆粒放入堆積空間時，先自堆積空間中任取一已堆積顆粒為參考顆粒並搜尋周圍顆粒之相關資料，以此資料沿參考顆粒周界尋找放置新顆粒之可能位置，再檢核是否完全未與其他已堆積顆粒重疊，逐步完成所有顆粒之堆積。由於此法係以二維圓形顆粒為基礎所建立的，因此較適合於圓形顆粒，如圖 3 之支援盤搜尋堆積成果圖[4]。惟此堆積演算法為平面堆積，並未考慮重力因素及邊界問題，實用範圍較小。其特點為屬於靜態堆積，所花費之直接堆積時間較動態堆積少，但當顆粒數較多時，因計算機無法如人工方式進行直接判斷，本法會有較多時間是浪費在尋找可堆積位置上。另外此法亦很難應用至圓形以外之顆粒，發展至三維顆粒之可行性不高，本文不建議持續研究此一方法。

3.隨機實降堆積法

此演算法最主要係針對隨機散佈靜態堆積時，常因空間問題而缺乏堆積效率所另行建立之方法。此法採用顆粒整齊排列以減少初步堆積時間，再同時實降落下堆積。其作法首先將所有顆粒整齊排列在堆積空間及其上方，相鄰兩顆粒中心之距離為所有顆粒中最大顆粒之粒徑，各顆粒之大小、形狀、方向則仍以隨機方式決定，再同時如下雨般同時落下堆積。當顆粒與顆粒接觸時，則依顆粒動態碰撞準則決定各顆粒下一時間步階之座標位置，直至所有顆粒靜止或幾乎沒有位移時為止。由於此演算法與實際情形較為接近，堆積結果相當理想，適合後續相關研究之用，圖 4~5 為文獻中此法之堆積過程及成果[5]。此法理想上應可以縮短堆積所耗之時間，惟實際進行時發現整體堆積時間中靜態堆積所佔時間相當微小，動態堆積才是決定整體堆積所耗時間之關鍵，而實降式動態堆積時間主要決定因素在於初步堆積之總高度，此法所採用的整齊排列方式並未如預期有較明顯之堆積效率改善。此法在堆積時間上雖較部分文獻上之堆積演算法少，但實際上並不是絕對較有效率，仍有可改善之空間。1.實際模擬堆積時發現若是以相同方式處理圓形顆粒會形成串列而無法完成堆積，如圖 6 所示[3]；2.初始堆積總高度若能設法降低，則總堆積時間就會大幅降低，文獻中所用之排列方式並不是最理想的。因此如將最初顆粒排列方式改依各顆粒本身之最大粒徑為準，一方面可以避免圓形顆粒垂直位置相同而形成串列無法完成堆積之困擾，另一方面則因可以增加每一排之顆粒數目，所以顆粒初始堆積之總高度就可以降低，可再進一步縮短動態堆積時間，如圖 7 所示[3]。惟此法仍屬動態堆積，實用時整體所耗堆積時間相當可觀，再者，如何決定動態堆積時間也是值得進一步探討的問題。

4. 隨機散佈二段式實降堆積

此法先以隨機散佈方式決定顆粒之相關參數，次將所有顆粒以霣降方式堆成較緊密之堆積，圖 8 中為圓形顆粒之堆積過程[5]，圖 9 為模仿此法進行之類多邊形堆積過程[3]。此法具有堆積之緊密度佳之優點，但因其最後階段仍是動態堆積，會面臨堆積時間太長，及堆積體何時達到穩定的判斷困擾，實用上與隨機霣降堆積法差異性不大，且未求初始堆積順利，可能給予較大空間，則又可能造成總堆積高度較高而大幅增加動態堆積時間，本文仍不建議採用此法作為模擬堆積方法。

5.隨機搜尋堆積演算法

此法為本人參考相關文獻之堆積演算法所另行建立之堆積方法，主要述求點在於改以靜態堆積取代動態堆積及未來方便延伸至三度空間二方向上。此演算法之堆積流程如下，1.以隨機方式決定各顆粒之各個基本參數資料及計算顆粒面積及極慣性矩；2.依顆粒特性上下左右四方向最遠點位與中心點座標之水平及垂直距離； 3.將第一顆中心座標放置至堆積空間左下角處；4.自第二顆開始，先將顆粒中心點座標參考前一顆之中心點座標決定，X 方向貼齊左邊界，Y 方向座標為前一顆之中心點座標下降一自訂距離開始搜尋可以放置的位置(此距離實際上係由使用者依經驗自行決定的，依實際執行堆積之經驗得知此一距離大約等於前一顆粒主半徑之二倍)，如欲放置的位置與邊界或其他顆粒重疊，則水平向右移動，直到搜尋到未與其他顆粒或邊界重疊之位置；5.如果整層均搜尋不到可放置的位置，則上升一層間間距繼續步驟 4.搜尋，層間間距由使用者依精密度需求配合模擬堆積經驗選定，直至搜尋到可放置的位置為止，6.依次完成所有顆粒的堆積，圖 10 及圖 11 分別為橢圓形及類多邊形顆粒之堆積成果圖[2,3]。此法為靜態堆積，相對於動態堆積所耗時間相當少，且堆積時僅須考慮是否與表層顆粒重疊即可，所以堆積時間與堆積顆粒間之關係接近代數關係，與動態堆積方式成幾何關係大不相同。

叁、堆積法特性比較

本文以模擬實例堆積進行五種堆積演算法之實用性及堆積特性進行比較分析，主要比較項目為：1.適用顆粒外形—限制顆粒外形等於限制未來之發展性，限制越少實用性越佳；2.動靜態堆積—動態堆積需考慮顆粒位移速度、顆粒旋轉及顆粒間碰撞問題，圓形顆粒處理上較為單純，顆粒外形越複雜實用越困難，靜態堆積僅需考慮重疊問題，整體之處理較為簡單；3.堆積所耗時間—一般而言，動態堆積耗時較多，靜態堆積耗時較少，惟其中隨機散佈堆積演算法雖為靜態堆積在較稀疏堆積空間裏耗時很少，但在較緊密的堆積空間裏常因搜尋可放置位置不易而導致耗時陡增，實用上有困擾；4.堆積成果—除隨機散佈堆積演算法之外，其餘演算法堆積之成果皆相當緊密，其中支援盤堆積演算法所得結果接近圓形，屬於平面堆積，實際應用上不佳，而隨機搜尋堆積演算法會因所選取之精度稍低而致極少數顆粒不符合重力影響原則，可以修改精度方式改善；5.發展至三維顆粒之可能性—現實生活中絕大部分都是三維顆粒及三維空間問題，若所採用的方法無法發展至三維，則模擬之結果獲後續之研究探討皆無法與實際

情形相印證，實用之價值將會大打折扣。本文模擬五種堆積演算法，整理探討各演算法在實用上之特性，如表 1 所示。另外為求相互比較起見，分別以 30、60、90、120、150 及 180 顆類多邊形顆粒，進行隨機散佈霣降堆積、隨機霣降堆積及隨機搜尋霣降堆積(隨機搜尋堆積成果加上霣降程序)三種演算法之堆積耗時比較，圖 12 為隨機散佈霣降堆積 180 顆類多邊形顆粒之結果，圖 13 為隨機霣降堆積 180 顆類多邊形顆粒之結果，圖 14 為隨機搜尋霣降堆積 180 顆類多邊形顆粒之結果。四種演算法之堆積耗時比較如圖 15 所示，圖中 M-1、M-2A、M-2B、M-3 分別為隨機散佈霣降堆積、隨機霣降堆積、改良式隨機霣降堆積、隨機搜尋霣降堆積四種方法，其中進行隨機散佈霣降堆積時為求增加動態堆積時之效率，在初始堆積時給予隨機散佈之空間較小，雖然造成初始堆積時間較長，但總堆積高度可以較小，且隨著顆粒數增加，動態堆積之影響增大，隨機霣降堆積的排列方式就不見得擁有優勢，改良式隨機霣降堆積就有明顯的改善，但相較之下隨機搜尋霣降堆積演算法由於初始堆積即相當緊密，動態堆積之影響甚微，總堆積耗時明顯少很多。

肆、結論與建議

1. 動態堆積雖然與實際情形較為接近，但在實際應用時發現欲達到理想靜止狀態所耗時間接近無限大，主要在於所選之時間步階必須很小以符合動態分析精度之要求，整體堆積所需時間就隨之而大幅上升，因此選用動態分析演算法時應針對計算過程加以改善，以提高演算法之實用性。若將其發展至非圓形顆粒或是三維顆粒系統會因判斷顆粒間重疊及接觸方向等問題而大幅增加計算時間，更加深實用上之困難程度。
2. 隨機霣降堆積演算法與隨機散佈霣降堆積演算法均為動態堆積，若顆粒初始排列或散佈放置之顆粒總高度越低，動態堆積所耗時間就越少，因此若能如改良式般在初始階段壓低顆粒總高度，就可以提升演算法的實用性。
3. 靜態堆積雖與實際情形有些微差異，但相對於動態堆積有二大優勢，一是堆積所耗時間相當短，二是因無需考慮顆粒間碰撞問題，可以發展各種外形顆粒之系統。
4. 若認為動態堆積是必須的過程以符合實際，則可以以靜態之隨機搜尋堆積演算法進行第一階段堆積，取得比隨機散佈霣降堆積演算法及隨機霣降堆積演算法之初始排列低很多之初始堆積總高度，再以霣降方式進行短時間之重力作用，會大幅降低動態堆積所耗時間。
5. 實際顆粒多為三維顆粒，較二維顆粒複雜許多，即使計算機計算速度不斷提升，但若仍完全採用動態分析將因耗時過鉅而無從發展起，建議採用先靜後動之模擬堆積模式，可以大幅縮短總堆積時間，增加實用性及未來之發展性。

伍、參考文獻

1. 梁維中，王仲宇，「顆粒堆積的自動擬生程序之研究」，大學生暑期參與專題研究計劃成果報告，中央大學土木工程系，(1993)。
2. 林世洪，張大鵬，「以類多邊形顆粒數值模擬粒狀材料之堆積性質」，中國土木水利工程學刊，第十四卷，第二期，pp. 193-206，(2002)。
3. 林世洪，張大鵬，「以二維類多邊形顆粒堆積體探討粒狀材料行為」，國立台灣科技大學營建工程研究所博士論文，(2003)。
4. Cundall, Peter A. and Otto Strack, D. L., “The Development of Constitutiove Laws for Soil Using the Distinct Element Method,” *The International Conference on Numerical Methods in Geomechanics*, pp. 2-6, Aachen, April, (1979).
5. 李宗龍，盛若磐，王仲宇，「橢圓顆粒介質體運動之數值模擬」，碩士論文，中央大學土木工程研究所，中壢，(1996)。
6. 吳錦順，褚炳麟，「以個別元素法探討卵礫石堆積之力學性質」，碩士論文，中興大學土木工程研究所，台中，(1998)。

表 1 五種堆積演算法特性之比較

模擬堆積方法	比較項目				
	適用顆粒外形	動靜態堆積	堆積所耗時間	堆積成果	發展至三維可能性
隨機散佈堆積演算法	不限	靜態	少(較稀疏) 多(較緊密)	1.平面堆積	可
支援盤搜尋堆積演算法	圓形	靜態	少	1.平面堆積 2.實用性不佳	否
隨機賈降堆積演算	不限	動態	多	1.重力堆積 2.堆積成果緊密	可
隨機散佈賈降堆積演算法	不限	動態	多	1.重力堆積 2.堆積成果緊密	可
隨機搜尋堆積演算法	不限	靜態	少	1.非重力堆積 2.堆積成果緊密	可

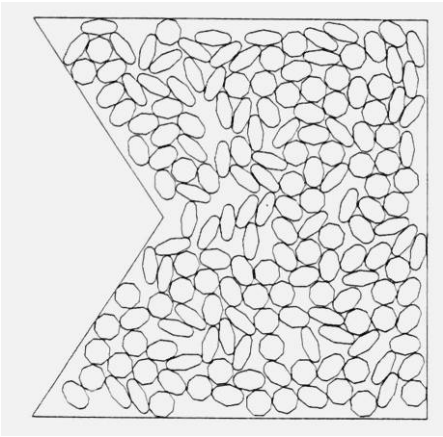

圖 1 隨機散佈堆積圖[1]

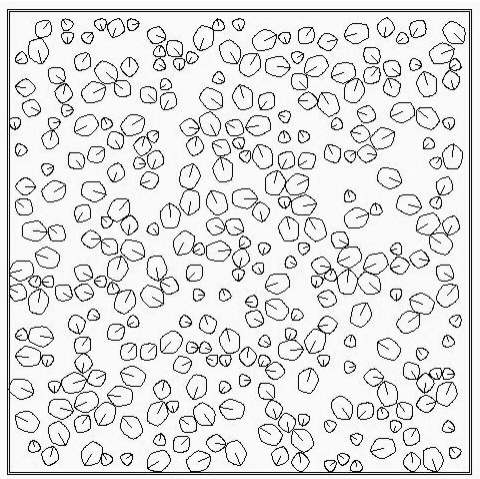

圖 2 隨機散佈堆積圖[2,3]

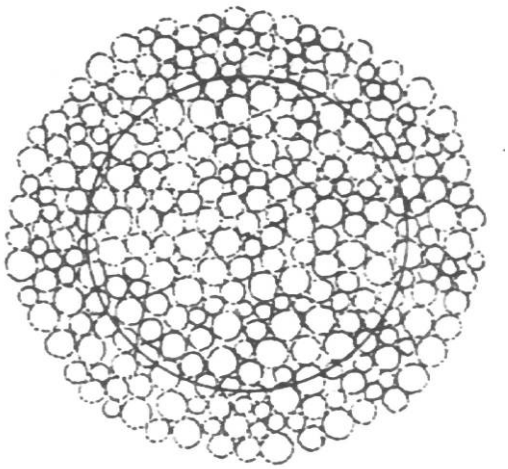

圖 3 支援盤搜尋堆積演算法[4]

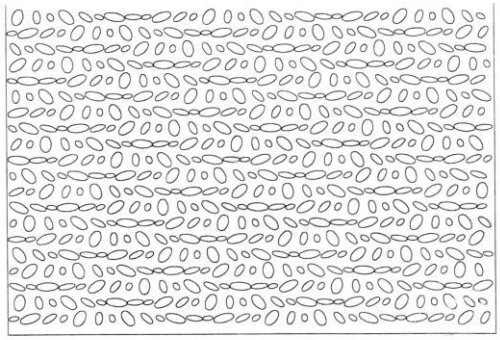

圖 4 隨機實降堆積圖[5]

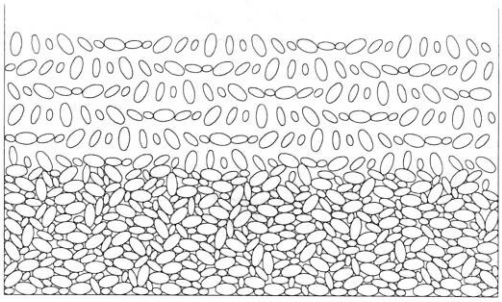

圖 5 隨機實降堆積圖[5]

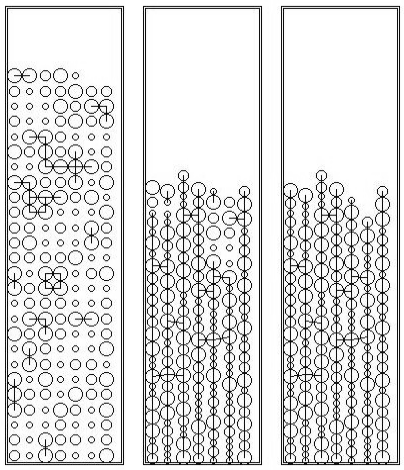

圖 6 圓形顆粒隨機霣降堆積成果圖[2,3]

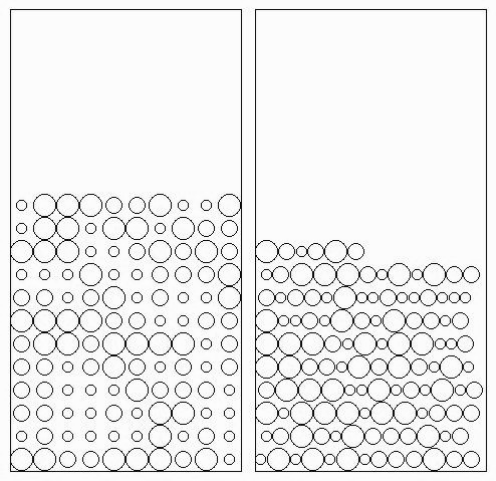

圖 7 改良式隨機霣降初始堆積圖[2,3]

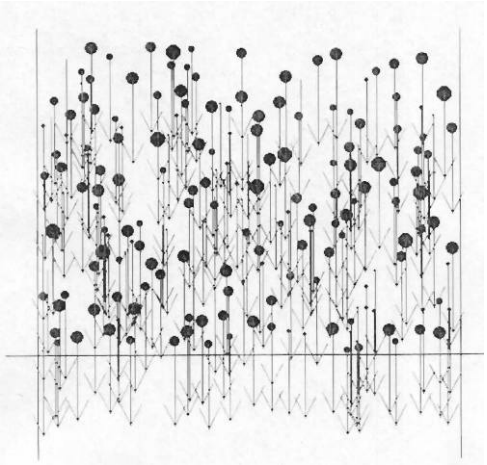

圖 8 隨機散佈霣降堆積過程圖[6]

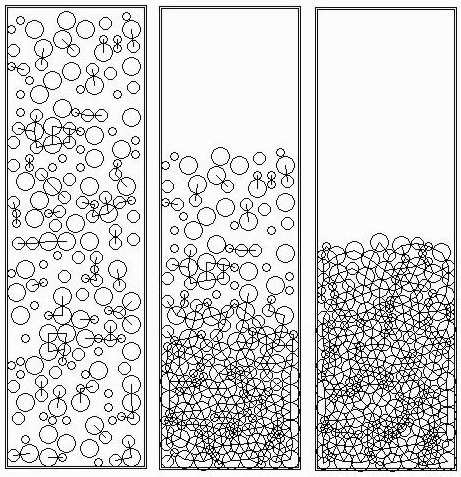

圖 9 隨機散佈霣降堆積過程圖[2,3]

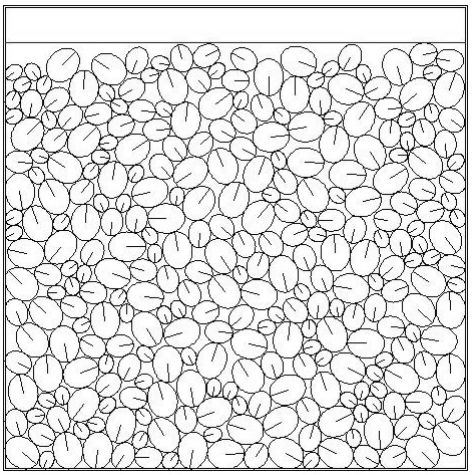

圖 10 橢圓形隨機搜尋堆積成果圖[2,3]

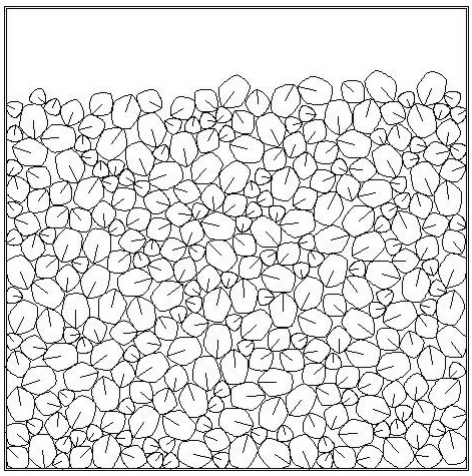

圖 11 類多邊形顆粒隨機搜尋堆積成果圖[2,3]

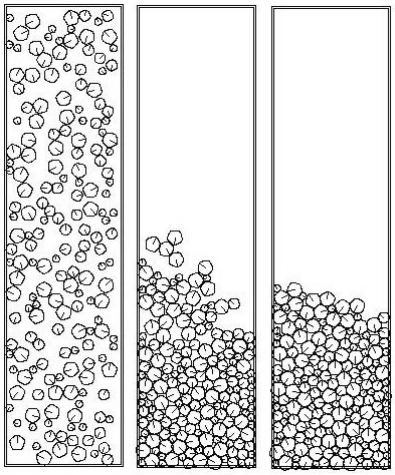

圖 12 隨機散佈實降堆積成果圖

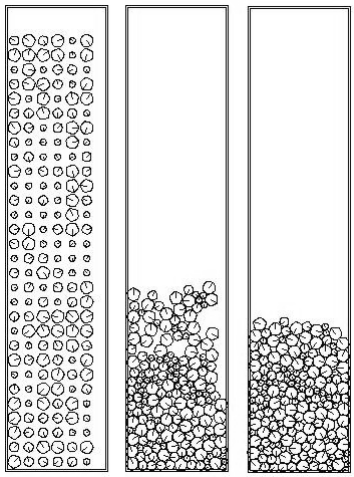

圖 13 隨機實降堆積成果圖

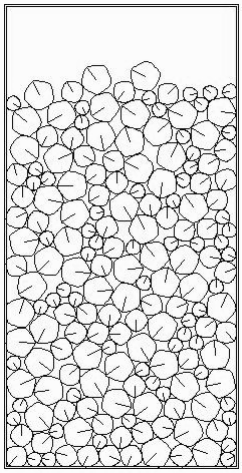

圖 14 隨機搜尋實降堆積成果圖

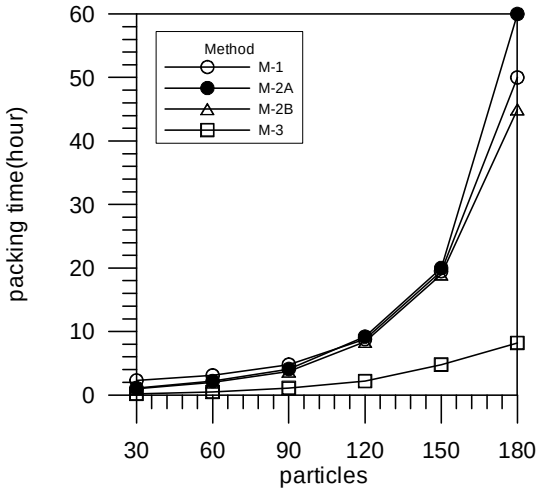

圖 15 動態堆積演算法堆積時間比較圖