

美軍聯合急造機場技術發展之研析

作者/李孟文中校

提要

- 一、美軍發展之「聯合急造機場」，簡稱JRAC計畫，將於軍事工程上運用前所未有地高度資訊化技術與裝備，使其在減少後勤支援情況下，工兵部隊能迅速完成應急機場建造作業，以因應未來軍事計畫作戰需求，達到作戰部隊快速投入戰術行動之目標。
- 二、國軍未來面對應急作戰過程中，必定遭受敵大規模空襲，其重要設施尤其攸關我空優戰力發揮之機場，將成為主要攻擊目標，如何迅速構築應急機場設施為本文探討重點。
- 三、美軍聯合急造機場技術能使工程機械修築應急機場能力上大幅精進，內容包括「急造機場決策支援系統(RACDST)」、「工程控制系統(Grade Control system)」、「快速評核工程車(RAVEN)」等，以提升美軍建造機場時的場址評估、工程機械作業等方面之運用，未來美軍在各種軍事行動戰術運用上，得以減少運輸、後勤等方面限制因素，增加敵反制之困難與複雜性。
- 四、聯合急造機場技術對我防衛作戰而言，無疑是國軍發揚空中武力之最佳解決方案；相對地，也將是進犯者的難題。

關鍵詞：聯合急造機場（JRAC），急造機場決策支援系統(RACDST)，工程控制系統(Grade Control system)

前言

美軍未來的軍事行動必須能迅速並有效投射兵力與武器到世界任何一個角落，係屬應急作戰之一部份。目前美軍在軍力規劃的策略上，須符合甚至超越以下戰力部署之目標：1.將作戰部隊必須在 10 日內部署至威脅地區。2.佈署之作戰部隊須於 30 日內對敵展開攻擊，且能在未來 30 日內準備攻擊下一個目標。以目前美軍的海運能力，受限於時效性僅能提供有限度的支援任務來滿足上述目標；然而戰略的空運行動，將成為提供未來軍力機動化的主要手段。不幸地，世界上許多地區的機場設施若非遭敵軍控領就是嚴重損壞，或者根本不存在。目前而言，美軍工兵部隊並沒有能力快速完成整修或建造一座應急機場，以符

合上述軍力部署時間表的需求^[1]。

基於上述原因與時間效用的角度，美國陸軍工兵研究發展中心（ERDC）主導一項計畫，定名為「聯合急造機場」，簡稱 JRAC。「聯合急造機場」計畫將運用軍事工程機械之新式科技與技術，使工兵部隊能順利遂行應急機場建造作業，以因應未來軍事計畫作戰需求。該計畫期望用最少資源以及裝備數量建造或修築應急機場，以大幅降低後勤運送需求。

「聯合急造機場」計畫概述

「聯合急造機場」專案始於 2002 年，為美軍工兵研發中心為期 6 年的綜合研究成果。其焦點著重於發展工程技術與作業效能的解決方案，提升美軍迅速建造或整修應急機場的技術能力。計畫中包括 2 次科技運用驗證，實施方式則利用軍事演習活動，以工兵部隊新式工程裝備與技術進行演練。第一次驗證在 2004 年，位於北卡羅萊納州的 Fort Bragg 舉行。第二次美國陸軍工兵研究發展中心於 2007 年於澳洲的 Northern Territory 舉行，並成功完成聯合急造機場的專案演習驗證任務。「聯合急造機場」專案，同時也是 2007 年美澳聯合軍演 Talisman Saber (TS07) 的主要部分。專案內容包括建造一條 1,250 公尺機場跑道、兩個佔地,平方公尺的停機坪以及相連的飛機滑行道，演習全程均運用「聯合急造機場」之先進技術，著重以降低後勤支援負荷，達到快速建造並增加系統可靠度之要求。經過 6 年研究發展階段，「聯合急造機場」專案得以成功地展現成果，未來將成為美軍快速反應作戰之利器^[2]。該計畫的主要目標有以下三點：

- 1.快速系統化之機場場址選定最佳決策。
- 2.強化機場建造生產效率。
- 3.迅速提升土壤穩定度。

聯合急造機場技術主要區分為軍事工程決策支援作業、工程機械施工資訊化管理以及地質改良穩定技術等先進科技應用，本文將逐一探討。

註¹：Travis A. Mann, Joint Rapid Airfield Construction Technology Demonstration, Engineer Research and Development Center, USACE,2009,p2.

註²：Travis A. Mann, JOINT RAPID AIRFIELD CONSTRUCTION TECHNOLOGY DEMONSTRATION, Engineer Research and Development Center, USACE,2009,p2.

軍事工程決策支援技術

JRAC 計畫最初構想，期望在美澳於 Talisman Saber (TS07)聯合演習時，對計劃中各項先進科技運用進行實兵驗證；同時也可提供澳洲軍方未來作為永久性設施使用。基於以上原因，該項計畫之驗證主要目的為：

1.急造機場規劃之地點為結合澳洲未來需求，在功能上必須符合未來澳洲軍方規劃之設計原則。

2.演習間演練之軍事行動規劃，必須能使參予演習期間之部隊與裝備，同時具有於世界其他戰術行動地區建造軍事設施的能力。

美軍 JRAC 計畫由緊急野戰機場建造之工兵任務當中，發展出「急造機場決策支援系統(Rapid Airport Construction Decision Support Toolset, RACDS T)」，如圖 1。急造機場決策支援資訊系統主要分為「建構區可行性評估模組(ASA)」、「機場設置估算 (AFL)」、「工程作業建造估算模組 (E-NOps)」等軟體模組^[3]。

一、建構區可行性評估模組(Area Suitability Assessment ,ASA)

1.建構區可行性評估模組，係藉由軟體程式依照設定之機場建造環境條件，運用分析篩選地形圖資來決定合理可行的場址，乃是選定合適地區建造機場之重要步驟，分別為：

進行選取合適地區之地形圖資程序，它經由不斷反覆的執行圖資評估，以選取合適區域，同時逐次刪除不適切區域。在執行過程中產生數值地形圖，並儲存符合建構條件之地區資料。圖 2 為建構區可行性評估模組之圖形化使用者介面預設值，以及所考量的合適地區搜尋標準，主要區分合適區域高程、交通、水文、障礙設施等資料。

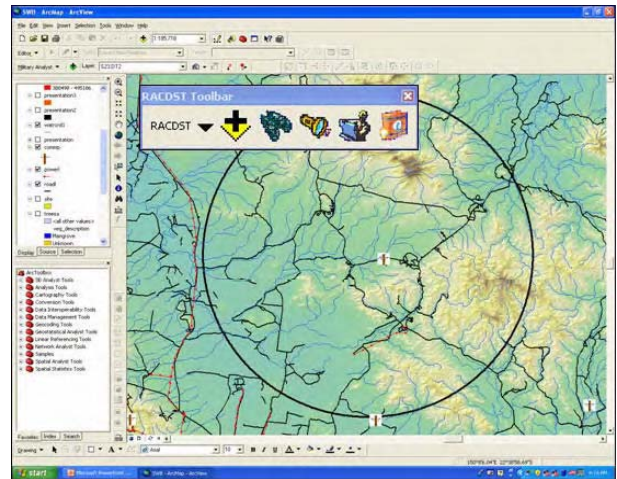


圖 1 美軍急造機場決策支援系統由地理資訊系統圖資進行規劃設計作業

參考資料：Gary L. Anderton .etc, Joint Rapid Airfield Construction 2007 Technology Demonstration, US Army Engineer Research and Development Center, July, 2008,p21.

註³：Gary L. Anderton, Ernest S. Berney, Travis A. Mann, J. Kent Newman, E. Alex Baylot, Daniel K. Miller, and Quint Mason, Joint Rapid Airfield Construction 2007 Technology Demonstration, US Army Engineer Research and Development Center, July, 2008,p21.

建構區可行性評估模組運用近似分析方式，藉由選定平緩地形與較佳交通網路，以縮小合適地區範圍，能降低搜尋時效，並找出符合標準條件之合適地區。

2.透過「建構區可行性評估模組」的分析，可以從龐大的地形圖資中，迅速尋找合適建構機場的區域，減少以往大海撈針似的搜尋與人為誤判可能性。圖 3 為建構區可行性評估模組於 JRAC 專案執行的結果，在合適地區中(黃色框內)有顏色之位置為適合建造機場的區塊。

二、機場設置模組(Airfield lay-down and cut/fill module, AFL)

機場設置模組係將機場之 3D 電腦模型以高程斷面方式呈現，運用先前「建構區可行性評估模組」執行結果，輸入「機場設置模組」後便可使用數值地形圖資之高程資料。技術人員可選擇使用機場之飛機種類與跑道標準等級，於程式模組資料庫中決定機場形式與跑道長度；同時於程式中指定機場座向(方位角)，分析高程面選擇與最大可執行挖填土方量之計算時間。圖 4 顯示「機場設置模組」使用者介面與預設值，初始分析可以運用「建構區可行性評估模組」完成分析之數值圖，提供機場位址規劃。然而預定設置機場之垂直高程資料變動，取決於挖方與填方量間差異值之最小化，理想機場位址是最小填方值。圖 5 為技術人員輸入需求參數後，顯示符合標準之機場所有可能的場址。圖 6 顯示本次演習驗證之合適地區最南端位置，程式設定在土方開挖量 10 萬立方公尺以下之理想位址，同時於涵蓋區域內，考量空軍氣象單位提供該地區風向氣

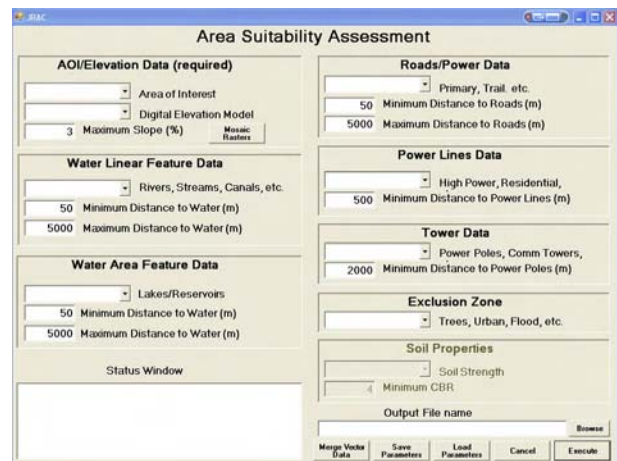


圖 2：為美軍急造機場建造所發展之建構區可行性評估模組（ASA）介面

參考資料：Gary L. Anderton .etc, Joint Rapid Airfield Construction 2007 Technology Demonstration, US Army Engineer Research and Development Center, July, 2008,p21.

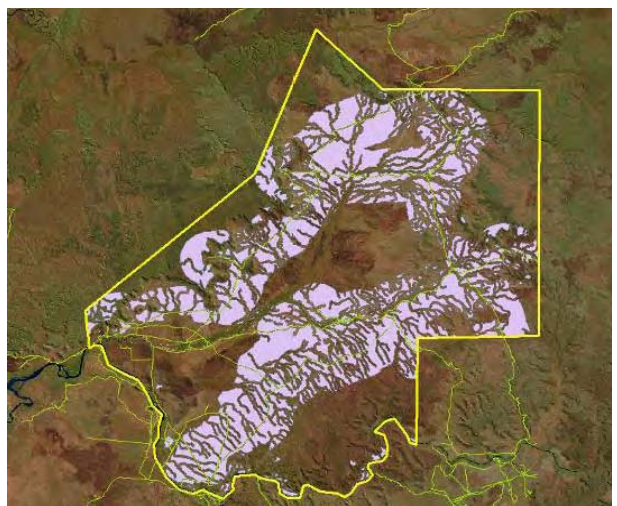


圖 3 建構區可行性評估系統（ASA）依據參數選定適合建造機場區域

參考資料：Gary L. Anderton .etc, Joint Rapid Airfield Construction 2007 Technology Demonstration, US Army Engineer Research and Development Center, July, 2008,p24.

候資料後於程式模組選定機場起始端與末端方位角 120 與 140 度之座向，並顯示這些被選定位置之經緯度。

機場設置模組於評估選定場址後，將機場模型置入其中於開挖土方量最小的情形下完成模型設置，它能精確的將 3D 機場模型導入地形曲面中評估，經由場址評估系統選定可行區域後，再將機場模型以轉方位角的方式進行分析以計算開挖土方量、土質狀況與所需工時等資料，大幅簡化工程設計規劃時間以爭取作業時效。

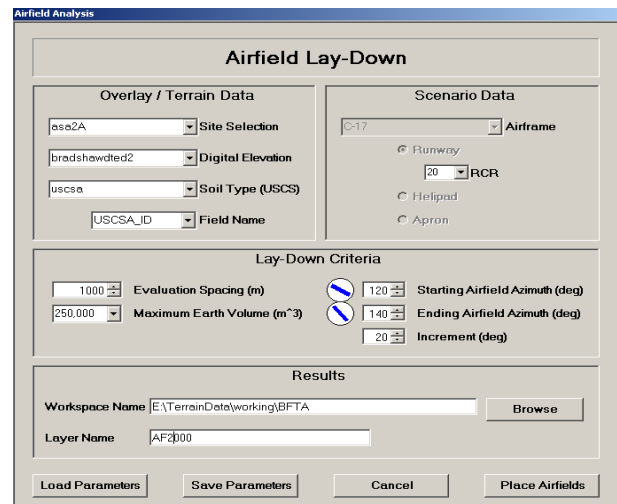


圖 4 為機場設置估算系統 (AFL) 使用者操作介面

參考資料：Gary L. Anderton .etc, Joint Rapid Airfield Construction 2007 Technology Demonstration, US Army Engineer Research and Development Center, July, 2008,p25.

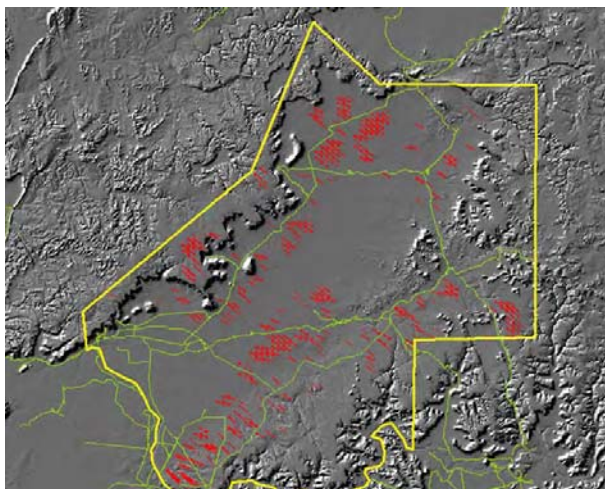


圖 5 機場設置估算系統 (AFL) 分析符合參數選定位址

參考資料：Gary L. Anderton .etc, Joint Rapid Airfield Construction 2007 Technology Demonstration, US Army Engineer Research and Development Center, July, 2008,p21.

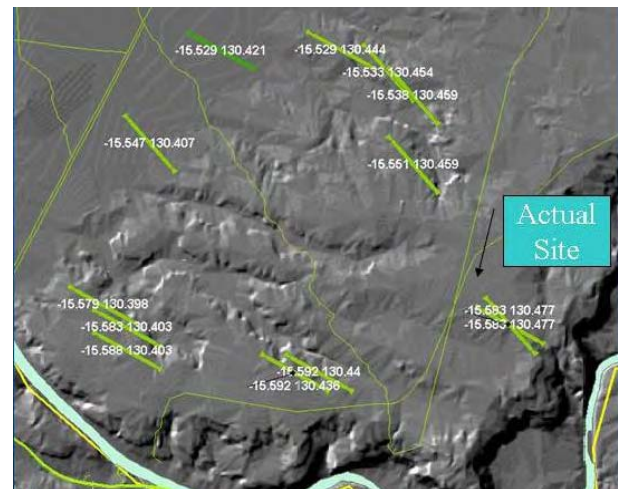


圖 6 機場設置估算系統 (AFL) 考量開挖量、方位角之機場設置位址

參考資料：Gary L. Anderton .etc, Joint Rapid Airfield Construction 2007 Technology Demonstration, US Army Engineer Research and Development Center, July, 2008,p23.

三、工程作業建造估算模組(Engineer construction estimate, ENOps)

工程作業建造估算模組，是一種能在已設定工程規模大小型態下，評估工程執行效率的模組，它提供預先已輸入部分的建造資料之基本估算，譬如適合 C

-17 或者 C-130 運輸機起降的機場模型，內建在系統當中作為使用者選用的資料庫，使用者可於使用者圖形介面中輸入作業環境與地形的指令，即會提供所需地形特性的規模，如圖 7。工程作業建造估算系統的使用者介面，於 JRA C 專案中技術人員可選擇系統資料庫中已設定完成之作業模組(build_ALZ_MOG.Heavy)，顯示降落區域之建造計畫，其中包含機場起降載重等級與飛機型式，系統視窗中區分場景參數與地形參數，場景參數需輸入作業環境中之作業起始時間與溫溼度狀況；地形參數包括土壤類別，機場長度、面積與作業量。經由工程作業協助施工規劃分析後將地形分析資料所提供上百個位址，減少至 21 處位址並顯示其經緯度、方位角、開挖量、地質狀況以及工時，如圖 8^[4]。

工程作業建造估算系統包含一套資料轉換模組，其主要為輸出與每一個合適機場位址之地形影像資料，為了縮減多餘不必要的地形影像資料，以便進行資料轉換，而將機場位址資料群組匯入資料庫中。場址資料庫是以開放標記語言(XML)編寫而成，便於未來擴充開發之用。地形資料格式為一般之 ESRI ASCII 檔，影像資料為 geoTIFF 檔，資料轉換後匯入 nDview 3D 模型製作軟體進行詳細規劃設計，於 nDview 規劃完成後，可將資料輸出至 GPS 工程控制系統中，進行施工機具之規劃

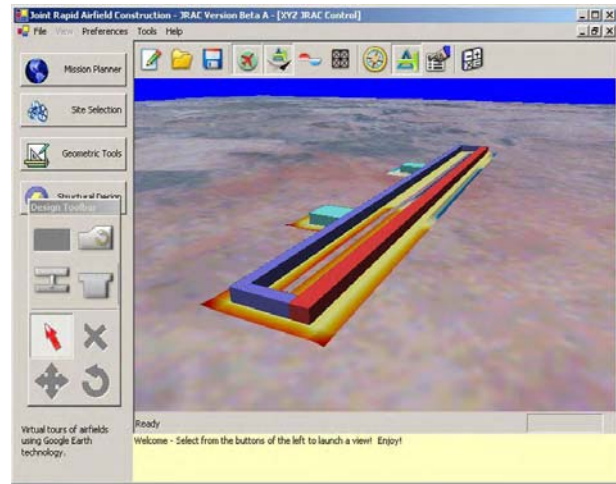


圖 7 顯示工程作業建造估算系統 nDview 機場模型

參考資料：Gary L. Anderton .etc, Joint Rapid Airfield Construction 2007 Technology Demonstration, US Army Engineer Research and Development Center, July, 2008,p29.

No.	Lat	Long	Azimuth	Volume See m3	Soil Type (USCS)	Work Duration hr
1	-15.2910	130.6117	120	10127	SMI	230
2	-15.2910	130.6117	140	10127	SMI	230
3	-15.3637	130.6664	120	10127	SMI	230
4	-15.4001	130.6194	120	14148	SMI	230
5	-15.4001	130.6194	140	14388	SMI	230
6	-15.4182	130.6195	140	18298	SMI	230
7	-14.9651	130.6836	120	21519	SMI	230
8	-15.4182	130.6195	120	22147	SMI	230
9	-15.5289	130.4212	120	48986	SMI	298
10	-15.5470	130.4073	140	112003	SMI	402
11	-15.5827	130.4775	140	120846	SMI	421
12	-15.5377	130.4685	140	168038	SMI	521
13	-15.5921	130.4396	120	175497	SMI	537
14	-15.5512	130.4686	140	189119	SMI	566
15	-15.5920	130.4402	120	192358	SMI	573
16	-15.5787	130.3982	120	209139	CL	608
17	-15.5287	130.4446	120	214683	SMI	620
18	-15.5827	130.4775	120	219038	SMI	629
19	-15.5877	130.4029	120	239571	SMI	673
20	-15.5832	130.4029	120	244085	SMI	682
21	-15.5332	130.4638	140	245985	SMI	686

Runway length+clearzones = 1,372 m (4,500 ft)
Primary area width = 97.5 m (319.8 ft)
Prepared area = 107,104 m² (1,152,268 ft²)
USCS soil type assumed uniform for region based on initial site surveys.

圖 8 經過工程作業(ENOps)模組地形分析後選出 21 個最佳方案

參考資料：Gary L. Anderton .etc, Joint Rapid Airfield Construction 2007 Technology Demonstration, US Army Engineer Research and Development Center, July, 2008,p28~29.

註⁴：Gary L. Anderton, Ernest S. Berney, Travis A. Mann, J. Kent Newman, E. Alex Baylot, Daniel K. Miller, and Quint Mason, Joint Rapid Airfield Construction 2007 Technology Demonstration, US Army Engineer Research and Development Center, July, 2008,p27.

與管理^[5]。

美國陸軍工兵研究發展中心於 2007 年在澳洲執行聯合急造機場作業中，該套系統由實證結果發現，場址評估系統在選定建造機場可行區域的程序上進行的十分順利，機場設置估算系統在可行區設置機場跑道模型成效顯著，但須在設定斜率的情況下才能精確計算開挖土方量，同時若能選定工程技術與施工機械後，工程作業系統就能精確計算總工程進度與時間，該專案在每天工作 12 小時達 14 天，共 168 小時完成，與估算時間 138.5 小時僅差距 29 小時，已十分接近實際作業之結果^[6]。

「聯合急造機場」數位設計的另一個特性即是，當建造時發現設計規劃之瑕疵或錯誤，能針對變更需求立即進行修正，改變原先設計圖檔。本次聯合急造機場作業之初便遭遇上述的狀況，因原先跑道設計之方位不利於飛機起降，必須立即重新設計以降低整體計畫進度延宕。此次變更設計決策定案後，繪圖人員便立即對數位圖資進行修正，完成後於施工指揮所以無線網路訊號將資料傳送至工程機械上，變更作業不到 4 小時便已完成^[7]，由於不需重新定位與高程的基樁，因此也不會影響建造時程的進度，計畫十分成功^[8]。

工程管理資訊系統的應用，將土方工程帶進新的領域，從工程選址、規劃、量測、設計以及土石方計算等諸多繁複的程序、技術文件、圖表與行政作業予以整合，大幅減少誤差與遺漏的可能性，縮短作業時間，提升管控效益，極具導入應用的價值。

工程機械施工管理與運用技術

JRAC 專案的主軸在強化計畫之整合性，工程施工效率亦為本專案重要的一環。因此，工程機械施工管理技術之運用即是提升建造效能的重要關鍵。JRAC 專案相關技術採用工程控制系統(Grade Control system)運用於工程機械施工管理部份，工程控制系統已自 2001 發展至今，其技術水準與能力的提升令人刮目

註⁵：Gary L. Anderton, Ernest S. Berney, Travis A. Mann, J. Kent Newman, E. Alex Baylot, Daniel K. Miller, and Quint Mason, Joint Rapid Airfield Construction 2007 Technology Demonstration, US Army Engineer Research and Development Center, July, 2008,p27.

註⁶：Gary L. Anderton, Ernest S. Berney, Travis A. Mann, J. Kent Newman, E. Alex Baylot, Daniel K. Miller, and Quint Mason, Joint Rapid Airfield Construction 2007 Technology Demonstration, US Army Engineer Research and Development Center, July, 2008,p30~31.

註⁷：Travis A. Mann, JOINT RAPID AIRFIELD CONSTRUCTION TECHNOLOGY DEMONSTRATION, Engineer Research and Development Center, USACE,2009,p3.

註⁸：Travis A. Mann, JOINT RAPID AIRFIELD CONSTRUCTION TECHNOLOGY DEMONSTRATION, Engineer Research and Development Center, USACE,2009,p2.

相看，並以十分迅速的腳步不斷演進。JRAC 專案已完成工程控制系統運用於專案科技的研究工作，分析它們於軍事應用上的適用性，其功能說明如下。

JRAC 專案中運用之工程控制系統主要由兩個民間機構，Trimble 與 Ca-tepi llar 合作開發完成。所有工程機械均裝置機械專用 GPS 系統，運用於專案場址中多部機械控制系統上。工程控制系統採用(Caterpillar Trimble Con-trol Technol ogies, CTCT)之機械控制科技，本次專案中共計裝置於 22 部工程機械中，包括 6 部推土機、6 部平路機、5 部刮運機及 5 部壓路機[9]。



圖 9：工程控制系統(GCS)結合 GPS 輔助機具操作精度即時控制實例

參考資料：Travis A. Mann, JOINT RAPID AIRFIELD CONSTRUCTION TECHNOLOGY DEMONSTRATION, Engineer Research and Development Center, USACE,2009,p9.

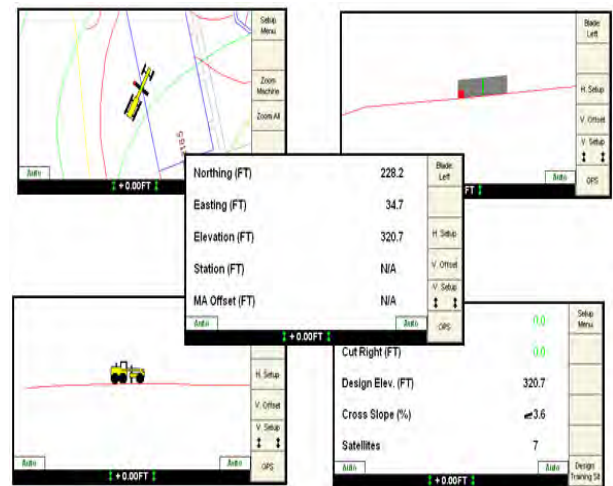


圖 10：工程控制系統(GCS)工程機械顯示幕之畫面資訊

參考資料：Gary L. Anderton .etc, Joint Rapid Airfield Construction 2007 Technology Demonstration, US Army Engineer Research and Development Center, July, 2008,p53.

為能即時監控施工作業進度提升施工管理人員對整體施工作業之掌控能力，工程控制系統具備即時動態量測之 RTK GPS 自動鏟刀控制能力，圖 9 顯示多部工兵機械搭載工程控制系統於 JRAC 專案中聯合作業情形。系統中運用無線電波由指揮中心、GPS 控制基站與工程機械實施網絡連線，指揮中心能即時掌握區域內每部工程機械之施工狀況，同時亦將工程規劃資料傳送至每部工程機械駕駛艙中之顯示器，螢幕提供目前機械高程以及預定之施工面高程，工程機械上所裝置之 GPS 接收器，係為取得工程機械之鏟刀傾角與方位座標。圖 10 顯示工程機械駕駛室螢幕介面畫面，透過工程控制系統，機械操作者可以即時明確了解工程施作面位置與高程，而不需依賴以往大量測量人員耗力耗時之定樁作業，確認施工面後反覆地指揮工程機械校正施工誤差。運用工程控制系統

註⁹：Gary L. Anderton .etc, Joint Rapid Airfield Construction 2007 Technology Demonstration, US Army Engineer Research and Development Center, July, 2008,p52.

能大幅降低施工誤差產生之風險，提高精確度與工程機械作業效能，JRAC 專案在工程控制系統運作下僅產生 4 公分誤差。技術生疏的操作人員亦能透過這套系統達到熟手操作者的表現，且能以同一組操作人員於工程不同階段操作各種工程機械。

指揮中心內部，採用一套施工監管系統(Site Vision Office, SVO)其功能包括 3D 圖資匯入、3D 模型檢核、圖資上傳至工程機械、無線監控施工狀態、指揮工程機械施工動線、即時顯示挖填方量等項目。施工監管系統（SVO）顯示介面如圖 11，螢幕左側為目前規劃機場資料檔案，中間部份以顏色顯示工程機械施工後之高程，其中綠色表示已施工至設計規劃之機場高程，棕色表示仍未達施工標準(高於 20 公分)，藍色代表高程低於施工標準(低於 20 公分)；螢幕右側顯示目前施工中之工程機械種類、數量與連線狀態。

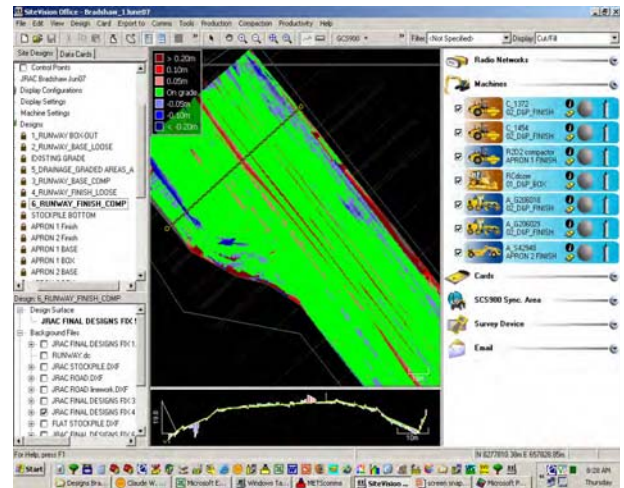


圖 11：施工監管系統(SVO)之螢幕介面資訊

參考資料：Gary L. Anderton .etc, Joint Rapid Airfield Construction 2007 Technology Demonstration, US Army Engineer Research and Development Center, July, 2008,p54.

透過施工監管系統（SVO）能將裝置機械控制系統之施工機械於施工區域中之工作狀態傳送至指揮中心，以伺服器即時運算每部機械之高程與座標資料，完成工區土方作業量之地形圖資。然而，產生之圖資會隨著持續作業中的工程機械，不斷地更新圖資，施工機械之坐標亦即時顯示於螢幕中，指揮官能輕易地掌握作業中每部機械的即時資訊。此外，指揮官也可以透過這套系統即時調整施工狀態，做出立即有效之管理作為，主要效益歸納如下：

1.工程控制系統於 JRAC 專案中運用施工指揮所的電腦終端設備，提供工兵機械位置並顯示每部工兵機械之即時作業量資訊。由於指揮所能即時監控施工中之工兵機械情形，且能在錯誤發生前察覺發現誤差，因而更進一步具備了減低施工錯誤的能力。

2.施工監管系統可即時提供專案精確位置，並對現場工兵機械的優異掌控能力扮演十分重要之角色。運用數位化軍事工程技術，能輕易地將計劃階段的資訊，立即轉換成軍事土方工程之建造階段。傳統的方法製圖須以不同視角與

手法呈現許多圖組，並且要將 3D 的物件以 2D 方式描述在圖紙上。再者，傳統工法仰賴釘設基樁當作所完成的設計高程位置的實體呈現。如此耗時的程序容易產生人為疏失，同時，由於作業人員的誤差或是工程作業所需，因此需要一組專業的測量團隊不斷的量測校正新的樁位，然後移除舊的樁位，暨耗時又耗工。

3.利用電腦與全球定位系統，藉由連續上傳訊息到作業工程機械上，顯示機械作業指定區域之現地高程，與設計高程實際的差異，以虛擬顯示器告知機械操作人員，減少反覆量測定樁等此類程序，來強化土方作業系統。藉由提供每部作業機械於專案工區場址之相對位置。操作人員能清楚了解作業範圍且無需基樁來告知所要完成的高程與作業路線。這種工法能大幅降低施工錯誤的風險，因而增加整體土方工程作業的效率。

JRAC 專案工程機械作業於 2007 年 6 月 2 日開始實施障礙物清除與挖掘作業 6 月 16 日便完成可供 C-17 運輸機起降跑道。圖 12 顯示建造中機場空照圖，施工作業以 2 天時間每日晝間 12 小時實施，並完成驚人之舉，比預計完成時間提前 5 天^[10]。

本階段 JRAC 專案突破目前所發展之工程控制系統各方面效能的限制，並且驗證實用性後已達相當成熟階段；但部分能力仍有待提升的空間。當計畫進入轉換與成熟階段時，此次演練資料極具價值，若沒由傳統作業法兩相比較是無法分析出這些系統的直接效益。所驗證的工程控制系統增加作業人員效率，以及建造過程中消彌重覆作業與錯誤的工作，無疑地是專案中迅速時限內達成任務的最重要之關鍵角色。

近十年間，民間土木工程藉由科技發展，強化機械施工作業已十分進步。其中將全球定位系統，以及運用無線網路控制作業量等科技整合到工程機械皆



圖 12：聯合急造機場(JRAC)專案中工程機械聯合作業之空照實景

參考資料：Travis A. Mann, JOINT RAPID AIRFIELD CONSTRUCTION TECHNOLOGY DEMONSTRATION, Engineer Research and Development Center, USACE,2009,p53.

註¹⁰：Travis A. Mann, JOINT RAPID AIRFIELD CONSTRUCTION TECHNOLOGY DEMONSTRATION, Engineer Research and Development Center, USACE,2009,p4.

已完成。這些先進科技能有效運用於營建工程省去標定樁位的需求，並提供工區挖填作業現況之即時資訊至施工指揮中心，大幅提昇工作效率。此外，則是大幅降低標定施工範圍時，傳統方式時常產生判定樁位誤差而造成重覆作業與錯誤。可以預見地，在未來美軍的發展中，工程控制系統與數位化軍事工程運用將扮演至要關鍵的角色。

地質改良穩定技術

JRAC 專案之聯合急造機場係以篩濾夯實礫料建造的跑道、二個停機坪以及滑行道，均運用近幾年開發之先進地質穩定工法，來達到快速強化地質土壤強度。本次於澳洲進行的驗證環境，區域內土壤性質屬無塑性土壤、泥沙等典型的沙質類型。因此機場鋪面設計以高早強水泥（3 號），與多聚炳烯纖維混合物組成，以提升鋪面承載力，提供必須獲得的強度和耐久性，達到急造機場設計壽期的設計要求，並能提供 C-17 運輸機起降超過 500 架次以上之標準。JRAC 專案施工時，將水泥與纖維混合物拌入土壤至預期深度(達 6 英吋)，藉以改良機場鋪面之地質強度。進一步地，再以乳化聚合物（Polymer）噴灑機場表面，以封阻跑道表面減少灰塵並達到防水功效，避免機場鋪面侵蝕損壞。建構作業進程序如下：

1.先針對停機坪與滑行道地面的壓實作業，以達到設計的高程位置。

2.以平路機耙齒耙鬆表面土壤，配合水車撒水來增加土壤含水量達到預期溼度，並將水泥包以符合設計標準的配置率，均勻散佈於預定位置。

3.將多聚炳烯纖維覆蓋於表面後，以鐵力士 RS35 拌合機實施拌合作業，如圖 13，主要將高早強水泥與多聚炳烯纖維均勻拌合，伴隨壓實作業，達到預期穩定測試強度之目標。

4.機場鋪面初步完成後，再藉由高機動多功能輪車(HMMWV)搭載強力噴灑設備，將乳化聚合物（polymer）均



圖 13：為 RS35 拌合機作業實景

參考資料：Travis A. Mann, JOINT RAPID AIRFIELD CONSTRUCTION TECHNOLOGY DEMONSTRATION, Engineer Research and Development Center, USACE,2009,p108.

勻散佈至地面，如圖 14。

二個停機坪與滑行道的施工與土壤穩定作業，總共耗費 72 小時不眠不休的工作。於完工後 18 小時，隨即進行飛機起降作業，完成後之機場並無明顯損壞[11]。

在品質管制方面，在美軍軍事行動力求迅速的原則下，工程品質由於慢又繁瑣的測試程序，以及缺乏整合與通盤的品管規劃下常被忽略掉，工程品質往往無法妥慎管控而增加不確定性，進而影響任務執行變數。此外，對易造成機場損壞的大型飛機起降(如 C-17 型運輸機)，需要達到比以前更高鋪面品質之水準。為克服以上因素，JRAC 專案中另外一部份即是發展一套整合系統，以因應 JRAC 獨特的品質管制技術。JRAC 中品質保證作業包括確認足夠夯實度之必要措施。其特定目標如下^[12]：

1. 檢覈量測土壤飽和度與土壤密度試驗程序。
2. 檢覈穩定與非穩定土壤強度之試驗程序。
3. 土壤夯實作業提供數值分析結果，包括完成夯實斷面測試。
4. 於夯實作業中規劃品質控管程序。

為達到迅速有效且合乎品質需求下，JRAC 專案發展一部快速評核工程車(Rapid assessment vehicle-engineer, RAVEN)，車上配備有快速土壤分析工具組(Rapid soil analysis kit, RSAK)以及快速品質評核工具組(Rapid quality assurance kit, RQAK)。

1. 快速土壤分析工具組：能精確且快速地了解土壤類別，以建立聯合急造機場之設計標準，這些儀器可取得土壤之土壤濕度、礫徑分布(GSD)、塑性限度(PL)等資料。這些土壤檢測資料可直接匯入分析軟體進行運算，以線性迴歸分析將塑性限度轉換成塑性指標(PI)。由土壤類別、礫徑分布以及可塑性指標再以軟



圖 14：為高機動多功能輪車(HMMWV)噴灑乳化聚合物 (polymer) 作業實景

參考資料：Travis A. Mann, JOINT RAPID AIRFIELD CONSTRUCTION TECHNOLOGY DEMONSTRATION, Engineer Research and Development Center, USACE, 2009, p113.

註¹¹：Travis A. Mann, JOINT RAPID AIRFIELD CONSTRUCTION TECHNOLOGY DEMONSTRATION, Engineer Research and Development Center, USACE, 2009, p4.

註¹²：Travis A. Mann, JOINT RAPID AIRFIELD CONSTRUCTION TECHNOLOGY DEMONSTRATION, Engineer Research and Development Center, USACE, 2009, p5.

體迴歸分析估算土壤最佳含水量(OMC)與最大乾密度(MDD)。透過這些土壤分析資料能進一步得知土壤密度曲線，建立急造機場之設計標準。此外，RAVEN 工程車配有遠距工程通聯設備 (TeleEngineering Communications Equipment – Deployable, TCED)可將採集獲得之重要資訊經由衛星通訊回傳。值得一提的是 RAVEN 工程車亦能利用自動偵查路徑設備 (Automated route reconnaissance kit, ARRK) 進行工兵偵察任務，並紀錄車輛之 GPS 軌跡以及蒐集行經路徑如橋樑、交叉路口等重要設施之影像資料^[13]。

2.快速品質評核工具組：主要區分為鋼珠密度試驗、含水量檢測、動態錐貫入試驗以及 Clegg 衝擊試驗等。

(1)鋼珠密度檢測，係以容積取代法於施工過程中用於量測合適之土壤密度，如圖 15。此稱之為「鋼珠密度試驗」，它融合沙錐法(ASTM D-1556)以及簡易之沙置換試驗 (ASTM D-4914)。試驗時採用 3/16 英吋鋼珠來進行容積置換檢測之結果，既快速又簡易並且十分精確^[14]。



圖 15：為 JRAC 專案進行鋼珠密度試驗實景
參考資料：Travis A. Mann, JOINT RAPID AIRFIELD CONSTRUCTION TECHNOLOGY DEMONSTRATION, Engineer Research and Development Center, USACE,2009,p10.

(2)含水量檢測，係運用標準微波試驗程序(ASTM D-4643)量測土壤含水量，此法用於決定土壤乾密度以及控制工程進行時之土壤含水量，比起以往傳統方法，提供了更精確之檢測結果。

(3)動態錐貫入試驗係 JRAC 專案開發的一種自動化動態錐貫入試驗 (D-CP) 方式，其裝置於 RAVEN 快速評估工程車上，由作業人員以電腦控制液壓裝置，動態錐貫入試驗時之土壤強度評估以加州載重比試驗(CBR)進行，然而加州載重比試驗與深度數值立即顯示於車上可攜式電腦，如圖 16。產生之檢測資料檔案會與 GPS 紀錄位址同時儲存於電腦中，便於爾後進行分析與參考。

(4)Clegg 衝擊試驗(ASTM D- 5874)係用於評估拌合水泥、纖維之穩地

註¹³：Gary L. Anderton .etc, Joint Rapid Airfield Construction 2007 Technology Demonstration, US Army Engineer Research and Development Center, July, 2008,p34.

註¹⁴：Gary L. Anderton .etc, Joint Rapid Airfield Construction 2007 Technology Demonstration, US Army Engineer Research and Development Center, July, 2008,p35.

性土壤強度，是以 C-legg 衝擊試驗結果和無緯壓縮強度(UCS)產生關連性之方程式進行分析。Clegg 衝擊主要用來判定夯實度，因此密度試驗需要逐步分階段地完成，如圖 17。由於簡單操作、迅速 Clegg 衝擊試驗對於監測土質改良穩定層強度值，並找出與區分強度不足區域的運用上極具價值^[15]。

澳洲 JRAC 專案於實驗室與實地研究中，完成急造機場的品質檢核，並運用先進儀器進行評估、比較、選擇程序，其主要目的在減少工程執行期間的檢測試驗頻率與資料處理量，進而提升施工決策效率等。藉由精確迅速的檢測與品質管控，決定最佳夯實量與土壤強度，提供工程設計之參考依據，以制定施工標準確保工程作業之品質。



圖 16：為 RAVEN 快速評估工程車進行自動化動態錐貫入試驗（DCP）實景

參考資料：Travis A. Mann, JOINT RAPID AIRFIELD CONSTRUCTION TECHNOLOGY DEMONSTRATION, Engineer Research and Development Center, USACE,2009,p33.



圖 17：為進行鋼珠密度試驗與 Clegg 衝擊試驗實景
參考資料：Travis A. Mann, JOINT RAPID AIRFIELD CONSTRUCTION TECHNOLOGY DEMONSTRATION, Engineer Research and Development Center, USACE,2009,p93.

結論

美軍聯合急造機場技術關鍵在資訊與全球定位科技之系統整合，其運用於軍事工程中，使得工兵部隊在應急機場構築的能力與效率上大幅精進。這些新科技提升美軍在世界任何一個偏遠角落，建造機場時的場址評估、工程機械運用以及工程技術等方面的效能，促使未來美軍在各種軍事行動之戰術運用上，減少許多運輸、後勤等方面之限制因素，並大幅增加敵方反制上之困難與複雜

註¹⁵：Gary L. Anderton .etc, Joint Rapid Airfield Construction 2007 Technology Demonstration, US Army Engineer Research and Development Center, July, 2008,p40.

性。對國軍而言，本島防衛作戰初期，島內重要設施極可能遭受高密度之飛彈攻擊損毀而喪失功能，機場也不例外。為使空中武力得以發揮，惟有迅速修復機場或者建造應急機場。此時，時間就是關鍵，聯合急造機場技術對我防衛作戰而言，無疑地是國軍發揚空中武力之最佳解決方案。相對地，也將是進犯者的難題。未來「聯合急造機場」不僅對於軍事工程應用上產生極大的衝擊與震撼，亦能將其推廣至更多軍事永久設施建造及其他工程上之應用，以縮短工期提升精度與工程品質。

參考文獻

1. Gary L. Anderton, Ernest S. Berney, Travis A. Mann, J. Kent Newman, E. Alex Baylot, Daniel K. Miller, and Quint Mason, Joint Rapid Airfield Construction 2007 Technology Demonstration, US Army Engineer Research and Development Center, July, 2008.
2. Travis A. Mann, JOINT RAPID AIRFIELD CONSTRUCTION TECHNOLOGY DEMONSTRATION, Engineer Research and Development Center, USACE, 2009.
3. Christina Fisher, Ft. Bragg's Rapid Airfield construction ,Technology In Construction, Associated Construction Publications, September, 2004.
4. Anderton, Gary L. and Mann, Travis A., "U.S. Military's Joint Rapid Airfield Construction Program," Proceedings of the ASCE International Air Transport Conference, Orlando, FL, 2002.
5. Anderton, Gary L., "Rapid Contingency Airfield Upgrade and Construction," (Submitted for publication), Military Engineer, Society of American Military Engineers, 2005.
6. Phillips, Lucy and Freeman, Reed, "Rapid Assessment Technologies for Evaluating Potential In-Theater Airfield Sites," Proceedings Transportation Systems 2004 Workshop, Ft. Lauderdale, FL, 2004.
7. Phillips, L., Rushing, J., and Newman, K., "Evaluation of Rapid Assessment Tools for Determining Strength Characteristics of Chemically Stabilized Unsurfaced Pavements." International Journal of Pavements, (Vol. 3 (1-2), January-May 2004.
8. Phillips, Lucy, "Field Evaluation of Rapid Airfield Assessment Technologies" Masters Thesis, Mississippi State University, MS, 2005.

作者簡介

李孟文中校，現為工兵學校戰工組主任教官

學歷：中正理工學院 54 期(八十三年班)、工校正規班 141 期(九十年班)、國立屏東科技大學企業管理所碩士班。

經歷：排長、連長、教官。