

1945 年硫磺島戰役日軍守備之研究—兼論不同土質條件衰減層抗爆效能

曾世傑上校、楊國鑫教授、蔡營寬中校、王璽少校

提要

- 一、1945 年硫磺島戰役中，日軍因熟知守備區域地質條件特性，據以調整兵、火力配置、提升工事阻絕強度、將全島各類型工事予以地下化，並放棄灘岸決戰而改採誘敵深入之作戰指導，將美軍登陸兵力極大化的削弱，並成功延遲美軍作戰時程將近 36 日。
- 二、本研究從戰前日軍守備與戰場經營切入，並分析作戰工事對作戰經過之影響以及從中所獲得之啟發，接續置重點探討我國目前面臨敵情威脅與灘岸一帶之地質特性，並進一步執行地下掩體上方衰減層抗爆震效能分析。
- 三、數值模型建立與分析，成功預測出 5.5kgTNT 炸藥於地表爆炸後，所造成之彈坑大小與爆壓在地層中傳遞衰減的趨勢，並提出衰減層設計尺寸，係以 315 號疏鬆石英砂且鋪設 3 層地工織布之回填加勁土條件最佳，其設置厚度僅 143cm。
- 四、本篇於防衛作戰期間戰力防護階段中，軍事工程構築整備事項提出：「反覘陣地以求克敵之道」、「結合兵要調查遂行固定設施抗爆震評估」、「研提最佳化掩體之防禦體系」、「強化部隊精神戰力教育」等具體建議事項。

關鍵字：硫磺島戰役、堅固工事、衰減層、抗爆震

前言

1945 年 2 月 19 日，太平洋戰爭中的硫磺島戰役爆發，美軍挾著優勢海、空軍戰力，在其海軍陸戰隊登陸前夕，即已對硫磺島上的日軍守備部隊主力、各類型陣地進行登陸前火

力射擊，其目的在於截斷日軍來自於海、空方面的後勤、人員持續補充力量以及為登陸部隊開創登陸初期良好態勢。由上充分瞭解，因硫磺島地理位置特殊，美日雙方對於該島均有著攻必取、守必固的強烈作戰

企圖，¹而能於戰場中立於不敗之地的條件之一，係取決於對地形、地質特性的瞭解與運用。美軍因未對硫磺島地質特性與守備重點進行先期探查，從而導致登陸初期與島上作戰階段，大量損傷兵員；而日軍因熟知守備區域地質條件特性，據以調整兵、火力配置、提升工事阻絕強度、將全島各類型工事予以地下化，並放棄灘岸決戰而改採誘敵深入之作戰指導，將美軍登陸兵力極大化的削弱，並成功延遲美軍作戰時程將近 36 日(2 月 19 日迄 3 月 26 日)。²

進一步探究硫磺島戰役相關文獻，僅聚焦於攻勢方是如

何獲得勝利，對於戰敗一方之日軍守備作為較少著墨。經文獻分析後，在戰役初始階段，美軍海軍陸戰隊登陸第一梯隊雖未遭遇強大抵抗，卻在後續進入縱深地帶作戰時期，遭受到莫大損傷，其主要原因有以下幾點：

1. 美軍未能掌握硫磺島上實際守備兵力大小，³無法精確分析灘岸黑砂地質環境對於登陸部隊所帶來之影響。⁴

2. 美軍雖於戰前進行強大海、空軍火力攻擊，卻未能於登島 D 日前夕分析攻擊效果，日軍仍然具備抵抗美軍從海上登陸的兵力與戰力。⁵

¹ 美國第 21 轟炸隊於 1944 年 6 月開始在塞班島建造基地，並至 11 月完成，硫磺島因位居東京與塞班島中點站，1945 年 2 月美軍登陸硫磺島後，中型轟炸機已可自硫磺島起飛執行任務，迄 1945 年 3 月間，塞班島基地已能遂行 300 架空中堡壘大型編隊任務。摘錄自楊德鈞，《第二次世界大戰大畫史》，北開文化事業出版社，1989 年 3 月，頁 320。

² 硫磺島戰役中，美軍係以戰死 5,500 員、負傷 1,9250 員作戰人員之高昂代價所換來的最後勝利，亦使得原定 5 日內攻克作戰時程，最後竟高達 36 天。摘錄自國防部政治作戰局，《硫磺島作戰史料彙編》，國防部政治作戰局，1978 年 7 月，頁 143。

³ 美軍情報部門雖於夏威夷地區實施廣泛反情報措施，並到處散布謠言說將對臺灣日軍進行攻擊，然對於守備硫磺島守軍指揮官言，卻絲毫沒有任何影響；另美軍情報部門未曾注意硫磺島上尚有 7 千餘人海軍部隊，未能掌握島上實際守軍兵力。摘錄自鈕先鐘編譯，《島嶼戰爭—太平洋爭奪戰》(臺北：軍事譯粹出版社，西元 1954 年)，頁 263-265。

⁴ 1944 年 10 月，第五兩棲軍雖已掌握敵軍地圖、美國水道局地圖以及航空母艦於 6、7 月份空中攻擊時的空照圖，有關敵人戰鬥序列的情報卻不完全，且依情報部門判讀結果，對於海灘的研究指出，普通車輛在鬆軟砂地上運動有困難，但牽引車較為容易。但 D 日登陸沙灘後，人車均陷入灘岸一帶，與當初情資落差甚遠。摘錄自國防部史政局編譯，《硫磺島兩棲戰史》(臺北：國防部史政局，西元 1962 年 3 月)，頁 60-61。

⁵ 美軍雖於登陸前 72 天連續對島上實施火力攻擊，然而即便登陸後，美軍地面部隊與其空中作戰支援飛機，仍舊遭受島上日軍火炮反擊。摘錄自鈕先鐘編譯，《島嶼戰爭—太平洋爭奪戰》(臺北：軍事譯粹出版社，西元 1954 年)，頁 270。

3.日軍於戰前已精準研判美軍攻島企圖，並耗費將近半年以上時間，於島上進行完整堅固陣地、多道阻絕設施，以及將島上各類型工事構築予以地下化。⁶

4.日軍島上守備指揮官栗林忠道中將，將原本灘岸決戰方案，結合島上地形特性，調整為縱深防禦為主，並沿敵最有可能登陸灘岸至縱深地帶構築多道帶狀陣地。⁷

基於上述觀點可知，日軍海、空補給路線雖於開戰前已遭美軍截斷，卻仍於作戰期間給予美軍帶來巨大傷損，其主要關鍵即是日軍正確防禦作戰指導與戰場經營能力。

為進一步探究日軍守備主要重點與戰場經營對於防衛作戰重要性影響，下列研究中，除進行日軍防禦作戰指導外，亦

從戰前日軍守備與戰場經營切入，並分析作戰工事對作戰經過之影響以及從中所獲得之啟發，接續置重點探討我國目前面臨敵情威脅與灘岸一帶之地質特性，並進一步執行地下掩體上方衰減層抗爆震效能分析，期能對我防衛作戰戰力防護作為提供些許芻議。

日軍守備重點與戰場經營

美軍自1941年珍珠港事件後，即開始規劃一系列對日作戰行動，並以跳島方式遂行作戰，⁸逐步攻克遭日軍所侵佔的太平洋群島。迄1944年2月，美軍攻克馬紹爾群島，10月，美軍於雷伊泰灣海戰中大勝日軍後，⁹日軍海、空戰力迅速削減，美軍遂逐步向日軍所佔領之島嶼採取攻勢行動。¹⁰日軍此時已研判美軍下一步即將對硫磺島進行兩棲登陸作戰，並

⁶ 蘇虹，《天昏海暗—太平洋戰爭》（臺北：藍天出版社，西元1964年8月），頁210-211。

⁷ 栗林忠道將褶鉢山地區規劃成陣地要塞化，於掩體內部配置各種不同種類且密集武器系統，其海岸砲與砲兵火網能夠相互支援，其火砲配置於褶鉢山與北部高原地區隱、掩蔽處，防止敵軍進行反擊，主抵抗線一般朝向西北—東南方向跨越硫磺島。摘錄自國防部政治作戰局，《硫磺島作戰史料彙編》（臺北：國防部政治作戰局，西元1978年7月），頁14。

⁸ 日本的島鏈防禦體系意外被自給自足的大批兩棲部隊攻破，美軍兩棲部隊置重點於攻佔關鍵島嶼，逐步進逼日本帝國核心，並以繞道摧毀重要地點的方式推進。摘錄自國防部史政編譯室，《第二次世界大戰發生之軍事錯誤》（臺北：國防部史政編譯室，西元2005年8月），頁239。

⁹ 1944年雷伊泰灣海戰中，日軍海上聯合艦隊第二艦隊司令長官栗田健男中將，於10月20日起，與美國太平洋艦隊展開海上作戰行動，日軍栗田艦隊最終於10月28日戰敗結束。摘錄自星辰、清浪、張宇翔、長陽，《太平洋戰爭—海島鏖戰》（臺北：知兵堂出版社，西元2010年3月），頁206-308。

¹⁰ 曾世傑，〈淺析1945年硫磺島戰役〉《清流雙月刊》（臺北），西元2016年5月，頁52。

強化島上各式防禦系統，同時增強島上防守兵力以及進行各項工事構築與阻絕設置，¹¹ 下列將從島上地理、地質進行分析後，再逐步探討日軍守備重點。

一、硫磺島地理位置與地質條件

硫磺島地理位置，係處於東京與關島兩地直線的中點位置(詳如圖1所示)，北距東京約1,216公里，南距關島約1,292公里，係硫磺列島之第一大島，此島縱長約8公里、橫寬約4公里，面積約為21平方公里，島上北端灘岸地質屬岩石懸崖，南端為火山地形，又名褶鉢山，其灘岸稍具平坦可供登陸使用，海拔為160公尺，為本島最高處。¹²島上因火山地形，佈滿硫磺氣味，地下溫度甚高，在褶鉢山與北部高地中間地區，覆蓋一層較厚之粗糙黑色火山灰，粒子甚小可被風吹動，故在此柔軟地質表層，人員與



圖1 硫磺島地理位置暨島上俯視圖
資料來源：作者修正自 Google 網路地圖，
<https://www.google.com.tw/maps/place/硫磺島>，檢索日期：西元2021年11月25日。

車輛均難以通行，且因無地下水源，飲用水全靠儲存雨水與海水蒸餾淡化取得，¹³對於守備部隊言，除不利於部隊長期於島上生活外，更遑論進行戰場經營與工事構築等艱難任務。

硫磺島上地質條件雖不利於人員長期於島上生活，然因其所處之關鍵地理位置，卻形塑出其重要之地理戰略價值，此點可從當時美軍與日軍的戰略涵義中窺見一斑，摘述重點如後：¹⁴

¹¹ 1941 年美日戰爭爆發時，小笠原群島上的全部守軍僅 1,400 員，且全部在父島。迄 1943 年，第 1 號機場已在硫磺島構築，由於美軍於 1944 年 2 月攻略馬紹爾群島，故日本帝國大本營認為馬里亞納迄加羅林群島地區業已受威脅，於是日軍乃採取加強內線地區(加羅林—馬里亞納—小笠原群島)防禦兵力，迄 3、4 月份，硫磺島上之兵力已逐漸增多。摘錄自國防部史政局編譯，《硫磺島兩棲戰史》(臺北：國防部史政局，西元 1962 年 3 月)，頁 10—11。

¹² 董旻杰、張凱倫、周明，《太平洋戰爭-美日對決》(臺北：知兵堂出版社，西元 2007 年)，頁 211。

¹³ 迄 1944 年 5 月底時，由於島上海軍、陸軍兵力已達 7 千餘人，因此守備部隊指揮官特別提出指導：「在此狹窄的海島上，飲水及其他生活上的必需品是如此的稀少，但卻集中著七千人以上的海軍與陸軍人員。如果陸海軍能合作無間，小心謹慎地做一融合協調的部隊，其結果便將產生決心，以增加該島的作戰力量」。摘錄自國防部史政局編譯，《硫磺島兩棲戰史》(臺北：國防部史政局，西元 1962 年 3 月)，頁 8-12。

¹⁴ 同註 12，頁 209。

(一)美軍攻佔硫磺島戰略涵義

1. 硫磺島位處東京與塞班島中間，美軍B-29轟炸機可於該島起飛至東京轟炸，航程相較塞班島減少一半，載彈量可增加一倍，戰鬥機亦可隨伴護航。

2. 硫磺島機場，可作為B-29轟炸機備降機場，亦可提供因戰損之各類型戰機緊急降落修復或加油補給。

(二)日軍守備硫磺島戰略涵義

1. 硫磺島位居日本本土南方，可提供東京及早預警功能。

2. 可自硫磺島起降戰鬥機，對途經之美軍轟炸機進行攔截，降低對日本本土威脅。

3. 在硫磺島之海、空戰力，可具備對馬里亞納群島上美軍反擊之能力。

日軍因研判美軍將會以進攻日本本島為主要目的，¹⁵勢必攻佔硫磺島成為其前進基

地，故強化島上各類型工事強度，¹⁶以下探討其守備作戰指導與戰場經營重點。

二、日軍守備作戰指導

1944年6月美軍攻佔塞班島後，日本大本營即刻重新調整硫磺島上兵力配置，以109師團全權負責島上守備任務，守備指揮官由栗林忠道中將擔任，島嶼守備指揮系統詳如圖2所示。初期抵禦美軍登陸作戰指導，係海軍戰術家所堅持建議為：「海灘需嚴重加以防禦，並於水際與敵人實施決戰」。迄1945年1月，栗林忠道修改其防禦作戰構想為「使守備陣地內達到堅強與相互支援的陣地為目的，全島即劃分五大守備地區，當陣地遭敵切斷時，採取逆襲以恢復陣地功能」。¹⁷

¹⁵ 硫磺島屬於小笠原群島，位於塞班島至東京的中點上，對美國而言，硫磺島可作為向日本推進的中點，可以提供對馬里亞納基地海軍、轟炸機提供掩護與轟炸機的中途站。摘錄自舒孝煌、耿直，《二戰記事—會戰名將武器組織》(台北：麥田出版社，西元1995年)，頁114。

¹⁶ 迄1944年5月底，日本陸軍在硫磺島兵力已達官兵5,170員、大砲13門、輕重機關槍200挺以上、步槍4,652支，另外日本海軍守備隊所使用武器有14門12cm以上大口徑之海岸砲、12門高射砲、30門25公厘雙管高射砲。摘錄自國防部史政局編譯，《硫磺島兩棲戰史》(臺北：國防部史政局，西元1962年3月)，頁11。

¹⁷ 硫磺島日軍指揮系統尚稱複雜，以指揮權責區分，島上陸軍由栗林忠道指揮，所有海軍部隊由市丸少將指揮；以部隊層級劃分，分別是109師團、混成第二旅團、海軍地面部隊等三個主要司令部；以防禦地區區隔，分別是褶鉢山、南部、西部、東部、北部等五大防禦地區；栗林忠道與其參謀群，考量美軍海上與空中力量，將會使島上海灘地區及第1號機場附近陣地無法防守，因此最初計畫係要求將褶鉢山與北部元山地區加以要塞化，並輕微防守海灘，由高地火力掩護，同時空留較大預備隊採取逆襲，惟此方案與海軍戰術家所堅持灘岸決戰相左。摘錄自國防部史政局編譯，《硫磺島兩棲戰史》(臺北：國防部史政局，西元1962年3月)，頁12-22。

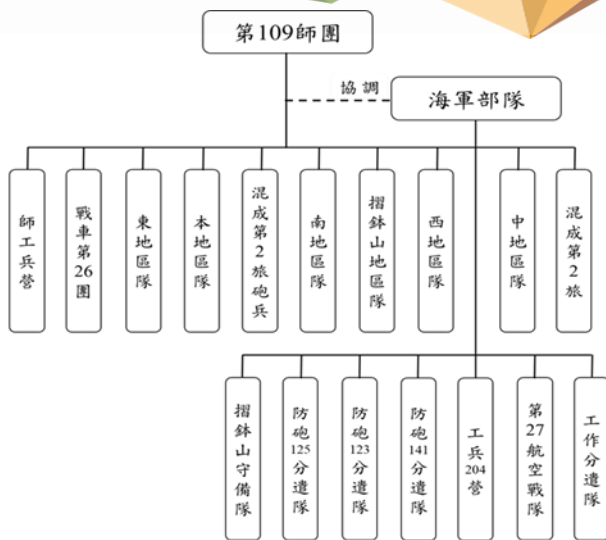


圖2 日軍於1945年2月守備硫磺島作戰指揮系統要圖

資料來源：摘錄自國防部史政局編譯，《硫磺島兩棲戰史》(臺北：國防部史政局，西元1962年3月)，頁553~556；蕭英煜、吳光中，〈第二次世界大戰美、日太平洋島嶼作戰之研究—以沖繩島、硫磺島及臺灣為例〉《陸軍學術雙月刊》(桃園)，第51卷第543期，2015年10月，頁107。

栗林忠道借鑒過往日、美兩軍交戰經驗獲知，美軍慣常採取戰術戰法係在登陸灘岸初期，以優勢海、空軍火力對島上各類型防禦陣地、各式工事阻絕設施進行火力打擊，尤置重點在任何一切即將影響美軍登陸部隊之兵力、火力與阻絕設施，故揚棄過往「灘際決戰」之戰術戰法指導，改採「縱深防禦」為主要作戰模式，並結合島上地質條件特性以及兼顧海軍戰

術家所提方案，作出肆應硫磺島守備作戰指導(守備區域劃分如圖3)，摘述如後。¹⁸

(一)全島守備部署以縱深防禦為主、灘頭防禦為輔，海軍守備部隊沿海灘構築堅固支撐點。

(二)於褶鉢山、元山守備地區均加以要塞化，依縱深防禦指導遂行兵、火力配置。

(三)沿海灘縱深地區敵接近路線，埋設大量地雷，並配置綿密火網殺傷敵軍。

(四)作戰全程區分誘伏、近距射擊與機動作戰，係以損耗敵軍大量兵力為目標。

此一修正後之島嶼守備指導要點，突顯出日軍最後選定折衷方案，以間接配備部署，¹⁹達成兵力地下化、砲兵陣地要塞化的作戰指導，²⁰主要係考量地形與敵軍具備登島作戰能力，亦是因為島上地形以及地質條件關係，迫使日軍不得不放棄以灘岸一線直接配備之防禦守備方案。²¹

¹⁸ 栗林忠道原規劃以縱深地區守備為主要部署，然因考量島上所有建築工事材料均仰賴海軍運輸，所以最後不得不做出折衷方案作戰指導，縱深防禦為主、灘岸防禦為輔。摘錄自同註12，頁213-216。

¹⁹ 間接配備係指：當防禦正面過廣或敵有迂迴之可能時，乃採配備方式。以一部兵力配置於預想敵攻擊地區，以警報敵之當近，妨害、遲滯敵之行動，並拘束之；主力控置於適當地區為機動打擊部隊，乘敵半渡或迂迴行動中，實施反擊而擊滅之。摘錄自國防部，《國軍軍語辭典(九十二修訂版)》(臺北：國防部史政局，西元2004年3月15日)，頁6-53。

²⁰ 栗林忠道於1945年初，對島上兵火力配置作戰指導中，要求兵力地下化、砲兵陣地要塞化。摘錄自游俊傑，《島嶼防衛作戰之研究—以1945年2月硫磺島戰役為例》，陸軍學術雙月刊，第五十五卷第563期，2019年2月，頁108。

²¹ 直接配備係指：當正面適宜或局部正面必須固守時，乃行之配備方式，依陣地防禦要領，憑藉障礙，編組陣地，藉火力及逆襲，擊滅敵人於陣地當及陣地內。摘錄自國防部，《國軍軍語辭典(九十二修訂版)》(臺北：國防部史政局，西元2004年3月15日)，頁6-53。



圖3 日軍守備區域劃分暨兵力部署要圖

資料來源：筆者重繪自羅伯特·奧尼爾編著，《太平洋戰爭圖文史》，金城出版社有限公司，2019年8月，頁437；國防部史政局編譯，《硫磺島兩棲戰史》（臺北：國防部史政局，西元1962年3月），頁567。

三、戰場經營重點評析

栗林忠道指揮官所重新修訂之島上防衛作戰指導，對於後續美軍海軍陸戰隊第一登陸梯隊影響甚大，尤其美軍甫登陸灘岸一線之際，因尚未遇到日軍大規模抵抗，致使美軍部隊心生大意與輕敵，加上灘岸因火山灰覆蓋地質，導致其人員與輜重車輛均陷入灘岸地帶，²² 較難以順利向縱深地區邁進，登陸作戰期間確實因此而

造成其重大損傷，接續將深入探討日軍於島上遂行各項戰場經營作為。

(一)克服島上惡劣環境，完成各類型工事地下化

硫磺島上遍布因火山噴發期間所自然演化成的天然岩洞以及火山灰所覆蓋成的黑灰地質，開挖至地表下方約 10 公尺處，即會遇到夾雜高溫達 40 度以上之硫磺氣體逸散，²³ 其土質鬆軟，可運用傳統人工構

²² 美軍登陸部隊第五師的陸戰隊人員，由紅一號海灘慢慢地爬上鬆軟的火山灰土堆，在該處構築工事固為容易，但是前進卻困難與易感疲勞。摘錄自國防部史政局編譯，《硫磺島兩棲戰史》（臺北：國防部史政局，西元 1962 年 3 月），頁 133。

²³ 同註 10，頁 53。

築工事方式向下進行開挖。²⁴而日軍守備部隊雖因缺乏大型機具，開挖工事均採人工方式進行，其施工環境亦相當艱困，然仍在戰役前夕，克服天然阻礙，完成島上多數各式防禦陣地、工事地下化作為。

(二)依敵進攻路線遂行縱深防禦，極大化削弱敵軍戰力

日軍依敵最大可能進攻軸線，於戰場經營階段，就島嶼特性構築堅固核心陣地帶，以此為核心向外延伸發展出多道堅強作戰工事與阻絕設施，²⁵並運用島上原有之天然孔道，繼續向其內部開挖施工，²⁶擴展出可儲放戰略物資空間、地下掩體、遮蔽式掩體、火炮陣地掩體等各類型工事，以防備敵由空中或海上遂行之火力攻擊。

因島上地形條件特殊，北

部多岩石峭壁，南部多屬平坦區域，因此能夠遂行非正規登陸作戰地區，僅褶鉢山向北延伸之灘岸一線。經日軍研判美軍進攻軸線後，極有可能從褶鉢山向東北延伸約 5 至 8 公里處灘岸進行登島作戰，且日軍採取海灘不抵抗模式，因此島上火砲射擊方向全部指向側面或者斜面上，²⁷此種配置火力方式，看似雖放棄擊敵於海上之大好機會，但確因有效之隱、掩蔽措施，而減少日本守軍火炮陣地遭受美軍海上艦砲反擊之危險，給予登陸美軍迎頭痛擊，削弱其戰力。

(三)精研美軍戰術戰法，適切調整兵火力部署

栗林忠道指揮官，係當時硫磺島戰役中之日軍最高層級指揮官，因其過往豐富作戰

²⁴ 硫磺島中部的防禦工事中，大部分都是純粹人工性的，除了火山地形區域與北部三分之一地區外，此島地形均不足以構成堅強的天然防禦陣地，但是此島卻很便於設防，因島上火山灰地質鬆軟，既像粗砂又像細石，僅需簡易工具，即可挖出複雜工事，將火山灰土壤與水泥結合，即可以組成最優品質混凝土；栗林忠道有著充分時間進行島上防禦工事，且島上士兵除了挖掘工事，亦無其他消遣，最終建構成島上各式類型的地下通道設施以及堅固陣地工事。摘錄自鈕先鐘編譯，《島嶼戰爭—太平洋爭奪戰》(臺北：軍事譯粹出版社，西元 1954 年)，頁 266。

²⁵ 同註 10，頁 53。

²⁶ 島上工事設施已於美軍登陸前大部完成，包含機場底下將近有數百公尺之連通地道、8 百公尺連接兩座營指揮所地下孔道、孔道內裝設電燈且各防禦陣地間底下均有複雜交通網保持聯繫，且火炮、戰防砲、迫擊砲陣地工事中，加強壁體厚度達到 1.2 至 2.4 公尺強度。摘錄自鈕先鐘編譯，《島嶼戰爭—太平洋爭奪戰》，(臺北：軍事譯粹出版社，西元 1954 年)，頁 266。

²⁷ 栗林忠道回顧曾經於塞班島和關島之日軍守備部隊，因為與登陸美軍進行海灘戰鬥而失去半數以上兵力與火力，而消耗其持久戰力，而斷然於硫磺島採取「海灘不抵抗」守備模式，並將所有火力指向島上敵接近路線。摘錄自國防部政治作戰局，《硫磺島作戰史料彙編》(臺北：國防部政治作戰局，西元 1978 年 7 月)，頁 115。

經驗，深知美軍登島作戰慣用戰術戰法，必先取得作戰地區局部海、空優勢後，才得以遂行登陸作戰。故日軍自 1944 年初起，大幅強化硫磺島上防禦系統，透由本土運送大量火炮及彈藥，²⁸ 迄美軍登陸前，島上彈藥已囤儲步槍及其他武器將近 2 萬支、彈藥多達 2 萬多發、各類型迫砲口徑以上之火砲數量高達 700 多門，²⁹ 且其配置位置經過計算後，均使島上火力發揚無死角與間隙。

日軍火炮配置方式除消除間隙之外，更重要的是均以地下化與進入遮蔽式掩體為優先，即便後續遭受美軍從海、空轟炸攻擊之火力，仍能有效維持其武器系統功能。

(四)結合作戰地區特性，構成完整防禦體系
硫磺島面積僅 21 平方公里，日軍為削弱美軍登島主力部隊，特於島上建構完整防禦體系，其中地表上方工事，係以結合

島上地形，於敵軍可能接近路線，構築多道阻絕設施、戰車壕與布雷系統，用以遲滯、拒止敵軍向縱深地帶突入；地下工事則由地表下方岩塊、土體(衰減爆壓層)與地下結構體組成：包含全島構築無數個地下掩體，並裝設電力設施，³⁰ 修築深達 9 層地下坑道、各式機槍與砲兵掩體(硫磺島日軍防禦陣地種類數量詳如表 1)，並將各式天然孔洞以地下孔道串接，形成綿密地下交通網設施，並設置完整地下通信聯絡線路，另地下坑道設置則深達 9-12 公尺，³¹ 此作法除可有效達成隱、遮蔽及利於島上兵力、物資調整，更可衰減炸彈於地表爆炸後產生之爆震波。

²⁸ 1944 年 7 月，美軍佔領塞班島時，日軍大本營決定於硫磺島方面調整以 109 師團負責守備任務，原急迫集結用於救援塞班島之人員、武器裝備，全部轉移馳援硫磺島，預期打造硫磺島為一攻不可破陣地。摘錄自國防部史政局編譯，《硫磺島兩棲戰史》(臺北：國防部史政局，西元 1962 年 3 月)，頁 12-13。

²⁹ 詹中一，《硫磺島戰史對國軍反登陸作戰之啟示》，海軍學術雙月刊，第四十九卷第 6 期，民國 104 年 12 月，頁 111。

³⁰ 美國陸軍軍官學校，《美軍對日戰爭第三卷》(臺北：美國陸軍軍官學校，西元 1950 年)，頁 39。

³¹ 日軍除設置地下掩體與聯絡道外，更巧妙運用地形構築防戰車壕，凡敵戰車可能前進之道路均加以布雷，以阻止美軍登陸即向內陸挺進。詹中一，《硫磺島戰史對國軍反登陸作戰之啟示》，海軍學術雙月刊，第四十九卷第 6 期，民國 104 年 12 月，頁 111-113。

表1 硫磺島日軍防禦陣地種類數量統計表

陣地種類	陣地數量	統計至 1944.12.3	統計至 1945.2.10	增減狀況(%) (「-」為遭敵摧毀)
海岸砲		3	6	+100
兩用火砲陣地		16	42	+162
兩用火砲陣地(備用)		4	8	+100
自動高射砲陣地		151	203	+34
自動高射砲陣地(備用)		2	16	+700
有掩體砲兵陣地		39	67	+71
無掩體砲兵陣地		40	5	-87
戰防砲-攻擊敵艦艇 火砲陣地		18	3	-83
機關槍陣地		352	292	-17
總計		625	642	+2.5

資料來源：筆者修改自國防部史政局編譯，《硫磺島兩棲戰史》(臺北：國防部史政局，西元1962年3月)，頁67。

戰場經營對作戰經過之影響

美軍自1944年10月雷伊泰海戰勝利後，栗林忠道已研判美軍後續攻島企圖，並立即在天然防禦工事為基礎上，加緊各型工事構築速度，³²以下將依序探討美軍作戰指導、日軍戰場經營對作戰經過之影響，俾得從實際作戰經過中，驗證作戰工事所發揮之效能。

一、美軍作戰指導

美軍於1944年10月3日參謀首長聯席會議中決議，有關太平洋戰爭進行期間作戰指導，並摘述如後。³³

1.由西南太平洋部隊，對於呂宋的佔領擔任艦隊的掩護與支援，目標日為1944年12月

20日。

2.在南部諸島中佔領一處或多處陣地，目標日為1945年3月1日。

美軍持續對此作戰指導，逕行充分研判與討論後，認為攻佔此陣地(島嶼)必須具備該地區作戰中所能使用之機場，僅硫磺島符合此一要求。另10月7日，參謀首長聯席會議下發一份參謀研究，內容提及『分遣隊』作戰任務如後：³⁴

1.削減日本海軍與空軍的力量，及削弱日本帝國的生產能力。

2.摧毀小笠原群島的敵海軍與空軍。

3.佔領與防守硫磺島，並發展該島的空軍基地。

³² 于倉和譯，《太平洋戰爭》(臺北：風格司藝術創作坊，2011年2月)，頁148-185。

³³ 國防部史政局編譯，《硫磺島兩棲戰史》(臺北：國防部史政局，西元1962年3月)，頁43-49。

³⁴ 同註33，頁50-53。

迄10月9日，尼米茲海軍上將發布高度機密文件給史密斯將軍，並通知：「硫磺島已明確決定為目標」，後續任命斯普魯恩斯海軍上將擔任戰役指揮官，並編組作戰部隊，登陸作戰指揮系統詳如圖4所示。時任登陸部隊指揮官第五兩棲軍軍長斯密特將軍，持續依上述決議備戰，並於1945年2月下達登陸硫磺島作戰指導(登陸作戰兵力部署如圖5所示)：「以第4、第5陸戰師在島的東南岸並列登陸，第3陸戰師為預備隊。登陸後，左翼第5師切斷硫磺島最狹窄頸部，並轉向西南佔領褶鉢山地區；右翼第4師佔領1號機場，並續向東北方擴張

二、各階段作戰與工事造成之影響

硫磺島戰役自2月19日美軍登陸起，迄3月26日完成肅清島上殘餘日軍為止將近36天，然爭取作戰區域之海、空優及轟炸島上重要指管、陣地、掩體、工事及阻絕設施等行動，卻早已於登陸前持續進行2個多月，以下將作戰經過區分各階段進行探討。

(一)登陸作戰準備，奪取制海權與制空權(1944年12月迄1945年2月18日)

1944年11月，美軍佔領馬里亞納群島後，為奪取作戰區制空與制海權，空軍經常不斷派出轟炸機轟炸硫磺島，³⁶

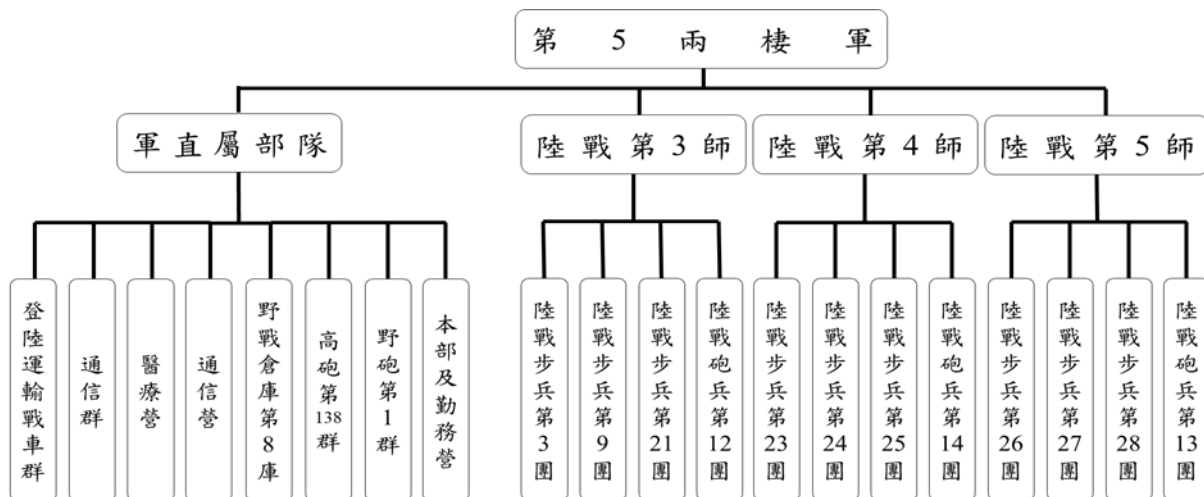


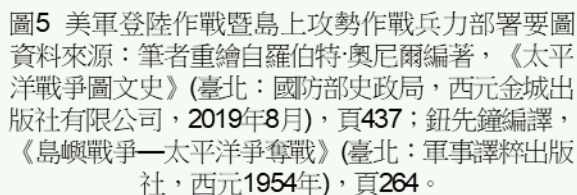
圖4 美軍登陸部隊作戰指揮系統圖

資料來源：筆者修改自國防部史政局編譯，《硫磺島兩棲戰史》，國防部史政局，1962年3月，頁517~544；蕭英煜、吳光中，〈第二次世界大戰美、日太平洋島嶼作戰之研究—以沖繩島、硫磺島及臺灣為例〉《陸軍學術雙月刊》(桃園)，第51卷第543期，2015年10月，頁108。

戰果」。³⁵

迄登陸當天止，連續執行72天

³⁵ 同註34，頁54-59。



- 1.夜間擾亂、戰鬥機掃射敵軍與偵察硫磺島上重要目標等。
- 2.無論晝夜，瓦解敵軍在海上運輸行動。

1.2月19日拂曉，美軍海上艦砲持續砲擊後，艦載機起飛遂行島上轟炸。9時，兩棲登陸車開始從海上推進至灘岸內45公尺，並成功掩護第一波海軍陸戰隊搶灘登陸成功，然因灘岸一線均為4.5公尺高，由火山

39 同註 34，頁 94-95。

灰堆積成的斜坡，使美軍人、車均陷入火山灰中難以前進，且無法構築散兵坑保護自己。10時，日軍防禦工事砲火、隱蔽處之迫擊砲與機槍火力開始從兩側夾擊，頓時海灘彈如雨下，⁴⁰作戰異常艱辛，迄天黑時，美軍有6個步兵團、6個砲兵營與2個戰車營共約3萬人上岸，佔領約3600公尺寬、深650公尺至1000公尺不等的登陸場，第一天戰損計548人陣亡，受傷1,755人。⁴¹

2.2月20迄22日，第5師開始向褶鉢山攻擊，並以手榴彈、炸藥包、火焰噴射器逐一消滅岩洞中日軍，並使用推土機將洞口封閉，終能肅清此區域日軍抵抗；⁴²陸戰第4師在艦砲支援下突破日軍防線，並切斷島南日軍與元山間聯繫，成功攻佔1號機場，其工兵部隊立即搶

修機場設施，⁴³並沿機場向北構築工事，防敵逆襲。

3.綜觀此階段作戰，美軍當初預期以登陸前火力轟炸擊潰硫磺島上火砲陣地企圖，在登陸當天即受到嚴重考驗，⁴⁴另日軍憑藉島上戰場經營、堅固作戰工事、隱、掩蔽火砲陣地強大火力優勢，確實給予登陸美軍海軍陸戰隊極大殺傷力。

(三)豎立軍隊士氣精神象徵，持續向任務目標進攻(2月23日迄3月1日)

1.2月23日，1020時，左翼海軍陸戰第5師第28團2營E連終於攻上褶鉢山頂並插上美國國旗，此後繼續掃蕩山地周邊地區；⁴⁵2月24日，第3師第21團突破了二號南側機場的防線，但隨著地形升高，遇到日軍大小據點將近800

⁴⁰ 羅伯特·奧尼爾編著，《太平洋戰爭圖文史》(臺北：金城出版社有限公司，2019年8月)，頁430-435。

⁴¹ 同註12，頁237。

⁴² 同註12，頁238-239。

⁴³ 對美國而言，硫磺島擁有極高戰略價值，當戰鬥還在繼續進行的時候，海蜂工兵已經開始改善機場設施，到了三月初，第一架受損的B-29轟炸機就曾緊急降落在硫磺島上，此外第15戰鬥機大隊也進駐該島，為超級空中堡壘轟炸機護航。摘錄自于倉和譯，《太平洋戰爭》(臺北：風格司藝術創作坊，西元2011年2月)，頁182。

⁴⁴ 自從美軍佔領馬里亞納群島，其空軍與海軍火力經常不間斷轟炸硫磺島，迄2月19日登陸前，美軍已連續轟炸72天之久，雖島上機場最終被炸毀，但因日軍重要作戰工事均埋設在地表以下與高原隱蔽處，美軍登陸當天卻仍然遭受到島上日軍強大火力反擊。摘錄自同註38，頁270。

⁴⁵ 1945年2月23日上午，美國海軍部長福雷斯特與第五兩棲軍軍長史密斯關注硫磺島作戰經過時，持續注視在褶鉢山山頂飄揚之美國國旗，顯出相當激動，福雷斯特總結說：「褶鉢山升起的國旗，意味著海軍陸戰隊從此後500年的榮譽！」島上其他美軍看見國旗，都感到勝利的曙光，海軍軍艦上的水兵看見象徵勝利的國旗，也都歡聲雷動。摘錄自同註12，頁243。

個，⁴⁶日軍憑藉著密密麻麻、縱橫交錯的地堡與坑道，抵抗越來越強，最終美軍以慘重代價，佔領第 2 號機場南端。

2. 迄 3 月 1 日，右翼第 4 師雖遭受從四處各地偽裝良好碉堡日軍火力攻擊下，犧牲大部兵力，⁴⁷最後仍勉力攻佔第 2 號機場北端東面的任務目標——382 高地。⁴⁸

3. 此階段作戰中，美軍陸戰隊英勇插上美國國旗作戰行為，充分展現精神戰力，大幅度提升美軍作戰士氣；另因日軍已將整座褶鉢山與北方高地變成地下要塞，⁴⁹地表以下均由一系列長度不一的聯絡道，將各地下碉堡、掩體構連成完整堅強防禦體系，也造成美軍陸戰隊傷損慘重，惟此區域日軍兵員與火炮亦已消耗殆盡。

(四) 美軍持續掃蕩，日軍採取最後反攻(3 月 2 日迄 26 日)

1. 3 月 2 日迄 6 日，第 5 師持續向西山脊北部與 362 高地進攻，惟作戰地區逐漸變成陡峭山谷與突出露岩等具天然防禦條件地形，作戰遂以近戰使用之火焰噴射器、火箭筒、手榴彈等武器為主，美軍此階段傷損計 4,292 人；3 月 7 日迄 15 日，第 4 師在其砲兵火力掩護下，向敵防線火雞瘤地區攻擊，⁵⁰期間持續遭敵來自位於岩石山脊上、溝渠中隱蔽陣地內的火力攻擊，⁵¹這些均係機關槍與步槍交叉火網形成之威脅。

2. 3 月 8 日，美軍已突入至第 2 號機場防線，並逐次向西北部壓縮對日軍包圍圈，3 月 17 日栗林忠道指揮官向東京大本營發出電報：「戰局終已面臨最後之關頭，現期於十七日夜半…親率全員敢行壯烈之總攻擊…縱粉深碎骨亦必在所不惜…」，⁵²結果栗林兵團長、市乞司令

⁴⁶ 同註 38，頁 278。

⁴⁷ 陸戰第 4 師在奪佔島上第 2 制高點 382 高地時，屢遭日軍交叉火網攻擊，傷亡極其慘重，382 高地因此被稱為絞肉機，戰鬥部隊傷亡達到 50%。摘錄自同註 12，頁 245。

⁴⁸ 同註 38，頁 279。

⁴⁹ 在 18-19 世紀之拿破崙時代，「要塞」亦即城堡和設防的都市，就現今說法言，「要塞」為在軍事上有重要意義的、有堅固、鞏固防禦設備的據點。摘錄自克勞塞維茲原著、王洽南譯，《戰爭論》(臺北：國防部史政編譯局，西元 1991 年 3 月)，頁 421。

⁵⁰ 火雞瘤防線係位於島上南村落一圓形場中間地區。摘錄自同註 33，頁 310-389。

⁵¹ 美軍陸戰隊常遭受隱藏於島上洞穴與罅隙之日本守軍攻擊，一旦日軍位居地表陣地遭摧毀，日軍即刻退入洞穴，因這些天然洞穴或既設地下掩體，能夠提供日軍適當掩護，狀況許可時，又走出洞穴開始射擊。摘錄自同註 33，頁 434-435。

官於17日夜半實行最後總攻擊時，均告陣亡。迄26日，美軍已完成硫磺島上最後掃蕩任務，並由美軍步兵第147團接替硫磺島防禦任務。⁵³

3.本階段作戰中，日軍已於戰前充分利用島上地形地物特性進行戰場經營，甚至對於美軍可能作戰經過路線亦一再進行反覆演練，⁵⁴企圖達成陣地工事、兵火力配置、創新戰術戰法行動，⁵⁵以發揮殲滅敵軍戰力最大效果。

硫磺島戰役中，美軍雖以優勢兵、火力對守島日軍進行攻擊，然而在日軍結合作戰地區地形、地質特性與戰場經營之手段，成功達成拖延美軍島上作戰時間以及造成其重大損傷之任務，主要因日本守軍實地瞭解與充分利用硫磺島地質、地形與地貌條件，得以量地用兵，於灘岸一線大幅度節

約兵力，並於山地、高原、縱深地帶遂行各項戰備整備、工事構築，使其兵力、各類型陣地、戰略物資達到地下化、掩體化作為。日軍守備島嶼作戰指導與手段，殊值我輩軍人效法與看齊，同時須擷取日軍進行戰場經營之思維與措施，用以啟發我防衛作戰戰力防護各項作為。

以下將借鏡上述硫磺島戰役中，日軍防禦島嶼與作戰經過之經驗教訓，接續分析我國面臨中共敵情威脅，並探討在不同土質條件下，進行地下掩體衰減層抗爆震案例分析，預期提出我國灘岸抗爆震地下掩體設施之衰減層設計尺寸建議成果，並提出個人對於防衛作戰軍事工程構築之芻議。

⁵² 國防部政治作戰局，《硫磺島作戰史料彙編》（臺北：國防部政治作戰局，西元1978年7月），頁97。

⁵³ 同註33，頁439。

⁵⁴ 美軍情報部門於作戰經過時期，亦不斷在戰場蒐集擄獲日軍大量情報文件進行分析，三月初發現一份無日期之硫磺島北部日軍地圖，該地圖顯示出美軍部隊可能所在位置，美日兵力部署大致與2月底概同，日軍俘虜曾經說明此地圖係日軍1月份舉行作戰演習準備使用，上述可證明日軍已透由頻繁演習大致研判出美軍進攻行動方案。摘錄自同註34，頁391。

⁵⁵ 栗林忠道為激勵島上官兵奮勇殺敵信念，特地印發英勇的戰鬥誓詞：「...我們應該握著炸彈，向敵人戰車衝鋒，以來炸毀它們；我們應該滲入敵人陣地中，以來殲滅他們；我們應該彈不虛發，一槍打一個；每個在戰死之前應該負責殺死十個敵人；...我們還要用游擊戰繼續阻撓敵人」，此一戰術戰法上指導，確實灌注至每一位日本守軍，從美日兩軍作戰經過中發現，日軍莫不以擊殺進入防禦陣地內之美軍部隊為其主要任務。摘錄自同註53，頁47-48。

國軍現行面臨威脅與抗爆震分析

吾人從栗林忠道中將於硫磺島戰役中備戰整備手段中，瞭解戰前精準研判敵情威脅，並因應敵軍戰術戰法，而克敵致勝重要性。觀察目前臺海情勢發展對我威脅狀況有增無減，中共軍機、軍艦擾臺各項行動頻仍。美國《2021中國軍力報告》顯示，中共對臺動武主要軍事選項有四種：「空中和海上封鎖、有限度或脅迫性軍事行動、空中和導彈攻擊以及聯合登陸入侵臺灣本島」，⁵⁶而我國最新國防報告資料顯示，2021年10月1至4日，有多達149架次共機侵擾我國空域，此狀況不但使我空防壓力遽增，亦企圖打壓我民心士氣，⁵⁷另部長邱先生亦於立法院報告時說明，面對中共軍力擴張、對臺軍事威攝與侵擾等行動，國軍將積極推動國防發展與戰力整建，建構堅強可恃之防衛戰力，並提出「愈接近本島、反制力愈強作為」等重

要聲明，⁵⁸顯示國軍不畏強權以及奮戰守土之決心。

我們須借鏡硫磺島戰役中日軍守備戰場經營之經驗與教訓，並肆應當前敵情威脅與動態演變，強化戰力防護階段各項作為，平時除完善可供使用之兵要地形與設施調查外，更應建立一系列軍事掩體設施如何衰減爆炸引致爆震波之研究機制，以及建構地下掩體、衰減層抵抗爆震之設計尺寸與規範，俾可供遭敵猝然突襲時，縮短構築軍事抗爆震地下掩體設施之時間，以大幅提升國軍戰力防護效能。

一、中共對我危害行動分析

國內軍事研究人員曾經指出中共有四種可能犯臺軍事行動模式，且將以多重併行實施，務以擊潰我軍作戰意志為首要目的。從美軍登陸硫磺島前之作戰準備階段—海、空火力轟炸模式中，研判上述中共各種可能採取手段，對我危害最大行動者，係以其火箭軍對我重要指管系統、地下指揮所、機

⁵⁶ 摘錄自鍾志東，〈研析《美國 2021 中國軍力報告》對台海安全之評估〉，《國防安全雙週報》，財團法人國防安全研究院國家安全研究所，第 42 期，2021 年 11 月 26 日，https://indsr.org.tw/Content/Upload/files/biweekly/42/4_WilliamChihTungChung.pdf，檢索日期：2022 年 2 月 10 日。

⁵⁷ 摘錄自呂昭隆，〈共機頻侵擾 國防部最新報告揭 10 字因應策略〉，《中時電子報》，<https://tw.sports.yahoo.com/news/因應共機侵擾-國防部秉持-愈接近本島-反制力愈強-010103924.html>，檢索日期：2022 年 2 月 9 日。

⁵⁸ 摘錄自聯合新聞網，〈共軍威懾 國防部提 12 項精進作為強化應對能力〉，《聯合新聞網電子報》，2021 年 10 月 13 日，檢索網址：<https://udn.com/news/story/10930/5814117>，檢索日期：2022 年 2 月 10 日。

場、港埠、防空陣地、雷達、情監偵等固定設施等，遂行精準火力打擊。⁵⁹

中共遂行登陸作戰前，必優先思考其制空、制海權之獲得，在進入島上作戰階段後，其陸航旅攻擊直升機，將對我軍陣地、武器、裝備、人員造成重大危害。⁶⁰國內軍事研究學者曾就中共陸航旅攜行之火箭彈對我設施造成影響進行探討，並提出2.7kg炸藥於地表爆炸後，以地表下方鋪設5層地工織布作為衰減層之衰減效果最佳，且加勁土回填厚度僅需102cm，尖峰爆壓值即可降低至48kPa等具體研究成果。⁶¹本篇在上述研究成果基礎上，持續進行地下掩體衰減層抵抗爆震之相關研究，並以陸航旅武裝直升機所經常掛載之S-8航空火箭彈為威脅源，⁶²針對不同

土質條件所構成之衰減層，進行抗爆震效能方面之研究。

二、抗爆震文獻探討

有關抗爆震文獻分析中，美軍因應作戰實務需要，遂結合現地進行爆炸試驗，其試驗內容除空氣場爆壓傳遞現象外，亦探討許多有關與地下結構體上方抗爆層衰減爆壓之研究，其研究成果多被整理成技術規範以供研究使用。上述爆炸試驗結果數據亦被歸納成經驗公式，其中以1986年版之TM5-855-1技術規範建議之土中尖峰爆壓值經驗公式較為精準，⁶³並可供初步評估使用，惟公式中相關參數需結合現地土層條件，較能進行後續有效之評估與應用，將於下列第(四)小節中內容，結合本研究數值分析案例進行深入探討。

⁵⁹ 曾世傑、楊國鑫、蔡營寬，《地下結構體抗爆震研究-以加勁土衰減爆震壓力之數值分析為例》，陸軍工兵半年刊第159期，2021年10月，頁3-5。

⁶⁰ 摘錄自〈武直-10〉，《百度百科》，<https://baike.baidu.com/item/%E6%AD%A6%E7%9B%B4-10/5543885>，檢索日期：2022年2月10日。

⁶¹ 國內軍事研究學者曾就中共陸航旅攜行之火箭彈對我設施造成影響進行探討，並提出2.7kg炸藥於地表爆炸後，以地表下方鋪設5層地工織布作為衰減層之衰減效果最佳，且加勁土回填厚度僅需102cm，尖峰爆壓值即可降低至48kPa等具體研究成果。摘錄自曾世傑、楊國鑫、蔡營寬，《地下結構體抗爆震研究-以加勁土衰減爆震壓力之數值分析為例》，陸軍工兵半年刊第159期，2021年10月，頁13-22。

⁶² S-8DM航空火箭彈係一系列由蘇聯空軍和塞爾維亞空防軍研製的航空型火箭彈系武器，被軍用飛機用以攻擊地面半硬和堅硬目標，經常被掛載於Su-24, Su-25, Su-27, Su-27K, MiG-27, MiG-29, Mi-8, Mi-24, Mi-28, Ka-252 and Ka-50等定翼機、旋翼機等航空器上，彈頭重量為5.5至6公斤不等。摘錄自〈S-8 unguided aircraft rockets〉，檢索網址：<https://web.archive.org/web/20140321125243/http://www.rbs.ru/vttv/99/Firms/AppPhys/e-s8.htm>，檢索日期：2022年2月15日。

⁶³ TM5-855-1(1986). Design and analysis of hardened structures to convention weapon effects. The Departments of the Army, The Air Force, The Navy and The Defense Special Weapons Agency, Washington, DC, USA.

三、臺灣灘岸地質現況

臺灣地質由花東縱谷、西部麓山帶(北部為主)、西部濱海平原、中央山脈西翼、中央山脈東翼、海岸山脈等主要地質區所組成，⁶⁴其中西部麓山帶靠近灘岸地區主要常見為砂岩、頁岩與礫岩等項，⁶⁵又中央山脈以西地區，大多遭受東西向河川切割，且河川下游大多是泥砂、礫石質土壤所淤積而成之沖積扇平原地形，如濁水溪沖積扇即是以粗砂與厚層礫石為主，地質特性為強度與透水性高，可壓縮性低，⁶⁶如欲在此地質條件下進行開挖施作地下結構體，可就近以現地土壤作為回填土料，縮短地下掩體施工工時與節省成本，故須先行對砂性土質進行抗爆震之數值模型分析，以獲得不同地質條件下之掩體設計尺寸。

四、不同土質條件抗爆震效能案例分析

硫磺島戰役中，日軍雖於島上建構一系列地下掩體等設

施結構物，用以抵抗美軍重層火力，然而因當時時間與工程技術有限，未能對已構築好之地下掩體設施進行抗爆震效能分析。國內研究學者曾以 2.7kg TNT 炸藥為威脅源，於地表爆炸中，提出具體加勁土配置方式與衰減爆壓效能等豐碩成果，惟針對不同土質條件抗爆震行為，尚未建構完整性研究。本研究係奠基於前述成果基礎之上，衰減層以國內砂性土壤回填料與地工織布材料所組成，探討地表 TNT 炸藥爆炸後，爆震波經過不同土質條件衰減爆壓之效果，下列依序述明數值分析之土壤材料參數、案例分析數值模型建立與綜合分析。

(一)材料參數說明

國內學界常用之 LS-DYNA 爆震軟體，常用於進行數值模型建立與分析，具備探討爆震波經由介質傳遞之瞬間暫態現象之功能，廣泛於業界

⁶⁴ 摘錄自然與人文數位博物館，〈變質作用與變質岩〉，檢索網址：<http://digimuse.nmns.edu.tw/Default.aspx?tabid=409&ObjectId=0b00000181e341b1&Domin=g&Field=rm&TypeKind=&FieldName=>，檢索日期：2022 年 2 月 10 日。

⁶⁵ 摘錄王原賢，〈西部麓山帶〉，《臺灣大百科全書》，檢索網址：<https://nrch.culture.tw/twpedia.aspx?id=3269>，檢索日期：2022 年 2 月 9 日。

⁶⁶ 摘錄自水利署水文技術組，〈多元整合空間資訊技術於地層下陷監測之應用〉，《水利署電子報》，2019 年 2 月 22 日，檢索網址：https://epaper.wra.gov.tw/Article_Detail.aspx?s=D083F1D2672AFD57，檢索日期：2022 年 2 月 9 日。

使用，亦為本次進行數值分析研究工具。本篇數值模型案例建立係以空氣場、TNT 炸藥、地工織布與土壤等參數所組成，其中衰減層土壤參數設定係本研究主軸，爆炸威脅源則設定為 5.5 公斤的 TNT 炸藥，⁶⁷ 餘程式功能、參數設定與介紹均已於前人研究中詳述。⁶⁸

(二) 案例分析

本案例設置原則，為符合真實物理現象，以建立 3D 數值全模型實施探討(設計尺寸詳如圖 6 所示)，⁶⁹ 另炸藥放置於地表上，爆炸後引致之爆震波向四周傳遞，並隨經過之介質(僅空氣、土壤、地工織布)性質不同，不同土質條件傳遞衰減效果亦將所差異。

衰減層回填土材料參數輸入值(詳如表 2 所示)，⁷⁰ 分別以標準砂與 315 號石英砂在深度

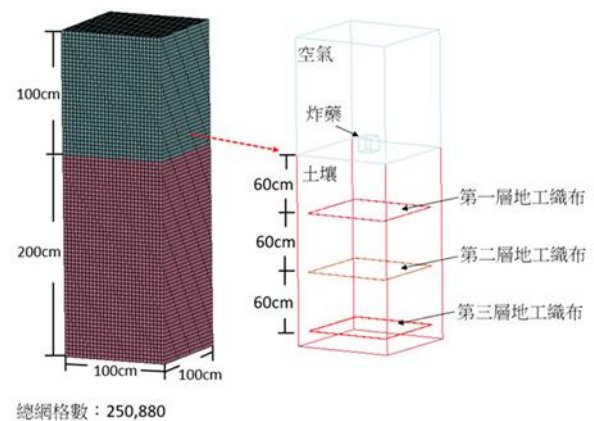


圖6 衰減層數值模型配置示意圖

資料來源：依本研究成果繪製。

與夯實條件等變數下進行衰減效能分析，⁷¹ 結果分述如後。

1. 土壤衰減層深度變化

地表炸藥爆炸後，爆震波傳遞至不同土質之衰減程度，將隨不同深度而有所變化。距地表炸源 0-60 公分區間，深層土雖較淺層土衰減值效果較佳，然趨勢較不明顯；另距離炸源越遠(180cm)處，深層土尖峰爆壓值為 755kPa、淺層土則為 1224kPa，深層較淺層土壤衰減效能多達 38%；另由表 2 土壤

⁶⁷ TNT 炸藥係由 LS-DYNA 第 8 號材料參數所描述，所需輸入值計有密度等 7 項，並依 TNT 5.5 公斤重量、密度進行換算體積大小，並輸入於所建立之數值模型尺寸。摘錄自曾世傑、蔡營寬、施述立，〈防衛作戰戰力防護之研究—以北部灘岸後方地區構築地下掩體為例〉《陸軍工兵半年刊》，第 156 期，2020 年 6 月，頁 17。

⁶⁸ 曾世傑、楊國鑫、蔡營寬，《地下結構體抗爆震研究-以加勁土衰減爆震壓力之數值分析為例》，陸軍工兵半年刊第 159 期，2021 年 10 月，頁 13-15。

⁶⁹ 本案例設定炸藥於地表爆炸後，爆震波傳遞土層介質，且土層四周係均質條件，無產生反射；另數值模型建立中，為避免爆震波傳遞至邊界四周產生反射，數值模型外在邊界均設置無反射。

⁷⁰ LS-DYNA 土壤材料中，土壤受瞬間動態之應力-應變行為主要以 EPS1~EPS10、P1~P10 等參數描述，實際參數可參考自曾世傑，〈地下結構體爆震反應研究〉《國防大學中正理工學院軍事工程研究所碩士論文》，(桃園)，2005 年，頁 73-75。

⁷¹ 本研究設置網格數量高達 25 萬，以 Intel(R) Core(TW) i5-11400@2.60GHz(RAM16GB)，時間需時 2 天。

表2 不同土質材料主要參數輸入值

LS-DYNA第五號土壤材料參數輸入一覽表								
土質類型	深度描述	參數區分	密度 (g/cm ³)	動態 剪力模數 (Mbar)	體積 模數 (Mbar)	剪力屈服面 係數		
		有效圍壓 (kPa)	RO	G	BULK	A0	A1	A2
緊密 標準砂	淺	49.05	1.708	0.000355	0.2264	0	0	0.646
	深	196.2	1.708	0.000736	0.2264	0	0	0.646
疏鬆 標準砂	淺	49.05	1.635	0.000325	0.005254	0	0	0.462
	深	196.2	1.635	0.000722	0.005254	0	0	0.462
315號 疏鬆石 英砂	淺	49.05	1.466	0.000449	0.005254	0	0	0.567
	深	196.2	1.466	0.000743	0.005254	0	0	0.567

附記：參數反映土層物理現象「RO：緊密或疏鬆程度；G：土層深、淺程度」

資料來源：摘錄自曾世傑，〈地下結構體爆震反應研究〉《國防大學中正理工學院軍事工程研究所碩士論文》，（桃園），2005年，頁73-75。

參數進一步探討，深度衰減機制主要係由土壤動態剪力模數 **G** 值控制，土層越深則 **G** 值越大，爆壓值衰減效果越好，與物理現象趨勢吻合。

2. 不同土質變數與衰減層夯實程度影響

不同土壤之回填料其土壤密度、動態剪力模數等亦隨之改變，影響爆壓衰減程度也有所差異，本節針對苗栗三義礦業 315 號石英砂與標準砂等兩種回填覆土材料，進行抗爆震衰減數值分析。圖 7 顯示兩

種材料分別在淺層覆土條件下、距離炸源 180 公分處尖峰爆壓極值，疏鬆標準砂為 1224kPa，315 號石英砂 984kPa，兩者相較後，以 315 號石英砂衰減效能多達 20% 較優，且製造成本亦較為低廉；⁷² 衰減層夯實程度主要密度所控制，體積固定下，密度越大則土壤重量越重，⁷³ 衰減效能也會有相關的影響。圖 7 顯示衰減層在不同緊密程度衰減爆壓曲線之比較，以疏鬆砂衰減爆壓效能衰減多達 60% 較好。深

⁷² 美國渥太華 (C-190) 標準砂與一般建築材料所使用之砂土比較，美國渥太華標準砂係符合 ASTM C778 規範工地密度試驗用且常用於土壤力學實驗中，故標準砂成本較為昂貴。

⁷³ 依據物理公式「物體密度等於每單位物體體積內所含有的質量大小」，計算公式 $\rho = M/V$ (ρ = 密度、 M = 質量、 V = 體積)，在相同體積下所含土壤重量與密度的關係是呈正比，故固定重量下，密度越大，體積越大。摘錄自蔡坤憲，教育物理如何看懂物理公式(一):定義篇，《物理雙月刊》，2019 年 4 月 11 日，檢索網址：https://pb.ps-taiwan.org/catalog/ins.php?index_m1_id=3&index_id=441，檢索日期：2022 年 2 月 17 日。

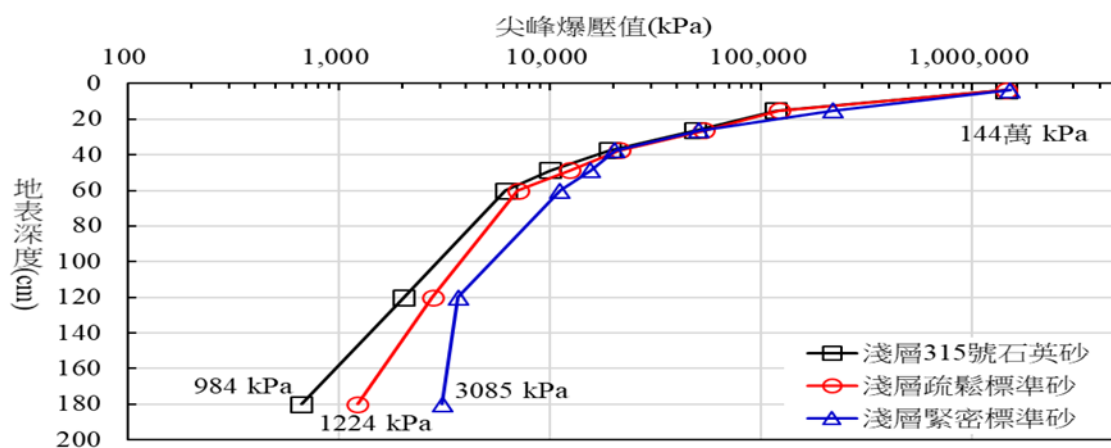


圖7 不同土質變數與衰減層夯實程度
資料來源：依本研究成果繪製。

究土壤夯實程度衰減爆壓機制，其原因主要為緊密砂土粒子間較為緊實，當爆震波透過土層粒子間碰撞進行傳遞時，因孔隙被壓縮之故，導致粒子間傳遞較為連續，能量衰減較少。

3.加勁土衰減探討

依美軍經驗公式建議，當爆壓值介於 **48kPa** 以上時，將對人體造成主要傷害。基此條件，前人研究中，可在砂性土壤中加入地工織布等加勁材料，其抗拉伸機制可有效衰減爆炸產生之尖峰爆壓值，並提出在回填土中鋪

設 **5層** 地工織布，可達衰減爆壓值效果最好，然鋪設 **3層** 亦可兼具經濟效能。

從圖 8 顯示鋪設 **3層** 地工織布加勁材料與未加勁土壤比較，距離炸源 **180cm** 處，未加勁土層衰減爆壓值仍達到 **1224kPa**，對人體產生極大危害，加勁土結果中，欲降尖峰爆壓值至 **48kPa** 以下，以淺層 **315** 號石英砂組成之加勁材料較佳，回填土衰減層僅需 **147cm**，不致對人體造成危害。

4.抗貫穿效能探討

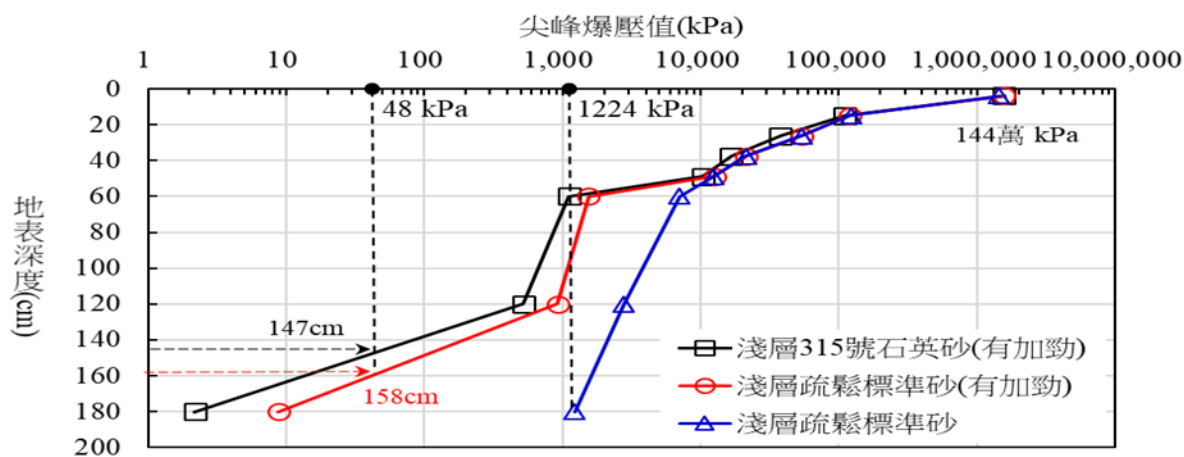


圖8 加勁土衰減爆壓曲線圖
資料來源：依本研究成果繪製。

爆炸過程所釋放能量形成動態壓力，土壤之動態特性與破壞之影響範圍受衝擊波能量影響，然接觸爆炸源之材料受高強度爆壓影響，會形成破壞之彈坑現象(如圖 9 所示)，彈坑大小亦顯示出抗貫穿能力。

為使爆炸引致彈坑不影響地下掩體，掩體上方衰減層須在一定厚度以上。表 3 顯示在不同土質條件下，地表爆炸引致彈坑直徑與範圍，且彈坑範圍越小、防護效果越好，其中以加勁土壤在深層、夯實緊密標準砂條件，炸藥引致彈坑直徑 51cm、深度 22cm 為最佳，本表數據可納入衰減層設計考量，方能全面達到安全防護之目的。

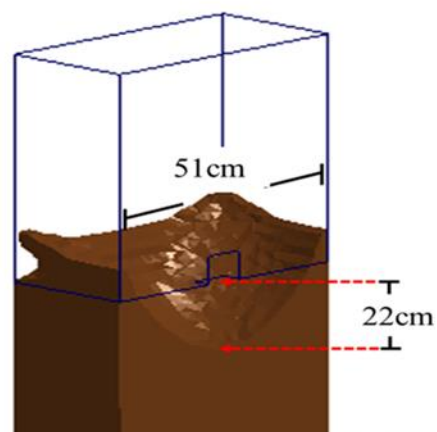


圖9 地表爆炸引致夯實緊密加勁土之彈坑現象
資料來源：依本研究成果繪製。

5.美軍建議經驗公式探討

在美軍 TM5-855-1(1986)規範中，對於炸藥於地表、地中爆炸後，衰減尖峰爆壓值與爆壓傳遞現象有諸多爆炸試驗可供參考，然而試驗土層性質與我國灘岸現地土區相差甚遠，美軍建議規範土層基本性質如表 4 所示。⁷⁴

表3 不同土質條件土壤受地表爆炸引致彈坑大小

不同土質條件下地表爆炸彈坑大小一覽表							
加勁條件	區分 尺寸 (cm)	淺層			深層		
		疏鬆 標準砂	緊密 標準砂	315號 石英砂	疏鬆 標準砂	緊密 標準砂	315號 石英砂
未加勁土	彈坑直徑	86	81	86	84	78	84
	彈坑深度	35	27	33	30	24	30
加勁土壤	彈坑直徑	61	60	60	52	51	52
	彈坑深度	22	22	22	22	22	22

資料來源：依本研究成果繪製。

⁷⁴ TM5-855-1(1998). Design and analysis of hardened structures to convention weapon effects. The Departments of the Army, The Air Force, The Navy and The Defense Special Weapons Agency, Washington, DC, USA, P8-1.; 曾世傑，〈地下結構體爆震反應研究〉《國防大學中正理工學院軍事工程研究所碩士論文》，頁 12。

表4 美軍TM5-855-1規範中之回填材料基本性質

回填土料名稱	基本描述	比重	乾密度 (mg/m ³)	含水量 (%)	飽和度 (%)	孔隙比 (%)
Demodry1	Dry Sand	2.67	1.69	4	18.3	30
Demowet1	Wet Sand	2.71	1.59	24.8	92.6	3
DSOIL3	Clayey Sand	2.69	1.85	2.5	15.1	26.5

附記：美軍準則規範試驗之回填材料土壤共計有20餘種，此次研究土壤性質選定與美軍試驗土中性質最相近的乾砂土來做比較。

Special Weapons Agency, Design and analysis of hardened structures to convention weapon effects, Washington, D.C., 1998, P8-1；曾世傑，〈地下結構體爆震反應研究〉《國防大學中正理工學院軍事工程研究所碩士論文》，頁12。

從圖 10 資料顯示，係筆者歸納美軍建議經驗公式中，提出有關砂性土壤衰減尖峰爆壓值數據，並與本研究數值模型預測值進行比較與分析，數據趨勢顯示，美軍經驗公式值與本研究預測值交會處，距地表炸源 112.5cm 處較精準，另誤差值在 10%以內之距離，約為 90cm 至 110cm 範圍之間，在此範圍外，其誤差值將超過 10%以上，不具參考價值。由上述分析可知，美軍經驗公式運用於預測尖峰爆壓值仍有

其限制，仍會依土質條件區域不同而產生誤差範圍，故欲獲得本國不同土質衰減尖峰爆壓值之相關精準數值，可進行數值分析，以同步修正數值模型參數，或可納入後續再實施縮尺與現地爆炸試驗之研究。

6.衰減層設計尺寸探討

本節次係探討前述數值分析成果，主要變數區分加勁條件、深淺變化、彈坑體積、尖峰爆壓值等項，經綜合評析，探究尖峰爆壓值衰減至 48kPa 時，衰減層適切設計厚度。

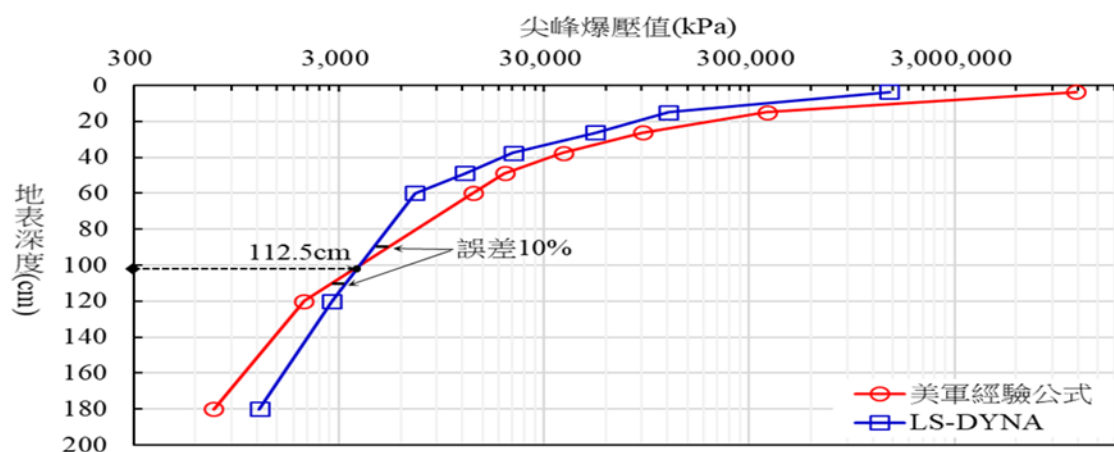


圖10 美軍經驗公式與LS-DYNA預測數值分析曲線圖
資料來源：依本研究成果繪製。

從表 5 顯示，以鋪設 3 層地工織布之加勁土層作為衰減層，無論哪一種砂土條件，距離炸源 180cm 處之尖峰爆壓值均未超過人體能夠負荷數值。爆壓衰減效果以深層土壤與疏鬆砂土較佳，然在抗貫穿能力比較，則以夯實緊密砂土較佳，另以工程施工成本言，以 315 號石英砂較具經濟成本。總體而言，以疏鬆 315 號石英砂作為衰減層回填料，在加勁、深層條件下，具備高效能衰減尖峰爆壓值，以及較佳之抗貫穿能力，且鋪設厚度僅需 143cm。

對我防衛作戰啟發與建議

1945 年硫磺島戰役距今已將近 77 年，然戰事殷鑒不遠，

我們都應該汲取過往戰史經驗與教訓，因應現今所面臨之敵情威脅及早準備，俾得在未來戰場與敵決戰時，能夠獲取最大成功公算。目前中共武力發展仍不斷提升，對我威脅狀況有增無減，我軍仍應保持警戒，時刻謀求知敵勝敵之道，下列就防衛作戰期間戰力防護階段中，軍事工程構築整備事項提出個人芻議。

一、鑽研敵軍戰術戰法、反覘陣地以求克敵之道

日軍於 1945 年 2 月 19 日美軍登陸硫磺島前，除完善島上各類型防禦工事之外，另自 1945 年 1 月開始，積極針對美軍自灘岸登陸迄島上作戰階段所有可能攻勢行動，進行陣地

表5 美軍TM5-855-1規範中之回填材料基本性質

不同地質條件衰減爆壓數值參數研究一覽表								
項次	土質條件	加勁層數	深、淺層變化	彈坑直徑 a(cm)	彈坑深度 c(cm)	彈坑體積 $\frac{4}{3}\pi a^2 c$ (cm ³)	尖峰爆壓值 (kPa)	爆壓衰減至 48kPa 設計厚度
1	疏鬆標準砂	0	淺層	86	35	1,084,309	1,224	—
2		0	深層	84	30	886,682	755	—
3		3	淺層	61	22	342,902	8.8	158cm
4		3	深層	52	22	249,183	2.5	154cm
5	緊密標準砂	0	淺層	81	27	742,031	3,085	—
6		0	深層	78	24	611,630	2,453	—
7		3	淺層	60	22	331,752	8.5	168cm
8		3	深層	51	22	239,691	6.5	163cm
9	疏鬆 315號石英砂	0	淺層	86	33	1,022,349	983	—
10		0	深層	84	30	886,682	663	—
11		3	淺層	60	22	331,752	2.2	147cm
12		3	深層	52	22	249,183	0.25	143cm

附記：設計厚度中「—」符號代表超出180cm，不敷設計成本。

資料來源：依本研究成果繪製。

反覘與反覆進入陣地演練，而從日軍俘虜截獲敵軍作戰行動判斷圖顯示，日軍研判美軍兵力部署與其作戰實際經過大致相同，顯示日軍鑽研美軍戰術戰法發揮效果，此作法也造成美軍作戰重大傷亡。

我國臺灣本島在西部灘岸一帶地質條件，尤以出海口地區，主要以粒狀土壤為主，包含礫石質、砂土等承載力性質較高土層，然再往灘岸內陸地質條件則差異性較大，以中南部雲嘉南地區而言，此區間較多魚塢、水稻田等地形，對於機甲車輛運動均造成影響。因此在遂行戰場經營任務時，作戰部隊應先就作戰地區戰術位置進行兵要調查，針對地質土層條件建立資料庫，並著手分析哪些地質影響人車機動，哪些地質條件適合快速建構地下化掩體設施、半遮蔽式掩體陣地，並從敵可能登陸灘岸地帶反覘陣地配置地點，及早肆應敵向我接近路線，適切規劃配置兵、火力部署，再依配置位置區域、地質條件、陣地種類、可容納兵力大小、戰時可供戰場經營時間等項，建構完整防禦體系(詳如圖 11 所示)，使各層級野戰部隊更加熟稔戰場環境特性，將平時戰場經營、作戰用兵指導、

部隊接戰完整行動程序，結合年度戰備任務訓練、重大演訓、電腦輔助兵棋推演、漢光實兵等項，進行反覆周而復始演練，俾達到仗在哪裡打，部隊在哪裡訓練之指導原則。

二、深入研究戰史勝敗關鍵、結合兵要調查遂行固定設施抗爆震評估

美軍於硫磺島戰役登陸前將近2個多月時間，在島上投下累計數以萬噸炸藥，企圖為後續登陸部隊，掃除戰場敵軍設置各項雷區、阻絕工事與陣地，然日軍憑藉著錯綜複雜的地下化工事掩體，抵禦美軍初期對硫磺島的轟炸，方能在晝夜連續不斷砲擊威脅下，使得其戰力得以保存完好；另日軍充分利用島上灘岸黑砂軟弱地質環境，限制美軍灘岸登陸行動，依量地用兵原則，採取間接守備作戰指導，成功吸引美軍逐步向日軍預設殲敵地區，並重創美軍登陸部隊於灘岸與縱深地區，我輩軍人應持續深入研究過往中西戰史當中勝負關鍵因素，並汲取經驗運用於建軍備戰各項作為。

我國國防部為使各級野戰部隊更加貼近戰場實戰化訓練，近年來在作戰區規劃指導下，

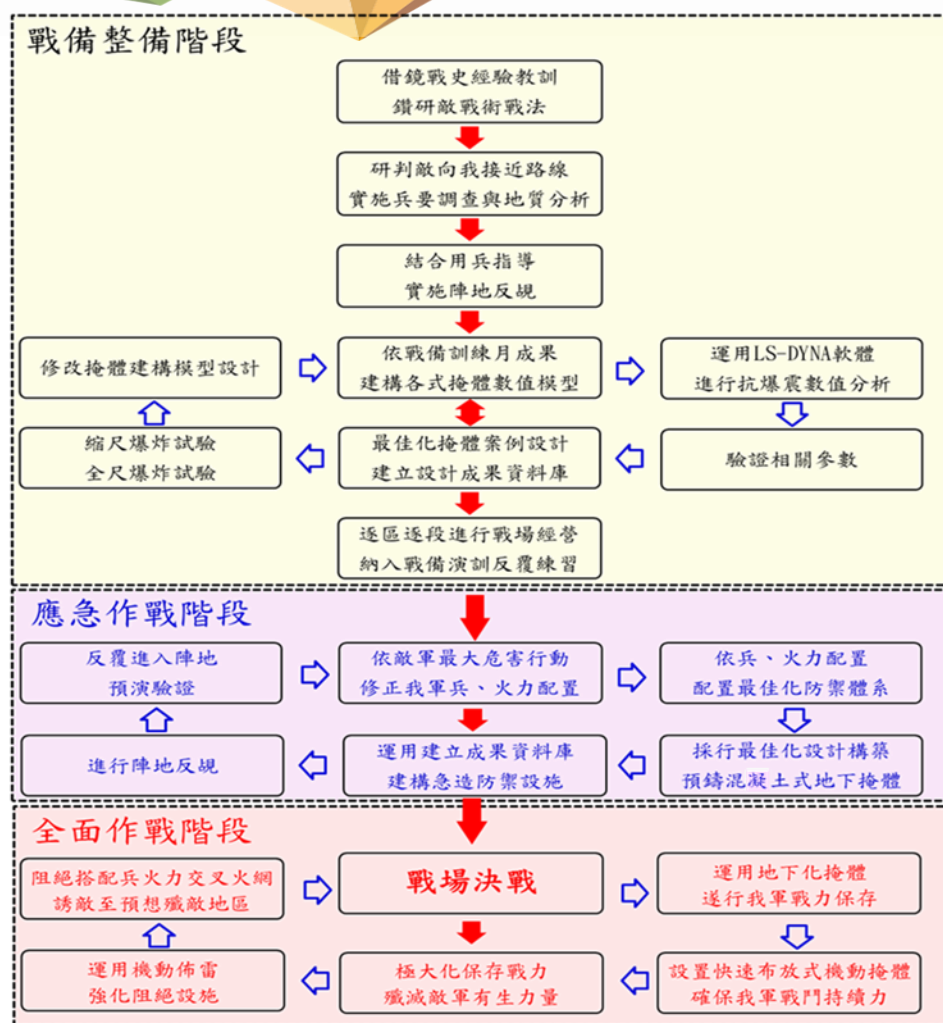


圖11 運用抗最佳化掩體設計與構築機制遂行防衛作戰
資料來源：依本研究成果繪製。

不分晝夜均依計畫在各縣市省道、縣道遂行戰備偵巡任務，無論是戰車、機械化步兵、砲兵自走砲等各類型部隊，均可於平時戰備任務訓練月階段，看見上述部隊出現在城市、鄉鎮等固定設施、公園、涵洞、橋樑等周邊進行巡弋，同時進行單一或多兵種作戰任務訓練。因此可結合戰備任務訓練時期，運用各層級部隊偵蒐機構，先就本身負責戰術任務位置範圍，進行兵要調查與資料更

新，主要包含敵軍登陸上岸地區地質條件現況，以及可供戰時運用之固定設施類型、數量、機動道路、橋樑、涵洞位置等項，然而這些設施最早係依國家耐震設計規範進行設計，對於抵抗爆炸貫穿與衰減尖峰爆壓仍有待進一步評估，因此後續戰場經營應結合兵要調查結果，依所需徵用設施用途進行抗爆震效能評估，提高野戰部隊戰場存活率。

三、結合數值分析與抗爆炸試驗，研提最佳化掩體之防禦體系

美軍於1986年、1998年產製的TM5-855-1技術規範中，雖有針對將近20多種不同回填土壤進行爆炸試驗，並依試驗結果數據，歸納出現今所使用之尖峰爆壓經驗公式，俾供後續地下掩體與其上方衰減層尺寸設計使用。然經本研究實際從事美軍經驗公式與我國回填料數值分析比較，得出僅在距離炸源較遠的某距離範圍區間之誤差值在10%以內，餘範圍均超過容許誤差值，顯示出美軍經驗公式仍會受到回填土材料在不同地區、相異之物理性質、回填條件、相對密度、夯實程度大小等因素而影響其精準預測。

本研究中，實際針對我國回填土材料進行數值模型建立與分析，成功預測出5.5kg TNT炸藥於地表爆炸後，所造成之彈坑大小與爆壓在地層中傳遞衰減的趨勢，並且提供加勁土在不同土質條件下，衰減爆震波至人體可接受程度的尺寸設計，最終提出以315號石英砂進行疏鬆回填且地工織布鋪設3層之加勁土，在距離炸源180cm處可最大化衰減爆壓值趨近於0kPa，另設計尺寸中，

僅需回填143cm厚度，即可將尖峰爆壓值衰減至48kPa以下，以施工成本節省與效能而言最高。後續建議以本研究為基礎，持續針對敵軍最大可能採行火力威脅，進行數值模型建立與分析，再配合縮尺爆炸試驗、現地全比例尺爆炸試驗驗證與參數修正，據以設計出相對應抵抗爆壓傳遞之衰減層尺寸或各種類型掩體構型，設計最佳化防禦掩體構型，完善防禦體系機制，並作為本軍抗爆震工事教範修訂依據。

四、強化部隊精神戰力教育、俾得提升戰場抗壓能力

1944年3、4月起，日軍大本營已逐步強化硫磺島上防禦兵力、武器裝備等戰略物資，然栗林忠道指揮官於6月接掌硫磺島守備任務後，依其與美軍交戰經驗，深知美軍登陸前勢必以海空火力炸射摧毀島上既設工事、陣地。因此在後續戰場經營指導中，除調整兵、火力部署為間接配備外，更以其卓越領導統御灌注至防區每一位日軍官兵，故其所轄部眾均能克服島上不利傳統構工之險惡環境，貫徹指揮官作戰意志，使島上防禦達到兵力地下化、砲兵陣地要塞化；另栗林中將更於3月17日發出訣別電文，最終以身先士卒之

姿，突圍美軍包圍並於激戰當中戰死沙場，充分將軍人武德精神戰力發揚到極致。

我國軍部隊自 1949 年間，逐次轉進至臺澎金馬地區戍守迄今已有 73 年，此期間雖歷經 3 次臺海危機，均因國軍部隊在堅苦卓絕環境中，仍持續貫徹守土堅定信念，亦是因為作戰部隊長期重視官兵精神戰力教育，而使得軍人魂得以延續。值此中共戰機、戰艦持續以擾臺行動企圖打擊我軍民士氣之際，各級作戰部隊應以戰史為鑑，將戰史教育落實在每位官兵心中，除強化官兵個人戰技技能外，亦可磨練幹部在沒有預案下，對於戰鬥、戰術之間各種臨機狀況處置能力，再配合各基地測考中心震撼堡教育、戰場抗壓訓練，使官兵感受輕、重機槍彈藥、火炮炸彈落在身邊的震撼力，真正落實仿真戰場景況訓練，更加貼近戰場實況。

結語

孫子兵法提及：「知彼知己、百戰不殆」與「先為不可勝、以待敵之可勝，不可勝在己、可勝在敵」等兩段。主要突顯出：「若要於戰場中立於不敗之地，其關鍵在於自身準備程度是否完善；若要尋找戰場中戰

勝敵人的契機，決定權在於敵人是否犯下致命錯誤，並遭我識破後，得以能突入敵間隙，指向敵軍要害」。由此看來，日軍守備硫磺島防禦作戰指導，即是以孫子兵法所提及立於不敗之地的精神，所進行一系列戰場經營作為，然日軍雖於開戰之初失去海空支援，卻能以其大縱深多據點堅固陣地、縝密火力發揚作為以及頑抗到底戰至最後一兵一卒的精神，給予登陸美軍部隊極大震撼與損傷。

由上亦知，國軍長期準備之戰場經營與戰力防護作為，就是未來防衛作戰中立於不敗之地的關鍵，而我軍只要能夠掌握戰場客觀兵要條件，並研判敵軍最大可能行動，據以適切兵火、力配置，同時強化各類型設施抗炸效能與重要軍事力量地下化，必能於戰力防護階段爭取完整戰力保存，使後續戰力發揚極大化。