

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

曾世傑中校、楊國鑫教授、蔡營寬中校

提要

- 一、國軍地面主要機甲部隊進行戰力保存階段時，將受限於既有之地形、地物、橋樑、涵洞、地下化固定設施等，導致其戰術戰法運用受限，若能於戰前建構一急造、堅固之地下結構體工事，將有助於提高作戰時成功公算。
- 二、本篇研究初步先探討國軍可能遭受之敵軍威脅、接續置重點於回填加勁土於軍事工程方面之運用、CFD(Computational Fluid Dynamics)數值模型建立與參數研究後，依研究成果進行分析與提出建議，期能對於地下結構體抗爆震等議題，提出具體可行之芻議。
- 三、本研究係在地下結構體上方鋪設衰減層，並以炸藥TNT2.7kg在地表爆炸後，探討加勁土衰減爆震效能，獲得以地工織布層數鋪設5層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，不致影響人體危害，對於軍事防護工程研究成果與作戰實務貢獻相當顯著。

關鍵字：地工織布、加勁土、抗爆震

前言

我國臺灣地處西太平洋邊陲地帶，緊鄰大陸地區東南沿海區域，雖與大陸隔著臺灣海峽，然因地勢南北狹長缺乏戰略縱深，如若敵軍採取猝然突襲進犯，我軍極有可能在未及應變下，導致第一線部隊作戰

人員肇生重大傷亡，為降低在遭受敵軍第一擊後之危害，勢必需藉由一系列具抗爆震性能之結構體，以防護我軍重要指管設施、部隊人員、武器以及戰略物資安全，此一規劃亦早已納入我軍歷年重要戰備任務與重大演訓驗證重點項目。¹上開所述之結構體，其存在位置與

¹ 國軍年度重大演訓均模擬敵軍採取猝然突襲後，國軍遂行戰力防護及戰力保存等各項作為，包含戰機優先轉場至具地下化功能之基地、地面部隊主要戰甲車進入戰術位置周邊地下化設施；另近年國軍於戰備任務訓練期間，將駐地機動至戰術

型式係以地表下方較符合作戰需求，其原因之一在於地下結構體上方回填土，能有效衰減地表爆炸引致爆震波高壓傳遞，其二同時兼備隱匿我軍企圖之目的，這恰是孫子兵法第四篇軍形篇所提及「...善守者藏於九地之下，善攻者動於九天之上...」之自保與全勝的概念。²國防部長邱先生於2021四年期國防總檢討中提及：「...建構防衛固守、重層嚇阻的堅實戰力...」，意指國軍須運用一切手段，以創新思維，籌建小型、大量難以反制之不對稱戰力，發展創新不對稱戰術戰法，³使國軍於開戰之前立於不敗之地。因此，在不進行軍備競賽條件下，建構具防禦能力地下結構體，將可提升國軍部隊於作戰時之整體戰力。然而，綜觀臺灣西部沿海灘岸一線，幾乎未見具抗炸能力之地下結構體永久設施，是故國軍地面主要機甲部隊進行戰力

保存階段時，將受限於既有之地形、地物、橋樑、涵洞、地下化固定設施等，導致其戰術戰法運用受限，若能於戰前建構一急造、堅固之地下結構體工事，將有助於提高作戰時成功公算。

一般於市區城鎮、鄉間道路所見之橋樑、涵洞、地下隧道與地下化設施，其最初設計僅達到「建築物耐震設計規範及解說」、「公路橋樑耐震設計規範」要求標準，並未將抵抗爆震力納入規範中設計，⁴然而地震力與地表炸藥爆炸後引致爆震力相比，無論震波、震幅大小、或在介質中傳遞型態等項，均有所差異。前開所提之既有地下化設施、地形、地物、橋樑、涵洞型式，僅能具備國軍作戰部隊進行隱蔽、欺敵、偽裝等功能，其抗炸能力仍有待評估。且建構具抗炸效能之地下結構體

位置各項欺敵、隱匿、戰力保存等納入重點演練科目，其中特別將戰術位置周邊之橋樑、涵洞、民間保修廠等地形、地物以及地下化設施等堅硬固定設施，納入戰力保存作為。摘錄自呂炯昌，〈漢光36號演習首日空軍戰機轉場佳山基地戰力保存〉，《NOWnews 今日新聞》，<https://www.nownews.com/news/5031844>，檢索日期：2020年10月27日；洪哲政，〈國軍戰備周國防部：演練重點是戰力保存作為〉，《聯合新聞網》<https://udn.com/news/story/10930/4967390>，檢索日期：2021年6月30日。

² 陸軍官校編印，《孫子兵法註釋》（高雄：陸軍軍官學校，民87年9月），頁111。

³ 中華民國110年四年期國防總檢討編纂委員會著，《2021四年期國防總檢討》（臺北：國防部，民110年3月），頁1-3。

⁴ 交通部，〈公路橋樑耐震設計規範〉，《中華民國交通部》，https://www.motc.gov.tw/ch/home.jsp?id=740&parentpath=0%2C2%2C738&customize=divpubreg_view.jsp&dataserno=419&aplistdn=ou=data,ou=divpubreg,ou=ap_root,o=motc,c=tw&toolsflag=Y&imgfolder=img%2Fstandard，檢索日期：2021年7月7日；內政部營建署建築管理組，〈建築物耐震設計規範及解說〉，《中華民國內政部營建署》，<https://udn.com/news/story/10930/4967390>，檢索日期：2021年7月7日。

仍有許多須探討事項，如回填料性質、現地土層夯實度大小，對於爆震波之傳遞均有所影響，是故有必要針對地下結構體抗炸效能進行一系列評估與研究。

蒐整國內、外文獻發現，美軍對於地下結構體抗爆震效能已有相關研究，並且對於結構體上方覆土層厚度提出約15cm至180cm建議；⁵另外筆者亦於2020年針對地下結構體埋置深度、壁體厚度等設計進行研究，並提出具體尺寸建議。⁶然而上述並未針對回填土性質進行探討，若能在不影響抗爆震效果下，減少結構體埋置深度，將有助於減少開挖以及回填時間，爭取急造式地下結構體構築時效，可大幅提升戰力防護效能。基於前述考量，本篇研究初步先探討國軍可能遭受之敵軍威脅、接續置重點於回填加勁土於軍事工程方面之運用、CFD(Computational Fluid Dynamics)數值模型建立與參數研究後，依研究成果進行分

析與提出建議，期能對於地下結構體抗爆震等議題，提出具體可行之芻議。

敵情威脅評估

國軍歷年重大演習中，共軍軍事威脅以及武力犯臺可能採取模式，均在「電腦兵棋推演」、「實兵演練」中進行驗證，藉以磨練戰場指揮官臨機決斷應處能力，並將推演成果之應變作為、全民總力、軍事動員、戰力保存、整體防空、資電作戰等項，據以納入經常戰備時期各項備戰計畫。⁷下列就當前我陸軍地面主戰部隊，可能面臨危害最大敵軍威脅進行初步探討，藉以分析我軍在戰力保存作為可能應處作為。

一、當面敵情研判

國內研究專家曾經對共軍犯臺模式進行研究，並歸納提出下列包含「低層次恐嚇、封鎖、有限攻擊、全面攻擊」等數種方式或階段。⁸上述犯臺方式可能同時多重併行實施，對我軍戰力造成相當大的危害，其中以火箭軍對我重要政軍指管系統、地下

⁵ The Departments of the Army, The Air Force, The Navy and The Defense Special Weapons Agency, Design and analysis of hardened structures to convention weapon effects, Washington, D.C., 1998, P8-1~8-2.

⁶ 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23-29。

⁷ 國防部軍事新聞通訊社，〈「漢光37號」演習複合式兵棋推演 達預期訓練目標〉，<https://mna.gpw.gov.tw/news/detail/?UserKey=939deb63-36e6-46af-9c05-fb47cc0004a2>，檢索日期：2021年7月1日。

⁸ 劉廣華，〈論中共可能犯台模式與我國因應之道〉《全球政治評論》，第6期，2004年4月，頁81。

指揮所、機場、港埠等固定設施危害最大，⁹ 後續登島作戰階段，將以陸航旅等具高度機動力部隊，對我戰甲車等移動式目標進行精準火力打擊，¹⁰ 其砲兵旅則優先以我軍固定式掩體陣地或機動力較差部隊進行摧毀與攻擊，¹¹ 均將造成我地面主戰部隊重大傷亡。

二、對我危害最大之敵軍威脅

依共軍近年來軍力發展，其陸、海、空、火箭軍部隊均有對臺進行火力遠程打擊之能力，為使本篇研究聚焦，僅就初始作戰與島上作戰階段火力打擊進行探討，此期間對我陸軍地面部隊危害最大威脅，應屬火箭軍、陸航旅、砲兵旅等遠程火力打擊部隊，下列就共軍由演轉戰伊始至島上作戰期間，對我最大威脅進行分析。

(一) 火箭軍優先對我軍事固定設施、陣地進行精準導彈攻擊

共軍作戰伊始，極可能運用火箭軍彈道導彈針對我政、軍指管系統、海空基地、各式掩體、陣地、地下化設施進行一系列火力精準打擊，以取得制電磁、制空、制海權為其優先主要目的。因我國現有具軍事防護能力之地下化設施興建已行之有年，其遭受共軍第一擊導彈攻擊可能性，亦早已納入歷年漢光演習之重點驗證科目，因此在原軍事地下化工程設施附近，應尋找具相同功能之地下化設施作為因應，或是建構具抗炸能力之急造地下化工事，以降低敵軍火力對我產生之危害。

(二) 砲兵旅、陸航旅對我具機動力之戰甲部隊實施火力制壓

集團軍下轄砲兵旅編制之火砲有 03 式多管火箭砲、05 式自走砲、自行迫榴砲、07 式自走砲、89 式火箭砲等型式，進入島上作戰階段後，可遂行

⁹ 彈道導彈雖然對於固定設施可發揮強大效果，惟須先期確認對象目標所在座標位置，然而對於移動中或經常機動之部隊，其攻擊性較差；且導彈發射仍具有準備時間較長、發射陣地間機動費時、無明顯隱掩蔽設施等限制因素。摘錄自陳振國、杜建明，〈中共火箭軍戰術彈道導彈對我軍事之威脅與因應對策〉《海軍學術雙月刊》，51 卷第 6 期，2017 年 12 月，頁 77。

¹⁰ 共軍陸航旅曾進行多機型、多彈種跨海突防突擊演練，其中多彈種係指導引飛彈、火砲、雷達、通信陣地等固定目標攻擊之彈藥，亦有對戰車等機動目標攻擊之彈藥。摘錄自沈明室，〈共軍陸航及空中突擊部隊近期訓練的趨勢〉《國防安全雙週報》，第 31 期，2021 年 6 月 25 日，頁 18。

¹¹ 共軍集團軍砲兵旅下轄 03 式 300 毫米遠程火箭炮(12 門火砲)、05 式 155 毫米履帶式自行榴彈炮(18 門火砲)、PCL181 式 155 毫米卡車載加榴炮等大口徑火力，其中 05 式自行榴彈炮最大射程超過 50 公里，最大射速超過 8 發/分鐘，射擊反應時間不超過 1 分鐘。摘錄自國平軍史，〈集團軍砲兵旅強大的火力輸出〉，《今日焦點》，<https://buzzly.net/p/JtKR10vi/>；晨曦軍情，〈我國陸軍砲兵旅，目前裝備了哪些火砲，實力有多強？〉，《百度百科》，<http://baijiahao.baidu.com/s?id=1642111110606379761&wfr=spider&for=pc&searchword=%E7%82%AE%E5%85%B5%E6%97%85%E6%9C%89%E5%A4%9A%E5%B0%91%E7%81%AB%E7%82%AE>，檢索日期：2021 年 9 月 7 日。

地對空、地對地火力打擊；¹²另陸航旅攻擊直升機可掛載機砲、火箭彈、反坦克、空對地、空對空飛彈等，作戰期間將對我軍人、裝及軍事設施造成重大損害，¹³其中就 S-5 航空火箭彈攻擊能力言，其主要攻擊對象為地面機甲部隊與掩體、陣地等地面目標，因中共陸航旅不受地障限制、機動力迅速、火力強大，其殺傷力可造成地面目標重大傷損。

(三)應處作為建議

上開所提之地下化軍事設施遭受共軍火力打擊後，其原本防護力將大幅下降，我軍勢必有所因應，以強化戰力保存能力。除提高我軍戰甲部隊防護力外，其機動力、隱、掩蔽、欺敵等措施亦須優先考量；另為有效進行敵軍威脅分析，本篇研究將以對我危害最大之共軍陸航旅掛載武器，進行抗爆震研究，初期先以掛載之火箭彈彈種為地表爆炸威脅源，並在前人研究基礎上，進一步建構適切數值模型實施分析。

有關地下結構體抗爆震方面研究，國內軍事人員已就

中共衛士火箭系列，對我地下掩體造成危害影響，進行詳細研究分析，並成功模擬火箭於地表爆炸後，爆震波傳遞至土層、地下掩體內部之衰減現象。¹⁴然而前人研究中，如欲將爆震波衰減至對人體傷害最低之爆壓下，其地下掩體上方之回填土至少須達 7.5 公尺，是故須進行深開挖，其所耗費時間與工程技術相當費時且複雜，對於應急作戰階段實施急造式地下結構體言，較無法符合作戰需求。因此，若能在兼顧防護力之前提下，可進一步將加勁土納入抗爆震整體研究考量，有效減少結構體上方回填加勁土層厚度。惟必須對加勁土實施爆震衰減效能評估後，方可得出建議之加勁土尺寸設計參數。

土工合成材料與加勁土運用於軍事防護工程探討

加勁土壤工法係運用土壤與加勁材料之相互磨擦作用，予以提高土壤整體間之穩定性，此一工法主要使用細長比高、富撓曲性且張力強度大之鋼材或土工合成材料，置放於填土區

¹² 〈軍改 5：集團軍屬炮兵旅〉，《搜狐》，https://m.sohu.com/n/483108577/?pvid=000115_3w_a，檢索日期：2021 年 9 月 7 日。

¹³ 〈武直-10〉，《百度百科》，<https://baike.baidu.com/item/%E6%AD%A6%E7%9B%B4-10/5543885>，檢索日期：2021 年 9 月 7 日。

¹⁴ 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 29。

內，以增加支承力、減輕側向土壓力，進而提升加勁土體穩定性。¹⁵一般常見地工合成材料有地工流網 (geonets)、地工格室 (geocells)、垂直排水帶 (geodrains)、地工磚 (geofoams)、地工格網 (geogrids)、地工織物 (geotextiles; woven & nonwoven)，其功能為加勁、排水、過濾、隔離等，而常見於土木水利工程用途有土石籠袋、地工砂袋、¹⁶加勁擋土牆、加勁邊坡、加勁路堤等。¹⁷在軍事方面用途，常見有地工織布抵抗彈藥貫穿、加勁土運用於急造組合式抗爆震擋牆、靶場背彈面擋土牆等，其主要功能有衰減、吸附爆震波能量，下列分別就軍事方面用途進行抗爆震機制探討。

一、地工織布抵抗貫穿力

由於地工織物聚合物複合性材料具備抗貫穿勁度以及高吸附衝擊波能力，已逐漸廣泛運用於國防產業，此外因材料形狀與特性，也被用於特定應

用之需求。在抵抗子彈貫穿研究方面，織物聚合物複合性材料透過變形、分層以及層間剪力作用，吸附子彈動能以延遲子彈貫穿速度。¹⁸另外彈道撞擊能量穿透地工織布時，將會因為地工織布貫穿點周邊拉伸變形，而導致貫穿能量轉變成地工織布材料拉伸能量取代，¹⁹可進一步研判此拉伸變形係因地工織布張力而形成張力膜效應，而子彈貫穿動能經過地工織布後透過張力膜效應而消散。

二、急造組合式抗爆震擋牆

受限於防衛作戰應急作戰階段時間短促，為使我軍作戰部隊與敵接戰時，具備較高持續戰力，在工事阻絕設施與各式掩體建構要求，必須要能夠具備快速組裝、現地取材性質。國內外軍事防護工程研究人員針對組合式掩體 (HESCO) 已提出相關研究，並舉出美國、泰國等世界各國組合式掩體案例比較，其中美軍長期處於戰地之故，因此研

¹⁵ 蘇茂林、劉俊杰、李錫霖，〈加勁工法在公路工程之應用探討〉《台灣公路工程月刊》，2005年4月，第31卷第10期，頁12-13。

¹⁶ 周南山，〈地工合成材料在永續工程之應用〉，《中華民國環境工程學會電子報》，2016年第2期，https://www.cienve.org.tw/epaper/105_2/tech1.aspx，檢索日期：2021年7月2日。

¹⁷ 郁興實業，〈加勁土壤結構〉，《郁興實業產品暨工法介紹》，<https://yurhsin.com/blog/2015/06/24/geogrid-retainingwall/>，檢索日期：2021年7月2日。

¹⁸ Phadnis V A, Pandya K S, Naik N K, Roy A, V V Silberschmidt. (2013). Ballistic impact behaviour of woven fabric composite: finite element analysis and experiments. J Phys Conf Ser 451:012019.

¹⁹ Martínez-Hergueta F, Ridruejo A, González C, LLorca J. (2017). Numerical simulation of the ballistic response of needle-punched nonwoven fabrics. International Journal of Solids and Structures. Volumes 106-107, 56-67.

發出多功能性之組合式掩體，除可作為砲台、戰車、直升機等重要武器裝備掩體外，²⁰且經過強化後之土石籠袋圍束後，大幅提升抗炸效能，在兼具快速組裝條件下，其功能可達急造組合式抗爆震擋牆。圖 1 顯示美軍於戰地當中，運用鐵絲網、土工織布改良後之組合式掩體(其組成與外觀類似我國土木水利工程常見之土石籠袋)，²¹並以大量現地砂土材料作為回填料，即可快速依照作戰需求組合成各類型掩體、瞭望台，大幅提升戰場戰力保存能力。

除上述探究不同類型與功能外，印度有學者針對 HESCO 急造組合式抗爆震擋牆，延伸其軍事與商業方面用途(詳如圖 2 所示)，同時實施衝擊波試驗驗證，並獲得下列具體成果：

1. 急造組合式抗爆震擋牆可以有效衰減衝擊波。
2. 衝擊波衰減因子取決於平均粒徑大小與擋牆厚度。
3. 土工織布隔絕砂土與衝擊波直接接觸，進而降低應力傳遞幅度。

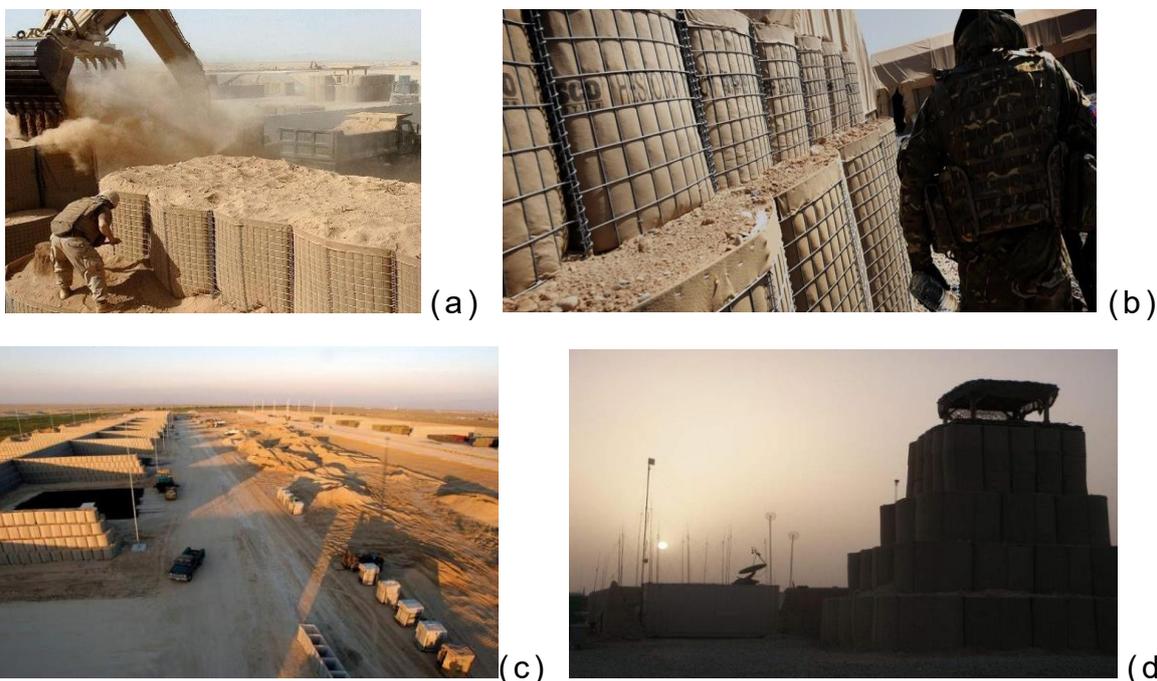


圖 1 美軍於戰地組裝急造組合式抗爆震擋牆：(a)組裝並回填現地砂土；(b)多層堆疊組立；(c)各類型掩體；(d)4 層式瞭望台

資料來源：摘錄自 HESCO，〈Defensive Barriers, Protective Structures and Body Armour〉，《Army Technology》，<https://www.army-technology.com/contractors/infrastructure/hesco/>，檢索日期：2021 年 7 月 2 日。

²⁰ 吳奇諭，〈防衛作戰中組合式掩體運用之研究〉《陸軍工兵半年刊》，第 150 期，2017 年 5 月，頁 2-3。

²¹ HESCO，〈Defensive Barriers, Protective Structures and Body Armour〉，《Army Technology》，<https://www.army-technology.com/contractors/infrastructure/hesco/>，檢索日期：2021 年 7 月 2

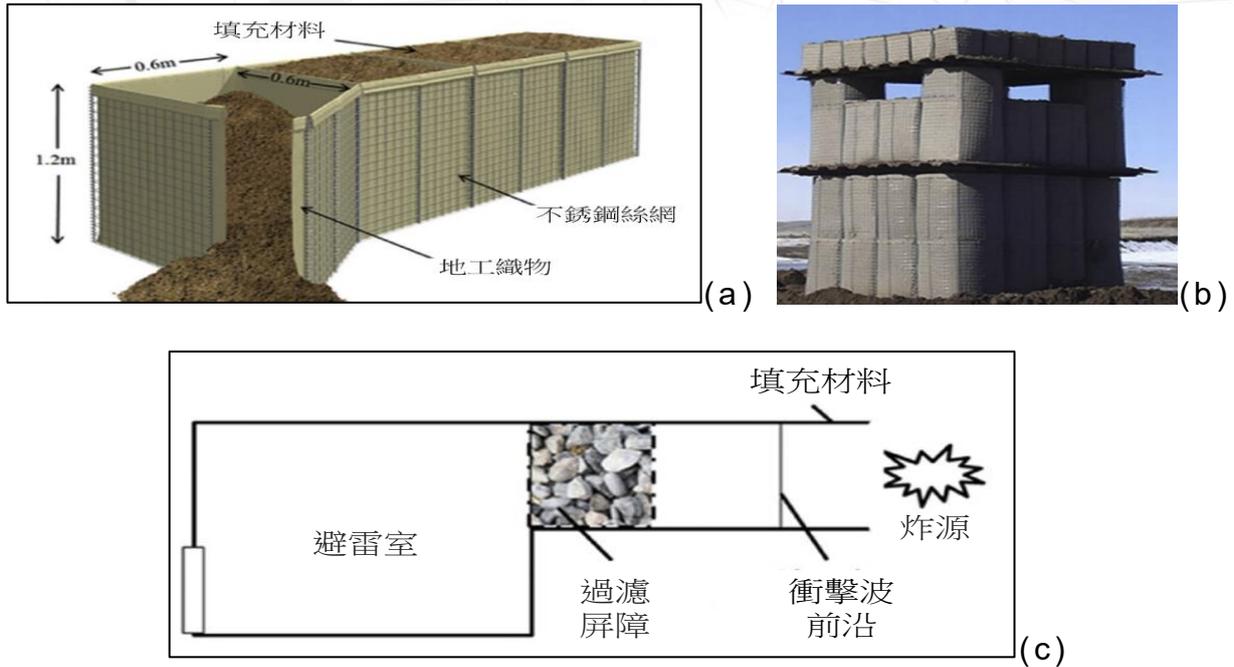


圖 2 急造組合式抗爆震擋牆功能與用途：(a)組裝後回填材料形成 0.6x0.6x1.2m 抗爆震擋牆；(b)工事掩體；(c)密封採礦室通風管道，阻隔衝擊波

資料來源：摘錄自 Padmanabha Vivek, Sitharam Thallak G.. (2017). Shock wave attenuation by geotextile encapsulated sand barrier systems. *Geotextiles and Geomembranes*. Volume 45, Issue 3, June 2017, Pages 149-160.

4. 抗爆震擋牆回填合適材料後，即可成為有效保護系統，以衰減衝擊波傳遞。

5. 由於土工織布與鐵絲網由外向內包覆回填土，其本身材質無法承受高溫與衝擊波直接壓力，須依實際環境條件適切調整土工織布強度。

三、射擊訓練場背彈牆加勁土堤

軍事射擊訓練場地通常會於現地選定山坡坡趾或坡面處進行施作，²² 圖 3 所示係我軍某區域大型演訓射擊場地，其背彈面土體能衰減彈藥射擊後所產生爆震波，且爆炸後之碎片不致傷害靶場附近鄰房、

人員與固定設施之安全。然而即便做好各項防護措施，炸藥爆炸引致爆震波仍對周邊鄰舍造成不小影響，並容易引起周邊靶場民眾陳抗事件發生，因此有必要針對大型火砲訓場進行爆震影響評估，如有造成明顯危害區域，建議可進一步實施訓場減震工程作為因應。

有關靶場減震工程，國內均有相關實際案例，以戰車砲射擊訓練場背彈牆施作工程為例（詳如圖 4），²³ 在射擊場背彈面處，施作大面積加勁土堤工程，將可以有效達到靶場爆震波減震效果。

²² 張忠義，〈聯合演訓場地〉，《自由時報》，<https://news.ltn.com.tw/news/politics/breakingnews/1109090>，檢索日期:2021年7月2日。

²³ 屹祥有限公司，〈戰車砲被彈牆加勁堤〉，《加勁擋土牆實績專區》，<https://photo.xuite.net/a601.b489/5618613/5.jpg>，檢索日期:2021年7月2日。



圖 3 國內某大型聯合演訓射擊場地 (靶區位於自然邊坡表面處)

資料來源：修改自張忠義，〈聯合演訓場地〉，《自由時報》，
<https://news.ltn.com.tw/news/politics/breakingnews/1109090>，檢索日期：2021 年 7 月 2 日。



圖 4 戰車砲射擊訓練場背彈牆加勁土堤

資料來源：修改自竝祥有限公司，〈戰車砲背彈牆加勁堤〉，《加勁擋土牆實績專區》，
<https://photo.xuite.net/a601.b489/5618613/5.jpg>，檢索日期：2021 年 7 月 2 日。

國外亦有加勁擋土牆爆震實例研究，並進行全尺寸爆炸試驗，²⁴ 文獻中顯示(詳如圖 5)，加勁擋土牆爆炸試驗配置圖，在一個 3 米高之回包式加勁擋土牆體，遭受距離 5 米處炸藥爆炸後之動態反應行為，可以發現爆震波雖然使土工織布表面產生燒毀、融蝕以及些微向內壓縮之現象，但就加勁擋土牆整體而言，仍然維持良好直立性，此係土層外部因有土工織布包覆而產生圍束作用，以及內部織物與土壤之間摩擦力，得以強化土體穩定性。

四、土工織物與加勁土壤抗爆震機制探討

綜合上述，可以得知土工

織物與加勁土壤對於抵抗子彈貫穿、以及炸藥爆炸後產生衝擊波、爆震波，具有不同程度消散能量的效果，分析如後。

1. 土工織物張力膜效應衰減子彈貫穿能量

現有國防產業中，製造抵抗子彈貫穿之防彈衣材料，除了使用金屬、陶瓷、高性能複合材料板等硬質防彈衣之外，另有以高性能纖維如尼龍、凱芙拉或者超高分子聚乙烯等軟質材料組成之軟式防彈衣。²⁵ 子彈因撞針撞擊彈藥底火引發彈殼內部發射藥，並將彈頭由槍管發射至目標物，子彈彈頭飛行期間因為空氣間產生摩擦力，而導致隨距離越遠，動能也

²⁴ Ng C. C, Chew S. H, Karunaratne G. P, S. A. Tan, S. L. Loh. (2012). Flexible and Rigid Faced MSE Walls subject to Blasting. *Advances in Transportation and Geoenvironmental Systems Using Geosynthetics*. 332-336.

²⁵ 李赫，〈製造防彈背心必備的纖維「克維拉」，為何能夠強鋼勝鐵？〉，《PanSci 泛科學》，2018/11/22，<https://pansci.asia/archives/149495>，檢索日期：2021 年 9 月 7 日。

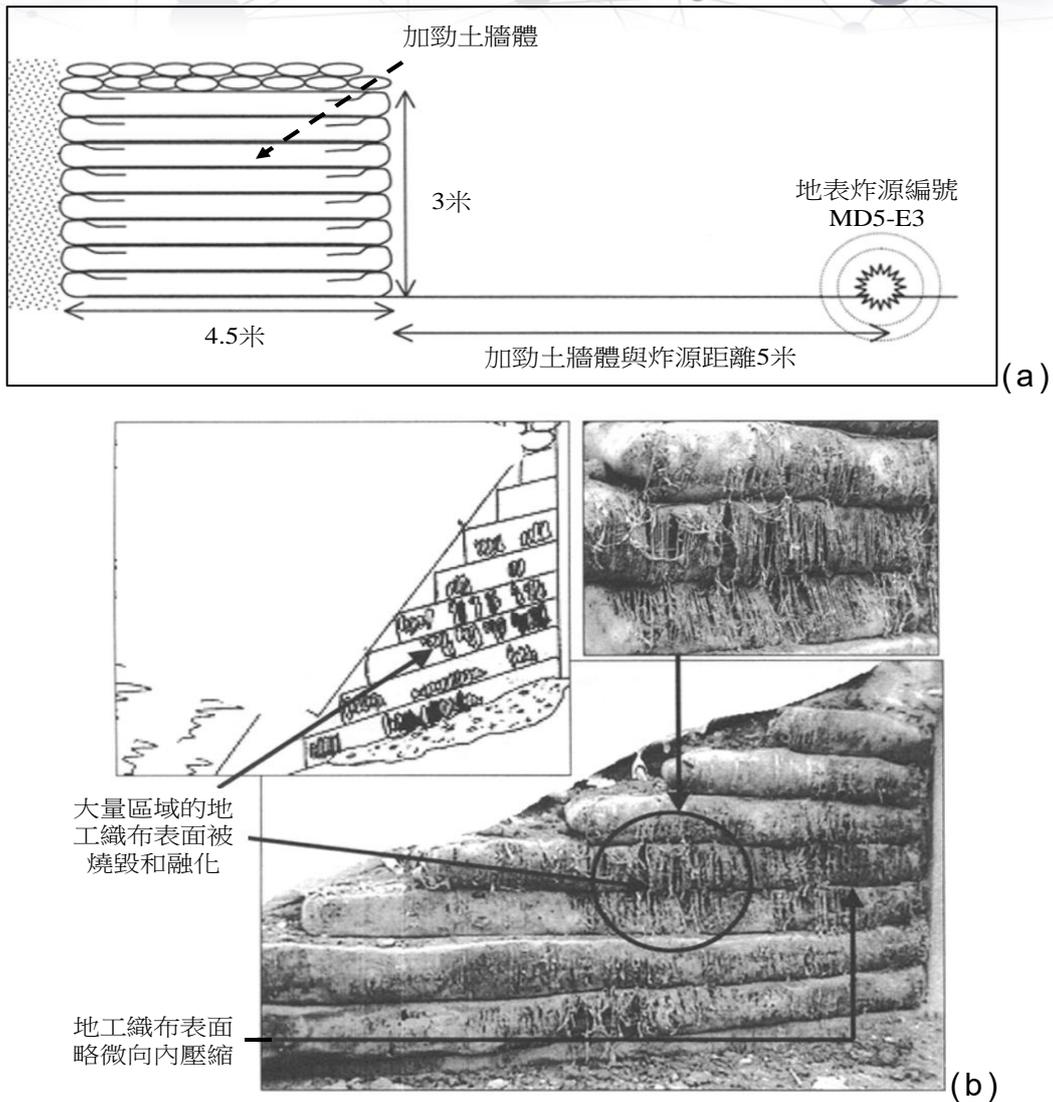


圖 5 加勁土牆體爆炸試驗配置圖：(a)爆炸試驗前；(b)爆炸試驗後

資料來源：摘錄自 Ng C. C, Chew S. H, Karunaratne G. P, S. A. Tan, S. L. Loh. (2012). Flexible and Rigid Faced MSE Walls subject to Blasting. *Advances in Transportation and Geoenvironmental Systems Using Geosynthetics*. 327~330.

逐漸消散。在國外所進行相關試驗中，亦顯示出子彈貫穿織物材料期間所導致之能量損耗、延遲子彈貫穿速度，除了材料本身提供摩擦力之外，更有一大部分係因織物材料本身經過拉撐後，所產生之張力膜效應、拉伸變形、剪切效應、纖維毀壞等方式吸附子彈衝擊能量。

2. 土石籠袋以圍束力衰減衝擊效能

土石籠袋運用於軍事方面上，即是常見急造組合式抗爆震擋牆。係以鐵絲構成網狀並內嵌地工織布，其特點快速組裝，並且可回填現地土壤等粒狀材料，組構完成後，其穩固機制主要由地工織物與鐵絲網

貢獻拉撐力量，此一圍束力已有效提升土石籠袋抗爆震強度。承受炸藥爆炸後引起衝擊波與爆震力之防護關鍵因素，主要是由土石籠袋內部之粒狀土壤提供顆粒之間摩擦力、剪力作用、地工織布降低應力傳遞幅度等。然而土石籠袋外側之地工織布表面容易遭受來側面炸藥爆炸後之高溫、高壓、爆炸碎片而損壞。

3. 加勁土堤、擋土牆藉織物摩擦力消散衝擊波能量

加勁土堤、擋土牆製作主要以回包式加勁工法，在土壤中鋪設加勁材料，藉由土壤與加勁材間之互制行為產生摩擦阻力以穩定土體，同時因本身自重關係，可以抵抗牆體背後的側向土壓力或其他應力。²⁶當加勁擋土牆來自於正面或側面某個距離之炸藥爆炸產生衝擊波效應時，衝擊波傳遞至加勁土體時，因為土體內部加勁材料與土壤互制作用後產生摩擦力，有效衰減土體內部衝擊波能量。然而土體表面織布也容易產生燒毀、融蝕、以及遭受爆炸後碎片破壞情形，需要局部處理，以恢復其原有功能。

4. 地下結構體抗爆震實例

在國、內外研究學者、業界工程所實施之地工織布、加勁土壤在抗爆震研究以及工程實務運用，可以瞭解其抵抗外力動態反應以及對衝擊波、爆震波防護機制。因此若能進一步將地工織布運用於地下結構體開挖施工後之回填土壤中，其衰減爆震波可以達到減壓減震的功能，將能有效提升地下結構體防護力。

美軍對於地上或地下結構體防護作為，已做了一系列爆炸試驗方面研究，以地下結構體抗爆震研究為例，由圖 6 可知美軍在地下結構體防護設計配置概念，²⁷其威脅主要區分結構體上方、側面以及底層等三個方面，在一預劃施作地下結構體防護工程區域中，在完成現地土方開挖、支撐工法、底版、樓版、主體結構物施工後，分別從側方回填土壤，並在結構物上方實施回填土衰減層設置，最後施作混凝土抗炸板或以碎石覆蓋。美軍亦有進行在不同條件威脅下，炸藥爆炸引致地表衝擊波、爆震應力在回填土層傳

²⁶ 盟鑫永續綠色工程教育園區，〈回包式加勁擋土牆工法介紹〉，《綠色工法展示》，<http://www.ecopark.gold-joint.com/product.php?CNo=16&PNo=12>，檢索日期：2021年7月3日。

²⁷ The Departments of the Army, The Air Force, The Navy and The Defense Special Weapons Agency, Design and analysis of hardened structures to convention weapon effects, Washington, D.C., 1998, P8-1.

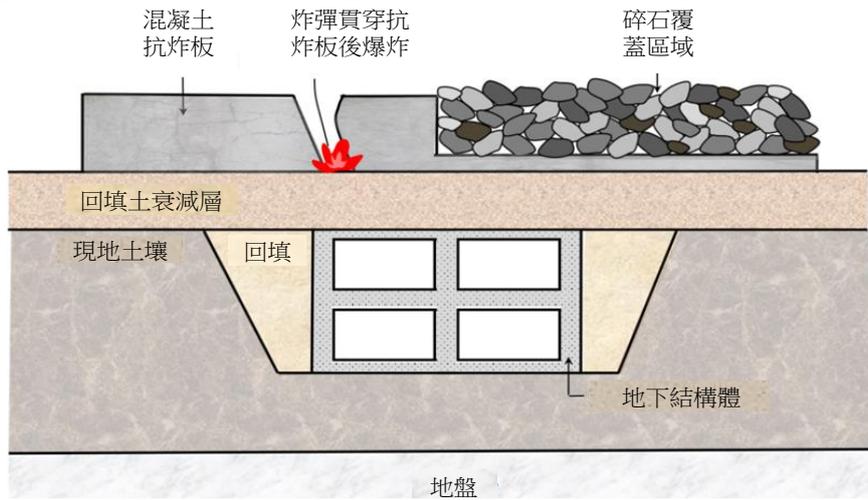


圖 6 美軍地下結構體防護敵軍威脅示意圖

資料來源：修改自 The Departments of the Army, The Air Force, The Navy and The Defense Special Weapons Agency, Design and analysis of hardened structures to convention weapon effects, Washington, D.C., 1998, P8-1~8-2.

遞效益之研究，並進一步提出地下結構體上方衰減層設計尺寸約 15cm 至 180cm 建議；另就衰減層回填土壤描述，美軍亦提供乾砂、濕性黏土、粉質黏土、礫質黏土、塑性黏土、砂質黏土等土壤物理性質數據參考。然此衰減層中並未加入地工織物等材料，將可作為後續相關研究議題深入探討。

現地土壤會因為地域性不同，其物理性質條件會有所差異。上述美軍試驗土壤主要來源均在美國地區，與我國現地土壤仍有相當差異，因此在進行回填加勁土抗爆震分析研究時，必須先就臺灣現地進行土壤與地工織物物理性質試驗，其所得研究成果方能符合我國加勁土抗爆震設計要求。

數值模型案例研究

筆者曾經對地下結構體上方衰減層抗爆震效能分析進行研究，在所建構數值模型中，共計建置空氣、TNT炸藥、土壤、地下結構體等四種元素網格，並針對不同掩體結構厚度、不同埋置深度實施程式運算與分析，獲得200公斤TNT在地表爆炸，衰減層至少需建構至7.5米，結構體內部爆壓始可降低至不造成人體危害程度等具體成果。²⁸

然而前述衰減層僅以回填砂土實施研究，數值模型建立係以2維簡化模型探討，雖然有效減少網格數量，然與現地場景仍有些許誤差。下列程式分析中，將在前述研究基礎上，建構3維數值模型，持續進行加勁

²⁸ 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19-22。

土衰減爆震分析，為減少網格劃分數量與計算時間，僅就衰減層所發揮效能探討，並未探討地下結構體內部爆壓數值。

其中敵軍威脅來源，則調整為共軍對我危害最大之敵軍威脅中，陸航旅所掛載火箭彈武器—S-5M 航空火箭彈，²⁹TNT 等值重量概約 2.7kg，並假定火箭彈發射後，穿透混凝土抗炸板，於衰減層上方爆炸；另衰減層主要組成成分，係使用筆者 2020 研究相同性質砂土，並於內部增加不同性質土工織布(Geotextile)後，針對土工織布鋪設層數、材料勁度、降伏強度等項，進行爆壓衰減效能之研究，下列就材料參數、數值模型建立、參數研究等部分實施說明。

一、材料參數概述

本研究運用 LS-DYNA 爆震分析軟體進程式分析，數值模型完成建構後，需要輸入空氣、炸藥、土壤、土工織布等 4 種材料參數，同時輸入空氣、炸藥狀態方程式後，得以進行運算。

程式驗證部分，筆者蒐整國、內外文獻後，已於 2020 年研究中，針對爆震分析軟體數值模型完成驗證，所得到驗證數據與文獻值相近，³⁰除摘錄前次研究中空氣、炸藥、土壤參數與狀態方程式進行分析外，尚有部分數據係依據材料物理性質試驗、國外期刊文獻、筆者研究成果等資料，進行比對換算後取得，下列就土壤、炸藥、空氣、土工織布材料參數實施說明。

(一) 土壤材料參數

土壤材料(SOIL_AND_FOAM)，LS-DYNA 編號第 5 號。在某個狀態下，土壤會像是一個流體一樣存在，因此需要給予幾何邊界或是在一結構內部被限制，其內建參數均可由土壤力學試驗求取。³¹ 主要由土壤密度(RO，物理試驗)、動態剪力模數(G，動三軸試驗)、降伏函數(A0、A1、A2，靜三軸試驗)以及高圍壓下之應力應變(EPS1~EPS10、P1~P10，靜水壓縮試驗)等數值，對土壤模型進行描述。土壤參數整理如表 1 所示。

²⁹ S-5 航空火箭彈係共軍陸航旅此類型發射總重達 3.64kg，其中 TNT 等值重量概約 2.7kg，連續射擊下，殺傷半徑至少 100 米平方。摘錄自百科知識中文網編輯群，〈航空火箭〉，《百科知識中文網》，<https://www.easyatm.com.tw/wiki/%E8%88%AA%E7%A9%BA%E7%81%AB%E7%AE%AD>；摘錄華人百科，〈航空火箭彈〉，《華人百科》，<https://www.itsfun.com.tw/%E8%88%AA%E7%A9%BA%E7%81%AB%E7%AE%AD%E5%BD%88/wiki-8565395-7292275>，檢索日期:2021 年 7 月 4 日。

³⁰ The Departments of the Army, The Air Force, The Navy and The Defense Special Weapons Agency, Design and analysis of hardened structures to convention weapon effects, Washington, D.C., 1998, P8-1.

³¹ Livermore Software Technology Corporation, 〈LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL VOLUME I〉,《LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY CORPORATION》, P55-58。

表 1 土壤材料參數輸入參考值

* MAT_005			* MAT_AND_FOAM				
RO	G	BULK	A0	A1	A2	PC	VCR
1.466	4.49E-4	5.25E-3	0	0	0.567	0	0
EPS1	EPS2	EPS3	EPS4	EPS5	EPS6	EPS7	EPS8
0	-0.0189	-0.035	-0.0612	-0.0881	-0.1158	-0.1371	-0.1736
EPS9	EPS10						
-0.2115	-0.2509						
P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
0	5.11E-5	7.34E-5	1.160E-4	1.58E-4	2.02E-4	2.33E-4	2.82E-4
P9	P10						
3.42E-4	5.49E-4						

資料來源：筆者自行研究整理自 Livermore Software Technology Corporation，〈LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL VOLUME I〉，《LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY CORPORATION》，P55-58；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 75。

(二)炸藥、空氣材料參數(進行文獻蒐整後得到)

炸藥材料(MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN)，LS-DYNA 編號第 8 號。可以運用於高爆炸藥的爆炸進行建模模擬，同時需要定義其狀態方程式。主要由炸藥密度、爆速、Chapman-Jouguet 壓力等數值對其進行描述；³² 另狀態方程式則需要輸入狀態方程式係數(A、B、R1~R2、OMEGA)、初始內能(E0)、初始相對體積(V0)等項，始能計算分析。

空氣材料(MAT_NULL)，LS-DYNA 編號第 9 號。³³ 這種材料允許在不計算軸差應力的情況下考慮狀態方程式，可選擇粘度係數。此外，可以進行拉伸和壓縮的侵蝕作用。此選項卡片僅需輸入空氣密度；另其

狀態方程式則須輸入狀態方程式係數(C4、C5)、初始相對體積(V0)等項，始得程式計算。有關炸藥、空氣材料參數，整理如表 2 所示。

(三)土工織布材料參數

土工織布材料(MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY)，LS-DYNA 編號第 24 號。³⁴ 可以定義具有任意應力應變曲線和任意應變率相關性的彈塑性材料。主要由密度(RO)、材料勁度(E)、柏松比(PR)、破壞時降伏強度(SIGY)等數值，對土工織布材料受力後之應力應變行為進行描述，筆者蒐整國外文獻後，針對程式輸入參數值選項進行比對計算，並將此材料參數整理如表 3 所示。

³² 同註 31，P61-63。

³³ 同註 31，P64-65。

³⁴ 同註 31，P124-128。

表 2 炸藥、空氣材料參數輸入參考值

*MAT_008			* MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN				
RO	D	PCJ					
1.63	0.693	0.21					
*EOS_JWL							
A	B	R1	R2	OMEG	E0	V0	
3.72	0.03231	4.15	0.95	0.3	0.07	1	
*MAT_009				* MAT_NULL			
RO							
0.00129							
*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL							
C4	C5	V0					
0.4	0.4	1					

資料來源：筆者自行研究整理自 Livermore Software Technology Corporation, 〈LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL VOLUME I〉, 《LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY CORPORATION》, P61-65；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 94。

表 3 土工織布材料參數輸入參考值

*MAT_024		* PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY					
RO	E	PR	SIGY				
0.45	6.3	0.4	0.00471				

資料來源：文獻提供材料勁度為 18.75、降伏強度為 12.3，經過單位比例換算後，得到表列輸入值。筆者自行研究整理自 Livermore Software Technology Corporation, 〈LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL VOLUME I〉, 《LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY CORPORATION》, P61-65；Kuo-Hsin Yang, Jung Chiang, Cha-Wei La, Jie Han, Ming-Lang Lin. (2020). Performance of geosynthetic-reinforced soil foundations across a normal fault. Geotextiles and Geomembranes. Volume 48, Issue 3, 357-373.

二、數值模型建立與分析

炸藥於地表爆炸後，會形成一個點震源，並藉由周圍介質(如土壤、空氣等)向外傳遞，為簡化此一複雜問題，並使本研究探討聚焦加勁土衰減爆壓之過程，故作以下假設，以利後續得到預期研究成果。

(一)為簡化數值模型計算時間及減少元素數量，仿真現地爆炸條件，故採用三維模型分析。並經由簡化模型與收斂性分析驗證後，採用二分之一簡化模型。

(二)數值模型運算最終僅需獲得地下結構物上方處，衰減後之爆壓數值，意指加勁土底層與地下結構體上方介面間之爆壓值，故無設置地下結構體，以減少網格數量。

(三)炸藥形狀方面，依炸藥重量換算正立方體體積，並取之邊長適當比例作為本分析模型網格尺寸依據。

(四)主要針對炸藥爆炸時所產生之瞬間爆震波傳遞現象進行分析。

(五)地下織布與土壤密合，程式以ALE流固耦合進行運算。

(六)邊界條件：爆震波在空氣、土中傳遞越遠，尖峰爆壓值愈小，而本節主要探討加勁土衰減爆壓過程，並不考慮由邊界所反射之爆震波影響，邊界條件均設置無反射。

有關數值模型建立相關尺寸，參據目前對我危害最大之敵軍威脅，優先考量於地表處(地表下方為衰減層)，設置重量 2.7kg 之 TNT 炸藥，於衰減層上方爆炸後引致爆震波傳遞至下方加勁土層。

美軍在地下結構體設置爆壓衰減層配置中，亦提出在未加勁條件下，衰減層厚度可

介於 15cm-180cm 之間。基於上述，本研究設置二分之一簡化數值模型，未加勁土層之衰減層厚度為 180cm、長 200cm、寬 100cm、地表炸藥 2.7kg(詳如圖 7 所示)；另於加勁土層中設置三層地工織布，並針對上述數值模型，區分地工織布層數、材料勁度、材料降伏強度等三種參數，進行分析計算。³⁵

三、加勁土案例研究與爆壓衰減機制

參數研究案例中，在相同炸源下，區分地工織布層數(2、3、5 層)、材料勁度(各增減 50%)、材料降伏強度(各增減

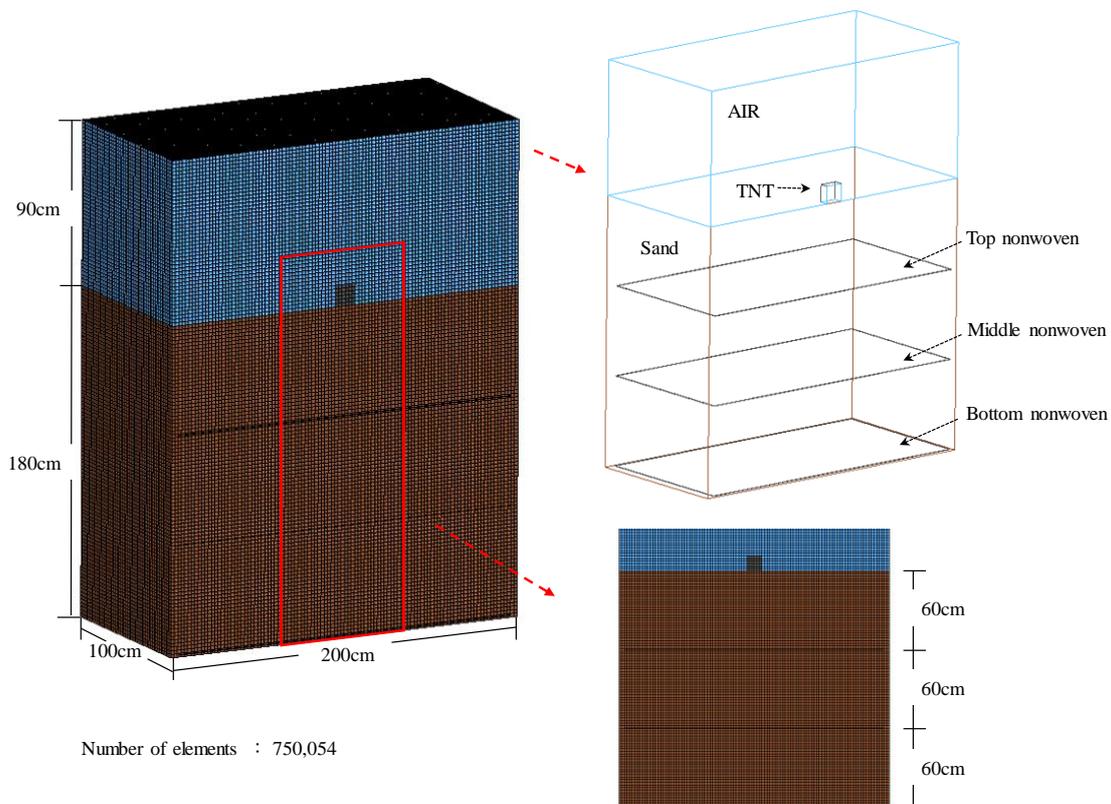


圖 7 衰減層加勁土數值模型配置示意圖

資料來源：作者依研究數據繪製。

³⁵ 本研究設置網格數量高達 75 萬，以 AMD Ryzen 5 2600 Six-Core Processor 3.4GHz (RAM 64G)計算，時間需時 3 天。

50%)等三種不同條件，進行參數研究，其成果詳述如後。

(一)地工織布鋪設層數

鋪設層數探討，係在土層中分別鋪設 2 層、3 層、5 層等三種層數之地工織布，進一步探討加勁土衰減爆壓的效果與層數增減的效應。由圖 8 數據顯示，在未加勁土層中，2.7kgTNT 炸藥於地表爆炸後之尖峰爆壓值高達 21 萬 kPa，隨著土層深度增加至 180cm，爆壓值亦逐漸衰減至 475kPa，仍對人體產生主要危害。³⁶

以加勁土底部衰減爆壓值探討：2 層地工織布降至 13kPa、3 層與 5 層均降至 1kPa 以下；以衰減爆壓值至 48kPa 以下，進行衰減層設計厚度比較：2 層地工織布之設計厚度降

至 157cm、3 層地工織布之設計厚度降至 142cm、5 層地工織布之設計厚度降至 102cm。依層數基準值言，進行層數增減預測，對其爆壓衰減均有不同程度影響。

(二)地工織布材料勁度 (Stiffness)

材料勁度探討，一般業界地工織布材料勁度可以隨著工程實際需要進行特製，材料勁度代表地工織布拉伸強度，數值越大其施作成本隨之提高、抗拉伸強度亦會增強，下列就常見之材料勁度大小進行分析(詳如圖 9 顯示)。以加勁土底部衰減爆壓值探討：當材料勁度達到 9.38 時，預測尖峰爆壓值降至 66kPa，仍對人體產生重大危害，另當勁度分別為

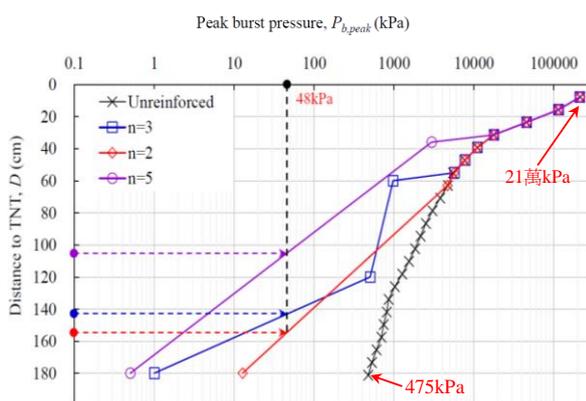


圖 8 地工織布數衰減爆壓效能
資料來源：作者依研究數據繪製。

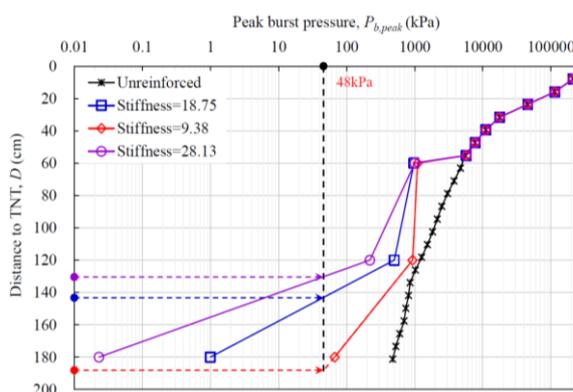


圖 9 地工織布材料勁度衰減爆壓效能
資料來源：作者依研究數據繪製。

³⁶ 依據美軍經驗公式建議，炸藥引致之爆震波，對於人體產生最大傷害為主要爆震，主要爆震達到 48kPa，即會對人體產生重大傷害，故本篇研究後續均以此為設計基準進行探討。摘錄自 The Departments of the Army, Air Force, and Navy and the Defense Special Weapons Agency, UTechnical Manual Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapons EffectsU, U.S., 1998.; 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 25。

18.75、28.13 時，其預測尖峰爆壓值均降至 1kPa 以下；以衰減爆壓值至 48kPa 以下進行衰減層設計厚度比較：材料勁度為 9.38 之設計厚度降至 189cm、勁度為 18.75 之設計厚度降至 142cm、勁度為 28.13 之設計厚度降至 130cm。依材料勁度基準值言，進行增減勁度數值預測，對其爆壓衰減各有不同影響，均可有效降低衰減層設置厚度。

(三)地工織布材料降伏強度 (Ultimate strength)

材料降伏強度探討，材料降伏強度係指地工織布材料達到破壞時之強度，圖 10 顯示業界製造地下織布材料中，常見之設計降伏強度。以降伏強度基準值為設計目標(12.3)，無論各增加(18.45)、減少(6.15)50%，其衰減爆壓數值均相同一致，衰減層設計厚度降

至 142cm。此現象係因為尚未達到材料真正破壞勁度之前，爆壓衰減趨勢均無任何變化。因此，後續在進行相關爆震衰減試驗研究時，降伏強度均使用一般業界常見設定條件即可。

(四)衰減爆壓機制探討

將上述參數研究成果整理成表 4 進行說明，可以發現以基準值參數設置衰減層，衰減爆壓至不影響人體安全之設置厚度，僅需 142cm，與未加勁土層設置厚度相比，設置厚度減少 66%；另在加勁土鋪設厚度的參數變化中，係以地下織布鋪設 5 層參數所需鋪設厚度最少，僅需要 102cm，與未加勁土層比較，減少厚度高達 76%，衰減效益值最好。如欲維持鋪設地下織布三層條件下，則以增加材料勁度達 28.13，亦可達到減少厚度的效果，厚度僅需鋪設 130cm，減少鋪設厚度達 69%。

另外就加勁土衰減爆壓機制進行深入探討，由圖 11、12 顯示，在相同歷時下，炸源在加勁土正上方爆炸後，爆震波透過土層介質往下方傳遞現象，右側壓力桿可以顯示相對顏色的尖峰爆壓值，並將加勁土與未加勁土進行比較後可以清楚瞭解其差異性。

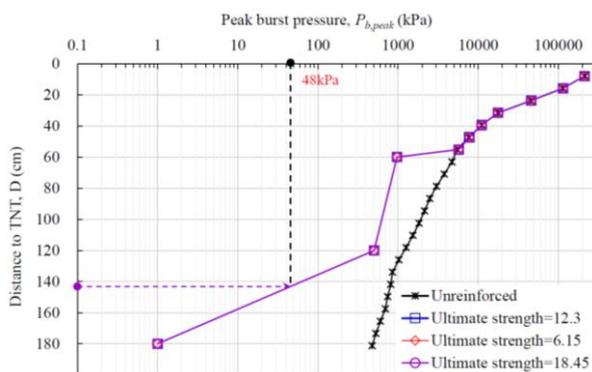


圖 10 地工織布材料降伏強度衰減爆壓效能
資料來源：作者依研究數據繪製。

表 4 土工織布衰減爆壓值參數研究比較表

區分	地下織布層數	材料勁度	降伏強度	設計厚度 cm(減少百分比)
未加勁土	—	—	—	422(0%)
加勁土基準值	3	18.75	12.3	142(66%)
地下織布層數	2	18.75	12.3	157(63%)
	5	18.75	12.3	102(76%)
材料勁度	3	9.38	12.3	189(55%)
	3	28.13	12.3	130(69%)
降伏強度	3	18.75	6.15	142(66%)
	3	18.75	18.45	142(66%)

資料來源：作者依研究彙整。

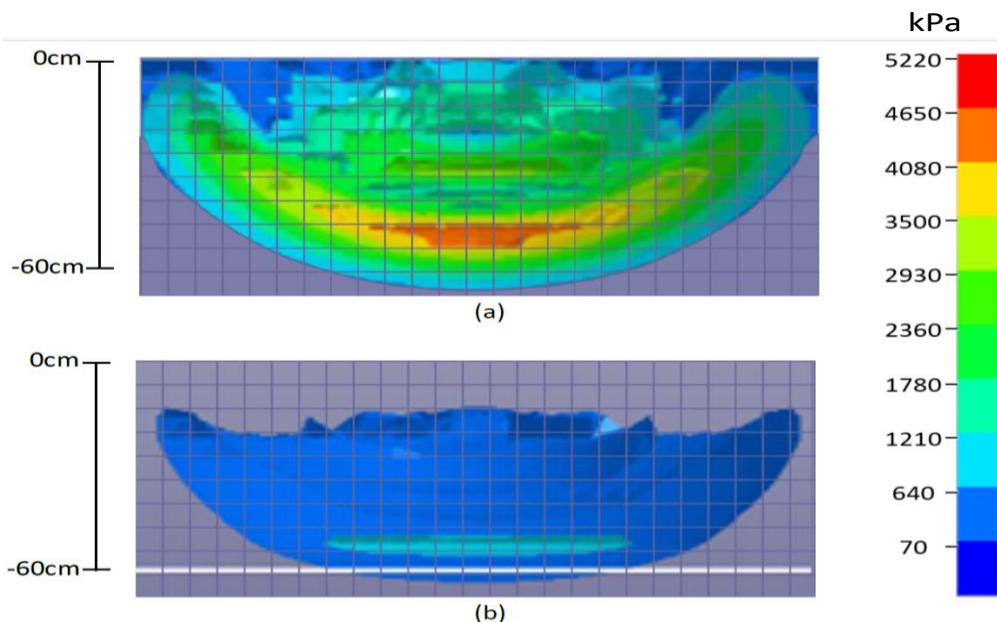


圖 11 相同歷時下之地表爆炸引致爆震波傳遞土層衰減數值：(a)未加勁土；(b)加勁土

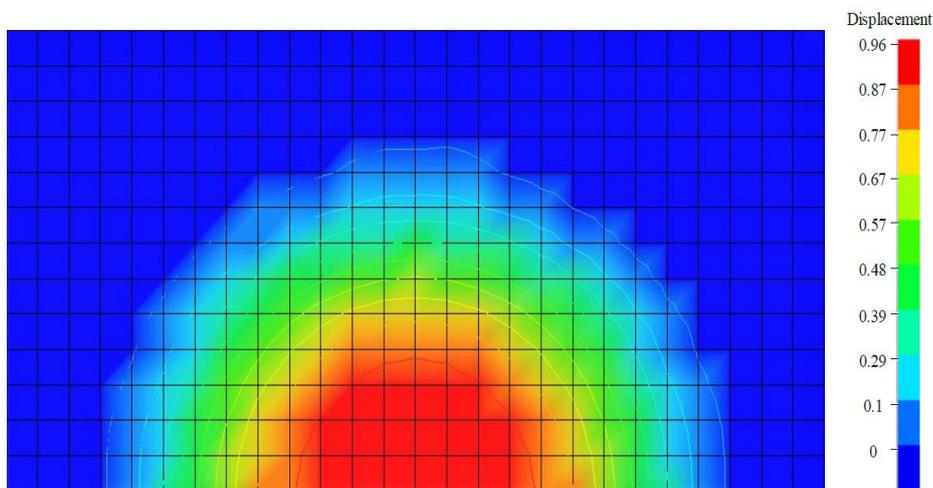


圖 12 土工織布遭爆震波經過後，橫向拉伸變形現象(俯視圖)
資料來源：作者依研究數據繪製。

張力膜效應，以地下深度 60cm 處而言，未加勁土層中爆壓數值衰減至 4500kPa，加勁土第一層地工織布爆壓數值則衰減至 970kPa 左右。以爆震波傳遞波形現象分析，未加勁土層在相同砂土介質中傳遞，其波形較為尖銳，加勁土第一層因遭地工織布阻隔後產生材料拉撐現象，波形顯得較為平緩，且地工織布水平變形量以中央區域達到 0.96cm 為最大，拉撐變形量則依序向外輻射減少，中央變形量最大現象原因在於炸藥在地表中央爆炸之故，導致爆震波由地表中央向土層下方傳遞，距離炸源越遠爆壓值越小，變形量亦就越小。

討論與建議

一、加勁土抗爆震效能顯著、適切運用於軍事防護工程

本篇研究重點係肆應對我陸軍地面部隊危害最大之敵軍威脅，據此設計地下結構抗爆震威脅來源，並以美軍建議地下結構體上方衰減層厚度，作為未加勁土之設計基準數值模型，同時探討地工織布鋪設層數、加勁材料勁度、降伏強度對於加勁土衰減之效能。本研究發現加勁土能夠有效衰減地表

爆炸引致爆震波之傳遞，且衰減效能相當顯著，當地表 TNT 為 2.7kg 時，以地下織布層數鋪設 5 層效果最佳，加勁土鋪設厚度僅需達 102cm，尖峰爆壓值可降低至人體不受危害影響程度；另本研究成果可適切納入國軍軍事防護工程設計建議尺寸，除可減少地下結構體主體工程構築後回填土厚度，與降低施工經費外，另在維持抗爆震效能情況下，能夠縮短施工時間，以提升我防衛作戰戰力防護成效。

二、肆應與日俱增之敵情威脅、研擬急造式軍事防護工程因應

依我國 2021 四年期國防總檢討所提：「...中共持續精進彈道飛彈、巡弋飛彈、空射攻陸飛彈、及長程多管火箭等戰力...」³⁷ 資訊可知，敵軍從未放棄以武力犯臺，我軍仍需持續發展克敵制勝之道，並以不對稱作戰思維，研擬急造防護工程因應，提升國軍戰場存活率。國、內外研究中，對於地工織布抗貫穿、急造組合式抗爆震擋牆、加勁土堤背彈牆等軍事防護工程與材料，已進行相關研究與獲得具體成果，均應用於國防產業中。

³⁷ 同註 3，頁 8。

我軍在敵情威脅與日俱增下，且又身處戰地，更需迫切針對急造式軍式防護工程如各類型遮蔽式、半遮蔽式地下掩體進行深入研究，須先滿足迅速、具抗炸防護力的條件，在不同敵情威脅下，從而進行地下結構體、急造組合式擋牆之抗爆震研究，並分別就埋置深度、型式尺寸、結構體材料、回填土材料、以及地工織布材料性質實施探討。為增進研究時效，可先建構數值模型並進行CFD電腦程式運算後，再進行縮尺爆炸試驗、全比例尺爆炸試驗，俾求得抗爆震地下結構體之最佳構型。

三、重視國防科技研究成果、適時納入準則修訂參據與物力動員簽證

我國於防衛作戰中係處於守勢作戰，且歷年演訓科目常以中共「由演轉戰」狀態，誘使我軍開始進入應急作戰階段，由此研判，我軍須於經常戰備時期做好一切備戰作為。其中包含歷年國防科技研究成果，係經過嚴謹學術研究方法，所發表之相關結論與建議，如涉及與民間物力動員相關之戰備資、阻材類型、數量、施作方式等項，

應視作戰需求，除作為工事構築準則教範修訂參據外，更可納入年度物力簽證，俾使國防科技研究與軍事作戰相結合。

本次研究成果中，已探討出加勁土除具有衰減抗爆震效能外，同時可減少衰減層鋪設厚度，大幅縮減地下結構體防護工程施工所需時間；另筆者於2020年亦成功研究獲得預鑄工法能縮短應急作戰階段地下結構體施作時間與增強防護能力。因此，是類研究成果可繼續深入探討，未來可依研究成果，將其納入戰備資、阻材物力簽證品項，戰時得以提供作戰部隊運用。

四、擴大研究能量，強化大型射擊訓練場減震效能

國軍地面大型火炮射擊訓練場設置地點周邊均有人員、鄰舍、民間物資、財產等，火炮、戰車砲射擊訓練期間，雖有進行人員、交通管制、以及周密防護作為等，但是爆炸後產生之噪音分貝以及爆震波透過地層向外傳遞，均造成很大的爆炸影響。為使國軍睦鄰工作更加順遂，有必要先期就是類火炮射擊訓練場射擊期間，實施爆震波減震效益評估。

故本研究後續可進一步於國軍大型火砲訓練場周邊地層，設置加勁土衰減層與爆壓監測儀器，經過資料蒐集、過濾、分析後，評估結果如需實施射擊訓練場減震工程，可將研究成果所提出衰減層鋪設層數、地工織布材料強度參數，納入作戰訓練工事設計考量，俾有效減少因火砲、戰車砲射擊對周邊鄰舍、人員、財產、裝備之影響。

結語

戰略指導戰術、戰術指導戰鬥、戰技，軍事防護工程階層雖僅在工程技術層面，但是要能夠達到戰略、戰術、戰鬥方面的成功，更是維繫於人員戰技、國防科技、軍事工程技術的精良，而國防科技研究成果更需與軍事作戰實務相結合。

本研究係在地下結構體上方鋪設衰減層，並以炸藥 **TNT2.7kg** 在地表爆炸後，探討加勁土衰減爆震效能，獲得以地下織布層數鋪設 **5層** 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**，不致影響人體危害，對於軍事防護工程研究成果與作戰實務貢獻相當顯著。當敵情威脅不斷

持續變化的今天，我們仍應以高度戒備的心態繼續進行與國防事務有關之各項研發與備戰作為，如此將可更增加我防衛作戰成功公算。