

國立臺灣大學工學院土木工程學系

碩士論文

Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis



反覆衝擊載重下鑽孔對岩石損傷影響

Drilled-Hole Effects on Rock Damage

under Repeated Impact Loading

林俊廷

Jun-Ting Lin

指導教授：王泰典 博士

Advisor: Tai-Tien Wang, Ph.D.

中華民國 112 年 6 月

June, 2023



國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書
MASTER'S THESIS ACCEPTANCE CERTIFICATE
NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY

反覆衝擊載重下鑽孔對岩石損傷影響

Drilled-hole effects on the rock damage under repeated impact loading

本論文係 林俊廷 (R10521122) 在國立臺灣大學土木工程學系完成之碩士學位論文，於民國 112 年 6 月 20 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明。

The undersigned, appointed by the Department of Civil Engineering on June, 20, (2023) have examined a Master's thesis entitled above presented by Lin Jun Ting R10521122 candidate and hereby certify that it is worthy of acceptance.

口試委員 Oral examination committee:

<u>王泰典</u>	_____	_____
(指導教授 Advisor)		
<u>李良輝</u>	<u>許珮均</u>	<u>簡志峻</u>
<u>陳彥宏</u>	_____	_____
系主任/所長 Director: <u>葛宇宸</u>		



致謝

碩士生涯兩年放眼看過得很快，但認真的細看每個日子，是很充實每個環節都有它存在的必要，在此需要謝謝這一路上幫過我的每個人。

先謝謝王泰典老師，當年願意收我為學生，曾經說過希望能在老師身上學到你 10%的功力，但現在看起來可能只有喝酒的部份有學到。你給過我很多的機會讓我嘗試以及學習做好一件事，在研究中也給予很大的空間自由發揮。老師您也給予我們很多機會去參加研討會獲取新知識，還有參加野外活動看非卡通圖案的真實岩石從中認識真實的工程地質，謝謝。

王門的好夥伴們，謝謝羿帆、連冠、士元、柏愷及彥杰一起在各種互相支持，不管是在課程還是其他活動上都會互相幫忙；謝謝宥傑老哥及詠智黃氏兄弟兩位不管在研究上還是一般生活瑣事上的幫忙，你們幫忙整個王門處理了許多事情，讓世界又和平過了一天，那是肯定的。其他小夥伴們也很感謝當時一起搬了快4000公斤的石頭讓我可以做實驗。’曾經一起參加過的野外活動以及馬拉松，都是與大家這兩年不可抹滅的回憶。其他 R10 的朋友，有你們的存在增添了許多不同的回憶，這邊特別感謝涂育彰跟葉錦德，能坐在你們兩個旁邊真的很幸運，互相鬥嘴的畫面不會忘。謝謝鄭皓宇、莊子霆及魏銷廷三人，在我念研究所期間能一起回憶大學往事還有持續觀察魏董的肚子。

最後必須感謝我的家人與女友，謝謝芷君能陪伴我做一些有趣的事情，讓我的生活過得更快樂。謝謝爸爸媽媽姐姐哥哥及我最強後盾的阿姨們，有阿姨們幫助讓我不管在台中還是台北都有一個歸宿總是會擔心我有沒有正常作息，謝謝你們。謝謝爸爸媽媽，求學生涯總是依靠著你們，抱歉沒有達成爸爸您對我研究所的期待，要天天穿襯衫及長褲上課，但有達成在學業上面的任務，謝謝你。你們對我的鼓勵總是滿滿的，儘管我唸研究所只是一件小事，你們總把這件事當成拯救世界的大事，讓我有滿滿的動力完成學業，謝謝大家。

2023/08 林俊廷



摘要

岩石隧道工程常見的工法為新奧工法以及TBM工法，相較於適於長隧道、地質變異小的TBM工法，新奧工法因開挖、支撐作業彈性大，而有較大的適用性。新奧工法主要以鑽炸或是機械進行岩盤開挖，前者開炸效率較高，但開炸擾動較大，且伴隨振動與噪音，使用上會有所限制；後者遂成為應用新奧工法在環境限制條件下的最後選項。然而對於節理稀疏、韌度較高岩盤，岩石破碎难度大，現地常利用鑽堡在開挖面鑽孔，再利用液壓錘反覆衝擊岩盤表面，增加開挖效率。儘管實務上常見預鑽孔提高反覆衝擊開挖岩盤的作業方式，然而鑽孔的效益為何？是否存在對反覆衝擊開挖岩盤的碎岩機制有何差異？目前相關研究付之闕如，以致鑽孔與反覆衝擊錘擊位置的配合，儘能憑藉作業人員經驗及運氣。

本研究應用離散元素法建立一套數值模式，探討鑽孔存在與否情況下，反覆衝擊生成應力波在岩盤中的傳遞差異。數值模型透過應力波振幅隨傳遞距離增加而衰減驗證其正確性，並試圖透過物理模型試驗結果比較其應用性後，繼而應用於探討反覆衝擊下鑽孔對岩盤損傷的影響。

研究結果顯示，根據數值模擬結果能與應力波相關理論進行驗證，得以確定數值模擬符合理論。當應力波傳遞過孔洞時對周遭的速度振幅會有影響，在不同孔洞大小及位置還有擊打時所產生的波長都會對此造成有不同結果。擊打時孔洞周遭會有破壞的產生也能利用波傳特行進行解釋，得以確認鑽孔可對開挖效率提升。

關鍵字:機械開挖工法、岩石開挖、應力波傳、數值模擬

Abstract

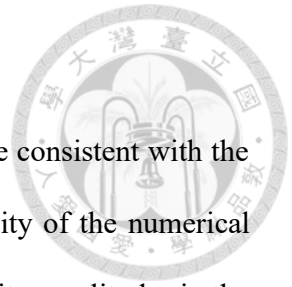


The common construction methods for rock tunnel engineering are the New Austrian Tunneling Method (NATM) and Tunnel Boring Machine (TBM) method. Compared to the TBM method, which is suitable for long tunnels with less geological variability, the NATM offers greater flexibility in excavation and support operations, making it more versatile. The NATM primarily involves rock excavation using drilling and blasting or mechanical methods. The former has higher excavation efficiency but causes greater disturbance, vibration, and noise, limiting its usage. Therefore, the latter becomes the final option when applying the NATM under environmental restrictions. However, for rock formations with sparse joints and higher strength, rock fragmentation becomes more challenging. In such cases, boreholes are drilled on the excavation face, and hydraulic hammers are used to repeatedly impact the rock surface, thereby increasing excavation efficiency. Although pre-drilling is commonly employed to improve the effectiveness of repeated impact excavation, the benefits of drilling are often unclear. Furthermore, the existence of differences in rock fragmentation mechanisms during repeated impact excavation remains largely unexplored. As a result, the coordination between borehole placement and the impact locations of the hammer mainly relies on the experience and luck of the operators.

This study applies the Discrete Element Method (DEM) to establish a numerical model to investigate the differences in the propagation of stress waves in rock formations under repeated impacts, considering the presence or absence of boreholes. The numerical model verifies its accuracy by examining the attenuation of stress wave amplitudes with increasing propagation distance. Furthermore, the applicability of the model is evaluated by comparing it with physical model test results. Subsequently, the model is employed to examine the

influence of boreholes on rock damage under repeated impacts.

The research findings indicate that the numerical simulation results are consistent with the theoretical principles of stress wave propagation, confirming the validity of the numerical model. When stress waves pass through boreholes, they affect the velocity amplitudes in the surrounding area. The size and location of the boreholes, as well as the wavelength generated during impacts, produce different outcomes. The presence of boreholes can enhance excavation efficiency, as the damage around the boreholes during impacts can be explained by the propagation characteristics of waves.



Keywords: Mechanical excavation method, Rock excavation, Stress wave propagation, Numerical simulation

目錄



論文口試委員審定書.....	i
致謝.....	ii
摘要.....	iii
Abstract	iv
目錄.....	vi
圖目錄.....	viii
表目錄.....	xiii
第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機與目的.....	1
1.2 研究方法與流程.....	2
1.3 研究架構與主要內容.....	3
第二章 文獻回顧.....	4
2.1 岩石開挖理論與常見工法.....	4
2.1.1 鑽炸開挖工法.....	4
2.1.2 破碎機開挖工法.....	8
2.1.3 全斷面隧道鑽掘機或隧道掘削機開挖.....	9
2.2 岩石開挖工法效率比較.....	11
2.3 破碎機工法的效率提升.....	12
2.4 應力波傳播行為.....	15
2.5 數值模擬應用案例.....	19
第三章 研究方法.....	25
3.1 數值模式建立.....	25
3.1.1 反覆荷載測試.....	25
3.1.2 波傳特性與監測.....	29
3.1.3 基本數值模式.....	33
3.2 數值模式驗證.....	35

3.2.1 應力波傳衰減理論驗證.....	36
3.3 物理模型結果驗證.....	39
3.4 鑽孔影響應力波傳遞數值模型設計.....	46
3.4.1 PFC 中鑽孔模擬方式影響探討.....	46
3.4.2 鑽孔模擬流程.....	49
3.4.3 數值模型物理性質.....	50
3.4.4 波長設計.....	54
3.4.5 孔洞大小.....	56
3.4.6 波長對孔洞影響.....	57
3.4.7 孔洞位置影響.....	57
3.4.8 擊打造成孔洞附近破壞.....	59
第四章 結果與討論.....	60
4.1 孔洞大小影響.....	60
4.2 波長對於孔洞影響.....	69
4.3 孔洞位置影響應力波傳遞方向.....	74
4.3.1 波長 60 mm.....	74
4.3.2 波長 120 mm.....	80
4.4 擊打破壞過程.....	85
第五章 結論與建議.....	91
5.1 鑽孔影響模擬結論.....	91
5.2 研究後續建議.....	92
參考文獻.....	93
附錄一 問題與答覆.....	95
附錄二 應變計試驗結果.....	98

圖目錄



圖 1.1 研究流程圖	2
圖 2.1 鑽炸開挖工法輪進作業工作項目循環(摘自王泰典(2020)).....	6
圖 2.2 炸藥發爆過程能量分佈(摘自王泰典(2020)).....	6
圖 2.3 爆震波周圍岩石的徑向壓縮、切向伸張之變形	7
圖 2.4 炸藥造成炸孔附近之裂隙(摘自王泰典(2020)).....	7
圖 2.5 炸藥爆炸造成岩石之撓曲破壞(摘自王泰典(2020)).....	7
圖 2.6 炸藥爆炸造成岩石之剪力破壞(摘自王泰典(2020)).....	8
圖 2.7 液壓錘現場開挖照(攝自南港隧道)	9
圖 2.8 TBM 切削頭(攝自桃園捷運綠線).....	10
圖 2.9 開挖工法分布圖(摘取自 Ocak(2010)等人)	12
圖 2.10 各種機具開挖表現(a)Roadheader,(b)破碎機,(c)鑽炸法(摘取自 Ocak(2010)等人).....	12
圖 2.11 不同開挖狀態(a)無應力解壓槽狀況下(b)礦底開挖(c)開挖應力解壓槽(d)有應力解壓槽狀況下(摘取自 Wang(2022)等).....	13
圖 2.12 P 波能量傳遞過程 (摘取自 Zhang(2016)).....	18
圖 2.13 S 波能量傳遞過程 (摘取自 Zhang(2016)).....	18
圖 2.14 左圖 狹縫寬大於波長繞射行為不明顯 右圖 狹縫寬小於波長繞射行為明顯 (摘取自網路)	19
圖 2.15 左圖建設性干涉(constructive interference) 右圖破壞性干涉(deconstructive interference) (摘取自網路).....	19
圖 2.16 PFC3D 運算流程	20
圖 2.17 Linear parallel bond 平行鍵結示意圖圖(摘取自 PFC 使用手冊)	21
圖 2.18 模型與缺陷大小 (摘取自 Zhang(2021)等).....	23

圖 2.19 (a)第一次加載後的裂縫變化，(b)第二次加載後的裂縫變化，(c)監測點的速度與位移資料(摘自 Zhang(2021)等人))	23
圖 2.20 (a)第一次軸向加載後的裂縫變化，(b)第二次側向加載後的裂縫變化，(c)第三次軸向加載後的裂縫變化與破壞，(d)監測點的速度資料與位移資料(摘自 Zhang(2021)等人)).....	24
圖 2.21 監測點的位移與速度歷史，正位移代表拉伸，負位移代表壓縮 (摘自 Zhang(2021)等)).....	24
圖 3.1 反覆荷載測試試體	25
圖 3.2 模擬所得反覆荷載下試體應力應變變化	27
圖 3.3 模擬所得反覆荷載試驗之應力應變曲線	28
圖 3.4 測試波速使用之長方體	31
圖 3.5 本研究建立的 PFC 基本模型	33
圖 3.6 紅色圓盤為牆體用來模擬擊打行為	34
圖 3.7 實驗量測之速度波型	35
圖 3.8 依據量測波型自行簡化產生之 sin wave 波型	35
圖 3.9 直線與環形分布監測點位置	36
圖 3.10 直線分布監測點數值模擬所得速度振幅變化	37
圖 3.11 數值模擬所得振幅變化與 Bornitz model 描述比較.....	38
圖 3.12 環形分布監測點 Z 向振幅比較	39
圖 3.13 物理模型試體	40
圖 3.14 物理模型試驗採用的加速規	40
圖 3.15 物理模型試驗流程	41
圖 3.16 物理模型試驗加速規布置	42
圖 3.17 物理模型試驗量測資料及處理	43
圖 3.18 物理模型試驗量測所得各方向振幅變化	44

圖 3.19 物理模型試驗量測訊號時間	45
圖 3.20 本身具有孔洞模型的速度分布圖	47
圖 3.21 本身具有孔洞模型的鍵結接觸狀況	47
圖 3.22 牆體鑽孔模型的速度分布圖，擊打位置與孔洞間球體會有較大速度產生	48
圖 3.23 牆體鑽孔模型的鍵結接觸狀況，孔洞周遭都進入張力破壞	48
圖 3.24 鑽孔影響應力波傳遞數值模擬的流程	49
圖 3.25 紅線為原始數據，黑虛線為趨勢線，藍線為去趨勢後的數據	50
圖 3.26 單軸壓縮下應力曲線	51
圖 3.27 動態加載下應力應變關係圖	51
圖 3.28 監測點與擊打點的位置關係	52
圖 3.29 監測點速度變化	53
圖 3.30 牆體大小設計	53
圖 3.31 牆體與球體速度變化	54
圖 3.32 擊打波長 30 mm	55
圖 3.33 擊打波長 50 mm	56
圖 3.34 擊打波長 75 mm	56
圖 3.35 完整模型孔洞分布與監測點設置	57
圖 3.37 三方向不同孔洞數量模型	58
圖 3.38 孔洞位置及監測球布設點位	58
圖 3.39 擊打造成孔洞附近破壞數值模型	59
圖 4.1 50000 Hz 波長 30 mm 完整試體速度分布	60
圖 4.2 50000 Hz 波長 30 mm 孔洞試體速度分布	60
圖 4.3 完整試體孔洞一周遭球體速度振幅變化	62
圖 4.4 完整試體孔洞二周遭球體速度振幅變化	63
圖 4.5 完整試體孔洞三周遭球體速度振幅變化	64

圖 4.6 完整試體孔洞四周遭球體速度振幅變化	65
圖 4.7 完整試體孔洞周遭球體速度振幅變化	66
圖 4.8 有孔試體孔洞周遭球體速度振幅變化	66
圖 4.9 完整試體模型與孔洞試體模型比較	68
圖 4.10 各孔洞振幅放大倍率比較	69
圖 4.11 頻率 30000Hz 完整試體速度分布	71
圖 4.12 各頻率下的 FFT	72
圖 4.13 不同波長下各孔洞的放大倍率	74
圖 4.14 90 度各孔洞標號	75
圖 4.15 90 度孔洞垂直振幅變化	76
圖 4.16 90 度孔洞水平振幅變化	76
圖 4.17 210 度各孔洞標號	77
圖 4.18 210 度孔洞垂直振幅變化	77
圖 4.19 210 度孔洞水平振幅變化	78
圖 4.20 330 度各孔洞標號	78
圖 4.21 330 度孔洞垂直振幅變化	79
圖 4.22 330 度孔洞水平振幅變化	80
圖 4.23 90 度孔洞垂直振幅變化	81
圖 4.24 90 度孔洞水平振幅變化	81
圖 4.25 210 度孔洞垂直振幅變化	82
圖 4.26 210 度孔洞水平振幅變化	82
圖 4.27 330 度孔洞垂直振幅變化	83
圖 4.28 330 度孔洞水平振幅變化	83
圖 4.29 入射波方向改變	84
圖 4.30 孔洞影響鍵結分布	85

圖 4.31 鍵結破裂於孔洞周圍	85
圖 4.32 孔洞影響鍵結分布	86
圖 4.33 完整模型監測球的速度	87
圖 4.34 鑽孔模型監測球的速度	87
圖 4.35 鑽孔模型 6 號及 7 號監測球的速度	88
圖 4.36 完整試體 FFT 頻譜分析	89
圖 4.37 孔洞試體 FFT 頻譜分析	89
圖 4.38 鑽孔模型監測球的振幅分布	90



表目錄

表 2.1 岩盤工程/隧道工程開挖案例整理(摘自王泰典(2020)).....	10
表 2.2 不同情況下的開挖效率(摘取自 Wang(2022)等).....	14
表 3.1 反覆荷載測試參數	26
表 3.2 反覆荷載試驗求得參數	27
表 3.3 參數一試體速度計算	32
表 3.4 參數二試體速度計算	32
表 3.5 參數二試體速度計算	33



第一章 緒論



1.1 研究動機與目的

隧道開挖的重點在於開挖效率、開挖成本、開挖安全以及開挖對周遭的影響，現在隧道開挖工法中主要有隧道鑽掘機(Tunnel Boring Machine,縮寫 TBM)、新奧工法(新奧地利隧道施工法,New Austrian Tunneling Method,NATM)中的鑽炸開挖工法以及機械開挖工法，TBM 潛盾工法的好處在於開挖範圍大且遇到較好的土質開挖效率高，但需要較大的施工空間讓機器能進入地下，例:桃園捷運綠線以及台北捷運信義線延伸段;鑽炸開挖工法(Drill and Blast Method，簡稱 D&B)對於硬岩有很好的開挖效率，因其具有因地制宜及彈性的施工特色，為目前岩石隧道施工應用最廣的開挖方式之一，但對於周遭的擾動範圍過大，會產生噪音及大量粉塵，對周遭環境產生負面的影響，所以較為適用在郊區不適合人口擁擠的都市，例:草埔森永隧道。破碎機開挖工法係運用俗稱破碎機的液壓錘(hydraulic hammer)，衝擊破碎岩石，以達到開挖之目的。液壓錘又稱為油壓劈裂機(power splitter)，常結合俗稱怪手的挖掘機(excavator)的機械拱臂，運用其液壓動力與操作系統，以利快速移動與多點破碎。破碎機開挖主要運用在軟弱岩盤及開挖震動受限工址之岩盤開挖工程。為了增加開挖效率會在開挖面上鑽孔而後利用機械擊打開挖面，讓此開挖效率增加，此方法所需要的工作範圍並不像 TBM 潛盾工法需要能將潛盾機制入地底，所產生的擾動也不會像鑽炸法如此劇烈，破碎機開挖工法在此兩方面有較優於其他兩者工法的表現。

然而運用此種鑽孔及液壓錘擊打開挖面的開挖方式，有時也會遇到無法有效擊碎岩體的狀況，原因來自於岩體強度過強，在擊打時無法達到的預期效果，對於此種工法的研究也相當有限，遠不及 TBM 潛盾工法以及鑽炸法有較多的相關力學研究探討，以至於現場施工時多數使用經驗去判斷鑽孔位置以及擊打位置，開挖效率則難以判斷。

本研究欲利用此擊打表面所產生震動行為，與波傳行為進行比較，探討在有孔洞的岩體表面遇到應力波造成的破壞，且利用波傳行為對孔洞的位置以及擊打位置進行設計，增進開挖效率。

1.2 研究方法與流程

本研究欲利用物理實驗及數值模擬去探討鑽孔的影響，兩種方法都會與波傳理論解進行比對，驗證模型以及實驗的結果與應力波有關。在驗證完成後會進行鑽孔分析，利用孔洞大小、孔洞位置及波長的影響探討波傳的影響，最後對此研究進行結論與建議。

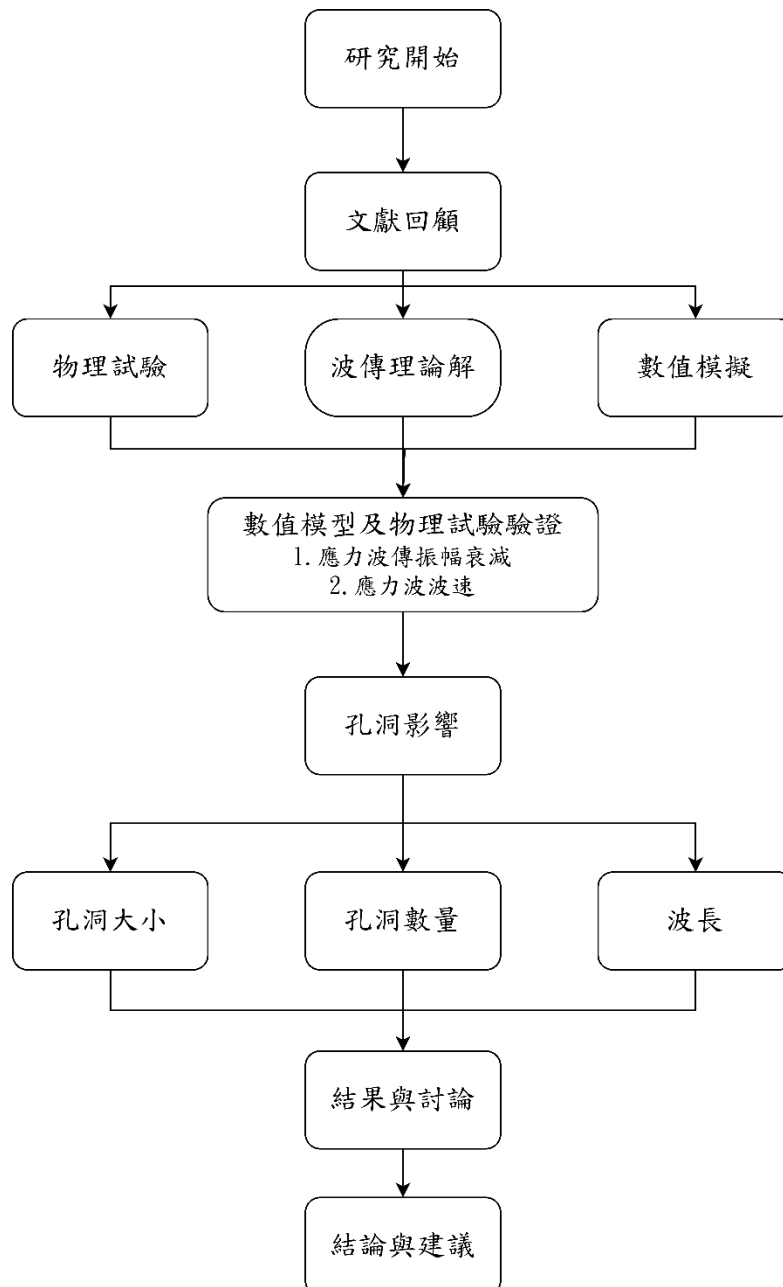


圖 1.1 研究流程圖

1.3 研究架構與主要內容

第一章 緒論

主要為介紹研究動機與目的、架構與主要內容，以及指出研究對實務上的應用性。

第二章 文獻回顧

文獻回顧中主要介紹與此研究相關之文獻，探討有關機械開挖工法在岩石開挖的相關研究文獻，與鑽孔破碎機開挖法進行比較；接續在探討鑽孔破碎法中的震動引致的破壞，介紹前人利用數值模擬振動與孔洞的影響，以及歸納出對本研究的影響。

第三章 研究方法

此篇章會進行研究流程的論述以及應力波傳特性的驗證，主要是先以驗證前人相關研究與波傳理論解的關係，確認數值模擬與波傳理論驗證吻合後，後續在進行物理實驗與數值模擬結果比較；後續再將合理且可行的方法去進行鑽孔試驗的影響。

第四章 結果與討論

依據第三章方法論的結果，進行分析與討論孔洞對於應力波傳的影響。

第五章 結論與建議

將本研究的結果進行一個總結，並提出本研究對於擊打試驗的貢獻，以及對於此研究的後續研究方法建議。



第二章 文獻回顧



利用破碎機開挖工法進行隧道開挖為常見開挖方式，其中如遇到較為完整及強度良好的岩體，工程單位會利用鑽堡機在開挖面進行鑽孔，以降低岩體結構的完整性，增加開挖效率。本研究中主要探討破碎機的開挖工具液壓錘擊打開挖面後，擊打所產生的應力波如遇到孔洞周圍的力學影響。因此本章會藉由回顧前人進行的相關研究，主要會以岩石開挖理論與常見工法，如何提高衝擊錘的開挖效率，應力波傳分析，數值模擬應用相關案例。

2.1 岩石開挖理論與常見工法

王泰典(2020)在翡翠原水管工程隧道開挖可行工法評估暨技術諮詢報告書中整理了常見的岩石開挖工法，依據作用的原理可以分為爆破、機械破碎、掘削、化學破裂、切割等，而在台灣的隧道開挖案例中，以鑽炸開挖工法、機械開挖工法及掘削工法較為常見。

2.1.1 鑽炸開挖工法

鑽炸開挖工法(Drill and Blast Method，簡稱 D&B)，因具有因地制宜的施工特性，為目前岩石隧道施工應用最廣的開挖方式，施工流程需先在開挖表面進行鑽孔供炸藥置入其中，隨後引爆炸藥產生極為快速、高能量之化學反應，而造成岩石碎裂及破壞，岩石受到炸藥爆炸而破壞的過程中包含粉碎作用、裂隙作用、解壓破碎、剝離作用、氣體作用、撓曲破壞、剪力破壞、以及岩塊間彼此碰撞之破碎等 8 種作用機制。

A.粉碎(crushing)作用：炸藥引爆後形成高溫、高壓氣體，如炸孔氣壓超過周圍岩石之動態抗壓強度時，高溫、高壓氣體呈柱狀向外迅速擴張，因而造成岩石組構性的粉碎破壞(Duvall，1965)。

B.裂隙(fracturing)作用：炸孔氣壓通過粉碎區後，以放射狀的爆震波作用於周圍岩石，並造成其徑向壓縮、切向伸張之變形如圖 2.3 所示。如變形超過岩石之動態抗張變形(dynamic tensile breakage strain)，周圍岩石則於炸孔四周粉碎區外圍形成一濃密的放

射狀裂隙區，向外延伸直至切向應力減弱到無法產生新裂隙為止。

爆震波隨傳遞距離增加，強度逐漸減小而無法造成新裂隙，但仍足以延伸存在炸孔周圍，其尖端與張力變形方向垂直之原有裂隙，而於濃密裂隙區外圍形成較稀疏的放射狀裂隙如圖 2.4 所示。

一般而言，濃密裂隙區的範圍與炸藥之爆速、炸孔粉碎區之大小、岩石之傳波速度、動態抗張強度以及動態變形模數有關。稀疏裂隙的延伸程度則與原有裂隙之長度有關，且主要沿節理及層面等原有不連續面方向延伸，較少垂直原有不連續面。

C.解壓破碎(fracturing by release of load)：經粉碎與裂隙岩石作用後爆震波持續向外傳遞，炸孔氣壓因體積膨脹或氣體自裂隙逸散而迅速減低，起爆初期受強烈壓縮作用之周圍岩石發生解壓，以圓柱狀或圓錐狀朝炸孔中心(已形成自由面)膨脹，而產生解壓破裂。

D.剝離作用(reflection breakage or spalling)：爆震波向外傳遞遭遇自由面反射呈張力波及剪力波。如反射張力波之強度超過岩石之動態抗張強度，則對岩石造成剝離作用。於炸孔四周存有平行炸孔之空隙、節理面或層面情況時，剝離作用較為明顯，惟其導致炸藥能量大量耗散於過度破碎炸孔與不連續面間之岩石，減弱向外傳遞之能量，因而降低不連續面外岩層之破碎效果。

E.氣體作用(gas extension of strain wave)：爆震波向外傳遞後，殘留於炸孔內之氣體持續以較弱之壓力貫入裂隙作用形成之裂隙，並於前端造成應力集中，使放射狀裂隙繼續延伸，稱為氣體作用。氣體作用受裂隙作用所產生放射狀裂隙之數量和長度影響，裂隙數量愈多、長度愈長，則氣體作用之範圍愈大，裂隙之發展愈強烈。

F.撓曲破壞(flexural rupture)：放射性裂隙形成後，爆震波與炸孔氣壓作用在炸孔軸線垂直之平面上，對於裂隙造成之柱狀岩柱或錐狀岩楔形成加載，並造成部份岩石發生撓曲破壞如圖 2.5 所示。破壞之規模與岩塊之堅硬度有關。Ash(1973)指出撓曲破壞之規模與岩石之硬度、彈性係數及放射性裂隙形成岩塊厚長比之三次方成正比。

G.剪力破壞(shear fracturing)：炸藥引爆破裂岩石並將之向外拋擲，由於岩石受力

程度不一，剪力破壞可能發生在石塊中既存之裂隙或震波產生之裂隙間，造成岩石額外之破碎如圖 2.6 所示。

H.岩塊間彼此碰撞之破碎(fracturing by in-flight collisions)：破裂之岩塊因爆震波與炸孔氣壓作用，向外高速脫離飛出，因快速碰撞造成額外之破碎。地下工程之開炸通常先拔心炸出自由面，後續炸出之岩石於拔心形成之空間碰撞轉向後飛出，故此種碰撞破裂機制在地下工程之開炸較一般露天礦場顯著。

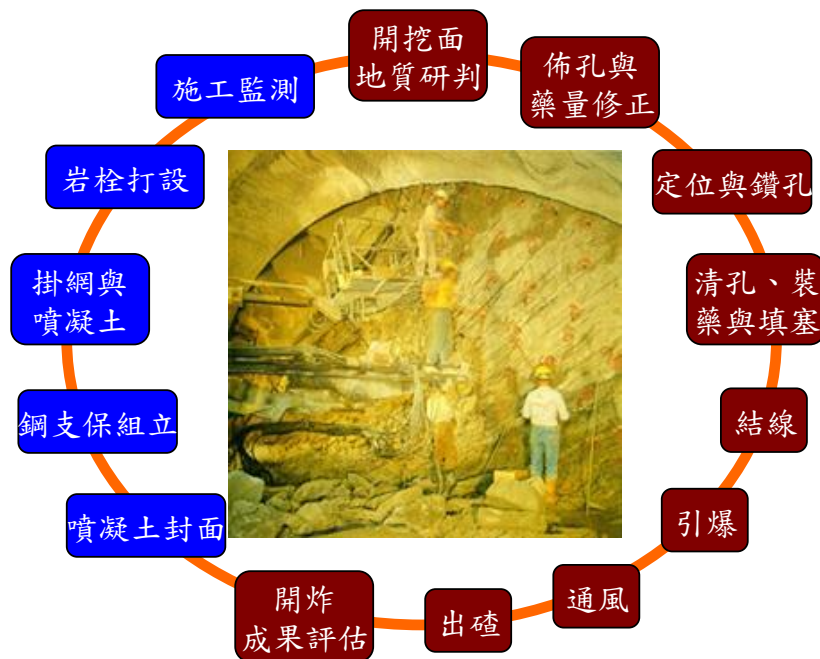


圖 2.1 鑽炸開挖工法輪進作業工作項目循環(摘自王泰典(2020))

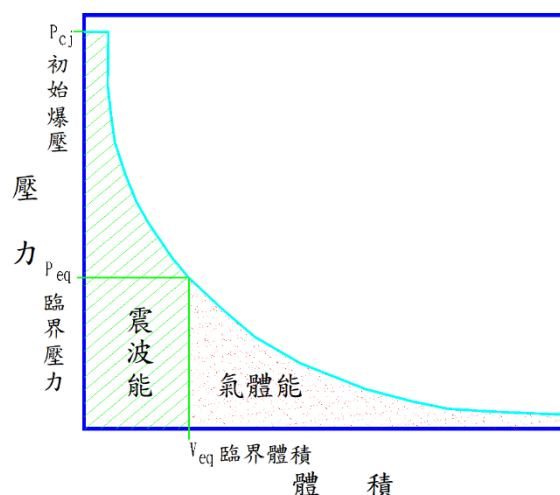


圖 2.2 炸藥發爆過程能量分佈(摘自王泰典(2020))

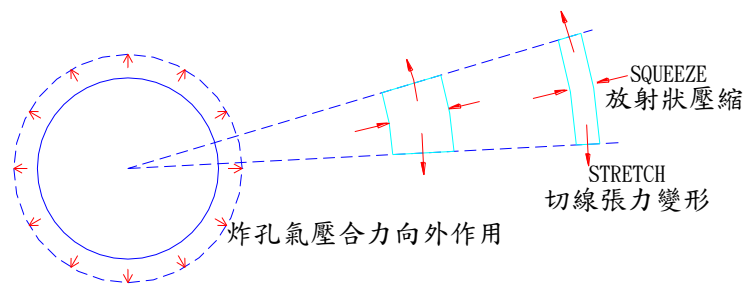


圖 2.3 爆震波周圍岩石的徑向壓縮、切向伸張之變形

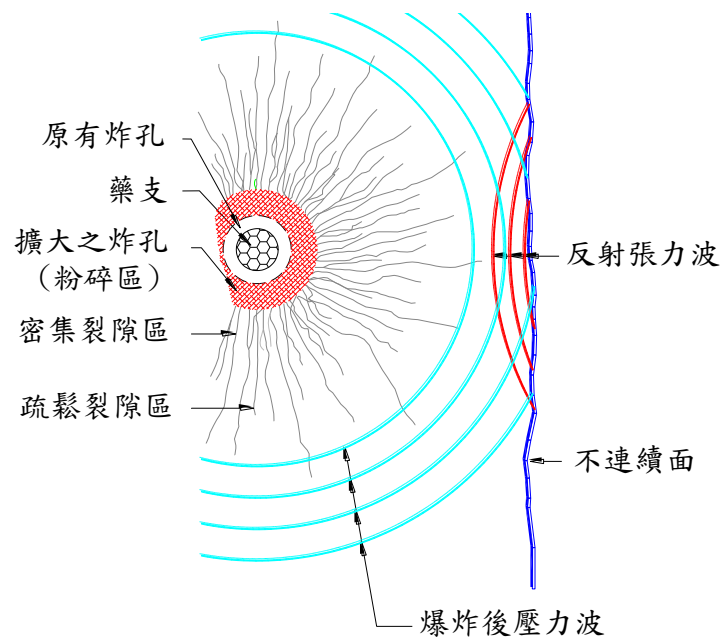


圖 2.4 炸藥造成炸孔附近之裂隙(摘自王泰典(2020))

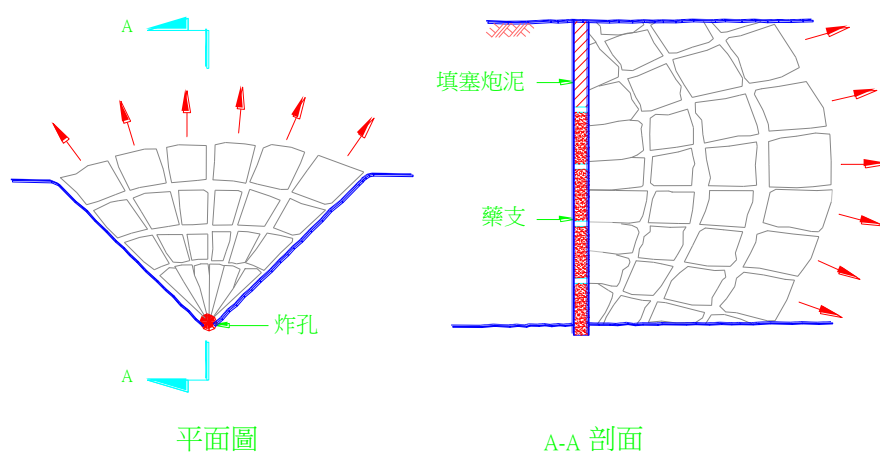


圖 2.5 炸藥爆炸造成岩石之撓曲破壞(摘自王泰典(2020))

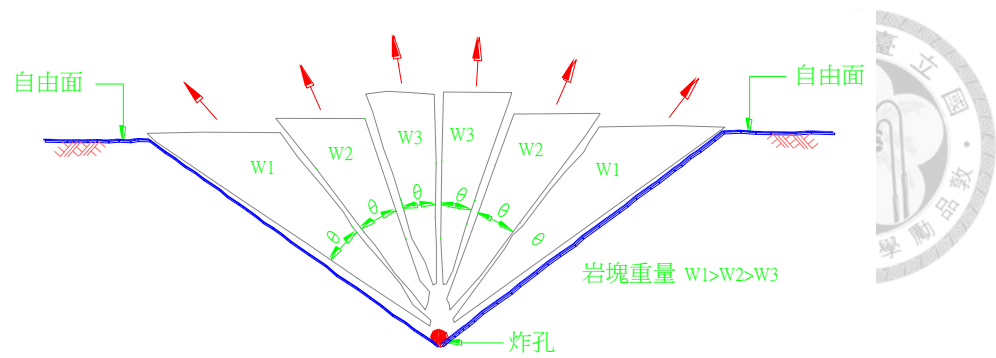


圖 2.6 炸藥爆炸造成岩石之剪力破壞(摘自王泰典(2020))

2.1.2 破碎機開挖工法

破碎機開挖工法是運用液壓錘(hydraulic hammer)，衝擊岩石以達到開挖之目的，常會結合怪手的挖掘機(excavator)的機械拱臂，運用其液壓動力與操作系統，以利快速移動與多點破碎。破碎機開挖主要運用在軟弱岩盤及開挖震動受限工址之岩盤開挖工程。因台灣之地質構造複雜岩性相當不均質，在遭遇軟弱岩盤中使用機械開挖，開挖時較不會因震動而傷及周圍岩體。隧道岩盤開挖程序，依岩石既有弱面節理方向及岩體軟弱破碎程度規劃碎岩開挖步驟。岩質膠結程度較好強度高者，由上往向下及兩側開挖。若岩質膠結程度較差強度低者，則順採保留土心方式開挖，以平衡開挖造成土壓。

圖 2.7 為液壓錘開挖現場，破碎機、鑿岩機常為機械破碎岩石的主要設備，配合液壓錘重覆鑿碎岩石，必要時亦可配合鑽孔輔助提高錘擊效率，具有應用廣、設備多、彈性大優勢，屬於機械開挖的一種方式，常稱鑽掘開挖工法，以利與鑽炸工法區隔。鑽掘開挖工法遭遇岩盤節理面不發達、岩石韌度過大時，液壓錘錘擊能量耗散於半無限域岩體中，開挖效率較低。

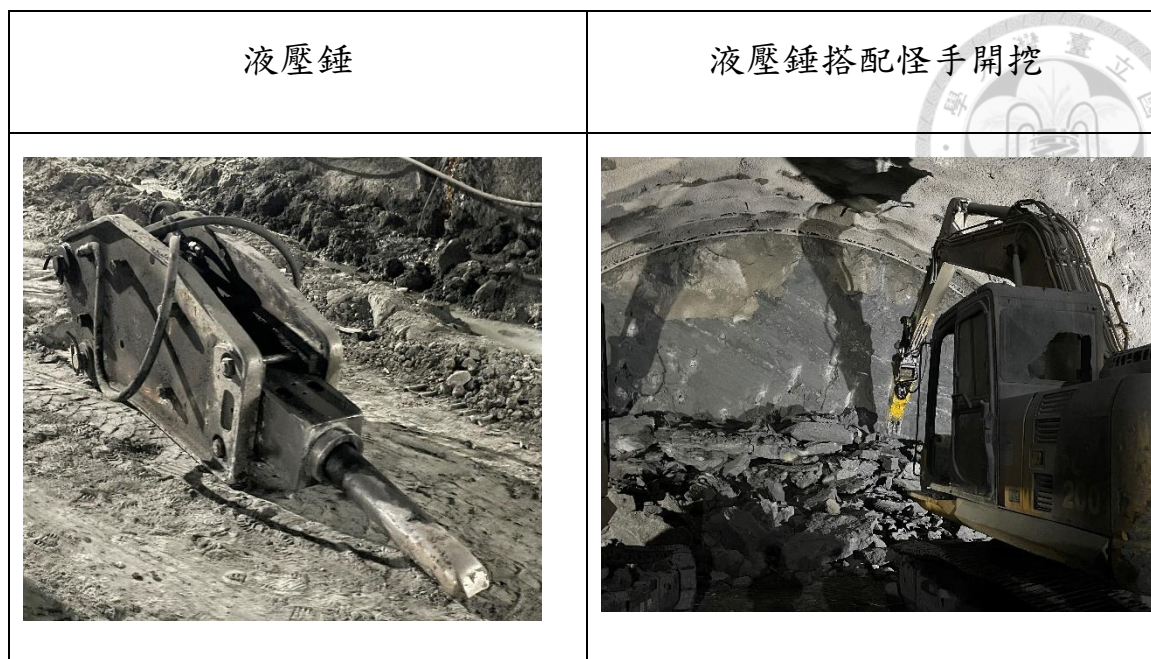


圖 2.7 液壓錘現場開挖照(攝自南港隧道)

2.1.3 全斷面隧道鑽掘機或隧道掘削機開挖

全斷面隧道鑽掘機(Tunnel Boring Machine, TBM)包括開敞式(open-type TBM, 又稱支撐式 TBM 或撐靴式 TBM)以及護盾硬岩 TBM(shielded hard rock TBM)兩大類。前者適應硬岩地層, 沒有盾構, 使用支撐靴(gripper)和前後支撐交替撐緊洞壁上以承受 TBM 向前掘進的巨大反作用力與反扭矩, 並可以調整掘進方向。如果遇到局部不穩定岩層, 開敞式 TBM 使用自帶的輔助設備打設岩栓、加鋼絲網、噴混凝土、加圈樑等方法加固, 以保持隧道周壁穩定。當遇到局部特軟弱圍岩或破碎帶, 開敞式 TBM 使用自帶的超前鑽及灌漿設備, 預先固結掘進前方的一段圍岩, 待圍岩強度自穩後再安全掘進。永久性的隧道襯砌通常待全線貫通後再集中進行。

護盾硬岩 TBM 用於破碎岩層, 在 TBM 後方採用混凝土襯砌支撐不穩定的周壁。又可分為雙護盾及單護盾兩種。雙護盾 TBM 具有兩種模式: 在穩定岩層用支撐靴穩定 TBM 掘進; 在不穩定岩層、破碎岩層, 用 TBM 之後的隧道周壁作為支撐來穩定 TBM; 若岩層過於堅硬, 可輔以地面預鑽及鑽爆工序, 使岩層破碎, 從而讓 TBM 更易通過。單護盾 TBM 用於破碎岩層, 通常需仰賴混凝土類支撐穩定隧道周壁。

全斷面隧道鑽掘機及隧道掘削機皆為兩種現代化的機械開挖設備, 具有施工自動

化程度高、開挖精準、效率高的優勢；惟設備特殊，常需訂製、發進場地需求大。應用時隧道需達一定長度以上，整體開挖效率與施工成本始能顯現。圖 2.8 為桃園捷運綠線 TBM 切削頭。



圖 2.8 TBM 切削頭(攝自桃園捷運綠線)

表 2.1 整理岩盤工程及隧道工程數個開挖案例，以做為後續比較探討基礎。

表 2.1 岩盤工程/隧道工程開挖案例整理(摘自王泰典(2020))

原理	簡稱	工法概要	工法特性	限制、缺點	岩盤開挖應用案例	備註
爆破	鑽炸	鑽孔、裝藥、結線、開炸	應用廣、設備多、施工快、彈性大	開炸振動、噪音需控管、常為鄰惡主因、常有超挖、欠挖現象	新和平隧道 曾文防淤隧道，距土石壩約 200 m 南化防淤隧道，距土石壩約 200 m， 混凝土溢流道約 600 m 阿姆坪防淤隧道	需進行爆破振動量測試，取得振動衰減特性，優化開炸設計
破碎	破碎機、鑿岩機	液壓錘重覆鑿碎、可配合鑽孔輔助	應用廣、設備多、彈性大	節理面不發達、岩石韌度大時，效率低	新自強隧道、新山里隧道 阿公店水庫引水隧道	
掘削	Road-header	臂式切割頭掘削岩石	自動化設備、開挖精準、效率高	開挖機及配合設備(灑水、載具)特殊	北二高新店隧道	設備重新訂製，時程過久
	TBM	全斷面刀盤掘削岩石	自動化設備、開挖精準、效率高	設備特殊，常需訂製、發進場地需求大	國道五號雪山隧道 新武界隧道 士林電廠頭水隧道	需適合發進場地 訂製設備時程較久

2.2 岩石開挖工法效率比較

Ocak(2010)等人在伊斯坦堡的捷運路線 Kadikoy-Kartal 的開挖過程中進行了開挖工法的比較，此路線開挖中分別利用新奧工法以及 TBM 兩種不同開挖工法，其分部如圖 2.9，在新奧工法中分別會利用鑽炸開挖工法、Roadheader 機械開挖工法以及破碎機開挖工法此三種開挖方法比較開挖效率的高低，圖 2.10 為三者在一個開挖輪進下所需要花費的時間比例，以開挖的時間來看 Roadheader 所需要花費的時間大約為破碎機開挖法與鑽炸法的兩倍，鑽炸法的開挖時間需要包含鑽孔、炸藥裝置、爆破及通風。另一個影響開挖時間的因素為出碴的時間，Roadheader 的出碴時間為 9.8%，破碎機工法的出碴時間為 13.3%而鑽炸法的出碴時間為 29.4%，鑽炸法很難控制爆炸後所引起的破碎岩塊大小，大量的岩塊會影響運輸碴土的問題，且也因為爆炸引起的擾動區較大，所以在打設支撐的時候也需要更多的時間，約為 Roadheader 及破碎機開挖法的兩倍。

其中對於破碎機開挖效率的影響，怪手本體的重量的重量與液壓錘的重量有相當的關係 (Anderson and Papineau, 1989; Tuncdemir, 2007)，如果機械本身的重量不足，無法使液壓錘的衝擊力有效的傳遞在開挖面上，也會令機具開始搖晃不穩使得效率降低，操作員的經驗也會影響到此開挖效率，所以破碎機工法的開挖效率主要會取決於液壓錘的有效加載程度與敲擊於岩體不連續面的位置。

鑽炸法仍然是遇到高強度岩石的最佳開挖法，雖然會受到爆破產生的振動以及運輸碴土上面的困難，但使用鑽炸法是必要的，但如遇較弱岩石，Roadheader 的開挖效率會比破碎機開挖法更有效，但如遇到 Roadheader 鑽頭齒輪磨耗以及搬運的問題，勢必需要使用破碎機工法讓工程能順利進行，破碎機工法在開挖效率與其他兩者對比是最中庸的姿態呈現，但在於運輸碴土、機械搬運的方便性以及對岩體擾動的程度是較優秀的，因此若能有效提升此開挖效率勢必對於岩石開挖工程有所幫助。

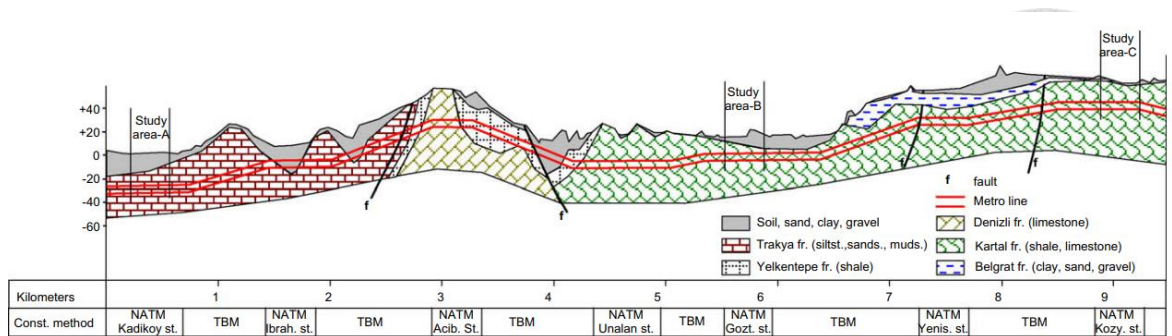


圖 2.9 開挖工法分布圖(摘取自 Ocak(2010)等人)

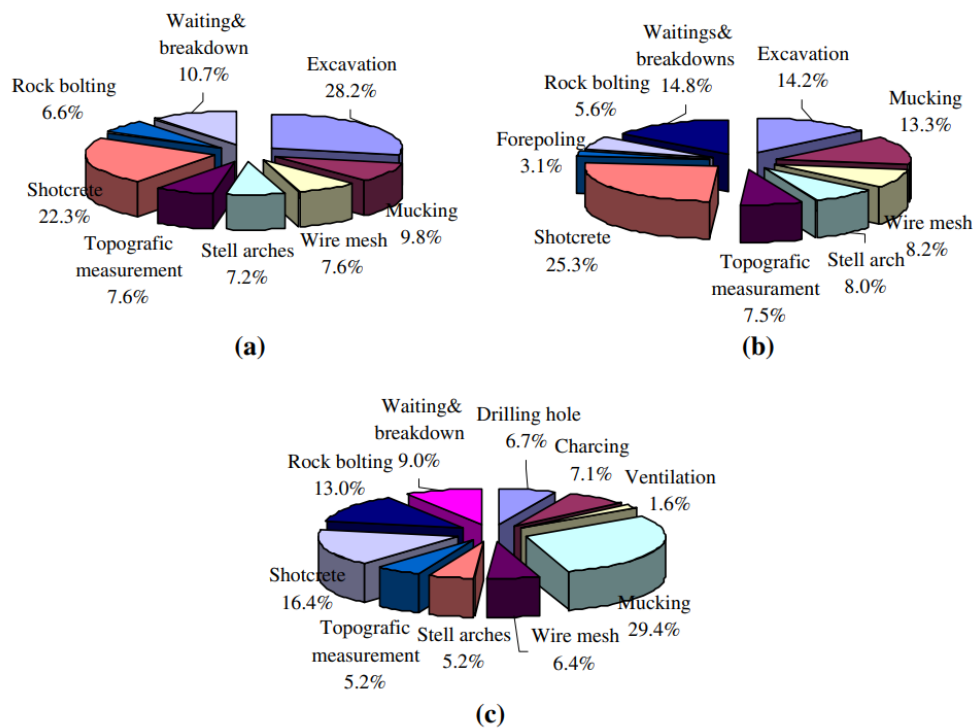


圖 2.10 各種機具開挖表現(a)Roadheader,(b)破碎機,(c)鑽炸法(摘取自 Ocak(2010)等人)

2.3 破碎機工法的效率提升

破碎機開挖工法效率與岩體強度有顯著關係，如遇到超過中強岩(單軸壓縮強度 500 kgf/cm^2)以上強度的岩體，會有造成開挖效率不佳；工址調查所得到的岩體單壓強度無法代表整個工區的岩體單壓強度，因此如遇到整體岩體強度高於原先設計階段，整體開挖效率會下降許多，在臺灣相關使用破碎機開挖法的案例中，會先利用鑽堡在開挖面上進行鑽孔，而後進行液壓錘擊打開挖面的動作使得岩體破壞以提升此工程之開挖效率。

Wang (2022)等人於中國貴州對破碎機開挖法在不同開挖順序下的開挖效率做了比

較與探討，一種開挖方式為完整岩體狀況下進行開挖，另一種為在開挖面底下先進行應力解壓槽開挖，使得岩體處於解壓狀況下進行開挖，討論此兩種狀況下使用破碎機開挖法的效率。對於先前經驗破碎機開挖法適用於中強岩以下的岩體(單軸壓縮強度 500 kgf/cm^2 以下)，而在此文獻中研究區域的岩體單軸壓縮強度為 $117\text{MPa}(1193.049 \text{ kgf/cm}^2)$ 至 $176.5\text{MPa}(1799.798 \text{ kgf/cm}^2)$ ，明顯此區的岩體強度高於破碎機開挖工法先前案例的單壓強度。開挖效率的比較在此研究中是以下列四種狀況進行比較，(a)在無應力解壓槽下直接開挖(b)礦底開挖(c)開挖應力解壓槽(d)在有應力解壓槽狀況下進行開挖，如下圖 2.11 所示。



圖 2.11 不同開挖狀態(a)無應力解壓槽狀況下(b)礦底開挖(c)開挖應力解壓槽(d)有應力解壓槽狀況下(摘取自 Wang(2022)等)

表 2.2 不同情況下的開挖效率(摘取自 Wang(2022)等)

Excavation mode	Time/ min	Mined ore/t	Efficiency/ (t·h ⁻¹)
Excavating pillar directly without excavating stress relief slot	130	107.4	49.6
Cutting orebody floor	40	21.2	31.8
Excavating stress relief slot	138	72.2	31.4
Excavating pillar after excavating stress relief slot	33	87	158.2
Overall	341	287.8	50.6

於表 2.2 中由上到下分別呈現(a)在無應力解壓槽下直接開挖(b)礦底開挖(c)開挖應力解壓槽(d)在有應力解壓槽狀況下進行開挖，在(a)情況下每小時的開採效率為 49.6 噸重，(d)情況下的開採效率為每小時 158.2 噸重已超過三倍的開挖量與(a)情況進行對比，若加入開挖硬力槽的時間(c)情況，經過換算為每小時開挖 55.85 噸重，也高於平均與(a)情況，因此進行此應力開挖槽的步驟能有效提升此開挖效率。

本篇文獻研究中也有討論開挖危險區 EDZ(Excavation Damage Zone)的範圍，研究中岩體以垂直底表方式上下開挖，開挖後水平方向應力釋放，在垂直方向產生應力集中開挖周圍岩體裂隙增加，開挖處附近破碎的岩體區域稱為 EDZ。破碎機開挖法所引起的 EDZ 範圍是關鍵因素，相對於鑽炸法所產生的擾動範圍，破碎機開挖法的擾動範圍是相對好控制及預測的，因此此文獻中有進行 18 個深度為 3.5 公尺的鑽孔對 EDZ 範圍進行監測，主要監測作用是在當開挖時破碎機破壞岩體範圍是否能與原先 EDZ 範圍接近，有效利用 EDZ 範圍不使破壞範圍擴大。在研究中所監測到的 EDZ 厚度為 1.92 至 3.41 公尺，平均為 2.59 公尺，因此代表開採深度每輪應小於 2.59 公尺，而後每輪開挖都利用此方法增加開挖效率以及開挖的安全性。而於 EDZ 範圍監測結果可以得知此方法能有效利用 EDZ 的發展使得開挖效率與安全性提升。

從 Wang 等(2022)的文獻中可以得知利用應力解壓槽的開挖使得岩體從三軸應力態

轉換為雙軸應力態或單軸應力態能有效提升開挖效率，比原先的開挖方法提升了兩倍的開挖量，及有效利用破碎機開挖工法與 EDZ 範圍使開挖效率與安全性的提升，硬岩的開採也能從原先的鑽炸法轉換為破碎機開挖工法，以減少對周遭岩體的擾動。

2.4 應力波傳播行為

應力波是應力和應變擾動的傳播模式，在可變形固體介質中為質點速度的變化與相對的應力變化，以波的形式傳播稱為應力波。在岩石領域中，應力波可以在鑽探工程，爆破工程以及採礦工程所引起的震動中發現，透過應力波傳的行為能增加我們在進行開挖岩石、爆破岩石以及採礦的效率跟產量，以減少不必要的能量消耗。應力波傳遞方式可以分為 Body wave 體波以及 Surface wave 表面波，Body wave 中可以區分為 P-wave 及 S-wave，兩者的差別可以利用傳遞方向的不同與波速不同進行區分。P-wave 意旨(primary wave)或是壓力波(pressure wave)，在所有震波中傳遞速度最快，傳遞介質的震動方向與震波能量傳播方向平行，對於一均質均向的介質 P 波的傳遞速度能以下列公式表示

$$v_p = \sqrt{\frac{E_d(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad \text{式(2.1)}$$

其中 E_d 為波傳播材料介質的彈性模數， ν 為材料介質的波松比， ρ 為材料介質的單位密度，P 波傳遞的過程能以下圖 2.12 表示，將材料力學介質想成很多粒子組合的狀態，每個粒子都代表一極小材料單元，P 波傳遞能量方向與粒子運動方向一致，此能量會依序傳給下一個單位粒子。

S-wave 意旨 Secondary wave 或 Shear wave(剪切波)，S 波在均質均向的介質中的波速可以利用此方程式表示，其中 E_d 為波傳播材料介質的彈性模數， ν 為材料介質的波松比， ρ 為材料介質的單位密度，S 波的波速小於 P 波的波速。S 波的傳播方向與材料位移為垂直關係，如圖 2.13 所示。S 波只能在固體中傳遞，無法在氣體與液體中進行傳遞，將固體中每個材料粒子之間想成用彈簧連接，此能量的傳播就是依靠此彈簧進行傳遞，因此在岩體中遇到節理面或洞穴或氣孔會影響到 S 波的傳播，且節理面若與 S 波

的傳播方向垂直，S波的能量會大大減少甚至消失。

$$v_s = \sqrt{\frac{E_d}{2\rho(1+\nu)}}$$

式(2.2)

而在P波與S波的作用下會產生一種在自由表面的雷利波，在均質均向的材料中，雷利波會以橢圓的運動方式進行在材料表面，此種表面波主要有以下幾種特徵。雷利波振幅會隨著距離增加以指數下降，但雷利波的運動範圍被限制在表面因此衰減速度較體波還要慢，雷利波的波速稍微比S波低一些，可以由式2.3來表示，波速大小取決於材料參數。基於上述特性，雷利波被廣泛應用於非破壞檢測中，用以檢查固體中的細微破壞。

$$V_R/V_S = \frac{0.862 + 1.14\nu}{1 + \nu}$$

式(2.3)

應力波傳遞於材料中，距離起始點各個質點振幅會隨著距離增加而衰減的現象，Bornitz(1931)利用鑽井時所產生應力波波傳變化推導出此經驗公式：

$$A_2 = A_1 \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^n e^{-\alpha(r_2-r_1)}$$

式(2.4)

公式中，符號代表著：

1. A_2 :與震源距離 r_2 處之振幅
2. A_1 :與震源距離 r_1 處之參考振幅
3. n :幾何阻尼係數(通常採用 0.5)
4. α :材料阻尼係數
5. r_1 :參考點距離震源距離
6. r_2 :質點距離震源距離

以點震源距離 r_1 的地方做為基準振幅值(A_1)，其他點位利用之間距離 r_2 進行計算出相對的振幅 A_2 ，Ewing(1957)提出衰減的變化與能量密度有關，波向外傳遞時，因往

四周擴散波前表面積變大，而使得能量密度降低，此現象會造成波動的振幅隨著距離而降低，加上能量密度與震幅成正比關係，因此震幅也會隨著距離的增加而下降成反比關係也稱為幾何阻尼效應。材料阻尼為土體之間的摩擦所引起，摩擦後產生熱能導致量逐漸消散導致振幅衰減，材料阻尼相比於幾何阻尼來說影響甚小，因此可將材料阻尼忽略不計，在此公式中適用於加速度振幅、速度振幅及位移振幅，振幅方向適用於與擊打方向相同。

應力波如遇到孔洞或是有障礙物於原先傳遞路徑上，波會彎曲繞過此障礙物，形成波的彎曲和交互干涉的現象，是波運動常見的行為繞射(diffraction)，繞射現象會導致波的能量在空間中產生干涉，使得某些位於孔洞後面的位置有較大的振幅產生，而波的能量守恆，因此總能量不會改變只是將波的能量重新分布於此空間中，因此其他區域會生較小之振幅，而波長與孔洞大小決定繞射行為是否明顯，當波可以通過的區域小於波長大小會使得繞射的行為較容易觀察，如圖 2.14 所示。應力波干涉的行為可以分為建設性干涉(constructive interference)以及破壞性干涉(deconstructive interference)，當兩個或多個應力波在某一個位置相遇時，如果相位差為 0 或是 2π 的整數倍，則振幅會相加形成建設性干涉(constructive interference);如果兩者之間的相位差為 π 或奇數倍的 π ，則振幅會因此抵銷，產生破壞性干涉(deconstructive interference)，如圖 2.15 所示。

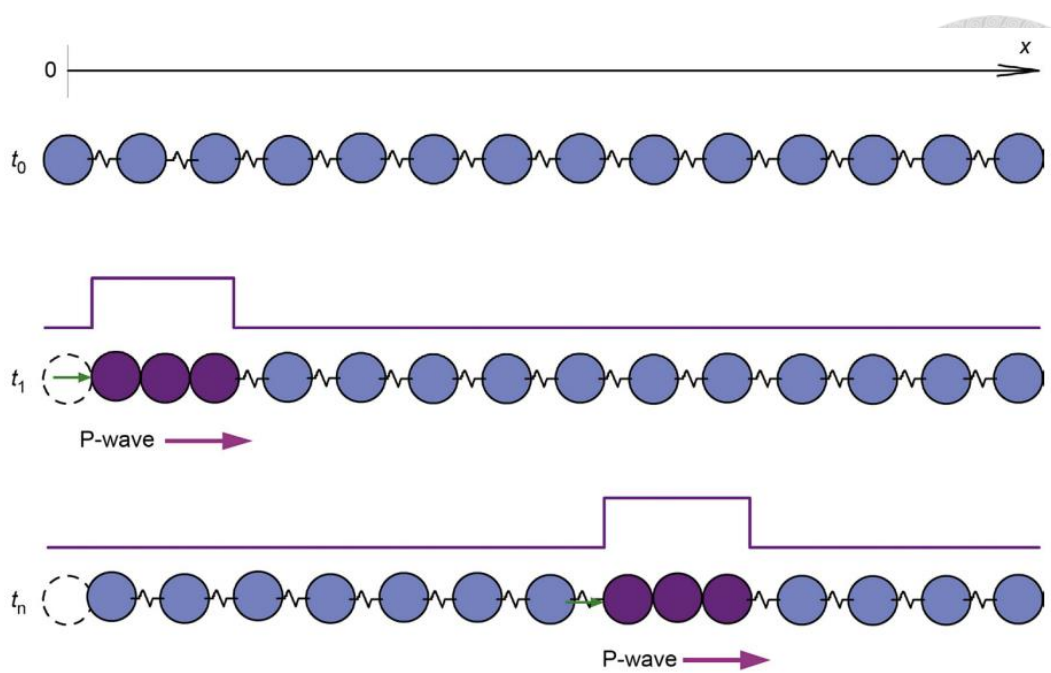


圖 2.12 P 波能量傳遞過程 (摘取自 Zhang(2016))

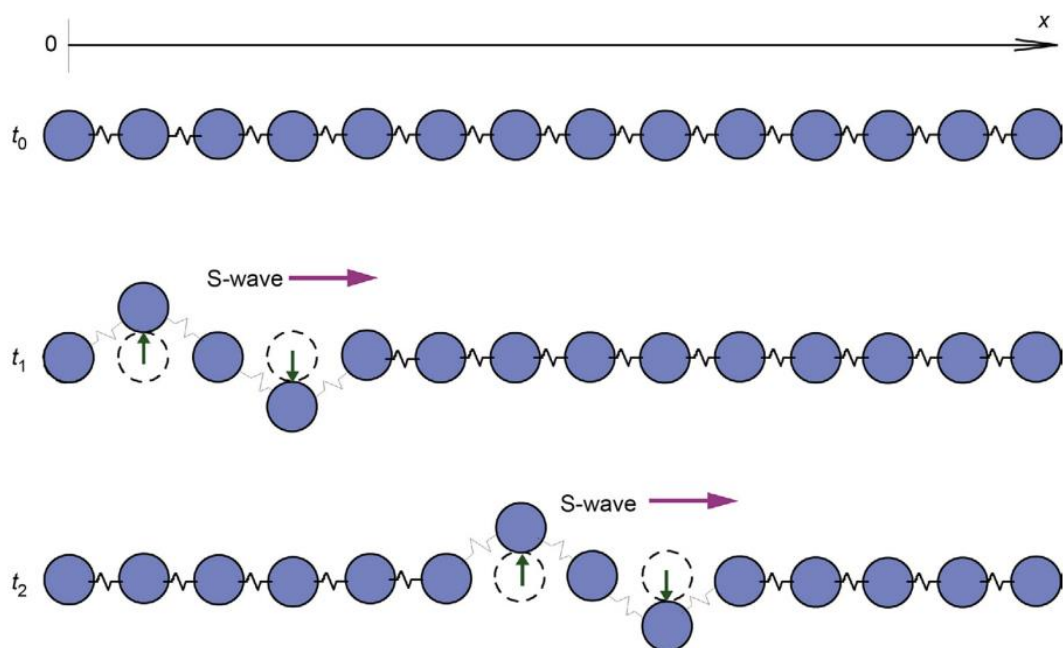


圖 2.13 S 波能量傳遞過程 (摘取自 Zhang(2016))

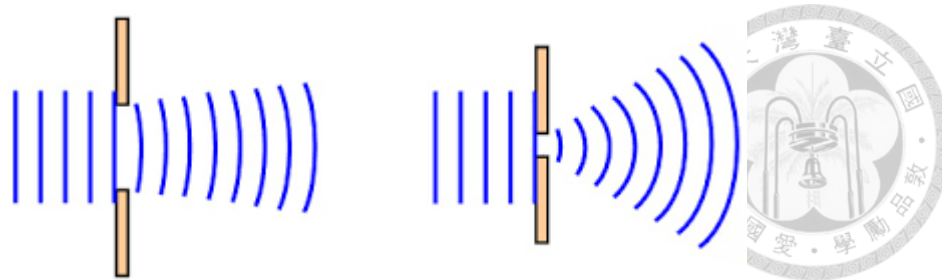


圖 2.14 左圖 狹縫寬大於波長繞射行為不明顯 右圖 狹縫寬小於波長繞射行為明顯

(摘取自網路)

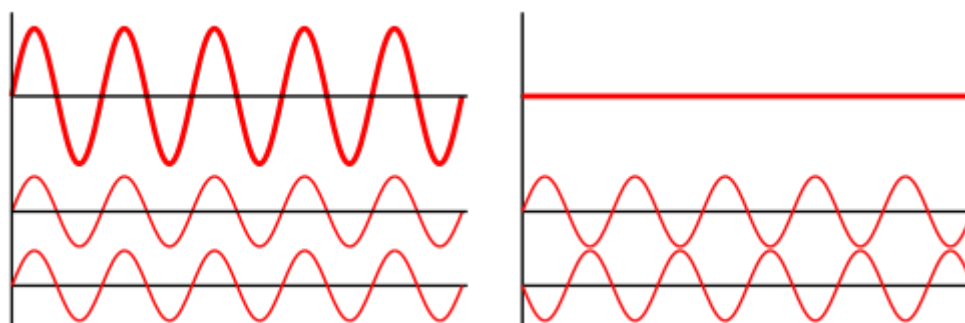


圖 2.15 左圖建設性干涉(constructive interference) 右圖破壞性干涉(deconstructive

interference) (摘取自網路)

2.5 數值模擬應用案例

有關岩石開挖效率以往研究多採用大量的物理實驗或現地調查，獲得數據進行分析，物理實驗可得到直觀的數據，但不同條件的試驗曠日費時，且所費不貲，試驗亦因控制條件限制，常出現誤差而影響分析結果。數值模擬工具的進步提供了另外的選擇，數值模擬結果透過物理實驗驗證後，可以代替大部分的物理實驗，更快找到數據的趨勢，包括有限差分法、有限元素法及離散元素法皆曾被應用為岩石開挖的數值模擬工具。

PFC^{3D}(Particle Flow Code)為美國 Itasca 公司基於離散元素法所開發的數值軟體 (Cundall 和 Strack，1994)，離散元素法(Discrete Element Method,DEM)將材料視為由許多離散、具相互作用的元素組成，這些元素可以進行碰撞，滑動與旋轉等運動，模擬在不同條件下之行為，且模擬過程可將變形、破壞的過程納入考慮，而得到更真實的材料物理力學行為。PFC3D 軟體所使用的材料參數為微觀參數，不同於傳統連續體力

學常用的巨觀參數，必需利用簡單物理試驗與軟體模擬結果進行校正，以達到與現實材料參數接近的數值。在 PFC^{3D} 軟體分析需要加入以下的假設



1. 球顆粒視為剛體，不能產生變形。
2. 顆粒形狀為球體。
3. 顆粒通過內部力與力矩成對組成接觸。
4. 物理接觸時的行為使用軟接觸法，其中允許剛性顆粒在接觸點重疊，接觸點與相對位移遵守力與位移定律。
5. 鍵結存在於顆粒之間

軟體計算流程主要是依據牛頓運動定律進行相關物理量的計算，且根據軟體內部所設定的 timesteps 代表每個運算循環所代表的時間，利用此 timesteps 的時間對球顆粒進行牛頓第二運動定律計算每顆球的加速度，當所承受的外力大於鍵結強度時，變會產生斷鍵，斷鍵的發生時視為材料內部破壞，對於岩體來說可以視為產生裂隙。即使球顆粒元素產生斷鍵分離原先模型，依然可以遵照牛頓運動定律計算，PFC^{3D} 優勢在於可針對破壞機制的探討，本研究利用波傳對於孔洞岩體的破壞行為過程，PFC^{3D} 具有相當的優勢。

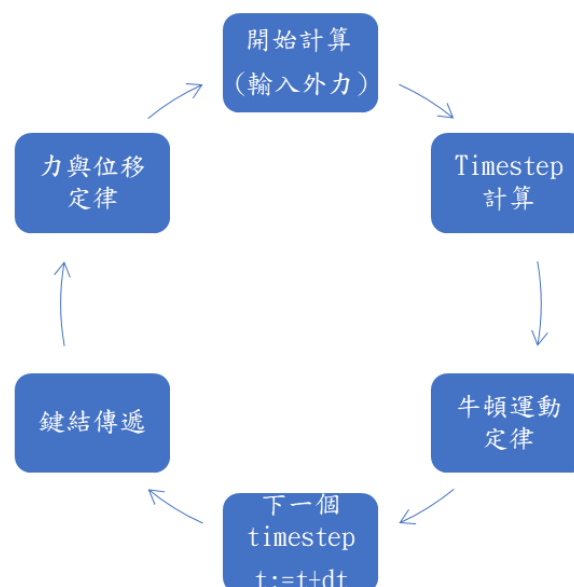


圖 2.16 PFC3D 運算流程

三種元素進行實際物的接觸點，而鍵結的等具膠結特性的材料進行模擬。平行鍵結

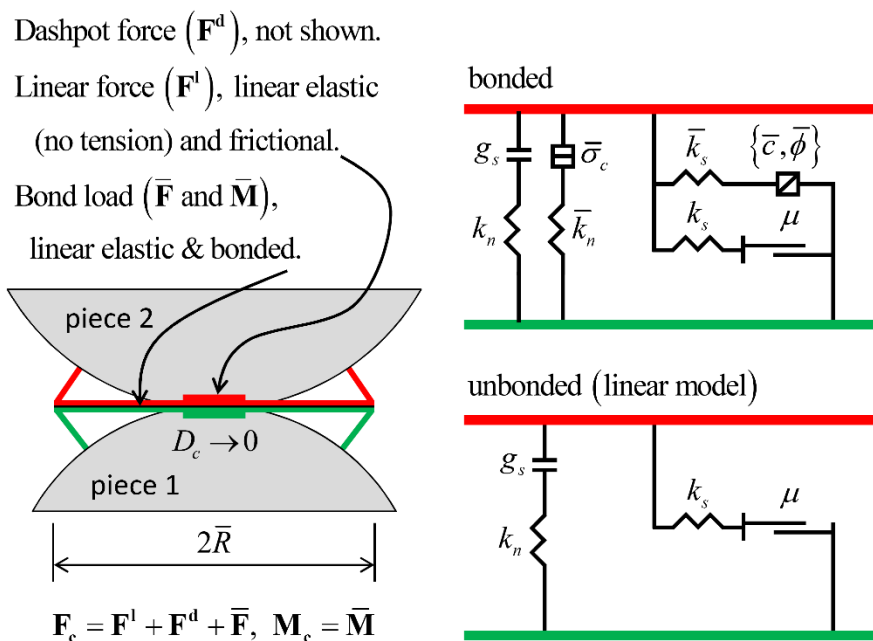


圖 2.17 Linear parallel bond 平行鍵結示意圖圖(摘取自 PFC 使用手冊)

PFC 軟體對於破壞發展可透過斷鍵描述裂紋生成的過程，相對於連續體分析具有優勢。本研究主題為應力波傳播經過有孔表面的反應，孔洞周遭是否出現裂紋、甚至是破壞為此研究核心之一，因此採用 PFC^{3D} 作為主要分析軟體。PFC 軟體亦能模擬波傳力學特性。

Zhang 等(2021)研究地震造成的邊坡破壞，探討岩體中節理或其他孔洞的影響，利

用 PFC^{2D} 進行模擬，模型寬 76 mm、長 152 mm，正中心設置一傾斜 30°、長 12.6 mm、寬 1.3 mm 的缺陷(圖 2.18)，透過模型上方與下方輸入地震速度波，可造成試體破壞。

文獻中利用阪神大地震的地震歷時輸入模型，將地震加速度歷時積分為速度資料，分別輸入軸向地震速度歷時與水平向地震速度歷時資料，藉以模擬孔洞受到餘震的影響。其中連續的地震速度歷時加載於同一方向，但模型中的裂縫並未因此增加(圖 2.19)，主因來自 Kaiser 效應(1950)，即當岩體或其他材料在受到重複循環的聲發射(AE)或地震活動模式，若應力低於先前峰值應力時，隨後的荷載下並不會產生聲發射，可以利用此方法估計岩體在各個方向上曾承受的最大法向應力大小。

震動速度歷時方向從軸向變成水平向再轉換為軸向後，則明顯看到因為方向地震力的變化，使裂縫數量增加，最後導致試體的破壞。在第一次軸向加載完後，更改為側向加載總共使用了 772490 timesteps，觀察到在缺陷處右上與左下處有新的裂縫產生，而後再進行一次軸向加載，第二次的側向加載改變了原先裂縫周圍的應力分布，因此 Kaiser 效應消失，以至於第三次加載使得裂紋擴張，導致試體破壞，如圖 2.20

裂縫生成的時機部分，模擬結果發現當最大拉伸位移(0.11mm)出現時裂縫產生，而非加載最大速度與最大壓縮位移(-0.15mm)之時；岩體的抗壓強度大約為抗拉強度的 4 到 25 倍，因此裂紋的產生會發生在最大拉伸位移而不是最大壓縮位移的發生，裂紋發生後觀察到軟體中的球顆粒會有相對劇烈的運動，經過數個 Timesteps 後才又恢復相對平穩的速度與位移變化。由此文獻中可得知利用 PFC 軟體可以觀察到震波影響裂紋發展的過程，且也可以利用 timesteps 時間的計算得知與真實時間加載的關係，與本研究所需要觀察的方向大致相同，此文獻可作為借鏡。

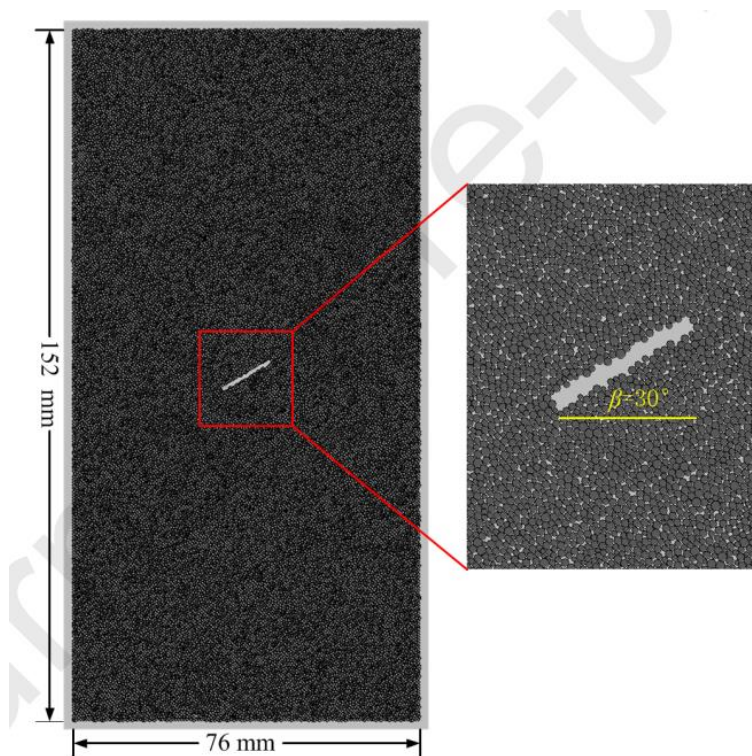


圖 2.18 模型與缺陷大小 (摘取自 Zhang(2021)等)

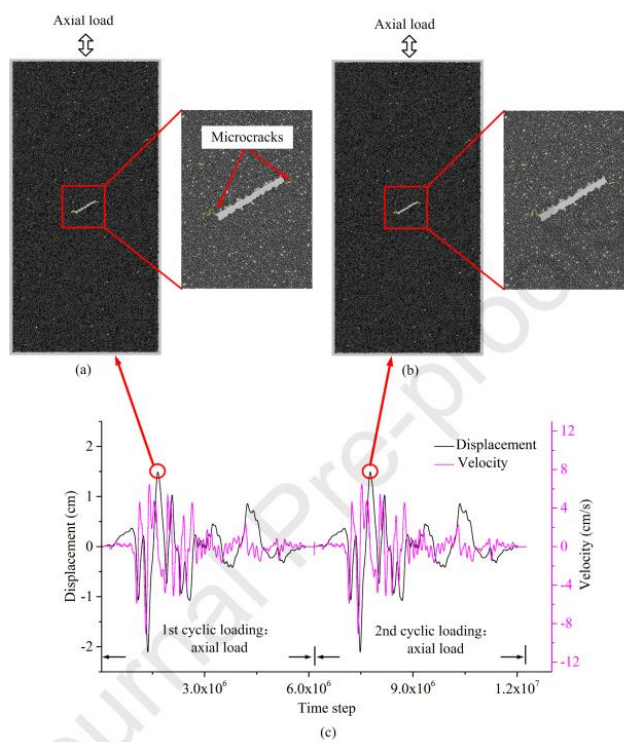


圖 2.19 (a)第一次加載後的裂縫變化，(b)第二次加載後的裂縫變化，(c)監測點的速度與位移資料(摘自 Zhang(2021)等人))

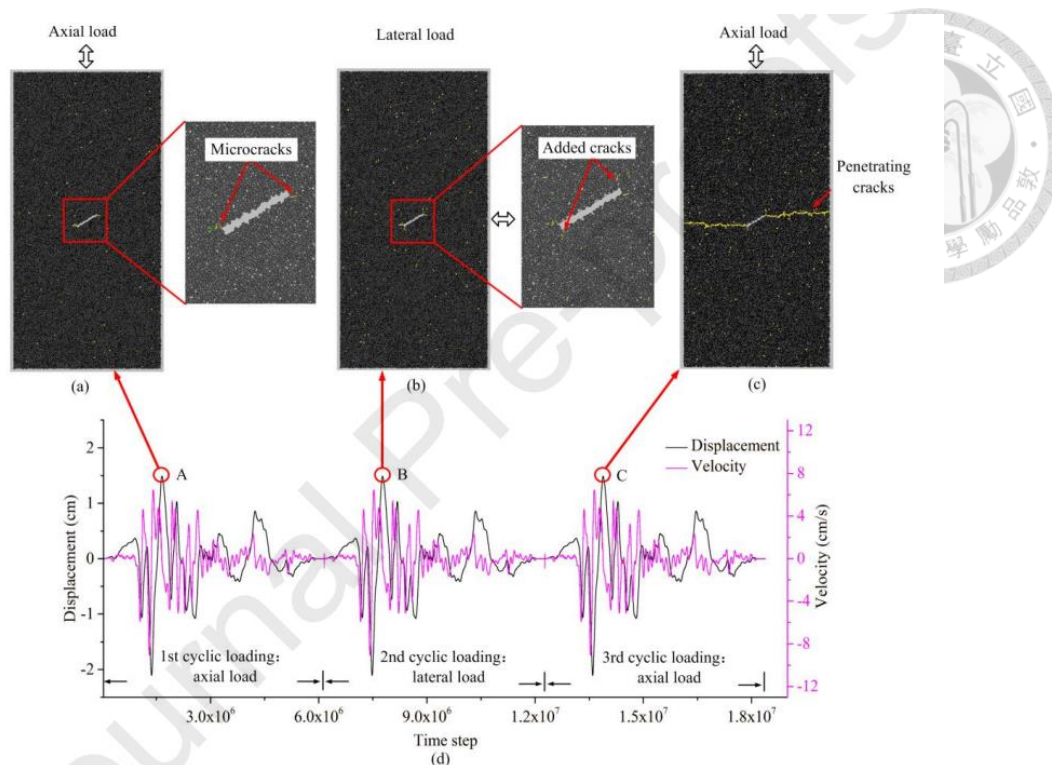


圖 2.20 (a)第一次軸向加載後的裂縫變化，(b)第二次側向加載後的裂縫變化，(c)第三次軸向加載後的裂縫變化與破壞，(d)監測點的速度資料與位移資料(摘自 Zhang(2021)等人))

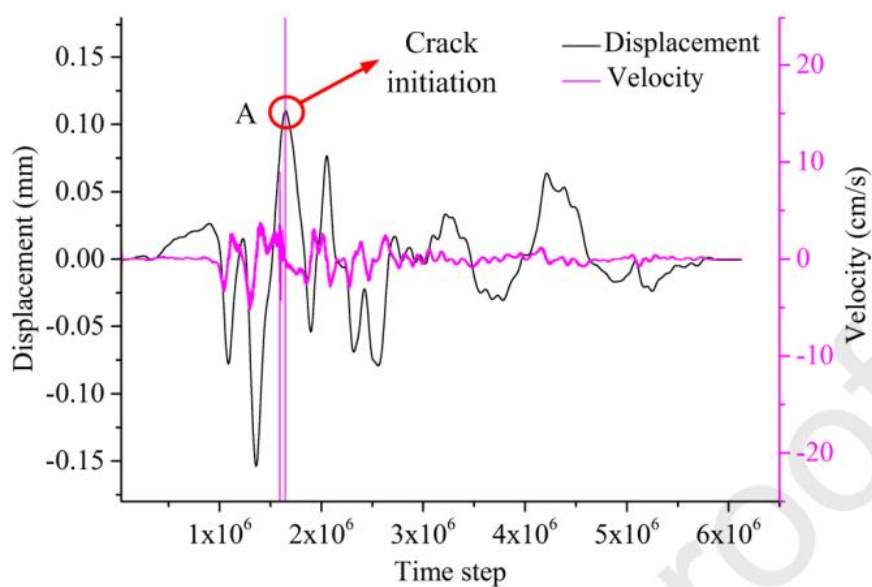


圖 2.21 監測點的位移與速度歷史，正位移代表拉伸，負位移代表壓縮 (摘自 Zhang(2021)等))

第三章 研究方法



本研究目的是透過應力波傳遞特性探討液壓錘反覆衝擊下，鑽孔對岩體開挖的影響。鑑於現地試驗調查與監測方法易受地層變異影響，兼有液壓碎岩作業引致風險，本研究透過建立數值模擬技術方式，配合理論模式與物理模型試驗比對，驗證模式可行性後，據以設計不同鑽孔佈置對岩石損傷的影響。

3.1 數值模式建立

為有效利用 PFC 軟體進行反覆衝擊荷載下鑽孔對岩石損傷影響模擬，本研究首先建立簡單圓柱試體模型，承受反覆荷載，觀察試體應力-應變反應，掌握數值模型建立與模擬物理量監測的技術；繼而建立基本數值模式，以供應力波傳理論與物理模型實驗比對依據。

3.1.1 反覆荷載測試

本研究利用兩個徑高比為 1:2、半徑為 50 mm、長度為 200 mm 的圓柱型試體(圖 3.1)，試體頂部以給定 $y = 0.0000001 * \sin(2\pi * t)$ m 的速度變位，進行反覆荷載測試。表 3.1 為兩試體的微觀參數。

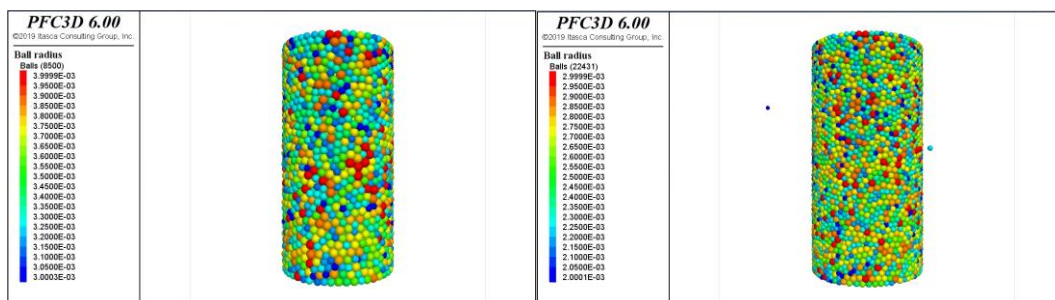


圖 3.1 反覆荷載測試試體

表 3.1 反覆荷載測試參數

	模型 A	模型 B
球顆粒粒徑(m)	0.003-0.004	0.002-0.003
Density (kg/m ³)	2500	2500
球顆粒數	8500	22431
emod(Pa)	1e7	5e9
kratio	1.33	1.33
Pb_ten (N)	0.35e7	0.35e7
Pb_coh (N)	0.75e7	0.75e7
fric	0.5	0.5
dp_nratio	0.5	0.5

圖 3.2 為模擬所得反覆荷載下試體應力應變變化，利用試體的尖峰應力與尖峰應變比值，即可求得動態彈性模數 $E_d = \frac{\sigma^{peak}}{\epsilon^{peak}}$ ，此動態彈性模數高於靜態彈性模數。

監測試體中間側壁(高度 100 mm 處)四個方位：0 度、90 度、180 度及 270 度顆粒位置，計算其 X 方向與 Y 方向變位量，再對此兩方向進行平均以代表整體側向變形，據以計算應變後再與軸向應變比較計算波松比。

依據表 3.1 中的模型一試體進行反覆荷載，監測得壓應力峰值為 0.5419 MPa，應變峰值為 0.0159(圖 3.3a)，得到動態楊氏模數 $E_d=34.13$ MPa，側向應變峰值為 0.0023，根據計算波松比為 $\nu=0.144$ ，單位重設計為 2500 kg/m^3 ，根據 P 波公式，波速為 $v_p=119.81 \text{ m/sec}$ 。

模型二試體反覆荷載，監測得壓應力峰值為 2.57 MPa，應變峰值為 1.58×10^{-4} (圖 3.3b)，得到動態楊氏模數 $E_d=16.28$ GPa，側向應變峰值為 2.47×10^{-5} ，波松比為 $\nu=0.156$ ，根據 P 波公式，波速為 $v_p=2630 \text{ m/sec}$ 。

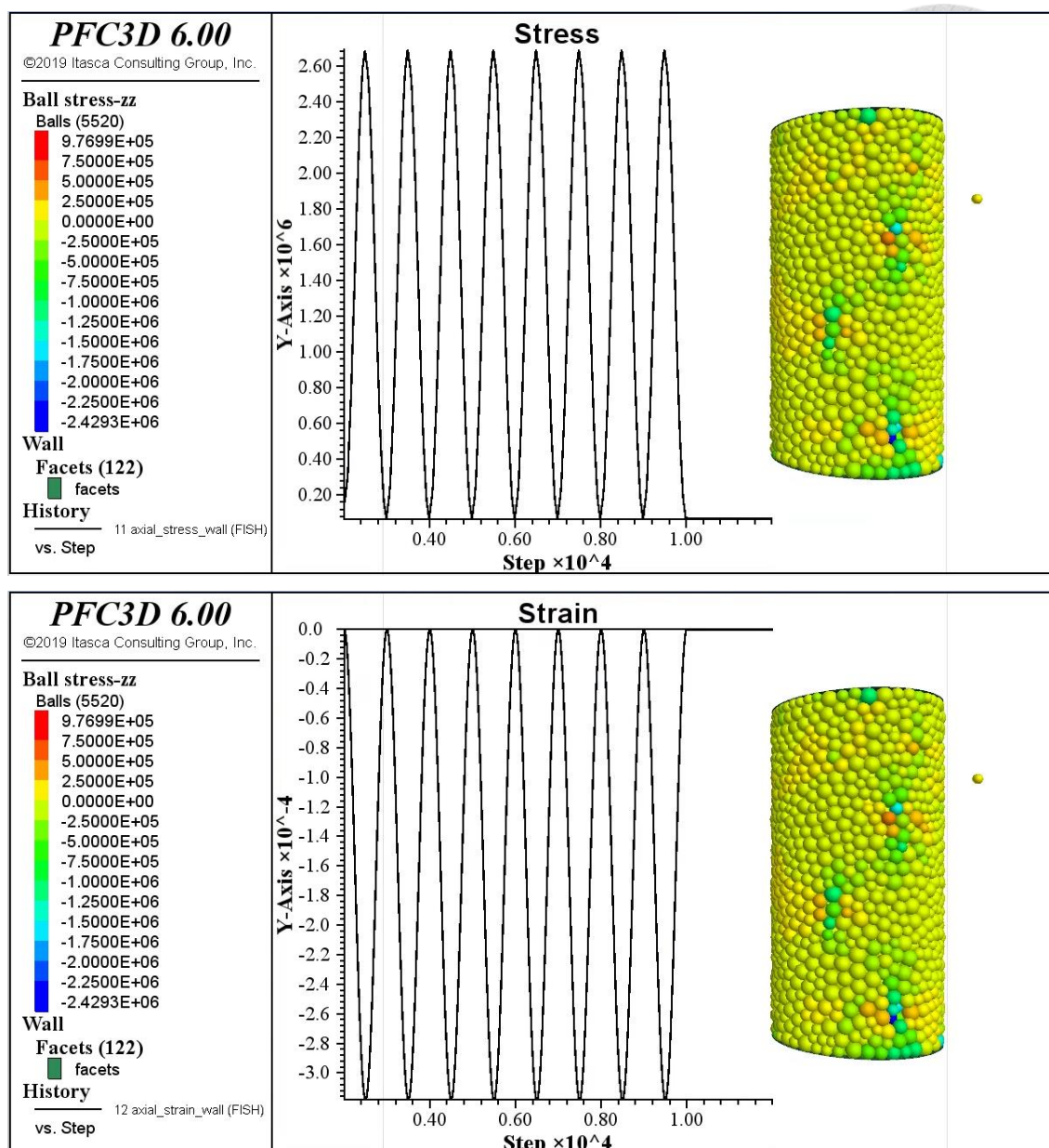
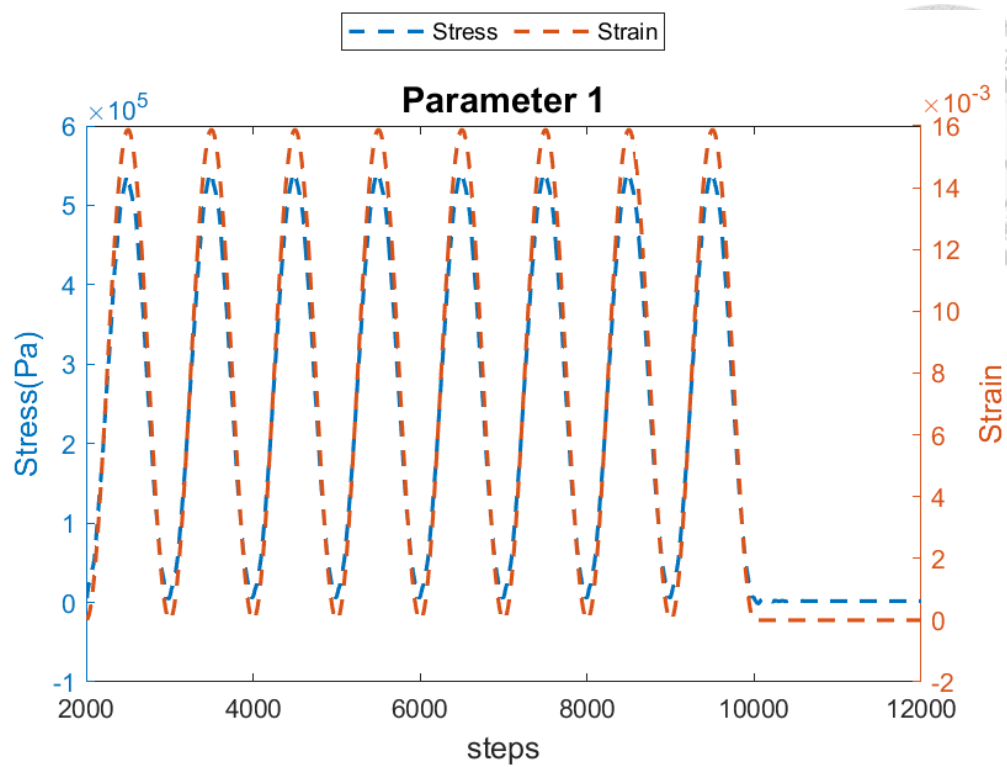


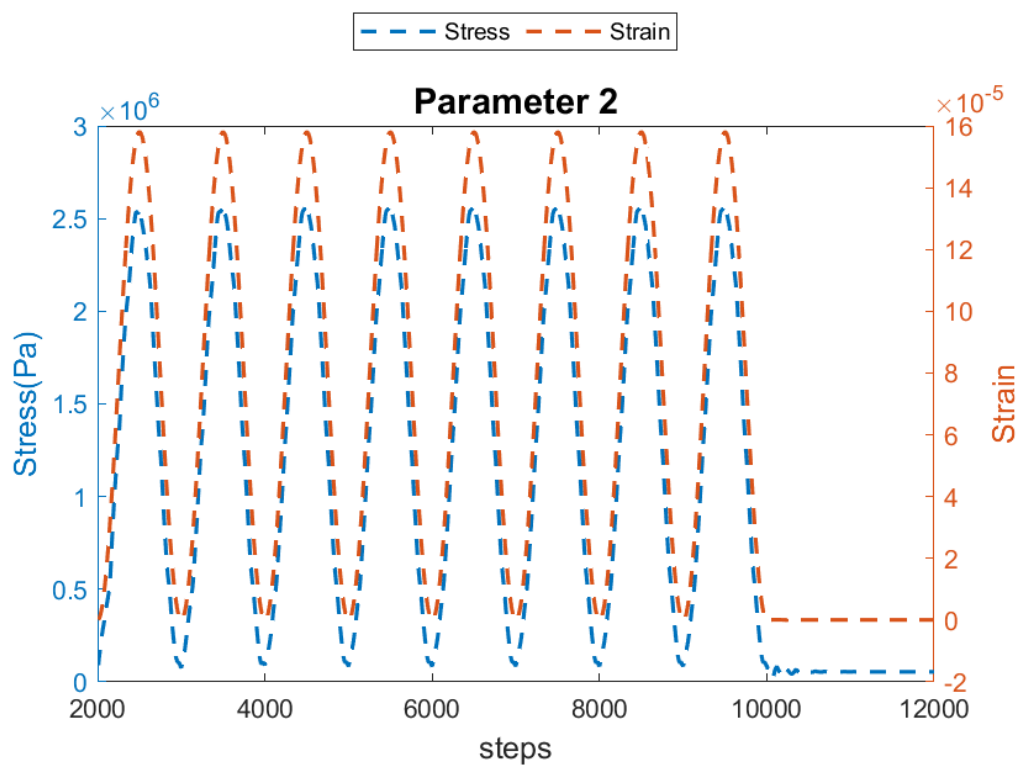
圖 3.2 模擬所得反覆荷載下試體應力應變變化

表 3.2 反覆荷載試驗求得參數

	模型 1	模型 2
動態楊氏模數	34.13(MPa)	16.28(GPa)
波松比	0.144	0.156
P 波波速(m/sec)	119.81	2630



(a)



(b)

圖 3.3 模擬所得反覆荷載試驗之應力應變曲線

3.1.2 波傳特性與監測

本研究另建立一 100x100x1000 mm 長方體試體(圖 3.4)，其中模型在 Z 方向加長，係為使波傳播於材料中的行為在試體中得以展現，在試體的最高處的中心點(50, 50, 1000)給予牆體速度模擬擊打，且在波傳播的方向(-z 方向)每十公分設置一個監測點位，觀察監測點位首次接觸到應力波的時間，再按兩者之間的距離計算出此材料的應力波波速。PFC 軟體使用 timestep 時間步做為計算時間單位，需搭配 cycle 數轉換出真實速度 $V_p = \frac{\text{兩點之間距離}}{(\text{timestep} * \text{cycle})}$ 。因縱波速度(V_p)比橫波波速(V_s)快，橫波 V_s 抵達監測點的時間決定可能受到縱波影響而不易判斷，故此處先計算縱波波速。監測點布設在 Z 方向，與擊打方向一樣，每十公分測量 z 方向的速度；軟體中的正 z 方向為向上，負 z 方向為向下。

監測點間距 10 公分，應力傳播的時間差相當接近，本研究自波速開始採-z 方向傳播的 steps 數為時間計算依據，第一個點位 10 公分處因較靠近擊打位置，波傳時間較難掌握，其他點位(20 公分到 90 公分處)擁有較好的數據資料。

表 3.3 為模型一試體的波速計算結果，表格中自行計算欄位的 steps 為利用動態楊氏模數計算出的 P 波波速，做為距離除上速度的分母，求得時間後，再將此時間除上軟體中的 Timestep(設定為 $8e-7$)，估計 Steps 的大小，再與軟體中自行計算值比較。其中因監測位置至擊打點距離小，應力波的波速相對大，細小的距離差別可能就會造成時間及速度計算出現差距。軟體中監測點 2 至擊打位置距離 0.1977m，計算得波速為 $172.84^m/sec$ ，明顯大於前述依動態楊氏模數計算的波速 $119.81^m/sec$ 。監測點 3 距離 0.2989m，計算得波速為 $126.247^m/sec$ ，亦略大於 $119.81^m/sec$ ；監測點 4 到 9 的波速則落在 $115^m/sec$ 至 $121^m/sec$ 之間，與依動態楊氏模數計算波速接近。整體波速平均落在 $125^m/sec$ ，主要受到監測點 2 的影響。再從 Steps 的觀點來說，一個 Step 代表為 $8e-7$ 秒，從監測點 2 的 Step 差距為 630 Step，代表兩者之間差了 0.000504 秒，差距極小，但換算成波速誤差不容小覷，為後續分析應注意之處。

表 3.4 為模型二的波速計算結果，表格中自行計算欄位的 steps 為利用動態楊氏模

數計算出的 P 波波速，做為距離除上速度的分母，求得時間後，再將此時間除上軟體中的 Timestep(設定為 $8e-7$)，估計 Steps 的大小，再與軟體中自行計算值比較。模型二的 P 波波速為 2630m/sec ，比模型一 119.81m/sec 大上許多，已經達到公里級的波速。其中因監測位置至擊打點距離小，應力波的波速相對大，細小的距離差別可能會造成時間及速度計算出現差距。監測點 2 距離擊打位置 0.1974m 的點位，波速為 2468.51m/sec 與理論計算上 2630m/sec 有段落差，在監測點 3 距離 0.2968m 的點位，波速為 2650.61m/sec 會接近理論波速，而在監測球 4 到 9 的區間所得到的應力波速會介於 2158m/sec 至 2289m/sec 之間，此段數據是明顯小於原先計算理論值，誤差可能原因會來自於動態楊氏模數的錯估以及 Steps 數計算上面的問題，波速的計算中動態楊氏模數佔了很重要一部分，越大會得到越快的波速，而 Steps 數的原因可能來自於需要以相同距離的 Steps 數比較，以每兩個監測球之間的距離來討論的話，自行計算與軟體計算之 step 數會約略落差在 10 到 20 個 Steps，Timestep 於軟體中設定為 $8e-7$ 每個 Step 代表的真實秒數，因此也代表大約相差 $8e-6$ 秒至 $1.6e-6$ 秒，差距極小，但換算成波速誤差不容小覷，為後續分析應注意之處。

從上述的試驗能確定材料參數與應力波速度關係能在軟體中展現，而為了追求模擬精度，未來在計算波長的大小會利用軟體中的波峰間距計算波速而後反推波長，較能代表此模型。

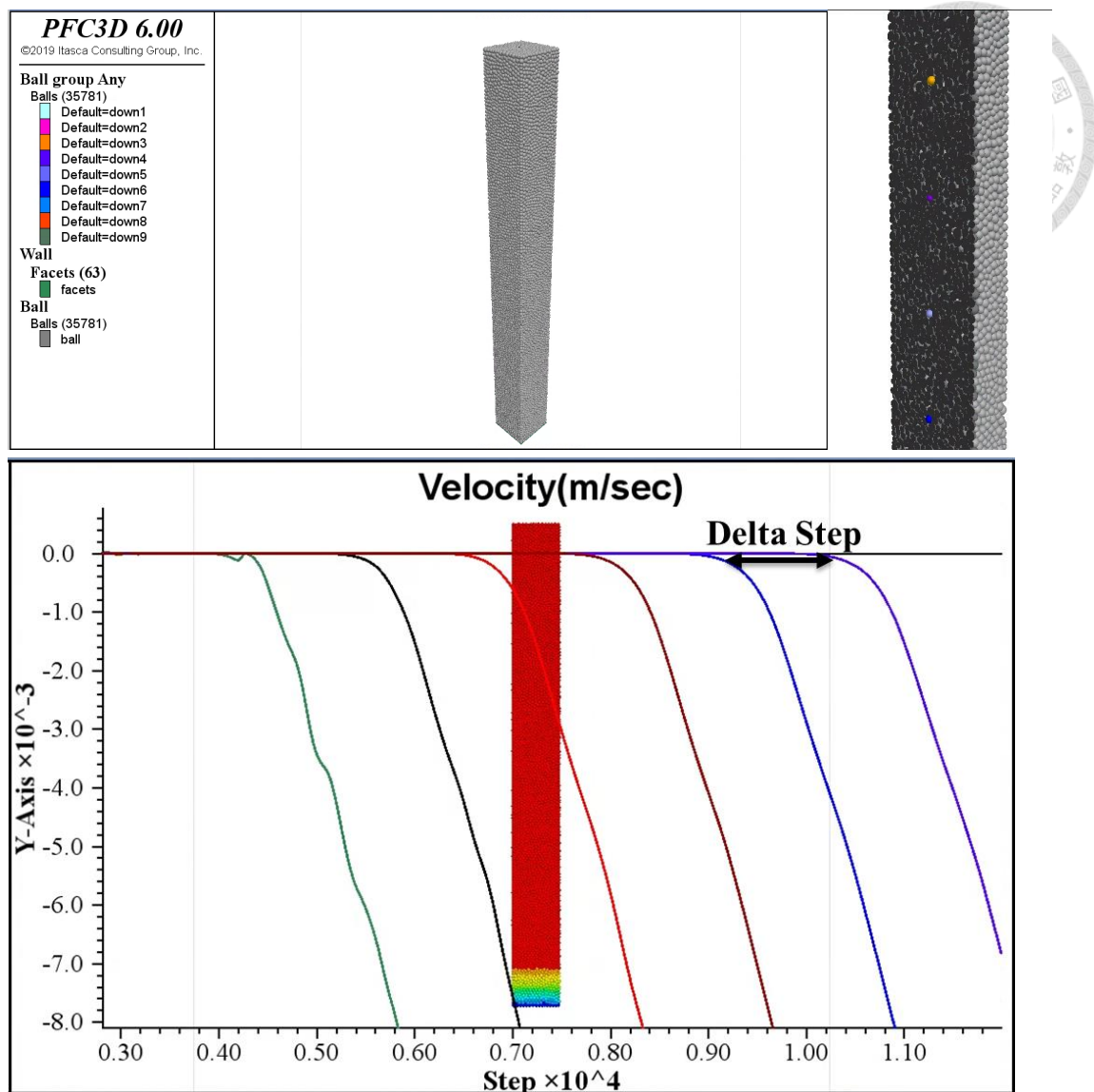


圖 3.4 測試波速使用之長方體

表 3.3 參數一試體速度計算

模型一			
距離(m)	自行計算 (steps)	PFC3D (steps)	Vel (m/sec)
0.198	2063.07	1430	172.85
0.299	3119.07	2960	126.25
0.397	4138.44	4240	116.94
0.499	5206.70	5350	116.60
0.597	6231.93	6380	117.03
0.696	7262.96	7420	117.27
0.799	8332.57	8650	115.41
0.898	9369.37	9260	121.22
		average	125.45

表 3.4 參數二試體速度計算

模型二			
距離(m)	自行計算 (steps)	PFC3D (steps)	Vel (m/sec)
0.197	93.86	100	2468.51
0.297	141.10	140	2650.62
0.399	189.75	218	2289.15
0.499	237.22	289	2158.78
0.597	283.66	340	2194.22
0.699	332.24	398	2195.46
0.796	378.53	459	2168.92
0.898	426.68	519	2162.17
		average	2285.98

3.1.3 基本數值模式

本研究繼而採用半徑為 1.8 mm 的球顆粒進行建模，軟體參數如表 3.5 所示，模型大小為 300 mm 立方體，模型的球顆粒數量為 1,027,163 顆(圖 3.5)。球顆粒元素縮小有助於提高數值解精度，按陳正勳(2011)與 Gu et al.(2020)等文獻建議，元素與入射波波長之間的比值需小於 1/10，岩體的應力波波速約略落在 2000 m/s，在擊打頻率為 30,000 Hz 的情況下，波長為 66.7 mm，顆粒尺寸需小於 6.67 mm。本研究建立的數值模型預期可有良好的求解精度。

表 3.5 參數二試體速度計算

	模型參數
球顆粒粒徑(m)	0.0018
Density (kg/m ³)	2500
球顆粒數	1,027,163
emod(Pa)	5e9
kratio	1.33
Pb_ten (N)	0.35e7
Pb_coh (N)	0.75e7
fric	0.5
dp_nratio	0.5

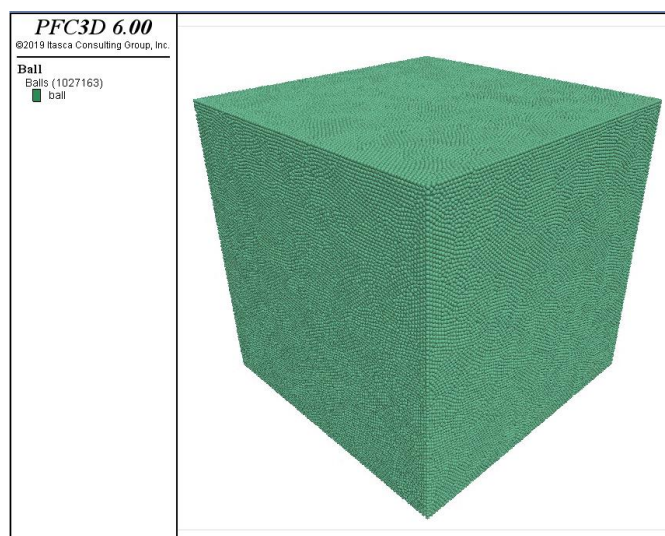


圖 3.5 本研究建立的 PFC 基本模型

為模擬液壓錘擊打岩體的狀況，擊打位置設計於試體正中心的頂部(圖 3.6)。擊打模擬的方式為利用軟體中的牆體(wall)給予 z 軸方向(垂直地表)速度對試體進行衝擊，此速度的數據來自於先前的擊打物理試驗中取得(黃冠霖(2022))，擊打物理試驗為利用筋膜槍作為震動的來源，擊打在岩石試體產生應力波，且利用加速規得到震動產生的加速度數據，後續將加速度資料進行積分為速度以方便輸入 PFC^{3D} 軟體中，在試驗時會在擊打試體與筋膜槍上加裝加速規得取震動所產生的數據，筋膜槍上的加速度規紀錄之數據為用來在數值模擬時的震動速度資料，試體上的加速度規為用來得取不同點位上的加速度資料。

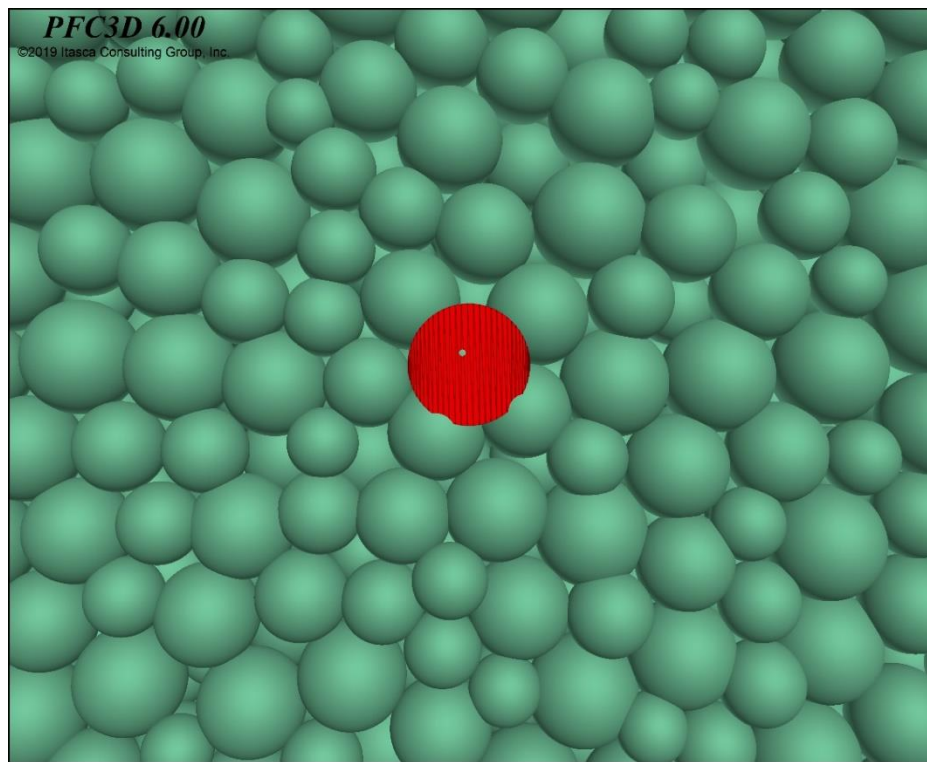


圖 3.6 紅色圓盤為牆體用來模擬擊打行為

本研究以正弦波(sine wave)形式輸入速度資料，相對於先前研究以測量所得波型較為複雜的震動資料(圖 3.7)，自行產生之波型較能掌控其頻率及振幅的變化(圖 3.8)，亦有利於避免實驗受到外部因素干擾而影響數據，而對於後續的模擬能做出更多調整與變化，如利用孔洞的大小與波長之間的關係探討繞射的行為、利用擊打頻率的變化探討應力波傳遞，便於探討波傳行為是否有效提升孔洞周圍岩石損傷、破壞等現象。

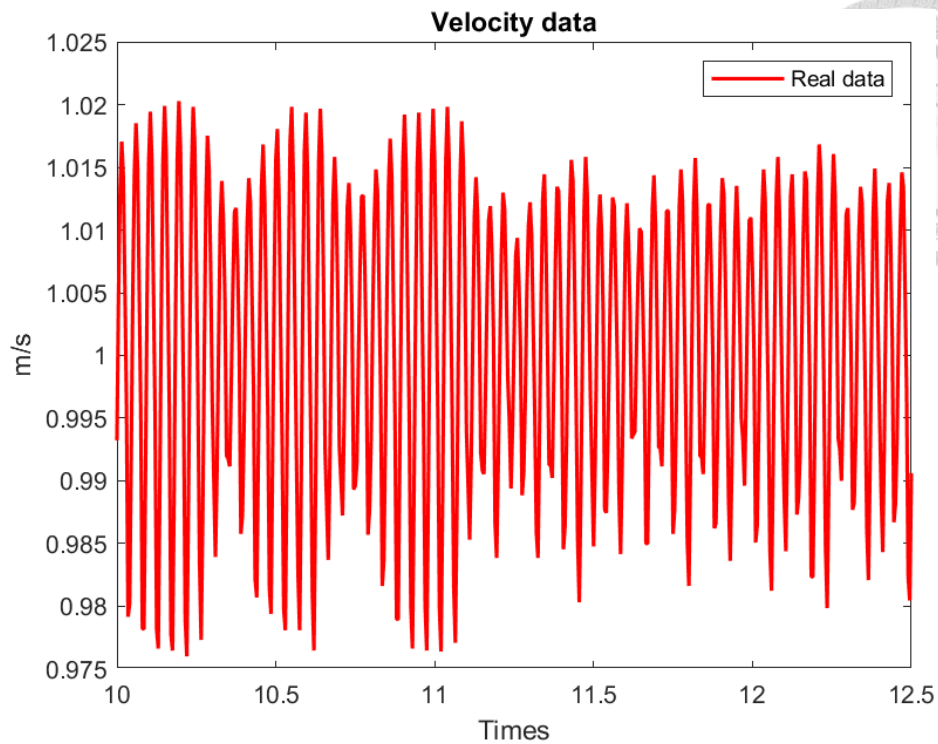


圖 3.7 實驗量測之速度波型

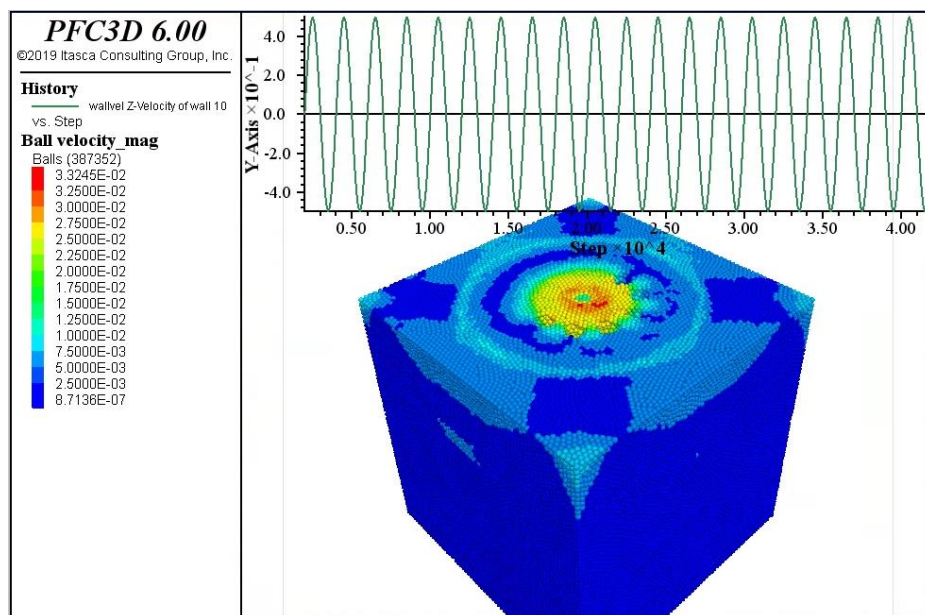


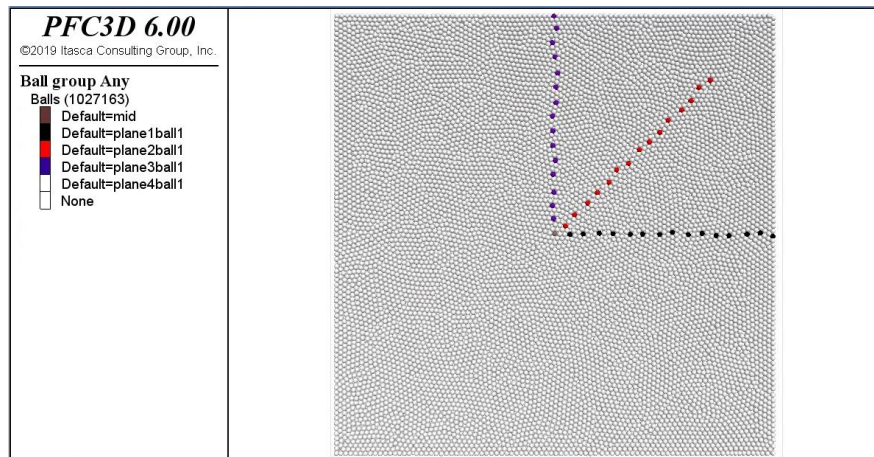
圖 3.8 依據量測波型自行簡化產生之 sin wave 波型

3.2 數值模式驗證

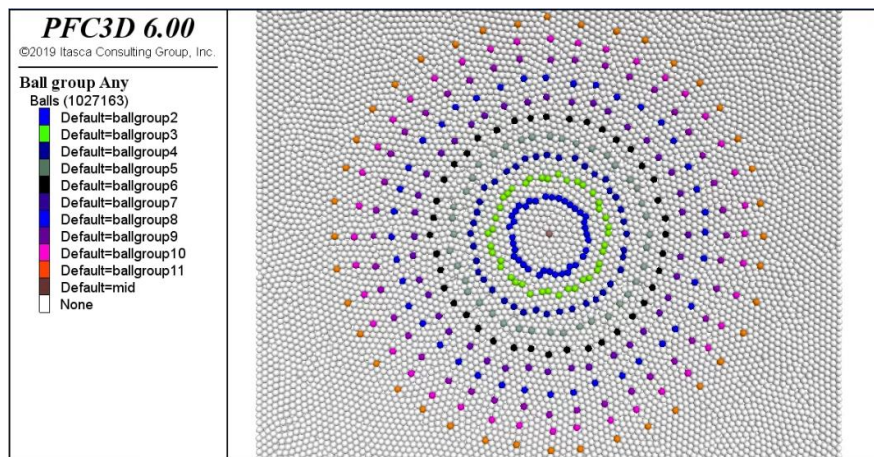
本節首先透過 Bornitz 振幅衰減理論公式，驗證本文建立基本數值模型在反覆衝擊荷載下描述波傳特性的正確性，繼而嘗試以物理模型試驗結果驗證應用性。

3.2.1 應力波傳衰減理論驗證

Bornitz 振幅衰減理論公式描述應力波傳遞過程的振幅衰減。然而 PFC 數值模型球顆粒位置係任意指定，可能因為球顆粒的排列不整齊，引致在指定方向同一距離的球顆粒中心點位出現偏差，亦可能與相鄰球顆粒有不同的接觸鍵結位置，產生不一致的振幅大小，因此，本研究採用直線以及圓形分布監測點(圖 3.9)，比較驗證數值模型的正確性。直線分布為觀測其振幅衰減程度是否與距離成反比，圓形分布為監測同樣距離下振幅的大小是否一致，本小節以速度振幅變化為代表，選擇與擊打方向相同之 Z 方向振幅為比較依據。



(a)



(b)

圖 3.9 直線與環形分布監測點位置

圖 3.10 為直線分布監測點數值模擬所得速度振幅變化，在 0 度、45 度及 90 度的方

位，每一徑向距離 10 mm 振幅變化除了第一點稍有差異外，其他位置之監測點之振幅變化接近一致，數值模擬波傳在此試體具均勻性，且振幅隨著距離增加而減少。

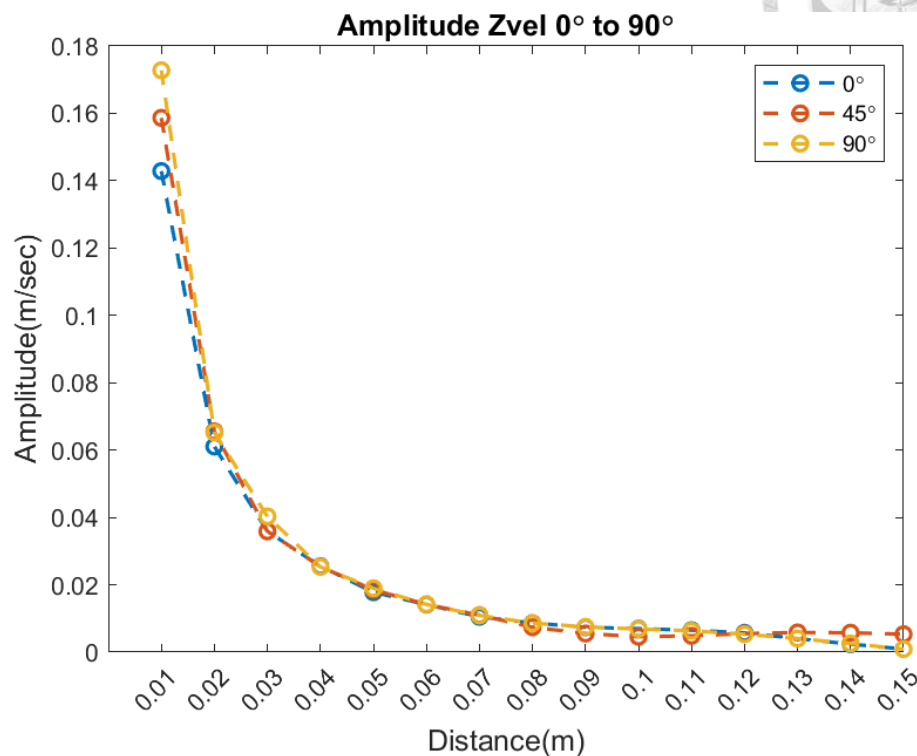


圖 3.10 直線分布監測點數值模擬所得速度振幅變化

Bornitz model (1931)中，距離以及幾何阻尼影響波傳振幅大小，監測點的距離可直接計算，因球顆粒中心在不同方向並非 10 mm 整數差值，因此分為三個方向分別比較。圖 3.11 為比較結果，幾何阻尼嘗試先利用建議值 0.5、材料阻尼 0.1 條件下，解析公式 (2.4 式)所得振幅雖與模擬結果皆呈現衰減現象，但量值明顯大於模擬結果，主要原因來自 Bornitz 公式係依土層鑽孔經驗而發展，建議的阻尼值可能不適用於本研究模擬的岩石。經過調整測試後，若將材料阻尼係數設訂在 1.2 至 1.4 之間，如圖 3.11 右側欄位，本研究數值模擬所得振幅變化與 Bornitz model 描述非常接近。

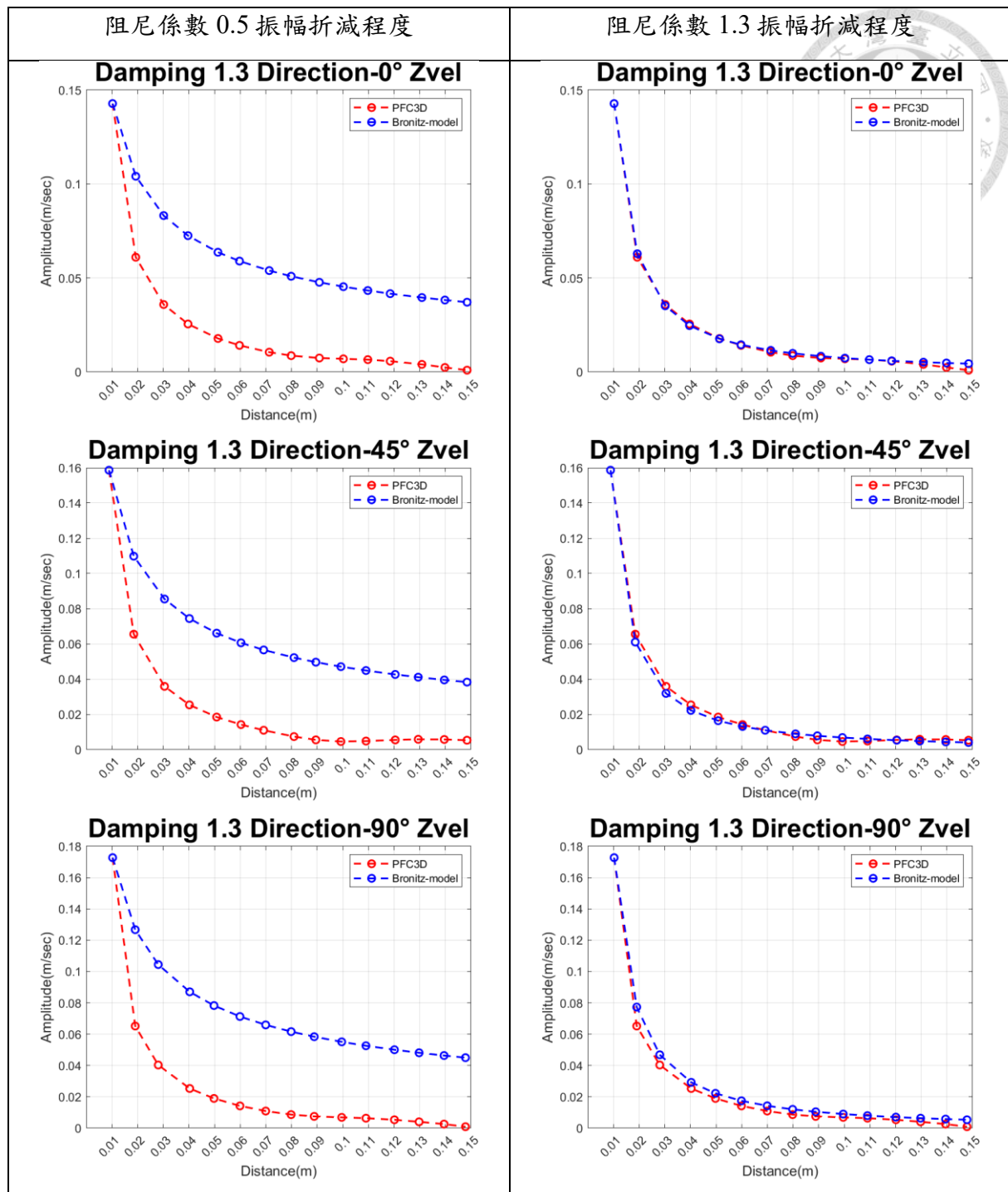


圖 3.11 數值模擬所得振幅變化與 Bornitz model 描述比較

圖 3.12 為環形分布監測點比較結果，圖中由外到內依序為距離中心 20 mm 的監測環至距離 110 mm 的監測環，每一監測環每隔 10 度有一監測球顆粒，每環共 36 個。較靠近擊打點的球體會有較大的振幅，因此監測圖 2 的半徑較大，在較靠近擊打位置的監測圖 2 及監測圖 3 所產生的振幅會有較不平整的值，是受到較靠近擊打位置，所以變動

較大，如同前面提到經驗公式的驗證，距離會影響振幅的結果，而較中間處監測圖 4 到監測圖 7 的振幅差異較小較均勻，監測圖 8 到 10 則會有約每 90 度一個週期的變動，都會在約 45 度角時產生較小值，此原因來自模型形狀問題，45 度角會位在角隅點，而受到反射波的影響。此驗證模型可以得知完整模型在各個角度的波傳行為是相同的。

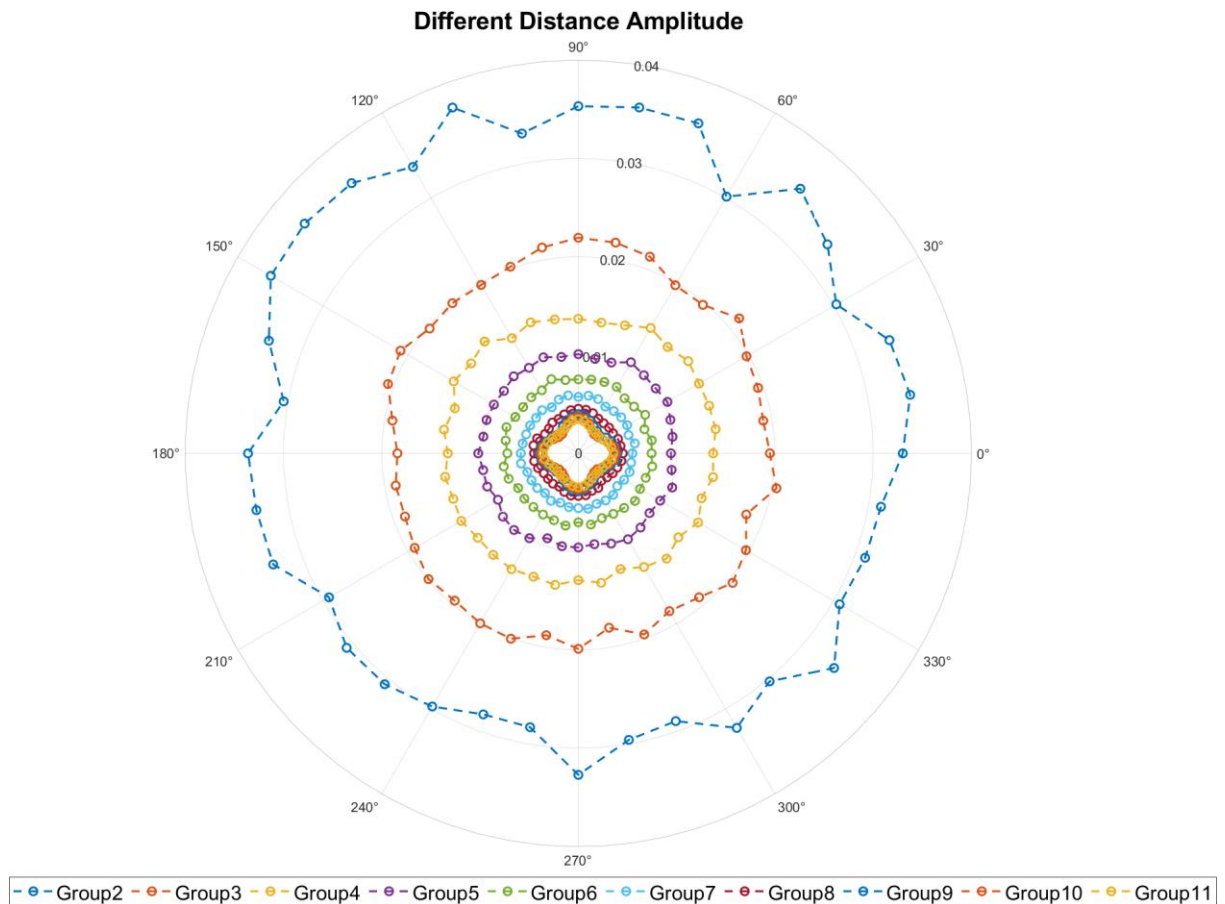


圖 3.12 環形分布監測點 Z 向振幅比較

3.3 物理模型結果驗證

物理模型實驗之目的是為能模擬真實情況，獲得到相關的實驗數據，並提供數值模型的驗證。為模擬液壓錘破碎機反覆擊打岩體開挖面的碎岩及應力波傳遞的過程，本研究使用購自印尼 Watukelir 凝灰岩作為試體(圖 3.13)，岩石大小為 300 mm 立方體，為，單壓強度約 20MPa，材料質地細緻且完整，不連續面不發達；模擬液壓錘破碎機的擊打器具為筋膜槍，擊打頻率落在 40 Hz 至 50 Hz 之間，依不同模式有不同的頻率選擇；測量應力波傳遞過程之儀器為加速規，可即時獲取當下振動資料，本研究會採用

兩種加速規，分別為來自美國 Silicon Designs, Inc 公司的加速規與來自德國 Bay Sensor Tec GmbH 公司加速規(圖 3.14)，每秒可以記錄 1000 筆數據資料。

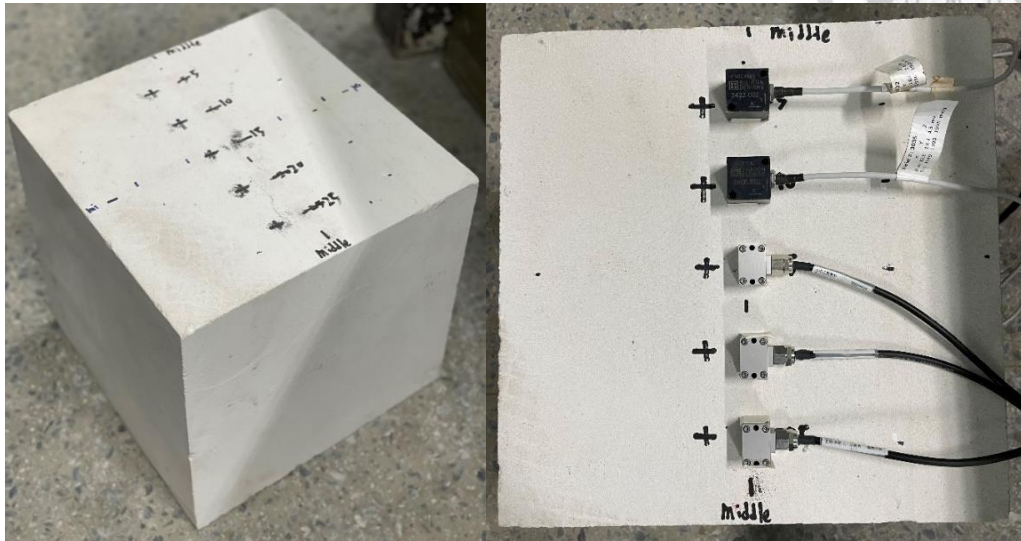


圖 3.13 物理模型試體

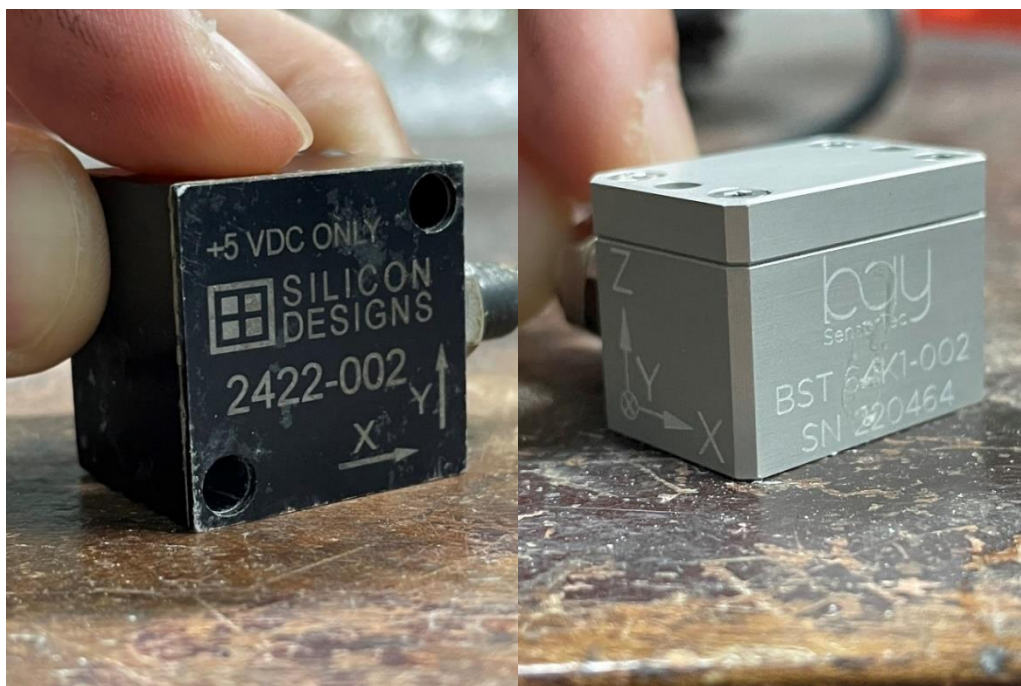


圖 3.14 物理模型試驗採用的加速規

圖 3.15 為物理模型試驗流程，簡述如下：

1. 檢測加速規的功能是否正常，當加速規正放置於平面時，Z 軸方向加速度需與地吸引力相同為 1g，若誤差過大可能為接線接觸不良，需重新接線。

2. 將加速規置於岩石的擊打表面，利用強力雙面膠使其穩定黏在表面不受擊打而有自然晃動，而影響到實驗結果。
3. 筋膜槍對岩石表面中心點位進行擊打，產生震動。
4. 將需要的加速規震動資料匯出、整理。
5. 加速度資料進行去趨勢，只要留取變化震動的資料，進行傅立葉轉換得到主頻率與振幅大小。
6. 與理論值進行比較。

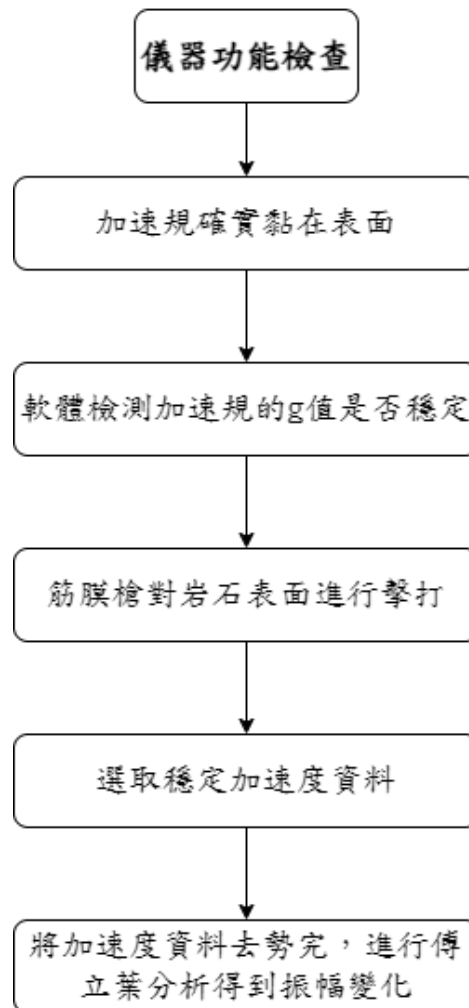


圖 3.15 物理模型試驗流程

實驗中也會對波速進行計算，將加速規位於試體表面(圖 3.16)，測量 Z 方向的加速度變化，此方向與筋膜槍的擊打方向相同，此時所量測到的波屬於剪力波 S-Wave，欲利用不同點位的加速規資料，尋找相同波型的地方利用波峰的時間相減得到時間差，

與距離相除得到剪力波速，每顆加速規的距離會使用中心點作為依據。

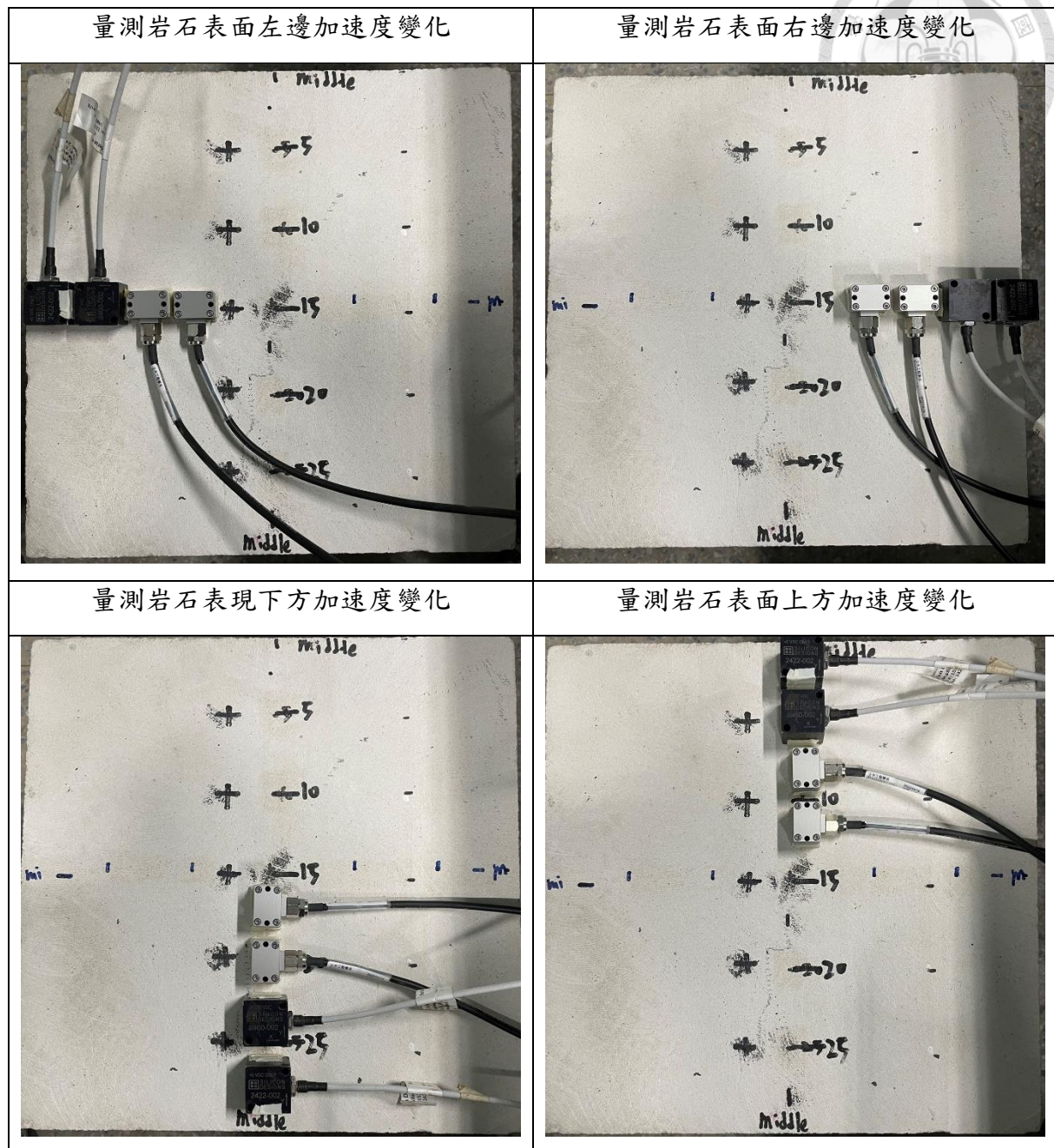
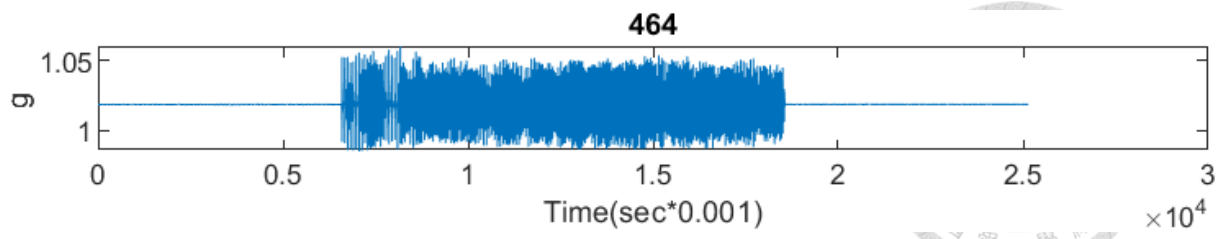
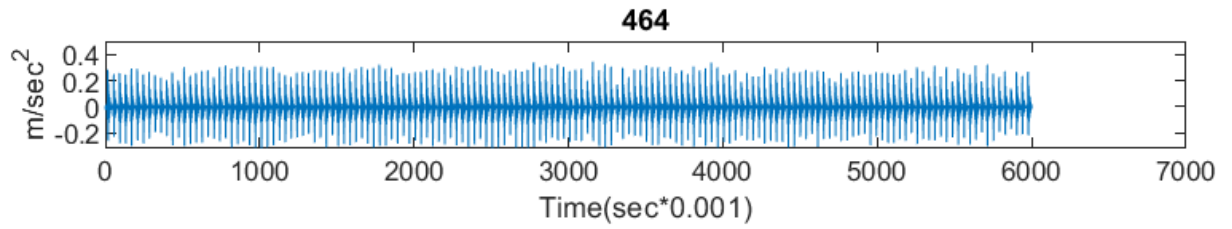


圖 3.16 物理模型試驗加速規布置

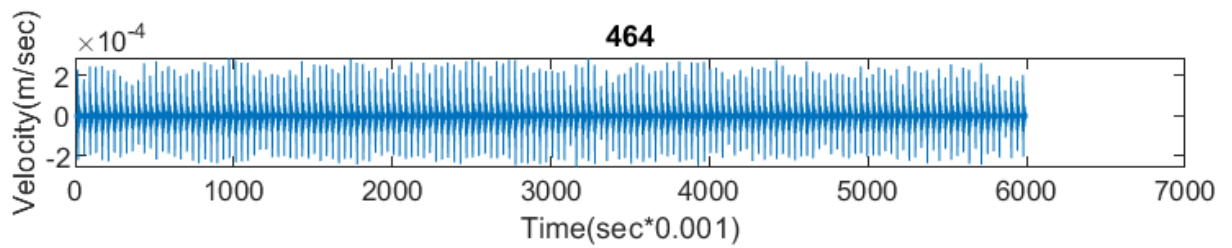
圖 3.17a 為多個加速規中量測所得加速度歷時的一例，透過訊號處理濾除趨勢可得圖 3.17b，再積分後可能速度歷時(圖 3.17c)，最後再進行傅立葉轉換，可獲得圖 3.17d 的主要頻率分布，大約為 26 Hz 及其倍頻。



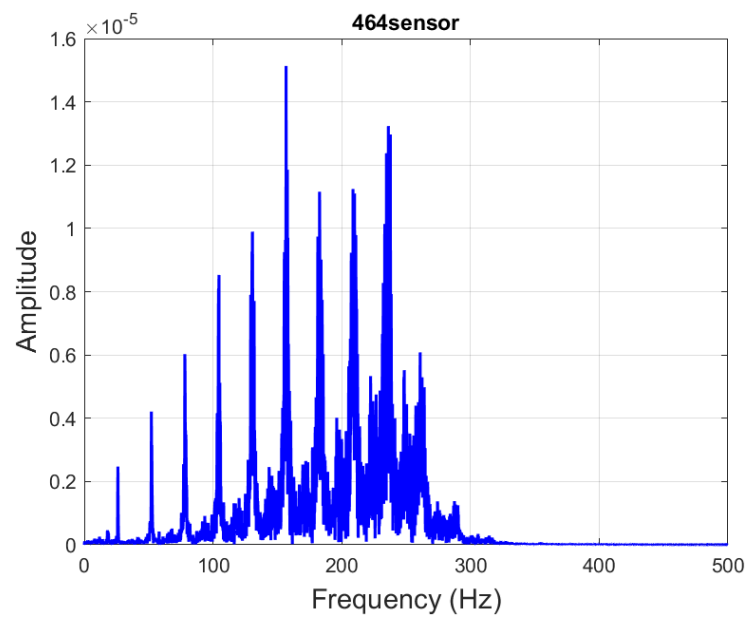
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 3.17 物理模型試驗量測資料及處理

圖 3.16 的加速度規布置，由內到外的代號分別為 464sensor、463sensor、3422sensor、

3035sensor，其相鄰距離為 30 mm，圖 3.18 為為各方向的振幅變化，X 軸座標 1~4 分別代表由內到外排列加速度規量測結果，振幅並未因距離增口而衰減，而是呈現高低起伏的變動。在岩石表面左右兩側的振幅變化趨勢接近，先在監測點 2 降低而到監測點 3 後大幅提升；岩石表面下側振幅變化不一致，下方變化為鋸齒狀，先增加後再降低又再增加；岩石表面上側為 V 字形變化，持續衰減至監測點三後，監測點四又大幅提升。

造成監測點間振幅變化未如 Bornitz model 描述，可能原因在於加速規大小相對岩石試體較大，岩石試體的大小為 300 mm 立方體，加速規大小約為 20 mm 立方體，以每 20mm 作為一個質點監測加速度變化，波傳遞時的波長無法有效的表現波動行為，且可能因為反射影響振幅的變化，使距離邊界較近的監測點受到反射波的影響，而有較大振幅。

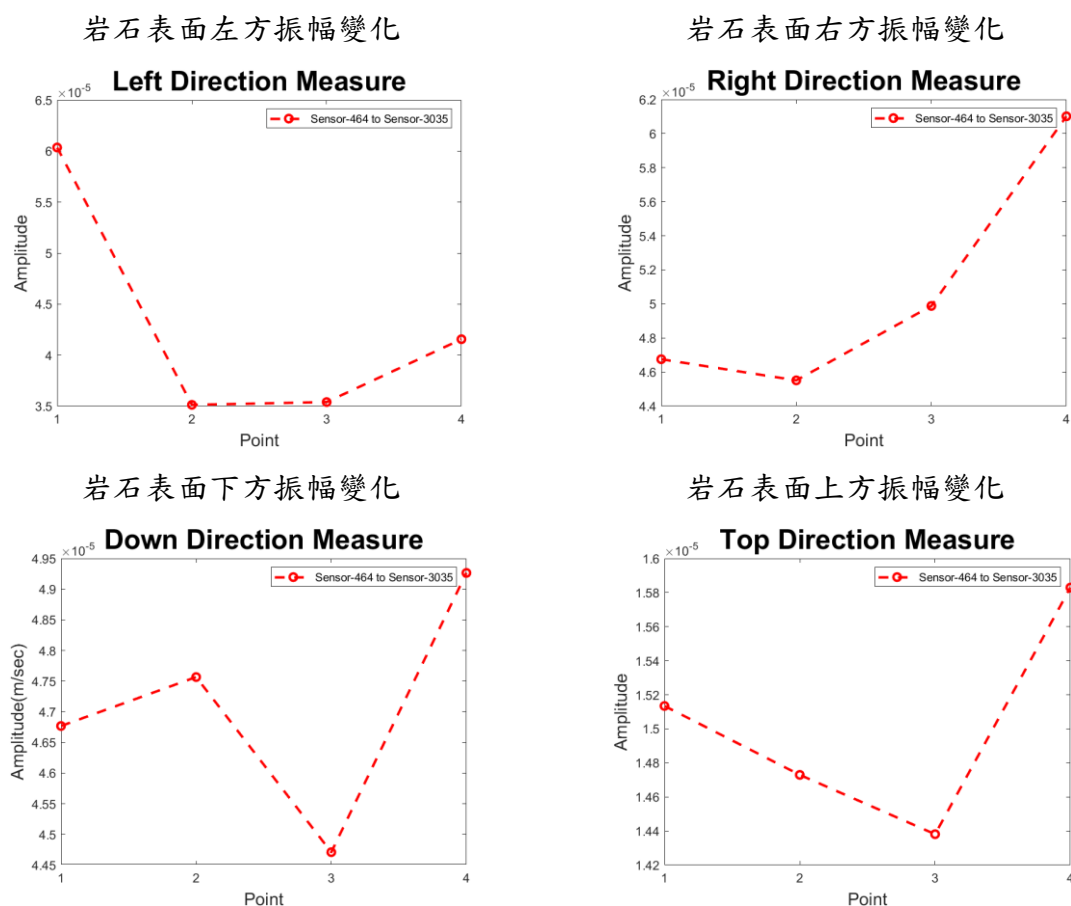


圖 3.18 物理模型試驗量測所得各方向振幅變化

岩石的剪力波速約為 2000 m/sec，監測點間隔 30 mm，代表 0.000015 秒應力波就

會傳遞到下一個監測儀器，而監測儀器每秒紀錄 1000 個數據，每個數據代表 0.001 秒，已經明顯大於波傳的時間，因此在測量波速方面物理實驗無法有效的得到數據。圖 3.19 為四組加速規加速度與時間歷時圖，每個加速規的第一個波峰為 2.515 秒到 2.516 秒之間，因儀器限制以及試體大小的限制，無法有效利用此方法量測試體的波速。

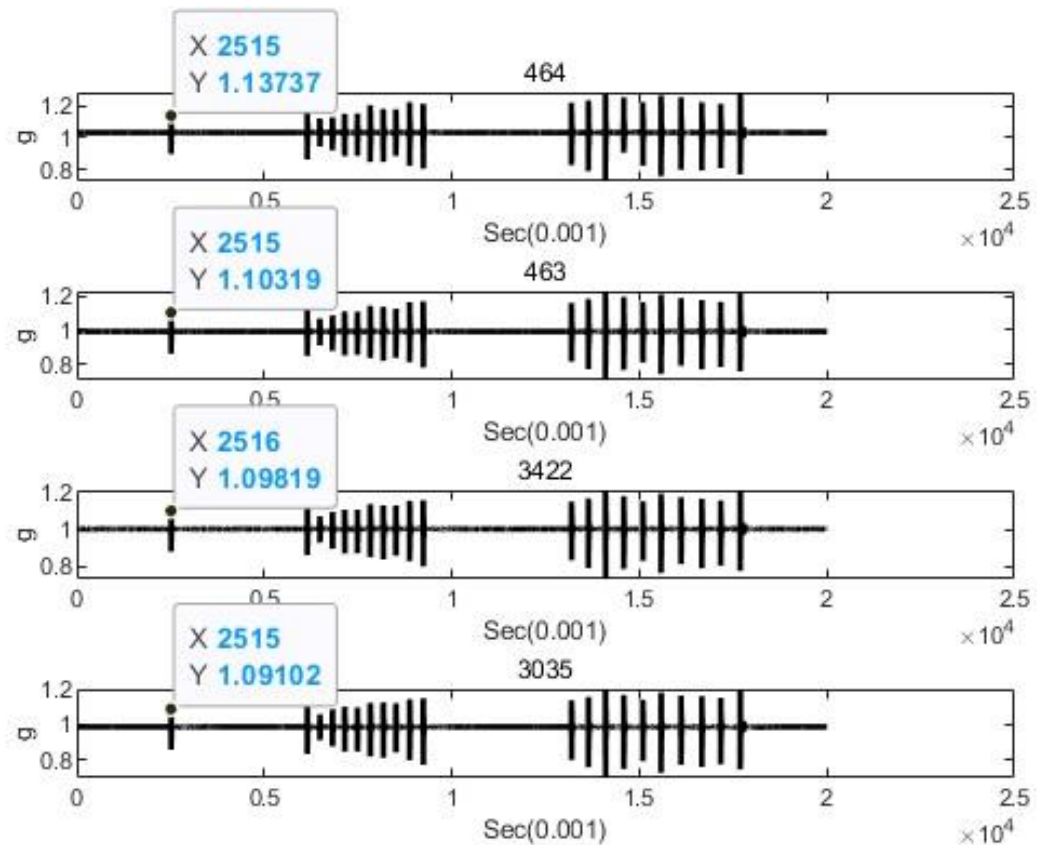


圖 3.19 物理模型試驗量測訊號時間

儘管物理模型試驗未能提供本研究數值模擬模擬驗證應用，由模擬結果與 Bornitz model 描述所得仍一致，數值模擬仍具正確性。本研究將據以設計鑽孔數值模型。

3.4 鑽孔影響應力波傳遞數值模型設計

3.4.1 PFC 中鑽孔模擬方式影響探討

鑽孔影響應力波傳遞數值模型設計延續前述基本數值模型，在模型中設置鑽孔位置直接移除球顆粒元素，意即僅考慮鑽孔存在對應力波傳遞的影響，而不考慮鑽孔過程造成的損傷。

擊打位置設於試體正中心上方(0, 0, 150)，應力波呈輻射擴散。圖 3.20 為具有鑽孔模型受反覆衝擊荷載試體上表面的速度分佈，呈現均勻地擴散，較易於觀察波傳力學行為。在 Linearbond Model 中，鍵結的狀態(pb-state)可以分為 4 種狀態：

1. 數字 0 代表已經斷鍵 unbonded
2. 數字 1 代表因為張力破壞而引致斷鍵
3. 數字 2 代表因為剪力破壞而引致斷鍵
4. 數字 3 代表鍵結完整並未受到破壞

圖 3.21 中以紅、黃、青綠、藍四種顏色分別代表 3、2、1、0 鍵結狀況，在原先就具有孔洞的模型鍵結接觸只會在擊打位置有產生斷鍵(黃色，剪力破壞)，孔洞周遭並未受到影響(紅色，並未斷鍵)。相較於圖 3.22 利用牆體鑽孔設置的數值模型，因鑽孔過程造成孔洞附近鍵結因張力破壞(青綠色)而斷鍵(圖 3.23)；受到破壞後的斷鍵行為影響也導致在反覆衝擊荷載產生不均勻的速度分布，從擊打處到靠近孔洞區域的球體會產生一朝向 z 方向的速度與位移，並非產生如 $\sin$ 波傳遞時具有高低起伏之速度與位移變化。本研究著重鑽孔存在對應力波傳的影響，將以原先具有直接移除鑽孔位置球顆粒的數值模型進行分析，並比較鑽孔存在與否條件下，應力波傳遞孔洞周遭球顆粒的振幅變化。

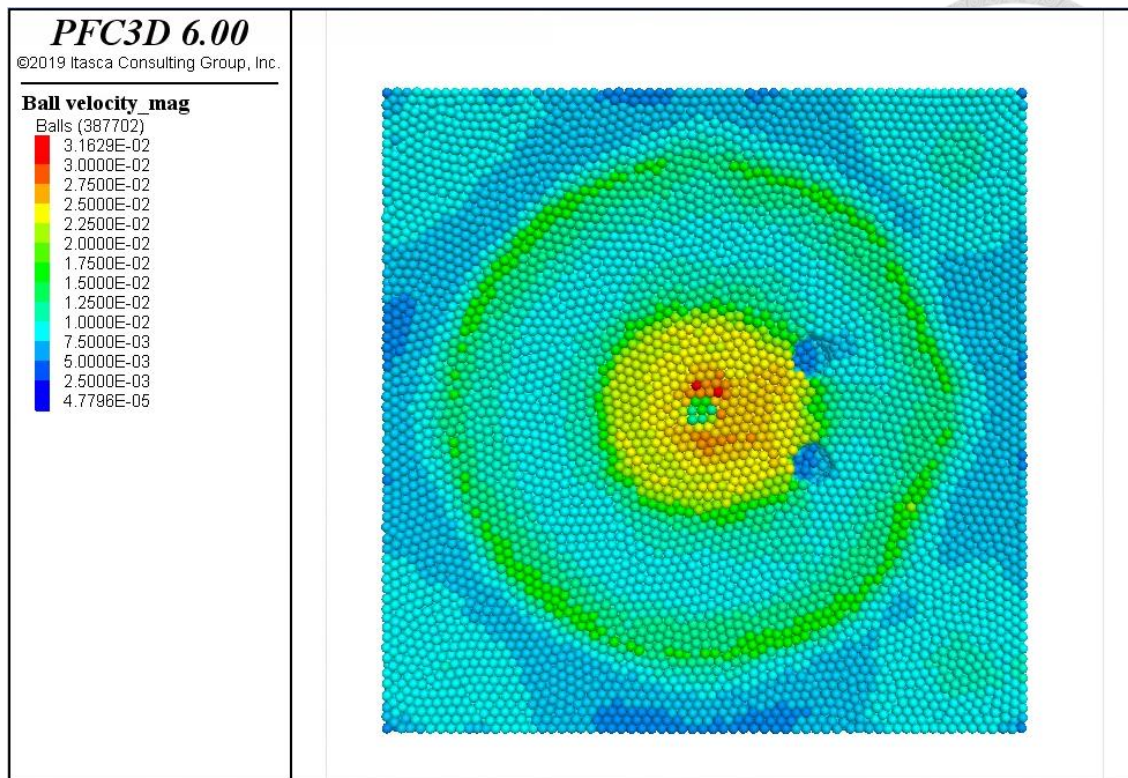


圖 3.20 本身具有孔洞模型的速度分布圖

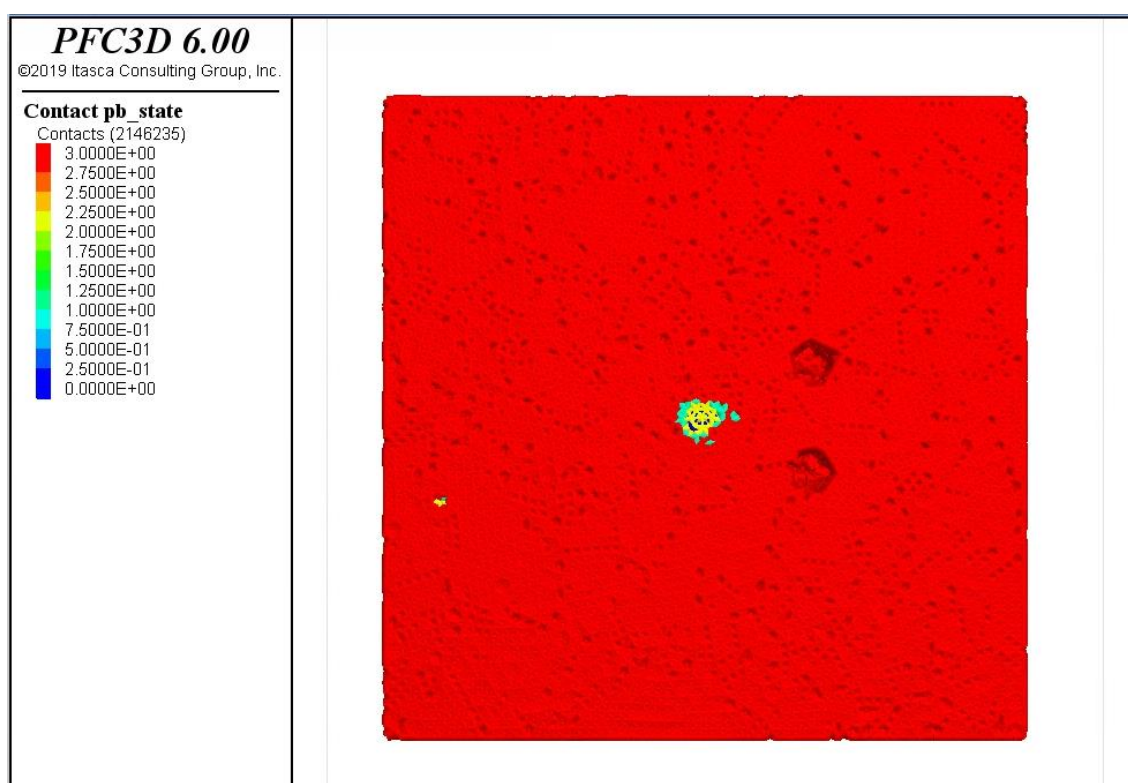


圖 3.21 本身具有孔洞模型的鍵結接觸狀況

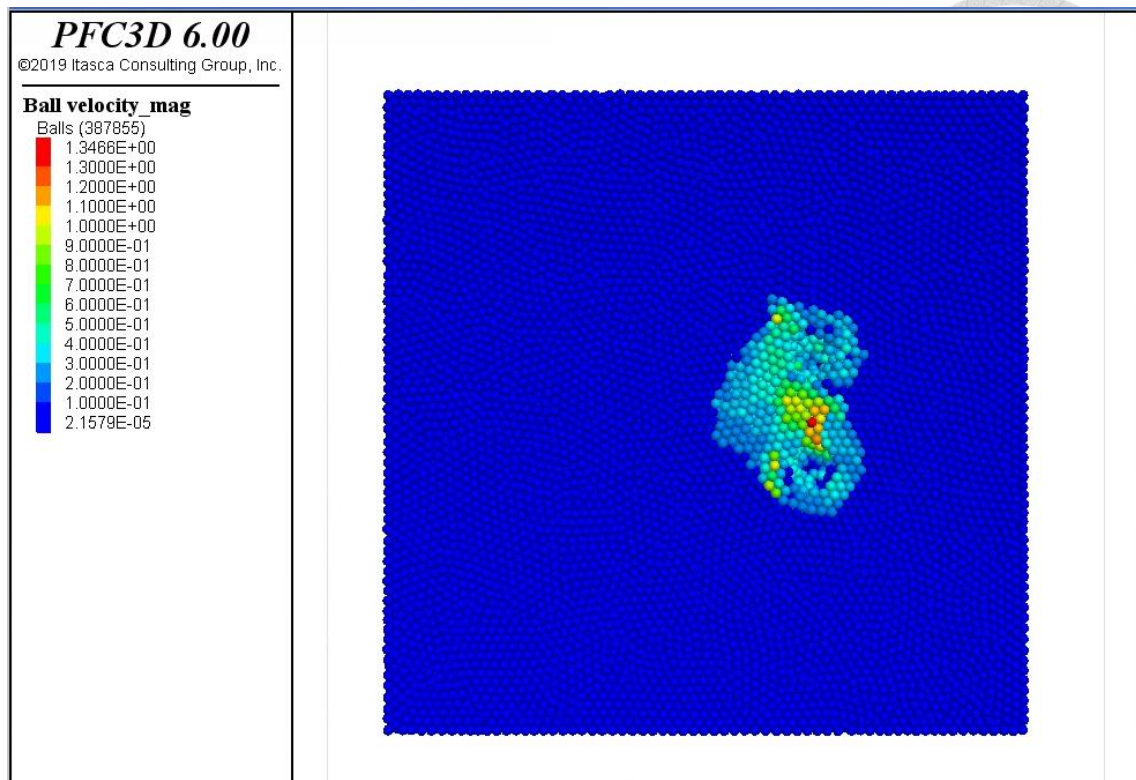


圖 3.22 牆體鑽孔模型的速度分布圖，擊打位置與孔洞間球體會有較大速度產生

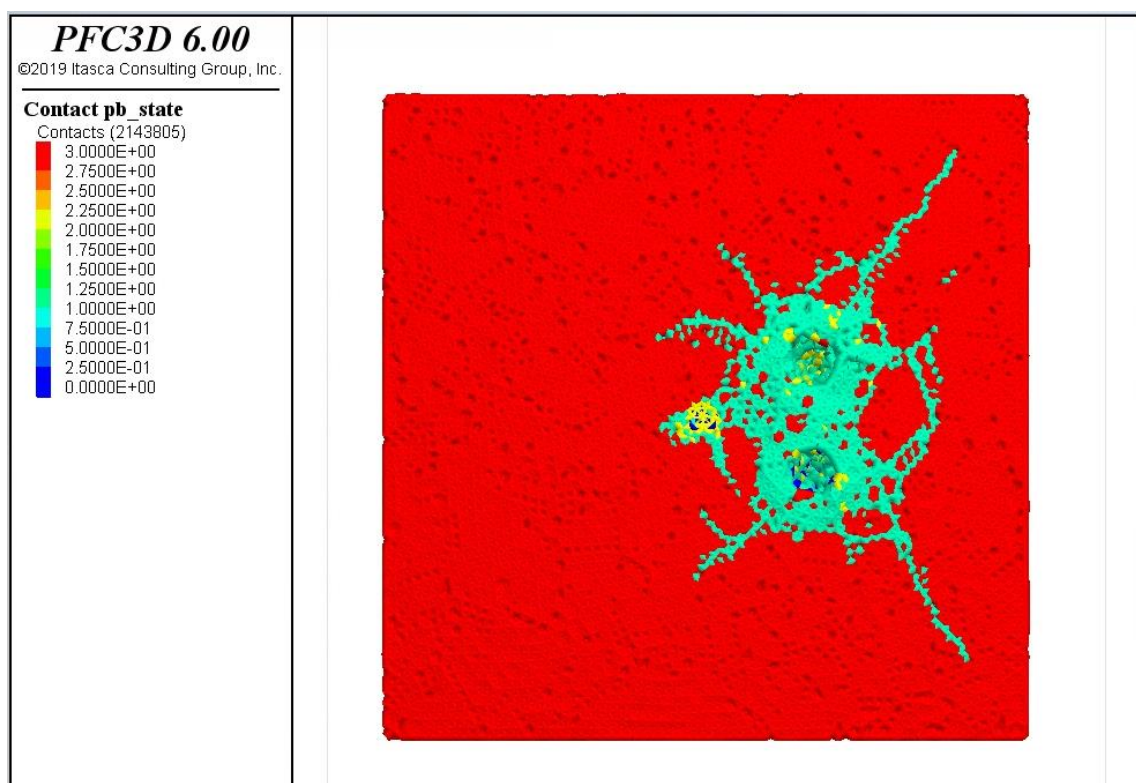


圖 3.23 牆體鑽孔模型的鍵結接觸狀況，孔洞周遭都進入張力破壞

3.4.2 鑽孔模擬流程

圖 3.24 為數值模擬的流程，首先建立基本數值模型，設置監測點位置並令程式運跑過程記錄速度振幅值，使試體承受反覆衝擊荷載，取得無鑽孔試體監測點位速度振幅記錄。再移除預定鑽孔位置的球顆粒元素，再使試體承受反覆衝擊荷載，取得具鑽孔試體監測點位速度振幅記錄。比較前後兩次速度振幅記錄，即可獲得鑽孔對應力波傳遞效應的影響，並儘可能抑低數值模擬模型設置造成的誤差。

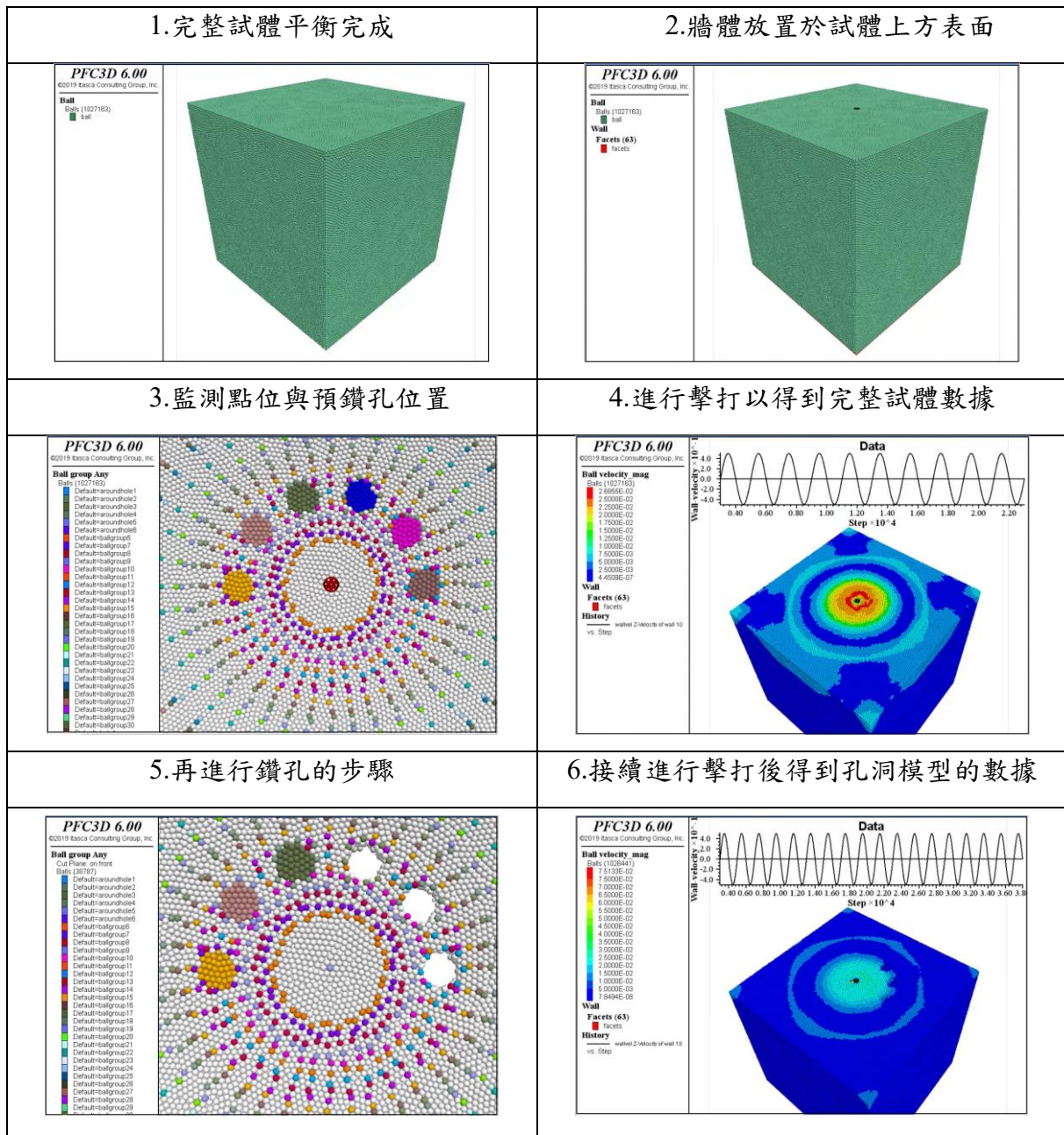


圖 3.24 鑽孔影響應力波傳遞數值模擬的流程

數值模型中的監測點位主要記錄 X、Y、Z 三個方向的速度變化，將監測點速度歷時記錄取出後，首先進行訊號分析，去除趨勢或週期性的變化的去勢(detrend)處理，使資料更能展現真實的波動情況。去除趨勢的資料過後亦可進行快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform, FFT)，將時間域的訊號轉換為頻率域的訊號，以得到此波型之振幅與主頻，以利比較孔洞試體與完整試體之間的差別。

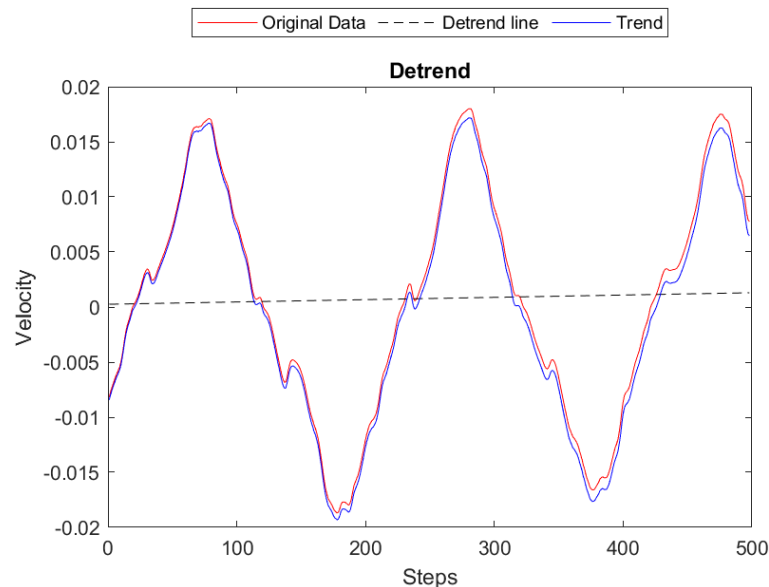


圖 3.25 紅線為原始數據，黑虛線為趨勢線，藍線為去趨勢後的數據

3.4.3 數值模型物理性質

模型設計為 30 公分立方體，此材料單軸壓縮強度 34MPa，如圖 3.26 所示，靜態楊氏模數落在 7.89 GPa，動態楊氏模數為 17.76 GPa，波松比為 0.145，單位重為 2500 kg/m³，縱波(P 波)波速為 2732 m/s，橫波(S 波)波速為 1762.5 m/s，雷力波波速為 1580.57 m/s，動態應力應變的結果如圖 3.27 所示。

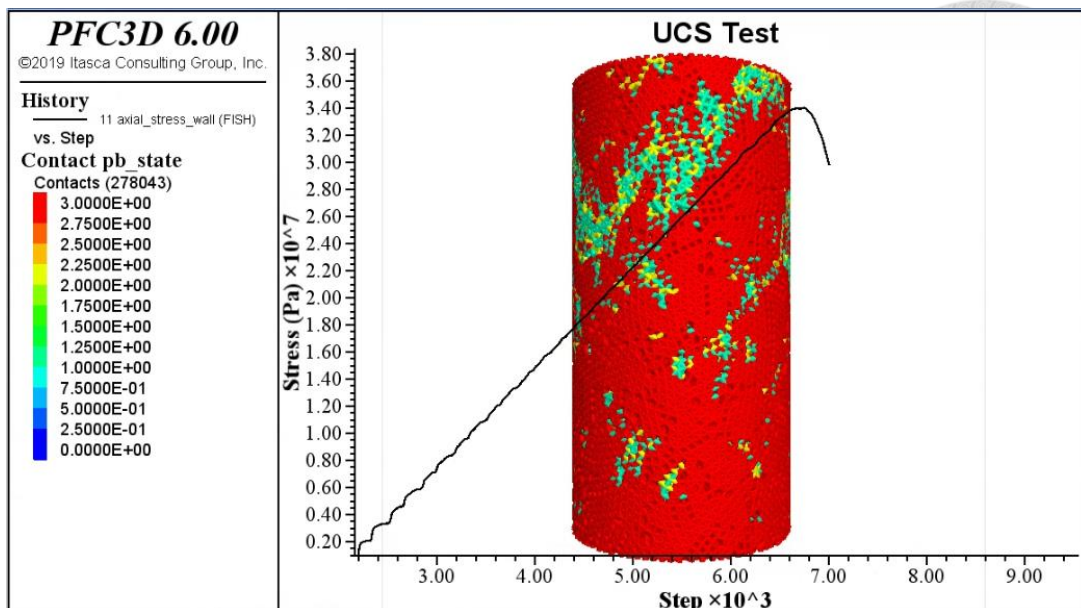


圖 3.26 單軸壓縮下應力曲線

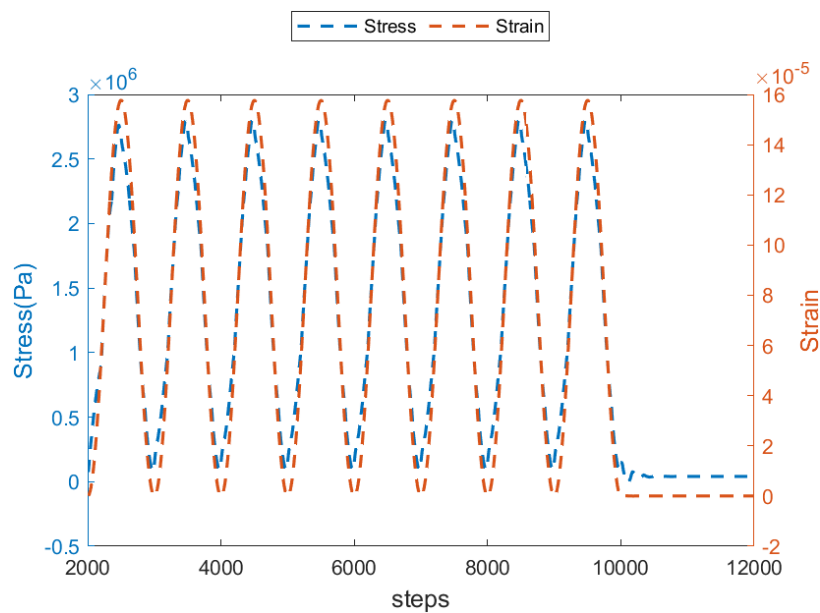


圖 3.27 動態加載下應力應變關係圖

實際軟體中的波速是以表面監測點所監測到的速度，以 Z 方向速度的波峰以及兩個波峰之間的時間差進行計算，以得到在擊打時所產生的剪切波波速(S 波)，以此與動態楊氏模數計算出來的結果進行相比，監測點的位置分別距離擊打點每 10 mm 設置一個，如圖 3.28 所示。

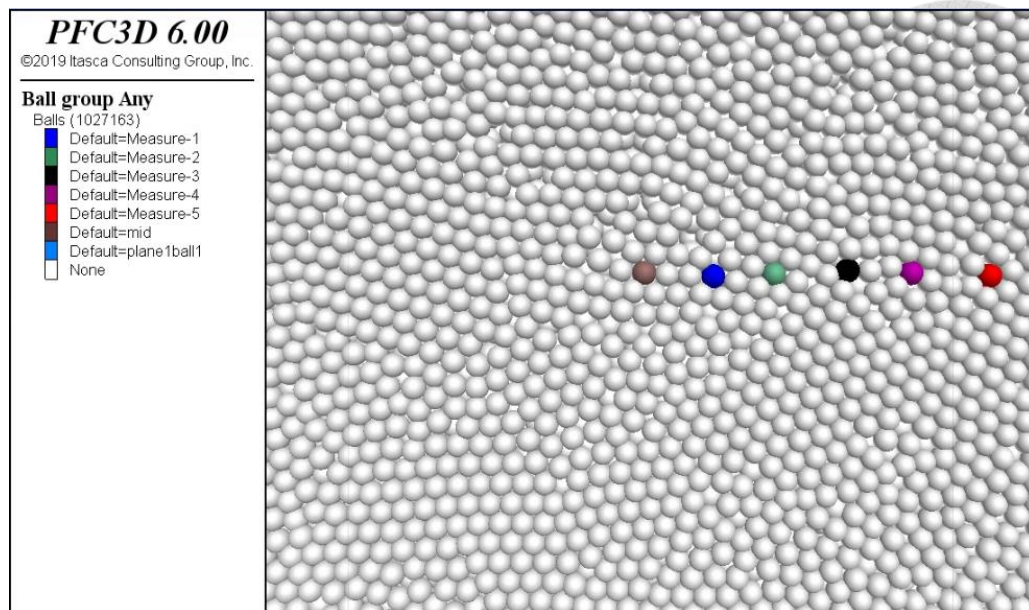


圖 3.28 監測點與擊打點的位置關係

監測結果中，以圖 3.29 波型來計算，深藍色線段為監測點一，綠色線段為監測點二，黑色線段為監測點三，紫色線段為監測點四以及紅色線段為監測點五，以每個波峰的點位做為監測值，以中間 8000 Step 至 10000 Step 作為計算區域，監測點一的波峰在 8531 Step，監測點二波峰位在 8646 Step，監測點三波峰落在 8789 Step，監測點四波峰落在 8941 Step，監測點五落在 9055 Step，經過各點之間的計算，剪切波速約略落在 1500 m/s 上下，比利用動態楊氏計算出 1762.5 m/s 小了一些，但整體趨勢以及頻率變化是符合預期，之後計算會以波速 1500 m/s 做為剪切波速的設計。

在圖 3.29 速度圖中，起初波型會有較大擾動，是來自於當在利用牆體擊打試體時，需要先進行牆與試體之間接觸的平衡，平衡完後仍然會存有速度在球體本身，因此擊打開始後，原先球體速度受到擾動後初始波傳較為複雜不規則，解決此大擾動的問題在於牆體大小設計，這邊分別設計當牆體在半徑 1.8mm、3mm 以及 5mm 狀況下的擾動情況，圖 3.30 為牆體大小設計圖。

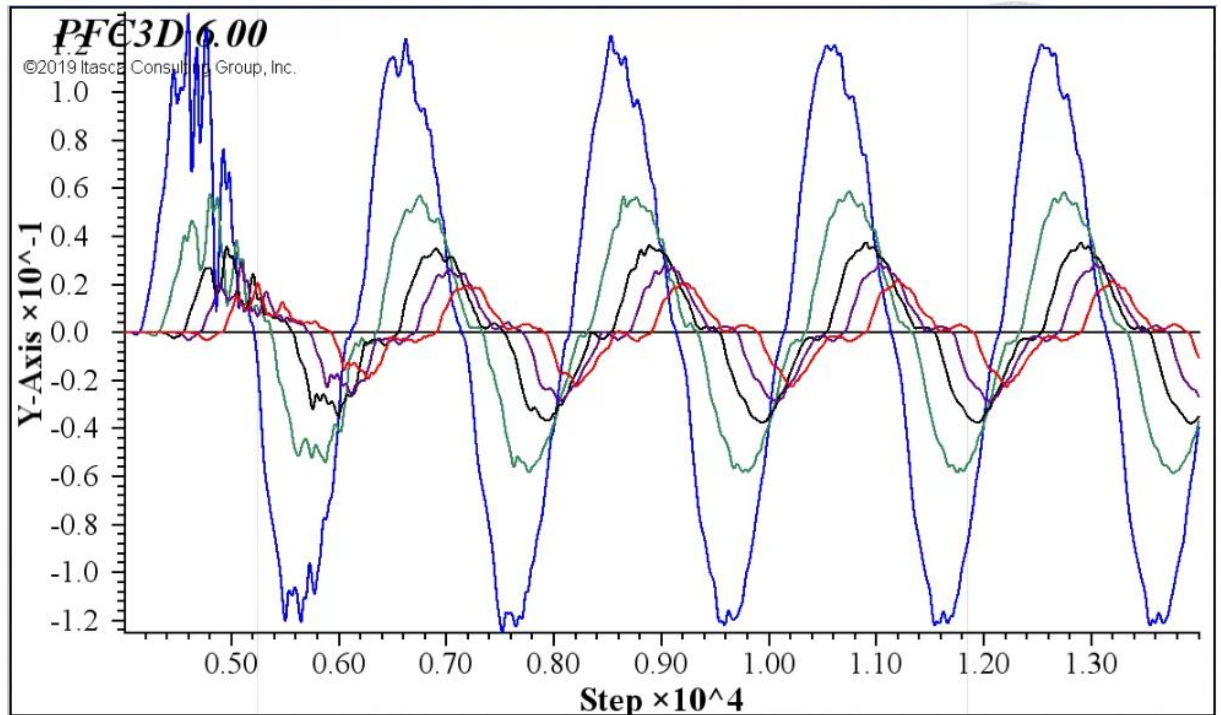


圖 3.29 監測點速度變化

牆體大小影響

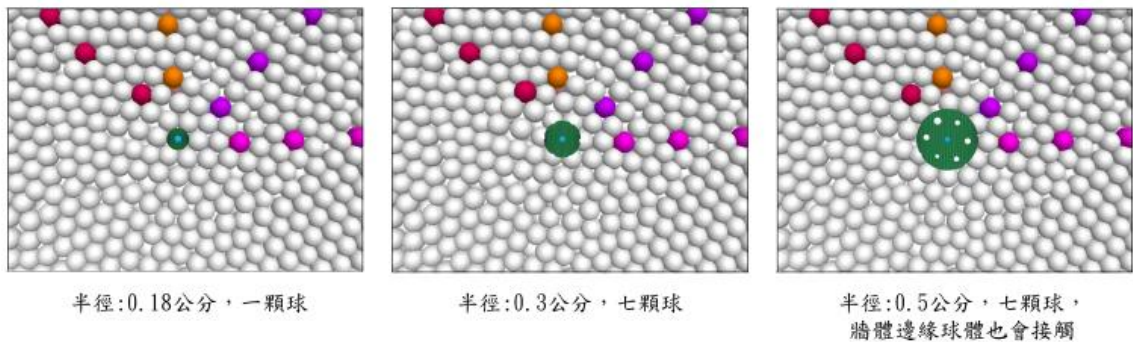


圖 3.30 牆體大小設計

在圖 3.31 中，監測球的布置為距離 10 到 50 mm 處各設置一個做為監測，以 Z 方向速度為比較，在牆體半徑為 1.8 mm 下，球體速度的波型較為混亂，無法利用牆體做為主要輸入速度來源，半徑增加到 3 mm 及 5 mm 的牆體，波型受到影響較小，主因來自於輸出的能量相對較大，較能使試體受到此擊打影響，因此後續模擬會利用牆體半徑 5 mm 做為反覆衝擊輸入的範圍。

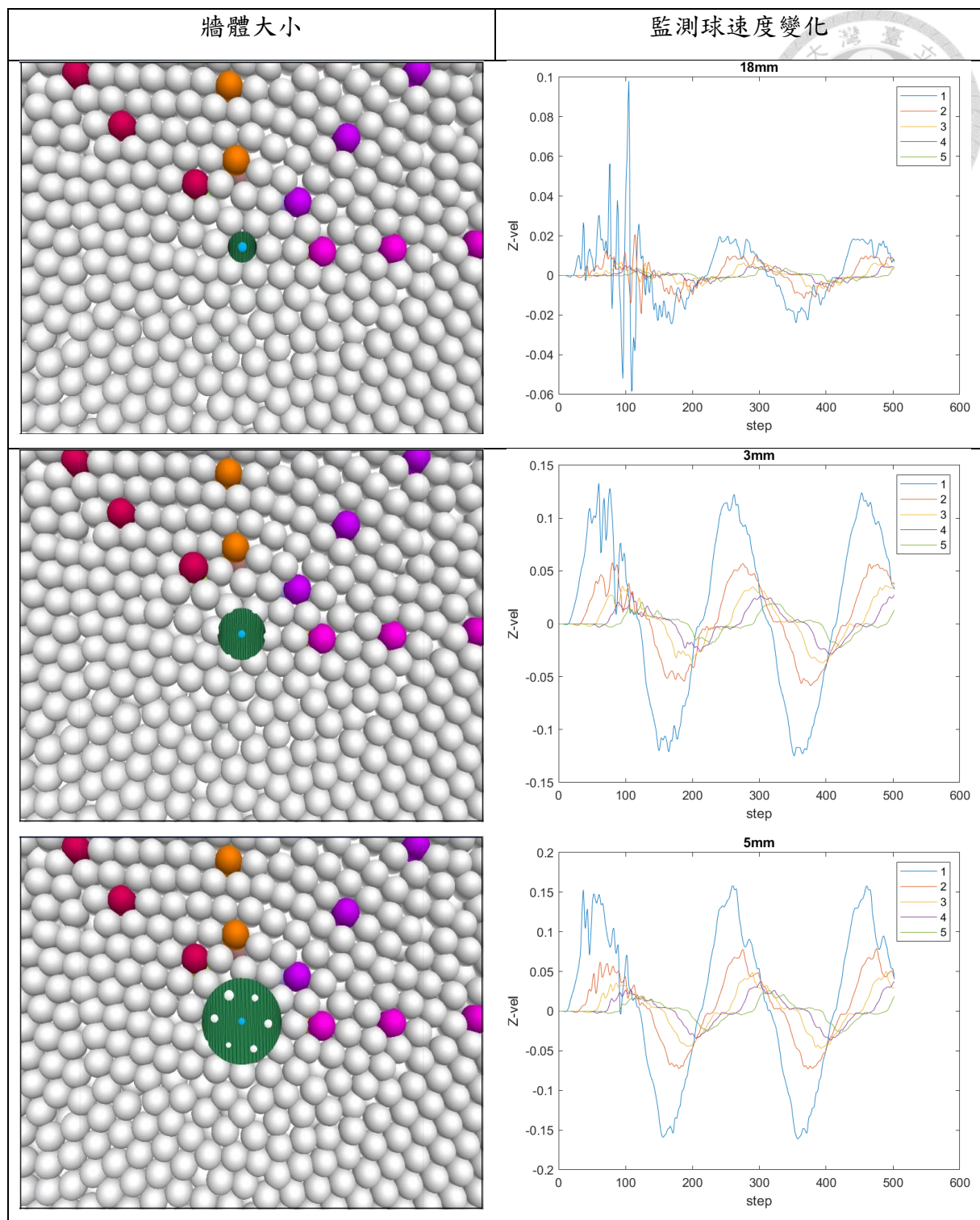


圖 3.31 牆體與球體速度變化

3.4.4 波長設計

依照先前計算出在擊打表面的表面波速約略落在 1500 m/s 上下，若需要對於波長進行變化，則需改變輸入波的週期。本研究在此採用三種週期展現應力波波長變化的

影響，分別為波長 30 mm、60 mm 及 75 mm，對應的頻率依序為 50,000 Hz、30,000 Hz、20,000 Hz，波長的測量方式會利用擊打表面球體 Z 方向速度的分布進行判斷，一個完整的波型會有高低起伏，有正有負，即速度等高線圖中一個正速度區間與一個負速度區間分布為一個波長的大小。圖 3.32 為設計波長 30 mm 的情況，利用上述的測量方式，波長大小在各方向約略落在 30 mm，圖中三個波型落在 30 mm 至 31 mm，與設計值相符。圖 3.33 為設計波長 50 mm 情況，圖中測量波長為 50.4 mm，遠離擊打位置波長略減為 49 mm。圖 3.34 為設計波長 75mm 情況，圖中測量波長為 75.4 mm，因數值模擬試體大小為 300 mm * 300 mm * 300 mm，要觀測到 75 mm 波長之第二個波相對較短波長 30 mm 及 50 mm 試體較困難，因此未判斷遠離擊打位置波長。從上述三種不同的波長設計模擬結果顯示，試體的波速利用監測點位的波峰進行反推較為準確，更具代表性。儘管波速與週期大小皆可變換，改變波長較易模擬及比較，此一瞭解對於後續利用波長與孔洞大小關係設計鑽孔佈置，探討繞射的影響極為重要。

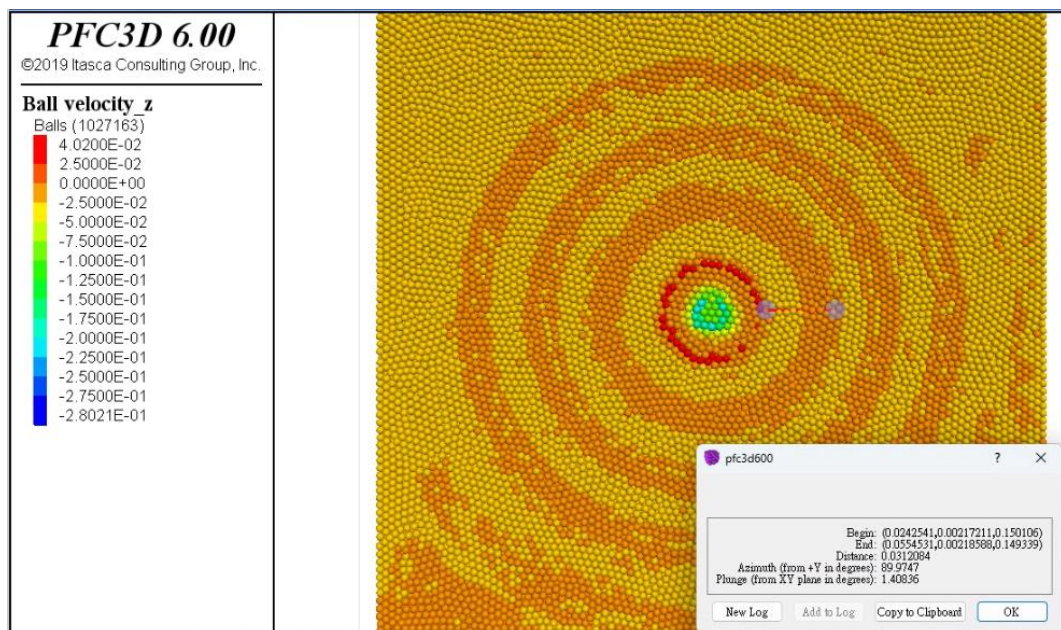


圖 3.32 擊打波長 30 mm

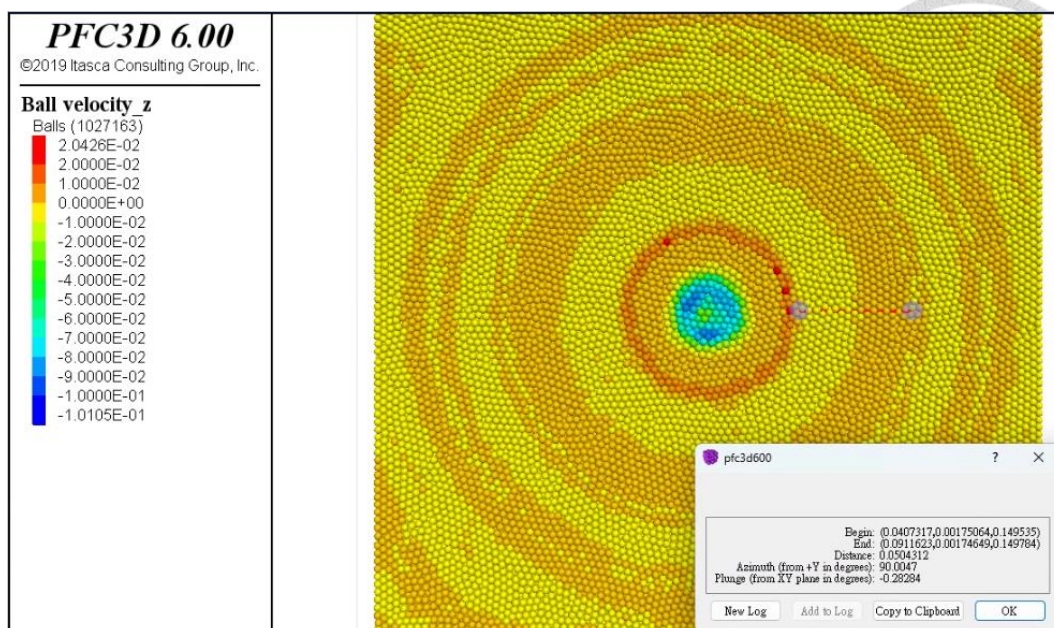


圖 3.33 擊打波長 50 mm

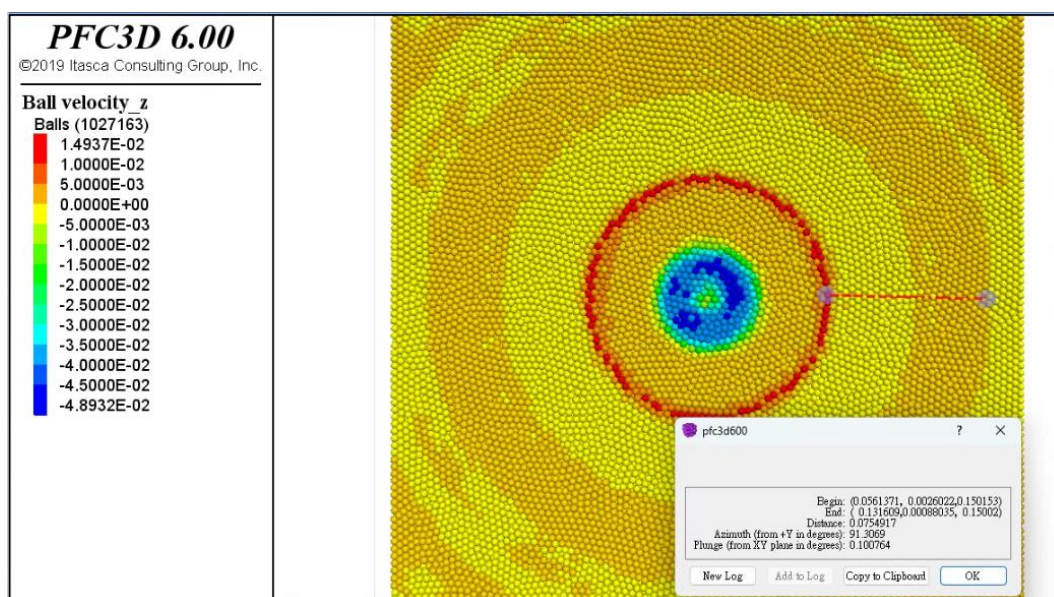


圖 3.34 擊打波長 75 mm

3.4.5 孔洞大小

應力波傳遞遇到孔洞宛如遇到障礙物，需要繞過方能繼續傳遞，繞過障礙物過程可能局部改變傳遞方向，即所謂繞射現象。在相同波長下遇到不同孔徑時，應力波繞射後與原先入射波產生干涉行為會有不同，因此孔洞大小對應力波傳遞影響為本研究課題之一，主要在觀察不同孔洞大小對應力波傳遞的影響，是否能讓應力波能量集中耗散在孔洞附近。

孔洞分布在模型的四個方向，以中心順時針旋轉(45°、135°、225°、315°)，大小分別為直徑 15 mm、30 mm、45 mm 及 60 mm，反覆衝擊荷重擊打位置至孔洞周緣最近距離相同為 40 mm。孔洞周圍每 18 度設置一點位監測其三方向速度變化，輸入波的波型為 50,000 Hz 的 Sin 波，波長 30 mm，振幅皆為 0.5 m/s。

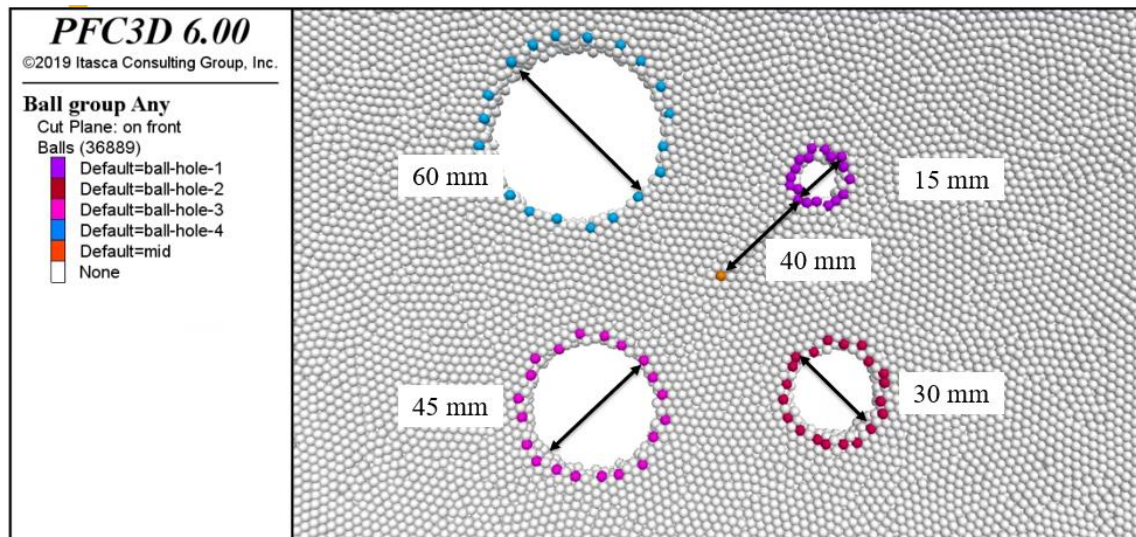


圖 3.35 完整模型孔洞分布與監測點設置

3.4.6 波長對孔洞影響

本小節改變波長討論遇到同樣孔洞大小時周圍振幅的變化，以五種波長討論波長與孔洞之間的比例影響，由短到長為 30 mm、60mm、120mm、300 mm 及 3000 mm，孔洞大小設計與 4.1 小節相同為 15 mm、30mm、45mm 及 60mm。波長設計為考慮與孔洞之間的比例，以及當波長遠大於孔洞時的影響，以此設計何種擊打頻率下對孔洞周圍的影響較為顯著。以波長 30 mm 的模型為例，應力波傳遞時分別會碰到 0.5 倍、1 倍、1.5 倍及 2 倍的波長孔徑比；當波長變成 60 mm，則會是 4 倍、2 倍、1.33 倍及 1 倍的波長孔徑比，則可以得知在不同的波長孔徑比下，何種比例較適合在開挖中使用。

3.4.7 孔洞位置影響

現地反覆衝擊開挖時，開挖面上會進行大量鑽孔，以提升開挖效率。本研究亦探討不同鑽孔數量與位置對應力波傳遞的影響。

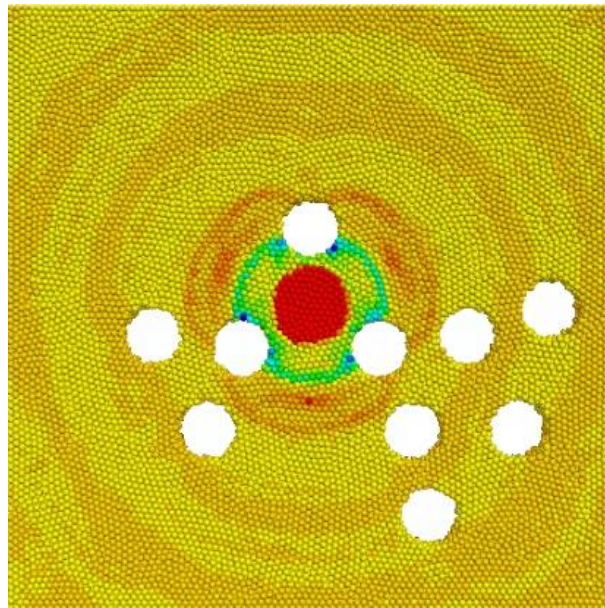


圖 3.36 三方向不同孔洞數量模型

圖 3.36 為探討不同鑽孔數量與布置對應力波傳遞影響的數值模型，分別會在 90 度、210 度及 330 度三個方位設計不同的鑽孔配置，90 度的方位為單一鑽孔，210 度的方位為兩層共 3 個鑽孔，330 度方位為三層共 6 個鑽孔，以比較應力波穿過孔洞後的傳遞特性。圖 3.37 為監測球布設位置，監測球位置固定在每個孔洞周遭，孔洞周遭每 18 度一個監測球，即一個孔洞周圍設置 20 個監測球。監測球記錄擊打過程中 X、Y、Z 三個方向的速度變化，以提供探討波傳受孔洞的影響。

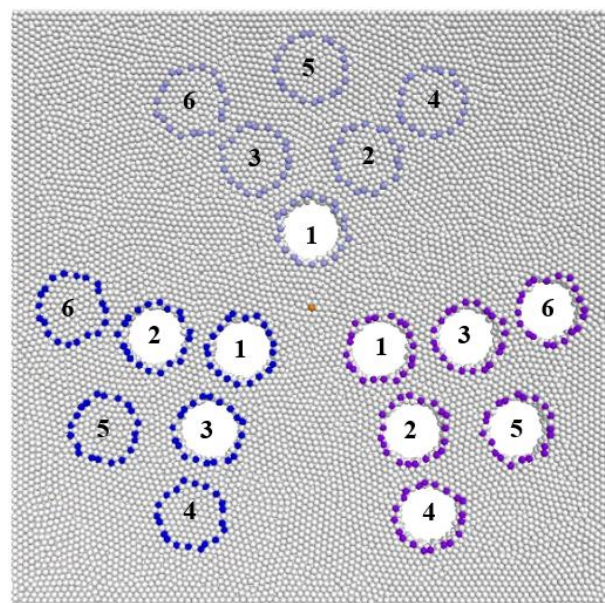


圖 3.37 孔洞位置及監測球布設點位

孔洞大小設計為直徑 30 mm，每列之間的距離為 40 mm，為避免孔洞距離過近影響模擬結果，多孔的布置將以 120 度除上孔數加一設計，意即將孔洞均勻設置於 120 度。以兩孔為例，2 個鑽孔分布在 120 度中，孔洞之間的角度差為 $120/(2+1)=40$ 度。

3.4.8 擊打造成孔洞附近破壞

反覆衝擊造成擊打位置破碎雖非本研究主題，但提高擊打振幅、加大反覆衝擊施加在試體的能量，亦能造成孔洞附近應力波傳遞不同的反應，因而本研究亦加以探討。輸入速度自 $0.5 * \sin(200 * 2 * \pi * t)$ ，逐漸加大振幅迄 $20 * \sin(200 * 2 * \pi * t)$ ，以增加反覆衝擊施加於試體的能量。設計頻率為 20,000 Hz、波長 75 mm。

為模擬孔洞周圍破壞並非受到反覆衝擊直接擊打造成，而係透過應力波傳遞受到孔洞存在所致，在探討擊打造成孔洞附近破壞時，將比較孔洞距離擊打位置 40 mm(圖 3.38a)與 60 mm(圖 3.38b)兩模型模擬結果。

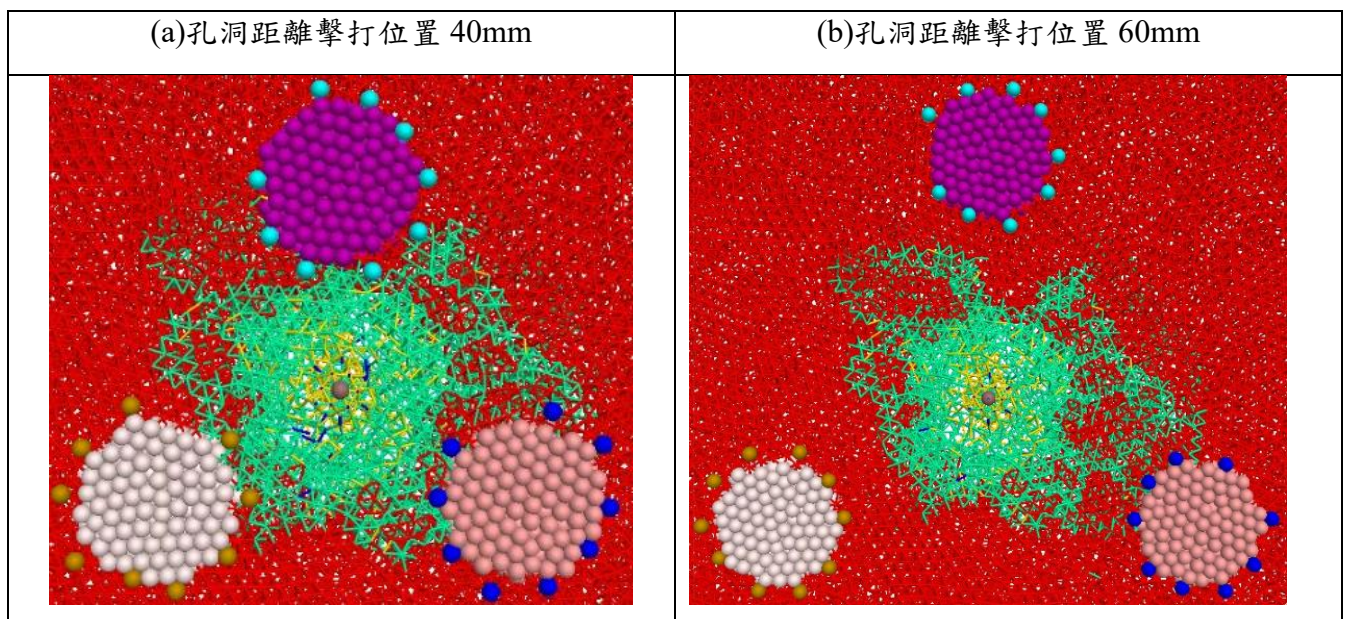
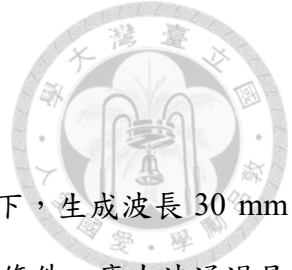


圖 3.38 擊打造成孔洞附近破壞數值模型

第四章 結果與討論



4.1 孔洞大小影響

圖 4.1 為 50,000 Hz 反覆衝擊荷載、輸入速度振幅 0.5 m 條件下，生成波長 30 mm 應力波通過完整試體的速度分佈，圖 4.2 為相同反覆衝擊荷載輸入條件，應力波通過具不同大小孔洞試體的速度分佈。比較圖 4.1 與圖 4.2，應力波傳遞受到孔洞大小不同的影響，在孔洞四周出現不同的速度反應，原先完整模型的應力波傳遞時薄型完整；孔洞模型傳遞時能在孔洞後方觀測到速度分布不完整有斷裂的現象。圖 4.6 至圖 4.6 將完整試體位置孔洞四周監測球記錄所得速度歷時進行快速傅立葉轉換(FFT)結果，主頻為 50,000 Hz，但在不同大小孔洞四周位置，振幅各不相同，主要係不同監測位置至擊打中心距離不同所致。

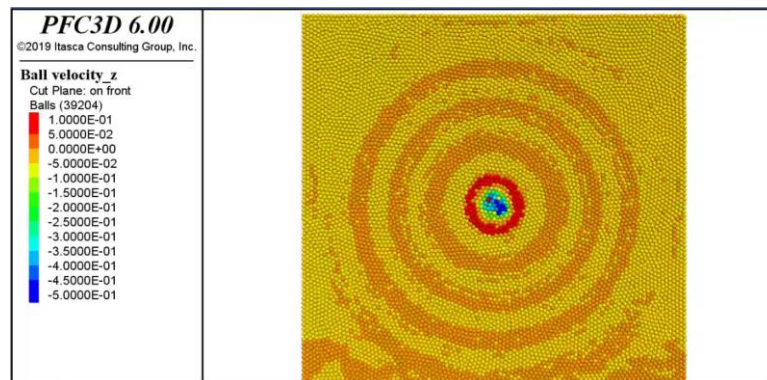


圖 4.1 50000 Hz 波長 30 mm 完整試體速度分布

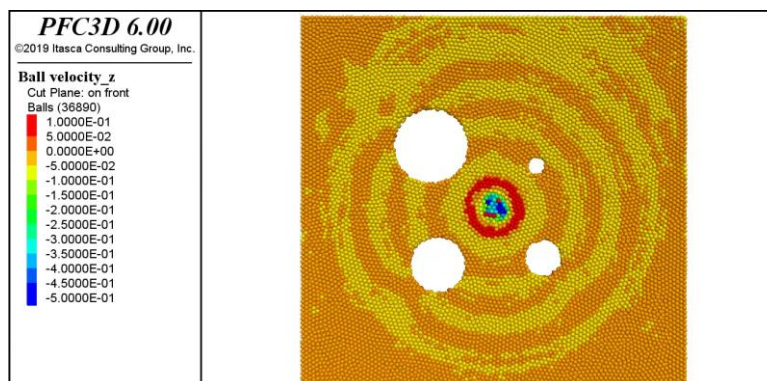


圖 4.2 50000 Hz 波長 30 mm 孔洞試體速度分布

圖 4.7 以各孔洞中為極坐標中心，繪出圖 4.6 至圖 4.6 不同監測點位置主頻振幅極圖，到極圖中心的距離表示振幅大小，藍、紅線分別表示水平方向及垂直方向振幅變

化。將孔洞距離擊打點最近的點位轉換角度至極座標 0 度角，以逆時針方向旋轉排列各點位。以孔洞一為例，原先距離擊打點最近的角度為 225 度，經過轉換變成圖 4.7(a) 的 0 度。各孔洞的極圖形狀偏向擊打側，因距離擊打處較近，振幅衰減相對較少。

圖 4.8 為具不同大小孔洞監測點位置主頻振幅變化的極圖，係具孔洞模型模擬所得速度歷時經 FFT 所得主頻振幅，孔洞模型下的水平振幅會提升較明顯，且大過垂直向振幅。圖 4.9 為比較完整模型與孔洞模型下水平振幅與垂直振幅的變化差異，藍點線代表完整模型下的振幅分布，紅點線代表有孔模型下的振幅分布，距離擊打點較近的前半圓(-90 度到 90 度)會產生較明顯的增量相對於後半圓(90 度到 270 度)。

圖 4.10 代表有孔試體振幅除以完整試體的比例分布圖，表示應力波傳遞受到孔洞的影響。靠近擊打側，振幅明顯增加，直徑 15 mm 的孔洞一 0°監測點位，自完整試體水平向振幅 0.0173 增加至 0.0413，放大倍率 2.39 倍，垂直向振幅 0.0202 增加至 0.0289，放大倍率 1.44 倍；直徑 30 mm 的孔洞二 0°監測點位，自完整試體水平向振幅 0.0174 增加至 0.0435，放大倍率 2.5 倍，垂直向振幅 0.0173 增加至 0.0209，放大倍率 1.21 倍；直徑 45 mm 的孔洞三 0°監測點位，自完整試體水平向振幅 0.0132 增加至 0.0459，放大倍率 3.48 倍，垂直向振幅 0.017 增加至 0.0276，放大倍率 1.62 倍；直徑 60 mm 的孔洞四 0°監測點位，自完整試體水平向振幅 0.0148 增加至 0.0598，放大倍率 4.04 倍，垂直向振幅 0.0169 增加至 0.0433，放大倍率 2.56 倍；前述監測點位至擊打位置距離相同，受到孔洞影響，振幅增加量隨孔洞大小而增加。但在遠離擊打點的區域(180 度)，振幅小於完整試體的振幅大小，表示孔洞存在使減弱了應力波傳遞至對應位置的能量。

將所有孔洞前後數據進行比較，有孔試體模型振幅除以完整試體模型振幅來代表這個方向上的增值為正相關或負相關，可以發現在入射波碰到孔洞的前半圓區域，會產生明顯的正相關，尤其在擊打點與孔之間的方向兩側，增長幅度明顯大於後半圓，如圖 4.10 所示。在孔洞一(15 mm)、孔洞二(30 mm)及孔洞三(45 mm)在垂直向及水平向放大倍率的圖形會有凹字型的放大分布，最近點位 0 度角放大倍率會相對左右側放大倍率較低，孔洞一 0 度角放大倍率為 1.43 而 36 度角放大倍率為 2.47；孔洞二 0 度角放大

倍率為 1.21 而 342 度放大倍率為 2.52；孔洞三 0 度角放大倍率為 1.63 而 72 度角放大倍率為 2.60。孔洞四(60 mm)則會是最近點位會產生較大的放大倍率 2.56 比旁邊點位較大。其中會有部分區域小於一呈負相關，孔洞一至孔洞三於 180 度的位置會產生小於一的放大倍率，放大倍率的分布形狀像漏斗，0 度及 180 度較小其他區域較大，但於孔洞四 180 度區域則會相反，呈現較大的放大倍率，放大倍率的分布型狀像是凸字型，在 180 度有較顯著放大倍率。

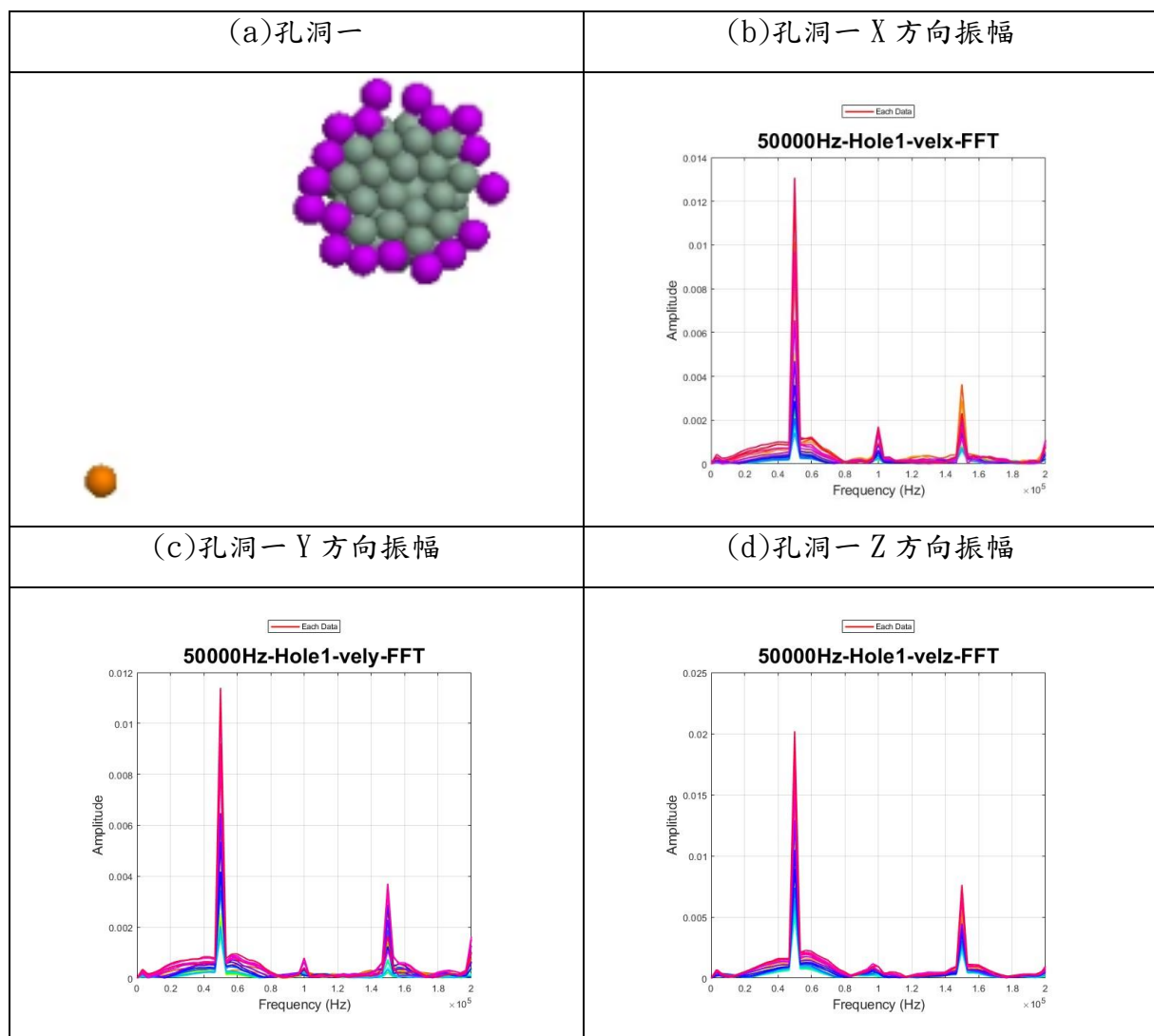


圖 4.3 完整試體孔洞一周遭球體速度振幅變化

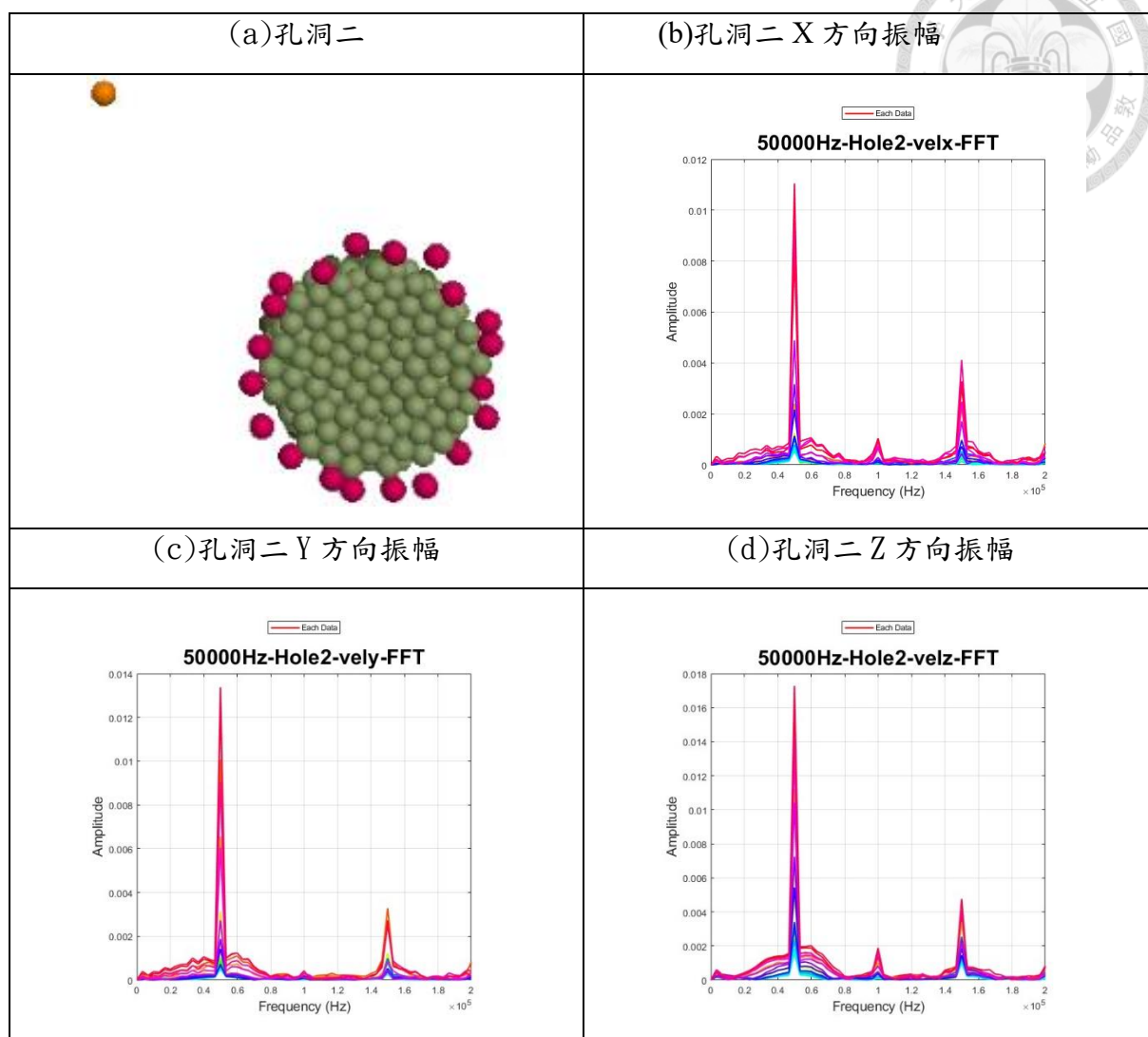
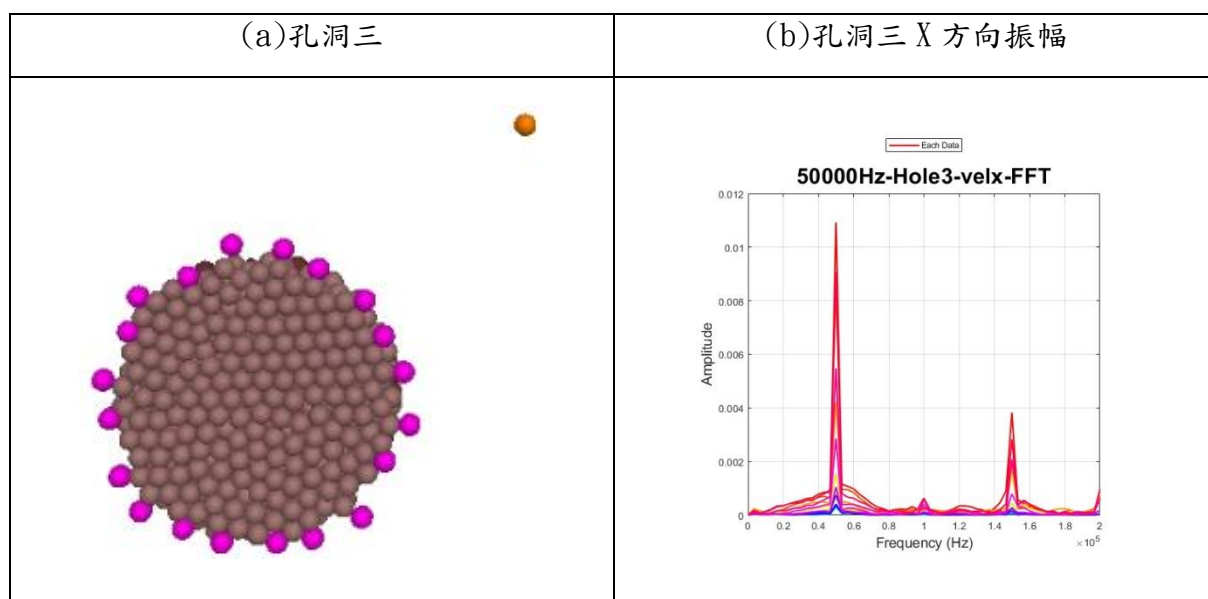


圖 4.4 完整試體孔洞二周遭球體速度振幅變化



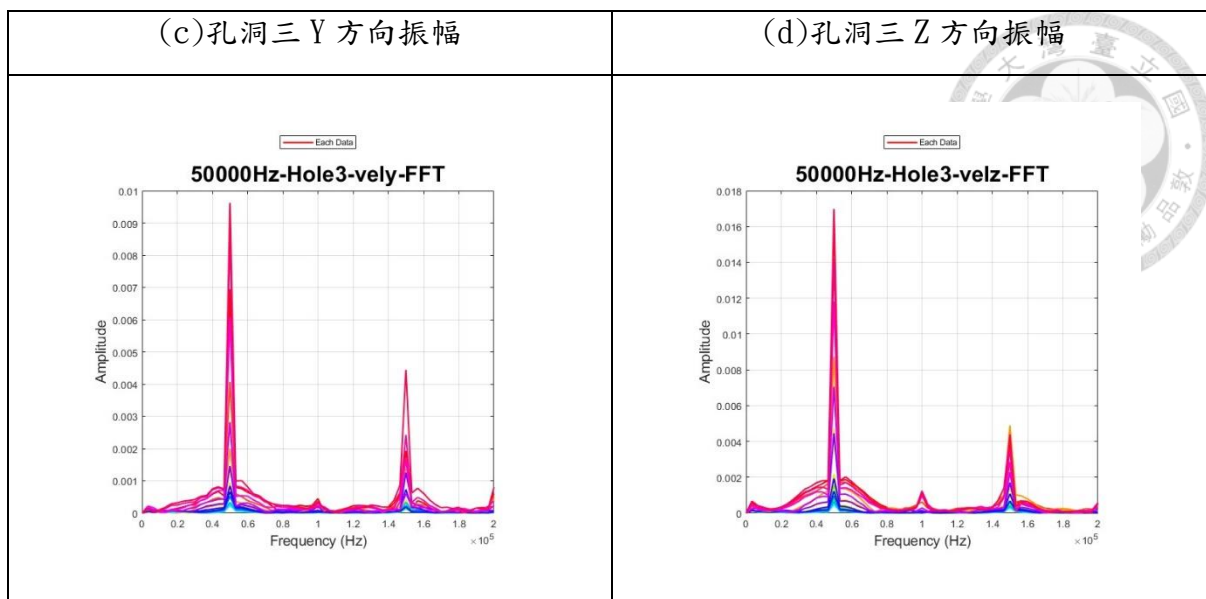
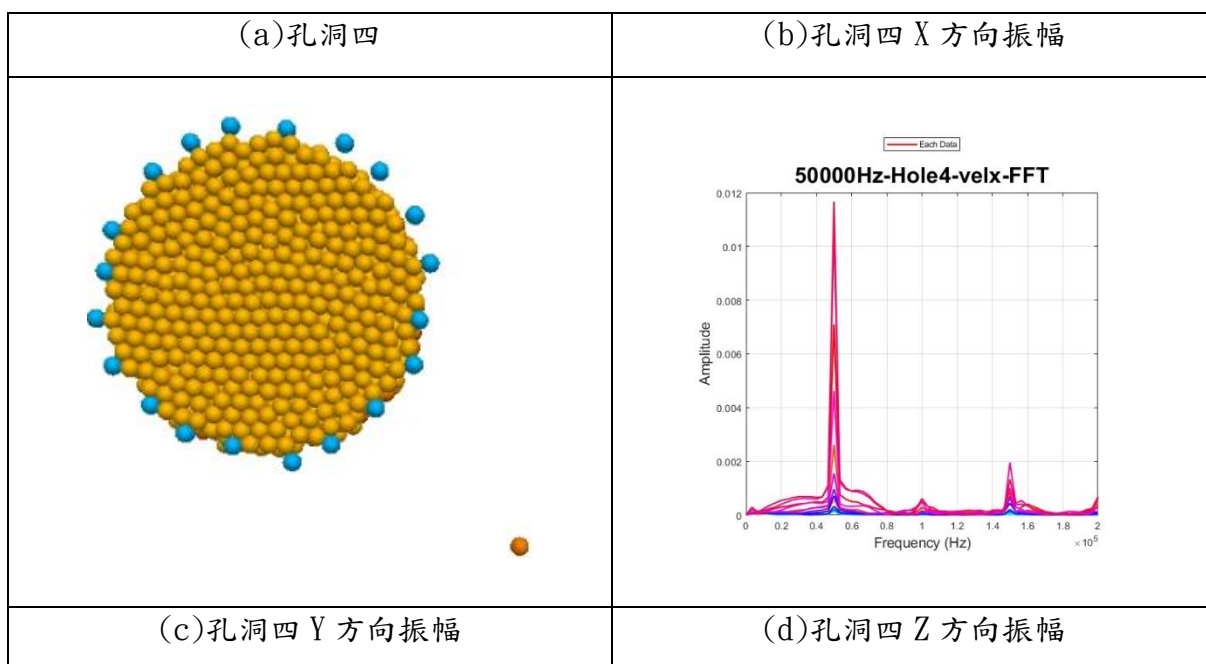


圖 4.5 完整試體孔洞三周遭球體速度振幅變化



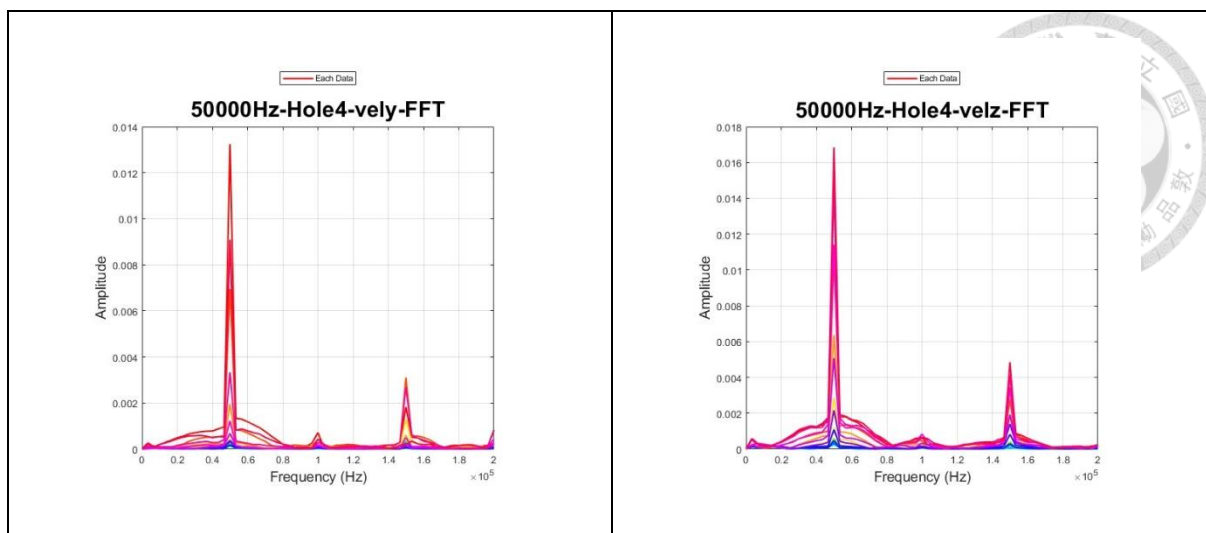
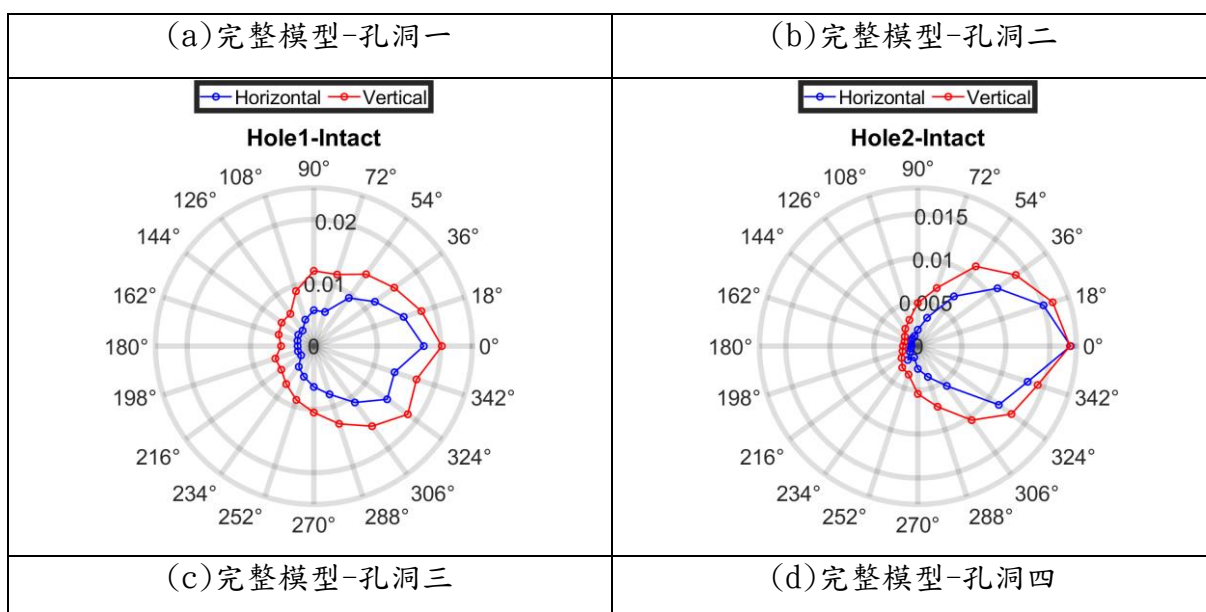


圖 4.6 完整試體孔洞四周遭球體速度振幅變化



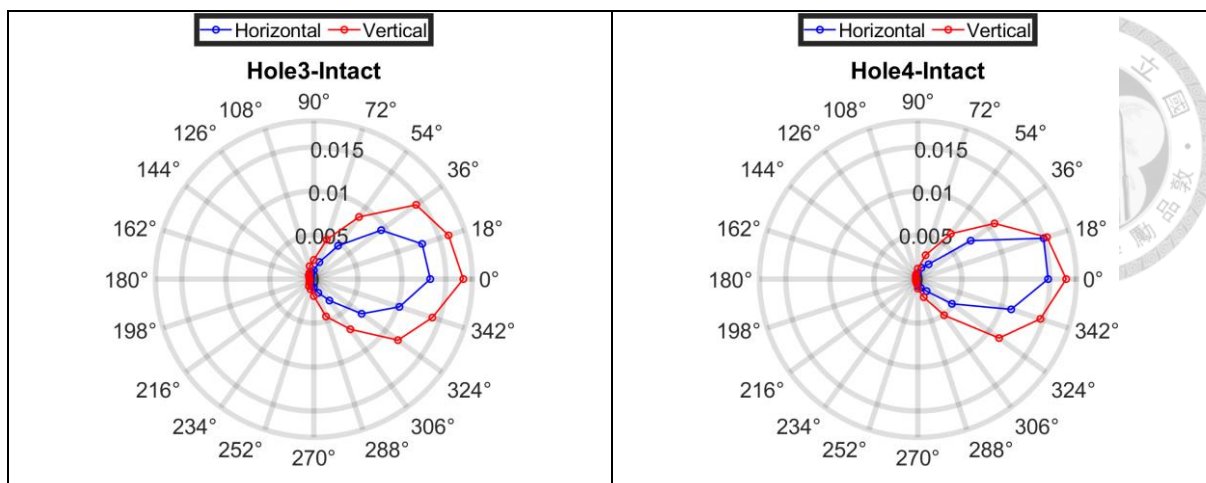


圖 4.7 完整試體孔洞周遭球體速度振幅變化

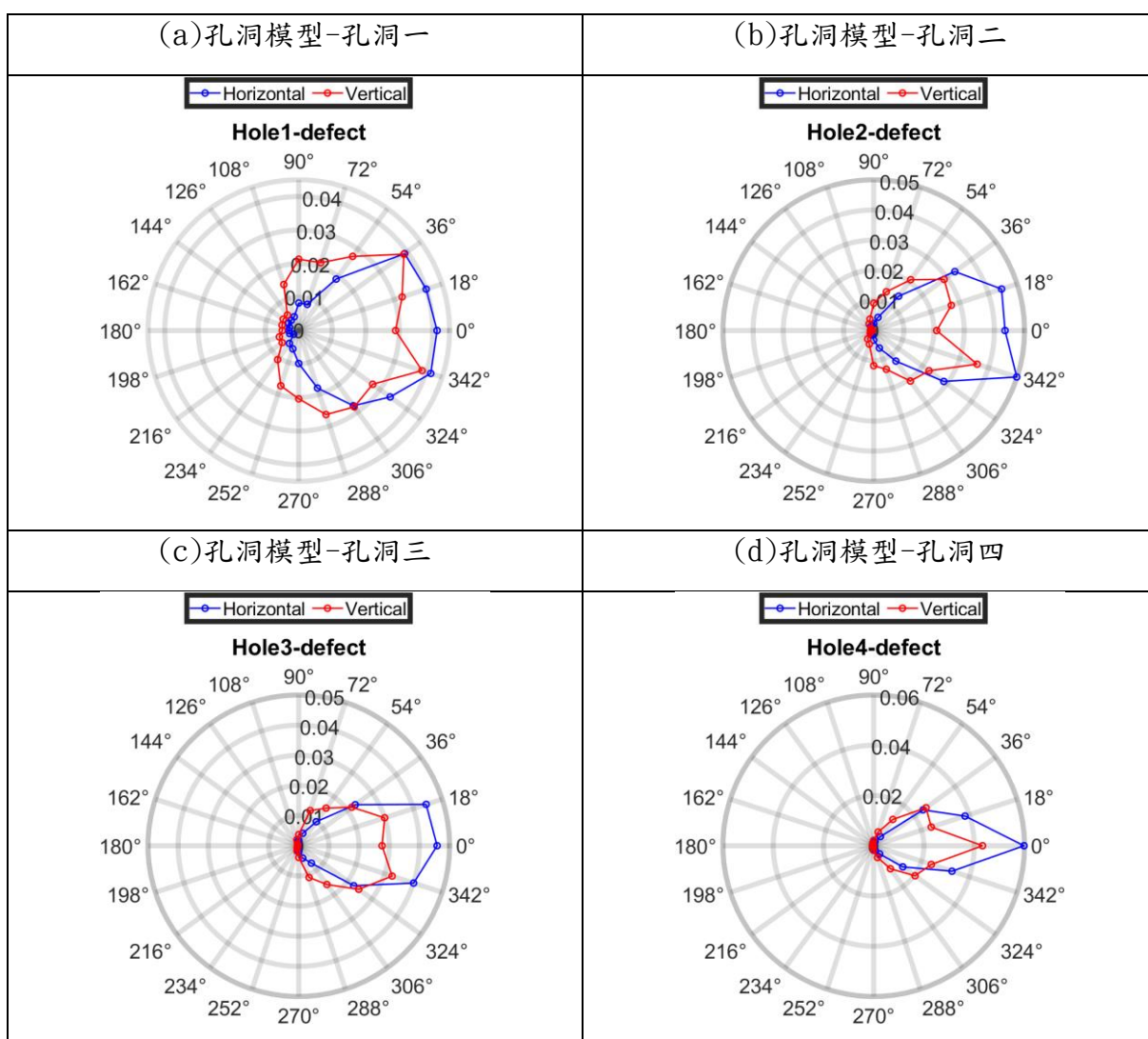
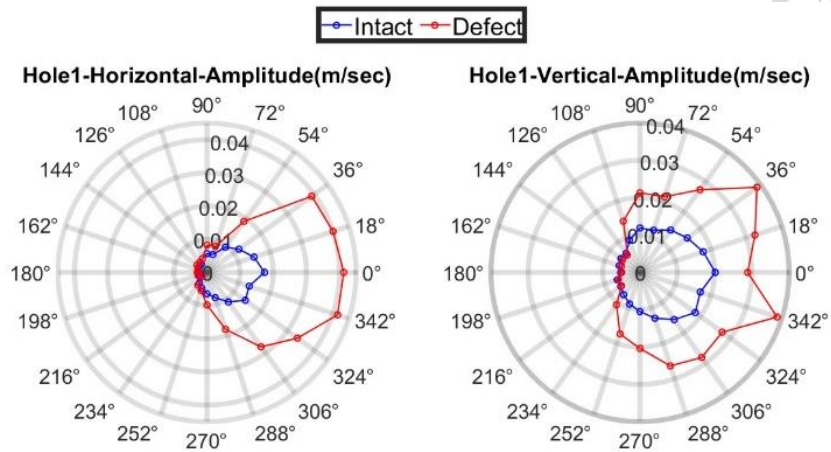
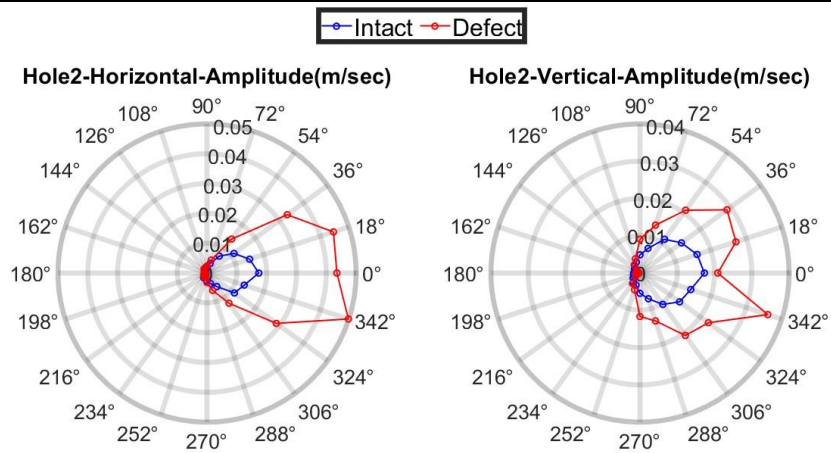


圖 4.8 有孔試體孔洞周遭球體速度振幅變化

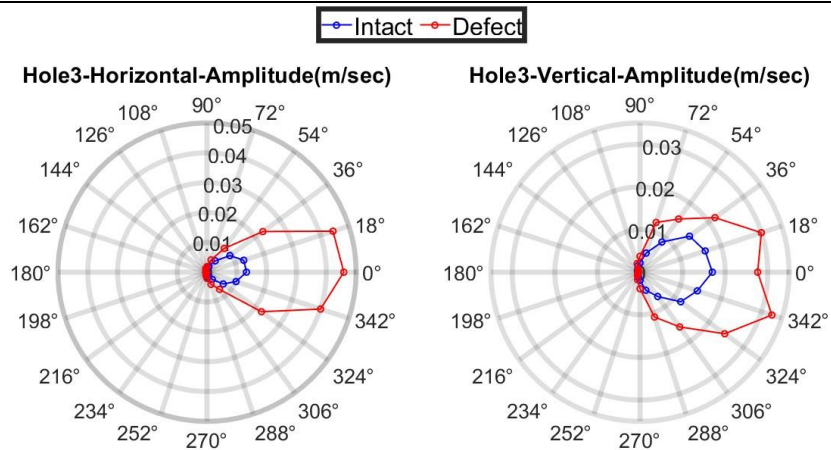
(a)孔洞一



(b)孔洞二



(c)孔洞三



(d)孔洞四

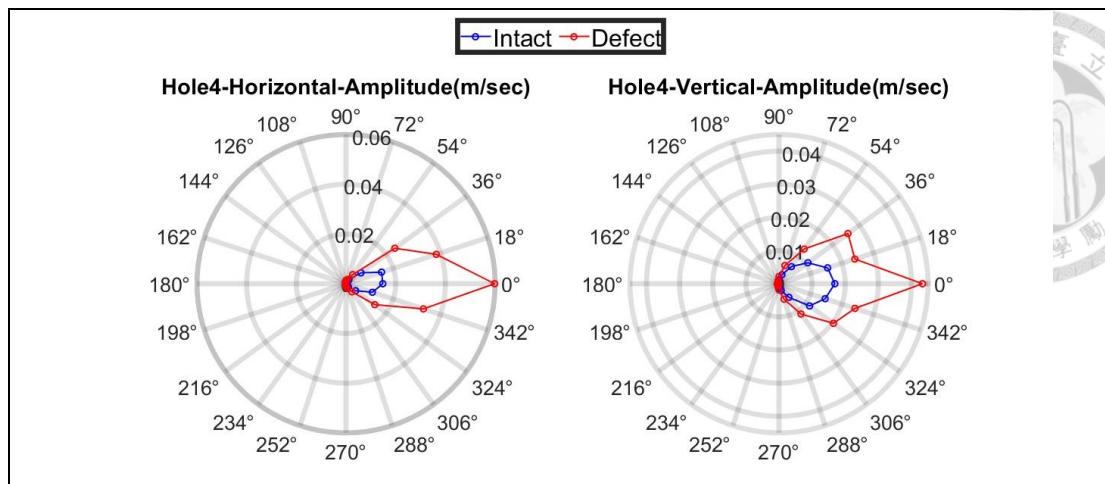
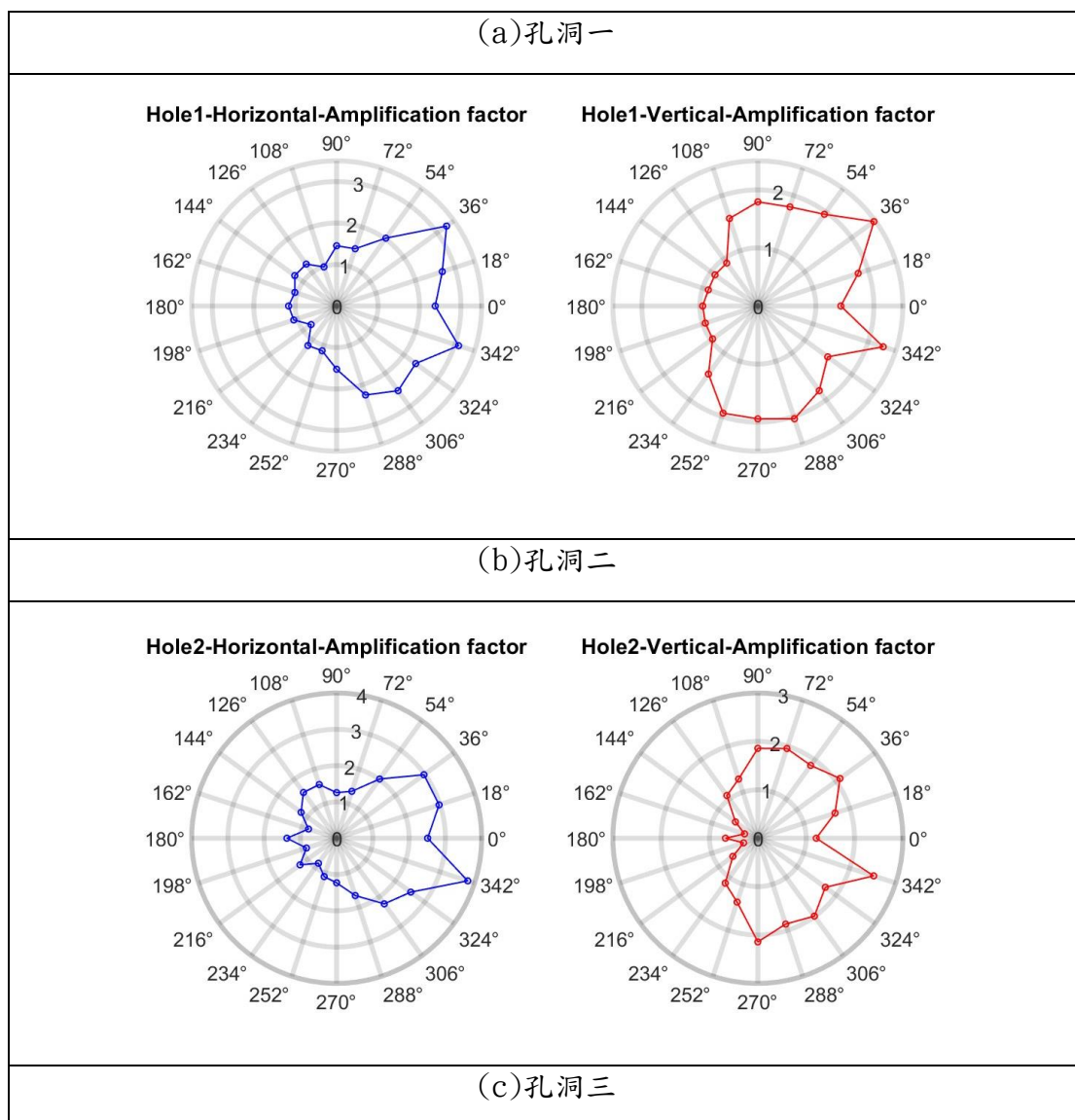


圖 4.9 完整試體模型與孔洞試體模型比較



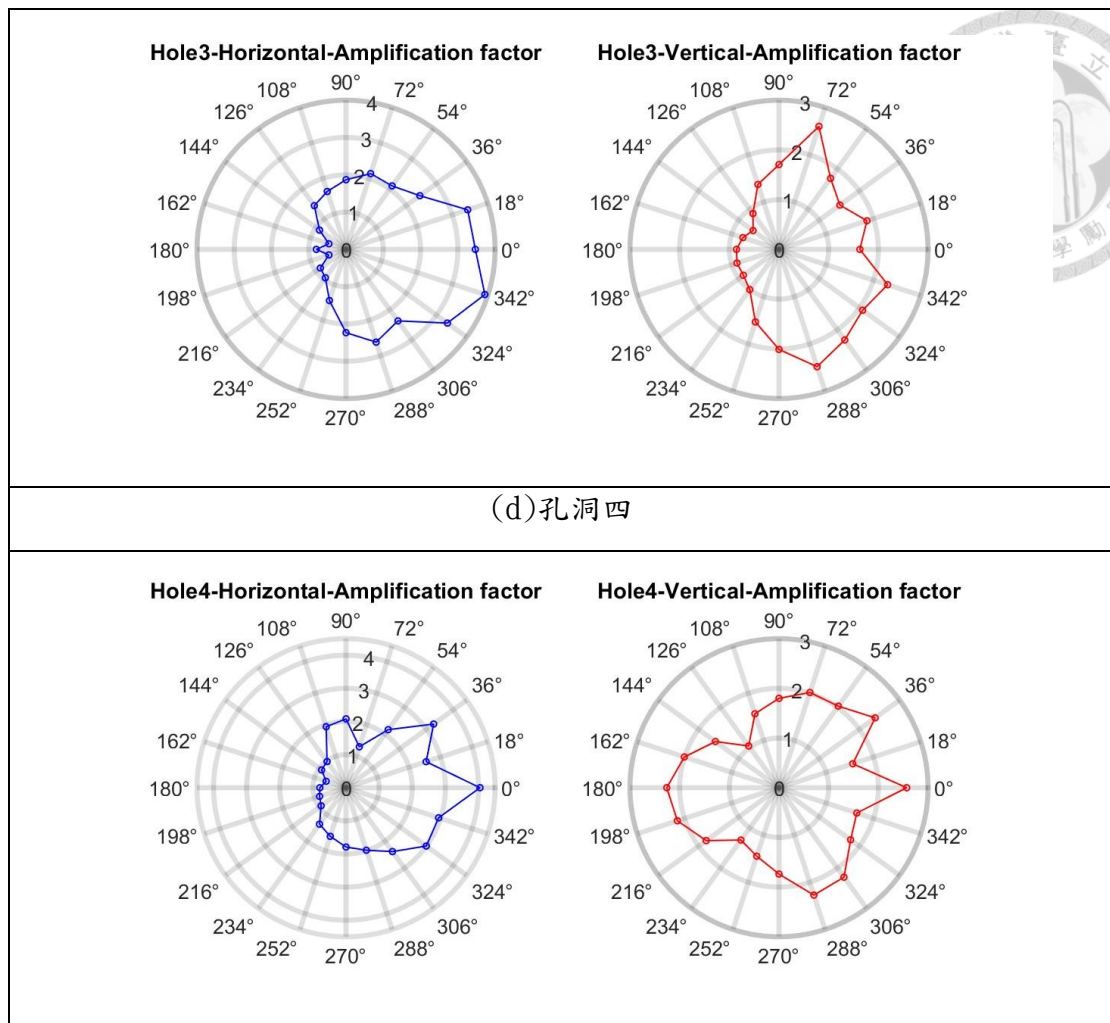


圖 4.10 各孔洞振幅放大倍率比較

4.2 波長對於孔洞影響

圖 4.11 分別為不同擊打頻率下的表面波速度分布，圖 4.11(a)為擊打頻率 25000 Hz 波長 60 mm，能在 300 mm 試體表面觀察到兩個波型；圖 4.11(b)為擊打頻率 12500 Hz 波長 120 mm，能在 300 mm 試體表面觀察到一個波型；圖 4.11(c)為擊打頻率 5000 Hz 波長 300 mm，在試體表面上無法明顯觀察到一個波長；圖 4.11(d)為擊打頻率 500 Hz 波長 3000 mm，波長已經大於試體大小無法觀察到波長。圖 4.12 為各頻率下傅立葉轉換後的頻譜圖。主頻皆在所設計的擊打頻率。

圖 4.13 為不同波長下各孔洞的放大倍率，圖 4.13(a)為波長 0.03 m 下不同孔洞的放大倍率，結果如 4.1 小節所示，在遇到 0.5 倍波長孔徑比(孔洞四 0.06 m)會在 0 度及 180 度產生較大的放大倍率，而其他孔徑比(2 倍、1 倍、0.67 倍)的放大倍率皆會在另個

方向(90 度及 270 度)的方向產生較大的放大倍率，其中以入射(0 度)兩側 36 度至 90 度區間會產生較大的放大倍率，此現象於波長 0.06 m 模擬中亦同。

而當波長漸進增大至 0.12 m，孔洞附近振幅變化會有所不同，當遇到孔洞一(0.015 m)，孔洞附近垂直及水平振幅放大倍率皆在 0.8 至 1.2 之間，並未有相對大幅度的變化；遇到孔洞二(0.03 m)，孔洞附近水平振幅放大倍率在 0.71 至 1.44 之間，水平向振幅變化相對於垂直向振幅較大；而孔洞三(0.045 m)水平向振幅放大倍率介於 0.50 至 1.58 之間，垂直向振幅放大倍率介於 0.75 至 1.48 之間，孔洞四(0.06 m)的變化幅度與孔洞三接近。對於各孔洞的放大行為皆是以入射波先靠近孔洞的前半圓有較大的振幅放大倍率，後半圓則會漸進衰減。

當波長為 0.3 m 在各孔洞垂直向振幅放大倍率並未有明顯變化，孔洞前方與後方皆在 1 倍左右，於水平向速度振幅放大倍率在孔洞前(0 度)及(180 度)有較明顯變化最大可達 1.56 最小達 0.71，且增長幅度會隨著孔洞樂大有越明顯的趨勢，主因在挖除孔洞後水平向自由度增加使振幅增加。

當波長為 3 m 在各孔洞垂直向振幅放大倍率並未有明顯變化，孔洞前方與後方皆在 1 倍左右，於水平向速度振幅放大倍率會在孔前(0 度)及孔後(180 度)產生較明顯變化最大可達 1.43 最小可達 0.51，且增長幅度會隨著孔洞樂大有越明顯的趨勢，主因在挖除孔洞後水平向自由度增加使振幅增加。

在本小節中，利用五種波長觀察對四種不同大小孔洞的影響進行探討。在結果中有些部分行為相似可以歸納出當波長與孔徑之間的比例較接近 1 時，對於孔洞周遭的振幅會有較顯著影響，反之若超過四倍波長孔徑比時，孔洞周遭振幅並未有顯著影響，以波長 0.03 m 模型與波長 0.06 m 的模型會對四個孔洞皆對水平向速度振幅及垂直向速度振幅有明顯的影響。波長 0.12 m 的模型能較明顯看出此結果，在孔洞一(8 倍)及孔洞二(4 倍)速度振幅變化並不顯著，但遇到孔洞三(2.67 倍)及孔洞四(2 倍)孔洞前方的放大倍率會相對較大。波長 0.3 m 及 3 m 的模型因波長孔徑比已明顯大於孔洞尺寸，因此在垂直向速度變化皆無明顯變化。水平向速度振幅放大倍率則會因為鑽孔位置使自由度

增加，放大幅度並未會因波長孔徑比而影響倍率。而在四種不同波長模型中，皆能觀察到在孔洞的前方的監測點會因為鑽孔後產生比原先完整模型更大的振幅，這個現象會來自於應力波遇到孔洞後產生繞射以及散射，致使原先入射波與散射波相遇產生破壞性干涉以及建設性干涉的現象，所以孔洞周遭的能量分布發生了變化。

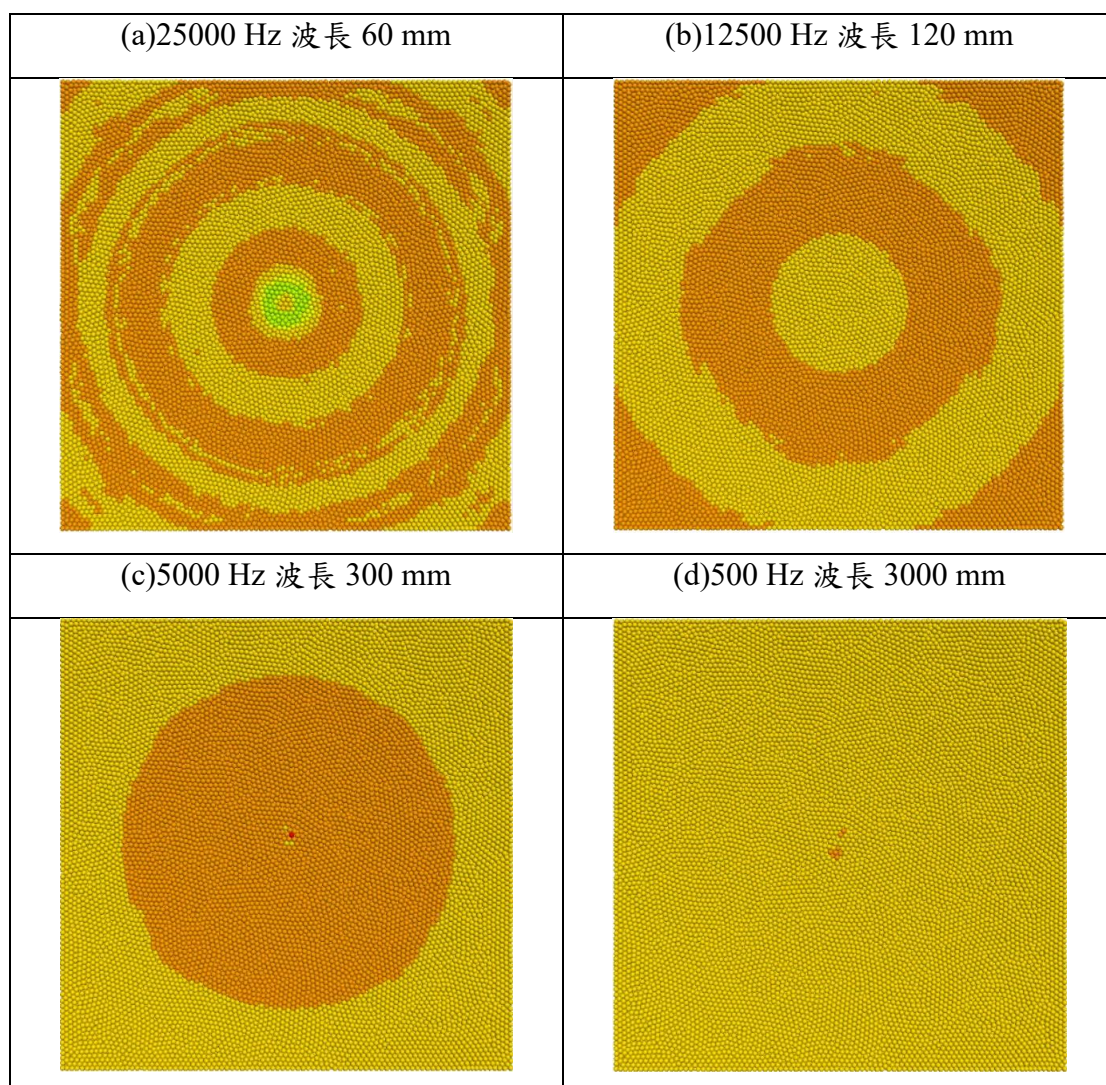


圖 4.11 頻率 30000Hz 完整試體速度分布

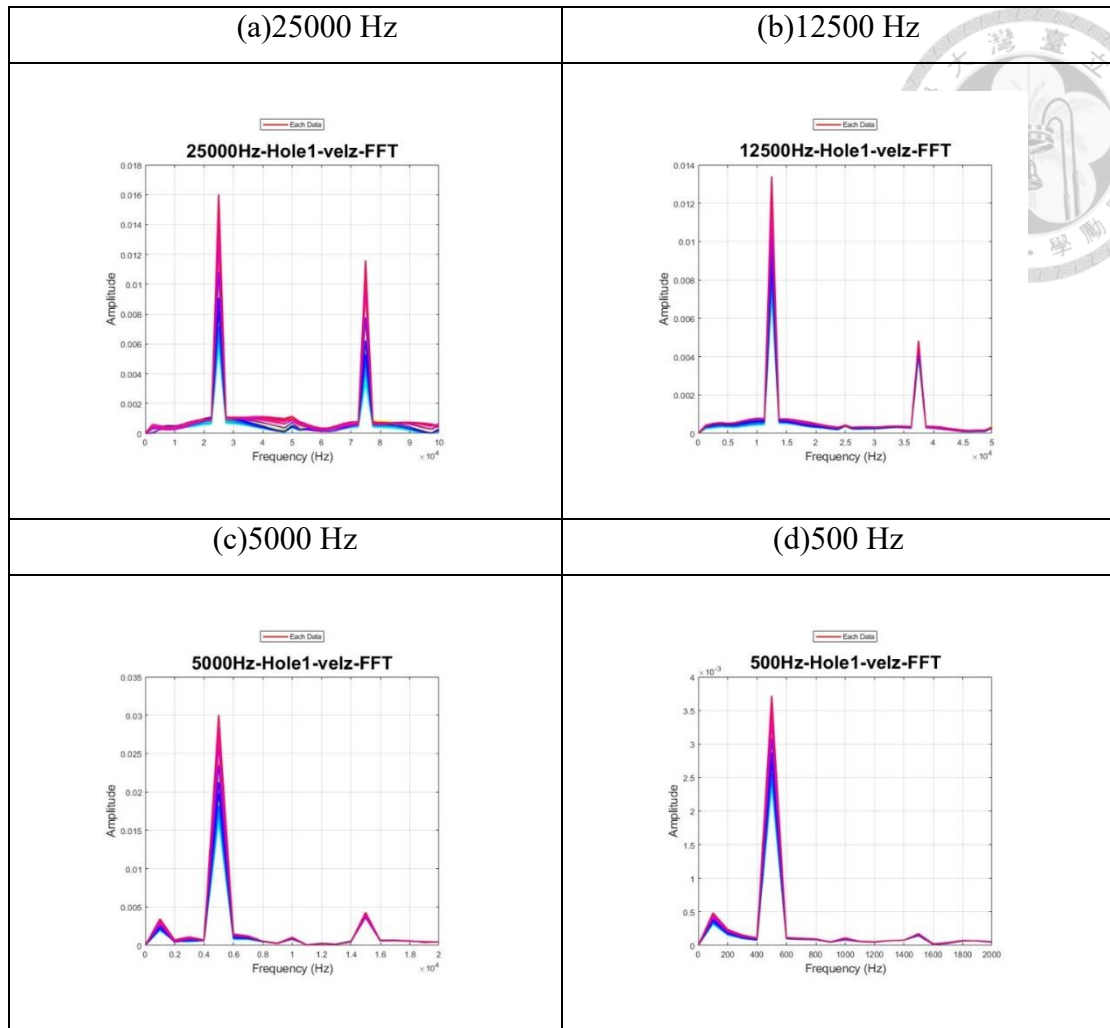
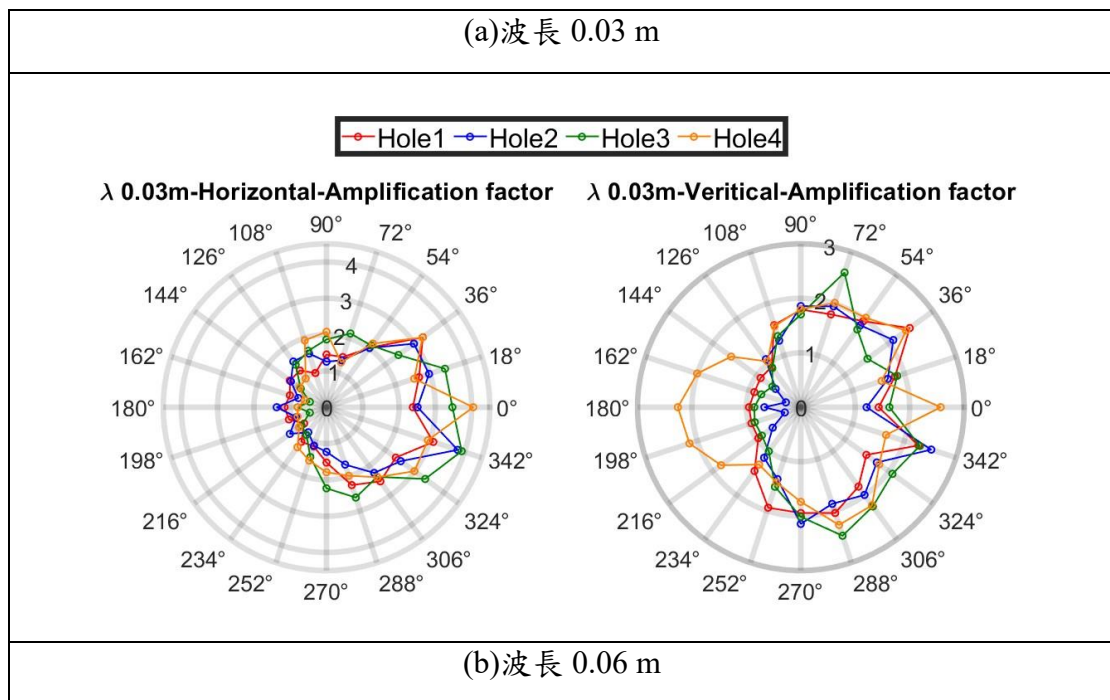
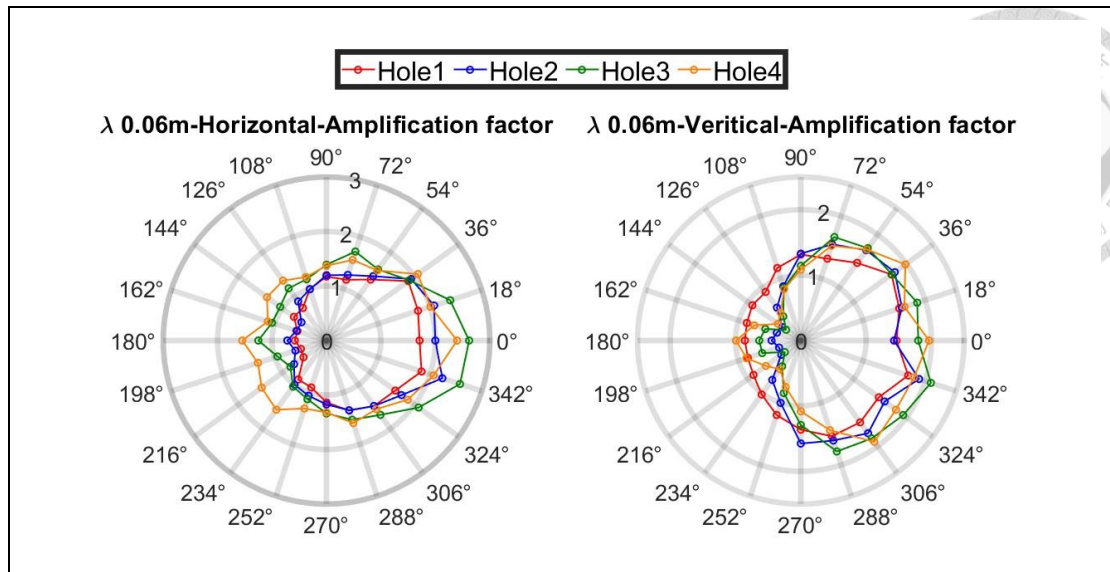
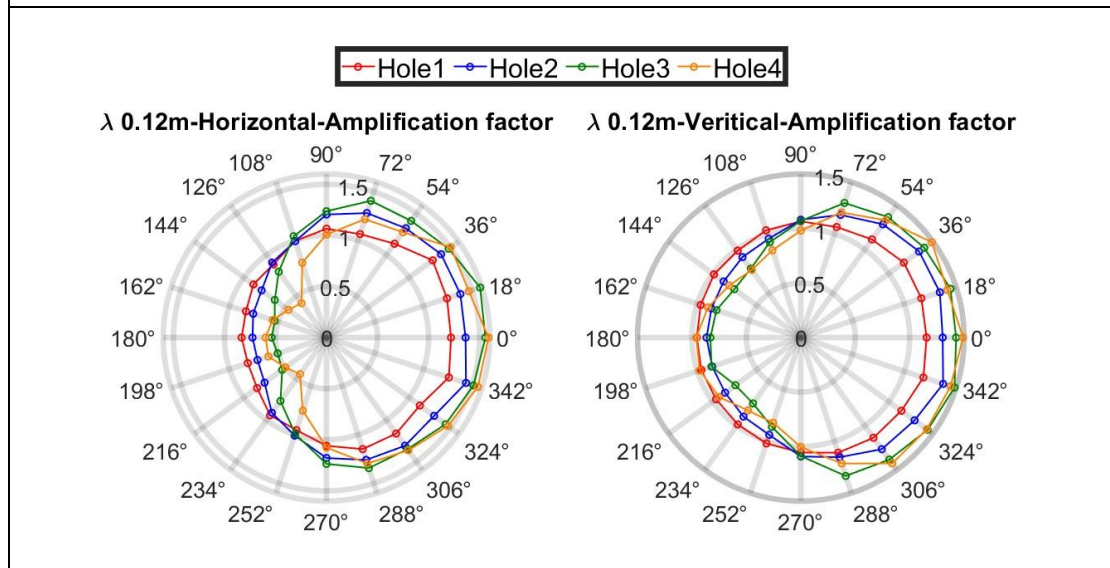


圖 4.12 各頻率下的 FFT

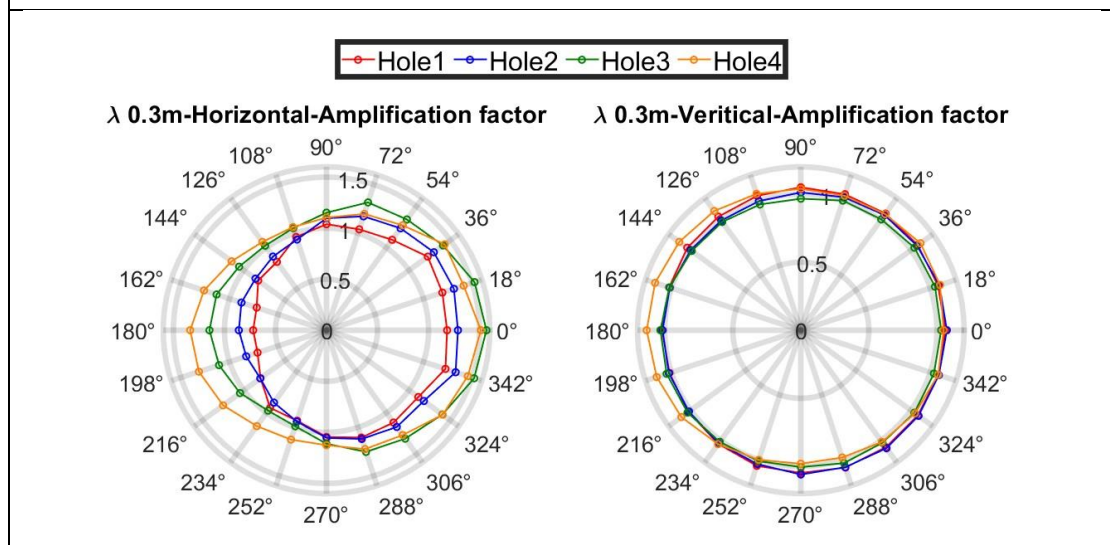




(c)波長 0.12 m



(d)波長 0.3 m



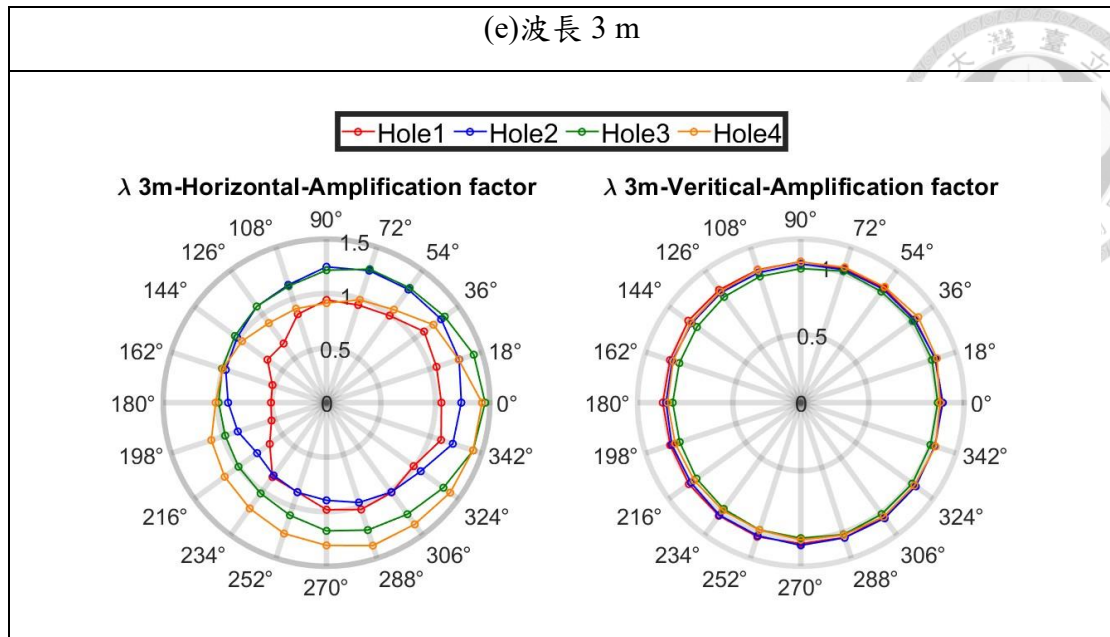


圖 4.13 不同波長下各孔洞的放大倍率

4.3 孔洞位置影響應力波傳遞方向

4.3.1 波長 60 mm

圖 4.14 為 90 度方向單一孔洞對各孔洞的標號，以逆時針旋轉的順序排列孔洞編號，圖 4.15 及圖 4.16 為各點位在垂直向振幅與水平向振幅的變化分布，藍點線為完整試體振幅分布，紅點線為鑽孔後的振幅分布，將各孔洞離擊打點較近的點位轉換至極座標 90 度其他點位依序逆時針排列。鑽孔過後孔洞 1 的垂直向會增大，趨勢如同 4.1 小節，前半圓(0 度至 180 度)會產生相對較大的振幅，而後續孔洞 2 至孔洞 6 則會產生相對完整試體較小的振幅，孔洞 2 及孔洞 3 振幅趨勢從原先入射波方向較大衰減成偏向孔洞外側較大的趨勢，孔洞 4 至孔洞 6 的振幅變化趨勢也從入射波方向衰減成較偏孔洞外側，其中以孔洞五會衰減最明顯。水平向振幅的變化趨勢與垂直向接近，孔洞一會有明顯增加而孔洞二至孔洞六會有衰減的現象且振幅分布會偏向孔洞外側，其中以孔洞五衰減最明顯。

圖 4.17 為 210 度方向三孔洞各孔洞的標號，圖 4.18 與圖 4.19 分別為垂直向振幅與水平向振幅的變化分布。垂直向振幅變化在孔洞 1 的變化趨勢如同 4.1 小節，前半圓(0 度至 180 度)會產生相對完整試體較大的振幅，孔洞 2 及孔洞 3 的結果會與 90 度單孔狀

況不同，原先衰減的分布因為鑽孔使得振幅上升，上升的分布會在孔洞靠外側的區域，孔洞 2 外側(90 度至 144 度)孔洞 3 外側(54 度至 90 度)，孔洞 4 至孔洞 6 的變化趨勢與單孔狀況下相近，皆會衰減。水平向振幅變化趨勢與 90 度單孔模型有差異，在孔洞 2 及孔洞 3 會因鑽孔過後振幅上升，增加的區域範圍會在孔洞外側稍微偏中心，且在孔洞 4 及孔洞 6 振幅也會提升，範圍則會是偏內側，孔洞 5 則是大幅衰減。

圖 4.20 為 330 度方向六孔洞各孔洞的標號，圖 4.21 與圖 4.22 分別為垂直向振幅與水平向振幅的變化分布。垂直向振幅在孔洞 4 與孔洞 6 開孔後即有不同，振幅會因為開孔後而增加，且範圍是在孔洞外側，孔洞 5 振幅並未因開孔後而上升，反成衰減狀態。水平向振幅方面，孔洞 4 至孔洞 6 的變化會不同於 90 度與 210 度，孔洞 4 與孔洞 6 的振幅增量會偏向孔洞內側且孔洞 5 振幅會提升，提升的範圍與孔洞 1 的趨勢相同。

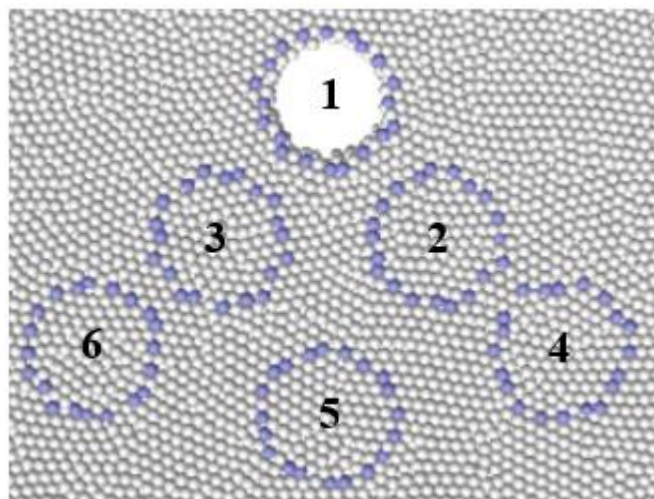
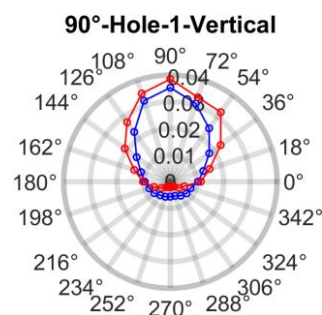


圖 4.14 90 度各孔洞標號



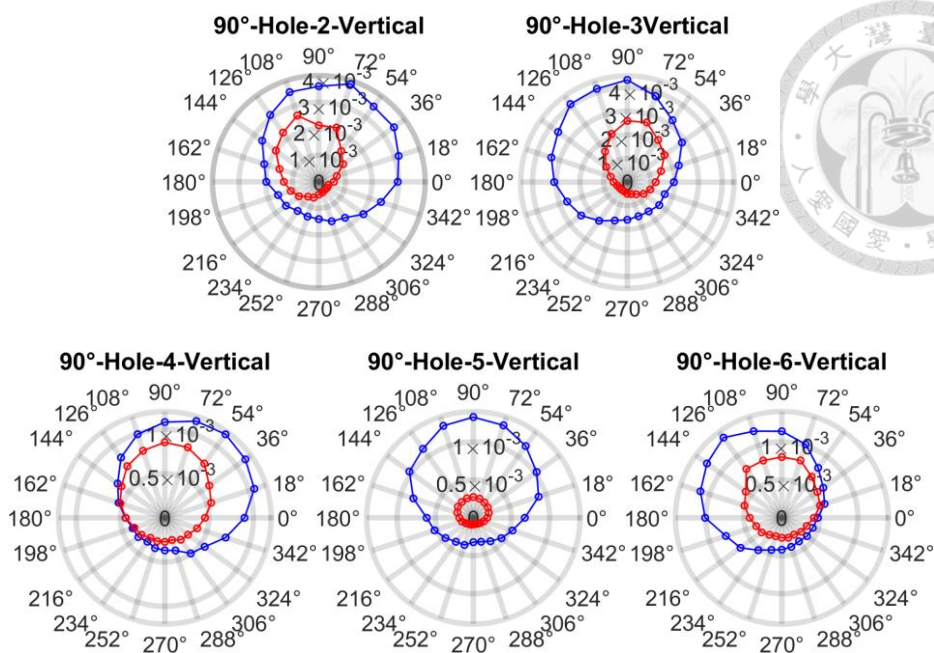


圖 4.15 90 度孔洞垂直振幅變化

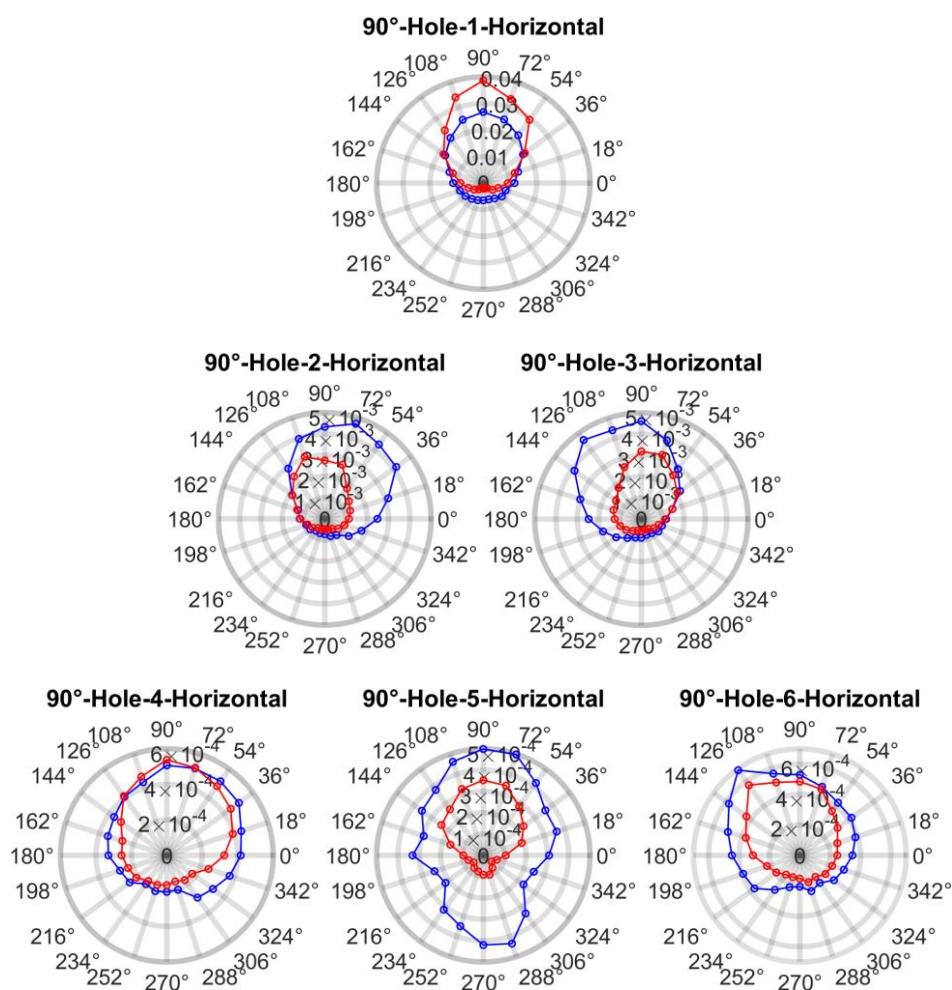


圖 4.16 90 度孔洞水平振幅變化

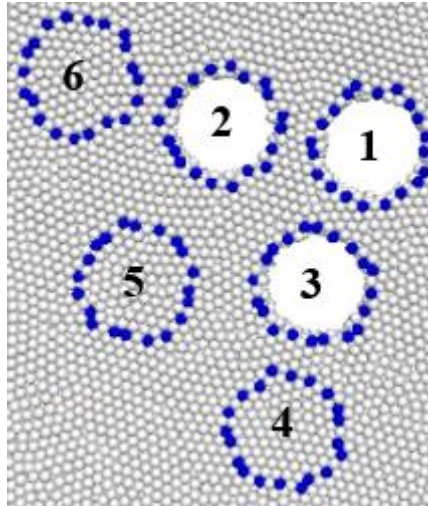


圖 4.17 210 度各孔洞標號

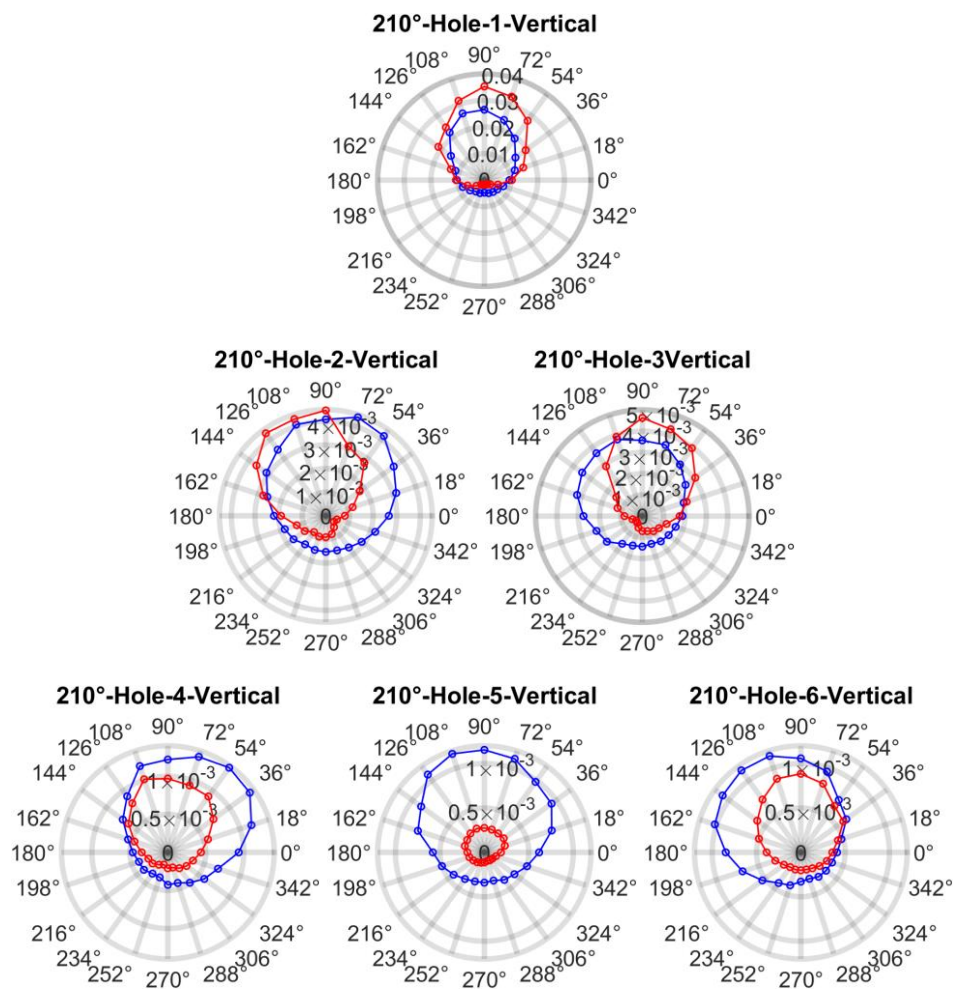


圖 4.18 210 度孔洞垂直振幅變化

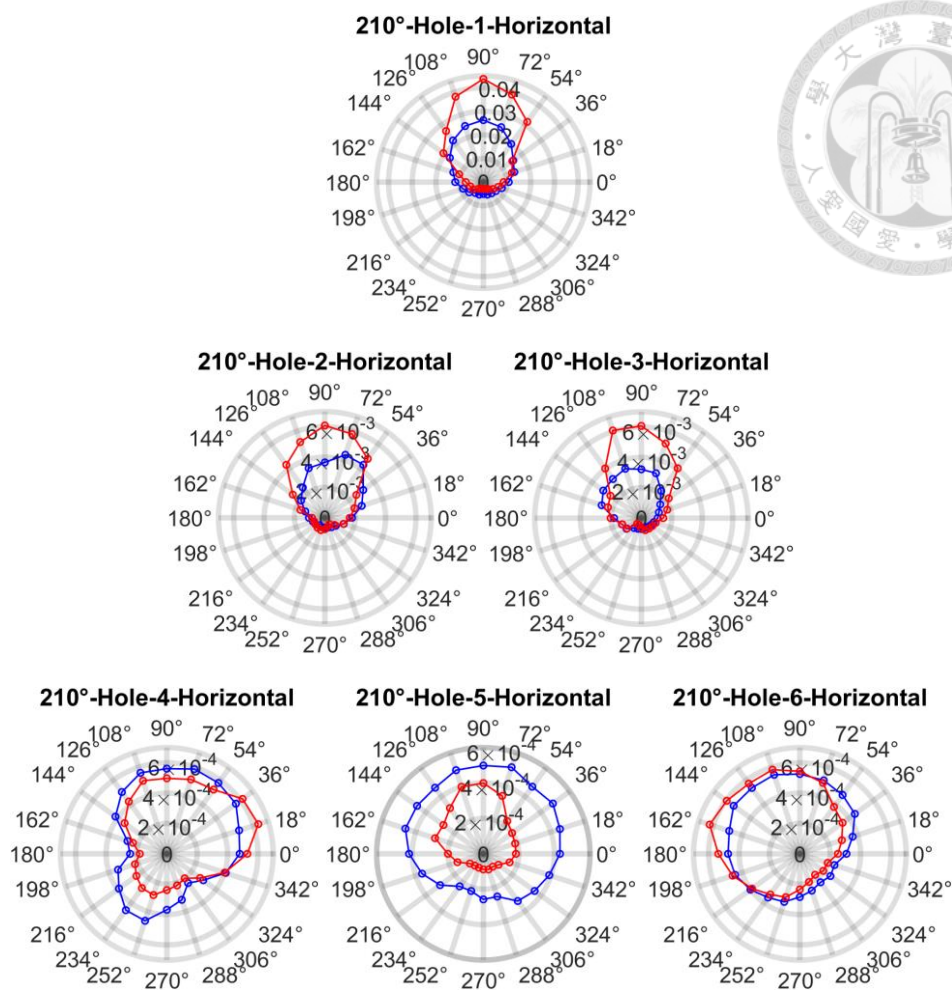


圖 4.19 210 度孔洞水平振幅變化

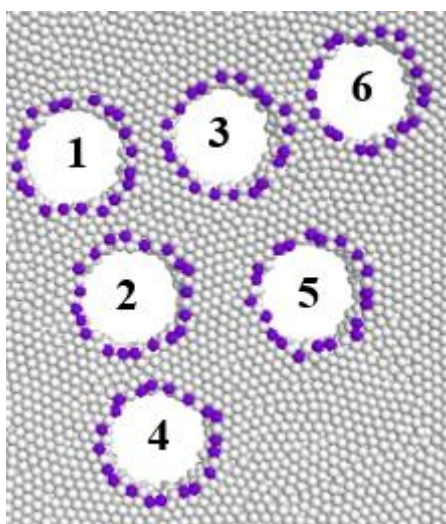


圖 4.20 330 度各孔洞標號

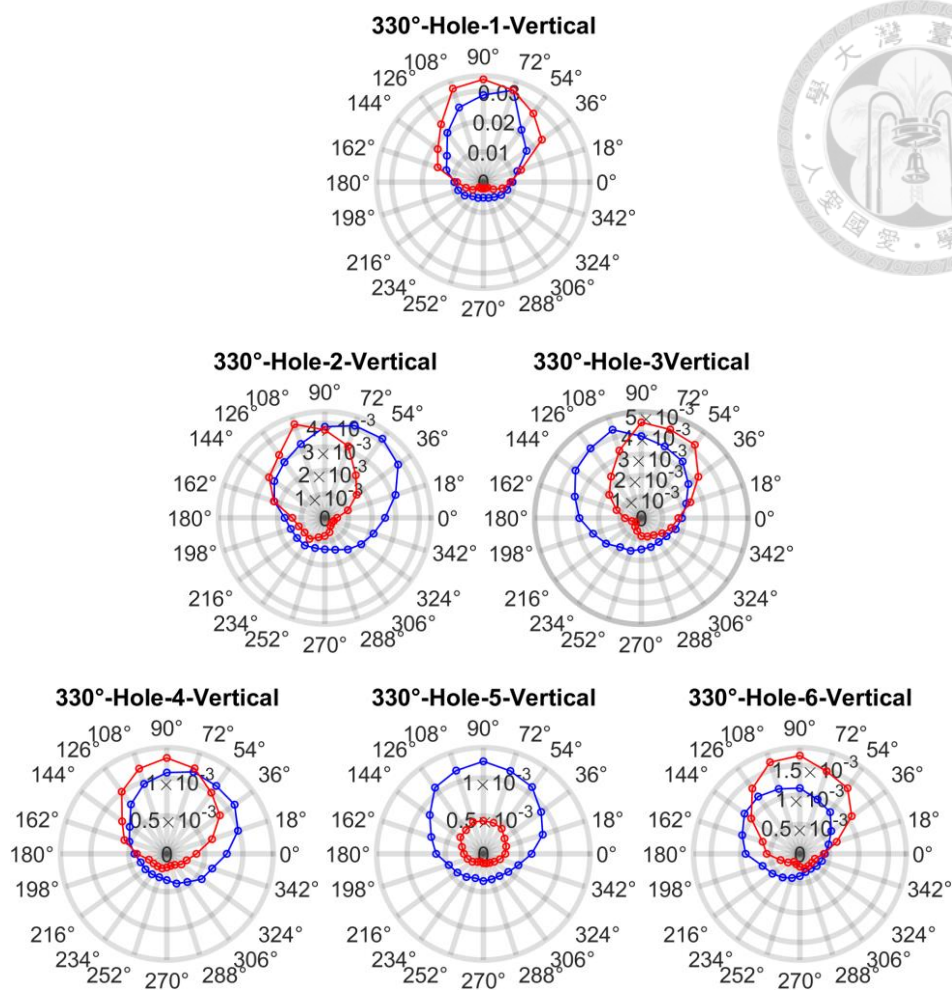
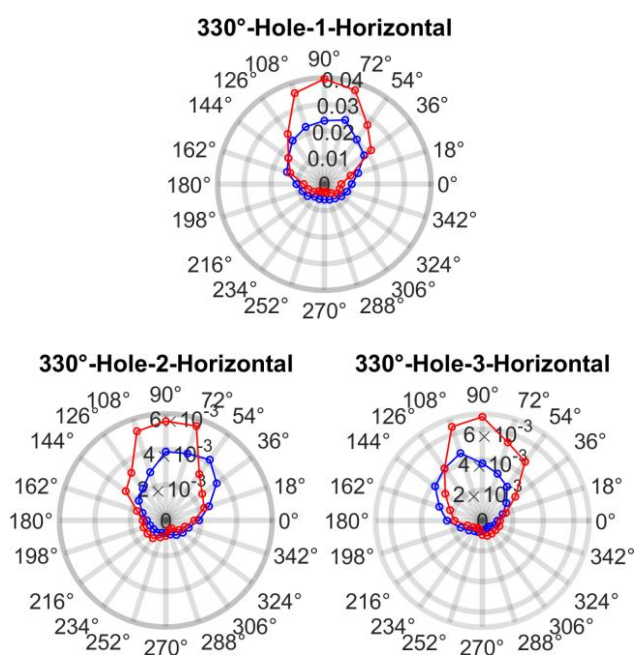


圖 4.21 330 度孔洞垂直振幅變化



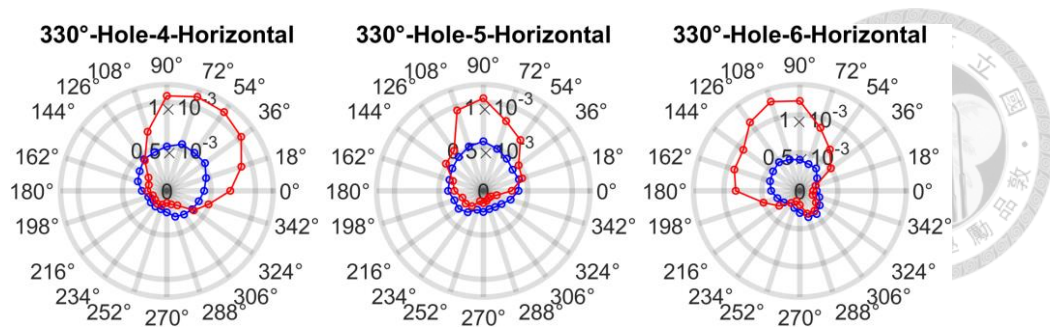


圖 4.22 330 度孔洞水平振幅變化

4.3.2 波長 120 mm

圖 4.23 與圖 4.24 為 90 度單一孔洞受 120 mm 波長擊打下的垂直振幅變化與水平振幅變化，單鑽孔狀況下因波長與孔徑之間的比例較大(4 倍)，孔洞 1 周遭振幅會因為鑽孔而增加，後續孔洞 2 至孔洞 6 並未有明顯衰減，呈現狀況與 4.3.1 小節在 60 mm 波長下擊打後會有明顯衰減不同。水平向振幅在孔洞 2 及孔洞 3 的外側振幅會有些微提升，孔洞 4 即孔洞 6 則會是在孔洞內側區域產生些微提升。

圖 4.25 與圖 4.26 為 210 度鑽三孔的孔洞垂直與水平振幅分布，孔洞 2 及孔洞 3 挖除過後使得垂直與水平振幅提升，且提升的範圍接近是在孔洞前半圓(0 度至 180 度)與 4.3.1 小節主要分布在孔洞外側(孔洞四 90 度至 144 度、孔洞六 36 度至 90 度)，孔洞 4 至孔洞 6 在垂直向振幅會產生相對 90 度單孔時較明顯衰減，其中以孔洞 5 垂直向衰減較為明顯，而水平向振幅則會在孔洞後方產生些微增加，變化趨勢與垂直向有所異。

圖 4.27 與圖 4.28 為 330 度鑽六孔下的垂直振幅與水平振幅分布，在孔洞 4 至孔洞 6 皆被挖除下，對於周圍振幅皆為提升，孔洞 4 及孔洞 6 在垂直向會是靠近前半圓(0 度至 180 度)會提升，孔洞 5 的衰減程度不如其他方向的衰減程度；在水平方向振幅提升範圍相對於 210 度更廣，孔洞 2 及孔洞 3 接近孔洞周圍都會提升，孔洞 4 及孔洞 6 的範圍則是像葫蘆形狀的提升，前半圓(0 度至 180 度)靠近孔洞內側提升明顯，後半圓(180 度至 360 度)則是孔洞外側提升較明顯，孔洞 5 則是在前半圓提升較多。

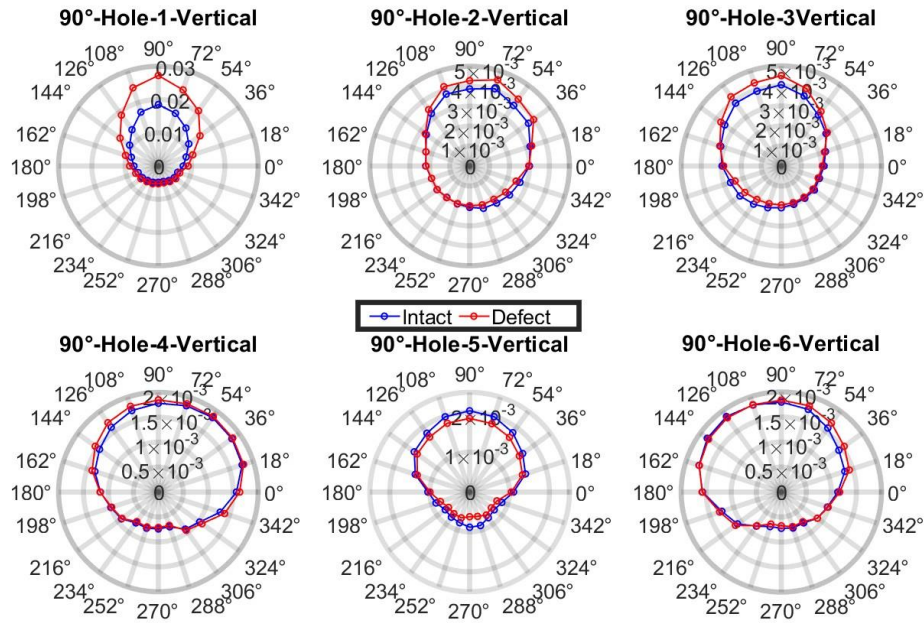


圖 4.23 90 度孔洞垂直振幅變化

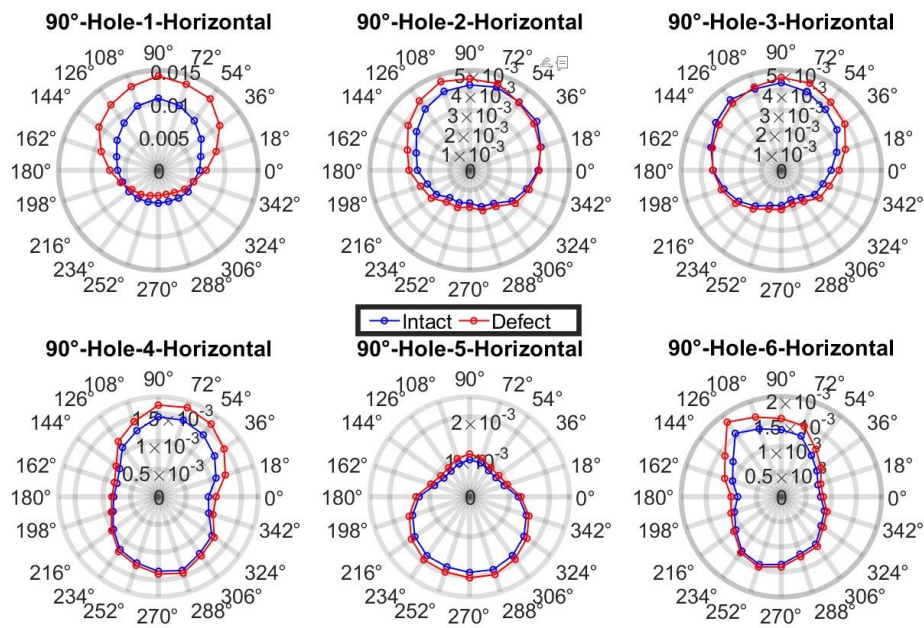


圖 4.24 90 度孔洞水平振幅變化

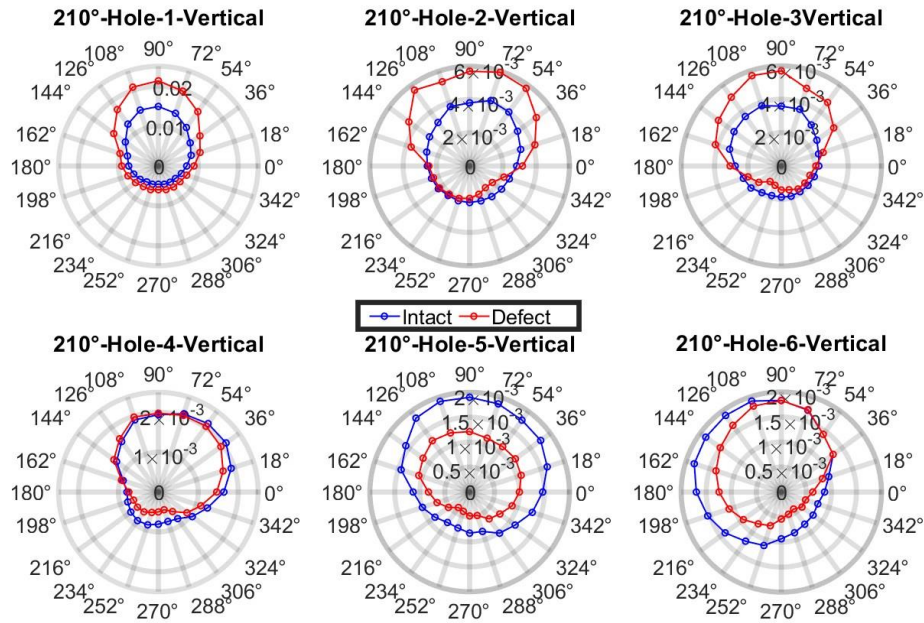


圖 4.25 210 度孔洞垂直振幅變化

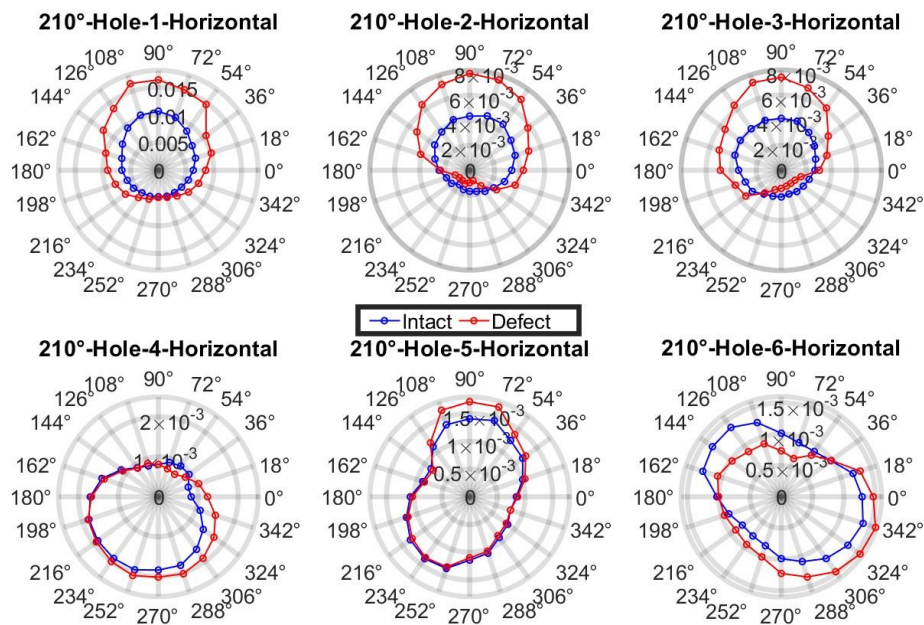


圖 4.26 210 度孔洞水平振幅變化

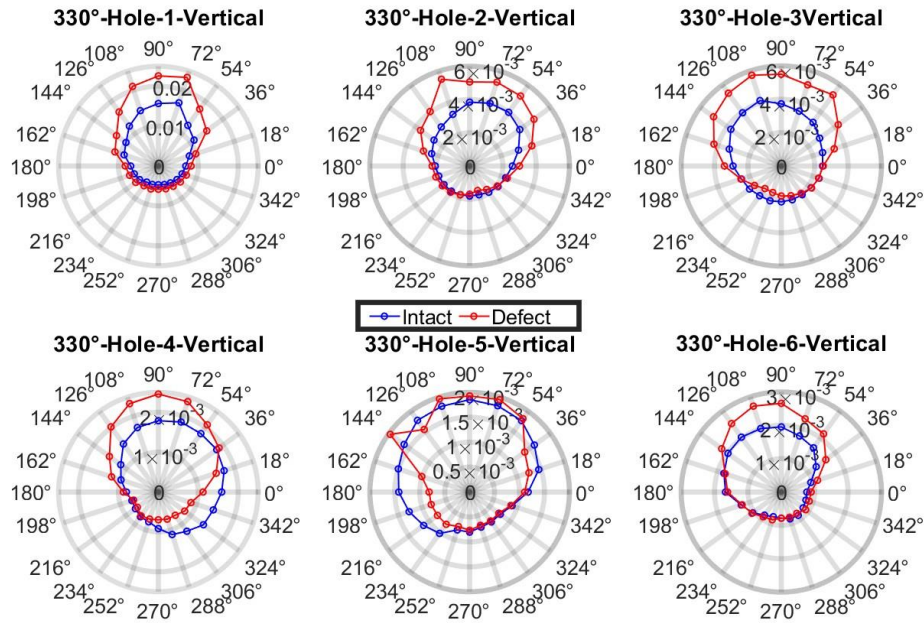


圖 4.27 330 度孔洞垂直振幅變化

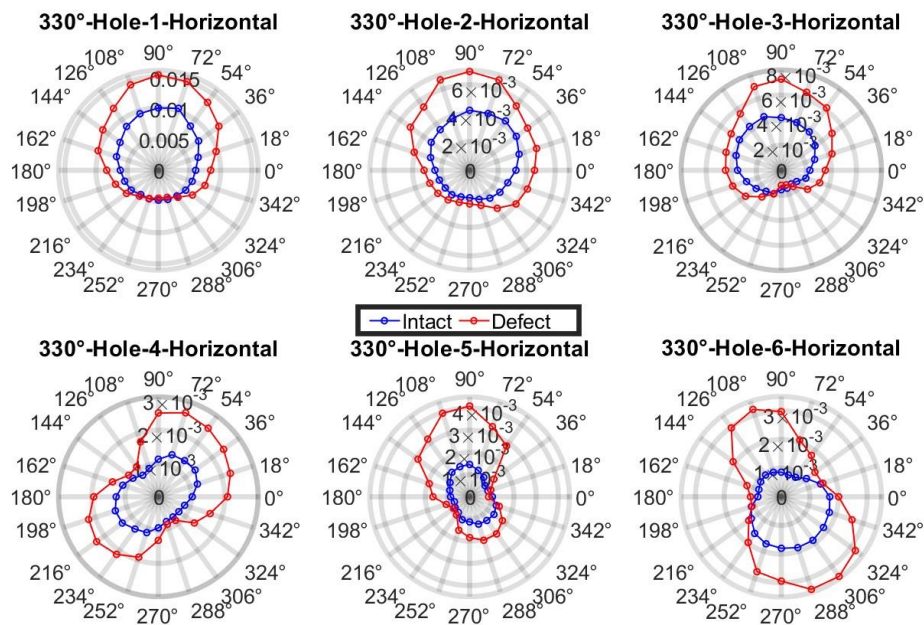


圖 4.28 330 度孔洞水平振幅變化

利用不同孔洞數及波長的變化可以得知，若只有單個孔洞對於後方的振幅會因為應力波傳遞方向改變而有明顯衰減，但補上其他孔洞可以使原先衰減的區域得到一定的振幅提升，提升的範圍與前一排孔洞的位置有關，圖 4.29 為入射波方向變化示意圖，

當碰到孔洞一而繞射的入射波遇到原先方向上的入射波形成干涉的现象，使得在孔洞外側較常產生明顯的振幅提升，而孔洞五會因為在孔洞一的正後方，使得原先的入射波無法直接傳遞在孔洞周圍，因此振幅明顯下降。當後續孔洞打開，使得入射波方向改變造成干涉行為振幅提升，由此開孔的動作能讓振幅得到部分提升，孔洞設計須考量到入射波角度，減少不必要孔洞(孔洞五)。當波長漸增至孔洞數倍，對於孔洞的繞射現象影響不明顯，振幅衰減程度較小在各孔洞的振幅會提升較明顯。

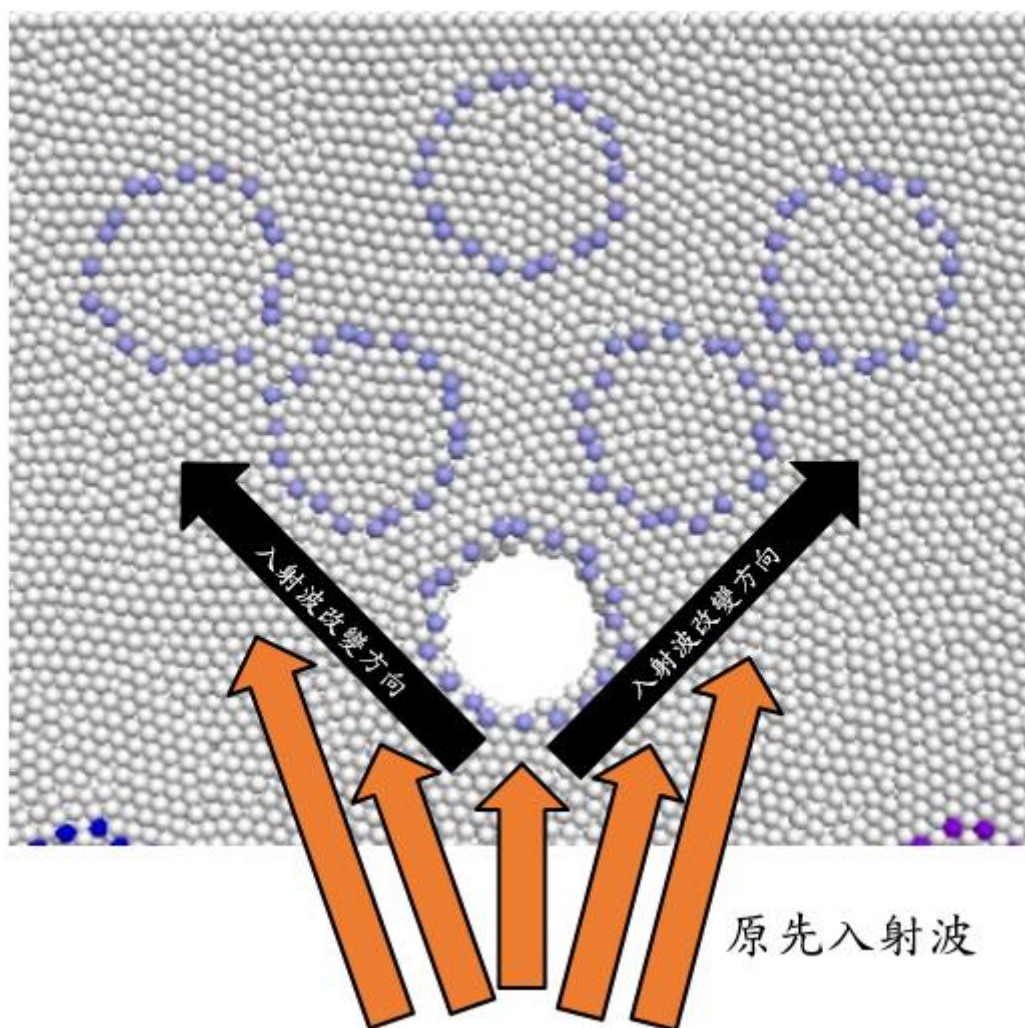


圖 4.29 入射波方向改變

4.4 擊打破壞過程

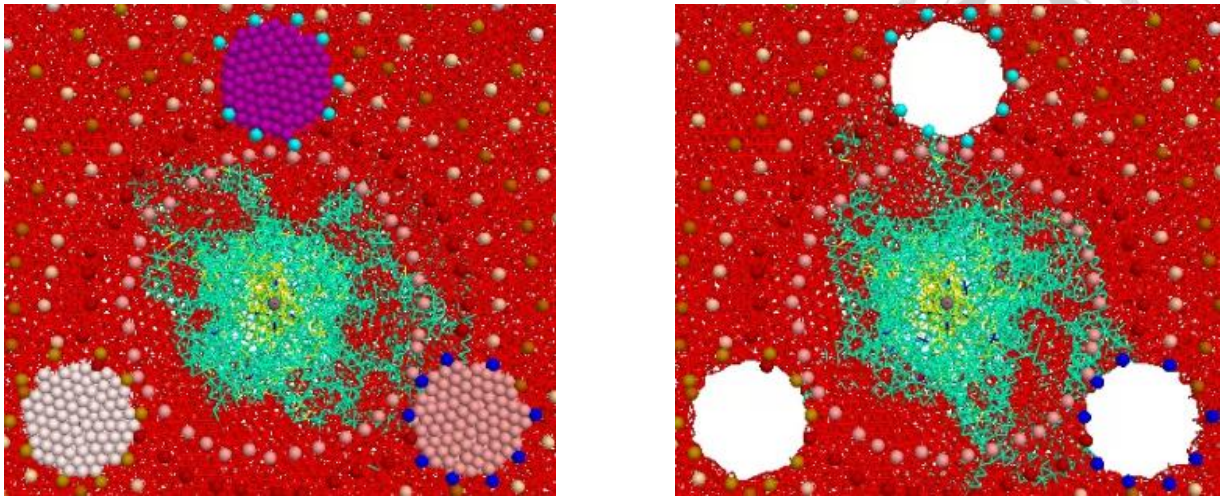


圖 4.30 孔洞影響鍵結分布

圖 4.30 為完整模型與孔洞模型進行擊打試驗後的鍵結分布，完整模型的鍵結破壞分布主要是在擊打區周遭向外擴散，在鑽孔模型中鍵結破壞的區域能發現有朝孔洞的方向。圖 4.31 為將鑽孔模型放大易觀察鍵結破壞，黑色圈線代表在相同擊打時間下，與完整模型相比鍵結斷裂不同之處，孔洞周遭會有斷鍵的產生，鍵結斷裂增加的區域會產生於孔洞靠近擊打處的位置。

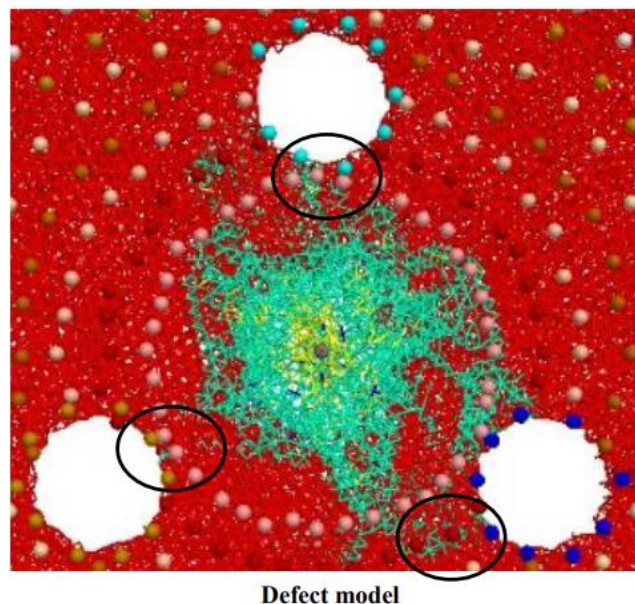


圖 4.31 鍵結破裂於孔洞周圍

圖 4.32 為在 90 度方向的孔洞周遭的鍵結破壞分布，在孔洞的下半圓區域 6 號球及

7 號球周遭的鍵結會有破壞，因此比較這個區域的速度分布探討破壞原因。

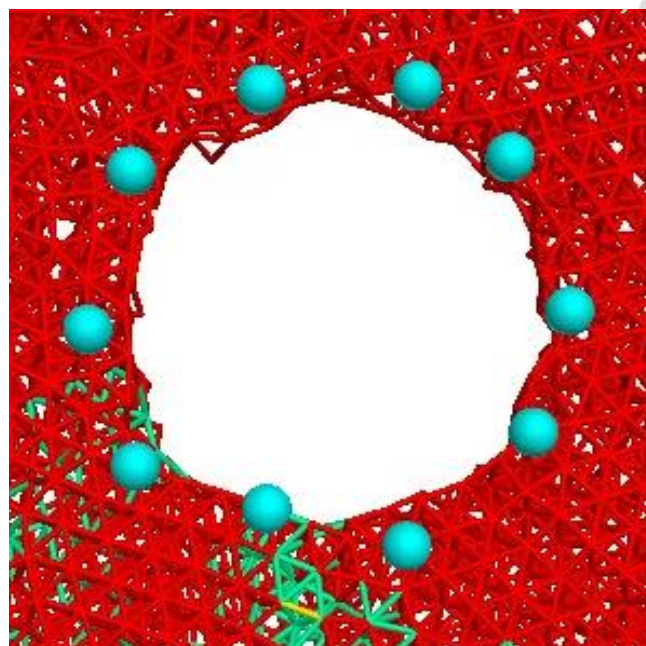


圖 4.32 孔洞影響鍵結分布

圖 4.33 及圖 4.34 為在完整模型以及鑽孔模型監測球的速度變化，依照設計的頻率為 20000Hz，timestep 設計為每一個 Step 代表 $5e-8$ 秒，所以每 1000 個 Step 會產生一個波型。在圖 4.33 中的波型為較完整且規律的波型，每 100 個 step 都會產生一個波型。

圖 4.34 的速度波型在前面 8000step 都為完整波型，但監測球 6 號及 7 號的速度變化在 8000steps 後會明顯不同，速度會有持續增加的變化，依照牛頓運動定律速度若一直增加，代表位移也會持續向上移動，球顆粒已經因為振動過大導致彈飛。

圖 4.35 為 6 號監測球及 7 號監測球在不同模型下的速度變化，完整模型在擊打過程中速度變化的週期皆為 100steps，鑽孔模型到 800steps 過後速度變化的週期會增大，且球顆粒的位移持續增加。

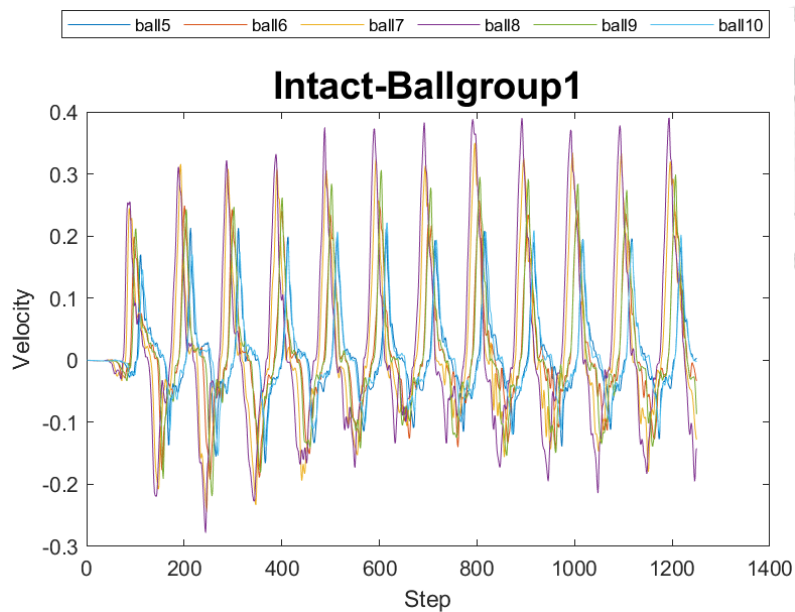


圖 4.33 完整模型監測球的速度

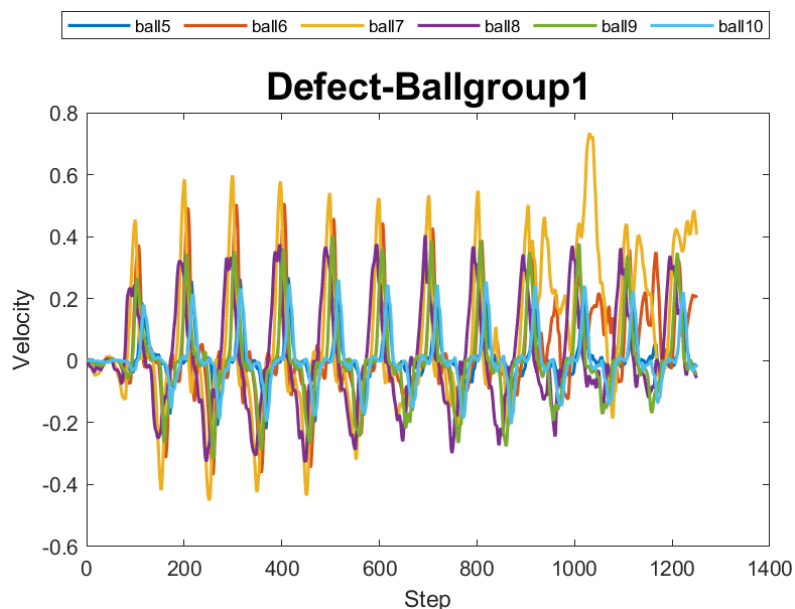
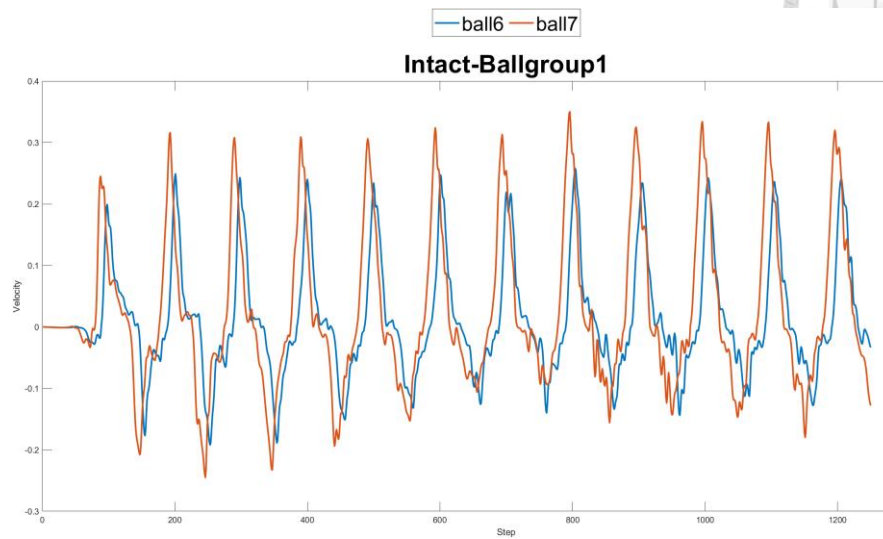


圖 4.34 鑽孔模型監測球的速度

圖 4.36 及圖 4.37 為完整試體與孔洞試體孔洞一周遭監測球進行 FFT 結果，完整試體頻譜分析結果一致，振幅大小受於距離影響而有不同；孔洞試體在 6 號及 7 號球的頻譜圖中在低頻率有副頻振幅較顯著，以破壞的結果進行討論此區也是破壞先產生的區域，震動頻率降低且振幅增加。圖 4.38 為每個監測球在不同模型下的比較，藍線為完整模型的振幅大小分布，紅線為鑽孔模型的大小分布，對比鍵結斷裂的位置以及振幅上升的區域，是有同樣的趨勢，孔洞一的七號監測球(288 度)較大的振幅產生，鍵結斷

裂的情況也會在七號監測球產生較明顯。

(a)完整模型 6 號監測球、7 號監測球



(b)鑽孔模型 6 號監測球、7 號監測球

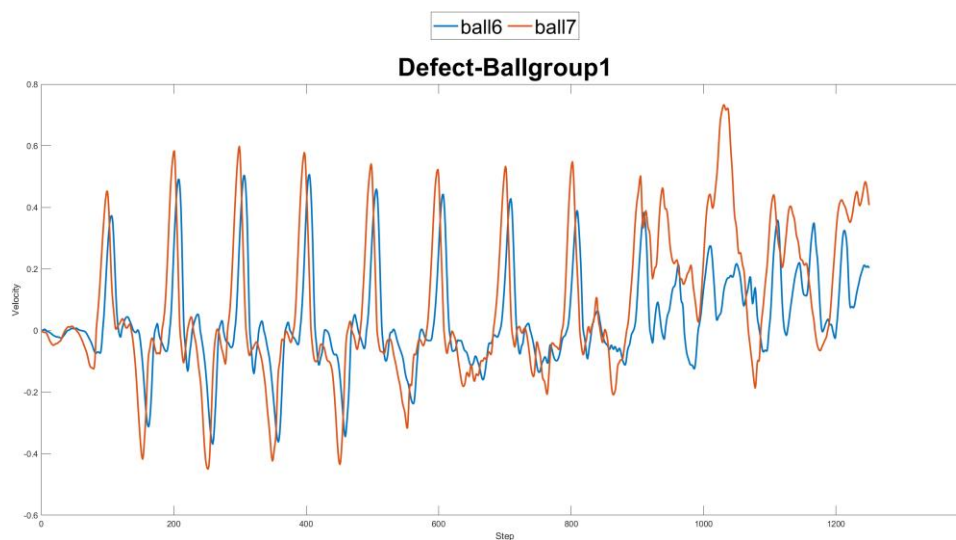


圖 4.35 鑽孔模型 6 號及 7 號監測球的速度

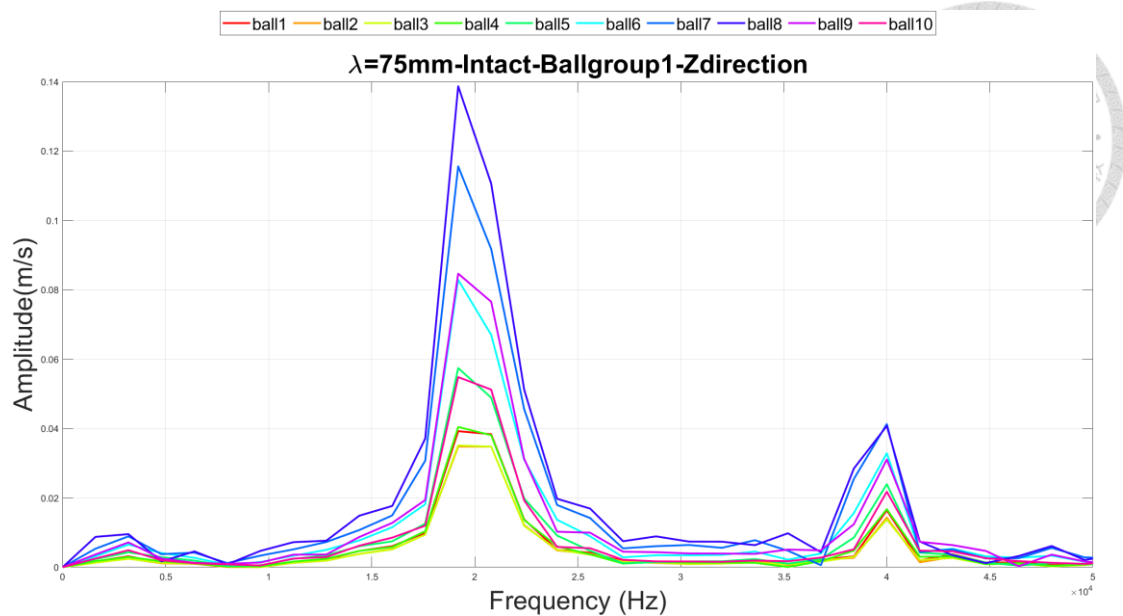


圖 4.36 完整試體 FFT 頻譜分析

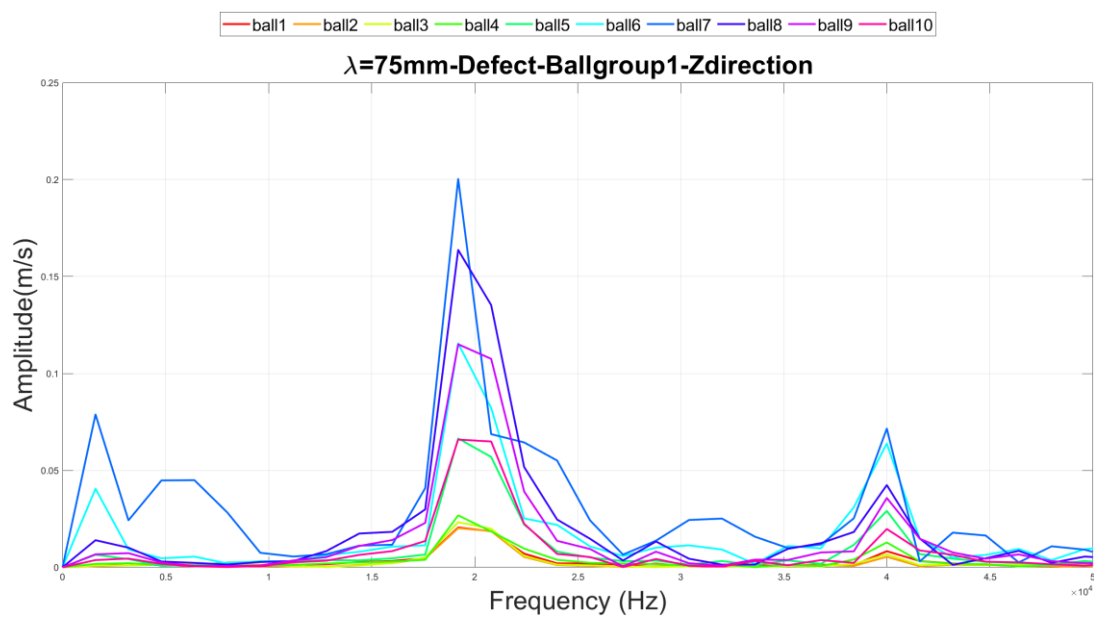


圖 4.37 孔洞試體 FFT 頻譜分析

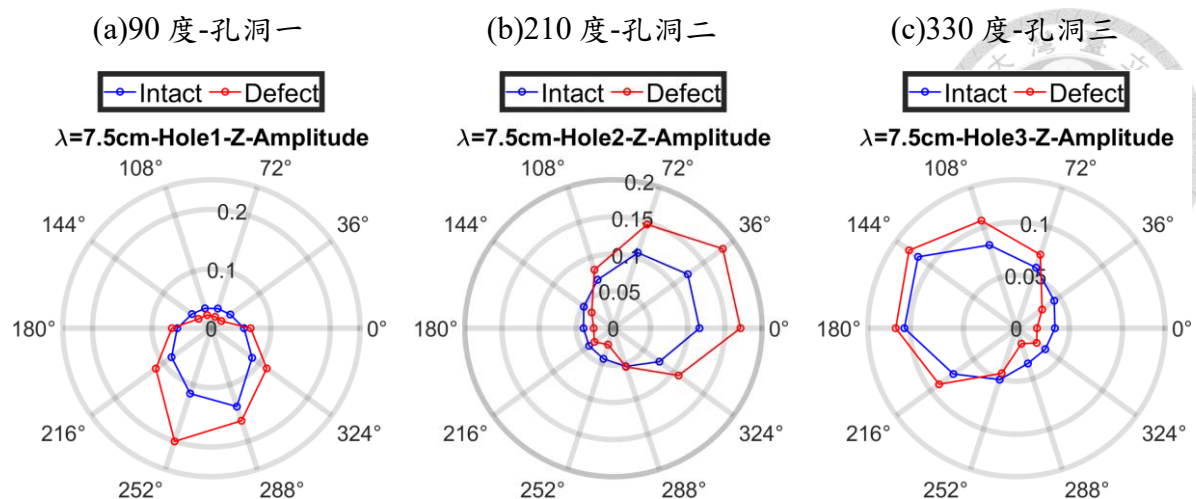


圖 4.38 鑽孔模型監測球的振幅分布

在 4.4 小節中，振幅的增量變化，會間接影響到孔洞周遭的破壞行為。孔洞對擊打試驗的破壞效率是正相關，球體振幅增加引致隨著擊打時間周遭鍵結因此斷裂。破壞的球體在振幅以及震動頻率都產生變化，應力波傳遞的行為與之有關。

本章節利用了孔洞影響應力波傳的特性，分別探討孔洞大小、波長、孔洞位置及擊打破壞的過程這四種不同狀況孔洞周圍的振幅變化。孔洞前後的振幅變化截然不同，孔洞較靠近擊打處的區域會有明顯振幅增量，遠離處會有衰減的現象。且於孔洞後方的波傳方向也間接引致其他點位振幅會有所改變。破壞的過程也會因為孔洞使周圍振幅及頻率改變，最後引致破壞。

第五章 結論與建議



5.1 鑽孔影響模擬結論

1. 本研究發展數值模擬擊打試驗，利用離散元素數值方法考慮元素大小及解析解驗證可使用來討論應力波波傳行為。振幅與距離之衰減關係符合理論值，應力波波速與材料之間的關係也能與理論值相互對應。物理試驗驗證因儀器精細度受到影響與限制，振幅衰減的行為受到邊界影響無法與現地開挖的半無限域進行比較而受到反射影響，波速傳遞速度相對實驗試體過大，難以呈現傳遞過程。
2. 應力波傳遞過孔洞時，周遭的振幅分布因受散射以及初始波影響，靠近震源的孔洞周遭振幅會上升；反之離震源較遠處會振幅會折減，與前人研究 (Masserey et al.(2016))有相同趨勢結果，因此在現地開挖時的鑽孔布置是有正相關的影響。
3. 利用孔洞的大小以及波長的變化可以得到當波長與孔洞直徑大小接近，會產生較明顯的振幅增量，當波長明顯大於孔洞尺寸時，增量會不明顯。
4. 利用孔洞的不同排列順序及波長的變化，可以得知應力波穿過孔洞後，於孔洞正後方的能量會降低。波傳遞的方向會因繞射及散射而改變，使原先的應力波與散射波互相干涉，影響振幅大小的變化。未來若在衝擊錘開挖現場進行鑽孔施工步驟時，可以減少不必要的鑽孔增加效率。
5. 對試體進行鑽孔可以使損傷及破壞更快產生，增加岩石開挖效率。損傷的原因除了擊打所造成的破壞，還有因為孔洞使周遭振幅上升使其發生破壞，從速度的週期變化中可以看出何時受到破壞。孔洞試體與完整試體在 FFT 轉換的主頻以及振幅都會有所改變，在有孔試體的副頻會有較顯著的振幅，尤其是破壞的球體，因破壞後球體震動頻率與原先不同。

5.2 研究後續建議

1. 若需要完成物理試驗的結果，需要提高儀器的測量頻率，岩石的波速相對於試體相比過大，傳遞時間僅需 0.0001 秒，儀器每秒鐘的測量頻率為 1000Hz 僅能每 0.001 秒得到一筆數據，因此需要提高此精度。
2. 若擁有充足時間，需利用真實衝擊錘的擊打頻率進行數值模擬試驗。真實衝擊錘的擊打頻率約在 10Hz 至 20Hz，本研究數值模擬的擊打頻率為 500Hz 至 50000Hz。若使用真實衝擊錘頻率進行模擬，以現在的電腦計算時間需要達到 4 個月或更久才能達到足夠的波數進行分析。
3. 物理試驗試體為 300 毫米立方體，在擊打時會受到地板反射影響，需要消除反射所造成的影響，以模擬真實開挖為半無限域。
4. 未來可在現地進行試驗，觀測孔洞周圍的破壞行為與數值模擬的結果趨勢是否相同。



參考文獻



1. Bornitz, G. (1931). Über die Ausbreitung der von Grozklolbenmaschinen erzeugten Bodenschwingungen in die Tiefeo Springer-Verlag.
2. Eissa, E. A., & Kazi, A. (1988). Relation between static and dynamic Young's moduli of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining & Geomechanics Abstracts*, 25(6).
3. Gu, X., Liang, X., Shan, Y., Huang, X., & Tessari, A. (2020). Discrete element modeling of shear wave propagation using bender elements in confined granular materials of different grain sizes. *Computers and Geotechnics*, 125, 103672.
4. Lu, J. F., Shi, M. Q., & Feng, Q. S. (2020). Scattering of elastic waves by a circular hole in the unsaturated soil. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 137, 106295.
5. Masserey, B., & Fromme, P. (2017). Analysis of high frequency guided wave scattering at a fastener hole with a view to fatigue crack detection. *Ultrasonics*, 76, 78-86.
6. Ni, S. H., Kuo, H. H., Ju, S. H., & Guo, J. L. (2017). In-Situ measurement of the vibration decay characteristics of alluvial soil deposits. *Journal of GeoEngineering*, 12(3), 109-118.
7. Ocak, I., & Bilgin, N. (2010). Comparative studies on the performance of a roadheader, impact hammer and drilling and blasting method in the excavation of metro station tunnels in Istanbul. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(2), 181-187.
8. Wang, S. F., Sun, L. C., Yu, T. A. N. G., Yue, J. I. N. G., LI, X. B., & Yao, J. R. (2022). Field application of non-blasting mechanized mining using high-frequency impact hammer in deep hard rock mine. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 32(9), 3051-3064.
9. Zhang, X., Zhang, Q., Liu, Q., & Xiao, R. (2022). A Numerical Study of Wave Propagation and Cracking Processes in Rock-Like Material under Seismic Loading Based on the

Bonded-Particle Model Approach. *Engineering*.

10. Zhang, Z. X. (2016). *Rock fracture and blasting: theory and applications*. Butterworth-Heinemann.
11. 王泰典. (2020). 翡翠原水管工程隧道開挖可行工法評估暨技術諮詢. 國立臺灣大學. 台北
12. 陳正勳. (2011). 岩石隧道受震行為及襯砌破壞機制之研究. 國立臺灣大學, 台北.
13. 黃冠霖. (2022). 岩石挖掘數值模擬與室內實驗評估. 國立臺灣大學, 台北.



附錄一 問題與答覆

提問人 Questioner	問題 Comments of Questioner	答覆 Answer
許珮筠 博士	在論文中有使用振動及震動一詞，請問哪一個字較符合研究中的行為？	震動一詞較適用於地震所引起的動作，振動一詞較適用於往復運動等單擺運動，研究中模擬的行為較適用於振動一詞。
許珮筠 博士	論文中並未提到 PFC3D 微觀參數？	謝謝提醒，已經補上於表 3.5
許珮筠 博士	為何文章中 4.1 小節孔洞二增量最小？	原先比較增量方式為完整試體與有孔試體振幅相減除上完整試體，但會因為孔洞大小而影響到點位有遠近問題，使得振幅大小有所差異。因此更改為完整試體與有孔試體進行相除，直接觀測該點位的振幅放大倍率。
許珮筠 博士	文獻不完整	謝謝提醒，已經補上
簡志峻 老師	監測點是軟體中的 measure ball 還是單顆球？	利用單顆球體作為監測，measure ball 會是多顆球體的平均，會影響到振幅的變化數值。
簡志峻 老師	孔位建議編號	了解，已更改在圖上說明。
簡志峻 老師	振幅衰減的表達需要講清楚	了解，已更改為放大倍率，較清楚鑽孔的影響。
陳韋志 老師	論文實質上的貢獻為何？	本研究的貢獻在於數值模

		 擬工具的使用，在數值模擬以及理論方面相互映證，接續搭配鑽孔行為探討應力波傳第時的變化，孔洞的大小與孔洞的排列有個初步的建議給予，未來可嘗試在現地開挖面試驗。
陳韋志 老師	實驗結果不好，可能原因來自甚麼?數據是否有先濾波?	數據會在邊界地方產生較大振幅，可能來自於反射。數據皆有先進行濾波，加速度資料濾波後進行積分得到速度，接續FFT。
陳韋志 老師	球顆粒大小選擇?	為了符合模擬精度以及電腦運算時間，經過多次嘗試球顆粒 0.0018 m 是較符合的尺寸。
陳韋志 老師	孔洞大小的影響怎麼比較?	於4.1小節中，在相同波長下，孔洞越大時水平方向與垂直方向的振幅放大倍率皆較大，4.2小節中不同波長下，波長孔徑比越接近，放大倍率越明顯。
陳韋志 老師	多孔測試中，為何五號孔會衰減?	因為應力波受到孔洞一使得方向改變，孔洞五在孔洞一的正後方，應力波無法直接傳遞到孔洞五周圍，振動不明顯。

李宏輝 老師	軟體中 Timestep 是固定的嗎?還是會改變?	時間步對每個不同的試體都會改變，在研究中 100 萬顆球的模型會使用 timestep=5e-8，在反覆荷載則因為模型較小只需要使用 timestep=8e-7。
李宏輝 老師	實驗結果不好，與 2022 黃冠霖的研究結果有差別，原因為何?	可能原因來自點位設置的點不同，點位設置較近且靠近邊界使反射明顯。
李宏輝 老師	研究量測振動的方式是使用加速規，是不是可以考慮用黏貼的應變計來測量?	謝謝建議，經過嘗試，利用筋膜槍及鐵鎚敲擊試體，因振動能量過低對於應變計都無反應，必須直接在應變計進行敲擊才有變化，結果在附錄二。
李宏輝 老師	PPT 中 42 頁何謂 'Weak Zone'?	Weak Zone 代表應力波因為孔洞影響，使得方向改變後部分區域的振動行為不明顯，如應力波穿越孔洞一後，使後方的區域振動幅度降低，此為 Weak zone。

附錄二 應變計試驗結果

感謝國防理工大學李宏輝教授借我示波器及放大器，以方便進行試驗。

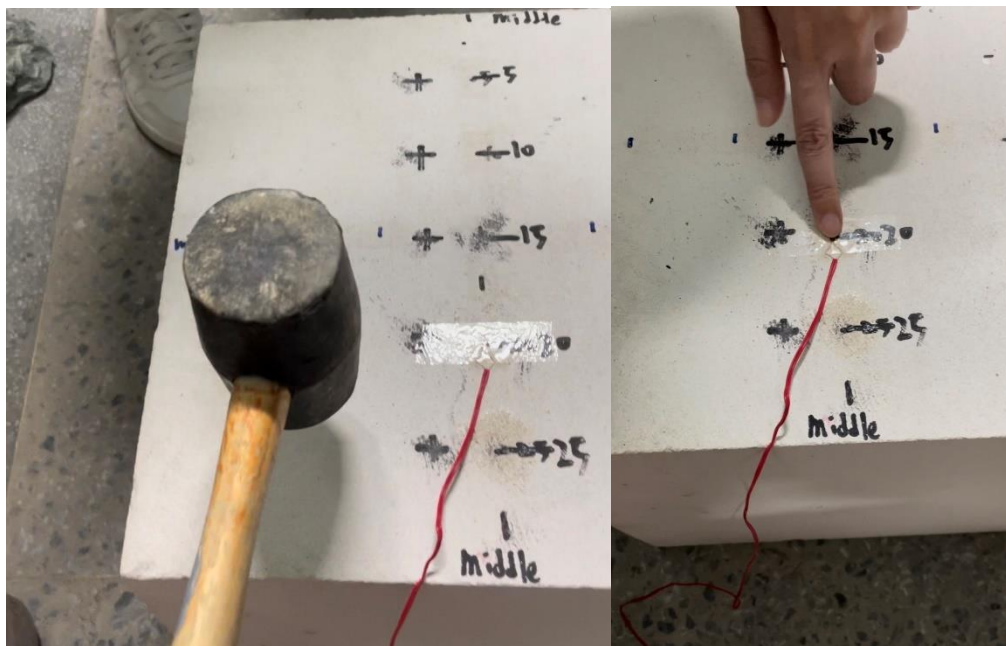


試驗儀器



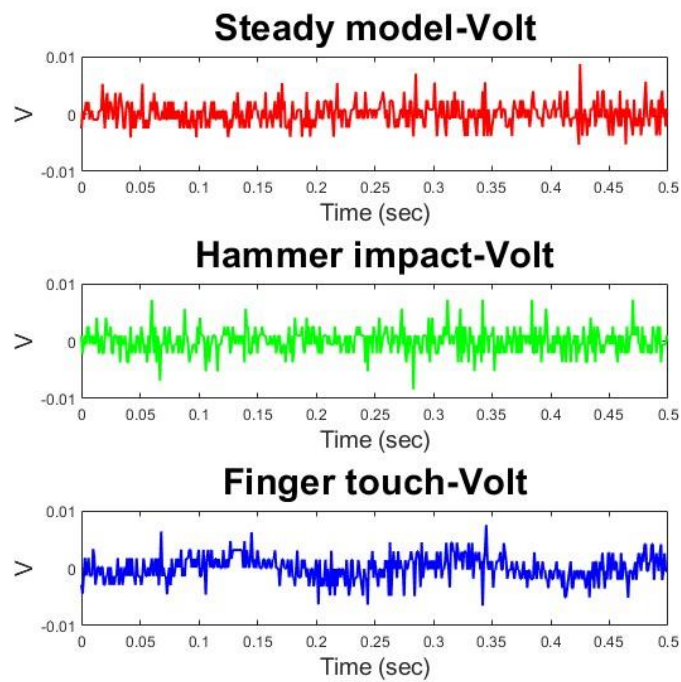
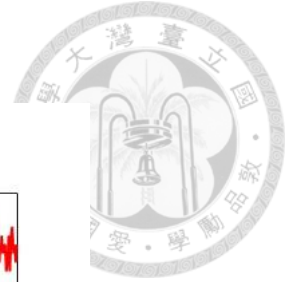
上方：廠牌 AGILENT 型號:DSO5054A 數位儲存示波器

下方廠牌 KYOWA 型號:CDV-700A 放大器

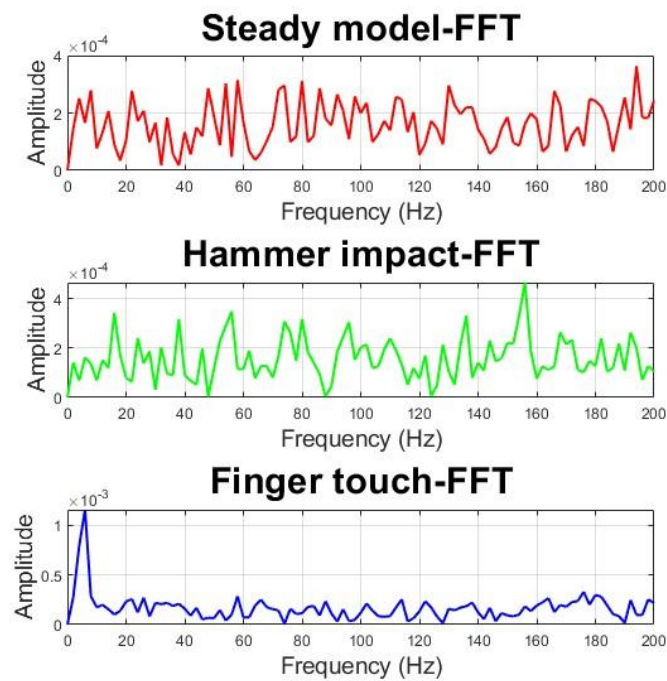


左圖錘擊示意圖右圖手指點按示意圖

試驗結果



應變計福特變化，上到下分別為穩態況下、槌擊狀況下及手指點按應變計



FFT 結果，上到下分別為穩態況下、槌擊狀況下及手指點按應變計