

# 附錄三

## 水下噪音模擬評估報告



# 海龍三號離岸風力發電計畫 第 1 次環境影響差異分析報告

委辦機關：光宇工程顧問股份有限公司

執行單位：國立臺灣大學工學院海洋技術研究中心

執行人：陳琪芳 石久寬 陳鵬奎



2020 年 4 月 16 日

## 一、簡介

此次打樁模擬分析 2500kJ 之樁槌能量，使用 4.4 米直徑以相同之環境參數進行環差分析，環境及樁體參數如下表 1。選取時域分別計算不同樁槌能量輸入及不同之樁體直徑，由 0 秒開始每 0.5 毫秒為單位計算至 0.3 秒，比較其聲壓在時間域上之差異，並分別計算不同輸入能量計算距離打樁 50 公尺處水深 5 米之 SEL 聲曝值，並結合 RAM 之海洋聲傳計算模組計算其衰減至距離打樁 750 米處之 SEL 聲曝值。

表 1、環境及樁體參數

	數值	單位
樁體半徑	2.2	m
樁壁厚度	80	mm
樁體長度	80	m
當地水深	56	m
計算範圍	60	m

表 2、有限元素參數設定

參數設定	數值	單位
楊氏係數	210	GPa
普松係數	0.3	
密度	7850	kg/m <sup>3</sup>
聲速	1980 至 2100	m/s
密度	2060 至 2190	kg/m <sup>3</sup>
底質等效 聲吸收係數(上)	0.25	dB/λ
底質等效 聲吸收係數(下)	0.48	dB/λ
壓縮波吸收係數	1.5	dB/λ
剪力波吸收係數	3	dB/λ
計算頻率	40 至 1403	Hz
最大網格尺寸	0.2 (λ/4)	m

## 二、 分析方法

由於風機打樁噪音量測，由於操作限制和安全考慮，無法於主樁打樁過程中從源頭測量範圍內所接收之聲壓位準，故使用有線元素模擬計算打樁所產生噪聲，並利用 RAM (Range dependent Acoustic Model) 聲學傳播模式模擬風機之打樁噪音之傳播情形，影響範圍跟海床底質有關，次要為地形因素。由模擬結果預測水下噪音可能影響中華白海豚之範圍。

### I. 有限元素分析

本報告採用有限元素法進行模擬計算，其整體模型架構可參照圖 1，模型主要組成樁、海水與底質層。本研究使用聲固耦合介面(Structure-Acoustic)，模型為線性軸對稱，自由液面則給予(pressure release)之邊界條件，並將邊界負載施加於樁上方，其衝擊式打樁作用力為一瞬間暫態衝擊力，並使用指數型函數衰減近似其真實打樁情形。

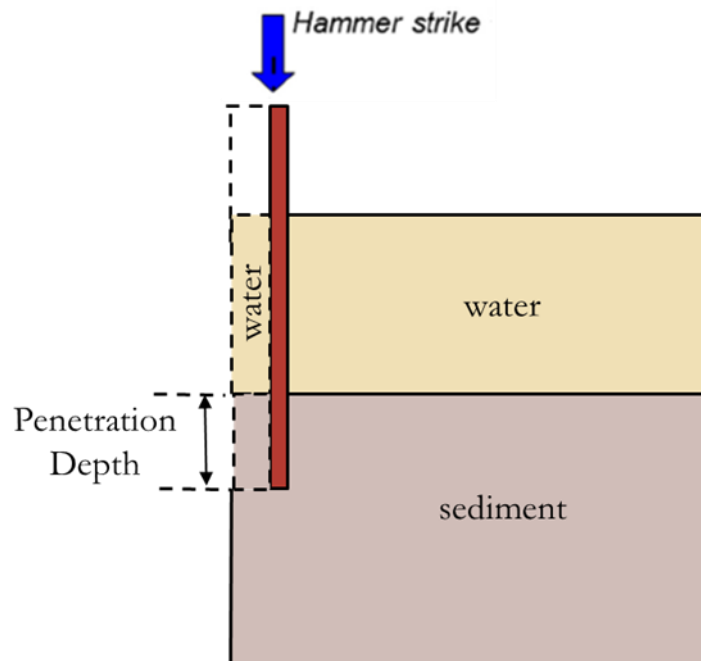


圖 1 打樁噪音模擬架構圖

材料參數中底質參數參考科技部表層沉積物資料庫，水文資料庫採用由美國海軍實驗室 (Naval Research Laboratory, NRL) 發展之全球混合層深度模式 (Generalized Digital Environment Model, GDEM) 溫度、深度及鹽度之輸出並計算出海水聲速，其底質與海水層之相關環境輸入可參考圖 2 至 4，邊界條件設置中由於底質設置成計算聲場，然而施工真實情形下樁入泥時會受到來自底質的摩擦力與阻力，故需考慮樁打入泥時樁與底質間摩擦力所造成之能量損失，該能量損失是利用於入泥段樁加入壓縮波與剪力波之等效吸收係數。

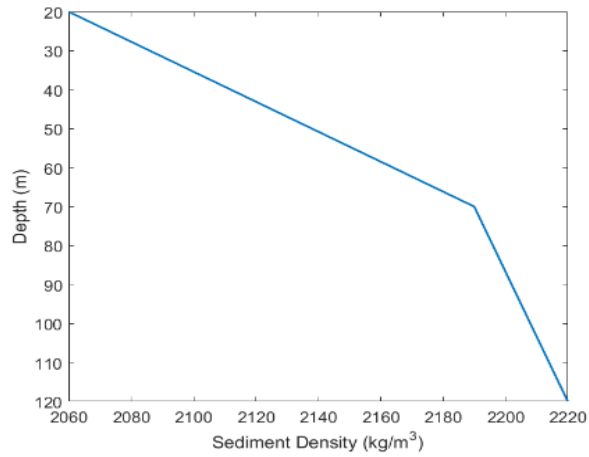


圖 2 底質密度深度曲線圖

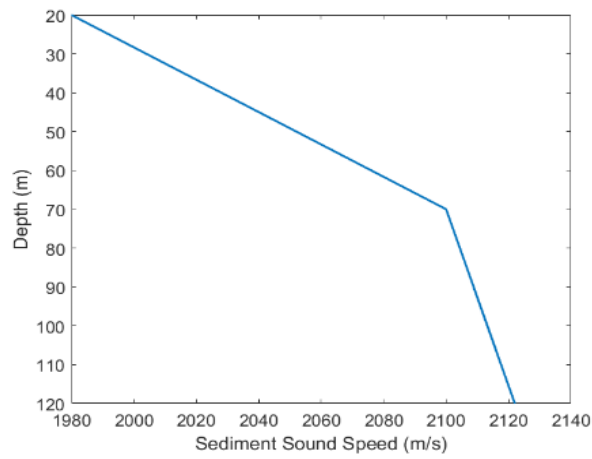


圖 3 底質聲速深度曲線圖

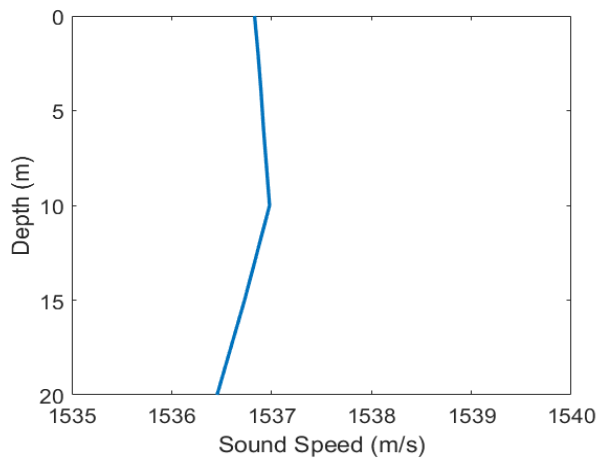


圖 4 海水層聲速深度曲線圖

而在進行聲學有限元素模擬聲波特性時，為了能更精準表現該聲波之特性，使用 1/4 倍最小波長之網格，因此最大網格尺寸設定為 0.2 公尺主要採用四邊形網格。

## II. RAM 聲學傳播模式

(Range-dependant Acoustic Model)

RAM 聲學傳播模組為海洋環境之水下聲波能量傳遞計算使用之波動方程式，常採用圓柱座標系統( $r$  距離,  $\theta$  角度,  $z$  深度)，並假設海洋環境為軸對稱，因此聲場不隨著  $\theta$  而變化，故可簡化為二維方程式。在海洋環境中，若海底地形或聲速隨著距聲源之水平距離( $r$ )而變化時，也就是複雜水文環境時，是屬於 Range Dependent 之海洋環境，拋物線方程近似法(PE Approximation)，即適用這一類之計算程式。

基於拋物線方程之傳播模型(Range-dependant Acoustic Model, RAM)被用於導出音傳損耗(Transmission Loss)。風機打樁之能量強度集中在 80 Hz ~400 Hz，模擬使用 80 Hz ~400 Hz 做為模擬頻段參數，計算各單頻距離風機 750 公尺之音傳損耗(Transmission Loss)，並與已建立之聲源於頻域上進行傅立葉寬頻合成(Fourier Synthesis)以得到時序列聲場，如下式

$$P(r, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-W_{max}}^{W_{max}} S(w)g(r, z, w)e^{-iwt} d_w$$

$S(w)$  為距離聲源 1 米處之複數聲壓頻譜和  $g(r, z, w)$  為複數 TL。

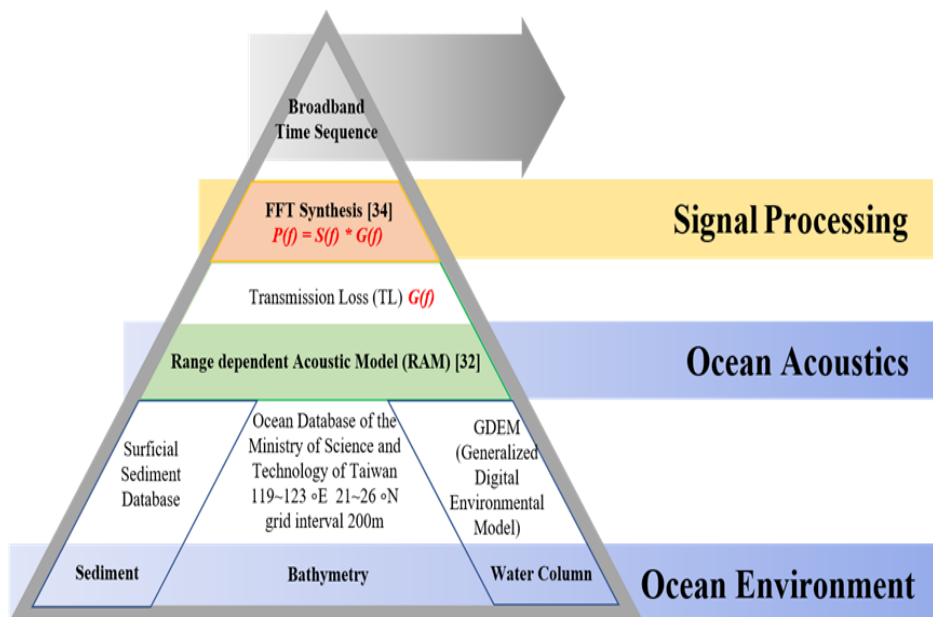


圖 5 海水層聲速深度曲線圖

在進行數值模擬時，所採用之環境資料庫，可分為水文、地形及底質三大項。水文資料庫採用由美國海軍實驗室 (Naval Research Laboratory, NRL) 發展之計算全球混合層深度模式 (Generalized Digital Environment Model, GDEM) 溫度及鹽度之輸出結果。

### 三、打樁噪音模擬時域計算

以 2500KJ 之樁槌能量進行時域計算，使用 4.4 米直徑之樁體進行環差分析，觀察其聲壓在近場隨時間之變化，其輸入條件如表 1 及表 2、入泥深度 60 公尺，由 0 秒開始每 0.5 毫秒為單位計算至 0.3 秒，選取樁徑 4.4 米及最大樁槌能量 2500kJ，圖 10 為基樁受到樁槌敲擊後之近場聲壓分布，於 0.01 秒開始輻射聲壓。

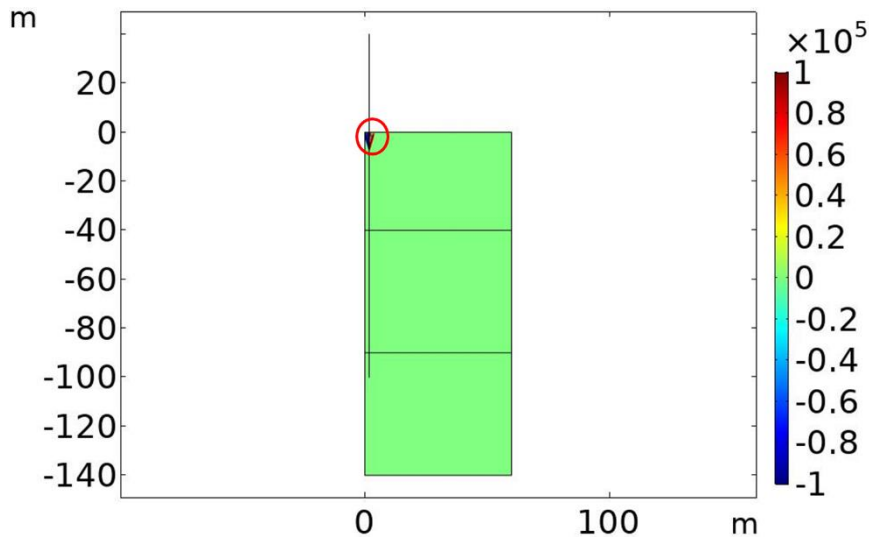


圖 6 0.01 秒之聲壓分布情形

由於樁之應力波較快達到水面與樁之交界面，因此由水面與樁之交界面聲場最先輻射出聲壓，觀察 0.02 秒之聲壓變化可看見水層中之波前。

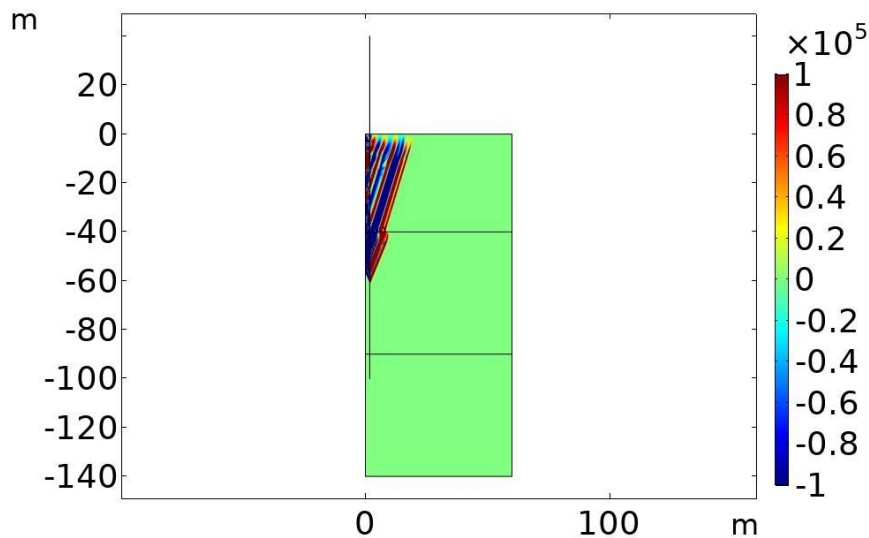


圖 7 0.02 秒之聲壓分布情形

由 0.04 秒及 0.05 秒可看出由樁底輻射之聲壓折射入水層中，使得水層中可以看到有兩種角度之波前，隨著時間越來越高情況下第一個波前向外傳遞出去且能量逐漸降低。

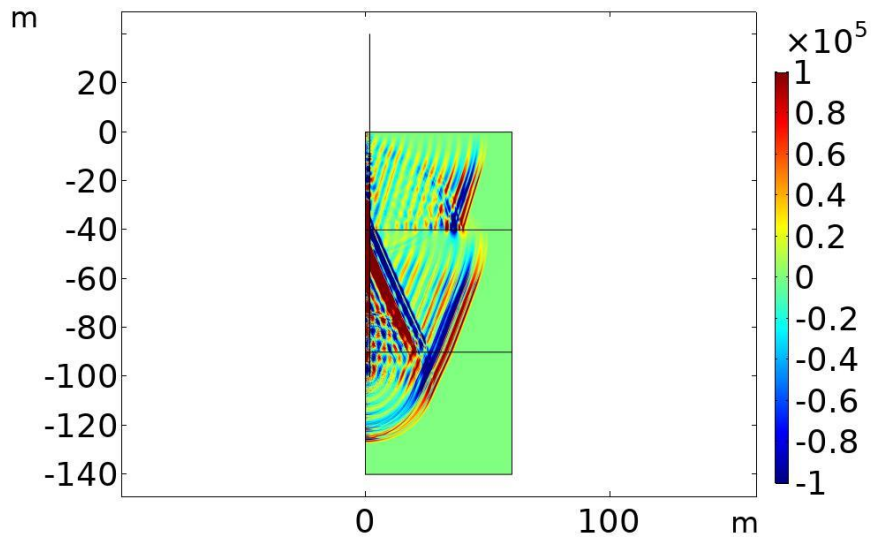


圖 8 0.04 秒之聲壓分布情形

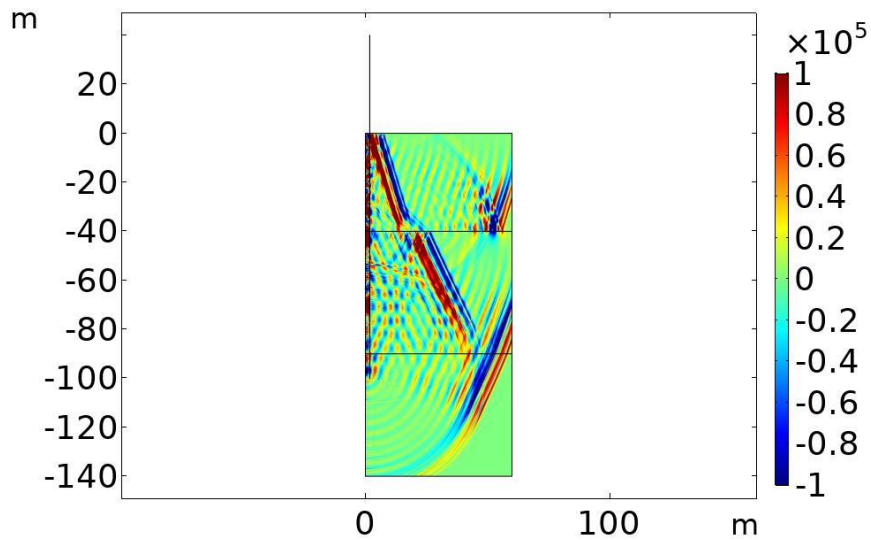


圖 9 0.05 秒之聲壓分布情形

選取距離樁體 1 公尺、水深為 5 公尺之聲壓結果，繪製 2500KJ 輸入能量之聲壓時序列圖，由於時域計算中只考慮至 0.3 秒，因此不足一秒部分則將能量視為 0 補足至一秒。



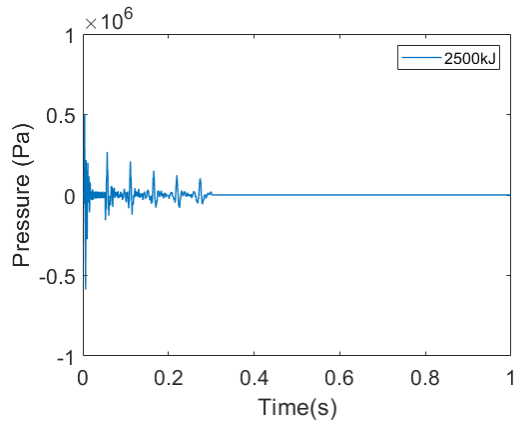


圖 10 4.4 米樁輸入能量 2500KJ 之聲壓時序列圖

計算打樁噪身結果選取時域模擬下距離打樁 1 公尺水深 5 公尺處之聲壓。從聲壓時序列圖之比較可以明顯看出樁槌能量為影響造打樁噪聲之種因素，樁槌輸入能量越強其聲壓之峰值也越大，使用同意之樁所產生之圖形亦相近，聲壓時序列圖中並無明顯差異，推測其對噪聲能量之影響不大。

由上述聲壓時序列結果進行計算得出聲曝值 SEL @ 1m，利用聲曝值將打樁噪聲之能量量化表示，能輕易看出不同樁槌能量及樁槌能量造成之差異，如下表呈現。能量越大直徑越大所產生之噪聲越大，相較於能量樁體直徑造成之影響並不顯著，樁槌能量仍是影響皆收到之聲壓能量之主因，樁徑之改變對於聲壓能量影響不甚明顯。

樁槌能量	2500KJ
樁體直徑	4.4 米
	210

表 3 接收水深 5 米距離樁 1 米 聲曝值 SEL (dB re 1  $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ )

#### 四、 RAM 聲學傳播模式計算 750 米處之聲壓結果

以 4.4 米樁徑，樁槌能量為 2500KJ 之聲源時間序列，對各單頻音傳損耗 (Transmission Loss, TL) 計算，於頻域上進行傅立葉寬頻合成。模擬參考點位為 P1、P2 及 P3 位置如下圖 11 所示。

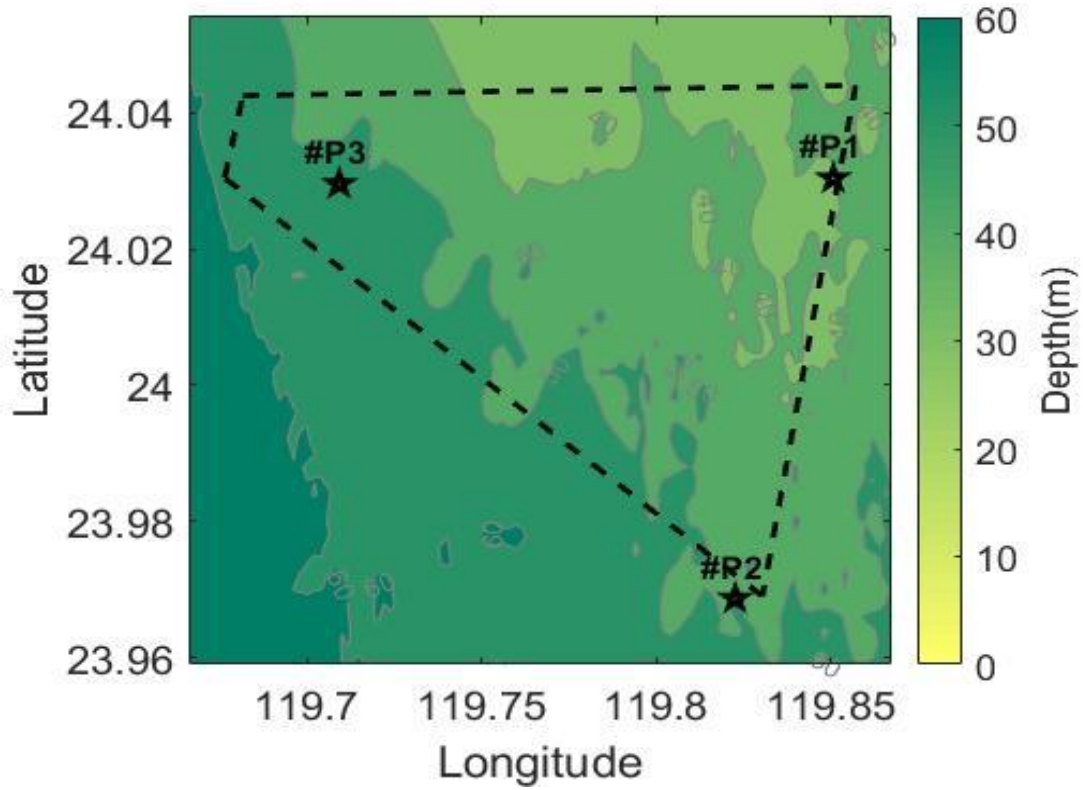


圖 13 水下噪音模擬參考點位置示意圖

表 4 打樁噪音模擬參數設定

底質	大氣海洋局表層沉積物資料庫
地形	科技部海科中心之地形資料庫
水文	全球混合層深度模式 (GDEM)
月份	6 月
接收深度	5 m
聲源深度	5 m
聲源強度	依據 COMSOL Multiphysics 有限元素模型分析 得出結果
頻率	80 Hz~400 Hz
計算距離	10km
格點	水平計算網格 20 m 輸出水平網格 100 m 垂直計算網格 1 m 輸出垂直網格 1 m
計算角度	8 方位角

表 5 海龍三號模擬點位資訊

點位	經度	緯度	水深(公尺)
P1	119° 51.05'	24° 1.821'	56

圖 12-14，分別為 P1、P2 及 P3 點位各方向之噪音位準距離 750 公尺處之聲壓值，模擬點位之結果列於表 8。

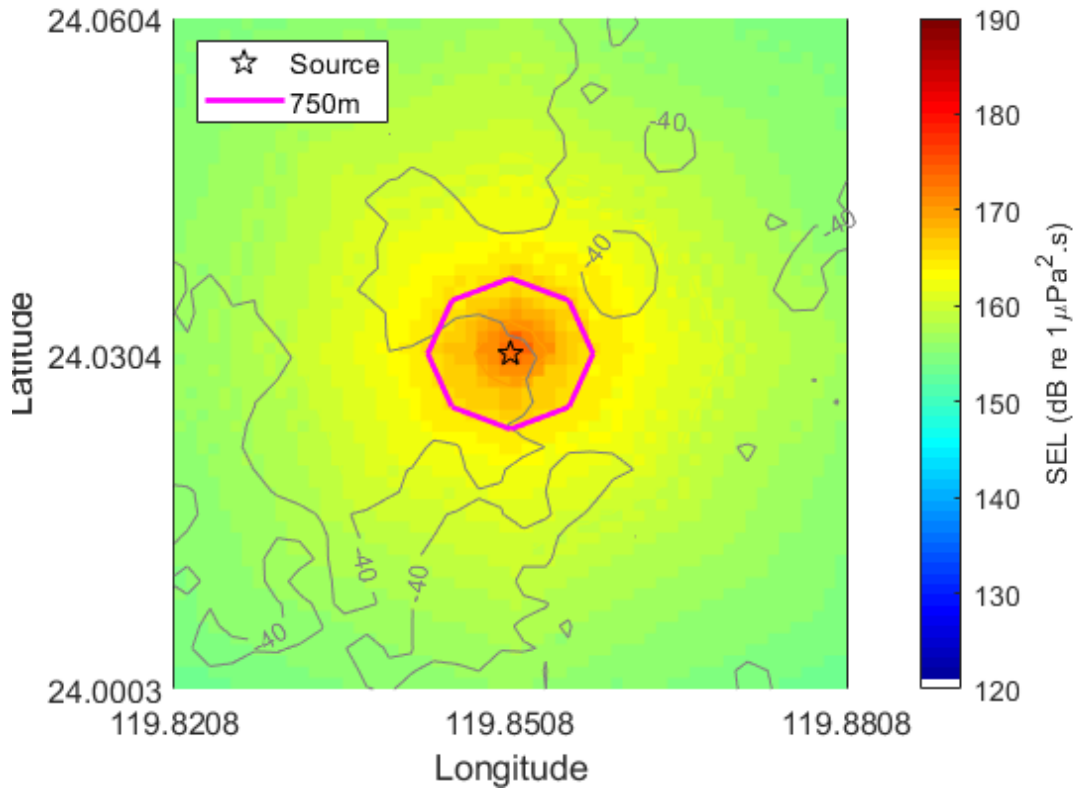


圖 12 P1 4.4 米樁能量 2500kJ，距離 750 米處之 SEL 分布

表 6 海龍三號模擬點位資訊

點位	經度	緯度	水深(公尺)
P2	119° 49.35'	23° 58.12'	44.2

圖 13 為 P2 點位各方向之噪音位準距離 750 公尺處之聲壓值，模擬點位之結果列於表 8。

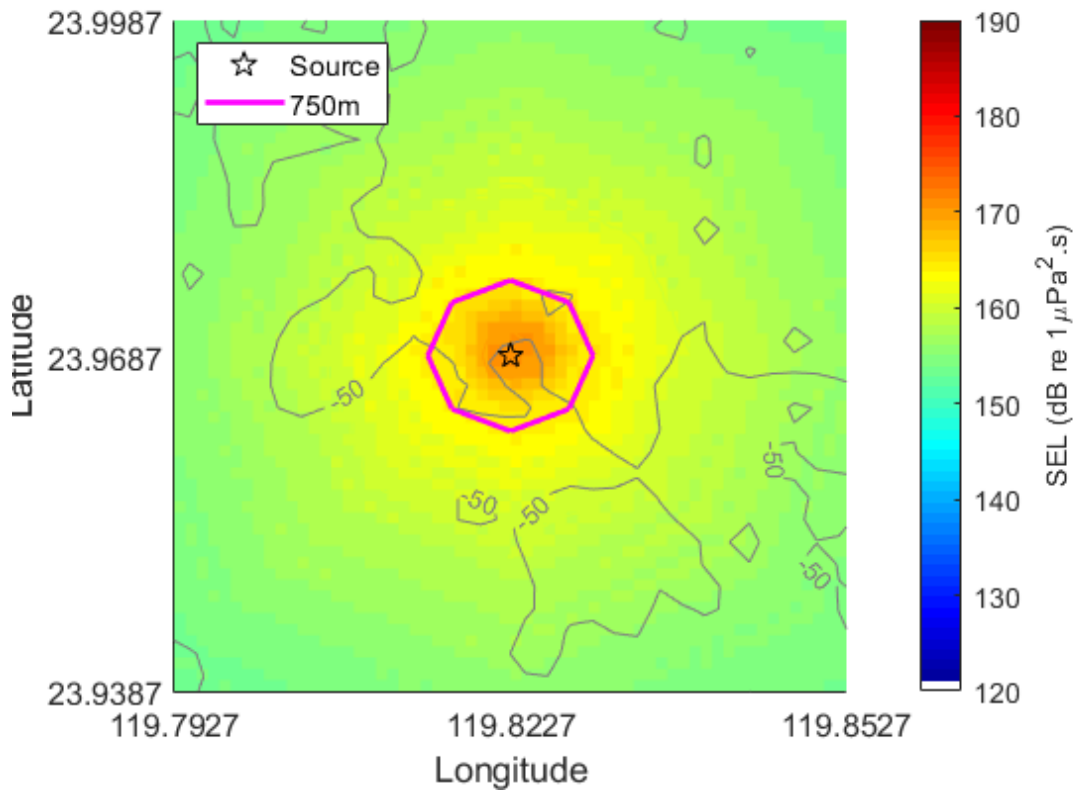


圖 13 P2 4.4 米樁能量 2500kJ，距離 750 米處之 SEL 分布

表 7 海龍三號模擬點位資訊

點位	經度	緯度	水深(公尺)
P3	119° 42.59'	24° 1.8'	48.2

圖 14 為 P3 點位各方向之噪音位準距離 750 公尺處之聲壓值，模擬點位之結果列於表 8。

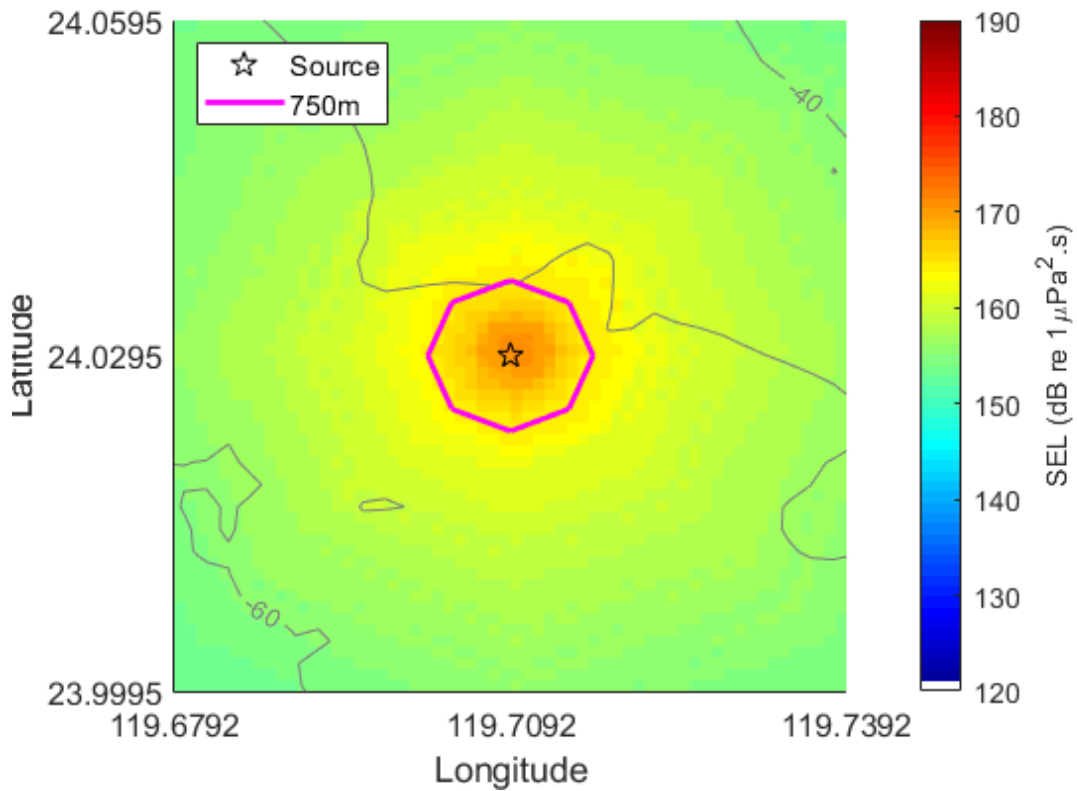


圖 14 P3 4.4 米樁能量 2500kJ，距離 750 米處之 SEL 分布

表 8 不同點為算例於 750m 處接收水深 5 米之八方位之 SEL 聲曝值  
(單位 dB re  $1\mu Pa^2s$ )

點位	P1	P2	P3
方位角	4.4m 2500kJ	4.4m 2500kJ	4.4m 2500kJ
0°	166	167	166
45°	166	166	166
90°	166	167	166
135°	166	166	166
180°	166	166	166
225°	166	166	166
270°	166	166	166
315°	166	166	166

## 五、 RAM 聲學傳播模式計算減噪後 750 米處之聲壓結果

再以同樣能量的聲源經減噪措施(減 10dB)距離 750 公尺處之聲壓分布繪製於圖 15 至圖 17，並將各模擬點位之結果列於表 9 由模擬結果顯示，經減噪措施後各點聲源距離 750 公尺處之聲壓值介於 156-157 dB。

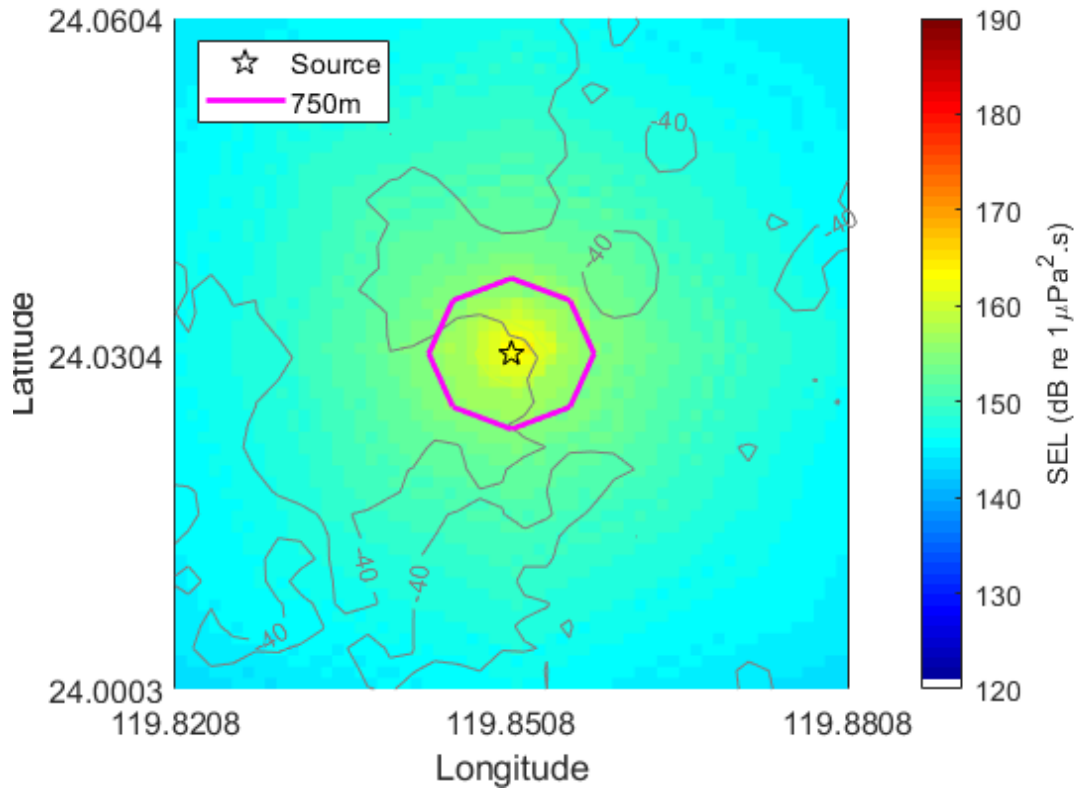


圖 15 P1 4.4 米樁能量 2500kJ，距離 750 米處之 SEL 分布(減噪後)



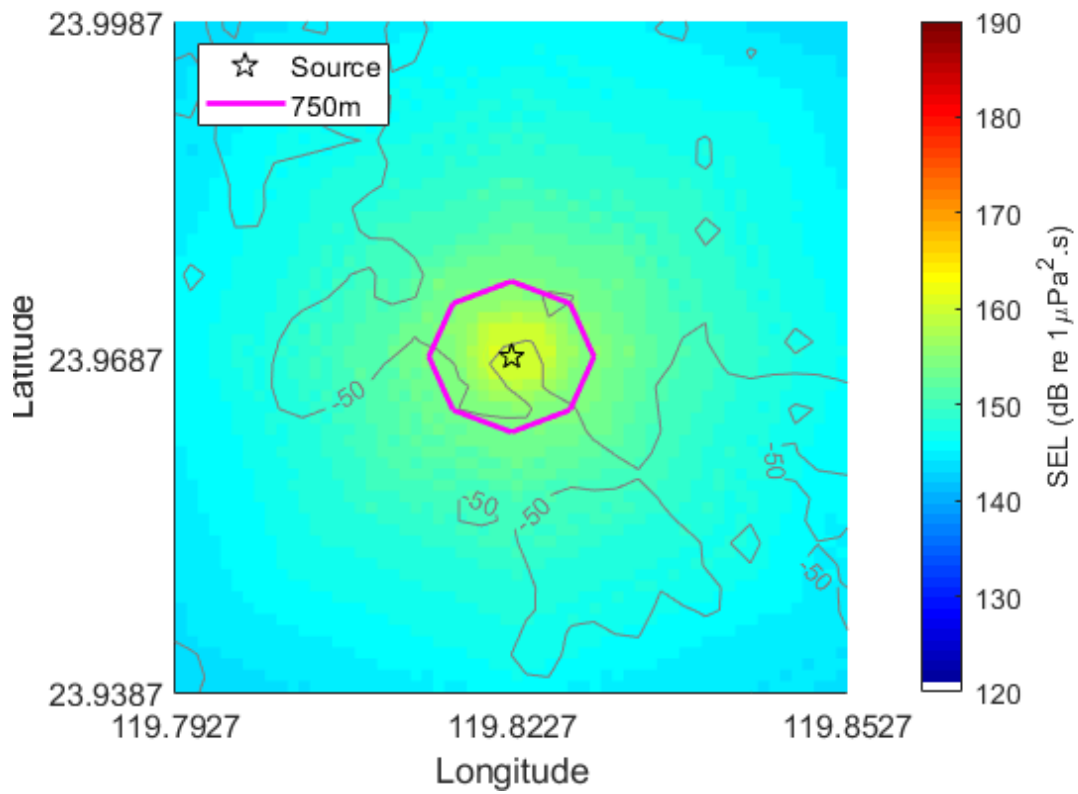


圖 16 P2 4.4 米樁能量 2500kJ，距離 750 米處之 SEL 分布(減噪後)

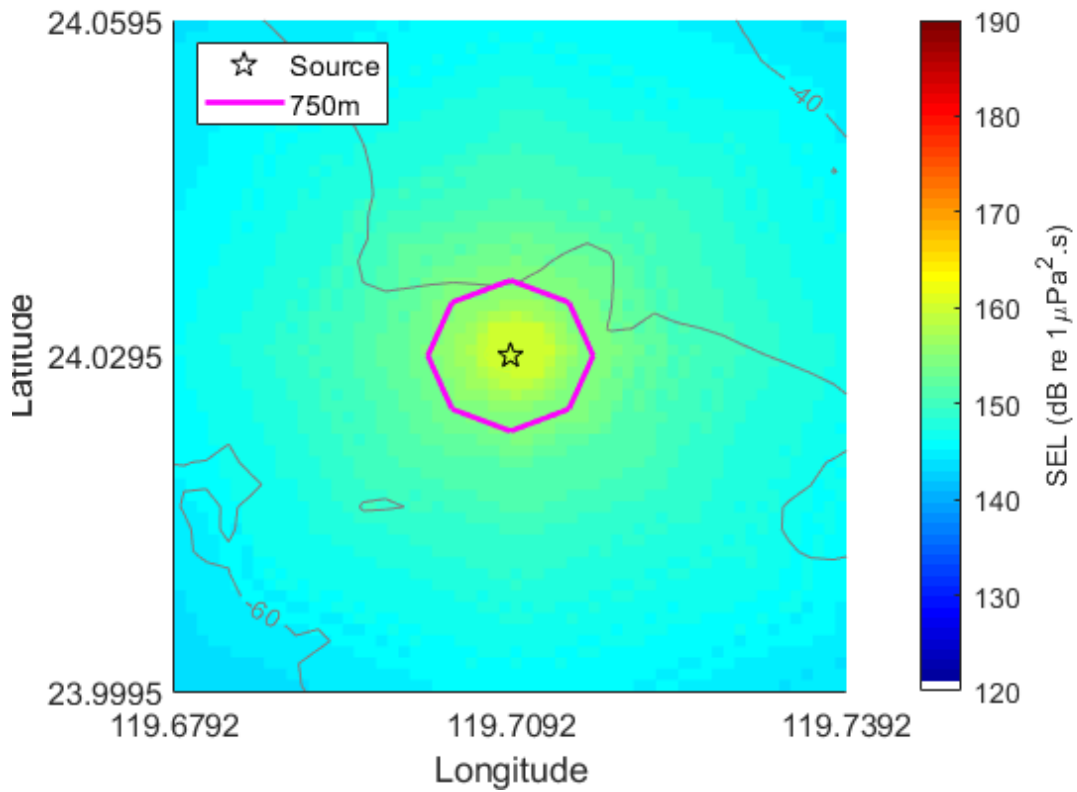


圖 17 P3 4.4 米樁能量 2500kJ，距離 750 米處之 SEL 分布(減噪後)

表 9 不同點位算例經減噪後於 750m 處接收水深 5 米之八方位之 SEL 聲  
曝值  
(單位 dB re  $1\mu Pa^2s$ )

點位	P1	P2	P3
方位角	4.4m 2500kJ	4.4m 2500kJ	4.4m 2500kJ
0°	156	157	156
45°	156	156	156
90°	156	157	156
135°	156	156	156
180°	156	156	156
225°	156	156	156
270°	156	156	156
315°	156	156	156

## 六、結論

由時域有限元素法計算 2500kJ 樁槌輸入條件下，其 750 米處聲曝值結果如表 10 所示，P2 點位所得之聲曝值較 P1 點位小，約有 1dB 之差值，P3 點位得到之聲曝值結果則和 P2 點位相近，推測因素為底質相近。由於 750 米處聲曝值已超出法規所訂定於 750 公尺處應小於 160dB 的規範閾值，故將採取相關減噪措施來降低聲壓能量以符合小於 160dB 之規範。

目前較被廣泛運用之氣泡幕減噪工法(bubble curtain)，應用於打樁噪音之減噪效果約為 10dB-15dB，對應到此次打樁模擬結果預期採取減噪措施後，保守估計能有效地將 750 公尺處之聲曝值控制在 156dB-157dB 之間，符合小於 160dB 之承諾，如表 11 所示。

表 10 P1、P2 及 P3 點位不同算例對應 750 米處之 SEL 聲曝值  
(單位 dB re  $1\mu Pa^2s$ )

點位	P1	P2	P3
樁徑	4.4m	4.4m	4.4m
能量			
2500KJ	167	166	166

表 11 P1、P2 及 P3 點位不同算例(經減噪)對應 750 米處之 SEL 聲曝值  
(單位 dB re  $1\mu Pa^2s$ )

點位	P1	P2	P3
樁徑	4.4m	4.4m	4.4m
能量			
2500KJ	157	156	156