

水中せん孔発破に伴う水中圧力波について

曾我部隆久*・ 荘 司 喜 博**・ 大 内 正 美***

1. はじめに

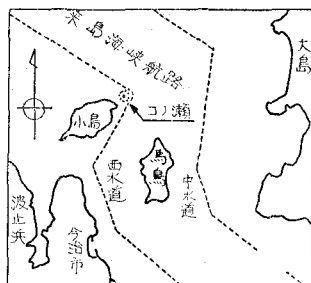


図-1 来島海峡

なかでも西水道北口に位置する岩礁“コノ瀬”は大きな障害となっている。このため運輸省第三港湾建設局はコノ瀬を水深 -19 米まで浚渫し撤去する航路整備計画をたて、工事実施のための調査研究として、電磁誘導起爆方式による水中せん孔発破工法の検討をすすめてきた。この、来島海峡海域は漁業資源の宝庫であり、また周辺には海水浴場等のレクリエーション施設が点存している。このため、水中発破工事の実施にあたっては、水中発破圧力が漁業に与える影響（魚体の損傷、魚群の威嚇など）あるいは遊泳者に与える影響が大きな問題となる。そのため数値シミュレーションによる水中発破圧力の予測などによる検討を行ってきたが、今回は現地での水中発破試験工事を実施して、水中圧力の実測を行い、数値シミュレーション結果との対比を含めて、水中発破圧力波の特性を把握した。そして、供試魚を用いた魚体の損傷調査を行い、数値シミュレーションによる影響予測の有効性をたしかめた。

2. 現地地形と発破工法

コノ瀬は図-2に示すように、D.L. -19 m 以浅の範囲が南北約 150 m、東西約 40 m の馬の背状となった岩礁である。付辺の潮流は大潮時には最大 10 ノットに達するといわれ、複雑な海底地形のため渦流が生じる、そのためコノ瀬の浚渫撤去により、航路水深を確保するとともに渦流を除こうとするものである。図-3に示す旧コノ瀬灯台位置の岩盤ボーリング結果によれば岩質は花崗閃緑岩からなり、所々にアップライト質岩脈がみられる。表層の 1 m 強は風化が進んでいる。

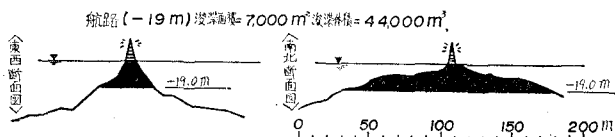


図-2 コノ瀬浚渫工事内容

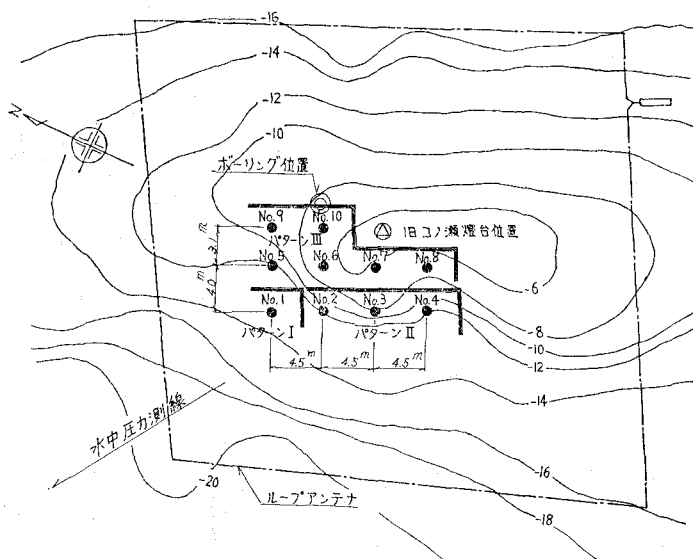


図-3 コノ瀬の海底地形・水中発破パターン

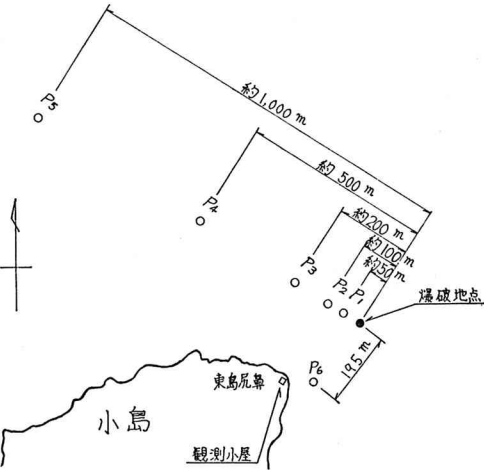
このような岩盤浚渫の施工法として、発破工法について、昭和 49 年度から種々の検討が行なわれてきた。その結果このような、急潮流の現地においては、無線起爆

* 正会員 運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所長
 ** 正会員 同 上 神戸調査設計事務所次長
 *** 同 上 松山港工事事務所来島工場長

の 1 つである電磁誘導起爆方式による水中せん孔発破工法の採用が妥当とされ、そのための予備実験を含む検討をへて、最終的に本工事規模の現地実験を行うに至った。こうして昭和 53 年 11 月、世界で初めて電磁誘導起爆法による水中発破が実施された。

3. 発破工事の内容と水中圧力の測定

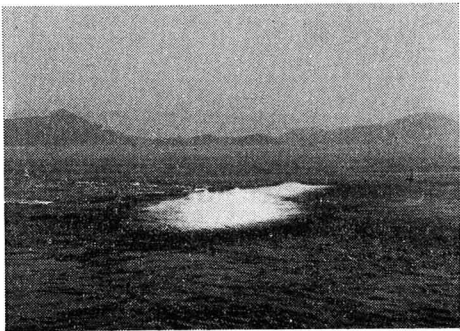
発破は昭和 53 年 11 月から 12 月の間に 3 回 (薬量 100 kg, 350 kg, 1 080 kg) 行なわれた。使用火薬は GX-



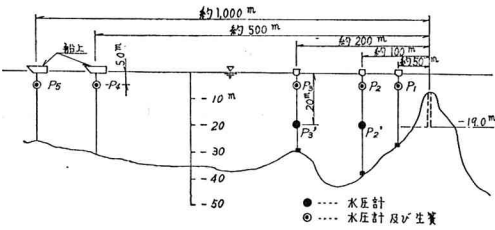
図—4 測点の平面配置

1 号ダイナマイトであり、さつ孔は口径 210 mm で、ウェルマンさつ孔機 2 台をミニセップに搭載して行った。各回のさつ孔配置は 図—3 に示すとおりである。水中圧力の計測は水圧計 (Kulite HKMS-375 型) に増幅器 (MELKA STK-61C) を接続し、耐水圧容器に組みこんだものを用いた。測点および水圧計の配置は低潮流であり、かつ航路からはずれた小島の北側に配した (図—4、図—5 参照)。発破は 3 回とも完爆し成功した。

しかし水中圧力測定結果は、測得率が 40% にとどまっ



写真—1 発破瞬間の海面状況 (第 3 回発破, 薬量 1 080 kg)



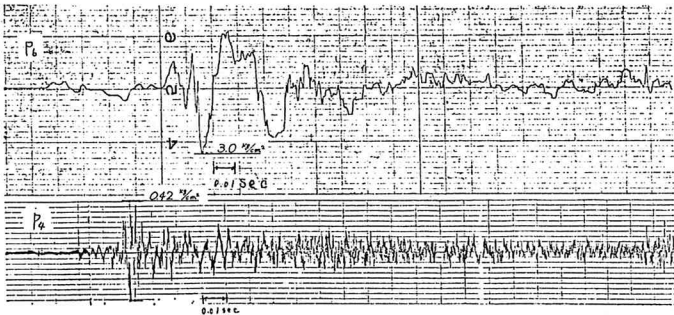
測点	水深 (m)	配置深さ (m)	備 考
P1	27	海面より 5	生 簀
P2	45	海面より 5	生 簀
P3	45	海面より 20	生 簀
P4	47	海面より 5	生 簀
P5	47	海面より 20	生 簀
P6	38	海面より 5	生 簀
P7	38	海面より 5	生 簀
P8	20	海面より 19	生 簀

註) P6 は海底に設置した生簀に取り付けた (海底面より 1m)。

図—5 水圧計及び生簀等配置図

表—1 水中圧力波の圧力最高値

	爆心と測定点間距離 (m)			水中圧力波の圧力最高値 (kg/m ²)		
	第 1 回	第 2 回	第 3 回	第 1 回	第 2 回	第 3 回
P3	191	220	212	—	1.1	—
P3'	191	220	212	—	1.1	—
P4	500	500	500	0.30	0.39	0.42
P5	1 000	1 000	1 000	0.12	0.29	0.77
P6	—	—	195	—	—	3.00
発破時潮流	南 流 0.8 kt	北 流 4.0 kt	北 流 3.0 kt	(潮流は潮表の値をとった.)		

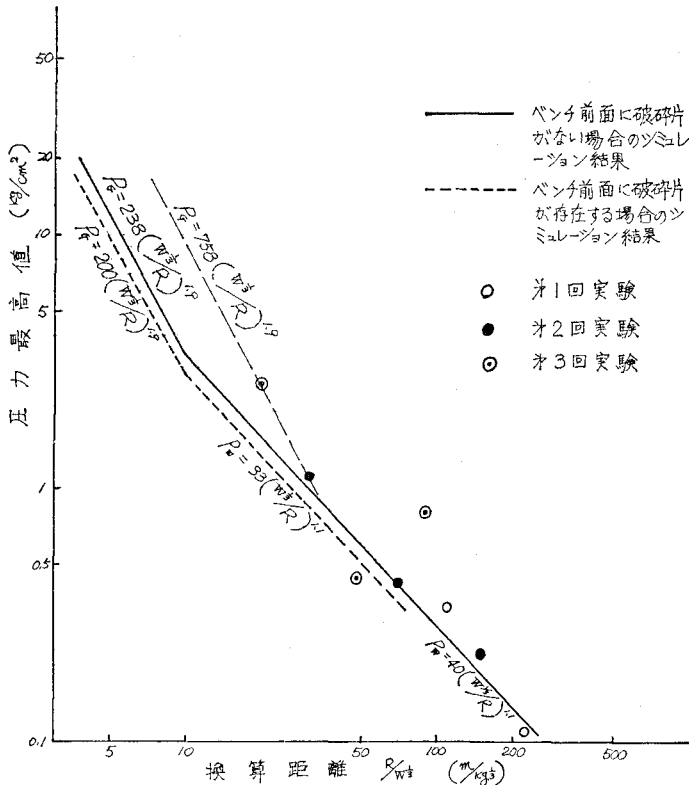


図—6 実測した水中圧力波形 (第 3 回, P6, P4)

た (表—1)。このように、爆源近くで測定ができなかったのは、同付辺の潮流が予想以上に大きく (最大約 7 ノット)、また 1.5 ノット以下の憩流時間が短かったために、ケーブルの切断が生じたことなどによる。測定結果の代表として第 3 回のときの P6, P4 の実測波形を図—6 に示す。

4. 水中発破予測シミュレーション

数値シミュレーションに用いた、プログラムは京都大学・佐々宏一らが製作した DAY-2 コードである。計算方法はある時間 ($t=t_0$) に材料内に存在している応力場をラグランジェ座標系で示された運動方程式を適用し、これを差分で解き $t=t_0$ 時間に対応するモデル内各点の



図一10 水中圧力波の圧力最高値と換算距離(実測値とシミュレーション結果の比較)

近くの $R=50\sim 100\text{m}$ では圧力最高波が岩盤-水衝撃波の岩盤中での伝播距離に関係するため、岩盤中の減衰度合(距離の約2乗に反比例)に近いことを示す。 $R>100\text{m}$ の範囲については、コノ瀬のような急傾斜の地形では、爆源から相当はなれたところまで岩盤を伝播して水中に出て到達してきた圧力波と、爆源に近いところで岩盤から水中に透過して、水中を伝播してきた圧力波では後者の方が減衰が小さいために水中における球面波としての減衰関係(距離の1.13乗に反比例)に近い減衰傾向を示す。また破砕岩の存在の効果は最高圧力値についてみると10%程度減少させるという結果が出た。

5. 実測水中圧力波とシミュレーション結果との対比

爆源近傍地点での実測値が得られなかったのでパルスの傾向の強い波形の確認はできなかった。ここでは最も爆源に近い実測値のとれた第3回目の P_0 と同時の P_4 の波形記録をみてる。 P_0 は周期の長い波動がみられ、シミュレーションの図-8に示す $R=200\text{m}$ の波形に類似した岩盤-水衝撃波が卓越した波形を示している。 P_4 は爆源からの距離が大きく、微小な、周期の短い波動を示す。実測とシミュレーションの圧力最高値とを比較すると換算距離の大きい付近では比較的良好一致

しているといえる。換算距離の小さい範囲ではデータ数が少ないがあえて図中の2点を結ぶ直線の式を求めてみると $P_0 = 758(W^{1/3}/R)^{1.9}$ となりシミュレーション結果の減衰傾向と一致する。

6. 魚類に対する撮影予測と結果について

ここでは、おもに水中発破による魚体の損傷についての影響予測と結果について言及する。室内における供試魚および模型魚を用いた、損傷機構の解明の結果、損傷程度は水中圧力波のエネルギー密度に関係することが判明し、さらにシミュレーション結果や現地試験により水中せん孔発破の水中圧力波のピーク圧 P と Ef に $P=0.169Ef^{0.558}$ という関係が求められた。この結果、実験によって把握した各魚種毎の生存安全限界の Ef と数値シミュレーションのアウトプットである爆源からの距離における圧力最高値をもとに各魚種毎の安全限界を示す爆心からの距離を予察することができる。

今回魚体損傷影響調査は第1回と第3回の2回行なわれた。7種の供試魚を図-

5に示すように配置した生簀へ入れて、発破後、観察および魚体解剖による損傷程度の把握を行った。表-3に

表-3 主な魚種に対する安全限界距離

魚 種	安全限界に対応するエネルギー密度	せん孔発破とした左項に対応させた圧力最高値	安全 限 界 距 離	
			予 察 (薬量 1 000 kg)	実験結果 (薬量 1 080 kg)
ハマチ	85 J/m ²	2.1 kg/cm ²	115 m	100~110 m
カサゴ	53	1.6	146	160~170
マダイ	40	1.4	164	180~190

安全限界距離の予察と第3回発破(1080 kg)の調査結果とを示した。この結果をみると予察と結果がよく一致していることがわかる。この結果から水中圧力波の数値シミュレーションが魚体損傷影響の予察に有効であることが裏付けられた。なお、魚群の威嚇についても生簀中の魚群を水中ビデオで観察するなどの調査を行つたが大きな影響はみられなかった。

7. ま と め

今回の試験工事によって次のような結論を得た。

(1) 水中せん孔発破に伴う水中圧力波の特性が把握でき、貴重な資料が得られた。

(2) 測定された水中圧力波の波形および測定された圧力最高値は数値シミュレーション結果に近いものであった。

(3) 現地調査結果からもとめた魚体の安全限界距離は数値シミュレーション結果をもとに予察したものとよく一致した。

(4) (2)(3) から数値シミュレーションによる水中圧力波の予測は、水中発破工法を検討するにあたっての

影響予測に十分寄与するものである。

参 考 文 献

- 1) 佐々宏一・外：海底穿孔発破に起因する圧力波の予測とその実測結果について，工業火薬協会誌，Vol. 38, No. 2, 1977.
- 2) 小川輝繁・福山郁生・外：水中せん孔爆破に伴う水中圧力波（第 3 報），工業火薬協会誌，第 38 号，No. 5, 1977.
- 3) 第三港湾建設局，水中発破方法調査（1）-（5），1975-1979.
- 4) （社）日本水産資源保護協会，水中発破問題検討委員会報告書，第 1-5 号，1974-1979.