

海底発破によるその周辺におよぼす影響

渡 辺 登

序

本州四国連絡橋の建設，瀬戸内海で隔てられた，本州と四国を橋で結ぶことは，瀬戸内海沿岸における生活の利便と経済水準の向上の見地からはもちろん，西日本全体の総合的な整備開発の上からも長い希望であった。

本州と四国間の1日当り輸送量は旅客約11万人，貨物約18万tに達し，今後ますます増加するものと考えられる。しかし明石海峡，備讃瀬戸，来島海峡等における主要航路の船舶の幅員の現状からみて，今後の輸送需要の急激な増大にこたえることは，きわめて困難と考えられる。

本州四国連絡橋の歴史は古い，昭和30年以来種々の見地から調査，研究が行なわれてきた，しかし架橋の実施する機関として，昭和45年7月本州四国連絡橋公団が発足し，昭和60年までに3ルート完成すべく鋭意調査，設計，施工各方面にとり組んでいる次第である。

これらの完成には，昭和47年の試算であるが総事業費1.3兆円である。図-1にルートを示す。

昭和60年における，予想される世界長大橋の20位までを列举すると表-1のようになる。世界の20位までのうち10は我国に架る橋で，昭和48年11月開通した関門橋を除いて本四連絡橋である。

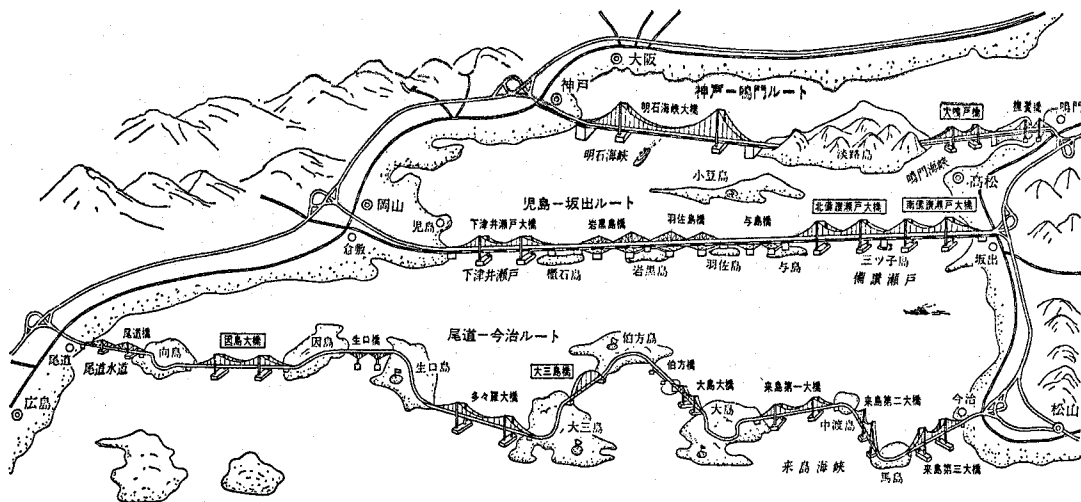


図-1 ルート俯瞰図

表-1 昭和60年における世界長大支間吊橋予想

順位	橋 名	国 名	中央支間長	摘 要
1	明 石 海 峡	日 本	1,780m	本四Aルート
2	Humber	イギリス	1,410	工事中
3	Verazano Narrows	アメリカ	1,298	
4	Golden Gate	〃	1,280	
5	Mackinac Straits	〃	1,158	
6	南 備 讃 瀬 戸	日 本	1,110	本四Dルート
7	Bosphorus	トルコ	1,074	
8	George Washington	アメリカ	1,067	
9	Salazar	ポルトガル	1,013	
10	Forth Road	イギリス	1,006	
11	来 島 第 三	日 本	1,000	本四Eルート
12	Severn	イギリス	988	
13	下 津 井 瀬 戸	日 本	909	本四Dルート
14	多 々 羅	〃	890	本四Eルート
15	北 備 讃 瀬 戸	〃	869	本四Dルート
16	来 島 第 一	〃	860	本四Eルート
17	New Tacoma Narrows	アメリカ	853	
18	大 鳴 門	日 本	808	本四Aルート
19	因 島	〃	770	本四Eルート
20	関 門	〃	712	
21	Ovinoco	コロンビア	712	

長大橋の建設については種々の技術的未解決な問題がありそのおもなものとしては次の項目があげられる。

1. 風に対する安定性
2. 地震に対する安定性
3. ケーブル架設工法
4. 吊橋上の鉄道の走行性
5. 船舶の航行安全対策
6. 海中基礎の施工

このうち海中基礎の施工に関連して、海底掘削は吊橋の橋台、橋脚の建設に第1にとりあげられる問題である。3ルートの下部工の計画設計諸元は表2, 3, 4のとおりである。

今回の報告はその海底掘削工法のうち、火薬を使用した海底岩盤掘削実験を実施したので、以下に報告する。

1. 発破による海底岩盤掘削工法

海中に巨大な橋台、橋脚基礎を建設するための手段として、海底岩盤の掘削はさけてとおることのできない困難な問題の一つである。本四連絡橋の架橋地点は複雑な海底地形、大水深、強潮流など厳しい自然条件のため、従来の工法に加えて、新しい技術手法が必要とされる。

当公団として、現在までこの開発は主として大型掘削機械についてであり、それ相応の成果をあげてい

表-2 神戸～鳴門ルート海峡部橋梁諸元

橋名	橋種	支間長・橋長 (m)	上部工鋼重		基礎 番号	基礎寸法 軸×直×高 (m)	最大 水深 (m)	最小 投入 長 (m)	地質		基礎種別	下部工数量合計		
			種別	重量 (t)					根入層	支持層		掘削 (m³)	コンクリート (m³)	鋼材 (t)
明石海峡大橋	中央部 側部 3径間吊橋	中央部 790-1, 581-790 側部 本州側 135-140-135 淡路側 135-140-135 橋長 4,125	ケーブル 塔 吊構造部 側部	74,000	1P	14×42×56	-1	10	沖積層	明石層	海中締切直接基礎			
				40,000	2P	14×42×56	-6	10	沖積層	明石層	ニューマチック・ケーソン			
				88,000	3P	14×42×71	-21	10	沖積層	明石層	鋼製足場オープンケーソン			
				18,000	4A	80×66×115	-38	5	沖積層	明石層	設置ケーソン			
					5P	35×70×83	-55	21	明石層	明石層	通水枠オープンケーソン			
					6P	35×70×68	-42	19	明石層	神戸層	通水枠オープンケーソン			
					7A	80×66×107	-28	7	明石層	神戸層	設置ケーソン			
					8P	14×42×61	-11	10	沖積層	神戸層	鋼製足場オープンケーソン			
					9P	14×42×54	-9	5	沖積層	神戸層	ニューマチック・ケーソン			
					10P	14×42×52	-2	5	花崗岩	花崗岩	海中締切直接基礎			
			計	220,000								338,100	1,534,000	94,900
大鳴門橋	3径間吊橋	100-330- 870-330 橋長 1,630	ケーブル 塔 吊構造部 計	18,800	1A	62×55×42	-3	7	和泉層	和泉層	海中締切直接基礎			
				9,600	2B	15×55×42 (12φ3.5×9)	-2	5	和泉層	和泉層	多柱基礎			
				40,100	3P	23×60×21 (18φ3.5×16)	-4	6	和泉層	和泉層	多柱基礎			
					4P	23×60×18 (18φ3.5×13)	-4	5	和泉層	和泉層	多柱基礎			
				68,500	5A	64×55×61	-1	6	和泉層	和泉層	海中締切直接基礎			
			計									144,500	252,300	11,700

(注) 基礎番号欄の数字は起点側からの基礎の番号を示し、A は橋台、B はケーブル支柱、P は橋脚を示す。

表-3 児島～坂出ルート海峡部橋梁諸元

橋名	橋種	支間長・橋長 (m)	上部工鋼重		基礎 番号	基礎寸法 軸×直×高 (m)	最大 水深 (m)	最小 投入 長 (m)	地質		基礎種別	下部工数量合計		
			種別	重量 (t)					根入層	支持層		掘削 (m³)	コンクリート (m³)	鋼材 (t)
下瀬戸津大井橋	3径間吊橋	230-920-230 橋長 1,390	ケーブル 塔 吊構造部 計	17,300	1A	63×54×44	+41	29	花崗岩	花崗岩	陸上直接基礎			
				9,300	2P	17×54×37	-8	22	花崗岩	花崗岩	ニューマチック・ケーソン			
				35,900	3P	17×54×24	-9	8	花崗岩	花崗岩	設置ケーソン			
				62,500	4A	65×54×59	+8	11	花崗岩	花崗岩	陸上直接基礎	559,200	237,300	13,100
岩黒島橋	3径間吊橋	162-504-162 橋長 828	桁	41,600	1P	15×45×46	0	4	花崗岩	花崗岩	設置ケーソン			
					2P	20×45×35	-23	4	花崗岩	花崗岩	設置ケーソン			
					3P	20×45×35	-12	10	花崗岩	花崗岩	設置ケーソン			
					4P	20×45×41	+1	6	花崗岩	花崗岩	陸上直接基礎	387,900	206,200	16,100
羽佐島橋	3径間吊橋	162-504-162 橋長 828	桁	41,600	5P	20×45×30	-5	9	花崗岩	花崗岩	設置ケーソン			
					6P	25×45×46	-16	9	花崗岩	花崗岩	設置ケーソン			
					7P	25×45×63	-13	5	花崗岩	花崗岩	設置ケーソン			
与島橋	3径間吊橋	135-210-165 橋長 510	桁	12,600	1P	15×40×35	+11	3	花崗岩	花崗岩	陸上直接基礎*			
					2P	13×40×34	-5	5	花崗岩	花崗岩	設置ケーソン			
					3P	10×40×32	0	6	花崗岩	花崗岩	設置ケーソン			
					4P	15×36×13	+65	10	花崗岩	花崗岩	陸上直接基礎	84,500	30,800	1,500
北瀬戸大渡橋	3径間吊橋	270-990-270 橋長 1,530	ケーブル 塔 吊構造部 計	20,200	1A	55×53×63	+20	5	花崗岩	花崗岩	陸上直接基礎			
				14,400	2P	21×54×22	-7	8	花崗岩	花崗岩	設置ケーソン			
				39,900	3P	21×54×19	-6	6	花崗岩	花崗岩	設置ケーソン			
				74,500	4A	62×50×98	-7	7	花崗岩	花崗岩	設置ケーソン	1,027,700	838,000	58,000
南瀬戸大渡橋	3径間吊橋	270-1,100-270 橋長 1,640	ケーブル 塔 吊構造部 計	24,600	5P	21×54×38	-24	7	花崗岩	花崗岩	設置ケーソン			
				15,700	6P	30×54×52	-36	9	三尊層 花崗岩	花崗岩	設置ケーソン			
				42,500	7A	60×55×128	-23	27	三尊層 花崗岩	花崗岩	設置ケーソン			
			計	82,800										

表-4 尾道～今治ルート海峡部橋梁諸元

橋名	橋種	支間長 (m)	上部工鋼重 種別	重量 (t)	基礎 番号	基礎寸法 軸×直×高 (m)	最大水深 (m)	最小埋入長 (m)	地質		基礎種別	下部工数量合計		
									根入層	支持層		掘削 (m³)	コンクリート (m³)	鋼材 (t)
尾道橋	斜張橋	85-210-85 橋長 380	桁	4,100	1 A	17×22×24	+32	8	土砂花崗岩	花崗岩	陸上直接基礎	26,000	17,000	1,100
					2 P	15×20×53	-2	6	土砂花崗岩	花崗岩	海中締切直接基礎			
					3 P	15×20×53	+3	11	土砂花崗岩	花崗岩	陸上直接基礎			
					4 P	16×14×27	+22	4	土砂花崗岩	花崗岩	陸上直接基礎			
因島大橋	3径間吊橋	220-770-220 橋長 1,210	ケーブル塔 吊構造部計	6,200 5,100 12,600 23,900	1 A	53×40×58	+5	5	花崗岩	花崗岩	陸上直接基礎	147,200	137,600	4,700
					2 P	17×40×12	0	6	花崗岩	花崗岩	陸上直接基礎			
					3 P	17×40×18	-3	8	花崗岩	花崗岩	海中締切直接基礎			
					4 A	47×40×46	+28	11	花崗岩	花崗岩	陸上直接基礎			
生口橋	P C 橋	150-250-150 橋長 550	上部工 (コンクリート)	30,000 m³	3 P	13×21×36	+3	7	土砂花崗岩	花崗岩	陸上直接基礎	89,300	66,200	4,500
					4 P	32×28×32	-20	9	土砂花崗岩	花崗岩	設置ケーソン			
					5 P	32×28×32	-18	11	土砂花崗岩	花崗岩	設置ケーソン			
					6 P	13×21×42	-4	6	土砂花崗岩	花崗岩	海中締切直接基礎			
多々羅大橋	3径間吊橋	300-890-300 橋長 1,490	ケーブル塔 吊構造部計	8,800 4,900 16,600 30,300	1 A	55×42×40	+45	30	土砂花崗岩	花崗岩	陸上直接基礎	481,600	180,500	8,800
					2 P	22×39×35	-8	20	土砂花崗岩	花崗岩	ニューマチックケーソン			
					3 P	18×39×17	-5	5	土砂花崗岩	花崗岩	海中締切直接基礎			
					4 A	70×42×70	-2	13	土砂花崗岩	花崗岩	陸上直接基礎			
大島三橋	アチ1橋	300 橋長 327	桁	5,100	1 A	28×30×44	+4	7	花崗岩	花崗岩	陸上直接基礎	66,400	24,800	300
					2 A	28×30×44	-2	4	花崗岩	花崗岩	陸上直接基礎			
伯方橋	3径間連続橋	100-100-100 橋桁 300	桁	2,600	1 A	10×20×10	+30	4	土砂花崗岩	花崗岩	陸上直接基礎	15,600	10,600	300
					2 P	12×20×41	-7	5	花崗岩	花崗岩	海中締切直接基礎			
					3 P	12×20×41	-7	5	花崗岩	花崗岩	海中締切直接基礎			
					4 P	14×14×22	+19	9	土砂花崗岩	花崗岩	陸上直接基礎			
大島大橋	中央部吊橋 側部吊橋 大島側吊橋 橋長 830	550 140 140 橋長 830	ケーブル塔 吊構造部計	3,100 1,900 5,300 1,600 11,900	1 A	50×40×33	+6	6	花崗岩	花崗岩	陸上直接基礎	180,300	91,300	3,900
					2 P	15×39×15	-4	4	花崗岩	花崗岩	海中締切直接基礎			
					3 P	15×39×15	-5	4	花崗岩	花崗岩	海中締切直接基礎			
					4 A	50×40×33	+17	17	花崗岩	花崗岩	陸上直接基礎			
来島第一大橋	3径間吊橋	190-860-190 橋長 1,240	ケーブル塔 吊構造部計	7,900 6,900 13,900 28,700	1 A	60×42×46	+2	16	花崗岩	花崗岩	陸上直接基礎	193,000	206,200	8,300
					2 B	14×38×15	+3	5	花崗岩	花崗岩	陸上直接基礎			
					3 P	17×40×24	-7	7	花崗岩	花崗岩	陸上直接基礎			
					4 P	17×40×27	-10	3	花崗岩	花崗岩	陸上直接基礎			
来島第二大橋	3径間吊橋	110-550-110 橋長 770	ケーブル塔 吊構造部計	3,000 3,400 8,100 14,500	6 P	15×39×10	-1	2	花崗岩	花崗岩	陸上直接基礎	106,300	53,800	2,400
					7 P	15×39×15	-3	5	花崗岩	花崗岩	陸上直接基礎			
					8 A	48×39×52	+27	4	花崗岩	花崗岩	陸上直接基礎			
来島第三大橋	中央部吊橋 側部吊橋 今治側吊橋 橋長 1,520	1,000 260 260 橋長 1,520	ケーブル塔 吊構造部計	10,000 7,100 12,200 4,400 33,700	9 A	54×42×70	+17	14	花崗岩	花崗岩	陸上直接基礎	277,100	150,300	5,200
					10 P	18×41×20	-10	3	花崗岩	花崗岩	海中締切直接基礎			
					11 P	18×41×18	-5	6	花崗岩	花崗岩	海中締切直接基礎			
					12 A	47×42×36	+60	23	花崗岩	花崗岩	陸上直接基礎			

る。今回これらの機械掘削に併わせて、従来から岩掘削の主体をなしている発破工法を海底岩盤の掘削に利用するため基礎的実験を実施した。海中での発破作業は、これまで水深、潮流が大きい場所でのさく孔方法、装薬、発破法に問題があり、さらには漁業への影響もからみ、我国では大規模に実施された例はなく、欧米諸国の実施状況に比べ大きな遅れとなっている。しかし、これらの技術的格差は最近の研究により大部分が解決できる見通しがつき実験工事の実施にふみきったものである。

海底岩盤掘削については、種々の工法があり、海象、海底地盤条件に応じて適した工法がとられている。これらの工法は表－５に大別され、この中で水深、潮流などに対応できるものとしての一つがこれから述

表－５ 海底岩盤掘削工法

工 法 \ 項 目	水深 限界 (m)	岩 種	掘 削 層 厚 (1段)	礫 処 理 法	掘削精度	経済性 (m ² 当り 単価)	備 考
打 撃 砕 岩	50	主として軟岩 一部硬岩	5m	エアリフト、ポンプ グラブバケットなど	良 好	高 い	水深が浅くなるにつれて、 装置が浅くなり効果が落ちる
カッター船(ポン プ、バケット、ディ ンパーを含む)	30	軟 岩	10	ポンプ バケット	良 好	安 い	軟岩もかなり軟いもののみ
大 口 径 掘 削	50	軟岩～硬岩	10	エアリフト	良 好	高 い	単一孔の場合、掘削は 200mまでも可
貼 付 け 発 破	30	軟岩～硬岩	1	グラブバケット	良 好	安 い	平直面の掘下りは非常に困難
さ く 孔 発 破	50	軟岩～硬岩	10	グラブバケット エアリフト	不 良	安 い	1回の爆破量が多いほど 単価が安くなる
水 圧 ジェット	—	軟岩～硬岩	—	—	良 好	—	開 発 中
火 炎 ジェット	—	硬 岩	—	—	—	—	開 発 中
電 磁 破 壊	—	—	—	—	—	—	開 発 中
海底ブルドーザー	50	軟 岩	1	グラブバケット エアリフト	良 好	—	開 発 中

べる、さく孔発破工法である。発破工法の中でのさく孔発破は、大量掘削の場合についても最も効率のよい方法と考えられており、基礎的掘削についても主工法として採用できるものであろう。しかし掘削精度上からは大口径掘削機等との併用が望ましく、その場合副工法として利用すべきと思われる。さらに凹凸の調整、のり面整形等については、他の掘削工法内で必要に応じて利用されるもので補助工法として扱われるものである。

2. 海底岩盤発破法の変遷

これまでに実施されてきた、海底岩盤の発破による掘削は、先きに述べたように我国においては大規模には行なわれていないが、航路浚渫、暗礁除去、海底パイプライン基礎掘削、発電所取水部の掘削など部分的に実施されてきた。しかし欧米諸国で実施されているような規模の掘削が、未経験であることは、我国の漁業への影響が格段に複雑なことの他に、かなりの技術的格差があることに起因している。

今回実施した発破技法が、どの程度の技術レベルにあるかを見る意味で、工法の変遷にふれておくと、表－６に一連の技法の変化を示したが、これから分るように最も効率のよい発破掘削法として、さく孔発

表-6 海底発破法の変遷

方 式	作 業 方 法	発破方法	結線方法	水深及び作業限界	破砕効率	利点及び欠点
火 薬 投 下 ↓	火薬の直接投下	導 火 線 又は 電気発破	海上結線	5 m 以浅 静水域	悪 い	簡便 普通火薬の使用 1地点ずつ個別爆破 位置決め困難 衝撃圧大
貼 付 け 発 破 ↓	ダイバーによる火薬 ブロックの設置	電気発破	海上結線 又は 水中結線	ダイバー作 業限界通常 10 m 以浅 静水域	悪 い 暗礁などの突 起物には効率 良い	簡便 普通火薬使用可 大量爆破不可 衝撃圧大 盤下げ等掘削出来ず
さく孔発破 ↓	ダイバーによる海底 簡易さく孔装薬	電気発破	海上結線 又は 水中結線	10 m 以浅 静水域	やや良好	さく孔長 2 m 以下 作業効率悪い 多数孔同時爆破可能 脚線の断線などの恐 れあり
さく孔発破 ↓	ポンツーン上からの さく孔 装薬用パイプ建込み 火薬の同時装薬	電気発破	船上結線 又は 海上結線	15 m 以浅 静水域	良 好	多数孔同時爆破出 来る ダイバー作業なし さく孔長 5~8 m まで 自動装填器の使用可
さく孔発破 ↓	自己昇降式作業台の 使用 二重管式さく孔機の 利用 作業台上からの火薬 の直接投入 脚線の船上からの抜 きとり	電気発破	船上結線	30 m 以浅 潮流 1 kt 程度まで	良 好	耐水、耐圧火薬の利用 さく孔、装薬の連続作 業 さく孔長 5~8 m ダイバー不用 多数孔同時爆破時の脚 線の混乱、断線の恐れ あり
さく孔発破	自己昇降式作業台の 使用 二重管式さく孔機の 利用 作業台上からの火薬 及び受信器の直接投 下	無線起爆	ナ シ	さく孔機使 用限界まで (- 50 m 程 度)	良 好	耐水、耐圧火薬の利用 さく孔、装薬の連続作 業 さく孔長 5~8 m 程度 まで 潮流、水深に左右され ず発破作業が出来る 断線、脚線の混乱なし ダイバー不要 簡便

破を海中で、いかに能率よく実施するかに努力が向けられている。

さらに装薬時間を短縮すべく、装填器の使用が一般的になり、欧米でも最も普及している方法となっている。最近では、水中構造物の大型化に伴ない、水深の大きい地点でのさく孔に大型海上作業台を使用するようになり、さく孔精度の確保とさく孔能率を上げ、さらには断線の心配がなくなり、母線の延長などの作業がなくなるため、気象、海象条件による稼働率の低下が防がれ、工期の短縮、工費の低減が計られ

る。

また発破施工地点は、水深の増大と共に潮流などの厳しい海象条件での、ダイバーによる作業が制約される場所では、さく孔、装薬が連続的に海上の作業台から実施されることになり、同時に多数孔を爆破するための、さく孔時間が長くなり、火薬も耐水、耐圧性が要求される。このような条件下で海底発破を実施するには、1) 作業台の使用、2) 高速二重管式さく孔機の使用、3) 作業台からの直接装薬、4) 耐水、耐圧火薬、雷管の使用、5) 脚線の混乱、断線防止、の5条件が満足されなければならない。この意味から今回の施工実験は、現在の技術の集大成から一步進めて、脚線をなくした、無線起爆法に達したことに大きな意義をもっている。

3. 要望テーマと本実験との関連

はじめに述べたように、本実験の実施にあたって、欧米諸国に較べ未経験な分野も多く、開発ならび解決しなければならない問題が多い。これらの問題と本実験との関連を表-7にまとめた。同表に示されるように幾つかの項目については、何らかの型で検討したが、残された問題も多い。特に衝撃圧の影響以外の海水汚濁等のいわゆる、公害防止に関して何らの検討もできなかった。今後の問題の一つであろう。

4. 実験の目的

本実験工事は、本四連絡橋の橋台、橋脚基礎掘削についての一工法である海底岩盤さく孔発破工法により、一自由面さく孔発破を行ない、海底発破工法の具体的な手法、機械、さらに発破のその周辺に及ぼす影響などについて調査を行なうことを目的としたものである。

従来水中発破として実施されてきた海底発破の岩盤への貼付けによる発破は、その破碎効果および、発破法に問題があり、当公団として、本工事のための架橋地点を想定するに、水深20～30^m、潮流5～6^{ノット}の場所での工法としては成り立ち難い。このため本実験工事は、主として海底さく孔機の性能および、さく孔用作業台の操作性などを見ることに重点を置き、さらに大水深、大潮流下における装薬法、発破法などを具体的に調査することにした。さらに海底さく孔発破の場合、問題となる雷管の殉爆性、スプリット法、深度による破碎性などについても実験を行ない、構造物に与える発破の影響についても、実際に部材に生ずる歪と発生した衝撃圧力との関係を測定することにより、衝撃圧と静圧との差異を求めるための実験を実施した。

5. 実験の概要

(1) 実験場所および実験位置 (図-2、図-3 参照)

愛媛県越智郡上浦町多々羅岬沖

(2) 実験期間

昭和46年12月～昭和47年9月 (表-8 参照)

(3) 実験の細部工程

一自由面の海底さく孔発破の細部工程は表-9に示す。

(4) 実験項目

今回した実験項目は表-10にまとめたが、大別して次の4項目について行なった。

- ① さく孔機、海上作業台などの現場作業性と作業手順の調査
- ② 発破法、装薬法、雷管、火薬などの実用性の調査および実験

表-7 要望テーマと本実験との関連

要 望 テ ー マ	検 討 の 程 度 ○主 △従 ×なし	本 実 験 項 目
作 業 用 足 場	△	一自由面さく孔発破実験
・水中発破の振動および衝撃圧のスパットへの影響	△	同上 及び構造物影響実験
・耐衝撃圧構造の検討	△	同上 及び衝撃防止材実験
・さく孔機の取付とさく孔性能への設計上の検討	△	エアカーテン効果実験 同上
・さく孔発破掘削専用船の検討	△	同上
さく孔機とさく孔性	○	一自由面さく孔発破実験
・海洋条件とさく孔偏差との関係	○	同上
・潮流に対するコーダクターパイプの設計と作業性の検討	○	同上
・さく孔深度限界とさく孔速度の検討	○	同上
・消音機の開発	×	
・大型2重管式回転打撃さく岩機以外のさく孔機の検討	△	同上 及び文献調査
発破技術と火薬類	○	一自由面さく孔発破実験 他
・耐水, 耐圧火薬の開発	○	同上 及び予備実験
・水中殉爆性の検討	○	同上 及び殉爆実験
・潮流下の脚線補強, 処理法の検討	○	同上
・水深による破砕効果の比較	○	破砕効果テスト
・低爆速火薬の使用と破壊効果	×	
・経時変化による急速効果減衰火薬の開発	×	
・不発処理法	△	一自由面さく孔発破実験
・遠隔誘導無線起爆工法の確立	○	同上 及び予備実験
・平滑面仕上発破技術の確立	△	プレスプリット工法実験
・火薬装填器の開発	×	
・さく孔間隔, さく孔長, 火薬類, 火薬量の変化による破砕効果の検討	○	同上 及び陸上破砕実験, 予備実験
海底発破の周辺への影響	○	エアカーテン効果テスト, 構造物影響実験 他
・発破振動防止用プレスプリット法の効果	△	プレスプリット工法実験
・振動対策	△	振動測定 (安全工学協会)
・エアカーテンの効果, 仕様の検討	○	エアカーテン効果実験及び予備実験
・衝撃波の魚, 貝類への影響調査	○	同上 及び魚類影響調査実験 (安全工学協会)
・衝撃波の構造物に与える影響	○	構造物影響試験
・衝撃波防止材の検討	○	衝撃波防止材実験
・海水汚濁処理, 急速沈降剤の開発	×	
ずり揚げ装置	△	一自由面さく孔発破実験
・エアリフト, グラブ船, ポンプ船などの利用と破砕程度の検討	△	同上

計画	実施
☐	☐

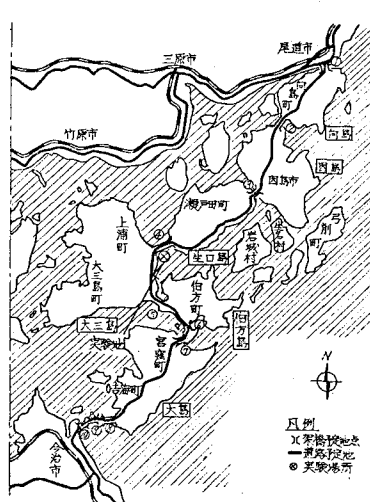
[illegible]

図-2 実験場所



図-3 実験位置図

表-10 実験総括表

実験項目		試験概要		発破		仕様		エフカーテン仕様						測定		項目							
水深 (m)	試験配置、パターン	さく孔 間隔 (m)	さく孔 径 (mm)	薬径 (mm)	薬種	1孔当り全量 (kg)	装薬量 (kg)	装薬長 (m)	孔数 (本)	起爆方式	送圧 (MPa)	圧入率 (%)	圧入率 (%)	圧入率 (%)	圧入率 (%)	水中音	水中音	圧入率	変位	作業性	写真 (水中)		
一自由面さく孔発破実験 作業台への影響調査を同時測定		0	1.0	5.5	70	49	GX-1	2.25	2025	9	有線	なし											
		0	1.0	5.5	70	49	GX-1	8.25	7425	9	有線												
		0	2.0	5.5	70	49	GX-1	8.64	7775	9	有線												
		0	2.0	5.5	70	49	GX-1	8.25	7425	9	有線												
		10	1.0	5.5	70	49	GX-1	210	1875	9	有線	7	52	2	40	0.5	2						
		10	1.0	5.5	70	49	GX-1	225	2025	9	有線	7	52	2	40	1.0	1						
		10	1.0	5.5	70	49	GX-1	750	6805	9	有線	7	52	2	40	1.0	2						
		10	1.5	5.5	70	49	GX-1	8.25	7425	286	有線	7	52	2	40	1.0	2						
		10	2.0	5.5	70	49	GX-1	8.25	7425	286	有線	7	52	2	40	1.0	2						
		10	2.0	5.5	70	49	GX-1	9.90	10494	455	有線	7	52	2	40	1.0	2						
角爆実験		30	2.0	5.5	70	49	GX-1	1350	12150	432	有線	6.5	7	52	2	40	1.0	1					
		30	2.0	5.5	70	49	GX-1	1350	12150	414	有線	6.5	7	52	2	40	1.0	1					
		2.5	1.0	0.2	70	30	GX-1	0.1kg	6.4	有線	有線	なし	なし	なし	なし	なし	なし						
		20	2.0	2.0	70	30	GX-1	0.1kg	6.4	有線	有線	なし	なし	なし	なし	なし	なし						
破砕効果試験		10	中心	1.0	50	30	GX-1	100gr	300gr	各1	有線	なし	なし	なし	なし	なし							
		40																					
水中プレスプレート実験		2.5	0.75m	1.0m	25m	60	30	GX-1	0.25	1.2	有線	なし	なし	なし	なし	なし							
		30	1.0m	1.3m	25m	60	30	GX-1	0.8	4.8	有線	なし	なし	なし	なし	なし							
エフカーテン効果試験		2.5	試験1 (図参照)	試験2 (図参照)	試験3 (図参照)	試験4 (図参照)	試験5 (図参照)	試験6 (図参照)	試験7 (図参照)	試験8 (図参照)	試験9 (図参照)	試験10 (図参照)	試験11 (図参照)	試験12 (図参照)	試験13 (図参照)								
		30	試験1 (図参照)	試験2 (図参照)	試験3 (図参照)	試験4 (図参照)	試験5 (図参照)	試験6 (図参照)	試験7 (図参照)	試験8 (図参照)	試験9 (図参照)	試験10 (図参照)	試験11 (図参照)	試験12 (図参照)	試験13 (図参照)	試験14 (図参照)							
無線起爆試験		5	一箇所	0-5m	0-10m	25	30	GX-1	100-200gr	100-1800gr	25	有線	7	52	2	40	1.0	2					
		30																					
建造物影響試験 (1)		2.5	縦断(中道より、なし) h=6.4 φ=400 φ=2500 コンクリート壁 (RC地盤) t=400 φ=2500 W=2000	0-5m	0-10m	25	30	GX-1	100-200gr	100-1800gr	25	有線	7	52	2	40	1.0	2					
		30																					
建造物影響試験 (2)		2.5	コンクリートケーソン t=400, 4000x 鋼骨 t=50 φ=2000	0-5m	0-10m	25	30	GX-1	100-200gr	100-1800gr	25	有線	7	52	2	40	1.0	2					
		30																					

表-8 全体実施工程表

項目 \ 年月	46年 12月	47年 1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月
実験計画、段取り												
予備実験												
一自由面発破												
陸上発破試験												
破砕効果試験												
プレスブリッティングテスト												
殉爆試験												
構造物影響試験												
エアカーテン効果テスト												
衝撃圧防止材テスト												
爆破衝撃水流速度テスト												
解析												
報告書作成												

③海底さく孔発破による破砕性の調査

④水中爆発衝撃圧の影響とその低減方法に関する実験

(5)実験方法

①一自由面さく孔発破実験

水中発破による一般的な型
式は、二自由面のベンチ発破
であるが、第1の手順として、
ベンチを作るための発破があ
らかじめ必要であり、本実験
はこの最初の心抜き発破に相
当するもので、薬量、さく孔
パターン、水深を変え発破工
法の状況、エアバルブの効果
等を調査したもので、その作
業要領は図-4に示すように、
まず海底に衝撃圧低減用エア
パイプを設置し、その上に作

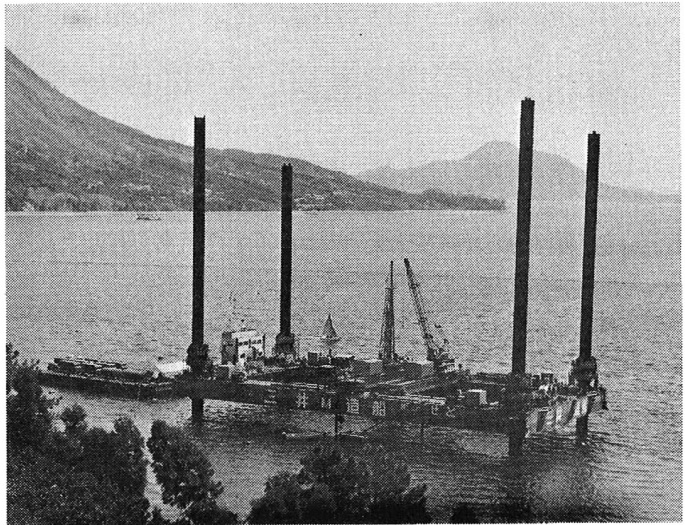


写真 実験場全景

業台をかぶせるように設置する。この作業台より $\phi 70$ mm、長さ5 mの発破孔を9本さく孔し、さく孔用外管を
通して火薬を作業台より装填する。火薬は有線起爆の場合は脚線および母線を結線し図-5の方法で
これらの線を取り出す。無線起爆の場合は起爆装置と火薬を結合し上部から落下させて装填する。さ
く孔作業中は各種計測器を設置し、各作業終了後、点火設計を行う。その破砕効果はエアリフトにより
ずり上げを行ない、ダイバーによる水中撮影を行なって計測を実施した。この実験に付帯して実施し
たものは、衝撃圧、振動、水中音の諸測定、作業台への影響などである。またさく孔の標準パターン
として海底さく孔心抜きの常識的なものを選び、 $1.0\text{ m} \times 1.0\text{ m}$ 、 $2.0\text{ m} \times 2.0\text{ m}$ の正方形とし、さく孔長
は5.0 mを基準とした。表-11に発破の仕様を示す。

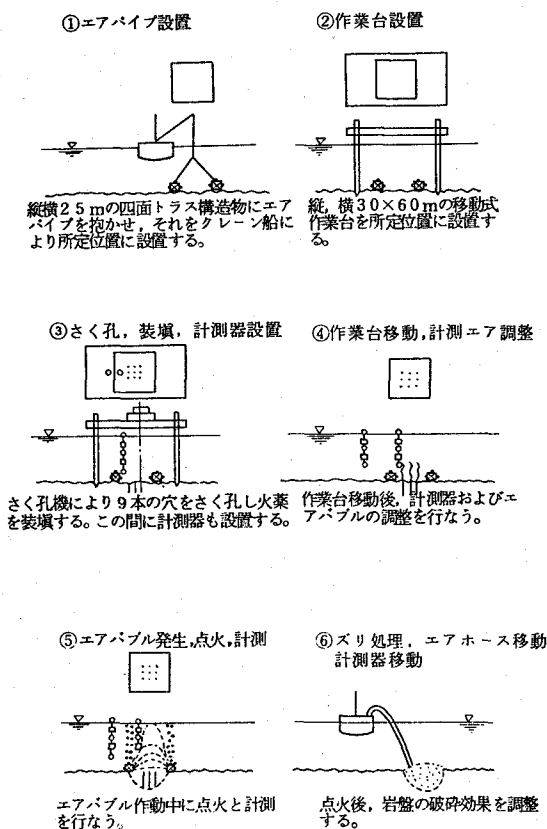


図-4 一自由面さく孔発破要領図

②水中衝撃圧防止実験

さく孔発破に伴う、水中衝撃圧を防止するための実験として、エアバブルカーテン、衝撃圧防止材による実験を行なった。

エアバブルカーテンはまずその仕様を決定するため、超音波によるカーテンの減衰効果をみることに、パイプの径、吐出孔径、吐出間隔などを比較した。さらに水中の火薬の爆発による水中衝撃圧をエアバブルカーテンがどのように吸収するかを見るため、実験プール内および水深10～30^mの海中においてエアバブルを発生させ、その軽減効果を測定した。海中部の実験においては、火薬を水中で爆発させた場合と、海底岩にさく孔して爆発させた場合の2例について、それぞれエアバブルカーテンの内と外の衝撃圧の大きさを比較した。

さらにエアバブルカーテンの他にゴム膜など数種の衝撃防止材を選定し、それらの防止効果を実験プール内で同様の方法で測定した。

③水中衝撃圧の構造物への影響

水中衝撃圧が周辺に及ぼす影響については、これまで種々議論されてきたが、決定的な算定方法がないため、今回の実験において実際のさく孔発破の影響がどのようなものかを i) 作業台の振動、歪、衝撃圧力、ii) 実験プール内のモデル構造物の水中衝撃圧の応答、iii) さく孔発破時の地盤振動を測

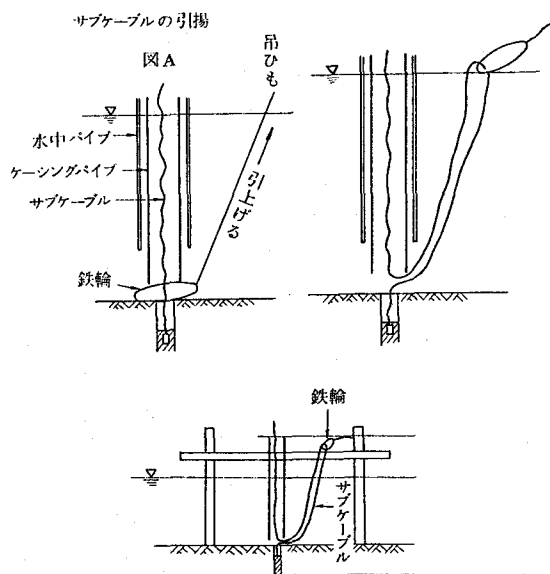


図-5 脚線のぬきとり図

表-11 発破仕様

パターン No.	水深 m	発 破 仕 様										エアーカーテン		備 考
		孔間隔 (m)	孔長(m)	孔径(φ)	薬径(φ)	薬種	薬量/孔	薬量(kg)	装薬長 (m)	孔数	起爆法	空気量 m³/mφ・m	パイプ列	
1	10	1.0	6.0	70	49	GX-1	2.10	18.75	0.55	9	有線	0.5	2	
2	10	1.0	5.7	"	"	"	2.25	20.25	0.7	"	"	1.0	1	
3	10	1.0	6.0	"	"	"	7.50	68.05	1.8	"	"	"	2	
4	10	1.5	5.5	"	"	"	8.25	74.25	2.86	"	無線	"	"	
5	10	2.0	"	"	"	"	8.25	74.25	2.86	"	"	"	"	
6	10	2.0	"	"	"	CX-1	9.90	104.94	4.55	"	"	"	"	
7	30	2.0	5.8	"	"	GX-1	13.50	121.50 (+19.75)	4.15	"	"	"	1	(増ダイ 19.75含む)
8	30	2.0	"	"	"	"	13.50	121.50	4.15	"	"	"	2	

定することにより検討した。

実験プール内の実験においては、コンクリートおよび鋼管の壁に対して、水中衝撃圧が作用した場合、片持構造の場合と両端固定の場合の2例について歪、変位、作用応力をそれぞれ測定した。さらにコンクリートおよび鋼管ケーソン内で火薬が爆発した場合についても同様に測定を行なった。

6. 実験設備と器具

(1)作業台

さく孔用作業台としては、水深30^m、最大潮流5^{ノット}を想定し、この条件に耐えるものとして自己昇降式作業台「MSEP-1せと号」をさく孔作業用に改造したものを使用した。作業台の仕様は表-12に示す。

表-12 作業台仕様

主 要 目	項 目	仕 様	備 考
作 業 台	主 要 寸 法	60m×30m×3m (長さ) (幅) (深さ)	
	中 央 開 口 寸 法	45m×20m (長さ) (幅)	改造後
支 柱 (コ ラ ム)	寸 法	1.8m×5.5m (外径) (長さ)	改造後
	本 数	4 本	
動 力 装 置	ディーゼル機関	F101.714 175PS 1800rpm	2 台
	発 電 機	(主) 135KVA 1800rpm (補助) 33KVA	2 台
	油圧パワーユニット	(主) プランジポンプ 99P×2.210kg/cm ² , 260ℓ/min×2	ディーゼル機関により駆動
	"	(副) ギヤポンプ 18P×2, 8.5kg/cm ² , 85ℓ/min×2	
昇 降 装 置	三井テーパーリンク把握式ジャッキ	400T型×4基, 最大揚量12m/H 最大ストローク 500m/m	
繫留ウインチ	油圧モーター駆動ウインチ(複胴)	直巻能力5T, ロープスピード9m/min ワイヤーロープ6×24×30m/φ×300m	4 基
	油圧モーター駆動ウインチ(単胴)	直巻能力15T, 保持力30T, ロープスピード 10~35m/minワイヤーロープ6×24×34φ×340m	4基(増設分)
ア ン カ ー	4 T 鋼製アンカー	5Tウインチに接続	
	9 T 鋼製アンカー	15Tウインチに接続	
トラベラー	A ト ラ ベ ラ ー	クローラークレーン (335-S, 32T吊)搭載	トラベラーズパン 21m
	B ト ラ ベ ラ ー	O.D機(BBE51改造型) サノストラクター搭載	走行速度 1m/min トロリー(台車) 横行速度 0.5m/min
改造後の MSEP-1 「せと」 設計条件	作業水深37mにおいて 波高2.5m 潮流5kt 風速30m/sec 但し使用するパイプの直径、本数、支持条件等によって異なる。 台風時(風速60m, 波高3.5m~5m)には避難する。		

(2)さく孔機

従来孔径60~110^{mm}程度の岩盤ボーリングを行う場合、硬岩の短い孔ではさく岩機が使用され、孔壁の不安定な砂礫や土砂を掘るか、または硬岩でも長孔の場合には、ロータリー式のボーリング機が使用されてきた。今回の使用にあたって、OD機(スウェーデンのAtlas COPCO社製のOverburden Drilling Equipment)はこれらの機械の二つの働きを同時または、別々に一台で行うことができるローテーションドリフトと呼ばれる改良さく岩機にケーシング掘削機能をもたせたものである。

これはリングビットとクロスビットの組合せからなるもので、リングビットに接続する管がケーシングの役目をするとともに、装薬に対する誘導管の役目をするところに特徴をもつ、さく孔機の全体組立図を図-6 に示す。

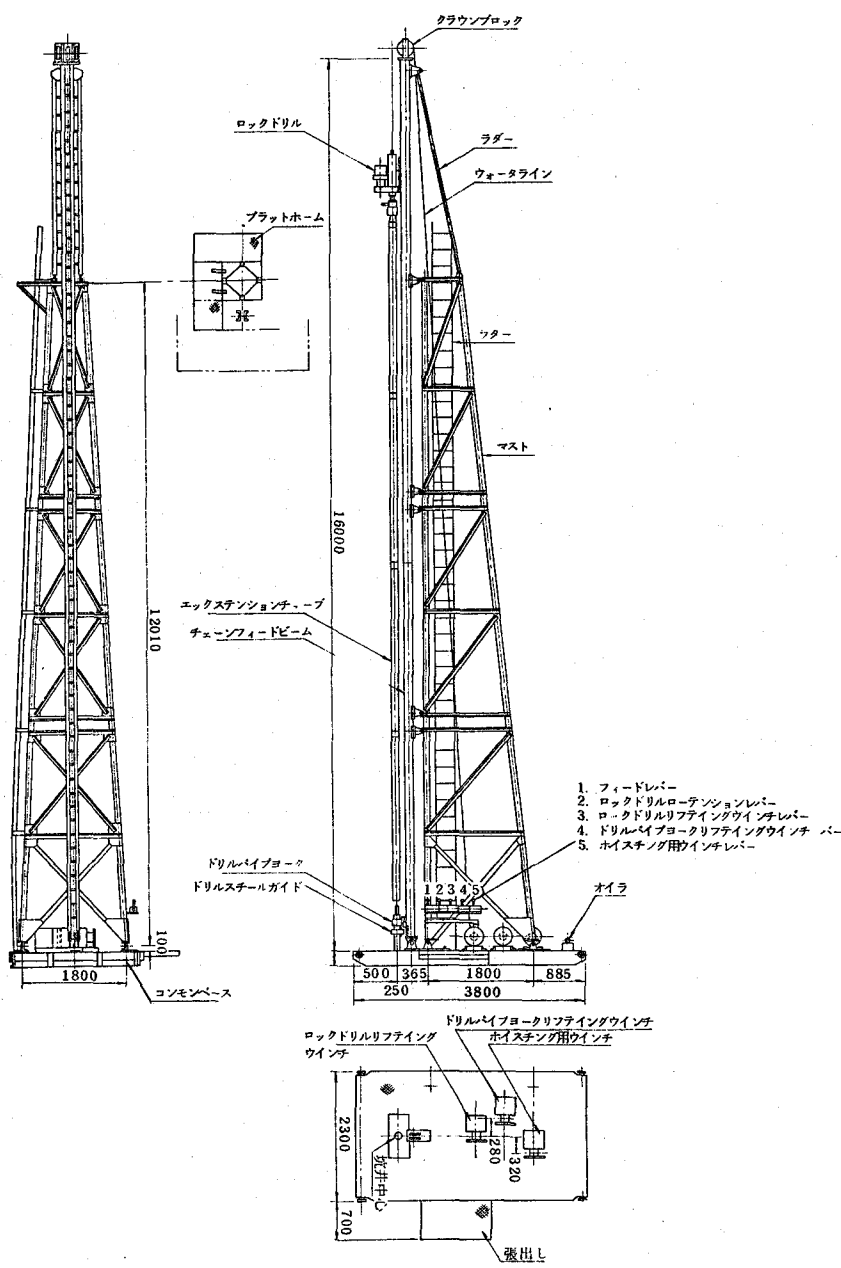


図-6 多々羅岬沖海底発破実験工事 O.Dさく孔機全体組立図

③装薬および発破作業

①使用火薬および雷管

表-13 に示すように今回使用した爆薬、雷管について海底用特殊火薬、雷管として開発されたものである。

②有線起爆

薬筒製作の全体図は図-7 に示すが、製作手順は発破母線、塩ビパイプを準備し、親ダイを作製する。この場合雷管電通試験を行なっておき薬包を作製する。装填作業は先にさく孔した長さを測定して薬筒装填を行うが、サブケーブルを用いて薬筒をケーシングパイプに沿って装填する。サブケーブルの引出し法については、図-5 に脚線の抜きとり図で示したが、発破パターンの1ブロック毎に海面上でとりまとめる必要がある。起爆法は陸上で行なわれている方法と変わらないが、海中作業のための安全点検に困難があり、確実性に問題がある。

③無線起爆

起爆素子の全体図は図-8 に示すが、有線起爆のように脚線を必要と

表-13 (1) 爆薬性能表

要 目	単 位	GX-1号ダイナイト	CX-1号ダイナイト
比 重		1.5~1.6	1.6
落錘感度	cm	21~30	60
火 薬 力	kg/cm ²	10,200	11,000
爆 速	m/sec	6800~7300	7000~7500
耐水圧性		10kg/cm ² 水圧10日 完爆 D.V6500~7000	10kg/cm ² 水圧30日 完爆

表-13 (2) EDX-1号電気雷管性能

要 目	性 能
耐 水 圧 性	10kg/cm ² 水圧 30日完爆
鉛 板 試 験	10.3m/m 以上
耐 静 電 気 性	2000PF 8kV
耐 漏 洩 電 流 性	0.2Amp 5秒発火せず
耐 熱 性	60℃ 20時間以上
管 体	原管 8号
"	管長 50m/m
脚 線	脚線長 21m
"	脚線径 0.6 m/mφ 平行ビニール線

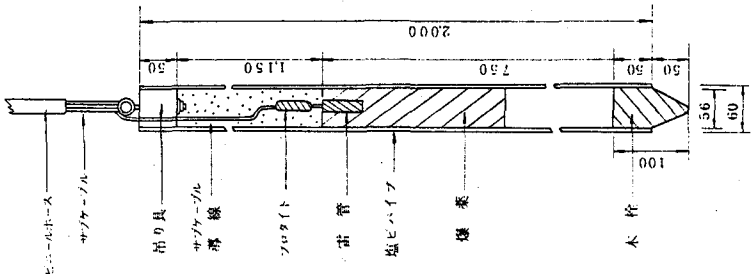


図-7 全体図

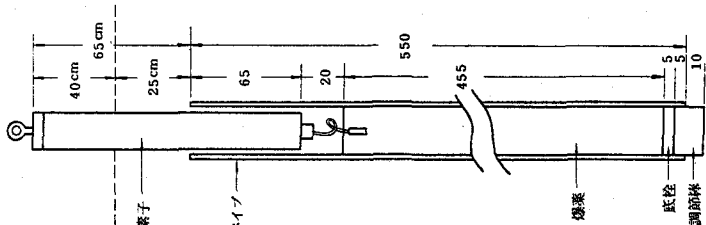


図-8 全体図

せず、さく孔長を測定後薬筒をケーシングパイプに沿って装填する。これは $\phi 5$ のロープの先にフックを付けもので吊り下げ、所定の位置に装填したらロープのフックを外す、無線起爆法は開発されたばかりであり、その原理および方法は図-9 に示すように、起爆指令器、起爆素子A、起爆素子Bか

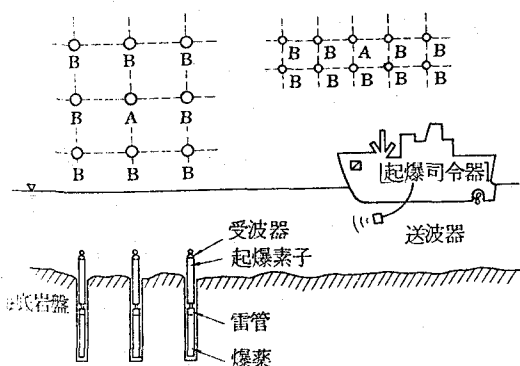


図-9 無線起爆法配置図

ら構成され、起爆素子に雷管を接続し、火薬と一体とし受波器は海底上に出るようにさく孔内に設置する。一回の発破パターンにつき、起爆素子Aを一本として、数本の起爆素子Bを組合せて使用する。起爆指令器は爆発地点から十分離れた、船または作業台に置き、送波器は海中で起爆素子に向けて設置する。

起爆指令器により第一号の信号（25 kHz，FM変調波，周波数 380 Hz）を送波器から海中に超音波として発射する。超音波信号をA，B素子がそれぞれ受波し、信号判別して第二のスイッチを入れそれぞれのコンデンサを充電する。次に第二号の信号（25 kHz，FM変調波，周波数 400 Hz）を起爆指令器より同様に発射すると、A素子が信号を受け、信号を判別して、A素子のスイッチが入り、コンデンサの電荷が雷管に瞬間的に流れてA素子に接続した火薬が爆発する。この爆発により発生する衝撃波をB素子が受け、一定レベル（10 kg/cm² に設定）以上のときにB素子の第三のスイッチが入り、B素子に接続した火薬が爆発する方法である。図-10 に起爆素子のフローチャートを示す。

起爆素子の安全性は超音波による起爆法であるから、取扱いには十分注意しなければならないが、海中には自然騒音、船舶の走行騒音、工事騒音、音響器騒音等があり、これらの騒音により起爆素子が誤動作しない必要がある。このためFM変調波を二種類と衝撃波とを信号として使用し、騒音の影響を全く受けないように設計されている。発破の確実性については、指令信号に対して起爆素子の電子回路が正常に作動し、雷管に定格以上の電流が流れれば発破は確実に起る。

(4) エアバブルカーテン

水中衝撃圧の減衰効果を得るため、海底にエアパイプを敷設し、台船または作業台より、エアホースを通してバブルを発生させ、バブルを透過する衝撃圧を減衰させる目的で図-11 に示すトラスわく組にパイプを二列に配し、パイプの浮き上り防止とパイプを水平に保持して、均等なバブルを吐出させる役目を行った。

(5) 水中衝撃圧測定器

水中衝撃圧の測定器には機械的測圧器（クラッシャーゲージ、ダイヤフラムゲージ、ピストンゲージ等）と電気的測圧器（圧電気型測圧器、ひずみゲージ型測圧器、圧抵抗型測圧器等）がある。機械的測

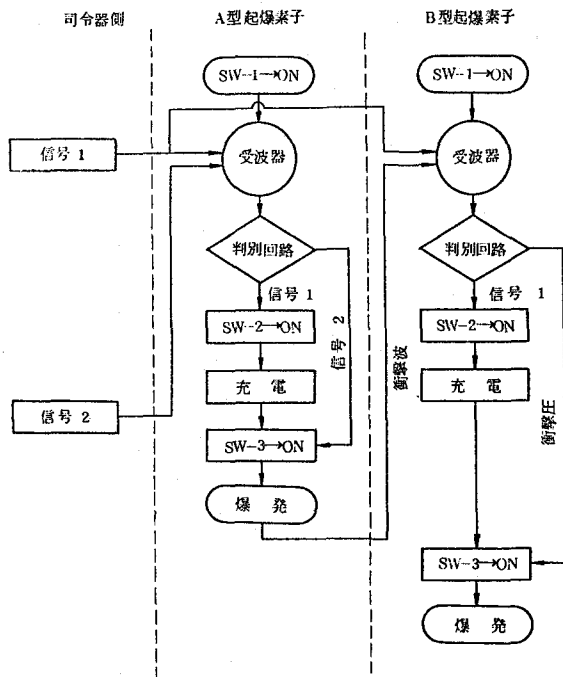


図-10 起爆素子フローチャート

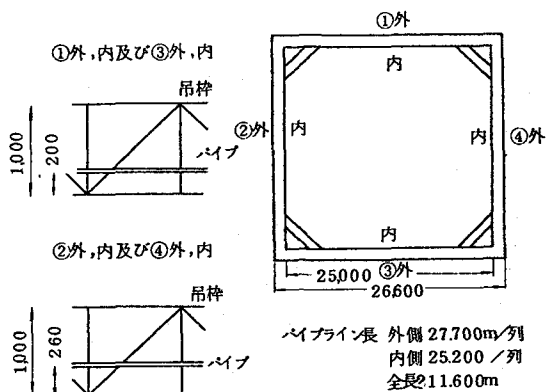


図-11 トラスわく組

圧器は外力による永久変形を生ずる材料、たとえば銅、鉛などで作った板、円柱、球等の変形量から圧力を求める方式のものである。この測圧器は構造が簡単で安価であり、取扱いが簡便であるから手軽に使用される、しかし水中衝撃圧のような動的圧力を受けた場合の測圧器の変形量は、その圧力最高値だけに比例するのではなく、圧力波形の影響を受けて変化する、そこで測定値を信頼できるためには、測定

対象となる発破による衝撃と同一条件の衝撃を行なって、測定器の校正が必要である。圧力が時間とともにどのように変化するか、測定することができないため、圧力波の性状を詳しく知ることができない。

一方電気的測圧器は圧力を電気量に変換する、圧力電気量変換素子（トランジューサー）を用いた測定器である。この場合トランジューサーによって変換された信号は、計測することが複雑で難かしいため、現場実験にはあまり採用されていない。しかし、圧力の最高値と時間的変化を正確に捕えるためには、電気的測定器を用いなければならない。また水中衝撃圧を与える水中圧力波の周波数成分は、広範囲にわたっている。そこで今回の実験においても圧電気型測圧器を採用した。図－12に電気石ゲージの構造を示す。

(6) ずり処理

破砕効果の確認に当っては、発破後、破砕位置に土運船を配し、8" のエアリフトパイプをデリックで吊しながら、ダイバーの誘導のもとに建て込みを行ない、ダイバーは破砕状況、マウスの海底への密着状況を確認しながら、エアリフト作動時にはジェットホースを使い、周囲の破砕岩をマウスへ集めた。使用機器は表－14、またそれらの配置は図－13に示す。

7. 実験結果と考察

(1) エアバブルカーテン

① 超音波によるエアバブルカーテンの効果

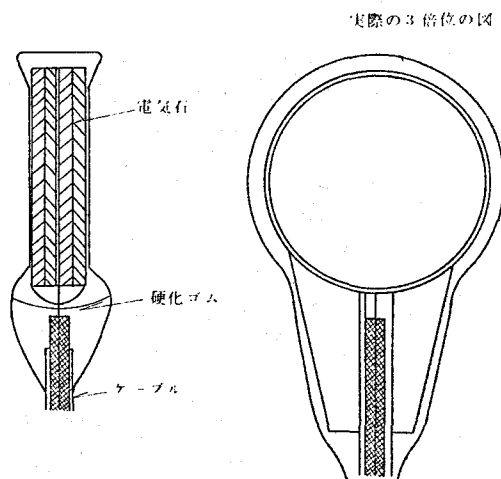
実験の目的は、本実験で使用するエアバブル吐出管のエア吐出量およびエア噴出孔の孔径と間隔を決定する資料を得ることである。この実験では圧力発生源として水中音の送波器を用い、エアバブルカーテンによる音波の減衰率を求めた。

測定法概念図は図－14に示すが、測定結果をまとめると図－15となる。これらの測定結果から

i) パイプにあけた穴の径は1^{mm}でも2^{mm}でも大きな差はないが、4^{mm}では効果が落ちる。

ii) 穴の間隔については25^{mm}または45^{mm}附近が最も効率が良いような傾向がある。

iii) 減衰は周波数の大きいものほど大きく10^{kHz}以上については、数百分の1まで落ちるが、1^{kHz}以下のものは数分

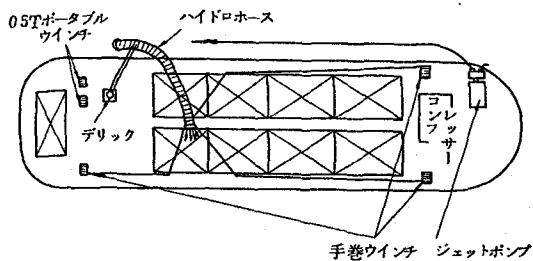


図－12 電気石ゲージの構造

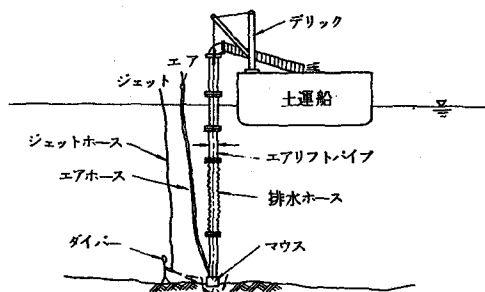
表－14 水深10m用使用機器

機器名称	要 目
土 運 船	200m ³ 底開式 L=28.5m B=8.3m
コンプレッサー	ロータリー式 106PS/1800 rpm 10.5m ³ /min 7kg/cm ²
ジェットポンプ	10PSディーゼルエンジン駆動、渦巻式 最大送水量 0.6m ³ /min 揚 程 30m
エアリフトパイプ	8" SGF
先端 マウス	400φ 先端切欠きあり
エ ル ポ	8" エアリフトパイプとハイドロホースとの接続
ハイドロホース	8" ×約6m (ゴム製) ×2
デ リ ッ ク	
ポータブル手巻 ウ イ ン チ	デリック操作用 0.5T×2台 ハイドロホース固定用 3台
コンプレッサーホース	2"
ジェット用消防ホース	2"

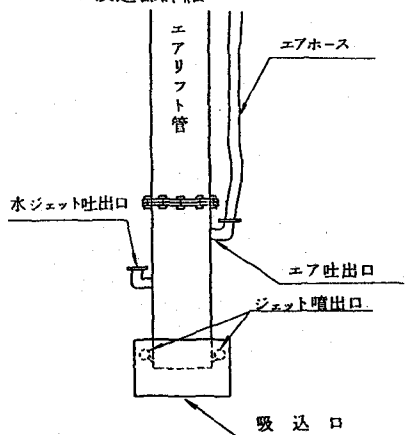
(a) 平面図



(b) 断面図



エアリフト吸込部詳細



水ジェット吸込口

水ジェット噴出口

図-13 水深10m用ザリ処理機器配置

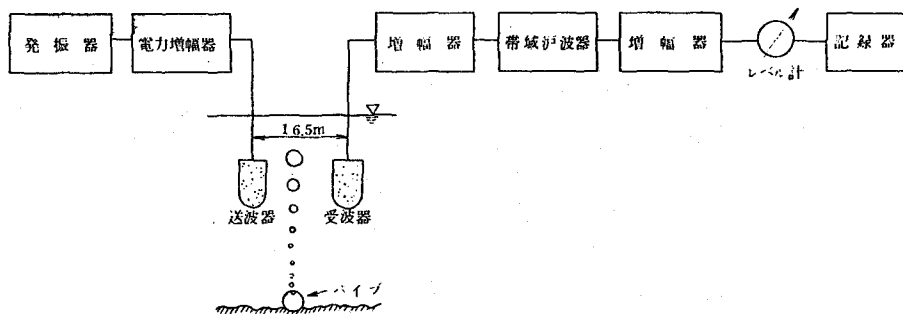


図-14 ブロック図

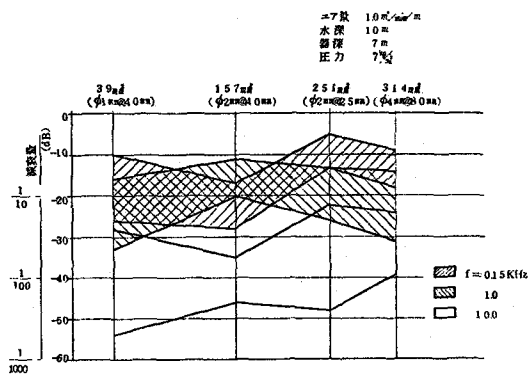


図-15 エアバブルカーテン超音波透過実験結果

の1しか落ちない。

Ⅳ) エア量は高周波のものについては、エア量の増加と共に減衰量も大きくなる傾向がみられるが、低周波のものに対しては $0.3 \sim 1.0 \text{ m}^3/\text{min}$ の間では大きな差はみられない。

Ⅴ) 同量のエア量に対して、2列と1列のエアカーテンでは 2^{mm} ϕ 、 40^{mm} ピッチ程度までは2列の方が減衰効果大きい。

② 水中吊し火薬の爆発による水中衝撃圧のエアバブルカーテンによる減衰効果

前述の超音波によるエアバブルカーテンの効果が、実際の火薬の爆発によって生ずる水中衝撃圧が、エアカーテンによりどのように減衰するかをみるために実施した。まず実験プール（水深25 m）内にエアパイプを敷設し、流量、孔径、パイプ間隔を変化させ、爆発による水中衝撃圧の減衰を測定した。パイプからの吐出径は1, 2, 4 mm, 流量は0.1, 0.3, 0.5, $1.0 \text{ m}^3/\text{min}$ の組合せで行った。要領図は図-16による。

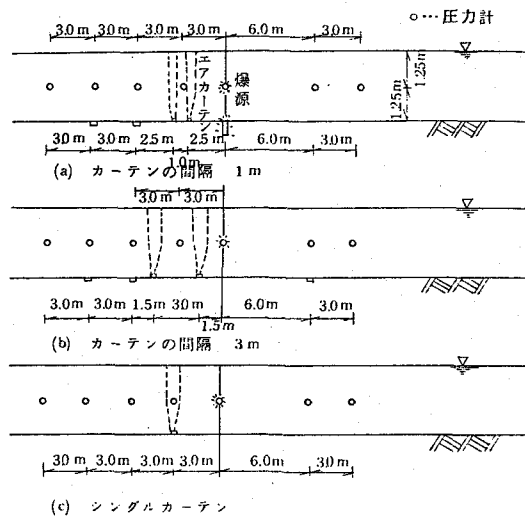


図-16 実験要領図

測定結果は表-15にまとめた。本実験で使用するエアカーテンの大きさは $25 \text{ m} \times 25 \text{ m}$ であり、そのパイプライン内での実験は $200 \sim 1800 \text{ g}$ の火薬を水中に吊し、水深10 m地点にてバブルカーテンの効果を測定した。得られた結果は表-16, 図-17に示すが、表-13中の爆源からの距離は、水中の音速を 1500 m/sec として伝播時間から計算したものである。

プール内実験と現場規模実験を比較するに、プール内実験では現場規模実験に比較し、エア量が少ないにもかかわらず水中衝撃圧はエアカーテンにより $\frac{1}{10}$ 以下に落ちている。しかし現場規模実験では $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{5}$ 程度の低下しかみられなかった。

③ 一自由面さく孔発破による水中衝撃圧のエアバブルカーテンによる減衰効果

実験の細部の内容については、5.実験の概要の項で述べている。圧力測定は他の測定（魚類影響調査、水中音、地盤振動測定等）と共に図-18, に示すように配置した。実験の結果は表-17にまとめたが、本実験におけるエアバブルカーテンの減衰効果は当初期待した値よりも小さい結果であっ

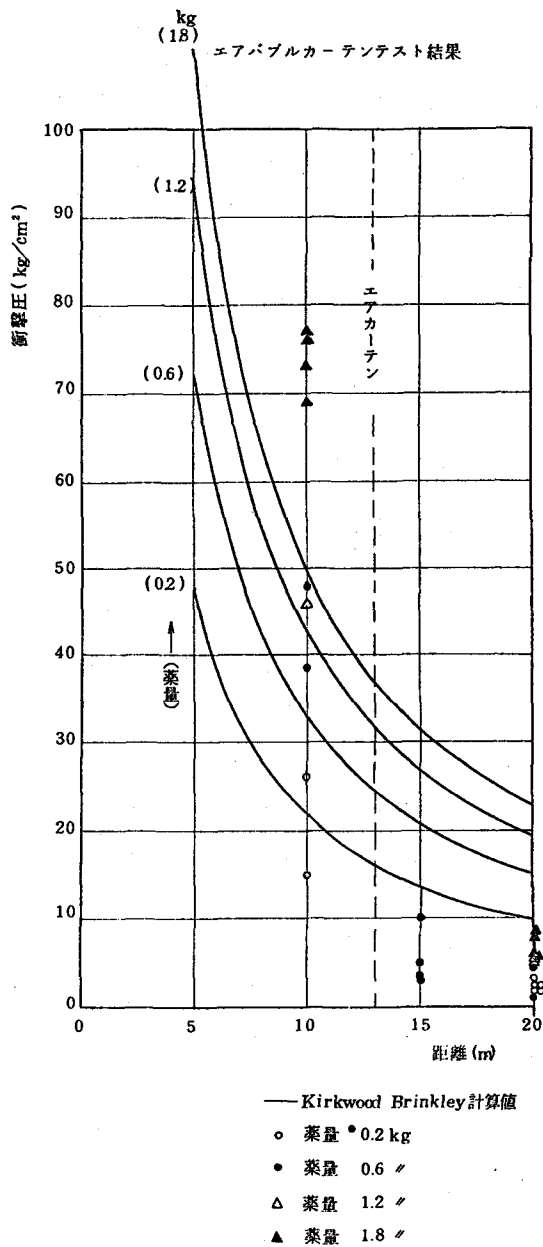


図-17

たが、水中衝撃圧を軽減するのに有効であるといってもよいだろう。

しかし予備的な実験結果では数十分の1～十数分の1にまで落とす効果が、本実験では僅か $\frac{1}{3}$ 程度しか落ちず種々の条件によって結果は大きく異なることがわかる。結論として云えば

i) 水中での一自由面さく孔発破に生じた水中衝撃圧の圧力最高値と薬量および爆心からの距離との関係を式で表わすと、

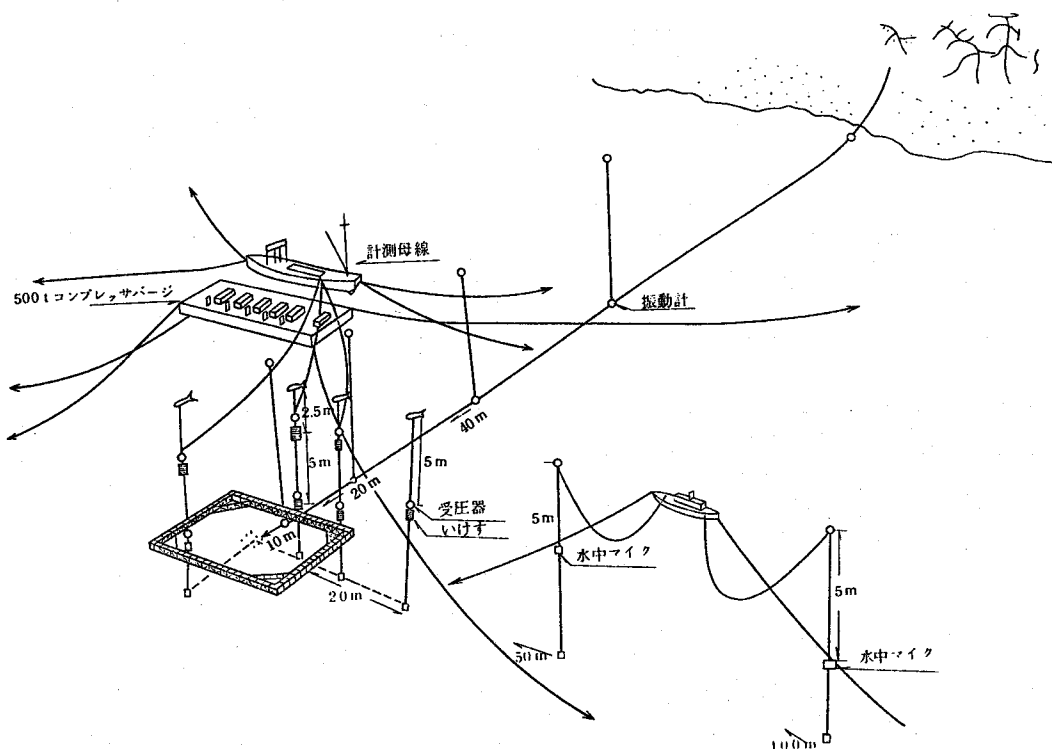


図-18 計測機器全体配置図

エアバブルカーテンの内側

$$P = 186 \left(\sqrt[3]{W/R} \right)^{1.06} \quad \text{ただし } 15 < R/\sqrt[3]{W} < 4$$

エアバブルカーテンの外側

$$P = 521 \left(\sqrt[3]{W/R} \right)^{1.78} \quad \text{ただし } 4 < R/\sqrt[3]{W} < 9$$

P: 圧力最高値 [kg / cm²]

W: 薬量 [kg]

R: 爆心からの距離 [m]

ii) 水中においてさく孔発破を行った場合には、爆源から地盤を介して水中に伝播してくる地盤一水伝播波のもつ圧力が水中衝撃圧の重要な要素となる。

iii) 潮流や水深によるエアバブルカーテンの乱れが考えられるが、薬量に対してエアバブルカーテンの大きさが適当であったかどうか。

iv) さく孔発破に生ずる水中衝撃圧の大きさは、発破対象岩の性質、発破による破砕の程度、発破条件などに大きく左右される。今回の実験対象岩は風化花崗岩や堆積土砂であり、爆発のもつエネルギーの僅かが地盤の破砕に使用されず、ほとんど大部分のエネルギーが水中衝撃圧となって水中に投射されたと考えられる。

(2) 水中衝撃圧防止材

水中衝撃圧防止または減衰させるため、エアバブルカーテンによる方法を実施してきたが、その他幾つかの材料の防止効果をみて今後の資料とするため実施した。

i) 選定に当っては材料単価が安価なこと。

表-15 エアバブルカーテン実験結果(実験プール内での実験)

No	カーテンの 仕 様	カーテンのない方向			カーテンのある方向		
		測 点	距 離 (m)	圧 力 (kg/cm ²)	測 点	距 離 (m)	圧 力 (kg/cm ²)
1	流量 100 l/min/m 孔径 2 mm 間隔 3 m	P ₀	6	33.8	P ₂	3	57
		P ₀	6		P ₀	6	156
		P ₀	9		P ₀	9	146
					P _{1,2}	1 2	155
2	同 上	P ₀	6	31.3	P ₃	3	41.5
		P ₀	6		P ₀	6	0.24
		P ₀	9		P ₀	9	1.14
					P _{1,2}	1 2	148
3	流量 300 l/min/m 孔径 2 mm 間隔 1 m	P ₀	6	26.7	P ₃	3	81.2
		P ₀	6		P ₀	6	0.08
		P ₀	9		P ₀	9	0.50
					P _{1,2}	1 2	0.27
4	同 上	P ₀	6	28.9	P ₃	3	89.8
		P ₀	6		P ₀	6	0.09
		P ₀	9		P ₀	9	0.53
					P _{1,2}	1 2	0.75
5	流量 300 l/min/m 孔径 1 mm 間隔 3 m	P ₀		29.7	P ₃	3	140
		P ₀			P ₀	6	0.20
		P ₀			P ₀	9	1.03
					P _{1,2}	1 2	0.44
6	同 上	P ₀	6	26.5	P ₃	3	84.7
		P ₀	6		P ₀	6	0.14
		P ₀	9		P ₀	9	0.72
					P _{1,2}	1 2	1.39
7	流量 100 l/min/m 孔径 1 mm 間隔 1 m	P ₀	6	35.4	P ₃	3	7.4
		P ₀	6		P ₀	6	3.6
		P ₀	9		P ₀	9	1.3
					P _{1,2}	1 2	0.34
8	同 上	P ₀	6	35.0	P ₃	3	5.4
		P ₀	6		P ₀	6	2.2
		P ₀	9		P ₀	9	1.14
					P _{1,2}	1 2	—
9	流量 500 l/min/m 孔径 4 mm シングル	P ₀	6	28.0	P ₃	3	57.0
		P ₀	6		P ₀	6	1.00
		P ₀	9		P ₀	9	0.70
					P _{1,2}	1 2	1.00
10	流量 1,000 l/min/m 孔径 4 mm シングル	P ₀	6	24.9	P ₃	3	10.7
		P ₀	6		P ₀	6	0.23
		P ₀	9		P ₀	9	0.23
					P _{1,2}	1 2	0.83
11	同 上	P ₀	6	25.3	P ₃	3	11.5
		P ₀	6		P ₀	6	0.27
		P ₀	9		P ₀	9	0.96
					P _{1,2}	1 2	0.8

表-16 エア-バブルカーテン実験結果

NO	薬量 (kg)	バブルカーテン の流量** (m ³ /min/m)	P ₁ 点の測定値			P ₂ 点の測定値			減衰率 $\frac{\delta P_1}{\delta P_2}$
			距離 (m)	圧力値 (kg/cm ²)	δP_1	距離 (m)	圧力値 (kg/cm ²)	δP_2	
1	0.6	1.0 (1.0×1列)	—	—	—	16.1	10.2	0.534	—
2	0.6	1.0 (")	—	—	—	18.0	4.24	0.381	—
3	0.6	1.0 (0.5×2列)	—	—	—	19.7	3.50	0.230	—
4	0.6	1.0 (")	—	—	—	19.7	2.21	0.145	—
5	0.2	1.0 (1.0×1列)	—	—	—	19.7	3.05	0.304	—
6	0.2	1.0 (")	—	—	—	20.0	2.51	0.254	—
7	0.2	1.0 (0.5×2列)	—	—	—	20.0	2.05	0.208	—
8	0.2	1.0 (")	—	—	—	20.2	2.14	0.219	—
9	0.2	0.5 (0.5×1列)	7.58	13.9	0.470	19.8	0.80	0.080	5.85
10	0.2	0.5 (")	7.57	24.8	0.837	19.0	2.33	0.221	3.79
11	0.6	0.5 (")	6.63	38.9	0.747	19.3	5.09	0.327	2.28
12	0.6	0.5 (")	5.37	49.4	0.748	18.9	6.37	0.400	1.87
13	1.2	1.0 (1.0×1列)	8.21	46.8	0.882	20.6	5.70	0.304	2.90
14	1.8	1.0 (")	8.21	74.2	1.20	20.5	8.16	0.371	3.23
15	1.8	1.0 (")	7.80	72.9	1.11	20.2	5.90	0.264	4.20
16	1.8	1.0 (0.5×2列)	7.10	86.4	1.18	20.2	6.62	0.295	3.99
17	1.8	1.0 (")	8.50	72.5	1.22	20.8	8.81	0.407	3.00
18	0.6	1.6 (1.6×1列)	7.26	48.2	1.03	17.4	6.33	0.362	2.85
19	0.6	1.6 (")	7.89	44.7	1.05	11.5	11.3	0.650	1.62
20	1.8	1.6 (")	7.89	57.5	0.889	18.2	17.4	0.692	1.28
21	1.8	1.6 (")	7.26	62.7	0.882	18.3	19.2	0.768	1.15
22	0.6	1.6 (0.8×2列)	6.95	49.6	1.01	18.6	6.72	0.414	2.44
23	0.6	1.6 (")	7.26	30.9	0.658	19.5	3.54	0.230	2.86
24	1.8	1.6 (")	8.05	40.9	0.147	19.6	8.15	0.352	1.84
25	1.8	2.0 (1.0×1列)	9.47	8.65	0.164	18.9	0.69	0.029	5.73
26	0.6	2.0 (")	11.0	3.1	0.106	23.0	0.3	0.024	4.51

δP はKirkwood Brinkleyの式 $P = K (W^{1/2}/R)^{1.13}$ で計算した圧力最高値 P_c と計測された値 P_m との比 $P_m/P_c = \delta P$ としてある。

表-17 自由面さく孔発破測定結果

No.	薬量(kg)	仕 様	爆源からの距離(m)	$W^{1/3}/R$	圧力最高値 (kg/cm ²)	エアーカーテン仕様
1	18.75	P ₁ U(上)	21.1	0.1224	425	1.0m ³ /min /m×2列
		L(下)	20.3	0.1308	27.0	
		P ₂ U	15.1	0.1692	5.0 (堆)	
		L	14.0	0.1897	4.0 (堆)	
		P ₃ U	18.6	0.1428	4.0 (堆)	
		L	15.4	0.1725	1.5 以 上	
2	20.24	P ₄ U	34.7	0.0765	1.5 以 上	1.0m ³ /min /m×1列
		P ₁ U	—	—	—	
		L	4.9	0.5561	50.4	
		P ₂ U	21.9	0.1244	49.8	
		L	20.4	0.133	17.3	
		P ₃ U	19.6	0.139	11 以 上	
3	68.05	L	18.9	0.144	5 以 上	1.0m ³ /min /m×2列
		P ₄ U	35.2	0.0774	60.4	
		P ₁ U	17.1	0.237	6	
		L	16.0	0.255	41.4	
		P ₂ U	15.1	0.270	64.4	
		L	13.6	0.300	61.0	
4	74.23	P ₃ U	16.2	0.252	50 以 上	1.0m ³ /min /m×2列
		L	15.2	0.268	78.5	
		P ₄ U	35.0	0.116	21.2	
		P ₁ U	11.4	0.368	110	
		L	8.8	0.477	101	
		P ₂ U	16.3	0.257	38	
5	74.23	L	13.9	0.302	47.6	1.0m ³ /min /m×2列
		P ₃ U	20.5	0.205	26	
		L	18.7	0.224	33.6	
		P ₄ U	36.6	0.114	15.5	
		P ₁ U	35.6	0.118	9.6	
		P ₂ U	21.0	0.200	30	
6	104.94	L	20.3	0.207	41.7	1.0m ³ /min /m×2列
		P ₃ L	10.1	0.416	89	
		P ₄ L	10.3	0.408	98.6	
		P ₅ U	21.5	0.195	24	
		L	20.7	0.203	33.6	
		P ₁ U	36.0	0.131	8.9	
7	141.24	P ₂ U	23.5	0.200	34.6	1.1m ³ /min /m×1列
		L	20.3	0.232	22.8	
		P ₃ L	9.2	0.512	110	
		P ₄ L	10.4	0.453	33	
		P ₅ U	23.1	0.203	24.6	
		L	21.0	0.216	22.5	
8	121.50	P ₁₃	24.6	0.211	25	1.1m ³ /min /m×1列
		P ₁₂	15.9	0.327	63.3	
		P ₁₁	10.1	0.515	110	
		P ₂₄	44.5	0.117	24.7	
		P ₂₃	43.2	0.120	38.5	
		P ₂₂	38.0	0.134	34.6	
8	121.50	P ₂₁	36.8	0.141	28.6	1.1m ³ /min /m×1列
		P ₁₃	23.5	0.210	24.8	
		P ₁₂	14.2	0.348	61.6	
		P ₁₁	7.4	0.669	71.3	
		P ₁₄	42.9	0.115	8.26	
		P ₂₃	41.3	0.119	11	
8	121.50	P ₂₂	36.2	0.136	13.8	1.1m ³ /min /m×1列
		P ₂₁	33.4	0.148	13	

ii) 取り扱いが簡単なこと

iii) 減衰効果が期待できるもの

を考慮した。使用した材料は表—18に示す。

表—18 防 護 材 料

防 護 材	厚 み	形 状	仕 様
発泡ネオプレンゴム	5m/m	300m/m×300m/m	
硬質ウレタンスポンジ	10m/m 20m/m	600m/m×600m/m	
発泡ネオプレンゴム	5m/m 10 " 20 "	"	
発泡ポリエチレンゴム	5m/m 10 " 20 "	"	
亜鉛引鉄板	1m/m	"	
鉄板	2m/m 5m/m	"	
ブラストマット	50m/m	"	シート厚1.9m/m

衝撃圧の減衰効果が期待できるものとして考えられるものは、断熱圧縮効果が期待できるもの、吸収係数が大きいものの2つである。

試験結果は表—19にまとめたが、この表で分るように鉄板以外のものについては、種類の如何を問わず効果がある、今回用いた厚みの鉄板では水中衝撃圧は透過するとみなしてよい。ゴム、スポンジ系のものは厚みが大きいほど効果的な影響が見られるが確定的でない。

(3) 水中衝撃圧の魚類への影響

さく孔発破により生じた衝撃圧により魚類がどのような損傷を受け、またエアバブルカーテンの効果がどの程度であるかを見るための実験である。

実験に当っては水産庁南西海区水産研究所の指導のもとに、実験魚種、匹数、設置位置などを決定した。図—19に設置図を示す。

実験はさく孔発破実験に伴う衝撃圧測定と同時に実施した。網イケスにはメバル、ハマチ、アイナメ、タイ、アコウ、エビ、チヌなどの各種2～4匹ずつ、4～5種を入れ、爆破10分後に回収し解剖、レントゲン撮影を行ない、損傷程度を判定した。実験結果は図—20のようにまとめられる。

エアバブルカーテン内、外の比較においては、明らかにカーテン効果はみられたが、カーテン外のものでも全死に近いものもみられた。その原因は、

i) 被爆により魚類は内部諸器官の組織が破裂し、骨格が脱離するなどの症状を呈し、その損傷が著しい場合にはへい死する。

表-19 防護材の試験結果(実験プールでの実験)

NO	防護膜の種類	防護膜のない方向			防護膜のある方向		
		測点	距離 (m)	圧力最高値 (kg/cm ²)	測点	距離 (m)	圧力最高値 (kg/cm ²)
1	プラスチックマット 50 mm	P ₃	3		P ₃	3	7.1
		P _{3.6}	3.6	34.4	P _{3.6}	3.6	15.1
		P _{4.2}	4.2	33.9	P _{4.2}	4.2	
2	硬質ウレタンスポンジ 20 mm	P ₃	3		P ₃	3	9.4
		P _{3.6}	3.6	39.3	P _{3.6}	3.6	15.3
		P _{4.2}	4.2	37.7	P _{4.2}	4.2	
3	硬質ウレタンスポンジ 10 mm	P ₃	3		P ₃	3	8.5
		P _{3.6}	3.6	38.7	P _{3.6}	3.6	12.6
		P _{4.2}	4.2	33.5	P _{4.2}	4.2	
4	発泡ポリエチレン 5 mm	P ₃	3		P ₃	3	10.4
		P _{3.6}	3.6	43.2	P _{3.6}	3.6	15.1
		P _{4.2}	4.2	39.3	P _{4.2}	4.2	
5	発泡ポリエチレン 10 mm	P ₃	3		P ₃	3	10.2
		P _{3.6}	3.6	39.3	P _{3.6}	3.6	15.7
		P _{4.2}	4.2	36.6	P _{4.2}	4.2	
6	発泡ポリエチレン 20 mm	P ₃	3		P ₃	3	10.0
		P _{3.6}	3.6	41.9	P _{3.6}	3.6	14.3
		P _{4.2}	4.2	38.5	P _{4.2}	4.2	
7	発泡ネオプレンゴム 5 mm	P ₃	3		P ₃	3	11.8
		P _{3.6}	3.6	44.0	P _{3.6}	3.6	20.8
		P _{4.2}	4.2	41.6	P _{4.2}	4.2	
8	発泡ネオプレンゴム 10 mm	P ₃	3		P _{3.3}	3	8.8
		P _{3.6}	3.6	—	P _{3.6}	3.6	18.7
		P _{4.2}	4.2	41.2	P _{4.2}	4.2	
9	発泡ネオプレンゴム 20 mm	P ₃	3		P ₃	3	8.1
		P _{3.6}	3.6	45.8	P _{3.6}	3.6	21.0
		P _{4.2}	4.2	42.4	P _{4.2}	4.2	
10	亜鉛引鉄板	P ₃	3		P ₃	3	56.7
		P _{3.6}	3.6	43.2	P _{3.6}	3.6	45.8
		P _{4.2}	4.2	38.5	P _{4.2}	4.2	
11	鉄板 2 mm	P ₃	3		P ₃	3	56.4
		P _{3.6}	3.6	46.6	P _{3.6}	3.6	42
		P _{4.2}	4.2	44.3	P _{4.2}	4.2	
12	鉄板 5mm	P ₃	3		P ₃	3	41.1
		P _{3.6}	3.6	44.0	P _{3.6}	3.6	36.1
		P _{4.2}	4.2	39.3	P _{4.2}	4.2	

ii) 被爆による損傷状態には魚種により差異がみられた。実験に供した魚種のうちでは、タケノコメバル＝マダイ＞ハマチ＞アイナメの順で被爆程度に差がみられたが、アイナメのように体型が紡錘形でうきぶくろを欠除し、骨格が軟柔な魚は薬量 74 kg のさく孔発破で爆心から 10 m の近距離に置かれてもへい死するものではなく、全て遊泳しており、内部諸器官の損傷も極めて軽微であった。

iii) 爆源を中心として 25 m × 25 m のエアバブルカーテンを設置したさく孔爆破の場合、カーテンのすぐ外側に配置した魚類の内部諸器官の損傷は極めて軽減され、殆んどが生存遊泳していた。このことからエアバブルカーテンは有効と判定されるが、カーテンを離れるに従って損傷程度は高くなり、爆源から 35 m 前後においては、いずれの場合も内部諸器官に損傷を受けへい死する特徴がみられた。

iv) 水中衝撃圧のピーク圧と損傷指数との間には、爆心からの距離区分により相関性がみられた。すなわち近距離で直撃的な被爆を受け、損傷が著し

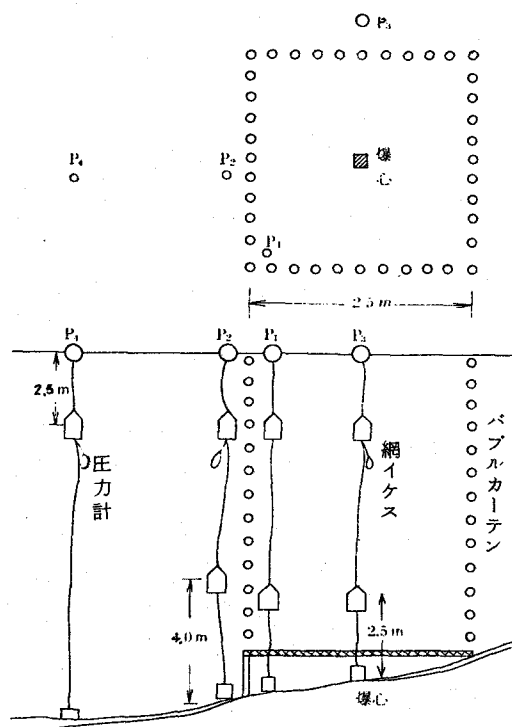


図-19 設置図

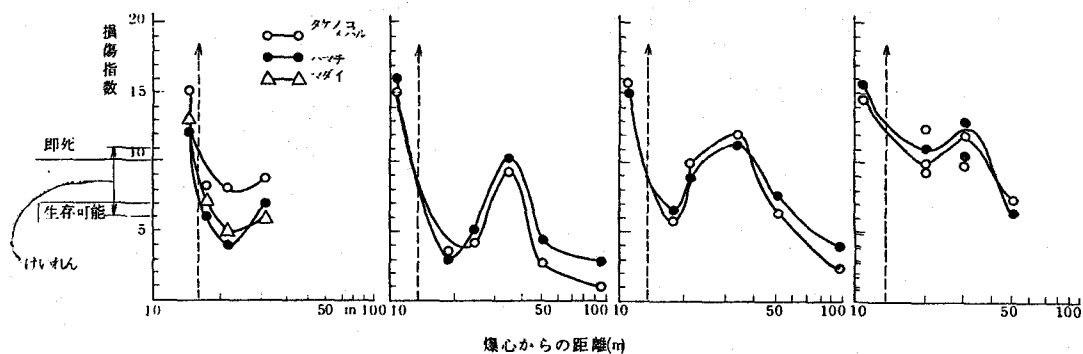


図-20 爆心からの距離と魚類の損傷指数
(水産庁、南西海区水産試験所による)

いカーテン内の群，カーテン外側から20 mまでの損傷指数が極めて低い群，前者よりやや損傷指数が高い20～30mの間に置かれている群およびカーテン内と同じように著しい損傷を受けた30～40 mの間に配置された群に区分された。

(4) その他諸実験測定

その他実験した項目は水中音，地盤振動，火薬および雷管の殉爆実験，水深による破碎効果，水中衝撃圧の構造物への影響（実験プール内）等であるが，誌面の都合上記述することは出来ないが，表－10の実験総括表を参照されたい。

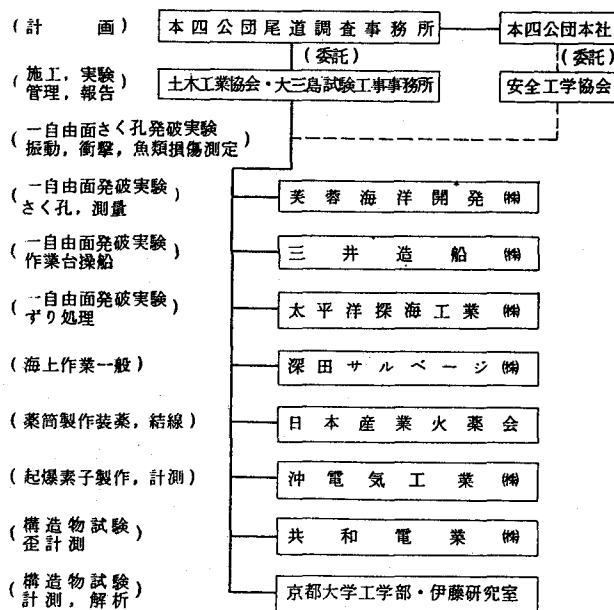
8. 結 び

今回の報告は水中発破に関する一連の実験目的，実験方法，実施条件および器材，測定という順序に記述したが，誌面の都合上水中衝撃圧による影響および防止方法についてのみにとどまった。

今後に残された問題については全体的にみて，さく孔装薬，発破を作業台上から実施し，水中衝撃圧をエアバブルカーテンによって防止できるという初期の目的は達成された。しかし大規模爆破時の衝撃圧資料も極端に乏しく，今回の実験が今後の検討への一助になれば幸いである。またわが国においてこのような大規模実験ができたことは今後の海洋土木工事の施工法を検討するなかで海底さく孔発破技術が一步向上したことにより議論されることを期待する。

おわりに今回の実験が短期間に，しかも大部分が海中工事にもかかわらず，無事故で実施出来たのは，ひとえに各分野を担当された方々の努力に負うところが大きい，末筆ながら感謝する次第である。

実験組織図を示す。



実 験 組 織