

水中せん孔爆破に伴う水中圧力波 (第3報)

—現場実験の解析—

小川輝繁*, 福山郁生*, 伊藤一郎**, 奈良平俊彦***,
長坂 進****

本州四国連絡橋公団が比較的水深の浅い海域において実施した無自由面および一自由面爆破実験によって得られた水中圧力波の計測結果を解析し, 次のような点を明らかにした。水深の浅い海域における水中せん孔爆破に伴う水中圧力波には比較的低周波の Ground wave と高周波の Water wave があり, 前者の波動の方が後者より距離減衰が大きいため, 爆源に近い傾坡では Ground wave が卓越するが, 遠方では Water wave が卓越する。

1. 緒 言

第1報¹⁾第2報²⁾では, 水中せん孔爆破に伴う水中圧力波の特性を水槽実験によって検討したが, さらに実規模の実験による検討が行なえればきわめて望ましい。たまたま本州四国連絡橋公団は昭和50年2月~3月に香川県坂出沖において, 実規模の海底せん孔爆破試験を行なったが, この実験の計測計画ならびに計測結果の解析を財団法人総合安全工学研究所に依頼した。筆者らはこの問題の検討委員会のメンバーとなり, 水中圧力波に関する問題を担当した。本論文は, 上記の海底せん孔爆破実験における水中圧力波の計測結果と, その圧力波の伝播特性の検討結果について述べたものである。

実験は無自由面爆破と一自由面爆破の2通り実施した。

2. 試験爆破の概要

この試験の目的は水中爆破の施工技術の検討と爆破による周辺環境への影響把握であった。Fig. 1に実験地点を示した。爆破地点は図中の4Aおよび7Aである。4A地点では一自由面爆破実験(以下これを4A爆破と呼ぶ)7A地点では無自由面爆破実験(以下これを7A爆破と呼ぶ)を実施した。

4A爆破では, 二面島の汀線近傍の岩盤を4回に分けて爆破した。その条件をTable 1に示す。まず, T.P.—5mより上の堆積層はグラブ船で浚せし, 露

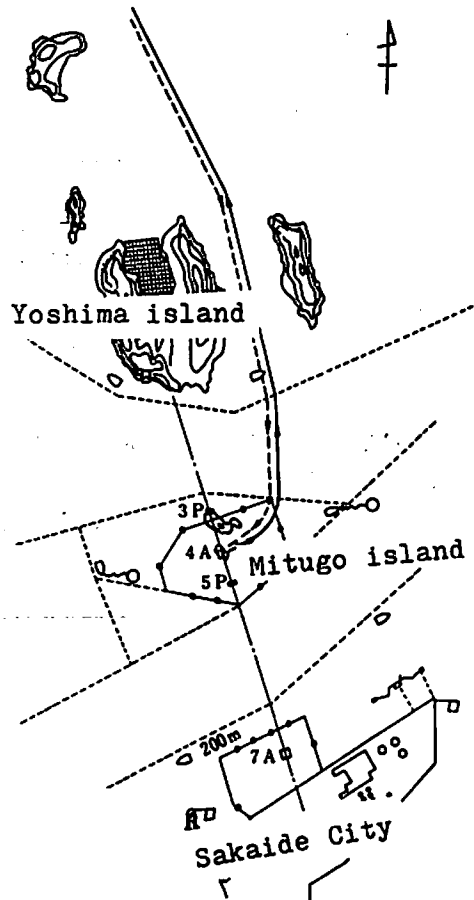


Fig. 1 Site of experiments

昭和52年5月25日受理

* 横浜国立大学工学部安全工学科, 〒355 横浜市中区大岡 2-31-1

** 京都大学工学部資源工学科, 〒606 京都市左京区吉田本町

*** 本州四国連絡橋公団, 〒105 東京都港区西久保松山町 1

**** 本州四国連絡橋公団 坂出工事事務所, 〒762 坂出市京町3-3-8

Table 1 Blasting condition at 4A area

Test No.	1	2	3	4
Depth of the upper end of borehole (m)	5	5	5	5
Number of borehole	12	24	36	76
Length of bore hole (m)	5	5	5	5
Diameter of borehole (mm)	153	153	153	153
Spacing of borehole (m)	2	2	2	2
Diameter of charge (mm)	75	75	75	80
Length of charge (m)	3.2	3.2	3.2	2.7
Total amount of charge (kg)	240	480	720	1520

出した岩盤面から垂直に長さ5mの装薬孔がODせん孔機により所定の本数だけせん孔された。各装薬孔には爆薬20kgが装填された。爆薬は海底爆破用に開発されたGX-1ダイナマイトである。爆破対象岩は風化花崗岩で、風化の程度は場所により差があり、弾性波速度(P波)は2500m/S~3000m/Sであった。第1回~第3回爆破では導爆線起爆、第4回爆破では超音波遠隔起爆法が用いられた。

7A地点は、水深約15mの海底下に約30mの厚さの砂礫層が堆積しており、その下に風化花崗岩がある。ここでは、上部に堆積している砂礫層を残したまま

Table 2 Blasting condition at 7A area

Test No.	1		2			3			4			5											
Kind of* blasting	I		I			D			D			D											
Delay time (S)	0		0			2			3			0		1		2		3			4		5
Depth of water(m)	13.6 ~15.6	13.5 ~15.0	14.1 ~14.2	14.1 ~14.2	14.0 ~14.3	14.0 ~14.1	14.0 ~14.5	14.0 ~14.1	14.0 ~14.4	14.3 ~14.2	14.0 ~14.2	14.1 ~14.2	14.2 ~14.4	13.9 ~14.1	14.2 ~14.3								
Number of boreholes	9	9	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4								
Borehole length(m)	32.4 ~36.0	35.5 ~3.5	34.8 ~34.9	34.6 ~35.2	34.7 ~34.9	34.4 ~35.0	33.5 ~36.5	30.3 ~35.4	34.5 ~34.7	34.8 ~35.0	34.2 ~34.7	34.2 ~35.4	34.9 ~35.2	34.6 ~35.1									
Amount of charge(kg)	180	180	60	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80								

* I : Instantaneous blasting D : Delay blasting

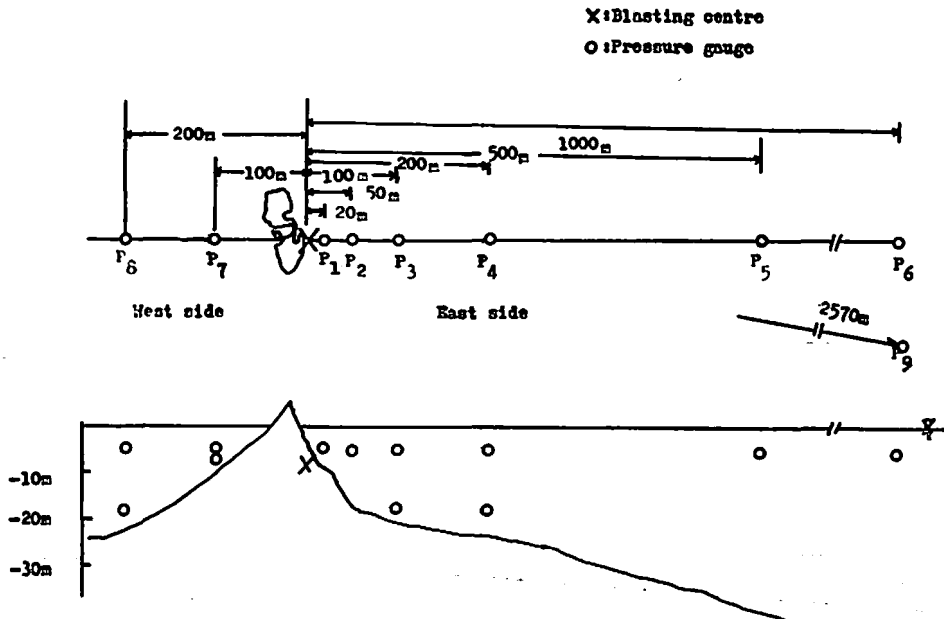


Fig. 2 Arrangement of pressure gauges near 4A area

風化花崗岩を爆破する工法を試みた。破碎の対象となった岩盤は T.P. -45m~T.P. -50m の風化花崗岩で、その特性は場所によってかなりの差があり、その P 波速度は 2500m/S~4000m/S である。爆破試験は 5 回行われたが、各爆破の条件は Table 2 に示すとおりである。装薬孔は、海面上に設置された台船に据えたせん孔機によって T.P. -50m まで垂直にせん孔された。使用したせん孔機は ODせん孔機とウェルマンせん孔機で、せん孔径は前者の場合 153mm、後者の場合 146mm である。また、いずれの装薬孔にも 20kg の GX-1 ダイナマイトを装填し、装薬長は 3.27m、薬径 70mm であった。

3. 水中圧力波の計測

圧力波の計測は、半導体トランスデューサである Kulite-HKMS-375 と豊田工機製 PMS-5M が使用された。これらの圧力計より発信された信号は測定用ケーブルで、近隣の小島および台船上に設けた計測室へ送り、増幅器を通してデータレコーダに収録された。測定系は DC~20KHz の信号に対して一様な応答を有している。

4A 爆破では Fig. 2, Table 3 に示すように 9 地点に測点を設け、それぞれに圧力計 (Kulite-HKMS-375) を設置した。P₇ および P₈ 点は、爆源から見て島の裏側にあるので、爆破によって生じた波動がこれらの点に達するには島の下の岩盤を通る。その他の測

Table 3 Position of pressure gauges near 4A area

Observing point	Direction and distance from blasting centre (m)	Distance of gauge from sea level(m)	Depth of sea (m)
P ₁	East 20	5	7
P ₂	East 100	5	16
P ₃ U.	East 100	5	21
P ₃ L.		19 (Test No. 4 17)	
P ₄ U.	East 200	5	22
P ₄ L.		18	
P ₅	East 500	5	40.5
P ₆	East 1000	5	40.5
P ₇ L.	West 100	5	8
P ₇ U.		6	
P ₈ U.	West 200	5	12
P ₈ L.		10	
P ₉	East 2570	5	-

U: Upper L: Lower

点は爆破点側にあるので、爆破点と圧力計を結ぶ線はすべて海水中である。

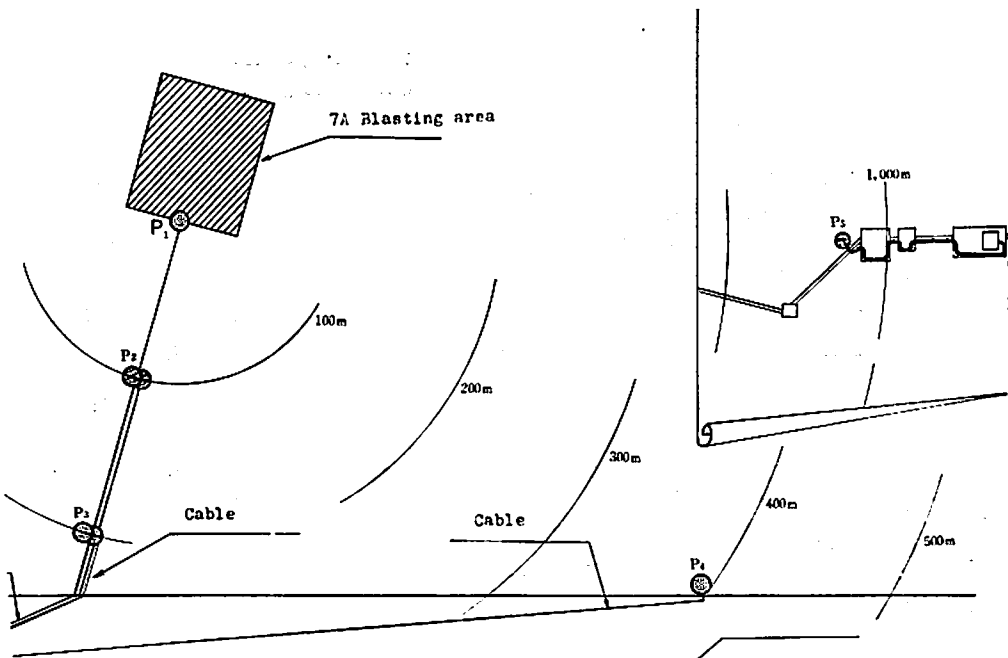


Fig. 3 Arrangement of pressure gauges around 7A area

7A 爆破での測点の位置を Fig.3, Table 4 に示す。第1回と第2回の試験爆破では $P_3 \sim P_5$ 点で豊田工機製 PMS-5M を使用した。第3回～第5回で使用した圧力計は、 $P_1 \sim P_3$ 点では Kulite HKMS-375, P_4 および P_5 点では豊田工機製 PMS-5M である。

4. 結果の解析および考察

4.1 4A 地点の試験爆破

(1) 圧力波形について

4A 地点試験爆破の波形例を Fig.4 に示す。爆破後初動が測点に達するまでの時間 t_{ar} と、爆源の中心

Table 4 Depth of water and pressure gauges at measuring points near 7A area

Observing point	Depth of sea(m)	Depth of gauge(m)
P_1U	14	2.5
P_1L	14	11.5
P_2	11	2.5
P_3	6	2.5
P_4	5	2.5
P_5	-	2.5

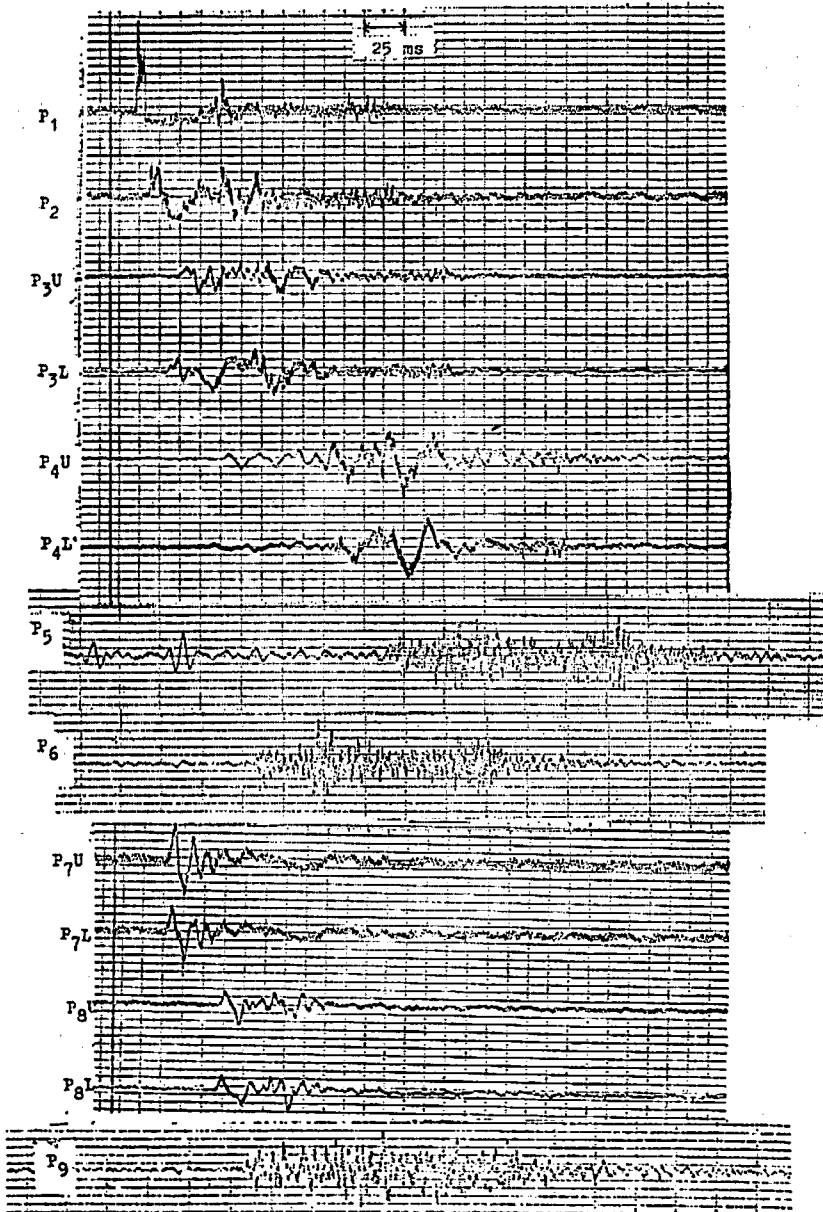


Fig. 4 Examples of observed waveform (4A-Test No.1)

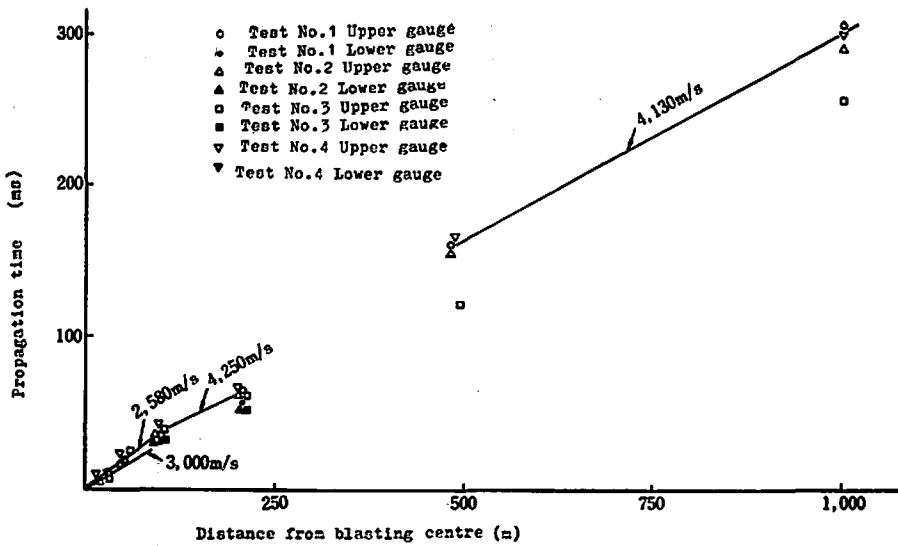


Fig. 5 Relation between propagation time of ground wave and distance from blasting centre (4A)

から測点までの距離Rとから圧力波の初動の走時曲線を描き、Fig. 5に示した。走時曲線の勾配が2500~3000 m/S程度のもとの、4000m/S強程度のものが見られるが、前者は強風化花崗岩の、後者は風化の程度の少ない花崗岩のP波の伝播速度と一致している。故に圧力波の初動は、岩盤中を伝播し、その後水中へ透過してきた波動、すなわち地盤-水圧力波であることがわかる。

Fig. 4によれば、P₁点の波形では最初に正圧があらわれ、その後急激に圧力が低下し、絶対圧力が零の状態をしばらく持続している。この圧力波形が得られる理由は次のように説明できる。すなわち、最初に計測点に到達する波動は、先に述べたように地盤から水中へ透過してきたものであるが、この圧力波は正圧をもつために最初に正圧が現われている。続いて、水面からの反射波が負圧を伴いつつ計測点に到達するから、その影響により圧力波は急激に減衰する。海水は耐張力性をもたないために、合成圧が本来負になるべきところでも絶対圧としては零を示すことになる。このように、絶対圧が零を示している領域はCavitation領域と呼ばれ、現象的には多数の細かい真空泡ができていくことになる。このように、浅い所で観測される圧力波では、海面からの反射波が圧力波形に大きな影響を及ぼすが、この波形はP₁点のように比較的爆源に近い測点で観測された圧力波形の初動部付近によく認められた。しかし、爆源から離れた遠方の測点では海面からの反射波の他に、海底さらにその下の地層内の境界で反射した反射波あるいは屈折波などの影響が加わり、圧力波としてきわめて複雑なものとなると考え

られる。Pekeris⁴⁾やPapadakis⁵⁾らは、空気層と岩盤層にはさまれた水層で水中吊るし爆発を行なった時の水中圧力波の伝播について理論的に検討した。その結果、波源から遠く離れた所では、水中圧力波は両界面での反射波が重畳した複雑な分散波となり、これらはGround wave, Water wave および Airy wave からなること、Ground wave は比較的低周波、Water wave は高周波、Airy wave はその中間の周波数であり、群速度はGround waveの最も早いものが岩盤中の音速に、Water waveの最も早いものが水中での音速に等しく、Airy waveの群速度は前者の群速度より遅いことなどを明らかにしている。そこで、彼らの結果と4A爆破についての実測結果と対比して考えてみることにする。前者では水層に、後者では岩盤層に爆源がある。Fig. 4に示した波形に見られる高周波の波動のみについて走時曲線を求め、Fig. 6に示した。ただし、高周波の波動の始まりが明瞭に判別できるのはP₅, P₆およびP₇の各測点で計測された波形である。走時曲線の勾配はほぼ1500m/Sの値となり、この値は海水中での音速と一致している。したがって、上記の3測点で観測された高周波の波動は、PekerisらのいうWater waveと考えるとよい。一方、波形の初動部に見られる地盤-水圧力波は、比較的low周波であること、およびその走時曲線の勾配が岩盤中の音速に一致していることより、彼らのいうGround waveに対応するものと思われる。また、このGround waveは、海底岩である風化花崗岩の影響のみならず、さらにその下に存在している新鮮な花崗岩層との

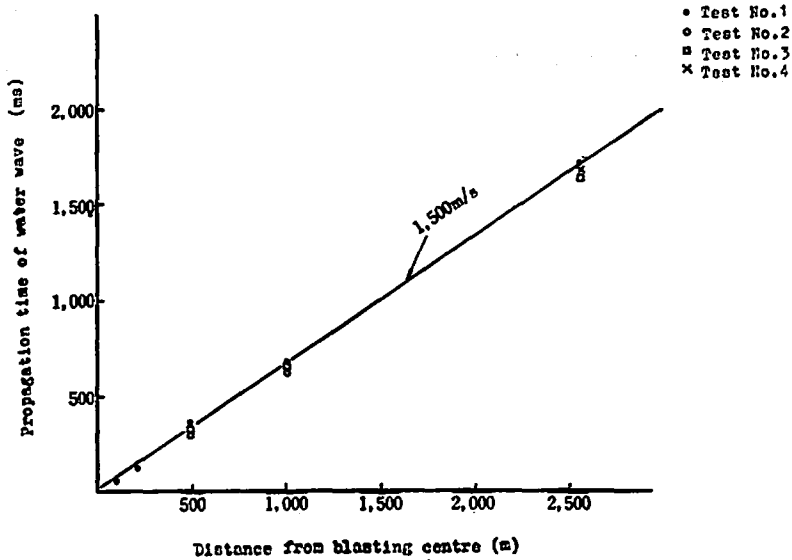


Fig. 6 Relation between propagation time and the distance from the blasting centre for high frequency waves observed at P_3 , P_6 and P_9

境界での反射波や屈折波の影響も受けているものと考えられる。

(2) 圧力波の大きさについて

Water wave の圧力の大きさを明確に読み取ることのできる記録は P_3 , P_6 および P_9 の各測点で得られたものである。これらの測点での測定から求めた Water wave の圧力の大きさ P_w (kg/cm^2) と爆源からの換算距離 $R/W^{1/3}$ (R : 爆源からの距離 (m), W : 薬量 (kg)) との関係をも最小自乗法で整理し、次式を得た。

$$P_w = 25.3 \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{1.1} \quad (1)$$

また、Fig. 7 に Ground wave の圧力の大きさ (正圧) と換算距離との関係を示した。この関係を最小自乗法を用いて整理し、次式を得た。

$$P_{GR} = 197 \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{1.9} \quad (2)$$

ここで、 P_{GR} : Ground wave の圧力の大きさ (kg/cm^2)

W : 薬量 (kg), R : 爆源からの距離 (m)

(1) および (2) 式より明らかなように、Water wave より Ground wave の方が距離に対する減衰が大きいため、Fig. 4 の波形例に見られるように、爆源に近いところでは Ground wave が卓越するが、爆源から遠く離れた点では Water wave が卓越してることがわかる。

(3) 水中圧力波形におよぼす島の影響

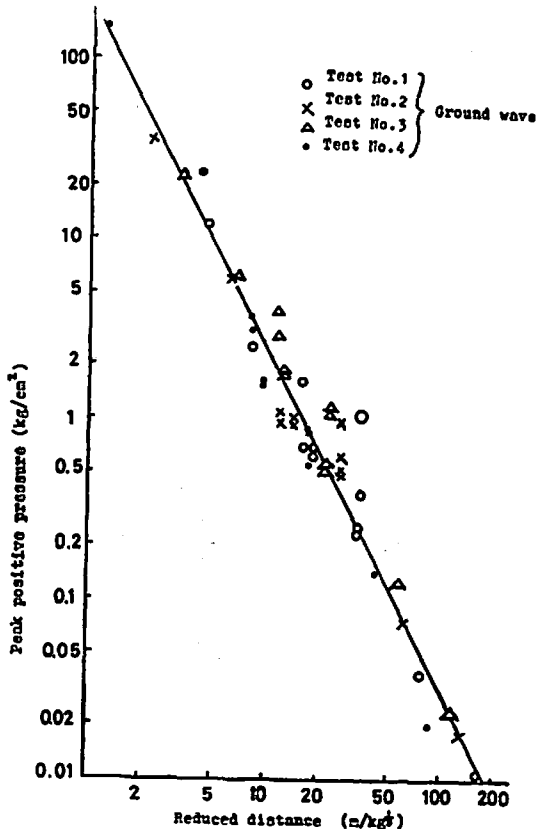


Fig. 7 Relation between peak positive pressure and reduced distance (4A)

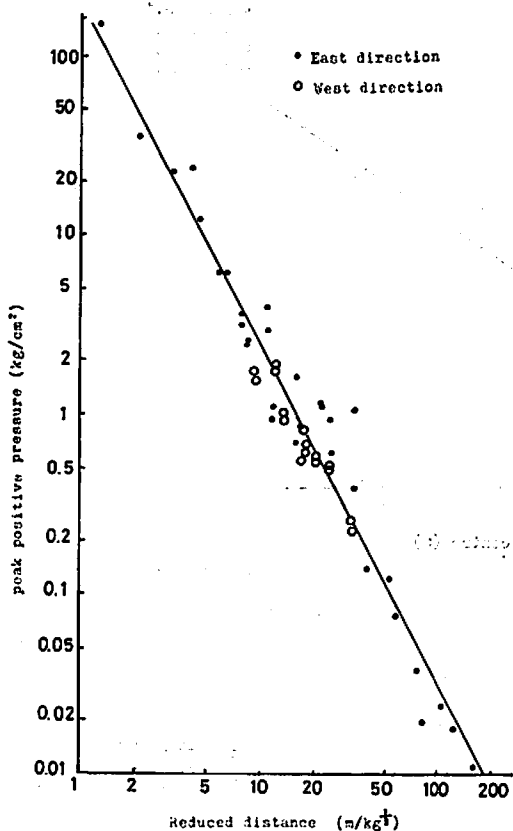


Fig. 8 Relation between peak positive pressure and reduced distance (4A)

4A爆破では汀線近くを爆源として、二面島をはさんで東西方向に測圧点を配置してあるので、島の存在が水中圧力波にどのような影響を及ぼしているかについて検討してみる。Fig. 8は圧力波の伝播方向との関係が分りやすくなるようにFig. 7を書き直したものであるが、島が存在することによる影響はGround waveにはあらわれていない。一方、Water waveについてはFig. 4の圧力波形をもとにして検討してみる。爆源に対して西側の測点 P_7 および P_8 点と対称な位置にある東側の測点は P_3 および P_4 点である。これらの4点の圧力波形を比較すると、東側の測点で得られた波形ではGround waveの上に高周波のWater waveが重なっているが、西側の P_7 および P_8 点で得られた圧力波形にはWater waveは見られない。このことは、西側へのWater waveの伝播が島により阻止されていることを示すものである。

4.2 7A 地点の試験爆破

(1) 圧力波形について

Fig. 9は7A爆破の波形の1例を示したものである。ここでも、4A爆破で得られた圧力波形と同様に、低周波の圧力波と高周波の圧力波が認められ、前者が先行して観測されている。また、爆源に近い点では低周波の圧力波動が卓越しているが、遠方では逆である。Fig. 10には、起爆後低周波の圧力波の初動が測点に達するまでの時間 t_{GR} と爆源の中心から測点までの斜距離 R との関係を示した。すなわち、同一測線

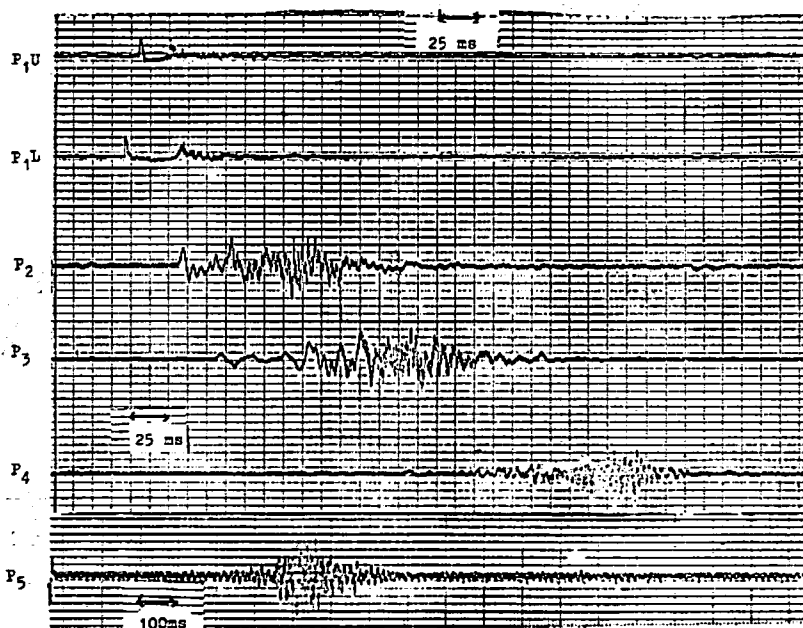


Fig. 9 Examples of observed waveform (7A-Test No. 3)

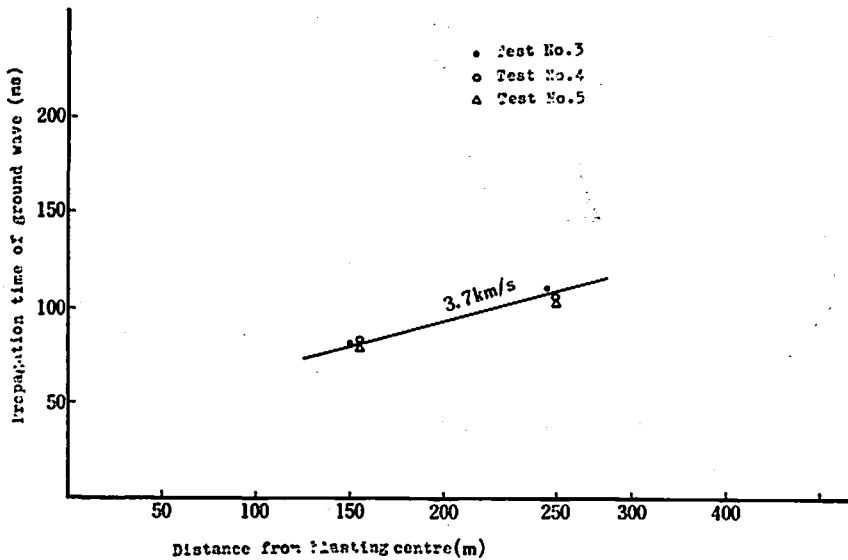


Fig. 10 Relation between propagation time of ground wave and distance from blasting centre (7A)

上にある P_2 点および P_3 点の測定値を結ぶ直線の勾配は 3.7km/S である。この値は基盤岩である花崗岩の音速に近い値である。この低周波の圧力波は基盤岩および堆積層を通して水中へ透過してきた地盤水圧力波であり、Pekeris らのいう Ground wave とみなすことができる。

一方、高周波の圧力波について、それらの波群の伝播速度を求めて、Table 5 に示したが、それらの値は海水中の音速にはほぼ一致している。したがって、測定された高周波の圧力波は海水中を伝播してきた Water wave と見なすことができる。このように海底下 35m 近くに爆源があるような無自由面爆破においても Water wave が生成することがわかる。

(2) 圧力の大きさについて

第3回、第4回および第5回の段発の実験では、水中圧力波は段毎に完全に分離して観測された。各段毎

の爆破により得られた圧力波の正圧部の最高値を求め、爆源から測点までの斜距離との関係を Fig. 11 に示した。結果はかなりばらついているが、これらの関係を最小自乗法により整理して求めると、次式のようにになる。

$$\left. \begin{aligned} P_{GR} &= (4.17 \times 10^4) \cdot R^{-2.26} \text{ (Ground wave)} \\ P_W &= 100 \cdot R^{-1.5} \text{ (Water wave)} \end{aligned} \right\} (3)$$

この結果、Ground waveの方が Water wave よりも距離減衰が大きいことがわかる。爆源に近い P_1 点、 P_2 点では Ground water が卓越するが、爆源より遠距離では逆である。また、Fig. 11 に示した測定値はかなりばらつきが大きい、このことは、爆源付近の岩盤の性質が水中圧力波にかなりの影響を及ぼすことを示すものであろう。すなわち、第3回～第5回の実験が実施された段発爆破では、毎回爆源の位置を異にしており、しかもこれらの段発爆破で破壊の対象

Table 5 propagation velocity of high-frequency wave

Test No.	Horizontal distance* from blasting point (m)			Propagation time**			Velocity (km/S)	
	R_2	R_3	R_4	t_2	t_3	t_4	$\frac{R_3 - R_2}{t_3 - t_2}$	$\frac{R_4 - R_3}{t_4 - t_3}$
3	145	240	435	114	180	310	1.44	1.50
4	150	250	420	117	185	300	1.47	1.48
5	145	245	435	119	185	310	1.52	1.52

* R_2 , R_3 and R_4 mean horizontal distance from blasting points to P_2 , P_3 , and P_4 points respectively.

** t_2 , t_3 and t_4 are traveling times of high-frequency wave to P_2 , P_3 and P_4 respectively.

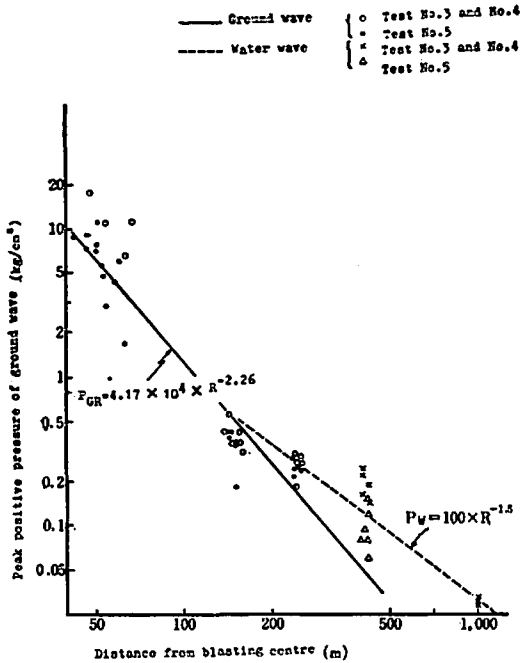


Fig. 11 Relation between peak positive pressure and blasting centre (7A)

となった花崗岩は場所によって風化の程度にかなりの差があり、このような岩盤の性質の差異が破壊効果に、ひいては水中圧力波の生成に対して影響を与えるものと考えられる。とくにこの傾向は、第3回および第4回の爆破により生じた破砕圈に近接して実施された第5回爆破の際に得られた水中圧力波の測定値によく現われているように思われる。

水中圧力波の大きさについて、4A 爆破と 7A 爆破の結果を比較すると、Ground wave, Water wave のいずれについても距離減衰に差が認められる。Ground wave の距離減衰は地盤の特性の影響を強く受けるので、4A 爆破および 7A 爆破の地盤の特性の違いが Ground wave の距離減衰指数の差異となって現われたものと考えられる。一方、Water wave の距離減衰に差が認められたのは次のように考えれば説明できる。Water wave は水中に生じた圧力波が水面と水底での反射のくり返しにより、水面では節、水底では腹となるようなモードの圧力波動を形成し、これが水の層を2次的に伝播することにより生ずるものと考えられる⁹⁾。波動がエネルギーの全くない媒質中を伝播する場合は波動のもつ圧力は距離の0.5乗に反比例する。水はエネルギーの非常に小さな媒質であることから、その距離減衰指数は0.5に近い値でなければならないが、実際には4A 爆破の距離減衰指

数は1.1、7A 爆破の場合は1.5である。このように距離減衰が大きくなるのは、圧力波の一部が空気中や地盤中に透過するためと考えられる。圧力波の境界面での透過率は両側の媒質の音響インピーダンスの差が小さい程大きい。したがって、圧力波の空気層への透過率は7A 爆破の場合も4A 爆破の場合も差がない。しかし、海底地盤は7A 爆破では水で飽和した砂礫層であり、4A 爆破では風化花崗岩であるため、海底地盤の音響インピーダンスは7A 爆破の方が水のそれに近い。したがって、海底地盤への圧力波の透過率は7A 爆破の場合の方が4A 爆破の場合より大きいため、距離減衰指数に差が生じたものと考えられる。

4.3 基礎研究¹²⁾との関連

基礎研究¹²⁾では、無自由面爆破の場合は地盤一水圧力波、一自由面爆破の場合はガス圧力波と地盤一水圧力波が生ずることを明らかにした。今回の現場実験でも、無自由面爆破、一自由面爆破共に地盤一水圧力波は観測された。しかし、一自由面爆破である4A 爆破においてガス圧力波が観測されなかったが、これは第2報²⁾で明らかにしたガス圧力波の方向性から説明することができる。すなわち、4A 爆破において設置された圧力計の位置は方向角 θ が90度に近く、ガス圧力波が伝播しない方向にある。さらに、今回の現場実験では Water wave が観測されたが、これは爆源から遠方の観測点で測定される圧力波で、爆源近傍の圧力波について検討した基礎研究では明らかにすることができなかったものである。

5. 結 言

比較的水深の浅い海域における無自由面と一自由面の海底爆波によって得られた水中圧力波を解析して、次のような点が明らかになった。

- (1) 比較的低周波成分で構成される Ground wave と高周波成分で構成される Water wave の両者が一自由面爆破、無自由面爆破共に観測された。
- (2) 爆源に近い領域では Ground wave が卓越して観測されるが、爆源から遠く離れた測点では逆に Water wave が卓越して観測されるようになる。
- (3) Water wave は水中を伝播する波動であるため、伝播経路の途中に島などの障害物があると伝播を阻止されるが、Ground wave は地盤中を伝播してきた圧力波であるから、伝播経路中に障害物があっても、ふつうの場合には伝播を阻止されることはない。
- (5) 基礎研究の結果から、今回の現場実験では地盤一水圧力波 (Ground wave) の卓越は予想されたが、爆源から遠方で観測される Water wave は予測できなかった。

終りに、本研究に対して助言頂いた財団法人総合安

全工学研究所水中発破の安全性の検討委員会の委員各位に感謝する。

文 献

- 1) 小川輝繁, 福山郁生, 伊藤一郎: 工業火薬, 38, p.144 (1977)
- 2) 小川輝繁, 福山郁生, 伊藤一郎: 工業火薬 38, p.203 (1977)
- 3) Atlas Copco: Atlas Copco Pub. No. 5170 (19

70)

- 4) C. L. Pekeris: The Geological Society of America, MEMOIR No. 27 (1948)
- 5) I. Papadakis: North Atlantic Treaty Organization Salant ASW Research Centre, technical Redort, No. 187 (1971)
- 6) 早川正己: 「物理探査」ラテライズ, p112 (1972)

**A study on pressure waves caused by underwater borehole blasting(3)
-Analysis of results of site tests-**

by Terushige Ogawa*, Ikuo Fukuyama*, Ichiro Ito**, Toshihiko Narahira*** and Susumu Nagasaka****

Pressure-versus-time records with respect to the pressure waves obtained by site tests of underwater overburden blasting with 180-480kg charges and crater blasting with 240-1520kg charges in a shallow sea area were analysed. In the overburden blasting, the water depth and the overburden thickness at the blasting points are 15 meters and 35 meters respectively, and the water depths at the measuring points are in the range, of 5 to 14 meters. In the crater blasting, the water depths at the blasting and observing points are 5 meters and 5 to 40 meters respectively. In each of the cases of overburden blasting and crater blasting, the underwater pressure waves mainly consist of low-frequency ground waves and high-frequency water waves. Here the attenuation exponent of water wave pressure is less than that of ground wave pressure. Water waves and ground waves propagate through the water and the ground respectively. Consequently a small island opposes an obstacle to propagation of water waves but not to propagation of ground waves.

* Faculty of Engineering, Yokohama National University, 2-31-1 Ooka, Minami-ku, Yokohama, Japan.

** Faculty of Engineering, Kyoto University, Yoshidahonmachi, Sakyo-ku, Kyoto, Japan.

*** Honshu-Shikoku Bridge Authority, Shiba Nishikubo Shiroyama-cho, Tokyo, Japan.

**** Sakaide Construction Office, Honshu-Shikoku Bridge Authority, 3-3-8 Kyo-machi, Sakaide, Kagawa, Japan.