

爆薬の爆轟によって媒質内を伝播する圧力波の研究（第2報）

—海底発破時に近接孔に作用する衝撃圧力—

小川輝繁*, 福山郁生*, 鈴木明人**

中野雅司***, 山下理雄****

本四架橋工事における海底発破を利用して、発破孔近傍の孔内に生ずる衝撃圧を測定するとともに、爆薬の殉爆性について検討し、海底での段発破において懸念される爆薬の異常の問題について考察した。オーバーバーデン発破と汀線付近での1自由面発破について実験した結果、発破点近傍の孔内衝撃圧の大きさは両者ほとんど差がないが、オーバーバーデン発破の方がやや大きくなる結果が得られた。多数孔発破の近傍の孔内衝撃圧のピーク圧は、発破孔に極めて近い位置では1孔のみ発破した場合とほぼ一致しているが、距離が離れるに従い、他の発破孔の圧力が加重される。次に水中吊りし爆発によりGX-1ダイナマイトの水中殉爆特性を検討した。GX-1ダイナマイトが殉爆しないための水中衝撃圧の限界のピーク圧力値はドナーの薬量が増える程小さくなる。しかし、衝撃圧のエネルギー密度を見ると殉爆しないための限界値はほぼ一定で23~26 KJ/m²程度であることがわかった。

1. 緒言

海底発破では陸上発破に比べ、段発破が難しいといわれている。これは、段発破のように各装薬孔の間で雷管の起爆時間に差がある場合、遅れて起爆する装薬孔の雷管や爆薬が先に起爆した装薬孔の発破の衝撃圧によって異常となる可能性が陸上発破に比べ海底発破の場合の方が大きいのである¹⁾。この問題について、爆薬の感度²⁾や電気雷管の耐衝撃圧性³⁾⁴⁾の実験的研究や爆源近傍の衝撃波の伝播特性についての理論的検討⁵⁾などの結果が報告されている。しかし、海底発破の現場で爆源近傍の孔内の衝撃圧を実測したデータは見られない。

本研究は、本州四国連絡橋児島一坂ルートの南北

偏讃瀬戸大橋の橋脚基礎工事における海底発破を利用して、爆源近傍の孔内の衝撃圧を測定し多数孔海底発破における近傍の装薬孔内圧力と発破孔からの距離との関係について考察した。さらに、爆薬の水中殉爆特性についても検討したので、その結果を報告する。

2. 海底発破における近接孔内衝撃圧の測定方法

南北偏讃瀬戸大橋工事の発破現場における近接孔内衝撃圧の測定は橋脚基礎 3P 及び 6P 地点で行った。3P は面積が約 700 m² 程度の極めて小さな小島の約 1/3 程度を削って作られる橋脚基礎である。そのため、汀線付近で発破を行った。ここで孔内衝撃圧の測定は 6P の発破における段発破の採否を検討するために行ったものであり、この測定を 3P 実験と呼ぶ。なお、3P 実験は 1 回しか行わなかった。

6P の場所は発破対象岩の上に約 10~15m の堆積層があり、その上にさらに約 35m の海水層がある。ここでは堆積層を残したままの発破即ちオーバーバーデン発破を行った。ここで孔内衝撃圧の測定は、電磁誘導式起爆に必要な磁界測定用にせん孔された孔を利用して、オーバーバーデン発破における爆源近傍の衝撃圧を測定し、3P 実験の結果と比較検討する目的で行った。なお、この測定を 6P 実験と呼ぶ。

2.1 3P 実験

Fig. 1 に発破孔と計測孔の位置関係を示す。発破孔付近の海底面は TP (東京湾中等潮位) - 1 ~ - 3 m

昭和59年10月17日受理

* 横浜国立大学工学部

〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台 156

TEL 045-335-1451

** 大成建設㈱技術研究所

〒245 横浜市戸塚区名瀬町 344-1

TEL 045-812-1211

*** 日本油脂㈱武豊工場

〒470-23 愛知県知多郡武豊町西 1982

TEL 05697-2-1221

**** 本州四国連絡橋公団

〒105 東京都港区西久保城山町1第22森ビル

TEL 03-434-7281

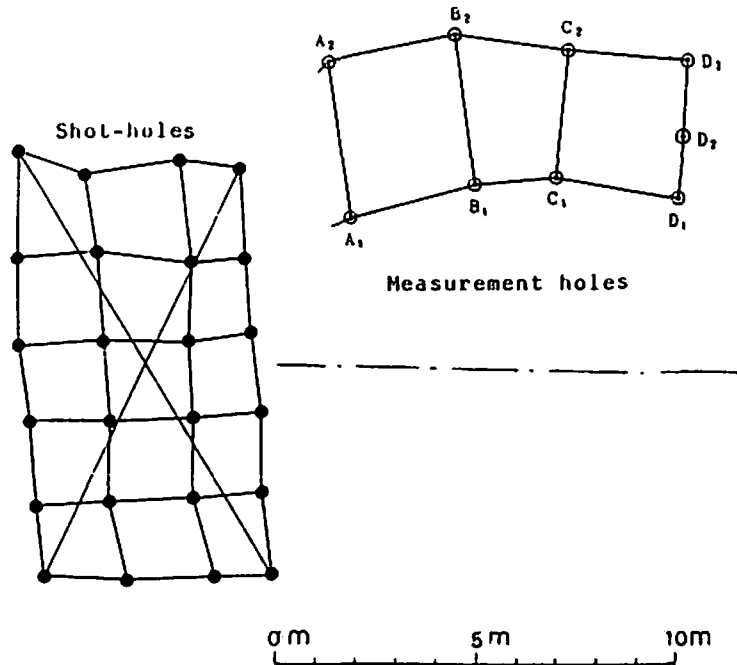


Fig. 1 Arrangement of shot-holes and measurement holes for 3P experiment

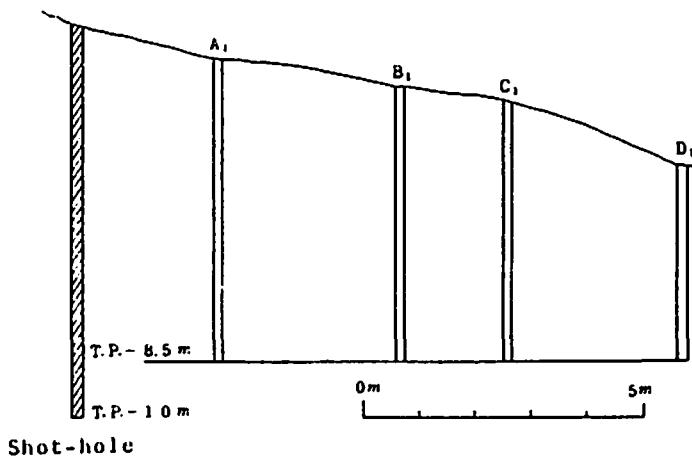


Fig. 2 Cross-section of measurement area

であり、24孔の発破孔を TP - 10m までせん孔した。9本の計測孔はすべて TP - 8.5m までせん孔した。Fig. 2 は計測孔 A₁, B₁, C₁, D₁ に沿った海底地形の断面を示したものである。

装薬孔は孔径 153mm で、各装薬孔に 30kg の GX - 1 ダイナマイトを装薬し、24孔で合計 720kg の斉発発破を行った。なお、ダイナマイトは導爆線によって起爆した。

計測孔には外径 100mm、肉厚 5 mm の塩ビパイプを挿入した。A₁ 及び A₂ 孔には底から 50cm の位置に圧力計を設置した。B₁ 孔及び B₂ 孔は圧力計を内蔵した長さ 2 m の模造薬を孔の奥に装薬しその上に圧力計を設置した。なお、B₂ 孔の模造薬は緩衝材で保護されている。C₁ 孔及び C₂ 孔には長さ 1 m の模造薬を孔の奥に装薬し、その上に圧力計を取りつけた。D₁ 孔には孔の奥に長さ 94cm のプaster を入れ、次に圧

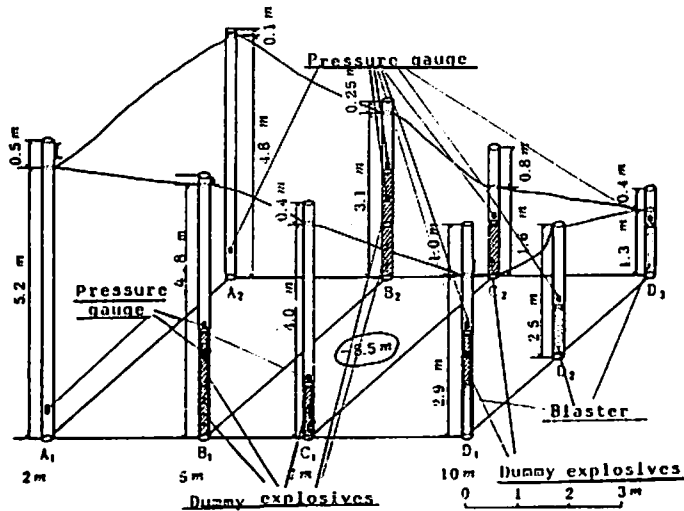


Fig. 3 Sketch of measurement holes for 3P experiment

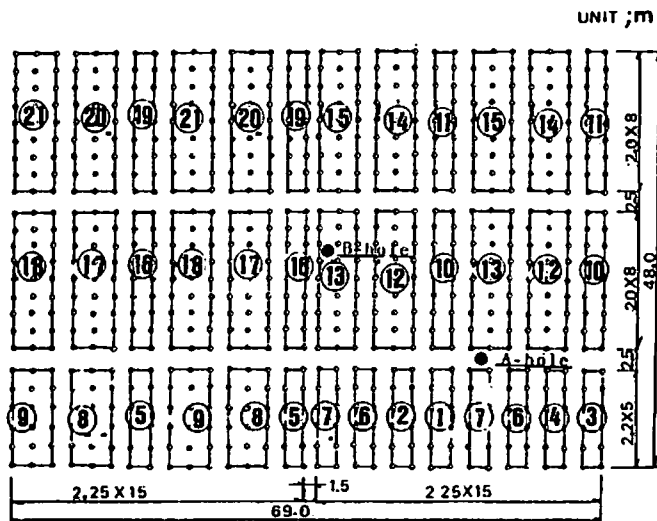


Fig. 4 Pattern for 6P blasting

力計を内蔵した長さ1mの緩衝材付模造薬を装填し、その上に圧力計を設置した。D₂及びD₃孔には長さ92cmのブラスターを入れ、その上に圧力計を取りつけた。Fig. 3には計測孔の見取図を示した。模造薬は直径が75mmで、外径80mm肉厚2.5mmの塩ビパイプに入れたものである。また、緩衝材には厚さ7~9mmの発泡スチロールを用いた。

圧力計には円筒型チタン酸バリウムをエポキシ樹脂で保護したものを用いた。この圧力センサーからの信号をインピーダンス変換器を通した後ケーブルで計測室へ送り、データレコーダ及びトランジエントレコー

ダで記録した。なお圧力計とインピーダンス変換器の間のケーブルは強い衝撃が加わらないように銅管で保護した。

2.2 6P 実験

6Pの発破パターンをFig. 4に示す。6Pでは21回の発破を行ったが、それぞれの発破の薬量、位置等をTable 1に示す。また、計測孔はFig. 4に示したA孔及びB孔の2孔とした。圧力計の位置は、A孔では30kg装薬の上端とほぼ同じレベル、B孔では20kg装薬の中心と同じレベルとした。使用した圧力計は半導体型圧力計(kulite HKMS-375)であり、これより得

Table 1 Data of 6 P blasting

No.	Number of holes	Number of holes	Charges (kg)	Charges of 1 hole (kg)
1	1	12	360	30
2	2	12	360	30
3	3	12	360	30
4	4	12	360	30
5	5	24	480	20
6	6	24	720	30
7	7	24	720	30
8	8	36	720	20
9	9	36	720	20
10	10	36	720	20
11	11	36	720	20
12	12	54	1080	20
13	13	54	1080	20
14	14	54	1080	20
15	15	54	1080	20
16	16	36	720	20
17	17	54	1080	20
18	18	54	1080	20
19	19	36	720	20
20	20	54	1080	20
21	21	54	1080	20

られた信号を計測室に伝送し、データレコーダ及びトランジエントレコーダに記録した。

3. 測定結果及び考察

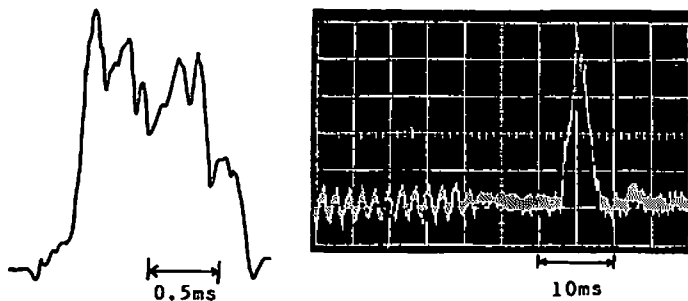
3.1 近接孔内衝撃圧の圧力波形とピーク圧

3 P 及び 6 P 実験で得られた孔内衝撃圧の圧力波形例を Fig. 5 に示す。圧力波形は典型的な衝撃波形とは異なっているが、パルス波形である。圧力の立ち上がり時間すなわち擾乱が始まってからピーク圧に達するまでの時間は爆源から隠れるに従い大きくなる傾向

が見られる。

衝撃圧のパルス幅を比較すると、6 P 実験によるものの方が 3 P 実験によるものより 3 倍程度大きくなっている。この理由の 1 つとしては、水深が浅く、オーバーバーデンのない 3 P 実験の場合希薄波の影響によりパルス幅が短かいものと考えられる。

Table 2 は 3 P 実験によって得られた孔内衝撃圧のピーク圧の一覧表である。Table 2 に示したピーク圧と爆源からの距離との関係を Fig. 6 に示す。ただし、



(a) 3P experiment (B_1 hole) (b) 6P experiment ($R_b=8m$)

Fig. 5 Examples of pressure waveforms in bore hole

Table 2 Peak pressure in borehole obtained by 3P experiment

Hole	R_b (m)*	R_D (m)*	Peak pressure (kg/cm ²)
A ₁	3.0	6.3	590
A ₂	3.5	8.8	350
B ₁	5.9	9.4	350
B ₂	6.4	11.4	210
C ₁	7.9	11.2	130
C ₂	8.8	13.2	70
D ₁	10.9	13.9	74
D ₂	11.1	14.6	66
B ₁ (SE)**	5.9	9.4	280
B ₂ (E)**	6.2	11.4	230
D ₁ (SE)**	10.9	13.9	34

* R_b : Distance from the nearest shot-hole

R_D : Distance from center of blasting block

**SE : Inside of dummy explosives covered by buffer

S : Inside of dummy explosives

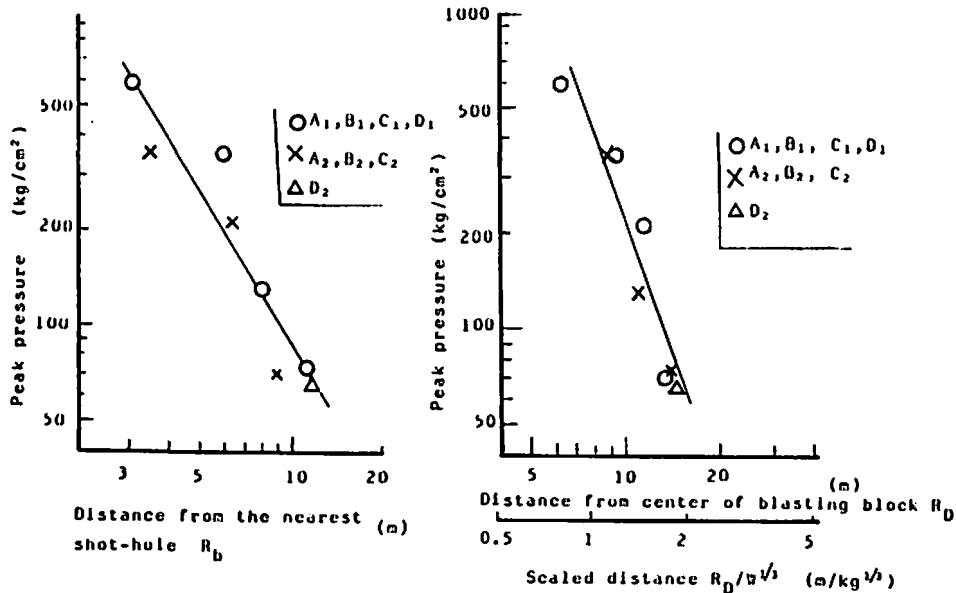


Fig. 6 Relation between peak pressure in borehole and distance from the nearest shot-hole or center of blasting block obtained by 3P experiment

3P 実験では 24 孔の斉発発破であるので爆源は 1 点と見なすことができない。そこで、計測孔から最も近い装薬孔までの距離 R_b を爆源からの距離としたものを Fig. 6 (a) に、発破ブロックの中心からの距離 R_D を爆源からの距離としたものを Fig. 6 (b) に示した。

多数孔発破の場合、近傍の衝撃圧の大きさは各孔から生ずる衝撃圧の重なり方の影響を受けるため、計測孔と発破孔の相対的な位置関係にも依存する。そのた

め、衝撃圧のピーク圧と爆源からの距離との関係は必ずしも一直線上にはプロットされない。たとえば Fig. 6 (a) では、 A_1, B_1, C_1, D_1 を結ぶ線 (ライン I とする) 上の計測値は A_2, B_2, C_2, D_2 (ライン II とする) 上の計測値よりやや大きい。これについて簡単なモデルを作って、衝撃圧の重なり方の効果調べるための計算を行った。これによると R_b が同じ場合 Fig. 1 で一点鎖線で示した中心線に近い点程衝撃圧が大きいとい

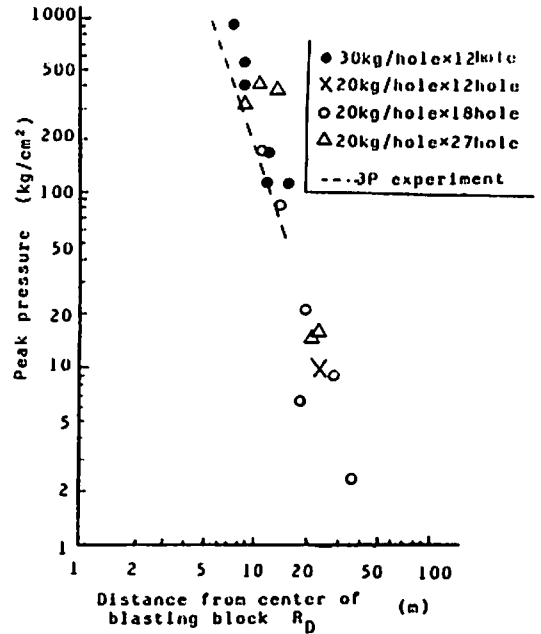
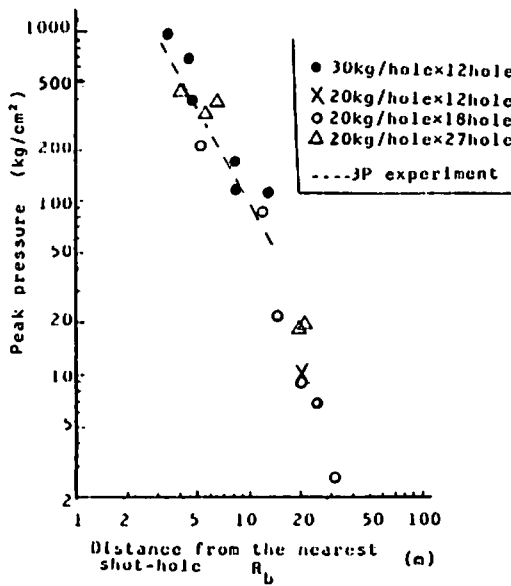


Fig. 7 Relation between peak pressure in borehole and distance from the nearest shot-hole or center of blasting block obtained by 6 P experiment

う結果が得られ、実測値と一致した。しかし、この計算によれば上記のように衝撃圧の重なるの効果が生ずるのは R_b が爆源域の幅即ち約 10m まででそれ以上離れると、ほとんど差がなくなるという結果を得た。

Fig. 7 には、6P 実験によって得られた孔内衝撃圧と最短装薬孔までの距離 R_b 並びに発破ブロックの中心までの距離 R_D の関係を示す。なお、図の中で点線で示した関係は 3P 実験で得られた関係式を表わしたものである。なお、6P 発破では①～④パターンを除くと、発破ブロックを 2 つずつ同時に斉発破したが、測定された衝撃圧の波形を見ると距離差のために各発破ブロックによる波は分離している。そのため、2 つのブロックを同時に発破した場合もそれぞれの発破ブロックを別々に発破したと見なして整理した。6P 発破では 1 孔の薬量が 20kg と 30kg の 2 種類で、各発破ブロックの薬量は 240kg～540kg であるが、この程度の薬量差の影響は孔内衝撃圧のピーク圧の差に表われていない。これは岩盤条件等他の要因によるばらつきの方が薬量差によるピーク圧の差異よりも大きいためであると考えられる。また、6P 実験の方が 3P 実験に比べて 1 ブロックの薬量が少なく、1 孔の薬量も等しいか少ない。それにもかかわらず、Fig. 7 を見ると孔内衝撃圧のピーク圧測定値は 3P 実験の結果よりやや大きいと見なされる。この理由としてはオーバ-

ーバーデンの影響や岩盤条件の差異等が考えられる。

Fig. 7(a) を見ると、6P 実験で得られたピーク圧と R_b との関係は R_b が 13～15m 付近を境として勾配が変化している。これは次のような理由によるものと考えられる。装薬孔に非常に近い位置での衝撃圧のピーク圧は 1 孔のみの発破によるものとほぼ等しいと考えてよいが、距離が離れるに従い、他の装薬孔の発破の影響が加重されていく。しかし、装薬孔は有限であるので、ある距離以上ではそれ以上衝撃圧は加重しないと考えられる。このように考えると、ピーク圧と R_b との関係は R_b が極めて小さい時は 1 孔の発破による距離減衰であるが、 R_b が少し増加すると他孔の発破による衝撃圧が加重され、その影響がピーク圧にあらわれて勾配がややゆるやかになる。しかしさらに離れてそれ以上衝撃圧が加重しなくなると勾配は再び急になる。Fig.

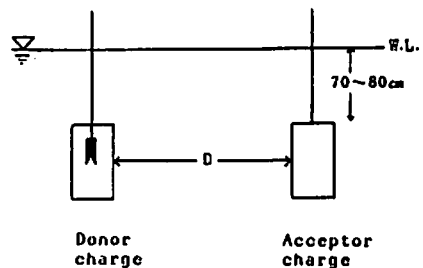


Fig. 8 underwater gap test

Table 3 Critical values for underwater sympathetic detonation of GX-1 dynamite

Weight of donor charge (kg)	Critical values for underwater sympathetic detonation			
	Distance (m)	Peak pressure (kg/cm ²)	Impulse (s · g/cm ²)	Energy flux density (J/m ²)
0.040	0.40	620	19	24
0.100	0.64	490	22	23
0.200	0.86	440	26	26
5.000	4.17	210	46	26

7 (a) では、 $R_b=13\sim 15m$ は衝撃圧の加重がなくなる点と見なすことができる。この距離は 6P の発破ブロックの長辺の長さ即ち幅の平均値とほぼ一致する。

3.2 近接孔内の爆薬への影響

海底せん孔発破における衝撃圧が近接孔内の爆薬に及ぼす影響を明らかにするために、爆薬の水中殉爆特性に関する実験を行った。実験池の中に電気雷管をつけた励爆薬と雷管をつけない受爆薬を Fig. 8 に示すように用い、励爆薬の爆発による衝撃圧で受爆薬が殉爆しないような両者間の最短距離 D を求めた。さらに、その時の受爆薬の位置での衝撃圧を測定し、そのピーク圧を不爆限界圧力 P_{NEL} とした。励爆薬には椶ダイナマイト 40g 成型品、30mm ϕ 紙筒入 100g GX-1 ダイナマイト及びポリエチレン袋入 5kg GX-1 ダイナマイトを使用した。受爆薬には椶、特桐、GX-1 の 3 種類のダイナマイトを用いた。また、原則として 30mm ϕ 紙筒入の 100g 薬包を受爆薬としたが、励爆薬が 5kg の時のみはポリエチレン袋入の 5kg 薬包を受爆薬とした。

Fig. 9 には不爆限界圧力と励爆薬の薬量との関係を示す。図より水中殉爆感度は薬種により差があり、水

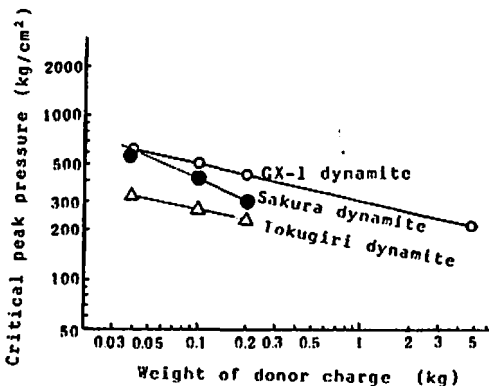


Fig. 9 Relation between critical peak pressure for underwater sympathetic detonation and weight of donor charge

中発破用に開発された GX-1 ダイナマイトは陸上発破用の特桐ダイナマイトに比べ水中殉爆感度が鈍感であることがわかる。また、励爆薬の薬量が増加するに従い、不爆限界圧力は低下する傾向にある。これは励爆薬の薬量が増加するにつれて水中衝撃圧のパルス幅が大きくなることによるものと考えられ、爆薬の水中殉爆問題は作用する衝撃圧のピーク圧のみではなくその波形も考慮して検討しなければならないことを示している。

圧力波形を加味して衝撃波の強さを表わす量としてはインパルス及びエネルギー密度がよく用いられるので、GX-1 ダイナマイトに対する不爆限界衝撃圧についてこれらの値を求めて Table 3 に示す。この結果、ピーク圧とインパルスの不爆限界値は薬量が異なると

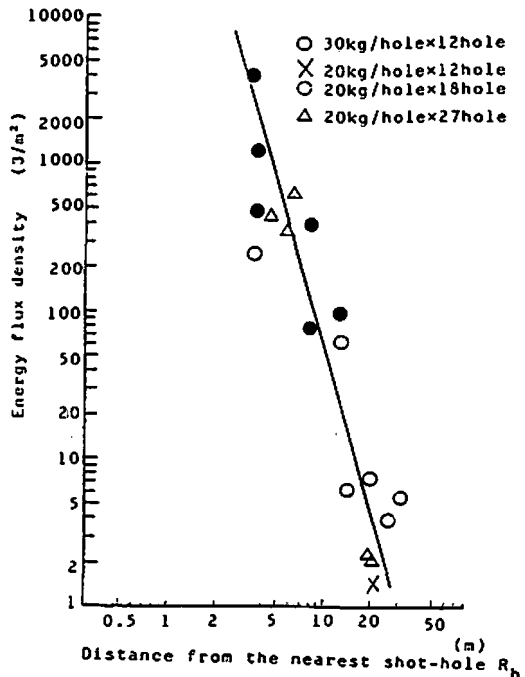


Fig. 10 Energy flux density of pressure wave in borehole obtained by 6P experiment

変わるが、エネルギー密度は薬量に関係なくほぼ一定値となっている。これより、爆薬の水中殉爆を考える場合は衝撃波の大きさを表わす物理量としてはエネルギー密度を用いればよく、GX-1 ダイナマイトの不燃限界エネルギー密度は $23\sim 26\text{kJ/m}^3$ 程度であることがわかる。そこで、6P 発破で得られた衝撃圧のエネルギー密度と装薬孔からの距離 R_0 との関係を Fig. 10 に示す。Fig. 10 に示した関係を最小自乗法で整理すると距離減衰指数は 3.7 となり、エネルギー密度の距離減衰は極めて大きいことがわかる。ただし、水中殉爆実験による水中衝撃圧と海底せん孔発破での近接孔内衝撃圧とは、パルス幅や圧力波形がかなり異なる。そのため、水中殉爆実験の結果をそのまま海底せん孔発破に適用できるか否かの検討が必要であるが、これについては今後の課題である。

4. 結 言

多数孔の海底せん孔発破において近接孔内に生ずる衝撃圧を測定した。最も近くの装薬孔からの距離が $3\sim 20\text{m}$ の位置の孔内で測定した衝撃圧の波形はパルス状ではあるが典型的な衝撃波形とは少し異なり、不連続的な圧力の立ち上がりは見られない。装薬孔に極めて近い位置での衝撃圧は 1 孔のみ発破の場合と一致しているが、少し離れると他孔の発破の影響が加わる。そのため、衝撃圧の大きさは各装薬孔からの衝撃圧の重なり具合にも影響される。また、多数孔発破の近傍では各孔からの衝撃圧の加重効果が距離が離れるに従い大きくなるので、孔内衝撃圧のピーク圧の距離減衰指数は 1 孔のみの発破の場合に比べ小さい。しかし、

最も近い装薬孔からの距離が発破ブロックの辺の長さ程度以上となると、上記の加重効果は増加しなくなり距離減衰指数は大きくなる。

水中殉爆実験によって、ダイナマイトが水中殉爆しないための衝撃圧の不燃限界値を求めた。不燃限界の衝撃圧のピーク圧は励爆薬の薬量の増加とともに低下するが、そのエネルギー密度はほぼ一定となり、GX-1 ダイナマイトについての不燃限界値は $23\sim 26\text{kJ/m}^3$ である。

最後に、本研究は本州四国連絡橋公団第 2 建設局より財団法人総合安全工学研究所が委託を受けて実施した調査研究の一部として行ったものである。種々御指導頂いた福井工業大学伊藤一郎教授、関西大学谷口敏一郎教授はじめ、調査研究委員会のメンバー各位並びに研究遂行の上で御援助頂いた当時の第 2 建設局坂出工事事務所 所長 杉田秀夫氏はじめ所員各位に感謝する。

文 献

- 1) 水谷寛, 米田昭昭; 工業火薬, 34, 5, P 283 (1973)
- 2) 藤原修三, 飯田稔, 日下部正夫, 水島容二郎; 工業火薬, 34, 4, P 208 (1973)
- 3) 鈴木輝彦, 浜崎正文, 井沢信之; 工業火薬, 28, 3, P 194 (1967)
- 4) 山崎陸重, 早川哲夫, 三井志郎, 佐々木信彦, 橋瓜清; 工業火薬, 34, 4, P 218 (1973)
- 5) 田中克己, 疋田強; 工業火薬, 34, 4, P 213 (1973)

Pressure Wave Propagation in Different Mediums by Detonation of Explosives
(II) Shock Pressure Generated in the Boreholes near the Blasting Points

by Terushige OGAWA*, Ikuo FUKUYAMA*, Aketo SUZUKI**,
Masashi NAKANO*** and Michio YAMASHITA****

Taking advantage of the submarine blasting in the construction of Honshu-Shikoku Bridge Route, we measured the shock pressure generated in the boreholes near the blasting points, studied the gap sensitivity of an explosive and examined the problem of possible troubles with the explosive in delayed blasting at the bottom of the sea.

We carried out experiments on crater blasting near the shoreline and overburden blasting. The results of the experiments have shown that there is little difference in the intensity of the shock pressure in the borehole near the blasting point between the said 2 types of blasting, although the intensity in the case of overburden blasting is a little larger.

The peak value of the shock pressure in the borehole near the multi-hole blasting points is almost the same with that of crater blasting, if the borehole locations is quite close to the blasting points. However, as the location separates farther from the blasting points, the effects of other blasting points are added.

We examined the shock initiation sensitivity of GX-1 by the underwater explosion. The threshold peak pressure value of the underwater shock waves to initiate the acceptor charge decreases with an increase of the donor charge. However, a review of the energy flux density of shock pressure shows that the threshold energy flux density to initiate value the dynamite is almost constant or approximately 23-26 kJ/m².

(*Department of Safety Engineering, Yokohama National University,
Tokiwadai 156, Hodogayaku, Yokohama, Japan.

** Technical Research Institute, Taisei Corporation, Nazecho
344-1, Totsukaku, Yokohama, Japan.

*** Taketoyo Factory, Nippon Oil & Fats Co., Ltd, Taketoyocho,
Chitagun, Aichi, Japan.

**** Honshu-Shikoku Bridge Authority, Nishikuboshiroyamacho 1,
Minatoku, Tokyo, Japan.)