

電磁誘導起爆法を用いた水中発破について

谷口敬一郎*, 井上啓司*, 酒井秀喜*, 田中幹雄*

ここ数年間にわたって、電磁誘導起爆法に関する理論的ならびに実験的研究を重ねてきたが、このたび、研究の成果を実地に応用して、水中発破の施工を行なうという機会を得たので、実用的な見地からの計算法および計算結果の適用法等について報告する。

現物は瀬戸内海来島海峡西水道に位置する「コノ瀬」とよばれる暗礁で、航路整備を目的として、岩盤を水面下 19m まで除去しようとするものである。このような不規則な形状の地形に沿って敷設された励磁ループが作る磁界の計算は、非常に複雑かつ困難であるが、ループを小分割して、それぞれの小部分が作る磁界を合計するという計算法により、電子計算機を用いて比較的容易に計算することが可能となった。

水中発破工事はつぎのように 3 回実施された。

第 1 回	昭和 53 年 11 月 24 日	薬量	100 kg	1 孔
第 2 回	昭和 53 年 11 月 29 日	薬量	350 kg	3 孔
第 3 回	昭和 53 年 12 月 26 日	薬量	1,080 kg	6 孔

1. 緒言

愛媛県今治港沖の来島海峡は狭い水路と激しい潮流のために、昔から海難事故多発海域として著名である。運輸省第 3 港湾建設局では、かなり以前から瀬戸内海航路整備の一環として、来島海峡小島沖に潜在する「コノ瀬」暗礁の除去を計画していたが、自然条件の厳しい海中での発破工法については、多くの問題が残されていて、慎重な検討が必要とされていた。

第 3 港湾建設局では昭和 49 年より「水中発破方法調査」について、継続的な調査研究を行ない、昭和 51 年 8 月には各種遠隔起爆法の海中実験、昭和 53 年 1 月にはコノ瀬における電磁誘導起爆法の実地試験を経て、昭和 53 年 11~12 月に同起爆法による水中発破工事を実施した。このような遠隔起爆法を採用した海中施工発破は世界ではじめてのことである。

電磁誘導起爆法に関する基礎的な理論に関しては、すでに発表されているが^{1)~3)}、この理論を実際に適用した一例として、計算法・工法・結果等について報告する。

2. 現場の自然条件

Fig. 1 は来島海峡付近の見取り図で、除去対象とされているコノ瀬は Fig. 2 に示されるように、小島の東

北約 250m の沖合いに位置し、馬の背状の地形をしている。ボーリングによる調査によれば、岩質は花こう閃緑岩であり、ところどころアブライトの硬い岩眼がこれを貫いていることが明らかにされている。また、弾性波探査の結果では、旧灯標付近の下部に縦波速度が 4km 以上の速度層が分布しており、しゅんせつや砕岩作業では岩盤の除去が困難で、発破作業が必要とされている。工事計画はこの岩礁を水深 -19m の面まで除去しようとするものである。

この付近の潮流は小潮時で約 3 ノット、大潮時には 10 ノットにも達し、しかも、水流が渦巻いて複雑な流動をなしている。一般に、水中発破において、通常の陸上発破で採用されているような有線起爆方式が適用できるのは、潮流が 3 ノット以下とされており、これ以上では水中の結線作業や導線の保守が困難となる。したがって、上述のような自然条件の下では、遠隔起爆法を採用せざるを得ない。

3. 不規則な形状の励磁ループによる磁界の計算法

矩形、正方形および円形の励磁ループがつくる磁界については、すでに報告したので^{1)~3)}、ここでは、当該現場のように、不規則な地形に沿って敷設されたループによる磁界の計算方法について述べる。

この工事のために敷設された励磁ループは非常に不規則な形状をしているが、水平面に投影した形はほぼ

昭和 54 年 4 月 6 日受理

*関西大学工学部土木工学科 〒564 吹田市千里山荘 3 丁目

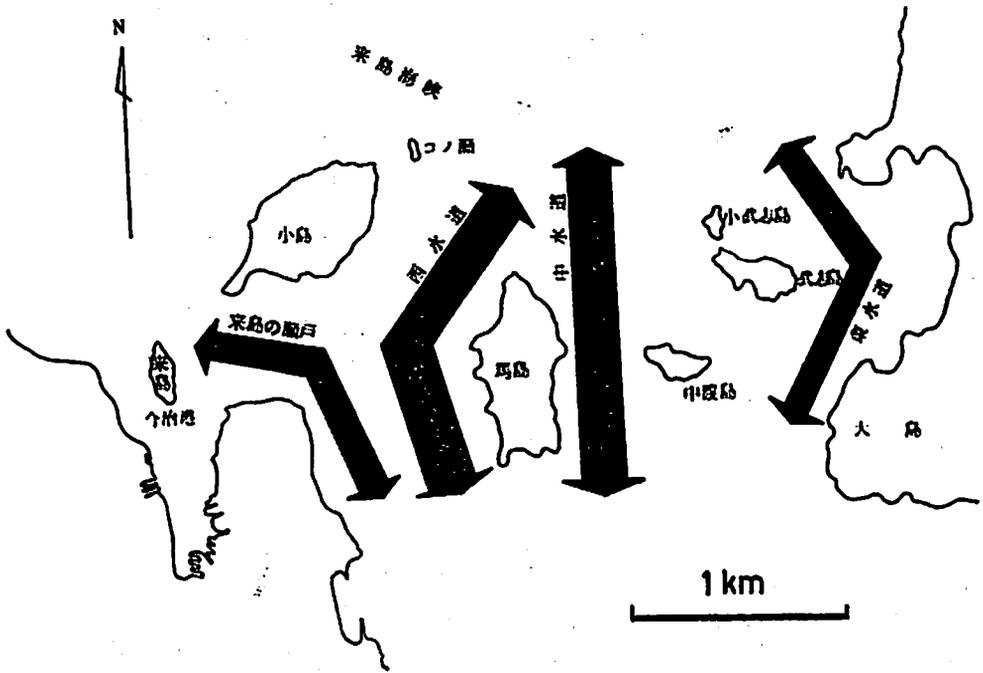


Fig.1 Plan of the Kurushima Straits.

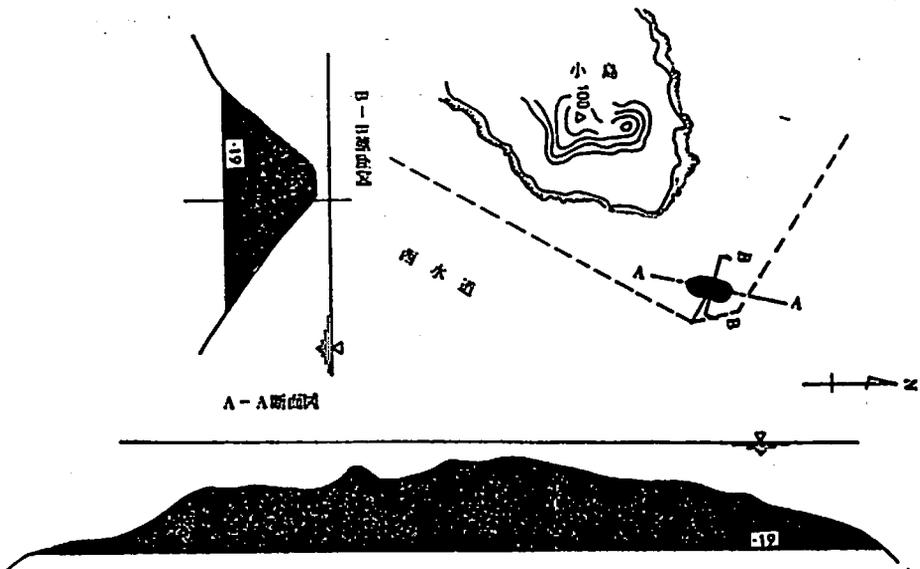


Fig.2 Topography of the Konose Reef.

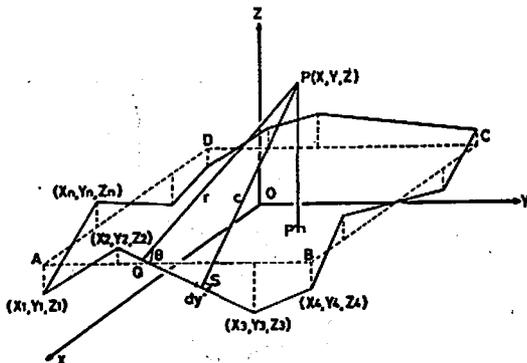


Fig. 3 Co-ordinates of the irregular loop.

南北 40m × 東西 35m の矩形に近い形状をなしている。いま、ループの各部分が直線とみなされる程度にループを Fig. 3 のように N 分割する。ループに電流 I を流したとき、任意の点 P における垂直磁界 H_z は、分割されたループ線素それぞれがつくる垂直磁界の重ね合によって与えられる。

まず、区間 AB において、Fig. 3 に示されるような任意の位置にループの微小部分 dy' を考える。 dy' による P 点での磁界 dH' は Biot-Savart の法則によって、次式で与えられる。

$$dH' = \frac{I}{4\pi} \cdot \frac{\sin \theta}{r^2} dy' \quad (1)$$

ただし、 $\sin \theta = c/r$, $c = \overline{PS}$, $r = \overline{PQ}$ であり、また、

$$r = \left[(a-x)^2 + (y'-y)^2 + \left\{ \frac{z_3-z_2}{y_3-y_2} (y'-y_2) + (z_3-z_2) \right\}^2 \right]^{1/2}$$

と表わすことができる。

さらに、P 点における垂直成分 dH_z' は、

$$\begin{aligned} dH_z' &= \frac{a-x}{c} \frac{y_3-y_2}{\sqrt{(y_3-y_2)^2 + (z_3-z_2)^2}} dH' \\ &= \frac{I}{4\pi} \frac{(y_3-y_2)(a-x)}{\sqrt{(y_3-y_2)^2 + (z_3-z_2)^2}} \cdot \frac{1}{r^3} dy' \quad (2) \end{aligned}$$

となる。

したがって、Fig. 3 に示されるように、区間 AB が 3 つの直線部に分割された場合、区間 AB による P 点の垂直磁界 $H_{(11)}$ はつぎのようになる。

$$\begin{aligned} H_{(11)} &= \frac{I}{4\pi} \frac{(y_3-y_1)(a-x)}{\sqrt{(y_3-y_1)^2 + (z_3-z_1)^2}} \\ &\times \int_{y_1}^{y_2} \frac{dy'}{\left[(a-x)^2 + (y'-y)^2 + \left\{ \frac{z_3-z_1}{y_3-y_1} (y'-y_1) + (z_3-z_1) \right\}^2 \right]^{3/2}} \\ &+ \frac{I}{4\pi} \frac{(y_3-y_2)(a-x)}{\sqrt{(y_3-y_2)^2 + (z_3-z_2)^2}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\times \int_{y_2}^{y_3} \frac{dy'}{\left[(a-x)^2 + (y'-y)^2 + \left\{ \frac{z_3-z_2}{y_3-y_2} (y'-y_2) + (z_3-z_2) \right\}^2 \right]^{3/2}} \\ &+ \frac{I}{4\pi} \frac{(y_4-y_3)(a-x)}{\sqrt{(y_4-y_3)^2 + (z_4-z_3)^2}} \\ &\times \int_{y_3}^{y_4} \frac{dy'}{\left[(a-x)^2 + (y'-y)^2 + \left\{ \frac{z_4-z_3}{y_4-y_3} (y'-y_3) + (z_4-z_3) \right\}^2 \right]^{3/2}} \end{aligned}$$

すなわち、区間 AB が n 分割されたとすれば、

$$\begin{aligned} H_{(11)} &= \sum_{i=1}^n \frac{I}{4\pi} \frac{(y_{i+1}-y_i)(a-x)}{\sqrt{(y_{i+1}-y_i)^2 + (z_{i+1}-z_i)^2}} \\ &\times \int_{y_i}^{y_{i+1}} \frac{dy'}{\left[(a-x)^2 + (y'-y)^2 + \left\{ \frac{z_{i+1}-z_i}{(y_{i+1}-y_i)} (y'-y_i) + (z_i-z) \right\}^2 \right]^{3/2}} \quad (3) \end{aligned}$$

となる。

ここで、被積分関数の分母を $[S]^{3/2}$ 、ならびに、 $(z_{i+1}-z_i)/(y_{i+1}-y_i) = \alpha$ 、とおくと、

$$\begin{aligned} S &= (a-x)^2 + (y'-y)^2 + \left\{ \alpha(y'-y_i) + (z_i-z) \right\}^2 \\ &= (1+\alpha^2) \left[\left\{ y' - \frac{y+\alpha(\alpha y_i - z_i + z)}{1+\alpha^2} \right\}^2 \right. \\ &\quad \left. + \frac{(1+\alpha^2)(a-x)^2 + \left\{ \alpha(y-y_i) - (z-z_i) \right\}^2}{(1+\alpha^2)^2} \right] \end{aligned}$$

と書かれる。つぎに、

$$\begin{aligned} Y &= y' - \frac{y+\alpha(\alpha y_i - z_i + z)}{1+\alpha^2} \\ A &= \frac{(1+\alpha^2)(a-x)^2 + \left\{ \alpha(y-y_i) + (z_i-z) \right\}^2}{(1+\alpha^2)^2} \end{aligned}$$

とおき、 $y'=y_i$ のとき $Y = \beta_1$ 、 $y'=y_{i+1}$ のとき $Y = \beta_2$ とすれば、積分の結果は、

$$\int_{y_i}^{y_{i+1}} \frac{dy'}{S^{3/2}} = (1+\alpha^2)^{-3/2} \left\{ \frac{\beta_2}{A\sqrt{A+\beta_2^2}} - \frac{\beta_1}{A\sqrt{A+\beta_1^2}} \right\}$$

となる。いま、

$$\begin{aligned} B_1 &= (y_i-y) + \alpha(z_i-z) \\ B_2 &= (y_{i+1}-y) + \alpha^2(y_{i+1}-y_i) + \alpha(z_i-z) \end{aligned}$$

とおけば、区間 AB による P 点の垂直磁界は次式で与えられることになる。

$$H_{(11)} = \sum_{i=1}^n \frac{I}{4\pi} (a-x) \left\{ \frac{B_2}{A\sqrt{A+B_2^2}} - \frac{B_1}{A\sqrt{A+B_1^2}} \right\} \quad (4)$$

同様な方法によって、励磁ループの辺 BC, CD, DA による垂直磁界 $H_{(22)}$, $H_{(33)}$, $H_{(44)}$ を求めることができ、これらを合計すれば、ABCD の励磁ループが空气中に置かれた場合、P 点における垂直磁界が与えられることになる。

実際の計算に当っては、ノ瀬付近の海底地形の深

浅測量図により、励磁ループの各部が直線に近似されるように分割し、上述のような方法によって、電子計算機を用いて計算を行なった。

4. 計算結果

Fig. 3 に示される現場の励磁ループの中心点（水面下 14m に相当）における垂直磁界 H_z は計算の結果、

$$H_z = 0.0219 NI (\text{AT/m})$$

で与えられる。ただし、この値はループが空気中にあるものとした場合である。ここに、 N は励磁ループの巻き数、 I は電流である。このループは平面的にみると、ほぼ $35\text{m} \times 40\text{m}$ の矩形に近い形状をしているが、もし、同寸法の水平ループであるとすれば、計算上、

$$H_z = 0.0242 NI (\text{AT/m})$$

となる。実際のループの方がやや低い値を示すのは、ループの形状の不規則性によるものと考えられる。

ループの中心軸上で、水面下 10m 地点における垂直磁界は、

$$H_{z(10)} = 0.0209 NI (\text{AT/m})$$

で、これを基準として -10m 面における垂直磁界の分布を計算した結果が Fig. 4 である。ループの形状が複雑であるため、磁界の分布も単純ではないが、10本の爆破孔付近では、 $H_{(z)}/H_{z(10)}$ が 0.9~1.2 の範囲内にあり、比較的安定した磁界の中にあるといえる。

各爆破孔中における深さ方向の変化は Fig. 5 に 4 例が示されている。他の孔についても同様であるが、いずれも起爆素子が位置する -10~-15m の間では、

$$H_{(z)}/H_{z(10)} = 1.0 \sim 1.25$$

の間であって、垂直磁界の深度による変化は少いといえる。

5. 海水による影響

励磁ループによって作られる磁界が、媒質の影響を受けて、空気中の場合より小さくなることは、すでに前の報告^{2),3)}において指摘した。不規則な形状のループについての厳密な解はまだ明らかでないが、いままでの理論的な考察の推移から、該当ループと同様な大きさの円形ループの場合と大きな差がないものと考えられる。

円形の励磁ループにおいて、媒質による磁界の低下は、

$$F^2 = \pi f \mu_0 \sigma_1 a^2 \quad (5)$$

で示されるパラメータに依存することを明らかにした。ここに、 f は励磁ループに流す交流の周波数、 μ_0 は真空中の透磁率で $= 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ 、 σ_1 は媒質の導電率で海水の場合は $\approx 3 \text{U/m}$ 、 a はループの半径である。

いま、 $f = 550$ ヘルツ、 $a = 20\text{m}$ とすれば、 $F^2 = 2.61$

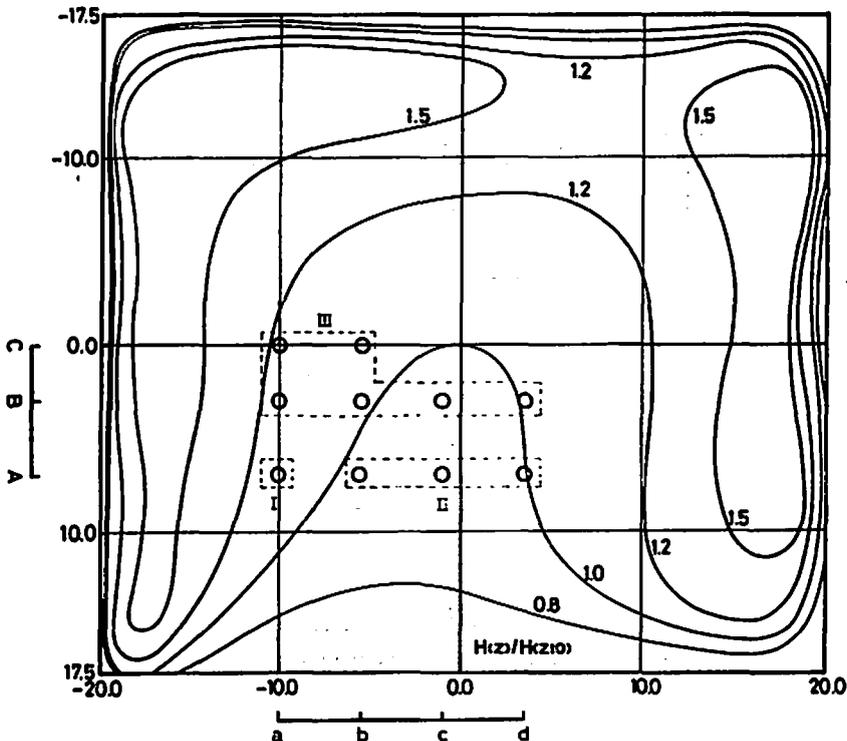


Fig. 4 Distribution of vertical magnetic component in the plane of 10m under the sea level.

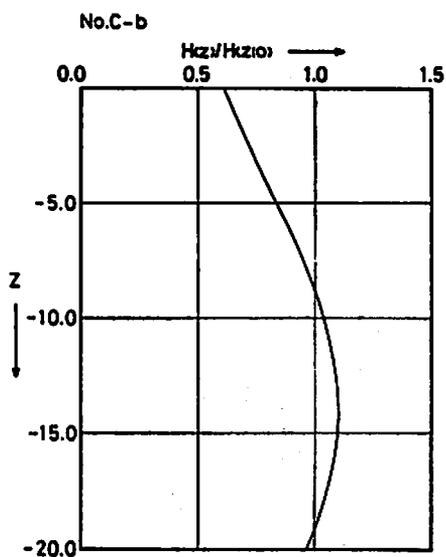
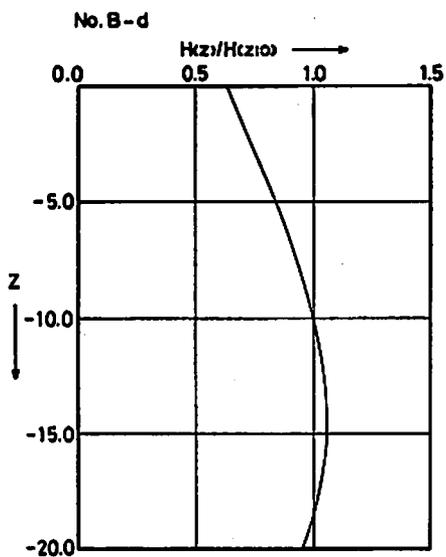
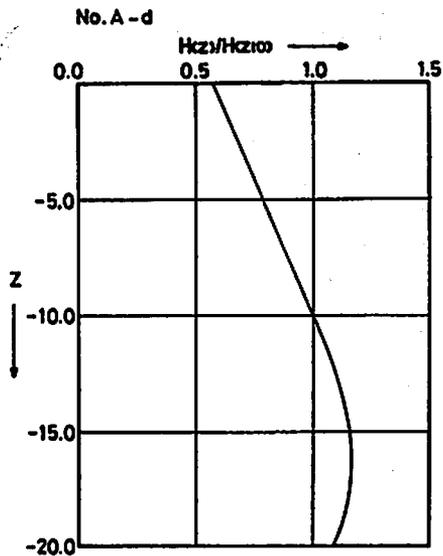
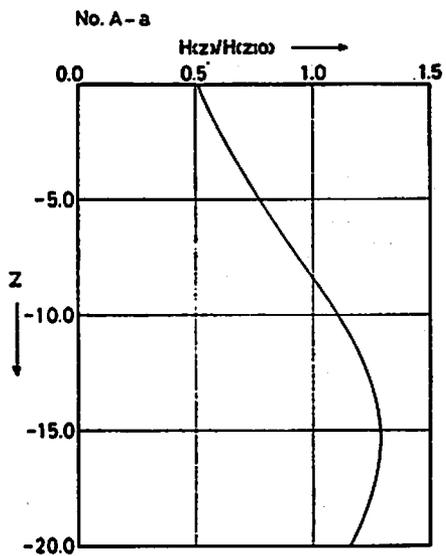


Fig. 5 Variations of vertical magnetic field along the blasting holes.

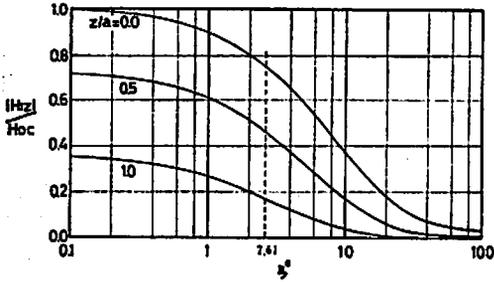


Fig. 6 Vertical component of magnetic field affected by medium.

$$F^2 = \pi f \mu_0 \sigma_1 a^2,$$

- f : Frequency of exciting current
- μ_0 : $4\pi \times 10^{-7} H/m$
- σ_1 : Conductivity of medium
- a : Radius of exciting loop.

となる。Fig. 6 は円形ループの軸上における3点($z=0$, $z=0.5a$, $z=a$)での、媒質の影響を計算した結果で、各点における垂直磁界 $|H_{1z}|$ と同ループの中心点における空気中での磁界 H_{0c} との比で表わされている。図から明らかなように、いずれの点でも、 F^2 が大きくなると、磁界が小さくなる。 $F^2=2.61$ を示す破線と各曲線との交点より、磁界の減少の程度を知ることができる。すなわち、ループの中心点では、空気中の場合に較べて約78%に低下し、 $z/a=0.5$ の点では($a=20m$, $z=10m$)、約56%に低下する。中心点から半径分離れた軸上の点では、約17%に低下し、実用に耐えないといえよう。

6. 施工法

上述のような計算の結果を基礎として、実際の工事施工上の計画がなされた。まず、発破孔は1孔当りの装薬量を100~200kg、孔間隔を4.0m×4.5mとした。孔数は合計10本で、これらを取り囲むように、励磁ループは平面的に35m×40mの矩形とした。これらの関係はFig. 7に示されている。また、Fig. 8は発破

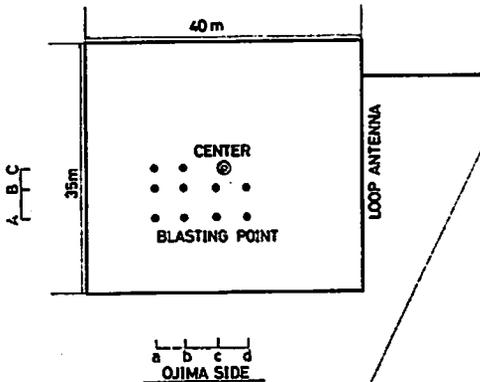


Fig. 7 Drilling Pattern.

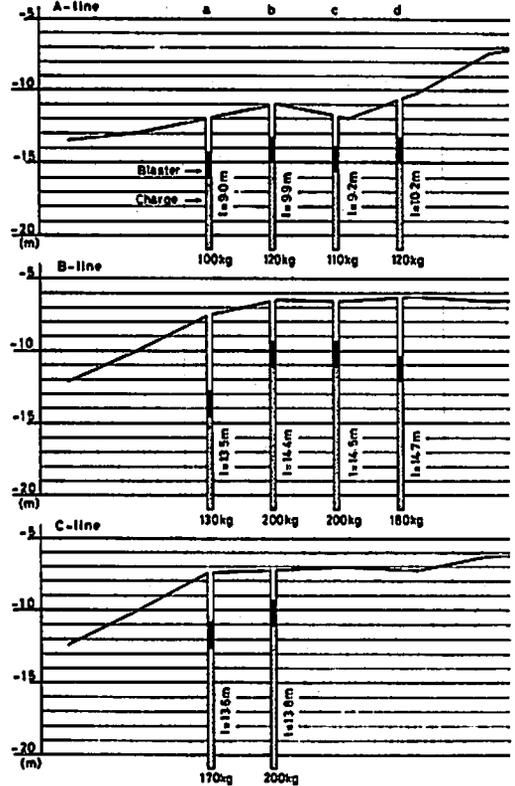


Fig. 8 Sections of topography and blasting holes.

孔を含む地形断面ならびに装薬長等を示している。

穿孔には Wellman ST-3 型機が使用され、SEP (Self Elevating Platform) 上から作業が行なわれた。穿孔孔径は200mm、深さは9.0~14.7mであり、爆薬はGX-1号ダイナマイトで実薬径は130mm、雷管はEDX-2号が用いられた。当初は5回の発破が計画されていたが、急潮流によるSEPの使用制限等により、発破回数は3回に変更された。Table 1は各発破における諸元を表示したものである。

励磁ループは断面積が14mm²の3心構造で、これを直列に接続して3回巻きのループとした。ループ電線の全長は220mで、この敷設には潮止り時を利用し、大型台船から一斉に投下する方法が採用された。投下後、潜水作業によってアンカー・ボルトに固定し、所定の形状となるように整形された。

小島基地に設置された交流発振機と励磁ループを結ぶ送電線は22mm²×2心で、全長430m、海底に沿って敷設された。送電線とループの直流抵抗値は合わせて1.5Ωであり、これ等の導線と海水との間の絶縁抵抗は300MΩ以上であった。

起爆薬子 (Blaster) は日本油脂 K. K. の開発による LB-5 改型を使用した。この薬子は励磁ループの面に

Table.1 Elements of blastings

No.	Date	Holes		Charge (kg)
		Location	Length (m)	
1st	24 Nov. 1978	A-a	9.0	100
2nd	29 Nov. 1978	A-b	9.9	120
		A-c	9.2	110
		A-d	10.2	120
3rd	26 Dec. 1978	B-a	13.5	130
		B-b	14.4	200
		B-c	14.5	200
		B-d	14.7	180
		C-a	13.6	170
		C-b	13.8	200

対して垂直に設置された場合、1AT/mの磁界によって、点火コンデンサー(20 μ F)に43Vの充電電圧が生ずるという特性を有している。EDX-2号雷管を点火するのに要するエネルギーPは、20 μ Fのコンデンサーを用いた場合2.4m jouleで、 $P=CV^2/2$ の関係から、充電電圧が15.5V以上であれば、点火することができる。安全を期するために、エネルギー的にみた安全率を4とすれば、充電電圧は31V以上あれ

ばよいことになる。起爆素子の特性から逆算すれば、必要な磁界の強さは0.721(AT/m)以上である。ただし、コンデンサーの充電時間を60秒とすると、値和充電電圧の90%にしか到達しないので、これを考慮すれば約0.8(AT/m)の磁界強度が必要となる。

第4・5節で述べたように、水面下10mの中心点における垂直磁界は、 $N=3$ 、として、 $H_{(z10)}=0.06271$ (AT/m)で与えられた。各孔の起爆素子が位置する点でもっとも磁界強度の低いのは、A-c孔(-15m)で、 $H_{(z)}/H_{(z10)}=0.95$ である。また、この点における媒質の影響による減衰は約56%となるので、必要な磁界の強さは空気中の場合に換算して、 $0.8(AT/m)/0.95 \times 0.56 \div 1.5(AT/m)$ となる。これからループに流す励磁電流を求めると、 $I \div 24A$ が得られる。

工事に先立って、励磁ループの敷設が完了した時点で、予測通りの磁界が発生しているかどうかを確かめるとともに、起爆素子に雷管を接続して点火の有無を検証したが、いずれも満足すべき結果が得られた。

7. 発破ならびにその結果

発破工事に用いられた励磁電流は550ヘルツ、41Aであった。第1回の発破は1孔、第2回は3孔、第3回は6孔、いずれも斉発である。発破に際しては、同時に水中衝撃圧力、地盤振動、魚類に与える影響等の



Fig.9 Sketch after the last blasting.
SH : Shelled rock R : Rock

諸観測も実施された。多くの測定データならびにダイバーによる海底地形の目視により、すべての発破は完全に行なわれたものと推測された。Fig. 9は第3回目の発破が終了した後の海底の状況をスケッチしたもので、岩盤のいたるところにきれつが生じ、破碎された岩石が飛散しているのが認められる。

各回の発破が終了した後に、破碎転石によるループの損傷の有無を調べるため、送電線+励磁ループの導通テスト、ならびに海水との絶縁テストを行なった。第1回および第2回の発破後には、これらのテスト結果に異常は認められなかったが、第3回の発破の場合は、ループの相当な部分が転石に埋り、絶縁抵抗が数 $k\Omega$ に低下した。ただし、導通抵抗は 1.5Ω と変化がなかった。このことは、転石によってループの外被が破損し、心線が海水と接触したために生じたものと考えられる。

これまでの実験的研究の結果によれば、ループ外被が相当損傷しても起爆が可能であるということを確認していたので、追加的に雷管を接続して、このままで遮隔起爆法の手順をくり返したところ、予期通り雷管を点火することができた。この追加実験は今後実際の施工上、ある程度のループの破損等が許容されることになるので、益するところが大きいと思われる。

8. 結 論

理論的あるいは実験的に多くの検討を重ねてきたが、実際規模の発破工事に適用したのは初めてのことで、この工事によって実用上の多くの経験を深めることができ、また下記のように得るところが多くあった。

- (1) コノ瀬のような激しい潮流の中でも、励磁ループ・送電線の敷設ならびに保守について支障は生じなかった。
- (2) 相当不規則な海底地形に沿って励磁ループが敷

設されたが、シミュレーションによる磁界の計算が可能であった。

- (3) 爆破孔内の起爆素子には十分な点火エネルギーが誘起され、すべてが完爆した。
- (4) ループに多少の損傷が生じても点火が可能であった。
- (5) その他、作業上多少の試行錯誤があったが、実際上の支障となることはなかった。

なお、現在(昭和54年夏)発破区域付近のグラブしゅんせつ作業が行なわれているが、岩盤の破碎状況はきわめて良好で、発破の成果が大であったと報告されている。

最後に、本工事において種々研究上の便宜を賜わった運輸省第3港湾建設局の関係各位に深甚なる謝意を表する所である。同時に、終始御懇篤な御指導を頂いた水中発破方法調査委員会委員長福山郁生博士はじめ各委員に厚く御礼を申し上げます。なお、本工事がまったく無事故でしかも成功裡に所期の目的が達成できたのは、参加各企業の努力の賜とここに名を掲げて謝意を表します。財団法人日本海洋開発建設協会、来島航路水中発破調査共同企業体、日本油脂株式会社、日本大洋海底電線株式会社、住友金属鉱山株式会社、海洋機器株式会社。

文 献

- 1) 谷口敬一郎：工業火薬協会誌，vol. 37, No. 3, p. 144 (1976)
- 2) 谷口敬一郎：工業火薬協会誌，vol. 38, No. 1, p. 3 (1977)
- 3) 谷口敬一郎，井上啓司，山川英二，酒井秀喜：工業火薬協会誌，vol. 39, No. 5, p. 261 (1978)
- 4) 植田武雄・中野雅司：工業火薬協会誌，vol. 35, No. 5, p. 211 (1974)
- 5) 谷口敬一郎，井上啓司，酒井秀喜，田中幹雄：工業と技術，vol. 6, No. 4, p. 90 (1978)

On the underwater blasting works by electromagnetic firing method

by Keiichiro Taniguchi*, Keiji Inoue*, Hideki Sakai* and Mikio Tanaka*

A series of underwater blasting works had been carried out on a reef called "Konose" where is at the Kurushima Straits in the Inland Sea of Japan. In this works, the electromagnetic remote control firing method was applied, because the tidal current at this district is very rapid.

As the exciting loop was laid down on the natural reef, the shape of loop became very irregular. In this paper, the calculation method of magnetic field by such loop is proposed, and the application manners of calculated results are described.

The blastings were carried out as follows.

No.	Date	Charges	Holes
1 st	24, Nov. 1978	100 kg	1
2 nd	29, Nov. 1978	350 kg	3
3 rd	26, Dec. 1978	1,080 kg	6

All blastings were good success.

(*Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kansai University, 3, Senriyama-Higashi, Suita, Osaka.)

ニュース

事故情報——黒色火薬造粒工場の爆発事故

米因ペンシルベニア州モーシックのベリン工場黒色火薬造粒工場で、1979年7月16日 15.50 就業中に黒色火薬の爆発事故が起きた。

爆発原因は、かみなりによるもので、第2回目のかみなりが造粒工場かあるいは近辺に落雷し、工場は、黒色火薬約1,360キログラムとともに瞬間的に爆発した。雷雲を伴うあらしの接近に先だち、作業員は、退避させてあったので、爆発による被害者は皆無。隣接工場の被害は軽微で、破片のブリキ板は600フィート飛散した。なお造粒工場は自然地形の防塵施設であった。

出典：事故情報 (I. M. E. # 784)

(田中俊二)

事故情報——TNT 圧填機における爆発事故

オーストリア・ウィーン市ラムプレヒト街ダイナミット・ノーベル社工場において、1978年11月15日午後3時45分、作業中、爆発事故が発生した。

当日の気象、 -2°C 、687mmHg、湿度90%、天候快晴。タイプ、ジェンニーの250トンプレス機で200g TNT ベレット2個、300g TNT ベレット2個計4個を1回の圧搾工程で同時に製造できるが、作業員不在の時に、プレス機が作動し、圧填した200g の TNT が不完爆発を起し、工具および放爆面のプラスチック屋根材等を破壊した。TNT 200g 中 30g はそのまま爆発しないで工具に付着していた。人員被害なし。

原因は不明で、作業員3名が別室で爆発音を聞いた以外一切不明。

出典：国際火薬類事故情報交換会報告 No. 345

(田中俊二)