

トンネル用遠隔制御発破システムの開発

鈴木 聡*, 川村 実*, 廣崎義一*

山岳トンネルの発破作業の自動化を目的とし、結線を有しない電磁誘導方式による遠隔制御発破システム(Remote Controlled Blasting System=RCB System)を試作した。従来の海洋用RCBシステムではアンテナも受信起爆装置も大型のため、海底岩盤掘削等の特殊な工事にしか使用することができなかったが、一般的な発破作業にも使用可能なようにアンテナと受信起爆装置を大幅に改良して、小型化したものを試作し、岩盤中にて起爆試験を行った。その結果、周波数550 Hz、一辺が3 mの角形ループアンテナを用いて、ループアンテナと岩盤中に爆薬と共に装薬した受信起爆装置の距離が11 m(進孔長1.2 m)でも正常に起爆しうることが確認された。

1. 緒言

最近の土木・建設業界では、施工現場における作業の合理化を図るため、新技術の開発が盛んに展開されている。発破作業の分野においても、特に山岳トンネルにおける発破作業を自動化すべく、含水爆薬の自動装填機の開発^{1,2)}が進められており、さらに結線を要しない無線起爆工法の確立³⁾が望まれている。

無線起爆工法については、その媒体として、音波・電磁波等を利用することが考えられ、超音波遠隔起爆法、本四架橋南北備讃瀬戸大橋下部工工事の際に使用された電磁誘導遠隔起爆工法⁴⁾等がある。また、マイクロ波無線起爆システムの研究⁵⁾も行われている。しかしながら、現状の山岳トンネルにおいて実用化された無線起爆装置はない。

電磁誘導遠隔起爆工法である従来の海洋用遠隔制御発破システム(海洋用RCB)は、無線のため装薬等の作業性が良好で、かつ受信起爆装置内に電源を格納しないため誤爆等の恐れがなく安全に取り扱えることが特徴であるが、反面、アンテナも受信起爆装置も大型であることからそのまま山岳トンネルなどの一般的な発破作業に転用することができなかった。

そこで我々は、一般的な発破工法、特に山岳トンネルにも使用可能なようにアンテナと受信起爆装置の小型化を検討してシステムを試作し、岩盤中にて孔底起爆による発破試験を行ったので、その開発状況につい

1997年5月12日受理

*日本油脂株式会社 武豊工場

〒470-23 愛知県知多郡武豊町字北小松谷61-1

TEL 0569-72-0921

FAX 0569-73-7376

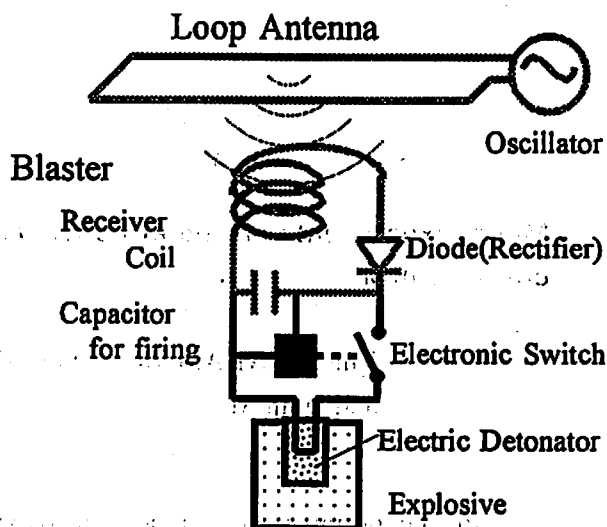


Fig. 1 Blaster set-up

て報告する。

2. システム概要

本システムの概略をFig. 1に示す。

本システムは、発振機・ループアンテナ・受信起爆装置から構成されており、発破時に550 Hzの交流電流を発生する発振機からループアンテナに電流を供給し、ループアンテナ内部に交流磁界を発生させる。これにより親ダイに取り付けられた受信起爆装置内の受信コイルの両端に起電力が誘起され、直流に整流された後、点火用コンデンサに蓄えられる。点火信号(本システムの場合は交流磁界が消滅したとき)により点火用コンデンサが放電して雷管が起爆し発破を行うものである。

ここで、過去に実用化された海洋用RCBの概略を

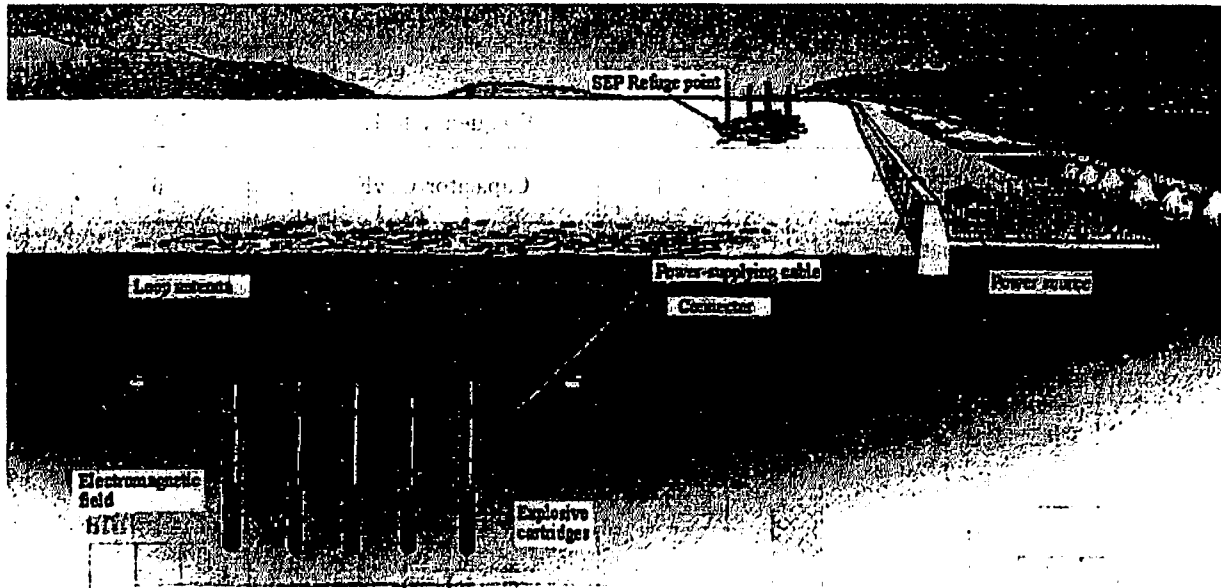


Fig. 2 Blasting by RCB system

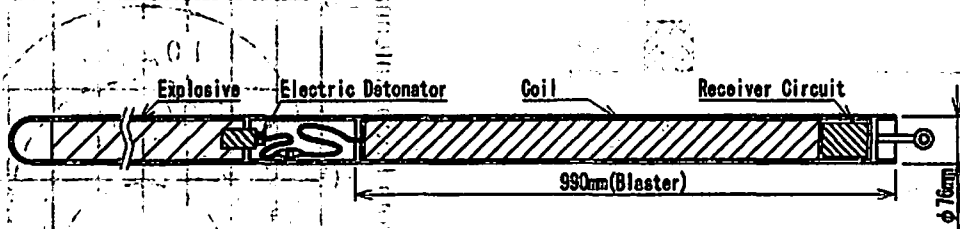


Fig. 3 Blaster-explosive assembly cartridge

説明する。海洋用RCBは従来の有線発破では作業が困難な潮流の激しい水深の深い場所での岩盤掘削やしゅんせつ工事を行うために開発された発破システムで、Fig. 2に示すような大がかりなものであった。これに用いられた受信起爆装置もFig. 3に示すように大型のものであった。

今回我々の開発したシステムは上記システムの小型化を目指したものである。そしてトンネル用遠隔制御発破システムの将来像としては、例えば、複数のアームを有した無人ガントリージャンボを用い、削孔、受信起爆装置(親ダイ)・バルクエマルジョンやANFO(増ダイ)の自動装薬、タンピング作業までを完全無人化で行うことを想定している。

3. ループアンテナと発振機の検討

受信起爆装置はカットオフを防止するために、現在の発破工法と同様に孔底起爆が好ましいことから、岩盤を問題なく透過する周波数に設定する必要がある。従って、海洋用RCBで実数のある550 Hzを発振周波数とした。

磁束密度について簡単に説明する。Fig. 4に示す一辺 $2a$ (m)の角形ループアンテナの場合、 x 軸上の磁束密度 B_x (Wb/m²)は式(1)で与えられる。

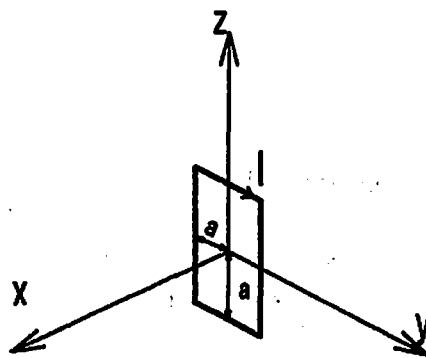


Fig. 4 Axis of electromagnetic field

$$B_x = \frac{2\mu_0 \cdot a^2 \cdot N \cdot I_0}{\pi \sqrt{2a^2 + x^2} \cdot (a^2 + x^2)} \quad (1)$$

ここで B_x : x 軸上の磁束密度(Wb/m²)

μ_0 : 真空の透磁率($4\pi \times 10^{-7}$ [H/m])

$2a$: ループアンテナの一辺(m)

N : 巻数(回)

I_0 : ループアンテナ電流(A)

ループアンテナ電流 I_0 (A)は、式(2)で与えられる。

$$I_0 = \frac{V}{R} \quad (2)$$

Table 1. Specification of loop antenna and oscillator

Loop Antenna		Oscillator	
Size $2a$ (m)	3×3	Frequency f_0 (Hz)	550
Section of antenna $l \times t$ (m \times m) ^{*1}	0.15×0.15	Capacitor C (μ F)	6
Diameter of cable (mm)	7	max. Current (A)	110
Cable turns N (turn)	38		
Inductance L (mH) ^{*2}	13		

*1 see Fig. 5

*2 connected with power-supplying cable (length 100 m)

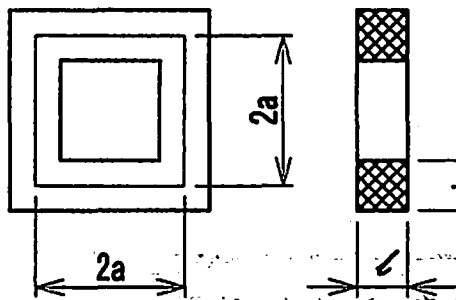


Fig. 5 Shape of loop antenna

ここで R : ループアンテナとケーブルの直流抵抗 (R)

V : 電源電圧 (V)

発振周波数 f_0 (Hz) は、式 (3) で与えられる。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} \quad (3)$$

ここで f_0 : 発振周波数 (Hz)

L : ループアンテナのインダクタンス (H)

C : 発振機のコンデンサ容量 (F)

さらに、インダクタンス L (H) は、Fig. 5 に示すような矩形断面正方形コイルの場合、式 (4) で与えられる。

$$L = 16a^2 N^2 \left[1n \frac{2a}{l+t} + 0.22 \frac{l+t}{2a} + 0.73 \right] \times 10^{-9} \quad (4)$$

ここで l : ループアンテナ長 (m)

t : ループアンテナ厚 (m)

以上のことを考慮して、最初にループアンテナのサイズを検討した。海洋用RCBのアンテナサイズは数10 m～数100 mと非常に大きかった。山岳トンネルに使用する場合は、トンネル内に収容可能なサイズにする必要がある。また、トンネル上部には、換気用ダクト等があるため、ループアンテナのサイズは約5 m以下とする必要がある。今回はそのサイズを1辺3 mの矩形断面正方形ループアンテナとした。

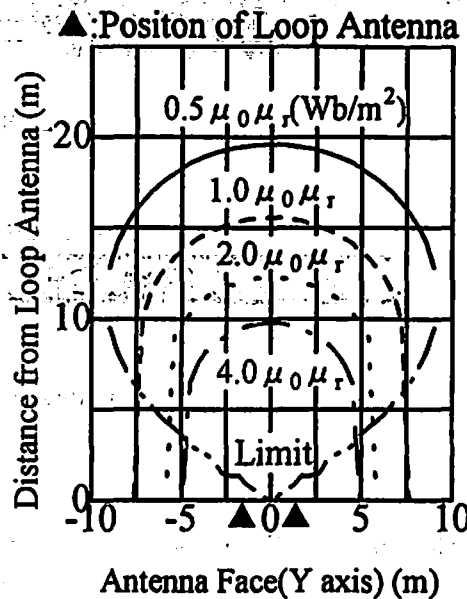


Fig. 6 Contour of flux density

Table 1 にループアンテナと発振機の代表値 (実測値) を示す。また、Table 1 に示す条件の時 (アンテナ電流は 70 A) の磁束密度分布 (Fig. 4 の X-Y 平面上) を Fig. 6 に示す。

4. 受信起爆装置の試作

受信起爆装置内の受信コイルの両端に生ずる誘導起電力 E (V) は、式 (5) で与えられる。

$$E = 0.02\pi \cdot \eta \cdot \mu_r \cdot f_0 \cdot n \cdot S \cdot Bx \quad (5)$$

ここで η : 受信起爆装置の受信効率 (%)

μ_r : コアの比透磁率

n : 受信コイルの巻数

S : 受信コイルの断面積 (m²)

以上のことを考慮して、受信起爆装置の外径から検討を行った。現在、山岳トンネルの発破工法で一般的に用いられているビット径は、42 mm であるが、将来は削孔機的能力向上でビット径が大きくなると予想し、

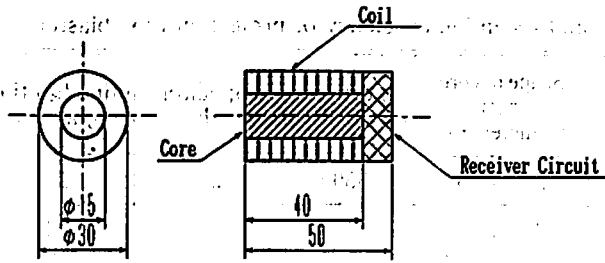


Fig. 7 Short type blaster

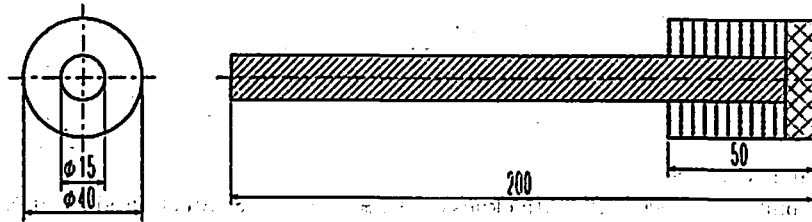


Fig. 8 Projection type blaster

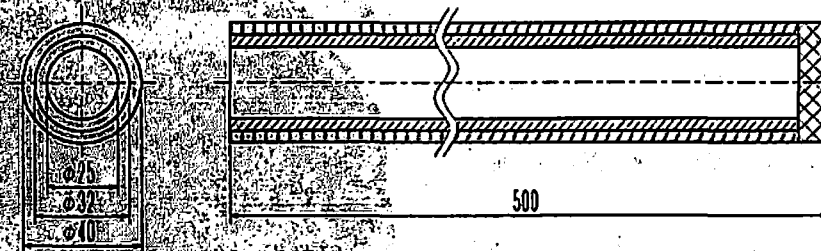


Fig. 9 Tube type blaster

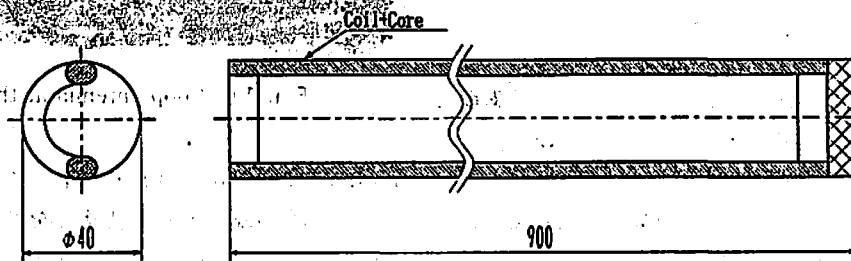


Fig. 10 Side type blaster

Table 2 Specification of blasters and reception efficiency

Fig.	Type	Diameter (mm)	Length (mm)	Turn of coil (T)	Efficiency (%)
Fig. 7	Short	30	50	11000	4.0
Fig. 8	Projection	40	200	13500	14.0
Fig. 9	Tube	40	500	10500	0.4
Fig. 10	Side	40	900	3700	0.4
LB-4W	Undersea	70	900	5500	46.0

受信起爆装置の外径を最大40mmとし、各構造の受信起爆装置の試作・評価を行った。

Fig. 7~10に概略図を、Table 2に各仕様を示す。

また、併せて海洋用受信起爆装置(型式LB-4W)の仕様も示す。

検討を行った結果、Fig. 7の凸型受信起爆装置が

Table 3 Specification and reception efficiency of projection type blasters

Type	Diameter (mm)	Material of core	Shape of core length, diameter (mm)	Turn of coil (T)	Capacitor (μF)	min. Ignition voltage (V)	Efficiency (%) ^{*3}
Ferrite-A	$\phi 40$	Ferrite ^{*1}	200, $\phi 15$	13500	20	23	15
Ferrite-B	\uparrow	\uparrow	350, $\phi 15$	\uparrow	\uparrow	23	31
Ferrite-C	\uparrow	\uparrow	200, $\phi 15$	\uparrow	47	15	11
Ferrite-D	\uparrow	\uparrow	\uparrow	\uparrow	20 ^{*4}	20	20
Ferrite-E	\uparrow	\uparrow	185, $\phi 15$	\uparrow	\uparrow	\uparrow	17
Si Steel-A	\uparrow	Si Steel ^{*2}	200 \times 10 \times 10	\uparrow	20	23	6
Si Steel-B	\uparrow	\uparrow	200 \times 15 \times 15	\uparrow	\uparrow	23	14

*1 Relative permeability $\mu_r = 800$

*2 Relative permeability $\mu_r = 3500$ Plate thickness = 0.3mm 6.5% Si Steel (Product of NKK)

*3 Power supplying time 60 sec

*4 Improved circuit

受信性能、サイズ、構造の点で一番優れていたため、この構造について、コアと受信回路について詳細な検討を行った。Table 3に検討結果を示す。

Table 3に示す結果から、受信起爆装置の受信能力の向上策として、

- ① コアの体積を増加させ、コイルを通過する磁束密度を上げる。
- ② 受信回路にサイリスタを追加し、受信回路内部の電力損失を低下させる。

の2点が有効であることが判明した。

コアの材質については、フェライトコアとケイ素鋼板コアとを比較した結果、フェライトコアのほうがコアの体積当たりの受信能力が優れていたため、フェライト-D型を改良してフィールド試験用受信起爆装置(以下フェライト-E型と記す)とすることにした。

5. フィールド試験

フィールド試験は、備北粉化工業株式会社要害鉱山(岡山県新見市)にて行った。本鉱山は良質な結晶性石灰岩をルーフ&ピラー方式にて採掘している。

従って、ループアンテナを天井から吊り下げる方式とした。ループアンテナと切羽をFig. 11に示す。ループアンテナと切羽の距離を9.8mに設定し、ループアンテナの防護は行わなかった。

ほぼ中央に芯抜きを想定した能力測定及び起爆試験用の装薬孔と、踏まえを想定し中心から5m離れた位置に能力測定用の装薬孔を削孔した。Fig. 12に各装薬孔の位置を示す。

発破パターンは、進行長1.2m、破砕量0.4m³の8孔パラレルカットで芯抜きを想定したものである。ポアホールはビット径105mmの4孔とその中心にビット

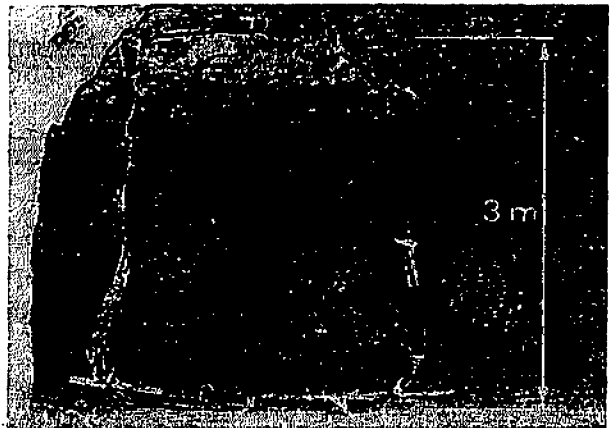


Fig. 11 Loop antenna at the face

径45mmの1孔を組み合わせたものである。その周囲にビット径45mmの8孔の装薬孔を削孔した。1孔当たりの装薬量は600gである。発破パターンをFig. 13に示す。

フェライト-E型受信起爆装置の外観図をFig. 14に示す。フェライト-D型受信起爆装置と異なる点は、装薬孔への挿入性を向上させるため、コーンを取り付けたこと、コアの長さが短くなり185mmになったことである。これにより受信効率は17%に、また、LB-4Wの36%になった。

ループアンテナ及び発振機はTable 1に示したものをを用いた。アンテナ電流を70A(電源電圧24V)、発振時間は60secで、能力測定及び起爆試験を行った。

フェライト-E型受信起爆装置の実測電圧値(ループアンテナ・切羽間9.8m、進行長1.2m)及び大気中での計算による受信電圧値をFig. 15に示す(コアの断面積 $9.3 \times 10^{-4} \text{ m}^2$)。

能力測定の結果、芯抜きの孔底部に設置した受信起

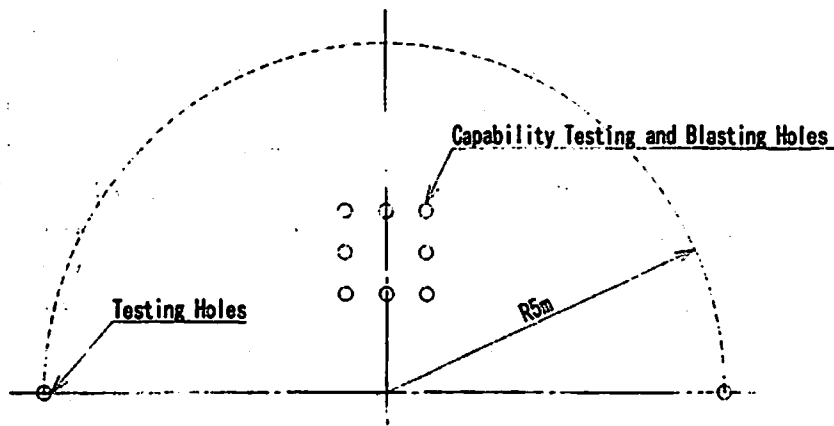


Fig. 12 Capability testing holes and blasting holes

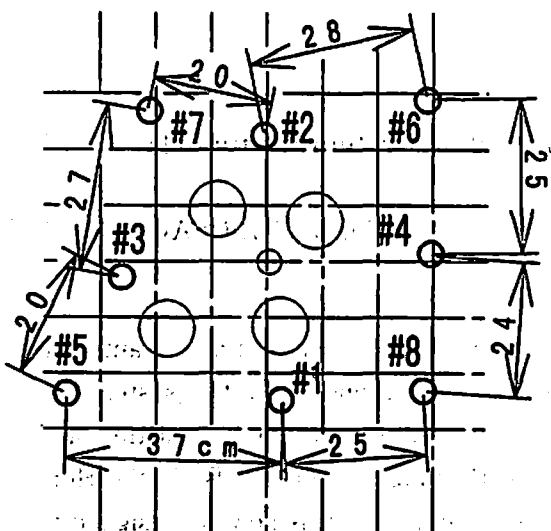


Fig. 13 Blasting pattern

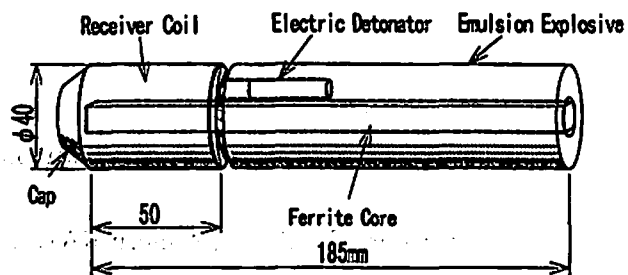


Fig. 14 Ferrite-E type blaster

爆装置の受信電圧は25Vで、点火玉を用いた起爆確認試験でも問題ないことを確認した(フェライト-E型受信起爆装置の最低起爆電圧は20Vである)。また、踏まえの孔底部における受信電圧は17Vであった。(アンテナ電流を70Aから110Aにすれば、踏まえ孔底部でも26Vとなり、最低起爆電圧を上回る。)

能力確認後、受信起爆装置にMS段発雷管及び単孔形状含水爆薬(200g)を取り付けた親ダイを8個作成し、各装薬孔に装薬後、増しダイ(1孔当たりφ25×100gを4本)を装薬し、タンピングを行った。

周囲の安全を十分確認した後、発振機を作動させてから60sec後に発振機を停止、すなわち起爆信号を送信して、受信起爆装置を起爆させた。その結果、正常に起爆し発破を行うことができた。

飛石によるループアンテナの損傷については、破砕量が約0.4㎡と少なかったこともあり、ループアンテナの被覆に傷は付いたが断線していなかった。また、受信起爆装置の破片はコイルだけであった。

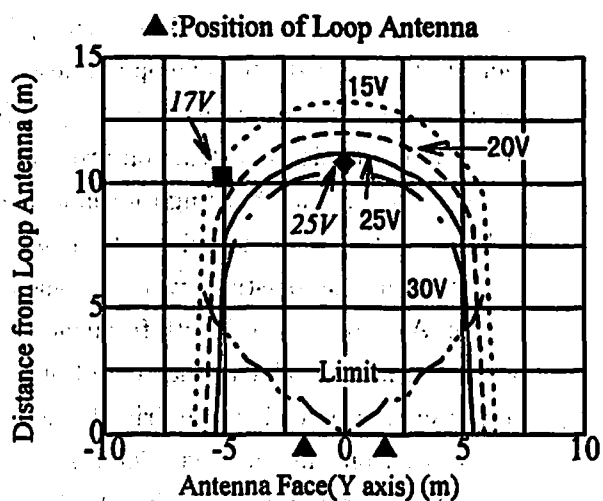


Fig. 15 Received voltage measured (italics) and calculated (gothic)

6. 結論

本研究では、山岳トンネルにおいて無線発破を実現するための一手段として考案した遠隔制御発破システムの受信起爆装置、ループアンテナと発振機について試作・検討した。その結果、3×3mのループアンテナを用いて、その中心から10m離れた半径5mの円内に約25cm間隔で配置した受信起爆装置を起爆させることが可能なシステムであることが確認された。また、岩盤を問題なく透過する事が確認できた。本シ

テムでは、ループアンテナと受信起爆装置の距離をさらに延ばす必要があるが、将来の無線発破のベースとなる一要素技術を確立できたと考えている。今後は、ループアンテナと受信起爆装置の距離の延長化、並びにシステムのさらなる安全性の向上に努めたい。

謝 辞

本システムの研究開発に当たっては、関西大学工学部の飯田幸雄教授の絶大なるご援助をいただいた。また、フィールド試験を行うに当たって備北粉化工業(株)下橋課長をはじめとする皆様方のご支援を得た。ここに深く感謝の意を表する。

文 献

- 1) 廣崎義一, 川村爽, 早川隆, 角谷文彦, 火薬学会, 1996年春講演要旨集, P. 105 (1996)
- 2) 佐藤俊一, 田崎隆三, 岡田喬, 御手洗良夫, 火薬学会, 1996年, 春講演要旨集, P. 103 (1996)
- 3) 後藤勇, 橋元和男, 新藤崇, 「第1回建設ロボットシンポジウム論文集」P17 (1990)
- 4) 工業火薬協会編, 「新発破ハンドブック」, P114, (1989), 山海堂
- 5) 橋本賢二, 田崎陽治, 黒川孝一, 「工業火薬」, Vol. 54, No. 2, 87 (1993)

Development of remote controlled blasting system for tunnels

by Satoru SUZUKI*, Minoru KAWAMURA* and Yoshikazu HIROSAKI*

A wireless blasting system for tunnel construction, which consists of a loop antenna, blasters and power supplier, has been developed. The base technology of this system had been studied in 1970s to develop wireless blasting equipment for underwater blasting, and had been successfully used as a Remote Controlled Blasting System (RCB) in the Honshu/Shikoku Bridge construction project. This underwater system is now re-designed to apply to underground blasting for tunnel construction. The diameter of a blaster is fitted to be loaded into a blast hole down to 45 mm.

Experimental blastings were successfully carried out in a underground site using this system. A current of 70 A with frequency of 550 Hz was supplied to the loop antenna of 3 m × 3 m square to charge blasters of 40 mm in diameter and 185 mm in length. The blasters were preliminary loaded into drilled holes of 1.2 m in depth. The surface of the rock was 11 m away from the antenna. The results showed expected performance of the system.

(*NOF Corporation Aichi Works Taketoyo-Plant 61-1 Kitakomatsudani Taketoyo-cho Chita-gun, Aichi 470-23, JAPAN)