

電磁誘導起爆法による試験工事の理論計算
(来島海峡ノ瀬における)

関西大学工学部 正会員 谷口敬郎
 関西大学工学部 正会員 井上啓司
 関西大学大学院 学生員 酒井秀喜
 関西大学大学院 学生員 田中幹雄

1. 緒言

過去数年にわたり谷口らにより電磁誘導現象を利用した遠隔起爆法について種々の検討が行なわれ、円形および矩形ループアンテナの作る磁界についてはすでに明らかにされている。本研究においては、愛媛県今治市来島海峡ノ瀬において行なわれた大規模な水中発破試験工事をモデルとし、複雑な地形を考慮したループアンテナの作る磁界を算定した。さらに、海水による磁界強度の減衰、起爆素子(LB-5改型)の充電電圧特性を考慮し現場における発振条件等について検討した。LB-5改型の特性として雷管起爆に必要な充電電圧は31(V)である。また、1(AT/m)の電磁場においてLB-5改型の充電電圧は43(V)であり、雷管を点火させるために必要な垂直磁界強度は、 $H(z) = 1 \times 31/43 = 0.72$ (AT/m)となる。

2. 磁界強度の理論計算

現場の地形は複雑であり、これに対応させるためにループアンテナを深淺図より5mごとに分割し、その小片が作る垂直磁界をBiot-Savartの法則により算出し、それぞれの小片の積算として任意点の垂直磁界を求めた。図-1に示したようなN分割ループについて考えると垂直磁界 $H(z)$ は、

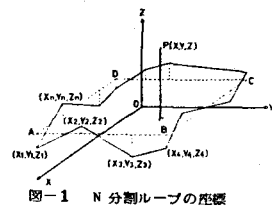


図-1 N分割ループの座標

$$H(z) = \sum_{i=1}^N \frac{I}{4\pi} \frac{y_{i+1} - y_i}{\sqrt{(y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2}} (a-x) \int_{y_i}^{y_{i+1}} \frac{dy'}{\left[(a-x)^2 + (y'-y)^2 + \left\{ \frac{z_{i+1}-z_i}{y_{i+1}-y_i} (y'-y_i) + (z_i-z) \right\}^2 \right]^{3/2}} \quad (1)$$

と求められる。

したがって、図-1におけるAB間の磁界強度 $H(z)$ は、

$$H(z) = \sum_{i=1}^N \frac{I}{4\pi} (a-x) \left\{ \frac{\beta_2}{A\sqrt{A+\beta_2^2}} - \frac{\beta_1}{A\sqrt{A+\beta_1^2}} \right\} \quad (2)$$

となる。ただし、 $\eta = \frac{z_{i+1} - z_i}{y_{i+1} - y_i}$, $A = (1+\eta^2)(a-x)^2 + \{ \eta(y-y_i) + (z_i-z) \}^2$

$$\beta_1 = (y_i - y) + \eta(z_i - z) , \quad \beta_2 = (y_{i+1} - y) + \eta(z_{i+1} - z_i) + \eta(z_i - z)$$

である。図-2は、 $z = -10m$ の水平断面における等磁界曲線、図-3は短辺方向の垂直断面における等磁界曲線であり、それぞれ $H(z)/H(z_{10})$ で表わした。ここで、 $H(z)$ はループ中心軸上 $z = -10m$ での垂直磁界強度であり

$$H(z_{10}) = 0.02092 \cdot N \cdot I \quad (AT/m) \quad (3)$$

N; ルーアアンテナの巻数(T), I; アンテナ電流(A) である。
地形に応じてルーアアンテナ近傍では磁界の変化が激しいが、
爆破孔付近(図中O印)では $H(z)/H(100)$ が 0.9~1.2 程度の範囲
で比較的安定している。

3. 海水による磁界強度の減衰

空気中に絶縁された半径 a の円形ループが水平に置かれ、ループ面から下方 $z = h$ に導電性の半無限媒質との境界面が存在する場合について考える。電磁誘導現象の理論的基礎となる Maxwell の電磁方程式は、この問題の物理性を考慮し、円柱座標を用いれば、

$$\frac{\partial E_\phi}{\partial z} = \mu \frac{\partial H_r}{\partial t}, \quad \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} (r E_\phi) \right] = -\mu \frac{\partial H_z}{\partial t}, \quad \frac{\partial H_r}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial r} = \sigma E_\phi + \epsilon \frac{\partial E_\phi}{\partial t} \quad \text{---(4)}$$

であり、 ϵ, μ, σ はそれぞれ媒質の誘電率、透磁率、導電率である。式(4)から磁界の成分を消去し、媒質を海水と考えると、ループが海底面に設置されたものとする、 $h=0$ で垂直磁界を与える式は、

$$H(z) = \frac{aI}{2} \int_0^\infty \frac{2\lambda^2}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 - k_i^2}} e^{-z\sqrt{\lambda^2 - k_i^2}} J_0(p\lambda) J_1(a\lambda) d\lambda \quad \text{---(5)}$$

となる。ただし、 $k_i^2 = j\omega\mu\sigma$ である。

図-4 は、現場の状況を考慮し、 $a=20\text{m}$ 、 $f=550\text{Hz}$ 、 $\sigma=3.0\text{v/m}$ の条件で電子計算機により演算を行なった結果である。磁界強度は $H(z)/H(100)$ で表わした。ここで $H(100)$ は空気中の円形ループ面上の中心の値で $H(100) = 0.025 \cdot N \cdot I$ (AT/m) である。

4. アンテナ電流の計算

アンテナ電流の計算にあたっては、N 分割ループと円形ループの中心の値の比 $H(20)/H(100) = 0.84$ 、図-4 よりループ面から 5m 離れた点での媒質による磁界強度の減衰率 0.65、および、LB-5 改型の特性である 60 秒充電での充電率 90% を考慮すると起爆に必要な磁界強度はつぎのようになる。

$$H(z) = 0.72 / (0.84 \times 0.65 \times 0.9) = 1.46 \text{ (AT/m)}$$

ルーアアンテナの巻数を $N=3$ (T) とすると必要のアンテナ電流は式(4)より

$$I > 1.46 / (0.02092 \times 3) = 23.3 \text{ (A)}$$

となる。

5. 結言

本研究で述べた計算法は実際に使用する条件に応じて比較的容易に磁界分布を予測することができ、今後は爆破の施工に先だって、磁界分布を予測計算し、確実にかつ経済的に設計を期することが可能となった。

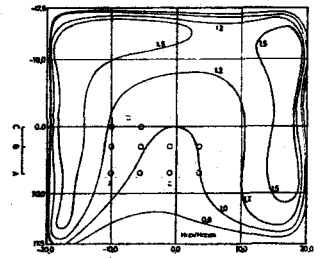


図-2 せん孔位置および
-10m 面における等磁界曲線

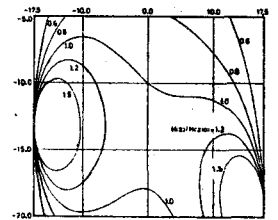


図-3 掘削方向
における等磁界曲線

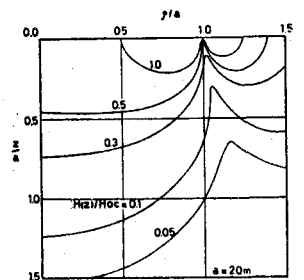


図-4 掘削断面
における等磁界曲線