

電磁波レーダを使用した城郭石垣の控え長に関する実験について

* 応用地質(株)つくば技術開発センター 正会員 ○前川 聡
 ** (株)大林組土木技術本部 正会員 疋田喜彦
 ** (株)大林組土木技術本部 正会員 古屋 弘

1. はじめに

我が国の近世城郭石垣は、16世紀後半から17世紀前半のごく短期間に築造されたものが多く、築造後400年前後の経過により石垣が変状し、修復工事を必要としているものがある。これらの修復工事を計画・設計するに際して、測量・観察といった外側の検査に加えて、控え長や背面空洞の有無といった内側の検査が必要である。ところが、こうした石垣は文化財に指定されていることが多く、部分解体やボーリングのような局部破壊による検査が困難であり、非破壊測定による検査が原則になっている。筆者等は電磁波の反射波を利用する電磁波レーダ法がこのための有力な調査法になると考え、これまでいくつかの検討を行ってきた。¹⁾ここでは、解体工事により実測が可能な石垣において実験を行い、簡易なアンテナの改造と相互相関を利用する解析により、自動的かつ比較的高精度で控え長を求める方法を開発したので報告する。

2. 電磁波レーダによる石垣控え長の測定

図-1のように、石垣の表面に電磁波の送受信アンテナを置いて、送信アンテナ(T)から電磁波パルスを放射する。電磁波は拡散・減衰しながら石垣内部を伝播し、背面で反射し、それらが表面に戻り、受信アンテナ(R)に捉えられる。この時、往復伝播時間を t (ns)、石垣中の電磁波速度を V (cm/ns)とすると、石垣控え長 h (cm)は(1)式で求められる。ただし、 X_0 (cm)は送信アンテナと受信アンテナの間隔である。

$$h = (V^2 \cdot t^2 - X_0^2)^{0.5} / 2 \quad (1)$$

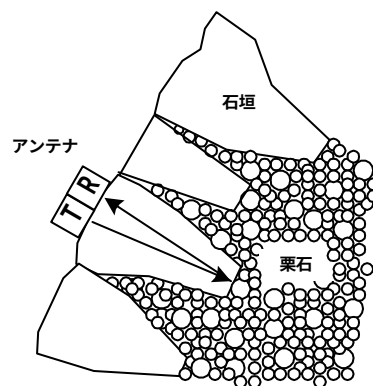


図-1 電磁波レーダによる石垣控え長の測定

ところが、実際の城郭石垣での測定波形例は図-2、

図-3に示すように、一般に城郭石垣は角錐状で背面側が細くなっていることから、最深部の反射波振幅が小さく、初動の後に振幅の大きな成分が表れたり、形状や縦横比によっては手前に側面反射波が表れることがある。このため、これまで行なってきたような目視、手作業による読取では判断に迷い、結果として大きな誤差になることがあった。

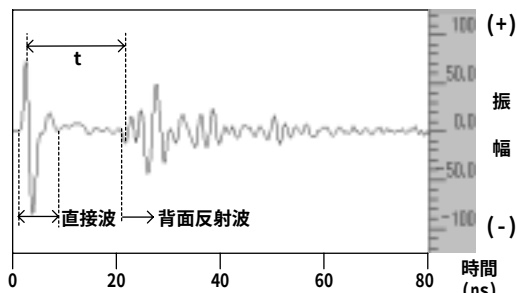


図-2 初動の後に振幅の大きな波形が表れた例

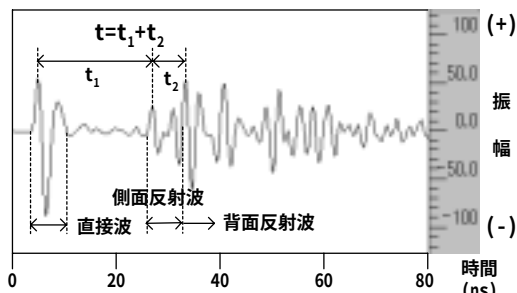


図-3 初動の手前に側面反射波が表れた例

そこで今回、石垣控え長の測定精度を高める方法として次の2点を検討した。

(1)アンテナの改造による直下感度の増大

(2)相互相関による石垣背面までの往復伝播時間の自動解析

キーワード 石垣控え長、非破壊測定、電磁波レーダ、アンテナ、相互相関

連絡先 * 〒305-0841 茨城県つくば市御幸が丘43 TEL:029-852-6621

** 〒108-8502 東京都港区港南2-15-2 TEL:03-5769-1322

3. アンテナの改造方法

本来、最深部の石垣反射波はアンテナの指向角を狭めることにより増大できると考えられる。ここではアンテナの指向角を変えるものではないが、図-4に示すように送信アンテナと受信アンテナの間隔を初期値 D_0 から D に縮めて、アンテナ直下からの受信電力を増大させる方法を行なった。なお、アンテナにはこれまでの複数の周波数のアンテナを使用した測定で比較的良好な結果を得ている中心周波数 400MHz(送受信間隔 16cm)を使用した。

4. 相互相関による控え長の自動解析

石垣における測定記録は図-2、図-3のように、まず送信アンテナから受信アンテナへ石垣表面を直接伝播する直接波が表れ、往復伝播時間の経過の後に石垣背面や側面からの反射波が表れる。今回の改造により相対的に石垣の最深部の反射波振幅が増大することが期待される。またノイズは送信波形との相関が小さく、直接波は送信波形に相似であると考えられる。従って、直接波とそれ以外の間で相互相関を取ることで、相関係数が最大になる条件から最深部までの往復伝播時間を求める方法が考えられる。この方法であれば、これまで目視、手作業で行ってきた読取を自動で行なうことができる。ただし、測定時の増幅率の設定による影響を修正するために、直接波、石垣背面反射波ともに増幅率で除した後に相互相関を計算することになっている。

5. 実験結果

実測値が 80~139cm の範囲にある複数の石垣で測定を行ったところ、全体の 15% の石垣において大幅に精度が改善された。また、平均誤差も D/D_0 が 1.0 の時は 15.3%であったが、0.84 及び 0.75 の時には 10.5%となり改善が認められた。大幅な改善が見られたのはいずれも初動の後に振幅の大きな波形が表れたもので、側面反射波が顕著に表れた石垣はなかった。例として、実測控え長が 80cm の石垣に関して、 D/D_0 を変えて求めた測定記録、相互相関、控え長を図-5、図-6、図-7に示す。測定記録では D/D_0 が 1.0、0.88 と 0.84、0.75 とでは波形が大きく変化し、前者では初動の後に振幅の大きな成分が表れるのに対して、後者では初動付近が最大振幅になっている。このため相互相関の最大値も 0.84、0.75 の方が早く表れる。相関係数の最大値が表れる時間を往復伝播時間とし、別の既知厚の石垣から求めた電磁波速度(10.3cm/ns)を乗じて求めたのが図-7で、 D/D_0 を 0.84 あるいは 0.75 にすることで測定結果がより実測値に漸近することが判る。

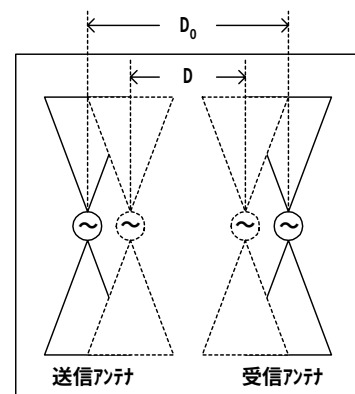


図-4 送信アンテナと受信アンテナの間隔の縮小方法

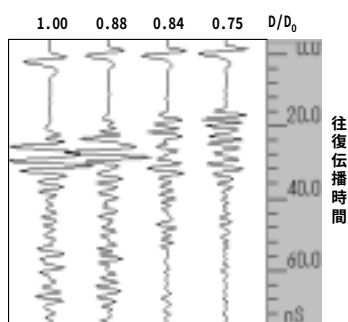


図-5 測定記録

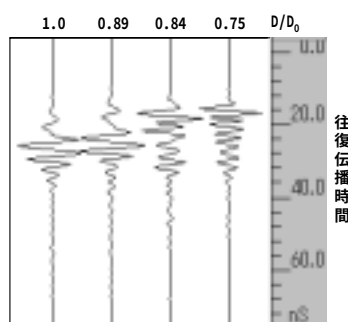


図-6 相互相関計算結果

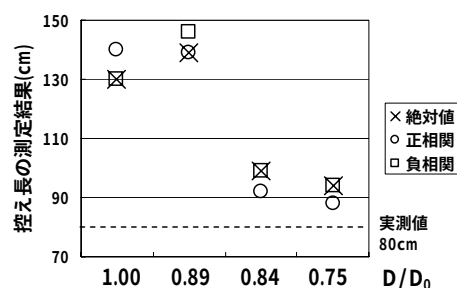


図-7 控え長の測定結果

6. まとめと今後の課題

アンテナの送信アンテナと受信アンテナの間隔を狭めたり、相互相関による解析を行なうことにより、城郭石垣の控え長を自動的かつ比較的高精度で求めることができた。今後は、測定例を増やし、問題点の有無を確認するとともに、背面空洞の判定に利用できるかどうかに取り組んでいきたい。

【参考文献】

¹⁾ 疋田、古屋、前川：老朽化石垣の非破壊探査技術による計測精度の検証、土木学会第 57 回年次学術講演会、2002.9