

住友建設(株) 正会員 ○君島喜一郎
 東海大学 正会員 極壇 邦夫
 アプライドリサーチ(株) 正会員 境 友昭

1. まえがき

地震時における城址の石垣の安定性の評価を行うためには、石積みの地中での長さ(控え長)に関する知見が必要である。ところが、衆知のように石積みの控えは地盤中にあり、これまで非破壊的にその長さを知る手だては皆無に等しいという状況であった。

衝撃弾性波による測定技術は、コンクリート構造物の厚さなどの健全性の非破壊検査技術として開発されたものである。比較的平面構造を持つコンクリート構造物と比較すると、石積み用の石材は、1次元弾性体と見なし得る材料であり、その長さを測定することは、コンクリートの厚さ測定よりも容易なのではないかと推測された。

本報文は、衝撃弾性波法の石積み控え長の測定への適用性を検討するため、実城址で実施した試験結果について報告するものである。

2. 測定方法

衝撃弾性波法に長さ(厚さ)の測定は、測定面に入力された弾性波が被測定物中を多重反射することによって生じるフラッターエコーの周波数を求め、この周波数 f から、

$$L = \frac{V_P}{2f} \quad (1)$$

として長さ L を求める方法である。ここで、 V_P は、被測定物の縦弾性波速度である。式(1)から明らかなように、石材の控え長を測定するためには、フラッターエコー周波数と弾性波速度を測定する必要がある。

2.1 弾性波速度

弾性波速度の測定方法の概念を図-1に示す。図に

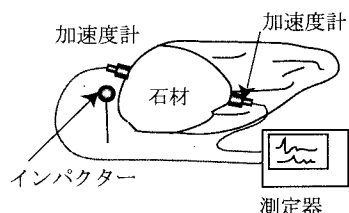


図-1 弾性波の測定方法

示すように2個の加速度計を用い、これを石材の面を挟む2点に相対向する方向で設置する。石積みでは、隣接する石材の間に隙間があるので、ここを利用する。

キーワード 石積み、衝撃弾性波、弾性波速度、
 連絡先 神奈川県平塚市北金目 1117 東海大学土木工学科 Tel
 & Fax 0463-50-2054 Email:gokudan@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp

加速度計は、手で押しつけることによって固定する。図-2は、石材番号 B388 の弾性波速度の測定波形を示

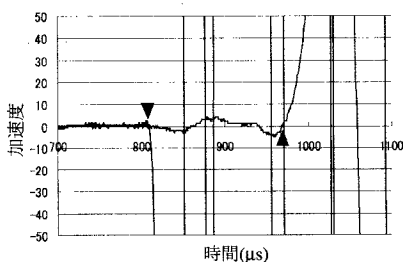


図-2 弾性波の測定結果

すものである。石材面での測定点間距離は、0.74mで、波動の到達時間差は、167μsであり、これから、弾性波速度は、4,431m/sと計算される。なお、使用したインパクターは、直径15mm(質量14g)のボールベアリング用の鋼球である。

2.2 内部欠陥、長さ

加速度計を石材の露出表面に鉛直方向に取り付け、その近傍を同様にインパクターで打撃する。

打撃によって石の露出面に弾性波が発生する。この弾性波は、石の長手方向を含めあらゆる方向に伝搬する。しかし、加速度計の感度軸方向を石の長手の軸方向と一致させているので、長手方向に伝搬した波動がより強く測定される。波動は、石の先端部まで到達するとそこで反射して測定面に向かう。このような伝搬を繰り返し、すなわち、多重反射現象が生じる。この多重反射の周期を求め、式(1)に代入すると、長さが求められる。多重反射の周期は、最大エントロピー法(MEM)によって求めている。式(1)に使用する弾性波速度は、2.1によって測定する。石材の内部に欠陥(弾性波の反射面)があると、波動は、この境界でも多重反射し、長さ以外の位置にスペクトルピークが生じる。

3. 解析方法

解析方法として、

- (1) MEM スペクトル
- (2) MEM スペクトログラム法

を用いた。図-3は、MEM スペクトル法による B388 石材の解析結果であるが、1,370mm に強いスペクトルがあり、このスペクトル位置から石材の長さは1,370mmと推定される。しかし、図に示すように、1,370mm 位置のスペクトル以外にも、1,722mm、254mm にスベ

表-1 測定結果

石材	弾性波速度 (m/s)	測定長 (mm)	実測長 (mm)	誤差 (%)
B388	4,431	1,393	1,350	3.1
Y-5	4,952	923	900	2.6
Y-9	3,509	1,042	1,100	-5.2
Y-10	4,576	1,218	1,200	1.5
Y-12	3,375	1,485	1,350	10.0

クトルがあり、特に、「長さ」の測定を基本とした場合、最も長いと評価される値、すなわち、1,722mmの可能性を完全に棄却することはできない。図-4は、

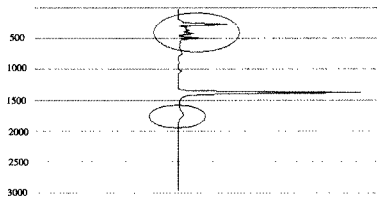


図-3 MEM 解析

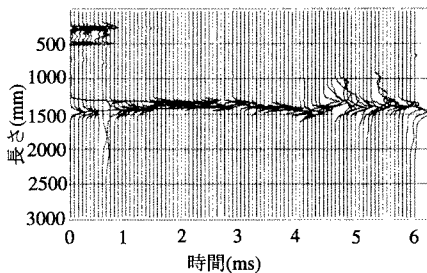


図-4 時間窓 MEM 解析

同じ測定波形を MEM スペクトログラムによって解析したものである。図の横軸方向は、解析開始の時間を示し、画面の全幅で 5ms である。縦軸は、図-3 と同様に長さを示し、周波数と弾性波速度から式 (1) によって求めた値である。図-4において、1,700mm 前後の位置のスペクトルは、測定開始から 450 μ s 後に現れているが、継続して現れているものではなく、長さ方向の多重反射によるスペクトルとは考えられない。これによって、図-3で、厚さの判定が困難であった、1,370mm のスペクトルと 1,722mm のスペクトルでは、1,370mm のスペクトルが「控え長」に相当するものであることが判明する。

4. 測定結果と考察

4.1 測定精度

表-1に測定結果のまとめを示す。測定対象とした全ての石材について、石積み状態での控え長さの測定が可能であった。Y-12 石材を除いて測定誤差は、ほぼ 5%以下となっている。Y-12 石材では、10%の誤差となっている。実測値の誤差、弾性波速度の測定誤差などを考慮すると、十分に実用可能な精度と考えられる。

4.2 測定方法

石積みの控え長の測定では、まず石材の弾性波速度の確定が必要である。この測定方法として、石材の露出面を透過する方向での弾性波の測定を行う。弾性波速度が得られたら、この値を用いて、通常の「厚さ」測定を行う。解析では、厚さを確定するためにスペクトログラム解析を行い、最も「厚くなる」長さを求める。スペクトルのみでは、内部に摂理などの反射面がある場合に厚さの測定精度が悪くなる可能性がある。測定点は、できるだけ石材露出面の中央で行うことが望ましい。しかし、必ずしも、石材中央部の控え長が最大となっている訳ではないので、測定点を上下、左右方向に移動させて平均的な値を求めることが必要となる。

4.3 健全性評価

衝撃弾性波法では、石材の内部に僅かな摂理や亀裂が存在する場合、これを波動の反射面として検出することができる。図-4に示した石材 B388 では、測面から 250mm および 500mm 前後の位置に反射面が検出されている。しかし、検知された反射波動の継続時間が短いことから、亀裂は小さいものと判断した。

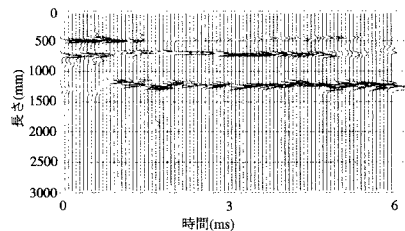


図-5 時間窓 MEM 解析 (Y-10)

図-5は、Y-10 石材のスペクトログラムであるが、500mm, 750mm 位置に継続時間の長いスペクトルが見られ、やや大きめの亀裂の可能性が見られる。また、スペクトログラムの初期の時間では、長さのスペクトルよりも内部反射のスペクトルの方が相対的に強い強度を持っており、B388 石材と比較して Y-10 石材では内部の亀裂が大きいと推定される。しかし、いずれの石材でも控え長が測定されており、弾性波の伝搬を遮断するような深刻な亀裂でないことは明らかである。

石材の健全性評価方法は今後の課題となるが、スペクトログラムは評価手法開発の手がかりとなるものと思われる。