

論文 機械インピーダンスおよび衝撃弾性法による実物大模型擁壁の健全性の測定

久保 元樹^{*1}・極檀 邦夫^{*2}・森濱和正^{*3}・境 友昭^{*4}

要旨：設計強度 18MPa の実物大 L 形擁壁を供試体として、インパルスハンマーの応答波形から機械インピーダンスを算出し、コンクリート表面の強度指標等高線図を描き、弱体部を抽出した。打設深さによるコンクリート強度増加の影響を調べた。擁壁の壁は上端よりも下端が厚くなっているため、音響インピーダンス境界面が平行ではない。測定面と反射境界面が平行でない場合、鋼球打撃によって生成される多重反射波を周波数解析して求める厚さ計測の誤差を検討した。底板に設置した模擬的な内部空洞を、鋼球接触時間、波形減衰時間の両者から探査できるかについても検討したので報告する。

キーワード：機械インピーダンス、鋼球接触時間、スペクトログラム、内部空洞

1. まえがき

高度成長期に大量に建設されたコンクリート構造物のメンテナンスに対する社会的要請は今後増大すると予想される。メンテナンスを適切に実施するためには、適切な構造物健全性診断が欠かせない。

筆者らは、これまで非破壊検査の新しい方法として、鋼球打撃によってコンクリートに発生した縦弾性波が平行する境界面間で多重反射することによって生成される周波数を解析し、コンクリート構造物の健全性を判定する研究^{1,2)}を行ってきた。

測定した速度波形からスペクトルおよびスペクトログラム(時間窓周波数解析)により多重反射波を解析すると、コンクリート内部の欠陥や厚さを高精度で計測できることがわかった。また、波形の周波数解析を経由せず、速度波形の初期波形から推定される鋼球接触時間は、コンクリートの強度と比例関係にあることや、コンクリートに剥離あるいは浮きがある部分では、それが無い部分に比較して長くなること、波形の振幅、減衰率が異なることを実験から確認した。

本研究は、1日に数千点の計測が可能である機械インピーダンスを用いて、測定の等高線図に類似したコンクリートの強度分布等高線図など面的な情報を得ること、および測定面と反射面

が平行でない場合の衝撃弾性波法による厚さ測定の精度検証を示すものである。

2. 衝撃応答の測定

鋼球衝突の場合

コンクリートを図-1に示すような多数の質点がバネで連結した弾性体モデルと仮定する。鋼球(質量 m)が任意の速度(V)でコンクリート表面に衝突すると考える。コンクリートが完全な半無限弾性体であれば、鋼球の持つ運動量は衝突によってコンクリート表面の力積に変換される。すなわち、打撃によって発生する力は、鋼球の質量と衝突速度の積に比例し、鋼球接触時間に反比例することになる。

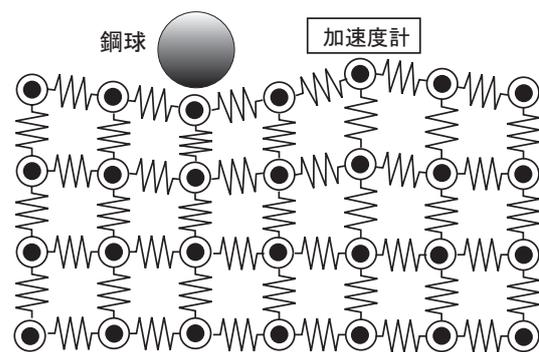


図-1 打撃によるコンクリートの变形

*1 東海大学 大学院工学研究科 学生(正会員)

*2 東海大学 工学部土木工学科 助教授 工修 (正会員)

*3 (独) 土木研究所 技術推進本部 構造物マネジメント技術チーム 主任研究員(正会員)

*4 アプライドリサーチ(株) 代表取締役 工博

いま，打点近傍の加速度計によって計測される鋼球接触時間は，コンクリートの強度に関連する情報を保持して弾性波動が伝搬すると仮定すると，コンクリートの硬さに関する剛性の指標値が得られることになる。

インパルスハンマーで叩く場合

次に，鋼球の代わりにインパルスハンマーを用いて打撃力と衝突速度を測定し，打撃力を速度で除すことによって規準化した得られる機械インピーダンスについて述べる。

コンクリート表面が劣化している場合，ハンマー衝突の初期段階ではコンクリート表面の塑性変形が進行すると考えられる。この間，ハンマーの運動量は消費され，ハンマーの初期速度が同一であったとしても，コンクリートの弾性変形量は小さくなり，結果的に衝撃力は相対的に小さくなる。すなわち，表面劣化コンクリートの機械インピーダンスは，表面の影響を強く受けると推量される。

ハンマーの持つ運動量の全てがコンクリートに伝達されるとハンマーは停止し，ハンマーはコンクリートの弾性変形エネルギーによって押し戻される。このとき，コンクリートの表面ではすでに塑性変形が終了しているから，コンクリートの弾性変形エネルギーは，全てハンマーの運動量に変換されると考えられる。すなわち，衝撃力が最大値に達した後のハンマーの運動量に対するコンクリート表面劣化影響は小さいと推測されるので，表面が劣化したコンクリートであっても非劣化部分の強度推定が可能であると考えられる。

3. 実験の概要

3.1 L 型供試体

実験に使用した L 型供試体の断面寸法は，鉛直方向の壁が上端 280mm，下端 650mm，高さ 1800mm である。上端から下端方向へ厚さが連続的に増加している。底板断面は，壁面が乗っている部分は厚さ 300mm で水平に 650mm，その底板の前側は水平に 1000mm，厚さは 300mm から 150mm まで一定勾配で減少している。正面から見た幅は 2550mm である。

L 型供試体の写真を 図-2 に示す。

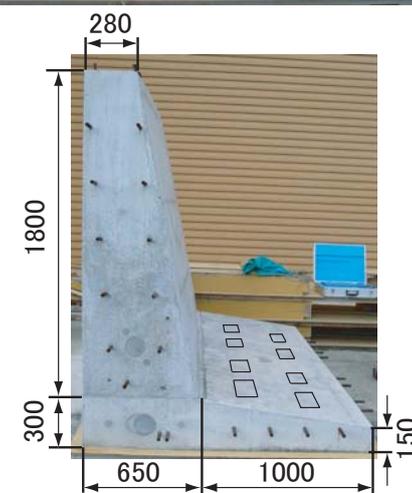
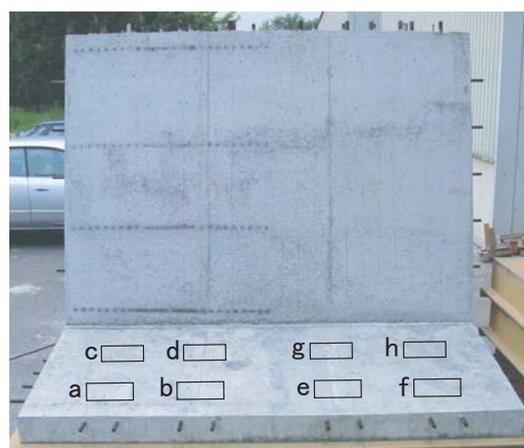


図-2 L 型供試体の寸法 (単位 mm)

製作条件は，壁面が普通セメント，呼び強度 18MPa，粗骨材最大寸法 25mm，水セメント比 63.0% である。底板は高炉セメント，呼び強度 18MPa，粗骨材最大寸法 40mm，水セメント比 59.0% である。

かぶり厚さは，壁の前面，背面ともに 20mm-200mm，底板は 20mm-170mm と変化させた。底板には，内部欠陥を模擬して，発泡スチロールとポーラスコンクリートを a-f の位置に 8 点埋設した。埋設した大きさは，幅 100mm 長さ 200mm で，発泡スチロールの厚さは 20mm，ポーラスコンクリートの厚さは 50mm である。

測点は，底板表面，壁前面，壁背面に 10cm メッシュを記した。壁面の縦の列は 25，横の行は 17，底面の列は 25，行は 9 である。測点数は，底板表面 225 点，壁前面 425 点，壁背面 425 点である。

3.2 測定方法

測定は，インパクト（鋼球）打撃による弾性波を加速度計で測定するものと，インパルスハ

ンマーにより応答波形を測定するものの2種類である。

弾性波の測定は、メッシュ交点を挟みインパクトと加速度計を対称に配置して行なった。加速度計には、インパクトにより発生した弾性波が音響インピーダンスの境界面で反射を繰り返す多重反射波と表面を伝搬する表面弾性波が入力される。加速度計の軸感度は、表面に対して鉛直方向とした。これは、コンクリート板の厚さ方向での応答に着目しているからである。

加速度計 PCB352C66(共振周波数 35kHz)で、インパクトの鋼球直径は 15mm と 30mm を用いた。測定装置は 2ch 同時測定、サンプリング時間 2μs、サンプリングデータ数 5000 個である。インパルスハンマーは、DYTRAN(5805A)を用いて打撃力波形を直接計測した。

3.3 機械インピーダンスについて

インパルスハンマーの測定波形例を図 - 3 に示す。図中の打撃力 F_{max} は、A/D 変換の相対値となっているので、相対的な力を示している。波形は、表面が劣化していると判断されるコンクリートを打撃したときのものであり、上に凸でピーク前半の時間が長い波形となっている。

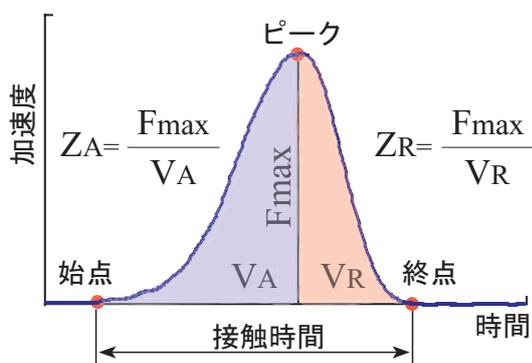


図 - 3 打撃力波形

打撃力がピークに至る時間は、ハンマーがコンクリート表面を変位させる過程であり、また打撃力がピークから減衰する時間は、逆にコンクリート表面の変形が元に戻る過程である。打撃力によってコンクリート表面に塑性変形が生じるか、あるいはコンクリート内部での摩擦によってエネルギーが吸収されるようなことがない限り、ハンマーの運動エネルギーは、コンク

リート表面の変形エネルギーに変換され、またこの変形エネルギーは運動エネルギーとしてハンマーに返される。したがって、コンクリートが理想的な半無限弾性体であれば、打撃力波形は打撃力がピークとなる時間に対して対称な波形となると考えられる。

ハンマーの衝突速度 V は、ハンマーの加速度を数値積分すると得られる。また、 F_{max} は、加速度の最大値にハンマーの質量を乗じて求められる ($F_{max} = ma_{max}$)。

コンクリート表面が劣化している場合、コンクリート表面の変形過程では、塑性変形によってハンマーの運動エネルギーが消費されることになる。これから、コンクリートの弾性変形量が少なく、同一初速度に対して最大打撃力が相対的に小さくなると推量される。

そこで、変形の進行過程と回復過程を分け、打撃力が最大に至るまでの速度(加速度の時間積分)を V_A 、最大に達した後の速度を V_R とし、

$$Z_A = \frac{F_{max}}{V_A} \dots\dots(1)$$

$$Z_R = \frac{F_{max}}{V_R} \dots\dots(2)$$

とおく。

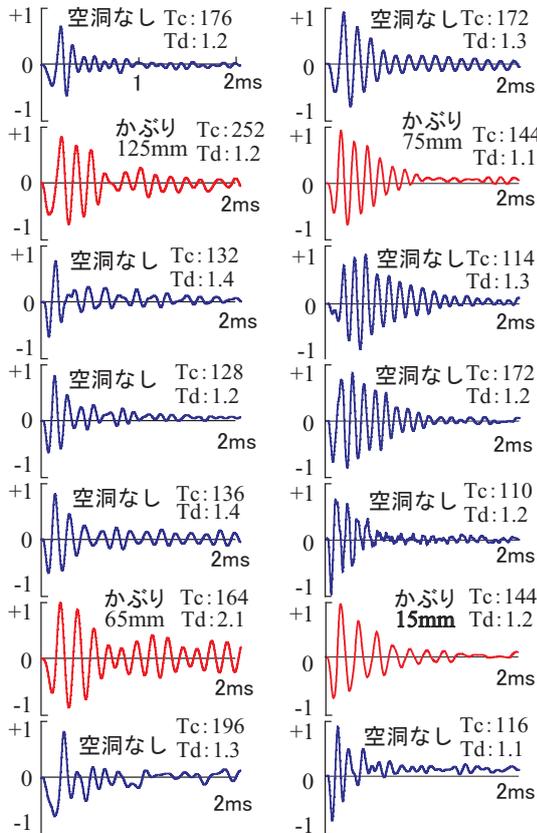
Z_A は、変形過程であるから、コンクリートの表面が劣化している場合には、この過程で消費される運動量が大きく、したがって、打撃力の最大値は相対的に小さくなるから、劣化の度合いが高い程、小さな値となる。すなわち、式(1)をそのまま適用すると、コンクリート表面の劣化に影響された強度指標となる。一方、 Z_R は、回復過程、すなわち、コンクリート内に蓄積されたポテンシャルエネルギーが解放される過程であるから、コンクリート自身の強度指標である。

4. 測定結果および考察

4.1 底板の内部空洞の探査

模擬的な空洞を設置した底板コンクリートは製作の手違いによって表面がゴム状の軟弱な薄膜により覆われた状態であった。このため、現地構造物でも稀な表面劣化による軟弱表層を測定することとなった。図-4に、加速度波形を数

値積分した時間軸速度波形を示す。測定ラインの A-A および B-B の位置は、図-5 に記入した。



A-A 発泡スチロール B-B ポーラスコンクリート
図 - 4 空洞と速度波形

今回はコンクリート内部空洞の探査は、鋼球接触時間 (Time of contact : T_c 単位 μs) と波形の減衰率から算出する減衰時間 (Time of damping : T_d (単位 ms)) に着目した。縦軸の振幅は+1から-1と基準化したもの、横軸の時間は2msである。

鋼球接触時間の算出は、加速度波形を数値積分して速度波形を求め、第一周期の最小値(波形の最下端値)と最大値(波形の最上端値)の時間差を読みとり2倍した。減衰時間の算出は、音響学の減衰率を参考にした。波形の最大値を探してそれ以降の波形振幅を自乗し、数値積分した値を平滑化する。その対数を求めて最初の値の1/10になる時間を減衰時間とした。

発泡スチロール埋設のほぼ中心線(A-A)を通る波形を見ると、かぶり125mmの鋼球接触時間 T_c は $252\mu s$ と空洞のない部分と比較して長くなっているが、減衰時間は1.2msと差異は小さ

い。かぶり65mmの T_c は $164\mu s$ と空洞のない部分より多少長いですが、減衰時間は2.1msと減衰している。

ポーラスコンクリート埋設の T_c は両方とも $144\mu s$ と空洞のない部分より多少長いですが、減衰時間はかぶり75mm = $1.1ms$ 、かぶり15mm = $1.2ms$ と空洞のない部分と変わらない。ポーラスコンクリートの場合は、骨材の間に空間が存在しても骨材が連続して柱のように上部コンクリート板を支持するので空洞のない部分との相違は微少であろうと推測した。

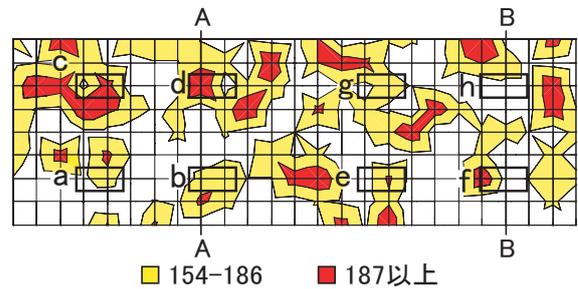


図 - 5 空洞と鋼球接触時間 (単位 μs)

空洞と鋼球接触時間の関係を 図 - 5 に示した。平均値 m 、標準偏差 s とすると、 m と $m+s$; 154-186, $m+s$ 以上が 187 である。表面が軟らかいと鋼球は塑性変形と弾性変形が複合しながらコンクリート板を押すので鋼球接触時間が長くなる。通常のコンクリートでは、内部に空洞があると鋼球接触時間は、空洞までの厚さに比例して増加する。

供試体底板表面の軟弱層がノイズとなって影響している発泡スチロールの c(かぶり105mm), d(かぶり125mm) とポーラスコンクリートの f(かぶり15mm) の鋼球接触時間が長くなっている。しかし、普通のコンクリートの場合では、c, d よりもかぶり厚さの薄い a(かぶり45mm), b(かぶり65mm) の鋼球接触時間が長くなるのが一般的である。

次に減衰時間による内部空洞検出の結果を 図 - 6 に示す。平均値 m 、標準偏差 s とすると、 m と $m+s$; 1.25-1.47, $m+s$ 以上が 1.48 である。内部に空洞が存在すると、空洞直上のコンクリート板は衝撃によって薄板のたわみ振動に類似した挙動を示す。膜振動(たわみ振動)が生じる場合は、多重反射波の減衰に比較して減衰時間が長く

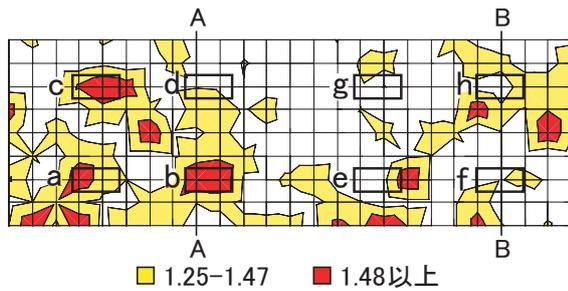


図 - 6 空洞と波形減衰時間 (単位 ms)

なる。図-6によると、発泡スチロールの a(かぶり 45mm), b(かぶり 65mm), c(かぶり 105mm) の減衰時間が 1.48ms 以上と長くなり空洞位置と対応している。

4.2 壁前面の機械インピーダンス Z_R 分布

前半の機械インピーダンス Z_A は、表面劣化の影響を受けるが、後半の機械インピーダンス Z_R は、コンクリート自身の強度を反映している。

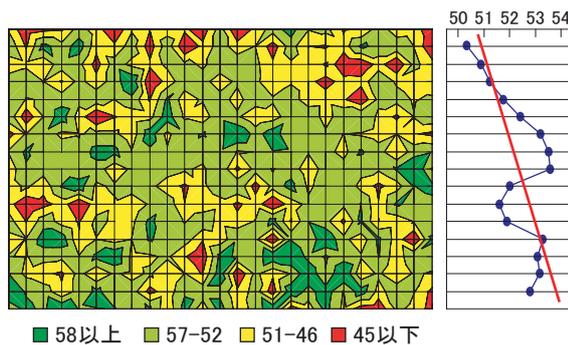


図 - 7 壁前面の機械インピーダンス

図-7に、機械インピーダンス Z_R の標準偏差を計算して4分割した等高線分布を示す。平均機械インピーダンスの平均値 m から標準偏差 s を差し引いた最下位 16%;45 以下に弱体部が存在する可能性が高いと今回は考えて、このように表示した。

上端部や周辺部に Z_R の最下位 16% が集中している。壁のように上部打設面された部材は高さ方向で強度が異なり、一般に底面に近い方が強度が高くなるといわれている。そこで壁前面の深さ方向の機械インピーダンス平均値を求めて、図の右端に示した。全体の傾向は下部に向かって機械インピーダンスは増加している。

4.3 壁の MEM による厚さ測定

壁の前面は斜めで背面は鉛直であり、上端は

280mm で、下端では 650mm と厚くなっている。したがって、前面と背面は平行ではない。したがって、前面打撃により発生した弾性波が、背面に対して垂直に入力しないため、反射波が打撃点に戻らない可能性がある。

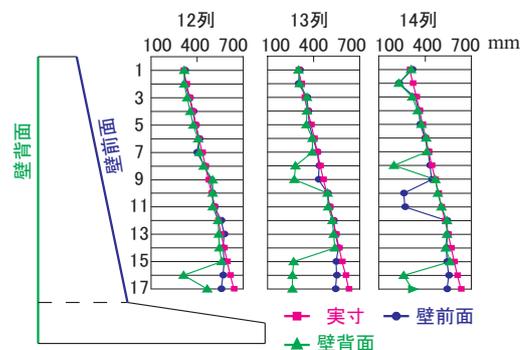
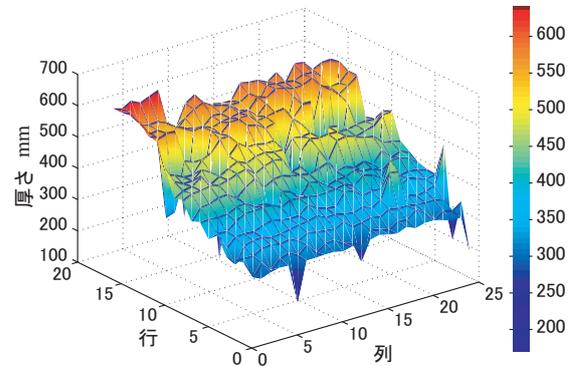


図 - 8 壁の厚さの測定 (単位 mm)

弾性波を信号処理して厚さを計算するには、コンクリートを伝搬する縦弾性波速度 V_p を多重反射波の固有振動数 f の 2 倍で除した式 (3) により算出できる。

$$D = \frac{V_p}{2f} \dots \dots (3)$$

固有振動数は速度波形を最大エントロピー法 (MEM) によって周波数解析して求めている。

前面の 10cm の測点数 425 点と背面の測点数 51 点の縦弾性波から MEM および MEM スペクトログラムで算出した厚さを 図-7 に 3 次元表示した。測点の列は 1 から 25 まで、壁の厚さを 100mm-700mm で表示した。

図-8 の下方に 12 列、13 列、14 列の壁厚さの断面図を表示した。背面にはボス供試体や円柱コア抜きした箇所の影響により厚さが薄い点が計測されている。実寸、前面からの計測厚さ、背面からの計測厚さの 3 者はよく一致している

ので、使用した供試体の前面背面の非平行の程度では弾性波の反射にほとんど影響しないと推量される。

4.4 壁前面の鋼球接触時間分布

図-9に壁前面の鋼球接触時間の分布を示す。標準偏差を用いて4段階表示した。m-s以下；196以下，m～m-s；197-230，m～m+s；231-264，m+s以上が256である。機械インピーダンスの場合よりも弱部部が集合しており上部が弱く下部が強い傾向が明確に認められる。

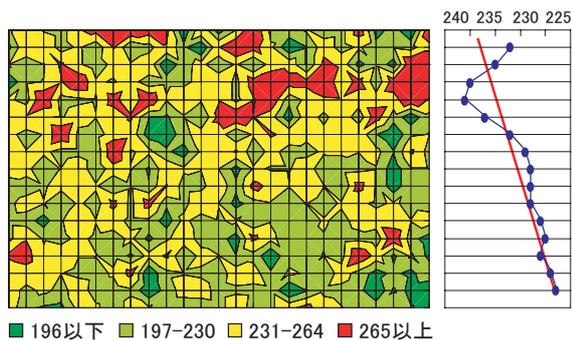


図-9 壁前面の鋼球接触時間 (単位 μs)

機械インピーダンスと同様に、深さ方向の平均接触時間を右端に示した。機械インピーダンス Z_R では、中央下部が小さい値だったが、鋼球接触時間では消滅している。

全体を総合すると、機械インピーダンスよりも加速度計から求めた鋼球接触時間の分布の方が妥当のように見える。今後の検討課題であるが、インパルスハンマーに組み込まれている力計よりも弾性波を測定する加速度計の感度が約100倍よいことも影響していると思われる。

4.5 壁背面の機械インピーダンス分布

壁背面にはボス供試体が36箇所、直径100mmの円柱コア採取点が17箇所ある。ボスまたはコア抜きした後に、低強度のセメントペーストで補修してある。

図-10に、機械インピーダンス Z_R の小さい点、m-s以下と、m～m-sを、ボス供試体：長方形、円柱コア抜きした点：円と対応させて示した。

図によると、機械インピーダンス Z_R の平均値 m から標準偏差 s を引いた下位16%(赤色)と長方形の枠線、円とほとんどが一致している。したがって、機械インピーダンスの等高線表示は、

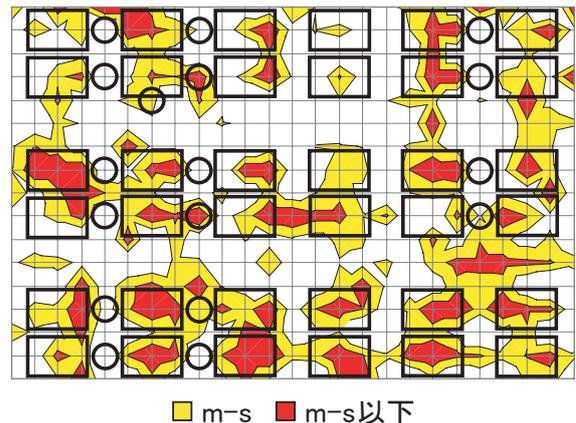


図-10 壁背面の機械インピーダンス

コンクリートの強度指標の小さい範囲を把握するのに有効であると思われる。

5. まとめ

実物大模型擁壁を供試体として、疑似内部空洞の探査の可能性、連続的に変化する壁の厚さ計測、機械インピーダンスによる強度指標の等高線分布図などを目的とした実験結果をまとめると次のとおりである。

- (1) 内部空洞の検知では、コンクリート表面で測定した波形から、鋼球接触時間を算出する方が、機械インピーダンスによる場合よりも、高精度であることがわかった。
- (2) コンクリートの強度分布を、機械インピーダンス Z_R を指標値として推定した。圧縮強度やヤング係数との相関関係を検討する課題は残っているが、機械インピーダンスは、コンクリートの強度の指標となるものと考えられる。また、多数点を空間的に計測しその分布をコンター表示することによって、強度の弱い部分の検出が可能であることがわかった。

参考文献

- 1) 境友昭, 極檀邦夫, 久保元樹, 久保元: 接触抵抗によるコンクリート強度の推定, 日本非破壊検査協会シンポジウム論文集, pp.57-64, 2003.7.
- 2) 久保元樹, 極檀邦夫, 三上正憲, 四宮卓夫: 機械インピーダンスによるRC擁壁の健全性検査, 土木学会, 第59回年次学術講演会講演概要集5部門, pp.211-212, 2004.9.