

衝撃弾性波による吹付けモルタル法面の剥離検知

FLAW DETECTION OF THE JET MORTAR BY ELASTIC WAVE METHOD AND MECHANICAL IMPEDANCE

土谷組 ○岩井 大輔 土谷 勝彦 齋藤 晃史 柘植 哲治 秋松 和正
iTECS 技術協会 極壇 邦夫

急傾斜地の落石・崩落を防止するためのモルタル吹付工法の施工品質は、強度と地山との密着度合い(剥離)により確認されるのが一般的であるが、現状の測定法には問題点が指摘されている。

今回、インパルスハンマーで測定して強度と剥離を検知する方法、加速度計で測定した波形から剥離を判定する方法を検討した。最初に剥離供試体を用いた室内実験で、強度指標と剥離の特徴を把握し、次に現地法面を測定した結果を報告する。

キーワード：吹付けモルタル，強度指標，機械インピーダンス，iTECS 法

1. まえがき

吹付け工法とは、従来はモルタル吹付法を指していた。吹付けモルタルは、圧搾空気によって施工面に高速度で吹付けるため、型枠なしで薄いものから厚いものまで自由に施工でき施工面に密着させる特性を持っている。山岳の岩肌や法面の保護、老朽化した構造物の修繕工事に用いられている。しかし、このような施工法の特性は逆に欠点にもなり、出来上がったコンクリートの品質が作業員の熟練と能力によって左右され、ばらつきの多いものになっている。

従来のモルタル法面の施工品質は、強度は反発度法、地山との密着度合いは打音法により確認されるのが一般的であったが、反発度法は誤差が±50%程度あると指摘されていること、打音検査は測定者の主観による判定に影響されることやデータの記録再現性に問題があった。

そこで、モルタル吹付けの施工品質の向上を図るため、モルタル法面の強度指標と剥離の有無を新しい非破壊試験法によって評価できるかを検討した。採用した非破壊試験法は、インパルスハンマーにより得られる機械インピーダンス法と NETIS に登録されている iTECS 法である。最初に剥離供試体を用いた室内実験で、2つの方法の強度指標と剥離の基本的な特徴を把握した。現地法面の測定は、健全と思われる場所と、老朽化の進んだ場所を選定して比較検討した。

2. 大型剥離供試体による室内実験

2-1. 供試体と測定装置

剥離の特徴を理解するために、図-1 に示す大型の疑似剥離供試体を製作し実験を行った。疑似剥離供試体は、発泡スチロールを埋設して、発泡スチロール上部の薄板を剥離と仮定した。

剥離供試体の大きさは、1700×1700×200 mm、設計強度は 24MPa である。発泡スチロールは 200×200×20mm を埋設した。剥離厚さは、20,40,60,80mm である。測定ラインは、厚さ 20mm, 40mm の疑似剥離中心を横断する線に 5cm 間隔に番号を付けた 33 点である。(図-3 参照)

インパルスハンマーは、ハンマーヘッド質量 190 グラム、サンプリングクロック 0.5 μs、サンプリング数 2000、加速度計感度 0.04mv/m/s² を使用した。打撃強度は、弱打と強打の 2 段階で測定した。インパルス



図-1 疑似剥離供試体の測定

ハンマーの打撃力を所定範囲にするためにトリガーを設定した。

衝撃弾性波は、測定装置 iTECS-4 を用い、コンクリート表面を鋼球 15mm(約 15 グラム)で叩き、約 5cm 離れた点に加速度計を手で押しつけて測定した。サンプリングクロック 2μs、サンプリング数 5000/ch である。

2-2. 機械インピーダンスについて

剥離供試体の強度指標と、剥離をインパルスハンマーで打撃したときの打撃力波形から機械インピーダンスを算出して検討した。機械インピーダンスについて簡単に説明する。

吹付けモルタルの表面は凹凸があるので、打撃力波形は左右対称とならないで前半部分の面積が大きくなり、なだらかな傾斜の形となる。質量 M のハンマーが速度 V で、バネ係数 k のコンクリート表面に衝突するときのコンクリートの最大変位を x とする。

機械インピーダンスは、 $\sqrt{Mk} = \frac{F_{max}}{V}$ により得られる。打撃力最大のピークの前半は、ハンマーがコンクリートを押し続けている時間、ピーク後半はコンクリートが復元して戻る時間である。機械インピーダンスは前半 Z_A と後半 Z_R 、ハンマーの接触時間は前半 T_A と後半 T_R に分けて検討した。

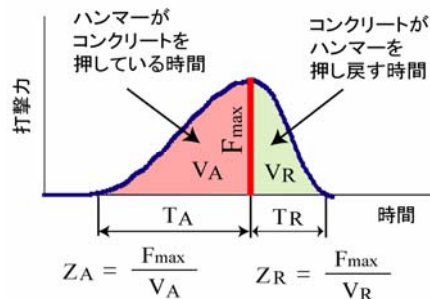


図-2 機械インピーダンス

2-3. ハンマー機械インピーダンスと加速度計の速度波形による剥離の特徴

疑似剥離供試体の剥離の厚さ 20mm と 40mm を横切るように測定した結果を図-3 に示した。インパルスハンマーによる打撃力波形を、20mm, 40mm, 200mm の順序に左から右へ並べた。打撃力波形に記入してある前半機械インピーダンス Z_A 、後半機械インピーダンス Z_R 、前半ハンマー接触時間 T_A 、後半ハンマー接触時間 T_R を比較する。

剥離の厚さ 20mm では、 Z_A と Z_R の両方が小さい値となっている。また、 T_A 、 T_R は両者共に大きな値となっている。厚さ 40mm では、 Z_A と Z_R は 20mm よりもやや大きい値となっている。 T_A 、 T_R は 20mm よりもやや小さい値となっている。剥離が無い厚さ 200mm の部分では、20mm, 40mm に比較すると Z_A, Z_R はかなり大きくなっている。

コンクリート板のたわみは、曲げ剛性(コンクリートのヤング率 E と断面 2 次モーメント I の積)に比例すると考えられる。厚さが薄くなると曲げ剛性が低下するため板のバネ係数は減少する。 Z_A 、 Z_R はバネ係数の関数であるので 20mm, 40mm では小さくなるのは当然のことと思われる。厚さ 200mm で剥離のない健全なコンクリートの打撃力波形は、ピーク前半が少し大きい、ほぼ左右対称の形となる。

打撃力波形の機械インピーダンス Z_A 、 Z_R およびハンマーの接触時間から剥離のない健全な部分と剥離と推定される部分を判別するには上記の特徴を手がかりに多数の測定データを統計的に検討する方法が考えられる。

インパクトによる衝撃によって剥離部分がどのように揺れ動くかを加速度計で捉えて比較した。波形を比較するときは加速度波形を数値積分した速度波形でおこなった。加速度計で捉えた

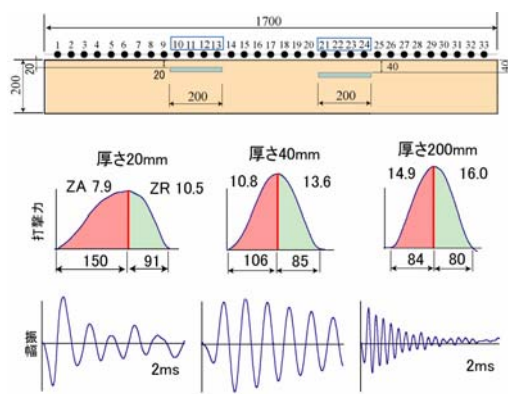


図-3 供試体と加速度波形と打撃力波形

加速度波形は、縦弾性波（P 波）、横弾性波（S 波）、表面波（レイリー波、R 波）の 3 種類の波が混合したものである。良質なコンクリートの弾性波速度は、P 波：4000m/s、S 波：P×62%=2480 m/s、R 波：P×57%=2280 m/s 程度である。

厚さが 20mm と 40mm の薄い部分の速度波形の特徴は、周期が長いこと、波形の減衰がゆるやかである、(減衰率が小さい) 振幅が少し大きいことである。周期が長く減衰のゆるやかな波形を MATLAB などサウンドにすると低いぼこぼこという音に近い。剥離のない部分の波形の音は、硬い高音の感じである。

3. 現地モルタル法面の剥離と強度及び強度指標

良好な A 地点の場合

最近施工された良好なモルタル法面 A 地点について説明する。測定範囲は、縦方向 240cm 横方向 600cm である。測定データを詳細に検討するため縦横を 20cm 間隔に区切り、横 13 本、縦 31 本の線を引き、正方形のメッシュの交点 403 点を計測した。

表面は、吹付け工法のため局所的にはイボ状の突起が存在している凹凸面である。この突起がハンマーの打撃によって破壊破損すると推測されるが打撃力強度と突起部分の破壊強度との関係は不明である。そこでインパルスハンマーの打撃力を強めと弱めの 2 種類とした。

いくつかの測定データを検討した結果、モルタルやコンクリートの強度指標を推定するためには打撃力を強く、剥離や表面劣化の程度に着目した場合は、打撃力を弱くした方が適しているようである。

インパルスハンマーによる測定は、打撃力を一回だけ測定する方法である。衝撃によって剥離箇所が振動を繰り返しても、その振動を感知することは困難である。そこで、衝撃による振動を測定するためにインパクターの近傍に加速度計を手で押しつけて弾性波による衝撃振動を測定した。図-4 の打撃力波形は、ハンマーの打撃力が強いときのものである。剥離なしの ZR から推定した強度推定値は、15.8MPa と 18.7MPa であるが、剥離では 4.2MPa と著しく弱い。剥離なしの TR は、102 μ s、91 μ s と短い、剥離では 289 μ s と約 3 倍長くなっている。なお、この剥離の大きさはおよそ縦 10cm 横 8cm と局所的なものであった。

表-1 に、吹付けモルタル表面に施工時の凹凸やいぼ状の突起がある状態での、ZR から推定した強度推定値とハンマーの後半接触時間 TR を示した。測定点の配置は、縦横 5 本の方眼で、方眼の間隔は 3cm である。ZR から推定した強度推定値が最小の 5.0MPa と 7.4MPa は、接触時間 TR が最長の 180 μ s、144 μ s と対応している。ZR から推定した強度推定値の大きさ間が上位の 30.6MPa、24.3MPa、19.0MPa は、接触時 TR が短い下位の 92 μ s、97 μ s、95 μ s に対応している。剥離は ZR から推定した強度推定値が低下すること、変形の指標である後半のハンマー接触時間が長くなることがわかった。



写真-1 現地法面 A 地点の測定風景

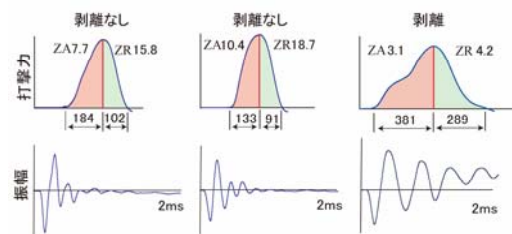


図-4 現地法面 A 地点 打撃力波形と速度波形

表-1 強度推定値とハンマー接触時間

ZR からの推定強度					ハンマー後半接触時間 TR				
15.9	13.2	13.0	11.5	7.4	117	126	117	138	144
21.6	24.3	12.5	10.8	19.0	99	97	121	120	113
15.6	13.5	21.0	19.3	30.6	113	130	108	101	92
14.6	13.9	5.0	21.3	16.9	116	113	180	105	115
13.0	16.6	15.8	18.4	19.0	125	104	110	99	95

測定箇所を代表する ZR から推定した強度推定値を求めるにはハンマーの後半接触時間 TR, 打撃力 Fmax, 表面劣化の度合いを表す ZA/ZR の比などを総合して統計処理する必要がある。現状の ZR から推定した強度推定値の平均値は 15.9MPa, 不偏分散の標準偏差は 3.3MPa である。なお, 突起を砥石で平滑処理した後の, ZR から推定した強度推定値の平均値は 17.2MPa であった。すなわちインパルスハンマー法の機械インピーダンスで, 打撃力波形を種々検討すると, $15.9/17.2=0.92$, モルタル吹付けの凹凸のある表面状態でも約 92% の強度推定値が得られた。最終的には, 剥離の判定基準を数値で規定することが望ましいが, 現地構造物の多様性を勘案すると, 今後多数のデータを集めて解析し検討する必要がある。

図-5 に機械インピーダンス ZR の分布を等高線で示した。局部的に機械インピーダンス ZR が小さい測点が点在するが集合して群れをなすものは存在しないので, この吹付けモルタル法面は良好で健全と判断される。

図-6 に重症剥離点および剥離のない点の打撃力波形と速度波形を示した。ハンマーの打撃によって法面の表面が部分的に破砕すると前半の波形がのこぎりの歯のようにギザギザとなる。機械インピーダンス ZR, ハンマー接触時間 TR は剥離の特徴と一致している。また, 加速度計から得た速度波形を観察すると法面の表面の異常が理解される。

インパルスハンマー法によって剥離がどの程度まで検知できるかを検討するために図-7 を作成した。×印は打音法による剥離, 赤く塗りつぶした範囲が機械インピーダンス ZR から推定した剥離である。両者の的中率は約 6 割であるが, 群れて広い面積の剥離はほぼ検知しているので実用的には有用な結果と思われる。

4.まとめ

法面吹付けモルタルの剥離検知および強度推定をインパルスハンマー法と速度波形から検討した。

1. 剥離の検知は, 加速度計から計算した波形の周期と減衰率を組み合わせる方法が信頼性が高い。測定が簡便で迅速に測定できるインパルスハンマー法でも, 打撃力波形を種々検討すると重症剥離では 6 割程度は検知できた。
2. いぼ状突起のある吹付けモルタル法面の ZR から推定した強度推定値は, 後半接触時間 TR, 打撃力 Fmax, ZA/ZR の比などを統計処理して決定すると, 表面を平滑したときの約 9 割の強度推定値が得られた。
3. 加速度計の近傍をインパルスハンマーで打撃して両者を観測する方法を採用すると, 剥離, 強度の両方を検知するのに有効であると考えられる。

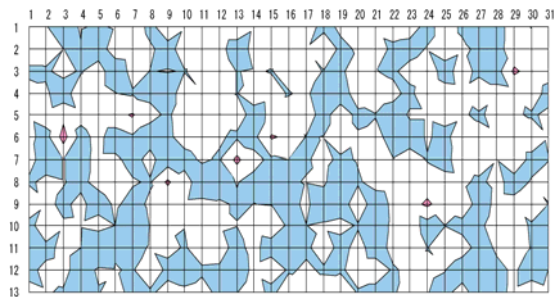


図-5 現地法面 A 地点 強度指標等高線

劣化の進んだ重症法面 B 地点の場合

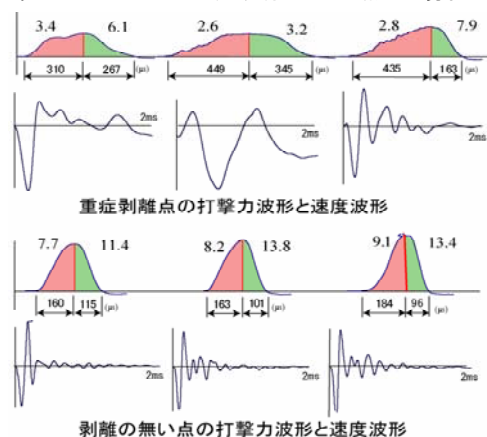
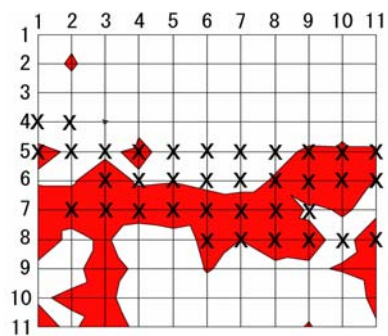


図-6 重症法面 B 地点 打撃力波形と速度波形



ZRが小:赤色 ×:打音法による剥離
図-7 重症法面 B 地点 強度指標等高線