インパクトエコー法によるPCグラウト充填の定量的評価

1. はじめに

プレストレストコンクリート (PC) のグラウト充填に関 する非破壊評価は重要な課題であり、いくつかの試みがな されている.本研究では、インパクトエコー法を取り上げ、 実験と解析を行ったのでその報告をする.

まず, グラウトが未充填の供試体と完全に充填された供 試体を用意して実験を行い, FFT ならびにウェーブレット 変換を用いたスペクトル分析を試みた.そして,境界要素 法を用いた数値解析を行い,実験と比較するとともに,実 験とは異なる条件でのシミュレーションを行った.

2. インパクトエコー法

インパクトエコー法は図-1(a) に示すように、検査対象 となる構造物の表面に直接衝撃力を与えて応力波を発生 させ、表面で得られた振幅応答波形から構造物内部の状 況を把握するものである.通常、得られた時間波形をフー リエ変換して周波数スペクトルを得て、スペクトルに現れ るピークから欠陥や底面までの距離を推定する.例えば、 図-1(a) に示すような板厚 D の部材にインパクトエコーを 適用すると、図-1(c) に示すようにある周波数 f_D におい て最大値を示す周波数スペクトルが得られる.このような 周波数スペクトルにおけるピーク値は、衝撃力によって発 生した応力波が板厚 D の距離を多重反射することによっ て生じたもので、周波数 f_D と板厚 D の間には次の関係が ある¹⁾.

$$D = \beta c_P / (2f_D) \tag{1}$$

ここに、 β は形状係数 (通常は 0.96)、 c_P は P 波の伝播速 度 (m/s) である.式(1)により、周波数 f_D と P 波速度 c_P が既知であれば板厚 D を推定することができる.もし、部 材内に欠陥がある場合には、欠陥と表面の間においても多 重反射が生じることから、別の周波数 f_L においてスペク トルピークが得られ、そのピークから表面から欠陥までの 深さ L を推定することができる.





図-2 実験概要図と供試体

d=28mm

3. 実験

本研究では直径 4mm の鋼球を 30cm の高さから落下さ せることで衝撃力を入力し,同表面の 15mm 離れた点にお いてレーザードップラー振動計(小野測器 LV-1610)を用 いて過渡的な速度波形を得た.実験概要図と供試体を図-2 に示す.供試体は外形寸法が 600 × 600 × 121mm の板状 供試体で,(I) コンクリートのみ,(II) ϕ =38mm の空の シース管を埋め込んだもの,および(III) シース管内に ϕ =28mm の鋼棒を挿入してグラウト充填したものの 3 種類 を作製した.

実験結果を図-3に示す. 左段は FFT による周波数スペ クトルであり、右段はウェーブレット変換による時間-周波 数スペクトルである.いずれも上から順に供試体(I),(II), (III)に対する結果を示している. 各図に現れているスペク トルピークは、シース管や鋼棒の存在やその位置および供 試体の板厚と密接な関係を持っている. 図-3(I) より、板 厚に対応したピーク周波数 fn が明確に得られている.ま た,図(II)のFFTによる周波数スペクトルにおいては、板 厚に対応するピーク fp と空のシース管の深さに対応する ピーク f_L が得られている. ただし, 板厚に対応するピーク fp は少し低周波側に移動していることがわかる.これは, シース管を回折して多重反射が起こるために見かけ上、板 厚が増加しているためである.図(III)においては、FFT とウェーブレットのいずれの結果においても板厚に対応し たピーク周波数 fp と鋼棒と表面との間における多重反射 に起因するピーク周波数 fs が得られている. 鋼棒におけ る反射では、空洞における反射と比較して位相が反転する ため, f_S は f_L の約 1/2 の値に現れている.

ウェーブレット変換解析は時間経過とともに変化する周 波数成分を抽出する解析手法である.図-3 右段の時間軸上 に初めに現れているスペクトル成分が表面波による影響で あり、その後、時間軸上に尾根になって現れているものが 板厚や鋼棒深さに対応するスペクトルピークを表している.

Key Words: インパクトエコー法, *PC* グラウト, ウェーブレット変換, 境界要素法 〒 152-8552 東京都目黒区大岡山 1-12-1

土木学会第57回年次学術講演会(平成14年9月)

このようにウェーブレット変換を用いれば、表面波の影響を取り除いた形でグラウト充填評価を行うことができる.



図-3 供試体 (I)~(III) で得られた実験結果 (左段が FFT によ るフーリエスペクトル,右段がウェーブレット変換の結果)



4. 境界要素法による解析

検査で得られる波形やスペクトルをあらかじめ推定する ためには数値解析によるシミュレーションが有効である. 数値解析の適用性を判断するために図-2の実験を模した2 次元解析モデルを用いて解析を行った.解析モデルを図-4 に示す.表面のある一要素に対して単位振福の表面力を与 え,近傍の点で変位を計算し,それに入力の周波数成分を 掛け合わせて実験に対応するスペクトルを得た.その結果 を図-5の左段に示し,それを逆フーリエ変換して得られ た時間域波形に対してウェーブレット変換を行った結果を 右段に示す.これらの結果は実験で得られた結果(図-3 参 照)と非常に似た特性を示しており,本解析の適用性が確 認された.

つづいてモデル (III) の鋼棒周りの境界条件を変化させ て、実験では再現し難い部分的なグラウト充填を表現し、 数値シミュレーションを行った.解析モデルは図-6の左段 に示すモデル1とモデル2で、得られた周波数スペクトル 結果を図-6の右段に示す.解析モデル1は、鋼棒上面がグ



図-5 境界要素法による解析結果 (左段が FFT によるフーリエ スペクトル,右段がウェーブレット変換の結果)

ラウト未充填部の場合で、入力点から見るとあたかもモデ ル (II) に近い条件になっている.解析結果からも小さい振 幅であるが、 f_L のスペクトルピークが見られ、また、板厚 に対応する f_D も確認できる.解析モデル 2 は鋼棒下面に 未充填部があるため、 f_S とともに低周波側にずれた f_D が 確認できた.よって、実際の検査でこのようなスペクトル が得られた場合、鋼棒の位置より下方にグラウト未充填部 が存在する可能性が高いといえる.



図-6 解析モデルとそのフーリエスペクトル

5. 結論

インパクトエコー法による PC グラウトの充填評価手法 についての検討を行った. FFT ならびにウェーブレット 変換を用いたスペクトル特性の分析によるグラウト充填評 価の可能性を示した.境界要素法を用いた数値シミュレー ションを行い,完全な解析モデルではないにしろある程度 の精度があることがわかった.今後は減衰や側方境界から の影響を考慮した解析モデルを正確に再現することでより 精度が高く,より実験に近いスペクトルや波形を再現でき ると考える.

参考文献

 Mary J. Sansalone and William B. Streett: Impact-Echo, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y. 1997.