

論文 合成部材での未充填部の打音法検査

壹岐直之^{*1}・清宮 理^{*2}・星野聡志^{*3}・越村幸直^{*4}

要旨: 鋼板が部材周囲に存在する合成部材では、コンクリート充填後の空洞などの欠陥(未充填部)を目視により確認できない。種々の検査法の中で簡易な打音法に注目して鋼板裏面の未充填部をどの程度検出できるのかを把握するため、未充填部の大きさ・形状・鋼板の厚さ・水の有無を要因にした実験を行い、実験結果を測定波形の振幅比・継続時間・スペクトルなどに着目して整理した。この結果、打音法の適用範囲、限界などを把握した。

キーワード: 非破壊検査法、打音法、合成部材、未充填部、スペクトル

1. はじめに

周囲を鋼板で囲い、内部にコンクリートを打設する鋼・コンクリート合成部材が橋脚、沈埋トンネルなどに採用されている。合成部材の鋼殻内にコンクリート(自己充填の高流動コンクリート)を充填した場合、鋼板とコンクリート間に未充填部が生じる可能性がある。未充填部は鋼板の存在により外部から目視観測できない。未充填部の確認方法に関しては、打音法¹⁾、赤外線法、RI法、超音波法などが提案されている。

サンドイッチ部材による合成式沈埋函では、未充填部の検出にRI法が現在採用されている。これはRI法のみが未充填深さを検出できると判断されたためである。しかし、作業が連続的に行えず、検査時間がかかり、かつ価格も高い。未充填部の検査として、より高速で、かつ低価格で行うため、打音法を再検討した。打音法により鋼板とコンクリートの非接触部分の範囲を迅速に測定し、未充填範囲が広い箇所に対してRI法を用いて深さを特定する検査法を考えている。現在、打音法では人間の耳を頼りに未充填部を検出しているが、これを音響工学的に打撃音と共鳴音との振動数、振幅などを計測し、そのデータを根拠として非接触部分を特定する技

術の可能性を検討する。本論文では、模型試験体を用いた実験の結果について述べる。実験要因は、未充填部の形状寸法、鋼板の厚さ、および未充填部内の水の有無とした。

2. 打音試験の概要²⁾

2.1 供試体

供試体は寸法500×500×300mmのコンクリートの上面に鋼板を設置したものである。コンクリートは、設計基準強度24N/mm²の普通コンクリートである。コンクリートの強度が鋼板の振動に及ぼす影響は小さいと考え、今回は、高流動コンクリートでなく、普通コンクリートを使用した。鋼板の材質はSS400で、板厚を9, 12, 16および22mmとした。両者はスタッドジベルで結合した。

実際の未充填部の形状は種々あるが、円形形状と三角柱状の2種類を取り上げた。三角柱状は型鋼周囲の未充填部を再現したものである。薄い木製合板を型枠にして空洞を確保し、これを未充填部とした。また未充填部内を乾燥状態と水潤状態の2種類とした。水潤状態は、未充填部内に水を注入して作成した。

供試体の形状寸法を図-1に示す。供試体の種

*1 若築建設(株) 土木本部 技術研究所 研究員 (正会員)

*2 早稲田大学 教授 理工学部土木工学科 工博 (正会員)

*3 早稲田大学大学院 理工学研究科 建設工学専攻

*4 早稲田大学 理工学部 土木工学科

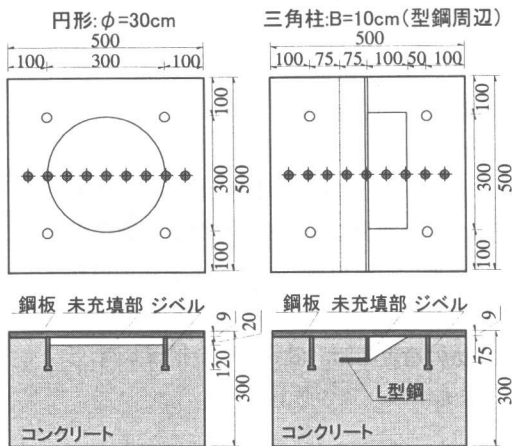


図-1 供試体の形状寸法

類は以下のとおりである。円形未充填部の直径は50mm, 100mm, 200mmおよび300mmの4種類であり、未充填部での厚さは20mmとした。三角柱状の未充填部は、図-1に示す高さ75mmのL型鋼の背面に作成した。未充填部の高さは75mm、奥行きは300mmに固定し、未充填部の幅を50mm, 100mmおよび150mmの3種類とした。

2.2 試験装置

打撃はインパクトハンマーにより人力で行った。測定は加速度計およびコンデンサー式マイクロフォンの2種類で、打撃した点のすぐ傍において行った。受信用の加速度センサーは広域AEセンサー00S-WBで、信号波形記録装置はメモリハイコダ8852でサンプリング振動数は200kHzである。マイクロフォンでの受信用センサーは、騒音計ユニットで電圧を出力した。発生した打撃音をマイクロフォンによって電気信号に変換し、これを高速フーリエ変換（FFT）アナライザーにより振動数分析した。マイクロフォンの測定振動数の範囲は20Hzから20kHzで、波形振幅は30から135dBの範囲を測定できる。またFFTアナライザーの解析能力は0 Hzから100kHzの範囲である。図-2にマイクロフォンでの測定の構成を示す。打音法を行なった計測点は図-1中に示した。打撃を各計測点で行ないながら、鋼板で加速度あるいは振動音を測定した。

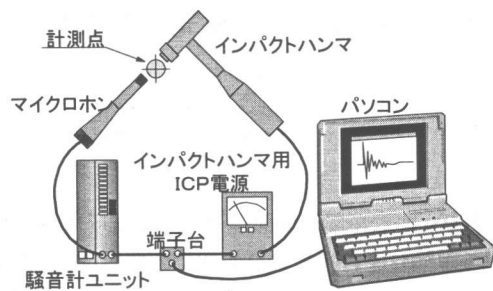


図-2 測定機器と構成

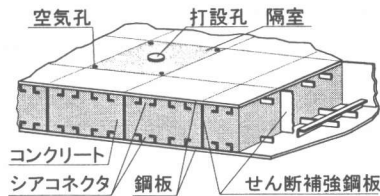


図-3 沈埋函上床版サンドイッチ部材

3. 未充填部検出の調査の流れ

3.1 検出する未充填部の規模の設定

今回検討の対象とした合成部材は、図-3に示す沈埋函上床版部である。長さ3m、幅3m、高さ1m程度の鋼殻内に高流動コンクリートを中央の孔より充填する。板厚は9mm, 11mmが一般的である。今までの実証試験や現地試験結果から、大きな未充填部は存在しないものの、鋼殻の隅、L型鋼（シアコネクタ）周辺などに未充填部が見られる場合もあった。現在、どの程度の未充填部を検出すればよいか、根拠が少ない。

未充填部が広範囲に存在するときのサンドイッチ部材の曲げ及びせん断耐力の減少の程度は載荷試験³⁾より明らかにされており、5mm程度以下の深さでは耐力の低下はほとんどないことが判っている。沈埋函部材では、周囲から水圧と土圧を受けることから、この外力により鋼板が降伏しないことを今回の目安とした。円形の未充填部の場合、等分布荷重: ω を受けたとき、鋼板を周囲単純固定の円形板と仮定して鋼板中心の応力度: σ を計算すると下式となる。

$$\sigma = 3\omega(a/2)^2(3+\nu)/(8h^2) \quad (1)$$

ここで、 a : 円形板の直径、 h : 板厚、 ν : 鋼板のポアソン比である。

いま水深を30m、板厚を11mmと仮定し、常時

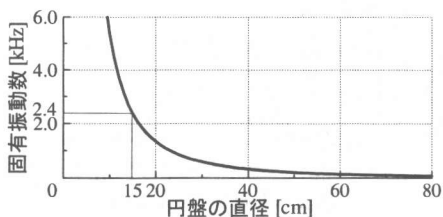


図-4 円形板の直径と固有振動数の関係

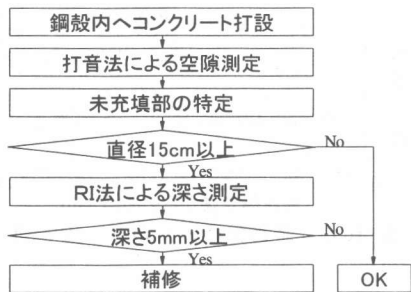


図-5 打音法による調査

での設計荷重を勘案すると、おおよそ直径30cmで鋼板が降伏する。目標として直径15cmを検出すれば構造的には良いことになる。また、この円形板の直径と一次固有振動数の関係を図-4に示す。直径が大きくなるに従い一次固有振動数は低くなるが、直径15cmでは2.4kHzであり、これより低い振動数を検出すれば良いことになる。

3.2 現地での調査の流れ

現在、沈埋函の未充填部の検出にはRI法と打音法⁴⁾が用いられている。打音法はRI法の補助的に用いられ、検査技術士の耳のみの判断で、記録には残らない。図-5に示す今回提案している方法では、打音法により広範囲の未充填部の可能性のある箇所を特定し、この箇所のみRI法により未充填部の深さを特定し、必要に応じて補修することとする。この手順により、現場での検査を大幅に簡易化し、検査記録を残すことを目標としている。

4. 波形の状況

取得された波形（加速度および電圧）の状況を以下に示す。図-6(a)は、板厚9mmで円形 ϕ 20cmの未充填部の中心を打撃し、中心で測定したものである。どちらの測定波形も比較

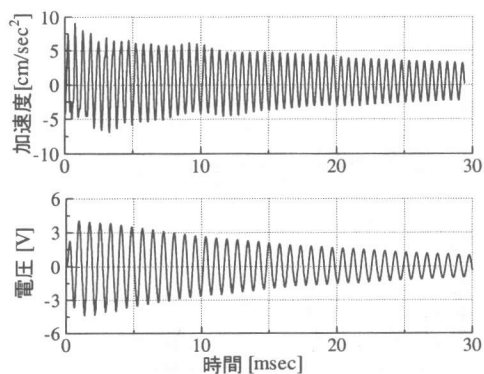


図-6(a) 未充填部の加速度波形および電圧波形

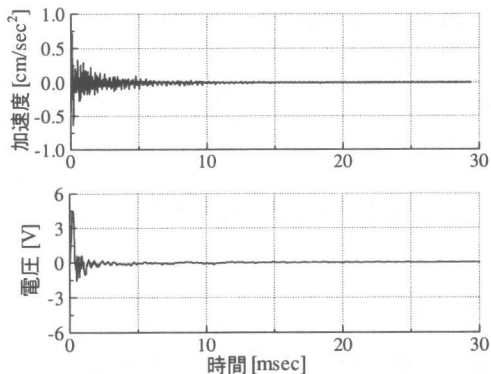


図-6(b) 充填部の加速度波形および電圧波形

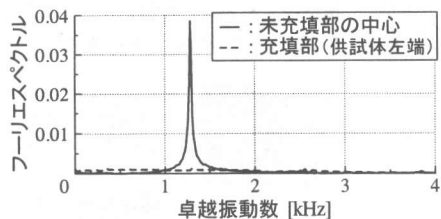


図-7 電圧波形のスペクトル

的に低い振動数の波形が継続した。振幅は指数的に減衰し、時間15msec程度で半減した。また、音色は低い感じがした。図-6(b)に、図-6(a)と同じ供試体の、充填部（供試体左端の計測点を打撃し、左端の計測点で測定）での波形を示す。充填部では、加速度の最大振幅は未充填箇所の1/10程度であるが、電圧の最大振幅は未充填箇所とほぼ同じであった。振動の継続時間は、加速度、電圧ともに非常に短かった。加速度波形では高周波成分が急激に減少し、電圧波形では10数波後に振幅がほとんど0となった。音色も硬い感じの音となった。これらのことから、音色

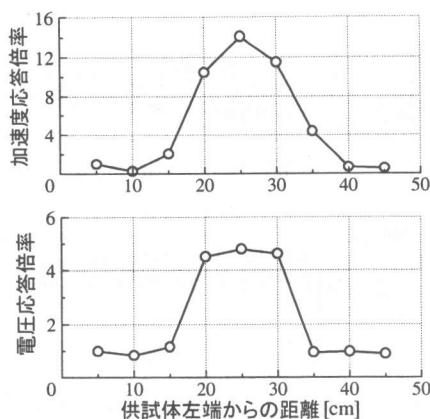


図-8 (a) 応答倍率の分布 (円形: $\phi=20\text{cm}$)

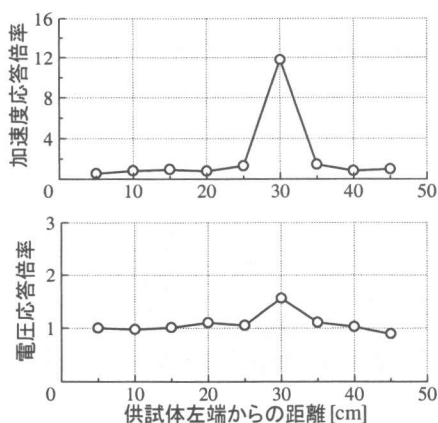


図-8 (b) 応答倍率の分布 (三角柱: $B=10\text{cm}$)

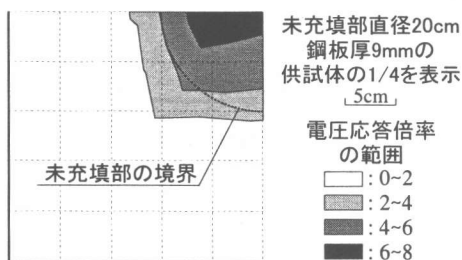


図-9 応答倍率の平面分布 (円形: $\phi=20\text{cm}$)

によっても未充填部の有無は認識可能であるが、波形の状況から判るように、充填部の波形は未充填部に比べて振動の継続時間が明らかに小さく、波形分析によっても未充填部の有無の認識は十分可能であることが判った。

図-7に、図-6 (a) および図-6 (b) に示した電圧波形のスペクトルを示す。未充填部では約 1.3kHz の振動数が卓越した。これは円形板の一次固有振動数と見なせ、二次以上の高次の振動

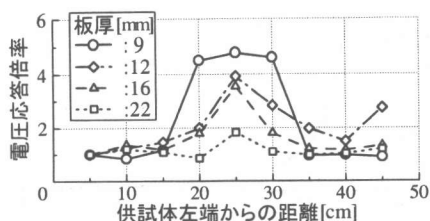


図-10 (a) 応答倍率の分布 (円形: $\phi=20\text{cm}$)

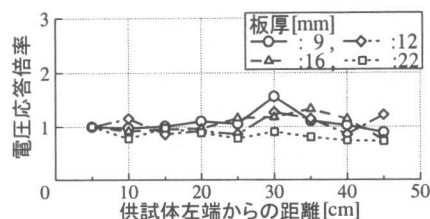


図-10 (b) 応答倍率の分布 (三角柱: $B=10\text{cm}$)

数は見られなかった。円形板の共鳴音を拾っているといえる。一方、充填部のスペクトル振幅は小さく、顕著に卓越する振動数帯はなかった。

5. 波形の解析

5.1 応答倍率

図-8 (a) に、板厚 9mm で円形: $\phi=20\text{cm}$ の未充填部の場合での波形の応答倍率の結果を示す。ここで応答倍率とは、各計測点の最大振幅値を、供試体左端の計測点 (充填部) での最大振幅値で割ったものであり、加速度波形によるものと、電圧波形によるものとがある。応答倍率は、供試体左端から $20\sim 30\text{cm}$ の範囲で大きくなり、未充填部の中央で最大となった。中央部での応答倍率は加速度で 15 程度、電圧で 5 前後となった。

図-8 (b) に、三角柱: $B=10\text{cm}$ (型钢周辺) での応答倍率を示す。未充填部の中央での応答倍率は、加速度で 12 程度、電圧で 1.6 程度であった。加速度による測定の方が電圧 (音響) での測定よりも応答倍率が大きく、未充填部を検出しやすい事が判った。

図-9に、板厚 9mm で円形: $\phi=20\text{cm}$ の場合の電圧応答倍率の平面的な分布結果を示す。供試体の $1/4$ の範囲で 5cm 間隔の格子状に測定した結果であるが、右上に応答倍率の大きな箇所が存在し、未充填部の範囲をほぼ検出している。

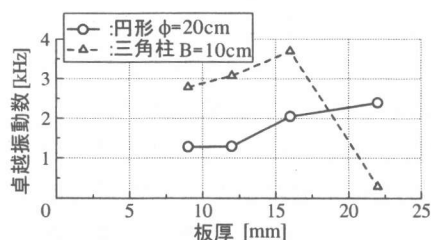


図-11 板厚と卓越振動数の関係

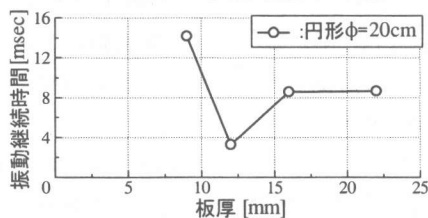


図-12 板厚と継続時間の関係

5.2 板厚の影響

図-10 (a) および図-10 (b) に板厚と電圧応答倍率の関係を示す。円形:φ=20cmの場合、板厚の増加とともに応答倍率は減少した。一方、三角柱:B=10cm (型钢周辺)の場合、応答倍率は円形:φ20cmの場合よりも小さく、さらに、板厚の増加によって応答倍率が減少した。

図-11に、未充填部の中央で測定したときの、板厚と卓越振動数との関係を示す。板厚が厚くなるに従い卓越振動数は増加した。また、図-12に示すように、未充填部中央での振動の継続時間は板厚の影響をさほど受けず、相関は認められなかった。ここで、振動継続時間の設定について、充填部と未充填部で適度な差が生じるよう計測した波形から検討し、本論文では、振幅が最大振幅の1/2になるまでの時間を継続時間と定義した。

板厚が厚い場合には応答倍率での未充填性の有無の判定は難しく、現状では板厚9,12mm程度が判定可能といえる。

5.3 未充填部の大きさの影響

図-13に、板厚9mmでの未充填部の大きさ(直径もしくは幅)と、未充填部中心の加速度応答倍率との関係を示す。大きさが10cm以上あれば応答倍率は10倍を超えた。ただし、大きさと応答倍率との関係は比例しているわけではなかつ

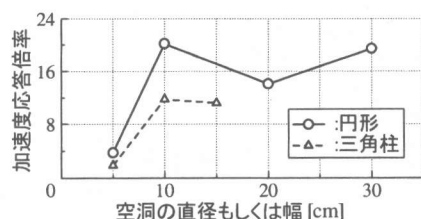


図-13 未充填部の大きさと応答倍率の関係

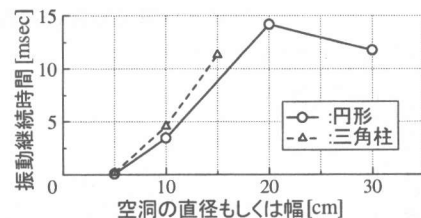


図-14 未充填部の大きさと継続時間の関係

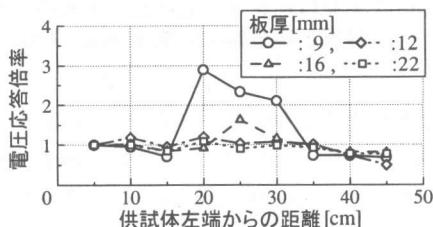


図-15 未充填部を水で充填したときの
応答倍率の分布 (円形:φ=20cm)

た。図-14に、板厚9mmでの未充填部の大きさと、未充填部中心での加速度波形の継続時間との関係を示す。大きさが大きくなると、継続時間は長くなる傾向があった。

以上示したように、未充填部の大きさが5cmの場合は、応答倍率および継続時間について充填部との間に顕著な差はなく、5cm以下の未充填部は打音法による検出は困難といえる。

5.4 水の有無

コンクリートを充填した直後、未充填部は水に満たされていると考えられるが、その後、未充填部には水が無くなるのが一般的である。どの時点で未充填部の検査をするかは施工条件により左右されるが、水の有無によりどのような影響があるかを調べた。以降では未充填部の中央での測定結果を基に述べる。

図-15に円形:φ=20cmの未充填部での電圧応答倍率を示す。板厚9mmでは、水が無い場合(図-10 (a) 参照)と同様に、充填部と未充填部と間

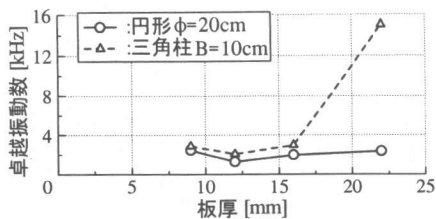


図-16 未充填部を水で充填したときの
板厚と卓越振動数の関係

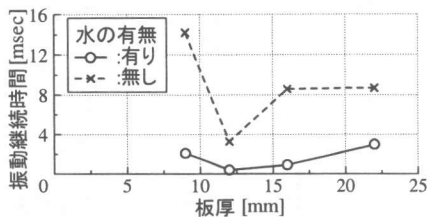


図-17 未充填部を水で充填したときの
板厚と継続時間の関係 (円形:φ=20cm)

に応答倍率の顕著な差が認められた。しかし、板厚が大きくなると応答倍率の差は顕著でなくなった。また、図-16に示すように、電圧の卓越振動数は、板厚22mmの三角柱:10cm以外では、1.5~2.9kHzであった。板厚が比較的薄い場合は、水が有る場合でも、水が無い場合(図-11参照)と同程度の卓越周波数を持つため、未充填部の検出は可能と考える。しかし、図-17に示すように、振動の継続時間は水が有る場合は3msec以下と短くなり、充填部と未充填部とに顕著な差は認められなかった。(図-6(b), 図-12参照)

水が存在する時期での測定は、応答倍率と卓越振動数に着目すると良い。

6. 結論

① 今回の実験から、合成部材でのコンクリート未充填部の位置を打音法(加速度および音響音)によって検出可能であることが判明した。すなわち、未充填部では応答倍率が大きくなり、波形の卓越振動数が低くなり、かつ振動の継続時間も長くなった。応答倍率などから、未充填部が5cm程度以下の場合は打音法による検出は難しく、10cm程度以上の場合は検出可能であった。また、未充填部における計測波形の卓越振

動数は、おもに鋼板の未充填部での1次固有振動数に等しく、スペクトルのピークの有無によっても未充填部が検出できた。

② 鋼板の強度から、板厚9mm程度では直径20cm以上の未充填部が悪影響を及ぼすと考える。この未充填部を検出するためには、計測方法などにより一律的にはいえないが、応答倍率5以上、卓越振動数2.4kHz以下、継続時間として5msec以上を目安に測定すると良い。

③ 打音法では、板厚が16,22mmの場合、未充填部の検出は困難となった。また水が未充填部内にあると、全般的に検出精度が落ちる傾向があった。特に、継続時間での判定は困難であった。

今回、未充填部の深さの影響などは考慮しておらず、これは今後の検討課題としたい。

なお、本研究は、早稲田大学・(財)沿岸開発技術研究センター・国土交通省港湾技術研究所・五洋建設(株)・東洋建設(株)・東亜建設工業(株)・佐伯建設工業(株)・若築建設(株)による、合成構造への充填コンクリートの開発に関する共同研究の一環として実施した。

参考文献

- 1) 魚本健人, 伊東良浩: 打音法によるコンクリートの非破壊検査, コンクリート工学論文集, Vol.7, No.1, pp.143-152, 1996
- 2) 清宮理, 押山宏晃, 北澤壮介, 坂井直人, 佐野清史: 打音法による合成部材の未充填部の空洞検査, 第55回土木学会年次学術講演会, VI-130, 2000.9
- 3) 清宮理, 木村秀雄, 小島朗史: 未充填部を有するサンドイッチ部材の曲げおよびせん断特性, 運輸省港湾技術研究所報告, Vol.35, No2, pp.105~145, 1996.6
- 4) 高橋秀樹, 西田徳行, 園山哲夫, 城代高明: サンドイッチ構造施工実験における高流動コンクリートの充填性とその検査方法, 土木学会論文集, No.651/VI-47, pp.11~26, 2000.6