非破壊検査を用いた PC グラウトの充填度の評価

解

鎌田 敏郎*1·内田 慎哉*2·服部 晋一*3

PC 構造物の維持管理において、グラウト充填度の評価の重要性が高まっている。本稿では、この評価に用いる非破壊検査 として、衝撃弾性波法を適用する手法の原理と課題について述べたのち、課題解決のための最新の取組みについて紹介する。 具体的には、シース断面内においてグラウトが部分的に充填された状況を想定した2次元衝撃応答解析を実施することで、部 分未充填の程度を把握するための評価指標について検討した結果を紹介する。また、弾性波の入力のための打撃により発生す る表面波の影響を取り除くために、音響伝達関数を用いた評価手法を導入し、グラウト未充填部におけるシース表面からの反 射波を効率的に検出する手法についても述べる。

キーワード:非破壊検査, PC グラウト, 充填度, 衝撃弾性波法, 部分充填, 音響伝達関数

1. はじめに

PC構造物においては、シース内のグラウトは、PC鋼材 を腐食から保護するとともに、コンクリートとシース中の PC鋼材とを一体化する役割を果たしている。しかし、シ ース内にグラウト未充填部分が存在すると、シース内への 浸水などにより PC鋼材の腐食が発生し、構造物の耐久性 に問題を生じるおそれがある。また、PC鋼材の破断によ り第三者被害が生じる可能性もある。このような事例とし ては、1985年に英国で発生した Ynys-y-Gwas橋(PC桁 橋)のグラウト充填不良を起因とした PC鋼材の破断によ る落橋がよく知られているが、1980年代後半から 90年に かけて、わが国においても PC鋼材の腐食(写真 - 1)、そ れに伴う鋼材破断による突出が報告されている¹⁾。

PC グラウトの充填状況を確認する方法としては、削孔 による目視検査がもっとも確実であるが、コストや時間も かかるうえに健全な部材に損傷を与えるため、非破壊検査 の適用が望ましい。このため、これまで X 線法、超音波 法、AE 法、電磁波レーダ法、衝撃弾性波法、および電磁 パルス法などの種々の非破壊検査法が研究・開発されてき た^{2~6)}。いずれの検査法もそれぞれ制約があり、グラウ



写真 - 1 グラウト充填不良に伴う PC 鋼材の腐食

ト充填状況を評価する手法として必ずしも確立されていな いのが現状である。一方,実構造物での運用を考えた場 合,試験時の安全管理上の制約や計測時間,コストも少な い方が望ましい。このため近年では,比較的試験条件に制 約がなく簡便な検査が可能な衝撃弾性波法が広く検討され ている。本稿においては,衝撃弾性波法に焦点をあて解説 する。

2. 既往の研究と課題

グラウト充填評価に用いる衝撃弾性波法には、PC 鋼材



軸方向に弾性波を伝播させる方法と,部材の断面方向に弾 性波を伝播させる方法がある。前者は部材長全長にわたっ ての平均的なグラウト充填状況を把握するための概略検査 法として位置付けられており,橋梁端部の定着部から弾性 波を入力し,もう一端の定着部で検出するもので,周波数 スペクトルや波形エネルギー,弾性波伝播速度などを用い てグラウト充填状況を評価するものである。一方,後者は 部材における未充填箇所を特定する詳細検査法としての特 長を有しており,シース直上のコンクリート表面から弾性 波を入力し,未充填部のシース表面で反射される波動成分 による縦波共振現象を利用するものである。

後者の一例として、衝撃弾性波法⁷⁾の原理を図-1に 示す。シース内にグラウトが完全に充填されている場合に は、版底面で反射波が生じる。一方、シース内にグラウト 未充填部が存在すると、未充填部(空隙)のシース表面に おいても反射波が生じる。これらの反射波は、それぞれコ ンクリート表面との間で反射を繰り返し、縦波共振現象が 励起される。版厚やシース深さに相当する縦波共振による ピーク周波数は 理論上 以下の式により算出される。

JULY SKIG,	~工山町二上,	201	V) 1410 0	у зг и с	10.00
$f_T = C_p/2T$					(1)
$f_d = C_p/2d$					(2)

ここで, f_r :版厚に相当するピーク周波数, f_d :シース 深さに相当するピーク周波数, C_p :コンクリートの縦波伝 播速度,T:版厚,d:シース深さ(かぶり)である。



図 - 1 インパクトエコー法による欠陥検出の原理

図-2に周波数スペクトルの例を示す。図において、 (a)は空隙位置に相当する理論上の共振周波数faが卓越し たピークとして存在する場合、(b)は共振周波数faおよび それ以外の周波数にもピークが存在する場合を示してい る。また、(c)は共振周波数 fa においてピークが出現しな い場合を示している。本手法は、周波数スペクトルのピー ク周波数からグラウト未充填箇所を検出するため、(a)は 未充填の存在を評価可能であるが、(b)、(c)は未充填の有 無を特定できない。このような周波数スペクトルが現れる 原因としては、内部を伝播する弾性波の振幅が減衰により 小さくなり、打撃により発生する表面波の振幅の影響が大 きくなるためであると考えられる。このような現象に対す る改善策の一つとして、統計的手法を導入した手法が報告 されている⁸⁾。この手法においては、計測波形の前半部分 に着目し、最大エントロピー法(MEM)を適用した後に 周波数スペクトルを算出している。これにより、縦波共振 現象に起因する卓越したピークを検出することを可能にし



図 - 2 衝撃弾性波法による周波数スペクトル例

ている。図 - 3は MEM により卓越した周波数ピークを検 出した例を示す。



図-3 最大エントロピー法による周波数スペクトル例

以上の手法によるグラウト未充填状況の検出性能については,空隙径が空隙の深さの1/4 程度までは検出が可能であるが,それ以下の領域では空隙有無が判定できないとの結果が得られている。

一方,実構造物の施工時においては,「先流れ現象」等 の発生により,グラウトがシース断面内において完全に充 填されず,部分的に充填された状態になっているケースも 想定されるが,こうした条件下で部分的な充填状況を適確 に評価する方法については未だ検討例が少ない。また,シ ース径が小さく埋設位置が比較的深い場合には,シースか らの反射波に対して表面波の影響が大きくなり,従来の手 法では周波数のピークが検出できない状況が想定され,課 題の克服に向けた検討が必要となっている。

3. 部分的な PC グラウト充填状況の評価

ここでは、グラウトがシース断面内に完全に充填されて いない場合(部分未充填)を対象として、2次元衝撃応答 解析による弾性波伝播シミュレーションを行い、部分未充 填の評価に用いる指標の検討を行った結果について紹介す る。シース断面内の空隙と測定位置との相対的な関係によ り反射波が変化するため、いくつかのケースを想定し、部 分未充填部の影響を検討している。また、部分充填された PC グラウトの充填度は、周波数スペクトルのユークリッ ド距離を用いた指標によって評価している。

3.1 ユークリッド距離による評価

解析モデルを図 - 4 に示す。荷重の入力に用いた鋼球 は直径 9.6 mm とし、出力位置は荷重の入力位置から 30 mm 離れた節点とした。各構成材料の材料定数は、表 - 1 に示す物性値に設定した。周波数スペクトルのユーク リッド距離の計算を式(3)に示す。ユークリッド距離が小 さければ各周波数におけるスペクトル強度の値が近く、周 波数スペクトルの類似度が高いことを表している。

$$L = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} (a_i - b_i)^2}$$
(3)

ここで, *L*はユークリッド距離, *a*_iおよび*b*_iはそれぞれ 断面内完全充填ケース, 評価対象ケースの*i*番目の周波数 におけるスペクトル強度である。



図 - 4 解析モデル例 (シース径 78 mm)

表 - 1 解析モデルの物性値

要素	ヤング率 (GPa)	密度 (g/cm ³)	ポアソン比
コンクリート	30	2.3	0.2
空隙	1.6×10^{-23}	2.2×10^{-11}	2.0×10^{-20}
シース	200	7.9	0.3
モルタル	25	2.0	0.2

3.2 部分未充填の評価結果

図-5にユークリッド距離の計算結果を示す。横軸に 充填率(%),縦軸にユークリッド距離を示している。シ ース断面内の空隙部と測定位置の関係から、以下のケース に分けて解析を行った。

(1) 未充填箇所を上部から測定する場合(CASE 1)

本ケースでは、空隙部が打撃側にあるため、充填率が大 きい場合に空隙の大きさの影響が表れやすくなる。グラフ より、充填率が 90 %以上であれば、ユークリッド距離に より部分未充填が定量的に評価できる可能性があることが 示された。

(2) 未充填箇所を底面から測定する場合(CASE 2)

本ケースでは、空隙部が打撃側と反対側にあるため、充 填率が小さくなるまで空隙の大きさの影響が表れにくい。 グラフより、充填率が20%以上ではユークリッド距離は ほとんど変化しないことがわかる。このため、本ケースで はユークリッド距離を用いても、部分未充填であることを 定量的に把握するのは難しいとの結果が得られた。



図-5 グラウト充填率とユークリッド距離

(3) 未充填箇所を側面から測定する場合(CASE 3)

本ケースでは、空隙部の大きさの変化が打撃側に表れや すい。グラフより、未充填の割合が大きくなるにしたがっ て、ユークリッド距離が徐々に増加する傾向が確認できる。 このため、充填率が 30 %以上であれば、ユークリッド距 離により部分未充填であることを定量的に評価できる可能 性があることが示された。

以上の解析結果から,シースを側面から測定する場合 (CASE3)において,もっとも適確に部分未充填の状況を 把握できる可能性があることがわかった。

4. 音響伝達関数による表面波の影響抑制

シース径が小さく埋設位置が深い場合には、反射波に対 して表面波の影響が大きくなる。そこで、著者らは、表面 波の影響を取り除くため、弾性波が伝播・反射する弾性体 構造を音響信号の伝達系としてモデル化し、波動伝播特性 を記述する音響伝達関数を導入することで、シース空隙部 からの反射波(信号)を表面波(雑音)から効率的に分離 する方法を提案している⁹。

4.1 音響伝達関数

PC グラウト充填部, 未充填部それぞれにおいて同一の 衝撃入力で受信した 2 点の時刻歴波形から高速フーリエ変 換 (FFT) により音響伝達関数を算出する。図 - 6 に計測 時の打撃点 P1, P1'検出点 (S1, S2), (S1', S2')の位置 関係を示す。式(4), 式(5)に計測点間の音響伝達関数の関 係を示す。

$$H_{f}(\omega) = \frac{Y_{12}(\omega)}{Y_{11}(\omega)} \tag{4}$$

$$H_{\nu}(\omega) = \frac{Y_{12}'(\omega)}{Y_{11}(\omega)} = \frac{H_{01}(\omega) \cdot H_f(\omega) + T_{52}(\omega)}{H_{01}(\omega) + T_{51}(\omega)}$$
(5)

ここで、 $H_f(\omega)$ は PC グラウト充填部の検出点 S1, S2 間における音響伝達関数, $H_v(\omega)$ は PC グラウト未充填 部の検出点 S1', S2'間における音響伝達関数, また H_{01}



図-6 計測原理と計測配置

(ω) は打撃点 P1 から S1 までの音響伝達関数である。
 S1', S2' において検出される反射波のそれはそれぞれ T_{S1}
 (ω), T_{S2}(ω) で表している。

4.2 評価指標値

反射波の大きさを定量的に評価するため、充填部、未充 填部のそれぞれの音響伝達関数(インパルス応答)の差異 と、y11'(t)のたたみ込み演算より得られる振幅差 $\Delta h(t)$ を二乗積分して、式(6)により定義した評価指標(S)を導 入した。

$$S = \int_{0}^{T_{m}} \{\Delta h(t)\}^{2} dt$$
(6)

本手法の評価で用いたコンクリート供試体の概要を図 - 7 に示す。グラウト充填状況の異なったシースが3体の コンクリート供試体に埋設されている。また鋼製シースの 内部には呼び径32 mmのPC 鋼棒が挿入されている。充填 状況の評価のために、シースの片側半分は完全充填であ り、片側半分は完全未充填としている。



図-7 供試体の構造と外観

この評価指標とシース深さ,およびシース径との関係を 図-8に示している。シース深さが浅く,シース径が大 きいケースでは比較的評価指標は大きくなる。一部の例外 (シース深さ100 mm,シース径93 mm)を除き,シース 深さと評価指標の関係,およびシース径と評価指標の関係 には正の相関関係がみられた。本評価指標でシース深さ 150 mm,シース径48 mm 程度のグラウト未充填まで検出 可能であることが明らかとなった¹⁰。



図 - 8 評価指標とシース深さ・シース径の関係 横軸の数値は、シース深さ(mm)_シース径(mm)を表す。

5. おわりに

PC グラウトの充填状況を評価する非破壊検査として、 衝撃弾性波法の原理と課題,新しい取組みについて紹介し た。衝撃弾性波法は検査時の制約が少なく,簡便に計測で きる手法であり,グラウト充填状況の詳細検査に適用でき る可能性を有している。表面波の影響を除去する手法を導 入することで,従来よりさらに深く小口径のシースの充填 状況を評価する可能性が見いだされている。今後,実運用 においては,現場へのアクセスや,装置の可搬性などが課 題になってくると考えられ,検査の効率化,ロボット化の ニーズも高まってくると思われる。このような要求に対し て衝撃弾性波法の適用性は高く,今後活用される場が増大 すると考える。

参考文献

- プレストレスト・コンクリート建設業協会: PC 構造物の維持保 全 - PC 橋の予防保全に向けて-, 2010
- 2) 鎌田敏郎,内田慎哉:コンクリート構造物の診断における非破 壊検査の適用の現状と今後の展望,物理探査,第60巻,第3号, pp.253-263,2007
- 3) 鎌田敏郎,浅野雅則,川嶋雅道,内田慎哉,六郷恵哲:弾性波 による PC グラウト充填評価手法の実構造物への適用,土木学 会論文集 E, Vol.62, No.3, pp.569-586, 2006.9
- 4) 真鍋英規, 葛目和宏, 鎌田敏郎, 木村嘉富:非破壊調査技術を 用いた PC グラウト充てん度の評価, コンクリート工学, 第49巻, 第6号, pp.18-24, 2011
- 5)藤井 学,宮川豊章:PC グラウト充填状況の非破壊検査法,土 木学会論文集,第402号,V-10,pp.15-26,1989.2
- 6)内田昌勝,加藤佳孝,恒国光義,魚本健人:各種非破壊試験方 法の PC グラウト充填検査への適用性の検証,コンクリート工 学年次論文集, Vol.27, No.1, 2005
- 7) Sansalone, M. and Streett, W.B. : Impact Echo, Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry, Bullbrier Press, Ithaca, NY and Jersey Shore, PA, 1997
- 8)前田洋祐,内田慎哉,鎌田敏郎,李 興洙,西上康平:PCグラウト充填評価のためのインパクトエコー法の適用範囲に関する研究,コンクリート構造物の補修,補強,アップグレードシンポジウム論文報告集,第13巻,pp.229-236,2013
- 9) Widrow, B. and Stearns, S.D. : Adaptive signal processing, Prentice-Hall, 1985
- 10)服部晋一,鎌田敏郎,内田慎哉,中川拓郎:音響伝達関数を用 いた衝撃弾性波法による PC グラウト充填状況の非破壊評価手 法の検討,第69回土木学会年次学術講演会講演概要集,V-095, pp.189-190,2014

【2014年9月2日受付】