報告 PCグラウトの充填度評価に関する非破壊検査の適用

平林 望*1・植木 博*2・齋藤 豪*1

要旨:グラウト充填状況を変えた供試体を用いて,衝撃弾性波法で伝播速度を評価指標とし て測定し,その検証にX線透過法の非破壊試験を行った。その結果各試験は有効であること が判明したので,インパクト・エコー法を追加して既設道路橋の中間横桁に適用した。本文 は供試体,実橋を通して各試験方法で得られた知見について報告する。 キーワード:グラウト充填度,非破壊試験,PC鋼棒,衝撃弾性波,伝播速度

1. はじめに

1967年に英国で Bicton Medows 歩道橋のプレ キャストセグメント継ぎ目で主ケーブルが著し く腐食して倒壊したのを機に既設PC構造物に おけるグラウトの充填不足によるPC鋼棒の腐 食劣化が国内外で報告されるようになってきた。 日本国内では橋脚横ばりにプレストレッシング を導入した PRC 構造橋脚のPC鋼棒が破断し, 後埋めコンクリートとともに跳び出すという事 故が顕在化している。

このため現存するPC構造物のグラウト充填 度の診断を行う非破壊試験法が研究・開発され ているものの明確な成果は,まだ得られていな いのが現状であり,可視化が可能となるX線透 過法を用いることが多い。しかし,X線の人体 への影響を考えると適用できる部材厚さが制限 されるとともに手法の特性から 線発生装置の 反対側にフィルムが必要となり,撮影部位は桁 ウエブ等でフィルムが設置できる場合に限定さ れる。その他に全面に足場が必要となる等によ り高価となる。またリアルタイムで診断が難し いという課題も有する。このような中で,比較 的簡易な検査手法として衝撃弾性波を用いた診 断手法が有効であることが報告^{1)~2)}されている。 その際,充填状況の評価指標としては衝撃弾性 波の減衰特性,周波数特性及び弾性波の伝播速

度が用いられる。著者らは,そのうち減衰特性 を指標として供試体による実験³⁾を行った後, 実橋に適用して充填不足と考えられるPC鋼棒 を捉え,X線撮影で充填不足を確認した。そし てグラウトを再注入し,減衰特性がどのように 変化するかを報告 4)してきた。減衰特性は緊張 力の大きさによって変動することが指摘¹⁾され ており,汎用的な評価指標とするには緊張力に よる補正を行う必要がある。しかし,既設構造 物ではコンクリートのクリープ, PC鋼材のリ ラクセーション等により導入されている緊張力 の正確な評価は難しい。今回, PCはり供試体 を作成し,緊張力とグラウト充填状況を因子に して、伝播速度がどのように変化するかについ て実験をおこなった。その成果を踏まえて既設 道路橋の中間横桁のPCグラウト充填状況診断 に適用するとともにインパクト・エコー法, 線透過法により検証を行った。本文は供試体と 実橋での測定結果について報告をする。

- 2. 供試体による実験
- 2.1 供試体

P C 梁を模した長さ4m および6mの供試体(図
1)を作製し、それぞれにPC鋼棒 26mm、
シース管径 32mmを3本設置した。導入張力は
10t、20tとした。

- *1 (財)首都高速道路技術センター 技術部 (正会員)
- *2 首都高速道路公団 東東京管理局保全部調査役 (正会員)



図 - 1 供試体概要

グラウト注入形態については,A管を完全に 充填したもの,C管を完全充填量の1/2を注入 したもの,B管を完全に充填し,導入張力を10t にしたものの3種類とした。

また,実際にそのグラウト充填状況をX線撮 影で診断した結果,4mと6m供試体のA管と B管については,完全に充填されていることを 確認した。C管については図-2に示すように, グラウト注入側より完全に充填されている部分, 空と充填が混在する区間があることがわかった。 供試体はH鋼の上に板を敷き,異形鉄筋D29 を支承としてその上に置いて測定した。



図 - 2 グラウト充填状況

2.2 測定方法

図 - 3 に打撃振動解析装置を示す。振動波形 を測定するために P C 鋼棒の一端(打撃出力側) に加速度計ピックアップを設置する。また,伝 播時間の開始時間を測定するためおよび打撃エ ネルギーを評価するために,打撃入力側の P C 鋼棒支圧板にもセンサーをとりつけた。打撃は 打撃力を一定とするため鋼球(3 kg)を一定 の高さから P C 鋼棒端部に衝突させた。振動波 形の解析は P C カード型データ収集システムを 用いておこなった。



図 - 3 打撃振動解析装置

図 - 4 に伝播時間測定図を示す。CH1(打 撃入力側)波形の計測開始点(トリガ点)から CH2(出力側)の出力波形の計測開始点(波 形の立上り点)までの伝播時間(t)を測定す る。この伝播時間を入力点と出力点の距離の関 係から伝播速度に変換した。測定データはPC 鋼棒1本につき,グラウト注入側,排出側の2 方向から打撃振動を加え,片側10データを採 取し,上下突飛データ値を除く8データを平均 化して評価した。測定のサンプリング間隔は1 µsとした。



2.3 実験結果と考察

(1) PC鋼棒の軸力の影響

各供試体のA,B,C管の鋼棒端部において 振動波を測定し,伝播時間で供試体の長さを除 して速度に変換した結果を図-5に示す。各供 試体とも不完全充填のPC鋼棒は,完全充填の ものに比べ伝播速度が速いことが確認された。 また,伝播速度は,今回の導入軸力範囲内では

P C 鋼棒の軸力の影響をあまり受けないことが 明らかとなった。このことにより,伝播速度か らグラウトの充填状況の診断ができる可能性が あることが判明した。



(2) 不完全充填における未充填側の推定

PC鋼棒の打撃振動波の伝播速度はPC鋼 棒周辺のグラウト状況によって変化することが 確認されているが、その位置は特定できない。 そこで、各供試体のグラウト注入側を打撃し、 反対側で受信した場合と排出側を打撃し、反対 側で受信した場合の伝播速度を比較し、未充填 の多い側を推定できるか試みた。なお、不完全 充填であるC管はX線撮影により図-2のよう に、各供試体の未充填箇所は排出側に分布して いる。



図 - 6 打撃位置による伝播速度の比較

実験の結果は図 - 6のとおりで,4m,6m の供試体では逆の結果となり未充填が多い側の 推定は難しいと考えられる。

3. 実橋における実験

3.1 橋梁A

対象とした橋梁の概要を図 - 7 に示す。この橋 梁においては,中間横桁に3本のPC鋼棒が配 置されており,同じ形式内にある2箇所につい て衝撃弾性波の測定を行い,計6本のデータを 得た。また,グラウト充填状況の確認のためX 線撮影を行った。

(1) 衝擊弾性波法

衝撃弾性波の計測は,対象となる中間横桁に おいて,鋼棒定着部を露出させて打撃を加え, 反対側においても鋼棒定着部を露出させて鋼棒 端からの直接測定とした。衝撃波の入力は,金 属ハンマーで行い,サンプリング間隔は1µs とした。測定は,中間横桁2箇所のそれぞれ3 本の鋼棒について,両側からの測定を行った。 測定データはPC鋼棒1本につき,片側10デ ータを採取し,上下突飛データ値を除く8デー タを平均化して評価した。

3.2 橋梁B

対象とした橋梁は図 - 8 に示すように,上下 線一体構造で,PC鋼棒は長く中間地点にてカ プラ - で継いでいる。この橋梁では衝撃弾性波 法とコンクリート内部探査に用いられる非破壊 試験法のインパクト・エコー法を未充填位置を 特定するために適用した。また,内部充填状況 の確認のため,X線撮影を行った。

(1) 衝擊弾性波法

衝撃弾性波の計測は,鋼棒定着部を露出させ なくても測定できるかを調べるため,対象とな る中間横桁において,後埋めコンクリート上か ら衝撃弾性波を発生させ,反対側においても後 埋めコンクリート上で測定を行った。測定は中 間横桁2本のそれぞれ3本の鋼棒について片側 から測定を行った。衝撃弾性波を金属ハンマー



図 - 7 橋梁A概要図



図-8 橋梁B概要図

によって与え,打撃方向,受信方向ともPC鋼 棒の軸方向に一致させ,縦波振動を捉えること とした。測定はサンプリング間隔を100µs とし,5回測定したデータから上下突飛データ 値を除く3データを平均化して評価した。

(2) インパクト・エコー法

インパクト・エコー法は,専用の弾性波発射 装置により一定の衝撃を与え,同じ面で反射波 を測定し,コンクリート内部の反射波を分析す ることにより空隙の位置と形状が把握できる。 この方法は片面での測定で内部探査が可能であ るため,測定する隙間の無い端横桁にも適用で きる利点がある。



測定は中間横桁の4本の鋼棒について3断面 で計12箇所計測した。図-9にインパクト・ エコー法での測定例を示す。図中の色が濃くな っているところは反射波の強さを示し,空隙の 可能性が高い。横軸は打撃面からの深さである。

4. 実橋での測定結果と考察

- 4.1 X 線
- (1) 橋梁A

X線試験結果からは,部分的に充填不足が確 認され,その形式は図-10の2タイプに分類 できる。1(a)~1(c)では充填タイプ の連続した未充填部が片側に偏っている状況で あり,2(b)においてはタイプのように中 間地点付近に若干未充填部が見られた。ただし, いずれも軽微な未充填であった。2(a)と2 (c)は,ほぼ完全に充填されていた。

(2) 橋梁 B

橋梁BのX線試験結果からは,未充填部が発 見されず全箇所においてほぼ完全に充填されて いるものと判断した。



4.2 伝播速度

(1) 橋梁A

測定結果を表 - 1 に示す。伝播速度は,鋼棒 2(a)と2(c)で約4,500m/sを下回る値が でて,他は約5,000m/sより速い。供試体の実験 結果でも完全充填時は4,500m/s程度であるこ とから,2(a)と2(c)では完全に充填さ れていると判断できる。ここで,X線での測定 結果と照合してみると,完全充填の箇所が一致 しており,伝播速度を用いた方法が実橋におい ても有効であることが判明した。

また,グラウトの充填状況では,タイプ で 順側に未充填が偏っていたが,伝播速度の1 (a)~(c)における測定結果からは双方の 打撃側でほとんど差がない状況であった。

鋼棒 No.	平均伝 (m)	播速度 / s)	X 線結果 (充填タイプ)
	順則	送则	
1(a)	5,107	5,149	
1(b)	5,045	5,005	
1(c)	5,320	5,337	
2(a)	4,360	4,430	充填
2(b)	4,994	5,086	
2(c)	4,414	4,502	充填

表-1 伝播速度の測定結果(橋梁A)

(2) 橋梁 B

測定結果を表 - 2 に示す。今回2本の中間横桁について後打ちコンクリートの上から測定を行ったが,1本は3,000m/s台でもう一方は1,000m/s台となり,そのうちの1箇所で伝播波が測定できなかった。いずれも測定速度はかなり遅く,通常のコンクリート中を伝播する速度よりも遅くなった。これは,PC鋼棒が長いこと,更に途中でカプラ-により継手が存在する

ことにより,出力波形が微弱でほとんどがノイ ズに隠れている状態であったことと,後打ちコ ンクリート面に表面処理がされており,内部と の連続性が確保されなかったことなどが原因と 考えられる。

12 - 2	- 2 仏祖还反の別に和木(侗木D)		
鋼棒 No.	平均伝播速度	X 線結果	
	(m/s)	(充填タイプ)	
1 (A)	3,249		
1 (B)	3,132		
1 (C)	3,290		
1 (D)	3,218	充填	
2 (A)	1,013		
2 (B)	測定不能		
2 (C)	983		
2 (D)	1,130		

表-2 伝播速度の測定結果(橋梁B)

4.3 インパクト・エコー法

橋梁Bにおいてインパクト・エコー法で測定 した結果は12箇所中1箇所で充填不足の反射 があったが,他は全て充填されており,X線で の測定結果とほぼ一致している。



1箇所検出された未充填断面の測定結果を図 -11に示す。今回測定したところはX線でも 未充填が確認できない状況であったので,走行 車両によるノイズの影響によるものと考えられ る。今回の測定箇所では未充填のサンプルにな るものがなかったので,今後は未充填のある鋼 棒で位置特定の可能性を測定をする必要がある。

5. まとめと今後の課題

今回の供試体及び実橋での実験結果より以下

のことが言える。

- 5.1 供試体
- (1) グラウトが完全に充填されたPC鋼棒に
 おいては緊張力(185~370N/mm²)による伝
 播速度の影響は少ない。
- (2) 完全充填と不完全充填では伝播速度に明らかな差があり,不完全充填では伝播速度は速い。
- (3) 不完全充填で打撃側と受信側を変える事 により不完全充填区間を特定することは伝 播速度では難しい。
- 5.1 実橋
- (1) 衝撃弾性波の伝播速度を測定する場合は, PC鋼棒を露出させ,直接打撃すると共にP C鋼棒に直接センサーを貼付する方法が良い。PC鋼棒を露出させない場合には,鋼棒 の長さや継手の有無及びコンクリート表面 状況等を考慮して打撃エネルギーを検討す る必要がある。また,伝播速度では未充填な 位置を特定する事は難しい。
- (2) インパクト・エコー法は完全に充填された位置を特定することが可能である。

今回の一連の測定結果からグラウトの充填状 況を診断する際に必要となる伝播速度のしきい 値を決めることはデータが少なく難しいため, 今後データの蓄積が必要となる。

衝撃弾性波の伝播速度を測定するには後埋め コンクリートを除去する必要があり,完全な非 破壊試験とは成り得ないが,比較的簡易にグラ ウト充填状況の概要を診断できる可能性が高い。 一方,インパクト・エコー法は,非破壊試験そ のものであるが,PC鋼棒上を連続的に測定し なければならない。どちらかというと詳細点検 に用いる手法であると考えられる。このため実 橋の測定ではこれらの特性を考えて適正な手法 を選定する必要がある。 6. おわりに

2001 年 11 月に IABSE と fib の共催により「ポ ストテンション鋼材の耐久性」に関するワーク ショップが開催され,非破壊検査の現状につい ても報告がなされている。その結論は,「非破壊 あるいは限定された破壊による検査・観測手法 の中にはグラウトされたポストテンション緊張 材の状態を十分に評価できる手法は無く,明ら かに疑いのある場所を注意深く削孔し,目視検 査する方法が最善である」と要約されている。 我々は,今後も実橋でのデータの蓄積を計り, 精度の向上に努め,検査手法の確立を目指した い。

インパクト・エコー法での測定では,(株)太 平洋コンサルタント辻 正之氏に,まとめには ピーシー橋梁(株)徳良 賢一氏に大変お世話に なりました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 山田和夫,黒野幸弘,中井裕司:PC鋼棒 中を伝播する弾性波の伝播特性に及ぼす緊 張力の影響に関する基礎的研究,セメン ト・コンクリート論文集,No.49,pp.534-539, 1995
- 2) 富田芳男,岩波光保,大即信明:衝撃弾性 波の応答特性を利用したPCグラウト充填 度評価に関する基礎的研究,コンクリート 工学年次論文報告集,Vol.21,No.2, pp.1261-1266,1999
- 3) 牛島宏・宮村正樹・中野聡・植木博・奥山
 暁人:打撃振動波の減衰定数に着目した P
 C グラウト充填度の評価に関する考察,
 (社)非破壊検査協会,超音波分科会資料,
- 4) 植木博・須藤佳一・奥山暁人・平野雅一・ 本庄克彦:「打撃振動波形の減衰定数に着目 したPCグラウトの充填診断」,土木学会構 造工学委員会 構造物診断研究小委員会, 構造物診断に関するシンポジウム,1998.7