

弾性波モニタリング手法による PC 鋼材の破断検知に関する実験的研究

日本道路公団 試験研究所 正会員 ○横山 和昭
 日本道路公団 試験研究所 正会員 紫 桃 孝一郎
 (株) 千代田コンサルタント 正会員 肥 田 研 一
 オリエンタル建設 (株) 正会員 二井谷 教 治

1. はじめに

環境に対する適切な配慮がなされた設計が行われ、十分な品質管理のもとで施工が行われた場合、PC 橋は耐久性の高い構造物であり、わが国では多数の PC 橋が建設されてきた。しかし、これらの中には、塩害等の環境条件の影響により、PC 鋼材が腐食し破断することも危惧されるものもある。PC 鋼材の破断は、PC 橋の耐荷力に大きな影響を与えることになるが、一般の視視点検では発見し難いため、定量的なモニタリングが必要である。定量的なモニタリングには、応力を測定する方法や PC 鋼材の破断により発生する弾性波を測定する方法などが挙げられるが、本研究では、AE センサーや加速度計等を用いた弾性波モニタリングに着目し、室内および実橋での検証実験を行い、その適用性について検討を行った。

2. 室内検証実験

2. 1 実験方法

AE センサーによるモニタリングシステムの適用性、PC 鋼材破断時における弾性波信号の特性などを検討するため、供試体による基礎的なモニタリング実験を行った。供試体は、図-1 に示すような矩形断面の桁で、PC 鋼材を 3 段配置した。供試体は 3 体製作し、それぞれに配置する PC 鋼材を、鋼棒、鋼より線および鋼線とした。供試体の種類および実験ケースを表-1 に示す。各 PC 鋼材の緊張力は、規格引張荷重の約 60% とし、グラウトの施工状態をそれぞれ、上段より完全グラウト、アンボンド (グラウトしない) および部分グラウト (切断位置を中心に 500mm グラウトなし) の 3 種類とした。

実験では、機械的手法および腐食促進手法で人為的に PC 鋼材を切断し、3 種類の既存モニタリングシステムによって破断の検出および発生位置の特定を行い、各システムの特長および適用性について検討を行った。また、PC 鋼材の種類やグラウト状態の違いによる弾性波信号の特性についても調査を行った。AE センサー

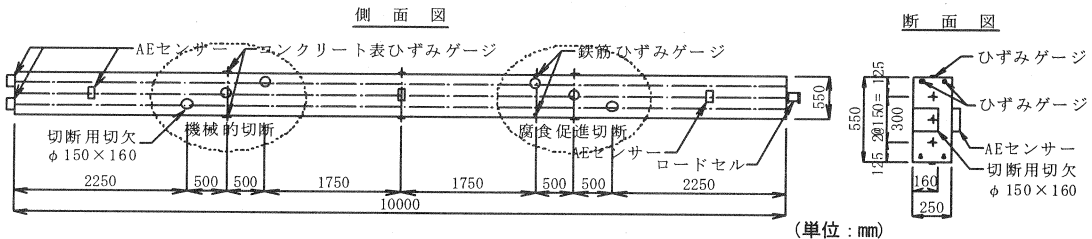


図-1 供試体形状寸法およびモニタリング概要

表-1 供試体種類および実験ケース

供試体名称	PC 鋼材		実験ケース					
	種類	鋼材径	機械的切断			腐食促進切断		
			完全グラウト	部分グラウト	アンボンド	完全グラウト	部分グラウト	アンボンド
B1	鋼棒	φ 23	○	○	○	○	○	○
B2	鋼より線	1S17.8	○	○	○	○	○	○
B3	鋼線	12 φ 5	○	○	○	○	○	○

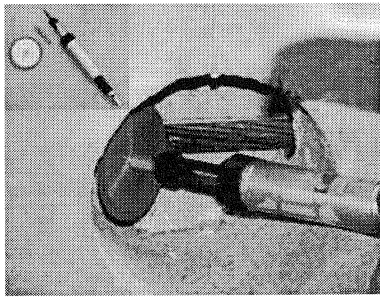


写真-1 機械的切断状況 (PC 鋼より線)

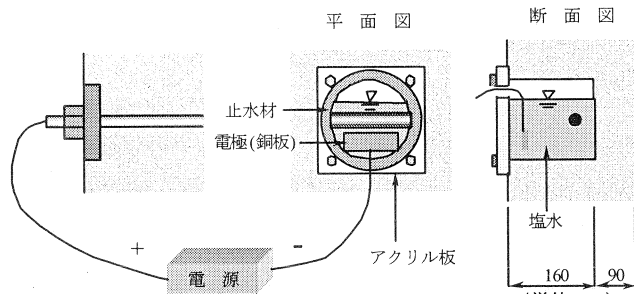


図-2 腐食促進切断概要 (単位: mm)

は、図-1に示すようにシステムごとに供試体の両端付近および中央部の3ヶ所とし、参考のため一部の定着具にもセンサーを取付けた。また、PC 鋼材破断によって生ずる鉄筋およびコンクリートのひずみの変化、およびアンボンドPC 鋼材の緊張力の変化を、ひずみゲージおよびロードセルを配置して測定した。

PC 鋼材の機械的切断は、供試体の切断位置に設けた切欠きを利用し、グラインダーを用いて行った。PC 鋼より線の切断状況を写真-1に示す。機械的切断が終了した後、アンボンドPC 鋼材のみ取替え、引き続き腐食促進による切断を行った。腐食促進切断は、図-2に示すように電食による方法とした。腐食促進切断実験では、モニタリングは無人で行い、PC 鋼材が完全に破断した後にデータを回収した。モニタリング期間中は、ひずみおよび緊張力についても15分間隔のインターバル計測を行い、経時変化を測定した。

2. 2 実験結果

ここでは、実構造物におけるPC 鋼材の破断に類似した腐食促進による切断に関してのみ報告する。

腐食促進による鋼材切断実験は、約2週間で終了した。図-3に、PC 鋼より線アンボンド鋼材の緊張力の経時変化を示す。通電開始後2日目以降に、段階的な緊張力の低下が見られ、PC 鋼より線は素線ごとに破断が徐々に進行することが分かる。なお、鋼線についても鋼より線と同様の破断傾向が見られた。

図-4は、PC 鋼より線の素線破断検出率を、グラウト状態ごとおよびシステムごとに集計したものである。実験に使用したPC 鋼より線は、IS17.8であり、素線数は19本である。したがって、素線19本の破断に対して19回の破断が検出できれば、検出率は100%である。グラウト状態ごとの検出率に着目すれば、部分グラウトの検出率が他のグラウト状態に比べて若干高いものの、有意な差ではない。システムごとの検出率に着目すれば、システム1およびシステム2の検出率は平均で80%以上であるに対し、システム3は60%程度であった。その他の鋼材種類についても同様の傾向が見られた。

室内検証実験から得られたその他の知見を以下に列挙する。

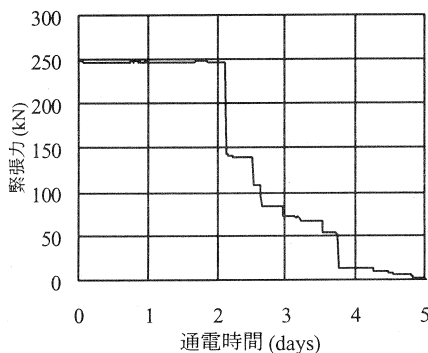


図-3 緊張力の経時変化 (アンボンドPC 鋼より線)

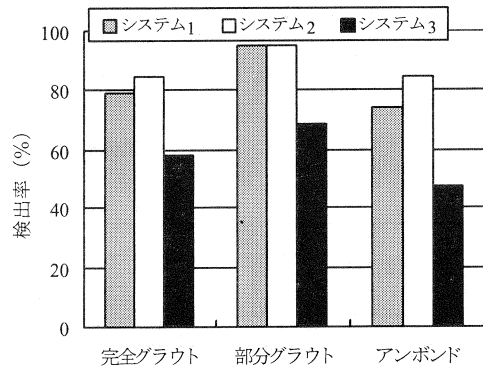


図-4 PC 鋼材破断の検出率 (PC 鋼より線)

- (1) モニタリング期間中、作業音および降雨などの背景雑音（以下、暗騒音と記す）が発生したが、エネルギー、周波数領域、最大振幅値などの弾性波特性の相違から鋼材破断との識別が可能であった。
- (2) 鋼材破断位置の特定は、ほとんどの場合かなり正確であったが、アンボンド鋼材および部分グラウト鋼材では、弾性波の伝播が複雑で一部位置の特定に誤りが見られた。
- (3) グラウト状態の違いによる弾性波信号の特性については、周波数領域および減衰に関して若干の相異が見られた。

以上より、適切なセンサーを使用し、適切なセンサー配置を行えば、PC鋼材の種類およびグラウト状態によらず、PC鋼材の破断が検出可能であることが室内実験によって検証された。

3. 実橋検証実験

3.1 実験方法

室内実験では、一部で発生した作業音あるいは降雨などを除けば、ほとんど暗騒音のない環境下でモニタリングが行われた。ところが、実際の橋梁は絶えず橋面交通があり、気象作用の影響も受ける。そこで、実橋検証実験では、供用中の橋梁において交通騒音を主体とする暗騒音の中でPC鋼材の破断が検出可能であるかを確認することを主目的とし、さらに、その検出精度についても検証することとした。

実験方法は、AEセンサーを配置した対象橋梁に、図-5に示すような供試体を取付け、室内実験と同様に、電食による腐食促進方法によって供試体に配置したPC鋼材を切断した。写真-2に供試体の取付け状況を示す。配置するPC鋼材はより線のみとし、規格引張荷重の約60%の緊張力を与えた。グラウトの充填状態は室内実験と同様に、完全グラウト、アンボンドおよび部分グラウトの3種類とした。モニタリング時には、AEセンサーを6~7m間隔で対象橋梁のウェブを中心に取付け、PC鋼材破断の検出および発生位置の特定を行った。また、図-5に示すように、埋込型ひずみ計およびロードセルによりコンクリートひずみおよびアンボンドPC鋼材の緊張力の経時変化を測定した。実験に使用した供試体はtype1（長さ1750mm）およびtype2（長さ750mm）の2種類で、配置するPC鋼材径および鋼材本数が異なる。使用した供試体およびモニタリングを実施した橋梁を表-2に示す。対象橋梁は2橋で、東関東自動車道のPC箱桁および東名高速道路のPCT桁である。

実験に供したモニタリングシステムは、室内実験の3システムのうち2システムである。表-3にシステムの概要を示すように、センサーの周波数帯域および制御方法には違いがあるが、暗騒音とPC鋼材破断との識別方法や破断位置の特定方法は同様である。

モニタリングは、約1ヶ月間実施し、データの収録は無人で継続的に行った。埋込型ひずみ計およびロードセルに

表-2 対象橋梁および使用供試体

対象橋梁	設置方向	使用供試体	PC鋼材	
			種類	鋼材径
東関東自動車道 S橋(PC箱桁)	橋軸方向	type1	PC鋼より線	1S21.8
	橋軸直角方向			1S21.8
東名高速道路 N橋(PCT桁)	橋軸方向	type1		1S21.8
	橋軸直角方向	type2		1S17.8

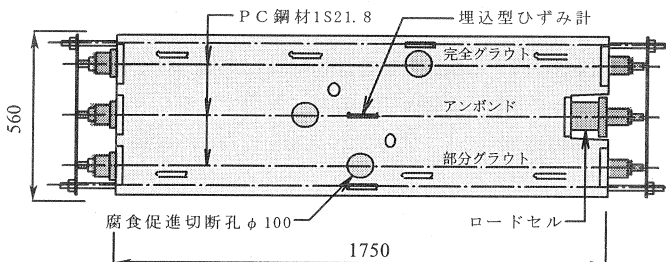


図-5 供試体の概要 (type1) (単位: mm)

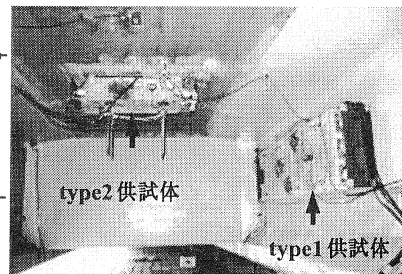


写真-2 供試体取付け状況

表-3 モニタリングシステムの概要

	システム1	システム2
センサー	30~150kHzプリアンプ内蔵AEセンサー	2~20kHz圧電式加速度計
システム	ローカル制御	インターネットによる制御, データ転送
鋼材破断と暗騒音との識別	弾性波の伝播特性, 弾性波の特徴, 発生位置などから判断	
鋼材破断位置の特定	各センサー間の信号到達時間から推定	

についても15分間隔のインターバル計測を行い、経時変化を測定した。

3. 2 実験結果

モニタリング終了後、2種類のシステムから得られた弾性波データを専門技術者が分析して暗騒音と識別し、PC鋼材破断の発生時刻および位置の特定を行った。図-6に、S橋の橋軸方向に設置した供試体で測定したアンボンドPC鋼材緊張力の経時変化と両システムによって検出したPC鋼材破断の発生時刻を示す。図中の段階的な緊張力の低下は、PC鋼材の素線破断によるものと考えられる。図-6から明らかなように、緊張力の段階的な変化と両システムによるPC鋼材破断の検知はほぼ整合している。これより、実橋における様々の暗騒音下でも弾性波モニタリング手法によりPC鋼材破断の検出は可能であることが検証できた。

図-7に供試体ごとのPC鋼材破断の検出率を示す。検出率とは、モニタリング終了後に確認されたPC鋼材素線破断本数に対する検出数を表す。S橋では、橋軸方向供試体および橋軸直角方向供試体とも検出率は80%程度であった。N橋の検出率は、橋軸方向供試体については90%程度であったのに対し、橋軸直角方向

供試体の検出率は70%程度であった。これは、N橋の橋軸直角方向供試体 (type2) はPC鋼材長が短く、また、緊張から試験までの期間が長かったため、モニタリング時の緊張力が所定の緊張力より小さくなったことが影響していると考えられる。これらの検出率から、ほとんどの場合の素線破断について検出が可能であったと考えられ、絶えず暗騒音の存在する実橋においても、室内と同程度の精度でPC鋼材破断が検出できることが確認できた。なお、システムおよびグラウト充填状況の違いによる検出率についても大きな差異は見られなかった。また、破断位置特定の誤差については、両システムともセンサー間隔の5%程度であった。

4. まとめ

弾性波モニタリング手法によるPC鋼材の破断検知に関する検証実験を、供試体および既設PC橋を利用して行った。その結果、センサーを適切に配置すれば、PC鋼材の破断が高い精度で検出できることが検証された。今後は、PC橋の維持管理手法の一つとして、弾性波モニタリング手法の実用化に向けて検討していく予定である。

謝辞: 本研究を行うにあたり、「PC橋のモニタリング技術に関する研究委員会」(委員長: 魚本健人教授)の委員の皆様にご貴重なご助言を賜りました。ここに記し、謝意を表します。

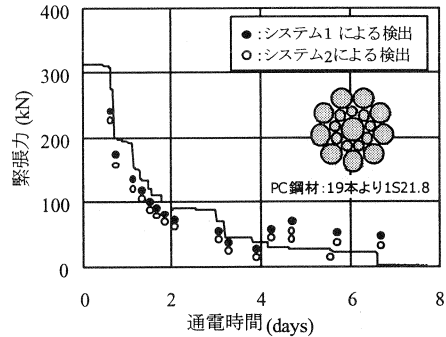


図-6 アンボンドPC鋼材緊張力の経時変化

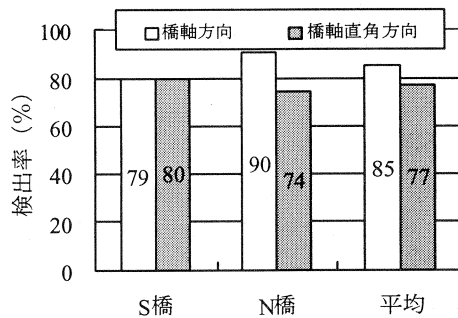


図-7 PC鋼材破断の検出率