

論文 プレテンション PCT 桁の載荷試験における AE 計測および超音波計測の適用性

榎園 正義^{*1}・谷倉 泉^{*2}・松久保 博敬^{*3}・野島 昭二^{*4}

要旨: 本研究は、塩害環境下にあるプレストレストコンクリート構造物に脱塩工法を適用するにあたり、その電気化学的影響を各種非破壊試験により評価するため、実橋から撤去したプレテンション PCT 桁を用いて載荷試験を行い、その適用性等の研究を行ったものである。簡易 AE 計測システムおよび超音波計測システムを独自に構築し、長期載荷試験および静的破壊試験を行った結果、AE 計測では載荷試験中のコンクリートのひび割れおよび PC 鋼材の破断線検知のモニタリング、超音波計測ではコンクリート部材の劣化（ひび割れ発生）過程での超音波伝播速度および受信波形による評価方法が有効であることが判明した。

キーワード: 載荷試験, 非破壊検査, AE 法, 超音波法, PC 鋼材の破断, ひび割れ, モニタリング

1. はじめに

既存の橋梁では、交通量の増加や車両の大型化による荷重の増大による繰返し荷重および塩害の影響等によって、コンクリート構造物に損傷、劣化が見られるようになり、最適な補修・補強工法の選定と同時にその構造物の診断手法の確立が重要となっている。

コンクリート構造物を対象とした現行の計測手法としては、一般的には変位や応力等によるモニタリングが実施されているが、この他に実構造物への非破壊試験の一例として AE 法や超音波法が挙げられる。これまでも AE 法や超音波法に関する研究¹⁾²⁾が各方面で進められているが、形状・寸法が大きい構造物の場合には非破壊検査手法としての適用性が実用レベルまで至っていないのが現状である。そのため、実務的で高精度な非破壊検査技術による診断手法の確立が求められている。

本研究は、塩害劣化により架け替えを余儀なくされたプレテンション PCT 桁（以下、プレテン桁と呼ぶ）に脱塩工法（連続通電）を適用し、載荷試験中の PC 鋼材の破断検知やコンクリート部材の劣化現象の評価技術として、AE 計測システムおよび超音波計測システムの適用性について検討を行ったものである。

2. 試験概要

供試体、載荷試験および計測システム等について以下に説明する。

2.1 プレテン桁供試体

供試体は、北陸自動車道金沢西 IC～小松 IC 間で塩害劣化により架替を行ったスパン 14m の単純桁であり、これに端部処理・整形等を行っている、主な諸元は次に

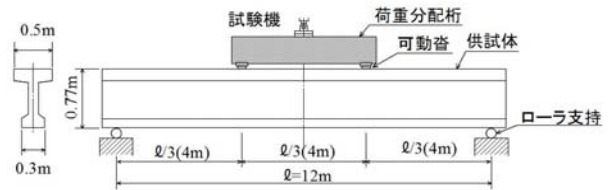


図-1 載荷試験方法概要

示すとおりである。

<主な諸元>

- 1) 型式; プレテンション PC 単純桁
- 2) 桁長; 14,100mm (切断整形前) → 13,100mm (整形後)
- 3) コンクリート設計基準強度; 49N/mm²
- 4) PC 鋼材; PC 鋼より線 7 本より 9.7mm
- 5) 脱塩工法の通電条件 (ウェブと下フランジを対象)
 - ・連続通電方式
 - ・電流密度 (最外部 PC 鋼材表面積当たり 5A/m²)
 - ・ファイバー方式 (ほう酸と炭酸カルシウムの混合液)

2.2 載荷試験方法

載荷試験は、脱塩工法の通電期間に渡って静的曲げ載荷を行う定荷重での載荷試験、および静的曲げ破壊試験を行った。載荷試験方法は、電気油圧サーボ式試験機を用い、図-1 に示すように荷重分配桁(鋼桁; 長さ 5m×幅 0.5m×高さ 0.7m)を用いた 3 等分点での 2 点集中載荷とした。

2.3 載荷試験条件

図-2 に示す脱塩工法の通電期間において、載荷荷重の最大値は、当初設計の最大設計荷重相当 192kN (PC 鋼材の $\sigma_{py} \times 0.65$) とした。また、192kN 載荷試験後、徐々

*1 (社) 日本建設機械化協会 施工技術総合研究所 研究第二部 研究課長 (正会員)

*2 (社) 日本建設機械化協会 施工技術総合研究所 研究第二部 部長 (正会員)

*3 電気化学工業 (株) 無機材料研究センター (正会員)

*4 (株) 高速道路総合研究所 道路研究部 橋梁研究室 主任研究員 (正会員)

にクリープ現象と考えられるひずみやたわみの増加が認められたため、荷重（通電）10日後からは載荷荷重を150kNに低減し、約2ヶ月間（合計57日間）の荷重制御による静的曲げ載荷試験を行った。

脱塩後の静的曲げ破壊試験は、プレテン桁の変形によって荷重が増加しなくなった最大荷重559kNまで載荷試験を実施した。なお、この最大荷重は、当初設計の曲げ耐力（500kN）以上であった。

2.4 測定項目と測定方法

本試験の測定項目と測定方法は、次のとおりとした。

(1) ひずみ・たわみ（図-3(a)参照）

桁下面コンクリート表面のひずみ測定は無誘導型ひずみゲージを、桁たわみ測定は変位計を用いて行った。

(2) AE（アコースティック・エミッション）計測

載荷試験（連続通電）中に発生する可能性のあるPC鋼材の破断検知等を行うため、たわみ型振動子（圧電素子φ27mm、厚さ0.5mm）を利用して試作したAEセンサと簡易的なAE計測システムを構築し、常時監視による連続的なモニタリングを行った。

AEセンサの取付け位置は、図-3(b)に示すように超音波計測を考慮し、プレテン桁下面（10箇所）と桁端部（2箇所）の合計12箇所とした。なお、載荷試験中のAEによる破断検知等の連続的なモニタリングは、プレテン桁下面のAEセンサ（R0～R9）を用いて行った。

(3) 超音波（伝播時間・速度・波形）計測

現状では桁中のPC鋼材（より線）の付着強度の低下やコンクリート中の変状を計測する手法として、適切な非破壊試験方法が見当たらないため、事前にノイズ対策等の基礎実験を行い、新たな超音波計測システムを構築した。

この超音波計測の特徴は、超音波送受信装置から試作したAEセンサに超音波パルスを入力して超音波を発生させ、他のAEセンサでコンクリート中を伝播してきた超音波の伝播時間（伝播速度）や伝播波形（受信波形）等の特性から、プレテン桁内部の変状の有無を推定するものである。

2.5 計測システムの検討

(1) AE計測システム

1) フィルタの設定

より正確に現象を把握するための基礎実験を通じ、最終的に15kHzのハイパスフィルタに設定した。

2) 簡易型AE計測システムの構築

プレテン桁下面に設置した10個（R0～R9）のAEセンサのどれか1つが、しきい値（20mV/div）を超えた場合にトリガを開始し、自動的に収録する図-4に示すシステムとした。

3) AE発生位置の位置標定

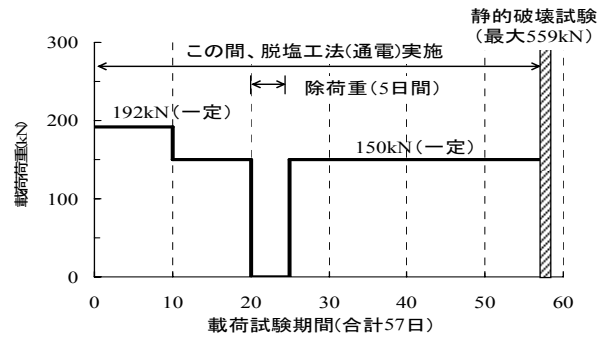
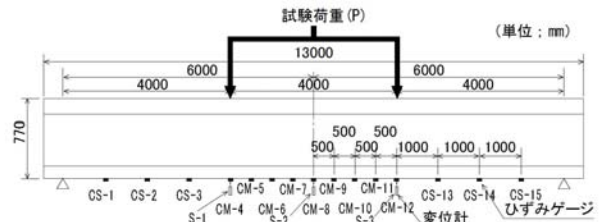
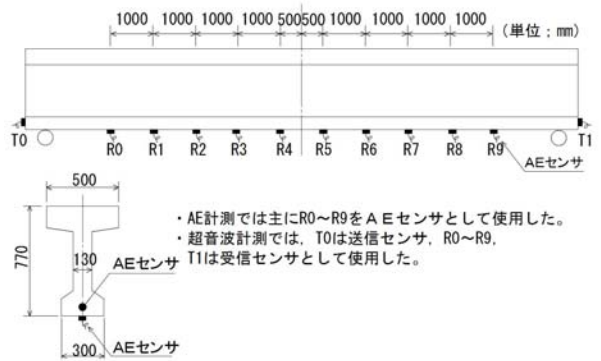


図-2 載荷試験の条件



(a) ひずみおよびたわみの測定位置



(b) AE計測・超音波計測の測定位置

図-3 測定位置

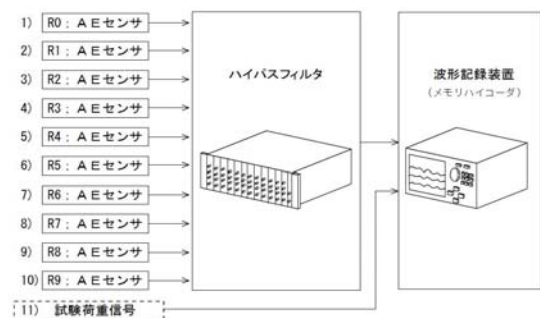
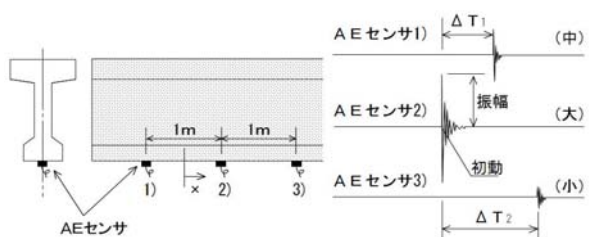


図-4 AE計測システムの構成



(a) AEセンサの配置 (b) AE波形の状況

図-5 AE発生位置の位置標定

AE の位置標定については、AE 波形の伝播時間差と伝播速度から算出することとした。

例えば、図-5 に示すような AE 波形が受信され、計算によって 2 次元位置標定を行う場合は、AE センサ 1) と 2) との伝播時間差を $\Delta T1$ 、伝播速度を V とすると、標定位置 X は下式(1)によって求められる。

$$X = V \cdot \Delta T1 \times 1/2 \quad (1)$$

ここに、 $\Delta T1$; 伝播時間差

V ; AE 波のコンクリート伝播速度

(2) 超音波計測システム

1) 超音波計測システムの構築

プレテン桁内部に生じるノイズ対策のため、超音波装置からの受信信号にフィルタ(バンドパス)を挿入し、図-6 に示すような計測システムを構築した。

2) 計測方法 (透過法、並列法)

図-7 に示すように透過法および並列法による超音波計測を実施した。

3) 受信波形の評価方法

デジタルオシロスコープの画面では、図-8 に見られるような受信波形が観測される。ここで、X 軸方向は時間軸 (sec) を、Y 軸方向は受信波の電圧 (V) を示す。伝播速度(L/T)は、この伝播時間 (T) と伝播距離 (センサ間の距離 ; L) から算出し評価する。

受信波形は、図-8 に示すようにコンクリート部材の劣化程度が超音波の伝播エネルギーの損失度 (受信振幅の減衰) によって表現できるものと考え、その損失度を受信波形の面積を計算することで評価する方法とした。単位は $V \cdot \text{sec}$ となる。

3. 試験結果および考察

一定荷重での載荷試験中および静的曲げ破壊試験時の AE・超音波およびひずみ・たわみ計測結果について述べる。

3.1 載荷試験 (一定荷重下での脱塩工中)

(1) AE 計測

約 2 ヶ月間の載荷試験期間中にプレテン桁から発生した AE 波の受信記録の例を図-9 に示す。AE の検知結果の特徴は、次のとおりであった。

1) AE の発生位置

AE センサ R0~R8 の範囲で AE の発生が認められた。

2) AE の発生状況

載荷試験の経過日数と AE 発生事象との関係を図-10 に示す。この図からもわかるように、コンクリートの微小割れと推定される AE が試験経過日数と共に増加し、累計 30 回の事象が検知された。

以上の定荷重載荷試験後、脱塩工仮設材を全て撤去して AE 発生(累計)の多い位置付近を目視調査した結果、

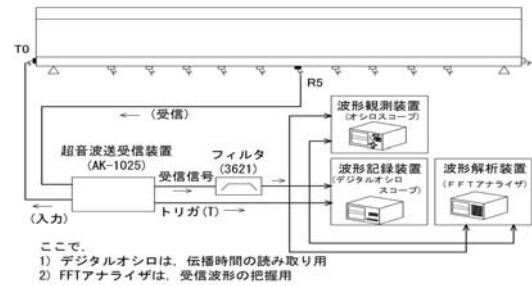
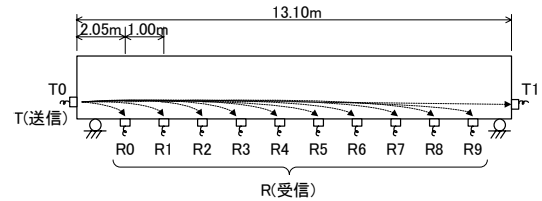
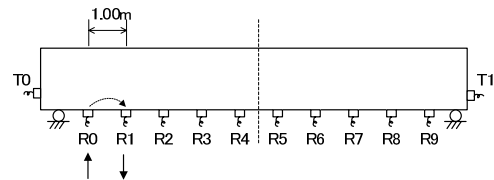


図-6 超音波計測システムの構成



(a) 透過法による計測方法



(b) 並列法による計測方法

図-7 超音波の計測方法

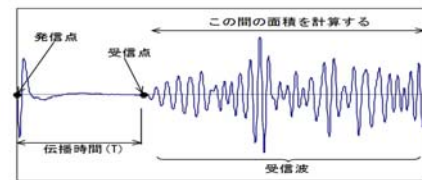


図-8 受信波形の例

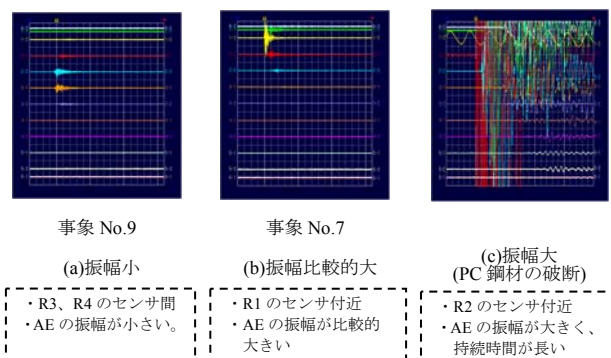


図-9 AE 波の受信記録の例

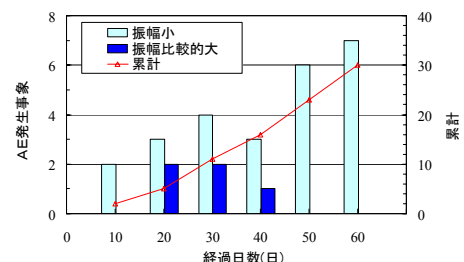


図-10 AE 発生事象と経過日数との関係

新たに微細なひび割れの発生があり、AE 発生位置標定とほぼ一致することがわかった。

(2) 超音波計測

1) 透過法

a. 図-11 に示す走時曲線から、試験前では距離と時間との関係にほぼ比例関係が成り立つが、経過（経時）と共に R3~T1 のセンサ間で伝播時間が長くなる傾向を示しており、コンクリート部材内部で何らかの劣化が進行しているものと考えられる。

b. 図-12 に示す T0 と T1 間 (L=13.10m) での受信波形（面積）の比率によると、コンクリート部材内に AE で検知された微細なひび割れの発生やたわみの増加によって、受信波形が徐々に減衰（約 60%の減少）していく傾向が認められた。これは試験荷重等の影響によるものと推定される。

以上のように、透過法による走時曲線および受信波形の変化から、コンクリート部材内部に微細な何らかの変化、例えば、超音波を減衰させるマイクロクラックの発生³⁾や剛性の低下等が発生しているものと考えられる。

2) 並列法

a. 図-13 に示すように各センサ間（1m 間隔）での超音波の伝播速度は 4566m/s~4762m/s であり、各区間で若干のバラツキを有することが判明した。また、経時変化によると各センサ間の超音波の伝播速度が 2~6%とわずかに低下する傾向が見られた。

b. 各受信波形には、桁断面方向のひび割れ発生等による急激な振幅の減衰（大きな変化）は認められなかった。

以上より、並列法による超音波の伝播速度や受信波形に大きな変化が見られなかったことから、桁下面でのひび割れ（桁断面方向）の発生はないものと判断される。

(3) ひずみ・たわみ

図-14 に示すように、192kN の荷重を載荷した直後からひずみ・たわみの増加（クリープ現象）が認められた。荷重を 150kN に低減すると、ひずみ・たわみ共にほぼ安定した値となり、大きな変化は見られなかった。

3.2 静的曲げ破壊試験

(1) AE 計測

1) AE の発生状況

・ 図-15 に示すように、しきい値を超えて検知された AE の累計は 150 回以上となった。

・ 図-16 に示すように、試験荷重 550kN では R6 センサ付近で、最大荷重 559kN では R2 センサ付近で振幅が大きく、持続時間の長い AE を検知した。特に、図-16(b) の AE 波形は、PC 鋼材の破断による AE 波の特徴と考えられる。

2) AE 発生位置の標定（559kN 時；図-17 参照）

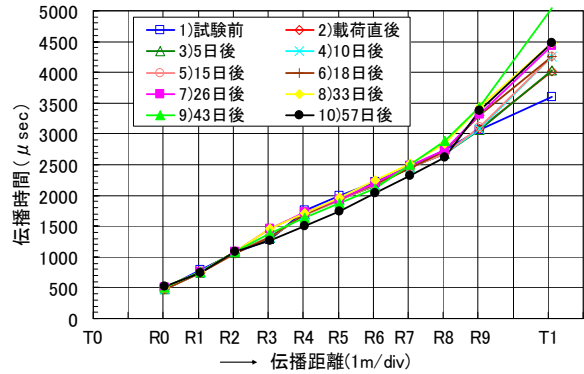


図-11 伝播距離と伝播時間の関係

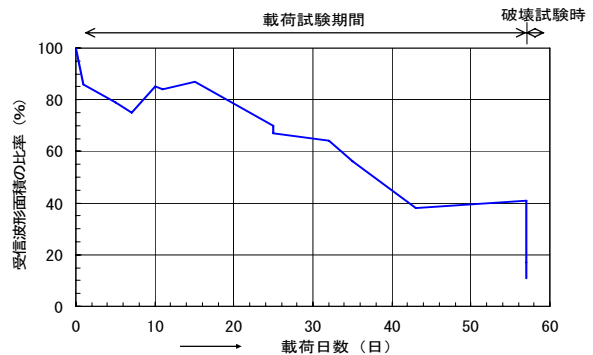


図-12 受信波形面積の経時変化 (T0-T1 間)

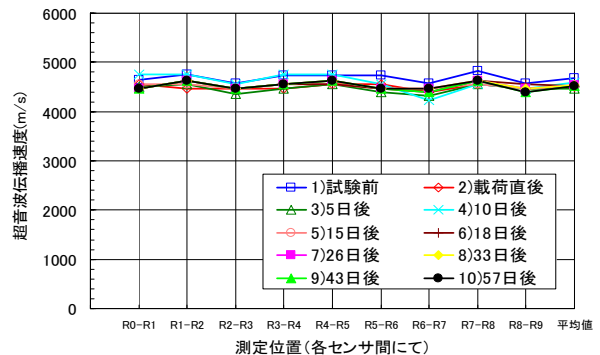
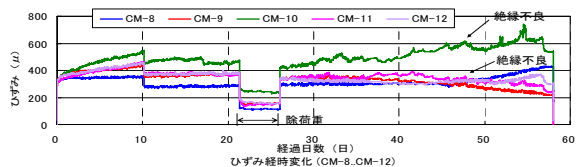
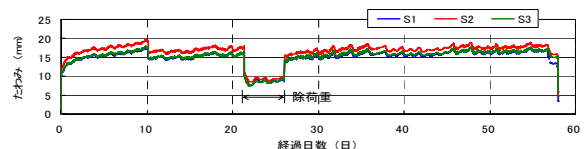


図-13 各センサ間の超音波伝播速度の変化



(a) ひずみ経時変化



(b) たわみ経時変化

図-14 ひずみ・たわみの経時変化

R1 センサのフィルタ故障のため、正確な位置標定は困難であるが、AE の発生箇所を含む AE センサ (R0 と R3) から概略の位置標定を試算した結果は、 $V=4000\text{m/s}$ とした場合には、 $X = 4000\text{m/s} \times 80\mu\text{s} \times 1/2 = 0.16\text{m}$ と推定される。

この位置標定結果は、後述する PC 鋼材のはつり出し調査結果に示すように、PC 鋼材の破断推定位置付近でより線の 1 本に破断が確認され、位置標定結果とほぼ一致することが判明した。

(2) 超音波計測

1) 透過法

<走時曲線>

- ・ 図-18 に示す走時曲線から、目視によるひび割れ発生荷重 (275kN) 載荷時には、R4~T1 センサの区間で超音波の伝播時間が増大する傾向を示し、AE 発生事象の急増した現象とも一致する。
- ・ 559kN 載荷時では、断面方向のひび割れが発生していない T0-R0 センサ間を除き、R1~R9, T1 センサの全区間で伝播時間の大幅な増加が認められた。
- ・ 特に、R2, R6 センサ付近では傾きの変化が大きく、この位置ではせん断ひび割れの増加や PC 鋼線の破断等による影響が現れたのではないかと考えられる。

<受信波形>

- ・ 図-19 に示すように、目視されたひび割れ発生位置の前後 (T0-R3, T0-R4) で受信波形を比較すると、伝播経路にひび割れを含む T0-T4 センサ間に受信波形の大幅な減衰 (面積比率が 45%) が認められた。
- ・ また、破壊荷重 (559kN) では、多数の曲げひび割れ等の発生により、T0-R3 および T0-R4 センサ共に、受信波形が大幅に減衰した。

载荷条件 センサ位置	(a)150kN載荷時 (ひび割れ無し)	(b)275kN載荷時 (ひび割れ発生荷重)	(c)559kN載荷時 (曲げ破壊荷重)
T0-R3間 (L=5.05m)			
1) 伝播速度	3976m/s(100%)	3769m/s(95%)	2275m/s(57%)
2) 受信波形の 面積比率	100%	107%	11%
T0-R4間 (L=6.05m)			
1) 伝播速度	4033m/s(100%)	3580m/s(89%)	2030m/s(50%)
2) 受信波形の 面積比率	100%	45%	6%
備考	・ 図中の縦目盛(V)は100mV/div, 横目盛(H)は、500μs/divを示す。		

図-19 受信波形の例

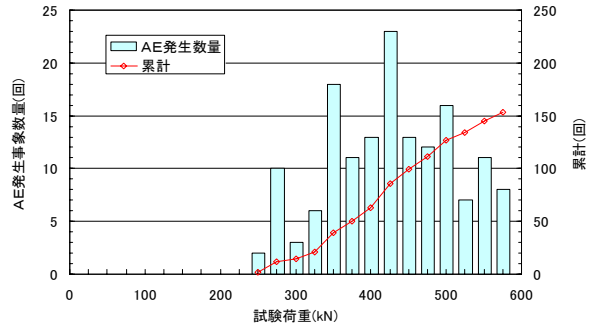


図-15 破壊試験時の AE 検知結果

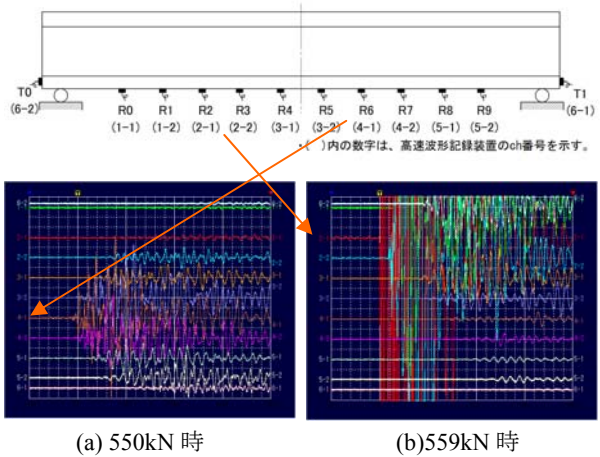


図-16 プレテン桁から発生した AE 波形の例

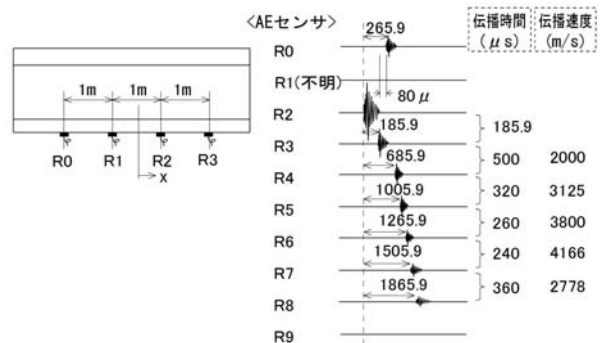


図-17 AE 発生位置の標定 (559kN 時)

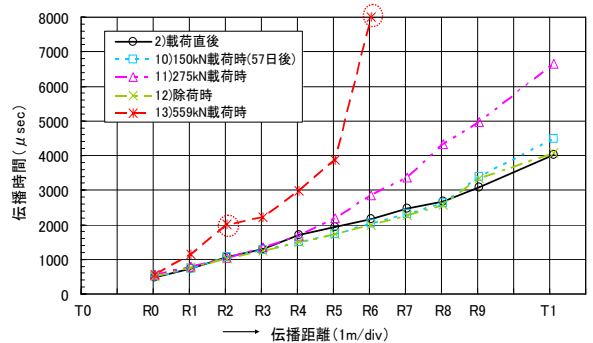


図-18 走時曲線

2) 並列法

<伝播速度>

- ・ 図-20(a) に示すように、荷重試験(57日)後の伝播速度は 4386~4630m/s で、ほとんど変化は認められなかった。
- ・ また、275kN 荷重(ひび割れ発生)時には、曲げ区間(R3~R7)で伝播速度の低下を生じ、目視でひび割れの発生が確認された R3-R4 センサ間では、伝播速度 2941m/s と大幅な速度低下が認められた。ただし、プレテン桁の除荷重時には、導入されているプレストレスによってひび割れが完全に閉じることから、伝播速度に変化は生じなかった。
- ・ 559kN 荷重時の伝播速度は、桁全長に渡り 1087~2252m/s(23~50%)と大幅な速度低下が認められた。

<受信波形>

- ・ 受信波形の比率は、図-20(b)に示すように、559kN 荷重時にはセンサ区間(R1~R8)で 29~58%へ増加し、大幅な振幅の減衰が認められた。
- 以上のことから、プレテン桁に曲げひび割れが発生した場合には、超音波の伝播速度や受信波形に大きな影響を及ぼすことが確認できた。すなわち、伝播速度や受信波形の変化に着目することで、プレテン桁のひび割れ発生等の異常箇所の検出が可能であると考えられる。

(3) PC 鋼材のはつり出し調査

PC 鋼材の破断が AE で推定されたプレテン桁(切断片)を用いて、下フランジコンクリートのはつり調査を行った。その結果、写真-1 に示すように R1-R2 センサ間から約 22cm の位置で、PC 鋼材(より線の 1 本)の破断が確認され、本 AE 計測システムの有効性が検証されたと考えられる。

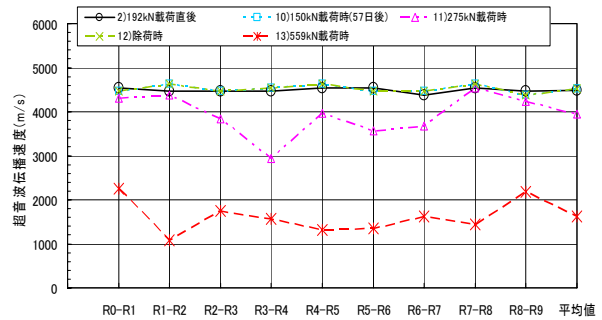
なお、この破断面を調査した結果、この位置では塩分分析のための試料採取が行われており、その時のドリルによる損傷が破断原因となっていることがわかった。

4. まとめ

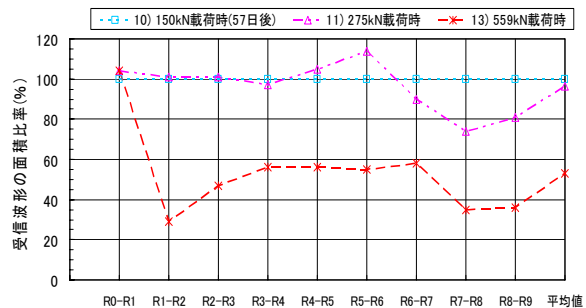
本研究では、独自に考案した簡易 AE 計測システムおよび超音波計測システムを用いて PC コンクリート部材の劣化進行過程での適用性検討を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 簡易 AE 計測システムは、静的曲げ破壊試験の最大荷重付近でのみ PC 鋼材の破断が確認され、システムの有効性が検証された。なお、この PC 鋼材の破断は脱塩工法が影響したものではなかった。
- (2) プレテン桁の劣化進行(健全性)を評価するためには、超音波計測システムによる伝播特性(速度、受信波形)の変化に着目することが有効な手法になりうると思われる。ただし、プレテン桁の除荷時に、

導入されているプレストレスによってひび割れが完全に閉じる場合には、伝播速度に変化は生じない。



(a) 超音波伝播速度の変化



(b) 超音波受信波形の変化

図-20 超音波の伝播速度および受信波形の変化



(a) はつり出し状況

(b) PC 鋼材破断の確認

写真-1 PC 鋼線のはつり出し結果

参考文献

- 1) 野崎喜嗣, 構造物コンクリートの内部評価方法(超音波伝播特性による打継ぎ部の健全度の検討), 日本非破壊検査協会, 資料 No.009-150, pp.147-150, 1999.10
- 2) 友清 剛, 山本浩二, 魚本健人, AE 法による鉄筋コンクリート梁の疲労劣化評価, 日本非破壊検査協会, 資料 No.009-151, pp.151-154, 1999.10
- 3) 鎌田敏郎他, コンクリートのひび割れ方向性と超音波伝播特性に関する基礎的研究, 日本非破壊検査協会, 資料 No.009-153, pp.159-162, 1999.10