

論文 RC 部材の腐食鉄筋中を伝搬する弾性波特性に関する検討

河邊 亮太^{*1}・国枝 稔^{*2}・三浦 泰人^{*3}・中村 光^{*4}

要旨：腐食ひび割れが発生する前までの鉄筋腐食した RC 構造物のモニタリング技術の確立を目指し、RC 部材中の鉄筋の腐食率が変化した場合の弾性波の伝搬速度を求めた。その結果、鉄筋中を伝搬する弾性波の速度が腐食生成物による拘束、ひび割れによる拘束の解放と関係しており、腐食初期の変化を捉えられる可能性を示した。また、NaCl 混入の有り、無し の 2 種類の試験体を屋外に曝露し、衝撃弾性波法及び自然電位・分極抵抗測定による、定期的なモニタリングを実施した。その結果 NaCl を混入していない試験体は伝搬速度が一定であったのに対し、NaCl を混入した試験体では曝露時間に伴う伝搬速度の低下が見られた。

キーワード：鉄筋腐食、弾性波伝搬速度、衝撃弾性波法、自然電位法、分極抵抗法

1. はじめに

コンクリート構造物の鉄筋腐食は軸方向ひび割れが入った段階では目視により腐食が確認できるが、その時点では劣化が進んでいる状態であり、その前の段階の腐食の状態を把握できる技術開発が急務となっている。鉄筋コンクリート中の鋼材の腐食評価に関する既往の研究において、腐食による鉄筋の断面形状の変化に伴う弾性波の伝搬特性の違いを考察したものがある¹⁾。著者らは断面形状の変化の微小な腐食初期段階において、RC 部材中の腐食鉄筋の弾性波伝搬速度が低下することを実験的に明らかにし、それを鉄筋がコンクリートと腐食生成物により拘束を受けたためであると推察した²⁾。既往の研究により、鉄筋中を伝搬する弾性波は拘束のある状態と拘束のない状態では、拘束のある状態の方が伝搬速度が遅くなる(コンクリートの弾性波伝搬速度に近くなる)ことが明らかにされている³⁾。したがって腐食によって弾性波伝搬特性が異なればモニタリングに利用できる可能性がある。

本研究では鉄筋の弾性波伝搬速度が腐食によって変化するメカニズムを検討することを目的として、電食および NaCl を混入し屋外曝露して腐食させた鉄筋および健全な鉄筋に対し、衝撃弾性波法による試験を行い、RC 部材中の鉄筋中を伝搬する弾性波の速度を調査した。鉄筋の伝搬速度を測定することで、鉄筋をはつりだすことなく腐食の状況を把握できるモニタリング手法の構築が

可能となると考えられる。

2. 電食試験体での弾性波伝搬速度

2.1 試験体概要

試験体の概要を図-1 に示す。試験体は D19 のねじ節異形鉄筋を 100mm×100mm×1500mm のコンクリートブロックの中央に配置したものとした。コンクリートの配合を表-1 に示す。使用したコンクリートは粗骨材最大寸法 20mm の普通コンクリートで、セメントには早強ポルトランドセメントを使用した。コンクリートの打設後 2 日にて脱型し、湿布養生を行った。なお、コンクリートは材齢 28 日で圧縮強度 39.7MPa、弾性係数 32.3GPa であった。

電食は材齢 29 日より開始した。電流密度 0.865mA/cm² で一定となるように制御し、腐食程度の制御は通電時間を変えることによって調節した。腐食程度は 0% を含め 5 段階とし、鉄筋の露出部には安全及び腐食防止のため、ビニールテープを巻くことによって絶縁を行った。

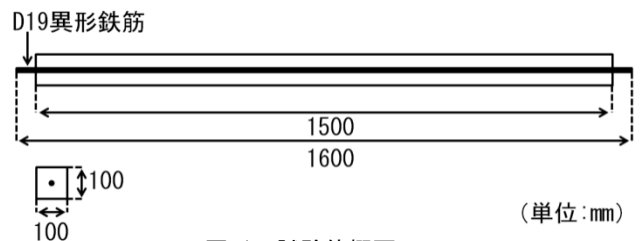


図-1 試験体概要

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
		水	セメント	粗骨材	細骨材	高性能 AE 減水剤
53.5	46.1	180	336	1022	794	3.0

*1 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (学生会員)

*2 岐阜大学 工学部社会基盤工学科教授 博士(工学) (正会員)

*3 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻助教 (正会員)

*4 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻教授 博士(工学) (正会員)



写真-1 試験体上面の腐食ひび割れ性状



写真-2 試験体側面の腐食ひび割れ性状



写真-3 試験体側面の腐食ひび割れ性状

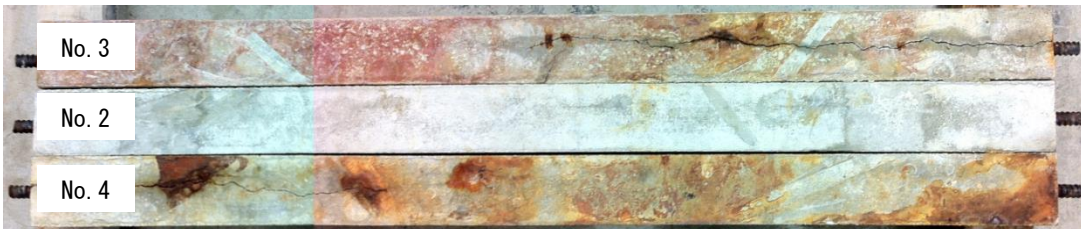


写真-4 試験体底面の腐食ひび割れ性状

表-2 に各試験体の鉄筋の質量減少率を示す。質量減少率は、試験後に取り出した鉄筋の質量と打設前の鉄筋の質量の差から算出した。

写真-1~4 に試験体の腐食ひび割れ性状を示す。No.2 試験体は腐食ひび割れがみられるものの、部分的なものであり、No.3, No.4 のような軸方向に大きく入るひび割れは発生していなかった。

2.2 衝撃弾性波法による試験

2.2.1 試験方法

図-2 に試験概要を示す。鉄筋の弾性波伝搬速度は、コンクリート部に間に挟む形で AE センサを鉄筋側面の 2 か所に配置し、片方のセンサの近傍で弾性波を入力し、センサ間距離を 2 個のセンサにおける弾性波の到達時刻差で除することによって計算した。弾性波の入力は、直径 10mm、質量 4.1g の鋼球を高さ 400mm より自由落下させて衝突させることにより発生する弾性波を用いた。AE センサは共振周波数 150kHz のものを使用し、波形は

表-2 鉄筋の質量減少率(実測値)

試験体名称	質量減少率 (%)
No. 1	0
No. 2	1.9
No. 3	3.3
No. 4	4.4
No. 5	9.7

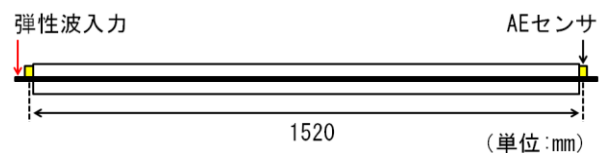


図-2 試験概要

サンプリングレート 1MS/s で収録した。検出された AE 信号はプリアンプ 40dB で増幅させ、しきい値は 35dB とした。また、ノイズを除去するため、ハイパスフィルタとローパスフィルタを組み合わせ、5kHz-400kHz のバンドパスフィルタを使用した。

試験は試験体を水槽から取り出し、屋内にて静置し、十分乾燥させた状態で行った。

2.2.2 弾性波到達時刻の算定方法

計測結果として得られる弾性波の到達時刻は前述のしきい値 35dB を超えた時間と定義されており、機器が判定したしきい値から、時刻をさかのぼった際に、さらに小さなしきい値に対して最も早く到達した振幅をもとに判定した。図-3 に補正概要を示す。横軸は計測機器が記録した到達時刻を原点とした場合の時間を示し、縦軸は弾性波の振幅を示している。なお、横軸に平行な赤い線はしきい値の値である。(a) は打点側センサの波形を拡大したものであり、急激に立ち上がりを示す点を到達時刻と定義した。(b) はコンクリートを挟んだ反対側のセンサの波形であり、横軸の原点以前にしきい値以下の振幅を持つ波が複数記録されていることがわかる。そこでしきい値を超える以前に目視にて確認された微小な振幅の波の立ち上がり点を到達時刻と定義した。

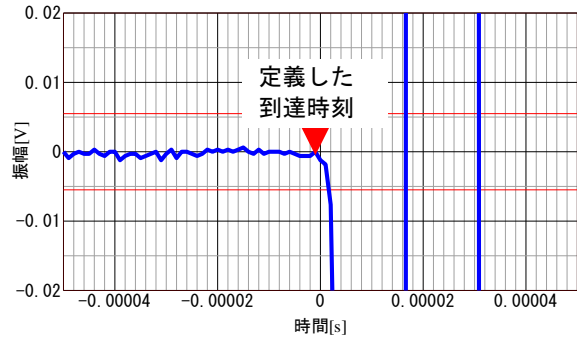
2.3 実験結果

質量減少率と弾性波伝搬速度の関係を図-4 に示す。弾性波の入力は各供試体 10 回ずつとし、グラフのプロットは各入力での計測値である。なお、同一の計測条件で算出した鉄筋単体の弾性波伝搬速度は 5208m/s であり、既往の研究⁴⁾からコンクリートの弾性波伝搬速度は 4000m/s 程度と仮定している。図より腐食初期段階では、弾性波伝搬速度が顕著に小さくなっていることがわかる。その後、質量減少率が増加することによって速度の上昇が見られた。これは腐食の初期段階では腐食生成物により、コンクリートと鉄筋の付着が強くなり⁵⁾、鉄筋への拘束力が強まったため伝搬速度が低下し、腐食の進行によりひび割れが進展し、拘束が弱くなることで伝搬速度が大きくなったと推察される。また本試験においては、質量減少率 3.3% 以降は速度変化が見られず、ひび割れの進行後の腐食程度の検出は困難であることから、弾性波伝搬速度を用いた鉄筋の腐食評価は腐食初期段階までが適用範囲となる可能性が高いと判断できる。

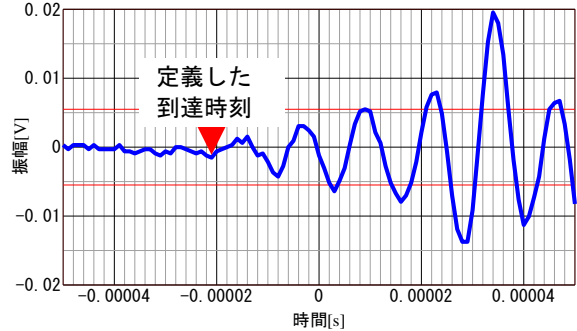
3. 屋外曝露試験体での弾性波伝搬速度

3.1 試験体概要

前章までの結果を踏まえ、実構造物の腐食劣化を模擬するために、屋外曝露により鉄筋を腐食させた試験体に対する弾性波伝搬速度および自然電位・分極抵抗の計測を行った。



(a) 弾性波入力側センサの補正



(b) コンクリート反対側センサの補正

図-3 弾性波到達時間補正概要

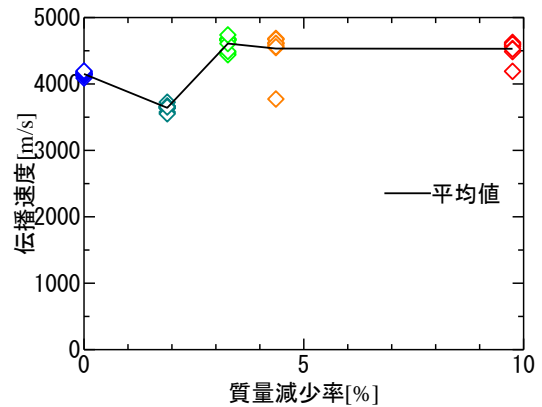


図-4 伝搬速度-質量減少率関係

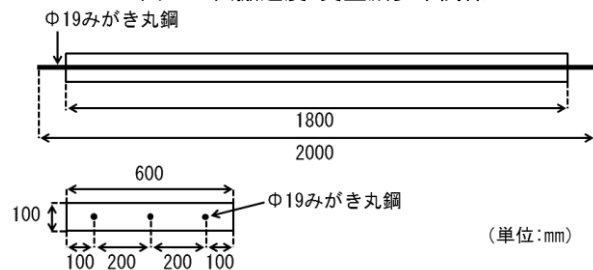


図-5 試験体概要

図-5 に試験体概要を示す。試験体は 600mm×100mm×1800mm のコンクリートに直径 19mm のみがき丸鋼を 3 本配置したものである。

コンクリートの配合を表-3 に示す。試験体は 2 体作製し、うち 1 体は腐食を促進させるために NaCl を 1.2kg/m³ 混入させた。コンクリートは材齢 14 日で NaCl 未混入のものは圧縮強度 24.8MPa、弾性係数 22.2GPa、NaCl 混入のものは圧縮強度 24.0MPa、弾性係数 22.9GPa であった。

表-3 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
		水	セメント	細骨材	粗骨材
60.0	54.1	175	292	929	786

材齢 14 日で弾性波伝搬速度, 自然電位, 分極抵抗の初期値を測定し, その後屋外に曝露した。

その後は 1 か月ごとに定期的なモニタリングを実施した。

弾性波伝搬特性を把握する試験体とは別に, 腐食状況を確認するための小型試験体も作製した。図-6 に試験体の概要を示す。試験体は 100mm×100mm×100mm のコンクリートに直径 19mm のみがき丸鋼を 1 本配置した。コンクリートから露出している鉄筋はシリコンを用いて被覆した。コンクリートの配合は表-3 に準じ, 腐食を促進させるために NaCl を 1.2kg/m³ を混和した試験体と混和していない 2 種類を作製した。材齢 14 日で屋外曝露を開始した。

3.2 試験概要

図-7 に試験概要を示す。鉄筋の弾性波伝搬速度は, コンクリート部に間に挟む形で AE センサを鉄筋側面の 2 か所に配置し, 片方のセンサの近傍で弾性波を入力し, センサ間距離を 2 個のセンサにおける弾性波の到達時間差で除することによって計算した。試験体は試験前日に屋内に搬入し, 600mm×450mm の木板を両端部に枕木として設置した。

弾性波の計測パターンを表-4 に示す。パターン 1 およびパターン 2 は AE センサの種類による検討を行うものであり, それぞれ共振周波数 150kHz のセンサと, 一般に衝撃弾性波法では数 10kHz の周波数が入力されることから⁶⁾, より低い周波数で感度の良い共振周波数 60kHz のセンサを使用し, 弾性波の入力は直径 10mm, 質量 4.1g の鋼球を 400mm の高さからガイドパイプを通して自由落下させて衝突させることにより発生する弾性波を用いた。パターン 3 は曝露開始 2 ヶ月目より実施し, よりエネルギーが大きく低い周波数を入力するため直径 20mm, 質量 32.6g の鋼球を 400mm のガイドパイプを通して自由落下させて衝突させることにより発生する弾性波を用い,

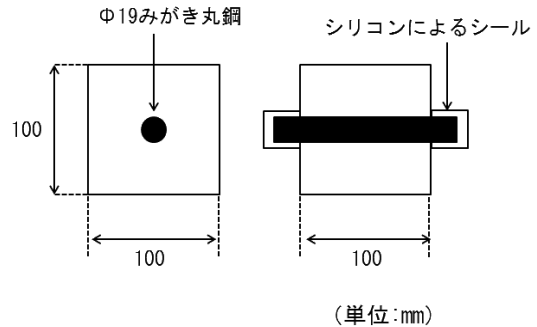


図-6 小型試験体概要

共振周波数 60kHz のセンサで検出した。検出された AE 信号はパターン 1 とパターン 2 はプリアンプ 40dB で増幅し, パターン 3 では 60dB で増幅した。全ての計測パターンにおいてしきい値は 35dB とし, 波形はサンプリングレート 1MS/s で収録した。また, 周辺雑音を除去するため, ハイパスフィルタとローパスフィルタを組み合わせ 5kHz-400kHz のバンドパスフィルタを使用した。

自然電位, 分極抵抗の計測位置を図-8 に示す。自然電位及び分極抵抗は各鉄筋に対し 3 か所で計測を行った。また曝露より 4, 9, 12 ヶ月後, 小型試験体を切断し, 鉄筋の腐食性状の確認を実施した。

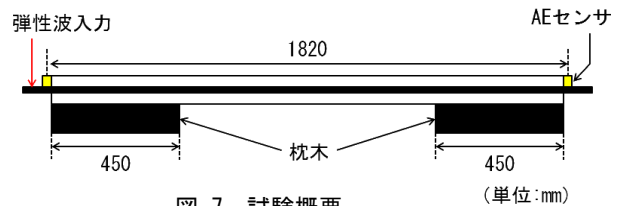


図-7 試験概要

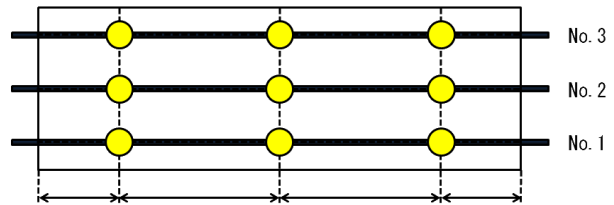


図-8 自然電位・分極抵抗計測位置

表-4 計測パターン

	パターン 1	パターン 2	パターン 3
センサ共振周波数	150kHz		60kHz
弾性波入力源	Φ10mm, 質量 4.1g の鋼球を 高さ 400mm から自由落下		Φ20mm, 質量 32.6g の鋼球を 高さ 400mm から自由落下
プリアンプ	40dB		60dB

3.3 実験結果

曝露時間と弾性波伝搬速度の結果を図-9に示す。弾性波の入力は20回行い、弾性波の到達時刻は計測機器により記録したものをを用いた。計測された結果は図-3のように、コンクリート反対側センサの波形において、しきい値を超える以前に波が存在する場合は、見かけ上速度が著しく小さくなってしまいうため、特異的な値を取るデータを削除した後、速度の大きいものから10個分のデータの平均値を利用した。グラフより、全パターンにおいてNaClを混入していない試験体は伝搬速度がほぼ一定の値であるのに対し、NaClを混入した試験体では曝露3ヶ月目より伝搬速度が低下傾向にあると判断できる。これはNaClを混入した試験体では腐食が開始し、腐食生成物による鉄筋への拘束力が強まったため伝搬速度が低下したためであると推察される。また速度の平均値はパターン1,2,3の順に大きくなっていることが確認できる。これはパターン1,2に関しては低周波数で感度の良い共振周波数60kHzのセンサがコンクリート反対側の波の立ち上がりをより敏感にとらえ、パターン3に関してはより減衰の小さい計測条件であるため波の立ち上がりが鋭

敏になっているためであると推察される。

曝露時間と自然電位・分極抵抗の関係をそれぞれ図-10, 11に示す。グラフより分極抵抗値は両試験体で有意な差は見られないものの、値としては非常に小さく腐食しやすい状態であると判断できる。自然電位に関しては曝露3ヶ月までNaCl混入の差異がないが、4ヶ月以降はNaClを混入していない試験体ではほぼ一定値であるのに対し、NaClを混入した試験体において自然電位の低下傾向が見られた。これは、図-9の弾性波伝搬速度の傾向と一致しており、自然電位法と同様の腐食初期段階の評価を、弾性波伝搬速度を用いて行うことができる可能性が示されたといえる。

写真-5に曝露4, 9, 12ヶ月に切断した小型試験体の鉄筋性状を示す。曝露4ヶ月ではどちらも腐食が見られなかったが、9ヶ月, 12ヶ月においてはNaClを混入したもので端部から中心部へと進行していく腐食が確認された。したがって、現段階は環境により鉄筋が腐食し始める、腐食開始段階であると推察される。

3.4 計測結果と気温との関係

図-9の弾性波伝搬速度結果では、NaClを混入した試

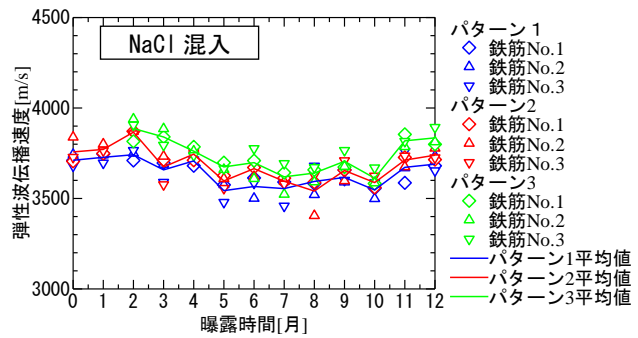
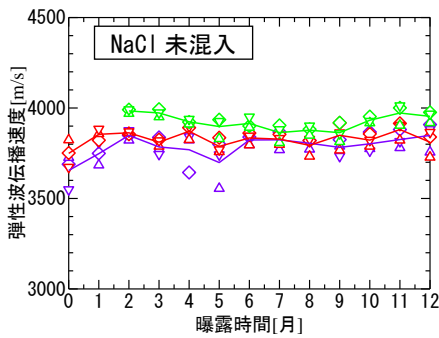


図-9 弾性波伝搬速度の推移

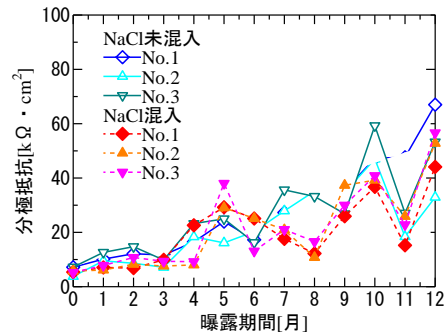
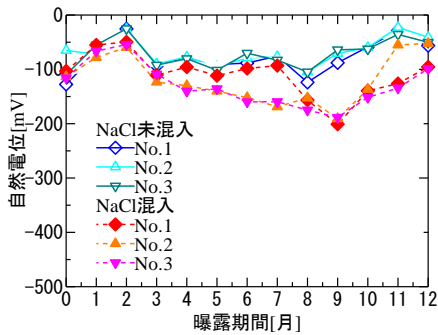
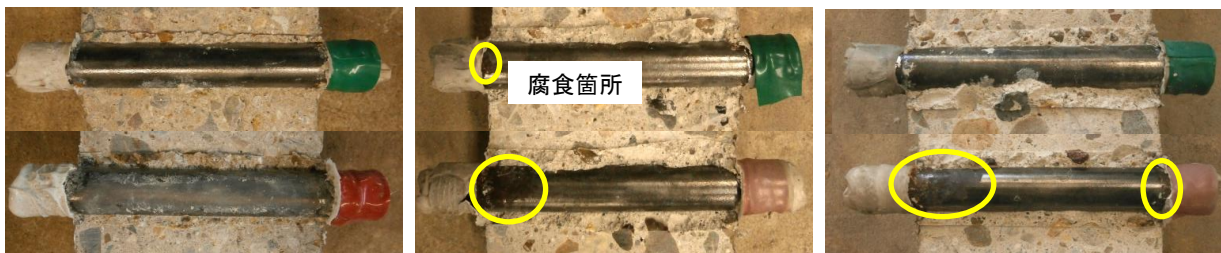


図-10 自然電位の推移

図-11 分極抵抗の推移



(a) 曝露4ヶ月

(b) 曝露9ヶ月

(c) 曝露12ヶ月

写真-5 小型試験体の鉄筋性状(下がNaCl混入試験体)

験体で曝露から 11 カ月以降、弾性波伝搬速度の上昇が見られている。また自然電位法においても曝露 9 ヶ月以降は健全側に推移していることから、計測時の環境、特に気温が計測結果に影響を与えている可能性を考慮し、実験による検討を行った。

図-12 に曝露期間と計測時の気温を示す。図-9 の伝搬速度結果を比較すると、NaCl 未混入の試験体では気温との関連性がほとんどないものの、NaCl を混入した試験体では、気温 20℃を下回った時点より伝搬速度が上昇していると判断できる。図-10 の自然電位の結果は NaCl 混入の有無に関わらず、気温の低下に伴って上昇する傾向にあった。自然電位は気温により変化することが知られており⁷⁾、気温が弾性波伝搬速度に関しても影響を与えるかどうかを確認するための試験を行った。

曝露から 12 ヶ月経過した試験体を室温 20℃の恒温室内に 2 日間静置した後に、弾性波伝搬速度を計測し、図-9 の 12 ヶ月目の計測結果と比較を行った。試験条件及び計測パターンはそれぞれ図-7、表-4 と同様のものを用いた。

弾性波伝搬速度の計測結果を図-13 に示す。グラフより、NaCl 未混入の試験体では気温によらず一定値であるのに対し、NaCl を混入した試験体では全パターンにおいて低下傾向が見られた。このことから材料自体の弾性波伝搬速度は温度による影響を受けず、腐食生成物存在下では鉄筋への拘束力に対し、温度が影響を与えていると推察できる。なお、そのメカニズムについては現段階では不明であり、今後の検討が課題である。

4. 結論

本研究はコンクリート構造物中の鉄筋の腐食を早期に診断する技術を確認するため、RC 部材中の鉄筋に対し弾性波伝搬速度を計測し、腐食との関係を考察した。以下に本研究で明らかになった点を示す。

- 鉄筋の弾性波伝搬速度は腐食初期段階において低下し、さらに腐食ひび割れが生じるまで腐食が進行すると上昇することがわかった。これは腐食初期段階では鉄筋に対する拘束が強まるのに対し、腐食が進行し、ひび割れが進展することにより拘束が解放されるためであると推察される。
- 屋外に曝露した試験体中の鉄筋を伝搬する弾性波の速度が曝露期間の増加にしたがい低下することが確認された。これは自然電位の推移と同様の傾向を示しており、弾性波伝搬速度が自然電位法と同様に腐食の初期段階の評価に利用できる可能性が示された。
また計測時の気温により、NaCl を混入していない試験体では伝搬速度に変化がないのに対し、NaCl を混入した試験体において伝搬速度が変化することが

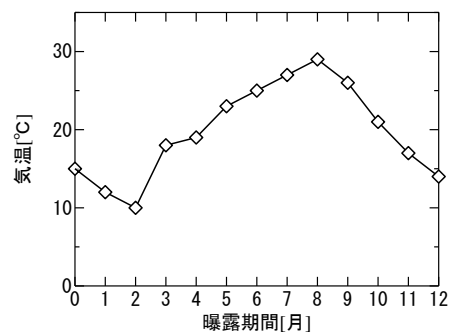


図-12 計測時の気温

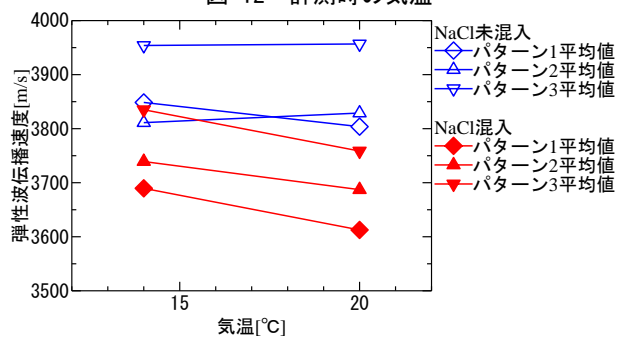


図-13 気温による弾性波伝搬速度の変化

明らかとなった。

参考文献

- 林隆浩, 山田和夫, 阿部秋男, 桃木佳子: 腐食した鉄筋内部の弾性波動伝播特性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.15, No.1, pp.649-654, 1993.6
- 河邊亮太, 国枝稔, 上田尚史, 中村光: AE 法を用いた腐食鉄筋の付着挙動の評価に関する研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集第, Vol.12, pp.369-374, 2012.11
- 鎌田敏郎, 浅野雅則, 国枝泰祐, 国枝稔, 六郷恵哲: 弾性波特性パラメータを用いた PC グラウト充填評価手法, 土木学会論文集, Vol.61, No.746, pp.25-39, 2003.11
- 岩野聡史, 森濱和正, 極檀邦夫, 境友昭: 弾性波速度の測定によるコンクリートの圧縮強度の推定, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.1, pp.1637-1642, 2003.6
- 土木学会: 材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造的な性能, コンクリート技術シリーズ 71, pp.24-27, 2008
- 日本コンクリート工学会: コンクリート診断技術'12 基礎編, pp.110, 2012
- 土木学会: コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会(338 委員会)成果報告書(その 2) およびシンポジウム論文集, コンクリート技術シリーズ 99, pp.130-133, 2012