

論文 温度履歴養生条件の違いが硬化過程におけるモルタルの弾性波伝搬特性に及ぼす影響

長島 裕丈^{*1}・大野 健太郎^{*2}・上野 敦^{*2} 鎌田 知久^{*3}

要旨：蒸気養生を伴うプレキャストコンクリートでは、適切な前養生時間の確保と最高温度保持工程以降におけるコンクリート表層部の乾燥抑制の必要性が指摘されている。本研究では温度履歴養生条件の異なるモルタルの接水から 24 時間までの組織形成過程について埋設鉄筋を介した超音波法および AE 法にて考察した。その結果、モルタルの硬化に伴い鉄筋と良好な付着が実現すると、超音波伝搬速度は材齢経過とともに低下することが確認された。また、AE 法の結果から、養生槽内とモルタルの温度差によるモルタル内外のひずみ差に起因する AE は、モルタル組織に悪影響を及ぼす要因である可能性が示唆された。

キーワード：モルタル, 温度履歴養生, 圧縮強度, 超音波伝搬速度, AE ヒット数, AE 源位置標定

1. はじめに

近年の建設業の労働力不足を背景に、プレキャストコンクリートの利用拡大がますます期待されている。多くのプレキャストコンクリートには、一貫した品質管理が行われる工場で、型枠の稼働率を向上させるために早期脱型を目的とした蒸気養生が行われている。その特徴として、品質が安定していること、工期短縮や省力化が可能なことなどの長所が挙げられる¹⁾。一方、蒸気養生による給熱を受ける前のコンクリートの組織が熱作用で生じる応力に耐えうる状態にないと、脱型後の細孔構造が粗大化すること²⁾、また、コンクリートの温度が水和熱の影響で養生槽内よりも高くなり、コンクリートからの水分逸散による乾燥が引き起こされ、材齢 28 日における強度が低下すること³⁾が確認されている。そのため、前養生時間を貫入抵抗値 3.5N/mm^2 となる凝結始発時間まで確保すること²⁾、最高温度保持工程から降温工程にかけてコンクリート表層部の乾燥抑制のための散水の有効性が指摘されている³⁾。しかしながら、蒸気養生中に刻々と変化するコンクリートの組織形成過程への前養生の有無による影響やコンクリートの物理的特性を直接捉えた研究は少なく、不明確な部分が多い。

以上の背景を踏まえ、本研究では蒸気養生を模擬した温度履歴を受けるモルタルを対象に超音波法およびアコースティック・エミッション (AE) 法を適用し、フレッシュな状態から硬化に至るモルタルの物理的特性を直接捉えることを目的とした。超音波法では、鉄筋を伝搬する超音波速度の推移から鉄筋とモルタルの付着状態に基づいたモルタルの組織変化を分析した。また、微細ひび割れ形成時や固体間の接触および摩擦などが要因となり

放出される微小な弾性波を AE 法により検出し、温度履歴養生中の鉄筋とモルタルの界面の状態変化や界面組織への影響を考察した。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびモルタルの配合

使用材料を表-1に、モルタルの配合を表-2に示す。セメントには普通ポルトランドセメント、細骨材には JIS R 5201 に規定されているセメント強さ試験用標準砂を使用し、水セメント比 50% のモルタルを作製した。

2.2 養生条件

図-1 に蒸気養生を模擬した温度履歴養生工程を示す。養生工程は既往の研究²⁾を参考とし、昇温速度 20°C/h 、最高温度 65°C 、最高温度保持時間 3 時間、降温速度 15°C/h とした。また、セメントと水が接してから昇温を開始するまでの時間を前養生とし、モルタルの練混ぜ、打込み、締固め、超音波法および AE 法の計測準備に要する時間として 60 分を含んでいる。養生条件は、接水後 20°C 一定の気温で封かん養生し、温度履歴を与えない CONST、前養生時間を 60 分のみとし、その後昇温を開始した

表-1 使用材料

材料	記号	詳細	密度
水	W	上水道水	1.00g/cm^3
セメント	C	普通ポルトランドセメント	3.16g/cm^3
細骨材	S	セメント強さ試験用標準砂	2.64g/cm^3

表-2 モルタルの配合

W/C (%)	単位量(kg/m^3)		
	W	C	S
50	256	512	1536

*1 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科都市基盤環境学域 (学生会員)

*2 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科都市基盤環境学域 准教授 (正会員)

*3 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科都市基盤環境学域 助教 (正会員)

STEAM-P0, JIS A 1147 に準拠した貫入抵抗値が 3.5N/mm² になるまで 20℃一定の前養生を 355 分確保し、その後昇温を開始した STEAM-P3.5 の 3 水準とした。全ての供試体は材齢 24 時間まで温度管理機能を有する養生槽内で養生し、その後は 20℃、60%R.H.の恒温恒湿室にて封かん養生した。

2.3 温度履歴養生中の測定項目

(1) 超音波法

図-2 に超音波法および AE 法に用いた供試体概要を示す。内寸 190×190×195mm のアクリル製の型枠に、型枠底面から鉄筋中心までの距離を 50mm として鉄筋 (D16) を固定し、高さ 100mm までモルタルを打ち込んだ。AE センサ (60kHz 共振型) を鉄筋に接着し、鉄筋を伝わる超音波速度を接水 1 時間後から 24 時間測定した。超音波の入力は振幅値を 15V、信号継続時間を 10μs とした矩形波を AE センサに作用させて鉄筋に入力した。検出信号は、プリアンプにて 60dB 増幅し、1 波形をサンプリング時間間隔 0.1μs で記録した。また、温度履歴を与える養生条件 STEAM-P0 と STEAM-P3.5 については、モルタルを打ち込んでいない状態での超音波伝搬速度を測定した (empty)。なお、鉄筋とモルタルの付着が良好となると予想される CONST の供試体については、組織が十分に成長した時の基準値として材齢 28 日における超音波伝搬速度を測定した。

(2) AE 法

図-2 に示す供試体を超音波計測用とは別に作製し、AE の計測を実施した。AE 法においては、鉄筋に接着したセンサに加え型枠にも 2 つ接着し、鉄筋貼付センサでは鉄筋とモルタル界面から生じると予想される AE 信号を、型枠貼付センサではモルタル自体の組織変化による AE 信号の取得を目的として計測した。AE 計測では、共振周波数 60kHz の AE センサを使用し、検出信号をプリアンプにて 40dB 増幅し、閾値を 35dB とした。また、1 波形をサンプリング時間間隔 0.33μs として記録した。

(3) 温度

各条件の温度履歴養生中のモルタルの温度、鉄筋の温度および温度履歴養生槽内の温度を測定した。図-2 に示すように、超音波計測用供試体に T 熱電対をモルタル中心 (MC)、鉄筋中心 (RC)、モルタル表層 (MO) および鉄筋表層 (RO) にそれぞれ配置した。測定は接水 60 分後から材齢 24 時間まで実施した。

2.4 試験項目

(1) 圧縮強度

養生条件ごとに JSCE-G 505 に準拠して φ50×100mm の円柱供試体の圧縮強度を測定した。試験材齢は 1 日および 28 日とし、接水後 24 時間は温度管理機能を有する養生槽内で養生を行い、その後は 20℃、60%R.H.の恒温

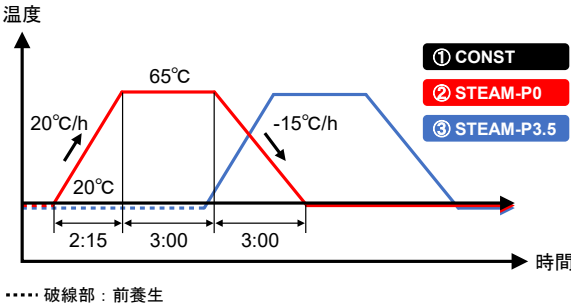


図-1 温度履歴養生工程

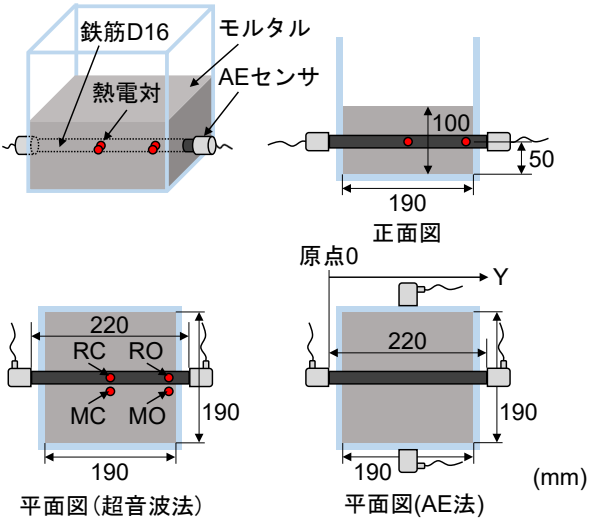


図-2 供試体概要とセンサ配置

表-3 圧縮強度および静弾性係数の結果

養生条件	圧縮強度 (N/mm ²)		静弾性係数 (kN/mm ²)	
	材齢1日	材齢28日	材齢1日	材齢28日
CONST	7.7	60.6	14.4	35.4
STEAM-P0	19.7	48.7	21.9	33.3
STEAM-P3.5	23.0	51.1	23.1	33.3

恒湿室で封かん養生した。

(2) 静弾性係数

圧縮強度試験と同じ供試体を用いて、材齢 1 日および材齢 28 日において JIS A 1149 に準拠した静弾性係数試験を実施した。

3. 結果および考察

3.1 圧縮強度および静弾性係数

表-3 に各養生条件の材齢 1 日および材齢 28 日の圧縮強度および静弾性係数を示す。材齢 1 日においては温度履歴養生を行った STEAM-P0 および STEAM-P3.5 の圧縮強度および静弾性係数が CONST よりも高い。材齢 28 日においては、STEAM-P0 の圧縮強度および静弾性係数は CONST と比較して低く、STEAM-P3.5 は STEAM-P0 よりも高い。よって、モルタル組織がある程度成長す

るまでの時間，すなわち貫入抵抗値が 3.5N/mm^2 となるまでの時間を確保することでその後の温度履歴養生の効果を引き出せることが改めて確認された。

3.2 超音波伝搬速度

図-3 に各養生条件の鉄筋の超音波伝搬速度と温度の関係を示す。なお、図-3 (a) および (b) では測定温度に何らかのノイズが混入した影響を受けデータの一部が点在している。図-3 (a) の 20°C で封かん養生した CONST の超音波伝搬速度は、黒点線で示す貫入抵抗値が 3.5N/mm^2 となる凝結始発時間までは約 5450m/s であるが、その後から速度は低下し、接水 24 時間後には約 5330m/s となった。このことから、凝結始発時間は水和の誘導期から C_3S の反応へ移行を開始する時期に相当し、モルタルの硬化が進むに伴い、鉄筋との付着特性が向上するタイミングと考えられる。コンクリートと鉄筋の二相からなる複合材料の弾性波伝搬モデルは、Chung が提案している⁴⁾ように、図-4 のように考えることができる。すなわち、鉄筋の周囲にモルタルが付着していくと、両者の接点における波動変位は等しくなくてはならないことから、接点での超音波伝搬速度も等しくなることが報告されている⁵⁾。接水直後のモルタルがフレッシュな状態では強度発現していないため鉄筋との付着が弱く、鉄筋の超音波伝搬速度へのモルタルの影響は小さいと考えられるが、凝結始発時間以降に硬化が進み、鉄筋とモルタルの付着が強固になると、鉄筋の超音波伝搬速度はモルタル側に引き寄せられ、低下するものと考えられる。

接水 60 分後に昇温工程を開始した STEAM-P0 は、最高温度保持工程が開始した接水後約 200 分から CONST と比較してモルタルを伝搬する超音波速度が急低下している (図-3 (b))。これは、昇温により急速に水和物が生成され、モルタルの鉄筋への付着が強固になったことが考えられる。その後、降温工程途中から約 50m/s 上昇し、材齢 24 時間で 5300m/s となった。ここで、図中に赤で示した empty の結果から、モルタルを打ち込んでいない場合でも昇温工程から最高温度保持工程にかけて速度が 50m/s 程度低下し、最高温度保持工程から降温工程にかけて約 50m/s 程度上昇する挙動を示している。この挙動の要因は現段階では不明のため今後の検討項目とする。

次に、図-3 (c) の貫入抵抗値が 3.5N/mm^2 となるまでの前養生時間を確保した STEAM-P3.5 では、昇温工程が開始するタイミングからモルタルの超音波伝搬速度が低下し始めている。その後、STEAM-P0 と同様に降温工程途中で速度が上昇する傾向がみられる。しかし、その上昇幅は約 20m/s と STEAM-P0 と比較して小さい。これは、モルタルの水和に伴う鉄筋周りの付着による速度低下が要因となり、前養生時間を長く確保した STEAM-P3.5 では SETAM-P0 よりも良好な水和反応が継続したためモル

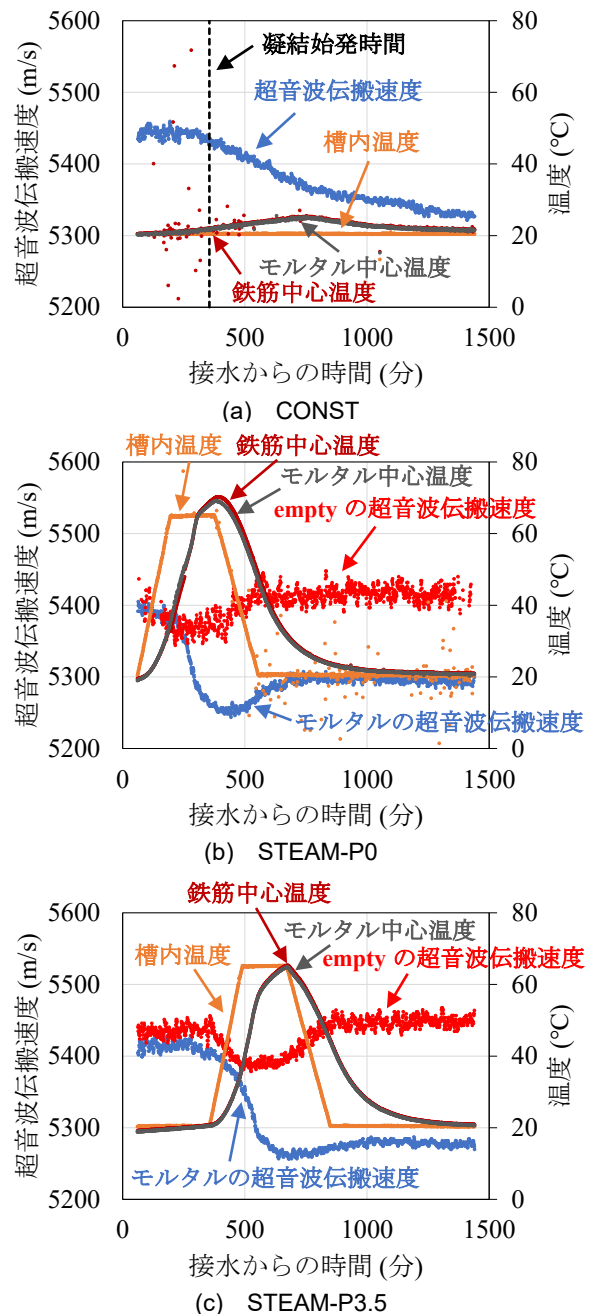


図-3 超音波伝搬速度と温度の関係

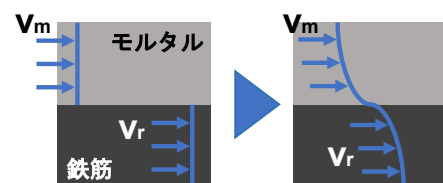


図-4 複合材料の弾性波伝搬モデル⁵⁾

タルの付着がより強固となり、結果的に速度の上昇幅が小さくなった可能性が考えられる。ここで、材齢 1 日における圧縮強度は表-3 より $\text{CONST} < \text{STEAM-P0} < \text{STEAM-P3.5}$ の順である。材齢 24 時間後の鉄筋を伝わる超音波伝搬速度は圧縮強度が高いほど低い。また、付着特性が高いと考えられる CONST の材齢 28 日における超

音波伝搬速度は約 5270m/s であり，材齢 24 時間から約 60m/s 低下しており，他条件についてもモルタルの強度が高まることで鉄筋の超音波伝搬速度が低くなる可能性が推察される。よって，鉄筋とモルタルの付着強度とモルタル組織そのものの強度には相関関係があり，材齢が経過し強度が高まるにつれ鉄筋の超音波伝搬速度が低くなり，モルタルの付着特性は高くなると考えられる。

3.3 AE ヒット数

図-5 に各養生条件の 1 分間当たりの AE ヒット数と温度の関係を示す。なお，モルタル中心温度 (MC) から養生槽内温度を引いた値をモルタル中心温度差，モルタル表層温度 (MO) から養生槽内温度を引いた値をモルタル表層温度差として示している。図-5 (a) の CONST では，鉄筋に接着したセンサおよび型枠に接着したセンサともに毎分数個程度の AE 信号が検出された。一方，温度履歴養生を行った STEAM-P0 および STEAM-P3.5 (図-5 (b) と (c)) の 1 分間当たりの AE ヒット数は降温工程以降で急激に増加しており，鉄筋に接着したセンサからはいずれも最大で毎分約 600 個検出された。また，型枠に接着したセンサが検出した AE ヒット数に着目すると，STEAM-P0 では最大で毎分約 250 個，STEAM-P3.5 では STEAM-P0 よりも少ない毎分 200 個程度が降温工程終了後に発生している。また，STEAM-P0 の接水後約 550 分で槽内とモルタル中心部および表層の最大温度差はそれぞれ約 27℃，約 25℃，STEAM-P3.5 は接水後約 850 分で槽内とモルタル中心部および表層の最大温度差はそれぞれ約 24℃，約 21℃と STEAM-P3.5 の方がいずれも温度差が小さい。これは，STEAM-P3.5 では，前養生時間を水和の誘導期と呼ばれる接水から 2～3 時間より長く確保した後に昇温を行ったため，C₃S の水和加速を後押しする形で昇温による熱エネルギーを与えることができ，その後の水和減速期と降温工程が重なったことが考えられる。しかし，STEAM-P0 では，前養生時間が不十分であったため，降温工程時のモルタル組織の水和発熱による温度上昇が STEAM-P3.5 よりも活発であったため，モルタル中心温度差およびモルタル表層温度差が大きくなったと推察される。よって，本研究の降温工程終了時において型枠に接着したセンサが検出した AE は，養生槽内とモルタル中心および表層の温度差によるモルタル内外のひずみ差に起因する事象を捉えている可能性が考えられる。また，鉄筋に接着したセンサが検出した AE は，型枠に接着したセンサが検出した AE ヒット数を大きく上回っていることから，モルタル内外のひずみ差に加えて鉄筋とモルタル間の収縮時に発生したひずみ差による事象を検出している可能性が考えられる。

次に，型枠に貼付した AE センサの累積 AE ヒット数と表-3 に示した材齢 1 日および材齢 28 日における圧

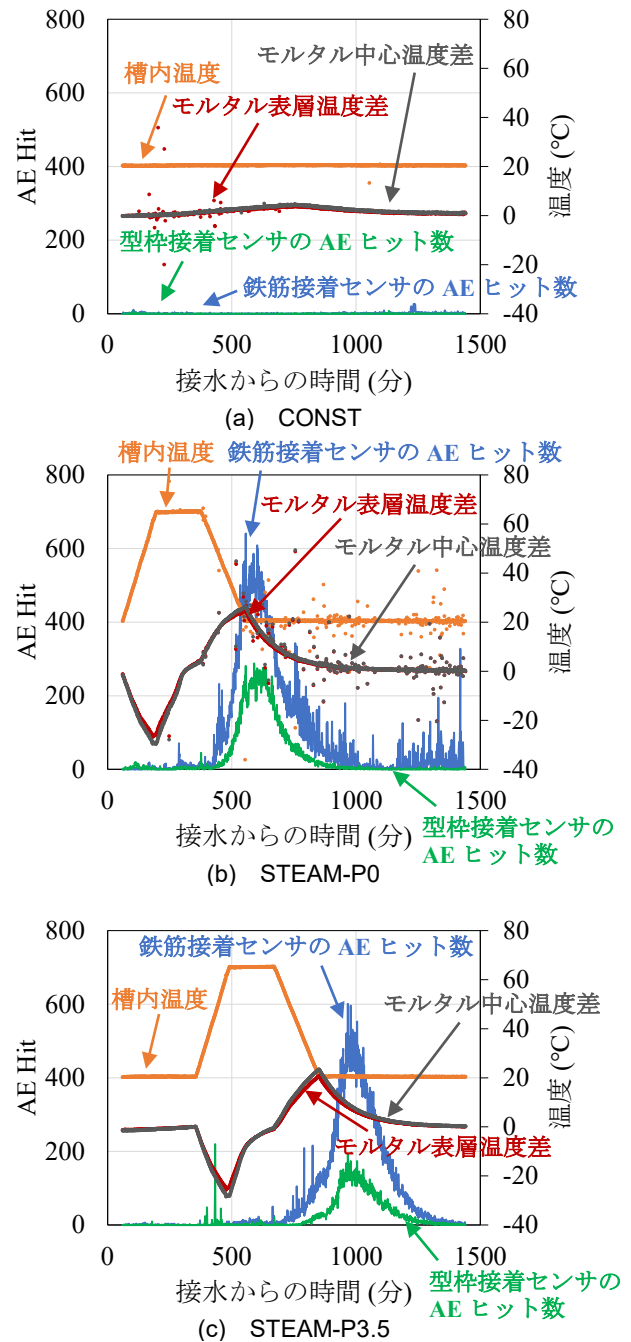


図-5 1 分間当たりの AE ヒット数と温度の関係

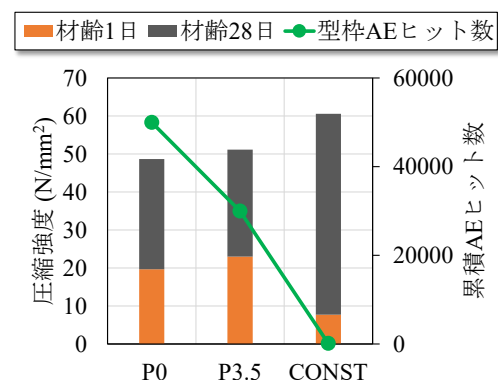


図-6 累積 AE ヒット数と圧縮強度の関係

縮強度の関係を図-6 に示す。既往の研究⁶⁾より、温度履歴を受ける無筋のモルタルを対象とした AE 計測においても降温工程で発生頻度が高く、本研究における型枠接着センサが検出した AE ヒット数は鉄筋接着センサと比較して少ないことから、鉄筋とモルタル界面で生じた AE の影響は小さく、モルタルそのものの組織状態を主として捉えていると考え、強度との関係を考察した。CONST の場合において、接水後 24 時間で検出された AE ヒット数は 130 個程度であった。一方、STEAM-P0 では約 50000 個、STEAM-P3.5 では約 30000 個と温度履歴を与えた場合、温度一定で養生する CONST と比較して多くの AE が検出された。さらに、累積 AE ヒット数が多いほど材齢 28 日における圧縮強度が低い関係が確認できる。よって、本研究で型枠に接着したセンサから検出された AE は、モルタル内部の温度がモルタル表層および槽内よりも高く、温度差に伴う収縮ひずみ差が生じることで発生したと考えられ、モルタル組織に悪影響及ぼす要因を含んでいると推察される。

3.4 AE 源位置標定結果

図-7 に CONST における鉄筋に接着した 2 センサの到達時間差と超音波法による超音波伝搬速度から算出した一次元の AE 源位置標定結果について振幅値別に示す。図中の縦軸 Y は図-2 に示した鉄筋上の座標を表しており、原点を鉄筋端部とした。図より、AE 源は鉄筋上に散在しており、その数は 100 個程度である。なお、鉄筋外の AE 源は標定誤差によるものと考えられる。

図-8 に STEAM-P0 および STEAM-P3.5 の一次元の AE 源位置標定結果について振幅値別に示す。図より、STEAM-P0 は接水後約 450 分から AE 源が標定され始めている。これは、モルタル中心温度差およびモルタル表層温度差が約 18℃となったタイミングである。一方、STEAM-P3.5 では、接水後約 800 分から AE 源が標定され始めている。このときのモルタル中心温度差は約 19℃、モルタル表層温度差は約 16℃である。ここで、鉄筋の超音波伝搬速度の推移より、STEAM-P0 は速度が低下し始めた接水後約 200 分からモルタルの凝結が開始したと考えられ、位置標定の結果より、その約 250 分後から温度低下に伴う鉄筋とモルタル界面のひずみ差による AE が発生し始めている。STEAM-P3.5 の鉄筋の超音波伝搬速度に着目すると、モルタルの凝結は昇温工程の開始時間と同タイミングと考えられ、その後 AE 源が標定され始

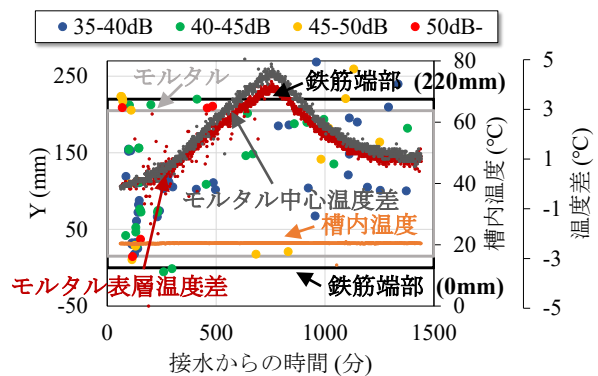


図-7 養生条件 CONST の AE 源と温度の関係

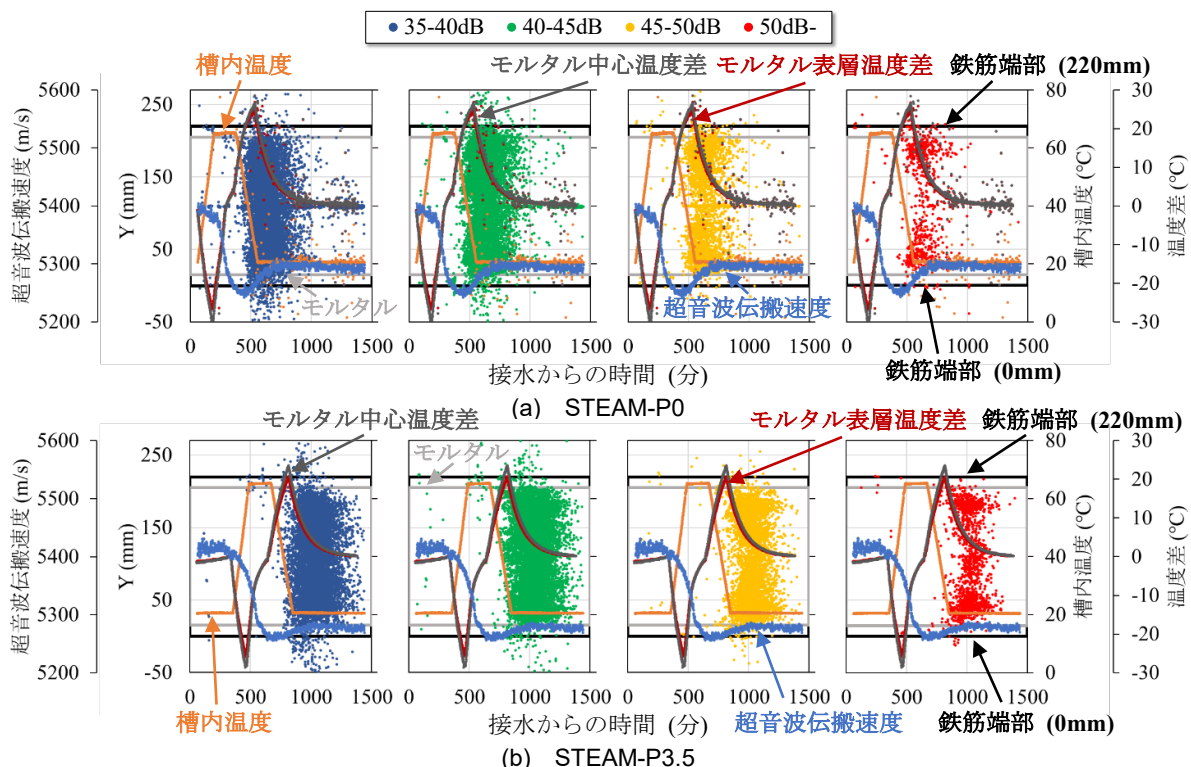


図-8 養生条件 STEAM-P0 および STEAM-P3.5 の AE 源と超音波伝搬速度および温度の関係

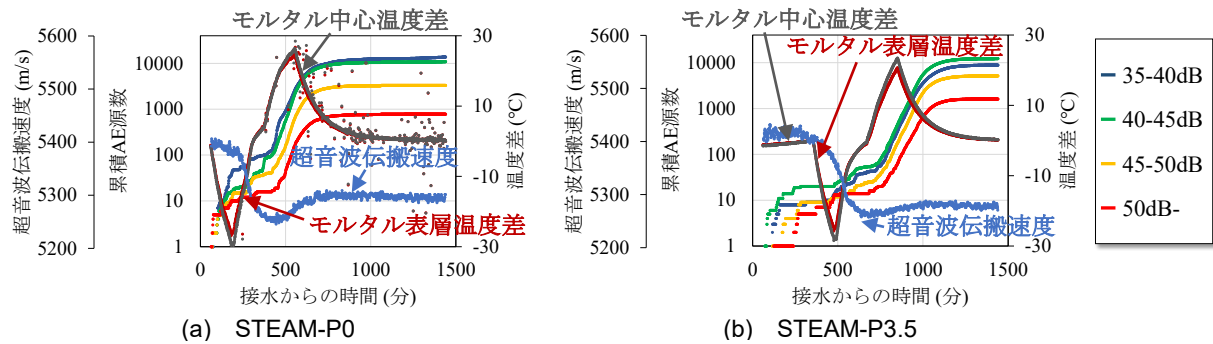


図-9 養生条件 STEAM-P0 および STEAM-P3.5 の累積 AE 源数と超音波伝搬速度および温度の関係

める接水後 800 分までは約 445 分であり、STEAM-P0 よりもモルタルの組織形成に伴う鉄筋との付着が開始してから AE 発生までの時間が長い。すなわち、STEAM-P0 と比較して STEAM-P3.5 は、モルタルの組織形成が十分に行われた後に AE が発生し始める傾向にあると言える。

図-9 に STEAM-P0 および STEAM-P3.5 の位置標定された AE 源の累積数と超音波伝搬速度および温度の関係を示す。STEAM-P0 の振幅値 35～45dB の AE 源は接水後約 450 分から 100 個を越える AE 源数が標定され始めているが、45dB 以上の AE 源はその約 50 分後の接水から 500 分の時間から検出され始めている。同様に、STEAM-P3.5 の振幅値 35～45dB の AE 源は接水後約 800 分から 100 個を越える AE 源数が標定され始めているが、45dB 以上の AE 源は接水後約 850 分の時間から検出されている。ここで、槽内との温度差に着目すると、STEAM-P0 の接水後 500 分時点でモルタル中心温度差が約 23℃、モルタル表層温度差は約 22℃である。STEAM-P3.5 の接水後 850 分ではモルタル中心温度差が約 23.5℃、モルタル表層温度差は約 20.5℃である。いずれの養生条件でも、振幅値 35～45dB の AE 源が検出され始めた時より 45dB 以上の AE 源が検出され始めた時のモルタル中心温度差およびモルタル表層温度差は大きいことから、槽内とモルタルの温度差が大きくなるタイミングで振幅の大きい AE が発生しやすくなった可能性が考えられる。

また、STEAM-P0 と比較して STEAM-P3.5 において、50dB 以上の振幅の大きい AE 源が多い。ここで、超音波法の結果より、STEAM-P3.5 の降温工程終了後の鉄筋とモルタルの付着特性は STEAM-P0 と比較して高い。つまり、鉄筋とモルタル界面の付着特性が高いほど、両者のひずみが生じた際に検出される AE の振幅値も大きくなる可能性があるが、今後付着強度試験などで確認する必要があると考えられる。

4. まとめ

本稿で得られた知見を以下に示す。

- (1) 材齢 24 時間後の鉄筋を伝わる超音波伝搬速度は圧縮強度が高いほど低く、鉄筋とモルタルの付着強度と

モルタル組織そのものの強度には相関関係があると推察される。

- (2) 本研究で型枠に接着したセンサから検出された AE は、モルタル内部の温度がモルタル表層および槽内よりも高く、温度差に伴う収縮ひずみ差が生じることで発生したと考えられ、モルタル組織に悪影響及ぼす要因を含んでいると推察される。
- (3) AE 源位置標定結果より、前養生時間を 60 分としたときと比較して前養生時間を貫入抵抗値 3.5N/mm² となるまで時間を確保した後に昇温を開始することで、モルタルの組織形成が十分に行われた後の降温工程後に AE が発生し始める傾向にある。
- (4) AE 源位置標定結果より、モルタルと槽内の温度差が大きくなるタイミングで、振幅の大きい AE が発生しやすくなる可能性が示された。

参考文献

- 1) 万木正弘ほか：プレキャストコンクリート製品の設計と利用研究委員会，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.1-8，2009.6
- 2) 村田哲ほか：極初期組織形成が温度履歴養生後のモルタル特性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.481-486，2015.6
- 3) 鳥海秋ほか：蒸気養生中の散水がコンクリート表層部の品質および強度特性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.2，pp.493-498，2018.6
- 4) Chung, H. W. : Effects of embedded steel bars upon ultrasonic testing of concrete, Magazine of Concrete Research, Vol.30, No.102, pp.19-25, March.1978
- 5) 尼崎省二ほか：コンクリートの弾性波速度に及ぼす鉄筋の影響および表面法による弾性波速度の測定，コンクリート工学論文集，Vol.18，No.2，pp.95-102，2007.5
- 6) 長島裕丈ほか：温度履歴を受けるモルタルの硬化過程における超音波および AE モニタリング，コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム論文集，Vol.7，pp.99-104，2022.8