

論文 電動ハンマを活用した再振動締固めの有効性に関する検討

加藤 淳司*1・槇島 修*2・折田 現太*1

要旨：コンクリート構造物の施工において、ブリーディングの発生に伴う沈下現象による不具合の解消方法として再振動締固めがあるが、一般的な締固めに用いる棒形振動機では効果的に活用することが難しい。そこで、筆者らは、沈下現象によって不具合の発生しやすい部位が P コーン部であることに着目し、対象部の再振動締固めの実施方法として電動ハンマを活用する方法を考え、電動ハンマの加振が再振動締固めに有効であるかを確認するため、実験的な検討を行った。その結果、型枠振動機と同等の振動が得られることを確認し、適切な加振時間を設定することで不具合の解消に有効であることを確認した。

キーワード：ブリーディング、沈下、漏水、空隙、セパレータ、再振動締固め

1. はじめに

地下の商業施設や水槽構造物などでは、躯体から漏水が生じないように高い止水性能が求められる。そのため、漏水の原因となるひび割れやコールドジョイント、充填不良などの不具合を生じさせないことや、打継ぎ部の一体化を図るなど、高い施工品質が求められる。

一方で、コンクリートには、ブリーディングの発生に伴う沈下現象が存在し、適切な締固めが行われても漏水が生じる原因になる場合がある。このような沈下現象は、**写真-1**に示すような、P コーン部下面に生じる空隙や P コーン部周囲のひび割れとして確認される場合が多く、躯体を貫通するセパレータを通じて漏水の起点となる。

このブリーディングの発生に伴う沈下現象による不具合の解消方法の一つに再振動締固めが考えられるが、土木学会では、「再振動を行う適切な時期は、締固めによって再び流動性が戻る状態の範囲で、できるだけ遅い時期が良い」と示されている。ただし、同文献では、硬化が始まったコンクリートに実施することによって不具合が発生する場合があることも指摘されており、締固めが可能な時間の把握が重要であるが、適切な実施時期は明確になっていない。

また、実施工において、目的のコンクリート層が、再振動締固めの適切な実施時期になった場合、型枠内では目的の層の上に複数層打込まれた後と考えられる。そのため、一般的な締固めに用いられる挿入式の棒形振動機では、挿入が困難になることが考えられ、対象の範囲を効果的に振動できない可能性がある。

そこで、筆者らは、沈下現象によって漏水につながる P コーン部およびセパレータ下面に生じる連続した空隙を解消する方法として、型枠側から再振動締固めを実施することが効果的と考えた。また、P コーン部を固定するフォームタイを振動させることで、対象範囲を効率的に加振できると考え、**写真-2**、**写真-3**に示す電動ハン

マを活用した再振動締固めの有効性について検討することとした。

本検討では、電動ハンマによる振動が一般的な型枠振動機と比較して、締固め効果を有する振動であるかを評価することを目的として、コンクリート内を伝搬する振動特性を評価する実験を実施した。また、電動ハンマを用いて加振時間を変化させた再振動締固めを実施することで、セパレータ周囲に存在する連続した空隙の変化を蛍光エポキシ樹脂真空含浸試験²⁾の実施によって、また、耐漏水性を加圧透水試験³⁾の実施によって確認した。



写真-1 P コーン部の沈下



写真-2 使用した電動ハンマ



写真-3 電動ハンマによる加振状況

*1 飛島建設（株） 技術研究所 研究開発グループ（正会員）

*2 飛島建設（株） 技術研究所 研究開発グループ 博(工)（正会員）

2. 実験概要

2.1 電動ハンマの振動特性の評価

電動ハンマの振動がコンクリートの締固めに有効であるかを確認するため、工事で使用される型枠振動機と電動ハンマを対象に、型枠内 (L1800×H900×W800mm) に打込んだコンクリート内の加振時の加速度を計測した。

(1) 使用したコンクリート

使用したコンクリートの調合を表-1 に示す。普通ポルトランドセメントおよび AE 減水剤を用いた、呼び強度 30N/mm²、スランプ 18cm、空気量 4.5%の調合とした。

(2) 使用した振動機と振動方法

比較する型枠振動機として壁型 (型枠面に振動面を押し当てる形状) とクサビ型 (固定用の単管と型枠面の間に差し込む形状) の 2 種類を用いた。また、電動ハンマは、仕様の異なる A、B の 2 種類を用いた。使用した振動機の基本仕様を表-2 に示す。

なお、電動ハンマは、セパレータに連結したフォームタイの先端に設置して振動させた。

(3) 加速度の計測方法

試験体寸法と加速度センサの配置概要を図-1 に示す。加速度の計測は、コンクリート天端から深さ 100mm、セパレータの横 20mm の位置に設置した加速度センサによって行った。また、型枠からの距離に応じたコンクリート内の振動の伝搬状況を評価するため、加速度センサは 1 軸式を用い、型枠面から 55mm、285mm、515mm、745mm の位置に配置して、セパレータの軸方向の振動を計測した。なお、電動ハンマの加振をフォームタイの先端で行うことから加速度センサは、セパレータから比較的近い 20mm の位置に配置した。また、型枠振動機を使用する場合の振動機と加速度センサの高さは、型枠振動機の中心と加速度センサ位置を一致させた。

計測された加速度は、加振開始から終了までの全ての振動データを解析し、実効加速度 (以降、R.M.S.と示す) として評価した。R.M.S.は、最大加速度の二乗値の平均の平方根を示し、加速度の平均的な大きさを表す。一般に正弦波では、最大加速度の 0.707 倍とされる。

2.2 加振時間の違いによる効果の検討

電動ハンマの加振時間を変化させた再振動締固めの実施による、セパレータ周囲に存在する連続した空隙への影響について、電動ハンマ A を用いて評価した。

なお、特定の振動機で評価した加振時間の違いによる効果は、R.M.S.などの振動特性を把握した他の振動機においても振動エネルギーを評価⁴⁾することで加振時間の効果が推定できるものと考え、作業性が良好な充電式の電動ハンマ A を用いた。

評価は、図-2 に示した、セパレータを設置した型枠内 (L320×H500×W200mm) のコンクリートの充填状況

表-1 コンクリートの調合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
		セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤
50.8	46.4	366	186	796	945	3.66

表-2 振動機の基本仕様

項目	型枠振動機		電動ハンマ	
	壁型	クサビ型	A	B
電圧	100V	100V	DC18V	100V
出力	280W	280W	—	—
消費電力	—	—	430W	550W
振動数	160～200Hz	250～300Hz	—	—
打撃数	—	—	0～4,850RPM	0～3,200RPM
質量	4.7kg	5.3kg	2.6kg	3.3kg

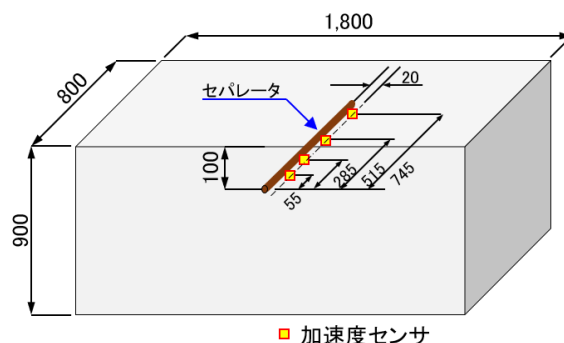


図-1 試験体寸法と加速度センサの配置概要

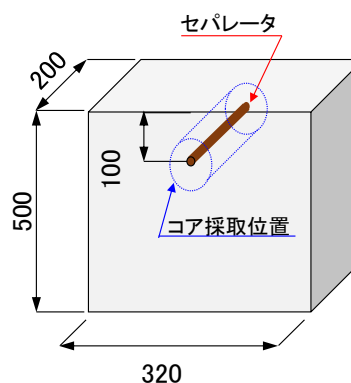


図-2 試験体寸法とコア採取位置の概要

と耐漏水性を評価した。なお、打込み時の締固めは、電圧 100V 径 φ30mm 振動数 250Hz の棒状振動機を上から試験体の 2 か所に挿入し、それぞれ 5 秒ずつ加振した。

(1) 再振動締固めの実施時期および加振時間

再振動締固めの実施時期は、ブリーディングの継続による再沈下の影響を排除するため、ブリーディング終了直後が良いとされる既往の文献⁵⁾を参考に、本件でも、ブリーディングが終了した打込みから 250 分後に、型枠

が動かないよう固定して、再振動を実施した。再振動締め加振時間は、15 秒、35 秒、55 秒の 3 水準を設定した。なお、比較として再振動締めを実施しない条件も設定した。

(2) 連続した空隙の評価および耐漏水性の評価

評価する試験体は、図-2 に示すようにセパレータを中心とした $\phi 100\text{mm}$ のコアを採取した。なお、同一の実験条件の試験体を 2 体作製し、1 体をセパレータ周囲の連続した空隙の評価に、もう 1 体を耐漏水性の評価に適用した。

セパレータ周囲の連続空隙の評価は、セパレータを中心としたコアを採取し、蛍光エポキシ樹脂真空含浸法により、空隙の存在を視覚的に確認した。

採取したコアによる評価は、図-3 に示すように含浸した蛍光エポキシ樹脂（主剤粘度：120～180mPa・s）が硬化した後に、3 分割に切断し、セパレータを中心とした断面と、セパレータを縦に切断した縦断面によって評価した。なお、蛍光エポキシ樹脂真空含浸法によって評価可能な空隙は、数 μm の微細な空隙まで確認できることを確認している。

セパレータ部の耐漏水性の評価は、図-4 に示す加圧透水試験により、ゲージ 1 目盛り 0.05MPa ずつ段階的に加圧し、漏水が生じる水圧を評価した。この試験は、セパレータが内在するコア試験体（ $\phi 100 \times 200\text{mm}$ ）を容器内に固定し、片側の端面から任意の水圧を 10 分間継続して与え、対面からの漏水の有無を評価する試験である。

3. 結果および考察

3.1 電動ハンマの振動特性の評価

各振動機の加振による、コンクリート中の型枠からの距離と R.M.S. の関係を図-5 に示す。型枠の奥行き寸法は 800mm であり、横軸の 0mm は振動を与えた側の型枠面の位置を、800mm はその対面の型枠面の位置を表している。

図に示すように、型枠に最も近い 55mm の位置の R.M.S. は、型枠振動機壁型、電動ハンマ B、電動ハンマ A、型枠振動機クサビ型の順に大きな値を示した。

なお、計測された各振動機の振動数は、電動ハンマ B、電動ハンマ A、型枠振動機壁型、型枠振動機クサビ型の順に大きく、それぞれ 332Hz、300Hz、264Hz、219Hz、の値を示した。型枠振動機に比べ、電動ハンマがやや大きい傾向を示した。

コンクリート内部では、いずれの振動機の R.M.S. も同様の傾向を示し、振動源の型枠に最も近い 55mm の位置で最大となり、コンクリート内部ほど R.M.S. が低下する傾向であった。また、型枠から 515mm の位置の R.M.S. が最小となり、対面の型枠に近い 745mm の位置では

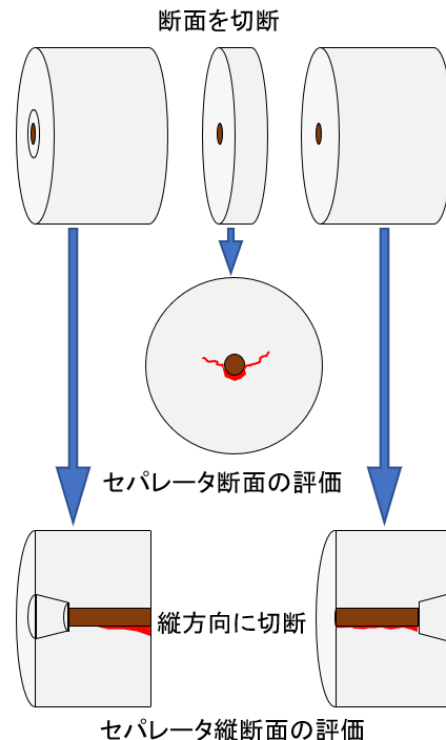


図-3 採取コアの切断と評価概要

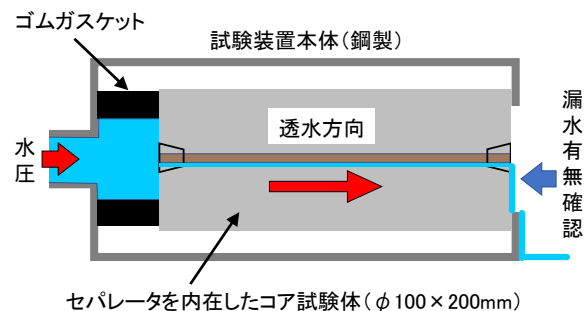


図-4 加圧透水試験の概要

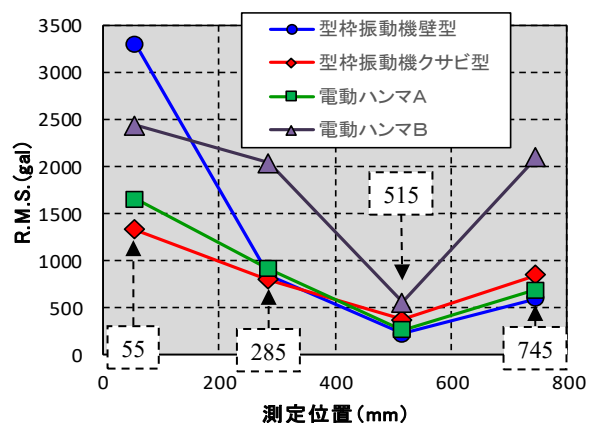


図-5 測定位置と R.M.S. の関係

R.M.S.が増加する傾向であった。

以上の結果より、いずれの振動機からの振動も型枠側からコンクリート内部に伝搬し、コンクリート中で振動が減衰した状況を確認した。

ただし、電動ハンマ B を除く 3 つの振動機では、表層部の R.M.S に差異があったにもかかわらず、コンクリート内部の R.M.S が同等であることから、振動機によって発生する振動特性によって減衰の程度に差異を生じたものと考えられる。

次に、セパレータを直接振動させた 2 種の電動ハンマでは、セパレータの振動によってコンクリート内部の加速度の減衰が低減されることを期待したが、他の型枠振動機と同様の傾向を示したことから、セパレータに伝わった振動がコンクリートを振動させる締固め効果は大きなものでないと考えられる。

次に、セパレータに振動を直接与える電動ハンマ、および型枠振動機クサビ型では、型枠振動機壁型に比べて型枠面からの R.M.S.の減衰が少ないと評価されたため、型枠面からだけでなくセパレータを介して内部のコンクリートに振動が伝わり、締固めに一定の影響があるものと推察される。

また、いずれの振動機も対面の型枠に近い 745mm の位置で加速度が増加したことから、両端の型枠を固定するセパレータを振動の媒体として、対面の型枠面を振動させたことによって、対面の型枠の近傍のコンクリートの加速度が増大したものと考えられた。なお、電動ハンマ B は、対面の型枠に近い位置の加速度が最も大きな値を示していることや、コンクリート内部の R.M.S.が他の

振動機よりも大きいことから、セパレータを通じたコンクリートの振動が期待できる振動機と推察される。

3.2 加振時間の違いによる効果の検討

(1) セパレータ下面の充填状況の評価

蛍光エポキシ樹脂を真空含浸した試験体に紫外線を照射し、発光した樹脂の含浸範囲の観察結果を写真-4 から写真-7 に示す。再振動締固めを実施しない試験体は、写真-4 に示すように、セパレータの上下面に連続して蛍光エポキシ樹脂が存在している状況が確認できるとともに、セパレータを起点としたひび割れが生じていることも確認された。このように、作成した試験体は、セパレータ周囲にブリーディングの発生に伴う沈下現象による不具合を再現できていることを確認した。

再振動締固め加振時間 15 秒の試験体は、写真-5 に示すように、再振動締固めを実施しない試験体に対してセパレータの上面の連続空隙が解消している状況が確認されたが、セパレータ下面の連続空隙やひび割れに変化は見られなかった。

次に、再振動締固め加振時間 35 秒および 55 秒の試験体は、写真-6 および写真-7 に示すように、再振動締固めを実施しない試験体で見られたセパレータ上面の連続空隙が解消しただけでなく、セパレータ下面の連続空隙の一部も解消している。さらに、セパレータ周囲のひび割れや空隙も認められない状況であった。

以上のように、電動ハンマ A を用いた再振動締固めによって、ブリーディングの発生に伴う沈下現象による不具合を減少可能であることが確認され、その程度は加振時間が長いほど大きいことを確認した。

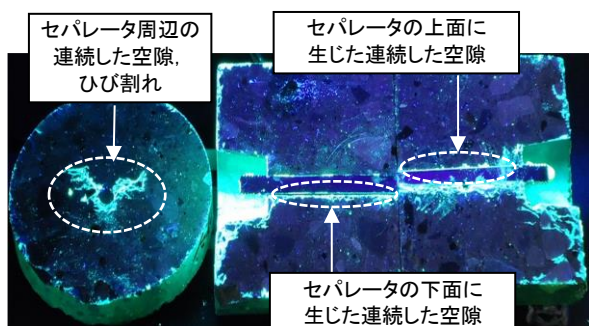


写真-4 再振動締固めを実施しない試験体

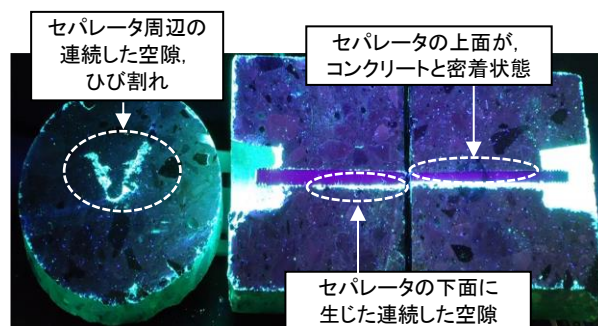


写真-5 再振動締固め加振時間 15 秒の試験体

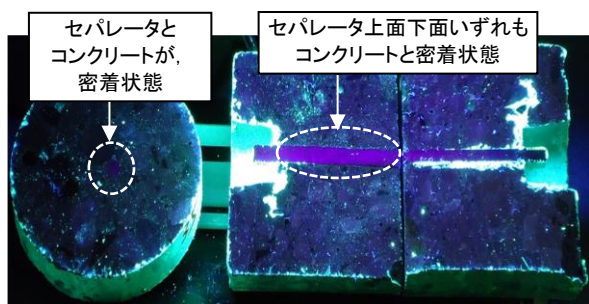


写真-6 再振動締固め加振時間 35 秒の試験体

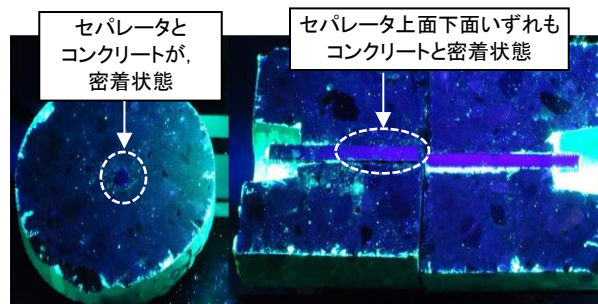


写真-7 再振動締固め加振時間 55 秒の試験体

また、セパレータ周囲のひび割れやセパレータ下面の連続空隙は、型枠方向からの再振動締固めで解消できることを確認した。

(2) 耐漏水性の評価

蛍光エポキシ樹脂含浸試験では、数 μm の微細な空隙を評価できることから、蛍光エポキシ樹脂の存在の有無だけでは試験体の耐漏水性を評価できないため、加圧透水試験によって耐漏水性を評価した。再振動締固めの加振時間と漏水が発生することのない水圧（以降、耐水圧と示す）との関係を図-6に示す。

再振動締固めを実施しない試験体では、加圧透水試験機に試験体をセットし、水圧を上昇させる以前に漏水が生じることが確認され、耐漏水性が低い状況であることを確認した。

再振動締固め加振時間 15 秒の試験体では、耐水圧が 0.05MPa と評価された。蛍光エポキシ樹脂真空含浸試験によって再振動締固めを実施しない試験体と比較した結果では、明確な改善効果が認められなかったが、この評価試験によって、耐漏水性の改善効果があることを確認した。

次に、再振動締固め加振時間 35 秒の試験体では、耐水圧が 0.20MPa となり、明確な耐漏水性の改善効果が認められた。

また、再振動締固め加振時間 55 秒の試験体では、耐水圧が 0.15MPa となり、加振時間 35 秒の試験体よりも耐漏水性がやや劣る結果であった。この結果は、同一条件の試験数を $N=1$ として行っているため、試験によるばらつきを考慮できていないことが原因と考えられ、今回の実験だけでは要求される耐漏水性に応じた再振動締固め加振時間を定量的に評価するには至らなかった。ただし、振動機の振動特性に応じた適切な加振時間を設定することによって、所要の耐漏水性を確保できる可能性があると考えられる。

以上より、電動ハンマ A を用いた再振動締固めによって耐漏水性が向上することが確認され、ブリーディングに伴う沈下現象によって生じる不具合を効果的に改善することができる可能性があるものと考えられる。

本件の評価方法として用いた蛍光エポキシ樹脂真空含浸試験は、連続した空隙の存在を視覚的に評価することが可能であり、漏水発生メカニズムおよび対策立案の評価に有効であるものと考えられる。

また、加圧透水試験では、耐水圧を定量的に評価できることから、コンクリート構造物に生じる水圧に応じた漏水対策の立案や実証に有効な評価方法であるものと考ええる。

さらに、耐水圧を定量的に評価することは、本報告にて示した、新しい再振動締固め手法における加振時間の

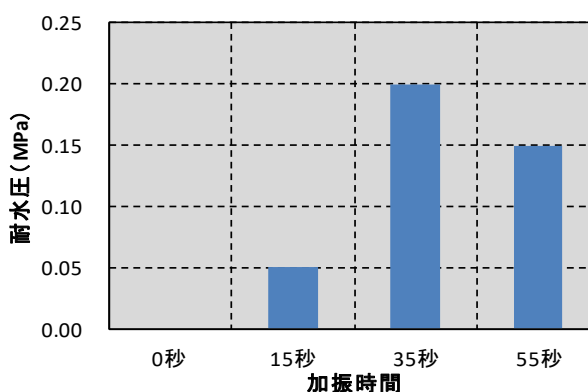


図-6 再振動締固め加振時間と耐水圧の関係

評価や、今後の加振時期の検討など、さらなる適用性拡大の可能性が認められる。

このことから、振動機の振動特性である加速度や振動数などを把握することによって、既往のコンクリートの締固め完了エネルギーの評価⁹⁾のように、本報告の検討対象である「ブリーディングに伴う沈下現象によって生じる不具合」を解消するための振動エネルギーによる判断も可能になるものとする。

4. まとめ

本件の検討によって得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 評価の対象とした電動ハンマは、一般的な型枠振動機と同等の加速度が得られる振動機であることが確認され、型枠方向から行う再振動締固めに活用可能な振動機として扱うことができる。
- (2) 電動ハンマによってフォームタイを加振することは、型枠面からコンクリート内部に振動を与える方法であるとともに、セパレータを介してコンクリート内部を振動させる一定の効果があると考えられた。
- (3) 適切な締固めを行った試験体であっても、再振動締固めを行わない場合には、セパレータ周囲にひび割れや連続した空隙が生じることが蛍光エポキシ樹脂真空含浸試験によって確認され、加圧透水試験によって、耐漏水性が極めて低い状態になることを確認した。
- (4) 電動ハンマによる再振動締固めによって、セパレータ周囲の連続した空隙やひび割れが解消出来ることが確認された。
- (5) 電動ハンマによる再振動締固めにおいて、適切な加振時間を設定することで、セパレータ部の耐漏水性の改善効果が確認された。
- (6) 定量的に耐漏水性を評価することが可能であれば、振動機の振動特性である加速度や振動数などから、

不具合解消のための振動エネルギーによる判断も可能になるものと考える。

ここで検討した型枠方向から行う再振動締固め手法は、ブリーディングに伴って生じるセパレータ周囲の不良を効率的に改善できるため、打込み時の苦渋作業である叩き作業の軽減につながり、施工の合理化技術としても期待される。

ただし、本技術を汎用的に展開するためには、ブリーディングの発生や硬化性状の異なるコンクリートや施工時期に応じて適切な加振時間を設定する必要があるなど検討すべき課題があると考ええる。

施工品質の向上と施工の合理化を実現するために、今後もさらなる検討を進めたいと考える。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート示方書<施工編>，pp.121-122，2017
- 2) 岩城圭介，加藤淳司，平間昭信，塩谷智基：微視的断面観察による酸劣化したコンクリートの微細構

造の評価，コンクリート工学年次論文集，vol.26，No.1，pp.999-1004，2004

- 3) 加藤淳司，櫻井臣央：コンクリート構造物の止水建材の性能評価に関する実験報告，日本建築学会大会学術講演概集(関東)，1161，pp.321-322，2015年9月
- 4) 梁俊，丸谷剛，坂本淳，松元淳一，下村泰造，滝沢正徳：締固め完了エネルギーに基づくコンクリートの締固め完了範囲の評価方法に関する研究，土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造)，vol.69，No.4，pp.438-449，2013
- 5) 折田現太，加藤淳司：沈下ひび割れ解消に有効な再振動締固め時期に関する検討，日本建築学会大会学術講演概集(北陸)，1128，pp.255-256，2019年9月
- 6) 槇島修，川里麻莉子：流動化剤(増粘剤一液タイプ)を用いたコンクリートの締固め性能に関する検討，土木学会第71回年次学術講演会，V-363，pp.725-726，平成28年9月