

論文 振動締固め時間がコンクリートの圧縮破壊過程および中性化に与える影響

坂野 大世*1・山田 悠二*2・川崎 佑磨*3

要旨: 本研究では、目標スランブ 12cm のコンクリートの振動締固め時間が、圧縮破壊過程および中性化に与える影響について、アコースティック・エミッション (AE) 法と促進中性化試験より検討した。AE 法によるモニタリングの結果、波形パラメータである平均周波数と RA 値で評価すると、振動締固め時間が長い場合、せん断型破壊への移行が小さい応力レベルから確認された。中性化深さは促進期間 26 週経過時において、せん断型破壊に小さい応力レベルから移行する傾向にあった、振動締固め時間がもっとも長い供試体で最大となることが確認され、物質移動抵抗性の低下が見られた。

キーワード: 振動締固め時間、圧縮破壊過程、AE 法、AE パラメータ、中性化深さ

1. はじめに

建設業就業者数は、少子高齢化の影響により、2008 年からの 10 年間で約 30 万人以上が減少しているなど、深刻な作業員不足に陥っている。その解決策として、国土交通省は、i-construction の一環である「コンクリート工の効率化」を推進し、鉄筋コンクリート構造物の現場打ちコンクリートにおける目標スランブを 8cm から 12cm に見直し流動性を向上させた。その結果、時間当たりの打込み量は 22% 向上し、作業員数を 19% 削減できる効果が得られた。さらに今後の展望としては、より流動性の高いコンクリートの積極的な使用も期待されている。一方で、土木学会コンクリート標準示方書施工編では、振動締固め時間は、5~15 秒程度と規定²⁾されており、現場では技術者がその範囲内で振動締固め時間を決定している。上述のようにコンクリートの流動性は増大していく傾向にあるものの、振動締固め時間が与える各種要因については必ずしも明確ではなく、特に流動性の向上に伴い、過剰な振動の付与となるケースの増加が懸念される。これまでに、スランブまたはスランブフローなどといった、コンクリートのフレッシュ性状ごとに最適な振動締固め時間が存在することや、振動時間が長いほど表面空隙率や中性化が小さくなる傾向があることが報告³⁾されている。また、振動締固め時間がコンクリートの圧縮強度に与える影響について、振動締固め時間の増加によって圧縮強度が増加する傾向がある⁴⁾ことや、圧縮強度は締固め度に比例して増加する傾向があること⁵⁾が報告されている。したがって、振動締固め時間が、コンクリートの各種品質に影響を与える可能性が考えられる。

しかしながら、これらの既往研究は、バイブレータの使用方法に関する提案や、締固め時の振動エネルギーの

伝搬状況の可視化、締固め性の評価方法の提案など締固め施工に着目したものであり、振動締固め後のコンクリートの品質を主として行われた研究は多くなく、特に微視的な性状の変化に着目した研究は少ない。

以上を踏まえ筆者らは、振動締固め時間と硬化コンクリートの性状の関係、特に振動締固めが過剰となった場合のコンクリートの性状に関する検討を行っている⁶⁾。その結果から、振動締固め時間の増加とともに圧縮強度が微増すること、細孔径分布から約 0.1~10 μm の空隙量が少なくなることなどについて報告した。しかし、振動締固め時間を長くすることで、毛細管空隙量が増加して破壊過程や耐久性に影響が出る可能性もある。そこで本論文ではさらに発展させて、アコースティック・エミッション (AE) 法による微細な破壊挙動のモニタリングと、物質透過抵抗性を評価する指標の一つである中性化に対する影響の検討結果について報告する。

本研究では、テストピースサイズの無筋コンクリートを対象に、目標スランブ 12cm のコンクリートへの振動締固め時間の変化が、硬化コンクリートの圧縮強度試験時の破壊過程および中性化に与える影響について検討した。前者については、目視観察とともに AE 法によるモニタリングを、後者については促進中性化試験を行って検討した。なお本研究は、特にスランブの増大に伴って懸念される、過剰な振動締固めによるコンクリート品質への影響について、基礎的なデータの取得を重点に置いており、最適な振動締固め時間を示すことを主題としていない。

2. AE 法

圧縮強度試験における損傷・破壊過程を AE パラメー

*1 立命館大学大学院 理工学研究科 環境都市専攻 (学生会員)

*2 福岡大学 工学部 社会デザイン工学科 助教 博 (工) (正会員)

*3 立命館大学 理工学部 環境都市工学科 准教授 博 (工) (正会員)

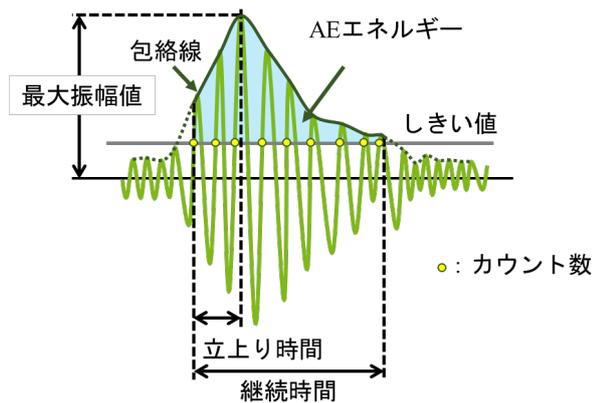


図-1 検出されるAE波形の一例とAEパラメータ

タ解析によって検討した。AE計測により検出されたAE波形パラメータを図-1に示す。

本研究では、立上り時間 $0\mu\text{s}$ 、エネルギー 0 、カウント 1 のいずれかを満たすAE現象を、ノイズとして解析対象外とした。また平均周波数については、AEセンサの周波数特性より、 50kHz 未滿および 600kHz 以上のデータを解析範囲外として取り除いた。ここで平均周波数はカウント数を継続時間で除した値である。

AEパラメータのうち、応力レベルと累積AEヒット数、累計AEヒット率との関係および平均周波数とRA値の関係について検討した。ここで応力レベルは、最大応力に対するある時点での応力の比率であり、RA値は立上り時間を最大振幅値で除した値である。なお累計AEヒット率では、荷重初期は荷重板と供試体面の圧着による影響、圧縮破壊直前はマイクロクラックの連結に伴うAEヒット数の急増の影響から、応力レベル $0\sim 20\%$ および $80\sim 100\%$ の範囲を評価対象外とした。また、応力レベル 20% における累計AEヒット数を累計AEヒット率 0% 、応力レベル 80% における累計AEヒット数を累計AEヒット率 100% とする。

平均周波数とRA値の関係について、既往研究 $7)$ にならって図-2に示すように、立上り時間が短く周波数が相対的に高くなる場合は引張型クラックと、立上り時間が長く周波数が相対的に小さくなる場合にはせん断型クラックであると分類し、50個のAEパラメータの移動平均値を用いた。AEパラメータは、荷重初期～中期の応力レベル $20\sim 50\%$ 、荷重中期～後期の応力レベル $50\sim 80\%$ で評価した。また、破壊直前のせん断型クラックへの移行の影響を確認するために、RA値と平均周波数の関係のみ、荷重最終期の応力レベル $80\sim 100\%$ についても評価を行った。

3. 供試体および実験の概要

配合は、生コンクリートプラントの配合を参考として、目標スランブが 12cm 、目標空気量が 4.5% 、水セメント

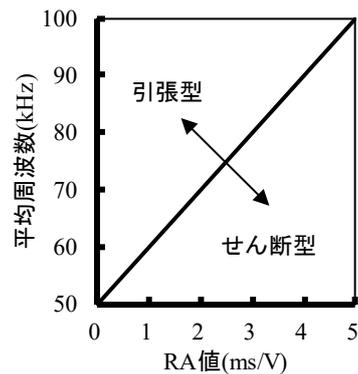


図-2 RA値と平均周波数の関係

表-1 使用材料

材料	記号	種類	密度 (g/cm^3)
セメント	C	普通ポルトランドセメント	3.16
水	W	水道水	1.00
細骨材	S	砕砂 甲賀土山産	2.62 (表乾)
粗骨材	G1	砕石 2010 甲賀土山産	2.68 (表乾)
	G2	砕石 1505 甲賀土山産	2.67 (表乾)
	-	2010:1505=6:4	2.66 (表乾)
混和剤	Ad1	高性能AE減水剤 C $\times 0.67\%$ (ポリカルボン酸エーテル系)	1.08
	Ad2	AE助剤 C $\times 0.3\%$ (変性ロジン酸化合物系 陰イオン界面活性剤)	1.04

表-2 コンクリートの配合

G_{max} (mm)	SL (cm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)						
					W	C	S	G		Ad1	Ad2
								G1	G2		
20	12	55	4.5	46.5	171	309	837	587	391	2.07	0.93

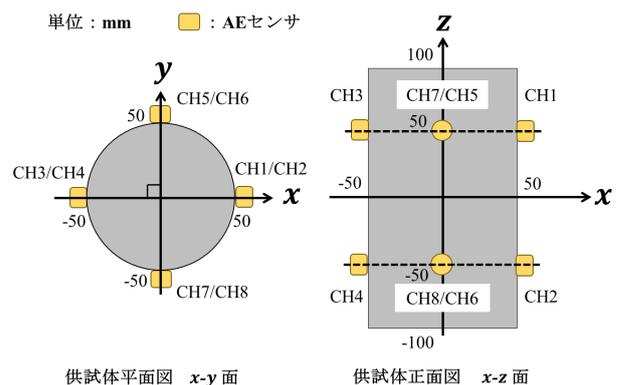


図-3 AEセンサ設置位置

比を 55% とした。供試体の使用材料および配合を表-1、表-2に示す。スランブ、空気量の実測値は、それぞれ 9.5cm 、 4.9% となり、両者とも許容範囲 (スランブ: $12\pm 2.5\text{cm}$ 、空気量: $4.5\pm 1.5\%$) に含まれることが確認された。作製したコンクリート供試体は、各ケースで $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体を4体とした。そのうち3体を一般的な圧縮強度試験に供し、残り1体をAE計測用に圧縮試験を行った。各供試体は、JIS A 1132に基づいて作製

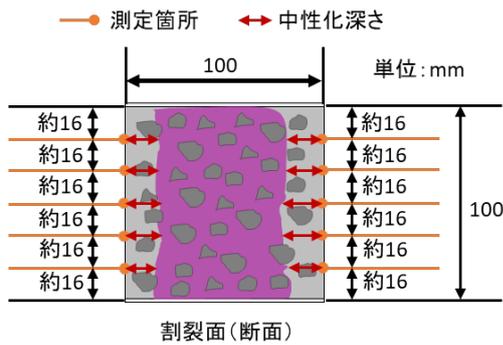


図-4 中性化深さ測定位置

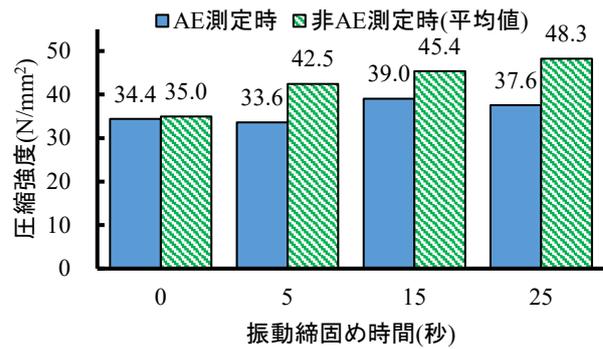


図-5 圧縮強度試験結果

した。コンクリートの打込みは、2層とした。振動締固め時間は1層あたり、振動締固めを行わない0秒、コンクリート標準示方書施工編に規定されている振動締固め時間の上下限值である5秒、15秒、規定外となる25秒の4ケースとし、振動体の直径28mm、出力280W、振動数200-242Hzの棒状バイブレータにより振動締固めを行った。ただし、振動締固め時間が15秒と25秒の試験体の合計加振時間としては、いずれも過剰である。振動締固めについては、筆者らがこれまでに報告⁶⁾した方法と同様に行い、JISA 1132の規定にならって行った。また、表層への粗骨材の露出を防止し、各種試験実施が困難となる状況を避けるため、2層目の振動締固め終了後に、型枠外から木槌で軽く叩いた。

AE測定は、 $\phi 100 \times 200$ mmの円柱供試体にAEセンサを8個取り付け、材齢28日時の圧縮強度試験時に行った。しきい値は40dB、サンプリング間隔を1 μ sとして測定した。コンクリート供試体は試験前に端面を研磨し、AEセンサ取り付け部分はディスクグラインダによって平滑にした。AEセンサは共振周波数150kHzのものを使用した。AEセンサは図-3に示される位置に取り付け、ワックスによって固定した。万能試験機より発せられるノイズの検出を低減するため、上下の載荷板にテフロンシートをグリスにより取り付けた。

促進中性化試験は、JISA 1152に基づいて実施した。実験供試体は、各ケースで100×100×400mmの角柱供試体を3体作製した。中性化深さの測定は、中性化促進1, 4, 8, 13, 26週経過時に行った。中性化深さの測定箇所は、図-4に示す箇所であり、1供試体当たり合計10箇所とした。本論文では、促進期間26週経過時の結果について示す。

4. 実験結果および考察

4.1 圧縮強度試験結果

図-5に圧縮強度試験結果を示す。なお、同図にはAE測定を実施した際の結果(1体)とAE測定を実施していない場合の圧縮強度試験結果の平均値(3体、参考文献6)の再掲)を示した。AE測定時の結果は、既往研究

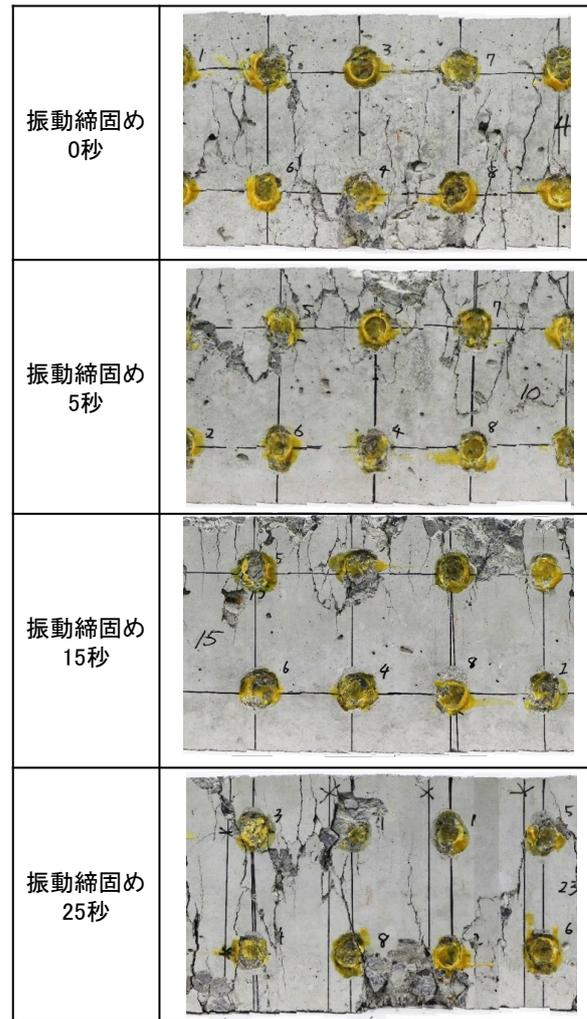


写真-1 圧縮試験後の様子

⁴⁾やAE測定を実施していない場合の結果⁶⁾ほど明確ではないものの、振動締固め時間が長くなるほど、圧縮強度はおおむね増加する傾向にあった。圧縮強度に明確な差異が生じなかった原因として、万能試験機の載荷板と圧縮強度試験供試体の間に挿入したテフロンシートおよびグリスの存在が考えられる。既往研究より、載荷板と供試体間の摩擦は、載荷面における横方向の変形を拘束し、見かけ上で圧縮強度がより大きく計測されることが指摘⁸⁾されている。このことから、テフロンシートおよびグリスが載荷板と供試体間の摩擦を低減させたことにより、

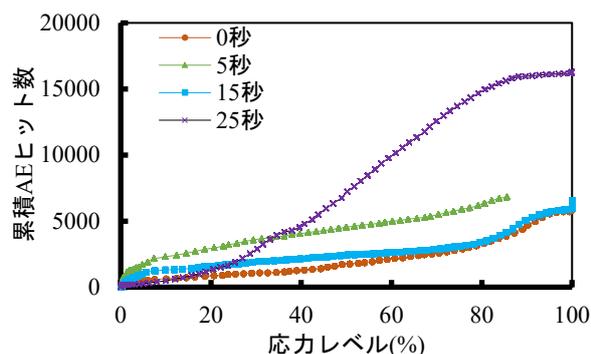


図-6 累計 AE ヒット数

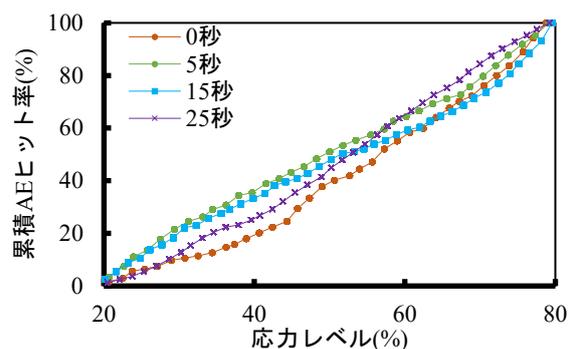


図-7 累計 AE ヒット率

これまでに報告した結果ほど、AE 測定時では各ケース間の圧縮強度に差が見られなかったことが推定される。

4.2 圧縮試験後の円柱供試体の様子

圧縮強度試験終了後の各供試体の外周面の様子を、写真-1 に示す。これは、円柱供試体の外周面を 16 方向から撮影した写真を並べ、一枚の画像にしたものである。写真の上側が、万能試験機の上側の載荷板との接地面側である。

写真-1 より、振動締め時間 0 秒では供試体の下部において、振動締め時間 5 秒および 15 秒では供試体の上部において、振動締め時間 25 秒では供試体の高さ方向全体において大きなクラックが供試体表面に確認された。振動締め時間 0 秒では、木槌打撃による振動を除き、締めを行っておらず、コンクリート内部には振動締めを行ったものよりも粗大な気泡や空隙が多く含まれると推定される。一方で供試体上部では、打ち込み後に表面均しを行うため、供試体下部よりも相対的に密実になることが考えられる。その結果、振動締め時間 0 秒において、供試体の下部が脆弱部となって、損傷・破壊が生じ、大きなクラックが発生したと考えられる。振動締め時間 5 秒、15 秒および 25 秒では、いずれも振動締めを行うことにより、気泡、粗大な空隙は取り除かれることが考えられる。ここで、1 層目に着目した場合、振動締めによる影響は、1 層目のみではなく、2 層目の振動締めの際にも受けることが推定される。また 2 層目の振動締めを行う際に、1 層目に残留していた気泡などは、2 層目の振動締めの影響によって上昇し、排出されることが考えられる。しかし、その上昇途中で振動締めが終了した場合、2 層目に気泡が留まる可能性が考えられる。これらのことから、2 層目の方が 1 層目よりも相対的に粗となり、破壊が進行しやすい状態にあったことが考えられる。振動締め時間 25 秒では、長時間の振動付与によってコンクリート内部の粗大な気泡は排出され、気泡や粗大な空隙の残留は他のケースよりも少ないと考えられる。この点から、供試体の高さ方向全体として気泡や粗大な空隙に関する偏りはあまりないと考えられ、脆弱な部分が比較

的になかったと考えられる。振動締め時間 25 秒では、供試体表面上に顕在化したクラックが供試体の高さ方向全体に渡っていた。これは、供試体内部における粗大な空隙が少ないことにより、全体で均等に荷重を受け、破壊に至ったと考えられる。以上より巨視的視点では、振動締め時間の増加により、欠陥が少なくコンクリートの均質性が向上したこと、既報⁹⁾で報告したとおり、細孔レベルの空隙量が減少したことが強度の増大に繋がったと考えられる。

4.3 AE パラメータ解析

(1) AE ヒット数と応力レベルの関係

応力レベルと累積 AE ヒット数の関係を図-6 に示す。なお、振動締め時間 5 秒では、応力レベル 85%以下において、計測機器のトラブルにより計測結果が記録されておらず、当該データは含まれていない。同図より各供試体の累積 AE ヒット数は、振動締め時間 0 秒では 5832 個、振動締め時間 15 秒では 6520 個、振動締め時間 25 秒では 16281 個検出された。なお振動締め時間 5 秒では、計測された応力レベル 0~85%において 6808 個検出された。以上より振動締め時間 25 秒では、振動締め時間 0 秒、15 秒よりも、累積 AE ヒット数は 2.5~2.8 倍程度多く検出された。また振動締め時間 0 秒と 15 秒では、AE 発生挙動が全体的に似たような傾向が確認された。振動締め時間 5 秒に関しては、破壊直前のデータの欠如より、最終的な累計 AE ヒット数は不明である。一方で、計測した範囲のデータより、振動締め時間 0 秒、15 秒よりも累計 AE ヒット数は数千個程度多いものの、その検出傾向はおおむね同様であり、破壊直前に関してもヒット数の発生割合は振動締め時間 0 秒、15 秒と同程度であることが推定される。

応力レベルと累積 AE ヒット率の関係を、図-7 に示す。結果より、振動締め時間 5 秒、15 秒の場合、応力レベル 20~80%における累計 AE ヒット数の増加割合はほぼ一定であり、同様の現象が継続的に発生していたと考えられる。一方で振動締め時間 0 秒、25 秒の場合、応力レベル 20~50%では細かい変動が、応力レベル 50~80%では、5 秒、15 秒と同様にほぼ一定に増加すること

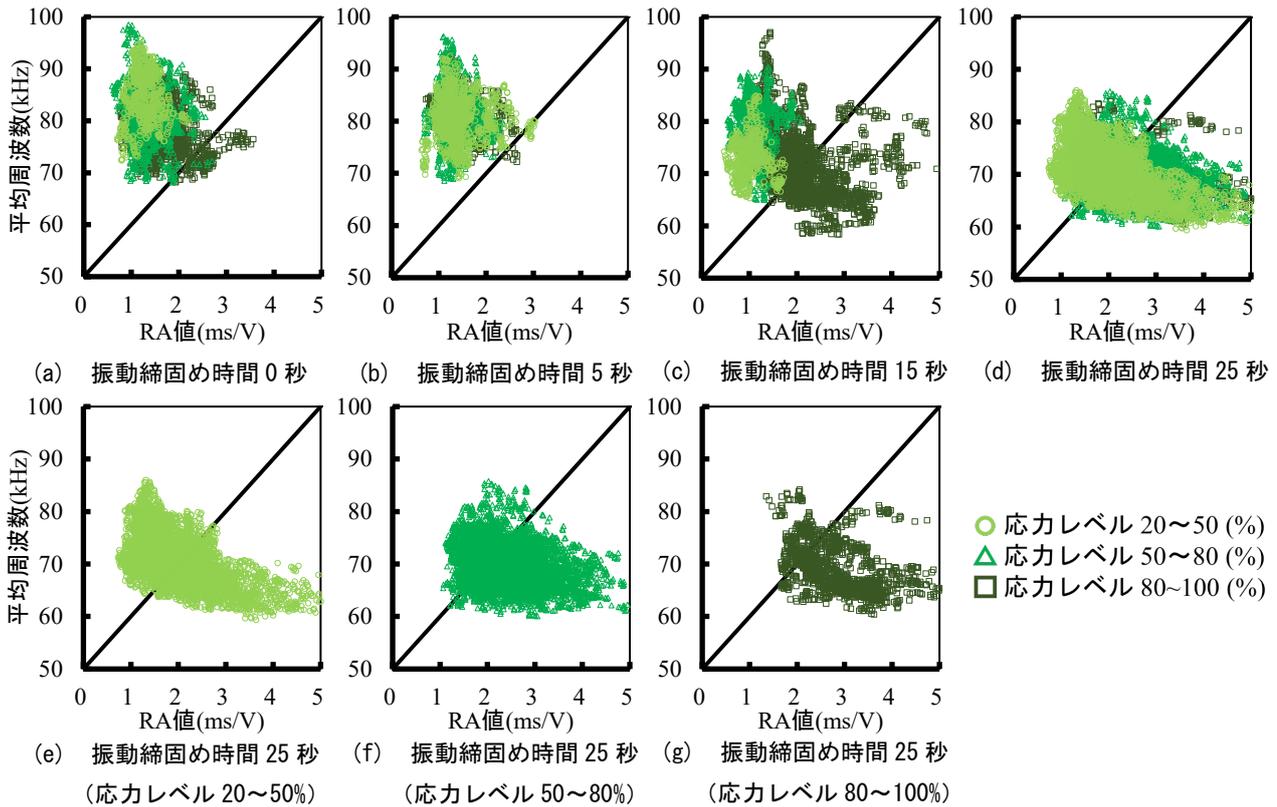


図-8 平均周波数と RA 値の関係

が確認された。よって、振動締め時間 0 秒、25 秒では、応力レベル 50%を境に、それぞれ異なる AE 現象が発生していたことが考えられる。

(2) 平均周波数と RA 値の関係

平均周波数と RA 値の関係を、図-8 に示す。結果より、破壊直前のデータが不足している振動締め時間 5 秒を除き、振動締め時間 0 秒から振動締め時間 25 秒にかけて振動締め時間が長くなるほど、プロット範囲がせん断型側へと推移していることについても確認された。一方で振動締め時間 0 秒、5 秒、15 秒において、せん断型と識別されたプロットのほとんどは、応力レベルが 80%以上の範囲であった。振動締め時間 25 秒では、応力レベル 20~50%の時点において、既にせん断型と分類されるものが多くみられ、以後においても、せん断型に多く分類されるといった特徴があった。また、累計 AE ヒット率の傾向による分類より、振動締め時間 5 秒、15 秒の応力レベル 20~80%では、ほぼすべて引張型クラックに分類された。

振動締め時間が長くなるほど、フレッシュコンクリート内では材料分離が生じ、ブリーディングが増加することが考えられる。また、ブリーディングによって骨材下面に水が拘束され、骨材下面に空隙を生じさせること⁹⁾や、打ち込み方向上部にかけて毛細管空隙が増加すること¹⁰⁾などが、既往研究より報告されている。これらのことから、微視的視点では振動締め時間の増加により、

遷移帯や毛細管空隙などの連続空隙が増加するなどして、影響を及ぼすことが考えられる。

AE モニタリングによる破壊挙動としては、まず、引張型の破壊が生じ、その後、引張型の破壊により生じたクラックが連結し、コンクリート内部でずれや摩擦を生じさせ、せん断型の破壊に移行する。また、破壊の起点になるのはコンクリート中に含まれる空隙であると考えられる。

振動締め時間が短い供試体では、巻き込み空気などの粗大な空隙などは多く残存することが考えられる。一方で、ブリーディングの上昇が緩やかであることにより、連続的な空隙は形成されにくかったと考えられる。このため、振動締め時間 0 秒や 5 秒において引張型クラックに分類される AE が多数見られたことが考えられる。

振動締め時間が長い供試体では、巻き込み空気などの粗大な空隙は十分に除去されてモルタル部はマクロには密になることが考えられる。しかし、ブリーディングの影響により、毛細管空隙や遷移帯といった連続的で微小な空隙がコンクリート全体において生じることが考えられる。そのため、それらの空隙を起点としたずれや摩擦などに起因する、せん断型クラックに分類される AE 現象が初期の応力レベルより多くなったことが推測される。したがって、特に、振動締め時間 25 秒において、AE ヒットや、せん断型クラックに分類される AE が非常に多く検出され、その発生頻度も非常に高かったことが

考えられる。

4.4 中性化試験結果

図-9に促進期間26週経過時における各ケースの中性化深さの平均値を示す。この結果から、先述した平均周波数とRA値の関係より初期の応力レベルからせん断型破壊への移行が見られた振動締固め時間25秒の供試体の中性化深さの平均値が最大であることが確認された。これは上述のように、振動締固め時間の増加によって、微小かつ連続的な空隙が増加したことにより、コンクリートの物質透過抵抗性が低下したことによる影響であると推察される。太田らの結果³⁾における結果と相反するものの、配合や材料、供試体の寸法と振動時間、中性化期間などが異なり、それらの差異によって結果に影響したことが推測される。

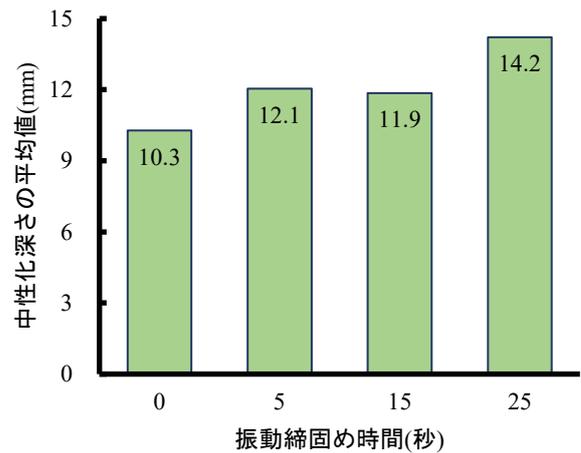


図-9 26週経過時における中性化深さの平均値

5. まとめ

本実験では、振動締固め時間が圧縮強度試験時の損傷・破壊過程および中性化に与える影響について、圧縮試験時のアコースティック・エミッション法によるモニタリングの適用と促進中性化試験により検討を行った。以下に本検討の範囲で得られた結果を示す。

- 1) 圧縮強度試験後のコンクリート供試体の破壊状況より、振動締固め時間の相違によって破壊形状に差異が生じることが確認された。
- 2) 圧縮強度試験時にAE法による微小な破壊挙動についてモニタリングした結果、振動締固め時間が長い場合、圧縮強度は大きくなるものの、早期におけるせん断クラックへの移行が確認され、これについては、コンクリート内部の微小な空隙の連続性に起因することが推測される。
- 3) 振動締固め時間が長い場合、中性化深さが大きくなることが確認され、物質透過抵抗性の低下が示唆されるとともに、2)に示した空隙の連続性を裏付けるものと考えられる。

以上より、振動締固めが過剰となることでもっとも懸念されることは、微小な空隙の構造が連続になる可能性があり、このことが物質移動抵抗性に影響を与えかねないことである。ただし、本論文にて示す結果は、限定的な条件でのものであるため、今後は、配合条件や供試体の寸法による影響などを踏まえた検討を行いたい。

参考文献

- 1) 国土交通省：2018年10月12日 i-Construction 推進コンソーシアム 第4回企画委員会 資料-1, p.39, 2018.10

- 2) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕, p.122
- 3) 太田真帆, 伊代田岳史：性状が異なるコンクリートにおける適切バイブレータの締固めの方法の提案, 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, Vol.16, p.183-188, 2016.10
- 4) 神代泰道, 金子智弥：コンクリートの締固め状況の可視化に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, 2015.7
- 5) 梁俊, 國府勝郎, 宇治公隆, 上野敦：フレッシュコンクリートの締固め性試験法に関する研究, 土木学会論文集E, Vol.62, No.2, p.416-427, 2006.6
- 6) 坂野大世, 山田悠二, 川崎佑磨：振動締固め時間がコンクリートの力学的特性および細孔構造に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, p.1198-1203, 2020.7
- 7) 西畑清華, 渡辺健, 橋本親典, 大津政康：再生骨材コンクリートのAE発生特性の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, p.1991-1996, 2006.7
- 8) 小阪義夫, 谷川恭雄：コンクリート圧縮供試体の内部応力分布におよぼす載荷面の拘束の影響, コンクリートジャーナル, Vol.8, No.号, p.12-18, 1970.6
- 9) 田籠滉貴, 伊代田岳史：ブリーディングによる空隙構造の違いが物質透過性に及ぼす影響, 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, Vol.16, p.189-194, 2016.10
- 10) 石垣邦彦, 胡桃澤清文, 名和豊春：ブリーディングがセメントペースト硬化体の微細構造に及ぼす影響評価, セメント・コンクリート論文集, Vol.66, No.1, p.111-118, 2012.2