

論文 再振動締固めの最適な時期に関する AE 法に基づいた圧縮破壊メカニズムの考察

吉岡 優志郎*1・川崎 佑磨*2・山田 悠二*3・清水 駿太郎*4

要旨：再振動締固めはコンクリートの品質向上に有用であり、遅い時期に再振動することが望ましいと報告されている。しかし圧縮破壊メカニズムについて詳細に検討されていない。そこでアコースティック・エミッション（AE）法を用いて、再振動締固め時期の異なるコンクリートの圧縮破壊メカニズムを考察した。その結果、本研究の範囲ではコンクリート抵抗値 $18 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ 程度となる時期に再振動を加えることが適していることがわかった。また、AE パラメータ解析では、再振動時期を遅らせた場合、粗骨材界面が改善されるが、モルタル部の緻密性は低下することが示唆され、物質移動抵抗性でもその影響が確認できた。

キーワード：圧縮破壊メカニズム、コンクリート抵抗値、再振動締固め、物質移動抵抗性、AE 法

1. はじめに

高度経済成長期以降、インフラ設備のために大量のコンクリート構造物が急速に施工された。そのため、現在になって当時の施工における不備が散見され始めており、これらの構造物に対して初期欠陥やひび割れなどといった様々な問題が顕在化している。施工欠陥のない高品質なコンクリートを作製する手段の一つに、再振動締固め（以下、再振動と称す）がある。再振動とは、コンクリートを締固めた後に適切な時期に再び振動を加える手法である。再振動を行うことで気泡や余剰水の除去による圧縮強度、鉄筋との付着強度の向上および沈下ひび割れの低減に効果があり、コンクリートの品質向上に大きな影響を与えることが報告されている¹⁾。再振動はできるだけ遅い時期に行うことが望ましいとされているが、その実態については明確になっていない点が多く、再振動の時期がコンクリート中のどの箇所にどのように影響するのか不明瞭である。また、硬化コンクリートの品質に与える影響に関する情報は極めて少ない²⁾。

アコースティック・エミッション（以下、AE と称す）法とは、コンクリート中での破壊によって生じた弾性波を検出するものであり、AE パラメータ解析を行うことによってコンクリート中で生じた破壊の発生数やクラッ

クの分類、破壊の規模等を分析することができる手法である。既往の研究では、圧縮載荷時のコンクリートのひび割れの種類（ボンドクラックやモルタルクラック）とそのひび割れが発生する応力レベルの関係について多くの知見が得られている³⁾。そのため、圧縮載荷時の AE 挙動を応力レベルごとに評価することで比較的簡易にコンクリート中に発生するひび割れを分類することができ、詳細な分析が可能であると考えられる。

以上を踏まえ本研究では、時期を変化させて再振動を行ったコンクリートの圧縮破壊メカニズムを詳細に考察して、適切な再振動時期の推定を試みた。同時に、促進中性化試験から物質移動抵抗性の評価も行い、AE 法に基づく再振動時期の評価の有用性を確認した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

本研究での使用材料を表-1 に示す。コンクリートの配合を表-2 に示す。目標空気量は $4.5 \pm 1.5\%$ 、目標スランプは $12 \pm 2.5 \text{ cm}$ とした。

2.2 試験項目

力学的特性については、圧縮強度試験と静弾性係数試験を行った。圧縮強度試験は JIS A 1108、静弾性係数試験

表-1 使用材料の特性

材料	記号	産地/供給地	特性
セメント	C	普通ポルトランドセメント	密度 3.14 g/cm^3
水	W	水道水	密度 1.00 g/cm^3
細骨材	S	甲賀土山産砕砂	表乾密度 2.62 g/cm^3 、吸水率 1.73% 、実積率 65.3%
粗骨材	G1	甲賀土山産碎石 1505	表乾密度 2.67 g/cm^3 、吸水率 0.97% 、実積率 58.3%
	G2	甲賀土山産碎石 2010	表乾密度 2.66 g/cm^3 、吸水率 0.69% 、実積率 58.7%
混和剤	Ad1	高性能 AE 減水剤	密度 1.06 g/cm^3
	Ad2	AE 減水剤（100 倍希釈）	密度 1.04 g/cm^3

*1 立命館大学 理工学部環境都市工学科（学生会員）

*2 立命館大学 理工学部環境都市工学科准教授 博士（工学）（正会員）

*3 山口大学 工学部社会建設工学科講師 博士（工学）（正会員）

*4 立命館大学 理工学研究科環境都市専攻

表-2 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m³)					Ad (C×%)		SL (cm)	Air (%)	Temp (°C)
		W	C	S	G1 1505	G2 2010	Ad1	Ad2			
55	47	170	309	845	389	585	0.7	0.3	13.0	4.0	25.3

は JIS A 1149 に準拠して行った。圧縮破壊過程については、上記とは別で AE 計測のための圧縮試験を行い、得られた波形データの各種パラメータ解析を行った。AE センサは図-1 に示す位置に設置した。コンクリートの物質移動抵抗性については促進中性化試験を JIS A 1153 に準拠して行い、測定する試験体には 100×100×400mm の角柱供試体を用いた。また、中性化深さの測定は JIS A 1152 に準拠して行った。測定箇所は 100×100mm 断面の高さ方向片側 5 箇所、1 供試体あたり合計 10 箇所とし、1 ケースあたり 3 本計測した平均値を評価した。

2.3 再振動締固めの実施方法

型枠への打込みは 2 層に分けて行った。円柱供試体では、初期振動は 1 層につき、棒状バイブレータによる振動締固めを図-1 の位置で 5 秒行い、木槌による打撃振動を型枠側面に円周方向の等間隔 4 箇所を 4 回ずつ行った。その後、再振動として、棒状バイブレータを用いて図-2 の位置に 5 秒間の振動を加え、再度、打撃振動を行った。角柱供試体は、バイブレータ振動は 100×100×100mm 区画内中央部に 1 箇所の計 4 箇所、木槌振動は型枠外側に等間隔 8 箇所に行った。棒状バイブレータは振動体の直径 28mm、出力 280W、振動数 200～242Hz のものを用いた。再振動実施時期の指標には N 式貫入深さより求めたコンクリート抵抗値を用いた。コンクリート抵抗値は以下の式 (1) より算出した。

$$R = mgh / (L/A) \quad (1)$$

ここで R:コンクリート抵抗値 (×10⁻³N/mm²)

m:突き棒質量 (g) g:重力加速度 (m/s²)

h:落下高さ (mm) L:貫入深さ (mm)

A:貫入した部分の突き棒の表面積 (mm²)

N 式貫入深さ試験の概要として、ポリバケツ (φ450×350mm) 内に打設したコンクリート打ち上がり面に対して、スランブ試験用の突き棒 (φ15×500mm) を垂直に設置した塩ビ管 (φ25mm) 内に挿入し自由落下させ、コンクリートへの貫入深さを測定した。落下高さについては 1000mm で行った。貫入深さは、100mm が最も効果が高いと報告されている²⁾ため、その前後を含めた 120mm, 100mm, 70mm に達した時期を再振動実施時期とした。その結果から得られたそれぞれのコンクリート抵抗値である 11×10⁻³N/mm², 18×10⁻³N/mm², 39×10⁻³N/mm² を試験体名とした 11N, 18N, 39N, および P (再振動なし) の 4 ケースで各種実験を行った。

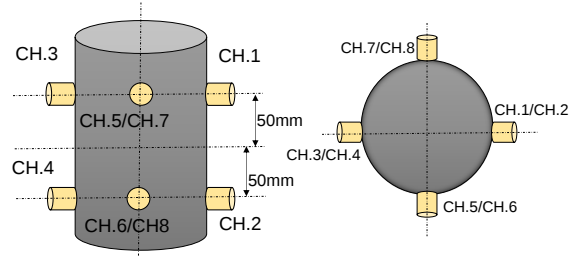


図-1 AE センサの設置位置

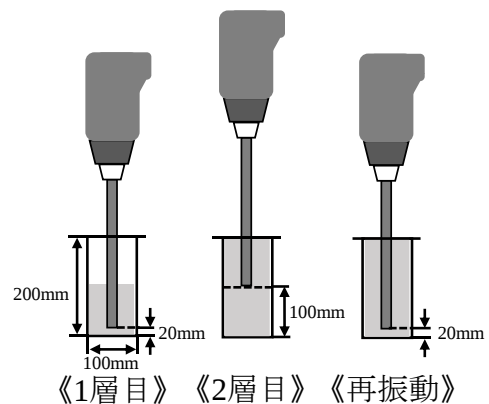


図-2 供試体振動位置

3. AE 計測

3.1 計測方法

共振周波数 150kHz の AE センサを図-1 に示すように 8 個設置した。設置箇所は供試体 AE センサ設置箇所のコンクリート表面は平滑になるように研磨した。その後、エレクトロニックスで供試体に接着した。周波数帯域が 10kHz～2MHz の AE 計測器を使用して、増幅レベルを 60dB, しきい値を 40dB に設定して計測した。また、テフロンシートにグリスを塗って載荷板と供試体の間に設置した。これは、載荷試験時に載荷板と供試体の摩擦によって AE 現象を検出するため、その影響を低減するためである。

検出される AE 現象から得られる AE パラメータの例を図-3 に示す。このうち、図-4 に示すように、ひび割れ識別としてよく利用される RA 値 (立上り時間/最大振幅値) と平均周波数 (カウント数/継続時間) の関係を使用した。RA 値は波形の立上り角度の逆数を示すことから、RA 値が小さく平均周波数が高い場合は突発型の波形を示す傾向があり、ひび割れ発生などに起因する一次 AE と呼ばれ引張型の AE 現象に分類できる。一方で、RA 値が大きく平均周波数が低い場合は連続型の波形を

示す傾向があり、ひび割れ進展などに起因する二次 AE と呼ばれせん断型の AE 現象に分類することができる⁴⁾。

3.2 振幅分布(Ib 値)

マグニチュード M と地震が発生する回数を N とするとき次の統計則が成り立つ。

$$\log_{10}N = a - bM \quad (2)$$

ここで N :発生総数 (個) M :マグニチュード

a, b :定数

式 (2) で傾きは $-b$ と負で表せることにより、この b 値が小さいと規模の大きい破壊傾向、 b 値が大きいと規模の小さい破壊傾向を示している。この振幅分布は岩石等の固体材料における微小破壊の事象と同一性を示すことがわかっている⁵⁾。そのため、これらの関係はコンクリートから得られた AE のパラメータ解析で用いることが知られている。しかし、AE と地震ではさまざまな違いがある。例えば、地震に比べて波形長さが短時間である点や AE の最大振幅値の上下限值付近では中央付近に比べて式 (2) のような直線近似が容易にできないことなどが挙げられる。そこで b 値決定の振幅範囲を、得られた AE データをもとに算出した平均値 μ と標準偏差 σ を用いて決定する改良 b 値 (Ib 値) を用いた。

$$Ib = \frac{\log_{10}N(w_1) - \log_{10}N(w_2)}{(\alpha_1 + \alpha_2)\sigma} \quad (3)$$

ここで $N(w_1)$:振幅 $\mu + \alpha_1\sigma$ 以上の AE 累積数

$N(w_2)$:振幅 $\mu + \alpha_2\sigma$ 以上の AE 累積数

$(\alpha_1 + \alpha_2)\sigma$:振幅の範囲

なお、平均値と標準偏差を算出するための AE データ数を 100 個とし、 $\alpha_1=1$ 、 $\alpha_2=0$ として Ib 値を求めた。大きな AE 現象を示唆する Ib 値は 0.05 以下であることが報告されており⁶⁾、本研究でも 0.05 を基準として破壊挙動を考察した。

4. 実験結果

4.1 強度試験

各ケースの材齢 28 日における圧縮強度試験と静弾性

係数試験の結果を図-5 に示す。結果は供試体 3 本の平均値を示している。圧縮強度は P と比べて 11N は 5%、18N は 7%、39N は 4%増加した。静弾性係数は P に比べて 11B は 8%、18B は 6%、39B は 3%増加した。再振動締めを行うことにより圧縮強度および静弾性係数の増加が全ケースで確認できた。既往研究²⁾から、再振動を行うことで初期振動に加えてブリーディング水が更に除

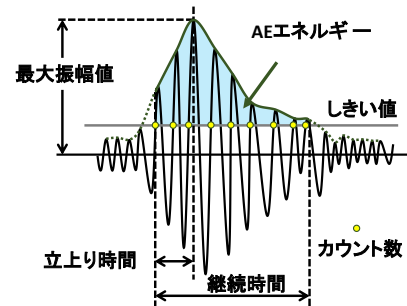


図-3 検出される AE 波形の例

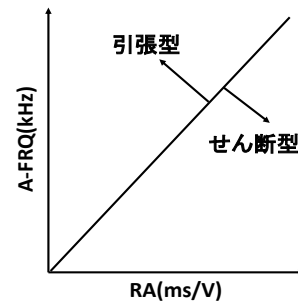


図-4 RA 値と平均周波数 (A-FRQ) の関係

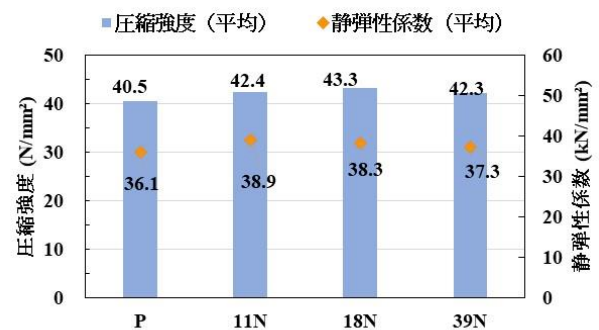


図-5 圧縮強度試験結果

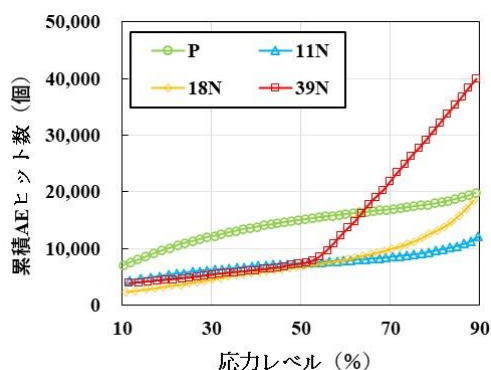


図-6 応力レベル 10~90%の累積 AE ヒット数

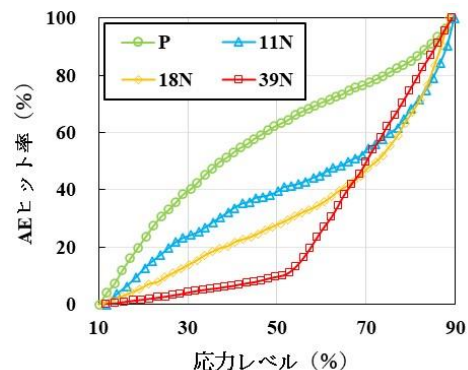


図-7 応力レベル 10~90%の AE ヒット率

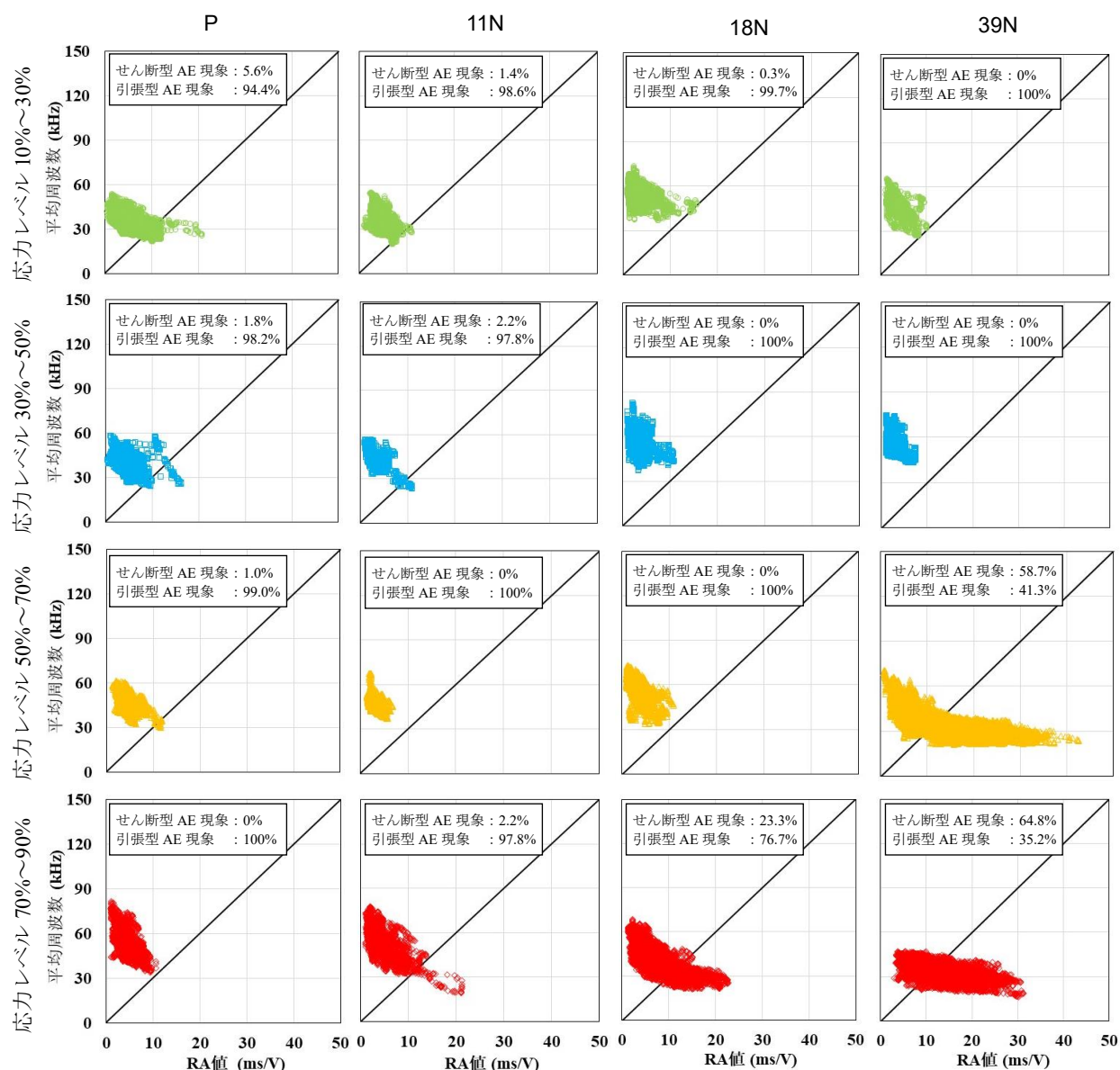


図-8 AE 解析結果(RA 値-A-FRQ)

去されることが報告されている。そのため本研究においても再振動を行った試験体では同様の現象が図られたと考えられ、再振動を行っていない P 以上に実質的な水セメント比が低下したと推察できる。また、骨材界面に残留していたブリーディング水が除去されたことでコンクリート硬化後の内部空隙が減少した可能性が考えられる。

4.2 AE 解析結果

(1) AE ヒット数-AE ヒット率

各ケースの応力レベルと累積 AE ヒット数の関係を図-6 に示す。なお、載荷初期は載荷板と供試体の圧着、破壊直前では大きい破壊が連続し破壊の進展が早いことや AE センサがコンクリート表面のひび割れや剥離により外れることがあり、信頼性が得られないことから、応力レベル 10%以下、90%以上を評価対象外とした⁷⁾。以下の AE 計測の結果も同様とした。

図-6 によると、再振動を行うことで再振動の時期によらず、応力レベル 50%程度までの AE ヒット数が P に比べて減少する傾向が確認された。一方で、再振動の時期が遅くなる(コンクリート抵抗値が大きくなる)ほど、応力レベル 50%以降の AE ヒット数が増大しやすくなり、また AE ヒット数の増加が顕著となる応力レベルは再振動の時期が遅いほど低いことがわかる。

応力レベルと累積 AE ヒット率の関係を図-7 に示す。これは、各応力レベルでの累積 AE ヒット数を応力レベル 10~90%で発生した総 AE ヒット数で除して百分率で表したものであり、AE ヒット数の増大の傾向をより明確にしたものである。これによると、再振動時期を遅くするにつれて低応力レベルでの AE ヒット率が減少し、後半にかけて増大しやすくなる傾向が明確となった。一般に、応力レベル 50%までは骨材界面のボンドクラック

が発生しやすく、それ以降ではモルタルクラックの発生が多くなるとされている⁸⁾。このことから、応力レベル50%以下のAEはボンドクラック、これ以降の応力レベルではモルタルクラックによるAEが卓越していると推定される。これを踏まえると、再振動の時期を遅くするほど粗骨材界面に蓄積されるブリーディング水が多くなり、これが除去されることで硬化後に粗骨材界面に形成される空隙が減少しやすくなり、ボンドクラックが発生しにくくなったと考えられる。さらに、再振動の時期が遅いと、コンクリートの凝結が進行し、モルタル部分に形成されるブリーディング水の水道がふさがりにくなり、モルタル部の緻密度が低下することでモルタルクラックが増大しやすく、モルタルクラックが発生する応力レベルでのAEの発生が顕著になったと考えられる。

(2) RA 値—平均周波数

各ケースのAE計測によって得たデータからRA値および平均周波数を算出した。図-8はそれらの関係を応力レベル20%ごとに分けて図示した。また、せん断型AE現象と引張型AE現象の割合を図中に示している。ここで、せん断型AE現象とは、クラックの開口を意味する引張型AE現象が連続的に発生してクラックが連結することで生じるものである。

再振動を行ったケースではPと比べて、応力レベル50%までのせん断型AE現象が少ない傾向にあった。これは上述の通り、再振動を行うことでボンドクラックが生じにくくなったことで、クラックが連結しにくくなったためではないかと考えられる。一方で応力レベル50%以上の場合においては、再振動の時期を遅らせるほどせん断型AE現象の増加傾向が顕著となった。特に再振動の時期を最も遅らせた39Nでは、応力レベル50~70%の領域からせん断型AE現象の傾向が顕著となっており、他のケースに比べて早期にクラックの連結が生じやすくなる傾向が推測できる。これは、モルタルクラックが多く発生したことによってひび割れ同士の連結が生じやすくなったことが影響したものと考えられる。

(3) I_b 値—AE エネルギー

各ケースのAE計測で得たデータから I_b 値、AEエネルギーを算出した。図-9から図-12はそれらと応力レベルの関係を示している。Pや11Nでは、初期の応力レベルから I_b 値は頻繁に0.05を下回っており、AEエネルギーも大きい。このことから、载荷初期からコンクリート内部で大きな破壊が発生していると考えられる。これはRA値と平均周波数の結果と同様に、ボンドクラックの破壊が多発しているためと考えられる。18Nや39Nでは、比較的AEエネルギーが低く、 I_b 値もほとんど0.05を上回っている。再振動によってボンドクラックの発生を抑制したことが考えられる。高応力レベルにおいて

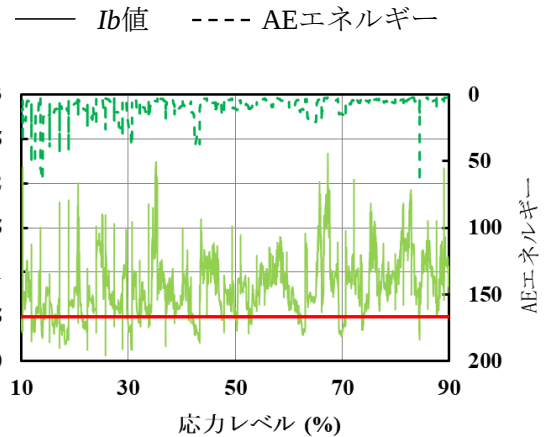


図-9 P(I_b 値-AE エネルギー)

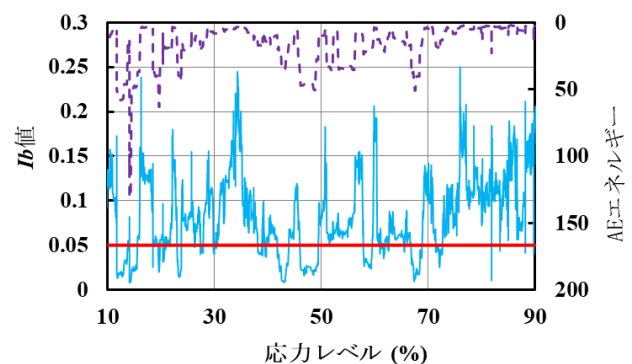


図-10 11N(I_b 値-AE エネルギー)

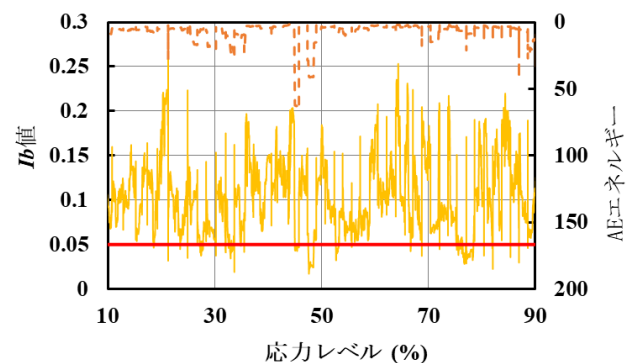


図-11 18N(I_b 値-AE エネルギー)

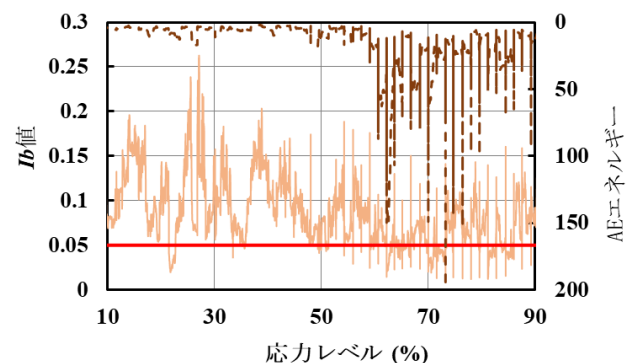


図-12 39N(I_b 値-AE エネルギー)

18N では、 I_b 値は 0.05 を上回り、AE エネルギーも比較的に低い。一方で 39N では、 I_b 値が頻繁に 0.05 を下回っており、AE エネルギーも増大していることから、規模の大きい破壊が発生していると考えられる。

4.3 促進中性化試験結果

各ケースの促進中性化試験 13 週目時点の結果を図-13 に示す。P と比較して 11N は 25%，18N は 33% 中性化深さが減少したが、39N では 6% 中性化深さが増加しており、39N は中性化に対する抵抗性が低下した。

AE 解析の結果より、39N ではボンドクラックの発生が予想される応力レベルにおいてクラックに対する高い抵抗性が確認された。一方で、モルタルクラックの発生が予想される応力レベルの領域においては、再振動を行っていないものよりも AE 発生数の増加が顕著になった。また、クラックの連結が早くその破壊規模も大きかったことから、モルタル部分の緻密度が低下していると推察した。そのため、この影響により 39N の中性化に対する抵抗性が低下したと考えられる。これらのことから、粗骨材界面の改善は再振動の時期が遅いほど効果的であり、圧縮強度からも確認できたが、モルタル部分の緻密度は再振動の時期が早い方が得られやすいと考えられる。すなわち、粗骨材界面の改善とモルタルの品質の関係はトレードオフになるため、両者のバランスが最適になる時期に再振動を実施することが圧縮強度の向上だけではなく物質移動抵抗性を向上させるうえで望まれる。本検討の範囲ではコンクリート抵抗値が $18 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ となる時期が物質移動抵抗性を向上させるうえで最も適しているという結果が得られた。

5. まとめ

本研究では、コンクリート抵抗値を指標に再振動の時期を変化 (11×10^3 , 18×10^3 , $39 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$) させて再振動締めを行ったコンクリートの強度特性、AE 特性、中性化に関する検討を行った。本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 圧縮強度と静弾性係数は、再振動締めを行うことで増加した。一方で、再振動締めの時期による相違は認められなかった。
- (2) AE 解析では、再振動締めを行うことで低応力レベルにおいて規模の大きい AE 現象が減少する傾向が見られた。高応力レベルにおいては規模の大きな AE 現象やせん断型 AE 現象が増加する傾向が見られた。特にコンクリート抵抗値 $39 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ ではそれが顕著に表れた。
- (3) 促進中性化試験の結果、コンクリート抵抗値が $18 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ となるまでに再振動を加えることで再振

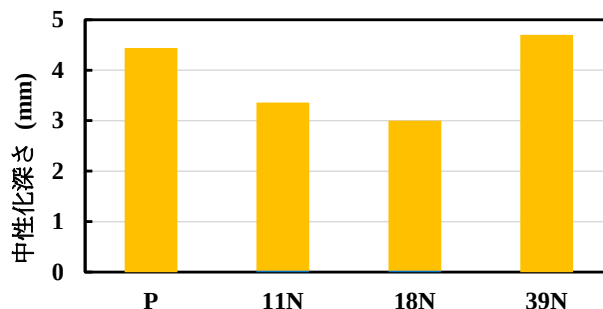


図-13 促進中性化試験結果 (13 週目)

動を行っていないものと比べて中性化深さが減少した。しかし、コンクリート抵抗値 $39 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ では再振動を行っていないものに比べて中性化深さが増加した。したがって、物質移動抵抗性が向上する最適な再振動時期が存在すると考えられる。

- (4) 今回の配合ではコンクリート抵抗値が $18 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ 程度の時期に再振動を加えることで、粗骨材界面を改善するとともにモルタル部分の密実性を得られると推察され、強度や物質移動抵抗性の向上を図れることがわかった。

参考文献

- 1) 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書（施工編），pp.119，2017.4
- 2) 佐藤悠士朗，樋原弘貴ほか：コンクリートの最適な再振動の実施に向けた実験的検討，コンクリート工学論文集，Vol.31，pp.11-22，2022
- 3) 山田悠二，川崎佑磨ほか：鉄鋼スラグ粗骨材を使用したコンクリートの圧縮破壊過程の AE モニタリング，材料，Vol.71，No.6，pp.540-547，2022.6
- 4) 日本コンクリート工学協会：コンクリート便覧（第 2 版），技報堂出版，1996.2
- 5) 塩谷智基：地盤内破壊評価法へのアコースティック・エミッションの適応に関する研究，熊本大学学位論文，1998.3
- 6) 日本非破壊検査協会：非破壊検査技術シリーズ アコースティック・エミッション試験Ⅱ，pp.98-100，2008
- 7) 伊岐見哲也，鎌田敏郎，内田慎哉：表面を油で覆われた粗骨材を用いたコンクリートにおける AE 法による圧縮破壊性状の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，2006
- 8) 小阪義夫，谷川恭雄，太田福男：コンクリートの破壊挙動に及ぼす粗骨材の影響（第 2 報：マイクロクラック観察法による検討），日本建築学会論文報告集，No.231，1975.5