

論文 拘束条件の有無による非鉄スラグ細骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮特性の評価

中島 和俊*1・渡辺 健*2・橋本 親典*3・石丸 啓輔*4

要旨：本研究では、非鉄スラグ細骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮特性を拘束条件の有無によって検討するために、長さ変化試験による自由収縮ひずみ、リング試験による拘束下でのひずみおよびひび割れ挙動により評価を行った。更に、リング試験において AE 法を用いて微小な破壊挙動の計測を実施した。その結果、非鉄スラグ細骨材を置換したコンクリートの乾燥収縮抑制効果を確認した。また、銅スラグ細骨材を用いたコンクリートにおいては、累計 AE ヒット数の増加と AE 振幅の減少から、乾燥収縮に起因する微小破壊が局所化せず、ひび割れ分散性を有する可能性が示された。

キーワード：銅スラグ、フェロニッケルスラグ、乾燥収縮、ひび割れ、リング試験、AE 法

1. はじめに

近年、環境保護の観点から、川砂、海砂などの良質な骨材の採取規制が行われている。それに伴い、碎石砕砂が主流となりつつある。一般にこれらの碎石砕砂は、川砂、海砂などに比べ、骨材の粒径が悪く、吸水率が低いことから、品質が安定した良質な骨材の供給形態の構築が急務となってきた。

本研究で着目したのが産業副産物である非鉄スラグである。非鉄スラグには、銅スラグやフェロニッケルスラグなどが挙げられ、JIS によりコンクリート用骨材として規定¹⁾されている。これら非鉄スラグの特徴としては、碎石砕砂よりも弾性係数が高く、吸水率が低いことなどから、乾燥収縮抑制効果²⁾が期待できる。銅スラグの生産は西日本で約 80%と多く、西日本において、非鉄スラグを代替骨材として用途拡大が期待できる。

一方で、非鉄スラグを 30%程度置換した範囲内での検討はされているものの、置換率 30%を超えたコンクリートの諸特性については知見が少ない。

そこで本研究では、非鉄スラグ細骨材を置換したコンクリートの長さ変化試験による最終収縮量から乾燥収縮抑制効果の評価、リング試験による目視で確認可能な乾燥収縮ひび割れの評価、AE 法による目視で確認可能なひび割れ発生以前のコンクリート内部の微小破壊の挙動を評価し、非鉄スラグ細骨材を置換したコンクリートの乾燥収縮抑制効果の検討を行った。

なお、本研究では、乾燥収縮量を定量化する試験である JIS A 1129 の長さ変化試験と乾燥収縮ひび割れの評価に利用される ASTM C 1581 のリング試験を実施するものとした。更に、既往の研究³⁾⁴⁾より、乾燥収縮により引

き起こされる微小破壊をアコースティック・エミッション法(以下、AE 法と称す)で評価した事例が示されている。AE 法は、ひび割れが目視で確認できるまでのコンクリート内部の微小破壊を検出および解析することで、より詳細にひび割れの低減効果を検討できることから採用した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本研究で使用した材料の物理的性質を表-1 に示す。セメントは普通ポルトランドセメント(密度: 3.16g/cm³)を使用した。また、粗骨材は、最大寸法が 15mm と 20mm の骨材を 4:6 の割合で混ぜて使用した。非鉄スラグ細骨材は JIS A 5011-2 および JIS A 5011-3 に規定されるそれぞれ産地の異なる 2 種類を使用した。

2.2 配合

本研究で使用した配合を表-2 に示す。目標スランプは全て 8±2cm、空気量 4.5±1.5%で一定とした。コンクリートの配合は、非鉄スラグ細骨材の置換による効果を検討するため、W/C を一定とし、非鉄スラグ細骨材を普通細

表-1 材料物性値

骨材		記号	産地	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
非鉄スラグ 細骨材	フェロニッケル スラグ	FNS1.2	大江山	3.08	0.31
		FNS5.0	八戸	3.08	1.78
	銅スラグ	CUS2.5	小名浜	3.53	0.1
		CUS2.5	東予	3.6	0.11
普通骨材	碎石(砂岩)	G	板野町	2.57	1.6
	砕砂(硬質砂岩)	N	阿波市	2.57	1.77

*1 徳島大学大学院 先端技術科学教育部 知的力学システム工学専攻 博士前期課程 (学生会員)

*2 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門 准教授 博士(工) (正会員)

*3 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門 教授 工博 (正会員)

*4 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部総合技術センター 技術専門職員 (正会員)

表-2 配合およびフレッシュ性状

配合	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					混和剤(C×%)			SL (cm)	air (%)	Ct (℃)	
			W	C	S			G	AE 減水剤	高性能 AE減水剤				AE剤
					N	FNS	CUS							
N (普通骨材)	47	45	165	350	780	－	－	949	0.5	－	0.2	8	3.5	21.3
FNS1.2-30% (大江山産)		43			522	268	－	950	0.7	－	0.2	8.5	4	20.5
FNS5.0-50% (八戸産)		46			399	478	－	951	0.5	－	0.2	9	4.5	21.1
FNS5.0-100% (八戸産)		47			－	976	－	952	0.35	－	0.2	10	5.5	21
CUS2.5-50% (小名浜産)		45			390	－	536	953	－	0.35	0.25	10	4.5	18.8
CUS2.5-100% (小名浜産)		46			－	－	1095	954	－	0.28	0.2	8	4	19
CUS2.5-50% (東予産)		46			399	－	547	955	－	0.3	0.2	7.5	4	18.8
CUS2.5-100% (東予産)		48			－	－	1142	956	－	0.2	－	7	5	18.6

骨材に容積置換した。フェロニッケルスラグの置換率は、30%,50%,100%の3水準、銅スラグの置換率は、50%,100%の2水準とし、細骨材の置換率による違いについて検討した。AE 減水剤はリグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体を、高性能 AE 減水剤はポリカルボン酸エーテル系化合物が主成分のものを、AE 剤にはアルキルエーテル系陰イオン界面活性剤が主成分のものを使用した。

2.3 強度試験

圧縮強度試験(JIS A 1108)、静弾性係数試験(JIS A 1149)に準じ、材齢 7 日、28 日の 2 水準でそれぞれ行った。円柱供試体を 5 体作製し、平均した値を圧縮強度および静弾性係数とした。

2.3 長さ変化試験

本研究室では、JIS A 1129-2「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法：コンタクトゲージ法」(以後、JIS 法という)の 1/4 の日数で最終的な乾燥収縮量を把握できる急速乾燥収縮試験⁹⁾を提案しており、本研究では、これに準拠した試験を行った。

試験方法は、角柱供試体(100×100×400mm)を用い、表面と裏面に、中央部分と左右 100mm 間隔でコンタクトチップを 3 枚ずつ貼り付け、測定時の標点とし、1 供試体につき表面 2 か所、裏面 2 か所の合計 4 か所の 2 点間の長さ変化を測定した。最小目盛 1/1000 まで読み取り、4 箇所の乾燥収縮ひずみの平均を算出することで、精度向上を図った。その後、脱型後 1 週間水中養生したものを材齢 0 日とし、乾燥炉を利用して炉内温度を 40℃、湿度 15±5%で低温炉乾燥させ 56 日あるいは収束するまで測定を実施した。なお、前回の収縮ひずみと今回の収縮ひずみの差が全体の収縮ひずみの 5%以下になった時、収縮は収束したものとみなす。この試験では、JIS 法による最終的な乾燥収縮量より安全側な値を得ることができる⁹⁾ことから、各種使用骨材による収縮ひずみの実際の低減効果を短期間で把握するために利用した。

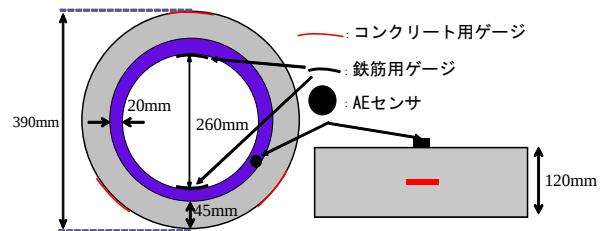


図-1 リング供試体概要

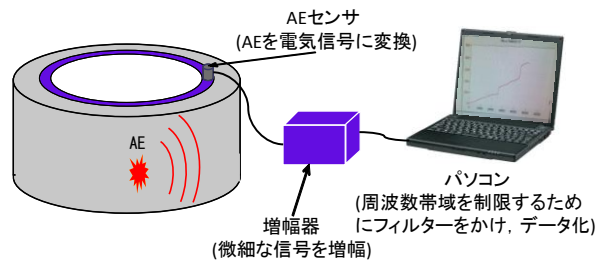


図-2 AE 検出の概略図



写真-1 リング試験および AE 計測

2.4 リング試験

リング供試体は、図-1 に示すような外径 390mm、高さ 120mm、コンクリート部分の厚さ 45mm、内側を厚さ 20mm の鋼製リングで拘束するものとした。

本実験では、既往の研究⁹⁾を参考に、養生は行わず、打設後 1 日目のものを材齢 1 日とし、リング供試体外面

のコンクリート部分にコンクリート用ひずみゲージを 3 本貼り付け、コンクリート外面のひずみを測定した。また、リング供試体上面をアルミニウムテープで覆い、下面は非吸湿材であるコンクリートパネルを敷くことにより、水分の蒸散をコンクリート側面に限定した。更に、既往の研究に加え、収縮に伴う微小破壊以外の外部からの振動を可能な限り抑えるため、発砲ポリエチレン製のマットを敷いた。計測方法は、ひずみゲージの貼り付けや上記の処理を行った後、恒温室内(温度 20℃, 湿度 60%)に静置し、収縮ひずみの測定およびクラックスケールによるひび割れ幅の測定を行った。なお、複数ひび割れが発生した供試体については最大ひび割れ幅のものをひび割れ幅とした。写真-1 に試験の様子を示す。

2.5 AE 法

AE 法の原理は、コンクリート等の個体材料に荷重などの外力を与えることにより、材料内部から発生する弾性波は材料内部を伝播し、表面に取り付けた AE センサによって電気信号に変換されることにある。その後、微弱な信号は増幅器により増幅され、帯域通過型フィルタでろ過されて検出される。この検出された AE を解析することによってその破壊形状を評価するものである。AE 計測は、マイクロクラックの発生に伴い生じる弾性波を計測する技術であり、微細レベルでの破壊現象に対して高い検出能力をもった計測技術である。

本研究では、リング供試体を用いて、乾燥収縮に起因するコンクリートの微小破壊について計測を行った。なお、AE 法で計測される AE は、コンクリート部で生じる微小破壊とみなし、これらはコンクリート表面および内部に生じる乾燥収縮に起因する微小破壊と仮定した。リング供試体内側の鋼製リング上面に 150kHz 共振型の AE センサを供試体 1 体につき 1 つ設置し、センサ表面にグリスを塗り、長時間接着するようにエレクトロニックにより固定した。本実験の概略を図-2 に示す。

3. 結果および考察

3.1 圧縮強度および静弾性係数

各種配合の材齢 28 日における圧縮強度および静弾性係数を図-3、図-4 に示す。図-3 より、東予 CUS50% 以外の配合では、N と同程度かまたはそれ以上の圧縮強度が得られた。一般的に非鉄スラグを置換したコンクリートは、通常のコンクリートよりもエントラップトエアが多く入り、更に、ブリーディング量の増加が考えられているため 28 日における圧縮強度は下がる懸念される。しかし、細骨材のみ置換する場合には、そのような傾向は見られず、良好な強度性状が得られたのではないかと考えられる。

これより、コンクリートの強度特性は粗骨材に依存し

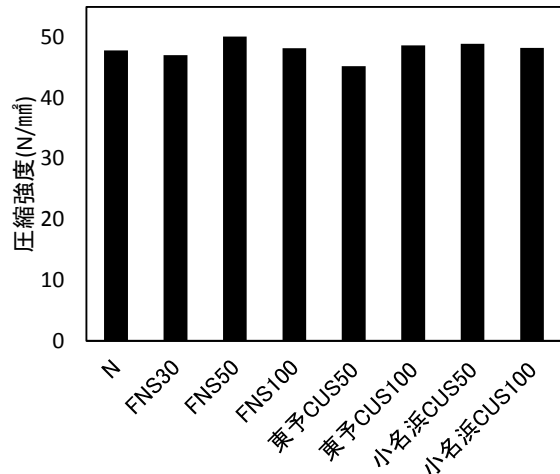


図-3 圧縮強度

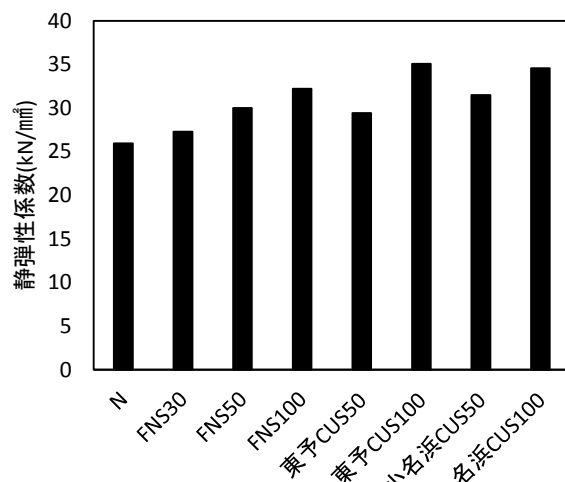


図-4 静弾性係数

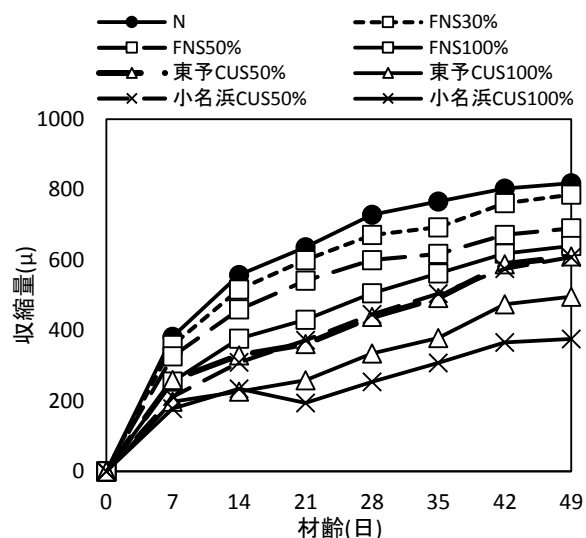


図-5 乾燥収縮ひずみ

ている部分が大きく出るせいか、非鉄スラグ細骨材を置換しモルタル分に変化を持たせても、強度特性に影響を与えないことが確認された。

一方、静弾性係数については、非鉄スラグ細骨材を置

置換した全配合において、基準配合である N を上回り、置換率の増加に伴い大きな値を示すことが確認できた。これは非鉄スラグ細骨材自体のヤング率が一般的に高いためではないかと考えられる。これより、非鉄スラグ細骨材を置換したコンクリートに関しては、強度特性には大きな差が見られなかったものの、骨材自体のヤング率が普通細骨材とは異なるため、静弾性係数の増加が認められたと考えられる。

これより、JIS^{1),2)} で規定されている上限を超えて、置換率 30% とした配合であっても、強度特性に関しては悪影響を及ぼさないことが確認された。

3.2 長さ変化試験

拘束条件無しの角柱供試体における長さ変化試験の結果を図-5 に、終局収縮量を図-6 に示す。収縮が収束した 49 日における終局収縮量による比較から、非鉄スラグ細骨材を置換することによる収縮量の低減を確認した。また、同細骨材を置換した配合間では、置換率を上げることによって、更なる収縮量の低減が確認できた。これは、コンクリートが乾燥することに伴う水分の蒸散により、骨材の吸水率に応じた水分の逸散が生じ、この際に働く毛細管張力によって乾燥収縮による収縮量に影響を及ぼしたためではないかと考えられる。すなわち、非鉄スラグ細骨材の吸水率の低さが、収縮量に寄与したためではないかと考えられる。また、静弾性係数の増加が確認されたことから、非鉄スラグ細骨材の弾性特性がセメントペーストの長さ変化を拘束し、収縮量を抑制したためと考えられる。非鉄スラグ間において比較すると、FNS 系の収縮量は CUS 系よりも大きい。これは、角柱供試体の質量減少率が N>FNS 系>CUS 系という結果を示しており、比較的 FNS 系のほうが水分量の蒸散が多かったためと考えられる。

なお、小名浜 CUS100% において、14 日～21 日にかけて、膨張側に結果が得られていることに関しては、測定器の故障によって異なる測定器を使用したために生じた器械誤差ではないかと考えられる。

3.3 リング試験

3.3.1 ひび割れ幅

はじめに、鋼製リングによる拘束によって得られた乾燥収縮ひび割れについて考察する。リング試験によって得られたひび割れ幅を図-7 に示す。ひび割れの発生は、材齢 8 日で N、小名浜 CUS50%、材齢 9 日で大江山 FNS30%、八戸 FNS50%、材齢 10 日で八戸 FNS100% のひび割れを目視により確認した。ひびわれ発生本数および発生日を表-3 に示す。発生時のひび割れは、全配合で写真-2 に示すように水分の蒸散を限定したリング側面の表面において、上から下まで貫通した状態で確認された。図-6 より、非鉄スラグ細骨材を置換することによるひ

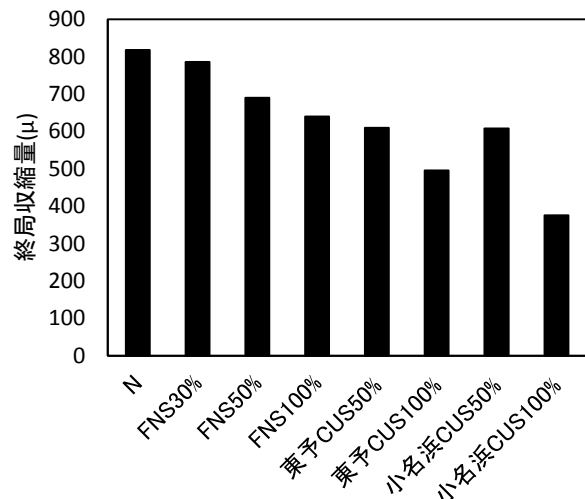


図-6 終局収縮量(角柱)

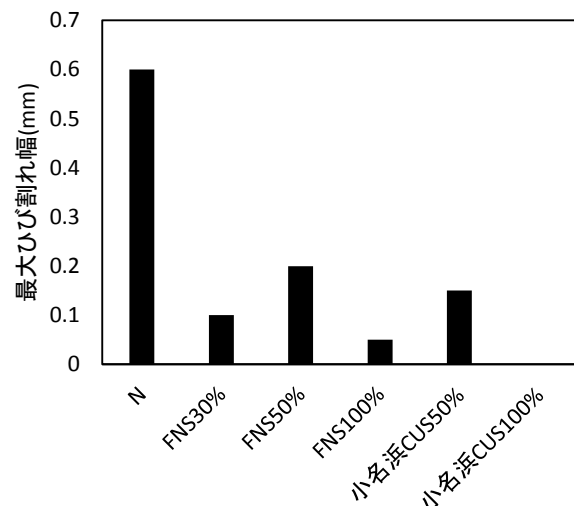


図-7 ひび割れ幅

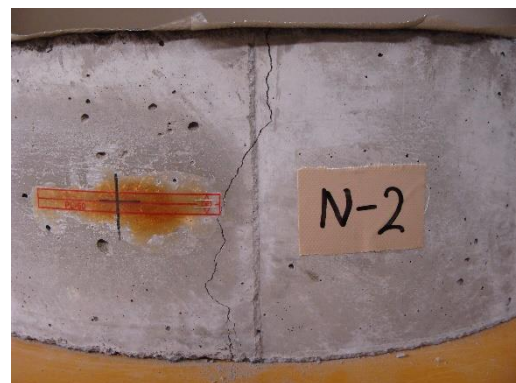


写真-2 ひび割れの様子

表-3 ひび割れ発生本数および発生

ひび割れ	N	FNS30%	FNS50%	FNS100%	CUS50%	CUS100%
本数	1	1	2	1	1	0
発生日	8	9	9	9	8	-

び割れ幅の縮小を確認することができた。なお、拘束条件無しの長さ変化試験より得られた収縮量の関係とひび割れ発生日、本数、ひび割れ幅については、同関係にはならず、長さ変化試験における最終的な収縮量だけでは、ひび割れ発生のリスクやひび割れ発生時期については検討することができないことが確認された。

3.3.2 収縮ひずみと累計 AE ヒット数

図-8 にリング外面の収縮ひずみ(N,FNS 系), 図-9 にリング外面の収縮ひずみ(CUS 系), 図-10 に累計 AE ヒット数(N および FNS 系), 図-11 に累計 AE ヒット数(CUS 系), 累計 AE ヒット数とは, AE 法により計測された AE ヒットを累積したものである。図-8,9 より, 角柱供試体での長さ変化試験と同様に, リング試験においても収縮量は, N と比較して, FNS100%は 300 μ (60%), CUS100%は 350 μ (70%)抑えられることができ, 非鉄スラグ細骨材置換による乾燥収縮抑制効果が確認できた。

材齢とともに乾燥収縮が進行し, ひび割れに至ったが, 図-10 より, ひび割れが可視化する以前に突発的な AE の増加が見られる。一方, 図-11 において, ひび割れが可視化していない小名浜 CUS100%にはこのような傾向は見られない。すなわち, このような AE の増加は目視で確認可能なひび割れをもたらす多数の微小な破壊であると考えられ, ひび割れ発生以前に連続的に発生する傾向が確認できた。この結果, リング試験と AE 法を併用することで, コンクリート内部のひび割れをもたらす微小破壊が進展する挙動を捉えられることができたと考えられる。

また, 図-11 より, 小名浜産銅スラグを置換した配合において, 銅スラグ細骨材を置換した配合では, 10 日間による累計 AE ヒット数が図-10 に示した N および FNS 系の配合よりも 2 倍以上多くなる傾向が確認できた。これは, AE センサの位置とひび割れ発生箇所の距離間隔も考えられるが, 図-6 よりリング供試体側面の最大ひび割れ幅の縮小が確認できたことから, 銅スラグ細骨材を置換した配合においては, 目視で確認可能なひび割れをもたらす微小な破壊が局所化して起こるのを抑制し, ひび割れをもたらす微小破壊の総数を増加させ, 微小破壊を供試体全面に分散させたためではないかと推測できる。

3.3.3 AE の振幅

代表的な配合である N, 小名浜 CUS100%, FNS100%において, 計測期間中に計測された AE の振幅を図-12 に示す。AE の振幅によって AE の破壊規模を評価できるという知見が得られている。これより, 累計 AE ヒット数だけでは銅スラグのひび割れ分散性を確認できなかったため, 振幅によるひびわれ分散性の検討を行った。

図-12 より, 目視により確認できるひび割れが発生し

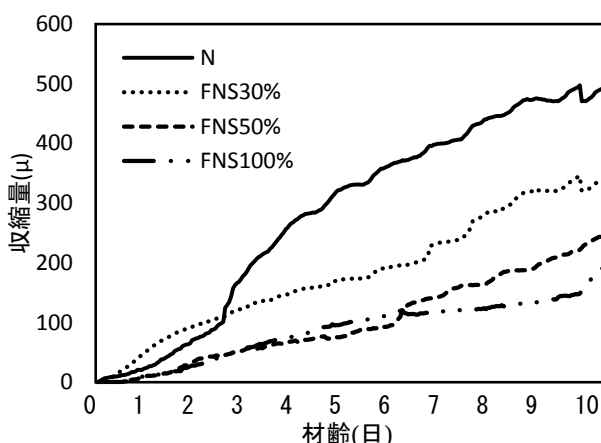


図-8 リング外面ひずみ(N,FNS 系)

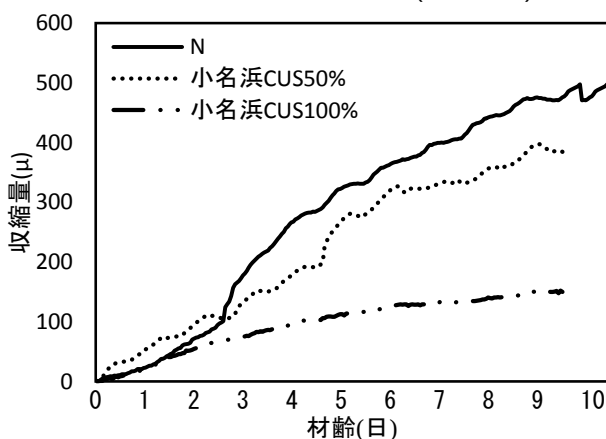


図-9 リング外面ひずみ(CUS 系)

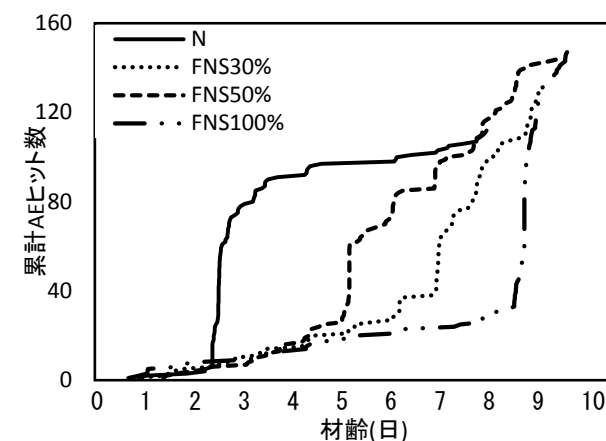


図-10 累計 AE ヒット数(N,FNS 系)

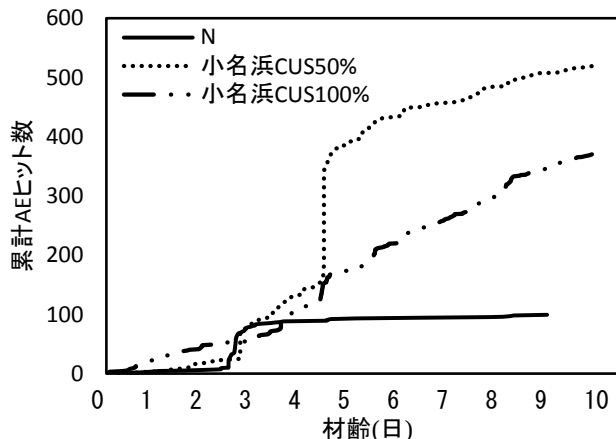


図-11 累計 AE ヒット数(CUS 系)

たNではひび割れ前に比較的大きなAEの振幅が検出されているのに対し、ひび割れが発生しなかった小名浜CUS100%においては、比較的小きなAEの振幅が検出されている。また、ひび割れは発生したが、ひび割れ幅の縮小が確認されたFNS100%については、Nと小名浜CUS100%の間に位置し、乾燥収縮に起因する微小破壊の規模は小さかったものと考えられる。これより、CUS系がN及びFNS系よりも累計AEヒット数が多くなった原因として、比較的小きな規模の微小破壊が多数検出されていたためではないかと考えられる。

本試験では1つの供試体に対し1つのAEセンサによる微小破壊を評価したためにひび割れ分散性を断言できなかったが、AEセンサを増やし、AE源の位置評価を行うことで、銅スラグ細骨材を置換したコンクリートのひび割れ分散性の確認を今後の検討課題としたい。

4. 結論

本研究では、非鉄スラグ細骨材である銅スラグ細骨材とフェロニッケルスラグ細骨材を置換したコンクリートの利用用途拡大を大きな目的とし、それらの収縮特性を拘束条件の有無によって評価した。更に詳細に検討するためにAE法を用いて実験的検討を行った。以下に、本研究の範囲内で得られた知見を示す。

- (1) 非鉄スラグ細骨材はJISに規定される置換率より多く置換しても、コンクリートの強度特性に悪影響を及ぼさず、基準配合と同等、またはそれ以上の圧縮強度を得ることができる。更に、乾燥収縮量を低減することが可能であり、低減効果は置換率に依存する。
- (2) 非鉄スラグ細骨材を置換したコンクリートは、乾燥収縮ひび割れに対する抵抗性を向上させる効果があり、ひび割れ発生時期を遅延させることやひび割れ幅を縮小させる特性を有することが明らかとなった。
- (3) AE法によって、リング試験における拘束条件下での乾燥収縮に伴う乾燥収縮ひび割れをもたらしコンクリート内部の微小破壊の進展状況をモニタリングし、ひび割れ発生時期やひび割れ発生リスクについて推測できる可能性が示唆された。

以上の結論より、JISにより規定される上限を超えて、置換率30%以上とした配合であっても良好な性能を確認することができ、圧縮強度、弾性係数、収縮特性については、今後、代替骨材としての利用用途拡大が期待できる。更に、リング試験とAE法の併用によって、銅スラグ細骨材に乾燥収縮に起因するひび割れ分散性を有する可能性が示唆された。

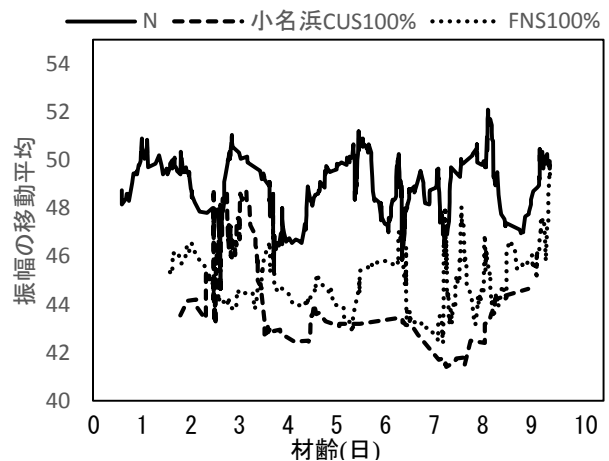


図-12 AEの振幅

謝辞：本研究を遂行するにあたり、土木学会コンクリート委員会2種委員会「非鉄スラグ骨材コンクリート研究小委員会（委員長 宇治公隆 首都大学東京大学院教授）」から各種試料の提供を受けました。ここに付記し感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：銅スラグ細骨材を用いたコンクリートの施工指針，コンクリートライブラリー92
- 2) 土木学会：フェロニッケルスラグ細骨材を用いたコンクリートの施工指針，コンクリートライブラリー91
- 3) 石丸啓輔，福田圭佑，橋本親典，渡辺健：銅スラグ骨材を用いたコンクリートの耐火性および乾燥収縮抑制効果に関する研究，土木学会四国支部技術研究発表会講演概要集，Vol.19，pp.323-324，2013
- 4) 深瀬晶之，渡辺健，平岡良彦，橋本親典：乾燥収縮によるひび割れ抑制対策としての遮光・散水の効果の検討，コンクリート工学年次論文集，第35巻，第1号，pp.475-480，2013
- 5) 渡辺健，深瀬晶之，橋本親典，石丸啓輔：リング試験におけるコンクリート乾燥収縮のアコースティックエミッション法による評価，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14巻，pp.95-100，2014
- 6) 井上裕貴，橋本親典，渡辺健，石丸啓輔：骨材の吸水率がコンクリートの乾燥収縮特性に与える影響に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，第33巻，第1号，pp.473-478，2011
- 7) 大津政康著：アコースティック・エミッションの特性と理論，（第2版），森北出版，2005