

論文 高炉セメントを用いたコンクリートの施工初期に発生するひび割れに対するフライアッシュの効果に関する実験的研究

大野 誠徳^{*1}・渡辺 健^{*2}・横手 晋一郎^{*3}・石井 光裕^{*4}

要旨: 高炉セメント B 種を用いたコンクリートにおける初期ひび割れの顕在化が指摘されている。本研究では、フライアッシュを混入することによって、施工初期に発生するひび割れの低減効果を検討することを目的とし、沈下ひび割れ、乾燥収縮および温度ひび割れに関して実験的に検討を行った。実験の結果、フライアッシュ混入による効果は、フライアッシュを細骨材代替で 10%混入することにより、沈下ひび割れおよび乾燥収縮が低減される傾向を示した。また、潜在的な温度ひび割れについて、非破壊検査手法の一つである AE 法によって、その発生を確認することができた。

キーワード: 施工初期、ひび割れ、AE 法、フライアッシュ、高炉セメント B 種

1. はじめ

近年、高炉セメント B 種を用いたコンクリートの初期強度は、同一水セメント比において、普通ポルトランドセメントと同等の強度を発現するようになった。これは高炉セメント B 種のブレン値を大きくしたためである。そのため、高炉セメント B 種が本来持つ温度ひび割れ低減の能力が失われ、高炉セメント B 種を用いたコンクリートの施工初期に発生するひび割れが顕在化していることが指摘されている。

本研究では、高炉セメント B 種を用いたコンクリートに、潜在水硬性のないフライアッシュを混入することによって、温度ひび割れを抑制することができると考えた。また、フライアッシュを用いたコンクリートは伸び能力が高く、沈下ひび割れを抑制することが知られているため²⁾、フライアッシュは施工初期に発生する温度ひび割れや沈下ひび割れ等の初期ひび割れを低減することができると考えられる。したがって、本研究では高炉セメント B 種にフライアッシュを混入することによって、初期ひび割れの低減効果を実験的に検討し、フライアッシュの有効利用について検討することとした。

具体的には、4 種類の配合の供試体を作製し、温度ひび割れの測定、沈下ひび割れの測定、乾燥収縮の測定において、フライアッシュの有無及びその混入率、セメント代替と細骨材代替における違いを比較検討する。また、温度ひび割れの評価方法において、従来の目視による評価方法に対し、本研究では非破壊検査手法の一つであるアコースティック・エミッション法³⁾ (以下、AE 法)を用いることによって、目視では確認することが困難な潜在的かつ微細な温度ひび割れを検出し、コンクリート内

部に潜在的に発生する温度ひび割れの評価の可能性についても検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用供試体および評価方法

(1) 沈下ひび割れについて

沈下ひび割れの測定に関しては、渡辺らの研究²⁾を参考にし、図-1 に示すような 900×600×200mm のスラブ型枠内に、3 本の異形鉄筋 (D22) を鉄筋中心間隔 150mm で設置した。この型枠にコンクリートを打設し、その後鉄筋直上に発生する沈下ひび割れを測定した。沈下ひび割れはかぶりが小さいほど、発生しやすく、本研究においては、沈下ひび割れの発生が顕著に現れるように、かぶりを 15mm に統一して評価を行った。また、測定には沈下ひび割れ発生の不規則性、ひび割れ幅や深さのばらつき等を考慮しなければならない。したがって、図-2 に示すように 3 本の鉄筋直上の A, B, C の領域に、それぞれに 50mm 間隔で 17 箇所、合計 51 箇所の測定点を設け、鉄筋に垂直な直線と沈下ひび割れが交差する点におけるひび割れ幅の測定を行うこととした。また、材齢 1 日で測定した沈下ひび割れ幅は、それ以後大きな拡大や変化をしないことから、その発生状況や発生時間に関係なく、材齢 1 日で測定を行うことにより、統計的に沈下ひび割れの評価を行うこととした。測定にはクラックスケールを用いた。更に、沈下ひび割れは、ブリーディング量と密接な関係を持つことが指摘されており⁴⁾、本研究において、ブリーディング量について測定を実施した。

*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 (正会員)

*2 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部助教 博士 (正会員)

*3 阿南生コンクリート工業株式会社 (正会員)

*4 株式会社四国総合研究所 (正会員)

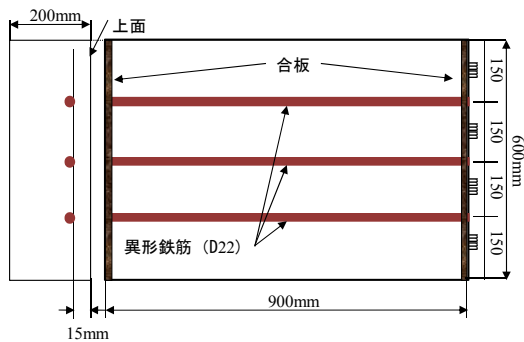


図-1 スラブ型枠の寸法形状

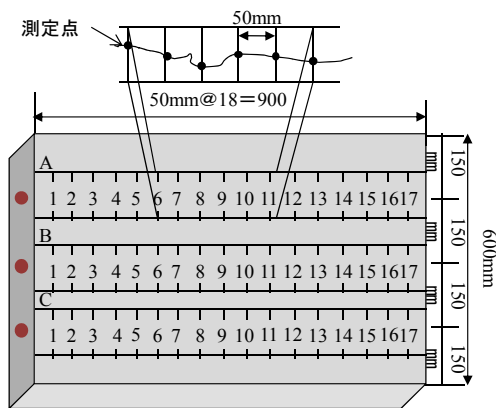


図-2 スラブ供試体上に設けた測定点箇所

(2) 乾燥収縮について

乾燥収縮に関しては、 $100 \times 100 \times 400$ mm の角柱供試体を配合ごとに3本採取し、JIS A 1129「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法」に準じて乾燥収縮の測定を行い、配合ごとの違いについての検討を行った。測定日は、材齢14日における供試体の測定値を基長とし、以後、3、7、14、21、28、56、74、91、180日での測定を行うこととした。また、供試体の養生方法については水中養生とした。

(3) 温度ひび割れについて

温度ひび割れの測定に用いた壁供試体の寸法形状を図-3に示す。 $1800 \times 900 \times 400$ mm の壁供試体（底面を拘束した状態）に異形鉄筋（D22）を底面から50mmの位置に埋設し、その両端にAEセンサ（60kHz共振型）を取り付け、測定を行った。鉄筋には、コンクリートの拘束効果およびコンクリート内部に生じる微細なクラックによるAEを伝達する効果を期待した。また、埋込型ひずみ計も供試体の上部、中部、下部の3箇所に、セパレータに結束線で固定することにより埋設し、温度変化およびひずみの測定を同時に行った。測定はコンクリート打設後から脱型までの約3日間と脱型後約3日間行った。降雨や風による雑音によって測定に支障をきたす

恐れがあるため、測定期間中は、供試体全体をテントで覆い、供試体端部はブルーシートによりセンサに直接降雨があたらないように対策を行った。

(4) AE法について

AEとは、個体材料内部の微細な破壊、あるいはそれと同様なエネルギー解放過程によって発生する弾性波動現象のことである³⁾。この弾性波をAEセンサによって検出し、AE発生挙動を解析することによって構造物の破壊性状や劣化度の評価をするのがAE法である。

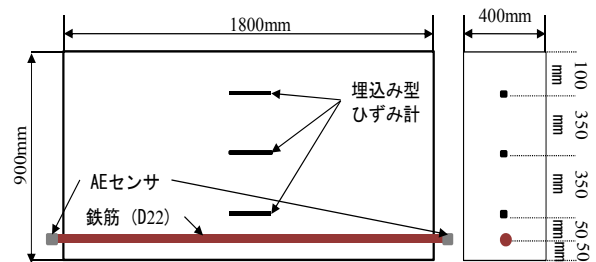


図-3 壁供試体の寸法形状

2.2 使用材料および配合

本研究に用いた供試体の配合を表-1に示す。供試体の種類は、高炉セメントB種を用いたコンクリート（以下、BBFA0）、高炉セメントB種を用いたコンクリートに、フライアッシュII種をセメント代替として20%混入したもの（以下、BBFA20）、フライアッシュIV種を細骨材代替として10%混入したもの（以下、BBFA10）、普通ポルトランドセメントを用いた普通コンクリートにフライアッシュII種をセメント代替として20%混入したもの（以下、NFA20）の4種類を作製した。

セメントは高炉セメントB種（密度 3.04g/cm^3 ）と普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm^3 ）を使用した。細骨材は砕砂（表乾密度 2.57g/cm^3 、粗粒率 2.95%）と海砂（表乾密度 2.57g/cm^3 、粗粒率 2.00%）を混合して使用した。粗骨材は砕石2010（表乾密度 2.57g/cm^3 、実績率 61.0%）と砕石1505（表乾密度 2.57g/cm^3 、実績率 61.0%）を混合したものをを使用した。フライアッシュはフライアッシュII種（密度 2.28g/cm^3 ）とフライアッシュIV種（密度 2.20g/cm^3 ）を使用した。混和剤はポリカルボン酸系の高性能AE減水剤およびAE剤を用いた。

本研究における配合は、実際のコンクリートの使用状態を想定し、28日強度をそろえるように調整を行った。強度に関しては、 $\phi 100 \times 200$ mm の円柱供試体を供試体ごとに12本採取し、材齢3、7、28、91日で圧縮強度試験を行うこととした。

表-1 配合表

供試体名	Gmax (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
						W	C	FA	S	G	AD	AE
BBFA0	20	10 ± 2.0	4.5 ± 1.5	54	46.5	166	308	-	822	946	3.08	1.54
BBFA20				46	44.5	162	282	71	766	953	3.53	4.59
BBFA10				54	45.5	164	304	68	727	969	3.04	5.32
NFA20				46	44.5	164	286	71	766	953	3.57	3.93

3. 実験結果

3.1 圧縮強度試験

材齢ごとの圧縮強度試験の結果を図-4 に示す。材齢 28 日における圧縮強度は、4 供試体ともに 30N/mm²前後の値となった。図-4 から、フライアッシュおよび高炉セメント B 種による長期強度増進の効果が見られる。また、フライアッシュを混入したことによる影響は、BBFA0 と BBFA20 にはあまり違いが見られないが、BBFA10 に関しては、初期強度がやや高く、強度の伸び方も 4 供試体の中で最良の結果となった。

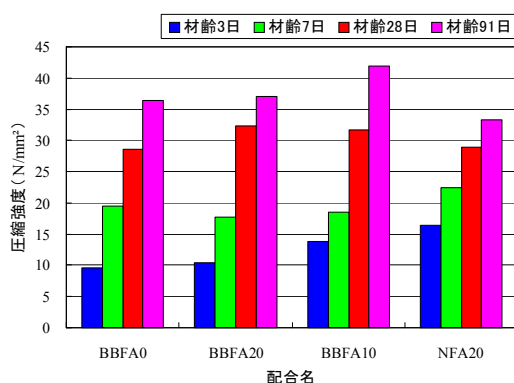


図-4 圧縮強度試験の結果

3.2 沈下ひび割れの測定

沈下ひび割れの測定はコンクリート打設後 1 日でクラックスケールを用いて行った。供試体一体につき 17@3=51 箇所の測定点を設け、平均ひび割れ幅を算出する。なお、測定点に複数のひび割れが生じている場合には、その平均値を用いた。また、追加測定として、市販の詳細ひび割れ幅測定器（以下ひび割れ幅測定器とする）による測定も行った。測定方法は、図-2 の B の領域で 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 の 7 つの点で測定を行うこととした。なお、ひび割れ幅測定器に関してはコンクリート打設後 1 日での測定ではなく、本研究における参考データとして測定を行うこととする。ブリーディングについては、円柱供試体製後、JIS A 1123「コンクリートのブリーディング試験方法」に基づき、コンクリート表面に浮水してくるブリーディング水を 10 分ごとに計量し、計量 60 分後からは 30 分ごとに計量する。240 分まで、合計

12 回の計量を行い、ブリーディング量を求めた。

表-2 に沈下ひび割れの平均ひび割れ幅を、図-5 にブリーディング量と時間の関係を示す。表-2 におけるサンプルとは、ひび割れ幅測定器と同様の測定点における平均ひび割れ幅を、クラックスケールを用いて求めた時の値とする。

表-2 から、クラックスケールとひび割れ幅測定器の測定結果には値に多少の違いは見られるが、供試体ごとの傾向についてはほぼ同様の結果を示した。サンプルについても同様のことが言えるが、ひび割れ幅測定器の値とやや異なる値を示しているのは、サンプルにおけるクラックスケールの測定値が測定点一箇所であるのに対し、ひび割れ幅測定器の測定値は測定点を中心にした 8 mm 四方の測定範囲内におけるひび割れの平均値であるためである。したがって、ひび割れ幅測定器の測定値とクラックスケールの測定値はやや異なる値を示したと考えられる。

結果については、高炉セメント B 種を用いたコンクリートにフライアッシュを混入したことによる沈下ひび割れの抑制は、BBFA10 に関してはひび割れ幅を抑制する効果が見られたが、BBFA20 に関しては、BBFA0 よりもひび割れ幅が大きくなるという結果になった。BBFA20 と NFA20 を比較することにより、フライアッシュをセメント置換した場合、普通セメントに比べて高炉セメント B 種で沈下ひび割れが大きくなる傾向があると考えられる。これらの結果より、フライアッシュを混入したことによる効果は見られなかったことが分かる。

ブリーディングについては、最終ブリーディング量が多いほど沈下ひび割れの発生しやすいこと³⁾をふまえ、図-5 の結果を見ると、BBFA0 および NFA20 の最終ブリーディング量が多く、BBFA10 および BBFA20 の方が少ないという結果になっていることが分かる。BBFA20 以外の結果に関しては、クラックスケールにより測定した沈下ひび割れの結果と相関性があるが、BBFA20 は最終ブリーディング量が少ないにも関わらず、ひび割れ幅は大きいという結果になった。この原因としては、フライアッシュを高炉セメント B 種とセメント置換した場合、その伸び能力が発揮されない可能性があるなどの原因

が考えられる。

表-2 沈下ひび割れの平均ひび割れ幅 (mm)

測定方法	BBFA0	BBFA20	BBFA10	NFA20
クラックスケール	0.34	0.55	0.22	0.30
サンプル	0.34	0.71	0.24	0.47
ひび割れ幅測定器	0.30	0.39	0.21	0.31

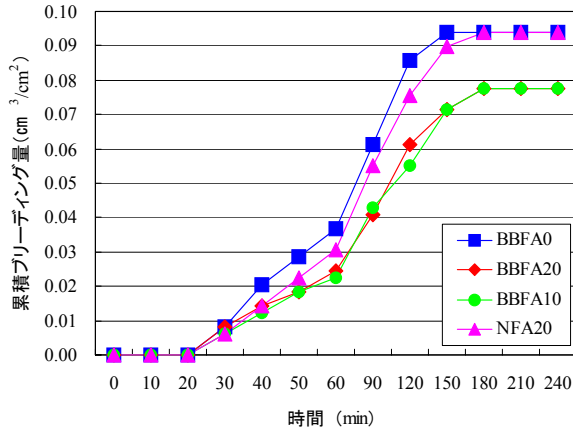


図-5 ブリーディング量と時間の関係

3.3 乾燥収縮の測定

乾燥収縮に関しては、JIS A 1129「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法」に準じて乾燥収縮についての評価を行った。環境条件を考慮し、室温 20℃、湿度 60%に保たれた実験室にて測定を行うこととした。長さ変化率試験の結果を図-6に、質量減量率の結果を図-7に示す。本研究は、施工初期に発生するひび割れを想定しているため、図-6および図-7には28日までの測定結果を示している。

一般に、高炉セメントB種を用いたコンクリートは乾燥収縮が普通コンクリートより大きくなることが知られており、図-6においてもその傾向が現れている。

フライアッシュの影響については、図-6において、BBFA0以外の乾燥収縮が抑制されていることが分かる。図-7においても、フライアッシュ混入コンクリートの質量減量が抑制されるという結果になった。

また、図-6のBBFA10とBBFA20を比較すると、ほとんど違いが見られないことから、単位セメント量の多いBBFA10の方がよりフライアッシュの効果を得ていると考えられる。更に、図-7におけるBBFA10の質量減量率は、他のフライアッシュ混入コンクリートと比較しても、明らかに低い値を示している。これもフライアッシュによる効果だと考えられる。水セメント比が大きいということもあるが、同じ水セメント比のBBFA0と比

較しても、その効果は確認できたといえる。

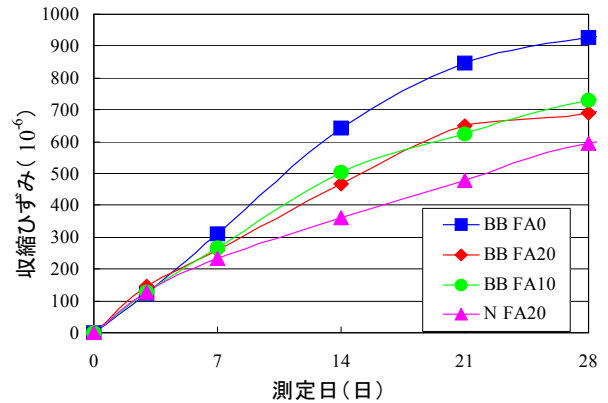


図-6 長さ変化率試験の結果

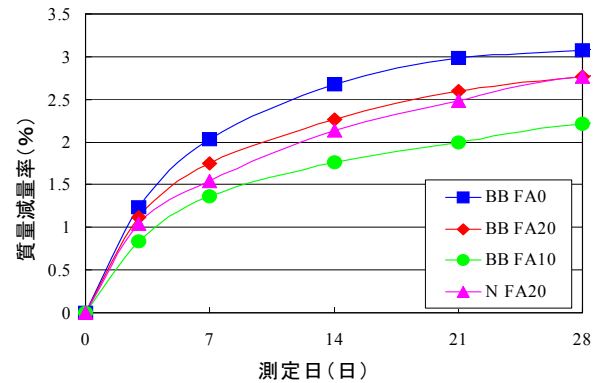


図-7 質量減量率の結果

3.4 温度ひび割れの測定

温度ひび割れの測定は、AE法による測定とともに目視観察およびひび割れ幅測定器による測定も行った。図-8から図-11に、それぞれBBFA0、BBFA20、BBFA10、NFA20の、AE法による測定結果と外気温およびコンクリート内部の温度変化の関係を示し、図-12から図-15にAE法による測定結果とひずみの関係を示す。なお、ここでいう累積AEヒット数とは、ひび割れ数の累積とし、ひずみについては温度補正を行った実ひずみの値を示している。また、AEについては、発生が明確なもので評価し外部からのノイズを削除するため、2つのセンサ(ch1, ch2)がほぼ同時に認識したひび割れのみをプロットすることとした。本研究において、センサの同時認識の基準は、AE発生時に2つのセンサが受信した時間差が0.001秒以内であることとする。また、4種類それぞれの累積AEヒット数が大きく違っていたため、本研究ではAEの発生挙動を定性的に評価することで、温度変化との相関性を検討することができると考えた。また、各配合間においてAEヒット数が大きく違った原因としては、センサを取り付ける鉄筋端面の状態やセンサと鉄筋間の接触具合が影響したと考えられるが、詳細に

については不明であり、今後検討していくこととした。

図-11 および図-15 の上部温度、上部ひずみは実験上の都合で測定することができなかつたため、示していないが、その他の上部温度、上部ひずみの傾向から同様の結果になることが予想される。

図-8 から図-11 において、温度変化に関しての傾向は、4 種類とも上部、中部、下部において、同様の傾向を示した。また、AE に関しては、4 種類全てに、コンクリート打設後 20~30 時間の間に AE が急増している。この間でのコンクリートの温度変化に着目すると、図-8 から図-11 より、20~30 時間の間は、水和熱によりコンクリート温度が上昇した後に、温度が低下する過程であることが分かる。また、図-12 から図-15 において、コンクリート下部におけるひずみに着目すると、上部および中部のひずみに比べ、下部のひずみが小さいことが分かる。このことから、コンクリート底面および鉄筋による拘束が影響していると考えられ、温度ひび割れが発生し易い状態であることが分かる。これらのことより、時間経過が 20~30 時間の間で発生した AE は潜在的かつ微細な温度ひび割れであると考えられる。

フライアッシュ混入による影響については、図-8 から図-11 の温度変化において、フライアッシュによる温度上昇の抑制効果は確認できなかった。また、AE 法においても、フライアッシュの効果を明確に判断することができるようなデータは得られなかつた。しかし、図-9 から図-11 のフライアッシュを混入した供試体において、脱型後の約 70 時間以降に、AE が急増する所があることが分かる。これらの AE については、温度変化が少ない箇所まで生じており、経過時間が 20~30 時間の間で発生した AE とは、発生メカニズムが異なると考えられる。これらの AE の発生が、フライアッシュを混入したことによる影響であるかの断言はできないが、BBFA0 にはその発生傾向が見られないことから、フライアッシュが何らかの影響を示している可能性がある。

また、目視による温度ひび割れを観察したところ、BBFA0 には 3 箇所、BBFA20 には 4 箇所、BBFA10 には 3 箇所のひび割れが確認でき、NFA20 にはひび割れが確認できなかった。ひび割れについては、図-3 の壁供試体において、壁供試体の下端部付近から縦方向に発生しているひび割れで、壁供試体を貫通していると思われるものを温度ひび割れとして認識した。ここで、NFA20 には目視によるひび割れの確認ができなかつたが、NFA20 でもコンクリート内部において他の 3 供試体と同様に微細なひび割れが発生し、それを AE 法によって検出することができたと考えている。

AE 法による測定の結果、4 つの供試体において同様に 20~30 時間の間で AE が発生していることから、微細な

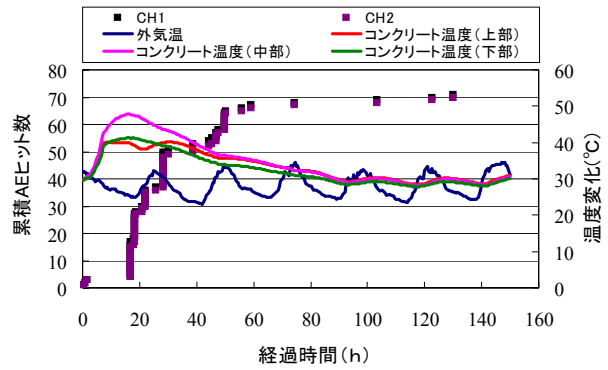


図-8 BBFA0 の AE 法による測定結果と温度の関係

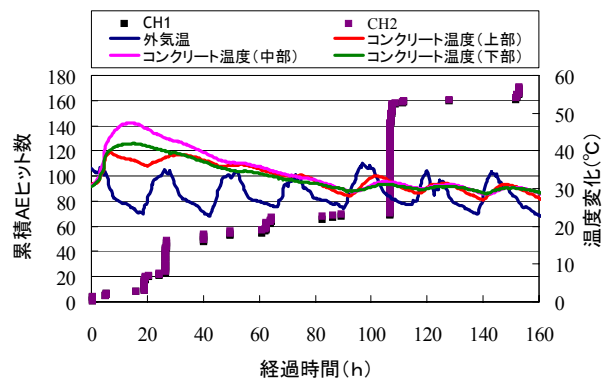


図-9 BBFA20 の AE 法による測定結果と温度の関係

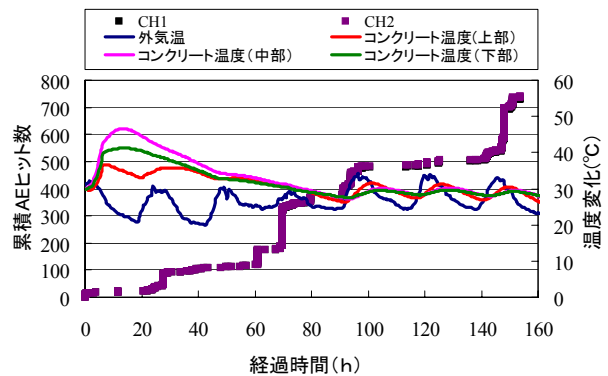


図-10 BBFA10 の AE 法による測定結果と温度の関係

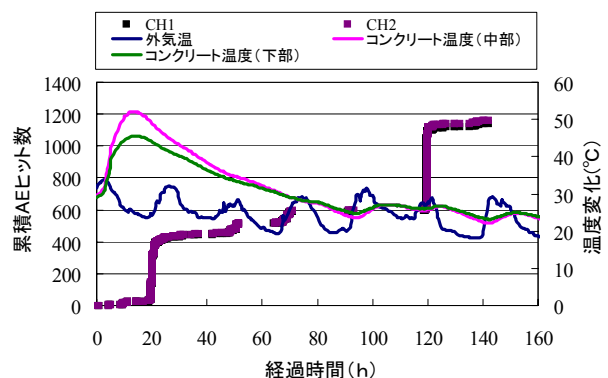


図-11 NFA20 の AE 法による測定結果と温度の関係

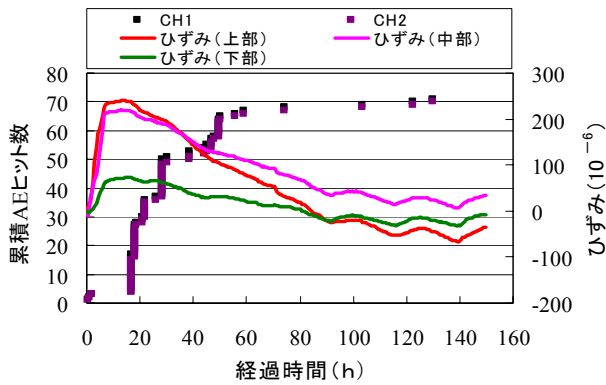


図-12 BBFA0のAE法による測定結果とひずみの関係

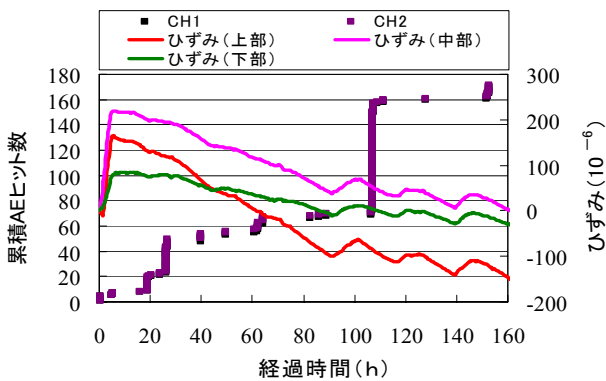


図-13 BBFA20のAE法による測定結果とひずみの関係

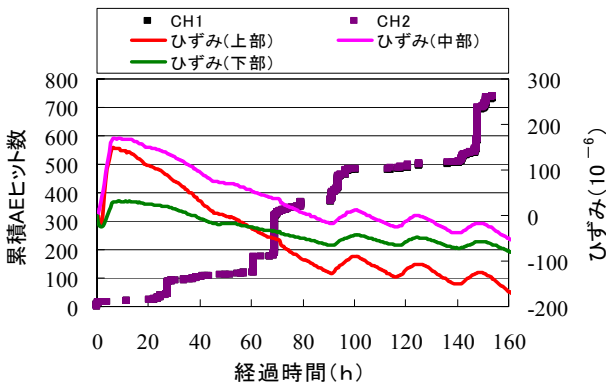


図-14 BBFA10のAE法による測定結果とひずみの関係

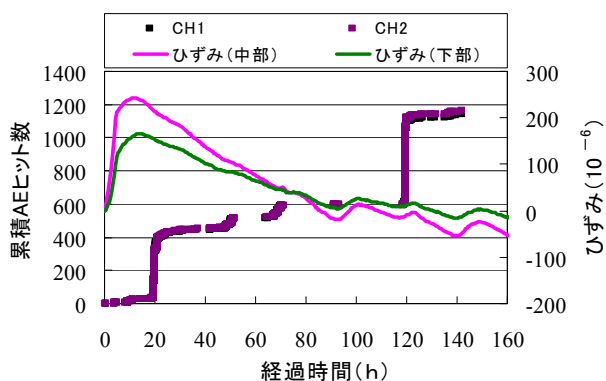


図-15 NFA20のAE法による測定結果とひずみの関係

温度ひび割れをAE法によって検出できる可能性が示されたが、各配合での再現性なども含め、今後更なる検討が必要である。

4. まとめ

本研究の範囲で得られた結果を以下に示す。

(1) 沈下ひび割れに関しては、フライアッシュによるひび割れの抑制効果は、BBFA10にはその抑制効果が確認できたが、BBFA20にはフライアッシュを混入していないものよりも、ひび割れ幅が大きくなるという結果になった。

(2) 乾燥収縮に関しては、測定28日までの範囲で、フライアッシュを混入したことによる乾燥収縮の抑制効果が、フライアッシュを混入した供試体全てにおいて確認できた。

(3) 温度ひび割れに関しては、AE法によって潜在的な温度ひび割れの発生を確認することはできたが、フライアッシュによるひび割れの抑制効果を評価するまでには至らなかった。しかし、フライアッシュを混入したコンクリートのAEの発生傾向は、フライアッシュ無混入の供試体と異なる可能性がある。

謝辞

本研究は、(社) 四国建設弘済会の2009年度建設事業に関する技術開発支援制度による助成を受けて実施した。また、研究を遂行するにあたり、徳島大学の正木祐介氏の協力を受けたことを付記し、深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会 コンクリート委員会: 施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー126(資料編), pp.34-35, 2007
- 2) 渡辺 健, 橋本親典, 水口裕之, 上田隆雄: フライアッシュIV種混入コンクリートを用いたRCスラブの沈下ひび割れ特性に関する検討, 土木学会論文集, Vol.767, No.64, pp.131-141, 2004
- 3) 大津政康: 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, p2, 2005
- 4) 源島良一, 徳光義治, 牧角龍憲: コンクリートの沈みひび割れに関する実験的研究, 第37回土木学会年次学術講演会講演概要集V, pp.215-216, 1982