

論文 初期養生条件が石灰石骨材を用いたコンクリートの諸性質に及ぼす影響

桑江 ひとみ*¹・迫田 恵三*²・丸 章夫*³

要旨：本研究は，初期の養生条件が石灰石コンクリートの性質に及ぼす影響を明らかにするため，湿布養生日数や等価アルカリ量の異なる石灰石コンクリート，川砂利コンクリートを屋外および屋内へ1年間暴露した。その結果，初期の湿布養生期間が長くなると，強度が増大し，炭酸化が抑制された。X線回折強度試験では，初期湿布養生期間が長くなると，エトリンガイトの析出量が減少した。圧縮強度試験時に測定したAE試験結果では，初期の湿布養生期間が長いものほど低応力レベルでのAE発生数が減少した。

キーワード：湿布養生日数，圧縮強度，長さ変化率，炭酸化，粉末X線回折法，AE法

1. はじめに

コンクリートは，適切な配合および養生を行えば，その耐久性は半世紀以上得られると言われている。しかしながら，建設当時の施工不良によるコンクリートの早期劣化問題も数多く報告されている。

セメントの水和反応はコンクリートの練り混ぜ直後に活発に起こり，硬化するにつれて減速する。このとき，湿度や温度を十分に保った養生を行わなければ，水和反応によって発生するエトリンガイトが遷移帯に多く残存する^{1),2)}。養生が不十分なコンクリートは，遷移帯の空隙が多くなり，強度が低下することが考えられる。

不適切な養生がコンクリートの性質に及ぼす要因は，骨材の種類，品質によって異なることが考えられる。現在，完全リサイクル型コンクリートとして石灰岩碎石を用いたコンクリートが注目されている。石灰岩碎石は，密度や吸水率の観点から見てもコンクリート用骨材として十分満足できると言われている³⁾。しかしながら，その一方で石灰石は非炭酸塩不純物が表面に付着していることから，セメント中のアルカリ分と反応し有害な膨張を起こすことが考えら

れる⁴⁾。

そこで本研究では，石灰石コンクリートを暴露する前の初期湿布養生日数が，コンクリートの性質に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。初期の湿布養生期間は1日，3日および7日とし，その後屋外および屋内へと暴露した。暴露期間は1年としている。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1に使用した骨材の物理的性質を示す。石灰石は埼玉県秩父産碎石を，川砂利は静岡県安倍川産を使用した。石灰石コンクリート，川砂利コンクリートともに細骨材には富士川産川砂を使用した。本研究で使用した骨材は，すべてアルカリ骨材反応に対し無害である。

セメントは普通ポルトランドセメント（密度3.15g/cm³）を使用した。

2.2 配合および供試体寸法

コンクリートの配合を表-2に示す。石灰石，川砂利コンクリートの単位水量は178kg/m³とし，水セメント比を40，60%の2種類とした。セメント中の等価アルカリ量をNa₂O換算で0.6，1.0

*1 東海大学大学院 海洋学研究科海洋工学専攻 工修（正会員）

*2 東海大学 海洋学部海洋土木工学科 工博（正会員）

*3 地質鉱物エンジニアリング（株） 理博（正会員）

%と変化させるため、練り混ぜ水に 1N の NaOH 水溶液を添加した。供試体は直径 100mm × 高さ 200mm の円柱供試体と、100mm × 100mm × 400mm の角柱供試体を作製した。

2.3 養生方法と暴露環境

図-1 に供試体の養生方法および暴露方法を示す。供試体は脱型後、湿布養生を 1, 3 および 7 日間行い、その後屋外および屋内に暴露した。湿布養生はコンクリート打設後 24 時間以内に脱型し、水分を含んだ麻袋で供試体を被覆することによって行った。湿布養生の他に、水温 20 の水中養生を行った。暴露期間および養生期間は 2001 年 10 月から 1 年間とした。

屋外暴露試験は東海大学海洋学部敷地内（静岡県清水市）で行い、屋内暴露は恒温恒湿室内（室温 20，相対湿度 50%）で行った。暴露環境の年間平均気温は 16.7 である。清水市は温暖な気候であり、冬季も氷点下を下回することはまれであるため、コンクリートへの凍結融解作用の危険性は少ない。年間積算降水量は 2593mm 程度となっており、この値は北海道などの寒冷地よりは多く、亜熱帯地方である沖縄県とはあまり差がない。

2.4 試験項目

表-3 に試験項目と方法を示す。圧縮強度試験は暴露 4 週、13 週、30 週および 56 週で行った。長さ変化率試験は暴露 2 週、4 週、8 週、13 週、30 週および 56 週で行った。本研究では 56 週目の圧縮強度試験時に AE (Acoustic Emission) 試験を行った。中性化深さ試験および粉末 X 線回折強度試験は、暴露試験終了後に行った。

3. 結果および考察

3.1 圧縮強度

図-2 に屋内暴露した各種コンクリートの圧縮強度試験の結果を示す。図中に示す R_{20} とは、コンクリート中の総等価アルカリ量である。図では等価アルカリ量 0.6% の石灰石コンクリートと川砂利コンクリートの結果を示した。屋内暴露した供試体の圧縮強度は、使用した粗骨材

表-1 骨材の性質

骨材種類	石灰石	川砂利	川砂
粗骨材最大寸法 (mm)	25	20	
密度 (g/cm ³)	2.71	2.65	2.62
吸水率 (%)	0.22	0.69	0.89
FM 値	7.08	6.66	3.07

表-2 コンクリートの配合

骨材種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
			W	C	S	G	AE 剤
石灰石	40	41	178	445	689	1025	0.17
	60	45		297	811	1025	0.11
川砂利	40	40	178	445	672	1019	0.17
	60	44		297	793	1021	0.11

表-3 試験項目と方法

試験項目	試験方法
圧縮強度試験	JIS A 1108
長さ変化率試験	JIS A 1129
AE 試験	JCI コンクリートにおける AE 試験方法（試案）
中性化深さ試験	フェノールフタレイン溶液噴霧
粉末 X 線回折強度試験	水和物の同定・定量



図-1 養生条件および暴露環境

の種類に関わらず初期湿布養生期間が短いものほど低下している。初期の湿布養生期間が長くなると、水和反応はより進行した状態で暴露される。屋内暴露では、コンクリートは連続乾燥を受け水和反応がほとんど停止するため、初期の養生期間の違いが圧縮強度に影響したと考えられる。暴露 56 週での湿布養生期間 1 日のコン

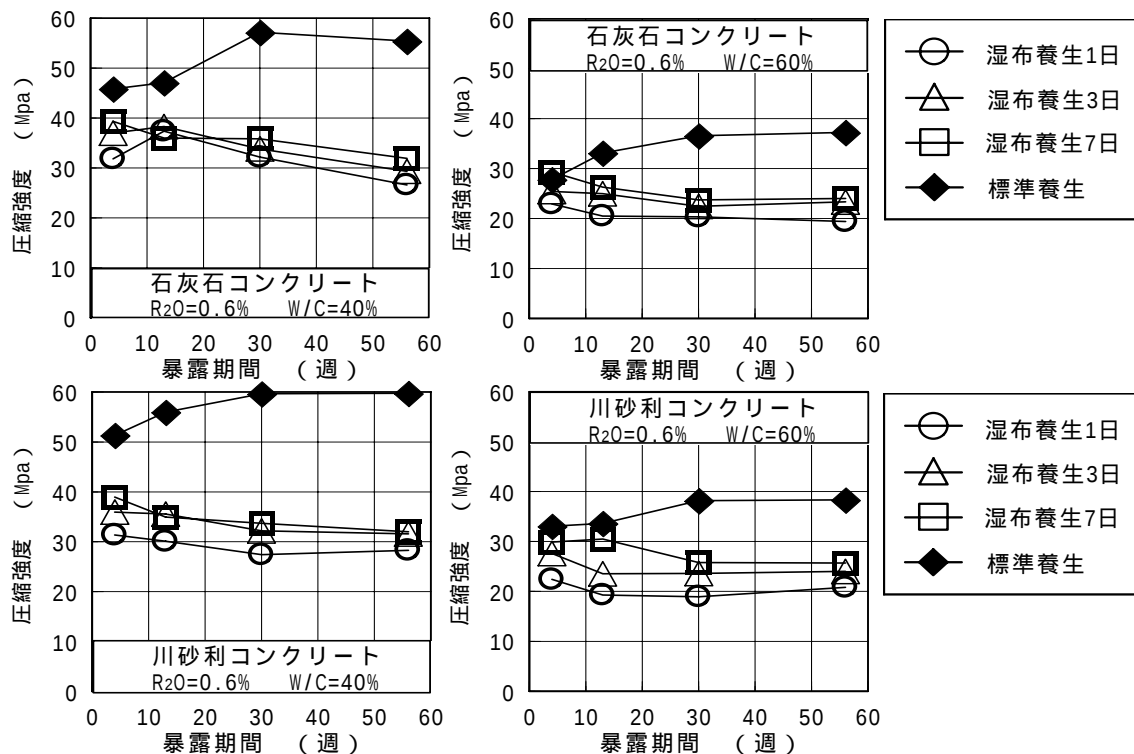


図-2 湿布養生期間が屋内暴露した各種コンクリートの圧縮強度

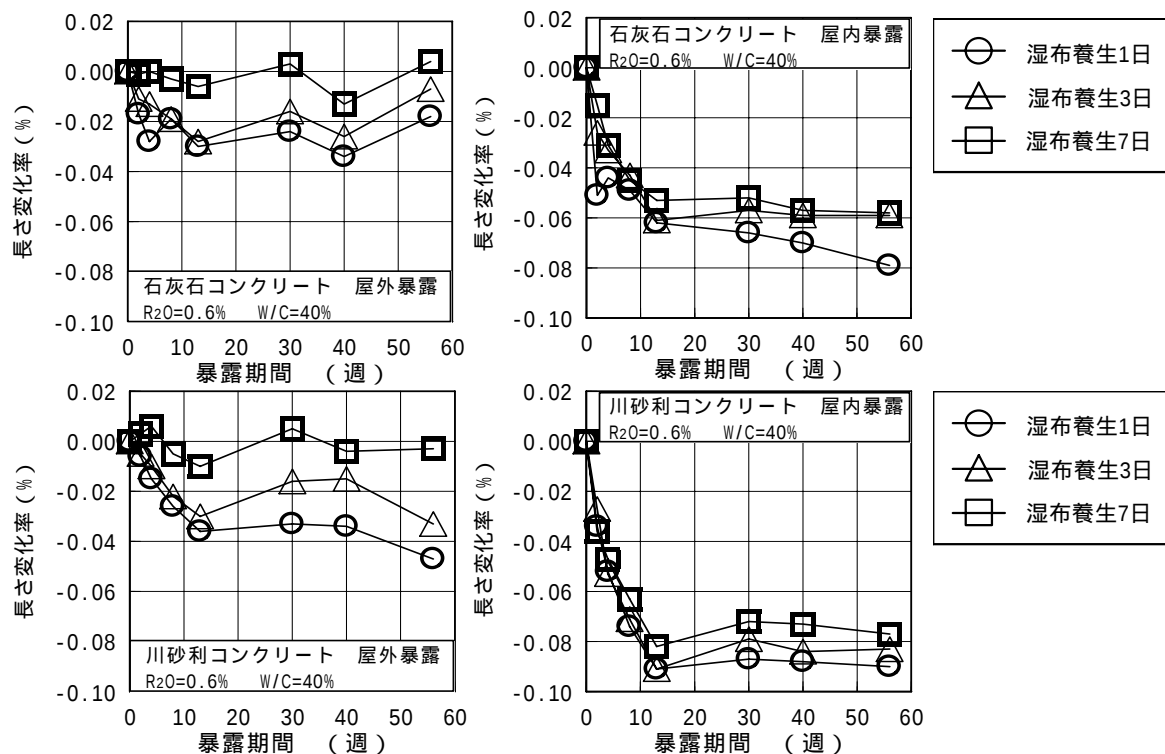


図-3 屋外および屋内に暴露した各種コンクリートの長さ変化率

クリートの圧縮強度は、湿布養生期間7日の供試体よりも約20%低下した。このような湿布養生期間と圧縮強度との関係は、等価アルカリ量が1.0%と高い場合でも同様な傾向が得られた。

一方、屋外暴露した供試体は、十分な前養生を行わなかった場合でも、降雨によって水分の

供給が得られる。このため、初期養生期間と圧縮強度との間に明確な関係が得られなかった。

3.2 長さ変化率

図-3に、屋外および屋内に暴露したW/C=40%、等価アルカリ量0.6%の石灰石コンクリートと川砂利コンクリートの長さ変化率を示す。長さ

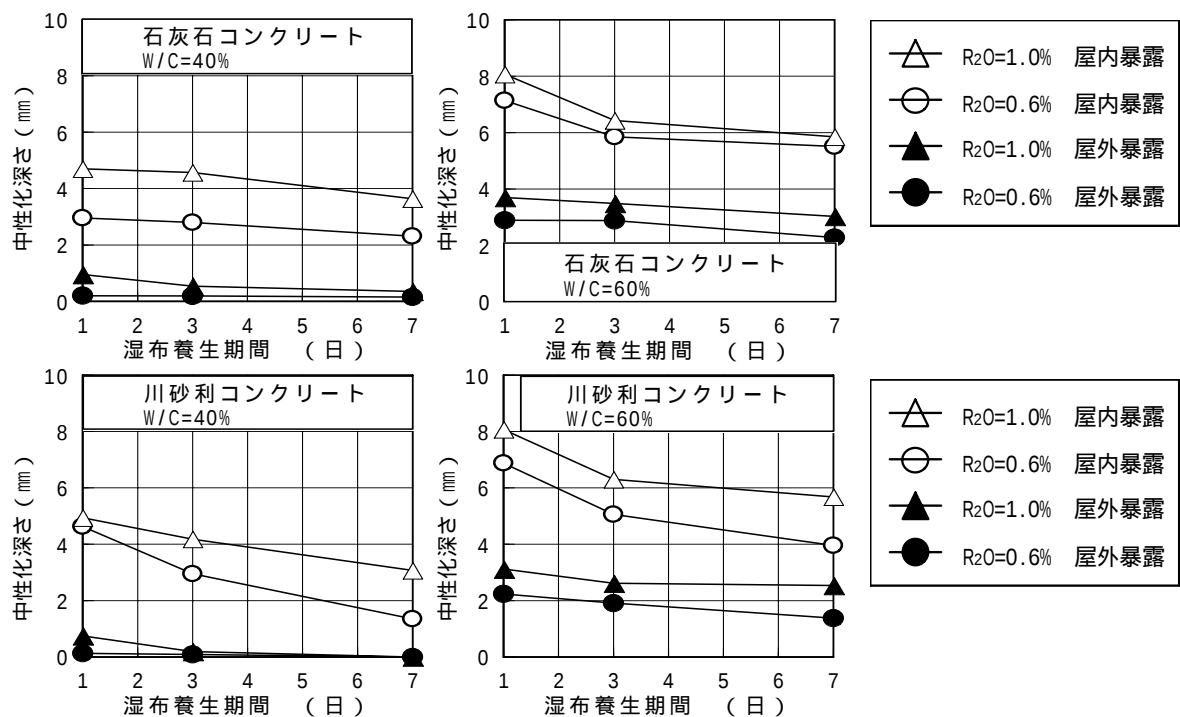


図-4 屋外および屋内に暴露した各種コンクリートの中性化深さ

変化率は暴露直前の供試体長さとし、各暴露期間における供試体長さとの比である。この図の長さ変化率のマイナス側は、コンクリート供試体の収縮を意味する。石灰石コンクリート、川砂利コンクリートともに屋外、屋内暴露において湿布養生期間が短くなると、長さ変化率は収縮傾向を示した。これについては、暴露前の水和の程度が影響したと考えられる。

屋外暴露については暴露期間中、乾湿繰り返しによって長さ変化率は収縮と膨張を繰り返す。一方、屋内暴露においてはコンクリート内部の水分が逸散し、暴露開始から13週にかけての収縮が著しい。また、暴露13週以降の収縮は緩やかになっている。

石灰石と川砂利で比較すると、屋外、屋内暴露ともに川砂利コンクリートの方が収縮傾向を示した。これは、川砂利の吸水率が石灰石よりも高いからだと考えられる⁷⁾。

3.3 炭酸化

図-4に、暴露56週目の中性化深さの結果を示す。中性化深さは石灰石、川砂利コンクリートともに屋外よりも屋内の方が大きくなった。また、初期湿布養生期間が長くなると、中性化

深さは小さくなり、水セメント比が増加すると大きくなった。

等価アルカリ量0.6、1.0%で比較すると、等価アルカリ量が1.0%の方が屋外、屋内暴露ともに中性化深さが大きくなった。これは、等価アルカリ量が高くなることによってセメント硬化体のC-S-H構造が不均質になり、水和反応が阻害されるからだと考えられる⁴⁾。

全体的に、石灰石コンクリートの中性化深さは川砂利コンクリートよりも大きくなった。これについては、石灰岩碎石中に含まれる非炭酸塩不純物がセメントペースト中に溶出する可能性が挙げられる。非炭酸塩不純物がペースト部に溶出すると、水酸化カルシウムと化学反応を起こし、炭酸化させると考えられる⁵⁾。

3.4 粉末X線回折強度

図-5に、粉末X線回折強度試験による暴露56週目のエトリンガイトの結果を示す。エトリンガイトは、図-6に示すようなピーク点から底辺までの高さで評価した。その結果、石灰石コンクリート、川砂利コンクリートともに初期の湿布養生期間が長くなると、エトリンガイトの析出量が減少した。この傾向は、屋外暴露した供

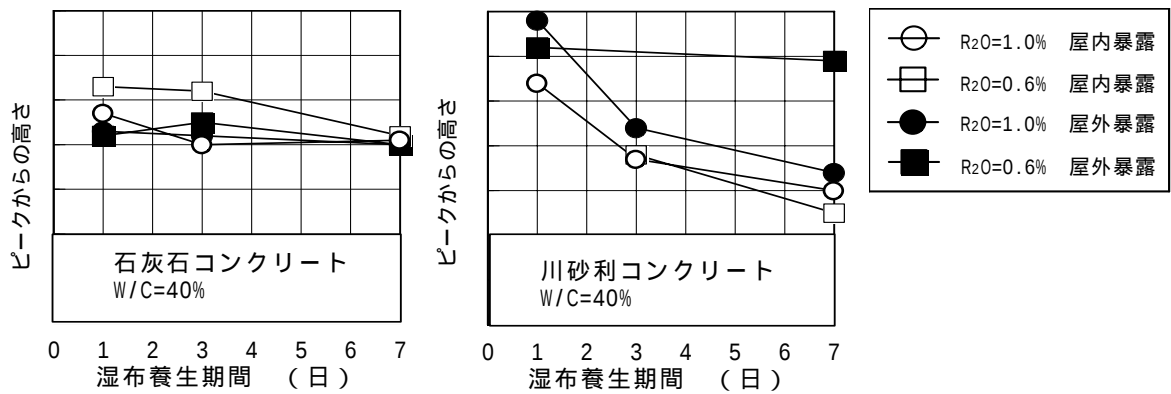


図-5 屋外および屋内に暴露した各種コンクリートのエトリンガイト

試体よりも屋内暴露した供試体の方に顕著に表れた。以上のことから、コンクリートの養生条件が異なるとエトリンガイトの析出量が変化し、強度やその他の性質に影響を及ぼすと考えられる。

3.5 AE 累積イベント総数

コンクリートの養生条件やアルカリ量などが異なると骨材界面とセメントペーストマトリックスとの間に空隙が生じ、載荷した場合に低応力レベルでひびわれが進展することが考えられる。本研究では圧縮強度試験時に円柱供試体の側面中央部分に AE 端子を取り付け、載荷直後から破壊に至るまでの AE 累積イベント総数を測定した。AE 計測では、供試体破壊時に発生した音の回数を記録するが、ここで示す AE 累積イベント総数とは、各荷重レベルでの破壊音の個数を累積させたものである。図-7、図-8 に、荷重が載荷された時の AE 累積イベント総数を示す。図-7 より、水セメント比 40% で等価アルカリ量 1.0% の場合、屋内暴露したコンクリートは粗骨材の種類に関わらず初期湿布養生期間の短いもののほど低荷重載荷時での AE 発生数が多かった。低応力レベルでのひび割れの進展は遷移帯のマイクロクラックから起こる。このことから、初期の湿布養生期間が長くなると、遷移帯での微細ひびわれの発生が少なくなり、圧縮強度が増加すると考えられる。

図-8 に、水セメント比 60% で屋内暴露した石灰石コンクリートの AE 発生数を示す。等価アルカリ量 0.6% と 1.0% を比較すると、等価アルカリ

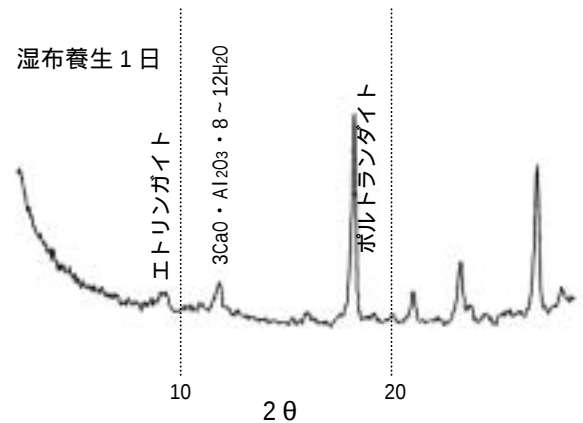


図-6 屋内暴露した石灰石コンクリートの粉末X線回折図 (W/C=40%, R2O=0.6%)

量が低い方の AE 発生数が少ない。これについては高アルカリ環境下での C-S-H 構造の組織異常により空隙が増し、セメント硬化体が脆弱になるからだと考えられる。

以上のことから、AE の発生増減については、遷移帯の粗密やセメント硬化体の強度が影響すると考えられる。

4. おわりに

湿布養生期間や等価アルカリ量、水セメント比の異なる、石灰岩碎石や川砂利を粗骨材として使用したコンクリート供試体を屋内と屋外に 1 年間暴露した結果、以下のような知見が得られた。

- (1) 石灰石、川砂利コンクリートの初期湿布養生期間が 1 日、3 日、7 日と長くなると、屋内暴露したコンクリートの圧縮強度は増大した。
- (2) 屋外暴露、屋内暴露ともに初期の湿布養生

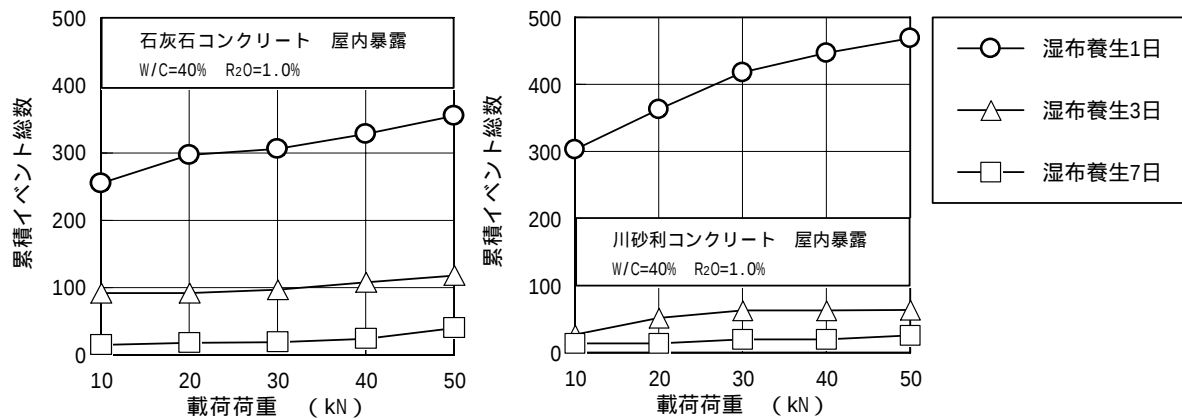


図-7 荷重載下時のAEイベント総数 (W/C=40%, R₂O=1.0%)

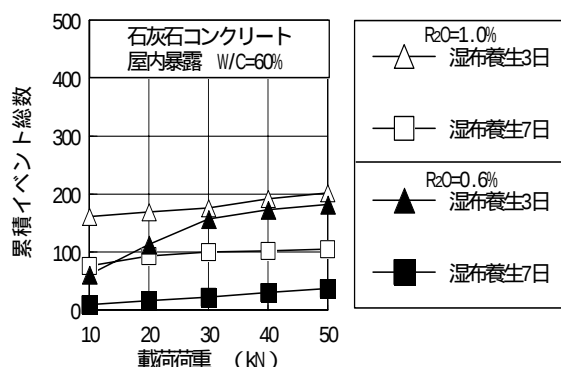


図-8 荷重載荷時のAEイベント総数
(W/C=60%, 石灰石コンクリート)

期間が短いものほど長さ変化率は収縮傾向を示した。

(3) 中性化深さは、初期の湿布養生期間が短いものほど、等価アルカリ量が多くなるほど大きくなった。屋内暴露したコンクリートの中性化深さは、屋外暴露したものよりも大きく、石灰石コンクリートの中性化深さは、川砂利コンクリートよりも大きくなった。

(4) 石灰石コンクリート、川砂利コンクリートともに初期湿布養生期間が長くなると、エトリンガイトの析出量が減少した。

(5) AE試験結果では、初期湿布養生期間が長いものほど低応力レベルでのAE発生数が減少した。等価アルカリ量が高くなると、AE発生数は増加した。

参考文献

- 1) 伊藤一聡・岸利治・魚本健人：種々の養生温度下で形成されたセメント硬化体の空隙構造，第24回コンクリート工学年次論文集，No.1，pp489-494，2002
- 2) 伊代田岳史・魚本健人：早期脱型による乾燥と水分の再供給がコンクリートの内部組織構造に与える影響，第23回コンクリート工学年次論文集，No.2，pp787-792，2001
- 3) 安本礼持・秋山達志・内田美生・永田邦博：石灰石粗骨材を用いた高強度コンクリートの強度特性，第55回セメント技術大会講演要旨，pp214-215，2001
- 4) 小林一輔 編集：コンクリート構造物の耐久性診断シリーズ 4 コンクリートの組織構造の診断，森北出版，1993
- 5) 小林一輔 著：コンクリート構造物の早期劣化と耐久性診断，森北出版，1996
- 6) 田澤榮一・佐伯昇 監訳：コンクリート工学 微視構造と材料特性，技報堂出版，1998
- 7) たとえば 桑江ひとみ・迫田恵三・竹田宣典：モンモリロナイト含有量や吸水率の異なる各種粗骨材コンクリートの耐久性について，第56回セメント・コンクリート論文集，pp499-505，2002