

論文 石灰石骨材を使用したコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性に関する検討

中山英明^{*1}・鳴瀬浩康^{*2}・吉田浩一郎^{*3}・白石良太^{*4}

要旨：本研究では、石灰石砕石と結晶質石灰石砕砂を使用したコンクリートについて、収縮特性、強度性状および一軸拘束試験によるひび割れ抵抗性を評価した。その結果、石灰石砕石と結晶質石灰石砕砂を組合せて使用した場合、硬質砂岩砕石と山砂を用いた場合に比べ、コンクリートの自由収縮ひずみは40%以上低減した。また、初期材齢からコンクリートの圧縮強度は高くなり、特に高炉セメントB種で顕著となった。この収縮低減効果と初期強度の増大により、山砂と硬質砂岩砕石を用いた場合に比べて、収縮ひび割れ抵抗性を大きく向上できることが明らかとなった。

キーワード：石灰石、結晶質、砕砂、圧縮強度、乾燥収縮、収縮ひび割れ、ひび割れ抵抗性

1. はじめに

社会資本の整備に関して品質の確保が重要な要素であり、特にコンクリート構造物については耐久性の向上、つまり長寿命化が求められている。コンクリート構造物の寿命を長くするには、ひび割れの発生を抑えることが重要であり、その対策として、コンクリートの収縮を低減できる混和材料の使用や骨材の選定があげられる。特に、乾燥収縮に及ぼす骨材種類の影響は大きく、乾燥収縮の小さくなる骨材として石灰石粗骨材が注目されている¹⁾。また、近年、良質な天然骨材の枯渇や環境保全による海砂の採取規制等から、コンクリート用骨材として砕砂を使用するケースが増加しており、石灰石砕砂も使用されるようになってきている。石灰石砕石と石灰石砕砂を使用したコンクリートは、これまでも完全リサイクルコンクリートが提唱されているが²⁾、収縮ひび割

れ低減の観点からも有効なコンクリートになりうる可能性がある。しかしながら、石灰石砕砂は天然骨材に比べ、総じて粒形が悪いため、配合条件によっては、単位水量の増加やフレッシュコンクリートの品質低下を招くことがある。このため、石灰石砕砂は単独ではなく天然砂との混合で使用されるケースが多い。これに対して、主にセメント原料としてのみ使用されてきた結晶質石灰石を原料とした砕砂のコンクリートへの適用性を検討し、天然骨材を使用したコンクリートと同等の性状を得られることが確認されている³⁾。

そこで、本研究では、一軸拘束試験により、石灰石砕石と結晶質石灰石砕砂を組合せて使用した、セメント種類の異なるコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性を評価した。また、膨張材や収縮低減剤を使用した場合と収縮ひび割れ抵抗性を比較検討した。

表 - 1 使用材料

材料	記号	種類および性質
セメント	N	普通ポルトランドセメント (密度: 3.16g/cm ³)
	M	中庸熟ポルトランドセメント (密度: 3.21g/cm ³)
	BB	高炉セメントB種 (密度: 3.04g/cm ³)
細骨材	S1	山砂 (表乾密度 2.63g/cm ³ , 吸水率 1.57%, FM2.54)
	S2	結晶質石灰石砕砂 (表乾密度 2.69g/cm ³ , 吸水率: 0.57%, F.M: 2.36, 微粒分量 3.2%)
粗骨材	G1	硬質砂岩砕石 (表乾密度 2.72g/cm ³ , 吸水率 0.70%, F.M6.53, 実積率 61.0%, 微粒分量 0.4%)
	G2	石灰石砕石A (表乾密度 2.71g/cm ³ , 吸水率 0.30%, F.M6.39, 実積率 63.2%, 微粒分量 3.7%)
	G3	石灰石砕石B (表乾密度 2.69g/cm ³ , 吸水率 0.38%, F.M6.12, 実積率 64.2%, 微粒分量 2.2%)
AE 減水剤	AD	主成分: リグニンスルホン酸系化合物とポリオール複合体
膨張材	EX	C S A系 (密度 3.05g/cm ³)
収縮低減剤	SA	低級アルコール系 (密度 1.00g/cm ³)

*1 (株) 宇部三菱セメント研究所 埼玉センター コンクリートグループ 主席研究員 (正会員)

*2 (株) 宇部三菱セメント研究所 埼玉センター コンクリートグループ グループリーダー (正会員)

*3 (株) 宇部三菱セメント研究所 宇部センター コンクリートグループ 研究員 (正会員)

*4 (株) 宇部三菱セメント研究所 埼玉センター コンクリートグループ 研究員 (非会員)

表 - 2 コンクリートの配合

記号	W/B (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m ³)									
			W	SA	C	EX	細骨材		粗骨材			AD
							S1	S2	G1	G2	G3	
N-S1-G1	55.0	47.1	164	-	298	-	863	-	1004	-	-	0.745
N-S2-G2		44.6	168	-	305	-	-	829	-	1035	-	0.763
N-S1-G1-EX		47.2	162	-	275	20	863	-	1004	-	-	0.738
N-S1-G1-SA		47.3	160	2	295	-	871	-	1004	-	-	0.738
M-S1-G1		48.1	156	-	284	-	899	-	1004	-	-	0.710
M-S2-G2		45.7	162	-	295	-	-	858	-	1035	-	0.738
BB-S1-G1		47.2	160	-	291	-	868	-	1004	-	-	0.728
BB-S2-G2		45.2	164	-	298	-	-	847	-	1035	-	0.745
BB-S2-G3		44.5	160	-	291	-	-	837	-	-	1044	0.728

記号はセメント種類-細骨材種類-粗骨材種類-その他混和材料, 単位結合材量(B)はセメント(C)+膨張材(EX)

2. 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリートの配合

使用材料を表 - 1 に示す。セメントは普通ポルトランドセメント (N), 中熟熱ポルトランドセメント (M) および高炉セメント B 種 (BB) を使用した。粗骨材には, 産地の異なる 2 種類の石灰石砕石と硬質砂岩砕石, 細骨材には結晶質石灰石砕砂と山砂を使用した。膨張材は CSA 系の低添加型膨張材を, 収縮低減剤は低級アルコール系を使用した。また, 膨張材は単位セメント量の内割, 収縮低減剤は単位水量の内割で使用した。コンクリートの配合を表 - 2 に示す。配合は水結合材比 (W/B) 55% および AE 減水剤使用量 (B × 0.25%) を一定とし, スランプ 12 ± 1.5cm, 空気量 4.5 ± 1.0% となるように単位水量を調整した。その結果, 同一スランプを得るのに必要な単位水量は, M < BB < N となり, また硬質砂岩砕石と山砂の組合せは, 石灰石骨材の組合せよりも 4 ~ 6kg/m³ 少なくなった。コンクリートの練混ぜは強制練り水平二軸形ミキサを使用し, 空練りを 15 秒間, その後水および混和剤を投入して 90 秒間行った。

2.2 試験項目および試験方法

(1) 一軸拘束試験および自由収縮試験

一軸拘束試験は, 図 - 1 に示す試験体 (JCI SAS3-2「コンクリートの自己収縮応力試験方法」) を用いて, 鉄筋

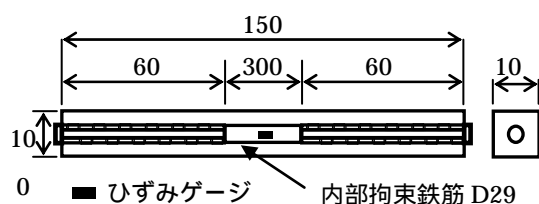


図 - 1 一軸拘束試験体図 (mm)

のひずみ量を測定した。今回の試験では, 拘束鉄筋には異形鉄筋 (D29) を使用した。また, 無拘束試験は 100 × 100 × 400mm 型枠を用いて埋込型ひずみ計 (見かけの弾性係数 40N/mm²) にて自由収縮ひずみを測定した。なお, 試験体本数は, 一軸拘束試験は 3 本, 無拘束試験は 2 本とした。

(2) 力学的性質

材齢 3, 7, 14, 28, 56 日で, 圧縮強度 (JIS A 1108), 割裂引張強度 (JIS A 1113) および静弾性係数 (JIS A 1149) を測定した。

2.3 養生方法

全ての試験において養生は同一とし, 成型後, 型枠のまま材齢 7 日まで封かん養生し, その後脱型して 20 , 相対湿度 60% 環境にて気中養生を継続した。なお, 比較として, 圧縮強度については, 材齢 2 日で脱型後, 標準養生を実施したケース (材齢 7, 28 日) も追加した。

3. 実験結果

3.1 力学的性質

圧縮強度を図 - 2, 3 に, 引張強度を図 - 4 に, 圧縮強度と静弾性係数の関係を図 - 5 に示す。硬質砂岩砕石と山砂を使用した場合, 標準養生では, 材齢 28 日の圧縮強度は N と BB が同等となり, 強度発現の遅い M が最も低くなった。気中養生では, BB の材齢 28 日の圧縮強度は標準養生時の約 80% となり, N や M に比べ, 圧縮強度の低下が大きかった。これは, 初期の養生の影響を受けやすい BB は, 気中養生により圧縮強度の増進が小さくなったためと考えられる⁴⁾。石灰石砕石と結晶質石灰石砕砂を使用した場合, いずれのセメントも材齢 3 日から圧縮強度が高くなった。これは, 石灰石骨材を使用した場合, カルシウムカーボアルミネート水和物が生成されること¹⁾や結晶質石灰石砕砂のほうが, 山砂よりもペー

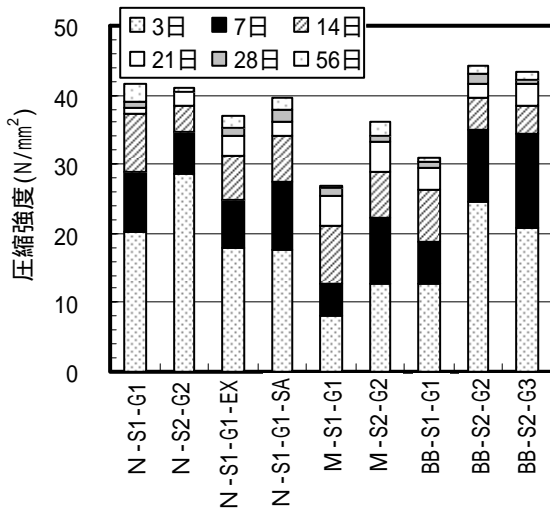


図 - 2 圧縮強度(材齢7日まで封かん, 以降気中養生)

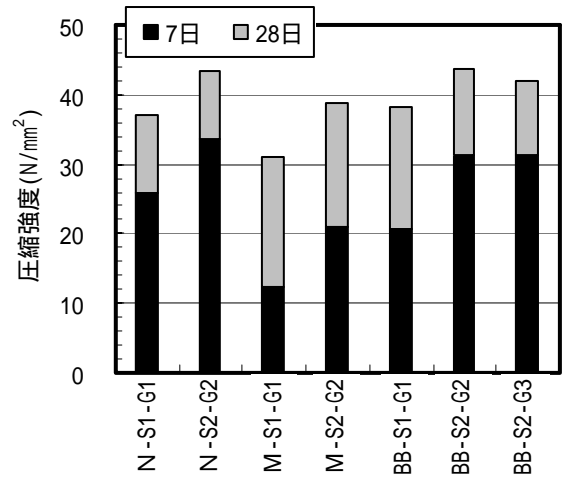


図 - 3 圧縮強度(標準養生)

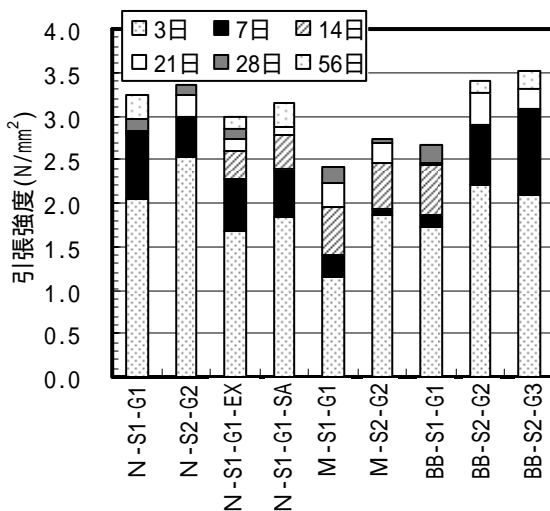


図 - 4 引張強度

ストとの付着力が高くなることによると考えられる。また、セメント種類によらず、石灰石粗骨材の微粒分量が多くなるほど初期強度は高くなることが報告されているが⁵⁾、本結果では、石灰石骨材による初期強度の増加はMおよびBBのほうがNよりも大きくなった。特に気中養生したBBは、硬質砂岩と山砂を使用した場合と異なり、材齢7日までの強度の増進が大きく、Nと同等以上の圧縮強度となる傾向を示した。高炉スラグ系混合セメントは石灰石微粒粉末共存下でスラグの反応が促進されることが報告されている⁶⁾。本結果においても、石灰石砕石および結晶質石灰石砕砂の微粒分量がBBの強度発現に影響を及ぼしていると考えられるため、今後検討する必要がある。また、産地の異なる石灰石砕石を使用した場合、石灰石砕石Aを用いたBB-S2-G2のほうが圧縮強度は若干高くなった。

膨張材を使用した場合の圧縮強度は、未使用の場合に

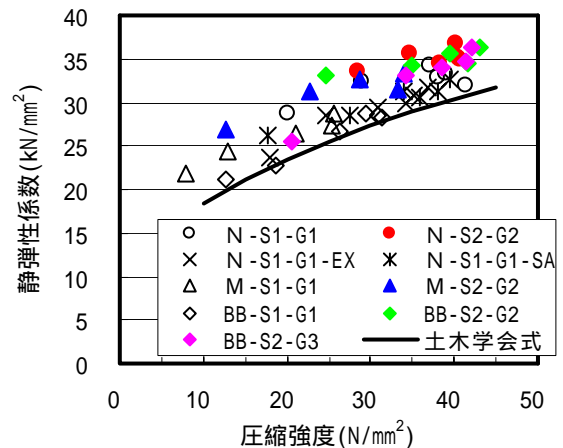


図 - 5 圧縮強度と静弾性係数の関係

比べ、材齢7日以降の圧縮強度が低くなったが、収縮低減剤を使用した場合の圧縮強度は、未使用の場合と同等となった。

引張強度は材齢により若干のばらつきはあるものの、圧縮強度に対する割合は、骨材種類に係らず同等となった。また、圧縮強度と静弾性係数の関係は土木学会式に比べ、同一圧縮強度における静弾性係数は若干高く、特に石灰石骨材を使用したほうが、その傾向は大きくなった。

3.2 自由収縮ひずみ

凝結始発時を原点とした自由収縮ひずみの経時変化を図-6,7に示す。膨張材を使用した配合を除けば、自由収縮ひずみは、材齢7日までは自己収縮に、材齢7日以降は自己収縮および乾燥収縮に起因したひずみとみなすことができる。硬質砂岩砕石と山砂を使用した場合、材齢7日までの自由収縮ひずみは、NおよびBBでいずれも 50×10^{-6} 程度となり、Mはほぼ0となった。その後気中養生を開始すると自由収縮ひずみは急増し、材齢56

日時点では、NとBBは同等となった。石灰石骨材を使用した場合、コンクリートの乾燥収縮は小さくなると言われているが¹⁾、本結果においても、石灰石砕石と結晶質石灰石砕砂を使用した場合、セメント種類にかかわらず、自由収縮ひずみは、硬質砂岩砕石および山砂に比べて40%以上小さくなった。また、BB-S2-G2とBB-S2-G3の自由収縮ひずみは同等であり、石灰石粗骨材の産地の違いが自収縮ひずみに及ぼす影響は小さかった。

膨張材または収縮低減剤を使用した場合、材齢56日での自由収縮ひずみは、これらを使用しない場合に比べて、膨張材で約33%、収縮低減剤で約24%小さくなった。

以上の結果より、自由収縮ひずみの低減効果は、本実験の範囲では、石灰石砕石と結晶質石灰石砕砂を使用する場合が最も高く、次いで膨張材、収縮低減剤の順となった。

3.3 収縮応力およびひび割れ抵抗性

ひび割れが発生した配合ケースのひび割れ発生日数を図-8に、鉄筋のひずみより算出したコンクリートの引張応力および引張強度の経時変化を図-9に示す。図-9において、応力が急激に低下しているのはひび割れの発生によるものであり、目視においてもこれを確認している。硬質砂岩砕石と山砂を使用した場合、ひび割れ発生日数はBBが最も短く、NとMは同等となった。BBは、材齢28日までの自由収縮ひずみが最も大きく、また気中養生により引張強度が低かったことが影響していると考えられる。Mは自由収縮ひずみがNよりも小さいが、BBと同様に引張強度が低かったことが影響していると考えられる。また収縮低減剤を使用した場合、自由収縮ひずみが低減された効果により、ひび割れ発生日数は長くなった。膨張材は収縮低減剤よりも自由収縮ひずみの低減効果が大きいいため、材齢56日時点でひび割れは認められなかった。一方、石灰石砕石と結晶質石灰砕砂を使用した場合、いずれのケースもひび割れは認められなかった。これは、石灰石骨材による自由収縮ひずみの低減効果と、初期強度の向上により引張強度が高くなったことによるものと考えられる。

各配合の引張応力、引張強度および応力強度比を表-3に示す。なお、ひび割れが発生した配合は、ひび割れ発生時の、ひび割れが発生していない配合は、材齢56日時点の値をそれぞれ算出した。また、ひび割れ発生時の引張強度は、土木学会コンクリート標準示方書（設計編：標準）に示された引張強度と圧縮強度の関係式に、実験結果を最小二乗法によりフィッティングし、推定した。

今回の実験条件では、ひび割れ発生時の応力強度比は0.53~0.75となった。また、セメント種類によりひび割

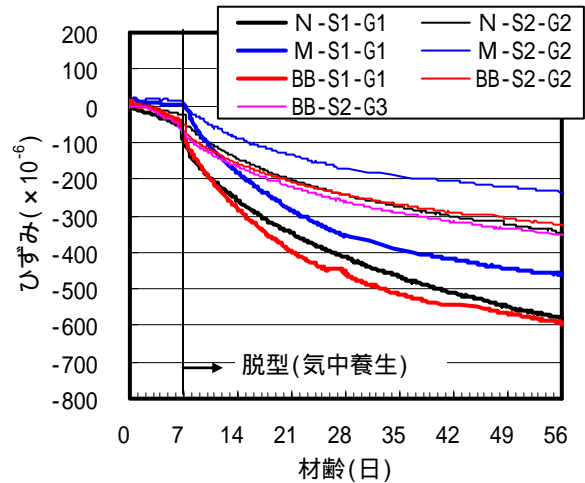


図-6 自由収縮ひずみの経時変化

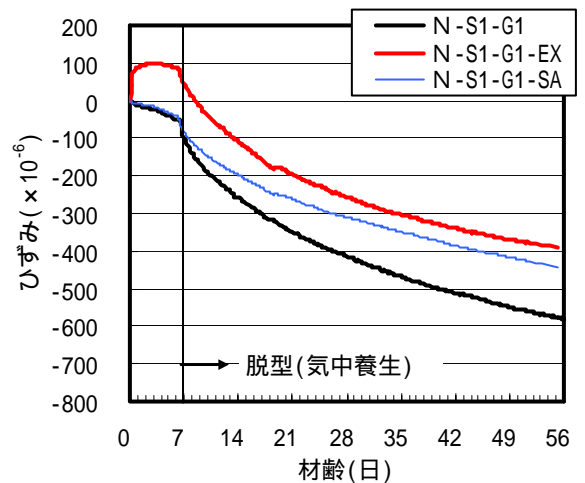


図-7 自由収縮ひずみの経時変化

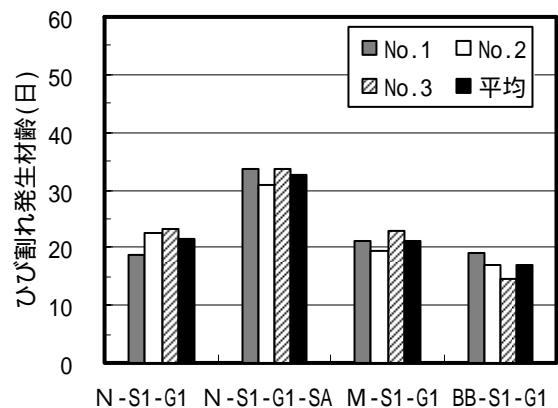


図-8 ひび割れ発生日数

れ発生時の応力強度比が異なることが報告されているが⁷⁾、本結果ではセメント種類の影響は明確にはならなかった。

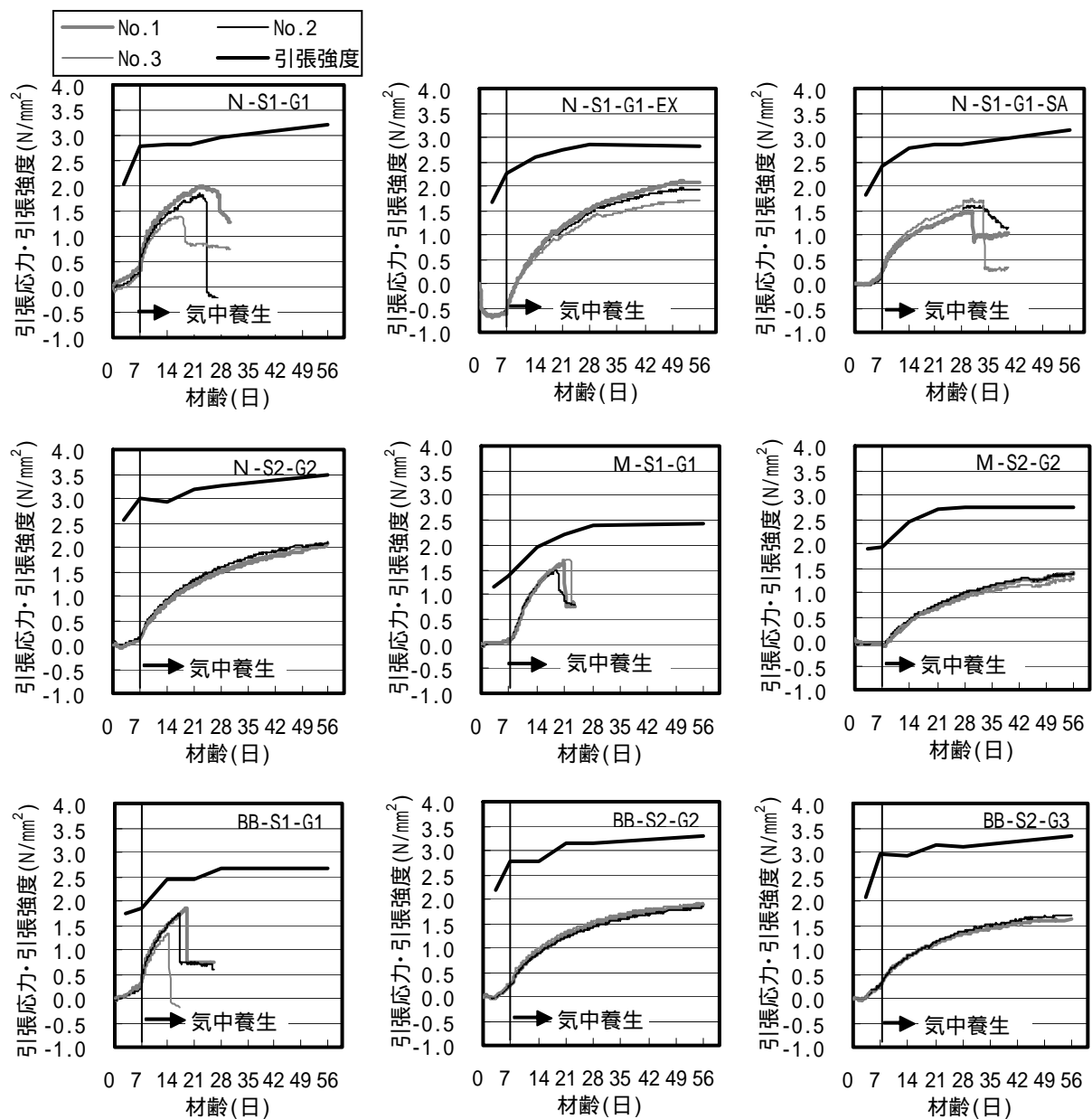


図 - 9 コンクリートの引張応力・引張強度の経時変化

表 - 3 引張応力，引張強度および応力強度比

記号	ひび割れ発生材齢*1 (日)	引張応力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	応力強度比
N-S1-G1*2	21.6 (18.7, 22.7, 23.3)	1.74	3.03	0.57
N-S2-G2	-	2.06	3.48	0.59
N-S1-G1-EX	-	1.96	2.99	0.66
N-S1-G1-SA*2	32.8 (33.7, 30.9, 33.7)	1.59	3.02	0.53
BB-S1-G1*2	16.9 (19.0, 17.1, 14.5)	1.63	2.34	0.70
BB-S2-G2	-	1.88	3.28	0.57
BB-S2-G3	-	1.75	3.32	0.53
M-S1-G1*2	21.0 (21.0, 19.3, 22.8)	1.64	2.18	0.75
M-S2-G2	-	1.36	2.75	0.49

*1 3本の平均 ()内は各試験体の値，*2 ひび割れ発生時の値，他は材齢56日の値

4. まとめ

石灰石砕石と結晶質石灰石砕砂を使用したコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性を評価した結果、以下の事項が判明した。

- (1) 山砂と硬質砂岩砕石を用いた場合に比べ、コンクリートの自由収縮ひずみは40%以上低減した。また、その低減効果は、山砂と硬質砂岩砕石に膨張材を使用した場合や収縮低減剤を使用した場合よりも大きくなった。
- (2) 山砂と硬質砂岩砕石を用いた場合に比べ、初期材齢からコンクリートの圧縮強度は高くなった。また、その傾向はセメント種類で異なり、特にBBで顕著となった。
- (3) 材齢56日時点で一軸拘束試験によるひび割れ発生は認められず、山砂と硬質砂岩砕石を用いた場合に比べ、収縮ひび割れ抵抗性を改善できた。これは、収縮低減効果と初期強度の増大によると考えられる。
- (4) 今回の試験では、産地が異なる石灰石粗骨材と組み合わせた場合の収縮性状や強度性状に関して、十分に検討していない。今後さらにデータを蓄積し、石灰石砕石および結晶質石灰石砕砂の組み合わせによる効果を検証したい。

参考文献

- 1) (社)セメント協会：コンクリート専門委員会報告 F-46 石灰石骨材コンクリートに関する研究，pp.41-44，1992.10
- 2) 友澤史紀ほか：完全リサイクルコンクリート（エココンクリート）の研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.341-342，1994.9
- 3) 栗田基央ほか：結晶質石灰石砕砂のコンクリートへの適用性に関する検討，(株)宇部三菱セメント研究所研究報告 No.8，pp.40-54，2007.1
- 4) (社)セメント協会：コンクリート専門委員会報告 F-38 初期の乾燥がコンクリートの諸性質に及ぼす影響，pp.14-17，1985.7
- 5) 長塩靖祐ほか：石灰石粗骨材の微粉分量がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.99-104，2008
- 6) 佐川孝広ほか：高炉セメントの水和反応に及ぼす石灰石微粉末の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.93-98，2007
- 7) 斉藤敏樹ほか：フライアッシュコンクリートの収縮ひび割れに関する検討，土木学会第63回年次学術講演会，pp.857-858，2008.9