

論文 各種セメントと石灰石骨材を使用した高強度コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性に関する研究

中山英明*1・鳴瀬浩康*2・中里剛*3・木村祥平*3

要旨: 各種セメントと石灰石砕石および石灰石砕砂を使用した高強度コンクリートについて、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、石灰石砕石および石灰石砕砂を使用した場合、硬質砂岩砕石および山砂を使用した場合に比べ、コンクリートの自己収縮ひずみおよび乾燥収縮ひずみが低減し、収縮ひび割れ抵抗性を改善できることが明らかとなった。

キーワード: 石灰石, 砕砂, 簡易断熱養生, 高強度コンクリート, 圧縮強度, ひび割れ抵抗性

1. はじめに

近年、コンクリートの収縮に起因したひび割れが問題となっている。ひび割れを抑制する対策として、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骨材が注目されている¹⁾。筆者らは、前報²⁾において、各種セメントと石灰石砕石および石灰石砕砂を組み合わせたW/C=55%のコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性について検討した。その中で、石灰石砕石および石灰石砕砂を使用した場合、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%以上低減すること、および初期材齢から圧縮強度は高くなり、特にその傾向は高炉セメントB種で顕著となることが判明している。しかしながら、石灰石骨材を使用したコンクリートが高湿履歴を受けた場合に、粗骨材とセメントペーストの線膨張係数の違いによる微視的温度応力を受け、強度が低下するケースが報告されている³⁾。このため、比較

的高い温度履歴を受ける高強度コンクリートに石灰石骨材を使用した場合の強度発現性を詳細に検討する必要があると考える。また、高強度コンクリートでは自己収縮も含めた収縮を考慮する必要があるが、石灰石骨材を使用した場合の自己収縮の低減効果については詳細な検討を行っていない。

そこで、本研究では、各種セメントと石灰石砕石および石灰石砕砂を使用した高強度コンクリートについて一軸拘束試験を実施し、強度発現性およびコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性を評価した。

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)、中庸熱ポルトランドセメント(M)低熱ポルトランドセメント(L)を使用した。また一部ケースで高炉セメントB種(BB)も使用した。粗骨材には、石灰石砕石と硬質砂岩砕石、細骨材には石灰石砕砂と山

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	中庸熱ポルトランドセメント(密度: 3.21g/cm ³)
	L	低熱ポルトランドセメント(密度: 3.24g/cm ³)
	BB	高炉セメントB種(密度: 3.04g/cm ³)
細骨材	S	山砂(表乾密度 2.63g/cm ³ , 吸水率 1.57%, FM2.54)
	LS	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	G	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%)
	LG	石灰石砕石(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%)
高性能AE減水剤	SP	主成分: ポリカルボン酸系

*1 三菱マテリアル(株)セメント研究所 コンクリートグループ 主任研究員(正会員)

*2 三菱マテリアル(株)セメント研究所 コンクリートグループ グループリーダー(正会員)

*3 三菱マテリアル(株)セメント研究所 コンクリートグループ 研究員(非会員)

砂を使用した。コンクリートの配合を表-2 に示す。配合は水セメント比(W/C)45%および35%とし、W/C=45%の場合はスランプ 18±2.5cm, 空気量 4.5±1.5%, W/C=35%の場合はスランプフロー60±5cm, 空気量 3.0%以下となるように高性能 AE 減水剤で調整した。その結果、石灰石骨材を使用した場合、いずれのセメントも、硬質砂岩砕石および山砂を使用する場合よりも混和剤添加量は少なくなった。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、W/C=45%の場合は全材料投入後 90 秒間、W/C=35%の場合はモルタル先練りで 30 秒間、その後粗骨材を投入して 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無拘束縮試験

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、鉄筋のひずみ量を測定した。なお事前にひび割れ発生時の拘束度が 0.5 程度となる拘束条件を検討した結果、拘束鉄筋には異形鉄筋 (D29) を使用した²⁾。また、無拘束試験は 100×100×400mm 型枠を用いて埋込型ひずみ計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。

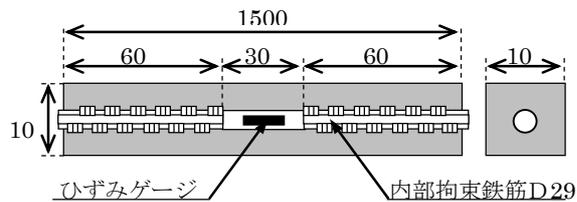


図-1 一軸拘束試験体図 (mm)

(2) 力学的性質

材齢 3, 7, 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。

(3) 細孔径分布

圧縮強度試験後の供試体の細孔径分布を水銀圧入式ポロシメーターにより測定を行った。

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。ただし、圧縮強度試験では、標準水中養生および簡易断熱養生も実施した。

3. 実験結果

3.1 力学的性質

一軸拘束試験と同一養生とした場合の圧縮強度を図-2 に、簡易断熱養生時の圧縮強度を図-3 に、簡易断熱養生時の温度履歴を図-4 に示す。一軸拘束試験と同一養生の場合、いずれのケースも石灰石骨材を使用したコンクリートの材齢 3 日における圧縮強度は、硬質砂岩砕石および山砂を使用したものより高くなった。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⁾や石灰石砕砂のほうが山砂よりもペー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、M や L を使用した場合には、材齢 7 日以降の強度増進も良好で、硬質砂岩砕石および山砂を使用

表-2 コンクリートの配合

記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						SP (C×%)
			W	C	S	LS	G	LG	
45N-S-G	45.0	44.4	165	367	786	-	1020	-	0.60
45N-LS-LG		42.3	165	367	-	767	-	1054	0.50
45M-S-G		44.5	165	367	792	-	1020	-	0.58
45M-LS-LG		42.5	165	367	-	772	-	1054	0.43
45L-S-G		44.6	165	367	792	-	1020	-	0.50
45L-LS-LG		42.5	165	367	-	775	-	1054	0.40
45BB-S-G		44.5	165	367	792	-	1020	-	0.55
45BB-LS-LG		41.9	165	367	-	753	-	1054	0.40
35N-S-G	35.0	52.0	165	472	910	-	870	-	1.45
35N-LS-LG		50.2	165	472	-	898	-	900	1.28
35M-S-G		52.1	165	472	915	-	870	-	1.20
35M-LS-LG		50.3	165	472	-	904	-	900	0.95
35L-S-G		52.2	165	472	918	-	870	-	1.25
35L-LS-LG		50.4	165	472	-	907	-	900	0.90

記号は W/C・セメント種類-細骨材種類-粗骨材種類

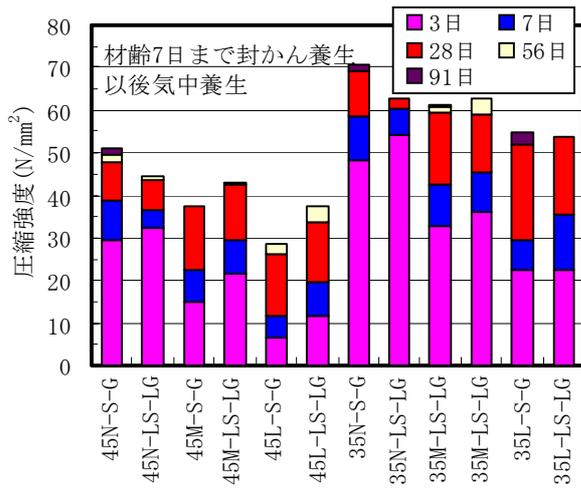


図-2 圧縮強度(一軸拘束試験と同一養生)

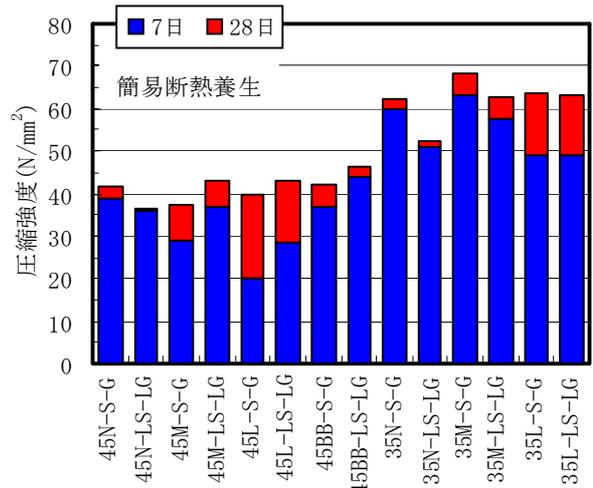


図-3 圧縮強度(簡易断熱養生)

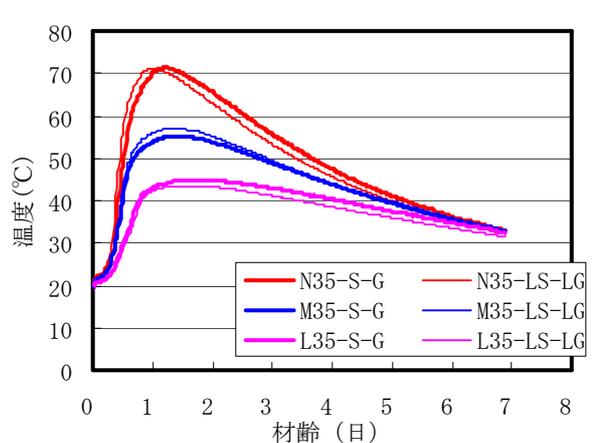
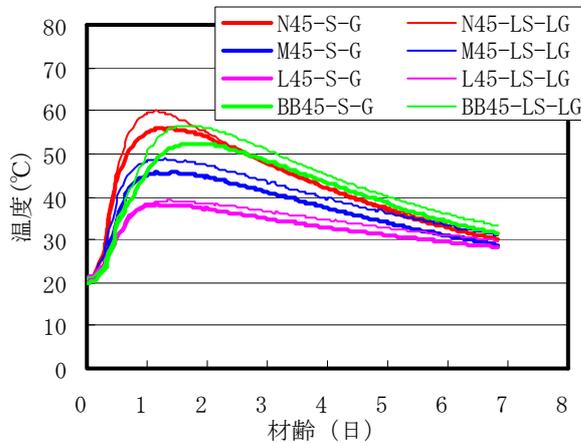


図-4 簡易断熱養生時の温度履歴

した場合と同等以上の圧縮強度となった。ただし、Nを使用した場合には材齢7日以降の強度増進が小さく、硬質砂岩碎石および山砂を使用した場合より低くなった。また、簡易断熱養生の場合、W/C=45%では、Nを除いて、石灰石骨材を使用したほうが圧縮強度は高くなった。これは、簡易断熱養生では、石灰石骨材を使用したほうが総じて温度上昇が早くなっており、水和が促進されたためと考えられる。しかし W/C=35%で石灰石骨材を使用した N および M は、硬質砂岩碎石および山砂を使用した場合よりも圧縮強度は低下した。簡易断熱養生時の最高温度は L<M<N の順となっていることや、W/C=35%で、L の場合には強度が低下していないことから、石灰石骨材を使用する場合、温度履歴下では、最高温度が強度発現性に及ぼす影響が大きくなる可能性があると考えられる。ただし、W/C=45%において、Nより最高温度が3°C程度低いBBでは、石灰石骨材を使用したほうが強度は高くなっており、今後、温度履歴下での最高温度やセメント種類の違いによる影響などについては検討課題としたい。

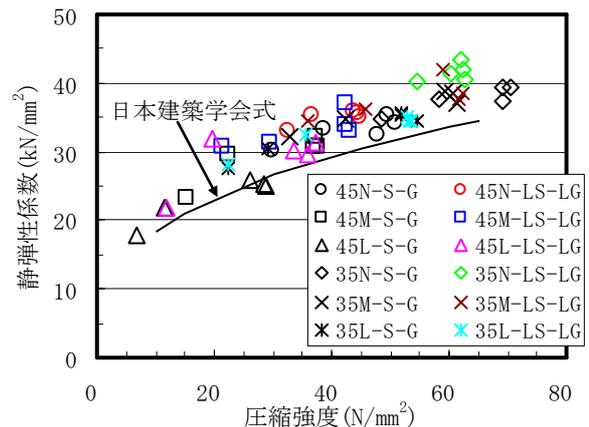


図-5 圧縮強度と静弾性係数の関係

一軸拘束試験と同一養生とした場合の圧縮強度と静弾性係数の関係を図-5に示す。圧縮強度と静弾性係数の関係は日本建築学会式に比べ、同一圧縮強度における静弾性係数は高く、また石灰石骨材を使用したほうが、硬質砂岩碎石および山砂を使用した場合よりも静弾性係数

は若干大きくなった。

3.2 細孔径分布

W/C=45%における一軸拘束試験と同一養生および簡易断熱養生した材齢 7 日の供試体の細孔径分布を図-6 に示す。一軸拘束試験と同一養生の場合、石灰石骨材を使用したコンクリートは、硬質砂岩碎石および山砂を使用する場合に比べ、総じて細孔半径 100nm 以上の細孔容積が減少し、また総細孔容積も減少した。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し、それらの水和物がコンクリートの圧縮強度に影響を及ぼす空隙を充填し、減少させることが報告されている⁴⁾。本結果においても同様の傾向が認められた。また簡易断熱養生の場合も、石灰石骨材を使用したほうが総細孔容積は減少するが、細孔半径 100nm 以下の細孔容積が減少する傾向を示した。ただし、N では石灰石骨材を使用したほうが簡易断熱養生の圧縮強度は低下していることから、細孔構造からは圧縮強度の低下は説明できないと考えられる。

3.3 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-7 に示す。図において材齢 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。硬質砂岩碎石と山砂を使用した場合、W/C=45%では、L、M、N の材齢 7 日の自己収縮ひずみはそれぞれ、0、 -60×10^{-6} 程度、 -90×10^{-6} 程度となった。また W/C=35%では、それぞれ -70×10^{-6} 程度、 -100×10^{-6} 程度、 -200×10^{-6} 程度となり、 $L < M < N$ の順となった。また水セメント比が低くなるほど自己収縮は大きく、これらは既往の知見と一致した⁵⁾。その後気中養生を開始するといずれも自由収縮ひずみは急増し、材齢 91 日時点では N が最も大きくなるものの、M と L では自由収縮ひずみの差異は小さかった。また W/C と自由収縮ひずみには明確な傾向は認められなかった。

石灰石骨材を使用した場合、材齢 7 日の自己収縮ひずみは W/C=45%では、それぞれ L、M、N が、0、0、 -60×10^{-6} 程度となった。また W/C=35%では、それぞれ -70×10^{-6} 程度、 -100×10^{-6} 程度、 -170×10^{-6} 程度となり、硬質砂岩碎石と山砂を使用した場合よりも自己収縮ひずみは小さくなった。また材齢 91 日時点の自由収縮ひずみも小さくなっており、高強度コンクリートに石灰石骨材を使用することによって、自己収縮も含む自由収縮ひずみは低減できることが明らかとなった。

3.4 収縮応力およびひび割れ抵抗性

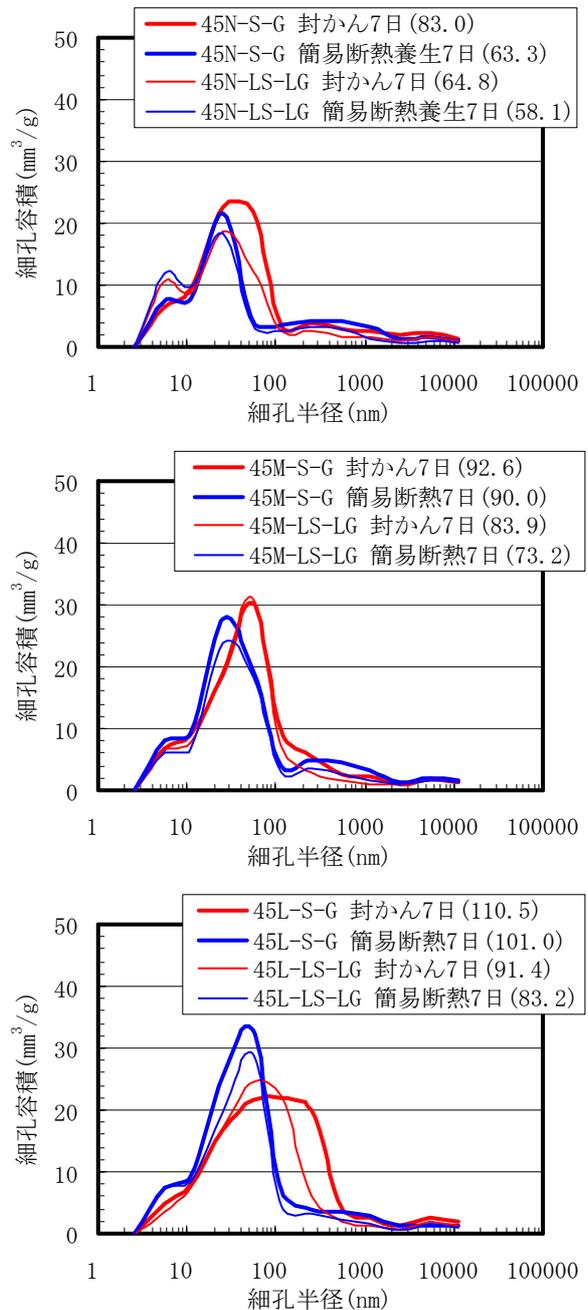
鉄筋のひずみより算出したコンクリートの引張応力および引張強度の経時変化を図-8 に、ひび割れが発生した配合ケースのひび割れ発生日数および応力強度比を表-3 に示す。なお、図中には(1)式より配合毎に圧縮強

度と割裂引張強度の関係から算出した結果も併せて示す。

$$f(t) = a \cdot f_c(t)^b \quad (1)$$

ここに、 $f(t)$ は引張強度、 $f_c(t)$ は圧縮強度、 a, b は係数である。

図において、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。ただし、一部ケースで、ひび割れが中央区間(節部を除去した 30cm 区間)から外れて発生したために、一時的に応力は低下するものの、その後再び応力が増加した。この場合、応力が最初に低下した時点をひび割れ発生日数として評価した。



*凡例中の () 内は総細孔容積(mm³/g)

図-6 コンクリートの細孔径分布

石灰石骨材を使用した場合、同一材齢における引張応力は、硬質砂岩砕石および山砂を使用する場合よりも小さくなっている。また、引張強度は同等または若干小さくなっており、本研究の範囲では、高強度コンクリートの領域では石灰石骨材による引張強度の増進は小さいと考えられる。なお、W/C=35%において、材齢91日の引張強度が低下しているが、これは気中養生による乾燥の影響によると考えられる。

ひび割れが発生した供試体はいずれも硬質砂岩砕石

表-3 ひび割れ発生材齢および応力強度比

記号	ひび割れ発生材齢(日)*	応力強度比
45N-S-G	23.6 (20.7, 29.7, 20.2)	0.65
45M-S-G	30.6 (29.3, 34.8, 27.6)	0.71
45L-S-G	26.4 (23.1, 27.2, 28.8)	0.73
35N-S-G	40.9 (31.8, 27.5, 63.5)	0.63
35M-S-G	43.3 (34.8, 35.2, 60.0)	0.58
35L-S-G	44.2 (44.7, 48.1, 39.7)	0.67

*3本の平均 ()内は各試験体の値

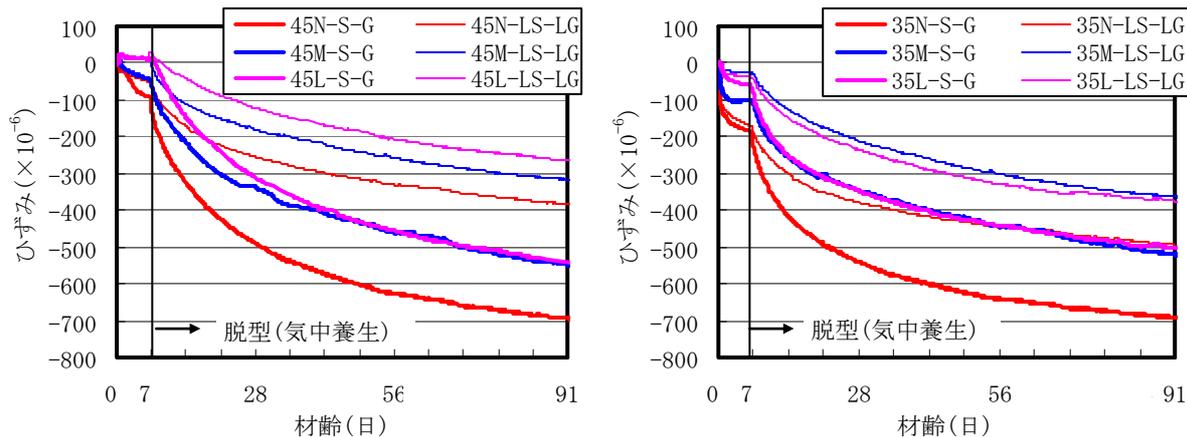


図-7 自由収縮ひずみの経時変化

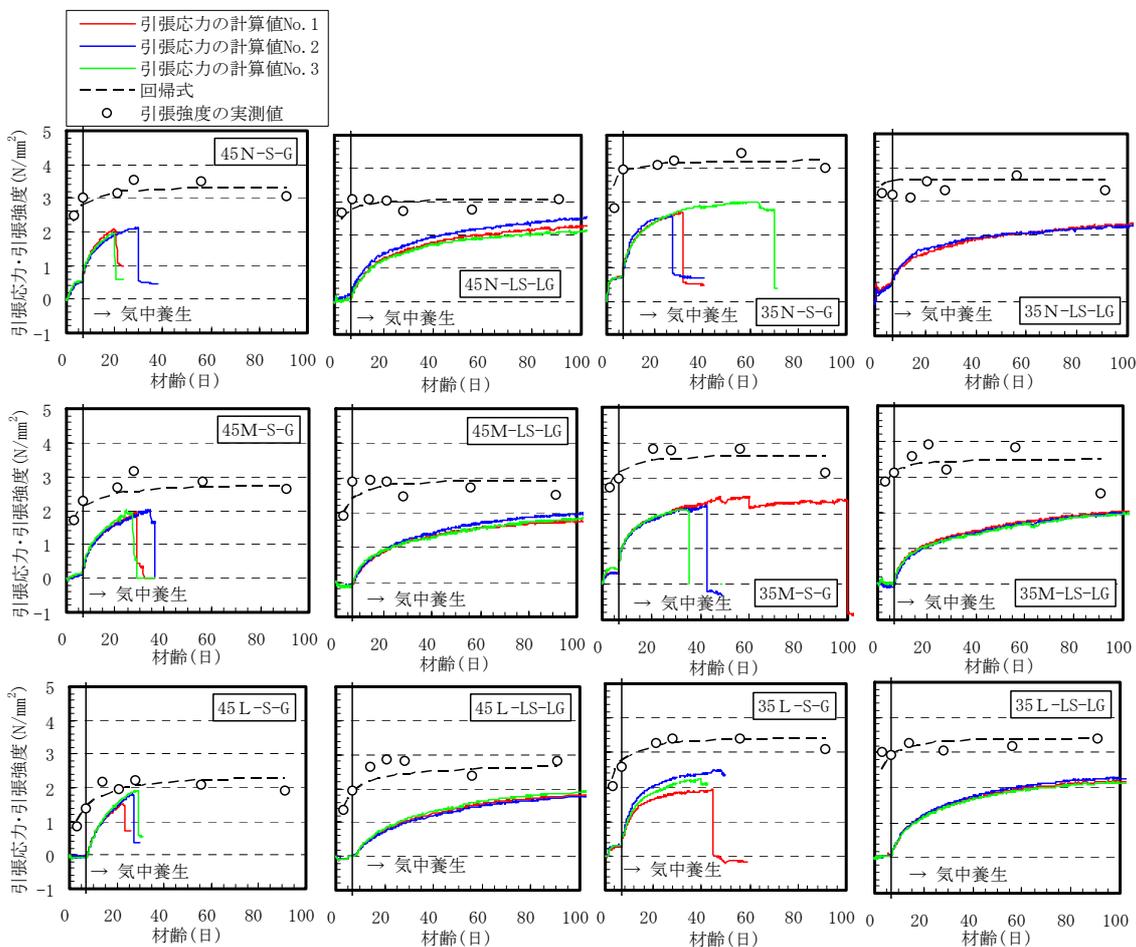


図-8 コンクリートの引張応力・引張強度の経時変化

および山砂を使用したケースであった。セメント種類に関わらず、ひび割れ発生日数は同等と判断されるが、W/Cが低いほうが、ひび割れ発生日数は長くなる傾向が認められた。また、ひび割れ発生時の応力強度比はW/Cが低いほうが小さくなった。さらに、セメント種類により応力強度比が異なることが報告されているが⁹⁾、本結果ではLの応力強度比が比較的大きくなった。

石灰石骨材を使用した場合、試験体にひび割れは発生しておらず、収縮ひび割れ抵抗性が高くなることが明らかとなった。なお、NおよびW/C=35%のLでは、材齢91日における応力強度比が、硬質砂岩砕石および山砂を使用した場合のひび割れ発生時の応力強度比を超えている。この理由として、材齢が長くなるほど応力強度比が高くなること⁷⁾や拘束試験体の乾燥の違いが、試験体内部の応力分布に影響を及ぼした可能性等が考えられる。今後さらに検討する必要がある。

4. まとめ

各種セメントと石灰石砕石および石灰石砕砂を使用した高強度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、コンクリートの自己収縮ひずみおよび乾燥収縮ひずみが低減した。また、その低減効果は、セメント種類やW/Cにより異なった。
- (2) 一軸拘束試験と同一条件下において、山砂と硬質砂岩砕石を用いた場合に比べ、材齢3日のコンクリートの圧縮強度は若干高くなる傾向を示した。しかし、その後の強度の伸びは小さく、Nは材齢28日以降の圧縮強度は小さくなった。

- (3) 山砂と硬質砂岩砕石を用いた場合に比べ、W/C=45%では簡易断熱養生下における圧縮強度は高くなる傾向を示した。しかし、W/C=35%では圧縮強度が低下するケースが認められた。特に最高温度が高いNでその傾向は顕著となった。
- (4) 本研究で検討した範囲では、高強度コンクリートにおいて、石灰石骨材を使用した場合、収縮低減効果により、ひび割れ抵抗性が向上することが明らかとなった。

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) 中山英明ほか：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.541-546，2009
- 3) 相澤健太ほか：骨材が高温履歴を受けた高炉スラグ微粉末含有コンクリートの強度に及ぼす影響，第61回セメント技術大会，pp.60-61，2007
- 4) 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
- 5) (社)日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書，pp.22-25，1996
- 6) 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
- 7) 上田賢司ほか：コンクリート部材に生じる乾燥収縮ひび割れ予測に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.21，No.2，pp.775-780，1999