

コンクリートのひび割れ発生強度に影響を与える要因に関する実験的検討

三井住友建設(株) 正会員 博(工) ○佐々木 亘
 三井住友建設(株) 正会員 石澤 正大
 三井住友建設(株) 正会員 博(工) 谷口 秀明
 三井住友建設(株) 正会員 博(工) 樋口 正典

Abstract : This paper is meant as the study on factors of crack strength of concrete for PC superstructures and describes the examination results. As a result, followings were obtained; 1) When the specimen size is larger, the influence of curing condition on the compressive strength is smaller because the volume-surface ratio is also larger. 2) The influence of mineral admixture, curing condition and specimen size on the relationship of compressive strength and Young's modulus is small. 3) The crack strength is smaller than the split tensile strength on split tensile strength test. The influence of the condition of mix proportion, the curing condition and the specimen size on the relationship of crack strength and split tensile strength is small. 4) The influence of specimen size on crack strength in drying condition is bigger because of increasing unevenness of concrete..

Key words : Crack Strength, Mineral Admixture, Coarse Aggregate, Curing, Size Effect

1. はじめに

コンクリート構造物を長期的に供用するためには、ひび割れの発生を抑制し、発生後にはその幅を制御することが重要である。最近では、天然骨材の品質低下に起因するコンクリートの収縮ひずみの増加とそれに伴うひび割れの発生が問題となり、学協会において様々な議論がなされた¹⁾。一方、コンクリート構造物の高耐久化を目的としてコンクリート自体にも様々な性能が要求され、例えば高流動コンクリートや短繊維補強コンクリートのように、多様な材料や配合のコンクリートが従来にも増して使用されるようになってきている。特に短繊維補強コンクリートでは、その特徴である引張特性を評価する上で、コンクリートのひび割れ発生強度が重要な特性値の一つとなっている²⁾。また、二酸化炭素排出量削減に対する意識の高まりなどもあり、セメントの一部を高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材で置き換えたコンクリートの検討が活発に行なわれており、RC構造物だけでなくPC構造物も対象とした実用化に向けた取り組み³⁾がなされている。このようなコンクリートの配合や材料の変化がひび割れ発生強度に与える影響を把握することは、コンクリート構造物の高耐久化に資するものとして重要であると考えられる。

このような背景のもと、本稿ではPC上部工で多用される設計基準強度40 N/mm²程度の早強コンクリートを対象に、コンクリートのひび割れ発生強度に影響を与える要因に関する検討を行なった。

2. 実験概要

2.1 実験要因

本実験では設計基準強度40 N/mm²程度のコンクリートを想定し、水結合材比(W/B)は40%で一定とした。セメントは早強ポルトランドセメントとし、細骨材には山砂と砕砂を容積比率4:6で混合したもの、粗骨材には砕石2005を使用した。この条件の下、骨材量および混和材の影響について調べた。表-1に使用材料、表-2にコンクリートの配合を示す。以下、各配合については、表-2に記載した記号で呼ぶこととする。

一般のコンクリートを想定した基本配合であるH40の単位水量は165 kg/m³、単位粗骨材絶対容積は0.375 m³/m³である。G300、G200およびG0では、H40に対してモルタル細骨材容積比(s/m, m=w+c+s)を一定とし、単位粗骨材絶対容積を変化させた。G300、G200およびG0の単位粗骨材絶対容積は、それぞれ、0.300

表-1 使用材料

材料		種類, 物性など	記号
水		水道水	W
結合材	セメント	早強ポルトランドセメント (密度 3.13 g/cm ³ , 比表面積 4610 cm ² /g)	C
	シリカフェーム	エジプト産 (密度 2.25 g/cm ³ , BET 比表面積 15.0 m ² /g)	SF
	高炉スラグ微粉末	密度 2.91 g/cm ³ , ブレーン比表面積 6300 cm ² /g, せっこう添加なし	BF
	フライアッシュ	JIS II 種灰 (密度 2.19 g/cm ³ , ブレーン比表面積 3880 cm ² /g)	FA
細骨材		山砂 (表乾密度 2.62 g/cm ³ , 吸水率 1.90%) と砕砂 (硬質砂岩, 表乾密度 2.61 g/cm ³ , 吸水率 1.68%) を容積割合 4:6 で混合	S
粗骨材		砕石 2005 (硬質砂岩, 密度 2.64 g/cm ³ , 吸水率 0.96%)	G
化学混和剤		高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸エーテル系化合物)	SP
		AE 剤 (変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤)	AE

表-2 コンクリートの配合

記号	水結合材比 W/B [%]	モルタル 細骨材 容積比 s/m [%]	細骨材 率 s/a [%]	空気 量 [%]	単位 ペースト 絶対容積 [m ³ /m ³]	単位粗骨材 絶対容積 [m ³ /m ³]	単位量 [kg/m ³]							
							W	B				S	G	
								C	SF	BF	FA			
H40	40.0	45.3	43.0	4.5	0.297	0.375	165	413	413				740	990
G300		45.3	51.4	4.5	0.338	0.300	188	470	470				828	792
G200		45.4	64.5	4.5	0.392	0.200	218	545	545				949	528
G0		45.3	100	4.5	0.502	0.000	279	698	698				1185	0
G0-2		55.2	100	4.5	0.403	0.000	224	560	560				1443	0
SF10		44.5	42.6	4.5	0.302	0.375	165	413	371	41			727	990
BF50		44.5	42.6	4.5	0.302	0.375	165	413	206		206		727	990
FA30		42.6	41.5	4.5	0.314	0.375	165	413	289			124	695	990
SF10G0		44.4	100	4.5	0.511	0.000	279	698	628	70			1161	0
BF50G0		44.5	100	4.5	0.510	0.000	279	698	349		349		1163	0
FA30G0		42.6	100	4.5	0.529	0.000	278	695	487			209	1114	0

m³/m³, 0.200 m³/m³, 0.000 m³/m³である。G300 は高流動コンクリート, G200 は短繊維補強コンクリートで想定される単位粗骨材絶対容積としている。G0-2 は G0 と同様に単位粗骨材絶対容積が 0.000 m³/m³のモルタル配合であるが, 細骨材量の影響を検討するため s/m を 10%程度増加させ, 単位ペースト絶対容積を G200 と同程度としたものである。

SF10, BF50 および FA30 は, H40 に対してセメントの一部をそれぞれシリカフェーム, 高炉スラグ微粉末およびフライアッシュで置換したものである。置換率は, 既往の研究^{4),5)}を参考に, それぞれ 10%, 50%, 30%とした。さらに, それぞれの配合について粗骨材を除いたモルタル配合(記号 G0 を付記)を設定し, 粗骨材の影響を確認することとした。高性能 AE 減水剤の使用量は, 配合によって大きな差が生じないように材料分離を生じない範囲での最低限の調整に留めた。空気量は目標値を 4.5±0.5%として AE 剤により調整した。

2.2 供試体の作製および測定項目

コンクリートの練混ぜは公称容量 100 リットルの強制 2 軸ミキサにより行なった。粗骨材を除く材料によるモルタル練りを 90 秒行ない, その後, 粗骨材を使用する配合では粗骨材を投入しさらに 90 秒の練混ぜを行なった。練混ぜが終了しフレッシュ性状を確認した後, ただちに供試体の作製を行なった。供試体は φ100×200 mm および φ150×300 mm の円柱供試体である。

作製した円柱供試体を用いて圧縮強度, 静弾性係数, 割裂引張強度およびひび割れ発生強度の測定を行なった。ひび割れ発生強度は, 割裂引張強度試験において供試体端面にひずみゲージを貼りつけ, 計測されたひずみの変化が不連続になった点^{2),6)}をひび割れ発生強度として評価を行なった。測定には基本的に

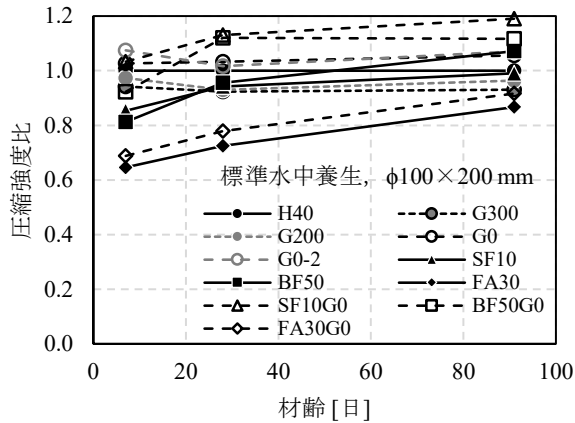


図-1 圧縮強度 (H40 に対する比として表示)

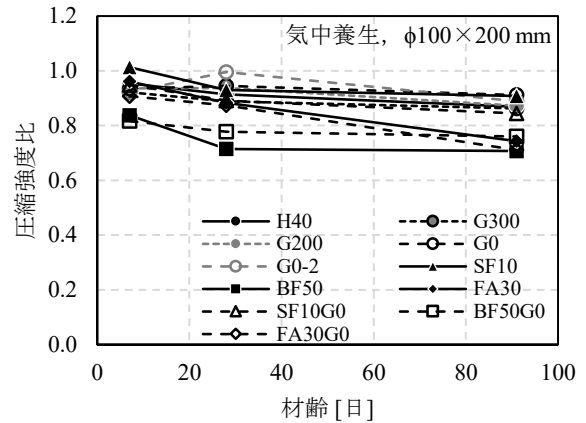


図-2 気中養生供試体の圧縮強度 (標準水中養生に対する比として表示)

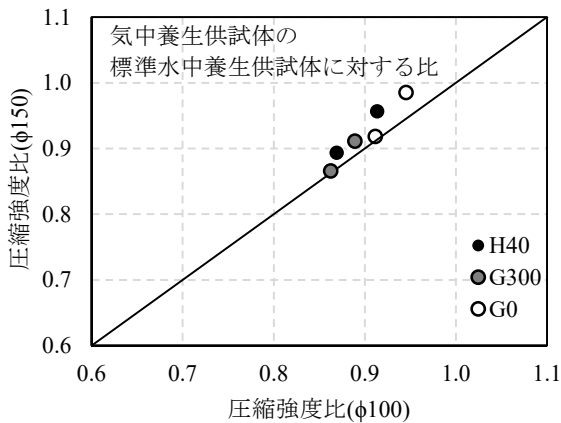


図-3 気中養生供試体の圧縮強度と供試体寸法の関係 (標準水中養生に対する比として表示)

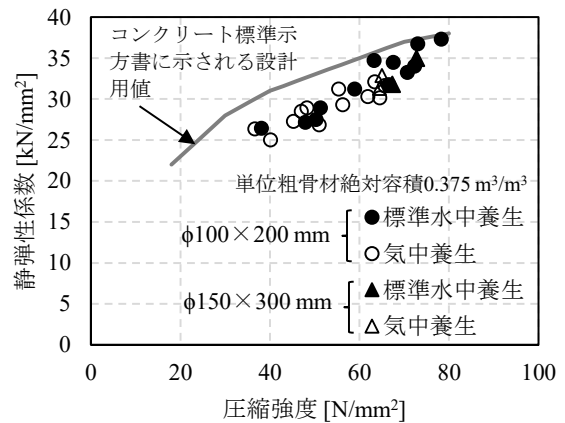


図-4 圧縮強度と静弾性係数の関係

φ100×200 mm の供試体を使用し、ひび割れ発生強度に影響を与える要因の検討として一部の条件では φ150×300 mm の供試体も用いた。具体的には、割裂引張強度試験では G200 を除くすべての配合で供試体寸法の比較を行ない、圧縮強度試験では、H40, G300, G0 のみで供試体寸法の影響について確認を行なった。供試体の養生は、標準水中養生または材齢 7 日まで 20℃封緘養生を行なったのち温度 20℃湿度 60%の気中養生 (以下、気中養生と呼ぶ) の 2 水準とした。測定は材齢 7, 28, 91 日で行なった。なお、φ100×200 mm 円柱供試体の標準水中養生および気中養生における、圧縮強度、静弾性係数および割裂引張強度については、前報^{7),8)}で報告しているものである。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度および静弾性係数

図-1 に標準水中養生を行なった φ100×200 mm 円柱供試体の圧縮強度を示す。縦軸は H40 に対する比の値であり、H40 の圧縮強度は材齢 7, 28, 91 日において、それぞれ、59.0, 70.7, 73.0 N/mm²であった。また、図-2 に気中養生を行なった φ100×200 mm 円柱供試体の圧縮強度を示す。縦軸は同じ配合の標準水中養生に対する比の値である。

図-1 より、既報^{7),8)}のとおり、混和材を用いた場合に初期強度が小さくなること、粗骨材を除いたモルタルのほうが圧縮強度が大きくなることなどがわかる。また、図-2 より、高炉スラグ微粉末やフライアッシュを用いた場合には乾燥の影響による圧縮強度発現の停滞が大きくなることも明らかである。

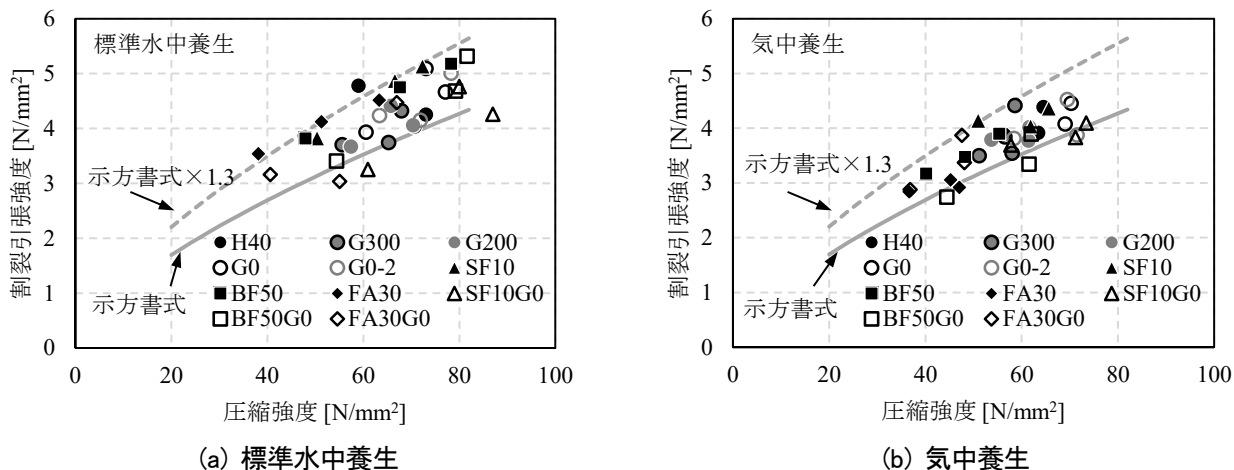


図-5 圧縮強度と割裂引張強度の関係

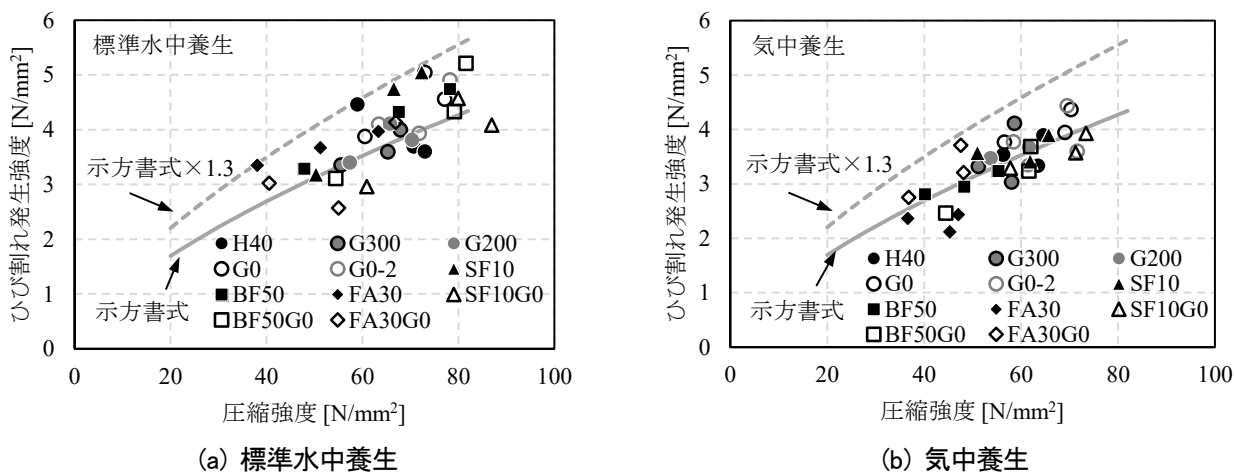


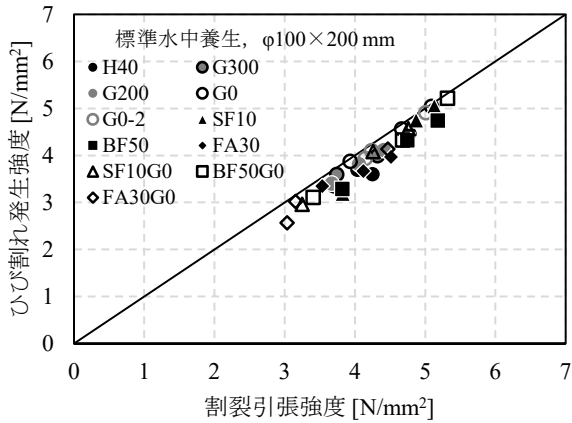
図-6 圧縮強度とひび割れ発生強度の関係

図-2 に示した気中養生供試体の標準水中養生供試体に対する圧縮強度の比のうち、配合 H40, G300 および G0 に関して供試体寸法の影響について整理したものが図-3 である。横軸に $\phi 100 \times 200$ mm 円柱供試体、縦軸に $\phi 150 \times 300$ mm 円柱供試体による値を示している。これによれば、供試体寸法が大きいほうが圧縮強度比が同程度から 0.05 程度大きい。これは、供試体寸法が大きいほうが標準水中養生と気中養生の差異が小さいことを意味する。 $\phi 100 \times 200$ mm の円柱供試体に比べ、 $\phi 150 \times 300$ mm の円柱供試体のほうが体積表面積比(V/S)が大きいため、供試体表面からの乾燥の影響が、比較的小さくなったものと考えられる。

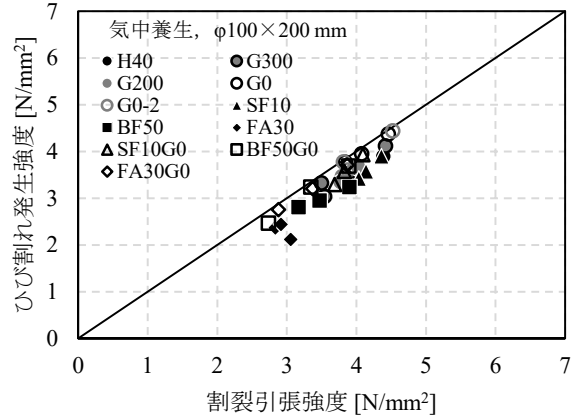
図-4 に単位粗骨材絶対容積を $0.375 \text{ m}^3/\text{m}^3$ とした配合の圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。コンクリート標準示方書 (以下、示方書) に示される設計用値⁹⁾も併せて示している。圧縮強度と静弾性係数の関係については使用する骨材の影響を受け、本実験で用いた骨材を使ったコンクリートの静弾性係数は全体的に示方書に示される設計用値より小さい傾向にある。配合要因としては、前報^{7), 8)}で報告したように単位ペースト絶対容積の影響が大きく混和材や乾燥の影響は小さいが、この図からは、供試体寸法の影響も小さいことがわかる。

3.2 割裂引張強度およびひび割れ発生強度

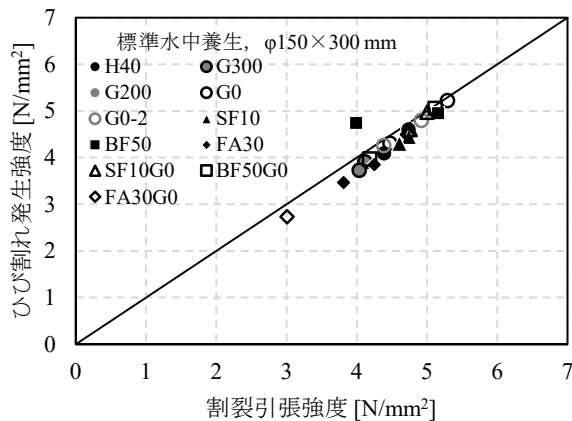
図-5 および図-6 に圧縮強度と割裂引張強度およびひび割れ発生強度の関係を示す。図中には、示方書に示される圧縮強度の特性値と引張強度の特性値の関係式¹⁰⁾から求まる値を示した。本実験で測定された圧縮強度と割裂引張強度の関係については、示方書式と概ね同様な関係を示し、割裂引張強度は示方書式より求ま



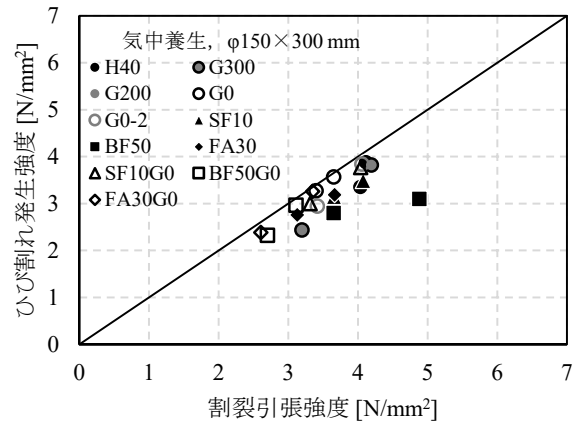
(a) 標準水中養生 (φ100×200mm)



(b) 気中養生 (φ100×200mm)



(c) 標準水中養生 (φ150×300mm)



(d) 気中養生 (φ150×300mm)

図-7 割裂引張強度とひび割れ発生強度の関係

る値から 1.3 倍程度の範囲にあった。ひび割れ発生強度についても、圧縮強度の関係においては傾向は示方書式と同様であるが、全体的に割裂引張強度に対して 1 割程度低い値となる傾向にあることがわかる。これより、割裂引張強度試験において最大荷重に到達する以前に、供試体表面にはひび割れが発生していると考えられる。

図-5 および図-6 から養生方法について比較すると、標準水中養生に比べて気中養生では全体的に値が小さくなっているものの、圧縮強度との関係には大きな影響を与えないことがわかる。

図-7 に割裂引張強度とひび割れ発生強度の関係を養生方法および供試体寸法ごとに示す。養生条件、供試体寸法および配合条件によらず、ひび割れ発生強度

は割裂引張強度に比べて同程度から 1 N/mm^2 程度小さい結果となった。割裂引張強度は割裂引張強度試験における最大荷重から算出されるが、供試体直径が 100 mm や 150 mm の場合には、破壊エネルギーに起因する寸法効果により最大荷重とひび割れ発生荷重が異なる可能性が指摘されている¹¹⁾。本実験におけるひび割れ

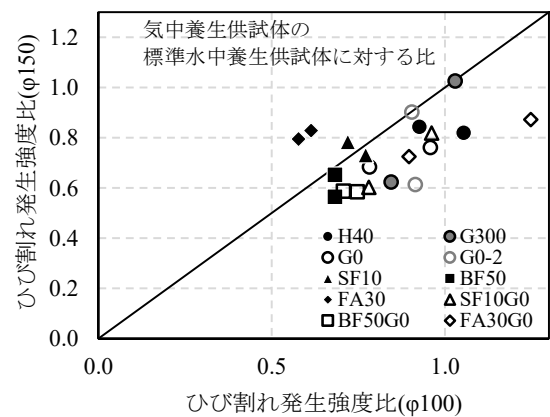


図-8 気中養生供試体のひび割れ発生強度と供試体寸法の関係 (標準水中養生に対する比として表示)

発生強度と割裂引張強度の差異はこの指摘を裏付けるものであると考えられるが、本実験の範囲では、割裂引張強度とひび割れ発生強度の関係に与える養生条件、供試体寸法および混和材や骨材量の配合条件の影響については明確な傾向は確認できなかった。

図-3 と同様、図-8 に気中養生供試体の標準水中養生供試体に対するひび割れ発生強度の比に関する供試体寸法の影響について整理した。この図より、FA30を除いて、供試体寸法が大きいほうがひび割れ発生強度が小さくなることがわかる。ひび割れ発生強度は供試体表面のひび割れ発生から測定しているため、V/Sの影響は小さいと考えられるが、供試体寸法が大きいことで乾燥による不均一性が增大している可能性が考えられる。

4. まとめ

本稿では、水結合材比一定の条件で、混和材の使用の有無および骨材量を変化させた供試体を作製し、圧縮強度、静弾性係数、割裂引張強度およびひび割れ発生強度について検討を行なった。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 供試体寸法が大きいほど体積表面積比が大きく圧縮強度に与える気中養生の影響は小さくなる。
- (2) 圧縮強度と静弾性係数の関係に与える混和材、養生条件および供試体寸法の影響は小さい。
- (3) ひび割れ発生強度は割裂引張強度より小さい値となるが、ひび割れ発生強度と割裂引張強度の関係に与える配合条件、養生条件および供試体寸法の影響は小さい。
- (4) 気中養生時のひび割れ発生強度は、不均一性の増大という点から供試体寸法の影響が大きくなる。

参考文献

- 1) 例えば、日本コンクリート工学会：コンクリートの収縮問題とその対応—委員会報告書，2010. 3
- 2) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），2004. 9
- 3) 国立研究開発法人土木研究所他：低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書(I)～(VI)，共同研究報告書第471号～476号，2016, 1
- 4) 佐々木亘，芦塚憲一郎，出口宗浩，谷口秀明：高強度コンクリートの力学特性に与える鋼繊維の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 35, No. 1, pp. 277-282, 2013. 7
- 5) 斯波明宏，谷口秀明，樋口正典：早強セメントを用いた環境負荷低減型コンクリートに関する実験的研究，第22回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp. 509-514, 2013. 10
- 6) 佐々木亘，谷口秀明，樋口正典，宮川豊章：短繊維補強コンクリートのひび割れ発生強度に与える養生方法の影響，コンクリート構造物の補修・補強・アップグレードシンポジウム論文報告集，第13巻，pp. 33-40, 2013, 11
- 7) 佐々木亘，谷口秀明，樋口正典：PC部材に用いる早強コンクリートのひび割れ抵抗性に与える骨材量の影響，第23回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp. 269-274, 2014, 10
- 8) 佐々木亘，谷口秀明，石澤正大，樋口正典：早強コンクリートのひび割れ抵抗性に与える混和材ならびに骨材量の影響，第24回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp. 527-532, 2015. 10
- 9) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書 [設計編]，p. 39, 2013. 3
- 10) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書 [設計編]，p. 35, 2013. 3
- 11) 田中泰史，Joop. A. den Uijl：確率論的解析手法による割裂引張強度の寸法効果に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 30, No. 3, pp. 49-54, 2008. 7