

早強コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性に与える混和材ならびに骨材量の影響

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

Abstract: This paper is meant as study of the influence of mineral admixture and volume of coarse aggregate on the shrinkage crack resistance of early-strength concrete for PC superstructures and describes the examination results. As a result, followings were obtained; 1) The influence of curing condition is big on compressive and split tensile strength of concrete with mineral admixture except silica fume. 2) The influence of mineral admixture on Young's modulus is small. 3) Under enough curing, the use of mineral admixture raises split tensile strength of concrete (with coarse aggregate). 4) The structure of cement matrix becomes minute with mineral admixture. However, it may not lead to improvement of shrinkage crack resistance.

Key words: Shrinkage Crack Resistance, Mineral Admixture, Coarse Aggregate

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。近年では、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も活発に行なわれている²⁾。したがって、このような多様なコンクリートの配合変化に起因するひび割れ抵抗性の変化を把握することは、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 上部工で用いられる設計基準強度 40 N/mm²程度の早強コンクリートのひび割れ抵抗性に与える混和材および骨材量の影響を検討した。

2. 実験概要

2.1 コンクリートの条件

コンクリートの使用材料を表-1、配合を表-2 に示す。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。基準となる配合である H40 は、設計基準強度 40 N/mm²程度の PC 上部工で用いられるコンクリートを想定し、水セメント比は 40%、セメントには早強ポルトランドセメントを用いた。H40 に対し、水結合材比は一定としてセメントの一部をシリカフューム、高炉スラグ微粉末またはフライアッシュで置換することで混和材の影響を検討した。置換率は、既往の研究^{3),4)}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(記号 G0 を付記)でも試験を実施し、粗骨材の影響を確認した。なお、混和材を用いない H40 および H40G0 のデータは既報⁵⁾で報告したものである。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、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 4.5±1.0%程度となるよう AE 剤により調整した。

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 , プレーン比表面積 6300 cm ² /g, せっこう添加なし	BF6
	フライアッシュ	JIS II 種灰 (密度 2.19 g/cm ³ , プレーン比表面積 3880 cm ² /g)	FA2
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
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	BF6	FA2			
H40	40.0	45.3	43.0	4.5	0.297	0.375	165	413	413				740	990
H40G0	40.0	45.3	100	4.5	0.502	0.000	279	698	698				1185	0
H40SF	40.0	44.5	42.6	4.5	0.302	0.375	165	413	371	41			727	990
H40BF6	40.0	44.5	42.6	4.5	0.302	0.375	165	413	206		206		727	990
H40FA2	40.0	42.6	41.5	4.5	0.314	0.375	165	413	289			124	695	990
H40SFG0	40.0	44.4	100	4.5	0.511	0.000	279	698	628	70			1161	0
H40BF6G0	40.0	44.5	100	4.5	0.510	0.000	279	698	349		349		1163	0
H40FA2G0	40.0	42.6	100	4.5	0.529	0.000	278	695	487			209	1114	0

2.2 測定項目

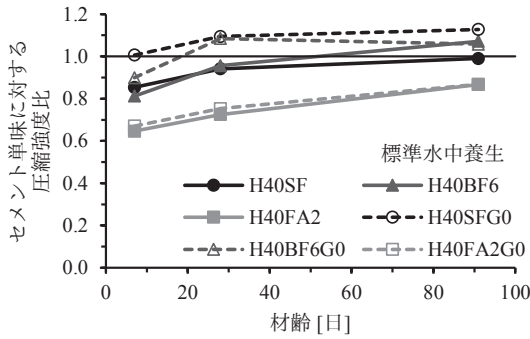
(1) 力学特性の確認

力学特性の確認は、圧縮強度試験(JIS A 1108), 静弾性係数試験(JIS A 1149)および割裂引張強度試験(JIS A 1113)によって行なった。供試体はφ100×200 mm の円柱供試体であり、養生方法は標準水中養生および後述する鉄筋拘束試験と同様の養生(以下、鉄筋拘束同一養生と呼ぶ)とした。鉄筋拘束同一養生は打込み直後から材齢 7 日までは 20℃封緘養生とし、材齢 7 日以降は温度 20℃湿度 60%の恒温恒湿室に存置した。測定は材齢 7 日, 28 日, 91 日を基本とし、一部の条件では材齢 14 日で割裂引張強度の測定を行なった。

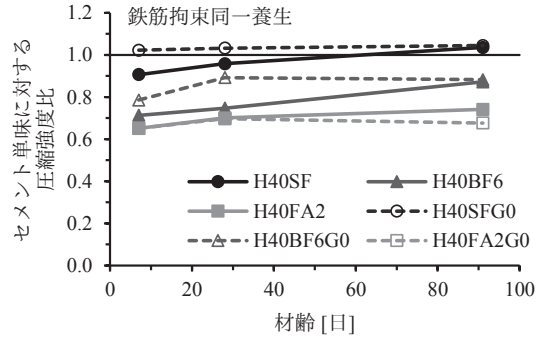
(2) 鉄筋拘束試験による収縮応力

鉄筋拘束試験を実施し、収縮応力の測定を行った。鉄筋拘束試験では JCI 「コンクリートの自己収縮応力測定方法」⁶⁾を参考に、100×100×1500 mm の角柱供試体の断面中央に D32 鉄筋を配置した。鉄筋の長さ方向の中央 300 mm の範囲で節、リブを取り除いたうえでテフロンシートを二重に巻き付け、コンクリートとの付着を生じないようにした。鉄筋中央部のひずみを測定し、コンクリートの収縮により生じる応力を算定した。打込み直後から温度 20℃湿度 60%の恒温恒湿室に存置し、材齢 7 日まではポリエステルフィルムにより封緘状態、材齢 7 日で脱型した後は 6 面乾燥状態とした。供試体数は 2 体とした。

また、100×100×400 mm の角柱供試体を用いて、鉄筋同一養生における自由収縮ひずみの測定を行なった。自由収縮ひずみの測定は、JCI 「高流動コンクリートの自己収縮試験方法」⁷⁾を参考に、供試体中心部に設置した埋込みひずみ計により行なった。鉄筋拘束試験と同様に、打込み直後より温度 20℃湿度 60%の恒



(a) 標準水中養生



(b) 鉄筋拘束同一養生

図-1 圧縮強度のセメント単味に対する比と材齢の関係

湿恒湿室に存置し、材齢7日まではポリエステルフィルムにより封緘状態、材齢7日で脱型した後は6面乾燥状態とした。供試体数は2体とした。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度

図-1 に混和材を用いた配合の圧縮強度と材齢の関係を示す。圧縮強度はセメント単味(H40 または H40G0)との比の値として示している。図-1(a)は標準水中養生の結果であるが、シリカフュームおよび高炉スラグ微粉末では、粗骨材を用いたコンクリートの場合、材齢28日でセメント単味の9割程度、材齢91日ではセメント単味と同等以上の圧縮強度が発現している。一方モルタルでは、シリカフュームでは材齢7日時点、高炉スラグ微粉末では材齢28日時点でセメント単味を上回る圧縮強度となった。既報⁵⁾と同様に単位粗骨材絶対容積が小さくなることで圧縮強度が大きくなる傾向であるが、その程度がセメント単味の場合よりも大きい。これは、粗骨材量を減じた分単位結合材量が多くなっているため、水和熱の影響により混和材を用いた場合の強度発現が促進された可能性が考えられる。これに対してフライアッシュでは、材齢91日でセメント単味の8割程度であるほか、コンクリートとモルタルで圧縮強度比に差異がみられなかった。前者は、同様の傾向が報告されている⁸⁾ほか、本実験ではフライアッシュの置換率をC種相当の高置換率に設定した影響が考えられる。後者についてはフライアッシュによる遷移帯の改善効果⁹⁾により骨材の影響が相対的に小さくなった可能性も考えられるが、骨材径の圧縮強度への影響メカニズムも含め、さらなる検討が必要と考えられる。

図-1(b)に示す鉄筋拘束同一養生の場合は、標準水中養生と比較すると、高炉スラグ微粉末を用いた配合での圧縮強度の低下が顕著である。シリカフュームのみ、セメント単味と同程度の圧縮強度であった。

図-2 は鉄筋拘束同一養生を行なった場合の圧縮強度と材齢の関係を示したものである。圧縮強度は標準水

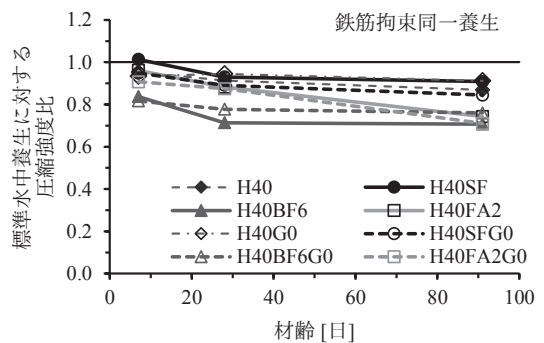


図-2 鉄筋拘束同一養生における圧縮強度の標準水中養生に対する比と材齢の関係

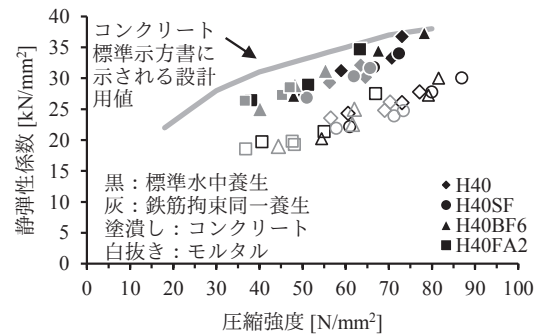
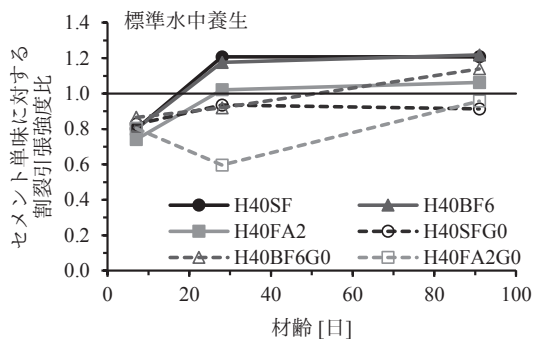
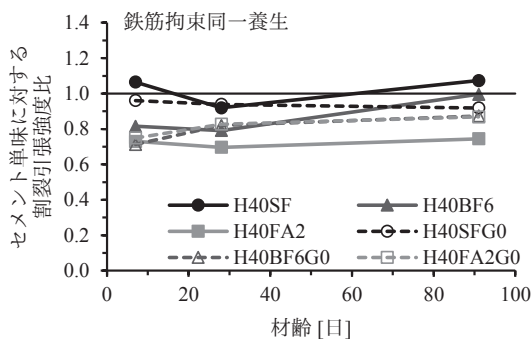


図-3 静弾性係数と圧縮強度の関係



(a) 標準水中養生



(b) 鉄筋拘束同一養生

図-4 割裂引張強度のセメント単味に対する比と材齢との関係

中養生の場合の圧縮強度との比の値として示している。いずれも長期材齢になるほど標準水中養生との差が大きくなるが、高炉スラグ微粉末およびフライアッシュの場合には標準水中養生との差異がより大きい。一方、シリカフュームを用いた場合にはセメント単味と同程度であった。これは、シリカフュームはポズラン反応だけでなく、微粒子の充填によっても圧縮強度に寄与しているためと考えられる。なお、標準水中養生との差異に、粗骨材の有無が与える影響は小さいようである。

3.2 静弾性係数

図-3 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。図中

にはコンクリート標準示方書¹⁰⁾(以下、示方書)に示される設計用値も併せて示している。静弾性係数は骨材の種類や量により変化^{5), 11)}し、本実験で用いた骨材および配合では、粗骨材を用いたコンクリートであっても示方書の設計用値に比べて若干小さい。しかし、混和材の使用や養生条件の違いが、静弾性係数と圧縮強度の関係に与える影響はほとんど見られない。

3.3 割裂引張強度

図-4 に混和材を用いた配合の割裂引張強度と材齢の関係を示す。割裂引張強度はセメント単味(H40 または H40G0)との比の値として示している。図-4(a)は標準水中養生の結果であるが、図-1 に示した圧縮強度の場合と異なり、混和材を用いることで、セメント単味に比べ割裂引張強度が大きくなる傾向がみられる。また、セメント単味の場合には、割裂引張強度に与える単位粗骨材絶対容積の影響は明確ではなかった⁵⁾が、混和材の使用による割裂引張強度の改善効果は粗骨材を用いたコンクリート配合のほうが高い傾向にあった。粗骨材とペーストの界面に存在する遷移帯の性状が、混和材の充填やポズラン反応によって改善されることで割裂引張強度が大きくなった可能性が考えられる。

図-4(b)に示す鉄筋拘束同一養生の場合は、前述の標準水中養生と比べると、図-1(b)に示した圧縮強度の場合と近い傾向となっていることが確認できる。すなわち、十分な水の供給がなされなかった場合には、セメント単味の場合と同様に、圧縮強度の増進に付随した割裂引張強度の増進はみられるが、ポズラン反応などの混和材の使用による改善効果は発揮できないものと考えられる。

図-5 は鉄筋拘束同一養生を行った場合の割裂引張強度と材齢の関係を示したものである。割裂引張強度は標準水中養生の場合の割裂引張強度との比の値として示している。粗骨材を用いないモルタルでは傾向が不

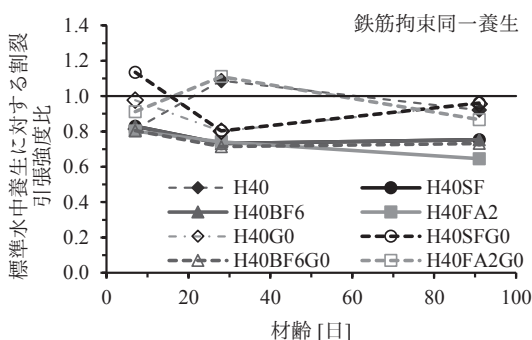


図-5 鉄筋拘束同一養生における割裂引張強度の標準水中養生に対する比と材齢の関係

明瞭であるものの、いずれの混和材もセメント単味の場合に比べ、鉄筋拘束同一養生では標準水中養生に比べて割裂引張強度が低下する傾向がみられる。圧縮強度の場合には低下の程度が小さかったシリカフュームにおいても、割裂引張強度では高炉スラグ微粉末およびフライアッシュと同等である。鉄筋拘束同一養生、すなわち乾燥が割裂引張強度に与える影響が大きいことがわかる。

3.4 収縮ひずみ

図-6 に単位ペースト絶対容積と鉄筋拘束同一養生での自由収縮ひずみの関係を示す。セメント単味のデータに関しては、既報⁵⁾における表-2 に示した2配合以外のデータも併せて示した。なお、これ以降の図も同様である。

図-6 より、フライアッシュの材齢7日を除いて、セメント単味の場合と同様に単位ペースト絶対容積が大きくなると収縮ひずみも大きくなった。フライアッシュの材齢7日では、単位ペースト絶対容積の影響がみられない結果であるが、長期材齢では単位ペースト絶対容積の影響が明らかであること、図-1 などでもわかるように他の配合に比べて強度発現が遅いことなどから、初期材齢では差異が生じるほどの収縮ひずみを生じていないものと考えられる。この図より、収縮ひずみと単位ペースト絶対容積の関係や、収縮ひずみそのものに対して、混和材の使用によって有意な差は生じていないといえる。

3.5 鉄筋拘束試験による収縮応力

鉄筋拘束試験では、材齢7日で脱型し乾燥環境下に置いた後、すべての供試体でひび割れが発生した。図-7 に鉄筋拘束供試体にひび割れが発生した材齢と単位粗骨材絶対容積との関係を示す。単位粗骨材絶対容積が $0 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 、すなわちモルタルでは、ひび割れ発生材齢は混和材の種類に抛らずほぼ同時期であるが、粗骨材を用いると使用する混和材によってひび割れ発生材齢が大きく異なる。割裂引張強度の小さいフライアッシュが最もひび割れ発生材齢が大きく、割裂引張強度がセメント単味の場合と同程度であったシリカフュームでは、セメント単味に比べ半分程度のひび割れ発生材齢であった。これは、割裂引張強度の発現速度と収縮応力の発生速度のバランスでひび割れ発生材齢が決まると考えられるが、混和材の使用は粗骨材がモルタルの収縮を拘束する効果に大きな影響を与えることを示唆する結果であると考えられる。

図-8 にひび割れ発生応力または応力強度比と単位ペースト絶対容積との関係を示す。ここで、ひび割れ発生応力とは供試体にひび割れが発生する直前にコンクリートに生じていた引張応力であり、その時の鉄筋ひずみから算出した。また、応力強度比とはひび割れ発生応力と割裂引張強度の比であり、割裂引張強度はひ

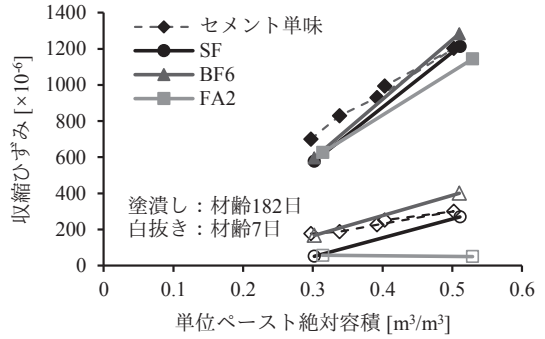


図-6 単位ペースト絶対容積と収縮ひずみの関係

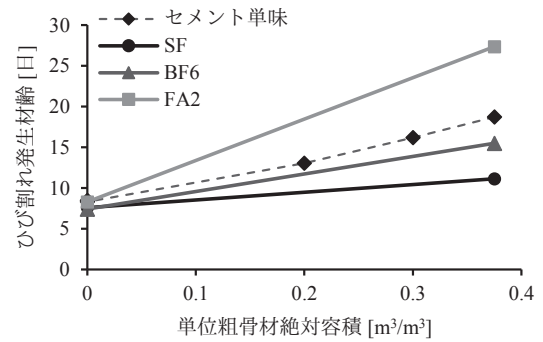


図-7 単位粗骨材絶対容積とひび割れ発生材齢の関係

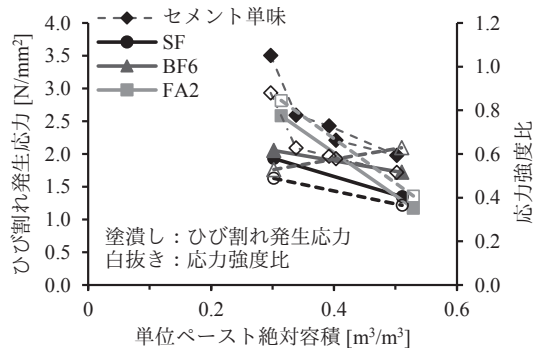


図-8 単位ペースト絶対容積とひび割れ発生材齢の関係

び割れ発生材齢に近い材齢で測定した鉄筋拘束同一養生での割裂引張強度である。材齢 7, 14, 28 日のうち最も近い材齢のものを使用した。この図より、ひび割れ発生応力または応力強度比と単位ペースト絶対容積の関係においても、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末、シリカフュームの順でひび割れ発生応力や応力強度比が低下する傾向にあり、圧縮強度や割裂引張強度とは逆の傾向である。供試体で測定したマクロな収縮ひずみは同程度であっても、マトリクスが緻密になることで断面内では不均一な収縮応力が発生¹²⁾し、局所的に高い引張応力が生じることで、ひび割れ発生応力が低下した可能性が考えられる。

4. まとめ

水結合材比 40%一定の条件で混和材を用いたコンクリートおよびモルタルを作製し、力学特性、収縮ひずみおよび鉄筋拘束による収縮応力について検討を行なった結果、以下の知見を得た。

- (1) シリカフュームを用いた場合の圧縮強度を除いて、混和材を用いた場合の圧縮強度および割裂引張強度に与える養生の影響は大きい。
- (2) 静弾性係数に与える混和材の影響は小さい。
- (3) 十分な養生を行えば、混和材を使用することで、特に、粗骨材を用いた場合の割裂引張強度が大きくなる。
- (4) 混和材を用いることでマトリクスが緻密になっても、収縮ひび割れ抵抗性の向上には繋がらない可能性がある。

本実験は限られた条件での試験であり、混和材を用いたコンクリートの実際のひび割れ抵抗性には、温度や混和材の使用による配合変化など、他の様々な要因の影響を受ける。そのため、様々な条件の影響を複合的に評価できるよう、さらなる検討が必要であると考えられる。

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) 例えば、中村英佑，鈴木聡，鈴木雅博，渡辺博志：混和材を用いたコンクリートの収縮とクリープ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. 503-508, 2013. 10
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの自己収縮研究委員会報告書，2002. 9
- 7) 日本コンクリート工学協会：超流動コンクリートの研究委員会(II)，pp. 209-210, 1994. 5
- 8) 中村英佑，石井豪，鈴木雅博，渡辺博志：混和材を用いたコンクリートの強度と耐久性に関する実験的研究，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. 53-58, 2014. 10
- 9) 橋本徹，白根勇二，高橋晴香，鳥居和之：分級フライアッシュと石灰石骨材によるコンクリートの強度改善メカニズムに関する一考察，材料，Vol. 63, No. 10, pp. 694-701, 2014. 10
- 10) 土木学会：2012 制定コンクリート標準示方書 [設計編]，2013. 3
- 11) 谷口秀明，樋口正典，藤田学，岡誠一：早強コンクリートの力学的特性と体積変化の実態把握，第 15 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. 239-244, 2009. 10
- 12) 宮沢伸吾，田澤栄一：セメント系材料の曲げ強度に及ぼす不均一な乾燥収縮応力の影響，土木学会論文集，第 426 号/V-14, pp. 121-129, 1991. 2