

収縮低減剤を用いたコンクリートの耐久性

Durability of Concrete Mixed with Shrinkage Reducing Agent

谷口 秀明 HIDEAKI TANIGUCHI
東北支店 杉村 悟 SATORU SUGIMURA
土木設計部 西村 一博 KAZUHIRO NISHIMURA
樋口 正典 MASANORI HIGUCHI

この報告では、新しく開発された収縮低減剤がコンクリートの耐久性に及ぼす影響を確認した。試験の結果、この収縮低減剤を使用すれば、一般の収縮低減剤よりも少ない使用量で、コンクリートの乾燥収縮ひずみが乾燥期間4週で約30%、26週で約20%低減できる。また、この収縮低減剤は、コンクリートの圧縮強度を5%程度低下させるが、凍結融解、中性化および塩分浸透に対する抵抗性には影響を及ぼさない。

キーワード：収縮低減剤、圧縮強度、乾燥収縮、凍結融解作用、中性化、塩分浸透性

This report describes the durability of the concrete mixed with a new shrinkage reducing agent. As a result of the experiments, the shrinkage reducing agent can decrease the drying shrinkage of hardened concrete by about 20% to 30% with less quantity than a general shrinkage reducing agent. The shrinkage reducing agent does not decrease resistance to freezing and thawing action, carbonation and chloride penetration of hardened concrete though decreases compressive strength by about 5%.

Key Words: Shrinkage Reducing Agent, Compressive Strength, Drying Shrinkage, Freezing and Thawing Action, Carbonation, Chloride Penetration

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が問題となり、この問題の収束に向けた学協会の活動が活発になってい

る¹⁾。収縮対策の一つとして、膨張材や収縮低減剤等の収縮低減材料を単独で、あるいは複数組み合わせる方法があり、これまでにさまざまなコンクリート構造物に適用されつつある²⁾。また、最近では、あらかじめ収縮低減成分を含む AE 減水剤もしくは高性能 AE 減水剤も開発されている。しかし、収縮低減剤あるいはこの成分を含む混和剤およびこれを用いたコンクリートの品質については、必ずしも明確になっていないのが現状である。前報³⁾においては、筆者らは、市販の一般的な収縮低減効果を持つ各種混和剤（収縮低減剤、収縮低減剤の成分を含む AE 減水剤もしくは高性能 AE 減水剤、これ以降、収縮低減材料と呼ぶ）を集め、それらを用いたコ

ンクリートの圧縮強度、収縮および凍結融解抵抗性に及ぼす影響を把握した。

本報では、任意のプレストレストコンクリート（以下、PC）橋梁工事の収縮低減によるひび割れ抑制を目的に、この工事で使用されるコンクリートに収縮低減剤を添加し、コンクリートの圧縮強度、ヤング係数、乾燥収縮のほか、凍結融解、中性化および塩分浸透に対する抵抗性を確認した。使用した収縮低減剤は、前報³⁾において比較的良好な結果が得られたものである。また、当該コンクリートは、収縮低減剤以外に膨張材を併用しており、筆者らの一部が開発してきた、「低収縮コンクリート²⁾」に位置づけられる。

2. 試験方法

(1) コンクリートの条件

コンクリートの使用材料および配合を、それぞれ、表-1、表-2 に示す。本研究は、前述のとおり、任意のPC 橋梁工事における収縮低減によるひび割れ抑制を目的としたものである。このため、使用するコンクリート

表-1 使用材料

材料名	種類, 物性, 成分	記号
水	水道水	W
セメント	早強ポルトランドセメント (密度 3.13g/cm ³)	C
混和材	膨張材 (密度3.16g/cm ³ , 標準使用量 20kg/m ³)	E
細骨材	旧天竜川下流域陸砂(表乾密度2.62g/cm ³ , 吸水率1.44%)	S
粗骨材	旧天竜川下流域陸砂利(最大寸法 25mm, 密度2.64g/cm ³ , 吸水率0.81%)	G
混和剤	AE減水剤 (ポリカルボン酸系化合物)	WAE
	収縮低減剤(炭化水素系化合物とグリコールエーテル系誘導体)	RS
	AE剤	AE

表-2 コンクリートの配合

配合	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				WAE (C ×%)	AE (C ×%)	RS (kg/m ³)	
			W	B		S				G
				C	E					
A	44.2	39.5	152	324	20	718	1106	0.5	0.004	-
B										4.0

は、同工事で使用予定の設計基準強度 36N/mm² の早強ポルトランドセメントを使用したコンクリートを評価対象とした。使用した収縮低減剤は、近年、新しく開発された、炭化水素系化合物とグリコールエーテル系誘導体を成分とするものである^{4), 5)}。膨張材は、施工計画段階より使用する予定にしており、収縮低減剤を使用する配合 B に対しても使用することとした。すなわち、配合 B は、膨張材と収縮低減剤を組み合わせた「低収縮コンクリート²⁾」である。

表-2 に示すとおり、収縮低減剤以外は、配合を同一にして、収縮低減剤の効果を確認することとした。収縮低減剤を用いない配合 A のコンクリートは、実際の工事に使用しているものである。水セメント比等の配合条件は、工事に先立って実施した試し練りにより定めている。このため、収縮低減剤以外の使用材料はすべて、工事現場近くのレディーミクストコンクリート工場に常備されたものである。

コンクリートの製造には、公称容量 100 リットルの強制二軸ミキサを使用し、1 回の練混ぜ量を 70 リットルとした。セメントおよび粗骨材を用いて 10 秒間の空練りを行い、その後、水および混和剤を添加して 150 秒間の練混ぜを行った。収縮低減剤を添加するものに関しては、実際の製造では、収縮低減剤はトラックアジター

タのドラム内に後添加するため、室内試験においても練り上がったコンクリートが入ったミキサ内に後添加し、その後 60 秒間の練混ぜを行った。

(2) コンクリートの品質に関する試験

フレッシュコンクリートのスランプおよび空気量は、現場における運搬ロスを考慮し、それぞれ、11.0 ± 1.0cm, 5.0 ± 0.5% の範囲であることを試験により確かめた。今回の試験では、硬化コンクリートの品質、特に耐久性を主な評価対象とした。コンクリートの品質と評価試験方法を、以下に示す。

①力学的性質： JIS A 1108 および JIS A 1149 に準拠し、圧縮強度およびヤング係数の測定を行った。試験には標準水中養生を行った円柱供試体 (φ 100 × 200mm) を用い、試験材齢を 7 日および 28 日とした。

②乾燥収縮ひずみ： JIS A 1129-1 に準拠し、長さ変化試験 (コンパレータ法) を実施した。使用した供試体 (100 × 100 × 400mm) は、7 日間の水中養生を行った後、恒温恒湿室 (20℃, 60%R.H.) で乾燥させた。乾燥開始から乾燥期間 26 週 (6 ヶ月) までの長さ変化率 (乾燥収縮ひずみ) と質量減少率を測定した。

③凍結融解に対する抵抗性： JIS A 1148 に準拠し、凍結融解試験を実施した。試験開始までの供試体 (100 × 100 × 400mm) の養生は標準水中養生で、材齢は 28 日である。

④中性化に対する抵抗性： JIS A 1153 に準拠し、促進中性化試験を実施した。供試体 (100 × 100 × 400mm) は、試験開始までに 4 週間の標準水中養生を行い、さらに 4 週間の気中養生 (20℃60%R.H.) を行った。中性化の促進条件は、温度 20℃, 湿度 60%R.H., CO₂ 濃度 5% である。中性化深さの測定は、中性化試験装置に供試体を入れた後、1, 4, 8, 13 および 26 週である。

⑤塩分浸透に対する抵抗性： 塩分浸透に対する抵抗性は、電気泳動と浸せきの 2 種類の試験方法で確認した。前者は電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験、後者は浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験であり、それぞれの方法は、JSCE-G571, JSCE-G572 に準じた。電気泳動の試験を開始するまでの材齢は 28 日、養生は標準水中養生である。また、浸せき開始までの材齢および養生も同様であり、浸せきの期間は 6 ヶ月である。いずれも円柱供試体 (φ 100 × 200mm) を用いた。

表-3 硬化コンクリートの品質に関する試験の結果

配合	圧縮強度試験		静弾性係数試験		長さ変化試験				凍結融解試験	促進中性化試験	塩分浸せき試験	電気泳動試験
	圧縮強度 (N/mm ²)		ヤング係数 (kN/mm ²)		乾燥収縮ひずみ (×10 ⁻⁶)		質量減少率 (%)		耐久性指数 (%)	中性化深さ (mm)	塩化物イオンの見かけの拡散係数 (cm ² /年)	塩化物イオンの実効拡散係数 (cm ² /年)
	7日	28日	7日	28日	4週	26週	4週	26週	300サイクル	26週	26週	4週
A	42.2	50.5	30.4	32.9	379	535	1.28	1.77	62.4	0	0.55	0.628
B	39.5	47.4	29.8	32.7	261	431	1.17	1.70	61.1	0	0.51	0.583
比(B/A)	0.94	0.94	0.98	0.99	0.69	0.81	0.91	0.96	0.98	-	0.93	0.93

3. 硬化コンクリートの品質評価試験の結果および考察

硬化コンクリートの品質評価試験の結果を、表-3 に示す。それぞれの試験結果に対して考察を行うと、以下のようなになる。

(1) 力学的性質

圧縮強度は、表-3 に示すとおり、収縮低減剤の使用により、材齢 7 日、28 日のいずれにおいても 6%低下している。前報³⁾においては、収縮低減剤 (8kg/m³) を練混ぜ水に混合してコンクリート (水セメント比 55%、普通ポルトランドセメントを使用) を製造した結果、本研究で対象とする収縮低減剤を用いたコンクリートの圧縮強度は、これを含まないコンクリートに比べて約 5%高くなった。

他の収縮低減材料には、圧縮強度を 10~20%低下させるものが存在するため、今回の試験で使用した収縮低減剤の低下率は小さい。しかし、今回の試験結果より、得られる圧縮強度は、コンクリートの配合もしくは製造方法の相違により±5%程度異なる可能性があるため、事前に試し練りで確認し、必要に応じて水セメント比を微調整することが望ましい。

圧縮強度とヤング係数の関係を、図-1 に示す。本工事で使用したコンクリートのヤング係数は、コンクリート標準示方書や道路橋示方書の構造計算に用いる標準値とほぼ一致する。両者の関係においては、使用した収縮低減剤の影響も全く認められないことがわかる。

(2) 乾燥収縮

乾燥期間と乾燥収縮ひずみの関係を、図-2 に示す。図中には、コンクリート標準示方書⁶⁾の予測式で計算

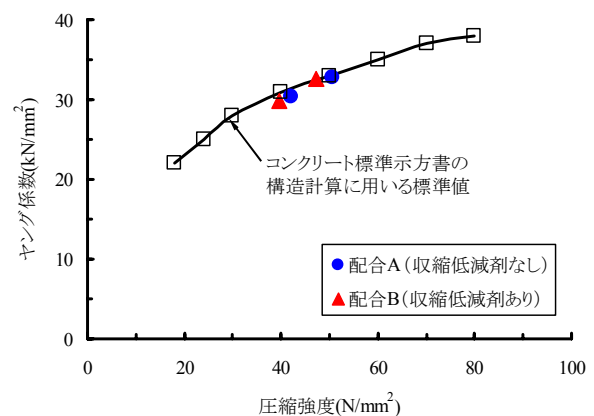


図-1 圧縮強度とヤング係数の関係

した結果を示した。また、同示方書の予測式を k 倍した式に乾燥収縮ひずみの試験値を当てはめて最小二乗法で k 値を求めた結果も示した。

収縮低減剤を使用しないコンクリート (配合 A) の乾燥収縮ひずみは、コンクリート標準示方書の予測式で計算した値とほぼ同等であり、k 倍した予測式では k=0.93 になった。一方、収縮低減剤を用いたコンクリート (配合 B) の乾燥収縮ひずみは、コンクリート標準示方書の予測式に対して k=0.67 倍した曲線にほぼ相当する。また、表-1 に示すとおり、乾燥期間 4 週と 26 週における乾燥収縮ひずみの比を求めると、それぞれ、0.69、0.81 となり、乾燥開始直後ほどその効果は高いと評価される。ただし、配合 A の乾燥期間 26 週の結果は、それまでの乾燥期間におけるひずみ変化から類推してやや小さいように思われる。前述のようにコンクリート標準示方書の予測式を利用して評価すると、k 値の配合 A に対する配合 B の比は、0.67/0.93=0.72 となり、全乾燥期間を通して 28%の収縮低減効果を期待できる材料であると見なせる。

乾燥期間と乾燥収縮ひずみの比率の関係を示したものが、図-3 である。ここで、乾燥収縮ひずみの比率とは、各乾燥期間の乾燥収縮ひずみに関して、配合 A の値に対する配合 B の値の比率である。図中のコンパレータ法の結果は、図-2 に示す試験結果である。また、コンタクトゲージ法とダイヤルゲージ法の結果は、現地のレディーミクストコンクリート工場における試し練りにおいて採取した供試体を用いて、それぞれの方法で乾燥収縮ひずみを測定し、乾燥収縮ひずみの比率を求めたものである。前報³⁾でも述べたとおり、乾燥収縮ひずみは、同じ配合、供試体であっても測定方法によって若干異なり、これに伴い、収縮低減材料の効果の評価も異なる。図-3 において、コンパレータ法とコンタクトゲージ法およびダイヤルゲージ法では、供試体の採取場所や試験場所が異なるので、一概に比較することはできないが、コンタクトゲージ法とダイヤルゲージ法の結果を考慮すれば、今回使用した収縮低減剤の収縮低減効果は、前述のコンパレータ法で得られた結果よりももう少し期待できるようなのである。特に、前報³⁾の試験に比べて収縮低減剤の使用量を 8kg/m^3 から 4kg/m^3 に減じているが、十分に収縮低減効果は 8kg/m^3 の場合と遜色のない結果である。

(3) 凍結融解に対する抵抗性

凍結融解試験の結果を、図-4 に示す。耐久性指数は、表-3 に示している。試験終了の 300 サイクルまでの相対動弾性係数の変化および耐久性指数には、収縮低減剤の有無による相違は全く認められない。

収縮低減剤は、実用化されてすでに 20 年以上が経過しているが、前報³⁾のとおり、収縮低減材料の使用により相対動弾性係数が低下する傾向があり、収縮低減材料の中には試験開始直後から急激に低下するものも存在する。

筆者らの一部は、レディーミクストコンクリート工場で使用される骨材の中には、これを使用すると、コンクリートの収縮が大きくなるとともに、凍結融解に対する抵抗性も低下する可能性があることを確かめている^{7,8)}。このような場合には、収縮のみに着目し、既存の収縮低減剤を使用すると、凍結融解に対する抵抗性を一層下げることになる。今回使用した収縮低減剤は、収縮低減効果を発揮しつつ、凍結融解に対する抵抗性を低下させないことが最大の利点であり、寒冷地において、そのような骨材を使用せざるを得ない状況下においても十分適用できる材料の一つと言える。

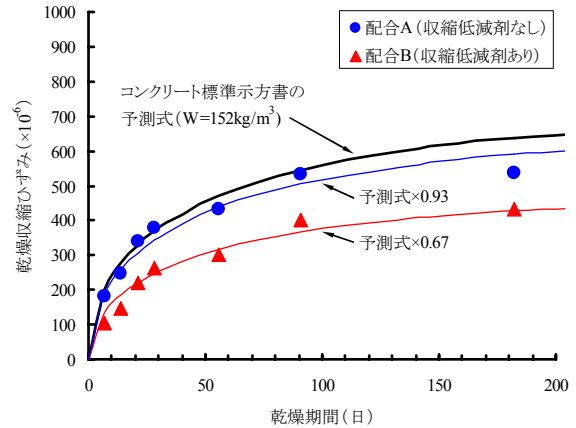


図-2 乾燥期間と乾燥収縮ひずみの関係

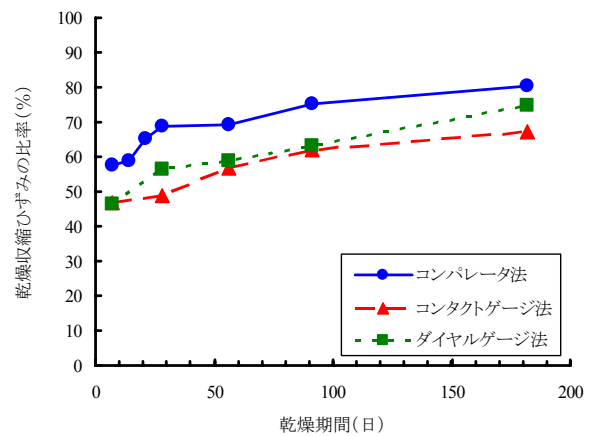


図-3 乾燥期間と乾燥収縮ひずみの比率の関係

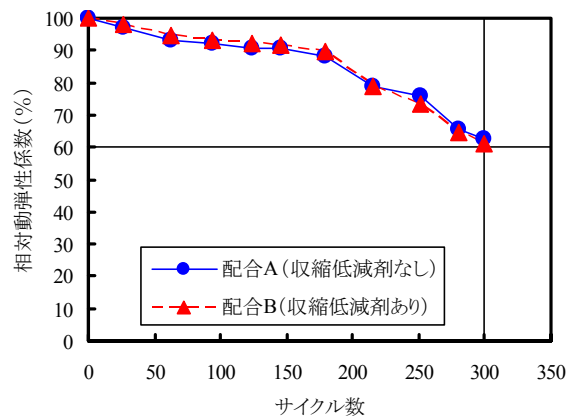


図-4 凍結融解試験の結果

(4) 中性化に対する抵抗性

コンクリート標準示方書⁶⁾では、水セメント比が 50% 以下の領域では、対象とした構造物のかぶりであれば、通常のコンクリートの場合には中性化の照査を必要としない。このため、今回の試験で使用した水結合材比 44.2% のコンクリートを対象とする PC 橋梁に適用する



写真-1 トラックアジテータのドラム内への収縮低減剤の投入状況

にあたっては、本来、中性化に関する照査は省略できる。しかし、同示方書の照査は、収縮低減剤を使用したコンクリートの試験結果に基づくものではない。

前報³⁾の段階においては、中性化試験を実施していなかったため、既往の文献を調査し、中性化に対する抵抗性を低下させる結果が報告されていないことを確認した。しかし、前述のように、収縮低減剤の種類によっては20%程度の強度低下を示すようなものが存在するのも事実であり、使用する収縮低減剤は、コンクリートの中性化に対して悪影響を及ぼさないことを実証しておく必要がある。

今回使用した収縮低減剤に関しては、促進期間26週までの中性化深さは、表-3に示すとおり、いずれの配合も0mmであり、収縮低減剤の有無の影響は認められない。

(5) 塩分浸透に対する抵抗性

一般に、混和剤メーカーの技術資料や既往の研究報告では、収縮低減剤を用いたコンクリートの塩分浸透性に着目し、塩化物イオンの拡散係数を求めたものは見当たらない。筆者らは、前報³⁾において水セメント比40%のコンクリートを対象とし、膨張材と一般的な収縮低減剤（低級アルコールのアルキレンオキシド付加物）を組み合わせた場合の塩化物イオンの見掛けの拡散係数を示した。その結果では、膨張材あるいは膨張材と収縮低減剤の併用が、塩化物イオンのみかけの拡散係数に及ぼす影響は認められなかった。

今回の新しい収縮低減剤を使用するにあたっては、表-3に示すとおり、電気泳動による塩化物イオンの実効拡散係数と、塩水浸せきによる塩化物イオンの見掛けの拡散係数の双方を試験により確認した。配合Bの試

表-4 トラックアジテータのドラム内への収縮低減剤の投入によるコンクリートの品質変化

	スランプ(cm)	空気量(%)	材齢7日の 圧縮強度 (N/mm ²)
A) 投入前	9.0	4.5	37.1
B) 投入直後	10.5	4.6	36.9
B-A	1.5	0.1	-0.2
C) 1/4排出時	12.0	3.9	37.3
D) 3/4排出時	10.0	3.8	37.4
D-C	-2.0	-0.1	0.1

験値はいずれの方法においても配合Aに比べて若干小さいことがわかる。前述のとおり、圧縮強度は、収縮低減剤の使用により6%低下しているが、塩分浸透に対する抵抗性には全く影響を及ぼしていない。

また、中性化あるいは塩分浸透によるコンクリート内部鋼材の腐食には、コンクリート自体の緻密性以外に、ひび割れの有無あるいは幅と密接に関係する。今回検討した新しい収縮低減剤は、その双方に対して期待できるものと言える。

4. 実機試験

新しく開発された収縮低減剤を用いたコンクリートの品質は、前述のとおり、室内試験では良好な試験結果が得られたため、レディーミクストコンクリート工場の製造設備とトラックアジテータを使用して、実機試験を実施した。

コンクリートの配合は、表-2に示す配合Bである。収縮低減剤を入れる前のコンクリートは、公称容量3.0m³の強制2軸ミキサを使用して製造し、トラックアジテータを使用して現場まで運搬した。その後、写真-1に示すように収縮低減剤を投入して攪拌した。収縮低減剤はドラムを低速で回転させながら投入口から1分程度かけて投入し、投入完了後から低速で15秒間、高速で45秒間の攪拌を行った。

コンクリートの品質は、スランプ、空気量および材齢7日の圧縮強度（標準水中養生を行ったもの）で評価した。試料は、トラックアジテータが現場に到着した時点、収縮低減剤の投入直後、コンクリートを1/4排出した時点および3/4排出した時点に採取した。

スランプ、空気量および材齢7日の圧縮強度の試験結

果を、表-4 に示す。表-4 に示すとおり、収縮低減剤を後添加することにより、投入前よりもスランプが 1.5cm 増加した。しかし、空気量はほとんど変化がなく、圧縮強度についても、室内試験では 6%の低下が認められたが、実機ではほとんど差異が認められない。

JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」では、積荷のおよそ 1/4 と 3/4 のところから試料を採取し、スランプ試験を行い、両者のスランプの差が 3cm 以内となるような攪拌能力を持つ運搬設備を使用するように規定している。今回の試験結果では、スランプの差は 2cm であり、この規定を満足する。現場までの運搬、並びに収縮低減剤の投入作業、後添加後の排出等一連の作業により練上りからかなり時間が経過しているため、スランプの変化には経時変化の分を含むものである。しかし、投入直後から 3/4 排出時点までのスランプの変化はかなり小さいことがわかる。空気量は時間の経過に伴って若干低下しているが、1/4 と 3/4 の試料ではほとんど差が認められない。圧縮強度に関しても、投入直後からの空気量の若干の低下に伴って微増しているが、投入前から 3/4 排出時点までの変化は極めて小さい。

以上のように、新しく開発された収縮低減剤は、レディーミクストコンクリート工場の製造設備とトラックアジテータを使用しても、室内試し練りと同等のコンクリートの品質を確保できることが確認された。

5. まとめ

新しく開発された収縮低減剤を使用したコンクリートの力学的性質、乾燥収縮ひずみ、凍結融解、中性化および塩分浸透に関する試験を実施した結果、以下のことが明らかになった。

- ① 圧縮強度は、収縮低減剤の使用により 5%程度低下する可能性がある。ただし、収縮低減剤の使用は、圧縮強度とヤング係数の関係に及ぼさない。
- ② 乾燥収縮ひずみは、収縮低減剤の使用により、乾燥期間 4 週では約 30%、26 週では約 20%の低減を期待できる。また、乾燥期間 1 週から 26 週までの乾燥収縮ひずみに対して、コンクリート標準示方書の予測式を補正した式 (k 倍式) を当てはめた場合には、その低減率は 28%となった。すなわち、この収縮低減剤は、一般の収縮低減剤よりも少ない使用量で十分な収縮低減効果を発揮できる。
- ③ 収縮低減剤を使用しても、コンクリートの凍結融解、中性化および塩分浸透に対する抵抗性はいずれも低下しない。すなわち、収縮低減剤を使用しないコンクリートと同等と見なして、耐久性設

計を行うことができる。

- ④ トラックアジテータに後添加しても、新しく開発された収縮低減剤は、室内試し練りと同等のコンクリートの品質を確保できる。

謝辞：本研究にご協力をいただいた、(株)フローリックの坂本健氏および西祐宜氏に深く感謝致します。

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，2010.3
- 2) 谷口秀明，浅井洋，樋口正典，三上浩，藤田学：低収縮コンクリートの開発と実構造物への適用，三井住友建設技術研究所報告，第 6 号，pp.65-72，2008.11
- 3) 谷口秀明，佐々木亘，樋口正典：収縮低減効果を有する混和剤を用いたコンクリートの品質，三井住友建設技術開発センター報告，第 9 号，pp.43-50，2011.10
- 4) 西祐宜，中江理，橋爪進，名和豊春：水溶性収縮低減剤が乾燥収縮および凍結融解に与える影響，日本コンクリート工学会年次論文集，Vol.31，No.1，pp.1099-1104，2009.7
- 5) 福島浩樹，石森正俊，胡桃澤清文，名和豊春：乾湿繰り返しによるセメント硬化体の収縮・膨張挙動，セメント・コンクリート論文集，No.64，pp.74-81，2010
- 6) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書【設計編】，2008.3
- 7) 谷口秀明，佐々木亘，斯波明宏，樋口正典：コンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす要因に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.365-370，2010.7
- 8) 谷口秀明，佐々木亘，樋口正典，村田宣幸：東北地方の骨材を用いたコンクリートの品質評価，第 20 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.461-464，2011.10