

中庸熱ポルトランドセメントと膨張材を併用したコンクリートの収縮ひずみ制御に関する検討

Experimental Study on the Control of Shrinkage Strain of Concrete using Moderate-heat Portland Cement and Expansive Additive

椎名 貴快*

Takayoshi Shiina

要 約

近年、土木コンクリート構造物の品質や長期耐久性に対する要求が高まる中で、収縮ひび割れの抑制を目的に、石灰石骨材や膨張材、収縮低減効果のある混和材料などを用いたコンクリートの適用事例が増えている。本検討では、中庸熱ポルトランドセメントと膨張材を併用したコンクリートに着目し、収縮ひずみの抑制を目的とした室内試験を実施した。試験の結果、膨張材をセメント内割りで 25 kg/m^3 混合し、石灰石骨材や高性能 AE 減水剤（収縮低減タイプ）と組み合わせて用いた場合、強度低下することなく硬化初期に 500×10^6 程度（ 20°C 環境）の大きな膨張量で圧縮応力を導入でき、乾燥開始後は収縮量も小さく長期に渡って圧縮応力が残存することで、収縮ひび割れの発生を極限まで抑えられることがわかった。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 収縮ひび割れのメカニズムと制御対策
- § 3. 室内試験
- § 4. 施工適用例
- § 5. まとめ

§ 1. はじめに

平成 26 年 6 月に改正された「公共工事の品質確保の促進に関する法律」では、発注者側の責務として、「必要に応じて完成後の一定期間を経過した後において施工状況の確認及び評価を実施するよう努めること」と定められた。これはつまり、請負者側における施工品質の保証範囲が、従来は施工時における段階確認や完成検査までであったものが、竣工引渡しから一定期間経過後の変状までも含むことを暗示している。このような保証を付すことで、請負者に対して、従来と同じ材料でより丁寧な施工や品質管理を促し、一定期間後における変状や損傷要因を排除し、構造物の長寿命化を図る狙いがあるとされる¹⁾。すでに一部の直轄工事では「長期保証制度」と称して試行導入されており、今後、同制度を取り入れた契約物件が増えることも考えられる。

「長期保証制度」は、一般的な瑕疵とは異なり、あらかじめ仕様書等で定める性能指標に対して、長期の保証を求めるものである。例えば、橋梁上部工やトンネル覆工などの土木コンクリート構造物では、完成後の一定期間内に確認された（主として乾燥収縮に伴う）ひび割れに対して、規定幅を超過した場合、請負者側にその機能回復処置を科している。

「収縮ひび割れ」を引き起こすセメント硬化体の収縮変形は、自己収縮や乾燥収縮、温度変化に伴う収縮などに起因しており、その原因は使用材料や配合、施工方法のほか、気温や湿度といった環境条件の変化や構造物の形状寸法による拘束作用など多岐にわたる。このため、請負者側の施工技量のみで収縮ひび割れの発生を完全に防ぐことは難しい。また土木構造物は建築物のような意匠への要求がほとんどなく、設計安全率も高いため、収縮ひび割れに対して比較的寛容で、これまで厳密な対策はとられてこなかった。現状では、購入するレディーミクスコンクリート（以下、レミコン）の乾燥収縮率が所定基準を満足しているかを確認し、場合によっては発注者側と協議の上、石灰石骨材や膨張材などを使用している。

しかしながら、土木構造物においても、竣工後の収縮ひび割れに対する発注者側からの要求が高まる中で、近年では大型インフラ工事が増え、従前よりも厳しい耐久性等の品質確保が求められるようになった。

* 技術研究所土木技術グループ

このような背景から、コンクリートに収縮ひび割れを発生させない、もしくは大幅に低減する対策への要望は極めて大きい。そこで、低発熱系の中庸熱ポルトランドセメントと膨張材を併用したコンクリートに着目し、膨張材を最適混合することで、収縮率の極めて小さいコンクリートについて検討を行ったので報告する。

§2. 収縮ひび割れのメカニズムと制御対策

2-1 収縮ひび割れメカニズム

通常、コンクリートは乾燥による硬化体中での水分移動に伴って内部に収縮応力（体積変化）を生じるが、拘束がない状態では収縮しても巨視的には引張応力は発生しない。しかし、何らかの要因で収縮が拘束されるとコンクリートに引張応力が生じる。コンクリートの収縮は時間の経過とともに進展するため、徐々に引張応力が増大し、引張応力がコンクリートの引張強度を上回った時にひび割れが発生する。

収縮ひび割れの発生を防止する方法として、収縮に対して拘束のない状態を継続できればよいが、現実的に実構造物では不可能である。そのため、コンクリート自体の収縮ひずみを極限まで小さくする方法が有効となる。具体的には、低収縮材料の使用（石灰石骨材、フライアッシュなど）や収縮に寄与する材料の使用抑制（水、セメントなど）、収縮ひずみ自体の低減（膨張材、収縮低減剤、せっこうなど）などが挙げられる。

2-2 収縮ひずみ制御対策

コンクリートの収縮ひずみを施工可能な範疇で制御する方法の1つとして、硬化初期に大きな膨張量を与えてコンクリートに圧縮応力を導入することで、乾燥開始後も収縮量が小さく、長期に渡って圧縮応力が残存し、収縮ひび割れの発生を極限まで抑える方法が考えられる（図-1）。そのためには、使用材料（セメント、骨材、混和剤）を厳選し、配合設計の組み立てを工夫して、膨張

と収縮を制御することが求められる。

2-3 収縮ひずみの規格値

コンクリートのひび割れ制御のため、収縮ひずみに対して基準値や制限値を定めたものが幾つかある（表-1）。例えば、土木学会のコンクリート標準示方書〔設計編〕³⁾では、設計時での収縮ひずみの最終値を $1,200 \times 10^{-6}$ 程度を想定し、〔施工編〕⁴⁾には重要な構造物で $1,000 \times 10^{-6}$ を超えないこととしている。日本建築学会では、2006年に「鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針（案）・同解説」⁵⁾を発行し、収縮ひび割れ制御のための対策標準を示し、後に「膨張材・収縮低減剤を使用するコンクリートの調合設計・製造・施工指針（案）・同解説」⁶⁾へと続いている。また2009年の「建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事」⁷⁾では、計画供用期間が長期および超長期の構造物では特記がない場合にはコンクリートの乾燥収縮率は 8×10^{-4} 以下と規定された。日本コンクリート工学会では、2010年にコンクリートの収縮問題検討委員会が乾燥収縮ひび割れ制御に関する報告書⁸⁾をまとめ、乾燥収縮ひび割れを防ぐために、設計者や施工者のほか、レミコンやセメント、骨材、混和材料などの供給者が対応すべき点について提案している。

表-1 コンクリートの収縮量規定化

出典	仕様書	収縮量の規定
土木学会	2017年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕	設計時の収縮ひずみ最終値 $1,200 \times 10^{-6}$ 程度を想定
	2017年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕	重要構造物に対して $1,000 \times 10^{-6}$ を超えないこと
日本建築学会	建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2009	乾燥収縮率は、計画供用期間が長期（100年）および超長期（200年）の場合は 8×10^{-4} 以下
	鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針（案）・同解説	乾燥収縮ひずみ（ $\times 10^{-6}$ ） 標準仕様：800~650 高級仕様：650~500 特級仕様：500以下

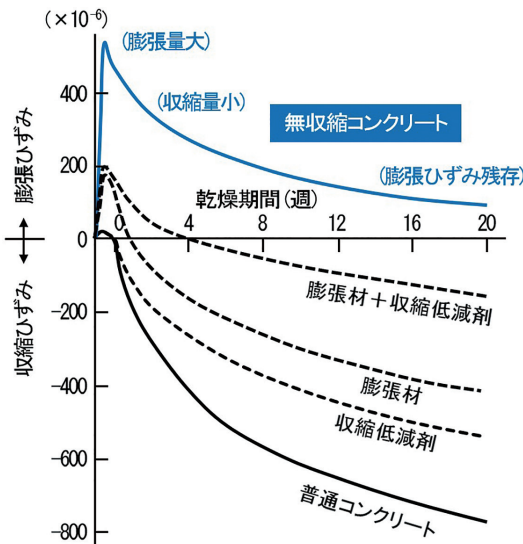


図-1 収縮ひずみ制御コンクリートの概念図²⁾

これらの規定値が設けられたのは、土木分野では、2002年に完成した京奈和自動車道垂井高架橋で、JISコンを使用していたにも関わらず、想定を超える収縮ひび割れで桁がたわむ問題が発生したことに端を発している。また建築分野では、住宅品質確保促進法の施行以降、RC造建物での収縮ひび割れに対する関心が高まり、発注者側のひび割れ抑制に対する要求も強まったことで責任を明確化する動きが出てきたことによる。

§3. 室内試験

3-1 概要

硬化初期に大きな膨張ひずみを効率的に導入する方法として、膨張材を低発熱系セメントに混和する方法を採用した。ただし、低発熱系のセメントに膨張材を用いた

場合、環境温度や単位膨張材量などの条件次第では、過膨張によって強度低下やひび割れを引き起こすことがある。例えば、低熱ポルトランドセメントは初期強度発現が小さいため、単位膨張材量を標準量 20 kg/m³とした場合、膨張ひずみが過大となるため、一般的にはポルトランドセメント単味の下限量が規定されている。このため大きな膨張ひずみを硬化初期に導入することは難しい。一方で、中庸熱ポルトランドセメントは、膨張材を適量で用いると、強度低下がほとんどなく大きな膨張ひずみを導入することが可能とされる。また中庸熱の方が低熱よりも現場調達しやすい利点もある。以上より、中庸熱ポルトランドセメントをベースセメントに選定した。

本試験では、フェーズ I として、中庸熱ポルトランドセメントに膨張材を混和した時の膨張ひずみの値を、単位膨張材量や環境温度等の異なる条件で確認した。次にフェーズ II では、拘束膨張収縮試験にて単位膨張材量や混和剤の種類の違いによる膨張・収縮ひずみの挙動を確認した。これらの結果から、コンクリートの収縮ひずみ制御のための条件を見出すこととした。

3-2 使用材料とベースコンクリート配合

表-2 および表-3 に使用材料およびベースコンクリート配合を示す。中庸熱ポルトランドセメントに石灰系の膨張材を使用し、粗骨材には収縮低減効果を期待できる石灰石碎石を用いた。混和剤は高性能 AE 減水剤で、一般品のほかに、収縮低減効果を有する収縮低減タイプを選定した。なお練上がり温度に応じて標準形または遅延形を使用した。ベースコンクリートの配合は、呼び強度 30 N/mm² で、水セメント比 44.0%，細骨材率 42.8%，単位セメント量 323 kg/m³ で、目標スランプ 12 cm ± 2.5，目標空気量 4.5% ± 1.5 である。

表-2 使用材料

材料名	記号	仕 様
セメント	C	中庸熱ポルトランドセメント 密度 3.21 g/cm ³ ，比表面積 3,120 cm ² /g
膨張材	EX	石灰系，密度 3.16 g/cm ³ 比表面積 3,450 cm ² /g
細骨材	S	山砂，表乾密度 2.60 g/cm ³ 吸水率 1.84%，FM2.81
粗骨材	G	石灰石碎石，表乾密度 2.69 g/cm ³ 吸水率 0.37%，FM6.51
水	W	上水道水
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤
	SR	高性能 AE 減水剤（収縮低減タイプ）
	AE	AE 剤（樹脂酸塩系海面活性剤）
	DF	消泡剤

表-3 ベースコンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)			
		W	C	S	G
44.0	42.8	142	323	793	1096

3-3 試験要因

フェーズ I では、単位膨張材量や環境温度、混和剤の種類の違いがコンクリートの拘束膨張率や圧縮強度に与える影響を確認した。具体的には、W/C や s/a を一定として、中庸熱ポルトランドセメントに膨張材を内割りで 0 kg/m³，15 kg/m³，20 kg/m³，25 kg/m³ の 4 水準で使用し、環境温度を 10℃，20℃，30℃ の 3 条件としている。また混和剤の種類は、高性能 AE 減水剤（標準形 I 種）を一般品と収縮低減タイプの 2 種類とした（表-4）。コンクリートの拘束膨張率の測定は、JCI-S-009-2012：「円筒型枠を用いた膨張コンクリートの拘束膨張試験方法」に準拠しておこなった。試験に用いた円筒型枠の素材はブリキのため、環境温度の違いによってわずかに伸び縮みする。そのひずみ分が測定結果に影響を及ぼさないようにするため、試験開始 24 時間前に型枠自体を試験環境温度下に存置して用いた。

次にフェーズ II では、単位膨張材量や混和剤の種類の違いによるコンクリートの拘束膨張収縮特性を比較した。具体的には、単位膨張材量を 0 kg/m³，20 kg/m³，25 kg/m³ の 3 水準とし、混和剤には高性能 AE 減水剤（標準形 I 種）の一般品と収縮低減タイプの 2 種類を用いた（表-5）。コンクリートの拘束膨張収縮率の測定は、JIS A 6202 の附属書 B（参考）の「膨張コンクリートの拘束膨張及び収縮試験方法」の B 法に準拠して実施した。

表-4 試験要因（フェーズ I）

試験要因	水準	内 容
単位膨張材量	4	0, 15, 20, 25 kg/m ³
環境温度	3	10, 20, 30℃
混和剤の種類	2	高性能 AE 減水剤 （一般品，収縮低減タイプ）

表-5 試験要因（フェーズ II）

試験要因	水準	内 容
単位膨張材量	3	0, 20, 25 kg/m ³
混和剤の種類	2	高性能 AE 減水剤 （一般品，収縮低減タイプ）

表-6 評価方法

フェーズ	試験項目	試験基準
I	拘束膨張試験	JCI-S-009-2012
II	拘束膨張収縮試験	JIS A 6202 附属書 B（B 法）

3-4 コンクリート練混ぜ手順

コンクリートの製造には二軸強制型ミキサを使用し、粗骨材を全量投入したら細骨材を半分と粉体（セメント、膨張材）を入れ、最後に細骨材の残りを投入した後、10 秒間空練りした。次に、水と混和剤を投入して 30 秒混ぜ、掻き落した後、さらに 30 秒練って排出した。

3-5 試験結果 (フェーズ I)

(1) フレッシュ性状

表-7 にコンクリートのフレッシュ性状測定結果を示す。使用材料はあらかじめ試験環境温度に調整された室内に 24 時間以上存置して材料温度を安定させ、採取したコンクリートの練上がり温度 (C.T) が設定環境温度の ±3℃ の範囲に収まるようにした。また練上がり時のフレッシュ性状は、助剤 (AE 剤, 消泡剤) の量を固定し、高性能 AE 減水剤 (SP) の添加量のみで調整して確保した。

(2) 拘束膨張率

表-8 に単位膨張材量が 15 kg/m³, 20 kg/m³, 25 kg/m³ の時にコンクリートに発生する拘束膨張率 (自己収縮を包含) の最大値を環境温度 10℃, 20℃, 30℃ で示す。拘束膨張率の値は、膨張材量が多いほど、また環境温度が高いほど大きくなり、同じ膨張材量でも環境温度によって拘束膨張率にやや差を生じることがわかった。これはつまり、中庸熟ポルトランドセメントをベースにした時、目標とする拘束膨張率を導入するには、環境温度を考慮した膨張材量の設定が必要であることを示している。また、単位膨張材量 20 kg/m³ 以上で環境温度 20℃ 以上の時、拘束膨張率は一般的な収縮補償ひずみの目標上限 250×10⁻⁶ を超える値となった。なお、単位膨張材量が多く、環境温度が低いほど拘束膨張率が最大値に到達するまでに期間を要した。このため、膨張材の性能を十分に発揮させるため、単位膨張材量や環境温度に応じて湿潤養生期間を適切に調整する必要がある。

(3) 環境温度と圧縮強度

図-2 に環境温度 10℃, 20℃, 30℃ での材齢 7 日圧縮強度 (無拘束状態) の試験結果を単位膨張材量別に示す。7 日強度は環境温度が高いほど大きくなるが、単位膨張材量の違いによる顕著な差はなかった。

(4) 膨張材量と拘束膨張率, 圧縮強度の関係

図-3 に、単位膨張材量と拘束膨張率, 圧縮強度 (無拘束) との関係を示す。なお単位膨張材量は 0~25 kg/m³ で、圧縮強度は膨張材無混入に対する強度比 (材齢 7 日, 28 日) で示し、環境温度 20℃ での結果である。膨張材量 15~25 kg/m³ の範囲で、圧縮強度は無混入に比べてやや

表-8 拘束膨張率の測定結果

膨張材量 (kg/m ³)	拘束膨張率の最大値 (×10 ⁻⁶)		
	環境温度 (℃)		
	10	20	30
15	143 (16 日)	177 (7 日)	220 (1 日)
20	244 (16 日)	272 (7 日)	299 (2 日)
25	387 (19 日)	436 (10 日)	459 (5 日)

備考) () 内の日数は拘束膨張率が最大値に到達した材齢

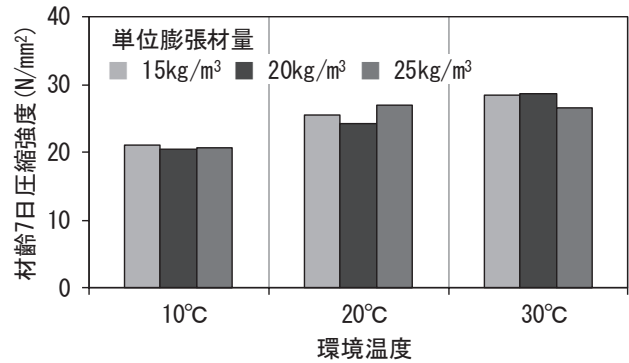


図-2 環境温度, 単位膨張材量と 7 日強度の関係

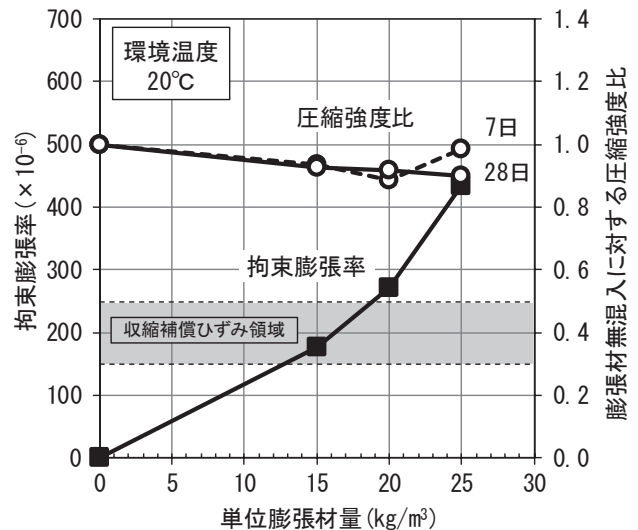


図-3 単位膨張材量と拘束膨張率, 圧縮強度の関係

表-7 混和剤添加量とフレッシュ性状結果

膨張材量 EX (kg/m ³)	環境温度 T _e (℃)	混和剤			試験結果		
		SP (B×%)	AE (B×%)	DF (B×%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	C.T (℃)
15	10	0.70	0.6	0.5	12±2.5	4.5±1.5	T _e ±3
	20	0.75			12.5	5.1	13
	30	0.80			11.0	4.7	18
20	10	0.70	0.6	0.5	12.0	5.4	30
	20	0.75			14.0	5.4	13
	30	0.80			11.5	4.9	19
25	10	0.75	0.6	0.5	11.0	5.1	30
	20	0.80			13.0	5.1	13
	30	0.85			11.0	4.5	19
					12.0	5.3	30

低いものの、膨張材を使用した配合での比較では強度低下はほとんどなく、膨張材量 25 kg/m³ で 436×10⁻⁶ の大きな拘束膨張ひずみを導入できた。なお本試験の圧縮強度は無拘束状態での結果であり、実構造物では鉄筋や型枠等で拘束状態となるため、本試験のような無拘束状態に比べて強度の低下はさらに小さくなると考える。

(5) 収縮低減タイプ混和剤の効果

収縮低減タイプの混和剤を用いた時のフレッシュ性状や拘束膨張率, 圧縮強度への影響を環境温度 20℃ の条件で確認した。試験に用いた収縮低減タイプ混和剤は、ポリカルボン酸系化合物とグリコールエーテル系誘導体を主成分とした高性能 AE 減水剤で、減水成分と収縮低減成分の 2 種類を混合して一液化している。各々の成分効

果を保証する標準使用量は、同製品では単位粉体量に対して1.15%であり、この内の0.75%が減水成分、0.4%が収縮低減成分となる。上記の使用量を下回って用いた場合、特に収縮低減効果が想定どおり発揮されない場合がある。なお本剤による収縮低減効果は標準で5~15%程度とされる。これらを考慮して、本試験では単位粉体量に対して1.20%を使用し、フレッシュ性状はスランプ11.0 cm、空気量4.8%であった。

高性能 AE 減水剤（収縮低減タイプ）を用いた時の拘束膨張率および圧縮強度の値を、一般的な高性能 AE 減水剤を用いた場合と比較して表一〇に示す。なお、単位膨張材量は 25 kg/m³、環境温度 20℃ の条件で、圧縮強度は材齢 7 日および 28 日で実施した。試験の結果、拘束膨張率の値は、収縮低減タイプを用いた時に 492×10⁻⁶ となり、10%以上膨張率が大きくなる傾向となった。また圧縮強度は、一般的に、混和型収縮低減剤を用いるとセメント水和反応の遅延によりコンクリートの圧縮強度は低下する傾向にあると指摘されている。本試験では高性能 AE 減水剤（収縮低減タイプ）を標準量程度用いたが、コンクリート圧縮強度の低下は確認されなかった。

以上より、中庸熟ポルトランドセメントに単位膨張材量 25 kg/m³ を使用し、さらに収縮低減タイプの混和剤を用いた場合、500×10⁻⁶ 程度の大きな拘束膨張率を導入しつつ、圧縮強度（無拘束状態）の低下はほとんどなく、使用性に大きな問題はないことがわかった。

3-6 試験結果（フェーズⅡ）

図一四に、コンクリートの拘束膨張収縮特性を単位膨張材量や混和剤の種類の違いで比較して示す。ここで、単位膨張材量は 0 kg/m³、20 kg/m³、25 kg/m³ の 3 水準で、混和剤には高性能 AE 減水剤（標準形Ⅰ種）の一般品と収縮低減タイプを用いた。

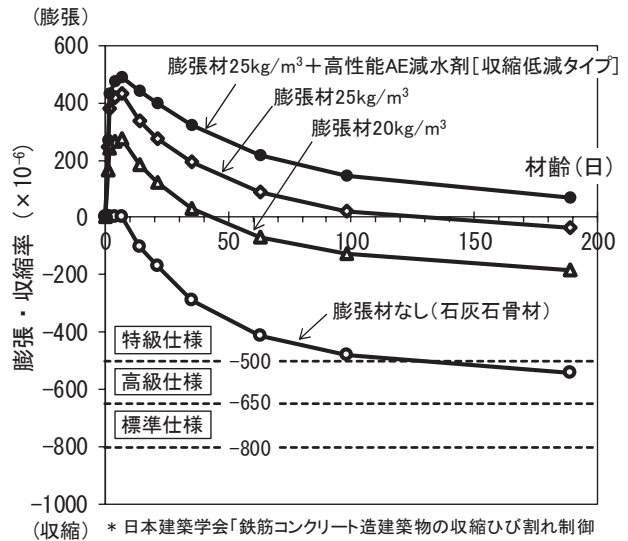
膨張材を混和する前のベースコンクリートの収縮率は、材齢 182 日目（26 週）で -542×10⁻⁶ となり、厳選した石灰石骨材の効果等によって日本建築学会の高級仕様相当⁵⁾ であった。次に膨張材を混和して使用量を増やすことで収縮率はより小さくなり、単位膨張材量 25 kg/m³ での収縮率は -36×10⁻⁶ で概ねゼロとなった。さらに収縮低減タイプの高性能 AE 減水剤を用いると、収縮率は 182 日経過しても膨張側で圧縮応力が残存しており、その値は +70×10⁻⁶ であった。なお本剤の添加による収縮低減効果は、膨張材による初期膨張率を除いて算出した場合、一般の高性能 AE 減水剤と比較して、約 11%低減であった。これは本製品の標準低減率 5~15%を満足する効果であった。つまり、膨張材の収縮補償効果と収縮低減成分による収縮低減効果は各々独立して作用し、互いの効果を足し合わせたものと概ね一致すると考えられる。

以上より、膨張材の使用量を調整し、収縮低減タイプの混和剤を用いることで収縮ひずみを大幅に小さくするだけでなく、残存した圧縮応力によって極めて高い収縮ひび割れ抵抗性を有するコンクリートとなった。

表一〇 収縮低減タイプ混和剤の拘束膨張率と強度

高性能 AE 減水剤	膨張材量 (kg/m ³)	拘束膨張率 (×10 ⁻⁶)	圧縮強度 (N/mm ²)	
			7 日	28 日
一般品	25	436	25.7	41.9
収縮低減タイプ	25	492	25.8	42.2

備考) 環境温度 20℃, 石灰石骨材を使用



* 日本建築学会「鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説」より

図一四 コンクリートの拘束膨張収縮特性

§ 4. 施工適用例

(1) 概要

壁厚 1,100 mm × 高さ 4,500 mm × 延長 21.8 m の側壁コンクリートにおいて、外部拘束による温度ひび割れおよび収縮ひび割れの発生が懸念されたため、本試験結果を参考に、中庸熟ポルトランドセメントと膨張材を併用した無収縮コンクリートを適用した。コンクリートは、呼び強度 30 N/mm²、水結合材比 44.0%、単位結合材量 323 kg/m³ で、細骨材は石灰石砕砂と細目砂の混合、粗骨材は石灰石砕石で、混和剤には高性能 AE 減水剤（収縮低減タイプ）を使用した。膨張材の使用量は、20℃環境での拘束膨張率 500×10⁻⁶ 相当を導入するため 25 kg/m³ を選択した。コンクリートの製造では混練時間をやや延長し、膨張材が均一に分散するように配慮した。

(2) 現場計測

側壁スパン中央の高さ 1,000 mm 位置で、壁厚中心部と表面付近（表面から深さ 100 mm）に熱電対を設置してコンクリート温度を計測した。また同壁中心部に無応力容器および埋込み型ひずみ計を設置し、膨張材で導入した膨張ひずみおよびコンクリート実ひずみの挙動を 1 時間間隔の自動計測で測定した。

(3) 施工状況

コンクリート荷卸し時のフレッシュ性状は、スランプ 13.5 cm、空気量 4.5%で、コンクリート打込み開始時の外気温は 9.2℃と低く、コンクリート打込み温度は 13.3℃であった。本施工では、打込みから 8 日目に型枠を緩め、その後、気泡緩衝シートと散水による保温・湿潤養生を材齢 22 日まで実施した。

(4) コンクリート温度

図-5 にコンクリート温度（中心部，表面付近）および外気温の履歴を示す。材齢 60 日までの平均気温は 8.8℃で、側壁中心部でのコンクリート温度は最高 41.8℃（材齢 1.6 日）に達し、打込み温度からの温度上昇量は 28.5℃であった。

(5) 圧縮強度

表-10 にコンクリート圧縮強度（標準養生，無拘束）の試験結果を示す。またセメント会社の技術資料⁹⁾より、中庸熟ポルトランドセメントの C/W 強度式から求めた値も併記した。圧縮強度は、技術資料に示された強度に比べて、7 日強度は 1 割以上大きいものの、28 日以降はやや小さい結果であった。なお実構造物では拘束状態のため、圧縮強度はもう少し大きいと考える。

(6) コンクリート膨張ひずみ

図-6 に無応力容器内に設置した埋込み型ひずみ計から求めたコンクリートの自由ひずみの測定結果を示す。なお、横軸は硬化原点を起点とした材齢（日）である。無拘束状態での自由ひずみには、温度の上昇・降下による熱膨張収縮ひずみ成分も含まれているが、材齢後半に残存するひずみは膨張材による膨張ひずみ成分と捉えることができる。測定の結果、材齢後半での自由ひずみは平均 460×10^{-6} ほどで安定しており、これが膨張ひずみ成分と考える。なおこの値は、事前の配合設計で想定した膨張率 500×10^{-6} よりもやや小さいが、施工時の気温や練上がり温度等から想定した膨張率 450×10^{-6} と概ね等しい結果であった。

(7) コンクリートの熱膨張係数

図-7 に無応力容器内の埋込み型ひずみ計による自由ひずみと熱電対による測定温度の関係を示す。温度と自由ひずみの勾配（=熱膨張係数）は、硬化原点以降、温度上昇時に $53.7 \times 10^{-6}/\text{℃}$ と極めて大きく、温度降下時には $3.8 \times 10^{-6}/\text{℃}$ と小さい値であった。これは、温度上昇時に膨張材の効果が大きく発揮され、その後も膨張効果が持続していることを示している¹⁰⁾。

(8) コンクリート実ひずみ

図-8 に埋込み型ひずみ計で計測した実ひずみの測定結果を示す。実ひずみは、拘束状態での温度変化による温度ひずみ、乾燥収縮による収縮ひずみ、膨張材による膨張ひずみおよびクリープひずみを含んでいる。材齢 2.2 日で実ひずみが 87×10^{-6} に達し、それ以降は値が小さくなるものの、材齢 60 日でも 40×10^{-6} の膨張側にあり、収縮低減効果が保持されていることを確認した。

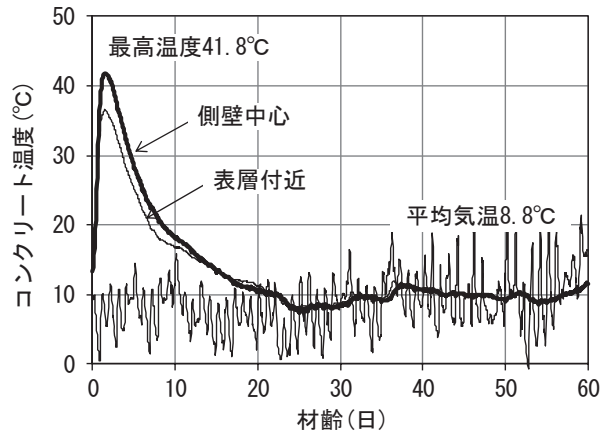


図-5 コンクリート温度の履歴

表-10 コンクリート圧縮強度

項目名	圧縮強度 (N/mm ²)		
	7 日	28 日	56 日
標準養生（無拘束）	30.8	46.9	55.2
セメント会社技術資料 ⁹⁾	27.2	48.0	58.8

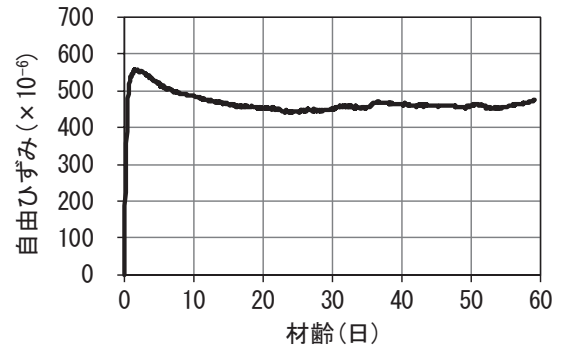


図-6 コンクリートの自由ひずみ

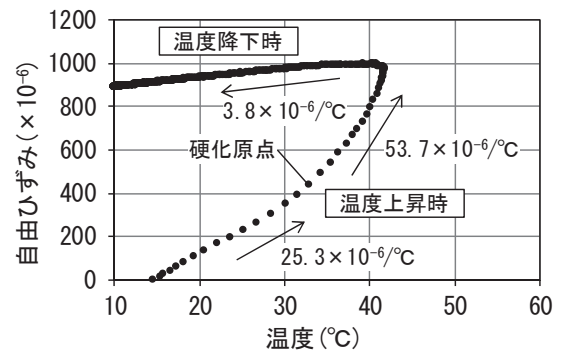


図-7 温度と自由ひずみの関係

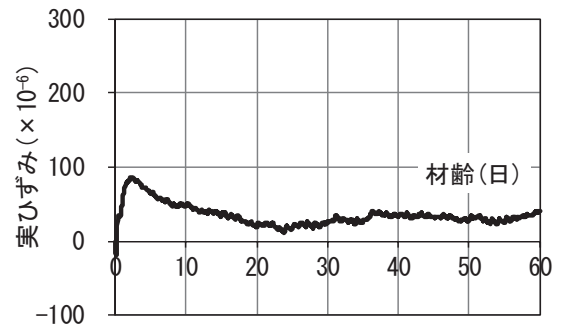


図-8 コンクリートの実ひずみ

(9) 硬化コンクリートの表層品質評価

コンクリート打込み完了から 300 日ほど経過後、硬化コンクリートの表層品質を表面吸水試験 (SWAT) で確認した。表一11 に表面吸水試験による表面吸水速度 P600 の結果を示す。測定の結果、表層品質のグレードは「良」で、良好な表層品質を有していることがわかった。

表一11 表面吸水試験の結果

気温 (℃)	含水率 (%)	表面吸水速度 P600 (ml/m ² /s)	グレード判定
23.5	4.6	0.018	良

グレード評価:0.250 以下(良), 0.250~0.500(一般), 0.500 以上(劣)

§5. まとめ

本報では、低発熱系の中庸熱ポルトランドセメントと膨張材を併用し、さらに収縮量の小さい良質な骨材や収縮低減タイプの混和剤を一緒に用いることで、収縮ひび割れの発生を極限まで抑える「無収縮コンクリート」について、室内試験結果や実施工からその実用性について示した。ここで紹介したコンクリートは、環境温度を考慮して膨張材の効果を最大限に引き出すことで硬化初期に大きな圧縮応力を導入し、さらに厳選した骨材や混和剤による収縮低減効果により、長期に渡って圧縮応力を残存させる方法でコンクリートの無収縮化を実現するものである。

近年、土木コンクリート構造物の品質や長期耐久性に対する要求が益々高まる中で、ひび割れの発生を防ぐ、も

しくは大幅に低減させるための技術ニーズが増えている。本報で紹介した膨張・収縮ひずみを制御した無収縮コンクリートの知見が活かされることを期待している。

参考文献

- 1) 小原和彦：道路構造物における長期品質確保の取り組みについて、平成 27 年度国土交通省国土技術研究会論文集、2015. 10
- 2) 富田六郎：超低収縮コンクリート、コンクリート工学、Vol. 32, No.7, 1994. 7
- 3) 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書 [設計編]、2017. 3
- 4) 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書 [施工編]、2017. 3
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針 (案)・同解説、2006. 2
- 6) 日本建築学会：膨張材・収縮低減剤を使用するコンクリートの調合設計・製造・施工指針(案)・同解説、2017. 2
- 7) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事、2009
- 8) 日本コンクリート工学会：コンクリートの収縮問題検討委員会報告書、2010. 3
- 9) 宇部三菱セメント株式会社：技術資料第 6 版、2013. 4
- 10) 佐竹紳也、山田信一、秋山文生、中村雅彦：低添加型膨張材の建築工事への適用と展開、コンクリート工学年次論文集、Vol. 26, No. 1, pp. 231-236, 2004