

論文 エトリンガイト・石灰複合系膨張材を用いた推進管 2 種の曲げひび割れ耐力に関する検討

前田 拓海*1・樋口 隆行*2・荒木 昭俊*3・串橋 巧*4

要旨: エトリンガイト系膨張材とエトリンガイト・石灰複合系膨張材を用いた推進管を作製し、曲げひび割れ耐力について比較検討した。いずれの膨張材の場合でも、JSWAS A-2 規定の性能を満たす推進管 2 種が製造できることが確認された。また、エトリンガイト・石灰複合系膨張材を用いた推進管のひび割れ荷重は、エトリンガイト系膨張材に比べて大きい結果となった。エトリンガイト系膨張材に比べて大きな膨張を付与できるエトリンガイト・石灰複合系膨張材は、ケミカルプレストレスをより効果的に導入でき、曲げひび割れ耐力に優れた推進管が製造できる。そして、少ない膨張材量で経済的に配合設計できる可能性が示唆された。

キーワード: 膨張材, 膨張コンクリート, 推進管, ケミカルプレストレス, ケミカルプレストレイン

1. はじめに

膨張材は、ヒューム管やボックスカルバートをはじめとした幅広いコンクリート製品に汎用的に用いられている。膨張コンクリートは、鉄筋拘束された条件でコンクリートに膨張が付与されることで、コンクリート内部にはケミカルプレストレスによる圧縮応力が、鉄筋には引張ひずみのケミカルプレストレインがそれぞれ導入される。導入されたケミカルプレストレスはコンクリートの曲げひび割れ耐力の向上¹⁾²⁾に寄与し、また、鉄筋に導入されたケミカルプレストレインは、ひび割れ発生後のひび割れ幅を低減する効果を有することが知られている³⁾。

一方で、膨張材はコンクリート技術の多様化に伴い、カルシウムサルホアルミネートを主要成分とするエトリンガイト系膨張材や、水酸化カルシウムの生成を膨張の駆動力とする石灰系膨張材、カルシウムサルホアルミネートに遊離石灰を多く包含させて膨張量を高めたエトリンガイト・石灰複合系膨張材などが広く普及している⁴⁾⁵⁾⁶⁾。少量添加で高膨張を発現させる膨張材を有効に活用できれば、ケミカルプレストレスによって曲げひび割れ耐力を高めた高性能のコンクリート製品の製造や、経済的な配合設計に繋がる可能性がある。筆者らは、エトリンガイト系膨張材とエトリンガイト・石灰複合系膨張材の 2 種類を用いたボックスカルバートの曲げひび割れ

耐力について検討⁷⁾を行っているが、幅広いコンクリート製品に膨張材が用いられる中で、エトリンガイト・石灰複合系膨張材を用いたコンクリート製品への検討事例は少ないのが現状である。

そこで本報では、エトリンガイト系膨張材 (Ex 1) とエトリンガイト・石灰複合系膨張材 (Ex 2) を用いた推進管を作製し、ケミカルプレストレスによる曲げひび割れ耐力の向上効果について比較検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

セメントは普通ポルトランドセメント (C, 密度: 3.15 g/cm³)、膨張材は JIS A 6202 に規定される、区分 30 型のエトリンガイト系膨張材 (密度: 2.95 g/cm³) と、区分 20 型のエトリンガイト・石灰複合系膨張材 (密度: 3.08 g/cm³) の 2 種類を用いた。細骨材は栃木県産の砕砂 (S, 表乾密度: 2.61 g/cm³)、粗骨材は栃木県産の砕石 (G, 表乾密度: 2.64 g/cm³, G max: 15 mm) をそれぞれ用いた。混和剤 (Ad.) はポリカルボン酸系の高性能減水剤を用いた。表-1 に、コンクリートの配合を示す。エトリンガイト系膨張材を 57 kg/m³ 混和した Ex 1_57 と、エトリンガイト・石灰複合系膨張材を用いて添加量を 50 kg/m³ と 40 kg/m³ に削減した Ex 2_50 および Ex 2_40 の 3 水準とした。膨

表-1 示方配合

No.	配合	W/C (%)	W/B (%)	s/a (%)	Air (%)	(kg/m ³)				(kg)		Ad. (B×%)	スラブ ^a (cm)	空気量 (%)
						W	C	S	G	Ex 1	Ex 2			
1	Ex 1_57	35.2	31.5	46.7	2.0	168	477	806	931	57	—	0.67	8.0	1.5
2	Ex 2_40	35.2	32.5	46.7	2.0	168	477	806	931	—	40	0.67	9.5	1.7
3	Ex 2_50	35.2	31.9	46.7	2.0	168	477	806	931	—	50	0.67	6.5	3.2

*1 デンカ株式会社 青海インフラ技術研究部 研究員 (正会員)

*2 デンカ株式会社 青海インフラ技術研究部 グループリーダー 博士 (工学) (正会員)

*3 デンカ株式会社 青海インフラ技術研究部 部長 (正会員)

*4 デンカ株式会社 青海インフラ技術研究部 研究員

0.05 mm 以上のひび割れが計測された荷重から拘束条件の曲げ強度を算出した。

2.4 推進管の試験方法

推進管は管理材齢の 14 日で、測定精度：1/100 mm の変位計を鉛直方向に、ゲージ長：60 mm のひずみゲージを円周方向に、それぞれ図-1 に示す位置に設置した。その後、JSWASA-2 に準じて曲げ耐力試験を行った。図-1 に示すようにゴム板と角材をそれぞれ当て、荷重を管体にほぼ均等に分布するように鉛直に加えた。

(1) 性能検査

JSWASA-2 で規定される推進管 2 種の曲げひび割れ耐力に相当する荷重：207.5 kN (85.4 kN/m×有効長：2,430 mm) で載荷を一時停止し、幅 0.05 mm を超えるひび割れの有無を調べた。また、変位計で荷重 10 kN 毎の推進管の鉛直方向のたわみを計測した。

(2) ひび割れ荷重 (幅 0.05 mm 以上)

幅 0.05 mm を超えるひび割れが確認された時点の荷重を「ひび割れ荷重」とした。ひび割れ幅は、ペーパークラックゲージを用いて目視で確認した。

(3) 初亀裂荷重

目視で確認できる幅 0.05 mm 以上のひび割れよりも、更に細かい初亀裂が生じた時点の荷重を「初亀裂荷重」とした。初亀裂荷重は、ひずみゲージを用いて荷重 10 kN 毎のひずみをデータロガーで測定し、ひずみの変曲点から判断した。

(4) 破壊荷重

JSWASA-2 で規定される推進管 2 種の終局曲げ耐力に相当する荷重：311 kN (128 kN/m×有効長：2,430 mm) まで載荷し、推進管が破壊しないことを確認した。推進管に破壊が生じると荷重が増加しなくなるため、規定荷重：311 kN における荷重増加の継続有無を確認した。

3. テストピースの試験結果および考察

3.1 膨張ひずみ

図-4 に、膨張ひずみを示す。Ex 2_40 および Ex 2_50

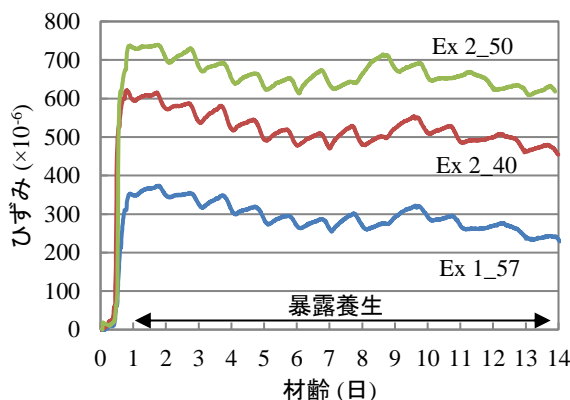


図-4 膨張ひずみ

の最大膨張率 (材齢 1 日) は、Ex 1_57 に比べて大きい結果となった。また、材齢 1 日以降は暴露養生によって収縮挙動を示すが、膨張材の種類による収縮の傾向に違いは確認されなかった。管理材齢に相当する材齢 14 日時点では、いずれの水準も 200×10^{-6} 以上の膨張ひずみが蓄積されており、収縮補償効果およびケミカルプレストレス効果が得られると推察される。

エトリンガイト・石灰複合系膨張材の Ex 2 は、エトリンガイト系膨張材の Ex 1 に比べて、少ない添加量で大きな膨張ひずみが付与されたことで、効果的、かつ、経済的に収縮補償効果を発揮すると考えられる。

3.2 圧縮強度

図-5 に、圧縮強度を示す。いずれの配合も、管理材齢 14 日の圧縮強度は、JSWASA-2 規定の 50 N/mm^2 を上回った。しかしながら、Ex 2_40 および Ex 2_50 の圧縮強度は、Ex 1_57 と比較して小さい結果を示した。Ex 2 を用いた配合は、示方配合とは別枠で用いた膨張材の添加量が Ex 1 に比べて削減されたことで、膨張材を含む単位結合材量が少なくなり、圧縮強度が小さい結果となった可能性がある。また、無拘束条件下で大きな膨張が付与された影響を受けた可能性がある。但し、鉄筋拘束された条件では、一軸拘束膨張試験体の膨張率が $1,000 \times 10^{-6}$ 以下では強度低下が生じないことが報告⁸⁾⁹⁾されているため、実物の推進管への影響は小さいと考えられる。

大きな膨張を発現するエトリンガイト・石灰複合系膨張材を多量に混和した配合で、無拘束条件のテストピースを用いた強度管理を行う場合には、事前の試験練りで圧縮強度への影響を確認することが重要となる。

3.3 曲げ強度

図-6 に、材齢 14 日における膨張ひずみと曲げ強度の関係を示す。膨張ひずみが大きい Ex 2_40 は、Ex 1_57 に比べて曲げ強度が大きい結果を示した。より大きなケミカルプレストレスが導入された効果と推察される。Ex 2_50 は曲げ強度の変動が大きい影響を受けたためか、膨張ひずみと曲げ強度の明瞭な相関性が確認できなかった。

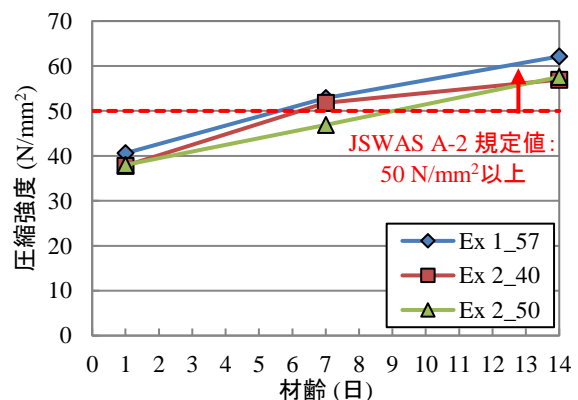


図-5 圧縮強度

一方で、Ex 2_50 は Ex 1_57 と比較して膨張材添加量が少ないにもかかわらず、同程度の曲げ強度が発現された。エトリンガイト・石灰複合系膨張材の Ex2 は、エトリンガイト系膨張材の Ex1 に比べて、少ない添加量で効率的にケミカルプレストレスを導入できると考えられる。

図-7 に、一軸拘束膨張試験体の材齢 14 日における荷重とひび割れ幅の関係を示す。エトリンガイト系膨張材の Ex 1_57 と、大きな膨張ひずみが付与された Ex 2_50 の結果を抜粋した。曲げ強度に相当する荷重載荷時に引張側表面にひび割れが発生した。設置したパイ型変位計の標点距離内に、目視確認でひび割れが 1 本入った結果を選定して考察した。標点距離内にひび割れが生じなかった場合や、複数本のひび割れが発生した結果は除外した。同一の荷重が生じた 35 kN 時点では、Ex 2_50 のひび割れ幅が、Ex 1_57 に比べて小さいことが確認された。エトリンガイト・石灰複合系膨張材の Ex2 は鉄筋に大きな膨張ひずみがケミカルプレストレスとして導入されることで、曲げひび割れ発生後のひび割れ幅の低減効果が生じたと考えられる。

4. 推進管 2 種の試験結果および考察

4.1 性能検査

図-8 に、推進管の性能検査の結果を示す。JSWAS A-

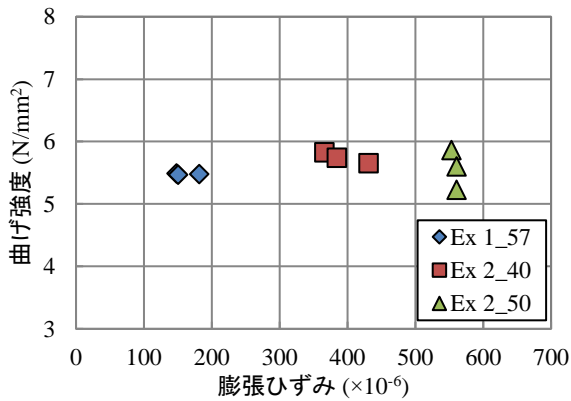


図-6 膨張ひずみと曲げ強度の関係 (材齢 14 日)

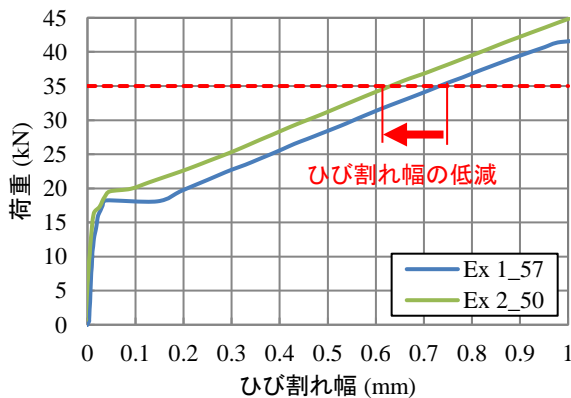


図-7 荷重とひび割れ幅の関係 (材齢 14 日)

2 で規定される推進管 2 種の曲げひび割れ耐力に相当する荷重 : 207.5 kN を載荷した場合でも、推進管に幅 0.05 mm 以上のひび割れや外観の異常は確認されなかった。また、いずれの水準においても、207.5 kN 載荷時までの荷重とたわみの関係は同様の傾向を示し、膨張材の種類による違いは確認されなかった。寒冷期の過酷な環境条件においても、いずれの膨張材を用いた場合でも、JSWAS-A-2 規定の性能を満たす推進管 2 種が製造できることが確認された。

4.2 ひび割れ荷重

図-9 に、推進管のひび割れ荷重を示す。いずれの膨張材を用いた推進管においても、JSWAS A-2 による幅 0.05 mm 以上のひび割れ荷重の規定値 : 207.5 kN を上回

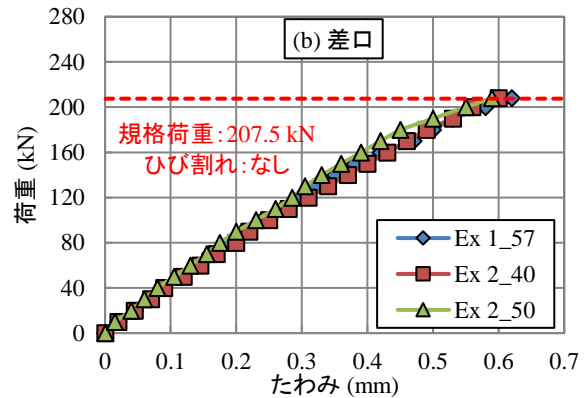
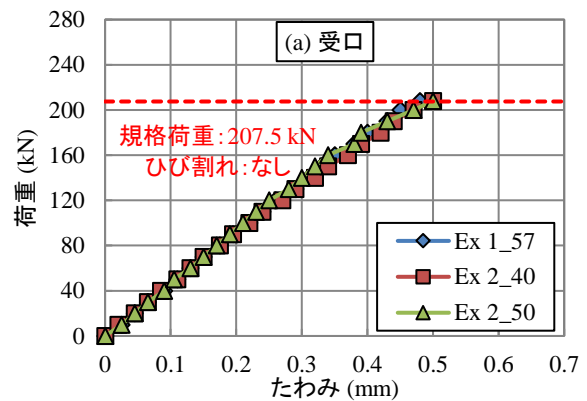


図-8 推進管の性能検査

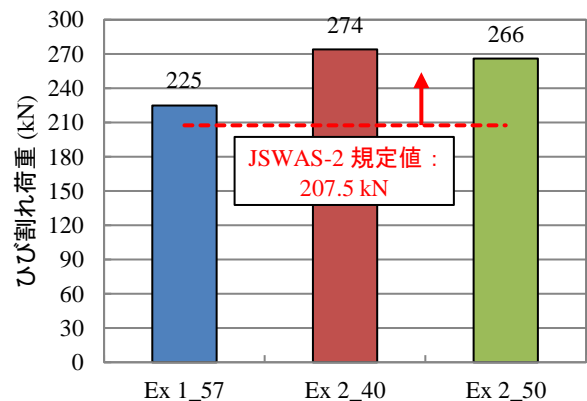


図-9 推進管のひび割れ荷重

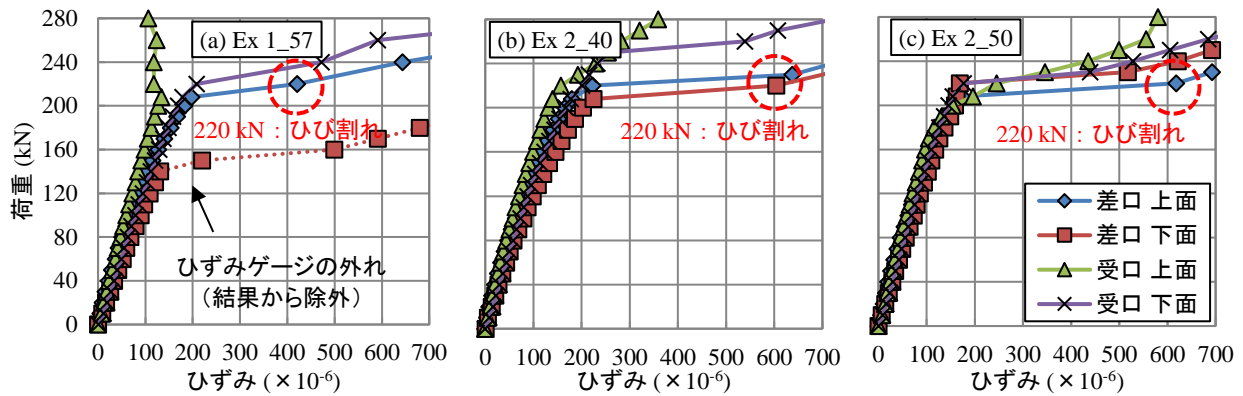


図-10 推進管の荷重とひずみの関係

った。また、Ex 2_40 および Ex 2_50 は、Ex 1_57 に比べてひび割れ荷重が大きい結果となった。ここで、テストピースの結果を踏まえると、エトリンガイト・石灰複合系膨張材の Ex 2 は、エトリンガイト系膨張材の Ex 1 と比較して、大きな膨張ひずみが付与され、ケミカルプレストレスの導入によって曲げ強度が向上した。推進管においてもテストピースと同様に、大きな膨張ひずみが付与されることでケミカルプレストレスが効果的に導入され、ひび割れ荷重が向上したと推察される。

4.3 初亀裂荷重

図-10 に、推進管の荷重とひずみの関係を示す。全体の傾向から、各測定箇所でも 300×10^{-6} を超える大きなひずみの変曲点が確認された時点の荷重を初亀裂荷重とした。初亀裂は推進管の差口側の上面もしくは下面で最初に確認された。いずれの配合も初亀裂荷重は 220 kN であり、目視で確認できる幅 0.05 mm 以上のひび割れよりも細かい初亀裂が生じた荷重が、ひび割れ荷重の規定値：207.5 kN を上回る結果となった。目視判断よりも正確なひずみゲージを用いたひび割れの評価手法の結果を踏まえても、JSWASA-2 規定のひび割れ荷重の性能を満足していると考えられる。また、Ex 2_40 および Ex 2_50 の初亀裂荷重が Ex 1_57 と同程度であったことから、エトリンガイト・石灰複合系膨張材は、エトリンガイト系膨張材と比較して膨張材の添加量を削減した場合でも同等の曲げひび割れ耐力が得られ、経済的な材料設計が可能と考えられる。

ここで、幅 0.05 mm 以上のひび割れ荷重と、目視で確認できない微細なひび割れの初亀裂荷重の差分(図-11)について見ると、Ex 2_40 および Ex 2_50 がそれぞれ 54 kN、46 kN を示したのに対して、Ex 1_57 は 5 kN に留まった。これは、鉄筋に大きな膨張ひずみが付与された Ex 2_40 および Ex 2_50 は、微細な初亀裂が 220 kN で生じた後、ひび割れ幅が 0.05 mm 以上に到達するまでの荷重および曲げひび割れ耐力が、Ex 1_57 に比べて向上していると考えられる。既往の文献¹⁰⁾では、膨張コンクリートを用いたボックスカルバートは、鉄筋に導入されたケ

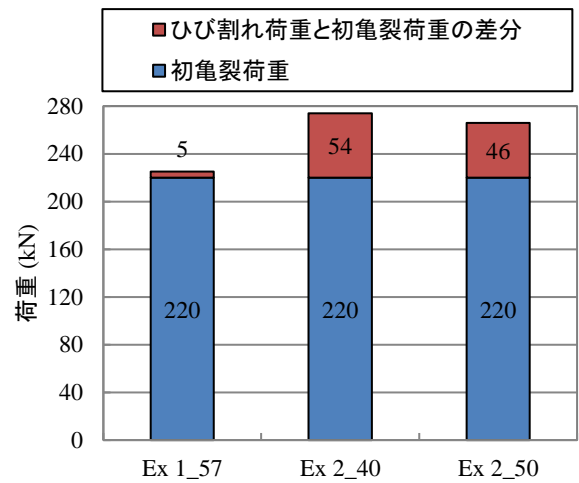


図-11 推進管のひび割れ荷重と初亀裂荷重

ミカルプレストレインによって、曲げひび割れ発生後のひび割れ幅が低減されることが報告されている。また、テストピースの Ex 2 でも同様の効果が確認された(図-7)。このことから、構造や成型方法は異なるものの、エトリンガイト・石灰複合系膨張材を用いた推進管も同様に、ひび割れ発生後のひび割れ幅の低減効果が得られた可能性がある。本検討では、推進管のひび割れ荷重の評価を中心に検討しているが、今後は、鉄筋に導入されるひずみの影響を含めて、ひび割れ幅の低減効果についても検討していきたい。

4.4 破壊荷重

表-2 に、推進管の曲げ耐力試験の結果を示す。いずれの膨張材を用いた推進管においても、JSWASA-2 による推進管 2 種の終局曲げ耐力に相当する荷重：311 kN を載荷した場合でも、破壊は生じなかった。

4.5 曲げ割れ耐力試験の総括

Ex 1 と Ex 2 のいずれの膨張材においても、JSWASA-2 規定の性能を満たす推進管 2 種が製造できることが確認された。また、エトリンガイト系膨張材の Ex 1 に比べて大きな膨張を付与できるエトリンガイト・石灰複合系膨張材の Ex 2 は、ケミカルプレストレスをより効果的に

表-2 推進管の曲げ耐力試験の結果

項目		Ex 1_57	Ex 2_40	Ex 2_50
JSWAS A-2 規定の性能	曲げひび割れ耐力に相当する荷重：207.5 kN における幅 0.05 mm 以上のひび割れの有無	ひび割れ無し		
	終局曲げ耐力に相当する荷重：311 kN における破壊の有無	破壊無し		
その他の 試験結果	幅 0.05 mm 以上のひび割れ荷重 (kN)	225	274	266
	幅 0.05 mm のひび割れよりも細かい初亀裂荷重 (kN)	220	220	220
	ひび割れ荷重と初亀裂荷重の差分 (kN)	5	54	46
	ひび割れ荷重と JSWAS A-2 規定値との比率 (ひび割れ荷重/JSWAS A-2 規定荷重)	1.08	1.32	1.28

導入でき、曲げひび割れ耐力に優れた推進管が製造できる。また、ひび割れ幅の低減効果が得られる可能性がある。そして、少ない膨張材量で経済的に配合設計できる可能性が示唆された。

5. まとめ

- (1) エトリンガイト・石灰複合系膨張材の Ex_2 は、エトリンガイト系膨張材の Ex 1 に比べて、少ない添加量で大きな膨張ひずみを付与し、効果的、かつ、経済的に収縮補償効果を発揮すると考えられる。
- (2) 膨張ひずみが大きいエトリンガイト・石灰複合系膨張材の Ex 2 は、エトリンガイト系膨張材の Ex 1 に比べて、少ない添加量で効率的にケミカルプレストレスを導入できると考えられる。
- (3) いずれの膨張材を用いた推進管においても、推進管 2 種の曲げひび割れ耐力に相当する荷重：207.5 kN 載荷時にひび割れや外観の異常は確認されなかった。寒冷期の過酷な環境条件においても、JSWAS A-2 規定の性能を満たす推進管 2 種が製造できることが確認された。
- (4) エトリンガイト・石灰複合系膨張材の Ex 2 を用いた推進管のひび割れ荷重は、エトリンガイト系膨張材の Ex 1 に比べて大きい結果となった。
- (5) エトリンガイト系膨張材の Ex 1 に比べて大きな膨張を付与できるエトリンガイト・石灰複合系膨張材の Ex 2 は、ケミカルプレストレスをより効果的に導入でき、曲げひび割れ耐力に優れた推進管が製造できる。また、ひび割れ幅の低減効果が得られる可能性がある。そして、少ない膨張材量で経済的に配合設計できる可能性が示唆された。

謝辞：本研究を行うにあたり、中川ヒューム管工業株式会社の皆様にご協力を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 栖原健太郎, 辻幸和, 芦田公伸：膨張コンクリートを用いた鉄筋コンクリートはりのひび割れ幅の低減効果, セメント・コンクリート論文集, No.63, pp.316-323, 2009
- 2) 栖原健太郎, 田所雄治, 柄澤英明, 辻幸和：膨張コンクリートの引張ひずみの終局値に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.172-177, 2012
- 3) 栖原健太郎, 李春鶴, 芦田公伸, 辻幸和：膨張コンクリートを用いた CPC はりの曲げひび割れの評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.229-234, 2009
- 4) 盛岡実, 萩原宏俊, 坂井悦郎, 大門正機：カルシウムサルホアルミネート系膨張材の水和反応, セメント・コンクリート論文集, No.52, pp.2-7, 1998
- 5) 盛岡実, 萩原宏俊, 姜珍圭, 大場陽子, 坂井悦郎, 大門正機：遊離石灰含有量の多いカルシウムサルホアルミネート系膨張材の水和反応, 無機マテリアル, No.7, pp.99-106, 2000
- 6) 盛岡実, 萩原宏俊, 坂井悦郎, 大門正機：膨張材の水和反応と材料設計, セメント・コンクリート論文集, No.54, pp.316-323, 2000
- 7) 前田拓海, 樋口隆行, 荒木昭俊, 保利彰宏：エトリンガイト・石灰複合系膨張材を用いたボックスカルバートの曲げひび割れ耐力に関する検討：コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.76-81, 2023
- 8) 辻幸和：一軸拘束を受けた膨張コンクリートの力学特性, 土木学会論文集, 第 372 号/V-5, pp.149-155, 1986
- 9) 土木学会：膨張コンクリート設計施工指針, コンクリートライブラリー-75, p. 5, pp. 99-100, 1993.
- 10) 栖原健太郎, 辻幸和, 吉野亮悦, 芦田公伸：CPC ボックスカルバートの解析方法の一提案, セメント・コンクリート論文集, No.64, pp.316-322, 2010