

論文 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

前田 拓海*1・樋口 隆行*2・荒木 昭俊*3・保利 彰宏*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それぞれ用いたボックスカルバートの曲げひび割れ発生荷重について比較検討した。いずれの膨張材を用いたボックスカルバートにおいても、JIS A 5372 で規定されるひび割れ荷重を満足し、ひび割れは確認されなかった。エトリンガイト系膨張材に比べて同一の添加量で大きな膨張を付与するエトリンガイト・石灰複合系膨張材は、ケミカルプレストレスが導入されることでボックスカルバートの曲げひび割れ発生荷重が向上した。少ない膨張材量で経済的に曲げひび割れ耐力に優れたボックスカルバートの配合設計が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, ボックスカルバート, ケミカルプレストレス, 曲げひび割れ耐力

1. はじめに

膨張材は、乾燥収縮の抑制やケミカルプレストレスの導入を目的として、汎用的に用いられている。膨張コンクリートを用いた CPC (Chemically Pre-stressed Concrete) 部材は、膨張コンクリートによる膨張を鉄筋が拘束することで、コンクリート内部にケミカルプレストレスによる圧縮応力が導入され、曲げひび割れ耐力が向上する¹⁾²⁾。また、鉄筋にはケミカルプレストレスが導入されることで、曲げひび割れ発生後のひび割れ幅の低減に寄与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系水和物を主要生成物としたエトリンガイト系膨張材や、水酸化カルシウムの生成を主体とした石灰系膨張材、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率を高めたエトリンガイト・石灰複合系の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、経済的な配合設計や、より大きなケミカルプレストレスを導入させた高性能なコンクリート製品の製造に繋がる可能性がある。しかしながら、上述した膨張材について、エトリンガイト系と石灰系の膨張材を用いたコンクリート製品の比較検討例はある⁷⁾⁸⁾ものの、エトリンガイト・石灰複合系

の膨張材を用いたコンクリート製品の曲げひび割れ耐力の影響を詳細に検討した例はない。

そこで本報では、エトリンガイト系膨張材 (CSA) とエトリンガイト・石灰複合系膨張材 (P-CSA) を用いたボックスカルバートを作製し、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)、混和材は高炉スラグ微粉末 (BF, 密度: 2.89 g/cm³, プレーン比表面積: 4,370 cm²/g) を用いた。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。細骨材は茨城県産の陸砂 (S, 表乾密度: 2.61 g/cm³)、粗骨材は茨城県産の碎石 (G, 表乾密度: 2.67 g/cm³, G max: 20 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 I 種を用いた。

表-1 に、コンクリートの配合を示す。設計基準強度 40 N/mm² の配合をベースとして、エトリンガイト系膨

表-1 コンクリートの配合

No.	配合	W/C (%)	W/B (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m ³)						Ad. (B×%)	
					W	C	BF	CSA	P-CSA	S		G
1	CSA 配合	44.3	33.9	40.0	158	357	74	35	—	699	1076	0.6
2	P-CSA 配合	44.3	33.9	40.0	158	357	74	—	35	699	1076	0.6

スランプ: 12.0~15.0±2.5 cm, 空気量: 2.0±1.5%

*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 特殊混和材部 技術・マーケティンググループ 課長 博士 (工学)

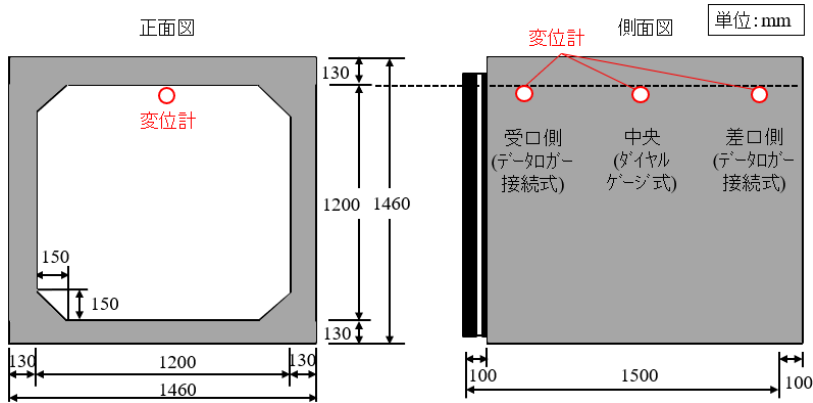


図-1 ボックスカルバートの図面



図-2 ボックスカルバートの写真

張材を用いた CSA 配合とエトリンサイト・石灰複合系膨張材を用いた P-CSA 配合の 2 水準とした。膨張材はセメント置換の内割で 35 kg/m^3 を混和した。

2.2 ボックスカルバートとテストピースの概要

図-1 に、ボックスカルバートの図面と変位計の設置位置、図-2 に、ボックスカルバートの写真をそれぞれ示す。膨張コンクリートを用いて、各配合のボックスカルバートをそれぞれ 2 体ずつ (No.1, および, No.2), 合計 4 体作製した。ボックスカルバートの寸法は、内幅：1,200 mm×内高：1,200 mm×有効長：1,500 mm とした。ボックスカルバートの製造では、膨張コンクリートを打設し、実際のコンクリート工場製品の製造を模擬して蒸気養生を施した後、屋外の製品ヤードにて気中養生を施した。蒸気養生は、コンクリートを打設してから約 3 時間後に開始し、昇温は 1 時間当たり $13.3 \text{ }^\circ\text{C/hr}$ とした。最高温度 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ で 4 時間保持し、自然降温した。材齢 1 日で脱型した後、気中養生を施した。図-3 に、蒸気養生の槽内上部に設置した熱電対で測定した温度履歴を示す。最高温度は $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 程度で管理された。コンクリート打設時の外気温は、 $8\sim 9 \text{ }^\circ\text{C}$ 程度であった。また、ボックスカルバート製造時のコンクリートを用いて、膨張率、圧縮強度、および、拘束条

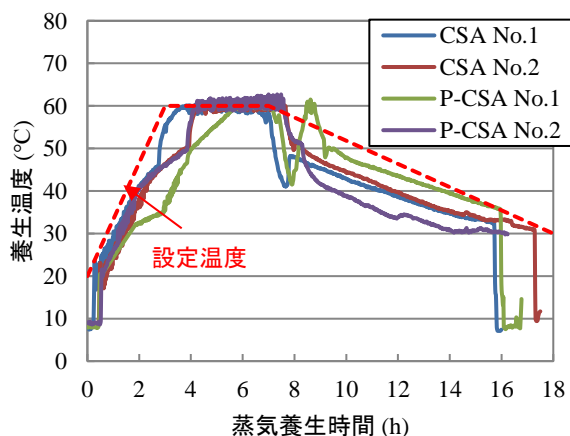


図-3 蒸気養生の温度履歴

件における曲げ強度を測定するためのテストピースを採取し、ボックスカルバートと同様の条件で蒸気養生を施した。気中養生後のボックスカルバートに、測定精度： $1/100 \text{ mm}$ の変位計を設置した。ボックスカルバートの頂版内側に、中央部はダイヤルゲージ式の変位計、受口側と差口側は、データロガー接続式の変位計をそれぞれ設置した。

2.3 テストピースの試験方法

(1) 圧縮強度

JISA 1108 に準じて、コンクリートの圧縮強度を測定した。蒸気養生を施した $\phi 100 \times 200 \text{ mm}$ のテストピースを用いて、材齢 1 日、7 日、および、14 日で圧縮強度を測定した。脱型後、ボックスカルバートと同一の環境条件で気中養生を施した。

(2) 膨張率

JISA 6202 に準じて、コンクリートの膨張率を測定した。蒸気養生を施した $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$ の一軸拘束膨張試験体を用いた。膨張率測定のため、脱型後は、 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 気中養生を施した。

(3) 拘束条件における曲げ強度

膨張率測定後の一軸拘束膨張試験体を転用した。蒸気養生後、材齢 16 日まで気中養生を施した一軸拘束膨張試験体にパイ型変位計を設置し、JISA 1106 に準じて曲げ強度試験を行った。荷重とひび割れ幅を計測し、 0.05 mm 以上のひび割れが計測された荷重を「拘束条件における曲げ強度」として算出した。

2.4 ボックスカルバートの試験方法

出荷材齢に相当する 14 日間以上の気中養生期間を確保し、No.1 のボックスカルバートは材齢 15 日で、No.2 のボックスカルバートは材齢 14 日でそれぞれ曲げ耐力試験を実施した。図-4 に、ボックスカルバートの曲げ耐力試験の載荷方法を示す。

(1) 性能検査

JISA 5372 に準じて、曲げ耐力試験によってボックスカルバートに荷重を載荷し、設置した変位計から、荷

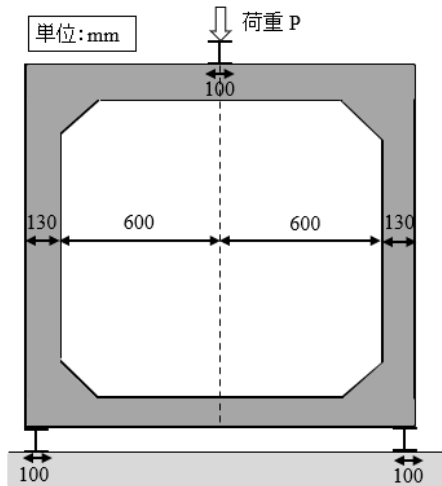


図-4 曲げ耐力試験の荷重方法

重 10 kN 荷重毎 (10~100 kN) のたわみを計測した。また、ひび割れ荷重の規定値 : 70.1 kN/m に相当する曲げ耐力試験の規定荷重 : 105.2 kN (70.1 kN/m × 有効長 : 1.5 m) を上回る 105.5 kN 時点で荷重を一時停止し、幅 0.05 mm を超えるひび割れの有無を確認した。

(2) 曲げひび割れ発生荷重

JISA 5372 に準じて、曲げ耐力試験を実施し、変位計によって計測されたコンクリートのたわみと荷重の関係を整理した。荷重が一時的に小さくなった変曲点を、「曲げひび割れ発生荷重」として判断した。

(3) 破壊荷重

JISA 5372 に準じて、曲げ耐力試験を実施し、コンクリートの破壊によって荷重が増加しなくなった時点の荷重を破壊荷重とした。各配合における No.1 のボックスカルバートの 1 体ずつ試験した。

3. テストピースの試験結果および考察

3.1 膨張率

図-5 に、拘束膨張試験による膨張率の結果を示す。P-CSA 配合の最大膨張率 (材齢 4 日) は、CSA 配合に比べて大きい結果となった。また、拘束条件における曲げ強度を測定した材齢 16 日時点では、CSA 配合は乾燥収縮によって膨張ひずみが殆ど残存していないのに対して、P-CSA 配合は 160×10^{-6} 程度の膨張ひずみが導入されていた。35 kg/m³ の同一の単位膨張材量では、エトリンガイト・石灰複合系膨張材を用いた P-CSA 配合は、CSA 配合に比べて大きな膨張を付与し、より効果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-6 に、圧縮強度を示す。いずれの膨張材を用いた場合でも、出荷材齢に相当する材齢 14 日の圧縮強度は、設計基準強度 : 40 N/mm² を上回った。しかし、P-CSA 配合の圧縮強度は CSA 配合よりも小さい結果を示し

た。無拘束条件下で大きな膨張が付与された影響と考えられるが、鉄筋拘束された条件においては、一軸拘束膨張試験体の膨張率が 1000×10^{-6} 以下では強度低下が生じないことが報告^{9),10)}されているため、実物のボックスカルバートへの影響は小さいと考えられる。

単位膨張材量が 35 kg/m³ の本試験においては強度低下の影響は小さいものの、大きな膨張を発現するエトリンガイト・石灰複合系の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 拘束条件における曲げ強度

図-7 に、拘束条件における曲げ強度を示す。P-CSA 配合の曲げ強度は、CSA 配合に比べて高い結果となった。蒸気養生後、CSA 配合は気中養生による乾燥収縮の影響で膨張ひずみが殆ど残存していないのに対して、P-CSA 配合は 160×10^{-6} 程度の膨張ひずみが導入されていた。より大きな膨張を付与した P-CSA 配合の方が、CSA 配合に比べてケミカルプレストレスによる圧縮応力が多く導入されたため、拘束条件における曲げ強度が大きくなったと考えられる。

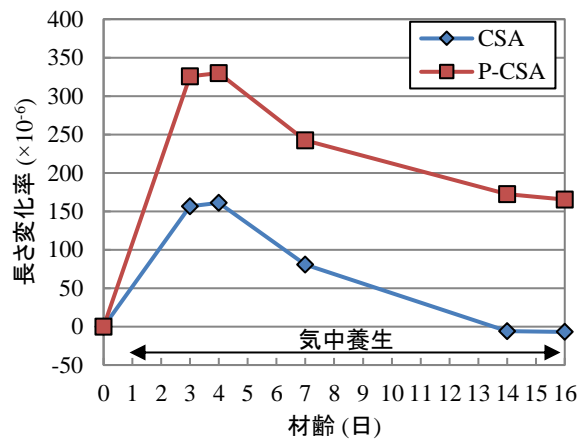


図-5 膨張率

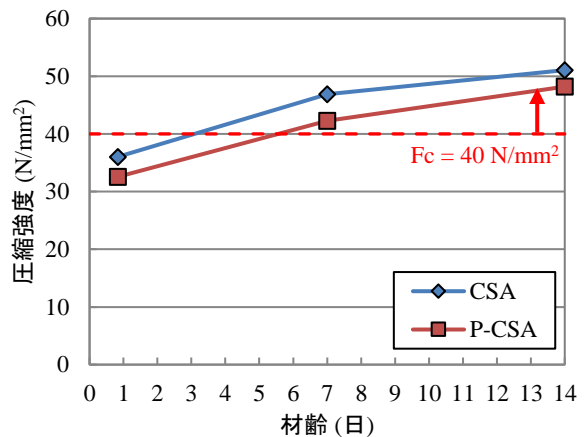


図-6 圧縮強度

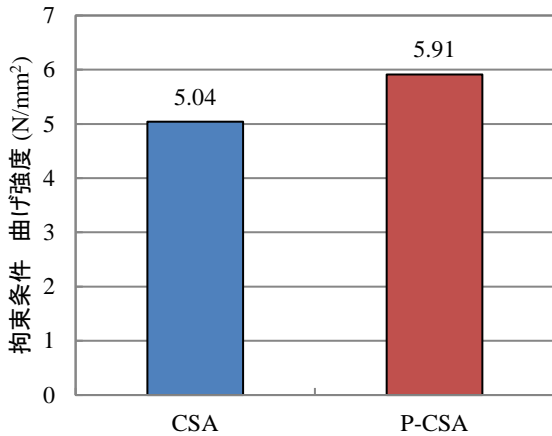


図-7 拘束条件における曲げ強度 (材齢 16 日)

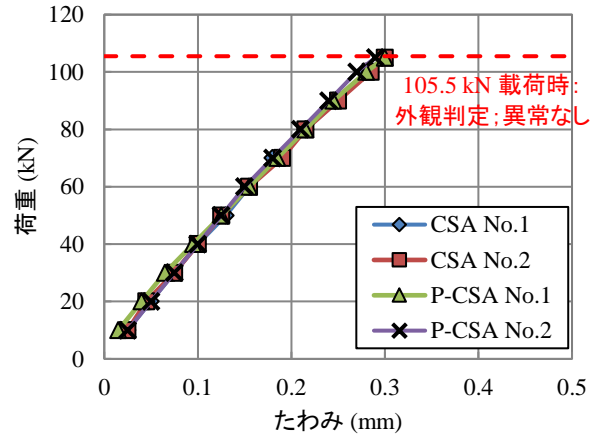


図-9 性能検査

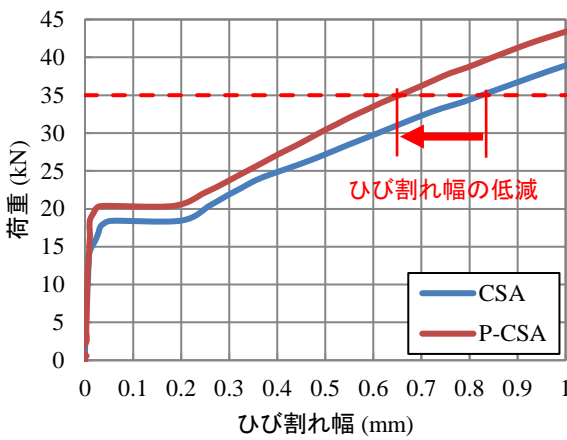


図-8 一軸拘束膨張試験体の荷重とひび割れ幅の関係

図-8 に、一軸拘束膨張試験体の荷重とひび割れ幅の関係を示す。同一の荷重が生じた 35 kN 時点では、P-CSA 配合のひび割れ幅が、CSA 配合に比べて小さいことが確認された。P-CSA 配合は大きな膨張が付与されることで、曲げひび割れ発生後のひび割れ幅の低減が生じたと考えられる。

4. ボックスカルバートの試験結果および考察

4.1 性能検査

図-9 に、性能検査の結果を示す。ボックスカルバートの頂版内側の中央部に設置した変位計 (図-1) を用いて、荷重とたわみの関係を整理した。ボックスカルバート RC-2 種 (1,200 × 1,200 × 1,500 mm) の規定荷重を上回る 105.5 kN の荷重を載荷した場合でも、ボックスカルバートの外観に異常やひび割れは確認されなかった。また、いずれの水準においても、105.5 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。

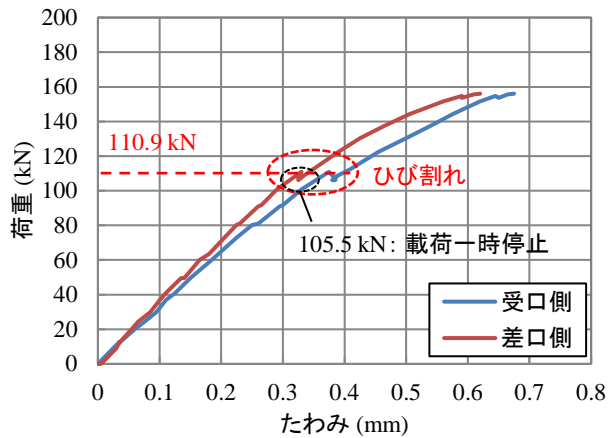
4.2 曲げひび割れ発生荷重

図-10 に、ボックスカルバートの荷重とたわみの関係、図-11 に、2 体のボックスカルバートにおける曲

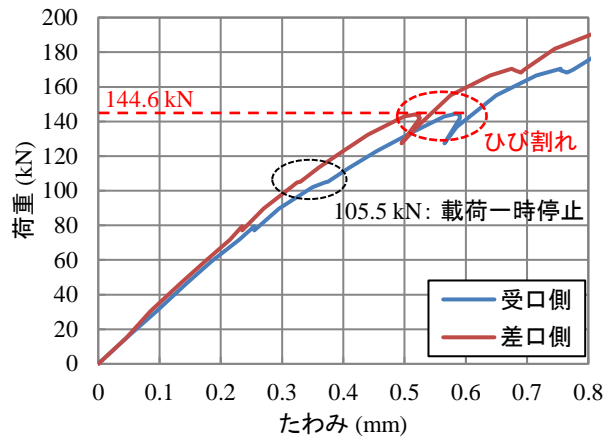
げひび割れ発生荷重の平均値をそれぞれ示す。たわみは、ボックスカルバートの受口側と差口側に設置した変位計の結果を抽出した。荷重が一時的に小さくなった変曲点を、曲げひび割れ発生荷重として判断した。なお、曲げひび割れ発生荷重は、目視によるひび割れ確認の結果も踏まえて判断した。

ボックスカルバートの曲げひび割れ発生荷重は、CSA 配合の No.1 で 110.9 kN、No.2 で 144.6 kN、P-CSA 配合の No.1 で 164.8 kN、No.2 で 136.1 kN となった。いずれの膨張材を用いたボックスカルバートにおいても、曲げ耐力試験の規定荷重である 105.2 kN 以上を満足した。また、P-CSA 配合における 2 体のボックスカルバートの曲げひび割れ発生荷重の平均値は、CSA 配合に比べて大きい結果となった。ここで、テストピースの試験結果を踏まえると、P-CSA 配合は、CSA 配合に比較して大きな膨張を付与することで、よりケミカルプレストレスが導入され、拘束条件における曲げ強度が向上したと考えられる。ボックスカルバートの曲げひび割れ発生荷重においても、テストピースの試験結果と同様に、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が発現されたと推察される。

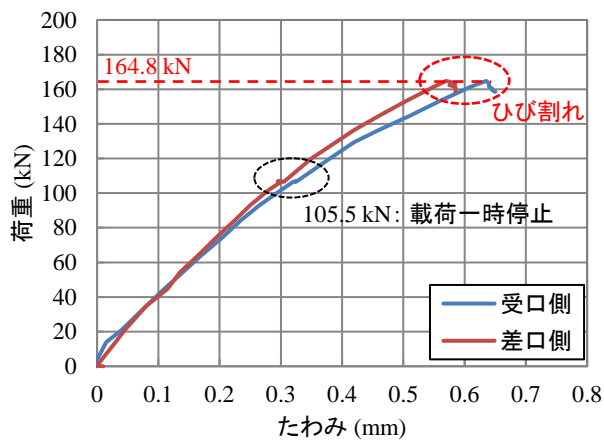
また、既往の文献¹⁾では、膨張コンクリートを用いたボックスカルバートは、鉄筋に導入されたケミカルプレストレスインによって、曲げひび割れ発生後のひび割れ幅が低減されることが報告されており、P-CSA 配合のテストピースにおいても同様の効果が確認されている (図-8)。このことから、エトリンサイト・石灰複合系膨張材を用いたボックスカルバートも同様に、曲げひび割れ発生後のひび割れ幅の抑制効果が得られる可能性がある。本検討では、ボックスカルバートのたわみの計測による曲げひび割れ発生荷重の評価に主眼を置いているが、今後は、鉄筋に導入されるひずみの影響を含めて、ひび割れ幅の低減効果についても検討していきたい。



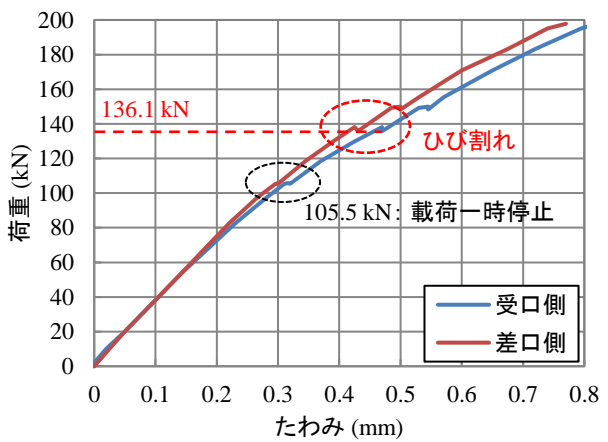
(a) CSA_No.1



(b) CSA_No.2



(c) P-CSA_No.1



(d) P-CSA_No.2

図-10 ボックスカルバートの荷重とたわみの関係

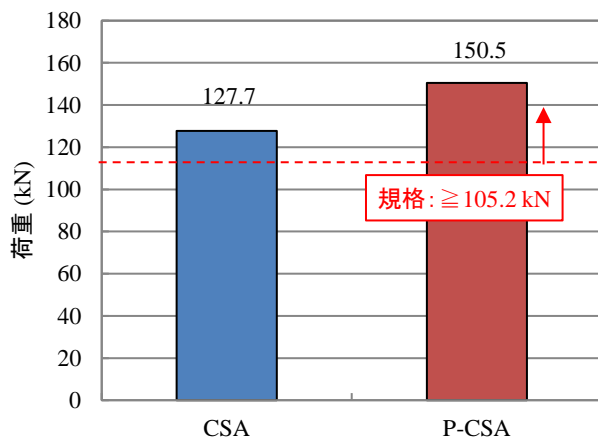


図-11 曲げひび割れ発生荷重

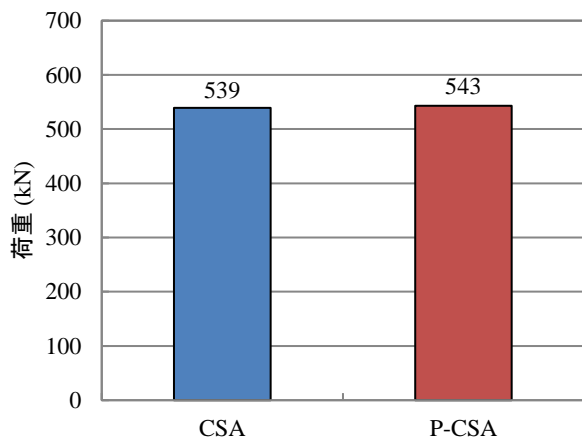


図-12 破壊荷重

4.3 破壊荷重

図-12に、破壊荷重を示す。いずれのボックスカルバートにおいても、膨張材の種類に関わらず、破壊荷重に大きな違いは確認されなかった。

4.4 曲げ耐力試験の総括

表-2に、ボックスカルバートの曲げ耐力試験の結果を示す。CSA 配合と P-CSA 配合のいずれにおいて

も、JISA 5372 規定の性能を満たすボックスカルバート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ボックスカルバートが製造できる。そして、同一の曲げひび割れ耐力を有するボックスカルバートを製造す

表-2 ボックスカルバートの曲げ耐力試験の結果

項目		単位	CSA 配合			P-CSA 配合		
			No.1	No.2	Ave.	No.1	No.2	Ave.
JIS A 5372 規定の性能	規定荷重 (105.2 kN) における 0.05 mm 以上のひび割れの有無	—	ひび割れ無し					
その他の 試験結果	曲げひび割れ発生荷重	kN	110.9	144.6	127.7	164.8	136.1	150.5
	破壊荷重	kN	539	—	—	543	—	—
	曲げひび割れ発生荷重/規定荷重	—	1.05	1.37	1.21	1.57	1.29	1.43

る場合には、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。要求物性を満たし、かつ、経済性に優れた膨張コンクリートの最適な配合設計については、今後、詳細に検討していきたい。

5. まとめ

- (1) 同一の単位膨張材量の場合には、エトリンガイト・石灰複合系膨張材を用いた P-CSA 配合は、CSA 配合に比べて大きな膨張を付与し、より効果的に収縮補償効果を発揮すると考えられる。
- (2) P-CSA 配合の拘束条件における曲げ強度は、CSA 配合に比べて高い結果となった。より大きな膨張を付与した P-CSA 配合の方がケミカルプレストレスによる圧縮応力が多く導入された影響と考えられる。
- (3) いずれの膨張材を用いたボックスカルバートにおいても、曲げ耐力試験の規定荷重を上回る 105.5 kN の荷重を載荷した場合でも、異常やひび割れは確認されず、JIS A 5372 規定の性能を満たすボックスカルバートが製造できることが確認された。
- (4) 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ボックスカルバートが製造できる。そして、同一の曲げひび割れ耐力を有するボックスカルバートを製造する場合には、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、バルテクス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, 田所雅治, 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, 2012.7
- 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, 2009.7
- 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, 2000.11
- 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) 佐久間隆司, 鈴木脩, 佐竹紳也, 渡邊斉: 早強型膨張材の諸特性とコンクリート製品への適用性, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.131-136, 2003.7
- 8) 鈴木脩, 松村武文, 橋本哲夫, 渡邊斉: 早強型膨張材の遠心力鉄筋コンクリート管への適用に関する基礎研究, コンクリート工学論文集, 15 巻, 1 号, pp.23-33, 2004.7
- 9) 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, 1986.8
- 10) 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, 1993.7
- 11) 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