

論文 収縮低減材を用いたコンクリートのひび割れ抵抗性に関する実験的検討

小林 俊秋*1・俵 道和*2・金田 憲太郎*3・來徳 芳明*3

要旨: 本稿では、収縮低減材を用いたコンクリートのひび割れ抵抗性について報告する。収縮低減材を用いたコンクリートの拘束ひび割れ試験を行った結果、コンクリートのひび割れ発生日数は、膨張材を用いることにより最も大きく向上した。さらに収縮低減材の組合せ、乾燥開始材齢について検討を行なった結果、膨張材および塗布型収縮低減剤を組み合わせて用いたコンクリートのひび割れ抵抗性が最も大きく向上すること、乾燥開始材齢を7日から14日とすることにより、膨張材または収縮低減型 AE 減水剤を用いたコンクリートのひび割れ抵抗性が大きく向上することがわかった。

キーワード: 塗布型収縮低減剤, 収縮低減型 AE 減水剤, 膨張材, 乾燥開始材齢, 拘束ひび割れ試験

1. はじめに

環境対応型社会の実現に向けて、コンクリート構造物の長寿命化の要求が高まってきている。コンクリート構造物に発生する収縮ひび割れは、鉄筋腐食を誘発するなど、構造物の耐久性や安全性を低下させる要因となる。したがって、収縮ひび割れの発生を低減させる対策が重要であるといえる。ひび割れを抑制する対策として、膨張材や収縮低減剤などを用いて収縮量を低減する方法や補強鉄筋や繊維材料を用いてひび割れを分散させて制御する方法が有効とされている。しかし、制御方法や用いる材料の種類、使用量および養生方法によって効果が異なる。また、ひび割れを抑制するための新技術として収縮低減タイプの減水剤、塗布タイプの収縮低減剤等も開発され使用実績も増えてきている。これらの対策をどのように組み合わせた場合に有効性や施工性および経済性を満たす最適なコンクリートが得られるかは不明である。これらの対策の有効性や施工性および経済性を満たすためには、その挙動を把握し、費用対効果を考慮した材料設計をすることが必要である。

本研究では、基礎実験として拘束ひび割れ試験を行い、収縮低減材の種類、その組合せおよび乾燥開始材齢を変化させた場合の収縮ひび割れ抵抗性に与える影響について定量的な評価を行った。

2. 実験概要

2.1 要因と水準

要因と水準を表-1 に示す。乾燥収縮を低減する材料として有効とされる収縮低減剤、膨張材を選定した。また、膨張材と収縮低減剤は併用されるケースも多い。両

者の作用機構は全く異なるために、併用した場合の効果について確認するため、組み合わせを選定した。収縮低減剤を用いたコンクリートの乾燥の影響を確認するために乾燥開始材齢を要因とした。

表-1 要因と水準

要因	水準
収縮低減材の種類	塗布型収縮低減剤 (CS), 収縮低減型 AE 減水剤(AESR), 膨張材 (EX)
収縮低減材の組合せ	AESR+CS, CS+EX, AESR+EX
乾燥開始材齢	7日, 14日

2.2 使用材料および配合

使用材料を表-2 に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを用い、収縮低減材としては、膨張材、収縮低減タイプの AE 減水剤および塗布型収縮低減剤を選定

表-2 使用材料

材料名	記号	種類・産地および物性値
セメント	N	普通ポルトランドセメント, 密度: 3.16 g/cm ³
細骨材	S	西茨城郡岩瀬町飯淵産砕砂, 密度: 2.63 g/cm ³
粗骨材	G	西茨城郡岩瀬町飯淵産 2005 砕石, 密度: 2.61 g/cm ³
AE 減水剤	AE	AE 減水剤, リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体
収縮低減型 AE 減水剤	AESR	収縮低減型 AE 減水剤, 変性リグニンスルホン酸化合物, ポリカルボン酸コポリマーとポリエーテル誘導体の複合物
膨張材	EX	低添加型石灰系膨張材, 密度: 3.15 g/cm ³
塗布型収縮低減剤	CS	低級アルコールのアルキレンオキシサイド付加物

*1 オリエンタル白石 (株) 技術研究所主任研究員 (正会員)

*2 オリエンタル白石 (株) 技術研究所主任研究員 工修 (正会員)

*3 オリエンタル白石 (株) 福岡支店施工・技術部土木工事チーム 工事主任

表-3 コンクリートの配合

配合記号	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	SP/P (C+E) (%)	AE剤 (%)	消泡剤 (%)	単位量 (kg/m ³)							
							W	C	E	S	G	SP	AE剤	消泡剤
PL	55.0	4.5	48.0	0.70	0.003	0.000	170	309	0	877	951	2.164	0.009	0.000
EX	55.0	4.5	48.0	0.70	0.003	0.000	170	289	20	877	951	2.164	0.009	0.000
AESR	55.0	4.5	48.0	1.40	0.008	0.001	170	309	0	877	951	4.327	0.025	0.003
EX+AESR	55.0	4.5	48.0	1.40	0.008	0.001	170	289	20	877	951	4.327	0.025	0.003

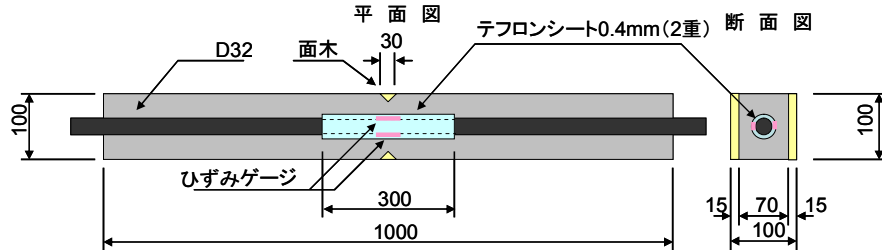


図-1 拘束ひび割れ試験体

表-4 試験概要

試験項目	試験方法	測定間隔	養生方法
拘束ひび割れ	JCI-SAS3 に準拠。100×100×1000mm の試験体を用いて、鋼材ひずみ、ひび割れ幅およびひび割れ発生時期を測定	鋼材ひずみ：1 時間 ひび割れ幅：試験終了時	コンクリート打設後、20℃、60%で湿潤養生を行い、所定乾燥開始材齢（7、14 日）に型枠を脱型し、その後、20℃、60%で気中養生する。
乾燥収縮	JIS A1129-2 に準拠。100×100×400mm	7、14、28、35、56、91、182 日	拘束ひび割れ試験と同一
圧縮強度・弾性係数	JIS A1108 に準拠	乾燥開始材齢、28 日、91 日およびひび割れ発生時	拘束ひび割れ試験と同一
		材齢 28 日	水中養生
割裂引張強度	JIS A1113 に準拠	乾燥開始材齢、28 日、91 日およびひび割れ発生時	拘束ひび割れ試験と同一
		材齢 28 日	水中養生

し、収縮低減材を単体で使用した場合と組み合わせた場合について検討を行った。表-3 にコンクリートの配合を示す。水セメント比を 55%とし、目標スランプを 10.0 ± 2.5cm、目標空気量を 4.5 ± 1.5%とした。配合記号 PL、EX には、AE 減水剤、AESR、EX+AESR には、収縮低減型 AE 減水剤を用いた。

2.3 養生

コンクリートの製造と打込みは、温度 20℃、湿度 60% の恒温恒湿室で行った。その後の養生については、全ての配合について同じ 20℃、湿度 60% の恒温恒湿室で養生マットに散水シートで覆い養生を行った。乾燥開始材齢 7 日の試験体は 7 日、乾燥開始材齢 14 日の試験体は 14 日まで、散水養生期間とした。

2.4 試験概要

拘束ひび割れ試験は、「混和材料から見た収縮ひび割れ低減と耐久性改善研究委員会報告書」¹⁾ の試験方法を参考にした。試験体形状を図-1、試験概要を表-4 に示す。同一条件の試験体本数は、拘束ひび割れ試験体は 3 本、乾燥収縮試験体は 2 本、圧縮強度・弾性係数および割裂引張強度は 3 本とした。図-1 に示すように 100×100×1000mm のコンクリートに D32 (SD345) の拘束鉄筋

を埋設した拘束ひび割れ試験体を用いて、ひび割れ対策の有効性を検討した。鉄筋ひずみを測定するため鉄筋中央部に表・裏 2 枚のひずみゲージを貼付した。鉄筋中央部に鉄筋とコンクリートの付着を除去するためにテフロンシート 0.4mm を 2 重に巻き付けた。試験体中央部に断面欠損率 30% のひび割れ誘発目地を設けた。試験体の脱枠は、乾燥開始材齢の時点とし、乾燥開始材齢まで型枠を存置した。脱枠後の乾燥条件は、試験体 6 面全面乾燥とした。保管期間の試験体周辺の温度、湿度条件は 20 ± 5℃、相対湿度 60 ± 5%とした。本試験で 30% のひび割れ誘発目地を設けた理由は、予備試験を実施し、断面欠損率を 10、15、20 および 25% と設定し膨張材を使用したコンクリートの拘束ひび割れ試験を実施したが、いずれの場合もひび割れが発生しなかったために、本試験では断面欠損率 30% となるひび割れ誘発目地を設置することとした。塗布型収縮低減剤は、圧縮強度試験体、乾燥収縮および拘束ひび割れ試験体ともに脱枠直後全面に 150g/m² 塗布した。なお、本実験ではひび割れ低減対策を施した試験体に短期間でひび割れを発生させるために、ひび割れ誘発目地を設置した。したがって、本実験のひび割れ発生日数は、本実験条件の範囲内における数値である。

3. 実験結果

3.1 強度試験

(1) 圧縮強度

圧縮強度の経時変化を図-2に示す。乾燥開始材齢7, 14日の圧縮強度は、収縮低減材の種類、その組合せによらずに概ね同等の傾向を示した。しかし、乾燥開始材齢7日のEX+AESRの圧縮強度は、他と比較して強度発現が遅く、材齢28日までに8N/mm²程度の差となった。

(2) 割裂引張強度

割裂引張強度の経時変化を図-3に示す。乾燥開始材齢7日のEX, AESRの割裂引張強度は、他と比較して強度発現が遅く、材齢28日までに0.4N/mm²程度の差とな

った。その後、EXの割裂引張強度は、他と比較して強度発現が増加し、材齢91日までに、0.7N/mm²程度の差となった。乾燥開始材齢7日のAESR+CSの割裂引張強度は、他と比較して強度発現が遅く、材齢28日までに1.0N/mm²程度の差となった。その後、AESR+CSの割裂引張強度は、他と比較して強度発現が増加し、材齢91日までに、PLと同程度となった。乾燥開始材齢14日のAESR, CSの割裂引張強度は、他と比較して強度発現が遅く、材齢28日までに0.5N/mm²程度の差となった。その後、AESR, CSの割裂引張強度は、他と比較して強度発現が増加し、材齢91日までに、PLと同程度となった。AESRを用いたコンクリートの割裂引張強度は、他と比較して強度発現が遅延する傾向が確認された。

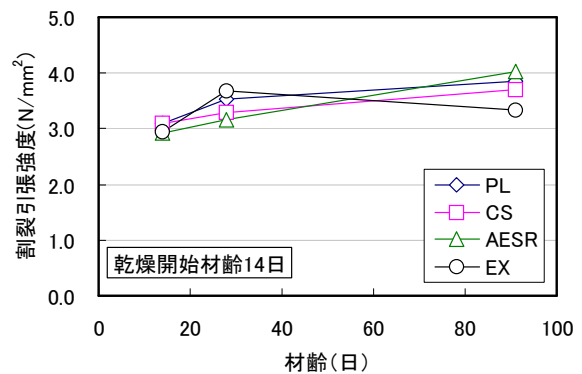
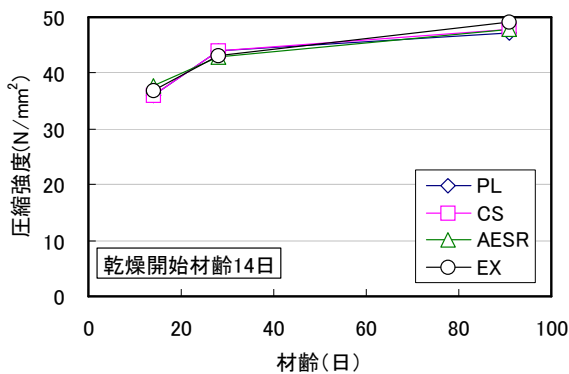
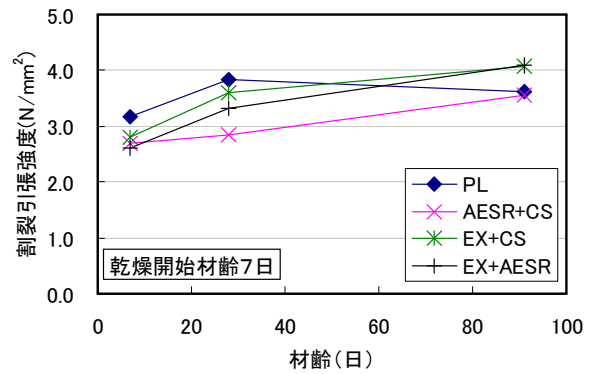
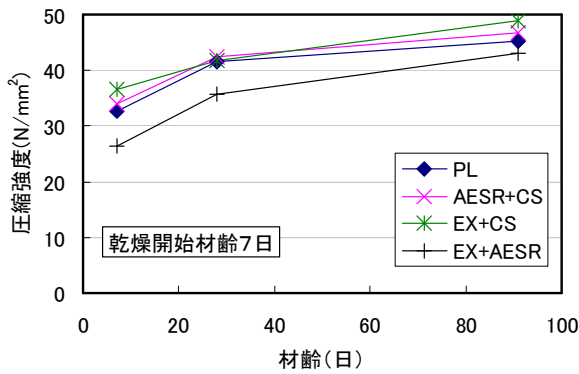
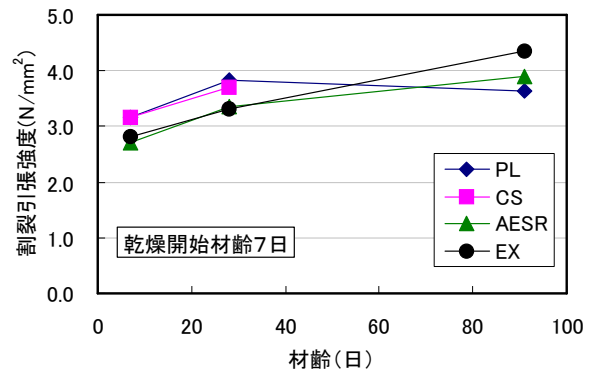
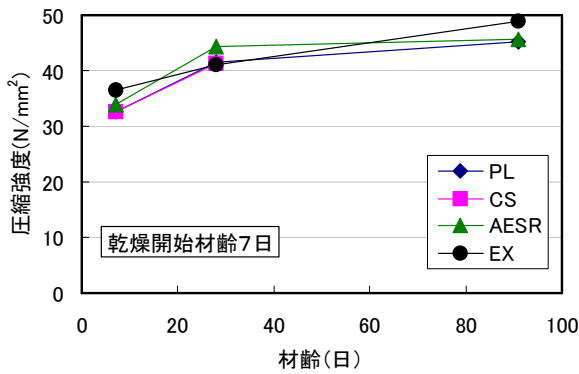


図-2 圧縮強度の経時変化

図-3 割裂引張強度の経時変化

(3) 静弾性係数

静弾性係数の経時変化を図-4に示す。乾燥開始材齢7日のEX, AESRの静弾性係数は、他と比較して発現が早く、材齢28日までに 3.0kN/mm^2 程度の差となった。乾燥開始材齢7日のEX+CS, AESR+CSの静弾性係数は、他と比較して発現が早く、材齢28日までに 3.0kN/mm^2 程度の差となった。乾燥開始材齢14日のEXの静弾性係数は、他と比較して発現が早く、材齢28日までに 3.0kN/mm^2 程度の差となった。その後、EXの静弾性係数は、他と比較して同程度発現が増加し、材齢91日までに、 5.0kN/mm^2 程度の差となった。AESR, EXを用いたコンクリートの静弾性係数は、他と比較して発現が促進する傾向が確認された。

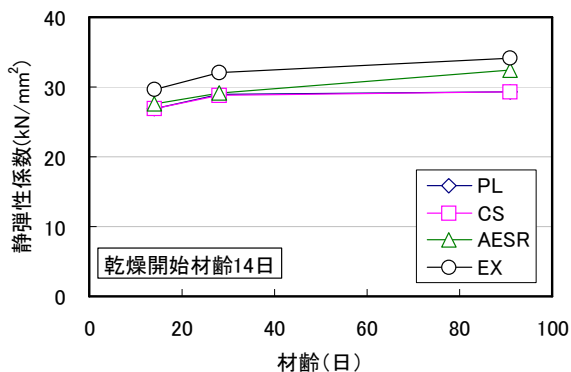
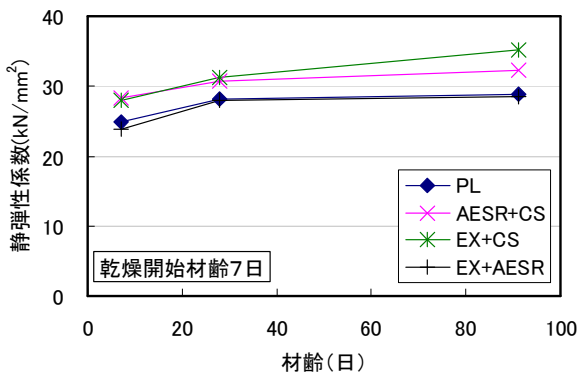
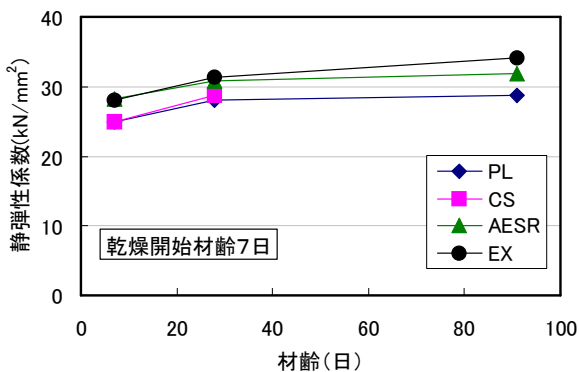


図-4 静弾性係数の経時変化

3.2 乾燥収縮試験

乾燥収縮ひずみの経時変化を図-5に示す。乾燥開始材齢7日の乾燥収縮ひずみの低減効果は、大きい順にEX > AESR > CS > PLとなり、EXが 190×10^{-6} 程度と最も大きかった。収縮低減材の組合せの収縮低減効果は、大きい順にEX+CS > EX+AESR > AESR+CS > PLとなり、EX+CSが 220×10^{-6} 程度と最も大きかった。乾燥開始材齢14日の収縮低減材の収縮低減効果は、大きい順にAESR = EX > PL > CSとなり、AESR = EXが 130×10^{-6} 程度と最も大きかった。乾燥開始材齢の増加に伴い、AESRの収縮低減効果は増加し、CSの収縮低減効果は減少した。AESR, EXを用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの低減効果は、他と比較して大きい傾向が確認された。

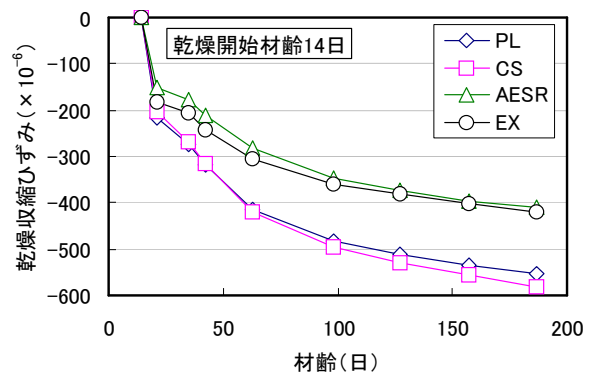
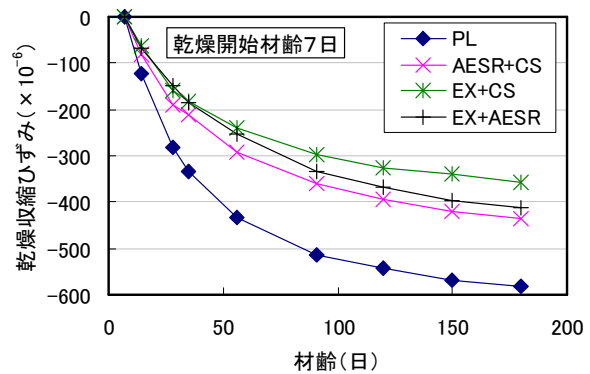
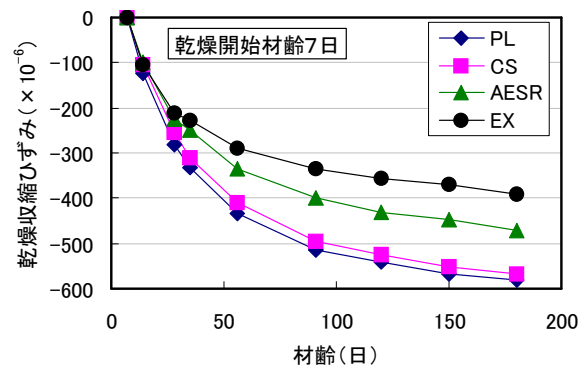


図-5 乾燥収縮ひずみの経時変化

3.3 拘束ひび割れ試験

(1) 乾燥開始材齢 7 日、収縮低減材を変えた場合

乾燥開始材齢 7 日で、収縮低減材を変えた場合の拘束応力の経時変化を図-6 に示す。コンクリートの拘束応力は、鋼材中央部に貼付した表・裏 2 枚のひずみゲージによる鋼材のひずみ、コンクリートと鋼材の断面積比、鋼材の弾性係数から算出した。図-6 より、ひび割れ発生日数は、大きい順に $EX > CS > AESR > PL$ となり、EX が 128 日と最も大きくひび割れ抵抗性が向上した。次に CS が 33 日、AESR が 25 日となり PL の 14 日に比べてひび割れ抵抗性が向上した。図-5 より拘束応力の発現速度と乾燥収縮ひずみの低減効果との間には負の相関が認められた。一方、ひび割れ発生日数と乾燥収縮ひずみの低減効果との間では AESR と CS の関係が入れ替わっている。AESR は、CS に比べて乾燥収縮ひずみの低減効果が大きい、ひび割れ発生日数は小さい。この理由は、AESR の割裂引張強度が、CS に比べて小さく、ひび割れ発生の抵抗性が減少したためである。収縮低減剤を添加すれば、養生中の吸水が少なくなり、水和率が劣って、硬化後の組織を多少粗くする。そのため、強度に若干の悪影響を及ぼすことが報告されている²⁾。また、拘束ひび割れ試験体は、実構造物と比べて、部材寸法・形状、体積表面積比から乾燥の影響が大きく作用する。その結果、AESR を用いたコンクリートの強度発現が遅延したと考えられる。塗布タイプ収縮低減剤を塗布したコンクリートは初期材齢の優れた水分保持性能によって養生効果を発揮し、空隙構造は緻密になるため³⁾、強度が発現したと考えられる。さらに、AESR の弾性係数が、CS に比べて大きく拘束応力を増加させひび割れ発生の誘発を高めたと考えられる。

(2) 乾燥開始材齢 7 日、収縮低減材の組合せを変えた場合

乾燥開始材齢 7 日で、収縮低減材の組合せを変えた場

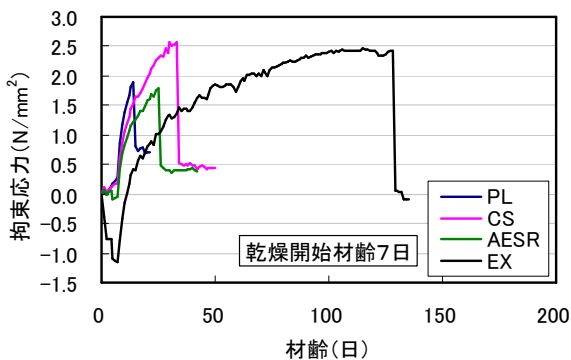


図-6 拘束応力の経時変化
乾燥開始材齢 7 日、収縮低減材を変えた場合

合の拘束応力の経時変化を図-7 に示す。図-7 より、ひび割れ発生日数は、大きい順に $EX+CS > EX+AESR > AESR+CS > PL$ となり、EX+CS が 183 日と最も大きくひび割れ抵抗性が向上した。次に EX+AESR が 98 日、AESR+CS が 43 日となり PL の 14 日に比べてひび割れ抵抗性が向上した。収縮低減材を単体で用いるコンクリートに比べて収縮低減材を組合せて用いたコンクリートのひび割れ抵抗性が大幅に向上することがわかった。しかし、AESR を組み合わせたコンクリートはひび割れ抵抗性が低下した。図-5 より、EX+CS、EX+AESR、LSB+AESR は、乾燥収縮ひずみの低減効果が同程度であるにもかかわらず、ひび割れ発生日数では、EX+CS に比較して EX+AESR、AESR+CS は小さな値を示した。この理由については、次のことが考えられる。図-3 より、割裂引張強度は、AESR+CS が最も小さく、次に EX+AESR が小さく、ひび割れ発生の抵抗性が減少した。さらに、図-4 より、EX+CS、AESR+CS の弾性係数は、EX+AESR に比べて大きく拘束応力を増加させひび割れ発生の誘発を高めたと考えられる。

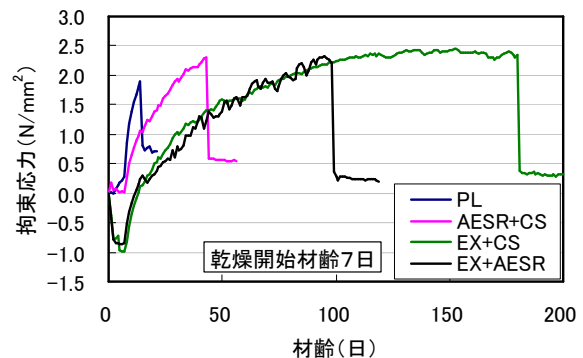


図-7 拘束応力の経時変化
乾燥開始材齢 7 日、収縮低減材の組合せを変えた場合

(3) 乾燥開始材齢 14 日、収縮低減材を変えた場合

乾燥開始材齢 14 日で、収縮低減材を変えた場合の拘束応力の経時変化を図-8 に示す。図-8 より、ひび割れ発生日数は、大きい順に $EX > AESR > CS > PL$ となり、EX が 159 日と最も大きくひび割れ抵抗性が向上した。次に AESR が 48 日、CS が 39 日となり PL の 24 日に比べてひび割れ抵抗性が向上した。これはセメントの水和に必要な水分の供給が乾燥開始材齢の増加により保持されたためであると考えられる。乾燥開始材齢 7 日と 14 日の間では AESR と CS の関係が入れ替わっている。乾燥開始材齢 7 日では AESR のひび割れ発生日数は、CS に比べて小さい。一方、乾燥開始材齢 14 日では AESR のひび割れ発生日数は、CS に比べて大きい。CS は、その他の収縮低減材に比べて乾燥開始材齢の増加に伴うひび割れ

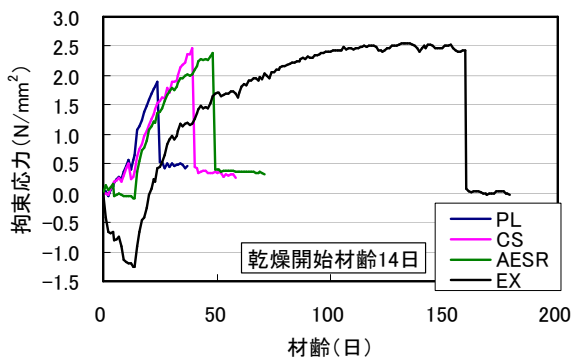


図-8 拘束応力の経時変化
乾燥開始材齢 14 日，収縮低減材を変えた場合

発生日数の増加する効果が小さい。CS を塗布したコンクリートの水分保持性能が，乾燥開始材齢の増加により，相殺されたためであると考えられる。養生中の吸水が少なくなり，水和率が劣って，強度発現が遅延した AESR を用いたコンクリートは，乾燥開始材齢の増加により大幅にひび割れ抵抗性が向上したと考えられる。一方，図-5 より AESR，EX の乾燥収縮ひずみの低減効果の差が小さいにもかかわらず，AESR，EX のひび割れ発生日数では，大きな差を示した。この理由については，図-3 より初期材齢における AESR の割裂引張強度が最も小さく，ひび割れ発生の抵抗性が減少したためである。

(4) 収縮応力強度比

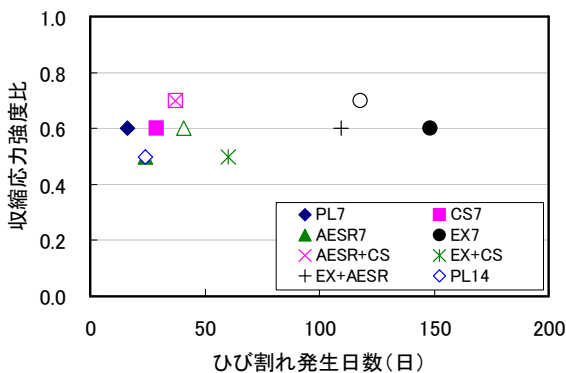


図-9 収縮応力強度比とひび割れ発生日数

乾燥開始材齢 7，14 日で，収縮低減材およびその組合せを変えた場合の収縮応力強度比（拘束応力／割裂引張強度）とひび割れ発生日数の関係を図-9 に示す。収縮応力強度比は 0.5～0.7 の範囲になった。一般に，コンクリートのひび割れは引張強度の 0.7 程度で発生し，またひび割れ発生日数が遅くなるほどその値は大きくなる傾向がある⁴⁾。しかし本実験では，収縮応力強度比とひび割れ発生日数に明確な相関は認められなかった。

4. まとめ

収縮低減材を用いたコンクリートの拘束ひび割れ試験を行い，ひび割れ抵抗性について検討を行った。本実験の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) 乾燥開始材齢 7 日で，収縮低減材を変えた場合，ひび割れ発生日数は，大きい順に EX>CS>AESR>PL となり，EX が 128 日と最も大きくひび割れ抵抗性が向上した。
- (2) 乾燥開始材齢 7 日で，収縮低減材の組合せを変えた場合，ひび割れ発生日数は，大きい順に EX+CS>EX+AESR>AESR+CS>PL となり，EX+CS が 183 日と最も大きくひび割れ抵抗性が向上した。
- (3) 乾燥開始材齢 14 日で，収縮低減材を変えた場合，ひび割れ発生日数は，ひび割れ発生日数は，大きい順に EX>AESR>CS>PL となり，EX が 159 日と最も大きくひび割れ抵抗性が向上した。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会，混和材料から見た収縮ひび割れ低減と耐久性改善研究委員会報告書，pp.199-208，2010.9
- 2) 張英華，張金喜，藤原忠司：有機系収縮低減剤を用いた硬化ペーストの長さ変化と微細構造，コンクリート工学年次論文集，vol.24，No.1，pp.189-194，2002
- 3) 郭度連，花田達雄，杉山彰徳：塗布タイプ収縮低減剤を用いたコンクリートの性能向上，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.632-636，2009
- 4) 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メカニズムと対策技術の現状－，2003.5