

論文 膨張コンクリートによるひび割れ低減効果の定量評価

三谷 裕二*1・石井 祐輔*1・谷村 充*2・丸山 一平*3

要旨: コンクリート内部に鉄筋を配置した一軸拘束ひび割れ試験より、膨張コンクリートと普通コンクリートのひび割れ性状を比較し、膨張コンクリートの収縮ひび割れ低減効果を定量的に検討した。その結果、膨張コンクリートには、ひび割れ本数・ひび割れ係数の明らかな低減効果があることを確認した。また、膨張コンクリートによるひび割れの低減効果は、普通コンクリートの乾燥収縮ひずみに対して、乾燥収縮ひずみの低減分に初期の膨張ひずみ分として $100\sim 150\times 10^{-6}$ 程度の低減量を加味することで概ね評価できる可能性を示した。

キーワード: 膨張材, 膨張コンクリート, 乾燥収縮, 拘束ひび割れ試験, 収縮ひび割れ

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の高耐久化の観点から、収縮ひび割れ制御への関心が高まり、乾燥収縮量が規定化される趨勢にある。

一方、材料面からの収縮ひび割れ低減策として、膨張材が広く利用されており、その効果についても経験的には認知されている。しかしながら、ひび割れ制御を合理的に行う上では、膨張材の効果をより定量的に示すことが求められている。とりわけ、JIS A 1129 試験のように、無拘束試験体より得られた乾燥収縮ひずみに対して、膨張材の効果を適切に考慮する方法が求められている。

本研究では、コンクリート内部に鉄筋を配置することにより、ひび割れの分散性を評価できる一軸拘束ひび割れ試験体を用いて、膨張コンクリートおよび普通コンクリートのひび割れ性状(本数・幅)を比較し、膨張コンクリートの収縮ひび割れ低減効果を実験的に把握した。さらに、ひび割れ本数およびひび割れ係数と無拘束試験体で測定した乾燥収縮ひずみの関係より、普通コンクリートの乾燥収縮ひずみに対する膨張材の収縮低減効果を定量的に評価した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配(調)合

表-1に使用材料、表-2にコンクリートの配(調)合を示す。粗骨材には、コンクリートの乾燥収縮ひずみ(JIS A 1129)のレベルがあらかじめ確認されている¹⁾($600\sim 1000\times 10^{-6}$ 想定)3種類の硬質砂岩砕石(最大寸法: 20mm)を用いた。検討したコンクリートの配(調)合は、各粗骨材を用いた普通コンクリートおよび粗骨材 G1,

表-1 使用材料

材料	記号	物理的性質など
セメント	C	普通ポルトランドセメント/ 密度: 3.16g/cm^3 , 比表面積: $3310\text{cm}^2/\text{g}$
膨張材	EX	低添加型石灰系膨張材/ 密度: 3.16g/cm^3 , 比表面積: $3450\text{cm}^2/\text{g}$
細骨材	S	山砂/表乾密度 2.56g/cm^3 , 吸水率 2.57%
粗骨材	G1	硬質砂岩砕石/表乾密度: 2.61g/cm^3 , 吸水率: 1.77%, 実積率: 61.1%
	G2	硬質砂岩砕石/表乾密度: 2.72g/cm^3 , 吸水率: 0.94%, 実積率: 58.7%
	G3	硬質砂岩砕石/表乾密度: 2.73g/cm^3 , 吸水率: 0.55%, 実積率: 60.1%
高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系

表-2 コンクリートの配(調)合

	W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)							スランプ (cm)	空気量 (%)	凝結時間 (h-m)	
			W	C	EX	S	G1	G2	G3			始発	終結
PL1	50.0	48.6	170	340	—	843	909	—	—	18.0	4.3	6-20	8-45
PL2		50.6		340	—	878	—	910	—	19.0	4.5	6-10	8-15
PL3		49.4		340	—	857	—	—	935	18.0	4.5	6-20	8-35
EX1		48.6		320	20	843	909	—	—	18.5	4.9	6-50	9-15
EX2		50.6		320	20	878	—	910	—	18.0	4.5	6-45	9-00

スランプ, 空気量, 凝結時間の測定は JIS A 1101, JIS A 1128, JIS A 1147 に準拠

*1 太平洋セメント(株) 中央研究所 工修 (正会員)

*2 太平洋セメント(株) 中央研究所 博士(工学) (正会員)

*3 名古屋大学 環境学研究科都市環境学専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

G2を用いたものに低添加型膨張材を $20\text{kg}/\text{m}^3$ 混和した膨張コンクリートの計5水準とした。配(調)合条件は、単位水量 $170\text{kg}/\text{m}^3$ 、水/(セメント+膨張材)比50%、単位粗骨材かさ容積 $0.57\text{m}^3/\text{m}^3$ 、目標スランブ $18\pm 2.5\text{cm}$ 、目標空気量 $4.5\pm 1.5\%$ とし、所定のスランブ、空気量になるように、高性能AE減水剤、AE助剤の添加量を調整した。

コンクリートの練混ぜは 20°C 、R.H.80%の試験室内で行った。練混ぜにはパン形強制練りミキサ(公称容積55L)を用い、練混ぜ手順は「材料投入(G+S+C+EX)→空練り30秒→注水(W+混和剤)→練混ぜ120秒→排出」とした。

表-2にはコンクリートのフレッシュ性状を併記しており、スランブおよび空気量は目標値を満足した。

2.2 実験項目および実験方法

2.2.1 拘束ひび割れ試験

図-1に一軸拘束ひび割れ試験体の概要を示す。ひび割れ分散性(本数・幅)を評価することを目的として、既往の研究²⁾を参考に、JIS A 1151「拘束されたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験」(以下、JIS法と称する)の試験体の試験区間を1000mm(JIS法:300mm)に変更し、コンクリート内部に異形鉄筋D10(鉄筋比:0.5%)を配置した。また、ひび割れ性状を明確に評価できるように、拘束鋼材の断面積を大きくして拘束度を高めた(拘束鋼材比:38.5%, JIS法:約8%)。拘束鋼材の中央部図心位置にひずみゲージを貼付し、打設完了時からのひずみ変化を測定した。

打設完了から材齢7日までは、 20°C 環境下で仕上げ面にポリエステルフィルムを被せ、その上を湿布で覆った状態で養生した(以下、湿潤養生と称する)。材齢7日に脱型した後は、 20°C 、R.H.60%の恒温恒湿室内で気乾養生した。試験体は各配(調)合で2体作製した。

2.2.2 自由膨張・収縮特性

自由収縮・膨張ひずみは、無拘束試験体(100×100×400mm)の中心部に設置した埋込型ひずみ計(見かけの弾性係数: $40\text{N}/\text{mm}^2$)より測定した。養生条件は、拘束ひび割れ試験体と同一とし、材齢7日以降の 20°C 、R.H.60%環境下における収縮ひずみを乾燥収縮ひずみと

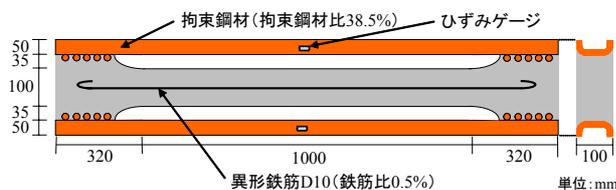


図-1 拘束ひび割れ試験体の概要

した。

なお、同試験方法で測定した乾燥収縮ひずみは、JIS A 1129-2のコンタクトゲージ法による測定値と比較して若干大きくなる結果が報告されている³⁾。

2.2.3 強度特性

拘束ひび割れ試験体と同様に、材齢7日まで 20°C ・湿潤養生、材齢7日以降は 20°C ・R.H.60%で気乾養生した円柱供試体(φ100×200mm)を用いて、圧縮強度、静弾性係数、および割裂引張強度を測定した。試験方法はそれぞれJIS A 1108, JIS A 1149, JIS A 1113に準拠した。試験材齢は3, 7, 14, 28, 56, 91日とし、割裂引張強度のみ、各配(調)合で拘束ひび割れ試験体に初ひび割れを確認した材齢の強度も測定した。

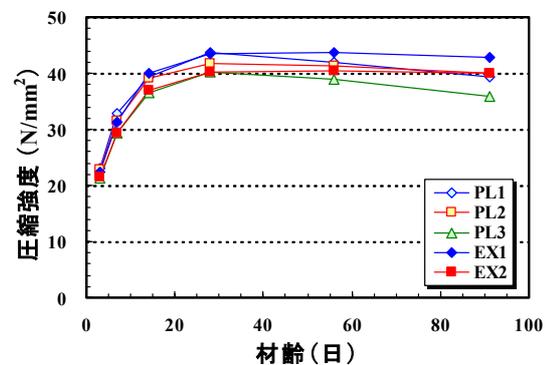


図-2 圧縮強度

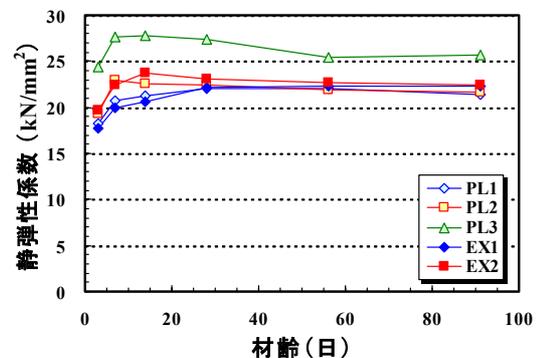


図-3 静弾性係数

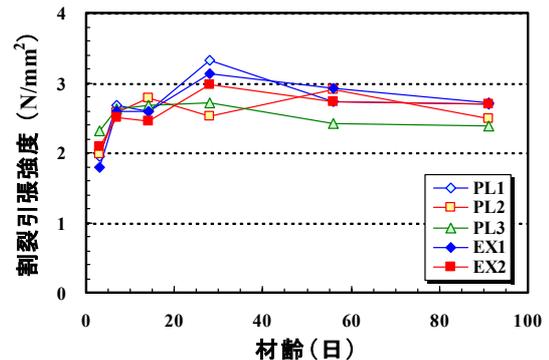


図-4 割裂引張強度

3. 実験結果および考察

3.1 強度特性

図-2～図-4に圧縮強度、静弾性係数、割裂引張強度の結果を示す。圧縮強度および割裂引張強度は、粗骨材の種類や膨張材の有無による影響が限定的であった。一方、静弾性係数は、膨張材の有無による差は認められないものの、材齢7日までの湿潤養生中は粗骨材の種類によって $G3 > G2 > G1$ の順に大きい傾向があった。

圧縮強度、静弾性係数、割裂引張強度は、材齢14日または28日で最大となった後、材齢の進行とともにやや低下する傾向が認められる。既往の研究⁴⁾でも同様の結果が得られており、このメカニズムについては、乾燥下におけるセメントペーストと骨材の収縮差の観点などから詳細に検討することが必要と考えられる。

3.2 自由膨張・収縮特性

図-5に自由膨張・収縮ひずみの経時変化を示す。ひずみの起点は凝結始発時とした。材齢7日までの湿潤養生中のひずみを見ると、PL1, PL2, PL3では、それぞれ約 110×10^{-6} , 90×10^{-6} , 40×10^{-6} の収縮ひずみが生じており、これは自己収縮の影響によるものと考えられる。EX1, EX2では、材齢1日の時点で、 160×10^{-6} 程度の膨張ひずみが生じており、それ以降は徐々に収縮するものの、材齢7日時点の膨張ひずみは、それぞれ約 130×10^{-6} , 150×10^{-6} であった。

図-6に、材齢7日以降の 20°C , R.H.60%環境下における乾燥収縮ひずみを示す。PL1, PL2, PL3の乾燥材齢182日(6か月)における乾燥収縮ひずみは、それぞれ約 1120×10^{-6} , 950×10^{-6} , 700×10^{-6} であり、粗骨材の種類による明確な差が認められた。乾燥収縮ひずみと静弾性係数の関係を見ると、静弾性係数が大きいほど乾燥収縮ひずみが小さくなっており、既往の知見⁵⁾と同様の傾向であった。

EX1, EX2の乾燥材齢182日の乾燥収縮ひずみは、約 975×10^{-6} , 780×10^{-6} であり、膨張材無混和のPL1, PL2と比較して約13%, 17%小さかった。既往の研究でも、無拘束試験体で測定した乾燥収縮ひずみ(乾燥材齢182日)は、膨張コンクリートが普通コンクリートより5~20%程度小さい結果が報告されている^{6), 7), 8)}。

なお、乾燥収縮ひずみの測定は、ひずみがほぼ一定値となる乾燥材齢260日まで継続した(乾燥材齢182日から260日までの乾燥収縮ひずみの増加量は配(調)合によらず概ね2%程度)。以下、拘束ひび割れ試験の長期性状については、乾燥材齢260日の時点に着目して考察する。

3.3 拘束ひび割れ試験

3.3.1 短期性状

図-7に、拘束ひび割れ試験体に生じる拘束応力の経時変化を示す。拘束応力は、拘束鋼材のひずみを用い、

コンクリートと拘束鋼材の力の釣合い条件およびひずみの適合条件より算出した(正:引張, 負:圧縮)。

PL1, PL2, PL3では、材齢7日時点で約1.1, 0.9, 0.8 N/mm^2 の引張応力が発生しており、これは、湿潤養生中に生じる自己収縮に起因したものと考えられる。一方、EX1, EX2は、膨張材の作用によって、材齢1日付近で

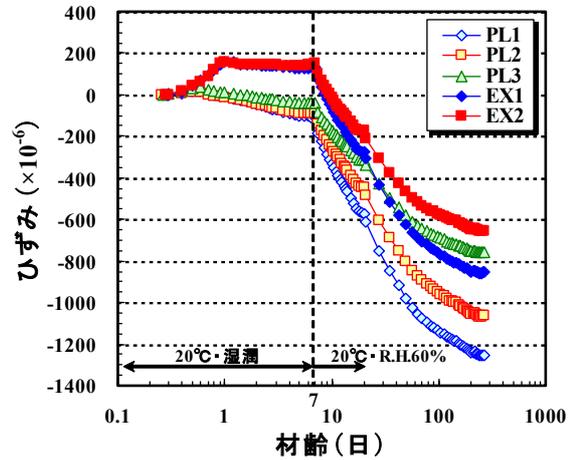


図-5 自由膨張・収縮ひずみの経時変化

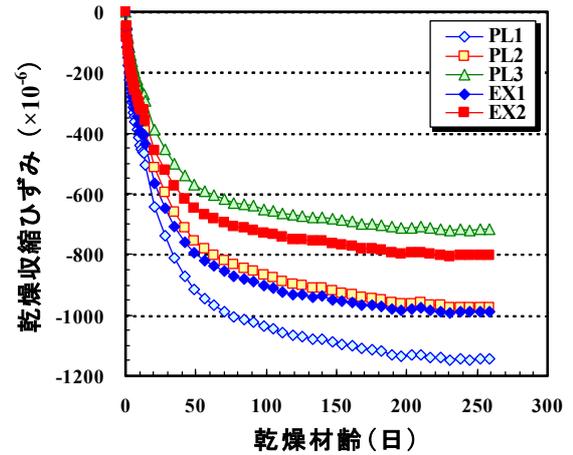


図-6 乾燥収縮ひずみの経時変化

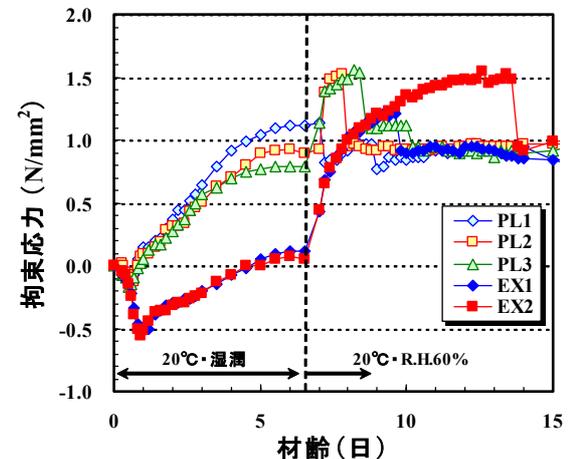


図-7 拘束応力の経時変化

0.5N/mm²程度の圧縮応力が生じている。材齢 1 日以降、圧縮応力は収縮に伴って減少していくものの、材齢 7 日時点の応力は概ねゼロであり、普通コンクリートに対して 0.9~1.0N/mm²の引張応力の低減効果が認められる。

表-3 に、拘束ひび割れ試験体に初ひび割れを確認した時点の乾燥材齢、拘束応力、割裂引張強度、および応力強度比（拘束応力/割裂引張強度）を示す。初ひび割れが発生した時点の応力強度比は 0.4~0.6 程度であり、粗骨材の種類や膨張材の有無による一定の傾向は認められなかった。

3.3.2 長期的性状

図-8、表-4 に、乾燥収縮ひずみがほぼ収束した乾燥材齢 260 日におけるひび割れ状況、および各試験体のひび割れ本数、平均ひび割れ幅、ひび割れ係数（ひび割れ幅の合計/試験区間の長さ）⁹⁾を示す。ひび割れ幅は、試験体の打設面と底面の中央部および両側面から約 15mm 内側の 3 点（全 6 点）をクラックスケールで測定し、その平均値とした。

PL1, PL2, PL3 について、ひび割れ本数の平均値は 4.5 本, 3 本, 1.5 本、ひび割れ係数の平均値は 955×10^{-6} , 645×10^{-6} , 400×10^{-6} であり、乾燥収縮ひずみが小さいほどひび割れ本数およびひび割れ係数が減少した。また、EX1, EX2 については、ひび割れ本数（2.5 本, 1.5 本）、ひび割れ係数（ 475×10^{-6} , 310×10^{-6} ）ともに、PL1, PL2 の 1/2 程度に減少しており、膨張材の混和による明確なひび割れ低減効果が認められた。一方、ひび割れ幅については、乾燥収縮ひずみの大きさや膨張材の有無による明確な差は見られなかった。既往の研究でも同様の結果が報告されており、ひび割れ幅に対しては、収縮量の影響より鉄筋比の影響が卓越するためと考えられる¹⁰⁾。

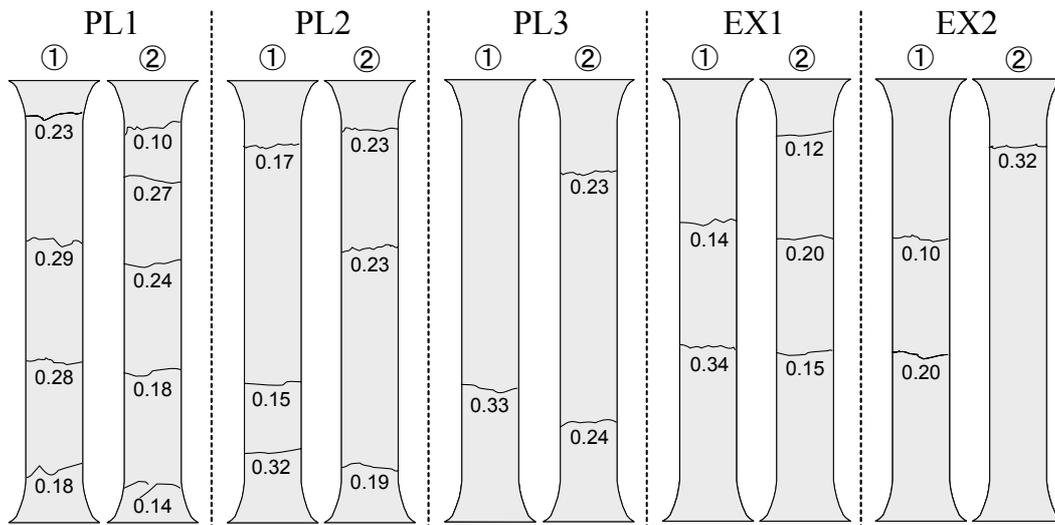
表-3 初ひび割れ発生時の応力強度比

		初ひび割れ発生時			
		乾燥材齢 (日)	拘束応力 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	応力強度比
PL1	①	1	1.14	2.89	0.39
	②	1	1.49		0.52
PL2	①	1	1.53	3.23	0.47
	②	1	1.41		0.44
PL3	①	2	1.56	3.10	0.50
	②	2	1.66		0.54
EX1	①	3	1.21	3.00	0.40
	②	3	1.23		0.41
EX2	①	7	1.54	2.46	0.63
	②	10	1.69	未実施	—

表-4 ひび割れ本数・幅・係数（乾燥材齢 260 日）

		ひび割れ本数	平均ひび割れ幅* (mm)	ひび割れ係数 ($\times 10^{-6}$)
PL1	①	4	0.25	980
	②	5	0.19	930
PL2	①	3	0.21	640
	②	3	0.22	650
PL3	①	1	0.33	330
	②	2	0.24	470
EX1	①	2	0.24	480
	②	3	0.16	470
EX2	①	2	0.15	300
	②	1	0.32	320

*各試験体のひび割れ幅の平均値



数値はひび割れ幅(mm)

図-8 ひび割れ状況（乾燥材齢 260 日）

3.3.3 ひび割れ性状の評価

図-9, 図-10に, ひび割れ本数および平均ひび割れ幅と無拘束試験体で測定した乾燥収縮ひずみの関係を示す。図中には, 日本建築学会の指針¹¹⁾で提示されている修正ベースマレー法¹²⁾および大野法¹³⁾による予測値を併記している。実験値と予測値を比較すると, ひび割れ本数は, 乾燥収縮ひずみが大きくなるに従って, 実験値が予測値を上回る傾向が見られる。また, ひび割れ幅については, 修正ベースマレー法では小さく, 大野法では若干大きく評価する結果となった。予測式は実 RC 壁部材を対象としたものであり, 本実験のような小型試験体の結果への適用性は十分に検討されていないが, 収缩量に対するひび割れ本数・幅の変化傾向は概ね対応していると考えられる。小型試験体および実構造物のひび割れ性状に関するデータを蓄積し, 双方の関係性を明確にすることが今後の課題である。

図-11は, 乾燥材齢 260 日におけるひび割れ本数およびひび割れ係数と無拘束試験体で測定した乾燥収縮ひずみの関係より, 普通コンクリートの乾燥収縮ひずみに対する膨張材の収縮低減効果を検討した結果である。各配(調)合のひび割れ本数・ひび割れ係数は試験体 2 体の平均値とした。普通コンクリートと膨張コンクリートの回帰直線を比較すると, 乾燥収縮ひずみが同一の場合のひび割れ本数・ひび割れ係数は, 膨張コンクリートが普通コンクリートより明確に小さい傾向があり, 回帰直線の乖離分は, 膨張材の初期膨張によってもたらされた効果と考えることができる。

図中の斜線部は, 膨張材による初期膨張ひずみの効果を $100\sim 150\times 10^{-6}$ と見込み, 膨張コンクリートの乾燥収縮ひずみから低減させた場合の範囲を示したものであるが, 総じて普通コンクリートの回帰直線と良く対応している。これより, 膨張材によるひび割れの低減効果と

しては, 普通コンクリートの乾燥収縮ひずみに対して, 乾燥収縮ひずみの低減分に初期の膨張ひずみ分として $100\sim 150\times 10^{-6}$ 程度の低減量を加味することで概ね評価できると考えられる。ここで得られた初期の膨張ひずみ分として見込んだ低減量は, 膨張コンクリートによる膨

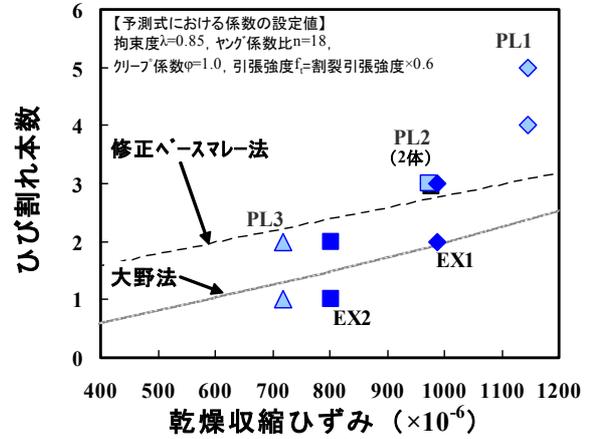


図-9 ひび割れ本数と乾燥収縮ひずみの関係 (乾燥材齢 260 日)

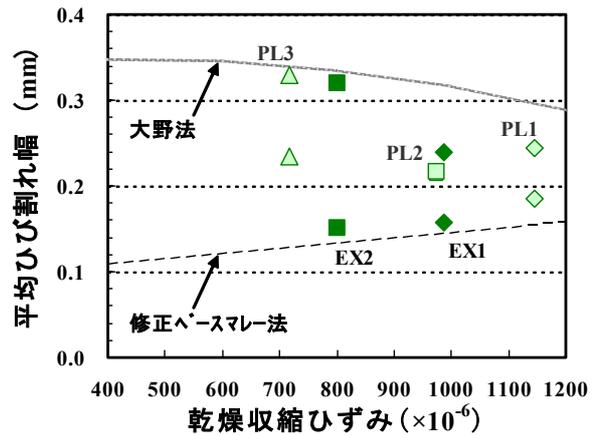


図-10 平均ひび割れ幅と乾燥収縮ひずみの関係 (乾燥材齢 260 日)

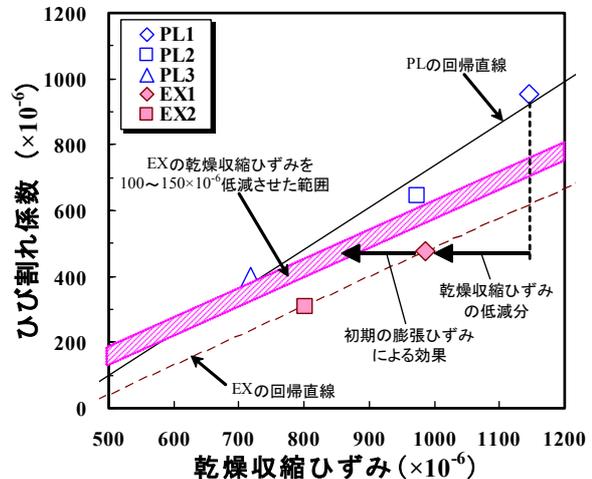
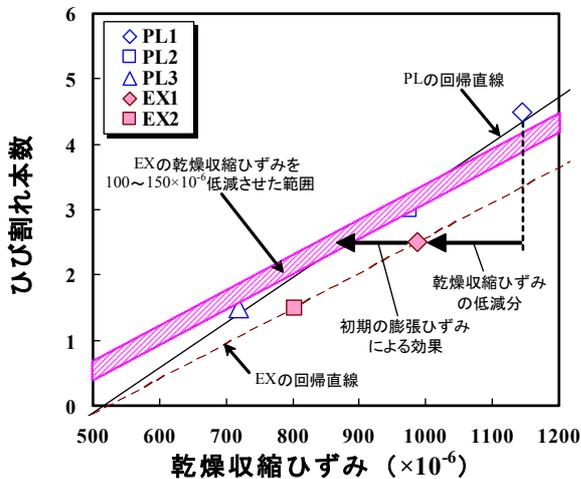


図-11 膨張材による収縮低減効果の検討 (乾燥材齢 260 日)

張圧縮応力を応力解析によって乾燥収縮ひずみの低減量に換算した既往の研究結果^{14), 15)}と概ね同等である。

4. まとめ

本研究では、ひび割れの分散性を評価できる一軸拘束試験によって、膨張コンクリートの収縮ひび割れ性状を把握するとともに、無拘束試験体で測定した乾燥収縮ひずみに対する膨張材の収縮低減効果を定量的に評価した。以下に得られた知見をまとめて示す。

- (1) 無拘束試験体で測定した乾燥収縮ひずみ（乾燥材齢182日）は、膨張コンクリートが普通コンクリートより15%程度小さかった。
- (2) 膨張コンクリートは、普通コンクリートに対して、ひび割れ本数・ひび割れ係数の明らかな低減効果があった。
- (3) ひび割れ幅は、膨張材の有無や乾燥収縮量による明確な差がなかった。
- (4) 膨張コンクリートのひび割れ低減効果は、普通コンクリートの乾燥収縮ひずみに対して、乾燥収縮ひずみの低減分に $100\sim 150\times 10^{-6}$ 程度の低減量を加味することで概ね評価できる可能性がある。

参考文献

- 1) 杉山真悟, 兵頭彦次, 谷村充: 粗骨材の乾燥収縮測定に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), A-1, pp.433-434, 2011.8
- 2) 井上和政, 三井健郎, 見澤大介, 木之下光男, 齊藤和秀: 一軸拘束ひび割れ試験を用いた乾燥収縮量が異なるコンクリートのひび割れ量に関する検討, 「コンクリートの収縮特性評価およびひび割れへの影響」に関するシンポジウム論文集, pp.47-52, 2010.12
- 3) 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
- 4) 都築正則, 酒井正樹, 一瀬賢一, 平田隆祥: 粗骨材種類および収縮低減材料の異なるコンクリートにおける拘束ひび割れ試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.425-429, 2011
- 5) 兵頭彦次, 谷村充, 藤田仁, 番地成朋: 石灰石骨材がコンクリートの収縮特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.571-576, 2009
- 6) 都築正則, 一瀬賢一, 植松俊幸: 乾燥収縮ひずみの異なるコンクリートに及ぼす収縮低減材料の効果に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.595-600, 2009
- 7) 郭度連, 佐竹紳也: 膨張材および収縮低減剤を用いたコンクリートの収縮低減効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.573-578, 2007
- 8) 大野吉昭, 鹿毛忠継, 起橋孝徳, 河上浩司, 高橋祐一: コンクリートに用いる混和材料の収縮低減効果に関する調査(その2 収縮低減効果とその考察), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.265-266, 2009
- 9) 石橋敏, 山根昭, 坂本昭夫, 川畑茂男: 建物外壁のひびわれ調査結果の分析, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), pp.145-146, 1983.9
- 10) 徐泰錫, 大野義照, 中川隆夫: 鉄筋コンクリート壁の乾燥収縮ひび割れ幅へのコンクリート強度と鉄筋量の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), A-1, pp.641-642, 2005.9
- 11) 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, pp.78-86, 2006.2
- 12) 橋田浩: 鉄筋コンクリート造外壁の収縮ひび割れ幅と本数の簡易推定式の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), A-1, pp.645-646, 2005.9
- 13) 大野義照, 中川隆夫, 劉勇, 岸本一蔵: 鉄筋コンクリート壁の収縮ひび割れ幅の予測, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.513-518, 2004
- 14) 百瀬晴基, 閑田徹志: 膨張材による収縮低減効果の定量化, 鹿島技術研究所年報, 第58号, pp.81-86, 2010.9
- 15) 橋田浩, 菊地俊文, 辻埜真人, 田中博一: 膨張材と石灰石骨材を併用した低収縮コンクリートに関する検討 その3 初期膨張力と収縮ひずみ低減効果, 日本建築学会大会講演梗概集(北陸), pp.927-928, 2010