報告　ひび割れ低減コンクリートの製造に関する検討

小林哲夫*[1]・小田部裕一*[2]・閑田徹志*[3]・金塚美喜男*[4]

要旨：住宅の品質確保の促進等に関する法律の施行や構造物の性能規定化に伴う高耐久性化への要求から，鉄筋コンクリート建築物のひび割れ低減に対する社会的な関心が高まっている。著者らは，低熱ポルトランドセメントと膨張材を用いたひび割れ低減コンクリートが温度ひび割れや乾燥収縮ひび割れに対して高いひび割れ抵抗性を有することを室内実験により明らかにしてきた。本報告は，ひび割れ低減コンクリートを実建築物へ適用するに際して実施した実機プラントでの製造実験及び製造時の品質変動についてまとめたものである。

キーワード：低熱セメント，膨張材，ひび割れ低減コンクリート，生コン工場，品質変動

1.　はじめに

住宅の品質確保の促進等に関する法律の施行や構造物の性能規定化に伴う高耐久性化への要求から，鉄筋コンクリート建築物のひび割れ低減に対する社会的な関心が高まっている。コンクリートのひび割れは，鉄筋腐食の大きな誘発要因となり鉄筋コンクリート建築物の耐久性を損なうことから，収縮ひび割れを生じない，もしくは大幅に低減できるコンクリートの実現に対する要求は極めて高いといえる。

コンクリートのひび割れに対して，発生自体は許容し，耐久性上有害な幅（例えば 0.3mm）以下に抑制することが今までの対策であった。このため，収縮ひび割れを特定の場所に集中させて対処するひび割れ誘発目地の採用や，ひび割れ幅の拡大を抑えるため鉄筋を多く配置することなどが通常採用されてきた。

しかし，このような既存手法には採用にあたって制限も多く，例えば構造耐震外壁では，鉄筋のかぶり厚さを確保する必要から十分な目地深さを取ることが容易でないこと，構造床スラブでは目地自体の設置が難しいこと，などの問題点が挙げられる。さらに，長大建築物や過酷な環境下にある建築物では，前記のような対処方法でひび割れ幅を制限することは難しく，耐久性や美観を損なう大きな要因となっている。したがって，前記のような対症療法でなく，収縮ひび割れ発生の根本的な要因であるコンクリートの収縮を制御し，ひび割れの発生を制限可能にした低コスト型のコンクリートが強く求められている。

著者らは，低熱ポルトランドセメント（以下，低熱セメントと略す。）と膨張材を用いたひび割れ低減コンクリートが温度ひび割れや乾燥収縮ひび割れに対して高いひび割れ抵抗性を有することを室内実験により明らかにしてきた[1), 2)]。このひび割れ低減コンクリートは，発熱量が少ない上，自己収縮や乾燥収縮が少ない性質を併せ持つ低熱セメントをベースに低添加型膨張材を組み合わせ，調合を最適化したものである。その特徴は，大きな初期膨張を利用した効果的なケミカルプレストレスの導入，及び乾燥収縮の低減効果によりひび割れ低減を実現したことにある。

本報告は，ひび割れ低減コンクリートを実建築物へ適用するに際して実施した実機プラントの製造試験及び製造時の品質変動[3),4)]をまとめたものである。

*1 住友大阪セメント（株）セメント・コンクリート研究所　工修（正会員）
*2 住友大阪セメント（株）セメント・コンクリート研究所　（正会員）
*3 鹿島建設（株）技術研究所建築生産グループ上席研究員　ph.D.　（正会員）
*4 東京エスオーシー株式会社　（正会員）

表－１　使用材料

使用材料	種類	物性
セメント	低熱セメント	密度=3.24g/cm^3，比表面積=3240cm^2/g
膨張材	エトリンガイト石灰複合系	密度=2.94g/cm^3，比表面積=2800cm^2/g
細骨材	茨城県波崎産陸砂	密度=2.60 g/cm^3，吸水率=1.19%, 容積混合率=70%
	栃木県葛生産砕砂（石灰岩）	密度=2.70 g/cm^3，吸水率=0.96%, 容積混合率=30%
粗骨材	茨城県笠間産砕石 2005 （硬質砂岩）	密度=2.65 g/cm^3，吸水率=0.51%，粗粒率=6.59
混和剤	高性能 AE 減水剤	変性リグニンスルホン酸化合物
	空気量調整剤	アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤

表－２　ひび割れ低減コンクリートの基本的な調合

ｽﾗﾝﾌﾟ (cm)	空気量 (%)	W/(C+E) (%)	s/a (%)	単位量（kg/m^3）						
				水 (W)	ｾﾒﾝﾄ (C)	膨張材 (E)	細骨材 (S)	粗骨材 (G)	高性能 AE 減水剤 (Ad_1)	空気量調整剤 (Ad_2)
18±2.5	4.5±1.5	45.5	49.1	165	343	20	894	935	3.63	0.012

表－３　各シリーズにおける検討項目と実験項目

種別	検討項目	試験項目
実機プラントでの製造実験	①実機プラント製造における最適膨張材量	一軸拘束膨張(JIS A 6202 B 法)(試験材齢:35 日) 拘束応力試験(JCI 自己収縮委員会に準ずる) [5] (試験材齢:100 日)
	②コンクリート中の膨張材分布の均一性	一軸拘束膨張(JIS A 6202 A 法)(試験材齢:7 日)
	③高性能 AE 減水剤の後添加が膨張特性に及ぼす影響	一軸拘束膨張(JIS A 6202 B 法)(試験材齢:35 日)
	④養生日数がひび割れ抵抗性に及ぼす影響	拘束応力試験(JCI 自己収縮委員会に準ずる) (試験材齢:100 日)
レディーミクストコンクリートの製造時の品質変動	⑤フレッシュ性状	スランプ(JIS A 1101)，空気量(JIS A 1108)，コンクリート温度
	⑥力学特性	圧縮強度(JIS A 1108), 引張強度(JIS A 1113), ヤング係数(JIS A 1149) (試験材齢：1,3,7,14,28,91 日)*
	⑦膨張・収縮特性	一軸拘束膨張(JIS A 6202 B 法)(試験材齢:35 日)
	⑧ひび割れ抵抗性	拘束応力試験(JCI 自己収縮委員会に準ずる) (試験材齢:100 日)

＊ 2 階，3 階の試験材齢は，3，7，28 日である。

2.　実験概要

2.1　使用材料および調合

使用材料を**表－１**に，また実機プラントの製造実験において使用した基本的な調合を**表－２**に示す。

コンクリートの仕様はスランプ 18cm, 設計基準強度 24N/mm^2 であるが，ひび割れ以外の耐久性を高めるために水結合材比を 45%程度まで

下げた。したがって，材齢 28 日の目標強度は 33N/mm^2 となる。また型枠解体を円滑に行うため，材齢 3 日において 10N/mm^2 以上の圧縮強度を規定した。

水結合材比を 40，45，50%の 3 水準，単位膨張材量を 15kg/m^3，20kg/m^3 の 2 水準に系統立て変化させた室内実験から，所定の材齢において所要の強度を満足し，しかも拘束応力試験[5)] においてひび割れが発生しなかった水結合材比 45.5%および単位膨張材量 20kg/m^3 の調合を基本調合として選定した。

実機プラントでの製造実験の一部では，製造時における最適な膨張材量を求めるために，単位膨張材量 20kg/m^3 の他に 24kg/m^3 も実験した。

2.2　検討項目および実験方法

検討項目と試験項目を**表－3** に示す。実機プラントでの製造実験では，①最適膨張材量，②コンクリート中の膨張材分布の均一性，③高性能 AE 減水剤の後添加が膨張特性に及ぼす影響，④養生日数がひび割れ抵抗性に及ぼす影響について検討した。

最適単位膨張材量については，室内実験で得られた 20kg/m^3 の単位膨張材量をもとに，実機プラントで製造されたコンクリートが十分な膨張・収縮特性を有するかにより検討した。

コンクリート中の膨張材の均一性は，アジテータ車排出直後，中盤，終盤のコンクリートを採取し，それらの膨張率を測定し比較することにより検討した。コンクリートの使用材料の総量に対して一般に 2%にも満たない膨張材が所定のひび割れ抵抗性を発揮するには，コンクリート中において均一に分散されることが不可欠であり，上記の検討を行ったわけである。

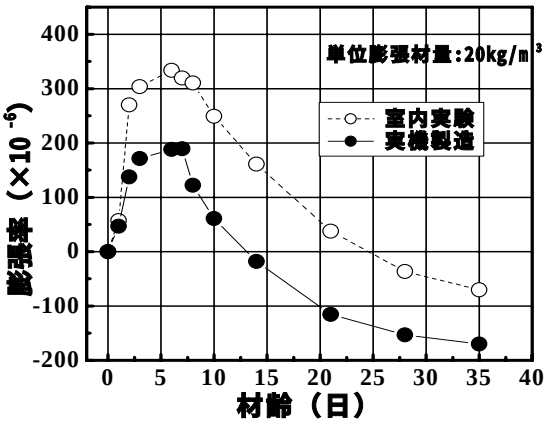
高性能 AE 減水剤の後添加が膨張・収縮特性に及ぼす影響は，練上りから 50 分で許容の範囲内にあるコンクリートと，120 分経過して流動性が所定の許容範囲を超えて低下したコンクリートに高性能 AE 減水剤を後添加して所定の流動性としたものの膨張・収縮特性を比較し，検討した。気温が高い時期ではコンクリートの流動性低下が大きくなり，所定の許容範囲を逸脱する恐れもある。このようなコンクリートでも，高性能 AE 減水剤を後添加して流動性を回復させて打込んだ方が，コンクリートの一体性を確保する上で有利な場合もある。しかしながら，高性能 AE 減水剤を後添加して流動性を回復させたコンクリート，特に一般の収縮補償を目的としたものより膨張エネルギーがやや大きいひび割れ低減コンクリートの膨張率の報告はない。そこで，上記の高性能 AE 減水剤の後添加が膨張・収縮特性に及ぼす影響を検討した。

養生日数がひび割れ抵抗性に及ぼす影響の検討については，室内実験では養生日数は 7 日としたが，現場の施工工程から養生日数を 3 日に短縮する必要が生じたため実施した。

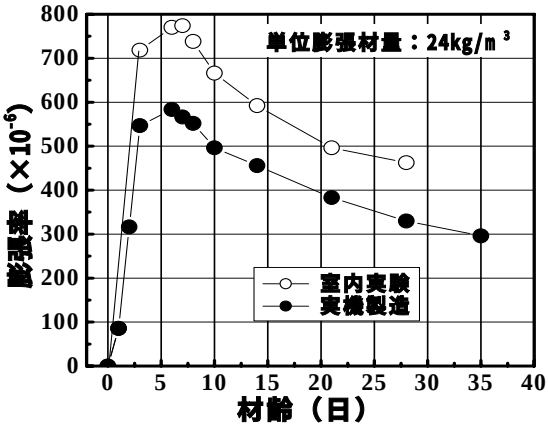
ひび割れ低減コンクリートは，練混ぜ効率のよいと思われるダブルミキシングの手法を用いて，セメント，膨張材，骨材を投入後 10 秒間空練りした後，予め混和剤を溶解させた練混ぜ水の 40%を 1 次水として加え 50 秒，残りの練混ぜ水を 2 次水として加え，30 秒間二軸強制練りミキサで練混ぜた。

膨張・収縮特性の測定は JIS A 6202 の B 法，膨張特性のみの測定には JIS A 6202 の A 法を用いた。この JIS A 6202 の A 法または B 法の一軸拘束供試体は，材齢 1 日脱型後，所定材齢まで標準養生した。拘束応力試験用供試体は，打込み後 3 日間封緘養生とし，その後温度 20℃，湿度 60%の恒温恒湿室で静置した。実機プラントでの製造時の品質変動を求めた試験において採取された強度試験用供試体は，材齢 3 日脱型後，所定材齢まで現場封緘養生とした。

ひび割れ低減コンクリートを適用した建物は，地上 4 階建ての SRC 造研究施設である。日射の影響を受け，ひび割れ発生の危険性が大きいと考えられる南面の 3 箇所の耐震外壁に，合計約 250m^3 のひび割れ低減コンクリートを打ち込んだ。各階打込み時の 1，4，8 車目のアジテータ車について，練り上がり直後および荷卸し時にコンクリートのフレッシュ性状を確認した。各



図－１　室内実験と実機製造の膨張収縮特性の比較



図－２　室内実験と実機製造の膨張収縮特性の比較

階打込み時の 4 車目のアジテータ車から採取したコンクリートの強度および膨張・収縮特性を確認すると共に，4 階の場合には拘束応力も測定した。

3.　実験結果

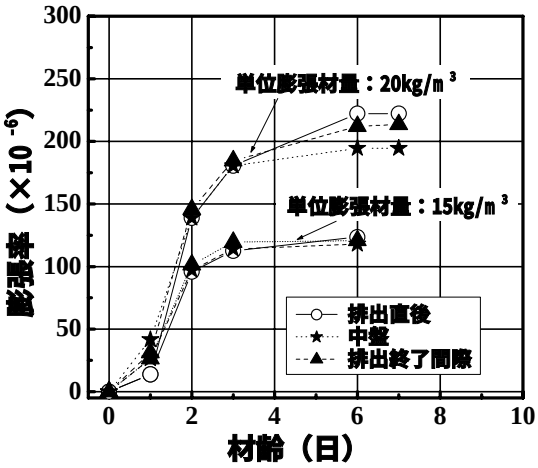
3.1　実機プラントの製造実験

最適膨張材量の検討結果を**図－１，２**に示す。

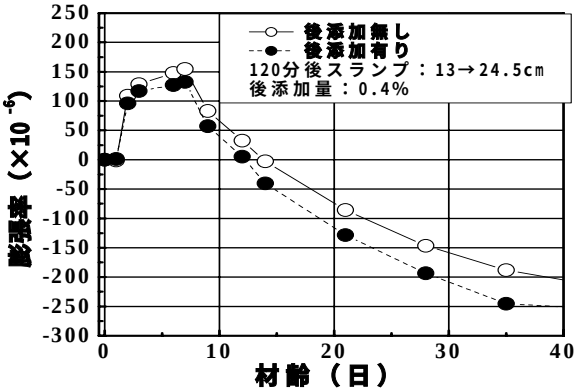
図－１では単位膨張材量を 20kg/m^3 とし，袋詰めの膨張材を解体し手動で投入している。一方，**図－２**では単位膨張材量を 24kg/m^3 とし，自動計量装置を用いて投入している。いずれの場合も，室内実験と比較して実機プラントで製造されたコンクリートの方が，膨張率が小さくなっている。室内実験と実機プラントで製造されたコンクリートの膨張率の差については，現時点では充分に解明することはできなかった。しかし，ケミカルプレストレスコンクリートのように膨張エネルギーが大きい場合，型枠拘束の解放時期によりその後の膨張率が異なることが示唆されている [6)]。すなわち，室内実験と実機プラントでの製造実験では，型枠を解体するのに数時間の相違があったことが影響しているとも考えられる。

ここでは上記の差が生じることを考慮して，室内実験において得られた最適膨張材量に 4kg/m^3 増加させることとした。

コンクリート中の膨張材分布の均一性についての検討結果を**図－３**に示す。単位膨張材量が



図－３　膨張材の均質性の確認



図－４　混和剤の後添加が膨張収縮特性に及ぼす影響

標準量の 20kg/m^3 の場合，およびそれより少なく分散し難いと思われる 15kg/m^3 の場合を検討したが，何れの場合にもアジテータ車内の採取箇所による膨張率に大きな差はなく，膨張材が均一に練り混ぜられていたと考えられる。

高性能 AE 減水剤の後添加が膨張特性に及ぼ

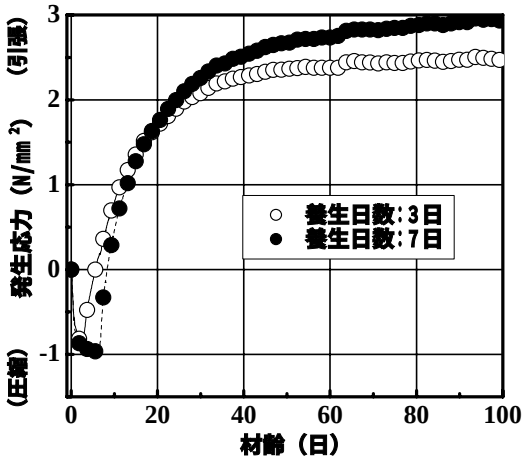
す影響の検討結果を**図－４**に示した。両者とも最大の膨張率に差はなく，乾燥過程において若干の差が認められるが，膨張・収縮特性全般はほぼ同等とみなせる。したがって，流動性低下が大きくなった場合，高性能 AE 減水剤を後添加して流動性を回復させても膨張率に及ぼす影響は少ないといえる。

養生日数が拘束応力試験に及ぼす影響を検討した結果を**図－５**に示した。養生日数を 7 日とした場合，発生する圧縮応力も大きくなるが，圧縮応力減少から引張応力増加区間における応力の変化率が大きく，材齢 100 日の時点の引張応力も約 0.5N/mm^2 大きい。これは，養生日数が 3 日の場合に引張応力が導入される時期がより早く，クリープにより緩和されたため [7]と思われる。膨張材はセメントマトリックスを介在して膨張力を発揮する。したがって,初期養生を長くすることにより，セメント自体の水和も促進し,セメントマトリックスの強度発現も促し，膨張力を効果的に導入でき，しかもセメントマトリックスも緻密化し耐久性が向上すると言われている [8]。今回の実験では，養生日数 7 日の場合が 3 日と比較して引張応力は大きくなっているが，前述の観点からすると養生日数は最低でも 3 日以上，できる限り長く取るのが耐久性上望ましい。

3.2　実機プラントでの製造時の品質変動

前節の検討により，室内実験と実機プラントで製造されたコンクリートの膨張率に差が生じる可能性が判明したので，基礎梁の拘束が大きい 1 階のひび割れ低減コンクリートは単位膨張材量を 24kg/m^3 と通常より多く使用し，その他の階は単位膨張材量を 22kg/m^3 とした。

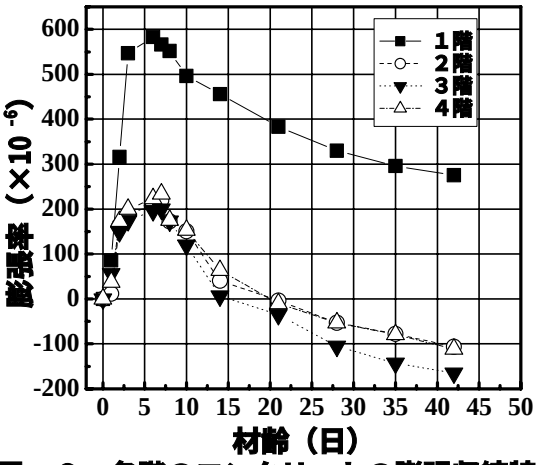
地上 4 階建ての SRC 造研究施設に打込んだコンクリートは，概ね安定して良好な流動性が得られた。しかしながら，練上り後打込みまでが 60 分以上経過した 2 階と 3 階の一部では,コンクリートの流動性が低下したため，現場において高性能 AE 減水剤をアジテータ車に添加して対処し，その後の製造では高性能 AE 減水剤の添加量を増加して対処した。



図－５　養生日数が拘束応力に及ぼす影響

表－４　各階のコンクリートの強度

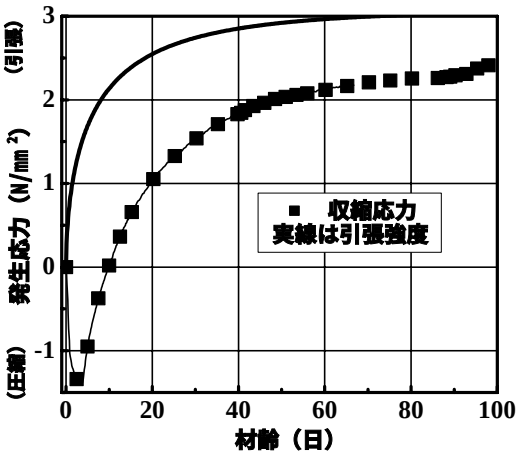
階数	強度種別	材齢					
		1 日	3 日	7 日	14 日	28 日	91 日
1	圧縮	6.14	13.4	20.4	27.6	37.0	47.1
	割裂引張	0.75	1.42	1.98	2.33	2.62	3.07
	ﾔﾝｸﾞ係数	12.9	19.4	25.7	28.2	32.2	33.1
2	圧縮	---	11.9	21.6	---	39.3	---
	割裂引張		1.19	1.92		3.26	
	ﾔﾝｸﾞ係数		18.1	24.7		35.8	
3	圧縮	---	11.7	20.4	---	37.7	---
	割裂引張		1.33	2.06		2.68	
	ﾔﾝｸﾞ係数		17.1	23.6		28.4	
4	圧縮	6.86	12.2	20.7	32.5	42.1	53.1
	割裂引張	0.70	1.23	1.83	2.08	2.35	2.49
	ﾔﾝｸﾞ係数	13.7	17.1	21.8	30.4	32.6	36.3



図－６　各階のコンクリートの膨張収縮特性

現場封緘養生の強度試験結果は**表－４**に示すように目標強度を十分に満足している。

各階の拘束膨張率を**図－６**に示す。1 階に打込んだ単位膨張材量 24kg/m^3 の場合には，最大膨張率が 600×10^{-6} に近くなっているが,膨張ひび割れや強度低下などの問題はなかった。2 階以上に用いた単位膨張材量 22kg/m^3 では，200×10^{-6} 程度の最大膨張率となっており，単位膨



図－７　１階コンクリートの拘束応力

張材量 2kg/m^3 の差により最大膨張率にかなりの差が生じた。この差については，今後検討していきたい。1 階に用いた単位膨張材量 24kg/m^3 の場合の拘束応力試験結果を**図－７**に示すが，材齢 100 日を経過した時点でもひび割れは発生せず，十分なひび割れ抵抗性を有することを確認できた。

4．まとめ

本報告は，ひび割れ低減コンクリートを実建築物へ適用するに際して実施した実機プラントの製造実験及び製造時の品質変動についてまとめたものである。今回の検討範囲から以下の知見が得られた。

(1) 室内実験と実機プラントで製造されたコンクリートの膨張率に差が生じる場合もあることを考慮し，これを加味した上で適切な単位膨張材量を選定する必要がある。今回，実機プラントでは室内実験で得られた最適単位膨張材量 20kg/m^3 より多い 22～24kg/m^3 を使用した。

(2) 流動性低下が大きくなった場合，高性能 AE 減水剤を後添加して流動性を回復させても膨張率に及ぼす影響は少ないといえる。

(3) 養生日数 3 日と 7 日ではひび割れ低減コンクリートの拘束応力にほとんど差が無く，むしろ養生日数 7 日の引張応力が材齢 100 日の時点においてやや大きくなった。しかし，十分な養生により発揮される膨張コンクリートのひび割れ抵抗性を勘案すると，少なくとも養生日数は 3 日以上できる限り長くとる必要がある。

(4) 地上 4 階建ての SRC 造研究施設に打込んだひび割れ低減コンクリートのフレッシュ性状，強度特性，膨張・収縮特性，ひび割れ抵抗性はいずれも当初の目標を満足した。

参考文献

1) 小田部裕一・鈴木康範・稲葉洋平・溝淵利明：温度応力の抑制に対する材料評価方法に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.1113-1118，2002

2) 小田部裕一・小林隆芳・百瀬晴基・閑田徹志：各種セメントを用いた膨張コンクリートのひび割れ抵抗性，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.419-424，2003

3) 閑田徹志・百瀬晴基・桜本文敏・鈴木康範・小田部裕一：ひび割れ低減コンクリートの開発（その 3　実躯体適用実験　計画及び材料試験結果），日本建築学会大会学術講演梗概集，　pp.109-110，2003

4) 百瀬晴基・閑田徹志・桜本文敏・鈴木康範・小田部裕一：ひび割れ低減コンクリートの開発（その 4　実躯体適用実験　計測結果），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.111-112，2003

5) 日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書，pp.58-60，2002.9

6) 細田　暁：微視的機構に着目した膨張コンクリートのひび割れ抵抗性およびひび割れ後の軟化性状に関する研究と RC 部材への適用，東京大学学位論文，p.73，2001.3

7) 小阪義夫・森田司郎：鉄筋コンクリート工学，丸善，pp.226-232，1975

8) 日本コンクリート工学協会：膨張コンクリートによる構造物の高機能化／高耐久性化に関するシンポジウム委員会報告書・論文集，pp.9-24，2003.9