

論文 膨張材と収縮低減剤を併用したコンクリートによる床スラブのひび割れ低減効果に関する実験的検討

閑田徹志^{*1}・百瀬晴基^{*2}・桜本文敏^{*3}

要旨：膨張材と収縮低減剤を併用したひび割れ低減コンクリート(CRC)について、調査を検討し床スラブのひび割れ低減対策として実工事に適用した。調査検討ではCRCの圧縮強度やフレッシュ性状等の基礎物性を明らかにし、工事に使用する調査を決定した。また、実工事では、採用した調査によるフレッシュ性状の安定性を確認するとともに、躯体コンクリートのひずみ挙動を実測した。その結果、CRCは安定したフレッシュ性状と優れた施工性を有し、ケミカルプレストレスの導入とその後の収縮低減効果により高いひび割れ低減効果を有することを示した。

キーワード：乾燥収縮、ひび割れ、床スラブ、膨張材、収縮低減剤

1. はじめに

建設構造物の耐久性への社会的関心の高まりを背景に、コンクリート構造物の耐久性に大きな影響を与える収縮ひび割れを抑制する技術が注目されている。膨大な研究成果の蓄積に基づき、収縮ひび割れ発生機構が定量的に解明されつつあり、材料、施工、構造の異なるアプローチから対策技術が提案されている¹⁾。しかし、これら対策の中で定量的な効果が実証され、“収縮ひび割れ抑制設計”が可能な例は少ない。

将来のひび割れ抑制設計方法の確立に向け、効果が顕著で定量評価が可能な抑制技術のひとつとして、膨張材と収縮低減剤(以下SRA)を組み合わせたひび割れ低減コンクリート(以下CRC)がある²⁾。膨張材と収縮低減剤の組み合わせは相乗効果が大きく、超低収縮のコンクリートが実現可能で、実躯体の収縮ひび割れ低減に効果が顕著であることが報告されている³⁾。

しかし、CRCを実際の工事に適用する場合、調査選定手順、コンクリート製造および施工上の留意点、躯体のひび割れ発生メカニズムに及ぼす効果など明らかとなっていないことも多い。

これらを受け、本研究では、CRCを実工事に適用する際に考えられる課題を解決するため、調査選定、実施工、躯体のひずみ挙動について一連の検討を実施し、CRCの実用性とひび割れ低減効果について定量的に報告する。

2. 材料選定実験

2.1 材料選定実験の計画

(1) 実験要因

工事対象は4階建て立体駐車場であり、床ひび割れの抑制を最終的な目的としてCRCの適用を検討した。調査検討実験では、SRA種類を決定するため、表-1に示す要因について実験を行った。SRA種類について検討したのは、対象工事では日本建築学会JASS5に準拠し、現場荷卸時の空気量範囲が4.5%±1.5%となる必要があり、SRA添加により空気量などフレッシュ性状に与える影響が大きいと言われていることによる⁴⁾。また、練上がり温度については、実際のコンクリート打設時期を勘案し、その影響を把握するために30の条件を20に追加した。

(2) 使用材料および調査

*1 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)

*2 鹿島建設(株) 技術研究所 建築生産グループ 研究員 (正会員)

*3 鹿島建設(株) 技術研究所 建築生産グループ グループリーダー 工修(正会員)

SRA は、市場で支配的な低級アルコール系で、表 - 1 の 4 種類を対象とした。製品 B および C は、製品 A の空気連行性を向上させるべく、化学組成の変更を行ったものである。D は同系統の他メーカー製品である。それ以外の材料は共通とし、セメントは普通ポルトランド、膨張材は低添加型の石灰-CSA 系、空気量調整剤と高性能 AE 減水剤はそれぞれ JIS A 6204 の AE 剤(I 種)、標準型 I 種のポリカルボン酸系を用いた。

表 - 2 は調合の一覧で、SRA の添加量を単位水量の一部に置換した。各調合とも水結合材比 45%、単位水量 170kg/m³ で膨張材をセメントの内割で 20kg/m³ 添加した。AE 剤および高性能 AE 減水剤は、それぞれ空気量 4.5% およびスランプ 18cm を目標に添加量を調整した。

(3) 試験項目

表 - 3 は試験項目の一覧で、これらの試験結果により適切な SRA 種類の選定を目指す。フレッシュ性能では空気量とスランプの経時変化への影響に着目し、圧縮強度では SRA の添加による強度低下に着目した。膨張収縮性状は、標準の拘束試験(B 法)を用いて比較を行った。また、気泡間隔係数は、SRA 添加により懸念される連行気泡の粗大化の影響を明らかにするためにリニアトラバース法により計測した。

2.2 材料選定実験の結果と SRA 種類の選定

表 - 4 は練混ぜ結果の一覧で、高性能 AE 減水剤添加量は、SRA 種類および練上がり温度に依らないが、目標空気量を得るための AE 剤添加量は大きく異なる。Mix-A では、他の SRA 種類を用いた場合と比較して、AE 剤量が増加しており、30 の条件では空気連行が困難であった。

表 - 4 練混ぜ結果の一覧

調合	練上がり20℃						練上がり30℃					
	*1高性能AE減水剤量(%)	*2AE剤量(A)	経過時間(分)	スランプ(cm)	空気量(%)	練上がり温度(℃)	高性能AE減水剤量(%)	AE剤量(A)	経過時間(分)	スランプ(cm)	空気量(%)	練上がり温度(℃)
Mix-N	0.75	0	0	18.7	3.3	22.1	0.60	0	0	15.5	4.6	27.1
			30	10.5	3.1	22			30	6.0	3.9	25.9
			60	6.3	2.8	21.7			60	3.0	3.2	26.9
Mix-A	0.70	6	0	19.6	4.4	22	0.65	40	0	18.2	2.2	31.7
			30	14	3.3	22.1			30	4.0	1.8	31.9
			60	9.6	2.7	22.2			60	1.2	1.6	31.4
Mix-B	0.70	1	0	19.8	5	21.6	0.65	1	0	18.3	4.6	31.6
			30	13.5	2.8	21.5			30	6.3	3.3	31.6
			60	10.3	2.7	21.7			60	4.5	2.5	31.1
Mix-C	0.65	1	0	17.8	5.7	21.9	0.65	1	0	17.2	3.8	31.6
			30	12.7	4.6	21.4			30	3.6	2.0	31.8
			60	9.8	4.3	21.4			60	2.0	2.0	31.8
Mix-D	0.65	1	0	19.4	4.1	21.7	0.65	1	0	17.3	3.0	31.6
			30	15.2	2.8	21.7			30	6.2	2.2	31.8
			60	12	2.7	21.6			60	3.0	1.9	31.5

*1 対結合材重量比 *2 結合材重量に対して0.003%を1Aと表記

図 - 1 は、30 のスランプと空気量の経時変化を練上がりから 60 分後までの低下率で示してある。60 分後のフレッシュ試験は、練上がり時の試験後、静置した材料を練り返して行った。スランプロス率は、材料を静置したことから全般に大きな値となっているが、SRA 無添加の Mix-N と比較して各 SRA 添加の場合には小さめの値で、SRA 種類の影響は大きくない。この傾向と異なり、空気量の低下率は無添加の場合には小さく、SRA 添加では大きい結果で、SRA 種類の影響も比較的大きく、各種類の中では製品 C による Mix-C が空気量の保持性能が高かった。

図 - 2 には練上がり温度 20 の圧縮強度の経時変化を示してある。この図から、SRA 無添

表 - 1 材料選定実験の検討要因

実験要因	水準数	水準
SRA種類	5	SRA無混和および4種類(A,B,C,D)
練上がり温度	2	20℃および30℃

表 - 2 材料選定実験の調合一覧

調合	水結合材比(%)	単位水量(kg/m ³)	細骨材率(%)	*1膨張材添加量(kg/m ³)	*2SRA添加量(kg/m ³)	SRA種類
Mix-N	45	170	45	20	0	-
Mix-A	45	170	45	20	5	A
Mix-B	45	170	45	20	5	B
Mix-C	45	170	45	20	5	C
Mix-D	45	170	45	20	5	D

*1 膨張材はセメント内割 *2 SRAは単位水量に含める

表 - 3 試験項目の一覧

試験項目	試験方法	目的
フレッシュ性状	JIS A 1128 JIS A 1101	空気量およびスランプの経時変化の把握
圧縮強度	JIS A 1108	圧縮強度の低下傾向の把握
膨張収縮性状	*1 JIS A 6202 附属書2準拠	初期膨張および乾燥収縮性状の把握
気泡間隔係数	ASTM C 457 (リニアトラバース法)	耐凍害性の代用特性の把握

*1 ただし、打設後7日までは対かん養生

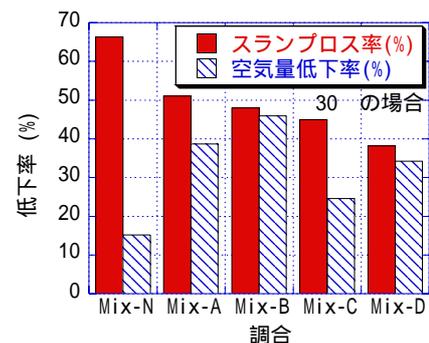


図 - 1 フレッシュ性状の経時変化

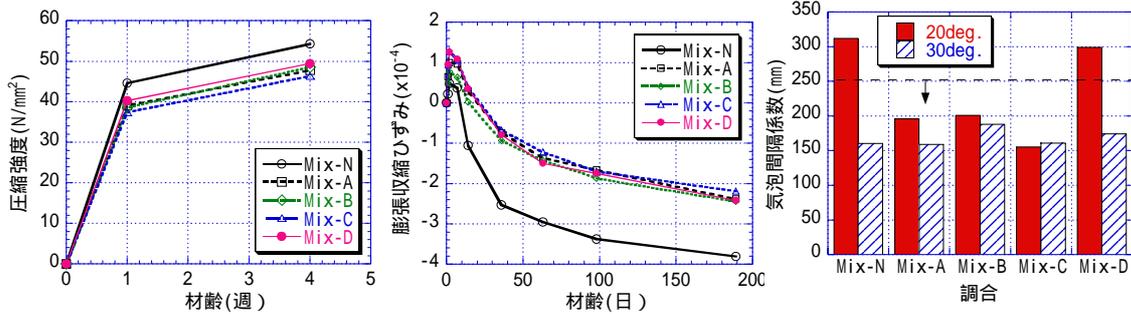


図 - 2 SRA 種類と圧縮強度 図 - 3 SRA 種類と膨張収縮性状 図 - 4 SRA 種類と気泡間隔係数

加の場合と比較して，SRA 添加の場合には圧縮強度が低くなり，その低下幅は最大 10%程であり SRA 種類の影響は顕著でないことが分かる。

図 - 3 は拘束膨張収縮試験の結果で，SRA 無添加に対して，添加した調合では初期の膨張量が 2 倍程度に増大し，乾燥収縮量も 40%程度小さくなっている。既往の文献⁴⁾による SRA 添加量 5 kg/m³ における乾燥収縮低減量は 30%程度で，膨張材と SRA の相乗効果が大きいと言える。

図 - 4 は気泡間隔係数の測定結果で，20 における Mix-N と Mix-D を除き，各ケースとも凍結融解性に優れるとされる 250 μm 以下⁵⁾を満足していることがわかる。20 の Mix-D についても，SRA なしの Mix-N と同程度で 250 をやや上回る 300 μm 程度であり，全体として連行気泡の粗大化については問題がない結果となった。

以上の結果から，空気連行性が良好でない製品 A は特に夏季の高温時には使用に問題あることが分かった。その他の SRA では性状に顕著な相違は認められなかったが，性能を総合的に判断し製品 C を実施工に採用することとした。

3. 実施工

3.1 施工計画

(1) コンクリート工事の計画

図 - 5 は適用建物の平面図で，CRC を 2 階から 4 階の駐車場部分 960m²/階に適用する計画とした。各階では必要量約 140m³ をコンクリートポンプにて半日かけて打設し，3 日おきに 3 階分の施工を終えるものとした。表面は直仕上げで，コテ均し 3 回にて仕上げる工程とし，仕上げ後は散水にて材齢 3 日まで湿潤養生を行うこ

とを徹底した。スラブは 140mm厚で D10@200 の複配筋，はり間方向の一方方向スラブとして設計し，フラットデッキプレートを使用した。

(2) コンクリートの調合と製造の計画

工事に使用する CRC はスランプ 18cm，品質基準強度 27N/mm² の仕様で，試練りにより調合を表 - 5 のように決定した。上記の仕様に対応する出荷工場の通常の調合(原調合)も表 - 5 に示したが，SRA 添加の影響による圧縮強度の低下や空気量のばらつきを勘案し，水結合材比を原調合の 58%から 54%に低減した。また，空気量の経時による低下の抑制や運搬時のエントラップトエア巻込みに対処するため，AE 剤に加え消泡剤も併用した。消泡剤はポリオキシアルキレン誘導体系で，結合材質量比 0.0025%添加した。

CRC の製造においては，膨張材を自動投入，SRA を手投入とした。膨張材は，外付けの専用圧送機械により地上の材料タンクからミキサーに所定量を添加し，SRA はプラントの水計量タンクへ専用人員により添加した。練り混ぜ時間は，通常の 30 秒を延長し 45 秒とした。

(3) 計測計画

躯体コンクリートのひずみ挙動を測定するため，3 階床スラブの 1 グリッドを選び，ひずみゲージを貼付したダミー鉄筋を 3 点に埋め込み，各点では 3 方向のひずみを長期計測してロゼット解析に供した。本研究では，コンクリートとダミー鉄筋は一体として挙動すると考え，同時にコンクリート温度も測定することで温度ひずみを分離して評価した⁶⁾。

また，図 - 6 に示す模擬試験体(内部拘束試験体)を工事と同時に打設し，床スラブと同配筋

による内部拘束のみの場合の挙動を計測した。さらに、自由膨張収縮ひずみを代用するものとして、膨張挙動を安定化させるため鉄筋比0.1%の微小な拘束を導入した同寸法の試験体によりひずみ挙動を計測した（以下、微拘束試験体）。また、フレッシュ試験と圧縮供試体採取を実施して性状の安定性を調査した。

3.2 施工結果

ミキサー車 28 台/日程度の出荷を 9 月初旬に 3 日行い 3 層分の打設を大きな問題なく終了した。CRC の荷卸時温度は 30 を超えたが、打設時の締固めおよびこて均し仕上げは通常のコンクリートと大差なく実施可能であった。

図 - 7 および図 - 8 は、出荷 4 台程度毎にフレッシュ試験を行った結果で、それぞれスランプと空気量のばらつきを示している。荷卸時の値は管理限界である $18 \pm 2.5\text{cm}$ および $4.5 \pm 1.5\%$ の範囲内にほとんど分布している。練上がり時には運搬時間約 30 分の影響を勘案し、スランプと空気量ともに大きめの値として出荷した。当初懸念された空気量のばらつきは、高い頻度でのフレッシュ試験により AE 剤の投入量の微調整を実施し、消泡剤でエンラップトエアの巻込みを防止したため抑制されたと考えられる。

第三者機関で実施した現場水中養生による圧縮試験の結果は、材齢 28 日において 35N/mm^2 程度以上を確保し、十分な余裕をもって品質基準強度 27N/mm^2 以上を満足する結果となった。

3.3 計測結果

材齢 4 ヶ月時点まで目視観察した結果、各階の床スラブ面積 960m^2 についてひび割れ収縮目地を設置せずに一度に施工したにも関わらず、ひび割れの発生は全く認められなかった。

ひずみ挙動は、ひずみゲージの温度依存性を補正して得られたコンクリートの実際の挙動を表すと考えられる全ひずみ、およびこれから温度ひずみを除いた実ひずみの 2 種類について検討した。温度ひずみは、微拘束試験体の 6 時間間隔での温度変化に伴うひずみ差分のプロットを最小二乗法で線形近似して求めた線膨張係数

表-5 工事に使用するコンクリート調査

調査	水結合材比 (%)	単位水量 (kg/m^3)	細骨材率 (%)	*1 膨張材混和量 (kg/m^3)	*2 SRA 混和量 (kg/m^3)	*2 AE 減水剤 (L/m^3)
原調査	58	180	47	-	-	0.78
CRC	54	180	46	20	5	1.08

*1 膨張材はセメント内割 *2 単位水量に含める

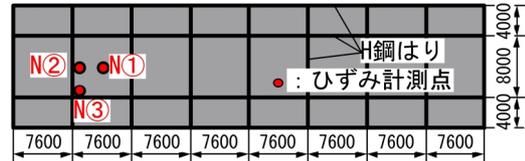


図-5 適用建物の平面図およびひずみ計測点

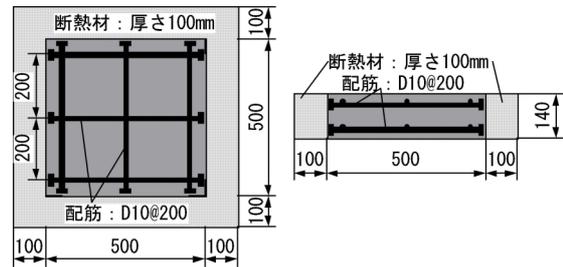


図-6 模擬試験体（内部拘束試験体）

$10.3 \mu/$ により算定した。この線膨張係数は、セメントと膨張材の水和反応が安定化したと考えられる材齢 11 日以降 91 日までのデータを用いており、材齢依存性や含水率の影響が一定程度反映された値となっている。

図 - 9 に床コンクリートのひずみ挙動を示す。図中の横軸は CEB-FIP90 による有効材齢、また縦軸は最大主ひずみで表記してある。N ~ N

の各点において実ひずみおよび全ひずみとも最大主ひずみは類似の挙動を示しており、計測位置による差異は小さい（ただし、N は 32 日時点以降は計測不能）。実ひずみは、初期の膨張ひずみが材齢約 75 日時点でも 100μ 程度残存しているのに対し、全ひずみは、初期に $100 \sim 150 \mu$ 膨張した後収縮し、約 75 日時点で 200μ 程度の収縮側のひずみとなっている。この違いは、打設時のコンクリート温度 30 以上に対して、材齢約 75 日時点では床コンクリート温度が約 20 も低下しており、この温度の影響による。

拘束の違いによるひずみ挙動の違いを示したのが図 - 10 で、微拘束試験体のひずみに対して、内部拘束試験体では 100μ 程度小さく、床コン

クリートではさらに 200 μ 程度小さい。図中のひずみは実ひずみであり、図 - 3の場合と比較して体積に対する表面積の比が小さく、乾燥が進みにくいことを表している。

図 - 11は床コンクリートの主ひずみとその方向の分布で、最大主ひずみは 80 ~ 105 μ，最小主ひずみは 25 ~ 80 μ 程度の値となっており、全体に最小と最大主ひずみの差は比較的小さい。

4. 考察

以下では、コンクリートのひび割れに支配的な影響を拘束応力 σ_c について簡単に検討する。ただし、この検討を行う方法については、かなりの仮定が含まれており、参考値程度の取り扱いとする。しかし、このような実床部材の拘束応力に関する検討はこれまで少なく、貴重な知見となることが考えられる。

ここでは、拘束体のひずみを床コンクリートの実ひずみ挙動から推定することで力の釣合いを介して σ_c を算定する。実ひずみを用いるのは、次の理由による。即ち、基礎ばりに拘束される外壁などの場合と異なり、対象建物の床スラブでは主たる拘束体である内部の補強鉄筋および鉄骨はりと同被拘束体の床コンクリートは同じ環境温度のもとで類似の温度挙動をすると考えられ、両者の線膨張係数の相違が小さいことから温度変化により床コンクリートに発生する拘束応力は軽微と考えられるためである。

単純化のため、床スラブを一軸部材と考えると、コンクリートと拘束体の力の釣合いは(1)式

となる。 σ は拘束応力、 ε は弾性ひずみ、 E は弾性係数、 A は断面積、下付き文字の c はコンクリート、 d はデッキプレート、 s は鉄骨はり、 r は補強鉄筋を表す。

$$\sigma_c A_c + \varepsilon_d E_d A_d + \varepsilon_s E_s A_s + \varepsilon_r E_r A_r = 0 \quad (1)$$

(1)式から σ_c を求めるため、 ε_d 、 ε_s 、 ε_r が必要である。今回はこれらを直接計測していないが、鉄骨はり位置に近いN およびN 点のはり長さ方向の床コンクリートひずみ(図 - 11のY方向の垂直ひずみ)により代用する。ここに、 ε_d 、 ε_s 、 ε_r は同一と仮定した。ここで対象とする2

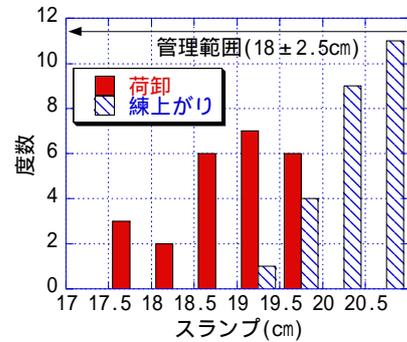


図-7 スラブのばらつき

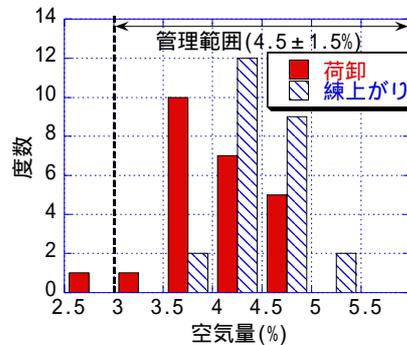


図-8 空気量のばらつき

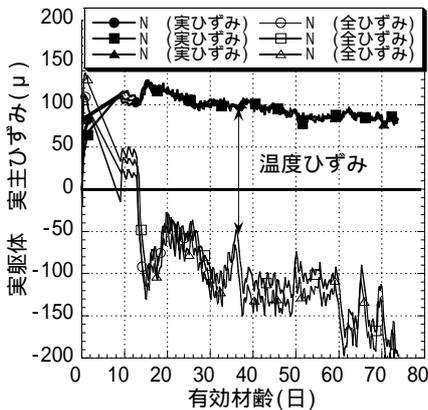


図-9 躯体ひずみの経時変化

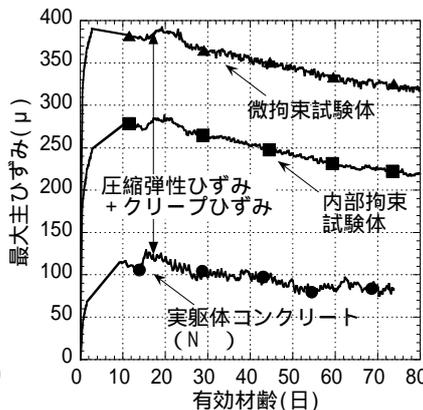


図-10 ひずみ挙動への拘束の影響

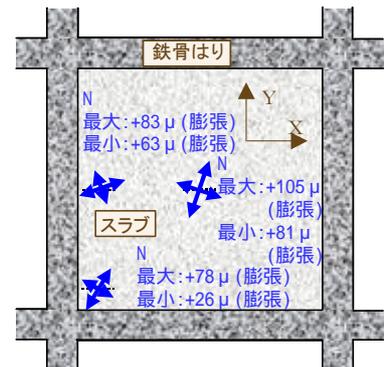


図-11 ひずみ分布

次元部材のひずみの分布を一次元部材として単純化しても応力の算定に顕著な誤差が生じないことはこれまでの研究で報告されている⁷⁾。表-6と表-7は、それぞれこの算定における入力値と結果で、 N と N の平均を取ると最大膨張時にケミカルプレストレスによる $\sigma_c = 0.84\text{N/mm}^2$ の圧縮応力が発生、その後75日材齢時までには 0.49N/mm^2 が残存していると算定された。これより、乾燥収縮による応力緩和が -0.3N/mm^2 程度起こったことになる。

上記の圧縮応力は今後の乾燥収縮ひずみの進展を考慮しても長期的なひび割れ発生抑制に大きく寄与することが期待される。本建物のコンクリートおよび部材の条件で、土木学会式⁸⁾にて算定した場合、乾燥材齢75日で最終乾燥収縮ひずみの70%程度が進行していると計算される。これから床コンクリートの乾燥収縮の過半は進行していると仮定すると、長期的には上記ケミカルプレストレス圧縮応力がほぼ消失することになる。一方、ひび割れ発生強度を割裂強度の0.7倍程度と考えたとき¹⁾、引張側に少なくとも 1.5N/mm^2 程度の引張応力の発生がひび割れ発生までに許容されるから、本床スラブのひび割れ発生の危険度は低いと推察される。今回のような鉄骨ばりに拘束されたデッキ床スラブではひび割れが生じることが多いが、CRCを用いることでこれを抑止し良好な結果となった。

5. まとめ

本研究では、ひび割れ低減コンクリートを実工事に適用する際に考えられる課題を解決するため、調合選定、実施工、躯体のひずみ挙動について実験的検討を実施し、次の結論を得た。

- (1) 空気連行性に着目して低級アルコール系収縮低減剤を選定した結果、実工事にて連行空気量が安定導入でき、良好な施工を実現した。
- (2) 各階の床面積 960m^2 をひび割れ収縮目地なしに施工したが、材齢4ヶ月時点まで床スラブにひび割れの発生は認められなかった。
- (3) 実躯体では略算の結果ケミカルプレストレ

表-6 応力推定に用いた諸係数

項目	詳細	断面積(mm ²)
コンクリート	7600×140mm	1058034
デッキプレート	7600×1mm	7600
配筋	D10 @200mm 2段	5966
鉄骨断面	400×200×12×22mm	26144
はり鋼材弾性係数	2100000 N/mm ²	-

表-7 コンクリート拘束応力の推定

経時 ポイント	入力値		算定結果
	推定源	ひずみ $\epsilon_s, \epsilon_c (\mu)$	応力 $\sigma_c (\text{N/mm}^2)$
最大 膨張時	N②	110	0.87
	N③	104	0.82
	平均	107	0.84
材齢 75日	N②	65	0.51
	N③	58	0.46
	平均	62	0.49

スが 0.8N/mm^2 程度導入されたと推測され、長期的なひび割れの発生の危険性は低い。

謝辞 本研究を遂行するにあたり電気化学工業および旭電化工業の関係各位には多大なご協力を賜った。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 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
- 2) 富田六郎：超低収縮コンクリート，コンクリート工学，Vol.32，No.7，pp.105-109，1994
- 3) 富田六郎他：混和材料の使用によるRC建築物のひびわれ低減効果，コンクリート工学，Vol.24，No.5，pp.14-21，1986
- 4) 富田六郎：収縮低減剤，コンクリート工学，Vol.26，No.3，pp.55-60，1988
- 5) 笠井芳夫：コンクリート総覧，技術書院，pp.495，1995
- 6) 百瀬晴基他：低熱ポルトランドセメント及び膨張材を用いたコンクリートの実RC構造物壁部の収縮挙動，JCI 膨張コンクリートによる構造物の高機能化シンポジウム，pp.21-26，2003
- 7) 今本啓一：各種コンクリート壁体の収縮挙動、日本建築学会構造系論文集、No.568、P.15、2003
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書[構造的な性能照査編]，第3章，pp.30-34，2002