

低収縮コンクリートの開発と実構造物への適用

Study on Development and Practical Use of Low Shrinkage Concrete

谷口 秀明 HIDEAKI TANIGUCHI
 浅井 洋 HIROSHI ASAI
 樋口 正典 MASANORI HIGUCHI
 三上 浩 HIROSHI MIKAMI
 藤田 学 MANABU FUJITA

本報は、膨張材や収縮低減剤を使用した低収縮コンクリートの開発とその適用事例について述べたものである。実験の結果、膨張材と収縮低減剤の併用によりコンクリートの乾燥収縮を 1/3 程度にできること、高強度、高流動あるいは軽量を目的とした特殊コンクリートの乾燥収縮あるいは自己収縮を低減できること、塗布型の収縮低減剤を養生剤としても、単位水量の減少による収縮および収縮ひび割れの低減と同等の効果が得られることなどがわかった。また、低収縮コンクリートを使用して 5~10 年を経過した構造物には、収縮ひび割れが発生していないことが確認された。

キーワード：低収縮コンクリート、乾燥収縮、自己収縮、高強度コンクリート、高流動コンクリート、人工軽量骨材コンクリート

This paper describes the development of the low shrinkage concrete using expansive admixture and shrinkage-reducing admixture. As a result of the experiment of the concrete, followings were obtained; 1) Shrinkage of concrete using both of the admixtures becomes about 1/3 of that of normal concrete, 2) Those admixtures are effective also in the shrinkage reduction of special concrete such as high strength concrete, high-fluidity concrete and lightweight aggregate concrete, 3) Spreading shrinkage-reducing admixture on hardened concrete surface, the effect on reducing shrinkage and shrinkage cracks is almost equal to the case of decreasing the unit volume of water. Moreover, it is confirmed to the structure which passed 5-10 years after using the low shrinkage concrete that shrinkage crack does not occur.

Key Words: Low Shrinkage Concrete, Dry Shrinkage, Autogenous Shrinkage, High Strength Concrete, Self-Compacting Concrete, Lightweight Aggregate Concrete

1. はじめに

コンクリート構造物を長期的に供用するためには、ひび割れの発生を抑制し、発生後にはその幅を制御することが重要である。最近では、骨材の品質の影響によりコンクリートの自己収縮ひずみおよび乾燥収縮ひずみがいずれも一般的な骨材を用いた場合の 2 倍程度となり、甚大なひび割れ・変形を生じた橋梁が報告されている¹⁾。このため、2007 年制定コンクリート標準示方書²⁾では、収縮ひずみの試験値が明らかでないコンクリートを使用する場合には、収縮ひずみを通常の 1.5 倍として設計すること等が盛り込まれた。しかし、このような過大な値

を見込んだ設計は不経済であることは明らかであり、建設に係わるさまざまな問題を引き起こす可能性がある。したがって、なるべく早い段階（計画・設計段階）よりコンクリートの品質の地域性を把握し、たとえば、コンクリートの収縮が大きくなる可能性のある場合については、これを考慮した設計を行うか、あるいは収縮を低減させるための対策を講じることが重要である。

筆者らの調査結果³⁾によれば、呼び強度 40 のレディーミクストコンクリートの標準配合には、単位水量が 200kg/m³、単位セメント量が 600kg/m³ を超えるものも存在する。このため、骨材の品質が直接的に収縮に及ぼす可能性とともに、骨材の品質が配合に影響を及ぼすこ

表-1 配合の基本条件

W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)			
		W	B	S	G
53	47	168	316	824	975
40	43		420	725	995

W/B : 水結合材比, s/a : 細骨材率, W : 練混ぜ水, B : 結合材 (セメントと膨張材), S : 細骨材, G : 粗骨材

とにより収縮ひずみを増大させることを考慮する必要がある。単位水量を低減させるためには、AE 減水剤から高性能 AE 減水剤に変更する手段がよく用いられている。しかし、施工性能などの他の性能・品質への影響を考慮すれば、高性能 AE 減水剤の使用により減じることができる単位水量には限界がある。

収縮低減対策の一つとして膨張材を使用することが増えている。たとえば、耐震補強を目的とする巻立てコンクリートでは、拘束によるひび割れを抑制するため、以前より膨張材が使用されている。しかし、これに関しても、筆者らの調査結果⁴⁾では、最大ひび割れ幅は0.1mm という微細なものが多いものの、調査対象の全橋でひび割れが確認されており、拘束が大きな構造物ではより効果的な方法が望まれている。

本報では、今後の収縮低減対策の一つとして、膨張材と収縮低減剤を組み合わせたコンクリート（以下、低収縮コンクリートと呼ぶ）を取り上げ、通常のコンクリートおよび特殊コンクリートにおける収縮低減効果とコンクリート橋への適用事例を紹介する。また、練混ぜ時に収縮低減剤を使用できない場合を想定し、養生として収縮低減剤を塗布した場合の効果についても触れることとする。

2. 低収縮コンクリートの収縮特性

(1) 目的および実験方法

本章では、膨張材と収縮低減剤の使用による通常のコンクリートの収縮低減効果を確認した。

普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm³，記号：C），細骨材（鬼怒川産川砂，表乾密度 2.56g/cm³，記号：S）および粗骨材（葛生産硬質砂岩系碎石 2005，表乾密度 2.67g/cm³，記号：G）を基本材料とし、膨張材（石灰系，標準型，記号：E）と収縮低減剤（低級アルコールアルキレンオキッド付加化合物界面活性剤，記号：RS）を組み合わせた。また、表-1 に示すとおり、単位水量を一定とし、水結合材比(W/B)を 40%と 53%とした2種類の配合を比較した。単位膨張材量は膨張材の製

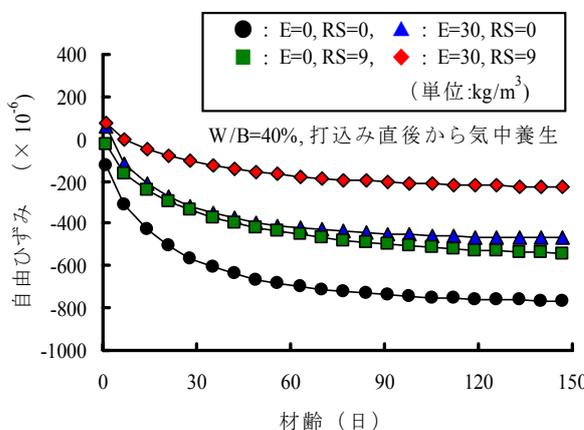
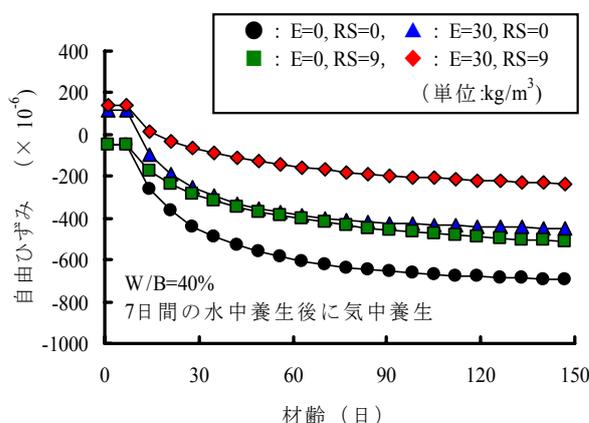
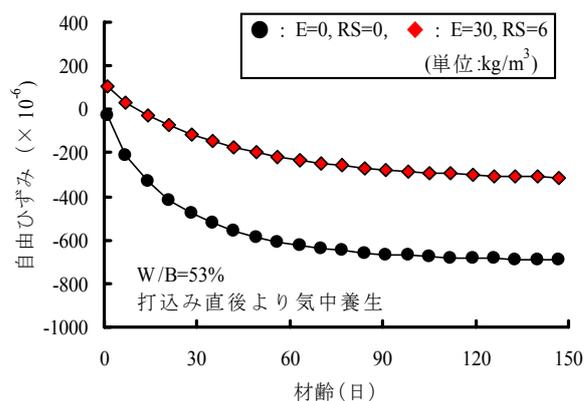
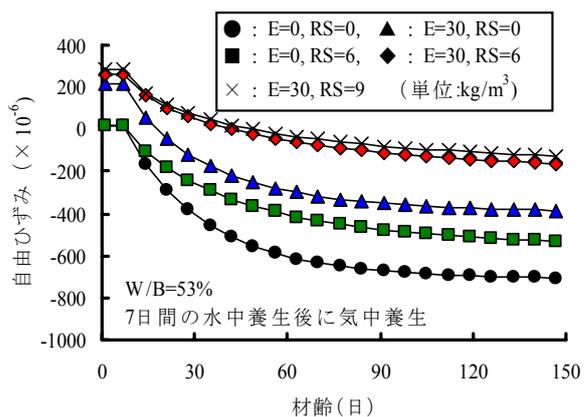


図-1 コンクリートの自由ひずみの経時変化

表-2 特殊コンクリートの使用材料，配合および試験結果（フレッシュ性状および材齢 28 日の圧縮強度）

	水結合材比, W/B (%)	水粉体比, W/P (%)	細骨材率, s/a (%)	単位量 (kg/m ³)										スランブ (cm)または スランブフロー (mm)	500mm フロー 時間 (秒)	空気量 (%)	V漏斗 流下 時間 (秒)	U型充 てん高 さ (mm)	圧縮強度 (N/mm ²)	
				W	P		S		G		SP	RS	標準 水中 養生						気中 養生	
					B	LF	S1	S2	GN	GL										
																				C
A1	30.0	30.0	40.3	150	500	0	0	330	343	1020	0	7.5	0.0	18.5	—	4.1	—	—	82.5	79.9
A2	35.0	30.2	52.7	175	480	20	79	554	248	742	0	12.7	9.0	655×680	6.6	3.8	12.8	345	78.9	76.6
B1	36.5	31.3	52.7	175	480	0	79	554	248	0	372	12.8	0.0	625×645	5.8	5.0	15.2	325	67.8	61.3
B2	36.5	31.3	52.7	175	460	20	79	554	248	0	372	13.4	9.0	645×670	7.6	3.5	18.1	340	68.4	63.3

C: 早強ポルトランドセメント(密度3.13g/cm³), E: 膨張材(石灰系, 低添加型, 密度3.16g/cm³), LF: 石灰石微粉末(密度2.64g/cm³), S1: 川砂(表乾密度2.54g/cm³), S2: 砕砂(表乾密度2.64g/cm³), GN: 砕石2005(絶乾密度2.65g/cm³), GL: 軽量粗骨材(絶乾密度1.33g/cm³), SP: 高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系), RS: 収縮低減剤(低級アルコールアルキレンオキッド付化合物界面活性剤)

造会社が示す標準使用量(30kg/m³)とした。なお、表中の結合材の単位量とは、セメントと膨張材の単位量を合計したものである。

スランブの調整(8~12cm)には、水結合材比53%ではAE減水剤(変成リグニンスルホン酸化合物)を、水結合材比40%では高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)を使用した。いずれの配合においてもAE剤を併用して空気量を4.5±1.0%の範囲に調整した。収縮低減剤は、単位結合材量に対して2%程度を目安にし、水結合材比53%では6kg/m³、40%では9kg/m³とした。なお、水結合材比53%についてはその1.5倍の使用量(9kg/m³)として、その効果も確認した。

長さ変化に伴う自由ひずみは、角柱供試体(100mm×100mm×400mm)内に設置した埋込みひずみ計により測定を行った。養生方法としては、材齢7日まで水中養生を行った後、気中養生(温度20℃、湿度60%)を行った場合と、打込み直後から気中養生とした場合を比較した。

(2) 実験結果および考察

自由ひずみの経時変化を、図-1に示す。図中のひずみの起点は凝結の始発とした。7日間の水中養生を行った場合の自由ひずみは、多少の自己収縮ひずみを含むが、おおそ、乾燥収縮ひずみとして扱うことができる。水結合材比が小さい(単位結合材量が多い)場合や水中養生を行わない場合には、膨張材による初期の膨張ひずみは小さくなる傾向がある。また、水結合材比53%では、収縮低減剤を6kg/m³使用するよりも膨張材を30kg/m³使用したほうが収縮ひずみは若干小さくなるが、水結合材比40%においては両者の違いは認められない。しかし、膨張材と収縮低減剤を併用すれば、いずれの水結合材比においても、収縮ひずみはそれらを用いない場合の1/3程度まで低減できることがわかる。なお、水結合材

比53%においては、収縮低減剤を標準量の1.5倍使用しても標準量との差異は認められないので、収縮低減剤の効果は使用量に比例するものではないことがわかる。

3. 膨張材と収縮低減剤の併用による特殊コンクリートの収縮低減効果

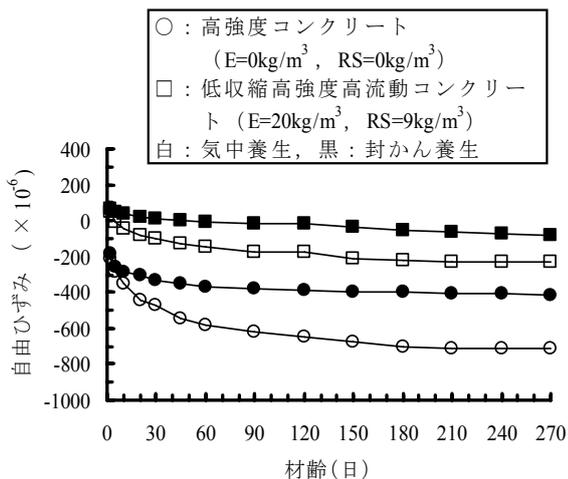
(1) 目的および実験方法

高流動コンクリート、高強度コンクリート、軽量コンクリート等は、それぞれの性能を活かしたさまざまな構造物への使用が期待できる。しかし、それらのコンクリートは一般に単位セメント量が多くなる傾向があること等により、通常のコンクリートよりも収縮量が増加する傾向にある。そこで、この章では、前章で得られた結果をもとに、それらの特殊コンクリートに対する膨張材と収縮低減剤の併用による収縮低減効果を確認した。

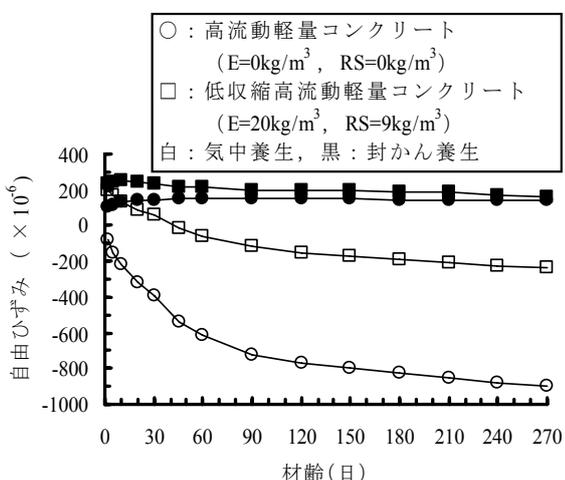
表-2は、実験に使用した特殊コンクリートの使用材料、配合および試験結果(フレッシュ性状、圧縮強度)である。配合A1は、通常のスランブ18cm程度の高強度コンクリートで、配合A2の低収縮高強度高流動コンクリートとの比較として用いた。配合B1およびB2は、いずれも人工軽量粗骨材を使用した高強度高流動コンクリートで、膨張材と収縮低減剤の有無ならびに高性能AE減水剤の使用量以外の配合条件を一致させた。高流動コンクリートの流動性状は、土木学会指針⁵⁾をもとに、自己充てん性ランク1に相当するものとして調整した。ひずみの測定方法は、前章と同一である。養生方法は、前章で実施した気中養生以外に封かん養生(アルミ箔粘着テープでシールした状態)を行い、自己収縮ひずみを測定した。

(2) 実験結果および考察

自由ひずみの経時変化を、図-2に示す。普通骨材を



(a) 普通骨材を使用した場合



(b) 人工軽量骨材を使用した場合

図-2 膨張材と収縮低減剤の併用による特殊コンクリートに対する収縮低減効果

用いた高強度コンクリート（配合 A1）の収縮ひずみは、封かん養生であっても自己収縮により材齢 10 日には約 -300×10^{-6} に達する。低収縮型高強度高流動コンクリート（配合 A2）の収縮ひずみは、養生方法にかかわらず、配合 A1 よりも相当に低減されており、自己収縮、乾燥収縮の双方の低減に効果が認められる。一方、人工軽量粗骨材を使用した場合には、膨張材と収縮低減剤の有無によらず、封かん養生では膨張ひずみを生じた状態で持続していることがわかる。これは、人工軽量粗骨材の内部に含まれる水がセメントマトリックスに放出することで相対湿度の低下を抑制し、また、初期水和に必要な量を十分に上回る水量を供給することにより、自己収縮ひずみを低減させる働きに起因するものである。このような効果を有するため、事前に十分に含水させた人工軽量粗骨材を用いる場合には、コンクリートの自己収縮の低

表-3 使用材料および配合

記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤	
			W	C	S	G	種類	量(Cx%)
H40	40	40.7	170	425	701	1020	SP	0.70
H40U	40	38.1	185	463	630		WA	0.30
H40D	40	43.8	150	375	796		SP	1.50

W:水道水, C:早強ポルトランドセメント(密度 3.13g/cm^3), S:鬼怒川産川砂(表乾密度 2.58g/cm^3)と葛生産砕砂(表乾密度 2.64g/cm^3)の混合(1:1), G:葛生産砕石(表乾密度 2.65g/cm^3), SP:ポリカルボン酸系高性能AE減水剤, WA:リグニンスルホン酸系AE減水剤

減を目的に、膨張材と収縮低減剤を併用する必要性はほとんどない。しかし、膨張材や収縮低減剤を使用しない高流動軽量コンクリートの乾燥環境下における収縮ひずみは、材齢 270 日で -900×10^{-6} に達する。これに対し、乾燥収縮量の低減を目的として膨張材と収縮低減剤を併用すれば、使用しない場合に比べて 1/3 程度に低減できることがわかる。このように、さまざまな性能を高める目的で製造された特殊コンクリートは、その性能を高める代わりに収縮量の増加を招くことがあるが、膨張材と収縮低減剤の併用により自己収縮および乾燥収縮の双方あるいは乾燥収縮のみを低減させることができ、より高い性能を有するコンクリートの実現が可能であることが確認された。

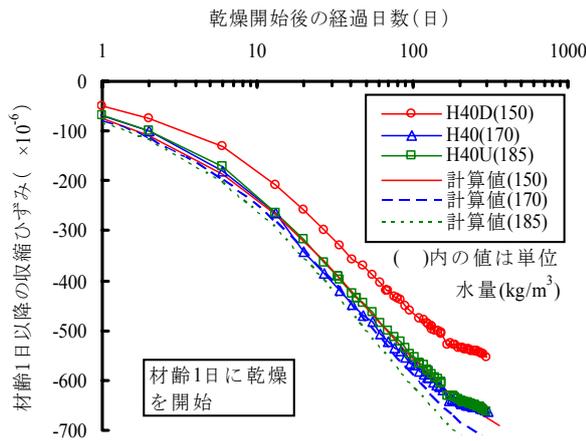
4. 施工段階における塗布型収縮低減剤によるコンクリートの収縮低減効果

(1) 目的および実験方法

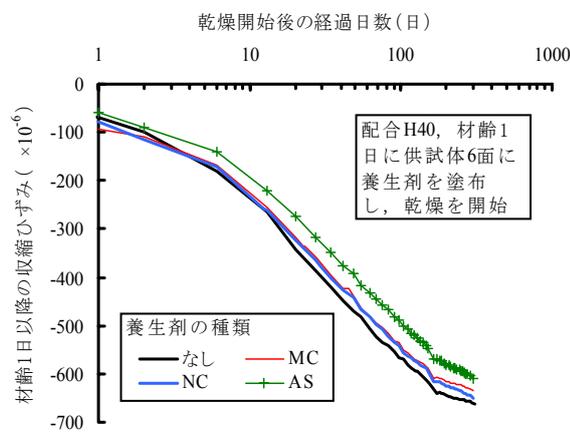
諸事情により、練混ぜ時に収縮低減剤を混入できない場合を想定し、施工段階の収縮低減を図る方法の一つとして、塗布型収縮低減剤を養生段階で噴霧した場合の効果を確認することとした。

実験には、表-3 に示す設計基準強度 40N/mm^2 の PC 用コンクリートを想定し、単位水量を変化させた 3 配合を使用した。このうち、配合 H40 のコンクリートに対し、塗布型の収縮低減剤（低級アルコールのアルキレンオキシド付加物、記号：AS、塗布量： 200ml/m^2 ）を用いた場合と、一般的な市販の養生剤として水溶性パラフィンワックス（記号：MC、塗布量： 150ml/m^2 ）および浸透型養生剤（塩基性シリカ化合物、記号：NC、塗布量：3 倍希釈により 100ml/m^2 ）を用いた場合の効果を比較した。

コンクリートの乾燥収縮の低減効果は、無拘束状態の（自由）収縮ひずみと鉄筋拘束による収縮ひび割れの



(a) 単位水量の効果



(b) 養生剤の効果

図-3 乾燥開始した材齢1日以降の収縮ひずみ

発生日数によって評価することとした。前者は、角柱供試体（寸法：100×100×400mm）を使用し、供試体の中心に埋込み型ひずみ計を取り付けてひずみの測定を行った。後者は、JCI-SAS2⁶⁾を参考として、100×100×1,500mmの供試体の中心部に鉄筋 D32（長さ方向の中央 300mm 範囲のリブおよび節を除去している）を設置したもので、型枠の内側はシートで縁切りを行った。

養生剤は、打込み開始から材齢1日まで封かん養生した供試体の表面に霧吹きを用いて塗布し、その塗布量は噴霧前後の質量変化で確認した。全面に養生剤を塗布した後、乾燥を開始した。

(2) 実験結果および考察

図-3 に示すとおり、材齢 300 日における配合 H40D の収縮ひずみは、配合 H40 よりも 100×10^{-6} 程度小さく、単位水量の減少による収縮低減の効果が認められる。しかし、配合 H40 と配合 H40U の収縮ひずみはほぼ同値である。コンクリート標準示方書²⁾による乾燥収縮ひず

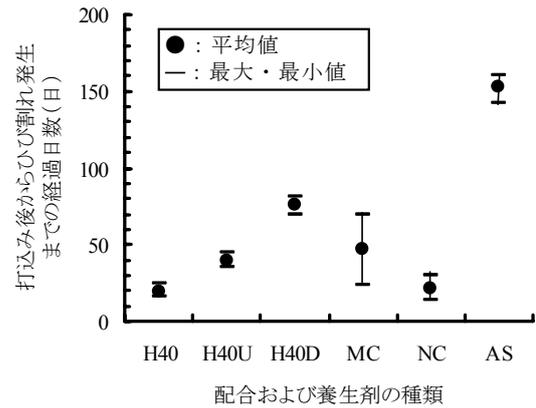


図-4 配合および養生剤の種類と収縮ひび割れ発生までの経過日数の関係

みの計算値でも、比較した単位水量の範囲では乾燥収縮ひずみの差は材齢 300 日で数 10×10^{-6} 程度であり、配合によっては単位水量による収縮低減効果が明確でない場合もあるようである。配合 H40 に対して養生剤を塗布すると、いずれも収縮ひずみは小さくなる傾向があるが、通常の養生剤(MC,NC)の効果は小さく、収縮低減を目的として使用するのには適切ではないと言える。塗布型収縮低減剤 AS は、塗布しない場合に比べて 60×10^{-6} 程度の収縮低減効果を発揮している。ただし、前述の単位水量を 150 kg/m^3 まで減じた配合 H40D の効果には達していない。

図-4 に示すとおり、ひび割れ発生日数に着目した場合にも配合 H40D には明確な効果が認められるが、配合 H40 と配合 H40U の単位水量とひび割れ発生日数の関係は逆転している。図-3(b)において収縮低減にほとんど効果がなかった通常の養生剤のひび割れ発生日数は、養生剤 MC では若干遅延したが、養生 NC については使用しない場合とほぼ変わらない結果である。収縮ひずみは、塗布型の収縮低減剤 AS を使用しても配合 H40D の低減効果に達しなかったが、収縮ひび割れの発生日数に関しては、配合 H40D よりも 2 倍程度遅延し、明確な効果が認められる。

コンクリートの収縮低減に対しては単位水量をできるだけ少なくすることが基本である。しかし、コンクリートの施工性能も重要な要素で、実務上、これを満足するための単位水量の低減には限界がある。このため、本論文で検討した塗布材料の使用等の施工作業段階における対策も含めて総合的に検討し、適切な方法を講じることが重要であると考えられる。



写真-1 RC 張出し床版への適用

5. 低収縮コンクリートのコンクリート橋への適用事例

この章では、膨張材と収縮低減剤を併用した低収縮コンクリートを実構造物に適用した事例を紹介する。

(1) 美観を重視した RC 張出し床版への適用

低収縮コンクリートの対象となった橋梁は、橋長が30.4m、幅員が車道 7m、歩道 3.5~4.37m のポストテンション PC 単純 T 桁である。RC 張出し床版は、写真-1 に示すように水平、鉛直の両方向に対して曲線を活かしたデザインが採用された。コンクリートの仕上り面の品質には高い水準が求められ、特にひび割れを発生しないことが必要条件とされた。しかし、RC 張出し床版は主桁を架設した後現場打ち工法によって構築するため、主桁による拘束で収縮ひび割れを生じる可能性があった。そこで、2. における検討結果をもとに、模擬試験体(橋軸方向 1/2 の切出しモデル)において6ヶ月後までひび割れを発生しないことを確認したうえで、低収縮コンクリート(現地での試験練り結果より、W/Bは53.0%から52.1%に変更)を工事に適用した。本橋は竣工して約8年が経過しているが、ひび割れ発生は生じていない。

(2) 塩害劣化した橋台の断面修復への適用

凍結防止剤の散布により塩害による劣化が進行し、橋台のコンクリート表面から約15cmの深さまで劣化したコンクリートを除去した後、補修材で断面修復を行う必要があった。しかし、市販の補修材はモルタルであり、大断面修復には不向きである。そこで、表-4 に示す低収縮型高流動コンクリートを適用した。水結合材比は、要求される強度ならびに塩化物イオンの浸透性から45%以下とした。しかし、水結合材比を小さくし、単位結合材量を増加させると、水和に伴う発熱量や自己収

表-4 橋台の断面修復用コンクリートの配合

水結合材比, W/B (%)	水粉体比, W/P (%)	細骨材率, s/a (%)	単位量 (kg/m ³)									
			W	P			S		G	SP	RS	Li
				B		LF	S1	S2				
				C	E							
44.9	35.8	51.6	175	350	40	100	490	337	804	7.4	9.0	2.7

C: 普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm³), E: 膨張材(石灰系, 密度3.15g/cm³), LF: 石灰石微粉末(密度2.71g/cm³), S1: 海砂(表乾密度2.55g/cm³), S2: 砕砂(表乾密度2.64g/cm³), G: 粗骨材1505(絶乾密度2.68g/cm³), SP: 高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系), RS: 収縮低減剤(低級アルコールアルギレンオキサイド付加化合物界面活性剤), Li: 亜硝酸リチウム



写真-2 塩害で劣化した橋台の断面修復材に使用した施工例

縮量が大きくなり、かえってひび割れの発生により塩化物イオンの浸透を助長させる可能性があるため、水結合材比は45%とし、自己充てん性を得るために必要となる単位粉体量は石灰石微粉末で補填した。膨張材は、標準使用量が30kg/m³のものであるが、既設コンクリートが乾燥していることや湿潤養生を行いにくい部分であること等を考慮し、単位結合材量の約10%とした。収縮低減剤の使用量は、前章における検討結果を踏まえ、9.0kg/m³とした。このほか、塩化物イオン濃度を考慮し、亜硝酸リチウムを使用した。低収縮コンクリートを使用した断面修復部分は供用を開始して約5年が経過しているが、ひび割れの発生は確認されていない。

(3) 塩害劣化した PC 部材の断面修復への適用

塩害による劣化が PC 橋の PC 鋼材あるいはその周りのコンクリートに達した場合には、(2)と同様に劣化したコンクリートを除去し、適切な補修材で修復する必要がある。PC 部材の断面修復を行うに当たっては、RC 部材とは異なり、はつり後の断面にプレストレスが再分配されることや、断面修復部分にプレストレスを再導入し、断面修復材の収縮や PC 部材への荷重作用によるひび割れを抑制すること等に対する事前の検討と施工時の管理を必要とする。



写真-3 塩害劣化を想定したPC桁の断面修復実験において、低収縮型高強度高流動コンクリートにより断面修復を行った状況⁸⁾

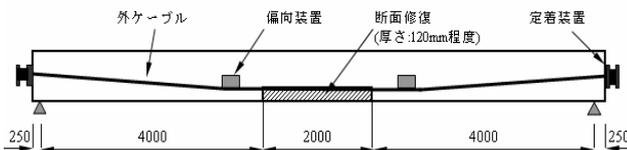


図-5 PC桁の断面修復および外ケーブル補強の方法⁸⁾

PC桁下面の劣化を想定し、従来のプレパックドコンクリートのように逆打ち工法で充てんできる低収縮型高強度高流動コンクリートを検討した。使用したコンクリートは、表-2に示す配合A2に類する配合である。ただし、逆打ち工法で流し込んでも桁コンクリートとの一体性が確保できるよう、発泡剤を用いてコンクリートに適度な初期膨張性を付与した。

なお、この実験は、(独)土木研究所と(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会によるPC橋の改造技術共同研究委員会の活動の一環で実施したものであり、既報^{7), 8)}では断面修復の材料および施工方法の検討、断面除去、断面修復、外ケーブル補強および補修・補強後の暴露状態におけるPC桁の挙動、載荷試験によるPC桁の力学的性能等について詳細な検討を行っている。

6. まとめ

低収縮コンクリートに関する基礎的実験および実構造物への適用によって、以下のことがわかった。

- ① 膨張材と収縮低減剤を併用すれば、通常のコンクリートの乾燥収縮ひずみを1/3程度に低減できる。
- ② 膨張材と収縮低減剤の併用は、高強度、高流動あるいは軽量を目的とした特殊コンクリートの乾燥収縮ひずみの低減にも十分に効果がある。高強度高流動コンクリートに対しては自己収縮ひずみを

低減することも可能性である。

- ③ 練混ぜ時の収縮低減剤が使用できない場合、塗布型の収縮低減剤を養生剤として用いれば、単位水量の減少により得られる収縮ひずみおよび収縮ひび割れと同等の結果が得られることがわかった。
- ④ 低収縮コンクリートを適用し、5～10年間を経過した構造物には、収縮ひび割れが発生していないことが確認された。

なお、本報では、膨張材および収縮低減剤による収縮低減あるいはひび割れ抑制効果について述べたが、実際の構造物においては、材料面のみならず、設計面、施工面を含めた総合的な検討が重要である。

参考文献

- 1) 土木学会：垂井高架橋損傷対策特別委員会中間報告書，2005.9
- 2) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書【設計編】，2008.3
- 3) 谷口秀明，樋口正典，藤田学：PC橋を対象とした高強度コンクリートの配合，強度および収縮に関する一考察，第15回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.193-198，2006.10
- 4) 谷口秀明，豊田邦男，辻野英幸，内田誠二郎：寒冷地における収縮補償用コンクリートの膨張特性，膨張コンクリートによる構造物の高機能化/高耐久化に関するシンポジウム論文集，pp.13-20，2003.9
- 5) 土木学会：高流動コンクリート施工指針，1998.7
- 6) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの自己収縮応力試験方法(案)，JCI-SAS2
- 7) 中村定明，濱田譲，谷口秀明，中村雅之：PC橋の改造技術に関する研究—その3：PC部材のはつりの適切性に関する研究—，プレストレストコンクリート，Vol.50，No.1，pp.54-60，2008.1
- 8) 谷口秀明，渡辺博志，竹中秀樹，三加 崇：PC橋の改造技術に関する研究—その4：大規模な断面修復の材料および施工に関する検討—，プレストレストコンクリート，Vol.50，No.2，pp.92-100，2008.3