

論文 尿素を用いた低収縮コンクリートの実構造物への適用

田中 博一^{*1}・河井 徹^{*2}・野田 宏昭^{*3}・綾野 克紀^{*4}

要旨: コンクリートのひび割れ発生を低減する目的で尿素を用いたコンクリートをRCラーメン高架橋のスラブおよび梁に約450m³適用した。適用に際しては、尿素の混入量、粗骨材の種類などを要因とした配合選定試験を実施し、施工性、乾燥収縮ひずみ低減効果などを総合的に考慮して配合を選定した。さらに、実構造物において、同時期に施工した尿素を用いたコンクリートと普通コンクリートの温度およびひずみを計測し、ひび割れ調査を実施して比較した。その結果、尿素および石灰石粗骨材を用いることで、乾燥収縮ひずみが40%以上低減すること、実構造物においてひび割れ低減効果が得られることなどを確認した。

キーワード: 尿素, 石灰石粗骨材, 乾燥収縮, ひび割れ, 現場計測, 実構造物

1. はじめに

コンクリート構造物にひび割れが発生した場合、構造物の耐久性や水密性などの性能が低下することが懸念される。近年、土木学会「2007年制定コンクリート標準示方書」や日本建築学会「建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2009」では、コンクリートの収縮に関する考え方が見直されており、コンクリートのひび割れ制御に対する関心が高まっている。

コンクリート構造物に発生するひび割れには、セメントの水和熱に起因する温度ひび割れや乾燥収縮ひび割れがある。温度ひび割れの低減については、尿素を用いたコンクリート（以下尿素コンクリート）に関する研究が行われ、尿素を用いた場合、練混ぜ直後の吸熱反応による温度低減効果と硬化時におけるセメントの水和反応の抑制効果により、コンクリートの水和熱低減効果があると報告されている^{1),2)}。さらに、筆者らは、尿素の高い水溶性と非揮発性に着目し、尿素コンクリートのひび割れ低減効果に関する研究を行っており、尿素コンクリートが温度ひび割れだけでなく、乾燥収縮ひび割れに対しても効果があることを明らかにした^{3),4)}。しかし、尿素コンクリートの実構造物におけるひび割れ低減効果については、ダム現場の骨材貯蔵設備の壁で確認した事例⁵⁾はあるが、少ないのが現状である。

そこで、本研究では、実構造物に尿素コンクリートを適用し、普通コンクリートと尿素コンクリートの温度およびひずみを現場で計測し、ひび割れ調査を実施して尿素コンクリートの実構造物におけるひび割れ低減効果について検討した。実施工に適用するにあたり事前に、尿素の混入量、粗骨材の種類を要因として配合選定試験を実施して最適な配合を選定した。

2. 配合選定試験

2.1 要因と水準

要因と水準を表-1に示す。要因は尿素混入量および粗骨材の種類とした。粗骨材の種類は、石灰石砕石と安山岩砕石を質量比4:6で混合した混合粗骨材と石灰石粗骨材のみを用いたものの2水準とした。なお、U0(混合)は、実施工にコンクリートを供給するレディーミクストコンクリート工場の30-12-20Nに対する標準配合であり、乾燥収縮をさらに低減する目的で、石灰石粗骨材のみを用いた場合についても検討することとした。

表-1 要因と水準

記号	尿素混入量 (kg/m ³)	粗骨材の種類
U0 (混合)	0	混合粗骨材 (石灰石+安山岩)
U20 (混合)	20	
U30 (混合)	30	
U0 (石灰石)	0	石灰石粗骨材 (石灰石のみ)
U20 (石灰石)	20	
U30 (石灰石)	30	

2.2 使用材料および配合

使用材料を表-2、配合を表-3に示す。尿素は無色無臭で直径1~2mmの粒状結晶（濃度99.0%以上）であり、水に溶けやすい（溶解度108g/100mL (20℃)）、水と混ぜると吸熱反応する（溶解熱-15.4kJ/mol）、非揮発性（ヘンリー定数 4.4×10^{-8} 気圧 m³/mol）などの特徴がある。尿素を用いる場合、尿素が水に溶解して液体の容積が増加するので、同一スランプを得るために単位水量を尿素の容積分だけ減少させた³⁾。また、はく落防止対策として、ポリプロピレン製の短繊維を混入率0.05% (455g/m³)として用いた。短繊維混入前のスランプおよび空気量の

*1 清水建設（株）技術研究所企画部 副主任研究員 工修（正会員）

*2 元清水建設（株）工博（正会員）

*3 九州旅客鉄道（株）施設部工事事務所

*4 岡山大学大学院 環境学研究科 教授 工博（正会員）

表-3 配合

記号	W/C (%)	(w+u)/c 容積比 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
				W	C	U	S	G1	G2	Ad
U0(混合)	46.9	1.49	43.0	168	358	0	754	410	615	3.58
U20(混合)	42.7	1.49	43.0	153	358	20	754	410	615	3.58
U30(混合)	40.5	1.49	43.0	145	358	30	754	410	615	3.58
U0(石灰石)	46.9	1.49	43.4	165	352	0	766	1037	—	3.52
U20(石灰石)	42.6	1.49	43.4	150	352	20	766	1037	—	3.52
U30(石灰石)	40.3	1.49	43.4	142	352	30	766	1037	—	3.52

目標値は12cm および4.5%とした。

2.3 試験項目

試験項目を表-4に示す。スランプおよび空気量は、短繊維を混入する前後で測定した。温度は短繊維混入前に測定した。圧縮強度および乾燥収縮は短繊維混入後のコンクリートを用いて測定した。圧縮強度試験体は測定材齢まで20±2℃の水中で養生した。乾燥収縮試験体は材齢7日まで20±2℃の水中養生を行った後、20±1℃、60±5%RHの恒温恒湿室内に静置した。

2.4 練混ぜ方法

練混ぜには、練混ぜ容量60リットルの強制二軸型ミキサを使用し、短繊維以外の材料を投入後90秒間練り混ぜた。スランプ、空気量および温度を測定した後、コンクリート全量をミキサ内に戻して、所定量の短繊維を混入してさらに30秒間練り混ぜた。

2.5 試験結果および考察

(1) フレッシュ性

スランプ、空気量および温度の測定結果を表-5に示す。すべての配合においてスランプおよび空気量は目標値を満足した。尿素を用いた場合、粗骨材の種類によらず、コンクリートの温度が2℃～3℃低下した。これは、練混ぜ直後の尿素と水の吸熱反応による温度低減効果^{2),3)}であると考えられる。

(2) 圧縮強度

圧縮強度試験結果を図-1に示す。尿素コンクリートの圧縮強度は、尿素混入量によらず、普通コンクリートと同等であった。表-3に示すように尿素コンクリートでは、尿素的容積分だけ単位水量を減少させるので、水セメント比は小さくなるが、水と尿素を合わせた液体の容積は普通コンクリートの水の容積と同等であるため、尿素が圧縮強度に与える影響は小さいものと考えられる。また、粗骨材の種類については、コンクリートの種類によらず圧縮強度はほぼ同等であった。

(3) 乾燥収縮

乾燥収縮試験結果を図-2に示す。また、尿素混入量と乾燥期間20週後における乾燥収縮ひずみとの関係を図-3に示す。図-3より、粗骨材の種類によらず、乾燥

表-2 使用材料

材料	記号	仕様
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm ³
細骨材	S	山砂 表乾密度 2.60g/cm ³ 吸水率 2.71%, F.M. 2.53
粗骨材	G1	石灰石碎石 表乾密度 2.70g/cm ³ 吸水率 0.50% Gmax20mm
	G2	安山岩碎石 表乾密度 2.65g/cm ³ 吸水率 0.51% Gmax20mm
混和材	U	尿素 密度 1.32g/cm ³ , 窒素分 46%
混和剤	Ad	AE減水剤
合成短繊維	PP	ポリプロピレン繊維 密度 0.91 g/cm ³ 形状 換算直径 0.0648mm×12mm

表-4 試験項目

試験項目	試験方法	備考
スランプ	JIS A 1101	
空気量	JIS A 1128	
温度	JIS A 1156	
圧縮強度	JIS A 1108	φ100×200mm 材齢7日, 28日, 91日
乾燥収縮	JIS A 1129	100×100×400mm ダイヤルゲージ法

表-5 スランプ、空気量および温度測定結果

配合	時期	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)
U0(混合)	短繊維混入前	11.5	4.3	23
	短繊維混入後	8.0	4.2	—
U20(混合)	短繊維混入前	12.5	4.7	21
	短繊維混入後	9.5	4.5	—
U30(混合)	短繊維混入後	14.0	5.4	20
	短繊維混入後	10.5	5.0	—
U0(石灰石)	短繊維混入前	13.0	4.7	25
	短繊維混入後	10.0	4.5	—
U20(石灰石)	短繊維混入前	13.0	4.6	23
	短繊維混入後	10.0	4.5	—
U30(石灰石)	短繊維混入後	14.5	4.8	23
	短繊維混入後	11.5	4.4	—

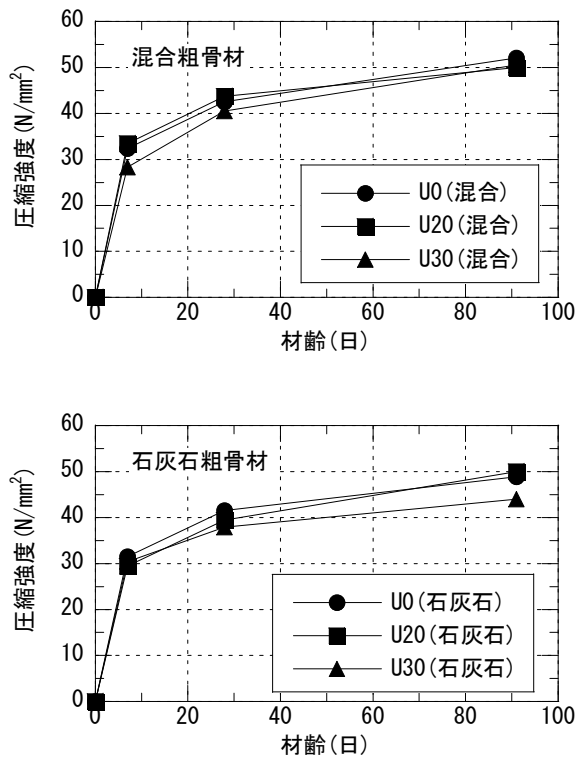


図-1 圧縮強度試験結果

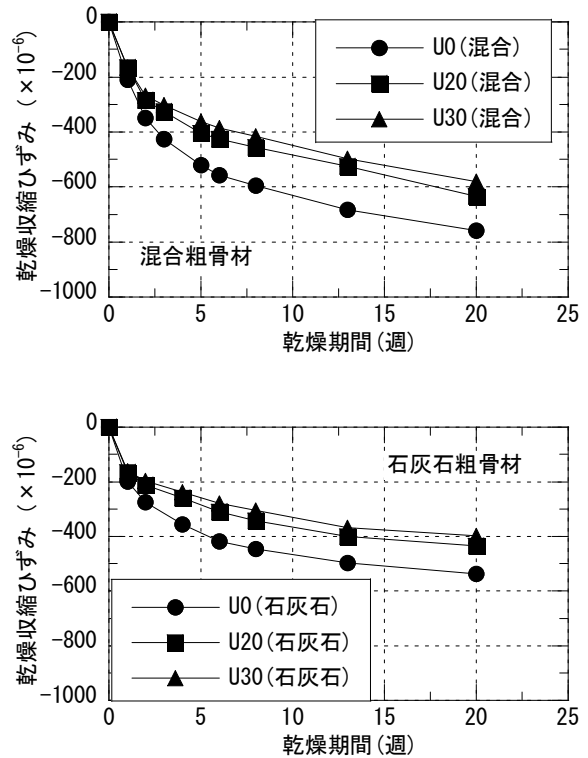


図-2 乾燥収縮試験結果

収縮ひずみは、尿素混入量の増加に伴い直線的に減少した。尿素による乾燥収縮ひずみ低減効果は、粗骨材の種類によらず、混入量 20kg/m³ の場合で約 20%、混入量 30kg/m³ の場合で約 25%であった。尿素により乾燥収縮ひずみが低減する主要因は、単位水量の低減および尿素的非揮発性であると考えられる³⁾。表-3 に示すように、同一スランプを得るために尿素混入量 20kg/m³ の場合で 15kg/m³、尿素混入量 30kg/m³ の場合で 23kg/m³ の単位水量を低減できる。すなわち、尿素を用いた場合、コンクリート内部から蒸発する水分が減少するために乾燥収縮ひずみが低減するものと考えられる。一方、粗骨材の種類を混合粗骨材から石灰石粗骨材にすることで、乾燥収縮ひずみは約 30%低減した。これは石灰石粗骨材による乾燥収縮低減効果^{6),7)}であると考えられる。レディーミクストコンクリート工場の標準配合である U0 (混合) と比較して、尿素および石灰石粗骨材を用いることにより、乾燥収縮ひずみが尿素混入量 20kg/m³ では約 43%、尿素混入量 30kg/m³ では約 48%低減することが明らかになった。

2.6 選定配合

配合選定試験の結果、尿素および石灰石粗骨材が乾燥収縮ひずみの低減に効果的であることが明らかとなった。尿素的混入量については、製造時にレディーミクストコンクリート工場にて 1 袋 20kg 入りの尿素的をミキサ内に手投入するので、投入手間を省力化するために混入量を極力少なくしたいこと、図-2 より、U20 (石灰石)

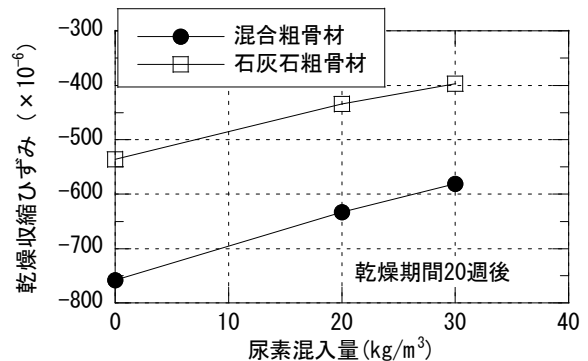


図-3 尿素混入量と乾燥収縮ひずみとの関係

の乾燥期間 26 週後の乾燥収縮ひずみが、「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)」⁸⁾に示されている特級仕様 (目標値 500×10^{-6} 以下) と同等程度になると推測され、十分な収縮低減効果を期待できることなどを総合的に判断し、実施工に適用する配合は、尿素混入量 20kg/m³ で石灰石粗骨材を用いた表-3 の U20 (石灰石) とした。

3. 実構造物への適用

3.1 構造物概要

尿素コンクリートを適用した構造物の概要を写真-1 に示す。適用構造物は、RC ラーメン高架橋であり、スラブおよびスラブを支持する梁に尿素コンクリートを適用した。施工面積は約 750m²、施工数量は約 460m³ である。

本構造物は2段階施工の高架橋で1期施工は数年前に完了しており、今回の2期施工では1期施工のスラブおよび梁を打ち継いで施工した。

3.2 使用材料および配合

使用材料は表-2と同様である。配合は、配合選定試験で選定した表-3のU20(石灰石)とした。なお、尿素コンクリートを適用した箇所以外は、レディーミクストコンクリート工場の標準配合である表-3のU0(混合)の普通コンクリートを用いて施工した。

3.3 現場計測項目

コンクリート内部に埋設した熱電対と埋込み型ひずみ計により、コンクリートの温度とひずみを測定し、施工後約1か月においてひび割れ調査を実施してひび割れ発生箇所、ひび割れ幅、ひび割れ長さを測定した。コンクリートの温度、ひずみの現場計測箇所を図-4に示す。コンクリートの温度、ひずみの計測箇所は、1期施工箇所との打継ぎ部となるスラブ中央部(No.1)とスラブ端部(No.2)およびスラブ隅角部(No.3)の3か所とし、スラブ厚250mmのほぼ中央部になるように設置した。さらに、幅0.9m×高さ1.4mの横梁断面中央部(No.4)においてコンクリートの温度を測定した。温度とひずみの計測は、打込みから12日程度までは10分おきに行い、それ以降は、1カ月に1回実施した。なお、現場計測は、同規模の施工面積でほぼ同時期に施工した普通コンクリートについても同様な測定位置で実施した。

3.4 施工方法

コンクリートの製造はレディーミクストコンクリート工場にて行い、2.75m³の強制二軸練りミキサを用いて製造した。1バッチあたりの練混ぜ量は2m³とし、練混ぜ時間は60秒とした。尿素は、他の材料を投入する際に、ミキサ内部に手投入した。製造したコンクリートはアジテータ車に4m³ずつ積み込み、現場まで運搬した。現場にてアジテータ車に短繊維を所定量投入したのち、2分間高速かくはんさせてから、コンクリートポンプ車を用いて打ち込み、棒状パイプレータで締め固めた。施工後、スラブ上面は材齢7日まで養生マットを敷設して散水養生を行い、材齢5日で梁側面を脱型し、材齢21日以降にスラブおよび梁下面を脱型した。

3.5 試験結果および考察

(1) 施工性

普通コンクリート、尿素コンクリートともに受入れ時の品質管理試験にすべて合格する結果となり、実施工において尿素コンクリートを安定供給できることが確認された。材齢4週の圧縮強度は普通コンクリートで35.7N/mm²、尿素コンクリートで36.0N/mm²であり、ほぼ同等であった。施工性については、打ち込み、締固めおよび仕上げにおいて、尿素コンクリートは普通コンクリー



写真-1 尿素コンクリート適用構造物の概要

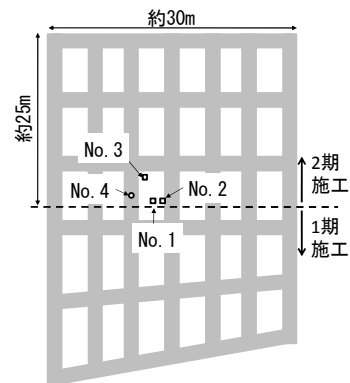


図-4 コンクリートの温度、ひずみの現場計測箇所

トと同様であり、問題ないことが確認された。

(2) コンクリートの温度

コンクリートの温度測定結果を図-5に示す。なお、尿素コンクリートについては、日照の影響を受けるスラブ上において外気温を測定した。気象庁のデータによる施工時の気象条件は、普通コンクリートの場合で天候晴、最高気温33.4℃、日照時間11.1hr、尿素コンクリートの場合で、天候晴、最高気温30.4℃、日照時間11.3hrであり、気温が高く、日照の影響が大きい施工条件であった。尿素コンクリートの温度測定結果から、打込み直後から外気温の上昇とともにコンクリートの温度は上昇し、打込み後約7時間後には約40℃となった。その後、外気温は下がったものの、コンクリート温度は上昇し、スラブでの最高温度は打込み後約13時間で約55℃に達した。スラブは表面積が大きく部材厚が小さいため、外気温および日照の影響を大きく受けることによりコンクリートの温度が上昇した結果、セメントの水和反応が促進されたものと考えられる。最高温度になった後、温度は急激に低下し、打込み後3日目には約30℃まで低下した。最高温度に達した後は、スラブは表面積が大きく部材厚さが小さいため放熱速度が速くなった結果、温度低下が速くなったものと考えられる。普通コンクリートのスラブの温度測定結果は、尿素コンクリートとほぼ同等であった。

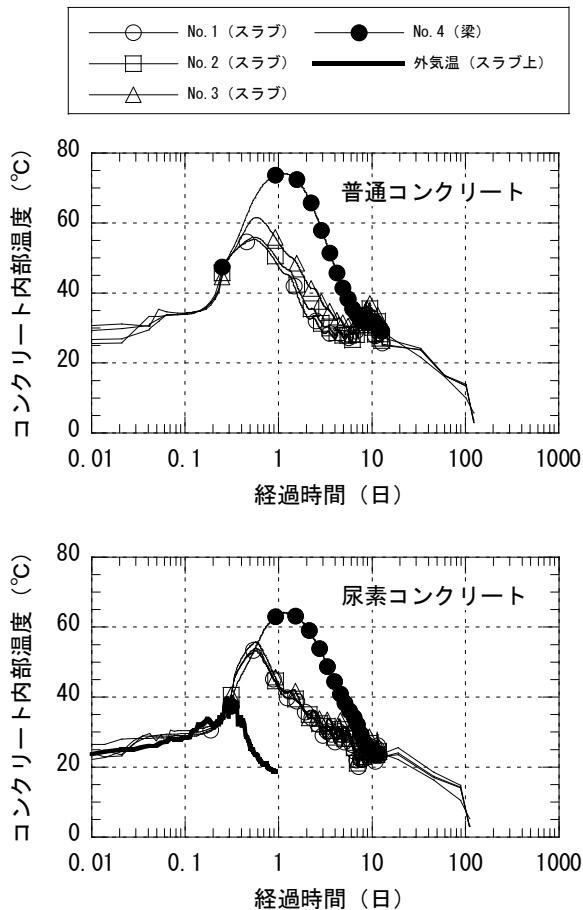


図-5 コンクリートの温度測定結果

梁の温度は、コンクリートの種類によらず、打ち込み後27時間程度で最高温度に達し、その後、ゆっくりと低下して、普通コンクリートの場合で打ち込み後12日程度、尿素コンクリートの場合で打ち込み後7日程度で30°C程度まで低下した。梁の最高温度は、普通コンクリートで約74°C、尿素コンクリートで約64°Cであり、尿素コンクリートの方が普通コンクリートよりも約10°C低下した。これは、尿素を用いることでセメントの水和反応が遅延した結果であると考えられる³⁾。

(3) コンクリートのひずみ

コンクリートのひずみの測定結果を図-6に示す。コンクリートのひずみは、配合は同じで骨材の種類のみが異なるコンクリートで別途実施した環境温度30°Cにおける凝結試験の結果から得られた始発時間を参考にして、普通コンクリートでは打ち込み後4.5時間、尿素コンクリートでは打ち込み後6時間を測定の開始点とした。埋込み型ひずみ計で測定される実ひずみには、温度による線膨張(自由)ひずみ、自己収縮ひずみ、乾燥収縮による収縮ひずみ、弾性ひずみ、クリープひずみが含まれていると考えられる。普通コンクリートの実ひずみは、No.1では経過時間100日後まで徐々に小さくなり、No.2では経過時間約2日において急激に約 200×10^{-6} 増加した。

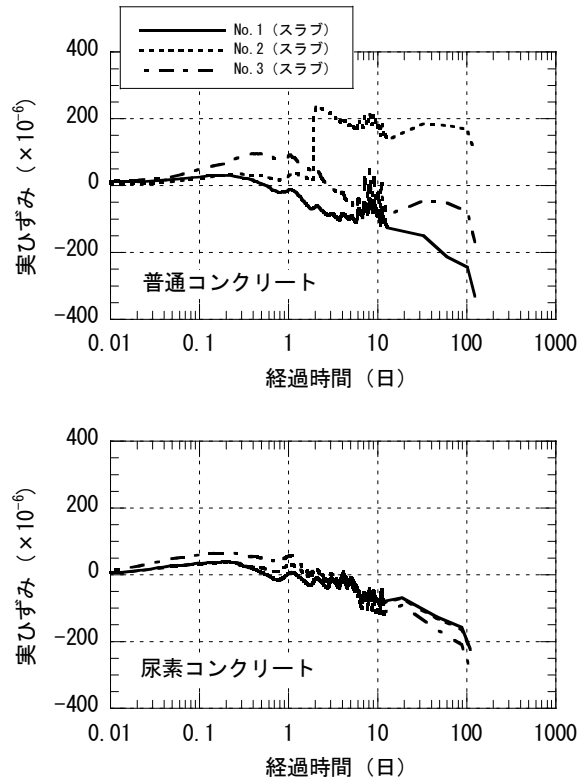


図-6 コンクリートのひずみ測定結果

No.3では経過時間約10日から30日において約 40×10^{-6} 増加した。No.2については、ひび割れ調査時にひずみ計のほぼ中心位置にひび割れが発生していることが確認されており、ひび割れが発生したためにひずみが急激に変化したものと考えられる。No.3については、ひび割れ調査時にひずみ計の近い位置にひび割れが発生していることが確認されており、ひび割れの影響を受けているものと考えられる。尿素コンクリートの実ひずみは、測定位置によらずほぼ同様となり、温度低下に伴い徐々に小さくなる結果となった。スラブ中央部で測定したNo.1の経過時間約100日における実ひずみを比較すると、尿素コンクリートは普通コンクリートより、実構造物において約 110×10^{-6} の収縮低減効果が確認された。これは、尿素および石灰石粗骨材による乾燥収縮低減効果によるものと考えられる。

(4) ひび割れ調査

施工後約1か月後に実施したひび割れ調査結果から得られたひび割れ幅とひび割れ延長との関係を図-7、図-8に示す。なお、ひび割れ幅はクラックスケール、ひび割れの長さはスケールを用いて測定した。スラブについては、普通コンクリートでは主に1期施工箇所に打ち継いだ付近に幅0.15mm~0.2mmのひび割れが発生したが、尿素コンクリートでは幅0.1mm未満の微細なひび割れが発生したものの、幅0.1mm以上のひび割れは発生しなかった。スラブでのひび割れ総延長は、普通コンクリートで

約 38m に対し、尿素コンクリートで約 23m であった。今回施工したスラブは、施工時の外気温、日照の影響により、材齢初期に急激な温度変化を受ける条件であったため、ひび割れが発生しやすかったものと考えられる。図-6 より、ひび割れ調査時における No.1 の実ひずみは、普通コンクリートで約 190×10^{-6} 、尿素コンクリートでは約 110×10^{-6} の収縮が生じており、尿素コンクリートは普通コンクリートより収縮が約 80×10^{-6} 小さかった。尿素コンクリートのスラブは、外気温、日照の影響を受けることにより、コンクリートの温度は普通コンクリートとほぼ同等となったものの、尿素および石灰石骨材による乾燥収縮ひずみ低減効果で実ひずみにおける収縮が低減されたため、ひび割れが減少したものと考えられる。梁については、普通コンクリートでは主に幅 0.1mm ~ 0.15mm のひび割れが発生したが、尿素コンクリートでは幅 0.1mm のひび割れが 1 本のみ発生した。梁でのひび割れ総延長は、普通コンクリートで約 42m に対し、尿素コンクリートで約 0.5m であった。普通コンクリートの梁のひび割れは、コンクリートの温度が約 74℃ まで上昇したことを考慮すると、水和熱により蓄積された温度応力および脱型後に受けた乾燥により発生したものと考えられる。尿素コンクリートの梁は、尿素によるセメントの水和抑制効果でコンクリートの温度上昇量が抑制されたため、ひび割れが減少したものと考えられる。

以上より、実構造物においても石灰石粗骨材を用いた尿素コンクリートのひび割れ低減効果を確認した。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 尿素混入量 $20\text{kg}/\text{m}^3$ とし、石灰石粗骨材を用いた尿素コンクリートの乾燥収縮ひずみは普通コンクリートと比較して約 43% 低減することを確認した。
- (2) 実施工において、尿素コンクリートが普通コンクリート同様に施工できることを確認した。
- (3) 現場計測から得られた経過時間約 100 日における実ひずみは、普通コンクリートでは約 330×10^{-6} に対して、石灰石粗骨材を用いた尿素コンクリートでは約 220×10^{-6} の収縮であり、実構造物においても収縮低減効果を確認した。
- (4) 施工後約 1 月のひび割れ発生状況は、普通コンクリートと比較して石灰石粗骨材を用いた尿素コンクリートでは著しく低減されており、実構造物においてひび割れ低減効果を確認した。

なお、現場計測およびひび割れ調査は継続して実施し、長期的なひび割れ発生状況を確認していく予定である。

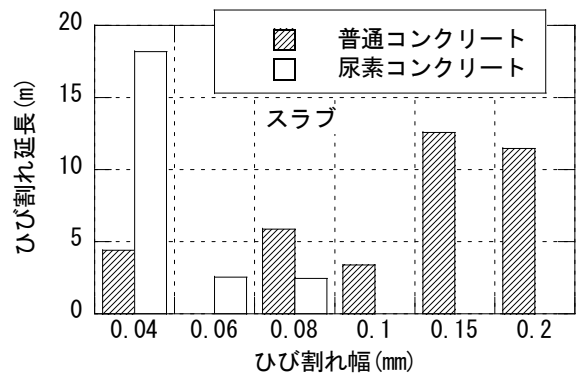


図-7 ひび割れ幅とひび割れ延長との関係 (スラブ)

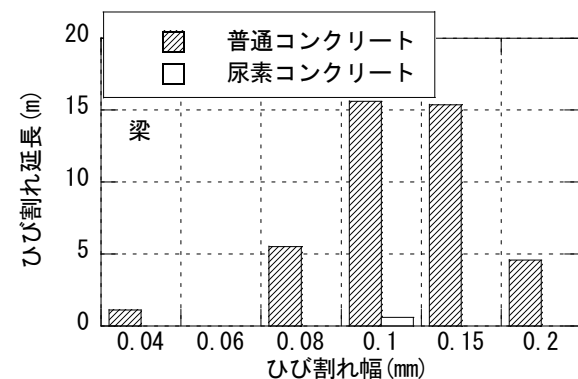


図-8 ひび割れ幅とひび割れ延長との関係 (梁)

謝辞

本研究の実施にあたっては阪田憲次岡山大学名誉教授から多くの貴重な助言を頂きました。ここに記して深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 阪田憲次, 浜田利彦, 岩城圭介: 尿素によるコンクリートの水和熱低減効果に関する研究, セメント技術年報, 42, pp.403-406, 1988
- 2) 綾野克紀, Mwaluwinga, S., 亀高誠治, 阪田憲次: 高流動コンクリートの水和熱低減に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.87-92, 1995
- 3) 河井徹, 阪田憲次: 尿素を用いたコンクリートの諸特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.639-644, 2007
- 4) Tanaka.H, Hashida.H, Kawai.T: Effect of limestone as aggregate and urea on reducing drying shrinkage of concrete, ConMat'09, 2009
- 5) 河井徹, 田中博一, 阪田憲次: 尿素を用いたコンクリートによるひび割れ制御, コンクリートテクノ, Vol.29, No.7, pp.14-18, 2010.7
- 6) 田中博一, 橋田浩: 骨材の種類がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.553-558, 2009
- 7) 今本啓一, 石井寿美江, 荒井正直: 各種骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮特性と骨材比表面積の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 606 号, pp.9-14, 2006.8
- 8) 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, p.121, 2006.2