

論文 乾燥によりコンクリート表面に発生する微細ひび割れの性状

阿波 稔*1・大塚浩司*2・今野洋一*3

要旨：本研究は、乾燥によりコンクリート表面に発生する微細ひび割れの性状を明らかにすることを目的としたものである。このような微細ひび割れは、肉眼での検出が困難であることから、検出手法としてX線造影撮影法を用い、普通養生および蒸気養生を行ったコンクリート供試体により、乾燥によって時間とともにその表面に発生する微細ひび割れの性状を観察した。研究の結果、乾燥によってコンクリート表面に発生する微細ひび割れの形態およびその経時変化を明らかにした。また、蒸気養生を行ったものは、普通養生を行ったものに比べて微細ひび割れの増加率が大きくなること等が分かった。
 キーワード：微細ひび割れ、乾燥、養生、X線検査技術

1. まえがき

コンクリートが乾燥するとその表面には非常に微細なひび割れが発生することが多い。しかし、この種の微細ひび割れは、肉眼での観察が困難であるため、部材の検査においても見過ごされることが多い。また、その性状については、研究例が少なく、ほとんど明らかにされていない。しかし、このような表面微細ひび割れに雨水が浸透し、凍結融解作用を受けるような場合には、部材の耐久性が低下する恐れがあると考えられる。著者等の予備的な実験においても、このような微細ひび割れの発生がコンクリートの耐凍害性を低下させることが明らかとなっている。

そこで、この研究は、普通養生および蒸気養生を行ったコンクリート供試体を養生終了後、恒温恒湿室で乾燥させ、時間とともにその表面に発生する微細ひび割れの性状を調べることを目的としたものである。微細ひび割れの検出には、研究室独自に開発した、水とほぼ同じ浸透性をもつ造影剤をひび割れに浸透させX線照射を行う、X線造影撮影法を用いた。また、走査型電子顕微鏡による微細ひび割れの観察も併せて行った。

2. 実験方法

2.1 使用材料

実験に用いたセメントは、早強ポルトランドセメントである。細骨材は、川砂を使用し、粗骨材は、最大寸法20mmの碎石を使用した。コンクリートは、水セメント比50%、スランプの範囲は 8 ± 1 cmとした。その配合を表-1に示す。

2.2 供試体および養生

供試体は、図-1に示すような寸法 $100 \times 100 \times 400$ mmの直方体である。

表-1 配合

粗骨材 最大寸法 (mm)	スランプ の範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	水セメ ント比 (%)	細骨 材率 (%)	単位量 (kg/m ³)			
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
20	8 ± 1	2 ± 1	50	49.0	205	410	803	885

本実験で用いた養生方法は、

- *1 東北学院大学大学院 工学研究科土木工学専攻、工修（正会員）
- *2 東北学院大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）
- *3 東北学院大学大学院 工学研究科土木工学専攻（正会員）

普通養生および蒸気養生の2種類であり、その概要を表-2に示す。普通養生は、打設後、温度20℃、湿度100%の恒温室中で24時間前養生を行い、その後、材令1週まで20℃の水中で行った。蒸気養生は、打設後、前養生を行わず直ちに昇温させたものと、打設後、温度20℃、湿度100%の恒温室中で4時間の前養生を行ったものの2種類を用いた。最高温度(55℃)の継続時間は、各養生条件において積算温度が同一となるように変化させた。なお、他の条件である昇温速度と降温速度は、それらの影響が小さく一定となるように、それぞれ、12℃/hrおよび-3℃/hrとした。

養生終了後、供試体の表層部を厚さ20mmにダイヤモンドソーで切断し、図-1に示すように供試体表面を除く全ての面をエポキシ樹脂で

シールした。これは供試体表面以外からの水分の逸散を防ぐためである。供試体の厚さを薄くするとコンクリートの乾燥進行速度が大きくなるので本実験では、

微細ひび割れの発生を促進した結果が得られるものと考えられる。なお、供試体を薄くすれば、非乾燥側からの拘束力は小さくなるが、表面微細ひび割れの発生には、表層近くの粗骨材の拘束力の影響が大きく、非乾燥側からの拘束力の影響は、それほど大きくないと考えられる。供試体は、温度20℃、湿度50%の恒温室に3ヶ月間放置し、コンクリート表面微細ひび割れを観察した

2. 3 微細ひび割れの検出

(1) X線造影撮影

水平に置いた供試体表面の4辺上にゴム粘土で堤を作り、その中に造影剤を5mm程度の深になるように溜めた。約30分間そのままの状態を持続させた後、造影剤を排出し、表面を布で拭き、X線フィルムを供試体底面に密着させ上面よりX線透過撮影を行った。そして、現像処理したX線フィルムを読影機(シャカステン)を用いて観察し、微細ひび割れを検出した。検出された微細ひび割れを、10cm×10cmの範囲でトレースした。また、発生した微細ひび割れの個数、トレースの長さをキルビメータで測定し、微細ひび割れの総長(長さの総計)およびそれぞれの密度(ひび割れ個数および総長をトレース面積で除した値)を求めた。

(2) 走査型電子顕微鏡(SEM)

X線造影撮影終了後の供試体から寸法40×40×20mm程度の試料を作り、供試体の表面にあたる試料の面に金を蒸着させ、その面をSEMで観察し微細ひび割れの観察を行った。

3. 実験結果および考察

3. 1 表面微細ひび割れの形態

(1) 普通養生

X線造影撮影法により、コンクリート表面に発生した微細ひび割れを検出した結果、普通養生

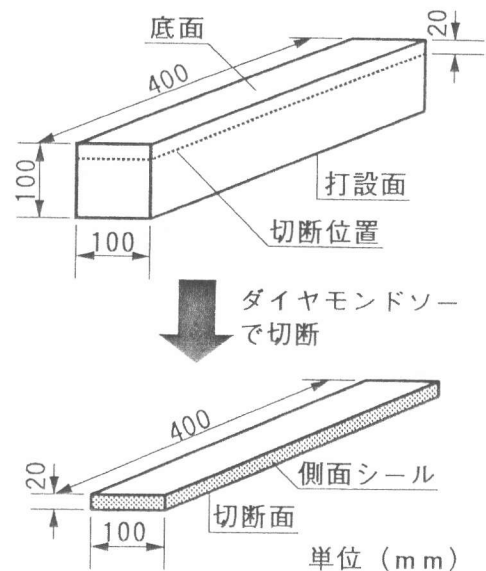


図-1 実験供試体

表-2 養生方法および条件

実験 No.	養生方法	養生条件				供試体数	
		前養生時間 (hr)	昇温速度 (°C/hr)	最高温度保持時間 (hr)	降温速度 (°C/hr)		
1	普通養生					3	
2	蒸気養生	0	12	55	5.8	-3	3
3	蒸気養生	4	12	55	4.0	-3	3

を行った場合は、養生終了直後、ひび割れの発生は見られなかった。しかし、乾燥開始3日頃から表面微細ひび割れが発生し初め、経時変化とともにその数を増していった。

写真-1は、乾燥3ヶ月のX線フィルム上に検出された微細ひび割れの拡大写真である。写真上の灰色の部分骨材で、その周りの白い線が骨材の剥離ひび割れである。そして、その骨材の周辺部および上部に見られる白い線や白い雲状の部分がモルタル部に発生した微細ひび割れであると考えられる。

写真-2は、3ヶ月経過した供試体の表面をSEMにより観察を行ったものである。その結果、写真に見られるような長さ2~10mm程度、幅0.01~0.02mm程度の交差する複数の微細ひび割れが観察された。X線造影撮影を行った場合に見られる白い線や白い雲状の部分は、このようなコンクリート表面の微細ひび割れ部に造影剤が浸透したため、また、造影剤がこのひび割れを通じてコンクリート内部の極表面付近に発生する微細ひび割れ部や骨材の剥離部に浸透したために生じたものであると思われる。

(2) 蒸気養生

蒸気養生を行った場合は、前養生時間を十分に取ったものは、養生終了直後、ほとんど微細ひび割れが発生していなかった。しかし、前養生時間を全く取らなかったものは、養生終了後、既に表面に数多くの微細ひび割れが発生していた。写真-3は、そのX線フィルム上に検出された微細ひび割れの拡大写真である。ひび割れは、骨材とペーストとの剥離ひび割れに加えてモルタル部に発生するひび割れが見られた。このような蒸気養生過程で発生する微細ひび割れの性状についての詳細は、既に著者等が文献 [1] および [2] において発表している。また、この蒸気養生の場合にも、養生終了直後、乾燥させると表面微細ひび割れが経時変化とともにさらに数を増していった。乾燥3ヶ月でその供試体表面をSEMで観察した結果、発生していた微細ひび割れの形態は、写真-2の場合とほぼ同様であった。

3. 2 微細ひび割れの経時変化

(1) 普通養生

図-2は、普通養生を行った場合の養生終了直後、乾燥開始1週間、1ヶ月および3ヶ月に発生した微細ひび割れのトレース図の1/4の部分(5cm×5cm)を示したものであ

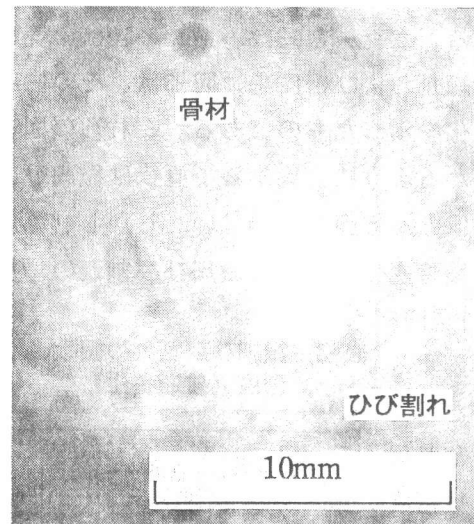


写真-1 X線フィルムの拡大写真
(普通養生3ヶ月)

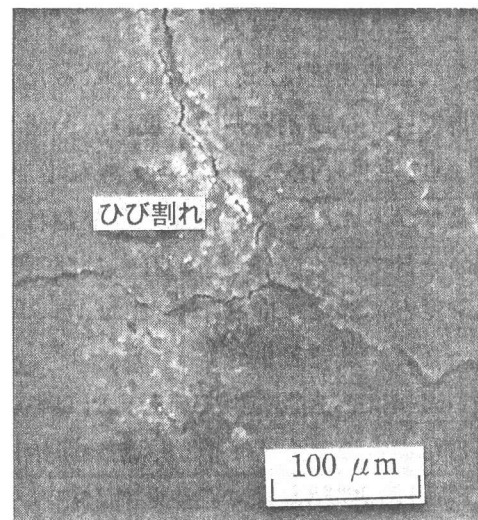


写真-2 SEM (普通養生、3ヶ月)

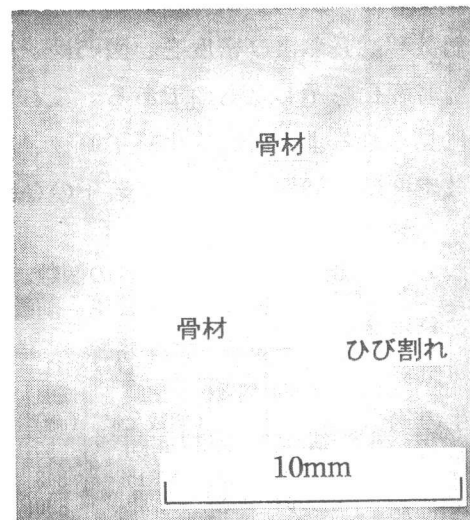


写真-3 X線フィルムの拡大写真
(蒸気養生、前養生0時間、直後)

る。また、表-3は、10cm×10cmの範囲の個数、総長および密度を、図-3は、その密度の経時変化を示したものである。これらの図、表から分かるように、養生終了直後は微細ひび割れは、ほとんど発生しない。しかし、乾燥開始後、経時変化とともに微細ひび割れの増加が見られ、1週間経

表-3 微細ひび割れの個数、総長および密度（普通養生）

時間	ひび割れ			
	個数	密度 (個数/cm ²)	総長 (mm)	密度 (mm/cm ²)
直後	43	0.43	75	0.75
1週	153	1.53	350	3.50
1ヶ月	251	2.51	490	4.90
3ヶ月	285	2.85	551	55.1

過する。さらに、乾燥開始1ヶ月経過するとひび割れ個数密度は2.51個/cm²となった。3ヶ月後では、ひび割れ個数密度は2.85個/cm²となり1ヶ月と比べてそれ程大きな増加は見られなかった。また、個々のひび割れの長さの合計であるひび割れ総長もひび割れ個数密度と同様な傾向を示した。

(2) 蒸気養生

図-4は、蒸気養生で前養生時間を4時間とした場合の養生終了直後、乾燥開始1週間、1ヶ月および3ヶ月に発生した微細ひび割れのトレース図の1/4の部分(5cm×5cm)を示したものである。また、表-4は、10cm×10cmの範囲の個数、総長および密度を、図-5は、その密度の経時変化を示したものである。これらの図、表に見られるように、養生終了直後、ひび割れ個数密度は0.30個/cm²と既に若干のひび割れが発生して

表-4 微細ひび割れの個数、総長および密度（蒸気養生、前養生4時間）

時間	ひび割れ			
	個数	密度 (個数/cm ²)	総長 (mm)	密度 (mm/cm ²)
直後	30	0.30	59	0.59
1週	215	2.15	343	3.43
1ヶ月	412	4.12	890	8.90
3ヶ月	443	4.43	953	9.53

考えられる。そして、乾燥開始1週間では、ひび割れが増加しているのが見られ、ひび割れ個数密

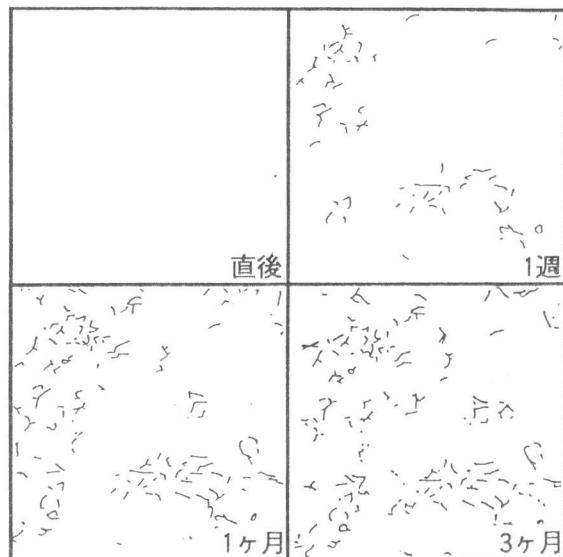


図-2 微細ひび割れのトレース（普通養生）

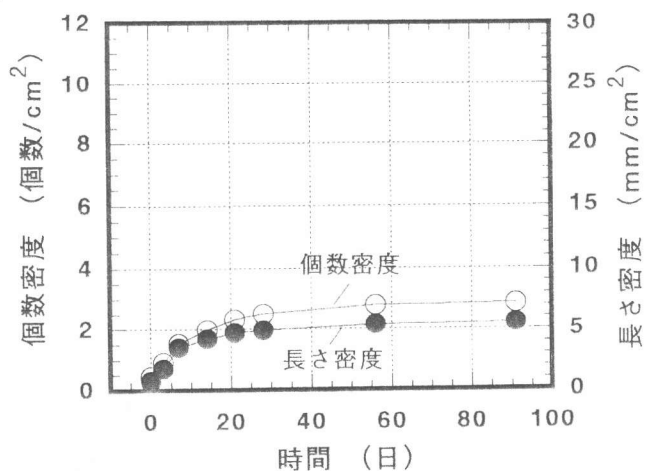


図-3 微細ひび割れの経時変化（普通養生）

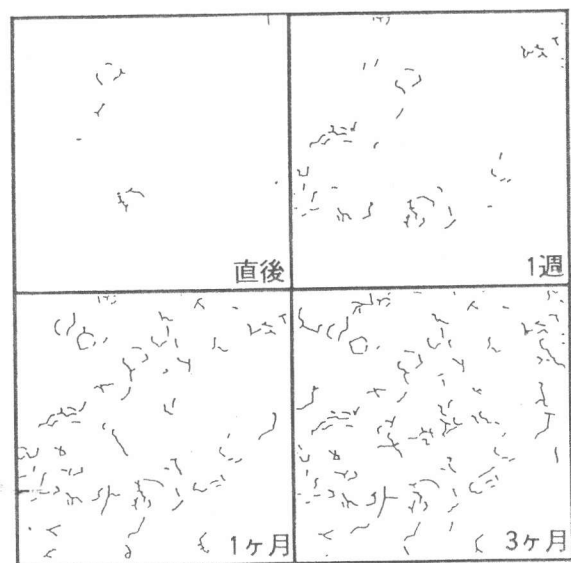


図-4 微細ひび割れのトレース
(蒸気養生、前養生4時間)

度は2.15個/cm²であった。さらに、1ヶ月经過するとひび割れ個数密度は4.12個/cm²となり著しくひび割れが増加するのが見られた。しかし、3ヶ月後では、ひび割れ個数密度は4.43個/cm²であり1ヶ月に比べてそれ程大きな増加は見られなかった。また、ひび割れ総長もひび割れ個数密度と同様な傾向を示した。

図-6は、蒸気養生で前養生時間を0時間とした場合の養生終了直後、乾燥開始1週間、1ヶ月および3ヶ月に発生した微細ひび割れのトレース図の1/4の部分(5cm×5cm)を示したものである。また、表-5は、10cm×10cmの範囲の個数、総長および密度を、図-7は、その密度の経時変化を示したものである。これらの図、表に見られるように、養生終了後、既にひび割れ個数密度は6.72個/cm²とかなりの数のひび割れが発生していた。これは、前養生を全く行わずに昇温させたために、コンクリートが未だ流動状態

であり、熱膨張率が大きく、ペースト部の熱膨張率と骨材の熱膨張率の差により生じたものであると考えられる [2]。そして、乾燥開始1週間および1ヶ月でもひび割れの増加が見られ、ひび割れ個数密度はそれぞれ7.94個/cm²および10.26個/cm²であった。しかし、3ヶ月後ではそれ程大きなひび割れの増加は見られず、ひび割れ個数密度は10.65個/cm²であった。また、ひび割れ総長もひび割れ個数密度と同様な傾向を示した。

表-5 微細ひび割れの個数、総長および密度 (蒸気養生、前養生0時間)

時間	ひび割れ			
	個数	密度 (個数/cm ²)	総長 (mm)	密度 (mm/cm ²)
直後	672	6.72	905	9.05
1週	794	7.94	1480	14.80
1ヶ月	1026	10.26	1950	19.50
3ヶ月	1065	10.65	2023	20.23

(3) 普通養生と蒸気養生との比較

図-8および図-9は、普通養生の場合と蒸気養生の場合の微細ひび割れの性状を比較するために、図-3、図-5および図-7で示したひび割れ個数密度と長さ密度を重ね合わせたものである。これらの図から分かるように、乾燥開始1ヶ月程

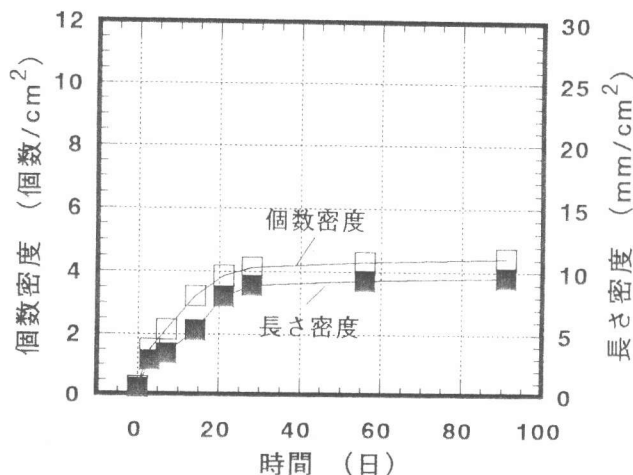


図-5 微細ひび割れの経時変化 (蒸気養生、前養生4時間)

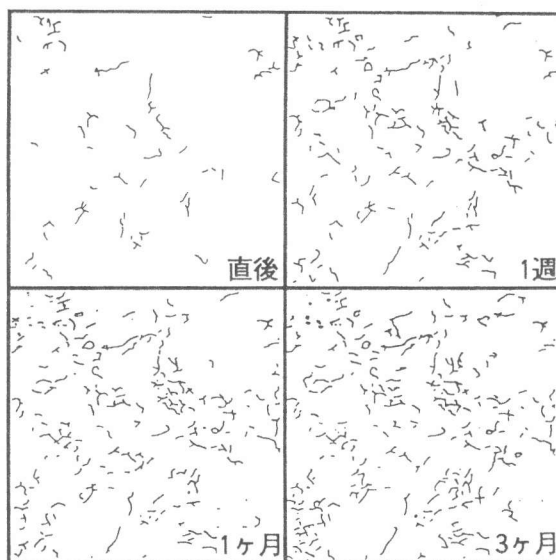


図-6 微細ひび割れのトレース (蒸気養生、前養生0時間)

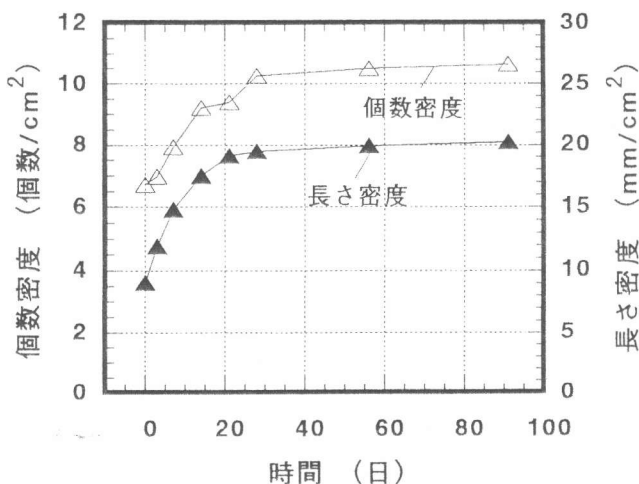


図-7 微細ひび割れの経時変化 (蒸気養生、前養生0時間)

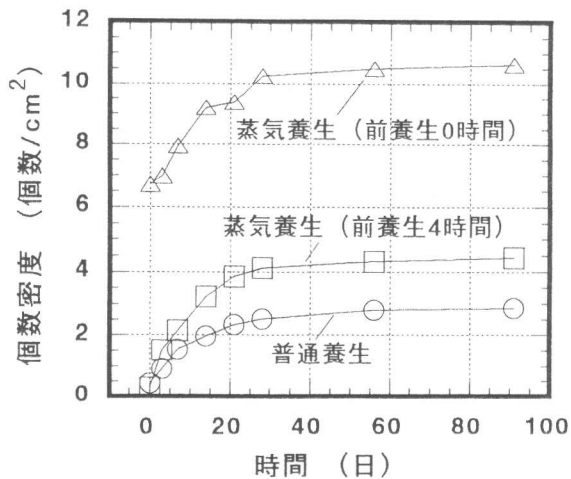


図-8 微細ひび割れの経時変化 (個数密度)

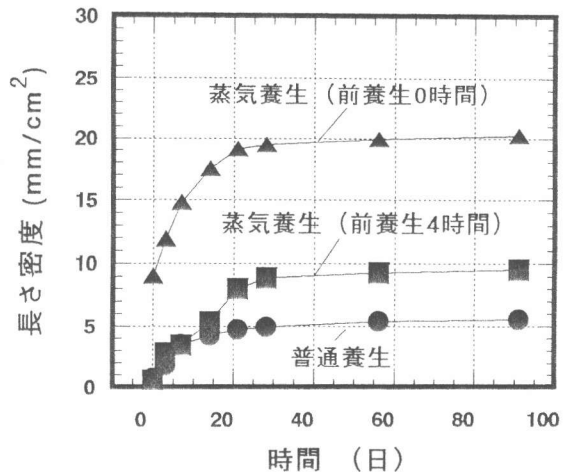


図-9 微細ひび割れの経時変化 (長さ密度)

度までは、普通養生および蒸気養生ともにひび割れが増加したが、蒸気養生を行ったものの方がひび割れの総量、増加率ともに大きくなる傾向が見られた。また、蒸気養生で前養生時間を0時間としたものは、4時間の場合と比べて、養生終了直後のひび割れの量は多いが、乾燥開始後のひび割れの増加量にはあまり大きな差が見られなかった。

4. まとめ

普通養生および蒸気養生を行ったコンクリート供試体を用いて、乾燥によって時間とともにその表面に発生する微細ひび割れの性状を調べる実験を行った結果、実験の範囲内で次のことが言える。

(1) 乾燥によってコンクリート表面に発生する微細ひび割れをX線造影撮影法によって検出した結果、普通養生および蒸気養生の何れの場合においても、それらには、骨材とペーストとの剥離ひび割れとモルタル部のひび割れとがあることが分かった。また、SEMによってその表面を観察した結果、長さ2~10mm程度、幅0.01~0.02mm程度の交差する複数の微細ひび割れが観察された。

(2) 普通養生コンクリートの表面に乾燥によって発生する微細ひび割れは、養生終了後、乾燥開始3日頃から発生し、経時変化とともにその数を増していったが、1ヶ月程度経過するとその数はほぼ一定となった。

(3) 蒸気養生コンクリートで、前養生時間を十分に取った場合は、養生終了直後に、その表面にほとんど微細ひび割れは見られなかったが、前養生時間が短い場合は、かなりの数の微細ひび割れの発生が見られた。何れの場合も乾燥開始後、経時的に微細ひび割れは増加していくが、普通養生の場合と同様に1ヶ月後からはその数はほぼ一定となった。

(4) 蒸気養生を行った場合は、普通養生を行った場合と比べて、微細ひび割れの早期における増加率が大きくなる傾向が見られた。また、蒸気養生で前養生時間が4時間の場合と0時間の場合の微細ひび割れの増加量にはあまり大きな差が見られなかった。

参考文献

- [1] 阿波 稔・大塚浩司・諸橋克敏：蒸気養生過程で発生する鉄筋コンクリート部材の微細ひび割れ、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 15、No. 1、pp. 567-572、1993. 6
- [2] 大塚浩司・阿波 稔：蒸気養生過程で発生する鉄筋コンクリート部材の微細ひび割れ性状、材料、Vol. 43、No. 419、pp. 949-955、1994. 8