

コンクリートの蒸気養生過程で発生する 表面微細ひび割れの性状に関する研究

大塚浩司¹・庄谷征美²・小関憲一³・阿波 稔⁴

¹正会員 工博 東北学院大学教授 工学部土木工学科 (〒985 多賀城市中央1-13-1)

²正会員 工博 八戸工業大学教授 工学部土木工学科 (〒031 八戸市大字妙字大開88-1)

³正会員 (株)ピー・エス 東北支店 土木技術部次長 (〒980 仙台市青葉区1番町2-1-1)

⁴学生員 工修 東北学院大学大学院工学研究科 (〒985 多賀城市中央1-13-1)

本研究は、コンクリートの蒸気養生過程で発生する、初期欠陥としての表面微細ひび割れの性状を研究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線造影撮影法を独自に開発した。鉄筋コンクリート供試体を用いて、種々の蒸気養生条件が微細ひび割れの性状に及ぼす影響について実験的に検討した。研究の結果、蒸気養生の各段階で、3種類の異なる微細ひび割れを観察することに成功した。また、これらの微細ひび割れの性状に及ぼす各種要因の影響について検討した。さらに、微細ひび割れ防止の面から、実験結果と蒸気養生に関する諸規定との比較検討を行った。

Key Words : steam curing, microcracks, X-ray inspection technique, contrast medium, microstructure of concrete

1. まえがき

近年、建設工事の合理化にともなって、プレキャスト化された鉄筋コンクリート部材の使用が急速に進んでいる。工場においてプレキャスト部材を製造する場合、一般に、その養生を促進するために常圧蒸気養生を用いることが多い。常圧蒸気養生の方法については、土木学会コンクリート標準示方書、建築学会建築工事標準仕様書、コンクリート製品関係のJIS、ACI規準等で規定されている。これらの規定に従って製造された蒸気養生コンクリート製品の品質は、常温で硬化させたものと同等であると考えられている。しかし、強度の面では同等でも、蒸気養生コンクリートの表面には、微細ひび割れが多数発生していることがある。このひび割れは、蒸気養生過程で発生すると考えられるが、微細なため製造直後には、一般に、肉眼では発見することが困難で、製品検査を通過して市販され使用されていることが多い。そのような製造直後で発生した微細ひび割れは、製品が供用されている間にコンクリートの乾燥にともなって成長し、やがて肉眼でも観察されるようになりクレームの原因ともなる。また、この微細

ひび割れに浸透した水の凍結融解作用によって凍害が発生し、耐久性を損なう原因となる恐れがある。従って、この初期欠陥となる微細ひび割れの性状を解明し、その防止策を検討することが急がれている。しかし、この蒸気養生過程で発生する微細ひび割れの性状については、これまで、それを検出する適当な手段がないこともあり、ほとんど解明されていない。

そこで、本研究では、微細ひび割れの検出手法として浸透性の高い液状の造影剤をコンクリート表面から浸透させX線造影撮影を行うという方法を独自に開発した。また、走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて微細ひび割れ付近のコンクリートの破断面を観察する手法も併せて用いた。本論文は、種々の条件下で蒸気養生された鉄筋コンクリート供試体において、上記の手法を用いて検出された微細ひび割れの発生状況、測定したコンクリートおよび鉄筋のひずみ、コンクリートの温度などから、蒸気養生過程のどの段階でどのようなひび割れが発生するのか、また、その発生機構、発生条件、さらに、その防止策等について検討した結果をまとめたものである。

なお、コンクリートの蒸気養生過程で発生する微

Table 1 Mix proportions of concrete

Maximum aggregate size (mm)	Slump (cm)	Water-cement ratio (%)	Fine aggregate percentage (%)	Air content (%)
20	8±1	50	47	4
Unite weight (kg/m ³)				
Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	
194	388	713	968	

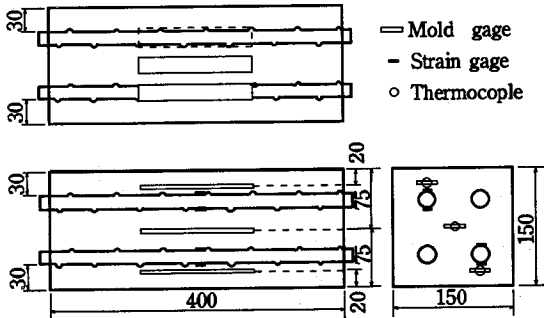


Fig.1 Shape and dimensions of the specimen (mm)

細ひび割れには、蒸気養生条件の他に、供試体形状やコンクリートの配合等の条件が影響を及ぼすと考えられる。本実験では、室内実験のため小型供試体を用い、コンクリートの配合も混和剤を用いない種類のみを用いた。従って、得られる結果もこれらの条件の範囲に限定されたものとなると考えられる。

2. 実験の概要

(1) 使用材料および供試体

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%、スランプを8±1cmとした。その配合を **Table 1** に示す。

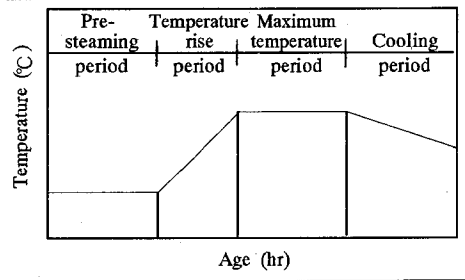
供試体は、**Fig.1** に示すような形状をもつ矩形供試体である。その寸法は、150×150×400mmであり、長軸方向にSD345、D16の鉄筋を、かぶり30mmで4本配置した。

(2) 蒸気養生

本実験で用いた蒸気養生条件は、**Table 2** に示す通りである。条件は、土木学会コンクリート標準示方書施工編¹⁾、建築学会建築工事標準仕様書・同解説(JASS10)²⁾ およびACI Committee 517.2R-87³⁾ を参考にして、規定の条件を外れる場合も含めて、前

Table 2 Steam curing conditions

Series	Pre-steaming period (hr)	Rate of temperature rise (°C/hr)	Maximum temperature period (°C) (hr)	Rate of cooling (°C/hr)
1	6	12	55	3.1
2	4			4.0
3		20	4.9	-85
4				
5	2	12	55	4.9
6				5.8
7	0			



養生時間、昇温速度および降温速度の組み合わせを変えた7種類の条件を用いた。前養生は、温度20°C、湿度100%の恒温室中に行い、最高温度は55°Cとし、その継続時間は、各養生条件において蒸気停止までの積算温度が同一となるように変化させた。また、本実験では、実際の蒸気養生状態を想定して、供試体を湿らせた布で包みビニールシートで密封し、恒温室中で温度制御をしながら蒸気養生を行った。供試体は、型枠に入れたままの状態で行った。なお、鉄筋を固定するために型枠に設けた穴は、ゴム粘土でシールした。

(3) 微細ひび割れの検出

微細ひび割れの検出には、X線造影撮影法および走査型電子顕微鏡（以下SEMと記す）を用いた。それぞれの検出方法を以下に示す。

a) X線造影撮影

供試体の蒸気養生終了後、供試体の表層部を厚さ20mmにダイヤモンドソーで切断し、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程度の深さになるようにためた。約30分間そのままの状態を維持させた後、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（シャーカステン）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、100×100mmの範囲でトレ

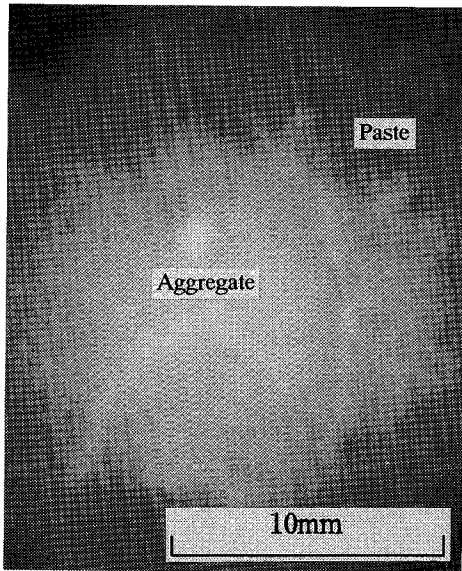


Photo.1 Separation cracks between aggregate and paste detected by X-ray with contrast medium

ースした。また、発生した微細ひび割れの総数、トレースの長さをキルビメータで測定した微細ひび割れの総長（長さの総計）およびそれぞれの密度（ひび割れ総数および総長をトレース面積で除した値）を求めた。なお、X線造影撮影に用いた造影剤は、ほぼ水と同じ粘性および浸透性を持つ、研究室独自に開発したセシウム(Cs)系のものである。

b) 走査型電子顕微鏡(SEM)撮影

SEMは、JEOL JSM-T300を用いた。X線造影撮影終了後の供試体を、コンクリートの組織をなるべく壊さないようにして破断し、寸法20×20×40mm程度の試料を作り、試料の破断面に金を蒸着させ、その面をSEMで観察し微細ひび割れの検出およびコンクリート組織の観察を行った。

(4) ひずみと温度の測定

コンクリートのひずみと温度の測定には、2枚の亚克力板の間にストレインゲージを挟み込んだ形式のモールドゲージと熱電対を使用した。埋め込み位置は Fig.1 に示すように、それぞれ供試体打設面より20mm, 75mm, 130mmの深さである。また、鉄筋のひずみは、鉄筋中央部の表面にストレインゲージを上下に2枚貼り、その測定値を平均して用いた。

(5) 細孔容積の測定

コンクリートの細孔容積の測定には、水銀圧入式ポロシメータを使用した。試料は、X線造影撮影終了後の供試体を砕き、アセトンに浸漬して水和を停

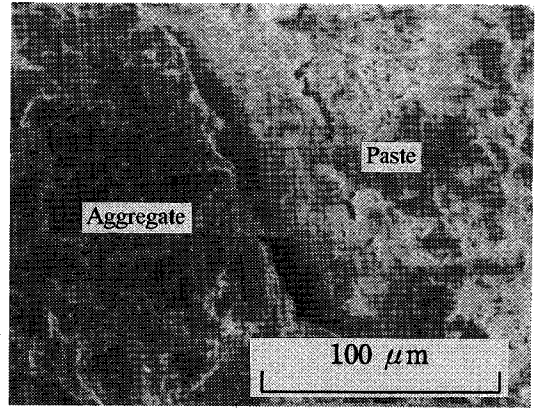


Photo.2 Separation cracks between aggregate and paste detected by SEM

止させたモルタル部の小片を用いた。

(6) 強度試験

強度試験には、寸法φ100×200mmの円柱供試体を用いた。供試体は、蒸気養生終了後、湿度100%、温度20°Cの恒温室中に24時間放置して脱枠し、圧縮強度および引張強度を測定した。

3. 微細ひび割れの検出結果

種々の蒸気養生条件下におけるコンクリートの表面微細ひび割れの発生状況をX線造影撮影法によって検出した結果、種々のタイプのひび割れが見られた^{4)~7)}。そこでその検出結果に、さらにSEMによる破断面の観察結果を加えて検討してみると、それらは、骨材とペーストとの剥離ひび割れ、モルタルひび割れ、気泡ひび割れの3種類に大別できることが分かった。それらの概要について以下に示す。

(1) 骨材とペーストとの剥離ひび割れ

Photo.1は、X線フィルム上に検出された骨材とペーストとの剥離ひび割れ部の拡大写真である。写真の骨材とペーストとの境界部の弧状の白い線が剥離ひび割れで、造影剤が骨材とペーストとの隙間に浸透したために生じたものであると考えられる。

Photo.2は、X線フィルム上で骨材とペーストとの剥離ひび割れと考えられた付近のコンクリートの破断面を、SEMで観察した像である。写真左の黒い部分が骨材であり、写真右の白い部分がペースト部である。その骨材とペーストとの界面に黒い帯状の部分が見られる、これが剥離が生じた部分である。

(2) モルタルひび割れ

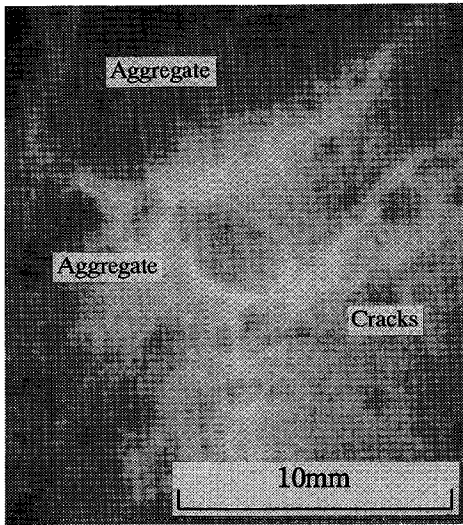


Photo.3 Mortar cracks detected by X-ray with contrast medium

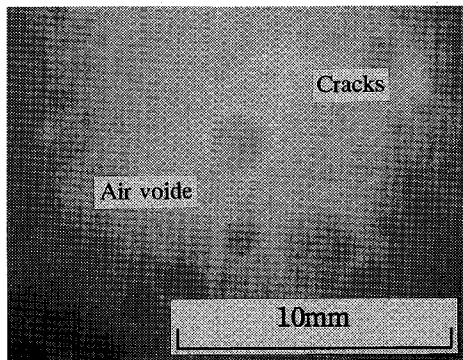


Photo.5 Vapor cracks detected by X-ray with contrast medium

Photo.3は、X線フィルム上で検出されたモルタルひび割れ部の拡大写真である。写真上部および中央の灰色の部分が骨材で、その周りの白い曲線は骨材とペーストとの剥離が生じたものである。その骨材の周辺に白い雲状の部分が見られる、これは、モルタル部に発生した多数の微細ひび割れ群であると考えられる。

Photo.4は、コンクリート破断面のモルタルひび割れ付近を、SEMで観察した像である。写真左に見える白い部分が骨材で、右の灰色の部分がペースト部である。骨材とペーストとの界面の黒い部分は、骨材とペーストとの剥離が生じたものである。その骨材界面からペースト部に伸びるいくつかの黒い線が見られる、これがモルタルひび割れであると考えられる。X線造影撮影を行った場合に見られる白い雲状の部分は、このような微細ひび割れ部に造影剤

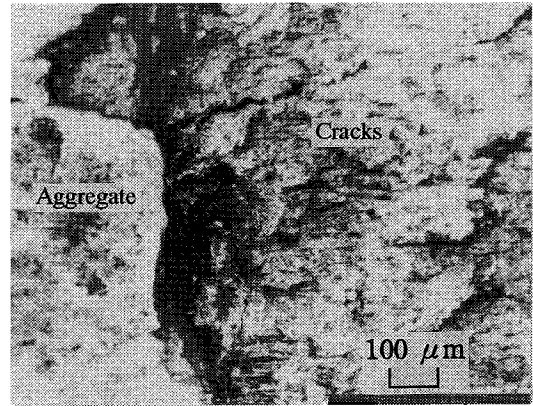


Photo.4 Mortar cracks detected by SEM

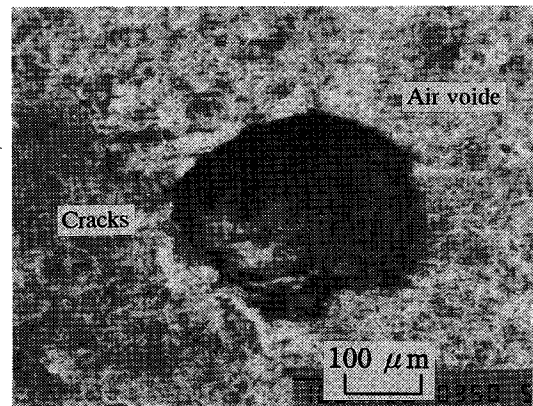


Photo.6 Vapor cracks detected by SEM

が浸透したために生じたものと思われる。

(3) 気泡ひび割れ

Photo.5は、X線フィルム上で検出された気泡ひび割れ部の拡大写真である。写真中央の灰色の球形の部分が気泡であり、そこから放射状に伸びる白い線がひび割れであると考えられる。

Photo.6は、コンクリート破断面の気泡ひび割れ付近を、SEMで観察した像である。写真中央の黒い球形の部分が気泡であり、そこから放射状に伸びる黒い線がひび割れである。また、気泡内にもひび割れが観察された。

4. 蒸気養生条件の影響

前養生時間、昇温速度および降温速度などの養生条件が、微細ひび割れの性状に及ぼす影響について調べた結果を以下に示す。なお、他の条件である、前養生温度(20℃)、最高温度(55℃)、積算温度(552℃・hr)は一定とした。

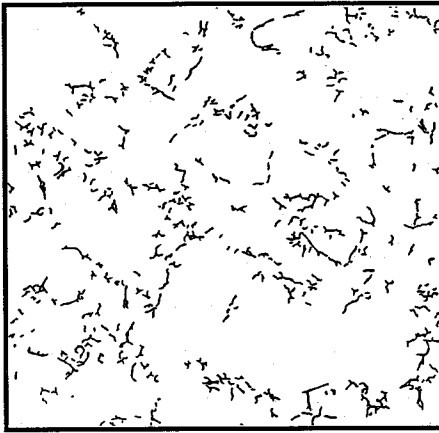


Fig.2 Microcracks on the surface of concrete (Presteaming period : 0 hr, Rate of temperature rise : 12 °C /hr, Rate of cooling : -3 °C /hr, Series 7)

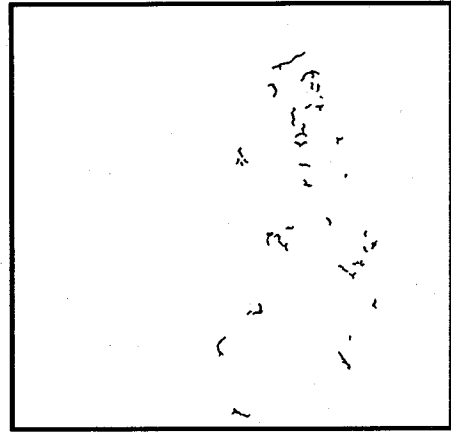


Fig.4 Microcracks on the surface of concrete (Presteaming period : 6 hr, Rate of temperature rise : 12 °C /hr, Rate of cooling : -3 °C /hr, Series 1)

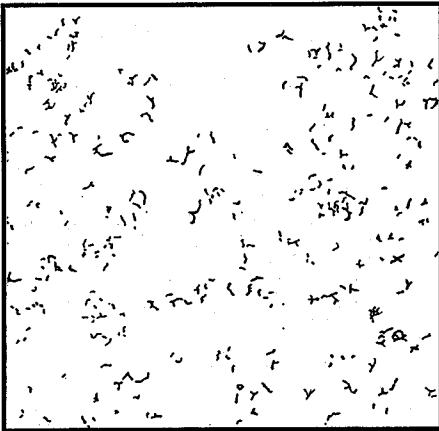


Fig.3 Microcracks on the surface of concrete (Presteaming period : 2 hr, Rate of temperature rise : 12 °C /hr, Rate of cooling : -3 °C /hr, Series 6)

(1) 前養生時間

前養生時間の長さが、微細ひび割れの性状に及ぼす影響を調べるために、前養生時間は、0時間、2時間、4時間および6時間の4種類に変えて実験を行った。また、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°C/hrおよび-3°C/hrとした。その結果の概要は次のようである。

Fig.2、**Fig.3**および**Fig.4**は、前養生時間をそれぞれ0時間、2時間および6時間と変化した場合の微細ひび割れの発生状況のX線造影撮影によるトレース図である。これらのひび割れには、3章で述べた3種類のひび割れが含まれているが、**Table 3**は、その種類に関わらず、それらの総数、総長および密

Table 3 Length, number and density of cracks for different presteaming period (Rate of temperature rise : 12 °C /hr, Rate of cooling : -3 °C /hr)

Pre-steaming period (hr)	Cracks			
	Number of cracks	Density (number/cm ²)	Length of cracks (mm)	Density (mm/cm ²)
0	468	4.68	957	9.57
2	300	3.00	616	6.16
4	42	0.42	141	1.41
6	26	0.26	70	0.70

度を示したものである。これらの図、表から分かるように前養生時間が短い場合には、長い場合と比べて微細ひび割れが数多く発生している。前養生時間が0時間の場合には、ひび割れ個数密度が4.68個/cm²である、ところが、前養生時間が2時間では、3.00個/cm²と減少し、4時間となるとさらに減少して、0.42個/cm²となり、6時間では、0.26個/cm²となっている。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同様な傾向を示し、前養生時間の増加とともに減少している。

Table 4は、**Table 3**で示した微細ひび割れの総数および総長のうち、骨材とペーストとの剥離ひび割れ、モルタルひび割れおよび気泡ひび割れのそれぞれが全体に占める割合を示したものである。この表に見られるように、前養生時間が短い場合の微細ひび割れは、モルタルひび割れが比較的多く、骨材とペーストとの剥離ひび割れや、少量の気泡ひび割れが観察された。また、前養生時間が長い場合には、観察された全ての微細ひび割れが、骨材とペースト

Table 4 Ratios of crack types for different presteaming period
(Rate of temperature rise : 12 °C /hr, Rate of cooling : -3 °C /hr)

Pre-steaming period (hr)	Number of cracks			Length of cracks		
	Separation (%)	Mortar (%)	Vapor (%)	Separation (%)	Mortar (%)	Vapor (%)
0	20	75	5	33	62	5
2	54	44	2	65	32	3
4	97	3	0	98	2	0
6	100	0	0	100	0	0

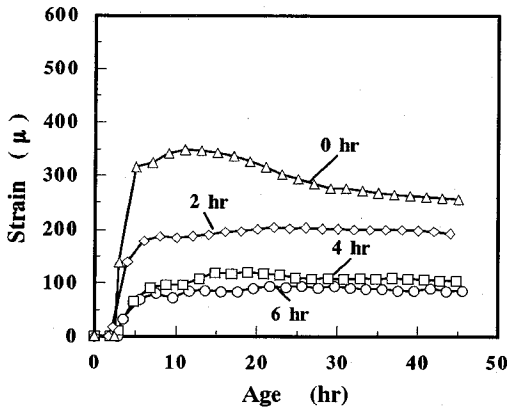


Fig.5 Strain-age curves for different presteaming period

との剥離ひび割れであった。

Fig.5は、これらの微細ひび割れの発生原因をコンクリートのひずみの面から検討するために、コンクリート表面から20mmの位置に埋め込んだモールドゲージによるひずみの測定結果を示したものである。図中の曲線は、前養生時間0時間、2時間、4時間および6時間の場合で、それぞれ、供試体3個の測定結果を平均したものである。この図から分かるようにゲージは昇温と共に引張り(膨張)ひずみが急激に増大し、昇温速度が同じでも前養生時間が短いものほど、そのひずみの増加率は高く、その最大ひずみ値も大きくなる傾向が見られた。その最大値は、前養生時間が0時間の場合には約370 μ であり、2時間の場合は約200 μ 、4時間の場合は約140 μ 、6時間の場合は約100 μ であった。このように、前養生時間が長いものほどひずみの増加率やその最大値が小さくなるのは、未硬化コンクリートの水分量がブリーディングや水和の進行にともない減少し、セメント硬化体の増加によって流動状態を失うためであると思われる。すなわち、コンクリートの熱膨張率が、前養生時間の経過とともに、水の熱膨張率約100 μ /°C付近から硬化コンクリートの熱膨張率約10 μ /°Cに急

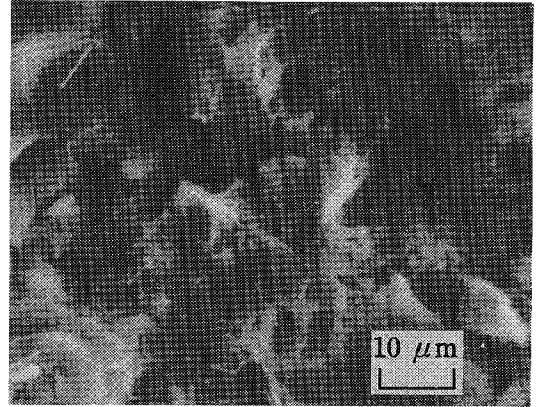


Photo.7 Freshly fractured surface of concrete by SEM
(Presteaming period : 0 hr, Rate of temperature rise : 12 °C /hr , Rate of cooling : -3 °C /hr, Series 7)

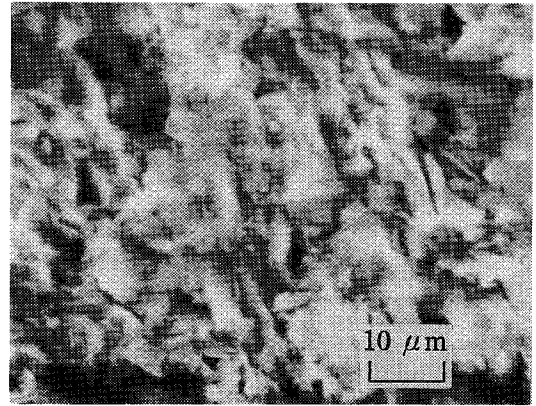


Photo.8 Freshly fractured surface of concrete by SEM
(Presteaming period : 6 hr, Rate of temperature rise : 12 °C /hr , Rate of cooling : -3 °C /hr, Series 1)

速に近づくためであると推察される。このような流動状態のペースト部の熱膨張率と骨材の膨張率との差が骨材周辺の剥離やモルタル部の微細ひび割れの発生原因となると考えられる。

前養生時間の短縮は、加熱によるコンクリートの熱膨張量を増加させる原因となる。このような熱膨張量の増加は、硬化コンクリートの微細構造にも影響を及ぼしているのではないかと考えられた。そこで、コンクリート組織のSEMによる観察、コンクリートの細孔容積の測定およびコンクリートの強度試験を行った結果を以下に示す。

Photo.7および**Photo.8**は、前養生時間を0時間および6時間とした場合のコンクリートの新鮮な破断面をSEMで観察した結果である。これらの写真は、

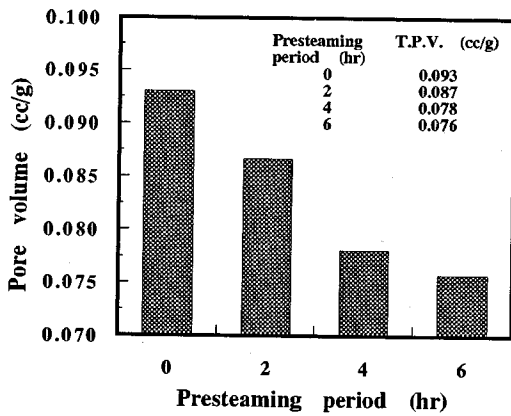


Fig.6 Pore volume for different presteaming period

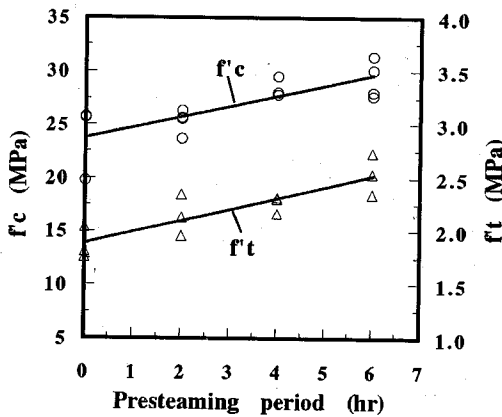


Fig.7 Relations between strength and presteaming period

ペースト部におけるセメントの硬化体である。前養生時間が0時間の場合は、種々のセメント水和物からなるゲルが全体に生成し、その中に大きく発達した結晶も見られる。しかし、前養生時間を6時間とした場合は、0時間のものとは比べてセメントゲルの形状は比較的細く均一であった。

Fig.6は、前養生時間を、0時間、2時間、4時間および6時間とした場合の、コンクリートの細孔容積を示したものである。この図に見られるように、前養生時間を0時間としたものは、全細孔容積が0.093 cc/gである、ところが、前養生時間の増加とともに全細孔容積は減少し、前養生時間を6時間としたものは、0.076cc/gであった。

Fig.7は、前養生時間を0時間、2時間、4時間および6時間とした場合のコンクリートの圧縮強度と引張強度の試験結果を示すものである。この図より、前養生時間が0時間の場合、6時間の場合と比べて圧縮強度で約19%、引張強度では約26%もの低下が見られた。

これらの結果から分かるように、前養生時間の短



Fig.8 Microcracks on the surface of concrete (Rate of temperature rise : 12 °C /hr, Presteaming period : 4 hr, Rate of cooling : -3 °C /hr, Series 2)

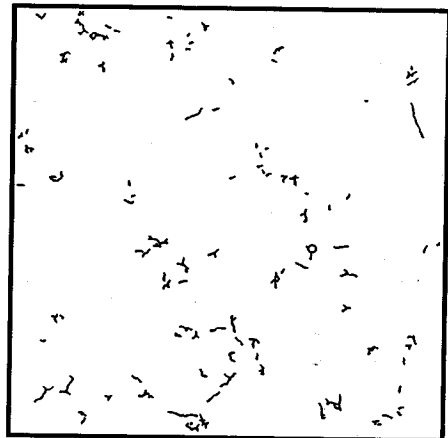


Fig.9 Microcracks on the surface of concrete (Rate of temperature rise : 20 °C /hr, Presteaming period : 4 hr, Rate of cooling : -3 °C /hr, Series 4)

縮は、コンクリート組織の緻密さを欠かさず、コンクリートの強度を低下させる原因となる。これは、セメントが水和の初期の段階で、急激な加熱を受けたために、水和生成物の形状が大きくなった⁹⁾ことや、未硬化コンクリート中の水が加熱により膨張し空隙を増加させた⁹⁾ためであると考えられる。

(2) 昇温速度

昇温速度の大きさが微細ひび割れの性状に及ぼす影響を調べるために、昇温速度は、12°C/hr、20°C/hrおよび35°C/hrの3種類に変えて実験を行った。また、前養生時間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4時間および-3°C/hrとした。その結果の概要は次のようである。

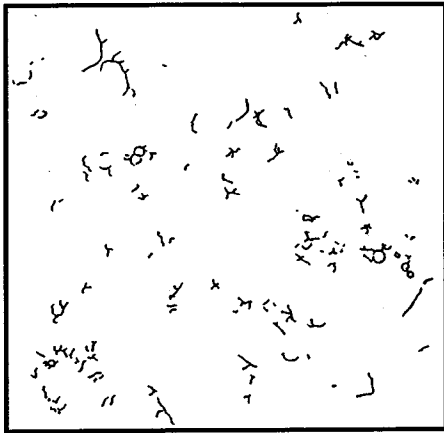


Fig.10 Microcracks on the surface of concrete (Rate of temperature rise : 35 °C /hr, Presteaming period : 4 hr, Rate of cooling : -3 °C /hr, Series 5)

Table 5 Length, number and density of cracks for different Rate of temperature rise (Presteaming period : 4 hr, Rate of cooling : -3 °C /hr)

Rate of temp. rise (°C/hr)	Cracks			
	Number of cracks	Density (number/cm ²)	Length of cracks (mm)	Density (mm/cm ²)
12	42	0.42	141	1.41
20	172	1.72	303	3.03
35	192	1.92	377	3.77

Table 6 Ratios of crack types for different rate of temperature rise (Presteaming period : 4 hr, Rate of cooling : -3 °C /hr)

Rate of temp. rise (°C/hr)	Number of cracks			Length of cracks		
	Separation (%)	Mortar (%)	Vapor (%)	Separation (%)	Mortar (%)	Vapor (%)
12	97	3	0	98	2	0
20	89	3	8	91	3	6
35	78	4	18	85	3	12

Fig.8, **Fig.9** および **Fig.10** は、昇温速度をそれぞれ、12°C/hr, 20°C/hr および 35°C/hr と変化させた場合の微細ひび割れの発生状況のトレース図である。また、**Table 5** は、トレースした微細ひび割れの種類に関わらず、その総数、総長および密度を示したものである。これらの図、表に見られるように、昇温速度が12°C/hr, 20°C/hr および 35°C/hr と大きくなっても、ひび割れ個数密度は、それぞれ0.42個/cm², 1.72個/cm² および 1.92個/cm² とそれほど大き

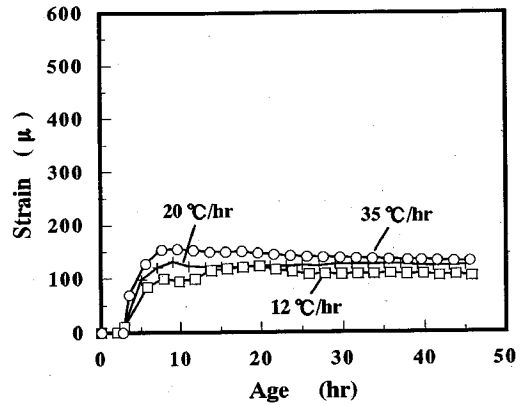


Fig.11 Strain-age curves for different rate of temperature rise

な増加は見られなかった。また、ひび割れ総長も同様な傾向を示した。

Table 6 は、**Table 5** で示した微細ひび割れのうち、骨材とペーストとの剥離ひび割れ、モルタルひび割れおよび気泡ひび割れのそれぞれが全体に占める割合を示したものである。この表に見られるように、昇温速度が12°C/hrの場合は、骨材とペーストとの剥離ひび割れの割合が極めて高く、昇温速度が35°C/hrの場合は、骨材とペーストとの剥離ひび割れに加えて、気泡ひび割れの割合が増加するのが見られた。

Fig.11 は、このような微細ひび割れの発生原因をコンクリートのひずみの面から検討するために、コンクリート表面から20mmの位置に埋め込んだモールドゲージの測定結果を示すものである。図中の曲線は、昇温速度を12°C/hr, 20°C/hr および 35°C/hr と変化させた場合である。この図から分かるように、全てのゲージは、昇温と共に引張ひずみが増大し、昇温速度が大きいものほど、ひずみの増加率は大きくなる傾向が見られた。これは、コンクリートが急激に加熱されたため、コンクリート中の空気や水が膨張したためであると思われる、その過程で前述のような気泡ひび割れが発生すると考えられる。

昇温速度の大きさが、硬化コンクリートの微細構造に及ぼす影響を調べるために、コンクリート組織のSEMによる観察、コンクリートの細孔容積の測定、コンクリートの強度試験を行った。その結果の概要を以下に示す。

Photo.9 および **Photo.10** は、昇温速度が12°C/hrの場合と35°C/hrの場合のコンクリートの新鮮な破断面をSEMで観察した結果である。これらの写真は、ペースト部におけるセメントの硬化体であるが、昇温速度が12°C/hrの場合と35°C/hrの場合の生成されたセメントゲルの形状を比較すると、その形状に大

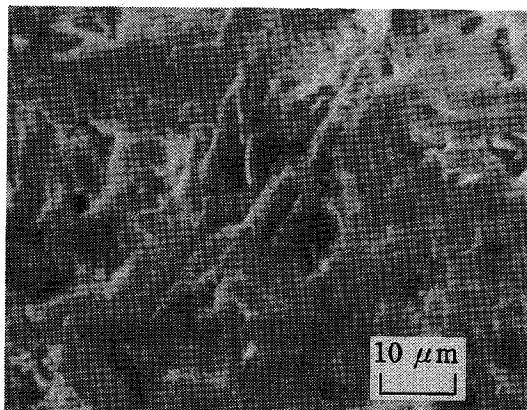


Photo.9 Freshly fractured surface of concrete by SEM (Rate of temperature rise : 12 °C /hr, Presteaming period : 4 hr, Rate of cooling : -3 °C /hr, Series 2)

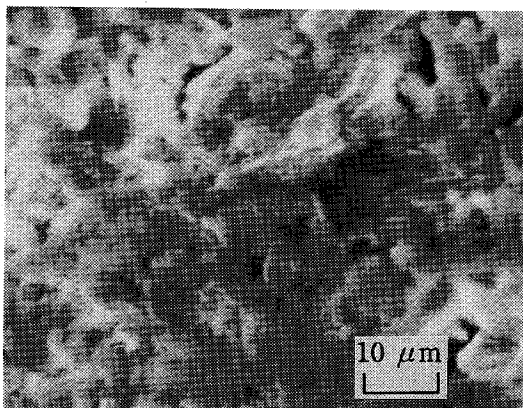


Photo.10 Freshly fractured surface of concrete by SEM (Rate of temperature rise : 35 °C /hr, Presteaming period : 4 hr, Rate of cooling : -3 °C /hr, Series 5)

きな差は見られなかった。

Fig.12 は、昇温速度を12°C/hr, 20°C/hrおよび35°C/hrとした場合の、コンクリートの細孔容積を示すものである。この図に示されるように、昇温速度が大きくなっても、全細孔容積の値は、それぞれ、0.078cc/g, 0.074cc/gおよび0.079cc/gとあまり大きな差は見られなかった。

Fig.13 は、昇温速度を12°C/hr, 20°C/hrおよび35°C/hrとした場合のコンクリートの圧縮強度と引張強度の試験結果を示すものである。この図に示されるように、昇温速度が変化しても、圧縮強度、引張強度ともにあまり差は生じなかった。

これらの結果から分かるように、昇温速度が12°C/hrから35°C/hrと大きくなってもコンクリートの微

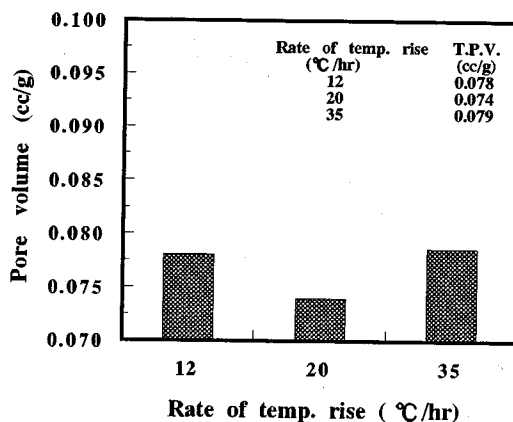


Fig.12 Pore volume for different rate of temperature rise

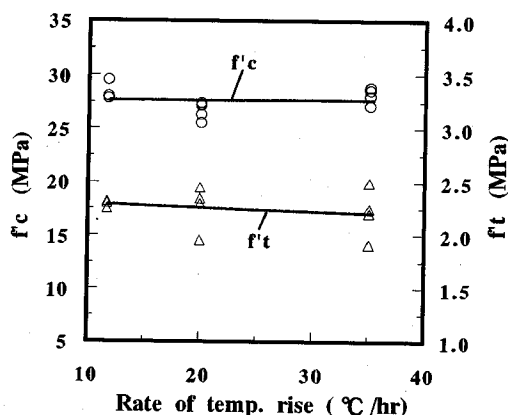


Fig.13 Relations between strength and rate of temperature rise

細構造およびコンクリートの強度ともにそれほど大きな変化は見られなかった。これは、昇温速度の大きいものは、加熱にともなうコンクリート中の空気や水の膨張率は大きい、十分な前養生時間をとった場合にはその膨張量はそれほど大きくなりなく、コンクリートの微細構造が比較的緻密であるためと考えられる。

(3) 降温速度

降温速度の大きさが微細ひび割れの性状に及ぼす影響を調べるために、降温速度をACI規定値に近い-3°C/hrと、寒冷地で直ちに外気温にさらした場合を想定して-85°C/hrの2種類に変えて実験を行った。また、前養生時間および昇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4時間と12°C/hrとした。その結果の概要は次のようである。

Fig.8 および **Fig.14** は、降温速度を-3°C/hrおよび-85°C/hrと変化させた場合の微細ひび割れの発生状況のトレース図である。また、**Table 7** は、トレ

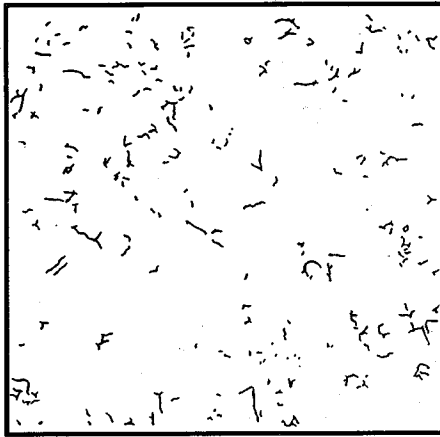


Fig.14 Microcracks on the surface of concrete (Rate of cooling : $-85\text{ }^{\circ}\text{C/hr}$, Rate of temperature rise : $12\text{ }^{\circ}\text{C/hr}$, Presteaming period : 4 hr, Series 3)

Table 7 Length, number and density of cracks for different Rate of cooling (Presteaming period : 4 hr, Rate of temperature rise : $12\text{ }^{\circ}\text{C/hr}$)

Rate of cooling ($^{\circ}\text{C/hr}$)	Cracks			
	Number of cracks	Density (number/cm ²)	Length of cracks (mm)	Density (mm/cm ²)
-3	42	0.42	141	1.41
-85	273	2.73	436	4.36

Table 8 Ratios of crack types for different rate of cooling (Presteaming period : 4 hr, Rate of temperature rise : $12\text{ }^{\circ}\text{C/hr}$)

Rate of cooling ($^{\circ}\text{C/hr}$)	Number of cracks			Length of cracks		
	Separation (%)	Mortar (%)	Vapor (%)	Separation (%)	Mortar (%)	Vapor (%)
-3	97	3	0	98	2	0
-85	89	11	0	92	8	0

スした微細ひび割れの種類に関わらず、その総数、総長および密度を示したものである。これらの図、表に見られるように降温速度が大きくなると微細ひび割れの増加が認められ、ひび割れ個数密度は、降温速度が $-3\text{ }^{\circ}\text{C/hr}$ の場合は 0.42 個/cm^2 で、 $-85\text{ }^{\circ}\text{C/hr}$ の場合は 2.73 個/cm^2 であった。また、ひび割れ総長も同様な傾向を示した。

Table 8は、**Table 7**に示したひび割れのうち、骨材とペーストとの剥離ひび割れ、モルタルひび割れおよび気泡ひび割れのそれぞれが全体に占める割合を示したものである。この表に見られるように、降

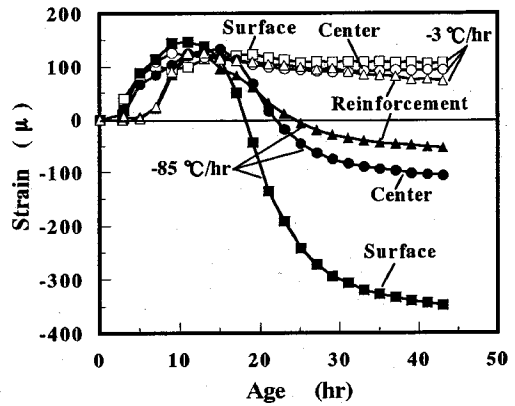


Fig.15 Strain-age curves for different rate of cooling

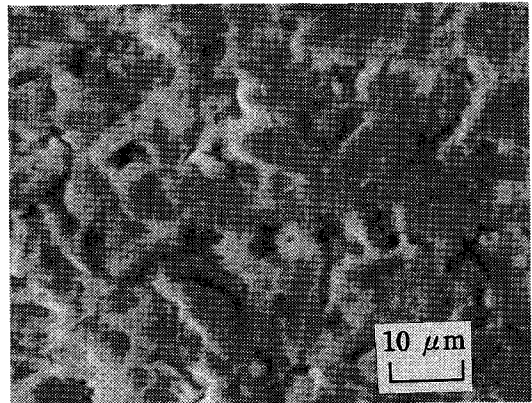


Photo.11 Freshly fractured surface of concrete by SEM (Rate of cooling : $-85\text{ }^{\circ}\text{C/hr}$, Presteaming period : 4 hr, Rate of temperature rise : $12\text{ }^{\circ}\text{C/hr}$, Series 3)

温速度が何れの場合にも、骨材とペーストとの剥離ひび割れの占める割合が極めて高いが、降温速度が、 $-85\text{ }^{\circ}\text{C/hr}$ と大きな場合には、モルタルひび割れの割合が増加するのが観察された。

Fig.15は、これらの微細ひび割れの発生原因をコンクリートのひずみの面から検討するために、コンクリートの表面と中心に埋め込んだゲージのひずみの経時変化を示したものである。この図に見られるように、降温速度を $-3\text{ }^{\circ}\text{C/hr}$ とした場合は、表面と中心のひずみにそれほど差はないが、 $-85\text{ }^{\circ}\text{C/hr}$ とすると表面と中心に $250\text{ }\mu$ 程度の大きなひずみ差が現れた。このようなひずみ差は、表面と内部とにおける、コンクリートの温度差から生じるものであって、イニシャルテンションとなり表面付近のコンクリートの骨材とペーストとの剥離やモルタル部の微細ひび割れを発生させる原因となると考えられる。また、コンクリート内部の鉄筋のひずみは、図に見られる

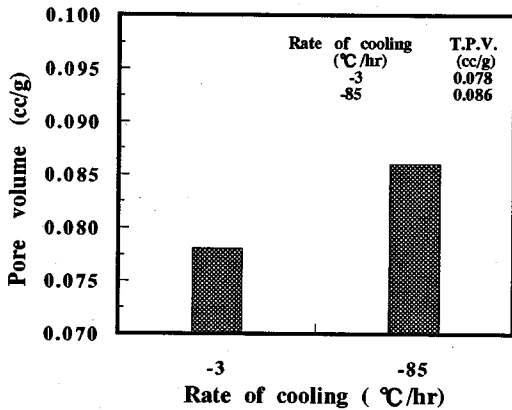


Fig.16 Pore volume for different rate of cooling

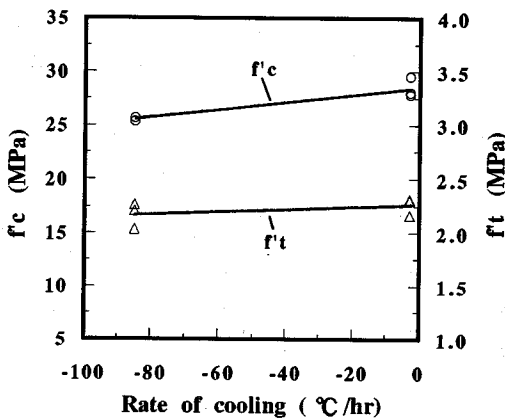


Fig.17 Relations between strength and rate of cooling

ように、降温速度が -3°C/hr の場合は、コンクリート表面のひずみとあまり差が見られないが、 -85°C/hr となると表面との間に大きなひずみ差を生じさせた。このような鉄筋による拘束も微細ひび割れが発生する原因の一つではないかと考えられる。

降温速度の大きさが硬化コンクリートの微細構造に及ぼす影響を調べるために、コンクリート組織のSEMによる観察、細孔容積の測定、コンクリートの強度試験を行った。その結果を以下に示す。

Photo.9 および **Photo.11** は、降温速度を -3°C/hr および -85°C/hr とした場合のコンクリートの新鮮な破断面をSEMにより観察した結果である。これらの写真に見られるように、ペースト部に生成されたセメントゲルの形状に大きな変化は見られないが、降温速度が大きい方がやや組織が粗いように見える。

Fig.16 は、降温速度が -3°C/hr および -85°C/hr の場合の細孔容積を示したものである。この図に見られるように、降温速度が -3°C/hr の場合は、全細孔容積が 0.078cc/g であった、しかし、降温速度が大きい -85°C/hr の場合は、全細孔容積が約10%増加し

Table 9 Specification regulations for presteaming period

Specifications	Regulations for presteaming period
JSCE	2~3 hr
JASS 10	Rate of temperature rise of 20°C/hr 3~7 hr
ACI Committee 517	Presteaming temperature of $16\sim 38^{\circ}\text{C}$ 2 hr minimum

0.086cc/g となった。

Fig.17は、降温速度が -3°C/hr および -85°C/hr の場合のコンクリートの圧縮強度と引張強度の試験結果を示すものである。この図より、降温速度が -85°C/hr のもの、 -3°C/hr のものに比べて圧縮強度、引張強度ともに減少し、それぞれ約10%および5%の低下が見られた。

これらの結果から、降温速度が大きい場合は、コンクリートの微細構造を粗くし、細孔容積を増加させ、コンクリート強度を減少させる傾向があることが分かった。これは、降温速度が小さいものは、コンクリートの温度が室温に達するまで35時間程度かかり、降温中にも水和反応が進み組織が緻密になるのに比べて、降温速度が大きいものは、コンクリートの温度が急激に下がったことにより降温中の水和反応は進まず、急激な温度降下で表面に微細ひび割れが発生するためであると思われる。

5. 蒸気養生条件の検討

以上述べたように、蒸気養生条件は、微細ひび割れの発生に極めて大きい影響を及ぼすことが分かった。そこで、微細ひび割れ防止の面から実験結果を通して現行の示方書類の蒸気養生に関する規定を検討した結果は次のようである。

Table 9は、学会の示方書類における蒸気養生に関する規定のうち前養生時間の規定を示したものである。この表に見られるように、土木学会では2~3時間、建築学会では3~7時間、また、ACIでは最低2時間としている。しかし、実験の結果、土木学会ならびにACIで規定されている前養生2時間をとっても、かなりの微細ひび割れが発生していることから、これらの規定の前養生2時間ではこのようなひび割れを防止するには不十分であると思われる。また、土木学会および建築学会の規定には、前養生温度の規定はないが、時間ばかりでなく前養生温度についての規定も必要であると考えられる。

Table 10 は、学会の示方書類における蒸気養生に関する規定のうち昇温速度の規定を示したものであ

Table 10 Specification regulations for rate of temperature rise

Specifications	Regulations for rate of temperature rise
JSCE	20°C/hr or less
JASS 10 ACI Committee 517	10~20°C/hr 22~33°C/hr

Table 11 Specification regulations for rate of cooling

Specifications	Regulations for rate of cooling
JSCE	養生室の温度は、徐々に下げ、外気の温度と大差がないようになってから、製品を出す。
JASS 10	槽内の温度と外気温の差が大きい場合は、部材の急激な冷却を防止する処置を講ずる。
ACI Committee 517	2.8°C/hr Maximum average decline

る。この表に見られるように、土木学会では、20°C/hr以下、建築学会では、10~20°C/hr、ACIでは、22~33°C/hrとしている。しかし実験の結果、前養生時間と降温速度の影響を十分に小さくした場合には、昇温速度を土木学会、建築学会に規定されている範囲の20°C/hrより大きい35°C/hrとしても微細ひび割れの個数密度や強度にそれほど大きな差は見られなかった。

Table 11 は、学会の示方書類における蒸気養生に関する規定のうち降温速度の規定を示したものである。この表に示されるようにACIの規定には、最大2.8°C/hrという規定があるが、土木学会と建築学会には具体的な降温速度の規定はない。しかし、実験の結果から前養生時間と昇温速度の影響を小さくしても降温速度が大きいとかなり多くの微細ひび割れが発生している。従って、降温速度の具体的な範囲を定める必要があると思われる。

5. 結論

鉄筋コンクリート供試体を用いて、種々の蒸気養生条件がコンクリート表面に発生する微細ひび割れの性状に及ぼす影響を、X線造影撮影法、SEM、ポロシメータ等によって調べる実験を行った結果、実験の範囲内で次のようなことが言える。

(1) コンクリートの蒸気養生過程で発生する表面微細ひび割れには、種々のタイプのもが見られたが、それらを大別すると、骨材とペーストとの剥離

ひび割れ、モルタルひび割れ、気泡ひび割れの、3種類になる。

(2) 前養生時間の長さが微細ひび割れの性状に及ぼす影響は極めて大きい。前養生時間が短い場合には、他の条件である昇温速度と降温速度の影響をできるだけ小さくするようにしても、非常に多くの微細ひび割れが発生する。前養生時間が短い場合の微細ひび割れには、モルタルひび割れが比較的多く見られた。その発生原因は、主として、流動状態のペースト部の熱膨張率と骨材の熱膨張率との差であると考えられる。また、前養生時間の短縮は、コンクリート組織の緻密さを欠如させる原因となり、コンクリートの強度を低下させる傾向がある。

(3) 昇温速度の大きさが微細ひび割れの性状に及ぼす影響は比較的小さい。昇温速度が比較的大きい場合でも、他の条件である前養生時間と降温速度の影響を小さくすれば、微細ひび割れの発生は少ない。また、同じ条件下では、昇温速度の大きさがコンクリートの微細構造に及ぼす影響は比較的少なく、コンクリート強度にあまり大きな差を生じさせない。

(4) 降温速度の大きさが微細ひび割れの性状に及ぼす影響は比較的大きい。降温速度が大きい場合には、他の条件である前養生時間と昇温速度の影響を小さくしても、微細ひび割れが発生する。降温速度が大きい場合の微細ひび割れは、骨材とペーストとの剥離ひび割れが比較的多く見られた。その発生原因は、コンクリート部材表面の温度の低下にともなう部材中心と表面とのひずみ差や鉄筋による拘束であると考えられる。また、降温速度が大きい場合は、コンクリート組織の緻密さを欠如させる原因となり、コンクリートの強度を低下させる傾向がある。

(5) 微細ひび割れ発生防止の面から実験結果を通して現行の示方書類の規定を検討した結果、土木学会示方書に規定されている前養生2時間をとっても、場合によっては微細ひび割れを防止するには不十分であることが分かった。また、土木学会および建築学会に規定されている昇温速度の限界の20°C/hrより大きい35°C/hrにしても微細ひび割れの発生に及ぼす影響がそれほど大きくないこと、さらに、土木学会と建築学会では降温速度に関する具体的な規定はないが、降温速度が大きいと微細ひび割れが発生しやすいことから具体的な範囲を定める必要があること等が分かった。

6. あとがき

表面微細ひび割れの発生には、本研究で行った蒸気養生条件の他に、コンクリートの配合条件の影響

が大きいものと考えられるので、現在、水セメント比や空気量等、配合条件が異なる場合について同様の実験を行っている。さらに、このような表面微細ひび割れと部材の耐久性との関連性についても実験的に検討している。今後は、供試体形状等の条件についても実験を行い表面微細ひび割れの防止策を総合的に検討したいと考えている。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書，施工編，pp. 252-253, 1991.
- 2) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説，JASS 10，プレキャストコンクリート工事，pp. 84-91, 1991.
- 3) ACI：ACI Standards, Committee 517. 2R-87, 1987.
- 4) 諸橋克敏，大塚浩司，阿波 稔：蒸気養生した鉄筋コンクリート表面における微細ひびわれの性状，第47回土木学会年次学術講演概要集 V，pp. 902-903, 1992.
- 5) 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われ，コンクリート工学年次論文集，15-1，pp. 567-572, 1993.
- 6) 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性状，第48回土木学会年次学術講演概要集 V，pp. 692-693, 1993.
- 7) 吉目木祐也，大塚浩司，諸橋克敏，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に関する実験的研究，土木学会東北支部技術研究発表会講演概要，pp. 582-583, 1994.
- 8) 近藤連一，後藤誠史，大門正機，保坂義公：セメントの水和に及ぼす加熱養生の影響，セメント・コンクリート，No. 321，pp. 2-8, 1973.
- 9) 鈴木一孝：セメントの水和と物性，コンクリート工学，Vol. 11，No. 11，pp. 15-24, 1981.

(1994.6.29 受付)

PROPERTIES OF MICROCRACKS FORMED ON SURFACE OF CONCRETE AT STEAM CURING PERIOD

Koji OTSUKA, Masami SHOYA, Ken-ichi KOSEKI and Minoru ABA

The purpose of this investigation was to study the condition and mechanism of microcrack formation on the surface of concrete at steam curing period. A new X-ray technique using a contrast medium was developed for this study. Influences of steam curing conditions on the formation of microcracks were studied through experiments with reinforced concrete specimens. As a result, successful detection of three different types of microcracks was possible. Influences of various factors on the formation of microcracks were also studied and the results were compared with the specification regulations of JSCE, JASS, ACI from the viewpoint of cracks prevention.