

論文

[1094] 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

阿波 稔*1・大塚浩司*2・諸橋克敏*3

1. まえがき

コンクリート製品を製造する場合、一般に促進養生方法として蒸気養生が広く用いられている。蒸気養生において、その養生方法が不適切である時、コンクリートの耐久性が著しく低下する場合がある。その原因としては、蒸気養生過程でコンクリート表面および内部に微細なひびわれが発生することや細孔構造の変化が生じることなどが考えられている¹⁾。しかし、蒸気養生のどの段階で、どのような微細ひびわれが発生するのか、また、その発生条件や発生機構などの面から検討したものは少なく不明な点が多い。

本報告は、蒸気養生コンクリートの養生過程で発生する微細なひびわれの発生状況、発生条件および発生機構を解明することを目的に、種々の蒸気養生条件において発生した微細ひびわれの性状をX線造影撮影法を用い検出し、さらに鉄筋およびコンクリートの内部ひずみの変化と温度とを測定し、両者を比較検討した結果をまとめたものである。

2. 実験方法

2.1 使用材料

セメントは、早強ポルトランドセメントを用いた。骨材は、細骨材として川砂、粗骨材として最大寸法20mmの碎石を使用した。鉄筋は、市販の横筋異形鉄筋SD345、D16を用いた。なお、造影剤は研究室独自に工業用に開発したものを使用した。

2.2 配合および練り混ぜ

本実験に用いたコンクリートの配合は、表-1に示す通りである。

2.3 蒸気養生

蒸気養生条件を表-2に示す。前養生として、20℃の恒温室中に4時間放置したものと、前置なしの2種類行い、昇温時間はそれぞれ3時間と1時間、最高温度は55℃で4時間保持した。また後養生は、それぞれ徐冷(20℃の恒温室内)と急冷(-30℃の冷凍庫)とした。なお、比較のために普通養生(20℃の恒温室内で湿潤養生)についての実験も行った。

本実験では、実際の蒸気養生状態を想定するために、

表-1 配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブの範囲 (cm)	W/C (%)	S/A (%)	空気量 (%)
20	8±1	50	47	4
単位量 (kg/m ³)				
水	セメント	細骨材	粗骨材	
W	C	S	G	
194	388	713	968	

表-2 蒸気養生条件

供試体 NO	前置時間 前置温度	昇温時間 (hr)	最高温度 保持時間	後養生温度 (℃)
4-3	A	3	55℃	20
	B	3		-30
4-1	A	1		20
	B	1		-30
0-3	A	3	4hr	20
	B	3		-30
0-1	A	1		20
	B	1		-30
C-1	普通養生		20℃	

*1 東北学院大学 工学研究科 土木工学専攻 修士課程 (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 (株) P・S 第一技術部

供試体を湿らせた布で包みビニールで密封し、恒温室中で温度制御しながら蒸気養生を行った。そして打設後材令24時間で養生を終了した。

2.4 供試体

供試体の寸法は、図-1に示すように15cm×15cm×40cmの矩形であり、長軸方向にD16鉄筋を4本配置した。なお、鉄筋のかぶり厚は、3cmである。供試体は、表-2に示す蒸気養生条件のもとで9シリーズの条件について、それぞれ3体ずつ27体を用いた。

2.5 測定

2.5.1 ひびわれの検出

ひびわれの検出には、X線造影撮影法を用いた。そのシステムを図-2に示す。X線発生装置からX線を供試体に放射し、透過したX線をイメージングプレートで受け、画像をX線制御室のTVモニターで観察できるようになっている。また、供試体を透過したX線を直接フィルムに撮影して検出する方法も可能である。本報告では、TVモードの検出方法よりX線フィルムによる直接撮影の方が精度が高く微細なひびわれをより鮮明に撮影できるという理由からこの直接撮影の結果について述べている。

養生終了後、X線撮影時に表面および表面付近の微細なひびわれをより鮮明に映し出すために、供試体表層部を厚さ2cmにダイヤモンドソーで切断した。そして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、造影剤を5mm程度の深さになるようにため、微細ひびわれに浸透させた。造影剤を浸透させた供試体のX線撮影をした。そして現像したフィルムを読影機にかけてひびわれの観察を行った。

2.5.2 コンクリートのひずみ、温度および鉄筋のひずみの測定

コンクリートのひずみと温度の測定には、市販の埋め込み型ゲージと熱伝対を使用した。また、埋め込み位置は図-1に示すように、それぞれ供試体打設面より2cm、7.5cm、13cmの深さである。鉄筋のひずみ測定には、供試体中央部の鉄筋表面にストレインゲージを対称に2枚貼り、測定結果を平均した。なお、これらの測定は打設後より15分毎に24時間の間行った。

3. 実験結果および考察

3.1 微細ひびわれの性状

X線撮影したフィルムを読影機にかけ、10×10cm²の範囲の微細ひびわれをトレースしたものを図-3(a~e)に示す。また、各養生条件で発生したひびわれの個数およびひびわれのトレースの長さをキルビメー

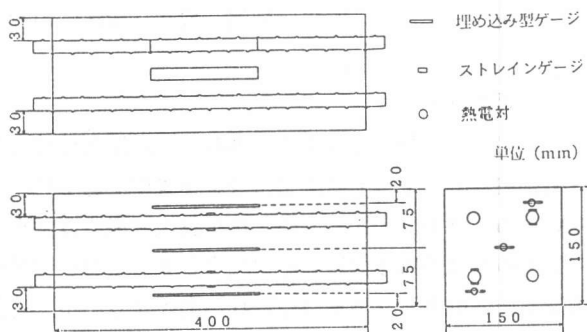


図-1 供試体寸法

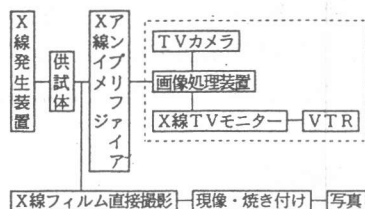


図-2 ひびわれ検出システム

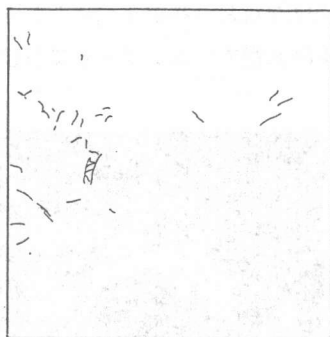
表-3 ひびわれ総長および総本数

供試体			ひびわれ総長	ひびわれ総本数
養生時間(h)・温度(C)			(cm)	(本)
前	昇	後養生		
4	3	2.0	12.60	39
		-3.0	42.05	282
	1	2.0	48.25	232
		-3.0	76.05	402
0	3	2.0	94.10	457
		-3.0	139.35	730
	1	2.0	134.95	955
		-3.0	190.50	1103

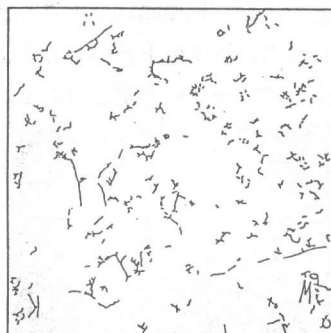
タで測定しひびわれ総長（総計の長さ）を求めた（表-3）。そして、各養生段階における養生条件が微細ひびわれの発生およびその形態に及ぼす影響について検討した結果は次のようである。

①前置時間の影響

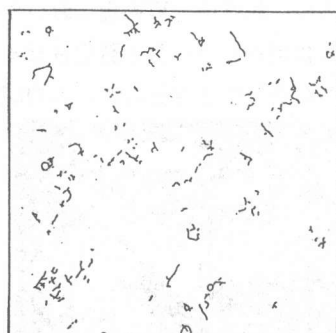
前置4時間の場合の図-3（a）と0時間の場合の図-3（b）を比較してみると（両者とも温度上昇速度は適切で、下降速度も緩やかである）。図-3（a）は、骨材とモルタル部の剥離が若干見られる程度でひびわれの発生は、ほとんどない。一方、図-3（b）ではひびわれ個数および総長が大幅に増加した。ひびわれの主要な形態は、骨材とペーストの剥離、モルタル部のひびわれが観察された。これらのひびわれが大部分を占めたが、中には気泡などの空隙を起点とした放射状のひびわれも小数見られた。骨材とペーストの剥離状態のX線フィルムの拡大写真（10倍）を写真-1に示す。黒い影のある部分が骨材でモルタルとの界面への造影剤の浸透により、白く写っている所が剥離部分である。



a. 前置時間4時間
上昇時間3時間、徐冷



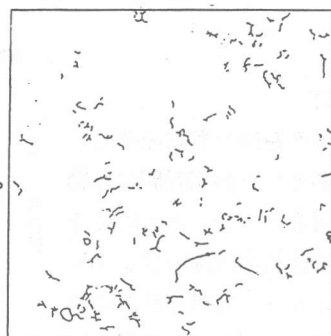
b. 前置時間0時間
上昇時間3時間、徐冷



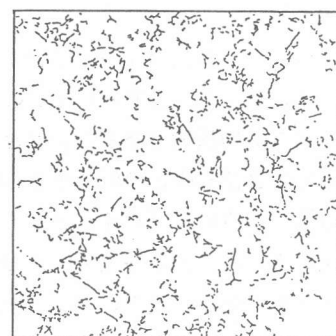
c. 前置時間4時間
上昇時間1時間、徐冷

②上昇速度の影響

温度上昇速度の緩やかな図-3（a）の場合と急な図-3（c）の場合を比較すると（両者とも前置時間は適切で、温度下降速度も緩やかである）。特徴として、図-3（c）では総ひびわれ量の増加が認められたが、前置時間の影響ほど大きくはない。骨材とモルタル界面の剥離は少なく、比較的大きな気泡から周りに放射状に発生するひびわれが多く観察された。気泡を起点としたひびわれの拡大写真（10倍）を写真-2に示す。写真中央に見える球形の白い部分が気泡である。そこから放射状に伸びる白い線がひびわれである。



d. 前置時間4時間
上昇時間3時間、急冷



e. 前置時間0時間
上昇時間1時間、急冷

図-3 ひびわれのトレース

多く観察された。気泡を起点としたひびわれの拡大写真（10倍）を写真-2に示す。写真中央に見える球形の白い部分が気泡である。そこから放射状に伸びる白い線がひびわれである。

③後養生の影響

後養生温度を急激に低下させた図-3（d）の場合と、徐冷した図-3（a）の場合とを比較すると（両者とも前置時間、上昇速度は適切）、図-3（d）の場合には、骨材とペーストの剥

離した部分がかなり多く見られ、モルタル部にもひびわれが少し観察された。しかし気泡などを起点とした空隙ひびわれは全く観察されなかった。これは、空隙ひびわれが後養生の要因で発生するのではないと考えられる。

④複合条件の影響

複合条件として前置を0時間、温度上昇速度を1時間にしさらに急冷したものを図-3 (e) に示す。8シリーズの蒸気養生条件の中で最もひびわれが発生しやすい条件であったためひびわれ総数および総長ともに大きかった。ひびわれの主要な形態は、骨材とペースト間の剥離が著しく進み、剥離した骨材の周りのモルタル部に微細なひびわれが非常に多数、発生しているのが見られた。複合条件でのひびわれの形状を写真-3に示す。骨材の剥離の周りの雲状の白い部分は非常に多数の微細ひびわれの集合体であると考えられる。

蒸気養生過程における急激な温度の上昇や下降は、粗骨材とモルタルの剥離を生じさせる。さらに、温度の上昇過程において前置の不足、急加熱はモルタル部や気泡などの空隙を起点とした所に微細ひびわれを発生させる。つまり、温度の上昇過程および下降過程でコンクリートにひびわれを発生させるための応力が発生しているものと推察される。

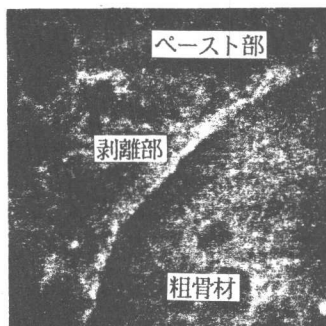


写真-1 骨材の剥離状況

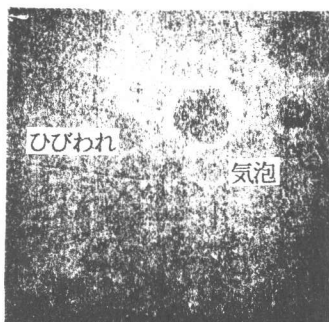


写真-2 空隙ひびわれ

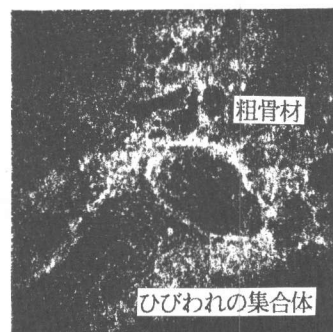


写真-3 モルタルひびわれ

3. 2 コンクリートのひずみ

3. 2. 1 ひずみの原点の検討

未だ流動状態であるコンクリートが時間と共に硬化し、骨材および鉄筋との付着が生じ始めそれらが相互間に影響し合う時点のひずみを0として検討を行った。この時点を決めるために、各養生条件における供試体内部のコンクリートの温度とひずみ、および埋込みゲージ自身の熱膨張率を測定した。その結果の一例を図-4に示す。この場合は前養生なしで温度上昇させたものである。ゲージは、流動状態のコンクリートの中を温度の上昇とともにゲージ自身(使用したモールドゲージの材質であるエポキシ樹脂)の熱膨張率に従い伸びて行くが、やがてコンクリートの硬化により拘束され始める。つまり、ゲージ自身の熱膨張率からの伸びと、離れる時点が現れる。この点をコンクリートと骨材および鉄筋相互間に付着が生じ影響し合う点とした。その時点は、図から分かる様に打設後約2時間であった。前養生を4時間置いたものについても同様な実験の結果、付着時点は打設後4時間であった。

3. 2. 2 ひずみの経時変化

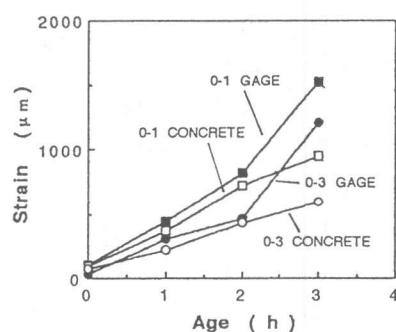


図-4 コンクリートとゲージの付着時期

①前置時間と温度上昇速度の影響

図-5は、前置時間と上昇速度を変えた(すべて下降速度勾配は緩やかである)場合のひずみの経時変化を示すものである。また、各養生条件における最大ひずみの値を表-4に示す。これらの表、図から見られるように前置が0のものは、前置4時間のものに比べて、ひずみの最大値が2倍にも大きくなる。また、前置0のものでも、温度上昇速度が速いものの方が最大ひずみの値が大きくなっている。一方、前置を4時間としたものは、上昇速度が変化しても最大値にそれ程の差はない。

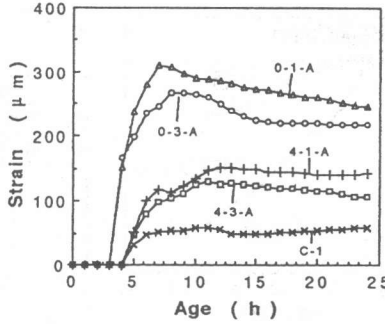


図-5 ひずみ経時変化(徐冷)

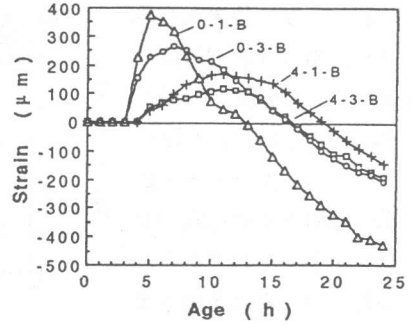


図-6 ひずみ経時変化(急冷)

②後養生の影響
図-6は、温度下降速度勾配を急激にした(前置時間、上昇速度は変化している)場合のひずみの経時変化を示すものである。この図より養生温度が降下し始めると、供試体は収縮する。前置が0のものは、前置4時間のものに比べて収縮量が大きく、前置が0のものでも温度上昇速度が速いものの方が収縮量は大きくなった。また、前置時間を4時間にとったものは、収縮量にはあまり差が現れなかった。

表-4 コンクリートの最大ひずみ

供試体		コンクリートの最大ひずみ
前置	昇温	(μm)
4	3	1 2 3
	1	1 6 1
0	3	2 5 5
	1	3 4 3
普通養生		5 7

③供試体中心ひずみと表面付近ひずみの差

図-7は、徐冷した場合と急冷した場合(前置0時間、上昇速度1時間)の供試体表面と中心のひずみの経時変化を示したものである。また、表-5に各養生条件における供試体表面と中心の最終ひずみの差を示す。これら図、表より、前置のないものは、急冷されるとひずみに顕著な差が現れた。しかし、前養生を適切に行ったものは、徐冷と急冷のひずみ差にそれ程差は見られなかった。後養生温度の急激な低下は、コンクリート部材の表面と中心に大きな温度差を生じさせた。その温度差は、徐冷では、約5℃程度であったが、急冷では、約11℃にも達した。このような温度差は、イニシャルテンションとなり骨材とペーストの剥離、モルタル部の微細ひびわれを発生させる原因となると考えられる。

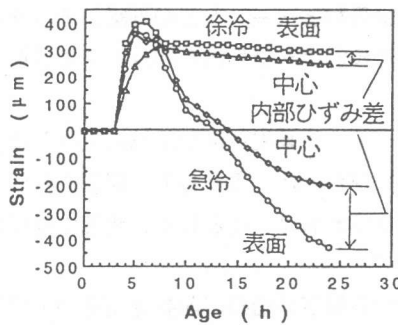


図-7 コンクリートの内部ひずみ差(0-1)

表-5 コンクリートの内部ひずみ差

供試体			コンクリートの内部ひずみ差
前置	昇温	後養生	(μm)
4	3	2 0	- 2 5
		- 3 0	7 2
	1	2 0	- 1 4
		- 3 0	3 2
0	3	2 0	- 5
		- 3 0	1 6 8
	1	2 0	- 1 1
- 3 0		2 5 4	
普通養生			- 1 0

表-5に各養生条件における供試体表面と中心の最終ひずみの差を示す。これら図、表より、前置のないものは、急冷されるとひずみに顕著な差が現れた。しかし、前養生を適切に行ったものは、徐冷と急冷のひずみ差にそれ程差は見られなかった。後養生温度の急激な低下は、コンクリート部材の表面と中心に大きな温度差を生じさせた。その温度差は、徐冷では、約5℃程度であったが、急冷では、約11℃にも達した。このような温度差は、イニシャルテンションとなり骨材とペーストの剥離、モルタル部の微細ひびわれを発生させる原因となると考えられる。

3. 2. 3 コンクリートと鉄筋の相対ひずみ

図-8は、後養生を急冷した場合（前置時間0時間、上昇時間1時間）の温度の下降時点を原点としてコンクリートと鉄筋の相対ひずみの経時変化を示したものである。また、表-6に各養生条件における相対ひずみの最終値を示す。これら図、

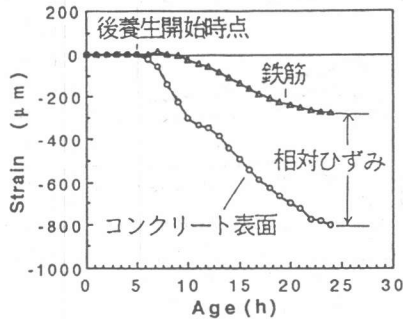


図-8 コンクリートと鉄筋の相対変位ひずみ

表-6 コンクリートと鉄筋の相対ひずみ

供試体			相対ひずみ	
養生時間(h)・温度(C)			(μm)	
前置	昇温	後養生		
4	3	2.0	4.1	
		-3.0	3.6	
	1	2.0	-3.0	
		-3.0	5.5	
0	3	2.0	3.9	
		-3.0	1.87	
	1	2.0	-3.8	
		-3.0	5.23	

表より、前養生が適切であれば温度上昇速度の大小にかかわらず後養生の影響は少ない。しかし、前養生が不適切である場合、後養生の影響を著しく受け、コンクリートと鉄筋の相対ひずみが増加し、イニシャルテンションが発生した。さらに温度上昇速度が速いものほど相対ひずみは増加した(図-8)。このような、鉄筋とコンクリートとの相対ひずみによるイニシャルテンションは、コンクリート部材内の内部と外部に生じるひずみ差に加えて骨材とペーストの剥離の増加やモルタル部の微細ひびわれ発生の一因であると考えられる。

4. まとめ

蒸気養生コンクリートの養生過程で発生する微細なひびわれの発生状況、発生条件および発生機構を解明するための実験を行った結果、実験の範囲内で次のことがいえる。

1. 蒸気養生過程で、コンクリートには骨材とペーストとの剥離、モルタル部における骨材間を連結するような微細なひびわれおよび比較的大きな気泡を起点とする放射状の微細ひびわれが発生することが分かった。
2. 骨材とペーストとの剥離は、主として、後養生温度を急速に下げた場合に生じること、モルタル部における骨材間を連結する微細ひびわれは、主として、前養生時間が不足した時に生じること、気泡を起点とした放射状の微細ひびわれは、主として、温度上昇速度が大きいときに生じることが分かった。
3. 蒸気養生過程のコンクリートのひずみ測定の結果、前養生時間が不足したり、上昇速度が大きかったりすると最高温度に達した時点のコンクリートのひずみが他の条件の場合よりもかなり大きくなり、また、温度下降時の収縮量も大きくなることが分かった。
4. 後養生温度の急激な下降は、コンクリート内部と外部との温度の違いによる大きなひずみ差を生じさせ、また、内部の鉄筋と表面のコンクリートとのひずみ差も大きくすることが分かった。そのひずみの差は微細ひびわれを発生させるのに十分な大きさであった。

参考文献

- 1) 住吉 窪山 今橋 塩谷、コンクリートの組織や物性によらず蒸気養生の影響、セメント技術年報、XXXV、1981、p. 290~293
- 2) 町田 大塚 諸橋、コンクリート表面における微細ひびわれ検出に関する研究、土木学会東北支部技術研究発表会講演概要、平成3年度、p. 550~551
- 3) 諸橋 大塚 阿波、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、p. 902~903