

報告 マスコンクリートPC梁のパイプクーリングによる温度ひび割れ制御

西岡 真帆^{*1}・井上 敏弘^{*2}・不破 崇博^{*3}・山本 康広^{*4}

要旨：本報告は、マッシブなPC梁部材の温度ひび割れを制御する対策のうち、パイプクーリングの使用に着目し、パイプ内水温の温度変化を考慮した移流拡散モデルを用いた有限要素法による数値解析、および試験施工を踏まえて実構造物へ適用したものである。結果として、移流拡散モデルを用いた有限要素法の妥当性や、パイプクーリングによるマスコンクリートの温度ひび割れ低減効果を確認した。

キーワード：マスコンクリート、パイプクーリング、移流拡散モデル、ひび割れ制御

1. はじめに

西名古屋港線旅客線化事業は、名古屋西南部地域の基幹公共サービスの充実と沿線の均衡あるまちづくりの促進のため工事が進められており、JR東海が名古屋臨海高速鉄道(株)との工事協定に基づき、平成11年から高架橋ほかの工事を施工中である。

当該工事のうち、名古屋市港区に位置する計画道路交差部においては、交差角、桁下空頭から橋脚梁部の断面寸法が2.7m×3.0m、延長が25.4mのPC梁構造とした。このため、部材断面の大きいコンクリート構造物として、ひび割れに関する照査を行った。

部材断面の大きいコンクリート構造物では、セメントの水和熱に起因する温度ひび割れが生じやすくなるため、ひび割れに関する照査を行い、有害なひび割れが発生しないことを確認することが原則となっている¹⁾。

対象構造物の温度ひび割れ発生メカニズムは内部拘束作用によるものが卓越する。

内部拘束による温度ひび割れの制御対策としては、主に内部温度を下げて表面との温度差を小さくする対策と、表面からの放熱を抑えて内部との温度差を小さくする対策が挙げられる。内部温度を下げる方法は、使用するセメントの

種類の変更や単位セメント量の低減など材料・配合によるものや、コンクリートのプレクーリング、打込み後のコンクリート温度を下げるパイプクーリングなど多くの方法がある。また、表面からの放熱を防ぐ方法は、保温性の高い型枠の使用が考えられる。

設計上の制約から、使用するセメントの種類は早強ポルトランドセメントもしくは普通ポルトランドセメントに限られており、これを踏まえて事前解析を行った結果、ひび割れ制御対策案はパイプクーリングの実施、または保温性の高い型枠の使用に絞られた。

このうち、保温性の高い型枠の使用については、施工時の温度管理が不可能であることから、ひび割れ制御対策は、パイプクーリングを実施することとした。

パイプクーリングを実施するにあたり、最適な配管ピッチ、配管ルート、通水方法とその管理などの計画は、すべて温度応力に関する解析的な検討から行った。また、事前に試験施工を実施し、解析手法の妥当性を確認した。

実施工では、事前解析から温度の管理値を設定することにより通水管理を行い、その結果、ひび割れのないPC梁が完成した。

本報告は、パイプクーリングによる温度ひび

※1 清水建設(株) 土木事業本部 技術第一部 工修(正会員)

※2 名古屋臨海高速鉄道(株) 技術部 施設建設課 主幹

※3 東海旅客鉄道(株) 建設工事部 土木工事課 係長

※4 清水・鴻池・鈴中共同企業体 所長

表-3.1 コンクリートの配合

セメントの種類	f _{ck} ¹⁾ (N/mm ²)	f _n (N/mm ²)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)				
							W	C	S	G	A d ²⁾
普通ポルトランドセメント	40	40	39.5	40.4	18	4.5	167	423	682	1039	4.23

1)設計基準強度…基準材齢：28日， 2)Ad：高性能 AE 減水剤

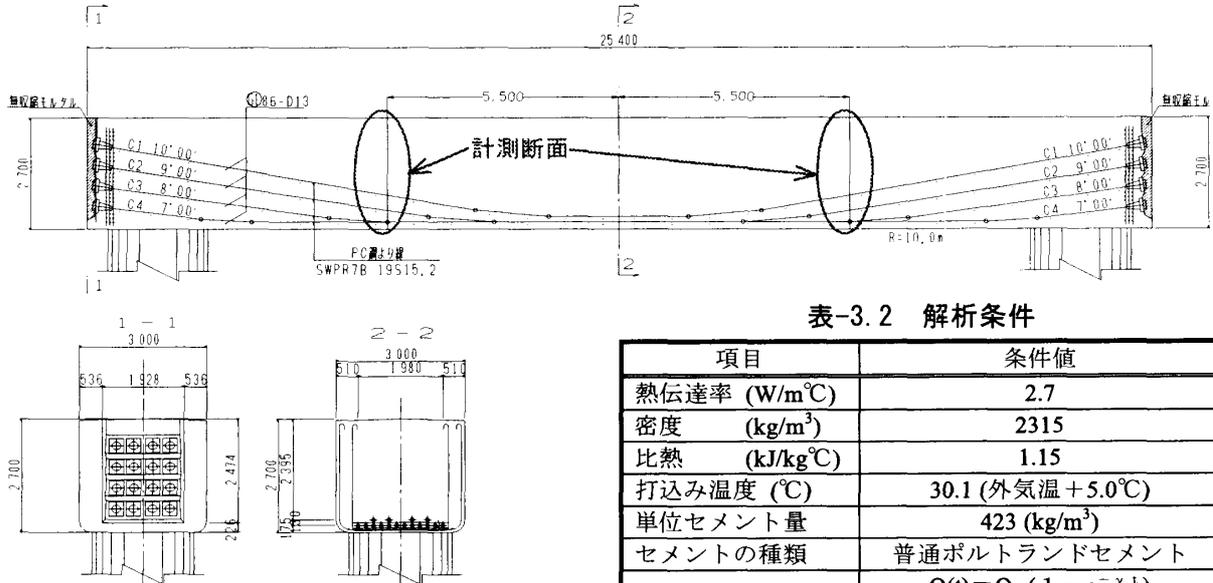


図-3.1 構造物の概要

割れ制御の解析的検討と，事前に行った試験施工，実施工での通水管理方法とその施工結果について報告するものである。

2. 移流拡散モデルによるパイプクーリング解析

パイプクーリングの解析は，コンクリート温度とパイプ内水温との熱の授受によるパイプ内水温の変化を考慮できる移流拡散モデルを用いた。

移流拡散モデルによるパイプクーリング解析は比較的新しい技術であるが，実測値とよく一致すること²⁾，最適なクーリングパイプの配置を選定する方法として有効であること³⁾から，通水方法および通水管理に関する検討は，このモデルを採用した。

表-3.2 解析条件

項目	条件値	
熱伝達率 (W/m ² ·°C)	2.7	
密度 (kg/m ³)	2315	
比熱 (kJ/kg·°C)	1.15	
打込み温度 (°C)	30.1 (外気温 + 5.0°C)	
単位セメント量	423 (kg/m ³)	
セメントの種類	普通ポルトランドセメント	
断熱温度上昇式	$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-\gamma t})$ $Q_{\infty} = 58.5, \gamma = 2.03$	
外気温の設定	名古屋市の旬別平均気温	
熱伝達係数 η (W/°C·m ²)	合板：5 (2週間撤去) 養生マット：8 (2週間撤去) 無養生：14	
通水条件	通水管径	シース管：95 (mm) パイプ：1 (inch)
	通水流量	15 (l/min)
	熱伝達係数	$h = 320$ (W/°C·m ²)
	通水温度	外気温
通水期間	2週間	
圧縮強度 (N/mm ²)	$f_c'(t) = t / (0.06477 + 0.01868t)$ ただし，t：材齢(日)	
ヤング係数(N/mm ²)	$4700 \times \sqrt{f_c'(t)}$	
引張強度 (N/mm ²)	$0.44 \times \sqrt{f_c'(t)}$	
ポアソン比	0.18	
線膨張係数(μ/°C)	10	
クリープによるヤング係数の補正係数 ϕ	材齢3日まで：0.73 材齢5日以降：1.00 材齢3～5日は線形補間	

3. マスコンクリートPC梁のパイプクーリングによる解析的検討

3.1. 構造物の概要

本構造物は，断面寸法が2.7m×3.0m，延長が25.4mのPC梁である。図-3.1に梁の側面図および断面図を示す。

表-3.3 解析ケースおよび解析結果

ケース名	通水方法	解析結果			
		最大温度(°C)		最大応力 (N/mm ²)	最小ひび割れ 指数
		表面	内部		
CASE-1	通水なし	50.8	86.2	3.25	0.59
CASE-2	シース管+パイプクーリング	38.0	58.6	1.36	1.06
CASE-3	パイプクーリング (60cm ピッチ)	50.3	66.9	1.40	1.14
CASE-4	パイプクーリング (50cm ピッチ)	46.2	63.2	0.91	1.66

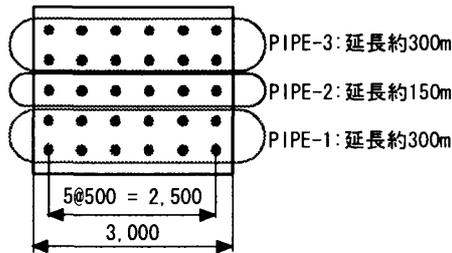


図-3.2 通水断面図

使用したコンクリートの配合を表-3.1 に示す。

3.2. パイプクーリングピッチの検討

解析は、3次元有限要素法を用いた非定常熱伝導解析および応力解析を行い、ひび割れ指数を算出して評価を行った。

ここでは、クーリングパイプ仕様の概略(シース管使用の可否やパイプピッチ)を決定するために、パイプ内水温は一定として解析を行った。表-3.2に解析条件を示す。なお、パイプ壁面とコンクリート面との熱伝達係数は、式(1)から求めた⁴⁾。

$$h = 552u + 50.0 \text{ (W/m}^2\cdot\text{°C)} \cdots \text{式(1)}$$

ここに、 u は流速(m/s)

なお、温度ひび割れの制御目標値は、ひび割れ指数 1.45 以上とした。

表-3.3 に解析ケースおよび解析結果を示す。解析の結果、シース管を利用した通水にパイプクーリングを追加した CASE-2 では、梁スパン中央下部にシース管が集中しているため、下端表面部が過冷却され、ひび割れ制御対策としては逆効果となることがわかった。

次に、クーリングパイプの配管ピッチを 60cm と 50cm に設定した CASE-3 と CASE-4 を比較すると、CASE-3 は目標値を下回り CASE-4 は目標値を上回る結果となった。以上の結果から、

表-3.4 通水に関する解析条件

項目	条件値
通水管径	1 (inch)
通水流量	15 (ℓ/min)
熱伝達率 h	320 (W/°C・m ²)
通水入口温度	15(°C), 25(°C)
通水期間	5 日間
通水方向	1 日ごとに逆転

配管ピッチは 50cm が妥当だと判断した。

3.3. 通水方法および通水管理に関する解析的検討

次に、3.2 で設定した配管ピッチの妥当性や最適な通水方法(通水ルート、通水温度、通水流量)および管理温度を設定をするため、移流拡散モデルを用いて詳細な検討を行った。

(1) 通水ルートの検討

クーリングパイプのパイプ延長は最大でも 300m 程度が一般的であるため、通水は 3 系統とした。図-3.2 に通水断面図を示す。

通水ルートは、梁の端部から通水する方法と、梁の中央部から通水する方法について検討を行った。いずれのルートも原則として梁断面の内部から表面部へと水が流れ、コンクリート表面部がパイプ温水で加温されるよう考慮した。

解析条件は通水条件を除いては表-3.2 を用いた。表-3.4 に移流拡散モデルで検討した通水に関する解析条件を示す。

解析の結果、端部から通水を行う場合、パイプクーリングの効果は梁スパン方向で対称性が損なわれることがわかった。一方、梁中央部から通水した場合は、パイプクーリングの効果は梁全体にほぼ一様であった。以上のことから、通水ルートは中央部からの通水とした。

(2) 通水管理方法の検討

通水管理は、コンクリート内に計測器を設置し、その結果に基づき行うこととした。

管理温度の設定は、表面と内部の温度差に着目し、通水入口温度を3水準(15°C, 25°C, 35°C)として行った解析結果から、ひび割れ指数 1.45 を上回る温度差(以下、許容温度差)を材齢ごとに求めて行った。図-3.3 に表面と内部の温度差とひび割れ指数との関係図の一例を示す。図中の温度の数値はいずれも通水入口温度を示す。この場合の許容温度差は、材齢 16h の場合 18°C、材齢 48h の場合 23°C となる。以上のような手順で求めた許容温度差のうち最も厳しい値を管理温度として設定し、上面と中心との温度差、下面と中心との温度差が上面側、下面側の管理温度を上回らないよう通水管理することとした。なお、管理温度は材齢により異なるため、段階的に設定した。図-3.4 に管理温度図を示す。

また、実施工での通水管理の基礎データを得る目的で、通水入口温度、通水流量の違いが表面と内部の温度差に与える影響を別途解析で検討した結果、通水入口温度を 10°C 下げると表面と内部の温度差は 3~4°C 下がること、通水流量を 5 l/min 上げると表面と内部の温度差は 3~5°C 下がることが確認できた。

4. 試験施工

4.1. 目的

前述の通り、実施工でのパイプクーリングによる温度ひび割れ制御は解析的検討に基づいているため、パイプクーリングのコンクリート温度低減効果の確認、および移流拡散モデルの妥当性を検証することを目的として試験施工を行った。

4.2. 試験概要

試験要因はパイプクーリングの有無とし、実施工の梁断面の一部を模擬して試験を行った。表-4.1 に試験ケースを示す。試験体製作時の型枠は硬質ウレタンフォームで断熱し、さらにコンクリート打設後の上面にもこれを敷設した。

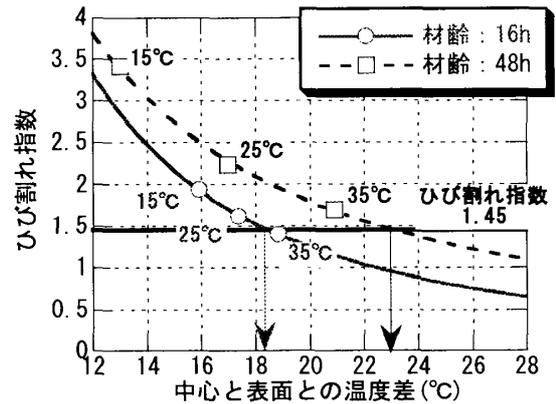


図-3.3 管理温度の設定

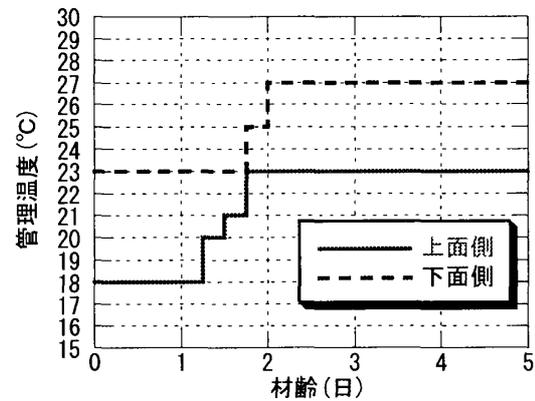


図-3.4 管理温度図

表-4.1 試験ケース

試験ケース	試験体寸法	パイプクーリングの有無
ケース 1	1m×1m×L2m	なし
ケース 2	1m×1m×L8m	あり

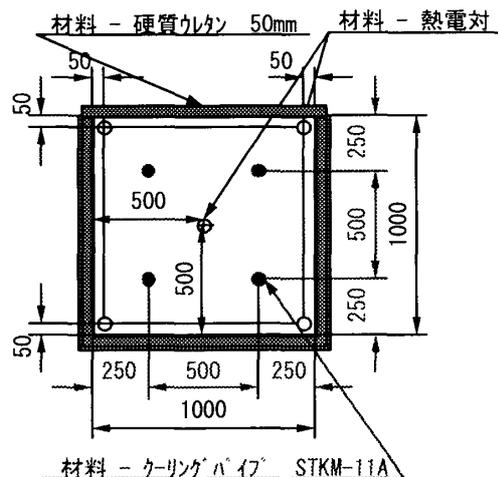


図-4.1 試験体断面図(ケース 2)

ケース 2 の試験体は、クーリングパイプを 50cm ピッチで設置した。計測は温度計測のみとし、各試験体とも中央断面で行った。図-4.1 にケー

ス2の試験体断面図を示す。

通水流量は 15(l/min)とし、水道水(平均 24.6℃)を通水した。なお、流量管理は量水器で行った。

4.3. 試験結果と考察

図-4.2 に各試験体の中心部の温度と外気温、通水温度の経時変化図を示す。試験の結果、ケース1のピーク温度は 85.7℃、ケース2のピーク温度は 68.2℃であり、ピーク温度を 17.5℃下げることができた。また、ピーク後もコンクリート温度は徐々に低下し、通水開始から4日後には外気温とほぼ同等となった。このことから、パイプクーリングはコンクリート温度低減に有効であることが確認できた。

図-4.3 にケース2の解析値と実測値とを示す。ピーク温度は解析値が 69.5℃、実測値は 68.2℃、表面と中心との温度差は、解析値が最大で 4.9℃、実測値は最大で 5.1℃とほぼ一致した。ピーク材齢には若干のずれが生じたが、実施工の計画に対しては問題のない範囲と考えた。

5. 実工事への適用

5.1. クーリング設備

クーリングパイプは、STKM11A(機械構造用炭素鋼鋼管)φ25.4mm(t=1.2mm)を使用し、事前に検討した通水ルートに基づき配置した。

冷水製造設備は、最大で毎分 75l(25l×3系統)の水を 20℃(25℃から 5℃)冷却する能力を有するものを設置した。

5.2. 計測設備

計測位置は解析結果をもとに最小ひび割れ指数位置付近の2段面(図-3.1 参照)とした。

計測はパソコンによる自動計測とし、リアルタイムで計測結果を表示できるほか、コンクリートの内部温度と表面温度の最大温度差を管理温度図とともに表示するシステムを作成し、管理を行った。有効応力計は、実際のひび割れ指数を確認するために設置した。表-5.1 に計測項目一覧を、図-5.1 に計測断面図を示す。

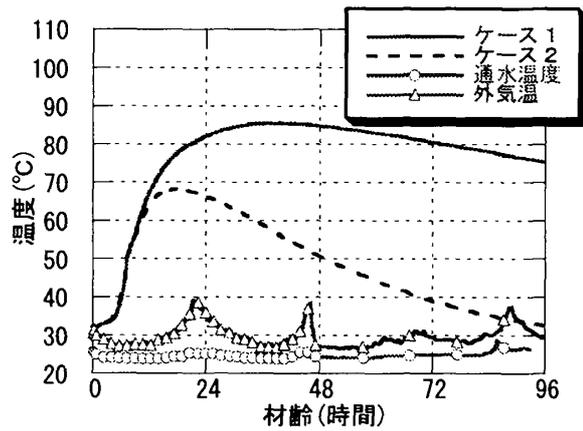


図-4.2 試験結果

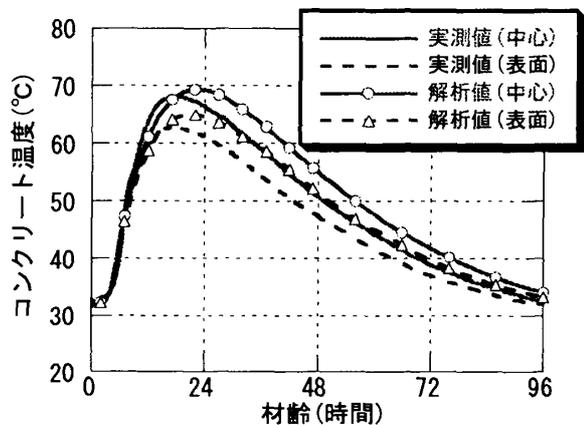


図-4.3 解析値と実績値との比較(温度)

表-5.1 計測項目一覧表

測定箇所	計測項目	計測器
コンクリート	応力	有効応力計
	温度	熱電対
クーリングパイプ	温度	熱電対
	流量	流量計
外気温	温度	熱電対

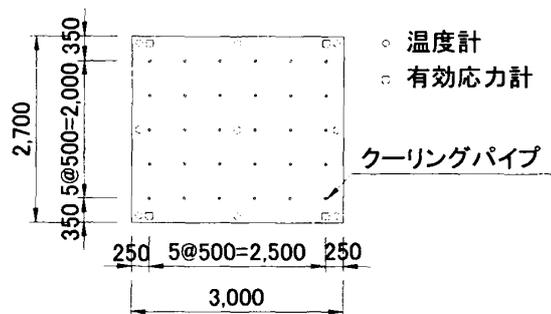


図-5.1 計測断面図

5.3. 施工結果と考察

通水条件は一連の解析を行った結果、安全を見込み、通水温度 15°C、通水流量 20 l/min で始め、温度・流量を調整しながら、管理温度を上回らないよう施工管理を行った。コンクリート温度の経時変化図を図-5.2 に、最大温度差の経時変化図と管理温度図を図-5.3 に示す。最大温度差はピーク時で 16.8°C となったが、管理温度を上回ることにはなかった。

図-5.4 に有効応力計の計測結果のうち、最大応力を示した測点のひび割れ指数を示す。ひび割れ指数は温度差が最大となる材齢 16h 付近では 4.94 であったが、材齢 72h 付近で最小の 2.05 となった。これは、温度差により発生する応力以外の外的要因によるものだと考えられるが、目標値の 1.45 は満足する結果が得られた。

6. まとめ

パイプクーリングによる温度ひび割れ制御を事前解析から定めた温度差に従って、通水量・通水温度等を管理した結果、ひび割れのないマッサンな PC 梁が完成した。また、今回得られた結果の範囲内では、移流拡散モデルを用いたパイプクーリングの解析手法は妥当であることがわかった。

謝辞

本報告における解析方法、施工計画については、法政大学の溝淵利明先生に貴重なご意見、ご助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：【2002年制定】コンクリート標準示方書[施工編]，2002。
- 2) 溝淵利明，成田総一郎，都築慶剛，平戸裕之，田邊忠顕：マスコンクリートのパイプクーリングによる熱除去効果に関する研究，土木学会論文集，No.655，V-48，pp.119-132，2000。
- 3) 溝淵利明，二塚保之，村尾義則：パイプクーリングによるひび割れ制御対策効果に関する研究，土木学会論文集，No.665，VI-49，pp.147-163，2000。
- 4) 田邊忠顕，山川秀次，渡辺朗：パイプクーリングにおける管壁面の熱伝達率の決定ならびに冷却効果の解析，土木学会論文報告集，第 343 号，pp.171-179，1984。

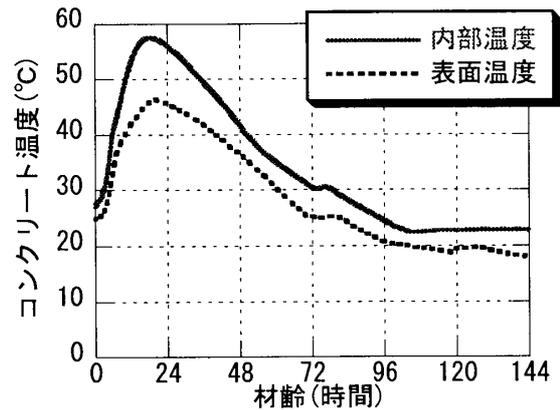


図-5.2 温度経時変化図（上面）

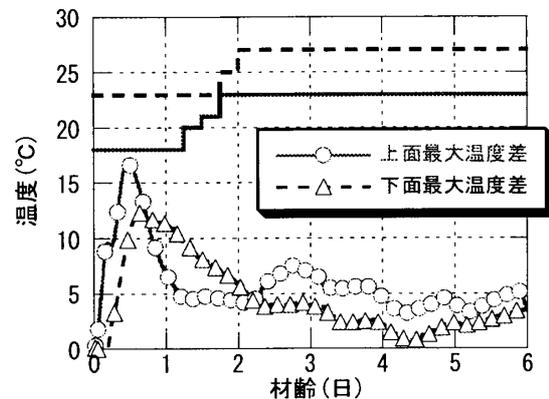


図-5.3 最大温度の経時変化図

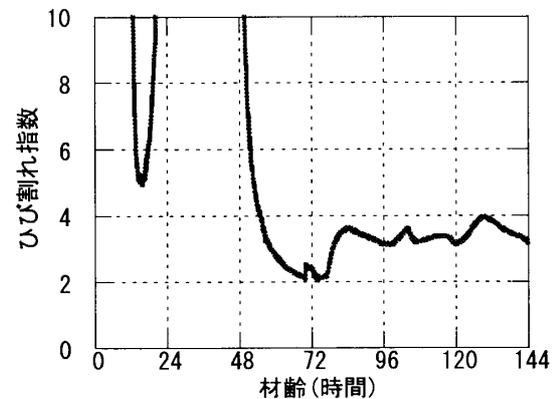


図-5.4 ひび割れ指数経時変化図