

(104) 現場打ち高強度コンクリートの初期ひび割れに関する検討

プレストレスト・コンクリート建設業協会 正会員 ○佐藤 重一
 建設省土木研究所 河野 広隆
 同上 渡辺 博志
 同上 丁 海文

1. まえがき

高強度コンクリートは、塩化物イオンなどの透過性が小さいため、これを用いた部材は耐久性に優れたものとなる。ところが、コンクリート中の単位セメント量が多いため、セメントの水和熱による温度ひずみが大きく、かつ、自己収縮が大きくなるため、高い耐久性を確保するためには初期ひび割れに対する配慮が必要となる。すなわち、コンクリートの温度ひずみや自己収縮ひずみを拘束することによって発生する拘束応力をできるだけ正確にとらえ、ひび割れ発生の危険性を検討する必要がある。ところが、高強度コンクリートの温度ひずみならびに自己収縮ひずみの進展程度はかなり大きく、かつ、その進展に合わせてコンクリートのヤング係数も急激に変化し、クリープの影響も加わることから、拘束応力を正確に予測することは容易ではない。

ここでは、現場打ち高強度コンクリート部材に想定される温度履歴を与えた供試体を製作し、コンクリートに発生するひずみの経時変化を測定するとともに、このひずみを拘束した際に発生する拘束応力の再現試験を行い、拘束応力に及ぼすコンクリートの温度の影響とクリープの影響について考察を行った。

2. 試験方法

2.1 コンクリートの拘束試験

コンクリートの長さ変化を拘束することによって生じる拘束応力を測定する試験方法として、これまで、いくつかの試験方法が考案されている。このうち、温度ひび割れを対象とした試験方法としては、建材試験センター規格試験¹⁾が有名であり、拘束鋼材の温度履歴を制御することにより、拘束鋼材量を変化させることなく、任意の拘束率を与えられる特徴を有するものである。しかし、供試体や拘束鋼材の温度制御が必要となり、特殊な拘束ジグを準備しなければならないなど、容易に実施することは難しい試験方法となっている。一方、コンクリートの自己収縮に起因する拘束応力を把握する試験方法として、JCI 自己収縮研究委員会から、「コンクリートの自己収縮試験方法(案)」(以下 JCI 試験法)²⁾が提案されている。この方法は、拘束鋼材を被拘束体となるコンクリート中に埋め込み、コンクリートと拘束鋼材の付着応力によって拘束を与えるものであり、特殊な拘束ジグを必要とせず簡易に実施できる利点を有するが、コンクリートと鋼材の温度履歴を個別に制御することができないので、温度応力をとらえる観点からは、必ずしも適切な試験方法であるとはいえない。

本研究では、試験方法の簡易性の観点から、基本的に JCI 試験法に準拠して試験を実施することとし、水和発熱ともなう温度応力も検討範囲に含めることから、型枠を発泡

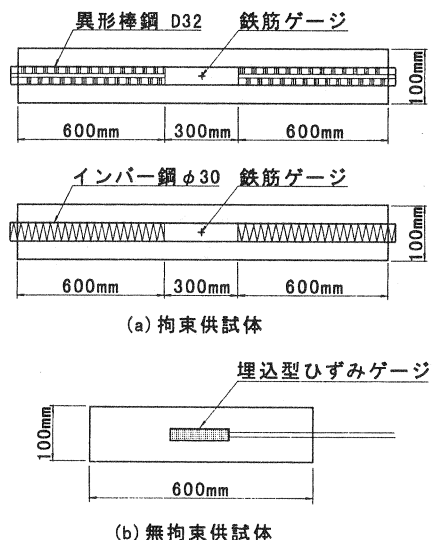


図-1 試験供試体

スチロールで覆い、コンクリート供試体に高温履歴を与えた。ただし、コンクリートの変形を拘束する拘束鋼材については、通常の鉄筋を用いた場合、コンクリートの温度変化につれて拘束鋼材も長さ変化を生じるため、供試体温度がピークに達した後、冷却時に発生する拘束応力をとらえられない問題点がある。ここでは、この点を解消するため、拘束鋼材として線膨張係数の小さいインバー鋼 (線膨張係数 $1.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) を用いた試験も行った。なお、拘束鋼材を配置せず無拘束状態でのコンクリートひずみを測定する供試体も準備した。供試体寸法は図-1に示すとおりであり、拘束応力は、拘束鋼材に貼付したひずみゲージから求めることとし、無拘束供試体のひずみは、供試体中央部に埋設した埋め込みゲージを用いて測定を行った。表-1に試験ケースを示す。コンクリートの配合は、目標とする配合強度を $100\text{N}/\text{mm}^2$ として、表-2に示すとおりとした。使用したセメントは早強ポルトランドセメントである。また、供試体に異なった温度履歴を与えるためコンクリートの打込み温度の目標値を5、20、40℃の3種類に設定した。試験では、これらの目標値におおよそ近い値が得られたが、5℃に設定したものでは、目標値よりもやや高く、練上り温度で10℃程度であった。

表-1 試験ケース

打込み温度 (°C)	拘束試験		無拘束試験
	D32	インバー	
5	○	○	○
20	○	○	○
40	○	○	○

表-2 コンクリートの示方配合

Gmax (mm)	目標値		W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)			
	スランプ(cm)	空気量(%)			W	C	S	G
20	23 ± 2.5	2.0	25	42.6	160	640	687	941

2.2 コンクリートのひずみと拘束応力の発現状況

拘束のないコンクリート供試体に生じるひずみの増加量を $\Delta \epsilon_{cf}$ 、鋼材の温度変化によって生じるひずみの増加量を $\Delta \epsilon_{sf}$ としたとき、コンクリートの変形を鋼材で拘束することによって、コンクリートに発生する応力の増加量 $\Delta \sigma_c$ は、ひずみの適合条件を仮定することにより次式で与えられる。

$$\Delta \sigma_c = -\frac{n \rho E_{ce}}{1 + n \rho} (\Delta \epsilon_{cf} - \Delta \epsilon_{sf})$$

ここで、 $n = E_s / E_{ce}$ すなわち、コンクリートの有効ヤング係数 E_{ce} と拘束鋼材のヤング係数 E_s の比、 $\rho = A_s / A_c$ すなわち、コンクリートの断面積と拘束鋼材の断面積の比である。したがって、コンクリートに発生する拘束応力は、コンクリートと拘束鋼材のひずみ差によって発生するものであり、コンクリートひずみが同一でも拘束鋼材のひずみによって発生する応力は異なったものになる。

図-2は打込み温度を20℃とした供試体の温度履歴を示したものであり、図-3は、無拘束供試体の温度およびひずみ履歴から推定されるコンクリートと拘束鋼材のひずみ差 ($\epsilon_{cf} - \epsilon_{sf}$) をD32鉄筋で拘束した場合と、インバー鋼材で拘束した場合のそれぞれについて示したものである。

D32鉄筋を拘束鋼材として用いた場合、コンクリート温度が上昇する間、すなわち、加水後の経過時間が8時間から12時間までの間でコンクリートと拘束鋼材のひずみ差

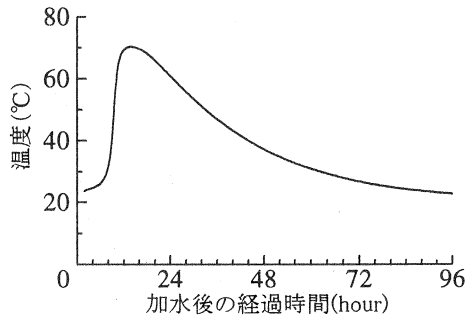


図-2 供試体の温度履歴

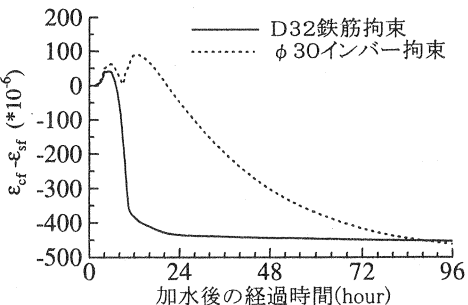


図-3 コンクリートと拘束鋼材のひずみ差

が急激に生じ、その後、ひずみ差の変化はほとんどなくなっている。したがって、この場合に発生する拘束応力は、コンクリート温度が上昇する極初期材齢において発生し、その後、拘束応力はほとんど変化しないことが予想される。これに対し、インバー鋼を用いた場合は、コンクリート温度が低下するとともに、コンクリートと拘束鋼材のひずみ差が生じていて、コンクリートの温度低下時に拘束応力が発生すると考えられる。実際に拘束を与えた供試体のコンクリートに発生していた拘束応力の測定結果を図-4に示す。拘束応力の符号は、引張応力を正としている。(以後、拘束応力に関するグラフは、

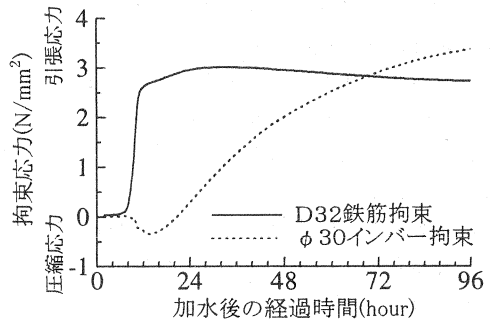


図-4 拘束応力の履歴

いずれも引張応力を正にとることとする。) コンクリートと拘束鋼材のひずみ差から予想される拘束応力の発生パターンと実際の拘束応力の発生状況はよく一致していて、D32鉄筋で拘束した場合、非常に短期間のうちに拘束応力が発生しているのに対し、インバー鋼で拘束した場合は、コンクリート供試体の温度低下に応じてゆっくりとした速度で拘束応力が発生している。したがって、コンクリートの有効ヤング係数を求める際、D32鉄筋による拘束試験では、極初期材齢では推定可能であるが、その後は、拘束応力の原因となるコンクリートと拘束鋼材のひずみ差の変動が小さくなるので有効ヤング係数を求めることができない。これに対しインバー鋼で拘束を行った場合、極初期材齢では、コンクリートと拘束鋼材とのひずみ差が小さいので発生する拘束応力の値も小さく、有効ヤング係数を把握することは困難であるが、水和反応が停滞しコンクリートの温度が低下し始めた後の拘束応力は大きくなり、有効ヤング係数の予測が可能となる。

たとえば、新旧コンクリートの打継部近傍や鉄筋近傍のコンクリートに発生する初期応力は、拘束体が温度変化にともなうひずみを生じるのでD32鉄筋拘束で再現される応力パターンに近くなり、被拘束体となるコンクリート部材全体が長さ変化を生じない拘束体による拘束を受けるような場合は、インバー鋼材拘束で再現される応力パターンに近くなるものと考えられる。実際は、両者の中間的な拘束状態が再現されることとなる。したがって、実部材に発生する拘束応力を推定する際に必要となる有効ヤング係数を求めるために実施する拘束試験としては、D32鉄筋およびインバー鋼、両者による拘束試験が必要になると考えられる。

3. 試験結果

3.1 打込み温度の違いによる拘束応力

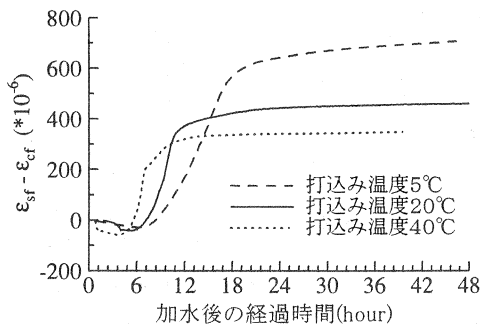


図-5 コンクリートと拘束鋼材(D32)のひずみ差

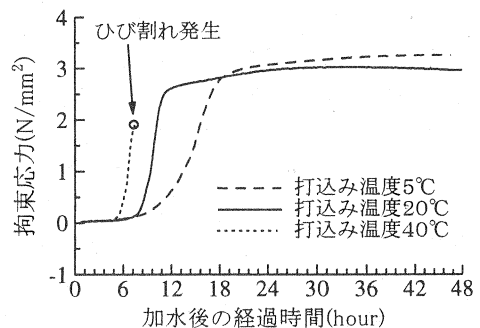


図-6 D32鉄筋で拘束した場合の拘束応力

コンクリートの打込み温度を変化させた場合、打込み温度が高くなるにともない、初期の水和反応が加速されるためコンクリートの自己収縮ひずみの進行速度も大きくなることが予想される。図-5は拘束鋼材と

して D32 鉄筋を用いた場合の無拘束時のコンクリートと拘束鋼材のひずみ差を示したものである。打込み温度が高くなるにつれて、コンクリートと拘束鋼材のひずみ差の発生速度は大きくなっているが、一定値に収束したときのひずみ差は、打込み温度の大きな方がむしろ小さくなっている。

図-6は、D32鉄筋でコンクリート供試体を拘束した場合に測定されたコンクリートの拘束応力を示したものである。打込み温度が40℃の場合は、拘束応力が 2.0N/mm² 弱の時点でひび割れの発生が認められ、その後、拘束応力が低下したので明確ではないが、打込み温度が5℃、20℃の拘束応力は、ひずみ差の場合とは異なり、ほぼ同じ値に収束していた。

拘束鋼材としてインバー鋼を用いた場合に測定された拘束鋼材とコンクリートの無拘束時のひずみ差ならびに拘束応力の発生状況を、図-7、8に示す。初期材齢において打込み温度の高い場合は、コンクリートの自己収縮ひずみよりも膨張ひずみの方が大きいので、無拘束時の全コンクリートひずみは膨張を示す。また、拘束鋼材の温度ひずみが小さいので、コンクリートと拘束鋼材のひずみ差は負となり、発生する拘束応力は、打込み温度が 20℃、40℃の場合、圧縮応力が発生している。特に40℃の場合は、大きな圧縮応力が生じている。その後の引張応力の発現状況は、いずれの打込み温度の場合もほぼ同様となっている。

このように、コンクリートに生じる拘束応力は、コンクリートの極初期材齢におけるヤング係数の発現状況によって異なった値をとると考えられる。

3.2 コンクリートのヤング係数の発現状況

図-9は、φ 10cm × 20cm の供試体の圧縮強度試験を行って得られたヤング係数の発現状況を示したものである。ひずみの測定には、ゲージ長 60mm のワイヤーストレインゲージを用いている。コンクリートの打込み温度が40℃の場合、加水後の経過時間が6時間から10時間までの4時間のうちに、ヤング係数がほぼ0から36kN/mm²まで急激に上昇している。打込み温度が20℃の場合でも、加水後10時間から24時間までの14時間のうちに、ほぼ0から35kN/mm²までヤング係数が増加している。このような低水セメント比でかつ早強セメントを用いたコンクリートでは、強度発現が極めて急速に生じる。打込み温度が5℃の場合は、ヤング係数の発現はかなり緩慢になっている。

図-10は、材齢としてコンクリート温度の影響を考慮した有効材齢を用いた場合のヤング係数の発現状況を示したものである。ここで、有効材齢は、別途実施したコンクリートの凝結試験で得られる終結時を起

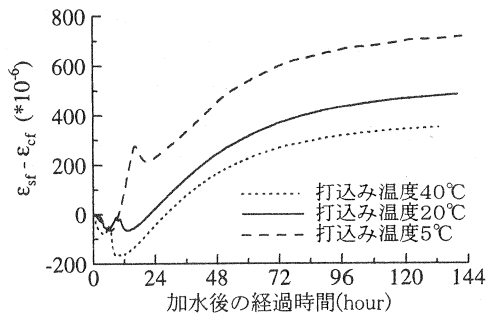


図-7 コンクリートと拘束鋼材(インバー鋼)のひずみ差

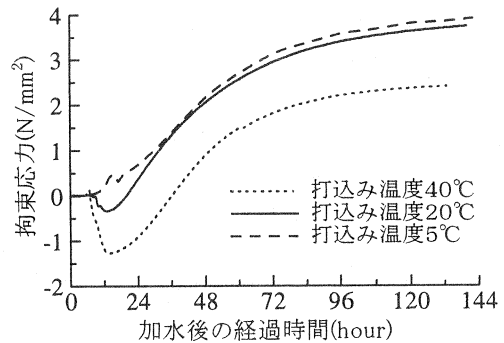


図-8 インバー鋼で拘束した場合の拘束応力

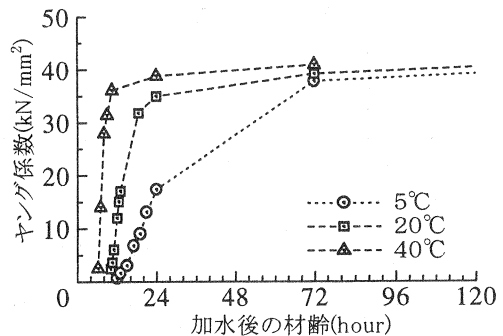


図-9 コンクリートのヤング係数の発現

点とし、アーレニウス則にしたがって計算したものである。すなわち、有効材齢を t_e とすると、

$$t_e = \sum \exp\left(13.65 + \frac{4000}{273 + T_i}\right) \cdot \Delta t_i$$

ここに、 T_i は材齢 Δt_i 間の供試体の平均温度である。図-10より、コンクリート温度が異なっても、有効材齢を導入することにより、ヤング係数の発現状況は一義的に表現できることがわかる。すなわち、コンクリートのヤング係数の発現は、コンクリートの終結時を正確に把握できれば、有効材齢を用いることにより、高い精度で予測可能であるといえる。

3.3 コンクリートの有効ヤング係数の推定

拘束試験で測定した拘束応力と、無拘束時のコンクリートと拘束鋼材のひずみ差から、次式によりコンクリートの有効ヤング係数が推定できる。コンクリートの有効ヤング係数を E_{ce} とすると、

$$E_{ce} = \frac{\rho E_s \Delta \sigma_c}{\rho E_s (\Delta \varepsilon_{sf} - \Delta \varepsilon_{\sigma c}) - \Delta \sigma_c}$$

与えられる。図-11は打込み温度が20℃で、D32鉄筋を拘束鋼材として用いた場合について、上式から推定される有効ヤング係数を示したものである。図中に示す点線は、図-10に示した圧縮強度試験結果から得られたヤング係数の発現状況を示したものである。なお、圧縮強度試験供試体と拘束試験供試体では温度履歴が異なるので、終結時点ではなく拘束応力の発生時点を有効材齢の時間原点としてヤング係数の算定を行っている。

この結果によると、加水後の経過時間が10時間程度までは、圧縮強度試験から推定されるヤング係数にほぼ等しくクリープの影響はほとんど認められないが、10.5時間以降は有効ヤング係数は急速に低下し始め、圧縮強度試験で得られるヤング係数との差は大きくなり、クリープの影響が大きくなったものと考えられる。これまで、クリープ試験による若材齢のクリープ係数を調べた研究事例はいくつか報告されているが、総じて荷重の載荷材齢が小さいほど、クリープひずみは急速に大きくなる結果が得られている。しかし、今回の拘束試験のように実構造物に生じることが予想される変動応力下では、

クリープの影響は、コンクリートが硬化した初期ではなく、むしろ、これよりも時間が経過した後に現れていることがわかる。図-12は単位時間あたりに生じていたコンクリートと拘束鋼材のひずみ差（ひずみ差の速度）を示したものである。この結果によると、単位時間あたりのコンクリートと拘束鋼材のひずみ差が低下したのと時期を同じくして、有効ヤング係数も低下していることがわかる。すなわち、コンクリートのクリープの影響は、拘束供試体のひずみ速度にも大きく依存していて、粘性的な性質を持っているといえる。

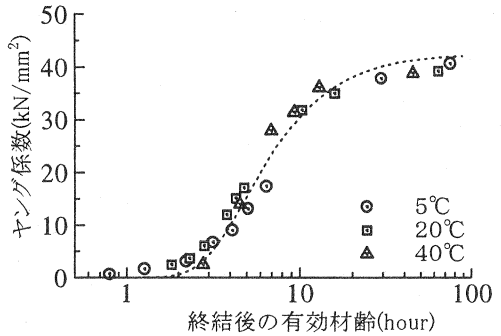


図-10 コンクリートのヤング係数の発現 (有効材齢表示)

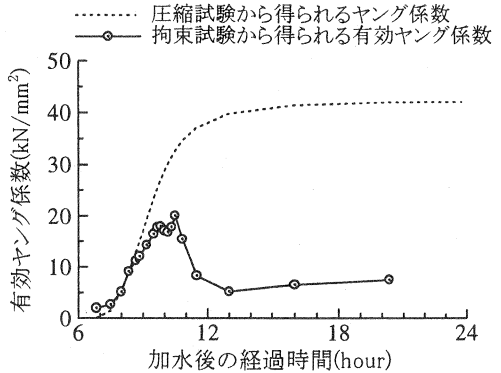


図-11 有効ヤング係数の推定結果 (20℃、拘束鋼材：D32鉄筋)

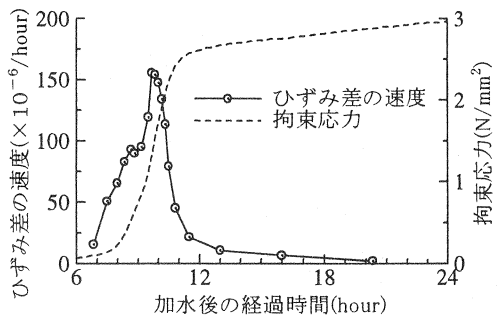


図-12 ひずみ差の速度 (20℃、拘束鋼材：D32鉄筋)

拘束応力の発生し始めた時点では、ひずみ速度が大きかったことにより、クリープの影響が小さく、圧縮強度試験で得られるヤング係数と有効ヤング係数がほぼ等しかったものと考えられる。ただし、ひずみ差の速度が低下することは、拘束応力の発生原因となるコンクリートと拘束鋼材のひずみ差が収束に向かい、拘束応力の進展も収束に向かっていること、すなわち、以後の拘束応力の増加がわずかであることを意味している。実際、図-12によると、ひずみ差の速度の低下が顕著となる加水後10時間程度経過した時点では、拘束応力は 2N/mm^2 に達して、拘束応力の収束値である 3N/mm^2 に対して、すでに約 $2/3$ 程度の応力が発生している。したがって、拘束応力の算定において、クリープの影響を無視して拘束応力を算定しても、それほど大きな誤差は生じないものと考えられる。

図-13、14は打込み温度が 20°C でインバー鋼を拘束鋼材とした場合の有効ヤング係数の推定値およびひずみ差の速度をコンクリート温度が降下した後について示したものである。この期間においても、ひずみ差の速度低下にともない有効ヤング係数が低下しており、クリープの影響がみられる。しかし、材齢の経過が大きくなり、ひずみ差の速度が小さくなっていることから、拘束応力の算定においては、有効ヤング係数として実際のヤング係数を用いてもよいと考えられる。

4. まとめ

今回の検討結果をまとめると次のとおりである。

- 1) 拘束鋼材として異形鉄筋を用いた場合は、コンクリートと拘束鋼材のひずみの差が極初期から発生し、コンクリート温度上昇時に発生する自己収縮ひずみに起因すると考えられる拘束応力を測定することができる。一方、拘束鋼材として線膨張係数の小さいインバー鋼材を用いた場合、コンクリート温度降下時に生じる温度収縮にともなって発生する拘束応力をとらえることができる。
- 2) コンクリートに発生する拘束応力は、コンクリートと拘束鋼材のひずみ差の他、コンクリートのヤング係数の発現状況にも影響を受ける。
- 3) 拘束応力を生じるコンクリートの有効ヤング係数の概略値を求めたところ、コンクリートの打込み温度によっては極初期材齢であってもクリープの影響が介在するとは限らない。クリープの影響は、コンクリートと拘束鋼材とのひずみ差の速度にも依存する。特に、ひずみ差の速度が小さくなると、クリープの影響が顕著となり、有効ヤング係数は低下する傾向が認められる。
- 4) 材齢の経過が大きくなると有効ヤング係数は実際のヤング係数に近い値となる。

参考文献

- 1) 品質評価試験方法委員会：品質評価試験方法委員会報告書、日本コンクリート工学協会、pp.139-147、1998.12
- 2) 自己収縮委員会：自己収縮委員会研究報告書、日本コンクリート工学協会、pp.199-201、1996.11

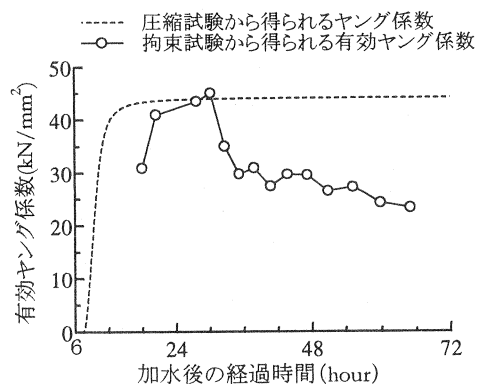


図-13 有効ヤング係数の推定結果 (20°C 、拘束鋼材：インバー鋼)

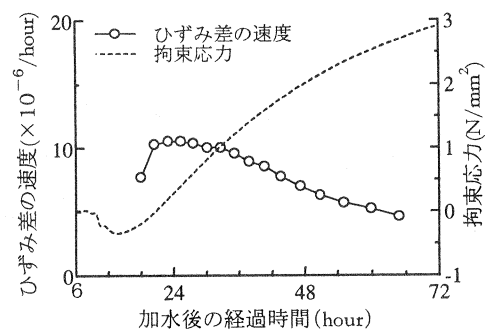


図-14 ひずみ差の速度 (20°C 、拘束鋼材：インバー鋼)