

論文 蒸気養生下におけるコンクリートの諸特性について

遠藤友紀雄^{*1}・田代藤雄^{*2}・森本博昭^{*3}・小柳 洽^{*4}

要旨：プレキャスト部材を蒸気養生したところコンクリート表面に温度応力が原因と思われるひびわれが発生した。この種のひびわれ発生メカニズムを解明するためには、まず養生中の部材の温度を精度よく推定することが前提となる。

本研究は、温度解析に必要となる熱特性、すなわち蒸気養生中の部材表面での熱伝達率および蒸気養生中のコンクリートの発熱特性について検討したものである。

キーワード：蒸気養生、熱伝達率、断熱温度上昇特性

1. はじめに

新潟県下のプレキャスト部材製造工場において100×100×100cmの角柱供試体を蒸気養生をしたところ、脱型時、コンクリート表面に温度応力が原因と思われるひびわれが発見された。この種のひびわれ発生メカニズムを解明するためには、まず養生中の部材の温度を精度よく推定する必要がある。そこで本研究では、温度解析に必要となる熱特性、すなわち(1)蒸気養生中の部材表面での熱伝達率および(2)蒸気養生中のコンクリートの発熱特性について検討した。

2. ひびわれ発生供試体

本研究で用いたひびわれ発生供試体の形状寸法は100×100×100cmの立方体である。この供試体には、図-1に示す位置に熱電対が設置されている。コンクリートは早強ポルトランドセメントを使用したW/C=33%の高強度コンクリートである。表-1にコンクリートの配合を示す。蒸気養生は一般的に行われている方法で、前養生を3時間行った後、養生槽内で槽内温度を15℃/hrの割合で60℃まで上昇させ、その状態を5時間保持した。その後、蒸気を止め4時間経過してから脱型を行い、脱型後部材を自然冷却した。

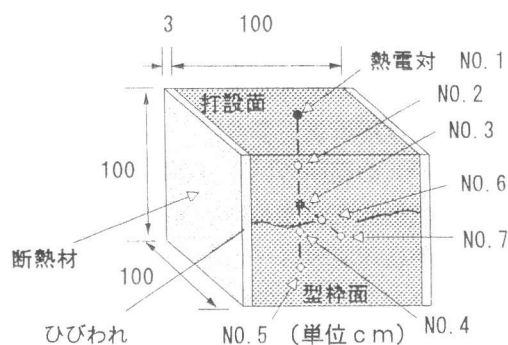


図-1 ひびわれ発生供試体

表-1 コンクリートの配合

設計基準強度 (kgf/cm ²)	Gmax (mm)	スラン ^o (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	W	C ^{*5}	S	G	AD ^{*6}
						(kg/m ³)				
500	20	8.0	2.0	33.0	40.0	157	476	686	1057	4.76

*5 早強ポルトランドセメント

*6 ナフタリン系減水剤

*1 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻（正会員）

*2 昭和コンクリート工業（株） 製造部

*3 岐阜大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

*4 岐阜大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

3. 蒸気養生中のコンクリートの熱伝達率の同定

蒸気養生中のコンクリート表面および鋼製型枠表面での熱伝達率は過去において検討されておらず、蒸気養生中の部材の温度履歴を推定するにあたっての1つの問題点となっている。そこで、本研究では蒸気養生中のコンクリートの温度履歴を計測し、その結果に基づいて逆算的手法により蒸気養生中のコンクリート表面ならびに鋼製型枠表面の熱伝達率を同定した。

3. 1 蒸気養生中のコンクリートの温度計測実験

本実験では、槽内の温度が定常状態の保温段階にある実際の養生槽内に供試体を入れ、それ以降の供試体内部の温度履歴を測定した。熱伝達率測定のために図-2に示すような50×50×50cmの角柱供試体を製作した。供試体内の熱移動を一次元の熱伝導状態とするために、蒸気と接する面を一面だけ露出させ、他の面にはすべて断熱材を貼り付けた。供試体の種類は熱伝達面がコンクリート表面のものと鋼製型枠を想定した鋼板表面のものの2種類とした。鋼板は厚さ0.5cmのものを用いた。コンクリートの配合は、前節で示した表-1の配合と同一とし、これらの供試体は試験日まで20℃で湿布養生を行なった。なお、試験時の材齢は20日とした。供試体には図-2に示すようにコンクリート表面から1、3、5、7.5、10、20、30cmの各深さに熱電対を埋め込み、その位置におけるコンクリートの温度履歴を測定した。

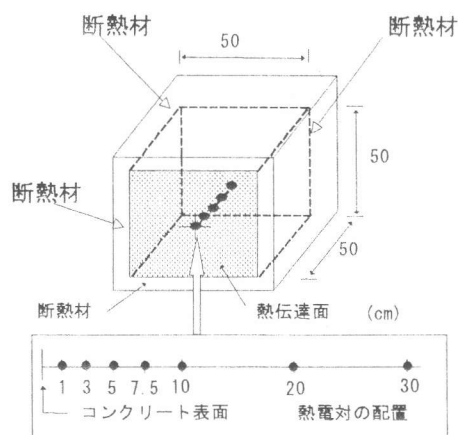


図-2 熱伝導率測定用供試体

3. 2 熱伝達率算定法

既存の温度解析例を参考にして熱伝達率を10～50 kcal/m²hr℃の範囲のいくつかのケースについて2次元の温度解析を実施した。温度解析も実験供試体と同様に熱伝達境界は一辺とし、他の辺は断熱境界とした。コンクリートの熱伝導率などの熱特性は、表-2に示す値を用い、養生槽内の温度及び供試体の初期温度は実測値を用いた。熱伝達率推定にあたっては、養生槽の温度が60℃で一定となった保温段階で供試体を入れ、それ以降の供試体各位置の温度を計測した。その実測値と温度解析値を比較しながら、試行錯誤的に熱伝達率の適正值を決定した。

表-2 コンクリートの熱特性

熱伝導率 (kcal/mhr℃)	比熱 (kcal/kg℃)	単位体積質量 (kg/m ³)
2.2	0.2	2300

3. 3 熱伝達率算定結果

図-3、図-4に実験で得られたコンクリートの温度履歴と温度解析結果をあわせて示す。図-3は熱伝達面がコンクリート表面、図-4は鋼板表面の場合である。図中のハッチングで示した範囲は熱伝達率18～22kcal/m²hr℃の範囲で得られる温度解析結果の変動の領域を示したものであり、下限が18kcal/m²hr℃、上限が22kcal/m²hr℃に相当する。

各図から、熱伝達面がコンクリートと鋼板のいずれのケースにおいても実験によって計測されたコンクリートの温度履歴は蒸気中に供試体を入れた初期段階においては、熱伝達率18kcal/m²hr℃で解析した場合とよく合致する。一方、養生後期になると熱伝達率22kcal/m²hr℃で解析した場合とよく合致する結果となった。このことから、蒸気養生中のコンクリートおよび型枠面における熱伝達率は、

常温下の温度解析で用いられる $10\text{kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$ の約2倍程度の $18\sim 22\text{kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$ が適当な値であると考えられる。これは、飽和蒸気が熱の伝達を促進するためであろう。また、熱伝達率 $18\text{kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$ と $22\text{kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$ でそれぞれ解析した時のコンクリートの温度差は $2\sim 3^\circ\text{C}$ 程度であり、熱伝達率をこの範囲に設定すれば、実際のコンクリートの温度履歴を実用上十分な精度で推定できるものと考えられる。さらに、型枠などの鋼板面の熱伝達率は、通常、コンクリート表面のそれに比べてやや大きめの値に設定されることが多いが、蒸気中においてはコンクリート表面と同程度の熱伝達率を用いてもよいことが分かった。ここで示されている結果は、実際の養生槽を用いて行った実験によるものであり、普遍性は高いものとする。

4. コンクリートの発熱特性

コンクリートの発熱量は一般に断熱温度上昇特性から評価する方法が用いられている。断熱温度上昇式は材齢の関数として各種提案されているが一般的に次の2式が用いられる。(1)

$$Q(t) = K\{1 - \exp(-\alpha t)\} \quad (1)$$

$$Q(t) = K[1 - \exp\{-\alpha(t-t_0)^\beta\}] \quad (2)$$

ここに、

Q : 断熱温度上昇量 ($^\circ\text{C}$) K : 終局断熱温度上昇量 ($^\circ\text{C}$)
 t : 材齢 (日) α : 温度上昇速度に関する定数
 β 、 t_0 : 実験定数

式(1)は通常のコンクリートに対して、式(2)は遅延剤等を用いた場合、に用いられることが多い。

さて、蒸気養生下においてはコンクリートの発熱は高温の蒸気により促進されることが考えられ、上の2式の α を大きくすることでコンクリートの発熱の促進を考慮できることがまず考えられる。本研究では式中の定数を補正した場合の上の2式それぞれについての蒸気養生下の温度解析に対する適用性を検討した。

4. 1 2次元温度解析

コンクリートの発熱特性の評価を行うため、土木学会コンクリート標準示方書平成3年度版に基づいて常温下におけるコンクリートの K 、 α を算定し、 $K=75.0$ 、 $\alpha=1.53$ を得た。本研究ではこれを初期設定値として次節に示す条件下で温度解析を実施した。そして解析結果および実測値の最高温度および温度勾配をそれぞれ比較しながら K 、 α を順次補正していき、最終的に K 、 α の適性値を決定した。

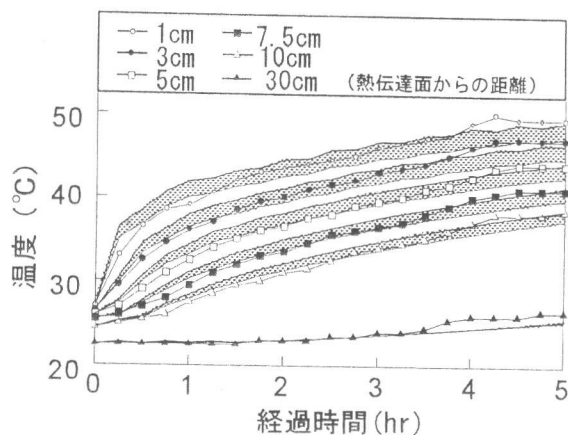


図-3 解析値と実測値の比較 (コンクリート面)

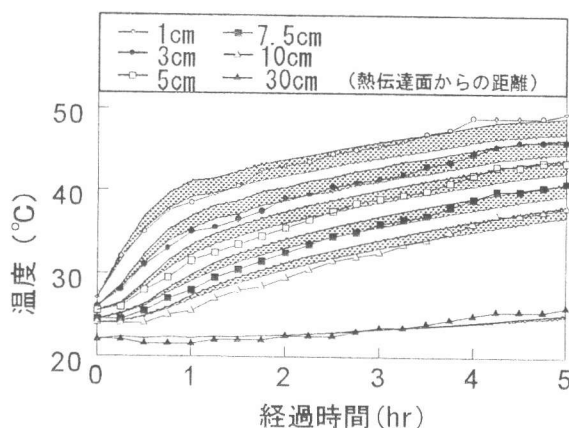


図-4 解析値と実測値の比較 (鋼材面)

(1) 解析条件

温度解析は解析対象供試体の1/2断面について実施した。熱伝達面は打設面、型枠側面、型枠底面とした。養生槽内の温度は実測値を用い、供試体の初期温度についても実測値をもとに推定した。なお、本研究においては前養生は考えず、蒸気が噴出される昇温過程以降を解析期間とした。

(2) 熱伝達率

蒸気養生時のコンクリート表面ならびに型枠表面での熱伝達率は、 $18 \sim 22 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr}^\circ\text{C}$ が適当であることは前節で示した。そこで昇温過程および保温過程のコンクリート表面における熱伝達率は $20 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr}^\circ\text{C}$ とした。降下過程については、工場内で自然降下させたことにより、風速等の影響は少ないと考えられることから通常値より低い $6 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr}^\circ\text{C}$ とした。

型枠表面については、昇温過程および保温過程時の熱伝達率を $18 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr}^\circ\text{C}$ とし、降下過程は脱型時まで $5 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr}^\circ\text{C}$ 、脱型後から $6 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr}^\circ\text{C}$ とした。

図-5に解析で用いた熱伝達率の経時変化と養生槽内の温度履歴を示す。

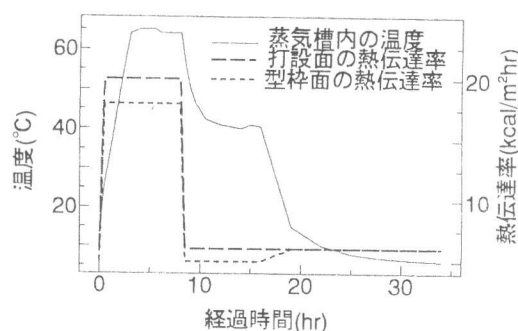


図-5 蒸気槽の温度と熱伝達率の経時変化

4. 2 解析結果

(1) 式(1)による評価

標準示方書の推奨式をもとに算出した $K=75.0$ $\alpha=1.53$ を用いて解析した結果と、ひびわれ供試体 ($100 \times 100 \times 100 \text{ cm}$) の実測値とを併せて図-6に示す。

供試体中心に注目すると解析値の最大温度は 82°C となり実測値とほぼ合致しているもののそれに到達する時間は実測値15時間に対し解析値25時間とかなりの差があることがわかる。また、コンクリート表面に注目すると実測値と解析値の温度上昇速度が大きく相違し、これにより解析値の最大

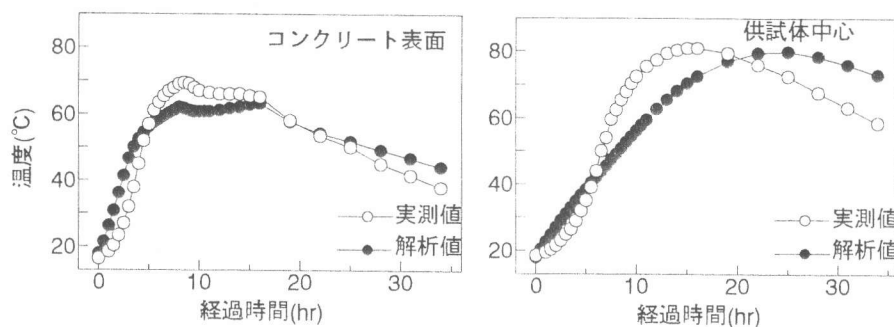


図-6 解析値と実測値の比較 ($K=75.0$, $\alpha=1.53$)

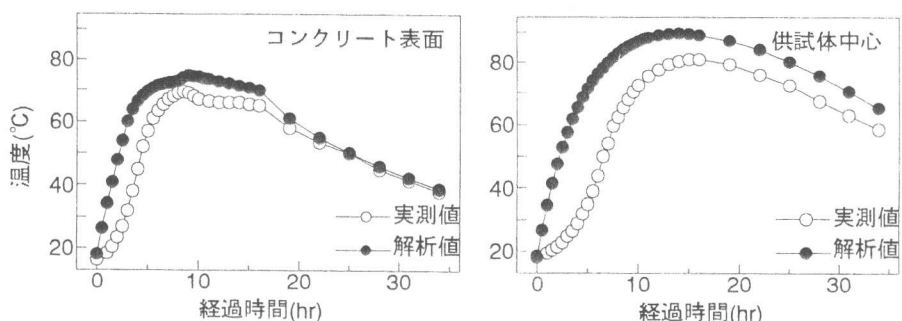


図-7 解析値と実測値の比較 ($K=75.0$, $\alpha=6.0$)

温度は 62°C で実測値よりも 10°C 程度小さい結果となった。よって、蒸気養生の発熱特性に断熱温度上昇特性を適用する場合、一般に用いられている評価式中の温度上昇速度に関する定数をより大きな値に補正する必要があると考えられる。

次に $K=75.0$ はそのままとし、 α の値を初期値の約4倍の $\alpha = 6.0$ とした時の解析結果を図-7に示す。この図から供試体中心の温度上昇の勾配は実測値に近似したものとなるが、最大温度は供試体中心で 90°C 、表面で 75°C と、実測値よりも 10°C 程度大きくなり、 α を

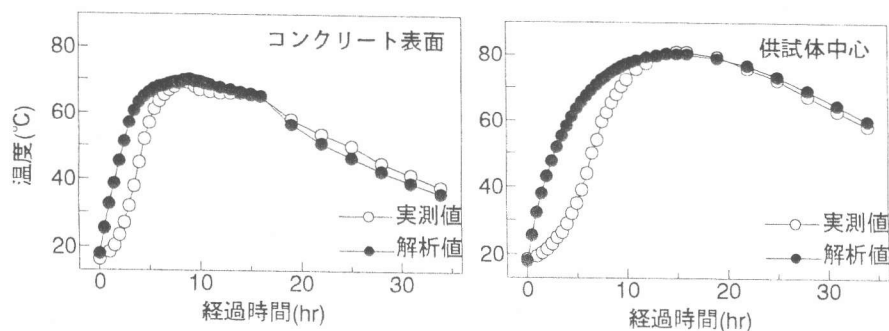


図-8 解析値と実測値の比較 ($K=66.0, \alpha=6.0$)

大きくした場合は、終局断熱温度上昇量 K を小さくする必要がある。そこで、

$$Q(t) = 66.0 \{1 - \exp(-6.0t)\} \quad (3)$$

図-8は式(3)を用いて温度解析した結果である。式(3)は K の初期値を 75.0 から 66.0 と約10%小さくし、 α はそのままのものである。この図から供試体中心およびコンクリート表面での温度上昇速度および最大温度の解析値は実測値とほぼ合致する。しかしながら、蒸気養生初期においては実測値に認められる温度上昇の遅れが考慮できないために、養生経過10時間までは最大 30°C 以上の温度差が生じており、実測値と著しく異なる結果となった。これらの結果から、 K, α を補正しても式(1)ではコンクリートの発熱を評価するには限界があると考えられる。

(2) 式(2)による評価

$$Q(t) = 58.6 \{1 - \exp(-9.95t^{1.8})\} \quad (4)$$

前節での結果を踏まえて、定数 β により温度上昇の遅れを表現できる式(2)を採用し、式中の K の値は前節で用いた値より若干小さく、 α の値を1.7倍程度大きく、すなわち式(4)に示すように $K=58.6, \alpha=9.95$ 、そして $\beta=1.8$ として解析を実施した。その結果を

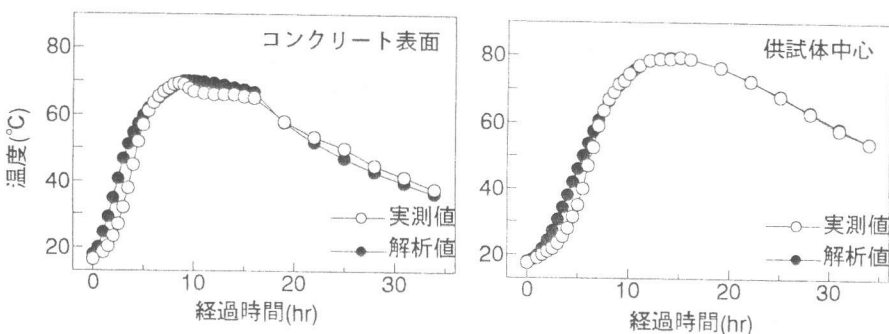


図-9 解析値と実測値の比較 ($K=58.6, \alpha=9.95, \beta=1.8$)

図-9に示す。供試体中心の温度履歴に注目すると、解析値の温度上昇速度および最大温度は実測値とうまく対応しているが、蒸気養生を開始して7時間までは解析値がほぼ直線的に温度上昇しているのに対して、実測値は経過時間4時間までは緩やかな温度上昇をなし、それ以降急激な温度上昇を示している。その結果、解析値は実測値よりも 5°C 程度大きく算定された。また、コンクリート表面の温度履歴も供試体中心温度履歴と同じように、最高温度および温度上昇速度においては実測値との対応は良好であるが、経過時間7時間までの解析値は実測値よりも 8°C 程度大きく算定された。これは、蒸気によるコンクリートの発熱特性の促進効果にタイムラグが生じているためと考えられ、現状では

これを厳密に考慮することは困難と言えよう。しかし、全般的にみて、コンクリート中心部、供試体表面部ともにほぼ実測値の温度履歴を再現しており、式(2)のように温度上昇の遅れを考慮する定数 β を導入した断熱温度上昇式において、式中の定数 K , α , β を適正化することにより、蒸気養生中のコンクリートの発熱特性を評価することが可能となるものと考えられる。本解析例では K の値を常温下の値の78%程度、 α については常温下の約6倍程度、また β の値は1.8程度とすると最も良好な結果が得られた。

(3) 供試体各部の温度履歴の比較

前項で、ひびわれ発生供試体中心(NO. 3)、コンクリート表面(NO. 1)の実測値と解析値との対応はほぼ良好であることは述べた。ここでは、図-1に示す供試体中心とコンクリート表面の中間に位置するNO. 2、型枠底面NO. 5、型枠側面NO. 7について、実測値と式(4)での解析値との対応について述べる。実測値と解析値の比較を図-10、11、12に示す。解析結果と実測値との対応はNO. 2については全般的に良好である。型枠側面NO. 7では下降過程後期になると解析値は実測値より7°C程度小さく算定されるが、全般的には両者の対応はおおむね良好であると考えられる。型枠底面NO. 5については解析値の最高温度が実測値のそれより7°C程度大きく算定されている。すなわち、同じ型枠面であるNO. 7では解析値と実測値との対応がほぼ良好であるのに対して、型枠底面NO. 5では推定精度が悪くなる結果となった。これは、養生槽内の温度が場所によって異なっている可能性があり、同じ型枠面でも側面と底面では周囲温度が異なっていたためと考えられる。

5. まとめ

本研究では、蒸気養生中にひびわれが発生した供試体を取り上げ、蒸気養生中のコンクリートの熱伝達率発熱特性を実験および解析により検討した。本研究で得られた結果をまとめると次のようになる。

- ①蒸気養生中のコンクリート表面ならびに型枠などの鋼材表面における熱伝達率は常温下のその2倍程度の18~22kcal/m²hr°Cであると考えられる。
- ②蒸気養生中のコンクリート表面と鋼製型枠表面の熱伝達率は同程度である。
- ③蒸気養生中のコンクリートの発熱特性は温度上昇の遅れを考慮できる式(2)のような断熱温度上昇式で評価することができる。ただし、式中の定数 K , α , β を補正する必要がある。本研究では K の値を通常の78%程度に小さくし、 α の値は通常の6倍程度大きく、また β の値は2前後とした場合に最も良好な解析結果が得られた。

参考文献

- (1) JCI; マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書、pp. 3~5 1985. 11

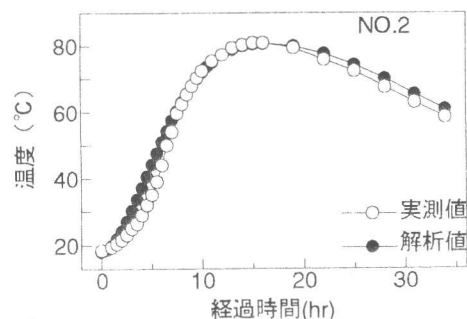


図-10 解析値と実測値の比較 (NO. 2)

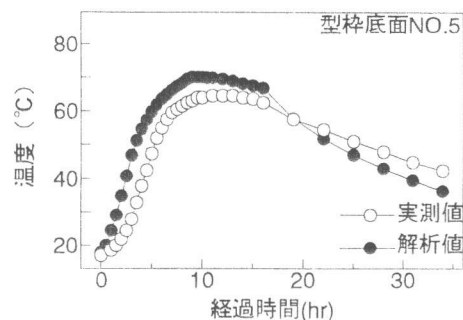


図-11 解析値と実測値の比較 (NO. 5)

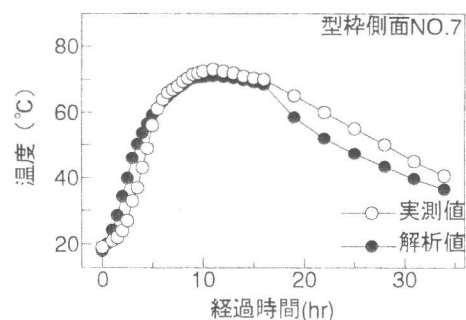


図-12 解析値と実測値の比較 (NO. 7)