

# 寒冷地気温変動下における高減衰ゴム支承材 内部温度の応答確認実験及び数値解析

潤田久也<sup>1</sup>・山崎智之<sup>2</sup>・大島俊之<sup>3</sup>・中村昌弘<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 (株)ブリヂストン 免震開発部 (〒244-8510 神奈川県横浜市戸塚区柏尾町一番地)  
E-mail:uruta-h@bridgestone.co.jp

<sup>2</sup>正会員 工博 北見工業大学助手 工学部土木開発工学科 (〒090-8507北海道北見市公園町165)  
E-mail:yamazaki@stce2.civil.kitami-it.ac.jp

<sup>3</sup>フェロー会員 工博 北見工業大学教授 工学部土木開発工学科 (〒090-8507北海道北見市公園町165)  
E-mail:oshima@mail.kitami-it.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 (株)ブリヂストン 免震開発部 (〒244-8510 神奈川県横浜市戸塚区柏尾町一番地)  
E-mail:nakam4-m@bridgestone.co.jp

高減衰ゴム支承材のせん断特性はゴムの温度によって変化することが知られており、ゴム支承材の内部温度と周囲気温の関係を知ることは支承材の設計に欠かせない重要な意味を持っている。本文では、実際に使用されるサイズ・構造のゴム支承材を使用し、温度変化の影響が顕著に現れる低温下において、周囲気温変動によるゴム支承材内部の温度変動を実測した結果を報告する。また、実験結果と非定常熱伝導解析による結果との対比を行い、解析手法が十分な精度をもって内部温度の推定が可能であることを確認した。更に、これらの結果をより単純な定式化により温度応答を見積もることができることも示した。

**Key Words :** rubber bearing, temperature, seismic design, bridge, Finite Element Method

## 1. はじめに

兵庫県南部地震以来、ゴム支承材による橋の耐震強化が図られ、ゴム材料の減衰機能を強化した高減衰ゴム支承材による免震化が各所で適用されつつある。しかし、ゴム材料のせん断特性には温度依存性があることが知られており<sup>1)</sup>、高減衰ゴムはその傾向が強い。これまでにゴム支承材の実物を含めた温度依存性評価が行われ、報告されているが<sup>2), 3)</sup>、これらの報告はゴム支承材内部が外気温と同じ温度になった状態での評価に基づくものであった。ところが、実際の使用環境下では外気温が刻々変化し、それに応じてゴム支承材の内部温度も刻々変化している。またゴム支承材には鋼板を介してコンクリートが連結しており、コンクリートやゴム支承材の熱伝導性が金属などに比べると遙かに小さいこともあって、外気温の変化とゴム支承材内部温度には分布があることや、温度の応答に時間遅れが出ることが予想されている。こうした外気温変動に対し、ゴム支承材の内部温度がゴム層の各部位でどのように変動するかを実測した例は無く、どのような温度分布を示すかは全く把握されていなかった<sup>4)</sup>。ゴム支承材

の内部温度の時間応答と温度分布に関する実験的研究によって、使用状況に応じたゴム支承材の内部温度の推定が可能となり、その結果せん断特性の温度依存性をより実際に近い使用条件下で評価できることになり、橋梁の免震設計に寄与できるものとなる。本論文では、ゴム支承材のせん断特性が温度の影響を受けやすい低温側即ち、寒冷地の気温変動を対象に、多く使用されているゴム支承材のサイズ1種類及びISO案製品検査サイズ1種類を選定し、低温試験室内にゴム支承材とコンクリート橋の一部を想定した供試体を組み立て、寒冷地各種気温変動パターンを再現することにより、高減衰ゴム支承材の内部温度応答を実験・計測した結果を検討し、さらに有要素法による非定常熱伝導解析との対比を行った。また、実験結果を反映した簡単な予測式の適用を検討した。

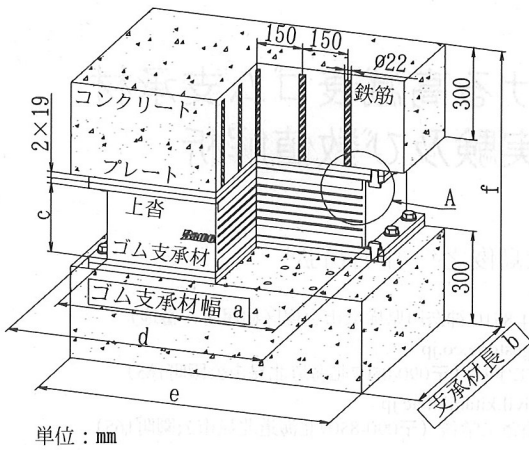
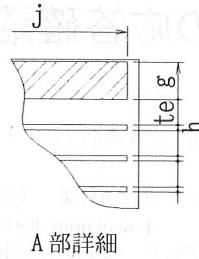


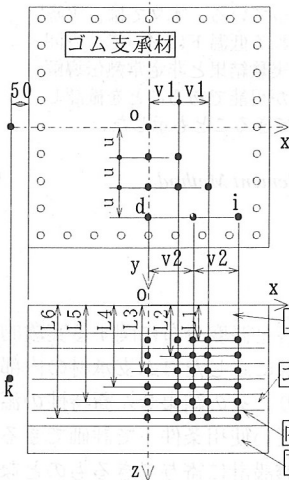
図-1 供試体の構造図

表-1 各部寸法  
単位: mm

記号	720□	420□
a	720	420
b	720	420
c	222.5	118
d	840	540
e	965	600
f	898.5	794
g	32	22
h	4.5	3.2
j	700	400
te	22	9



平面図



断面図

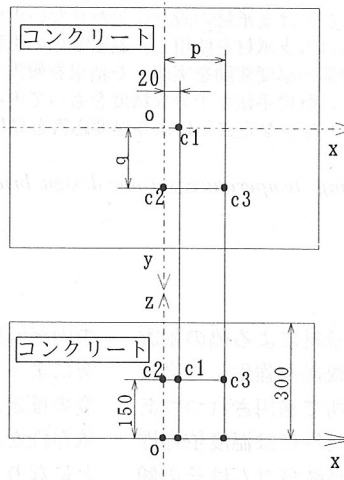


表-2 測定位置

単位: mm

記号	720□	420□
u	90	65
v1	90	65
v2	135	78.75
L1	45	27.5
L2	71.5	39.7
L3	98	51.9
L4	124.5	64.1
L5	151	76.3
L6	177.5	88.5
p	178.6	105
q	180	105

図-2 温度測定位置

## 2. 実験装置の概要

### (1) 供試体の構造

供試体はコンクリート橋脚の一部分を想定した下部のコンクリートと、コンクリート桁の一部を想定した上部のコンクリートを、鋼板プレートを介してゴム支承材とボルト締結し、組み立てた図-1の構造とした。低温試験室の床強度・間口の制限よりゴム支承材サイズはISO(案)標準サイズ420mm□×ゴム層(9mm×6層)、使用実績の多い720mm□×ゴム層(22mm×6層)の2種類とした。尚、被覆ゴム厚さは10mmとした。コンクリートには図-1に示すように150mm間

隔にφ22鉄筋を配置し実際に模した。

### (2) 温度測定位置

供試体内部の温度測定位置記号を図-2に示した。ゴム支承材の測定位置は各ゴム層厚さの中心、コンクリートについてはプレート境界面及び厚さ中心位置を測定した。供試体周囲についてもゴム層中心部表面よりk点50mm、コンクリート上o点より上30mm位置を測定した。供試体周囲温度が一樣であり、ゴム支承材が正方形であるため、温度はz軸に対称に分布することを考慮し、測定点を図-2黒丸点のように限定した。各サイズ毎の測定位置を表-2に示した。

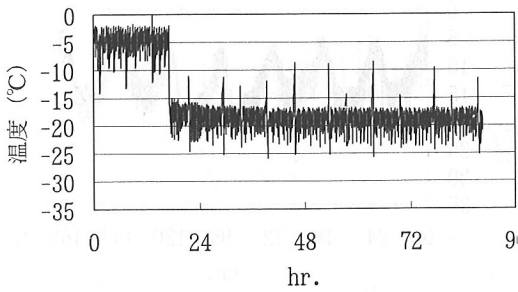


図-3 Step温度変動

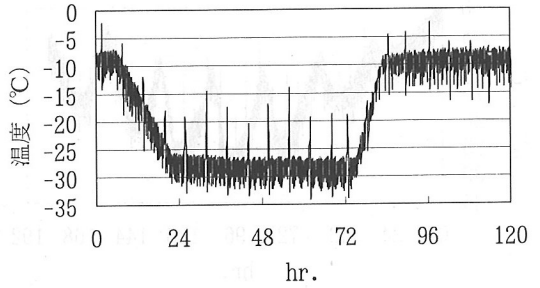


図-4 一定速度温度変動

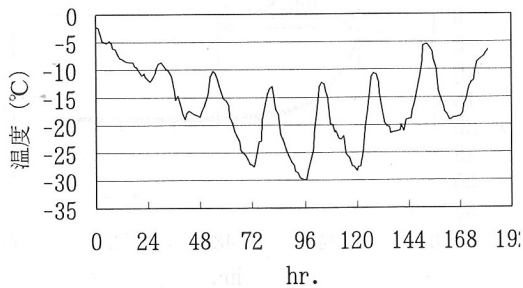


図-5 寒冷地観測気温(最低気温時)

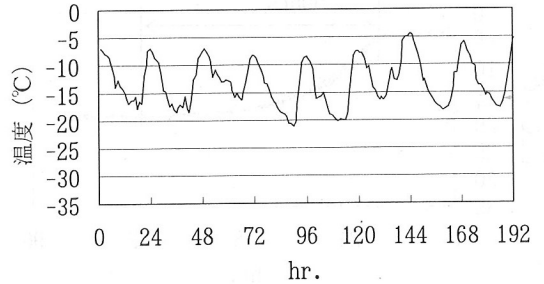


図-6 寒冷地観測気温(通常期冬季)

以降からは2種類の供試体をゴム支承材サイズで表させ720□, 420□と表す。

### (3) 温度測定方法

温度の測定は約10m長さの熱電対先端部に絶縁処理を施し、各ゴム層に挿入した。熱電対は低温用(種類T型銅-コンスタンタン,  $-40\sim 133^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ )を使用し、温度の測定間隔は1分とした。

## 3. 温度入力条件

冷却装置のプログラム制御機能により、試験室内温度変動を代表的な気温変動の3パターンとして時刻歴で再現させ、供試体周囲温度の変動として測定温度を図-3~8に時刻歴で示した。但し図-5,6は実観測気温である。実験は供試体内部温度がほぼ均一になり次第開始した。しかし測定結果には試験室冷却能力により送風による息つきや、4回/日間隔の除霜による昇温が大、小のノイズとなって現れた。

### (1) Step温度変動パターン

ここでは熱伝達・熱伝導による内部温度の応答を評価するために、試験室内の温度を階段状に変化させるStep温度変動パターンを再現した。寒冷地冬季

の通常期気温として $-5^{\circ}\text{C}$ から $-20^{\circ}\text{C}$ までの気温変化を想定し、階段状温度変化の入力に対する内部温度の応答を評価するために図-3の供試体周囲温度変動を入力条件とした。

### (2) 一定速度降温・昇温変動パターン

寒冷地厳冬季における日没・日昇時の気温変動を想定し、一定速度で変化する降温・昇温パターンを再現した入力温度変動を図-4に示した。温度変化は $-10\rightarrow -30^{\circ}\text{C}$ (降温速度 $-20^{\circ}\text{C}/16\text{hr}$ )、 $-30\rightarrow -10^{\circ}\text{C}$ (昇温速度 $-20^{\circ}\text{C}/8\text{hr}$ )である。

### (3) 寒冷地実観測温度変動パターン

寒冷地実観測気温として入手可能な北見地方観測データから、最も低い温度を記録した1週間及び通常期冬季に近いと思われるもの2種を採用した。但し、1時間間隔の観測データである。元データを図-5,6に示す。

a) 北見地方観測データ最低気温の時刻歴温度(1985年1月21日~1月28日)

これを元にプログラム化し、供試体周囲温度として測定した結果を図-7に示す。

b) 同地方通常期冬季時刻歴温度(1985年1月1日~1月8日)

同様にプログラム化した測定結果を図-8に示す。

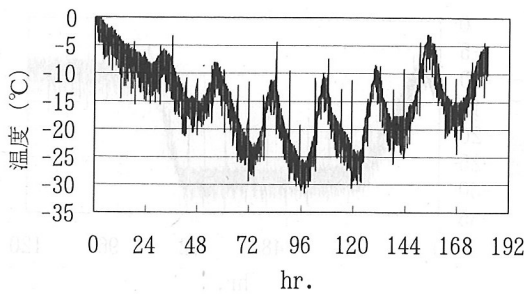


図-7 寒冷地最低気温時周囲温度変動

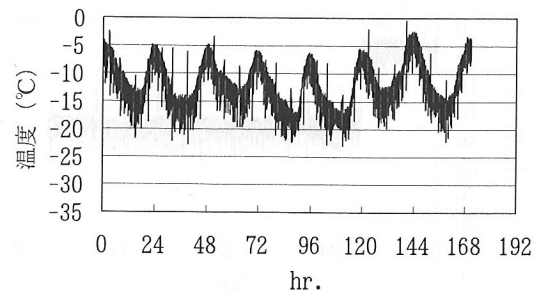


図-8 寒冷地通常期冬季再現周囲温度変動

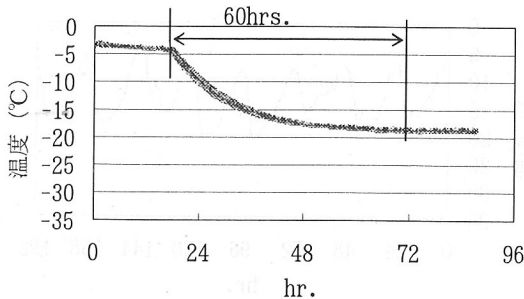


図-9 720□供試体内部温度

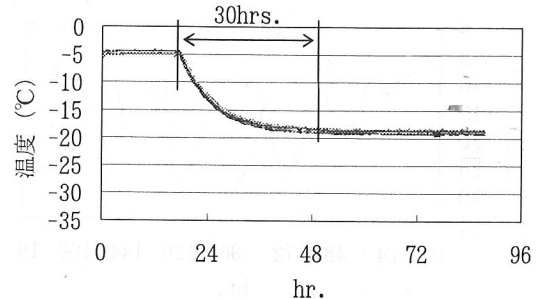


図-10 420□供試体内部温度

#### 4. 測定結果

##### (1) 測定精度

ここに使用した計測機器及び熱電対の測定精度は計測器が $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、熱電対が同様に $\pm 1^{\circ}\text{C}$ であった。従って全体の計測精度は最大 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ である。

##### (2) ゴム支承材及びコンクリート内部温度

各種の温度変動パターンによる供試体内部の温度応答を全測定点について以下図-9~16に示す。但し、熱電対の絶縁不良等によるデータは除いた。測定点が一供試体60点と多いことから、以後の測定結果の図においては供試体の代表的位置についての結果を示す。代表的測定点として図-2ゴム層L1, L3層平面内の中心o, 表面側d, 角部iの2×3点及びコンクリート厚さ中心3点の計9点とした。その他の位置については、これらの結果の中間的な値となっており、その差異は微小である。

##### a) Step温度変動パターン

720□, 420□ゴム支承材及びコンクリート内部の温度応答を全測定点について図-9, 10に示した。コンクリートの熱伝導率はゴムに対し文献値<sup>5)</sup>では5~10倍程度大きい。各測定点ではコンクリートとゴムの内部温度応答に大きな差はみられなかった。こ

れは供試体周囲の熱の大半がコンクリート表面から伝達され、コンクリート+鉄筋+プレートの熱伝導によってゴム支承材に伝達されたことによるものである。即ち、これらを伝わったことによってゴム支承材内部の温度変化を更に遅延させることになった。この結果ゴム支承材表面境界から最も遠い、供試体中心部測定点の温度変化と、ゴム支承材周囲温度変化が近いものとなり熱伝導の影響が出にくくなったと考えられる。また、鋼材の熱伝導率はコンクリート・ゴムに比べれば約100倍大きく計測時間間隔では瞬時に熱が伝わると考えられる。その影響もあって内部鋼板を挟んだゴム層間の温度分布は無視できる程度に小さいものとなった。さらに、ゴム支承材とコンクリート内部温度に差が小さいことから、ボルト締結した上・下沓と上・下プレート間鋼板同士の接触による伝導時の熱抵抗は無視できるものと思われる。以上より、Step温度変動入力に対し、内部温度の遅延応答時間は図-9, 10より目視で720□で60時間、420□で30時間程度となった。サイズによって約2倍差がある。

##### b) 一定速度降温・昇温変動パターン

-10 $\rightarrow$ -30 $^{\circ}\text{C}$ (降温速度-20 $^{\circ}\text{C}/16\text{hr}$ ) $\rightarrow$ -30 $\rightarrow$ -10 $^{\circ}\text{C}$ (昇温速度-20 $^{\circ}\text{C}/8\text{hr}$ )図-4参照の温度変動に対する720□, 420□供試体のゴム支承材及びコンクリート内部の温度応答を図-11, 12に示した。420□供試体

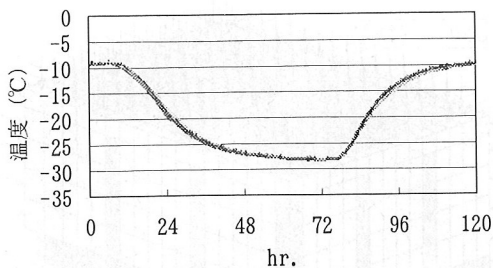


図-11 720□供試体内部温度変動

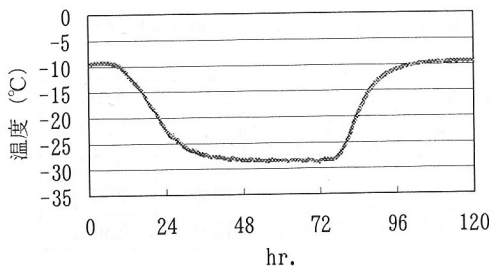


図-12 420□供試体内部温度

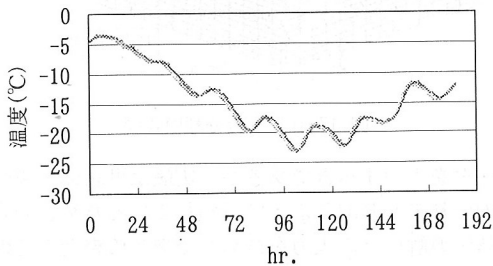


図-13 720□供試体内部温度変動

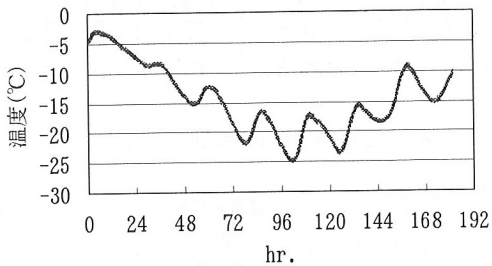


図-14 420□供試体内部温度変動

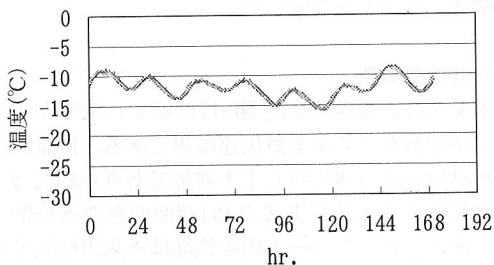


図-15 720□供試体内部温度変動

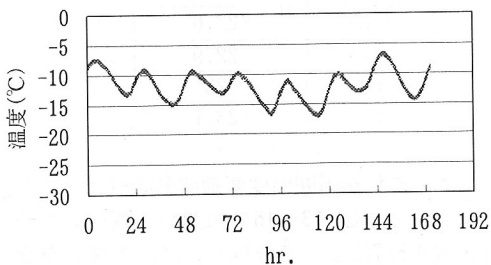


図-16 420□供試体内部温度変動

では降温してほぼ一定値に達しているが、720□では降温中である。初期温度約 $-10^{\circ}\text{C}$ 、振幅 $-20^{\circ}\text{C}$ の温度変化であるが、Step温度変動(図-9,10)の場合と温度の応答時間は大きくは変わらない。これは周囲温度変化速度が、Step温度変動と同様に部材内部応答速度よりも急激であったためである。更に、表題中に示した720□、420□に対応した供試体サイズによって応答に差が見られることを除いて、それぞれの内部温度分布は無視できる程度小さい。しかし、この結果から、a) Step温度変動の場合でも同じことであるが、コンクリートでは測定点が中心附近ではなく、且つ測定点数も少ないことを考えると、表面近くにおいても温度分布が無いものとは即断できない。実験では計測点における温度分布の差異は僅少であるものと解釈した。

### c) 寒冷地実観測温度変動パターン

北見地方観測データ最低気温の時刻歴温度(1985年1月21日~1月28日、図-7参照)に対する720□、420□ゴム支承材内部の温度応答を図-13,14に示し、北見地方通常期冬季時刻歴温度(1985年1月1日~1月8日、図-8参照)に対するコンクリート及びゴム支承材内部温度の応答を図-15,16に示す。測定域内のゴム層及びコンクリート内部の温度分布が無視できるほど小さいのは他の温度変動パターンの場合と同じである。また、図-5~8と図-13~16を比較すると、観測気温振幅に比べて内部温度振幅がかなり小さくなるのがわかる(表-3参照)。但し、振幅は最低気温時を挟んだ両側振幅の平均とした。図-5の最低温度観測時間附近で約 $17.3^{\circ}\text{C}$ の振幅があるのに対し、小サイズの420□でも $7.7^{\circ}\text{C}$ と約45%に抑えられる。

表-3 ゴム支承材内部温度振幅・時間遅れ

観測温度振幅及びラグ	720□	420□
最低気温振幅17.3°C	4.7°C	7.7°C
通常期冬季振幅12.6°C	3.7°C	6.3°C
最低気温(ラグ)	340分	250分
通常期冬季(ラグ)	245分	230分

表-4 ゴム支承材内部最低温度

温度°C	周囲温度	720□	420□
最低気温時	-31.7	-22.6	-24.6
通常期冬季	-23.5	-15.7	-16.9

表-5 720□供試体計測結果の一例

測定点	温度(°C)
o-L1	-23
o-L3	-22.6
d-L1	-22.9
d-L3	-22.7
i-L1	-23.2
i-L3	-22.6
c1	-22.9
c2	-23
c3	-23.1

一方、応答の遅れを周囲温度変動波形図-7,8とゴム層中心部温度波形図-13~16の相関性を調べるために相互相関をFFTによって分析し、時間のズレをラグとして取り出した。ラグは表-3の結果となった。更に、ゴム支承材内部温度の最低値は表-4のような結果となり、内部温度は周囲温度より約7°C以上高い。以上まとめると、内部温度応答の時間遅れは供試体サイズに応じて小さくなるが、両サイズ間での内部温度に大きな差は見られない。また、どの周囲温度変動のパターンに対しても、同じ供試体の内部温度変動は測定位置に依らず殆ど同じ結果となった。一例として図-13最低温度時の代表点9点の測定値を表-5に示した。

## 5. 非定常熱伝導解析との対比

ここでは実験の供試体であるゴム支承材+コンクリート構造物を含めた部分的な橋梁構造を有限要素モデルとした。本来なら、本モデルに図-5,6の観測

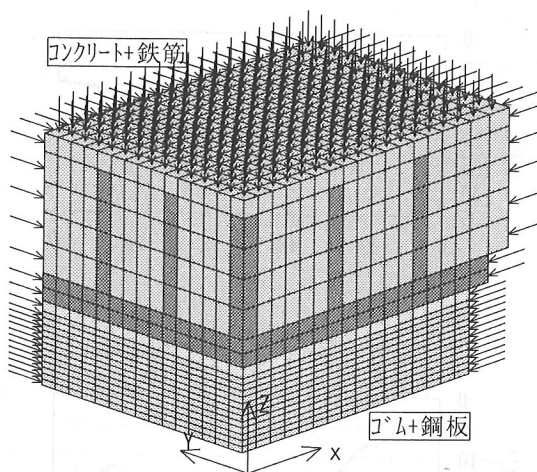


図-17 有限要素分割模式図

データを入力すべきであるが、実験は供試体と実験室内の熱のやり取りによって行われているため、非定常熱伝導解析との入力を含めたモデルの整合性を保つ目的で、各種温度変動パターンによる実験で得た供試体周囲温度の時刻歴(図-3,4,7,8参照)を入力条件とした。その上で、有限要素法(FEM)非定常熱伝導解析との比較を実施した。

### (1) 解析の概要

本モデルの要素分割を図-17に示す。矢印が周囲温度時刻歴を入力する熱伝達境界である。供試体は支承材中心ゴム層に対し上下対称でありx-z面、y-z面に対しても対称であるため1/8断面を要素分割した。また、コンクリート内の鉄筋は本来円柱状であるが同じ断面積の直方体で置き換えた。鋼板とゴム支承材、鋼板同士はボルトにて締結されているが、有限要素モデルでは同一節点で表され、熱伝達時の接触抵抗は考慮していない。また供試体表面の輻射も無視した。使用したプログラムはMARC-MENTAT2003、要素タイプは8節点アイソパラメトリック立体要素、モデルの節点数・要素数を表-6に示す。括弧内は鉄、ゴム、コンクリートの要素分割数である。使用した各部材の熱物性値は表-7に示した。適切な測定機器がなかったコンクリートの比熱<sup>9)</sup>を除き、他は実測値である。機械工学便覧記載値<sup>10)</sup>と比較すると、組成や測定法が異なることもあってゴムの熱伝導率、比熱は約2倍及び22%、鉄、コンクリートでは熱伝導率がそれぞれ40,29%大きな値を示した。非定常熱伝導解析を実行するに当たって熱物性値として熱伝達係数hが必要になる。熱伝達境界の熱伝達係数hは実験結果に合わせ、次のように決定した。

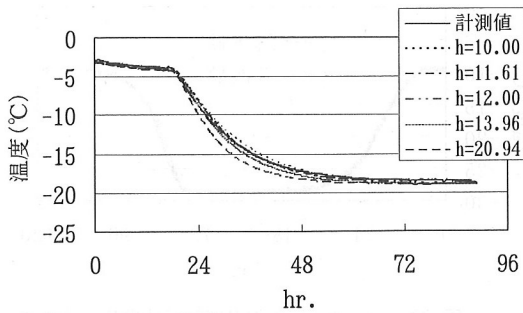


図-18 熱伝達係数hの決定

## (2) 熱伝達係数hの決定

熱伝達係数は部材の表面状態や対流の有無によって変わることが知られており、容易には決定しにくい。またそれが本来の目的ではない。そこで既往の文献値<sup>6)</sup>を参考に、実験結果に合わせることでより決定する方法をとった。熱伝達係数を評価する実験としてa) Step温度変動パターンの実験結果図-9を採用した。各温度変動パターンの実験結果から、部材の内部温度に分布が見られないことより、720□供試体について第3ゴム層L3の中心点oを対象にした。同中心点測定値と同じ部位のFEM解析結果とを熱伝達係数hをパラメータとして図-18に示す。図中、凡例として計測値、他はパラメータhとして示した。解析結果との温度変動が両者でどの程度合っているかの照合性を評価するために、各熱伝達係数hにおけるn個の計算結果と同じ時刻の計測値との差 $\Delta T_i$ について全データ数の平方平均を評価した。値の小さい方が照合性がよいものとして表-8に示す。詳細は省略するが、照合性のよい熱伝達係数hは以下のようにして求めた。hを横軸に $\Sigma \Delta T_i^2/n$ を縦軸に表し、3次多項式にて近似し、最小値を示すhを求めた。h=11.61 W/(m<sup>2</sup>·K)が最もよく合う結果となった。以降の解析には、得られたhを適用した。

## (3) FEM非定常熱伝導解析と実験結果の比較

解析に当たっては、以下の二つの気温変動パターンについての供試体周囲の計測温度を入力した。その際初期温度は全計測点の平均温度とした。また、解析値と計測値との比較部位は、実測結果では温度分布が僅かであったことを考慮して、前述した代表的測定点9点とした。

### a) 一定速度降温・昇温変動パターン

720□、420□ゴム支承材内部及びコンクリート内部の温度変動を計測値とともに図-19,20に示した。測定装置の計測精度を考えるとよく再現していると

表-6 有限要素分割内訳

供試体	節点数	要素数
720□	8330	7104(2155,3545,1404)
420□	6188	5161(1544,2548,1069)

表-7 使用部材の熱物性値

項目	単位	ゴム	鉄	コンクリート
密度 $\rho$	kg/m <sup>3</sup>	1146	7740	2350
定圧比熱Cp	J/(g·K)	1.732	0.432	0.88
熱伝導率 $\lambda$	W/(m·K)	0.312	38.76	1.821

表-8 解析結果の照合性

h	W/(m <sup>2</sup> ·K)	$\Sigma \Delta T_i^2/n$
10		0.1382
11.61		0.1027
12		0.1083
13.96		0.2064
20.94		0.9808

考えられる。

### b) 寒冷地実観測温度時刻歴パターン

同様に北見地方冬季観測データに基づく720□、420□ゴム支承材内部及びコンクリート内部の温度変動を計測値とともに図示した。図-21,22には北見地方最低気温の時刻歴温度による結果を示した。北見地方通常期冬季気温の時刻歴温度による結果は図-23,24に示す。計測精度を考えると比較的よく一致していると判断できる。

このように各種の気温変動に対して解析結果は良好な再現性を有すると考えられ、実観測気温によるゴム支承材内部温度の推定が可能となることがわかった。解析結果の一例として北見地方最低気温時における供試体内部温度の分布の様子を図-25,26に示した。図-7における最低周囲温度時のものである。

### c) 表面近傍の温度変動

図-25,26ではゴム表面の温度が他の部位と1~2°C違うことがわかる。その様子を見るため、720□供試体図-2の温度測定位置において、図中に示した黒丸印d位置からゴム層L1層の同一平面内表面から10mm内側位置の温度変動を図-27に示した。解析結果の方が応答が早くなるが、同位置計測値とは計測精度内(1.7°C)の温度変動でありゴム層内の温度分布は僅かと言える。一方、コンクリートでは計測位置の温度変動はゴム支承材内部と同じ変動を示すが、

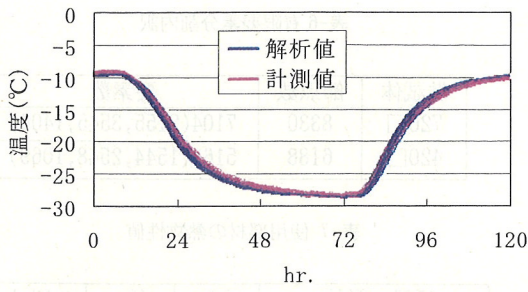


図-19 720□供試体内部温度解析結果及び計測値

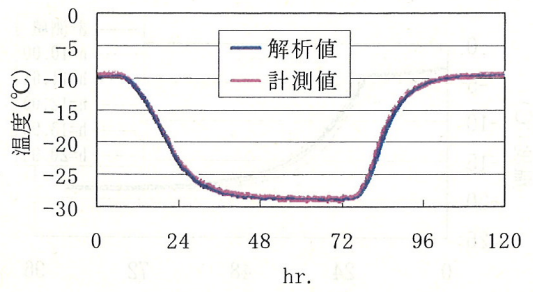


図-20 420□供試体内部温度解析結果及び計測値

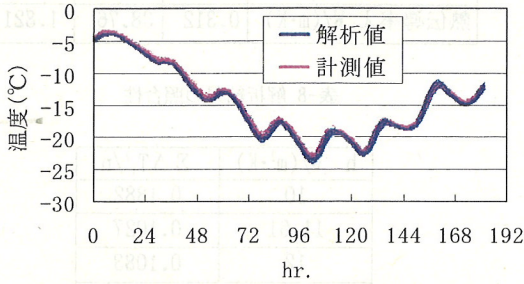


図-21 720□供試体内部温度解析結果及び計測値

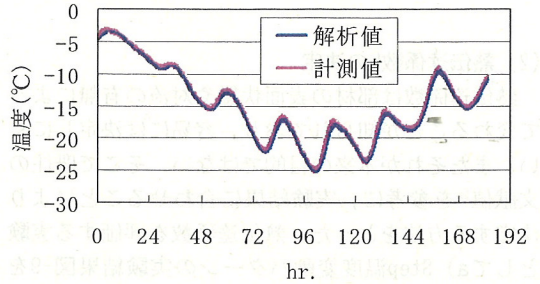


図-22 420□供試体内部温度解析結果及び計測値

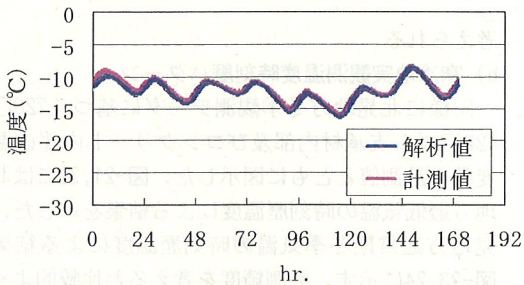


図-23 720□供試体内部温度解析結果及び計測値

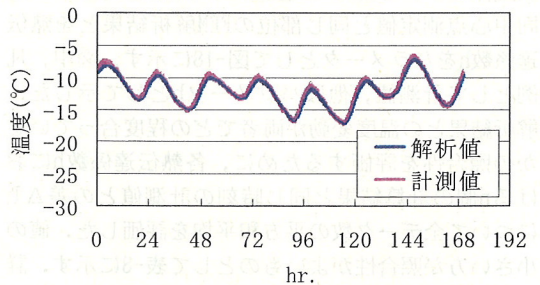


図-24 420□供試体内部温度解析結果及び計測値

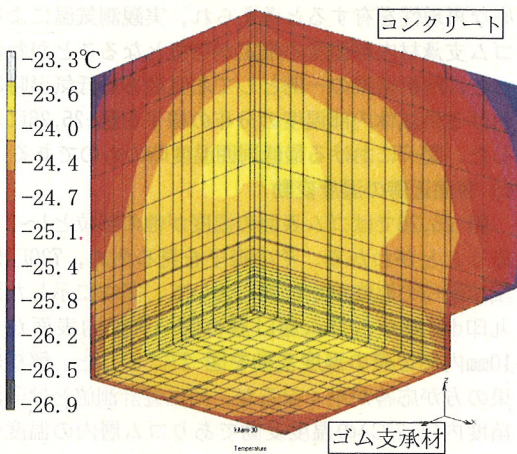


図-25 720□供試体内部温度分布解析結果

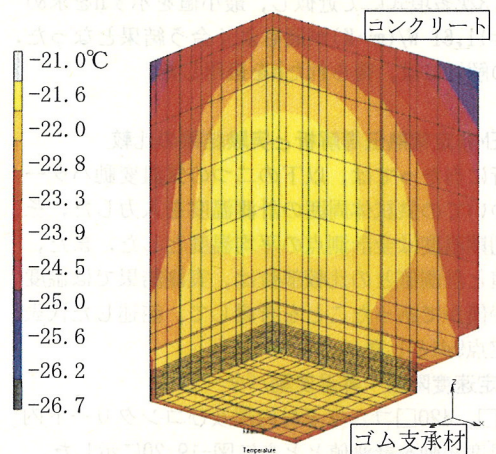


図-26 420□供試体内部温度分布解析結果



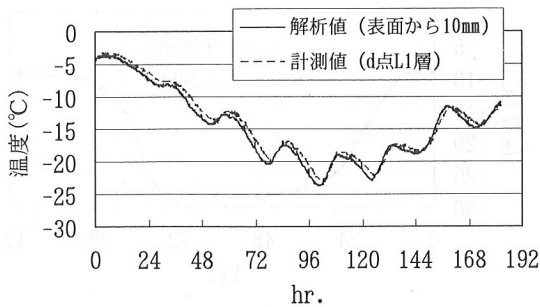


図-27 ゴム支承材表面より10mm内側温度変動

熱伝導解析結果から、420□供試体では表面近くになると内部に対し温度分布が最大6°C程度差があることがわかった(図-26参照)。しかしこのコンクリートの温度分布はコーナーに属する最低温度部位も含め表面近くに限定され、ゴム支承材に接する面では殆ど同じ温度になることも判明した。参考に、最高温度は図では識別できないが、ゴム支承材中心部節点である。このように熱伝導解析に於いても本供試体モデルではコンクリートのゴム支承材に接する面も含めて、ゴム支承材の内部温度分布は無視しうる程小さいことがわかった。従ってゴム支承材及びコンクリート構造体の熱伝導の効果により、周囲の温度の変化に対する供試体の温度分布は非常に小さいことが検証できた。またこれら結果より周囲温度変化に対する供試体の温度変化予測は供試体内部と外部の熱エネルギーの伝達によってモデル化可能と思われる。

## 6. 簡単な予測式の検証

前述の検討より、ゴム支承材には内部に温度分布は無視できるほど小さく、コンクリートの内部温度も表面近傍を除き分布が小さくなることから、温度変化は一体に扱えるものと仮定できる。このことは部材の熱伝導よりも熱伝達による熱エネルギーの収支を考慮した定量的扱いが可能になることを示している。ここではより単純化した扱いが出来るように熱伝達基礎式を基にモデルの定式化を検討した。

### (1) 熱伝達基礎式

供試体と周囲との熱エネルギーの収支の均衡を基礎式として式(1)のように表せる。

$$q = h \cdot A \cdot (T - T_{\infty}) = -C_p \cdot \rho \cdot V \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

表-9 供試体の係数

供試体	$\rho \cdot C_p \cdot V / (h \cdot A)$
720□	788.13
420□	449.21

$q$ : 単位時間に供試体表面を通過する熱量,  $h$ : 熱伝達係数,  $A$ : 供試体モデルの表面積,  $V$ : 供試体モデルの体積,  $C_p$ : 比熱,  $\rho$ : 密度,  $T$ : モデル温度,  $T_{\infty}$ : 室内温度

### (2) 係数の同定

式(1)は $T_0$ を供試体の初期温度として室内温度 $T_{\infty}$ までStep変化による応答に対して式(2)の解を与える。

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = e^{-\frac{h \cdot A}{\rho \cdot C_p \cdot V} t}, \quad (t = 0, T = T_0) \quad (2)$$

しかし、ゴム・鋼板・コンクリート部材の熱物性値は個々には得られてはいるものの、供試体モデル全体については見積もりが難しいため、次のように決定した。式から熱伝達・比熱等を含む係数 $h \cdot A / (\rho \cdot C_p \cdot V)$ は幸いなことに、一つの係数として扱えることがわかる。このこと及び内部温度に分布が見られないことより、a) Step温度変動パターンの実験より得られたゴム層の温度応答に式(2)を当てはめると、各供試体の係数 $h \cdot A / (\rho \cdot C_p \cdot V)$ は表-9のようになった。ここでゴム層の温度として各供試体ゴム層L3層中心o位置の実験結果を代表させた。サイズによって係数が異なった理由は、本実験の測定時間では熱伝導の影響が小さく、供試体の熱容量に支配されると考えられ、供試体熱容量に関係するサイズの影響が出たものと考えられる。

### (3) 基礎式数値解との対比

表-9を式(1)に代入して各種気温変動パターンについての供試体周囲の計測温度を $T_{\infty}$ として入力し、温度時刻変動の数値解を求めた。ゴム部第3層中心位置計測値とともに図-28~33に示す。簡単な一次の微分方程式であるが、計算値が若干応答が早くなることを除き、計測値に良好な近似をしていることが分かる。したがって、これらの結果は支承材の温度応答関数として供試体温度の予測に用いることができる。

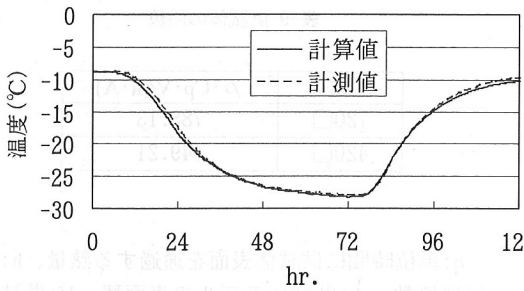


図-28 720□ 一定速度降・昇温変動

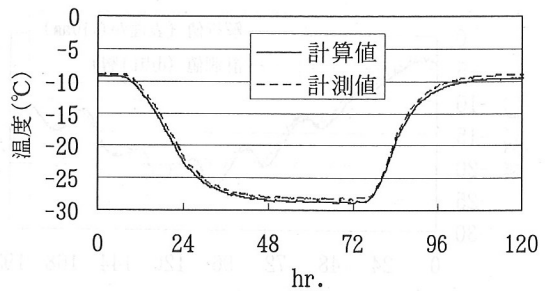


図-29 420□ 一定速度降・昇温変動

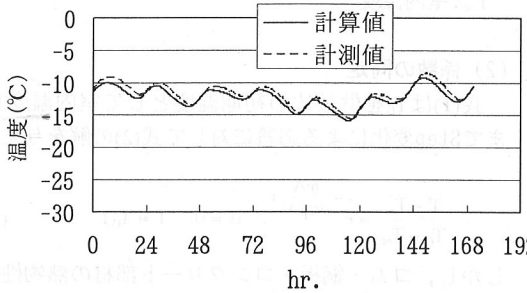


図-30 720□ 北見地方最低気温時温度変動

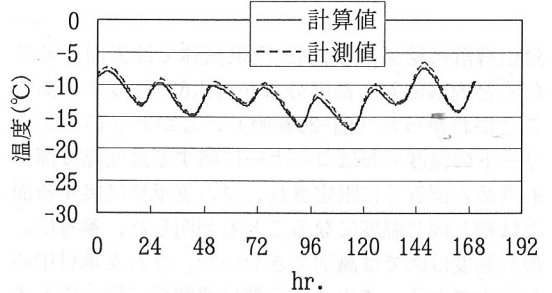


図-31 420□ 北見地方最低気温時温度変動

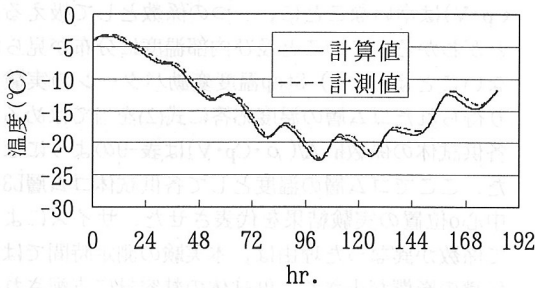


図-32 720□ 北見地方通常期冬季温度変動

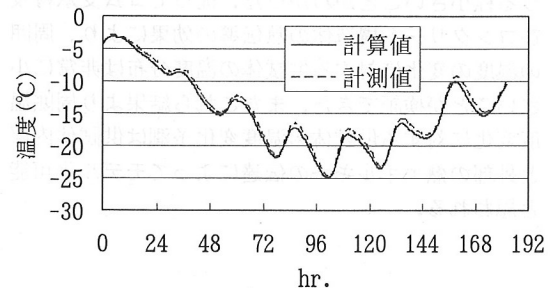


図-33 420□ 北見地方通常期冬季温度変動

## 7. 結論

試験室間口・床強度により供試体のサイズが限定されたが、高減衰ゴム支承材の内部温度の応答の様子が明確となった。また、FEM非定常熱伝導解析の妥当性が検証できたことにより、異なったサイズ・構造・構成の供試体内部温度がある程度予測可能になった。これらの結果はゴム支承材を使った橋梁系の耐震設計に有効に寄与するものと思われる。

1) 720□及び420□供試体では通常の外気温の変動に対してゴム支承材内部温度の分布は無視できるほど小さい。

2) 寒冷地実観測気温変動最低気温記録時(1985年1月21日～1月28日)に対し、ゴム支承材720□供試体の内部温度は最低気温 $-31.7^{\circ}\text{C}$ で $-22.6^{\circ}\text{C}$ であり、420□供試体では $-24.6^{\circ}\text{C}$ である。また、通常期冬季では同様に、720□供試体の内部温度は最低気温 $-23.5^{\circ}\text{C}$ で $-15.7^{\circ}\text{C}$ であり、420□供試体では $-16.9^{\circ}\text{C}$ である。

3) 内部温度の時間遅れ及び振幅は、最低気温を記録した波形に対し720□で340分、27%、420□で250分、45%となった。

4) 有限要素法非定常熱伝導解析結果と計測値との対比はよく、十分な再現性がある。ただし、熱伝達係数の決定には注意する必要がある。

5) 本供試体についてはゴム支承材の内部温度に分布が見られないため、温度に対して一体に扱うことができる。周囲との熱伝達式の数値解でも温度応答の十分な再現性を確認できた。

6) 現状ではゴム支承材設置場所の気温によりせん断特性を評価しているが、ゴム支承材の内部温度が推定可能になったことにより、実際に近いゴム支承材の温度でせん断特性を決定できる。

謝辞：この試験を企画する段階で北海道開発土木研究所構造研究室池田室長に有益なアドバイスをいただいたことに感謝します。

#### 参考文献

1) 日本ゴム協会 免震用積層ゴム委員会編：免震用積層

ゴムハンドブック，理工図書，平成6年

- 2) 大島俊之, 三上修一, 山崎智之, 池永雅良, 松井義孝, 久保和子：低温条件における免震装置の機能確認実験，構造工学論文集，Vol. 44A, pp. 753-760, 1998.
- 3) Ahmet Yakut, Joseph A. Yura: Evaluation of Elastomeric Bearing Performance at Low Temperatures, *Journal of Structural Engineering*, Vol.128, No.8, pp.995-1002, 2002.
- 4) 開発土木研究所 構造研究室：構造研究室資料第14号 低温域における免震支承の実験的研究報告 平成3年3月
- 5) 日本機会学会編：機械工学便覧 基礎編・応用編新版，丸善，2001年
- 6) J・P・ホールマン：伝熱工学<上>，平田賢監訳，プレイン図書出版，1988.

(2004. 1.15 受付)

## EXPERIMENTS AND NUMERICAL ANALYSIS ON RESPONSE OF INTERNAL TEMPERATURE OF HIGH DAMPING RUBBER BRIDGE BEARING UNDER LOW TEMPERATURE

Hisanari URUTA, Tomoyuki YAMAZAKI, Toshiyuki OHSIMA and Masahiro NAKAMURA

The shear performance of high damping rubber bridge bearings is influenced by low temperature. Therefore, getting to know the internal temperature of rubber bridge bearings and the relation with ambient temperature has an important meaning to the design of bridge structure. In this paper, two kinds of full-scale rubber bridge bearings were tested and checked at four different type ambient temperatures. Comparison of the experiments and results of transient heat conduction analysis was performed, and it was checked that the accurate estimation of internal temperature is possible by the numerical analysis. Furthermore, it was also shown that these results could be estimated by simpler numerical formulation.