寒冷地に建つ免震建物に設置された免震部材の環境温度測定

THERMAL OBSERVATION OF ISOLATING DEVICES INSTALLED IN BASE-ISOLATED BUILDINGS IN COLD REGION

塚野和臣 — *1 伊藤昭浩 — *2
谷口和久 — *3 羽沢昭宗 — *4
関 弘義 — *5 人見泰義 — *6

Kazuomi TSUKANO — *1 Akihiro ITO — *2
Kazuhisa TANIGUCHI — *3 Akimune HAZAWA — *4
Hiroyoshi SEKI — *5 Yasuyoshi HITOMI — *6

キーワード:

寒冷地, 免震部材, 温度依存性, 設置環境温度, 温度測定, 地震応答解析

Keywords:

Cold region, Isolating devices, Thermal dependence, Thermal environment, Thermal observation, Seismic response analysis

In cold region, it is considered that dynamic performance of base-isolated buildings is significantly affected by thermal dependence of restoring force characteristics of isolating devices. However, there is not enough of basic data concerned with the thermal condition for designing base-isolated buildings. In this study, thermal environment of isolating devices is investigated by thermal observation in two base-isolated buildings. For improving thermal environment of isolating devices, results of observation suggest that it is effective to enclose them by thermally insulating materials. It is also suggested that the temperature of isolating devices is mainly affected not by outer thermal environment but by the temperature of upper and lower-side structure.

1. はじめに

免震建物では上部架構の荷重を支える免震部材として、積層ゴムアイソレータ（以下、積層ゴムと略称）が多用されているが、その水平剛性は温度依存性を有しており、寒冷地に建設される場合には、積層ゴムの設置環境温度が免震性能に大きな影響を及ぼす。しかしながら、免震部材の設置環境温度の実測例は現在のところ皆無であり、免震建物設計時の設置環境温度の設定は、建設地の気象データに基づくなどの方法で、設計者の経験・判断で行っているのが実状である。

本研究は寒冷地に建つ免震建物を対象として、建物使用状況下での免震部材の設置環境温度を実測し、設計時の設定温度条件の妥当性検証及び今後の免震建物設計に資する環境温度データの蓄積を主な目的としたものである。

測定は釧路合同庁舎と釧路地家裁判所の2棟で実施しており、いずれも積層ゴムとその周辺に温度センサを設置し、温度の経時変化を下記の期日より継続して測定中である。本報告ではこの測定で得られた知見について報告する。

・釧路合同庁舎：'00/4/13～ ・釧路地家裁判所：'00/12/27～

2. 釧路合同庁舎での測定概要

釧路合同庁舎で採用している免震部材は天然ゴム系積層ゴム(800～1000φ)64基、鉛ダンパー(180φ)56基、鋼棒ダンパー(70φ)32基である。地下駐車場を免震層としているため、このうち積層ゴムは耐火被覆材として、周囲をセラミックファイバーブランケット(厚さ12.5mm、2枚重ね仕様)で覆っている。測定箇所は図-1、2に示す地下駐車場出口近傍の積層

【建物概要(釧路合同庁舎)】

建築面積: 4,581 m²
延べ面積: 25,063 m²
構造: 免震構造(NRB、基礎免震)
上部構造: 鉄骨鉄筋コンクリート造
階数: 地上9階、地下1階、塔屋1階
基礎: 場所打ちコンクリート杭
設計: 北海道開発局営繕部、(株)北海道日建設計
施工: 戸田建設・住友建設・伊藤組JV

*1 北海道開発局営繕部建築課 課長補佐
(〒060-8511 北海道札幌市北区北8条西2丁目)

*2 北海道開発局営繕部建築課 構造係長

*3 北海道開発局営繕部建築課 工務

*4 (株)北海道日建設計 取締役・工務

*5 (株)北海道日建設計構造設計室 室長・工務

*6 (株)日本設計構造設計部 主任技師・工務

*1 Assistant Manager, Building Div., Government Buildings Dept., Hokkaido Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.

*2 Assistant Manager, Building Div., Government Buildings Dept., Hokkaido Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.

*3 Engineer, Building Div., Government Buildings Dept., Hokkaido Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, M. Eng.

*4 Director, Hokkaido Nikken Sekkei, M. Eng.

*5 Manager, Structural Engineering Dept., Hokkaido Nikken Sekkei, M. Eng.

*6 Engineer, Structural Engineering Dept., NIHON SEKKEI Inc., M. Eng.

ゴムであり、積層ゴム表面、耐火被覆表面、上下躯体内部を含む計11点の温度を測定している。このうち躯体内部温度は躯体表面から500mmの位置に温度センサを埋め込んで測定している。温度センサには株式会社アンドデイ社製の「おんどり」を採用しており、1時間毎に温度を記録する設定とした。図-3に温度センサ取付け位置、図-4に温度センサ取付け状況を示す。

2.1 測定結果

表-1に‘00/12/27 から ‘01/12/27 の建物供用後1年間に測定された各点の最低、最高及び平均温度、表-2に同期間の外気温データ、表-3に設置環境温度の設定値と測定値の比較を示す。また、図-5、6は‘00/4/13～‘01/12/27の期間の測定データを抜粋したものである。

免震部材及び躯体温度は、建物が供用（9/11 引越し開始）される9月まではほぼ外気温に近いが、供用後は室内温度の上昇に伴って外気温との差が顕著となり、免震部材及び躯体温度は外気温よりも高くなっている。耐火被覆表面の温度は、最低：-2.0℃、最高：+23.3℃、平均：+12.6℃であり、周辺温度環境の影響を直接受けて、他の部位に比較して時刻変動が最も大きく現れている。そこでの最低温度は全測定点のうち唯一マイナス温度となっているが、外気温の最低値（-22.3℃）よりも20℃程度、また、日平均気温の最低値（-13.7℃）よりも12℃程度高い。一方、積層ゴムの表面温度は、最低：+5℃前後、最高：+22℃前後、平均：+13.5℃前後となっており、最低温度は耐火被覆表面よりも約7℃高い。その温度変動は躯体温度に同調して緩慢に変動する様相を呈しており、上下躯体内部温度を上下限として推移するとともに、冬期間は下部躯体温度側に近づく傾向にある。この特徴的な変動性状は、積層ゴムを介して上下躯体間に流れる熱流と躯体の大きな熱容量による影響が、耐火被覆材の断熱効果によって顕著に現れた結果であると解釈される。設計時には、外気温データに基づいて設置環境温度の設定を

平均温度：+10℃、温度変化：-15℃～+30℃

として免震性能の検討を行っているが、建物供用開始後の1年間の実測データに基づくならば、積層ゴムの設置環境温度は概ね

平均温度：+13.5℃、温度変化：+5℃～+22℃

であると推定される。現在測定中の積層ゴムは外気に直接接する場所に位置し、全積層ゴム中で最も厳しい温度環境にさらされていると考えられる。耐火被覆材に覆われた積層ゴム表面のみならず、周辺気温に追従すると考えられる耐火被覆表面も設計時の設定温度変動幅内に収まっており、設計時の環境温度設定値は低温側・高温側ともに安全側の設定であったと判断できる。

図-5 合同庁舎免震温度観測記録①

図-3 温度センサ取付け位置

図-4 温度センサ取付け状況

表-1 免震部材及び免震部材周辺の測定温度の概要
(2000/12/27～2001/12/27) (合同庁舎)

測定位置	最低温度 (°C)	最高温度 (°C)	平均温度 (°C)
積層ゴム上部躯体内部 ①	+8.2	+21.8	+15.1
積層ゴム上部躯体表面 ⑩	+4.5	+21.6	+13.2
積層ゴム 上フランジ表面	① +6.7 ④ +5.8	+21.9 +21.3	+14.5 +13.9
積層ゴム表面	② +5.9 ⑤ +5.1	+21.8 +20.9	+14.1 +13.3
耐火被覆表面 ⑦	-2.0	+23.3	+12.6
積層ゴム 下部フランジ表面	③ +4.8 ⑥ +4.1	+21.1 +20.7	+13.2 +13.4
積層ゴム下部躯体表面 ⑨	+1.7	+20.6	+12.3
積層ゴム下部躯体内部 ⑧	+4.1	+20.2	+12.5

表-2 外気温一覧(2000/12/27～2001/12/27) (気象台)

気温	最低気温 (°C)	最高気温 (°C)	平均気温 (°C)
測定期間内気温	-22.3	+25.7	+5.4
日平均気温	-13.7	+20.9	—

表-3 設置環境温度の設定値と測定値の比較 (合同庁舎)

測定位置	温度変化 (°C)	平均温度 (°C)
設定条件	-15.0～+30.0	+10.0
積層ゴム表面実測値	+5.1～+21.8	+13.3～+14.1
耐火被覆表面実測値	-2.0～+23.3	+12.6

3. 釧路地家裁庁舎での測定概要

釧路地家裁庁舎で採用した免震部材は、鉛プラグ入り積層ゴム(LRB750φ、ゴム配合：天然ゴム)44基である。釧路合

図-6 合同庁舎免震温度観測記録②

同庁舎とは異なり積層ゴムに耐火被覆を施していない。

図-7、8に示すように積層ゴムは、地下1階床下(免震ピット)に設置している。免震ピットの一部はドライエリアとして利用さ

れており、そこは上部グレーチングを介して外気と直結している。なお、建物外周の地下1階床梁下には防風ゴム(厚さ8mm)を取付け、外気が直接流入しないように配慮している。また、免震ピット内には庁舎内換気用吹出口を配置し、通常勤務時間内は室内の暖気を排気している。測定は積層ゴム及びその周辺に釧路合同庁舎と同種の温度センサを設置して行っており、積層ゴム表面、上下躯体内部を含む計10点で測定している。

3.1 測定結果

図-9には'00/12/27 から'01/12/27 の1年間に測定された温度データを示し、表-4には同期間の各点での最低、最高及び平均温度、表-5に設置環境温度の設定値と測定値の比較を示す(外気温データは表-2参照)。なお、'01/1/18~'01/3/7の冬期間に、積層ゴム近傍の免震ピット内気温を4点で測定しており、そのうちのピット内位置①、②の最低気温のみを表-4中に併記している。

図-9に示すように、積層ゴム表面温度の変動は釧路合同庁舎と同様に外気温の直接的な影響を受けておらず、積層ゴム表面の最低温度は最低外気温(-22.3℃)よりも20℃程度、日平均の最低気温(-13.7℃)よりも11℃程度高い。また、夏季データに着目すると、積層ゴム表面の最高温度は最高外気温(+25.7℃)よりも7℃程度、日平均の最高気温(+20.9℃)よりも3℃程度低くなっており、積層ゴムの温度変動幅は外気温よりもかなり小さい。なお、詳細なデータは省略するが、上部躯体内部温度は最も近いピット内位置図の気温変動に連繋するものの、そこでの気温に比較して変動幅は小さい。

釧路地家裁庁舎設計時には設置環境温度の設定を、

平均温度: +5℃、温度変化: -10℃~+20℃

として免震性能の検討を行っているが、1年間の実測データからは、積層ゴムの設置環境温度は概ね、

平均温度: +10℃、温度変化: -2.5℃~+18℃

であると推定される。釧路合同庁舎と同様に、現在測定中の積層ゴムは最も厳しい温度環境にさらされていると考えられるが、測定値は設定した温度変動幅内に収まっており、設計時の設定が妥当であるとともに、低温側に若干余裕を持った設定値になっていると判断できる。

3.2 釧路合同庁舎と釧路地家裁庁舎での測定結果の比較

釧路合同庁舎と釧路地家裁庁舎での厳寒期の設置環境温度を比較する目的で、図-10、11に'01/2/1~'01/2/10の温度データを示す。

積層ゴムの最低温度に着目すると、釧路地家裁庁舎の躯体温度が低いことも一因となって、積層ゴムは釧路合同庁舎に比較してかなり低温にさらされており、室内温度が低下する庁舎休業時(2/3~2/4)にはマイナス温度となる場合がある。釧路合同庁舎と釧路地家裁庁舎の相違点は、前者では積層ゴム表面温度は上下躯体内部温度の間を推移し、かつ下部躯体温度を下回らないのに対して、後者では低温側の下部躯体内部温度に極めて近い挙動を示し、最低温度が

【建物概要(釧路地家裁庁舎)】	
建築面積:	1,568 m ²
延べ面積:	8,170 m ²
構造:	免震構造(LRB、基礎免震)
上部構造:	鉄筋コンクリート造
階数:	地上5階、地下1階、塔屋1階
基礎:	直接基礎(支持地盤 砂岩)
設計:	北海道開発局宮崎部、(株)日本設計
施工:	竹中・東海・地崎JV

図-7 免震層伏図

図-8 軸組図

表-4 免震部材及び免震部材周辺の測定温度の概要
(2000/12/27~2001/12/27) (地家裁庁舎)

測定位置	最低温度(℃)	最高温度(℃)	平均温度(℃)
積層ゴム上部躯体内部①	+2.9	+18.5	+11.6
積層ゴム上部躯体表面⑩	-0.8	+18.4	+10.5
積層ゴム上部フランジ表面④	-0.4	+18.3	+10.6
積層ゴム表面②	-2.4	+18.1	+9.8
積層ゴム表面⑤	-2.1	+17.9	+9.8
積層ゴム下部フランジ表面⑥	-2.2	+17.2	+9.0
積層ゴム下部躯体表面⑨	-3.9	+17.4	+8.6
積層ゴム下部躯体内部⑧	-0.4	+16.9	+9.3
ピット内位置①	(-0.5)	—	—
ピット内位置②	(+8.2)	—	—

表-5 設置環境温度の設定値と測定値の比較(地家裁庁舎)

測定位置	温度変化(℃)	平均温度(℃)
設定条件	-10.0~+20.0	+5.0
積層ゴム表面実測値	-2.4~+18.1	+9.8

図-9 地家裁庁舎免震温度観測記録

それを下回る場合があることである。この相違は断熱性能を有する耐火被覆材の有無に起因するものであると考える。

表-6に積層ゴム表面温度実測値(断熱材の有無による比較)を示す。これは釧路地家裁庁舎において、断熱材の効果(有効性)を実証するために、試験的に断熱材(ロックウールフェルト 厚さ100mm)で覆った積層ゴム(1台のみ)の'01/12/27~'02/04/15の測定データである。断熱材を施した場合の積層ゴム表面温度は、断熱材を施さない積層ゴムの当該位置での温度に比較して、平均温度及び温度変化ともに温度環境が改善される結果となっている。よって、積層ゴムの温度環境を改善するためには、上下躯体の熱容量を利用し、断熱材で覆うことが効果的であると考える。

4. 免震部材の設置環境温度が釧路合同庁舎の応答解析結果に及ぼす影響

4.1 応答解析用の温度条件

設計時に採用した5種の実地震波及び模擬地震波を入力波とし、最大速度を50cm/secに設定して(レベル2地震)地震応答解析を行う。このうち、KUSHIRO(N63E)は模擬地震波であり、釧路沖地震(1993年1月15日)で観測された釧路地方気象台での記録(N63E成分)と構成地盤に基づいて作成している(参考資料1)。

採用した地震波

1. EL CENTRO(NS) 1940/5/18
2. TAFT(EW) 1952/7/21
3. HACHINOHE(NS) 1968/5/16
4. KUSHIRO(N63E): 模擬地震波
5. ART. WAVE 474: 模擬地震波

解析モデルは11質点系として設定した。上部構造は曲げせん断型モデル、免震部材は等価せん断型モデルとした。減衰は剛性比例型とし、上部構造は弾性一次周期に対して $h=2\%$ とした。また、免震層は $h=0\%$ とした。復元力特性は、上部構造をLinear型、免震部材をQuadri-Linear型とした。上部構造の基礎固定時の一次固有周期は1.19秒(X方向)、1.15秒(Y方向)、全エネルギー吸収部材降伏時の一次固有周期は4.02秒(X方向)、4.01秒(Y方向)となっている。

免震部材の復元力特性(剛性・耐力)に関わる変動要因として、温度変動・製品のばらつき・経年変化の3種を想定している。応答値の変動は平均温度時(製品のばらつき・経年変化無し)を“標準状態”として、それに対する変動率によって評価し、温度変動のみを考慮する場合と3種全ての変動要因を考慮する場合を検討する。

温度変動に関わる温度条件は設計時の設定条件と実測結果に基づき下記の2ケースについて行う。

CASE1: 設計時の設定温度条件

平均温度+10.0℃、温度変動-15.0~+30.0℃

CASE2: 実測された温度条件

積層ゴム: 平均温度+13.5℃、温度変動+5.0~+22.0℃

鉛ダンパー: 平均温度+12.5℃、温度変動-2.0~+23.5℃

このうちCASE2では、積層ゴムの設置環境温度はその表面で実測された温度に基づいて、また、鉛ダンパーについては耐火被覆表面での温度実測値を代用して設定している。

設計時には鉛ダンパー、鋼棒ダンパーの剛性・耐力に関する温度依存性を考慮していないため、CASE1では両者の復元力特性の変動は考慮していない。

表-7に各温度条件に応じる免震部材の剛性・耐力の変動率、表-8には解析条件(応答解析で採用した変動率の組み合わせ)を示す。

図-10 冬期間の免震温度観測記録 (合同庁舎)

図-11 冬期間の免震温度観測記録 (地家裁庁舎)

表-6 積層ゴム表面温度実測値(断熱材の有無による比較)
(2001/12/27~2002/4/15) (地家裁庁舎)

測定位置	温度変化(℃)	平均温度(℃)
積層ゴム表面温度実測値 (断熱材無し)	-0.7~+8.7	+5.4~+5.5
積層ゴム表面温度実測値 (断熱材有り)	+5.1~+10.4	+7.5

表-7 免震部材の剛性・耐力変動率

変動要因	① 温度変動による		② 製品のばらつきによる	③ 経年変化による	④・⑤ 両者を考慮
	CASE 1 設計時温度条件 -15~+30℃	CASE 2 実測温度条件 A +5~+22℃ B,C -2~+23.5℃			
免震部材			CASE1・2 共		
A 積層ゴム	-5~+15%	-2~+2%	± 5%	0~+20%	- 5~+20%
B 鉛ダンパー	なし	-4~+6%	±10%	なし	-10~+10%
C 鋼棒ダンパー		なし			

表-8 解析条件

CASE	CASE1 (設計時温度条件)					CASE2 (実測温度条件)				
免震部材復元力の変動要因	標準状態	① 温度変動のみ考慮	②・③ 全ての要因考慮	標準状態	① 温度変動のみ考慮	②・③ 全ての要因考慮	標準状態	① 温度変動のみ考慮	②・③ 全ての要因考慮	標準状態
温度	+10.0	+10.0	+30.0	+13.5	+5.0	+22.0	+12.5	+5.0	+23.5	+12.5
A 積層ゴム	1.00	1.15	0.95	1.35	0.90	1.00	1.02	0.98	1.22	0.93
B 鉛ダンパー	1.00	1.00	1.00	1.10	0.90	1.00	1.06	0.96	1.16	0.86
C 鋼棒ダンパー										
							1.00	1.00	1.10	0.90

各免震部材の復元力特性に対して設定した温度依存性は、積層ゴム剛性は参考資料2、鉛ダンパー耐力は参考文献1に基づいている。なお、鉛ダンパーの剛性については温度依存性が未知であるため、ここでは、耐力に連繋して変動するものとし、温度変動に伴う剛性変動率を耐力のそれと同一として検討する。また、CASE2では鋼棒ダンパーの剛性・耐力の温度依存性は小さいと判断して(参考資料3)温度変動は考慮しない。

積層ゴムの温度依存性に起因した低温側での剛性増大率は、CASE1

では1.15であるのに対し、CASE2では1.02に留まる。なお、CASE2の温度条件では鉛ダンパーの耐力(剛性)変動率は $-4\sim+6\%$ となる。

4.2 応答解析結果

表-9、図-12、13に最大応答層せん断力係数の標準状態に対する最大・最小変動率(X、Y方向)を示す。

温度変動のみを考慮する場合には、CASE1での応答量の変動は高温側よりも剛性が增大する低温側で大きくなり、そこでは標準状態に比較して最大で13%程度増大する。これに対して、CASE2では高・低温側での応答量変動幅が同程度となり、低温側での最大増大率は3%~4%程度で、CASE1よりも約10%程度小さい。これは、積層ゴム温度の平均と最低の差が実測データでは8.5℃であるのに対し、設計時の設定では25℃であり、それが応答量増大率の差違として現れている。

全変動要因を考慮する場合は、CASE1では鉛ダンパーの温度依存性を無視したため、両ケースの直接的な比較はできないにせよ、CASE2の低温側での最大変動率は、CASE1に比較して最大で約10%程度小さくなる。また、温度変動のみを考慮する場合を免震部材の温度依存性の寄与分とみなすならば、応答変動幅に占めるその割合がCASE1に比較して大幅に小さくなる。

5. 免震部材の設置環境温度が釧路地家裁庁舎の応答解析結果に及ぼす影響

5.1 応答解析用の温度条件

設計時に採用した5種の実地震波及び模擬地震波に対するレベル2地震動(地動最大速度50cm/sec)時の地震応答解析を行うことにより免震部材の温度依存性が応答量に及ぼす影響を検討する。このうち、KUSHIRO(NS)は釧路沖地震(1993年1月15日)で観測された釧路地方気象台での記録を原波の大きさのまま用いた。

採用した地震波

1. EL CENTRO(NS) 1940
2. TAFT(EW) 1952
3. HACHINOHE(NS) 1968
4. BCJ-L2 : 模擬地震波
5. KUSHIRO(NS) 1993

解析モデルは免震層下部を固定として、7質点等価せん断型モデルとした。減衰は剛性比例型とし、上部構造は基礎固定の一次振動に対して $h=2\%$ とした。また、免震層は $h=1\%$ とした。復元力特性は、上部構造をDegrading Tri-Linear型、免震層を修正 Bi-Linear型とした。上部構造の基礎固定時の一次固有周期は0.50秒(X方向)、0.51秒(Y方向)、積層ゴムのせん断歪率150%時の一次固有周期は3.05秒(X方向)、3.07秒(Y方向)となっている。

免震部材の復元力(剛性・耐力)変動要因は、温度変動・製品のばらつき・経年変化の3種を考慮する。合同庁舎と同様に平均温度時を標準状態として、温度変動のみを考慮する場合と3種の変動要因を全て考慮する場合で応答値がどのように変動するかを確認する。

温度変動に関わる設定条件は次の3ケースとする。

CASE1 設計時の設定温度条件

平均温度+ 5.0℃、温度変動-10.0~+20.0℃

CASE2 実測された温度条件(断熱材無)

平均温度+ 9.0℃、温度変動- 3.0~+20.0℃

CASE3 実測された温度条件(断熱材有)

平均温度+10.0℃、温度変動+ 4.0~+18.0℃

CASE3はCASE2と測定年次・期間は異なるが、試験的に断熱材で覆った積層ゴムの測定データに基づいて想定した設定条件であり、CASE2とは最低温度で+7℃、最高温度で-2℃、平均温度で+1℃の温

表-9 最大応答層せん断力係数の標準状態に対する変動率

CASE	免震部材復元力の変動要因	最大応答層せん断力係数の変動率	
		X方向	Y方向
CASE1 設計時	温度変動のみ考慮	-4%~+13%程度	-5%~+13%程度
	全ての変動要因考慮	-11%~+32%程度	-13%~+29%程度
CASE2 温度実測条件	温度変動のみ考慮	-3%~+4%程度	-2%~+3%程度
	全ての変動要因考慮	-17%~+22%程度	-18%~+20%程度

図-12 最大応答層せん断力係数の標準状態に対する変動率 (X方向)

図-13 最大応答層せん断力係数の標準状態に対する変動率 (Y方向)

表-10 免震部材の剛性・降伏荷重変動率

変動要因	① 温度変動による			② 製品のばらつきによる	③ 経年変化による	②・③両者を考慮
	CASE 1 設計時温度条件 -10~+20℃	CASE 2 実測温度条件 (断熱材無し) -3 ~+20℃	CASE3 実測温度条件 (断熱材有り) +4~+18℃			
変動条件	CASE1・2・3 共					
剛 性	-3.9~+4.2%	-3.9~+2.2%	-3.4~+0.3%	± 10%	0~+10%	-10~+20%
降伏荷重	-12.4~+14.1%	-12.4~+7.2%	-10.8~+0.9%	± 10%	0%	-10~+10%

表-11 解析条件

CASE	CASE1 (設計時温度条件)				CASE2 (実測温度条件) 断熱材無し				CASE3 (実測温度条件) 断熱材有り			
免震部材復元力の変動要因	標準状態	① 温度変動のみ考慮	②③ 全ての変動要因考慮	標準状態	標準状態	① 温度変動のみ考慮	②③ 全ての変動要因考慮	標準状態	標準状態	① 温度変動のみ考慮	②③ 全ての変動要因考慮	標準状態
温度	+5.0	-10.0	+20.0	+10.0	+5.0	-3.0	+20.0	+10.0	+10.0	+4.0	+18.0	+10.0
剛性変動率	1.00	1.042	0.961	1.237	1.00	1.033	0.973	1.232	1.00	1.016	0.978	1.213
降伏荷重変動率	1.00	1.141	0.876	1.233	1.00	1.111	0.908	1.205	1.00	1.055	0.932	1.150

度差が生じるものとして設定している。

表-10には免震部材の3ケースの温度条件に応じる剛性・降伏荷重の変動率、表-11には解析条件(応答解析で採用した変動率の組み合わせ)を示す。参考文献2に基づいて求めた積層ゴムの低温側での剛性増大率は、CASE1:1.04、CASE2:1.03、CASE3:1.02となっている。また、低温側での降伏荷重増大率は、CASE1:1.14、CASE2:1.11、CASE3:1.06となっている。

5.2 応答解析結果

表-12、図-14、15に最大応答層せん断力係数の標準状態に対する変動率の最大・最小値（X、Y方向）を示す。

温度変動のみを考慮する場合には、CASE1での応答量の変動が釧路合同庁舎では-4～+13%であり、高温側よりも剛性が増大する低温側での変動が大きかったのに対し、釧路地家裁庁舎では高・低温側での応答量変動幅が同程度となっており、低温側での最大増大率は4%～6%程度にとどまる。この低温側での応答量増大率の差は、設計時設定条件において、積層ゴム温度の平均と最低の差が釧路合同庁舎では25℃であったのに対し、釧路地家裁庁舎では15℃と小さいことによるものである。また、実測データに基づくCASE2では、両庁舎とも高・低温側での応答量変動幅が同程度となり、低温側での応答量の最大増大率は、釧路合同庁舎で3%～4%程度、釧路地家裁庁舎で4%～6%程度となる。両者の応答量増大率には極端な違いは認められないものの、釧路地家裁の免震部材が釧路合同庁舎よりも低温にさらされていることが垣間見られる結果となっている。なお、試験的に断熱材を施したCASE3では、低温側での応答量の増大率は最大で2%程度であり、CASE2の最大増大率に比較して約2～4%程度小さくなる。

全変動要因を考慮する場合には、釧路合同庁舎での結果とは異なり、CASE1, 2ともに応答変動幅に占める免震部材の温度依存性の寄与分は同程度となっている。また、断熱材を施した積層ゴムの実測データに基づくCASE3では、積層ゴムの設置環境温度が改善されたことを反映して、免震部材の温度依存性の寄与率はCASE1, 2に比較して若干小さくなる傾向にある。

6. まとめ

- (1) 寒冷地の免震建物において免震部材（積層ゴム）が断熱材で覆われた場合の設置環境温度は、上下躯体温度を拠り所として推定し得る。詳細な検討を要するが、免震部材が断熱材で覆われる場合には、上部躯体と下部躯体の温度に関わる主要な因子を、それぞれ直上階の室内温度と年平均気温に連繋する土中温度とみなすことによって、免震部材の温度変動幅をより適切に設定できる可能性があり、それが応答量変動幅の適切な評価に繋がると考える。
- (2) 釧路合同庁舎の場合、鉛・鋼棒ダンパーは耐火被覆を施していないため、積層ゴムと事情が異なるが、耐火被覆表面温度を周辺気温の代替値として考えるならば、それらの温度変動幅は積層ゴムに比較して大きくなるものの、設置環境温度は外気温の影響を直接受けていない。
- (3) 釧路地家裁庁舎に設置された積層ゴムは断熱材で覆われていないため、その表面温度の最低温度は下部躯体内部を下回って、マイナス温度となる場合がある。しかしながら、最低外気温（-22.3℃）よりも20℃程度、日平均の最低気温（-13.7℃）よりも11℃程度高く、合同庁舎と同様に設置環境温度は外気温の影響を直接受けていない。
- (4) 釧路地家裁庁舎で試験的に断熱材を施した積層ゴムの最低温度は、それを施していない積層ゴムに比較して6℃程度高くなり（表-6）、寒冷地における設置環境温度を改善するうえで断熱材が効果的であることが確認された。

表-12 最大応答層せん断力係数の標準状態に対する変動率

CASE	免震部材復元力の変動要因	最大応答層せん断力係数の変動率	
		X方向	Y方向
CASE1 設計時	温度変動のみ考慮	-7%～+6%程度	-6%～+4%程度
	全ての変動要因考慮	-15%～+14%程度	-15%～+11%程度
CASE2 温度実測条件	温度変動のみ考慮	-5%～+6%程度	-5%～+4%程度
	全ての変動要因考慮	-14%～+15%程度	-14%～+13%程度
CASE3 温度実測条件	温度変動のみ考慮	-4%～+2%程度	-3%～+2%程度
	全ての変動要因考慮	-13%～+13%程度	-13%～+12%程度

図-14 最大応答層せん断力係数の標準状態に対する変動率（X方向）

図-15 最大応答層せん断力係数の標準状態に対する変動率（Y方向）

【謝辞】 本論作成にあたっては、貴重な気象データを提供いただいた釧路地方気象台に謝意を表します。また、温度測定データ収集の際は、北海道開発局釧路開発建設部企画課 山岡栄一氏、(株)竹中工務店北海道支店 作業所長 中田盛行氏にご協力頂きました。ここに深く謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 高山, 森田, 安藤, 宅野: 「1/4箱小試験体を用いた鉛ダンパーの低温下動的加振試験」、日本建築学会大会学術講演梗概集, 1997. 9., pp. 553-554
- 2) 長谷川, 下田, 池永: 「LRBの温度特性」、日本建築学会大会学術講演梗概集, 1997. 9., pp. 511-512
- 3) 伊藤, 大沢, 徳光, 人見, 中田, 山本: 「鉛プラグ入り積層ゴム支承の低温下動的性能確認試験に基づく各種依存性の評価に関する一考察」、日本建築学会技術報告集 第11号, 2000. 12., pp. 37-42
- 4) 伊藤, 谷口: 「寒冷地における免震建物の構造設計に関する一考察（積層ゴムアイソレータの設置環境温度測定及び解析）」、平成13年度 国土交通省国土地技術研究論文集, 2001. 11., pp. 1-4
- 5) 谷口, 伊藤: 「寒冷地における免震建物の構造設計に関する一考察（積層ゴムアイソレータの設置環境温度測定及び解析）」、平成13年度 北海道開発局技術研究発表会梗概集, 2002. 2., pp. 169-176

【参考資料】

- 1) 「釧路合同庁舎免震構造評定委員会資料 (BCJ-免184)」, 平成8年4月。
- 2) 「天然ゴム系積層ゴムアイソレータ（低弾性仕様）, ゴム材料の温度依存性資料」, 昭和電線電機, 1995. 11. 27.
- 3) 「免震鋼棒ダンパーに使用されるSQ4415鋼材の低温時特性について」, 新日本製鐵株
- 4) 「釧路地家裁建築工事免震構造評定委員会資料 (BCJ-免542)」, 平成10年5月。

[2002年4月18日原稿受理 2002年7月23日採用決定]