

建物周囲の積雪による水平移動拘束の影響を考慮した 免震建物の地震応答解析

永野 康行*

Earthquake response analysis of seismic isolation building in snow season

Yasuyuki Nagano

The purpose of this paper is as follows. First, an experiment of the stiffness of the cover snow is carried out and then determined the constant of the lateral snow stiffness. Second, the influence on the horizontal displacement in the earthquake of the snow around is checked for the seismic structure by using the rate of spring of the cover snow which is a result of the experiment.

There are influences to which it's given in seismic base isolation system by 100 times of spring rate. A base isolated building seems to have to consider the cover snow by the hardness of this snow, so the cover snow may be cleaned appropriately.

1. 序

免震構造は、積層ゴムを設置した免震層で集中的に地震動のエネルギーを吸収し、建築物への地震動の入力を著しく低減する構造システムである。日本で免震建築が注目されるようになったのは、阪神・淡路大震災後のことで、建設件数も急激に増加した。近年では、既存不適格建築物の耐震改修にも、免震構造を採用することが増加し、普及の兆しが見えてきている⁽¹⁾。

このように近年では、免震構造を採用する件数が増加する傾向がある。通常考えられる問題点としてコストの問題や、敷地境界から建築物の変位を考慮した位置に配置すること、免震構造でない建築物と組み合わせる場合に変形に耐えうるエキスパンションジョイントのディティールが必要になることなどの制約がかかる。さらに局地的な問題として、多雪地域では雪の影響は重量として考慮されている。ところが、筆者が知る限り、免震構造物周辺の積雪の水平変位への影響について、考慮されている事例はない。この問題点に注目し、免震構造物の周辺積雪が、地震時の水平方向変位へいかなる影響を及ぼすかについて、解析的研究を実施し報告する。

本研究の目的は大きく次の二つである。第一に、積雪の剛性評価実験を実施し、積雪のバネ定数を求めること。第二に、実験結果である積雪のバネ定数を使用して、免震構造物周辺の積雪の地震時の水平変位への影響について調べることである。積雪量の多い札幌において、積雪日数の平年値（統計期間 1971～2000 年までの平均値）が 1 年を通して 132.4 日ある⁽²⁾。これより、多雪地域においては地震時の免震構造物周辺の積雪の水平変位への影響調査は重要であると言える。

* 建設工学科建築学専攻

辻と永野⁽³⁾は、建物周囲の積雪を弾性雪バネに置換し、免震部材の初期剛性に建物周囲の積雪を弾性バネとして考えたときのバネ定数を加えたものを積雪を考慮した場合の免震層の初期剛性として、地震応答解析を実施している。その際、積雪バネについては実測を行ったものではない。建築面積 $10 \times 10 \text{ m}^2$ の建物の周辺の積雪量を少, 中, 多と置いて、積雪バネをそれぞれ 1 t/cm , 3 t/cm , 5 t/cm と仮定した値で解析している。それに対して本研究では、簡易実験により積雪のバネ定数を求め、その値をもとに地震応答解析を実施するところに新規性がある。

2. 実験による積雪の剛性評価

2.1 実験方法

実験は屋内と屋外で行った。屋内では、実験試料としたかき氷は家庭用冷蔵庫（型番：Elabtax ER-85）の冷凍室（温度： -2°C ）で作った。電気氷削機（DIS-103）を使用し、内寸 $8.4 \text{ cm} \times 8.4 \text{ cm} \times 7.4 \text{ cm}$ (タテ×ヨコ×高さ) の透明な箱に山盛りになるまで氷を削り、箱の上面に定規を当てて平らに整えたものを実験試料とした。屋外では、2008 年 12 月 6 日から 7 日にかけて雪が降ってから 7 日程度経過した雪を使用し、雪を箱に詰める形で実験試料を作成した。屋内試料をはかり（株式会社アベラコーポレーション製 NKC-10）で雪を 5 回入れ替えて量ったところ、 185 g , 190 g , 175 g , 190 g , 190 g で、平均 186 g となった。

実験手順は、試料に荷重としてフィルムケース（底面積 6.15 cm^2 ）に 500 円硬貨（ 7 g /枚）を入れたものを重りとして乗せる。しかし、実験を行う間に実験試料となる雪が融けてから再度凍って固まってしまうため、重りを 5 mm の高さから自由落下させることとし、全ての実験において統一した。重りは 500 円硬貨 5 枚（ $=35 \text{ g}$ ）を始めとして、徐々に重りを上乗せしていった。重さを変えるごとに雪の沈下量を定規で測った。実験手順を図 1 に示す。

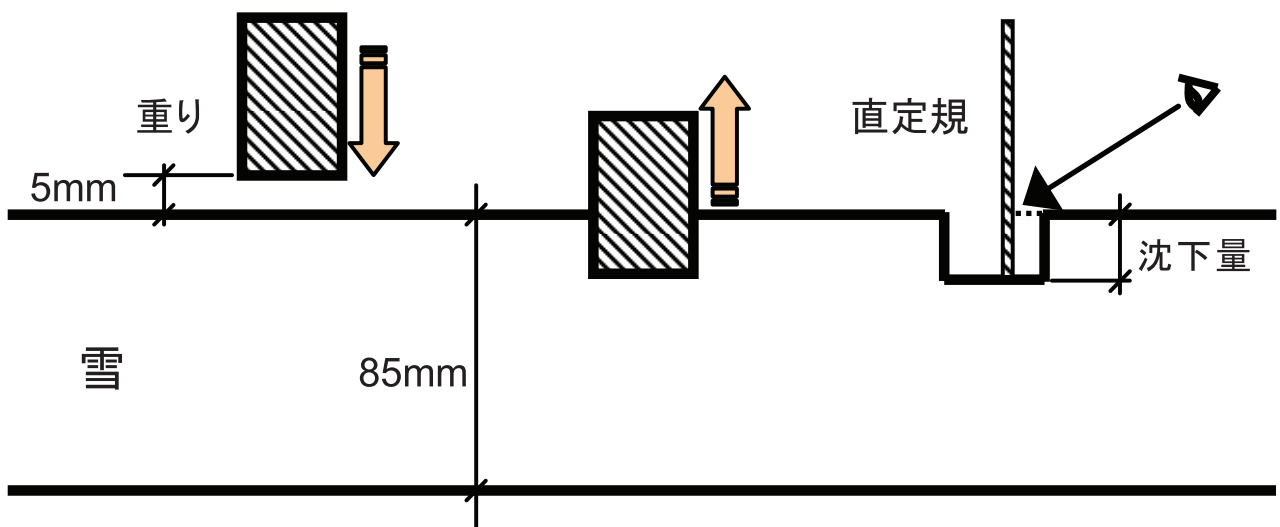


図 1 実験手順

2.2 実験結果

2.1 節に示すように実験試料を作成し、実験を実施した。屋内外における試料の変位測定結果をそれぞれ表 1、表 2 に示す。雪の温度は、すべての場合において 0℃であった。

表 1 屋内試料の変位測定結果

枚数	重さ (g) [N]	変位 (cm)
5	35 [0.343]	1.5
10	70 [0.686]	2.7
15	105 [1.029]	4.1
22	154 [1.509]	4.5
27	189 [1.852]	5.0
32	224 [2.145]	5.0
42	294 [2.881]	5.5
44	308 [3.018]	5.5

表 2 屋外試料の変位測定結果

枚数	重さ (g) [N]	変位 (cm)
22	154 [1.509]	1.1
27	189 [1.852]	1.9
32	224 [2.145]	4.4
37	259 [2.538]	4.8
42	294 [2.881]	5.5

これまでのデータから算出した屋内の実験試料の応力度－ひずみ度関係と屋外の実験試料の応力度－ひずみ度関係をそれぞれ図 2, 図 3 に示す。なお, 回帰曲線の算出には KaleidaGraph ver.4.01 を使用している。

図 3 のグラフの $y=0.75595x$ (4)式の直線から、バネ定数を算出する。まず、図 3 のグラフは、荷重をおもりの底面積 6.15cm^2 で除して応力度を算出し、また、その時の変位を箱の内寸である 8.5cm で除してひずみ度を算出する。そうして、算出した数値をプロットしたグラフに線形回帰直線を引き、その直線から雪のヤング係数を出す。

変位 1.1cm 、荷重 1.509N の場合、

$$\sigma = \frac{1.509}{6.15} = 0.245\text{N/cm}^2 \quad \dots (5) \text{ 式}$$

$$\varepsilon = \frac{1.1}{8.5} = 0.129 \quad \dots (6) \text{ 式}$$

このように、変位と荷重それぞれに算出した数値から、応力度、ひずみ度を算出する。

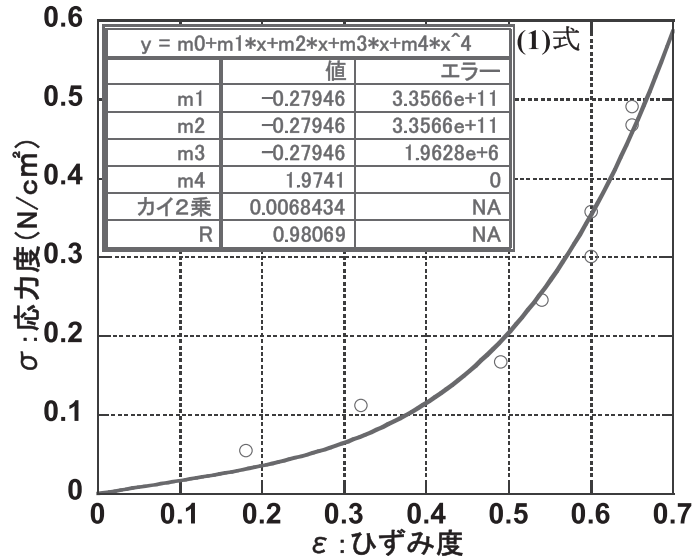


図2 応力度－ひずみ度関係（屋内）

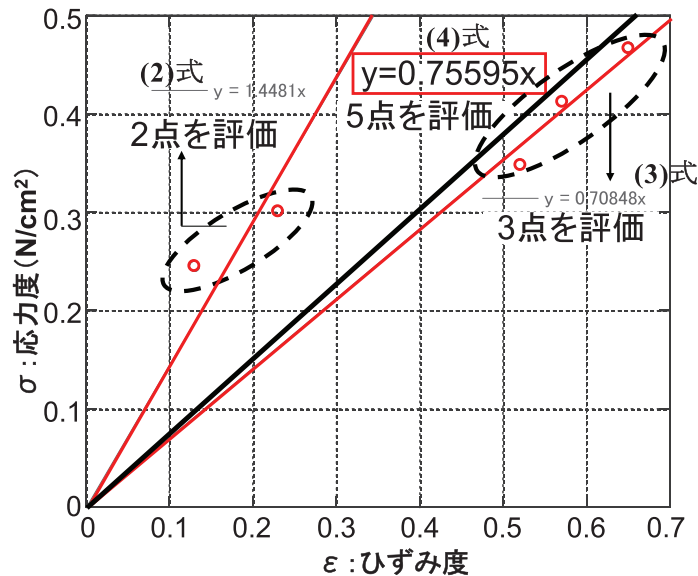


図3 応力度－ひずみ度関係（屋外）

3. 実高層耐震建築物の免震化に伴う免震層の設計

3.1 免震層の設計

免震構造物に対する積雪の影響を調べるために、免震部材の初期剛性に積雪のバネ定数を加えた数値を用いて、地震応答解析を実施する。モデルとなる高層建築物は耐震構造であるため、1階の下に免震層の設置を仮定するため、免震層の設計を行う。免震層の設計を行うにあたり、設定する数値は初期剛性のみとする。

3.2 構造物モデル

解析を進めるにあたり、モデルとなる建築物を設定する。

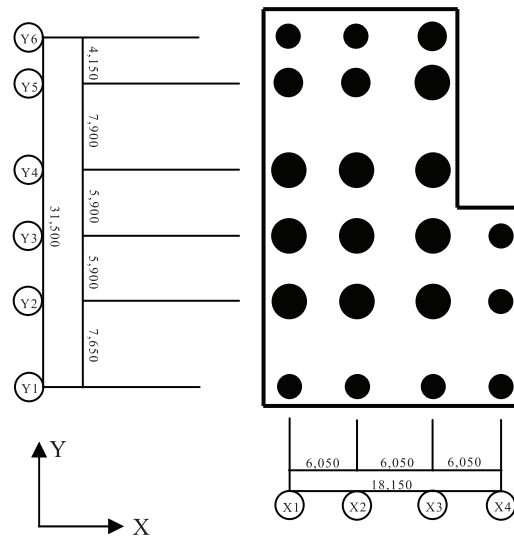


図 4 杭伏図

図 4 に対象とする構造物モデルの杭伏図を示す。図中の黒丸が構造物の杭（21 本）の位置を示している。杭の位置は図に示す通り芯名称を利用して特定する。

本設計では、天然ゴム系積層ゴム（G4；せん断弾性率 $=0.392\text{N/mm}^2$ ，ゴム総厚 $=20\text{cm}$ ） $\phi 650$ ， $\phi 700$ ， $\phi 750$ ， $\phi 850$ ， $\phi 900$ ， $\phi 950$ ， $\phi 1000$ をそれぞれ 3 基，3 基，1 基，3 基，4 基，4 基，3 基配置することとなる。これらの水平剛性をすべて足し合わせると， $23.668 \times 10^3 \text{ kN/m}$ となる。この数値の単位を変換して，解析に使用する数値にする。

$$23.668 \times 10^3 \text{ kN/m} \times 0.102 = 24.14 \text{ t/cm} \quad \dots (7) \text{ 式}$$

ここまでの免震層の設計である。これまでに求めた解析に必要な免震層の数値を表 3 に示す。

表 3 免震層諸元

階	階高(cm)	質量 ($\text{t} \cdot \text{s}^2/\text{cm}$)	初期剛性 (kN/cm)
免震層	200	0.63	236.68

3.3 まとめ

免震層の設計において，免震層の初期剛性を求めるには，まず基礎の軸力からその位置ごとの積層ゴムの外径を求める。さらにその位置ごとの積層ゴムの外径から，それぞれの水平剛性を求め，それらすべて足し合わせばよい。免震層の減衰定数については，減衰機構としてダンパーを別置きで設置する等，ゴム自体に減衰機能を持たせた積層ゴムや鉛を組み込んだ積層ゴム等が使われるが，本研究ではそれらを考えていないため，免震層の減衰を 20% と仮定している。

4. 積雪の影響を考慮した高層免震建物の地震応答解析

4.1 序

本章では、積雪の剛性評価実験の結果や3章の免震層の設計の結果を踏まえて、免震建物周囲の積雪を考慮した高層免震建物の地震応答解析を行う。入力地震動は、El Centro 1940 NS, Taft 1952 EW, Hachinohe 1968 NSを採用している。

4.2 構造物モデル

地震応答解析は図5に示すように多質点系振動モデルに置換し、実施する。質点数は免震層も含め17質点である。表4に応答解析のモデル諸元を示す。なお、上部構造物の減衰タイプは剛性比例型とし、1次に対する減衰定数を図5に示す。

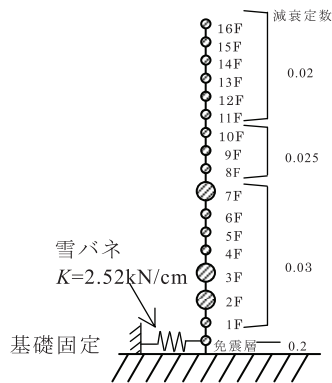


図5 地震応答解析モデル

表4 応答解析モデル諸元

階	質量 (t・s ² /cm)	初期剛性 (kN/cm)
16F	0.223	1,909
15F	0.477	3,828
14F	0.326	4,185
13F	0.327	4,347
12F	0.327	4,910
11F	0.329	5,357
10F	0.363	7,059
9F	0.398	7,507
8F	0.398	9,830
7F	0.819	13,066
6F	0.677	13,725
5F	0.679	14,536
4F	0.698	16,858
3F	1.116	21,970
2F	0.974	21,520
1F	0.630	23,716
免震層	0.630	237

4.3 積雪のモデル化

2章の実験結果である図3中に示した雪のヤング係数である 0.75595 を 0.8N/cm^2 として、建物長辺 (X 方向) の幅である $3,150\text{cm}$ を乗じると、

$$Kx = 0.8 \times 10^{-3} \text{ kN/cm}^2 \times 3,150 \text{ cm} \quad \dots (8) \text{ 式}$$

$$= 2.52 \text{ kN/cm}$$

となり、これが積雪深さ 1cm に対応するバネ定数である。

4.4 入力地震動

入力地震動として、最大速度を 50cm/s で基準化 (レベル2相当) した El Centro 1940 NS, Taft 1952 EW, Hachinohe 1968 NS を採用した。これら標準3波を入力地震動に採用した理由は、入力地震動として採用された実施例が多くあるためである。El Centro 1940 NS の最大加速度は 511cm/s^2 , Taft 1952 EW の最大加速度は 497cm/s^2 , Hachinohe 1968 NS の最大加速度は 330cm/s^2 である。

4.5 解析結果

図 6 に El Centro 1940 NS, Taft 1952 EW, Hachinohe 1968 NS の変位, せん断力応答結果を示す。

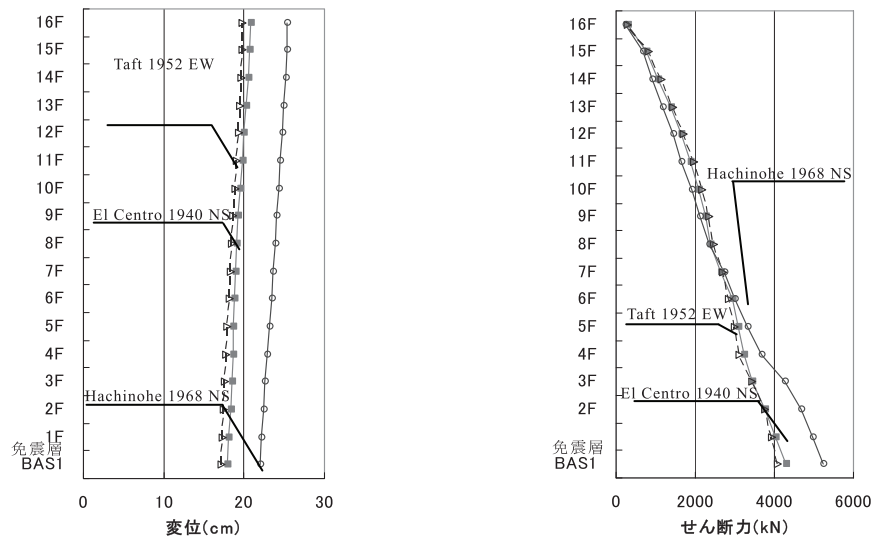


図 6 変位・せん断力応答結果 (1cm の積雪を考慮)

バネ定数を仮に 100 倍 (積雪深さ 100cm に相当) にした時の Hachinohe 1968 NS の変位・せん断力応答結果 (積雪あり, なし・耐震構造時) を図 7 に示す。

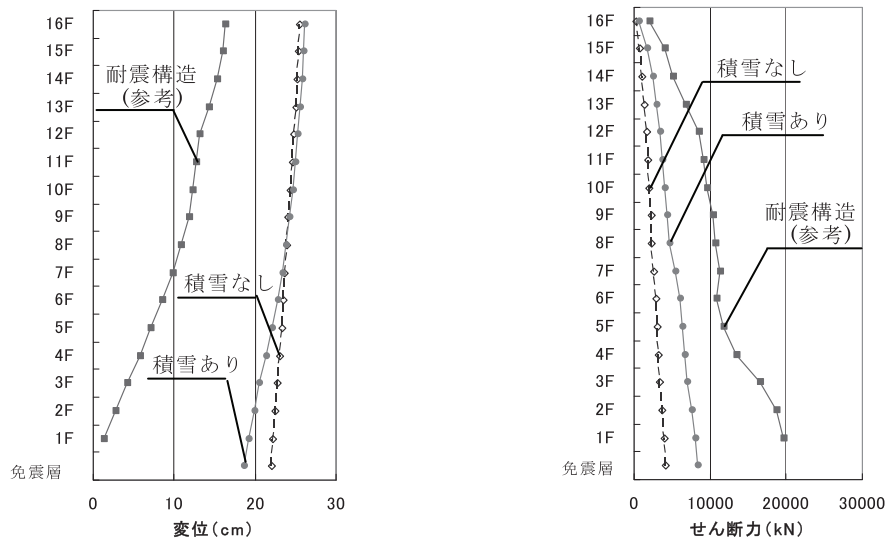


図 7 変位・せん断力応答結果 (バネ定数 100 倍 ; 入力地震動 Hachinohe 1968 NS)

4.6 まとめ

変位応答結果, せん断力応答結果から, 実験から得られたバネ定数を考慮した積雪あり (積雪深さ 1cm) の場合と, 考慮していない積雪なしの場合とで比較すると, 変位では最大でおよそ 1% 大きくなり, せん断力では最大でおよそ 2% 大きくなった。バネ定数 100 倍 (積雪深さ 100cm に相当) 時の免震層は積雪なしと比べて, 変位は Hachinohe 1968 NS では, 0.84 倍となった。せん

断力は、Hachinohe 1968 NS では、1.73 倍となった。本解析の範囲内ではあるが、積雪深さ 100cm では積雪の影響は少なからずあるといえる。

5. 結論

免震構造は、積層ゴムを設置した免震層で集中的に地震動のエネルギーを吸収し、建築物への地震動の入力を著しく低減する構造システムである。大地震が起こったときに建築物が崩壊せず、さらに震災後にもその機能を発揮できる建築物とすることができる。

本論文では、免震構造物周辺の積雪の地震時の水平変位への影響についての調査を実施した。まず、屋内と屋外でそれぞれの実験試料を作成して、実験を実施した。それぞれの実験試料は、条件が違うため、結果に大きな違いが出た。しかし、両方とも荷重が大きくなるとそれに伴い、変位も大きくなる。すると、重りの下方の雪が圧縮されて固まってしまうので、ある程度沈下したあとは変位しにくくなり、変位の幅が小さくなることがわかった。次に、免震層の設計を行った。免震層の初期剛性を求めるには、まず基礎の軸力からその位置ごとの積層ゴムの外径を求める。さらにその位置ごとの積層ゴムの外径から、それぞれの水平剛性を求め、それらすべてを足し合わせば、免震層の初期剛性が求められる。最後に、変位応答結果、せん断力応答結果から、実験から得られたバネ定数を考慮した積雪ありの場合と考慮していない積雪なしの場合とを比較したが、積雪量が 1cm の場合は、変位とせん断力にほとんど変化はなかった。バネ定数 100 倍（積雪深さ 100cm に相当）時の免震層は積雪なしと比べて、変位は Hachinohe 1968 NS では、0.84 倍となり、せん断力は、Hachinohe 1968 NS では、1.73 倍となった。本解析の範囲内では、積雪深さが 100cm では免震層に与える影響は少なからずあるといえる。この雪の硬さでは、免震建物は周囲の積雪を考慮する必要がある、適切に除雪等の建物維持管理が必要となる場合もある。

今後の課題として、積雪バネを求めるための試料数を増やし、積雪の状況・地域等のパラメータを考慮した解析の実施があげられる。

謝辞

本研究は、平成 20 年度 福井工業大学 学内特別研究費（個人研究）研究費 B により実施した。積雪の剛性評価においては、福井工業大学建設工学科主任教授 前田博司 博士より助言を頂いた。本論文での実験及び応答解析は卒研究生の春日智昭君の協力を得た。ここに記し感謝の意を表す。

参考文献・URL

- (1) 社団法人 日本免震構造協会：考え方 進め方 免震建築，pp.4-7・p.50，株式会社オーム社，2005.5
- (2) 札幌総合情報センター(株)：さっぽろお天気ネット，http://www.sweb.co.jp/tenki/record/sap_rec.html
- (3) 辻 拓哉，永野康行：積雪による水平変位の拘束を受ける免震戸建住宅の地震応答解析，日本建築学会北陸支部研究報告集，第 50 号，pp.17-20，2007.7

(平成 21 年 3 月 31 日受理)