長周期地震動による超高層住宅での室内被害評価

－扉や引出しの開閉を考慮した冷蔵庫の地震時挙動－

EVALUATION OF INDOOR DAMAGE IN HIGH-RISE BUILDINGS
DUE TO LONG PERIOD GROUND MOTION

－ Seismic behavior of refrigerator considering opening doors and drawers －

正月 俊行*, 翠川 三郎**, 三浦 弘之***, 初岡 徹朗****

Toshiyuki MASATSUKI, Saburoh MIDORIKAWA, Hiroyuki MIURA
and Tetsuro HATSUOKA

The aim of this study is to evaluate indoor damage in high-rise residential buildings due to long period ground motion. In this study the seismic behavior of a refrigerator was evaluated considering opening doors and drawers using shaking table tests and simulations. As the result of this study, the doors and drawers begins to open about 150 cm/s² in case that contents exist, and the refrigerator begins to move about 250 cm/s². And the refrigerator collides many times against walls severely with scattering contents during floor shaking. So it is highly possible that it blocks evacuation routes and injures people

Keywords : *Seismic behavior of furniture, Refrigerator, High-rise building, Shaking table test, Rigid body dynamics, Long period ground motion*

家具の地震時挙動, 冷蔵庫, 超高層建物, 振動台実験, 剛体の物理シミュレーション, 長周期地震動

1. はじめに

超高層建物では、長周期地震動により継続時間の長い大振幅の揺れが発生することが知られている。このような揺れでは、家具等が転倒するだけでなく大移動する可能性もあり、地震時に建物が構造的な損傷を受けない場合でも、人的被害や避難に障害が生じる恐れがある。榎田・ほか(2009)¹⁾は、E-ディフェンスを用いて超高層建物上階の室内が長周期地震動をうけてどのような状況になるのか振動実験を行っており、実験対象にはオフィスのみならず、住宅を想定した室内空間も含まれている。住宅の中でもキッチンでは、家具転倒対策がない場合、食器棚や冷蔵庫が転倒し、家具什器によって受ける被害が命の危険に及ぶ可能性がある場所であることを指摘している。東北地方太平洋沖地震の際の東京都でのアンケート調査²⁾では、家具類の転倒・落下・移動があった世帯の内、食器棚および冷蔵庫が転倒した世帯はそれぞれ30%程度および10%程度だった。

食器棚と比較すると冷蔵庫の転倒率は低いものの、冷蔵庫は、質量が重く、大きく滑って移動する可能性があり、扉が揺れの最中に開くと内容物が散乱したり、重心が前に移動して倒れやすくなった

りすることが指摘されている³⁾。そのため、地震時の冷蔵庫の挙動は複雑になるものと予想される。単純な直方体が仮定できる食器棚のような家具に対しては、床応答の等価振動数や入力レベルから家具の転倒率や滑り量を評価する式が提案されており^{4),5)}、短周期の揺れだけでなく、長周期の揺れについても被害事例と概ね整合する結果が得られることが確認されている⁶⁾。しかしながら、複雑な挙動をする冷蔵庫については、例えば、桜井ら⁷⁾が冷蔵庫に対して振動実験を行っているが、周期0.5秒以下の短周期の揺れに対する検討であり、周期が長く、大変位の揺れとなる長周期地震動についての検討は見当たらない。

そこで、本研究では、長周期地震動による室内被害評価のための基礎として、振動実験と数値シミュレーションを用いて、長周期地震動に対する扉や開閉を考慮した冷蔵庫の複雑な地震時挙動について検討を行う。具体的には、まず、振動実験の結果から揺れの大きさと挙動の関係について考察する。続いて、剛体の物理シミュレーションを用いて振動実験の再現を行って、実現象を再現できる計算モデルを作成する。そして、その計算モデルに基づいて、条件を変

* 株式会社構造計画研究所建築構造工学部

** 東京工業大学総合理工学研究科人間環境システム専攻
教授・工学(博士)*** 広島大学大学院工学研究科建築学専攻
准教授・博士(工学)**** 鹿島建設株式会社
(前 東京工業大学大学院 大学院生)Structure Engineering Dept., Kozo Keikaku Engineering Inc.
Prof., Dept. of Built Environment, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Hiroshima Univ., Dr. Eng.

Kajima Corporation
(Former Graduate Student, Tokyo Institute of Technology)

えた数多くのケースに対して数値実験を行い、扉や引出しの開閉や内容物の量が、冷蔵庫の地震時挙動に対してどのような影響を与えるか検討し、長周期地震動によるキッチンでの室内被害を評価する。

2. 振動実験

2.1 試験体諸元

Fig.1 に振動実験に用いた冷蔵庫の写真と諸元を示す。幅 80cm×奥行 65cm×高さ 170cm で、総質量が約 100kg である。冷蔵庫上部には両開きの扉があり、下部には 3 段の引出しがある。冷蔵庫の底面奥側は、動かしやすいようにローラーとなっており、手前側は、ローラーではない脚となっている。実験では、床材にフローリングを使用した。摩擦係数については、冷蔵庫本体下部を水平にゆっくりと引っ張り、滑り出す瞬間の力と滑り出した後の力から、それぞれ静摩擦係数と動摩擦係数を求めた。その結果、静摩擦係数は 0.30、動摩擦係数は 0.27 だった。

2.2 振動実験概要

冷蔵庫の振動実験として、以下の 3 種類を実施した。

- 本体の動きのみに着目して、扉や引出しを開かないようにして加振（以後、本体加振ケース(Doors and Drawers Fixed Shaking Case)と呼ぶ）
- 扉や引出しのみの開閉挙動に着目し、冷蔵庫本体を壁に固定して加振（以後、扉・引出し加振ケース(Body Fixed Shaking Case)と呼ぶ）
- 冷蔵庫を壁に固定せず、扉や引出しも固定しないで加振（以後、フリー加振ケース(Free Shaking Case)と呼ぶ）

Fig.2 にそれぞれの実験の条件を示す。a)本体加振ケースでは、冷蔵庫本体の加振方向の移動量を変位センサーで、加速度を冷蔵庫下部に取り付けた加速度センサーで計測した。内容物は配置していない。

b)扉・引出し加振ケースの実験は、冷蔵庫本体を壁際に固定し、片側の扉と上から 2 番目の引出しのみ開閉するようにして加振を行った。扉や引出しに入れる内容物については、i)内容物無、ii)扉に 3kg・引出しに 3kg の内容物配置、iii)扉に 7kg・引出しに 10kg の内容物配置、の 3 ケースを実施した。

c)フリー加振ケースの実験については、各扉と引出しに、それぞれ 3kg ずつ内容物を配置し、冷蔵庫上部の内部には 4 つの内容物(各 1kg)を配置した上で加振した（内容物の質量：計 19kg）。予備実験の結果、加振により冷蔵庫が回転を伴って大移動し、センサーによる計測が困難だった。そのため、計測は実施していない。なお、加振時の安全面を考慮して、バンドで冷蔵庫本体上部と壁を結び、冷蔵庫が最大でも 50cm 程度しか移動しないように拘束した。

加振は、正弦波による 1 方向加振とし、加振周期を 2~4 秒、加振加速度を 200~450cm/s² とした。

2.3 実験結果

Fig.3 に実験結果を示す。横軸は加振周期、縦軸は加振加速度で、各加振ケースに対する冷蔵庫の挙動を示してある。a)本体加振ケースについては、移動量によりシンボルを分けて表示している。図を見ると、加速度 250cm/s² から滑りが始まり、加振加速度が 300 cm/s² 以上になると、ほとんどのケースで移動量が 50cm 以上となった。400 cm/s² 以上では 1m 以上移動している。冷蔵庫は滑るのみで、転倒に至るケースは存在しなかった。

Size: W80 x D65 x H170 cm
Weight: 102.6kg
Body : 76.6kg
Doors : 4kg x 2
Drawers: 5kg x 2 + 8kg x 1
Internal Volume: 480L
Static friction coefficient: 0.30
Dynamic friction coefficient: 0.27

Fig.1 Photo and specification of refrigerator

Fig.2 Conditions of shaking table test

Fig.3 Results of shaking table test

b)扉・引出し加振ケースについては、扉・引き出しの開閉の有無を表示している。図を見ると、内容物の重さが重いほど、扉や引出しが開く加振加速度が小さくなる傾向が見られる。内容物がない場合は、どの加振ケースでも扉や引出しが開くことはなく、追加で周期1秒、500cm/s²の加振も実施したが開かなかった。一方、扉・引出しに3kgの内容物が配置されている場合は、扉も引出しも350cm/s²から開き始めた。扉に7kg・引出しに10kgの内容物を入れたケースでは、扉が350cm/s²、引出しが250cm/s²から開いた。

c)フリー加振ケースでは、扉・引出しの開閉の有無、および、本体が大きく移動してバンドにより移動量が拘束されたかどうかを示している。扉は加振加速度300cm/s²以上、引出しは350cm/s²以上で開いた。ただし、扉・引出し加振ケースとは異なり、バンドに引っ張られた衝撃がきっかけで扉や引出しが開く場合が多かった。実験では冷蔵庫が転倒することはなかったが、バンドによる拘束がない場合における転倒可能性は否定出来ない。

3. シミュレーションによる振動実験の再現

扉や引出しの開閉等が地震時における冷蔵庫の挙動に対して、どのような影響を与えるのか検討するにあたり、まず、冷蔵庫の現実の挙動(振動実験結果)を再現できる計算モデルを構築する。シミュレーションのプログラムとしては、剛体の物理運動シミュレーションが可能なSpringhead2[®]をベースとしたプログラムを用いる。衝突する剛体間の接触力を求める方法はペナルティ法である。

3.1 計算モデル

Fig.4に作成した計算モデルを示す。底面奥側のローラーと扉は、冷蔵庫本体と回転ジョイントで連結し、平行移動する引出しはスライダジョイントで連結した。内容物については、実験時の配置と同じになるように内容物の形状を模擬した直方体を配置した(Fig.2参照)。また、c)フリー加振ケースについては、シミュレーションでバンドの動きを再現するのは困難だったため、冷蔵庫の正面から50cmの距離に壁を設けることで冷蔵庫の移動を制限し、バンドの効果を疑似的に表現した。なお、壁は冷蔵庫本体のみと衝突するように設定し、扉や引出しの開閉を妨げないようにした。

Table1に、冷蔵庫各部の質量と摩擦係数を示す。冷蔵庫本体の摩擦係数は、実測値を基本とし、振動実験に合うように調整した。慣性テンソルは、質量や重心位置・立体形状から算出した。冷蔵庫本体・扉・引出しの棚板等と内容物が接する際の摩擦係数については、実測値が得られていないため、既往の摩擦係数の測定結果⁹⁾を参考に、静止摩擦係数0.33、動摩擦係数0.30を設定した。

剛体が接触した際における接触力(垂直抗力・摩擦力)の計算時に用いられるパラメータについて、バネ係数については、冷蔵庫全体の質量に対して垂直の理論固有周波数が20Hz、水平が10Hzとなるように設定した。ダンパ係数については、垂直の跳ね返り係数が0.3程度になるように設定した¹⁰⁾。

ローラーの回転ジョイントには、ジョイントの回転速度に比例した回転抵抗をかけた。実物のローラーは、冷蔵庫の重みにより若干つぶれていたため、動き始めの抵抗が大きいと推測された。その影響をシミュレーションにも反映させるため、回転速度がある閾値以上になるまでは大きな回転抵抗を設定しておき、閾値を超えたら回転抵抗を下げるような非線形なバネを設定した。扉の回転ジョイン

Fig.4 Simulation model of refrigerator

Table1 Mass and friction coefficient of simulation model

Parameters	Refrigerator				
	Body	Door	DrawerA	DrawerB	Roller
Mass(kg)	76.6	4.0	5.0	8.0	0.2
Static Friction Coefficient	0.30				
Dynamic Friction Coefficient	0.23				
Parameters	Contents				
	ii) 3kg in Doors, 3kg in Drawers		iii) 7kg in Doors, 10kg in Drawers		
	in Doors	in Drawers	in Doors	in Drawers	
	Mass(kg)	3.0	3.0	7.0	10.0
Static Friction Coefficient	0.33				
Dynamic Friction Coefficient	0.30				

Table2 Joint parameters

Joint Parameters		Roller Rotate Joint	Door Rotate Joint	Drawer Slider Joint
Control Type		Rotation Vel.	Rotation Disp.	Translation Disp.
Threshold		18rad/s	0.01rad	0.01m
Spring	Initial Value	0.1	650	3250
	Joint Value<Threshold	N・m・s/rad	N・m/rad	N/m
	Value during Reduction Joint Value>=Threshold	0.0001 N・m・s/rad	5 N・m/rad	30 N/m

Fig.5 Simulation result of refrigerator for doors and drawers shaking case (Period 2.5sec, Acceleration 350 cm/s²)

トには、回転角に比例した抵抗をかけるように設定し、引出しのスライダジョイントには移動量に比例した抵抗を設定した。扉と引出しは、開き始めの抵抗が大きく、ある程度開くと小さな抵抗で動くようになる。そのため、扉や引出しの開きが小さいときはジョイン

トに大きな抵抗が発生するようにしておき、ある閾値まで開いたら抵抗を下げるようにした。Table2 にジョイントに設定したパラメータを示す。表中の Control Type に記載してあるジョイントの値（例えば、ジョイントの回転速度）に、バネ係数(表中の Spring の値)をかけて抵抗力を計算している。バネ係数を変化させる閾値は、表中の Threshold に示してある。バネ係数や閾値の値は、振動実験に近い結果が得られるように試行錯誤により設定した。

3.2 振動実験の再現結果

Fig.5 に a) 本体加振ケースの再現結果の一例を示す。図は、加振周期 2.5 秒・加速度 350cm/s² の正弦波加振時における冷蔵庫の床に対する相対変位、相対速度を示している。実線がシミュレーションで破線が実験結果である。相対変位については、変位センサーが対象物を捉えられず、異常値を示した時間のデータを表示していないため、空白の部分がある。相対速度は、振動台と冷蔵庫に設置した加速度センサーから得られた加速度時刻歴波形から求めた。図を見ると、動き出しのタイミングや相対変位・相対速度波形の全体的なトレンドは同じ傾向となっており、振動実験を概ね再現できているものと考えられる。

Table3 に b) 扉・引出し加振ケースにおける振動実験の再現結果一覧を示す。表には、シミュレーションと振動実験における各加振ケースに対する扉の開閉の有無が示してある。表を見ると、シミュレーションにより得られた扉や引出しが開き始める加振加速度は、内容物が多い iii) のケースでは、振動実験と近い結果となっていることが分かる。内容物が少ない ii) のケースでは、シミュレーションと振動実験が整合しないケースがいくつか見られるが、この一因としては、扉や引出しと本体間のゴム磁石の密着等を今回のモデルでは表現出来ていないことが考えられる。

c) フリー加振ケースにおいては、Fig.6 に示すように本体が大きく移動して、バンドによる引っ張りが生ずる場合があった。図には、実験とシミュレーション両方の結果を示しており、シミュレーションでも実験と同様に、バンドに引っ張られた衝撃で扉や引出しが開いているのが分かる。シミュレーションによる振動実験の再現性の確認は、扉や引出しの開閉の有無とバンドによる引っ張りの有無の2点に着目して行った。振動実験の再現結果の一覧を Table4 に示す。表を見ると、前述の2点については、概ね振動実験を再現出来ているものと考えられる。

4. 扉や引出しの開閉を考慮した冷蔵庫の地震時挙動

4.1 検討方針

ここからは、作成した計算モデルを用いて、振動実験で加振不可能なケースも含めて、条件を変えた数多くのケースに対して数値実験を実施し、扉や引出しの開閉の有無や内容物の量が冷蔵庫の地震時挙動に与える影響について検討を行った。

数値実験において現実的な条件設定をするための事前検討として、約 70 棟の超高層集合住宅のキッチンの間取りを調査した。その結果、冷蔵庫の対面がシステムキッチンになっている Fig.7 のような間取りが最も多く、冷蔵庫の前後方向の最大移動可能距離は 1m 前後であった。そのため、数値実験では、冷蔵庫前方 1m の位置にシステムキッチンを想定した高さ 90cm の壁を配置した。

本検討では、冷蔵庫の地震時挙動に影響する因子として、①床応

Table3 Simulation result of body fixed case

●: Open - : Not Open

i) No Content

Shaking Case		Shaking Table Test		Simulation	
Acc. (cm/s ²)	Period (s)	Door	Drawer	Door	Drawer
500	1.0	-	-	-	-

ii) 3kg in Door and 3kg in Drawer

Shaking Case		Shaking Table Test		Simulation	
Acc. (cm/s ²)	Period (s)	Door	Drawer	Door	Drawer
300	2.0	-	-	-	-
300	2.5	-	-	-	-
300	3.0	-	-	-	-
350	2.0	●	●	-	-
350	2.5	●	●	-	-
400	2.0	●	●	-	●
450	2.0	●	●	●	●

iii) 7kg in Door and 10kg in Drawer

Shaking Case		Shaking Table Test		Simulation	
Acc. (cm/s ²)	Period (s)	Door	Drawer	Door	Drawer
200	2.0	-	-	-	-
200	2.5	-	-	-	-
200	3.0	-	-	-	-
250	2.5	-	●	-	●
250	3.0	-	●	-	●
300	2.0	-	●	●	●
300	3.0	-	●	●	●
350	2.0	●	●	●	●
350	2.5	●	●	●	●
400	2.0	●	●	●	●
450	2.0	●	●	●	●

Fig.6 Figures after restriction of moving range by band

Table4 Simulation result of free shaking case

Shaking Case		Shaking Table Test			Simulation		
Acc. (cm/s ²)	Period (s)	Restrained by Band	Door Opening	Drawer Opening	Restrained by Band	Door Opening	Drawer Opening
250	2.0	x	-	-	x	-	-
250	2.5	x	-	-	x	-	-
250	3.0	○	-	-	x	-	-
300	2.0	x	-	-	x	-	-
300	2.5	○	●	-	○	●	●
300	3.0	○	●	-	○	●	●
350	2.0	○	●	●	○	●	●
350	2.5	○	●	●	○	●	●
400	2.0	○	●	●	○	●	●
450	2.0	○	●	●	○	●	●

○: Restrained by Band x: Not Restrained

●: Doors or Drawers Open - : Not Open

Fig.7 Common kitchen plan of high-rise residential building

答波、②内容物の量・質量配分の2種類を想定した。これらの因子の組み合わせに対してシミュレーションを実施する。ここからは、①、②の因子に対して設定した数値実験の計算条件について述べる。

① 床応答波

床応答波として 1 方向（冷蔵庫の前後方向）の正弦波を用いた。超高層住宅上階における長周期地震動を想定し、正弦波の加振周期として 1～4 秒の 4 種類、加振速度として 20～300cm/s の 11 種類を想定した。最初の 2 周期分を加速時間とし、継続時間は加振周期の 8 倍とした。ただし、継続時間が 20 秒間よりも短くなる場合は 20 秒間とした。振動実験を行って計算モデルの検証がなされているのは周期 2～4 秒であるが、参考のために、周期 1～2 秒も検討対象に加えた。また、波の位相を反転したケースについても検討対象とした。以上の組み合わせを考慮すると、全加振波の数は 88 波となる。なお、冷蔵庫の扉や引出しが開く方向やキャスターが転がる方向が前後方向であること、冷蔵庫は壁や食器棚等の家具と隣り合わせに設置されていることが多く、前後方向の挙動の方が主体的であることから、冷蔵庫特有の複雑な地震時挙動が現れる前後方向のみを検討対象とした。

② 内容物の量・質量配分

数値実験で用いた内容物の配置を Fig.8 に示す。内容物を、扉・引出し・本体上部の 3 種類にわけて配置した。扉の内容物は、各扉のポケットに計 4 つ配置した。引出しの内容物としては、各引出しに一つずつ、計 3 つを配置した。本体上部の内容物は、3 段の棚にそれぞれ 6 個ずつ、計 18 個配置した。数値実験の際には、これらの内容物の配置や形状は変更せず、これらの総質量と質量配分を複数パターン想定した。

まず、内容物の全体量に対して i) 最大、ii) 中間、iii) 空の 3 ケースを想定した。冷蔵庫メーカーのカタログによると、内容物の量を最大でも定格容量の 60～70%以内とすることが推奨されていることから、定格容量の 70%を i)最大ケースとし、その半分弱の 30%を ii)中間ケースとした。冷蔵庫の簡単な実態調査から得られた単位容量あたりの内容物の質量(かさ比重)約 0.2kg/L を用いて、i)最大ケースでは内容物の全質量を $480\text{L} \times 0.2 \text{ kg/L} \times 0.7 \div 70\text{kg}$ とし、ii)中間ケースでは 30kg とした。

これを基本として、a) 内容物全体の質量、b)内容物全体に対する扉の内容物の割合、c) 扉の内容物以外の内容物の内で本体上部のものの割合、にバラツキを与えた。a)全体の質量については、基本の値および±10kg の 3 ケースを設定した。b)内容物全体に対する扉の内容物の割合および c)扉の内容物以外の内容物の内で本体上部のものの割合については、冷蔵庫の簡易な実態調査を元に、それぞれ 30%・20%の 2 ケースおよび 20%・40%・60%の 3 ケースを想定した。したがって、内容物が i) 最大および ii) 中間の場合、それぞれ 18 ケースの計算を行った。

4.2 検討結果

Fig.9 に、内容物の量が i)最大のケースにおける冷蔵庫の挙動の一例を示す。加振周期が 3 秒、加振速度が 300cm/s であり、a) 内容物全体の質量が 70kg、b)内容物全体に対する扉の内容物の割合が 20%、c) 扉の内容物以外の内容物の内で本体上部のものの割合が 40%のケースである。揺れが始まって 3 秒前後で扉や引出しが開き始め、10 秒前後で、傾きながら前面の壁に衝突した。その後は、内容物の散乱を伴いながら何度も激しく前後の壁に衝突し続けた。最終的には、本体上部の内容物の大半が下の引き出しの中に落下、あるいは、床に散乱する状態となった。このような状況下のキッチン

Fig.8 Contents layout for parameter study

Fig.9 Snapshot of simulation

Fig.10 Time history of input floor velocity, relative displacement, and velocity of refrigerator

に人がいた場合、怪我をする恐れがあり、避難することも困難であることが推察される。

Fig.10 には、Fig.9 で示したケースにおける加振の速度波形、および、冷蔵庫の床に対する相対速度と相対変位の時刻歴波形を示す。相対変位については、冷蔵庫の背面から前面に向かう方向が負の値となっている。冷蔵庫の最大移動速度は、本体の重心の床に対する相対移動速度から求めた。このケースでは、冷蔵庫が前面の壁に衝突する際に扉や引出しが開いていたため、移動量の最大値が 70cm 程度となっている。相対速度については、負の値の鋭いピークが発生している時に前面の壁との衝突が発生しており、正の値のピークが発生している時間は背面の壁と衝突している。図を見ると、前後の壁との衝突が繰り返し発生しており、最大で 250cm/s 程度で冷蔵庫が動いていることが分かる。

Fig.11 Input velocity vs refrigerator velocity and displacement

Fig.11 に、加振速度と冷蔵庫の変位や速度との関係を示す。内容物の量で3段のブロック（上から内容物の量が a) 最大・b) 中間・c) 空）に分けて表示しており、各ブロック内の上段には加振速度と冷蔵庫の最大相対変位の関係、下段には加振速度と冷蔵庫の最大相対速度の関係が示してある。また、左から加振周期 1 秒、2 秒、3 秒、4 秒の結果となっている。図中の 1 点鎖線は加振速度と冷蔵庫の移動速度が同じとなる線を示している。

まず、内容物が c) 空のケースの冷蔵庫の移動速度に着目すると、周期 2 秒以上では、図中の破線に示すような 3 折れ線の関係が見て取れる。3 折れ線の(A)の部分では、加振加速度が小さく、冷蔵庫がほとんど滑っていないので移動速度がほぼ 0 になっている。(B)の部分では冷蔵庫が滑っており、加振速度の増加に伴って移動速度も移動量も大きくなっている。加振周期 3 秒の場合、(A)と(B)の境界がある加振速度 120cm/s は加振加速度 250cm/s² 程度に対応し、設定した摩擦係数と整合した結果になっている。さらに、(C)の部分では壁と衝突して動きが制限され、冷蔵庫の移動速度の増分が小さくなる傾向が見られる。この傾向は、加振周期が長くなる程顕著にみられ、周期 3 秒以上では冷蔵庫の移動速度は加振速度と同じかそれ以下となっている。

一方、加振周期 1 秒では傾向が異なり、加振速度と冷蔵庫の移動

速度はほぼ比例の関係になっており、前述の(B)の部分のみが見られる。(A)と(B)の境界が見られない理由については、周期 1 秒では、冷蔵庫が移動を始める加振加速度に対応する加振速度が小さい（約 40cm/s）ことが挙げられる。(B)と(C)の境界が見られない理由としては、加振速度が 300cm/s のケースでも周期 1 秒だと加振変位が 50cm 弱であるため、冷蔵庫の移動速度が最大になる前に壁に衝突して制限を受けることがほとんどないことが挙げられる。この結果、周期 1 秒では、加振速度が 100cm/s より大きい場合、冷蔵庫の移動速度が加振速度の 1.5 倍前後となっている。

内容物がある a) 最大・b) 中間の場合については、(A)と(B)、および、(B)と(C)の境界が周期 2 秒～4 秒に見られ、周期 1 秒では境界が見られないという傾向は同様である。冷蔵庫の移動速度や移動量については、内容物が a) 最大のケースの周期 3～4 秒を除いては、多少のばらつきは見られるものの、c) 空の場合と平均的にはほぼ同じ値となった。内容物が a) 最大のケースの周期 3～4 秒については、移動速度や移動量の最大値は c) 空の場合とほぼ同じであるが、値が小さくなるケースが多いことが分かる。移動速度や移動量が小さくなっているケースでは、床応答の振幅が大きくなる前に、本体が傾いて前面の壁にもたれかかり、それ以降動かなくなっていた。このような挙動になるのは、内容物の量が多くなると、扉や引出しにかかる慣性力が大きくなって開きやすくなり、開いた際の重心のずれが大きくなるので倒れやすくなるためである。内容物が c) 空の場合は扉や引出しはほとんどのケースで開かず、内容物が a) 最大のケースでは加振加速度が 150cm/s² 程度、b) 中間のケースでは 200cm/s² 程度で、それぞれ扉や引出しが開き始めた。また、内容物の質量配分が異なる場合でも、挙動に大きな変化は見られず全体的な傾向は変わらなかった。

ここで、物が壁に衝突した際の衝撃力(N)は、[質量]×[衝突速度(m/s)]²/(2.0×[移動量(m)])の式により求められるが、冷蔵庫が人に衝突した際の負傷の可能性を冷蔵庫の移動速度から確認してみる。[移動量]を物が衝突した際の変形量とみなし、内容物が 70kg（総質量 172.6kg）、冷蔵庫の衝突速度を 200cm/s、冷蔵庫が人に衝突した際の胸部の変形量を 5cm と仮定すると、衝撃力は約 7000N となる。本棚がベッドに寝ている人に覆いかぶさった場合の静的な荷重は 400N～1000N で、幼児や児童が死亡する危険性があると言われて¹¹⁾。また、群衆事故により死傷者が発生した 2001 年明石市民夏まつりでは、一人につき約 2000N の力が作用していたと推定されている¹²⁾。これらの値と単純な比較は出来ないが、冷蔵庫の衝撃力は十分に大きく、冷蔵庫が人に衝突すると負傷する可能性が高いと考えられる。そのため、冷蔵庫は壁にしっかりと固定して動かないようにしておくことが重要だと考えられる。

5. 結論

本研究では、長周期地震動に対して、扉や引出しの開閉や内容物を考慮した冷蔵庫の地震時挙動について、振動実験と数値シミュレーションを用いて検討を行った。まず、冷蔵庫単体の振動実験を実施し、地震時の基本的な挙動を把握した。続いて、計算モデルを構築し、概ね振動実験の挙動をシミュレーションで再現できることを確認した。そして、その計算モデルに基づいて、条件を変えた数多くのケースに対して数値実験を行い、扉や引出しの開閉の有無や内

容物の量が冷蔵庫の地震時挙動に与える影響について検討すると共に、長周期地震動によるキッチンでの室内被害について考察を行った。

その結果、内容物がある場合は 150cm/s^2 程度で扉や引出しが開き始め、 250cm/s^2 程度で滑り出すことが分かった。また、加振周期 3 秒以上の長周期では、冷蔵庫の移動速度は最大でも加振速度と同程度となることが分かった。そして、冷蔵庫は、地震時に扉や引出しの開閉と内容物の散乱を伴いながら、前後の壁と激しく衝突を繰り返し、このような状況下のキッチンに人がいた場合、負傷する可能性が高く、避難することが困難であることが推察された。

本論文では、超高層住宅における地震時の室内被害に関して冷蔵庫単体の挙動に着目して検討を実施したが、今後は、冷蔵庫を含めた住宅全体の室内被害について検討していく予定である。

参考文献

- 1) 榎田竜太・長江拓也・梶原浩一・紀 曉東・中島正愛：大振幅応答を実現する震動台実験手法の構築と超高層建物の室内安全性，日本建築学会構造系論文集，第 74 巻，第 637 号，pp. 467-474，2009. 3.
- 2) 東京消防庁：平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震調査報告書，2012.
- 3) 東京都防災ホームページ：家具・家電転倒防止対策，
<http://www.bousai.metro.tokyo.jp/bousai/1000027/1000289.html>，
参照 2014. 10. 27.
- 4) 金子美香・林康裕：剛体の転倒率曲線の提案，日本建築学会構造系論文集，第 536 号，pp. 55-62，2000. 10.
- 5) 田村和夫・金子美香：室内家具の固定対策の検討，長周期地震動対策に関する公開研究集会，日本建築学会・構造委員会・高機能社会耐震工学ワーキンググループ，pp. 227-265，2008. 3.
- 6) 金子美香：東日本大震災の家具類の被害状況と簡易被害推定結果との比較，長周期地震動対策に関する公開研究集会，日本建築学会・構造委員会・長周期建物地震対応小委員会，2012. 3.
- 7) 桜井和敏，北沢千弘，斉藤洋，吉田靖：室内内容物（冷蔵庫，衣類乾燥機）の振動実験について，昭和 58 年消防科学研究所報 20 号，1983.
- 8) 長谷川晶一・他：Springhead2，<http://springhead.info/wiki/index.php>，
参照 2014. 10. 27.
- 9) 金子美香：地震時における家具の転倒率推定方法，日本建築学会構造系論文集，第 551 号，pp. 61-68，2002. 1.
- 10) 大町達夫，荒井靖博：個別要素法で用いる要素定数の決め方について，構造工学論文集，Vol. 32A，pp. 715-723，1986. 3.
- 11) 中泉洋香，高橋徹，斎藤大樹：巨大地震に対する超高層集合住宅の人・生活を守る技術の開発，その 4 家具の転倒による胸部損傷可能性に関する考察，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，構造 II，pp. 951-952，2011. 8.
- 12) 宮野道雄，生田英輔，長嶋文雄，田中裕，梶原浩一，奥野倫子：地震時の人体被災度計測手法の開発：胸部圧迫実験用ダミーの作製，地域安全学会論文集(10)，2008. 11.

EVALUATION OF INDOOR DAMAGE IN HIGH-RISE BUILDINGS DUE TO LONG PERIOD GROUND MOTION

– Seismic behavior of refrigerator considering opening doors and drawers –

Toshiyuki MASATSUKI^{}, Saburoh MIDORIKAWA^{**}, Hiroyuki MIURA^{***}
and Tetsuro HATSUOKA^{****}*

^{*} Structure Engineering Dept., Kozo Keikaku Engineering Inc.

^{**} Prof., Dept. of Built Environment, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

^{***} Assoc. Prof., Hiroshima Univ., Dr. Eng.

^{****} Kajima Corporation (Former Graduate Student, Tokyo Institute of Technology)

The aim of this study is to evaluate indoor damage in high-rise residential buildings due to long period ground motion. Enokida et al. (2009) indicates the risk that overturning furniture, such as a cupboard or a refrigerator, would hurt people in a kitchen, so it is important to evaluate the seismic behavior of such furniture. The seismic behavior of simple furniture, such as a cupboard, can be estimated using the previous method, but the seismic behavior of a refrigerator is complex and it is difficult to evaluate it because its doors and drawers would open during floor shaking. In this study the seismic behavior of a refrigerator was evaluated considering opening doors and drawers using shaking table tests and a simulation. First, the shaking table test of a refrigerator was conducted in order to understand the basic characteristics of the seismic behavior of a refrigerator. And the second, the calculation model of the refrigerator was built that can simulate the realistic behavior of the shaking table test. Finally, many cases of simulations were carried out to evaluate the effects of doors and drawers opening or the amount and weight balance of contents in the refrigerator. As the result of this study, the doors and drawers begins to open about 150 cm/s^2 in case that contents exist, and the refrigerator begins to move about 250 cm/s^2 . The moving velocity of the refrigerator is equal to or lower than shaking velocity because the moving velocity is limited by a collision against wall in case that shaking period is 3.0 sec or over. And the refrigerator would collide many times against walls severely with scattering its contents during floor shaking. So it is highly possible that it injures people and blocks evacuation routes.

(2014年 8 月 8 日原稿受理, 2014年10月17日採用決定)