

3.2.5 高層建物に付随する非構造部材の機能保持と避難性に関する考察

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

首都圏で長周期地震動が発生した場合、多大な被害の発生が想定される高層建物を対象にし、その耐震性能評価および被害軽減を目的として、長周期地震動が高層建物にもたらす被害を国民に明らかにするとともに、本実規模実験で検証される実践的な応答低減手法に関する研究成果を建築関連団体と連携・共有し指針を取りまとめ、安心・安全な高層建物の広い普及を目指すことは重要な課題である。

本研究では、高層建物に付随する非構造部材の機能保持と避難性に関する考察を行い、居住者への安全性の高い居住空間提供を目指す。

(b) 平成 22 年度業務目的

高層建物における非構造部材や家具類の地震時の挙動や応答特性および人間の避難に関する安全性の視点に立ち、長周期地震動の長時間の揺れによる家具等と人体との衝突等がどのように影響するかを検討するための振動台実験を実施する。また、人体ダミーを設置し、組み込まれた計測機器から得られる加速度データ等から衝撃力等を分析し、ダメージの程度について評価を行う。

(c) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
独立行政法人建築研究所	上席研究員	斉藤大樹	tsaito@kenken.go.jp

(2) 平成 22 年度の成果

(a) 業務の要約

高層建物における非構造部材や家具類の地震時の挙動や応答特性および人間の避難に関する安全性の視点に立ち、長周期地震動の長時間の揺れによる家具等と人体との衝突等がどのように影響するかを検討するための振動台実験を実施した。実験では、人体ダミーを設置し、計測機器から得られた圧力データ等から衝撃力等を分析し、ダメージの程度について評価を行った。

(b) 業務の成果

1) 室内の家具の衝突等による人命危険度の評価に関する既往の研究

物体の衝突による人命危険度の評価は、自動車衝突事故に対する安全対策の分野で研究が進んでいるが、家具との衝突等によって人体にどのような障害が発生する可能性があるのかは、まだ十分に研究がなされていない。以下、既往の研究から胸腹部圧迫による窒息死、胸部骨折、粘性障害についてまとめる。

① 胸腹部圧迫による窒息死

兵庫県南部地震における死者の多くは、就寝中に倒壊家屋の部材などで胸腹部を圧迫されたことによる窒息死であることが分かっている。また、その多くが落下物に直撃で胸郭が押しつぶされたのではなく、重量物に胸郭の動きを拘束されて短時間に窒息したと考えられている。

宮野氏ら¹⁾は、ダミー人形の胸部に載せた錘の重量を徐々に増やす実験を行い、荷重と胸部変形の関係として次のような近似式を得ている。

$$Y = 0.184L - 1.338 \quad (1)$$

ここに、Yは胸部変形量(mm)、Lは静荷重(kN)である。また、マウスを用いた実験では胸部にかかる静荷重(L)と体重(W)の比率 L/W が大きいほど死亡率が高いことから、窒息死の危険度を以下のように領域分けしている。

A (L/W=2 以下) : 死亡危険度は極めて低い

B~D (L/W=3~4) : 死亡危険度はやや高い

E (L/W=5 以上) : 死亡危険度は極めて高い

これより、(1)式の関係を図で表し、窒息死の危険度を領域分けしている(図1)。なお、図1では日本人男性の標準体重を W=63.5kg としている。この図を用いることで、ダミー人形の胸部変形量から死亡危険度を求めることができる。

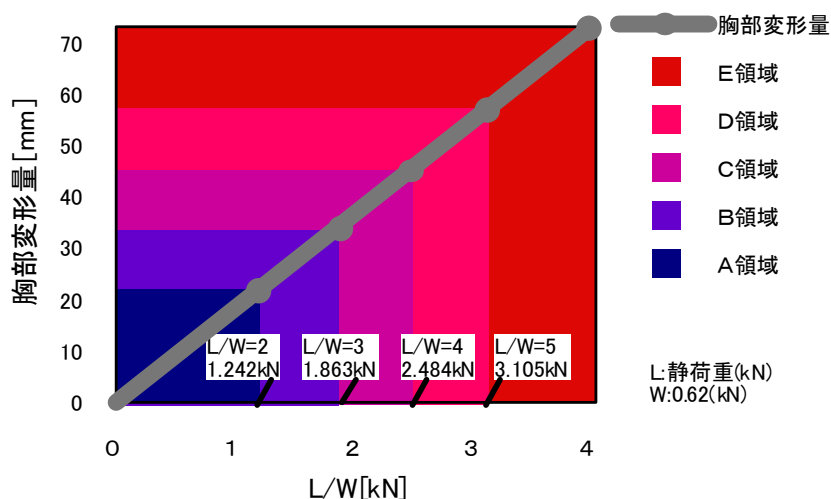


図1 窒息死危険度評価図(標準的な日本人男性の場合)¹⁾

② 胸部骨折^{1, 2)}

人体の胸部に家具が衝突する場合には、窒息以外に胸部骨折が起きる可能性がある。胸部骨折には、圧縮力に対する胸部の耐力(圧縮耐性)と衝突によって生じる胸部の応答加

速度に対する耐力（加速度耐性）の2つが関係することが分かっている。

圧縮耐性に関しては、圧縮力により胸骨や肋骨に働く曲げの力が曲げ耐力（圧縮耐性）を超えたときに骨折が発生する。Krorellらは木製インパクトを屍体胸部に前面衝突させる実験を行い、胸部障害について調査した。その中で、胸椎の最大加速度は障害の可能性を示すのに適切ではなく、胸部の厚さに対する胸部の変形量の比率である胸部圧縮率 C_{max} と胸部障害との相関が高いことを示した。さらに、自動車衝突安全性に関する指標として用いられている AIS(簡易障害度スケール)と胸部圧縮率 C_{max} の関係を、図2に示す実験データに基づいて、次式により近似した。

$$AIS = -3.78 + 19.56 \times C_{max} \quad (2)$$

ここに、胸部圧縮率 C_{max} は、

$$C_{max} (\%) = \text{ダミー胸部変形量(mm)} / \text{ダミー胸部厚(mm)} \times 100$$

により評価する。また、AISスケールは0～6の7段階の障害度を表し

0:無傷 1:軽傷 2:中等傷 3:重傷 4:重篤 5:瀕死 6:死亡

である。欧州の安全基準では、胸部圧縮率30%が採用されている。

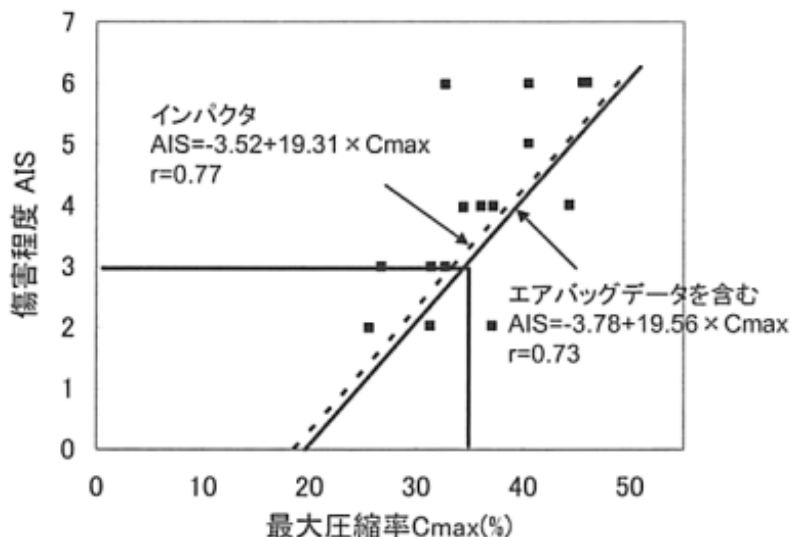


図2 最大圧縮率 C_{max} と障害度スケール AIS との関係¹⁾

加速度耐性は、衝突によって生じる胸部の応答加速度に伴う障害に関する耐性である。StappやMertzらはボランティアによる実験により障害発生の有無と加速度との関係を調査した。その結果を元に、米国自動車安全基準 FMVSS208 では前面衝突時の胸部耐性として許容加速度を60G（加速度累積時間3msec）と規定している。また、Snderによる既存研究において、痛みの限界である胸部合成加速度は60Gと定めている。さらに、同研究において生存限界加速度は175～200Gと定められている。

③ 粘性障害^{1, 2)}

Lauらの研究により、人体は剛体構造ではなく変形可能な構造のため、加速度による障害基準では障害の程度を表す尺度として不十分であることがわかってきた。衝撃速度5m/sec以下においては圧縮基準をもって評価が可能である一方、人体の非拘束時において、通常受ける5m/sec以上の衝撃速度に対してはさらに粘性特性や軟部組織傷害による影響

を考慮する必要がある。つまり、急速に荷重が作用した場合、粘性のある胸郭内臓器が十分急速に変形せず、内部圧力の上昇の後に破裂に至るような骨折を伴わない内臓障害がおこる場合がある。ちなみに、内臓臓器にゆっくり荷重が作用する場合は、入力エネルギーは変形を通して次第に吸収される。そこで、自動車衝突事故のインパクトバイオメカニクス研究では、変形速度と圧縮率の積の最大値を「粘性基準」と呼び、指標に用いている。

図 3 に示すように、変形速度 3m/sec 以下では変形速度の影響は小さく、圧縮耐性が指標となり、障害は圧迫障害となる。一方、火薬爆発のように変形速度が 30m/sec を超えると、変形速度が支配的となり、障害は爆風障害となる。粘性障害とは、その中間領域の変形速度の場合に発生する障害のことで、圧縮と変形速度の両方を考慮する必要がある。そこで、粘性障害をあらわす尺度として、最大粘性応答 VC_{max} [m/sec] を圧縮量 $C(t)$ (%) と変形速度 $V(t)$ の積の最大の値として次式により定義する。

$$VC_{max} = \max[V(t) \times C(t)] \quad (3)$$

自動車事故での粘性基準では、図 3 に示すように VC_{max} が 1.0m/s (AIS \geq 4) 以下なら安全とされている。

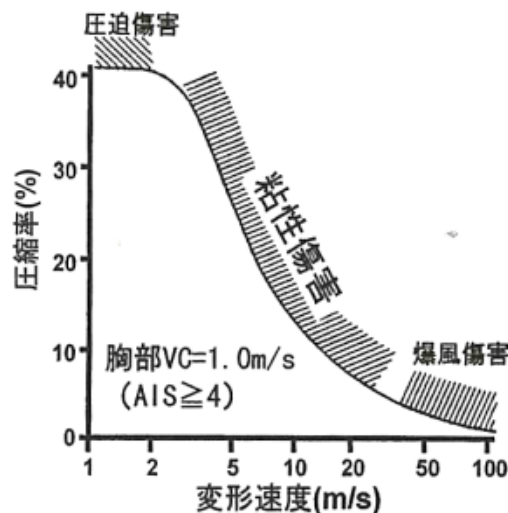


図 3 粘性基準の有効範囲¹⁾

2) 就寝時における胸部障害に関する振動台実験

長周期振動時の家具の挙動と人的危害評価とを関連付けた応答解析・シミュレーションを行うための基礎的研究として、長周期地震動が作用する動的状況下における家具転倒による人命危険性について検討した。とくに、典型的な死亡者発生形態であり回避行動が困難な「就寝時における胸部障害」に着目した振動台実験を行った。

① 実験概要

振動台実験は、独立行政法人建築研究所の実大構造物実験棟に設置されている「建研式大ストローク振動台」を用いて行われた。実験では、振動台上に家具とダミーを配置して加振し、家具が転倒してダミー人形の胸部に衝突する現象を再現した。胸部障害の主な要因として、①胸部圧迫による窒息、②胸部骨折(圧縮耐性・加速度耐性)、③粘性障害が挙げられるため、それぞれの危害評価基準となる①胸部荷重値、②胸郭変形量・胸部合成加速度、③胸郭変形量・変形速度について計測を行った。実験の様子を図 4 に示す。

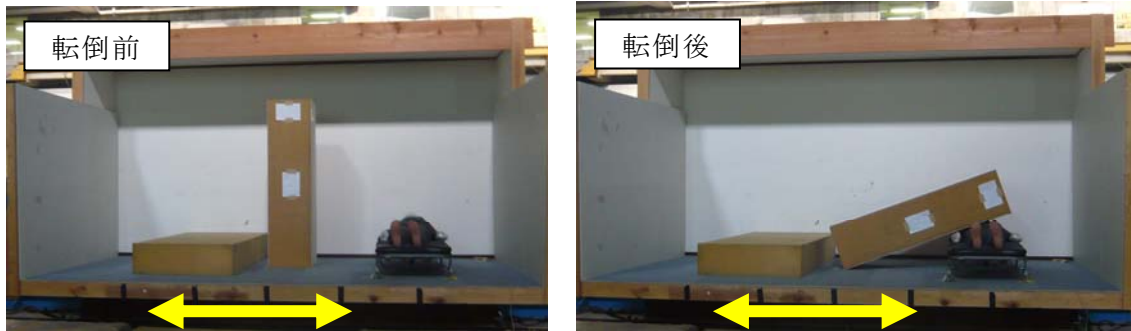


図4 実験の様子

なお、実験の実施に当たっては、千葉大学工学部建築学科・高橋研究室の協力を頂いた。

②入力波

入力波は、正弦波に加えて、長周期地震動を受ける超高層集合住宅の最上階の床応答波形を用いた。長周期地震動は、古村孝志・東京大学地震研究所准教授により作成された東海・東南海・南海地震の同時発生における東京都新宿区の工学的基盤の想定波形³⁾と南海地震における名古屋三の丸の想定波形⁴⁾である。また、超高層集合住宅は、標準的な40階建ておよび36階建ての鉄筋コンクリート造とし、地震応答解析には建築研究所により開発された解析プログラムSTERA3D⁵⁾を用いた。表1に入力波の概要を、図5に長周期地震動による超高層集合住宅の最上階床応答を示す。

表1 実験に用いた入力波の概要

加振1	周期4秒の正弦波（振幅120cm 速度190cm 加速度300cm）
加振2	周期2秒の正弦波（振幅30cm 速度100cm 加速度300cm）
加振3	東海・東南海・南海地震の際の東京新宿における40階超高層の最上階床応答
加振4	南海地震の際の名古屋三の丸における36階超高層の最上階床応答

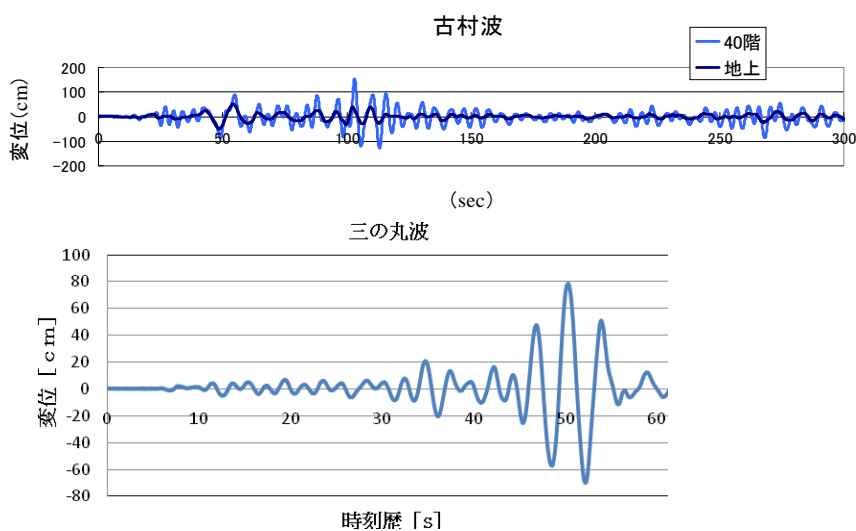


図5 実験に用いた超高層集合住宅の最上階床応答波形

③ 試験体・配置

使用した試験体の詳細を図 6 に示す。家具は、箆筒を想定した高さ 178cm、幅 57cm、奥行き 60cm の箱状の試験体（以下、タンスと表記）とした。家具に収納物を入れた場合の影響をみるため、空のタンス 0.45kN の中に本や発泡スチロールブロックを詰め込んだものをタンス 0.67kN とした。また、タンス(重心上)とタンス(重心上)は上下回転させた同じものを仕様した。さらに、それぞれのタンスの重量を等分布荷重にモデル化したものを図 7 に示す。なお、タンスの重心位置は、ポールの上からタンスを載せて左右の荷重の釣り合いのとれた位置として測定した。

ダミー人形は米国製のハイブリッドⅢと呼ばれるもので、米国の標準的な男性の寸法（身長 178cm、体重 78kg）を再現している。実験では、ダミー人形を敷布団の上に寝せた場合、ベッドに寝せた場合、さらに掛け布団を掛けた場合など、いくつかの実験パターンを想定してタンスが衝突するときの応答値を計測した。実験パターンを表 2 に示す。

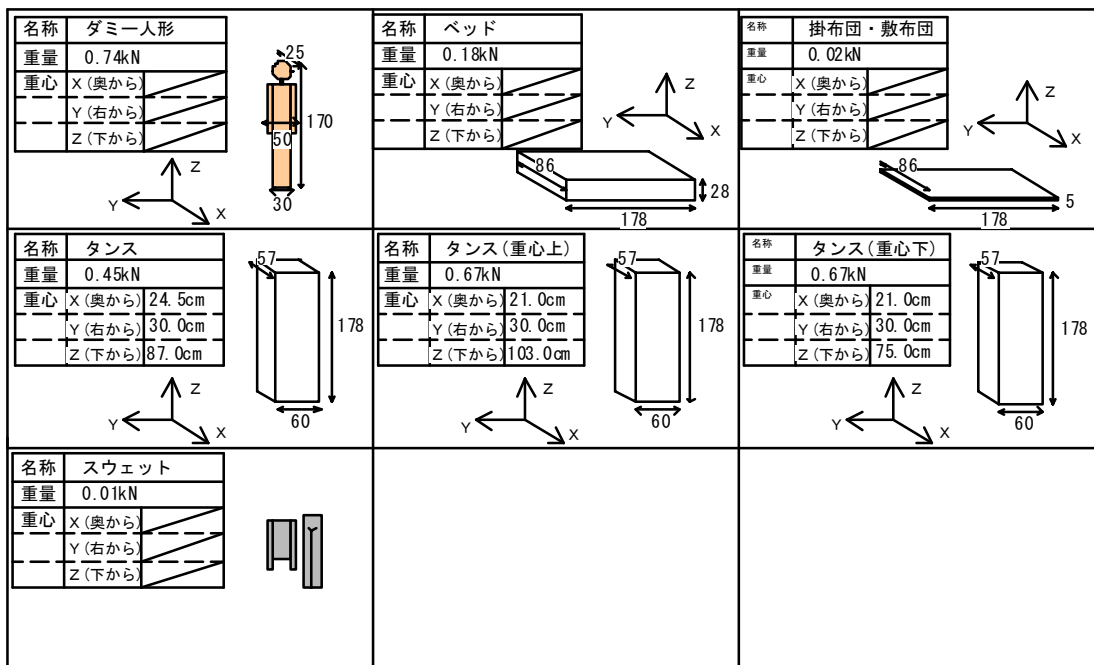


図 6 試験体の種類と形状

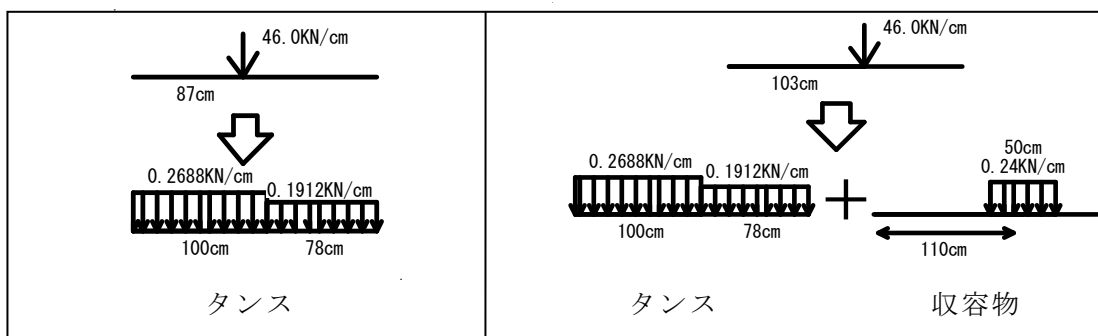


図 7 タンスと収容物の質量分布のモデル化

表 2 実験パターン

配置①	タンス(収納物無し 0.45kN)・敷き布団(h=5cm)
配置②	タンス(収納物無し 0.45kN)・ベッド(h=28cm)
配置③	タンス(収納物無し 0.45kN)・ベッド(掛け布団有り)
配置④	タンス重心上(収納物一段有り 0.67kN)・ベッド
配置⑤	タンス重心下(収納物一段有り 0.67kN)・ベッド

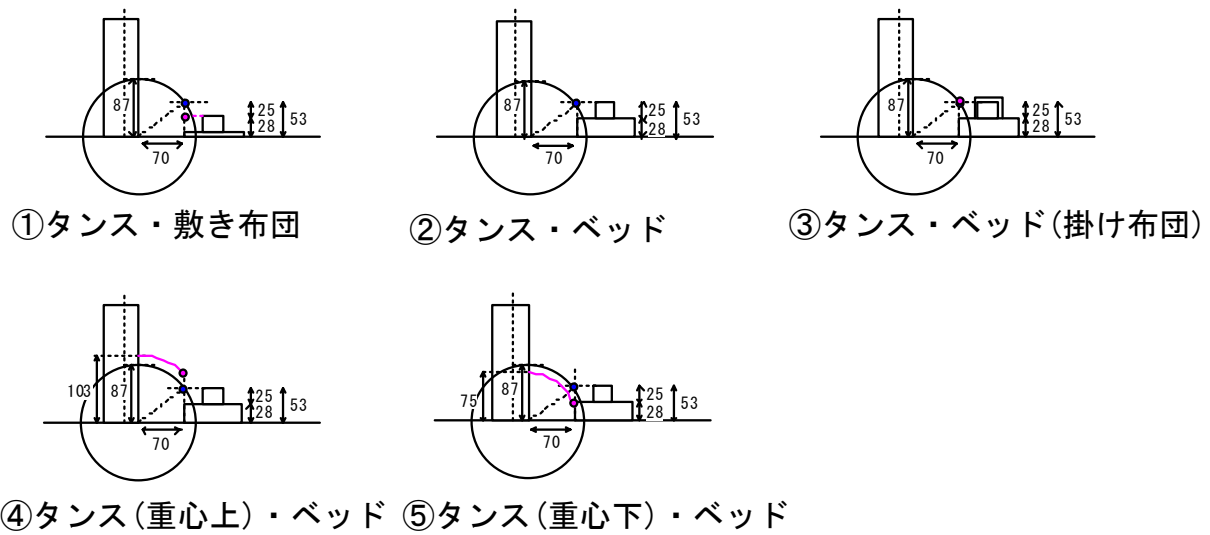


図 8 家具配置立面図[寸法：cm]

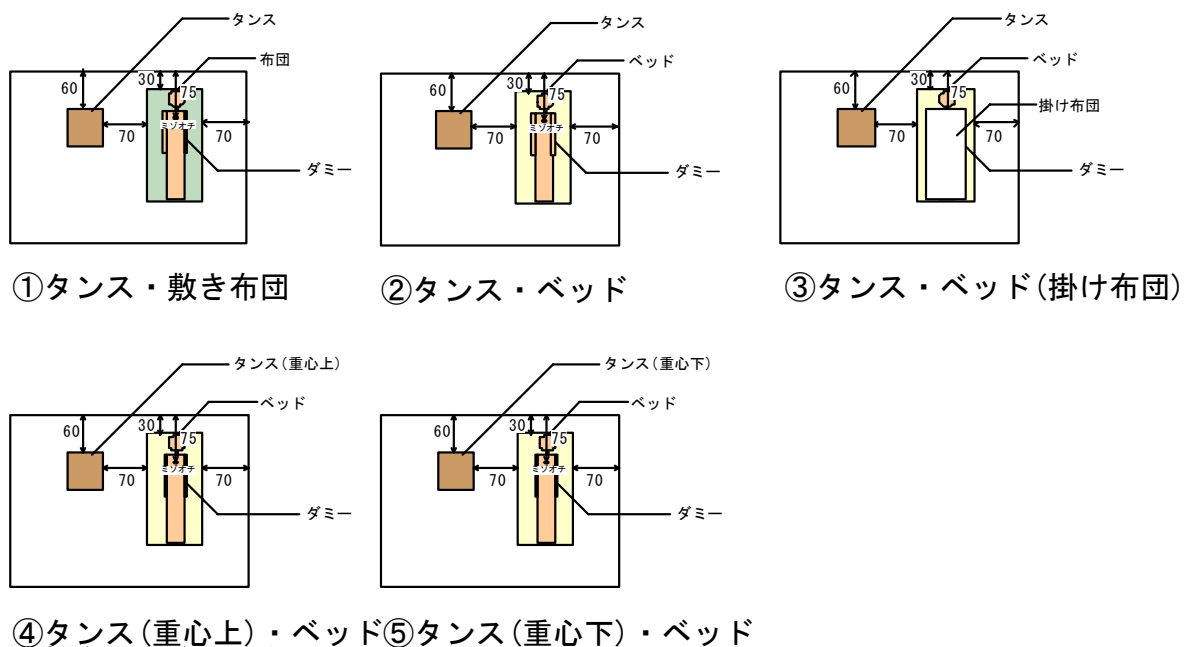


図 9 家具配置平面図[寸法：cm]

家具の配置パターンを図 8、図 9 に示す。いずれの配置においても転倒家具の端からと寝具の中心までの間隔を 113cm（家具の端から寝具の端までは 70cm）とした。基準は実験②タンス・ベッドとし、図 8 のよう、タンスの重心が青丸位置（寝具の端から 53cm の高さ）に当たるよう設定した。図 8 において、青丸が基準とした配置②における衝突点、ピンク丸がそれぞれの実験における衝突点である。さらに家具の間隔を 113cm から、75cm および 148cm に変えた場合の検討も行った。

④計測方法

胸部荷重値は「圧力分布測定システム(シートセンサー)」を用いて計測した。この機器では、フィルム状のシートセンサーに加わる圧力の分布と大きさを読み取り、表示・分析することが可能である。具体的には、シートセンサーをダミー人形と衣類の間に挟み、家具の衝突によってダミー人形の受ける荷重値（圧力分布）を、時刻歴応答で計測した。図 10 から図 12 にシートセンサーの様子を示す。

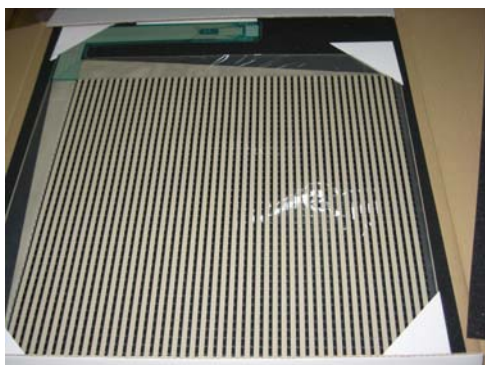


図 10 シートセンサー

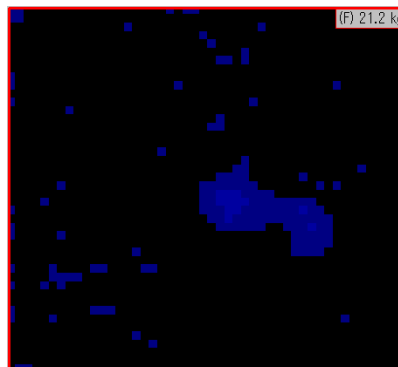


図 11 計測された圧力分布の例



図 12 シートセンサー設置状況

⑤年齢・性別の違いによる窒息死危険度

図 1 の窒息死危険度評価図から、標準的な日本人男性（体重 $W=0.62\text{kN}$ ）の場合に窒息死危険度の A 領域と B 領域との境界となる静荷重（危険度 A-B 境界荷重）は 1.242kN であった。性別と年齢が変化したときに、危険度 A-B 境界荷重がどのように変化するかを以下に考察する。

性別・年齢別の標準体重に表 3 の値を採用すると、危険度 A-B 境界荷重の変化は図 13 のように得られる。これより、致死危険度は年齢が若くなるにつれて高くなり、13 歳以上になると男性に比べ女性の方が若干高くなるのがわかる。また、タンス重量が

68kg (0.67kN) の場合には、その全重量が胸部にかかる場合には、10 才以下の子供は窒息死の可能性があることが分かる。

表 2 性別・年齢別標準体重

年齢[歳]	性別	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	成人
体重[kN]	男	0.1862	0.2107	0.2362	0.2666	0.2999	0.3352	0.3763	0.4332	0.4812	0.5321	0.5831	0.6007	0.6184	0.6203
	女	0.1823	0.2058	0.2303	0.2597	0.294	0.3342	0.3822	0.4292	0.4635	0.492	0.5057	0.5174	0.5184	0.5155

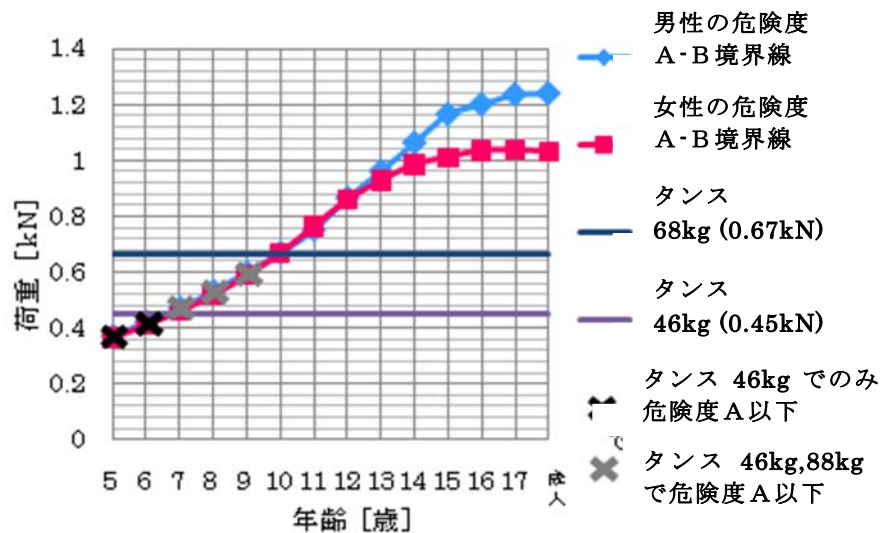


図 13 性別・年齢別危険度境界線図(5～17 歳と成人平均)

⑥実験結果の考察

シートセンサーで計測された胸部荷重値(以下、実測値と称する)の詳細な検討を行った。例として加振 2・配置②におけるシートセンサーで計測された荷重値の時刻歴応答を図 14 に示す。荷重値は「①転倒時に衝突した瞬間の荷重値(以下、瞬間荷重値と称する)」と「②衝突後、しばらく変動する荷重値(以下、変動荷重と称する)」と「③地震終了後に継続する静的な荷重値(以下、継続荷重値と称する)」に大きく分けられる。窒息死は持続的な胸部圧迫による影響である為、指標には③継続荷重値を用いた。図 14 の場合には、約 0.3kN が継続荷重値となる。各実測値は同じ状況のものを二回ずつ行い、平均値を用いた。

家具間隔を 113cm として、家具の配置や入力波を変えたときに、実測値と危険度 A-B の境界線を比較した結果を図 15 に示す。これを見ると、配置④の場合に実測値が 5 才児の窒息危険度 A-B の境界値に達することが分かる。しかし、本実験で設定した条件において窒息死危険度は概ね低いこと、加振による危険度の差は小さいことが分かる。

なお、配置②における家具間隔を変化させた場合の危険度について検討した結果を図 16 に示す。これをみると、ダミーにかかる家具荷重の計算値は、家具間隔が 150cm 以上離れたところから近付くにつれて大きくなるが、75cm 地点では家具重心が衝突接点を超えて反転するため、危険度が頭打ちになる結果となった。

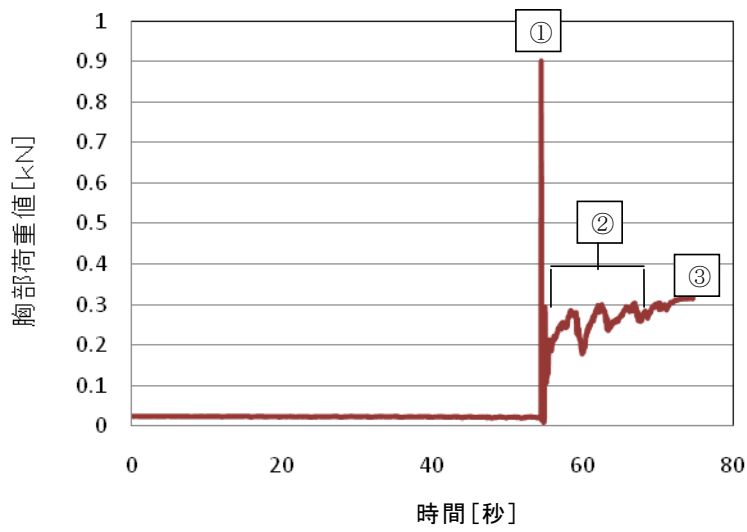


図 14 シートセンサーによる実測値の時刻歴応答(配置②・加振 2)

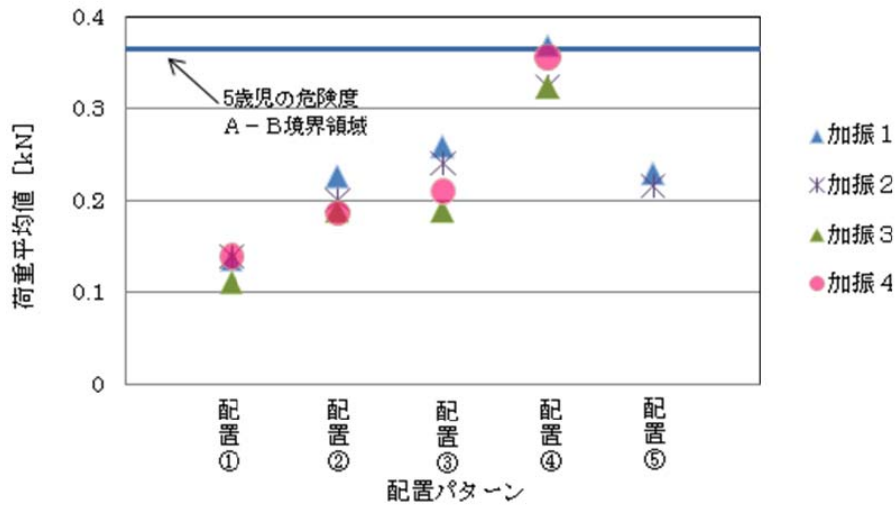


図 15 家具の配置パターンと入力波の違いによる圧縮荷重と窒息危険度

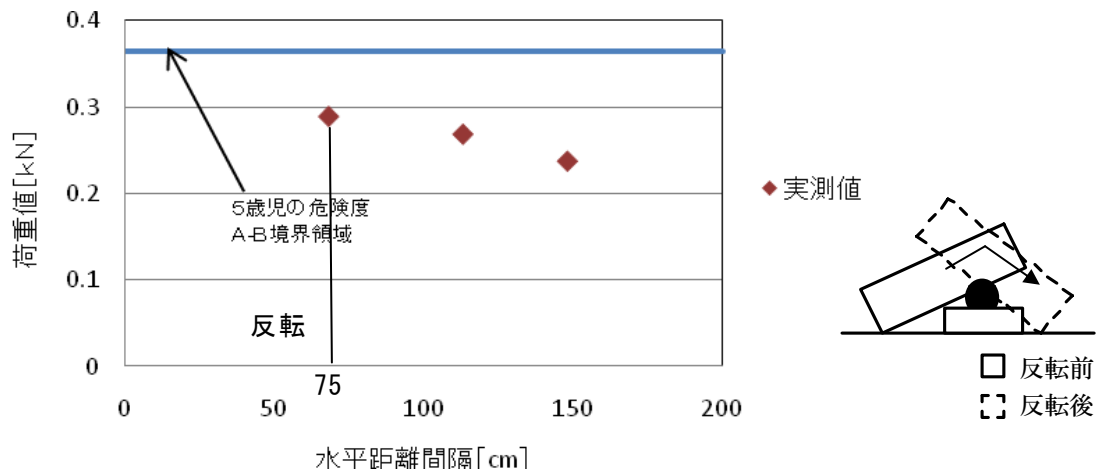


図 16 家具間隔の変化による圧縮荷重と窒息危険度 (間隔 75cm 以下で家具が反転)

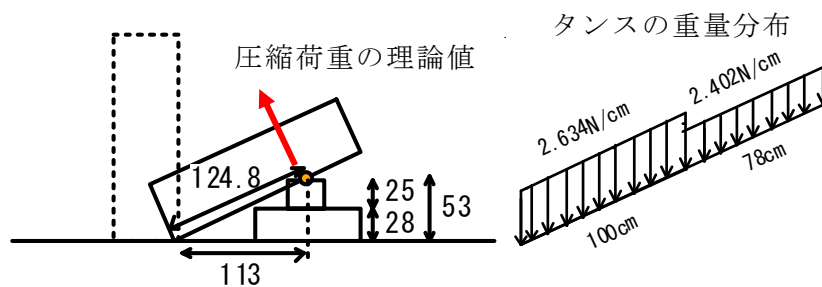


図 17 圧縮荷重の計算方法

シートセンサーがダミー人形の胸部に完全に密着していないことや、タンスの衝突部分とシートセンサーの位置がずれることがあるなどの理由で、実験による圧力の実測値が実際に胸部にかかる圧力よりも小さめに出る可能性がある。図 15 でも、配置④のタンス重量は 0.67kN であるにも関わらず、実測値は 0.4kN を下回っている。

そこで、図 17 に示すように、静的にタンスがダミー人形に載った状態を想定して、タンスの重量と傾きから圧縮荷重の理論値を計算したのが図 18 である。これより、配置④や⑤のように、タンスの重量が大きい場合には、5 歳児の危険度が B 領域に及ぶ可能性があることがわかる。実際の動的な実験の圧縮荷重は、図 15 の実測値と図 18 の静的な理論値の中間の値であると推測される。

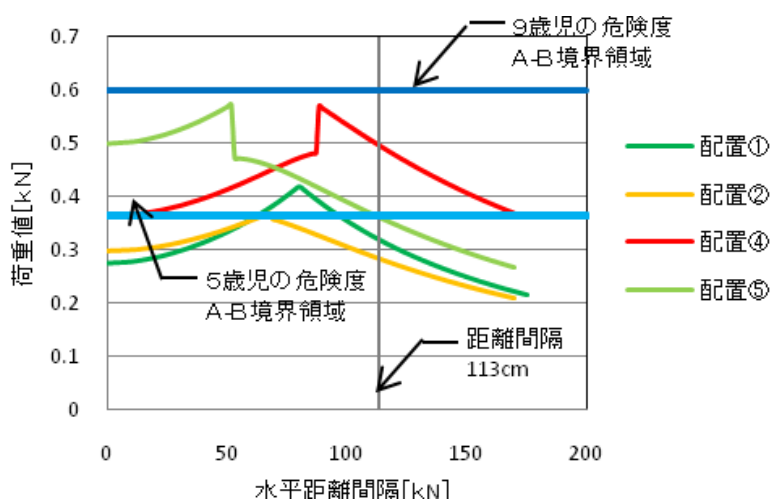


図 18 圧縮荷重（理論値）と窒息危険度

(c) 結論ならびに今後の課題

室内の家具の移動・転倒等による人的被害を検討するために、長周期地震動による超高層建築物の揺れを建築研究所の「大ストローク振動台」で再現し、床に寝かしたダミー人形に家具を衝突させる実験を行った。この実験は、就寝時に箆笥が倒れて下敷きになるような状態を想定したものである。実験では、ダミー人形の胸部にかかる衝突後の圧力分布をシートセンサーで計測し、その計測値から窒息死の危険度を評価した。その結果、5 才児では窒息死の危険度があるという結果が得られた。

今回のような検討事例は他にはないことから、実験方法や計測方法を確認することも本研究の目的であった。そのため、使用している家具が1種類のみであるなど、基本的な検討に留まっている。今後の課題として、

- ① シートセンサーによる計測では圧力値を過小評価する可能性があるため、正しい圧力値を計測するための工夫が必要であること
- ② 検討の対象が胸部圧迫による窒息死の危険度だけで、粘性障害や加速度障害のような動的な荷重効果による人体の障害については検討されていないこと
- ③ 実験で使用した家具の種類や数を増やし、実状に近い配置で実験を行うことなどが挙げられる。

(d) 引用文献

- 1) 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成－、地域安全学会論文集、No. 10, pp. 49-54, 2008年11月.
- 2) 「工学技術者と医療従事者のためのインパクトバイオメカニクス－交通事故で人ほどのようにして怪我するのか?」、自動車技術会インパクトバイオメカニクス部門委員会、2006年11月
- 3) 斉藤大樹、高橋徹、小豆畑達哉、野口和也、箕輪親宏：長周期建築物の地震時揺れを再現する建研式大ストローク振動台の開発、第12回日本地震工学シンポジウム、pp. 1478-1481, 2006年
- 4) 「長周期地震動と建築物の耐震性」、斉藤大樹（執筆分担）、日本建築学会、2007.12
- 5) 構造解析ソフトウェア STERA3D (<http://iisee.kenken.go.jp/net/saito/stera3d/index.html>)

(e) 学会等発表実績

学会等における口頭・ポスター発表

なし

学会誌・雑誌等における論文掲載

なし

マスコミ等における報道・掲載

なし

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1)特許出願

なし

2)ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成23年度業務計画案

平成23年度のEーディフェンス実規模実験から、長周期地震動の長時間の揺れによる家具等と人体との衝突等の被害の様相を以下の内容により評価し取りまとめる。

- ① 人体ダミーを設置し、組み込まれた計測機器から得られる加速度データ等から衝撃力等を分析し、ダメージの程度について分析を行う。
- ② 震動台実験の結果をもとに、室内の家具と人体の数値モデルを構築し、シミュレーション解析により人的被害を推定する方法を検証する。

