

2. 被災度評価ツールの整備

高橋 郁夫

1. 施設の被災度評価の位置づけ

企業の地震防災を進める場合には、まず地震時の被災状況を把握した上で対策をたてる必要がある。地震時の被災状況を把握するためには、施設の耐震性を把握することが重要になる。施設の耐震性把握のためには、建物の耐震診断を行うことが望ましいが、さらに施設内の設備機器類や天井・壁などの仕上げ部材の耐震性を含めた地震防災診断を行うことが有効である。

本開発では、一般的な地震防災診断や耐震診断などを補足するために、地震時の被災状況を簡易的に評価するツールを、既存技術を活用しながら整備した。特に、中小企業の生産施設などで重要な設備機器類の地震時挙動を評価し、機器類の安全性向上施策に反映できることを目的とした。

2. 被災度評価ツールの概要

ここで記すツールは、地震時における施設の被害程度を概略推定するものである。企業経営の評価や定性的な診断を行う他ツールと合わせて必要に応じて使用するものであり、図1に示すA, B-1, B-2, C, Dを用意している。以下にこれらの概要を示す。なお、各ツールにおける評価方法は後の節で示す。

A 地震時構造体被災度・修復コスト評価ツール

想定された地震時に建築物構造体がどの程度の被災度になるかを、既往の地震時被害率関数により概算する。これで得られた被災度の推定結果と建物規模より、過去の地震時の統計データに基づき修復コストを算定することが可能になる。また、B-1, B-2で建物の地震時応答を算定する場合にもこの情報を用いる。＜プログラムはEXCEL上で作成している。＞

B-1 建物の室内安全性評価ツール（建物構造被害軽微用）

Aの評価で建物構造被害が軽微あるいは無被害の場合には、建物構造はほぼ線形の範囲にあると考えられる。この場合には、建物の室内安全性評価ツールにより、建物の地震時応答と室内の什器・設備機器、天井・壁などのいわゆる非構造部材についての地震時被災程度が求められる。＜プログラムはEXCEL上で作成している。＞

B-2 建物の室内安全性評価ツール（建物構造被害中破用）

Aの評価で建物構造被害が中破の場合には、建物構造は一部損傷しており非線形化領域に入っていると考えられる。この場合には、被害軽微や無被害の場合とは建物応答挙動が異なる。本ツールではこれを反映した評価としているが、他の部分はB-1と同じである。＜プログラムはEXCEL上で作成している。＞

C 独立機器の応答評価ツール

生産施設などで、建物内に重要な機器が床にきちんと固定されずに置かれている場合に、機器の移動・転倒などの挙動を評価するツールである。個別に想定した地震動に対する評価を行うのに用いる。＜プログラムはEXCEL上で作成している。＞

D 独立機器の固定法評価ツール

生産施設における重要な設備機器は、ボルトなどで床に固定されている場合が一般的と思われる。本ツールでは、ボルトの耐力の妥当性を評価するシートとして整備している。

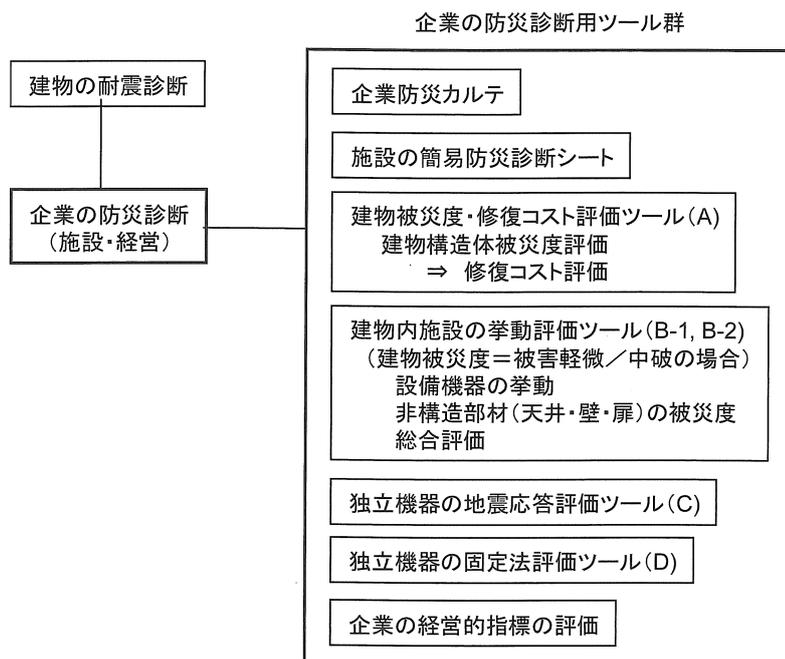


図1 防災診断用評価ツールの構成

3. 評価方法の概要

(1) 地震時構造体被災度評価 (ツール A)

地震時の建物被害については、構造躯体の被災度が最も重要である。構造躯体が地震時に大変形を受け大きな被害を生じると、地震後の安全性が問題となる可能性もあるし、仕上げ部材も多大な被害を受けることになる。

構造躯体の地震時応答は、その力学的特性に左右されるため、本来は耐震診断などによりきちんとした構造性能の把握を行って評価すべきである。ただしここでは地震時の企業活動への影響を簡易的に評価することを考え、過去の地震で受けた被害データをもとにした概略的な評価方法を採用した。

構造体の被災度の具体的評価手順は以下とする。

- 1) 地震動の最大速度振幅 (または震度) に応じた被災度別 (倒壊・大破、中破、小破、被害軽微) の被害率 (それ以上の被害となる確率) を既提案の被害率関数により評価する (年代別・構造種別・階数別)。RC 造・SRC 造の被害関数については林ほか¹⁾ (2000 年)、S 造の被害関数については林ほか²⁾ (2004 年) を用いる。
- 2) 中破となる確率を、中破以上となる被害率から倒壊・大破となる被害率を差し引くことで求める。同様に、小破となる確率を、小破以上となる被害率から中破以上となる被害率を差し引くことで求める。
- 3) 各被災度別の確率の中で最も大きな確率の被災度、または確率が 30% (仮設定) 以上となる最大の被災度をその建物の被災度とする。

(計算手順)

倒壊・大破確率 ⇒ PL

中破確率 ⇒ PM

小破確率 ⇒ PS

無被害 = 1.0 - PL - PM - PS ⇒ PN

被災度 = DL

IF PL ≥ 0.3 DL = 倒壊・大破 ⇒ END

IF $PL < 0.3$ and $PM \geq 0.3$ DL= 中破 ⇒ END

IF $PL < 0.3$ and $PM < 0.3$ and $PL \geq 0.3$ DL= 小破 ⇒ END

被災度 = MAX. (PL, PM, PS, PN)

(2) 被災建物の復旧コストの算出 (ツール A)

震災時の建物修復コストとしては、兵庫県南部地震の被害建物データをまとめたものが神田³⁾ (1999年)により提示されている。この文献では、生産施設などの細かな用途別補修費用データは示されていないものの、大きく、住宅、事務所、その他の3種類の用途区分でまとめられている。また、構造種別による区分としては、RC造・SRC造とS造の2区分が示されている。

ここでは、上記データなどを参考に、全体としての補修費用として、大破で6万円/m²、中破で5万円/m²、小破で4万円/m²とした。また、建物の新築費用に対する比率で表す場合には、大破、中破、小破のそれぞれに対し、20%、15%、10%とする。

(3) 建物内施設の地震時挙動評価手順 (ツール B-1、B-2)

構造躯体の被災度を基に、以下の手順で評価する。

- 1) 構造躯体の被災度が倒壊・大破以上の場合は、本ツールによる評価の対象外とする。
- 2) 構造躯体の被災度が小破以下の場合には、建物内施設 (非構造部材、家具・什器・設備機器類) の地震時被災度について、次の (4) で示す構造躯体の被害が軽微として求める評価方法に従い求める。この評価手法は、後で示す、「大規模大震災軽減化特別プロジェクト」の一環として開発した手法である。なお、建物の応答評価については今回は後述するように低層建物にまで拡張して用いている。
- 3) 構造躯体の被災度が中破の場合には、建物床の応答加速度・応答速度の地動に対する増幅率を構造躯体の被害が軽微とした場合の0.8倍とし、層間変形は構造躯体の被害が軽微とした場合の1.2倍として評価した。これらの値を用いて構造躯体の被害が軽微な場合と同様に次の (4) の方法に従い建物内施設の地震時被災程度を求めることができる。

(計算手順)

IF DL= 倒壊・大破 ⇒ 評価不能、⇒ END

IF DL= 中破 応答加速度=応答加速度×0.8、応答速度=応答速度×0.8、

応答層間変形=応答層間変形×1.2

(4) 非構造部材、家具・什器・設備機器類の具体的評価手法

(構造躯体被害が軽微・無被害、または中破の場合 (ツール B-1、B-2))

1) 全体の流れ

(3) で記述したように、ここでの非構造部材、家具・什器・設備機器類の評価手法は、文部科学省が平成14年度～18年度に実施した「大規模大震災軽減化特別プロジェクト」(⇒以下では「大大特」と略記する)の一環として実施された一連の研究成果、およびその結果として得られた「地震時室内安全性評価手法」⁴⁾を基にして作成した (図2参照)。

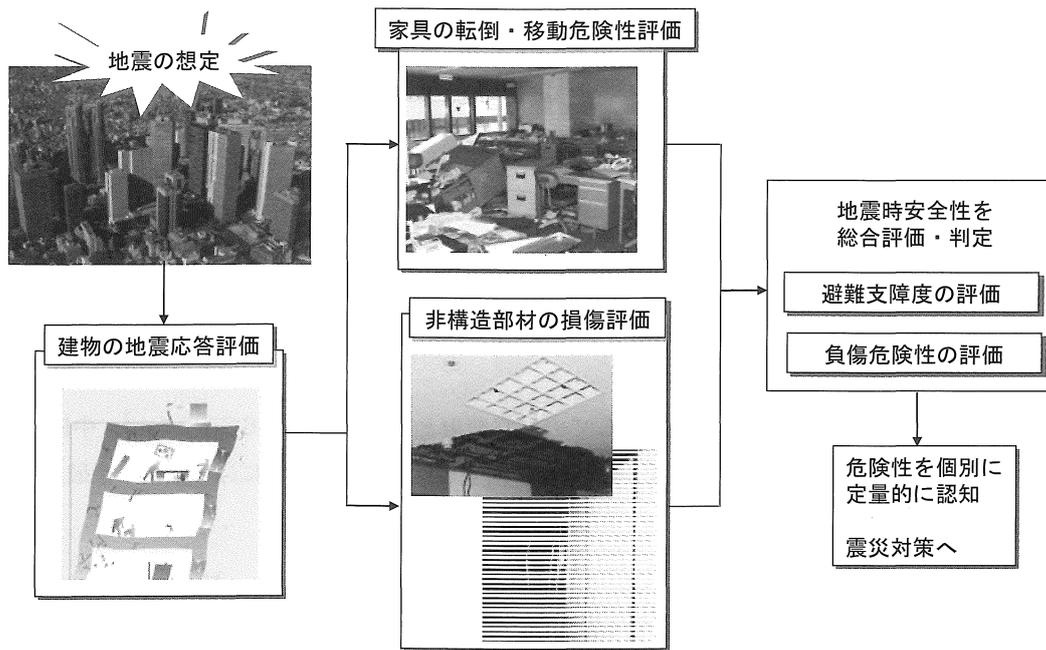


図2 室内安全評価のフロー⁴⁾

2) 建物応答の評価

本評価手法では、建物の応答値を地震動・建物の簡単なパラメータから簡易的に評価するものとしている。建物の平均的な振動モデルによる応答解析結果を基に、地震動の周期特性を地震動の最大加速度と最大速度の比(A/V)により評価し、構造種別(S造とRC造)・階数別の各階の最大加速度、最大速度、層間変位の平均的な応答予測式を作成して用いている^{4), 5)}。ただし、今回のツール開発においては、「大大特」の対象外であった4階建以下の低層建物にまで以下のように拡張して用いている。

(低層建物(4階建て以下)の応答評価について)

4階建て以下の低層建物においては、当然個々の地震動の周期特性や建物の周期特性が影響するものの、0.5秒以下の短周期成分が対象となるため、地震動の周期特性には個々の震源特性や表層地盤の増幅特性の影響が強くなり、マグニチュードや距離などによる一律の評価は困難となる。また、建物の周期特性についても、個々の建物の構造や仕上げ材など固有の特性の影響を強く受け、階数や構造種別だけで性質を区分できるほど単純ではなくなる。ここでは、4階建て以下の低層建物では、建物の応答値は地動の一定倍に増幅するという極めて単純な想定を基本とすることとした。具体的な応答値の評価は以下とした。

- ・床の応答加速度

建物最上階床で入力加速度の3倍とし、中間階は線形的に変化するとする

- ・床の応答(絶対)速度

建物最上階床で入力加速度の3倍とし、中間階は線形的に変化するとする

- ・層間変形

4階建て以下の場合の各階層間変形は、5階建ての場合の下層階層間変形と同じとする

3) 非構造部材、家具・什器・設備機器類の被災度評価

非構造部材の被災度評価は、既往の各種実験結果や地震時被災状況調査結果を基に推定する方式としている。判定基準は、外壁、内壁、ガラス・サッシについては層間変形角により、天井については床応答震度により、それぞれ損傷度を判定している。

扉については、損傷そのものではなく、地震後に扉が開閉可能かどうかを層間変形角で判断した。また、エレベータについては、地表震度によりエレベータの損傷度を判定した。

家具・什器・設備機器類の転倒・移動危険性については、既往の被害関数を基に評価式を構築し以下のパラメータを用いて算定する。

- ・家具・機器類の寸法（高さ・奥行）
- ・床材の状況（床の滑りやすさ）
- ・脚周りの状況（キャスターの有無）
- ・設置位置（壁際または部屋中央）
- ・固定状況（固定家具・機器類の割合・固定方法）

評価では、まず、各家具・機器類が固定されていないものとして転倒確率と移動期待値を算定する。次に、その値を固定家具・機器類の割合と固定方法に応じて減らすことで、固定効果を考慮した転倒確率と移動期待値を算定する。最後に、転倒危険度と移動危険度を組み合わせて、転倒・移動危険性評価結果とする。家具・機器類の転倒・移動危険性の総合評価は、転倒危険度と移動危険度の両方の値を用いて、0, 1, 2, 3の4つのランクに分けて設定している。

4) 総合安全性評価

本プログラムにおいては、負傷危険度についても算出しており、さらに、以上の家具・機器類の被害度、内壁・天井、外壁・開口部の損傷度、建物外への避難の支障度を基に、総合的な室内安全性を評価するものとなっている。

以上の評価方法については、1995年兵庫県南部地震、2004年新潟県中越地震、2005年福岡県西方沖地震などで一部の推定結果について実被害との対応が比較・検討されている⁴⁾。

上記評価手法における入出力関係を図3に示す。

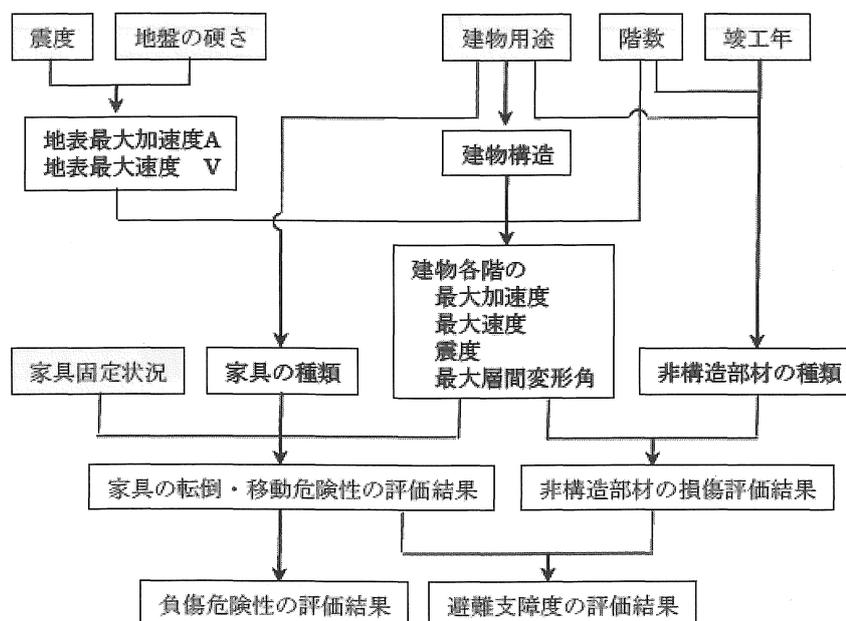


図3 室内安全評価における入出力関係⁴⁾

(5) 独立した機器類の応答評価（ツール C）および固定法評価ツール（ツール D）

独立した機器類の応答評価については、個別に床応答加速度・速度、機器形状、床と機器の間の摩擦係数などに応じて評価する。機器類の転倒確率は金子⁶⁾（2003年）に基づき、水平移動量の評価は金子ら⁷⁾（1999年）に基づき、それぞれ求める。

機器を固定する場合については、日本建築センターの「建築設備耐震設計・施工指針」⁸⁾等に従い評価するツール（評価シート）を整備した。

4. 入出力データについて

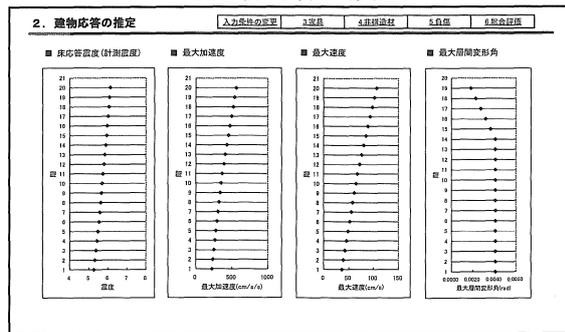
4) 入出力の種類

本開発ツールのうち B-1、B-2 は「大大特」の成果を基にしており、入出力については詳細版と簡易版の 2 種類のプログラムを用意している。詳細版プログラムは、地震の設定、家具や非構造部材の仕様を詳細に与えることができるプログラムであり、簡易版プログラムは、建築の知識や家具・非構造部材の情報がない場合でも簡易に評価できるプログラムである。ただし、簡易版については、ある程度デフォルト的な数値を用意して設定することにしており、使用上はこの条件を確認しておく必要がある。詳細版プログラムの入出力シートの例を図 4 に示す。以下で各シートについて簡単に説明する。

1. 入力シート

1.入力シート		1.建物応答	2.家具	3.非構造部材	4.負傷	5.総合評価
■ 建物情報入力						
建物名称	Aビル					
用途	住宅					
階数(地上)	20	階				
構造種別	鉄骨造(S)					
基準階高	320	cm				
地震の震さ	強かい					
■ 地震情報入力						
入力方法	加速度と速度					
震度	6弱					
マグニチュード	8.0		加速度 [cm/s ²]	速度 [cm/s]	震度	
震源距離	20.0	km	222.0	36.0	5.3	
最大加速度	222.0	cm/s ²				
最大速度	36.0	cm/s				

2. 建物応答の推定



3. 家具の転倒移動危険性評価

3. 家具の転倒・移動危険性評価		入力条件の変更	2.建物応答	3.家具	4.非構造部材	5.負傷	6.総合評価
■ 家具情報入力							
家具	A	B	C	D	定義の方法	震度	指定の方法
高さ [cm]	150	150	180	140			パネン・テレビ
奥行 [cm]	35	45	60	45			押入
キックアップ	なし	なし	なし	あり	なし	あり	
固定	固定	固定	固定	固定	固定	固定	
扉材	普通	普通	滑りやすい	滑りやすい	普通	普通	
固定方法	固定具なし	天井固定(ボルト)	壁固定(金具)	固定具なし	固定具なし	固定具なし	
■ 転倒・移動危険性の判定結果							
階	家具	A	B	C	D	パネン・テレビ	
20	3	1	0	3		2	
19	3	1	0	3		2	
18	3	1	0	3		2	
17	3	1	0	3		2	
16	3	1	0	3		2	
15	3	1	0	3		2	
14	3	1	0	2		2	
13	3	1	0	2		2	
12	3	1	0	2		1	
11	3	1	0	2		1	

4. 非構造部材の損傷評価

4. 非構造部材の損傷評価		入力条件の変更	2.建物応答	3.家具	4.非構造部材	5.負傷	6.総合評価
評価項目	外壁・内装・ガラス・サッシ・天井	壁	エレベーター				
3	大規模な被害・修理が必要	脱落・破損	エレベーター				
2	中規模な被害・修理が必要	脱落・破損	エレベーター				
1	軽微な被害・小規模な修理が必要	脱落・破損	エレベーター				
0	被害なし	脱落・破損	エレベーター				
階	外壁	内装	ガラス・サッシ	天井	壁	エレベーター	
20	0	0	0	1	0	2	
19	0	0	0	1	0	2	
18	0	0	0	1	0	2	
17	1	0	1	1	1	1	
16	1	0	1	0	1	1	
15	1	1	1	0	1	1	
14	1	1	1	0	2	2	
13	1	1	1	0	2	2	
12	1	1	1	0	2	2	
11	1	1	1	0	2	2	

5. 負傷危険性評価

5. 負傷危険性評価		入力条件の変更	2.建物応答	3.家具	4.非構造部材	5.負傷	6.総合評価
■ 入力 (概の部分)							
家具	A	B	C	D	テレビ・パソコン		
高さ [cm]	150	150	180	140			
奥行 [cm]	35	45	60	45			
キックアップ	なし	なし	なし	あり			
固定	固定	固定	滑りやすい	滑りやすい			
扉材	普通	普通	滑りやすい	滑りやすい			
固定方法	固定具なし	天井固定(ボルト)	壁固定(金具)	固定具なし	固定具なし	固定具なし	
震度	6	3	3	1		1	
震源距離	15.0	km	上記以外の家具の指定震源距離		40.0	km	
■ 負傷危険性評価							
階	家具	A	B	C	D	テレビ・パソコン	
20	2	1	0	2		2	
19	2	1	0	2		2	
18	2	1	0	2		2	
17	2	1	0	2		2	
16	2	1	0	2		2	
15	2	1	0	2		2	
14	2	1	0	2		2	
13	2	1	0	2		2	
12	2	1	0	2		2	
11	2	1	0	2		2	

6. 総合評価

6. 総合評価		入力条件の変更	2.建物応答	3.家具	4.非構造部材	5.負傷
3 被害度・損傷度・危険度・支障度が非常に高い						
2 被害度・損傷度・危険度・支障度が高い						
1 被害度・損傷度・危険度・支障度がやや高い						
0 被害度・損傷度・危険度・支障度が低い						
※被害程度の詳細については、各項目をクリック						
階	家具の被害度	内装・天井の被害度	外壁・開口部の被害度	室内での負傷危険度	建物外への立柱の支障	震
20	2	1	0	2	2	2
19	2	1	0	2	2	2
18	2	1	0	2	2	2
17	2	1	1	1	1	2
16	2	0	1	1	1	2
15	2	1	1	1	1	2
14	2	1	1	1	1	2
13	2	1	1	1	1	2
12	2	1	1	1	1	2
11	2	1	1	1	1	2

図 4 入出力シートの例

5) 建物・地盤・地震情報の入力

詳細版プログラムでは、「入力シート」に以下の項目を入力することで、各階の建物応答（最大加速度、最大速度、震度、層間変形）を算定する。

建物情報	建物階数、構造種別、基準階高
地盤情報	地盤の硬さ（硬い／普通／柔らかい）
地震情報	地震情報の入力方法（①～③）の選択
	①の場合 地表の最大加速度と最大速度
	②の場合 マグニチュードと距離
	③の場合 震度

- ① 最大加速度と最大速度を直接入力する方法。
- ② 想定地震の規模と対象地点までの距離を入力し、距離減衰式を用いて最大加速度と最大速度を算定する方法。
 1. 震度を入力する方法。各震度に対応する最大加速度と最大速度の値は、あらかじめ指定されている。

簡易版プログラムでは、「入力シート」で以下の項目のみを入力することで、各階の建物応答（最大加速度、最大速度、震度、層間変形）を算定する。

建物情報	建物階数、建物用途（事務所／住宅）、竣工年代
地盤情報	地盤の硬さ（硬い／普通／柔らかい）
地震情報	震度

3) 家具・設備機器類情報の入力

詳細版プログラムの「家具類の転倒移動危険性評価シート」では、以下の項目を入力することで、各家具類の転倒・移動危険性を判定する。

任意の家具・機器類について

- ・家具・機器類の名称
- ・高さとお行
- ・足元にキャスターが付いているかどうか（あり／なし）
- ・壁際に設置されているかどうか（壁際／部屋中央）
- ・床材の滑りやすさ（滑りやすい／普通／滑りにくい）
- ・固定方法（壁固定（金具）／壁固定（ベルト）／天井固定（ポール）／簡易な床固定／固定治具なし）

パソコン・テレビについて

- ・評価するかどうか（評価する／評価しない）
- ・固定方法（壁固定／足元固定／固定治具なし）

簡易版プログラムでは、「家具の転倒移動危険性評価シート」にて、以下の項目を入力すると、建物用途ごとに自動的にデフォルトとして指定している家具について、転倒・移動危険性を判定する。

指定された家具について

- ・固定割合（ほぼ全て固定／半数固定／一部固定／固定家具なし）
- ・固定方法（壁固定（金具）／壁固定（ベルト）／天井固定（ポール）／簡易な床固定／固定治具なし

4) 非構造部材情報の入力

詳細版プログラムの「非構造部材の損傷評価シート」では、以下の項目を入力することで、各非構造部材の損傷度を判定する。

- | | |
|--------------|----------------|
| ・外壁の種類 | （指定された選択肢から選ぶ） |
| ・内壁の種類 | （ 同 上 ） |
| ・ガラス・サッシの種類 | （ 同 上 ） |
| ・天井の種類 | （ 同 上 ） |
| ・扉の種類 | （ 同 上 ） |
| ・エレベータ取り付け年代 | （ 同 上 ） |

簡易版プログラムでは、「非構造部材の損傷評価シート」にて、建物用途、階数、竣工年代のデータのみから非構造部材の種類をデフォルトとして設定しているものを選択し、各非構造部材の損傷度を判定する。

5. 被災度評価の全体作業手順

最後に、ここで想定している施設の被災度評価手順を整理して以下に示す。

- (1) 対象建築物の情報整理（建設年代、構造種別、敷地位置、延床面積など）
- (2) 対象とする地震動強さの評価 or 設定（最大速度、最大加速度）
- (3) 評価ツール A により、地震時の構造体被災度と修復コストの概算を求める
- (4) 上での構造体被災度に応じて、被災度が小破・軽微であれば評価ツール B-1 を用いて、また被災度が中破であれば評価ツール B-2 を用いて室内安全性を評価する。これにより、室内の仕上げ材や家具什器・設備機器などに関する被害程度が得られる。
- (5) 生産設備や建築設備などで重要な機器について個別に検討する必要がある場合には、評価ツール C、D により応答挙動の評価あるいは固定方法の提案を行う。
- (6) 以上の結果をまとめて報告書を作成する。

6. まとめ

中小企業などの施設の地震時被災程度を概略推定する評価ツールを整備した。今後は本ツールを有効に活用して地震防災力向上に役立てていきたい。また、今回整備したツールの機能向上や使用性の向上も必要に応じて進めていきたい。

[参考文献]

- 1) 林康裕・宮腰淳一、田才晃、大野義照：1995年兵庫県南部地震におけるRC造建物群の耐震性能、日本建築学会構造系論文集、第528号、pp.135-142、2000年2月。
- 2) 林康裕・吹田啓一郎、井上真木：1995年兵庫県南部地震に基づく鉄骨造建物の被害率曲線、日本建築学会構造系論文集、第585号、pp.193-198、2004年11月。
- 3) 神田順：阪神・淡路大震災における建物の被災度と修復コスト、Re、No.120、(財)建築保全センター、pp.29-37、1999年7月。
- 4) 田村和夫・金子美香：高層建物の地震時室内安全性評価手法の提案、土木学会第9回地震災害マネジメントセミナー資料、pp.55-64、2008年2月。
- 5) 田村和夫・中村豊・金子美香・神原浩：高層建物内の地震時安全性評価技術の開発(その1)全体概要と建物の簡易応答評価手法、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.623-624、2005年9月。
- 6) 金子美香：地震時における家具転倒率の簡易推定法の提案、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.61-62、2003年9月。
- 6) 金子美香：地震時における家具転倒率の簡易推定法の提案、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.61-62、2003年9月。
- 7) 金子美香・林康裕・田村和夫：地震時における家具滑り量の簡易評価—新しい滑り量の推定式を用いて—、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.537-538、1999年9月。
- 8) 国土交通省国土技術政策総合研究所・(独)建築研究所監修：建築設備耐震設計・施工指針2005年版、(財)日本建築センター、2005年5月。