

長周期地震動と 高層建物の室内における対策

清水建設（株）技術研究所 田村和夫

2010年12月8日 地震災害マネジメントセミナー開催10周年記念シンポジウム

本日の内容

長周期地震動と超高層建物(検討・対応活動)

(超)高層建物の地震時室内被害

高層建物の地震時室内安全性評価手法

- ・ねらい・概要
- ・評価手法の内容
- ・簡易評価プログラムと検証、活用法

被害軽減化対策と対応について



長周期地震動と超高層建物に関する動向 - 1

・長周期地震動の存在が社会的にクローズアップ

2003年十勝沖地震が契機

2004年中越地震、2004年紀伊半島南東沖地震、

2007年能登半島地震、2007年中越沖地震、

(超高層ビルの揺れ(エレベータ停止)、実観測記録)

E-ディフェンスでの実験公開

その他マスコミによる報道

長周期地震動と超高層建物に関する動向 - 2

(学会における活動)

・土木学会・日本建築学会 巨大地震対応共同研究

連絡会 (2004年～) 共同提言発表(2006年11月)

・日本建築学会「東海地震等巨大災害への対応特別調

査委員会」 「長周期地震動と建築物の耐震性」

(2007年12月)

・日本建築学会「長周期地震動対策に関する調査」

(2007年～)

長周期地震動と超高層建物に関する動向 - 3

(国における活動)

・国交省:長周期建造物の設計用地震動・安全性検証法

(建築基準整備促進事業)

・文科省:超高層ビルの耐震評価法(振動実験、大大特)

長周期地震動予測地図(地震調査研究推進本部)

・内閣府:東海・東南海・南海地震時災害予測と対策推進

(中央防災会議)

(自治体における活動)

長周期地震動の特徴 と 建造物の揺れ

- ・長周期成分が卓越
- ・正弦波的
- ・長い継続時間
- ・遠距離大地震での増幅
- ・堆積平野で生成
- ・大マグニチュードの地震
で大振幅

長周期建造物が揺れる
建造物の**減衰の影響が大**
長時間の揺れ&**繰返し変形**
遠距離大地震での揺れ
特定周期の建造物が揺れる
地震による影響が**広範囲**

長周期地震動による超高層建物の揺れ

- ・大きな揺れ
- ・建物の減衰の影響が大
- ・長時間の揺れ&繰返し変形
- ・遠距離大地震での揺れ
- ・特定周期の構造物が揺れる
- ・地震による影響が広範囲

構造、非構造、人間への影響
減衰性の影響
エネルギー吸収能力、恐怖感
遠い地震でも被害を受ける
建物周期による被害の有無
地震被害が広範囲で多様

問題の設定

揺れ方の問題に関して

- ・長く大きい揺れに対して構造体や建物内施設、人間の感覚は？
- ・地域で固有な地震動の周期特性は？
- ・どの程度揺れが建物で増幅するのか？(振幅・減衰との関係)

建物の安全上・機能上の問題に関して

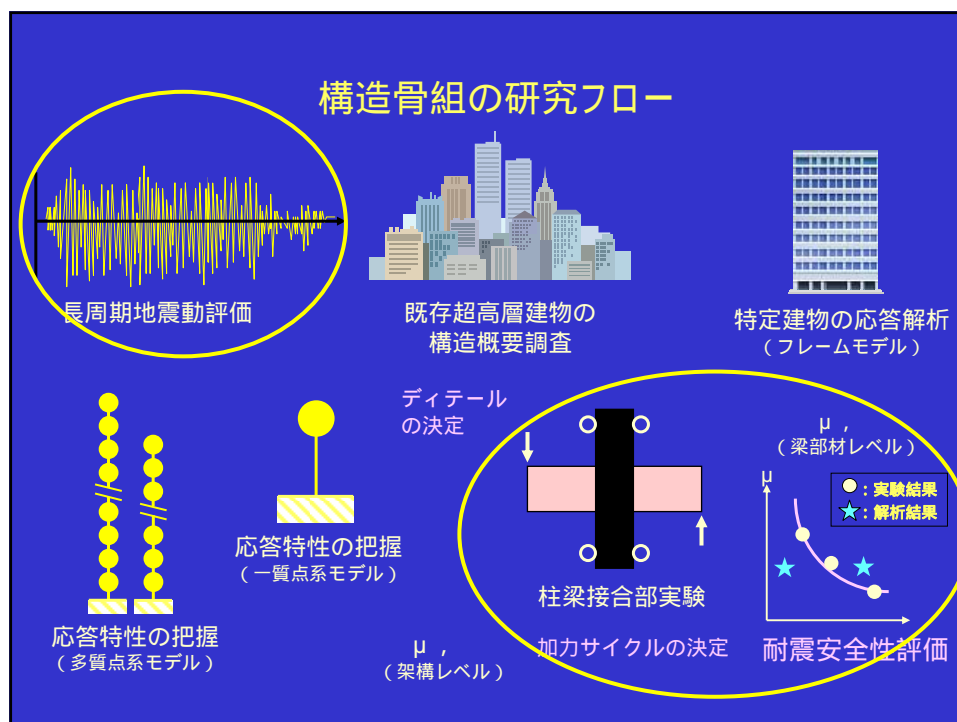
- ・構造被害がない場合の室内被害は？ 安全性は？
- ・エレベータの被害やインフラ被害による機能障害は？
- ・建物規模が大きいことによる影響度は？
避難、上下方向の搬送、復旧性、……

広域における問題、周辺との関係に関して

- ・遠距離地震で被害を受けることの問題は？
- ・建物の地域における機能の問題は？ 地域防災上の問題

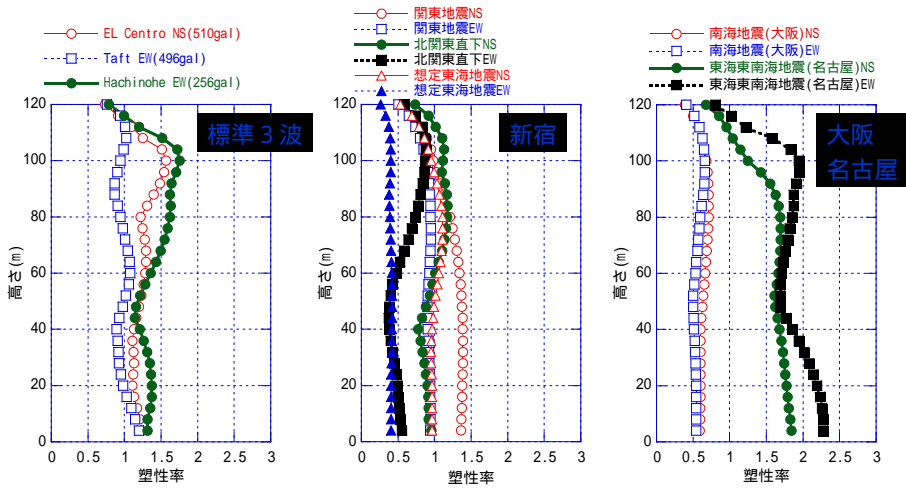
構造安全性に関する検討

- ・入力地震動の問題（地域・震源固有）
- ・構造特性の問題（構造種別・架構形式）



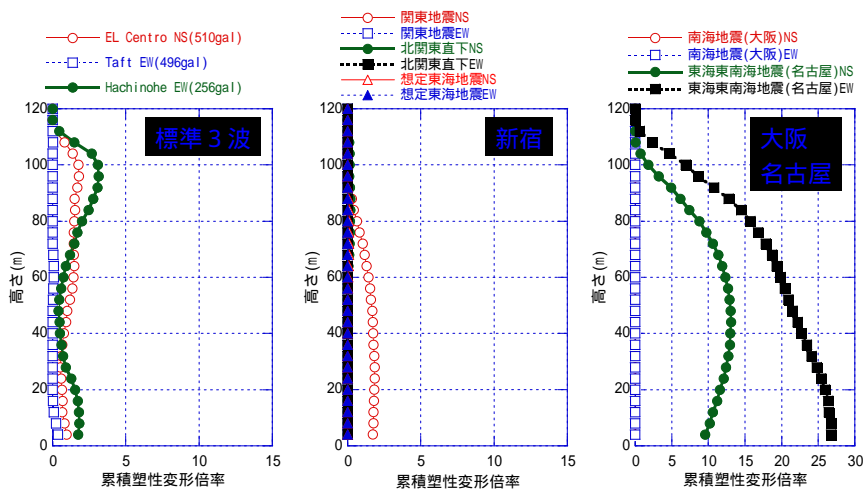
層塑性率の例(建物周期3秒(30層))

最大応答値はやや大きめになる可能性あり!



累積塑性変形倍率の例(建物周期3秒)

塑性吸収エネルギーは数倍になる可能性あり!



超高層建物の地震時室内被害

- ・安全上の問題
- ・機能上の問題

ビル内施設の地震被害

各種設備	給排水設備	機器類の移動・転倒	機能喪失
	空調設備	機器・配管の損傷	
	電気設備	インフラの被害	
	エレベータ	錘・ケーブル類被害 閉じ込め被害	
非構造部材	外壁C.W.	破損・ずれ・落下	避難障害 人的被害
	内壁	仕上げの剥落	
	扉	扉枠変形・開閉障害	
	天井	ボードの損傷・脱落	
家具類		移動・転倒・落下	

設備の耐震基準

日本建築センター「建築設備耐震設計・施工指針」2005年版

地震力に対する固定方法

設計用標準震度

	建築設備機器の耐震クラス			適用階の区分
	耐震クラスS	耐震クラスA	耐震クラスB	
上層階, 屋上及び塔屋	2.0	1.5	1.0	
中間階	1.5	1.0	0.6	
地階及び1階	1.0 (1.5)	0.6 (1.0)	0.4 (0.6)	

()内の値は地階及び1階（地表）に設置する水槽の場合に適用する。

機器の増幅率を含む

動的解析が行われない建物が対象

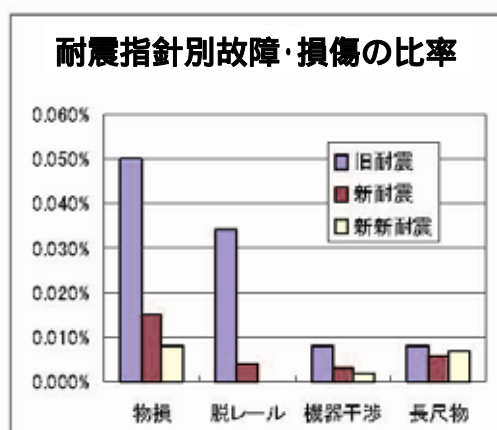
配管等の耐震措置

- ・配管の重量、支持形式により、支持部材が選定できる表が示されている。
- ・想定されている層間変形角は1/100

2005年千葉県北西部の地震による エレベーターの被害

東京足立区で
震度5強

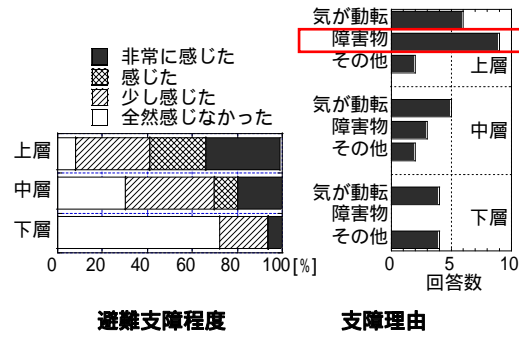
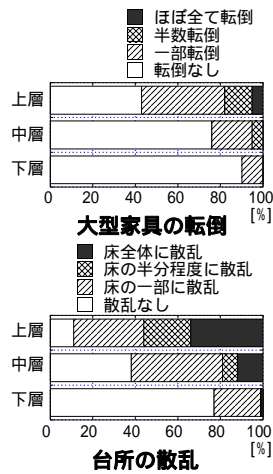
- ・停止エレベーター
64,000台
- ・閉じ込め78台
- ・復旧に丸一日



日本エレベーター協会 事故予防対応委員会
/ 技術委員会 / メンテナンス委員会:
エレベーター界、2006年1月号より

高層建物内の家具の被害の特徴

上層階での被害が多い



2005年福岡県西方沖地震
(高層集合住宅へのアンケート調査)

高層建物の地震時室内安全性評価手法

(高層建物の地震時室内安全性評価手法)

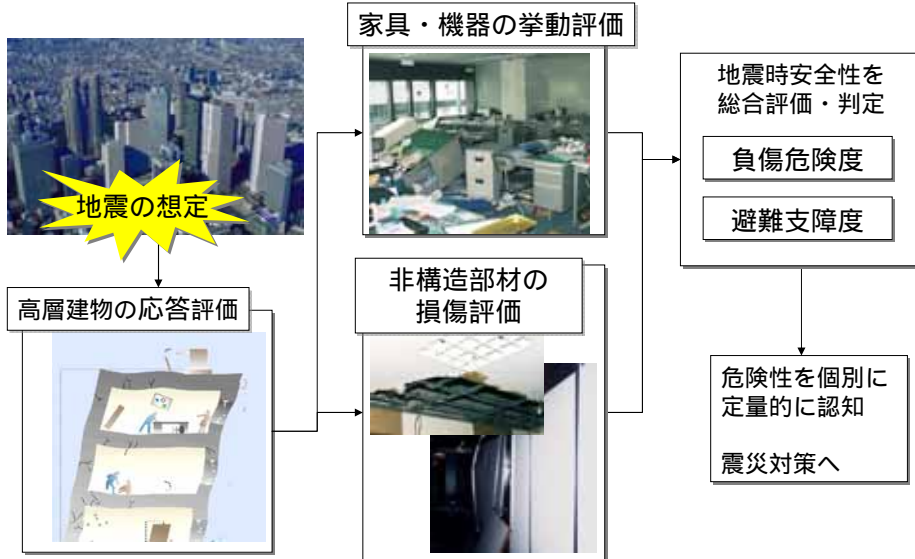
評価手法のねらい、概要

防災上のニーズ

- ◆ 建物内の地震危険性の所在とその度合いの周知
- ◆ ビルの震災計画・避難計画へ反映
- ◆ ビルが地震後に避難場所として使用可能性の判定
- ◆ 建物の固有情報(階数、設計仕様等)の反映
- ◆ 取りうる対策の提示とその効果の評価
- ◆ 専門家でなくても使える評価技術



高層ビル内の地震時安全性評価システム



評価システムの機能(1)

高層建物の簡易応答評価



- 建物用途
- 階数(5~50階)
- 地盤条件
- 想定震度(4~6強)

各階の揺れを計算

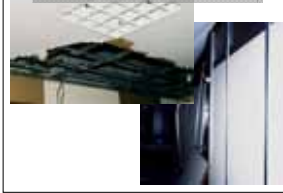
家具・機器の挙動評価



- 標準家具を指定
- 家具固定方法
- 固定割合

転倒・移動危険度をランク評価

非構造部材の損傷評価



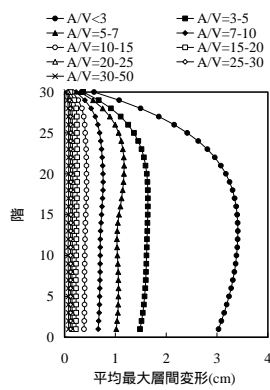
- 非構造部材の種別・構法を指定

損傷度をランク評価

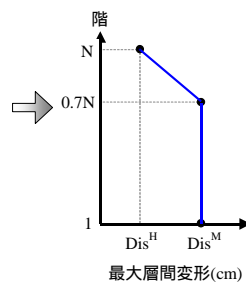
(高層建物の地震時室内安全性評価手法)

建物の簡易応答評価手法

応答評価式の推定方法(層間変形の場合)



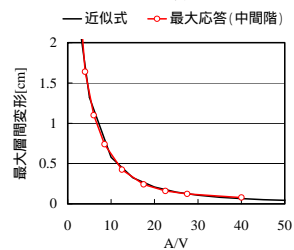
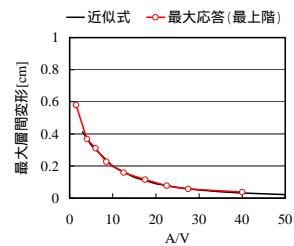
$A_{max}=100\text{Gal}$ に対する最大応答
(A/V で区分された地震動別の平均)



分布形状の
モデル化

最上階

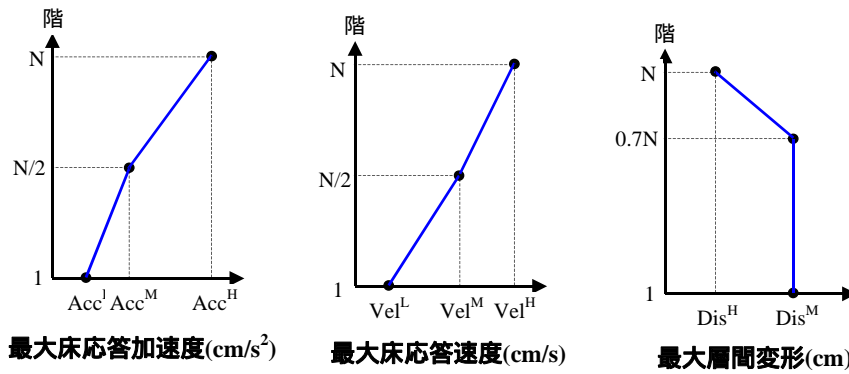
中間階



A/V による近似式の推定

$$Dis = \frac{1}{a \cdot (A/V)^2 + b \cdot (A/V) + c} \cdot A_{max}$$

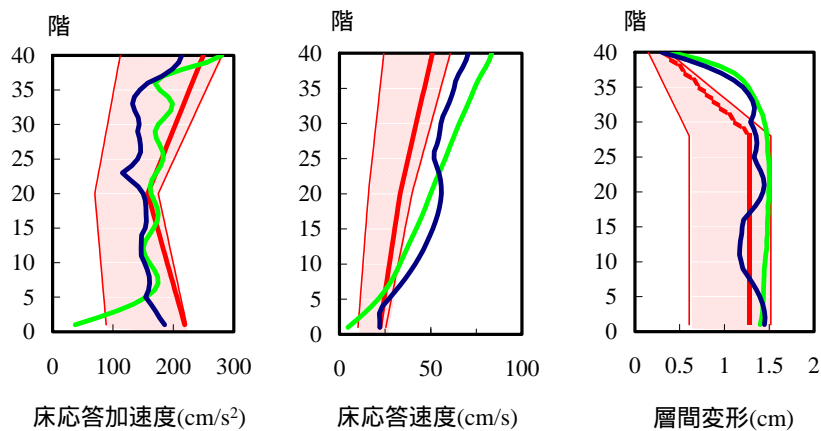
建物の簡易応答評価式の構築



- 地震の最大加速度・最大速度・建物階数から最大応答値を評価
- 構造種別(鉄筋コンクリート造、鉄骨造)を考慮
- 5階程度以上から適用可

関東地震に対する応答評価(東京都内に建つ40階S造建物)

- 簡易評価(震度5弱(V=10-25cm/s), 第2種地盤T_c=0.56)
- 簡易評価(A_{max}=222cm/s², V_{max}=22cm/s)
- SRSS(A_{max}=222cm/s², V_{max}=22cm/s)
- 時刻歴応答解析(関東地震再現波)

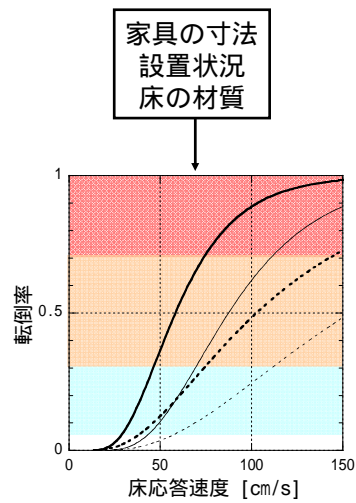
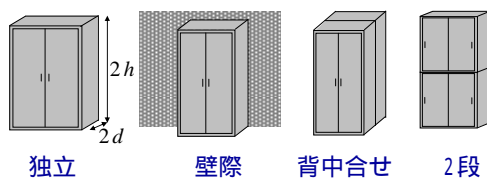


(高層建物の地震時室内安全性評価手法)

家具の転倒・移動評価手法

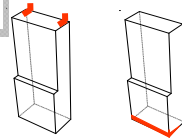
家具・機器の転倒・移動評価手法の構築

振動台実験を行い、設置状況を考慮した家具の転倒率曲線を構築



家具の固定効果の評価

29



市販の固定治具を対象、
個別の固定効果を把握

L型金具 ストッパー 対策なし



家具・機器固定方法の評価

30

	固定方法	
テレビ・ パソコン 以外	壁固定(ベルト/金具)	全ての床応答震度：0.1
	天井固定(ポール)	床応答震度6.5未満：0.1 床応答震度6.5以上：1.0
	簡易な床固定	床応答震度5.5未満：0.3 床応答震度5.5以上：1.0
	固定治具なし	全ての床応答震度：1.0
テレビ・ パソコン	壁/足元固定	全ての床応答震度：0.1
	固定治具なし	全ての床応答震度：1.0

家具・機器の転倒・移動評価

		移動危険度			
		0	1	2	3
転倒危険度	0	0	0	S	S
	1	1	1	1	1
	2	2	2	2	2
	3	3	3	3	3

(高層建物の地震時室内安全性評価手法)

非構造部材の損傷評価手法

非構造部材の損傷度評価

間仕切り壁の加力実験
(軽鉄下地ボード張り壁)

▶ 変形角と損傷の関係を把握



1/150: 開口部隅にシワ



1/100: シワ多数



1/50: 扉取付け部変形

層間変形角と損傷の関係

試験体	加力パターン	層間変形角						
		1/300	1/200	1/150	1/100	1/75	1/50	1/40
1	正負繰返	ボード 端部に微 小なシワ		ボード シワ多数 端部はらみ		目地開き ボード はらみ大		
	漸増			ボード 端部に微 小なシワ		ボード シワ多数 端部はらみ		ボード 端部破損
2	正負繰返	ボード 端部に微 小なシワ		ボード 端部はらみ		ビス抜け ボード はらみ大		ボード 端部破損
3	正負繰返	開閉困難	開閉不能 (残留変形なし)	開口部隅 にシワ	開口部隅 のシワ大	ドア枠残留変形 (変形0に戻しても 開閉困難)		

ボード端部に
微小なシワ

シワ多数
端部はらみ

ボード損傷
はらみ大
扉開閉困難

種々の非構造部材の損傷評価基準を設定

危険性	低い	やや高い	高い	非常に高い
軽量気泡 コンクリートパネル ALC (挿入筋 構法)	$R < 1/300$ 	$1/300 < R < 1/150$ 	$1/150 < R < 1/60$ 	$1/60 < R$
間仕切壁 (軸組下地 ボード)	$R < 1/150$ 	$1/150 < R < 1/60$ 	$1/60 < R$ 	
システム 天井	$I < 5.0$ 	$5.0 < I < 6.0$ 	$6.0 < I < 7.0$ 	$7.0 < I$

R: 層間変形角, I: 床応答震度

非構造部材の損傷度判定用の閾値

35

部位	種類・構法	判定の指標	分類	損傷度 1	損傷度 2	損傷度 3
外壁	カーテンウォール	層間 変形角	A	1/150	1/60	1
	ALCパネル(挿入筋構法)		B	1/300	1/150	1/60
	ALCパネル(その他の構法)		A	1/150	1/60	1
	左官仕上げ		C	1/400	1/200	1/100
	石張り(湿式)		C	1/400	1/200	1/100
	石張り(乾式)		B	1/300	1/150	1/60
	タイル(RC下地モルタル張り)		C	1/400	1/200	1/100
	タイル(PCパネル先付け)		A	1/150	1/60	1
	タイル(型枠先付け)		B	1/300	1/150	1/60
内壁	軸組み下地ボード	層間 変形角	A	1/150	1/60	1
	可動間仕切壁		A	1/150	1/60	1
	直張りボード		B	1/300	1/150	1/60
	コンクリートブロック		C	1/400	1/200	1/100
ガラス サッシ	弾性シーリング	層間 変形角	A	1/150	1/60	1
	弾性シーリング(劣化あり)		B	1/300	1/150	1/60
	硬化性パテ		C	1/400	1/200	1/100
天井	システム天井	床応答 震度		5.0	6.0	7.0
	在来天井			5.5	6.0	7.0
	直天井			6.0	7.0	7.5
鋼製扉	一般扉	層間 変形角		1/500	1/250	1/100
	耐震扉			1/166	1/83	1/33
エレベータ	1981年～	地表 震度		4.5	5.5	6.5
	～1980年			4.0	5.0	6.0

36

(高層建物の地震時室内安全性評価手法)

負傷危険性評価手法

負傷率・重傷率の算定法

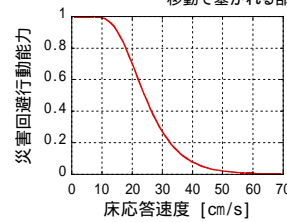
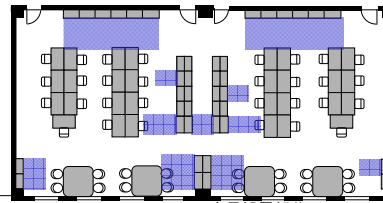
翠川・佐伯(1995)より

$$\text{室内閉塞率; } B = \frac{\text{転倒・移動による占有面積}}{\text{部屋面積} - \text{家具設置面積}}$$

災害回避
行動能力; H

$$\text{負傷率; } D = B \times (1 - H)$$

$$\text{重傷率; } S = \dots \cdot D$$



(高層建物の地震時室内安全性評価手法)

プログラムソフト

評価プログラムソフト

1. 入力シート

建物情報入力

建物名称	Aビル
所在地	東京都港区
用途	ビル
階数(地上)	15
竣工年代	1981 - 2000年
地震の被害	度かい

建物・地震情報の入力

地震情報入力

震度は 3強

2. 建物応答の検定

床応答変位(計測層数) 最大応答加速度 最大応答速度 最大層間変位角

高層建物の応答評価

- ・評価システム(Excel)
- ・プログラムマニュアル
- ・震災対策マニュアル

3. 家具の転倒・移動危険性評価

家具の転倒・移動危険性の入力

家具名	高さ	重量	固定	転倒	移動
机	75	10	0	1	1
椅子	45	5	0	1	1
棚	150	20	0	1	1
冷蔵庫	170	100	0	1	1
洗濯機	85	10	0	1	1
電子レンジ	165	10	0	1	1
テレビ	110	10	0	1	1
冷蔵庫	170	100	0	1	1
洗濯機	85	10	0	1	1
電子レンジ	165	10	0	1	1
テレビ	110	10	0	1	1

家具・機器の挙動評価

非構造部材の損傷評価

階	名称	内容	評価	評価	評価	エレベーター
15	天井	天井の浮き	0	0	0	0
14	天井	天井の浮き	0	0	0	0
13	天井	天井の浮き	0	0	0	0
12	天井	天井の浮き	0	0	0	0
11	天井	天井の浮き	0	0	0	0
10	天井	天井の浮き	0	0	0	0
9	天井	天井の浮き	0	0	0	0
8	天井	天井の浮き	0	0	0	0
7	天井	天井の浮き	0	0	0	0
6	天井	天井の浮き	0	0	0	0

評価プログラムソフト

— 標準版と簡易版 —

		標準版	簡易版
対象		自治体・企業の施設・防災担当者 (知識・情報あり)	自治体・企業の施設・防災担当者 (知識・情報なし) 一般人
入力	地震	マグニチュードと距離 最大加速度と速度	震度
	建物	構造・階数	構造・階数
	家具	寸法・設置状況・床材 固定対策	用途別にデフォルト家具を与える 固定対策
	非構造材	部材の種類・工法	建物用途・年代別にデフォルト部材 を与える
出力	家具	指定した家具の転倒・移動危険性	デフォルト家具の転倒・移動危険性
	非構造材	指定した部材の損傷程度	デフォルト部材の損傷程度
	人的被害	-	平均的な負傷率・重傷率

ビル内施設の被害予測事例 (S造30階建事務所)

41

各種設備: 一般的設備機器類は損傷しない

(最大加速度: 300 ~ 500Gal程度 < 設計基準値)

スプリンクラー、水槽、吊り照明器具、背の高いラック内機器、配管引込部、エレベータ内閉じ込め、等の被害には要注意

非構造部材: 被害軽微

- ・外壁: 被害軽微(金属カーテンウォール)
- ・内部軽量間仕切壁: 被害軽微、一部ドア開閉困難

家具類: 中程度の被害

- ・非固定の背の高い書棚・ラックが一部転倒、備品類が散乱
- ・キャスターつき備品は1m以上移動

(内外壁との衝突・損傷の可能性あり)

家具の転倒・移動予測事例 (RC造40階建集合住宅)

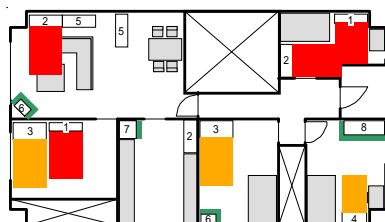
42

推定された超高層建物の応答値に対して
家具の転倒・移動を予測

高層階の家具移動量が大きい

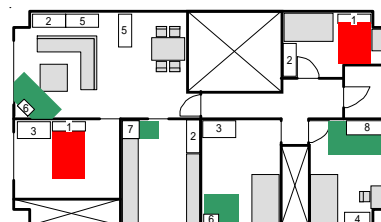
低層階でも転倒被害が大きい

- 転倒領域(転倒可能性かなり高い)
- 転倒領域(転倒可能性高い)
- 滑り移動領域



1階


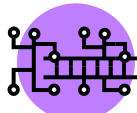


$A_{max}=375\text{cm/s}^2$
 $V_{max}=56\text{cm/s}$



40階

$A_{max}=243\text{cm/s}^2$
 $V_{max}=112\text{cm/s}$

地震時室内安全性評価ソフトウェアの利用提案

	地震発生前(日常)	地震発生後
企業 テナント 居住者	個々の建物、階、居室の 地震時安全性の評価、 防災対策の 検討・実施 	被害評価、 復旧支援計画への 反映 
自治体 行政	特定地域内の建物群 の被害想定、 防災指導、 震災対策への 反映 	被害評価、 復旧・救護活動への 反映 

課題

建物内地震時安全性の精度向上

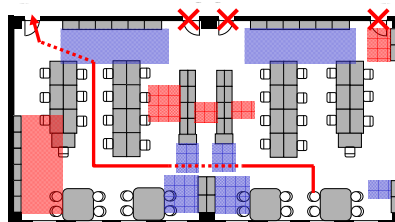
室内の負傷率・重傷率のデータ不足

避難支障度の評価

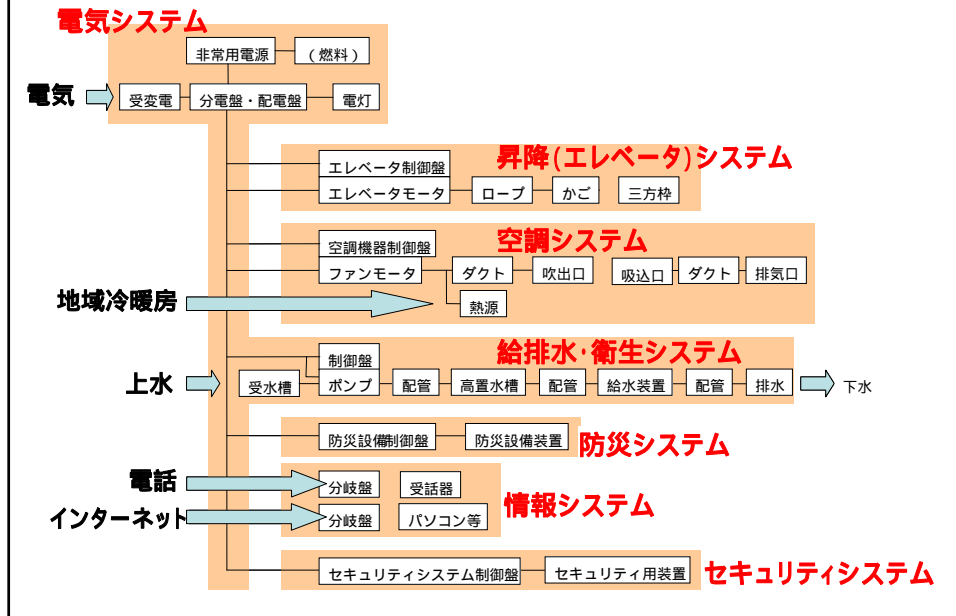
避難シミュレーション

プログラムとの連携必要

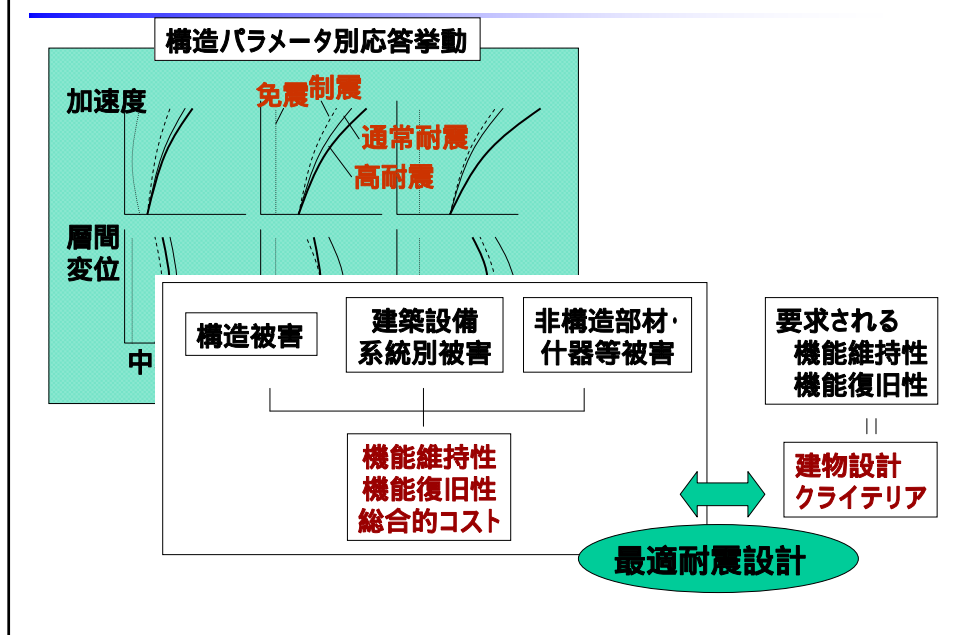
機能障害、復旧性との対応の検討



設備の全体システム(イメージ)



機能維持性を考慮した耐震設計フロー



被害軽減化対策と対応について

超高層ビル内施設の耐震対策 (1)ハード的対策 48

(1) 構造

耐震補強、構造ヘルスマモニタリングの活用(地震後の健全性確認)

(2) エレベータ

高耐震性エレベータの実用化、応急運転システム整備、
既存エレベータの耐震診断・耐震改修

(3) 各種設備

スプリンクラーの高耐震化改修、水槽のスロッシング対策、
機器・固定部の耐震性能向上(含:重要設備の多重化・分散化)
ライフライン途絶への対応(受水槽・高架水槽の水の有効利用法整備)

(4) 非構造部材

カーテンウォール(外壁)の軽量化・高耐震化、
その他の非構造部材への耐震工法の採用(優先的な補強対策実施)

(5) 家具・備品類

家具・備品の転倒防止対策

(家具固定面、家具自体、転倒防止器具の強度を確認)

超高層ビル内施設の耐震対策 (2)ソフト的対策

49

(1) 避難に関わる事前対策

-) 避難誘導システム・マニュアルの整備、避難誘導訓練の実施
-) 従業員の安否確認・保護、情報の確保、食料の備蓄等の対策
-) 帰宅困難者対策
-) 地域との連携に関する事前の協議

(2) 不安心理軽減に関わる事前対策

-) 事前の揺れの周知
-) 被害情報の放送

(3) 地震後火災に関わる事前対策

-) 地震災害に対応した防災体制の整備
(避難・消防設備のロバスト化、自衛消防組織設置、など)
-) 一斉避難への対応
(階段幅見直し、在館者への情報システム、エレベーターの利用、など)
-) 防火シャッターなどの機能確認

今後の課題

50

(1) 入力地震動、構造安全性評価法の整備

(2) 具体的設計検討、耐震診断の推進

(3) 耐震対策の実施

(4) 地震後の早期復旧のためのシステムの整備

(5) 設備全体システムとしての評価と合理的安全性・機能性向上法検討 (建物用途別)

