

2023年12月14日

令和5年度 国総研講演会

パネルディスカッションⅢ：地域防災力の強化

RC造建築物の 耐震レジリエンス性能の向上に 向けた取り組み

建築研究部長
長谷川 洋



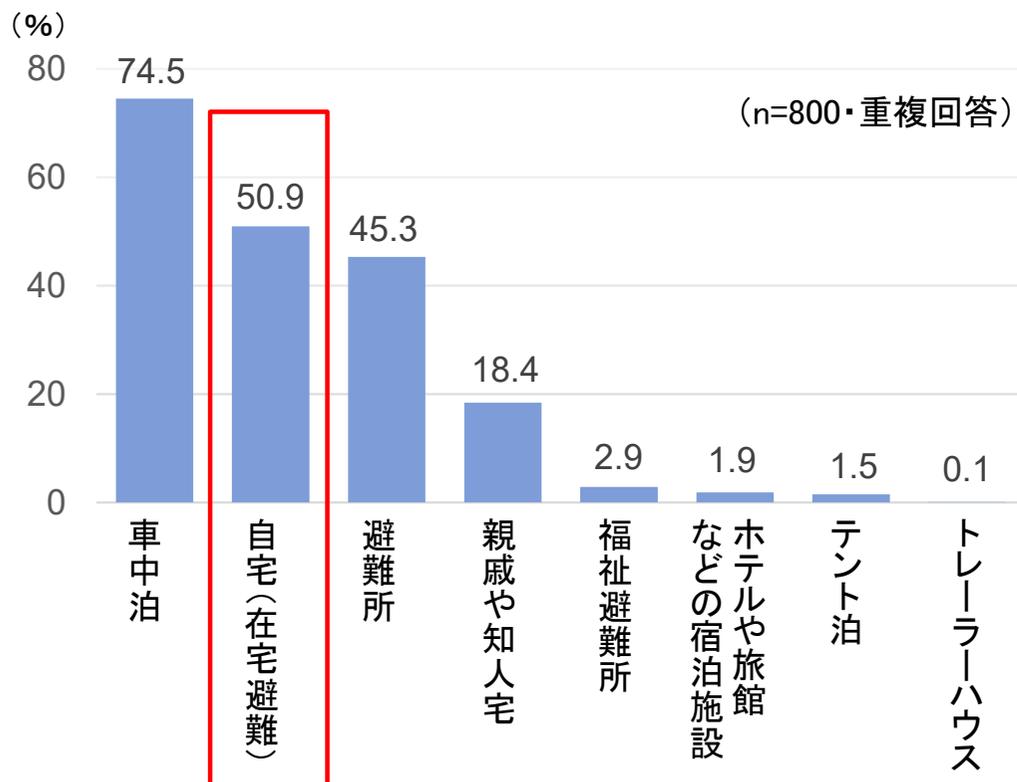
国土交通省

国土技術政策総合研究所

NILIM National Institute for Land and Infrastructure Management



- **首都直下型地震の被害想定(最大):**
建物の全壊・火災焼失棟数:約61万棟、**避難者数:約720万人**
- 近年、大地震時における「**在宅避難**」への**需要の高まり**。



避難先として経験した場所(熊本地震)

出典:平成28年度避難所における被災者支援に関する事例等報告書(平成29年4月・内閣府)をもとに作成

首都直下地震の被害想定

(単位:約 万人)

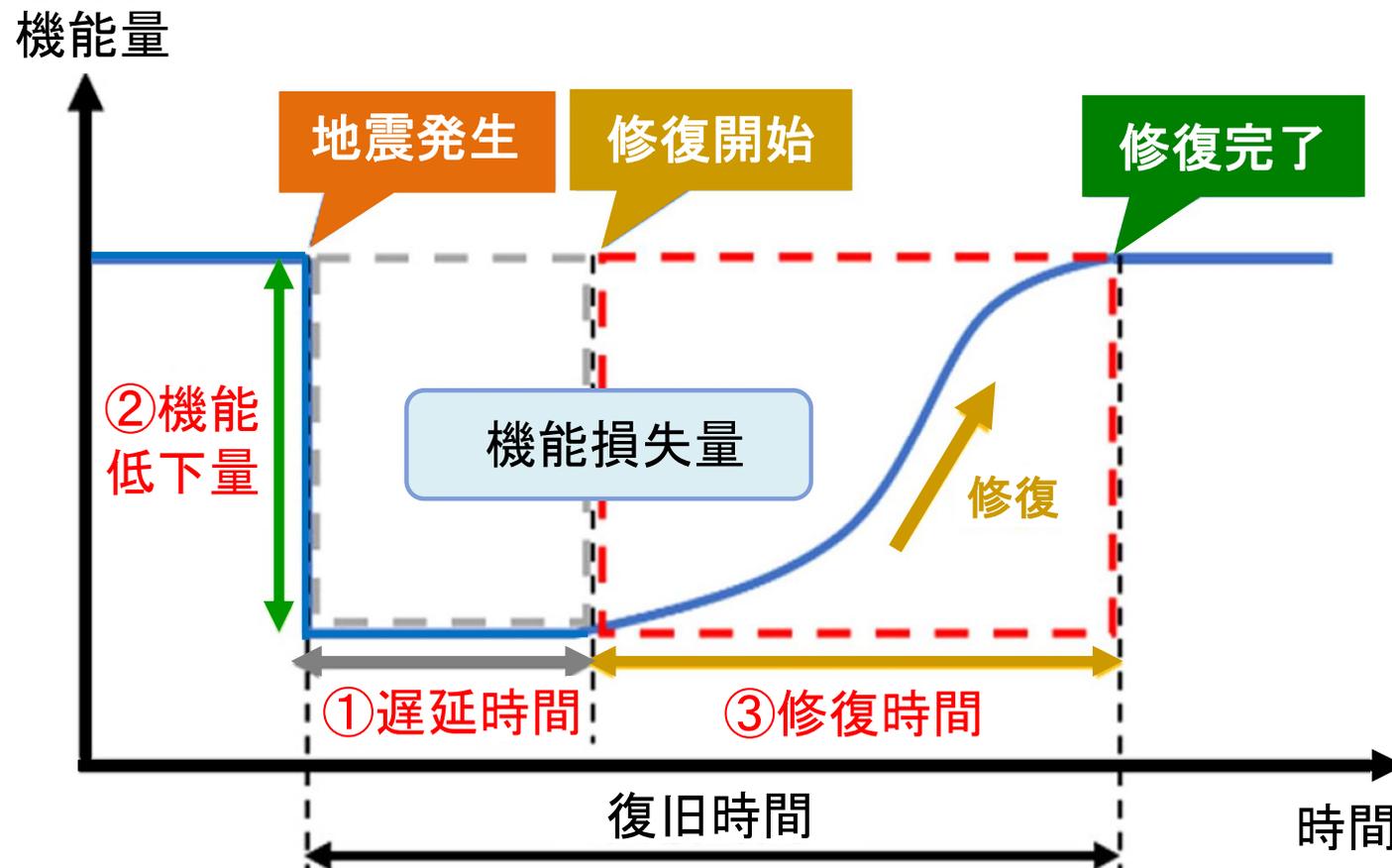
		最大※避難者数		
		合計	避難所	避難所外
1日後	合計	300	180	120
	都区部	150	91	60
2週間後	合計	720	290	430
	都区部	330	130	200
1ヶ月後	合計	400	120	280
	都区部	180	54	130

※ 最大は、「冬夕・風速 8m / s」の場合

出典:首都直下地震の被害想定と対策について(最終報告)～別添資料1 人的・物的被害(定量的な被害)～、(平成25年12月、中央防災会議首都直下地震対策検討ワーキンググループ)をもとに作成



1. 健全性・使用継続性の迅速な判断：①「遅延時間」の短縮
2. 継続使用が可能な耐震性能の確保：
②「機能低下量」の縮小、③「修復時間」の短縮



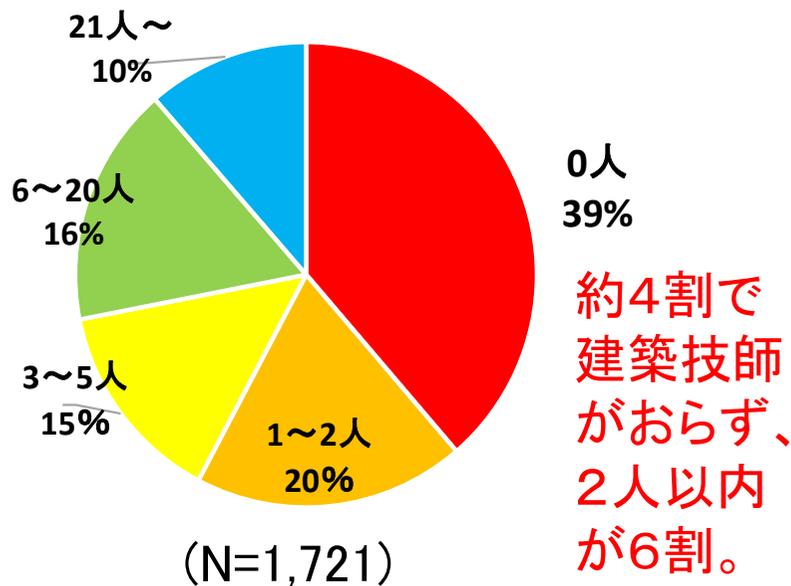
地震時の機能損失量の概念図



1. 健全性・使用継続性の迅速な判断

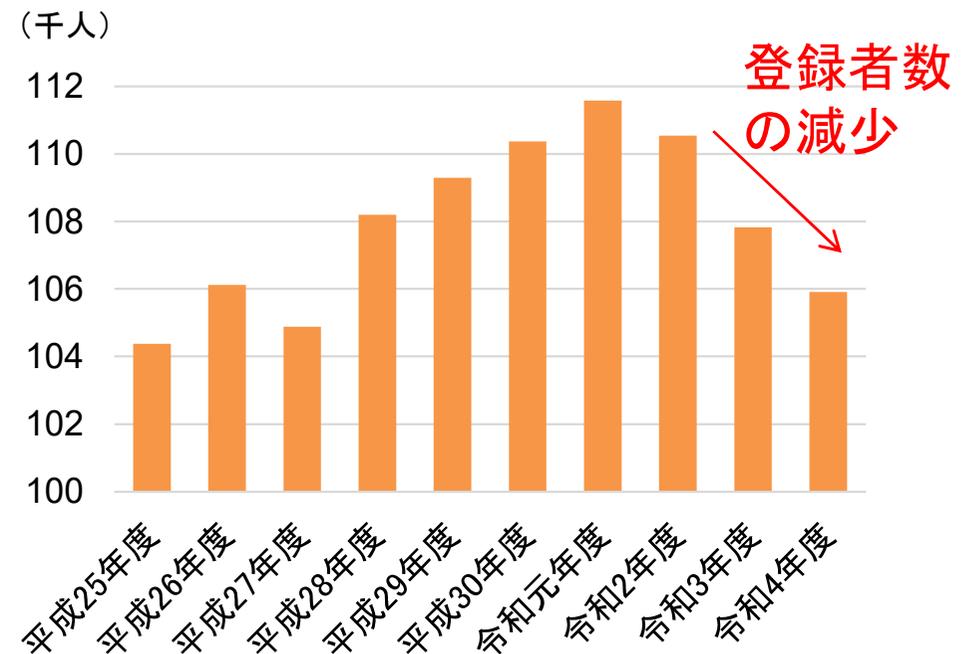


- 大地震時には、**マンパワー不足**（自治体建築技師や建築技術者等）
→ **使用継続性の判断に長期間を要することが懸念される。**
- **明確な基準に基づく、簡便で迅速な判定手法の確立が必要。**



自治体の建築技師数

出典：令和4年地方公共団体定員管理調査結果をもとに作成



被災建築物応急危険度判定士数の推移

出典：一般財団法人日本建築防災協会HPデータをもとに作成

- 「振動数比」※を用いることで、被災状況の簡便な評価が可能。
※ 被災後の固有振動数 / 被災前(平時)の固有振動数
- モデルに基づく解析の結果、「振動数比が0.55以上」で、被災度が「小破」以内の水準にとどまる蓋然性が高い。

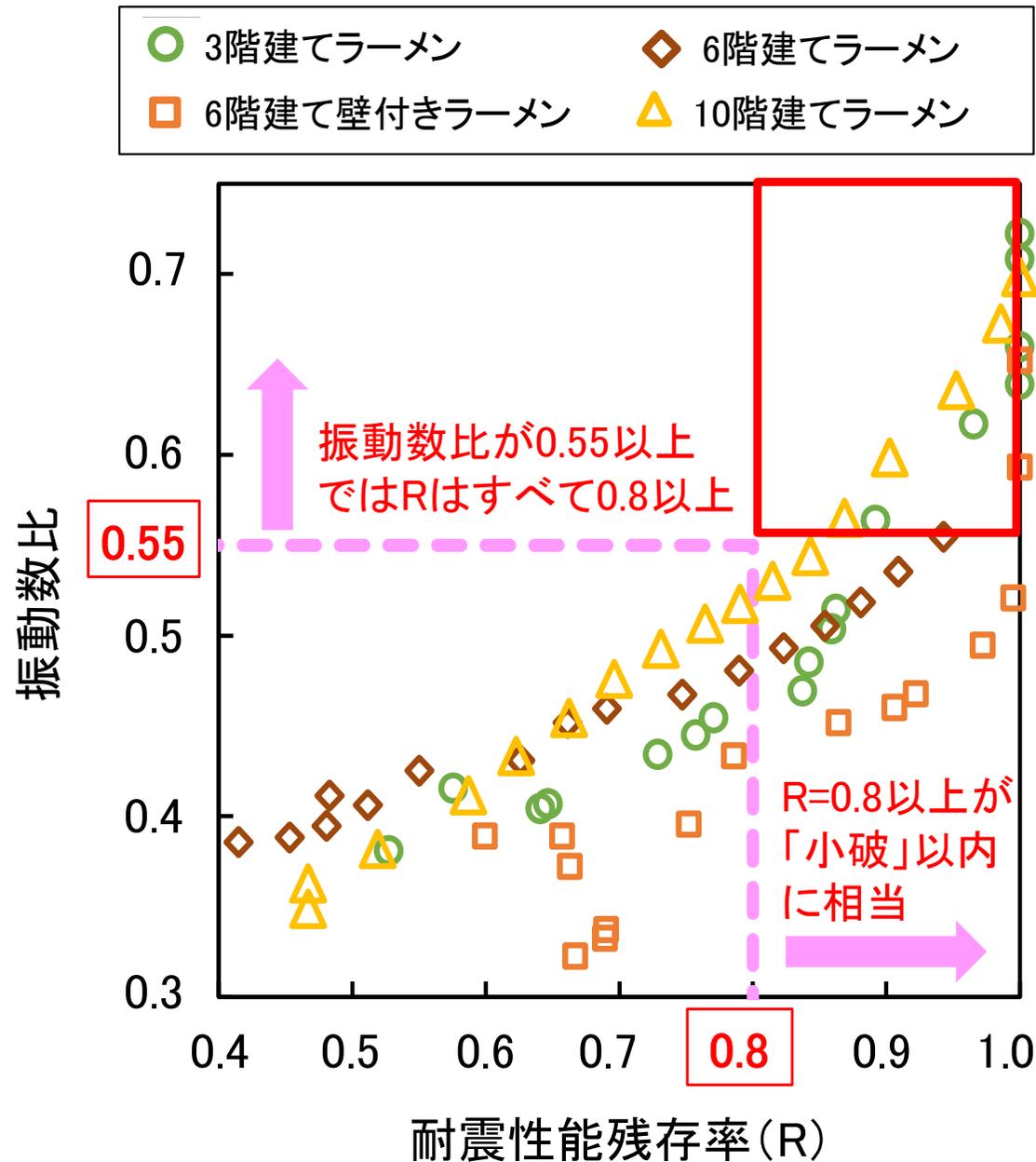


「小破」の被害イメージ

「小破」は「被災度区分判定」による被災度の基準の一つ

- 非構造部材(雑壁・間柱等)にせん断ひび割れが見られる。
- 構造部材(柱、耐力壁)の損傷は軽微又はほとんどない。

→ 継続居住が可能と想定



残存耐震性能率 (R) :

- 被災度区分判定基準で定められている被災建築物に残存する耐震性能を表す比率。

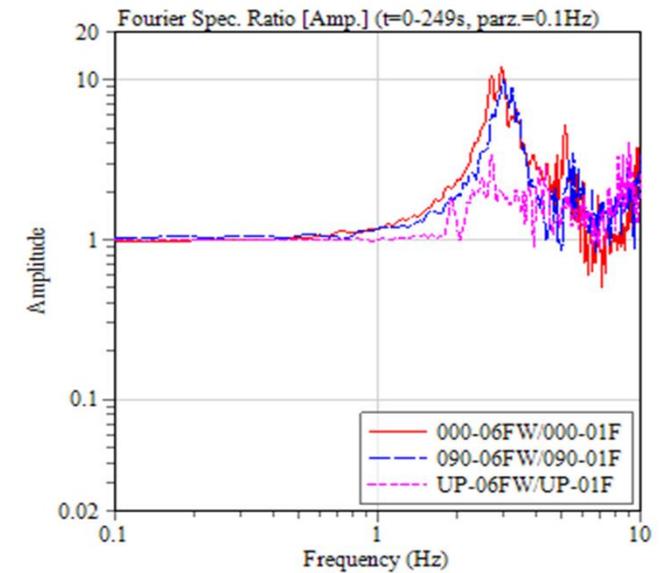
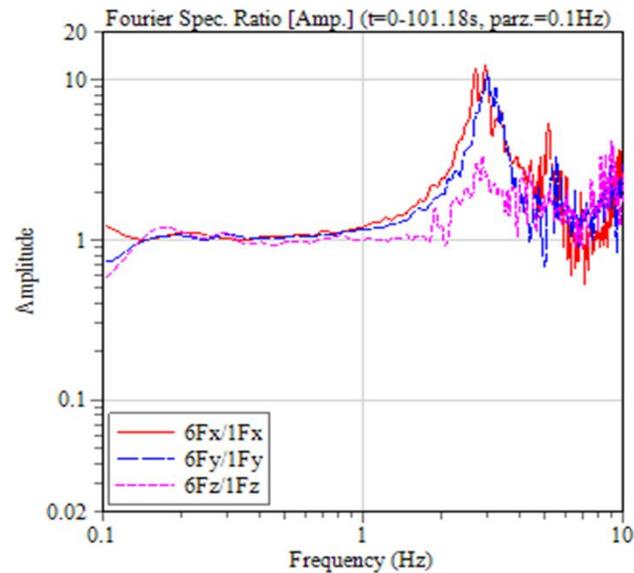
R = 1	: 無被害
$0.95 \leq R < 1$: 軽微被害
$0.8 \leq R < 0.95$: 小破
$0.6 \leq R < 0.8$: 中破
$R < 0.6$: 大破
R = 0	: 倒壊

モデル解析による振動数比と耐震性能残存率 (R) の関係

- 携帯型端末に専用アプリを用いた観測で、高価な高精度強震計と同等の判定結果が得られる。
- 専門家以外でも操作が容易、安価で停電時にも手軽に作動。



実験
建築物



携帯型端末



高精度強震計

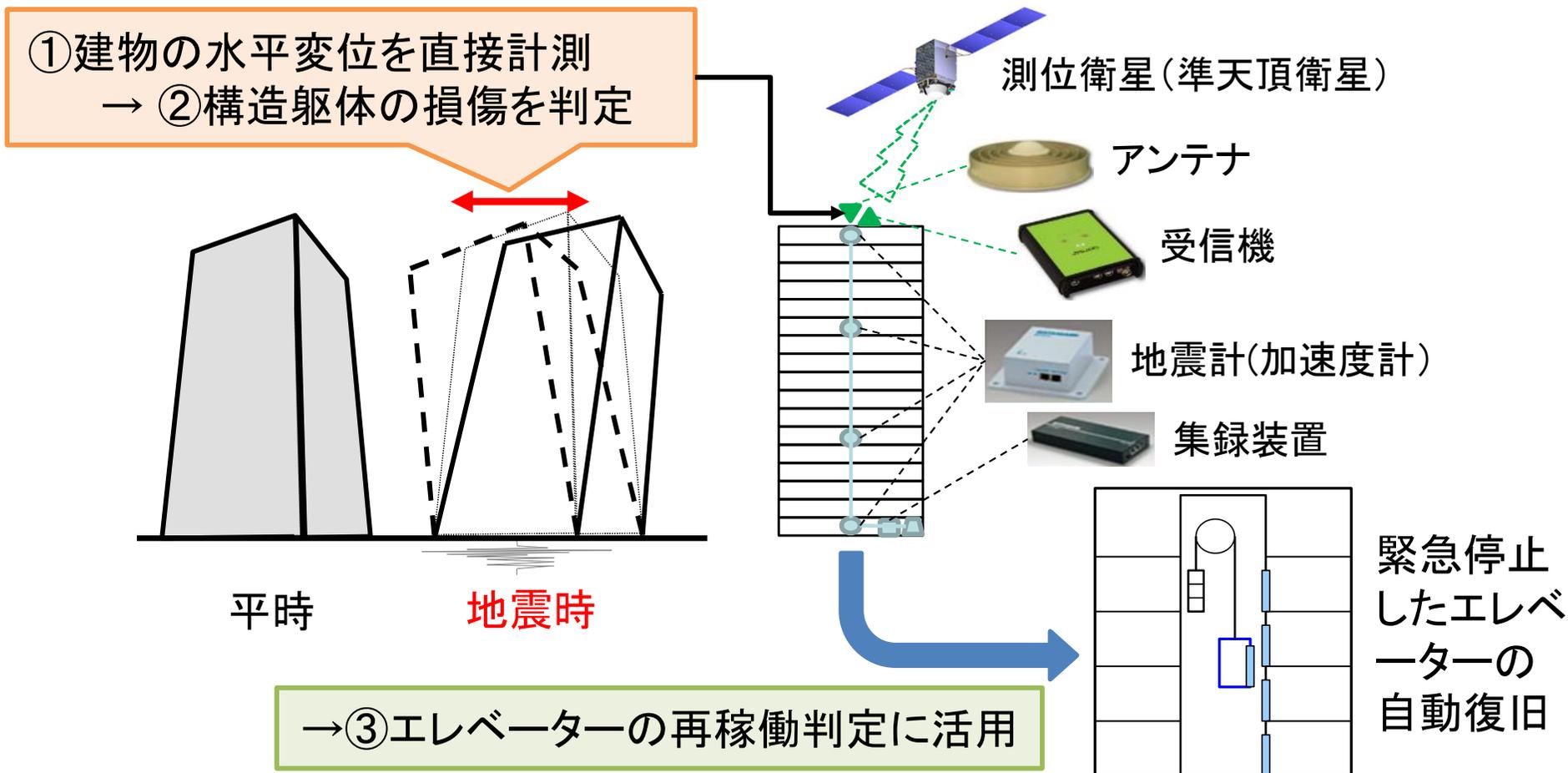
同等の計測精度

福島県沖地震(2021/02/13 23:07)での
観測結果の例





- 衛星測位データを実建物で受信し、被災時の建物の水平変位を直接計測するシステムを開発。
- 建物の使用継続性および緊急停止したエレベーターの再稼働の判定システムを構築。





2. 継続使用が可能な耐震性能の確保



- 建築基準法が要求する耐震性能は、大地震動レベル(極めて稀に発生する地震力)に対して、人命を確保できる耐震性能。

地震動レベル	耐震性能レベル			
	完全機能確保	機能確保	人命確保	崩壊寸前
中地震動未満のレベル	○	×	×	×
中地震動レベル	□	○	×	×
大地震動レベル	☆	□	●	×
(過大入力レベル)		☆	□	○

最重要建築物 重要建築物 一般建築物



- 「住宅性能表示制度」における「耐震等級」は、大地震動レベルに対する継続使用性については評価の対象外。

1-1 耐震等級：構造躯体の倒壊等防止

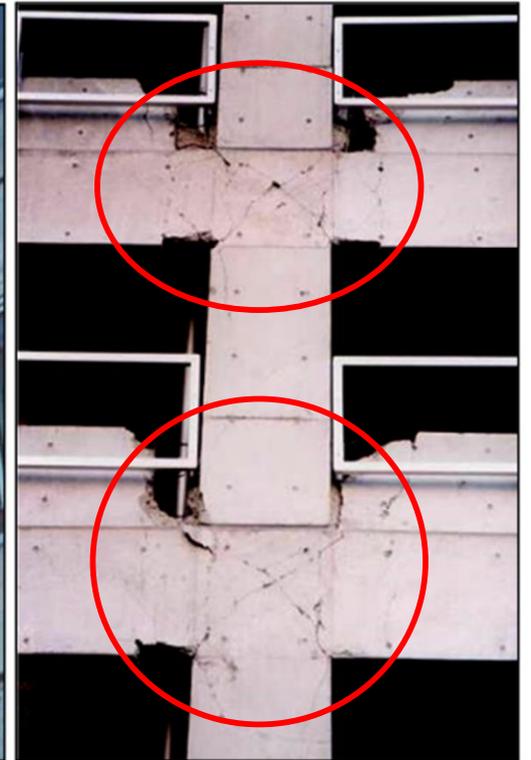
- 「極めて稀に(数百年に一度程度)発生する地震の力」に対する構造躯体の倒壊、崩壊等のしにくさを3段階の等級で表示。

1-2 耐震等級：構造躯体の損傷防止

- 「稀に(数十年に一度程度)発生する地震の力」に対する構造躯体の損傷の生じにくさを3段階の等級で表示。



- 大地震時に避難を余儀なくされるケース(構造性能の観点)
 1. 構造躯体が大きく損傷



RC造マンションの柱・はり接合部の損傷 (1995年阪神大震災)

倒壊は免れたが、柱・はり・柱はり接合部の損傷が極めて大きく、その修復費用が莫大であったため取り壊された。

- 大地震時に避難を余儀なくされるケース(構造性能の観点)
 2. 構造躯体の損傷が軽微でも、**非構造部材が大きく損傷**



RC造マンションの雑壁が大きく損傷し
住戸内が見通せる
(2011年東日本大震災・仙台市内)



RC造マンションの方立壁が損傷し
玄関ドアが開閉不能
(2016年熊本地震・熊本市内)

構造躯体の損傷は軽微であったが、雑壁等の損傷が大きく、継続使用(在宅避難)ができなかった世帯が発生。



- 大地震（極めて稀に発生する地震力）後の継続使用性の評価指標として、「耐震レジリエンス性能」を提案。
- 実装に向けて、評価指標の提案、評価方法基準案等を開発。

① 地震時の応答評価の高度化

② 損傷度の評価方法

③ 修復性の評価方法

④ 耐震レジリエンス性能の評価指標・
評価方法基準案、等級の区分方法案の取りまとめ

耐震レジリエンス性能を
①損傷のしにくさ
②修復のしやすさ
で評価することを想定

性能評価表示制度
の技術基準
への反映を想定

研究開発のフロー



- 被災度区分判定の「被災度」に着目し、設計時の解析により、**損傷度(=被災度)を算定**する手法を開発。

Step1: 非線形荷重増分解析
(せん断変形角・曲げ変形角等の算出、層崩壊系の確認等)



Step2: 各部材の塑性率の算定



Step3: 各部材の損傷度の算定



Step4: 建物の被災度の算定

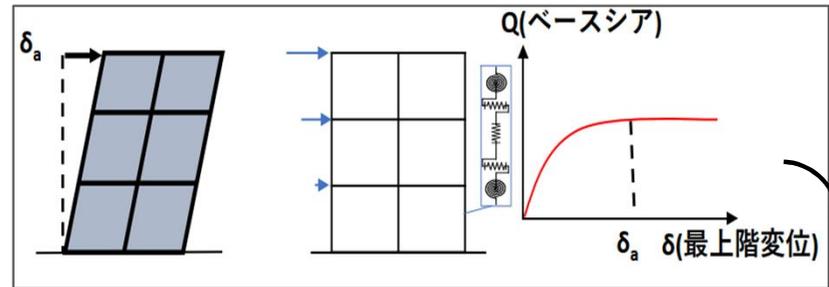
解析による損傷度(=被災度)の算定フロー(概要)

※ 詳細は次ページ

②-1 被災時の損傷度の評価手法 (2/2)



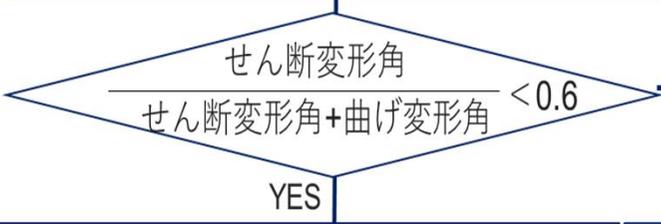
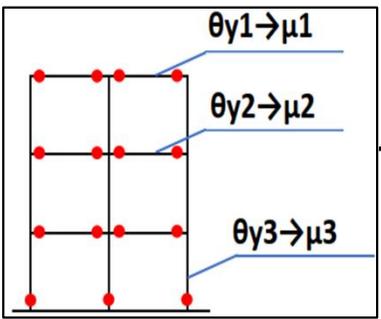
Step 1



今後、「損傷度評価Webプログラム(仮称)」として公開を予定

モデル化した建物の非線形増分解析の実施
せん断・曲げ変形角比率算出、崩壊形確認

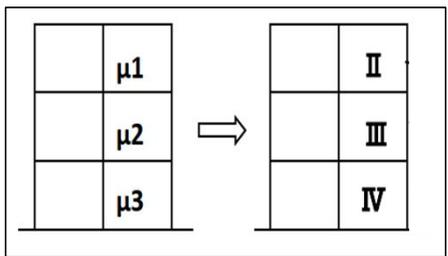
Step 2



端部曲げ回転角による各部材塑性率の算定

部材角による各部材塑性率の算定

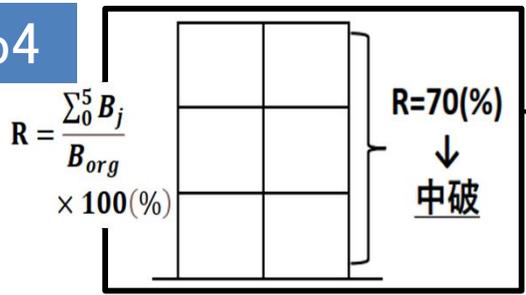
Step 3



損傷度-塑性率関係の定義を残留ひび割れから求める
(残留ひび割れは実験若しくは計算による)

部材塑性率から部材損傷度の算定

Step 4



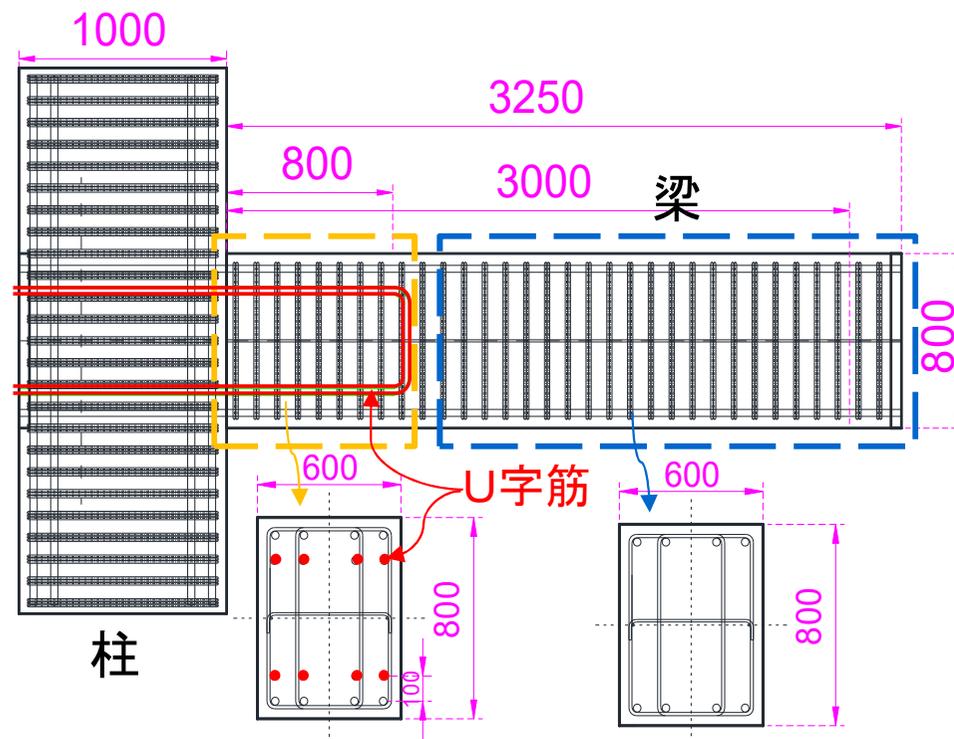
全体崩壊形
架構全部材の部材損傷度を
集計し建物被災度の算定

層崩壊形
崩壊層全部材の部材損傷度を
集計し建物被災度の算定

解析による損傷度(=被災度)の算定フロー

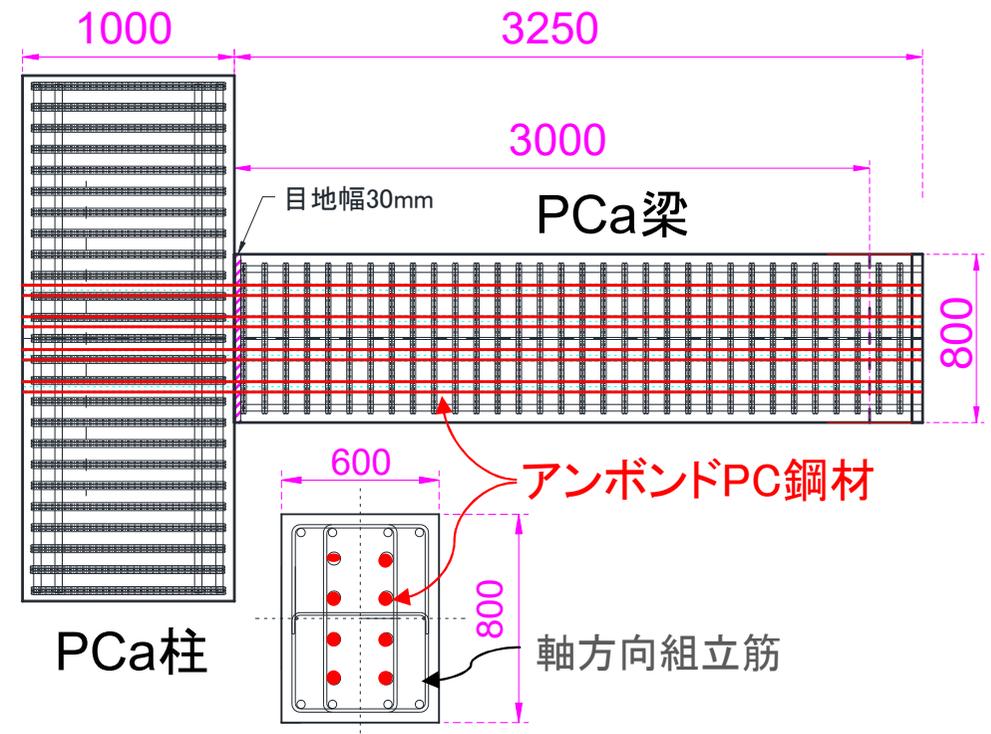


- 損傷低減に有望と考えられる技術について**載荷実験**を実施し、耐震レジリエンス性の評価のための**損傷性状**等のデータ収集。



【損傷箇所を制御する技術】

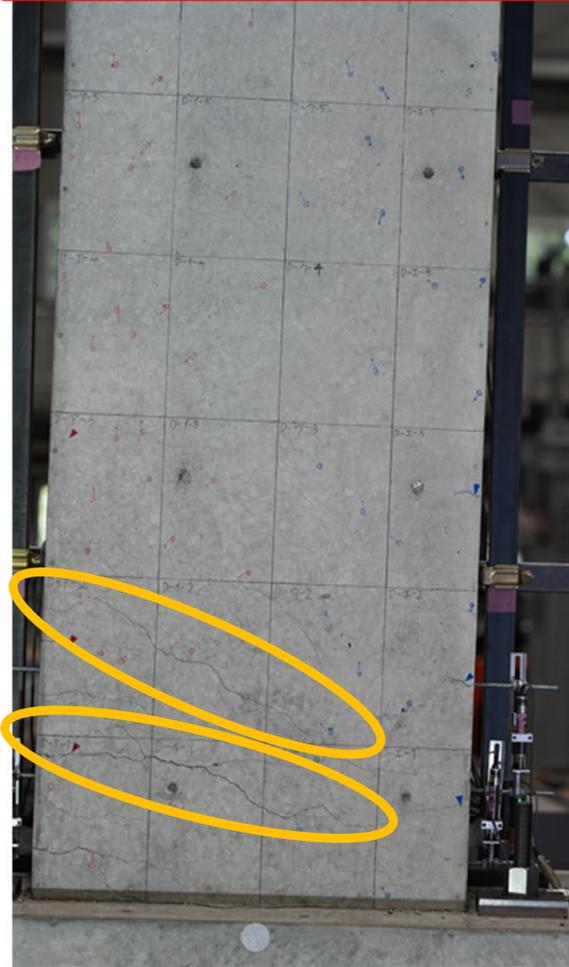
ヒンジリロケーション (HRC) 梁: 柱梁接合部の主筋量を増やし、梁の曲げ降伏による塑性ヒンジの形成位置を梁中央部に移動



【損傷量を低減する技術】

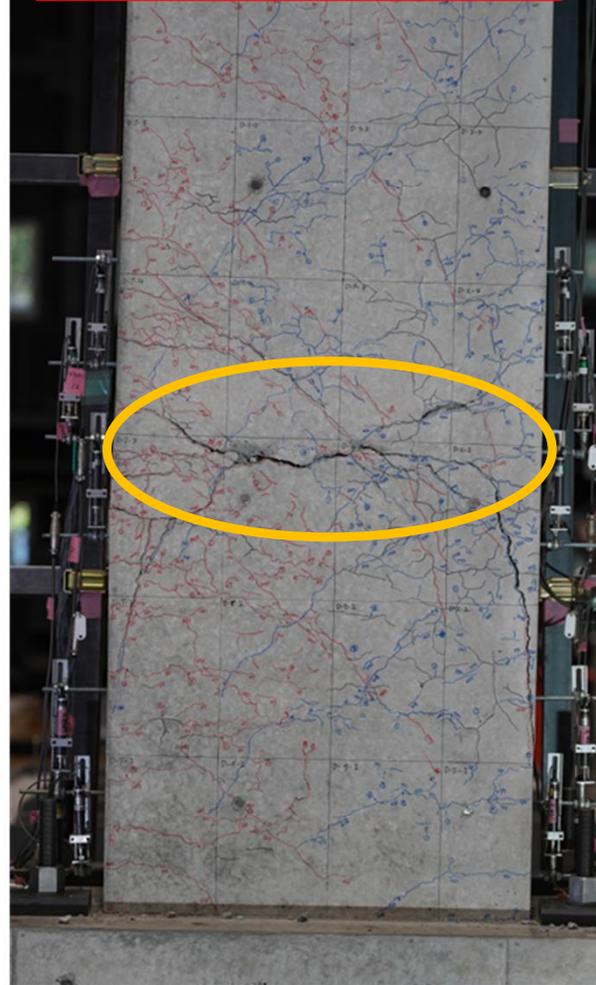
アンボンドPCaPC梁: PC鋼材をプレキャスト柱・梁部材に貫通させ、PC鋼材の緊張力によって圧着接合させ一体化

引張系の損傷が発生
(ひび割れ)



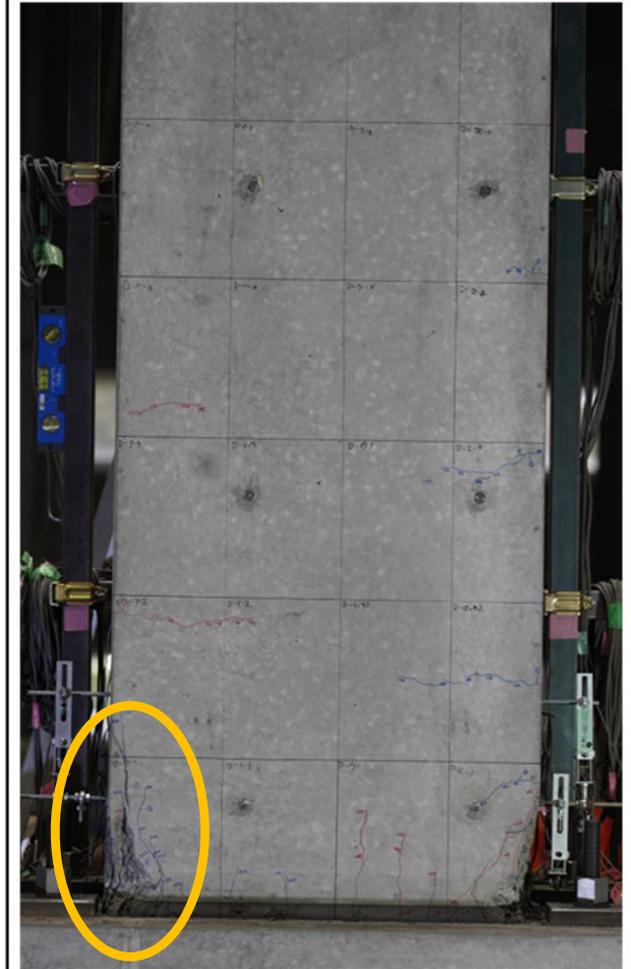
RC梁

損傷位置は制御。
損傷集中が激しい



HRC梁

圧縮系の損傷が発生
(コンクリート剥落)



PcaPC梁

梁の載荷実験結果(変形角1/50、2サイクル目、負側載荷・徐荷時)



- 梁の損傷量を許容範囲内に抑えるための変形角の解明
→ 応答変形を抑え、構造躯体や雑壁（方立壁等）の損傷をできる限り小さくする
- 損傷性状に応じた、修復性（修復のしやすさ）の評価・検討



【最終成果（予定）】

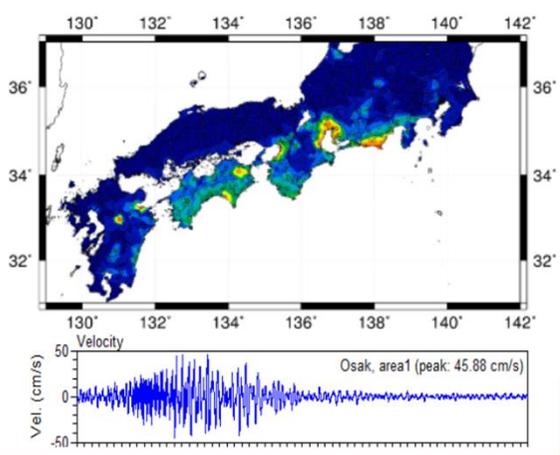
1. 損傷量と修復性の関係からみた、耐震レジリエンス性能の評価手法・評価基準の取りまとめ
2. 耐震レジリエンス性能に基づく耐震等級の分類方法の提案



ご清聴ありがとうございました



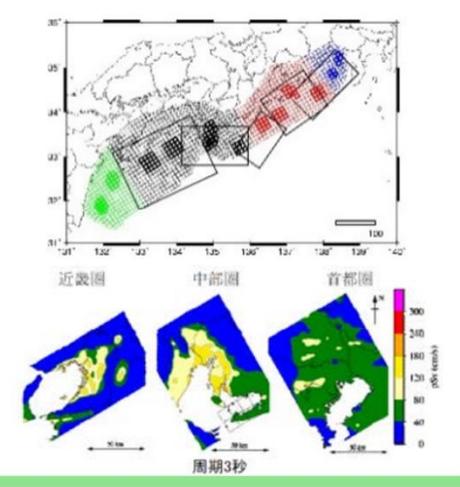
入力地震動の検討



応答評価の検討



内閣府の検討



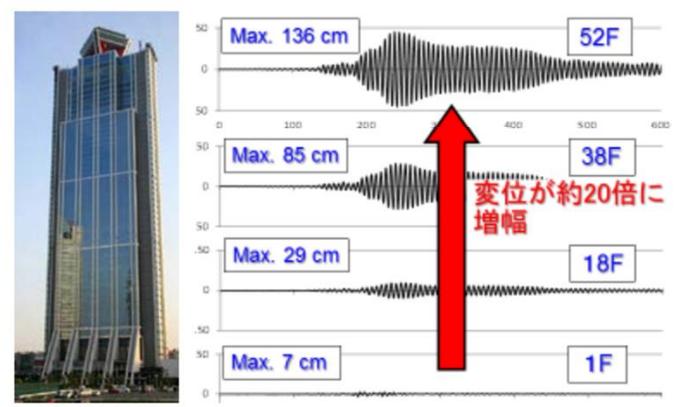
協力

国総研

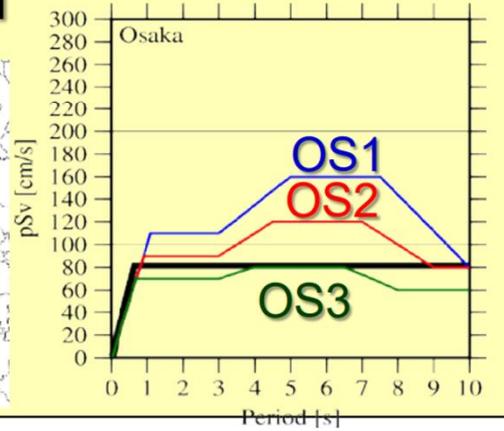
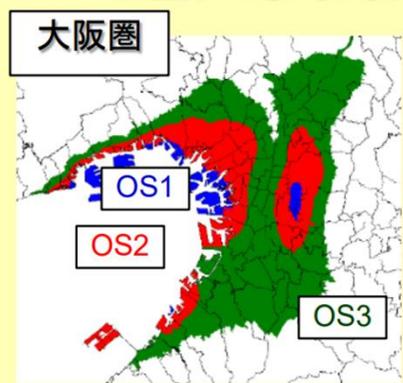
現象の理解
既往対策案の再評価

研究成果の提供

2011 東日本大震災

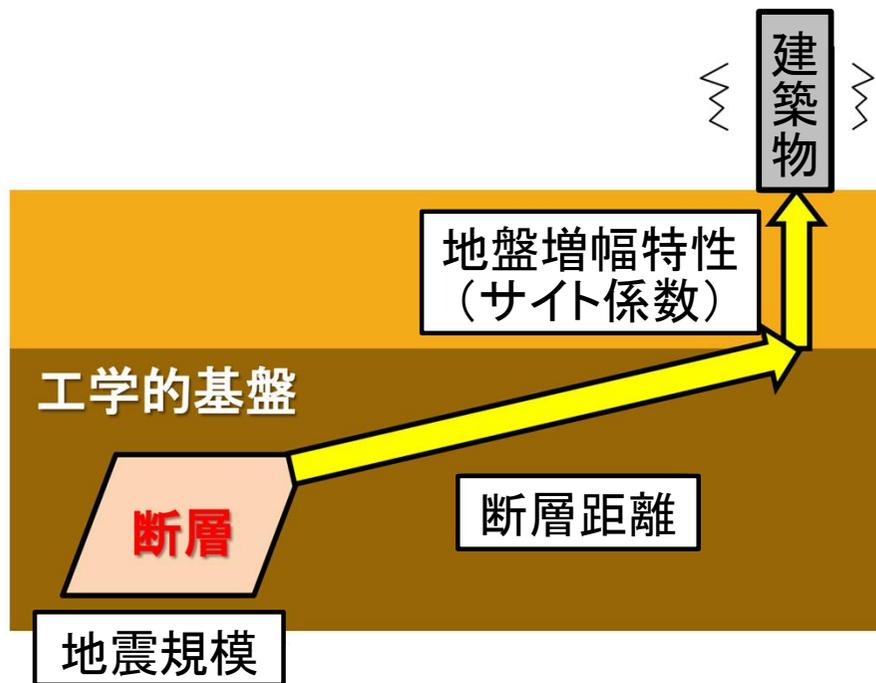


国交省住宅局「技術的助言」 2017.4 運用開始

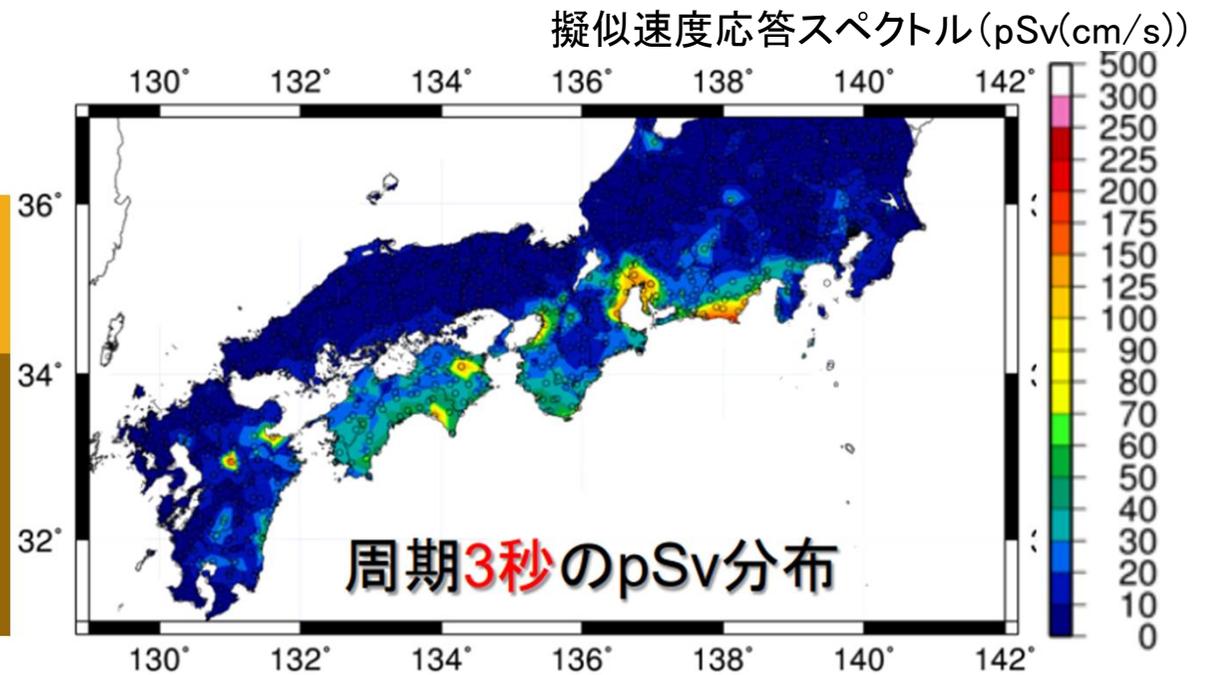




- 長周期地震動の算定方法の開発。
- 長周期地震動の計算（全国約1900地点で計算）
→ 長周期地震動の卓越地域を選定。
- 長周期地震動対策を促すべき地域区分と、設計用簡略化応答スペクトルの提案。



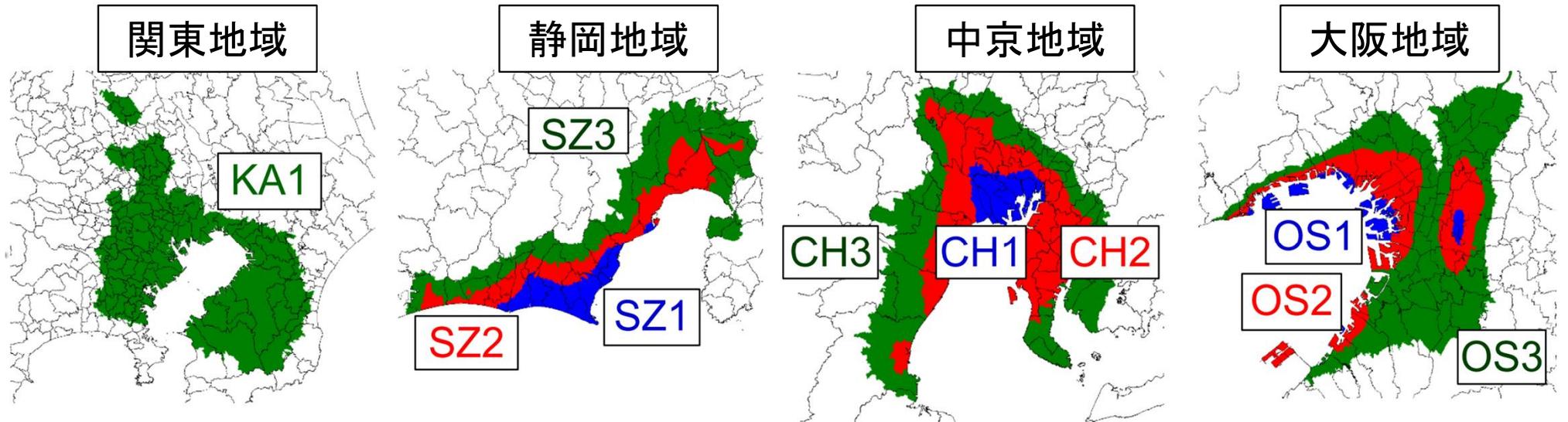
長周期地震動の算定の考え方



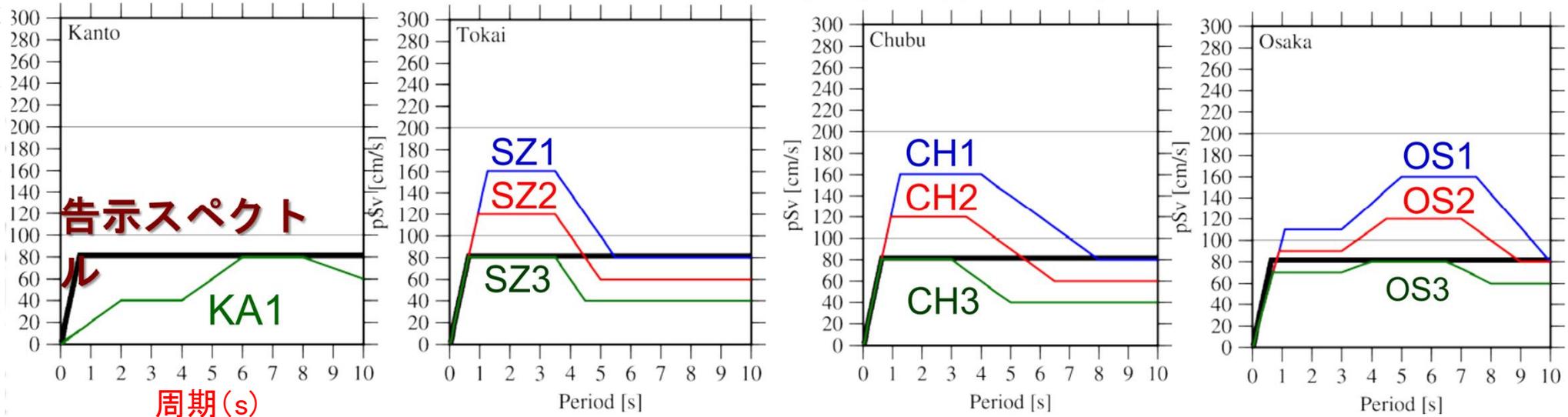
1707年宝永地震(Mw=8.87)の再現計算

3大都市圏と静岡等で長周期地震動が卓越

超高層建築物等の長周期地震動対策（～2016年）



疑似速度応答スペクトル (pSv)



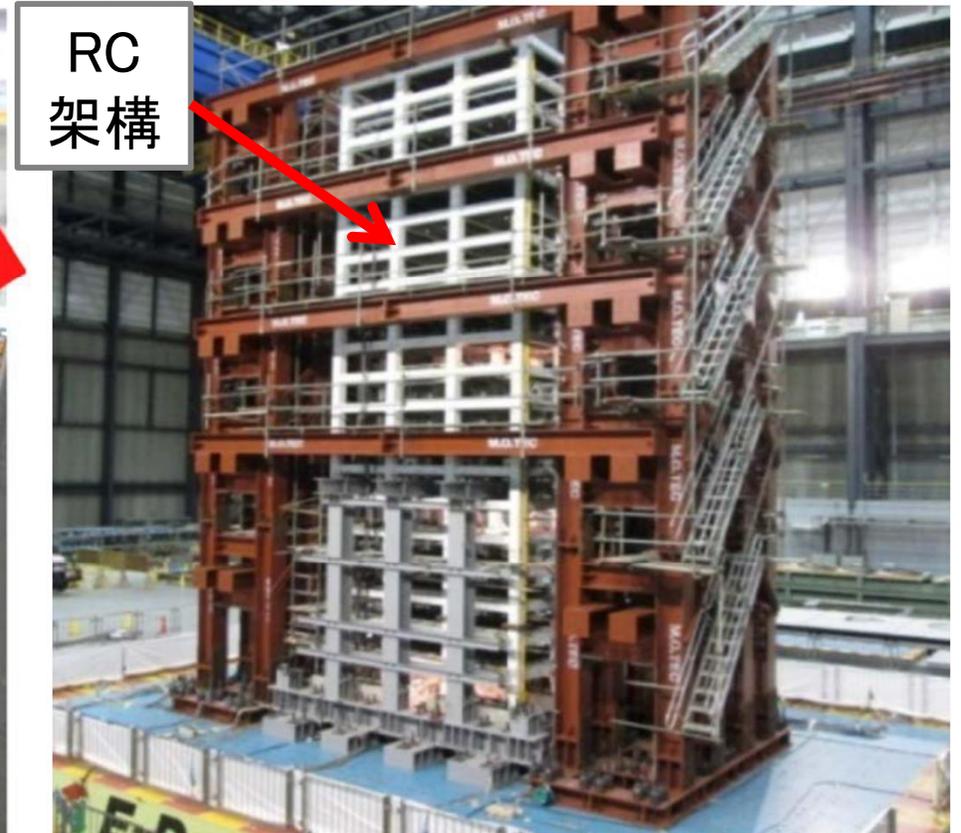
- : 設計時に構造計算に用いた地震動の大きさを上回る可能性が非常に高い地域
- : 設計時に構造計算に用いた地震動の大きさを上回る可能性が高い地域
- : 設計時に構造計算に用いた地震動の大きさを上回る可能性がある地域

長周期地震動対策を促すべき地域区分と入力地震動の提案

- 多数回繰り返しの影響や、共振による大変形の影響を実験で把握し、**応答解析法を提案し、設計法に反映。**
→ 時刻歴応答解析建築物性能評価業務方法書(改定)へ反映

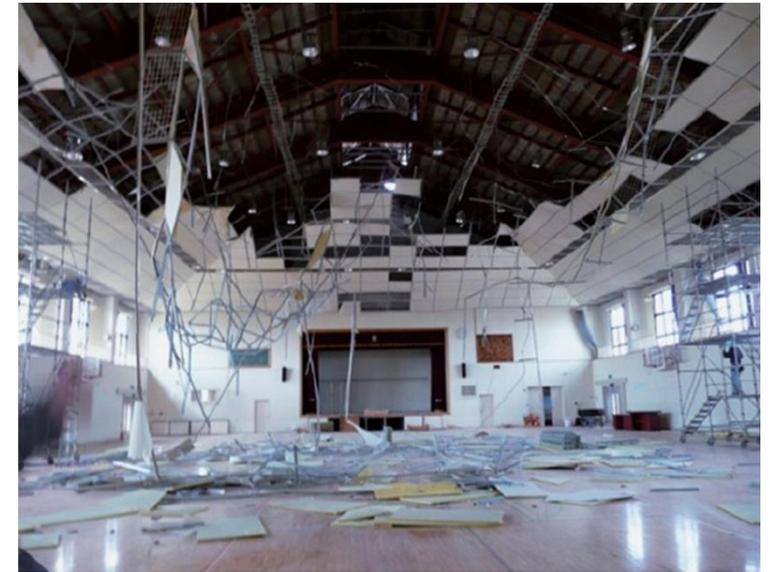


鉄骨実大架構の多数回繰り返し加力実験

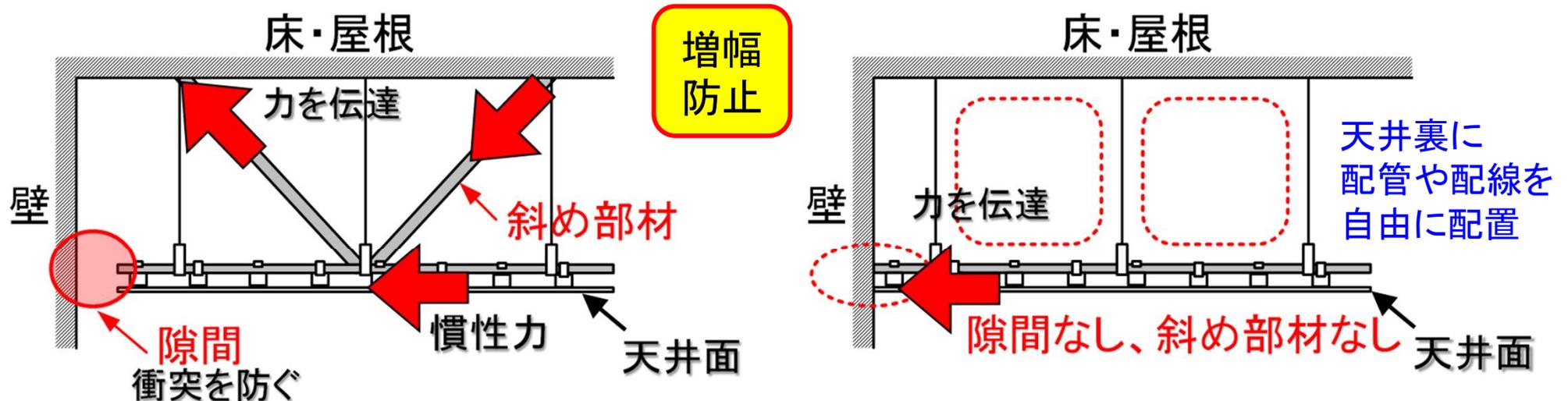


20層RC建築物の振動台実験

- 近年の地震で、吊り天井に大規模な被害が発生。
 - 吊り天井の仕様(2種類)に応じた耐震性を検証し、**設計法を提案**。
- **「特定天井」の基準新設※、告示改正**
※ 建築基準法施行令第39条改正(2013年7月)



体育館の吊り天井の脱落



(a) 斜め部材と隙間の設置

(b) 斜め部材・隙間なし

吊り天井の脱落対策(設計法の提案)