



東日本大震災を踏まえた建築分野の 研究の展開

国土技術政策総合研究所
建築研究部長 西山 功

建築研究部の取り組む分野(1)

建築研究部では、

暮らしや経済活動の舞台である建築物がより安全・快適に利用できるように、**構造、防火、環境・設備の各基準と基準を認証するシステム**について研究しています。

● **建築新技術**研究官

● **建築品質**研究官

■ **基準認証システム**研究室

性能指向の建築基準体系と性能確保システムのあり方、国際的な建築基準の動向などの研究

■ **構造**基準研究室

建築構造や地盤の安全に関する課題のうち、特に地震時の建築物の状況を把握・予測できる構造性能の評価手法、免震・制震技術の活用などの研究

■ **防火**基準研究室

火災時における建築物の避難安全の性能評価、火災拡大の抑制、構造耐火性能の確保などの研究

■ **環境・設備**基準研究室

室内環境や設備の安全性、快適性、省エネルギー性に関する技術や性能評価法などの研究

建築研究部の取り組む分野(2)

1. 安全・安心、快適性等の確保のための技術基準原案の作成、技術資料の整備のための調査研究

従来タイプ



2. 自然科学等関連周辺分野での研究の進展等を踏まえ、新たな知見が蓄積されつつある分野における調査研究

新知見タイプ

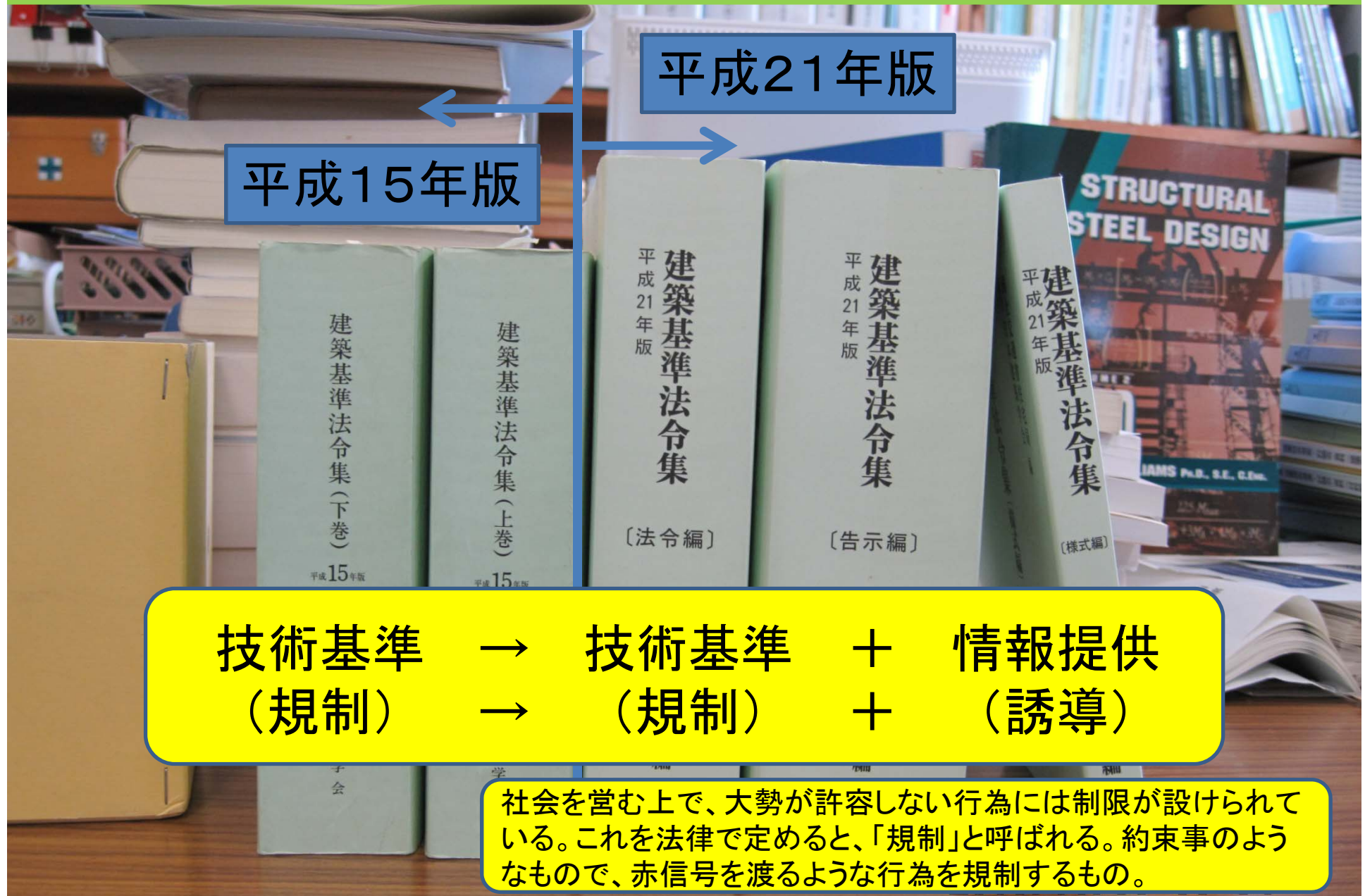
3. 研究分野としては、必ずしも脚光を浴びてはいないが、社会的に対応が必要と考えられる課題に対応する調査研究

新分野タイプ

個別の課題に適した対応策の実現のために必要な研究テーマを設定し推進
(これらは、技術政策研究や基盤研究として実施するが、突発的な課題や緊急の対応を要する課題に対して機動的 research を実施する。)

タイプに応じた対応

建築研究部の取り組む分野(3)



平成23年度に取り組んでいる課題

●地震動予測への対応(高耐震、長周期)

●地震による外装材脱落防止

●高強度鋼材のF値指定

●住宅の雨水進入

●東日本大震災とその後の対策

●各種の偽装対応

●木造3階建て学校の火災安全性

●その他

●地震後火災

●建物内事故予防ナレッジベース

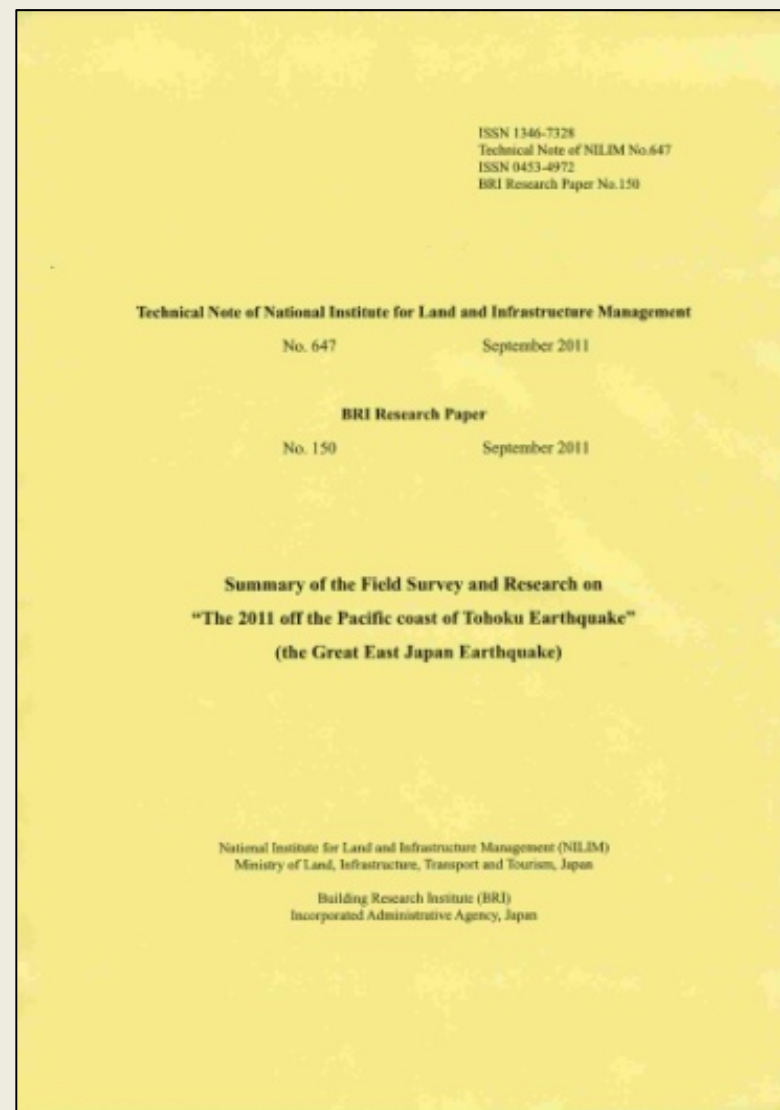
●エレベータ、エスカレータの事故対応

●低炭素・水素エネルギー

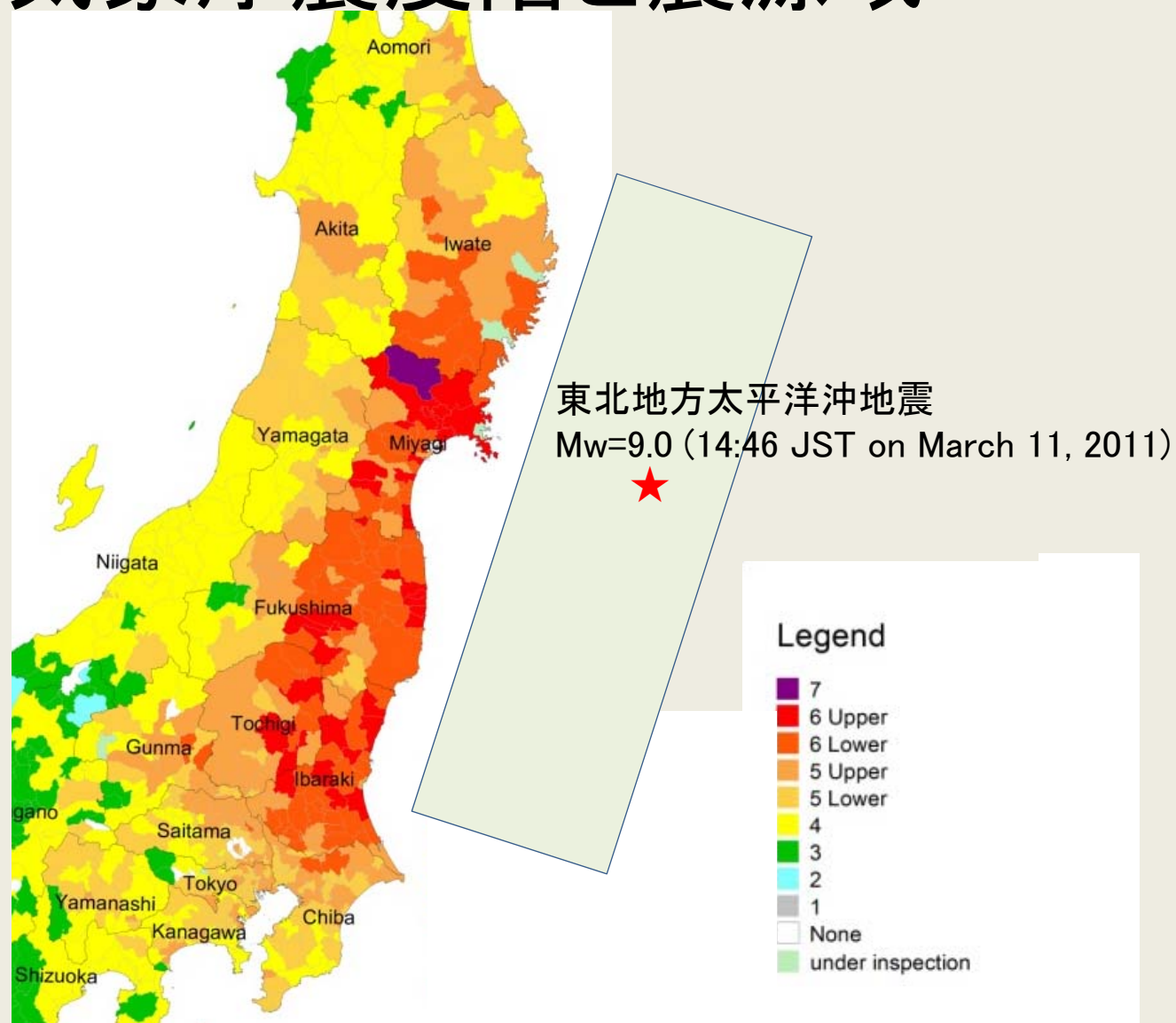
●再生可能エネルギー

東北地方太平洋沖地震の概要(1)

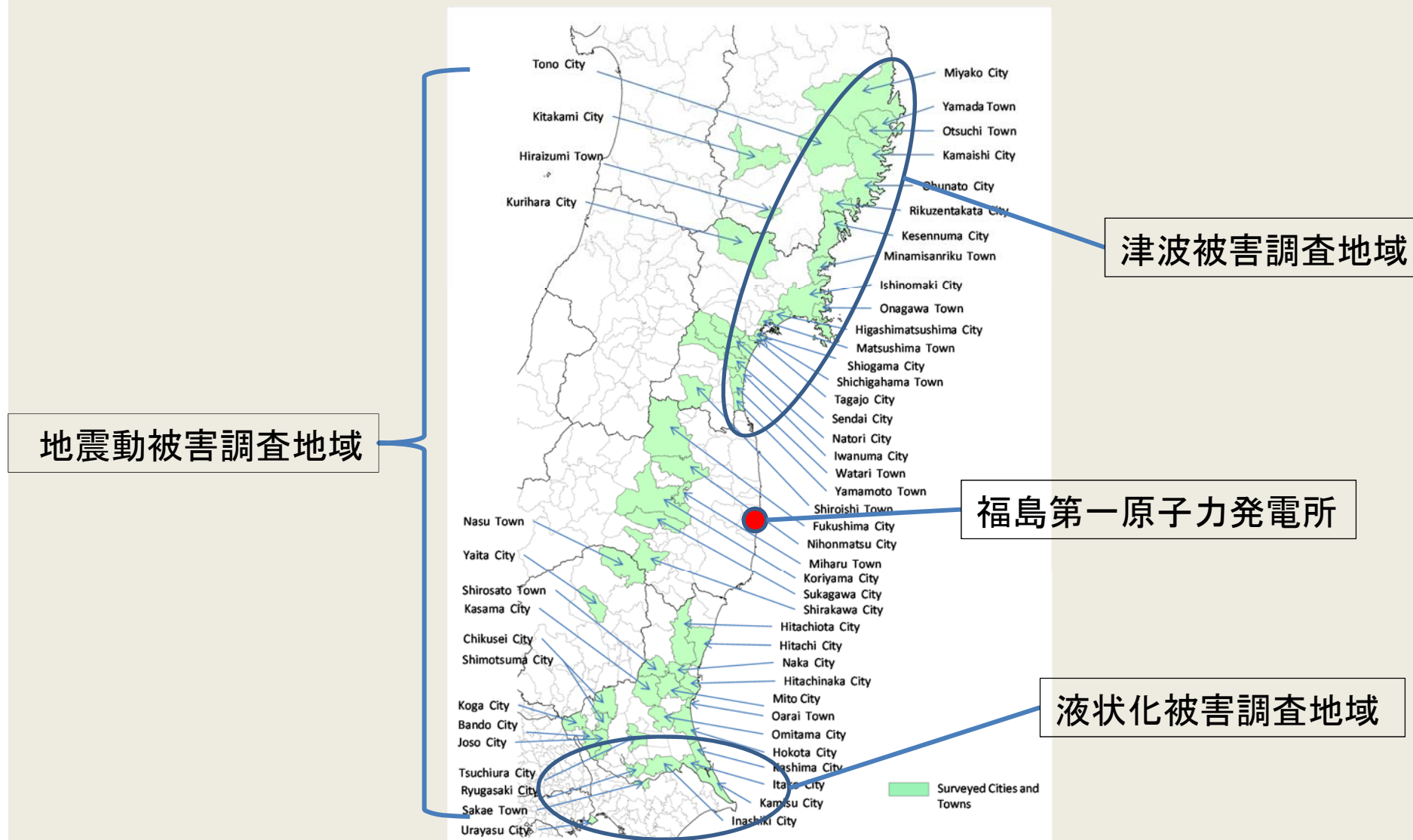
現地調査レポート



気象庁震度階と震源域



現地調査を実施した市・町

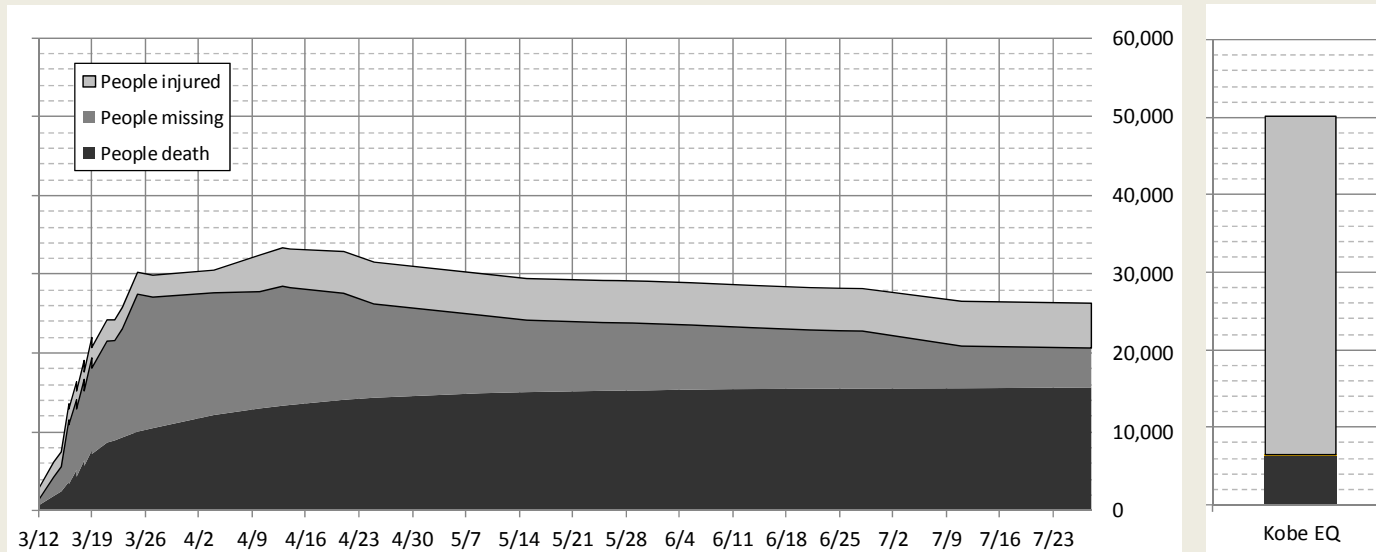


調査項目

- 地震動被害
 - 宅地・地盤、非構造部材、木造、鉄骨造、鉄筋コンクリート造、免震建物など(建築基準法施行令記載順)
- 津波被害
 - 木造、鉄骨造、鉄筋コンクリート造
- そのほか、火災被害・・・

東北地方太平洋沖地震の概要(5)

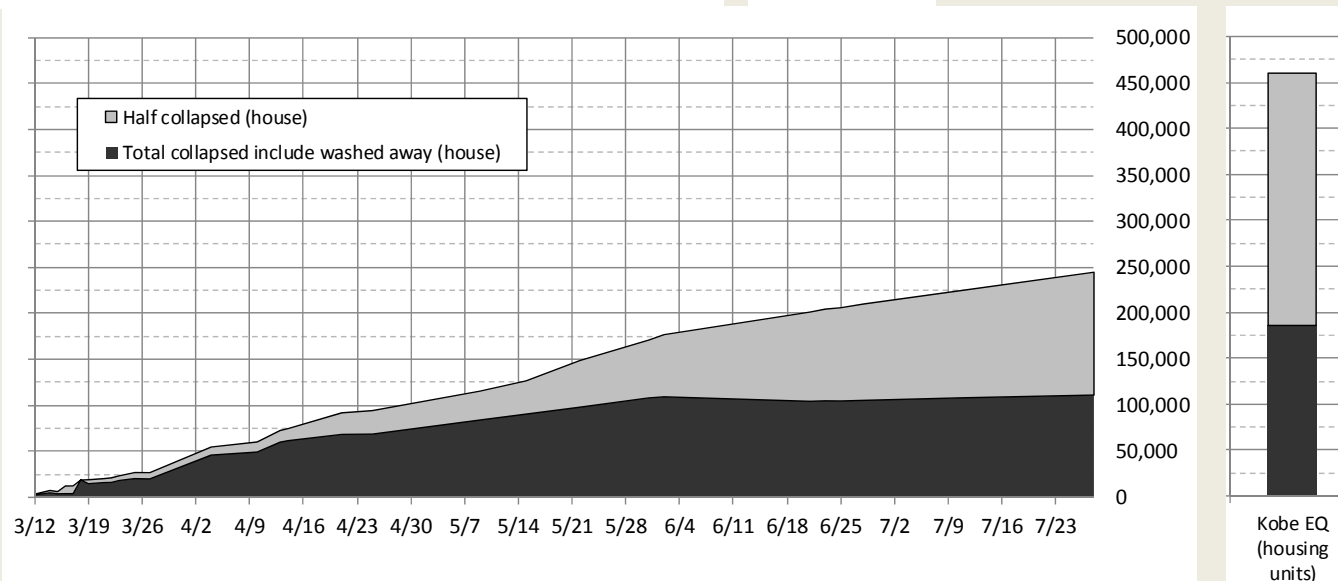
被害統計データ(東北地方太平洋沖地震 vs. 兵庫県南部地震)



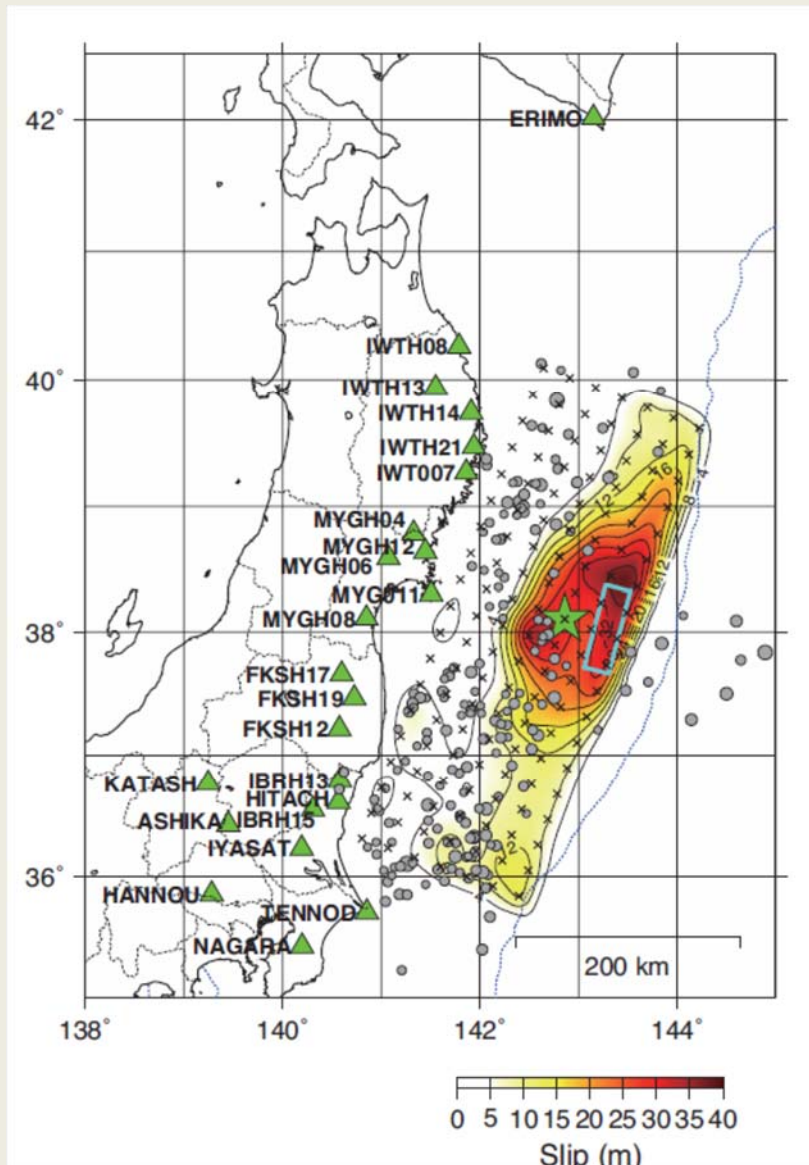
死者数
 東北地方太平洋沖
 地震: 15,700
 兵庫県南部
 地震: 6,434

全壊建物数
 東北地方太平洋沖
 地震: 114,000 戸
 兵庫県南部
 地震: 186,175 世帯

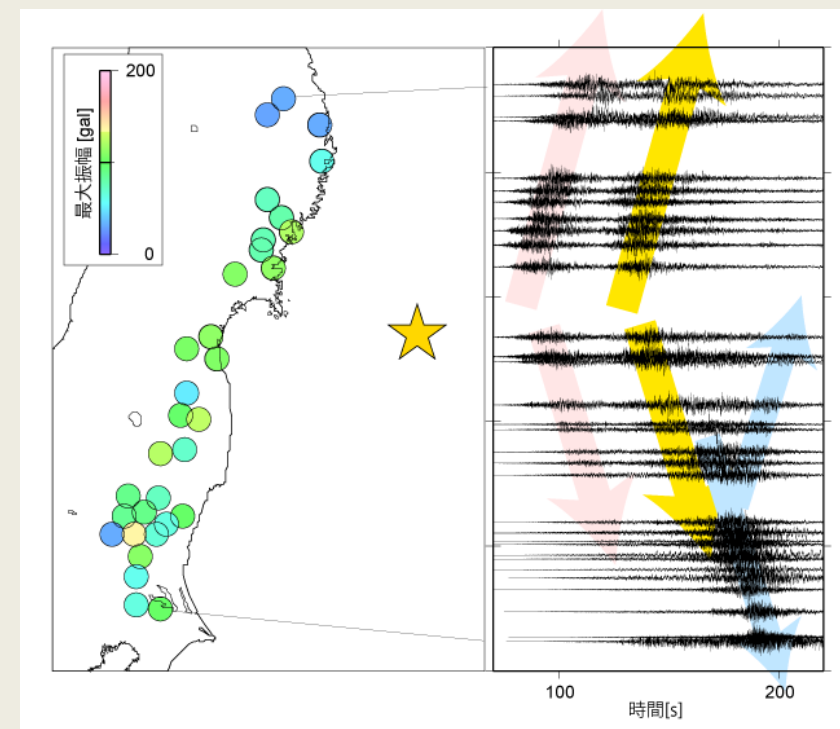
津波流失数は12万棟
 と言われている。



気象研究所による震源モデル

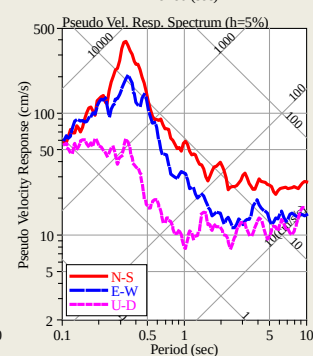
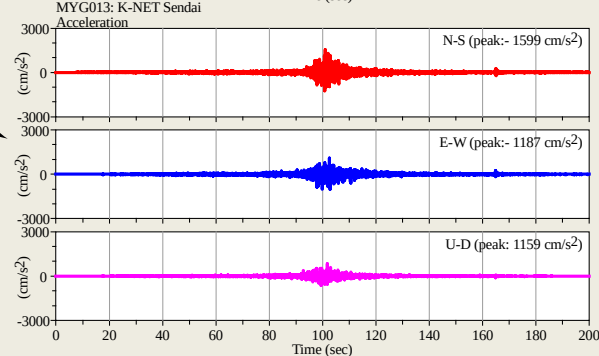
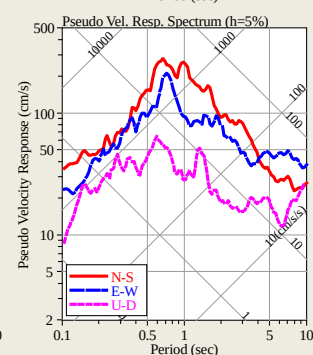
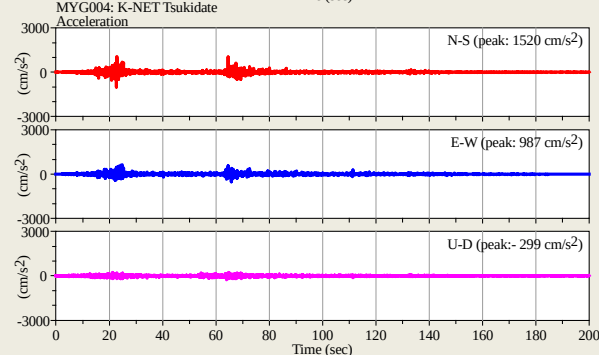
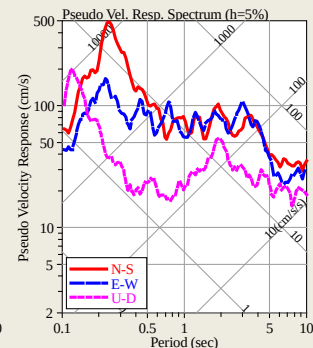
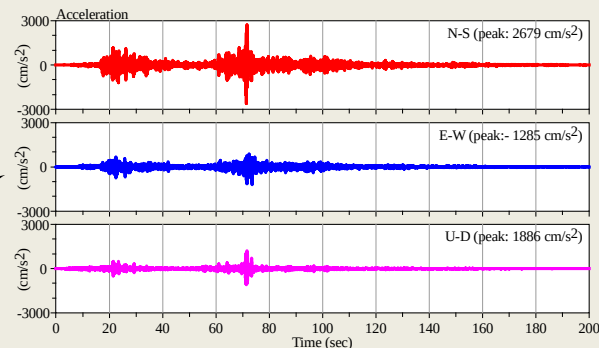
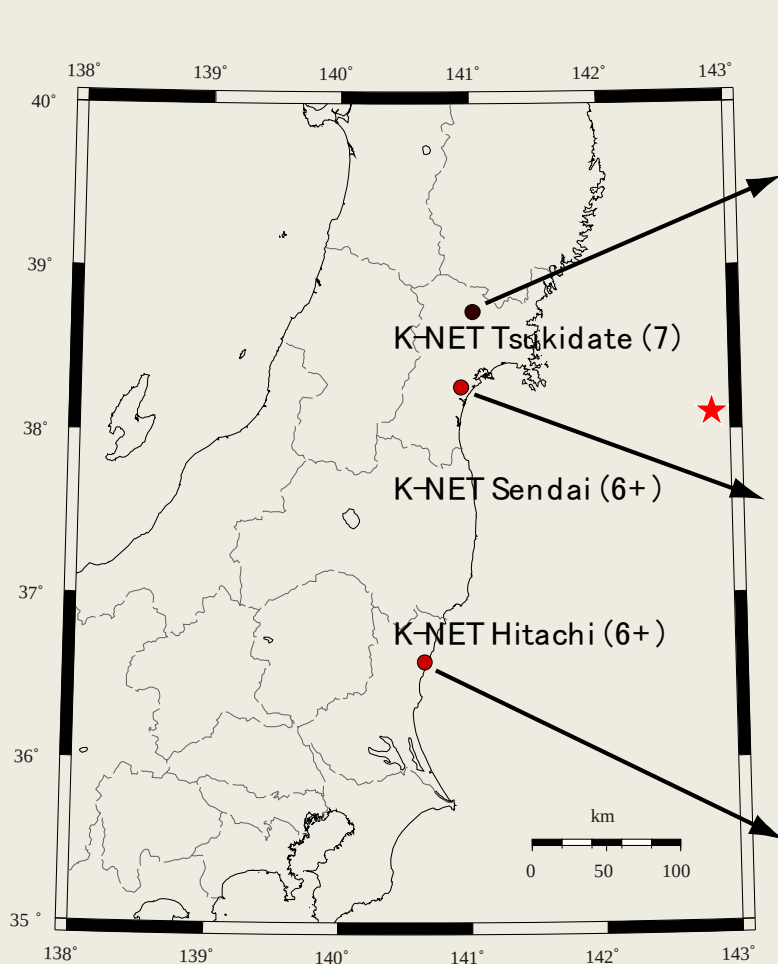


← 気象研究所



↑ 防災科研基盤強震観測網より
(KiK-net)

強震観測記録の例



IBR003: K-NET Hitachi

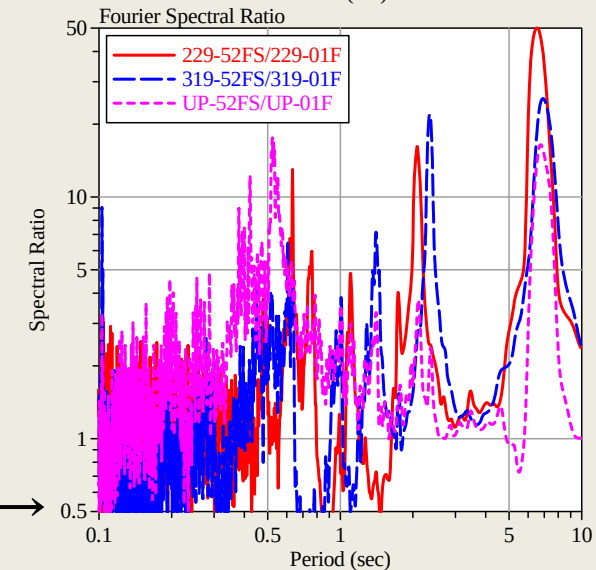
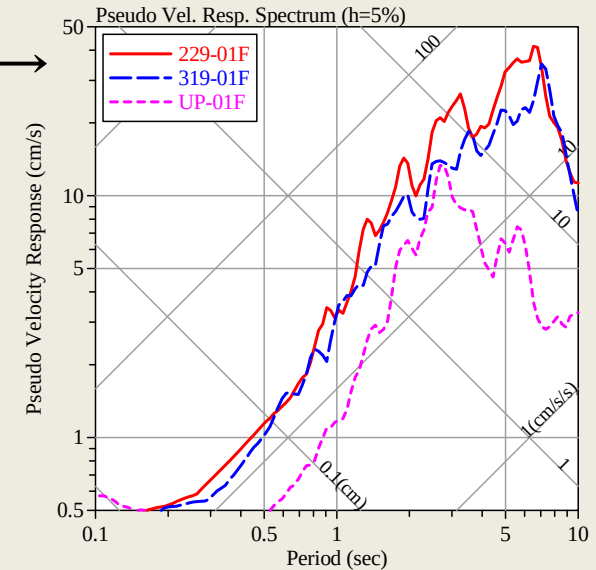
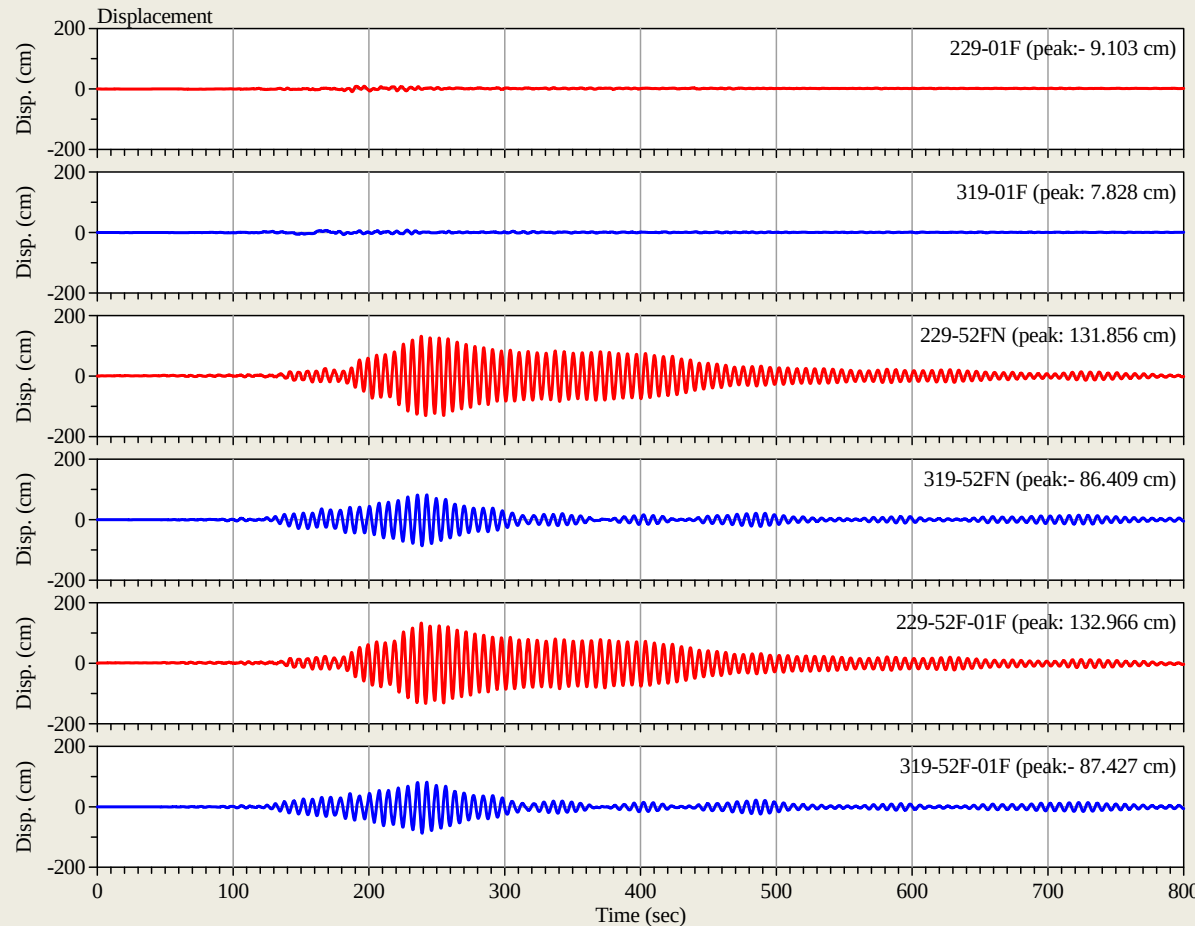
加速度時刻歴

疑似速度応答スペクトル

大阪での長周期地震動の観測例

応答変位の時刻歴↓

疑似速度応答スペクトル→



速度応答スペクトル比→

地震動による建築物被害(1)

典型的な宅地・地盤の被害



大規模な液状化と建築物等の沈下、傾斜



傾斜 3度

噴砂と住宅の傾斜



地盤破壊による基礎の破壊



開発中の丘の地盤のすべり



擁壁の被害と住宅の移動

地震動による建築物被害(2)

典型的な非構造部材の被害



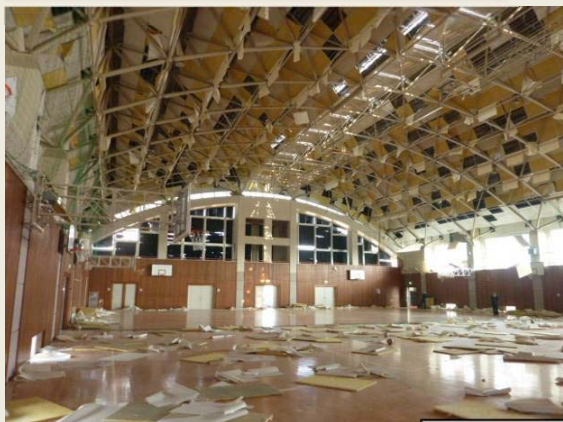
ひび割れとタイルの
剥落



ガラスの破損



外壁パネルの落下



吊り天井の損傷、落下

地震動による建築物被害(3)

典型的な木造の被害



店舗付き住宅
(1層の傾斜)



生物劣化



1層の崩壊



2層の崩壊

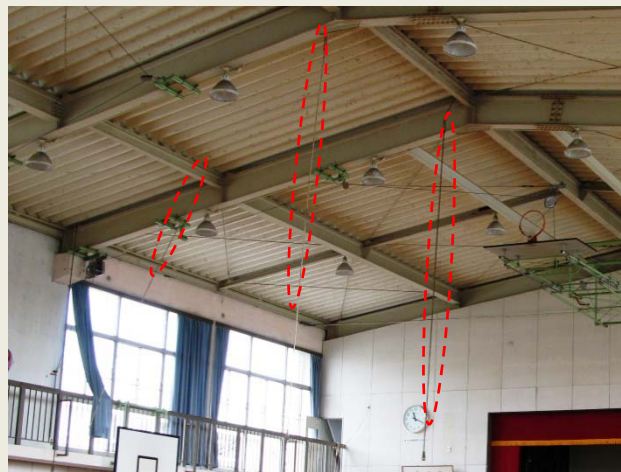


土蔵の被害
(土と漆喰で仕上げた日
本の伝統的木造倉庫)

典型的な鉄骨造の被害



ブレース座屈



水平ブレースの破断



接合部コンクリート剥落



接合部ブレース破断



ラチス柱の斜め材の座屈



天井材の顕著な落下及び外装材の落下



地震動による建築物被害(5)

典型的な鉄筋コンクリート造の被害



柱のせん断破壊による
弱1層の崩壊



非構造壁のせん断破壊



SRC造露出柱脚のアン
カーボルトの抜けだし



境界ばりのせん断
破壊



耐震壁開口部の
せん断破壊

地震動による建築物被害(6)

RC建築物(1)の典型的な被害

- 旧耐震基準で設計された10以上の庁舎が顕著な構造被害を受けた。短柱のせん断破壊と支持力喪失。これらの建物は、緊急対策本部としては使うことが出来なかった。
- 機能維持のための被害軽減が強く求められる。



RC建築物(2)の典型的な被害

- 耐震改修した建物のほとんどは、崩壊を防ぐことにより人命をしっかりと守った。
- いくつかの耐震改修した建物において損傷が観察された。



地震動による建築物被害(8)

RC建築物(3)の典型的な被害



オイルダンパーで耐震改修された集合住宅で非構造壁に損傷が見られた。



Courtesy of Mr. K. Watanabe of U.R.

典型的な免震建物の被害



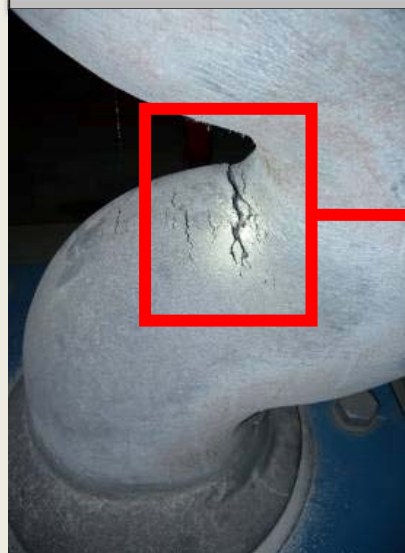
耐火カバーの損傷



エキスパンション
ジョイントの損傷



U字形ダンパーの
塗装の剥離



鉛ダンパーと表面の亀裂

〈まとめ〉

震度が大きく、被災地域がとても広いにもかかわらず、建築物被害はそれ程多くなかった。

- 宅地・地盤：造成宅地の被害や住宅の傾斜を調査した、非常に広い地域に激しい液状化被害が発生した
- 非構造部材：大空間における吊り天井, 外装, そして内装の落下を調査した
- 木造：典型的な被害を調査した
- 鉄骨造, 鉄筋コンクリート造：新耐震(1981)の前後で明瞭な違い、典型的な被害を調査した

〈対策〉

ほとんどの被害は過去の地震において観察されたものであった。また、過去の技術基準の改定は損傷を防ぐ上で有効であった。

しかし、液状化被害、大空間の天井落下、そして免震建物のダンパーの被害については早急な対策が必要である。

耐震改修した建物や公的建物の詳細な検討については現在行われている。

調査の目的

調査の目的は、

- 1) 津波による建築物被害の概要を理解すること
- 2) 建築物被害をもたらすメカニズムの理解に必要な基礎情報の収集
- 3) 津波避難ビルのような建築物を対象とする津波荷重や耐津波設計への貢献

調査の手法は、

- 1) 津波による建築物被害データの収集
- 2) 異なる構造種別毎に被害パターンの分類
- 3) 計算した建築物に作用した津波荷重と建築物の強さとの比較検討

フィードバック



津波による建築物被害(2)

木造の被害(1)



最大浸水深が6m(2層木造の軒高さに相当)以上の地域では、1層や2層の木造はほとんど流失した。その一方で、最大浸水深が1m程度では、ほとんどの木造は残存した。

津波による建築物被害(3)

木造の被害(2)



津波の作用する方向に遮蔽物となる建物があると津波荷重が低減される。木造住宅では、その出隅の柱や壁が流失したにもかかわらず残存したのが見られた。

1階をRC造とする併用構造では流失を免れたのが見られた。

鉄骨造の被害パターンの分類 (1)移動と(2)流失



柱脚部アンカーボルトの破断により移動したと考えられる建築物(左)や津波波圧により1層が傾斜した後に1層柱に引張力が作用し、1層柱頭位置の接合部で破壊が発生したと考えられる建築物(右)が見られた。

鉄骨造の被害パターンの分類 (3)転倒



基礎も含めた建築物全体が転倒したケースが見られた。ALCパネルの外装材は破壊されずに残存している。

鉄骨造の被害パターンの分類 (4)崩壊



構造躯体の崩壊には、2層鉄骨造の1層での層崩壊や海岸沿いの倉庫の部分崩壊があった。

鉄骨造の被害パターンの分類 (5)大きな残留変形



構造躯体のみが残存している鉄骨造において、軽度の傾斜がしばしば見られた。そのような一例として、山形ラーメン屋根をもつ鉄骨造が大きな残留変形を生じているにもかかわらず崩壊していないものであった。

鉄骨造の被害パターンの分類 (6)内外装の流失による大破



ALCパネル外壁がほぼ完全に破壊・流失し、鉄骨骨組みのみが残されている。このような例は多く見られた。

鉄筋コンクリート造の被害パターンの分類 (1)1層の崩壊



建築物の1層の柱頭と柱脚が曲げ降伏し、2層建築物の1層部分に層崩壊が生じた。

鉄筋コンクリート造の被害パターンの分類 (2)転倒



4層以下の建築物において転倒が見られた。すべての転倒建築物において、浸水深は建物高さを超過していた。転倒では、横に倒れたもののほか、ひっくりかえったものもあった。

鉄筋コンクリート造の被害パターンの分類 (3)移動と流失



多くの転倒した建築物では元の位置から移動していた。大きな浮力が建築物に作用したものと考えられる。移動したり転倒した建築物では、地上に引きずったような痕跡は見られなかった。

鉄筋コンクリート造の被害パターンの分類 (4)洗掘による傾斜



津波が建築物に作用する時に、建築物のコーナーに強い流れが発生し、洗掘によって地面に大きな孔が形成される。一例では、マット基礎の建築物がその孔に倒れ込んだ。

鉄筋コンクリート造の被害パターンの分類 (5)壁の破壊



ダブル配筋の300mm厚さの壁が、津波による圧力で曲げによりメカニズムを形成した。なお、支持スパンは10m以上であり、2層床がない建築物であった。

鉄筋コンクリート造の被害パターンの分類 (6)漂流物の衝突



漂流物の衝突は、窓や天井などの非構造部材において見られた。構造骨組みの明確な損傷は多くはなかったが、集合住宅において漂流物の衝突による明らかな壁の破壊が見られた。

調査建物のデータベース

現地調査において、約100棟の建築物の外形寸法と構造躯体寸法を計測した。

建築物名、住所、用途、建設年、津波避難ビルかどうか、構造種別、層数、外形寸法、海岸線あるいは川からの距離、GPS座標、標高、周辺環境、損傷状況などがデータベースに含まれている。

建物番号	RT-12	調査日	2011年4月6日
名称	診療所		
所在地	陸前高田市高田町馬場前	建設年	不明
用途	病院・診療所	津波避難ビル	指定なし
構造種別	S造 (ラーメン構造)		
建物規模	階数	3階 (地下 階)	高さ: 9.6m
	平面寸法	21.5m × 7m	
建物位置	海岸からの距離	約1200m	標高 5m (GPS)
	立地条件	陸前高田駅前交差点近く。平坦な市街地	
最大浸水深		9m	周辺建物の痕跡より
津波後の状況	建物の状態	原位置に残存	1×5スパン、外装材が脱落しているが躯体に損傷は見られない
	躯体の被害	被害なし	
備考	非構造部材の被害	被害あり	外装材の脱落

- ・ 外装材は、ほぼ全て剥落している
- ・ 1階柱口-300×300、桁行梁 H-300×150×6.5×8、梁間梁 H-396×199×7×11
- ・ 津波作用面の反対側に隣接する RC 造 2階建て躯体の被害は軽微であった



写真1 建物外観



写真2 建物内部

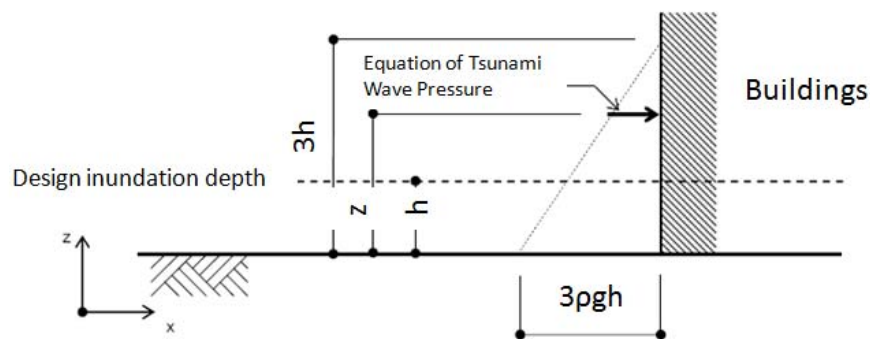


写真3 建物の柱梁部材



写真4 隣接するRC建物

内閣府による津波避難ビルのガイドライン 平成17年6月



$$\text{Equation of Tsunami Wave Pressure: } q_x = \rho g (3h - z) \quad (1)$$

q_x : design tsunami wave pressure (kN/m^2)

ρ : density of water (t/m^3)

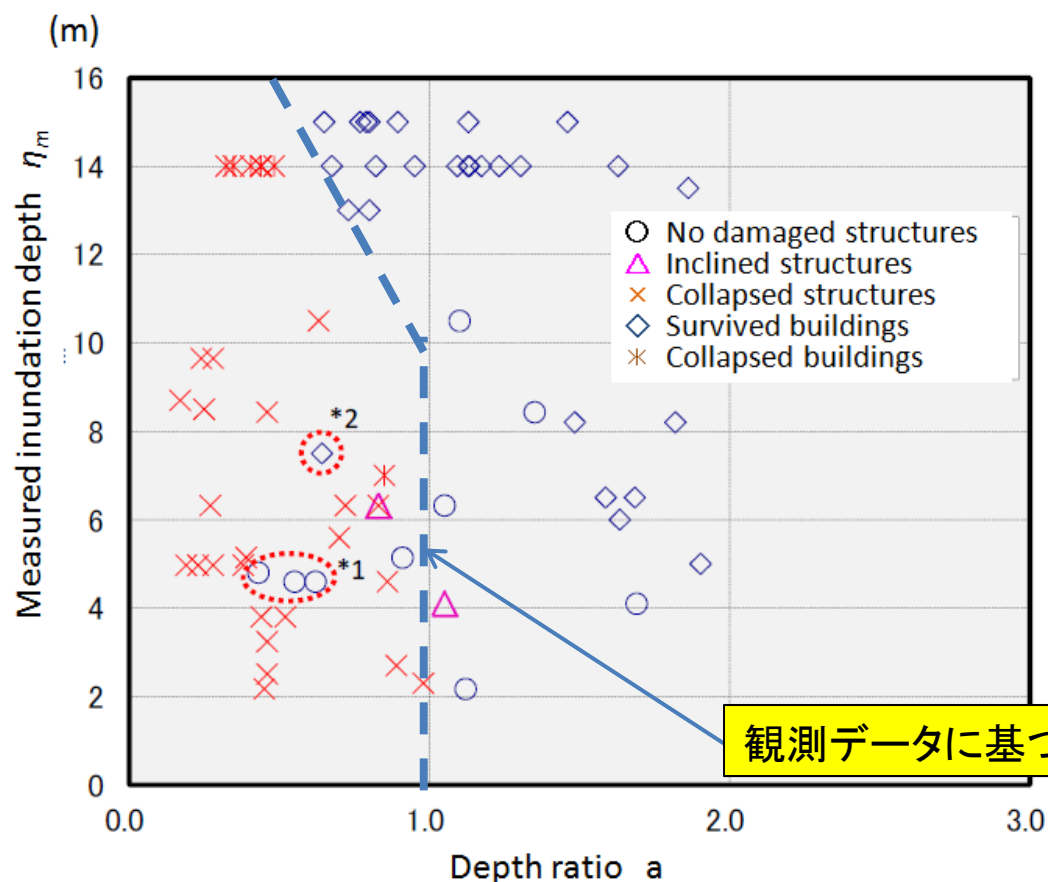
g : gravitational acceleration (m/s^2)

h : design inundation depth (m)

z : height from the ground ($0 \leq z \leq 3h$) (m)

内閣府ガイドラインでは、津波避難ビルの構造設計津波荷重として、(1)式で示す津波波圧を与えている。そこでは、実験結果に基づいて、設計浸水深の**3倍**の高さの静水圧として津波波圧が与えられている。

遮蔽物がある場合の津波の建築物への影響



水深係数は eq. (2) で与えられる。

$$a = \frac{\eta_e}{\eta_m} \quad (2)$$

a : 水深係数

η_e : 建築物等の強度に対応する
静的水圧深さ(m)

η_m : 計測浸水深 (m)

上図は遮蔽物があると見なせる場合の建築物等の損傷状況をプロットしている。損傷と非損傷とを分ける境界は、計測浸水深が10m未満において、水深係数 $a=1$ となっている。

まとめ

まとめは、以下のとおりとなる。

- 1) 異なる構造種別毎の被害パターンを分類し、各被害パターンの要因について検討した。
- 2) 調査した建築物等のデータベースを作成した。
- 3) データベースに基づいて、調査した建築物等の被害状況を計測浸水深や深さ比と対比してプロットした。内閣府ガイドラインでは3とされていた深さ比が、建築物等の被害状況の分かれ目を見ると計測浸水深が10m未満の場合では深さ比が1と見なせる。

東日本大震災からの4(+1)の重要課題

1. 住宅の地盤液状化対策の表示方法
2. 非構造部材、特に、天井落下防止のための構造計算法
3. 設計用長周期地震動の提案
4. 耐津波設計法の提案
5. (免震建物におけるダンパー被害の防止)

住宅の地盤液状化対策の表示方法



- 住宅に対する液状化対策の有無と**可能な**住宅性能表示の検討 (**消費者保護の観点から**)

地盤液状化に対する検討状況

1. 液状化対策技術検討会議(平成23年8月31日に最終報告書公表)
 - 1) FL法で概ね整合、造成年代や地震動の継続時間等にも着目して更なる研究
2. 東京都、浦安市など
 - 1) 東京都: 液状化マップの見直し
 - 2) 浦安市: 3学会(地盤・土木・建築)委託業務
地盤特性の把握(地盤)
被害の分析と今後の対策(土木・建築)
 - 3) 3次補正予算(震災復興)による検討
道路・下水道等の公共施設と隣接宅地等との一体的な液状化対策を推進する事業

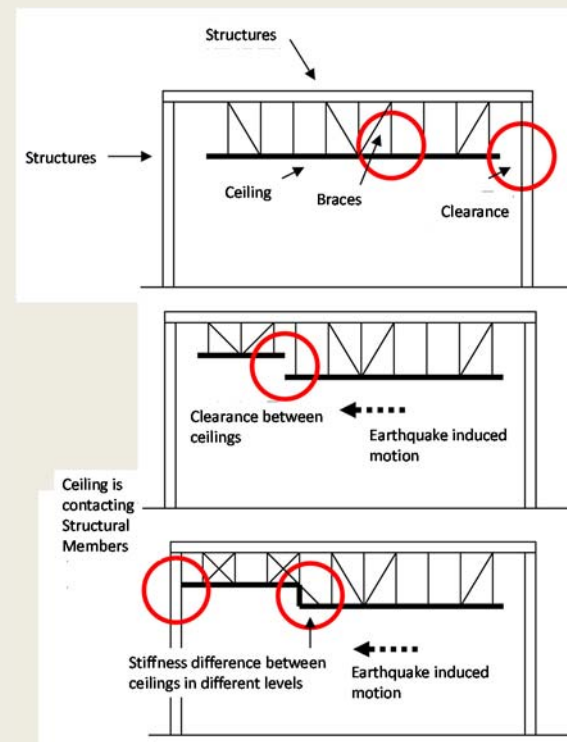
住宅の地盤液状化対策の表示方法

■基準整備促進事業による検討

戸建住宅を対象に、地盤の液状化に関する情報を表示するに当たり必要な知見を得るため、以下の項目について検討を実施。

- ・液状化予測手法の妥当性についての検討
(建築学会と連携)
- ・地盤の液状化に関する情報表示についての検討
(液状化判定の結果と対策の有無)
- ・液状化予測や対策に係る関連調査等についての知見収集・情報整理

非構造部材、特に、天井落下防止のための 構造計算法



過去の技術的助言
(MLIT, 2003.10)

- 過去の技術的助言(右図参照)のレビューと実施可能で現実的な構造計算法の検討

非構造部材、特に、天井の被害の様態



天井落下防止のための構造計算法など

①仕様1：定性的な斜め振れ止めなどの適切な配置及び落下防止対策
事務所などの天井については、**従来どおり**で問題が無さそう。

②仕様2：定量的な斜め振れ止めなどの適切な配置及び落下防止対策
最近の地震でしばしば天井落下が報告されているタイプの学校体育館のような建物の天井については、**ある程度の定量的な対応**が必要であろう。

構造設計者の
直接の
関与が
必要！

③仕様+計算：天井の構造モデル化

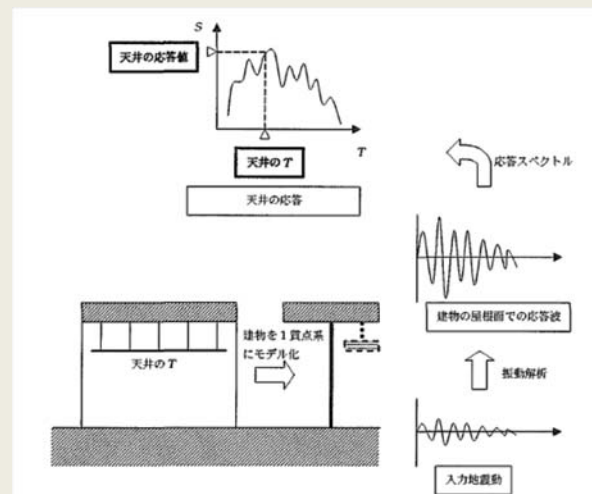
音楽ホールのように**天井が特殊**な建物では、天井に作用する力を算定し、天井を支持部分の強度が耐えられるかを確認する。構造設計者の直接の関与が必要だろう。

④特殊検証：時刻歴応答など

建物と天井の全体系をモデル化して検討を行う。建物と天井のそれぞれ1質点系モデル化の妥当性の検討も必要となる。

フェールセーフ

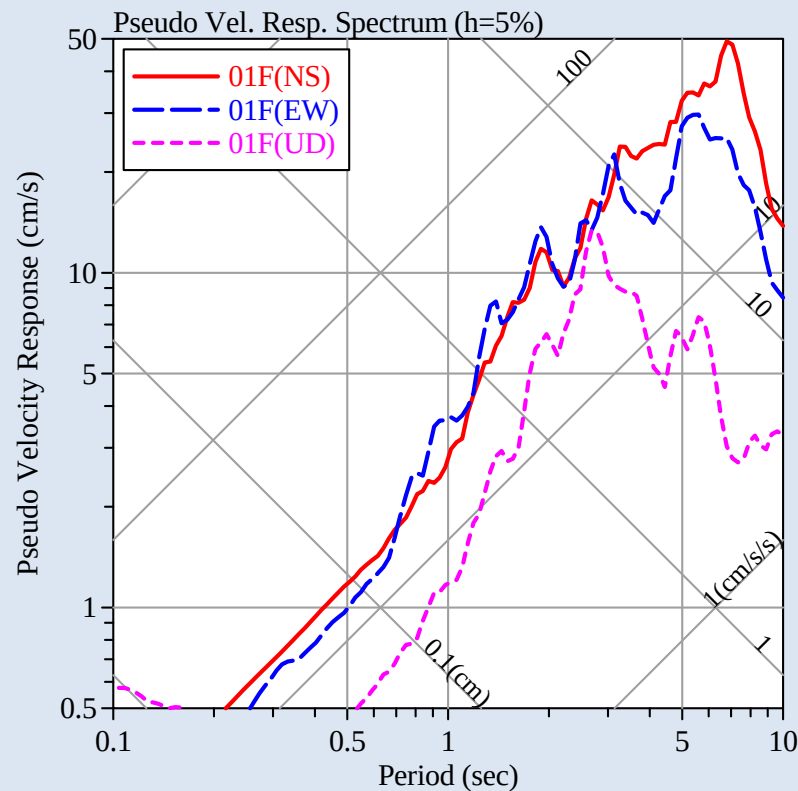
天井をひもで吊る、天井の下にネットを張るなどにより、天井を支持する部分が破損しても天井が落下しない工夫をする。



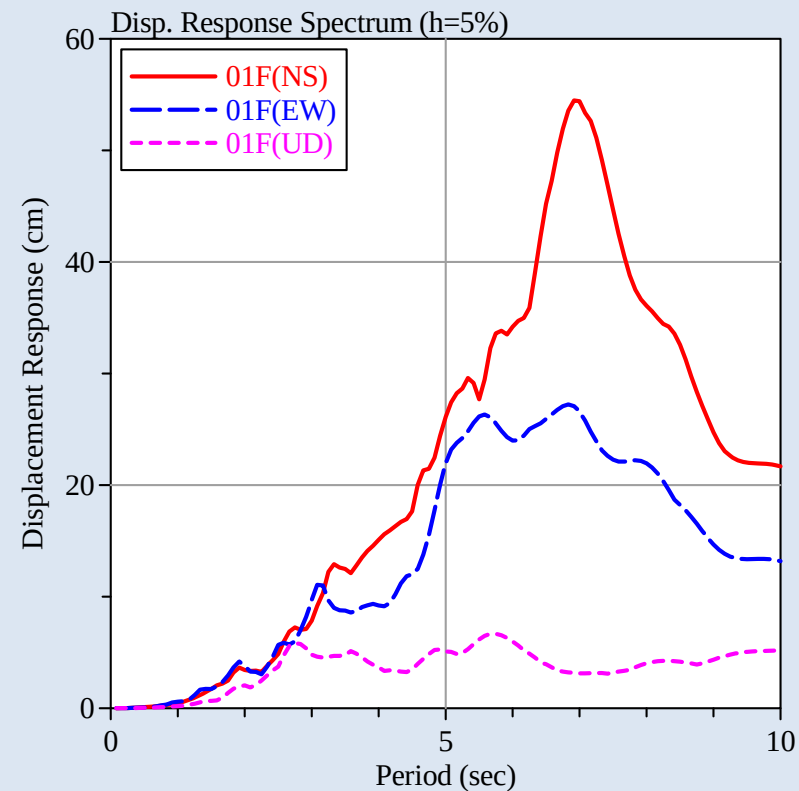
長周期地震動による問題の顕在化

- 長周期地震動対策試案は2010年12月にパブリックコメント、**東北地方太平洋沖地震の発生の約3か月前**、長周期地震動作成に係る基礎情報は建築研究所(BRI)から公表。
- 2003年十勝沖地震:北海道苫小牧市の石油コンビナートでスロッシングにより火災発生
- 2004年新潟県中越地震:震度3だった東京都港区の六本木ヒルズでエレベーターが損傷(地震管制運転装置が作動せず)
- 2007年新潟県中越沖地震:震源から200km以上離れた震度3だった東京都心で周期7秒程度の揺れが約3分間継続
- 2011年東北地方太平洋沖地震:新宿センタービルなどが最長13分間、最大108cm揺れた。また、700km以上離れた大阪府咲洲庁舎では最大137cmほど揺れた。

長周期地震動による問題の顕在化



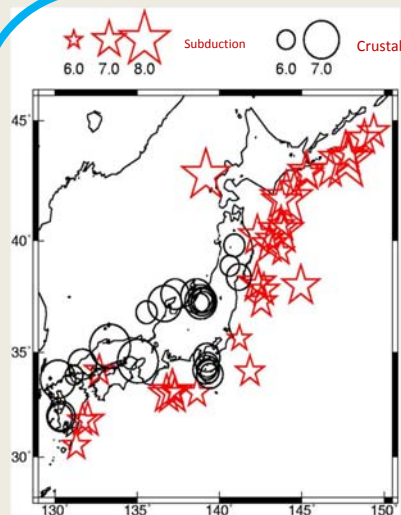
疑似速度応答スペクトル



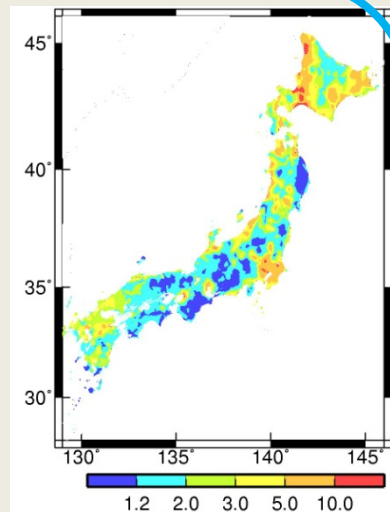
変位応答スペクトル

大阪府咲洲庁舎

設計用長周期地震動の提案



対象地震と観測記録



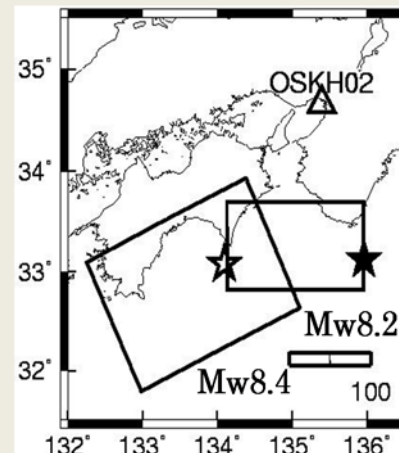
各地のサイト係数
速度応答スペクトル
群遅延時間

対策試案で手法提案

作業中

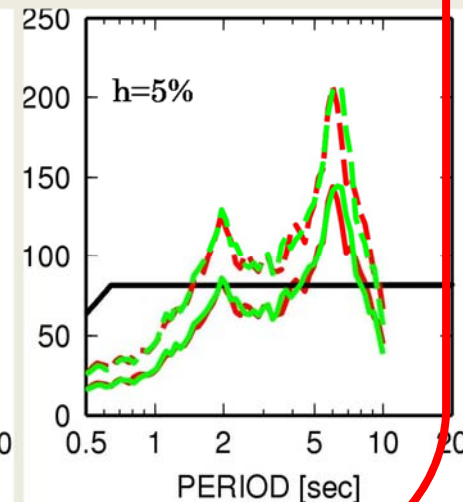
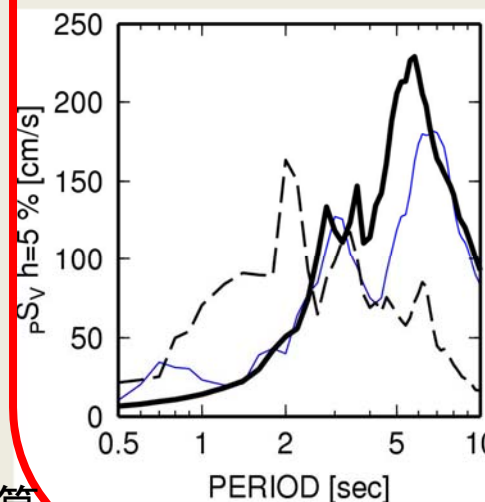
- ・ 東北地方太平洋沖地震で検証
- ・ 震源の方向によりサイト係数を見直す

対策試案に従い計算



震源モデル

サイト係数より、
速度応答スペク
トルや群遅延時
間が算定され、
波形を作成可能



予測波（左）とシミュレーション（右）

今後の問題

- 対策試案に対するコメントへの対応
 - 長周期地震動に対して何らかに対応すべきという方向性には賛成。
 - 南海地震や連動型地震等を対象地震に追加すべき。
 - 入力だけではなく、クライテリアもあわせて提示すべき。
 - 既存建築物への遡及は厳しく、緩和措置、補助等が必要。
- 震源モデル(南海地震、連動型地震)の提案が必要
 - 中央防災会議、地震研究推進本部からの提案が期待される、ただし、いつまでも待っていて対策が遅れることは許されない。
- 固有周期に一致しない卓越周期の地震動に超高層建築物が共振
 - 超高層建築物の観測例を検討したところ、1次周期は概ね合致。ただし、2次周期以降で一部差異。事例は例外的か？
 - 関東エリアで、地震後に1次固有周期が1.4倍程度に伸びた建物が例外的にあり。

耐津波設計法の提案



- 津波避難ビルの構造設計に関する検討、**津波荷重の評価**
浸水域の半分以上の地域は、浸水深が2m以下の地域となっている。

暫定指針による耐津波設計法の見直し

●津波荷重の設定の合理化

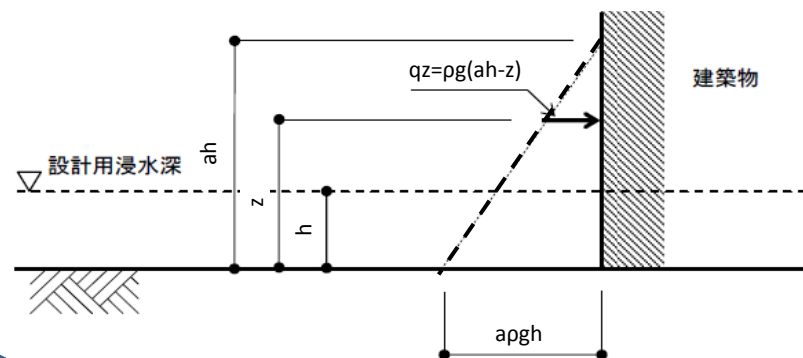
従来の内閣府ガイドライン

(実験に基づき設定)

一律、浸水深の3.0倍の静水圧

今回の震災を踏まえ
合理化

① 堤防や前面の建築物等による軽減効果が見込まれる場合	2.0倍
② ①のうち、海岸等からの距離が離れている場合(500m以遠)	1.5倍
③ ①、②に該当しない場合	3.0倍



併せて、荷重算定にあたって、以下のことを明示
①開口部（窓等）への流入による波力低減が可能
②ピロティの開放部分は荷重算定の対象から除外

※上記の他、浮力による転倒に関する検討、洗掘への設計上の配慮、漂流物の衝突への設計上の配慮について明確化

報道では、「堤防などの遮蔽(しゃへい)物があるなど地形的条件に応じて強度基準を緩和し、避難スペースの高さは想定される津波の浸水の高さ相当階の2階上に設ければ安全とした。」と掲載された。

更なる見直し(合理化)に向けて

- 津波遡上シミュレーションの精度を向上
(敷地での流速と浸水深(フルード数)の時系列的変化)
- 種々の断面形状の建物の抗力係数の評価
 - ・ 遮蔽物としての要件
 - ・ 建物に作用する転倒モーメント
 - ・ ピロティ建物への津波外力
 - ・ 建物内への水の流入、建物に作用する浮力
 - ・ 漂流物による衝突荷重
 - ・ 津波の押し波と引き波の方向
- 特別な調査・研究として水路実験等の位置づけの明確化
- L2津波など震源モデルの想定

(免震建物におけるダンパー被害の防止)



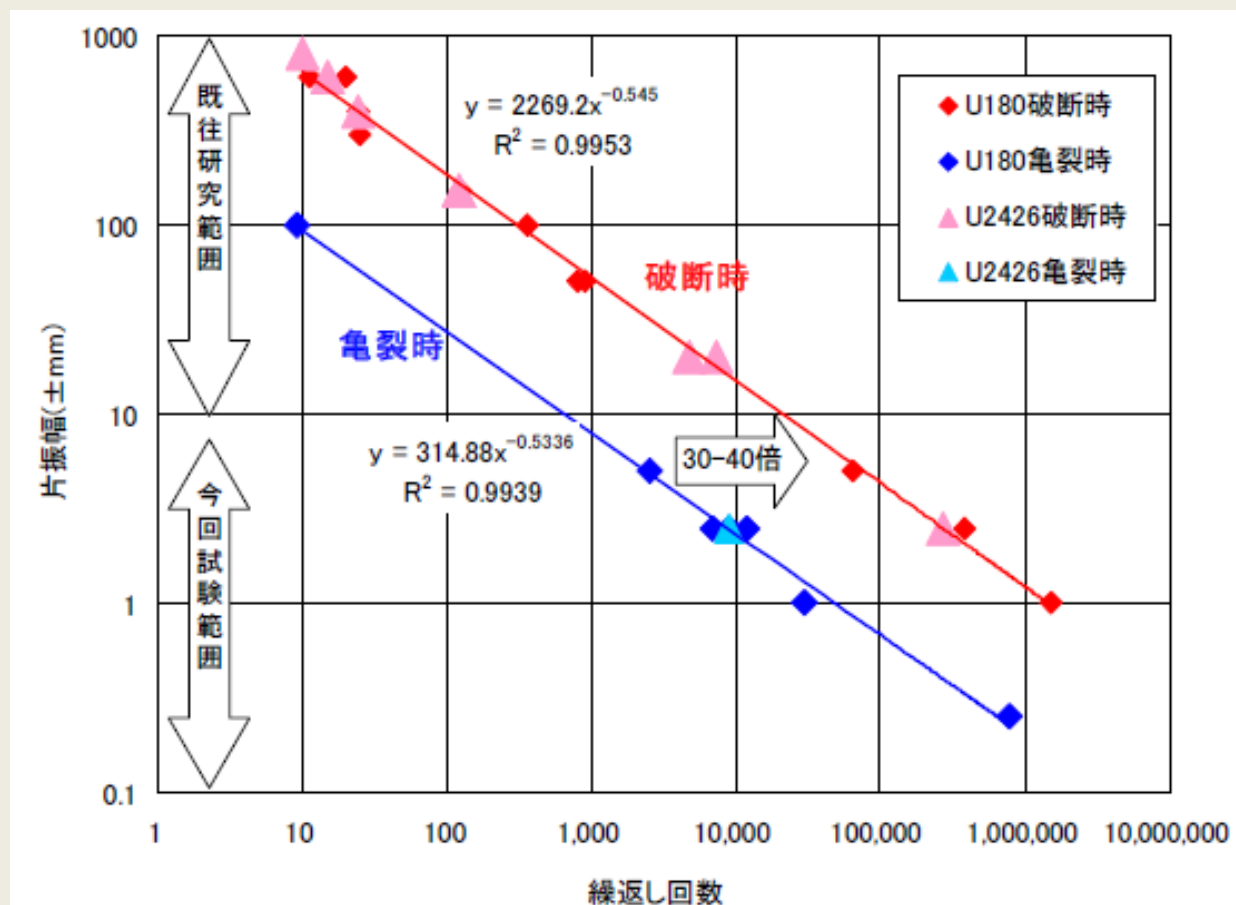
鉛ダンパーの亀裂

【鉛ダンパーは外観から調査可能】

鉛プラグ入リアイソレータ？

→ 最近、実験が実施されている

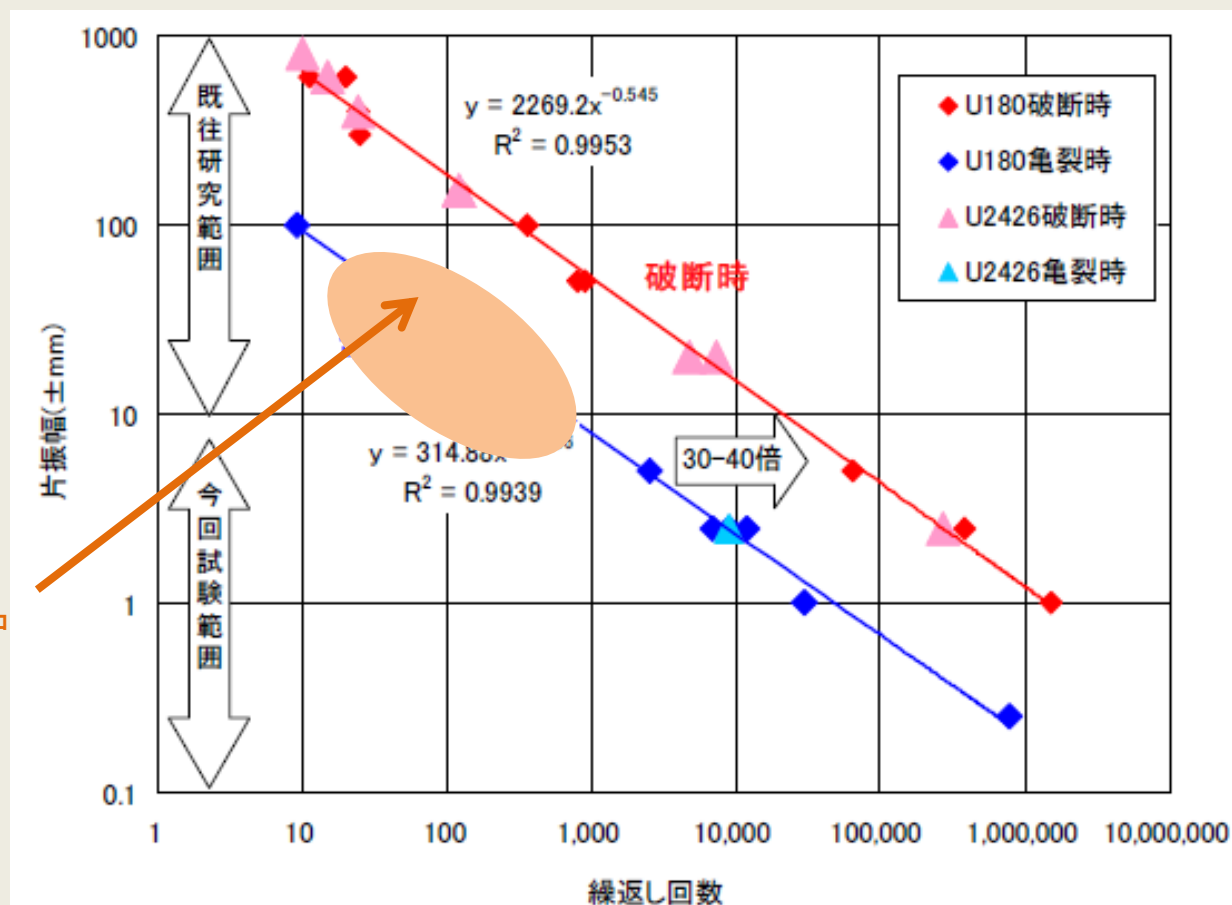
(免震建物におけるダンパー被害の防止)



露出した鉛ダンパーの疲労曲線

鉛ダンパー亀裂発生時・破断時の繰返し回数と振幅の関係（安永など、2010年AIJ大会）

(免震建物におけるダンパー被害の防止)



東北地方太平洋沖
地震による応答

露出した鉛ダンパーの疲労曲線

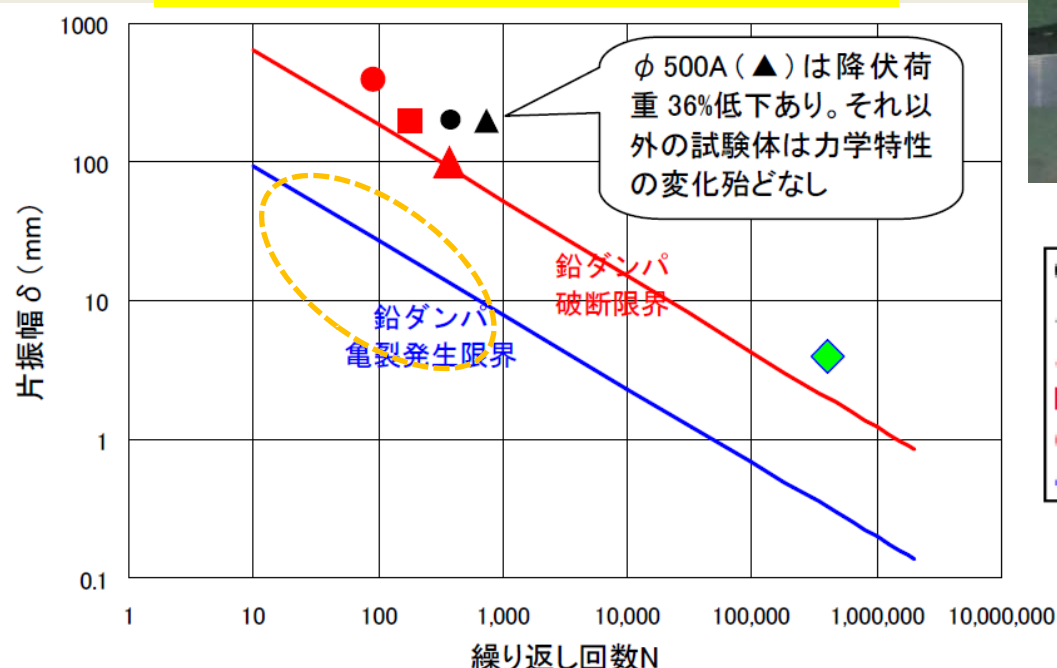
鉛ダンパー亀裂発生時・破断時の繰返し回数と振幅
の関係（安永など、2010年AIJ大会）

(免震建物におけるダンパー被害の防止)

鉛ダンパーであれば破断したであろう振幅・繰り返し(図中の赤線)でもLRBの力学特性はほとんど変化しなかった。

今後も継続して検証が進められる予定。

拘束された鉛ダンパーの実験結果



- φ 1000A
- ▲ φ 500A
- ▲ φ 500B#1
- φ 500B#2
- φ 500B#3
- ◆ φ 500疲労実験

(日本免震構造協会、北村ほかより提供)

追加の課題

昇降機に係る地震安全対策に関する検討

東日本大震災において、建築物に設置されているエスカレーター本体が落下するという被害が複数発生したことを踏まえ、エスカレーターの落下防止対策その他昇降機に係る地震安全対策についての検討に資することを目的とする。



今後の方針

- 政策の企画・立案・遂行に資する調査・研究等
- 法令等に基づく技術基準の原案作成
- 住宅・社会資本整備に関する技術指導
技術基準 → 技術基準 + 情報提供
(規制) → (規制) + (誘導)
- 本来業務として、ある程度時間をかけて行う研究
- 建築法体系勉強会の動き
- 技術基準の継続的な整備は今後も求められる
- コンタクトポイント提案や建築基準整備促進事業成果の反映
- 黄色本(構造関係技術基準解説書)の改訂(2007年版から4年経過)
- 他分野との連携にも重点