

地震工学

第7回

建築とハード対策(構造と非構造)

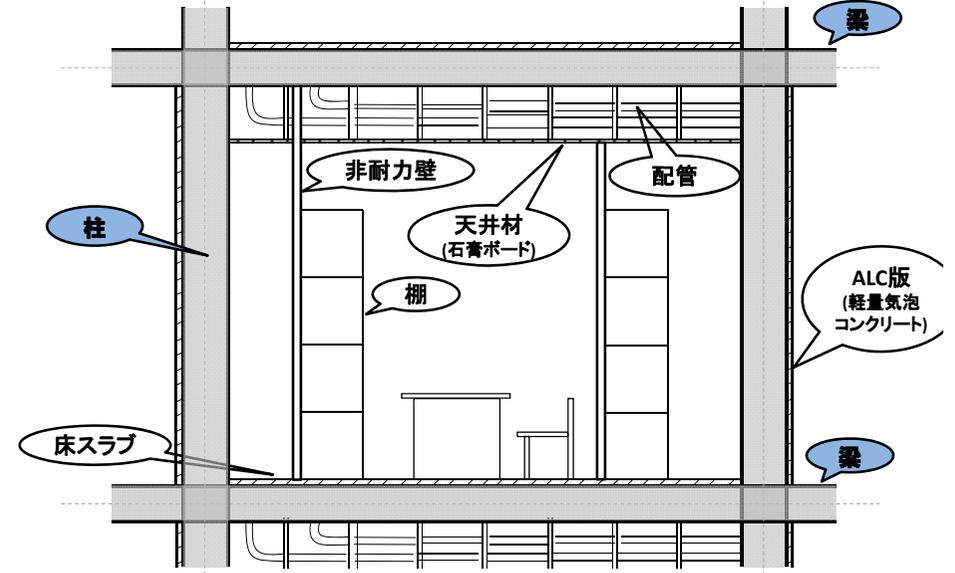
2019年6月13日

工学院大学 建築学部 まちづくり学科

久田嘉章

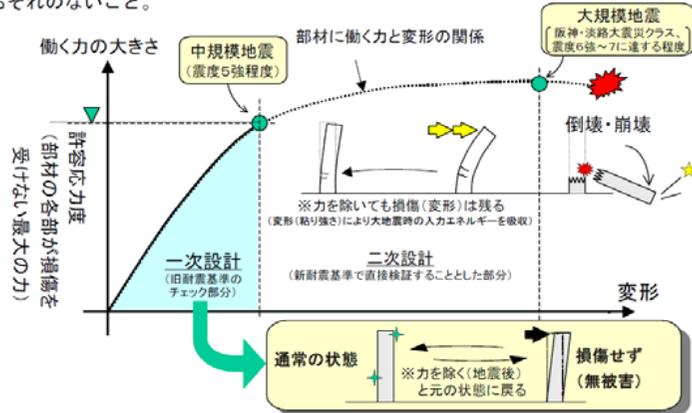
構造と非構造:高層建物の建物断面

部材:構造(柱・はり等)と非構造(非耐力壁・内外装・什器等)



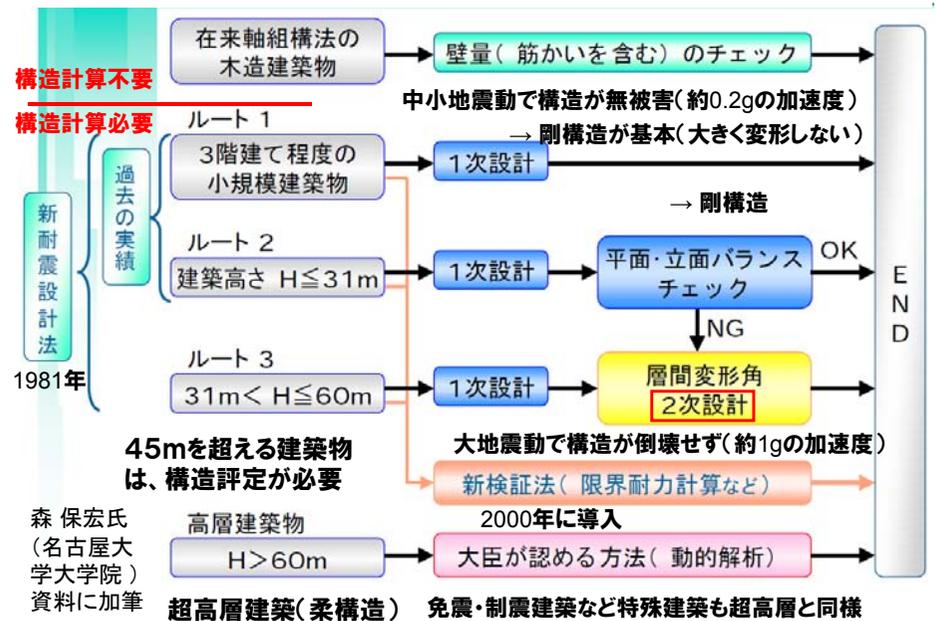
建築基準法の耐震基準の概念(構造対象、最低基準)

- 許容応力度計算(一次設計)
特徴「中規模の地震動でほとんど損傷しない」ことの検証を行う。(部材の各部に働く力 \leq 許容応力度)
⇒建築物の存在期間中に数度遭遇することを考慮すべき稀に発生する地震動に対してほとんど損傷が生ずるおそれのないこと。
- 保有水平耐力計算(二次設計)*
特徴「大規模の地震動で倒壊・崩壊しない」ことの検証を行う。(保有水平耐力比 $Q_u/Q_{un} \geq 1$)
⇒建築物の存在期間中に1度は遭遇することを考慮すべき極めて稀に発生する地震動に対して倒壊・崩壊するおそれのないこと。



* 二次設計には、保有水平耐力計算の他、より精密な許容応力度等計算やより高度な構造計算方法である限界耐力計算等がある。
国土交通省 <http://www.mlit.go.jp/common/000188539.pdf>

「構造」計算のルート(耐震規定:構造躯体が主対象)



森 保宏氏
(名古屋大学大学院)
資料に加筆

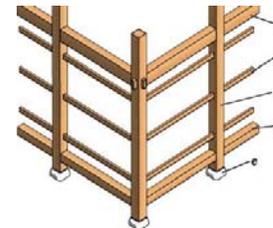
超高層建築(柔構造) 免震・制震建築など特殊建築も超高層と同様

木質系建物の耐震既定の変遷

(ホームズ君良く分かる耐震: <http://jutaku.homeskun.com/taishin/>)

- ・市街地建築物法施行(1920):耐震規定なし
- ・市街地建築物法改正(1924):耐震規定導入
震度法(設計震度0.1)、木造住宅:筋違など
- ・建築基準法施行(1950):施行令に構造基準導入
震度法(設計震度0.2)、木造住宅:壁量規定など
- ・建築基準法改正(1959):壁量規定強化など
- ・建築基準法・施行令改正(1971):RC造柱強化など
木造住宅:基礎とC造またはRC造の布基礎とすること、など
- ・建築基準法・施行令改正(1981):新耐震設計基準
木造住宅:壁量規定改定、構造用合板など面材壁追加
- ・建築基準法改正(1987):木造3階建物可能
- ・建築基準法改正(1995):接合金物等の奨励
- ・建築基準法改正(2000):木造住宅では、
1)地盤調査を義務化、地耐力に応じた基礎を特性(30kN未満では杭基礎 or べた基礎)、2)継手・仕口の仕様を規定(接合金物・ホールダウン金物など)、3)耐震壁配置のバランス計算義務化
- ・品確法(2000)、性能表示制度(2001):耐震等級など
- ・住宅瑕疵担保履行法(2009):現場検査(基礎・躯体)の義務化

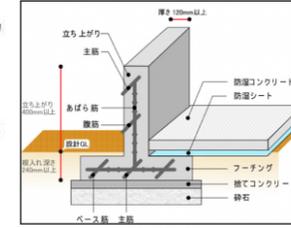
木造建物の基礎と断層直上による被害の違い



束・独立基礎(伝統工法)

画像でみる日本建築:

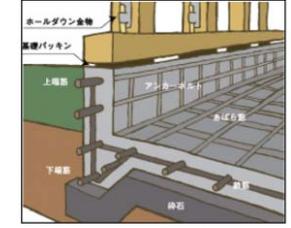
<http://www.wb.commufa.jp/kazuya/sub8.html>



布基礎

(1971年以降・無筋可)

FAD建築事務所 <http://fad-office.com/blog/blog/264>



べた基礎

(2000年以降・地耐力調査)



地表地震断層と伝統木造の被害(大破)
(下陳、田中氏・東電設計・提供)



古い住宅の被害



新築住宅

新耐震設計法:建築基準法施行令改正(1981)

1次設計(許容応力度計算):一次設計では構造耐力上主要な部分の地震時の応力度が許容応力度を超えないことを確認する(施行令第82条の1)

i層の層せん断力 $Q_i = C_i \times W_t$ (i層から上の建物重量)

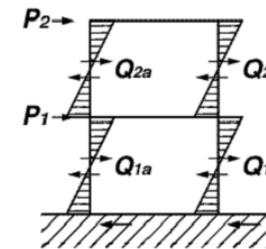
- $C_i = Z \cdot R_t \cdot A_i \cdot C_0$: 層せん断力係数
- Z: 地震地域係数
- R_t : 振動特性係数
- A_i : 地震層せん断力分布係数
- C_0 : 標準層せん断力係数

1次設計(中小地震): $C_0 = 0.2$

2次設計(大地震): $C_0 = 1.0$

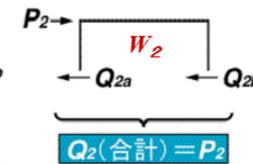
地震荷重(水平力)から層せん断力へ

各階水平力
(地震荷重)



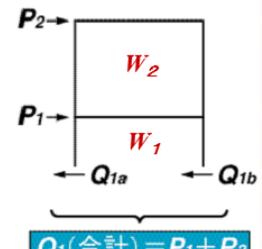
水平力を受ける
ラーメン

2階の水平震度
 $k_2 = P_2 / W_2$



2階の層せん断力
2階の層せん断力係数
 $C_2 = Q_2 / W_2$

1階の水平震度
 $k_1 = P_1 / (W_1 + W_2)$



1階の層せん断力
1階の層せん断力係数
(ベースシャー係数)
 $C_1 = Q_1 / (W_1 + W_2)$

P_i : 各階水平力(地震荷重)

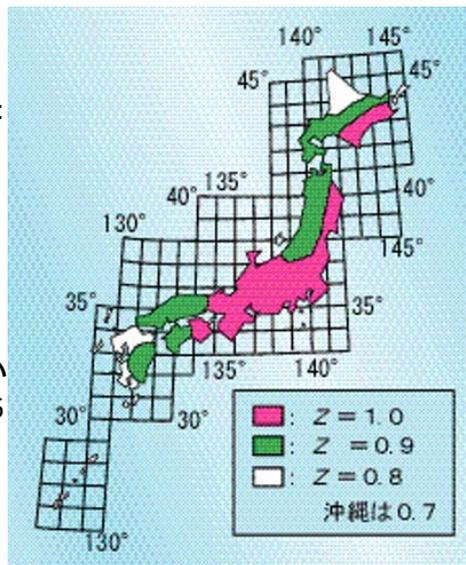
Q_i : 各部材せん断力

地域係数Z

歴史データから得られた係数:

- ・歴史上、地震の少ない地域の係数は小さい
- ・沖縄県は1972年米国から日本に返還。係数の継続性より値が小さい

- ⇒活断層など再現期間の長い地震は考慮していない(2016年熊本地震など)
- ⇒全国どこでも1.0以上の値を用いることが望ましい



9

振動特性係数Rt

標準的な地震動は周期約1秒以下の短周期成分が卓越するため、長周期での地震荷重を低減可能とする係数。但し、軟弱地盤ほど低減できない。標準的な加速度応答スペクトルを無次元化している。

$T > T_c$ の場合

$$R_t = 1 - 0.2 \left(\frac{T}{T_c} - 1 \right)^2$$

$T \leq T_c$ の場合

$$R_t = 1.0$$

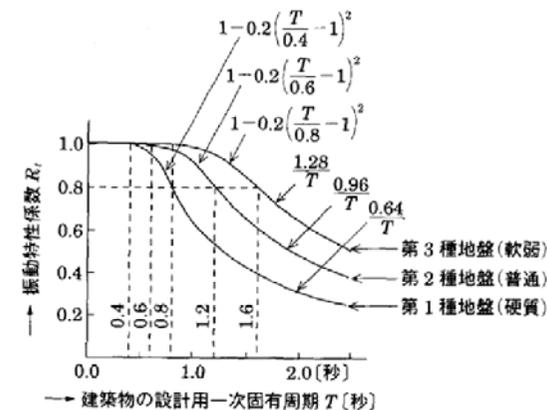
T : 設計用一次固有周期

T_c : 地盤特性係数

第1種地盤 $T_c = 0.4$

第2種地盤 $T_c = 0.6$

第3種地盤 $T_c = 0.8$



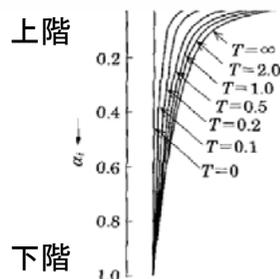
層せん断力係数の高さ方向分布Ai

建物の揺れを考慮し、低層階より上層階で層せん断力係数が大きくなることを考慮した係数。長周期の建物ほど、上階の増幅が大きい。

$$A_i = 1 + \left(\frac{1}{\sqrt{\alpha_i}} - \alpha_i \right) \times \frac{2T}{1+3T}$$

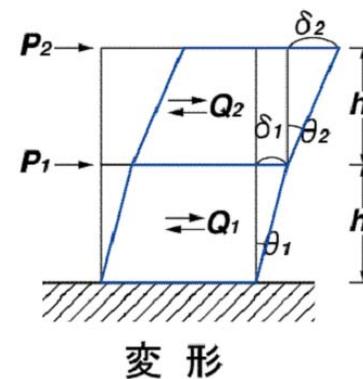
α_i : $\frac{\sum W_i}{W}$ (W : 地上部より上の全重量, $\sum W_i$: その層より上部の全重量)

T : 設計用一次固有周期



算定式 $A_i = 1 + \left(\frac{1}{\sqrt{\alpha_i}} - \alpha_i \right) \times \frac{2T}{1+3T}$
 ここで、 α_i : 最上部から*i*層までの重量の和を地上部の全重量で除した値
 T : 設計用一次固有周期(秒)

層間変位と層間変形角



• δ_1, δ_2 : 層間変位

• $\theta_1 = \delta_1 / h_1$
 $\theta_2 = \delta_2 / h_2$ } 層間変形角

• $K_1 = Q_1 / \delta_1$
 $K_2 = Q_2 / \delta_2$ } 層間剛性

• $F_1 = 1 / K_1$
 $F_2 = 1 / K_2$ } 層間柔性

変形

$$\rightarrow \delta = Q / K = QF$$

P_i : 各階水平力(地震荷重)

Q_i : 各階層せん断力

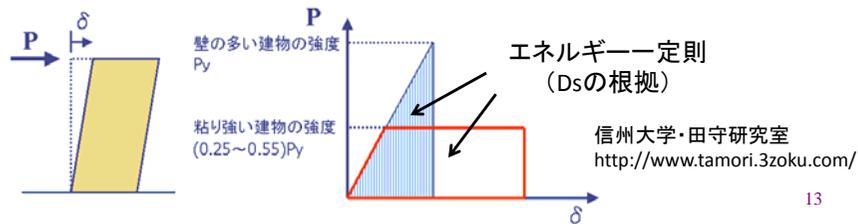
12

新耐震設計法:建築基準法施行令改正(1981)

2次設計(保有水平耐力計算):各階の必要保有水平耐力 Q_{un} は以下により計算する(施行令第82条の4)

$Q_{un} = D_s \times F_{es} \times Q_{ud}$: (必要)保有水平耐力

- D_s は各階の構造特性係数(0.25~0.55)
- $F_{es} = F_s \times F_e$ は各階の形状特性係数
 - F_s : 剛性率 R_s に応じた係数($R_s \geq 0.6$ で1、 $R_s < 0.6$ で最大2)
 - F_e : 偏心率 R_e に応じた係数($R_e < 0.15$ で1、 $R_e \geq 0.3$ で1.5)
- Q_{ud} は地震力によって各階に生じる水平力



2次設計(保有水平耐力計算): A_i 分布の水平力による増分解法を行い、建物各階の保有水平耐力が保有水平耐力以下であることを確認する

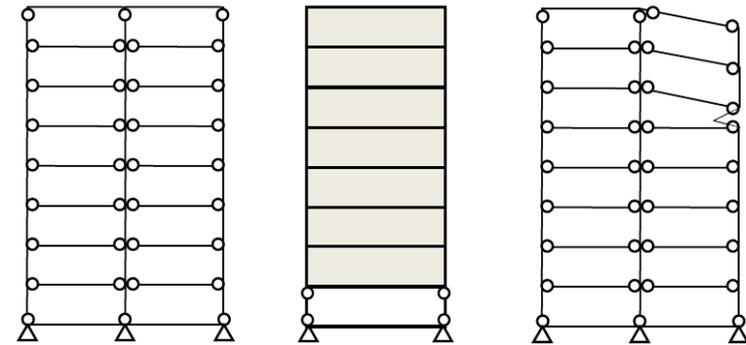


図9 建築物の崩壊メカニズムの例

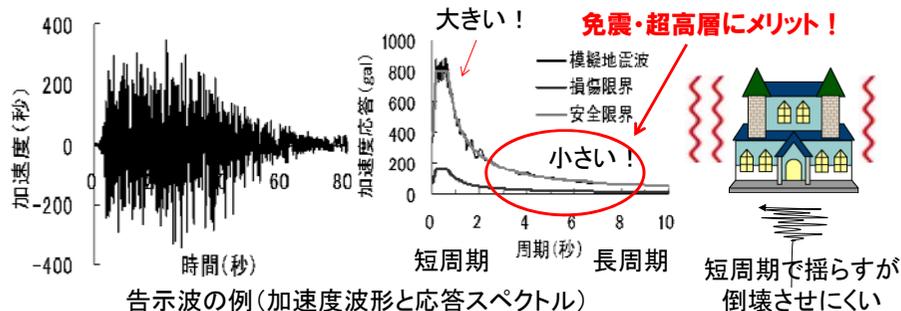
時刻歴応答解析(地震応答解析・動的解析)

超高層建築物や免震建築物では、時刻歴応答解析法による損傷・安全性確認を行わなければならない。

入力地震動: 観測波(エルセントロ波など)、告示波、サイト波(サイトにおける震源・伝播・地盤増幅特性を考慮したシミュレーション波)などを使用

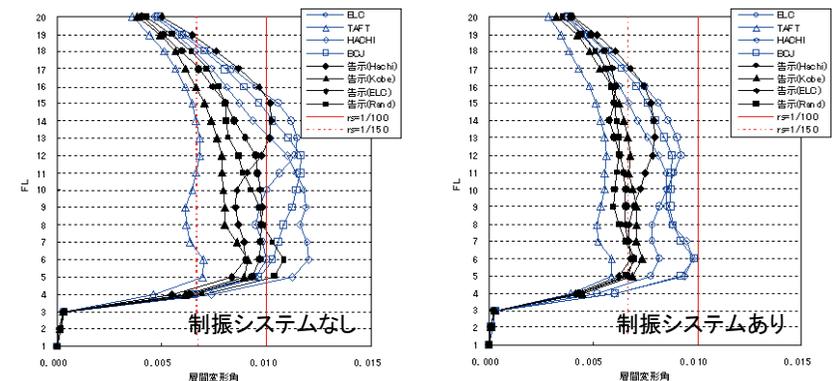
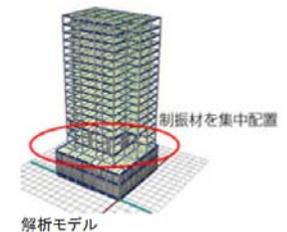
告示スペクトル: 解放工学的基盤(S波速度400m/s以上の地盤)における加速度応答スペクトル(減衰定数5%)、「稀に発生する地震動(レベル1)」と「極めて稀に発生する地震動(レベル2)」がある

告示波: 告示スペクトルに適合する模擬地震波(位相はランダムや観測地震波位相など)



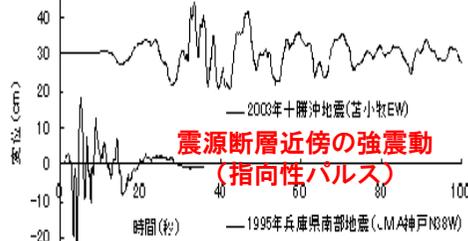
時刻歴応答解析の事例

地下2階地上17階建の鉄骨構造。建物の用途上、低層階の階高が高くなっています。そこで、ソフトファーストストーリーの考え方を導入した集中配置型の制振システムを採用。



活断層や海溝型巨大地震による特徴的な地震動(長周期・長時間地震動、断層近傍強震動)

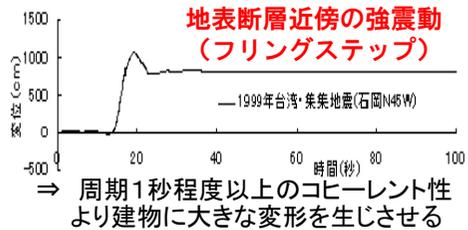
長周期・長時間地震動(堆積層表面波)
⇒地震動・卓越周期との共振



2003年十勝沖地震の苫小牧市におけるナフサタンクの全面火災
→卓越周期・長い継続時間



1995年兵庫県南部地震における神戸市の木造家屋の倒壊
→震度7、なぎ倒す

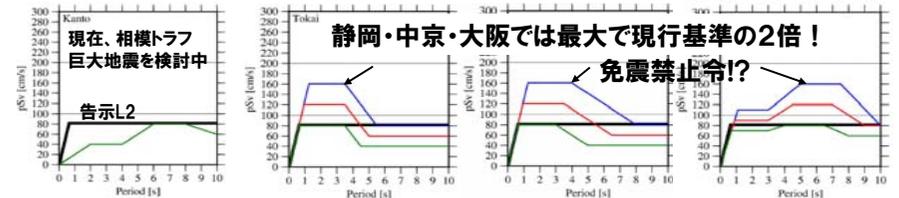


1999年台湾・集集地震による地表断層上のRC建物の傾斜
→移動・傾斜

国土交通省:超高層建築等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策(平成28年6月24日)

(建設省通知)

- 対象地域:南海トラフ沿いで約100~150年間隔で発生しているM8~9クラスの地震
(**実際には、千年に1度の1854年安政東海M8.4と1707年宝永地震M8.6を使用**)
- 対象地域:静岡・中京・大阪・関東の各地域
- 対象建物:平成29年4月1日以降、大臣認定による新築の超高層建築・免震建築など
- 主な対策:耐震設計、家具の転倒・移動防止、長時間繰返し累積変形の影響(500秒以上)



3大都市圏と静岡地域のゾーン別の設計用疑似速度応答スペクトル(黒線は告示レベル2)

2016年熊本地震の地表地震断層と建物被害調査



参加機関(延べ17名):
工学院大・安藤ハザマ
東京電機大・土木研
鯉沢工学研究所
減災アトリエ

期間:
2016年5月7~8日
2016年5月25日

調査法:
外観目視(岡田・高井
チェックシートなど)
一部、ヒアリング

調査建物(全224棟)
地表断層近傍
うち、断層直上36棟
木造・82%
1・2階・95%
非常に古い・50%
倒壊・14%(殆どが
非常に古い倉庫)
全壊・11%

建物①(築80年の伝統木造家屋、D4)



南面道路の地表地震断層(左建物は納屋)



築約80年の伝統木造農家(南面)



地表地震断層と東基礎・柱のずれ(南面)



断層のずれによる建物変形(北面)

活断層と地表地震断層(地質調査総合センター)

建物④(古い在来木造建物、D4)



地表地震断層と古い在来木造住宅の被害



断層ずれと無筋コンクリートブロックの被害



地表地震断層と同建物の傾斜被害(南面)



無筋コンクリートブロック基礎の被害

建物②(新しい木造住宅 D1)



正面道路の地表地震断層(約50cmのずれ)



新しい軽量鉄骨造(南面、外観上無被害)

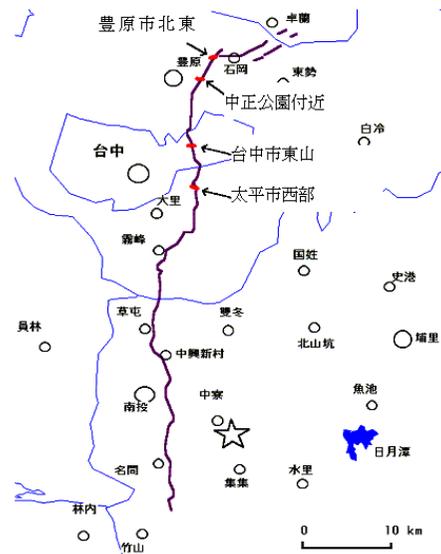


北側は約1.5mの盛土と地表断層のずれ(布基礎・耐震壁で基礎・建物は変形せず)



基礎隅角部のクラック

地表断層近傍の建物悉皆調査 1999年台湾・集集地震



1999 Chi-Chi Earthquake
(from Web Page of Nihon University)

- ① 豊原市北東部 (石岡に近い3号線沿い)
- ② 豊原市の中正公園付近
- ③ 台中市東山 (軍功小学校付近)
- ④ 太平市西部 (一江橋付近)

1999年台湾集集地震 被害調査報告書
(日本建築学会、2000)



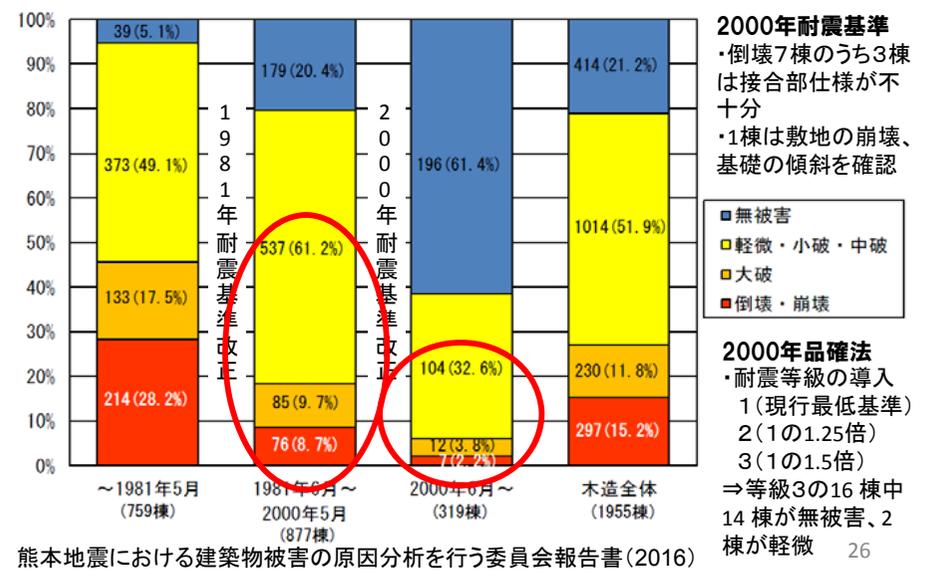


大平・一江橋付近 Google Street View (2009/11)



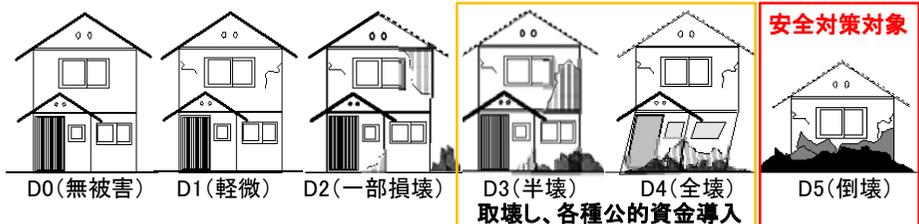
https://www.google.co.jp/maps/@24.1327538,120.7353386,3a,49.9y,282.35h,106.61t/data=!3m6!1e1!3m4!1ssA7uUMka90r_GHORvCJAJ2e071331218i6656

想定内:木造の建築時期別の被害状況 益城町の木造住宅被害:熊本地震建築物被害調査報告

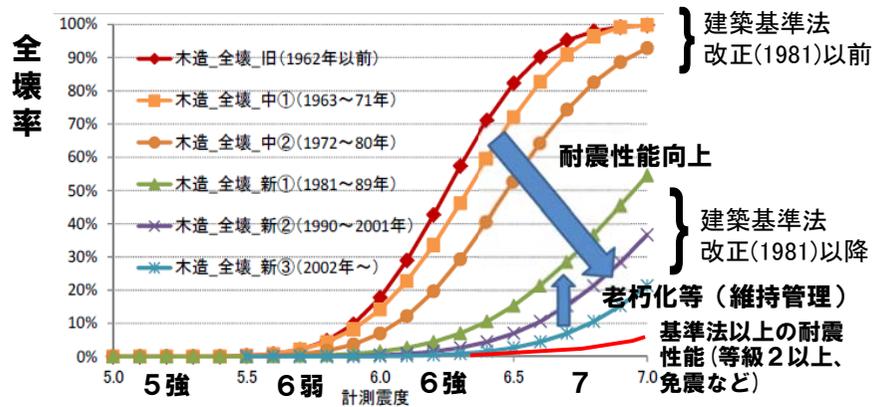


断層ズレの対策:益城町の市街地復興に向けた 安全対策のあり方等に関する最終報告(国交省2017)

- ・活断層のズレに対する安全対策(提案)
 - (1)低層建築物について
 - ⇒ 今後、新築される建築物について特段の追加的配慮は必要ない
 - ⇒ 一般市民には何もしなくても良いと誤解される可能性あり
- ・建築基準法(最低基準)の「安全」とは「倒壊しない」の意味
 - ⇒取壊しになれば、避難所・仮設住宅の生活等で死者が増大(直接死は50名、関連死は約300名)、復旧・復興へ膨大な時間・費用
 - ⇒活断層近傍のリスクを認知し、耐震等級3など高い耐震性能を!



中小～巨大地震対策:レジリエントな震災対策の概念 レジリエントな対策:事前の減災対策+事後の柔軟な対応力向上



木造建物の被害関数(内閣府被害想定2013)
事前の抵抗力向上 ⇒ 建物・まちの耐震性能向上・維持管理
(構造の耐震設計⇒人の生活のための機能維持・早期復旧設計へ)

2016年熊本地震の教訓:避難所等の被害の状況

○ 倒壊に至らないまでも、構造部材の部分的な損傷、非構造部材（天井材、内外装材、ガラス開口部、防煙垂れ壁等）の落下等により、地震後の機能継続が困難となった事例が多く見られた。

※ 建築基準法では、中規模地震に対して損傷しないこと、大規模地震に対して倒壊しないことを求めているが、大規模地震に対して損傷しないことは求めている。

構造部材の被害による耐震性の低下

<屋根支承部の破損（熊本市）> <鉛直ブレースの破断（熊本市）>

使用可能 57%(6棟) 使用不可能 43%(6棟)

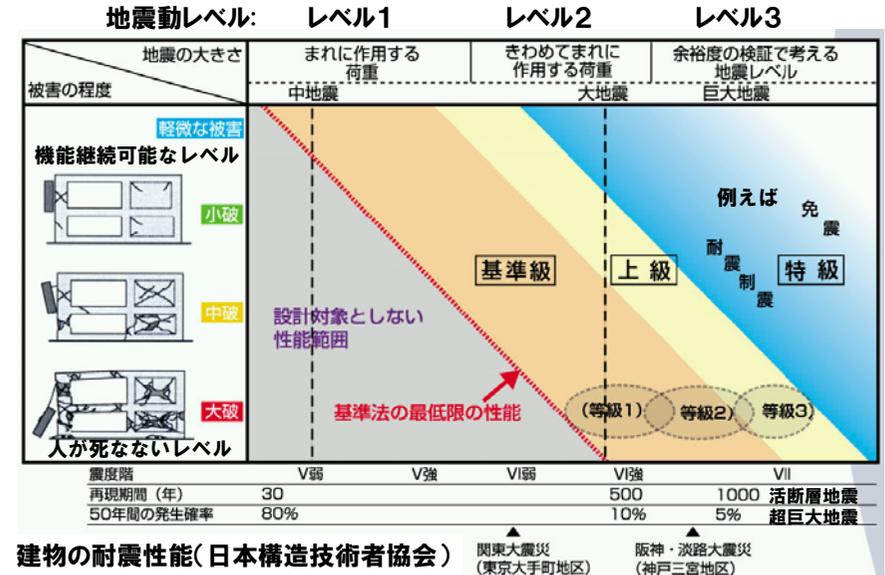
※ 益城市において避難所指定された建築物は、新耐震基準又は耐震改修済のものであったが、非構造部材（天井材、内装材）や構造部材の損傷・落下等により、避難所としての使用を検討した14棟のうち6棟が使用不可能となった。

非構造部材の被害

<天井材の落下（合志市）> <外装材の脱落（熊本市）> <ガラス開口部の損傷（宇城市）> <防煙垂れ壁の被害（益城市）>

⇒ 防災拠点となる建築物については、機能継続に係る対策が必要。
「熊本地震における建築物被害の原因分析を行う委員会」報告書のポイント(国土交通省2016)

建物の耐震性能(日本構造技術者協会) 一建築基準法(最低限の基準)より高い耐震性能を—



より高い耐震性能を評価・認証:レジリエンス性能設計 Resilience-Based Design Approach

Usefulness of Performance Metrics

USRC BUILDING RATING SYSTEM	SAFETY	DAMAGE	RECOVERY
★★★★★	Blocking exit paths unlikely	Minimal Damage (<5%)	Immediate to Days
★★★★	Serious injuries unlikely	Moderate Damage (<10%)	Within days to weeks
★★★	Loss of life unlikely	Significant Damage (<20%)	Within weeks to months
★★	Isolated loss of life	Substantial Damage (<40%)	Within months to a year
★	Loss of life likely	Severe Damage (40%+)	More than a year

確率・定量的な性能評価手法(FEMA P58など)により建物を評価・認証

民間主導

- ・Arup社のREDi™ Rating System
- ・U.S. Resilience CouncilによるBuilding Rating System、など

評価項目

- ・居住者の安全性
- ・直接被害額
- ・復旧時間

認証(LEEDに習う)

- ・Platinum、Gold、Silver Certified



U.S. Resilience CouncilによるSeismic Hazardに関する建物のRating System

課題2:建物の被害低減策(主として地震のハード対策)

1. 自宅の構造・非構造の耐震性を調べよ(構造種別、築年、平面・立面のバランス、室内の安全対策など)

2. 以下の項目の中から2つ以上選び、問いに答えよ。

- ・現行の建築物の耐震設計法を簡単に説明せよ(例:建築基準法の耐震基準の変遷、1981年新耐震設計法、層せん断力係数・層間変形角とは? 建物の規模や高さ別の耐震設計基準など)
- ・既存不適格建築・耐震診断・耐震補強とは何か?
- ・地震応答スペクトル・建物の固有周期・振動モードとは何か?
- ・仕様設計と性能設計の違いは何か?
- ・液状化とは何か? どのような対策があるのか?
- ・構造部材と非構造部材の違いは何か? 非構造部材には何があり、どのような耐震補強法があるか?
- ・耐震・免震・制震建築とは何か? それぞれの特徴は?
- ・2000年基準法改正で木造建築の耐震性はどうか改善されたか?

注意:

- ・参考にした文献や図表は必ず明記し、どの部分を参照したのか明確にすること。用紙A4とする。提出は2週間後の授業開始時とする