

地震工学

第10回

建築とハード対策(その2)

2018年7月5日

工学院大学 建築学部 まちづくり学科
久田嘉章

建物の地震防災・耐震設計:耐震・免震

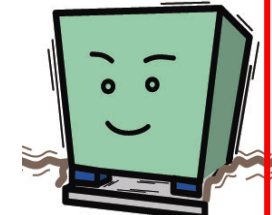


耐震構造
(耐震壁・筋交いなどで抵抗)

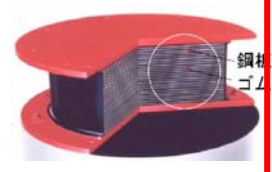


耐震補強の例

http://bousai.kke.co.jp/management/2005/08/post_1.html



免震構造
(免震層で揺れを逃がす)



免震積層ゴムの例

<http://www.jssi.or.jp/gaiyou/shoshin/cutmodel.jpg>

超高層建築に有効



制振構造
(制振装置で揺れを吸収)



制振補強の例

https://www.kyb-ksm.co.jp/products/vibration_control/vibration_control-0013.html

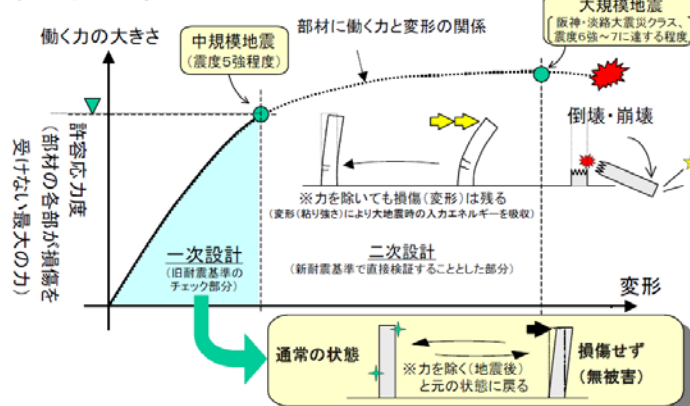
建築基準法の耐震基準の概要

○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) ※

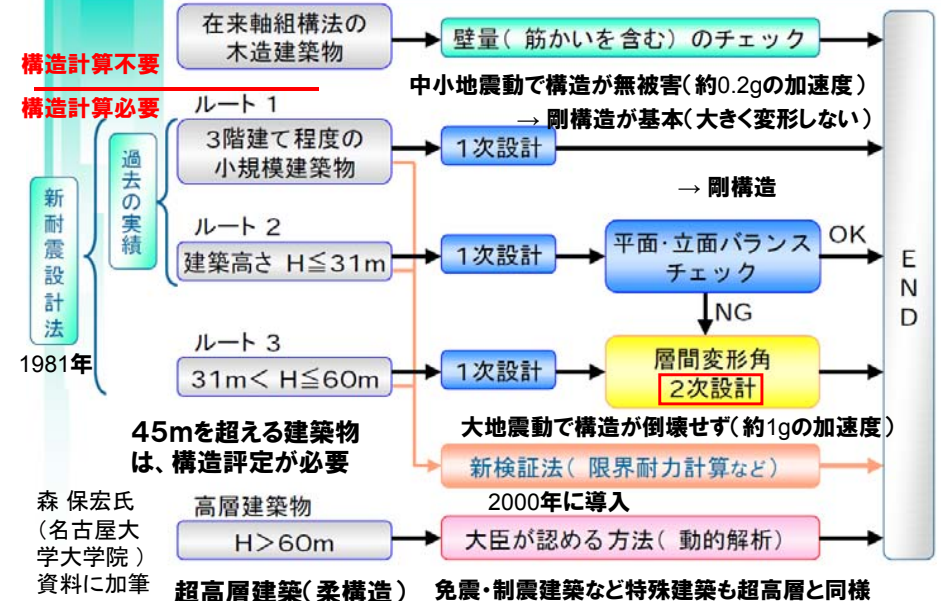
特徴「大規模の地震動で倒壊・崩壊しない」ことの検証を行う。(保有水平耐力比 $Q_u/Q_{un} \geq 1$)
⇒建築物の存在期間中に1度は遭遇することを考慮すべき極めて稀に発生する地震動に対して倒壊・崩壊するおそれのないこと。



※ 二次設計には、保有水平耐力計算の他、より厳格な許容応力度等計算やより高度な構造計算方法である境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(現在の耐震規定)



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・制震建築等特殊建築も超高層と同様

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): $C_0 = 1.0$

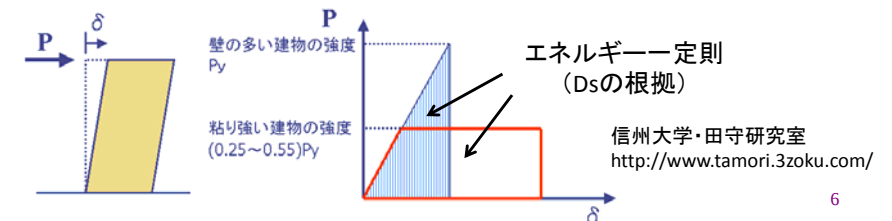
5

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



6

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析法を行い、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

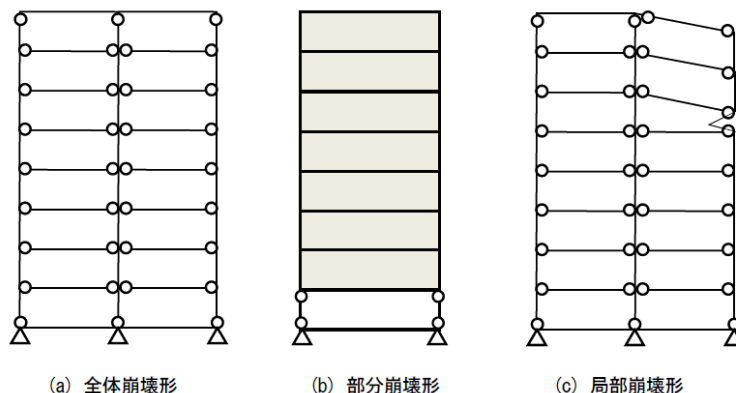


図9 建築物の崩壊メカニズムの例

7

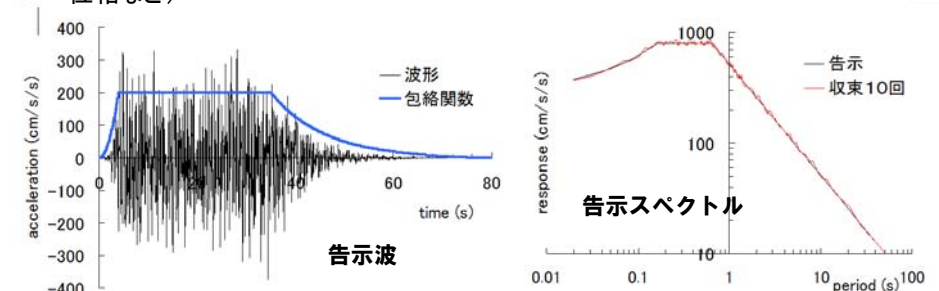
時刻歴応答解析(地震応答解析・動的解析)

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・安全性確認を行わねばならない。

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

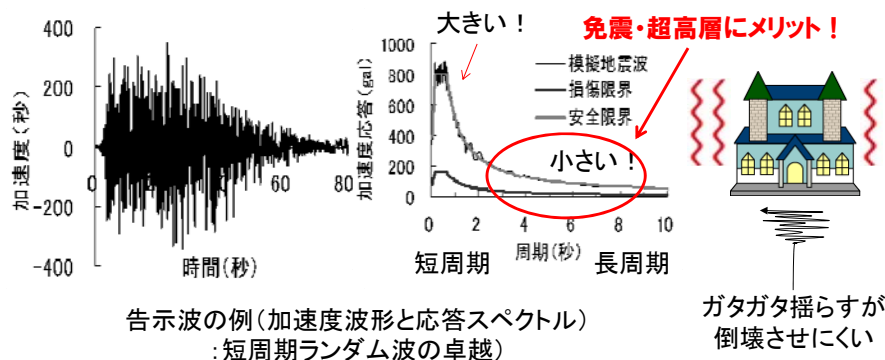
告示スペクトル: 解放工学的基盤(S波速度400m/s以上の地盤)における加速度応答スペクトル(減衰定数5%)、「稀に発生する地震動(レベル1)」と「極めて稀に発生する地震動(レベル2)」がある

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)



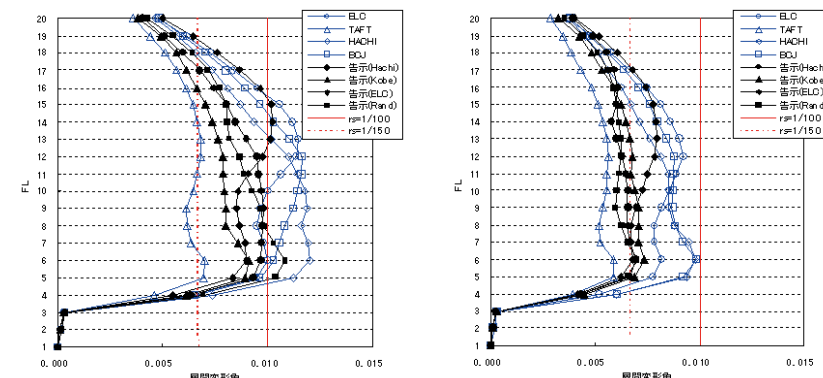
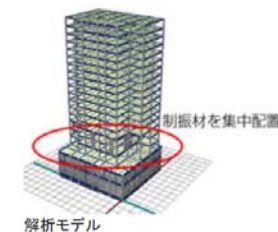
設計用・標準的地震動

- ・ 短周期地震動の時空間のランダム特性(短周期側)
- 標準的入力地震動(エルセントロ波、タフト波、告示波・・・)
- 耐震設計建物を大変形させ、倒壊させる破壊力は大きくない



時刻歴応答解析の事例

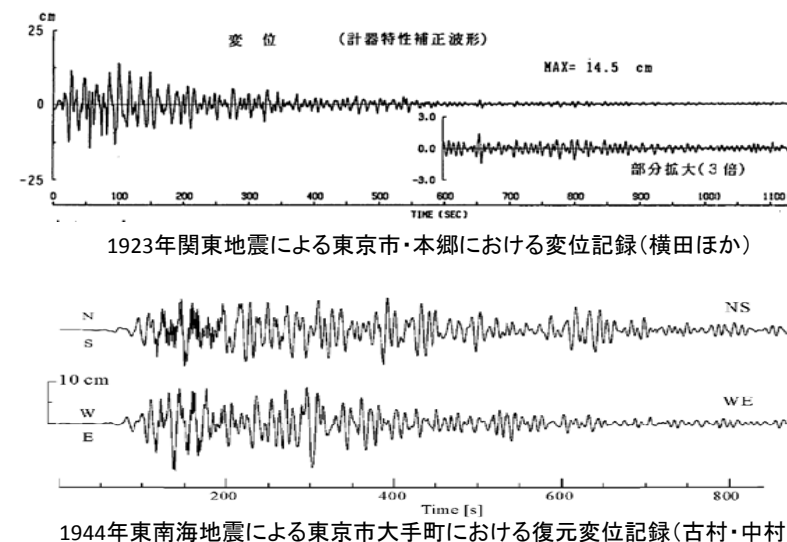
地下2階地上17階建の鉄骨構造。建物の用途上、低層階の階高が高くなっています。そこで、ソフトファーストストーリーの考え方を導入した集中配置型の制振システムを採用。



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)



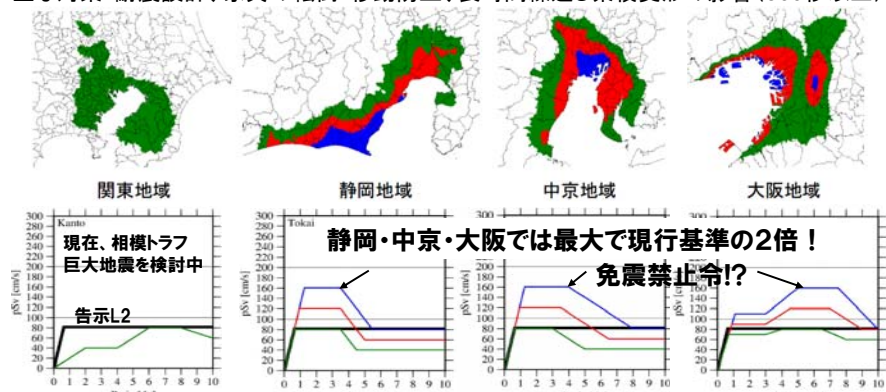
過去の巨大地震による東京の長周期地震動 1923年関東地震(M7.9)と1944年東南海地震(M7.9)



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)

- 対象地震: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)

現行告示L2波と国交省対策波を設定用地震動とした免震建物のL1地震動の応答例(免震構造協会)

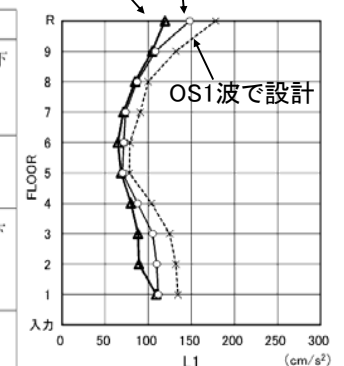
表1 建物のパラメータ

階	階高 (cm)	重量 (kN)	剛性 (kN/cm)
			RC造
9	400	10000	17124.9
8	400	10000	19265.5
7	400	10000	21406.1
6	400	10000	23546.8
5	400	10000	25687.4
4	400	10000	27828.0
3	400	10000	29968.6
2	400	10000	32109.2
1	400	10000	34249.8
免震	250	10000	—
免震層固定時1次固有周期			0.72秒
上部構造減衰定数 h			0.02

表2 耐震設計目標

レベル	耐震性能目標
L1	層間変形角 1/1000 以下 居住階の応答加速度 200cm/s² 以下
	免震層 200mm 以内
L2	層間変形角 1/500 以下 居住階の応答加速度 200cm/s² 以下
	免震層 600mm 以内

現行の告示L2波
で設計
CH1波で設計
OS1波で設計



告示L1波による加速度応答

⇒国交省対策波で免震建物を設計すると、現行の告示L2に比べてL1地震の加速度応答など耐震性が低下 (中澤ほか、2016年度建築学会大会)

2016年熊本地震の地表地震断層と建物被害調査



活断層と地表地震断層(地質調査総合センター)

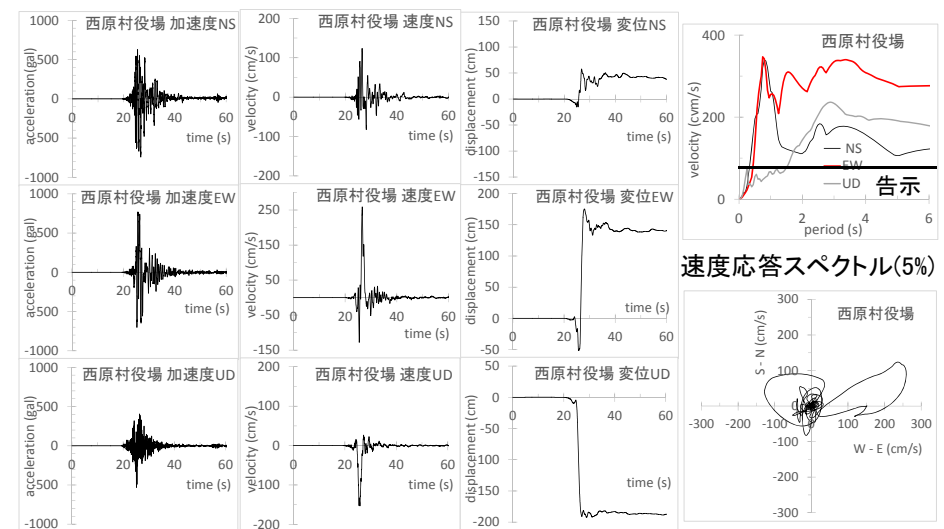
参加機関(延べ17名):
工学院大・安藤ハザマ
東京電機大・土木研
鯉沢工学研究所
減災アトリエ

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%

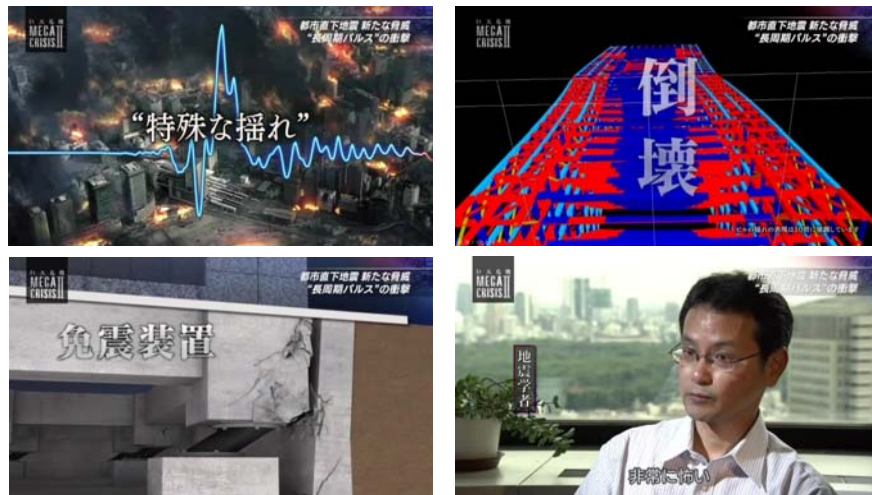
西原村役場の加速度・速度・変位波形



加速度 速度(基線補正) 変位 速度波形の平面内軌跡

・指向性パルスよりもフリグステップが明瞭(NHKスペシャルでは長周期パルス)
⇒破壊過程・グリーン関数の複雑さ? 免震・超高層建築には非常に厳しい

都市直下地震・新たな衝撃 長周期パルスの衝撃 NHKスペシャル MEGA CRISIS 巨大危機II 第1集「都市直下地震」(2017年9月2日放送)

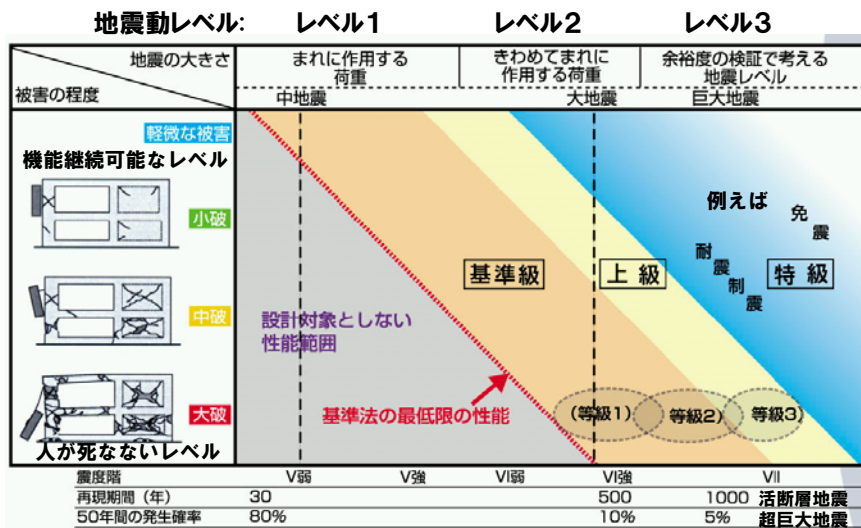


17

東京湾岸の超高層建築等を対象としたレベル1～3地震動と設計用クライテリア:加藤他(2016年日本建築学会大会)、東京都・構造設計指針(2016)に反映

	入力地震動	構造物 の性能	設計クライテリア		想定する 地震動の 発生頻度	備 考
			構造体	層間変形角		
中地震 (レベル1)	既往波 (25cm/s)	無被害 【機能維持】	短期許容 応力度 以内	1/200 以内	数十年に 一度発生	EL Centro, Taft, 八戸波
	告示波(稀地震) (Level 1)					実地震位相2波, ランダム位相
大地震 (レベル2)	既往波 (50cm/s)	軽微な補修に より 事業継続可能 【指定機能 維持】	部材塑性 率 < 4.0	1/100 以内	数百年に 一度発生	EL Centro, Taft, 八戸波
	告示波(極稀地震) (Level 2)					実地震位相2波, ランダム位相1波
	サイト波 (個別)					南海トラフ地震, 大正関東地震, 東京湾北部地震, の計3地震
	サイト波 (個別波をほぼ包絡)					断層モデルに基づく地震動の位 相を反映して作成
極大地震 (レベル3)	告示波(極まれ)の 1.5倍(Level 3-s)	崩壊・倒壊しないことを確認 【余裕度の検証】			数千年に 一度発生	サイト波の+αレベルや、他機 関から公開された地震動予測 スペクトル等に基づき設定
	告示スペクトル(極ま れ)の4秒以上を かさ上げ(Level 3-L)					— 最新の知見を反映し、十分に長 い継続時間を設定する

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)より高い耐震性能一

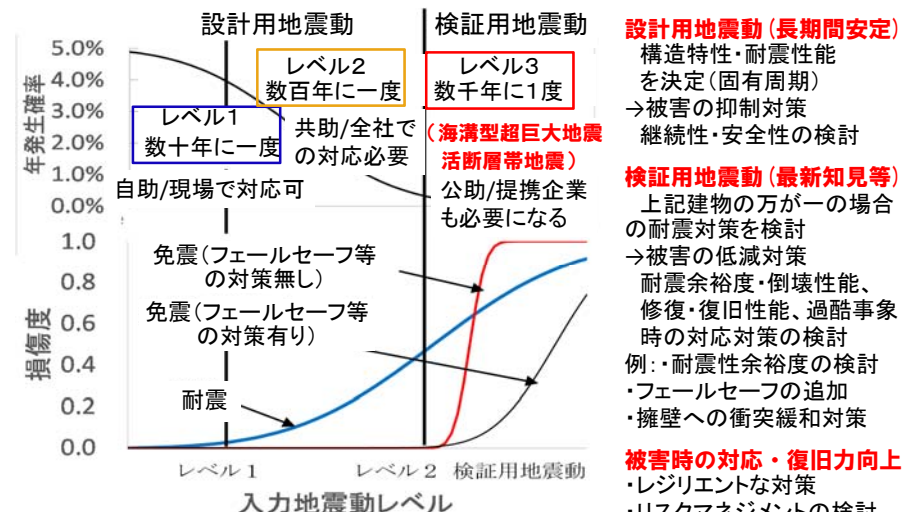


建物の耐震性能(日本構造技術者協会)

関東大震災
(東京大手町地区)

阪神・淡路大震災
(神戸三宮地区)

設計用・検証用地震動:地震動レベルと発生確率、耐震・免震の損傷度と対策・対応の概念(例)



⇒ 災害時の危機対応・修復性を考慮した設計が重要
(損傷の制御・モニター・点検・修復しやすい施設等)

設計用地震動(長期間安定)

構造特性・耐震性能を決定(固有周期)
→被害の抑制対策
継続性・安全性の検討

検証用地震動(最新知見等)

上記建物の方が一の場合の耐震対策を検討
→被害の低減対策
耐震余裕度・倒壊性能、修復・復旧性能、過酷事象時の対応対策の検討
例:・耐震性余裕度の検討
・フェールセーフの追加
・擁壁への衝突緩和対策

被害時の対応・復旧力向上

・レジリエントな対策
・リスクマネジメントの検討
(シビアアクシデントマネジメント、代替施設など)

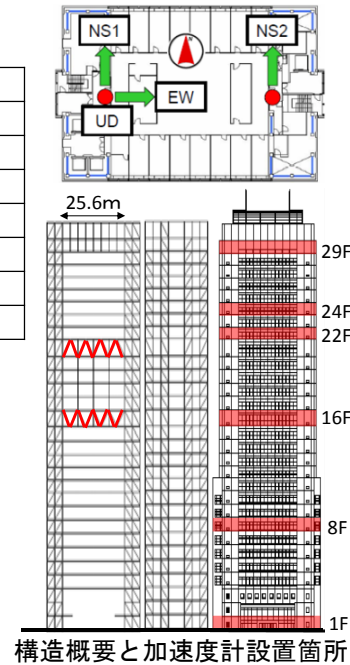
工学院大学新宿校舎

建物名称	工学院大学高層棟（新宿校舎）
建物場所	東京都新宿区西新宿
施工年	1989年
基準階面積	1,170㎡
階数	地上29階、地下6階、塔屋1階
構造種別	地上：鉄骨造（ブレース付ラーメン構造）
	地下1～2階：鉄骨鉄筋コンクリート造
	地下3～6階：鉄筋コンクリート造

固有周期と減衰定数

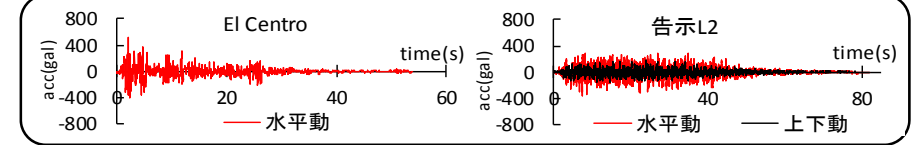
	次数	立体モデル	311地震観測	減衰定数
NS	1	3.038 s	3.080 s	0.019
	2	0.966 s	0.950 s	0.012
	3	0.496 s	0.470 s	0.030
EW	1	2.936 s	2.960 s	0.012
	2	1.015 s	0.990 s	0.012
	3	0.543 s	0.502 s	0.030

※ダンパーなしモデルの固有周期と減衰は
3.11地震の計測記録より同定

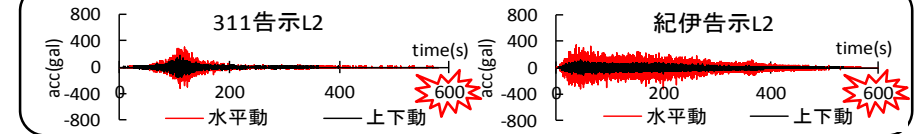


入力地震動

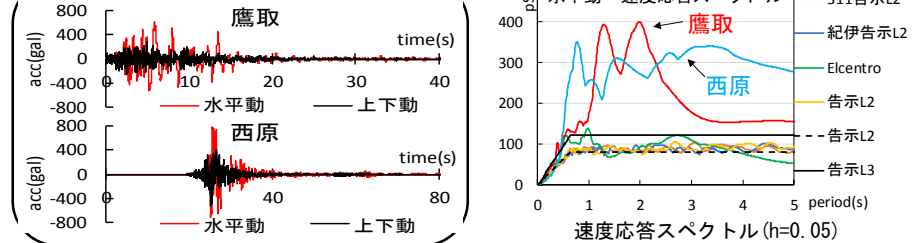
【標準型地震動】



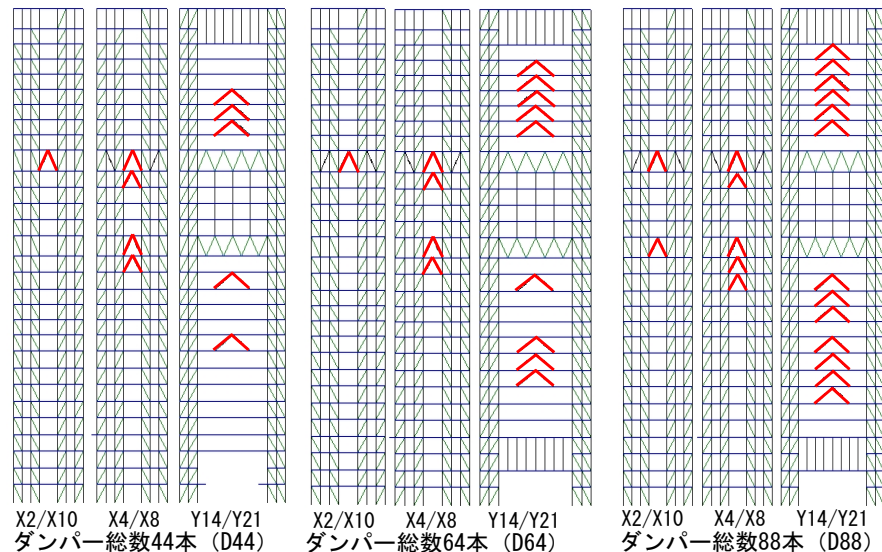
【長周期・長時間型地震動】



【震源近傍型地震動】



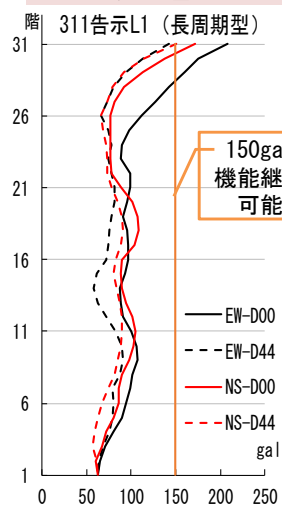
制震ダンパー設置モデル(増分解析より最適配置)



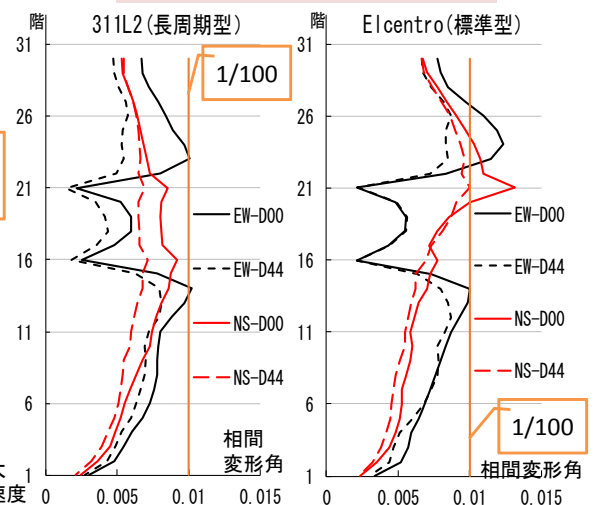
※BDH型制振オイルダンパー(最大減衰荷重が2000kN、カヤバシステムマシナリー社を仮定)

応答解析結果

L1地震動_加速度

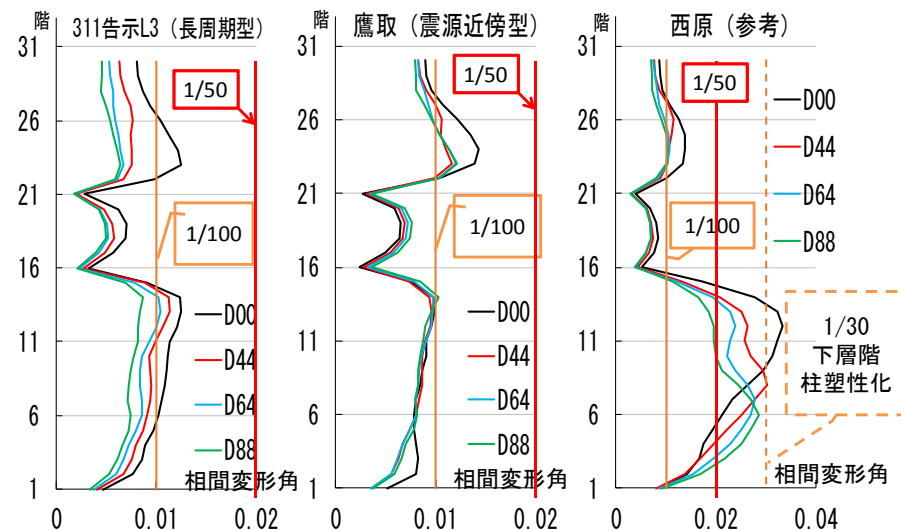


L2地震動_層間変形角



⇒ 44本の比較的小ない本数でL1・L2設計クライテリアを満足

応答解析結果 L3地震動 最大層間変形角 (EW)



⇒ 地表面層近傍の西原EW波 (参考) を除き、倒壊限界 (1/100程度) を満足
今後は梁端部の破壊 (疲労など)、ブレース座屈など詳細検討の必要有

損傷制御と確認 (見える化)・修復の容易さ

図9 ノースリッジ、兵庫県南部地震での破断例

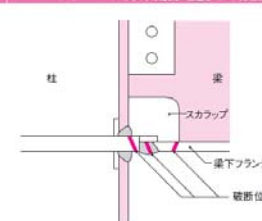
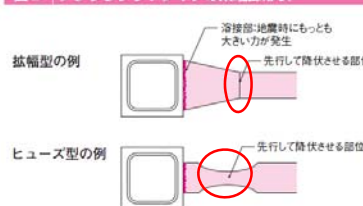
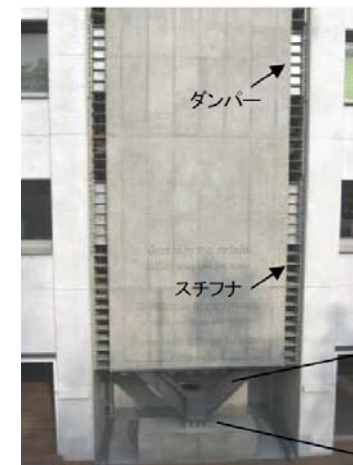


図8 ノンブラケットタイプの梁端部形状



「鉄骨のジョイント部には気をつける
(日本建築構造技術者協会)」より



東工大すずかけ台G3棟レトロフィットのロック
ング壁 (2010年) (日建連・耐震事例集より)

⇒ より高い耐震性能を確保すると同時に、万が一の災害時に速やかに損傷部を確認
し、損傷した場合には修復を容易にする対策が求められている (レジリエンス性能)

Resilience-Based Design Approach

○ 近年の大規模な自然災害を経験し、Code-Based and Performance-Based Designから回復力を基準とするResilience-Based Designへ

○ Resiliencyの判断基準にするRating Systemが実用化

The U.S. Resiliency CouncilのCoRE Ratings

Arup者のREDi™ Rating System (2013)、など

○ REDi™ Rating Systemの事例

・The 181 Fremont Tower in SF (56階・244mのS造、2017年竣工)

・ビルオーナーの高い環境・防災への要望 (LEED "Platinum" rating)

・REDi™ Rating "Gold" :

・設計基準 (475年に1度の地震で構造
躯体が弾性範囲内

・Maximum Considered Earthquake (MCE;
2500年に1度の地震) には変形制御・荷重
制御 (PEER-TBI (2010) に準拠)

・非構造部材が設計基準 (加速度・変位)
より厳しい条件をクリア

・危機管理体制の追加要求も満足



BRB (Buckling-restrained brace) と
damperを導入したmega-brace



mega-braceによる
エネルギー吸収
型の外郭構造

"The Resilience-Based Design of the 181
Fremont Tower" by I. Almufti et.al.,
STRUCTURE magazine, June 2016

課題3: 建物の被害低減策 (主として地震のハード対策)

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?

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。提出は次回授業の開始時とする