

単体と集団のDamage Impactの 制御

地震工学 第12講

単体のリスク制御

因果律からみたSeismic-Damage(地震被害)の制御: 3

Hazard = Seismicity × Attenuation × Ground Amplification

Damage Impact = Hazard × $\sum_{Population}$ Vulnerability

- 制御可能: Ground Amplification → 建築・土木工学
- 制御可能: Vulnerability, Population → 建築工学
- 制御不能: Hazard
- 事前評価: Seismicity → Hazard Map(地震想定)
: Damage Impact → Damage Map, Damage Scenario(被害想定)
- 直前予測: Attenuation → Nowcast(緊急地震速報)

北海道大学

Damage(被害)の制御

- Hazard = Seismicity × Attenuation × Ground Amplification
- Damage = Hazard × Vulnerability × Population

- 制御可能: Ground Amplification ← 建築・土木工学
 - ▶ 地盤改良
 - ▶ 基礎
- 制御可能: Vulnerability ← 建築工学
 - ▶ 耐震、免震、制振
- 制御可能: Population ← 都市計画・国土計画
 - ▶ 土地区画整理事業
 - ▶ 地域地区指定
 - ▶ 遷都
 - ▶ 地域誘導
- 制御不能: Seismicity
- 事前評価: Hazard ← 地震(工)学
 - ▶ Hazard Map(地震想定、強度度予測)
 - ▶ Risk Map(被害評価)
- 直前予測: Attenuation ← 地震学
 - ▶ Nowcast(緊急地震速報)
 - ▶ 避難誘導システム

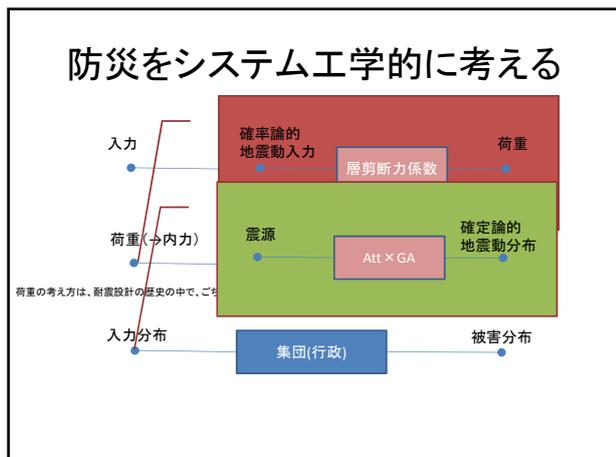
Vulnerability とは

対象物の地震脆弱性を表す関数(被害関数)

- **構造物単体の被害関数**
- 利用目的: 確率的入力(荷重)に対しての**部材の応力評価** → 部材設計
- 被害関数: **荷重-変形曲線**
- ①許容応力度設計: レベル1地震動に対して(中地震入力200gal程度)
 - 部材許容応力度 > 部材への応力度
- ②保有耐力設計: レベル2地震動に対して(大地震入力1000gal程度)
 - 層間変形角 ≤ 1/100 (1/200)
- ③限界状態設計: レベル2地震動に対して
- **集団の被害関数**
- 利用目的: 確定的入力(シナリオ地震)に対しての**構造物の終局状態評価** → リスク分布評価
- 被害関数: **震度(最大地動速度) - 被害率曲線** (Fragility curve, Damage rate function)
- ①地域の被害量評価・危険度ゾーニング
- ②効果的な防災行政の仕組みを考える基礎資料
- ③仕組みを支える科学的根拠

地震被害と入力のかえ方

- **単体防災: 民間ベースの防災**
 - 単体構造物(一般建物)の設計
 - Damage = Hazard × Vulnerability
 - Hazard: 確率論
- **集団防災: 行政ベースの防災**
 - 構造物の集合(コンプレックス)
 - 個別的レベルの集合(個人、世帯、企業等)
 - 地区的レベルの集合(町内会、街区、市町村)
 - 国レベル(都道府県、外国)
 - Damage = Hazard × Vulnerability × Population
 - Hazard: 確定論(シナリオ地震)



建造物の剪断破壊

地震力は建物を剪断破壊

剪断破壊は瞬間的(脆性的)破壊で非常に危険

斜めの破壊線
柱がせん断破壊
重量を支持できない
潰れる
崩壊のメカニズム

被害を受けた集合住宅('95年兵庫県南部地震)
3階部分は崩壊⇒生存空間が無い
⇒人命が喪失した(住人が死亡)

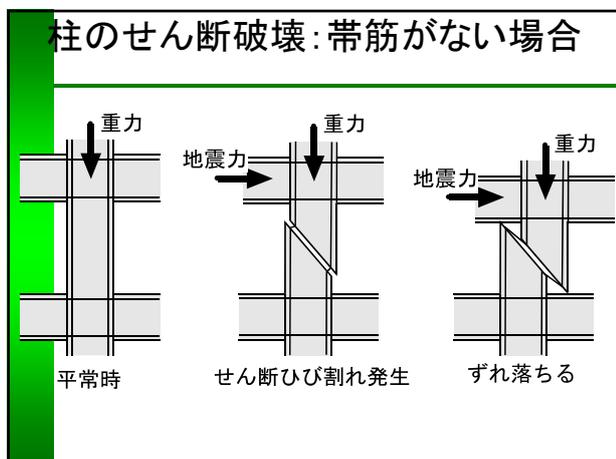
Laboratory of Structural Performance

剪断破壊のメカニズム

地震力(水平力)による剪断力が加わる

柱の剪断破壊のメカニズム

- ①破壊(滑り)の方向は圧縮(引張)軸の斜め方向
- ②軸線に沿って剪断力発生



水平力・剪断力に耐える工夫

- 耐震構造:頑丈につくる
- 免震構造:揺れの伝達経路を絶つ
- 制振構造:制御力を加える

制御方法

- 耐震
 - 剛構造
 - 柔構造
- 免震
 - アイソレータ+ダンパ
- 制振
 - パッシブ制御
 - アクティブ制御

13

耐震構造の考え方



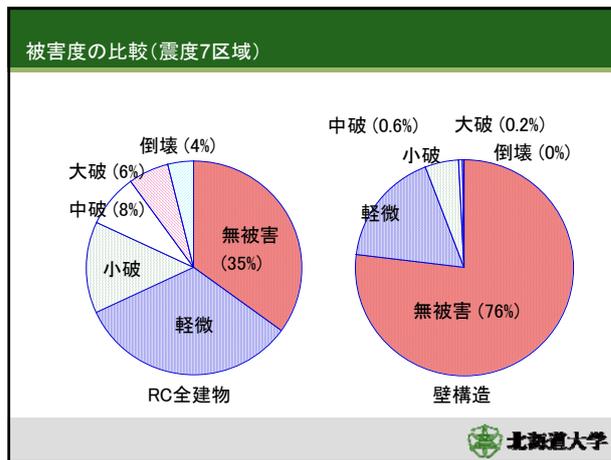
柱の鉄筋による補強



壁構造の採用

ラーメン構造より地震に強い

柱は変形しやすい
壁は変形しにくい

1階だけ耐震壁のない建物 (ピロティ建物)

耐震壁がある階 (住宅) はほとんど変形しない

耐震壁のない階 (駐車場、店舗など) に変形が集中

危険



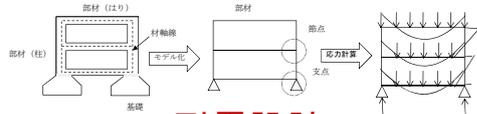
18

耐震設計の考え方



構造力学

- 骨組構造物を線材にモデル化し、応力を計算



耐震設計

- 応力に耐える断面を設計する手法(断面設計)

構造計算

- 設計基準等で規定された設計法(断面設計計算法)であり、実施設計に用いられる。

わが国の耐震技術の発達史

年代	地震・被害	建築技術	設計法	都市防災	社会的背景
1857	新潟県中越前地震(M6.8)				明治時代
1868	関東大震災(M7.0)				明治時代
1891	伊勢湾台風				明治時代
1924	相模湾地震(M7.3)				大正時代
1930	三陸地震(M8.1)				大正時代
1944	南海トラフ地震(M8.0)				太平洋戦争
1948	新潟県中越後地震(M7.5)				太平洋戦争
1968	新潟県中越後地震(M7.5)				太平洋戦争
1994	阪神・淡路大震災(M7.3)				平成元年
2011	東北地方太平洋沖地震(M9.0)				平成23年

年代	地震・被害	建築技術	設計法	都市防災	社会的背景
1857	新潟県中越前地震(M6.8)				明治時代
1868	関東大震災(M7.0)				明治時代
1891	伊勢湾台風				明治時代
1924	相模湾地震(M7.3)				大正時代
1930	三陸地震(M8.1)				大正時代
1944	南海トラフ地震(M8.0)				太平洋戦争
1948	新潟県中越後地震(M7.5)				太平洋戦争
1968	新潟県中越後地震(M7.5)				太平洋戦争
1994	阪神・淡路大震災(M7.3)				平成元年
2011	東北地方太平洋沖地震(M9.0)				平成23年

震度Kの概念

建物(重量 $w = mg$)に力 F が働いたときの力の釣り合い方程式は、
 $F - m\alpha = 0$
 $F = m\alpha$

震度 K を導入すると
 $K = \alpha / g$
 $F = mgK$
 $\therefore F = Kw$

年代	地震・被害	建築技術	設計法	都市防災	社会的背景
1924	相模湾地震(M7.3)				大正時代
1930	三陸地震(M8.1)				大正時代
1944	南海トラフ地震(M8.0)				太平洋戦争
1948	新潟県中越後地震(M7.5)				太平洋戦争
1968	新潟県中越後地震(M7.5)				太平洋戦争
1994	阪神・淡路大震災(M7.3)				平成元年
2011	東北地方太平洋沖地震(M9.0)				平成23年

許容応力度設計(弾性範囲で設計:K=0.1の時代)

荷重(震度K) 0.1 0.25~0.55 変形

部材の許容応力度 > 部材への荷重 ($F = 0.1 \times W$)

年代	地震・被害	建築技術	設計法	都市防災	社会的背景
1950					
1954	十勝沖地震(M8.2)				
1959	伊勢湾台風				
1963	新潟県中越前地震(M7.5)				
1964	新潟県中越前地震(M7.5)				
1968	十勝沖地震(M7.9)				
1969					

許容応力度設計(弾性範囲で設計:K=0.2の時代)

荷重(震度K) 0.2 0.25~0.55 変形

部材の許容応力度 > 部材への荷重 ($F = 0.2 \times W$)

年代	地震・被害	建築技術	設計法	都市防災	社会的背景
1971					
1981					
1986	中越前地震(M8.1)				
1994	阪神・淡路大震災(M7.3)				
1994	新潟県中越前地震(M7.5)				
2000					
2003	新潟県中越前地震(M8.0)				
2004	新潟県中越前地震(M8.0)				
2005					
2011	東北地方太平洋沖地震(M9.0)				

新耐震設計法 (2)保有耐力設計(LV1&LV2)

(1)層剪断力係数

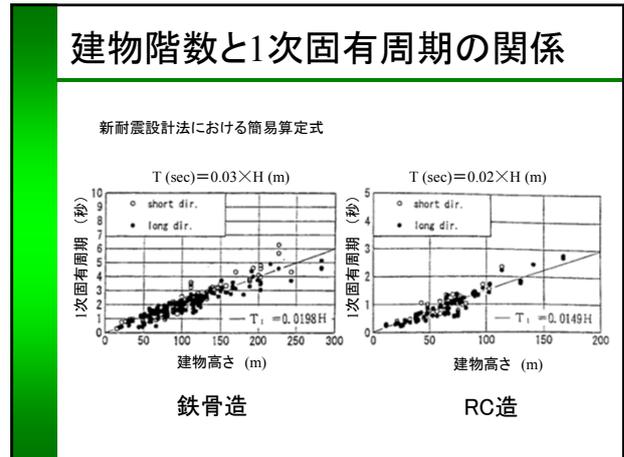
荷重 1.0 0.25~0.55 変形

LV1(200gal)に対しては許容応力度設計
LV2(1000gal)に対しては強塑性設計

年代	地震・地震学	建築技術	設計法	耐震状況	社会的影響
1971		建築基準法施行令改正 ・各層荷の採用			
1981		新耐震設計法施行 ・構造法から層別耐力(床剛)の導入 ・床剛耐力設計法導入(実用性能考慮)	建築基準法 設計法導入		
1985	中東の地震(M6.3)	免震建築物出現			
1985	巨大地震(M7.3)	設計法による免震建築物被害			千代田事件
1994	東北太平洋地震(M6.7)	震害調査報告(1)の公表			
1994	阪神・淡路大震災(M7.2)	震度7記録、死者6,000人以上			
2000		建築基準法改正 ・層別耐力計算導入(性能確保)	耐震設計法特別措置法 ・地震工学に関する調査研究の推進		
2003	中東太平洋地震(M6.9)				
2003	高層階地震動調査 新中東太平洋地震(M6.9)				
2004	山陽東部の震災				
2005	岐阜県地震(M6.9)				
2007	新潟県中越後地震(M6.8)				
2007	新潟県中越前地震(M6.8)				

限界耐力計算法

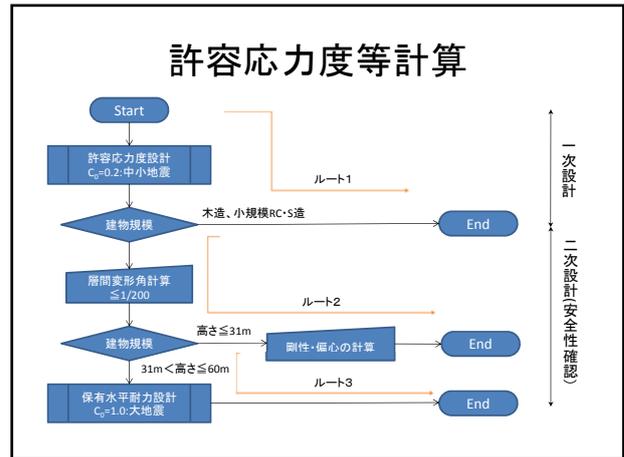
要素モデル(復元力特性)の重ね合わせ
荷重
変形
一質点系に縮約
作用する地震力
縮約された復元力特性
変形=F(固有周期, 減衰定数)
作用する地震力に対する応答値 $Q_{SNi} < \text{安全限界時耐力 } Q_{Si}$



耐震設計法と構造計算との関係

ごちゃごちゃした名前の付け方に注意

- 許容応力度等計算(1981年施行)
 - 1次設計と2次設計
 - 1次設計: 中小地震に対する使用性の確保
 - 2次設計: 構造の安全性確認
 - 建物規模による設計法のルート
 - ルート①: 許容応力度設計(木造建物、小規模RC)
 - ルート②: 剛性・偏心等チェック(高さ31m以下の建物)
 - ルート③: 保有水平耐力設計(高さ31mより高い建物)



限界耐力設計

限界耐力計算法

要素モデル(復元力特性)の重ね合わせ
荷重
変形
一質点系に縮約
作用する地震力
縮約された復元力特性
変形=F(固有周期, 減衰定数)
作用する地震力に対する応答値 $Q_{SNi} < \text{安全限界時耐力 } Q_{Si}$

時刻歴応答計算

建物のモデル化

1質点系モデル(Voigtモデル)

2階線形常微分方程式で定式化できる。→安全限界となる地動加速度>想定地震の地動加速度

建物の1質点系モデル

Voigtモデル:質量(M)、バネ定数(K)、粘性抵抗(D):各要素の変位が等しいモデル。
 $M(\ddot{x} + \ddot{y}) + D\dot{x} + Kx = 0$ ここに、 $F(t) = M\ddot{y}$:外力 (たとえば、地震力)

$$\ddot{x} + \frac{D}{M}\dot{x} + \frac{K}{M}x = -\ddot{y}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{M}} = 2\pi f_0, h = \frac{D}{2M\omega_0} \text{ とおくと } \ddot{x}(t) + 2h\omega_0\dot{x}(t) + \omega_0^2 x(t) = -\ddot{y}(t)$$

2階線形常微分方程式で定式化できる。
 $|\ddot{x} + \ddot{y}|_{\max}$ = (絶対) 加速度応答スペクトル
 $|\dot{x}|_{\max}$ = (相対) 速度応答スペクトル
 $|x|_{\max}$ = (相対) 変位応答スペクトル

建物の1質点系モデル

ここで時刻歴 $x(t)$ と $y(t)$ を指数関数で置換すると

$$x(t) = X e^{i(\omega t + \alpha)} = X$$

$$y(t) = Y e^{i(\omega t + \gamma)} = Y$$

$\dot{x}(t) = i\omega \cdot X e^{i(\omega t + \alpha)} = i\omega X$
 $\ddot{x}(t) = -\omega^2 \cdot X e^{i(\omega t + \alpha)} = -\omega^2 X$
 $\dot{y}(t) = i\omega \cdot Y e^{i(\omega t + \gamma)} = i\omega Y$
 $\ddot{y}(t) = -\omega^2 \cdot Y e^{i(\omega t + \gamma)} = -\omega^2 Y$

従って、常微分方程式は以下の解を得る。

$$\left[-\omega^2 + i2h\omega_0\omega + \omega_0^2 \right] X = -\omega^2 Y$$

$$X = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2 - i2h\left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)} \cdot Y$$

Voigtモデル
 $|\ddot{x} + \ddot{y}|_{\max}$
 $\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{M}}$
 $|\dot{x}|_{\max}$
 $|x|_{\max}$ = (相対) 変位応答スペクトル

加速度入力 \ddot{y} に対する応答は

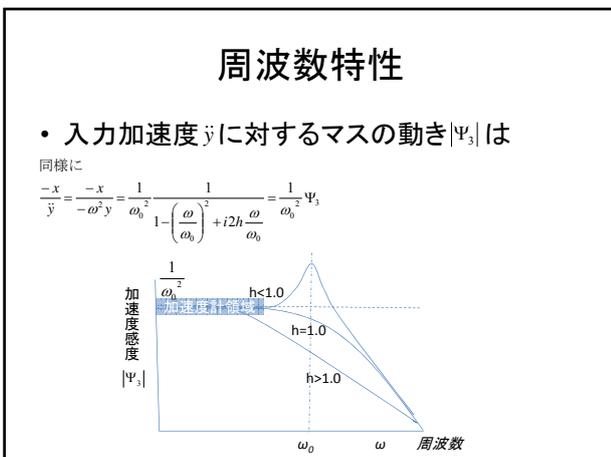
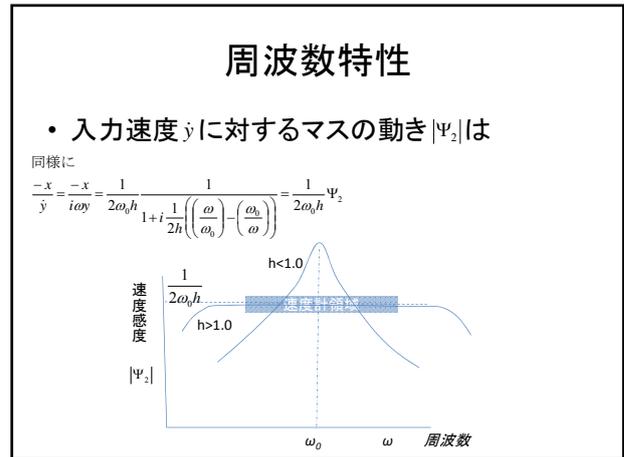
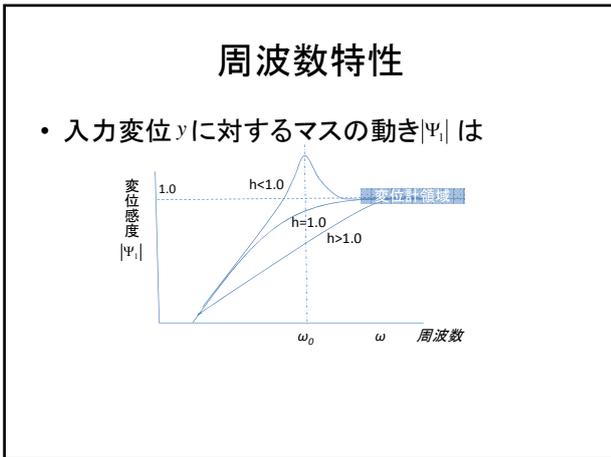
$$\frac{\ddot{X}}{\ddot{Y}} = \frac{-\omega^2 X}{-\omega^2 Y} = \frac{X}{Y}$$

$$\dot{X} = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2 - i2h\left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)} \cdot \dot{Y}$$

$$\ddot{X} = \frac{i\omega X}{-\omega^2 Y} = \frac{iX}{\omega Y} = \frac{X}{i\omega Y}$$

$$\dot{X} = \frac{1}{2h\omega_0} \frac{1}{1 + i\frac{1}{2h}\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right) - \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)} \cdot \dot{Y}$$

$$\frac{X}{Y} = \frac{X}{-\omega^2 Y}$$

$$\dot{X} = \frac{1}{\omega_0^2} \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + i2h\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)} \cdot \dot{Y}$$


耐震設計(単体防災)の理論

荷重-変形曲線

降伏点耐力

エネルギー

変形

• 弾性範囲において
 変形 = 荷重 / 剛性 ここに、荷重 = 加速度 × 質量
 変形を減らすには
 1) 荷重を減らせばよい = 加速度を減らす = 長周期化 → 柔構造
 2) 質量を減らせばよい = 軽量化
 3) 剛性を上げればよい = 短周期化 → 剛構造

• 非線形範囲において
 変形 = エネルギー / 降伏点耐力 ここに、エネルギー = 1/2 速度² × 質量
 変形を減らすには
 1) エネルギーを減らせばよい = 速度を減らす = 超長周期化 → 柔構造
 2) 質量を減らす = 超軽量化
 3) 降伏点耐力を上げる = 保有耐力を上げる (剛性保持) → 剛構造

37

免震・制振

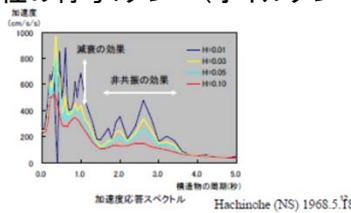


免震と制振の基本的考え方

- 建物側で応答を制御する
 - 振動の伝達経路を遮断
 - 建造物の非共振化
 - 非線形性の付与
 - エネルギー吸収
 - 制御力の付与

免震の原理

- 振動の伝達経路を遮断(非共振化):アイソレータ(積層ゴム)
- 非線形性の付与:ダンパ(オイルダンパ)



Hachinohe (NS) 1968.5.18

免震の例

高減衰積層ゴム



所在地: 埼玉県志木市
用途: 集合住宅
高さ: 41階
階数: 地上14階2棟
地下6階1棟

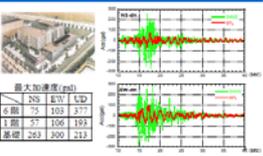
鉛プラグ型積層ゴムの設置



地震観測による免震効果の検証

観測地: 西武ビル・1992年兵庫県南部地震

階数	最大加速度 (gal)	最大変位 (mm)
1階	295	103
2階	75	103
3階	57	106
観測	263	209



制振

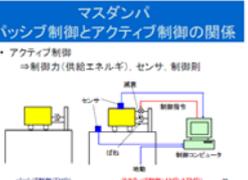
必要な供給エネルギーの観点から

- アクティブ型: マスダンパ
- セミアクティブ型: オイルダンパ, 2段ダンパ, 3段ダンパ
- パッシブ型: 弾塑性ダンパ, 粘弾性ダンパ, 摩擦ダンパ

マスダンパ

パッシブ制御とアクティブ制御の関係

- アクティブ制御
 - ⇒ 制御力(供給エネルギー), センサ, 制御則

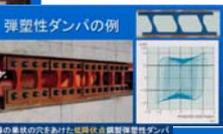


パッシブ制振の例

オイルダンパの設置例

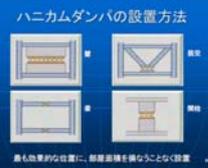


弾塑性ダンパの例



棒の集積の穴をあけた鉛鋼板を鋼製弾塑性ダンパを一緒に変性させる曲げモーメントに印刷し、構造部材よりもろい小さい変形が得られ、大変形時に鋼板が欠けエネルギーを吸収する。変形後、変位と吸収エネルギーの変形に対するチェックが必要。

ハニカムダンパの設置方法



最も効果的な位置に、設置面積を換なすことでの設置

アクティブ制振の例

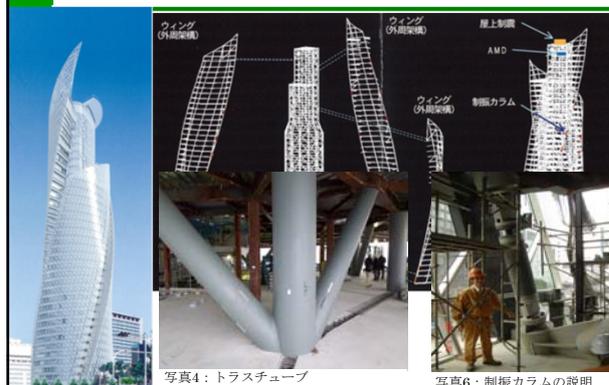
マスダンバ
パッシブ制御とアクティブ制御の関係

・アクティブ制御
⇒制御力(供給エネルギー)、センサ、制御則

可変剛性制御(AVS)

マイクダンバ(TMD)より
ストロークが
剛性変化による
フレキシビリティ制御

名古屋スパイラルタワーズ:制振の例



木質構造

木質材の性質と構造形態

木質材:生命体組織	
木質構造:Wood Structure	
素材	木
物理的特性	引張圧縮の両面で強度を持つ。 比重が小さい(生命体)。
構造的制限	木目に垂直方向は脆弱。 接合部に補強が必要。 燃えやすい。腐食しやすい。 崩壊しても生存空間が保存されやすい。
構造的利点	軸力(引張、圧縮)や曲げモーメントが発生する部材に適する。 軽量。 住宅規模(スパン20m程度)ならば建物全体に利用可能。 組構造建築の屋根材や床材として広範囲に利用可能。
構造形態	小屋組、床梁、骨組み架構、トラス、アーチ、シェル、ドーム

木質構造の特性

木質構造	RC構造
居住性(断熱性と吸湿性)が高い	居住性(剛性と遮音性)が高い
耐火性は劣るが、大断面が確保されればある程度の耐火性確保(集成材)	耐火性が高い
腐食しやすい	耐久性が高い
外観が美しい	独特の肌合いを持つ
造形性に優れる	造形性に優れる
材料のばらつきが大きい	均質性が高い

木質構造の特性(2)

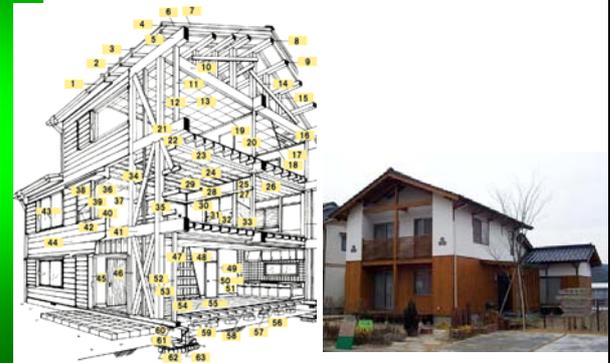
木質構造	RC構造
乾燥に伴い強度変化が大きい	ひび割れしやすい
軽量で強い	重量が大きい
施工が容易	施工期間が長い
解体容易	解体困難
安価	比較的高価

木造架構

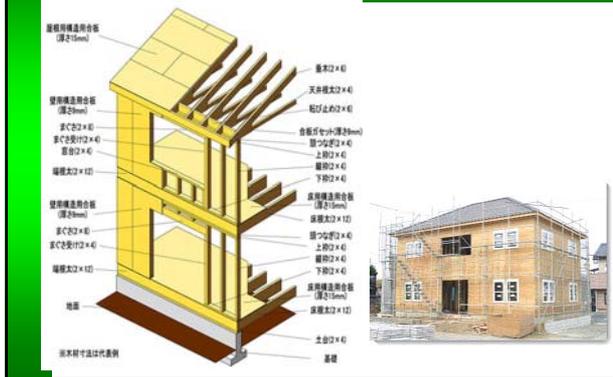
適用範囲は広い

- 軸組架構: 在来軸組構造、ラーメン構造
- 壁式架構: 枠組壁構法、プレファブパネル構法
- 大架構: アーチ、ドーム、シェル
- 混構造: 架構レベル混合、部材レベル混合

在来軸組構法



枠組壁構法



天然木材から木質材料へ

- 天然木材の欠点
 - ① 大断面材や長大材を得にくい。
 - ② 木材資源が枯渇し、低質材の有効活用が望
 - ③ 材質のばらつきや乾燥に伴う強度変化が大
- 木質材料 (Wood Based Materials) とは
木材を小さな木片に分解し、複合・再構成した製品
- エンジニアードウッド (Engineered Wood)
工学的手法によって強度性能が保証された木材または木質材料

木質材料の分類

木質材料

- エンジニアードウッド: 構造用集成材、
構造用LVL (単板積層材)
Laminated Veneer Lumber
- 非エンジニアードウッド: 造作用集成材、
パーティクルボード、
MDF (中密度ファイバーボード)
Medium-Density Fiberboard
→ 木材繊維を乾燥圧縮し合板化

構造用LVL

- Laminated Veneer Lumber (単板積層材)
 - 厚さ2~4mmの単板ベニアを繊維方向が平行になるように積層接着。
 - 軸部材として利用。





木質構造の耐震設計

- モデル化の難しさ
 - 木質構造は接合部において種々の破壊モードが現れる。
 - ボルト接合部の破壊: 木材支圧破壊、ボルト曲げ降伏、押抜き剪断破壊、木材引張破壊
 - ボルト接合部の木材破壊: 割裂破壊、木材めりこみ破壊、剪断破壊、引張破壊
 - 釘接合部の破壊: 木材支圧破壊、釘めりこみ破壊、釘曲げ降伏、釘曲げ降伏拔出
 - 基礎部への定着が不十分の構造体が多く、評価しにくい
 - 非構造体の取り扱い(耐震要素としても働いているはず。時代の変化が大きい)が未定。

壁量設計法

- 建築基準法: 2階建て以下、延べ床面積が500m²以下、最高高さ13m以下、軒高9m以下の木質構造については、壁量設計法で計算する。
- 耐震壁の有効壁長 = Σ壁倍率 × 壁長 > 必要壁量 (建築基準法、品確法で規定)
 - 壁倍率 = 短期許容剪断耐力 [kN] / (1.96 [kN/m] × L [m]) ← 実験結果より求める式
 - 壁の許容耐力 [kN] = 壁倍率 × 1.96 × 壁長
 - 壁倍率 = 1.0 の意味: 1m 当たりの短期許容剪断耐力 (= 1.96 kN/m = 1 [kg] × 0.2g) の壁

壁量設計法

- 建築基準法: 2階建て以下、延べ床面積が500m²以下、最高高さ13m以下、軒高9m以下の木質構造については、壁量設計法で計算する。
- 耐震壁の有効壁長 = Σ壁倍率 × 壁長 > 必要壁量 (建築基準法、品確法で規定)
 - 壁倍率 = 短期許容剪断耐力 [kN] / (1.96 [kN/m] × L [m]) ← 実験結果より求める式
 - 壁の許容耐力 [kN] = 壁倍率 × 1.96 × 壁長
 - 壁倍率 = 1.0 の意味: 1m 当たりの短期許容剪断耐力 (= 1.96 kN/m = 1 [kg] × 0.2g) の壁

壁倍率	有効壁長 [m]
1.0	1.5
1.5	2.0
2.0	2.5
2.5	3.0
3.0	3.5