

11.1 次世代性能照査型 耐震設計法

Seismic Performance

Assessment of Buildings

Volume 1 – Methodology

FEMA P-58-1 / September 2012

FEMA



構成

1. 背景
2. 基本
3. 性能評価型耐震設計の流れ



1. 背景

現行の仕様規定型耐震設計法

- ▶ 基準に規定される仕様を満足するようプロポーシヨンと建物各要素の詳細を決定
- ▶ 仕様規定：一定レベルの耐震性能を保有させる意図をもって規定

⇒意図する性能は時によって明確でなく、設計結果としての性能が評価され認識されることは殆どない

現行の性能評価型耐震設計法

▶ FEMA273 NEHRP 建物の耐震補強指針

- ・ 既存建物の耐震補強に着目
- ・ 種々の地震強度レベルと損傷度を関係付ける

▶ 性能レベル（性能指標）：

- ・ 機能保持
- ・ 即時使用可
- ・ 人命安全
- ・ 崩壊防止

現行性能評価型耐震設計法の課題

- (1) 建物の応答予測解析手法の精度と信頼性
- (2) 許容クライテリアに含まれる安全側レベルの不明瞭性
- (3) 新設建物に適用する際の信頼性と経済性
- (4) 債権者が意思決定する上でより理解し易い“性能”の表現方法

ATC-58/ATC-58-1プロジェクト —FEMAからの委託

- ▶ 債権者が意思決定できるような新たな性能指標を作成
- ▶ 応答予測精度の限界と地震ハザードレベルの不確実性を考慮しつつ、債権者に適切に伝える性能評価法の枠組み作成
- ▶ 新設、既設建物両方に適用可能
- ▶ 非構造システムや要素の損傷も定量評価

FEMA: Federal Emergency Management Agency (連邦危機管理局)
ATC: Applied Technology Council (実用技術協会)



2. 基本

性能指標

- ▶ **人的被害**：建物内で発生する人命損失、または入院が必要となる重度傷害
- ▶ **補修費用**：地震前の状態に復旧させる、または全壊の場合は同様の施工で新設するのに要する費用
- ▶ **補修時間**：地震前の状態に復旧させるに要する時間
- ▶ **被災度診断結果**：全体または一部が安全でないと診断される事 = **立入り禁止**

性能に影響を及ぼす要因

- ▶ 地震動強度
 - ▶ 建物の応答と非構造（内外装、設備）、設置備品、居住者への影響
 - ▶ 構造・非構造、設置備品の損傷脆弱性
 - ▶ 非構造・設置備品のタイプ、設置位置、量
 - ▶ 建物内人口
-
- ▶ 被災度診断を行う診断士の判断力
 - ▶ 補修方法
 - ▶ 供給労働力、材料調達、補修業者の対応力

評価を行う上での不確実性

- ▶ 断層と破壊開始点、地震マグニチュード
- ▶ 断層破壊点ーサイト間の表面地層状態
- ▶ 構造解析のモデル化

⇒ 減衰、地盤・構造物の相互作用、鉛直荷重抵抗要素や非構造要素の寄与？

- ▶ 地震発生の日や時間帯、建物内の人口の設定
- ▶ 非構造や設置備品のタイプ、量の設定
- ▶ 補修工法や施工速度の設定

地震強度？
スペクトル形状？
地震波？

性能評価の表現方法⇒性能関数

- ▶ 性能関数：地震の結果一定値以下の損失が生じる確率分布
- ▶ 横軸：性能指標（死者数、補修費用、補修工事期間）
- ▶ 縦軸：影響がこの値以下となる確率

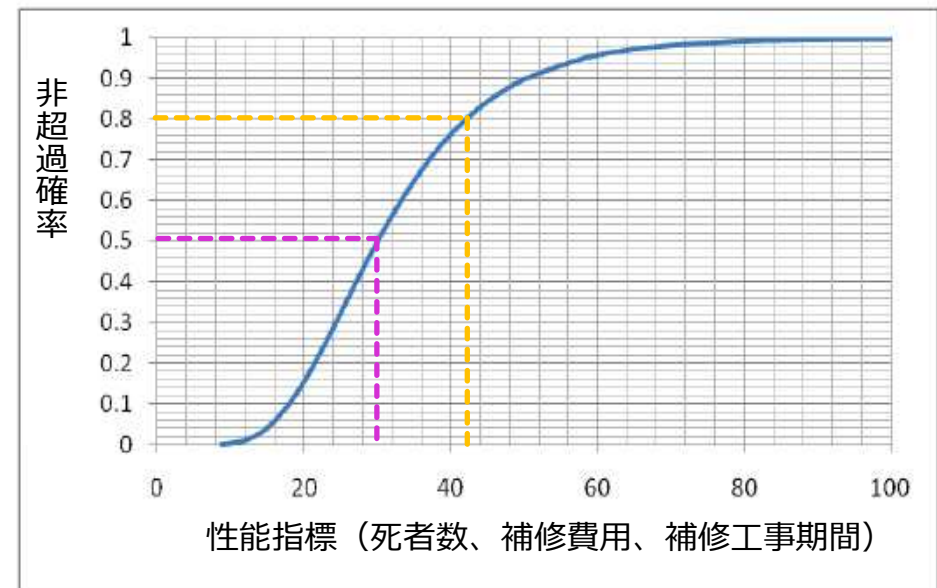


Figure 2-1 Hypothetical building performance function.

耐震性能評価の3つのタイプ

- ▶ 地震強度ベース
- ▶ シナリオベース
- ▶ 時間ベース

地震強度ベースの評価

- ▶ 一定の地震強度に対し建物の性能を評価
- ▶ 地震強度：
5%減衰の弾性加速度応答スペクトル（設計基準など）
- ▶ 地震動：
上記のスペクトルに適合する設計地震動

変動要因：適合させる地震動

シナリオベースの評価

- ▶ 特定のシナリオ地震に対し建物の性能を評価
歴史的に地震が繰返し発生する場合、将来発生が予想される地震
- ▶ シナリオ地震：
建物サイトから特定距離で特定マグニチュードの地震
- ▶ 地震強度の不確実性

変動要因：地震動予測式と適合させる地震動

シナリオ地震に対する地震動予測式： アテヌエーション式

$$\ln Y = c_1 + c_2 M - c_3 \ln R - c_4 R + \gamma$$

- ▶ Y：強震動パラメータの中央値（例えば特定周期に対する加速度スペクトル値）
- ▶ M：地震マグニチュード
- ▶ R：震源距離
- ▶ γ ：標準誤差⇒ 近震源の方向性、断層タイプサイトの地盤条件などを考慮

アテヌエーション式を用いた加速度応答スペクトル値

- ▶ 震源距離に対する周期0.2秒の加速度応答スペクトル値
- ▶ 3種類のアテヌエーション式
- ▶ 2種類の地震マグニチュード

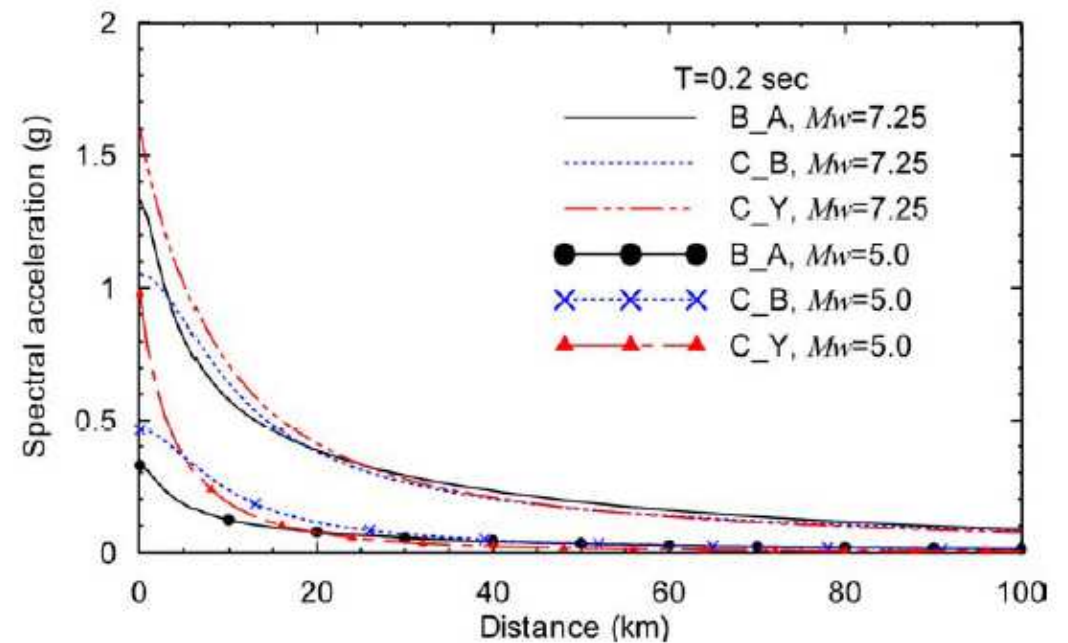


Figure 4-1 Differences between Boore and Atkinson (B_A), Campbell and Bozorgnia (C_B), and Chiou and Youngs (C_Y) ground motion prediction equations.

Boore-Atkinson式： 異なる百分位にある 加速度応答スペクトル

- ▶ $M_w=7.25$
- ▶ $r=5\text{km}$

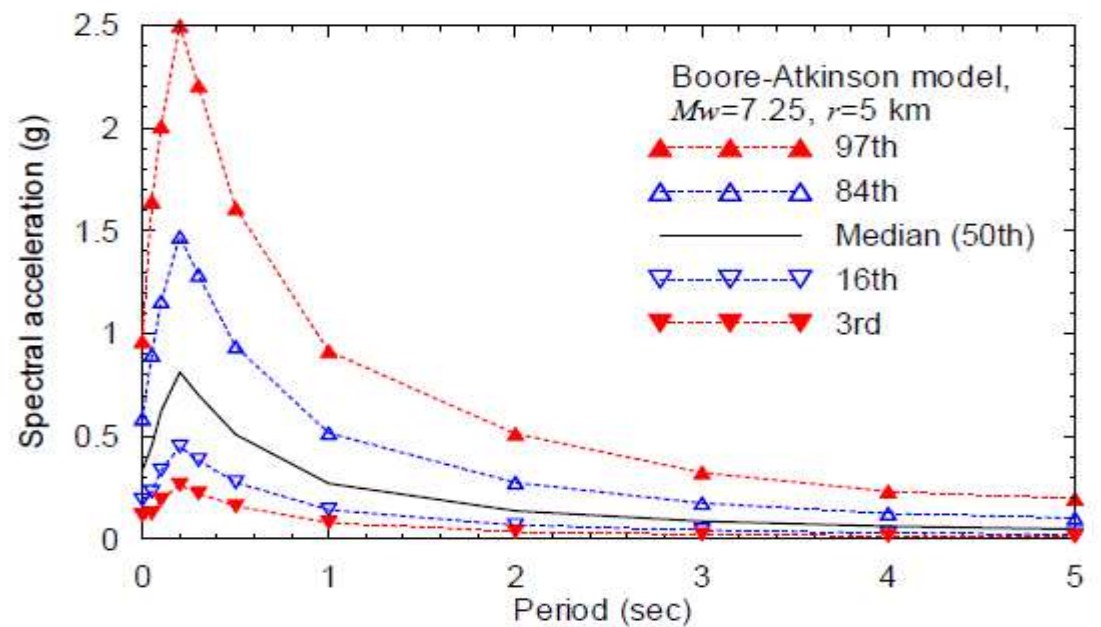


Figure 4-2

Response spectra with different probabilities of exceedance derived from a single ground-motion prediction equation for an earthquake scenario of $M_w=7.25$ and $r=5$ km.

時間ベースの評価 (1) —確率論に基づく地震ハザード評価

地震ハザードとは、地震動の大きさとこれを経験する確率を定量表示したもの

- 1 : 震源距離と発生確率
(各破壊点で発生確率が異なる)
- 2 : 各震源断層に対し地震規模と発生確率
- 3 : 地震規模と想定するサイトの地震動強度 (応答加速度etc)
- 4 : 地震動パラメータに関し一定期間内の超過確率

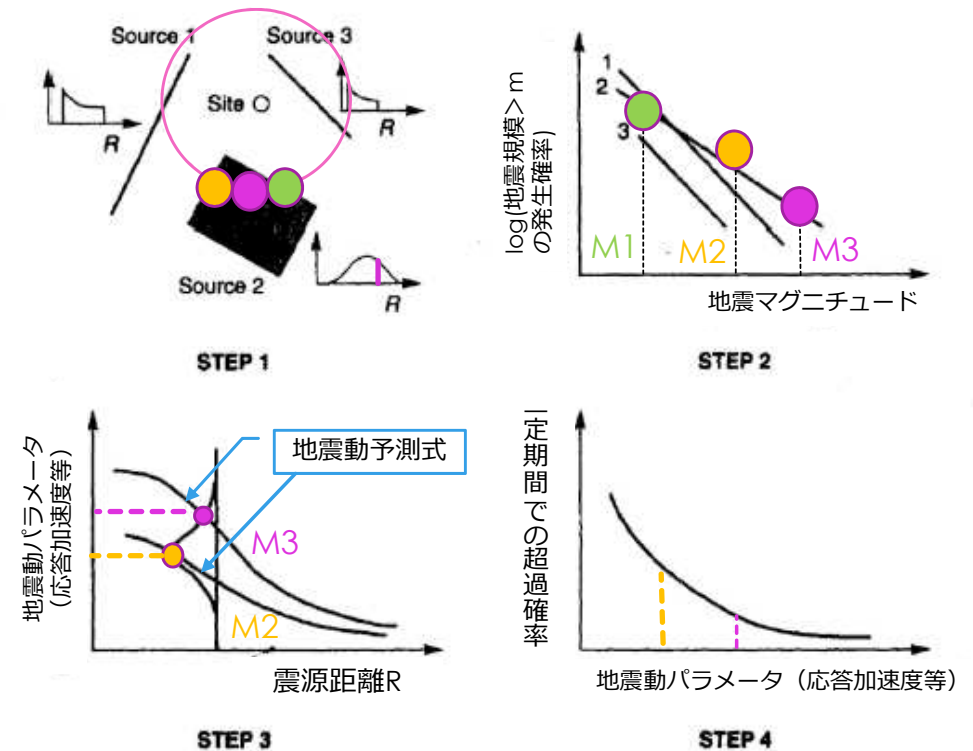
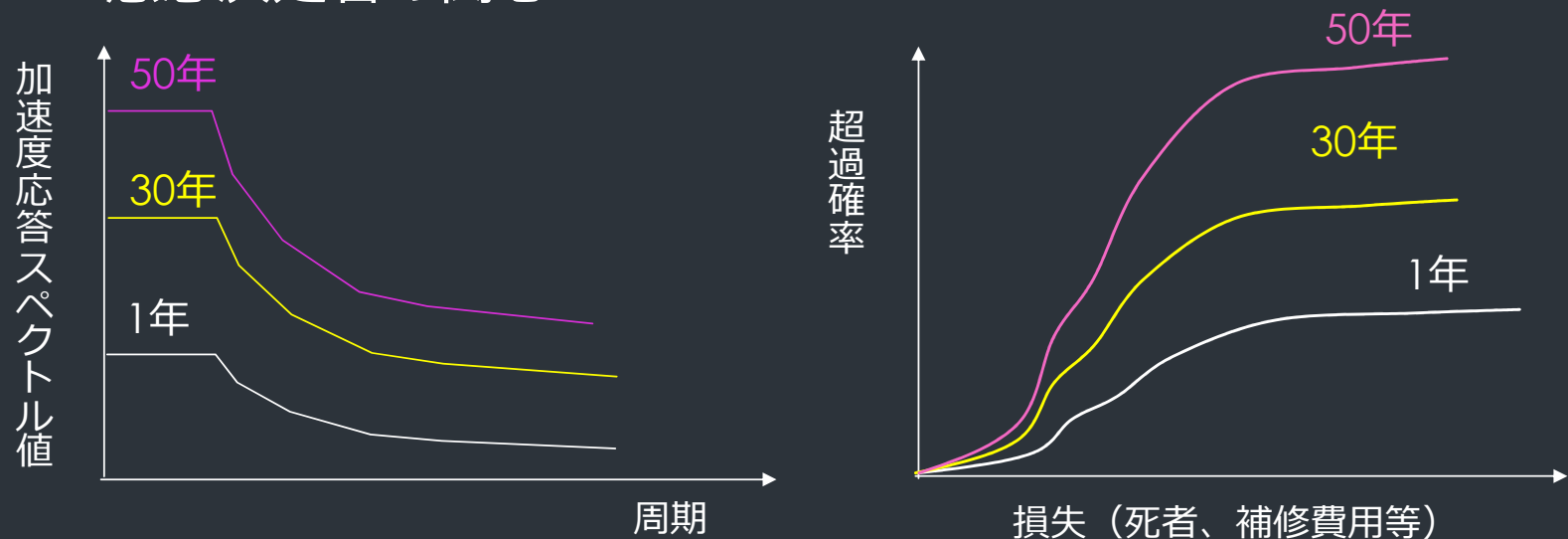


Figure B-3 Steps in probabilistic seismic hazard assessment (Kramer, 1996).

時間ベースの評価（2）

- ▶ 一定期間内に発生する全ての地震に対しその発生確率を考慮して建物性能を評価
- ▶ 対象とする期間（例えば、1年、30年、または50年など）：
意思決定者の関心

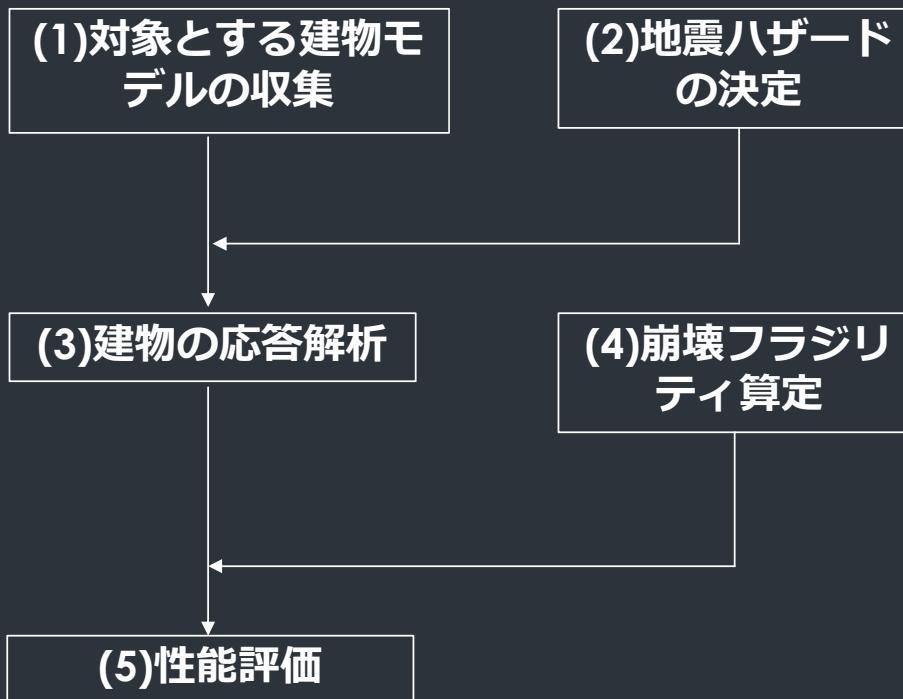


変動要因：再現期間、地震動予測式と適合させる地震動



3. 性能評価型耐震設計の流れ

設計フロー



(1) 対象とする建物モデルの収集

- ▶ 損傷タイプと損傷を引起す応答量
- ▶ 構造損傷結果：人命、補修方法・費用・補修期間、地震後安全でないとは診断される期間と入居への影響
- ▶ 非構造損傷結果（内外装、設備、家具類）：設置位置、損傷脆弱性、瓦礫発生可能性、補修方法・費用・補修期間、入居への影響
- ▶ 建物内の人口分布、および人口分布の日変化

フラジリティグループと性能グループ分類

- ▶ 損傷する可能性のある全ての構造要素、非構造要素と設置物はフラジリティグループおよび性能グループに分類する。
- ▶ 建物内にあり同一性能グループに属する構造要素、非構造要素と設置物の数量は建物要素・内容物リストから求める

フラジリティグループの例

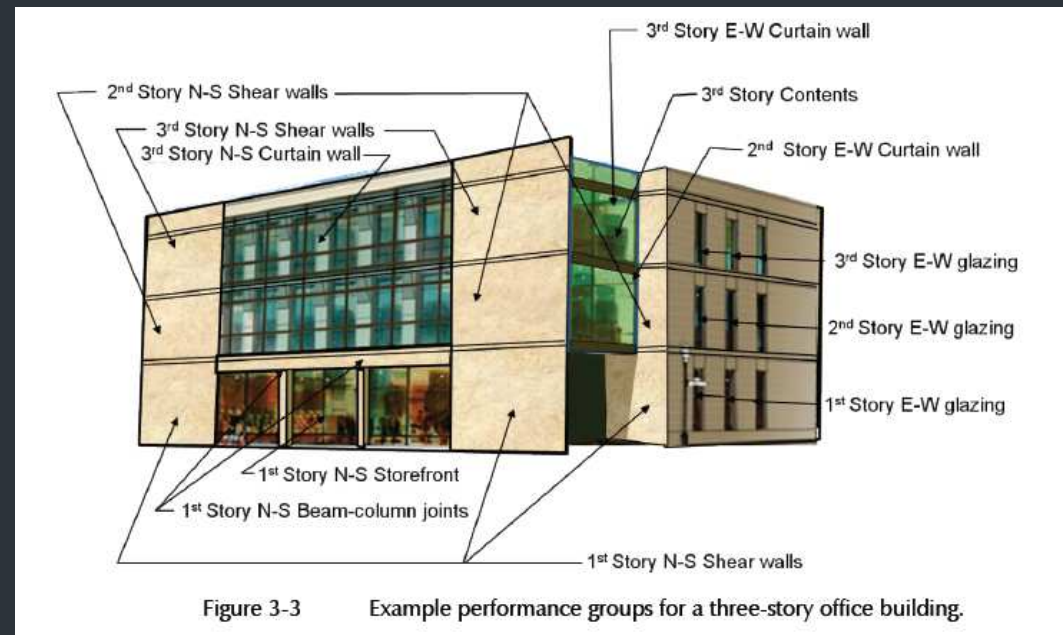
- ➡ A – 地下構造
- ➡ B – 骨格構造
- ➡ C – 内装
- ➡ D – 機械設備
- ➡ E – 家具・調度
- ➡ F – 施工・解体

表3-2 2層建て鋼製骨組み事務所ビルのフラジリティグループ例

分類番号	対象	照査指標
B1035.001	鋼製骨組み構造の接合部	層間変形角
B2022.001	外壁カーテンウォール	層間変形角
C1011.001	内部間仕切り壁	層間変形角
C3032.001	吊り天井	床応答加速度
D1014.011	トラクションエレベータ	地表面最大加速度
D3031.000	空調機械設備	床応答加速度
E2022.001	事務机システム	床応答加速度
E2022.112	収納キャビネット	床速度

性能グループの例

- ▶ フラジリティグループの下に分類される
- ▶ 同じ地震時要求性能指標（例えば特定の層で特定の方向の層間変位、床加速度、床速度）による性能が課せられる要素のグループ



(2)地震ハザードの決定

- ▶ 地震強度ベースの性能評価

参考スペクトルに適合するよう1つまたは一連の地震動記録を振幅調整

- ▶ シナリオベースの性能評価

マグニチュードと震源距離を定義したシナリオ地震⇒分散（地震動予測式etc）
を考慮した加速度応答スペクトル⇒地震動記録を振幅調整

- ▶ 時間ベースの性能評価

一定期間での地震動強度と超過確率（地震ハザード曲線）
⇒加速度応答スペクトル⇒地震動記録を振幅調整

(3) 建物の応答解析

- ▶ 非線形時刻歴応答解析
 - ・ 任意の応答値を求めることが可能
- ▶ 等価水平荷重法による簡易解析
 - ・ 形状が規則的で、限定的な非線形応答に留まる中低層建物
 - ・ 最大床応答加速度、層間変形角

(4)崩壊フラジリティ算定

a)地震強度を増加させていく動的解析
—多数の地震動を用いて崩壊フラジリティ分布を求める

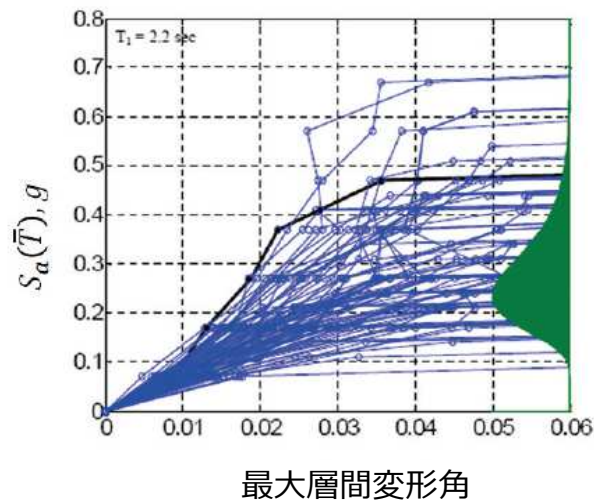


Figure 6-1 Sample incremental dynamic analysis results showing the distribution of collapse statistics for a hypothetical building.

b)限定数の動的解析
—限定数の地震動を用いた結果を正規対数分布で近似

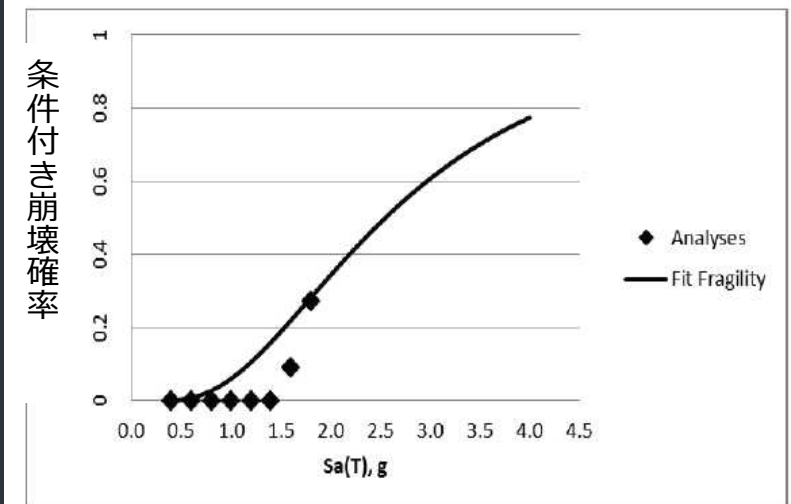


Figure 6-2 Illustration of collapse fragility estimated using nonlinear analysis at several intensity levels.

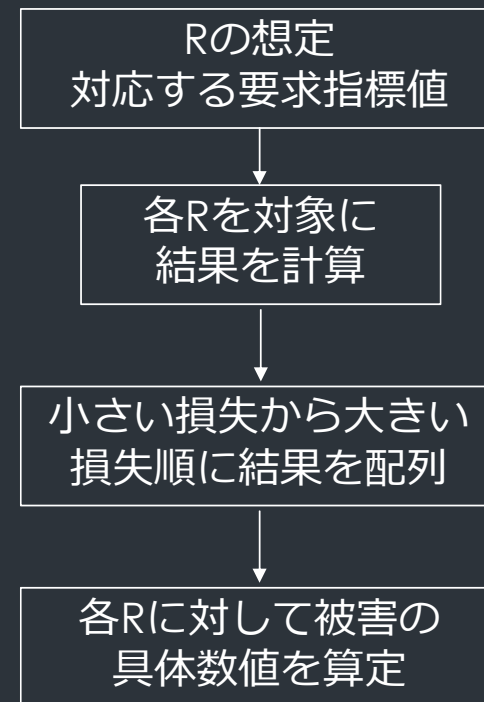


(5)性能評価：強度ベースとシナリオベースに対して

性能の計算方法

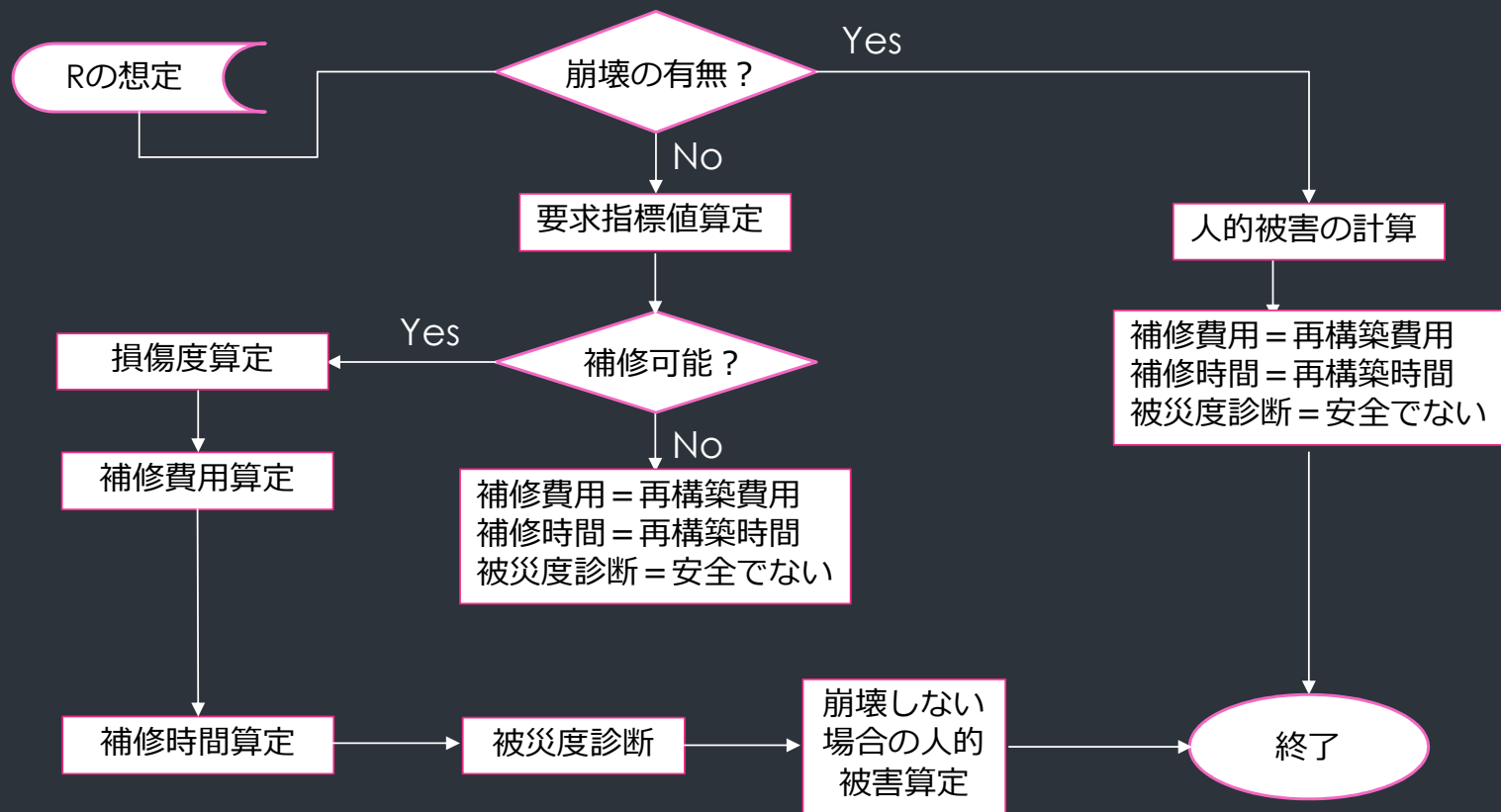
▶ “R” ; realization

1つの地震または1つのシナリオ
地震で引起される具体損失事象



崩壊：部分～全体
補修対象：非構造～構造要素

1つの地震に対する損失の計算方法



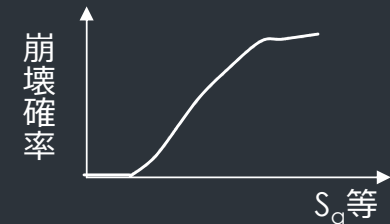
多数の地震に対する損失の計算

要求指標値群の計算
[$m \times R$] のマトリックス

m : 地震強度レベルの数
 R : 対象とする損失事象評価指標値の数

崩壊判定

崩壊フラジリティ関数

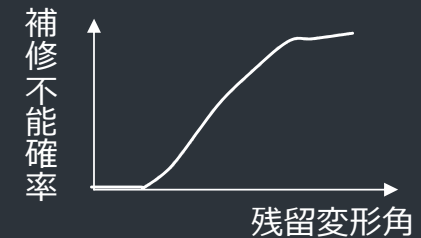


人的被害の計算

建物用途別時系列人口移動モデル
⇒ 死者数、重傷者数

Yes
補修可否

補修フラジリティ関数



要求指標値
損傷フラジリティ関数

Yes
損傷度判定

補修費用・
時間の計算

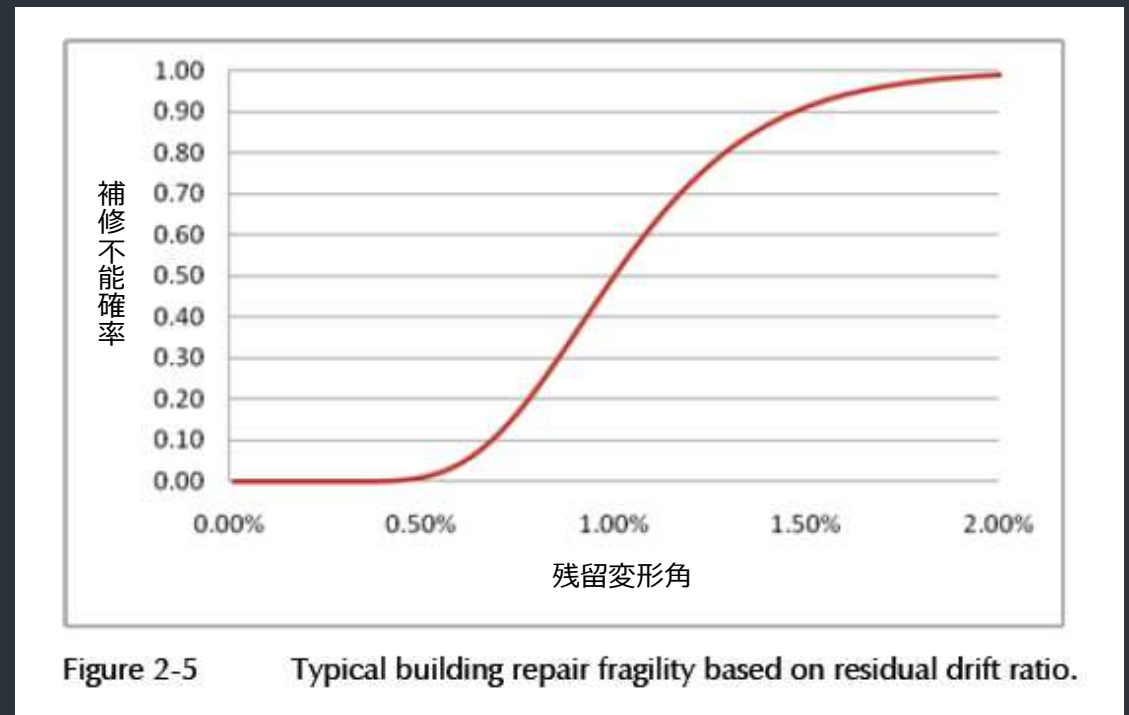
No
建替え費用・時間、安
全でない期間の計算

補修フラジリティ関数

- ▶ 対数正規分布の補修フラジリティ曲線
- ▶ 中央値：1%残留変位
- ▶ 標準偏差0.3



- ▶ 残留変形角0.5%まで補修可能
- ▶ 残留変形角2.0%は補修不可能





(5)性能評価：時間ベースに対して

地震ハザード曲線と解析に用いる地震動強度

1. $s_a^{min} \sim s_a^{max}$ の範囲を m 個の間隔に分割
2. 年平均発生確率 $\Delta\lambda_i$: 両端の年平均超過頻度の差
3. 中央点加速度スペクトル値を用いて目標スペクトルを作成

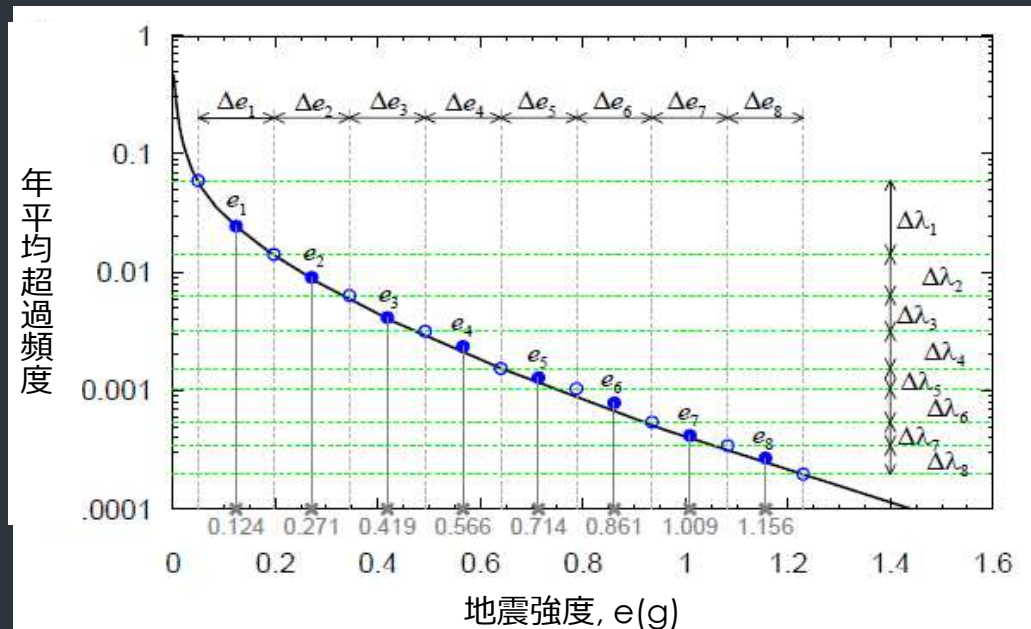


Figure 4-3

時間ベースの評価に関し、地震強度間隔と加速度応答スペクトル中央点、年平均超過頻度、および年平均発生確率を示すハザード特性

時間ベースの性能関数

1. 各分割範囲に対し中央点の値を用いて地震強度ベースの性能評価
 2. 評価結果はその地震強度の年発生頻度を用いて重み付け
 3. 各間隔で得られた値の総和
- 図の横軸は損失額の無次元表示

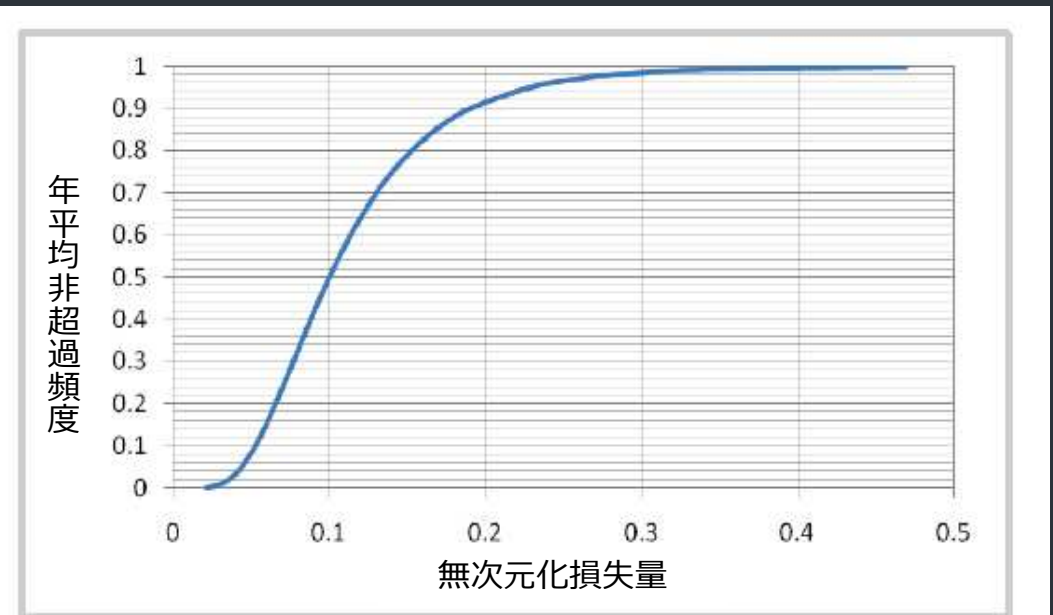


Figure 2-7

時間ベース評価に対する性能関数