

損傷スペクトルを用いた RC 構造物の損傷確率の評価
(その 1) 既往の損傷確率評価の概要

Evaluation of Damage Probability for RC Structures by Damage Spectrum
(Part 1) Review on the Damage Probability Assessment Methods

○佐藤亮介¹, 仲俊亮², 渡部俊宗², 田嶋和樹³, 白井伸明³

*Ryosuke Sato¹, Shunsuke Naka², Toshimune Watanabe², Kazuki Tajima³, Nobuaki Shirai³

Abstract: The objective of this study is to evaluate damages of RC building groups subjected to seismic events by considering uncertainty in damage states. For this purpose, first sources of uncertainty causing variability in the damage states were summarized, and the currently-used evaluation methods of damage probabilities were reviewed. In this paper, a damage evaluation method; referred to as "HAZUS" developed by FEMA, was focused on, and the methods generating the capacity curve, the demand spectrum and the fragility curve required to calculate the damage probability were reviewed.

1. はじめに

筆者らは、RC 構造物の損傷評価として、Bertero ら^[1]の提案する損傷スペクトルを用いた損傷評価手法の開発に取り組んでいる。既往の研究^[2]では、海溝型および直下型地震に対し、建物の損傷状態や被災地域の被害傾向を概ね捉えることができた。しかし、現状では、建物周期毎の損傷が確定値として算出されるため、建物群に対して適用する場合には、損傷状態のばらつきを考慮する手法を検討する必要がある。

建物群に対する損傷確率評価の方法は、統計的推定法と解析的手法の 2 つに分類できる。前者は、実際の地震被害調査結果と地震動強さを結びつけるものである。例えば国内では、兵庫県南部地震の計測震度と被害率の関係に用いられている。しかし、統計的推定法には地震動や地域の特性が含まれるため、異なる地震動や地域にそのまま適用できるとは限らない。一方、後者の解析的手法としては、FEMA によって開発された HAZUS^[3]が有名であり、キャパシティスペクトル法に基づく fragility 曲線の算定法が示されている。本報では、HAZUS を用いた損傷確率評価に着目し、損傷評価における不確実性の要因について検討する。

2. 不確実性の要因

吉川は^[4]、損傷状態を変動させる要因として、①地震危険度の設定に関する不確実性、②サイトの地震動評価に関する推定誤差、③地盤増幅特性の評価誤差、④地震動指標による構造物の応答評価誤差、⑤建物の耐力のばらつき、⑥モデル化の不確実性を挙げている。特定構造物の個別リスク評価の場合は①～④を考慮すればよく、建物群の集積リスク評価の場合には①～⑥すべてが対象となる。本報では、これらの不確実性と

HAZUS の関係について整理する。

3. HAZUS による損傷確率評価

HAZUS では、キャパシティ曲線と地震応答スペクトルより得られるデマンドスペクトルを重ね、その交点より応答値を算出し、建物毎に開発された fragility 曲線に入力することにより、損傷確率を算出する。

3. 1 キャパシティ曲線

建物のキャパシティ曲線は、プッシュオーバー曲線に基づいて作成される。デマンドスペクトルと同一座標に示す必要があるため、荷重-変形関係はプッシュオーバーモード係数 (α_1 : 1 次モードの有効質量比, α_2 : 1 次モードの有効高さ比) を用いて加速度-変位関係に変換される (Fig.1(a)). なお、HAZUS では、Table.1 に示す包括的建物群 (36 種類のモデル建物種別をリスト) に対し、工学的な設計パラメータや判断に基づいて設定されたキャパシティ曲線が開発されており、種々のパラメータを選択することで、簡便に作成することが可能である (Fig.1(b)). キャパシティスペクトルの不確実性を前述の①～⑥で考えると、余剰強度係数 γ , λ (⑤) やプッシュオーバー解析におけるモデル化 (⑥) が主な要因であると考えられる。

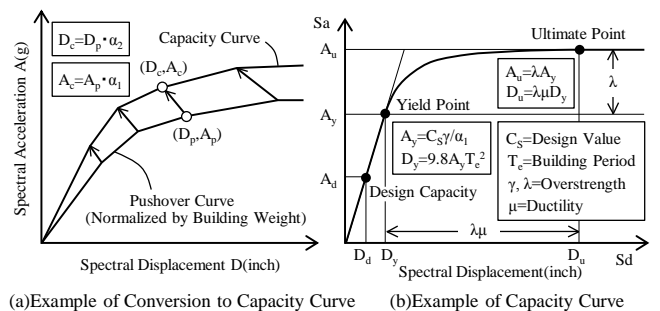


Fig.1 Capacity Curve

1 : 日大理工・学部・建築 2 : 日大理工・院 (前)・建築 3 : 日大理工・教員・建築

Table.1 Example of Building Structure Types

Description	Label	Height			
		Range		Typical	
		Name	Stories	Stories	Feet
Wood, Light Frame	W1		1 - 2	1	14
Steel Moment Frame	S1L	Low-Rise	1 - 3	2	24
	S1M	Mid-Rise	4 - 7	5	60
	S1H	High-Rise	8+	13	156
Concrete Moment Frame	C1L	Low-Rise	1 - 3	2	20
	C1M	Mid-Rise	4 - 7	5	50
	C1H	High-Rise	8+	12	120

3. 2 デマンドスペクトル

デマンドスペクトルは、短周期の一定加速度スペクトル領域および長周期の一定速度スペクトル領域の 2 つの主要部分により構成される。短周期加速度スペクトル S_{Asi} は、0.3 秒の周期における 5%減衰加速度スペクトルにより定義される。一定速度スペクトル領域 (S_{Ali}) は、 $1/T$ に比例する加速度スペクトルを有し、1 秒 5%減衰加速度スペクトルにより定義される。なお、 S_{Asi} および S_{Ali} は地盤増幅係数を用いて次式より表される。

$$S_{Asi} = S_{AS} \cdot F_{Ai} \tag{1}$$

$$S_{Ali} = S_{AI} \cdot F_{Vi} \tag{2}$$

ここで、 S_{AS} : Site Class B に対する短周期スペクトル加速度、 S_{AI} : Site Class B に対する 1-秒周期スペクトル加速度、 F_{Ai} : 地盤種別に対応する短周期増幅係数、 F_{Vi} : 地盤種別に対応する 1-秒周期増幅係数である。Fig.2 に 5%減衰の弾性応答スペクトルから非弾性応答スペクトルへ展開する過程を示す。デマンドスペクトルは、減衰低減係数で除した弾性応答に基づき、次式により算出される。

$$S_A[T] = S_{Asi}/R_A[\beta_{eff}] = S_{Asi}/(2.12/(3.21 - 0.68\ln(\beta_{eff}))) \tag{3}$$

$$S_A[T] = (S_{Ali}/T)/R_V[\beta_{eff}] = (S_{Ali}/T)/(1.65/(2.31 - 0.41\ln(\beta_{eff}))) \tag{4}$$

ここで、 R_A : 加速度領域低減係数、 R_V : 速度領域低減係数、 β_{eff} : 有効減衰である。有効減衰 β_{eff} は、弾性減衰 β_E と非弾性減衰 β_H の和で表現される。また、変位スペクトル $S_D(\text{inch})$ は、加速度スペクトル $S_A(\text{g})$ を用いて次式により算出される。

$$S_D[T] = 9.8 \cdot S_A[T] \cdot T^2 \tag{5}$$

以上より、デマンドスペクトルにおける不確実性は、地震動や地盤に関する①～④が主な要因である。

3. 3 損傷確率の算出

Fig.2 より、キャパシティ曲線およびデマンドスペクトルとの交点 (応答点) における変位が求められる。HAZUS では、応答点の変位に基づいたフラジリティ曲線が耐震設計水準・建物高さ・構造種別ごとに開発されており、Tab.2 に示す対数正規分布でモデル化されたフラジリティ曲線のパラメータ (対数標準偏差 β_{ds} 、中央値 $S_{d,ds}$) を選択することで作成可能である。条件付限界状態発生確率 $P[ds/S_d]$ は次式により表される。

$$P[ds|S_d] = \Phi\left[\frac{1}{\beta_{ds}} \ln\left(\frac{S_d}{S_{d,ds}}\right)\right] \tag{6}$$

ここで、 Φ : 標準正規累積分布関数、 β_{ds} : 対数標準偏差 (キャパシティ曲線およびデマンドスペクトルの不確実性を反映)、 $S_{d,ds}$: 損傷状態のしきい値に到達するときのスペクトル変位の中央値(inch)、 S_d : スペクトル変位(inch)である。Fig.3 に中水準(Moderate)の低層 RC 造骨組のフラジリティ曲線を示す。例えば、Fig.2 より得られた応答変位 D が 10(inch)であった場合、崩壊の確率が 55%となり、対象構造物の損傷は非常に甚大な被害となる可能性が高いことを意味する。

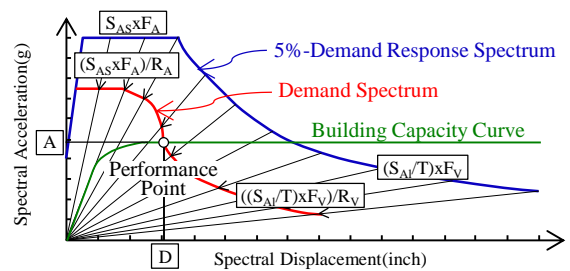


Fig.2 Example Demand Spectrum

Table.2 Example Structural Fragility Curve Parameters

RC Building Moderate Code	Slight		Moderate		Extensive		Complete	
	$S_{d,ds}$	β_{ds}	$S_{d,ds}$	β_{ds}	$S_{d,ds}$	β_{ds}	$S_{d,ds}$	β_{ds}
Low-Rise	0.90	0.89	1.56	0.90	4.20	0.90	10.80	0.89
Medium-Rise	1.50	0.70	2.60	0.70	7.00	0.70	18.00	0.89
High-Rise	2.16	0.66	3.74	0.66	10.08	0.76	25.92	0.91

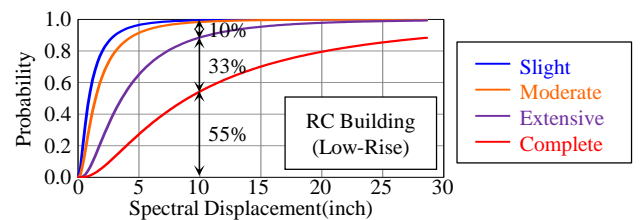


Fig.3 Fragility Curve (Moderate Seismic Code)

4. まとめ

HAZUS の損傷確率評価の概要を示し、キャパシティ曲線およびデマンドスペクトルに含まれる不確実性の要因を整理するとともに、それらが損傷確率評価に反映されていることを確認した。

5. 参考文献

- [1] Bozorgnia, Y. and Bertero, V. V.: Damage Spectra: Characteristics and Applications to Seismic Risk Reduction, Journal of Structural Engineering, ASCE, pp.1330-1340, 2003.10
- [2] 渡部俊宗ほか：実被害状況に基づく損傷スペクトルを用いた既存 RC 造建物の耐震性能評価法 (その 1~4), 日本建築学会学術講演梗概集, 2012, 2013
- [3] Federal Emergency Management Agency (FEMA); HAZUS-MH MR5 Multi-hazard Loss Estimation Methodology Technical Manual Earthquake Model
- [4] 吉川弘道：鉄筋コンクリート構造物の耐震設計と地震リスク解析, 丸善, pp.197-233, 2008

【謝辞】本研究の一部は科学研究費補助金(基盤研究(C) 代表者:白井伸明)の助成を受けて行われたものである。