

最大加速度と最大速度を用いた構造物被害の簡易評価法の有効性の確認

鉄道総合技術研究所 正会員 坂井 公俊, 室野 剛隆
 ジェイアール総研エンジニアリング 正会員 ○日野 篤志

1. はじめに 高架橋の地震被害を簡易に推定することを目的とした構造物の被害推定ノモグラムが提案¹⁾され、広域な鉄道システムの地震時安全性の概略評価に活用されている。これは図1のように表現され、地震動のPGAと卓越周期 $T' (=2\pi PGA/PGV)$ 、構造物の降伏震度 K_{hy} と固有周期 T_{eq} から被害ランクを容易に推定することができる。

ここで、従来から構造物の地震被害はPGAやPGV, SI値といった単一の指標と関連付けられることが多い一方、提案手法ではPGA, PGVという2つの指標を用いている。これにより構造物と地震動の共振現象、構造物の塑性化に伴う長周期化等も考慮した応答評価が可能となっている。また、近年の積極的な耐震補強の推進に伴い、構造物の耐震性、地震リスクは大幅に低減していることが期待されるが、今後より一層の地震対策の推進のためには、地震対策の効果を定量的に評価することが望まれる。

そこで本検討では、PGA, PGVを用いた被害推定ノモグラムをより幅広い応答塑性率($\mu=1\sim 10$)に対応させることで、じん性補強の効果を簡易に評価、把握できる手法を構築する。さらに、PGV等の単一指標を用いた fragility 曲線と比較してバラツキが小さくなることを再度確認する。

2. 解析条件 複数の構造条件、地震動条件を組み合わせた多数の動的解析を実施することで、地震動の最大値情報(PGA, PGV, PGD, SI)と構造物の応答塑性率 μ の関係を対応付ける。解析条件を以下に示す。

(1) 構造物条件 解析手法：等価1自由度モデルによる逐次非線形解析、構造物の非線形特性：Cloughモデル($\alpha=0.10, \beta=0.20$)、減衰定数 $h=0.04/T_{eq}$ ($0.1 \leq h \leq 0.2$)、等価固有周期 T_{eq} ：0.1~10秒まで対数軸で等間隔に40分割、降伏震度 $K_{hy}=0.5$ (固定)、応答塑性率 $\mu=1.0\sim 10.0$ まで1刻みで10タイプとなるようにそれぞれ地震動の振幅を調整

(2) 地震動条件 多様な震源特性、サイト特性を有する16,992記録(K-NETにおいて、1996年5月~2011年7月に観測された記録のうち、三成分合成加速度で50gal以上を計測した記録の水平成分)

なお、基本的な解析条件は構造物の被害推定ノモグラムを構築した際の条件と同様であるが、検討に用いる地震記録を追加するとともに構造物の応答塑性率 μ を1~10まで設定することで、より幅広い卓越周期 $T' (=2\pi PGA/PGV)$ 、応答塑性率 μ に対して整理を行っている。

3. 幅広い応答塑性率に対応した被害推定ノモグラム 多数の解析により得られた塑性率毎の結果を、横軸に正規化周期(T'/T_{eq})、縦軸に正規化加速度($PGA/K_{hy}/g$)として表示した結果を図2に示す。これより、全体的な形状は下に凸となっており、その極小値をとる正規化周期は、応答塑性率 μ が大きくなるほど長くなっている。また、既往の検討による被害推定ノモグラムも図2に黒点線で示しているが、各計算結果の概ね下限側を包絡しており、従来

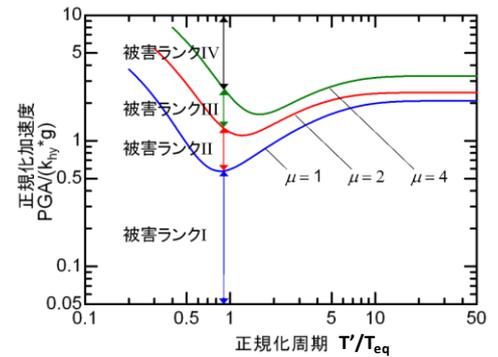
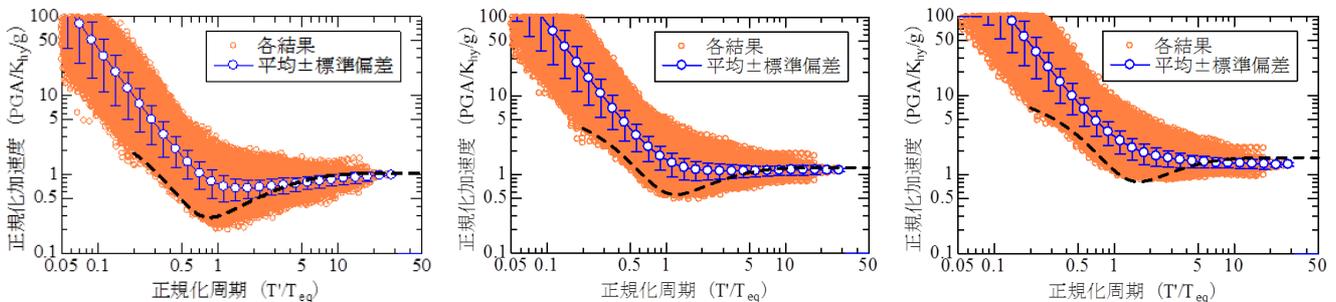


図1 構造物の被害推定ノモグラム¹⁾



(a) 応答塑性率 $\mu=1$ の場合

(b) $\mu=2$ の場合

(c) $\mu=4$ の場合

図2 構造物の応答解析結果の例

キーワード 地震被害, 構造物の被害推定ノモグラム, fragility 曲線, 変動係数

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38 株式会社ジェイアール総研エンジニアリング

の被害推定ノモグラムを用いることで構造物被害を安全側に評価出来ることが分かる。ただし、正規化周期 T'/T_{eq} が 0.2 よりも小さい範囲では、定式化上、ノモグラムの正規化加速度が一定値に収束する傾向を示すため、このような領域では過度に安全側の評価となってしまふ。そこで、ノモグラムの表現式を以下のように修正することで、幅広い正規化周期に適用可能とすることを目指す。これは、1 自由度系の伝達関数の形状の逆数をとったものである。

$$A_r = k_3 \times \sqrt{\left(1 - \left(\frac{T_r}{k_1}\right)^2\right)^2 + 4k_2^2 \left(\frac{T_r}{k_1}\right)^2} / \left(\frac{T_r}{k_1}\right)^2 \quad (1)$$

ここで、 T_r : 正規化周期 ($=T_{eq}/T'$)、 A_r : 正規化加速度 ($=PGA/K_{ny}/G$)、 k_1, k_2, k_3 : 回帰係数である。この k_1, k_2, k_3 を解析結果の平均値と平均一標準偏差に対して最小二乗法によって塑性率毎に評価するとともに、より任意の塑性率に対して適用可能とするために次式で示される簡易な 2 次関数で表現することを試みた。

$$k_i = \sum_{n=0}^2 x_{n,i} \cdot \mu^n \quad (2)$$

ここで、 k_i : 式(1)の回帰係数 ($i=1 \sim 3$)、 $x_{n,i}$: k_i を表現するための係数、 μ : 応答塑性率である。この $x_{n,i}$ を最小二乗法によって評価した結果を表 1 (平均を対象)、表 2 (平均一標準偏差を対象) に、この $x_{n,i}$ を用いることで表現される被害推定ノモグラム (平均を対象) を図 3 に青線で示す。この 9 個の係数を用いることで、正規化周期 T'/T_{eq} が 0.2 よりも小さな範囲においても適切な応答を評価出来るとともに、構造物が保有するじん性能の違いによる損傷の有無も考慮できる。

4. 指標として PGA, PGV を用いることによる推定精度向上の確認

2 章で実施した応答解析結果を用いて、単一の指標のみを対象とした fragility 曲線を作成し、その変動係数を構造物被害推定ノモグラムの結果と比較する。fragility 曲線の分布形は、従来から一般的に用いられている対数正規分布に基づくと考えて評価した。得られた変動係数のうち、 $\mu=1, 10$ の結果をまとめて図 4 に示す。これより、対象とする構造の周期、非線形応答量に応じて適切な指標が変化することが分かる。例えば、周期 0.2 秒程度の構造では PGV や SI 値、周期 1 秒程度の構造を対象とした場合には PGD を指標とした fragility 曲線を用いることで、バラツキの小さな評価が可能となる。続いて、図 3 で示された構造物被害推定ノモグラムを用いた場合の変動係数を図 5 に示す。この図の横軸は正規化周期となっているため、図 4 の結果と直接比較することはできないが、幅広い周期範囲において変動係数が 0.5 を下回っており、従来の単一指標を用いた場合よりもバラツキの小さな応答が評価可能であることが確認できる。

参考文献 1) 室野剛隆, 野上雄太, 宮本岳史: 簡易な指標を用いた構造物および走行車両の地震被害予測法の提案, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.3, 2010.

表1 平滑化後の係数一覧 (平均)

	k_1	k_2	k_3
x_2	-6.51515E-03	-8.78788E-03	-6.66667E-03
x_1	1.44758E-01	1.61697E-01	2.00606E-01
x_0	5.50667E-01	5.06000E-01	6.51333E-01

表2 平滑化後の係数一覧 (平均一標準偏差)

	k_1	k_2	k_3
x_2	-4.96212E-03	-9.58333E-03	-6.59091E-03
x_1	1.10765E-01	1.83538E-01	1.81894E-01
x_0	4.64833E-01	5.10500E-01	5.22333E-01

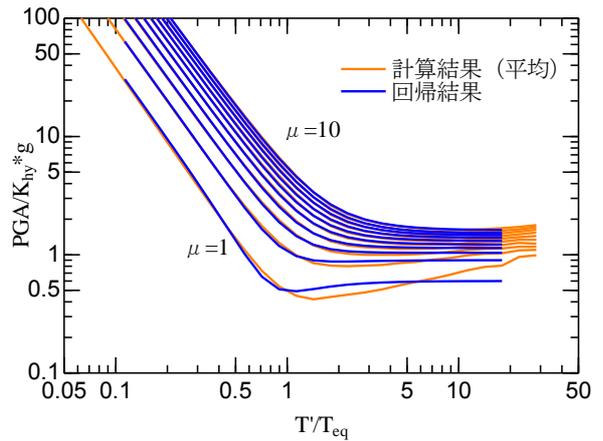


図 3 構造物の被害推定ノモグラム (平均)

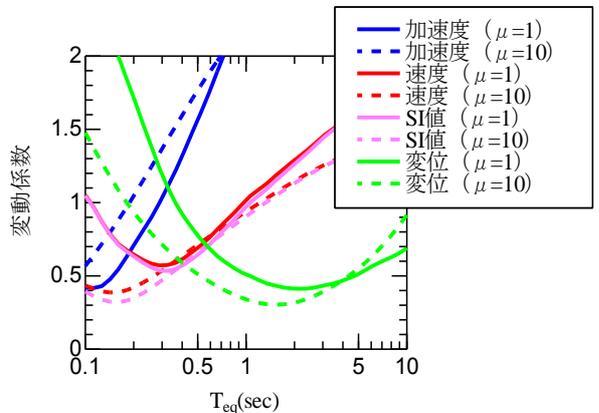


図 4 単一指標のみを用いた場合の変動係数

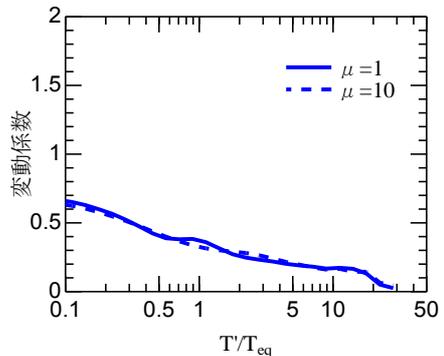


図 5 被害推定ノモグラムによる変動係数