

地震動の最大加速度と最大速度を用いた 土木構造物の地震被害推定ノモグラムの改良

坂井 公俊¹・室野 剛隆²

¹正会員 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail: ksakai@rtri.or.jp

²正会員 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail: murono@rtri.or.jp

筆者らが過去に提案した土木構造物の地震被害の簡易推定ノモグラムは、一般的な鉄道高架橋を対象としているため、構造物の減衰定数を周期に依存させた形で構築しており、他の振動特性を有する構造への適用が困難であった。そこで本検討では、任意の減衰定数を有する土木構造物に適用可能な地震被害の簡易推定ノモグラムを提案した。これは地震動の最大加速度、最大速度、構造物の周期、降伏震度、減衰定数のみをパラメータとして、応答塑性率を簡易に評価可能な手法である。本手法による応答評価のばらつきを評価した結果、従来から一般的に用いられている地震動の単一指標をパラメータとしたフラジリティーカーブよりも広い周期帯域で良好な応答値を算定可能であることを確認した。今回構築した被害推定ノモグラムを用いることで、任意の減衰定数、振動特性を有する土木構造物に対して、地震動との共振、非共振を考慮した上での被害推定を簡易に実施することが可能となる。

Key Words : nomograph of seismic damage estimation, damping factor, ductility facto, seismic damage of viaduct

1. はじめに

道路や鉄道といった多数の土木構造物群を対象とした弱点箇所の抽出や耐震補強の優先順位を決定するためには、各構造が有する地震リスクを効率的かつ適切に評価する必要がある。この時には、個別構造物を対象として基盤地震動評価から表層地盤挙動、構造物挙動の評価までを詳細に実施することは現実的ではなく、何らかの簡易な手法で構造物応答までを把握する必要がある。そこで、地震動の評価として距離減衰式^(例えば1)~3)や地震危険度解析^(例えば4,5)、地盤挙動の評価として地震増幅率^(例えば6)~8)、構造物の挙動評価としてフラジリティーカーブ^(例えば9)~11)などを用いることが有効であると考えられる。

ここで、筆者らは土木構造物の地震時挙動の簡易推定手法として、地震被害推定ノモグラムを提案している¹²⁾。これは、地震動の最大加速度と構造物の固有周期、降伏震度といった一般的なフラジリティーカーブに用いられる指標に加え、地震動の卓越周期を考慮することで、構造物と地震動の共振、非共振を考慮した被害推定が可能となる。この地震動の卓越周期は、距離減衰式によって

得られる最大加速度と最大速度のみから簡易かつ良好に評価できることも確認されており¹³⁾、従来のフラジリティーカーブとそれほど変わらない手間で、より適切な応答評価が期待される。

この被害推定ノモグラムは、一般的な鉄道土木構造物を対象として作成されている。つまり、構造物の固有周期は $T=0.2\sim 2.0$ 秒の範囲で多数仮定し、各構造物の減衰定数は $h=0.04/T$ と周期に依存する形¹⁴⁾で設定している。そのため被害推定ノモグラムの適用範囲としては、対象構造物の振動特性が作成条件に合致していることが求められ、極端に減衰の大きな構造や長周期化を図った構造には適用が困難である。また被害ランクを4段階に設定している(被害ランクⅠ: 応答塑性率 $\mu < 1$, 被害ランクⅡ: 応答塑性率 $1 \leq \mu < 2$, 被害ランクⅢ: 応答塑性率 $2 \leq \mu < 4$, 被害ランクⅣ: 応答塑性率 $4 \leq \mu$)ため、鋼板巻き等の耐震補強を実施し、じん性を高めた構造であってもその効果を陽な形で反映させることは困難であった。

そこで本検討では、被害推定ノモグラムをより発展させ、多様な減衰特性、変形性能を有する構造物に対しても簡易な応答評価が可能な手法の構築を目標とする。具

体的にはまず、減衰定数を $h=0.05$ に固定した場合の被害推定ノモグラムを構築する。このノモグラムは応答塑性率 $\mu=1\sim 10$ まで幅広い範囲で簡易に評価可能な表現形式とする。続いて、この被害推定ノモグラムの有効性を定量的に把握するために、従来の単一指標を用いたフラジリティカーブによる応答評価のバラツキと本手法の結果を比較する。最後にこの被害推定ノモグラムを構造物の減衰定数をパラメータとして簡易に修正する手法を提案し、妥当性を確認することで、任意の減衰を有する構造物に対しても、地震動の最大加速度、最大速度のみを指標とした地震被害推定を可能とする。

2. 減衰を固定した被害推定ノモグラムの構築

(1) 被害推定ノモグラムの概要

地震動の最大加速度 PGA 、最大速度 PGV 、構造物の等価固有周期 T_{eq} 、降伏震度 k_{hy} の4つの指標を用いて構造物の被害レベルを評価可能な被害推定ノモグラムの概念¹²⁾について簡単に説明する。ここで等価固有周期 T_{eq} は、弾性時の固有周期ではなく降伏周期を指している。

まず PGA 、 PGV から、地震動の卓越周期 T を次式により簡易的に算定する。

$$T = 2\pi \frac{PGV}{PGA} \quad (1)$$

続いて、正規化周期 T_r 、正規化加速度 A_r を次式によって評価するとともに、この T_r 、 A_r を被害推定ノモグラム(図-1)にプロットすることで、構造物の被害ランクが判定できる。

$$T_r = \frac{T}{T_{eq}} \quad (2)$$

$$A_r = \frac{PGA}{k_{hy} \cdot g} \quad (3)$$

前章で述べたように、この被害推定ノモグラムは多数の地震観測記録と構造物を網羅的に組み合わせた動的解析によって評価しているが、この時の構造物の減衰定数は、 $h=0.04/T_{eq}$ と構造物の固有周期に応じて変化させている。そのため被害推定ノモグラムの横軸の変化によって潜在的に減衰定数が変化していることになるが、この正規化周期 T_r には地震動の卓越周期の影響も含まれているため、このノモグラムから構造物の減衰の影響のみを陽な形で取り出すことは難しい。さらに、被害ランクとしてI~IVと4段階に分類しているが、この評価においては各構造物が保有する変形性能の違いは考慮できず、たとえ変形性能に富んだ構造物であっても同一の評価を実施せざるを得ない。

そこで、以降の検討ではまず減衰定数を $h=0.05$ に固定した場合の被害推定ノモグラムを構築する。この時のノ

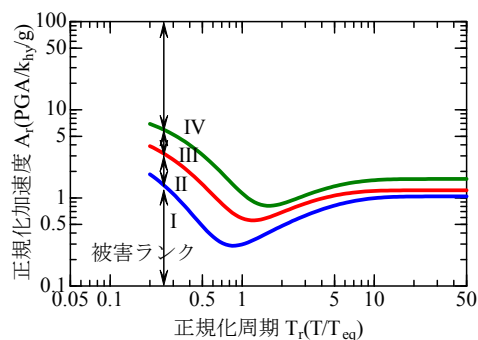


図-1 被害推定ノモグラムの表現方法¹²⁾

モグラムは被害ランクによって分類するのではなく、構造物の応答塑性率 $\mu (= \delta_{max}/\delta_y)$ によって評価することで、構造物の変形性能の差を被害程度の評価時に陽な形で考慮可能とすることを目指す。

(2) 動的解析の条件

多数の動的解析に基づき、構造物の減衰定数を固定した場合の被害推定ノモグラムを構築する。入力地震動は、防災科学技術研究所K-NET¹⁵⁾における観測記録を用いた。具体的には、1996年5月~2011年7月の間に発生した地震の観測記録のうち、三成分合成加速度で50gal以上を計測した記録の水平成分(NS, EW方向)の計16992記録を対象とした¹⁶⁾。これにより、幅広い地震動特性を有した入力条件での検討が可能となる。

土木構造物は鉄道橋梁や高架橋を想定し、簡易な1自由度モデルによって表現する。非線形特性としては、骨格を降伏点で折れるバイリニアモデル、履歴特性はCloughモデル¹⁷⁾ ($\alpha=0.10$, $\beta=0.20$)によって表現した¹⁴⁾。構造物の等価固有周期 T_{eq} は0.1~10秒まで対数軸で等間隔に40タイプ変化させる。減衰定数は $h=0.05$ に固定する。また降伏震度 k_{hy} は、各地震動を入力させた場合に応答塑性率 μ が1.0~10.0まで1刻みでそれぞれの応答となるように収束計算(収束誤差0.0001%以内)によって調整する。

以上の条件に基づき、各地震動、各構造物を対象とした多数の動的解析を実施することで、それぞれ PGA 、 PGV 、 T_{eq} 、各応答塑性率 μ の k_{hy} を算定する。得られた各結果を図-1と同様の表示形式で整理した例を図-2に示す。これらの図を見ると、各地震波形毎に正規化加速度 A_r はばらついてはいるが、大まかな傾向は図-1の被害推定ノモグラムと類似した特徴を有している。具体的には、正規化周期 $T_r=1.0$ 付近で A_r が最小となり、これよりも T_r が小さい領域では急激に A_r が大きくなる。また、逆に T_r が大きな領域では、徐々にではあるが A_r が増加するが、この傾向は応答塑性率 μ が大きくなるほど鈍くなっている。

(3) 被害推定ノモグラムの構築

上記(2)で得られた動的解析結果から、減衰5%、任意

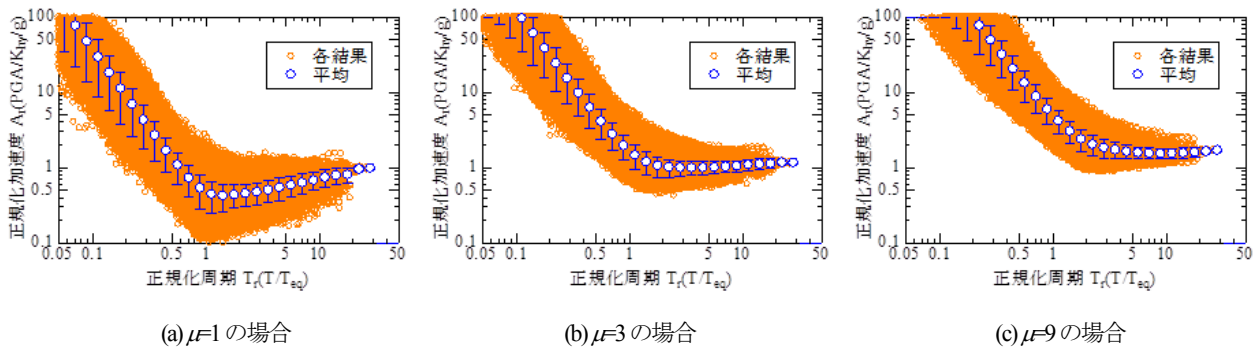


図-2 構造物の動的解析結果の例

の応答塑性率における被害推定ノモグラムを構築する。

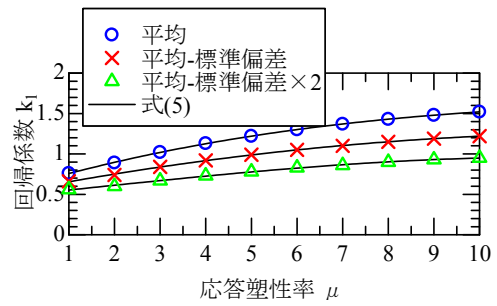
図-2で得られた計算結果を見ると、正規化周期 T_r が1.0よりも小さな領域では、両対数軸で直線状に正規化加速度 A_r が大きくなっている。一方で従来の被害推定ノモグラム¹²⁾はその定式化上、 T_r が小さな領域では A_r が大きくなるものの、ある時点から一定値に収束するような表現となっている。そこで本検討では被害推定ノモグラムの表現式を見直すこととした。

図-2の各平均値の特徴を再度確認すると、正規化加速度 A_r は正規化周期 $T_r=1.0$ 付近で最小となること、それ以外では徐々に増加している。 T_r の大きな領域では A_r は一定値に収束する一方で、 T_r の小さな領域では両対数軸で線形的に A_r が増加する。これは、1質点モデルの理論伝達関数の逆数をプロットした結果と類似している。そこで今回は、次式によって図-2を再現することを試みる。

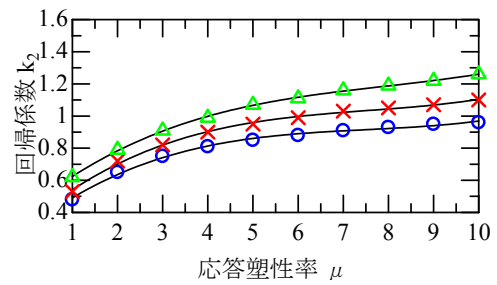
$$A_r = k_3 \times \frac{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{T_r}{k_1}\right)^2\right)^2 + 4k_2^2 \left(\frac{T_r}{k_1}\right)^2}}{\left(\frac{T_r}{k_1}\right)^2} \quad (4)$$

ここで、 k_1 , k_2 , k_3 は回帰係数であり、1質点系の伝達関数を調整するパラメータとなる。このうち k_1 は応答塑性率 μ 毎の共振周期の変化を表現する係数、 k_2 は減衰定数に相当する係数、 k_3 は全体の倍率を変化させる係数である。各応答塑性率（1～10まで10段階）の平均値（図-2の○印）、平均－標準偏差、平均－標準偏差×2を対象に回帰係数 k_1 , k_2 , k_3 を非線形最小二乗法によりそれぞれ評価した。ここで、平均だけでなく標準偏差を考慮した結果も対象としたのは、構造物被害の簡易評価を行う場合に、安全側に配慮した検討も実施可能とするためである。最終的に得られた回帰係数をまとめて図-3に示すとともに、この k_1 , k_2 , k_3 を式(4)に代入して得られる被害推定ノモグラム（ $\mu=1, 3, 6, 9$ ）を図-4に示す。

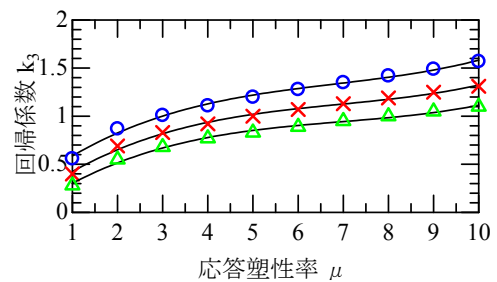
これらの結果より、式(4)によって各解析結果を概ね良好に再現できている。ただし、 $\mu=1$ においては $T_r \geq 1$ の領域で多少誤差が大きくなっている。一方で式(4)の形式で表現することで、 T_r が小さな領域において解析結果の



(a) 回帰係数 k_1



(b) 回帰係数 k_2

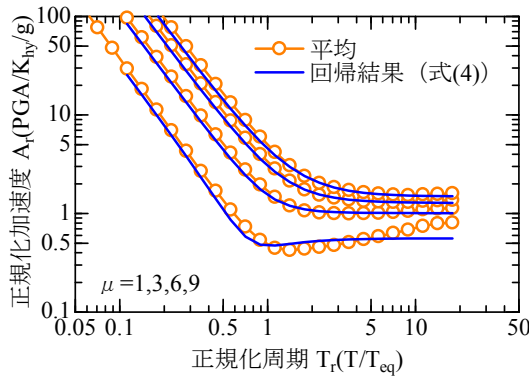


(c) 回帰係数 k_3

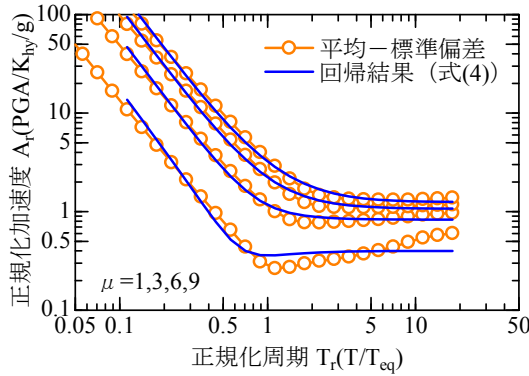
図-3 応答塑性率毎の回帰係数評価結果

傾向を適切に表現できているとともに、各塑性率毎のパラメータが3個と、従来（4個）と比較してより少ないパラメータで評価できている。また図-3の各回帰係数は応答塑性率 μ の変化に伴い連続的に変化している。具体的には、応答塑性率 μ が大きくなると、共振周期の変化を支配する k_1 は徐々に増大しているとともに、減衰定数を表す k_2 も徐々に大きくなっている。

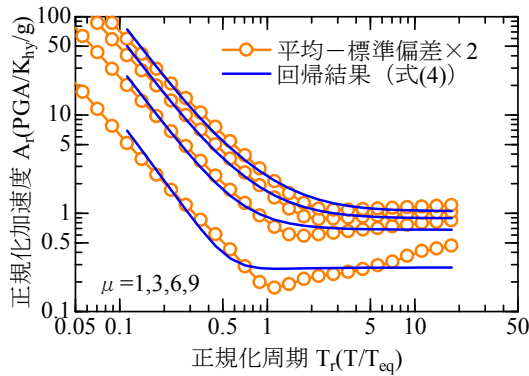
続いてこの各回帰係数を一般化することで、任意の応答塑性率における被害推定ノモグラムを簡易に算定可能



(a) 平均値を対象とした場合



(b) 平均-標準偏差を対象とした場合



(c) 平均-標準偏差×2を対象とした場合

図4 構造物の被害推定ノモグラム評価結果

とする。具体的には、各回帰係数を次式で示される簡易な3次関数で表現することを試みる。

$$k_i = \sum_{n=0}^3 x_{n,i} \cdot \mu^n \quad (5)$$

ここで、 k_i ：式(4)の回帰係数 ($i=1, 2, 3$)， μ ：応答塑性率 ($1 \leq \mu \leq 10$)， $x_{n,i}$ ： k_i を表現するための係数 ($n=0, 1, 2, 3$) である。この $x_{n,i}$ も非線形の最小二乗法によって評価した。最終的に得られた $x_{n,i}$ を表-1～表-3に、式(5)によって表現される各回帰係数 k_i の算定結果も図-3に実線で示している。これより、それぞれ12個のパラメータと式(5)によって各応答塑性率における k_i を適切に表現できており、これと式(4)のみから任意の応答塑性率に対する被害推定ノモグラムを簡易に評価可能となった。

表-1 式(5)の回帰係数 $x_{n,i}$ の評価結果 (平均)

	$n=3$	$n=2$	$n=1$	$n=0$
k_1	1.77E-04	-9.02E-03	1.64E-01	6.02E-01
k_2	1.20E-03	-2.71E-02	2.18E-01	2.99E-01
k_3	2.13E-03	-4.37E-02	3.54E-01	2.74E-01

表-2 式(5)の回帰係数 $x_{n,i}$ の評価結果 (平均-標準偏差)

	$n=3$	$n=2$	$n=1$	$n=0$
k_1	1.36E-05	-4.28E-03	1.08E-01	5.51E-01
k_2	1.26E-03	-2.86E-02	2.37E-01	3.31E-01
k_3	2.03E-03	-4.22E-02	3.39E-01	1.26E-01

表-3 式(5)の回帰係数 $x_{n,i}$ の評価結果 (平均-標準偏差×2)

	$n=3$	$n=2$	$n=1$	$n=0$
k_1	-1.79E-04	4.49E-04	5.88E-02	4.94E-01
k_2	1.03E-03	-2.45E-02	2.26E-01	4.22E-01
k_3	1.93E-03	-4.03E-02	3.20E-01	2.17E-02

3. 被害推定ノモグラムの有効性の確認

本検討で構築した構造物の被害推定ノモグラムは、地震動の情報として最大加速度PGAと最大速度PGV（もしくは卓越周期 T ）が必要となる。これにより、構造物の固有周期と地震動の卓越周期の関係に基づいた共振、非共振を考慮した応答評価が可能であるという特徴を有する¹²⁾。一方で一般的な脆弱性カーブは単一の指標のみから被害程度を表現する場合が多く（例えば⁹⁾～¹¹⁾、これと比較すると必要な地震動指標を1つ追加していることになる。そこで、本章では今回構築した被害推定ノモグラムの応答評価精度が、通常の単一指標のみを用いた脆弱性カーブよりも高いことを確認し、地震動パラメータを追加することの有効性について議論する。

まず、前章で実施した動的解析の結果を用いて、単一指標を用いた脆弱性カーブを作成する。対象とする指標は、距離減衰式等から比較的容易に算定可能な最大加速度PGA(gal)，最大速度PGV(kine)，最大変位PGD(cm)，SI値(kine)の4つとする。脆弱性カーブの作成方法としては、まず動的解析に用いた全地震波（16992波）のPGA,PGV,PGD,SI値を算定する。続いて構造物の条件としては、全て前章と同一条件とする（非線形特性はバイリニア+Cloughモデル，固有周期は0.1～10秒まで40タイプ，応答塑性率は1～10まで10タイプ）。なお構造物の降伏震度は一律0.5に固定し、それぞれ目標となる応答塑性率となるように、地震動の振幅を調整することで、各周期，応答塑性率となる地震動最大値を抽出した。最後にこの各結果を対数正規分布に従うと仮定し、平均と標準偏差を算定した。得られた脆弱性カーブの例（ $T_{eq}=0.8$ 秒，応答塑性率 $\mu=1, 3, 6, 9$ の場合）

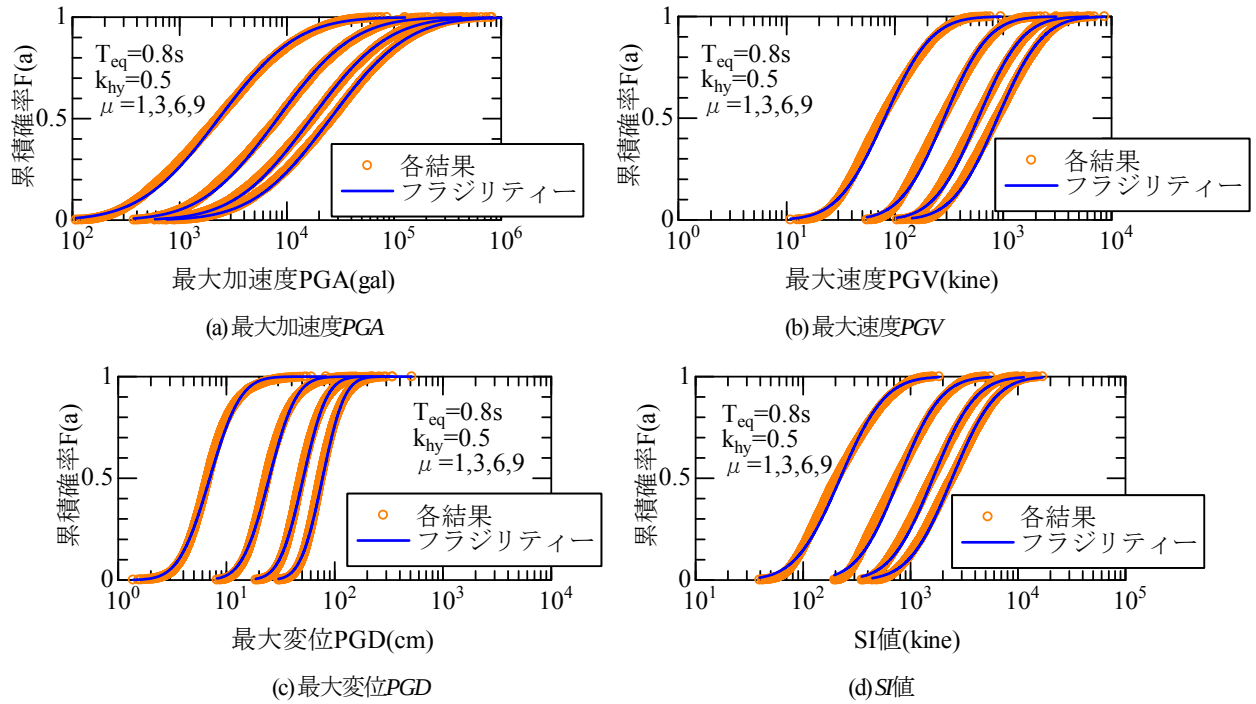


図-5 単一指標を対象としたフラジリティー曲線の例 ($T_{eq}=0.8s$ の場合)

を図-5に示す。

これらの結果より、単一指標を対象としたフラジリティーカーブの表現方法として、対数正規分布を用いることの妥当性が確認できる。また、各フラジリティーの勾配は $PGA > PGV \approx SI \text{ 値} > PGD$ の順に小さくなっており、その傾向は応答塑性率に依らず概ね一定である。そのため構造物の固有周期 T_{eq} が 0.8 秒程度の場合、フラジリティーを表現する指標として最大変位 PGD が適切であると考えられる。これをより定量的に表現するために、各フラジリティーカーブの変動係数を算定した。最終的に得られた結果のうち、応答塑性率 $\mu=1, 10$ の場合を図-6に示す。これより、構造物の固有周期 T_{eq} 、応答塑性率 μ によって適切な指標が変化していることが分かる。具体的には、 $T_{eq}=0.1s$ 、 $\mu=1$ の場合は PGA の変動係数が最も小さく、フラジリティーカーブを表現するために適切な指標となっている。一方で T_{eq} が 0.4 秒程度になると、 PGV 、 SI 値の変動が小さくなっていて、1 秒程度よりも長周期側では PGD の変動係数が最小となる。また、構造物が塑性変形をすると、構造物の振動周期が長周期化することに伴い変動係数の関係が全体的に短周期側にシフトしている。このように、単一指標を用いたフラジリティーカーブは扱いが容易である一方で、対象とする構造物の振動特性の違いによって適切な指標が変化するため、多種多様な特性を有する構造物群に対して適用する場合には注意が必要である。

続いて、2章で構築した被害推定ノモグラムの変動係数を算定する。ここで、被害推定ノモグラムは周期特性を表す指標として正規化周期 $T_r (=T/T_{eq})$ を用いているため、

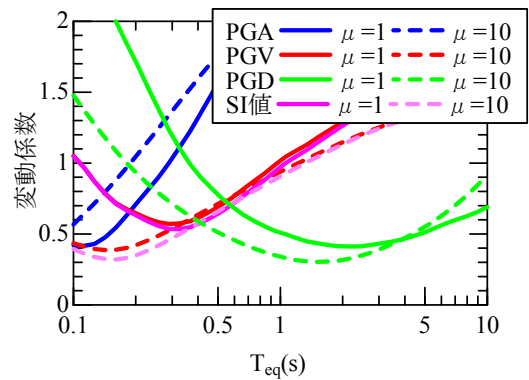


図-6 単一指標を対象としたフラジリティー曲線の変動係数 ($\mu=1, 10$ の場合)

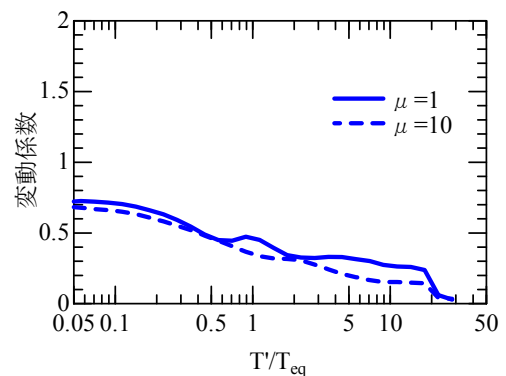


図-7 被害推定ノモグラムの変動係数 ($\mu=1, 10$ の場合)

変動係数は T_r に対して評価した。得られた結果を図-7に示す。これを見ると、変動係数は正規化周期 T_r が大きいほど小さくなっており、かつほぼ全ての T_r において変動係数は 0.5 よりも小さくなっている。これを図-6の結果と

比較すると、今回の結果は幅広い構造物周期において安定して変動係数が小さくなっており、被害推定ノモグラムを用いることで、単一指標を用いたフラジリティーカーブよりも幅広い構造特性に対して適切な応答値を算定可能であることが確認できる。これとはアプローチが異なるものの、既往の検討¹⁸⁾においても地震動指標として最大加速度と最大速度を用いることで、適切な構造物応答を評価可能であることが指摘されている。以上より、複数の地震動指標が利用可能な場合は、今回構築した被害推定ノモグラムを用いることで、より適切な応答評価が期待される。

ここで多数の構造物の地震被害簡易推定を目的とした場合、地震動指標は距離減衰式によって評価する場合が多いと考えられるが、この距離減衰式は複数の指標に対して構築されている場合もある^{例えは32)}。そのため従来のようなPGVを指標としたフラジリティーを用いた場合には、これと同一条件で構築されたPGAを評価することもそれほど大きな手間ではなく、今回の被害推定ノモグラムを用いる場合にも従来とほぼ同様の負荷でより適切な被害推定が実施可能である。よって本手法は、地震被害を簡易かつ高精度に推定することを目的とした場合には、非常に有効であると考えられる。

4. 減衰定数の変化に対応した被害推定ノモグラム

(1) 減衰定数の変化に伴う被害推定ノモグラムの補正

上記2章で構築した被害推定ノモグラムは、構造物の減衰定数を $h=0.05$ に固定した条件で構築している。一方で構造物の減衰定数が変化すると、地震時挙動が変化することは自明であり、これを考慮可能なノモグラムを構築することで、対象構造物の減衰特性が分かっている場合にはより妥当かつ適用性の広い被害推定が可能となる。そこで本章では構造物の減衰定数の変化に対応した被害推定ノモグラムの補正方法を提案する。

ここで筆者らは、構造物の減衰定数の違いを考慮した所要降伏震度スペクトルの補正方法を提案し、妥当性を確認している¹⁹⁾。この考えを応用することで、被害推定ノモグラムの補正を試みる。まず既往の検討では、減衰定数の変化に伴う所要降伏震度の変化（減衰 $h=0$ との比率）を次式で表現している。

$$\frac{K_{hy}(h)}{K_{hy}(0)} = \sqrt{\frac{1 - \exp(-4\pi h'_{eq} \tau'_{eq})}{4\pi h'_{eq} \tau'_{eq}} \{0.424 + \ln(4\pi h'_{eq} \tau'_{eq} + 1.78)\}} \quad (6)$$

ここで、 τ'_{eq} は構造物の塑性化周期 T'_{eq} に対する地震動の

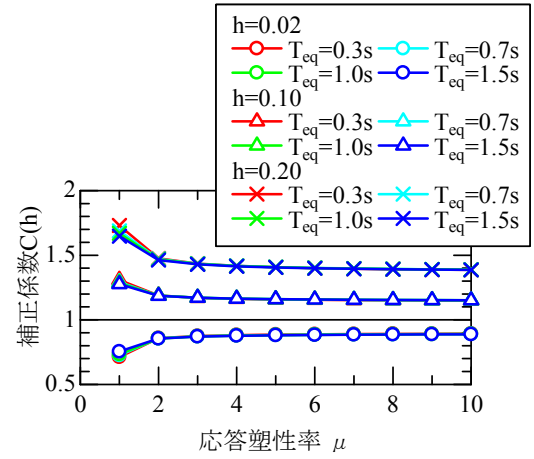


図-8 被害推定ノモグラムの補正係数の算定例

継続時間 T_d の比（ $\tau'_{eq}=T_d/T_{eq}$ ）である。構造物の塑性化周期 T'_{eq} は次式で表現される。

$$T'_{eq} = T_{eq} \sqrt{\frac{\mu}{1 + \gamma(\mu - 1)}} \quad (7)$$

式(7)の T_{eq} ：構造物の等価固有周期、 μ ：応答塑性率、 γ ：初期剛性に対する降伏剛性の比で今回は $\gamma=0.10$ としている。地震動の継続時間 T_d は、後述するように補正係数全体に与える感度がそれほど大きくないことと、小さな値を用いることで安全側の評価となることを勘案し、内陸地殻内地震の平均値である16.5sを一律用いることとした。

続いて式(6)の h'_{eq} は等価減衰定数で、次式により表現される。

$$h'_{eq} = \alpha(T_{eq}, h) \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}}\right) + h \quad (8)$$

この $\alpha(T_{eq}, h)$ は、内陸地殻内地震による記録、2次勾配比 $\gamma=0.10$ の条件下で式(9)により適切に表現できることを確認している¹⁹⁾。

$$\alpha(T_{eq}, h) = 1.53h - 0.028 \ln(T_{eq}) + 0.177 \quad (9)$$

上記の式(6)を減衰 $h=0.05$ と対象とする構造の減衰に対して算定し、両者の比を算定することで、ある等価固有周期 T_{eq} 、応答塑性率 μ を有する構造の所要降伏震度の比が算定できる。これは、正規化加速度 A_r の比の逆数に対応する。つまり、等価固有周期 T_{eq} 、応答塑性率 μ 、減衰 h の構造物における被害推定ノモグラムの補正係数 $C(h)$ は次式で表現できる。

$$C(h) = \frac{A_r(h)}{A_r(0.05)} = \frac{K_{hy}(0.05)}{K_{hy}(0)} \bigg/ \frac{K_{hy}(h)}{K_{hy}(0)} \quad (10)$$

そこで構造物の T_{eq} 、 μ 、 h を複数変化させた場合に対して補正係数 $C(h)$ を算定した。得られた結果を図-8に示すが、

構造物の等価固有周期 T_{eq} の変化が補正係数 $C(h)$ に与える影響は微小であることが確認できる。そこで、取扱いをより容易にするために、等価固有周期 T_{eq} は1.0sに固定することとする。こうすることで、式(6)の τ'_{eq} 、 h'_{eq} は以下のように簡略化できる。

$$\tau'_{eq} = 16.5 \sqrt{\frac{1+0.1(\mu-1)}{\mu}} \quad (11)$$

$$h'_{eq} = (1.53h + 0.177) \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}}\right) + h \quad (12)$$

以上を総括することで、任意の減衰 h を有する構造物の被害推定ノモグラムの算定手順を以下に示す。

Step1 式(4)、式(5)により、減衰定数 $h=0.05$ の場合の被害推定ノモグラムの算定する。

Step2 式(10)、式(6)、式(11)、式(12)と構造物の減衰定数 h から、応答塑性率毎の補正係数 $C(h)$ を算定する。

Step3 上記Step2の補正係数 $C(h)$ をStep1の被害推定ノモグラムに乗ずる。

(2) 提案法の妥当性の確認

今回提案した任意の減衰定数に対する被害推定ノモグラムの妥当性を確認する。検討方法としては、2章で実施した多数の構造物、地震動に対する動的解析を減衰定数 $h=0.20$ に変化させた構造物を対象として実施し、図-2と同様の方法で結果を整理した後に、各応答塑性率 μ 毎の正規化加速度 A_r の平均を評価する。これと上記(1)の手順に従って $h=0.20$ に補正した被害推定ノモグラムを比較する。最終的に得られた結果を図-9に示すが、被害推定ノモグラムは動的解析結果の平均値を適切に表現できており、手法の妥当性が確認できた。

今回提案した被害推定ノモグラムは、地震動指標としてPGA、PGVという2つの指標を必要とするものの、両指標は距離減衰式等によって比較的容易に算定可能であり、かつ単一指標を対象とした脆弱性よりも小さいバラツキで応答を評価可能である。さらに任意の減衰定数を有する構造物に適用可能であるため、振動特性が予め把握されているような構造物群を対象とした簡易被害推定手法として非常に有効であると考えられる。

5. まとめ

本検討では、任意の減衰定数を有する土木構造物に適用可能な被害推定ノモグラムの提案を行った。本検討により得られた成果を以下に示す。

(1) まず、構造物の減衰定数 $h=0.05$ の構造物に対して、被害推定ノモグラムを構築した。これは地震動の最大

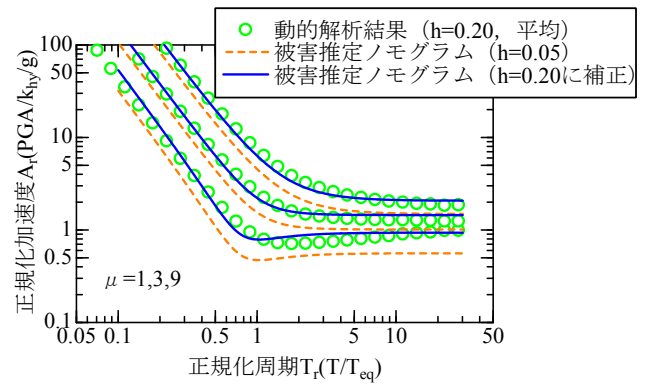


図-9 被害推定ノモグラムの補正結果 ($h=0.20$)

加速度PGA、最大速度PGV、等価固有周期 T_{eq} 、降伏震度 k_y のみのパラメータから応答塑性率の平均値、平均一標準偏差、平均一標準偏差 $\times 2$ に相当する値を簡易に評価可能である。

(2) 上記(1)の被害推定ノモグラムの有効性を従来の単一指標を対象とした脆弱性カーブと比較することで確認した。その結果、従来の脆弱性カーブは構造物の固有周期や応答塑性率に応じて適切な指標が変化するとともに、その変動係数は最も小さい条件においても0.5程度である。これに対して被害推定ノモグラムは、幅広い正規化周期に対して変動係数が0.5よりも小さくなっており、地震動の卓越周期 T と、構造物の固有周期 T_{eq} の比率を考慮することで、より適切な応答評価が可能となることが確認された。

(3) 減衰定数 $h=0.05$ のノモグラムを任意の減衰定数を有する構造物での結果に補正する方法を提案した。この方法は、減衰定数 h と応答塑性率 μ のみをパラメータとして簡易に算定可能な補正係数 $C(h)$ を上記(1)のノモグラムに乗じるだけであり、簡易に任意の減衰に対する被害推定ノモグラムが評価可能となる。さらに $h=0.20$ とした場合の被害推定ノモグラムと動的解析の結果を比較することで、本手法の妥当性を確認した。

今回提案した被害推定ノモグラムは、従来の脆弱性カーブとそれほど変わらない手間ですべての評価が可能であり、かつ幅広い周期範囲で変動係数の低減が可能としている。また、任意の減衰定数を有する構造物に対しても適用可能であるため、予め構造物の振動特性(T_{eq} , k_y , h)を評価しておけば、多数の構造物を対象とした場合にも非常に簡便かつ適切に被害程度が評価可能となる。

謝辞：本検討では、防災科学技術研究所のK-NETの観測記録を使用させていただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Gutenberg, B. and Richter, C. F.: Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration: (Second paper), *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 46, pp.105-145, 1956.
- 2) 司宏俊, 翠川三郎: 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, No.523, pp.63-70, 1999.
- 3) 大野晋: 距離減衰式のバリエーション, 地盤震動－現象と理論－, pp.194-205, 2005.
- 4) Cornell, C.A.: Engineering Seismic Risk Analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.58, No.5, pp.1583-1606, 1968.
- 5) 中島正人: 確率論的地震ハザード解析システムの開発－地震ハザード再分解機能の実装－, 電力中央研究所報告, N05051, 2006.
- 6) 翠川三郎, 松岡昌志, 作川孝一: 1987 年千葉県東方沖地震の最大加速度・最大速度にみられる地盤特性の評価, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 442 号, pp.71-78, 1992.
- 7) 古本吉倫, 杉戸真太, 能島暢呂, 鈴木貴詞: 変換係数による堆積地盤での計測震度の推定法, 地震工学研究発表会講演論文集, Vol.25, pp.57-60, 1999.
- 8) 末富岩雄: 強震時における地動分布特性の即時推定に関する研究, 佐藤工業技術研究所報, 別冊, No.1, 2000.
- 9) 林康裕, 宮腰淳一: 兵庫県南部地震における被害率曲線, 災害部門 PD, 地震動の特性と建築物の被害－経験と予測－, pp.15-20, 1998.
- 10) 長谷川浩一, 翠川三郎, 松岡昌志: 地域メッシュ統計を利用した広域での木造建築物群の震害予測: その 2 建築年代別木造建築物の被害関数の作成と震害予測例, 日本建築学会構造系論文集, No.505, pp.53-59, 1998.
- 11) 坂下克之, 志波由紀夫: 複数の破壊モードを考慮した土木構造物の地震時損傷確率評価手法の提案, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.69, No.4, I_667-I_677, 2013.
- 12) 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, pp.535-546, 2010.
- 13) 坂井公俊, 室野剛隆, 寺師浩二: 地震動の卓越周期簡易評価に関する検討, 土木学会第 66 回年次学術講演会, pp.797-798, 2011.
- 14) (公財) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 (耐震設計), 丸善出版, 2012.
- 15) Kinoshita, S.: Kyoshin Net (K-net), *Seismological Research Letters*, Vol. 69, pp.309-332, 1998.
- 16) 坂井公俊, 室野剛隆, 京野光男: 鉄道盛土の地震被害簡易推定手法の提案, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.68, No.3, pp.542-552, 2012.
- 17) Clough, R. W. and S. B. Johnston: Effect of stiffness degradation on earthquake ductility requirements, 第 2 回日本地震工学シンポジウム梗概集, pp.227-232, 1966.
- 18) 室野剛隆, 芦谷公稔, 横田崇: ナウキャスト地震情報の活用を想定した早期地震警報システムの開発 (その 2) - 地震動による構造物の被害ランク推定法 -, 第 26 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.1293-1296, 2001.
- 19) 田中浩平, 室野剛隆: 減衰定数の違いによる所要降伏震度スペクトルの補正係数の提案と適用範囲の拡張, 土木学会第 33 回地震工学研究発表会講演論文集, 2013.

NOMOGRAPH FOR SEISMIC DAMAGE ESTIMATION OF VIADUCT WITH VARIOUS DAMPING

Kimitoshi SAKAI and Yoshitaka MURONO

The nomograph of seismic damage estimation has been proposed for a general railway bridge, whose damping is depending on its natural period. Therefore, it might not be applied to the structures with various damping characters. Then, the new nomograph estimating a seismic damage of structures with various damping was proposed. This method evaluates a response ductility simply by using PGA, PGV, the natural period of structure, yield seismic intensity, and damping. It was checked that the variation coefficient of the fragility curve given by the proposed method is smaller than that estimated only by using a single parameter of the earthquake motion. Consequently, the proposed nomograph estimates the damage of the structures having arbitrary damping and natural period, considering resonant motion due to an earthquake.