橋梁・高架橋の地震被害発生確率の 即時推定手法のための検討

坂井 公俊¹·松本 星斗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 (〒185-0034 東京都国分寺市光町 2-8-38) E-mail: sakai.kimtioshi.36@rtri.or.jp ²正会員 鉄道地震工学研究センター(〒185-0034 東京都国分寺市光町 2-8-38) 鉄道総合技術研究所

E-mail: matsumoto.hoshito.03@rtri.or.jp

地震発生後に鉄道橋梁・高架橋の被害推定を即時的に実施することで、地震後の鉄道の運行再開判断に 資する情報を提供する手法を構築した.具体的には,過去に提案されている土木構造物の地震被害推定ノ モグラムを拡張することで、各構造物の被害発生確率等を即時的に推定可能な手法を構築した.提案手法 では、地震動の卓越周期と構造物の固有周期の比率を指標とすることで、地震動と構造物の共振・非共振 といった現象を反映した応答予測を実現しており、従来の単一指標に基づく構造物被害予測よりも信頼性 が高い. さらに, 各構造物の降伏震度, 変形性能の違いを陽な形で考慮することが可能であるため, 建設 年代の違いや耐震補強の効果を運行再開判定に直接関連付けることもできる.

Key Words: earthquake, nomograph of seismic damage estimation, seismic damage probability

1. はじめに

地震時に公共土木構造物に要求される性能としては, 大規模地震に対する安全性だけでなく、使用性や復旧性 など、多様な性能が考えられる. このうち復旧性につい て,比較的規模の大きな地震を想定した場合には,構造 物が損傷を受けた場合に、早期に修復が可能であること を指す場合が多い.

一方で、中小規模の地震を想定した場合には、鉄道 施設には地震後に安全を確保した上で、早期の運転再開 が求められる場合もあり、これも復旧性の範疇に入るも のと考えられる. 例えば 2018 年 6 月 18 日に発生した大 阪北部地震においては、各種施設の状況を確認する作業 に時間がかかり、多数の車両が駅間に停車するとともに、 乗客救済や運転再開に多くの時間を要した^{例えば1)}.これ を受けて、国土交通省が今後の同様な事案についての対 応の改善を図るための連絡会議を開催する²とともに, 各事業者は、乗客への適切な情報提供手法の検討や、運 転再開に要する手続きの時間短縮のための検討、各種情 報を有効に活用することで安全確認を行う範囲をきめ細 かく絞り込む手法の検討などを進めている. また筆者ら も早期運転再開に資する情報を提供することを目的とし て、地震直後に鉄道路線に沿った地震動や鉄道構造物の 被害ランクを推定するシステムを開発している³. この

ような早期の被害推定システムは,鉄道施設に限らず, 道路施設 4や配電設備 5等においても、各種施設の特徴 を考慮した上で構築されている事例がある.

ここで、鉄道施設を対象とした地震情報配信システム ³において実装されている、橋梁・高架橋の被害推定手 法(以降では、被害推定ノモグラムと呼ぶ)は、図-1の ような表現が行われている^の.具体的には、横軸を地震 動の卓越周期 Tと構造物の固有周期 Teq の比率(正規化 周期 Tr) で表現するとともに、縦軸を地震動の最大加速 度 PGA と構造物の降伏震度 kwの比率(正規化加速度 Ar) で表現した図(ノモグラム)に、対象とする構造物、地



震の情報をプロットするだけで、構造物の応答塑性率や 被害ランクを推定可能であるため、地震発生後の即時的 な被害発生有無の判定が可能である.この被害推定ノモ グラムでは、各構造物の耐震性能の違いや、地震動と構 造物の共振、非共振を簡易に考慮した上での応答評価、 被害予測が可能となるため、従来の単一指標を用いたフ ラジリティーカーブと比較して、構造物応答の予測精度 が高いことを確認している⁷.

この時に、従来の被害推定ノモグラムは、ある応答塑 性率µに至る正規化周期 T.と正規化加速度 A.の関係につ いて、多数の動的解析結果の平均値、平均-標準偏差、 平均-2×標準偏差を対象として作成している.しかし、 これ以外の条件での評価は実施していないため、後述す るように実際の運行再開判定や各種施設の点検優先度を 判定する際に、きめ細かい対応が困難なケースもあった.

そこで本検討では、この被害推定ノモグラムの機能を 拡張することで、各課題に対応することを目的とする. 具体的には、以下に示す2つの検討を行う.

- a) ある構造物にある地震動が作用した場合に、任意の安 全率(超過確率等)を持った形で応答塑性率µや被害 の発生を即時的に算定可能な手法の構築
- b) ある構造物にある地震動が作用した場合に,ある応答 塑性率μを上回る応答が発生する確率,被害が発生す る確率を即時的に算定可能な手法の構築

まず上記 a)については、従来の被害推定ノモグラム ⁷ では、上述したように各動的解析結果の平均値、平均値 -標準偏差,平均値-標準偏差×2を対象として,それ ぞれ回帰式が提案されている.この結果を用いることで, 地震動波形が有する各種の変動を考慮した上での平均的 な被害の推定や、ある程度の余裕を持った被害の推定が 可能となる.しかしながら、実際にはこれ以外の安全率、 超過確率を設定して被害推定を実施するようなケースも 考えられる. また, 過去の大規模地震における被害事例 を対象として被害推定ノモグラムの有効性の検証を行う 際には、実際の損傷(応答塑性率)が発生する確率を算 定するような状況も考えられるとともに、これを繰り返 すことで、どの程度の安全率を考慮した上で運転再開の 判断を行うことが適切か、という定量的な評価も可能と なると考えられる. このような観点で、上記 a)に対応可 能な手法の拡張を行う.

続いてb)についてであるが、例えば地震後の鉄道の運 行再開等を考える場合には、対象とする構造物が健全で あるか、損傷を受けているか、という結果が重要な情報 の一つとして挙げられる.この時には「応答塑性率が○ ○になる」「応答塑性率が○○になる確率が△△%であ る」という従来の被害推定ノモグラムを用いた応答塑性 率毎に個別に結果が得られるような表現方法や、上記 a) による結果の表示方法よりも、「応答塑性率が○○以下



図-2 入力地震動として用いた元波形の最大加速度と最大 速度の関係

になる」「△△%の確率で応答塑性率が○○以下になる」 という被害の発生確率で表現することがより有効である と考えられる.そのため、従来の被害推定ノモグラムの 表現方法と異なる表現として、上記 b)に対応可能な手法 の拡張を行う.

本論文の構成としては、まず2章において被害推定/ モグラムの改良に用いる地震動データ、構造物データの 条件、解析条件等を整理する.続いて3章では上記a)へ の対応、4章では上記 b)に対応するための検討を行う. ここで、3章、4章では構造物の初期減衰として、標準 的な減衰定数である 5%を固定値として用いた条件での 整理を行うこととし、5章では構造物の減衰が変化した 場合に各結果を簡易に補正する手法について整理を行う.

2. 解析の条件,解析結果の整理方法

本検討で用いる地震動と構造物の応答解析の条件について簡単に整理する.前述した構造物の被害推定ノモグラム[¬](図-1)は、多数の地震動を多様な特性(固有周期,降伏震度等)を有する構造物に入力した非線形動的解析の結果に基づいて作成されているが、今回の各種解析条件は、この被害推定ノモグラム構築時の条件と同様である.

まず,構造物に入力する地震動は,防災科学技術研究 所 K-NET[®]において公開されている観測記録を用いる. 具体的には,1996年5月~2011年5月の間に発生した地 震観測記録のうち,三成分合成加速度で50gal以上を観 測した記録の水平成分(NS,EW 方向)の計 16,992 記録 を用いた.また,これら各地震記録の最大加速度 PGA と,積分を行った結果得られる最大速度 PGV から,次 式 ©によって簡易的に地震動の卓越周期 T も算定した. 検討に用いた元波形の PGA (gal)と PGV (kine)の関係を図-2 に示すが,幅広い地震動特性(振幅レベル,周期特性) を有する時刻歴波形を用いていることが分かる.

$$T = 2\pi \frac{PGV}{PGA} \tag{1}$$

構造物は、一般的な鉄道橋梁・高架橋を想定し、等価 な1自由度非線形モデル⁹によって表現する.この時の 非線形特性は、骨格を降伏点で折れ曲がるバイリニアモ デル、履歴特性は Clough モデル¹⁰ (α =0.10, β =0.20) によ って表現した⁹.構造物の等価固有周期は、0.1~10 秒ま でを対数軸で等間隔に 40 タイプ変化させた.構造物の 減衰定数は h=0.05 を一律で設定したが、5章において減 衰が変化した場合の評価も行っている.また、構造物の 降伏震度 k_{y} は、各地震動を入力した場合に応答塑性率 μ (= δ_{nav}/δ)が 1.0~10.0 まで 1 刻みで 10 パターン、それぞれ の応答となるように収束計算によって調整した.以上の ように、一般的に存在する鉄道構造物の特性(周期、降 伏震度、変形性能)を包含するような条件において評価 を行っている.

これらの入力地震動,構造物の条件に基づいて動的解 析を実施した結果をもとに,正規化周期*T*,正規化加速 度*A*を次式によって算定し整理したものが,構造物の被 害推定ノモグラムである.

$$T_r = \frac{T}{T_{eq}} \tag{2}$$

$$A_r = \frac{PGA}{k_{hy} \cdot g} \tag{3}$$

つまり、上記の多様な特性を有する入力地震動、構造物 を用いた多数の動的解析の結果、16,992(入力地震動波 形の卓越周期)×40(構造物の等価固有周期)個の正規 化周期 T_rに対して、応答塑性率µが1~10となるための正 規化加速度 A_rが10パターン算定されていることになる. 次章以降ではこの解析結果を用いて、各種の検討を行う.

3. 応答塑性率毎の確率分布の評価手法の構築

(1) 離散的な応答塑性率を対象とした評価

前述した多数の動的解析結果を整理することで,各正 規化周期 Trにおいて,同一の応答塑性率µとなる正規化 加速度Arの分布を把握する.まずは,全ての解析結果を 正規化周期 Trと正規化加速度Arの関係でプロットした. 例として,応答塑性率µ=3,6,9の結果をまとめて図-3 に 示す.正規化周期 T=1~2 付近で正規化加速度 Arが最小 となり,これよりもTrが小さい領域では急激にArが大き くなっていることが分かるが,これは地震動と構造物の 共振・非共振の影響によるものである.既往の検討^っで は,このように正規化周期 Trと正規化加速度 Arを用いて 多様な条件の動的解析結果を整理することで,従来の最



大加速度 PGA や最大速度 PGV, SI 値といった単一指標 に基づく被害予測と比較してバラツキが小さくなること を確認するとともに,各応答塑性率における平均的な関 係を表現可能な回帰式を提案している.

本検討では、これらの結果を正規化周期 T,毎に分割し、 その分割内に含まれる解析結果の正規化加速度 A,を抽出 するとともに、A,の確率分布、累積確率 Fを算定する. この時に、正規化周期 T,は 0.01~100 の範囲で対数軸で等 間隔に 160 分割した.得られた結果のうち、図-3 で示し た応答塑性率 μ =3,6,9における T=0.5,1.0,20 付近の累積確 率 Fの評価結果をまとめて図-4 に実線で示す.またこれ らの図には、正規化加速度 A,の確率分布が対数正規分布 に従うとして、正規化加速度 A,の平均 m (ここでは応答 塑性率の μ と混同しないよう m と表記)と標準偏差 σ を 算定し、これに基づく累積確率も点線でプロットしてい



図-4 応答塑性率μ毎の正規化加速度Arの分布

るが、いずれの結果も動的解析による累積確率を良好に 再現している.これより、正規化周期 T,と応答塑性率µ を固定した場合の正規化加速度A,の確率分布は、対数正 規分布によって適切に表現可能であることが確認された.

そこで、それぞれの応答塑性率µ(µ=1~10の範囲で10 ケース)、正規化周期 T,(T,=0.01~100の範囲で160分割) に対して、正規化加速度Arの対数正規分布の平均値m、 標準偏差σを算定した.得られた結果のうち、代表的な ものを図-5に示す.平均値mは当然ではあるが図-3で示 した傾向と概ね一致しており、T,=1付近で最小となる下



(b)標準偏差のの算定結果

図-5 応答塑性率µ毎の正規化加速度 Ar の平均値,標準偏 差の算定結果

に凸の形状をしているとともに、応答塑性率µが大きく なるに従って全体的な形状が右上にシフトするとともに、 下に凸の傾向が鈍くなっていることが確認できる.

これに対して、標準偏差σは全体的に右下がりの傾向 を示しているとともに、応答塑性率μ=1の結果に対して μが3以上の結果では全体的に値が小さくなっている. 構造物が塑性化した場合に標準偏差σが小さくなる理由 としては、履歴減衰によって構造物の減衰が大きくなっ たことが考えられる.また、μ=3,6,9の結果にはそれほ ど違いがみられないものの、応答塑性率が大きくなるほ ど全体的に右側にシフトしているようにも見える.これ は、構造物の塑性化の影響が大きくなるほど、振動時の 卓越周期が長くなるため、結果として当初の正規化周期 よりも大きな値となっていることが要因の一つとして考 えられる.

(2) 連続的な評価への拡張

続いて、前節で評価を行った離散的な正規化周期 T, 応答塑性率µに対する平均値m,標準偏差σを連続的に評 価可能な形への拡張を試みる.まずµ=1~10 までの平均 値mは、既往の検討[¬]と同様に、1 自由度の理論伝達関 数の逆数を拡張した次式によって表現する.ただし既往 の検討では、全解析結果の算術平均を用いていたが、本



図-6 平均値 m の回帰係数 k の評価結果

表-1	式(5)の回帰係数 xniの評価結果
-----	--------------------

	<i>n</i> =3	<i>n</i> =2	<i>n</i> =1	<i>n</i> =0
k_1	1.7677E-04	-8.5606E-03	1.5929E-01	6.3400E-01
k_2	9.4406E-04	-2.2698E-02	1.9515E-01	3.5700E-01
k_3	2.1775E-03	-4.4831E-02	3.6163E-01	2.1733E-01

検討では対数正規分布の平均値であるため、この部分の 修正を行う.

$$\exp(m) = k_{3} \cdot \frac{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{T_{r}}{k_{1}}\right)^{2}\right)^{2} + 4k_{2}^{2}\left(\frac{T_{r}}{k_{1}}\right)^{2}}}{\left(\frac{T_{r}}{k_{1}}\right)^{2}} \qquad (4)$$

ここで、 k_1, k_2, k_3 は回帰係数であり、1自由度系の伝達関数の形状を調整するパラメータとなる.この回帰係数 $k_1, k_2, k_3 c$ 応答塑性率 μ 年に算出した結果を図-6に示すが、 μ が大きくなるほど各係数の値も大きくなっており、塑性化が顕著になるほど共振周期が長くなること、正規化周期 T_r の変化による平均値mの変化が鈍くなること、等を適切に反映した結果となっている.この結果を用いることで、応答塑性率 μ =1,2,3...,10のそれぞれにおいて、連続した正規化周期における平均値mを算定可能となる.

続いて、図-6の各プロットを次式で示す3次関数で表現することを試みる.

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

ここで、 k_i :式(4)の回帰係数(i=1,2,3)、 μ :応答塑性率 ($1 \le \mu \le 10$)、 $x_{n,i}$: k_i を表現するための係数(n=0,1,2,3) である.これらの各係数を最小二乗法によって評価した 結果を表-1に、これによって表現されるkを図-6に実線 で示す.この結果を見ると、式(5)と表-1の係数を用いる ことで、各応答塑性率におけるkを適切に再現できてい る.

続いて標準偏差σは、図-5 (b)に示したように、多少複 雑な形状をしている. そこで、以下の手順に従ってそれ



ぞれの標準偏差の算定結果を統合した後に,連続的な評価を実施可能な定式化を試みた.

まず,図-5 (b)の結果を見ると,構造物の応答塑性率μ が大きくなり,振動卓越周期が長周期化するに従って, 全体的な形状が右下にシフトしている.そこで,以下に 示す式(6)によって正規化周期*T*,に構造物の非線形化の影 響を簡易的に考慮することで,各結果を再度正規化する とともに,それぞれの応答塑性率における標準偏差σを 補正係数αで除することで,各結果が可能な限り重なる ように調整を行った.

$$T_r' = \frac{T}{\sqrt{\mu} \cdot T_{eq}} = T_r / \sqrt{\mu} \tag{6}$$

この時の調整は, T²=0.05 において daが概ね1になるように配慮を行って一定数倍している.上記の手順に従っ て調整を行った結果を図-7(a)に示すが,図-5(b)において みられた応答塑性率μによる違いを概ね同一の関係に整 理できていることが分かる.ただし,μ=1の結果は依然 として他の応答塑性率と比較すると多少の差が見られる が,本検討では,定式化の簡便さと全体の傾向の一致度 の観点から,この差異は許容するものと判断した.続い て,次式によって図-7(a)の平均的な傾向を再現すること を試みる.



$$\sigma/\alpha = \sum_{n=0}^{2} a_n \cdot \left(\log T_r'\right)^n \tag{7}$$

また,各応答塑性率の補正倍率αについても,図-7(b)の関係から,次式による表現を試みた.

$$\alpha = \sum_{n=-1}^{0} b_n \cdot \mu^n \tag{8}$$

これらの式における回帰係数*a*,*b*,をそれぞれ最小二乗法 によって評価を行った.得られた結果を表-2,表-3に示 すとともに,これによって算定される*σα,α*もそれぞれ 図-7に実線で示す.これらの結果を見ると,比較的簡易 な定式化によっても全体的な変化の傾向を適切に捉えて おり,式(7),(8)による表現が有効であることが確認でき る.

これらの結果を統合すると、任意の正規化周期 T, 応 答塑性率µに対する標準偏差σは次式によって表現する ことができる.

$$\sigma = \left[\sum_{m=0}^{2} a_m \cdot \left(\log T_r'\right)^m\right] \cdot \left[\sum_{n=-1}^{0} b_n \cdot \mu^n\right]$$
(9)

この式(9)によって算定される標準偏差σを動的解析によって得られる標準偏差σと比較した結果を図-8 に示すが, 全体的な傾向を大まかに表現できており,比較的簡易な 数式表現によって連続した標準偏差の評価が可能となった.

以上の結果を用いることで、任意の正規化周期 T, 応 答塑性率µを対象として、任意の応答塑性率µとなる正 規化加速度Aと累積確率Fの関係を算定可能となる.そ こで、この提案手法を用いて図-4と同一の条件に対して



(C) #500 場合 図-9 提案手法による応答塑性率#毎の正規化加速度Aの 累積確率の評価結果

評価した累積確率を図-9に示す.これらの結果を見ると, 網羅的な動的解析によって得られた平均値 m,標準偏差 dt,図-5に示したように正規化周期 T, 応答塑性率µに 対して複雑に変化しているものの,今回提案した連続的 かつ比較的容易に算定可能な手法を用いることでも,詳 細な動的解析の結果と概ね同等な累積確率を評価できて いることが分かる.そのため本手法を用いることで,あ る地震動,構造物が確定した時点で,応答塑性率µとな る確率を評価可能である.これにより,従来のような平 均値,平均値-標準偏差などといったある限定した条件 だけでなく,任意の安全率(超過確率)を設定した条件 における応答塑性率µを算定可能となった.

4. 応答塑性率の超過確率の評価手法の構築

本章では、ある地震動が作用した場合に、対象とする 構造物がある応答塑性率を超過する確率や、損傷の発生 確率を算定可能な手法を構築とする.この時には図-3に 示した多数の動的解析結果を応答塑性率μ毎に評価する のではなく、ある正規化周期*T*,正規化加速度*A*に対す る全ての地震波を用いた応答塑性率μを算定することで、 地震波形のバラツキを考慮した上での応答塑性率μの確 率分布を把握することとする.ただし今回実施した動的 解析は、応答塑性率μ=1~10までの 10段階のみを対象と して *A*を算出しているため、以下の条件に基づいて、μ と*A*の関係を補間することとした.

a) Ar=0(地震力=0)でµ=0(応答変位=0)とする.

b)0<μ<10の範囲では、離散的に与えられた応答塑性率μ 毎のArを用いて、線形補間によって内挿する.

c) μ>10 の範囲では Arの推定(外挿)は行わない(デー タなしとして取り扱う)

上記 b)の条件は、 $\mu < 1$ の範囲では厳密に成立するもの の、非線形領域では成立せず、何らかの誤差が含まれる と考えられる.そこで、この誤差の程度を確認するため に、ある地震波形に対して、応答塑性率を 0.1~10 まで 0.1 刻みで細分化して A_tを算定した結果と、上記の手順 に従って内挿した結果を重ねて図-10 に示す.この他、 複数の地震波、正規化周期 T_tにおいて同様の比較を行っ たが、両者の応答塑性率は比較的良好に一致していたた め、以降の検討では離散的に評価した応答塑性率 μ と正 規化加速度 A_tの関係を線形補間によって内挿した結果を 用いることとする.

これによって、任意の正規化周期 T, 正規化加速度 A, に対して、検討に用いたそれぞれの地震波に対する応答 塑性率 μ を抽出することが可能となった.そこで、 T=0.01~100 の範囲で対数軸で等間隔に 160 分割、 A=0.05~500 の範囲で対数軸で等間隔に 160 分割し、各格 子点において地震波毎の応答塑性率 μ を抽出した上で、 応答塑性率 μ の確率分布を算定した.得られた結果の例 を図-11 に示す.これまでの検討で確認されているよう に、正規化周期 T=1 付近では相対的に応答塑性率 μ が大 きくなっていること、また当然ではあるがA-が大きいほ ど μ が大きくなっていることが確認できる.

またこれらの図には、応答塑性率の発生が対数正規分 布に従うと仮定して平均、標準偏差を算定し、これによ り得られる累積分布関数も示しているが、各地震波形の 動的解析結果による累積確率を良好に再現できている. そのため、それぞれの *Tr*, *Ar* に対して応答塑性率の確率 分布を表現するために必要な平均、標準偏差を算定して











おけば、ある構造物、地震動を対象とした場合の応答塑 性率の確率分布を容易に算定可能となる.

そこで、上述したすべての T, Arの組み合わせ(160× 160 個)に対して、地震波形毎の応答塑性率µを算出す るとともに、対数正規分布に従うとして平均値 m,標準 偏差oの評価を行った.得られた結果を図-12 に示す. まず,各地震による応答塑性率の平均値 *m* を示した図-12 (a)を見ると,従来の被害推定ノモグラム^{の7}や前章の 図-5(a)で確認されているように,同一の正規化加速度 *A*^r においては *T*=1 付近において応答塑性率µの平均値が最 も大きくなるとともに,これよりも*T*,が小さくなると急 激にµが小さくなる.これは,構造物の固有周期と地震 動の卓越周期が変化することによる共振,非共振の効果 を反映しているものである.続いて,各条件での応答の バラツキを表した図-12 (b)を見ると,*T*,が大きくなるほ ど,応答塑性率µが大きくなる(正規化加速度 *A*,が大き くなる)ほど,標準偏差の値が小さくなっていることが 分かる.これも図-5(b)において得られていた知見を連続 的に表現したものであると捉えることができる.

今回整理した図-12の結果を用いることで、対象とする構造物にある地震動が作用した場合の応答塑性率µの確率分布を即時的に評価することができる.当然のように各種土木構造物には、安全性や復旧性といった各種の性能に応じた限界応答値が設定されているために、この結果を用いることで、各種性能に至る確率を簡易に把握することが可能となるため、地震発生後の点検箇所の優先順位付けや、運行再開判断を行う際の有効な情報の一つとして活用することが期待される.

5. 減衰定数の変化に対応可能な手法への拡張

前章までの検討は、構造物に付与する初期の減衰とし て h=0.05 を固定して設定した条件下での結果である.し かしながら構造物の減衰は、各種条件によって変化する ことが確認されており、例えば鉄道構造物の耐震設計で は、構造物の等価固有周期 Tag によって減衰を変化させ ている。. また筆者らも近年, 多数の実構造物を対象と した減衰の実測結果をもとに、地盤と構造物の周期比や、 1次モードに占める地中部と地上部の振幅の比率によっ て簡易かつ適切な減衰の設定法の提案も行っている ¹¹⁾¹². そのため、これまで構築した構造物の被害推定時にも減 衰の変化を考慮可能とすることで, 個々の構造物の状態 をより反映させた地震被害の推定や、それを活用した運 転再開の判断等の実現が期待される. そこで本章では, これまで構築した正規化周期Trと正規化加速度Arの関係 に対して,構造物の減衰を考慮可能な形に拡張するため の検討を行う.

この時に、基本的な流れとしては、従来の被害推定/ モグラム作成時の構造物の減衰による補正係数⁷と同様 の手法によって補正を行うこととする.まず、応答の平 均値*m*については、以下の手順に従って補正を行う.

Step1 式(4),式(5)により,減衰定数h=0.05の場合の応答の 平均値exp(m)を算定する.



(b)標準偏差σ
図-12 正規化周期,正規化加速度毎の対数正規分布の平均値,標準偏差算定結果

Step2 構造物の減衰定数hと次式⁷によって,応答塑性率 毎の補正係数C(h)を算定する.

$$C(h) = \frac{k_{hy}(0.05)}{k_{hy}(0)} / \frac{k_{hy}(h)}{k_{hy}(0)}$$
(10)

$$rac{K_{hy}(h)}{K_{hy}(0)} =$$

$$\sqrt{\frac{1 - \exp\left(-4\pi h'_{eq}\tau'_{eq}\right)}{4\pi h'_{eq}\tau'_{eq}}} \left\{ 0.424 + \ln\left(4\pi h'_{eq}\tau'_{eq} + 1.78\right) \right\}$$
(11)

$$\tau'_{eq} = 16.5 \sqrt{\frac{1+0.1(\mu-1)}{\mu}}$$
(12)

$$h'_{eq} = (1.53h + 0.177) \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}}\right) + h$$
 (13)

Step3 上記Step1の平均値exp(m)からStep2の補正係数C(h)を 除することで、任意の減衰hにおける応答の平均値 exp(m)を得る.

上記の手順に従って、減衰 h=0.20 とした場合の平均値



(b)標準偏差oの算定結果

図-13 減衰定数 20%における正規化加速度 Arの平均値,標準偏差の推定結果

mの補正結果を図-13(a)に示す.この図には、2章におい て設定した地震動、構造物の解析条件のうち、構造物の 減衰のみを h=0.20 に変更して網羅的に動的解析を行った 結果の平均値mもプロットしているが、今回提案した減 衰の違いによる平均値の簡易な補正手法によっても、動 的解析の結果を良好に再現できていることが確認できる.

続いて標準偏差のこついては、減衰を変化させた動的 解析の結果、減衰が大きくなるほどバラツキが小さくな ることが確認された.これは、3章において、考察を行 った、構造物の非線形化に伴う標準偏差の低下に関する 要因を支持する結果である.そして、この標準偏差の減 衰変化に伴う補正係数として、上述した式(10)~式(13)に よって得られる平均値の補正係数 *C*(*h*)を 1/1.21 倍した値 を減衰 *h*=0.05 の時ののから除することで、大まかな傾向 を再現できることが分かった.具体的には図-13 (b)に各 プロットで示すように、減衰*h*=0.20 とした場合の動的解 析結果は、減衰*h*=0.05 とした場合の動的解析の結果(図 -5(b))と比較して標準偏差が全体的に小さくなっている が、上述した手法によって補正係数を算定し、これを考 慮することで、標準偏差のの全体の傾向を適切に表現で きていることが分かる.

続いて、これらの関係を用いて、h=0.20の条件における正規化加速度と累積確率の関係を評価した結果を図-



図-14 減衰が変化した場合の提案手法による累積確率の 評価結果(h=0.20の場合)

14 に示す. 各図には構造物の減衰を h=0.20 とした条件 下での網羅的な動的解析によって得られた累積確率も重 ね描いているが,今回提案した減衰の簡易補正手法によ って,全体的な傾向を適切に表現していることが分かる.

また、今回提案を行った構造物の減衰の違いによる応答の平均値、標準偏差の補正手法は、図-12 で示したような応答塑性率µの発生確率を評価する際の平均値、標準偏差に対しても同様に適用することが可能である.具

体的には、以下の手順で実施することができる.

- ・平均値については、まず図-12 (a)からそれぞれの正規 化周期 Tr,正規化加速度 Arにおける平均値 exp(m)を読 み取る.さらに、この時の補正係数 C(h)を上述した手 順で算定する.この補正係数 C(h)を正規化加速度 Arに 乗じることで、減衰の補正を行った状況における Tr, Ar, exp(m)関係を得ることができる.
- ・標準偏差については、上記の条件に対応する標準偏差 のを同様の手順で補正する.これにより、減衰の増大 に伴うバラツキの低減を考慮できる.

上記の手法を用いた場合の損傷の発生確率が,多数の 動的解析の結果を良好に再現可能であることも,別途確 認済である.

以上の検討結果を総括すると、今回構築した各応答の 確率分布の算定手法は、任意の減衰を有する構造物に対 しても適用可能であり、各構造物の振動特性、耐震性能 の違いだけでなく、減衰の大小を考慮した上での構造物 損傷確率の評価をよりきめ細かく実施可能である.

6. まとめ

本検討では、地震発生後の鉄道施設の健全度を即時的 に判定することで、早期運転再開、効率的な点検箇所の 選定等に資する手法の開発を行った.得られた成果を以 下に列挙する.

- ・鉄道構造物の地震応答を即時推定可能な被害推定ノモ グラムの機能拡張を実施することとし、多数の動的解 析結果をもとに、以下の評価を実施可能な手法を提案 した。
 - a) ある地震動,構造物を固定した場合に,任意の安全 率(発生確率)を持った形で応答塑性率μを算定可 能な手法
- b)ある地震動、構造物を固定した場合に、ある応答塑 性率µを上回る確率を算定可能な手法
- ・上記 a),b)それぞれについて、構造物の減衰が変化した 場合の補正手法の整理も行った.この手法を活用する ことで、実際に被害推定結果を活用するユーザーの要 望に沿ったきめ細かい評価が可能となる.具体的には、 地震発生後に各構造物の即時被害推定を行う際、任意 の安全率を有した形での評価や、被害の発生確率の表 示といった結果の表現が可能となる.
- ・本手法は、地震動の卓越周期と構造物の固有周期との 比率で整理することにより、共振・非共振といった現 象を自動的に考慮した評価であるとともに、地震動の 強さだけでなく、構造物の耐震性能(降伏震度、変形)

性能)の違いも陽な形で考慮した被害推定が可能で ある.そのため、各構造物の設計年代の違いや、耐震 補強の有無を考慮した上での被害予測が実現可能とな るため、地震後の早期運転再開にこれらの効果を直接 反映できるという利点も有している.

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

- 河田惠昭:大阪北部地震でわかったこと,消防防災 の科学, No.134, pp.37-40, 2018.
- 国土交通省鉄道局:「大阪北部地震における運転再 開等に係る対応に関する連絡会議」の開催について, https://www.mlit.go.jp/common/001240621.pdf, 2018.
- 岩田直泰,坂井公俊,山本俊六,室野剛隆,青井 真:鉄道地震被害推定情報配信システム(DISER) を利用して素早く運転を再開する,RRR, Vol.77, No.2, pp.12-15, 2020.
- 4) 長屋和宏, 片岡正次郎, 日下部毅明, 松本幸司: 震後対応における意思決定を支援する即時震害推測システムの開発, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.72, No.4, pp.I_966-I_974, 2016.
- 5) 朱牟田善治,石川智巳:地震後の災害情報を逐次処理する配電設備被害推定の基本モデル ベイジアンネットワークを適用した被害推定システムの開発 -, 電力中央研究所報告,N07027,2008.
- 6) 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.
- 坂井公俊,室野剛隆: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,土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol.71, No.4, pp.I_32-I_39, 2015.
- Kinoshita, S.: Kyoshin Net (K-net), Seismological Research Letters, Vol. 69, pp.309-332, 1998.
- (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.
- 10) Clough, R. W. and S. B. Johnston: Effect of stiffness degradition 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.
- 11) 和田一範,坂井公俊,室野剛隆:実測に基づく鉄道高架 橋の減衰定数の特性把握と低減衰箇所の簡易抽出法,土 木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol.74, No.1, pp.1-12, 2018.
- 12) 石川太郎,坂井公俊,和田一範,室野剛隆,小島謙 一:構造物全体系の振動モードに占める地中部の振幅比 を考慮した鉄道橋梁・高架橋の実用的な減衰設定法の提 案,日本地震工学会論文集,Vol.20, No.3, pp.35-50, 2020.

METHOD FOR RAPID ESTIMATION OF DAMAGE PROBABILITY FOR RAILWAY STRUCTURES

Kimitoshi SAKAI and Hoshito MATSUMOTO

In this paper, a new method to carry out rapid damage estimation of the railway bridges and viaducts was proposed. The proposed method made it possible to estimates the damage occurrence probability of each structure immediately after an earthquake, by improving the nomograph used for seismic damage estimation. The proposed method is more reliable over the conventional method since it reflects the resonance of structure and earthquake by considering the ratio of the dominant period of seismic motions to the intrinsic period of the structures. In addition, proposed method explicitly considers the differences in the yield strength and deformation performance of each structure, depending on the year of construction and the seismic retrofit records. It follows that resulting damage estimation given by the developed method would be applicable for decision-making with regard to resuming train operation after earthquake.