

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手法 —

室野剛隆¹⁾, 芦谷公稔²⁾, 横田 崇³⁾

¹正会員 博(工) (財) 鉄道総合技術研究所 防災技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺光町 2-8-38)

²正会員 理修 (財) 鉄道総合技術研究所 防災技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺光町 2-8-38)

理博 気象庁 総務部 (〒100-8122 東京都千代田区大手町 1-3-4)

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研究開発の一環として、気象庁が配信を打ち出している面的な地震動分布情報から鉄道構造物等の被害推定を行う方法について検討している。本論文は、その基礎的検討として、構造物を 1 自由度系にモデル化し、非線形時刻歴応答解析を実施した結果について報告する。最大加速度 PGA と卓越周期 T の地震動による構造物の被害程度は、任意の降伏加速度 $k_{hy} \cdot g$ と降伏周期 T_s をもつ構造物に対して、PGA を $k_{hy} \cdot g$ で、 T を T_s で正規化することにより同一の基準でランク分け出来ることが分かった。これにより、地震動の PGA と T の 2 つの指標が与えられれば、構造物条件に応じた被害推定を行うことが可能となる。

Key Words : early damage estimation, earthquake disaster mitigation, strong motion parameters, response ductility

1. はじめに

近年、公的機関の地震観測網の整備が進んでおり、これらの観測網における即時観測情報を配信する計画が進んでいる。気象庁ではナウキャスト地震情報や面的な地震動分布情報の配信計画がある。この面的地震動分布は、広域な構造物の被害予測をするには、有用な情報であり、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の一環として面的な地震動分布情報から鉄道構造物の被害推定を行う方法を検討している。本論文ではその検討結果を報告する。

被害推定を行うには、構造物の被害と相関の高い地震動強さ指標として何を用いるかが重要なポイントの一つになる。鉄道や道路では構造物に被害が及ぶかどうかの判断基準として現在は加速度値が用いられている。しかし、地震動のどのような特性が構造物に損傷を与えるかは既に数多くの研究が行われており^{2),3)}、これらの研究成果を見ると、最大加速度は短周期域でのみ損傷と相関があるが、最大速度や SI 値は幅広い周期帯域でほどほどに相関が高いと結論づけられる。さらに、計測震度と構造物の被害との相関についても議論されている^{3),4)}。これらの指標を用いた被害推定システムも構築されている。しかし、いずれの指標においても各種の構造物に有効かどうかは検討の余地がある。このような状況に鑑み、本研究では橋梁・高架橋および盛土を対象として、解析的手法により構造物の被害をよく説明し得る地震動指標について検討した。なお、紙面の都合で橋梁・高架橋を対象とした結果のみ報告する。

2. 検討方法

(1) 検討方法の概要

本来であれば、観測記録や過去の震災データに基づく検討が望ましいが、鉄道構造物の広範囲な検討を行うだけのデータの蓄積が無い。幅広い構造物に対応した手法を評価するためには、広いパラメータ範囲で検討する必要がある。そこで、入力地震動や構造物特性を仮定した地震応答解析により構造物の応答値を算定し、その結果を基に地震動指標と構造物の被害レベルの相関をまとめた。

(2) 解析モデル

本研究では、橋脚・高架橋と盛土構造物の 2 形式について検討を行ったが、本論文では紙面の都合上、橋脚・高架橋について検討した結果を示す。

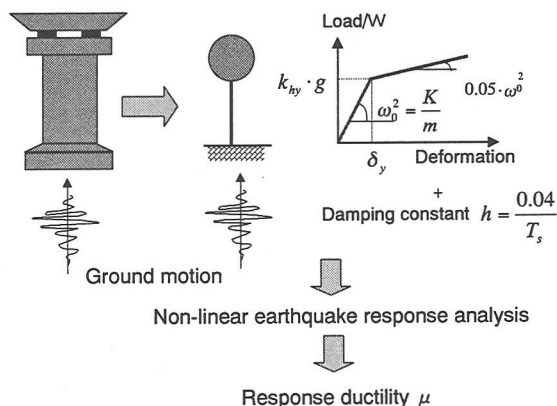


図-1 橋梁・高架橋の検討方法

一般的な鉄道橋脚や高架橋は比較的単純な構造であり、その動的挙動は1自由度系で表現できる⁹⁾。また、構造系の塑性化も考慮する必要がある。そこで、図-1に示すような非線形復元力を有する1自由度系で構造物をモデル化した。必要なパラメータは、降伏震度 k_{hy} 、周期 T および減衰定数 h である。各パラメータは既設構造物の調査や現行の耐震基準⁹⁾を踏まえて設定した(表-1)。

表-1 構造物モデルの諸元

Parameter	Value
降伏周期 $T(s)$	0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 2.0 (sec)
降伏震度 k_{hy}	0.3, 0.4, 0.8
復元力モデル	Clough model
減衰定数 h	$h=0.04/T$

(3) 被害ランクの設定

構造物の被害程度を表す指標として、応答塑性率や塑性ひずみエネルギー、さらにはそれらを組み合わせた概念も提案されている⁹⁾。本研究では、a)耐震設計では塑性率を用いて性能を照査している⁹⁾こと、b)設計時のデータが将来的にも活用できること等を考え、塑性率を用いて被害ランクを整理した(表-2)。ただし、この被害ランクは、あくまでも研究上の分類であり、実用にあたっては慎重に検討する必要がある。なお、ここでいう塑性率は部材単位の塑性率ではなく、構造系全体としての塑性率を考えている。

表-2 被害ランクと塑性率の関係

被害ランク	無被害	小被害	中程度の被害	大被害
塑性率	$\mu < 1$	$1 \leq \mu < 2$	$2 \leq \mu < 4$	$4 < \mu$

(4) 入力地震動

検討に用いた地震動は、表-3に示すとおりである。図-2に、用いた地震動の最大加速度PGAと卓越周期 T の関係を示した。横軸の卓越周期 T はフーリエ振幅より求めたものではなく、

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

で求めたものである。ここに、PGVは地震動の最大速度である。これは、地震動を、最大値が発生する付近では正弦波に近いと考えたことに相当する。別途行った検討では概ね良好であることを確認している。このような図上では、最大速度一定の線は直線で表現される。兵庫県南部地震と台湾集集地震の記録は印を変えて表している。兵庫県南部地震は、 T が約1.0秒で大きな揺れを示したものは、PGV・PGAとも大きい。一方、台湾集集地震ではPGVが100cm/sを越える記録もあるがPGAは相対的に小さい。この辺りの特性が、構造物の振動による被害

の大小関係に影響があったと推測できる。なお、解析では、地震動にバリエーションをつけるために、全ての地震動について、EW・NS成分ともに最大加速度を100～1000galまで100gal刻みに調整して用いた。

表-3 解析に用いた地震動

地震	データセット数
釧路沖地震(1993)	37
北海道南西沖地震(1993)	10
北海道東方沖地震(1994)	10
三陸はるか沖地震(1994)	26
兵庫県南部地震(1995)	34
台湾集集地震(1999)	54
鳥取県西部地震(2000)	48

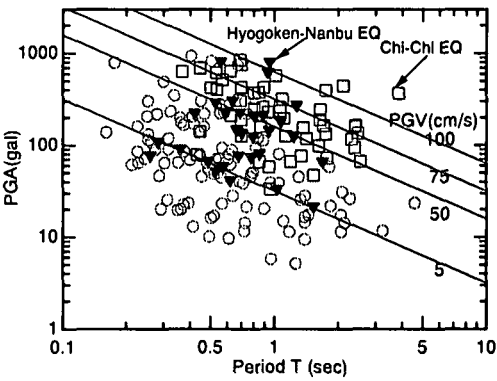
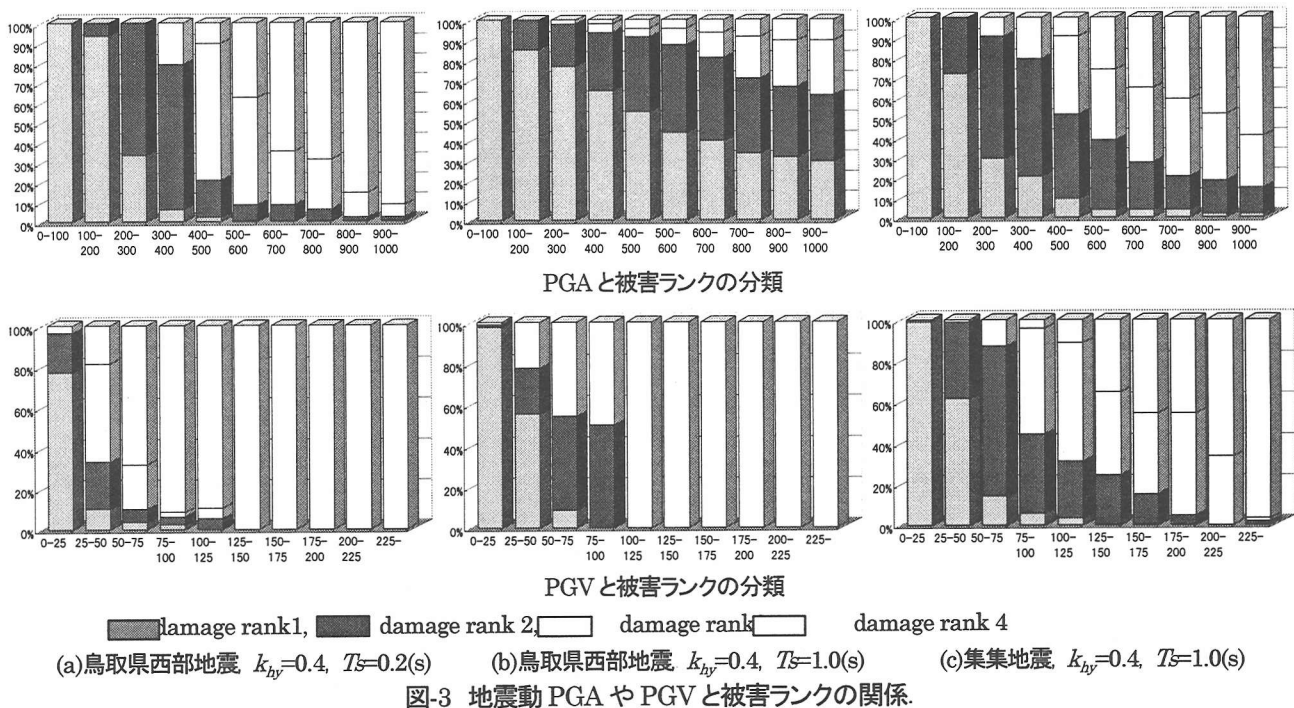


図-2 解析に用いた地震動の特性

3. 解析結果

(1) 構造物の被害と地震動指標の相関

まず、既往の被害予測法で用いられている地震動指標PGA、PGVと被害との相関を調べた。その一例が図-3である。PGAまたはPGV毎に被害レベルの発生率を示したものである。図(a)は、短周期構造物($T=0.2(s)$)に対する鳥取県西部地震の例であり、PGAにより明確に被害レベルが分かれており、被害の分類が可能であることが分かる。これに対して、長周期構造物($T=1.0(s)$)では(図(b))、PGAとともに被害レベルが相対的に大きくなる傾向にあるものの、同じPGAでも被害レベルはrank1-4まで多岐にわたってしまい、PGAによる被害の分類は不明瞭である。一方、PGVで見ると、いずれの構造物も、ほどほどに被害を分類できている。しかし、地震動の特性が異なれば、構造条件が同じであっても被害ランクの境界が全く異なってくる。図(c)に長周期構造物($T=1.0(s)$)に対する集集地震の例を示したが、この例より比較的大きなPGVでも被害レベルが小さい。これは、図-2で見ても分かるようにPGVに対してPGAが小さい記録があるためと思われる。このように、PGVであっても広い構造物条件、地震動特性に対して、常に適切に被害を分類できるとは言い難い。



(2) 構造物の被害のメカニズム

動的解析を行い、入力地震動を被害ランク別に分離し、その地震動の卓越周期 T と最大加速度PGAの関係を図-4に示すようなT-PGA図にプロットした。PGAが構造物の被害発生の支配要因であれば、被害ランクは等PGA線に平行に区分される。一方、PGVが支配要因であれば、等PGV線に平行に区分される。

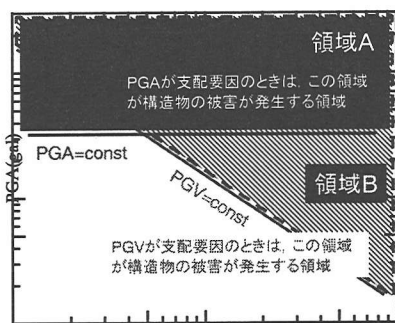


図-4 T-PGA 関係図を用いた被害の解釈

一例として、図-5に兵庫県南部地震に対する $k_{hy}=0.4$, $1.0(sec)$ のT-PGA関係図を示す。地震動の卓越周期 T が短い場合はPGVが、卓越周期 T が長い場合はPGAが被害を分類する支配要因になっているように見える。この図からも各被害ランクを適切に区分するには、単一指標では困難であり、構造物に被害が発生するのは、加速度・速度ともある程度の大きさ以上であることが分かる。

(3) 構造物の被害予測の提案

図-5により、構造物の被害にはPGA, PGVの両者が影響していることが分かる。しかし、構造物条件によ

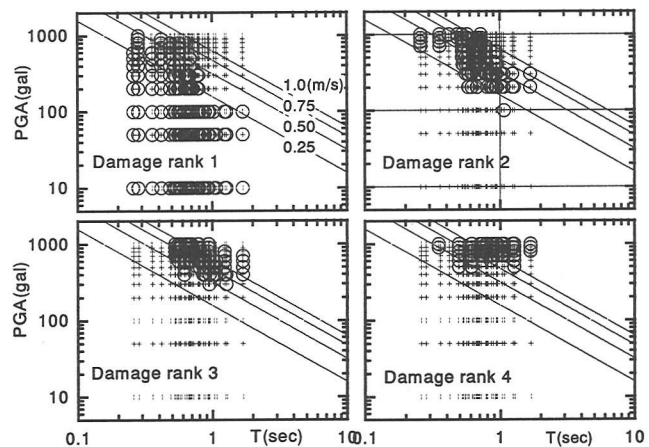


図-5 卓越周期-最大加速度関係図(T-PGA図).
(入力:兵庫県南部地震, 構造物: $k_{hy}=0.4, 1.0$)

て、T-PGA図で各被害ランクの分布が異なるため、このままでは構造物ごとにT-PGA関係図が必要となり、被害予測を行う上では都合が悪い。そこで、横軸の地震動卓越周期 T を構造物の降伏周期 T_s で正規化し、縦軸の地震動PGAを構造物の降伏加速度 $k_{hy} \times g$ (g は重力加速度)で正規化した。その結果を図-6に示す。

$T/T_s = 1$ のときに、 $PGA/k_{hy}g$ が最小となる。これは、入力地震に対して構造物が共振して、小さい地震動に対して構造物の応答が増幅し、容易に損傷することを表す。 $T/T_s < 1$ の領域では、いくらPGAが大きくても構造物は損傷せず、 $T/T_s > 1$ の領域では構造物の応答が増幅せず、入力PGAが降伏加速度を超えると損傷することを表している。このことは、ある地震動に対して、地震動の卓越周期よりも短周期構造物 ($T/T_s > 1$) の場合にはPGAが

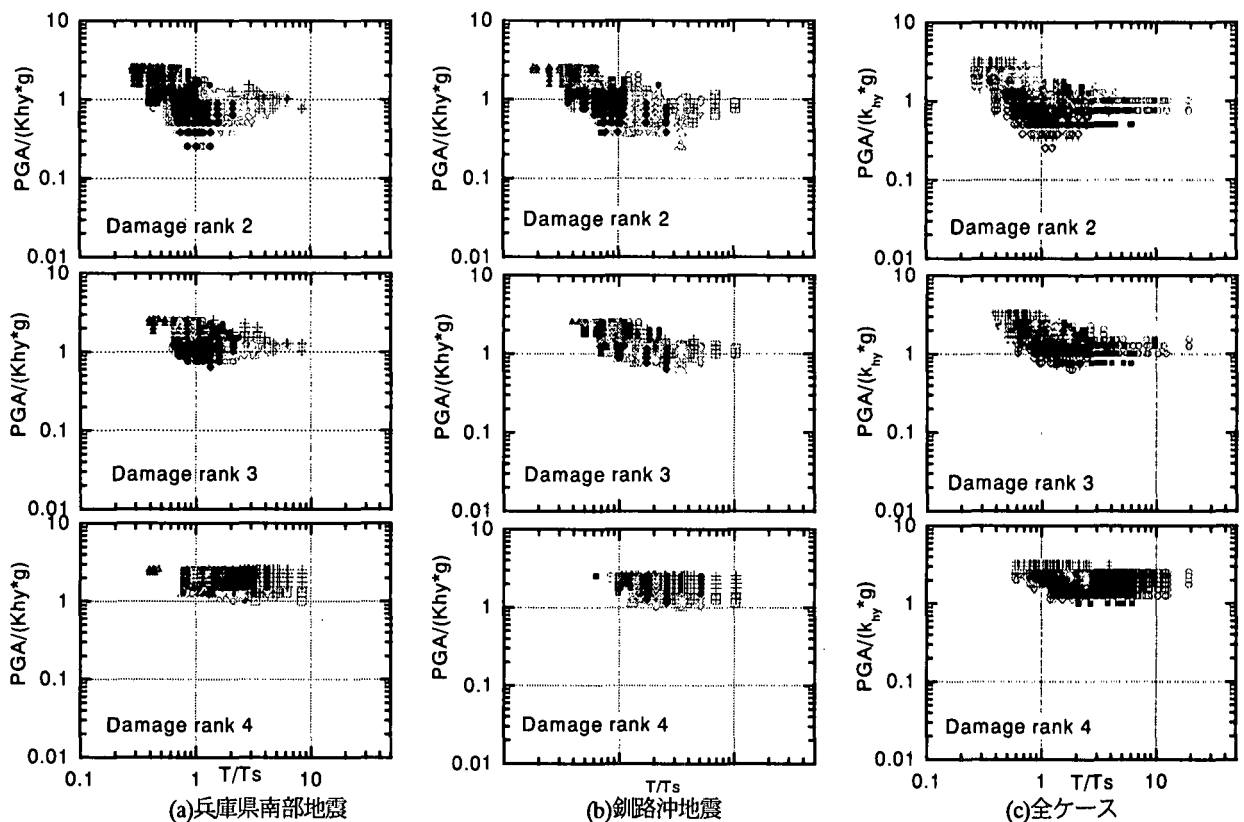


図-6 正規化 T/T_s -正規化 $PGA/k_{hy}g$ 図

(例として、兵庫県南部地震、釧路沖地震、全ケースを表示。プロット中には全構造形式が含まれている)

構造物の損傷を支配する要因になり、地震動の卓越周期よりも長周期構造物 ($T/T_s < 1$) の場合には PGV が支配要因になることを示している。このような傾向は、定性的には既往の研究でも指摘されているが、図-6 のように整理することにより、定量的にも明確な形で理解することができる。

また、被害ランクが進むと、構造物周期の延伸と減衰の増大により、全体的な形状が右上に移動するとともに、形状が滑らかになる。

以上の関係は、構造物種別や地震動種別によらず、ほぼ同一の分布になっており、普遍的な特性と考えられる。

現在、気象庁では観測記録を用いて、1km メッシュ毎の地震動強度分布を推定し、配信する計画がある。地震動指標としては、計測震度の他に、最大加速度 PGA や最大速度 PGV などが計画されている。一方、構造物側としては降伏震度 k_{hy} と周期 T_s をデータベースとして管理しておけば、地震発生後、約 5~10 分後には、構造物の耐震性能に応じたきめ細かい予測が可能となる。

4. おわりに

本研究では、鉄道構造物を対象として構造物の被害と地震動指標との相関をパラメータ解析により検討した。得られた結論を以下にまとめる。

1) 構造物に損傷が発生するのは PGA, PGV ともある

程度以上の大きさを有するときであり、PGA, PGV などの単独の指標では構造物の被害を詳細に分類することは限界がある。

2) 正規化周期 (地震動の卓越周期を構造物の降伏周期で除したもの) と正規化加速度 (地震動の PGA を構造物の降伏加速度で除したもの) の関係で見ることにより、構造物の耐震性能に応じたきめ細かい被害の推定が可能となる。

今後は、実被災データを用いて、本検討結果の妥当性の検証を行い、被害予測アルゴリズムの確立を目指す予定である。

参考文献

- 1) 芦谷公稔 他：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 1) 全体計画および早期地震諸元推定法、第 26 回地震工学研究発表会、2001。
- 2) 安藤陽一、山崎文雄、片山恒雄：地震動の強さ指標による構造物損傷の評価、第 8 回日本地震工学シンポ、pp.263-267,1990。
- 3) 境有紀、南忠夫、壁谷澤寿海：地震動の性質を簡便に表現する方法、第 3 回都市直下地震シンポ、pp.265-268, 1998。
- 4) 山崎文雄、大西淳一、山田聡：高速道路構造物の早期被害推定法の提案、第 3 回都市直下地震シンポ、pp.403-406, 1998。
- 5) (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、1999。
- 6) Park, Y. J. and Ang, A. H. S. : Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete, Journal of Structural Eng., Vol.111, No.4, 1985。