

高速道路の地震観測値に基づく通行規制基準の検討

山崎 文雄¹・山内 洋志²・本村 均³・浜田 達也³

¹正会員 東京大学 生産技術研究所 (〒106-8558 東京都港区六本木7-22-1)

²正会員 建設省 豊橋工事事務所(元 東京大学大学院生) (〒441-8149 豊橋市中野町字平西1-6)

³正会員 日本道路公団 試験研究所 保全研究室 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)

日本道路公団が管轄する高速道路においては、地震計が記録する最大加速度を指標として通行規制を行ってきた。しかし、通行規制を行っても実際には通行に支障が無いことが判明することが多く、現行の通行規制基準には改善の必要性が認められる。そこで本研究では、高速道路に新たに配備された地震計の観測値に基づく適切な通行規制基準を提案することを目的に、実際に通行規制が行われた地震について高速道路上の地震動分布を推定し、現行の通行規制基準の有効性を検討した。また、これらの指標間の関係や、従来の規制値の背景などについて考察した。その結果、規制基準の指標として、SI 値ないし計測震度を用いれば、最大加速度に比べ合理的な規制が可能となることが示された。

Key Words : expressway, traffic control, earthquake monitoring, earthquake ground motion, SI, PGA

1. はじめに

日本道路公団(JH)が管轄する高速道路においては、従来より、管理事務所などに設置された地震計が記録する最大加速度を指標として、80Galで通行止め、50Galで速度制限という地震時通行規制を行ってきた。しかし、通行規制を行っても実際には通行に支障が無いことが判明することが多く、現行の通行規制基準には見直しの余地が認められる。また、JHでは、兵庫県南部地震以降、SI 値や計測震度も計れる新型地震計を大幅に増設した¹⁾。このため、従来以上に、規制基準値の最大加速度を越えるケースが頻発することが予想される。

そこで本文では、この増設した地震計ネットワークによる観測値を用いて、高速道路の適切な通行規制のための地震動指標とその基準値に関して検討する。とくに、最近、関東地域で観測され通行規制が行われた複数の地震を例に、高速道路に沿った地震動分布を推定し、規制基準との関係を考察する。また、これまでの規制基準値の背景や、最近の地震計の感度向上などの状況を考慮して、現時点で考えられる通行規制基準の改善案を暫定的に提案する。

なお、本研究テーマに関連して、これまでに、実地震による高速道路被害データを収集整理するとともに、地震動強度分布を推定し、これらを比較することにより、橋梁・高架についての最大加速度、最大速度、計測震度に関する経験的被害関数を提案した²⁾。この被害関数を一般化するために、数値解析により、橋梁の構造特性や地震動特性を考慮した被害関数の構築を現在行っている³⁾。更に、運転シミュレータを用いて、地震動が車両の走行安定性に与える影響についても最近検討を開始している⁴⁾。

2. JHの地震計ネットワークと使用した地震記録

JH では、兵庫県南部地震をきっかけとした地震防災強化対策の一環として、きめ細かな交通管理と震後点検の効率化を目指して、沿線約 20km ピッチで地震計の整備を進めた。既設の 123 箇所の地震計に加えて、96 年度に 101 箇所、97 年度に 87 箇所の地震計を新設した(図-1)。新設地震計は、最大加速度に加えて、SI 値、計測震度がオンラインで収集されるとともに、IC カードに加速度波形も記憶される。現在、従来からある地震計を新型のものに更新しており、99 年度末にはこれが終了すれば、通行規制の基準となる指標の変更も可能となる。

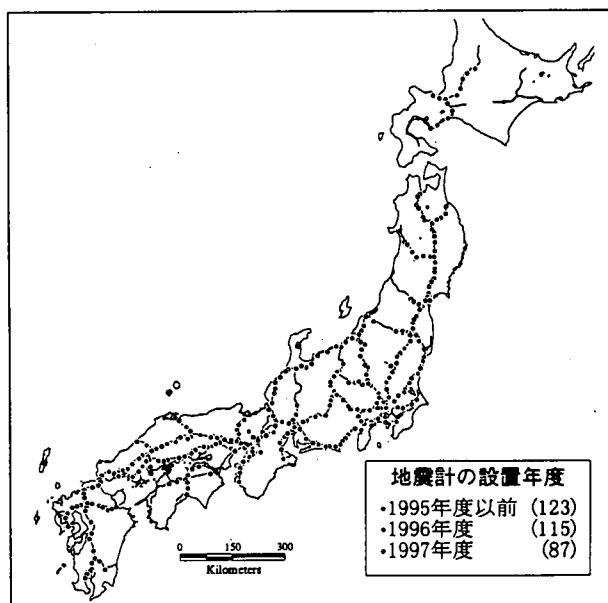


図-1 日本道路公団の高速道路網と制御用地震計

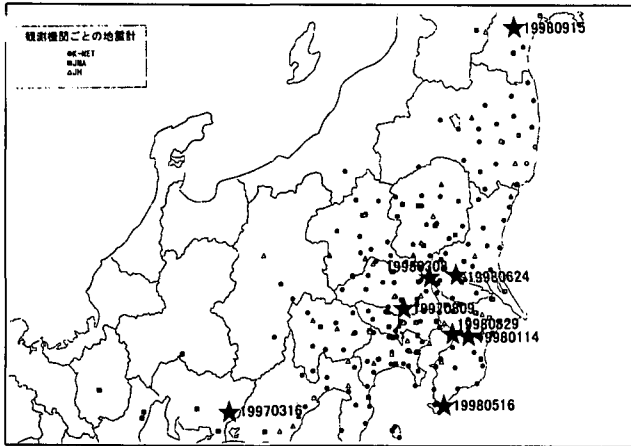


図-2 検討対象とした地震の震源および地震計配置

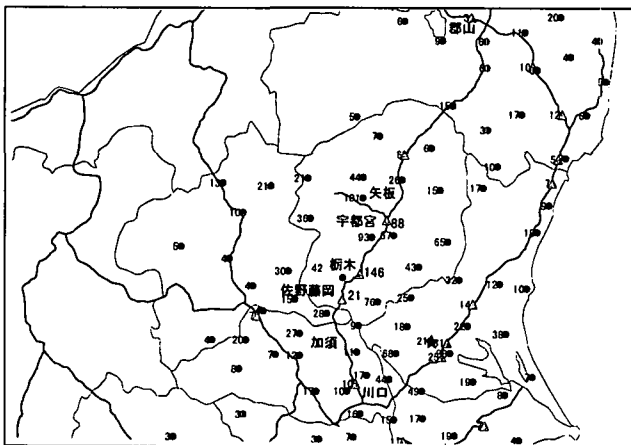


図-3 茨城県南部地震(1998/6/24)の観測最大加速度

JH の新型地震計については、その配備後の主要な 8 地震の波形記録を収集した。新型地震計の特性を評価するために、K-NET および気象庁の地震記録も合わせて解析を行った。解析に用いた地震の震源および地震計配置を図-2 に示す。これらの地震記録を対象として、最大加速度(PGA), SI 値, および計測震度を波形から計算した。PGA は、JH の地震計で観測されるものとの対応を取るために、水平 2 成分の合成最大値を計算した。SI 値についても、JH の地震計で観測されるものと同じ、建設省方式の SI 値を計算した。すなわち、各周期ごとに、減衰比 20% の 1 質点系に対する水平 2 方向の合成速度応答時刻歴の最大値を計算し、その周期 0.1 秒から 2.5 秒の間の平均値を求めた。これは、全方向について計算した速度応答スペクトルの包絡線について、周期 0.1 秒から 2.5 秒の間の平均値を取ったものとも表現できる。記録の豊富な K-NET については、これらの地震を用いて距離減衰式を作成した。

図-3 には、例として茨城県南部地震(1998 年 6 月 24 日)において観測された最大加速度値を示す。この地震では、東北自動車道で通行止めが行われたが、被害は発生しなかった。これらの地震についての距離減衰図からは、地震により、平均的な距離減衰式より大きいものと、小さいものとが見られる。また、どの地震においても、どの機関の地震計も、全体としてはそれほど顕著な特性の違いは見られない。しかし、地点ごとのばらつきはかなり大きく、全体の

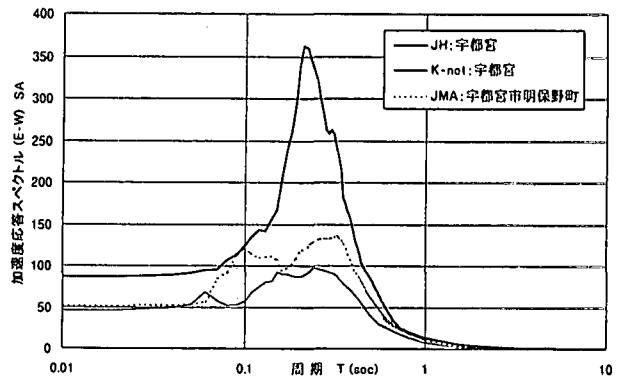


図-4 宇都宮周辺の観測点の加速度応答スペクトル
(茨城県南部地震(1998/6/24)EW成分)

傾向から外れている地点も見られる。これらは観測点固有の地盤震動特性の違いによるものと思われる。

3. K-NET距離減衰式に基づくJH観測点の揺れ易さ

前節の解析結果をもとに、JH 新型地震計において多数の記録が得られている、関東周辺の各観測点における揺れ易さを検討した。各観測点での揺れ易さの求め方は、K-NET が広域の地震動分布を良く表すという観点から、ここで用いた地震の K-NET データから構築した距離減衰式を基準とし、それとの比を取ることで相対的な揺れ易さ(増幅度)を求めた。これは、JH の各観測点ごとの記録数が少ないため、直接に距離減衰式から求める⁵⁾ことが困難だったからである。各地震における増幅度は、地震によってばらつく地点も見受けられるが、地震によらず一定の傾向をもつ地点もいくつかある。例えば、栃木 IC は PGA と SI 値の両方とも、JH の 45 地点中、増幅度が最大である。またその近傍の宇都宮 IC や佐野藤岡 IC も揺れ易い傾向にある。反対に揺れにくい地点の代表は成田 IC で、いずれの地震でも揺れにくいことが確認できる。これらの観測点では、揺れ易さの大小が顕著であることから、地形・地盤条件⁹⁾に何らかの特徴があるものと思われる。

これらの観測点については、地震計設置地点のスペクトル応答特性⁹⁾を考慮する必要があるものと思われる。宇都宮 IC について検討を行った。茨城県南部地震について、周辺他機関の観測点も含めて加速度応答スペクトルを求め、図-4 に比較する。これより、JH 宇都宮の加速度応答スペクトルは、K-NET や気象庁のものと大きな違いがあり、東西成分は周期約 0.2 秒に、また南北成分は約 0.25 秒に顕著なピークを持つという特徴がある。このような顕著なピークは、比較的近くにある K-NET や気象庁の記録には見られない。JH 宇都宮におけるこのような特徴は、他の地震についても見られるため、地点固有の震動特性を表しているといえる。方向による卓越周期の違いは、建物や盛土などの条件が、方向によって特性が異なるためとも思われる。

現地を視察した結果、地震計は高速道路の管理事務所建物の 1 階床の端に置かれており、周辺環境は田畑であり、建物は盛土上に建てられていた。また、

建物は、N 値 50 程度の支持地盤まで長さ 5m-10m 程度の杭で支えられていることが分かった。したがって、地震計の観測波形は、地盤・盛土と建物の相互作用の影響を受け、顕著なピークはこの振動系の卓越周期を表していると思われる。宇都宮では、K-NET 地震計の設置地点についても現地調査を行ったが、こちらは小高い山の中にあり、硬い地盤であることが周囲の地勢状況より推察できた。宇都宮における揺れ易さの差は、この地盤条件によるところが一番大きいものと思われる。

このように、地震計による観測値が代表すると考えられるのは、ごく狭い範囲の同じような地形・地盤条件の場所である。近傍にあっても、地形・地盤条件に大きな差があれば、揺れの強さに大きなばらつきが生ずる。したがって、高速道路に沿った地震動分布を推定するためには、地点ごとの地震動指標の揺れやすさを推定する手法の確立が急務である。高速道路建設時などに行った地盤調査結果をデータベース化し、このような評価に利用できるよう整備することが重要な課題と考えられる。

4. 高速道路に沿った地震動分布の推定

前節で求めた観測点の揺れやすさを用いて、実際に通行規制が行われた地震について地震動分布を推定し、現行の通行規制基準などについて検討する。観測値により構築した地震ごとの距離減衰式をトレンド成分とする Kriging 法²⁾により推定した地震動分布を、茨城県南部地震について図-5 に示す。解析は、JH の地震計のみを用いた場合と、K-NET の地震計のみを用いた場合の 2 通りについて行った。JH の地震計については前節で求めた増幅度を用い、K-NET 地震計と推定する高速道路上の点については、国土数値情報から推定した地盤増幅度³⁾を用いた。SI 値増幅度は最大速度のもので代用した。

これよりこの地域では、JH の地震計を用いた推定と K-NET によるものでは、傾向が異なる区間があることが確認できる。顕著なのは、栃木 IC 近辺であり、JH の観測値を用いた推定値は、K-NET からの推定値に比較してかなり大きなものとなった。Kriging 法では、観測点においてはその値を取り、観測点から離れると距離減衰式に漸近する。したがって、栃木 IC が周辺に比べて揺れ易いために、このような推定結果となった。K-NET の地震計を用いた推定結果では、東北自動車道（郡山～川口）における最大加速度の推定値は 58.7Gal となり、被害が出るとは考えにくい値であった。

またこの地震では、栃木 IC の観測 SI 値は 5 cm/s、計測震度は 4.1 であり、周辺の観測値よりは大きいが構造物被害の出るレベルよりはかなり小さかった。

5. 現在の規制基準値の背景と地震計の動向

現在の高速道路の通行止め基準値である最大加速度 80Gal の根拠について考えてみよう。この 80Gal という数字は、気象庁が 1949 年に旧震度階を作っ

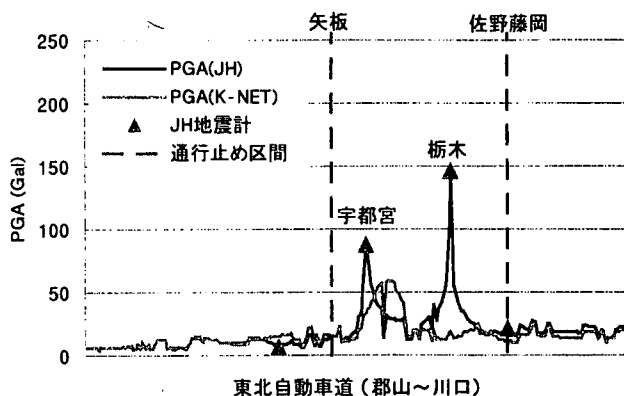


図-5 茨城県南部地震(1998/6/24)の東北自動車道に沿った推定最大加速度分布と通行止め区間

た際に、参考表の中で用いたもので、震度 4 が 25-80Gal の範囲、震度 5 が 80-250 Gal の範囲として、おおまかな目安として示された。この数字は、1943 年に提案された以下の河角式に基づくものである。

$$I = 2.0 \log_{10} PGA + 0.7 \quad (1)$$

気象庁はこの参考数字を以前に震度階級表から削除しているが、その後も様々なところで利用された。

高速道路の規制基準値決定の詳しいいきさつは分からないが、恐らく、被害が発生するのは震度 5 からと見なして、震度 5 の下限値に対応するこの数字を採用したものと思われる。当時は、震度は体感で決められていたため、機械計測できる加速度を用い、その基準値として震度 5 の下限に対応する値を採用したのであろう。この基準値を採用して以降、この値以下の観測値で高速道路被害が発生した事例はないと思われるので、安全側の数字ではあろうが、過度に安全側となっている可能性は高い。その根拠は、地震計の感度向上と、地震計台数の増加である。

地震計は、近年、短周期のスペクトル成分も観測できるように感度が向上したために、昔の地震計に比べて、同じ地震動に対して大きな加速度値を表示するようになった。これにともなって、河角式は現在の地震計による最大加速度と乖離するようになっている。最近の主要な地震記録から回帰した関係式⁷⁾によれば、河角式で震度 4.5 に対応する最大加速度が 79Gal であるのに対し、震度 4.5 に対応する(2 方向合成)最大加速度は 126Gal となる。

図-6 は K-NET で観測された 104 地震に対する 6,423 個の地震記録から、最大加速度と計測震度の関係を表したものであり、震度 4.5 に対応する合成 PGA の平均値は 250Gal を越えている。しかし、最大加速度と計測震度の関係は、対数標準偏差が 0.35 と変動幅が非常に大きく、同じ PGA であっても、計測震度で 1.0 程度のばらつきが頻繁に見られる。これは、PGA が、ランダム性の高い地震波の短周期成分に大きく影響されるためと考えられる。計測震度は、このような不安定性を取り除くために、周波数フィルターや継続時間を加味して安定性を計っている。以上の考察などからも、PGA が被害との相関が悪いこともある程度は説明できるものと思わ

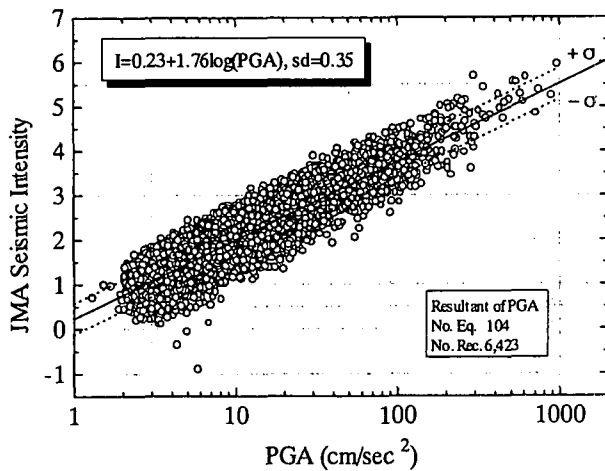


図-6 K-NET データによる最大加速度と計測震度の関係

れる。したがって、通行規制の基準となる指標として、最大加速度はあまり望ましくないと考えられる。

6. 新しい通行規制基準の提案

SI 値は、家屋等の被害と相関が高い指標として、都市ガス供給網の地震時制御のための指標として提案され⁸⁾、加速度計にアナログ回路を装着して SI 値を計算する SI センサーも作られている。都市ガス業界においても、従来は、供給停止基準として、河角式の震度 5 と 6 の境界値に対応する 250Gal を供給停止の目安に用いていた。しかし、日本ガス協会における検討の結果、構造物被害と相関の高い地震動指標は、最大速度と SI 値であることが示され、250Gal という基準値は、ガス業界では実効性を停止していた。さらに、兵庫県南部地震をきっかけとして、通産省は都市ガス施設の地震時緊急対応に関する基準を見直し、SI 値が 60cm/s を越えれば供給停止、30cm/s を越えれば要注意して供給停止に備えるという対応策を決定した⁹⁾。また、道路構造物の被害推定法としても、SI 値や最大速度により橋梁被害を推定する方法^{2),10)}が提案されている。

つぎに、SI 値と計測震度との関係を照査した。水平 2 方向に対する最大 SI 値⁷⁾を建設省方式の SI* 値に換算すると($SI^* = 1.10 SI_L$)次式が導かれる。

$$I = 1.96 \log_{10} SI^* + 2.26 \quad (2)$$

この式を用いると、計測震度 4.5 に対応する SI* 値は 13.9cm/s となる。また K-NET の記録から、SI* = 5cm/s 以上の 228 個のデータを選び、SI* 値と計測震度の関係を回帰した結果、以下の回帰式が求まった。

$$I = 1.99 \log_{10} SI^* + 2.32 \quad (3)$$

この式では、震度 4.5 に対応する SI* 値の平均値は、12.46cm/s となる。よっていずれの式でも、震度 5 の下限値を SI* 値で表現すると 12cm/s 程度である。

また、直接的に計測震度 4.5 を通行規制値とする方法もありうる。計測震度は、SI* 値と相関が高い⁷⁾ことより、通行規制が行われる回数や区間等は、SI* 値を用いる場合とほぼ同じになると思われる。

違いがあるとすれば、1) 計測震度の方が数字に対する一般の馴染みがある；2) 気象庁や自治体の震度計からは計測震度は即座に得られるが SI* 値は得られない；といった点である。現時点で、SI* 値の方が計測震度 비해、高速道路被害をよりよく表すというほどの結果は得られていない。

このように、現行の規制基準レベルを大きく変えないとしても「計測震度 4.5 またはこれに対応する SI* 値 12cm/s」を基準値とすると、安全余裕を下げずに、結果として通行規制回数は減るであろう。地震によっては、比較的小さな揺れで被害が発生する場合もある。また、観測地震動が計測震度 4.5 を記録する場合は、観測点以外でそれ以上の地震動が生じている可能性が高い。これらの不確実性が残っている現状では、この程度の保守的な基準値を取らざるを得ないものと思われる。

7. まとめ

日本道路公団が管理する高速道路の適切な通行規制基準を提案することを目的に、新設地震計の観測値を他機関の記録と比較・評価を行った。また、実際に通行規制が行われた地震について高速道路の地震動分布を推定し、現行の通行規制基準の有効性を検討した。これらの指標間の関係や、従来の規制値の背景や地震計の最近の動向について考察した。その結果、規制基準の指標として、SI 値ないし計測震度を用いれば、現在用いられている最大加速度に比べ合理的な通行規制が可能となることが示された。

参考文献

- 1) 山崎文雄：リアルタイム地震防災システムのための地震動モニタリング，第 1 回リアルタイム地震防災シンポジウム論文集，1999。
- 2) 山崎文雄，大西淳一，田山聡，高野辰雄：高速道路構造物に対する地震被害推定式の提案，第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集，Vol. 3, 3491-3496, 1998。
- 3) Kazi, K. R. and Yamazaki, F.: Development of Analytical Fragility Curves for RC Bridge Piers Using Strong Motion Records, 第 25 回地震工学研究発表会講演論文集，1999。
- 4) 山之内宏安，山崎文雄：運転シミュレータを用いた地震時の走行安定性に関する検討，第 25 回地震工学研究発表会講演論文集，1999。
- 5) 大西淳一，山崎文雄，若松加寿江：気象庁地震記録に基づく地盤増幅度と地形分類との関係，第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集，Vol. 1, pp. 909-1004, 1998。
- 6) 山内洋志，山崎文雄，若松加寿江，Shabestari, K. T.: 応答スペクトルの距離減衰式における地点係数と地形分類との関係，第 3 回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集，1998。
- 7) 童華南，山崎文雄：地震動強さ指標と新しい気象庁震度との対応関係，生産研究，48, 11, 1996。
- 8) 佐藤暢彦，片山恒雄，大保直人，川崎勝幸：新しい制御用地震センサーの開発と試作，第 18 回地震工学研究発表会，1985。
- 9) ガス地震対策検討会：ガス地震対策検討会報告書，資源エネルギー庁監修，1996。
- 10) 杉田秀樹：道路及び河川施設における地震防災システムの現状，第 1 回リアルタイム地震防災シンポジウム論文集，1999。