

## 新幹線地震影響評価システムの開発



島村 誠\* 山村 啓一\*

高速で走行する新幹線にとって地震に対する安全の確保はきわめて重要な課題である。そこで、合理的かつ効果的な地震対策を策定する上で不可欠となる地震リスクの定量的な把握を目的として、『地震影響評価システム』の開発を行った。本システムでは、汎用の地震活動度モデルおよび新幹線システムの特性評価パラメータにもとづいて、任意の線路区間における地震リスクを計算し、結果をビジュアルに表現することができる。

●キーワード：新幹線、地震リスク評価

### 1 はじめに

現在、最高速度360km/hを目指した新幹線高速化プロジェクトの一環として、様々な研究、開発、試験が進められている。地震に関しては、高速化によるリスクの増加を許容限度内に抑えるように対策を講じることが基本的な目標となるが、従来そのリスクの評価手法は未確立であった。そこで新幹線システム全体の地震時リスクを定量的に評価する手法を構築することを目的として、新幹線沿線の地震活動度モデルや車両の地震時走行安定性、高架橋の耐震性能、地震早期検知システムの警報性能等の評価パラメータを組み合わせた地震影響評価手法の開発を行った。また、リスク評価作業をPC上で効率的に実施し、結果を視覚的に表現することを目的として、開発した手法のアプリケーションソフトウェアを作成した。

### 2 地震影響評価システムの構成

従来、地震に対する鉄道の安全性は、もっぱら線路の各地点での地震動の規模と、地震動によって線路や構造物に生じる被害規模との関係にもとづいて評価されるのが通例であった。これに対し、新幹線は、地震の主要動が線路に到達する前に警報を発することができる地震早期検知システムを備えるとともに、高速で走行するため、地震検知

警報を受けてから停止するまでの時間および距離が在来線列車に比べて大きい。したがって、新幹線列車がさらされる地震リスクを正しく評価するためには、従前のような点情報にもとづくオフライン的な手法では不十分であり、面的な広がりをもつ地震動や被害の推定、オンライン（リアルタイム）でのシステム制御の評価手法への展開が必要となる。

また、従来『もし、〇〇市直下でマグニチュード△、△の地震が起こったら・・・』というような、特定のシナリオにもとづいて地震に対する安全性が議論されることが多かったが、新幹線のように供用期間の長い重要な社会基盤を対象とした場合、より大局的視野でのリスク評価が重要であることは言うまでもない。

今回の新幹線地震影響評価システムの開発に当たっては、このような新幹線の特性を考慮して評価手法を構築した。以下に、今回開発した新幹線地震影響評価システムを構成する各評価要素について述べる。

#### 2.1 地震活動度モデル

地球表面を適当な大きさに分けた各々の区域内でどの程度の規模の地震がどのくらいの頻度で起きるかという地震発生の活発さの度合いを『地震活動度』と呼んでいる。一般にひとつの区域を震源とする地震の規模（マグニチュード） $M$ と発生頻度 $N$ の間には、大規模な地震ほど発生頻度が小さいという関係があり、グーテンベルク・リヒター

(GR)式と呼ばれる次の式で表現できることが知られている。

$$\log_{10} N(M) = a - bM \quad (1)$$

ここで $a, b$ は地震活動度を表す非負の定数であり、区域によって異なる値をとる。

図1に日本近傍の地震の発生状況を示す。この図からわかるように、地震活動度には地域性があり、JR東日本の新幹線沿線に関していえば、地震活動度の高い震源域が太平洋側の海域に帯状に分布しているのが大きな特徴である。

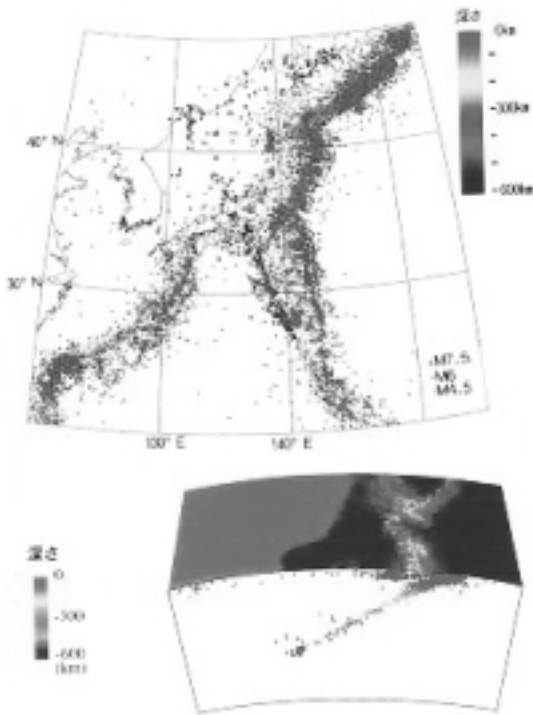


図1 日本近傍の地震の発生状況

る。

図1のような地震発生観測記録データと上述のGR式を使って、それぞれの震源域において想定される最大から最小までの様々な規模の地震の発生頻度を推定したものが『地震活動度モデル』である。本システムでは、リスク分析ツールとして、代表的な商用地震活動度モデルであるRiskLink<sup>®</sup>（応用アール・エム・エス株式会社）を使用している。

RiskLink<sup>®</sup>は、プレート境界で起きる巨大地震に適用される面震源モデル、活断層に適用される線震源モデル、プレート境界や活断層による巨大地震以外のプレート内の地震活動に適用されるランダム地震域震源モデルの3種類のモデルによって構成され、合計49,282個の地震シナリオの震源位置座標、マグニチュードおよび発生頻度によって日本全域の地震活動度を表現する。図2にRiskLink<sup>®</sup>の3種類の震源モデルの概略図を示す。

## 2.2 地震動の伝播

地震による地面の揺れ(地震動)は、地震のマグニチュードが大きいほど、また震源と地震動の観測地点との距離が近いほど大きくなる。この関係を利用して観測地点での地震動の大きさを予測するために用いられるのが『距離減衰式』である。

これまでに多くの研究者によって様々な距離減衰式が提案されているが、ここでは、Molasらの研究<sup>9)</sup>による距離減衰式を準用した。この式は従来の加速度計より優れているとされる87式加速度強震計による日本での多くの地震観測データに基づいて地震動の減衰関係を導き出した研

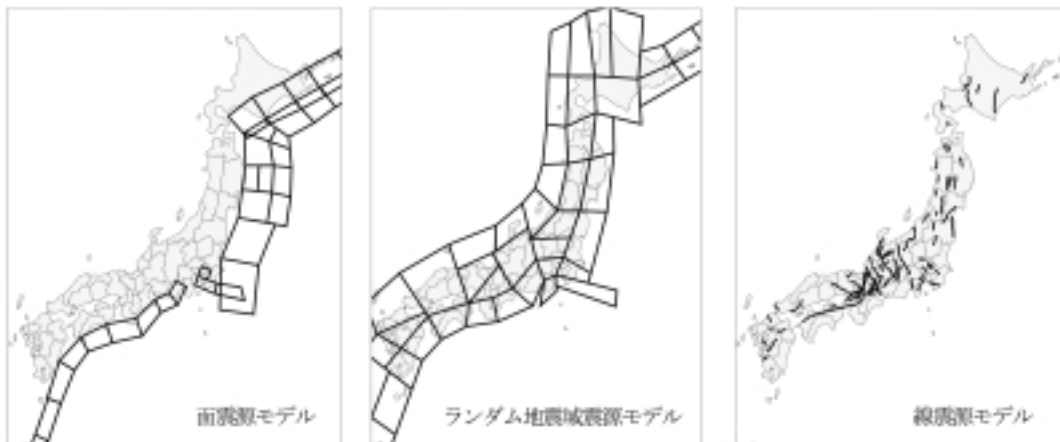


図2 RiskLin<sup>®</sup>の3種類の震源モデル

究の1つである。式は以下のとおりである。

$$\log y = b_0 + b_1 M + b_2 r + b_3 \log r + b_4 h + c_i + \varepsilon \quad (2)$$

ここで、 $y$ は地震動計測値(最大加速度(PGA)又はSI値)、 $M$ は地震のマグニチュード、 $r$ は震央距離、 $h$ は震源深さを表す。 $b_0, b_1, b_2, b_3$ および $b_4$ は回帰係数、 $c_i$ は地点係数、 $\varepsilon$ は回帰誤差。下表にこれらの数値を示す。

$y$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$c_i$	$\sigma$
PGA (gal)	0.21	0.48	-1.4 $\times 10^5$	-1.0	3.1 $\times 10^3$	0.23	0.28
SI (kine)	-1.64	0.62	-1.3 $\times 10^5$	-1.0	2.3 $\times 10^3$	0.18	0.26

ただし、ここで $\sigma$ は $\varepsilon$ の標準偏差を表す。

なお、従来は地震動の大きさを最大加速度(PGA:gal値)を用いて表すのが一般的であったが、最近では地震による被害の程度をよりの確に表現する計測震度やスペクトル強度(spectral intensity: SI値)が用いられることが多くなった。また、現在JR東日本では、地震時列車運転規制の決定にSI値を用いている。

SI値は、

$$SI = \frac{1}{2.4} \int_{0.1}^{2.5} S_v(T, h=0.2) dT \quad (3)$$

で定義される量であり、減衰定数 $h=0.2$ における速度応答スペクトルの周波数範囲0.1~2.5secの範囲の平均値を表す。

### 2.3 沿線地震ハザード

地震活動度モデルからひとつの震源域で発生する地震のマグニチュードとその発生頻度が求まり、距離減衰式に

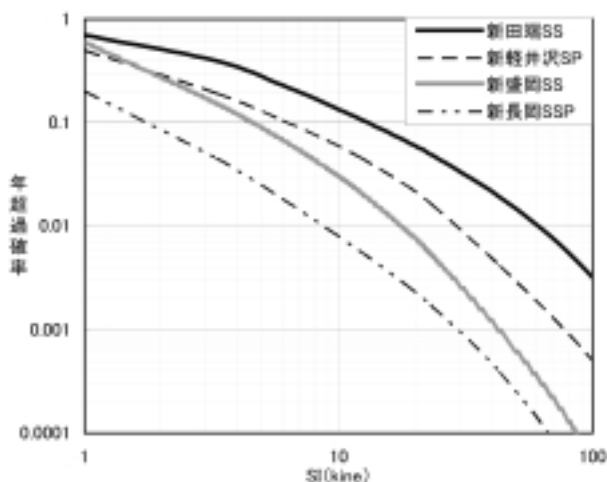


図3 地震ハザードカーブの一例

よって観測地点におけるそれらの地震に対する地震動の大きさが求まるので、これらにもとづいて、ひとつの観測地点における全ての震源域の全てのマグニチュードの地震による寄与を合計することにより、その地点においてどのくらいの大きさの地震動がどのくらいの頻度で観測されるかを推定することができる。

このような、観測点における地震動の大きさとその発生頻度の関係を地震ハザードと呼ぶ。図3にSI値を地震動指標とする新幹線沿線の地震ハザードを图示した地震ハザードカーブの一例を示す。

### 2.4 高架橋の地震時損傷評価

大規模地震時には、軌道を支える線路構造物が損傷し、変形等により構造物としての機能が損なわれ、列車走行に影響を与える。そこで、地震動規模(SI値)と高架橋損傷確率(フラジリティ)との関係を把握することを目的として、以下の手順により分析を行った。

- ① 実際に観測される様々な地震動を代表させるため、サンプル地震動として、『鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計』(平成11年)の設計地震動を策定するのに用いた実地震波の中から、海洋性地震4波、内陸性地震7波の計11波を選定。
- ② サンプル地震動の各地震波をシードとして、振幅を一定倍率で拡大、縮小することにより、SI値が10,15,20, ..., 100(kine)となるような19水準の相似な地震動群を作成。
- ③ 基礎および上部構造形式、柱高、せん断耐力比などを考慮して評価対象とする6タイプの代表的な高架橋を選定。
- ④ 選定した高架橋の骨組み数値モデルを作成し、線路方向および線路直角方向のそれぞれで静的非線形解析を実施して耐震性能(降伏、最大、終局曲げモーメントおよびせん断破壊の各損傷レベルの限界変位量)を評価。
- ⑤ 選定した高架橋のモデルの線路方向および線路直角方向それぞれで地震動時刻歴に対する動的応答解析を実施。解析は、②でサンプル地震動の振幅調整により作成した地震動群すべてについて行い、モデル上に設定した着目部位の最大応答変位量を算出。

- ⑥ 同一SI値の地震動群ごとに、上記⑤で算出した最大変位を④で評価した各損傷レベルに対する限界変位で除して対数をとった『対数変位倍率』の標本分布を求め、その母集団が正規分布にしたがうとみなして、理論分布の平均および標準偏差を算出。これらにもとづき、対数変位倍率が0以上となる確率を各SI値における損傷確率として算出。

以上の手順で計算した高架橋損傷確率のフラジリティカーブの一例を図4に示す。

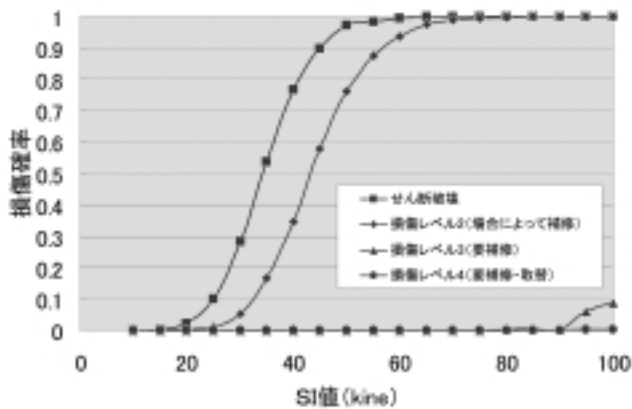


図4 高架橋損傷確率のフラジリティカーブ

## 2.5 車両の走行安定性評価

地震時における新幹線車両の走行安定性を評価するため、前節と同じく数値モデルを用いた地震時車両運動シミュレーションによる分析を行った。シミュレーションの条件は以下のとおりである。

- ① 新幹線車両が軌道狂いのない直線区間を一定速度で走行中に振動を受けるものとする。
  - ② 軌道はレール支持剛性の高いスラブ軌道を想定する。
  - ③ 加振条件は水平・線路直角方向の地表面地震波が、構造物を介してレールに伝達される構成とし、構造物の等価固有周期範囲を、 $T_{eq}=0.3\sim 1.5$  sec、減衰を $h=0.05$ とする。
  - ④ 走行安定性は車輪とレール間の相対水平変位にもとづいて判定するものとし、その限界値を70mmとする。
- また、分析手順は以下のとおりである。

- ① 前節で用いたのと同じ地震動群について、上記条件にもとづいて地震時車両運動シミュレーションを行い、各ケースについて車輪とレール間の最大相対水平変

位を算出。

- ② 同一SI値の地震動群ごとに、また同一等価固有周期の構造物ごとに、上記②で算出した最大変位を走行安定性の限界変位(70mm)で除して対数をとった『対数変位倍率』の標本分布を求め、その母集団が正規分布にしたがうとみなして、理論分布の平均および標準偏差を算出。これらにもとづき、対数応答変位比が0以上となる確率を各SI値、等価固有周期における『走行安定限界超過確率』として算出。

以上の手順で計算した走行安定限界超過確率の計算結果の一例を図5に示す。

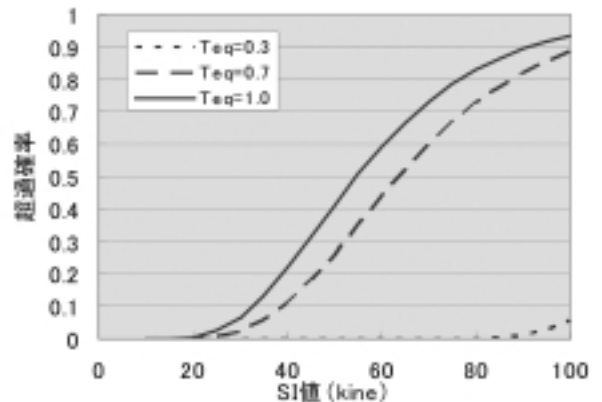


図5 車両の走行安定限界超過確率の計算結果

## 2.6 地震早期検知システムの警報特性

地震による被害を低減させるため、JR東日本の各新幹線には、地震発生時に列車を迅速かつ自動的に緊急停止させる地震早期検知システム(コンパクトユレダス)が導入されている。

震源から発する地震波には何種類かあるが、代表的なのはP波とS波である。P波はS波に比べ伝わる速度が約2倍程度大きい、エネルギーの大きさはS波の方が断然大きく、揺れによる被害の多くは、S波によって起こる。P波の揺れの始まりからS波の揺れの始まりの間の揺れを初期微動といい、S波による大きな揺れを主要動という。在来線の地震計が、単に主要動の大きさにもとづいて警報を発するのに対し、新幹線の地震早期検知システムは、P波とS波の伝播速度の差を利用することによって主要動が到達する前に警報を発することができる。

現在、このシステムは、図6に示すように15の海岸地震計と



図6 地震早期検知システムの地震計配置図

47の沿線地震計により構成されており、海岸地震計の位置は、地震活動度の高い海洋部で発生する地震をいち早く検知しうる場所が選定されている。海岸および沿線の各地震計が予め決められた警報しきい値を超える初期微動および主要動を検知した場合、まず地震計毎に決められた受け持ち区間内を走行中の列車に対して自動警報トリガーによって緊急停止の措置がとられ、次いで沿線地震計で検知した主要動の大きさにもとづいて、地震発生後の安全確認の可否およびその方法(車上点検または地上点検)が決定される。

上に述べた警報原理から明らかなように、地震早期検知システムによって列車が制動を開始してから主要動が到達するまでの余裕時間は、震源からの距離が大きいほど長くなる。一方、第2.2節に述べた地震動伝播の距離減衰によ

り、地震動の大きさは震源からの距離が大きいほど小さくなる。今回開発した地震影響評価システムでは、地震活動度モデルに含まれるすべての地震シナリオについて、その震源位置から地震計までの距離にもとづいて、線路上の各地点での地震動規模および制動余裕時間を算出することにより地震早期検知システムの効果を評価している。

なお、初期微動検知の計測値にはPI値を用いている。コンパクトユレダスでは、地上にある物体の地震応答加速度ベクトルと地震応答速度ベクトルの内積、すなわち単位時間の地震動がなす仕事量(仕事率)で表現される被害評価指標DI3)が導入されている。このDIにおける、P波到来から1秒間のP波成分の最大値がPI値である。P波地震属性とP波計測値(PI値)との関係を明らかにするため、地震早期検知システムによる地震観測データにもとづいて、PI値の距離減衰式を作成した得られた式は以下のとおりである。

$$PI = 0.83M - \log(r+h) - 0.0098 \times 10^{-0.11M} r - 12 + \varepsilon \quad (4)$$

また、この式の誤差項  $\varepsilon$  の標準偏差は0.45という結果が得られた。

## 2.7 リスク計算

今回開発した地震影響評価システムでは、次の5種類のリスク事象の発生確率あるいは頻度(列車本数)を計算することができる。

- A: 列車緊急停止
- B: 車上点検
- C: 地上点検
- D: 車両の走行安定限界値超過
- E: 高架橋の損傷箇所への列車の進入

任意のひとつの線路地点とひとつの地震の属性(震源位置、マグニチュード)の組み合わせについて、まず、(2)式および(4)式から当該地震が与えられた場合のそれぞれの警報しきい値に対する超過確率を求めることにより事象A、B、Cの生起確率を計算することができる。ただし、コンパクトユレダスが装備された新幹線のそれぞれの線路地点は、同時に1箇所の沿線地震計と複数箇所の海岸地震計の警報によって制御されているので、それら全ての地震計のいずれかにおいて警報しきい値を超過する場合を以て上記の事象の生起確率とする。

また、事象Dの生起確率は、最初に(2)式から当該地震が

与えられた場合に各SI値が観測される確率を計算し、これに第2.5節で調べた車両の走行安定限界超過確率を乗じ、それを全てのSI値について合計することによって求める。さらに、事象Eの生起確率は、次の手順により算出する。

- ① 当該線路地点の制御に關与する全ての地震計について、当該地震のP波およびS波が到着する時刻を計算。
- ② (2)式および(4)式により、上で求めた地震計と地震波(P,S)のペアに対する各到着時間において事象Aの警報トリガーが最初に発生する確率を計算。
- ③ 上記の警報トリガー各発生時刻にもとづいて、S波到着から列車が停止するまでの走行距離を計算。
- ④ 第2.4節で調べた高架橋の損傷フラジリティと(2)式から当該地震による単位距離当たりの高架橋損傷の平均発生箇所数を計算。
- ⑤ 上記③および④から、列車が停止するまでの走行区間に少なくとも1カ所の高架橋損傷が介在する確率を計算。
- ⑥ 上記②で求めた全ての時刻について上記⑤を合計することにより求める確率を算出。

以上の計算をそれぞれの線路地点について行うことにより特定の地震シナリオに着目した新幹線全域での地震リスクの評価を行うことができる。また、事象A~Eの生起確率に当該地震シナリオの発生頻度を乗じ、これを全ての地震について合計して各評価事象の期待発生頻度を求めることにより、それぞれの線路地点の大局的な地震リスクレベルを評価することができる。さらにこれらの評価事象の発生確率の支配パラメータ(高架橋の耐震性能、車両の走行安定性、走行速度、制動性能、地震早期検知システムの地震計測仕様および警報しきい値など)を変化させて計算を行うことにより、警報によって生じる輸送影響コストとリスク低減量のトレードオフの関係を把握することができる。

### 3 ユーザインターフェース

上に述べた新幹線の地震影響評価の計算手続きを効率的に行い、かつ結果をわかりやすく表示するため、グラフィカルユーザインターフェースを備えたアプリケーションソフトウェアとしてシステムを構築した。表示画面の一例

として、図7にシナリオ分析に用いる地震選択画面を示す。RiskLinkを構成する地震モデルの属性がリストの形で表示されており、このリストの項目を選択することにより評価対象地震の震源位置やマグニチュードを指定することができる。



図7 地震選択画面

図8はリスク分析結果の表示画面である。選択した線路区間範囲の地点位置を横軸として、各リスク事象の発生頻度期待値が折れ線で示されており、区間別、リスク事象別の発生頻度比較を行うことができる。



図8 リスク分析結果表示画面

## 4 利用方法

このシステムを用いることにより、様々な属性パラメータが地震リスクに与える寄与を定量的に把握することができる。このことにより、高速化や列車密度の増大が地震リスクに与える影響や、高架橋の耐震補強工事や車両のブレーキ性能の向上、地震早期検知システムの改善等の対策

によるリスク低減効果を統一的な数値的尺度で比較することが可能になり、今後の新幹線の地震リスクマネジメントにおいて、重点改善エリアの抽出や最適対策の選定等のための基礎情報として活用できるものと期待されている。

## 5 おわりに

今回開発した仕様を『バージョン1』として、引き続きシステムのバージョンアップの検討を進めている。次期バージョンでは、地震活動度や地盤増幅度、構造物フラジリティについて場所毎の条件の違いをより詳細に反映したモデルを導入するほか、新潟県中越地震による上越新幹線の脱線事故の分析から得られた様々な知見を踏まえ、脱線後のリスク事象についても分析ができるよう機能の拡張を行うことを計画している。

### 参考文献・出展

- 1) 総理府地震調査研究推進本部地震調査委員会編(1997):日本の地震活動,p.10
- 2) G.L.Molas,F.Yamazaki:Attenuation of Ground Motion in Japan including Deep Focus Events,Bulletin of the Seismological Society of America,85,5,pp.1343-1358,1995.10
- 3) Nakamura,Yutaka:A New Concept for the Earthquake Vulnerability Estimation and its Application to the Early Warning System , Early Warning Conference '98 Potsdam,Germany,1998.