

東海道新幹線地震防災システム機能強化



他谷 周一
TAYA Shuichi

東海道新幹線では、地震発生を早期に検知し、列車を減速・停止させることを主目的とした「東海道新幹線地震防災システム（以下、「地震防災システム」）」¹⁾を設置している。今回、①直下型地震に対する早期警報機能の強化、②連動型地震に対応する早期警報機能の強化、③遠方地震計でのS波検知機能の追加、④通信回線の断絶や長時間停電への対応の強化、からなる機能強化を行った。これら新機能は2013年5月末より稼働している。本稿は、この機能強化の内容を概説するものである。

キーワード：地震、地震計、地震防災システム、早期警報

1. 東海道新幹線地震防災システムの概要

地震防災システムは「東海道新幹線早期地震警報システム（通称：テラス）」と「沿線地震計」で構成されている（図-1）。「テラス」は前身の「地震動早期検知警報システム」の後継システムとして、平成17年より稼働している。線路から離れた位置で発生する大地震を少しでも早く検知するため、線路から離れた位置に地震計（以下、「遠方地震計」）を21か所に設置している。平成20年からは気象庁による緊急地震速報も併せて用いている²⁾。「沿線地震計」は沿線で大きな揺れを検知した場合に一定の範囲の列車に停止指令を出すので、50か所に設置している。線路近く（概ね30km以内）を震源とする地震の場合には、遠方地震計よりも沿線地震計による警報の方が先になる（図-2）。また、沿線地震計での地震観測結果は、地震後の運転規制判断の際にも用いられる。

東海旅客鉄道株式会社新幹線鉄道事業本部施設部工事課課長代理

2. 直下型地震に対する早期警報機能の強化

(1) 沿線地震計の概要と早期検知化の上での課題

東海道新幹線の地震時運転規制の取扱いでは、地震防災システムにより列車が停止した後、沿線地震計で観測した計測震度により5段階の運転規制を行うこととしている³⁾。運転規制が必要となる最も小さい計測震度は4.0で、低速で運転再開し安全確認を行うこととなっている。すなわち、列車を停止させる必要があるのは、沿線で計測震度4.0以上となる地震の場合であると言える。

計測震度の計算方法は気象庁公示により定められており、地震動が収まってから計算するものである。通常、



図-1 各地震計の配置

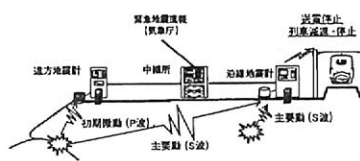


図-2 地震防災システム機能概要

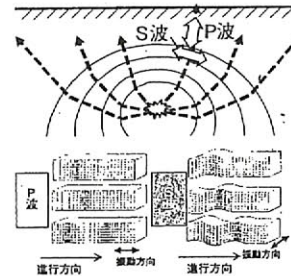


図-3 P波・S波の特徴

地震中に計測震度を測ることはできないため、沿線地震計では概ね計測震度4.0に相当する加速度（40gal）を検知した場合に列車停止指令を出すようにしている。

沿線地震計で地震波が観測されてから40galを検知するまでの時間は、地震の規模や震源～線路までの距離により異なるが、線路近くを震源とする地震の場合、およそ4～5秒程度である。直下型地震に対する警報の早期化とは、この4～5秒を1秒でも短くしようとするものである。270km/hで走行する列車は1秒間に75m進む。警報を1～2秒でも早期化できれば、大きな揺れの中を走行する距離を約75m～150m短くすることができる。

(2) 新しい地震動指標「警報用計測震度」の検討

地震の早期検知警報の手段としては、鉄道経緯と気象庁が開発したB-Δ法⁴⁾と呼ばれる方法が確立されている。B-Δ法は、地震波の最初の2秒分のデータを用いて、震央位置やマグニチュード（M）を推定する方法で、テラスの遠方地震計を始めJR各社の早期地震警報システムのほか、気象庁の緊急地震速報でも採用されている。今回も、まずはこのB-Δ法の沿線地震計への適用を考えた。

B-Δ法で精度良くMや震央位置を推定するには、地震波の到達タイミングを正確に読み取る必要があるが、沿線地震計は列車振動をはじめとする雑振動が多い箇所に設置されており、地震波到達タイミングを正確に読み取るのが難しい。B-Δ法を沿線地震計に適用し、確実に運用していくのは難しいと考えた。

そこで、新たにP波（初動）による揺れの強さからその地点のS波（主要動）による揺れの強さを予測する方法を検討することとした。

ここで、P波・S波それぞれの特徴を再確認する。震源から放出された地震波は、P波・S波いずれも図-3のような経路で伝播し、地震計に対して鉛直方向から入射する。

P波は縦波で、波の進行方向に振動するため、P波を地震計で観測すると上下に強く揺られる。すなわち「P波に

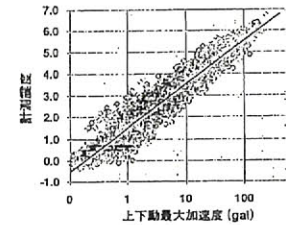


図-4 上下動加速度と計測震度の関係

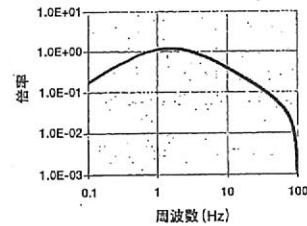


図-5 周波数フィルタ特性

よる揺れの強さ」は上下動の大きさと概ね表すことができる。一方、S波は横波で、波の進行方向に直行する方向に振動するため、S波を地震計で観測すると水平に強く揺られる。構造物乗客は水平動の大きさと比例関係にあり、水平動が大きいと震度も大きい、という関係にある。すなわち、「S波による揺れの強さ」は水平動の大きさおよび震度で表すことができる。以上から、「P波による揺れの強さとS波による揺れの強さの相関」は「上下動の揺れの強さと計測震度の相関」と置き換えできると考えられる。

そこで、過去の地震時に記録された波形データをもとに上下動最大加速度と計測震度を計算し、その関係を示す散布図を作成したところ、一定の相関があることが分かった（図-4）。式1は上下動最大加速度（ A_{max} ）と計測震度（ J ）の関係を示す回帰式である。

$$J = a \log(A_{max}) + \beta \quad a = 1.99, \beta = 1.59 \quad (式1)$$

図-4作成にあたっては、1998年～2011年の間に独立行政法人防災科学技術研究所のK-NETで記録された155地震・11,987個の波形データを使用した。また、上下動の最大加速度を求める際、計測震度との相関をより良くするために、加速度波形に対して図-5に示す特性を持つ周波数フィルタ処理を行っている。このフィルタは、計測震度を算出する際に用いる周波数フィルタに近い特性を持っている⁵⁾。

前述の上下動最大加速度と計測震度の相関関係を利用して、上下動加速度の大きさを逐次監視することで計測

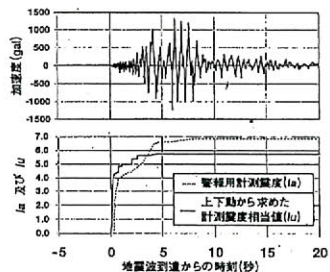


図-6 加速度・ I_u ・ I_a の時間的変化の比較 (2004年新潟県中越地震K-NET 小千谷記録波形より)

震度を予測し、早期に警報を出す方法を考えた。

地震波到達からある時点までの上下動加速度最大値を A_{umax} として逐次式(1)に代入して得た I は、上下動加速度から得た震度の時間的変化を表したものと考える。これを I_u と呼ぶこととする。過去に発生した直下型地震の記録波形を用いて、 I_u の時間的変化を求め、これと計測震度相当値である警報用計測震度 (I_a)⁹⁾ の時間的変化とを比較した (図-6)。その結果、「地震波到達直後は I_u が I_a よりも先行して大きな値となる」、すなわち「 I_u は計測震度を予測するように振る舞う」ことに気づいた。複数の地震波形で同様の比較をしたが、この特徴は M の大小や震央距離の遠近に関わらず共通して見られるものであった。

以上により、地震計で上下動加速度を測り、逐次計測震度の予測値 (I_u) を計算し続け、予測値が運転規制基準値 (4.0) を超えた場合に列車停止指令を出す、新しい早期地震警報判断手法を見出すに至った。

ところで、 I_u をそのまま予測値とすると、実際の計測震度よりも小さくなることもある。そこで、式(1)の切片 β を大きくし、意図的に大きめの予測値になるように調整することが考えられる。ここで β を大きくしすぎると、「警報が不要な小さな震度に対して警報を出す」、いわゆる空振り警報を増やすことになる。東海道新幹線沿線の場合は、0.6程度であれば β を大きくしても空振り警報を著しく増やさないことが分かっていく。調整した切片 β を用いて算出した I_u を「警報用予測震度 (I_{ap})」と呼ぶこととする。

(3) 警報用予測震度による早期警報効果

図-4を作成する際に使用したK-NETデータのうち、震央から30km以内で計測震度4.0以上となる169個について、 I_{ap} 4.0警報と40gal警報とで警報の速さを比較した。 I_{ap} 4.0警報は約半分の地震波に対して地震波到達から1.5秒以内に警報が出るのに対し、40gal警報は約半分が4.5



図-7 I_{ap} 警報・40gal警報タイミング比較

秒以上要する (図-7)。また、 I_{ap} 4.0警報は40gal警報に比べ平均で2秒程度警報を早期化できる。

(4) 雑振動等による誤警報対策

警報用予測震度を用いた手法は、大きく揺れてから警報を出す従来の手法よりも小さな振動レベルを処理することになるため、地震計の周辺で列車が通過したり、重機等が作業したりする際の振動による誤警報が懸念される。

地震動と雑振動とで卓越する周波数成分に着目すると、地震動はおおむね10Hz程度以下であるのに対し、雑振動の場合は数十～数百Hzである。今回は、 I_{ap} を求める前の段階で計測震度との間を高めるために図-5に示した周波数フィルタ処理を行うが、この処理が誤警報を防ぐ方法としても有効に機能する。雑振動の観測波形にこのフィルタを適用すると、振幅は約1/5～1/10以下に低減され、その結果、 I_{ap} も小さな値となり誤警報を防ぐことになる。

また、鉄道の沿線地震計は変電所等の敷地内に設置されることもあるため、電気的な影響による誤警報も懸念される。電気的な影響により観測波形に異常がある場合は、地震波とは明らかに異なる形状となるため、形状の違いに着目した様々な地震ノイズ判定手法を検討し、導入している。

3. 運動型地震に対応する早期警報機能の強化

線路から離れた位置で発生する地震に対しては、遠方地震計により地震の発生を早期に検知し、警報を出すことになる。遠方地震計はP波の最初の2秒からMや震央位置を推定する。推定結果は沿線に送信され、Mをもとに強く揺れる範囲を推定し、必要な範囲の送電が停止され、列車に非常ブレーキが作動する。Mが大きいかほど強く揺れる範囲は広くなり、警報範囲も広くなる。

M7以上の大地震の場合、断層の破壊に数秒～数十秒かかるため、遠方地震計は最初の2秒の段階だけではM

を大きく推定できず、強く揺れる範囲を十分に推定できない場合もある。そのため、2秒以後も逐次Mを算出しなおし、必要により警報範囲を広げる仕組みを導入している。

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震 (M9.0) では、断層長さが約500kmと非常に長く、断層破壊に180秒近く要し、その断層破壊過程は、まず宮城県沖で破壊が始まり、複数の断層面が運動して破壊する複雑なものだったと言われている¹⁰⁾。このような地震は「運動型地震」と呼ばれる。強震範囲も非常に広く、東海道新幹線でも東京駅から静岡駅付近まで震度4程度で揺れた。

運動型地震の場合、断層破壊にかかる時間が非常に長い。そのため、既存の逐次警報範囲を広げる仕組みを導入していても、警報範囲を十分に広げるまでに相当な時間がかかる。将来的に発生が懸念される南海トラフ巨大地震も東海・東南海・南海の各震源域が運動する地震になる可能性があると考え¹¹⁾、その震源域内を通る東海道新幹線で早期地震警報を有効に機能させるには、運動型地震に対していかに早く広範囲に警報を出せるかが課題である。

そこで、テラスでは「運動型地震の想定震源域内に震央位置を推定し、かつ一定以上のMを推定した場合に、運動型地震が発生したと見越して警報を出す」方法を採用することとした (図-8)⁹⁾。

運動型地震の想定震源域として「日本海津沿い」と「南海トラフ沿い」とを設定し、前者については推定M7.5以上で東京～静岡間の列車を停止させる。また、後者については推定M7.0以上で東京～新大阪間の列車を停止させる。

4. 遠方地震計でのS波検知機能の追加

線路から離れた位置で地震が発生した場合に、遠方地震計により初動で精度良くMや震央位置を推定できず、早期警報が出せないことは、自然現象が相手であるため、絶対には言い切れない。万が一に備え、遠方地震計でも大きな揺れ (120gal) を検知した場合に警報を出すように機能強化することとした。遠方地震計は新幹線沿線から50km～100km以上離れた箇所に設置されており、120gal検知後でも沿線が大きく揺れる前に警報を出せることも多い。

5. 通信回線の断絶や長時間停電への対応強化

地震計と中継所との通信には、NTT専用回線を用いているが、大きな地震や台風により地上の通信設備が損傷を受け、情報送信が途絶えることが考えられる。そのような場合でも通信が途絶えないよう、衛星携帯電話



図-8 運動型地震に対する早期地震警報

サービスをバックアップ回線として使用することとした⁹⁾。また、長時間の停電に備えて、遠方地震計では72時間、沿線地震計では24時間程度のバックアップができるよう、電源容量を拡大した。

6. おわりに

今回の機能強化により、東海道新幹線の地震防災技術レベルを一段階高いものにできたと自負する。中でも直下型地震に対する警報機能の強化のための技術開発には、約7年もの月日を費やすこととなったが、実用的で実効性の高い成果が得られた。これに満足することなく、今後も継続的に地震防災技術のブラッシュアップを続けたい。

【参考文献】

- 1) 他谷周一：東海道新幹線の地震防災システム，検査技術，pp.66-72，2010.4
- 2) 他谷周一：緊急地震速報の活用による地震防災システムの機能強化，JREA，2009.6
- 3) 伊藤雄輝，他谷周一：地震発生後の運転規制判断の適正化，日本鉄道施設協会誌，2006.10
- 4) 東田進也，小高俊一，芦谷公彦，大竹和生，野坂大輔：P波エンベロープ形状を用いた早期地震諸元推定法，地震，Vol.56.4，pp.351-361，2004
- 5) 他谷周一，中嶋繁：警報用計測震度および警報用予測震度の検討，土木学会第62回年次学術講演会，2007.9
- 6) 内閣府中央防災会議：東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会報告，2011.9
- 7) 内閣府中央防災会議：南海トラフ巨大地震モデル検討会中間とりまとめ，2011.12
- 8) 他谷周一，児玉聡：巨大地震に対する早期地震警報判断手法，2012年日本地震学会秋季大会，2012.10