

防災のキーテクノロジー



芦谷 公稔
Kimitoshi Ashiya
研究開発推進室
室長
[専門分野] 地震防災

はじめに

日本は世界でも有数の地震国であり、大規模な地震が繰り返し発生しています。鉄道の地震災害を軽減するためには、事前に施設の耐震性を高めておくことが基本ですが、一方で、地震発生時には迅速かつ適切に列車を減速・停止させることにより事故を未然に防がなければなりません。そこで、新幹線における防災のキーテクノロジーとして、地震時の列車運転規制に係わる技術の変遷を紹介します。

地震時自動列車制御のはじまり

新幹線開業以前の地震時の列車運転規制は、駅や保守区の職員の体感震度や簡易な地震計の最大加速度値を基に、職員の判断によって行われていました。東海道新幹線の開業にあたり、高速走行列車の地震時運転規制にさらなる安全性が求められ、自動列車制御システムが検討されました。世界初の試みとなったこのシステムは「対震列車防護システム」と呼ばれ、1965年12月に運用が開始されました。

このシステムは、加速度40ガル相当以上の揺れを感知すると動作する「制御用感震器」を、沿線の変電所に約20km間隔で設置し、感震器の動作信号を受けて変電所から本線への送電を停止することで、走行中の列車が電力異常を検知して自動で非常ブレーキを動作させるものです。この制御用感

震器は、倒立振子とその周囲（水平10方向）に配置した接点とで構成されており、地面が揺れると振子と接点が接触し通電することによって警報を出力するもので、原理は単純ですが、電気ノイズに強く、動作が安定していることから、現在でも補助制御装置として活躍しています（図1）。

その後導入された「表示用地震計」（図2）は、制御機能としては制御用感震器とほぼ同様ですが、地震動の大きさを記録するとともに、指令に通報できるため、運転再開の判断にも利用されることになりました。

最初の早期地震警報システム

東北新幹線開業に向けて、東北地方の太平洋沿岸で頻発する海溝型の大地震に対して、震源により近い海岸線に地震計を設置し、揺れが設定した基準値を超過した場合に警報を発し、沿線に大きな揺れが到達する前に列車運行

を制御する「海岸線検知点システム」が開発されました。これはいわゆる「早期地震警報システム」に属する最初のシステムです。ただし、このシステムでは、警報判断は主要動（S波）の大きさで行い、警報を発する範囲は海岸線検知点ごとに受持ち範囲としてあらかじめ設定するので、震源の位置や規模に応じて警報範囲を適宜変更することはできませんでした。

ユレダスの登場

新幹線の高速化が図られる中で、より早い時点で警報判断を行うこと、さらに警報を発する範囲を地震の規模に応じて的確に設定することが求められ、「早期地震検知・警報システム（ユレダス）」が開発されました。地震動は、最初に伝搬速度の速い初期微動（P波）と呼ばれる小さな縦揺れがきて、その後被害をもたらす大きな横揺れの主要動（S波）がきます。ユレダスは、P波

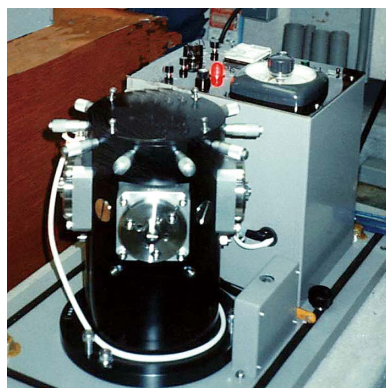


図1 制御用感震器



図2 表示用地震計



図3 山陽新幹線ユレダス

の約3秒間のデータで震源の位置や規模（マグニチュード）を推定し、推定した地震規模から簡単な経験式を用いて影響範囲を判断し必要な区間に警報を発することができますので、期待された「より早く、的確な」警報を可能にしました。ユレダスは主に海溝型の大地震を対象として海岸線検知点などに導入され、1992年に東海道新幹線、1996年に山陽新幹線で運用が開始されました（図3）。

コンパクトユレダス

内陸の直下型地震であった兵庫県南部地震（1995年）を契機に、内陸地震に対しても有効に早期警報を行うため、P波初動部約1秒で警報判断を行うことができる「コンパクトユレダス」が開発されました。ただし、警報判断は約1秒に短縮されましたが、その方法はP波振幅の基準値超過によるものであり、ユレダスのように震源の位置や規模に応じて警報範囲を設定することはできません。よって、海岸線検知点に用いる場合は、警報範囲を検知点ごとにあらかじめ固定していました。コンパクトユレダスは、東北・上越・長野新幹線における従来の海岸線検知点



図4 早期警報用地震計

システムおよび沿線検知点の表示用地震計の高度化を目的として1998年に導入されました。

新たなシステム開発

鉄道ではユレダスやコンパクトユレダスが世界に先駆けて実用化されましたが、兵庫県南部地震以降、世の中でも地震学や地震工学が進展し、さらに情報通信技術が飛躍的に高度化したのを契機に、観測された地震記録を即時に解析して防災情報として活用する「リアルタイム地震防災」の技術が進みました。そこで、鉄道総研は2000年度から気象庁と共同して新たな早期地震検知・警報手法の研究開発に取り組みました。ここでは、警報範囲は震源の位置や規模に応じて適切に設定できること（ユレダスの特徴）、および内陸地震にも対応するため、沿線で用いる場合の警報判断は1秒程度で行うこと（コンパクトユレダスの特徴）を念頭に置いて開発しました。この際、当時の地震学の最新の知見を基に、P波初動数秒のデータから震源位置や規模を推定する手法を抜本的に見直しました。

その結果、P波が急に大きくなると震央が近い、逆にゆっくり増加すると震央は遠いという特徴を利用し、P波の揺れ始めの1～2秒間の振幅増加率

から震央距離を求め、震央距離とP波初動部の最大振幅からマグニチュードを求める手法を考案しました。

新たに考案した早期地震検知手法を採用した地震計（「早期警報用地震計」）を開発し、この地震計を用いた新システムが九州新幹線（新八代・鹿児島中央間）で2004年から運用開始されました。

この後、新システムはユレダスやコンパクトユレダスの後継として採用され、2006年度までに新幹線全線において新システムに更新されています（図4）。

おわりに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は、我が国観測史上最大規模（マグニチュード9.0）を記録し、巨大津波を発生させるとともに未曾有の大災害をもたらしましたが、東北新幹線においては海岸線検知点の新システムが機能し、沿線に最大の揺れが到達する前に列車を減速することができました。しかし、課題がなかったわけではありません。今回の巨大地震のP波初動部の特徴はこれまで蓄積してきた知見とは異なるものでした。よって、巨大地震の早期検知の精度向上を図るためにも、今回観測された地震波形のさらなる分析が必要です。

また、今回の地震を契機に、巨大地震の震源域となる海溝付近に海底地震計を整備するプロジェクトが公的機関によって進められています。鉄道総研では、これらの公的機関の地震観測網の記録を有効活用するなど、新幹線の早期地震警報のさらなる性能向上を図るための研究開発を今後とも引き続き推進していきます。RRR