

- 鉄道一般
- 車両
- 施設
- 電気
- 運転・輸送
- 防災
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

海底地震計データを 早期地震警報に使う

近年、(国研)防災科学技術研究所などの公的機関により、日本海溝や南海トラフなどの巨大地震の発生が想定される海域を対象とした海底地震計観測網の整備が進められています。従来鉄道で利用している陸域の地震計に加えて、この海底地震計観測網のデータを活用することで、海域で発生する巨大地震に対して安全性が向上することが期待されます。ここでは、海底地震計情報の鉄道用早期地震防災システムでの活用に向けて、鉄道総研で開発した早期警報の基本アルゴリズムについて紹介します。



是永 将宏
Masahiro Korenaga
鉄道地震工学研究センター
地震解析研究室
副主任研究員
[専門分野] 地震工学



山本 俊六
Shunroku Yamamoto
鉄道地震工学研究センター
地震解析研究室
室長
[専門分野] 地震工学



青井 真
Shin Aoi
(国研)防災科学技術研究所
地震津波火山ネットワークセンター
センター長
[専門分野] 地震観測・
強震動地震学

はじめに

鉄道では、地震による被害を抑えるための対策の一つとして、早期地震防災システムが利用されています。早期地震防災システムは、地震発生時に地震計により地震による揺れ(地震動)をとらえて素早く解析を行い、鉄道に被害が及ぶ可能性がある判断された場合には警報を出力し、列車を減速、停止させるものです。これまで、鉄道の早期地震防災システムにおける警報

の判断には、線路沿線や、線路を取り囲むように配置された鉄道事業者独自の地震計のデータや、気象庁から配信される緊急地震速報のデータなど、おもに陸域に設置された地震計のデータが利用されてきました。

一方、近年、(国研)防災科学技術研究所(以下、防災科研)などの国の研究機関などによって、日本海溝や南海トラフなどの巨大地震の発生が想定される海域に、防災情報への利用を目的

とした海底地震計観測網の整備が進められています。これらの海底地震計観測網は、世界的にも例をみない広域でかつ非常に密に観測点が設置されており、また、そのデータをリアルタイムに受信、利用することが可能であるという特徴があります。

従来の早期地震防災システムに加えて、これら海底地震計観測網のデータを活用することで、海域で発生する巨大地震に対して安全性が向上することが期待さ

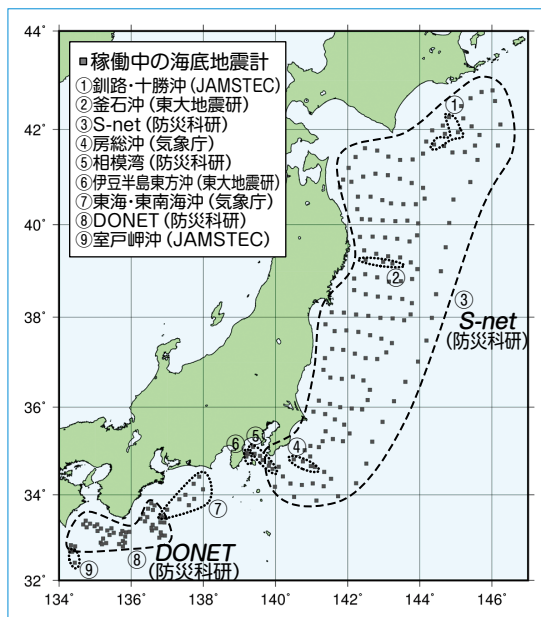


図1 公的機関による海底地震計の整備状況

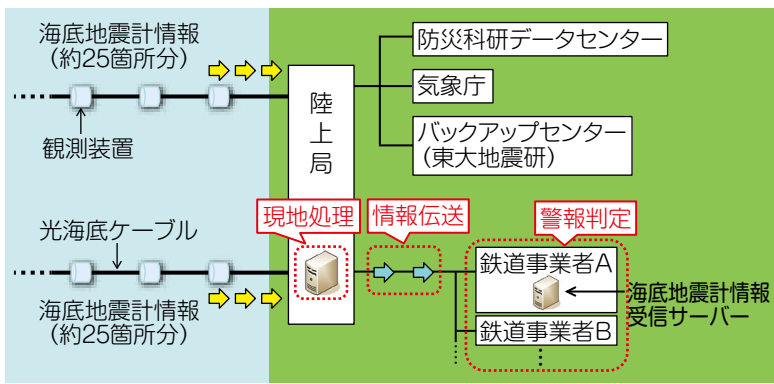


図2 S-net海底地震計情報の活用の仕組みとデータの流れ



図3 S-net海底地震計 観測装置
(提供：防災科学技術研究所)

れます。ここでは、海底地震計情報の鉄道用早期地震防災システムでの活用に向けた、鉄道総研の取り組みを紹介します¹⁾。

海底地震計情報の活用

公的機関により整備が進められている海底地震計観測網として、防災科研の日本海溝海底地震津波観測網S-netやDONETがあります(図1)。S-netでは、北海道沖から房総半島沖の太平洋海底に150点の観測装置が設置されています。また、DONETでは紀伊半島沖から四国沖の東南海・南海地震の想定震源域に、51点の観測装置が設置されています。各観測装置は、地震計や津波を計測するための水圧計などで構成されています。観測装置は光海底ケーブルにより接続されており、観測されたデータはリアルタイムで陸上の基地局(陸上局)に送信されます。

図2に、S-netにおける海底地震計情報の、鉄道の早期地震警報への活用の仕組みとデータの流れを示します。各観測装置(図3)で観測された海底地震計のデータは、光海底ケーブルを通じて陸上局内の処理装置にリアルタイムに集約され、鉄道で用いられる地震動指標値への変換やデータの欠測有無やノイズ判定などの処理(以下、現地処理)が行われます。その後、海底地震計用電文として通信回線を通じて各鉄道事業者の海底地震計情報受信サーバーに送信されます。各鉄道事業者の

海底地震計情報受信サーバーでは、受信した海底地震計用電文の情報をもとに、鉄道沿線に対して警報を出力するか否かの判定処理などを行います。

鉄道総研では、海底地震計情報を活用した早期警報の基本アルゴリズムとして、警報判定手法、海底地震計用電文の伝送手法、および、陸上局での現地処理に用いるデータ処理手法の開発を行いました。

警報判定手法

まず、海底地震計情報利活用の全体構成に係わる警報判定手法から説明します。

鉄道の早期地震防災システムで用いられている警報判定手法には、大きく分けてP波推定手法²⁾と規定値超過手法の2種類があります。

P波推定手法は地震波のP波初動部分のデータから震源位置、マグニチュードなどを推定し、被害の発生が想定される範囲に対して警報を発する手法です。早期性に優れますが、P波初動の微弱な振動を利用するため、事前に海底地震計で記録される地震動やノイズの特性を事前に十分に把握しなければ、警報の精度を保つことはできません。しかし海底地震計観測網の運用は始まったばかりで、まだ十分なデータの蓄積がありません。そのため、現時点ではP波推定手法の海底地震計への適用は行わず、今後のデータの蓄積を待って改めて検討することとしました。

もう一方の規定値超過手法は、観測された地震動の大きさが規定値を超えた場合に警報を出力する手法です。この手法は、大きな地震動を対象とするため、P波推定手法と比べてノイズによる影響を受けにくいという特徴があります。また、海底地震計は海域で発生する地震の震源の直近に設置されており、海域で発生した地震をより早期に検知することができるため、規定値超過手法でも十分な早期性を確保することが可能です。したがって、現段階での海底地震計情報を活用した安定した警報手法として、規定値超過手法を採用することとしました。規定値超過手法で用いる地震動指標については、陸域の地震計における規定値超過手法と同様に、JR警報用加速度³⁾と警報用リアルタイム震度⁴⁾を用いることとしています。

規定値超過手法の利用にあたっては、あらかじめ警報に用いる規定値を設定する必要があります。その際、海底地震計は警報の対象となる線路沿線から離れた場所に設置されていることから、距離に応じた減衰を考慮した規定値を設定する必要があります。また、海底地震計設置箇所の地下構造・設置環境・設置方法などによる振幅の増幅の影響もあわせて考慮する必要があります。そこで、海底地震計と陸域の地震計での地震動の特性の比較を行い、陸域と同様の距離減衰の関係を用いて警報用規定値を設定することが可能かを検証

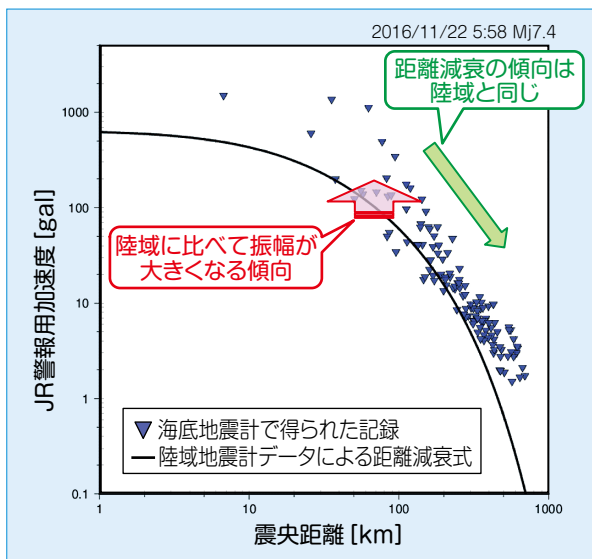


図4 海底地震計地震動記録と陸域距離減衰式との関係

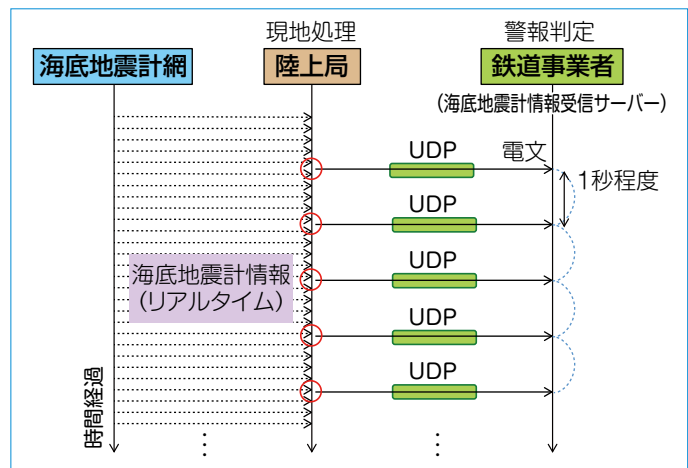


図5 海底地震計情報の伝送手法

しました。図4に、2016年11月22日福島県沖の地震 (Mj7.4) で、S-net海底地震計で得られたJR警報用加速度値と、陸域地震計のデータによる距離減衰式 (☞参照) をプロットしています。海底地震計のJR警報用加速度値は、おおむね陸域データと同様の減衰の傾向を示していることがわかります。そのため、距離の影響については陸域と同様の考えを適用することが可能であるといえます。また、ほぼすべてのデータで、海底地震計の観測値は陸域データよりも大きな値となっています。これは、海底地震計のデータが陸域に比べて振幅が大きくなる傾向があることを示しており、この増幅の影響を規定値に反映させる必要があることがわかりました。

海底地震計情報の伝送手法

次に、陸上局から各鉄道事業者の海底地震計情報受信サーバーまで海底地震計情報を伝送する手法を説明します。海底地震計情報の鉄道用早期地震

☞ 距離減衰

震源から遠くなるにしたがって、地震動が小さくなる現象。地震動の大きさと震源からの距離との関係を式に表したものを距離減衰式といいます。

防災システムでの利用に際しては、各海底地震計の情報をリアルタイムに安定的に伝送する必要があります。陸上局から海底地震計情報受信サーバーに対して、全海底地震計で観測された100Hzサンプリング (0.01秒間隔) のデータをそのまま送信すると、情報量は膨大なものになります。大きな情報量を安定的に伝送するためには十分な容量の通信回線を整備する必要があります。そこで、現地処理として陸上局で地震動指標の計算を行った後、その計算結果を統合した海底地震計用電文を0.01秒よりも長い伝送間隔で各鉄道事業者に伝送することにより、情報量を低減させることとしました。また、伝送の際の通信プロトコルと電文フォーマットも、回線の負荷が少なくなるよう検討しました (図5)。

通信プロトコルは、UDP (User Datagram Protocol) を採用しました。UDPは電文の送受信状況の相互確認を行わないため、伝送の信頼性は他のプロトコルに比べてやや低いものの、回線の負荷が小さいことが知られています。また、回線の負荷を一定とするために、地震発生の有無にかかわらず常時一定の伝送間隔で電文を伝送することとしました。

海底地震計用電文のフォーマットは、時刻などの情報を有する「ヘッダー領域」、各海底地震計の地震動指標値やデータの異常有無の情報を有する「データ領域」、および電文の誤り検出を目的とした「検定キー」から構成されています。データ領域には、陸上局に接続する海底地震計の最大約50箇所分の地震動指標の計算結果が記載されます。海底地震計用電文のサイズは約1000byteとなり、64kbps程度の低速回線でも1秒の伝送間隔で安定的に伝送することが可能です。

海底地震計情報の現地処理手法

陸上局の現地処理では、各海底地震計の地震動指標値の演算と、その結果をまとめた海底地震計用電文の生成を行います。また、データに海底地震計やシステムの故障・不具合などに起因したノイズが混入していると誤警報につながる可能性があることから、現地処理においてデータの品質をチェックして欠測やノイズの判定を行い、その判定結果を海底地震計用電文に反映させることとしました。海底地震計情報の現地処理の全体フローを図6に示します。はじめに「パケット確認処理」にて、各観測装置から送られる海底地震計情報を集約し、その受信/未受信

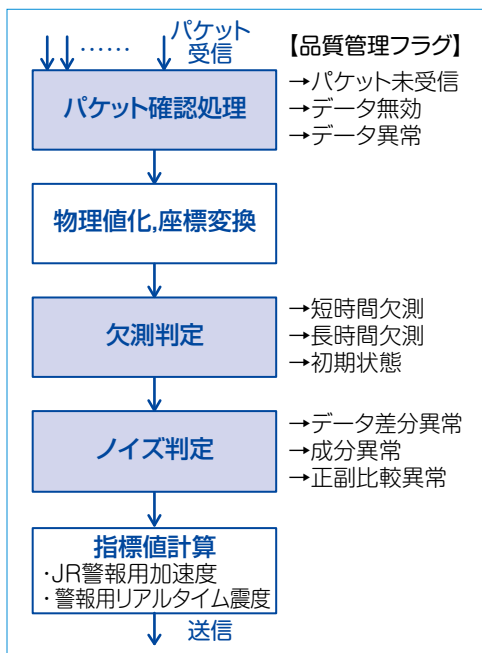


図6 陸上局の現地処理のフロー

の判定を行います。その後、データの物理値化と座標変換を行い、「欠測判定」においてデータの欠測状態を判定します。さらに、海底地震計情報に故障や異常によるノイズが含まれていないかを判定する「ノイズ判定」を行い、最後に、各地震動指標値を計算し、海底地震計用電文を作成します。

ノイズ判定は複数の方法で行っています。たとえば、誤警報を出力するリスクの高いノイズとして電気的なパルス状のノイズが考えられます。そこで、前後サンプルの加速度値の差分を監視し、差分が極端に大きい場合には異常を検出することとしています。また、加速度計の1成分のセンサーが故障し、観測値が得られなくなるケースに対応するため、各成分の値の違いを監視して違いが大きい場合に異常を検出することとしています。

複数地震計による誤警報防止

上記のノイズ判定手法は、海底地震計単体のデータを用いた誤警報防止手法ですが、突発的な電気ノイズやセンサー故障などに対する信頼性、安定性をさらに向上させるために、複数の海底地震計の情報を組み合わせることで

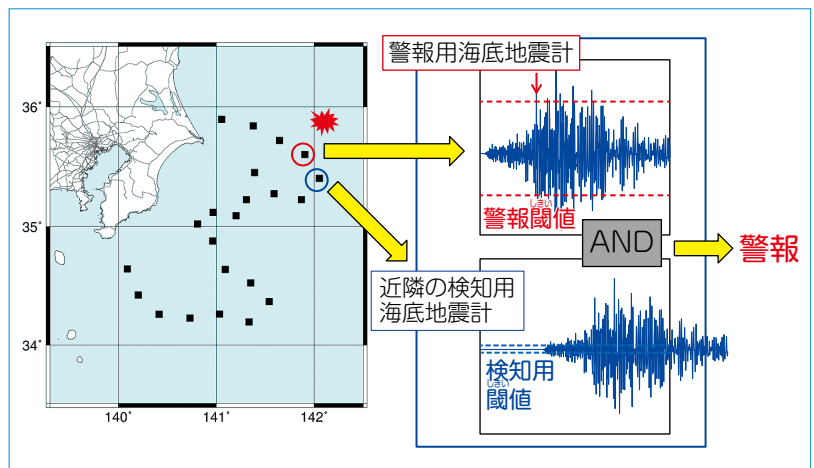


図7 複数点データによる誤警報防止手法

誤警報を防止する手法を提案しています。

S-netは各海底地震計間隔が30km程度と密に配置されており、警報の対象となるような大きな地震が発生した場合には、震源周辺の複数の地震計で大きな時間差なく地震動が観測されると考えられます。そこで、ある地震計(親: 警報用地震計)が警報用規定値(警報しきい値)を超える大きな地震動を観測したときに、ほぼ同時に周辺の別の地震計(子: 検知用地震計)においても地震動を観測した場合に警報を出力する手法を開発しました。提案した誤警報防止手法の概要を図7に示します。子の地震計が地震動をとらえる規定値(検知用しきい値)は、子に地震動が到達して通常の静穏時の地盤振動と異なる大きさの揺れが観測されたことが判断できればよいことから、警報しきい値より小さな値とすることで警報を出すまでの時間的なロスを極力減らすことが可能となります。また、地震計の故障などによる記録途絶を考慮し、警報用地震計に対して複数の検知用地震計を紐付ける『検知用グループ』を設定し、グループ内のいずれかの検知用地震計が検知用しきい値を超過した場合に警報が出力されることとしています。

おわりに

ここでは、鉄道における地震災害への対策として導入が進められている、海底地震計情報の鉄道用早期地震防災システムでの活用について紹介しました。ここで紹介した基本的なアルゴリズムは、すでに一部区間で新幹線早期地震防災システムに導入され、運用が開始されています。今後も、警報の早期性の向上など、海底地震計情報のより高度な利用に向けた取り組みを進めていく予定です。【RRR】

文献

- 1) 宮腰寛之, 山本俊六, 祇園昭宏, 神山真樹, 他谷周一, 渡辺篤, 切刀卓: 鉄道の早期地震警報への海底地震計情報活用に向けたデータ処理, 鉄道総研報告, Vol.29, No.1, pp.35-40, 2015
- 2) 芦谷公稔, 東田進也, 他谷周一, 小高俊一, 佐藤新二, 大竹和生, 中村洋光: ナウキャスト地震情報を活用した早期地震警報システム, 鉄道総研報告, Vol.17, No.8, pp.1~6, 2003
- 3) 中村洋光, 岩田直泰, 芦谷公稔: 地震時運転規制に用いる指標と鉄道被害の統計的な関係, 鉄道総研報告, Vol.19, No.10, pp.11~16, 2005
- 4) 切刀卓, 青井真, 中村洋光, 藤原広行, 森川信之: 震度のリアルタイム演算法, 地震第2輯, Vol.60, pp.243~252, 2008