

2004年11月15日

リアルタイム地震防災 - コレダスの開発 -

株式会社 システムアンドデータリサーチ
中村 豊
SDR@sdr.co.jp

はじめに

コレダス(地震動早期検知システム)は、地震時の対応を合理的かつ効果的なものにして災害をできるだけ減少させることを目的に考えられたものであり、構造物の損壊や脱線・転覆を防止するものではない。もちろん、早期の対応が脱線や転覆に至る確率を減少させることで、結果的にそれらを防止できることもある。しかし、あくまでもハードの損壊を防止するシステムではなく、地震時の即時対応を支援するシステムと考えるのが妥当である。

地震対策の基本と新潟県中越地震の教訓

地震対策の基本はやはりハード対策にあり、構造物・施設の耐震強化以外にはない。前もって十分な耐震化を実施していても、老朽化や予測できなかったことなどが起き得る。早期検知システムはこのような事態に対処するためのものである。特に、軌道上を列車が走行する鉄道システムの場合、地震発生時になにが起きるか予測できないところがある。早期検知システムが鉄道分野で発達したのもこうした恐れがあるためで、けっして、耐震化をないがしろにして早期検知システムにすべてを託したのではない。今回の新潟県中越地震でも耐震化が十分であったことが事故を災害にしなかった大きな要因であると考えている。もちろん、今回の地震被害を教訓にしてさまざまな新たな対策が講じられることと思う。これには日頃から安全運行に努力している研究者や技術者が、日頃の学識・経験を基に、綿密な調査を行い、周到な検討を進めていくものと期待している。にわか勉強で技術の背景も知らず、また誤解や偏見のおそれを省みず、今回の地震の教訓として声高に対策の不備を指摘するマスコミの論調には違和感を禁じ得ない。地震発生時間など、運が良かったという面もあるが、事故を災害にしなかったJR技術陣のこれまでの努力を素直に認めて、今後のさらなる対策の開発研究を暖かく見守ってほしいものである。

リアルタイム地震防災と早期検知システム

少なくとも当分の間、地震予知は実用化できないことを考えると、次善の策として、地震の発生をできるだけ早く検知し、危険な地震であれば直ちに警報を発して、必要な減災対応をとることが考えられる。これがリアルタイム地震防災といわれるものである。リアルタイム地震防災のトリガーとなるのが早期検知システムで、地震をできるだけ早く検知するのが早期検知システムに与えられた仕事である。

地震の早期検知

地震動には、最初に到達する波動(P波)と次に到達する波動(S波)がある。P波初動は一般に小さな震幅で、地震発生をいち早く伝える情報波である。S波初動は破壊的な地震動のさきがけであり、破壊エネルギーの到来を告げる波である。この言い回しは、カリフォルニア工科大学の金森博雄先生にならったものであるが、的確で理解しやすい。この地震動の性質を利用して、被害をもたらす可能性のある地震を、できるだけ早く検知することを考える。

地震発生をできるだけ早く検知する方法としては、以下のふたつが考えられる。

震源で地震発生を検知する(前線検知、Front Detection)

地震動のP波で地震を検知する(P波検知、P-wave Detection)

もちろん、各自のいる場所で地震を検知する(後方検知、On-site Detection)のが普通で、地震動が規定以上の大きさになることで警報を発する(トリガー警報、Trigger Alarm、ふつうS波以後の主要動直前での警報となるため、S波警報ともいう)のが普通である。

S波警報は、地震動が規定振幅を越えた瞬間に出すことができるので、検知と警報には時間差はない。P波警報は、一般にS波警報より早い段階で警報を出すことができる。しかし、P波であることの認識と検知後に危険なものになるかどうかの判断が必要で、判断に時間がかかりすぎるとS波警報より遅くなってしまうこともある。したがって、判断時間をいかに短くするかが工夫のしどころとなる。

鉄道分野での地震警報システム

鉄道分野では、警報対象が線路沿線であり、早期検知システムの対象としてまず海溝型の巨大地震が考えられていたために、後方検知および前線検知はそれぞれ沿線検知および海岸線検知と呼ばれることがある。

鉄道における警報地震計の発達史としては、まず後方(沿線)でS波警報するものが実用化された(在来線の沿線で使われている警報地震計、1960年代後半)。つぎに前線(海岸線)でS波警報するものが実用化された(東北新幹線の海岸線検知システム、1982年)。P波警報は最後に開発され、まず前線(海岸線とは限らない、既往大地震の震央域)で使われ始めた(東海道新幹線ユレダスシステム<判断時間3秒>、1992年)。つぎに判断時間を極限まで縮めて、後方(新幹線沿線)での利用が始まっている(盛岡以南の東北新幹線、上越新幹線および長野行新幹線、コンパクトユレダス<判断時間1秒>、1998年)。なお、コンパクトユレダスはS波警報(トリガー警報)も同時に備えており、早期警報が1秒より遅れることはない。

これまでに開発した早期検知システムの機能

地震時にできるだけ早く警報を出して緊急ブレーキをかける目的は次の3項目。

- できるだけ減速し、万一の場合の被災度を少なくする
- 損壊したかもしれないところを走行する危険を少なくする
- 対向列車が突入してくる危険を少なくする

ここでは、ユレダス、コンパクトユレダスおよび新世代の早期検知システム「フレックル」について、機能を簡単に説明するとともに実際の動作状況についても簡単に解説する。また、非常に手軽に使える手乗りサイズのデジタル警報地震計についても言及する。

ユレダス

世界で最初に開発された実用P波早期検知システムである。まず、検知した地震動がP波であることを確認すると、直ちに地震の全体像(震央位置、深さ、マグニチュード)を把握して当該地震の被害域を推定し、この被害域にかかっている地域に警報を発する。検知から警報まで約3秒の時間を要する。S波認識機能もあるため、S波到来後、震央位置などを再推定して、地震後対応のための情報としてセンターに通報する。監視対象の地震はユレダスを中心に200km程度の範囲内にあるものとしている。また、ユレダスは

一観測点のみのP波初動で警報を発令するので、検知点が破壊的な震動を受ける前には警報動作が完了しているという特長もある。

ユレダスの実用状況

まず東海道新幹線に、1990年からの試験導入を経て、1992年本格導入されたが、対象とする地震は海溝型地震など新幹線から遠く離れた地震で、繰り返し発生する大地震の特性を利用して予想される震源地域の近傍14カ所に設備されている。これらの監視域は相互に重なり合っており、ひとつのユレダスが故障しても他のユレダスが補完するように考えられている。山陽新幹線には、5カ所にユレダスが設置され、1996年から本格稼働している。各個所には正副2基のユレダスが設備されている。これらのユレダスの早期地震検知情報は、新幹線に近い、大阪圏、名古屋圏および静岡周辺在来線でも利用されている。そのほか、和歌山県独自の津波警報システムの中核をなすものとして、串本に1基ユレダスが設置されている。

研究用ユレダス

ユレダスによる研究地震観測は海外の研究機関と共同して、一時期最大4カ所(パークレー、パサデナ、メキシコシティ、イスタンブール)で行われていた。イスタンブール(ボアジチ大学地震研究所との共同)以外は動作状況がe-mailで通報され、パークレー(カリフォルニア大学パークレー地震研究所との共同)やパサデナ(カリフォルニア工科大学地震研究所との共同)では記録波形もインターネット経由でダウンロードできるようになっている。イスタンブールユレダスは2002年の研究所移転により1999年のコジャエリ地震直後から始められた観測が中止された。メキシコシティユレダス(メキシコシティの地震計設置登録センターCIRESとの共同)は1999年から共同観測が始められている。2001年に現在の場所に移設されたが、2003年1月のコリマ地震(M7.8)では、400kmほど離れたメキシコシティユレダスは、P波がメキシコシティに到達した後3秒で1次情報をユレダスセンターに送信してきている。その後CIRESのセンターからe-mailで関係者に情報が送信されている。地震発生後約2分(P波検知後40秒程度、日本時間午前11時過ぎ)で日本にM6.8の地震発生として情報が届いている。それまでの観測経験で、これはM7.8に相当する大きな地震と考えられたが、他の手段でこの地震の発生を確認できたのは数時間後であった。このように着実にデータを積み重ねていたが、2003年夏、落雷事故によって通信システムが損壊し、観測データの送信が止まっている。このため、研究用ユレダスとしては、現在、カリフォルニアのパークレーとパサデナに置かれた2基のユレダスが正常に稼働しており、観測情報を送信している。先日のパークフィールド地震(M6.0)はパサデナとパークレーの中間地点で発生した。両地点は断層の南北の延長上にそれぞれ位置しているが、両地点とも検知情報を通報してきた。

コンパクトユレダス

阪神大震災をもたらした兵庫県南部地震時に記録された、神戸市内のコンビニエンスストアの防犯カメラの映像群、NHK神戸支局のスキップバックカメラの映像などをみると、あきらかにP波を感じて後、数秒できわめて大きな地震動に襲われている。つまり、現行ユレダスの3秒の判断時間では、警報が出る前に大きく揺れだしてしまうことがわかった。この地震はユレダスが警報の対象とすべきものではないが、ユレダスの判断時間を短くして、震源地域においても大きく揺れ出す前に警報を出したいと考えて開発したものが、コンパクトユレダスである。このために判断時間を約1秒としている。コンパクトユレダスは、検知した地震動の危険性を判断することとし、それをもたらした震源諸元については推定しないことで判断時間の短縮を計っている。具体的にはP波部分の地震動の大きさが一定以上に大きくなれば、警報を発するというもので、P波認識機能が重要となる。監視対象地震はコンパクトユレダスを中心に概ね20kmの範囲と考えている。

盛岡以南の東北新幹線・上越新幹線および長野新幹線の沿線には、この1秒警報のコンパクトユレダスが合計43基設置されているが、太平洋沿岸および日本海沿岸にはそれぞれ、8基および5基、3秒警報のコンパクトユレダスが設置されている。海岸線コンパクトユレダスの警報処理時間が3秒と長いのは遠い警報対象域への警報であるため、監視対象範囲を広くしてより大きな地震を確実に補足するようにしたものである。また、東京メトロには地下鉄網の中心付近に1基、取り囲むように5基の合計6基のコンパクトユレダスが設置され、P波1秒警報システムとして稼働している。

コンパクトユレダスの動作例1 - 2003年宮城県沖地震

2003年5月26日18時24分頃発生した宮城県沖地震では、水沢江刺 - 盛岡間の高架橋に被害がでたが、深さ70kmの震源直上付近に位置する海岸線コンパクトユレダス(処理時間3秒にしている)がいち早く地震を検知して仙台 - 盛岡間の線路沿線にP波が到達する前に早期P波警報を発している。この地震は、新幹線の営業時間帯に発生した新幹線被害地震としては、2001年の芸予地震以来のものである。高架橋が被災したところの近くにあった沿線コンパクトユレダスは、到来したP波を検知して1秒で警報を発しており、その後さらにS波警報(トリガー警報)が出されている。このように多段に警報が出されたが、幸いにも、仙台 - 盛岡の区間の列車は、被災地周辺にはなく、駅に停車中が駅近傍を走行中で速度は出ていなかったため、何の問題も生じていない。構造物が被災するような600ガル近い大きな地震動の中でもコンパクトユレダスは期待通りの働きをした。

コンパクトユレダスの動作例2 - 2004年新潟県中越地震

2004年10月23日17時56分頃発生した新潟県中越地震では、深さ13kmの震源のほぼ直上に沿線コンパクトユレダスがあり、警報を出している。この警報がP Sどちらであったかはまだ発表されていないが、このコンパクトユレダスが担当している区間には2本の新幹線列車上り「とき332号」と下り「とき325号」が走行中であつた。「とき332号」は巡航速度で走行中であつたが警報により安全に緊急停車し、200km/h ~ 210km/hで走行中の「とき325号」はトンネルを出てから警報を受けたが脱線して停車した。乗客151人と乗員は全員無事だった。目撃証言などを勘案すると、脱線した列車が地震発生時に走行していたところはトンネル出口付近と考えられ、コンパクトユレダスが警報を出すのと走行列車がP波を受けたのはほぼ同時であつたと推測される。警報により直ちに送電が停止され、関係区間約40kmを走行中の「とき325号」と「とき332号」の緊急ブレーキが作動し始めたと考えられる。脱線現場に最も近いIK-NET長岡のEW方向加速度波形(ほぼ線路直交方向の加速度波形、JR加速度特性で496ガル、水平合成加速度の最大値は656ガル)をみると、脱線した「とき325号」付近には警報から約2秒後、S波が到達し、大きな震動が7秒ほど続いたと考えられる。この震動は0.7Hz ~ 3Hzが卓越しており、新幹線車両の固有振動数帯と重なっていることがわかる。このため、目撃証言にもあるように、下り列車「とき325号」は大きく左右に振動し始めたのではなからうか。トンネル出口を出た時の風圧の影響で不安定になりやすい最後部車両ではこの時、一部が脱線したかも知れない。新幹線は大きく左右に揺れながら、振動特性が大きく異なる箇所(地盤高さが急変し高架橋の高さが急変するところで、おおむねトンネル出口<キロ程206km>から約300mのところ)に進入したと考えられる。ここを越えて進むに従い、軌道面の振動は低い振動数が卓越し、振幅も急に大きくなっていったものと推測される。大きな震動の継続時間は約7秒でおおむね300m ~ 350mの走行距離に相当する。250mの列車の各車両がこの震動特性の急変部分に突入して、順次脱線したため、脱線方向が左右交互になったのであろう。また、中央部分の車両が脱線しなかったのは、地震動が一旦小さくなった約1秒間にこの部分を走行したためではなからうか。つまり今回の脱線は大きな地震動で全体が一気に飛ばされて脱線したものではなく、構造物の振動特性が急変する部分を走行中に順次脱線したものと推測される。一気に飛ばされれば、兵庫県南部地震の時に震源域で多くみられた脱線のようにおおむね一方向に脱線するものと考えられるが、今回の脱線状況はそうではなかった。

兵庫県南部地震の場合、常時微動調査結果によると、走行中や停止中にかかわらず、脱線や転覆は脱線危険度 K_d が相対的に大きいところで生じていた。今回でもこのことが確認されれば、脱線危険度の大きいところに脱線防止工を集中的に設備することで、脱線を効果的に防止できるようになるかも知れない。

フレックル

これはFast Response Equipment against Quake Load(地震力への即時対応機器)の頭文字をとって名付けた愛称FREQLで、「振れ来る」にかけている。

フレックルはユレダスの機能とコンパクトユレダスの機能を併せ持つ。断層地帯の誤差の出やすい観測点(パークレーやパサデナ)におかれたユレダスの地震観測データを用いて、震源諸元推定の精度向上を研究した結果、精度を向上させながら、ユレダス処理時間を1秒に縮めることに成功した。また、コンパクトユレダス機能についても見直しを行い、1秒以下でも警報が出るように改良した。また、これまでのP波認識方法に加えて、より確実な方法も開発して組み込み、より一層の信頼性向上を図っている。さらに、最大加速度や震度によるトリガ警報機能も有するという、必要な警報は確実に出すという特長をもっている。これは、リアルタイムで震度計測が可能なAcCo(アッコ、手乗りサイズデジタル強震警報計)の機能をも取り込んだもので、地震後は、震源諸元その他、最大加速度、計測震度相当値などが表示・通報される。また、センサ、処理装置、電源、無停電バックアップ、メモリなどを一辺約12cmの立方体までに小型一体化した。これによって、設置が簡単になるとともに専用の収容施設も軽便なもので十分なため、トータルコストが大幅に削減できるものと期待される。

アッコ

これはAcceleration Collector(加速度収集器)から名付けた愛称AcCoで、最大加速度と震度をリアルタイムに表示・警報できる手乗りサイズのデジタル警報強震計である。P波を識別する機能はない。震度をリアルタイムに表示したり震度で警報したりできるのは世界中でアッコしかない。もちろんアッコは波形の記録も可能となっている。K-NETやKiK-netのデータを用いた検討により、警報加速度を10Galに設定すると、震源域では、概ねP波検知後数秒程度で警報が出されることがわかっている。ただし、遠くの大きな地震や近くの小さな地震にも反応すると考えられる。こうした不要警報は年に数回発生すると考えられるが、この不要警報を許容すれば、すぐ近くで発生した被害地震に対しては実質的にP波警報器として使えると考えている。

気象庁の緊急地震速報との連携

震源域で地震を検知できれば、いち早く地震の発生を知ることができる。大地震はほぼ同じ場所で繰り返しおきるので、過去の震源域に地震計を配置すれば、震央の近くで大地震を検知することができる。しかし、震央域より離れた地域に地震発生情報を伝えるためには通信が必要となる。そこで、これらを専用線で接続して、情報を迅速に伝えようとしたものが、東海道新幹線などで使われているユレダスである。ユレダスの対象とする地震はこれまでに知られている大地震が対象であるが、これまでに知られていないところで大地震が発生する可能性も少なくない。そこで、たくさんの地震計を配置して、どこで大地震が発生しても必ず震央域で検知できるようにして、その情報を震央より遠くで被害が出そうな地域にいち早く伝達することで災害をできるだけ減じようというのが、緊急地震速報の考え方であろう。つまり、ユレダスの拡大版である。

今年2月からの試験運用の結果によると、P波検知から最初の緊急地震速報まで3秒以上最大7秒を要するため、震源域から離れたところしか有効ではない。そこで、最初の緊急地震速報まで7秒かかるとして、1秒警報のコンパクトユレダスが後方で出す警報より震央付近からの緊急地震情報が早くなる限界地点はどれくらい離れたところかを試

算してみる。このときP波速度を6km/sec、S波速度を3.5km/secと仮定する。P波が6(=7-1)秒間伝達する距離は36kmであるから、緊急地震速報のための地震計がある地点より震源距離が36km以上遠いところでは、緊急地震速報の方が早くなる。深さを10kmとすれば、限界地点の震源距離は46km(=36km+10km)となり、震央距離は約45kmとなる。このとき、緊急地震速報による余裕時間(警報からS波到来まで)はコンパクトコレダスによる余裕時間と同じく約4.5秒となる。地震規模と被害の関係によれば、被害域の半径が45km以上となるのは、ほぼM7以上の地震である。したがって、M7以上の場合に緊急地震速報が有効になるケースが発生することになる。しかし、震源域では数秒で大きな地震動に見舞われる。新潟県中越地震では震源域にあるの川口町の計測震度計の情報が入手できなかったり、長岡市役所の計測震度計が故障したと伝えられたことをみても、本当に必要な場合に緊急地震速報が伝達されない可能性は少なくない。このため、緊急地震速報だけに頼るのは危険であり、独自の警報システムを併せ持つことが重要となる。確実に迅速な地震警報システムを構築しようとするれば、後方と前線の組合せが不可欠となるのである。不要警報を嫌うところでは、自前のシステムとしてはきちんとしたP波警報システムを用いることになるが、多少の不要警報を許容できるのならば、自前のシステムとして非常に廉価なアッコを使うことも可能である。

いずれにせよ、新幹線をはじめとする鉄道や原子力発電所などのように確実に信頼性の高い早期警報が必要とされる機関では、緊急地震速報を利用するのは心許ない。こうした機関では、前線・後方いずれをも自前のシステムとして、早期警報が迅速にかつ確実に出されるようにすることになる。こうした機関の場合、緊急地震速報を利用するメリットはほとんど無いと考えられる。

鉄道総研と気象庁が共同開発した早期検知システムについて

コレダスやコンパクトコレダスは東北新幹線盛岡以北や九州新幹線には設置されていない。少なくとも八戸開業当初の盛岡以北にはP波警報システムは設備されておらず、九州新幹線については鉄道総研と気象庁が共同開発したP波警報システムが設置されている。これは近年開発されたもので、危険性を判断するのに要する時間が固定していない。最短は2秒とのことであるが、これで判断できなかった場合、1秒単位で判断時間が延びていく。気象庁の緊急地震速報にもこのシステムが使われているが、2004年2月からの試験運用の結果をみると、2秒で処理できたものはなく、通常3秒以上を要し、7秒かかったものもある。9月に発生した紀伊半島沖の地震でも7秒程度を要している。つまり、従来のコレダスシステムより早くなることはなく、むしろ確実に数秒以上遅くなるものと思われる。コンパクトコレダスと比較すれば、確実に3秒以上遅れることになる。迅速な警報という観点からは、これまでのコレダスの3秒より警報処理時間が増大するシステムを沿線(後方)で使うのはもちろんのこと、前線で使うのも問題であろう。九州新幹線の沿線では、設備はしたもののP波警報機能は使われていないとのことである(南日本放送のWEBニュース2004年10月25日18:21)。

おわりに

ここでは、いわゆる早期検知警報システムの日本での現状を概観した。リアルタイム地震防災は早期警報をトリガーとして始まるが、人間を相手にした場合、事前の準備や訓練が欠かせない。検知した地震動の大きさによって、適切な避難行動や防災行動が選択できる地震時の行動マニュアルのようなものを作成して、リアルタイム地震防災を各自で実践することをお薦めする。この際、地震動の大きさを適切に感じ取る震動感覚が必要になるが、文明国では適切な時間感覚が必要なように、地震国に住むものが必要な感覚として鍛えてみるのも一興ではないだろうか。

以上(2004/11/12了)