



新幹線地震対策技術の進化を振り返る

島 村 誠

新幹線は1964年の東海道新幹線開業以来半世紀にわたって日本の大動脈として走り続け、今なお列車事故による乗客の死傷者ゼロという世界に類を見ない記録を更新しつつある。自然災害が多発する国土の厳しい環境条件を考えれば、このことは驚異的とも感じられる。しかしそれは当初からの万全の対策によって達成されたのではなく、幾多の幸運に恵まれ、またその幸運に甘えることなくゆめぬ努力を重ねることによって得られた結果であった。本稿ではこの半世紀における新幹線地震対策技術の歩みを振り返る。

キーワード：新幹線、地震対策、早期地震警報、耐震補強

1. はじめに

東海道新幹線は1959年に建設計画が策定され、1964年秋の開業を目指して極めて短期間での建設が行われたが、この時期には今日の地球科学の根本原理のひとつとされるプレートテクトニクスの理論は未だ一般に知られておらず、わが国の地震学ならびに地震工学の分野における本格的な強震観測も始まったばかりであった。もちろん当時としては最高水準の科学的知見と技術を駆使して建設されたが、その後多くの技術開発成果や観測された地震被害データにもとづいてあらたな対策技術が導入されて今日に至っている。新幹線の地震対策は、文字どおり「走りながら考えて」発達してきた技術である。

2. 構造物耐震設計技術の変遷

わが国の鉄道技術は地震の少ないヨーロッパから持ち込まれたものであり、当初は具体的な構造物の耐震設計法が定められていなかった。1923年の関東大震災が契機となって、1930年鉄道省制定の『橋梁設計標準』や、1931年の土木学会の鉄筋コンクリート標準示方書で震度法がルール化されるようになった。震度法とは、設計水平震度（0.15～0.3程度）に構造物の質量を乗じた水平荷重を構造物に与えたときに構造物の各部材に生じる応力がその破壊強度を超えないように部材の断面を決定する設計法である。この設計水平震度は関東大震災を引き起こした大正関東地震における地動の最大加速度が根拠になっているといわれて

いるが、当時きわめて限られた地点以外に実際の計測記録はなく、被害状況からの推測にもとづいて決められたものであった。

わが国における1970年以前の構造物の耐震設計は水平方向の設計震度に対する構造物の弾性強度のみを保証するものであり、さらに大きな地震力が作用した場合に損傷が進展し崩壊にいたる機序を設計段階で考慮していなかった。ところが、1968年の十勝沖地震や1971年の米国カリフォルニア州のサンフェルナンド地震において、鉄筋コンクリートの柱がもろく破断する「^{せん}剪断破壊」によって構造物全体が大きく崩壊する現象が数多く見られた。1970年代前半にはこの原因調査が数多く行われ、その結果から構造物の強度を上回る地震力に対しても崩壊という大破壊を防ぐためには「^{せん}剪断破壊」を絶対避け、構造物に「粘り」をもたせなければならぬとの結論になった。こうしたことから、1980年代以降の基準では、鉄筋コンクリートの柱の^{おび}帯鉄筋をより多く配置するなど、構造部材および構造系全体としての「ねばり」を増すため、多くの工夫が盛り込まれた。

1995年の兵庫県南部地震では高速道路や新幹線、建物などに大きな被害を生じたが、この第一の原因が作用した地震力が設計で想定したものを大きく上回ったことにあるのは明白であった（写真1）。

そのため、発生確率は極めて低いが一度発生すれば巨大な外力として作用するという特徴を有する地震に対して、設計でどのような地震を想定し構造物にどのような耐震性能を保有させるかが、新たな課題として浮かび上がった。その結果、



写真—1 兵庫県南部地震による山陽新幹線高架橋の被害例

(1) 従来の設計基準類で標準的に想定されていた地震動に対応し、すべての構造物に対して損傷を受けない耐震性能を保有することを要請する「レベル1地震動」と

(2) 発生する確率は極めて低いが非常に強い地震動であって構造物に期待される使命に応じてある程度の損傷が発生し残留変位が生じても地震後比較的早期に修復可能あるいは最悪な場合でも構造物全体系の崩壊が生じないような耐震性能を保有することを要請する「レベル2地震動」の2段階の地震動に対する耐震設計基準が成立した。また、兵庫県南部地震で大きく崩壊した高速道路や新幹線、建物などを調査したところ、それらのほとんどは1970年以前に建設されており、その主な原因がやはり鉄筋コンクリートの「剪断破壊」であったことで1970年以降の耐震設計の妥当性が立証される結果ともなった。

上に述べたことから明らかなように、鉄道に限らず土木構造物の耐震設計法は理論的研究の結果を反映した変更とは別に地震被害が生じるたびに様々な修正が加えられてきた。つまり構造物が地震によってどのように壊れるかについての詳細な情報は現に供用中の個々の構造物に実際の被害が生じることで初めて明らかになるので、その原因究明の成果を敷衍することの繰り返しによって耐震設計法は進歩してきたのである。

3. 初期の地震動観測と運転規制

走行する列車に対する地震対策として、地震計で一定値以上の地震動を検知した場合に列車を自動的にかつ速やかに停止させるシステムはアイデアとしては早くからあったが、東海道新幹線建設時点において具体的な計画が策定されていなかった。そこへ開業を目前

にした1964年6月16日にマグニチュード7.5の新潟地震が発生し、これを受けて大慌てで地震時に新幹線列車を自動的に停止させるシステム「対震列車防護装置」の導入が決定された。

開業時点においては、地震動の検知と連動して変電所から列車へのき電を停止する機能を有する制御用地震計の設置が間に合わなかったため、暫定的な措置として沿線の保線担当事務所に換算震度階を表示することができる簡易地震計を設置し、震度3以上と思われる地震を検知した場合に駅長ならびに現場機関の長から中央指令への地震感知通告を行い、これを受けて電力指令が全区間の送電を止めることにより列車を停止させる方式であった。列車停止を行ったあとは震度3では70 km/hの添乗巡回（駅間に停止した列車は30 km/hで駅へ収容）、震度4以上の場合は地上巡回を行い安全を確認した後に運転を再開する方式とした。

地震が起こった場合に自動的に列車を停止させる方法としてATC（自動列車制御）を使用する方法と電源を切る方法の二つが検討されたが、最終的には全線25箇所の変電所に設置された制御用感震器により電源を切る方法が採用された。感震器に関しては機械式と電磁式の2種類が試作されたが、最終的には機械式が採用され、地震動の初めの段階でできるだけ早く警報を出すこと、不必要な警報は極力少なくすること、制御用感震器の精度などを勘案して、電源を切る基準となる地震動のしきい値を水平加速度40 galに設定した。この初代対震列車防護装置は東海道新幹線開業からおおよそ1年後の1965年11月から使用開始され、この段階で列車停止の自動化が実現した。

対震列車防護装置は山陽新幹線にも東海道新幹線とほぼ同じものが導入されたが、東北新幹線については対震列車防護システムを考える上での前提条件の違いを考慮した新しいシステムが導入された。このシステムの最大の特徴は沿線に設置された地震計で制御する沿線検知システムと海岸線に設置された地震計で制御する海岸検知システムの二重系で構成されている点である。沿線検知システムは東海道新幹線と同じものであるが、海岸検知システムは東北地方の地震が東海地方よりずっと多く、しかもその震源地は内陸部より沖合のほうが多いため、東北新幹線が内陸部を走るという条件を生かして、太平洋に発生する沖合地震に対して海岸線に配置した地震計でより早く地震波をとらえ列車を制御することをねらったものである。

また海岸検知点の選定にあたっては、太平洋の沖合に発生した被害地震は地震グループごとに相似性、反復性をもっていることを考慮してそのグループ分けさ

れた地震群に対して最も近くその感知点が適当な間隔であるように八戸から三浦半島間で8個所を選んだ。それぞれの感知点は数個所の沿線の変電所などを受け持ち規制することとし、信号は有線で変電所に伝送される。

4. 早期地震警報システム

ここまで述べてきた対震列車防護システムはいずれも地震の主要動（S波）を検知してその大きさにより列車を停止させる方式であったが、その後1970年代からにわかに発生が懸念されるようになった東海地震への対策および列車の高速化への対応として、地震の初期微動（P波）を検知して大きな揺れが到達する前の早い段階で列車を停止させることによって被害を最小限に抑えることを目的とした「早期地震警報システム」の開発が進められるようになった。その結果1992年3月に300系「のぞみ」がそれまでより50 km/h 高い最高速度270 km/hで営業運転開始するのにあわせて第1世代の早期地震警報システムであるユレダス（UrEDAS: Urgent Earthquake Detection and Alarm System）が世界初の実用的な早期地震警報システムとして東海道新幹線に導入された。

初期微動を検知するだけなら単にセンサーの感度の問題であり、今日の技術をもってすれば特に難しくないが、そのたびにスピードと正確な運行が売り物の新幹線を止めて輸送を大混乱に陥れることは許されない。ユレダスが画期的なのは、初期微動到着後の数秒間の波形情報だけでもとづいて地震のマグニチュードと震源位置を即座に推定し、これにもとづいて線路の各地点における地震の影響の大きさを予測して、地震影響が大きく列車を停止させる必要があると判定された範囲のみに対して警報を発するという、一連の処理

を瞬時に行う機能を有し、かつこれらの処理にともなう推定誤りに起因する誤警報の発生頻度を新幹線の高い定時運行の要求に対して許容されるレベルにとどめることに成功した点である。ユレダスとその後継システムは、その後順次東海道新幹線以外の新幹線各線にも導入されるとともに、その地震諸元推定アルゴリズムが2006年より気象庁から配信されるようになった緊急地震速報にも応用されている（図—1）。

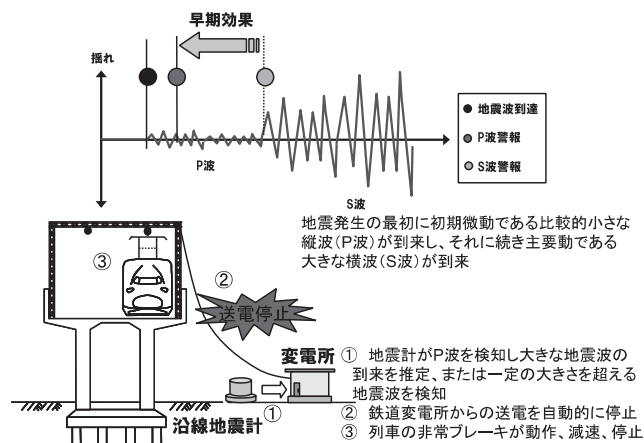
5. 既設構造物の耐震補強

前述のように、東海道新幹線の開業後に東海地震の発生が懸念されるようになったため、これへの対策として1979年から1992年にかけて様々な耐震補強対策が実施された。とくに東海道新幹線の線路全延長に大きな割合を占める盛土式の線路は、その優位性が高架橋に比べて建設費が安価なことにあったが、基本的に土を締固めて積み上げただけの古くから用いられてきた構造形式を踏襲したものであり、壊れやすいが壊れても復旧は容易であるという理由で建設時点では特別な耐震上の配慮がされていなかった。そこで対策必要箇所を絞り込んだ上で鋼製シートパイルを盛土の両サイドに直下の軟弱地盤を貫通して基盤層まで打設し、その頭部をPC鋼棒で線路を横断して両側のシートパイル同士を緊結する「シートパイル締切り工法」を施工して盛土区間の強化を図った。

2009年8月に発生した駿河湾を震源とするマグニチュード6.5、最大震度6弱の地震により東名高速道路の盛土のり面が40 mにわたって崩壊したが、対策済みの東海道新幹線の盛土には目立った被害はなく、この対策工法が盛土本体の形状維持に十分効果があることが実証された。

すでに述べたように1995年の兵庫県南部地震は山陽新幹線の高架橋が柱の剪断破壊によって崩壊するという重大事態を招いたが、たまたま新幹線の営業開始時刻である午前6時より前に発生したため悲劇を免れた。構造物耐震設計技術の変遷の項で触れたように、古い基準で設計されたコンクリート高架橋に剪断破壊の危険があることは、専門家の間ではこの地震の以前から既知であったが、一般には緊急性の高い課題であるとは認識されず、事前に具体的な対策がとられることはなかった。その潜在リスクが、阪神大震災によってあまりにも明白かつ衝撃的な形で顕在化したことで、既設構造物の耐震補強は喫緊の課題として取り上げられるところとなり急速に対策が進んだ。

鉄筋コンクリート高架橋柱に対する耐震補強対策は



図—1 早期地震警報システムのしくみ



写真一2 鋼板巻き立て補強工法（重機を用いた施工）

鋼板巻き工（写真一2）が標準工法であるが、駅部付近など高架下空間が店舗や事務所、倉庫等に活用されていて鋼板巻き工を採用することが難しい場合等に対処するため、近年では様々な構造や材料による新工法が開発されている。

6. 脱線対策および逸脱防止

2004年（平成16年）10月23日17時56分頃、新潟県中越地震が発生し、震央に近い浦佐・長岡駅間の滝谷トンネル北側坑口付近を走行中だった上越新幹線東京発新潟行き「とき325号」の7、6号車を除く計8両が脱線した（写真一3）。地震発生当時、同列車は長岡駅への停車のため、約200 km/hに減速して走行中であつたが、早期地震検知警報システムによる非常ブレーキが作動し、脱線地点から約1.6 kmの地点で停車した。この事故は、1964年10月1日の東海道新幹線開業以来、新幹線の営業列車では初の脱線事故となったため各種メディアにより「安全神話の崩壊」などと報道がなされ、社会に大きな衝撃を与えたが、



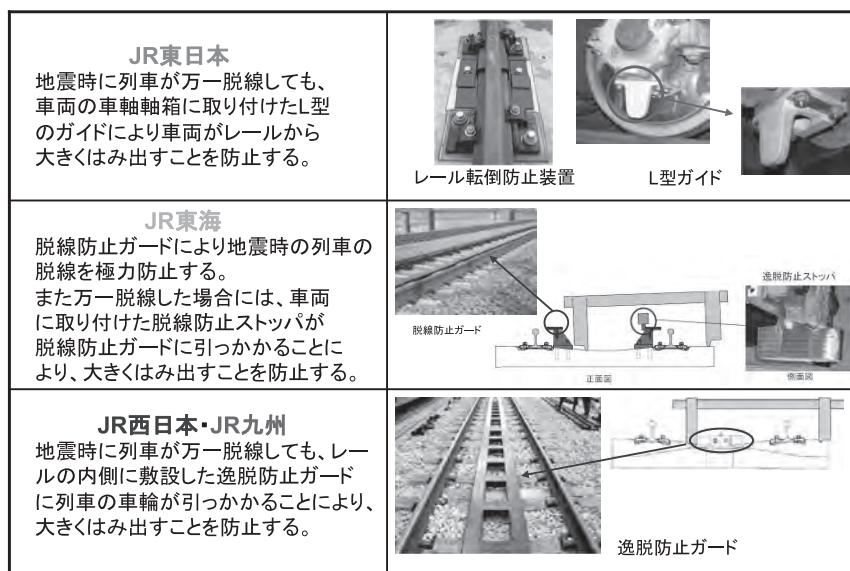
写真一3 新潟県中越地震による上越新幹線列車の脱線

過去の地震対策の積み重ねが奏功したことに数々の幸運が重なり、乗客乗員155人に対し、死者・負傷者は1人も出なかった。

その最も大きい要因として、まず脱線現場付近の高架橋において阪神・淡路大震災をふまえた鋼板巻き工法による耐震補強工事が完了していたため、地震による崩壊を免れたことが挙げられる。鋼板巻き工法による高架橋の耐震補強は、莫大な経費と長い工期が必要であるため、全体的な優先順位を把握しながら計画的に施工される必要があるが、当該箇所の高架橋は、国が示した一般的な基準に加えて、近傍における活断層の有無などの条件を考慮したJR東日本独自の基準にもとづいて優先的に耐震補強が行われていた。

当該列車は、8両が脱線したものの、最後尾車両を除いて軌道を大きく逸脱せず、横転や転覆、高架橋からの転落を免れることによって「ソフトランディング」の状態での停車することができた。この理由として先頭車（10号車）の排障器座金という部品やギアケースと脱線した車輪の側面がレール左右からを挟み込んだ形で脱線したことにより、脱線後も列車前方のレールがガイドの役割を果たして軌道を大きく逸脱せず停止することに貢献したこと、脱線地点がトンネルや高架橋の支柱などに被害が生じた区間ではなくほぼ直線であったこと、対向列車がなく二次事故が起きなかったこと、さらに先頭車以降の車両は脱線した車輪がレールの締結装置を破壊したため走行ガイドを失ったが、最後尾車両が上下線の間にある豪雪地帯特有の排雪溝にはまり込んだまま滑走したおかげで列車編成全体に大きな引張力が働いた状態で停止に至ったため、車両間の連結部がくの字に折れ曲がる「ジャックナイフ現象」を免れたことなどが挙げられる。東海道新幹線のようなマクラギ・バラスト構造の軌道であればこの事故の機序は相当違ったものになっていたであろうということは容易に想像できる。

レールに乗っているだけの構造の鉄道車両にきわめて大きな地震動が作用すれば脱線の可能性があることは明白である。しかし、高架橋の剪断破壊の場合と同様、実際に脱線事故が起きてみるまで一般にそれが対策すべき課題として認識されることはなかった。兵庫県南部地震以降、土木構造物の耐震補強が急ピッチで進められたが、2004年新潟県中越地震での新幹線の脱線を受けて巨大地震発生時には鉄道システム全体として減災に努めることの重要性が再認識され、地震時の脱線対策と巨大地震により万が一脱線した場合の逸脱対策が検討された。国土交通省の新幹線脱線対策協議会はその中間とりまとめで、構造物耐震対策、脱線



図一 2 JR 各社の車両脱線対策

対策（地震検知・警報装置の増設及び更新）、逸脱対策を提言した。

さらに具体策として脱線防止ガード、逸脱防止地上ガード及び車両ガード、レール締結装置等の損傷防止策、非常ブレーキの停止距離短縮化、早期地震検知システムの充実が検討され、すでに施工が進んでいる。

JR 各社がそれぞれの設備や輸送状況に合わせて導入を進めている地震時脱線・逸脱対策工の主な例を図一 2 に示す。例えば、JR 東日本が新幹線の全車両に取り付けた L 型車両ガイドは、新潟県中越地震の際に列車が脱線したものの車両部品と車輪がレールを挟み込んでスラブ軌道上からの逸脱防止機能を果たし大きな被害を免れたという現場調査の結果を踏まえて実施された対策である。

7. おわりに

新幹線の地震に対する安全性向上に向けたこれまでの取り組みについて述べた。各種の耐震、脱線・逸脱防止対策技術の開発・導入が順次進められているが、これらとて、もとより完璧なものではなく、システム全体としての安全性をより高い水準に引き上げていくことが求められる。そのためには今後さらに地震被害リスクの的確な目標設定および評価技術にもとづいて弱点箇所を抽出し効率的に対策を実施していくことが重要である。

新幹線に限らず、鉄道は今日一般に最も安全な交通機関のひとつだと考えられているが、歴史を振り返ると、大規模な事故がまれに発生しており、類似の事故を再び発生させないように対策を講じることにより安

全性を維持向上させてきた。地震だけについても、阪神淡路大震災や新潟県中越地震、さらに 2016 年熊本地震前震での新幹線の脱線を経験してつくづく思うのは、起こる可能性のあることはいつかは必ず起こるということであり、かつ、それらに対して事前に対策を打つことの難しさである。つまり、これまでの鉄道防災技術の進歩は、あらかじめ立てた計画に沿ったものというより、想定外の外的事象に対する応答としてのケースバイケースの意思決定の累積によって達成されてきたという側面が強い。そのような意味を込めて、本稿の表題に『進化』という言葉を用いた。今後、温暖化の進行に伴う苛烈気象の頻発や首都圏直下地震が想定される中で求められているのは、これまでのリアクティブ（後追い）な鉄道防災技術を少しでもプロアクティブ（先取り）なものに変えていく取り組みだと考えている。

J C M A

《参考文献》

- 1) 高井秀之（2011）：新幹線の地震対策 研究開発の経緯と今後の課題，JR gazette, 2011.9
- 2) 山本俊六，佐藤新二（2010）：鉄道における早期地震警報システムの変遷，RRR 2010.3
- 3) 曾根悟（2006）：地震と新幹線の安全性，予防時報 224
- 4) 島村誠（2010）：鉄道防災技術の進化と課題，予防時報 241

〔筆者紹介〕

島村 誠（しまむら まこと）
鉄建建設(株)
顧問

