



鉄道における地震との闘い ～いくつもの大地震を経験して～

鉄道地震工学研究センター長 小島謙一

はじめに

神奈川県西部を震源としたマグニチュード7.9の大地震（大正関東地震（1923年））による関東大震災から今年で100年の節目を迎えました。図1に示しますように関東大震災は首都圏および関東近郊の鉄道に大きな被害¹⁾を与え、鉄道のみならず日本における防災対策の契機となりました。現在では頻繁に耳にする「耐震設計」もこの震災以降、本格的に導入され、その後発生した多くの地震をもとに現行の考え方が作られています。

表1に大正関東地震（関東大震災）以降の主な地震を示します。日本全国でマグニチュード7クラスの大きな地震が多数発生していることがわかります。また、地震活動期といわれる近年においても頻繁に地震が起っています。これらの地震により鉄道では構造物や電柱の損傷、列車の脱線など、さまざまな被害を受けています。図2には東北地方太平洋沖地震における三陸鉄道の被災状況を示します。地震動のみならず巨大な津波の影響により、壊滅的な被害が生じています。ここでは、これまでに受けた地震

被害をふまえた鉄道における取り組みについて、過去を振り返りながら紹介します。

地震に強い鉄道構造物へ

関東大震災は鉄道のみならず、関東一円に大きな被害をもたらしました。この地震により構造物における耐震性が重要視され、耐震設計法の確立など地震防災の発展へとつながりました。このときの設計法は「震度法」とよばれ、構造物の自重の2割程度の大きさの荷重を水平方向に作用させて構造物の耐震性を評価するものであり、鉄道においても1930年に制定された「橋

図1 関東大震災における鉄道の被災状況（文献1から引用）

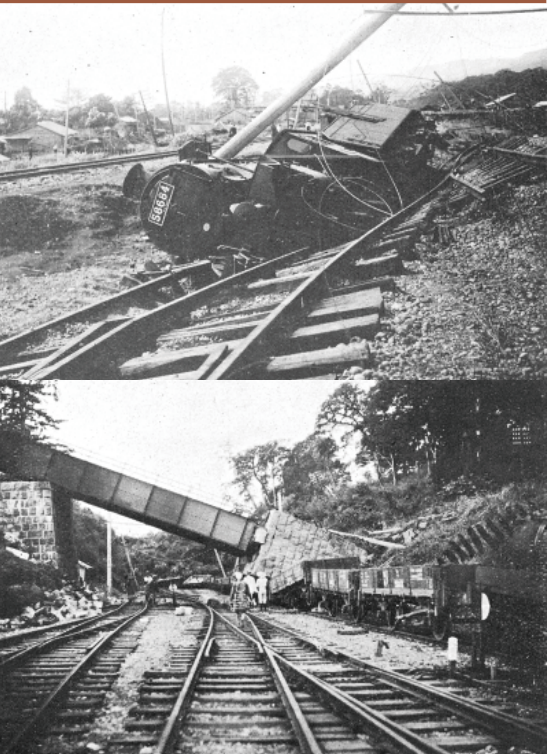


表1 関東大震災（大正関東地震）以降に発生した主な地震

年 (西暦)	地震	地震の 大きさ
1923	大正関東地震 (関東大震災)	M7.9
1944	東南海地震	M8.0
1945	三河地震	M6.8
1946	南海地震	M8.0
1948	福井地震	M7.1
1964	新潟地震	M7.5
1965	十勝沖地震	M7.8
1978	宮城県沖地震	M7.4
1983	日本海中部地震	M7.7
1993	釧路沖地震	M7.8
1994	三陸はるか沖地震	M7.5
1995	兵庫県南部地震	M7.3
2000	鳥取県西部地震	M7.3
2003	十勝沖地震	M7.5
2004	新潟県中越地震	M7.5
2011	東北地方太平洋沖地震	M9.0
2016	熊本地震	M7.3
2018	大阪府北部の地震	M6.1
2021	福島県沖の地震	M7.3
2022	福島県沖の地震	M7.4

(M: マグニチュード)



図2 三陸鉄道における被害状況



図3 兵庫県南部地震による鉄道の被害状況（文献2から引用）



りょう標準設計」において、はじめて耐震設計が導入されました。

現行の耐震設計のもととなったのが兵庫県南部地震（1995年）です。被害の一例を図3に示しますが、以前から設計で考えていた地震よりもはるかに大きな地震動により、新幹線をはじめ多くの構造物が被災²⁾しました。これらの被害をふまえて、1999年に「鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計」³⁾（以降、耐震標準）が制定され、これまでの設計地震動よりもはるかに大きな地震動（レベル2地震動）も考慮する2段階設計法や震度法に代わり非線形応答スペクトル法という方法を導入しました。その後、東北地方太平洋沖地震など2000年代に発生した地震を考慮した改訂版が2012年に発刊され、新設構造物の設計のほか、図4に示すような既設構造物の耐震補強にも活用されています。

運行時の安全性向上へ

地震被害の少ない鉄道構造物への取り組みと合わせて、地震時に乗客の安全を確保すること

も地震対策としてはきわめて大切な事項です。そのため、できるだけ早く、正確に地震を検知し警報を出力し、速やかに列車を停止減速させるシステムを開発・運用しています。

このシステムは東海道新幹線において、開業して間もない1965年から導入されています。図5に本システムに用いた地震検知装置を示します。その後、1982年には沿岸部で発生した地震をできるだけ早く検知するために、海岸線での揺れを計測し警報に用いる海岸線検知システムが実用化されました。

しかし、このシステムは主要動とよばれる大きな揺れが来る前に警報を出力することはできませんでした。列車の安全性を高めるには、少しでも早く警報を出力することが重要となります。そこで主要動が来る前に地震の大きさを予測し、被害が発生する可能性のある揺れと判断されれば警報を出力するシステムを構築しました。これが1992年から実用化されたP波検知による早期地震警報システム⁴⁾です。地震は最初に到達する微弱な揺れであるP波とその後の



図4 鉄道構造物の耐震補強例



図5 鉄道で用いられた最初の地震検知装置（制御用感震器）

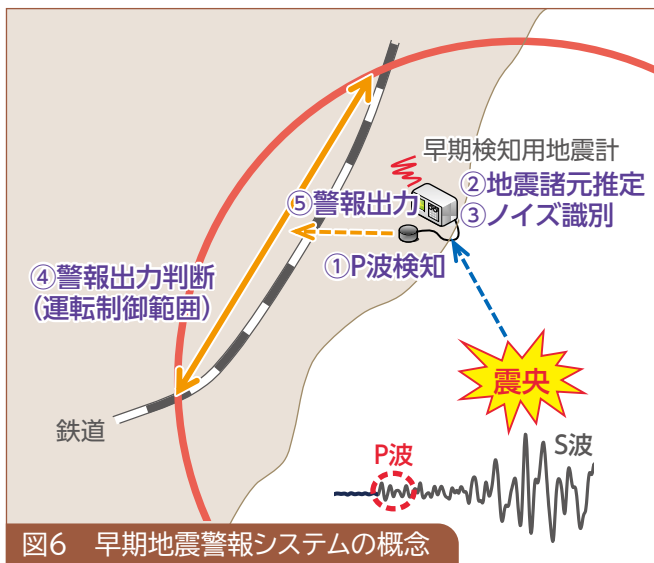


図6 早期地震警報システムの概念

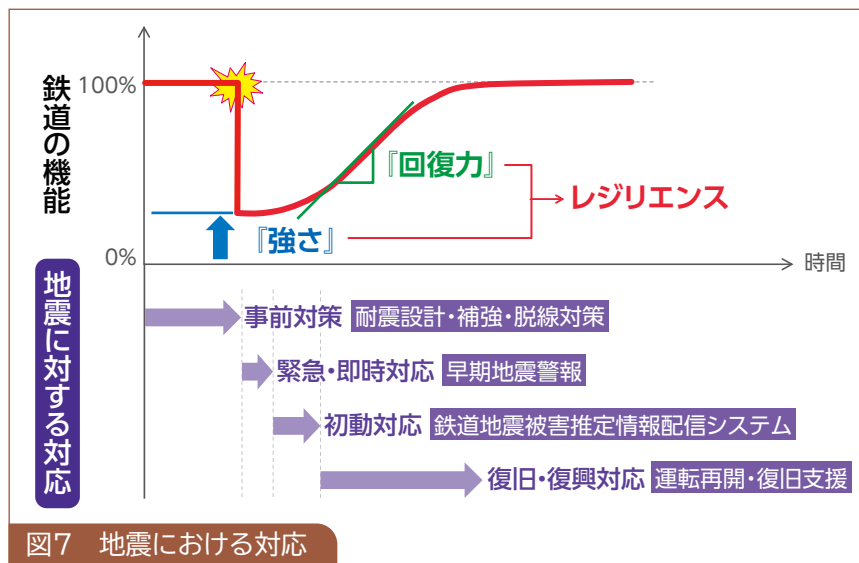


図7 地震における対応

大きな揺れのS波に分けられます。図6に概念図を示しますが、このシステムは大きな揺れであるS波が到達する前のP波から地震の全貌(地震諸元^⑤)を推定し、警報の発報を判断するものです。P波が検知されてから最短1秒で判断することができるため、大きな揺れが到達する前に警報を出し列車を停止減速させることが可能となります。

より安全な鉄道をめざして～持続的な対応～

関東大震災以降、経験した多くの地震から、地震に対する鉄道の安全性の向上を図っています。ただ、地震は「いつ」、「どこで」、「どのような大きさで」発生するかはわかりません。したがって、これからもさまざまな状況を想定して地震対策を進めていくことが大切になります。図7は現在、取り組んでいる地震への対応の考え方を模式的に示したものの⁵⁾です。図7(上図)に示すように地震により失われる機能をできるだけ少なくし(強さ)、失われた機能をできるだけ早く戻すこと(機能)が大切です。このような試みを地震レジリエンス^⑥の強化とよんでいます。そのためには図7(下図)のように、地震発生前から地震後に列車が運行再開するまでの持続的

な対応を進めていくことが必要となります。

通常の社会生活を維持するためのインフラとしての役割を考えると、地震に強い構造物とする、地震時に早く列車を止めるという対応以外に、できるだけ早期に列車の運行を再開させることが重要になっています。そのためには早い段階で、地震後における鉄道の被災状況を把握することが必要です。兵庫県南部地震以降、公的機関を中心に急速に地震観測網が整備されており、日本全国広い範囲で地震が起こった際の揺れがわかるようになっています。これらの観測網のうち緊急地震速報⁶⁾やK-NET^⑦を使い、即座に鉄道路線沿いの「揺れ」を評価するシステムを開発(鉄道地震被害推定情報配信システム⁸⁾)しています。本システムの出力イメージを図8に示します。K-NETなどの観測情報から観測地点以外の場所の揺れの予測を行い、路線全体の揺れの情報を提供しています。この結果を用いて点検箇所の優先順位を決定するなど、効率的な地震後の点検を行うことが可能となり、早期運行再開につながります。

また、耐震設計や早期地震警報システムも次の一歩としての研究を進めています。耐震設計においては、きわめて大きな地震であった東北

⑤ **地震諸元** 地震の発生日時、規模(マグニチュード)および震源の位置(緯度、経度、深さ)などの総称。本システムでは地震の規模(マグニチュード)、震央方位、震央距離を用いています。

⑥ **地震レジリエンス** 地震に対して強く、しなやかに回復する力であり、地震に対する対応力を意味します。

⑦ **K-NET** 国立研究開発法人防災科学技術研究所が日本全国約1,000箇所(20km間隔)に設置した地震計による地震観測網です。

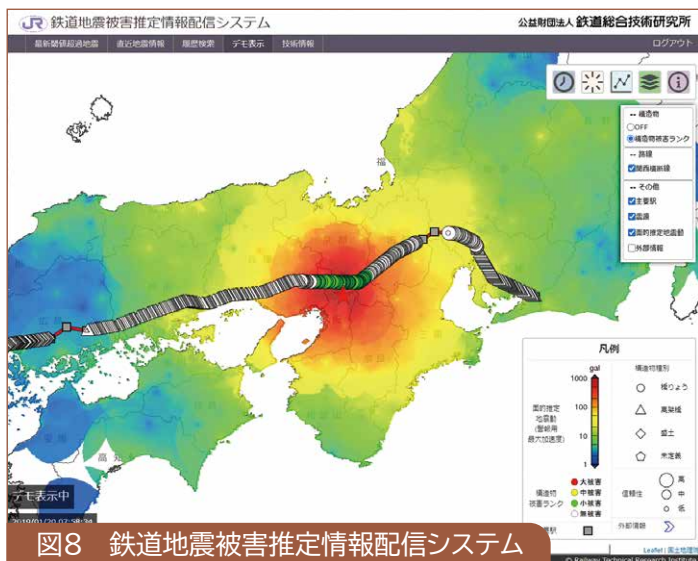


図8 鉄道地震被害推定情報配信システム

地方太平洋沖地震をふまえ「危機耐性」という概念を導入しています。これは、今後想定を超えるような地震の発生が必ずしも排除できない状況で、公共性の高い鉄道が壊滅的な状況に至らないような配慮を行うというものです。図9に危機耐性としての対応例を示します。図にありますように、高架橋に桁を支えるための柱（図中、青い柱）のほか、普段は何も支えていない予備の柱（図中、赤い柱）を構築しておきます。想定を超えるような巨大地震を受け、桁を支える柱がたとえ損傷したとしても、桁は予備の柱に載り落下を防ぐ⁹⁾というものです。これにより、桁の損傷や桁下にある構造物の崩壊を防ぐことができ、被害の最小化や早期復旧に役立ちます。このようにいざというときに、破滅的な被害を避け、早く復旧させるための対応が危機耐性です。

早期地震警報システムでは、より早い警報出力をめざして開発を進めています。図10に示します気象庁や防災科学技術研究所が整備を行っている海底地震計¹⁰⁾の活用です。これまでに、より早く地震を検知するため海岸線での地震計を用いるなどの改良を行っていますが、これは海底に直接設置された地震計をシステムに活用するものです。海底で発生した地震に関しては当然ながら陸の地震計よりも早く検知できるため、より早く警報を出すことが可能となります。

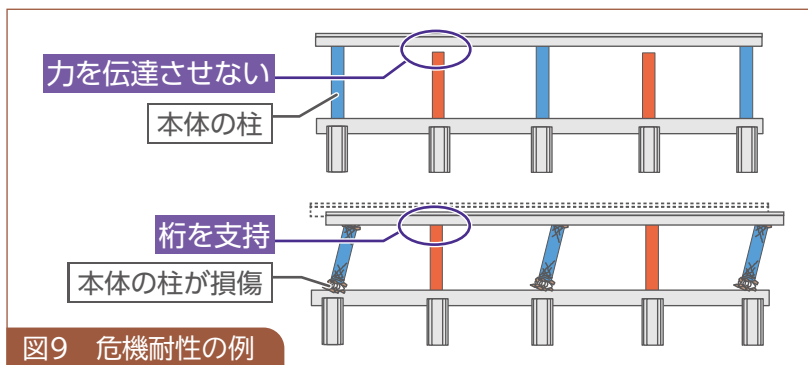


図9 危機耐性の例



図10 海底地震計（提供：防災科学技術研究所）

おわりに

地震に対してより安全・安心な鉄道をめざし、地震レジリエンスを向上させるための研究開発を進めています。今後も、これまでに受けた被害を教訓として生かし、地震防災技術の発展に向けた取り組みを行っていきたいと考えています。

文献

- 1) 鉄道省：大正十二年鉄道震害調査書，鉄道省大臣官房研究所，1927
- 2) 鉄道総合技術研究所：兵庫県南部地震鉄道被害調査報告書，鉄道総研報告，特別第4号，1996
- 3) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善，1999
- 4) 岩田直泰，山本俊六，是永将宏，野田俊太：早期地震防災システムで迅速かつ確実に列車を止める，RRR，Vol.73，No.3，pp.12-15，2016
- 5) 室野剛隆：鉄道地震工学研究センターの取り組みと地震関連研究の動向，RRR，Vol.73，No.3，pp.4-7，2016
- 6) Hoshihara M., Kamigaichi O., Saito M., Tsukada S., and Hamada N.: Earthquake early warning starts nationwide in Japan, Eos Trans. AGU, Vol.89, pp.73-74, 2008
- 7) Okada Y., Kasahara K., Hori S., Obara K., Sekiguchi S., Fujiwara H. and Yamamoto A.: Recent progress of seismic observation networks in Japan -Hi-net, F-net, K-NET and KiK-net- Earth Planets Space, Vol.56, pp.15-28, 2004
- 8) 岩田直泰，坂井公俊，山本俊六，室野剛隆，青井真：鉄道地震被害推定情報配信システム (DISER) を利用して素早く運転を再開する，RRR，Vol.77，No.2，pp.12-15，2020
- 9) 豊岡亮洋，室野剛隆：鉄道高架橋の危機耐性を高める自重補償構造と倒壊方向制御構造，コンクリート工学，第58巻，9月号，pp.749-754，2020
- 10) 金沢敏彦：日本海溝海底地震津波観測網 (S-net)，日本地震学会誌，No.28，pp.24-27，2016