

# 巨大地震にどう備えるか



芦谷 公稔  
Kimitoshi Ashiya  
鉄道総合技術研究所  
専務理事

古村 孝志  
Takashi Furumura  
東京大学  
地震研究所  
教授

広田 すみれ  
Sumire Hirota  
東京都市大学  
メディア情報学部  
教授

司会：室野剛隆 鉄道総合技術研究所 研究開発推進部長

芦谷 今年は1923年の関東大震災からちょうど100年目に当たります。鉄道総研の鉄道地震工学研究センターでは、毎年アニュアルミーティングを12月に開催しており、今年も関東大震災100年にちなんで催しを計画していますが、防災の日を迎えるに当たり、防災意識を再認識するという観点で別途企画を検討し、広報誌RRR9・10月号での座談会を開催させていただきました。今後の巨大地震にどう対応していくか、設計地震動を超えるような地震への対応や、鉄道を利用する方に鉄道の耐震性をどう理解していただくかなど、地震学の第一人者である古村先生と、地震の確率予測の認知やリスクコミュニケーションに関して心理学の観点から精力的な研究が行われている広田先生とともに議論させていただきたいと思います。

## 関東大地震について

室野 それではまず1923年に発生した大正関東地震の特徴や鉄道の被害の状況について簡単に振り返りたいと思います。古村先生にお聞きしたいと思います。関東地震とはどのような特徴をもった地震だったのでしょうか？

古村 関東地方は地震が多いことはよくご存じかと思いますが、フィリピン海プレートが陸側のプレートの下に沈み込み、さらにその下に太平洋プレートが沈み込んでいる、世界的にも珍しい構造のためです。フィリピン海プレートと陸側のプレートの境界で、200～400年の周期で発生するM(マグニチュード)8クラスの巨大地震を関東地震とよびます。前回の大正関東地震は100年前の1923年に発生していますので、周期性を考えるとまだしばらく起きないので

は？と思うかもしれません。ですが、鉄道のような社会資本は100年以上維持する必要がありますし、街の防災力を強化するうえで、100年はあつという間です。しばらく起きないから大丈夫、ということにはなりません。

**室野** 当時の地震波形は記録されていたのでしょうか？ また、どのような揺れだったのでしょうか？

**古村** 大正関東地震の揺れは、東京帝国大学の本郷や中央气象台の大手町の地震計で記録されていますが、激しい地震動であったために振り切れてしまっており、これを何とか復元する取り組みがされています。その結果、最大で10cm以上の揺れ幅で10分以上にわたって揺れが長く続いたことがわかりました。

M8クラスの巨大地震となると断層面の大きさが150km×100km程度ありますので、地震が発生してから断層のズレが1分間くらいかけて広がり続けます。関東平野は軟らかい地盤の上にあるので、揺れが強く増幅され、とじ込められて長く揺れ続けます。本震の1～2分後に大きな余震が続けて発生したことも、長い揺れとなった原因です。また、激しい揺れの中には巨大地震特有の“ゆらゆら”とした長周期の地震動成分が強く含まれていたことも地震計記録からわかりました。

**室野** 大正関東地震の揺れは、建物にとって相当厳しい揺れであったことがわかりました。それでは、実際の鉄道の被害はどのようなものだったのでしょうか？

**芦谷** 震源域であった小田原から三浦半島、房総の南部において、橋梁が落橋したり、基礎が傾いたりするなどの被害が報告されています。特に、根府川の上流で大規模な土砂崩壊が発生して土石流となり、根府川駅やその付近に停車していた車両を直撃し、112の方が死亡または行方不明になっています。それ以外に、石積み橋脚の亀裂や盛土・築堤の崩壊、トンネル坑口・内部の崩壊なども記録されています。大正関東地震というと、一般的には火災の被害が取り上げられますが、揺れによる構造物被害も多く発生しました。

**室野** 今では考えられないような被害が発生したようですが、当時の構造物は耐震設計はされていなかったのでしょうか？

**芦谷** 関東大震災前は、ヨーロッパの設計で作られたものがほとんどで、耐震設計はされていませんでした。

関東大震災前の1915年に佐野利器博士が震度法という手法を提案されています。建物の重さに水平震度をかけた慣性力に対して建物の安全性を確認するという単純な計算です。その後、関東大震災を経験し、1924年に「市街地建築物法」において世界で初めて法的な耐震設計、水平震度0.1が導入されました。

鉄道では1930年に鉄道省建設局制定の「橋梁標準設計(建工169号)」において、「自重および土圧に対し水平震度0.2を考慮すること」が示されました。

これが鉄道の耐震設計のスタートになります。

**室野** 現在、大正関東地震関連のイベントが多数行われていますが、その経験を継承していくことが防災意識の向上の観点から重要だと思います。このような取り組みの効果について、広田先生、お聞かせいただけますか？

**広田** 経験を語り継ぐことの効果については防災教育を中心に検討がなされています。基本は、被災者自身が他者に語ることによる経験のトラ





ンスレーションが重要, という考え方のようです。体験者が自身の経験を物語として伝えるのは、科学的には正確ではない面もあるかもしれませんが、相手に添った形になり有効だと思います。最近の研究ですが、特定可能な犠牲者効果という、統計的な情報(被害者数など)を伝えるより、名前のある1人の事例の方が効果が強い、という報告もあり、その点では災害体験を伝えることは強い効果をもつ可能性はあります。

一方で、社会心理学では、情報伝達により態度・行動を変えてもらう説得的コミュニケーション研究の文脈の中で、恐怖感を与え過ぎると、自我防衛の働きにより「私には関係のないことだ」と逆に対処しなくなるという説もあります。研究の決着はついていませんが、非常に強い危険を直視させることは難しく、対処方法が一緒に示されないと恐怖に直面できないということは真実ではないかと思っています。大正関東地震では火災が、兵庫県南部地震では建物の倒壊が、東日本大震災では津波が問題になったように、都市構造の変化などで地震がどんな被害を生むかも変わりますので、語り伝えることは重要ですが、やり方を考えないと防災の観点では逆効果になってしまうこともありうると思います。

### 耐震設計について

**室野** 少し話題を変えます。芦谷専務から大正関東地震後に震度法が導入されたという話があ

りましたが、今の設計法はどうなっているのでしょうか？

**芦谷** 1995年兵庫県南部地震では新幹線をはじめ多くの鉄道構造物が被害を受けました。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」(以降、耐震標準)が制定され、耐震設計法は大幅に変更になりました。これまでの設計地震動よりもさらに大きな地震動(レベル2地震動)を考慮するとともに、構造物の損傷過程にも踏み込んだ設計法となり、計算方法も震度法に比べてはるかに複雑になりました。さらに、2012年に改訂された耐震標準では、設計地震動に対して鉄道構造物が満たすべき性能を明確にして、それを照査する体系、これを性能設計法とよびますが、それが導入されました。例えば、大地震に対しては、建設地点で想定される“最大級”の地震動をL2地震動として設定し、その地震に対して、構造物が崩壊しないこと、これを安全性とよんで照査しています。

**室野** L2地震動の定義として、最大ではなくて最大級にした意図を教えてくださいませんか？

**芦谷** 将来にわたって発生する地震動を想定するとき、震源断層、破壊過程、伝搬経路など千差万別ですが、このような不確定性が大きい中でも、耐震設計では設計地震動を設定しなければなりません。耐震標準では、過去の地震記録を集めて設定していますが、それらの“最大”として定義してしまうと、少しでも設計地震動を超える地震動が観測された途端、設計地震動を変更する必要がありますが、合理的ではありません。そのため、非超過確率90%となる地震動を設定しており、10%程度は設計地震動を超えるような地震動が発生する可能性あることを許容しています。ただし、設計地震動を超えるような地震に対しても脆性的な壊れ方をしないように、粘り強い構造にするよう配慮をしています。

**室野** この点については、古村先生のお考えは

いかがでしょうか？

**古村** 想定地震の地震動の計算手法自体は確立されており、計算に必要な活断層や地下構造もよく調べられていますので、これらを用いて過去に起きた大地震の揺れをおおむね再現することができます。しかし、将来発生するおそれのある地震動を正確に予測できるかどうかは別問題です。地下の地震断層の位置や長さ、形状には不確定性がありますし、断層面のどこから壊れ始めるか、北側からか、南側からかなど、断層運動の詳細は地震が起きてみるまでわかりません。そこで、不確定性を考慮して、いろんなケースを考慮した地震動の計算が行われます。多数の予測結果の中から最大の地震動を設計地震動として採用することも考えられますが、それが起きる確率がきわめて低ければ、大小さまざまな予測結果に線引きをする、ある程度の合理的な考え方が必要でしょう。そうでないと物を作れなくなってしまいます。L2地震動を超えた途端に壊滅的な被害へと拡大しないように粘り強い構造物の設計を配慮しているのであれば、設計地震動に上限を設けることは合理的と言えるでしょう。どこで線引きするかは、最新の地震学や設計技術の知見そして経済性などの総合的な議論により合意形成することになると思います。

**室野** 合意形成という言葉が出ましたが、どれくらいの地震力を想定すればよいかという合意形成はうまくできるのでしょうか。広田先生、いかがですか？

**広田** 建築学会や原子力の分野で同様の議論がありました。両者とも最終的には経済性とのバランスで線引きを考えていました。

1979年にスロビック (Slovic) という意思決定の研究者がリスク認知の研究成果を発表して有名になったシンポジウムのサブタイトルが「How safe is safe enough?」でした。コストをかければいくらでも安全なものを作れると聞きますが、本当にそれで良いのかについては、技術



者側だけではなく多くの人に関与した社会的合意が必要です。そして合意形成をどう行っていくかという議論がリスクコミュニケーションにつながります。技術者側としては、科学的背景や合理性を考えて基準を考えているということ、一般の方に正しく伝える努力が必要だと思います。

**室野** 現在の耐震設計では、性能設計法を導入しているということでしたが、地震時に要求される性能として、技術者の考える性能と利用者の考える性能にはギャップがあるという研究もあります。こういうギャップが生まれる背景や、ギャップをうめるために我々がすべき努力について、広田先生のお考えをお聞かせいただけますか？

**広田** 建築学会の構造安全に関する委員会に一時期参加していました。そこでの性能設計の議論で一番の問題だったのは、一般の人は「建築基準法」の安全基準に誤解があって、基準を満たしていれば「自分の生命や身体の安全」に影響はない、と考えているということでした。しかし、実際には建築基準法は構造物が倒壊しないという最低基準に過ぎず、建物内で家具などにより怪我や死亡が起こりうることや、多少コストをかければ安全性は上がる、という点を理解してもらうことが必要、とのことでした。鉄道においては、脱線しなかったとしても、大地震時にどんなことが起きうるかは乗客も知っておきたいだろうと思います。安全基準といわれると、つい一般の人は絶対に安全だと思ってしまいがちです。技術者がどんな想定をしていて、どこ



までをカバーしているかが伝わっていることは利用者にとってもプラスだと思います。

### 想定外地震に対する対応

**室野** 最後に近年さまざまところで話題になっております「想定外」についての議論をしたいと思います。鉄道の耐震設計では「危機耐性」という考え方を取り入れています。芦谷専務からご紹介いただけますか？

**芦谷** 耐震標準では、設定された設計地震動に対して目標性能を確保するように規定されていますが、設計地震動を超えるような地震動があるということも認めています。そのため、設計地震動を超えた場合にも備えておく枠組みが必要ということで、危機耐性という概念が2012年に改定された耐震標準では取り入れられました。危機耐性の定義は、「想定以上の地震に対しても構造物またはシステムとして、破滅的な状況に陥らないように配慮すること」とされています。

まだ、危機耐性を直接的に照査する体系にはなっておらず、万が一、想定外の地震が発生した場合に、鉄道として避けたい事態（シナリオ）を特定し、それを避けるよう配慮を求めています。例えば、一番避けたい事態として「落橋し多くの人命が失われる」が考えられるので、これを回避するために支え棒的な役割をする自重補償機構を提案しています。

今、少しずつ勉強しているところで、今後の耐震設計に組み込んでいきたいと思っています。

**室野** 想定外を考えるのではなく、地震動の上限を適切に設定すればよいという議論もありますが、古村先生、実際に地震動の上限は設定できるのでしょうか？

**古村** マグニチュードが大きくなると強い地震動に見舞われる範囲は拡大しますが、揺れの強さ自体はM8を超えると徐々に頭打ちします。一方、揺れの継続時間が長くなり、長周期の地震動成分も加わってきます。全国の地震計記録を調べると、東北地方太平洋沖地震（M9）の地震動はM8クラスの地震の何倍も長く続いたが、揺れの強さは過去のM8クラスの地震のものと大きく変わりませんでした。少なくとも地震動の最大限はマグニチュードの大きさでは決まらないことに注意が必要です。

では、最大級の地震動をどう考えるか？ 私は、鉄道にとっての最悪シナリオを想定し、それを起こす強い揺れの性質とその発生原因を探ることが必要だと思います。たとえば、橋梁が、鉄道車両の振動と共振する固有周期をもち、その周期成分を強く増幅させる地盤の上に建っていて、さらにその周期成分の揺れを強く放射する地震断層が近くにあるという、悪条件がいくつも重なる場合に発生する地震動が、鉄道にとって最大級の地震動の1つと考えることができるでしょう。これは、必ずしもマグニチュードが大きな地震の場合に限りません。

**芦谷** 被害を最大化させてしまう地震動ということですね？

**古村** そのとおりです。鉄道にとって被害を最大化する地震動というのは、さまざまな悪条件がかけ算かけ算かけ算で重なった場合に考えられるので、そのどこかで連鎖を断ち切る必要があると思います。

**芦谷** 最悪シナリオのかけ算を寸断することは、現在の耐震設計でコントロールしている枠組みからはずれた部分に配慮するということだと考えれば、今のお話はまさに危機耐性だと思います。

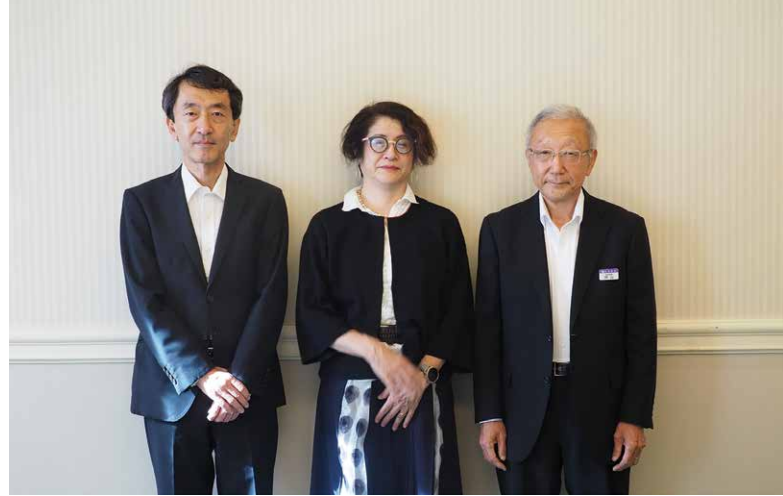
ました。

**室野** 危機耐性の概念の範疇で、今の御意見にも対応できそうで、良い課題をいただけたと思います。一方で、「想定外」に対してそもそも配慮する必要があるのでしょうか？ また、利用者にとどのように伝えていけばよいか？ 広田先生はどうお考えでしょうか？

**広田** 原子力分野では「100%安全」をうたっていた時期があり、おそらくその文脈から「想定外」があったことに対する強い批判が出てきたと考えています。したがって、ほかの分野ではそれほど「想定外」に対する批判を憂慮する必要はないと思っています。想定内・外というより、むしろ利用者に対しては「何が想定されているか」を伝えていくことが利用者にとっても有益だと思います。

**芦谷** 現行の耐震設計は、10%程度の設計地震動以上の地震動が発生する可能性があることを前提とし、定量的に評価できないものの、危機耐性として配慮するという枠組です。その意味では、設計地震動以上の地震も想定しており、想定内外という言い方より、定量的にコントロールできる範囲とそうでない範囲という言い方がいいかもしれませんね。

**室野** 想定外の言葉の使い方は気をつけないといけませんね。鉄道の場合は、コントロールできるところとできないところがあり、できないとこ



ろも配慮しましょうということですね。確かに、これまでもそのような説明をしてきました(図1)。

## まとめ

**室野** 大変多岐にわたる議論をいただきました。その中で、激甚化する地震災害に対して、どう対応するべきか、そのためのヒントや課題が見えてきたと思います。

耐震設計における設計地震動の設定においては、地震の断層運動の不均質性・多様性が大きく、予測結果には一定の幅があるのは自然現象として避けられません。この点に関しては、設計地震動を超えた途端に破滅的な状態にならないように配慮しながら、合理性をもって、設計地震動を設定し、耐震設計をすることになります。それでも、耐震設計でコントロールできない事象が発生する可能性は否定できません。このような事象は、さまざまな悪い条件が「かけ算」として重なると生じるので、かけ算をどこかで断ち切る配慮が必要です。鉄道で提唱する危機耐性もその方法の1つです。鉄道としても、今後とも技術開発をしっかり進めていかなければなりません。その一方で、耐震設計で実現している、または、実現しようとしている性能を利用者に正しく伝え、コミュニケーションを通して理解してもらうことが大変重要であることもわかりました。本日は、長時間にわたり、意見交換をいただき本当にありがとうございました。

図1 耐震設計と危機耐性の関係の概念図

