

# 中小規模地震から大規模地震までを考慮した鉄道構造物の復旧性評価



和田 一範  
Kazunori Wada

鉄道地震工学研究センター  
地震応答制御研究室  
副主任研究員



坂井 公俊  
Kimitoshi Sakai

鉄道地震工学研究センター  
地震応答制御研究室長



名波 健吾  
Kengo Nanami

鉄道地震工学研究センター  
地震応答制御研究室  
研究員



豊岡 亮洋  
Akihiro Toyooka

前 鉄道地震工学研究センター  
地震応答制御研究室長

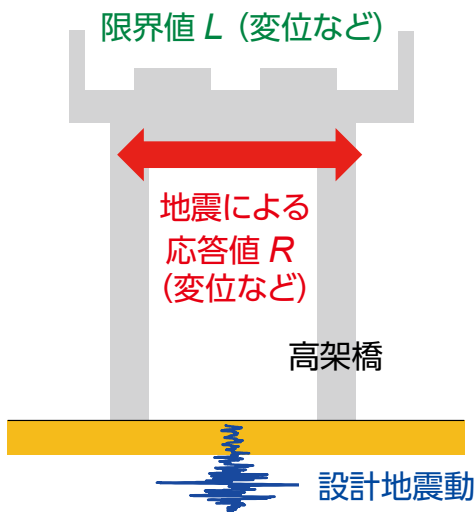
## はじめに

現在の鉄道構造物の耐震設計<sup>1)</sup>では、新幹線鉄道や大都市旅客鉄道の構造物のような重要構造物において、震度7程度の大規模地震に対して早期に修復可能な損傷に留めるという性能(復旧性<sup>2)</sup>)が要求されています。その一方で、近年頻発する震度5強～6強程度の中規模地震に対する構造物の要求性能は明示されておら

ず、例えば2018年大阪府北部地震や2021年福島県沖の地震、千葉県北西部地震などにおいては、構造物に致命的な損傷は生じなかったものの、被害状況の把握やその後の復旧作業などに時間を要し、早期運転再開や早期復旧など時間軸の観点で課題が浮き彫りとなりました。このような課題に対応するために、中小規模地震から大規模地震までを考慮した鉄道構造物の復旧性照査法を構築し、評価を行ったのでその内容について紹介します。

図1 通常の耐震設計における性能照査(応答値と限界値の比較)のイメージ

耐震設計における性能照査：  
構造物の限界値  $L$  > 構造物の応答値  $R$



## 復旧日数を照査指標とした復旧性照査法

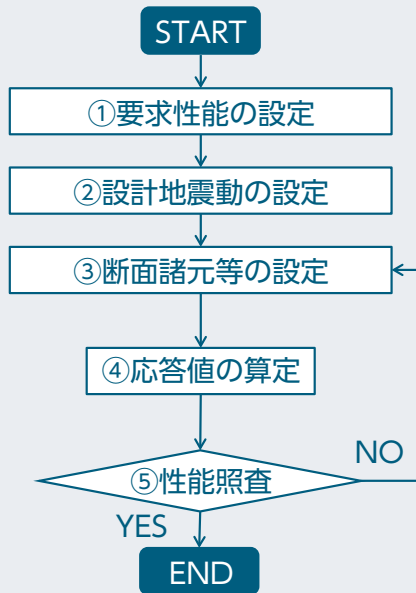
まず、通常の鉄道構造物の耐震設計<sup>1)</sup>における性能照査について述べます。基本的には、構造物の要求性能(安全性<sup>3)</sup>、復旧性など)を設定

### 復旧性

耐震標準で規定される性能のひとつで、構造物の機能を使用可能な状態に保つ、あるいは短期間で回復可能な状態に留めるための性能を指します。

### 安全性

耐震標準で規定される性能のひとつで、構造物が使用者や周辺の人々の生命を脅かさないための性能を指します。具体的には、 $L2$ 地震動に対して、構造物全体系が破壊しないための性能(構造体としての安全性)と、車両が脱線に至る可能性をできるだけ低減するための性能(構造物の機能上の安全性)があります。



手順	設計標準における安全性の場合	提案手法の場合
①	構造体の安全性など	目標とする復旧日数
②	L2 地震動	建設地点で想定される全ての地震動とその発生確率
③	構造寸法, 配筋などを設定	
④	L2 地震動に対する応答値(変位, 荷重など)を算定	全ての地震動に対する応答値を算定し, その確率を基に, 復旧日数の期待値を算定
⑤	「各部材の応答値(変位, 荷重など) < 各部材の限界値」を確認	「復旧日数の期待値 < 目標とする復旧日数」を確認

図2 提案手法と通常の耐震設計の検討手順の比較

し、構造条件（断面寸法や配筋）、地盤条件などから決まる構造物の限界値よりも、設計で考える地震作用（設計地震動）に対する構造物の応答値が小さいことを確認することになります（図1）。次に、提案する復旧性照査法の説明に移ります（図2）。ここでは、提案手法をより理解しやすくするため、通常の耐震設計における「安全性」の照査と比較しながら、また提案手法の検討内容の概念図（図3）を参照しながら説明します。基本的には、通常の耐震設計における性能照査と同じ手順になりますので、図1の

#### ☞ 設計耐用期間

構造物または材料、部材がその使用にあたり、目的とする機能を十分に果たさなければならない設計上与えられた耐用期間を指します。例えば、コンクリート構造物だと通常の環境条件で適切な維持管理がなされる前提で100年が目安となっています。

#### ☞ 期待値

発生確率を有する変数を確率変数といいます。確率変数の値と発生確率の関係である確率分布に応じた確率変数の重み付け平均を期待値といいます。

イメージをもって読み進めてください。

通常の耐震設計では、要求性能として「構造体の安全性」などを設定しますが、提案手法では、地震後の運転再開までの時間が課題となっている背景をふまえ、「目標とする復旧日数」を設定します（図2①）。ここで、復旧日数とは、**設計耐用期間**<sup>☞</sup>内に想定される地震によって生じる被害で復旧にかかる日数の**期待値**<sup>☞</sup>を意味します。次に、設計地震動を設定します（図2②）。通常の耐震設計では、設計地震動はL2地震動（建設地点で想定される最大級の地震動）など要求性能ごとに規定されますが、提案手法では上述した復旧日数の期待値を計算するために、建設地点で中小規模地震～大規模地震までの想定されるすべての地震動を発生確率も含めて算定<sup>2)</sup>する点が大きく異なります（図3①）。

続いて、構造物の断面諸元を設定し（図2③）、設計地震動に対する構造物の応答値を算定します（図2④）。通常の耐震設計では、L2地震動に対する応答値がひとつに決まりますが、提案手法では、発生確率を有する多数の地震動

⑤提案する復旧性照査：  
目標とする復旧日数 > 想定される復旧日数の期待値

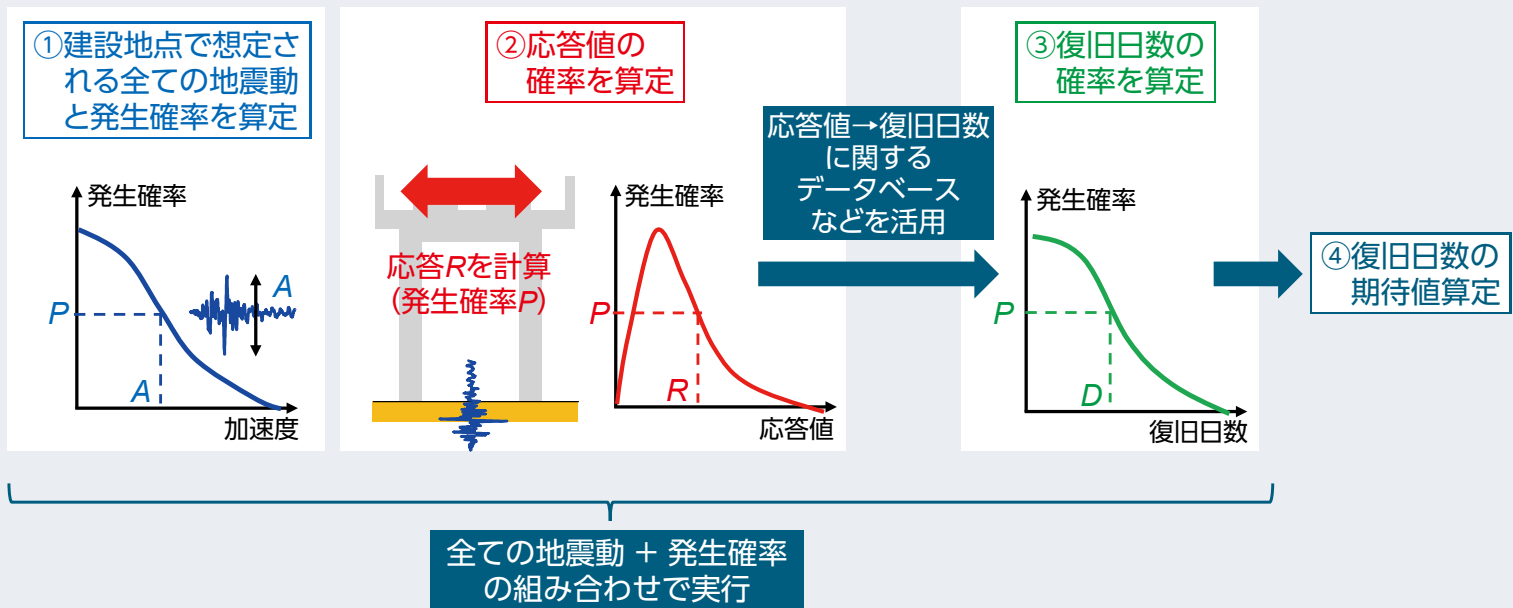


図3 提案手法による検討のイメージ

に対する応答値の確率(図3②)として算定されます。そのうえで、筆者らが開発した応答値に応じた復旧日数に関するデータベース<sup>3)</sup>などを活用することで、復旧日数の確率を算定し(図3③)、それを基に復旧日数の期待値を算定します(図3④)。このときは、例えば鉄筋コンクリート柱の損傷状態(図4)に応じた復旧日数(軽微な損傷なら復旧日数小、大きな損傷なら復旧日数大、など)を算定することになります。

最後に、性能照査を行います(図2⑤)。通常の耐震設計では、図1で示したように応答値が限界値(例えば、図4の大きな損傷状態での変位など)より小さいかどうかを判定するのに対応して、提案手法では算定された復旧日数の期待値が目標とする日数より小さいかどうかを判定します(図3⑤)。

### 実務的な復旧性照査の手順と試算

前章の提案手法(以下、原則的な手法と表記します)は、建設地点で想定されるすべての地震動およびその発生確率の算定(図2②)とそれに対する応答値の確率や復旧日数の期待値の算

定(図2④)などの煩雑な作業が必要となります。このため、原則的な手法に沿って設計することは実務的には困難な可能性が高いです。そこで、より実務的な復旧性照査の方法(以下、実務的手法と表記します)を整備したので、その手順を紹介します。

図5に実務的手法の手順を示します。原則的な手法の手順(図2の右表)との違いをわかりやすくするため、両手法の手順を並記しています。実務的手法では、要求性能に応じた復旧性照査用ノモグラムの選定を行い、**ノモグラム**<sup>®</sup>と降伏震度の大小比較で性能照査することに特徴が

#### ノモグラム

ある関数の計算を簡易に行うためのグラフのことを指します。

#### 等価固有周期, 降伏震度

いずれも構造物を骨組モデルなどでモデル化し、震度(加速度/重量加速度)を静的に漸増させたプッシュ・オーバー解析から算定できます。降伏震度は、部材が初めて降伏した時の震度を指し、等価固有周期は、震度-変位関係における降伏震度での変位と原点とを結ぶ割線剛性から計算される構造物の固有周期を指します。

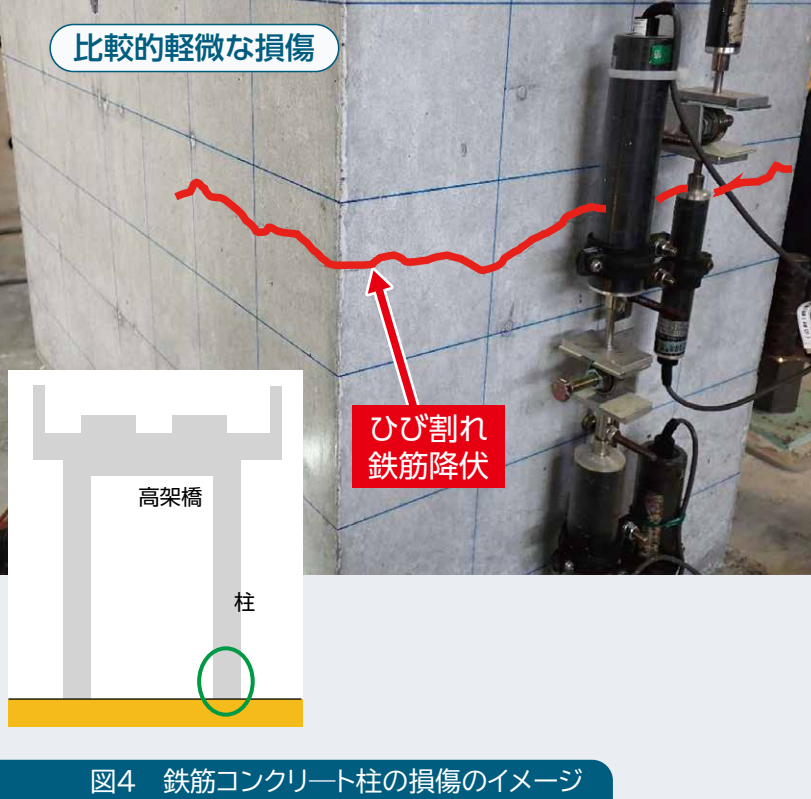
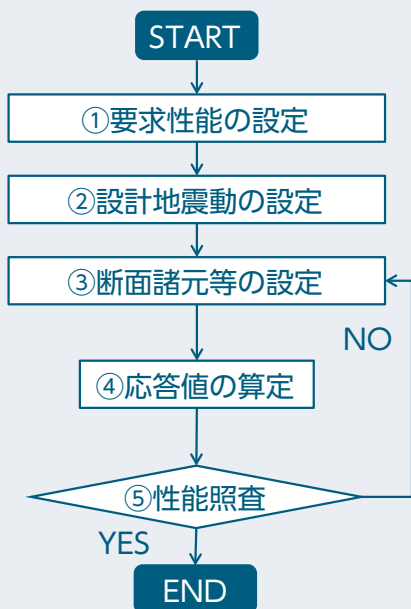


図4 鉄筋コンクリート柱の損傷のイメージ

あります。ここで、復旧性照査用ノモグラムとは、あらかじめ幅広い条件（地域や構造物）に対して原則的な手法で手順①～④の作業を実施しておくことで、目標とする復旧日数を満足できる構造物特性（等価固有周期、降伏震度<sup>®</sup>）を整理したものになります。すなわち、原則的な

手法では煩雑な作業であった手順②、④の作業が、実務的手法では、すでに用意してあるノモグラムから適切なものを選ぶという行為に集約されます。また、性能照査に必要な構造物の等価固有周期や降伏震度といった指標は手順③で算定されますが、これは通常の耐震設計におい

図5 提案手法における原則的な手法と実務的な手法の検討手順の比較



手順	提案手法 (原則的な手法)	提案手法 (実務的な手法)
①	目標とする復旧日数	
②	想定される全ての地震動とその発生確率	復旧性照査用ノモグラムの選択
③	構造寸法, 配筋などを設定 (等価固有周期, 降伏震度の算定)	
④	全ての地震動に対する応答値を算定し, その確率を基に, 復旧日数の期待値を算定	—
⑤	「復旧日数の期待値 < 目標とする復旧日数」を確認	「降伏震度 > ノモグラム」を確認

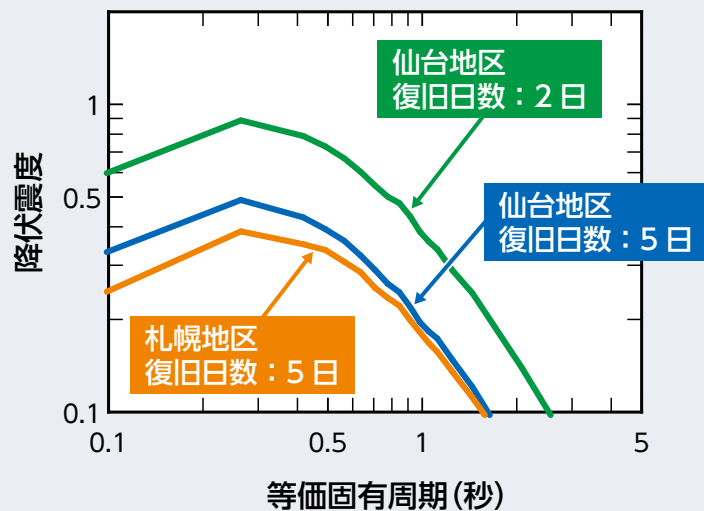


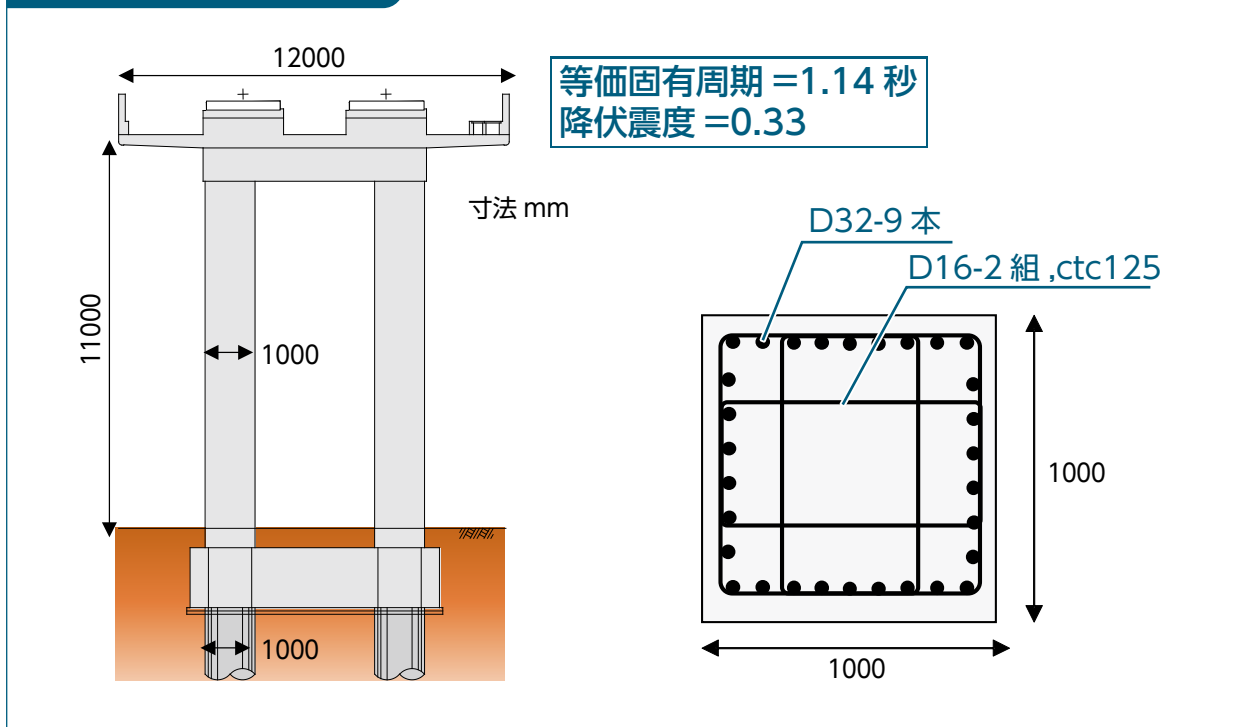
図6 復旧性照査用ノモグラムの例(ラーメン高架橋, 柱先行降伏の場合)

でも実施する手順ですので、実務的手法の一連の作業は通常の耐震設計の作業量をほとんど増やすことなく実行可能です。

復旧性照査用ノモグラムの例を図6に示します。例えば、本図の青線は「仙台地区で復旧日数5日を満足する構造物特性の集合」を意味し

ます。ここで、降伏震度は構造物の耐力のような指標ですので、降伏震度が大きい構造物の方が損傷しにくく、復旧日数の期待値がより小さくなります。すなわち、ノモグラムよりも大きな降伏震度を有する構造物であれば、要求性能を満足するといえます。本図より、要求する復

図7 ラーメン高架橋の設計例



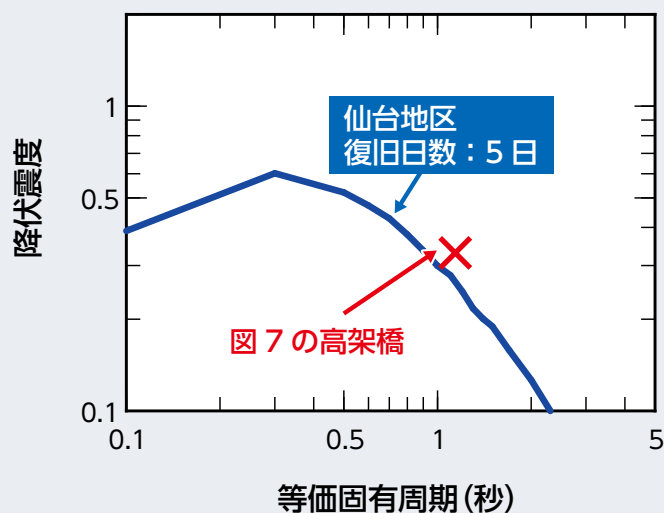


図8 復旧性照査用ノモグラムを用いた照査例(ラーメン高架橋, 柱先行降伏の場合)

旧日数が短い(高い性能を要求)場合, 必要な降伏震度が大きくなること, 仙台地区に比べて地震活動度が小さい札幌地区では, 同じ復旧日数を要求する場合でも低い降伏震度でよい, といった傾向が確認できます。このように, 本手法を用いることで地域や要求性能に応じた構造物が設計可能となります。

復旧性照査用ノモグラムを用いた設計の一例を紹介します。建設地点を仙台地区, 目標とする復旧日数を5日とし, 図7のような諸元の高架橋を設定したとします。この高架橋の等価固有周期と降伏震度を該当するノモグラム(図8)上に×印でプロットします。ここで, ノモグラムと図7の高架橋の降伏震度(×印)を比較すると, 高架橋の降伏震度の方が大きいことがわかります。これにより, 図7の高架橋は仙台地区で復旧日数の期待値が5日という性能を満足していることがわかります。このように本手法を

用いることで, 対象構造物が目標とする復旧日数を満足するかを簡単に確認することができます。

## おわりに

震度5強~6強程度の中規模地震発生時の運転再開に時間を要するという課題に対して, 復旧日数を照査指標とし, 中小規模地震から大規模地震までを考慮した鉄道構造物の復旧性照査法を提案するとともに, 実務的な方法まで整備しました。本手法により, 地域, 要求性能に応じた構造物が設計可能となります。また, 既設構造物についても, 復旧日数の観点から要注意箇所抽出や対策の優先順位付けなどに活用できると考えています。なお, 本研究は国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施しました。RRR

## 文献

- 1) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 丸善出版, 2012
- 2) 坂井公俊, 室野剛隆: 地震危険度解析に基づく生起確率付地震動群の作成方法, 鉄道総研報告, Vol.24, No.5, pp.11-16, 2010
- 3) 名波健吾, 和田一範, 坂井公俊: 構造種別・損傷レベルに応じた鉄道構造物の地震後復旧日数の算出, 第42回地震工学研究発表会, 2022