

地震後復旧時間を照査指標とした 橋りょう・高架橋の復旧性照査法

坂井 公俊* 和田 一範* 豊岡 亮洋**

Method for Verifying the Restorability of Railway Viaducts Using the Recovery Time
After an Earthquake as a Verification Index

Kimitoshi SAKAI Kazunori WADA Akihiro TOYOOKA

We have proposed a method for evaluating the restorability of railway structures. In the proposed method, all earthquake motions expected within the design service life are used as the design earthquakes. In addition, the recovery time after an earthquake, which is directly related to early recovery, is used as the verification index. We also proposed a more practical method of expressing structural conditions with the same recovery time as a nomogram by performing calculations under various conditions in advance. The proposed method allows us to construct structures that are easy to recover in the same procedure as the conventional seismic design, and it is expected to shorten the recovery time after an earthquake.

キーワード：耐震設計，復旧性照査，復旧時間，鉄道構造物

1. はじめに

地震時の鉄道構造物に要求される性能としては、安全性だけでなく復旧性も要求される。鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計）¹⁾において、地震時の復旧性として「想定される地震作用に対して、構造物の修復の難易度から定まる損傷等を一定の範囲内にとどめることにより、短期間で機能回復できる状態に保つ」ことが要求されている。この構造物の復旧性を確認する方法としては、構造物の耐用期間内に想定される複数の地震動を受けた場合に復旧期間や経費等が妥当な範囲内となる事を、初期費用と地震損失費用等を考慮して確認する方法²⁾が考えられる。このトータルコストを考慮した検討はこれまで各種施設を対象に実施されている^{3) 4) 5)}とともに、これを耐震設計に導入しているケース⁶⁾も存在する。また筆者らも鉄道鉄筋コンクリート（以下、RC）橋脚を対象にトータルコスト最小となる構造物の設計法の提案を行っている⁷⁾。

こうした流れを受けて、鉄道構造物の地震時復旧性も原則的にはこの考え方に従って照査を行う事になっている¹⁾。しかしながら、近年頻発する構造物が崩壊しない程度の地震、例えば2018年大阪府北部地震や2021年福島県沖の地震、2021年千葉県北西部地震等において、被害状況の把握やその後の復旧作業等に時間を要し、地震後の早期運転再開や早期復旧の観点での課題が浮き彫りになっている^{例えば8)}。このような課題に対応するために

は、コストに重点を置いた復旧性照査のみならず、地震後の復旧時間を陽な形で算定し、これを指標として構造物の設計を行うという方法も考えられる。このような観点で筆者らは各種鉄道構造物を対象として、地震に伴う損傷程度と復旧までに要する時間の関係を算定し、データベースとして整備するような取り組みを進めている⁹⁾。これを活用することで、各構造物の地震に伴う復旧時間を算定することも比較的容易に実施可能になりつつある。しかしながらこれを実施するためには、設計に関する技術、知識だけでなく、地震の発生確率や損失コストの考え方などの周辺知識と大規模な数値計算を行うための解析技術が要求される。そのため構造物のトータルコスト算出時と同様に、この手法を実務設計において実施することは現状では高いハードルがあると考えられる。

そこで、地震発生後の復旧時間を照査指標とした鉄道構造物の復旧性照査法を提案¹⁰⁾した。2章では、復旧時間を照査指標とした鉄道構造物の復旧性照査法を提案する。この時には、まず復旧時間を指標として復旧性を照査する手順を提案するとともに実務設計において実施可能とするための工夫である復旧性照査用ノモグラムという表示方法についても提示する。続いて3章ではRCラーメン高架橋を対象として、提案手法に基づく復旧性照査の試算を実施する。4章では復旧性照査用ノモグラムの評価を行うとともに、3章で試算を実施した構造物を対象としてノモグラムの有効性を確認する。

* 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室

** 鉄道地震工学研究センター

2. 復旧時間を照査指標とした復旧性照査法の提案

2.1 復旧性照査法の提案

本章ではまず、地震に伴う復旧時間を照査指標とした鉄道構造物の復旧性照査法を提案する。提案する照査の手順を図1に示すが、大まかな流れとしては、要求性能の設定、設計地震動の設定、構造物の応答値算定、構造物の性能照査となっており、通常の鉄道構造物の耐震設計の手順¹⁾と同等である。その一方で、今回提案する設計手法はいくつかの特徴を有しており、それらについて概説する。

まず構造物の要求性能の照査指標としては、「地震後の復旧時間」を設定する。これは前章で述べたように、近年の中規模～大規模地震において地震後の復旧時間が課題になっていることに直接対応することを目的としたものである。

次に設計地震動としては、上述した照査指標に対応するため「建設地点で想定される幅広い特性を有する多数の地震動」を設定する必要がある。この地震作用としては、確率論的地震危険度解析^{例えは¹¹⁾}の結果に基づく生起確率付き地震動群^{例えは¹²⁾¹³⁾}を用いることで、複数の地震動波形と発生確率の組み合わせによって評価する。

構造物の応答値を算定する際の手法は、通常の耐震設計において用いられる手法を基本として用いる。ただし現在の鉄道構造物の耐震設計では、L2地震動における地震応答値を精度よく評価することを主な目的としており、L1地震動やその他の地震動など、L2地震動よりも振幅レベルが小さな地震動に対しては相対的に安全側の応答となるような構造物のモデル化を行っている。しかしながら今回提案する復旧性照査法では、中小規模地震に対しても適切な地震応答値を算定する必要があるため、このような配慮を行った構造物のモデル化手法、応答値算定法^{例えは¹⁴⁾}を採用することが望ましい。

最後に構造物の復旧時間を評価する。これは、構造物の応答値に対応した復旧時間を設定する必要があるが、当然のように構造物の損傷部位やその損傷程度が異なると、復旧に要する時間は大きく変化する。また復旧の容易さは構造形式や周辺環境などの状況によっても大きく変化することが知られている。そのため、復旧時間は当該地点の状況を適切に勘案した上で、地震応答値と対応する形で適切に評価する必要がある。筆者らは、これを実施する際の基本的な検討として、鉄道構造物として一般的な構造形式、比較的理想的な条件下での地震応答値と復旧時間の関係を整理している⁹⁾ため、次章以降の試算ではこの結果を用いることとする。

上述した手順を経ることで「対象地点において構造物に作用する多数の地震動を設計地震動として設定し、こ

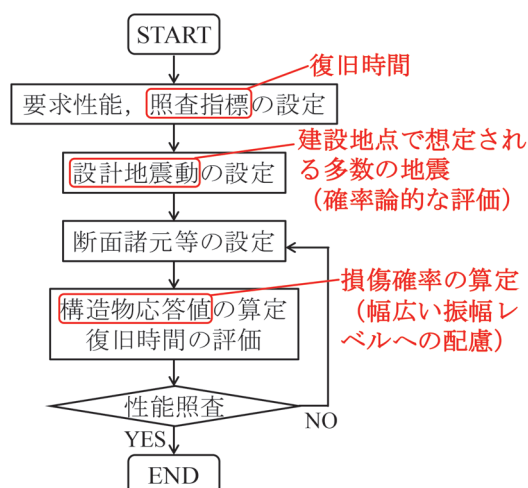


図1 提案する復旧性照査の手順

れらの地震動に対する構造物の復旧時間の期待値」が算定される。これが、要求する復旧時間を満足するか否かを判定することで、性能照査を実施する。この時には、鉄道構造物の標準的な設計法である限界状態設計法に基づく次式で性能照査を行う。

$$\gamma_i \cdot \frac{I_{RD}}{I_{LD}} \leq 1.0 \quad (1)$$

ここで、 I_{RD} ：設計応答値（復旧時間の期待値）、 I_{LD} ：設計限界値（要求する復旧時間）、 γ_i ：構造物係数（本検討では1.0）である。

2.2 復旧性照査用ノモグラムの提案

前節で提案した手法では設計地震動の設定、応答値の算定、性能照査等において多くの作業が必要となるため、実設計において全ての構造物でこれを実施することは困難である。そこで、これをより実務的に実施可能な手法を提案する。

実務的に復旧性を照査するためには、各段階の作業を簡便にする必要があるが、この時に鉄道構造物の耐震設計で用いられる所要降伏震度スペクトル¹⁾が参考になる。そこで、本検討においても所要降伏震度スペクトルに類するものとして、あらかじめ幅広い条件で復旧時間を評価しておき、これをスペクトル表示する手法（これを復旧性照査用ノモグラムと呼ぶ）を提案する。復旧性照査用ノモグラムの算定手順を図2に示すとともに、以下に各手順の概要を示す。

Step1：対象地点を設定し、対象地点における設計地震動（建設地点で想定される幅広い特性を有する多数の地震動）を評価する。これは生起確率付き地震動群によって表現する。

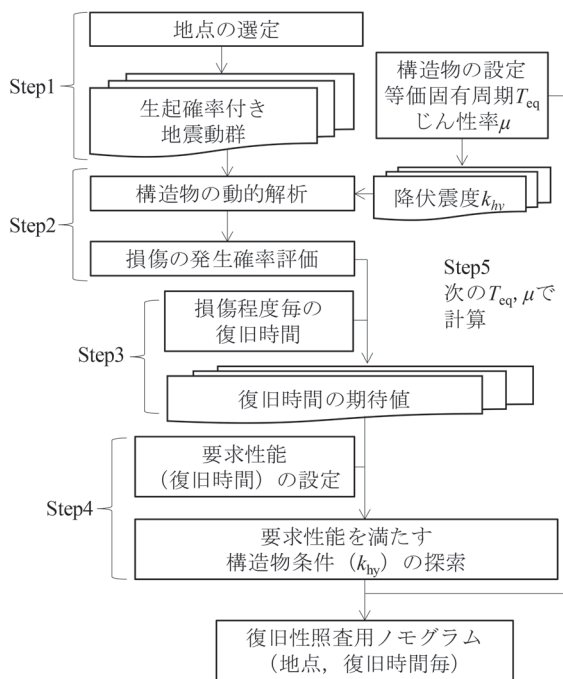


図2 復旧性照査用ノモグラムの算定手順

- Step2：設計地震動に対する構造物の応答値を算定する。この時にはまず、等価固有周期 T_{eq} 、じん性率 μ を有する条件に対して、降伏震度 k_{hy} を多数変化させた構造物モデル群を構築する。この構造物に対象地点の地震動波形群を入力した動的解析を行い、各構造物の応答塑性率および損傷程度の発生確率を算定する。
- Step3：上記 Step2 の損傷に対応する復旧時間を評価し、これに発生確率を乗じることで、復旧時間の期待値を評価する。
- Step4：構造物の設計限界値（目標とする復旧時間）を設定し、Step3 で得られた復旧時間の期待値の関係から、要求性能を満足する構造物 (T_{eq} , μ , k_{hy} の組合せ) を決定する。
- Step5：Step2~4 の手順を等価固有周期 T_{eq} 、じん性率 μ を変化させて繰り返し実行する。この結果から同一の復旧時間となる条件を結ぶことで、ある復旧時間を満足する構造物の振動特性の組合せをノモグラムによって表示する。

この手順を経ることで、ある地点、復旧時間に対して所要降伏震度スペクトルと同次元での表示が可能となる。ここで、上記の復旧性照査用ノモグラムを作成する際の計算条件と、前節で提案した手法を比較する。まず設計地震動については、各地域の確率論的地震危険度解析、生起確率付き地震動群を用いているため、両者で同一である。また、構造系が比較的単純で主たる塑性ヒンジの発生箇所が明らかな鉄道橋りょう・高架橋については構造物全体系を等価な1質点系に置換しても適切な応

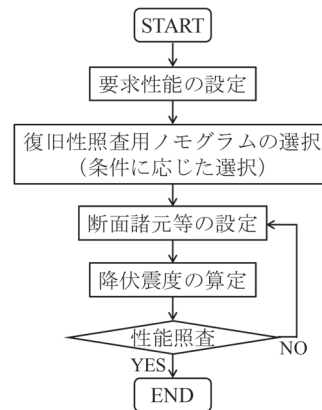


図3 復旧性照査用ノモグラムを用いた構造物の復旧性照査の手順

答値を算定可能であることが確認されている^{例えば1) 15)}。そのためこのような解析モデルを用いることで、各地震動に対する地震応答値や損傷の発生確率も両者で同等の結果が得られると考えられる。さらに、復旧性照査用ノモグラムは、復旧時間に応じた構造物の特性を表示したものであるため、任意の復旧時間に対応している。そのため、「復旧性照査用ノモグラム」では、2.1節と同一の地震作用を用いるとともに、構造物応答値や復旧時間としても同一の結果が得られるため、照査までの作業量を大幅に省力化した上での適切な復旧性照査を実現したものと考えられる。

なお Step3 では、「各地震動に対する構造物の応答値、損傷程度に応じた復旧時間」を評価する必要がある。これは前節において述べたように損傷部位や周辺的环境等によって大きく変化すると考えられる。これを適切に考慮した上での簡易なノモグラム作成、表示、補正の方法等については検討の余地があるが、本検討では標準的な条件下での地震応答値と復旧時間の関係⁹⁾を用いたノモグラムの試算を行う。

2.3 復旧性照査用ノモグラムを用いた設計の手順

この復旧性照査用ノモグラムを用いることで、建設地点の地震活動度、構造物の振動特性、変形性能、損傷箇所や復旧の容易さといった多様な条件に応じた所要降伏震度を簡易に把握可能となる。ここでは、復旧性照査用ノモグラムを用いた構造物の復旧性照査の手順を整理する。具体的な流れを図3に示すとともに、2.1節で提案した復旧性照査法(図1)との違いを下記に列挙する。

- ・「設計地震動の設定」において、2.1節では各地域の生起確率付地震動群を用いるが、ここでは各種の条件に応じた復旧性照査用ノモグラムを選択する。
- ・「構造物の応答値の算定・復旧時間の評価」は、2.1節では各波形を用いた応答値、損傷レベル、復旧時間

の評価を行うが、ここではプッシュオーバー解析の結果から構造物の降伏震度 k_{hy} を算定する。

・「性能照査」は、2.1 節では式 (1) により復旧時間の照査を行うが、ここでは対象構造物の降伏震度 k_{hy} が復旧性照査用ノモグラムで算定される所要降伏震度以上であることを確認する。

以上のように、各種条件に基づいて復旧性照査用ノモグラムを事前に用意しておくことで、所要降伏震度スペクトルを用いた性能照査とほぼ同様の作業によって復旧時間を照査指標とした照査が可能となる。この手法による結果の妥当性については、4 章で確認を行う。

3. 提案手法に基づく構造物の復旧性照査

3.1 性能、照査指標の設定

ここでは、2.1 節で提案した復旧性照査法を実際の鉄道構造物に適用することで、手法の有効性を確認する。なお計算を行う際の前提条件として、図 4 の地盤条件、対象構造物としては高さが 11m のラーメン高架橋とした。なお本手法では、想定する地域の地震活動度によって最終的な結果が異なるため建設地点を設定する必要があるが、ここでは仮に仙台地域を想定した。この箇所において要求する復旧時間を満足するような断面設定を行う。

提案手法では、構造物の要求性能に応じた照査指標として「地震後の復旧時間」を設定するが、今回は復旧時間の期待値を 5 日と設定する。この数値の設定方法については議論の余地があるが、事前に現在の鉄道標準に従って設計された複数の構造物（杭基礎を有するラーメン高架橋のうち、上部構造物が先行降伏するもの）に対して、全国の主要地域を対象に試算を実施した結果の平均的な復旧日数が 5 日であったため、コードキャリブレーションの観点も含めて本検討ではこの数値を設定している。この復旧日数 5 日が、式 (1) の設計限界値 I_{LD} に相当する。

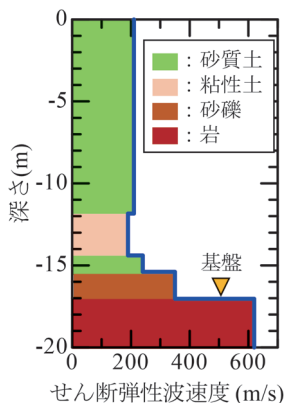


図 4 地盤条件

3.2 設計地震動の設定

提案手法では、建設地点に応じた地震発生確率、設計地震動を設定する。今回の試算では仙台地域を設定し、確率論的地震危険度解析を行った。計算を行う際の再現期間は、構造物の設計耐用期間¹⁾に相当する 100 年間とした。なお地震危険度解析の具体的な実施手順、使用する情報については、後述する地震動波形群の算定手法も含めて文献¹³⁾に準拠している。最終的に得られた地震発生確率の評価結果を図 5 に示す。

この結果に基づいて、生起確率付地震動群の合成を行う。本検討では、100~1500Gal (Gal は cm/s^2 を意味する) まで 100Gal 刻みで 15 の振幅レベルに分割するとともに、各振幅レベルにおいて 20 波ずつの合計 300 波を評価した。最終的に算定された波形の例を図 6 に示す。当然ではあるが、各地震動波形で想定するマグニチュード M_w や震源距離 R が異なるため、各地震動波形は振幅のみならず、経時特性、周波数特性も変化する。このような地震動波形群を設計地震動として設定する。

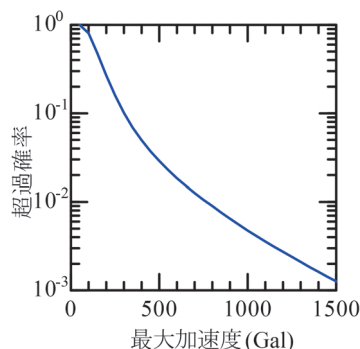
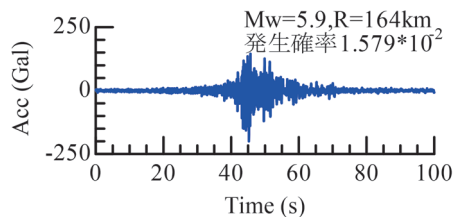
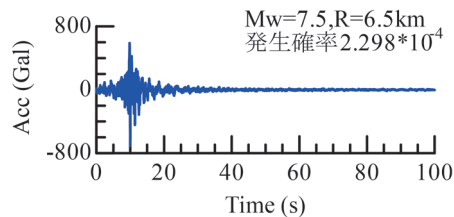


図 5 地震発生確率の評価結果 (仙台地域)



(a) 最大加速度 200 Gal



(b) 最大加速度 700 Gal

図 6 生起確率付地震動群の算定結果 (仙台地域)

3.3 構造物の応答値の算定、復旧時間の評価

当該地点の各種条件を基に、ラーメン高架橋の寸法と断面配筋を設定した。この時には、構造安全性とともに今回提案する手法によって復旧性の照査も満足するような断面を探索した。最終的に、図7に示す構造物寸法および断面配筋を設定した。なお、断面配筋については後の議論に用いる柱および杭のみを示している。この構造物の地震応答値算定を行うためのモデル化を行う。この時には、基本的に鉄道構造物の各設計基準^{例えは1)}に従って2次元の梁とばね要素によってモデル化を行うこととし、各要素に設定する弾性特性、非線形特性も各設計基準に従ってモデル化する。線路直角方向を対象としたブッシュオーバー解析の結果を図8に示すが、この構造物の等価固有周期 $T_{eq}=1.14s$ 、降伏震度 $k_{hy}=0.33$ となった。なおこの図におけるY、M、N点はそれぞれ構造物の復旧日数を評価する際に使用する損傷のコントロールポイントである。

構造物の応答値を算定する際には、この解析モデルをそのまま用いた非線形動的解析を実施することも考えられるが、本検討では使用する地震波数も勘案し、これを等価な1自由度系に置換したモデル^{1) 14) 15)}を用いることとした。この構造物の解析モデルに前節で算定した地震動波形群300波を網羅的に入力した動的解析を実行

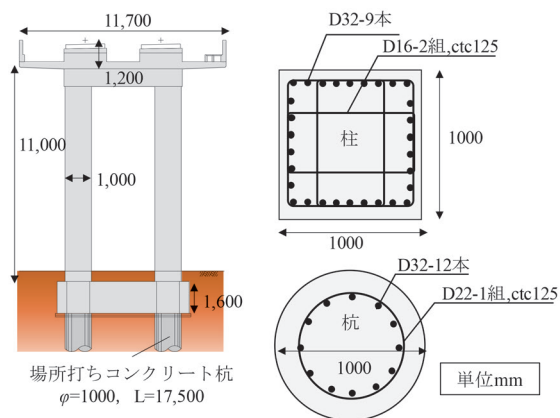


図7 設定した構造物寸法および柱、杭断面の配筋

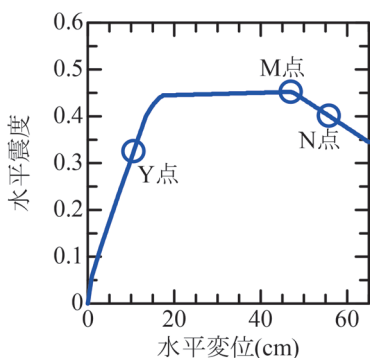


図8 構造物全体の荷重—変位関係

し、各波形に対する応答値を算定した。各波形の最大応答変位から、構造物の応答塑性率と超過確率の関係を整理した結果を図9に示す。この図には対象構造物のブッシュオーバー解析により得られた各損傷のコントロールポイント (μ_y , μ_m) も記載しているが、今回対象とした構造物、地震動に対しては、構造物の損傷レベル3の限界値である μ_n を超過する応答は発生しなかった。

続いて当該構造物の復旧時間を算定するが、この時には筆者らが過去に算定した構造形式、損傷程度に対応する標準的な復旧時間の関係⁹⁾をもとにする。具体的には、ラーメン高架橋に対して表1に示すように構造物の応答塑性率、損傷レベルに対応する復旧時間を設定した。復旧時間の算出条件、手法の詳細は文献⁹⁾に依るが、構造物の損傷レベルは鉄道構造物の耐震設計¹⁾の定義と同一である。また構造物の周辺環境としては、周囲に十分な作業スペースがあり、側道から資機材を搬入可能であるという理想的な条件を想定している。この構造物応答と復旧時間の関係性と図9に示した各損傷程度の発生確率を組み合わせることで、当該構造物の復旧時間の期待値を算定する。その結果、対象構造物の復旧時間の期待値は3.0日と評価された。これが式(1)の設計応答値 I_{RD} に相当する。

3.4 構造物の性能照査

最後に式(1)を用いて、構造物の復旧性を照査する。ここで構造物係数 $\gamma_1=1.0$ とすると、前節までの検討に

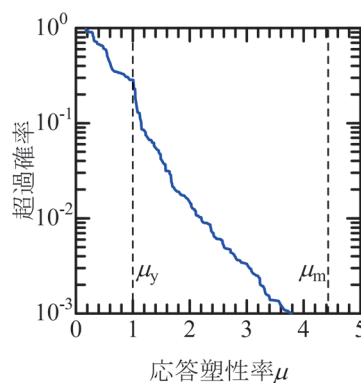


図9 構造物の損傷発生確率

表1 損傷程度と復旧時間の関係

損傷レベル	応答塑性率 μ	復旧時間 (日)
1	$0 \leq \mu < \mu_y$	1
2	$\mu_y \leq \mu < \mu_m$	8
3	$\mu_m \leq \mu < \mu_n$	23
4	$\mu_n \leq \mu$	28

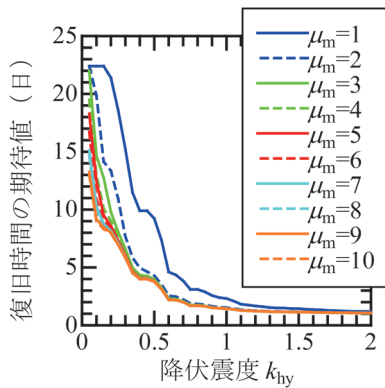


図 10 復旧時間の算定結果 ($T_{eq}=0.5$ 秒の場合)

より得られた構造物の要求性能、復旧時間の期待値を用いることで、

$$Y_i \cdot I_{RD}/I_{LD} = 1.0 \cdot 3.0/5 = 0.60 \leq 1.0 \quad (2)$$

となり、図 7 で設計した構造物は性能を満足するという結果が得られる。また今回は図 7 の構造断面で要求性能を満足したが、仮に式 (2) の照査の結果、性能を満足しない結果となった場合には、図 1 にある通り構造断面を見直した後に同様の手順によって復旧時間を算定する作業を繰り返し実施する。

このように、提案手法に従って設計地震動の評価、応答値の算定、性能照査を実施することで、当該地点において要求する復旧時間を満足する構造物が設計可能であることを確認した。

4. 復旧性照査用ノモグラムを用いた構造物の復旧性照査

本章では、2 章で提案した復旧性照査ノモグラムを算定するとともに、3 章の構造物を対象としてノモグラムを使用する有効性の確認を行う。検討対象地域は前章と同様に仙台地域とし、目標とする復旧時間も前章同様「5 日」に設定した。

まず、構造物の等価固有周期を $T_{eq}=0.5$ s に固定し、M 点じん性率 μ_m と降伏震度 k_{hy} を網羅的に変化させた条件で構造物の応答解析を実施し、前章と同様の手順で各構造物の復旧時間の期待値を算定した。得られた結果をまとめて図 10 に示す。ここで、復旧時間を算定する際の構造物のパラメータとして、損傷レベル 3 の限界値である N 点じん性率 μ_n を使用することも考えられる。ただし、構造物を設計する際には、当該地点において想定される最大級の地震動である L2 地震動に対して安全性を満足するように構造寸法や断面配筋が決定されている¹⁾。また、降伏震度 k_{hy} と μ_m 、 μ_n をパラメータとする

ことで、各条件の組み合わせ数が膨大になるため取扱いが煩雑になる可能性が考えられる。以上を踏まえて本検討では、N 点じん性率 μ_n はパラメータとして設定しない。そのため今回試算を行う復旧性照査用ノモグラムでは、地震動レベルや地震の発生確率、構造物の応答、損傷の発生確率として取り扱う範囲は、L2 地震動で想定する領域以下の範囲であり、発生する確率が極めて低い領域は対象としていない。この L2 地震動を超える領域については、鉄道構造物の耐震設計では「危機耐性」において考慮している¹⁾。

図 10 の結果より、当然ではあるが構造物の降伏震度 k_{hy} が大きくなるに従って、復旧時間の期待値は小さくなっている。また構造物のじん性率 μ_m が 2 以上の条件では、 μ_m に対する復旧時間の感度はそれほど大きくないことも確認できる。これは図 9 を見ても分かるように、構造物が大きな損傷となる確率は相対的に小さいためであり、復旧時間という観点では応答塑性率 μ が 1 を超過するか否か、つまり降伏震度がより重要な意味を持つと言える。またこの図より、目標性能とした復旧時間 5 日を満足する構造物の降伏震度 k_{hy} が容易に決定できる。例えば、 $\mu_m=1$ であれば、降伏震度 k_{hy} が 0.6 程度であれば復旧時間 5 日を満足することが分かる。

これと同様の検討を多様な等価固有周期 T_{eq} に対して実施し、復旧日数 5 日となる T_{eq} 、 k_{hy} の関係をじん性率 μ_m 毎にプロットした結果を図 11 に示すが、これが 2 章で提案した復旧性照査用ノモグラムである。

図 11 で示した復旧性照査用ノモグラムを用いることで、当該地域で要求する復旧時間（今回は 5 日）を満足する構造物の等価固有周期 T_{eq} 、降伏震度 k_{hy} 、じん性率 μ_m の組み合わせを容易に把握可能である。また当然ではあるが、構造物の降伏震度 k_{hy} がノモグラムの縦軸の数値以上であれば、その構造物の復旧時間の期待値は 5 日以下となる。そのため、ノモグラムの縦軸は、ある復旧時間以下にするために必要な降伏震度という意味で

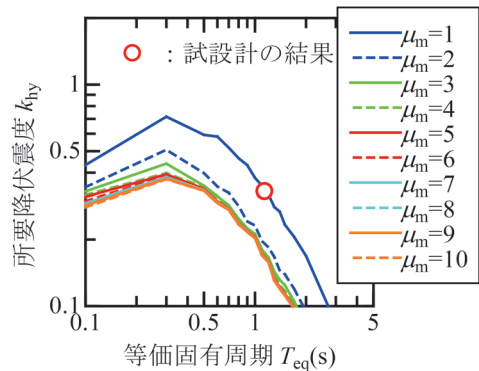


図 11 復旧性照査用ノモグラムの算定結果（仙台地域：復旧時間 5 日）

「所要降伏震度」と表記している。また今回算定した復旧性照査用のノモグラムを見ると、 $\mu_m=1$ の構造物は所要降伏震度が大きい、 μ_m が2以上の構造物では所要降伏震度が同程度になっている。これは図10でも考察したように、構造物が大きな変形を伴う領域の損傷程度、変形性能の差異は、構造物の復旧時間という観点においてはそれほど影響がないことを示している。

また図11の復旧性照査用ノモグラムには、3章で試設計を行った構造物の条件 ($T_{eq}=1.14s$, $k_{hy}=0.33$)も赤丸印でプロットしている。当該構造物のM点じん性率は $\mu_m=4.43$ であるが、当該構造物の降伏震度はノモグラムによる所要降伏震度よりも大きな値となっている(応答塑性率 μ は μ_m よりも小さくなっている)ことが確認できる。そのため、この復旧性照査用ノモグラムを用いた復旧性照査によっても適切な性能照査や、構造物断面の設計が可能であり、今回提案したノモグラムを用いることで、従来の耐震設計と概ね同様の手順によって復旧時間を照査指標とした構造物の設計が可能であるとと言える。

5. まとめ

本検討では、地震発生後の復旧時間を照査指標とした鉄道構造物の復旧性照査法の提案を行った。本検討で得られた成果を以下に列挙する。

- ・提案手法は、設計地震動として「設計耐用期間内に想定される幅広い特性を有する多数の地震動」を用い、地震後の早期復旧に直接関係する「復旧時間を照査指標」としている。これにより、復旧時間の課題を直接考慮した構造物の耐震設計が可能となる。
- ・提案手法を用いたラーメン高架橋の試設計を実施した。その結果、提案手法を用いることで復旧時間を直接照査指標とした構造物の耐震設計が可能であることを確認した。しかしながら、構造物の諸元が変化する毎に多数の動的解析、損傷程度の評価等が必要になるため、耐震設計時の復旧性照査手法としては非常に多くの時間を要する。
- ・提案手法をより実務的に実施可能とするため、あらかじめ多様な条件で計算を実施するとともに、同一の復旧時間となる構造物条件をノモグラムで表示する手法を提案した。さらに、上述したラーメン高架橋を対象とした試算の結果、この復旧性照査用ノモグラムを用いた構造物の性能照査が実施可能であることも確認した。提案手法を用いることで、従来の耐震設計と同様の手順で、復旧しやすい構造物の設計が可能となる。開発した手法を用いることで、新設構造物ではより復旧しやすい構造物の設計が可能となるとともに、既設構造物では復旧に時間を要する箇所、部材を事前に特定す

ることで、重点的な点検、対策が可能となり、結果として地震後の復旧時間の短縮が実現される。さらに、既設構造物については今後の耐用年数を考えた評価を実施することで、新設構造物と同等の要求性能を設定した上での対策レベルの合理化が実現される可能性や、復旧に時間を要するような特殊な構造物を対象とした対策優先順位の適正化等の実現も期待される。

なお今回提案した手法を実用化するにあたって、残された課題を以下に列挙する。まず本検討では手法の提案と限られた地域、構造物等の条件に基づく試算に留まっている。また本文中でも述べたように、構造物の損傷に伴う復旧時間は各種の条件によって大きく変化する可能性がある。こうした中で本検討における試算では、地震発生、地震動の不確実性、ばらつきは確率論的地震危険度解析によって考慮している一方で、構造物応答値や復旧時間の不確実性、ばらつきは無視している。これらを解決するためには、構造物の損傷に伴う復旧時間評価の高度化や構造物の特性等に応じた復旧性照査用ノモグラムの補正方法、構造物応答の不確実性を考慮した手法等について、検討を深度化させる必要がある。さらに、復旧性照査用ノモグラムを標準化するためには、今後より幅広い条件で評価を実施する必要もある。

本研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

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) 土木学会地震工学委員会耐震基準小委員会：土木構造物の耐震性能設計における新しいレベル1の考え方(案)、委員会活動報告書、2003
- 3) 大住道生、運上茂樹：トータルコストに基づく土木構造物の要求耐震性能の設定法に関する一検討、土木技術資料、Vol.41, No.10, pp.50-55, 1999
- 4) 一井康二：トータルコストに基づく耐震設計の提案と試算(重力式岸壁の例)、日本地震工学シンポジウム論文集、Vol.11, pp.2371-2376, 2002
- 5) 阿部淳一、杉本博之、渡邊忠朋：地震リスクを考慮した設計地震動強度算定に関する研究、土木学会論文集A, Vol.63, No.4, pp.780-794, 2007
- 6) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説、2022
- 7) 坂井公俊、室野剛隆、佐藤勉、澤田純男：トータルコストを照査指標とした土木構造物の合理的な耐震設計法の提案、土木学会論文集A1(構造・地震工学)、Vol.68, No.2, pp.248-264, 2012
- 8) 国土交通省：大阪北部地震における運転再開等に係る対応に関する連絡会議の開催について、2018, <https://www.mlit>

- go.jp/common/001240621.pdf (参照日：2024年5月6日)
- 9) 名波健吾, 和田一範, 坂井公俊：鉄道構造物を対象とした構造種別・損傷レベル毎の地震後復旧日数の算出, 土木学会論文集, Vol.79, No.13, 22-13037, 2023
 - 10) 坂井公俊, 和田一範, 豊岡亮洋：地震後の復旧時間を照査指標とした鉄道構造物の復旧性照査法, 日本地震工学会論文集, 第24巻, 2024
 - 11) Cornell, C.A.: Engineering Seismic Risk Analysis, *Bulletin of the seismological society of America*, Vol.58, No.5, pp.1583-1606, 1968.
 - 12) 安中正, 香川敬生, 石川裕, 江尻讓嗣, 西岡勉：期待損失評価のための確率論的ハザードに適合した地震動波形群の設定方法, 土木学会地震工学論文集, Vol.28, 2005
 - 13) 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
 - 14) 名波健吾, 坂井公俊：等価1自由度モデルを用いた鉄道高架橋の地震時挙動評価時の骨格曲線の高度化, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.78, No.4, pp.I_266-I_274, 2022
 - 15) 室野剛隆, 佐藤勉：構造物の損傷過程を考慮した非線形応答スペクトル法の適用, 土木学会地震工学論文集, Vol.29, pp.520-528, 2007