

# ライフサイクルコストを用いた 鉄道施設の耐震対策優先度判定法

坂井 公俊\* 室野 剛隆\* 佐藤 勉\*\*

Method of Priority Judgment of the Seismic Countermeasure Based on Life Cycle Cost

Kimitoshi SAKAI Yoshitaka MURONO Tsutomu SATO

Recently, reinforcement of railway structures, countermeasures against vehicle derailments and installation of seismometers for earthquake early warning, have been actively promoted to improve the railway safety against earthquakes. However, it takes a long period until the countermeasures are completely applied to the overall railway line. It follows that an index giving priority to possible countermeasures is required based on their budgets and resulting effects. In this study, as one of the indexes, a method of priority judgment of the seismic countermeasure is proposed based on the difference of life cycle cost for the cases with and without a countermeasure. By using this proposed method, priority of countermeasures is determined considering the inherent properties of a target line, such as their operation, earthquake, soil and structural conditions.

キーワード：耐震対策優先度判定，DLCC，生起確率付地震動群，鉄道システム

## 1. はじめに

鉄道システムは土木・建築構造物（以下、構造物）、軌道、電車線柱（以下、電柱）、車両など様々な施設・要素により構築されている。これらの地震対策は、各種施設ごとに独立に実施されており、そのため各々が保有する耐震性能も異なっている。しかし、鉄道システム全体の地震時安全性向上を目標とした場合には、各施設の耐震性能、耐震対策効果を共通の指標で評価する必要がある。さらに、限られた予算の中で効果的な耐震補強を実施するには、補強の優先順位や工法の選択について合理的な方針を設定する必要がある。従来の補強の優先順位決定は過去の地震被害等に基づいた技術者の経験的な判断による部分が大半を占めていると考えられ、鉄道システム全体を含んだ形での客観的、定量的な判断指標は整備されていない。

一方で、鉄道システム全体の地震リスクを評価する際には、これに対応した形での地震作用を設定する必要がある。従来から用いられている施設の地震リスク評価手法としては、確率論的地震危険度解析<sup>1)</sup>によって評価されるハザード曲線と構造物のフラジリティ曲線をかけ合わせることによって、損傷確率等を算定することが多い<sup>2)</sup>。ところが高架橋上に建設された電柱や車両の地震リスクを評価する場合には、高架橋上の応答を推定する必要があり、ハザード曲線だけでは不十分である。この問

題を解決するため、筆者らは過去に確率論的地震危険度解析に基づいた地震波形（生起確率付地震動群）のシミュレーション手法の提案を行っている<sup>3)</sup>。この生起確率付地震動群を用いることで、動的解析によって各種施設の損傷確率を算定可能であり、さらに動的解析を実施することで高架橋上端の応答波形も得られるため、電柱、軌道、車両等の構造物の影響を含んだ施設の地震リスクを評価することも可能である。つまり現在の技術レベルにおいて、鉄道システム全体の地震リスクを共通の指標で評価することが可能であると考えられる。

そこで本研究では、各種鉄道システムの地震リスクを算定し、ライフサイクルコストという共通の指標に基づいた耐震対策優先度判定法の提案を行う。さらにモデル線区に対して提案手法を適用することで、手法の適用性と有効性の検討を行う。

## 2. DLCCを用いた耐震対策優先度判定法

鉄道システム全体の地震安全性を向上させるためには、弱点箇所の耐震性能向上や、効率的な耐震対策優先度の判定を行う必要がある。従来の地震対策は、各種施設ごとに実施されており、鉄道システムとしてどの箇所に対策を実施することが最適な補強対策となるかといった判断を行うことは困難であった。そこで本章では、複数の施設、設備から構成される鉄道システムの耐震性能、補強効果と同じ指標で評価するために、耐震補強前後のライフサイクルコストの差分（DLCC：Difference of Life

\* 構造物技術研究部（耐震構造）

\*\* 構造物技術研究部

特集：構造物技術

Cycle Cost)<sup>4)</sup>に基づいた優先度判定法の提案を行う。  
 まず鉄道システムのライフサイクルコスト (LCC) を次式によって定義する。

$$LCC = C_I + C_R + \sum_{i=1}^N P_{fi} C_{fi} \quad (1)$$

ここで、 $C_I$ : 初期建設コスト、 $C_R$ : 補強コスト、 $P_{fi}$ : 地震によって損傷レベルが*i*となる確率、 $C_{fi}$ : 損傷レベルが*i*となった場合の損傷コスト、 $N$ : 限界状態の数である。損傷コスト  $C_{fi}$  は、補修コスト  $C_{REP}$  と営業損失コスト  $C_F$  の合計額で表現することとした。また、今回のLCCには維持管理費等は含まないこととしている。この場合、地震対策前後のLCCの差DLCCは次式で表現できる。

$$DLCC = LCC_0 - LCC_R = \left( \sum_{i=1}^{N_0} P_{fi}^0 C_{fi}^0 \right) - \left( C_R + \sum_{i=1}^{N_R} P_{fi}^R C_{fi}^R \right) \quad (2)$$

ここで、 $LCC_0$ : 耐震補強を行わない場合のLCC、 $LCC_R$ : 耐震補強を行った場合のLCC、 $N_0$ : 耐震補強を行わない場合の限界状態の数、 $N_R$ : 耐震補強を行った場合の限界状態の数である。

様々な補強対策に対してDLCCを算定し、比較することで、DLCCが大きいものほど補強効果が大きく、優先的に実施すべき補強対策であると判断できる。DLCCの算定手順を図1に示す。

### 3. モデル線区における地震対策優先度判定の試算

#### 3.1 モデル線区の構築

今回はモデル線区として延長10kmの地盤、橋梁、盛土、電柱からなる鉄道システムを構築した。橋梁、盛土の高さ分布、地盤の固有周期の概略を図2に示す。さらに橋梁においては降伏震度、等価固有周期、各損傷レベルに至る限界変形量、破壊形態（せん断破壊型、曲げ破壊型）、盛土においては、降伏震度、円弧すべりを発生させる際の円弧半径、各損傷レベルに至る限界変形量をそれぞれ設定している。また電柱においては、高さ10mのコンクリート柱を50m間隔で一様に配置し、周期、降伏震度、損傷に至る限界変形量を設定した。なお、橋梁、盛土の損傷は設計標準<sup>5)</sup>にあるように4段階に分類し、それぞれの限界値を設けているが、電柱については、損傷、無損傷の2段階で設定した。このモデル線区を対象に、各種補強を考えたDLCCの算定、最適な耐震対策の判定を行う。

#### 3.2 地震作用の設定

モデル線区の地震リスクを評価するための地震動群を設定する。ある一つの再現期間を想定した場合においても、対象とする地域の地震活動度が異なれば、想定される地震動レベルは大きく異なる。そこで本検討では、地

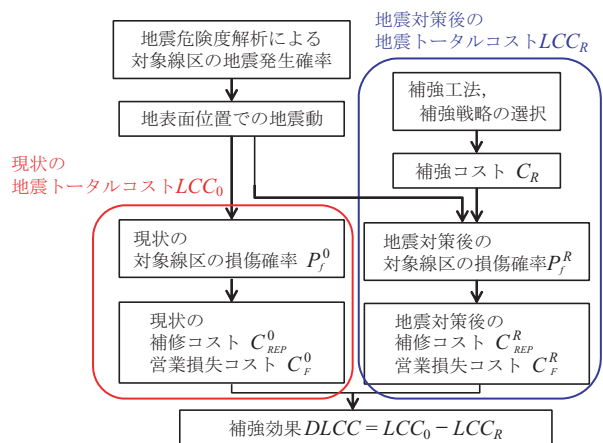


図1 DLCC算定フロー

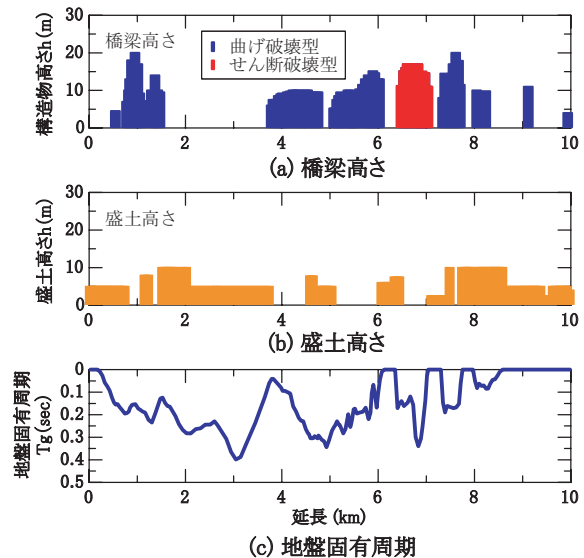


図2 モデル線区の概略

震活動度の高い地域（地域A）と低い地域（地域B）の2地域を想定し、確率論的地震危険度解析を実施した。地震危険度解析を行う際には、想定する地震動レベルとしてどの程度の再現期間を想定するか検討する必要があるが、今回は地震動の発生確率として30年間に3%の確率で発生する地震動とした。これは国の機関によって計算されている地震発生確率と同一である<sup>6)</sup>。今回の地域において算定された地震加速度は、地域Aでは760gal、地域Bでは334galである。このように周辺の地震環境（断層の有無、各断層の規模、発生確率）の違いによって、想定される地震動レベルが大きく変化するため、地域毎に要求される耐震対策が変化することが予想される。

次に筆者らが提案している生起確率付地震動群作成手法<sup>3)</sup>を用いて地震危険度解析結果を満たす時刻歴地震動波形（生起確率付地震動群）を、シミュレートする。最終的に得られた地震動群の例を図3に示す。

ここで得られた生起確率付地震動群は、工学的基盤（耐震設計上の基盤面、せん断弾性波速度  $V_s=400\text{m/s}$  程

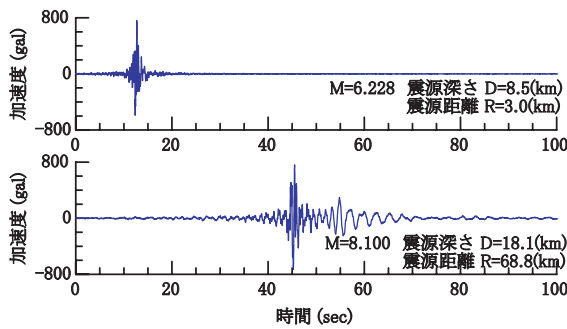


図3 生起確率付地震動群の例（地域A）

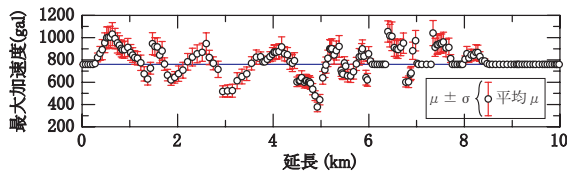


図4 地表面位置での地震応答の例（地域A）

度の連続地層)位置での地震動であるため、対象地点の地盤情報を用いた地盤応答解析を実施することで、地表面位置の地震動を求める。地盤応答解析としては、逐次非線形解析を用いた。地盤の非線形構成則としては、GHE-Sモデル<sup>7)</sup>を用いることとし、動的変形特性は多数の繰り返し三軸試験結果をもとに設定された標準的な値<sup>8), 9)</sup>をもとに設定している。減衰としては、地盤のせん断弾性波速度、土質分類をパラメータとして周波数依存性を考慮した減衰(Q値)の提案式<sup>10)</sup>に出来る限り一致するようなレーリー減衰を設定している<sup>11)</sup>。

以上の条件で、基盤位置での地震動群を入力とした地盤応答解析を実施することにより、地表面位置での地震動群の推定を行った。得られた地表面位置における地震動最大加速度の平均値、標準偏差をまとめて図4に示す。これらの結果より、地盤応答解析を実施することで、地盤条件に応じた地震動の増幅、減衰の影響を適切に評価されていることが分かる。

### 3.3 各種施設の損傷確率算定

前節で得られた地表面位置での地震動群を構造物に入力することで、応答値を推定する。応答値算定手法を簡単に説明する。橋梁は1自由度系にモデル化し、逐次非線形動的解析を行う。非線形構成則は骨格としてBi-linearモデル、履歴法則としてCloughモデル<sup>12)</sup>( $\alpha=0.20$ ,

$\beta=0.05$ )を用い、減衰定数は10%とした。盛土はニューマーク法<sup>13)</sup>により滑動変形量を算定する。電柱の応答は、橋梁と同様に1自由度系にモデル化した動的解析によるものとし、橋梁上に存在する場合は橋梁の応答波形を、盛土上に存在する場合は地表面波形をそれぞれ入力として用いる。さらに橋梁上に建設された電柱は、橋梁のロッキング応答の補正係数を考慮している<sup>14)</sup>。

以上の手続きにより、各地震動群に対する橋梁、盛土、電柱の地震応答値を推定できる。これと各損傷レベルの限界応答値を比較することで、各損傷レベルの発生確率を算定する。得られた損傷確率を図5に示す。この結果から、せん断破壊型の橋梁では損傷レベル4となる確率が非常に大きくなっていること、地震活動度の高い地域Aでは地域Bと比較して損傷確率が大きくなっていること等が分かる。

### 3.4 補修コスト、補強コストの設定

LCCを算定するために必要な補修コスト、営業損失コストの設定を行う。また、各種補強を設定するための補強工法の抽出、これに必要な補強コストについても設定する。

#### (1) 補修コスト、営業損失コストの設定

地震被害を受けた場合の補修コスト、営業損失コストを設定する。本検討では災害復旧誌や研究事例などの資料調査をもとに、表1、表2のように仮定した。なお営業損失コストは、表2の停止日数に1日の運輸収入を乗じることによって、算定可能である。今回は路線の1日の運輸収入として10億円と仮定した。

#### (2) 補強工法の設定

橋梁、盛土、電柱の補強工法、補強効果、補強コストを設定する。本検討では1つの事例として表3に示すような工法を設定し、各工法を適用した場合の損傷確率についても算定している。これ以外の補強工法を採用することも可能であり、この場合についても同様の手順で、耐震対策優先度を判定することが出来る。

### 3.5 DLCC算定および耐震対策優先度判定

#### 3.5.1 地震活動度の高い地域（地域A）の場合

##### (1) 第一段階目の補強

地震活動度が相対的に高い地域AにおけるDLCC算定結果を図6に示す。これによると、まず対象路線の地震

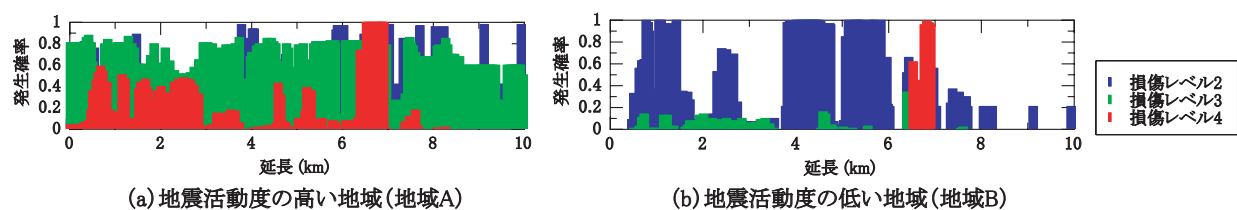


図5 構造物の損傷確率

特集：構造物技術

表1 設定した補修コスト

損傷レベル	盛土*	橋梁*	電車線柱*
1	—	—	—
2	—	0.1	—
3	—	0.3	—
4	0.2	2.0	0.01

単位：億円  
(\*それぞれ一箇所辺りのコスト)

表2 設定した営業損失コスト（停止日数）

損傷レベル	盛土	橋梁	電車線柱
1	—	—	—
2	0.5	1	—
3	3	5	—
4	6	90	2

単位：日

表3 設定した補強シナリオ

補強箇所	補強工法	補強効果	補強コスト
橋梁	鋼板巻き立て	靱性能上昇	100万円/本
盛土	グラウンドアンカー	応答値低減	1.5万円/m
橋梁上の電車線柱	ダンパー	応答値低減	10万円/本

による補修費、営業損失を合計したLCCは約1300億円であることが分かる。これに対して橋梁、盛土、電柱のそれぞれに地震対策を実施した結果を示しているが、補強費は最大でも10億円程度(他と比べて小さいため図には表れていない)であり、現状のLCCと比較して非常に小さい。一方で橋梁、盛土の地震対策を実施することで、被害発生確率を大幅に低減できるため、補修費等は低くなっている。その結果として、DLCCは全ての対策でプラス(電柱補強でも0.7億円程度のプラス)となっており、いずれの対策も有効であるという結果となった。その中でも橋梁に地震対策を実施することで、DLCCが最大になっている。つまりこの地域では橋梁から地震対策を実施することが最適であると言える。

なお、橋梁については、2タイプの破壊形態(せん断破壊型、曲げ破壊型)を有する橋梁をまとめて検討を行っている。そこでこれら破壊形態の違いによる対策効果を調べるために、それぞれの破壊形態を有する橋梁のみを補強した場合のDLCCの算定を行った。得られた結果を図7に示すが、今回の地域では曲げ破壊型の橋梁を補強するよりも、せん断破壊型の橋梁の補強を行う方がDLCCが大きくなるため、効果的な対策であると言える。

つまり、地域Aにおける第一段階目の地震対策としては、せん断破壊型を有する橋梁の補強を実施し、その後曲げ破壊型を有する橋梁の補強を実施することが有効であるという結果を得た。

(2) 第二、第三段階目の補強

続いて地域Aにおいて橋梁の地震対策が終了した後に実施すべき対策を調べるため、第一段階目の対策(せん断破壊型、曲げ破壊型の橋梁の補強)実施後のLCCに対する各種対策効果の算定を行った。得られた結果を図8に示すが、橋梁上の電柱の対策よりも、盛土の対策を

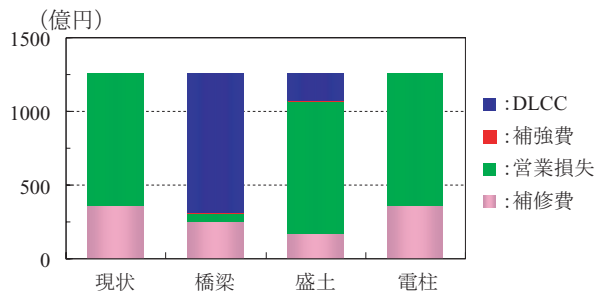


図6 DLCC算定結果 (地域A, 第一段階)

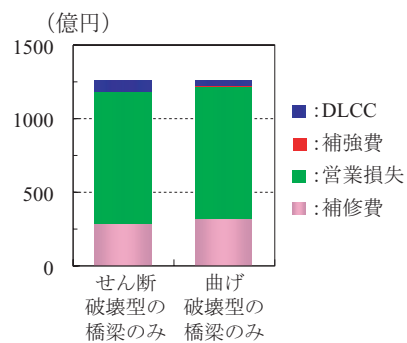


図7 破壊形態の異なる橋梁毎のDLCC算定結果

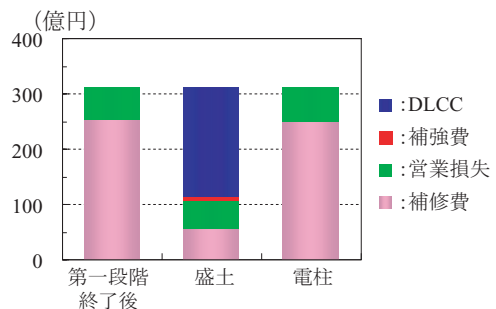


図8 DLCC算定結果 (地域A, 第二段階)

施することで、DLCCが大きくなることが分かる。よってこの地域では第二段階目の対策として盛土の補強が有効であると言える。

さらに橋梁上の電柱であるが、この図では表現されていないが、DLCCは0.7億円程度のプラスとなっている。つまり電柱の対策を実施することで、LCCが低減される結果になっており、第三段階目の対策としては、橋梁上の電柱の補強を実施、という結果が得られた。

### 3.5.2 地震活動度の低い地域（地域B）の場合

#### (1) 第一段階目の補強

地震活動度の相対的に低い地域BにおけるDLCC算定結果を図9に示す。地域Bでは想定される地震動のレベルが低いために、各種施設の地震リスクは低い。その結果、現状のLCCは地域Aと比較して小さくなっている（地域A：1260億円，地域B：970億円）。また、各種対策を実施した際のDLCCは、地域Aと同様に橋梁の対策を実施した場合が最大となっている。一方で、盛土の対策を第一段階目の対策として実施した場合には、DLCCがマイナスとなる。これは、路線全体の停止日数に与える影響として、橋梁の被害によるものが大半であるため、たとえ盛土の対策を実施したとしても、営業損失には変化がなく、結果として投資効果がマイナスになったためである。つまり地域Bでは第一段階目の対策として盛土の補強を実施したとしても、有効な結果は期待できないことになる。

橋梁の対策のうち、破壊形態毎のDLCC算定結果を図10に示す。これより、せん断破壊型の橋梁に対策を行うとDLCCが非常に大きくなるのに対し、曲げ破壊型の橋梁への対策はDLCCがマイナス(-2.63億円)となる。これは地域Bでは想定される地震レベルが低いため、曲げ破壊型の橋梁の損傷確率も低くなっている（図5(b)）。そのためにたとえ対策を実施しても損傷確率が変わらないため、対策効果がマイナスとなった。

以上の結果より、地域Bにおいては第一段階目の地震対策としては、せん断破壊型を有する橋梁のみ補強を実施することが有効であるという結果を得た。これは地域Aにおける第一段階目の地震対策（せん断破壊型→曲げ破壊型の順に全橋梁を補強）とは異なる結果となっており、地点の地震活動度によって有効な対策が異なることが明らかになった。

#### (2) 第二、第三段階目の補強

地域Bにおける第二段階目の対策を検討するため、せん断破壊型の橋梁を補強した状態のLCCを初期状態として、各対策を実施した場合のDLCCを算定する。(1)で述べたが、全橋梁（せん断破壊型+曲げ破壊型）に対策を実施したLCCは、せん断破壊型の橋梁に対策を実施したLCCよりも大きくなるということが分かっているため、曲

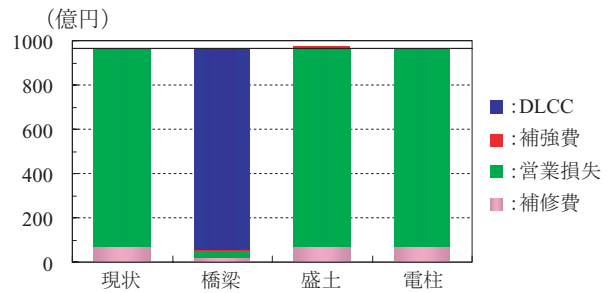


図9 DLCC算定結果（地域B，第一段階）

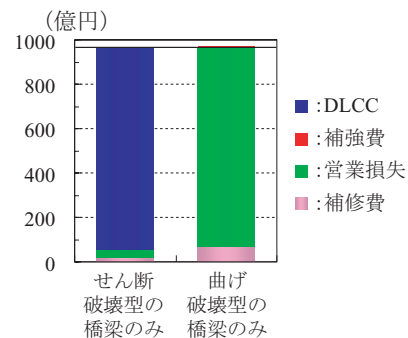


図10 破壊形態の異なる橋梁毎のDLCC算定結果

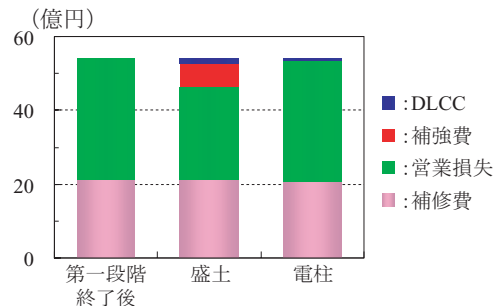


図11 DLCC算定結果（地域B，第二段階）

げ破壊型の橋梁に対する検討は実施していない。

得られた結果を図11に示すが、盛土、橋梁上の電柱ともに対策を実施することでDLCCがプラスとなっている。図9において第一段階目の対策として盛土を選択した場合にはDLCCがマイナスであったが、第二段階目の対策ではプラスとなっている。この原因としては、第一段階目の対策では地震時の営業停止に占める影響のほとんどが橋梁であったために、盛土の対策効果がほぼゼロであり、投資効果としてはマイナスとなっていた。ところが橋梁の補強を実施することで、盛土の損傷が路線全体の営業停止に与える影響が相対的に大きくなり、対策を実施することで営業損失が大幅に低減された。その結果として盛土対策のDLCCがプラスとなった。つまり適切な対策の検討を行う場合には、各段階での初期状態からの変化を適切にモデル化する必要があると言える。

また、図11の各種対策を実施した場合の結果の中で、

特集：構造物技術

DLCCが最も大きいのは盛土の補強である。そのため第二段階目の対策としては盛土, 第三段階目の対策としては橋梁上の電柱が選択された。

4. まとめ

本検討では、鉄道システム全体の耐震対策の優先順位を客観的・定量的に評価可能な手法として、DLCCに基づく耐震対策優先度判定法の提案を行った。本手法では地震を確率論的に評価し、この地震動評価結果を元に各種施設の損傷確率、対策前後のライフサイクルコストを計算することで、対策の有効性を評価した。

本手法の適用例として、モデル線区に対して各対策を実施した場合のDLCCを算定し、対策優先順位の設定を行った。その結果、たとえ同一地盤、同一構造が並んだ路線であっても、地震活動度が異なると有効な対策が変化することが分かった。つまり本手法を用いることで、線区の輸送密度、輸送量、地震活動度、地盤条件、構造形式、設計年代などの各種条件を反映させた上で、路線ごとに適切な地震対策を選定可能となることが期待される。

また、本手法では構造物上端の応答波形も算定されている。この応答波形を用いて車両の走行解析を実施することで、車両の脱線確率を算定することも可能であり、将来的にはより総合的な検討に発展させることも可能である。

ただし補修費、補強費、補強効果、その他停止に伴う損失費用等は様々な条件に依存して変化するため、実際の適用にあたっては、検討を行う路線の実情に応じた値を設定し、これに基づいた補強優先度の判定を行う必要がある。さらに、今後は構造物応答と地震動評価のそれぞれの予測精度の違いを加味した検討や、ネットワークによる代替輸送等を考慮した形での社会的損失等も含むより総合的な評価について検討を行う必要がある。

文献

- 1) Cornell, C.A.: Engineering Seismic Risk Analysis, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.58, No.5, pp.1583-1606, 1968.
- 2) 土木学会地震工学委員会耐震基準小委員会：土木構造物の耐震設計における新しいレベル1の考え方（案），2003
- 3) 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，第24巻，第5号，pp.11-16，2010
- 4) 佐藤忠信，吉田郁政，増本みどり，金治英貞：ライフサイクルコストを考慮した道路橋の補強戦略，土木学会論文集，No.784/VI-66，pp.125-138，2005
- 5) 運輸省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造等設計標準・同解説（耐震設計），1999
- 6) 藤原広行ほか：「全国地震動予測地図」作成手法の検討，防災科学技術研究所研究資料，2010
- 7) 室野剛隆，野上雄太：S字型の履歴曲線の形状を考慮した土の応力～ひずみ関係，第12回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.494-497，2006
- 8) 安田進，山口勇：種々の不撓乱土における動的変形特性，第20回土質工学研究発表会講演集，pp.539-542，1985
- 9) 野上雄太，室野剛隆：S字型履歴曲線を有する土の非線形モデルとその標準パラメータの設定，土木学会地震工学研究発表会論文集，30，2-0014，2009
- 10) 福島美光，翠川三郎：周波数依存性を考慮した表層地盤の平均的なQ-1値とそれに基づく地盤増幅率の評価，日本建築学会構造系論文集，460，pp.37-46，1994
- 11) 坂井公俊，室野剛隆：地震基盤深度を考慮した距離減衰式の補正係数，土木学会地震工学研究発表会論文集，30，1-0009，2009
- 12) Clough, R. W. and S. B. Johnston: Effect of stiffness degradation on earthquake ductility requirements, 第2回日本地震工学シンポジウム梗概集，pp.227-232，1966
- 13) Newmark, N. M: Effects of earthquakes on dams and embankments, Geotechnique 15, pp.139-160, 1975.
- 14) 今村年成，坂井公俊，室野剛隆：電車線柱と橋梁の相互作用の簡便な耐震評価手法の提案，土木学会第63回年次学術講演会概要集，I-127，2008