

# 鉄道施設の地震対策 優先度判定を支援する

坂井 公俊  
構造物技術研究部  
(耐震構造研究室 研究員)

室野 剛隆  
同  
(同 室長)

佐藤 勉  
同  
(主管研究員)



さかい きみとし むろの よしたか さとう つとむ

## はじめに

近年、我が国は地震活動期に入ったとされており、今後発生が危惧される大規模地震に対して、鉄道の安全性をいかに確保するかが重要な課題となっています。新設される構造物については、兵庫県南部地震での構造物の大被害をうけて改訂された耐震設計基準<sup>1)</sup>により設計され、その安全性は飛躍的に向上したと考えられます。一方で、既存の構造物については、想定される大規模地震に対する安全性を評価し、所要の性能を満足しない場合には、何らかの補強を行う必要があります。しかしながら鉄道は、(1) 広域に線状・面状に路線が敷設されており、検討対象範囲が広く、(2) 土木構造物（橋梁、盛土、トンネルなど）、建築構造物、電力設備、車両など、多様な設備から構成されています。

このうち、(1)の問題に対しては、膨大な既存構造物に対して、一律に地震対策を施すのは非現実的であると考えられます。限られた予算の中で効果的な地震対策を実施するには、補強の優先順位や工法の選択について合理的に設定する必要があります。また、(2)については、各設備の地震対策がそれぞれ独自に実施されており、各設備の耐震性能や地震対策効果を共通の指標で評価する必要があります。

これらの課題を解決するために、私達はライフサイクルコスト(LCC)という共通の指標に基づいて、各種設備の地震対策の効果を定量的に評価し、地震対策の優先順位付けの意思決定支援を行う方法の提案を行いました。従来の地震対策の優先順位決定は、技術者の経験的な判断による部分が大半を占めていましたが、この提案手法によって補強の効果を定量的に評価することで、他の設備も横並びで比較した優先順位の設定が可能となるとともに、利用者への説明責任を果たすことも期待されます。ここでは、その考え方を簡単に紹介するとともに、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について検討した結果を紹介します。

## DLCCを用いた地震対策優先度判定手法

先に述べたように、多様な設備から構成される鉄道システムの耐震性能、対策効果を同じ指標で評価するために、道路の分野で提案された<sup>2)</sup>対策前後のライフサイクルコストの差分(DLCC: Difference of Life Cycle Cost)に基づいて優先度判定を行うこととします。

鉄道システムのLCCは、初期建設コストと地震対策に要する補強コスト、さらに地震によって損傷を受けた場合の復旧コストの合計によって表現されます。このとき、地震対策前後のLCCの差DLCCは次式のように、地震対策を行う前の $LCC_0$ と地震対策を行った後の $LCC_R$ の差分で表現されます。

$$DLCC = LCC_0 - LCC_R$$

耐震対策効果DLCCを評価する際の流れを図1に示します。まず各構造物の地震による損傷確率を評価する必要があります。そのため、対象線区における地震の発生確率を計算し、ある期間内に想定される地震動波形を多数作成します。この地震動を構造物に作用させることで、構造物の損傷確率を算定し、これに基づいて復旧コスト、LCC

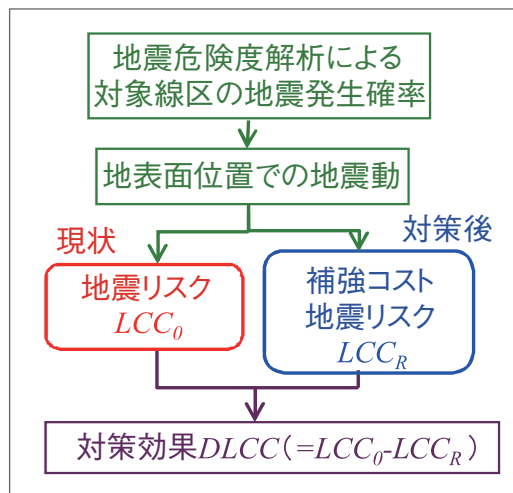


図1 耐震対策効果(DLCC)の算定フロー

を算定します。この作業を対策前後の線区に対して実施することで、DLCCが評価されます。

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することが出来ます。例えば図2に示すような鉄道システムが存在し、この路線に対する地震対策箇所、地震対策工法として、A、B、Cの3通りが考えられるとします。この時、それぞれの地震対策に対してLCCを計算し、現状のLCCとの差分を評価します。この結果では、対策箇所Bによる結果がDLCCが最大となっており、今後地震対策を行う場合に対策箇所Bから優先的に実施することが望ましい、といった結論が得られます。

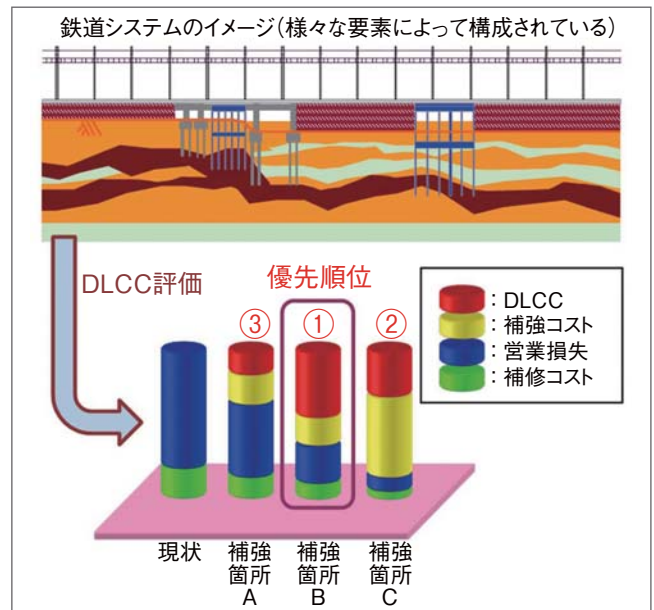


図2 耐震対策優先度の判定イメージ

### モデル線区による試算例

提案手法の適用例として、延長10kmのモデル線区に対して耐震対策優先度を判定します。今回対象とするのは、地震活動度の異なる2地域とし、その他の条件(構造物条件、運行条件等)は全て同一としました。この結果から、地震条件の変化に伴う対策優先順位の変化の有無について考察することが出来ます。

#### (1) モデル線区の構築

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想定しました。橋梁、盛土の高さ分布の概略を図3に示します。さらに橋梁においては耐力、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ます。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ました。なお、橋梁、盛土の損傷レベルは設計標準<sup>1)</sup>に準じて4段階に分類し、それぞれの限界値を設けました。電柱については、損傷、無損傷の2段階で設定しました。

#### (2) 地震作用の設定

本検討では、地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、地震の発生確率を計算しました。例えば、再現期間を1000年とした場合に想定される地震動波形<sup>3)</sup>の例を図4に、地表面位置における地震動最大加速度の分布を図5に示します。図5の結果より、地点毎の地盤条件の変化によって地震動の大きさが局所的に変化していることが分かります。

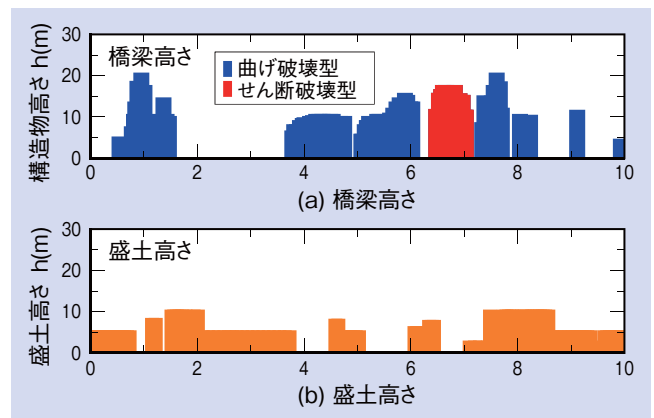


図3 モデル線区の概略

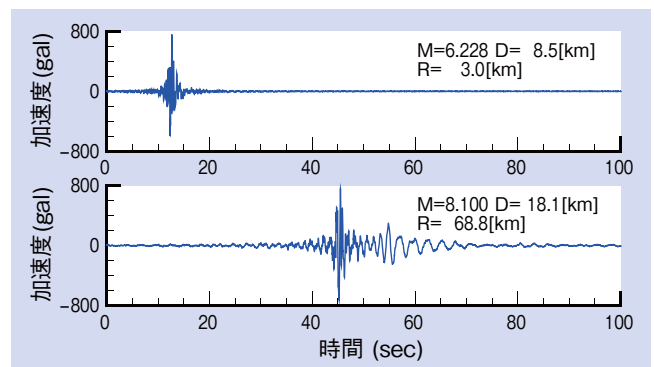


図4 発生確率を持った地震動の評価例(地域A)

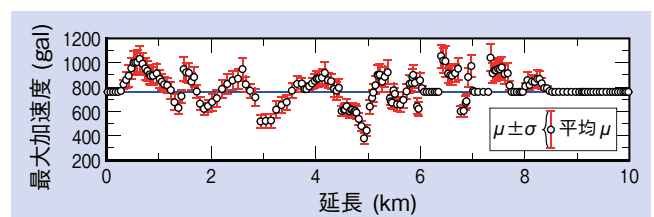


図5 地表面位置での地震応答の例(地域A)

### (3) 各種施設の損傷確率算定

地表面位置で算定された地震動波形を用いて、各構造物に損傷が発生する確率を算定します。橋梁は1自由度の非線形モデルで表現します。盛土はニューマーク法により滑動変形量を算定します。電柱の応答は、橋梁と同様に1自由度系にモデル化し、応答値を算定します。

得られた損傷確率を図6に示します。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と比較して構造物の損傷確率が大きくなっていることなどが分かります。

### (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います。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します。

#### (a) 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します。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設定しました。

#### (b) 補強工法の設定

橋梁、盛土、電柱の補強工法、補強効果、補強コストを設定します。本検討では1つの事例として表1に示すような工法を補強シナリオとして設定しました。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、地震対策優先度を判定することが出来ます。

### (5) DLCC算定および地震対策優先度判定

#### (a) 地震活動度の高い地域(地域A)の場合

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7に示します。橋梁、盛土、電柱それぞれの地震対策に必要な補強費は最大でも10億円程度であるのに対して、対策により被害発生確率が低減されるため、対策後に必要な補修費は大幅に小さくなり、DLCCは全ての対策でプラスとなっています。その中でも橋梁に地震対策を実施することで、DLCCが最大になっており、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ます。ただし、この結果は、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対策した結果であり、その効果の内訳を詳細にみると、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が大きくなっています。つまり、

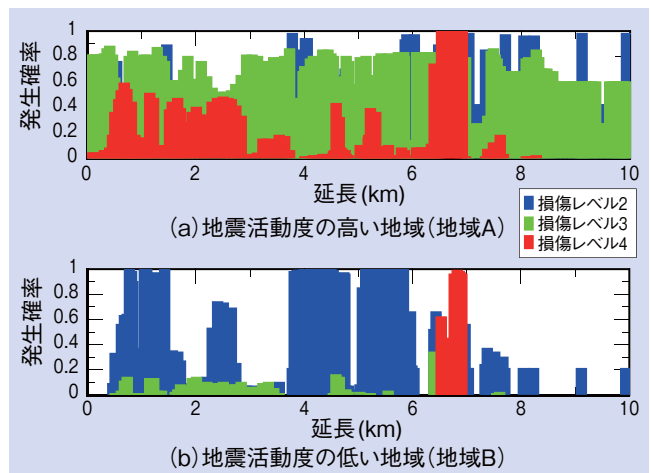


図6 構造物の損傷確率

表1 設定した補強シナリオ

補強箇所	補強工法	補強コスト
橋梁	鋼板巻き立て	100万円/本
盛土	グラウンドアンカー	1.5万円/m
電車線柱	ダンパー	10万円/本

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となりました。これは兵庫県南部地震以降、せん断破壊先行の構造物の対策を緊急的に行ってきた実情と良く整合しています。

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、橋梁の対策実施後のLCCに対する各種対策効果の算定を行いました。橋梁上の電柱の対策よりも、盛土の対策を実施する方がDLCCが大きくなることが分かります。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ます。

#### (b) 地震活動度の低い地域(地域B)の場合

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8に示します。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ます。一方、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がマイナスとなっています。これは、盛土は被災しても復旧が容易なのに対して、高架橋は復旧に時間を要し、路線全体の停止日数が大きくなることが原因です。

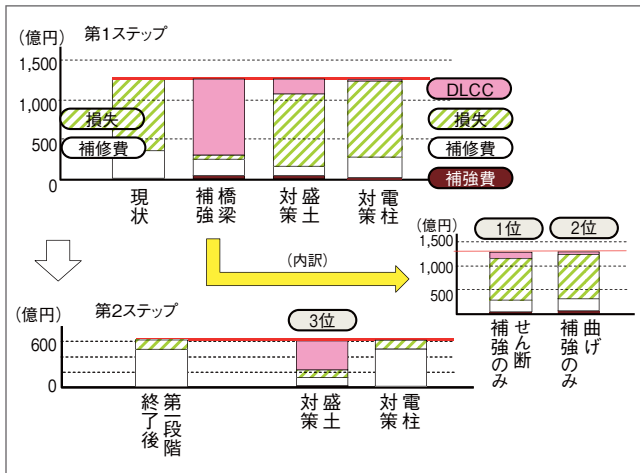


図7 地震活動度が高い地域でのDLCC算定結果

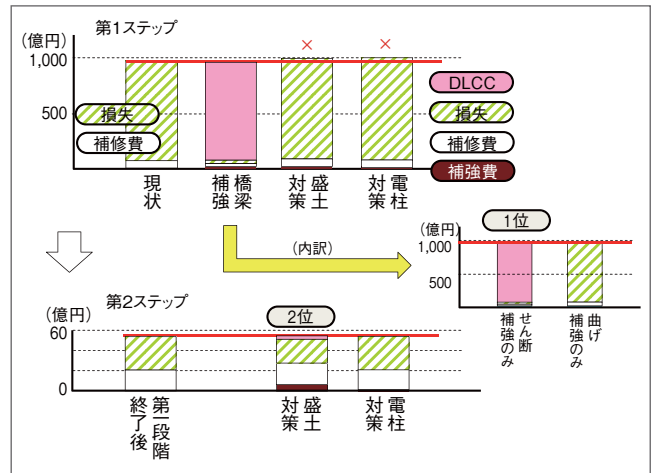


図8 地震活動度が低い地域でのDLCC算定結果

橋梁の対策の内訳を見ると、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がマイナスとなっています。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が低くなっているためです(図6(b))。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ました。

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を算定しました。第一段階目の対策として盛土を選択した場合にはDLCCがマイナスでしたが、第二段階目の対策ではプラスとなっています。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ました。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ため、盛土対策のDLCCがプラスとなりました。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を対象とするのが良いと判定されました。

上記(a)(b)で見たように、地点の地震活動度によって有効な対策が異なることが分かりました。実際の鉄道路線は、構造物条件や地盤条件、輸送条件などがさらに大きく変化しているため、本手法を用いることでその路線の条件に即した対策が選定されると考えられます。

### おわりに

本検討では、鉄道システム全体の地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に基づく地震対策優先度の評価手法の提案を行いました。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もとに各施設の損傷確率、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ます。

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ます。[RRR]

### 文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造等設計標準・同解説(耐震設計)，1999.
- 2) 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.
- 3) 坂井公俊，室野剛隆：地震の揺れを予測する，RRR，Vol.67，No.8，pp.18-21，2010.