

鉄道ネットワークのレジリエンス定量評価

ごうだてつろう なかのまさあき こたにしんじ いたうまれすけ なかむら
合田哲朗¹・中野雅章¹・小谷真史²・伊東希典²・中村ゆかり¹

¹日本工営（株）中央研究所 先端研究センター（〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原2304）

²日本工営（株）本社 鉄道事業部 鉄道技術部（〒102-8539 東京都千代田区麹町5-4）

次世代のコンサルティングサービスでは、大規模水害や巨大地震等の想定外の外乱に対してシステムが保有すべきレジリエンスを具体化し、真に持続可能で強靱なインフラを整備することが望まれる。本報告では、ダッカにおいて仮想的に構築した鉄道ネットワークを対象に、地震ハザードに対するレジリエンスの定量評価を行った。RC巻立てによる複数の補強シナリオに対して構造物の地震時損傷レベルを算出し、レジリエンス三角形を用いてシステムの最適な復旧順序を求めた。システムの機能に対する補強の費用対効果も併せて考慮することで、計画/設計におけるレジリエンス概念の導入の有用性を示した。

Key Words : レジリエンス, 鉄道ネットワーク, 数理最適化, 地震ハザード, ダッカ

1. はじめに

大規模水害や巨大地震といった未曾有の災害を経験し得る各種インフラシステムには、レジリエントであることが求められる。つまり、想定外の大規模災害に直面しても、主要な機能は崩壊をせず、機能を維持し、早期回復できることが要求される。

近年、レジリエンスというキーワードは我が国でも広く認識され始めており、様々なインフラへの評価手法が提案されている。Shiら¹⁾は、下水道ネットワークの流下能力や下水管の破壊エネルギーに着目し、複数の管路補強シナリオに対する補強効果を定量的に算出している。石橋ら²⁾は、強震動と津波を連続して受ける道路ネットワークに対し、リスク・レジリエンスの両側面から交通機能低減を評価している。岩田ら³⁾は、首都直下型地震について、鉄道ネットワークが有するレジリエンスを損失輸送量に着目して算出している。これらは研究ベースでは開発が進められているものの、社会実装した事例は未だ乏しい。そこで本報告では、岩田ら³⁾の計算手順を参考により実用的なアプローチを想定し、仮想的に構築した鉄道ネットワークを対象として、地震ハザードに対するレジリエンス評価法を提示する。

2. レジリエンス定量評価の必要性と手法

(1) 鉄道計画におけるレジリエンス評価の必要性

東日本大震災では太平洋沿岸部の鉄道路線の多くが、橋脚・電柱の倒壊、架線の破断、車両の脱線な

どの壊滅的な被害を受けた。代替バス輸送や復旧工事により徐々に機能を回復したものの、一定水準を取り戻すのにも多大な時間を要した。レジリエントなインフラ整備には、限られた予算内の効果的な防災・減災対策により被害を抑制するとともに、素早く復旧できるよう備えることが課題となる。

このような整備方針の策定のために、鉄道システムの機能低下と回復過程を定量的に評価する必要がある。このとき、輸送力はネットワークを構成して初めて定義できるものであるため、ネットワーク全体を対象としたモデル化が重要となる。多岐に渡る対策工等の効果を定量化し、最適な構造を選択することで、レジリエントな計画/設計が実施できる。

(2) 定量評価のための指標と手法

レジリエンスの定量化には、レジリエンス三角形を用いた。図-1にその概念図を示す。この考え方に

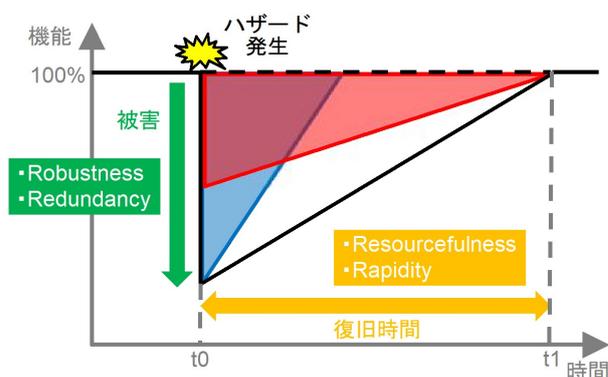


図-1 レジリエンス三角形の概念図

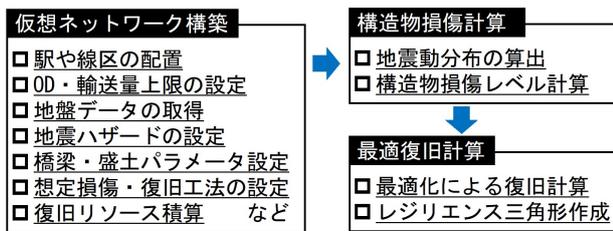


図-2 計算フロー

より、米国地震工学・学際研究センターが定義するレジリエンス評価の4R (Robustness・Redundancy・Resourcefulness・Rapidity) を総合的に評価できる。

レジリエンス三角形は、ハザード発生後の機能低下と時間経過に伴う機能回復を表現する。例えば、図-1の赤塗三角形は被災直後の機能低下は小さいものの復旧に時間を要することを示し、青塗三角形は被災直後の機能低下は大きいものの早期復旧できることを示す。三角形の面積がレジリエンスの特性値を代表している。

3. 評価対象及び諸条件設定

(1) 評価方針

今回は、仮想的に構築したダッカの鉄道ネットワークを対象に、地震被災時の構造物損傷による輸送機能低下とその復旧時間を考慮してレジリエンスを評価した。図-2に計算フローを示す。前章に記述したとおり、レジリエンスを考慮した計画/設計はネットワーク全体に対して行う。そのためまずは、構造物諸元・復旧にかかるリソース・輸送量等を設定する必要がある。

(2) 解析対象と諸条件の設定

図-3に解析対象を示す。ここでは10駅・11線区から構成される鉄道ネットワークを定義した。構造物は、橋梁と盛土の2種類とし、それぞれ計5線区、計6線区に属性を与えた。総延長は、70.5kmとなった。

a) 地盤データと地震ハザードの設定

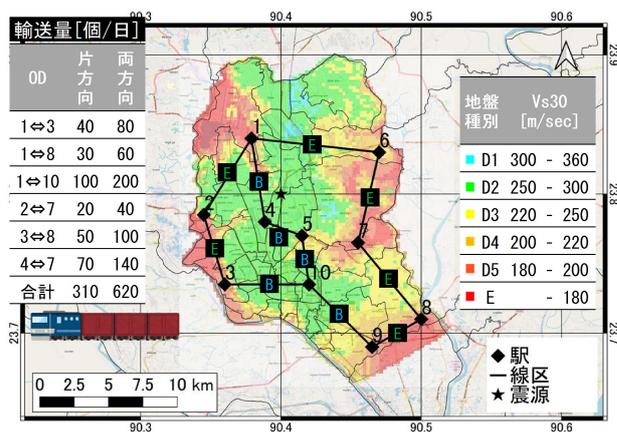
ダッカの地盤データには、2009年に成果が取り纏められた既往調査 (CDMP) の報告書⁴⁾を参照した。本計算では、米国NEHRPに規定される地盤種別に応じたVs30 (表層30mの平均S波速度) 分布を使用した。

地震ハザードには、今回は簡易的に単一シナリオを用いた。CDMPの既往調査報告書⁵⁾を参照し、モーメントマグニチュードMw=6.0、震源深さ8km、傾斜角90°のダッカ都市直下型の地震動を設定した。なお、同報告に記載の無い走向とすべり角は、それぞれ0°、90°と仮定した。

b) 橋梁と盛土の設定

橋梁は、脚高10mの単柱式橋脚・一室箱桁を設定した。同国耐震基準に準拠し、設計水平震度0.16に対して簡易設計を行った。プッシュオーバー解析により、降伏震度0.245、等価固有周期1.093となった。

盛土は、構造高3m・土質⁶⁾と設定した。力学的な



線区パラメータ

線区	構造物種別	延長 [km]	輸送上限 (片方向) [個/日]
(1, 2)	盛土	7.2	40
(2, 3)	盛土	5.8	60
(3, 10)	橋梁	6.7	70
(1, 4)	橋梁	6.7	170
(4, 5)	橋梁	3.2	100
(5, 10)	橋梁	3.9	100
(1, 6)	盛土	10.2	100
(6, 7)	盛土	7.4	100
(7, 8)	盛土	7.9	50
(8, 9)	盛土	4.4	70
(9, 10)	橋梁	7.1	70

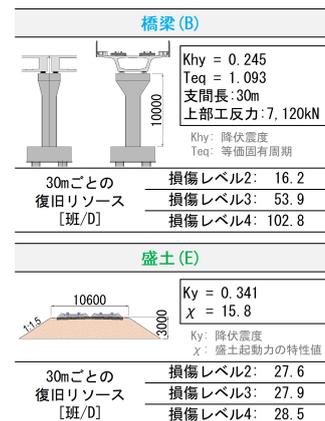


図-3 ダッカの仮想鉄道ネットワーク

パラメータは坂井ら⁷⁾の手法を用いて、構造高と土質区分に対する回帰式より、降伏震度0.341、盛土の起動力特性15.8となった。

両構造物に対して、鉄道標準⁶⁾の損傷レベル1-4を割り振り、各損傷に対して復旧に必要なリソースを積算した。これらの復旧リソースは、XX[班/D]と表現する。これは、「1班の作業員グループがXX日稼働する」ことで補修が完了することを意味する。

c) 輸送にかかる設定

コンテナ輸送には、6つのODを設定した。各ODには上下線があるため、両方向の輸送量を定義している。ネットワーク全体では、620[個/日]の輸送量が機能の最大値となった。また、各線区には1日当たりの輸送上限を設けた。

4. レジリエンス評価結果

(1) 構造物損傷計算の方法と結果

a) 計算方法

地震動分布の計算には、汎用ハザード解析ツールであるOpenQuakeを用いた。文献⁴⁾に記載のある距離減衰式のCY08 (Chiou and Youngs 2008) を適用して簡便法による処理を実施した。

構造物の損傷レベル計算は、鉄道総研により提案された損傷推定ノモグラム^{7,8)}を用いた。橋梁の損傷レベルは、地表面最大加速度 (PGA)、地表面最大速度 (PGV)、降伏震度、等価固有周期の4パラメー

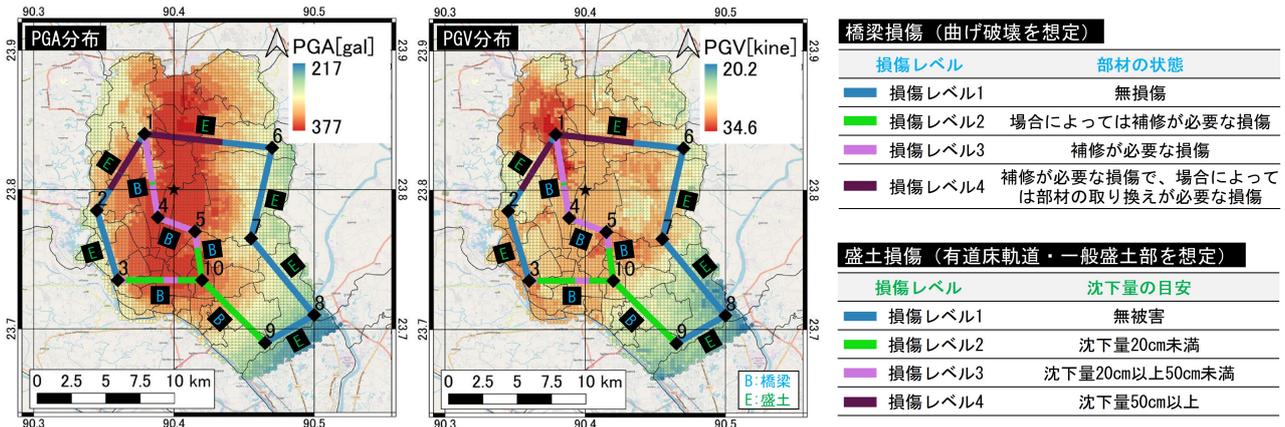


図-4 地震動分布と構造物損傷計算の結果

タより推定できる。また、盛土の損傷レベルは、PGA, PGV, 降伏震度, 盛土の起動力特性, マグニチュード, 震源距離の6パラメータより推定できる。

b) 解析結果

図-4に解析結果を示す。地震動分布に関しては、PGAは217-377[gal]の範囲で分布し、PGVは20.2-34.6[kine]の範囲で分布する結果となった。

構造物の損傷レベルは、PGAと相関を持つことが見て取れる。橋梁はPGAの大きい1-4-5の区間で損傷レベル3を観測し、他区間は主に損傷レベル2となった。盛土はPGAの大きい2-1-6区間で部分的に損傷レベル4を観測し、他区間は損傷レベル1となった。

(2) 最適復旧計算の方法と結果

a) 計算方法・計算条件

これまでに設定した仮想鉄道ネットワーク情報と構造物損傷計算の結果をもとに、混合整数線形計画法を用いた最適化計算により最適復旧順序を求めた。最適化の計算条件を以下に記載する。

- 被災後35日間を復旧の対象期間とする。
- 各線区へ投入できる1日当たりのリソース上限を1,000[班/日]とする。全体に投入できる1日当たりのリソース上限を1,500[班/日]とする。
- 各ODに対する輸送経路は問わない。
- 損傷を有する線区は、輸送量上限を1/2する。
- 線区の補修のために必要な復旧リソースが配分されたとき、輸送量上限を元の値に戻す。

目的関数には、鉄道ネットワークの機能が完全に回復するまでの総損失輸送量の最小化を与えた。これは、レジリエンス三角形の面積を最も小さくする復旧順序を算出することを意味する。

以上より奥田ら⁹⁾を参考に、最適化問題の定式化を行った。本計算では、各ODに対する全ての経路をNetworkXにより事前列挙して定式化に組み込むことで効率的な計算とした。また、奥田ら⁹⁾では上下線分離の構造物が想定されていたが、本設定では橋脚・盛土構造物は上下線が1つの構造物に付帯しているため、これを考慮して定式化した。解析には、線形計画ライブラリのPuLP2.6.0を使用した。

b) 解析ケースと計算概要

5つの解析ケースを設定した(表-1)。ケース①

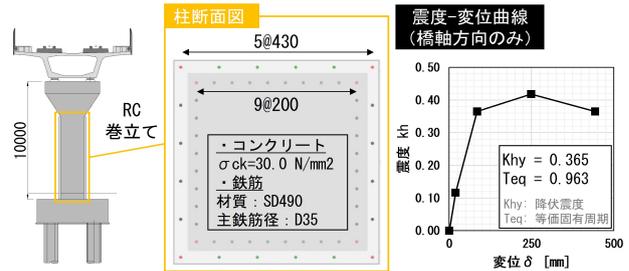


図-5 RC巻立て補強モデル

は、図-3に示す鉄道ネットワークを使用したモデル(補強無しモデル)である。ケース②~⑤は、特定の橋梁区間に対し、図-5のRC巻立て補強を行ったモデルである。各ケースの補強区間は、表-1の左2列目を参照されたい。補強により、橋脚の力学特性が変化し、損傷レベルも変化する。

c) 計算結果(レジリエンス三角形)

図-6にケース①~③のレジリエンス三角形と構造物損傷分布を示す。同図には、復旧期間・総損失輸送量と併せて求められた最適な復旧順序も表示する。特定線区にRC巻立てを施したケース②・③では、補強区間の損傷レベルが軽減され、それに応じてレジリエンス三角形が縮小した。特に被害の大きい1-4-5区間への補強(ケース③)では、復旧期間と総損失輸送量を比較的大きく低減したことがわかる。

d) 計算結果(費用対効果)および考察

表-1に全ケースにおける補強費用対効果の試算結果を示す。国土交通省R4施工パッケージ型積算方式標準単価表を参考に、RC巻立ての1m³当たり単価を7万円と仮定して、線区延長から橋脚基数を求めて補強費用を試算した。さらに、ケース①を基準に、ケース②~⑤の総損失輸送量の低減量を算出し、補強費用で除して費用対効果を求めた。ケース③の費用対効果が最も高く、7.05[個/百万円]となった。

同表には各ケースの復旧日数・補強費用・費用対効果が整理されており、これらを用いて情報のスクリーニングができる。例えば、被災後の復旧日数の制限が25日以内とされる場合、ケース③のみ制約を満たす。予算に制約があり補強に150百万円までしか支出できない場合、ケース④またはケース⑤より費用対効果等を考慮して選択すれば良い。

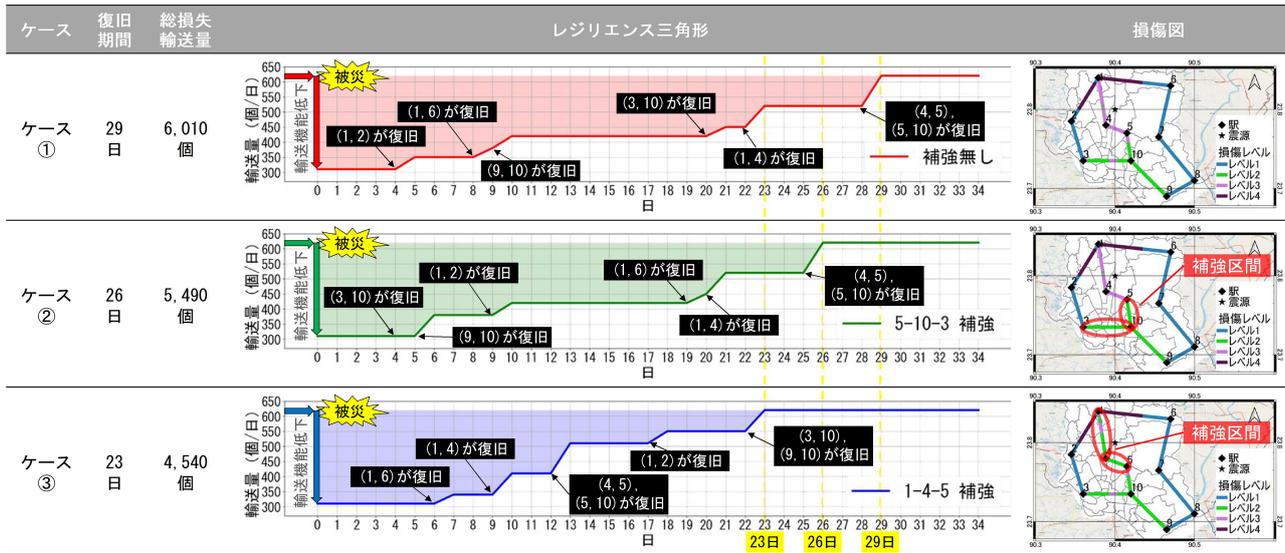


図-6 ケースごとのレジリエンス三角形と構造物損傷分布

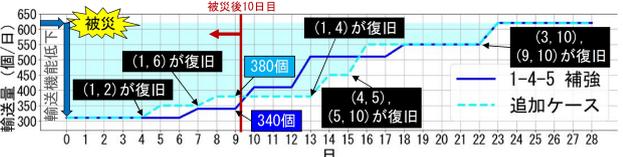


図-7 特定期間内の最適機能回復を示す追加ケース

表-1 RC巻立て補強の費用対効果

ケース	補強 区間 (駅間)	復旧 期間 [日]	総損失 輸送量 [個]	補強 橋脚数 [基]	補強費用 [百万円]	(B) 損失輸送量 低減量[個]	(B)/(A) 費用対効果 [個/百万円]
ケース①	補強 無し	29	6,010	0	0	-	-
ケース②	5-10-3	26	5,490	354	224	520	2.32
ケース③	1-4-5	23	4,540	330	209	1,470	7.05
ケース④	1-4	26	5,120	225	142	890	6.26
ケース⑤	4-5	27	5,660	105	66	350	5.27

e) 被災時の復旧優先順序決定への適用

ここでは、追加の検討ケースとして被災時の復旧優先順位決定を考える。すなわち、災害発生後に直ちに現況復旧できないものの、できるだけ早期に輸送量を回復していくことを優先する。図-7には、ケース③に対して被災後10日間(0-9日)の間で輸送機能を最大限回復することを想定した追加ケースの結果を示す。復旧順序を変化させることによって、追加ケースはケース③に比べて、被災後10日の時点で40[個/日](=380-340)の輸送力を多く確保できる。一方、追加ケースの全復旧までの総損失輸送量は4,630個となりケース③より90個多くなった。

以上の様に、レジリエンスの概念に基づき、被災と復旧の時間的評価を活用することで、目的に応じた、より説明性の高い意思決定が可能となる。

5. まとめと今後の課題

ダッカの仮想鉄道ネットワークを対象にレジリエンスの定量評価の活用例を示した。複数の補強ケースに対して、レジリエンス三角形に基づく評価を行い、その費用対効果までを算出することで、様々な制約・目的の下での最適な計画/設計に資する根拠付けが可能となることを示した。すなわち、レジリエンスは持続可能性を具体化できる設計上の性能の一つとなり得るものであり、コンサルティングサービスの付加価値に繋がるものと考え。今後はより実務に即した複雑な条件の下で、課題に応じた指標の抽出(設計思想)を検討し、レジリエンスに基づく性能設計の社会実装を目指す。

参考文献

- Shi, Z., Watanabe, S., Ogawa, K. and Kubo, H.: Structural Resilience in Sewer Reconstruction, Elsevier Inc., 2018
- 石橋 寛樹, 小島 貴之, 秋山 充良, 越村 俊一: 南海トラフ地震による強震動と津波を受ける道路ネットワークのリスク・レジリエンス評価手法の提案と構造物の補強優先度判定への適用, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), 76 巻, 4 号, p. I_32-I_46, 2020.
- 岩田 直泰, 丹羽 健友, 鈴木 崇正, 山本 俊六: 鉄道ネットワークの損失輸送量に着目した地震対策効果の定量的評価, 鉄道総研報告 Vol.35, No.1, 2021.
- Comprehensive Disaster Management Program (CDMP): Seismic Hazard Assessment of Dhaka, Chittagong, and Sylhet City Corporation Area, 2009
- Comprehensive Disaster Management Program (CDMP): Earthquake Risk Assessment of Dhaka, Chittagong, and Sylhet City Corporation Area, 2009
- 丸善出版: 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 平成24年9月
- 坂井 公俊, 室野 剛隆, 京野 光男: 鉄道盛土の地震被害簡易推定手法の提案, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), 68 巻, 3 号, 2012.
- 室野 剛隆, 野上 雄太, 宮本 岳史: 簡易な指標を用いた構造物および走行車両の地震被害予測法の提案, 土木学会論文集A, 66 巻, 3 号, p. 535-546, 2010.
- 奥田 大樹, 鈴木 崇正, 深澤 紀子, 尾崎 尚也: 大規模災害発生後の鉄道輸送の復旧戦略決定支援手法の基礎検討, 鉄道総研報告 Vol.34, No.2, 2020.