

災害後におけるスマートブリッジ敷設による道路交通への影響評価

山下 達也¹・藤原 章正²・力石 真³・有尾 一郎⁴

¹ 正会員 広島県庁 (〒730-8511 広島県広島市中区基町 10-52)
E-mail: t-yamashita74989@pref.hiroshima.lg.jp

² 正会員 広島大学大学院教授 先進理工系科学研究科 (〒739-8529 東広島市鏡山 1 丁目 5 番 1 号)
E-mail: afujiwara@hiroshima-u.ac.jp (Corresponding Author)

³ 正会員 広島大学大学院准教授 先進理工系科学研究科 (〒739-8529 東広島市鏡山 1 丁目 5 番 1 号)
E-mail: chikaraishim@hiroshima-u.ac.jp (Corresponding Author)

⁴ 正会員 広島大学大学院助教 先進理工系科学研究科 (〒739-8527 東広島市鏡山 1 丁目 4 番 1 号)
E-mail: mario@hiroshima-u.ac.jp (Corresponding Author)

シザーズ構造によって展開可能な橋梁であるスマートブリッジは、構造力学分野で災害復旧時に応急的に敷設できる新たな橋梁として実用化へ向け研究が行われている。しかし、交通計画分野においてスマートブリッジ敷設時の影響は研究されておらず、スマートブリッジは交通計画分野を含めた包括的な開発状況であるといえない。このことから、本研究は交通計画分野においてスマートブリッジ敷設時の影響について、平成 30 年豪雨災害後の呉市エリアにおける道路ネットワークを例に行った。研究手法として利用者均衡モデル及び BPR 関数を用いて、豪雨災害後の各リンクの交通量算出を行い、その結果からスマートブリッジ敷設時の影響の評価点である敷設時のネットワーク効果の算出及び交通計画分野におけるスマートブリッジの最適規格の推定を行った。

Key Words: Disaster Resilience, Smart Bridge, User Equilibrium, Braess Paradox, Emergency bridge

1. 研究背景

過去最大級や数十年に一度と評される自然災害が各地で毎年のように発災している。そのような災害の多くは、複数エリアにおいて同時多発的に発生しており、道路ネットワークに深刻なダメージを与え、集落の孤立や被災エリアの混雑を引き起こしている。このような自然災害へ対応をするために被災リンクの迅速な復旧が求められる。

災害復旧を目的とし、有尾ら¹⁾は展開可能なプレアセッション橋であるスマートブリッジ(以下 SB とする)を発明した。SB はマジックハンド等で用いられるシザーズ構造を有しており、緊急時に伸ばすことで橋梁をかけることができる折りたたみの橋梁形式である。しかし、SB の開発サイドである構造力学分野においてその力学特性が検証されることはあっても、SB の利用者サイドである交通計画分野において、被災した道路リンクに SB を敷設した際の復旧に着目した災害復旧研究は行われてこなかった。このことから、SB の開発サイドと利用者サイド間で適切な意見交換が行われておらず、SB の利用者サイド(災害復旧現場)の実情が反映されないという問題を有している。

さらには、SB の影響を定量的に評価がされていないため、実用化への大きな障壁である。

2. 研究目的

研究背景より、本研究は交通計画分野において SB により被災リンク復旧を行った際の影響を多角的に研究することが目的である。

研究目的を達するため、2 つの観点から SB を用いた道路ネットワーク復旧シミュレーションを行った。1 つ目は被災リンクを SB による復旧を行うことでエリア内の混雑を減少させる効果(SB のネットワーク効果)を分析する。このことは、SB を用いて被災リンクを迅速に復旧を行う場合と被災リンクを復旧しない場合の比較を行い、SB のネットワーク効果を定量的に評価するものである。2 つ目は災害復旧時に利用者サイド(交通計画分野)が求める SB の最適規格を分析する。このことは、道路ネットワークシミュレーション上で SB の規格を変更した際、最も混雑の減少効果が高い規格を推定するものである。

本研究では実際の災害時における SB 敷設時の影響を評価するため、平成 30 年 7 月豪雨災害を例に研究を行っ

表-1 SB 架橋実験結果から推定した規格と交通容量

内径	2055mm	外径	2978mm
設計荷重	120kN	設置人数	2人
長さ	21.5m	高さ	4m
展開時間	10分	供用開始時間	1時間
システム	油圧	実交通容量	7274台/日
平均速度	2.62km/h	最大交通容量	10911台/日

た。また、道路ネットワークシミュレーションの対象エリアを、平成 30 年 7 月豪雨災害で道路リンクの崩壊によって孤立した広島県呉市周辺とした。

3. SB の橋梁構造

本研究で用いる SB の特徴及び規格を本章で示す。

棒部材 2 本の中央をピン結合し、それぞれの部材が独立して回転することのできる単一シザーズ構造というものがあ。この単一シザーズ構造を左右の境界でピン結合し重ね合わせることで展開可能となるシザーズ構造となり、様々な分野でその利用価値が検討されている。この構造の利点は骨格のみで構成されており軽量の点や展開可能な点である。SB はこのシザーズ構造とオリガミを用いた弾性不安定(座屈)の一般論²⁾、座屈分岐問題³⁾の蛇腹構造の座屈理論に基づき、最小の力で展開可能な組立不要な橋梁として開発された。そのため、SB は迅速に展開架橋し、対岸に着岸と同時にデッキが完成し、そのまま供用が可能になるという理想的な最適構造の橋である。道路崩壊現場に到着後 1 時間で使用が可能であり、この復旧までの速さは他の復旧用橋梁にない最大の特徴である。

本研究で扱う SB の規格を表-1 に示す。

4. 本研究の流れ

本研究では、道路ネットワークシミュレーション上で SB を敷設した際の再現を行うため、被災により不通となったリンクのうち SB の敷設が可能なリンクを SB の規格を持ったリンクに置換した。

被災直後の道路ネットワークは Wardrop の第一原則⁴⁾「利用される経路の旅行時間は皆等しく、利用されない経路の旅行時間よりも小さいか、せいぜい等しい」に従うと考えたため、その再現した道路ネットワーク上で利用者均衡モデルを用いて各リンクの交通量を算出した。

SB 敷設時の影響を定量的に評価するため、各リンク交通量から算出した、研究対象エリアにおける総混雑度、総旅行時間、総走行時間費用の 3 つの観点を用いた。ここでいう混雑度は各リンクにおける(交通量/実交通容量)、走行時間費用は各リンクにおける(交通量・旅行時間・時間価値)である。最後にこれらの評価観点を用いて SB のネッ

表-2 エリア内の BPR 関数パラメータ

道路規格	α	$\beta 1$	$\beta 2$	自由流時の速度
高速道路	0.74	2.5	2.82	制限速度
多車線道路	0.31	1.1	2.82	制限速度
市街地 2 車線	0.2	1.2	2.82	制限速度
平地 2 車線	0.1	2.3	2.82	制限速度
山地 2 車線	0.1	3.7	2.82	制限速度
一車線	0.48	2.82	2.82	制限速度

トワーク効果及び交通計画分野における SB の最適規格を明らかにした。

本研究では、利用者均衡モデルの Flank-Wolfe 法⁴⁾により、各リンクの交通量を算出するため、各リンクの抵抗を表す方法として BPR 関数を用いた。

$$t_a(x_a) = t_{a0} \{1 + \alpha(x_a/C_a)^\beta\} \quad (1)$$

ここで、 t_a はリンク a における旅行時間、 x_a はリンク a における交通量、 t_{a0} はリンク a の自由流時における旅行時間、 C_a はリンク a における交通容量、 α および β は BPR 関数パラメータを表す。

本研究では、少量の交通を通すことが出来る SB の規格を持ったリンクを道路ネットワーク上で表現するため、SB を敷設するリンクの BPR 関数パラメータを別個に設け、そのリンク抵抗が高くなるように調整した。しかし、SB のパラメータを推定した先行研究がないため、SB 敷設時の影響評価の前に SB の BPR 関数パラメータ推定を行った。なお、本研究では SB 以外のリンクの BPR 関数パラメータを吉田ら⁵⁾の先行研究をもとに、表-2 の通り設定した。

5. 解析条件

本研究では、リンク数 31020、ノード数 20830、ゾーン数 1339、道路種類 415 の解析条件で道路ネットワークのシミュレーションを行った。また、本研究は被災直後から本復旧までの異なる復旧段階で SB 敷設時の影響を動的に評価するため、2018/7/7~2018/8/8 のうち道路ネットワークの回復状況が異なる計 16 日に着目し解析を行った。

6. SB の BPR 関数パラメータ推定

SB の BPR 関数パラメータ推定方法について本章で述べる。

SB を敷設した全てのリンクが SB の最大交通容量を下回ることを目的条件とし、SB の BPR 関数パラメータを増加させながら被災後の道路ネットワークで各リンク交通量を算出した。ここで SB を敷設したリンクとは、発災直後に寸断されたリンクのうち SB が敷設可能なリンクを指す。つまり、BPR 関数パラメータを増やすにしたがってリンクの抵抗が増えるため、SB を敷設したリンクの交通量

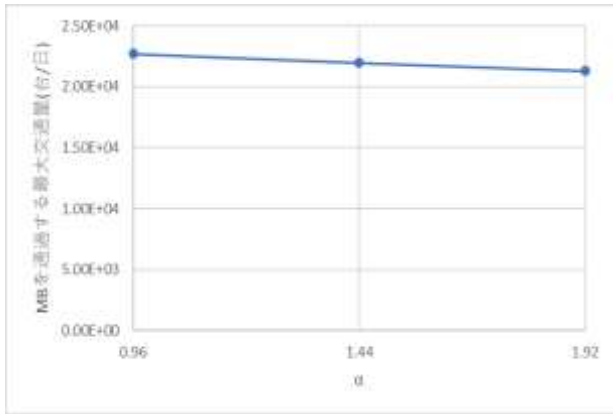


図-1 BPR 関数パラメータ変更時の SB を通る最大交通量

が減り、目的条件を満足することができる。

BPR 関数パラメータを増加させる基準として土木学会が提案した BPR 関数パラメータ⁹⁾($\alpha=0.48, \beta=2.82$)を参考に、BPR 関数パラメータを増加させていった。ここで、SB 供用中に交通容量以上の交通量が SB に集中した際、SB の前に渋滞が発生することが予測される。そのため、リンク交通量に対してリンク抵抗である交通時間を指数関数的に増加させることのできる BPR 関数パラメータ β の調整を行った。しかし、プログラムの特性上、BPR 関数パラメータ β を 10 以上にできなかったため $\beta = 9.87$ を上限値としたが、目的条件を満たさなかったため、BPR 関数パラメータ α により最終的な調整を行った。その結果、図-1 に示すように、BPR 関数パラメータ($\alpha=1.92, \beta=9.87$)の時、道路交通シミュレーション上で SB を敷設したリンクを通過する最大交通量が SB の最大交通容量を下回った。以上より、本研究では SB の BPR 関数パラメータとして $\alpha=1.92, \beta=9.87$ を用いた。

7. SB のネットワーク効果推定

本章は SB の敷設可能な全てのリンクにおいて SB を敷設した時のネットワーク効果を推定した結果を示す。前述したとおり、SB のネットワーク効果をエリア内の総混雑度、総旅行時間、総走行時間費用の 3 つの観点で評価した。

(1) 総混雑度及び総旅行時間の結果

前述した解析条件で総混雑度及び総旅行時間の結果を求めた。その結果、呉エリア内の総混雑度は SB を敷設することによって平均で 6.0%の減少であり、発災後の総混雑度軽減において SB 敷設が優位であることが示された。中でも、発災直後である 3 日目までの総混雑度軽減率の平均は 15.6%であり、発災後迅速に SB の敷設をした方が総混雑度の減少効果が高いという事がわかった。

呉エリア内の総旅行時間は、SB を敷設することで、特定



図-2 呉エリアにおける総走行時間費用の変化グラフ

の 1 日を除いて全ての日において減少した。しかし、SB を敷設することによって逆に総旅行時間を増やしてしまうという日が 1 日あり、Braess のパラドックスが生じた結果になった。

(2) 総走行時間費用の結果

前述した解析条件の下で解析を行い、SB の 1 日当たりのコスト(SB 本体価格及び SB 敷設に掛かる費用を使用日数で除したものを)を考慮して、SB 敷設による呉エリア内の総走行時間費用の結果を求めた。

SB 本体価格及び SB 敷設に掛かる費用を 1 億円と仮定したとき図-2 に示される結果であった。図-2 より、SB を敷設することで全ての日において総走行時間費用を減少させることができる結果となった。なお図-2 において、図の見やすさのため、7/7 及び 7/8 の結果は記していないが同じ傾向であった。以上より総走行時間費用の観点において SB の優位性が示されたといえる。

各日における総走行時間費用の減少額は最大で 7/7 の約 2480 億円、最小で 8/18 の約 0.83 億円であった。このことから、発災後迅速に SB の敷設をした方が総走行時間費用の減少効果が高いという事がわかった。

8. 交通計画分野における SB の最適規格の推定

交通計画分野における SB の最適規格を推定した手法を本章で示す。

本研究では SB の規格変更時における SB 改良コストとエリア内の総走行時間費用の減少額の差を SB 改良の経済効果とした。また、異なる SB の規格をシミュレーション上で表現するため、SB の BPR 関数パラメータを変更し、様々な規格を評価するため、SB の BPR 関数パラメータが異なる数ケースを用意した。よって本研究では、交通計画分野における SB の最適規格を、異なる復旧段階で最も経済効果の高い BPR 関数パラメータの組合せの中で再頻出の組合せであると定義した。

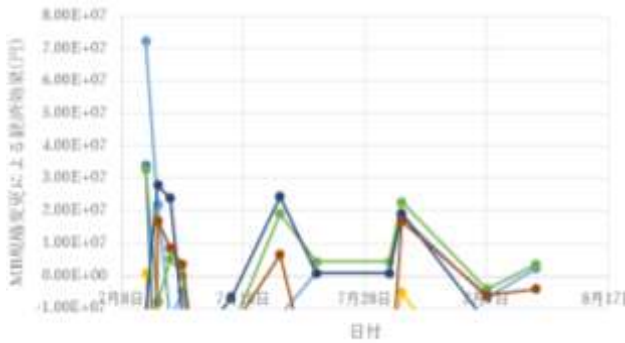


図3 SB規格変更時における経済効果

SB の BPR 関数パラメータの変更に伴う改良コスト算出のため、SB の BPR 関数パラメータ変更前後の交通量の変化率によって SB の改良に掛かるコストを以下の通り間接的に求めた。

$$C_i^{repair} = C^{twice} \times (MV_i/MV_{ben} - 1) \quad (2)$$

ここで、 C_i^{repair} は SB の規格変更ケース*i*における規格変更にかかるコスト(円)、 C^{twice} は SB の最大交通容量を 2 倍にするときにかかるコスト(円)、 MV_i は SB の規格変更ケース*i*における SB を通過する最大交通量(台)、 MV_{ben} は SB の規格変更が行われる前の SB を通過する最大交通量(台)。

結果を求めると図3 になり、縦軸に SB 規格変更による経済効果を横軸に発災後からの日数を示した。なお、本図における経済効果は、負になるものについては規格変更をしない方がよいという事を示しているため、本図では省略する。この結果より、SB の交通容量を 2 倍にする時にかかるコストが 4000 万円以下の場合においては $\alpha = 0.48$ 、 $\beta = 9.87$ の規格が最適であることがわかった。

8. まとめ

本研究は被災後に SB 敷設を行った際の影響を検証したものである。本研究を行うにあたり、シミュレーション

上で SB を通過する交通量と SB の最大交通容量より SB に適した BPR 関数パラメータを推定した。その推定結果から災害後に用いられる SB 敷設時のネットワーク効果を、総混雑度、総旅行時間、総走行時間費用の 3 つの観点から評価を行い、災害直後に SB を敷設することの優位性を示した。さらに、SB の BPR 関数パラメータの調整による SB の規格変更をシミュレーション上で疑似的に表現することで、交通計画分野における SB の最適規格を推定することができた。

謝辞：利用者均衡モデルのプログラミング指導及び研究におけるアドバイスをいただきました。株式会社福山コンサルタント小笹様をはじめ、関係の皆様へ謝意を表します。

参考文献

- 1) 有尾一郎・田中義和・中沢正利・古川祐輔・近広雄希. 高効率で折畳める橋構造物の開発研究(解析編), 第 25 回宇宙構造・材料シンポジウム. 2009. p.104-107.
- 2) 有尾一郎「おりがみ」から理想的な構造物への創造. 土木学会中国支部研究発表. 2009.
- 3) 中沢正利・有尾一郎・谷倉泉・小野秀一. MFM 概念とそれを応用したモバイルブリッジの研究開発. 土木学会全国大会. 2009.
- 4) 赤松寛. 交通ネットワークの均衡配分—最新の理論と解法—. 土木学会. 1998
- 5) 吉田禎雄・原田昇. 均衡配分用 BPR 式パラメータの推計. 土木学会論文集. 2002. No.695 (IV-54). p. 91-102.
- 6) 土木学会. 道路交通需要予測の理論と適応 第 II 編 利用者均衡配分モデルの展開. 2006.

(Received ?, 2021)

(Accepted ?, 2021)

EVALUATING OF EFFECTIVENESS OF LAYING SMART BRIDGE ON TRANSPORTATION FIELD AFTER DISASTER

Tatsuya YAMASHITA, Akimasa FUJIWARA, Makoto CHIKARAISHI and Ichiro Ario

Smart bridges, which are deployable bridges with scissors structures, have been studied in the field of structural mechanics that is development side for practical application as a new type of emergency bridges that can expand during disaster recovery term. However, in the field of transportation planning that is user side study, there is no research on the impact of laying smart bridges during disaster recovery term. The development of smart bridges is not a comprehensive development that includes the field of structural mechanics and the field of transportation planning. Therefore, this study evaluated the impact of laying smart bridges in the field of transportation planning, using the road network in the Kure City area after the heavy rain disaster in 2018 as an example. The user equilibrium model and the BPR function was used in the research method for calculating the traffic volume of each link after the heavy rain disaster. From this results, the network effect was calculated and the optimal standard of SB in the field of transportation planning was estimated, these trying are the impact evaluation point of SB after laying it.