



持続可能な橋梁の維持管理について — Sustainability of bridge maintenance —

著：Teslim B. Balogun, Adrienn Tomor, Jessica Lamond, Hazem Gouda, Colon A. Booth
訳：会誌編集委員会海外部会

橋梁の維持管理活動は、費用や環境への影響などの持続可能性について考慮することが重要である。橋梁の構造形式ごとに材料、構成部材、工法などに基づいた比較が行われてきたが、持続可能な構造形式を決定するために有益な維持管理活動に関連する情報は数少ない。本研究では、主要な橋梁の構造形式（コンクリート橋、鋼橋、石造橋）の維持管理性を考慮し、材料、エネルギー、輸送、人間健康、および生態系の観点から持続可能な構造形式を明らかにした。その結果、コンクリート橋と鋼橋の維持管理における環境への影響は、石造橋が12%であるのに対して、平均42%および46%というものであった。また、コンクリート橋と鋼橋の付属物は、維持管理において重要な役割を果たすために改良を行う必要があった。

1. はじめに

橋梁建設の持続可能性は、かぎられた資源、環境悪化、気候変動などの問題に対処するために、過去20年の間、建設業界の課題であった。建設、維持管理、解体の一連の活動で消費される材料とエネルギー資源量を考慮すると、橋梁、道路、鉄道などの輸送インフラは持続可能性の中核と考える必要があり（Pollalisら^[41]）、このことは英国エネルギー・気候変動省（DECC^[10]）により、気候変動やかぎられた資源における環境問題などが重要視されるにつれて明らかになってきた。英国の地方高速道路ネットワークは50,000橋以上の橋梁で構成されているが、英国運輸省（DfT^[11]）では、2015年から2021年までにおける維持管理の予算は約8,400億円（60億ポンド）の財政的制約があった。橋梁の維持管理はライフサイクル下においてこの制約を受け、その持続可能性に影響を与えることがあり、ネットワークの持続可能性を改善させるために、維持管理の観点から考慮される必要がある。したがって、さまざまな橋梁の維持管理に伴う環境への影響を調査して、もっとも持続可能な構造形式を選定することは有意義であり、維持管理の観点から、環境への影響が少ない（要するに、資源の消費量が少ない、気候変動への影響が少ない、エネルギーの消費量が少ないなど）構造形式を明らかにすることが、橋梁建設の持続可能性に繋がると考えられる。

2. 文献レビュー

橋梁建設の持続可能性について、従来は主に設計、建設、材料の観点から考慮されてきたが、維持管理の観点からはほとんど注目されていない。建設業界全体で定着しつつあるライフサイクルアセスメント（以下、LCA）の手法論を用いて、持続可能な橋梁の維持管理は、将来の建設のために調査され始めたばかりである（Pangら^[37]）。LCAは、建設、維持管理、解体、およびリサイクルから生じる環境への影響（気候変動、資源利用、

鉱物枯渇、水の消費など）の指標を示すことができる。文献により明らかにされたLCAによる指標は、一般的に橋梁形式（Gervasioやda Silva^[19]、Hammervoldら^[22]、HorvathやHendrickson^[26]）、材料（Bouhaya L, Roy RやFeraille-Fresnet F^[3]、Keoleian G^[32]、Lounis ZやDaigle L^[33]）、構成部材（Collings D^[7]、Du GやKaroumi R^[14]、Martin AJ^[34]）であるが、これらが橋梁の維持管理に考慮されることは稀である。

橋梁の維持管理を行うための調査における大部分は、データ不足のため簡易的な数値の推測統計を用いている（Keoleianら^[32]）。たとえば、伊藤ら^[8]は点検マニュアルから維持管理に関連する情報を抽出し、DuやKaroumi^[13]は業界や文献から情報を収集したが、ほかの調査では維持管理が想定されておらず（Bouhaya L, Roy R, Feraille-Fresnet F^[3]）、維持管理の選択肢について詳細に検討した調査はほとんど存在しない。Pangら^[37]は鋼、炭素繊維強化ポリマー、およびPC鋼材を補強するための選択肢を比較した。しかしながら、コンクリート橋、鋼橋、石造橋の維持管理方法を比較するための文献がないため、この調査ではLCAの手法論を用いて、一般的な橋梁形式の維持管理方法における結果を比較した。

3. 手 法

LCAは、コンクリート橋、鋼橋、石造橋で一般的に

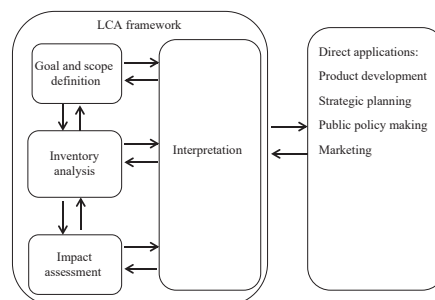


図 - 1 LCA の枠組み (ISO14040 から抜粋)

○ 海外文献 ○

行なわれる維持管理活動が与える環境への影響を評価するために使用される。LCA の手法論は、国際標準化機構（以下、ISO）による ISO14040 [27]、ISO14044 [28] に基づいており、これら ISO 規格の規準によって定められている。LCA の枠組みを図 - 1 に示す。LCA の一般的な手法論では、4 段階の反復工程が行われる。

- (a) 目標と調査目的の設定
- (b) ライフサイクルインベントリ（以下、LCI）
- (c) ライフサイクルインベントリアセスメント以下、LCIA）
- (d) 分析・評価

Ashurst [1] で使用された 3 つの基準に基づき、橋梁の構造形式ごとに 5 つの維持管理方法が表 - 1 のように選定された。

- 有効性：橋梁の総合的な安全性、性能のために必要な維持管理方法であること
- 費用：維持管理にかかる費用が約 140 万円（1 万ポンド）以上であること
- 時間間隔：一般的に 10 年以上の間隔をあけて実施すること

最近の研究では、関連する LCA の研究に基づいて、予防保全活動が考えられた。例をあげると、Horvath や Hendrickson [26] による塗装の塗替え、Hammervold ら [22] によるアスファルトの取替えとパラベットの鋼部材取替え、Collings [7] による橋面の舗装や防水層の取替えであ

る。LCA の分析に必要なデータは、従来の LCA 研究と一致している Du や Karoumi [13] [14] や Pang ら [37] の文献から収集した。抽出データの文献の出典元を表 - 2 に示す。文献から得られたデータの信頼性は、57 人の専門家（37 人の橋梁技術者、10 人の橋梁管理者、10 人の設計管理者）により検証が行われた。検証過程にはデータの賛否、また代替データの提案が可能なオンライン調査が含まれていた。本検証と同様の専門家である Cottam ら [9] の調査で使用された多数意見の平均率（以下、Apmo）は、切捨て率を算定するための 2 択（賛成または反対）に使用された。『賛成数』または『反対数』の割合が Ampo の Kapoor [31] の切捨て率を超えた場合、意見またはデータについての総意が得られたと判断する。切捨て率は以下の式により算定された。

$$Apmo = \frac{(\text{多数意見 (賛成数 + 反対数)})}{S}$$

ここで、S とは、文献データに賛成または反対のいずれかで回答した意見の合計である。賛成数は文献データに賛成する意見の総数であり、反対数は文献データに反対した意見の総数を表している。Ampo で明確な同意を得られなかった場合においては、平均値が採用された（Cottam ら [9]、Henning や Jordan [25]）。専門家らは、自身が反対したデータの代わりとなる推定データを提案するように要求された。提案されたデータの平均値は、

表 - 1 選定された維持管理方法における基準類

Maintenance method	Selection criteria			Source	Remarks
	Effectiveness	Cost	Interval		
Concrete bridges					
Grouting	Used to fill crack holes and prevent collapse	<ul style="list-style-type: none"> ■ Slightly expensive ■ Estimated cost of £15 000 	Every 30 years	UKRLG (2005)	Less rigorous
Overlying	Returns existing road surface to good condition	<ul style="list-style-type: none"> ■ More expensive ■ Estimated cost of £100 000 	Every 30 years	UKRLG (2005)	Very rigorous
Deck replacement	Restores totally damaged or deteriorated bridge	<ul style="list-style-type: none"> ■ Very expensive ■ Estimated cost of £622 000 	In 120 years	UKRLG (2005)	Extremely rigorous
Bearing renewal	Ensures a serviceable limit state is maintained	<ul style="list-style-type: none"> ■ More expensive ■ Estimated cost of £60 000 	Every 30 years	UKRLG (2005)	Less rigorous
Expansion joint renewal	Ensures a serviceable limit state is maintained	<ul style="list-style-type: none"> ■ Less expensive ■ Estimated cost of £15 000 	Every 20 years	UKRLG (2005)	Less rigorous
Steel bridges					
Structural metal painting	Ensures physical defects like rusted parts are returned to normal	<ul style="list-style-type: none"> ■ Less expensive ■ Estimated cost of £10 000 	Every 12 years	UKRLG (2005)	Less rigorous
Deck re-waterproofing	Provides adequate draining system for the bridge	<ul style="list-style-type: none"> ■ More expensive ■ Estimated cost of £30 000 	Every 20 years	UKRLG (2005)	Less rigorous
Pavement repair	Returns existing road surface to good condition	<ul style="list-style-type: none"> ■ More expensive ■ Estimated cost of £90 000 	Every 30 years	UKRLG (2005)	Slightly rigorous
Bearing renewal	Ensures a serviceable limit state is maintained	<ul style="list-style-type: none"> ■ More expensive ■ Estimated cost of £60 000 	Every 30 years	UKRLG (2005)	Less rigorous
Expansion joint renewal	Ensures a serviceable limit state is maintained	<ul style="list-style-type: none"> ■ Less expensive ■ Estimated cost of £15 000 	Every 20 years	UKRLG (2005)	Less rigorous
Masonry arch bridges					
Saddling	Able to solve multiple deterioration problems at once	<ul style="list-style-type: none"> ■ High cost amounting from material and labour intensity ■ Estimated cost of £23 400 	Masonry bridges that have undergone this type of repair may not require such rehabilitation in 200 years	Swoden (1990), Parke and Hewson (2008)	Rigorous work involved
Radial pinning	Able to strengthen the arch barrel	<ul style="list-style-type: none"> ■ Less expensive ■ Estimated cost of £10 000 	Masonry bridges that have undergone this type of repair may not require such rehabilitation work in 120 years	Swoden (1990), Parke and Hewson (2008)	Less rigorous
Water-proofing	Provides a drainage system for the bridge	<ul style="list-style-type: none"> ■ Slightly expensive ■ Estimated cost of £10 000 	May not be required until another 100 years	Page (1996)	Less rigorous
Near surface reinforcement	Strengthens the arch barrel by providing resistance across underneath cracked areas	<ul style="list-style-type: none"> ■ Slightly expensive ■ Estimated cost of £11 000 	May not be required until another 100 years	Page (1996)	Less rigorous
Sprayed concrete	Able to solve arch ring deterioration problems; affects the final appearance of the bridge	<ul style="list-style-type: none"> ■ Slightly expensive ■ Estimated cost of £10 800 	May not be required until another 100 years	Swoden (1990), Parke and Hewson (2008)	Less rigorous

表 - 2 抽出データの文献の出典元

Source	Focus	Criteria for selection
Ashurst (1993)	Masonry bridge	Repair and maintenance technique data
Page (1996)	Masonry bridge	Repair and maintenance technique data
Horvath and Hendrickson (1998)	Concrete and steel	Environmental impact of construction materials
Steele et al. (2003)	Masonry	Bridge repair and maintenance techniques data
Collings (2003)	Concrete bridge	Environmental impact of construction
Bell (2004)	Concrete, steel and masonry	Construction, maintenance, repair and rehabilitation techniques
Steele and Cole (2005)	Masonry bridges	Maintenance data
UKRLG (2005)	Concrete, steel and masonry bridge	Maintenance type
Collings (2006)	Concrete, steel and concrete-steel composite	Environmental impact of Construction materials
Guettala and Abibsi (2006)	Concrete bridge	Types deterioration and repair techniques
Hammond and Jones (2008)	Construction materials	Embodied energy for construction materials
Pacheco et al. (2010)	Steel bridge	Energy, transportation, manufacturing data
Zhang et al. (2011)	Steel bridge	Construction and maintenance data
Giustozzi et al. (2012)	Road pavement maintenance	Maintenance and transportation data
Du (2012)	Railway bridges	Maintenance data
Hammervold et al. (2013)	Steel, wooden and concrete	Construction and maintenance materials
Du and Karoumi (2014)	Railway bridges	Construction and materials
Pang et al. (2015)	Structural bridge maintenance	Maintenance material
Sarhosis et al. (2016)	Masonry bridge	Maintenance material

表 - 3 検証済の材料数量

Maintenance activity	Material	Quantity of material: t/m ²	Quantity of material: kg
Concrete bridges			
Grouting	Cementitious grout	0.14	140
Overlying	Concrete	0.22	220
	Asphalt	0.27	270
	Bitumen	0.30	300
Bearing renewal	Reinforcement	0.25	250
Expansion joint renewal	Reinforcement	0.25	250
Deck replacement	Concrete	2.50	2500
	Asphalt	0.27	270
	Reinforcement	0.12	120
	Bitumen	0.30	300
Steel bridges			
Structural painting	Epoxy paint	0.00051	0.051
	Polyurethane paint	0.000103	0.103
	Zinc coating	0.0004	0.4
Pavement repair	Asphalt	0.27	270
	Bitumen	0.3	300
Deck re-waterproofing	Concrete	0.1	100
	Reinforcement	0.1	100
Bearing renewal	Reinforcement	0.25	250
Expansion joint renewal	Reinforcement	0.25	250
Masonry arch bridges			
Saddling	Concrete	2.5	2500
	Asphalt	0.27	270
	Reinforcement	0.25	250
	Bitumen	0.3	300
	Fill	2	2000
Radial pining	Cementitious grout	0.12	120
	Dowel reinforcement	0.12	120
Waterproofing	Concrete	0.1	100
	Asphalt	0.1	100
Mastic	seal	0.1	100
Near-surface reinforcement	Cementitious grout	0.152	152
	Reinforcement	0.203	203
Sprayed concrete	Concrete	0.4	400
	Reinforcement mesh	0.1	100

Field や Hole ^[16] により幅広く賛成されなかった、または総意が得られなかったと見なされたが、English や Kernan ^[15]、Grobbelaar ^[20]、Henning や Jordan ^[25] により従来使用されていた。この平均値は、データの設定が正規分布の場合のみ正確であると考えられ、それ以外の場

合では分布の中央値または最頻値を用いる必要がある (Field や Hole ^[16])。集計データの正確性をテストするために、統計ソフト SPSS 13 が使用された。ここでは 0.05 の Shapiro-Wilk 有意水準が統計に使用され、推定データは正規分布に準ずることが分かった。平均値について

○ 海外文献 ○

は依然として誤差の影響を受けるが、標準偏差（以下、SD）の算出により誤差を最小限に抑えることができる（Field や Hole ^[16]）。SD は正規分布の母集団の変数を評価するために使用され（Grobbelaar ^[20]）、母平均の信頼区間を算出することが可能となる。95% または 99% の信頼区間は、統計的に許容されている。SPSS により、提案されたデータの平均、SD、および信頼区間を計算した。これらのデータを表 - 3 に示す。そのうち、SimaProLCA ソフトウェアへの入力データとしてこれらを使用し、選定した維持管理方法により環境への影響を評価した。

3.1 目標と調査目的

LCA の第 1 段階は、目標と調査目的の設定である。この LCA 調査の目的は、ライフサイクル排出量とエネルギー消費の観点から、コンクリート橋、鋼橋、石造橋における選定された維持管理活動の環境への影響を明らかにすることであった。LCA 調査の目的には、各維持管理活動に関連する材料の消費、輸送、エネルギー、および資源が含まれていた。LCA で説明されている材料は、さまざまな仕様のコンクリート、アスファルトコンクリート、鋼、砂であった。工場から現場へのすべての資材の輸送が想定されており、ガソリン、ディーゼル、水、および電気の消費がバックグラウンドシステムとしてモデル化された。

バックグラウンドシステムとフォアグラウンドシステムは、Clift ^[5] らによって説明されており、橋梁のような複雑な構造に適用可能である。バックグラウンドシステムでは部材特有のデータを使用するが、各プラントの過程と操作で識別できない均質な市場を通じて必要な材料とエネルギーをフォアグラウンドシステムに提供する（Clift ら ^[5]）。システムアプローチからの両方の過程は信頼できる（Finnveden ら ^[17]）。フォアグラウンドシステムデータは、関連する文献の出典元から取得され、専門家によって検証された。バックグラウンドデータ（エネルギー、プラント、電気）は、欧州、米国、中国における SimaPro によって収集されたデータから取得された。現在の研究では、欧州のバックグラウンドデータセット

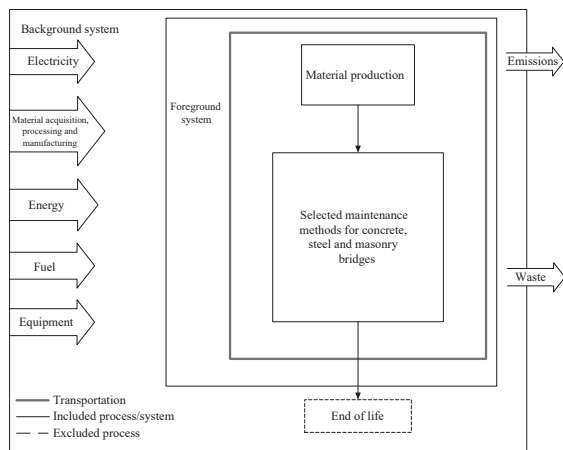


図 - 2 維持管理方法のシステム境界

が使用された。選定したすべての維持管理方法におけるバックグラウンドシステムとフォアグラウンドシステムの境界を図 - 2 に示す。すべての LCA 調査は、調査中のシステムの公正な比較を可能にする機能単位に基づいて実施された（Finnveden ら ^[17]、Heijungs や Guinee ^[24]、Rebitzer ら ^[42]）。

機能単位は、今回の研究で適用されるように、フォアグラウンドシステムおよびバックグラウンドシステム（Clift ら ^[5]）においてよく使用されている。共通の機能単位は、橋梁の床版を m^2 （Collings ^[7]）、橋長を m （Steele ら ^[45]）として橋梁の LCA 研究で従来より適用されてきた。しかし、機能単位は耐用年数の観点からもっともよく定義されているため、今回の研究における機能単位では、英国の橋梁の設計耐用年数の平均 120 年と同じ耐用年数となる橋梁の床版面積 m^2 として定義された（BSI ^[4]）。

3.2 L C I

LCA の第 2 段階は LCI である。調査で使用された入力データの出典元を表 - 2 および表 - 4 に示す。選定された維持管理活動の輸送中の材料、エネルギー消費、および輸送中の排出量の総量を計算すると、各維持管理活動に関連する潜在的な環境への影響が識別可能となり以下のように想定された。資材の現場までの輸送距離は英国における資材の平均輸送範囲内となる 16 km と想定された（Zhang ^[49]）。Pang ら ^[37] によっても使用されていたように、平均燃料消費量は 10 km/L であると想定された。

3.3 L C I A

LCA の第 3 段階は LCIA である。LCIA では、損傷指標に変換される LCI に関連する排出量の特定制が行われている（Jolliet ら ^[30]、Pennington ら ^[40]）。LCIA は、排出物（二酸化炭素（CO₂）、一酸化炭素（CO）、窒素酸化物（NO_x）など）、および資源の使用（水や土地など）による環境への影響の特定制が行われている（Finnveden ら ^[17]）。影響評価は、分類化と特性化が実行される 2 つ

表 - 4 調査で使用された入力データの出典元

Life cycle stage	Sub process	Data origin
Maintenance	Cementitious grout	Literature
	C30 and C40 concrete	Literature
	Asphalt	Literature
	Bitumen	Literature
	Reinforcement	Literature
	Epoxy paint	Literature
	Polyurethane paint	Literature
	Zinc coating	Literature
	Reinforcement mesh	Literature
	Mastic seal	Literature
	Production of electricity, diesel and gasoline	SimaPro
	Combustion of electricity, diesel and gasoline	SimaPro
	Production of water	SimaPro
Energy resources	SimaPro	

の主要なポイント（ミッドポイントとエンドポイント）で考慮される。出力では、正規化、グルーピング、および重み付けを行うこともできる。現在の研究では、LCIAにおける実行過程に、分類化、特性化、および正規化があった。分類化には、排出物と資源に関連する影響領域（環境指標）の選定が含まれる。この研究では、二酸化炭素、二酸化窒素（NO₂）、二酸化硫黄（SO₂）、およびエネルギーが環境指標として考慮された。これらは国際的に広く考慮されており（UN [48]）、橋梁に関連するほかの LCA 研究でも使用されている（Collings [7], Gervasio や da Silva [18], 伊藤・北村 [29], Keoleian ら [32]）。適切な影響領域は、資源枯渇、人間健康、および生態系に関連する領域である（Consoli ら [8]）。

調査のために選定された影響領域は、以下のとおりである。

- ・陸域酸性化（以下、TA）
- ・淡水富栄養化（以下、FE）
- ・気候変動（以下、CC）
- ・オゾン層破壊（以下、OD）
- ・光化学オキシダント生成（以下、POF）
- ・化石燃料枯渇（以下、FE）
- ・鉱物枯渇（以下、MD）
- ・粒子状物質生成（以下、PMF）

物質の特性化は、SimaPro の Recipe 手法論を使用して実施された。その後の正規化により、欧州規模での人間健康、生態系の質、および資源に対する影響領域の大きさが明らかになった。正規化係数は無次元であり、比較を可能とした調査目的に適用されたことに留意すべきである（Steele ら [45]）。

4. LCA の分析

ここでは、影響評価モデルのミッドポイント（影響領域：途中段階における環境負荷）とエンドポイント（被害領域：最終的な環境負荷）から検討したコンクリート橋、鋼橋、石造橋の複合的な維持管理方法についての環境アセスメントを示す。

4.1 ミッドポイント

コンクリート橋、鋼橋、石造橋の維持管理活動におけるミッドポイント分析の実施にあたり、環境への影響の評価に用いた 8 項目の指標を図 - 3 に示す。鋼橋は、すべての指標において相対的に高い影響を及ぼしており、各指標の割合は、CC (46%), OD (42%), POF (45%), PMF (49%), TA (48%), FE (49%), MD (48%), FD (42%) となっている。また、コンクリート橋においても同様に高い割合となっており、CC (41%), OD (44%), POF (41%), PMF (41%), TA (41%), FE (41%), MD (41%), FD (42%) であった。対して石造橋は比較的小さい割合を示し、CC (13%), OD (14%), POF (14%), PMF (10%), TA (11%), FE (10%), MD (11%), FD (16%) となった。

以上の結果から、鋼橋とコンクリート橋の維持管理活動は、いずれの指標においても大きな影響を与えること

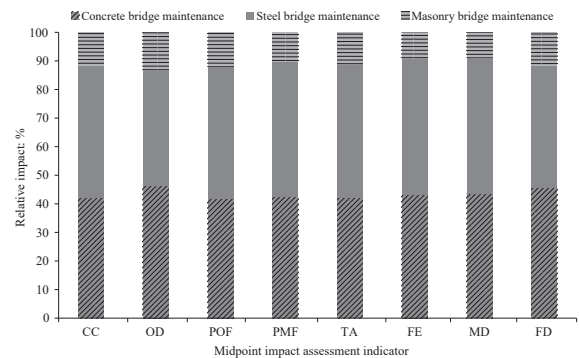


図 - 3 コンクリート橋、鋼橋、石造橋の維持管理方法の評価結果

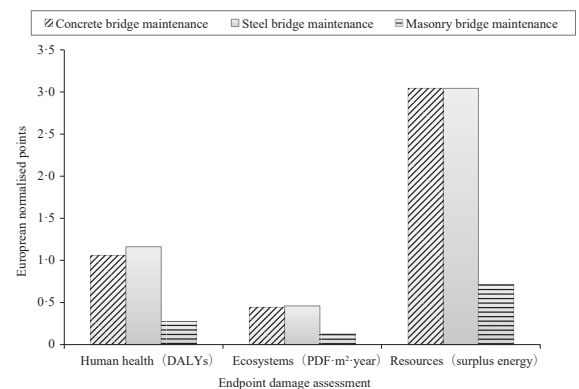


図 - 4 欧州規格による維持管理評価（コンクリート橋、鋼橋、石造橋）

が確認された。

4.2 エンドポイント

図 - 4 に、コンクリート橋、鋼橋、石造橋の維持管理活動が及ぼす人間健康、生態系および資源消費への影響に関連するエンドポイントの評価結果を示す。これらは欧州の基準より、人間健康（障害調整生存年数（以下、DALY）より推定）、生態系への影響（特定のエリアと期間から消失する種の割合に基づく評価（PDF 指標）により推定）および資源消費（余剰エネルギーに基づき推定した資源消費率）から評価するものである。

資源消費への影響評価では、石造橋の維持管理活動が 0.6 ポイントに対して、コンクリート橋と鋼橋の維持管理活動が 3.0 ポイントと大きな値を示した。次に、人間健康を示す指標 DALY は疾病や障害による早死で損失した生命の年数や障害を抱えて過ごす年数などへの影響評価についても、石造橋の維持管理活動が 0.3 ポイントに対して、コンクリート橋と鋼橋の維持管理活動がそれぞれ 1.0 および 1.2 ポイントと大きな値を示した。最後に、生態系への影響評価では、全体的に影響が少ない傾向を示しているが、そのなかでも石造橋はとくに影響が小さく、PDF 指標に基づく評価では 0.1 ポイントとなった。

総合的な結果として、石造橋がすべての評価において優れた性能を発揮することが証明された。

4.3 不確か性分析によるパラメータ変動の影響評価

現在の LCA 研究における入力データは、文献、専門家の意見、および SimaPro（最新の LCA ソフトウェア）

から収集している。

しかしながら、実際の橋梁に適用可能なデータを入力することは非常に困難である。たとえば、前述したように材料輸送の平均距離はすべての維持管理活動において 16 km、平均燃料消費量はすべての車両において 10 km/L を想定している。この範囲内での維持管理については適当な比較が可能であるが、それ以外のケースでは比較ができない場合がある。また、維持管理活動は決められたスケジュールで実施されることが想定されているが、偶発的な部材の損傷や気候の影響により、実際の維持管理活動のタイミングは構造物によって異なる。そこで、このような個別のケースについては SimaPro における欧州のデータベースを使用せず、ローカルデータを使用することとした。

また、Monte Carlo (以下、MC) のシミュレーションを、入力パラメータの変動性、輸送距離、維持管理活動の頻度、燃料消費量の違い、およびその他の入力パラメータに関連する環境への影響を評価するために実施した。SimaPro ソフトウェアにより、MC シミュレーションの統計的信頼区間を 95% とすることができた。

MC シミュレーションにより変数の対数正規分布を仮定したことで、図 - 3 に示した結果 (コンクリート橋、鋼橋、石造橋の維持管理方法を比較した場合のミッドポイント分析結果) に関して変動のあるパラメータを特定することが可能となった。既往の研究に基づき、計 1000 回の反復試行を行った (Parsons [39])。MC シミュレーションの出力結果より、コンクリート橋と石造橋の維持管理方法の比較を図 - 5 に、石造橋と鋼橋の比較を図 - 6 に、コンクリート橋と鋼橋の比較を図 - 7 に示す。図 - 3 に示した結果と比較して、シミュレーションから新しい結果は得られなかったため、不確実性が評価に与える影響は限定的であったと考えられる。

5. 考 察

LCA により、主な橋梁形式の一般的な維持管理活動の環境への影響に関連する有用な結果が得られた。石造橋の維持管理活動による環境への影響度がたった 12% であるのに対して、コンクリート橋と鋼橋はそれぞれ 42% と 46% となった。これらの結果は、石造橋の維持管理活動が、他の橋梁形式の維持管理活動よりも環境に対して持続可能であることを示している。これを裏付けるように、文献によると、英国のサリー市にある橋梁の 40% は、平均耐用年数が 190 年で大規模な改修が行われ、石造橋のみが大規模な補修なしで現行の耐用年数を超えている。橋梁の耐用年数にわたる持続可能性を評価するためには、原材料の抽出から、材料選定、製造、輸送、建設、維持管理、解体、リサイクルまでの一連の評価を実施する必要がある。このような分析では、実際の耐用年数も考慮する必要がある。新設橋梁は 120 年にわたって設計されているが、ほとんどの石造橋は 100 年以上前に建設されたものであり、当面の間、交通機能を維持し続けると予想される。新設に関しては、石造橋はもはや

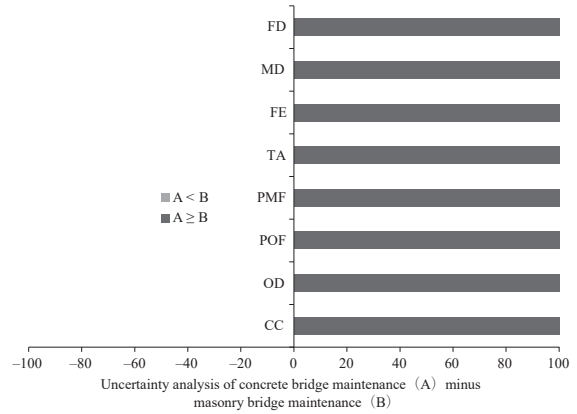


図 - 5 不確実性分析 (コンクリート橋 (A) および石造橋 (B) の維持管理活動の比較)

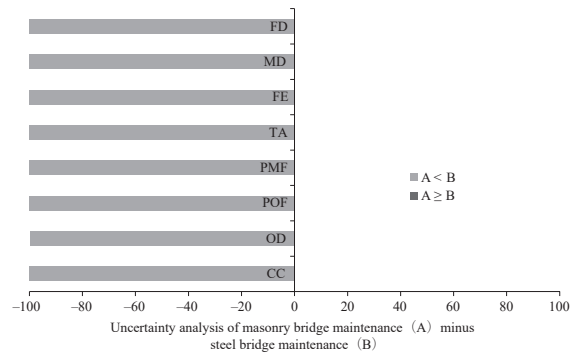


図 - 6 不確実性分析 (石造橋 (A) および鋼橋 (B) の維持管理活動の比較)

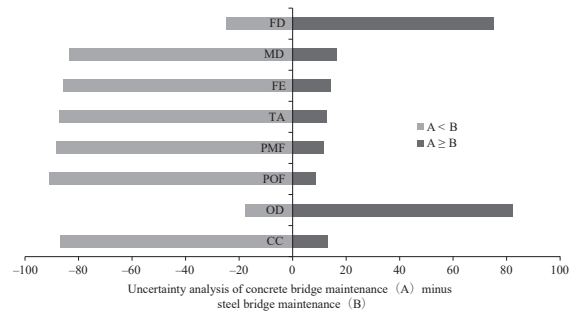


図 - 7 不確実性分析 (コンクリート橋 (A) および鋼橋 (B) の維持管理活動の比較)

選択肢には入らず、一般にコンクリート橋、鋼橋、もしくはそれらの複合構造に限定されている (Collings [7])。しかしながら、持続可能性の重要性は将来的に高まる傾向にあるため、石造橋は、実行可能な橋梁形式の選択肢として今後より多くの関心を引く可能性がある。

また、この結果は、維持管理活動に大きな影響を与えるコンクリート橋や鋼橋の付属物に改良の余地があることも示している。たとえば、伸縮継手の補修が、二酸化炭素、二酸化窒素、二酸化硫黄の排出に多大な影響を与えることが分かった。

6. 結 論

本研究では、コンクリート橋、鋼橋、石造橋の維持管理活動による環境への影響の比較を行った。本研究では、

有効性、費用、時間間隔に基づいて予防的かつ是正的な維持管理活動を選定した。LCAは、関連する材料、エネルギー、および輸送を考慮して、選定された維持管理活動の環境への影響を評価するために使用した。材料の数量については文献を参考にし、専門家による確認を受け、SimaPro データと組み合わせて使用した。選定された維持管理活動は、8項目の影響領域で評価しており、それらの影響の重要性は、欧州規模での人間健康、生態系への影響および資源消費を基準とした。

本研究から得られた主な知見は、コンクリート橋と鋼橋の維持管理活動の環境への影響度は、石造橋の12%に対して、平均でそれぞれ42%、46%ということである。したがって、新設橋梁の選択肢としてコンクリート橋と鋼橋に限定する現行の考え方を改める必要があるかもしれない。また、コンクリート橋や鋼橋の付属物は維持管理活動に多大な影響を与えるため、設計者はそれらの改良を検討すべきである。

参考文献

- Ashurst D (1993) An Assessment of Repair and Strengthening Techniques for Brick and Stone Masonry Arch Bridges, 1st edn. Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, UK, Contractor Report 284.
- Bell B (2004) European Railway Bridge Demography. Deliverable D 1.2. See http://www.sustainablebridges.net/main.php/D1.2-WP1-02-T-040531-F_Public.pdf?fileitem=22708836 (accessed 17/12/2018).
- Bouhaya L, Roy R and Feraille-Fresnet F (2009) Simplified environmental study on innovative bridge structure. *Environmental Science and Technology* 43 (1): 2066–2071.
- BSI (1999) BS 5400-2:1999: Steel, concrete and composite bridges: Part 2: Specification for loads. BSI, London, UK.
- Clift R, Frischknecht R, Huppes G, Tillman A and Weidema B (1998) Towards a Coherent Approach to Life Cycle Inventory Analysis. Setac Europe, Brussels, Belgium.
- Collings D (2003) Sustainable Development and Strategy for Cement and Concrete Construction Sector. British Cement Association, Camberley, UK and University of Surrey, Guildford, UK.
- Collings D (2006) An environmental comparison of bridge forms. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Bridge Engineering* 159 (4): 163–168, <https://doi.org/10.1680/bren.2006.159.4.163>.
- Consoli F, Allen D, Boustead I et al. (1993) Code of Practice: Guidelines for Life-Cycle Assessment. Setac North America, Pensacola, FL, USA.
- Cottam H, Roe M and Challacombe J (2004) Outsourcing of trucking activities by relief organisations. *Journal of Humanitarian Assistance* 1 (1): 1–26.
- DECC (Department of Energy and Climate Change) (2016) 2014 UK Greenhouse Gas Emissions, Final Figures. DECC, London, UK.
- DfT (Department for Transport) (2013) Action for Roads. A Network for the 21st Century. The Stationery Office, Norwich, UK. See https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/212590/action-for-roads.pdf (accessed 12/07/2017).
- Du G (2012) Towards Sustainability Construction: Life Cycle Assessment of Railway Bridges. PhD thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Du G and Karoumi R (2013) Life cycle assessment of a railway bridge: comparison of two superstructure designs. *Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life Cycle Design and Performance* 9 (11): 1149–1160.
- Du G and Karoumi R (2014) Life cycle assessment framework for railway bridges: literature survey and critical issues. *Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life Cycle Design and Performance* 10 (3): 277–294.
- English J and Kernan G (1976) The prediction of air travel and aircraft technology to the year 2000 using the Delphi method. *Journal of Transport and Research* 10 (1): 1–8.
- Field A and Hole G (2003) How to Design and Report Experiments. Sage Publications, London, UK.
- Finnveden G, Hauschild M, Ekvall T et al. (2009) Recent developments in life cycle assessment. *Journal of Environmental Management* 91 (1): 1–21.
- Gervásio H and da Silva LS (2008) Comparative life-cycle analysis of steel-concrete composite bridges. *Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life Cycle Design and Performance* 4 (4): 251–269.
- Giustozzi F, Crispino M and Flintsch G (2012) Multi-attribute life cycle assessment of preventive maintenance treatments on road pavements for achieving environmental sustainability. *International Journal of Life Cycle Assessment* 17 (1): 409–419.
- Grobbelaar S (2006) R&D in the National System of Innovation: A System Dynamics Model. PhD thesis, University of Pretoria, Hatfield, South Africa.
- Guettala A and Abibsi A (2006) Corrosion degradation and repair of a concrete bridge. *Materials and Structures* 39 (1): 471–478.
- Hammervold J, Reenaas M and Brattebø H (2013) Environmental life cycle assessment of bridges. *Journal of Bridge Engineering* 18 (2): 153–161.
- Hammond G and Jones C (2008) Embodied energy and carbon in construction materials. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Energy* 161 (2): 87–98, <https://doi.org/10.1680/ener.2008.161.2.87>.
- Heijungs R and Guinée J (1994) Software as a bridge between theory and practice in life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production* 1 (3–4): 85–189.
- Henning J and Jordan H (2016) Determinants of financial sustainability for farm credit applications – A Delphi study. *Sustainability* 8 (77): 1–15.
- Horvath A and Hendrickson C (1998) Steel versus steel-reinforced concrete bridges: environmental assessment. *Journal of Infrastructure Systems* 4 (3): 111–117.
- ISO (International Organisation for Standardization) (2006a) ISO 14040: Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. ISO, Geneva, Switzerland.
- ISO (2006b) ISO 14044: Environmental management – Requirements and guidelines. ISO, Geneva, Switzerland.
- Itoh Y and Kitagawa T (2003) Using CO2 emission quantities in bridge lifecycle analysis. *Engineering Structures* 25 (5): 565–577.
- Jolliet O, Margni M, Charles R et al. (2003) Impact 2002+: a new life cycle impact assessment methodology. *International Journal of Life Cycle Assessment* 8 (6): 324–330.
- Kapoor P (1987) A Systems Approach to Documentary Fraud. PhD thesis, University of Plymouth, Plymouth, UK.
- Keoleian G, Kendall A, Dettling J et al. (2005) Life cycle modelling of concrete bridge design: comparison of engineered

- cementitious composite link slabs and conventional steel expansion joints. *Journal of Infrastructure Systems* 11 (1) : 51–60.
- 33) Lounis Z and Daigle L (2007) Environmental benefits of life cycle design of concrete bridges. *Proceedings of the 3rd International Conference on Life Cycle Management, Zurich, Switzerland*, pp. 1–6.
- 34) Martin AJ (2004) Concrete bridges in sustainable development. *Proceedings of the Institute of Civil Engineers – Bridge Engineering* 157 (4) : 219–230, <https://doi.org/10.1680/ensu.2004.157.4.219>.
- 35) Pacheco P, Antonio P, Fonseca A, Resende A and Campos R (2010) Sustainability in bridge construction processes. *Journal of Clean Technology and Environmental Policy* 12 (1) : 75–82.
- 36) Page J (1996) *A Guide to Repair and Strengthening of Masonry Arch Highway Bridges*, 1st edn. Transport Research Laboratory, Crowthorne, UK.
- 37) Pang B, Yang P, Wang Y et al. (2015) Life cycle environmental impact assessment of a bridge with different strengthening scheme. *International Journal of Life Cycle Assessment* 20 (1) : 1300–1311.
- 38) Parke G and Hewson N (2008) *ICE Manual of Bridge Engineering*, 2nd edn. ICE, London, UK.
- 39) Parsons S (2016) *Interpreting Life Cycle Assessment for Decision-Making on Emerging Materials*. PhD thesis, University of Surrey, Guildford, UK.
- 40) Pennington D, Potting J, Finnveden G et al. (2004) Life cycle assessment part 2: current impact assessment practice. *Environment International* 30 (1) : 721–739.
- 41) Pollalis S, Georgoulas A, Ramos and Schodek D (eds) (2012) *Infrastructure Sustainability and Design*, 1st edn. Taylor & Francis, New York, NY, USA.
- 42) Rebitzer G, Ekvall T, Frischknecht R et al. (2004) Life cycle assessment –part 1: Framework, goal & scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment International* 30 (1) : 701–720.
- 43) Sarhosis V, De Santis S and de Felice G (2016) A review of experimental investigations and assessment methods for masonry arch bridges. *Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life Cycle Design and Performance* 12 (11) : 1439–1464.
- 44) Steele K and Cole G (2005) Environmental sustainability management. In *Bridge Management* 5 (Parke G and Disney P (eds)). Thomas Telford, London, UK, pp. 385–392.
- 45) Steele K, Cole G, Parke G, Clarke B and Harding J (2003) Highway bridges and environment – sustainable perspective. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Civil Engineering* 156 (4) : 176–182, <https://doi.org/10.1680/cien.2003.156.4.176>.
- 46) Swoden A (1990) *The Maintenance and Repair of Brick and Stone Masonry Structures*, 1st edn. Spon, London, UK.
- 47) UKRLG (UK Roads Liaison Group) (2005) *Management of Highway Structures – A Code of Practice*. The Stationery Office, Norwich, UK.
- 48) UN (United Nations) (2015) *Transforming our World: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. UN, New York, NY, USA, Report A/RES/70/1.
- 49) Zhang C, Amaduddin M and Canning L (2011) Carbon dioxide evaluation in a typical bridge deck replacement. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Energy* 162 (4) : 183–194, <https://doi.org/10.1680/ener.2011.164.4.183>

* : 会誌編集委員会海外部会委員
堀内 祐樹 (首都高速道路 ㈱)
渡邊 秀知 (㈱ ビーエス三菱)
佐藤 千鶴 (㈱ 銭高組)
田中 慎也 (㈱ IHI インフラ建設)
森田 遼 (鹿島建設 ㈱)

【2021年4月12日受付】



刊行物案内

Guidelines for Maintenance of Prestressed Concrete Cable-Stayed Bridge and Extradosed Bridge 2012

定 価 3,666 円 (税込) / 送料 300 円

会員特価 3,000 円 (税込) / 送料 300 円

公益社団法人 プレストレストコンクリート工学会